

WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA

im. Jarosława Dąbrowskiego

WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ I GEODEZJI



ROZPRAWA DOKTORSKA

EKSPERYMENTALNA ANALIZA DYNAMICZNYCH WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH GRUNTÓW WĄTPLIWYCH NA PRZYKŁADZIE PIASKU PYLASTEGO

Autor: kpt. mgr inż. Kamil SOBCZYK

Promotor: płk dr hab. inż. Ryszard CHMIELEWSKI, prof. WAT

Promotor pomocniczy: płk rez. dr inż. Leopold KRUSZKA

Warszawa 2023

Rozprawę doktorską wykonał doktorant: kpt. mgr inż. Kamil SOBCZYK

Dziedzina nauki: nauki inżynieryjno – techniczne

Dyscyplina naukowa: inżynieria lądowa, geodezja i transport

STRESZCZENIE W JĘZYKU POLSKIM

Eksperymentalna analiza dynamicznych właściwości mechanicznych gruntów wątpliwych na przykładzie piasku pylastego

Słowa kluczowe: dynamika gruntu; piasek pylasty; pręt Hopkinsona (SHPB); wysoka prędkość odkształcenia (HSR).

Wyznaczanie charakterystyk reakcji materiałów konstrukcyjnych, w tym budowlanych, na odkształcenia przy różnych prędkościach odkształcenia jest bardzo ważnym obszarem prowadzenia badań naukowych zarówno na potrzeby przemysłu militarnego, jak i cywilnego. Przykładem takiego materiału jest grunt, który w ostatnich latach znajduje się w stałym kręgu zainteresowania naukowców. W niniejszej pracy omówiłem badania gruntów przy różnych prędkościach odkształcenia, które mogą odzwierciedlać występujące oddziaływania na ten ośrodek stanowiący podłoże gruntowe lub warstwę ochronną. Oddziaływania te mogą być związane z katastrofami naturalnymi (np. osuwisko ziemne i skalne), z realizacją robót budowlanych (np. dynamiczne zagęszczanie gruntu, wbijanie pali fundamentowych) oraz z celową działalnością człowieka podczas działań terrorystycznych lub wojennych (np. atak rakietowy, użycie ładunku wybuchowego). Podane przykłady oddziaływań dynamicznych generują prędkości odkształcenia gruntu w zakresie od 10^2 s^{-1} do 10^4 s^{-1} . Powstające zagrożenia w sytuacjach kryzysowych inicjują zapotrzebowanie na poznanie charakterystyk różnych typów gruntów (zarówno spoistych, jak i niespoistych) poddanych obciążeniu o wysokiej prędkości odkształcenia (HSR) w celu właściwego dobrania rozwiązań projektowych oraz konstrukcyjnych dla obiektów budowlanych, dedykowanych elementów ochronnych i infrastruktury krytycznej.

Celowym więc jest ciągły rozwój w obszarze eksperymentalnych badań dynamicznych właściwości mechanicznych różnych materiałów, w tym również gruntów. Wykorzystałem w tym celu stanowisko badawcze oparte o technikę pręta Hopkinsona, do którego zalicza się zmodyfikowany (dzielony) pręt Hopkinsona. Dodatkowo w analizach doświadczalnych stosowałem laserowy analizator wielkości cząstek i aparat Proctora.

Przeprowadzona analiza literaturowa pozwoliła mi na zidentyfikowanie problemu naukowego dotyczącego realizacji procesu fizycznego eksperymentu dynamicznego prowadzonego na piasku pylastym jako reprezentatywnym przykładzie gruntów wątpliwych. Ten rodzaj gruntu jest często stosowany w robotach budowlanych w roli gruntu zasypowego. Cechuje się pospolicnością występowania na tle rodzajowym podłoża gruntowego w Polsce. Standardowo podlega on klasyfikacji jako grunt niespoisty, lecz ze względu na występowanie różnych poziomów zawartości frakcji drobnych (pyłowej i iłowej) wykazuje także pewne cechy gruntu spoistego.

Zaproponowałem autorską metodykę przygotowania próbki gruntu (badanego piasku pylastego) do analiz doświadczalnych na stanowisku SHPB z uwzględnieniem różnych wartości wilgotności gruntu. Opracowałem własne rozwiązanie dla procesu wstępnego zagęszczenia gruntu poprzez procedurę zagęszczenia wibracyjnego oraz sposób kalibracji wyrzutni pneumatycznej SHPB dla stosowanego typu pręta obciążającego – pocisku. Wdrożyłem również procedurę kompleksowej analizy skutków oddziaływania dynamicznego na piasek pylasty z uwzględnieniem zmian składu granulometrycznego tego gruntu w zależności od: zawartości frakcji drobnych (pyłowej i iłowej), przyjętej konfiguracji wariantów początkowego ciśnienia wyrzutni działającego na pręt obciążający – pocisk (w tym prędkości uderzenia pręta obciążającego – pocisku w pręt pomiarowy SHPB) oraz wilgotności tych próbek gruntu.

Podczas realizacji autorskiego Indywidualnego Planu Badawczego w zakresie dynamicznego zachowania wytypowanego przedstawiciela gruntów wątpliwych – piasku pylastego – opracowałem oryginalne rozwiązanie zdefiniowanego problemu naukowego. Przedstawiłem je w zbiorze pięciu powiązanych tematycznie artykułów naukowych. Publikacje te ukazały się w polskich i zagranicznych czasopismach naukowych, które znajdują się obecnie w wykazie MEiN. W zawartych w cyklu rozważaniach badawczych wykazałem, że dynamiczne właściwości mechaniczne trójfazowego gruntu wątpliwego, jakim jest badany piasek pylasty, mają charakter nieliniowy. Określiłem, że zależą one od jego wilgotności, składu granulometrycznego oraz od prędkości odkształcenia. W tej rozprawie doktorskiej udowodniłem zatem sformułowaną przeze mnie tezę badawczą: *Dynamiczne właściwości mechaniczne trójfazowego gruntu wątpliwego, na przykładzie piasku pylastego poddanego uderzeniu ściskającemu, mają charakter nieliniowy oraz zależą od wilgotności gruntu, jego składu granulometrycznego i są wrażliwe na prędkość odkształcenia.*

Uzyskane wyniki analiz wraz z opracowaną procedurą badawczą stanowią wartość dodaną do obszaru inżynierii uderzeniowej w zakresie dyscypliny inżynieria lądowa, geodezja i transport. Obejmują one proces przygotowania próbki gruntu, kalibrację stosowanego typu pręta obciążającego – pocisku i prętów pomiarowych w ramach stanowiska badawczego SHPB oraz szczegółową analizę uzyskanych wyników pomiarów na potrzeby wyznaczenia przebiegu wykresów dynamicznych właściwości mechanicznych gruntu. Elementem dodanym jest wdrożenie pomiaru zmiany składu granulometrycznego piasku pylastego w zakresie wzrostu zawartości frakcji drobnych w jego strukturze metodą dyfrakcji laserowej. Rezultaty badań umożliwiają określenie parametrów pochłaniania energii obciążenia dynamicznego poprzez warstwę ochronną gruntu. Umożliwia to określenie poziomu ochrony zarówno balistycznej oraz przeciwwybuchowej dla ukryć i schronów w zależności od rodzaju gruntu, jego wilgotności i grubości warstwy ochronnej.

STRESZCZENIE W JĘZYKU ANGIELSKIM

*Experimental analysis of the dynamic mechanical properties of doubtful soils
(ambiguous expansivity) using the example of silty sand*

Keywords: soil dynamics; silty sand; split Hopkinson pressure bar (SHPB), high strain rate (HSR).

Determining the response characteristics of structural materials, including construction materials, to strain at different strain rates is a very important area of scientific research for both military and civilian industries. An example of such a material is soil, which in recent years has been under the constant spotlight of researchers. I have discussed the study of soils at different strain rates, which may reflect the impacts occurring on this medium, which is the soil subsoil or protective layer. These impacts can be related to natural disasters (e.g., landslide and rockfall), construction works (e.g., dynamic soil compaction, driving foundation piles), and intentional human activity during terrorist or war activities (e.g., rocket attack, use of explosive device). The given examples of dynamic interactions generate soil strain rates in the range of 10^2 s^{-1} to 10^4 s^{-1} . Emerging threats in emergency situations initiate the demand for understanding the characteristics of different types of soils (both cohesive and non –cohesive) subjected to high strain rate (HSR) loading in order to properly select design and construction solutions for civil structures, dedicated protective elements and critical infrastructure.

Therefore, it is expedient to constantly develop in the field of experimental studies of dynamic mechanical properties of various materials, including soils. For this purpose, I used a test stand based on the Hopkinson bar technique, which includes a modified /split/ Hopkinson pressure bar. In addition, in the experimental analyses, I used a laser diffraction particle size analyzer and a Proctor apparatus.

The conducted literature analysis allowed me to identify a scientific problem concerning the implementation of the physical process of a dynamic experiment conducted on silty sand as a representative example of doubtful soils (ambiguous expansivity). This type of soil is often used in construction work as backfill soil. It is characterised by its common occurrence in the generic background of the ground substrate in Poland. By default, it is classified as non – cohesive soil, but due to the presence of different levels of fine fractions (silt and clay) it also shows some cohesive soil characteristics.

I have proposed an original methodology for the preparation of a soil sample (tested silty sand) for experimental analyses on the SHPB test stand, taking into account different soil moisture values. I have developed my own solution for the process of pre – compaction of soil through a vibratory compaction procedure and a way to calibrate the SHPB pneumatic launcher

for the type of loading bar – projectile used. I have also implemented a procedure for a comprehensive analysis of the effects of dynamic impact on silty sand, taking into account changes in the granulometric composition of this soil depending on: the content of fine fractions (silt and clay fractions), the adopted configuration of variants of the initial launcher pressure acting on the loading bar – projectile (including the impact velocity of the loading bar – projectile on the SHPB) and the moisture content of these soil samples.

During the implementation of the author's Individual Research Plan (IPB) on the dynamic behaviour of a selected representative of doubtful soil (ambiguous expansivity) – silty sand – I developed an original solution to a defined scientific problem. I presented them in a collection of five thematically related scientific articles. These publications have appeared in Polish and foreign scientific journals currently listed by the Ministry of Science and Higher Education. In the research considerations included in the experimental cycle, I have shown that the dynamic mechanical properties of a three – phase doubtful soil (ambiguous expansivity), such as the silty sand under study, are non – linear in nature. I determined that they depend on its moisture content, granulometric composition and strain rate. In this dissertation, I have therefore proved the research thesis I formulated: *The dynamic mechanical properties of three – phase doubtful soil (ambiguous expansivity), using compression-impacted silty sand as an example, are non – linear and depend on soil moisture content, granulometric composition and are sensitive to strain rate.*

The analytical results obtained, together with the research procedure developed, add value to the field of impact engineering in the discipline of civil engineering, geodesy and transport. This includes the preparation of the soil sample, the calibration of the type of loading bar – projectile and measuring bars used within the SHPB test stand, as well as a detailed analysis of the measurement results obtained for the determination of the dynamic curves of the mechanical properties of the soil. An added element is the implementation of measuring the change in granulometric composition of silty sand in terms of the increase in the content of fine fractions in its structure by laser diffraction method. The results of the tests make it possible to determine the dynamic loading energy absorption parameters through the protective layer of soil. This makes it possible to determine the level of both ballistic and explosion protection for hides and shelters depending on the type of soil, its moisture content and the thickness of the protective layer.

SPIS TREŚCI

Streszczenie w języku polskim.....	3
Streszczenie w języku angielskim	5
Wykaz użytych skrótów i głównych symboli.....	8
1. Wprowadzenie i motywacja do badań.....	9
2. Problem badawczy, teza i cele szczegółowe	14
3. Zbiór opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych	18
4. Metodyka badań	20
5. Rezultaty prac i oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.....	23
5.1. Charakterystyka wytrzymałościowa właściwości gruntów przy dużych prędkościach odkształcenia z zastosowaniem techniki Hopkinsona – Przegląd badań eksperymentalnych [publikacja P1].....	23
5.2. Charakterystyka pracy wyrzutni pneumatycznej w technice pręta Hopkinsona [publikacja P2].....	28
5.3. Przygotowanie próbki gruntu niespoistego oraz kalibracja wyrzutni pneumatycznej w dynamicznym badaniu SHPB [publikacja P3]	30
5.4. Eksperymentalne badanie dynamicznego zachowania piasku pylastego [publikacja P4].....	35
5.5. Analiza wpływu wilgotności piasków pylastych oraz prędkości uderzenia na ich zagęszczalność i zmianę składu granulometrycznego [publikacja P5].....	41
6. Podsumowanie i wnioski	48
Literatura	51
Załączniki	56

WYKAZ UŻYTYCH SKRÓTÓW I GŁÓWNYCH SYMBOLI

- **HSR** – ang. *high strain rate*, wysoka prędkość odkształcenia
- **IPB** – Indywidualny Plan Badawczy w ramach Szkoły Doktorskiej
- **IF** – ang. *impact factor*, współczynnik wpływu artykułu naukowego
- **SHPB** – ang. *split Hopkinson pressure bar*, zmodyfikowany (dzielony) pręt Hopkinsona
- **WAT** – Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie
- ν_i – współczynnik Poissona badanej próbki gruntu, wariant próbki gruntu nr i
- σ – naprężenia wewnątrz badanej próbki gruntu
- ε – odkształcenia badanej próbki gruntu
- e – wskaźnik porowatości
- G – moduł sprężystości poprzecznej Kirchhoffa
- E – moduł sprężystości podłużnej Younga
- $\Delta f_{Si+Cl,i-k} - f_{Si+Cl,i}$ – procentowa zmiana składu granulometrycznego poprzez wzrost wartości frakcji pyłowej i ilowej $f_{Si+Cl,i-k}$ w odniesieniu do próbki referencyjnej $f_{Si+Cl,i}$
- $f_{Si+Cl,i-k}$ – zawartość frakcji drobnych o średnicy ziaren mniejszej niż 63 μm (jako suma frakcji pyłowej i ilowej), wariant próbki gruntu nr i oraz wariant zmiennych nr k
- $f_{Si,i}$ – zawartość frakcji pyłowej w próbce gruntu, wariant próbki gruntu nr i
- $f_{Sa,i}$ – zawartość frakcji piaskowej w próbce gruntu, wariant próbki gruntu nr i
- $f_{Cl,i}$ – zawartość frakcji ilowej w próbce gruntu, wariant próbki gruntu nr i
- σ_θ – naprężenia w osłonie pierścieniowej próbki
- ρ_1 – gęstość objętościowa próbki gruntu po przeprowadzeniu eksperymentu dynamicznego
- ρ_0 – gęstość objętościowa próbki gruntu przed eksperymentem dynamicznym
- $\rho_{d,max,i}$ – maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego, wariant próbki gruntu nr i
- ε^T – fala transmitowana generująca odkształcenia w pręcie transmitującym
- ε^R – fala odbita generująca odkształcenia w pręcie inicjującym
- ε^I – fala padająca generująca odkształcenia w pręcie inicjującym
- $\dot{\varepsilon}$ – prędkość odkształcenia badanej próbki gruntu
- w_{sat} – wilgotność całkowita (pełne nasycenie wodą porów w gruncie)
- $w_{opt,i}$ – wilgotność optymalna, wariant próbki gruntu nr i
- w_i – wilgotność próbki gruntu, wariant wilgotności nr i
- v_i – prędkość uderzenia pręta obciążającego – pocisku w pręt inicjujący, wariant prędkości nr i
- p_i – ciśnienie w wyrzutni pneumatycznej, wariant ciśnienia nr i
- m_1 – masa próbki gruntu po przeprowadzeniu eksperymentu fizycznego
- m_0 – masa próbki gruntu przed eksperymentem fizycznym
- S_r – stopień wilgotności próbki gruntu
- L_1 – długość próbki gruntu po przeprowadzeniu eksperymentu fizycznego
- L_0 – długość próbki gruntu przed eksperymentem fizycznym

1. WPROWADZENIE I MOTYWACJA DO BADAŃ

Obecnie działa pneumatyczne są wykorzystywane do realizacji różnych badawczych testów uderzeniowych o bardzo zróżnicowanych możliwościach energetycznych, limitowanych kalibrem i ciśnieniem roboczym. Zgodnie z literaturą (Zbrowski, 2011) można wyróżnić systemy: małokalibrowe (do 70 mm), średniokalibrowe (70–150 mm) i wielkokalibrowe (powyżej 200 mm). Małokalibrowa wyrzutnia pneumatyczna stanowi istotny element stacjonarnego laboratoryjnego stanowiska badawczego pod nazwą **zmodyfikowany (dzielony) pręt Hopkinsona (SHPB)**. Za prekursorów tego typu dynamicznych badań na ściskanie ciał metalicznych uważa się ojca i syna Hopkinsonów – Johna i Bertrama (Hopkinson, 1872a; Hopkinson, 1872b; Hopkinson, 1914). W wyniku dalszych prowadzonych prac badawczych Kolsky przedstawił propozycję metody eksperymentalnej zwanej **metodą Kolsky’ego** lub zmodyfikowaną techniką pręta Hopkinsona dla **zakresu prędkości odkształcenia podczas ściskania od 10^2 s^{-1} do 10^4 s^{-1}** (Kolsky, 1949; Lindholm, 1964).

Zagadnienia związane z zachowaniem różnych materiałów poddanych oddziaływaniu dynamicznemu z wykorzystaniem stanowiska badawczego SHPB stanowią istotny element inżynierii uderzeniowej. Od wielu lat można zauważyć niesłabnące zainteresowanie i ciągły rozwój w obszarze eksperymentów dotyczących **dynamicznych właściwości mechanicznych** różnych materiałów konstrukcyjnych, w tym budowlanych. Do najczęściej badanych materiałów należą: metale (Kang i in., 2022; Cieplak i in., 2022), polimery (Lagdani i in., 2022; Wang i in., 2023a), beton (Guo i in., 2022; Shi i in., 2022), kompozyty zbrojone (Nachtane i in., 2020; Zhang i in., 2022), drewno (Bragov i in., 2022; Kruszka & Sobczyk, 2022), skały (Li i in., 2023; Zhou i in., 2023), a w ostatnich latach także **grunty** (Wang i in., 2020; Li i in., 2022). Wybrane rodzaje gruntów były i są wykorzystywane jako **materiał pochłaniający energię podczas oddziaływań wybuchowych i uderzeniowych** na obiekty budowlane w postaci **gruntowych warstw ochronnych** tych obiektów.

Kluczowym aspektem właściwego projektowania obiektów budowlanych (zarówno cywilnych, jak i militarnych) jest nie tylko poprawne rozpoznanie geotechniczne posadowienia tych obiektów, ale i także właściwe określenie parametrów gruntu do analizy jego współpracy z elementami konstrukcyjnymi, szczególnie fundamentami. Ponadto środek gruntowy zostaje poddany różnym statycznym i dynamicznym obciążeniom. Zgodnie z bieżącymi raportami istnieje aktualnie wiele zagrożeń bezpieczeństwa konstrukcji nośnych obiektów budowlanych, w tym zagadnień dotyczących interakcji z podłożem gruntowym (Annual Threat Assessment, 2023; The World Climate and Security Report, 2022):

- a) Zagrożenia w wyniku katastrof naturalnych i klęsk żywiołowych – powódzie, osuwiska, wichury, huragany, trąby powietrzne, zawieje śnieżne;
- b) Zagrożenia związane z celową działalnością człowieka – działania o charakterze militarnym i terrorystycznym w postaci **wybuchu bomby, ataku raketowego, użycia ładunku wybuchowego**;
- c) Zagrożenia związane z niezamierzoną działalnością człowieka – wypadki i kolizje, błędy konstrukcyjne obiektów, niepoprawna eksploatacja i konserwacja obiektów.

Część z wymienionych zagrożeń (np. osuwiska, atak raketowy) stanowi **oddziaływanie dynamiczne** i generuje prędkość odkształcenia gruntu rzędu od 10^2 s^{-1} do 10^4 s^{-1} . Dalsze zachowanie tak obciążonego gruntu ma duże znaczenie dla trwałości posadowienia obiektu budowlanego i ewentualnych następstw w postaci katastrofy budowlanej. Również roboty budowlane mogą wpływać w postaci oddziaływania dynamicznego na okoliczne budynki poprzez, np. **dynamiczne zagęszczanie gruntu** (Wu i in., 2020; Yao i in., 2022; Wang i in., 2023b) lub **wbijanie pali fundamentowych** (Filippov i in., 2021; Xiao i in., 2023). Istnieje zatem konieczność poznania rzeczywistej charakterystyki wytrzymałościowej różnych typów gruntów (zarówno spoistych, jak i niespoistych) poddanych **obciążeniu dynamicznemu przy wysokiej prędkości odkształcenia (HSR)**. Pozwala to na dobranie właściwych konstrukcyjnych rozwiązań projektowych zarówno dla elementów ochronnych i **obiektów infrastruktury krytycznej**, jak również dla innych obiektów budowlanych. W tym celu zasadnym jest wykorzystanie możliwości stanowiska badawczego SHPB do wyznaczenia charakterystyki dynamicznej gruntów podczas ściskania. Badania te pozwalają na określenie zależności **naprężenie – odkształcenie gruntów z uwzględnieniem prędkości odkształcenia**. W badaniach tych uwzględniono różną gęstość, wilgotność oraz strukturę uziarnienia (zawartość frakcji drobnych) próbek gruntu.

Na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat korzystano z wielu różnego rodzaju stanowisk badawczych pozwalających na wyznaczanie charakterystyk reakcji materiałów na odkształcenia przy różnych prędkościach odkształcenia. Zarówno w przemyśle militarnym, jak i w cywilnym wyznaczenie dynamicznej reakcji materiału jest bardzo ważnym obszarem prowadzenia badań naukowych. Zasadniczo można dokonać ogólnego podziału, że materiały odkształcają się w inny sposób pod działaniem obciążenia statycznego i dynamicznego. Zgodnie z przedstawianym w literaturze podziałem zakresów prędkości odkształcenia (Sivour & Kendall, 2014; Prusty & Banerjee, 2020) stanowisko badawcze SHPB można sklasyfikować w wysokim zakresie prędkości odkształcenia (HSR) dla przedziału od 10^2 s^{-1} do 10^4 s^{-1} . Te wartości odpowiadają zdarzeniom związanym z inżynierią lądową, m.in. mocnym

uderzeniom w podłoże gruntowe na przykładzie uderzenia pociskiem lub upadku skał oraz zjawiskom naturalnym dotyczącym trzęsień ziemi i innych wstrząsów wzbudzonych.

Pomimo że w literaturze światowej omawiane są różne grunty zarówno spoiste (gliny, gliny piaszczyste, gliny pylaste), jak i niespoiste (piaski drobno-, średnio-, gruboziarniste, piaski wapienne, piaski krzemionkowe) to nadal istnieje obszar do badania dynamicznego zachowania się różnych rodzajów gruntów, które ze względu na specyficzną trójfazową budowę mogą wykazywać silnie zróżnicowane właściwości dynamiczne. Przedmiotem niniejszej rozprawy doktorskiej jest **piasek pylasty**. Stanowi przykład gruntu pospolicie występującego w Polsce – stosowany np. w praktyce budowlanej jako grunt zasypowy. Często jest klasyfikowany jako grunt niespoisty, lecz ze względu na występowanie frakcji pyłowej wykazuje również pewne cechy gruntu spoistego, np. dotyczące wartości współczynnika filtracji. W związku z łatwą dostępnością na terenie kraju oraz swoją charakterystyką zachowania w odpowiedzi na obciążenia o wysokiej prędkości odkształcenia może być potencjalnie stosowany jako **materiał pochłaniający energię wybuchu w budownictwie ochronnym**. Efekt dynamicznego oddziaływania na grunt sypki, w tym wybrany piasek pylasty, można scharakteryzować poprzez przeprowadzenie analizy porównawczej zawartości poszczególnych frakcji w strukturze gruntu. W szczególności należy rozpatrywać zawartość frakcji drobnych (pyłowej f_{Si} i iłowej f_{Cl}) w odniesieniu do frakcji piaskowej f_{Sa} . Zgodnie z normą ISO (PN – EN ISO 14688–1, 2018) zakresy średnicy ziaren w strukturze gruntu to:

- dla frakcji iłowej f_{Cl} → do 0,002 mm;
- dla frakcji pyłowej f_{Si} → od 0,002 mm do 0,063 mm;
- dla frakcji piaskowej f_{Sa} → od 0,063 mm do 2 mm.

Analizowany piasek pylasty jest przykładem **gruntu wątpliwego** – grupy gruntów pomiędzy gruntami wysadzinowymi, a gruntami niewysadzinowymi przy zastosowaniu kryterium wysadzinowości według Wiłuna (Wiłun, 2013; Górska – Pawliczuk, 2017). Kryteria wysadzinowości gruntów zależą od właściwości fizycznych gruntów. Grunty niespoiste, cechujące się małą zawartością frakcji pyłowej i iłowej, w warunkach przemarzania nie tworzą wysadzin nawet w stanie pełnego nasycenia wodą. Powstający w nich lód powoduje przesunięcie nadmiaru wody do dołu. W efekcie zamrożony grunt zawiera mniejszą objętość wody w porach niż przed zamrażaniem. Natomiast grunty spoiste (posiadające większą liczbę cząstek pyłowo – iłowych) charakteryzują się wzrostem wysadzinowości wraz z coraz drobniejszym uziarnieniem struktury i coraz większą wilgotnością gruntu.

Określenie charakterystyki dynamicznej gruntu jest istotne w obszarze ochrony obiektów o specjalnym przeznaczeniu lub obiektów infrastruktury krytycznej. Taki typ obiektów zazwyczaj posiada zaprojektowaną warstwę gruntu jako dodatkową warstwę

ochronną lub wał ochronny – w sytuacji kryzysowej grunt może zostać poddany oddziaływaniu dynamicznemu w wyniku m.in. powietrznej fali uderzeniowej powstałej wywołaną eksplozją ładunku wybuchowego (Sobczyk i in., 2020). Konstrukcje ochronne przeznaczone do obrony cywilnej oraz urządzenia obrony cywilnej mają przypisane bardzo ważne zadania w czasie pokoju, jak również w czasie wojny. Kluczowym wyzwaniem jest zagwarantowanie właściwej ochrony ludności cywilnej przed różnego rodzaju działaniami niemilitarnymi (np. powodzie, osuwiska, burze, huragany) oraz militarnymi (celowe działania wojskowe, np. ostrzał artyleryjski i raketowy, akty terrorystyczne). Potrzeba analizy tego zagadnienia wynika z rosnącego znaczenia zjawiska terroryzmu w **niestabilnej sytuacji współczesnego świata**. Dla bezpieczeństwa państwa ważne jest rozważenie i analiza różnych konstrukcji ochronnych gotowych do szybkiego zastosowania w określonych warunkach. W większości krajów europejskich do obrony cywilnej wykorzystywane są **schrony i tymczasowe ukrycia**. Również w Polsce, poza utrzymywanymi w bieżącej gotowości obiektami ochronnymi, może powstać konieczność tworzenia dodatkowych ukryć oraz schronów (typu „ad hoc”) w przypadku wystąpienia określonej sytuacji kryzysowej. Zgodnie z definicją literatury fortyfikacyjnej, jest to otwarta konstrukcja chroniąca ludzi lub wybrany sprzęt przed założonymi czynnikami destrukcji z określonych stron ich oddziaływania. Konstrukcje takie, w tym ziemne, mogą być wykonane z elementów i materiałów podręcznych w terenie (np. blachy stalowe, drewno, kompozyty) oraz z elementów prefabrykowanych (np. prefabrykaty żelbetowe).

W celu zwiększenia poziomu ochrony obiektów budowlanych przed oddziaływaniem dynamicznym jednym z możliwych rozwiązań jest zastosowanie dodatkowej warstwy obsypki gruntowej. Rolę i kluczowe znaczenie pokrycia gruntowego wskazałem i uwzględniłem w analizie propozycji konstrukcji prefabrykowanych do ochrony obiektów infrastruktury krytycznej w publikacji (Sobczyk i in., 2018). Istnieje zatem potrzeba rozważenia i przeanalizowania wyboru powszechnie dostępnego w Polsce **piasku pylastego w celu zapewnienia dodatkowego pokrycia w postaci gruntowej warstwy ochronnej absorbującej efekty oddziaływania dynamicznego**.

Motywacją do rozpoczęcia badań zawartych w niniejszej rozprawie doktorskiej były analizy projektowo-koncepcyjne dotyczące propozycji konstrukcji ochronnych dla infrastruktury krytycznej, które opracowałem w ramach magisterskiej pracy dyplomowej (Sobczyk, 2017). W pracy przedstawiłem nową koncepcję zastosowania konstrukcji ochronnej w postaci prefabrykowanej kopuły żelbetowej w kilku wariantach w zależności od typów obiektów infrastruktury krytycznej. Kluczowy ochronny element składowy tej propozycji stanowiła gruntowa obsypka. Pozwala ona **zwiększyć zarówno ochronę balistyczną, jak i wybuchową obiektu** przed ewentualnymi skutkami bezpośredniego bądź pośredniego

ostrzału artyleryjskiego lub raketowego poprzez „odsunięcie” fali nadciśnienia powstałej w wyniku wybuchu od narażonej konstrukcji nośnej tego obiektu. Idea wykorzystania piasku pylastego jako dodatkowej warstwy ochronnej stanowiła punkt początkowy do opracowania Indywidualnego Planu Badawczego (IPB) realizowanego w trakcie kształcenia w Szkole Doktorskiej WAT. W oparciu o te wytyczne poprowadziłem dalsze kierunki analiz eksperymentalnych, których rezultatem jest przedmiotowy zbiór pięciu artykułów naukowych wraz ze sformułowanym problemem naukowym i tezą badawczą.

Równolegle z realizacją IPB poszerzałem teoretyczno-obliczeniowe obszary wiedzy z geotechniki poprzez **prowadzenie ćwiczeń rachunkowych i zajęć laboratoryjnych** na macierzystej uczelni. W okresie kształcenia w Szkole Doktorskiej WAT (tj. od października 2019 r. do czerwca 2023 r.) zajmowałem kolejno stanowisko inżyniera i starszego inżyniera w Instytucie Inżynierii Lądowej Wydziału Inżynierii Lądowej i Geodezji WAT. Prowadziłem także zajęcia dydaktyczne w ramach przedmiotów specjalistycznych: **mechaniki gruntów, fundamentowania oraz posadowienia obiektów budowlanych** (łącznie w powyższym okresie przeprowadziłem samodzielnie 418 godzin ćwiczeń rachunkowych i 262 godziny zajęć laboratoryjnych). W ramach rozwoju umiejętności w obszarze metodologii dotyczącej normowego wykonywania laboratoryjnych i polowych badań gruntowych zrealizowałem trzymiesięczny **staż naukowy** w Zakładzie Lotniskowym Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych w okresie wrzesień – listopad 2022 r. W programie stażu były ujęte zagadnienia dotyczące m.in. badań diagnostycznych podstawowych parametrów eksploatacyjnych sztucznych i naturalnych nawierzchni lotniskowych. Dodatkowo w celu zdobycia praktycznego doświadczenia w zakresie geotechniki, szczególnie cennego w reprezentowanej dyscyplinie naukowej, współuczestniczyłem czynnie jako **asystent rzeczoznawcy budowlanego** w wykonywaniu ekspertyz budowlanych i naukowo-technicznych, m.in. w ocenie stanu stateczności skarpy na Polskim Cmentarzu Wojennym w masywie Monte Cassino (Włochy) wraz z określeniem związku przyczynowo-skutkowego powstania lokalnego uszkodzenia muru oporowego i powstawania osuwisk na skarpie tego cmentarza (Chmielewski & Sobczyk, 2022) oraz w weryfikacji projektowych rozwiązań konstrukcyjnych naziemnych zbiorników magazynowych z obsypką gruntową infrastruktury paliwowej NATO wraz z analizą posadowienia tych obiektów (Kruszka i in., 2022). Potwierdzeniem osiągnięcia właściwego poziomu specjalistycznej wiedzy i doświadczenia praktycznego w obszarze inżynierii lądowej jest uzyskanie przeze mnie w 2022 r. **uprawnień budowlanych** do kierowania robotami budowlanymi w specjalności konstrukcyjno-budowlanej bez ograniczeń.

2. PROBLEM BADAWCZY, TEZA I CELE SZCZEGÓŁOWE

Rozprawę doktorską pt. *Eksperymentalna analiza dynamicznych właściwości mechanicznych gruntów wątpliwych na przykładzie piasku pylastego* stanowi zbiór pięciu opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych zgodnie z zapisami art. 187 ust. 3 Ustawy (Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, 2018). Cykl publikacyjny zawiera realizację autorskiego Indywidualnego Planu Badawczego (IPB) w zakresie dynamicznego zachowania wytypowanego przedstawiciela gruntów wątpliwych – piasku pylastego jako ośrodka trójfazowego (szkielet gruntowy – faza stała zbudowana z ziaren, powietrze w porach gruntowych – faza gazowa, woda w porach gruntowych – faza ciekła). Przeprowadzone fizyczne eksperymenty laboratoryjne oparłem o stanowisko badawcze dzielonego pręta Hopkinsona (SHPB). Zastosowałem również dodatkową aparaturę badawczą w celu rozwinięcia rozwiązania problemu naukowego w zakresie procesu przygotowania próbek gruntu (m. in. aparat Proctora, wstrząsarka wibracyjna) oraz analizy skutków oddziaływania dynamicznego na zmianę struktury próbek gruntu – analizator wielkości cząstek metodą dyfrakcji laserowej. Proponowane rozwiązania metodyczne zweryfikowałem, wykonując eksperymenty doświadczałne w oparciu o technikę pręta Hopkinsona podczas ściskania, z wprowadzeniem kombinacji wariantów zmiennych – czterech wilgotności próbek gruntu $w_1 \div w_4$ i czterech prędkości uderzenia pręta obciążającego – pocisku $v_1 \div v_4$ (w wyniku działania czterech ciśnień roboczych $p_1 \div p_4$ wyrzutni pneumatycznej SHPB). Metodyka badawcza zachowania piasku pylastego poddanego obciążeniu o wysokiej prędkości odkształcenia (HSR), którą wdrożyłem w toku prowadzonych badań, ma zastosowanie w wyznaczaniu dynamicznych właściwości mechanicznych wybranych gruntów. Praktyczne zastosowanie tych analiz prowadzi do wniosku o możliwości wykorzystania piasku pylastego jako grunтовой obsypki ochronnej, która zapewnia zarówno ochronę balistyczną, jak i wybuchową obiektów budowlanych. Wynika to ze zwiększenia odporności obiektów budowlanych na uderzenie w ich przegrody, np. dach lub ściany, oraz inne ochronne przesłony konstrukcyjne w obiektach obrony cywilnej, konstrukcjach infrastruktury wojskowych lub obiektach infrastruktury krytycznej. Konieczność poznania dynamicznej charakterystyki różnych typów gruntów (zarówno spoistych, jak i niespoistych) na potrzeby doboru konstrukcyjnych rozwiązań projektowych elementów ochronnych obiektów budowlanych i innej infrastruktury towarzyszącej jest niezwykle ważnym zagadnieniem ze względu na niestabilną sytuację geopolityczną i militarną w różnych regionach świata, np. trwający konflikt militarny na terenie Ukrainy.

Przedmiotem niniejszej rozprawy doktorskiej zgodnie z zapisami art. 187 ust. 2 Ustawy (Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, 2018) jest **oryginalne rozwiązanie problemu naukowego**, który dotyczy wyznaczenia eksperymentalnych zależności w zakresie dynamicznych właściwości mechanicznych gruntów wątpliwych na przykładzie piasku pylastego podczas ściskania z uwzględnieniem w analizie poniższych czynników:

- odkształcenia;
- prędkości odkształcenia;
- wilgotności;
- zawartości frakcji drobnych;
- zmiany składu granulometrycznego.

Doświadczalnie wykazałem, że zachowanie piasku pylastego jest wrażliwe na te czynniki. W rezultacie przeprowadzonych laboratoryjnych eksperymentów fizycznych wyznaczyłem przebiegi, w zależności od czasu trwania ściskającego obciążenia uderzeniowego, następujących funkcji w badanym piasku pylastym:

- naprężenie ściskające $\sigma(t)$;
- odkształcenie $\varepsilon(t)$;
- prędkość odkształcenia $\dot{\varepsilon}(t)$.

Badania ujęte w rozprawie uwzględniały różne wilgotności gruntu w oraz różną początkową zawartość frakcji drobnych (pyłowej i ilowej) f_{Si+Cl} . W analizie eksperymentalnej określiłem także zmianę składu granulometrycznego gruntu, polegającą na zwiększeniu zawartości frakcji drobnych Δf_{Si+Cl} , powstałą na skutek obciążenia uderzeniowego. Uzyskano to poprzez porównanie krzywej uziarnienia przed i po poddaniu próbek obciążeniem o wysokiej prędkości odkształcenia (HSR), co pozwoliło na określenie zakresu niszczenia struktury badanego gruntu. Przeprowadzone przeze mnie eksperymenty fizyczne pozwoliły na określenie eksperymentalnej zależności (2.1) na potrzeby modelowania konstytutywnego piasku pylastego:

$$\sigma = \sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, \Delta f_{Si+Cl}) \Big|_{\substack{w \\ f_{Si+Cl}}} \text{ dla danych: } \quad (2.1)$$

Specyfika rozwiązania tego problemu naukowego polega na złożoności prac przygotowawczych z próbką piasku pylastego do przeprowadzenia dynamicznego eksperymentu. Procedura osiągnięcia stanu wstępnego zagęszczenia gruntu stanowi ważny krok procesu przygotowania próbek suchych i o małej zawartości wilgotności. Taka próbka znajduje się w stanie dwufazowym lub trójfazowym – poza fazą stałą (szkielet gruntowy / ziarna) posiada fazę gazową (najczęściej w postaci powietrza) i/lub fazę ciekłą (najczęściej

w postaci wody). Brak przeprowadzenia procesu zagęszczenia będzie skutkować niepoprawnymi rezultatami eksperymentu fizycznego, ponieważ część energii uderzenia pręta obciążającego – pocisku jest wtedy wykorzystana do zmniejszania objętości pustek powietrznych (fazy gazowej). Opracowałem i zastosowałem metodykę zagęszczania wibracyjnego próbek gruntu, gdzie uzyskałem finalnie porównywalne wyniki gęstości tych próbek przygotowanych do eksperymentów fizycznych na stanowisku badawczym SHPB w porównaniu z metodą zagęszczenia uderzeniem (prętem obciążającym – pociskiem z małą prędkością uderzenia). W dotychczasowych publikacjach o różnych rodzajach piasków, np. o piasku koralowym (Xu i in., 2022) czy piasku wapiennym (Chen i in., 2022), nie zostały w pełni omówione zagadnienia w odniesieniu do powszechnie występującego w Polsce piasku pylastego (analizowanego w tym zbiorze artykułów naukowych).

Istotnym zjawiskiem fizycznym towarzyszącym badaniu dynamicznych właściwości mechanicznych piasku pylastego jest zmiana składu granulometrycznego próbek piasku pylastego polegająca na pękaniu ziaren – szkieletu gruntowego. W celu określenia tej zmiany należy przed rozpoczęciem i po zakończeniu eksperymentów fizycznych na stanowisku SHPB wykonać procedurę porównawczą zmiany zawartości frakcji pyłowej i iłowej Δf_{Si+Cl} w strukturze próbki z wykorzystaniem, m.in. klasycznej metody sitowej (PN – EN ISO 17892-4, 2017) lub analizatora wielkości cząstek metodą dyfrakcji laserowej (ISO 13320, 2020; ISO 9276-6, 2008). Zmiana zawartości frakcji pyłowej i iłowej Δf_{Si+Cl} powoduje różnicę w dynamicznym zachowaniu badanego gruntu. Zaobserwowanie tendencji zmiany krzywej uziarnienia w wyniku uderzenia pręta obciążającego – pocisku ma istotny wpływ na charakterystykę gruntu jako ośrodka pochłaniającego energię uderzenia, który stanowi właściwy materiał do zastosowania w postaci gruntowej powłoki ochronnej. Zmiana zawartości Δf_{Si+Cl} skutkuje m.in. wzrostem procentowym zawartości ziaren o mniejszej średnicy oraz zmianą w zachowaniu wody wypełniającej częściowo pory gruntowe w czasie dynamicznego oddziaływania.

W oparciu o rozpoznany problem naukowy zdefiniowałem tezę badawczą niniejszej rozprawy doktorskiej: ***Dynamiczne właściwości mechaniczne trójfazowego gruntu wątpliwego, na przykładzie piasku pylastego poddanego uderzeniu ściskającemu, mają charakter nieliniowy oraz zależą od wilgotności gruntu, jego składu granulometrycznego i są wrażliwe na prędkość odkształcenia.*** W celu udowodnienia tej tezy postawiłem następujący główny cel badawczy: ***(C0) Opracowanie i wdrożenie kompleksowej metodyki dotyczącej eksperymentalnego wyznaczenia właściwości mechanicznych piasku pylastego poddanego dynamicznemu ściskaniu na stanowisku badawczym SHPB. Metodyka***

ta uwzględnia różne wilgotności próbki, zawartości frakcji drobnych oraz prędkości uderzenia pręta obciążającego – pocisku.

W oparciu o powyższy cel główny sprecyzowałem następujące cele szczegółowe rozprawy doktorskiej:

- C1. opracowanie przeglądu literatury aktualnych badań dynamicznych różnych gruntów prowadzonych w ostatnich latach z wykorzystaniem technik badawczych pręta Hopkinsona;
- C2. opracowanie procedury kalibracyjnej wyrzutni pneumatycznej SHPB dla różnych długości pręta obciążającego – pocisku, poprzedzającej rozpoczęcie dynamicznych badań próbek piasku pylastego w oparciu o eksperymenty fizyczne i obliczenia numeryczne balistyki wewnętrznej prętowego pocisku wyrzutni SHPB za pomocą oprogramowania MatLab (badania walidacyjne wyrzutni pneumatycznej dla różnych ciśnień roboczych i długości pręta obciążającego – pocisku);
- C3. opracowanie algorytmu wstępnego zagęszczenia gruntu wątpliwego na przykładzie piasku pylastego poprzez proces zagęszczenia wibracyjnego próbek gruntu sposobem uderzeniowym (z wykorzystaniem SHPB o małej prędkości uderzenia) i wibracyjnym (za pomocą wstrząsarki wibracyjnej);
- C4. eksperymentalna analiza wyznaczania dynamicznych właściwości mechanicznych badanego gruntu w postaci następujących funkcji czasu trwania ściskającego obciążenia uderzeniowego (długości pręta obciążającego – pocisku): naprężenia ściskającego w próbce $\sigma(t)$, odkształcenia w próbce $\varepsilon(t)$ oraz prędkości odkształcenia próbki $\dot{\varepsilon}(t)$ wraz z naprężeniem rozciągającym w osłonie pierścieniowej próbki $\sigma_{\theta}(t)$ w oparciu o sygnał z tensometrów pomiarowych (wraz z korektą w oprogramowaniu FlexPro) dla różnych wilgotności próbki, początkowej zawartości frakcji pyłowej i ilowej f_{Si+Cl} oraz prędkości odkształcenia (prędkości uderzenia pręta obciążającego – pocisku w inicjujący pręt pomiarowy SHPB);
- C5. opracowanie algorytmu badawczego określenia zmiany składu granulometrycznego piasku pylastego Δf_{Si+C} poddanego oddziaływaniu dynamicznemu poprzez uderzenie pręta obciążającego – pocisku z wykorzystaniem analizatora wielkości cząstek metodą dyfrakcji laserowej;
- C6. opracowanie propozycji wykorzystania dynamicznej charakterystyki piasku pylastego jako warstwy gruntowej obsypki ochronnej w celu zwiększenia odporności militarnych i cywilnych elementów infrastruktury krytycznej na obciążenia dynamiczne.

3. ZBIÓR OPUBLIKOWANYCH I POWIĄZANYCH TEMATYCZNIE ARTYKUŁÓW NAUKOWYCH

Badania przeprowadzone w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej przedstawiłem w **zbiorze pięciu powiązanych tematycznie artykułów naukowych**, które zostały opublikowane w polskich i zagranicznych czasopismach naukowych (częściowo indeksowanych w bazie Journal Citation Reports). **Suma punktów zgodnie z Wykazem czasopism naukowych MEiN za publikacje uwzględnione w cyklu wynosi 450, a sumaryczny współczynnik wpływu IF czasopism to 6,461.** We wszystkich tych publikacjach P1 – P5 jestem ich **autorem większościowym**. Każdy manuskrypt publikacji był szczegółowo przedyskutowany przez wszystkich współautorów. Promotor i Promotor pomocniczy udzielali rad i komentarzy dotyczących treści manuskryptów. Oświadczenia współautorów o szczegółowym udziale merytorycznym przedstawiłem w ramach załączników Z1 – Z5.

Wykaz opublikowanych artykułów wraz z przyporządkowaną im wartością punktów zgodnie z Wykazem czasopism naukowych MEiN oraz współczynnikami wpływu IF zestawilem w tabeli 3.1.

Tabela 3.1

Wykaz opublikowanych artykułów naukowych wchodzących do zbioru tematycznego
(źródło: opracowanie własne)

Ozn.	Artykuły naukowe w zbiorze tematycznym	Punkty wg MEiN, IF
P1	Sobczyk K. , Chmielewski R., Kruszką L., Rekucki R., 2022, Strength Characterization of Soils' Properties at High Strain Rates Using the Hopkinson Technique – A Review of Experimental Testing, <i>Materials</i> , 15(1):274, DOI: 10.3390/ma15010274	MEiN: 140 pkt IF: 3,623
P2	Sobczyk K. , Kruszką L., Chmielewski R., Rekucki R., 2021, Performance characteristics of Hopkinson's set – up pneumatic launcher, <i>Acta Polytechnica</i> , 61(4):552-561, DOI: 10.14311/AP.2021.61.0552	MEiN: 40 pkt IF: –
P3	Sobczyk K. , Kruszką L., Grążka M., Chmielewski R., Rekucki R., 2022, Preparation of the non – cohesive soil sample and calibration of the pneumatical launcher in the dynamic soil test SHPB, <i>Safety Engineering of Anthropogenic Objects</i> , No. 1/2022:16-27, DOI: 10.37105/iboa.129	MEiN: 70 pkt IF: –
P4	Chmielewski R., Kruszką L., Rekucki R., Sobczyk K. , 2021, Experimental investigation of dynamic behavior of silty sand, <i>Archives of Civil Engineering</i> , LXVII(1):481-498, DOI: 10.24425/ACE.2021.136484	MEiN: 100 pkt IF: –
P5	Sobczyk K. , Chmielewski R., Kruszką L., Rekucki R., 2023, Analysis of the Influence of Silty Sands Moisture Content and Impact Velocity in SHPB Testing on Their Compactability and Change in Granulometric Composition, <i>Applied Sciences</i> , 13(8):4707, DOI: 10.3390/app13084707	MEiN: 100 pkt IF: 2,838

4. METODYKA BADAŃ

W niniejszej rozprawie doktorskiej opracowałem kompleksową metodologię dotyczącą eksperymentalnej analizy dynamicznych właściwości mechanicznych piasku pylastego podczas ściskania wraz z autorskimi elementami procesu przygotowania i analizy skutków oddziaływania dynamicznego na badane próbki gruntu. Ta metodologia obejmuje:

- szczegółową analizę porównawczą tendencji budowy stanowisk badawczych opartych na różnych wariantach techniki pręta Hopkinsona do badania właściwości dynamicznych gruntów z wykorzystaniem stanowiska badawczego SHPB w Instytucie Inżynierii Lądowej (Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji, Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego w Warszawie);
- badanie podstawowych cech fizycznych badanych piasków pylastych z różną zawartością frakcji drobnych, poprzez określenie ich składu granulometrycznego, wilgotności optymalnej oraz maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego;
- opracowanie zasady przeprowadzenia kalibracji wyrzutni pneumatycznej dla wariantów ciśnienia roboczego wyrzutni pneumatycznej z wykorzystaniem prętów pomiarowych SHPB (pręt obciążający – pocisk, pomiarowy pręt inicjujący, pomiarowy pręt transmitujący);
- opracowanie algorytmu realizacji wstępnego zagęszczenia gruntu wątpliwego poprzez proces zagęszczenia wibracyjnego w celu eliminacji pustek powietrznych w trójfazowym ośrodku gruntowym;
- wyznaczanie przebiegu wykresów wybranych dynamicznych właściwości mechanicznych piasku pylastego w oparciu o odczytane i skorygowane w oprogramowaniu FlexPro dane sygnałowe, które zostały zarejestrowane z wykorzystaniem zestawu tensometrów pomiarowych stanowiska SHPB;
- opracowanie algorytmu analizy zmiany składu granulometrycznego piasku pylastego porównując strukturę próbek przed rozpoczęciem i po zakończeniu cyklu badawczego na stanowisku SHPB poprzez wykorzystanie analizatora wielkości cząstek metodą dyfrakcji laserowej;
- zdefiniowanie koncepcji praktycznego wykorzystania piasku pylastego jako warstwy obsypki gruntowej na potrzeby wzmocnienia ochrony zarówno balistycznej, jak i wybuchowej dla cywilnych i militarnych obiektów budowlanych, w tym elementów infrastruktury krytycznej.

W wyniku realizacji rozprawy doktorskiej została opracowana i wdrożona **metodyka prowadzenia eksperymentalnej analizy dynamicznego zachowania się piasku pylastego poddanego oddziaływaniu dynamicznemu**. Efekty usystematyzowania eksperymentu mogą znaleźć zastosowanie, m.in. w wytypowaniu i badaniu gruntów wątpliwych do zastosowania jako gruntowa warstwa ochronna, która umożliwi absorpcję części energii pochodzącej od detonacji ładunku materiału wybuchowego. W konsekwencji taki efekt pochłaniania w ośrodku gruntowym wpływa pozytywnie na wzrost odporności wybuchowej różnych polowych obiektów militarnych oraz dedykowanych konstrukcji na potrzeby ochrony ludności cywilnej, m.in. schronów, ukryć, przesłon, schronohangarów i piwnic. Inne zastosowania wyników badań obejmują możliwość ich wykorzystania podczas modelowania zjawisk katastrof naturalnych oraz modelowania zachowania ośrodka gruntowego przy realizacji robót budowlanych powiązanych z oddziaływaniami dynamicznymi.

Prace badawcze realizowałem etapami poprzez opracowanie poszczególnych celów szczegółowych **C1 – C6**. Zestawienie problemu badawczego oraz celów szczegółowych wraz z metodami ich rozwiązania (Apanowicz, 2002; Zieliński, 2012), a także ich odniesieniem do publikacji przedstawiłem w tabeli 4.1.

Tabela 4.1

Zestawienie metod rozwiązania poszczególnych celów szczegółowych w odniesieniu do problemu badawczego i opublikowanych artykułów naukowych (źródło: opracowanie własne)

Problem badawczy	Odniesienie do celów szczegółowych	Odniesienie do publikacji	Metody rozwiązania
Wyznaczenie eksperymentalnych zależności w zakresie dynamicznych właściwości mechanicznych gruntów wątpliwych na przykładzie piasku pylastego podczas uderzenia ściskającego uwzględniając w analizie:	C1	P1	• Metoda analizy i krytyki literatury • Metoda porównawcza
	C2	P2	• Metoda eksperymentu fizycznego • Metoda porównawcza • Metoda statystyczna

- odkształcenie; - prędkość odkształcenia; - wilgotność; - zawartość frakcji drobnych; - zmianę składu granulometrycznego.	C2 C3	P3	• Metoda eksperymentu fizycznego • Metoda porównawcza • Metoda modelowania komputerowego
	C1 C4 C5	P4	• Metoda analizy i krytyki literatury • Metoda eksperymentu fizycznego • Metoda porównawcza
	C1 C5 C6	P5	• Metoda analizy i krytyki literatury • Metoda eksperymentu fizycznego • Metoda porównawcza • Metoda analizy i syntezy

5. REZULTATY PRAC I ORYGINALNE ROZWIĄZANIE PROBLEMU NAUKOWEGO

W tym rozdziale rozprawy doktorskiej zamieściłem podsumowanie oryginalnego rozwiązywania zdefiniowanego wcześniej problemu naukowego oraz uzyskanych rezultatów w efekcie przeprowadzonych badań w odniesieniu do sformułowanych celów szczegółowych. Wyniki analiz badawczych uporządkowałem w poszczególnych pracach w ramach zbioru opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych.

5.1. Charakterystyka wytrzymałościowa właściwości gruntów przy dużych prędkościach odkształcenia z zastosowaniem techniki Hopkinsona – Przegląd badań eksperymentalnych [publikacja P1]

W ostatnich latach dokonywano przeglądów literaturowych oraz zestawień badań na próbkach o zróżnicowanej charakterystyce materiałowej – metali, betonu, polimerów, ceramiki, skał i drewna – dla różnych zakresów prędkości odkształcenia z wykorzystaniem techniki pręta Hopkinsona (Field i in., 2004; Gray, 2012; Suescun – Florez i in., 2015; Siviour & Jordan, 2016; Blitterswyk i in., 2017). W tematyce gruntów znaczące prace przeglądowe zostały wykonane w 2012 (Omidvar i in., 2012) i 2015 (Mishra i in., 2015). Celem omawianej publikacji **P1** było dokonanie zestawienia aktualnych trendów badań w latach 2018 – 2021 w obszarze gruntów (zarówno niespoistych, jak i spoistych) poddanych oddziaływaniu dynamicznemu w oparciu o technikę pręta Hopkinsona.

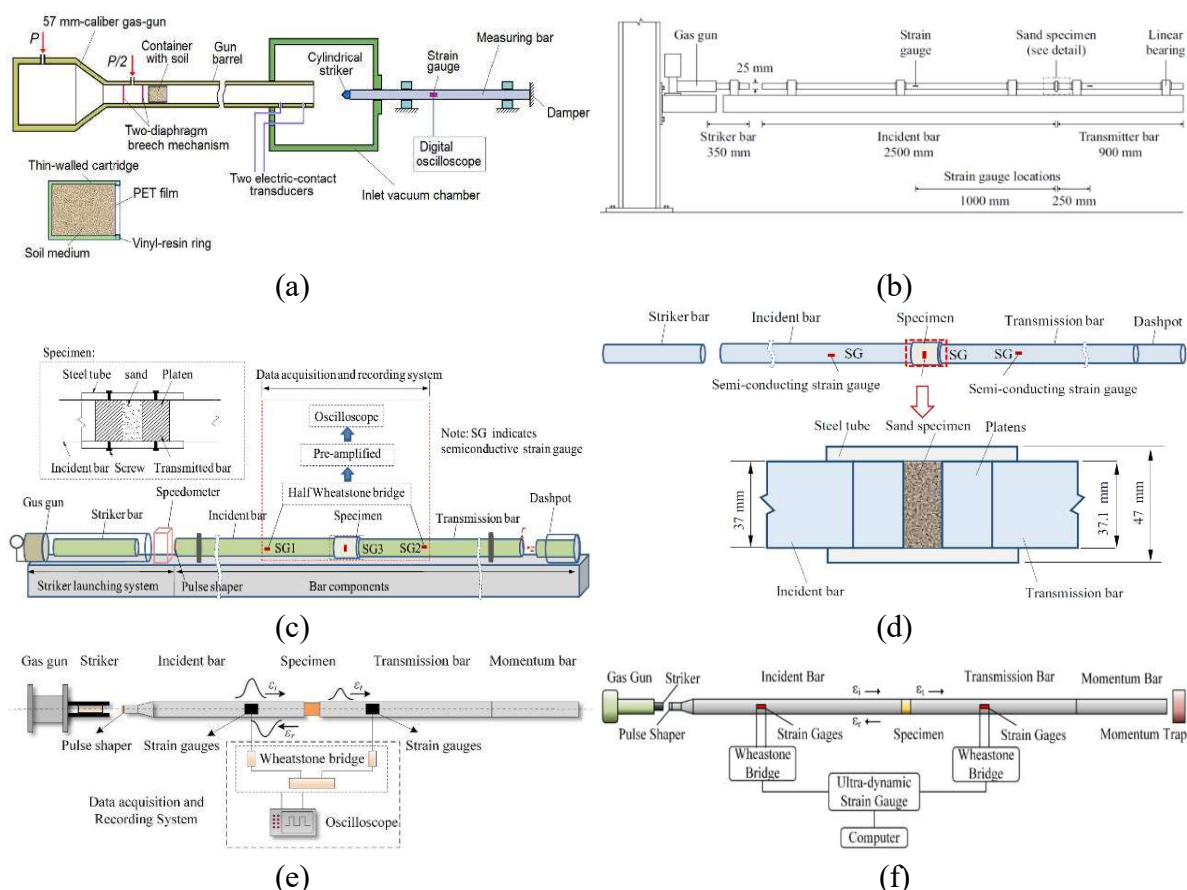
W związku z powyższym, w przeprowadzonych badaniach starałem się znaleźć odpowiedzi na następujące zagadnienia badawcze:

- ZA1.** Jakie rodzaje gruntów są poddawane dynamicznym badaniom z wykorzystaniem techniki pręta Hopkinsona w różnych regionach świata?
- ZA2.** Jakie są schematy stanowisk badawczych z zastosowaniem techniki zmodyfikowanego /dzielonego/ pręta Hopkinsona wykorzystywane w krajowych oraz zagranicznych instytucjach i ośrodkach naukowych?
- ZA3.** Jakie główne trendy badawcze można określić dla dynamicznych badań gruntów prowadzonych w ostatnich latach z wykorzystaniem różnych technik badawczych pręta Hopkinsona?

Rozwój badań dotyczący zachowania się różnych materiałów w szerokim zakresie prędkości odkształcenia pozwala na dokładne określenie ich charakterystyk statycznych i dynamicznych oraz skorelowanie z rzeczywistymi warunkami ich reakcji. W publikacji P1 zrealizowałem przegląd literaturowy w zakresie prowadzonych badań dynamicznych gruntów

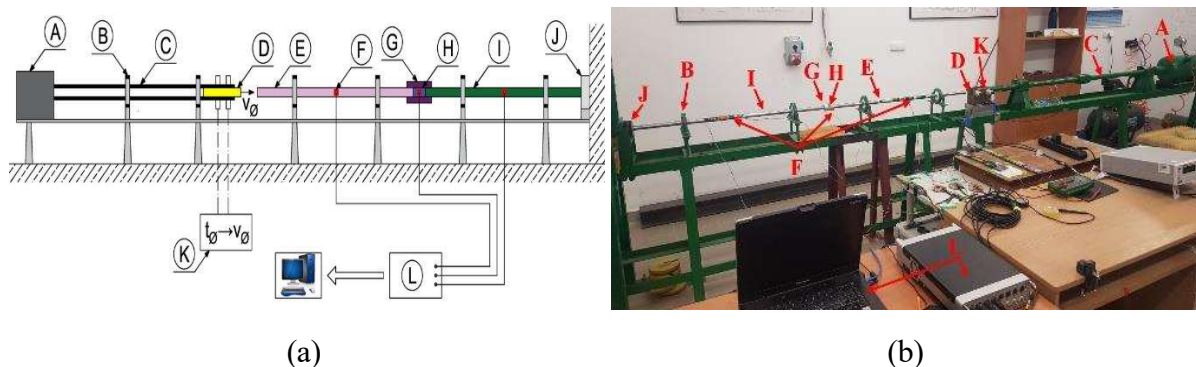
spoistych i niespoistych z wykorzystaniem techniki pręta Hopkinsona w oparciu o analizę aktualnych trendów badań w dziewiętnastu artykułach naukowych. Kluczowym parametrem, który dotyczy ograniczenia w stosowaniu techniki Hopkinsona, jest prędkość odkształcenia oczekiwana do osiągnięcia w trakcie badania. Zakres prędkości odkształcenia dla stosowanego w niniejszej rozprawie doktorskiej zmodyfikowanego /dzielonego/ pręta Hopkinsona (SHPB) mieści się w przedziale od 10^2 s^{-1} do 10^4 s^{-1} .

Na rys. 5.1 przedstawiłem zestawienie wybranych stanowisk badawczych SHPB wraz z ich schematami, które przeanalizowałem w publikacji P1. Zlokalizowane są one w zagranicznych instytucjach i ośrodkach naukowych w różnych częściach świata. Generalna zasada ich budowy wraz z listą istotnych elementów składowych jest podobna – zgodna z podejściem zmodyfikowanej konfiguracji Kolsky'ego. Idea eksperymentu polega na pomiarze efektu uderzenia pręta obciążającego – pocisku poprzez zarejestrowanie reakcji dynamicznej próbki gruntu umieszczonej w osłonie pierścieniowej pomiędzy prętami pomiarowymi.



Rys. 5.1. Zestawienie wybranych schematów stanowisk badawczych SHPB z zagranicznych ośrodków naukowych, według publikacji: (a) Bragov i in., 2018; (b) Barr i in., 2018; (c) Lv i in., 2019; (d) Lv i in., 2020; (e) Zhang i in., 2020; (f) Jia i in., 2021 (źródło: zgodnie z odniesieniem (a) – (f) w opisie rysunku)

Dynamiczne eksperymenty na próbkach piasku pylastego w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej prowadziłem na stanowisku badawczym SHPB w Zakładzie Inżynierii i Infrastruktury Wojskowej – Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji w Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie. Na rys. 5.2 przedstawiłem (a) schemat budowy wraz z oznaczeniem kluczowych elementów składowych oraz jego (b) realny widok ogólny .



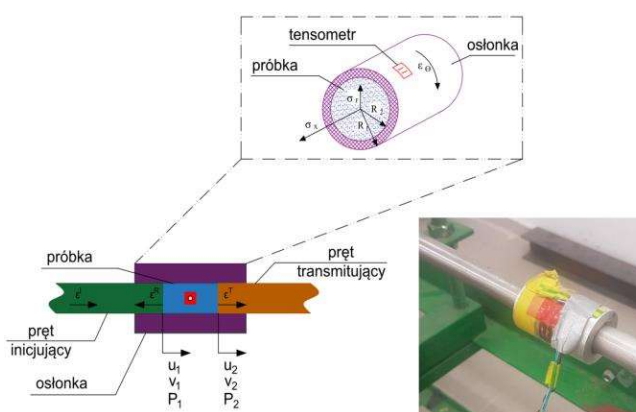
Rys. 5.2. Stanowisko badawcze SHPB w Zakładzie Inżynierii i Infrastruktury Wojskowej w WAT – (a) schemat budowy; (b) widok ogólny
(źródło: opracowanie własne w publikacji P1)

Do najważniejszych elementów składowych stanowiska badawczego SHPB należą:

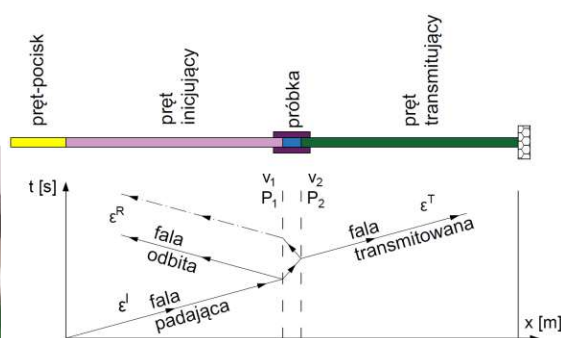
- A – pneumatyczna wyrzutnia pręta obciążającego – pocisku;
- B – konstrukcja zapewniająca osiowość prętów pomiarowych;
- C – prowadnica (lufa wyrzutni) pręta obciążającego – pocisku;
- D – pręt obciążający – pocisk;
- E – pomiarowy pręt inicjujący;
- F – zestaw tensometrów naklejonych na prętach pomiarowych i osłonie pierścieniowej próbki gruntu;
- G – element osłaniający badaną próbkę gruntu (osłona pierścieniowa);
- H – badana próbka gruntu;
- I – pomiarowy pręt transmitujący;
- J – element amortyzujący pręty pomiarowe;
- K – zestaw pomiarowy prędkości uderzenia pręta obciążającego – pocisku v_0 ;
- L – rejestrator wraz z komputerem.

Próbka gruntu podczas badania SHPB ma kształt cylindryczny i jest umieszczona w osłonie pierścieniowej (rys. 5.3) wykonanej z różnego rodzaju materiałów w zależności od założeń eksperymentu, np. plexi, duraluminium czy stal. Wymiary i charakterystyka materiału osłony zapewnia wystąpienie jednoosiowego stanu odkształcenia badanego gruntu przy dociskaniu próbki z obu stron prętami pomiarowymi – inicjującym i transmitującym.

Zgodnie z oznaczeniami na rys. 5.2, pręt obciążający – pocisk (D) jest napędzany gwałtownie uwolnionym ciśnieniem powietrza z wyrzutni pneumatycznej (A). Laserowy układ pomiaru czasu (K) dokonuje odczytu czasu, w jakim pręt obciążający – pocisk pokonuje znany odcinek, w tym przypadku 0,1 m. Znajomość tego czasu umożliwia wyznaczenie prędkości uderzenia. Po uderzeniu pręta obciążającego – pocisku w pomiarowy pręt inicjujący (E) powstaje w nim ściskająca fala inicjująca (fala padająca generuje odkształcenia w pręcie inicjującym ε^I) rozchodząca się wzdłuż tego pręta w kierunku próbki (H) otoczonej elementem osłaniającym – osłoną pierścieniową (G). W momencie dotarcia do końca pręta inicjującego fala częściowo kontynuuje propagację (fala transmitująca generuje odkształcenia w pomiarowym pręcie transmitującym ε^T) przez próbkę w kierunku pręta transmitującego (I), a częściowo zostaje odbita i rozpoczyna powrót do początku pręta inicjującego (fala odbita generuje odkształcenia w pręcie inicjującym ε^R). Fala, która przeszła przez próbkę i dotarła do pręta transmitującego na jego końcu jest ostatecznie wytłumiona w elemencie amortyzującym (J). Sygnały z tensometrów pomiarowych zostają zapisane przez cyfrowy rejestrator i przesłane do komputera (L). Opisane zjawisko falowe przedstawiłem na rys. 5.4.



Rys. 5.3. Cylindryczna próbka gruntu w osłonie pierścieniowej
(źródło: opracowanie własne w publikacji P1)



Rys. 5.4. Wykres falowy obrazujący zjawisko propagacji fal sprężystych
(źródło: opracowanie własne w publikacji P1)

W ramach przeglądu literatury wybranych artykułów naukowych w okresie 2018 – 2021 skupiłem się na omówieniu poniższych zagadnień w kontekście dynamicznych badań gruntu w oparciu o stanowisko SHPB:

- rodzaje próbek gruntu poddanych eksperymentom;
- wilgotność próbek gruntu;
- niestandardowe warunki temperaturowe próbek gruntu.

W wyniku zachodzących zmian klimatycznych kluczowe jest zrozumienie właściwości gruntu (w tym również i dynamicznych) w różnych zakresach temperatur wewnątrz próbki. Główny nacisk w tym obszarze badawczym położony jest na eksperymenty z zamrożoną

próbki gruntu, rzadziej publikacje dotyczyły badań w podwyższonej temperaturze. W obszarze badań w obniżonej temperaturze gruntu szczególne znaczenie mają eksperymenty w ramach złożonego procesu zamrażania – rozmrażania. W analizowanych artykułach wykonano unikalne badania polegające na poddaniu próbki gruntu działaniu dynamicznemu po przeprowadzeniu cykli zamrażania – rozmrażania. Istotnymi wnioskami z tych eksperymentów było sformułowanie zależności – im większa liczba cykli zamrażania – rozmrażania, tym mniejsze wartości maksymalnych naprężeń w próbce gruntu oraz im niższa temperatura próbki w cyklu zamrażania – rozmrażania, tym mniejsze wartości osiągniętych maksymalnych naprężeń.

