

prof. dr hab. inż. Zbigniew ZEMBATY,

Opole, 19 sierpnia, 2023

ORCID ID: 0000-0002-1605-5167

z.zembaty@po.opole.pl,

[url.: www.z.zembaty.po.opole.pl](http://www.z.zembaty.po.opole.pl)

Politechnika Opolska

Ul. Prószkowska 76

45-758 Opole

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Ahmet Tuğrul AKYILDIZ pod tytułem:

Infill structures protected against seismic excitations by polyurethane flexible joints

1. PODSTAWA RECENZJI

Recenzję opracowano na zlecenie Rady Naukowej Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej, pismem Przewodniczącego Rady z dnia 7 czerwca 2023 (pismo razem z rozprawą wpłynęło na Wydział Budownictwa i Architektury Politechniki Opolskiej w dniu 19 czerwca 2023).

2. CHARAKTERYSTYKA PRACY I JEJ TREŚĆ

Przedstawiona do oceny rozprawa liczy 259 stron i obejmuje 7 rozdziałów, cztery załączniki oraz spis literatury.

Rozprawa opisuje badania Poliuretanowych Złączy Podatnych (PZP), w języku angielskim nazwanych *PolyUrethane Flexible Joints* (PUFJ), do ochrony konstrukcji murowanych z cegły przed obciążeniami sejsmicznymi.

Po wstępie, gdzie sformułowano problem badawczy, w rozdziałach 2 i 3 opisano obszerny przegląd literatury. W rozdziale 4 został przedstawiony program dwóch eksperymentów, jednego w laboratorium w Słowenii (ZAG - Slovenian National Building and Civil Engineering Institute) i drugiego na stole wstrząsowym w Skopje, w Macedonii Północnej. W rozdziale 5 obszernie przedstawiono wyniki numerycznych symulacji badań przeprowadzonych w ramach eksperymentów. W rozdziale 6 przedstawiono uproszczone procedury obliczeniowe dot. badanych zagadnień, które sformułowano na podstawie badań numerycznych i eksperymentalnych. W rozdziale 7 podsumowano całą rozprawę i sformułowano wnioski końcowe. Rozprawę kończą cztery dodatki (A, B, C, D) oraz spis literatury.

Rozprawa stanowi częściowe wyniki opracowywania cyfrowych rezultatów z obu programów eksperymentalnych które współtworzył promotor a doktorant brał w nich częściowy udział. Całość programu badawczego była finansowana z projektu badawczego

"Infills and MASONRY structures protected by deformable POLYurethanes in seismic areas"

(akronim: INMASPOL) finansowanego w ramach *Seismology and Earthquake Engineering*

Research Infrastructure Alliance for Europe - SERA (H2020-EU.1.4.1.2. - integrating and

DZIEKANAT	
Wydziału Inżynierii Lądowej	
01 WRZ. 2023	
Wpłynęło dnia	10. 20. 17. 2. 2023
L. dz.	
podpis	<i>[signature]</i>

opening existing national and regional research infrastructures of European interest, INFRAIA-01-2016-2017 - Integrating Activities for Advanced Communities) koordynowanego przez Theodoros Rousakis'a z Uniwersytetu Demokryta z Tracji-Xanthi (Grecja). Liczący 257 stron raport końcowy Projektu odnotowuje 11 instytucji uczestniczących w Projekcie i ma 19 współautorów w tym promotora recenzowanej rozprawy. Wg. informacji uzyskanych od promotora Doktorant aktywnie uczestniczył na miejscu w niektórych eksperymentach i miał dostęp do wszystkich zapisów z badań, co umożliwiło mu przeprowadzenie niezależnego opracowania wyników w ramach przygotowywania ocenianej rozprawy. Szkoda, że Doktorant bardziej wyraźnie nie oddziela części wyników które opracował osobiście od wyników uzyskanych od innych partnerów tego dużego Projektu.

