

Andrzej Ubysz, prof. dr hab. inż.
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
Politechnika Wroclawska
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

Wrocław, dnia 8 września 2023 roku

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgra inż. Anna Jancy pt.

***DOŚWIADCZALNA I NUMERYCZNA ANALIZA ZACHOWANIA
BELEK KABLOBETONOWYCH O ZMIENNYM MIMOŚRODZIE SPRĘŻENIA
OBCIĄŻONYCH STATYCZNIE I DYNAMICZNIE***

1. Podstawa formalna opracowania recenzji

Podstawę formalną opracowania recenzji stanowi Uchwała Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Wojskowej Akademii Technicznej oraz Umowa o Dzieło nr 23/4000/501/2023 zawarta w dniu 01.08.2023 roku w pomiędzy Wojskową Akademią Techniczną im. Jarosława Dąbrowskiego (ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa), reprezentowaną przez płk dr inż. Pawła Kamińskiego na podstawie pełnomocnictwa nr 210/RKR/P/2023 z dnia 28 czerwca 2023 roku, a autorem niniejszej recenzji – prof. dr hab. inż. Andrzejem Ubyszem zatrudnionym w Politechnice Wrocławskiej na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego (Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław).

Promotorem pracy jest prof. dr hab. inż. Adam Stolarski z Wojskowej Akademii Technicznej.

2. Przedmiot i zakres pracy

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska Pani magister inżynier Anny Jancy pt.: „*Doświadczalna i numeryczna analiza zachowania belek kablobetonowych o zmiennym mimośrodku sprężenia obciążonych statycznie i dynamicznie*”. Praca ta została przygotowana w Wojskowej Akademii Technicznej pod kierunkiem Pana Profesora dra hab. inż. Adama Stolarskiego jako Promotora.

Opiniowana dysertacja zawarta jest w jednym tomie, liczącym 108 stron.

Praca dotyczy tematu w dziedzinie nauk technicznych: *budownictwo*, dyscyplinie naukowej: *inżynieria lądowa i transport* oraz specjalności: *konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone*. Głównym przedmiotem pracy jest opracowanie nowej, kompleksowej metody numerycznego modelowania kablobetonowych belek sprężonych o zmiennym mimośrodku sprężenia z dokładną kalibracją modelu weryfikowaną badaniami doświadczalnymi.

Finalnym efektem pracy są końcowe wnioski zawierające podsumowanie dyskusji wyników oraz pokazujące obszary badań, które powinny być przedmiotem rozważań dalszych prac naukowych.

3. Charakterystyka pracy

Rozdziały pracy stanowią zwartą tematycznie monografię o tematyce zawartej w tytule dysertacji. Dysertacje charakteryzują dwie, wyraźnie rozdzielone części:

- Część eksperymentalna, w której opisano zakres badań dla dwóch belek kablobetonowych ze zmiennym mimośrodem sprężenia zawierający opis geometrii, badań materiałowych, przebieg eksperymentu, otrzymane wyniki i ich analizę;
- Część teoretyczna zawierająca założenia modelowe przyjęte do analizy, w tym opis geometrii modelu numerycznego, siatki podziału z definicją kontaktu między elementami, statyczne i dynamiczne parametry materiałowe, a następnie weryfikowaną z doświadczeniem analizę numeryczną modelowanych belek pod obciążeniem statycznym i dynamicznym.

Najważniejsze zadania naukowe będące przedmiotem niniejszej rozprawy to:

- opracowanie kompleksowej metody numerycznego modelowania belek kablobetonowych o zmiennym mimośrodku sprężenia;
- wykonanie numerycznej analizy odkształceń i naprężeń przy oddziaływaniach sił statycznych i dynamicznych.

Temat badawczy podjęty przez Doktorantkę należy uznać jako ważny i aktualny, mający wyraźne odniesienie do projektowania konstrukcji z betonu sprężonego.

W kolejnych rozdziałach przedstawiono następujące zagadnienia.