Zgodnie z przeprowadzonymi analizami literaturowymi w obszarze aktualnych trendów w tematyce dynamicznych badań gruntu, główny nacisk badawczy znajduje się obecnie wokół zagadnień dotyczących cykli zamrażanie – rozmrażanie oraz eksperymentów w konfiguracji 3D – trójosiowego pręta Hopkinsona. Konfiguracja eksperymentu 1D jest częściej stosowana i rozpowszechniona w różnych uniwersytetach oraz ośrodkach badawczych na świecie niż konfiguracja 3D. Różnica w budowie stanowiska pręta Hopkinsona pomiędzy konfiguracją 1D i 3D polega na zastosowanym układzie jednowymiarowym lub przestrzennym prętów pomiarowych. Wykorzystanie sztywnej osłony pierścieniowej umożliwia uzyskanie sytuacji, w której wartości odkształceń promieniowych są zerowe. Główną zaletą konfiguracji 3D jest możliwość dokonania pomiaru i uzyskanie kompleksowej, trójwymiarowej reakcji badanego gruntu na oddziaływanie dynamiczne – zarejestrowane wyniki zachowania próbki w bardziej realnym stopniu ukazują odpowiedź badanego gruntu w porównaniu z wynikami uzyskanymi za pomocą klasycznej konfiguracji 1D w badaniach techniką pręta Hopkinsona.

W ramach podsumowania publikacji **P1**, w której skupiłem się na przeglądzie literaturowym badań eksperymentalnych dotyczących charakterystyki wytrzymałościowej właściwości gruntów przy dużych prędkościach odkształcenia z zastosowaniem techniki pręta Hopkinsona, należy podkreślić ciągły rozwój w tym obszarze w badaniach prowadzonych w instytucjach i ośrodkach naukowych w różnych regionach świata – zarówno w zakresie gruntów niespoistych, jak i spoistych. Przeprowadzone analizy literaturowe pozwoliły mi na uzyskanie odpowiedzi do wszystkich postawionych w tym etapie zagadnień badawczych **ZA1** – **ZA3** oraz umożliwiły osiągnięcie celu szczegółowego **C1**, co bezpośrednio przyczyniło się do realizacji celu głównego **C0**.

5.2. Charakterystyka pracy wyrzutni pneumatycznej w technice pręta Hopkinsona [publikacja P2]

Przedmiotem analiz w ramach publikacji **P2** była wyrzutnia pneumatyczna stanowiąca istotny element stanowiska badawczego SHPB. W przeprowadzonych badaniach starałem się znaleźć odpowiedzi na następujące zagadnienia badawcze:

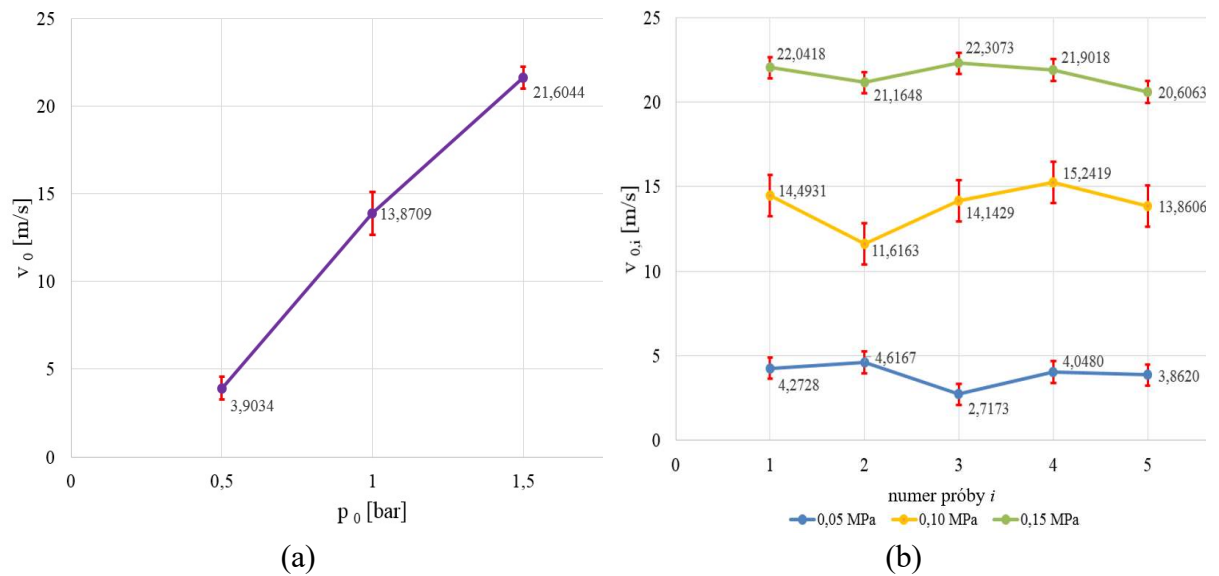
ZB1. Jak wygląda wykres zależności prędkości wylotowej pręta obciążającego – pocisku z lufy wyrzutni od ciśnienia roboczego w wyrzutni pneumatycznej dla zadanej długości pręta obciążającego – pocisku?

ZB2. Jaki jest charakter przebiegu wykresu prędkości wylotowej pręta obciążającego – pocisku z lufy wyrzutni (badanie każdorazowo przeprowadzone w pięciu próbach) w zależności od zastosowanego ciśnienia roboczego w wyrzutni pneumatycznej?

Analizowana wyrzutnia pneumatyczna składa się z komory ciśnieniowej o pojemności około 10 dm^3 wraz z gładką lufą o średnicy 20 mm i długości 2700 mm.

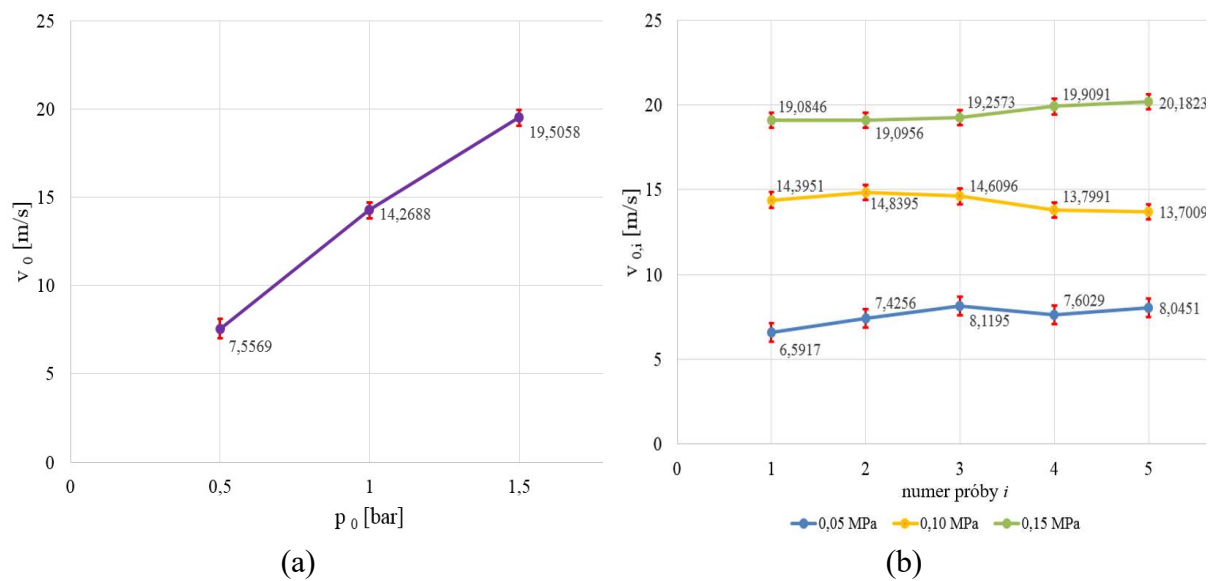
Dla omówionych wariantów pręta obciążającego – pocisku przeprowadziłem proces kalibracji wyrzutni pneumatycznej. Procedura obejmowała pomiary prędkości pręta obciążającego – pocisku v_0 w chwili wylotu z lufy dla trzech długości pręta obciążającego – pocisku ($L_1 = 100 \text{ mm}$, $L_2 = 200 \text{ mm}$ i $L_3 = 250 \text{ mm}$) w cyklu po pięć eksperymentów ($i = 5$ strzałów pomiarowych) w trzech wariantach ciśnienia roboczego p_0 wyrzutni pneumatycznej ($p_{0,1} = 0,5 \text{ bar}$, $p_{0,2} = 1,0 \text{ bar}$ i $p_{0,3} = 1,5 \text{ bar}$). Rezultaty przeprowadzonych analiz przedstawiłem graficznie w postaci wykresów prędkości wylotowej v_0 pręta obciążającego – pocisku w zależności od: (a) ciśnienia roboczego p_0 wyrzutni pneumatycznej i (b) numeru strzału pomiarowego i w trzech wariantach ciśnienia początkowego $p_{0,1} \div p_{0,3}$ wraz z przedziałami odchylenia standardowego σ dla długości pręta obciążającego – pocisku:

- $L_1 = 100 \text{ mm}$ na rys. 5.5;



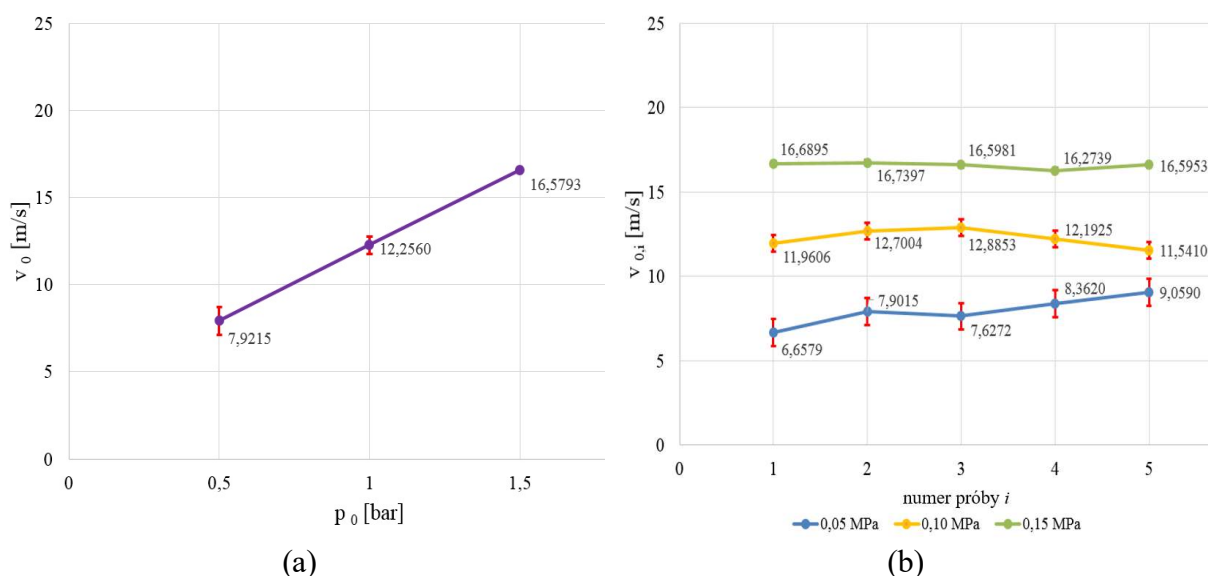
Rys. 5.5. Wykresy zależności (a) $v_0(p_0)$ oraz (b) $v_{0,i}(i)$ wraz z przedziałami odchylenia standardowego σ dla wariantu długości pręta obciążającego – pocisku $L_1 = 100 \text{ mm}$ (źródło: opracowanie własne w publikacji P2)

- $L_2 = 200 \text{ mm}$ na rys. 5.6;



Rys. 5.6. Wykresy zależności (a) $v_0(p_0)$ oraz (b) $v_{0,i}(i)$ wraz z przedziałami odchylenia standardowego σ dla wariantu długości pręta obciążającego – pocisku $L_2 = 200 \text{ mm}$ (źródło: opracowanie własne w publikacji P2)

- $L_3 = 250 \text{ mm}$ na rys. 5.7;



Rys. 5.7. Wykresy zależności (a) $v_0(p_0)$ oraz (b) $v_{0,i}(i)$ wraz z przedziałami odchylenia standardowego σ dla wariantu długości pręta obciążającego – pocisku $L_3 = 250 \text{ mm}$
(źródło: opracowanie własne w publikacji P2)

W ramach podsumowania publikacji **P2**, w której skupiłem się na metodyce procedury kalibracji wyrzutni pneumatycznej poprzedzającej rozpoczęcie dynamicznych eksperymentów z wykorzystaniem dzielonego pręta Hopkinsona, wyznaczyłem charakterystykę pracy wyrzutni dla trzech wariantów długości pręta obciążającego – pocisku oraz trzech wartości ciśnienia roboczego. W oparciu o interpretację graficzną rezultatów można przyjąć w przybliżeniu, że zależności $v_0(p_0)$ rosną w sposób liniowy dla analizowanego zakresu badania. Natomiast przebieg krzywych wykresów $p_{0,1} \div p_{0,3}(i)$ nie wykazuje wyraźnej tendencji. Wyniki dla kolejnych prób i w cyklu eksperymentalnym są do siebie zbliżone, lecz wykazują jednak pewne odchylenie standardowe od średniej wartości ze względu na indywidualne dla każdego strzału warunki tarcia pomiędzy prętem obciążającym – pociskiem i ścianką wewnętrzną lufy (pomimo każdorazowego zastosowania preparatu poślizgowego). Przeprowadzone analizy pozwoliły mi na uzyskanie odpowiedzi do wszystkich postawionych w tym etapie zagadnień badawczych **ZB1** – **ZB2** oraz umożliwiły udział w osiągnięciu celu szczegółowego **C1**, co bezpośrednio przyczyniło się do realizacji celu głównego **C0**.

5.3. Przygotowanie próbki gruntu niespoistego oraz kalibracja wyrzutni pneumatycznej w dynamicznym badaniu SHPB [publikacja P3]

Przedmiotem analiz w ramach publikacji **P3** był proces przygotowania próbki piasku pylastego do dynamicznego badania z wykorzystaniem stanowiska SHPB poprzez przeprowadzenie wstępnego zagęszczenia próbki gruntu metodą wibracyjną i uderzeniową

(z wykorzystaniem SHPB) wraz z porównaniem ich wyników. Dodatkowo analizowałem zbieżność charakterystyki wyrzutni pneumatycznej wyznaczonej eksperymentalnie (rezultaty zawarłem w publikacji **P2**) z numerycznymi wykresami pracy wyrzutni opracowanymi w środowisku Matlab.

W przeprowadzonych badaniach starałem się znaleźć odpowiedzi na następujące zagadnienia badawcze:

- ZC1.** Jak wygląda metodyka wstępnego zagęszczenia próbki gruntu niespoistego na przykładzie piasku pylastego poprzez zagęszczanie vibracyjne z zastosowaniem wstrząsarki vibracyjnej?
- ZC2.** Jaka jest różnica uzyskanych wyników gęstości objętościowej próbek piasku pylastego badanych przed i po przeprowadzonym procesie wstępnego zagęszczenia z wykorzystaniem metody uderzeniowej (za pomocą SHPB – uderzenie prętem obciążającym – pociskiem z małą prędkością uderzenia) oraz metody vibracyjnej (praca wstrząsarki vibracyjnej)?
- ZC3.** Czy opracowany model matematyczny przebiegu zjawiska strzału w lufie dla układu z impulsowym zasilaniem pozwala na wygenerowanie wykresów charakterystyki pracy wyrzutni pneumatycznej, które przedstawiają zbliżony przebieg krzywych w porównaniu pomiędzy analizami eksperymentalnymi i numerycznymi dla tych samych wariantów długości pręta obciążającego – pocisku: 100 mm, 200 mm i 250 mm?

W procesie przygotowania próbki gruntu niespoistego do dynamicznego badania z wykorzystaniem stanowiska SHPB istotne jest zapewnienie wstępnego stanu zagęszczenia gruntu. Szczególnie jest to ważny krok procesu przygotowania dla próbek suchych i próbek o małej wilgotności. Taka próbka znajduje się w stanie dwufazowym lub trójfazowym – posiada fazę gazową (w postaci powietrza). Brak przeprowadzenia procesu zagęszczenia będzie skutkować niepoprawnymi rezultatami eksperymentu. Część energii uderzenia pręta obciążającego – pocisku zostanie wykorzystana do zmniejszania objętości pustek powietrznych, czyli usuwania fazy gazowej z gruntu. Przeprowadziłem analizę dwóch sposobów zagęszczania tej samej próbki gruntu niespoistego z wykorzystaniem suchego piasku pylastego poprzez porównanie osiągniętych różnic w gęstości objętościowej próbki $\Delta\rho$. Szczegółową charakterystykę użytego rodzaju gruntu w oparciu o przeprowadzone badania laboratoryjne podstawowych cech fizycznych i mechanicznych przedstawiłem w publikacji P4.

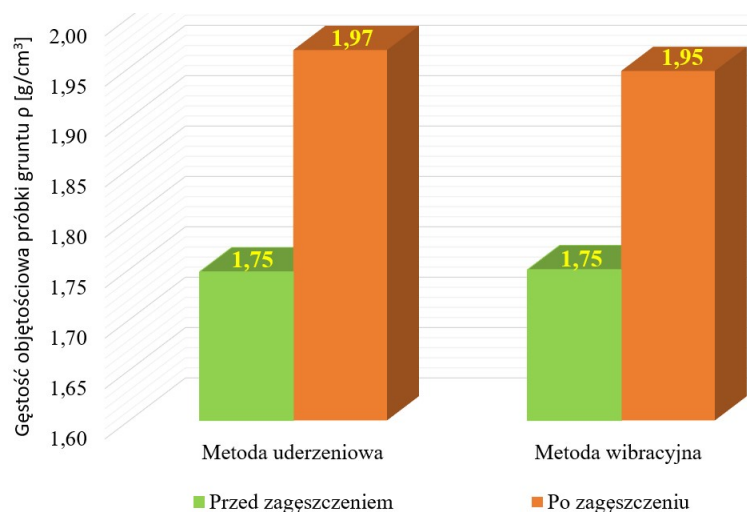
- Wstępne zagęszczenie sposobem uderzeniowym (z wykorzystaniem pręta obciążającego – pocisku SHPB poruszającego się z małą prędkością w chwili uderzenia)

W analizie wartość ciśnienia początkowego wynosiła 0,5 bar. Przy niższych wartościach ciśnienia pręt obciążający – pocisk nie uderzał w próbkę gruntu ze względu na jego wyhamowanie z uwagi na występujące zjawisko tarcia pobocznic pręta obciążającego – pocisku o ścianę wewnętrzną lufy wyrzutni. Konieczne jest dobranie możliwie małego ciśnienia roboczego. Zbyt duża wartość tego ciśnienia spowoduje uderzenie pręta obciążającego – pocisku w próbkę z dużą prędkością i zniszczenie szkieletu gruntowego próbki (zgodnie z celem zagęszczenia badanego gruntu tym sposobem nie powinno nastąpić zniszczenie szkieletu). Zaletą tej metodyki zagęszczenia jest stosowanie tej samej aparatury badawczej, która później jest wykorzystywana do prowadzenia eksperymentu fizycznego. Nie ma potrzeby korzystania z dodatkowego sprzętu pomiarowego. Proces wstępnego zagęszczenia próbki gruntu z wykorzystaniem SHPB odbywa się z ciśnieniem roboczym wyrzutni pneumatycznej do uderzenia prętem obciążającym – pociskiem kilka razy mniejszym niż w trakcie przeprowadzania eksperymentu fizycznego, by zminimalizować zjawisko zniszczenia szkieletu gruntowego próbki.

- Zagęszczenie wibracyjne (z wykorzystaniem wstrząsarki wibracyjnej)

Zagęszczenie próbki realizowałem na wstrząsarce wibracyjnej w czasie 60 s. W trakcie badań wytypowałem ten czas jako wystarczający. Proces wibracji przez dłuższy czas, np. 120 s czy też nawet 180 s nie spowodował znaczącego wzrostu wartości wstępnego zagęszczenia gruntu. Do powierzchni próbki przyłożyłem ciężarek o masie około 1000 g w celu zwiększenia efektu wstrząsów. W czasie pracy wstrząsarki część pustek powietrznych została wypełniona poprzez poruszające się ziarna gruntu – nastąpił proces zagęszczenia szkieletu gruntowego. W pracy omówiłem szczegółowo metodykę wstępnego zagęszczenia suchej próbki gruntu niespoistego wraz z ilustracją kolejnych etapów tej procedury.

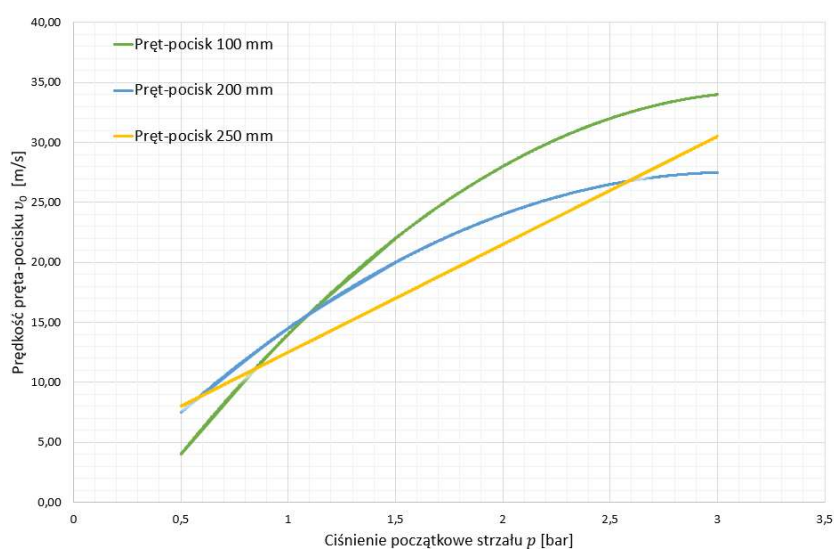
Na rys. 5.8 przedstawiłem zestawienie porównawcze rezultatów przeprowadzonej analizy wstępnego zagęszczenia próbki gruntu niespoistego na przykładzie piasku pylastego dla dwóch wariantów zagęszczenia: za pomocą uderzenia pręta obciążającego – pocisku i zagęszczenia wibracyjnego. Uzyskałem porównywalne uśrednione wartości gęstości objętościowej gruntu dla obu przypadków.



Rys. 5.8. Porównanie uśrednionych rezultatów przeprowadzonej analizy dwóch metod wstępnego zagęszczenia próbki piasku pylastego (źródło: opracowanie własne w publikacji P3)

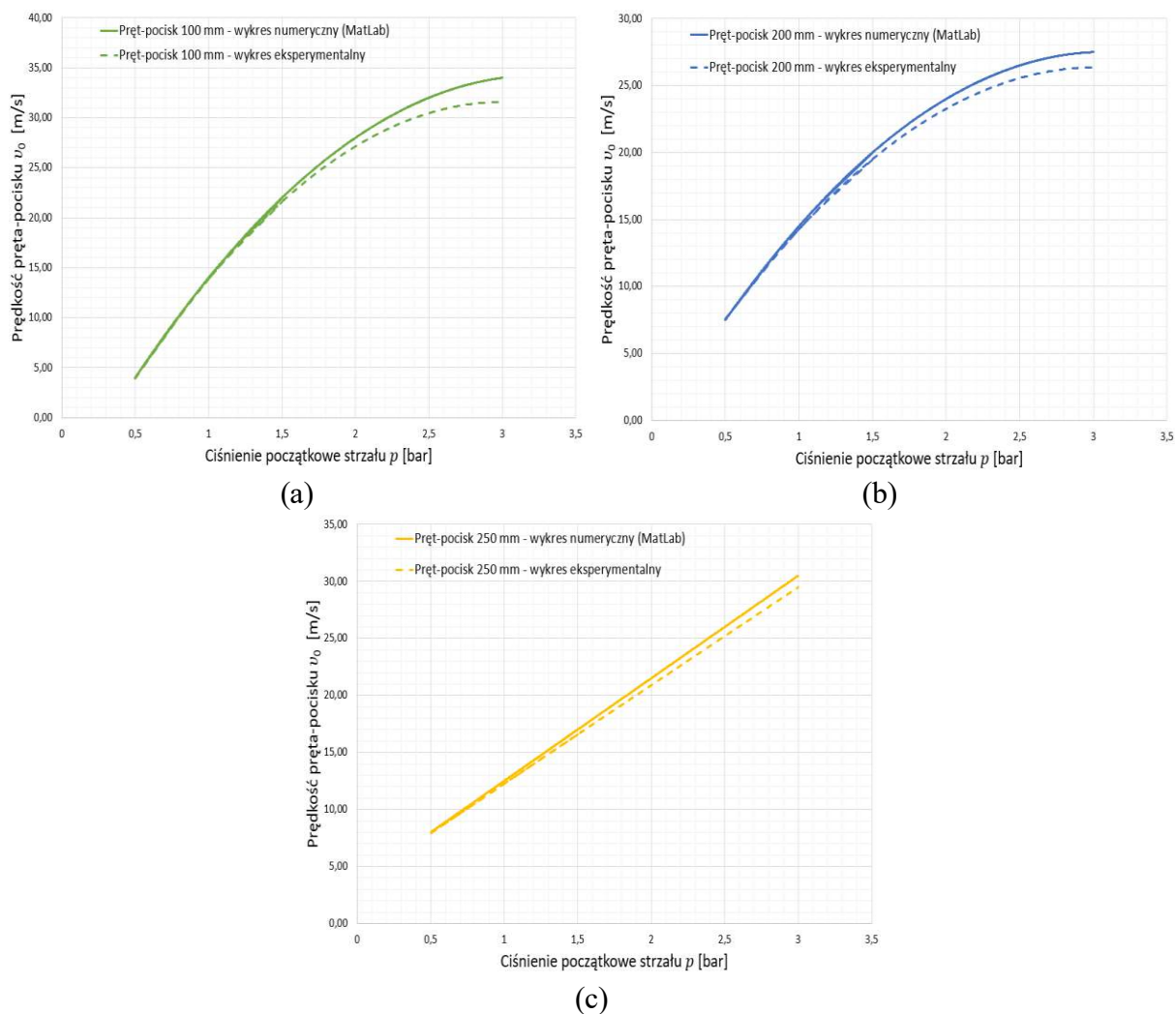
W celu przeprowadzenia analizy numerycznej charakterystyki pracy wyrzutni pneumatycznej wykorzystałem stworzony przez Współautora publikacji model matematyczny zjawiska strzału w lufie wyrzutni dla układu z impulsowym zasilaniem.

Dla wszystkich prętów obciążających – pocisków $L_1 = 100 \text{ mm}$, $L_2 = 200 \text{ mm}$ i $L_3 = 250 \text{ mm}$ wyznaczyłem charakterystyki zmiany ich prędkości uderzenia w funkcji ciśnienia roboczego. Analizę przeprowadziłem w zakresie ciśnienia początkowego p od 0,5 bar do 3 bar. Rezultaty tych badań zestawilem na rys. 5.9. Przedstawiona charakterystyka jest wynikiem obliczeń numerycznych wykonanych w oprogramowaniu Matlab na podstawie układu równań różnicowych opracowanych w oparciu o równanie stanu gazu w przestrzeni zapociskowej oraz równanie ruchu.



Rys. 5.9. Charakterystyka obliczeniowa zmiany prędkości uderzenia pręta obciążającego – pocisku v_0 w funkcji ciśnienia początkowego zasilania wyrzutnią pneumatyczną p (źródło: opracowanie własne w publikacji P3)

Zestawiłem porównanie rezultatów eksperymentalnych (z publikacji P2) i numerycznych (z publikacji P3) w postaci wykresów dla prętów obciążających – pocisków o długości: 100 mm – rys. 5.10a), 200 mm – rys. 5.10b) i 250 mm – rys. 5.10c). Widoczna jest dobra zgodność przebiegu krzywych pomiędzy analizą obliczeniową i fizycznym eksperymentem dla każdego przypadku długości pręta obciążającego – pocisku.



Rys. 5.10. Porównanie eksperymentalnych (linia przerywana) i obliczeniowych (linia ciągła) charakterystyk pracy wyrzutni pneumatycznej w postaci wykresów dla wariantów długości prętów obciążających – pocisków: (a) 100 mm, (b) 200 mm i (c) 250 mm
(źródło: opracowanie własne w publikacji P3)

W ramach podsumowania publikacji **P3**, w której skupiłem się na procesie przygotowania próbki gruntu niespoistego (na przykładzie piasku pylastego) do dynamicznego badania z wykorzystaniem stanowiska SHPB, dokonałem analizy zagadnienia wstępnego stanu zagęszczenia gruntu. Opracowałem i przedstawiłem kolejne etapy realizacji metodyki zagęszczania próbki piasku pylastego z wykorzystaniem wstrząsarki wibracyjnej. Uzyskane wyniki porównałem z metodyką uderzeniową (za pomocą uderzenia prętem obciążającym – pociskiem SHPB z małą prędkością uderzenia). Uzyskałem porównywalne uśrednione

wartości gęstości objętościowej próbek piasku pylastego dla obu metod zagęszczania. Natomiast istotną zaletą metody wibracyjnej jest wyeliminowanie ryzyka zniszczenia szkieletu gruntowego, który może nastąpić przy uderzeniu prętem obciążającym – pociskiem w metodzie dynamicznej. Dodatkowo, w oparciu o wykorzystany model matematyczny, przeprowadzono obliczenia numeryczne w oprogramowaniu Matlab na podstawie układu równań różnicowych bazujących na równaniu stanu gazu w przestrzeni zapociskowej oraz równaniu ruchu w celu wyznaczenia charakterystyki obliczeniowej zmiany prędkości uderzenia pręta obciążającego – pocisku w funkcji ciśnienia roboczego zasilania wyrzutni pneumatycznej. Końcowy efekt porównawczych analiz eksperymentalnych i numerycznych w obszarze charakterystyki pracy wyrzutni pneumatycznej zestawilem w postaci wykresów dla wariantów długości prętów obciążających – pocisków 100 mm, 200 mm i 250 mm. Przeprowadzone analizy pozwoliły mi na uzyskanie odpowiedzi do wszystkich postawionych w tym etapie zagadnień badawczych **ZC1 – ZC3** oraz umożliwiły na pozostały udział w osiągnięciu celu szczegółowego **C2** i osiągnięciu celu szczegółowego **C3**, co bezpośrednio przyczyniło się do realizacji celu głównego **C0**.

5.4. Eksperymentalne badanie dynamicznego zachowania piasku pylastego [publikacja P4]

Przedmiotem analiz w ramach publikacji **P4** były eksperymentalne badania wybranych próbek piasku pylastego z wykorzystaniem techniki pręta Hopkinsona w celu wyznaczenia i przedstawienia nieliniowych przebiegów wykresów dynamicznych właściwości mechanicznych piasku pylastego w postaci następujących funkcji:

- naprężenia w próbce gruntu $\sigma(t)$,
- odkształcenia w próbce gruntu $\varepsilon(t)$,
- prędkości odkształcenia próbki gruntu $\dot{\varepsilon}(t)$,
- naprężenia obwodowego w duraluminiowej osłonie pierścieniowej próbki gruntu $\sigma_{\theta}(t)$.

Analizowałem również zagadnienie identyfikacji i pomiaru zmian w wewnętrznej strukturze gruntowej Δf_{Si+Cl} dla próbek wybranego ośrodka gruntowego o czterech wilgotnościach, które zostały poddane oddziaływaniu dynamicznemu. Badania przeprowadziłem dla dwóch rodzajów próbek piasku pylastego, różniących się zawartością frakcji drobnych: $f_{Si+Cl,1} = 20,46 \%$ i $f_{Si+Cl,2} = 2,9 \%$.

W przeprowadzonych badaniach starałem się znaleźć odpowiedzi na następujące zagadnienia badawcze:

- ZD1.** Jak wilgotność piasku pylastego wpływa na dynamiczne zachowanie badanego gruntu w odpowiedzi na uderzenie prętem obciążającym – pociskiem?

ZD2. Jaki będzie charakter przebiegu krzywej wykresu naprężeń w zależności od odkształcenia dla badanego piasku pylastego o różnych wilgotnościach?

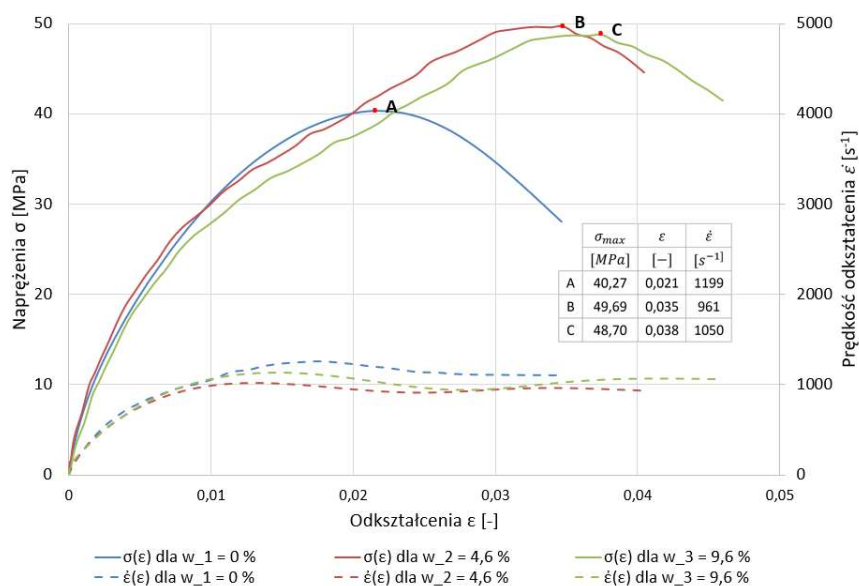
ZD3. Jak oddziaływanie dynamicznie poprzez uderzenie prętem obciążającym – pociskiem wpłynie na strukturę wewnętrzną (m.in. wskaźnik porowatości) próbek piasku pylastego o różnych wilgotnościach względem wartości wilgotności optymalnej gruntu?

W pierwszej kolejności do badania użyłem piasku pylastego (siSa) o zawartości frakcji drobnych, rozumianej jako suma frakcji pyłowej i ilowej $f_{Si+cl,1} = 20,46\%$ (średnica ziaren w szkielecie gruntowym poniżej 0,063 mm). Analizę uziarnienia wykonałem normową metodą sitową na mokro z uzupełnieniem krzywej dla frakcji drobnych metodą areometryczną (PN – EN ISO 17892-4, 2017). Parametry zagęszczalności badanego piasku pylastego $\rho_{d,max}$ i w_{opt} określiłem w normowym badaniu Proctora (PN – EN ISO 13286-2, 2010). Na podstawie przebiegu wykresu $\rho_d(w)$ wyznaczyłem wartość wilgotności optymalnej badanego gruntu $w_{opt,1} = 9,6\%$ dla maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego $\rho_{d,max,1} = 1,86 \text{ g/cm}^3$. W celu przeprowadzenia badań dynamicznych przygotowałem próbki gruntu o wilgotności: $w_1 = 0\%$ i $w_2 = 5\%$ (wartościach poniżej wilgotności optymalnej $w_1 < w_{opt}$ i $w_2 < w_{opt}$) oraz $w_3 = 10\%$ i $w_4 = 15\%$ (wartościach powyżej wilgotności optymalnej $w_3 > w_{opt}$ i $w_4 > w_{opt}$). W czasie realizacji eksperymentów fizycznych na stanowisku SHPB dla poszczególnych wariantów próbek wyznaczyłem ponownie ich wilgotność bezpośrednio przed uderzeniem prętem obciążającym – pociskiem. Finalnie próbki gruntów miały wilgotność: $w_1 = 0\%$, $w_2 = 4,6\%$, $w_3 = 9,6\%$ (wartość równa w_{opt}) i $w_4 = 14,6\%$.

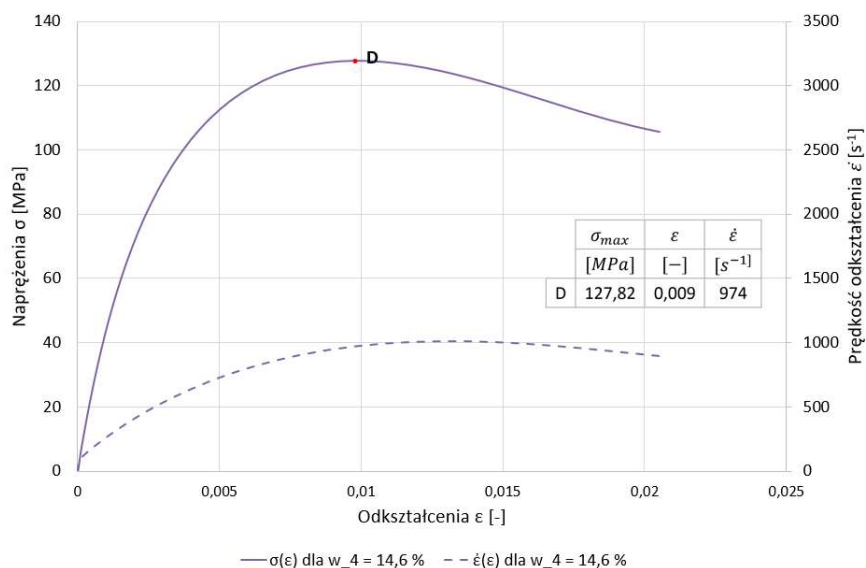
Cały cykl eksperymentalny przeprowadziłem wykorzystując stanowisko badawcze SHPB w Zakładzie Inżynierii i Infrastruktury Wojskowej w WAT. Do badań wykorzystałem pręt obciążający – pocisk o długości 200 mm oraz pręt inicjujący i transmitujący o równych długościach 1000 mm, każdy z nich o średnicy 20 mm.

W publikacji przedstawiłem graficzne podsumowanie eksperymentów w postaci zbiorczego zestawienia wykresów przebiegu odkształceń wzdłużnych prętów pomiarowych SHPB: $\varepsilon^l(t)$, $\varepsilon^R(t)$, $\varepsilon^T(t)$ i odkształcenia obwodowego osłony pierścieniowej $\varepsilon^\theta(t)$. Wykorzystałem do tego zarejestrowane sygnały z tensometrów pomiarowych oraz równania opisu zjawisk fizycznych zachodzących podczas doświadczenia. Na podstawie uzyskanych wyników z badań dynamicznych opracowałem wykresy zbiorcze badanych funkcji dla wszystkich wariantów wilgotności próbki gruntu $w_1 \div w_4$.

Wpływ wilgotności piasku pylastego na uzyskane wyniki jest możliwy do zaobserwowania na przedstawionych na rys. 5.11 wykresach, gdzie zmiany naprężenia w funkcji odkształcenia $\sigma(\varepsilon)$ oznaczyłem linią ciągłą, natomiast zmiany prędkości odkształcenia w funkcji odkształcenia $\dot{\varepsilon}(\varepsilon)$ oznaczyłem linią przerywaną. W gruntach z zawartością wody mniejszą od całkowitego nasycenia ($w < w_{sat}$) pracuje szkielet gruntowy w naprężeniach efektywnych. W gruntach nawodnionych ($w \geq w_{sat}$ przy całkowitym wypełnieniu porów wodą – brak fazy gazowej) pod wpływem obciążeń dynamicznych woda nie zdąży wypłynąć i pracuje równorzędnie ze szkieletem. Grunt pracuje w naprężeniach całkowitych, a woda może w stopniu większym niż szkielet przenosić obciążenia. Na rys. 5.11 przedstawiłem przebieg wykresów dynamicznego ściskania próbek piasku pylastego dla analizowanych wariantów wilgotności $w_1 \div w_4$. Na wykresach oznaczyłem również wartości lokalnych maksymalnych naprężeń plastycznych i odpowiadających im odkształceń – odpowiednio w punktach A, B, C i D. Charakter wykresów jest ograniczony do zakresu zmian naprężeń bez wpływu fal odbitych.



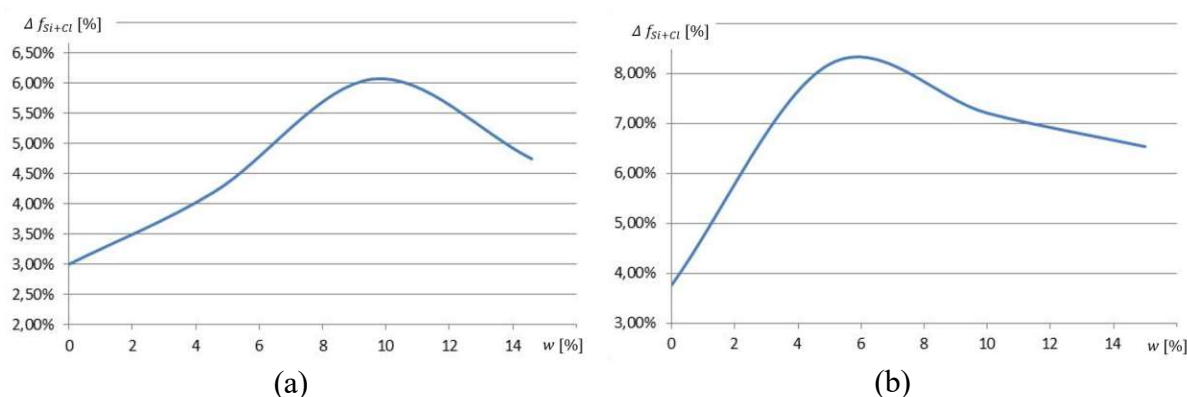
(a)



(b)

Rys. 5.11. Zestawienie wykresów złożonych zawierający zależności zmian naprężenia w funkcji odkształcenia $\sigma(\varepsilon)$ i zmian prędkości odkształcenia w funkcji odkształcenia $\dot{\varepsilon}(\varepsilon)$ dla wariantów wilgotności $w_1 \div w_4$, gdzie (a) $w_1, w_2, w_3 < w_{sat}$ oraz (b) $w_4 > w_{sat}$ wraz z oznaczeniem lokalnych wartości maksymalnego naprężenia plastycznego i odpowiadającym im wartościom odkształcenia (źródło: opracowanie własne w publikacji P4)

W publikacji podjąłem również tematykę analizy zmiany uziarnienia badanych próbek piasku pylastego w wyniku przeprowadzania dynamicznego uderzenia prętem obciążającym – pociskiem na stanowisku SHPB. Analizę sitową wykonałem na materiale gruntowym pobranym z przebadanych próbek dla każdego wariantu analizowanej wilgotności. Uzyskana ilość materiału pozwoliła mi na wykonanie analizy sitowej z dokładnością 0,3 % zawartości masowej poszczególnych frakcji. Na rys. 5.12a) przedstawiłem zależność zmiany zawartości frakcji drobnych $\Delta f_{Si+Cl,1}$, rozumianych jako przyrost zawartości frakcji o średnicy ziaren mniejszej niż 63 μm (suma frakcji pyłowej f_{Si} i ilowej f_{Cl}), w zależności od wilgotności w badanego piasku pylastego.



Rys. 5.12. Wykresy zmian zawartości frakcji drobnych Δf_{Si+Cl} w piasku pylastym (gdzie początkowa wartość: a) $f_{Si+Cl,1} = 20,46\%$ i b) $f_{Si+Cl,2} = 2,9\%$) po obciążeniu dynamicznym prętem obciążającym – pociskiem w zależności od wilgotności w próbki gruntu (źródło: opracowanie własne w publikacji P4)

Analizując zbiorcze zestawienie wyników z przeprowadzonych eksperymentów zwróciłem uwagę na próbki gruntu o wilgotności $w_4 = 14,6\%$ ze względu na odmienny charakter przebiegu zależności w porównaniu do próbek gruntu o mniejszej wilgotności. Woda zawarta w szkielecie gruntu dla tego wariantu próbek przenosi równorzędnie obciążenie dynamiczne i zachowuje się w sposób sprężysty w momencie oddziaływania dynamicznego. Wskaźnik porowatości przed uderzeniem prętem obciążającym – pociskiem wynosił $e = 0,43$, natomiast po uderzeniu prętem obciążającym – pociskiem wynosił $e = 0,38$. Wilgotność badanej próbki $w_4 = 14,6\%$ była większa od wilgotności całkowitej próbki po badaniu, która wyniosła $w_{sat} = 14,36\%$. W pozostałych próbkach, w których stopień wypełnienia porów wodą był mniejszy od wartości $0,8$ ($S_r < 0,8$), gaz (powietrze) wypełniający te pory w chwili obciążenia dynamicznego nie był w stanie przenosić tych obciążeń. Energia została spożytkowana na dogęszczenie pustek powietrznych.

W wyniku eksperymentów dynamicznych w każdym wariancie wilgotności próbki gruntu wskaźnik porowatości e zmniejsza się w odniesieniu do uzyskanej wartości w próbie Proctora. Takie rezultaty świadczą o dogęszczeniu dynamicznym gruntu podczas eksperymentów fizycznych z wykorzystaniem stanowiska SHPB. Analizując kolejne warianty wilgotności próbki widać, że początkowo dla gruntu suchego wskaźnik porowatości zmalał do $e = 0,35$. Dalej wraz ze wzrostem wilgotności jego wartość istotnie zmalała do $e = 0,26$. Natomiast kolejna zmiana wilgotności próbki na wartość wilgotności optymalnej spowodował wzrost wskaźnika do $e = 0,34$. Kontynuacja wzrostu wilgotności skutkowałą również wzrostem wartości wskaźnika do $e = 0,38$. Podczas badania próbek o wilgotności większej od wilgotności optymalnej uzyskiwane zagęszczenie piasku pylastego jest mniejsze od uzyskiwanego przy badaniu gruntów suchych.

W celu potwierdzenia powyższych obserwacji zrealizowałem dodatkowe eksperymenty w zakresie zmian wstępnej zagęszczalności gruntu pod obciążeniem dynamicznym z wykorzystaniem innej próbki piasku pylastego o zawartości frakcji drobnych $f_{Si+Cl,2} = 2,9 \%$. Parametry zagęszczalności badanego piasku pylastego $\rho_{d,max}$ i w_{opt} określiłem w normowym badaniu Proctora (PN – EN ISO 13286-2, 2010). Na podstawie przebiegu wykresu $\rho_d(w)$ wyznaczyłem wartość wilgotności optymalnej badanego gruntu $w_{opt,2} = 9,7 \%$ dla maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego $\rho_{d,max,2} = 1,80 \text{ g/cm}^3$. Na rys. 5.12b przedstawiłem zależność zmiany zawartości frakcji drobnych Δf_{Si+Cl} w zależności od wilgotności w badanym piasku pylastym.

W ramach podsumowania publikacji **P4**, w której skupiłem się na realizacji cyklu eksperymentalnego w oparciu o stanowisko SHPB, udowodniłem możliwość prowadzenia badań doświadczalnych na próbkach piasku pylastego (przedstawiciel gruntów wątpliwych) o różnych wilgotnościach za pomocą techniki pręta Hopkinsona w celu wyznaczenia dynamicznych właściwości mechanicznych gruntu. Na podstawie sygnałów z zestawów tensometrów pomiarowych naklejonych na pomiarowych prętach inicjującym i transmitującym oraz osłonie pierścieniowej próbki (wraz z korektą w oprogramowaniu FlexPro), a także stosując znane równania metody Kolsky’ego, dokonałem weryfikacji eksperymentalnej metodologii wyznaczania dynamicznych właściwości mechanicznych. Przedstawiłem charakterystykę dynamiczną piasku pylastego o różnych wilgotnościach w postaci przebiegu wykresów zmian naprężenia w funkcji odkształcenia $\sigma(\epsilon)$ i zmian prędkości odkształcenia w funkcji odkształcenia $\dot{\epsilon}(\epsilon)$. Omówiłem i pokazałem graficznie jak oddziaływanie dynamiczne poprzez uderzenie prętem obciążającym – pociskiem wpłynie na zmianę struktury wewnętrznej próbek piasku pylastego o różnych wilgotnościach na przykładzie próbek gruntu o zawartości frakcji drobnych $f_{Si+Cl,1} = 20,46 \%$ i $f_{Si+Cl,2} = 2,9 \%$. W oparciu o uzyskane wartości wskaźnika porowatości e dla próbek gruntu o wilgotnościach $w_1 \div w_4$ względem wilgotności optymalnej w_{opt} opracowałem wniosek, że największe zagęszczenie gruntu poddanego obciążeniu dynamicznemu poprzez uderzenie pręta obciążającego pocisku w badaniu SHPB następuje przy **wilgotności równej w przybliżeniu połowie wilgotności optymalnej**. Przeprowadzone analizy pozwoliły mi na uzyskanie odpowiedzi do wszystkich postawionych w tym etapie zagadnień badawczych **ZD1 – ZD3** oraz umożliwiły udział w osiągnięciu celów szczegółowych **C1** i **C5**, a także osiągnięcie celu szczegółowego **C4**, co bezpośrednio przyczyniło się do realizacji celu głównego **C0**.

5.5. Analiza wpływu wilgotności piasków pylastych oraz prędkości uderzenia na ich zagęszczalność i zmianę składu granulometrycznego [publikacja P5]

Przedmiotem analiz w ramach publikacji **P5** były zmiany składu granulometrycznego piasku pylastego w postaci różnicy zawartości frakcji drobnych Δf_{Si+Cl} w wyniku realizacji dynamicznych eksperymentów na stanowisku SHPB. Badania prowadziłem w oparciu o dwa różne rodzaje tego gruntu wątpliwego, przy zawartości frakcji drobnych $f_{Si+Cl,1} = 15,14\%$ oraz $f_{Si+Cl,2} = 20,48\%$, przy wilgotnościach – $w_1 = 0\%$, $w_2 = 5\%$, $w_3 = 10\%$ i $w_4 = 15\%$. Prędkość uderzenia pręta obciążającego – pocisku dla poszczególnych ciśnień w wyrzutni pneumatycznej SHPB wynosiła odpowiednio:

- dla ciśnienia $p_1 = 1,2 \text{ bar}$ uzyskano $v_1 = 12,76 \text{ m/s}$;
- dla ciśnienia $p_2 = 1,8 \text{ bar}$ uzyskano $v_2 = 17,69 \text{ m/s}$;
- dla ciśnienia $p_3 = 2,4 \text{ bar}$ uzyskano $v_3 = 21,32 \text{ m/s}$.

Zgodnie z normą badanie uziarnienia gruntu niespoistego wykonuje się poprzez oznaczenie składu granulometrycznego z wykorzystaniem laboratoryjnej metody sitowej (PN – EN ISO 17892-4, 2017). Najmniejsza średnica oczka sita wynosi $0,063 \text{ mm}$ ($63 \mu\text{m}$). W celu dokładniejszego poznania dalszego przebiegu krzywej uziarnienia w zakresie poniżej $63 \mu\text{m}$ koniecznym jest wykorzystanie precyzyjnego sprzętu laboratoryjnego, ponieważ analiza areometryczna dla małych próbek gruntu nie jest praktycznie możliwa do wykonania. W badaniach zastosowałem laserowy analizator wielkości cząstek z wykorzystaniem metody dyfrakcji laserowej (ISO 13320, 2020; ISO 9276-6, 2008), który umożliwia stworzenie wykresu krzywej o większym zakresie szczegółowości uziarnienia od rozmiaru średnicy ziarna równej $0,01 \mu\text{m}$ do $3500 \mu\text{m}$ (czyli w porównaniu z klasyczną analizą sitową możliwe do uzyskania są dodatkowe dane przebiegu krzywej uziarnienia w zakresie $0,01 \mu\text{m} - 63 \mu\text{m}$).

W przeprowadzonych badaniach starałem się znaleźć odpowiedzi na następujące zagadnienia badawcze:

- ZE1.** Czy istnieją powtarzalne tendencje w procesie zmiany składu granulometrycznego próbek piasku pylastego w zależności od wilgotności początkowej próbki gruntu?
- ZE2.** Jak początkowa wartość frakcji drobnych w piasku pylastym wpływa na jego zmiany składu granulometrycznego?
- ZE3.** Czy istnieją widoczne trendy w procesie zmiany składu granulometrycznego próbek piasku pylastego w zależności od prędkości uderzenia pręta obciążającego – pocisku dla różnych ciśnień roboczych wyrzutni pneumatycznej SHPB?

W celu poprawnej realizacji procesu analizy zmiany składu granulometrycznego piasku pylastego kluczowym etapem jest określenie początkowej struktury uziarnienia dla próbek

referencyjnych. Wykorzystałem w badaniach nowoczesny laserowy analizator wielkości cząstek Bettersizer S3 Plus. W rezultacie przeprowadzonej analizy wyznaczyłem wykresy krzywych uziarnienia i określiłem, że zawartość frakcji drobnych f_{Si+} (rozumianej jako procentowa zawartość frakcji pyłowej i iłowej z ziarnami o średnicy poniżej $63 \mu m$) jest równa dla:

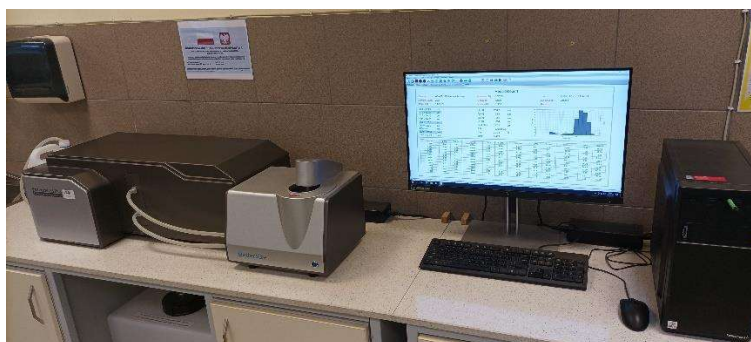
- cyklu badawczego nr 1 → pierwszy rodzaj próbki gruntu: $f_{Si+cl,1} = 15,14 \%$;
- cyklu badawczego nr 2 → drugi rodzaj próbki gruntu: $f_{Si+cl,2} = 20,48 \%$.

Oba rodzaje próbek poddałem analizie w badaniu wilgotności optymalnej w_{opt} – normowe badanie Proctora (PN – EN 13286-2). Wartość wilgotności optymalnej w_{opt} wyznaczyłem dla uzyskanej maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego $\rho_{d,max}$, przy stałej energii wstępnego zagęszczania dla różnych wilgotności, otrzymując następujące rezultaty:

- dla $f_{Si+cl,1} = 15,14 \%$ – $\rho_{d,max,1} = 1,89 g/cm^3 \rightarrow w_{opt,1} = 8,70 \%$;
- dla $f_{Si+cl,2} = 20,48 \%$ – $\rho_{d,max,2} = 1,95 g/cm^3 \rightarrow w_{opt,2} = 9,20 \%$.

Etap badań dotyczący uderzenia prętem obciążającym – pociskiem jako oddziaływania dynamicznego, którego skutkiem jest zmiana składu granulometrycznego próbek piasku pylastego, realizowałem na stanowisku SHPB. Budowę tego stanowiska badawczego wraz z opisem metodyki eksperymentalnej omówiłem w publikacji P1 w ramach podrozdziału 5.1.

Analizy zmian składu granulometrycznego próbek piasku pylastego (w wyniku oddziaływania dynamicznego pręta obciążającego – pocisku w ramach eksperymentów na stanowisku SHPB) przeprowadziłem w oparciu o badanie krzywej uziarnienia w laserowym analizatorze wielkości cząstek Bettersizer S3 Plus – widok urządzenia przedstawiłem na rys. 5.13. Podobnie jak stanowisko SHPB, również i analizator jest zlokalizowany w Zakładzie Inżynierii i Infrastruktury Wojskowej w Wydziale Inżynierii Lądowej i Geodezji WAT.



Rys. 5.13. Widok stanowiska badawczego laserowego analizatora wielkości cząstek Bettersizer S3 Plus zlokalizowanego w Zakładzie Inżynierii i Infrastruktury Wojskowej WAT
(źródło: opracowanie własne w publikacji P5)

Wstępnie zagęszczoną próbkę gruntu w określonym wariancie badania poddałem kolejno eksperymentom dynamicznym na stanowisku badawczym SHPB (zgodnie z metodyką omówioną w publikacjach P1 w podrozdziale 5.1 i P4 w podrozdziale 5.4). Warianty próbek badawczych wyróżniłem oraz zestawilem w tabeli 5.1 ze względu na przyjętą konfigurację zmiennych: ciśnienie robocze wyrzutni pneumatycznej działające na pręt obciążający – pocisk p_i (prędkość uderzenia pręta obciążającego – pocisku v_i) i wilgotność próbki gruntu w_i (procentową zawartość wody w próbce). Łącznie rozróżniłem dwanaście wariantów eksperymentów fizycznych przeprowadzonych na próbkach piasku pylastego za pomocą stanowiska SHPB. W każdym wariancie badałem cztery próbki gruntu w celu uzyskania miarodajnej próby statystycznej dla obu zawartości frakcji pyłowej oraz ilowej $f_{Si+Cl,1} = 15,14\%$ i $f_{Si+Cl,2} = 20,48\%$. Finalnie przeprowadziłem więc dziewięćdziesiąt sześć dynamicznych eksperymentów na stanowisku SHPB.

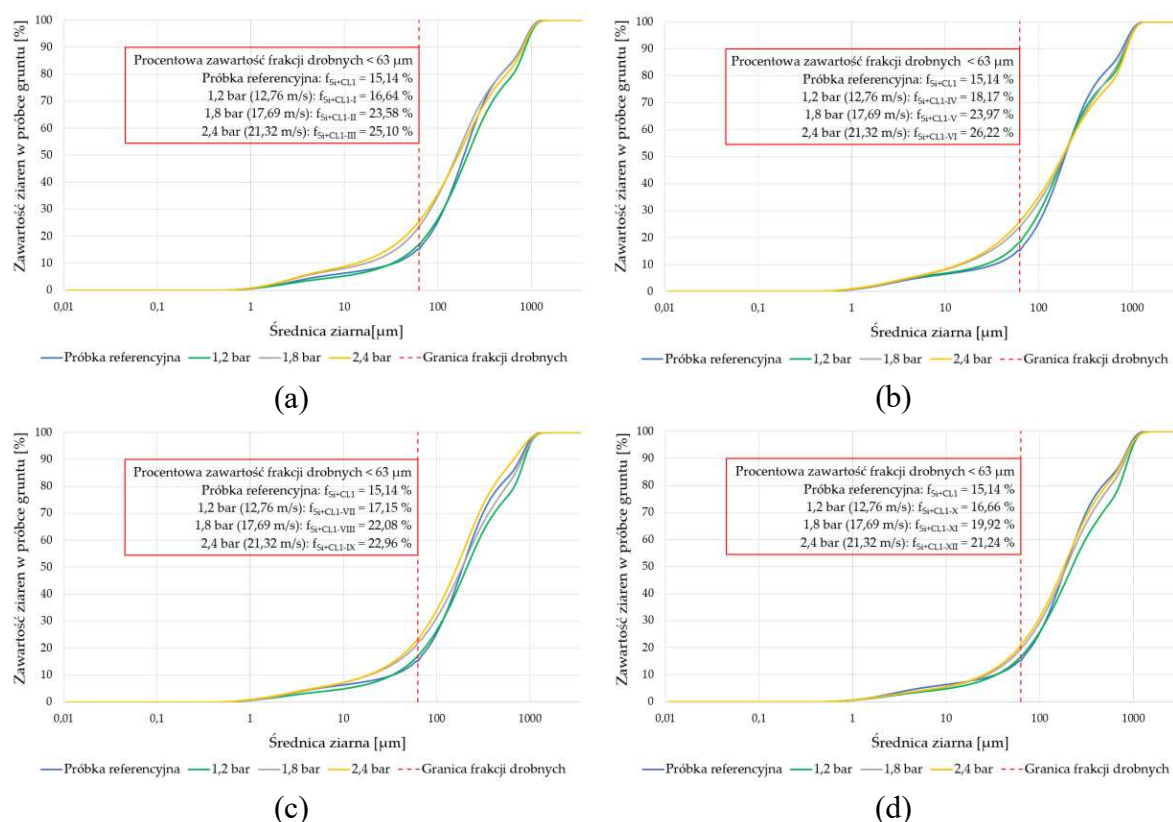
Tabela 5.1

Zestawienie wariantów próbki piasku pylastego I – XIII dla obu rodzajów gruntu $f_{Si+Cl,1}$ i $f_{Si+Cl,2}$ wykorzystanych w analizie zmiany wielkości cząstek (źródło: opracowanie własne w publikacji P5)

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII
$w_1 = 0\%$			$w_2 = 5\%$			$w_3 = 10\%$			$w_4 = 15\%$			Próbka referencyjna
$p_1 = 1,2\text{ bar}$ $v_1 = 12,76\text{ m/s}$	$p_2 = 1,8\text{ bar}$ $v_2 = 17,69\text{ m/s}$	$p_3 = 2,4\text{ bar}$ $v_3 = 21,32\text{ m/s}$	$p_1 = 1,2\text{ bar}$ $v_1 = 12,76\text{ m/s}$	$p_2 = 1,8\text{ bar}$ $v_2 = 17,69\text{ m/s}$	$p_3 = 2,4\text{ bar}$ $v_3 = 21,32\text{ m/s}$	$p_1 = 1,2\text{ bar}$ $v_1 = 12,76\text{ m/s}$	$p_2 = 1,8\text{ bar}$ $v_2 = 17,69\text{ m/s}$	$p_3 = 2,4\text{ bar}$ $v_3 = 21,32\text{ m/s}$	$p_1 = 1,2\text{ bar}$ $v_1 = 12,76\text{ m/s}$	$p_2 = 1,8\text{ bar}$ $v_2 = 17,69\text{ m/s}$	$p_3 = 2,4\text{ bar}$ $v_3 = 21,32\text{ m/s}$	

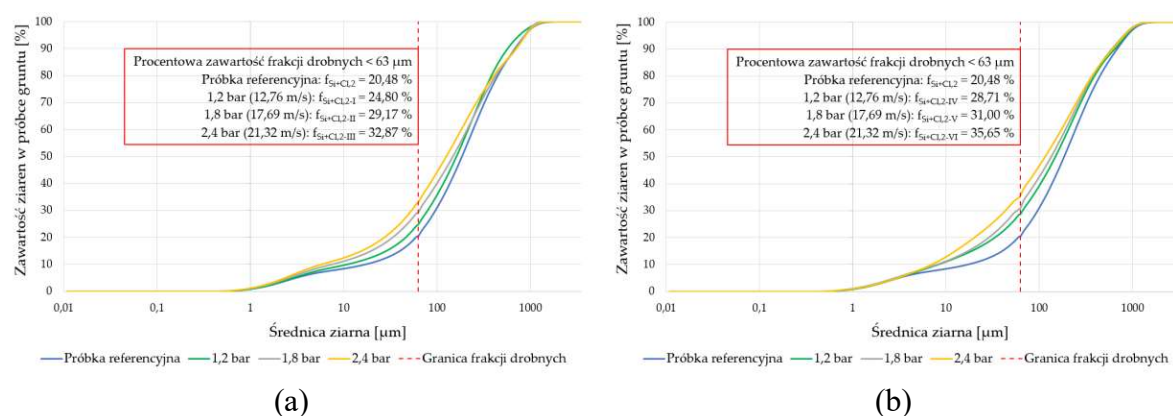
Zgodnie z przedstawionym opisem procesu przygotowania próbki gruntu każdy wariant piasku pylastego przebadałem w analizatorze wielkości cząstek metodą dyfrakcji laserowej w pięciu cyklach dla wyodrębnionych pięciu próbek (wykonałem po dwadzieścia pięć badań dla każdego wariantu I – XIII, czyli łącznie sześćset dwadzieścia pięć prób dla obu rodzaju gruntu). Wyniki uśredniłem w celu przedstawienia rezultatów badań dla każdego wariantu I – XIII (w zależności od zastosowanej konfiguracji zmiennych: początkowe ciśnienie wyrzutni działające na pręt obciążający – pocisk $p_1 \div p_3$ i wilgotność próbki gruntu $w_1 \div w_4$) na zbiorczych wykresach krzywych uziarnienia wraz z odniesieniem do próbki referencyjnej:

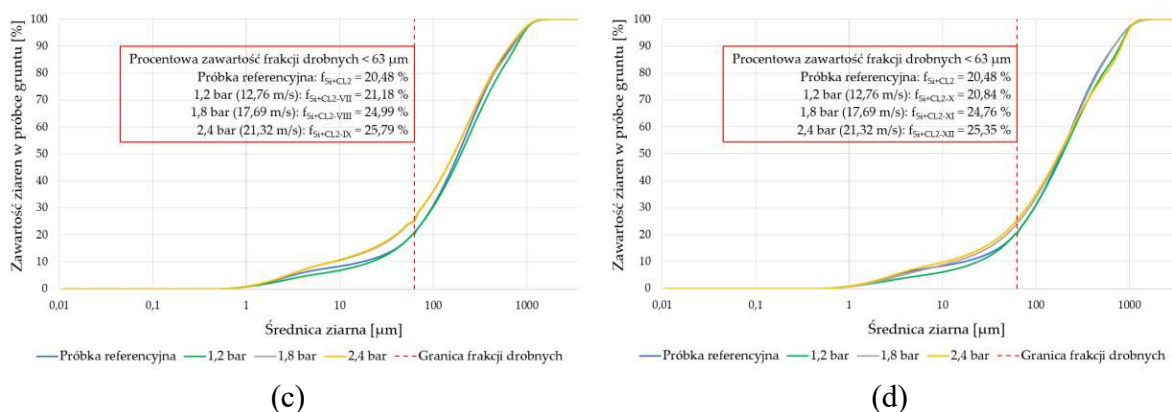
- dla pierwszego rodzaju próbki gruntu $f_{Si+C,1} = 15,14\%$ – na rys. 5.14 przy konfiguracjach wartości zmiennych: $p_1(v_1) - p_2(v_2) - p_3(v_3)$ oraz a) $w_1 = 0\%$, b) $w_2 = 5\%$, c) $w_3 = 10\%$ i d) $w_4 = 15\%$;



Rys. 5.14. Zbiornicze zestawienie wykresów krzywych uziarnienia dla piasku pylistego o zawartości frakcji pyłowej i ilowej $f_{Si+C,1} = 15,14\%$ w wariantach próbki I – XIII (dwanaście wariantów próbek poddanych oddziaływaniu dynamicznemu w SHPB i jedna nieobciążona próbka referencyjna) dla następujących wariantów obciążenia i wilgotności próbek: $p_1(v_1) - p_2(v_2) - p_3(v_3)$ oraz a) $w_1 = 0\%$, b) $w_2 = 5\%$, c) $w_3 = 10\%$ i d) $w_4 = 15\%$ (źródło: opracowanie własne w publikacji P5)

- dla drugiego rodzaju próbki gruntu $f_{Si+C,2} = 20,48\%$ – na rys. 5.15 przy konfiguracjach wartości zmiennych: $p_1(v_1) - p_2(v_2) - p_3(v_3)$ oraz a) $w_1 = 0\%$, b) $w_2 = 5\%$, c) $w_3 = 10\%$ i d) $w_4 = 15\%$.





