

Streszczenie

W rozprawie doktorskiej skupiono się na przedstawieniu możliwości modelowania geomateriałów z wykorzystaniem wybranych modeli konstytutywnych na przykładzie skały dolomitowej. Podstawowym problemem, jak i głównym celem pracy, jest odwzorowanie procesu pęknięcia kruchej skały w warunkach obciążeń statycznych oraz dynamicznych. Te dwa stany deformacji różnią się mechanizmami, które warunkują powstanie i przyrost spękań, i wymagają osobnej analizy zachodzących zjawisk przeprowadzonych w szerokim zakresie badań. Niniejsza praca jest podsumowaniem cyklu recenzowanych publikacji naukowych i stanowi swoiste streszczenie wszystkich prac zwracając szczególną uwagę na wnioski płynące z przeprowadzonych badań.

Do realizacji celu pracy przyjęto eksperymentalno-numeryczne podejście, bazujące przede wszystkim na opracowaniu parametrów dla wybranych modeli konstytutywnych: Karagozian and Case Concrete (KCC), Johnson Holmquist Concrete (JHC), a także dodatkowo Johnson Holmquist Ceramics (JH-2). Aby uzyskać dane niezbędne do procesu szacowania stałych modeli konstytutywnych przeprowadzono szereg testów eksperymentalnych w skali laboratoryjnej, uzupełnionych o dodatkowe testy zrealizowane na oryginalnych stanowiskach badawczych

Pierwszy zakres testów objął podstawowe stany obciążenia, jakim poddawana jest skała w swoim naturalnym otoczeniu: ściskanie jedno oraz trójosiowe, niebezpośrednie rozciąganie statyczne oraz dynamiczne metodą brazylijską, a także jednoosiowe ściskanie dynamiczne. Badania w zakresie dynamicznym przeprowadzono przy użyciu stanowiska zmodyfikowanego pręta Hopkinsona (ang. *split Hopkinson pressure bar*, SHPB). Przeanalizowany zakres ciśnień bocznych w testach trójosiowych jak i uzyskane szybkości odkształcenia w testach dynamicznych były niewystarczające do pełnej kalibracji modeli w złożonych stanach obciążenia. Brakujące dane zaadaptowano z prac literaturowych dotyczących badań dolomitu o podobnej wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie jak analizowany w niniejszym opracowaniu materiał. Zidentyfikowane mechanizmy zniszczenia różniły się w zależności od stanu obciążenia. W warunkach jednoosiowego ściskania wynikały one z akumulacji sąsiadujących mikro spękań równoległych do linii odkształceń głównych. W próbach poddanych obciążeniu trójosiowemu ograniczony jest rozwój deformacji na kierunku obwodowym i w efekcie następuje intensyfikacja ścinania oraz widoczny jest wzrost wytrzymałości rezydualnej (resztkowej) próbki. Wyniki testów rozciągania wykazały natomiast dużą dysproporcję między granicą wytrzymałości na ściskanie i na rozciąganie, czego efektem jest niemal natychmiastowe uwolnienie zakumulowanej energii deformacji w postaci propagacji spękania, po przekroczeniu wytrzymałości próbki. Numeryczne odwzorowanie tych zjawisk stanowiło jeden z największych problemów w procesie kalibracji modelu konstytutywnego

Druga grupę testów stanowiły badania eksperymentalne, gdzie wygenerowano złożone stany naprężenia w materiale próbki skalnej będące efektem jednoczesnego rozciągania i ściskania próbek podczas dynamicznego uderzenia stalowej kulki łożyskowej w badaną próbkę skały. Uzyskane wyniki zostały przeanalizowane oraz przystosowane do zaaplikowania

w celu kalibracji parametrów użytych modelowaniu konstytutywnym. Opisane eksperymenty były również podstawą ich walidacji.

Istotnym elementem niniejszej rozprawy, będącym równocześnie jednym z jej głównych elementów oryginalnych, było dokładne opisanie procedur szacowania wszystkich parametrów konstytutywnych dla modeli JHC oraz KCC. W każdej z procedur zastosowano autorskie propozycje pominięcia ograniczeń modeli związanych z uwzględnieniem skutków występowania stref rozciągania oraz odwzorowania dynamicznego umocnienia materiału. W przypadku modelu JHC zaadaptowano kryterium Mohra-Coulomba do wyznaczenia sił kohezji między ziarnami skały, a także opracowano osobne parametry konstytutywne dla maksymalnych powierzchni wytrzymałościowych do obciążeń statycznych i dynamicznych. Pozwoliło to na uwzględnienie biliniowego charakteru umocnienia dynamicznego dolomitu. Ponadto przeprowadzono szczegółowe studium parametryczne stałych akumulacji uszkodzeń, które bezpośrednio wpływają na szybkość uwalniania energii w procesie osłabienia materiału. Istotnym elementem w trakcie modelowania dyskretnego była analiza wpływu gęstości siatki elementów skończonych na uzyskiwany charakter spękań. Otrzymane wyniki porównano z rezultatami otrzymanymi ze statycznych i dynamicznych badań laboratoryjnych. Charakter spękań, jak również jakościowe odwzorowanie stref zniszczenia w odniesieniu do próbek po testach eksperymentalnych, cechowały się dużą zgodnością. Zauważono, że wpływ ciśnienia bocznego zmniejszył ilość płaszczyzn zniszczenia wynikających z oddziaływania kontaktu powierzchni próbki z głowica maszyny wytrzymałościowej w skutek czego zaobserwowano też ścinania na proces niszczenia próbek. W testach dynamicznych zaobserwowano dobre jakościowe odwzorowanie liczby i rozkładu spękań, a ich inicjacja miała miejsce w środkowej próbki części (w przypadku testu brazylijskiego) potwierdzając tym samym teorię o akumulacji uszkodzeń w materiałach kruchych poddanych obciążeniom dynamicznym.

