



Kielce, dnia 10.09.2023

Recenzent:

Prof. dr hab. inż. Grzegorz ŚWIT
Politechnika świętokrzyska
Wydział Budownictwa i Architektury
Katedra Wytrzymałości Materiałów i Konstrukcji Budowlanych
Al. Tysiąclecia Państwa Poleskiego 7
25-314 Kielce

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

**pt. „Doświadczalna i numeryczna analiza zachowania belek kablobetonowych
o zmiennym mimośrodzie sprężenia obciążonych statycznie i dynamicznie”
autorstwa mgr inż. Anny Jancy**

1. PODSTAWA FORMALNA OPRACOWANIA RECENZJI

Podstawą formalną opracowania recenzji stanowi:

- Pismo zlecające z dnia 7 lipca 2023 sygnowane przez Przewodniczącą Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego, Pana płk. prof. dr hab. inż. Michała Kędzierskiego.

2. PODSTAWA PRAWNA OPRACOWANIA RECENZJI

Podstawą prawną opracowania recenzji zgodnie z przesłanym pismem z dnia 7 lipca 2023 sygnowane przez Przewodniczącą Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego jest:

- Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018, poz. 1668),
- Ustawa z dnia 3 lipca 2018 r. przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018, poz. 1669),
- Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 20 września 2018 r. w sprawie dziedzin nauki i dyscyplin naukowych oraz dyscyplin artystycznych.

1/1



3. PRZEDMIOT I OPIS OGÓLNY ROZPRAWY

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Anny Jancy zatytułowanej „Doświadczalna i numeryczna analiza zachowania belek kablobetonowych o zmiennym mimośrodku sprężenia obciążonych statycznie i dynamicznie”. Promotorem pracy jest prof. dr hab. inż. Adam Stolarski.

Rozprawa została przedłożona w formie zwartej, jednostronnie zadrukowanego opracowania i liczy 108 stron. Składa się ona z 6 rozdziałów, wykazu literatury, użytych skrótów i ważniejszych oznaczeń, zamieszczonych rysunków i tabel oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. Bibliografia stanowi łącznie 51 pozycji, w tym 2 normy i 1 aprobatę techniczną.

Układ pracy jest czytelny i logiczny, charakterystyczny dla prac naukowych i badawczych, a sposób jej wydania w formie zwartej opracowania, jest typowym sposobem przedstawiania rozprawy doktorskiej.

4. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

4.1. Przedmiot, cel i zakres rozprawy

Zgodnie z informacją podaną przez Autorkę (str.23), celem pracy było udowodnienie tezy, że istnieje możliwość opracowania nowej, kompleksowej metody modelowania numerycznego kablobetonowych belek sprężonych o zmiennym mimośrodku sprężania z dokładną kalibracją modelu numerycznego względem badań doświadczalnych, na podstawie której można dokonać symulacji zachowania się belek we wszystkich fazach pracy do zniszczenia włącznie oraz prognozowania dynamicznej reakcji belek.

Celem rozwiązania problemu naukowego Autorka opracował zakres prac niezbędny do osiągnięcia zamierzonego efektu, który obejmował:

1. Przeprowadzenie badań doświadczalnych belek kablobetonowych o zmiennym mimośrodku sprężania przy oddziaływaniach statycznych.
2. Opracowanie nowej, kompleksowej metody modelowania numerycznego kablobetonowych belek sprężonych o zmiennym mimośrodku.