Rozdział pierwszy nawiązuje do polskich i zagranicznych badań w zakresie analizy zachowania elementów kablobetonowych. Zwięźle scharakteryzowano badania Noble'a, Limongelliego, Ng Koon, Tan Hwee, Sixa, Rawiego, Kima, Hussiena, Hopa, Nohego, Cigady, Kanga, Hafezolghoraniego, Brenkusa i innych, których tematyka dotyczyła między innymi:

- doświadczalnych badań belek kablobetonowych pod obciążeniem statycznym i dynamicznym,
- doświadczalnej weryfikacji belek sprężonych ze zróżnicowaną trasą kabli,
- wpływu geometrii na zachowanie belek sprężonych kablami zewnętrznymi,

- zachowania trójprzęsłowych próbek kablobetonowych sprężanych bez przyczepności,
- wpływu obciążeń udarowych na płyty sprężone,
- wpływu charakterystyk przyczepności ciągien w kablobetonowych dźwigarach mostowych w naturalnej skali,
- wpływu przyczepności kabla sprężającego o zmiennym mimośrodzie sprężenia na nośność belek kablobetonowych przy obciążeniach cyklicznych,
- wpływu stopnia sprężenia i wieku elementów na częstotliwość drgań własnych belek kablobetonowych o zmiennym mimośrodku sprężenia,
- wpływu siły sprężającej na właściwości dynamiczne konstrukcji kablobetonowych,
- możliwości wykrycia utraty siły sprężającej lub awarii splotu za pomocą analizy modalnej.

Część prac dotyczyła opracowywania przestrzennych modeli weryfikowanych eksperymentami laboratoryjnymi i w skali naturalnej na obiektach mostowych.

Nie pominięto również dorobku polskich badaczy, których badania nie znajdowały się jednak w głównym nurcie badań Doktorantki. Dotyczy to zarówno badań prekursorów konstrukcji sprężonych, Profesorów Olszaka i Kaufmana, jak i badań współczesnych prowadzonych w Wojskowej Akademii Technicznej z udziałem między innymi Promotora niniejszej pracy, Profesora Adama Stolarskiego i Doktorantki mgr inż. Anny Jancy oraz dr hab. inż. Rafała Szydłowskiego z Politechniki Krakowskiej.

Jako dyskusyjną uwagę krytyczną wskazałbym pominięcie kilku nazwisk, których badania i praca zawodowa nie dotyczyły bezpośrednio sfery badań prowadzonych przez Doktorantkę, ale których nazwiska kojarzą się z tematyką poruszoną w dysertacji. Mam tutaj na myśli między innymi Profesorów Kazimierza Flagę, Kazimierza Furtaka, Krzysztofa Dyducha, Jana Kmitę i Jana Biliszczuka. Przypominanie takich nazwisk jest nie tylko nobilitowaniem osób, ale przede wszystkim promowaniem polskiej myśli technicznej.

Istotnym walorem przeglądu literatury jest natomiast cytowanie bardzo aktualnych wyników badań, gdyż większość prac publikowana jest w minionej dekadzie.

Teza pracy, z pozoru oczywista, ale rozwinięcie (m.in. cele główne i szczegółowe) pokazują złożoność zagadnienia. W ramach polemiki uważam, że całą pracę ma charakter rozwiązania złożonego zadania badawczego i może jako zadanie lepiej charakteryzowałoby przedmiot dysertacji. Zadanie to rozpoczynałoby się od sformułowania: *Opracowanie nowej kompleksowej metody modelowania [...] .*

Rozdział drugi Dotyczy badań doświadczalnych wykonanych na dwóch belkach kablobetonowych o długości 1,60 metra i przekroju 150 x 220 [mm mm]. Siła sprężająca przekazywana jest przez docisk zakotwień. Z kontekstu pracy można wnioskować, że badania mają charakter pomocniczy w celu kalibracji wartości przyjętych w części dotyczącej modelowania numerycznego.

Część doświadczalna uwzględnia również badania materiałowe betonu i cięgien sprężających. Badania wykonano zgodnie tradycyjnymi procedurami. Na uwagę zasługuje bardzo staranne dokumentowanie przebiegu badań doświadczalnych zarówno jeżeli chodzi o zaprojektowaną koncepcję badań jak i monitorowanie całego procesu.

Zasadniczą istotę pracy zawarto w rozdziałach 4, 5 i 6, w których Doktorantka opisała przyjęte założenia i metodę badań numerycznych. Rozdziały te stanowią udowodnienie tezy (sposób rozwiązania zadania) i pozwalają na dyskusje wyników i sformułowanie końcowych wniosków.