W przypadku szacowania parametrów dla modelu KCC zastosowano nowatorskie podejście do określenia parametrów kontrolujących ewolucję uszkodzenia, a także wykazano nieścisłości związane z implementacją modelu w kodzie LS-Dyna (np. niejasne działanie parametrów normalizujących akumulację uszkodzeń). Aby pominąć wynikające z nich ograniczenia przeprowadzono dogłębną analizę literaturową oraz szerokie studium parametryczne w celu określenia wpływu wszystkich parametrów kontrolujących akumulację uszkodzenia. Ostatecznie, aby uzyskać natychmiastowe uwalnianie energii w rozciąganiu przy jednoczesnym powolnym uwalnianiu energii przy ściskaniu trójosiowym, opracowano i szczegółowo opisano strategię kalibracji bazującą na optymalizacji parametrycznej stałych konstytutywnych. Dzięki temu modele zarówno w prostych jak i złożonych warunkach obciążenia zarówno statycznych jak i dynamicznych cechowały się dobrą korelacją z testami eksperymentalnymi przy ściskaniu i rozciąganiu. Warto zaznaczyć, że nowatorskim elementem rozprawy doktorskiej było przeprowadzenie pełnej kalibracji tego modelu. Ponadto odpowiedź ilościowa modelu w postaci krzywych naprężenie – odkształcenie cechowała się zgodnością z błędem nieprzekraczającym 7,0%, co w przypadku naturalnych materiałów kruchych należy uznać za wynik satysfakcjonujący.

W niniejszym opracowaniu uwzględniono także wyniki działań podjętych w celu wyznaczenia parametrów dla materiału JH-2, który ze względu na swoje pierwotne

zastosowanie do ceramik, dobrze odwzorowuje kruche i dynamiczne procesy powstawania i rozwoju spękań. Mając na względzie fakt, że ten model konstytutywny dedykowany jest do zagadnień dynamicznych, nie jest możliwe prawidłowe odwzorowanie zachowania się materiału w zakresie statycznego rozciągania oraz w złożonych stanach naprężenia. Model ten został zatem uwiarygodniony na bazie eksperymentalnych testów dynamicznych obejmujących również fragmentację niewielkiego bloku skalnego. Opracowanie parametrów tego modelu było o tyle istotne, że bazując na późniejszych etapach i badaniach symulacyjnych został on wyselekcjonowany jako model najlepiej odwzorowujący proces powstawania spękań w dolomicie.

Na bazie przeprowadzonych badań potwierdzono, że model JHC cechuje się ograniczoną możliwością odwzorowania stanu rozciągania w materiale próbki i nie jest możliwe uzyskanie wynikających z tego faktu spękań. Model KCC, pomimo największej złożoności z punktu widzenia procesu wyznaczania niezbędnych parametrów, przeszacowuje nieznacznie deformacje w warunkach silnie dynamicznych, uniemożliwiając jednoznaczna identyfikację dystrybucji spękań w materiale. Z kolei model JH-2 wykazał się zadowalającą dokładnością we wszystkich przeprowadzonych testach.

W ostatnim etapie dokonano bezpośredniego porównania wszystkich trzech modeli w wyselekcjonowanych testach laboratoryjnych a także zaproponowano numeryczne odwzorowane kruchego pęknięcia oraz fragmentacji materiału skalnego w badaniach symulacyjnych opisujących proces tzw. strzelań dołowych, który prowadzony jest w kopalniach podziemnych w procesie urobku. Odwzorowano rzeczywiste warunki „*in situ*”, a zadawalające wyniki uzyskano dla modelu JH-2. Do modelowania zastosowano autorski skrypt do generowania modeli metryki strzałowej oraz specjalne podejście do odwzorowania ciągłości modelu. Badaniom poddano wpływ zmienności sekwencji odpalenia ładunków wybuchowych z uwagi na wielkość zniszczenia w materiale skały, a także na stan skruszenia urobku skały określony za pomocą funkcji SWEBREC.

Uzyskane wyniki potwierdziły, że przedstawione podejście do modelowania daje możliwość prawidłowego odwzorowania procesu pęknięcia w materiale skały w złożonym dynamicznym stanie obciążenia pochodzącym od detonacji materiału wybuchowego.

Kucewicz Michal