



Politechnika Wroclawska

Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

Recenzent:

Prof. dr hab. inż. Krzysztof Schabowicz

Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

Politechniki Wroclawskiej

Wybrzeże Wyspiańskiego 27

50-370 Wrocław

E-mail: krzysztof.schabowicz@pwr.edu.pl

Wrocław, 11.09.2023 r.

Przejsiem 11/09/2023
DZIEKAN
Wydziału Inżynierii Lądowej
[Signature]
prof. dr hab. inż. Andrzej Garbacz

Adresat Recenzji:

Rada Naukowa Dyscypliny

Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport

Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej

ul. Armii Ludowej 16

00-637 Warszawa

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Mgr inż. Edyty Kowalskiej

pt.: „Badanie właściwości mechanicznych i charakterystyk dynamicznych konstrukcji murowych
w diagnostowaniu uszkodzeń”

1. Podstawa formalna

Podstawę formalną do wykonania niniejszej recenzji stanowią:

- Uchwała nr 771/2023 Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki
Warszawskiej z dnia 4 lipca 2023 r.,

- Pismo Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Warszawskiej z dnia 13.07.2023 r. zlecające wykonanie recenzji, podpisane przez Przewodniczącą Rady Pana dra hab. inż. Konrada Lewczuka, prof. uczelni.

- Pismo Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej z dnia 12.07.2023 r. zlecające wykonanie recenzji, podpisane przez Dziekana Wydziału Pana prof. dra hab. inż. Andrzeja Garbacza.

2. Przedmiot i opis ogólny rozprawy

Przedmiot recenzji stanowi rozprawa doktorska mgr inż. Edyty Kowalskiej pt.: *„Badanie właściwości mechanicznych i charakterystyk dynamicznych konstrukcji murowych w diagnozowaniu uszkodzeń”*, a jej promotorem jest prof. dr hab. inż. Leszek Małyszko, promotorem pomocniczym dr inż. Piotr Bilko.

Rozprawa została przedłożona w formie zwartego dwustronnie zadrukowanego skryptu i liczy wraz z załącznikami 124 strony. Składa się ona z 6 rozdziałów. Bibliografia stanowi łącznie 141 pozycji, w tym 27 norm, instrukcji i adresów internetowych. Praca zawiera 72 rysunki i 12 tablic. Treść rozprawy poprzedza streszczenie w języku polskim i angielskim oraz wykaz ważniejszych symboli i oznaczeń.

Układ pracy jest czytelny, charakterystyczny dla prac naukowych i badawczych, a sposób jej wydania jest poprawny.

3. Ocena merytoryczna rozprawy

3.1. Problem naukowy, cel i teza rozprawy

Problemem naukowym, a zarazem celem postawionym w pracy jest diagnozowanie i lokalizacja uszkodzenia konstrukcji, w szczególności konstrukcji murowych, za pomocą nieinwazyjnych metod wykorzystujących właściwości mechaniczne i charakterystyki dynamiczne wyznaczone eksperymentalnie.

W pracy sformułowano tezę, a mianowicie:

Możliwe jest wykrycie i lokalizacja uszkodzeń konstrukcji murowej technikami nieinwazyjnymi na podstawie eksperymentalnie wyznaczonych parametrów mechanicznych i dynamicznych.

W celu rozwiązania postawionego problemu naukowego wykonano następujące zadania:

- przeprowadzono badania doświadczalne w celu określenia właściwości mechanicznych autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK), na potrzeby zdefiniowania parametrów materiałowych niezbędnych do analizy numerycznej modelu łuku z elementów ABK;
- zaproponowano nową metodę wyznaczania stałych sprężystości modułu Younga oraz współczynnika Poissona w teście rozłupywania z wykorzystaniem systemu optycznej korelacji obrazu. Metoda została zaprezentowana na przykładzie próbek z elementów ABK i potwierdzona na elementach z materiałów ciągłych;
- przeprowadzono symulację numeryczną modelu łuku murowego z ABK celem wyznaczenia lokalizacji kolejnych pęknięć na drodze utraty nośności, na podstawie przeprowadzonej dwuwymiarowej analizy odpowiedzi statycznej;
- przeprowadzono analizę numeryczną modelu łuku murowego z ABK, w celu określenia odpowiedzi na wzbudzenie impulsowe w wybranym punkcie nieuszkodzonego i uszkodzonego modelu łuku. Analiza ta miała na celu zbadanie wpływu uszkodzenia na częstotliwości drgań;
- przeprowadzono przybliżoną analizę wyężeńiową modelu komina murowego na podstawie projektowego, przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi w celu wskazania najbardziej wyężonych miejsc konstrukcji, które mogą odpowiadać prognozowanym lokalizacjom uszkodzenia;
- przeprowadzono test impulsowy stalowej płyty w dwóch wariantach - nieuszkodzonej i uszkodzonej - w celu określenia charakterystyk dynamicznych płyty. Na podstawie tych danych wyznaczono różne wskaźniki detekcji i lokalizacji uszkodzeń;
- przeprowadzono test impulsowy łuku murowego z elementów ABK nieuszkodzonego i uszkodzonego, celem określenia charakterystyk dynamicznych łuku, na podstawie których wyznaczono różne wskaźniki detekcji i lokalizacji uszkodzenia;
- wykonano test impulsowy komina murowanego nieuszkodzonego, celem określenia charakterystyk dynamicznych (jako test wstępny do dalszych badań).

3.2. Charakterystyka i ocena poszczególnych rozdziałów rozprawy

Praca składa się z sześciu rozdziałów. Pierwszy rozdział to Wprowadzenie zawierające cel, tezę i zakres pracy.

W rozdziale drugim przedstawiono wyniki badań właściwości mechanicznych autoklawizowanego betonu komórkowego. Poza wyznaczeniem wytrzymałości na ściskanie, określono gęstość i porowatość oraz wytrzymałość na rozciąganie przez rozłupywanie na dwóch rodzajach elementów badawczych o różnym kształcie. Szczególne zainteresowanie poświęcono

testowi rozłupywania z uwagi na rolę naprężeń rozciągających w zniszczeniu konstrukcji murowych z betonu komórkowego. Na podstawie własnych doświadczeń omówiono zastosowanie w teście tensometrii elektrooporowej oraz metody cyfrowej korelacji obrazu w odniesieniu do próbek walcowych.

Rozdział trzeci zawiera opis autorskiej metody wyznaczania w teście rozłupywania stałych sprężystości za pomocą cyfrowej korelacji obrazu na podstawie pomiaru przemieszczeń na zewnętrznej powierzchni prostopadłej do osi podłużnej próbki. Metodę opisano na przykładzie badań próbek z betonu komórkowego oraz przedstawiono możliwość jej rozszerzenia do badań z materiałów ciągłych. Rozdział zawiera także symulacje za pomocą metody elementów skończonych mechanizmu zniszczenia dwóch rodzajów próbek z rozdziału drugiego. Symulacje przeprowadzono jako zadanie przestrzenne wybierając w oprogramowaniu komercyjnym model izotropowego materiału sprężysto-plastycznego Mohra-Coulomba.

W rozdziale czwartym omówiono pokrótce informacje z dziedziny dynamiki, ułatwiające zrozumienie wykonywanych testów eksperymentalnych opisanych w dalszej części pracy. Omówione podstawowe techniki analizy drgań w dziedzinie czasu, które pozwalają na określenie parametrów drgań oraz podstawowe techniki analizy drgań w dziedzinie częstotliwości, umożliwiające określenie charakterystyk modalnych. Przedstawiono różnice między analizą bezpośrednią a odwrotną problemu dynamicznego. Przedstawiono cechy eksperymentalnej i operacyjnej analizy modalnej oraz wybrane metody identyfikacji uszkodzeń, które opierają się na zmianach parametrów modalnych konstrukcji.