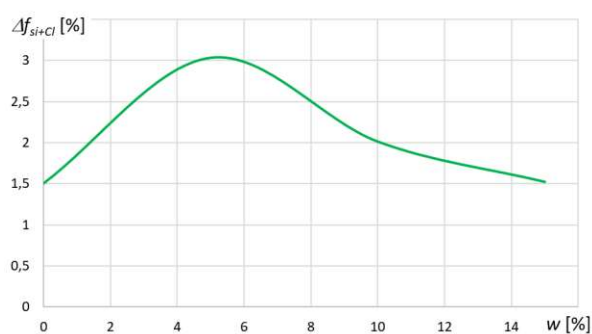
Rys. 5.15. Zbiorcze zestawienie wykresów krzywych uziarnienia dla piasku pylastego o zawartości frakcji pyłowej i iłowej $f_{Si+Cl,2} = 20,48 \%$ w wariantach próbki I – XIII (dwanaście wariantów próbek poddanych oddziaływaniu dynamicznemu w SHPB i jedna nieobciążona próbka referencyjna) dla następujących wariantów obciążenia i wilgotności próbek: $p_1(v_1) - p_2(v_2) - p_3(v_3)$ oraz a) $w_1 = 0 \%$, b) $w_2 = 5 \%$, c) $w_3 = 10 \%$ i d) $w_4 = 15 \%$ (źródło: opracowanie własne w publikacji P5)

W oparciu o rezultaty przeprowadzonych powyżej analiz badawczych wyróżniłem i omówiłem zauważalne tendencje w dynamicznej charakterystyce wytrzymałościowej piasku pylastego:

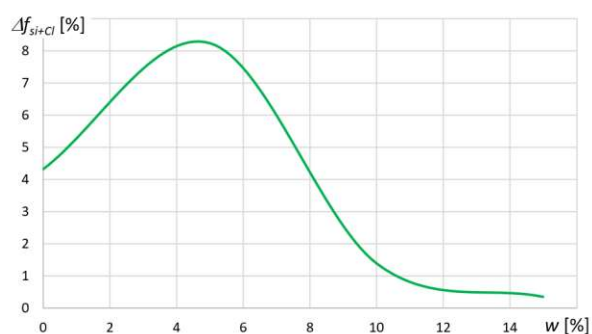
- Każda próbka piasku pylastego przebadana na stanowisku SHPB osiągnęła po zakończeniu badania większy udział frakcji drobnych (pyłowej i iłowej) w swoim składzie granulometrycznym w porównaniu z próbką referencyjną. Nastąpiło zjawisko niszczenia szkieletu gruntowego poprzez łamanie ziaren i wzrost procentowy ziaren o mniejszej średnicy.
- Dla danej wilgotności próbki gruntu widoczny jest trend wzrostu udziału frakcji pyłowej i iłowej w składzie granulometrycznym wraz ze wzrostem wartości zastosowanego roboczego ciśnienia wyrzutni pneumatycznej do rozpoczęcia ruchu pręta obciążającego – pocisku.
- Dla wilgotności próbek gruntu w_1 i w_2 (czyli wartości poniżej wilgotności optymalnej w_{opt}) dla danego początkowego ciśnienia roboczego wyrzutni pneumatycznej (prędkości uderzenia pręta obciążającego – pocisku) widoczna jest tendencja wzrostu wartości frakcji pyłowej i iłowej (brak jest wyraźnego wpływu fazy wody na rezultaty badania). Im wyższa wilgotność próbki gruntu (w szczególności dla wartości w_3 i w_4 powyżej wilgotności optymalnej w_{opt}) tym wyraźniej widać trend malejącej wartości frakcji pyłowej i iłowej w składzie granulometrycznym próbki piasku pylastego. Widoczna jest dynamiczna reakcja wody wypełniającej pory gruntowe. Woda nadaje próbce pewne cechy materiału sprężystego i „amortyzuje” dynamiczne oddziaływanie

uderzenia pręta obciążającego – pocisku. Taka interakcja skutkuje zmniejszeniem zjawiska niszczenia szkieletu gruntowego poprzez łamanie ziaren.

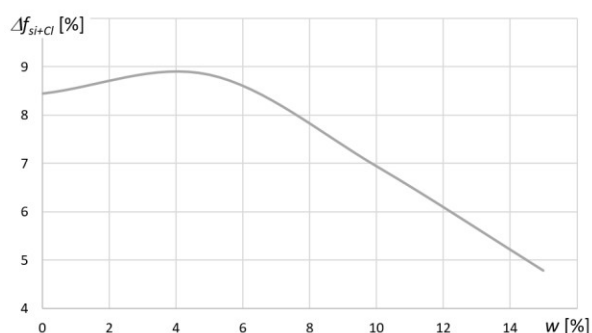
- Zarówno dla pierwszego $f_{Si+C,1} = 15,14\%$, jak i dla drugiego rodzaju gruntu $f_{Si+Cl,2} = 20,48\%$, największy wpływ na zmiany zawartości frakcji ma obciążenie poprzez uderzenie prętem obciążającym – pociskiem przy ciśnieniu roboczym wyrzutni pneumatycznej $p_3 = 2,4 \text{ bar}$ dla wszystkich wariantów wilgotności $w_1 \div w_4$. Szczególnie widoczne są zmiany dla próbek o wilgotności w_1 i w_2 mniejszych od wilgotności optymalnej w_{opt} . Dla wilgotności w_3 i w_4 większych od wilgotności optymalnej w_{opt} zachodzi zjawisko „amortyzacji” uderzenia poprzez reakcję wody w porach gruntowych. Przy tym ciśnieniu roboczym p_3 następuje największa procentowa zmiana składu granulometrycznego poprzez wzrost wartości frakcji pyłowej i iłowej względem próbki referencyjnej $f_{Si+Cl,1}$ i $f_{Si+C,2}$. Omówione powyżej tendencje w dynamicznej charakterystyce wytrzymałościowej piasku pylastego przedstawiłem graficznie na rys. 5.16.



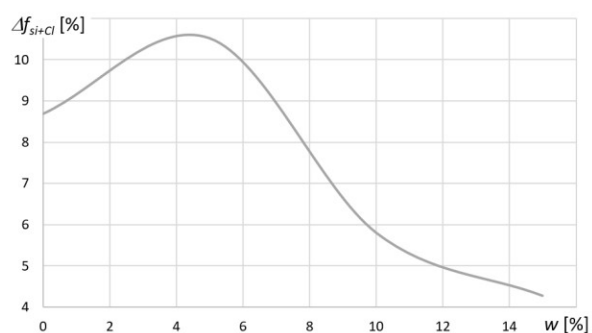
(a)



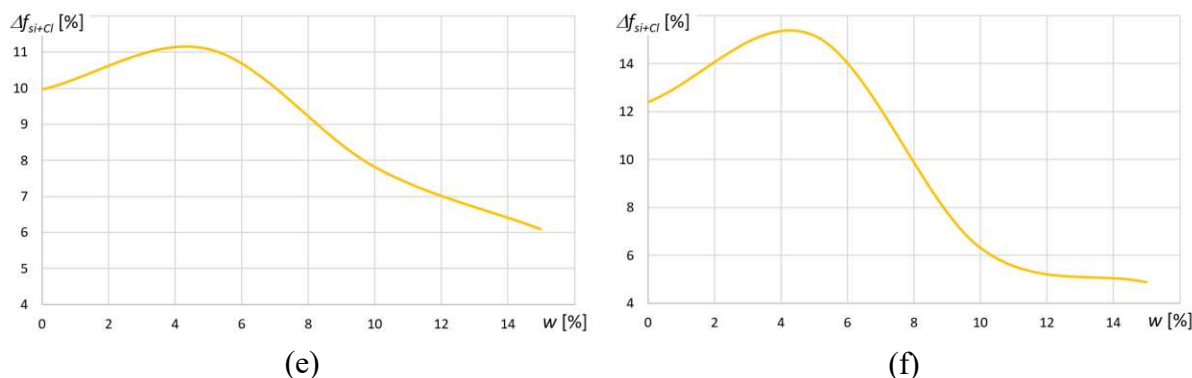
(b)



(c)



(d)



Rys. 5.16. Wykresy zmian zawartości frakcji drobnych Δf_{Si+Cl} w piasku pylastym po obciążeniu dynamicznym prętem obciążającym – pociskiem w zależności od wilgotności w próbki gruntu dla następujących wariantów:
a) $f_{Si+Cl,1}$ i p_1 , b) $f_{Si+Cl,2}$ i p_1 , c) $f_{Si+Cl,1}$ i p_2 , d) $f_{Si+Cl,2}$ i p_2 , e) $f_{Si+Cl,1}$ i p_3 , f) $f_{Si+Cl,2}$ i p_3
(źródło: opracowanie własne)

W ramach podsumowania publikacji **P5**, w której skupiłem się na eksperymentach z próbkami piasków pylastych o różnych zawartościach frakcji drobnych (pyłowej i iłowej) równych $f_{Si+Cl,1} = 15,14\%$ i $f_{Si+Cl,2} = 20,48\%$, dokonałem analizy zmian składu granulometrycznego próbek piasku pylastego. Zastosowałem procedurę porównawczą wartości frakcji pyłowej i iłowej f_{Si+Cl} w strukturze gruntu przed i po eksperymentach SHPB z wykorzystaniem laserowego analizatora wielkości cząstek. Omówiłem również powtarzalne tendencje w procesie zmiany składu granulometrycznego próbek piasku pylastego w zależności od wilgotności próbki gruntu – $w_1 = 0\%$, $w_2 = 5\%$, $w_3 = 10\%$ i $w_4 = 15\%$. Analogiczne rozważania dotyczące powtarzalnych tendencji gruntu prowadziłem w zależności od prędkości uderzenia pręta obciążającego – pocisku w wyniku oddziaływania roboczego ciśnienia wyrzutni pneumatycznej SHPB – $p_1 = 1,2 \text{ bar}$ ($v_1 = 12,76 \text{ m/s}$), $p_2 = 1,8 \text{ bar}$ ($v_2 = 17,69 \text{ m/s}$) i $p_3 = 2,4 \text{ bar}$ ($v_3 = 21,32 \text{ m/s}$). Opracowałem dane pokazujące jak wartość frakcji drobnych w piasku pylastym wpływa na jego zmiany składu granulometrycznego, w tym z uwzględnieniem poszczególnych wilgotności gruntu $w_1 \div w_4$, w odniesieniu do wilgotności optymalnej w_{opt} . Przeprowadzone analizy pozwoliły mi na uzyskanie odpowiedzi do wszystkich postawionych w tym etapie zagadnień badawczych **ZE1 – ZE3** oraz umożliwiły udział w osiągnięciu celu szczegółowego **C1** i **C5**, a także osiągnięcie celu szczegółowego **C6**, co bezpośrednio przyczyniło się do realizacji celu głównego **C0**.

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Niniejszą rozprawę doktorską pt. *Eksperymentalna analiza dynamicznych właściwości mechanicznych gruntów wątpliwych na przykładzie piasku pylastego* stanowi spójny zbiór pięciu powiązanych tematycznie artykułów naukowych zgodnie z zapisami art. 187 ust. 3 Ustawy (Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, 2018). Cykl publikacyjny ma na celu przedstawienie oryginalnego rozwiązania problemu naukowego zgodnie z zapisami art. 187 ust. 2 Ustawy (Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, 2018). Dotyczy ono opracowania i wdrożenia metodyki przygotowania, przeprowadzenia i analizy rezultatów dynamicznych eksperymentów fizycznych na próbkach piasku pylastego z wykorzystaniem stanowiska badawczego zmodyfikowanego /dzielonego/ pręta Hopkinsona na ściskanie (SHPB). Zaproponowana przeze mnie procedura badawcza umożliwia wyznaczanie dynamicznych właściwości mechanicznych badanego gruntu jako trójfazowego materiału sypkiego w zależności od składu granulometrycznego, wilgotności oraz prędkości odkształcenia. Rezultaty tej pracy stanowią podstawę do dalszego konstytutywnego modelowania zachowania badanego gruntu jako materiału pochłaniającego energię uderzenia lub wybuchu w konstrukcjach ochronnych.

Teza badawcza niniejszej rozprawy doktorskiej brzmi: *Dynamiczne właściwości mechaniczne trójfazowego gruntu wątpliwego, na przykładzie piasku pylastego poddanego uderzeniu ściskającemu, mają charakter nieliniowy oraz zależą od wilgotności gruntu, jego składu granulometrycznego i są wrażliwe na prędkość odkształcenia*. Motywacją badawczą do sformułowania tej tezy była kontynuacja analizy żelbetowej prefabrykowanej kopuły konstrukcji ochronnej dla infrastruktury krytycznej, którą opracowałem w ramach magisterskiej pracy dyplomowej. Zastosowanie dodatkowej obsypki gruntowej tej konstrukcji pozwoli na zwiększenie jej ochrony balistycznej i wybuchowej, jak również różnych obiektów budowlanych (w szczególności schronów oraz tymczasowych ukryć). Przeprowadzone w ramach rozprawy doktorskiej badania dotyczyły **piasku pylastego**, który jest reprezentatywnym przykładem gruntu wątpliwego. Grunt ten powszechnie występuje na terenie Polski. Grunty piaszczyste bez frakcji drobnych często wykorzystywane są do produkcji betonu, natomiast grunty zawierające te frakcje przeważnie są stosowane jako materiał obsypki. W rozprawie doktorskiej zajmowałem się opracowaniem kompleksowej metodyki badawczej obejmującej proces przygotowania próbki piasku pylastego do dynamicznego badania na stanowisku SHPB z uwzględnieniem wpływu wilgotności gruntu oraz proces wstępnego zagęszczenia tej próbki gruntu sposobem wibracyjnym wraz z kalibracją wyrzutni pneumatycznej SHPB dla pręta obciążającego – pocisku o różnych długościach

i prędkości uderzenia. W ramach tej metodyki przeprowadziłem analizę badawczą skutków oddziaływania dynamicznego na piasek pylasty w celu zbadania zmian składu granulometrycznego tego rodzaju gruntu o różnej zawartości frakcji pyłowej i ilowej oraz wilgotności w wyniku obciążenia uderzeniowego w zależności od ciśnienia roboczego wyrzutni pneumatycznej SHPB (prędkości uderzenia pręta obciążającego – pocisku).

Rezultaty prac zawartych w publikacjach P1 – P5 stanowią wartość dodaną do obszaru inżynierii uderzeniowej w zakresie dyscypliny inżynieria lądowa, geodezja i transport. Niestabilna sytuacja polityczno-militarno-gospodarcza we współczesnym świecie, a w szczególności prowadzone działania wojenne we wschodniej części Europy, generują potrzebę wzrostu poczucia poziomu bezpieczeństwa ludności cywilnej poprzez wzmocnienie elementów obrony cywilnej w zakresie schronów i tymczasowych ukryć. Jednym z rezultatów moich prac jest dodatkowe zabezpieczenie tych obiektów budowlanych za pomocą gruntowej warstwy ochronnej z piasku pylastego wspomagającej efekt absorpcji oddziaływania dynamicznego. Spowoduje to zwiększenie ochrony balistycznej oraz wybuchowej różnych budynków, w tym obiektów obrony cywilnej i konstrukcji infrastruktury krytycznej.

Badania eksperymentalne wykonane na stanowisku badawczym pn. zmodyfikowany /dzielony/ pręt Hopkinsona na ściskanie (SHPB) pozwoliły na uzyskanie **oryginalnego rozwiązania problemu naukowego**. Opracowałem i wdrożyłem kompleksową metodykę wyznaczenia eksperymentalnych zależności w zakresie dynamicznych właściwości mechanicznych gruntów wątpliwych, na przykładzie piasku pylastego podczas ściskania, z uwzględnieniem: odkształcenia, prędkości odkształcenia, wilgotności, zawartość frakcji drobnych oraz zmiany składu granulometrycznego. Końcowy rezultat przeprowadzonych prac badawczych uzyskałem poprzez kolejne etapy opracowywania poszczególnych celów szczegółowych **C1 – C6** (jednocześnie osiągając cel główny **C0**) w ramach zbioru pięciu powiązanych tematycznie artykułów naukowych **P1 – P5**, które zostały opublikowane w polskich i zagranicznych czasopismach naukowych. Potwierdziły one postawioną **tezę badawczą** niniejszej rozprawy doktorskiej.

Wyniki analiz eksperymentalnych odpowiedzi badanych piasków pylastych na obciążenia o dużej prędkości odkształcenia (HSR) mogą być podstawą do zaprojektowania konstrukcji ochronnych o zwiększonej odporności na oddziaływania dynamiczne. Te kwestie dotyczą gruntów stanowiących zarówno podłoże gruntowe, jak i również będących obsypką tych konstrukcji. Uzyskane dynamiczne charakterystyki wytrzymałościowe gruntu wątpliwego w postaci zmian naprężenia w funkcji odkształcenia $\sigma(\varepsilon)$ oraz zmian prędkości odkształcenia w funkcji odkształcenia $\dot{\varepsilon}(\varepsilon)$ dla różnych wilgotności oraz zawartości frakcji pyłowej i ilowej

stanowią podstawę budowy modeli konstytutywnych gruntów na potrzeby modelowania współpracy obiektu budowlanego z otaczającym ośrodkiem gruntowym.

Doświadczalnie udowodniłem, że w przypadku gruntów nawodnionych ($w \geq w_{sat}$) pod wpływem obciążeń dynamicznych woda współpracuje ze szkieletem gruntowym i może w stopniu większym niż szkielet przenosić obciążenia ściskające bezpośrednio na konstrukcje z niewielkim tylko udziałem szkieletu gruntowego. Oznacza to, że nie powinno być sytuacji, w których chroniony obiekt znajduje się w obsypce nawodnionej. W takim wypadku obsypka nie będzie posiadała pożądanych właściwości pochłaniających efekt oddziaływania dynamicznego.

Kolejnym aplikacyjnym rezultatem przeprowadzonych analiz jest określenie, że piasek pylasty stanowiący obsypkę obiektu powinien być o wilgotności zbliżonej do połowy wilgotności optymalnej. Zalecenie to wynika z otrzymanej eksperymentalnej zależności, iż przy tej wilgotności grunt ten uzyska największe zagęszczenie pod wpływem obciążenia o dużej prędkości odkształcenia (HSR) oraz w największym stopniu ulega zniszczeniu struktura jego szkieletu. To udokumentowane zjawisko fizyczne tłumaczy pochłanianie części energii uderzenia przez ten gruntowy materiał ochronny, która powoduje niszczenie szkieletu gruntowego.

LITERATURA

W kolejności alfabetycznej:

- Annual Threat Assessment of the US Intelligence Community*. Office of the Director of National Intelligence: McLean, VA, USA, 2023
- Apanowicz, J. *Metodologia ogólna*. Wydawca: Wyższa Szkoła Administracji i Biznesu, Gdynia, 2002. ISBN: 83-910869-9-3
- Barr, A.D.; Clarke, S.D.; Tyas, A.; Warren, J.A. Effect of Moisture Content on High Strain Rate Compressibility and Particle Breakage in Loose Sand. *Exp. Mech.* 2018, 58, 1331–1334. <https://doi.org/10.1007/s11340-018-0405-4>
- Blitterswyk, J.; Fletcher, L.; Pierron, F. Characterisation of the Interlaminar Properties of Composites at High Strain Rates: A Review. *Adv. Exp. Mech.* 2017, 2, 3–28. https://doi.org/10.11395/aem.2.0_3
- Bragov, A.M.; Balandin, V.V.; Igumnov, L.A.; Kotov, V.L.; Kruska, L.; Lomunov, A.K. Impact and penetration of cylindrical bodies into dry and water-saturated sand. *Int. J. Impact Eng.* 2018, 122, 197–208. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.08.012>
- Bragov, A.M.; Iuzhina, T.N.; Lomunov, A.K.; Igumnov, L.A.; Belov, A.A.; Eremeyev, V.A. Investigation of Wood Properties at Elevated Temperature. *J. App. Comp. Mech.* 2022, 8, 298–305. <https://doi.org/10.22055/JACM.2021.38486.3239>
- Chen, H.; Zhang, Ch.; Wei, J.; Li, M.; Wang, Y. A modified method for estimating the stress state of granular materials in the passive confined pressure SHPB tests. *Int. J. Impact Eng.* 2022, 160, 104063. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2021.104063>
- Chmielewski, R.; Sobczyk, K. Ekspertyza techniczna dotycząca oceny stanu stateczności skarpy na Polskim Cmentarzu Wojennym w masywie Monte Cassino (Włochy). Warszawa, 2022
- Cieplak, K.; Janiszewski, J.; Grązka, M.; Konwerski, Ł. Planar Shear Specimens for High Strain-Rate Testing of Engineering Materials Using the Conventional SHPB Technique: Experimental and Numerical Studies. *Phys. Sci. Forum.* 2022, 4, 13. <https://doi.org/10.3390/psf2022004013>
- Field, J.E.; Walley, S.M.; Proud, W.G.; Goldrein, H.T.; Siviour, C.R. Review of experimental techniques for high rate deformation and shock studies. *Int. J. Impact Eng.* 2004, 30, 725–775. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2004.03.005>
- Filippov, K.A.; Churkin, A.A.; Gavryutina, A.V.; Mukhin, A.A. High Strain Dynamic Testing for the Control of the Process of Immersion of Driven Piles. *Ind. and Civ. Eng.* 2021, 8, 41–50. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2021.08.41-50>
- Gray, G.T. High-Strain-Rate Deformation—Mechanical Behavior and Deformation Substructures Induced. *Annu. Rev. Mater. Res.* 2012, 42, 285–303. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070511-155034>

- Guo, L.; Guo, R.; Yan, Y.; Zhang, Y.; Wang, Z.; Mu, Y. Dynamic Compression Mechanical Properties of Polyoxymethylene-Fiber-Reinforced Concrete. *Materials*. 2022, 15, 7784. <https://doi.org/10.3390/ma15217>
- Górska-Pawliczuk, A. Grunty wysadzinowe - wyzwanie dla drogownictwa. *Magazyn Autostrady*. 2017, 5, 116–122
- Hopkinson, B. A method of measuring the pressure produced in the detonation of high explosives or by the impact of bullets. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 1914, A213, 437-456. <https://doi.org/10.1098/rsta.1914.0010>
- Hopkinson, J. Further experiments on the rupture of iron wire. *Manch. Lit. Philos. Soc.* 1872, 11, 119-121
- Hopkinson, J. On the rupture of iron wire by a blow. *Manch. Lit. Philos. Soc.* 1872, 11, 40-45
- ISO 13320, 2020. Particle Size Analysis - Laser Diffraction Methods
- ISO 9276-6, 2008. Representation of results of particle size analysis - Part 6: Descriptive and quantitative representation of particle shape and morphology
- Jia, J.; Tang, H.; Chen, H. Dynamic Mechanical Properties and Energy Dissipation Characteristics of Frozen Soil under Passive Confined Pressure. *Acta Mech. Solida Sin.* 2021, 34, 184–203. <https://doi.org/10.1007/s10338-020-00200-0>
- Kang, D.; Noh, H.-G.; Kim, J.; Lee, K. Inverse Identification of a Constitutive Model for High-Speed Forming Simulation: An Application to Electromagnetic Metal Forming. *Materials*. 2022, 15, 7179. <https://doi.org/10.3390/ma15207179>
- Kolsky, T.E. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading. *Proc. Phys. Soc.* 1949, B62, 676. <http://doi.org/10.1088/0370-1301/62/11/302>
- Kruszka, L.; Chmielewski, R.; Muzolf, P.; Sobczyk, K. Ekspertyza budowlana dotycząca weryfikacji projektowych rozwiązań konstrukcyjnych podziemnych zbiorników magazynowych stalowych o obudowie żelbetowej o osiach pionowych do magazynowania paliw płynnych. Warszawa, 2022
- Kruszka, L.; Sobczyk, K. Applications of Hopkinson Bar Technique for Capability Testing of High-Energy Absorption Materials. In: *NATO Science for Peace and Security Series C—Environmental Security*; Kovacs, T.A., Nyikes, Z., Furstner, I., Eds.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2022. https://doi.org/10.1007/978-94-024-2174-3_2
- Lagdani, O.; Tarfaoui, M.; Rouway, M.; Laaouidi, H.; Sbai, S.J.; Amine Dabachi, M.; Aamir, A.; Nachtane, M. Influence of Moisture Diffusion on the Dynamic Compressive Behavior of Glass/Polyester Composite Joints for Marine Engineering Applications. *J. Compos. Sci.* 2022, 6, 94. <https://doi.org/10.3390/jcs6030094>
- Li, J.; Sun, W.; Li, Q.; Chen, S.; Yuan, M.; Xia, H. Influence of Layered Angle on Dynamic Characteristics of Backfill under Impact Loading. *Minerals*. 2022, 12, 511. <https://doi.org/10.3390/min12050511>
- Li, Z.; Zhu, Y.; Song, Q.; Wang, P.; Liu, D. Dynamic Mechanical Properties and Failure Characteristics of Sandstone with Pre-Flaws Parallel to the Loading Direction. *Sustainability*. 2023, 15, 3587. <https://doi.org/10.3390/su15043587>

- Lindholm, U. Some experiments with the Split Hopkinson Pressure Bar. *J. Mech. Phys. Solids*. 1964, 12, 5, 317–335. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(64\)90028-6](https://doi.org/10.1016/0022-5096(64)90028-6)
- Lv, Y.; Li, X.; Wang, Y. Particle breakage of calcareous sand at high strain rates. *Powder Technol.* 2020, 366, 776–787. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.02.062>
- Lv, Y.; Wang, Y.; Zuo, D. Effects of particle size on dynamic constitutive relation and energy absorption of calcareous sand. *Powder Technol.* 2019, 356, 21–30. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.07.088>
- Mishra, S.; Chakraborty, T.; Basu, D. High Strain Rate Stress-Strain Response of Soils—A Review. *Jpn. Geotech. Soc. Spec. Publ.* 2015, 3, 80–85. <https://doi.org/10.3208/jgssp.v03.i13>
- Nachtane, M.; Tarfaoui, M.; Ledoux, Y.; Khammassi, S.; Leneveu, E.; Pelleter, J. Experimental Investigation on the Dynamic Behavior of 3D Printed CF-PEKK Composite under Cyclic Uniaxial Compression. *Compos. Struct.* 2020, 247, 112474. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112474>
- Omidvar, M.; Iskander, M.; Bless, S. Stress-strain behavior of sand at high strain rates. *Int. J. Impact Eng.* 2012, 49, 192–213. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2012.03.004>
- PN-EN ISO 13286-2, 2010. Metody badań laboratoryjnych gęstości na sucho i zawartości wody - Zagęszczanie metodą Proctora
- PN-EN ISO 14688-1, 2018. Rozpoznanie i badania geotechniczne - Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów - Część 1: Oznaczanie i opis
- PN-EN ISO 17892-4, 2017. Rozpoznanie i badania geotechniczne - Badania laboratoryjne gruntów - Część 4: Badanie uziarnienia gruntów
- Prusty, G.B.; Banerjee, A. Structure–Property Correlation and Constitutive Description of Structural Steels during Hot Working and Strain Rate Deformation. *Materials*. 2020, 13, 556. <https://doi.org/10.3390/ma13030556>
- Shi, B.; Xing, H.; Mu, C.; Li, J.; Xu, T.; Liu, W. Analysis of Optimal Loading Angle in Dynamic Flattened Brazilian Disc Splitting Test for Concrete. *Appl. Sci.* 2022, 12, 11834. <https://doi.org/10.3390/app122211834>
- Siviour, C.; Kendall, M.J. Understanding High Rate Behavior through Low Rate Analog. In: *Materials Science, Final Report*; Oxford University Department of Engineering Science: Oxford, UK, 2014
- Siviour, C.R.; Jordan, J.L. High Strain Rate Mechanics of Polymers: A Review. *J. Dyn. Behav. Mater.* 2016, 2, 15–32. <https://doi.org/10.1007/s40870-016-0052-8>
- Sobczyk, K. Propozycje konstrukcji ochronnych dla infrastruktury krytycznej. Magisterska praca dyplomowa. Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 2017
- Sobczyk, K.; Chmielewski, R.; Duda, K. The concept of a prefabricated structure for protection of critical infrastructure facilities. *Bull. Mil. Univ. Technol.* 2018, 67, 133–143. <http://doi.org/10.5604/01.3001.0012.0979>

- Sobczyk, K.; Chmielewski, R.; Kruszka, L. The concept of experimental research on the behavior of sand cover material for protective shelters for civilians. *Saf. Eng. Anthropog. Objects*. 2020, 1, 11-16. <https://doi.org/10.37105/iboa.51>
- Suescun-Florez, E.; Omidvar, M.; Iskander, M.; Bless, S. Review of High Strain Rate Testing of Granular Soils. *Geotech. Test. J.* 2015, 38, 20140267. <https://doi.org/10.1520/GTJ20140267>
- The World Climate and Security Report*. International Military Council On Climate And Security: The Hague, The Netherlands, 2022
- Ustawa Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, 2018. Dz.U.2023.742
- Wang, H.; Zhang, Y.; Tan, Z. Dynamic Response and Deformative Mechanism of the Shape Memory Polymer Filled with Low-Melting-Point Alloy under Different Dynamic Loads. *Polymers*. 2023, 15, 423. <https://doi.org/10.3390/polym15020423>
- Wang, J.; Fan, P.; Wang, M.; Dong, L.; Ma, L.; Gao, L. Experimental study of one-dimensional compression creep in crushed dry coral sand. *Can. Geotech. J.* 2020, 57, 1854–1869. <https://doi.org/10.1139/cgj-2019-0406>
- Wang, L.; Du, F.; Liang, Y.; Gao, W.; Zhang, G.; Sheng, Z.; Chen, X. A Comprehensive In Situ Investigation on the Reinforcement of High-Filled Red Soil Using the Dynamic Compaction Method. *Sustainability*. 2023, 15, 4756. <https://doi.org/10.3390/su15064756>
- Wiłun, Z. *Zarys geotechniki*. Wydawca: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2013. ISBN: 978-83-2061-914-0
- Wu, S.; Wei, Y.; Zhang, Y.; Cai, H.; Du, J.; Wang, D.; Yan, J.; Xiao, J. Dynamic compaction of a thick soil-stone fill: Dynamic response and strengthening mechanisms. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 2020, 129, 105944. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105944>
- Xiao, Y.; Liu, X.; Zhou, J.; Song, L. Field Test Study on the Bearing Capacity of Extra-Long PHC Pipe Piles under Dynamic and Static Loads. *Sustainability*. 2023, 15, 5161. <https://doi.org/10.3390/su15065161>
- Xu, D.; Zhang, Z.; Qin, Y.; Liu, T.; Cheng, Z. Effect of particle size distribution on dynamic properties of cemented coral sand under SHPB impact loading. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 2022, 162, 107438. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107438>
- Yao, Z.; Zhou, Ch.; Lin, Q.; Yao, K.; Satchithanathan, U.; Lee, F.H.; Tang, A.M.; Jiang, H.; Pan, Y.; Wang, S. Effect of dynamic compaction by multi-point tamping on the densification of sandy soil. *Comput. Geotech.* 2022, 151, 104949. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2022.104949>
- Zbrowski, A. Badania prototypu działu pneumatycznego. *Problemy Eksploatacji*. 2011, 3, 217–234
- Zhang, F.; Zhu, Z.; Fu, T.; Jia, J. Damage mechanism and dynamic constitutive model of frozen soil under uniaxial impact loading. *Mech. Mater.* 2020, 140, 103217. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2019.103217>

- Zhang, K.; Wang, F.; Yang, B.; Li, L.; Gao, L.; Sun, Y.; Guo, F. Mechanical Response and Failure Mechanisms of Natural Bamboo Fiber Reinforced Poly-Benzoxazine Composite Subjected to Split-Hopkinson Tensile Bar Loading. *Polymers*. 2022, 14, 1450. <https://doi.org/10.3390/polym14071450>
- Zhou, J.; Zhao, G.; Meng, X.; Liu, C.; Ma, L.; Xu, W.; Cheng, X. Experimental Investigation of the Size Effect of Rock under Impact Load. *Minerals*. 2023, 13, 43. <https://doi.org/10.3390/min13010043>
- Zieliński, J. *Metodologia pracy naukowej*. Wydawca: Aspra, Warszawa, 2012. ISBN: 978-83-7545-364-5

ZAŁĄCZNIKI

Publikacje P1 – P5 stanowią zbiór pięciu powiązanych tematycznie artykułów naukowych wraz z oświadczeniami współautorów o ich merytorycznym wkładzie, gdzie w każdej z tych pozycji jestem autorem większościowym. Przedstawiłem je pogrupowane w postaci załączników Z1 – Z5:

- Z1. Sobczyk K.**, Chmielewski R., Kruszka L., Rekucki R., 2022, Strength Characterization of Soils' Properties at High Strain Rates Using the Hopkinson Technique – A Review of Experimental Testing, *Materials*, 15(1):274, DOI: 10.3390/ma15010274
- Z2. Sobczyk K.**, Kruszka L., Chmielewski R., Rekucki R., 2021, Performance characteristics of Hopkinson's set – up pneumatic launcher, *Acta Polytechnica*, 61(4):552-561, DOI: 10.14311/AP.2021.61.0552
- Z3. Sobczyk K.**, Kruszka L., Grązka M., Chmielewski R., Rekucki R., 2022, Preparation of the non – cohesive soil sample and calibration of the pneumatical launcher in the dynamic soil test SHPB, *Safety Engineering of Anthropogenic Objects*, No. 1/2022:16-27, DOI: 10.37105/iboa.129
- Z4.** Chmielewski R., Kruszka L., Rekucki R., **Sobczyk K.**, 2021, Experimental investigation of dynamic behavior of silty sand, *Archives of Civil Engineering*, LXVII(1):481-498, DOI: 10.24425/ACE.2021.136484
- Z5. Sobczyk K.**, Chmielewski R., Kruszka L., Rekucki R., 2023, Analysis of the Influence of Silty Sands Moisture Content and Impact Velocity in SHPB Testing on Their Compactability and Change in Granulometric Composition, *Applied Sciences*, 13(8):4707, DOI: 10.3390/app13084707

Review

Strength Characterization of Soils' Properties at High Strain Rates Using the Hopkinson Technique—A Review of Experimental Testing

Kamil Sobczyk , Ryszard Chmielewski * , Leopold Kruszka  and Ryszard Rekucki

Department of Military Engineering and Military Infrastructure, Faculty of Civil Engineering and Geodesy, Military University of Technology, 2 Gen. Sylwester Kaliski Str., 00-908 Warsaw, Poland; kamil.sobczyk@wat.edu.pl (K.S.); leopold.kruszka@wat.edu.pl (L.K.); ryszard.rekucki@wat.edu.pl (R.R.)

* Correspondence: ryszard.chmielewski@wat.edu.pl

Abstract: The paper presents a review of crucial experiments and the latest publications, presenting the previous and current trends in experimental research in 2018–2021 in the area of soil dynamic interaction based on the Hopkinson bar technique. A review of investigated experimental test stands was made, in particular, cohesive and non-cohesive soil specimens prepared with different dimensions and densities. From this study, it can be concluded that the dynamic response of the soil depends on many factors, e.g., density, cohesion, moisture and grain structure of the soil specimen. There is still a noticeable interest in SHPB experiments performed in both 1D and 3D versions under modified conditions (frozen/heated soil specimen, different degree of water saturation content of the soil sample) in a wide range of strain rates 10^2 – 10^4 s^{−1}, which is a large field for further research. The need to learn about the characteristics of various types of soil (both cohesive and non-cohesive) for the selection of structural design solutions for the protection elements of critical infrastructure was emphasized.

Keywords: high strain rate; soil; split Hopkinson pressure bar; review



Citation: Sobczyk, K.; Chmielewski, R.; Kruszka, L.; Rekucki, R. Strength Characterization of Soils' Properties at High Strain Rates Using the Hopkinson Technique—A Review of Experimental Testing. *Materials* **2022**, *15*, 274. <https://doi.org/10.3390/ma15010274>

Academic Editors: Tomasz Sadowski and Eligiusz Postek

Received: 13 November 2021

Accepted: 27 December 2021

Published: 30 December 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Knowledge of both the static and dynamic behavior of the soil is important in geotechnical issues in building construction, in particular in the area of building foundations. The soil medium may be subjected to various static and dynamic loads. According to current reports, there are currently many threats to the safety of load-bearing structures of buildings, including the subsoil [1–3], in particular:

- (I) Threats as a result of natural disasters—floods, landslides, storms, hurricanes, tornadoes, snowstorms;
- (II) Threats related to intentional human activity—military and terrorist activities in the form of a bomb explosion, rocket attack, use of an explosive;
- (III) Threats related to unintended human activity—accidents and collisions, construction errors of building structures, improper operation and maintenance of building structures.

Some of these threats (e.g., landslide, missile attack) are dynamic interactions and generate a soil strain rate of 10^2 – 10^4 s^{−1}. Further behavior of the soil loaded in this way is of great importance for the maintenance of the foundation of the building and the possible consequences in the form of a construction disaster. Construction works can also have a dynamic effect on the surrounding buildings, e.g., dynamic soil compaction or driving of foundation piles. There is need to understand the characteristics of different types of soil (both cohesive and non-cohesive) in the best possible way in order to properly select design and construction solutions for buildings, protective elements and critical infrastructure. For

this, a split Hopkinson pressure bar (SHPB) test stand is used. This apparatus allows one to determine the dynamic characteristics of the analyzed soil and to learn the stress–strain relationship, taking into account the strain rate for a known density, moisture and grain structure of the soil specimen. In the case of the procedure of determining the constitutive model of soil subjected to dynamic action, additional experiments are required to determine the necessary coefficients and frequencies.

The SHPB stand is designed, depending on its configuration, to test construction materials for dynamic effects—metal [4–16], concrete [17–20], wood, rocks [21–29], soil [30–50] and other materials such as polymers, ceramics, etc. [51–58].

The dynamic properties of the soils are also studied using various methods, for example, bent elements and a resonance column, offering a medium-to-high frequency spectrum capable of capturing the dynamic constitutive behavior of the soil [59].

In recent years, reviews and comparisons of studies for various strain rates have been made using the Hopkinson bar technique [60–64]. In the area of soil, significant reviews were carried out in 2012 [65] and 2015 [66]. The aim of this study was to make a compilation of the current crucial research trends in the area of soils tested with dynamic interaction induced by the Hopkinson bar technique.

2. Strain Rate Ranges

Over the last several decades, many experimental devices have been used to determine the characteristics of the reaction of the impact on materials through the degree of deformability at various ranges of strain rates. In both the military and commercial civil industries, the dynamic response of the material is a broad and crucial field for scientific analysis. Essentially, a general division can be made that materials deform differently under the action of static and dynamic loads. There are divisions presented in Table 1 according to the ranges of the strain rate and the corresponding experimental techniques. The data were compiled based on strain range analyses for various materials [67–69].

Table 1. List of ranges of strain rate and experimental techniques.

Strain Rate (s^{-1})	Experimental Techniques				
10^8	Inertia important	Shock/Ultra-high	Plate impact		
10^6			Taylor impact		
10^4			Hopkinson bar		
10^2	Inertia negligible	High rate			
10^0		Medium rate/Intermediate	Hydraulic devices	Hard impact (missiles, rock falls)	Earthquake and induced shocks
10^{-2}		Quasi-static		Plane crash	
10^{-4}		Creep and stress relaxation	Conventional cross-head devices	Vehicle impact	
10^{-6}				Static load (consolidation, rheology)	
10^{-8}					

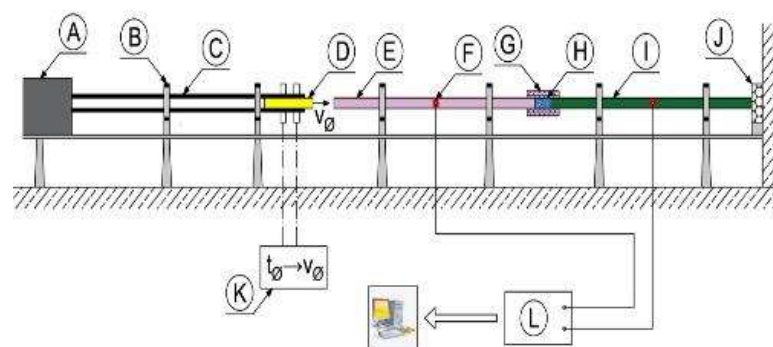
The development in the area of conducting experiments of the strain rate of many materials in various ranges allows for the precise determination of their characteristics and correlation with the actual conditions of their work. The commonly used experimental tests are summarized in Table 2; in particular, the respective ranges of strain rates are included [68].

Table 2. Experimental research taking into account the ranges of the strain rate.

Strain Rate (s^{-1})	Experimental Techniques
Compression tests	
Below 10^{-1}	Conventional load frames
10^{-1} – 10^2	Special servo-hydraulic frames
10^{-1} – $0.5 \cdot 10^3$	Cam plastometer and drop test
10^1 – 10^4	Split Hopkinson pressure bar
10^3 – 10^5	Taylor impact test
Above 10^5	Single- and two-stage gas gun
Tension test	
Below 10^{-1}	Conventional load frames
10^{-1} – 10^2	Special servo-hydraulic frames
10^2 – 10^3	Split Hopkinson pressure bar (in tension version)
10^4	Expanding ring
Above 10^5	Flyer plate
Shear and multiaxial tests	
Below 10^{-1}	Conventional shear tests
10^{-1} – 10^2	Special servo-hydraulic frames
10^1 – 10^3	Torsional impact
10^2 – 10^4	Split Hopkinson pressure bar (in torsion version)
10^3 – 10^4	Double-notch shear and punch
10^4 – 10^7	Pressure-shear plate impact

3. SHPB Test Stand and General Principle of the Experiment

The technique of the split Hopkinson pressure bar (SHPB) allows for the study and analysis of the phenomenon of co-interaction of soils and their behavior as a result of a dynamic impact with a measuring bar on the tested soil. A schematic visualization of the split Hopkinson pressure bar is shown in Figure 1 [70] and the actual view of the experimental stand in Figure 2—both drawings refer to an example of an experimental stand that is used for teaching and scientific research at the Department of Military Engineering and Infrastructure within the existing structure Faculty of Civil Engineering and Geodesy at the Military University of Technology in Warsaw.

**Figure 1.** General scheme of the SHPB stand at Department of Military Engineering and Infrastructure, MUT (reprinted from Ref. [70]).

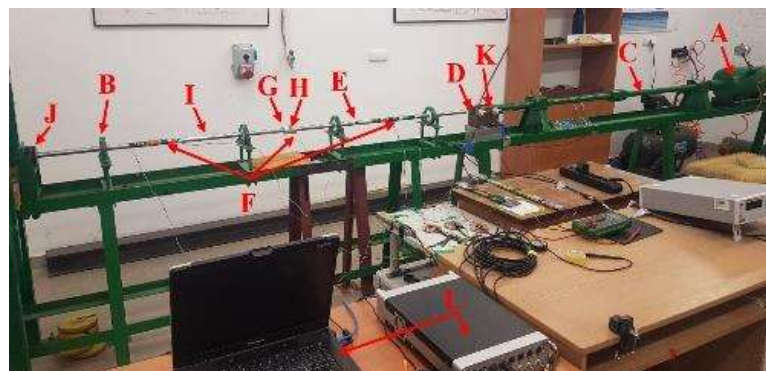


Figure 2. Real view of the SHPB stand at Department of Military Engineering and Infrastructure, MUT (reprinted from Ref. [70]).

The SHPB test stand shown in Figures 1 and 2 consists of the following elements:

- A—pneumatic cannon;
- B—construction ensuring bar alignment;
- C—barrel of loading bar projectile;
- D—bar projectile;
- E—initiating measuring bar;
- F—strain gauge set;
- G—rigid confining casing;
- H—soil specimen;
- I—transmitting measuring bar;
- J—damper;
- K—laser timekeeping system;
- L—measuring device with digital memory and computer software.

In order to facilitate the identification of individual elements of the experimental stand presented in Figures 1 and 2, the letters from A to L were used. The bar projectile/striker (D) moves in the barrel of the launcher and increases its speed as a result of frontal pressure; the compressed air is rapidly released from the pneumatic gun—compressed air is supplied by the compressor (A). At the moment of leaving the barrel of the launcher, the time is measured which allows one to determine the speed of the bar projectile/striker at the moment of hitting the initiating bar. The laser light beam (K) measures the time that the bar projectile/striker has traveled the previously known measurement distance, e.g., 0.1 m. When the front of the bar projectile/striker hits the front of the initiating bar (E), an elastic wave is generated having a compressive nature (the incident wave is responsible for the formation of the initiating bar deformation ϵ^I), which further moves along this initiating bar toward the tested sample soil (H) placed in a casing/tube (G) dedicated to a given experiment. When the wave reaches the end of the initiating bar, the phenomenon of partial wave passage through the tested soil sample toward the transmitting bar (I) takes place (the transmitting wave is responsible for the deformation of the transmitting bar ϵ^T). The remaining part of the generated wave is partially reflected—it carries out the return path to the beginning of the front of the initiating bar (the reflected wave is responsible for the deformation in the initiating bar ϵ^R). The first part of the wave finally reaches the shock absorber (J) passing its path through the test sample and the entire length of the transmitting bar. The generated pulses received from the strain gauges are recorded and saved using a multi-channel conditioner and recorder (L). Ultimately, the data in the form of a digital signal will be transferred to dedicated computer software. The illustration of the described phenomenon is schematically shown in Figure 3 [70].

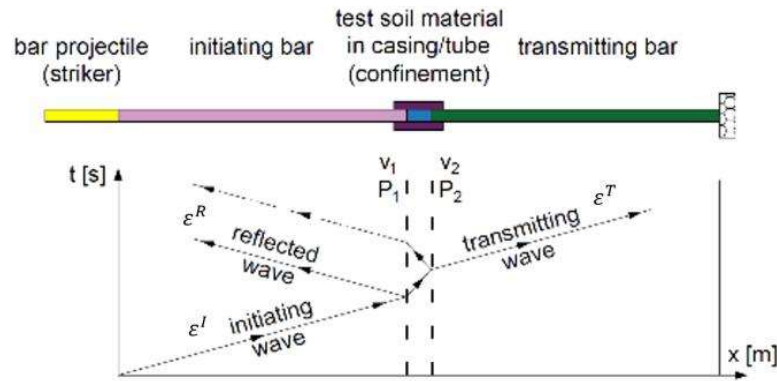


Figure 3. Wave diagram showing the phenomenon of propagation of elastic waves in SHPB (reprinted from Ref. [70]).

As a result of the experiment using the SHPB test stand, it is possible to calculate the strength dynamic parameters (stress σ , strain ε and strain rate $\dot{\varepsilon}$). Assumptions must be made for the further determination of the equations:

$$P_1(t) \cong P_2(t) \quad (1)$$

$$\varepsilon^I(t) + \varepsilon^R(t) \cong \varepsilon^T(t) \quad (2)$$

$$A = A_0 \quad (3)$$

where:

P_1 —force at the end of the initiating bar;

P_2 —force at the end of the transmitting bar;

ε^I —strain in the bar for the initiating wave;

ε^R —strain in the bar for the reflected wave;

ε^T —strain in the bar for the transmitting wave;

A_0 —cross-sectional area of the sample;

A —cross-sectional area of the bars.

Equation to determine stress $\sigma(t)$ as a function of time:

$$\sigma(t) \cong \pm E \cdot \varepsilon^T(t) \quad (4)$$

Equation to determine strain $\varepsilon(t)$ as a function of time:

$$\varepsilon(t) \cong \pm \frac{2 \cdot c_0}{L_0} \cdot \int_0^t \varepsilon^R(t) dt \quad (5)$$

Equation to determine strain rate $\dot{\varepsilon}(t)$ as a function of time:

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{2 \cdot c_0}{L_0} \cdot \varepsilon^R(t) \quad (6)$$

where:

E —Young's modulus of the material from which the bars are made;

c_0 —elastic wave propagation velocity in the longitudinal direction of the bar;

L_0 —sample length.

During the dynamic test using the SHPB stand, certain specific standards are applied—the test sample in the experiment has a cylindrical shape. For the duration of the experiment, the soil sample is kept in the casing/tube (Figure 4 [71])—various materials are used to make the casing/tube, adapted to the conditions of a given test, e.g., steel or duralumin. The characteristics of the material used and the ratio of the thickness and length of the

casing/tube allow for uniaxial deformation of the soil sample at the moment of pressing the front initiating and transmitting bars on both sides of the tested sample fronts.

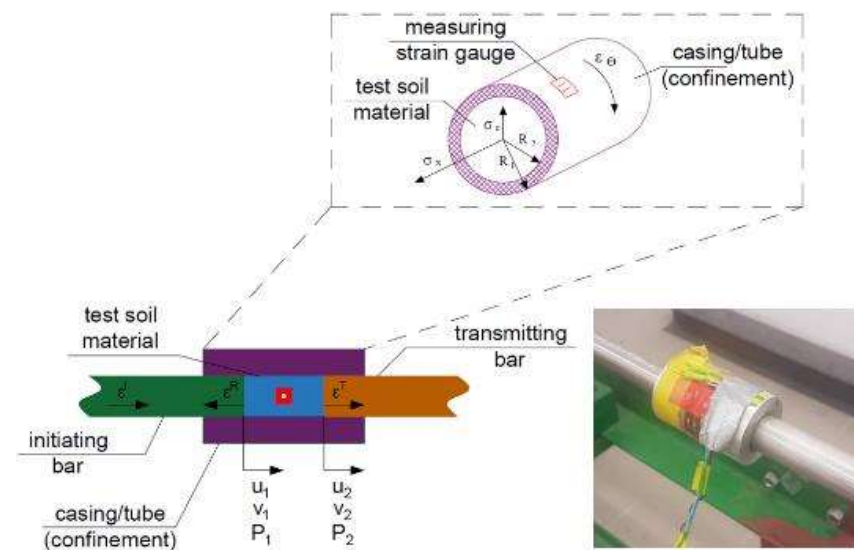


Figure 4. Cylindrical soil specimen in casing/tube (reprinted from Ref. [71]).

4. Current Trends in Soil Dynamic Research Using the Hopkinson Bar Technique

As part of this paper, a literature review was carried out in the area of dynamic tests of cohesive and non-cohesive soils using the Hopkinson bar technique ([61,66]). A compilation of the current crucial research trends in the area of soils loaded with a dynamic impact by applying the Hopkinson bar technique in 2018–2021:

- 2018

(I)

Test Soil Material: Dry and water-saturated sand

Authors: Bragov, A.M.; Balandin, V.V.; Igumnov, L.A.; Kotov, V.L.; Kruszka, L.; Lomunov, A.K.

Order of Cited Paper: [72]

Highlights/ Abstract: The work presents and analyzes new research achievements in the field of experimental, theoretical and numerical dynamic sand interaction—experiments were performed for the cases of sand saturated with water and dry sand, which was subjected to impact and penetration with the use of cylindrical beaters (the speed range from 50 to 450 m/s). The reverse experiment technique was used—the end face of the measuring bar in the variants of the flat, hemispheric and conical heads was dynamically struck with the use of a container containing sand inside the test heads. It is possible to determine the parameters of dynamic compressibility and shear resistance of compacted water-saturated sand as a result of calculations of the maximum and quasi-stationary values of the resistance to penetration in the variant of a flat-head striker. In accordance with the conditions of the mechanics of continuous media in the axisymmetric range, a numerical analysis of the resistance parameter was performed for the penetration of impactors into the soil medium—this allowed for the determination of the parameters of the Grigoryan model. A close convergence of the results obtained between the computational and experimental analysis was confirmed. The thesis is correct that the compacted sand in the variant of complete saturation with water achieves weaker results of shear properties; nevertheless, significant values are still maintained for the dynamic impact interaction velocity. Schematic system for the experimental measurement is shown in Figure 5.

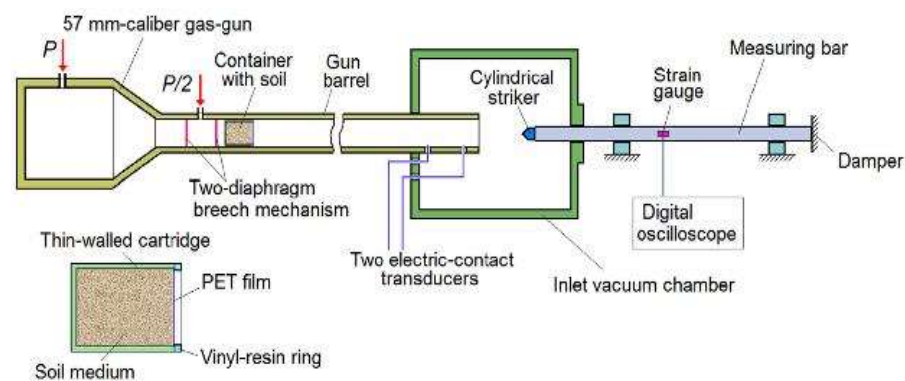


Figure 5. Schematic system for the experimental measurement of the forces resisting the penetration process in the reverse test (reprinted from Ref. [72]).

(II)

Test Soil Material: Water-saturated sand

Authors: Wang, S.; Shen, L.; Maggi, F.; El-Zein, A.; Nguyen, G.D.; Zheng, Y.; Zhang, H.; Chen, Z.

Order of Cited Paper: [73]

Highlights/Abstract: The sand from Stockton Beach, partially water-saturated, was tested on a split Hopkinson pressure bar to determine the compressive action at high strain rate in the soil under analysis. The essence of the research was to determine how the saturation of the sample with water at the existing initial dry sample density affects the selected parameters: initial deformation, energy absorption and grain crushing in the analyzed soil from Stockton Beach for specific experimental conditions in the form of average strain rates between $1 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ and $1.3 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$. The samples were located inside a cured steel pipe, and the dry density was determined to be 1.46 g/cm^3 , 1.57 g/cm^3 and 1.69 g/cm^3 with a water saturation level of the sample from 0% to over 90%. Sand samples with a density of 1.57 g/cm^3 during the test were also placed in polycarbonate chambers—they have a different wall thickness. After carrying out the tests, it was possible to define the conclusion that sand with partial water saturation depending on the stress–strain reaction shows stiffness increasing together with the initial density of the dry sand sample before water lock-up. This phenomenon is reversed—stiffness decreases with increasing water saturation in the sample. The tendency to increase the stiffness is generated by the stiffness of the sample closure only when enclosed in a steel tube. The phenomenon of energy absorption at the stress level present tends to increase together with a decrease in the stiffness of the tube casing (softer) and a decrease in the initial density of the dry sand sample. After the impact was performed in accordance with the test methodology, the crushed sand grains were collected for checking—a quantitative analysis of the grain crushing was performed based on Hardin’s relative fracture potential. It was observed that the occurrence of the sand grain crushing phenomenon increases with the stiffness of the tube casing and the initial dry density of the sample, while it tends to decrease linearly with increasing water saturation of the sample. The results of the tests performed are useful in the calibration and in improving the process of validation of multiphase constitutive models—it will help in determining the expected dynamic reactions in sands with partial saturation with water. View of the soil sample inside the tube is shown in Figure 6.

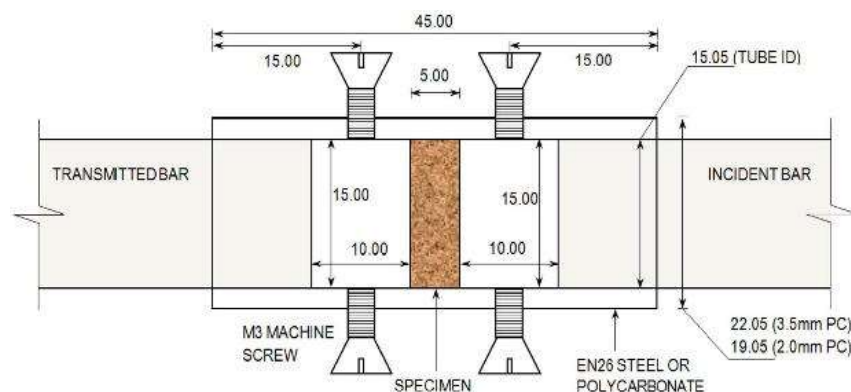


Figure 6. View of the soil sample inside the tube made of EN26 steel and 2.0/3.5 mm thick polycarbonate with measuring bars (reprinted from Ref. [73]). Dimensions are given in millimeters.

(III)

Test Soil Material: Sands - Ottawa sand, Euroquartz Siligran, Q-Rok

Authors: De Cola, F.; Pellegrino, A.; Glößner, C.; Penumadu, D.; Petrinic, N.

Order of Cited Paper: [74]

Highlights/Abstract: The experiment used a test stand in the elongated bar module—long split Hopkinson pressure bar (LSHPB). Load pulses in the range of up to 1.1 ms were generated. The study analyzed the dependence of the quantitative mechanical reaction of sand on compression at high strain rate (HSR) depending on the influence of the following factors: soil grain shape, size distribution of individual sand fractions, intergranular friction, confinement and initial compaction state. The applied test variant allowed determining the set of dynamic reactions of various types of sand in a wide strain rate range—sand samples have a compaction factor ranging from low to the highest compaction (which means the case of the lowest initial porosity coefficient). The total research analysis was based on the three types of sand used in the experiment: quasi-spherical Ottawa sand, sub-grained Euroquartz Siligran and polyhedral grain-shaped Q-Rok. For the given types of sand, the phenomena of morphology and grain size were investigated, which clearly affect the mechanical reaction in the compression variant. During the experiment, conditions enabling quasi-uniaxial strain and quasi-uniaxial stress were provided through the use of stiff (Ti64) and less rigid, deformable (latex) tube casing. An innovative achievement of this work was the determination of the effect of intergranular friction on the example of Euroquartz sand with a polymer coating. Sample preparation procedures based on representative initial consolidation states were used to maintain the realistic ranges in natural soil states from loose to dense. The conducted research is important because the results allow relating the determined parameters of the mechanical dynamic reaction in the case of HSR to the appropriate constitutive models. Long split Hopkinson bar setup is shown in Figure 7 and view of a casing made of (a) stainless steel and (b) latex is presented in Figure 8.

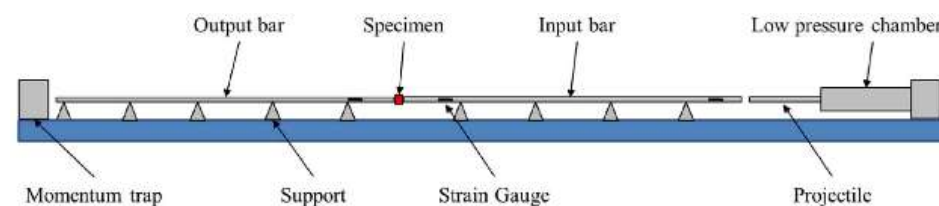


Figure 7. Long split Hopkinson bar setup (reprinted from Ref. [74]).

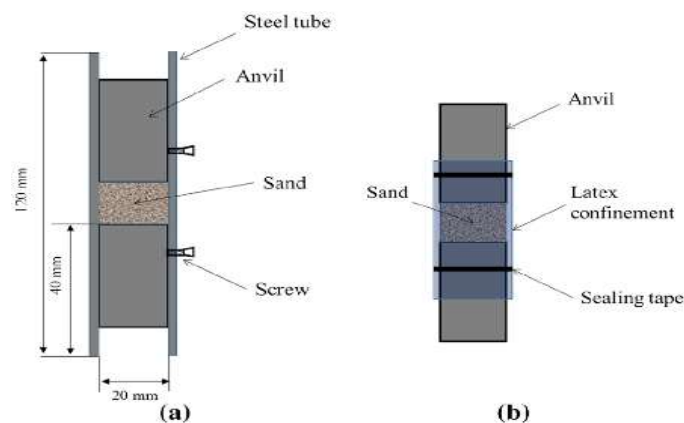


Figure 8. View of a casing made of (a) stainless steel and (b) latex (reprinted from Ref. [74]).

(IV)

Test Soil Material: Quartz sand

Authors: Barr, A.D.; Clarke, S.D.; Tyas, A.; Warren, J.A.

Order of Cited Paper: [75]

Highlights/ Abstract: In order to protect against the negative effects of events and various activities, e.g., explosion or fragmentation, gabion structures are used (a gabion structure is filled with one or more types of soil). The characteristic feature of these events is the strain rates and stresses at the time of their occurrence. The influence of water content in the soil in the gabion structure on the strength of the entire structure was observed—the situation of large strain rates and stresses in partially water-saturated soils is not fully known and discussed. Falling soil is a wide field for deepening further research—the behavior of this soil in the area depending on different compaction in different situations, e.g., external ballistics of a projectile requires further analyses. The paper presents tests of the compaction and compressibility of quartz sand based on the SHPB stand, depending on the sample's water saturation level (loose soil, up to 15% water content). On the other hand, for a well-compacted sample, the water content from 0% to 7.5% decreased the characteristic stiffness of the loose soil. In terms of the water content level above 7.5%, the situation of full water-saturated soil samples occurred. Before full water-saturated (below 7.5%), additional water did not result in the stiffness of the loose soil. However, after full water-saturated (above 7.5%), additional water in the soil pores increased the stiffness of the loose soil. Schematic system of a modified Hopkinson bar is shown in Figure 9 and section detail of specimen confinement is presented in Figure 10.

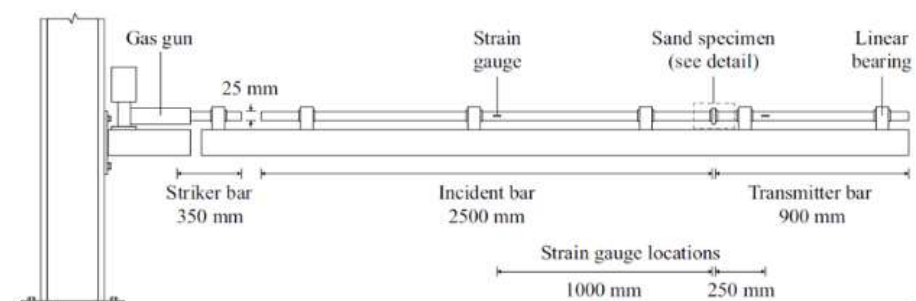


Figure 9. Schematic system of a modified Hopkinson split pressure bar for dynamic loading (reprinted from Ref. [75]).

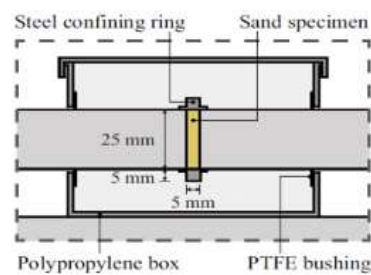


Figure 10. Section detail of specimen confinement (reprinted from Ref. [75]).

• 2019

(V)

Test Soil Material: Calcareous sand

Authors: Lv, Y.; Liu, J.; Xiong, Z.

Order of Cited Paper: [76]

Highlights/Abstract: The study focused on the analysis of calcareous sand in the area of high strain rates (HSRs)—it exhibits different characteristics compared to other soils, e.g., silica sand. The phenomenon of high strain rates occurs in many events and situations, e.g., dynamic driving of piles forming the pile foundation, mining and extraction of natural resources and utility loads caused by the movement of cars/airplanes/other vehicles. The experiment used the split Hopkinson pressure bar stand in the implementation of the calcareous sand reaction test cycle. Soil samples placed in a steel tube/casing were tested after dynamic impact, and the results were compared to the known values of the relative density and strain rate of exemplary reactions and dynamic properties of other loose soil, e.g., silica sand. In total, 6 validation tests were performed in the bar–bar version and 16 comparative tests for the dynamic properties of calcareous sand (the results were compared with silica sand). Different particle sizes, their non-spherical shapes and internal composition resulted in significantly different results of the dynamic reaction of the compared soil samples—the dynamic stiffness of calcareous sand is about 10 times lower than the dynamic stiffness of silica sand. Calcareous sand is porous in nature, and in a dynamic experiment, the grains were finally crushed after the plasticity and hardening of individual grains in the soil skeleton. The destruction mechanics of a single calcareous sand particle starts with local instability and extends until it fully breaks the particle as a result of an increase in the value of the load effect. Schematic view of SHPB is shown in Figure 11.

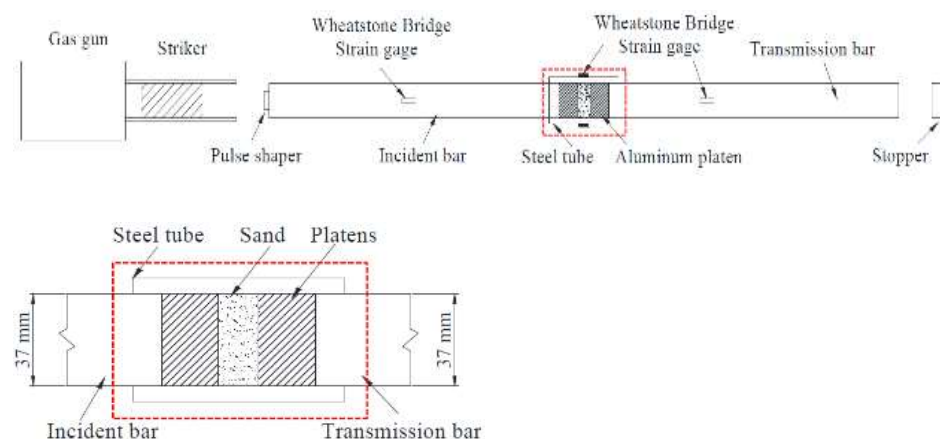


Figure 11. Schematic view of SHPB test with a soil specimen (reprinted from Ref. [76]).

(VI)

Test Soil Material: Calcareous and silica sand

Authors: Lv, Y.; Wang, Y.; Zuo, D.

Order of Cited Paper: [77]

Highlights/Abstract: The paper presents a research cycle using the split Hopkinson pressure bar stand for porous, calcareous and solid silica sands analysis. Samples of different grain sizes were used—fractions in four variants: 0.15—0.30 mm; 0.30—0.60 mm; 0.60—1.18 mm; and 1.18—2.00 mm. In the study of quartz sand, it was observed that the particle size has a significant impact on the reaction of the sample subjected to dynamic impact—the phenomenon of particle crushing appears, mainly in the last part of the strain-hardening process. Similar behavior also occurs in calcareous sand analysis; however, it continues throughout the loading process. It was measured by the fractal dimension approach that the inherent compliance trait in the crushing process of calcareous sand compared to silica sand is approximately 1.2 times stronger. Both experimental soils show opposite behaviors in terms of particle size—the larger the particle size, the more noticeable is the opposite process of changes in the void ratio and friction angle as a result of different inter-particle voids and mineral composition in these samples. Schematic view of SHPB test stand is shown in Figure 12.

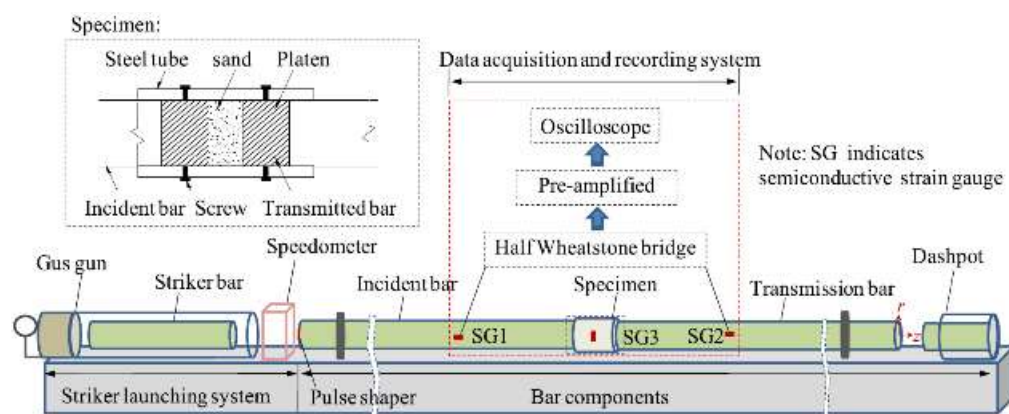


Figure 12. Schematic view of SHPB test stand (reprinted from Ref. [77]).