3. Przeprowadzenie analizy numerycznej zachowania się belek kablobetonowych przy oddziaływaniach statycznych wraz z porównaniem wyników rozwiązań numerycznych i badań doświadczalnych.
4. Opracowanie prognozy numerycznej zachowania belek kablobetonowych przy oddziaływaniach dynamicznych spowodowanych impulsem siły stałym w czasie oraz zmiennym w ograniczonym czasie.
5. Opracowanie w pełni trójwymiarowego modelu numerycznego, w którym każdy elementów składowych belki kablobetonowej jest zdefiniowany przy użyciu oddzielnych bryłowych elementów skończonych, bez sztucznego zwiększania sztywności belki poprzez lokalne dublowanie sztywności betonu oraz stali sprężającej i zbrojeniowej.
6. Wykorzystanie modelu betonu Concrete Damage Plasticity ze zbioru oprogramowania Abaqus., z własnym prawem ewolucji zmian naprężenia w funkcji odkształcenia oraz z rozszerzonym zdefiniowaniem parametru zniszczenia przy ściskaniu już od fazy plastycznego wzmocnienia betonu oraz w fazie naprężeń resztkowych przy ściskaniu i rozciąganiu.
7. Dobór parametrów materiałowych modelu betonu na podstawie wyników badań doświadczalnych próbek betonowych.
8. Wykorzystanie nieliniowych sprężysto-plastycznych aproksymacji zachowania się stali z doбором statycznych parametrów materiałowych na podstawie wyników badań doświadczalnych próbek stalowych.
9. Wykorzystanie modelu materiałowego Johnsona-Cooka do określenia prawa ewolucji dynamicznej granicy plastyczności stali.
10. Dobór parametrów określających dynamiczną wytrzymałość betonu i elementów stalowych.
11. Wykonanie obliczeń numerycznych przy wykorzystaniu jawnej procedury rozwiązywania równań różniczkowych ruchu Abaqus/Explicit, która w przypadku zagadnienia statycznego wymaga wprowadzenia graficznego sformułowania układu równań równowagi tłumionego ruchu nieoscylacyjnego.
12. Opracowanie metody kalibracji modelu numerycznego zapobiegającej powstaniu efektów niestateczności MES, powodujących nadmierne deformacje siatki MES w sprężonych belkach kablobetonowych.

1/2014



13. Analizę mechanizmu zniszczenia oraz wyznaczenie nośności belek kablobetonowych o różnym mimośrodku sprężania w każdej fazie pracy do zniszczenia włącznie na podstawie modelu numerycznego.
14. Analizę imperfekcji na wyniki numeryczne oraz charakter zniszczenia belek kablobetonowych przy oddziaływaniach statycznych.
15. Wyznaczenie nośności dla numerycznych modeli belek sprężonych kablobetonowych przy różnym obciążeniu dynamicznym wraz z analizą wpływu mimośrodu sprężania na nośność belek.

Zaprezentowany powyżej zakres pracy pozwolił Autorce na opracowanie ocenianej obecnie rozprawy.

Oceniana rozprawa składa się ze streszczenia pracy w języku polskim i angielskim, wykazu użytych skrótów i ważniejszych oznaczeń oraz sześciu rozdziałów.

Rozdział pierwszy zawiera uzasadnienie wyboru tematu pracy, jej tezy, główne cele oraz zakres.

W drugim rozdziale przedstawiono podsumowanie założeń projektowych oraz realizacji badań doświadczalnych dwóch belek kablobetonowych ze zmiennym mimośrodem sprężania. Rozdział zawiera opis ram czasowych realizacji badań doświadczalnych i uzyskanych wyników ze szczególnym uwzględnieniem analizy wpływu pełzania i wartości siły sprężającej na rezultaty testów. Ponadto w rozdziale tym omówiono wyniki zależności siła obciążająca – przemieszczenie belek, ze szczególnym zwróceniem uwagi na przebieg charakteru zniszczenia belek oraz zaobserwowane imperfekcje.

W trzecim rozdziale przegląd opisano założenia geometryczne modeli numerycznych, sposób ich podziału na elementy skończone oraz definicje parametrów materiałowych. Omówiono wpływ mimośrodu sprężania na dobór rozmiaru siatki elementów skończonych. Przedstawiono sposób modelowania elementami skończonymi składowych belek: cięgna sprężającego, zakotwień, prętów zbrojeniowych i betonu. Ponadto podano przyjęte wartości materiałowe dla poszczególnych elementów belki z uwzględnieniem statycznych i dynamicznych parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych. Omówiono model konstytutywny stali sprężającej zdefiniowany przez właściwości materiału dla zakresu sprężystego i plastycznego pracy w formie wykresu zależności naprężenie-odkształcenie, który został za aproksymowany do krzywej eksperymentalnej. W przypadku zbrojenia miękkiego