W rozdziale piątym pokazano możliwości diagnozowania uszkodzeń na podstawie eksperymentalnych badań charakterystyk dynamicznych konstrukcji oraz symulacji komputerowych. Przedstawiono przykładowe badania lokalizowania uszkodzeń na podstawie rejestracji sygnałów przyspieszenia wymuszonych młotkiem modalnym w nieuszkodzonej i uszkodzonej płycie stalowej. Szczególną uwagę zwrócono na konstrukcję wykonaną z elementów betonu komórkowego. Na podstawie łuków wykonanych w laboratorium przeprowadzono identyfikację symulowanych uszkodzeń za pomocą testu impulsowego eksperymentalnej analizy modalnej. Podjęto także próbę identyfikacji i prognozowania uszkodzeń w konstrukcjach in situ, na przykładzie murowanych kominów wykorzystując zarówno pomiary eksperymentalne jak i symulacje numeryczne.

Pracę kończy rozdział 6 zawierający podsumowanie i wnioski.

Przedstawiona w rozprawie i zweryfikowana doświadczalnie metodyka badań jest moim zdaniem trafna i poprawna pod względem merytorycznym. Zaprezentowane analizy odnoszą się zarówno do literatury krajowej jak i międzynarodowej. Podjęta tematyka wydaje się aktualna i potrzebna. Niewiele jest także prac poświęconych tej tematyce. Na uwagę zasługuje również staranność wykonanych badań i ich aplikacyjność w projektowaniu.

4. Uwagi krytyczne

Na wstępie chciałbym podkreślić, że przedstawione w niniejszym punkcie uwagi krytyczne odnośnie recenzowanej rozprawy zostały 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.

Znaczną część uwag krytycznych podano już w punkcie 3.2 przy recenzowaniu poszczególnych rozdziałów. Poniżej je zebrano i usystematyzowano. I tak:

- 4.1. Tytuł rozprawy zawiera wszystko to, co jest w rozprawie.
- 4.2. Praca napisana jest dobrym językiem z uwzględnieniem zasad stylistycznych, gramatycznych oraz interpunkcyjnych.
- 4.3. O jakie elementy rozbudowano oryginalną metodę analizy pola przemieszczeń otrzymywanego w teście rozłupywania do badania stałych sprężystości izotropowych materiałów ciągliwych oraz betonu zbrojonego? W jaki sposób wyznaczono realne wartości stałych sprężystości?
- 4.4. W badaniach wykorzystano technikę DIC. Jak szacowano niedokładności pomiarowe przy wykorzystaniu tej techniki?
- 4.5. W jaki sposób analizowano obszerne testy rozłupywania cylindrycznych i sześciennych próbek z autoklawizowanego betonu komórkowego?
- 4.6. W jaki sposób analizowano odpowiedzi konstrukcji na wzbudzenie impulsowe repliki łuku murowego z ABK - nieuszkodzonego i uszkodzonego?
- 4.7. W jaki sposób lokalizowano uszkodzenia za pomocą testów impulsowych w diagnozowaniu uszkodzeń?
- 4.8. W jaki sposób wyznaczono sekwencję kolejnych pęknięć łuku?
- 4.9. W jakim zakresie wyniki prac badawczych mogą być wykorzystane w praktyce inżynierskiej?

5. Wnioski

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. mgr inż. Edyty Kowalskiej pt.: *„Badanie właściwości mechanicznych i charakterystyk dynamicznych konstrukcji murowych w diagnozowaniu uszkodzeń”*, której promotorem jest prof. dr hab. inż. Leszek Małyško, promotorem pomocniczym dr

inż. Piotr Bilko stanowi rozwiązanie oryginalnego zadania naukowego dotyczącego diagnozowania i lokalizacji uszkodzenia konstrukcji, w szczególności konstrukcji murowych, za pomocą nieinwazyjnych metod wykorzystujących właściwości mechaniczne i charakterystyki dynamiczne wyznaczone eksperymentalnie.

Uważam, że przedstawiony w rozprawie cel został osiągnięty, sformułowane zadanie naukowe rozwiązane, a teza udowodniona.