(VII)

Test Soil Material: Calcareous sand

Authors: Wen, S.; Zhang, C.; Chang, Y.; Hu, P.

Order of Cited Paper: [78]

Highlights/Abstract: An experiment was performed on a calcareous sand sample using a split Hopkinson pressure bar with a bar length of 100 mm in order to analyze the mechanical properties for the dynamic impact case. In the study, the sample was closed in a casing/tube, and there were different test conditions: strain rates in the range of 500—800 s⁻¹ and pressure in the range of 0—200 MPa. An experiment was also carried out to determine the mechanical properties in the static variant in the HUT106D universal testing machine. Calcareous sand was tested under generally similar conditions as in the dynamic test—the differences were the strain rate of 2·10⁻³ s⁻¹ and the pressure in the range of 0–120 MPa. Firstly, it was observed that after exceeding a certain limit value of the dynamic load, the influence of the initial pressure on the dynamic mechanical properties of the calcareous sand sample was reduced. Another conclusion was the possibility of using the Tait equation of state to present the dependence of hydrostatic pressure–volume strain in the calcareous sand sample used for the experiment in both analyzed situations—dynamic and static study. The last observation was the statement that the strain rate effect is well demonstrated by the volumetric compression degree of the analyzed calcareous sand sample. Schematic view of the SHPB test system and calcareous sand specimen are shown in Figure 13.

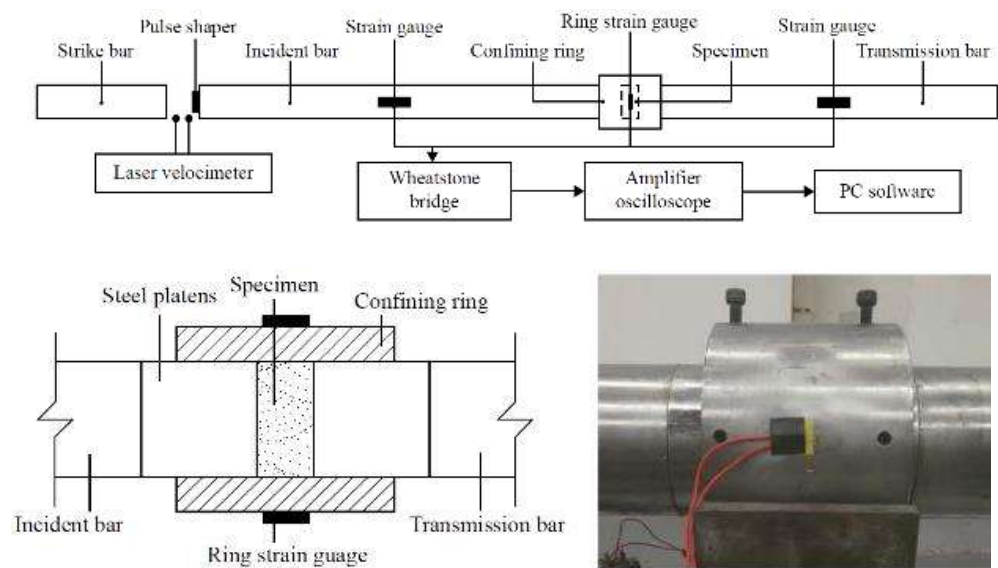


Figure 13. Schematic view of the SHPB test system and calcareous sand specimen (reprinted from Ref. [78]).

(VIII)

Test Soil Material: Carbonate sand

Authors: Xiao, Y.; Yuan, Z.; Chu, J.; Liu, H.; Huang, J.; Luo, S.N.; Wang, S.; Lin, J.

Order of Cited Paper: [79]

Highlights/Abstract: The paper presents tests on carbonate sand samples as part of compression experiments: (a) with the use of the Materials Testing System for quasi-static testing and (b) with the use of split Hopkinson pressure bar for dynamic testing. In order to precisely define the particle size distributions (PSDs) in the analyzed carbonate sand samples in the pre-test and post-test situations, laser diffractometry was used. The results presented in the form of stress–strain curves prove that the carbonate sand used in the experiment reveals the influence of the strain rate effect. On the basis of the stress–strain curves, a different course of the graph was also observed for the results obtained between the tests: (a) of a quasi-static nature and (b) of a dynamic impact character. The experiment conducted under various conditions of the values of the occurring stresses and input energy showed a different range of the phenomenon of particle fracture—it was determined in detail based on the PSD in the situation before the test and after the test. The phenomenon of susceptibility to breaking of soil particles is greater in the test (a) with a quasi-static load than in the test (b) with a load resulting from a dynamic impact. For the identical value of the stress level, the breaking susceptibility of carbonate sand particles subjected to the test (b) with a load of a dynamic impact is lower than in the test (a) with a quasi-static load than in the test. Another observation was the conclusion that the fracture mechanism depends on the level of stress values—the mechanism takes the form of attrition and abrasion for low stress values, but the mechanism for high stress values is fracture. General diagram of SHPB system is shown in Figure 14.

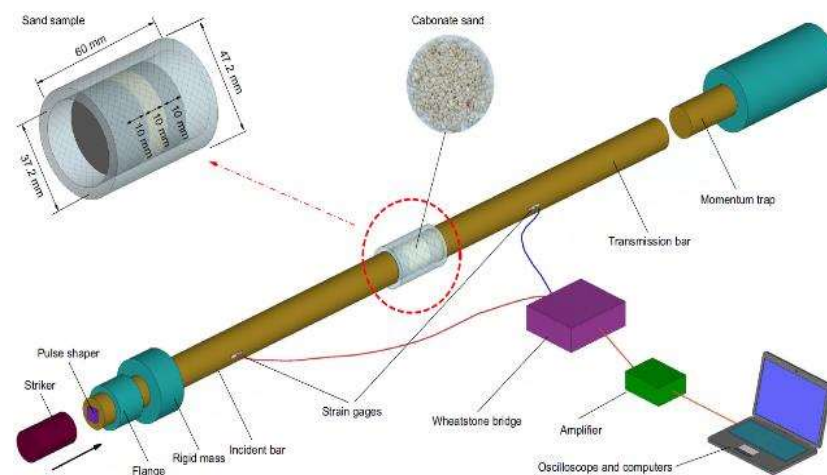


Figure 14. General diagram of SHPB system (reprinted from Ref. [79]).

(IX)

Test Soil Material: Frozen Silty Clay

Authors: Ma, D.; Ma, Q.; Yao, Z.; Yuan, P.; Zhang, R.

Order of Cited Paper: [80]

Highlights/ Abstract: The modified split Hopkinson pressure bar test stand allows you to analyze the dynamic behavior of a silty clay sample in an additional test module—artificial frozen sample. The dynamic hitting of a bar allows one to obtain the stress–strain dependency graph. The experiment enables the determination of several dynamic soil parameters: dynamic compressive strength, dynamic deformation modulus, energy dissipation and failure mode in the prepared sample, taking into account the axial precompressive stress ratio. During the study, the possibility of dividing the stress–strain dependency graph obtained in uniaxial and one-dimensional dynamic impact conditions into four segments was observed: (a) compaction part, (b) elastic part, (c) plastic part and (d) failure part. There was a noticeable trend of increasing values and successively decreasing them as the axial compressive stress ratio grows—the process takes place for selected dynamic parameters (e.g., dynamic compressive strength, deformation modulus for (a) compaction part, deformation modulus for (b) part elastic and absorbed energy density of the analyzed soil sample). For the axial compressive stress ratio with a value of 0.4, there is an observation that signs of the spall phenomenon are visible around the circumference of the sample, while in the central area of the sample, there is no disturbance to the soil structure. Only for the axial compressive stress ratio with a value from 0.7 to 0.9 are the signs of the shear failure process visible. There is a dependence that the higher the value of the axial compressive stress ratio, the stronger the result of the destruction process on the shear surface—for an axial compressive stress ratio of 1.0, the crush failure variant follows. Modified SHPB test stand is shown in Figure 15.

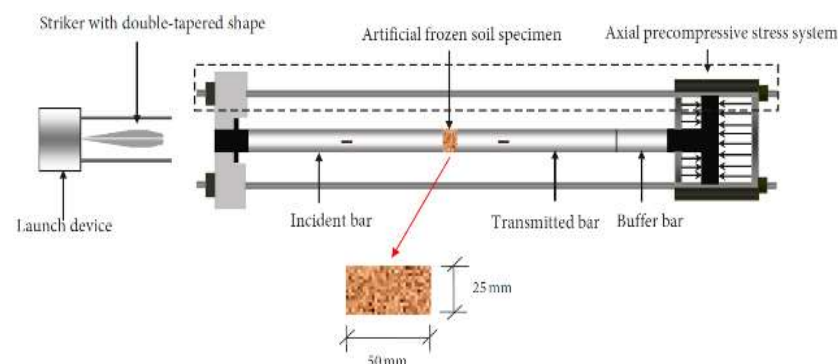


Figure 15. Modified SHPB test stand with frozen soil specimen - silty clay (reprinted from Ref. [80]).

- 2020

(X)

Test Soil Material: Volcanic sand

Authors: Varley, L.; Rutherford, M.E.; Zhang, L.; Pellegrino, A.

Order of Cited Paper: [81]

Highlights/ Abstract: Based on the split Hopkinson pressure bar test stand in the variant with an elongated bar, the soil was analyzed on the example of volcanic sand from Mount Etna in order to test the dependence of sample water moisture and the initial compaction coefficient to maintain dynamic soil subjected to a load by a projectile impact. The result of the experiment was the determination of, e.g., a graph of the dynamic dependence of stress–strains ultimately ending with a significant value of compressive strains. One of the assumptions of the experiment was to reflect the natural conditions of Mount Etna as much as possible in the research room. Volcanic sand samples with different characteristic parameters were used for the tests—samples with different percentages of water moisture and the initial porosity index. As part of the analysis, a significant influence of water (depending on the amount of its presence in the sample) on the dynamic behavior of the sample subjected to a dynamic impact with a bar was observed. The volcanic sand sample with low water content in the soil pores behaved similarly to the sample in dry conditions. It could be observed that a sample with a high percentage of water in the pores (water-saturated sample) has a significant dynamic reaction—water behaves like an incompressible material at the moment of dynamic impact, and there is a visible increase in the stiffness phenomenon at the strain of volcanic sand sample. When the sample is loaded in the quasi-static variant on a universal machine at a low strain rate, no significant influence of the water content in the sample on its behavior is observed. Additionally, an edge detection study was performed for the determination and comparative analysis of the grain fraction of the volcanic sand samples used in the experiment. Split Hopkinson pressure bar system is shown in Figure 16.

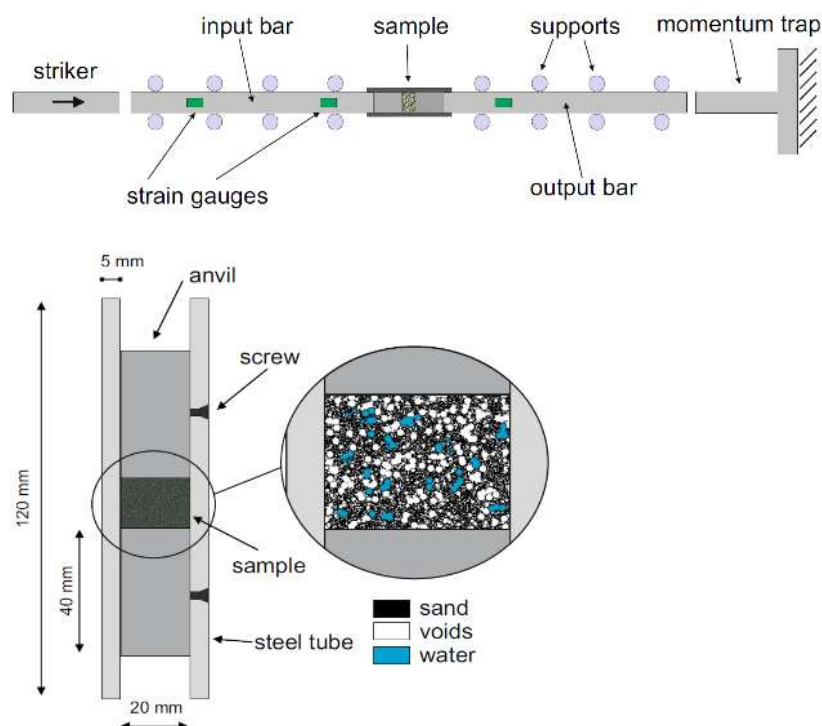


Figure 16. Split Hopkinson pressure bar system with soil specimen (reprinted from Ref. [81]).

(XI)

Test Soil Material: Coral sand

Authors: Dong, K.; Ren, H.; Ruan, W.; Ning, H.; Guo, R.; Huang, K.

Order of Cited Paper: [82]

Highlights/Abstract: The split Hopkinson pressure bar test stand with a measuring bar diameter of 37 mm was used for experiments with two different coral sand samples in order to determine the strain rate dependence under dynamic loading of soil samples. One-dimensional stress–strain plots in various ranges of the strain rate 460 to 1300 s^{−1} were determined as a result. The analysis also used the results obtained from the static machine for the strain rate 10^{−4} s^{−1} two types of coral sand showed different dynamic and static reactions during the experiment. As a conclusion, it was proposed that the susceptibility of a given type of coral sand to the strain rate is significantly dependent and related to the internal structure of grains, soil pores and the phenomenon of inter-particle friction. Additionally, proposed models supporting dynamic numerical calculations of coral sand samples as a result of dynamic impact were presented. SHPB experiment section for coral sand specimen is shown in Figure 17.

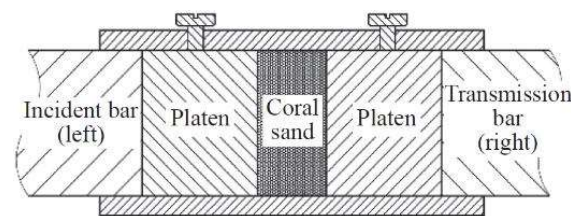


Figure 17. SHPB experiment section for coral sand specimen (reprinted from Ref. [82]).

(XII)

Test Soil Material: Calcareous sand

Authors: Zhao, Z.; Qiu, Y.; Zi, M.; Xing, H.; Wang, M.

Order of Cited Paper: [83]

Highlights/Abstract: As part of the experiment, the split Hopkinson pressure bar test stand was used to determine the effect of different levels of water content in calcareous sand samples under the conditions of one-dimensional state. During the research, the strain rates were obtained in the range of 209–1137 s^{−1}. During the experiment, it was observed that the correctness of the results significantly depends on the observance of the axial condition of the measuring bars and the performance of the calibration procedure of the characteristic parameters (e.g., sensitivity coefficient) of the set of measuring strain gauges located on the measuring bars. In the study, calcareous sand samples in the water unsaturation variant (low water moisture in the sample) were analyzed in detail, and a proposal of a dynamic behavior model was presented as a result of the stress–strain curve analysis. The impact of the limit strain value of 0.025 on the tangential modulus was observed in the tested soil type—the tangential modulus value was lower for the dry sample than for the wet sample for strain <0.025, and the tangential modulus value was greater for the dry sample than for the wet sample for strain >0.025. Schematic view of SHPB test stand is shown in Figure 18.

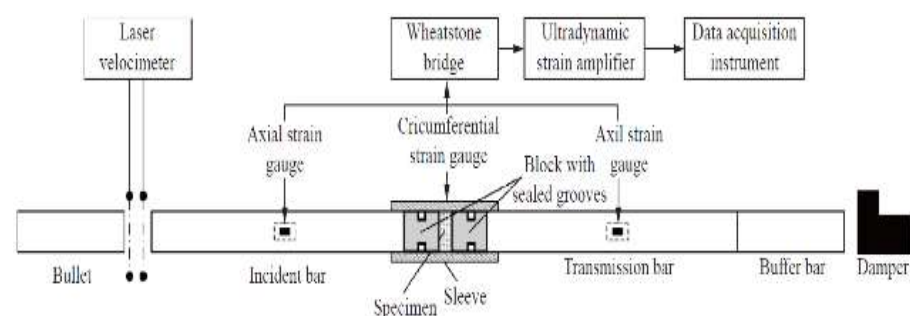


Figure 18. Schematic view of SHPB test stand (reprinted from Ref. [83]).

(XIII)

Test Soil Material: Calcareous sand

Authors: Lv, Y.; Li, X.; Wang, Y.

Order of Cited Paper: [84]

Highlights/Abstract: When conducting experiments using the Hopkinson technique at high strain rates, the phenomenon of dividing into smaller parts of angular and porous soil grains takes place—in this study, calcareous sand was analyzed. In addition to observing this process, it is also worth quantifying how many grains it concerns. A series of tests were performed and analyzed using the split Hopkinson pressure bar test stand to discuss how various variable conditions in the test (impact energies, relative densities, water moisture content and particle gradations) affect the phenomenon of calcareous sand grain breakage. It was observed that the process of grinding and reordering the soil grain structure continues during the entire dynamic loading process—it results from the analysis of the stress–strain curve of the tested soil sample in an almost linear form. The parameter relating to the particle breakage depends in an exponential way on the value of the impact energy of the bar projectile. In the beginning, for a soil sample with a low water content, a decrease in the particle breakage phenomenon is observed; a further increase in the soil moisture level causes an increase in the occurrence of particle breakage during the observation. The result of the study is also the conclusion that (a) for calcareous sand samples when saturated with water, larger-diameter particles are damaged more, and those with small diameter are less damaged, and (b) for calcareous sand samples with low water saturation or dry, particles with a small diameter are more damaged in the process, while those of a larger diameter are less damaged. SHPB test system with sand specimen is shown in Figure 19.

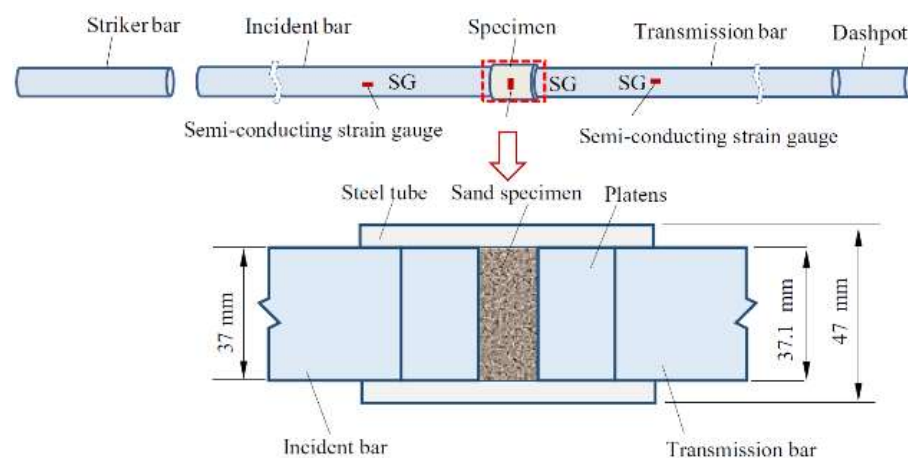


Figure 19. SHPB test system with sand specimen (reprinted from Ref. [84]).

(XIV)

Test Soil Material: Frozen soil

Authors: Zhang, F.; Zhu, Z.; Fu, T.; Jia, J.

Order of Cited Paper: [85]

Highlights/Abstract: The paper deals with the subject of dynamic mechanical properties as a result of tests using the split Hopkinson pressure bar test stand under HSR conditions for an experiment with a soil sample in the variant of a reduced temperature (frozen soil). The study focused on the process of changing the wave impedance value for the case of a frozen soil sample. A concordance was observed between the viscoelastic theory record and the wave impedance increase experiment when the sample was prepared by freezing. The indicated phenomenon results from the relaxation of water that has not been completely frozen—it results in an increase in the maximum stress values as a result of a dynamic bar impact on a frozen soil sample. The work used the effective medium theory by taking into

account the macroscopic parameter (velocity of the propagated wave) and the mesoscopic parameter (random or vertical microcrack mesh density), assuming the variable damage as the longitudinal wave propagation speed. The Zhu–Wang–Tang model was included in the dynamic analysis, which, for the Maxwell element (in the form of low-frequency parameters) in the assumed conditions of a frozen soil sample, did not finally fulfill the properties of a simple spring—this correlates with the observed macroscopic properties of the soil sample in the freezing variant. The result of the work was the development of a dynamic constitutive model for the analyzed soil type in the frozen sample variant (empirical and experimental results are comparable). Split Hopkinson pressure bar system is shown in Figure 20.

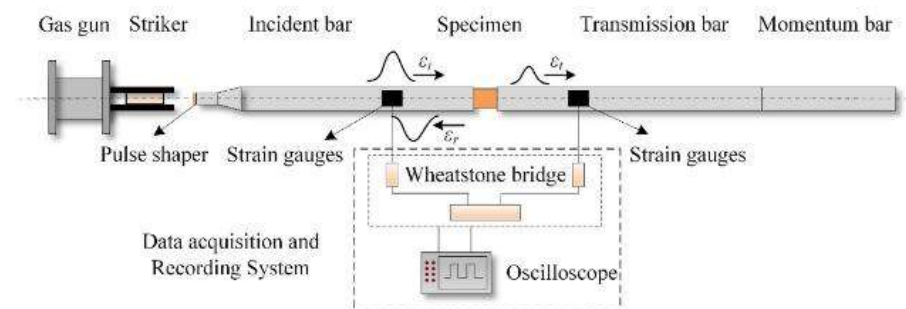


Figure 20. Split Hopkinson pressure bar system (reprinted from Ref. [85]).

- 2021

(XV)

Test Soil Material: Silty sand

Authors: Chmielewski, R.; Kruszka, L.; Rekucki, R.; Sobczyk, K.

Order of Cited Paper: [71]

Highlights/Abstract: Silty sand was subjected to a dynamic impact bar on a split Hopkinson pressure bar test stand. The aim of the experiment was to obtain the dependence graphs of stress–strain curves and strength dynamic parameters under changing conditions: (a) different strain rate values and (b) different values of water moisture in the sample. In the study, the possibility of sideways deformation of the sample was limited by sufficiently high tube/casing stiffness, obtaining oedometric conditions. A sieve analysis of the soil sample was performed, and the percentage content of individual fractions was determined—the largest percentage is the fine fraction. The use of the analyzed silty sand sample in a rigid casing/tube made of duralumin material allows the assumption of uniaxial deformation conditions in the experiment. The digital data recording was transferred to the computer through the use of a set of strain gauges on each of the two bars that were elements of the test stand (initiating bar and transmitting bar). An additional set of strain gauges was also glued onto the rigid casing/tube for peripheral results. During the experiment, the nature and values of the curves of three types of waves were determined—incident, reflected and transmitted waves created as a result of a dynamic impact with a bar. Soil samples of dominant sandy fractions and silts showed different density values in the standard optimal humidity test (Proctor test) than in the case of dynamic compaction under HSR (high strain rate) conditions. The cause of the phenomenon is a change in the type of soil particles through the fracture mechanism of the soil structure as a result of a large increase in the damage energy balance from bar impact. A unique element of the work was that it carried out and showed the results through a particle size distribution test curve for two different types of silty sand samples. Detailed view with the sample in contact with the fronts of both measuring bars is shown in Figure 21.

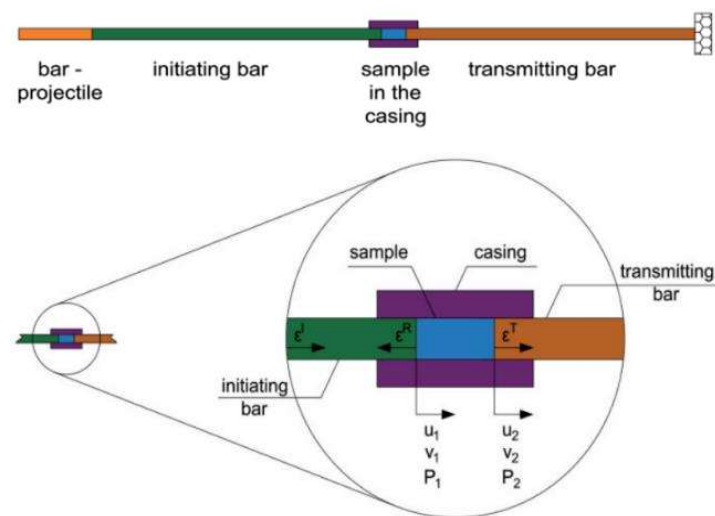


Figure 21. Detailed view with the sample in contact with the fronts of both measuring bars (reprinted from Ref. [71]).

(XVI)

Test Soil Material: Frozen soil

Authors: Zhu, Z.; Fu, T.; Zhou, Z.; Cao, C.

Order of Cited Paper: [86]

Highlights/Abstract: An important area in the construction industry is the influence of temperature (e.g., the situation between summer and winter) on dynamic reactions resulting from the influence of dynamic load. The study analyzed the dynamic mechanical properties of the soil sample in the freezing variant—soil samples with a water content of 20% and freezing temperatures of different values were tested on a split Hopkinson pressure bar test stand, where the soil was impacted by a dynamic bar projectile. The research on the dynamic reaction focused on two areas: (a) increase in the temperature of the soil sample and (b) mechanism of the failure process. During the development of the experiment results, the Ottosen model was used, including the assumptions and conditions of thermal activation theory, and consequently, the rate damage equation was determined. The final conclusion was the recommendation that an improved non-linear mode should be used for the dynamic and mechanical analysis of soil. General view of SHPB test system is shown in Figure 22.

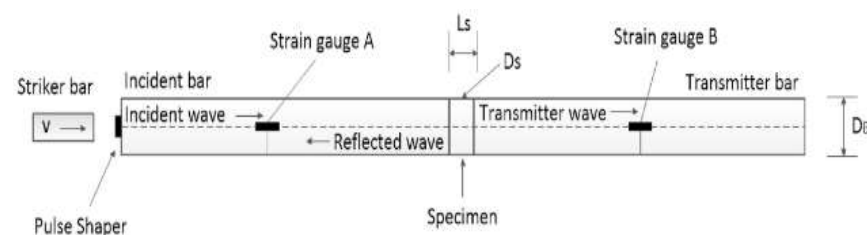


Figure 22. General view of SHPB test system (reprinted from Ref. [86]).

(XVII)

Test Soil Material: Sandy soil

Authors: Li, T.; Li, G.; Ding, Y.; Kong, T.; Liu, J.; Zhang, G.; Zhang, N.

Order of Cited Paper: [87]

Highlights/Abstract: The paper analyzes sandy soil samples—it is a type of soil that often occurs in nature as a type of geotechnical material. Based on the tests on the SHPB test stand, the variable test conditions were analyzed, such as soil sample moisture and soil sample compaction value on the response of dynamic mechanical properties as a result of the dynamic load of the bar projectile. It was observed that dry or low-water sandy

soil samples for the strain rate values between 500 and 2200 s⁻¹ were characterized by an increase in the dynamic reaction. The dynamic response can be enhanced by changing the sample conditions—higher water content in the soil (sample hydration) and a higher degree of compaction (additionally densifying the sample). It was shown that the results of the experiment for the soil with comparable values of the compaction degree of 97.5% and 100% had no significant differences; only significant deviations in the results were observed when comparing these values with 95%. It was also observed that the degree of humidity at the level of 15% causes an increase of about two times the dynamic mechanical properties in comparison with the soil samples with low water content. Another important factor is the type of the sleeve material—the sandy soil sample shows a different response to the dynamic impact of the bar projectile between the situation with the steel sleeve and the aluminum sleeve. The phenomenon is a result of the conditions for the triaxial stress state and the level of the Poisson's ratio value—assuming the same strain rate value, the sandy soil sample in the steel sleeve will show fewer dynamic properties than the sandy soil sample in the aluminum sleeve. Schematic view of SHPB test stand and a specimen are shown in Figure 23.

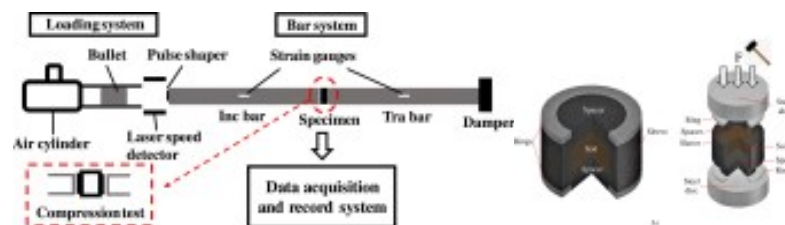


Figure 23. Schematic view of SHPB test stand and a specimen (reprinted from Ref. [87]).

(XVIII)

Test Soil Material: Frozen soil

Authors: Li, B.; Zhu, Z.; Ning, J.; Li, T.; Zhou, Z.

Order of Cited Paper: [88]

Highlights/Abstract: The paper focuses on the analysis of the effect of the complex freezing–thawing process for the values of dynamic mechanical properties of soil samples subjected to dynamic loading from a bar projectile/striker impact. The experiment used a split Hopkinson pressure bar test stand with a soil sample and a variable in the form of the number of freeze–thaw cycles performed and different temperature levels of these cycles. A significant influence of the number of performed freezing–thawing complex processes on the dynamic reaction of the soil sample was observed. The following results were observed on the basis of the test cycle: (a) the greater the number of freeze–thaw cycles, the lower the maximum stress values in the soil sample; (b) the limit number of freeze–thaw cycles for a balanced state of stress values in the sample is in range from 3 to 7; and (c) the lower the sample temperature in the freeze–thaw cycle, the lower the maximum stress values achieved. The study combined the discretized Zhu–Wang–Tang model and the theory of plasticity according to the condition of the plastic Drucker–Prager criterion. As a result of this integration, a constitutive model was developed taking into account the viscoelastic-plastic character area of the soil model dynamically loaded with a bar impact in the range of variable temperature conditions of the freeze–thaw cycle process. Finally, the results of the SHPB test were confirmed with the constitutive model developed. Research procedure of the conducted SHPB experiment is shown in Figure 24.

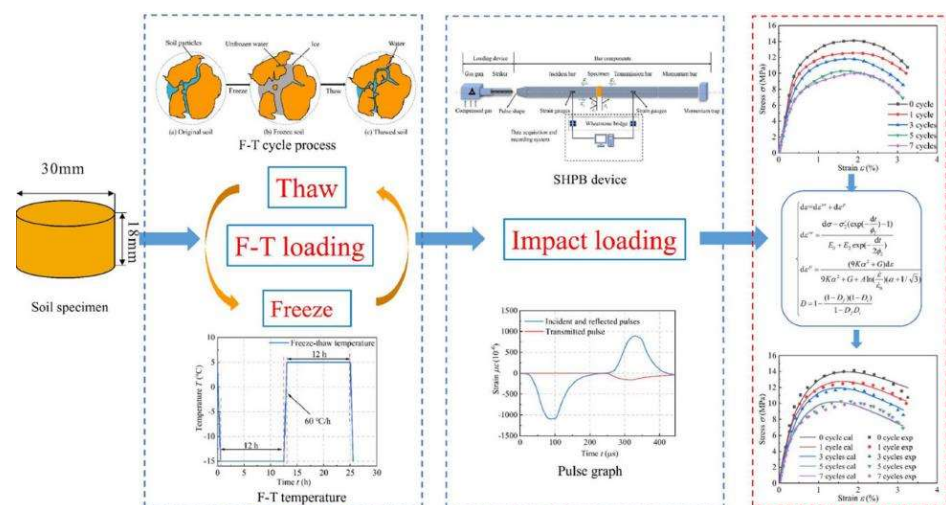


Figure 24. Research procedure of the conducted SHPB experiment (reprinted from Ref. [88]).

(XIX)

Test Soil Material: Frozen soil

Authors: Jia, J.; Tang, H.; Chen, H.

Order of Cited Paper: [89]

Highlights/Abstract: The paper presents the results of the experiment carried out on the basis of the split Hopkinson pressure bar test stand for various strain rates with the use of a soil sample in a variable temperature variant—the sample was frozen. The result of the research is a graphical plot of the stress–strain variability in the analyzed soil sample dynamically loaded with bar projectile. It was observed that during the test of a frozen soil sample with a dynamic load caused by a bar impact, the shear fracture phenomenon appears near the elastic limit. As a result, the ability of water to maintain bearing capacity (in frozen form—ice) in the pores of the soil is significantly lost. The role of stress transmission is mainly performed by the soil skeleton. In addition, it was established that there is a visible relationship between the strain rate values and the levels of freezing temperature used for the experiment, affecting the results of the study in the form of dynamic mechanical properties in soil samples. It was observed that (a) soil parameters' secant modulus, elastic modulus and strength increase their values for the case of an increase in the loading strain rate value; (b) soil parameters secant modulus, elastic modulus and strength increase their values when the freezing temperature of a soil sample is lowered; and (c) as a result of a dynamic impact of a bar projectile on the sample: strain of the soil sample, damage propagation and the process of phase transformation of melting from ice into water by providing additional energy. General view of SHPB system is shown in Figure 25.

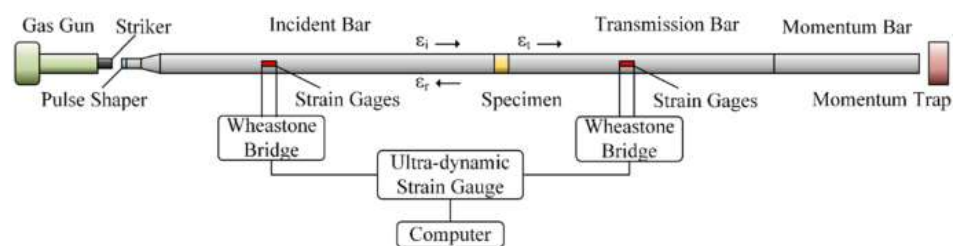


Figure 25. General view of SHPB system (reprinted from Ref. [89]).

5. Discussion

This paper focuses mainly on tests with measuring bars in the compression module. However, this method does not allow us to find out the full characteristics of the tested

sample. In tests using the Hopkinson technique, various modules of the Hopkinson bar can be used to determine the dynamic mechanical properties of the tested soil samples (or other samples, e.g., steel, concrete, ceramics)—the appropriate module should be selected depending on the type of sample of the tested material and the results sought:

- Compression;
- Tension;
- Shear;
- Crack resistance;
- Dynamic friction;
- Hardness (penetration);
- Bauschinger effect;
- Brazilian test (splitting test).

The main focus of this review in Section 4 is the compilation of selected experiments using the compression module through dynamic testing using the split Hopkinson pressure bar in the 1D configuration. The 1D configuration is more often used and more common in various universities/research centers around the world than the 3D configuration—it can be noticed by comparing the highlights/abstracts from Section 4. The limitations of using the Hopkinson technique are shown in Table 1—the key is the strain rate expected to be obtained by the researcher. For Hopkinson’s technique, the strain rate range is between the values 10^2 – 10^4 s^{−1}. In order to determine the mechanical properties of the tested soil sample in other ranges of the strain rate, a different test stand should be used:

- For the range ultra-high strain rate 10^4 – 10^8 s^{−1}—Taylor impact/plate impact;
- For the range medium strain rate 10^0 – 10^0 s^{−1}—hydraulic devices;
- For the range quasi-static and creep and stress relaxation strain rate 10^0 – 10^{-8} s^{−1}—conventional cross-head devices.

Experimental research taking into account the ranges of the strain rate is summarized in Tables 1 and 2.

Analyzing critically the observations and achievements of the publications presented in Section 4, attention should be paid mainly to:

(a) The type of soil used in the tested samples

There is a greater tendency to conduct research in non-cohesive types of soil (mainly sandy) than in cohesive soils:

- Quartz sand—a particularly good analysis was performed in [75], where the conclusion is valuable that before full water-saturated (below 7.5%), additional water did not result in the stiffness of the loose soil. However, after full water-saturated (above 7.5%), additional water in the soil pores increased the stiffness of the loose soil;
- Calcareous sand—a very good analysis was performed in [78], where a valuable note is that after exceeding a certain limit value of the dynamic load, the influence of the initial pressure on the dynamic mechanical properties of the calcareous sand sample was reduced;
- Carbonate sand—a particularly good analysis was performed in [79], where the important conclusion is that the fracture mechanism depends on the level of stress values—the mechanism takes the form of attrition and abrasion for low stress values, but the mechanism for high stress values is fracture;
- Volcanic sand—a particularly valuable analysis was performed in [81], with a conclusion that a sample with a high percentage of water in the pores (water-saturated sample) has a significant dynamic reaction—water behaves like an incompressible material at the moment of dynamic impact, and there is a visible increase in the stiffness phenomenon at the strain of volcanic sand sample;
- Coral sand—a particularly good analysis was performed in [82], where an important observation is that the susceptibility of a given type of coral sand to the strain rate is significantly dependent and related to the internal structure of grains, soil pores and the phenomenon of inter-particle friction;

- Silty sand—a particularly valuable analysis was performed in [71], where a unique element of the work was that it carried out and showed the results through a particle size distribution test curve for two different types of silty sand samples subjected to the same bar-projectile impact.

Particularly valuable are comparative analyses of dynamic research of two or more types of soil:

- In [74], the soil quasi-spherical Ottawa sand, sub-grained Euroquartz Siligran and polyhedral grain-shaped Q-Rok research was conducted, where an innovative achievement of this work is the determination of the effect of intergranular friction on the example of Euroquartz sand with a polymer coating;
- Dynamic calcareous and silica sand studies were performed in [77], where the important conclusion is that experimental soils show opposite behavior in terms of particle size—the larger the particle size, the more noticeable is the opposite process of changes in the void ratio and friction angle as a result of different inter-particle voids and mineral composition in these samples.

On the other hand, a smaller tendency for experiments is visible for cohesive soils; nevertheless, the results are equally important for tests in non-cohesive soils. In [80], dynamic studies of silty clay were performed, where it is worth noting the conclusion that there is a dependence that the higher the value of the axial compressive stress ratio, the stronger the result of the destruction process on the shear surface—for an axial compressive stress ratio of 1.0, the crush failure variant follows.

(b) The level of water content in the tested soil sample

Many experiments cited in this paper showed the influence of water content in the sample on the dynamic mechanical properties of the soil. In all analyzed studies, it was observed that such a dependence of the influence of water in the sample on the results of dynamic soil behavior is true. In the vast majority of studies, the situations between the dry state of the sample and the state of full water saturation in the sample are compared [72]. Experiments with soil samples with several levels of water content are also valuable—in the work of [71], samples with four different levels of water content were tested, where these values were related to the optimal humidity. It can be seen that the level of optimal humidity is a clear border of the different dynamic responses of the non-cohesive soil sample. It is valuable to compare the dynamic reaction of the soil for extreme situations—a dry sample and a sample fully saturated with water. In [72], the key conclusion is that the compacted sand in the variant of complete saturation with water achieves weaker results of shear properties; nevertheless, significant values are still maintained for the dynamic impact interaction velocity. Additionally, in [73], it is important to conclude that sand with partial water saturation depending on the stress–strain reaction shows stiffness increasing together with the initial density of the dry sand sample before water lock-up and stiffness decreases with increasing water saturation in the sample.

(c) Non-standard temperature conditions of the soil sample

As a result of the ongoing climate change, it is crucial to understand soil characteristics, including soil dynamic properties, in various temperature ranges inside the soil sample. The main focus of the research area is focused on experiments with a frozen soil sample. A valuable observation was obtained in [89] that during the test of a frozen soil sample with a dynamic load caused by a bar impact, the shear fracture phenomenon appears near the elastic limit. As a result, the ability of water to maintain bearing capacity (in frozen form—ice) in the pores of the soil is significantly lost. In the area of research with non-standard soil temperature, experiments as part of the complex freezing–thawing process are of particular importance. In [88], unique tests of subjecting a soil sample to dynamic action after carrying out freeze–thaw cycles were performed. The important conclusions from the experiment were that the greater the number of freeze–thaw cycles, the lower the maximum stress values in the soil sample, and the lower the sample temperature in the freeze–thaw cycle, the lower the maximum stress values achieved.

Another research path that allows for dynamic soil experiments is the possibility of using the Hopkinson technique in a 3D configuration—triaxial Hopkinson bar. Publication [90] presents the original version of the research using the Hopkinson technique—the three-dimensional SHPB test stand. The difference of the SHPB test stand between the 1D and 3D configuration is that 1D is one-dimensional dynamic impact and 3D is limited-pressure dynamic impact.

Using a rigid confining casing allows one to achieve a situation where the radial strain values are zero. In this 3D configuration, there is an additional bar—radial bar, which contacts directly and perpendicularly with the surface of rigid confining casing in accordance with Figure 26.

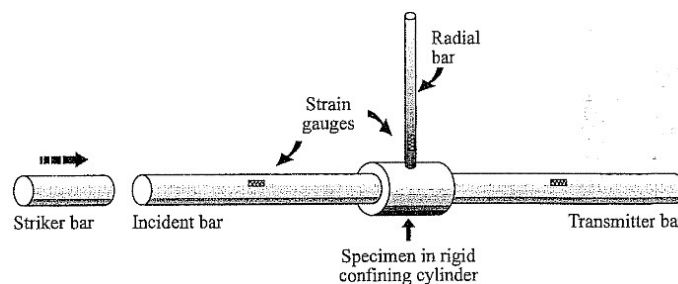


Figure 26. Diagram of the three-dimensional SHPB test stand (reprinted from Ref. [90]).

The equipment in the 3D configuration consists of: two axial measuring bars (initiating bar and transmitting bar), which allow one to measure the forces and displacements of the measuring bars axially in the X direction, and an additional one in the 3D radial bar configuration in the Y direction, which allows one to perform a radial stress measurement during the experiment. The main advantage of the 3D configuration was indicated—it enables the measurement and obtaining a comprehensive three-dimensional soil reaction to the dynamic impact. The dynamic response is more extensive compared to the classic 1D SHPB configuration. Publications [91,92] show another advantage of the 3D configuration as the widespread use of this variant of the experiment to measure the shear strength of a soil sample. It is possible to determine the dynamic characteristics of the soil response to HSR. An example of research on the dynamic behavior of sand samples (in conditions without drainage) was used to determine the influence of strain rate in the stress–strain relation. The main result shows an additional advantage of this configuration and indicates that the dynamic response of the soil sample as a stress–strain relation is more sensitive to the adopted pressure value in the test and not very sensitive to the level of loading rates. The final results in the 3D configuration may be the basis for the development of a constitutive model of this soil as a result of taking into account the triaxial stress state. Publication [93] shows a diagram of a triaxial Hopkinson bar test stand (Figure 27). The equipment is a research system that allows one to perform dynamic experiments in the uniaxial, biaxial and triaxial variants. It is worth noting that the bars are used as three pairs of test bars in three perpendicular directions X, Y and Z. In the X direction, a set of measuring bars (initiating and transmitting) in the 1D configuration is normally located. In addition, there are bars in the Y and Z directions—at their ends, there are load cylinders that limit the pressure in the bars. Figure 28 presents a schematic process of wave propagation: (a) a standard for 1D configuration is provided: ε_I —initiating wave, ε_R —reflected wave, ε_T —transmitting wave; and (b) additional for 3D configuration: ε_{y1} and ε_{y2} —confining wave.

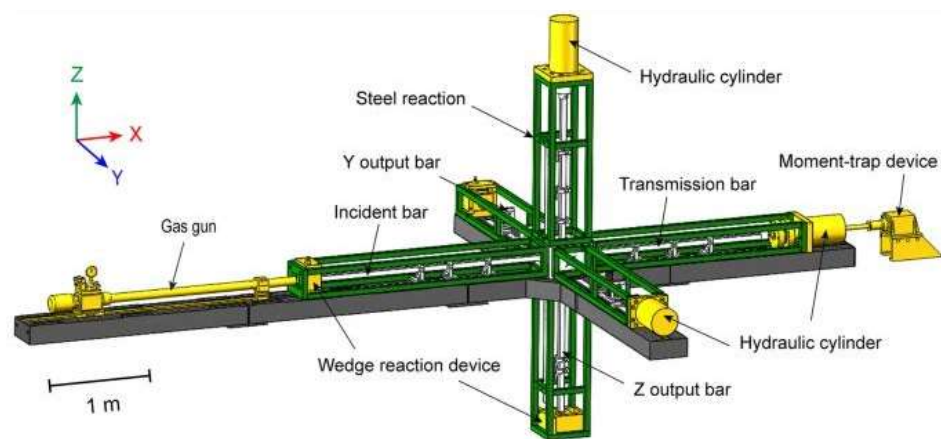


Figure 27. Schematic diagram of the Hopkinson bar triaxial test stand (reprinted from Ref. [93]).

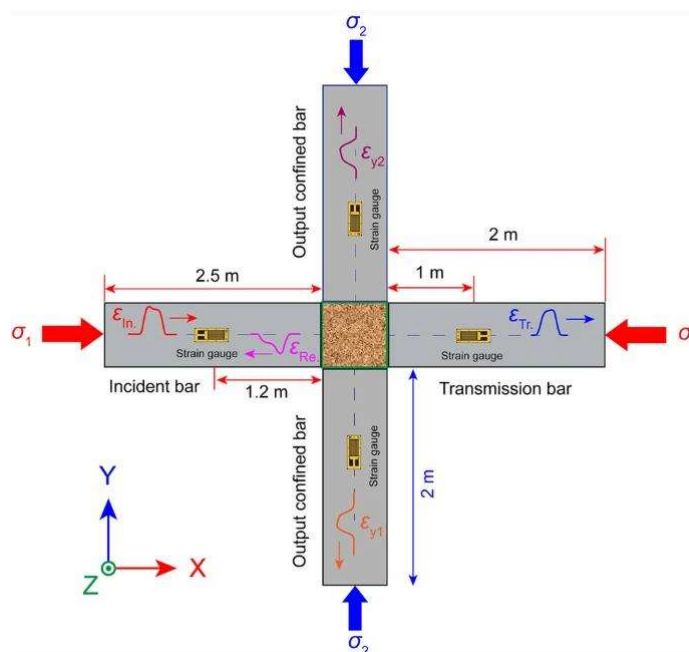


Figure 28. Schematic wave propagation process in 3D configuration (reprinted from Ref. [93]).

The results of the experiments in the triaxial Hopkinson bar configuration expand the research scope of understanding the full and complex dynamic characteristics of the tested soil sample, taking into account the triaxial state of stress in the X, Y and Z directions.

In the work based on the Hopkinson technique, an analysis of the dynamic behavior of soils, in particular sands, was carried out as a phenomenon of a “continuum” nature. The actual real behavior of soil (granular material) subjected to dynamic influence is different—the nature of the phenomenon is related to the particle interaction process in the moment of contact. The results of the multi-scale analysis of dynamic behavior of sands are published, which include analyses assessing the extent to which particle scale characteristics affect the dynamic interactions of the soil [94,95]. The important features that affect the dynamic response of the soil include: contact behavior of sand grains, morphology and origin.

6. Conclusions

The paper presents a literature review of crucial experimental tests of strength properties of soils (both cohesive and non-cohesive) in the area of high strain rates (HSRs) for the purpose of proper selection of structural design solutions for buildings, protective elements and critical infrastructure. In these dynamic physics experiments, the split Hopkinson pressure bar test stand is applicable.

The use of Hopkinson's technique in experiments to determine the dynamic properties of various materials, including cohesive and non-cohesive soils, is limited by the limited range of the strain rate. In order to determine the full characteristics of a given material in different strain rate ranges, tests should be performed based on other measuring devices, e.g., conventional cross-head devices for the quasi-static range. Depending on the dynamic mechanical properties tested and the expected results, it is necessary to select an appropriate test module for measuring bars and sample sizes, e.g., compression, tension and shear. The use of different test-type modules allows for more extended results.

The paper shows the SHPB test stand in 1D and 3D configuration. Sample diagrams are provided which include an additional radial bar in direct contact with the rigid confining casing and perpendicular to the other measuring bars (initiating and transmitting). The main advantage of using the 3D configuration was indicated—the possibility to understand the full triaxial dynamic response of the soil. The analyzed publications confirm the conclusion of the results with the use of the SHPB in the 3D configuration—in the example of sand, a very weak correlation of the initial density parameter value and the strain rate value in the stress–strain relationship was shown, while a strong correlation of the pressure level with the stress–strain relationship was demonstrated.

The paper presents a review of research patterns of physical experiments from 2018–2021. The current research trends in the area of soils loaded with dynamic interaction as a result of the application of the Hopkinson bar technique are presented. These studies show that the dynamic response of the soil depends on various factors: density, cohesion, moisture content and the grain structure of the soil specimen. Soils are sensitive to the strain rate, e.g., their initial modulus is greater if the specimens are dynamically loaded with a constant value of the strain rate and higher value of the initial density comparing these values to specimens subjected to static loading and dynamic loading with a lower initial density. Moreover, the thickened and saturated soil swells at a high strain rate. “Weaker” soil response to dynamic loads is observed at lower strains with the state of incomplete water saturation, while the “stiff” response occurs at higher strains related to the state of full water saturation (noticeable influence of the water saturation level in the soil specimen). There is also a noticeable increase in the number of SHPB experiments performed in both 1D and 3D versions under modified conditions (frozen/heated soil specimen, different degree of water saturation of the soil specimen) in a wide range of strain rates, which is a large field for further research. In order to determine the constitutive model of the tested soil, it is necessary to extend the research with other equipment in order to be able to determine all the required coefficients and frequencies of the adopted model.

Based on the conducted review of selected experiments with the use of the SHPB test stand in order to determine the dynamic mechanical properties of soil samples, it is possible to notice development trends in this area. It is evident in the 2018–2021 period under investigation that SHPB experiments are carried out in various universities/research centers around the world on many types of cohesive and non-cohesive soil samples—there is a greater research tendency for non-cohesive soil, in particular: quartz sand, calcareous sand, carbonate sand, volcanic sand, coral sand and silty sand. The most common variable in the research is the change in the water content in the soil sample—the research mainly analyzed the dynamic behavior of the soil in extreme moisture cases: dry soil and soil fully saturated with water. Less frequently, the investigators analyzed the dynamic behavior of the soil for several step changes in the water content levels in the sample (together with the determination of the optimal moisture value).

Based on the conducted review of experiments, the probable prospect of research development can be defined as:

- Further research work based on the SHPB test stand in the 1D configuration for various types of cohesive and non-cohesive soils (in particular for less common types of soil, which are insufficiently tested so far);

- Increasing the number of SHPB test stands in 3D configuration at universities/scientific institutions in the world in order to understand the full triaxial behavior of dynamic soil;
- Due to the advancing climate change in the world, it will be necessary to further understand the dynamic properties of various soils under non-standard temperature conditions and conduct research using the Hopkinson technique for heated and frozen soil samples (in particular, experiments are valuable where the sample is tested in freeze–thaw cycles).

Author Contributions: Conceptualization, K.S. and L.K.; methodology, K.S. and L.K.; formal analysis, K.S. and R.C.; investigation, K.S.; resources, K.S. and R.R.; data curation, K.S. and R.R.; writing—original draft preparation, K.S.; writing—review and editing, K.S., R.C. and L.K.; visualization, K.S.; supervision, R.C. and L.K. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Data available in a publicly accessible repository.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. *Annual Threat Assessment of the US Intelligence Community*; Office of the Director of National Intelligence: McLean, VA, USA, 2021.
2. *The World Climate and Security Report*; International Military Council On Climate And Security: The Hague, The Netherlands, 2021.
3. *The Global Risks Report*; World Economic Forum: Geneva, Switzerland, 2021; ISBN 978-2-940631-24-7.
4. Falta, J.; Zlámal, P.; Adorna, M. Instrumentation of Split Hopkinson Pressure Bar for testing of cellular metallic materials. *Acta Polytech.* **2018**, *18*, 10–14. [\[CrossRef\]](#)
5. Adorna, M.; Zlámal, P.; Fíla, T.; Falta, J.; Felten, M.; Fries, M.; Jung, A. Testing of hybrid nickel-polyurethane foams at high strain-rates using Hopkinson bar and digital image correlation. *Acta Polytech.* **2018**, *18*, 72–76. [\[CrossRef\]](#)
6. Markovsky, P.E.; Janiszewski, J.; Bondarchuk, V.I.; Stasyuk, O.O.; Savvakín, D.G.; Skoryk, M.A.; Cieplak, K.; Dziewit, P.; Prikhodko, S.V. Effect of Strain Rate on Microstructure Evolution and Mechanical Behavior of Titanium-Based Materials. *Metals* **2020**, *10*, 1404. [\[CrossRef\]](#)
7. Panowicz, R.; Janiszewski, J.; Kochanowski, K. Effects of Sample Geometry Imperfections on the Results of Split Hopkinson Pressure Bar Experiments. *Exp. Tech.* **2019**, *43*, 397–403. [\[CrossRef\]](#)
8. Močko, W.; Kostrzewski, C.; Brodecki, A. Influence of anisotropy on the viscoplastic properties of a hot rolled ti6al4v titanium alloy. *Arch. Metall. Mater.* **2018**, *63*, 403–411. [\[CrossRef\]](#)
9. Bragov, A.M.; Konstantinov, A.; Lomuniv, A.K.; Stolyarov, V.V.; Kuznetsov, A.V.; Smakovsky, M.S.; Savenkov, G.G. Features of Dynamic Deformation and Failure of Aluminum Bronze Processed by Laser Surface Treatment. *J. Dyn. Behav. Mater.* **2021**. [\[CrossRef\]](#)
10. Tang, W.; Kang, S.; Liu, Z. Dynamic Compression Deformation and Constitutive Model of Extruded Mg–1Zn–2Y Bar. *Trans. Indian Inst. Met.* **2021**, *74*, 2967–2975. [\[CrossRef\]](#)
11. Chen, G.; Ge, J.; Lu, L.; Liu, J.; Ren, C. Mechanism of ultra-high-speed cutting of Ti–6Al–4V alloy considering time-dependent microstructure and mechanical behaviors. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2021**, *113*, 193–213. [\[CrossRef\]](#)
12. Golasinski, K.M.; Janiszewski, J.; Sienkiewicz, J.; Płociński, T.; Zubko, M.; Świec, P.; Pieczyńska, E. Quasi-Static and Dynamic Compressive Behavior of Gum Metal: Experiment and Constitutive Model. *Metall. Mater. Trans. A* **2021**, *52*, 4558–4571. [\[CrossRef\]](#)
13. Su, G.; Liu, Y.; Xiao, X.; Du, J.; Zhang, P.; Shen, X. Influences of Stress State, Temperature, and Strain Rate on Ductility of Pure Iron. *J. Mater. Eng. Perform.* **2021**, *30*, 2036–2046. [\[CrossRef\]](#)
14. Wang, C.T.; He, Y.; Guo, Z.; Huang, X.; Chen, Y.; Zhang, H.; He, Y. Strain Rate Effects on the Mechanical Properties of an AlCoCrFeNi High-Entropy Alloy. *Met. Mater. Int.* **2021**, *27*, 2310–2318. [\[CrossRef\]](#)
15. Simoncini, M.; Forcellese, A.; Mancini, E.; Chiappini, G.; Sasso, M. Experimental and numerical investigation on forming limit curves of AA6082 aluminum alloy at high strain rates. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2021**, *112*, 1973–1991. [\[CrossRef\]](#)
16. Sharma, S.; Samal, M.K. Experimental Investigation of Strain-Rate- and Temperature-Dependent Mechanical Properties of SA516Gr.70 Steel and Development of an Appropriate Material Model. *J. Mater. Eng. Perform.* **2021**, *30*, 116–130. [\[CrossRef\]](#)
17. An, H.M.; Liu, L. Numerical study of dynamic behaviors of concrete under various strain rates. *Arch. Civ. Eng.* **2019**, *65*, 21–36. [\[CrossRef\]](#)

18. Hu, S.; Tang, H.; Han, S. Energy Absorption Characteristics of PVC Coarse Aggregate Concrete under Impact Load. *Int. J. Concr. Struct. Mater.* **2021**, *15*, 26. [\[CrossRef\]](#)
19. Wu, Z.; Zhang, J.; Yu, H.; Fang, Q.; Chen, L.; Yue, C. Experimental and mesoscopic investigation on the dynamic properties of coral aggregate concrete in compression. *Sci. China Technol. Sci.* **2021**, *64*, 1153–1166. [\[CrossRef\]](#)
20. He, Y.; Gao, M.; Xu, D.; Yu, X. Influence of Sub-zero Temperatures on the Dynamic Behaviour of Foam Concrete with Sand. *KSCE J. Civ. Eng.* **2021**, *25*, 3843–3851. [\[CrossRef\]](#)
21. Wang, T.; Song, Z.; Yang, J.; Zhang, Q.; Cheng, Y. A Study of the Dynamic Characteristics of Red Sandstone Residual Soils Based on SHPB Tests. *KSCE J. Civ. Eng.* **2021**, *25*, 1705–1717. [\[CrossRef\]](#)
22. Yu, L.; Zhang, T.; Zhu, Z.; Su, H.; Fan, P.; Wang, Y. Physical and dynamic mechanical behaviors of marble after heat treatment in quasi-vacuum and air-filled environments. *J. Cent. South Univ.* **2021**, *28*, 2770–2785. [\[CrossRef\]](#)
23. Huang, B.; Fu, S.; Xiao, Y. Uniaxial Compressive Behavior of Granite at High Strain Rates. *Rock Mech. Rock Eng.* **2021**, *54*, 4695–4721. [\[CrossRef\]](#)
24. Ke, B.; Zhang, C.; Liu, C.; Ding, L.; Zheng, Y.; Li, N.; Wang, Y.; Lin, H. An experimental study on characteristics of impact compression of freeze–thawed granite samples under four different states considering moisture content and temperature difference. *Environ. Earth Sci.* **2021**, *80*, 661. [\[CrossRef\]](#)
25. Majedi, M.R.; Afrazi, M.; Fakhimi, A. A Micromechanical Model for Simulation of Rock Failure under High Strain Rate Loading. *Int. J. Civ. Eng.* **2021**, *19*, 501–515. [\[CrossRef\]](#)
26. Wang, S.; Xiong, X.; Liu, Y.; Zhou, J.; Du, K.; Cui, Y.; Khandelwal, M. Stress–strain relationship of sandstone under confining pressure with repetitive impact. *Geomech. Geophys. Geo-Energy Geo-Resour.* **2021**, *7*, 39. [\[CrossRef\]](#)
27. Zhu, Q.; Li, D.; Han, Z.; Xiao, P.; Li, B. Failure characteristics of brittle rock containing two rectangular holes under uniaxial compression and coupled static–dynamic loads. *Acta Geotech.* **2021**. [\[CrossRef\]](#)
28. Zhao, Z.; Wu, B.; Zhang, Z.; Yu, W. Impact strength characteristics of granite under combined dynamic and static loading conditions. *Arab. J. Geosci.* **2021**, *14*, 105. [\[CrossRef\]](#)
29. Zhao, H.; Liu, C.; Zhang, J.; Ge, L. Breakage behavior of gravel rock particles under impact force. *Comput. Part. Mech.* **2021**, *8*, 1075–1087. [\[CrossRef\]](#)
30. Li, M.; Mao, X.; Cao, L.; Pu, H. Influence of Heating Rate on the Dynamic Mechanical Performance of Coal Measure Rocks. *Int. J. Geomech.* **2017**, *17*, 04017020. [\[CrossRef\]](#)
31. Xu, J.; Kang, Y.; Wang, Z.; Wang, X. Dynamic Mechanical Behavior of Granite under the Effects of Strain Rate and Temperature. *Int. J. Geomech.* **2020**, *20*, 04019177. [\[CrossRef\]](#)
32. Huang, J.; Xu, S.; Hu, S. Effects of grain size and gradation on the dynamic responses of quartz sands. *Int. J. Impact Eng.* **2013**, *59*, 1–10. [\[CrossRef\]](#)
33. Luo, H.; Cooper, W.L.; Lu, H. Effects of particle size and moisture on the compressive behavior of dense Eglin sand under confinement at high strain rates. *Int. J. Impact Eng.* **2014**, *65*, 40–55. [\[CrossRef\]](#)
34. Bragov, A.M.; Kotov, V.L.; Lomunov, A.K.; Sergeichev, I.V. Measurement of the Dynamic Characteristics of Soft Soils Using the Kolsky Method. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* **2004**, *45*, 580–585. [\[CrossRef\]](#)
35. Song, B.; Chen, W.; Luk, V. Impact compressive response of dry sand. *Mech. Mater.* **2009**, *41*, 777–785. [\[CrossRef\]](#)
36. Frew, D.J.; Forrestal, M.J.; Chen, W. Pulse shaping techniques for testing brittle materials with a split hopkinson pressure bar. *Exp. Mech.* **2002**, *42*, 93–106. [\[CrossRef\]](#)
37. Bragov, A.M.; Grushevsky, G.M.; Lomunov, A.K. Use of the Kolsky method for confined tests of soft soils. *Exp. Mech.* **1996**, *36*, 237–242. [\[CrossRef\]](#)
38. Charlie, W.; Ross, C.; Pierce, S. Split-Hopkinson Pressure Bar Testing of Unsaturated Sand. *Geotech. Test. J.* **1990**, *13*, 291–300. [\[CrossRef\]](#)
39. Luo, H.; Lu, H.; Cooper, W.L.; Komanduri, R. Effect of Mass Density on the Compressive Behavior of Dry Sand under Confinement at High Strain Rates. *Exp. Mech.* **2011**, *51*, 1499–1510. [\[CrossRef\]](#)
40. Parab, N.D.; Claus, B.; Hudspeth, M.C.; Black, J.T.; Mondal, A.; Sun, J.; Fezzaa, K.; Xiao, X.; Luo, S.N.; Chen, W. Experimental assessment of fracture of individual sand particles at different loading rates. *Int. J. Impact Eng.* **2014**, *68*, 8–14. [\[CrossRef\]](#)
41. Junyu, H.; Songlin, X.; Shisheng, H. Influence of particle breakage on the dynamic compression responses of brittle granular materials. *Mech. Mater.* **2014**, *68*, 15–28. [\[CrossRef\]](#)
42. Martin, B.E.; Chen, W.; Song, B.; Akers, S.A. Moisture effects on the high strain-rate behavior of sand. *Mech. Mater.* **2009**, *41*, 786–798. [\[CrossRef\]](#)
43. Wils, L.; Van Impe, P.O.; Haegeman, W. One-dimensional compression of a crushable sand in dry and wet conditions. In *Conference: Geomechanics from Micro to Macro*; Taylor & Francis Group: London, UK, 2015; pp. 1403–1408. ISBN 978-1-138-02707-7.
44. Sobczyk, K.; Kruszka, L.; Chmielewski, R.; Rekucki, R. Performance characteristics of Hopkinson’s set-up pneumatic launcher. *Acta Polytech.* **2021**, *61*, 552–561. [\[CrossRef\]](#)
45. Zhu, Z.W.; Tang, W.R.; Kang, G.Z. Dynamic Deformation of Frozen Soil at a High Strain Rate: Experiments and Damage-Coupled Constitutive Model. *Acta Mech. Solida Sin.* **2021**, *34*, 895–910. [\[CrossRef\]](#)
46. Ma, D.; Xiang, H.; Ma, Q.; Kaunda, E.E.; Huang, K.; Su, Q.; Yao, Z. Dynamic Damage Constitutive Model of Frozen Silty Soil with Prefabricated Crack under Uniaxial Load. *J. Eng. Mech.* **2021**, *147*. [\[CrossRef\]](#)