W rozdziale trzecim pokazano założenia do sformułowania modeli numerycznych, podział siatki w oprogramowaniu Hypermesh i parametry materiałowe. Utrudnieniem, ale równocześnie uściśleniem modelu materiałowego betonu było przyjęcie z programu Abaqus modelu Concrete Damage Plasticity. Walorem eksperymentu numerycznego była modyfikacja definicji parametru zniszczenia w modelu CDP uwzględniająca zniszczenie przy ścisaniu rozpoczynające się od fazy nieliniowego wzmocnienia betonu. Opiszano także sposób wyznaczenia dynamicznej wytrzymałości betonu na ścisanie z wykorzystaniem stałych wartości współczynnika wzmocnienia wytrzymałości dynamicznej.

Rozdziały czwarty i piąty zawiera wyniki statycznych i dynamicznych analiz numerycznych częściowo zweryfikowaną badaniami doświadczalnymi. Obciążenia dynamiczne realizowano impulsem siły stałym i zmiennym w czasie. W modelu obciążonym dynamicznie opisano ponadto dobór parametru tłumienia masowego.

Rozdział szósty zawiera dyskusję i wnioski z przeprowadzonych badań i analiz numerycznych oraz wskazania tematycznych obszarów, w których badania powinny być rozwijane. Zgodnie z postawionymi na wstępie zadaniami wnioski dotyczą zasadności nowej, kompleksowej metody modelowania numerycznego kablobetonowych belek sprężonych o zmiennym mimośrodzie sprężenia.

4. Ocena merytoryczna

Jak wspomniałem na wstępie recenzji, opiniowaną pracę doktorską uważam za ważną, wartościową merytorycznie i oceniam ją pozytywnie. Ocenę swoją uzasadniam następująco:

- Temat rozprawy jest odpowiednio dobrany, gdyż ma znaczenie nie tylko studialne, ale również bezpośrednie odniesienie do projektowania zaawansowanych konstrukcji. Uważam, że jest to szczególnie wartościowe, gdyż dowodzi o umiejętności analizy rzeczywistych zagadnień inżynierskich i projektowych.
- W zwięzłym przeglądzie literatury Doktorantka udowodniła wysoki poziom znajomości tematyki, w szczególności zagadnień już rozwiązanych, jak i tych które wymagają jeszcze pogłębionej analizy.
- Pomimo pewnych uwag dyskusyjnych program badań został poprawnie zaprojektowany i zrealizowany. Autorka wykazała się dużą rzetelnością i pracowitością zarówno przy realizacji eksperymentu, jak i w opracowaniu przestrzennego modelu sprężonego elementu. Nie było to zadanie łatwe, gdyż uwzględniono:
 - zarówno teoretyczny model betonu, który jest materiałem niejednorodnym,
 - jak i zagadnienia brzegowe przy współpracy betonu i stali
 - złożonego stanu naprężeń w strefie przy zakotwieniach,
 - zagadnienia niesymetrycznych i mimośrodowych obciążeń i towarzyszących im niesymetrycznych stanów odkształceń i naprężeń.
- Otrzymane wyniki badań zostały przedstawione szczegółowo, co pozwala na ich wykorzystanie przez innych badaczy.
- Zauważono obszary badań, które mogą być przedmiotem badań w dalszej pracy naukowej.
- Na bazie eksperymentu i modelowania numerycznego Doktorantka wykazała się umiejętnością prawidłowego i logicznego wnioskowania, co jest istotną umiejętnością, gdyż nawet najlepiej opracowane wyniki są bez odpowiedniej interpretacji jedynie bankiem tabel i wykresów.
- Należy również uznać uczciwość badawczą, gdyż pokazano również te wyniki badań, które nie wykazywały w pełni wzajemnej zgodności.

Do szczegółowych osiągnięć badawczych zaliczyłbym zagadnienia związane z modelowaniem numerycznym:

- modelowanie obszaru dostosowania siatki elementów skończonych betonu w sąsiedztwie elementów skończonych kabla sprężającego;
- analiza parametrów materiałowych przy obciążeniach statycznych i dynamicznych;
- pokazanie ścieżek naprężeń i parametru zniszczenia w zaimplementowanym w Abaqusie modelu betonu Concrete Damage Plasticity;
- analiza modelu betonu dla różnych wartości współczynnika wzmocnienia dynamicznego wytrzymałości betonu;
- opracowanie wykorzystania do analizy numerycznej złożonego modelu tłumienia masowego Rayleigha oraz analiza wpływu tłumienia masowego na nośność i przemieszczenia belek;
- wpływ imperfekcji na wyniki analiz numerycznych;
- analizy numeryczne dla modelu z wymuszeniem rysy i bez wymuszenia rysy;
- analiza odpowiedzi belki kablobetonowej przy obciążeniu impulsem stałym w czasie;
- analiza wpływu wzmocnienia dynamicznego wytrzymałości betonu na reakcję dynamiczną belek przy oddziaływaniu impulsu siły stałego w czasie oraz oddziaływaniu impulsu siły zmiennego w czasie;