lmt



(pręty zbrojeniowe oraz zakotwienia), przyjęto model materiału sprężysto-plastycznego z liniowym wzmocnieniem. Beton opisano wykorzystując model **Concrete Damage Plasticity (CDP)** zaczerpnięty z biblioteki programu ABAQUS. W przyjętym modelu wykorzystano średnią wytrzymałość betonu otrzymaną z badań doświadczalnych z uwzględnieniem wpływów reologicznych (pełzanie betonu) mających znaczny wpływ na sztywność modelu numerycznego belek. Opisano prawo ewolucji naprężeń w funkcji odkształcenia betonu. Doktorantka założyła model sprężysto-plastyczny z nieliniowym wzmocnieniem, liniowym osłabieniem i stałym naprężeniem resztkowym dla ściskania, natomiast dla rozciągania przyjęto model sprężysty z liniowym osłabieniem oraz stałym naprężeniem resztkowym. Ponadto Doktorantka zaproponowała w tym rozdziale modyfikację parametru zniszczenia w modelu **CDP** uwzględniającą zniszczenie przy ściskaniu rozpoczynające się już od fazy nieliniowego wzmocnienia betonu. W modelowaniu elementów stalowych wykorzystano model materiałowy Johnsona-Cooka w celu określenia wzmocnienia dynamicznego granicy plastyczności stali ze względu na prędkość odkształcenia. Rozdział zawiera także opis definicji kontaktu elementów skończonych różnych materiałów składowych belki – kontakt beton-zakotwienie, ciągnio sprężające-beton, zakotwienie-ciężno sprężające oraz zbrojenie miękkie a beton. Do obliczeń belek kablobetonowych wykorzystano jawną procedurę obliczeniową do rozwiązania równania równowagi dynamicznej za pomocą procedury Abaqus/Explicit. Opisano wpływ fali dylatacyjnej, krytycznego kroku czasowego oraz tłumienia masowego na tłumienie oscylacji belek w rozwiązaniu statycznym.

W rozdziale czwartym przedstawiono wyniki statystycznych analiz numerycznych wraz z analizą porównawczą do nośności i przemieszczeń otrzymanych na podstawie badań doświadczalnych. Rozdział ten zawiera także opis kalibracji modelu numerycznego do badań doświadczalnych przy wykorzystaniu parametru tłumienia masowego oraz analizę porównawczą zachowania się belek poddanych w badaniach doświadczalnych i numerycznych dla różnych mimośrodków sprężania. Przeprowadzono również dyskusję nad wpływem imperfekcji na wyniki analiz numerycznych oraz opisano interakcję wymuszonej imperfekcji na koncentrację naprężeń oraz lokalizację zniszczenia w numerycznym modelu belki.

Rozdział piąty zawiera opis wyników analiz dynamicznych dla obu typów belek pod oddziaływaniem obciążenia impulsem siły stałym oraz zmiennym w czasie. Ponadto w rozdziale tym podano sposób doboru parametru tłumienia masowego, a także wyznaczono nośności belek zarówno dla obciążenia impulsem siły stałym w czasie, jak i krótkotrwałym

hmd



impulsem siły zmiennym w czasie. Przedstawiono analizę porównawczą wpływu wartości zwiększonej wytrzymałości betonu na ściskanie z wykorzystaniem współczynnika wzmocnienia wytrzymałości dynamicznej na charakterystykę przebiegu przemieszczenia w czasie dla obu rodzajów oddziaływań. W rozdziale opisano szczegółowo przebieg zniszczenia belek podczas oddziaływania obciążenia krótkotrwałym impulsem siły zmiennym w czasie wraz z analizą porównawczą wpływu mimośrodowego sprężenia w belkach na wyniki zmienności przemieszczania w czasie.

W rozdziale szóstym przedstawiono dyskusję uzyskanych rezultatów. Sformułowano wnioski wynikające z przeprowadzonych badań i analiz. Podano dalsze kierunki badań mające na celu poszerzenie stanu wiedzy w zakresie zachowania się belek kablobetonowych poddanych obciążeniom statycznym i dynamicznym.

Rozprawę kończy wykaz literatury oraz wykaz rysunków i tabel.

Po zapoznaniu się z rozprawą stwierdzam, że przyjęty układ i sposób uporządkowania treści jest logiczny i czytelny, typowy dla prac o charakterze badawczym. Rozprawa napisana jest poprawną polszczyzną, a jej strona graficzna nie budzi zastrzeżeń. Dobór pozycji bibliograficznych jest trafny i wystarczający.

Podsumowując ten fragment recenzji uważam, że podjęty przez Autorkę temat rozprawy zasługuje na pozytywną ocenę ze względu na jej aktualny wydźwięk, tak z poznawczego jak i inżynierskiego punktu. Podobnie rzecz ma się ze sformułowaniem w rozprawie celem. Jest on zasadny i oryginalny.