47. Chai, X.J.; Deng, K.; He, C.F.; Xiong, Y.F. Laboratory Model Tests on Consolidation Performance of Soil Column with Drained-Timber Rod. *Adv. Civ. Eng.* **2021**, *2021*, 6698894. [\[CrossRef\]](#)
48. Ma, B.; Hu, Z.; Li, Z.; Cai, K.; Zhao, M.; He, C.; Chen, Q.; Chen, B.; Huang, H. A Three-Section-Settlement Calculation Method for Composite Foundation Reinforced by Geogrid-Encased Stone Columns. *Adv. Civ. Eng.* **2021**, *2021*, 5576713. [\[CrossRef\]](#)
49. Nurdin, S.; Sawada, K.; Moriguchi, S. Design Criterion of Reinforcement on Thick Soft Clay Foundations of Traditional Construction Method in Indonesia. In *MATEC Web of Conferences*; EDP Sciences: Les Ulis, France, 2019; Volume 258, p. 03010. [\[CrossRef\]](#)
50. Olson, S.J. Eisenhower Bridge North Abutment and Approach Settlement: A Case History of Timber Pile Downdrag and Comparative Downdrag Effect on Steel Piles. In Proceedings of the Geo-Congress 2020: University of Minnesota 68th Annual Geotechnical Engineering Conference, Minneapolis, MN, USA, 25–28 February 2020. [\[CrossRef\]](#)
51. Bragov, A.M.; Igumnov, L.A.; Konstantinov, A.Y.; Kruszka, L.; Lamzin, D.A.; Lomunov, A.K. Methodological aspects of testing brittle materials using the split Hopkinson bar technique. *Strain* **2021**, *57*, e12389. [\[CrossRef\]](#)
52. Rzyńska, G.; Gieleta, R. Effect of Test Velocity on the Energy Absorption under Progressive Crushing of Composite Tubes. *Adv. Sci. Technol. Res. J.* **2020**, *14*, 94–102. [\[CrossRef\]](#)
53. Miedzińska, D.; Gieleta, R.; Małek, E. Experimental study of strength properties of SLA resins under low and high strain rates. *Mech. Mater.* **2020**, *141*, 103245. [\[CrossRef\]](#)
54. Jiang, S.; Shen, L.; Guillard, F.; Einav, I. The effect of cement material properties on the fracture patterns developing within cement-covered brittle sphere under impact. *Acta Geotech.* **2021**, *16*, 763–773. [\[CrossRef\]](#)
55. Zhang, S.; Wang, W.; Liu, K.; Gong, S.; Li, D.; Li, H. Dynamic behavior of coal under true triaxial prestressed by using a Hopkinson bar. *Arab. J. Geosci.* **2021**, *14*, 2094. [\[CrossRef\]](#)
56. Chen, J.; Tao, W.; Pang, S. Impact Testing of 3D Re-Entrant Honeycomb Polyamide Structure Using Split Hopkinson Pressure Bar. *Appl. Sci.* **2021**, *11*, 9882. [\[CrossRef\]](#)
57. Jakkula, P.; Ganzenmueller, G.; Beisel, S.; Hiermaier, S. Investigating slow shock in low-impedance materials using a direct impact Hopkinson bar setup. In *EPJ Web of Conferences*; EDP Sciences: Les Ulis, France, 2021; Volume 250, p. 06009. [\[CrossRef\]](#)
58. Deng, Y.J.; Chen, H.; Chen, X.W.; Yao, Y. Dynamic failure behaviour analysis of TiB2-B4C ceramic composites by split Hopkinson pressure bar testing. *Ceram. Int.* **2021**, *47*, 7. [\[CrossRef\]](#)
59. Ishihara, K. Soil Behavior in Earthquake Geotechnics. In *Oxford Engineering Science Series*; Oxford University Press: Oxford, UK, 1996; Volume 46, ISBN 978-0198562245.
60. Suescun-Florez, E.; Omidvar, M.; Iskander, M.; Bless, S. Review of High Strain Rate Testing of Granular Soils. *Geotech. Test. J.* **2015**, *38*, 20140267. [\[CrossRef\]](#)
61. Field, J.E.; Walley, S.M.; Proud, W.G.; Goldrein, H.T.; Siviour, C.R. Review of experimental techniques for high rate deformation and shock studies. *Int. J. Impact Eng.* **2004**, *30*, 725–775. [\[CrossRef\]](#)
62. Blitterswyk, J.; Fletcher, L.; Pierron, F. Characterisation of the Interlaminar Properties of Composites at High Strain Rates: A Review. *Adv. Exp. Mech.* **2017**, *2*, 3–28. [\[CrossRef\]](#)
63. Siviour, C.R.; Jordan, J.L. High Strain Rate Mechanics of Polymers: A Review. *J. Dyn. Behav. Mater.* **2016**, *2*, 15–32. [\[CrossRef\]](#)
64. Gray, G.T. High-Strain-Rate Deformation—Mechanical Behavior and Deformation Substructures Induced. *Annu. Rev. Mater. Res.* **2012**, *42*, 285–303. [\[CrossRef\]](#)
65. Omidvar, M.; Iskander, M.; Bless, S. Stress-strain behavior of sand at high strain rates. *Int. J. Impact Eng.* **2012**, *49*, 192–213. [\[CrossRef\]](#)
66. Mishra, S.; Chakraborty, T.; Basu, D. High Strain Rate Stress-Strain Response of Soils—A Review. *Jpn. Geotech. Soc. Spec. Publ.* **2015**, *3*, 80–85. [\[CrossRef\]](#)
67. Siviour, C.; Kendall, M.J. Understanding High Rate Behavior through Low Rate Analog. In *Materials Science, Final Report*; Oxford University Department of Engineering Science: Oxford, UK, 2014.
68. Prusty, G.B.; Banerjee, A. Structure–Property Correlation and Constitutive Description of Structural Steels during Hot Working and Strain Rate Deformation. *Materials* **2020**, *13*, 556. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
69. Pająk, M. Dynamic response of SFRC under different strain rates—An overview of test results. In Proceedings of the 7th International Conference Analytical Models and New Concepts in Concrete and Masonry Structures, Kraków, Poland, 5–7 June 2011.
70. Sobczyk, K.; Chmielewski, R.; Kruszka, L. The concept of experimental research on the behavior of sand cover material for protective shelters for civilians. *Saf. Eng. Anthropol. Objects* **2020**, *1*, 11–16. [\[CrossRef\]](#)
71. Chmielewski, R.; Kruszka, L.; Rekucki, R.; Sobczyk, K. Experimental investigation of dynamic behavior of silty sand. *Arch. Civ. Eng.* **2021**, *LXVII*, 481–498. [\[CrossRef\]](#)
72. Bragov, A.M.; Balandin, V.V.; Igumnov, L.A.; Kotov, V.L.; Kruszka, L.; Lomunov, A.K. Impact and penetration of cylindrical bodies into dry and water-saturated sand. *Int. J. Impact Eng.* **2018**, *122*, 197–208. [\[CrossRef\]](#)
73. Wang, S.; Shen, L.; Maggi, F.; El-Zein, A.; Nguyen, G.D.; Zheng, Y.; Zhang, H.; Chen, Z. Influence of dry density and confinement environment on the high strain rate response of partially saturated sand. *Int. J. Impact Eng.* **2018**, *116*, 65–78. [\[CrossRef\]](#)
74. De Cola, F.; Pellegrino, A.; Glöbner, C.; Penumadu, D.; Petrinic, N. Effect of Particle Morphology, Compaction, and Confinement on the High Strain Rate Behavior of Sand. *Exp. Mech.* **2018**, *58*, 223–242. [\[CrossRef\]](#)
75. Barr, A.D.; Clarke, S.D.; Tyas, A.; Warren, J.A. Effect of Moisture Content on High Strain Rate Compressibility and Particle Breakage in Loose Sand. *Exp. Mech.* **2018**, *58*, 1331–1334. [\[CrossRef\]](#)

76. Lv, Y.; Liu, J.; Xiong, Z. One-dimensional dynamic compressive behavior of dry calcareous sand at high strain rates. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* **2019**, *11*, 192–201. [\[CrossRef\]](#)
77. Lv, Y.; Wang, Y.; Zuo, D. Effects of particle size on dynamic constitutive relation and energy absorption of calcareous sand. *Powder Technol.* **2019**, *356*, 21–30. [\[CrossRef\]](#)
78. Wen, S.; Zhang, C.; Chang, Y.; Hu, P. Dynamic compression characteristics of layered rock mass of significant strength changes in adjacent layers. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* **2019**, *12*, 353–365. [\[CrossRef\]](#)
79. Xiao, Y.; Yuan, Z.; Chu, J.; Liu, H.; Huang, J.; Luo, S.N.; Wang, S.; Lin, J. Particle breakage and energy dissipation of carbonate sands under quasi-static and dynamic compression. *Acta Geotech.* **2019**, *14*, 1741–1755. [\[CrossRef\]](#)
80. Ma, D.; Ma, Q.; Yao, Z.; Yuan, P.; Zhang, R. Dynamic Mechanical Properties and Failure Mode of Artificial Frozen Silty Clay Subject to One-Dimensional Coupled Static and Dynamic Loads. *Adv. Civ. Eng.* **2019**, *2019*, 1–9. [\[CrossRef\]](#)
81. Varley, L.; Rutherford, M.E.; Zhang, L.; Pellegrino, A. The Mechanical Response of Wet Volcanic Sand to Impact Loading, Effects of Water Content and Initial Compaction. *J. Dyn. Behav. Mater.* **2020**, *6*, 358–372. [\[CrossRef\]](#)
82. Dong, K.; Ren, H.; Ruan, W.; Ning, H.; Guo, R.; Huang, K. Study on strain rate effect of coral sand. *Explos. Shock. Waves* **2020**, *40*, 093102. [\[CrossRef\]](#)
83. Zhao, Z.; Qiu, Y.; Zi, M.; Xing, H.; Wang, M. Experimental study on dynamic compression of unsaturated calcareous sand. *Explos. Shock. Waves* **2020**, *40*, 023102. [\[CrossRef\]](#)
84. Lv, Y.; Li, X.; Wang, Y. Particle breakage of calcareous sand at high strain rates. *Powder Technol.* **2020**, *366*, 776–787. [\[CrossRef\]](#)
85. Zhang, F.; Zhu, Z.; Fu, T.; Jia, J. Damage mechanism and dynamic constitutive model of frozen soil under uniaxial impact loading. *Mech. Mater.* **2020**, *140*, 103217. [\[CrossRef\]](#)
86. Zhu, Z.; Fu, T.; Zhou, Z.; Cao, C. Research on Ottosen constitutive model of frozen soil under impact load. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **2021**, *137*, 104544. [\[CrossRef\]](#)
87. Li, T.; Li, G.; Ding, Y.; Kong, T.; Liu, J.; Zhang, G.; Zhang, N. Impact response of unsaturated sandy soil under triaxial stress. *Int. J. Impact Eng.* **2021**, *160*, 104062. [\[CrossRef\]](#)
88. Li, B.; Zhu, Z.; Ning, J.; Li, T.; Zhou, Z. Viscoelastic–plastic constitutive model with damage of frozen soil under impact loading and freeze–thaw loading. *Int. J. Mech. Sci.* **2021**, *214*, 106890. [\[CrossRef\]](#)
89. Jia, J.; Tang, H.; Chen, H. Dynamic Mechanical Properties and Energy Dissipation Characteristics of Frozen Soil under Passive Confined Pressure. *Acta Mech. Solida Sin.* **2021**, *34*, 184–203. [\[CrossRef\]](#)
90. Semblat, J.F.; Luong, P.; Gary, G. 3D-Hopkinson Bar: New Experiments for Dynamic Testing on Soils. *Soil Found.* **1999**, *39*, 1–10. [\[CrossRef\]](#)
91. Martin, B.E.; Kabir, M.E.; Chen, W. Undrained high-pressure and high strain-rate response of dry sand under triaxial loading. *Int. J. Impact Eng.* **2013**, *54*, 51–63. [\[CrossRef\]](#)
92. Kabir, M.E.; Chen, W.W. Dynamic Triaxial Test on Sand. *Dyn. Behav. Mater.* **2011**, *1*, 7–8. [\[CrossRef\]](#)
93. Liu, K.; Zhang, Q.B.; Wu, G.; Li, J.C.; Zhao, J. Dynamic Mechanical and Fracture Behaviour of Sandstone Under Multiaxial Loads Using a Triaxial Hopkinson Bar. *Rock Mech. Rock Eng.* **2019**, *52*, 2175–2195. [\[CrossRef\]](#)
94. Casante, G.; Santamarina, J.C. Interparticle Contact Behavior and Wave Propagation. *J. Geotech. Eng.* **1996**, *122*, 831–839. [\[CrossRef\]](#)
95. Senetakis, K.; Payan, M.; Li, H.; Zamanian, M. Nonlinear stiffness and damping characteristics of gravelly crushed rock: Developing generic curves and attempting multi-scale insights. *Transp. Geotech.* **2021**, *31*, 100668. [\[CrossRef\]](#)

Kamil Sobczyk
Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji
Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy badawczej, której wynikiem była publikacja:

Kamil Sobczyk, Ryszard Chmielewski, Leopold Kruszka, Ryszard Rekucki (2021): Strength characterization of soils' properties at high strain rates using the Hopkinson technique - A review of experimental testing, Materials, 15(1), 274, <https://doi.org/10.3390/ma15010274>

mój merytoryczny wkład polegał na:

- 1) realizacji kompleksowego przeglądu aktualnej literatury i bieżących trendów naukowych w analizowanej tematyce;
- 2) analizie oraz wykonaniu zestawienia szybkości odkształcenia i odpowiadającym im eksperymentalnych technik badawczych;
- 3) analizie ogólnej zasady eksperymentu dynamicznego na przykładzie wybranego stanowiska SHPB;
- 4) analizie i zestawieniu bieżących w latach 2018-2021 trendów badań dynamicznych gruntów z wykorzystaniem techniki pręta Hopkinsona wraz z przedstawieniem stosowanych stanowisk SHPB;
- 5) opracowaniu analizy krytycznej przeprowadzonych badań eksperymentalnych ze względu na wykorzystany rodzaj próbki gruntu, wilgotność badanej próbki gruntu oraz niestandardowe warunki temperaturowe próbki gruntu;
- 6) opracowaniu graficznym ilustracji i wykresów oraz współudziale w edycji tekstu manuskryptu;
- 7) podsumowaniu prowadzonych prac badawczych oraz sformułowaniu wniosków końcowych wraz z korektami i odpowiedziami wynikającymi z procesu recenzji.

Oświadczam, że jestem pomysłodawcą i autorem większościowym w/w publikacji.

Publikacja przygotowana w ramach opracowania przeze mnie w roli kierownika projektu wniosku o pozyskaniu funduszy z NCN na zakup materiałów do badań - konkurs Preludium edycja nr 45 (nr rej. wniosku 2022/45/N/ST10/01692).


.....
podpis

Warszawa, 16.07.2022 r.

Ryszard Chmielewski
Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji
Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy badawczej, której wynikiem była publikacja:

Kamil Sobczyk, **Ryszard Chmielewski**, Leopold Kruszka, Ryszard Rekucki (2021): Strength characterization of soils' properties at high strain rates using the Hopkinson technique - A review of experimental testing, Materials, 15(1), 274, <https://doi.org/10.3390/ma15010274>

mój merytoryczny wkład polegał na:

- 1) współudziale w edycji tekstu manuskryptu;
- 2) pełnieniu roli *corresponding author*;
- 3) przedstawieniu propozycji wybranych wniosków końcowych.

.....

.....
podpis

Warszawa, 16.07.2022 r.

Leopold Kruszka
Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji
Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy badawczej, której wynikiem była publikacja:

Kamil Sobczyk, Ryszard Chmielewski, **Leopold Kruszka**, Ryszard Rekucki (2021): Strength characterization of soils' properties at high strain rates using the Hopkinson technique - A review of experimental testing, Materials, 15(1), 274, <https://doi.org/10.3390/ma15010274>

mój merytoryczny wkład polegał na:

- 1) sformułowaniu celów i założeń pracy badawczej związanej z przeglądem badań eksperymentalnych zachowania się budowlanych gruntów sypkich w zakresie wysokich prędkości odkształcenia z wykorzystaniem techniki pręta Hopkinsona;
- 2) opracowaniu metodyki analizy literaturowej ze szczególnym uwzględnieniem układów obciążających próbki badanych gruntów w jednoosiowym stanie odkształcenia i właściwości fizycznych badanych materiałów;
- 3) udziale jako opiekun naukowy w pozyskaniu funduszy z NCN na zakup materiałów do badań w ramach opracowania wniosku do konkursu Preludium edycja nr 45 (nr rej. wniosku 2022/45/N/ST10/01692);
- 4) szczegółowej analizie wyników przeglądu literaturowego z zakresu wpływu wysokich szybkości obciążania na zachowanie się badanych gruntów sypkich w jednoosiowym stanie odkształcenia;
- 5) udziale w opracowaniu manuskryptu artykułu od strony merytorycznej, łącznie z wnioskami końcowymi;
- 6) wspólnym wypracowaniu z zespołem autorskim odpowiedzi i korekt wynikających z procesu recenzji.



.....
podpis

Warszawa, 16.07.2022 r.

Ryszard Rekucki
Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji
Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie

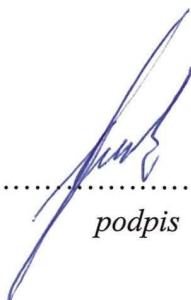
OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy badawczej, której wynikiem była publikacja:

Kamil Sobczyk, Ryszard Chmielewski, Leopold Kruszka, **Ryszard Rekucki** (2021): Strength characterization of soils' properties at high strain rates using the Hopkinson technique - A review of experimental testing, Materials, 15(1), 274, <https://doi.org/10.3390/ma15010274>

mój merytoryczny wkład polegał na:

- 1) nadzorze krytycznym nad realizacją przeglądu aktualnej literatury;
- 2) współudziale w edycji tekstu manuskryptu;
- 3) przedstawieniu propozycji wybranych wniosków końcowych.



.....
podpis

PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF HOPKINSON'S SET-UP PNEUMATIC LAUNCHER

KAMIL SOBCZYK, LEOPOLD KRUSZKA*, RYSZARD CHMIELEWSKI,
RYSZARD REKUCKI

Military University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geodesy, Department of Military Engineering and Military Infrastructure, 2 Gen. Sylwester Kaliski Str., 00-908 Warsaw, Poland

* corresponding author: leopold.kruszka@wat.edu.pl

ABSTRACT. The paper presents a performance characteristics of a pneumatic launcher, which is an important element of the split Hopkinson bar set-up (SHPB) at the Department of Military Engineering and Infrastructure (the Military University of Technology in Warsaw) for the purpose of dynamic strength tests of construction materials. The process of experimental calibration of the launcher for selected loading bar-projectiles is shown. Two types of compression during direct impact tests were also used simultaneously to investigate the behaviour of metallic samples with the use of this launcher as well as the Hopkinson measuring bar: the first — a short cylindrical sample, including a miniature (small diameter) sample, and the second — a long cylindrical sample (Taylor test). The relationships describing the stress and strain state as a function of strain rate for the first type of the experiment and engineering empirical formulas for the second type of the research were given.

KEYWORDS: Pneumatic launcher, Hopkinson measuring bar, direct impact tests.

1. INTRODUCTION

The beginnings of the development of gas launchers are related to a military technology. The design of the pneumatic guns used to launch large-diameter missiles was first presented by D. M. Medford in 1883 in Fort Hamilton (USA). However, the first land-based air cannons designed by the American inventor born in Kórnik (Poland), Major Edmund Żaliński, were installed in 1894 at Sandy Hook Fort in New Jersey. It was a three-gun battery of 15-inch (381 mm) coastal artillery guns operating in a similar way to an air gun: compressed air was used to fire a projectile (explosive charge) [1]. In 1900, Żaliński's triple air gun was installed on the USS Vesuvius, and a twin 8.425 in (214 mm) on the Holland IV submarine, known as Żaliński Boat, designed by Edmund Żaliński and John Holland. The rapid development of fuel and missiles in the late 1890s and early 1900s led to the creation of gunpowder guns and caused pneumatic guns to be substantially phased out from the US Army starting in 1905.

Currently, pneumatic guns are designed to carry out various research impact tests, with various energy possibilities, limited by the diameter and working pressure [2]. Small-diameter systems (up to 70 mm) allow for higher velocities for smaller-mass projectiles, while in medium-diameter solutions (70–150 mm) for objects with larger mass, the muzzle velocity is lower. The greatest drop in speed is recorded for large-diameter devices (over 200 mm).

The small-diameter pneumatic launcher is an important element of the stationary test stand called the split Hopkinson pressure bar SHPB [3]. This stand

is intended for testing the behaviour of samples of construction materials, including construction materials subjected to impact loads [4] and in the field metals [5–9] as well as for concretes [10], polymers, wood, soils [11–15] and other materials [16–18]. Understanding the dynamic strength characteristics of these materials is important for the design of protective structures for buildings, especially in the conditions prone to industrial accidents [19], to ensure safety [20]. With the use of compressed air, the launcher on this test stand allows for throwing projectiles, such as a bar or Hopkinson measuring bars, directly loading the tested metallic sample. U. S. Lindholm used a spring and then a pneumatic 0.5 inch (12.7 mm) launcher in the SHPB test stand for the first time at the beginning of the 1960s [21]. Until then, blasting shots have been used to generate a stress pulse in Hopkinson measuring bars.

The stationary pneumatic launcher, which is an element of the SHPB, intended to test the behaviour of material samples subjected to dynamic (shock) loads, does not meet the statutory definitions of “firearms”, “gun” and “pneumatic weapons” [22]. This means that pursuant to the Act of June 13, 2019 on the performance of economic activity in the field of production and trade in explosives, weapons, ammunition, and products and technology for military or police purposes [23] it is not considered a weapon. However, if the pneumatic launcher in question was designed and intended solely for the production or certification, qualification or testing of products included in Part IV — WT of the Annex to the Regulation [24], then it would be subject to regulation resulting from the provisions of the Act [25]. The contractor of such

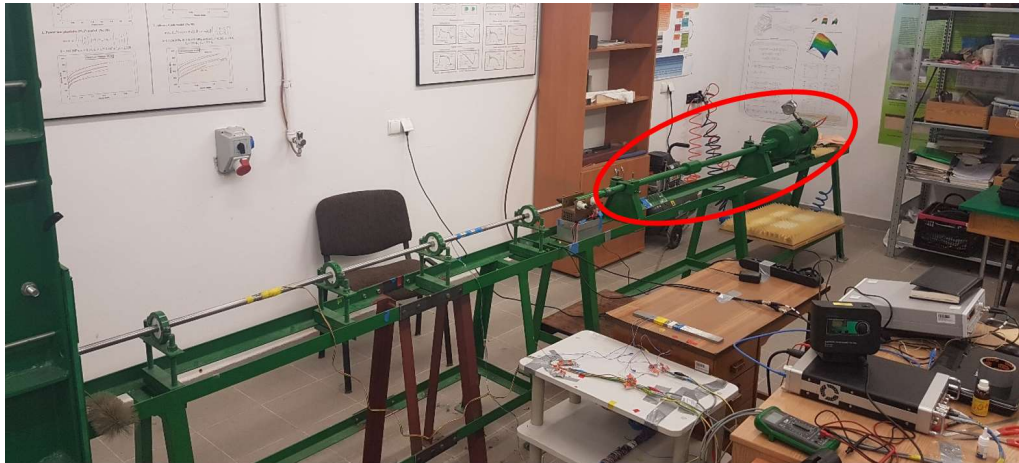


FIGURE 1. General view of the SHPB test stand DMEI (MUT) – on the right side of the test stand, there is a pneumatic launcher (the pressure chamber with the barrel are marked with a red ellipse).

a pneumatic launcher would have to have a license granted by the Minister of the Interior and Administration, at least in the scope of manufacturing and trading in products for military or police purposes specified in WT XIII section 1 or 2 depending on:

- a type of equipment specially designed or modified for the production of products covered by Part IV — WT, and specially designed components thereof;
- the type of a specially designed facility for conducting environmental tests and the type of specially designed equipment for the purpose of certification, qualification or testing of products included in the list contained in Part IV — WT.

At present, the disadvantages of split Hopkinson bars, such as the high air operating pressures to obtain high strain rates, the noise due to the instantaneous air expansion, and a large overall station length, have been eliminated in the electromagnetic Hopkinson bar. It uses the intense pressure created in the magnetic field created by the passage of an electric current pulse through a series of coils. The magnetic field behaves like the release of air from a high-pressure vessel and can impart a high initial velocity to the bar-projectile to obtain very high compressive and strain rates of metallic materials, more than 10^4 1/s. However, for low and medium impact velocities of this projectile, pneumatic launchers are still useful for conducting physical experiments in the range of deformation rates $10^2 - 10^3$ 1/s. They ensure a good reproducibility of obtaining the value of the impact velocity for individual set values of the deformation rate. However, from the point of view of objectivity of dynamic tests, it is necessary to conduct preliminary tests to validate the pneumatic launcher, a so-called calibration procedure, before a series of physical experiments to obtain empirical relationships between the working pressure and the impact velocity for the geometric parameters of the bar-projectile used in further tests, which characterize the performance of this launcher.

This is especially important during various schemes for material impact tests with the use of the pneumatic launcher. The subject of this work is devoted to these issues.

2. CHARACTERISTICS OF THE PNEUMATIC LAUNCHER OF THE SHPB STAND

The subject of the work is a pneumatic launcher included in the split Hopkinson bar testing stand (shown in Figure 1), which is located at the Department of Military Engineering and Infrastructure (DMEI) of the Military University of Technology (MUT) in Warsaw.

The pneumatic launcher consists of a pressure chamber with a capacity of 10 dm^3 with a smooth barrel with a diameter of 20 mm and a length of 2700 mm. Figure 2 shows a general view of the launcher and shows the valve with a digital pressure gauge that feeds the launcher chamber and the valve supplying the space behind the bar-projectile in the barrel.

The launcher in question is fed with compressed air from a compressor to a maximum working pressure $p_{max}=8$ bar. The important elements of this pneumatic system are:

- air compressor type Specair HL 275/50 (Figure 3);
- filter-reducer with a pressure gauge, connected by flexible spiral hoses with the compressor and the pneumatic launcher (Figure 4).

The launcher in question throws bar-projectiles of different lengths, it depends on the conditions of the physical experiment that is carried out on this test stand. Typical bar-projectiles are 100, 200 and 250 mm in length (Figure 5). Detailed parameters of these bar-projectiles are presented in the Table II.

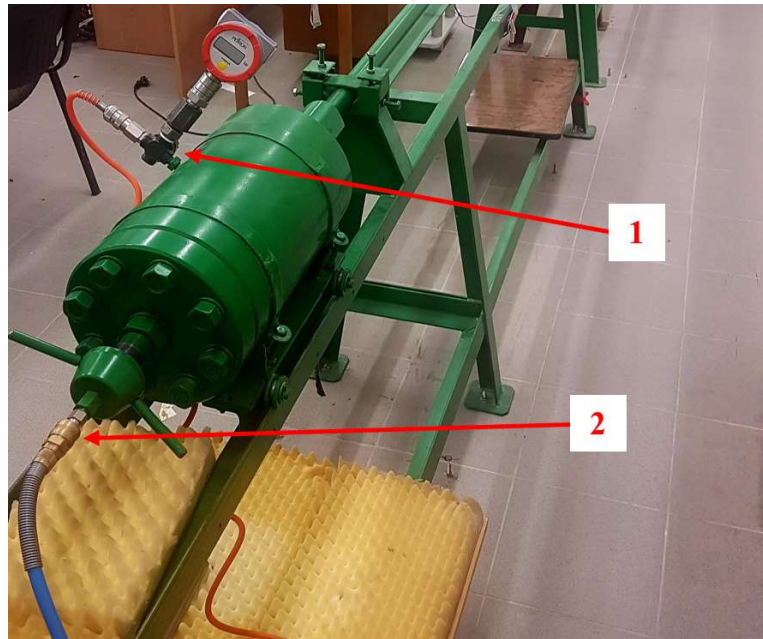


FIGURE 2. General view of the pressure chamber of the pneumatic launcher: 1 – valve with a digital pressure gauge that feeds the launcher chamber, 2 – valve supplying the space behind the bar-projectile in the barrel.



FIGURE 3. Air compressor type Specair HL 275/50.

	Bar-projectile		
	Type 1	Type 2	Type 3
Length L_{bp} [mm]	99.10	199.40	249.80
Weight m_{bp} [g]	234.91	353.72	491.04
Diameter D_{bp} [mm]	19.92	19.97	19.96
Material	Steel C350		
Modulus of longitudinal elasticity material E [GPa]	200		
Wave propagation velocity c_0 [m·s ⁻¹]	5000		

TABLE 1. Detailed parameters of typical bar-projectiles.

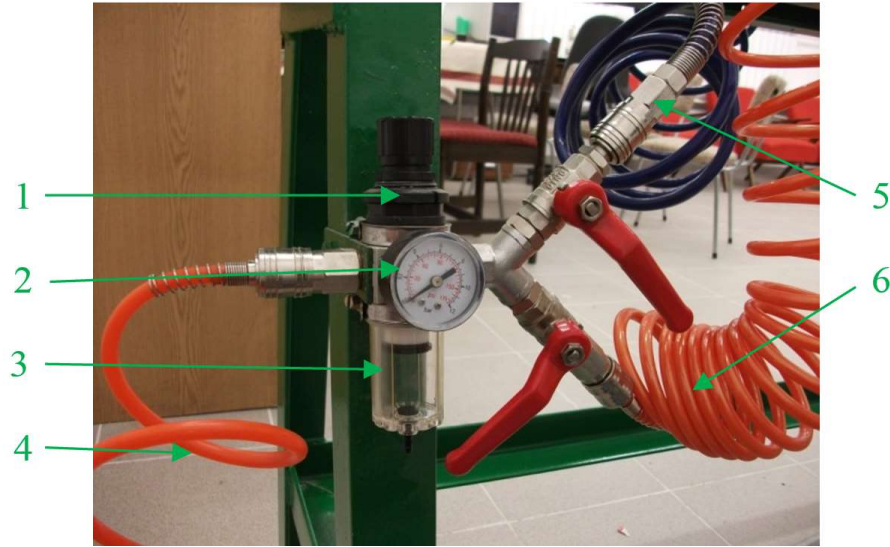


FIGURE 4. Filter-reducer with connections and manometer: 1 – pressure regulator, 2 – pressure gauge, 3 – filter, 4 – spiral tube (connected to the compressor), 5 – spiral tube (connected to the launcher chamber), 6 – spiral tube connected to the barrel part behind the bar-projectile.

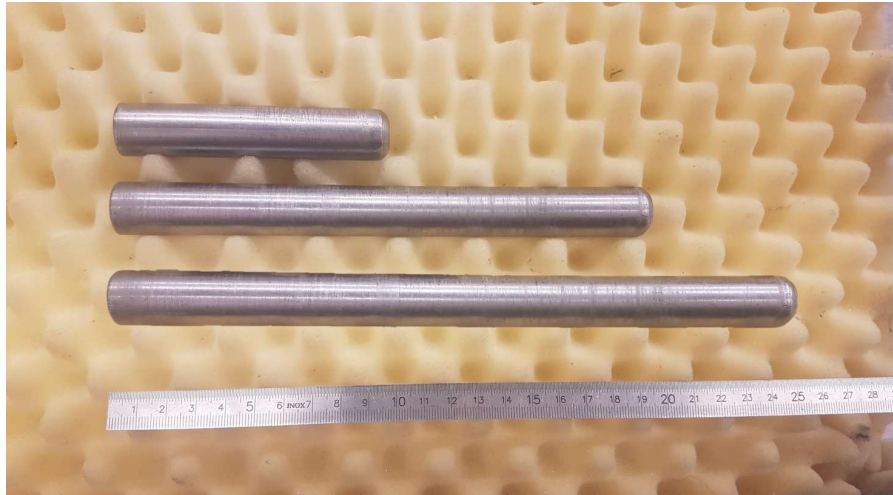


FIGURE 5. Typical bar-projectiles are 100, 200 and 250 mm in length.

3. PNEUMATIC LAUNCHER CALIBRATION PROCEDURE

The pneumatic launcher was calibrated for the bar-projectiles used. This procedure included measurements of the velocity v_0 of the bar-projectile at the moment of leaving the barrel for different lengths L_{bp} of the bar-projectile ($L_{bp1} = 100$ mm; $L_{bp2} = 200$ mm; $L_{bp3} = 250$ mm) in a cycle of five experiments (i = measurement projectile number) in three variants of the operating pressure p_0 of the pneumatic launcher ($p_{01} = 0,5$ bar; $p_{02} = 1,0$ bar; $p_{03} = 1,5$ bar).

The standard deviation for each cycle of five experiments was calculated according to the formula:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

The results of the calibration of the launchers are shown in Table 2.

The results contained in Table 2 are presented graphically as diagrams of the muzzle velocity v_0 of the bar-projectile depending on: a) the working pressure p_0 of the pneumatic launcher and b) the number of the experimental attempt in three variants of the initial pressure p_0 for the length L_{bp} of the bar-projectile:

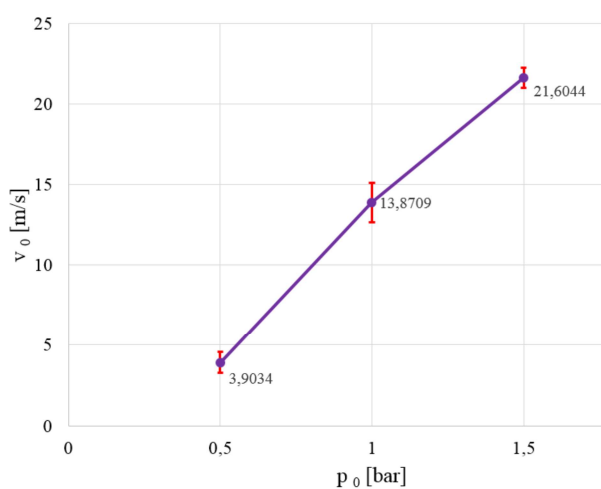
- $L_{bp1} = 100$ mm — Figure 6a and 6b;
- $L_{bp2} = 200$ mm — Figure 7a and 7b;
- $L_{bp3} = 250$ mm — Figure 8a and 8b.

4. IMPACT TESTS WITH THE USE OF AN SHPB PNEUMATIC LAUNCHER

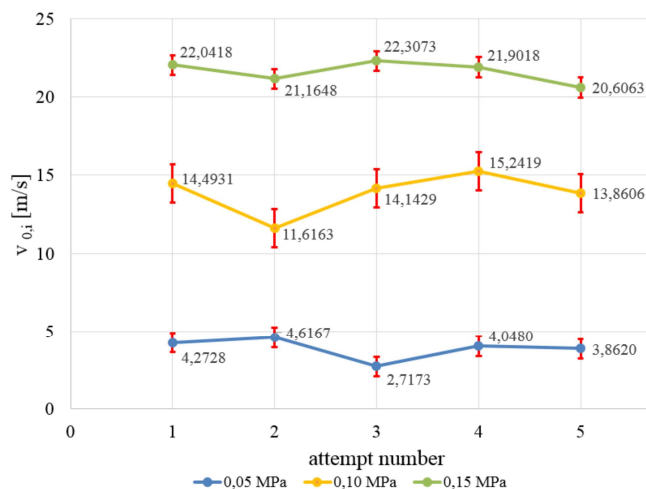
Using the SHPB pneumatic launcher, it is possible to use the schemes of two types of compression impact tests for the purpose of testing the behaviour of

Length L_{bp} of the bar-projectile [mm]	Attempt number	The velocity v_{0i} of the bar-projectile at the moment of exiting the barrel [m/s]		
		$p_{01} = 0.5$ bar (0.05 MPa)	$p_{02} = 1.0$ bar (0.10 MPa)	$p_{03} = 1.5$ bar (0.15 MPa)
100	1)	4.2728	14.4931	22.0418
	2)	4.6167	11.6163	21.1648
	3)	2.7173	14.1429	22.3073
	4)	4.0480	15.2419	21.9018
	5)	3.8620	13.8606	20.6063
Average velocity values v_{0i}		3.9034	13.8709	21.6044
Standard deviation σ_{0i}		0.6442	1.2185	0.6266
200	1)	6.5917	14.3951	19.0846
	2)	7.4256	14.8395	19.0956
	3)	8.1195	14.6096	19.2573
	4)	7.6029	13.7991	19.9091
	5)	8.0451	13.7009	20.1823
Average velocity values v_{0i}		7.5569	14.2688	19.5058
Standard deviation σ_{0i}		0.5488	0.4474	0.4534
250	1)	6.6579	11.9606	16.6895
	2)	7.9015	12.7004	16.7397
	3)	7.6272	12.8853	16.5981
	4)	8.3620	12.1925	16.2739
	5)	9.0590	11.5410	16.5953
Average velocity values v_{0i}		7.9215	12.2560	16.5793
Standard deviation σ_{0i}		0.7964	0.4891	0.1623

TABLE 2. Summary of the obtained muzzle velocities v_{0i} of the bar-projectiles for different variants of the length L_{bp} of the bar-projectile and the working pressure p_0 of the pneumatic launcher.

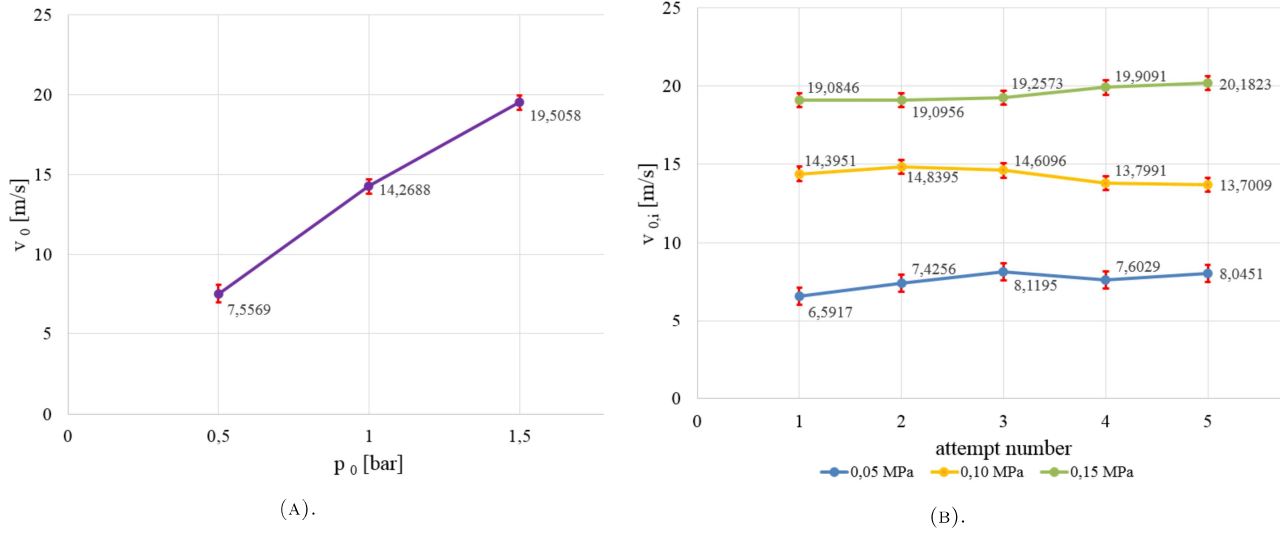
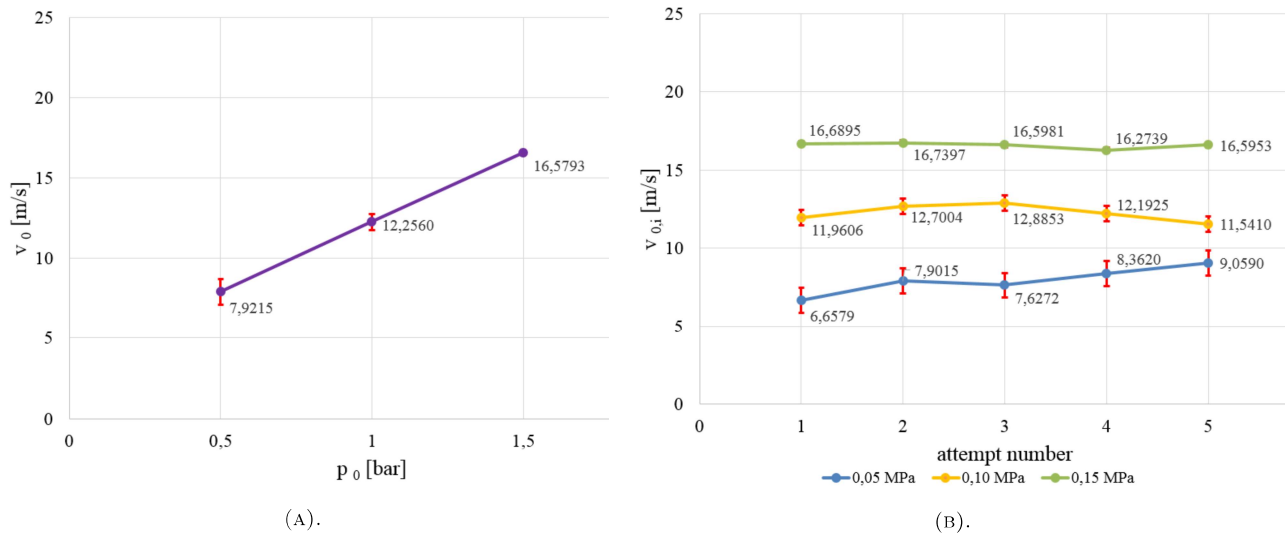


(A).



(B).

FIGURE 6. Dependency graph a) $v_0(p_0)$ and b) $v_{(0,i)}$ (i – number of the experimental attempt) for $L_{bp1} = 100$ mm.

FIGURE 7. Dependency graph a) $v_0(p_0)$ and b) $v_{0,i}$ (i – number of the experimental attempt) for $L_{bp2} = 200$ mm.FIGURE 8. Dependency graph a) $v_0(p_0)$ and b) $v_{0,i}$ (i – number of the experimental attempt) for $L_{bp3} = 250$ mm.

metallic samples: the first — a short cylindrical sample, including a miniature (small diameter) sample, and the second — a long cylindrical sample (Taylor test). Along with the diagrams, the formulas for both variants of direct compression are presented to determine the stress σ_s , strain ε_s and strain rate $\dot{\varepsilon}_s$ in the engineering (nominal) measure, and for the Taylor impact test - empirical formulas for calculating the initial dynamic yield stress proposed by Taylor σ_y^T and Wilkins and Guinana σ_y^{WG} [26] are presented.

(1.) Two variants of direct compression of the first type:

(a) variant I of a miniature sample — with the use of a loading bar-projectile, which, at the moment of impact, has accumulated kinetic energy many times greater than the work of elasto-plastic deformation of this sample; in this case, the speed of the bar-projectile is constant or changes slowly during the entire process of elasto-plastic deforma-

tion of the sample on the front of the Hopkinson measuring bar (Figure 9);

$$v_s(t) = c_{0,H} \cdot \varepsilon_t(t) \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon}_s(t) = \frac{1}{L_1} \cdot [v_0 - v_s(t)] \quad (3)$$

$$\varepsilon_s(t) = \frac{1}{L_1} \cdot \left[v_0 \cdot t - c_{0,H} \cdot \int_0^t \varepsilon_t(t) dt \right] \quad (4)$$

$$\sigma_s(t) = E_H \cdot \left(\frac{D_H}{D_1} \right)^2 \cdot \varepsilon_t(t) \quad (5)$$

where:

- L_1 is initial length of the short cylindrical specimen;

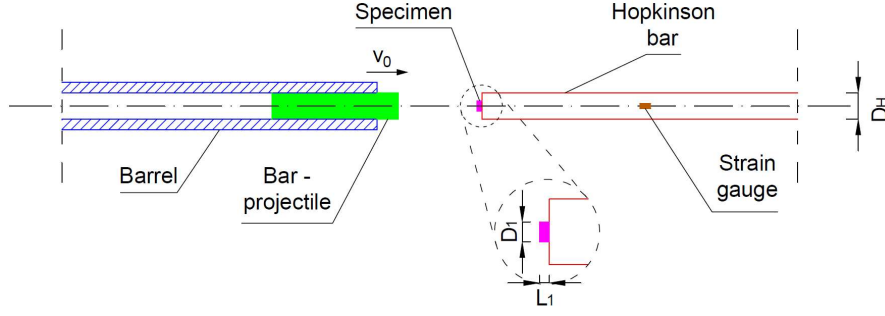


FIGURE 9. Scheme of direct compression in variant I – miniature short cylindrical sample.

- $\varepsilon_t(t)$ is elastic positive incident strain pulse in the measuring Hopkinson bar, registered by a strain gauge after passing the compressive loading wave through the specimen;
- D_H and D_1 are initial diameters of the measuring Hopkinson bar and the specimen, respectively;
- E_H is Young's modulus of the measuring Hopkinson bar;
- c_H is sound velocity in the measuring Hopkinson bar;
- σ_s is engineering stress in the specimen obtained as a function of time in the assumption of equality of forces at the ends of the specimen during the entire deformation process;
- ε_s is engineering strain in the specimen tested;
- $\dot{\varepsilon}_s$ is engineering strain rate of the specimen tested.

(b) variant II - with the use of a bar-projectile with a much lower mass than in variant I (about 50 % mass of a bar-projectile in variant I); the process of dynamic loading of the sample is wave-like in the case of the bar-projectile – sample – Hopkinson measuring bar system (Figure 10);

$$v_s(t) = v_0(t) - 2 \cdot c_{0,H} \cdot \varepsilon_t(t) \quad (6)$$

$$\dot{\varepsilon}_s(t) = \frac{1}{L_2} \cdot [v_0 - 2 \cdot c_{0,H} \cdot \varepsilon_t(t)] \quad (7)$$

$$\varepsilon_s(t) = \frac{1}{L_2} \cdot \left[v_0 \cdot t - 2 \cdot c_{0,H} \cdot \int_0^t \varepsilon_t(t) dt \right] \quad (8)$$

$$\sigma_s(t) = E_H \cdot \left(\frac{D_H}{D_2} \right)^2 \cdot \varepsilon_t(t) \quad (9)$$

where:

signs and symbols as in point 1.1.

(2.) Taylor impact test — a long cylindrical sample-projectile fired by a pneumatic launcher hits directly on the front of a Hopkinson measuring bar and undergoes an inhomogeneous elastic-plastic deformation (Figure 11).

$$\sigma_y^T = \frac{(L_0 - L_{pl}) \cdot \rho \cdot v_0^2}{2 \cdot (L_0 - L_1) \cdot \ln \left(\frac{L_0}{L_{pl}} \right)} \quad (10)$$

$$\sigma_y^{WG} = \frac{\rho \cdot v_0^2}{2 \cdot \ln \left(\frac{L_0 - L_{pl}}{L_1 - L_{pl}} \right)} \quad (11)$$

$$\dot{\varepsilon}_s = \frac{v_0}{2 \cdot (L_0 - L_{el})} \quad (12)$$

where:

- L_0 is initial length of specimen;
- L_1 is compressed (final) length of specimen;
- L_{pl} is length of a section of the specimen along its axis where only plastic deformation occurred;
- L_{el} is length of a section of the specimen along its axis where only elastic deformation occurred;
- σ_y is engineering yield stress (upper index T — according to the Taylor formula, upper index WG — according to the Wilkins and Guinan formulation);
- v_0 is impact velocity;
- ρ is mass density of specimen.

The above formulas describing the real (true) measures of stress σ_t , strain ε_t and strain rate $\dot{\varepsilon}_t$ of the tested samples in variants I and II have the following forms, respectively:

$$\dot{\varepsilon}_t(t) = \frac{\dot{\varepsilon}_e}{1 + \varepsilon_e(t)} \quad (13)$$

$$\varepsilon_t(t) = \ln [1 + \varepsilon_e(t)] \quad (14)$$

$$\sigma_t(t) = \sigma_e(t) \cdot [1 + \varepsilon_e(t)] \quad (15)$$

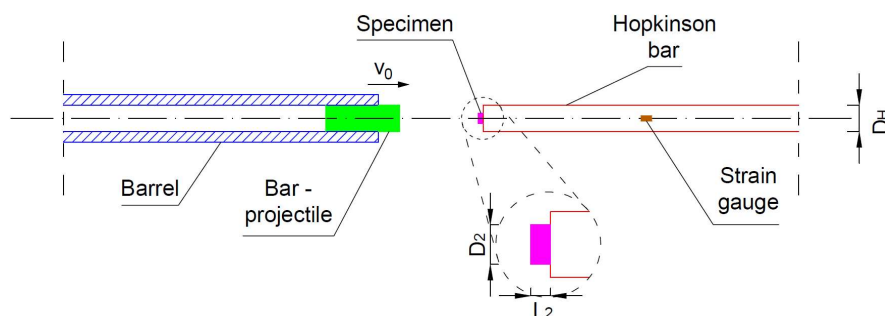


FIGURE 10. Scheme of direct compression in variant II – short cylindrical sample.

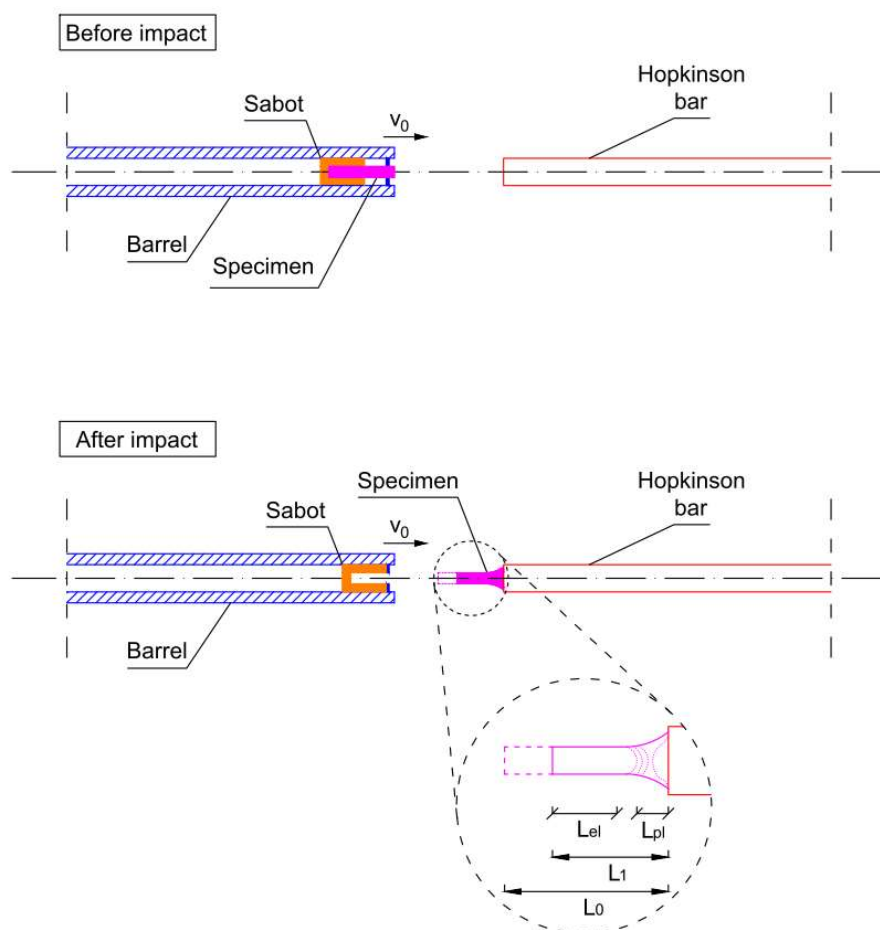


FIGURE 11. The scheme of the Taylor test - a long cylindrical sample before and after the test (isolines of permanent plastic deformations are marked on the longitudinal section of the sample).

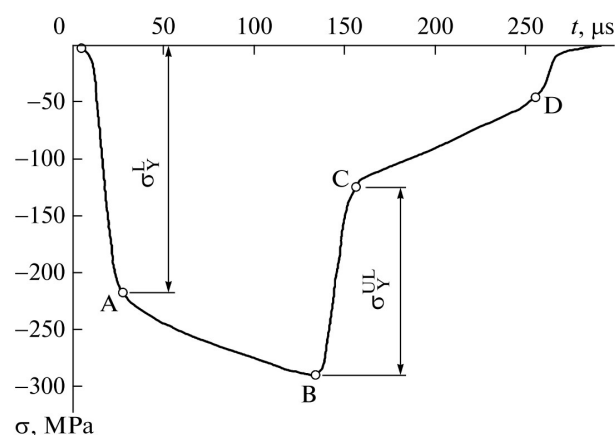


FIGURE 12. A typical course of the elastic strain impulse in the Hopkinson measuring bar for the determination of the yield strength of the tested metal for a dynamic loading σ_y^L and unloading σ_y^{UL} [27].

The direct compression test of a short cylindrical sample (variant II) also allows to determine the dynamic Bauschinger effect δ of the tested metal. The paper [20] presents a method of determining the measure of this effect using this shock test, using the registration of the compressive elastic deformation in time in the Hopkinson measuring bar for this purpose.

Figure 12 shows a typical course of an elastic strain pulse in this measuring rod. From this diagram, the initial dynamic yield limits can be determined: σ_y^L during loading and σ_y^{UL} during unloading – the differences between the points: between 0 and B, and between B and C. The calculation of the dynamic Bauschinger effect δ is determined from the relationship:

$$\delta = \frac{\sigma_y^{UL}}{\sigma_y^L}. \quad (16)$$

5. CONCLUSIONS

The characteristics of the operation of a pneumatic launcher for the purpose of conducting direct impact tests with the use of a bar-projectile and a Hopkinson measuring bar are presented.

The obtained results of the experimental calibration of the pneumatic launcher — loading bar-projectiles characterize the performance of a given essential element of the SHPB set-up, which is significant for conducting various impact direct tests, including the Taylor one.

Schemes of two impact tests with the use of the pneumatic launcher and the Hopkinson measuring bar are presented as noteworthy for dynamic testing of metals in various typical compression modes, which allow to determine their real impact resistance — two variants of direct compression of a short cylindrical sample, including miniature, and a long cylindrical

samples, which can also be used as projectiles in the Taylor test. For these tests, relationships were given that allow to determine the nominal (engineering) and real (true) values of stress σ , strain ε and strain rate $\dot{\varepsilon}$ as well as the initial dynamic yield strength σ_y in the version proposed by Taylor σ_y^T and Wilkins and Guinan σ_y^{WG} . Direct compression of a short cylindrical sample also allows to measure the dynamic Bauschinger effect δ .

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank Marcin Sokolnicki for his assistance in conducting the physical experiments presented in this paper, i.e., the experimental calibration of the pneumatic launcher.

REFERENCES

- [1] D. M. Hansen. Zalinski's dynamite gun. *Technology and Culture* **25**(2):264–279, 1984. <https://doi.org/10.2307/3104714>.
- [2] A. Zbrowski. Badania prototypu działu pneumatycznego. *Problemy Eksploatacji* **3**:217–234, 2011.
- [3] K. Sobczyk, L. Kruszka, R. Chmielewski, R. Rekucki. Selected technical and legal aspects of the pneumatic launcher operation for Hopkinson measuring bars set. *Inżynieria Bezpieczeństwa Obiektów Antropogenicznych* (3):163–172, 2020. <https://doi.org/10.37105/iboa.76>.
- [4] K. Sobczyk, R. Chmielewski, L. Kruszka. The concept of experimental research on the behavior of sand cover material for protective shelters for civilians. *Inżynieria Bezpieczeństwa Obiektów Antropogenicznych* (1):11–16, 2020. <https://doi.org/10.37105/iboa.51>.
- [5] J. Falta, P. Zlámál, M. Adorna. Instrumentation of Split Hopkinson Pressure Bar for testing of cellular metallic materials. *Acta Polytechnica CTU Proceedings* **18**:10–14, 2018. <https://doi.org/10.14311/APP.2018.18.0010>.
- [6] M. Adorna, P. Zlámál, T. Fíla, et al. Testing of hybrid nickel-polyurethane foams at high strain-rates using Hopkinson bar and digital image correlation. *Acta Polytechnica CTU Proceedings* **18**:72–76, 2018. <https://doi.org/10.14311/APP.2018.18.0072>.
- [7] P. E. Markovsky, J. Janiszewski, V. I. Bondarchuk, et al. Effect of strain rate on microstructure evolution and mechanical behavior of titanium-based materials. *Metals* **10**(11):1404, 2020. <https://doi.org/10.3390/met10111404>.
- [8] R. Panowicz, J. Janiszewski, K. Kochanowski. Effects of sample geometry imperfections on the results of split Hopkinson pressure bar experiments. *Experimental Techniques* **43**:397–403, 2019. <https://doi.org/10.1007/s40799-018-0293-7>.
- [9] W. Moćko, C. Kostrzewski, A. Brodecki. Influence of anisotropy on the viscoplastic properties of a hot rolled Ti6Al4V titanium alloy. *Archives of Metallurgy and Materials* **63**:403–411, 2018. <https://doi.org/10.24425/118954>.

- [10] H. M. An, L. Liu. Numerical study of dynamic behaviors of concrete under various strain rates. *Archives of Civil Engineering* **LXV**(4):21–36, 2019. <https://doi.org/10.2478/ace-2019-0044>.
- [11] M. Li, X. Mao, L. Cao, H. Pu. Influence of heating rate on the dynamic mechanical performance of coal measure rocks. *International Journal of Geomechanics* **17**(8), 2017. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000888](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000888).
- [12] Y. Lv, J. Liu, Z. Xiong. One-dimensional dynamic compressive behavior of dry calcareous sand at high strain rates. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* **11**(1):192–201, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.04.013>.
- [13] S. Wen, C. Zhang, Y. Chang, P. Hu. Dynamic compression characteristics of layered rock mass of significant strength changes in adjacent layers. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* **12**(2):353–365, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.09.003>.
- [14] J. Xu, Y. Kang, Z. Wang, X. Wang. Dynamic mechanical behavior of granite under the effects of strain rate and temperature. *International Journal of Geomechanics* **20**(2), 2020. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001583](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001583).
- [15] R. Chmielewski, L. Kruska, R. Rekucki, K. Sobczyk. Experimental investigation of dynamic behavior of silty sand. *Archives of Civil Engineering* **LXVII**(1):481–498, 2021. <https://doi.org/10.24425/ACE.2021.136484>.
- [16] A. M. Bragov, L. A. Igumnov, A. Y. Konstantinov, et al. Methodological aspects of testing brittle materials using the split Hopkinson bar technique. *Strain* p. e12389, 2021. <https://doi.org/10.1111/str.12389>.
- [17] G. Ryzińska, R. Gieleta. Effect of test velocity on the energy absorption under progressive crushing of composite tubes. *Advances in Science and Technology Research Journal* **14**(2):94–102, 2020. <https://doi.org/10.12913/22998624/118551>.
- [18] D. Miedzińska, R. Gieleta, E. Małek. Experimental study of strength properties of SLA resins under low and high strain rates. *Mechanics of Materials* **141**:103245, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2019.103245>.
- [19] A. Papliński. Assessment of threat arising by the exploitation of acetylene. *Inżynieria Bezpieczeństwa Obiektów Antropogenicznych* (3):198–211, 2020. <https://doi.org/10.37105/iboa.78>.
- [20] A. Baryłka. Zagadnienie zdolności obiektów budowlanych do użytkowania w problematyce inżynierii bezpieczeństwa tych obiektów. *Inżynieria Bezpieczeństwa Obiektów Antropogenicznych* (4), 2019. <https://doi.org/10.37105/iboa.31>.
- [21] U. Lindholm. Some experiments with the Split-Hopkinson Pressure Bar. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* **12**(5):317–335, 1964. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(64\)90028-6](https://doi.org/10.1016/0022-5096(64)90028-6).
- [22] Announcement of the Marshal of the Sejm of the Republic of Poland of May 15, 2020, on the publication of the consolidated text of the Act on weapons and ammunition (in Polish). Dz. U. 2020 poz. 955.
- [23] Act of June 13, 2019, on the performance of an economic activity in the field of production and trade in explosives, weapons, ammunition, as well as products and technology for military or police purposes (in Polish). Dz. U. 2019 poz. 1214.
- [24] Regulation of the Council of Ministers of September 17, 2019, on the classification of types of explosives, weapons, ammunition, and products and technologies for military or police purposes, the production or trade of which requires a license (in Polish). Dz. U. 2019 poz. 1888.
- [25] C. M. A. Silva, P. A. R. Rosa, P. A. F. Martins. An innovative electromagnetic compressive split Hopkinson bar. *International Journal of Mechanics and Materials in Design* **5**(3):281–288, 2009. <https://doi.org/10.1007/s10999-009-9101-y>.
- [26] S. J. Hiermaier. *Structures under crash and impact. Continuum mechanics, discretization and experimental characterization*. Springer, 2010. ISBN 978-1-4419-4479-5.
- [27] A. M. Bragov, A. Y. Konstantinov, A. K. Lomunov. Determining the Bauschinger effect using the direct impact technique. *Technical physics letters* **36**(8):694–695, 2010. <https://doi.org/10.1134/S1063785010080043>.

Kamil Sobczyk
Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji
Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy badawczej, której wynikiem była publikacja:

Kamil Sobczyk, Leopold Kruszka, Ryszard Chmielewski, Ryszard Rekucki (2021):
Performance characteristics of Hopkinson's set-up pneumatic launcher, Acta Polytechnica,
61(4), <https://doi.org/10.14311/AP.2021.61.0552>

mój merytoryczny wkład polegał na:

- 1) analizie poszczególnych kluczowych elementów wyrzutni pneumatycznej w ramach stanowiska SHPB;
- 2) opracowaniu procedury kalibracji wyrzutni pneumatycznej dla różnych wariantów długości pręta-pocisku i początkowego ciśnienia roboczego strzału;
- 3) analizie fizycznych eksperymentów zgodnie z opracowaną metodyką kalibracji w oparciu o istniejącą dokumentację techniczno-ruchową stanowiska badawczego;
- 4) analizie i wykonaniu zestawienia porównawczego typowych testów uderzeniowych z wykorzystaniem wyrzutni pneumatycznej stanowiska SHPB;
- 5) opracowaniu graficznym ilustracji i wykresów oraz współudziale w edycji tekstu manuskryptu;
- 6) podsumowaniu prowadzonych prac badawczych oraz sformułowaniu wniosków końcowych wraz z korektami i odpowiedziami wynikającymi z procesu recenzji.

Oświadczam, że jestem pomysłodawcą i autorem większościowym w/w publikacji.

Publikacja przygotowana w ramach opracowania przeze mnie w roli kierownika projektu wniosku o pozyskaniu funduszy z NCN na zakup materiałów do badań - konkurs Preludium edycja nr 45 (nr rej. wniosku 2022/45/N/ST10/01692).


.....
podpis

Warszawa, 16.07.2022 r.

Leopold Kruszka
Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji
Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy badawczej, której wynikiem była publikacja:

Kamil Sobczyk, **Leopold Kruszka**, Ryszard Chmielewski, Ryszard Rekucki (2021):
Performance characteristics of Hopkinson's set-up pneumatic launcher, Acta Polytechnica,
61(4), <https://doi.org/10.14311/AP.2021.61.0552>

mój merytoryczny wkład polegał na:

- 1) opracowaniu metodyki pracy badawczej, w tym formułowanie celów i założeń tej pracy dot. określenia na drodze eksperymentalnej właściwości użytkowych jednokomorowej wyrzutni pneumatycznej prętów-pocisków wykorzystaniem techniki pręta Hopkinsona na potrzeby określenia charakterystyki działania tej wyrzutni dla różnych konfiguracji badawczych określania właściwości dynamicznych materiałów konstrukcyjnych dla różnej geometrii badanych próbek za pomocą techniki pręta Hopkinsona;
- 2) udziale jako opiekun naukowy w pozyskaniu funduszy z NCN na zakup materiałów do badań w ramach opracowania wniosku do konkursu Preludium edycja nr 45 (nr rej. wniosku 2022/45/N/ST10/01692);
- 3) szczegółowej analizie wraz ze współautorami przeprowadzonych fizycznych eksperymentów dla wyznaczenia podstawowej charakterystyki działania tej wyrzutni - prędkości uderzenia pręta-obciążającego w zależności od długości tego pręta (pocisku) i ciśnienia roboczego w komorze wyrzutni;
- 4) udziale w opracowaniu manuskryptu artykułu od strony merytorycznej, łącznie z wnioskami końcowymi;
- 5) występowaniu jako autor korespondencyjny i wypracowaniu z zespołem autorskim odpowiedzi i korekt wynikających z procesu recenzji.

.....
podpis

Warszawa, 16.07.2022 r.

Ryszard Chmielewski
Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji
Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy badawczej, której wynikiem była publikacja:

Kamil Sobczyk, Leopold Kruszka, **Ryszard Chmielewski**, Ryszard Rekucki (2021):
Performance characteristics of Hopkinson's set-up pneumatic launcher, Acta Polytechnica,
61(4), <https://doi.org/10.14311/AP.2021.61.0552>

mój merytoryczny wkład polegał na:

- 1) nadzorze krytycznym realizacji przeglądu aktualnej literatury;
- 2) współudziale w edycji tekstu manuskryptu;
- 3) przedstawieniu propozycji wybranych wniosków końcowych.


.....
podpis

Warszawa, 16.07.2022 r.

Ryszard Rekucki
Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji
Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy badawczej, której wynikiem była publikacja:

Kamil Sobczyk, Leopold Kruszka, Ryszard Chmielewski, **Ryszard Rekucki** (2021):
Performance characteristics of Hopkinson's set-up pneumatic launcher, Acta Polytechnica,
61(4), <https://doi.org/10.14311/AP.2021.61.0552>

mój merytoryczny wkład polegał na:

- 1) nadzorze krytycznym nad opracowaniem procedury kalibracji wyrzutni pneumatycznej dla różnych wariantów długości pręta-pocisku i początkowego ciśnienia roboczego strzału;
- 2) współudziale w edycji tekstu manuskryptu;
- 3) przedstawieniu propozycji wybranych wniosków końcowych.



.....
podpis

Preparation of the non-cohesive soil sample and calibration of the pneumatical launcher in the dynamic soil test SHPB

Kamil SOBCZYK^{*1}, Lepold KRUSZKA¹, Michał GRAŻKA², Ryszard CHMIELEWSKI¹, and Ryszard REKUCKI¹

¹Faculty of Civil Engineering and Geodesy, Military University of Technology, Warsaw, Poland

²Faculty of Mechatronics, Armament and Aerospace, Military University of Technology, Warsaw, Poland

Abstract

The paper analyzes the problem of initial compaction of a non-cohesive soil sample on the example of dry silty sand samples. Two different compaction methodologies were used: I) dynamic compaction - using split Hopkinson pressure bar and II) vibration compaction - using a vibrating shaker. A better result of the compaction process was obtained for dynamic compaction with an initial pressure value of 0.5 bar (small difference in the result - both methods obtained comparable results). The paper also includes a numerical analysis of the calibration of the pneumatic launcher in the Matlab environment on the basis of the system of difference equations. The calibration process was carried out in the initial pressure range from 0.5 to 3.0 bar for three different variants of the bar-projectile length: 100 mm, 200 mm and 250 mm and compared with the experimental analysis - the results were consistent.

Keywords: sample preparation, non-cohesive soil, launcher calibration, soil dynamic testing, split Hopkinson pressure bar

1 Introduction

Research using the Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) test stand allows to learn about the dynamic characteristics of various materials used in construction, including steel, concrete, soil (cohesive and non-cohesive). In this paper, selected aspects of dynamic tests on non-cohesive soil samples are analyzed. Determining the dynamic characteristics of the soil is important in the area of protection of objects of high importance or critical infrastructure [1, 2]. This type of objects usually has a soil layer designed as an additional protective layer or a protective embankment - in a crisis situation the soil may be subjected to a dynamic load as a result of, for example, a shock wave caused by an explosive charge [6]. The publication [9] shows the use of tests based on the SHPB test stand to determine the dynamic characteristics of the soil - non-cohesive soil used as an additional protective layer of the temporary shelter. The effect of the combined phenomenon of a sharp increase in shock wave pressure and smooth relief is defined as a blast wave. Fig. 1 shows the Mach wave propagation scheme (it is a blast wave with a smoothed and uniform course). The Mach wave, according to the definition, is the resultant of an incident and reflected waves with almost even distribution [3].

The temporary shelters (ad hoc type) in their construction have an open casing. In order to increase the level of protection, additional sand covering was used. The role and significance of soil covering were indicated and included in the analysis of prefabricated structure proposals for the protection of critical infrastructure objects in the publication [7].

Proper preparation of the sample and SHPB test equipment is essential prior to testing. The reviews of the SHPB stand layouts together with the marked components and the soil samples used are presented in publications [4, 5, 8].

The aim of this paper is to show the methodology of two different variants of the preliminary preparation of a non-cohesive soil sample for dynamic tests and to perform the numerical and experimental calibration process of the

^{*}**Corresponding author:** E-mail address: (kamil.sobczyk@wat.edu.pl) Kamil SOBCZYK

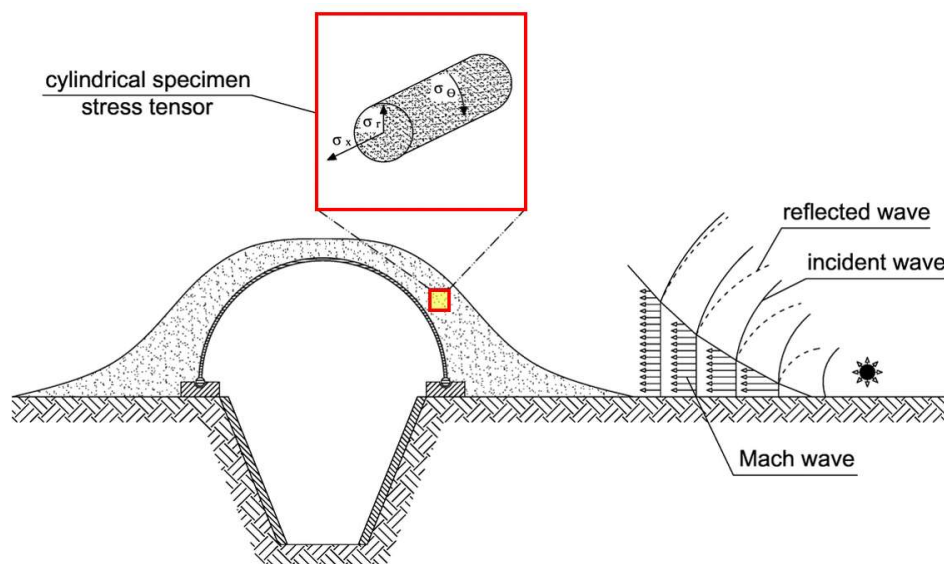


Figure 1. An example of a temporary shelter (ad hoc type) with the Mach wave marked and sand covering specimen with red marked (reprinted from [9]).

pneumatic launcher as an important component of the SHPB test stand.