Należy zauważyć, że Doktorantka wykazała się dobrą znajomością aktualnego stanu wiedzy naukowej i technicznej w zakresie prezentowanej tematyki, która podejmowana jest od pewnego czasu na Wydziale Geoinżynierii Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie. Świadczy to o dojrzałości naukowej Doktorantki, a przede wszystkim o jakości szkoły z jakiej się wywodzi. Niewątpliwie wpłynęło to korzystnie na całość pracy i dało możliwość nauczenia się programowania i prowadzenia badań naukowych i doświadczalnych. Wykonano badania, które poszerzyły istniejącą bazę wiedzy. Na tej podstawie dokonano krytycznej analizy otrzymanych rezultatów przeanalizowano je i opracowano wnioski. Całość pracy świadczy jednak o przygotowaniu do samodzielnego prowadzenia prac naukowych i badawczych. Rozprawa wnosi istotny wkład w rozwój wiedzy w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport, ma znaczenie naukowe i praktyczne, usystematyzowała częściowo wiedzę na temat diagnozowania i lokalizacji uszkodzenia konstrukcji, w szczególności konstrukcji murowych, za pomocą nieinwazyjnych metod wykorzystujących właściwości mechaniczne i charakterystyki dynamiczne wyznaczone eksperymentalnie.

Przeprowadzono badania doświadczalne pozwalające określić właściwości mechaniczne autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK), na potrzeby zdefiniowania parametrów materiałowych numerycznego modelu łuku z elementów ABK. Wyznaczono wytrzymałość na ściskanie, określono gęstość i porowatość oraz wytrzymałość na rozciąganie przez rozłupywanie elementów badawczych o różnym kształcie. Szczególną uwagę poświęcono testom rozłupywania z wykorzystaniem systemu optycznej korelacji obrazu, na podstawie których zaproponowano autorską metodę wyznaczania stałych sprężystości wykorzystując zarejestrowane przemieszczenia obserwowanej płaszczyzny próbki i rozwiązania teoretycznego. Zaproponowaną metodę rozszerzono do badania stałych sprężystości materiałów ciągliwych. Eksperymentalne testy rozłupywania dla wszystkich kształtów próbek z ABK zostały uzupełnione symulacjami numerycznymi metodą elementów skończonych, potwierdzając charakter zniszczenia z doświadczeń.

Wykonano dynamiczne testy impulsowe w celu określenia charakterystyk dynamicznych stalowej płyty i łuku murowego z elementów ABK. Eksperymentalne testy dynamiczne przeprowadzono dla obiektu nieuszkodzonego i uszkodzonego, co pozwoliło określić wybrane

wskaźniki detekcji i lokalizacji uszkodzeń. Opis badań poprzedzono omówieniem podstaw z dziedziny dynamiki, ułatwiających zrozumienie wykonywanych testów eksperymentalnych. Dodatkowo przeprowadzono analizę odpowiedzi statycznej modelu łuku murowego z ABK celem wyznaczenia modelu zniszczenia. Na podstawie tej symulacji wyznaczono lokalizację wymuszonego uszkodzenia łuku w miejscu powstania pierwszej rysy.

Dodatkowo, przeprowadzono analizę dwóch konstrukcji kominów murowych. Pierwsza obejmowała przybliżoną numeryczną analizę wytrzymałościową modelu komina. W analizie wykorzystano projektowe przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi, które posłużyło do określenia prognozowanych lokalizacji uszkodzeń konstrukcji. Druga analiza polegała na eksperymentalnym badaniu komina za pomocą testu impulsowego. W wyniku badania, otrzymano charakterystyki dynamiczne konstrukcji. Wyznaczono również dalsze kierunki prac badawczych i teoretycznych dotyczących tematyki rozprawy.

6. Sentencja Recenzji

Moim zdaniem recenzowana rozprawa mgr inż. Edyty Kowalskiej pt.: „Badanie właściwości mechanicznych i charakterystyk dynamicznych konstrukcji murowych w diagnozowaniu uszkodzeń”, której promotorem jest prof. dr hab. inż. Leszek Małyszko, promotorem pomocniczym dr inż. Piotr Bilko spełnia wymogi stawiane w stosownej Ustawie i Rozporządzeniu – i dlatego wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Z poważaniem,



Prof. dr hab. inż. Krzysztof Schabowicz