5. Uwagi dyskusyjne i krytyczne

Przy bardzo pozytywnej ocenie ogólnej, do zadań recenzenta należy także sformułowanie pytań i uwag krytycznych. Poniżej przytoczę wybrane spostrzeżenia.

- Nie pokazano ścieżki naprężenie – odkształcenie dla próbek betonowych.
- Na rysunku 2.13 nie pokazano lub nie wykonywano cykli odciążenia, które mają wpływ na efektywność sprężenia przy obciążeniach cyklicznych, w jakich najczęściej pracuje konstrukcja.

- Przyjęte do badań wymiary belek dość znacznie odbiegają od wymiarów stosowanych w rzeczywistych konstrukcjach inżynierskich. W takich przypadkach używa się sformułowania *Efekt skali*. W mechanice materiałów i konstrukcji *efektem skali* określa się wpływ wymiarów próbki na nominalną wytrzymałość materiału. Jeżeli wymiary elementu konstrukcyjnego wzrastają, nominalna wytrzymałość maleje. Efekt ten jest istotny przy projektowaniu, gdy wyniki z badań laboratoryjnych przenosi się na obiekty w skali naturalnej. Jest to szczególnie istotne dla materiałów takich jak beton, który jest materiałem niejednorodnym. Problem efektu skali występuje między innymi w strefie przypodporowej, gdzie znacznemu zniekształceniu ulega rozkład naprężeń, który często przyjmuje się zgodnie z zasadą Saint-Venanta.

Głos w dyskusji. W jaki sposób uwzględniono w badaniach efekt skali?

W jaki sposób modelowano numerycznie strefę przy zakotwieniach, aby symulować rozkład naprężeń zgodnie z zasadą Saint-Venanta?

- Przy projektowaniu i użytkowaniu konstrukcji sprężonych – w szczególności kablobetonowych – duże znaczenie mają straty reologiczne. W pracy pominięto długotrwałe badania reologiczne. Jest to spostrzeżenie, a nie zarzut, gdyż przy modelowaniu numerycznym można uwzględnić to wykorzystując zależności i modele reologiczne.

Głos w dyskusji. W jaki sposób wprowadzono straty doraźne i reologiczne do numerycznego modelu konstrukcji kablobetonowej ?

6. Końcowa ocena pracy

Praca zwraca uwagę zarówno ze względu na zakres jak i ze względu na staranność wykonanych i opracowanych badań. Dotyczy to zarówno badań doświadczalnych, jak i numerycznych. Dysertacja sformułowana jest w sposób pozwalający zakwalifikować ją jako pracę o charakterze naukowym.

Podjęty przez Doktorantkę temat ma praktyczne zastosowanie w pracach projektowych i z pewnością należy do zagadnień kreujących dalsze kierunki dyscypliny naukowej. Autorka pokazuje zaznajomienie się z tematyką na poziomie studium literaturowego, w tym z publikacjami naukowymi i normatywami oraz, co najważniejsze udowadnia, że potrafi samodzielnie przeprowadzać analizy badawcze i wyciągać konstruktywne wnioski. Problematyka, którą rozwija Doktorantka jest relatywnie nowa. Będzie zatem kolejnym wkładem polskich inżynierów do rozwijanych w świecie technologii badań na realnych obiektach.

Ranga tematu, sposób jego prezentacji w niniejszej rozprawie wskazująca na bardzo dobre przygotowanie Doktorantki do pracy naukowej oraz możliwość prezentowania tych wyników zarówno na konferencjach jak i w czasopismach naukowych, a także docelowe zastosowania praktyczne, uzasadniają wniosek o dopuszczenie Pani mgr inż. Anny Jancy do publicznej obrony oraz stosownie do zasad przyjętych przez Senat Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego ewentualnego wyróżnienie pracy.

Praca spełnia wymagania odnośnie prac doktorskich zawarte w w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z. 2023 r., poz. 742 z późn. zm.)


Andrzej Ubysz