2 Methodology of preliminary soil sample compaction

In the process of preparing a non-cohesive soil sample for dynamic testing with the use of a split Hopkinson bar, it is important to ensure the initial state of soil compaction. This is an especially important step in the preparation process for dry samples with a low moisture content. Such a sample is in a two-phase or three-phase state - it has a gas phase (most often in the form of air). Failure to carry out the compaction process will result in incorrect results of the experiment - part of the bar-projectile impact energy will be used to thicken the air voids. The authors of the publication analyzed various methods of compaction of the same soil sample on the example of 6.5 g of silty sand (detailed characteristics of the type of soil used and other tests of this soil are shown in the publication [8]):

I. Dynamic compaction (using SHPB)

The compaction of the sample is carried out on the same SHPB test stand, which is then used to conduct the experiment. The tests are carried out for various variants of the bar-projectile velocity as a result of the initial pressure work from the pneumatic launcher (e.g. 2 bar, 3 bar, 5 bar). On the SHPB test stand used by the authors of the publication for the current design of the pneumatic launcher, for technical reasons (including friction in the barrel), it is possible to initiate a bar-projectile movement with a minimum pressure value of 0,50 bar (Fig. 2).

For this pressure value, an analysis of the initial compaction of the soil sample as a result of a bar-projectile impact was carried out, presented in Table 1.

The advantage of this compaction methodology is the use of the same equipment, which is later used to conduct the experiment - there is no need to use additional measuring equipment. On the other hand, the disadvantage is the process of dynamic impact on the samples - the initial pressure from the pneumatic launcher to the strike with the bar-projectile is several times lower than during the experiment, but there is still a dynamic impact causing a small phenomenon of damage to the soil skeleton of the sample.

II. Vibration compaction (using a vibration shaker)

The sample is compacted on a vibrating shaker. The soil is compacted by vibrating the shaker for 60 seconds. During the tests, the time of 60 seconds was selected as sufficient - the vibration process for a longer time of 120 seconds and 180 seconds did not cause a significant increase in the soil compaction value. A weight of about 1000 g is placed on the sample in order to improve the vibrating effect. During the operation of the shaker, the air voids are filled with the moving soil grains - the process of compaction takes place.



Figure 2. The value of the pressure given by the pneumatic launcher for the shot - initial compaction of the soil sample

Table 1. Analysis of the initial compaction of a soil sample as a result of a bar-projectile impact.

	Experiment trial number 1	Experiment trial number 2	Experiment trial number 3	Average value
Sample mass m_0 [g]	6.50	6.50	6.50	6.50
Sample length before the shot L_0 [mm]	11.68	11.91	11.60	11.73
Bulk density of the soil before the shot ρ_0 [$\frac{g}{cm^3}$]	1.75	1.72	1.77	1.75
Shot pressure p [bar]	0.50	0.50	0.50	0.50
Bar-projectile speed v_0 [$\frac{m}{s}$]	6.54	6.46	6.78	6.59
Sample length after the shot L_1 [mm]	10.36	10.43	10.46	10.42
Difference in sample length ΔL [mm]	1.32	1.48	1.14	1.31
Bulk density of the soil after the shot ρ_1 [$\frac{g}{cm^3}$]	1.98	1.97	1.96	1.97
Difference in sample bulk density $\Delta\rho$	0.22	0.24	0.19	0.22

The methodology of compaction of a dry non-cohesive soil sample consists of following stages:

- unscrew all securing screws / bolts in the rigid casing (Fig. 3a)
- place one side of the cap over the narrower part of the black stopper, to the end of the stopper (Fig. 3b);
- insert the spacer I inside so that it adheres to the surface of the black stopper - check that the spacer reaches the end of the free space and sticks to the black stopper by e.g. tapping the spacer I with a hammer handle (Fig. 3c);

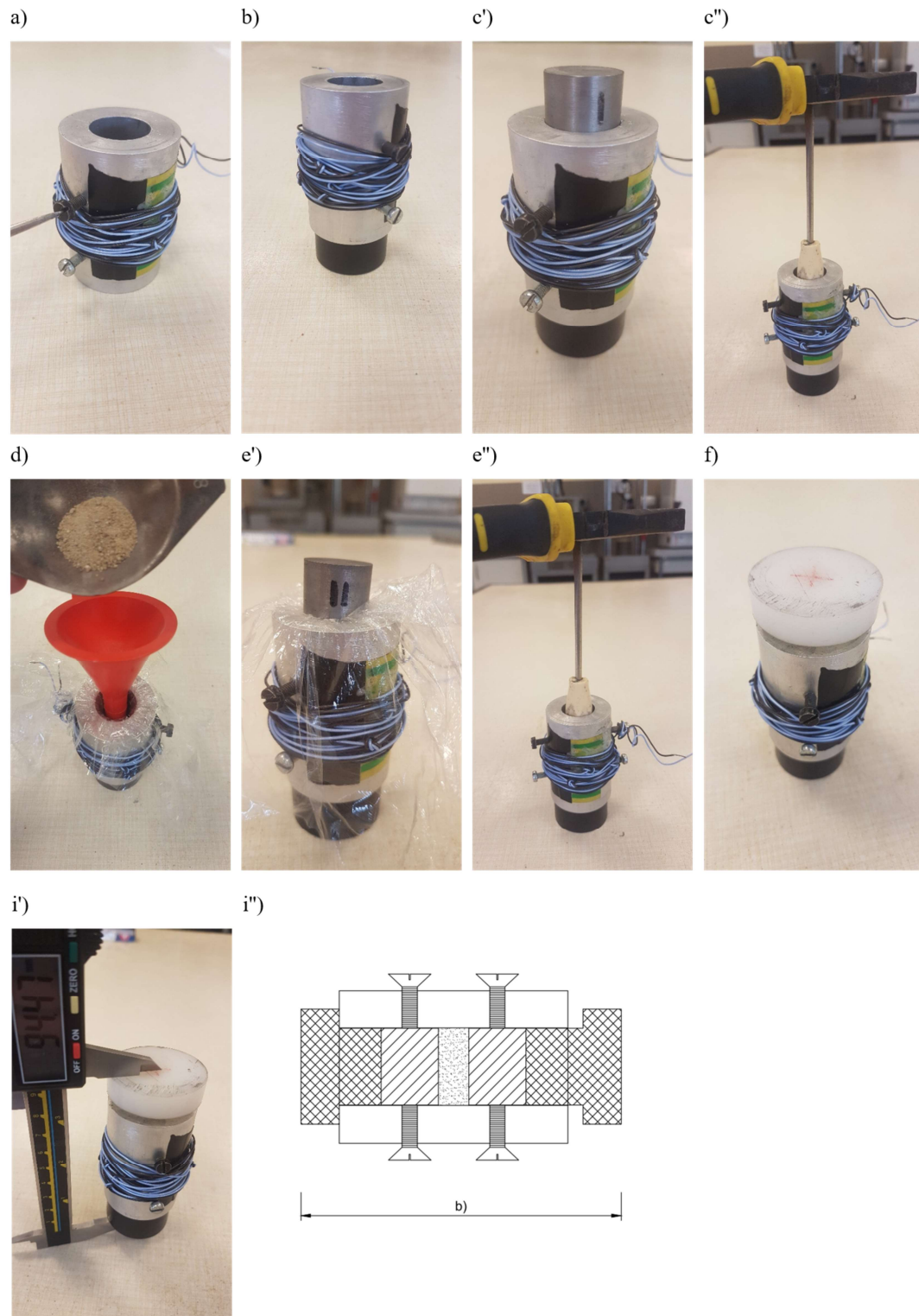


Figure 3. Following stages of the methodology of the vibratory compaction of the soil sample.

- tighten the screws / bolts that immobilize spacer I;
- place the soil sample into the foil-protected space of the casing and gently spread the sample to the sides of the rigid casing (Fig. 3d);

- insert spacer II inside so that it adheres to the sample surface - check that the spacer has reached the end of the free space and sticks to the sample by e.g. tapping the spacer II with a hammer handle (Fig. 3e);
- insert the white stopper with the narrow part into the rigid casing hole (Fig. 3f);
- measure the length a - the length between the outer edges of the black stopper and the white stopper - before the compaction process (Fig. 3g);
- put a metal weight on the white stopper - additional load approx. 1000 g (Fig. 3h);
- switch on the shaker for 60 seconds and at the same time protect the set against tipping over as a result of shocks;
- after switching off the shaker, remove the metal weight;
- tighten the screws / bolts that immobilize spacer II;
- measure the length b - the length between the outer edges of the black stopper and the white stopper - after the compaction process Fig. 3i);
- remove the white and black stopper - the sample in rigid casing is ready for testing with the Hopkinson bar (immediately before the test, unscrew the four screws / bolts to allow the movement of spacer I and II).

The analysis of the initial compaction of the soil sample as a result of the operation of the vibrating shaker, presented in Table 2, was carried out.

Table 2. Analysis of the initial compaction of a soil sample as a result of the operation of a vibrating shaker.

	Experiment trial number 1	Experiment trial number 2	Experiment trial number 3	Average value
Sample mass m_0 [g]	6.50	6.50	6.50	6.50
Sample length before vibration L_0 [mm]	11.88	11.49	11.78	11.72
Bulk density of the soil before vibration ρ_0 [$\frac{g}{cm^3}$]	1.73	1.78	1.74	1.75
Vibration time t [s]	60.00	60.00	60.00	60.00
Sample length after vibration L_1 [mm]	10.68	10.30	10.61	10.53
Difference in sample length ΔL [mm]	1.20	1.19	1.17	1.19
Bulk density of the soil after vibration ρ_1 [$\frac{g}{cm^3}$]	1.92	1.99	1.93	1.95
Difference in sample bulk density $\Delta\rho$	0.19	0.21	0.19	0.20

3 Mathematical model of the pneumatic launcher shot phenomenon for a system with impulse power supply

The system under consideration is supplied with air with known parameters at the initial moment. The known parameters are pressure, temperature and air volume. The entire shooting process is based on the adiabatic expansion of the air [12]. Air was assumed to be an ideal gas and it is possible to make some simplifications in the calculations. The gas temperature is relatively low below 100°C so there is no need to consider the change in specific heat at constant pressure c_p and volume c_v as a function of temperature. It is possible to use averaged values of these parameters.

The shooting process with a constant gas load can be divided into three periods:

- In the first period, the pre-chamber is filled to pressure with light gas p_1 and temperature T_1 (Fig. 5).
- After reaching the expected value of air pressure in the pre-chamber, the equipment operator initiates the shot. From that moment on, the second period is analyzed (Fig. 6). There is a very short moment, and it lasts until the bar-projectile begins to move as a result of the opening of the gas flow from the pre-chamber to the projectile chamber.

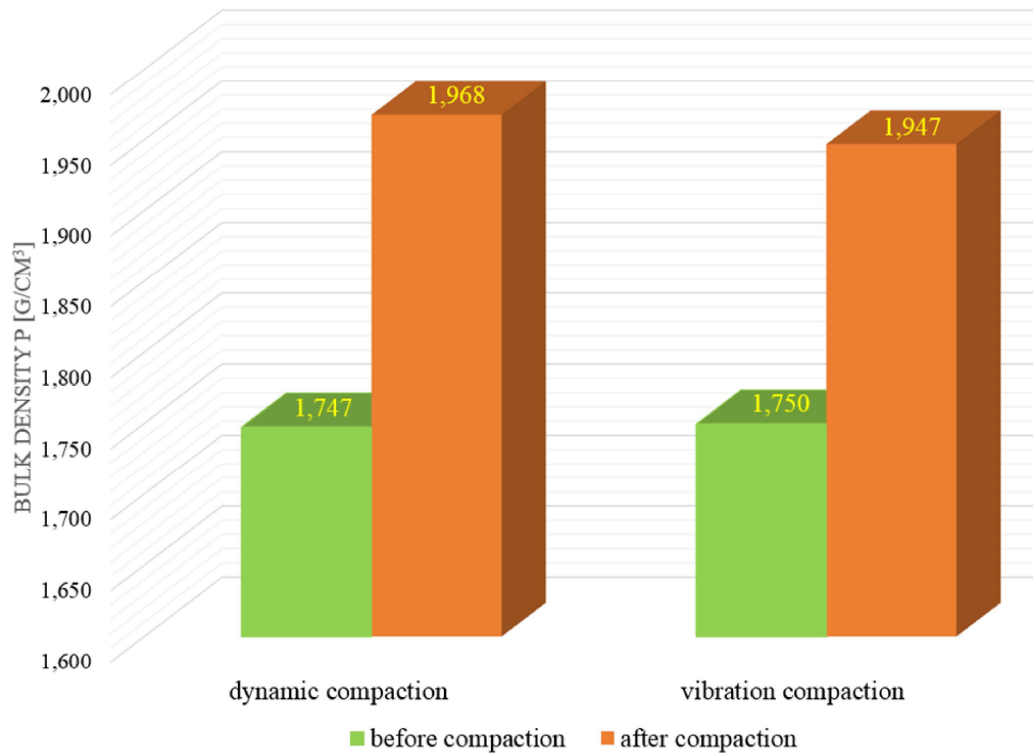


Figure 4. shows a comparison of the results of the analysis of preliminary compaction of a non-cohesive soil sample on the example of dry silty sand for the variant: I) dynamic compaction (with the use of SHPB) and II) vibration compaction (with the use of a vibration shaker).

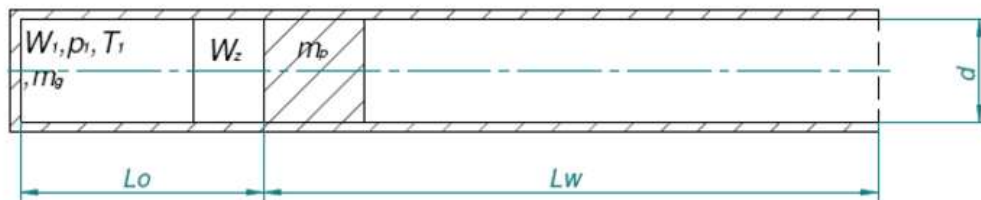


Figure 5. Physical model of the launcher system before turning the compressed air lever - first period of the shot process.

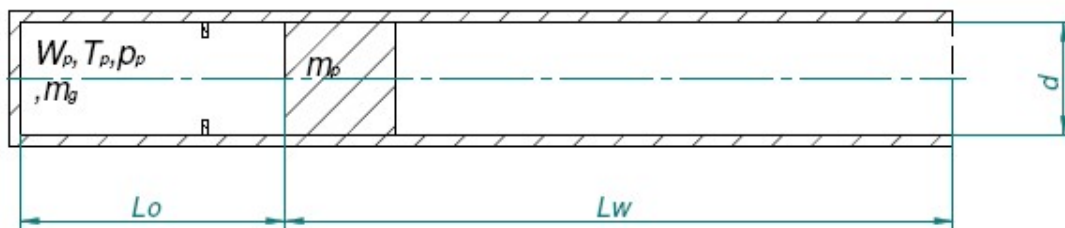


Figure 6. Physical model of the launcher system after opening of the gas flow from the pre-chamber to the projectile chamber – second period of the shot process.

Air parameters in volume $W_0 = W_1 + W_2$ are possible to calculate from the adiabatic equation:

$$p_0 = p_1 \cdot \left(\frac{W_1}{W_0} \right) \quad (1)$$

$$T_0 = T_1 \cdot \left(\frac{W_1}{W_0} \right) \quad (2)$$

These parameters describe the state of the air at the beginning of the bar-projectile movement. Therefore, they can be considered as initial values that are adopted for the calculations of the bar-projectile and the thermodynamic parameters of the gas during the shot.

c) The third period lasts from the moment the bar-projectile begins to move until it exits the barrel (Fig. 7).

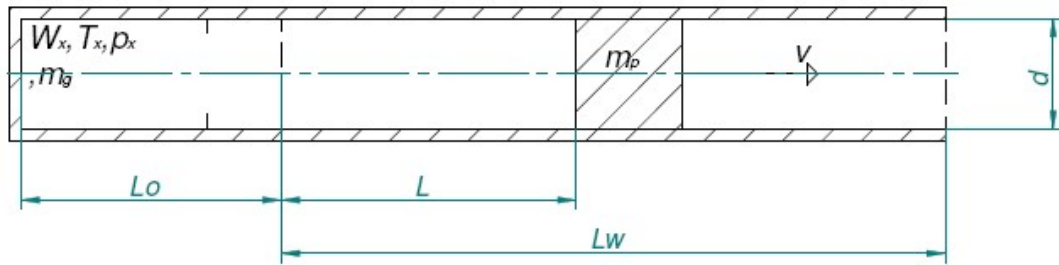


Figure 7. Physical model of the launcher system during the movement of the bar-projectile— third period of the shot process.

The basic equation of the mathematical model of the shot is the energy balance, resulting from the first law of thermodynamics:

$$dQ = dU + dL \quad (3)$$

where:

Q - energy supplied to the system;

U - internal energy of light gases;

L - work done on bar-projectile acceleration.

The relevant equations in this process can be expressed as:

- heat (energy) supplied to the system:

$$Q = c_v \cdot m_g \cdot (T_0 - T_n) \quad (4)$$

- internal energy of gas

$$Q = c_v \cdot m_g \cdot (T - T_n) \quad (5)$$

- external gas operation:

$$L = \varphi \cdot m_p \cdot \frac{v^2}{2} \quad (6)$$

where:

T - current temperature value;

T_0 - initial temperature value;

T_n - reference temperature;

m_p - mass of the bar-projectile;

m_g - air mass;

v - bar-projectile speed;

φ - secondary work factor [11] calculated from the equation:

$$\varphi = K + \frac{1}{3} \cdot \frac{m_g}{m_p} \quad (7)$$

for the case under discussion $K = 1$

Taking into account the above energy balance can be written as:

$$c_v \cdot m_g \cdot (T_0 - T_n) = c_v \cdot m_g \cdot (T - T_n) + \varphi \cdot m_p \cdot \frac{v^2}{2} \quad (8)$$

By transforming this equation with respect to temperature T :

$$\begin{aligned} c_v \cdot m_g \cdot (T_0 - T_n) &= \varphi \cdot m_p \cdot \frac{v^2}{2} \\ T_0 - T &= \frac{\varphi \cdot m_p}{c_v \cdot m_g} \cdot \frac{v^2}{2} \\ T &= T_0 - \frac{\varphi \cdot m_p}{c_v \cdot m_g} \cdot \frac{v^2}{2} \end{aligned} \quad (9)$$

Further transformations with respect to pressure to the next form of the above equation:

$$\begin{aligned} R \cdot T &= R \cdot T_0 - \frac{\theta \cdot \varphi \cdot m_p}{m_g} \cdot \frac{v^2}{2} \\ m_g \cdot R \cdot T &= m_g \cdot R \cdot T_0 - \theta \cdot \varphi \cdot m_p \cdot \frac{v^2}{2} \end{aligned} \quad (10)$$

From the Clapeyron equation:

$$p \cdot W = m \cdot R \cdot T \quad (11)$$

By using this relationship, equality is created:

$$p = \frac{m_g \cdot R \cdot T_0 - \theta \cdot \varphi \cdot m_p \cdot \frac{v^2}{2}}{W} \quad (12)$$

where:

$W = W_0 + dL$ - current volume value;

θ - ratio, $\theta = K - 1$.

The remaining equations of the mathematical model are related to the dynamics of the bar-projectile motion:

- equation of motion resulting from the second law of dynamics:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{p \cdot s}{\varphi \cdot m} \quad (13)$$

- speed equation:

$$\frac{dL}{dt} = V \quad (14)$$

Equations (12) - (14) allow to describe the shot process a pneumatic gas system with a constant mass of gas introduced into the system.

4 Comparison of the numerical and experimental characteristics of the work of the pneumatic launcher

The mathematical model presented in the previous chapter was used to develop the performance characteristics of the pneumatic launcher included in the split Hopkinson bar test stand (shown in Fig. 8), which is located at the Department of Military Engineering and Infrastructure (Military University of Technology in Warsaw).



Figure 8. View of the pneumatic launcher (purple marking) as an important element of the SHPB test stand.

Table 3. Summary of the characteristics of bar-projectiles

	Bar-projectile		
	Type 1	Type 2	Type 3
Length [mm]	99.10	199.40	249.80
Weight [g]	234.91	353.72	491.04
Diameter [mm]	19.92	19.97	19.96
Material	Steel C350		
Youngs modulus E [GPa]	200		
Wave propagation velocity c_0 [$\frac{m}{s}$]	5000		

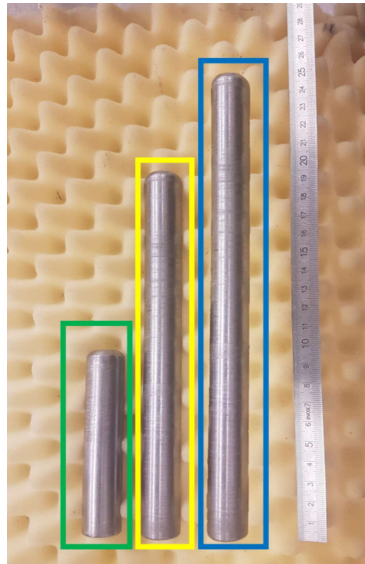


Figure 9. Bar-projectiles used for the analysis - 100 mm (green marking), 200 mm (yellow mark), 250 mm (blue mark)

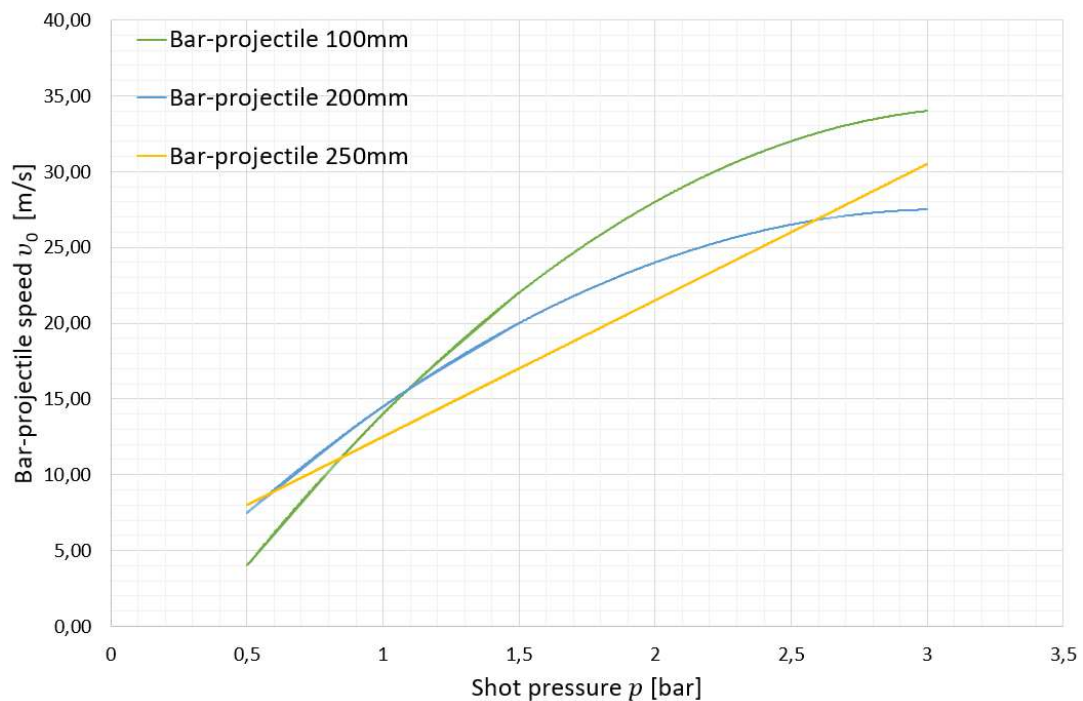


Figure 10. Characteristics of the velocity change at the moment of the bar-projectile impact v_0 as a function of the initial supply pressure p .

The presented launcher is powered by compressed air with a maximum pressure of 8 bar. The launcher throws bar-projectile of various dimensions - their length is variable and depends on the conditions of the experiment that is carried out on the split Hopkinson bar stand. In the analyzed study, the pneumatic system was used to throw bar-projectile of the following lengths: 100, 200 and 250 mm (Fig. 9). The detailed parameters of these bar-projectile are shown in Table 3.

For all types of bar-projectiles (1, 2 and 3 type), the characteristics of the impact velocity change as a function of the supply pressure were determined. The analysis was carried out in terms of the initial pressure p from 0,5 to 3,0 bar. The results of these analyzes are shown in Fig. 10. The presented characteristic is the result of numerical calculations made in the Matlab environment on the basis of a system of differential equations developed on the basis

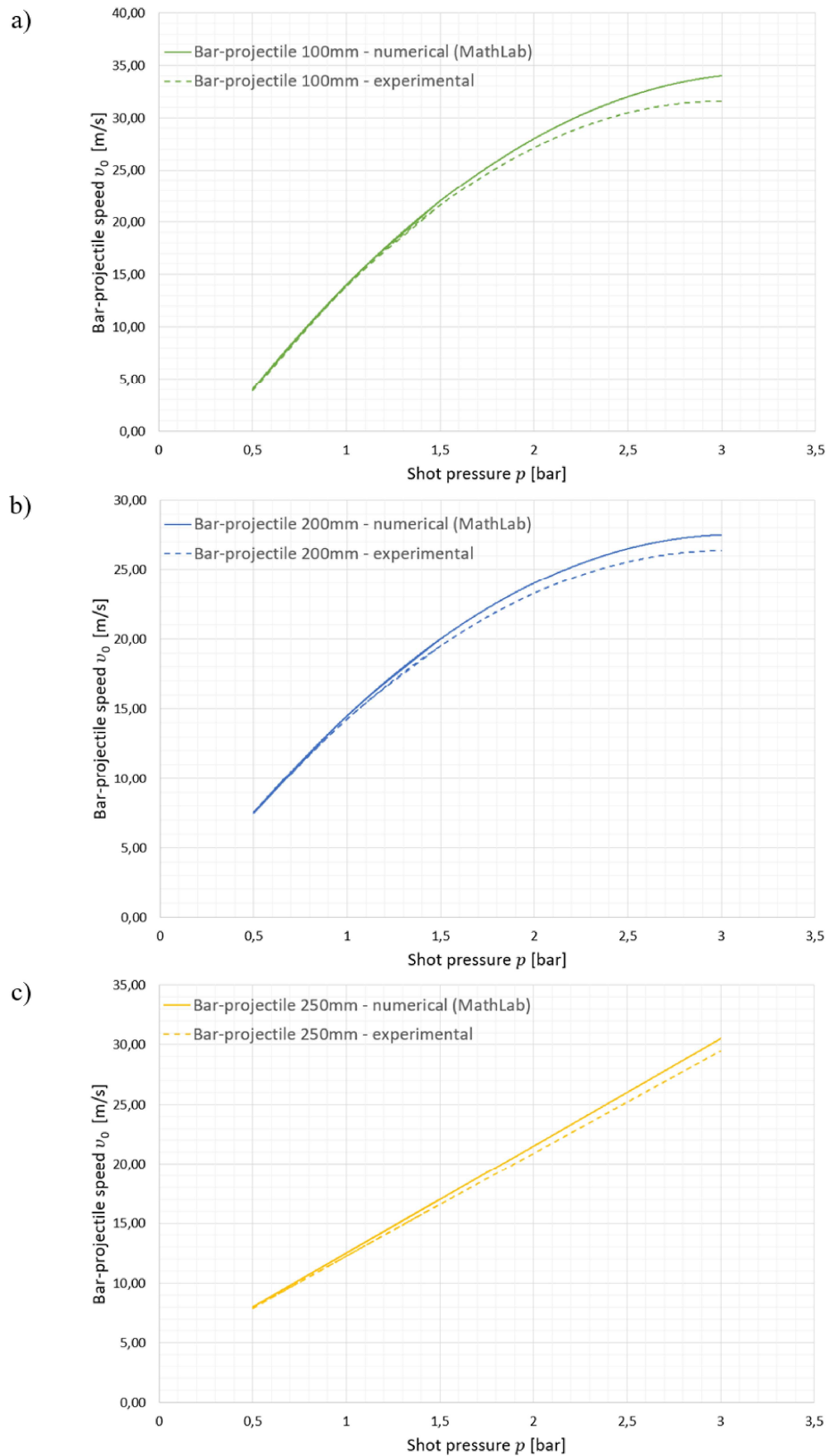


Figure 11. Comparison of the experimental and numerical results in the form of graphs for bar-projectiles: a) 100 mm, b) 200 mm and c) 250 mm.

of the equations: gas state in the battle space (equation 12) and motion (equation 13 and 14).

The publication [10] analyzes the characteristics of the impact velocity change as a function of the supply pressure on the basis of the conducted physical experiment for the same bar-projectiles. A comparison of the experimental and numerical results was made in the form of graphs for bar-projectiles: 100 mm - Fig. 11a), 200 mm - Fig. 11b) and 250 mm - Fig. 11c). There is a visible convergence of results between the numerical analysis in Matlab environment and the physical experiment for each bar-projectile case.

5 Conclusions

The paper analyzes the issue of initial compaction of a non-cohesive soil sample. For this purpose, samples of dry silty sand were used. Dry sand has two phases - a solid phase and a gas phase (air). In the two-phase model variant, the influence of the initial compaction process is particularly visible - the air voids are densified and the value of the soil volumetric density increases. Two different compaction methodologies were used for the analysis: I) dynamic compaction (using SHPB) and II) vibration compaction (using a vibrating shaker). A better result of the compaction process was obtained for dynamic compaction (small difference in the result - both methods obtained comparable results). The advantage of this method is the use of the same station in the compaction process, which is then used to conduct the experiment. The key issue is to select the lowest possible value of the initial pressure from the pneumatic launcher to accelerate the bar-projectile. In the analysis, the value of the initial pressure was 0.5 bar - at lower pressure values, the bar-projectile did not hit the soil sample due to the low speed and friction of the bar-projectile side against the inner wall of the barrel. It is necessary to select the lowest possible initial pressure - too high a pressure value will cause the bar-projectile to hit the sample at high speed and destroy the soil skeleton of the sample (the purpose of the impact should be the compaction process with the least possible damage to the skeleton). Additionally, a detailed methodology of the vibration compaction process (with the use of a vibration shaker) was shown, along with a description and photographs of the following stages.

The paper also includes a numerical analysis of the calibration of the pneumatic launcher, which is a component of the SHPB test stand. Calibration calculations were performed in the Matlab environment on the basis of the system of difference equations. The analysis was carried out in the range of the initial pressure from 0.5 to 3.0 bar for three different variants of the bar-projectile length: 100 mm, 200 mm and 250 mm. The result of the numerical analysis was compiled for comparison with the experimental analysis (previously published in another paper). The numerical and experimental characteristics of the pneumatic launcher obtained a high agreement of the results.

References

1. Baryłka, A. Zagadnienie zdatności obiektów budowlanych do użytkowania w problematyce inżynierii bezpieczeństwa tych obiektów. *Inżynieria Bezpieczeństwa Obiektów Antropogenicznych* **4** (2019).
2. Baryłka, A. & Bąk, G. Wpływ pożaru zewnętrznego na wyteżenie obudowy schronu wykopowego. *Inżynieria Bezpieczeństwa Obiektów Antropogenicznych* **3-4** (2018).
3. Chmielewski, R., Kruska, L., Rekucki, R. & Sobczyk, K. Experimental Investigation of Dynamic Behavior of Silty Sand. *Archives of Civil Engineering* **LXVII**, 481–498 (1 2021).
4. Mishra, S., Chakraborty, T. & Basu, D. High Strain Rate Stress-Strain Response of Soils—A Review. *Japanese Geotechnical Society Special Publication* **3**, 80–85 (2015).
5. Omidvar, M., Iskander, M. & Bless, S. Stress-strain behavior of sand at high strain rates. *International Journal of Impact Engineering* **49**, 192–213 (2012).
6. Papliński, A. Assessment of threat arising by closed – volume explosions of fuel-air mixtures. *Safety Engineering of Anthropogenic Objects* **4** (2021).
7. Sobczyk, K., Chmielewski, R. & Duda, K. The concept of a prefabricated structure for protection of critical infrastructure facilities. *Biuletyn WAT* **LIXII**, 173–196 (2 2018).
8. Sobczyk, K., Chmielewski, R., Kruska, L. & Rekucki, R. Strength Characterization of Soils' Properties at High Strain Rates Using the Hopkinson Technique - A Review of Experimental Testing. *Materials* **15**, 274 (1 2022).
9. Sobczyk, K., Chmielewski, R. & Kruska, L. The Concept Of Experimental Research On The Behavior Of Sand Cover Material For Protective Shelters For Civilians. *Safety Engineering of Anthropogenic Objects* **1** (2020).
10. Sobczyk, K., Kruska, L., Chmielewski, R. & Rekucki, R. Performance characteristics of Hopkinson's set-up pneumatic launcher. *Acta Polytechnica* **61**, 552–561 (2021).
11. Torecki, S. *Balistyka wewnętrzna* (Wydawnictwo WAT, Warszawa, 1980).
12. Wiśniewski, S. *Termodynamika Techniczna* (Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1980).

Kamil Sobczyk
Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji
Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy badawczej, której wynikiem była publikacja:

Kamil Sobczyk, Leopold Kruszk, Michał Grązka, Ryszard Chmielewski, Ryszard Rekucki (2022): Preparation of the non-cohesive soil sample and calibration of the pneumatical launcher in the dynamic soil test SHPB, Safety Engineering of Anthropogenic Objects, 1, 16, <https://dx.doi.org/10.37105/iboa.129>

mój merytoryczny wkład polegał na:

- 1) realizacji przeglądu aktualnej literatury i bieżących trendów naukowych w analizowanej tematyce;
- 2) opracowaniu metodyki wstępnego zagęszczenia próbki gruntu w wariacie zagęszczenia dynamicznego z wykorzystaniem stanowiska SHPB;
- 3) opracowaniu metodyki wstępnego zagęszczenia próbki gruntu w wariacie zagęszczenia wibracyjnego z wykorzystaniem wstrząsarki wibracyjnej;
- 4) wyselekcjonowaniu i przygotowaniu próbek piasku pylastego;
- 5) przeprowadzeniu kalibracji i kontroli gotowości aparatury stanowiska SHPB do przeprowadzenia fizycznych eksperymentów;
- 6) współudziale w wykonaniu fizycznych eksperymentów zgodnie z opracowaną metodyką wstępnego zagęszczenia próbki gruntu;
- 7) analizie porównawczej otrzymanych rezultatów wstępnego zagęszczenia próbek gruntu;
- 8) opracowaniu wyników eksperymentalnej charakterystyki pracy wyrzutni pneumatycznej;
- 9) analizie i wykonaniu zestawienia porównawczego numerycznej i eksperymentalnej charakterystyki pracy wyrzutni pneumatycznej;
- 10) opracowaniu graficznym ilustracji i wykresów oraz współudziale w edycji tekstu manuskryptu;
- 11) pełnieniu roli *corresponding author*;
- 12) podsumowaniu prowadzonych prac badawczych oraz sformułowaniu wniosków końcowych wraz z korektami i odpowiedziami wynikającymi z procesu recenzji.

Oświadczam, że jestem pomysłodawcą i autorem większościowym w/w publikacji.

Publikacja przygotowana w ramach opracowania przeze mnie w roli kierownika projektu wniosku o pozyskaniu funduszy z NCN na zakup materiałów do badań - konkurs Preludium edycja nr 45 (nr rej. wniosku 2022/45/N/ST10/01692).

.....

podpis

Warszawa, 16.07.2022 r.

Leopold Kruszka
Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji
Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy badawczej, której wynikiem była publikacja:

Kamil Sobczyk, **Leopold Kruszka**, Michał Grązka, Ryszard Chmielewski, Ryszard Rekucki (2022): Preparation of the non-cohesive soil sample and calibration of the pneumatical launcher in the dynamic soil test SHPB, Safety Engineering of Anthropogenic Objects, 1, 16, <https://dx.doi.org/10.37105/iboa.129>

mój merytoryczny wkład polegał na:

- 1) opracowaniu metodyki pracy badawczej, w tym sformułowanie celów i założeń tej pracy dot. eksperymentalno-obliczeniowej kalibracji wyrzutni pneumatycznej prętów-pocisków na stanowisku badawczym pn. dzielony pręt Hopkinsona na ściskanie na potrzeby badania próbek gruntu sypkiego pod obciążeniem uderzeniowym;
- 2) udziale jako opiekun naukowy w pozyskaniu funduszy z NCN na zakup materiałów do badań w ramach opracowania wniosku do konkursu Preludium nr 45 (nr rej. wniosku 2022/45/N/ST10/01692);
- 3) kierowaniu analizą eksperymentalno-obliczeniową na potrzeby wyznaczenia charakterystyki pracy jednokomorowej wyrzutni pneumatycznej: prędkości uderzenia pręta-obciążającego w zależności od długości tego pręta (pocisku) i ciśnienia roboczego w komorze wyrzutni;
- 4) udziale w opracowaniu manuskryptu artykułu od strony merytorycznej, łącznie z wnioskami końcowymi.

.....
podpis

Warszawa, 16.07.2022 r.

Michał Grązka
Wydział Mechatroniki, Uzbrojenia i Lotnictwa
Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy badawczej, której wynikiem była publikacja:

Kamil Sobczyk, Leopold Kruszka, **Michał Grązka**, Ryszard Chmielewski, Ryszard Rekucki
(2022): Preparation of the non-cohesive soil sample and calibration of the pneumatical launcher
in the dynamic soil test SHPB, Safety Engineering of Anthropogenic Objects, 1, 16,
<https://dx.doi.org/10.37105/iboa.129>

mój merytoryczny wkład polegał na:

- 1) opracowaniu i przygotowaniu modelu numerycznego zjawiska strzału (balistyki wewnętrznej układu pneumatycznego);
- 2) wykonaniu komputerowej symulacji strzału.



.....
podpis

Warszawa, 16.07.2022 r.

Ryszard Chmielewski
Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji
Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie

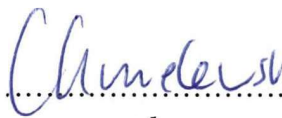
OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy badawczej, której wynikiem była publikacja:

Kamil Sobczyk, Leopold Kruszka, Michał Grązka, **Ryszard Chmielewski**, Ryszard Rekucki
(2022): Preparation of the non-cohesive soil sample and calibration of the pneumatical launcher
in the dynamic soil test SHPB, Safety Engineering of Anthropogenic Objects, 1, 16,
<https://dx.doi.org/10.37105/iboa.129>

mój merytoryczny wkład polegał na:

- 1) nadzorze krytycznym nad procesem wyboru i przygotowaniu próbek piasku pylastego;
- 2) współudziale w edycji tekstu manuskryptu;
- 3) przedstawieniu propozycji wybranych wniosków końcowych.

.....
.....
podpis

Warszawa, 16.07.2022 r.

Ryszard Rekucki
Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji
Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie

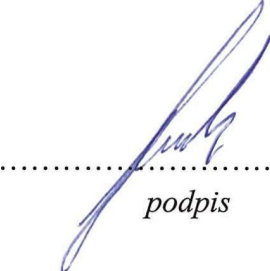
OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy badawczej, której wynikiem była publikacja:

Kamil Sobczyk, Leopold Kruszka, Michał Grązka, Ryszard Chmielewski, **Ryszard Rekucki**
(2022): Preparation of the non-cohesive soil sample and calibration of the pneumatical launcher
in the dynamic soil test SHPB, Safety Engineering of Anthropogenic Objects, 1, 16,
<https://dx.doi.org/10.37105/iboa.129>

mój merytoryczny wkład polegał na:

- 1) nadzorze krytycznym nad przeprowadzeniem kalibracji i kontroli gotowości stanowiska badawczego SHPB do wykonania fizycznego eksperymentu;
- 2) współudziale w wykonaniu fizycznych eksperymentów zgodnie z opracowaną metodyką wstępnego zagęszczenia próbki gruntu oraz nadzorze krytycznym nad zgodnością prowadzonych fizycznie eksperymentów w porównaniu do założeń ich metodyki;
- 3) przedstawieniu propozycji wybranych wniosków końcowych.



.....
podpis



EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF DYNAMIC BEHAVIOR OF SILTY SAND

R. CHMIELEWSKI¹, L. KRUSZKA², R. REKUCKI³, K. SOBCZYK⁴

Abstract: The paper includes experimental research using the Split Hopkinson Pressure Bar to determine dynamic compression curves and strength dynamic parameters to depend on the strain rate and moisture for silty sand soil samples. Those experiments are oedometric type based in a rigid confining cylinder. Samples of silty sand with fine a fraction content were taken for the study. To ensure sufficiently uniaxial strain of the tested material, the soil samples were placed in properly prepared casings made of duralumin for the needs of the tests. Thanks to the use of measuring strain gauges on the initiating and transmitting bars, as well as the casing, the nature of the loading pulse was obtained, which was then subjected to the process of filtration and data processing to obtain the nature of the incident, reflected and transmitted wave. During the above dynamic experiments with the representative of silty sand soils, it was observed that its dynamic compaction at a high strain rate is different than in the case of the Proctor test. This is due to higher compaction energy, which additionally changes the grain size by destroying the grains in the structure. The paper presents the results of particle size distribution analysis for two different types of soil samples - this type of analysis is unique. Hence experiments should be further continued for such soils with different granulations and various moisture using, for example, Hopkinson measuring bar technique to confirm for other silty sand soils that are often subgrade of various engineering objects.

Keywords: soil mechanics, experimental dynamic testing, split Hopkinson pressure bar, oedometric test.

¹ Lt Col, Ph. D., email: ryszard.chmielewski@wat.edu.pl, Military Univ. of Technology, Dept. of Military Engineering and Military Infrastructure, 2 Gen. Sylwester Kaliski Str., 00-908 Warsaw, Poland

² Ph.D., email: leopold.kruszka@wat.edu.pl (corresponding author), Military Univ. of Technology, Dept. of Military Engineering and Military Infrastructure, 2 Gen. Sylwester Kaliski Str., 00-908 Warsaw, Poland

³ M. Sc., email: ryszard.rekucki@wat.edu.pl, Military Univ. of Technology, Dept. of Military Engineering and Military Infrastructure, 2 Gen. Sylwester Kaliski Str., 00-908 Warsaw, Poland

⁴ Lt, M. Sc., email: kamil.sobczyk@wat.edu.pl, Military Univ. of Technology, Dept. of Military Engineering and Military Infrastructure, 2 Gen. Sylwester Kaliski Str., 00-908 Warsaw, Poland

1. INTRODUCTION

For many years, the unflagging interest and continuous development in the field of testing the mechanical properties of various building materials subjected to dynamic effects stresses have been noticed [1]. Particularly significant increase in the number of publications in this field concerns metals as well as for concretes [2], polymers, wood and soils [3-18]. Indeed, a large part of engineering problems includes research into high-rate strain-stress (HSR) soil response. This includes stress related to, inter alia, explosions [19-21], earthquakes, mine explosions [22], wheel loads of vehicles and aircrafts [23], dynamic soil compaction [24] and pile driving [25]. This is associated with the need to create as true and correct as possible constitutive models that are important in the process of calculating geoenvironmental properties as part of computer-aided design methods. It should be noted that in the process of constitutive modeling it is necessary to know the quasi-static and dynamic characteristics in a wide range of high strain rates together with changes in the physical characteristics of the soils subjected to this type of impact.

In tests using standard testing machines, it is possible to determine the strength parameters of materials for strain rates up to $5 \text{ [s}^{-1}\text{]}$. On the other hand, dynamic tests, require special testing equipment. John Hopkinson and his son Bertram Hopkinson are considered precursors in the field of material research methodology within high strain rates [26-28]. As a result of further works, Herbert Kolsky presented an experimental method called the Kolsky method or the Hopkinson bar technique for the range of strain rates from $5 \cdot 10^2 \text{ [s}^{-1}\text{]}$ up to $5 \cdot 10^4 \text{ [s}^{-1}\text{]}$ [29]. Due to the fact that soil is characterized by low stiffness, low impedance and high attenuation of waves, conventional test equipment typical for other materials is not suitable and should be modified depending on the needs in terms of adaptation to the soil sample. Soil behaviour during uniaxial dynamic compression has been studied in detail for matching of the soil sample.

Currently, in modern laboratories for dynamic soil testing, a test device called the Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) is used, operating on the basis of two measuring bars (initiating and transmitting) along with the tested soil sample placed between these bars. To determine the strain rate above $5 \cdot 10^4 \text{ [s}^{-1}\text{]}$ (the study for other materials than soil was published in [30, 31]), an additional modification of the Hopkinson Pressure Bar is used by exclusion of the initiating bar from the system and a direct impact with the bar-projectile on the sample adjacent to the transmitting bar (modification of the Hopkinson bar by applying a direct impact with loading bar-projectile on sample adhering to transmitting bar).

This paper presents the results of experimental tests using the SHPB to determine the strength dynamic parameters of silty sand soil samples with different moisture content subjected to dynamic impact under the condition of limiting its radial deformation. It should be also mentioned here that are well-known versions of the Kolsky method for determining the radial stress component in the specimen tested [5, 6].

2. SOIL AND RESEARCH METHODOLOGY

2.1. Soil specification

Silty sand (siSa) with a fine fraction content, understood as the sum of the silty and argillaceous fractions 20,46 [%] (with a diameter less than 0,063 [mm], $f_i + f_{\pi}$). The granulation analysis was performed using the wet sieve method with the addition of a curve for fine fractions by the aerometric method. Figure 1 shows the granulation curve of the soil tested.

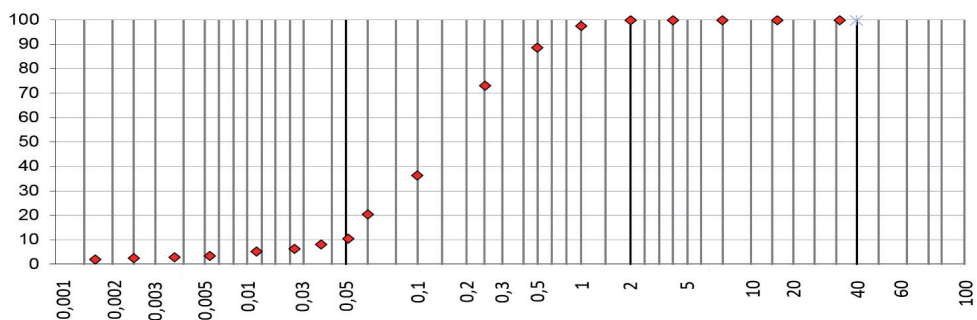


Fig. 1. Granulation curve of the tested soil.

Compactibility parameters ρ_{ds} and w_{opt} determined in the Proctor test, compacting the soil using method I according to the standard [1], (normal method). Figure 2 presents the diagram of the optimum moisture content of the tested soil.

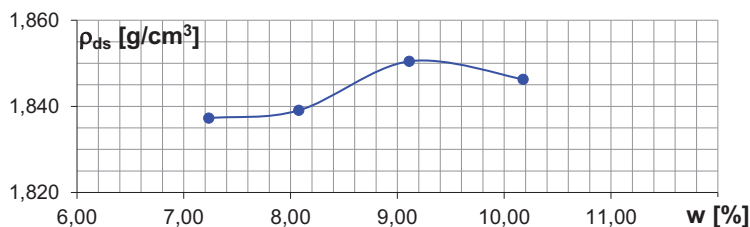


Fig. 2. Diagram of optimal moisture content of the tested soil.

The optimum moisture content of the tested soil was $OMC = 9,6$ [%], the maximum bulk density of the granular soil structure $MDD = 1,86$ [g/cm^3]. The aim of the study was to determine the characteristic strength parameters for ground base samples with different moisture content subjected to dynamic impact. Four soil samples were prepared containing percentage of moisture content respectively: $w_1 = 0$ [%], $w_2 = 4,6$ [%], $w_3 = 9,6$ [%] and $w_4 = 14,6$ [%]. Each of them had a length $L_0 \approx 3$ [cm], and the test for individual moisture content of the samples was repeated twice, the results presented are the arithmetic mean of these tests. The samples were placed in casings (which sufficiently ensured the occurrence of uniaxial strain of the tested material) and pressed on both sides with the initiating and transmitting bar.

2.2. Experimental setup

In order to determine the characteristic parameters of the soil samples tested, which were subjected to dynamic strain with a high strain rate, dynamic compression of these samples was performed as part of the test stand based on the Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB). The SHPB stand used in the present research, included in this paper, is located in the structure testing workshop on the explosive impact of the Faculty of Civil Engineering and Geodesy (Military University of Technology in Warsaw), its view is shown in Figure 3.



Fig. 3. SHPB test stand. Mechanical part of the station: (1) - pneumatic cannon with a barrel of loading bar-projectile, (2) - initiating measuring bar, (3) - transmitting measuring bar, (4) - soil sample in the casing, (5) - damper. Measuring part: (6) - strain gauges, (7) - compensating strain gauges, (8) - measuring device with digital memory, (9) - laser timekeeping system, (10) - computer software.

The bar-projectile is driven by the rapidly released air pressure from a pneumatic cannon powered by a compressor (1). During the flight of the bar-projectile, the laser timekeeping system (9) reads

the time in which the bar-projectile covers the distance 0,1 [m]. Knowing the flight time of the bar-projectile allows determining the speed of the bar-projectile at the moment of impact. After hitting the initiating bar (2), an elastic compression wave develops in it along the bar towards the sample (4). When it reaches the end of the initiating bar, the wave partially continues to propagate through the sample towards the transmitting bar (3), is partly reflected and starts returning to the beginning of the initiating bar. The wave that passed through the sample and reached the transmitting bar at its end is finally amortized (suppressed) (5). The described phenomena are presented in Figure 4.

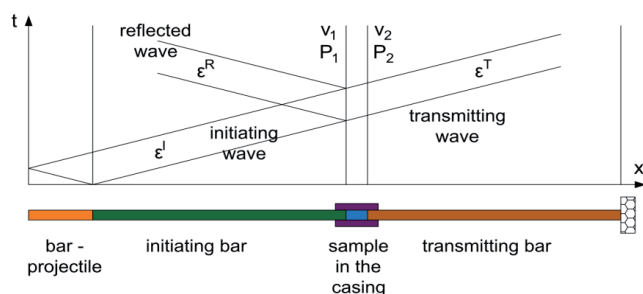


Fig 4. Wave chart illustrating the phenomenon of elastic wave propagation in a Split Hopkinson Pressure Bar. t - time, x - bar axis: bar-projectile and measuring bar, $\varepsilon^I(t)$, $\varepsilon^T(t)$, $\varepsilon^R(t)$ - elastic strain of the measuring bars over time measured by strain gauges, $P_1(t)$ and $P_2(t)$ - dynamic forces at the ends of the tested sample, $v_1(t)$ and $v_2(t)$ - the velocity of the fronts of the measuring bars.

Both on the initiating and transmitting bars, along the axis of the bars, 0,5 [m] from the front of these bars, two active strain gauges (6), parallel to each other, were glued. 1-LY11-3/120A strain gauges were used 3 [mm], of length, resistance $R = 120 [\Omega] \pm 0,35 [\%]$ and characteristic constant value of the load cell $k = 2,02 \pm 1 [\%]$). Thanks to this solution, the reliability of measurements increased and the impact of undesirable phenomena, e.g. buckling due to the effect of compressive force, was reduced. Active strain gauges glued on the bars, after supplementing with two compensating strain gauges (7) of the same parameters, were included in a full Wheatstone type strain gauge bridge supplied with DC 5 [V] from the LTT24 device (measuring device with digital memory). Part of the incident wave is reflected from the front of the bar and while returning it has a stretchy character. The diagram shows that initially the loading pulse is a positive sign (compression), while the returning wave has a negative sign (stretching). An example of its shape and character is shown in Figure 5. The measurement signals come from 3 channels of the LTT24 measuring device recording changes on active strain gauges included in the full-bridge systems:

- channel 1 - initiating bar;

- channel 2 - transmitting bar;
- channel 3 - sample casing.

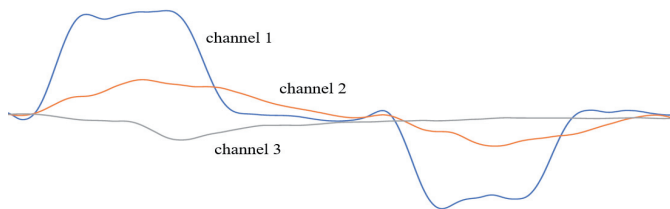


Fig. 5. Samples of recorded pulse shapes from three measurement channels.

On the duralumin casing of the soil sample, whose task due to its thickness is to ensure uniaxial strain of the tested soil, 2 strain gauges were also placed to observe the behaviour of the sample (strain gauges type 1-LY11-3/120A of length 3 [mm], resistance $R = 120 [\Omega] \pm 0,35 [\%]$) and a strain gauge constant $k = 2,02 \pm 1 [\%]$). Initially, the soil sample is being plastically deformed, which is accompanied by the phenomenon of force balancing P_1 and P_2 at its ends until a homogeneous stress condition is achieved within the sample. Impulses from the strain gauges are recorded using a multi-channel conditioner and LTT24 recorder (8), as well as a dedicated computer software (10). The recording of individual measurement signals was carried out during the experiments as digital signals at a sampling frequency of 1 [MHz] and a 24 bit linear quantization accuracy. Then, the recorded digital signals with a length of 4096 samples were filtered using FlexPro software. The best effects were obtained by low-pass filtration using the Chebyshev window at a cut-off frequency of 55 [kHz]. After filtering, the voltage signals were scaled to a strain unit $\mu\text{m} / \text{m}$. Then, using the appropriate equations and correlations, you can determine the soil sample stress, soil sample strain, soil sample strain rate, as well as the stress in the sample casing depending on time.

A 200 [mm] long bar-projectile and initiating and transmitting bars 1000 [mm] in length and a diameter of 20 [mm] each, were used for the tests. These elements were made of C350 steel characterized by a 200 [GPa] longitudinal modulus and a wave propagation velocity corresponding to the sound speed in the material 5000 [m/s].

The casings are made of duralumin (PA6/EN AW-2017A), which is characterized by a longitudinal elastic modulus of 72,5 [GPa], 27,2 [GPa] transverse modulus and 5100 [m/s] wave propagation velocity. Four casings were prepared - each with an internal diameter of 20 [mm] and an external diameter of 40 [mm] (wall thickness 10 [mm]).

During the tests, efforts were made to implement the assumed equal conditions: pressure of the pneumatic gun at the time of the shot $p \approx 5$ [bar], air temperature $T_{air} \approx 20$ [°C] and air humidity $w_{air} \approx 50$ [%] for each experiment carried out.

2.3. Dynamic measurement methodology

To be able to analyse the process of propagation of one-dimensional wave in the longitudinal direction of an infinitely long bar, it must be assumed that it is divided into constituent elements of small dimensions dx . Using the Hooke's law and Newton's second law, the wave propagation equation can be written as follows:

$$(2.1) \quad \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c_0^2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2};$$

where: u - movement within the bar;

c_0 - elastic wave propagation velocity in the longitudinal direction of the bar.

$$(2.2) \quad c_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}};$$

where: E - Young's Modulus of the material from which the bars are made;

ρ - the density of the material from which the bars are made.

Figure 6 illustrates the propagation of an elastic wave in a bar as a result of a bar-projectile impact towards its longitudinal axis.

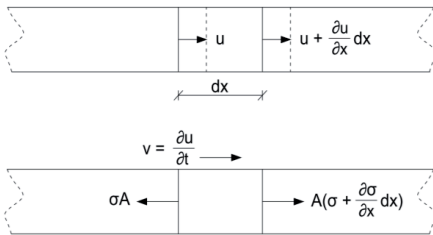


Fig. 6. Diagram of elastic wave propagation in a measuring bar [5].

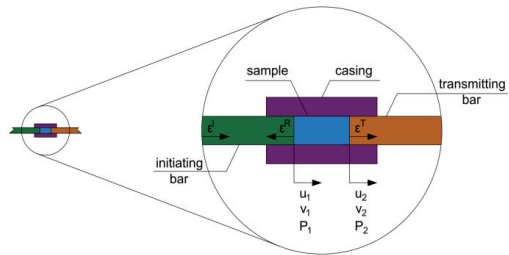


Fig. 7. Contact of the sample with the fronts of both measuring bars.

Further transformations and solutions of equations in this area were well presented in the study [5]. As part of the test, a soil sample was placed between the bars. This experiment is oedometric type, and allows the measurement of the complete three-dimensional dynamic response of soils, where $\sigma_1 = \sigma_x$; $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_r$; $\varepsilon_1 = \varepsilon_x$; $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0$, including also Poisson's ratio $\nu(t)$ and volumetric strain $\theta = \varepsilon_x$ as functions of time [8, 32]. Based on the knowledge of the incident, passing

and reflected wave characteristics, it is possible to determine the displacement of the sample contact with the bar ends, in Figure 7 marked as u_1 and u_2 . The uniaxial strain state ε was also determined in the bars for the initiating wave - ε^I , the transmitting wave - ε^T and the reflected wave - ε^R .

Assuming that a negative sign refers to for the compression wave, we obtain the strain equation:

$$(2.3) \quad \frac{\partial u}{\partial t} = -c_0 \cdot \varepsilon.$$

In the case when the bar-projectile hits the bars at speed v , and the cross-sections and material of the bar-projectile and bars are the same ($A = A_1 = A_2$; $\rho = \rho_1 = \rho_2$; $c_0 = c_1 = c_2$) the maximum stress in the bar σ defines the equation:

$$(2.4) \quad \sigma = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_0 \cdot v.$$

The displacement of the front of the initiating bar u_1 is the resultant of incident and reflected waves:

$$(2.5) \quad u_1(t) = c_0 \cdot \int_0^t \varepsilon^I(t) dt + (-c_0) \cdot \int_0^t \varepsilon^R(t) dt = c_0 \cdot \int_0^t (\varepsilon^I - \varepsilon^R)(t) dt.$$

Similarly, the displacement of the transmitting bar u_2 can be determined as follows:

$$(2.6) \quad u_2 = c_0 \cdot \int_0^t \varepsilon^T(t) dt.$$

Equations of front displacement velocities for each of the bars v_1 , v_2 can be represented as:

$$(2.7) \quad v_1(t) = c_0 \cdot (\varepsilon^I(t) - \varepsilon^R(t));$$

$$(2.8) \quad v_2(t) = c_0 \cdot \varepsilon^T(t);$$

where: v_1 - front speed of the initiating bar;

v_2 - front speed of the transmitting bar.

However, dependencies for forces P_1 , P_2 applied to the edges of the samples are:

$$(2.9) \quad P_1(t) = E \cdot A \cdot (\varepsilon^I(t) + \varepsilon^R(t));$$

$$(2.10) \quad P_2(t) = E \cdot A \cdot \varepsilon^T(t);$$

where: P_1 - force at the end of the initiating bar;

P_2 - force at the end of the transmitting bar.

Additionally, assuming that in a short sample the stress distribution is homogeneous throughout its entire volume, you can determine the average stress inside the sample σ as:

$$(2.11) \quad \sigma(t) = \frac{P_1(t) + P_2(t)}{2 \cdot A_0} = \pm \frac{1}{2} \cdot \frac{E \cdot A \cdot (\varepsilon^I(t) + \varepsilon^R(t) + \varepsilon^T(t))}{A_0};$$

where: A_0 - cross-sectional area of the sample;

A - cross-sectional area of the bars.

When we assume that:

$$(2.12) \quad P_1(t) \cong P_2(t);$$

$$(2.13) \quad \varepsilon^I(t) + \varepsilon^R(t) \cong \varepsilon^T(t);$$

$$(2.14) \quad A = A_0;$$

we will get the stress equation as a function of time inside the sample σ :

$$(2.15) \quad \sigma(t) \cong \pm E \cdot \varepsilon^T(t).$$

Average strain in the sample ε is:

$$(2.16) \quad \varepsilon(t) \cong \pm \frac{2 \cdot c_0}{L_0} \cdot \int_0^t \varepsilon^R(t) dt;$$

where: L_0 - sample length;

and the average strain rate $\dot{\varepsilon}$ can be designated as:

$$(2.17) \quad \dot{\varepsilon}(t) = \frac{2 \cdot c_0}{L_0} \cdot \varepsilon^R(t).$$

However, to determine the circumferential stress of the casing $\sigma_\theta(t)$, the equation must be used:

$$\sigma_\theta(t) \cong \pm E_\theta \cdot \varepsilon^\theta(t);$$

The measurement of peripheral stresses in the casing of the soil test sample is necessary to use the modified Kolsky method that allows determining the volume deformation of the tested sample and the intensity of strain. According to this modified method, the radial strain of the casing ε_r as a function of time is determined from the correlation [33]:

$$(2.18) \quad \varepsilon_r(t) = \frac{R_2^2(1 - \nu) + R_1^2(1 + \nu)}{2 \cdot R_2^2} \cdot \varepsilon^\theta(t);$$

where: R_1 - outer radius of the casing;

R_2 - inner radius of the casing;

ν - Poisson's ratio for the casing material.

Finally, the volume strain of the sample θ and the intensity of strain ε_i at the volumetric stressed condition are determined from the formulas:

$$(2.19) \quad \theta = \varepsilon + 2 \cdot \varepsilon_r.$$

An intensity of strain ε_i :

$$(2.20) \quad \varepsilon_i = \frac{2}{3}(|\varepsilon| + |\varepsilon_r|).$$

Taking into account changes in the volume deformation of the sample, the final correlations for stress and axial strain in the sample take the form:

$$(2.21) \quad \sigma_0(t) = \sigma(t)(1 \pm \varepsilon(t));$$

$$(2.22) \quad \varepsilon_0(t) = \ln(1 \pm \varepsilon(t)).$$

Taking into account - change of sample cross section as a function of time:

$$(2.23) \quad A(t) = \frac{A}{1 \pm \varepsilon(t)}.$$

3. FINDINGS

As a result of a series of test shots, changes in physical characteristics were obtained for each of the soil samples tested, which are presented in Table 1.

Table 1. Summary the of results of the test series.

	Soil sample moisture content			
	$w_1 = 0$ [%]	$w_2 = 4,6$ [%]	$w_3 = 9,6$ [%]	$w_4 = 14,6$ [%]
Sample mass before the shot m_0 [g]	16,00	19,92	17,76	22,28
Sample length before the shot L_0 [mm]	29,70	32,27	29,76	33,10
Bulk density of the soil before the shot $\rho_0 \left[\frac{g}{cm^3} \right]$	1,67	1,91	1,84	2,09
Shot pressure p [bar]	5,03	5,04	5,06	5,02
Bar-projectile speed $v_0 \left[\frac{m}{s} \right]$	33,22	31,45	33,11	30,77
Sample mass after the shot m_1 [g]	16,00	19,87	17,55	20,56
Difference in sample mass Δm [g]	0,00	0,05	0,21	1,72
Sample length after the shot L_1 [mm]	25,20	27,98	25,07	29,03
Difference in sample length ΔL [mm]	4,50	4,29	4,69	4,07
Bulk density of the soil after the shot $\rho_1 \left[\frac{g}{cm^3} \right]$	1,97	2,20	2,16	2,20
Difference in sample bulk density $\Delta \rho$	0,30	0,29	0,32	0,11

Below are the results of experiments in the form of diagrams based on the equations and correlations given in Section 2.3, in the first place these are the strain diagrams obtained directly from strain gauges using synchronization of the initial pulses:

- strain waveforms $\varepsilon^I(t), \varepsilon^R(t), \varepsilon^T(t), \varepsilon^\theta(t)$ for the sample $w_1 = 0$ [%], Figure 8;
- strain waveforms $\varepsilon^I(t), \varepsilon^R(t), \varepsilon^T(t), \varepsilon^\theta(t)$ for the sample $w_2 = 4,6$ [%], Figure 9;

- strain waveforms $\varepsilon^I(t)$, $\varepsilon^R(t)$, $\varepsilon^T(t)$, $\varepsilon^\theta(t)$ for the sample $w_3 = 9,6$ [%], Figure 10;
- strain waveforms $\varepsilon^I(t)$, $\varepsilon^R(t)$, $\varepsilon^T(t)$, $\varepsilon^\theta(t)$ for the sample $w_4 = 14,6$ [%], Figure 11.

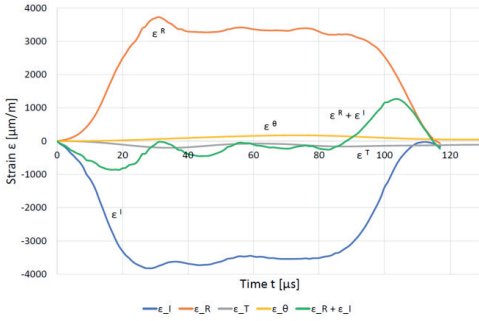


Fig. 8. List of dependencies of longitudinal strain of the bars (ε^I , ε^R , ε^T) and the peripheral strain of the casing ε^θ depending on the time t - sample $w_1 = 0$ [%].

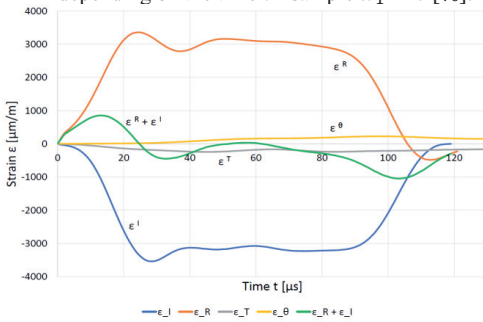


Fig. 10. List of dependencies of longitudinal strain of the bars (ε^I , ε^R , ε^T) and the peripheral strain of the casing ε^θ depending on the time t - sample $w_3 = 9,6$ [%].

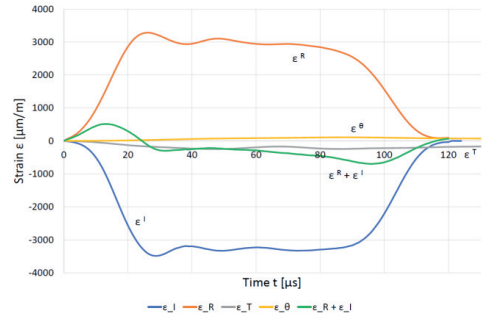


Fig. 9. List of dependencies of longitudinal strain of the bars (ε^I , ε^R , ε^T) and the peripheral strain of the casing ε^θ depending on the time t - sample $w_2 = 4,6$ [%].

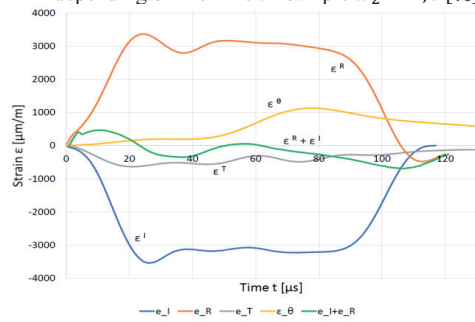


Fig. 11. List of dependencies of longitudinal strain of the bars (ε^I , ε^R , ε^T) and the peripheral strain of the casing ε^θ depending on the time t - sample $w_4 = 14,6$ [%].

The results presented in Figures 8-11 indicate that the increase in the accuracy of the synchronization of the initial pulses allows to obtain a better approximation of the sample equilibrium state. Then, collective charts of changes in the mechanical properties of the tested soil samples are presented as a function of time:

- changes in stress in the ground σ in Figure 12;
- soil strain ε in Figure 13;
- soil strain rate $\dot{\varepsilon}$ in Figure 14.