4.2. Ocena wartości naukowej rozprawy

Ocenę wartości naukowej rozprawy rozpoczynam od stwierdzenia, że zrealizowane badania eksperymentalne zostały zaprogramowane właściwie z punktu założonego celu. Metodyka zrealizowanych badań nie budzi większych zastrzeżeń. Badania zostały odpowiednio opisane i udokumentowane. Uzyskane rezultaty Autorka przedstawiła w sposób jasny i czytelny w formie graficznej w postaci bardzo licznych wykresów i zestawień tabelarycznych. Wykorzystanie oddzielnych, bryłowych elementów skończonych do modelowania numerycznego każdego z elementów składowych belek kablobetonowych, tj. beton, kabel sprężający, stal zbrojeniowa oraz system zakotwień, przy odpowiednim zdefiniowaniu warunków współpracy pomiędzy nimi, umożliwia symulację zniszczenia jakościowo zbliżoną do wyników badań doświadczalnych. Proponowane podejście modelowe

mt



umożliwiło odzwierciedlenie zachowania się belek kablobetonowych z systemem ciężna bez przyczepności do betonu. Metoda może być również dostosowana do systemu z przyczepnością poprzez zdefiniowanie odpowiedniej wartości współczynnika tarcia pomiędzy kablem sprężającym a betonem.

Przeprowadzona została poprawna analiza i interpretacja uzyskanych rezultatów i na tej podstawie wyciągnięte zostały właściwe wnioski.

Po analizie rozprawy uważam, że głównymi osiągnięciami naukowych Autorki są wymienione niżej następujące dokonania:

- opracowanie nowej, kompleksowej metody modelowania numerycznego kablobetonowych belek sprężonych o zmiennym mimośrodku,
- przeprowadzenie analizy numerycznej zachowania się belek kablobetonowych przy oddziaływaniach statycznych wraz z porównaniem wyników rozwiązań numerycznych i badań doświadczalnych,
- opracowanie prognozy numerycznej zachowania belek kablobetonowych przy oddziaływaniach dynamicznych spowodowanych impulsem siły stałym w czasie oraz zmiennym w ograniczonym czasie,
- opracowanie w pełni trójwymiarowego modelu numerycznego, w którym każdy elementów składowych belki kablobetonowej jest zdefiniowany przy użyciu oddzielnych bryłowych elementów skończonych, bez sztucznego zwiększania sztywności belki poprzez lokalne dublowanie sztywności betonu oraz stali sprężającej i zbrojeniowej,
- wykorzystanie modelu betonu Concrete Damage Plasticity ze zbioru oprogramowania Abaqus., z własnym prawem ewolucji zmian naprężenia w funkcji odkształcenia oraz z rozszerzonym zdefiniowaniem parametru zniszczenia przy ścisaniu już od fazy plastycznego wzmocnienia betonu oraz w fazie naprężeń resztkowych przy ścisaniu i rozciąganiu,
- wykorzystanie nieliniowych sprężysto-plastycznych aproksymacji zachowania się stali z doбором statycznych parametrów materiałowych na podstawie wyników badań doświadczalnych,
- wykorzystanie modelu materiałowego Johnsona-Cooka do określenia prawa ewolucji dynamicznej granicy plastyczności stali,

Handwritten signature



- opracowanie metody kalibracji modelu numerycznego zapobiegającej powstaniu efektów niestateczności MES, powodujących nadmierne deformacje siatki MES w sprężonych belkach kablobetonowych,
- analizę mechanizmu zniszczenia oraz wyznaczenie nośności belek kablobetonowych o różnym mimośrodku sprężania w każdej fazie pracy do zniszczenia włącznie na podstawie modelu numerycznego,
- wyznaczenie nośności dla numerycznych modeli belek sprężonych kablobetonowych przy różnym obciążeniu dynamicznym wraz z analizą wpływu mimośrodowo sprężania na nośność belek.

5. UWAGI KRYTYCZNE

Na wstępie chciałbym podkreślić, że przedstawione w niniejszym punkcie uwagi krytyczne odnośnie recenzowanej rozprawy nie obniżają jej wartości merytorycznej i jej jednoznacznie pozytywnej oceny. Zostały one podane w charakterze dyskusji i pewnego rodzaju uporządkowania przedstawionych treści z nadzieją, że mogą być przydatne i zostaną wykorzystane w trakcie opracowywania publikacji naukowych kierowanych do czasopism z tej tematyki.