3. UWAGI OGÓLNE

Pomysł stosowania Poliuretanowych Złączy Podatnych w budownictwie murowanym pochodzi już z wczesnych prac badawczych Promotora gdzie materiał ten był stosowany z sukcesem do naprawy konstrukcji murowanych z cegły a także do ich ochrony przed destrukcyjnym wpływem drgań. Pod tym względem materiał ten został przebadany wszechstronnie, łącznie z licznymi rozwiązaniami patentowymi. W ramach badań opisywanych w Rozprawie podjęto się sprawdzić efektywność stosowania tego materiału także w ochronie konstrukcji murowanych stanowiących wypełnienie ścianowe budynków narażonych na wpływy sejsmiczne. W tym celu zaprojektowane zostały dwa duże eksperymenty:

- Pierwszy w postaci statycznych testów specjalnie skonstruowanych paneli (badania wykonane w ZAG na Słowenii),
- Drugi w postaci badań na stole wstrząsowym jednokondygnacyjnego modelu budynku narażonego na wymuszenia sejsmiczne.

Uznać można, że podjęcie przez doktoranta wszechstronnej analizy numerycznej takich badań stanowiło znaczące wyzwanie badawcze i prowadziło do niebanalnych wyników.

4. MERYTORYCZNA ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Główny problem jaki postawił sobie Doktorant było sprawdzenie w jakim stopniu stosowanie Poliuretanowych Złączy Podatnych zwanych w rozprawie w skrócie PUFJ poprawia zachowanie się konstrukcji murowanych z cegły pod obciążeniem sejsmicznym.

4.1 Analizy statyczne i pseudostatyczne

Pierwszym badanym problemem było badanie małych i średnich modeli ścian zbudowanych z typowej cegły z pustaków na ścinani w różnych konfiguracjach. Następnie skonstruowano większe modele opasane ramą żelbetową które badano bez stosowania PUFJ oraz przy stosowaniu dodatkowego wypełnienia materiałem PUFJ i obciążanych w różny

sposób. Szczegółowy opis eksperymentów statycznych i pseudostatycznych znajduje się w pod-rozdziałach 4.1.1 - 4.1.9. Do testowanych paneli materiał poliuretanowy był dodawany na dwa sposoby. Po pierwsze poprzez wycięcie dostępu o szerokości 20mm u góry oraz po lewej i prawej stronie między murem ceglanym a żelbetową konstrukcją opasującą i po wypełnieniu materiałem poliuretanowym (Frame B). W przypadku nowoprojektowanych konstrukcji istniała możliwość wypełnienia wszystkich czterech stron wewnątrz ramy żelbetowej, a wokół ściany murowanej (Frame C). Modele obciążano znaczącą, stałą siłą pionową (reprezentującą obciążenia z wyższych kondygnacji budynku), oraz narastającą, cykliczną siłą pseudostatyczną prowadzącą do wzrastających uszkodzeń. Otrzymano dwukrotny lub dochodzący do 2.75 wzrost dopuszczalnych przemieszczeń ramy, dla których stosowano złącze poliuretanowe w porównaniu do ramy z wypełnieniem bez materiału poliuretanowego oraz stosunkowo niewielkie osłabienie poziomej sztywności całego układu wynikające ze stosowania materiału polimerowego.

Wyniki eksperymentów statycznych i pseudostatycznych były następnie szczegółowo analizowane w rozdziałach 5.1.1 – 5.3.3 gdzie opisano zastosowanie do tego celu programu MES ABAQUS. Oprócz modeli ram (A, B, C) analizie poddano także odpowiedź pustej ramy żelbetowej (*bare frame*). Modelowanie współpracy trzech materiałów (żelbet, mur ceglany i materiał poliuretanowy) w zakresie pracy nieliniowej i silnie nieliniowej stanowiło znaczące wyzwanie dotyczące choćby stałych materiałowych a także efektów współpracy (kontaktu) na granicy różnych ośrodków, z którego to wyzwania doktorant wywiązał się wzorowo. Widać to zarówno w szczegółowych analizach pętli histerezy odpowiedzi ramy w jej płaszczyźnie, ale także w interesującej i oryginalnej analizie rozwoju uszkodzeń pokazanej na rysunku 5.26. Jak na trudność modelowania zagadnień eksperymentalnych które same w sobie pokazują rozrzuty (CoV) sięgające 20% (czasem nawet dochodzące do 40 - 50%) uznać można wyniki statycznych i pseudo-statycznych analiz za bardzo dobre.