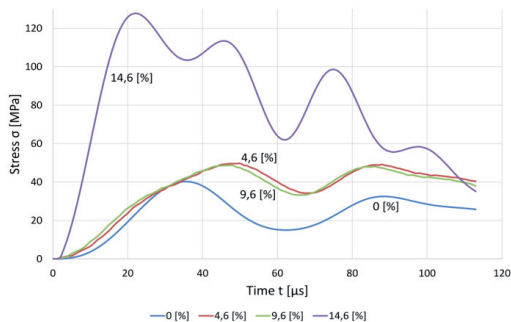


Fig. 12. List of longitudinal stress changes in the sample σ over time t .

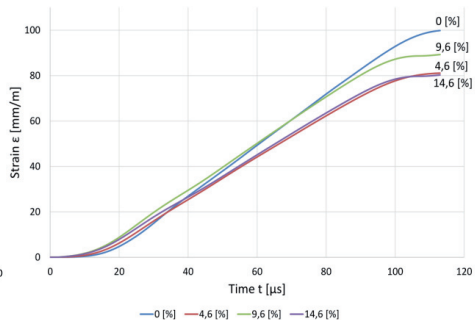


Fig. 13. List of changes in longitudinal strain of the soil samples ε as a function of time t .

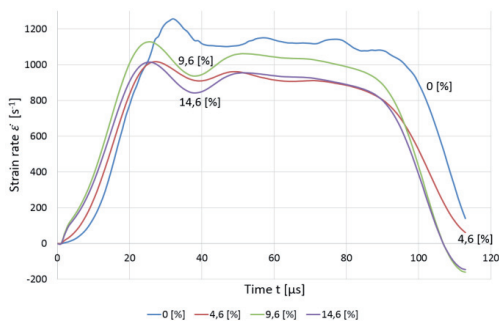


Fig. 14. A collective list of soil strain rate charts $\dot{\varepsilon}$ over time t .

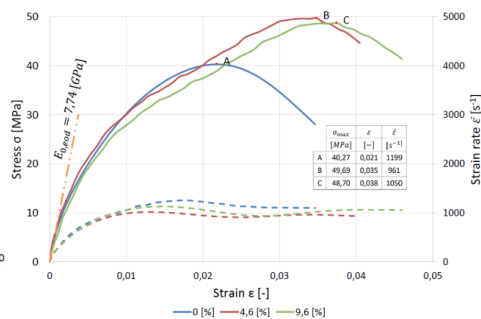


Fig. 15. Collective list of the dependence of stress - strain for the soils with less than total moisture ($w < w_{sat}$).

After testing the sample $w_4 = 14,6$ [%] it was noticed that water splashes appeared on the bars and the casing. The exact water loss can be determined by re-measuring the sample mass after being hit by the bar-projectile - Table 1 provides information on a significant difference in mass m_0 and m_1 compared to the previous results, $\Delta m = 1,72$ [g] can be designated.

The impact of moisture content on the results obtained can be seen on the diagrams of stress changes as a function of strain. In the soil with a moisture content of less than the total ($w < w_{sat}$), the soil skeleton works under conditions of effective stress. In the water-saturated soils under dynamic loads, water with a low content air does not flow out and it works evenly with the soil skeleton. The soil works in total stress, and even water carries the load to a greater extent than the soil skeleton. Figures 15 and 16 show the curves of dynamic compression for various moisture (Fig. 15 for less than total moisture ($w < w_{sat}$), and Fig. 16 for the water-saturated soil) for silty sand soil samples

with determined values of the initial dynamic oedometric modulus $E_{0,oed}$ modulus as well as local maximum plastic stresses and corresponding strains and strain rates, i.e. points A, B, C, and D.

The course of the curves in Figures 15 and 16 is limited to the range of stress changes without the effect of reflected waves. These figures show the initial dynamic oedometric modulus. For the case of moisture $w_1 = 0$ [%], $w_2 = 4,6$ [%] and $w_3 = 9,6$ [%], approximately the value of $E_{0,oed} = 7,74$ GPa was determined and for the case of $w_4 = 14,6$ [%] the value of $E_{0,oed} = 49,58$ GPa was determined.

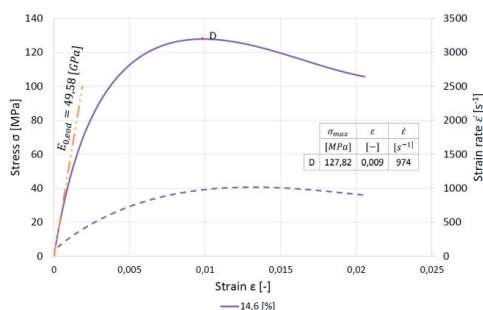


Fig. 16. Dependence of stress - strain for the water-saturated soil.

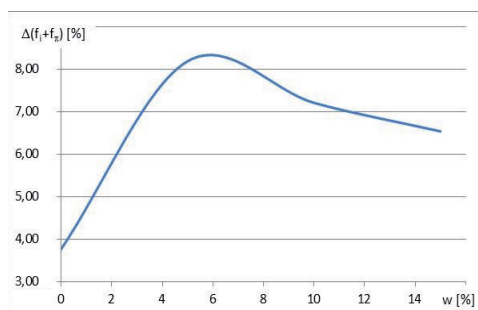


Fig. 17. Change in the content of fine fractions in the soil after the test, depending on the moisture content.

Another element analysed was the unique analysis of the change in granulation of the tested soil samples after the test. Sieve analysis was performed on the soil taken from the samples tested for all four moisture contents, two for each moisture content. The obtained amount of material allowed to perform a sieve analysis with an accuracy of 0,3 [%] of the mass content of individual fractions. The granulation curves had a similar course to the soil curve taken for testing, although some regularities consisting in changes in granulation can be observed. Figure 17 shows the dependence of the change in the content of fine fractions, understood as the sum of the content of the argillaceous fraction f_i and silty f_π after the test $\Delta(f_i + f_\pi)$ depending on the moisture content of the examined soil.

It should be noted that the course of the chart of the fine content change is similar to the course of the optimum moisture content test chart (see Figure 2).

4. DISCUSSION

By analysing summary statements of dependencies it is possible to observe that the sample $w_4 = 14,6$ [%] with selected parameters differs in character from the results for other samples with a lower

water content. It can be suggested that the water contained in the granular soil structure for this sample carries the dynamic load equally and behaves in an elastic way at the moment of dynamic impact. The void ratio of this sample before the test was 0,43, while after the test it amounted to 0,38. The moisture content of the tested sample was higher than the total moisture content of the sample after the test, which was 14,35 [%]. In the remaining samples, in which the degree of filling the pores with water was less than 0,8, the gas (air) filling these pores at the moment of dynamic impact was not able to carry these loads. The energy is used to thicken the air voids. Table 2 below presents the physical characteristics of the samples after the test: the void ratio e , the total moisture content w_{sat} and moisture level S_r .

Table 2. Physical features of the soil with a fine fraction content of 20,5 [%] after the test.

	Initial moisture				Proctor test w_{opt}
	0,0 [%]	4,6 [%]	9,6 [%]	14,6 [%]	9,6 [%]
e	0,35	0,26	0,34	0,38	0,42
w_{sat}	13,03	9,81	13,00	14,36	16,03
S_r	0,00	0,47	0,74	1,02	0,91

It can be seen that after the test, the soil void ratio decreases in relation to that obtained in the Proctor test, which indicates dynamic soil compaction during the test using a SHPB. This compaction is lower in the absence of water in the pores, but decreases with increasing moisture content. For moisture content above optimal, the compaction of the samples is even less than for the dry soils.

To confirm the change in soil compaction under dynamic loading, additional tests were carried out for samples with a fine fraction of 2,9 [%]. Figure 18 below shows the dependence of the change in the content of fine fractions, understood as the sum of the content of argillaceous f_i and silty f_π fractions after the test $\Delta(f_i + f_\pi)$ depending on the moisture content of the examined soil.

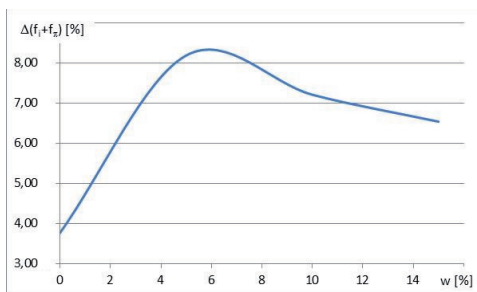


Fig. 18. Change in the content of fine fractions in the soil after the next test, depending on the moisture content.

Table 3 summarizes the physical characteristics of the soil samples with a fine fraction of 2,9 [%] after the SPHB test.

Table 3. Physical features of the soil with a fine fraction content of 2,9 [%] after the test.

	Initial moisture				Proctor test w_{opt}
	0,0 [%]	5,0 [%]	10,0 [%]	15,0 [%]	10,5 [%]
e	0,35	0,32	0,36	0,33	0,39
w_{sat}	13,34	12,15	13,47	12,53	14,76
S_r	0,00	0,38	0,71	1,17	0,71

It should be noted that the highest density of soil subjected to dynamic loading occurs at a moisture content of approximately half of the optimum moisture content.

5. SUMMARY

Experimental oedometric tests using the Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) to determine the dynamic behaviour for 4 ground base samples with different moisture contents ($w_1 = 0$ [%], $w_2 = 4,6$ [%], $w_3 = 9,6$ [%] and $w_4 = 14,6$ [%]) subjected to dynamic impact at a strain rate $\dot{\epsilon}$ of 10^3 . Silty sand soil with a fine fraction of 20,5 [%] was used for the tests. On the basis of signals from measuring strain gauges stuck on the initiating and transmitting bars and the sample casing, as well as using appropriate equations contained in the literature used, the following experimental relations were determined: soil sample stress $\sigma(t)$, its strain $\epsilon(t)$ and strain rates $\dot{\epsilon}(t)$, depending on the time. The obtained diagrams of strain from strain gauges allowed to receive the curves of dynamic compression for various moisture for silty sand soil samples with determined values of the initial dynamic oedometric modulus $E_{0, oed}$ as well as local maximum plastic stresses and corresponding strains.

It becomes advisable to conduct further experiments for a larger number of series of tests using the SHPB and to confirm whether the above described phenomenon of soil granulation change after the test also takes place at other contents of fine fractions. These tests should cover soils with different granulations and different moisture contents. During these tests, it is also necessary to determine the impact of the fine fraction content ($f_i + f_\pi$) and moisture content on the change in soil compaction in relation to the optimum moisture content and porosity index.

Another area for analysis is to examine the effect of moisture content on dynamic compaction. The test results obtained show that this compaction is different than in the case of the Proctor test.

REFERENCES

- [1] Field, J. E., Walley, S.M., Proud, W. G., Goldrein, H. T. and Siviour, C. R. (2004). "Review of experimental techniques for high rate deformation and shock studies". *International Journal of Impact Engineering*, 30(7): 725-775.
- [2] An, H.M. and Liu, L. (2019). "Numerical study of dynamic behaviors of concrete under various strain rates". *Archives of Civil Engineering*, LXV(4): 21-36.
- [3] Felice, C.W., Gaffney, E.S., Brown, J.A. and Olsen, J.M. (1987). "Dynamic high stress experiments on soil". *Geotech. Test. J.*, 10: 192-202.
- [4] Charlie, W.A., Ross, C.A. and Pierce, S.J. (1990). "Split-Hopkinson pressure bar testing of unsaturated sand". *Geotech. Test. J.*, 13: 291-300.
- [5] Bragov, A.M., Gandurin, V.P., Grushevskii, G.M. and Lomunov, A.K. (1995). "New potentials of Kolsky's method for studying the dynamic properties of soft soils". *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 36: 476-481.
- [6] Bragov, A.M., Grushevsky, G.M. and Lomunov, A.K. (1996). "Use of the Kolsky method for confined tests of soft soils". *Experimental Mechanics*, 36: 237-242.
- [7] Bragov, A.M., Lomunov, A.K., Chmielewski, R. and Kruszka, L. (2002). „Study of dynamic properties of selected soils at high rate of loading (in Polish)". *Biuletyn WAT*, LI: 59-72.
- [8] Bragov, A.M., Lomunov, A.K., Sergeichev, I.V., Tsembelis, K. and Proud W.G. (2008). "Determination of physicommechanical properties of soft soils from medium to high strain rates". *International Journal of Impact Engineering*, 35: 967-976.
- [9] Martin, B.E., Chen, W., Song, B. and Akers, S.A. (2009). "Moisture effects on the high strain-rate behavior of sand". *Mech. Mater.*, 41: 786-798.
- [10] Song, B., Chen, W. and Luk, V. (2009). "Impact compressive response of dry sand". *Mech. Mater*, 41: 777-785.
- [11] Huang, S., Chen, R. and Xia, K.W. (2010). "Quantification of dynamic tensile parameters of rocks using a modified Kolsky tension bar apparatus". *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2(2): 162-168.
- [12] Luo, H., Lu, H., Cooper, W.L. and Komanduri, R. (2011). "Effect of mass density on the compressive behavior of dry sand under confinement at high strain rates". *Experimental Mechanics*, 51: 1499-1510.
- [13] Omidvar, M., Iskander, M. and Bless, S. (2012). "Stress-strain behavior of sand at high strain rates". *International Journal of Impact Engineering*, 49: 192-213.
- [14] Xia, K. and Yao, W. (2015). "Dynamic rock tests using split Hopkinson (Kolsky) bar system – A review". *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 7(1): 27-59.
- [15] Li, M., Mao, X., Cao, L. and Pu, H. (2017). "Influence of Heating Rate on the Dynamic Mechanical Performance of Coal Measure Rocks". *International Journal of Geomechanics*, 17(8).
- [16] Lv, Y., Liu, J. and Xiong, Z. (2019). "One-dimensional dynamic compressive behavior of dry calcareous sand at high strain rates". *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(1): 192-201.
- [17] Wen, S., Zhang, C., Chang, Y. and Hu, P. (2019). "Dynamic compression characteristics of layered rock mass of significant strength changes in adjacent layers". *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12(2): 353-365.
- [18] Xu, J., Kang, Y., Wang, Z. and Wang, X. (2020). "Dynamic Mechanical Behavior of Granite under the Effects of Strain Rate and Temperature". *International Journal of Geomechanics*, 20(2).
- [19] Wang, Z. and Lu, Y. (2003). "Numerical analysis on dynamic deformation mechanism of soils under blast loading". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 23: 705-714.
- [20] An, J. (2010). "Soil behavior under blast loading". Ph.D. dissertation, University of Nebraska.
- [21] An, J., Yuan, C. Y., Cheeseman, B. A. and Gazonas, G. A. (2011). "Simulation of Soil Behavior under Blast Loading". *International Journal of Geomechanics*, 11(4).
- [22] Anderson, C.E., Behner, T., Weiss, C.E., Chocron, S. and Bigger R.P. (2010). "Mine blast loading: experiments and simulations", Southwest Research Institute, Report 18.12544/011.
- [23] Windisch, E.J. and Yong, R.N. (1970). "The Determination of soil strain-rate behavior beneath a moving wheel". *Journal of Terramechanics*, 7(1): 55-67.
- [24] Gu, Q. and Lee, F.H. (2002). "Ground response to dynamic compaction of dry sand". *Geo-technique*, 52(7): 481-493.
- [25] Holscher, P. and van Tol, F. (2009). "Rapid load testing on piles". *Balkema: CRC Press, Taylor and Francis Group*.
- [26] Hopkinson, J. (1872). "On the rupture of iron wire by a blow". *Proc. Manchester Literary Philosophical Society*, 11: 40-45.

- [27] Hopkinson, J. (1872). "Further experiments on the rupture of iron wire". *Proc. Manchester Literary Philosophical Society*, 11: 119-121.
- [28] Hopkinson, B. (1914). "A method of measuring the pressure produced in the detonation of high explosives or by the impact of bullets". *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, A213: 437-456.
- [29] Kolsky, T.E. (1949). "An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading". *Proc. Phys. Soc.*, B62: 676.
- [30] Guo, X., Sow, C-T., Khalil, C., Heuzé, T. and Racineux, G. (2019). "Material constitutive behavior identification at high strain rates using a direct-impact Hopkinson device." *7th International Conference on High Speed Forming (ICHSF) Germany 2016*.
- [31] Couque, H. (2014). "The use of the direct impact Hopkinson pressure bar technique to describe thermally activated and viscous regimes of metallic materials." *Philosophical transactions of the Royal Society A*, 372, 2023.
- [32] Semblat, J-F., Luong, P.M. and Gary, G. (1999). "3D-Hopkinson Bar: New Experiments for Dynamic Testing on Soils." *Soils and Foundations*, 39: 1-10.
- [33] Bragov, A.M., Lomunov, A.K., Konstantinov, A.Yu., Lamzin, D.A., Balandin, V.I.VI. (2016). "Estimation of radial strain of specimen on the basis of the theoretical and experimental analysis of a technique dynamic tests of materials in a rigid ferrule (in Russian)." *Problems of Strain and Plasticity Journal*, 78 (4): 378-387.

LIST OF FIGURES AND TABLES:

Fig. 1. Granulation curve of the tested soil

Fig. 2. Diagram of optimal moisture content of the tested soil

Fig. 3. SHPB test stand

Fig. 4. Wave chart illustrating the phenomenon of elastic wave propagation in a Split Hopkinson Pressure Bar

Fig. 5. Samples of recorded pulse shapes from three measurement channels

Fig. 6. Diagram of elastic wave propagation in a measuring bar

Fig. 7. Contact of the sample with the fronts of both measuring bars

Fig. 8. List of dependencies of longitudinal strain of the bars (ε^L , ε^R , ε^T) and the peripheral strain of the casing ε^θ depending on the time t - sample $w_1 = 0$ [%]

Fig. 9. List of dependencies of longitudinal strain of the bars (ε^L , ε^R , ε^T) and the peripheral strain of the casing ε^θ depending on the time t - sample $w_2 = 4,6$ [%]

Fig. 10. List of dependencies of longitudinal strain of the bars (ε^L , ε^R , ε^T) and the peripheral strain of the casing ε^θ depending on the time t - sample $w_3 = 9,6$ [%]

Fig. 11. List of dependencies of longitudinal strain of the bars (ε^L , ε^R , ε^T) and the peripheral strain of the casing ε^θ depending on the time t - sample $w_4 = 14,6$ [%]

Fig. 12. List of longitudinal stress changes in the sample σ over time t

Fig. 13. List of changes in longitudinal strain of the soil samples ε as a function of time t

Fig. 14. A collective list of soil strain rate charts $\dot{\varepsilon}$ over time t

Fig. 15. Collective list of the dependence of stress - strain for the soils with less than total moisture ($w < w_{sat}$)

Fig. 16. Collective list of the dependence of stress - strain for the water-saturated soil

Fig. 17. Change in the content of fine fractions in the soil after the test, depending on the moisture content

Fig. 18. Change in the content of fine fractions in the soil after the next test, depending on the moisture content

Tab. 1. Summary the of results of the test series

Tab. 2. Physical features of the soil with a fine fraction content of 20,5 [%] after the test

Tab. 3. Physical features of the soil with a fine fraction content of 2,9 [%] after the test

EKSPERYMENTALNE BADANIE DYNAMICZNEGO ZACHOWANIA PIASKU PYLASTEGO

Słowa kluczowe: mechanika gruntu, eksperymentalne testy dynamiczne, dzielony pręt Hopkinsona, test edometryczny.

Streszczenie. Artykuł obejmuje edometryczne badania eksperymentalne z wykorzystaniem techniki pręta Hopkinsona do określenia zarówno dynamicznego zachowania jak i zmian struktury dla próbek wybranego ośrodka gruntowego o różnej wilgotności poddanych oddziaływaniu dynamicznemu. Do badania wzięto piasek pylasty (siSa) o zawartości frakcji drobnych $f_i + f_\pi = 20,46\%$. W celu zapewnienia wystąpienia jednoosiowego stanu odkształcenia badanej próbki gruntu umieszczono ją w odpowiednio przygotowanej duraluminiowej osłonie pierścieniowej. Dzięki zastosowaniu tensometrów pomiarowych na prętach inicjującym oraz transmitującym, jak również osłonie zarejestrowano różne impulsy, które następnie poddano procesowi filtracji i obróbki danych, tak aby otrzymać obrazy propagacji sprężystych fal w prętach pomiarowych i w osłonie. Wykorzystując odpowiednie równania oraz zależności zmodyfikowanej metody Kolsky'ego dla trójwymiarowego stanu naprężenia w badanej próbce określono eksperymentalne zależności charakteryzujące zachowanie się próbek gruntu o różnej wilgotności: naprężenie $\sigma(t)$, odkształcenie $\varepsilon(t)$ oraz prędkość odkształcenia $\dot{\varepsilon}(t)$ w funkcji czasu. Na tej podstawie uzyskano krzywe ściskania dynamicznego dla różnej wilgotności próbek gruntu pylastego z określonymi wartościami początkowego dynamicznego edometrycznego modułu oraz lokalnych maksymalnych naprężeń plastycznych i odpowiadających im odkształceń. Podczas powyższych eksperymentów dynamicznych z próbkami gruntów typu piasek pylastego zaobserwowano, że jego dynamiczne zagęszczenie przy dużej szybkości odkształcania jest inne niż w przypadku testu Proctora. Wynika to z większej energii zagęszczania, która dodatkowo powoduje zmianę uziarnienia poprzez niszczenie ziaren w strukturze. W pracy przedstawiono wyniki analizy zmian uziarnienia dla dwóch różnych rodzajów próbek gruntu - tego typu analizy są unikalne. W związku z tym należy kontynuować eksperymenty dla takich gruntów o różnych granulacjach i różnej wilgotności, stosując technikę prętów pomiarowych Hopkinsona, w celu potwierdzenia opisanego zjawiska w innych gruntach typu piasek pylastego, które często są podłożem gruntowym dla różnych obiektów inżynierskich.

Received: 13.09.2020, Revised: 22.10.2020

Warszawa, 16.07.2022 r.

Ryszard Chmielewski
Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji
Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy badawczej, której wynikiem była publikacja:

Ryszard Chmielewski, Leopold Kruszka, Ryszard Rekucki, Kamil Sobczyk (2021):
Experimental investigation of dynamic behavior of silty sand, Archives of Civil Engineering,
67(1), 481, <https://doi.org/10.24425/ace.2021.136484>

mój merytoryczny wkład polegał na:

- 1) analizie próbek gruntu o różnej zawartości pylastej i wyselekcjonowaniu wybranych próbek piasku pylastego do eksperymentów fizycznych;
- 2) nadzorze krytycznym nad normową poprawnością prowadzonych badań laboratoryjnych;
- 3) przeprowadzeniu kontroli bieżącej wilgotności próbek gruntu bezpośrednio przed eksperymentem fizycznym;
- 4) opracowaniu wybranych elementów krytycznej dyskusji nad rezultatami eksperymentów fizycznych;
- 5) przeprowadzeniu sprawdzenia korygującego wybrane graficzne wykresy;
- 6) współudziale w edycji tekstu manuskryptu;
- 7) przedstawieniu propozycji wybranych wniosków końcowych.

.....Chmielewski.....
podpis

Warszawa, 16.07.2022 r.

Leopold Kruszka
Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji
Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy badawczej, której wynikiem była publikacja:

Ryszard Chmielewski, **Leopold Kruszka**, Ryszard Rekucki, Kamil Sobczyk (2021):
Experimental investigation of dynamic behavior of silty sand, Archives of Civil Engineering,
67(1), 481, <https://doi.org/10.24425/ace.2021.136484>

mój merytoryczny wkład polegał na:

- 1) sformułowaniu celów i założeń pracy badawczej związanej z przeprowadzaniem dynamicznych eksperymentów fizycznych dla określenia zachowania się piasku pylastego w jednoosiowym stanie odkształcenia za pomocą stanowiska badawczego pn. dzielony pręt Hopkinsona na ściskanie;
- 2) udziale jako opiekun naukowy w pozyskaniu funduszy z NCN na zakup materiałów do badań w ramach opracowania Preludium edycja nr 42 (nr rej. wniosku 2021/41/N/ST10/01303);
- 3) szczegółowej analizie uzyskanych wyników eksperymentów fizycznych, w szczególności dynamicznych zależności - rzeczywistych wykresów ściskania badanego piasku pylastego: naprężenie-odkształcenie oraz prędkość odkształcenia-odkształcenie z uwzględnieniem jego wilgotności;
- 4) udziale w opracowaniu manuskryptu artykułu od strony merytorycznej, łącznie z wnioskami końcowymi;
- 5) występowaniu jako autor korespondencyjny i wypracowaniu z zespołem autorskim odpowiedzi i korekt wynikających z procesu recenzji.

.....
.....
podpis

Warszawa, 16.07.2022 r.

Ryszard Rekucki
Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji
Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie

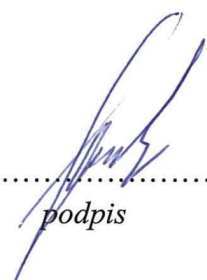
OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy badawczej, której wynikiem była publikacja:

Ryszard Chmielewski, Leopold Kruszka, **Ryszard Rekucki**, Kamil Sobczyk (2021):
Experimental investigation of dynamic behavior of silty sand, Archives of Civil Engineering,
67(1), 481, <https://doi.org/10.24425/ace.2021.136484>

mój merytoryczny wkład polegał na:

- 1) współudziale w przygotowaniu aparatury SHPB (w tym układu mostka Wheatstone'a i naklejeniu tensometrów pomiarowych);
- 2) nadzorze krytycznym nad przeprowadzeniem kalibracji i kontroli gotowości stanowiska badawczego SHPB do wykonania fizycznego eksperymentu;
- 3) współudziale w wykonaniu fizycznych eksperymentów zgodnie z opracowaną metodyką badawczą oraz nadzorze krytycznym nad zgodnością prowadzonych fizycznie eksperymentów w porównaniu do założeń ich metodyki;
- 4) przeprowadzeniu sprawdzenia korygującego wybrane analizy danych źródłowych z tensometrów pomiarowych;
- 5) współudziale w edycji tekstu manuskryptu;
- 6) przedstawieniu propozycji wybranych wniosków końcowych.

.....

podpis

Kamil Sobczyk
Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji
Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy badawczej, której wynikiem była publikacja:

Ryszard Chmielewski, Leopold Kruszka, Ryszard Rekucki, **Kamil Sobczyk** (2021):
Experimental investigation of dynamic behavior of silty sand, Archives of Civil Engineering,
67(1), 481, <https://doi.org/10.24425/ace.2021.136484>

mój merytoryczny wkład polegał na:

- 1) realizacji przeglądu aktualnej literatury i bieżących trendów naukowych w analizowanej tematyce;
- 2) wykonaniu laboratoryjnych badań: analizy sitowej (krzywej uziarnienia) oraz wilgotności optymalnej wybranego piasku pylastego wraz z opracowaniem wyników;
- 3) opracowaniu procedury przygotowania próbek piasku pylastego w osłonie;
- 4) opracowanie koncepcji metodyki badania dynamicznego piasku pylastego o różnej wilgotności z wykorzystaniem stanowiska SHPB;
- 5) współudziale w przygotowaniu aparatury SHPB (w tym układu mostka Wheatstone'a i naklejeniu tensometrów pomiarowych) oraz przeprowadzeniu kalibracji i kontroli gotowości aparatury stanowiska SHPB do przeprowadzenia fizycznych eksperymentów;
- 6) współudziale w wykonaniu fizycznych eksperymentów zgodnie z opracowaną metodyką badawczą;
- 7) opracowaniu i analizie danych źródłowych z tensometrów pomiarowych (w tym praca nad danymi w oprogramowaniu SigmaPlot i FlexPro);
- 8) wykonaniu zestawienia graficznego wykresów dynamicznego zachowania badanego piasku pylastego;
- 9) opracowaniu wybranych elementów krytycznej dyskusji nad rezultatami eksperymentów fizycznych;
- 9) opracowaniu graficznym ilustracji i wykresów oraz współudziale w edycji tekstu manuskryptu;
- 10) podsumowaniu prowadzonych prac badawczych oraz sformułowaniu wniosków końcowych wraz z korektami i odpowiedziami wynikającymi z procesu recenzji.

Oświadczam, że jestem pomysłodawcą i autorem większościowym w/w publikacji.

Publikacja przygotowana w ramach opracowania przeze mnie w roli kierownika projektu wniosku o pozyskaniu funduszy z NCN na zakup materiałów do badań - konkurs Preludium edycja nr 42 (nr rej. wniosku 2021/41/N/ST10/01303).

.....

.....
podpis

Article

Analysis of the Influence of Silty Sands Moisture Content and Impact Velocity in SHPB Testing on Their Compactability and Change in Granulometric Composition

Kamil Sobczyk *, Ryszard Chmielewski, Leopold Kruska and Ryszard Rekucki

Department of Military Engineering and Military Infrastructure, Faculty of Civil Engineering and Geodesy, Military University of Technology, 2 Gen. Sylwester Kaliski Str., 00-908 Warsaw, Poland; rysard.chmielewski@wat.edu.pl (R.C.); leopold.kruska@wat.edu.pl (L.K.); rysard.rekucki@wat.edu.pl (R.R.)

* Correspondence: kamil.sobczyk@wat.edu.pl

Abstract: This paper presents the results of a test cycle of two types of silty sand (*siSa*) with different contents of fine fractions. Fine fractions are understood as soil grains with a grain diameter of less than 63 μm (as the sum of silt and clay fractions). The soils tested had a content of fine fractions of $f_{\text{si+cl},1} = 15.14\%$ and $f_{\text{si+cl},2} = 20.48\%$, respectively, before the study. Changes in the content of these fractions after the experiments were analyzed. These experiments consisted of dynamic bar projectile impact loading, and a split Hopkinson pressure bar (SHPB) test stand was used in the study. Changes in the granulometric composition of the silty sands studied were carried out in a laser particle size analyzer, allowing measurement of fractional content in the grain size range from 0.01 μm to 3500 μm . As a result, a summary of changes in soil grain size curves in the range of fine fractions was compiled. Repeated trends were observed in the changes in the granulometric composition of the soil samples as a function of the moisture content of the soil sample ($w_1 = 0\%$, $w_2 = 5\%$, $w_3 = 10\%$, and $w_4 = 15\%$) and the impact velocity of the loading bar projectile for SHPB pneumatic launcher pressures ($p_1 = 1.2 \text{ bar} \rightarrow v_1 = 12.76 \text{ m/s}$, $p_2 = 1.8 \text{ bar} \rightarrow v_2 = 17.69 \text{ m/s}$ and $p_3 = 2.4 \text{ bar} \rightarrow v_3 = 21.32 \text{ m/s}$). The influence of the initial moisture content of the investigated soil on the value of the optimum moisture content obtained during its dynamic compaction was discussed. The trend in the behavior of the change in the granulometric composition of the tested samples was determined, taking the value of the initial moisture content of the soil in relation to the optimum moisture content of the reference sample as a reference. The largest percentage change in granulometric composition through an increase in the value of the silt and clay fraction relative to the reference sample $f_{\text{si+cl}}$ for both types of silty sand tested occurs for the same moisture content variant $w_2 = 5\%$ —for soil $f_{\text{si+cl},1} = 15.14\%$ there is an increase in the fine fraction of 11.08% and for soil $f_{\text{si+cl},2} = 20.48\%$ there is an increase in the fine fraction of 15.17%. In general, it can be seen that more silty soil is more strongly susceptible to the phenomenon of grain crushing for moisture content $w_1 = 0\%$ and $w_2 = 5\%$ less than its optimum moisture content $w_{\text{opt},1} = 8.70\%$. In contrast, less silty soil is more susceptible to the phenomenon of grain crushing for moisture contents $w_3 = 10\%$ and $w_4 = 15\%$ greater than its optimum moisture content $w_{\text{opt},2} = 9.20\%$. The presented dynamic physical phenomenon of soil behavior is crucial during explosive and impact impacts on structures made of soil, e.g., as ground protection layers.

Citation: Sobczyk, K.; Chmielewski, R.; Kruska, L.; Rekucki, R. Analysis of the Influence of Silty Sands Moisture Content and Impact Velocity in SHPB Testing on Their Compactability and Change in Granulometric Composition. *Appl. Sci.* **2023**, *13*, 4707. <https://doi.org/10.3390/app13084707>

Academic Editor: Jong Wan Hu

Received: 14 March 2023

Revised: 1 April 2023

Accepted: 6 April 2023

Published: 8 April 2023



Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Keywords: granulometric composition; grain crushing; laser particle size analyzer; silty sand; soil; high strain rate; split Hopkinson pressure bar

1. Introduction

Issues related to the behavior of different materials subjected to dynamic impact using a split Hopkinson pressure bar test stand are an important part of impact engineering. For many years, there has been an unflagging interest and continuous development in the

area of experiments on the dynamic mechanical properties of various structural materials, including building materials—the materials studied include metals [1–3], polymers [4–6], concrete [7–9], reinforced composites [10–12], wood [13–15], rocks [16–18] and, more recently, soils [19–22]. Soils are used as an energy-absorbing material during explosive and impact impacts on structures as ground protective layers for these structures. The intensification of research has also been accompanied by an increase in publications on the subject of modifying the specimen variants used and the experimental conditions associated with the Hopkinson bar technique. A summary of the conducted dynamic research, together with the construction and description of the SHPB test stand, has been collected in several review articles [23–25]. Table 1 shows a comparison of the total number of scientific papers (research and review article, book chapter, conference paper) using “Hopkinson bar” as a keyword between 2018 and 2022 according to the resources of the scientific databases Web of Science and Springer Link.

Table 1. Summary of the total number of scientific papers (research and review article, book chapter, conference paper) using “Hopkinson bar” as a keyword concerning dynamic experiments with samples of different materials from 2018 to 2022 according to the resources of the scientific databases Web of Science and Springer Link [26,27].

Year	Web of Science	Springer Link
2022	592	587
2021	538	456
2020	510	351
2019	486	359
2018	447	321

Directly related to the conduct of dynamic experiments based on the SHPB test stand is the issue of the effect of loading rate on changes in the microstructure of the tested sample—the group of structurally sensitive materials to dynamic effects includes brittle materials: rocks [28–30], coal [31,32], and loose material, e.g., non-cohesive soils [33–36]. Particularly valuable are the analyses and conclusions of published dynamic SHPB studies conducted for concrete samples [37] and different types of sand—coral sand [38] and calcareous sand [39]. Issues related to these analyses of the grain size change as the effect of particle size distribution on dynamic properties of different types of sand, e.g., calcareous sand and coral sand [40–42]. The mechanical behavior of different types of sand is strongly related to the particle size of the grains in its soil skeleton. In the reviewed papers, studies were conducted to investigate the effect of particle size distribution on the impact resistance of samples of different sand types based on SHPB dynamic tests. The results of the study were interpreted that sands (e.g., coral sand) experienced a very strong and sudden increase followed by a slow, gradual decrease in impact resistance with increasing average particle size d_{50} and cohesion c . Sands of different grain sizes had concretely apparent different force transmission mechanisms and failure patterns. When the particles were uniformly distributed, strength was provided by an arrangement of particles with the correct diameter and with cohesion c resulting from the fine fraction. Strength decreased when particle breakage occurred, and the force transmission mechanism changed, which also led to an uneven particle size distribution process.

The subject of this article is a non-cohesive soil—silty sand. It is often used as a backfill soil, i.e., an explosion-absorbing material in protective construction. The effect of dynamic action on loose soil—silty sand can be characterized by comparative analysis of the individual fractions in the soil structure (in particular, consider sandy fractions f_{sa} , silty fractions f_{si} , and clay fractions f_{ci}). A schematic division of the soil fractions according to [43] is shown in Figure 1.

Cl	Si			Sa			Gr			Co
	FSi	MSi	CSi	FSa	MSa	CSa	FGr	MGr	CGr	
	0,002	0,0063	0,02	0,063	0,2	0,63	2	6,3	20	63
										[mm]

Figure 1. Schematic division of soil fractions (adapted from Ref. [43]). Orange and green colors indicate the key range of silt fraction f_{Si} and clay fraction f_{Cl} in this article together with the limiting grain size diameters.

Testing the grain size distribution of non-cohesive soils is carried out by determining the granulometric composition using the laboratory sieve method according to [44]. The smallest mesh diameter of the sieve is 0.063 mm (63 μm)—in order to gain a more accurate understanding of the further course of the grain size curve in the range below 63 μm , it is necessary to use precision laboratory equipment, as aerometric analysis for small soil samples is not feasible. In this study, a laser particle size analyzer was used to produce a more detailed grain size curve from a grain size of 0.01 μm to 3500 μm —additional grain size curve data in the range of 0.01–63 μm can be obtained in comparison with classic sieve analysis (gradation test).

Sand, as a natural granular material, is a complex non-equilibrium energy dissipating system requiring detailed analyses. This is the motivation of the authors of the manuscript to add to the wide area of already existing publications on different sands the results of dynamic studies for one type of sand—silty sand (there is still a space of insufficiently studied examples of these soils). The aim of this study was to investigate the change in the granulometric composition of silty sand (two soil types— $f_{Si+Cl,1} = 15.14\%$ and $f_{Si+Cl,2} = 20.48\%$) in dynamic SHPB experiments with varying moisture content— $w_1 = 0\%$, $w_2 = 5\%$, $w_3 = 10\%$ and $w_4 = 15\%$ —and the impact velocity of the loading bar projectile for SHPB pneumatic launcher pressures— $p_1 = 1.2$ bar ($v_1 = 12.76$ m/s), $p_2 = 1.8$ bar ($v_2 = 17.69$ m/s), and $p_3 = 2.4$ bar ($v_3 = 21.32$ m/s).

Major points of highlights and innovations of study in this paper:

- Use of laser particle size analyzer to determine the grain size composition of the soil sample (grain size curve)—a more accurate method due to the wide range of possibilities for 0.01 μm to 3500 μm grain diameters testing compared to classic sieve analysis (gradation test) and aerometric analysis methods.
- Two types of silty sand with different contents of fine fractions were used for the study— $f_{Si+Cl,1} = 15.14\%$ and $f_{Si+Cl,2} = 20.48\%$. The manuscript also has a practical (not only academic) aspect because the two types of silty sand studied were from the construction site of two different construction critical infrastructure facilities in Poland—the soil samples taken were really existing in the subsoil.
- The study was conducted for a number of variants of soil samples depending on the variables, the impact velocity of the loading bar projectile for SHPB pneumatic launcher pressures, and moisture content of the sample (below and above the optimum moisture content) in order to create several potential sets of conditions for the use of this soil as, for example, ground protection layers loaded by dynamic action.
- Repeatable trends in changes in the granulometric composition of soil samples were observed and shown graphically on grain size curves. The largest percentage change in granulometric composition through an increase in the value of the silt and clay fraction relative to the reference sample f_{Si+Cl} for both types of silty sand tested occurs for the same moisture content variant $w_2 = 5\%$ —for soil $f_{Si+Cl,1} = 15.14\%$, there is an increase in the fine fraction of 11.08%, and for soil $f_{Si+Cl,2} = 20.48\%$, there is an increase in the fine fraction of 15.17%.

2. Characteristics of Soil Samples

In this study, two different types of non-cohesive soil samples were analyzed—two samples of silty sand with different percentages of fine fractions (silt and clay) in the soil skeleton. The silty sand is an example of a poorly expansive soil (doubtful soil—

ambiguous expansivity) and belongs to the group of soils between expansive and non-expansive soils (using the expansivity criterion according to Wilun). The criteria for soil freeze–thaw effects depend on the physical properties of the soil. Non-cohesive soils with a low silt and clay fraction do not form freeze–thaw effects even when saturated with water. The ice that forms in them presses excess water downwards so that these soils contain less water in the pores after freezing than before. Cohesive soils, on the other hand, which contain more silty particles, are more expansive; the finer the grain size, the higher the moisture content. The finer the grain size of the soil, the greater its moisture content. The finer the grain size of the soil, the smaller the pore size, and the more pores are almost completely filled with adsorbed water, the better the conditions for the formation of separated ice lenses and the formation of freeze–thaw effects. Poorly expansive soils (also referred to as doubtful soils) contain about 20–30% of particles smaller than 0.05 mm and about 3–10% of particles smaller than 0.002 mm [45–47]. Table 2 shows the accepted general division of soils into four groups in terms of their susceptibility to the phenomenon of freeze–thaw effects [48].

Table 2. General classification of soil types with regard to the phenomenon of freeze–thaw effects (symbols of soil names according to [43]).

Group I Non-Expansive Soils	Group II Poorly Expansive Soils (Doubtful Soils)	Group III Expansive Soils	Group IV Very Expansive Soils
gravel (Gr)	silty sand (siSa)	sandy-silty clay (sasiCl)	clayey sand (clSa)
sand-gravel mix (grSa)	clayey gravel (clGr)	clay (Cl)	sandy silt (saSi)
coarse sand (CSa)	clayey sand-gravel mix (grclSa)	sandy clay (saCl)	silt (Si)
medium sand (MSa)		silty clay (siCl)	clayey silt (clSi)
fine sand (FSa)			

Samples of silty sand with different silt and clay fraction contents were used in the research within the scope of this article. In order to correctly analyze the change in the granulometric composition of the silty sand, a key step is to determine the initial grain size structure for the reference samples. A state-of-the-art laser particle size analyzer Bettersizer S3 Plus was used in the study in the wet soil sample variant—a detailed description of the test methodology is presented in Chapter 3. As a result of the analysis, graphs of grain size curves were determined, and the content of the silt and clay fraction (understood as the percentage of grains with a diameter of less than 63 µm) was found to be equal for the:

- first type of soil sample— $f_{Si+Cl,1} = 15.14\%$ (the grain size curve in Figure 2a);
- second type of soil sample— $f_{Si+Cl,2} = 20.48\%$ (the grain size curve in Figure 2b).

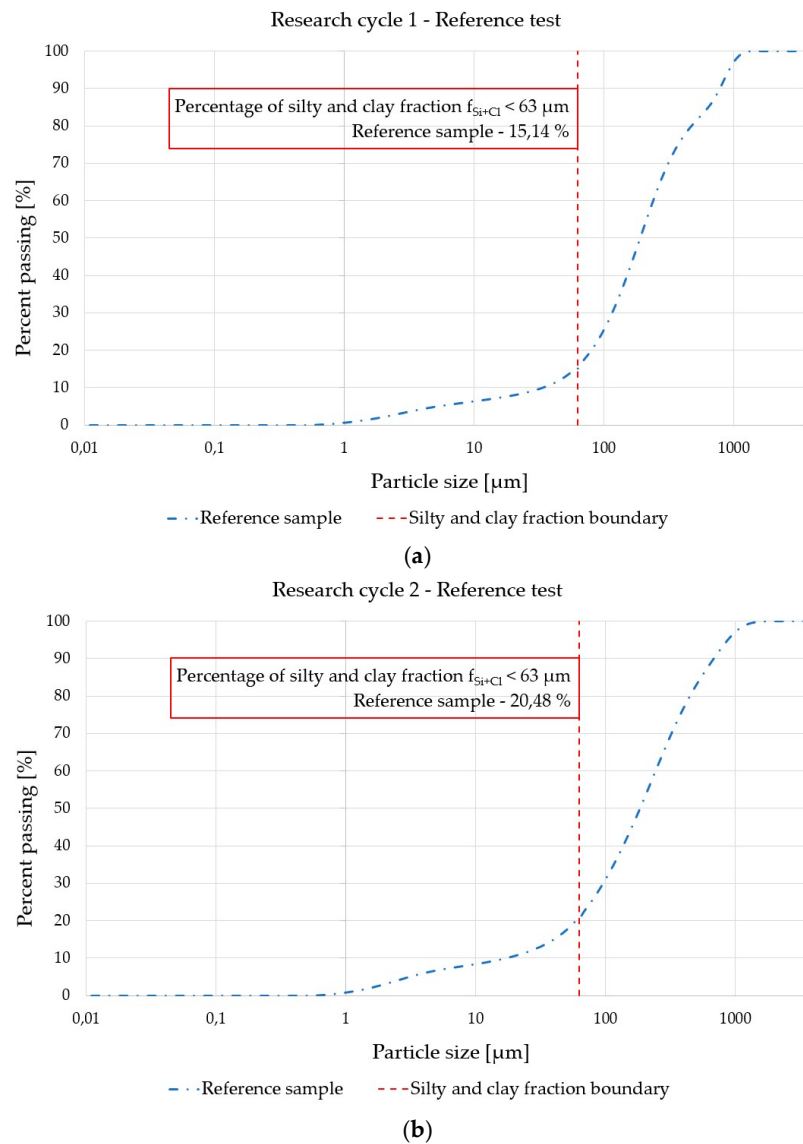


Figure 2. Comparison of graphs of grain size curves for silty sand with silt and clay fractions: (a) $f_{Si+Cl,1} = 15.14\%$ and (b) $f_{Si+Cl,2} = 20.48\%$.

Figure 3 shows the macroscopic appearance of the two reference samples of silty sand. Visually comparing them to each other, it is not possible to visually identify them due to the small grain diameter size in the silt and clay fractions—macroscopically, the samples appear similar.

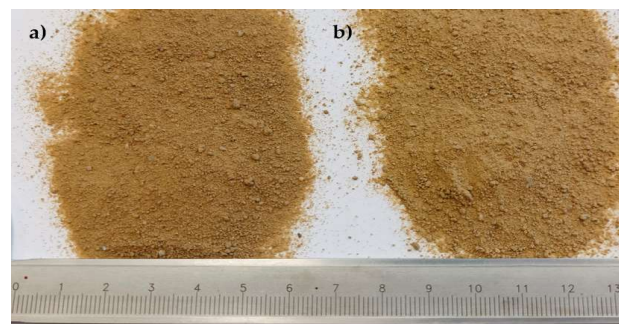


Figure 3. Macroscopic view comparison of reference silty sand samples: (a) $f_{Si+Cl,1} = 15.14\%$ and (b) $f_{Si+Cl,2} = 20.48\%$.

Both types of samples were analyzed in the optimum moisture content test (Proctor apparatus) according to [49]. The value of the optimum moisture content w_{opt} was determined for the obtained maximum volumetric density of the soil skeleton $\rho_{d,max}$, at constant compaction energy and for different moisture contents:

- for $f_{Si+Cl,1} = 15.14\%$ — $\rho_{d,max,1} = 1.89 \text{ g/cm}^3 \rightarrow w_{opt,1} = 8.70\%$ (Figure 4a);
- for $f_{Si+Cl,2} = 20.48\%$ — $\rho_{d,max,1} = 1.95 \text{ g/cm}^3 \rightarrow w_{opt,2} = 9.20\%$ (Figure 4b).

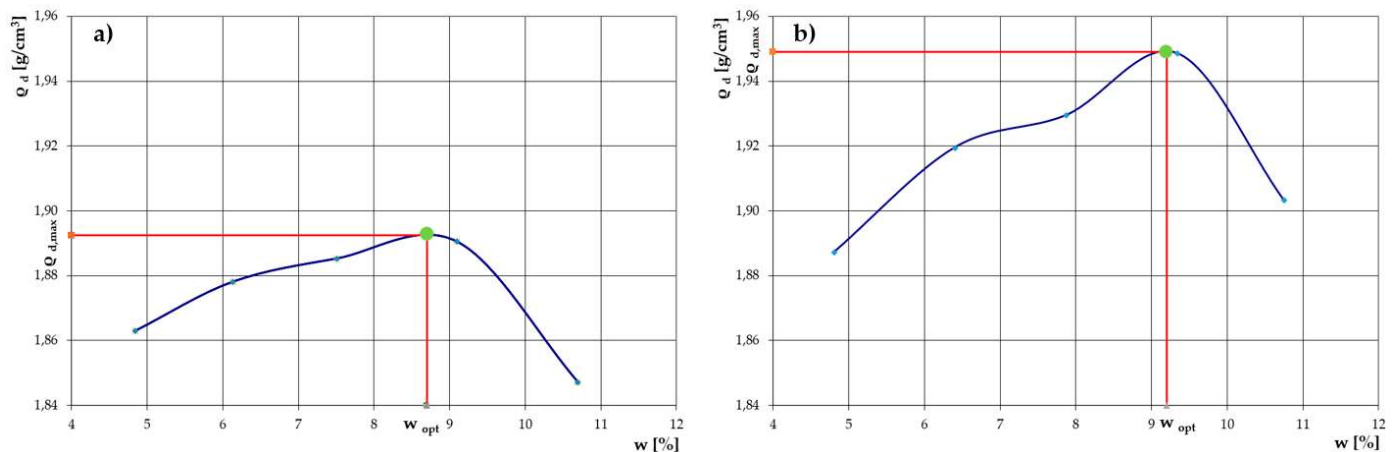


Figure 4. Comparison of optimum moisture content w_{opt} for samples: (a) $f_{Si+Cl,1} = 15.14\%$ and (b) $f_{Si+Cl,2} = 20.48\%$ (the blue line is the volumetric density curve of the soil in relation to its moisture content, the red line is the horizontal drop from the Y axis of the maximum volumetric density value of the soil and the vertical drop to the X axis (moisture content) to determine the optimum moisture content, the green color indicates the point of inflection of the curve of the graph).

3. Test Stand and General Experimental Methodology

3.1. Description and Components of the Test Stand

Once the soil sample has reached the laboratory, the testing analysis process is carried out on various test stands, including macroscopic evaluation of the physical properties of the soil or determination of the optimum moisture content (Proctor apparatus). In accordance with the subject of this article, the main test stands used in the experiment include a split Hopkinson pressure bar (SHPB) and a laser particle size analyzer.

The SHPB test stand takes into account the known density, moisture content, and strain rate of the granular structure of the soil sample in order to determine the dynamic properties of the soil being analyzed and to understand the stress–strain relationship. The main essence of the Hopkinson technique is that it is possible to analyze the response of different materials (including soil samples) subjected to dynamic action. The dynamic tests, the effect of which is the main focus of this work, were carried out based on the SHPB test stand located in the Department of Military Engineering and Infrastructure in the Faculty of Civil Engineering and Geodesy, MUT. A schematic diagram of the SHPB is shown in Figure 5, and an actual view of the test stand is in Figure 6.

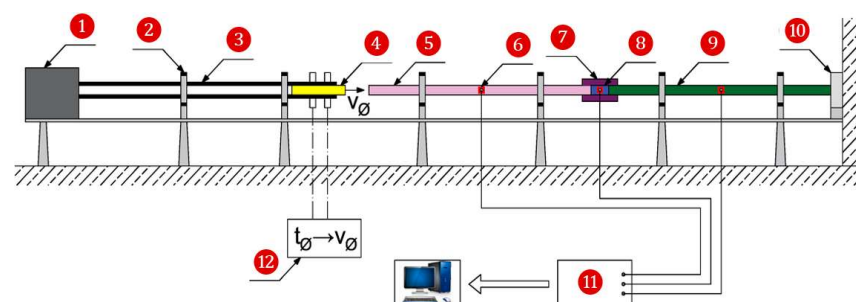


Figure 5. SHPB test stand diagram with designations of important components ①–⑫ (reprinted from Ref. [50]).

The following components of the SHPB test stand can be distinguished as important due to the specifics of the dynamic experiment methodology:

- ①—pneumatic bar projectile launcher [51];
- ②—design to ensure that the bars are axially aligned with each other;
- ③—bar projectile guide (launcher barrel);
- ④—bar projectile;
- ⑤—initiating bar;
- ⑥—set of measuring strain gauges;
- ⑦—soil sample casing (rigid ring);
- ⑧—soil sample under test;
- ⑨—transmitting bar;
- ⑩—damper (impact-absorbing element);
- ⑪—bar projectile speed measurement kit v_0 ;
- ⑫—digital recorder with computer.

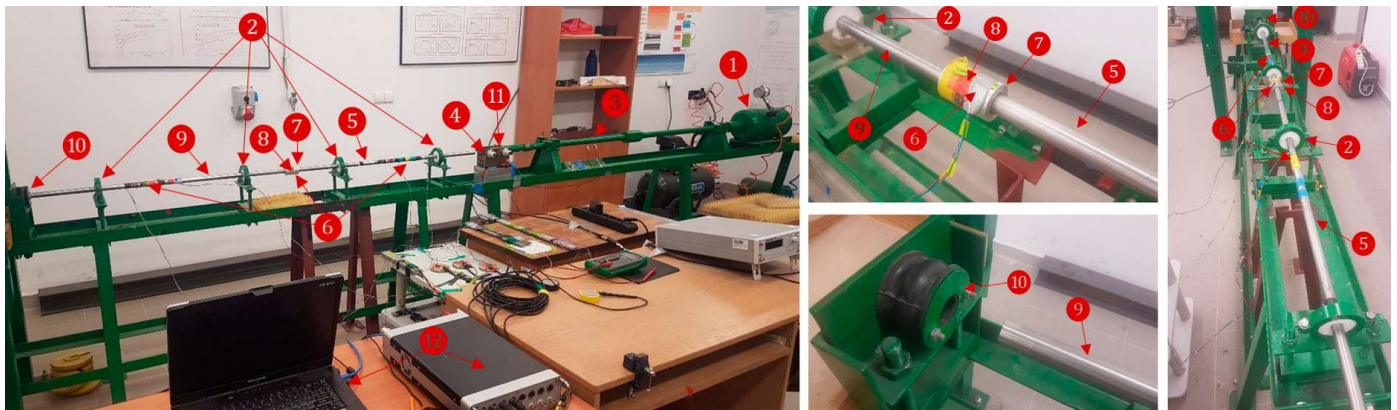


Figure 6. View of the SHPB test stand located in the Department of Military Engineering and Infrastructure of the MUT, with markings of crucial components ①–⑫.

The Bettersizer S3 Plus laser particle size analyzer was used to investigate the granulometric composition for each soil sample variant. The instrument combines the measurement methods of static light scattering and dynamic image analysis, thus offering the versatile ability to characterize particle size and shape in the range from 0.01 μm to 3500 μm . Analyses of changes in the granulometric composition of silty sand samples (as a result of dynamic bar projectile interaction within the SHPB stand experiments) were carried out based on the wet version of the grain size curve study in the Bettersizer S3 Plus laser particle size analyzer—the device is shown in Figure 7. It is located in the Department of Engineering and Military Infrastructure in the Faculty of Civil Engineering and Geodesy, MUT.

Important components of the laser particle size analyzer include:

- ①—main analyzer core;
- ②—measuring chamber system (water–soil mixture input–output);
- ③—circulation tank;
- ④—circulation and dispersion system of the water–soil mixture;
- ⑤—distilled water tank;
- ⑥—computer with dedicated software.

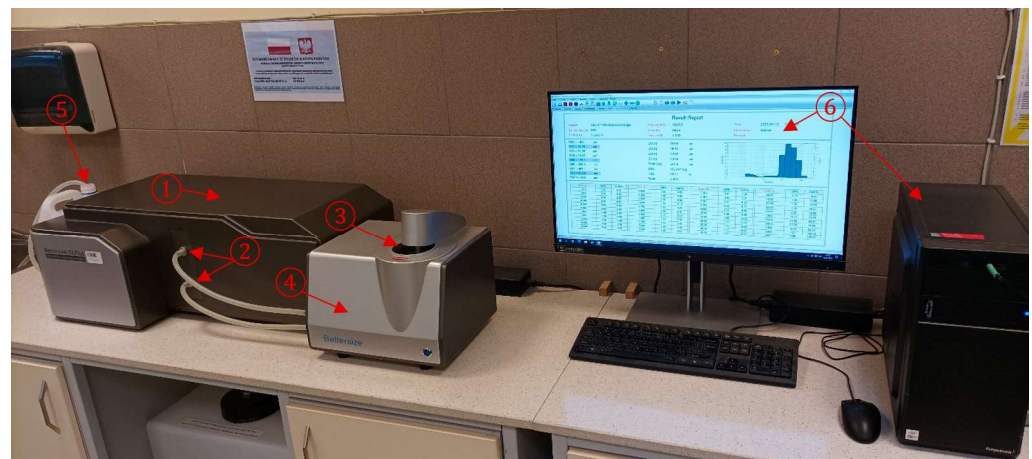


Figure 7. View of the Bettersizer S3 Plus laser particle size analyzer test stand located in the Department of Military Engineering and Infrastructure of the MUT, with markings of crucial components ①–⑥.

3.2. General Methodology for Conducting the Experiment

The soil sample ⑧ of the SHPB test is cylindrical in shape and is placed in a rigid casing ⑦ made of different materials depending on the experimental setup, e.g., Plexiglas, duralumin, or steel. The dimensions and material characteristics of the casing ensure that the uniaxial deformation state of the tested soil occurs when the specimen is pressed from both sides by the initiating ⑤ and transmitting ⑨ bars. According to the markings in Figure 6 and the methodology for conducting the SHPB experiment, the bar projectile load ④ is propelled inside the bar projectile guide ③ by rapidly released air pressure from a pneumatic launcher ①. The laser timing system ⑪ takes a reading of the time it takes for the bar projectile to move a known distance. Knowing this time allows the impact velocity to be determined. When the bar projectile strikes the initiating bar ⑤, a compressive elastic wave is generated in the bar (the incident wave generates deformations in the initiating bar ϵ^I), propagating along the bar toward the soil sample ⑧ surrounded by the casing element (rigid ring) ⑦. On reaching the end of the initiating bar, the wave partly continues to propagate (the transmitted wave generates deformations in the transmitting bar ϵ^T) through the sample towards the transmitting bar and partly is reflected and starts to return to the beginning of the initiating bar (the reflected wave generates deformations in the initiating bar ϵ^R). The wave that has passed through the sample and reached the transmitting bar at its end is finally attenuated in the damping element ⑩. The signals from the set of measuring strain gauges are recorded by a digital recorder and transmitted to a computer ⑫.

The investigation in the laser particle size analyzer (Figure 7) begins by flushing the unit system and pumping a new portion of the liquid from the distilled water tank ⑤ into the circulation tank ③. Once the soil sample has been transferred to the circulation tank ③, the water–soil mixture flows through the circulation and dispersion system ④. During the measurement, the particles dispersed in the selected medium are pumped through a set of two measuring chambers ② within the main core of the analyzer ①. In the first measuring chamber, short-wave laser light (532 nm) passes through the sample and is scattered according to the particle size. The 96 detectors detect optical signals over an angle range of 0.02–165°. Meanwhile, in the second measurement cell, CCD cameras (with 0.5× and 10× magnification) continuously take images to provide particle image analysis in the range of 2 µm to 3500 µm. An additional lens between the laser and the sample cell (lens 2) converts the diverging laser beam into a parallel beam and enables the detection of back-scattered light. The evaluation of the fine particle size distribution is based on the Fraunhofer or Mie scattering theory, which depends on the particle size and optical properties. Mie scattering theory enables an accurate description of the laser scattering law of

particles—it is a widely accepted theory in modern laser particle size analysis. Fraunhofer diffraction theory is a simplified version of Mie theory—relatively rarely used, mainly applied to describe the laser scattering law of relatively coarse particles. Mie theory is adopted for all bulk materials over a wide range of grain diameters. The Fraunhofer method is more dedicated to the analysis of coarse-grained powders. In the present work, Mie theory is adopted for further analysis. The methodology described is in accordance with the ISO standards on the subject [52–54]. Figure 8 shows a detailed scheme of particle size testing by laser diffraction from the stage of introduction of a soil sample into the system to the stage of analysis of the obtained results in dedicated computer software.

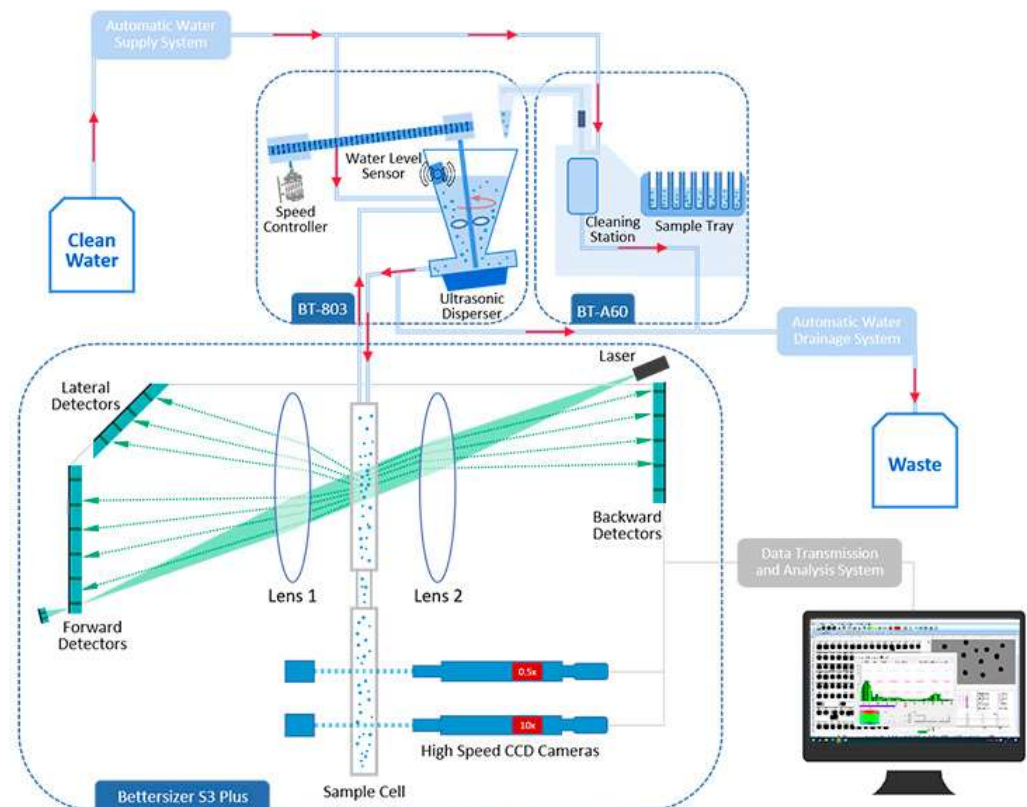


Figure 8. Detailed diagram of a soil sample test procedure on the Bettersizer S3 Plus laser particle size analyzer located in the Department of Military Engineering and Infrastructure of the MUT (reprinted from Ref. [55]).

3.3. Process of Preparing a Soil Sample for Testing

In the process of preparing a non-cohesive soil sample for dynamic testing using the SHPB test stand, an important step is to ensure the initial compaction state of the soil. In particular, this is an important step of the preparation process for dry and low moisture content samples. Such a sample is in a two-phase or three-phase state—it has a gas phase (usually in the form of air). Failure to carry out the compaction process will result in incorrect experimental results—some of the impact energy of the bar projectile will be used to compact the air voids.

The soil sample is cylindrical in shape, and its dimensions must comply with the condition [56] in Equation (1):

$$L = d \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot v}{4}} ; \quad (1)$$

where L —length of soil sample tested;

d —diameter of soil sample tested;

ν —Poisson's ratio of soil sample tested.

Using approximations of the calculated values, it is possible to determine the general approximation condition [57] in Equation (2):

$$L \approx 0.5 \cdot d. \quad (2)$$

The diameter of the soil sample corresponds to the diameter of the bar projectile and the measuring bars (initiating and transmitting). The indicated elements of the SHPB test stand in the Department of Military Engineering and Infrastructure of the MUT have a diameter of 20 mm—based on equation (2), the length of the soil sample is approximately 10 mm.

In the experimental methodology of SHPB testing, an important step is the selection of a suitable impulse shaper to ensure dynamic stress equilibrium. The introduction of an additional impulse shaper into the SHPB test stand system between the bar projectile and the initiating bar allows for a longer time of rising impulse, which enables the effect of better impedance matching and homogeneous deformation of the test material. The pulse shaper is usually a small and thin disc made of soft material—it can be made of aluminum, brass, rubber, nylon, copper, or stainless steel, about 0.1–2 mm thick [58]. During testing, the bar projectile strikes the impulse shaper in front of the initiating bar, thus generating a non-dissipative impulse propagating through the initiating bar. This pulse, with its slowly rising front, facilitates dynamic balancing of forces on the sample—a slowly rising pulse is the preferred loading pulse to minimize the effects of dissipation and inertia, thereby facilitating dynamic stress balance in the sample. The task of the pulse shaper is to ensure a constant strain rate during loading and to maintain force balance throughout the specimen. By changing the geometry of the pulse shaper, a variety of different pulses incident on the specimen can be produced. Depending on the materials being tested, different loading pulses are needed, which can be achieved by designing the shaper accordingly. The dynamic stress equilibrium condition is shown in Equation (3):

$$\varepsilon^I(t) + \varepsilon^R(t) \cong \varepsilon^T(t); \quad (3)$$

where ε^I —initiated wave (incident impulse);

ε^T —transmitted wave (transmitted impulse);

ε^R —reflected wave (reflected impulse).

Taking into account the addition and negative signs of the ε^I , ε^T , and ε^R graphs, it is possible to check the fulfillment of the dynamic stress equilibrium condition according to equation (3) by comparing the changes in the course of the graphs. An example of such a graph is shown in Figure 9—it is possible to compare the correspondence of the course of the blue graph ε^I and the black graph with the dashed line $\varepsilon^T - (-\varepsilon^R)$, where final form is $\varepsilon^T + \varepsilon^R$.

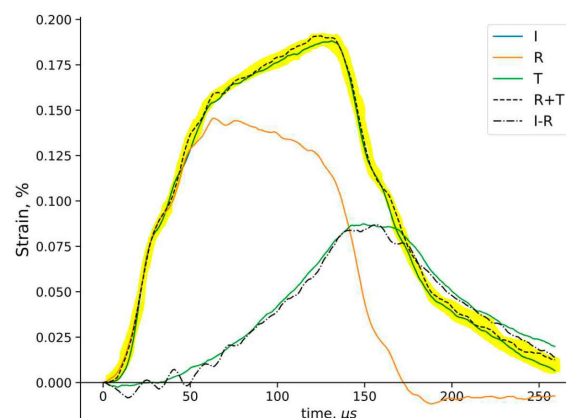


Figure 9. Example of graphical representation of the fulfillment of dynamic stress equilibrium condition (reprinted from Ref. [59]).

In accordance with the conclusions of the publication [60], the compaction process of the sample was carried out on a vibrating shaker. The soil was compacted by vibrating the shaker for 60 s. The tests carried out in [60] proved that a time of 60 s was sufficient—the vibration process for longer periods of 120 s and 180 s did not result in a significant increase in soil compaction values. A sinker weight of approximately 1000 g was applied to the sample to improve the effectiveness of the shaking compaction. During the shaker operation, the air voids were filled by the moving soil grains—the compaction process took place. Figure 10 shows the soil sample casing (rigid ring) and the auxiliary components necessary for the compaction process of a soil sample, with their markings:

- ①—base cork;
- ②—soil sample casing (rigid ring);
- ③—sily sand sample;
- ④—fixing screws;
- ⑤—pressure plate;
- ⑥—sinker 1000 g.

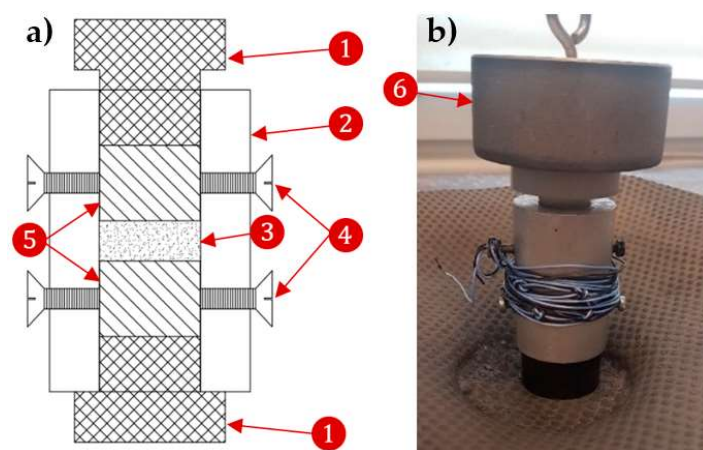


Figure 10. Installation for compaction of a sample of non-cohesive soil as part of the SHPB test with markings of the crucial components: (a) schematic diagram and (b) actual view ①–⑥ (reprinted from Ref. [60]).