Podczas czytania rozprawy nasunęły mi się, w kolejności, następujące uwagi krytyczne i dyskusyjne:

- a) str. 4 – w wersie 11 powinno być raczej *dynamicznej odpowiedzi belek* a nie *dynamicznej reakcji belek*
- b) str. 7 – w wersie 11 powinno być raczej..... *dynamic response of the beams*a nie *dynamic reaction of the beams*
- c) str. 16 – zdanie zaczynające się od słów *Betonowe konstrukcje sprężone*.....raczej w obecnej formie jest trudne do zrozumienia – moim zdaniem powinno ono brzmieć *Betonowe konstrukcje sprężone są powszechnie stosowane w obiektach inżynierskich o dużych rozpiętościach, w celu uzyskania wyższych nośności oraz redukcji wpływu ciężaru własnego konstrukcji.*
- d) w pracy Doktorantka używa pojęcia *nośności*, np. str. 65 – opis rys. 4.5 czy wers 11, ale nie definiuje o jaką nośność w tym konkretnym momencie chodzi, osoby postronne mogłyby mieć problem czy chodzi o nośność w danej chwili, czy

107



nośność graniczną, czy nośność dopuszczalną a może nośność w chwili zarysowania czy zniszczenia

- e) str. 66 – w wersji 1 użyto sformułowania..... *parametr zniszczenia przy ścisaniu*ale niestety nie został on w pracy wcześniej zdefiniowany a jest to jeden z ważniejszych parametrów – chyba, że Doktorantka miał coś innego na myśli
- f) tabela 3.3; 3.4; 3.5;3.6, rys. 3.9; 3.10 – brak informacji czy te wyniki są rezultatem badań Doktorantki czy też zaczerpnięte z literatury

6. WNIOSEK KOŃCOWY

Opiniowana rozprawa doktorska mgr inż. Anny Jancy zatytułowana „*Doświadczalna i numeryczna analiza zachowania belek kablobetonowych o zmiennym mimośrodku sprężenia obciążonych statycznie i dynamicznie*” rozwiązuje oryginalne zadanie naukowe dotyczące opracowania nowej kompleksowej metody modelowania numerycznego kablobetonowych belek sprężonych o zmiennym mimośrodku sprężenia z dokładną kalibracją modelu numerycznego względem badań doświadczalnych. Wykorzystanie zaproponowanego modelu umożliwi dokonanie symulacji statycznego zachowania się belek we wszystkich fazach pracy do zniszczenia włącznie oraz prognozowania dynamicznej reakcji belek. Jest to istotne dla bezpiecznej pracy szczególnie nowoprojektowanych rozwiązań konstrukcyjnych obiektów kablobetonowych co pokazują spektakularne katastrofy takich obiektów na świecie.

Uważam, że przedstawiony w rozprawie cel został osiągnięty, a sformułowane tezy udowodnione.

Autorka rozprawy wykazała się bardzo dobrą znajomością aktualnego stanu wiedzy w zakresie objętym tematem, umiejętnościami programowania i prowadzenia badań doświadczalnych. Zrealizowała obszerny zakres tych badań, otrzymała oryginalne wyniki, przeanalizowała je, krytycznie oceniła i sformułowała poprawne wnioski. Świadczy to o bardzo dobrym przygotowaniu i predyspozycjach do samodzielnego prowadzenia prac naukowo — badawczych Doktorantki.

Uwagi krytyczne zawarte w punkcie 5 recenzji nie obniżają wartości merytorycznej i ogólnej pozytywnej oceny rozprawy. Mają one charakter dyskusyjny, ale też i porządkowy. Mam nadzieję, że Autorka zechce je wykorzystać podczas przygotowywania artykułów do druku w czasopiśmie naukowych.

Hand



W mojej opinii rozprawa wnosi w przedmiotowym temacie istotny wkład w rozwój wiedzy w dyscyplinie naukowej inżynieria lądowa, geodezja i transport i ma znaczenie naukowe i praktyczne.

7. SENTENCJA RECENZJI

Biorąc pod uwagę sformułowania zawarte we wniosku końcowym, moim zdaniem recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Anny Jancy zatytułowana *„Doświadczalna i numeryczna analiza zachowania belek kablobetonowych o zmiennym mimośrodku sprężenia obciążonych statycznie i dynamicznie”* spełnia wymogi odnośnie do prac doktorskich zawarte w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2020, poz. 85) i stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony oraz wnoszę o wyróżnienie tej rozprawy doktorskiej.


Kielce/dn. 10-09-2023