4.2 Analizy dynamiczne

Celem analiz dynamicznych (opisanych w rozdziałach 4.2.1 - 4.2.10) było sprawdzenie na stole wstrząsowym odpowiedzi sejsmicznej stosunkowo prostego, jednokondygnacyjnego modelu konstrukcji żelbetowej ze zróżnicowanymi wypełnieniami typu A, B, C (przetestowanymi wcześniej w zakresie statycznym i pseudostatycznym). Do testów sejsmicznych wybrano zapis ze strefy epicentralnej trzęsienia ziemi Kefalonia z 2014 roku ze stacji sejsmicznej Chavriata, o szczególnie dużych maksymalnych przyspieszeniach poziomych wynoszących 0.74g i o stosunkowo krótkim zapisie pochodzącym z bliskiej strefy epicentralnej. W pierwszym etapie wybrano 4-kondygnacyjną konstrukcję żelbetową i przetestowano jej odpowiedź na wymuszenie zapisem Kefalonia. Celem tych testów było dostosowanie zapisu wstrząsów do możliwości wybranego stołu wstrząsowego. Okazało się,

że niezbędne jest zmniejszenie max wymuszeń do poziomu 77% wybranego zapisu Kefalonia. Co więcej ambitny program testów obejmował w jednym, małym modelu kilka wariantów wypełnienia co wymagało także obrotu modelu podczas testów o 90 stopni w płaszczyźnie poziomej i szybkiej naprawy niektórych ścian. Wszystko to spowodowało dość znaczące utrudnienia pełnych testów sejsmicznych na stole wstrząsowym a także zmiany pierwotnie zaplanowanego programu testów. Badania na stole wstrząsowym wykonano w czterech fazach sejsmicznych wymuszeń opisanych w rozprawie w rozdziale 4.2.8, których główną cechą było narastanie intensywności wymuszeń na stole wstrząsowym. Podczas całego programu testów wszelkie uszkodzenia wypełnień były starannie inwentaryzowane, a niektóre naprawiane. W fazie 3 model został obrócony o 90 stopni w płaszczyźnie poziomej celem testowania wypełnienia wzmocnionego materiałem polimerowym w jego pracy prostopadłej do płaszczyzny. Uszkodzony model został poddany dodatkowym badaniom za pomocą dużego wzbudnika drgań. Nie jest jasne, dlaczego takich badań nie można było wykonać np. harmonicznym wymuszeniem stołu wstrząsowego (tzw. sweep-sine test) uzupełnionych o testy impulsowe np. dużego młotka modalnego albo belki drewnianej zawieszanej na suwnicy. Natomiast szczegółowy opis uszkodzeń ścian wypełniających ponownie jest wykonany wzorowo i jest ciekawie opisany.

Wyniki testów sejsmicznych na stole wstrząsowym poddane zostały analizom i symulacjom numerycznym przy zastosowaniu modeli MES. Tym razem jednak zastosowano wiele uproszczeń opisanych szczegółowo na stronach 187-189, takich jak np. ograniczenie badanego czasu drgań do pierwszych 8 sekund. Mimo różnorodnych ograniczeń wizualizacyjne analizy uszkodzeń zostały znowu wykonane bardzo ciekawie (rysunki: 5.33-5.36).

4.3 Uproszczone procedury analityczne

Ponieważ praktyczna implementacja materiałów polimerowych dotyczyć powinna prostego, niskiego budownictwa o dużej wrażliwości na wymuszenia sejsmiczne jednak o stosunkowo słabej podatności dynamicznej więc wskazane jest wyprowadzić uproszczone inżynierskie formuły, które możliwe byłyby do stosowania w praktycznej inżynierii sejsmicznej krajów narażonych na duże ryzyko sejsmiczne (np. Grecja i Turcja). Takim uproszczonym formułow wykorzystującym analogię pracy wypełnienia murowanego jako „krzyżulca” o nieliniowych własnościach dynamicznych (*equivalent strut model*) jest poświęcony rozdział 6 rozprawy. Doktorant dokonał twórczej modyfikacji istniejących wzorów opisanych w literaturze i otrzymał formuły które wystarczająco dobrze modelują w uproszczony sposób sejsmiczną pracę zachowania się testowanego materiału polimerowego w analizowanych wypełnieniach ścian.