The variant soil sample prepared in this way was subjected to a dynamic experiment on the SHPB test stand according to the methodology discussed in Section 3.2. The variants of the test sample distinguished in terms of the initial launcher pressure acting on the bar projectile p_i (i.e., determining the average impact velocity of the bar projectile v_i) and the moisture content of the soil sample w_i (percentage of water in the sample) are summarized in Table 3. A total of 12 variants of the silty sand sample were distinguished. Each variant of the sample was dynamically tested 4 times to obtain a meaningful statistical sample for both variants of silty sand with a silt and clay fraction $f_{Si+Cl,1} = 15.14\%$ and $f_{Si+Cl,2} = 20.48\%$ —a final of 96 experiments were performed on the SHPB test stand.

Table 3. Summary of silty sand sample variants used in experiments conducted on the SHPB test stand.

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$w_1 = 0\%$			$w_2 = 5\%$			$w_3 = 10\%$			$w_4 = 15\%$		
$p_1 =$ 1.2 bar	$p_2 =$ 1.8 bar	$p_3 =$ 2.4 bar	$p_1 =$ 1.2 bar	$p_2 =$ 1.8 bar	$p_3 =$ 2.4 bar	$p_1 =$ 1.2 bar	$p_2 =$ 1.8 bar	$p_3 =$ 2.4 bar	$p_1 =$ 1.2 bar	$p_2 =$ 1.8 bar	$p_3 =$ 2.4 bar
$v_1 =$ 12.76 m/s	$v_2 =$ 17.69 m/s	$v_3 =$ 21.32 m/s	$v_1 =$ 12.76 m/s	$v_2 =$ 17.69 m/s	$v_3 =$ 21.32 m/s	$v_1 =$ 12.76 m/s	$v_2 =$ 17.69 m/s	$v_3 =$ 21.32 m/s	$v_1 =$ 12.76 m/s	$v_2 =$ 17.69 m/s	$v_3 =$ 21.32 m/s

Total sample variants: 12.

The soil samples after the completed dynamic experiments were combined according to the distribution shown in Table 3, and a reference sample (a silty sand sample not

subjected to dynamic impact in the SHPB test) was added to the compilation—a summary of the silty sand sample variants used in the laser particle size analyzer is shown in Table 4.

Table 4. Summary of silty sand sample variants used in particle size change analyses.

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII
$w_1 = 0\%$			$w_2 = 5\%$			$w_3 = 10\%$			$w_4 = 15\%$			
$p_1 =$ 1.2 bar $v_1 =$ 12.76 m/s	$p_2 =$ 1.8 bar $v_2 =$ 17.69 m/s	$p_3 =$ 2.4 bar $v_3 =$ 21.32 m/s	$p_1 =$ 1.2 bar $v_1 =$ 12.76 m/s	$p_2 =$ 1.8 bar $v_2 =$ 17.69 m/s	$p_3 =$ 2.4 bar $v_3 =$ 21.32 m/s	$p_1 =$ 1.2 bar $v_1 =$ 12.76 m/s	$p_2 =$ 1.8 bar $v_2 =$ 17.69 m/s	$p_3 =$ 2.4 bar $v_3 =$ 21.32 m/s	$p_1 =$ 1.2 bar $v_1 =$ 12.76 m/s	$p_2 =$ 1.8 bar $v_2 =$ 17.69 m/s	$p_3 =$ 2.4 bar $v_3 =$ 21.32 m/s	Reference sample

Total sample variants: 13.

For each soil sample variant, 5 mini-samples of 0.2 g were extracted. This mass value is due to the specifics of the test in this model of the Bettersizer S3 Plus laser particle size analyzer—feeding a larger mass of soil sample causes a process of flushing the excess sample out of the circulation tank until the desired mass effect of approximately 0.2 g is achieved. Distilled water was added to each of the 5 vessels containing an equal variant of the sample. Over a period of 24 h, the sample underwent a process of disentangling and loosening the clumps of the silt and clay fraction. The combined silt and clay particles (soil aggregate) were separated in the water into individual soil particles. After waiting for 24 h and the particle separation process, the soil sample was transferred to the circulation tank together with the water in the vessel. The remaining sediment in the vessel was also washed into this circulation tank—this ensures that no soil grains remain on the vessel walls. The laser particle size analysis was then commenced according to the methodology discussed in Section 3.2. Each sample from the vessel was subjected to a cycle of 5 analyses in the instrument. A total of 13 variants of the silty sand sample were distinguished. For each sample variant I–XIII, 5 mini-sample vessels of that variant were extracted (an example set of 5 mini-sample vessels is shown in Figure 11a,b). In order to obtain a meaningful statistical sample for both variants of the silty sand with a silt and clay fraction of $f_{Si+Cl,1} = 15.14\%$ and $f_{Si+Cl,2} = 20.48\%$, a cycle consisting of 5 analyses in the device was carried out. Finally, 650 analyses were carried out in the laser particle size analyzer.

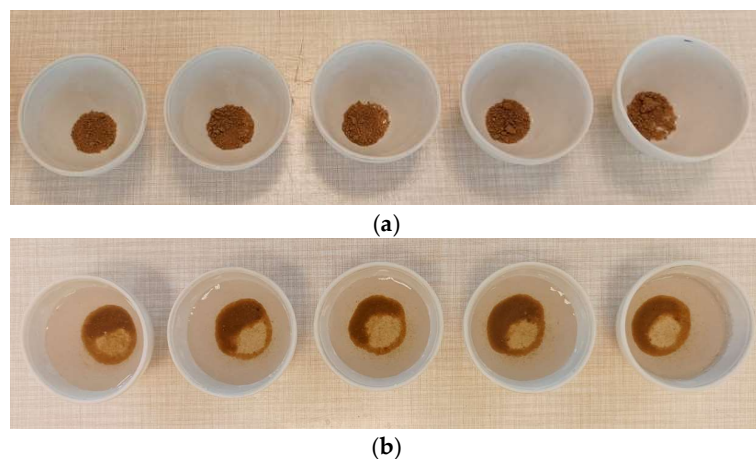
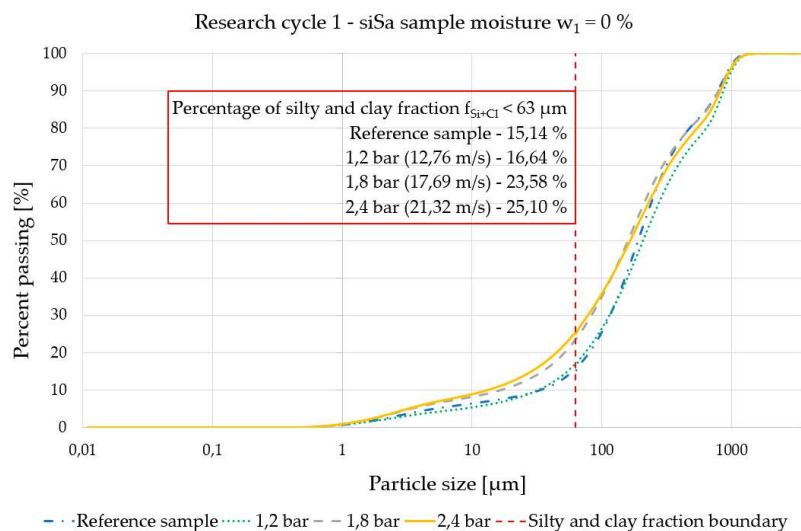


Figure 11. Preparation of silty sand samples for testing in laser particle size analyzer: (a) samples of silty sand before pouring distilled water (visible merged grains into compact lumps); (b) samples of silty sand after pouring distilled water and waiting for 24 h (separation into individual grains occurred).

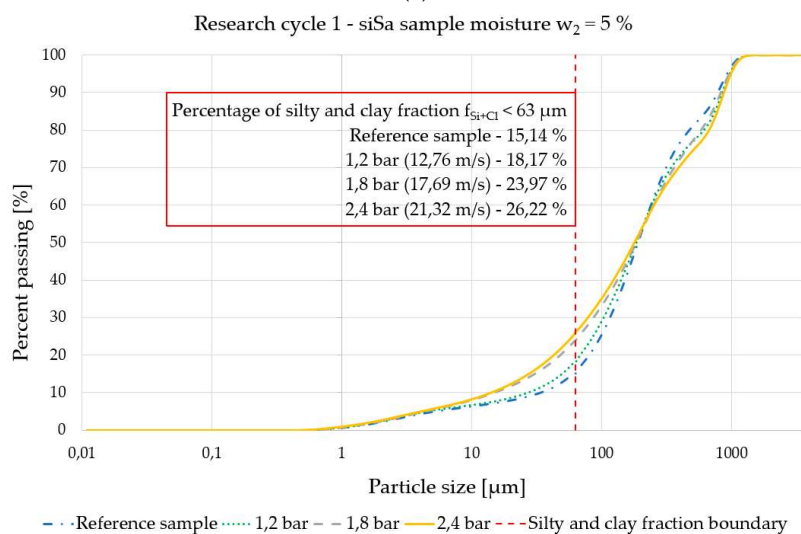
4. Test Results in the Laser Particle Size Analyzer

According to the description of the soil sample preparation process in Section 3.3, each variant of the silty sand sample was tested in the particle size analyzer by laser diffraction in five cycles for the extracted five mini-samples (a total of 25 tests performed for each variant I–XIII from Table 4). The 25 test results were averaged to present the results of the tests for each variant I–XIII (depending on the configuration of variables used: initial launcher pressure acting on the bar projectile p_1 – p_2 – p_3 and moisture content of the soil sample w_1 – w_2 – w_3 – w_4) in summary graphs of grain size curves with reference to the reference sample:

- for the first type of soil sample— $f_{Si+Cl,1} = 15.14\%$:
 - Figure 12a with variable configuration values $w_1 = 0\%$ and $p_1 = 1.2$ bar ($v_1 = 12.76$ m/s)– $p_2 = 1.8$ bar ($v_2 = 17.69$ m/s)– $p_3 = 2.4$ bar ($v_3 = 21.32$ m/s);
 - Figure 12b with variable configuration values $w_2 = 5\%$ and $p_1 = 1.2$ bar ($v_1 = 12.76$ m/s)– $p_2 = 1.8$ bar ($v_2 = 17.69$ m/s)– $p_3 = 2.4$ bar ($v_3 = 21.32$ m/s);
 - Figure 12c with variable configuration values $w_3 = 10\%$ and $p_1 = 1.2$ bar ($v_1 = 12.76$ m/s)– $p_2 = 1.8$ bar ($v_2 = 17.69$ m/s)– $p_3 = 2.4$ bar ($v_3 = 21.32$ m/s);
 - Figure 12d with variable configuration values $w_4 = 15\%$ and $p_1 = 1.2$ bar ($v_1 = 12.76$ m/s)– $p_2 = 1.8$ bar ($v_2 = 17.69$ m/s)– $p_3 = 2.4$ bar ($v_3 = 21.32$ m/s);



(a)



(b)

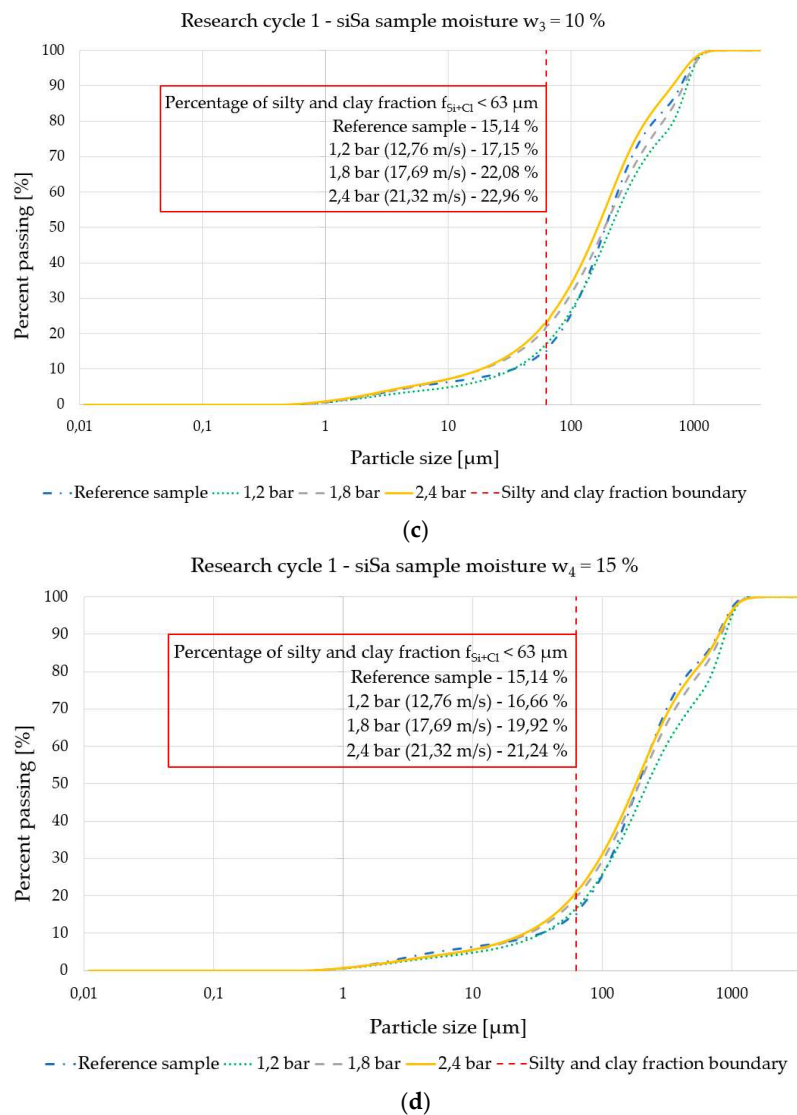
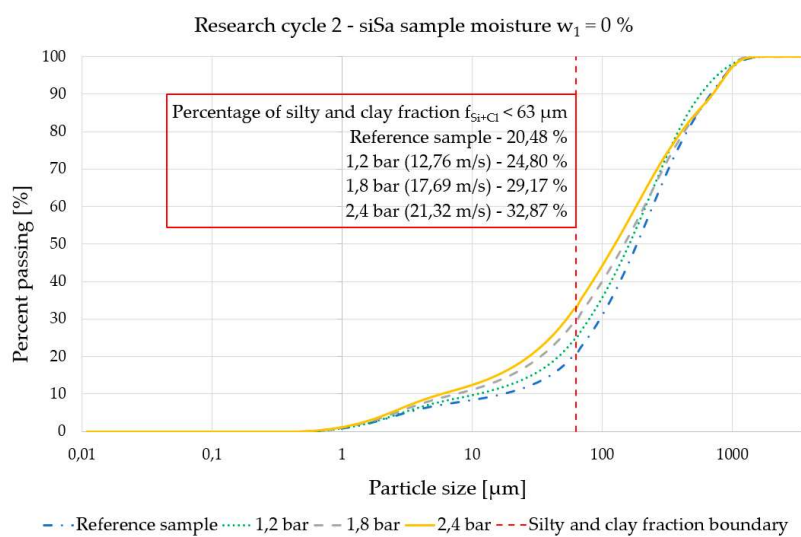
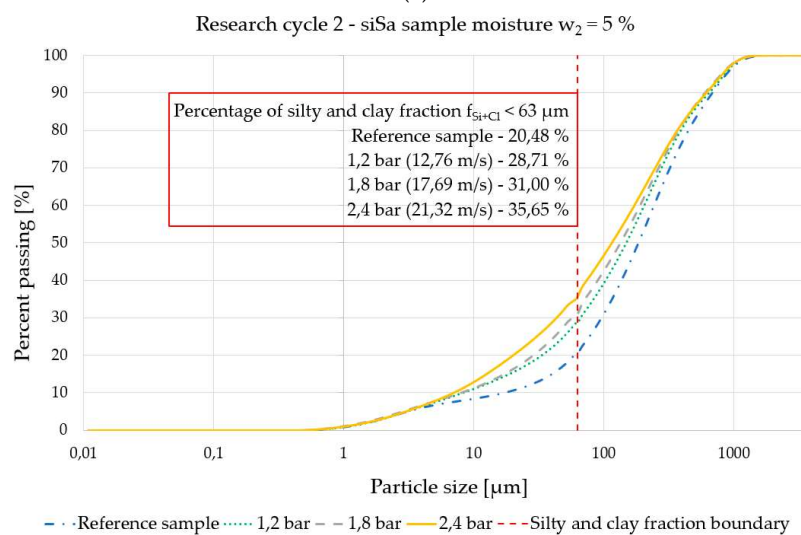


Figure 12. Summary graphs of grain size curves for silty sand with silt and clay fraction $f_{Si+Cl,1} = 15.14\%$ for sample variants I–XIII (12 sample variants subjected to dynamic impact in SHPB and reference sample without dynamic impact) in variable configurations: (a) w_1 and p_1 (v_1)– p_2 (v_2)– p_3 (v_3), (b) w_2 and p_1 (v_1)– p_2 (v_2)– p_3 (v_3), (c) w_3 and p_1 (v_1)– p_2 (v_2)– p_3 (v_3), (d) w_4 and p_1 (v_1)– p_2 (v_2)– p_3 (v_3).

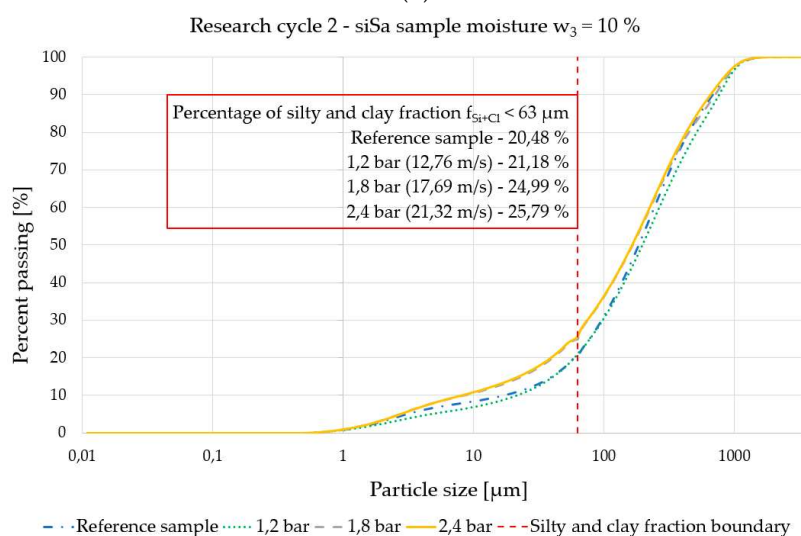
- for the second type of soil sample— $f_{Si+Cl,2} = 20.48\%$:
 - Figure 13a with variable configuration values $w_1 = 0\%$ and $p_1 = 1.2$ bar ($v_1 = 12.76$ m/s)– $p_2 = 1.8$ bar ($v_2 = 17.69$ m/s)– $p_3 = 2.4$ bar ($v_3 = 21.32$ m/s);
 - Figure 13b with variable configuration values $w_2 = 5\%$ and $p_1 = 1.2$ bar ($v_1 = 12.76$ m/s)– $p_2 = 1.8$ bar ($v_2 = 17.69$ m/s)– $p_3 = 2.4$ bar ($v_3 = 21.32$ m/s);
 - Figure 13c with variable configuration values $w_3 = 10\%$ and $p_1 = 1.2$ bar ($v_1 = 12.76$ m/s)– $p_2 = 1.8$ bar ($v_2 = 17.69$ m/s)– $p_3 = 2.4$ bar ($v_3 = 21.32$ m/s);
 - Figure 13d with variable configuration values $w_4 = 15\%$ and $p_1 = 1.2$ bar ($v_1 = 12.76$ m/s)– $p_2 = 1.8$ bar ($v_2 = 17.69$ m/s)– $p_3 = 2.4$ bar ($v_3 = 21.32$ m/s).



(a)



(b)



(c)

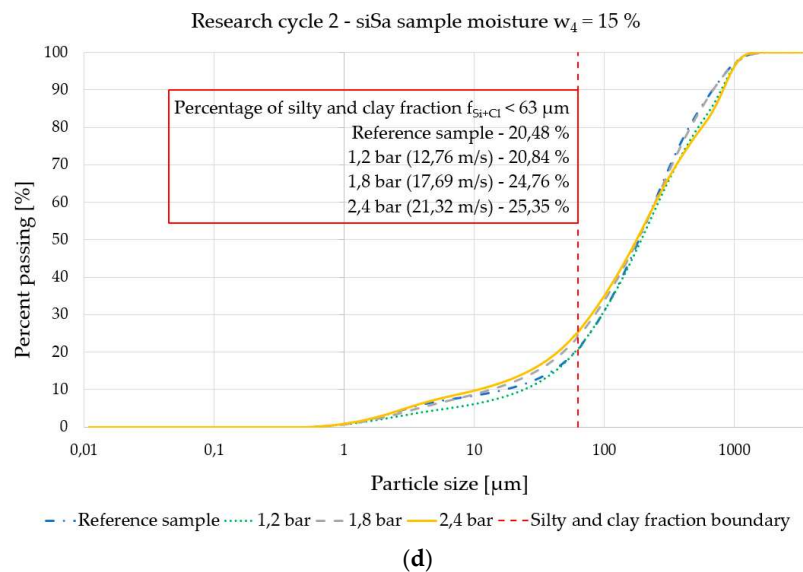


Figure 13. Summary graphs of grain size curves for silty sand with silt and clay fraction $f_{Si+Cl,2} = 20.48\%$ for sample variants I–XIII (12 sample variants subjected to dynamic impact in SHPB and reference sample without dynamic impact) in variable configurations: (a) w_1 and p_1 (v_1)– p_2 (v_2)– p_3 (v_3), (b) w_2 and p_1 (v_1)– p_2 (v_2)– p_3 (v_3), (c) w_3 and p_1 (v_1)– p_2 (v_2)– p_3 (v_3), (d) w_4 and p_1 (v_1)– p_2 (v_2)– p_3 (v_3).

5. Discussion

In order to clearly summarize the results of the tests in the laser particle size analyzer (results from Section 4) and to show the visible trends in the change of granulometric composition of the samples of silty sand subjected to dynamic impact in the SHPB test, Table 5 is prepared for both soil samples with initial content of silty and clay fraction $f_{Si+Cl,1} = 15.14\%$ and $f_{Si+Cl,2} = 20.48\%$. The table summarizes the results taking into account the initial moisture content of the soil sample and the pneumatic launcher pressure of the SHPB loading bar projectile.

Table 5. Summary of f_{Si+Cl} silty and clay fraction values obtained in the laser particle size analyzer for the different configurations of the variable variants of the silty sand sample after dynamic impact in the SHPB test.

Reference Sample f_{Si+Cl}		Moisture Content of the Silty Sand Sample w_i			
		$w_1 = 0\%$	$w_2 = 5\%$	$w_3 = 10\%$	$w_4 = 15\%$
$f_{Si+Cl,1} = 15.14\%$	Launcher pressure p_i / Impact velocity v_i	$p_1 = 1.2$ bar $v_1 = 12.76$ m/s	$f_{Si+Cl,1-I} = 16.64\%$	$f_{Si+Cl,1-IV} = 18.17\%$	$f_{Si+Cl,1-VII} = 17.15\%$ $f_{Si+Cl,1-X} = 16.66\%$
		$p_2 = 1.8$ bar $v_2 = 17.69$ m/s	$f_{Si+Cl,1-II} = 23.58\%$	$f_{Si+Cl,1-V} = 23.97\%$	$f_{Si+Cl,1-VIII} = 22.08\%$ $f_{Si+Cl,1-XI} = 19.92\%$
		$p_3 = 2.4$ bar $v_3 = 21.32$ m/s	$f_{Si+Cl,1-III} = 25.10\%$	$f_{Si+Cl,1-VI} = 26.22\%$	$f_{Si+Cl,1-IX} = 22.96\%$ $f_{Si+Cl,1-XII} = 21.24\%$
		$p_1 = 1.2$ bar $v_1 = 12.76$ m/s	$f_{Si+Cl,2-I} = 24.80\%$	$f_{Si+Cl,2-IV} = 28.71\%$	$f_{Si+Cl,2-VII} = 21.18\%$ $f_{Si+Cl,2-X} = 20.84\%$
		$p_2 = 1.8$ bar $v_2 = 17.69$ m/s	$f_{Si+Cl,2-II} = 29.17\%$	$f_{Si+Cl,2-V} = 31.00\%$	$f_{Si+Cl,2-VIII} = 24.99\%$ $f_{Si+Cl,2-XI} = 24.76\%$
		$p_3 = 2.4$ bar $v_3 = 21.32$ m/s	$f_{Si+Cl,2-III} = 32.87\%$	$f_{Si+Cl,2-VI} = 35.65\%$	$f_{Si+Cl,2-IX} = 25.79\%$ $f_{Si+Cl,2-XII} = 25.35\%$

Based on the data presented in Table 5, it is possible to note the behavioral trends and direction of trends in the dynamic characteristics of the silty sand:

- Each silty sand sample used on the SHPB test stand achieved a higher proportion of fine fractions (silt and clay) in its granulometric composition after the test compared to the reference sample. Each dynamic impact with the bar projectile resulted in an

increase in the value of the silt and clay fraction f_{Si+Cl} —there was a phenomenon of destruction of the soil skeleton through grain breaking and an increase in the percentage of smaller-diameter grains. The correctness of Equations (4) and (5) can be seen:

$$f_{Si+Cl,1-I} \div f_{Si+Cl,1-XII} > f_{Si+Cl,1} ; \quad (4)$$

$$f_{Si+Cl,2-I} \div f_{Si+Cl,2-XII} > f_{Si+Cl,2} . \quad (5)$$

- For a given moisture content of a soil sample, there was a trend towards an increase in the proportion of the silt and clay fraction in the granulometric composition with an increase in the initially applied pressure of the pneumatic launcher to start the bar projectile movement. The trend in the behavior of the sample occurred as the impact velocity of the bar projectile increased, which can be represented by Equations (6)–(9):

$$w_1 = 0\% \rightarrow \begin{matrix} f_{Si+Cl,1-I} < f_{Si+Cl,1-II} < f_{Si+Cl,1-III} ; \\ f_{Si+Cl,2-I} < f_{Si+Cl,2-II} < f_{Si+Cl,2-III} \end{matrix} \quad (6)$$

$$w_2 = 5\% \rightarrow \begin{matrix} f_{Si+Cl,1-IV} < f_{Si+Cl,1-V} < f_{Si+Cl,1-VI} ; \\ f_{Si+Cl,2-IV} < f_{Si+Cl,2-V} < f_{Si+Cl,2-VI} \end{matrix} \quad (7)$$

$$w_3 = 10\% \rightarrow \begin{matrix} f_{Si+Cl,1-VII} < f_{Si+Cl,1-VIII} < f_{Si+Cl,1-IX} ; \\ f_{Si+Cl,2-VII} < f_{Si+Cl,2-VIII} < f_{Si+Cl,2-IX} \end{matrix} \quad (8)$$

$$w_4 = 15\% \rightarrow \begin{matrix} f_{Si+Cl,1-X} < f_{Si+Cl,1-XI} < f_{Si+Cl,1-XII} ; \\ f_{Si+Cl,2-X} < f_{Si+Cl,2-XI} < f_{Si+Cl,2-XII} \end{matrix} \quad (9)$$

- As the moisture content of the soil sample increased, there was no simple relationship of change in the proportion of the silt and clay fraction in the granulometric composition (only an increasing relationship or only a decreasing relationship). For the moisture content of soil samples, w_1 and w_2 (values below the optimum moisture content w_{opt}) for a given initial pressure of the pneumatic launcher (given impact velocity), a tendency towards an increase in the value of the silt and clay fraction was apparent (there was no significant effect of water on the test results). The higher the moisture content of the soil sample (in particular for w_3 and w_4 values above the optimum moisture content w_{opt}), the stronger the trend of a decreasing value of the silt and clay fraction in the granulometric composition of the silty sand sample could be seen. There was a clear, dynamic response of the water filling the soil pores—the water gave the sample some characteristics of an elastic material and “damped” the dynamic impact of the bar projectile impact. This interaction had the effect of reducing the phenomenon of destruction of the soil skeleton by grain fracture, which can be represented in Equations (10)–(12):

$$\begin{matrix} p_1 = 1.2 \text{ bar} \\ v_1 = 12.76 \text{ m/s} \end{matrix} \rightarrow \begin{matrix} \text{if } w_1 < w_2 < w_{opt,1} \text{ then } f_{Si+Cl,1-I} < f_{Si+Cl,1-IV} \\ \text{if } w_2 < w_{opt,1} < w_3 < w_4 \text{ then } f_{Si+Cl,1-IV} > f_{Si+Cl,1-VII} > f_{Si+Cl,1-X} ; \\ \text{if } w_1 < w_2 < w_{opt,2} \text{ then } f_{Si+Cl,2-I} < f_{Si+Cl,2-IV} \\ \text{if } w_2 < w_{opt,2} < w_3 < w_4 \text{ then } f_{Si+Cl,2-IV} > f_{Si+Cl,2-VII} > f_{Si+Cl,2-X} \end{matrix} \quad (10)$$

$$\begin{matrix} p_2 = 1.8 \text{ bar} \\ v_2 = 17.69 \text{ m/s} \end{matrix} \rightarrow \begin{matrix} \text{if } w_1 < w_2 < w_{opt,1} \text{ then } f_{Si+Cl,1-II} < f_{Si+Cl,1-V} \\ \text{if } w_2 < w_{opt,1} < w_3 < w_4 \text{ then } f_{Si+Cl,1-V} > f_{Si+Cl,1-VIII} > f_{Si+Cl,1-XI} ; \\ \text{if } w_1 < w_2 < w_{opt,2} \text{ then } f_{Si+Cl,2-II} < f_{Si+Cl,2-V} \\ \text{if } w_2 < w_{opt,2} < w_3 < w_4 \text{ then } f_{Si+Cl,2-V} > f_{Si+Cl,2-VIII} > f_{Si+Cl,2-XI} \end{matrix} \quad (11)$$

$$\begin{matrix} p_3 = 2.4 \text{ bar} \\ v_3 = 21.32 \text{ m/s} \end{matrix} \rightarrow \begin{matrix} \text{if } w_1 < w_2 < w_{opt,1} \text{ then } f_{Si+Cl,1-III} < f_{Si+Cl,1-VI} \\ \text{if } w_2 < w_{opt,1} < w_3 < w_4 \text{ then } f_{Si+Cl,1-VI} > f_{Si+Cl,1-IX} > f_{Si+Cl,1-XII} . \\ \text{if } w_1 < w_2 < w_{opt,2} \text{ then } f_{Si+Cl,2-III} < f_{Si+Cl,2-VI} \\ \text{if } w_2 < w_{opt,2} < w_3 < w_4 \text{ then } f_{Si+Cl,2-VI} > f_{Si+Cl,2-IX} > f_{Si+Cl,2-XII} \end{matrix} \quad (12)$$

- Table 6 shows the percentage changes in silt and clay fraction as a consequence of bar projectile impact during the SHPB test compared to the reference sample, depending on the configuration of the variables—soil sample moisture content w_i and initial shot pressure p_i (impact velocity v_i). For the first type of soil sample $f_{Si+Cl,1} = 15.14\%$, the bar projectile impact load was most significant at a launching pressure $p_2 = 1.8$ bar for all moisture content variants $w_1 \div w_4$ (particularly prominent values are for samples with moisture content w_1 and w_2 lower than the optimum moisture content w_{opt} —for moisture content w_3 and w_4 higher than the optimum moisture content w_{opt} , there is a phenomenon of “damping” of the impact through the reaction of water in the soil pores). At this pressure p_2 , the greatest percentage change in granulometric composition occurred through an increase in the value of the silt and clay fraction in relation to the reference sample $f_{Si+Cl,1}$:

- $f_{Si+Cl,1} = 15.14\% \rightarrow f_{Si+Cl,1-III} = 25.10\%$ (increase of 9.96%);
- $f_{Si+Cl,1} = 15.14\% \rightarrow f_{Si+Cl,1-VI} = 26.22\%$ (increase of 11.08%);
- $f_{Si+Cl,1} = 15.14\% \rightarrow f_{Si+Cl,1-IX} = 22.96\%$ (increase of 7.82%);
- $f_{Si+Cl,1} = 15.14\% \rightarrow f_{Si+Cl,1-XII} = 21.24\%$ (increase of 6.10%).

However, for the second soil sample type $f_{Si+Cl,2} = 20.48\%$, the most significant was the bar projectile impact at SHPB pneumatic launcher pressure $p_3 = 2.4$ bar for all moisture contents $w_1 \div w_4$ (analogous to the first sample type, values were particularly noticeable for samples with moisture contents w_1 and w_2 lower than the optimum moisture content w_{opt} —for moisture contents w_3 and w_4 higher than the optimum moisture content w_{opt} , a phenomenon of “damping” of the impact occurred through the reaction of water in soil pores). At this pressure p_3 , the greatest percentage change in granulometric composition occurred through an increase in the value of the silt and clay fraction in relation to the reference sample $f_{Si+Cl,2}$:

- $f_{Si+Cl,2} = 20.48\% \rightarrow f_{Si+Cl,2-III} = 32.87\%$ (increase of 12.39%);
- $f_{Si+Cl,2} = 20.48\% \rightarrow f_{Si+Cl,2-VI} = 35.65\%$ (increase of 15.17%);
- $f_{Si+Cl,2} = 20.48\% \rightarrow f_{Si+Cl,2-IX} = 25.79\%$ (increase of 5.31%);
- $f_{Si+Cl,2} = 20.48\% \rightarrow f_{Si+Cl,2-XII} = 25.35\%$ (increase of 4.87%).

Table 6. Summary of percentage changes in silt and clay fraction as a consequence of bar projectile impact during SHPB testing compared to the f_{Si+Cl} reference sample depending on the configuration of variables—moisture content of the soil sample w_i and initial impact pressure p_i .

Launcher pressure p_i / Impact Velocity v_i	Moisture content of the silty sand sample w_i / Difference between $f_{Si+Cl,1-k}$ ($f_{Si+Cl,2-k}$) and reference $f_{Si+Cl,1}$ ($f_{Si+Cl,2}$)							
	$w_1 = 0\%$	Δ	$w_2 = 5\%$	Δ	$w_3 = 10\%$	Δ	$w_4 = 15\%$	Δ
		$f_{Si+Cl,1-k}$		$f_{Si+Cl,1-k}$		$f_{Si+Cl,1-k}$		$f_{Si+Cl,1-k}$
		– $f_{Si+Cl,1}$		– $f_{Si+Cl,1}$		– $f_{Si+Cl,1}$		– $f_{Si+Cl,1}$
$p_1 = 1.2$ bar $v_1 = 12.76$ m/s	$f_{Si+Cl,1-I} =$ 16.64%	1.50%	$f_{Si+Cl,1-IV} =$ 18.17%	3.03%	$f_{Si+Cl,1-VII} =$ 17.15%	2.01%	$f_{Si+Cl,1-X} =$ 16.66%	1.52%
$p_2 = 1.8$ bar $v_2 = 17.69$ m/s	$f_{Si+Cl,1-II} =$ 23.58%	8.44%	$f_{Si+Cl,1-V} =$ 23.97%	8.83%	$f_{Si+Cl,1-VIII} =$ 22.08%	6.94%	$f_{Si+Cl,1-XI} =$ 19.92%	4.78%
$p_3 = 2.4$ bar $v_3 = 21.32$ m/s	$f_{Si+Cl,1-III} =$ 25.10%	9.96%	$f_{Si+Cl,1-VI} =$ 26.22%	11.08%	$f_{Si+Cl,1-IX} =$ 22.96%	7.82%	$f_{Si+Cl,1-XII} =$ 21.24%	6.10%
		Δ		Δ		Δ		Δ
		$f_{Si+Cl,2-k}$		$f_{Si+Cl,2-k}$		$f_{Si+Cl,2-k}$		$f_{Si+Cl,2-k}$
		– $f_{Si+Cl,2}$		– $f_{Si+Cl,2}$		– $f_{Si+Cl,2}$		– $f_{Si+Cl,2}$
$p_1 = 1.2$ bar $v_1 = 12.76$ m/s	$f_{Si+Cl,2-I} =$ 24.80%	4.32%	$f_{Si+Cl,2-IV} =$ 28.71%	8.23%	$f_{Si+Cl,2-VII} =$ 21.18%	0.70%	$f_{Si+Cl,2-X} =$ 20.84%	0.36%
$p_2 = 1.8$ bar $v_2 = 17.69$ m/s	$f_{Si+Cl,2-II} =$ 29.17%	8.69%	$f_{Si+Cl,2-V} =$ 31.00%	10.52%	$f_{Si+Cl,2-VIII} =$ 24.99%	4.51%	$f_{Si+Cl,2-XI} =$ 24.76%	4.28%

$p_3 = 2.4 \text{ bar}$ $v_3 = 21.32 \text{ m/s}$	$f_{Si+Cl,2-III} =$ 32.87%	12.39%	$f_{Si+Cl,2-VI} =$ 35.65%	15.17%	$f_{Si+Cl,2-IX} =$ 25.79%	5.31%	$f_{Si+Cl,2-XII} =$ 25.35%	4.87%
--	-------------------------------	--------	------------------------------	--------	------------------------------	-------	-------------------------------	-------

The four directions of behavioral trends in the dynamic characteristics of the silty sand discussed above are susceptible to the influence of experimental conditions. Special attention should be given to the issues:

- Parallelism of the contact surface between the soil sample-initiating bar and the transmitting bar. There is a particular risk of the parallelism condition not being achieved as a result of the compaction process of the soil sample. Silty sand is a loose material and susceptible to shape change. Applying the pressure plate elements in a way that is not perpendicular to the wall edge of the soil sample casing (rigid ring) will result in non-parallelism of the contact surface between the soil sample-initiating bar and transmitting bar (i.e., there will be a local air void). Consequently, incorrect waveform data will be recorded for the reflected wave (as a result of non-parallelism of the contact surface between soil sample-initiating bar) and transmitted wave (as a result of non-parallelism of the contact surface between the soil sample-transmitting bar).
- Cohesive effect resulting from the internal structure of the tested soil sample. Silty sand is not a pure representative of sand containing only grains with a diameter in the range of 0.063 mm–2 mm (according to Figure 1). Silty sand has fine fractions below the limit of 0.063 mm—these give the soil sample cohesive characteristics, and the cohesion value is not zero. In simplification, it can be assumed that the more the fine fraction, the higher the cohesion value. According to the data in Table 6, it can be seen that the cohesion effect is not the only important factor influencing the results—the pore water content of the soil should be taken into account.
- Interfacial friction effect is a widely discussed issue for the various materials tested in the SHPB test stand, particularly loose materials [61–63]. The incident wave created by the impact passes from the initiating bar to the soil sample during its propagation. The wave passes through a soil sample with a non-uniform and variable cross-section, which will result in an uneven stress distribution in the axial direction of the sample due to the interfacial friction effect.

6. Conclusions

This paper is concerned with the analysis of changes in the granulometric composition of silty sand samples through a procedure comparing the values of the silt and clay fraction f_{Si+Cl} in the structure before and after SHPB experiments using a laser diffraction particle size analyzer.

Two types of non-cohesive soil–silty sands were selected for testing. The optimum moisture contents $w_{opt,1} = 8.70\%$ and $w_{opt,2} = 9.20\%$ were determined for both reference samples (tests carried out using the Proctor method), and the silt and clay fractions $f_{Si+Cl,1} = 15.14\%$ and $f_{Si+Cl,2} = 20.48\%$ were determined (tests carried out using a laser diffraction particle size analyzer, assuming a boundary value of 63 μm between the sandy fraction f_{Sa} and the silty fraction f_{Si}).

During comparative analysis of the test results, repeatable trends in changes in the granulometric composition of soil samples were noted:

- Each dynamic impact with the bar projectile results in an increase in the value of the silt and clay fraction f_{Si+Cl} (there is a phenomenon of destruction of the soil skeleton through the breaking of grains and an increase in the percentage of grains with a smaller diameter).
- As the value of the initially applied pressure of the pneumatic launcher to start the bar projectile movement increases, there is a noticeable trend towards an increase in the proportion of the silt and clay fraction in the granulometric composition of the sample.

- For soil samples with a moisture content of $w_1 = 0\%$ and $w_2 = 5\%$ (values below the optimum moisture content of $w_{opt,1} = 8.70\%$ and $w_{opt,2} = 9.20\%$ depending on the type of sample) for a given initial pressure of the pneumatic launcher, a tendency towards an increase in the values of the silt and clay fraction is apparent (there is no significant effect of water on the test results). The higher the moisture content of the soil sample (in particular for values $w_3 = 10\%$ and $w_4 = 15\%$ above the optimum moisture content $w_{opt,1} = 8.70\%$ or $w_{opt,2} = 9.20\%$ depending on the type of sample), the stronger the trend towards a decreasing value of the silt and clay fraction in the granulometric composition of the silty sand sample. There is a noticeable dynamic response of the water filling the soil pores—the water gives the sample the characteristics of an elastic material and “dampens” the dynamic impact of the bar projectile. This interaction of water in the sample has the effect of reducing the destruction of the soil skeleton through grain fracture.
- For the first type of soil sample $f_{Si+Cl,1} = 15.14\%$, the most significant is the bar projectile impact at an initial launcher pressure $p_2 = 1.8$ bar for all sample moisture content variants $w_1 \div w_4$ —at this pressure p_2 , the greatest percentage change in granulometric composition occurs through an increase in the value of the silty and clay fraction $f_{Si+Cl,1-k}$ relative to the reference sample $f_{Si+Cl,1}$. On the other hand, for the second type of soil sample $f_{Si+Cl,2} = 20.48\%$, the greatest percentage change in granulometric composition occurs with a bar projectile impact at an initial launcher pressure $p_3 = 2.4$ bar for all moisture content variants $w_1 \div w_4$ —at this pressure p_3 , the greatest percentage change in granulometric composition occurs through an increase in the value of the silty and clay fraction $f_{Si+Cl,2-k}$ relative to the reference sample $f_{Si+Cl,2}$.

Author Contributions: Conceptualization, K.S.; methodology, K.S. and R.C.; formal analysis, K.S. and R.C.; investigation, K.S.; resources, K.S. and R.R.; data curation, K.S. and R.R.; writing—original draft preparation, K.S.; writing—review and editing, K.S., R.C. and L.K.; visualization, K.S.; supervision, R.C. and L.K. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Figure 5—<https://doi.org/10.37105/iboa.51> (Data available in a publicly accessible repository, accessed on 1 March 2023); Figure 8—<https://www.bettersizeinstruments.com/uploads/file/bettersizer-s3-plus-users-manual-v8.pdf> (Data available in a publicly accessible repository, accessed on 1 March 2023); Figure 9—<https://doi.org/10.37105/iboa.129> (Data available in a publicly accessible repository, accessed on 1 March 2023).

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Nomenclature

w_i	moisture content of soil sample—moisture variant no. i
p_i	pneumatic launcher pressures—pressure variant no. i
v_i	velocity of the bar projectile at the moment of impact with the initiating bar—velocity variant no. i
$w_{opt,i}$	optimum moisture content value—variant of soil sample type no. i
$f_{Si+Cl,i}$	content of fine fractions with a grain diameter of less than $63 \mu\text{m}$ (as the sum of silt and clay fractions)—variant of soil sample type no. i
f_{Sa}	sandy fraction content
f_{Si}	silty fraction content
f_{Cl}	clay fraction content
$Q_{d,max}$	maximum volumetric density of the soil skeleton
ε^I	incident wave generates deformations in the initiating bar
ε^T	transmitted wave generates deformations in the transmitting bar
ε^R	reflected wave generates deformations in the initiating bar
L	length of soil sample tested

d	diameter of soil sample tested
ν	Poisson's ratio of soil sample tested
$f_{Si+Cl,i-k}$	content of fine fractions with a grain diameter of less than 63 μm (as the sum of silt and clay fractions)—variant of soil sample type no. i for the variant variables during experiment no. k
$\Delta f_{Si+Cl,i-k} - f_{Si+Cl,i}$	percentage change in granulometric composition through an increase in the value of the silty and clay fraction $f_{Si+Cl,i-k}$ relative to the reference sample $f_{Si+Cl,i}$

References

- Kang, D.; Noh, H.-G.; Kim, J.; Lee, K. Inverse Identification of a Constitutive Model for High-Speed Forming Simulation: An Application to Electromagnetic Metal Forming. *Materials* **2022**, *15*, 7179. <https://doi.org/10.3390/ma15207179>.
- Cieplak, K.; Janiszewski, J.; Grązka, M.; Konwerski, Ł. Planar Shear Specimens for High Strain-Rate Testing of Engineering Materials Using the Conventional SHPB Technique: Experimental and Numerical Studies. *Phys. Sci. Forum* **2022**, *4*, 13. <https://doi.org/10.3390/psf2022004013>.
- Brodova, I.; Yolshina, L.; Razorenov, S.; Rasposienko, D.; Petrova, A.; Shirinkina, I.; Shorokhov, E.; Muradymov, R.; Garkushin, G.; Savinykh, A. Effect of Grain Size on the Properties of Aluminum Matrix Composites with Graphene. *Metals* **2022**, *12*, 1054. <https://doi.org/10.3390/met12061054>.
- Wang, H.; Zhang, Y.; Tan, Z. Dynamic Response and Deformative Mechanism of the Shape Memory Polymer Filled with Low-Melting-Point Alloy under Different Dynamic Loads. *Polymers* **2023**, *15*, 423. <https://doi.org/10.3390/polym15020423>.
- Lagdani, O.; Tarfaoui, M.; Rouway, M.; Laaouidi, H.; Sbati, S.J.; Amine Dabachi, M.; Aamir, A.; Nachtane, M. Influence of Moisture Diffusion on the Dynamic Compressive Behavior of Glass/Polyester Composite Joints for Marine Engineering Applications. *J. Compos. Sci.* **2022**, *6*, 94. <https://doi.org/10.3390/jcs6030094>.
- Hu, F.; Gao, J.; Zhang, B.; Qi, F.; Zhao, N.; Ouyang, X. Effects of Modified Al_2O_3 -Decorated Ionic Liquid on the Mechanical Properties and Impact Resistance of a Polyurethane Elastomer. *Materials* **2021**, *14*, 4712. <https://doi.org/10.3390/ma14164712>.
- Shi, B.; Xing, H.; Mu, C.; Li, J.; Xu, T.; Liu, W. Analysis of Optimal Loading Angle in Dynamic Flattened Brazilian Disc Splitting Test for Concrete. *Appl. Sci.* **2022**, *12*, 11834. <https://doi.org/10.3390/app122211834>.
- Guo, L.; Guo, R.; Yan, Y.; Zhang, Y.; Wang, Z.; Mu, Y. Dynamic Compression Mechanical Properties of Polyoxymethylene-Fiber-Reinforced Concrete. *Materials* **2022**, *15*, 7784. <https://doi.org/10.3390/ma15217784>.
- Wang, W.; Zhang, Z.; Huo, Q.; Song, X.; Yang, J.; Wang, X.; Wang, J.; Wang, X. Dynamic Compressive Mechanical Properties of UR50 Ultra-Early-Strength Cement-Based Concrete Material under High Strain Rate on SHPB Test. *Materials* **2022**, *15*, 6154. <https://doi.org/10.3390/ma15176154>.
- Zhang, K.; Wang, F.; Yang, B.; Li, L.; Gao, L.; Sun, Y.; Guo, F. Mechanical Response and Failure Mechanisms of Natural Bamboo Fiber Reinforced Poly-Benzoxazine Composite Subjected to Split-Hopkinson Tensile Bar Loading. *Polymers* **2022**, *14*, 1450. <https://doi.org/10.3390/polym14071450>.
- Nachtane, M.; Tarfaoui, M.; Ledoux, Y.; Khammassi, S.; Leneveu, E.; Pelleter, J. Experimental Investigation on the Dynamic Behavior of 3D Printed CF-PEKK Composite under Cyclic Uniaxial Compression. *Compos. Struct.* **2020**, *247*, 112474. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112474>.
- Li, R.; Liu, L.; An, H.; Wang, Y. Study on Dynamic Constitutive Model of Polypropylene Concrete under Real-Time High-Temperature Conditions. *Appl. Sci.* **2022**, *12*, 1482. <https://doi.org/10.3390/app12031482>.
- Williams, O.; Taylor, S.; Lester, E.; Kingman, S.; Giddings, D.; Eastwick, C. Applicability of Mechanical Tests for Biomass Pellet Characterisation for Bioenergy Applications. *Materials* **2018**, *11*, 1329. <https://doi.org/10.3390/ma11081329>.
- Bragov, A.M.; Iuzhina, T.N.; Lomunov, A.K.; Igumnov, L.A.; Belov, A.A.; Eremeyev, V.A. Investigation of Wood Properties at Elevated Temperature. *J. App. Comp. Mech.* **2022**, *8*, 298–305. <https://doi.org/10.22055/JACM.2021.38486.3239>.
- Kruszka, L.; Sobczyk, K. Applications of Hopkinson Bar Technique for Capability Testing of High-Energy Absorption Materials. In *NATO Science for Peace and Security Series C—Environmental Security*; Kovacs, T.A., Nyikes, Z., Furstner, I., Eds.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2022. https://doi.org/10.1007/978-94-024-2174-3_2.
- Li, Z.; Zhu, Y.; Song, Q.; Wang, P.; Liu, D. Dynamic Mechanical Properties and Failure Characteristics of Sandstone with Pre-Flaws Parallel to the Loading Direction. *Sustainability* **2023**, *15*, 3587. <https://doi.org/10.3390/su15043587>.
- Zhou, J.; Zhao, G.; Meng, X.; Liu, C.; Ma, L.; Xu, W.; Cheng, X. Experimental Investigation of the Size Effect of Rock under Impact Load. *Minerals* **2023**, *13*, 43. <https://doi.org/10.3390/min13010043>.
- Wessling, A.; Kajberg, J. Dynamic Compressive and Tensile Characterisation of Igneous Rocks Using Split-Hopkinson Pressure Bar and Digital Image Correlation. *Materials* **2022**, *15*, 8264. <https://doi.org/10.3390/ma15228264>.
- Wang, J.; Fan, P.; Wang, M.; Dong, L.; Ma, L.; Gao, L. Experimental study of one-dimensional compression creep in crushed dry coral sand. *Can. Geotech. J.* **2020**, *57*, 1854–1869. <https://doi.org/10.1139/cgj-2019-0406>.
- Zhang, J.-C.; Li, Y.; Xu, B.; Meng, Q.-X.; Zhang, Q.; Wang, R.-B. Testing and constitutive modelling of the mechanical behaviours of gravelly soil material. *Arab. J. Geosci.* **2020**, *13*, 523. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05385-9>.
- Li, J.; Sun, W.; Li, Q.; Chen, S.; Yuan, M.; Xia, H. Influence of Layered Angle on Dynamic Characteristics of Backfill under Impact Loading. *Minerals* **2022**, *12*, 511. <https://doi.org/10.3390/min12050511>.

22. Chmielewski, R.; Kruska, L.; Rekucki, R.; Sobczyk, K. Experimental investigation of dynamic behavior of silty sand. *Arch. Civ. Eng.* **2021**, *LXVII*, 481–498. <https://doi.org/10.24425/ACE.2021.136484>.
23. Sobczyk, K.; Chmielewski, R.; Kruska, L.; Rekucki, R. Strength Characterization of Soils' Properties at High Strain Rates Using the Hopkinson Technique—A Review of Experimental Testing. *Materials* **2022**, *15*, 274. <https://doi.org/10.3390/ma15010274>.
24. Bhujangrao, T.; Froustey, C.; Iriondo, E.; Veiga, F.; Darnis, P.; Mata, F.G. Review of Intermediate Strain Rate Testing Devices. *Metals* **2020**, *10*, 894. <https://doi.org/10.3390/met10070894>.
25. Mishra, S.; Chakraborty, T.; Basu, D. High Strain Rate Stress-Strain Response of Soils—A Review. *Jpn. Geotech. Soc. Spec. Publ.* **2015**, *3*, 80–85. <https://doi.org/10.3208/jgssp.v03.i13>.
26. Web of Science Homepage. Available online: <https://www-1webofscience-1com-100003et80008.han.wat.edu.pl/wos/allldb/summary/> (accessed on 8 March 2023).
27. Springer Link Homepage. Available online: <https://link.springer.com/> (accessed on 8 March 2023).
28. Wu, N.; Fu, J.; Xiong, C. Studying the Characteristics of Chaos and Fractals of Construction Rocks under Different Loading Velocities. *Materials* **2022**, *15*, 7890. <https://doi.org/10.3390/ma15227890>.
29. Wang, J.; Huang, L.; Li, X.; Wu, Y.; Liu, H. Effect of Particle Size Distribution on the Dynamic Mechanical Properties and Fractal Characteristics of Cemented Rock Strata. *Mathematics* **2022**, *10*, 2078. <https://doi.org/10.3390/math10122078>.
30. Wang, J.; Lei, L.; Liu, Y.; Yang, Y.; Huang, Y. Fracture Fractal and Energy Transfer Characteristics of Deep-Mine Marble under an Impact Load. *Minerals* **2023**, *13*, 275. <https://doi.org/10.3390/min13020275>.
31. Wang, H.; Xu, W.; Cheng, B.; Zong, Q. Research on Particle Size and Energy Consumption Law of Hard Coal Crushing under Impact Load Based on SHPB Test. *Appl. Sci.* **2023**, *13*, 3298. <https://doi.org/10.3390/app13053298>.
32. Yuan, Q.; Wang, L.; Xie, G.; Gu, S.; Khan, N.M.; Jiao, Z.; Liu, H. Evaluation of the Energy Consumption and Fractal Characteristics of Different Length-Diameter Ratios of Coal under Dynamic Impact. *Energies* **2022**, *15*, 5498. <https://doi.org/10.3390/en15155498>.
33. Waddoups, R.; Clarke, S.; Tyas, A.; Rigby, S.; Gant, M.; Elgy, I. An Approach to Quantifying the Influence of Particle Size Distribution on Buried Blast Loading. *Eng* **2023**, *4*, 319–340. <https://doi.org/10.3390/eng4010020>.
34. Wang, T.; Ma, L.; Wang, M.; Li, Z.; Zhang, X.; Geng, H. Effects of particle shape on dynamic mechanical behaviours of coral sand under one-dimensional compression. *Eng. Geol.* **2022**, *304*, 106624. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106624>.
35. Li, S.A.; Xiong, Z.; Fan, P.; Xie, K. Experimental Study on the Influence of Moisture and Clay Content on Stress Wave Attenuation Characteristics of Filled Joints. *Appl. Sci.* **2022**, *12*, 9140. <https://doi.org/10.3390/app12189140>.
36. Yu, X.; Chen, L.; Fang, Q.; Chen, W. Stress Attenuation and Energy Absorption of the Coral Sand with Different Particle Sizes under Impacts. *Proceedings* **2018**, *2*, 545. <https://doi.org/10.3390/ICEM18-05440>.
37. Shemirani, A.B.; Naghdabadi, R.; Ashrafi, M.J. Experimental and numerical study on choosing proper pulse shapers for testing concrete specimens by split Hopkinson pressure bar apparatus. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *125*, 326–336. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.045>.
38. Xu, D.; Zhang, Z.; Qin, Y.; Liu, T.; Cheng, Z. Effect of particle size distribution on dynamic properties of cemented coral sand under SHPB impact loading. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* **2022**, *162*, 107438. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107438>.
39. Chen, H.; Zhang, Ch.; Wei, J.; Li, M.; Wang, Y. A modified method for estimating the stress state of granular materials in the passive confined pressure SHPB tests. *Int. J. Impact. Eng.* **2022**, *160*, 104063. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2021.104063>.
40. Xu, D.; Zhang, Z.; Qin, Y.; Yang, Y. Effect of particle size on the failure behavior of cemented coral sand under impact loading. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* **2021**, *149*, 106884. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106884>.
41. Chen, Y.; Tang, Y.; Guan, Y.; Liu, R.; Han, X.; Zhao, X. Study on the mechanical properties of coral sands with different particle gradations. *Mar. Georesources Geotechnol.* **2022**, *41*, 327–338. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2022.2037112>.
42. Chen, X.; Shen, J.; Wang, X.; Yao, T.; Xu, D. Effect of Saturation on Shear Behavior and Particle Breakage of Coral Sand. *J. Mar. Sci. Eng.* **2022**, *10*, 1280. <https://doi.org/10.3390/jmse10091280>.
43. PN-EN ISO 14688-1; Geotechnical Investigation and Research—Determination and Classification of Soils—Part 1: Determination and Description, ISO: Geneva, Switzerland, 2018.
44. PN-EN ISO 17892-4:2017-01; Geotechnical Investigation and Testing—Laboratory Testing of Soil—Part 4: Determination of Particle size Distribution, ISO: Geneva, Switzerland, 2017.
45. Wang, F.; Kong, L.; Zhou, Z. Study on Pore Structure and Mechanical Property of Expansive Soil under Different Dehydration Conditions. *Appl. Sci.* **2022**, *12*, 5981. <https://doi.org/10.3390/app12125981>.
46. Woldesenbet, T.T. Experimental Study on Stabilized Expansive Soil by Blending Parts of the Soil Kilned and Powdered Glass Wastes. *Adv. Civ. Eng.* **2022**, *2022*, 9645589. <https://doi.org/10.1155/2022/9645589>.
47. Al-Gharbawi, A.S.A.; Najemalden, A.M.; Fattah, M.Y. Expansive Soil Stabilization with Lime, Cement, and Silica Fume. *Appl. Sci.* **2023**, *13*, 436. <https://doi.org/10.3390/app13010436>.
48. Górka-Pawliczuk, A. Frost heave—A challenge for road construction (in Polish). *Magazyn Autostrady.* **2017**, *5*, 116–122.
49. PN-EN 13286-2. Unbound and hydraulically bound mixtures—Part 2: Test methods for laboratory reference density and water content—Proctor compaction.
50. Sobczyk, K.; Chmielewski, R.; Kruska, L. The concept of experimental research on the behavior of sand cover material for protective shelters for civilians. *Saf. Eng. Anthropog. Objects* **2020**, *1*, 11–16. <https://doi.org/10.37105/iboa.51>.
51. Sobczyk, K.; Kruska, L.; Chmielewski, R.; Rekucki, R. Performance characteristics of Hopkinson's set-up pneumatic launcher. *Acta Polytech.* **2021**, *61*, 552–561. <https://doi.org/10.14311/AP.2021.61.0552>.

52. ISO 13320; Particle Size Analysis—Laser Diffraction Methods, ISO: Geneva, Switzerland, 2020.
53. ISO 13322-2; Particle Size Analysis—Image Analysis Methods—Part 2: Dynamic Image Analysis Methods, ISO: Geneva, Switzerland, 2021.
54. ISO 9276-6; Representation of Results of Particle Size Analysis—Part 6: Descriptive and Quantitative Representation of Particle shape and Morphology, ISO: Geneva, Switzerland, 2008.
55. Bettersizer S3 Plus Laser Particle Size Analyzer User's Manual. Dandong Bettersize Instruments Ltd. Available online: <https://www.bettersizeinstruments.com/uploads/file/bettersizer-s3-plus-users-manual-v8.pdf> (accessed on 2 March 2023).
56. Lv, Y.; Liu, J.; Xiong, Z. One-dimensional dynamic compressive behavior of dry calcareous sand at high strain rates. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* **2019**, *11*, 192–201. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.04.013>.
57. Li, L.; Kuo, X.; Zhang, G.; Huang, K. Experimental Study on Dynamic Compressive Behaviors of Sand under Passive Confining Pressure. *Materials* **2022**, *15*, 4690. <https://doi.org/10.3390/ma15134690>.
58. Wang, J.; Li, W.; Xu, L.; Du, Z.; Gao, G. Experimental study on pulse shaping techniques of large diameter SHPB apparatus for concrete. *Lat. Am. J. Solids Struct.* **2021**, *18*, 1. <https://doi.org/10.1590/1679-78256268>.
59. Konstantinov, A.; Bragov, A.M.; Igumnov, L.A.; Eremeyev, V.A.; Baladin, V.V.; Baladin, V.V. Experimental Study and Identification of a Dynamic Deformation Model of Dry Clay at Strain Rates up to 2500 s⁻¹. *J. App. And Comp. Mech.* **2022**, *8*, 981–995. <https://doi.org/10.22055/JACM.2022.39321.3387>.
60. Sobczyk, K.; Kruszka, L.; Grązka, M.; Chmielewski, R.; Rekucki, R. Preparation of the non-cohesive soil sample and calibration of the pneumatical launcher in the dynamic soil test SHPB. *Saf. Eng. Anthropog. Objects* **2022**, *1*, 16–27. <https://doi.org/10.37105/iboa.129>.
61. Pei, P.; Pei, Z.; Tang, Z. Numerical and Theoretical Analysis of the Inertia Effects and Interfacial Friction in SHPB Test Systems. *Materials* **2020**, *13*, 4809. <https://doi.org/10.3390/ma13214809>.
62. Lu, F.; Lin, Y.; Wang, X.; Lu, L.; Chen, R. A theoretical analysis about the influence of interfacial friction in SHPB tests. *Int. J. Impact Eng.* **2015**, *79*, 95–101. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2014.10.008>.
63. Yu, X.; Zheng, B.; Yang, B.; Shi, T. Correction method of SHPB experiment considering adiabatic deformation and interfacial friction effects. *J. Aerosp. Power* **2018**, *33*, 2367–2375. <https://doi.org/10.13224/j.cnki.jasp.2018.10.008>.

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Kamil Sobczyk
Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji
Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy badawczej, której wynikiem była publikacja:

Kamil Sobczyk, Ryszard Chmielewski, Leopold Kruszka, Ryszard Rekucki (2023): Analysis of the Influence of Silty Sands Moisture Content and Impact Velocity in SHPB Testing on Their Compactability and Change in Granulometric Composition, Applied Sciences, 13(8), 4707, <https://doi.org/10.3390/app13084707>

mój merytoryczny wkład polegał na:

- 1) realizacji przeglądu aktualnej literatury i bieżących trendów naukowych w analizowanej tematyce;
- 2) wykonaniu laboratoryjnych badań normowych: analizy sitowej (krzywej uziarnienia) oraz wilgotności optymalnej wybranych próbek piasku pylastego wraz z opracowaniem wyników;
- 3) opracowaniu koncepcji metodyki badania dynamicznego piasku pylastego o różnej wilgotności z wykorzystaniem stanowiska SHPB oraz zmiany składu granulometrycznego z wykorzystaniem stanowiska laserowego analizatora wielkości cząstek;
- 4) współudziale w przygotowaniu aparatury SHPB (w tym układu mostka Wheatstone'a i naklejeniu tensometrów pomiarowych) i w przygotowaniu stanowiska laserowego analizatora wielkości cząstek (w tym wykonanie procesu agregacji grudek cząstek gruntowych) oraz przeprowadzeniu kalibracji i kontroli gotowości aparatury do przeprowadzenia fizycznych eksperymentów;
- 5) współudziale w wykonaniu fizycznych eksperymentów zgodnie z opracowaną metodyką badawczą;
- 6) wykonaniu zestawienia graficznego wykresów przebiegu krzywych uziarnienia badanego piasku pylastego przed i po uderzeniu prętem-pociskiem (zmiana składu granulometrycznego);
- 7) opracowaniu wybranych elementów krytycznej dyskusji nad rezultatami eksperymentów fizycznych;
- 8) opracowaniu graficznym ilustracji i wykresów oraz współudziale w edycji tekstu manuskryptu;
- 9) podsumowaniu prowadzonych prac badawczych oraz sformułowaniu wniosków końcowych wraz z korektami i odpowiedziami wynikającymi z procesu recenzji.

Oświadczam, że jestem pomysłodawcą i autorem większościowym w/w publikacji.

.....

.....
podpis

Warszawa, 13.04.2023 r.

Ryszard Chmielewski
Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji
Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy badawczej, której wynikiem była publikacja:

Kamil Sobczyk, **Ryszard Chmielewski**, Leopold Kruszka, Ryszard Rekucki (2023): Analysis of the Influence of Silty Sands Moisture Content and Impact Velocity in SHPB Testing on Their Compactability and Change in Granulometric Composition, Applied Sciences, 13(8), 4707, <https://doi.org/10.3390/app13084707>

mój merytoryczny wkład polegał na:

- 1) analizie próbek gruntu o różnej zawartości pylastej i wyselekcjonowaniu wybranych próbek piasku pylastego do eksperymentów fizycznych;
- 2) nadzorze krytycznym nad normową poprawnością prowadzonych badań laboratoryjnych;
- 3) przeprowadzeniu kontroli bieżącej wilgotności próbek gruntu bezpośrednio przed eksperymentem fizycznym;
- 4) przedstawieniu propozycji wybranych wniosków końcowych i korekt wynikających z procesu recenzji.


.....
podpis

Warszawa, 13.04.2023 r.

Leopold Kruszka
Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji
Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy badawczej, której wynikiem była publikacja:

Kamil Sobczyk, Ryszard Chmielewski, **Leopold Kruszka**, Ryszard Rekucki (2023): Analysis of the Influence of Silty Sands Moisture Content and Impact Velocity in SHPB Testing on Their Compactability and Change in Granulometric Composition, Applied Sciences, 13(8), 4707, <https://doi.org/10.3390/app13084707>

mój merytoryczny wkład polegał na:

- 1) sformułowaniu celów i założeń pracy badawczej związanej z przeprowadzaniem dynamicznych eksperymentów fizycznych dla określenia zachowania się piasku pylastego;
- 2) analizie uzyskanych wyników eksperymentów fizycznych, w szczególności dynamicznych zależności badanego piasku pylastego z uwzględnieniem jego wilgotności;
- 3) wypracowaniu z zespołem autorskim odpowiedzi i korekt wynikających z procesu recenzji.



.....
podpis

Warszawa, 13.04.2023 r.

Ryszard Rekucki
Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji
Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie

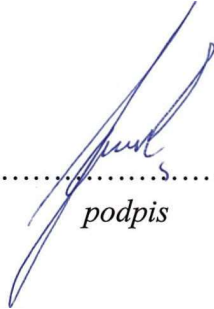
OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy badawczej, której wynikiem była publikacja:

Kamil Sobczyk, Ryszard Chmielewski, Leopold Kruszka, **Ryszard Rekucki** (2023): Analysis of the Influence of Silty Sands Moisture Content and Impact Velocity in SHPB Testing on Their Compactability and Change in Granulometric Composition, Applied Sciences, 13(8), 4707, <https://doi.org/10.3390/app13084707>

mój merytoryczny wkład polegał na:

- 1) współudziale w przygotowaniu aparatury SHPB (w tym układu mostka Wheatstone'a, przygotowaniu prętów pomiarowych i pręta-pocisku oraz naklejeniu tensometrów pomiarowych);
- 2) nadzorze krytycznym nad przeprowadzeniem kalibracji i kontroli gotowości stanowiska badawczego SHPB do wykonania fizycznego eksperymentu;
- 3) współudziale w wykonaniu fizycznych eksperymentów zgodnie z opracowaną metodyką badawczą oraz nadzorze krytycznym nad zgodnością prowadzonych fizycznie eksperymentów w porównaniu do założeń ich metodyki.


.....
podpis