5. SZCZEGÓŁOWE UWAGI KRYTYCZNE

5.1 Punkt 4.2.8, strony 137-139. Uproszczona analogia dotycząca zmian sztywności giętej modelu EI jest myląca, gdyż testowany w rozprawie model pracuje głównie na ścinanie a jedynie częściowo na zginanie. Dlaczego nie podano przynajmniej trzech częstości drgań własnych modelu w stanie nieuszkodzonym? Można się domyślić, że wykresy (b-c) z rysunku 4.46 zostały otrzymane z p. wzoru (4.3) i pochodzą z jakichś bliżej niesprecyzowanych testów rezonansowych wykonanych między fazami uszkadzającymi. Nie jest to prawidłowo i wyczerpująco opisane w rozprawie.

5.2 Rozwijając poprzedni punkt, zdaniem Recenzenta, badania dynamiczne modelu na stole wstrząsowym mają liczne wady na etapie planowania modelu i jego przystosowania do wybranego stołu sejsmicznego. Wiele wskazuje na to, że ta część badań odbywała się bez wpływu doktoranta a być może także promotora na planowanie modelu i przebieg testów.

- Nie jest jasny opis stołu i zaplanowanego eksperymentu. W rozprawie stół wstrząsowy opisuje się jako posiadający 5 stopni swobody (strona 133), jednak badania wykonuje się na stole wzbudzonym do drgań na jednym, poziomym stopniu swobody. Kwestie tych ograniczeń i ich uzasadnienie powinno być szczegółowo opisane w rozprawie.
- Brak jest częstości drgań własnych modelu w stanie nieuszkodzonym (*intact*) łatwych do otrzymania prostymi testami impulsowymi,
- Brak jest analiz sejsmicznych dla małych ruchów stołu wstrząsowego tzw. „*sweep-sine*” lub „*white-noise*”, za wyjątkiem krótkiej wzmianki na stronie 142 (u góry). Dlaczego nie wykonano ich dla modelu w stanie nieuszkodzonym?
- Zdaniem Recenzenta większość kłopotów eksperymentu sejsmicznego wynika z faktu niedostosowania modelu do możliwości stołu sejsmicznego. Należało wykonać bardziej podatny dynamicznie model dwukondygnacyjny wykonany w skali 1:2, być może wykorzystujący specjalne, zmniejszane cegły, co jest podejściem znanym od wielu lat w przypadku badań konstrukcji murowanych z cegły.
- Gdyby zastosowano inny zapis wymuszeń sejsmicznych o dłuższym czasie trwania i szerszym widmie (o niższym stosunku PGA/PGV) to niepotrzebne byłoby przeciążanie stołu wstrząsowego zbyt dużymi wartościami szczytowymi przyspieszeń. Do tego jednak potrzebna byłaby lepsza analiza wymuszeń od strony prędkości ruchu podłoża.

Oczywiście, tak jak napisano na początku doktorant nie miał zapewne wpływu na planowanie tego eksperymentu więc opisane powyżej wady nie dotyczą oceny jego pracy.

5.3 Całość rozprawy jest przygotowana bardzo starannie i napisana na ogół w dobrym języku angielskim, jednak, zdaniem piszącego te słowa objętość rozdziałów dotyczących

sformułowania problemu i analiz literaturowych jest zbyt obszerna w zakresie banalnych informacji o charakterze popularnym, niepasujące do rozprawy doktorskiej.

6. WNIOSEK I KOŃCOWA OCENA PRACY

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska Ahmet Tuğrul AKYILDIZ'a jest przygotowana z dużym nakładem pracy i bardzo starannie wykonana oraz sprawia na czytającym wrażenie, że Doktorant głęboko rozpoznał analizowany problem w zakresie przeglądu literaturowego, od strony teoretycznej jak i od strony przyszłych, praktycznych zastosowań.

Autor podjął się analiz trudnego i wielowątkowego problemu z obszaru sejsmicznej nieliniowej dynamiki budowli, w warunkach zniszczenia. Mimo pewnych wad badań dynamicznych, opisanych wcześniej w treści recenzji, w niczym nie umniejsza to pozytywnych wyników pracy Doktoranta, który w sposób wzorowy wykonał swoją pracę przygotowując ocenianą rozprawę.

Biorąc powyższe pod uwagę, oraz bardzo szeroki zakres Rozprawy, uznać można, że spełnia ona wymagania *Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* (Dz.U. 2003 nr 65 poz. 595 z późniejszymi zmianami) i może być podstawą nadania Autorowi stopnia naukowego doktora nauk technicznych. Wnoszę o przyjęcie Rozprawy i dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.

