

Rzeszów, 04.06.2023

dr hab. inż. Izabela Skrzypczak, prof. PRz
Politechnika Rzeszowska
Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr. inż. Krzysztofa Grzyba
pt. *The behavior of masonry stiffening walls based on*
the full-scale research

- **Podstawa formalna recenzji**

Podstawą opracowania recenzji jest uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport z dnia 27.04.2023 r. (zgodnie z pismem Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynierio Lądowa i Transport Politechniki Śląskiej dr hab. inż. Marcina Staniek, prof. PŚ z dnia 12.05.2023 r.).

- **Charakterystyka rozprawy**

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr. inż. Krzysztofa Grzyba pt. „The behavior of masonry stiffening walls based on the full-scale research”. Praca napisana jest w języku angielskim, ma charakter teoretyczno-badawczy i składa się z 9 rozdziałów, streszczenia w języku polskim i angielskim, poszerzonego streszczenia

w języku polskim, spisu literatury oraz załącznika. Bibliografia obejmuje 167 pozycji piśmiennictwa w proporcji 2/165 jeśli chodzi o publikacje polskojęzyczne i angielskojęzyczne oraz 21 norm, w tym 6 w języku polskim. Tekst zasadniczy rozprawy liczy 218 stron

i zawiera 197 rysunków, 54 tabele oraz 180 wzorów.

W rozdziale pierwszym (Wstęp), nakreślono aktualną sytuację gospodarczą i rynkową dotyczącą branży budowlanej w odniesieniu do okresu, w którym powstawała recenzowana praca doktorska. Jako wprowadzenie do problemu

badawczego, wskazano na koncepcję zrównoważonego rozwoju w budownictwie. Na tym tle opisano współczesne trendy kształtowania i projektowania konstrukcji budowlanych, które mają na celu optymalizację grubości ścian, ignorując pełną weryfikację obliczeniową ścian pod kątem oddziaływań - zarówno pionowych (wywołanych ciężarem własnym i obciążeniem użytkowym), jak i poziomych (obciążeniem zmiennym np. wiatr). Zwrócono uwagę, na znaczenie ścian usztywniających jako elementów nośnych, których zadaniem jest bezpiecznie przenoszenie sił poziomych na fundament oraz zapewnienie stabilności geometrycznej budynku, ograniczenie odkształceń poziomych, a także zapewnienie komfortu użytkowania. Podkreślono, że mimo, iż znaczenie tych elementów jest kluczowe, świadomość projektowania murowanych ścian usztywniających jest niewielka. Stwierdzono, że budynki o coraz cieńszych ścianach wymagają opracowania modeli obliczeniowych i metod projektowania w oparciu o dane eksperymentalne i badania numeryczne.

Rozdział drugi to uzasadnienie podjęcia tematu ścian usztywniających. W rozdziale tym sformułowano cel główny oraz cele szczegółowe, tezy i zakres wykonanych prac oraz strukturę niniejszej rozprawy doktorskiej.

Jako główny cel pracy przyjęto zbadanie i zamodelowanie zachowania się ścian usztywniających wykonanych z elementów murowych z autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK) zarówno w fazie sprężystej jak i nieliniowej.

Elementy cząstkowe pracy wskazano jako cele pośrednie:

- analiza stanu wiedzy w literaturze krajowej i zagranicznej dotyczącej murowanych ścian usztywniających,
- przegląd ustaleń normowych,
- rozdział obciążeń na ściany usztywniające,
- określenie rzeczywistej redystrybucji sił wewnętrznych,
- analiza propagacji zarysowań i morfologii rys,
- propozycja metody wyznaczania położenia środka skręcania budynku,
- określenie faz pracy murowanych ścian usztywniających w zakresie sprężystym i post-sprężystym.

W związku ze sformułowanymi celami postawiono następujące tezy pracy:

1. Sztywność poszczególnych części konstrukcji determinuje wielkość redystrybucji sił wewnętrznych w budynku murowanym.
2. Sprężysty zakres pracy konstrukcji murowej jest niewielki i stanowi ok. 30% nośności.
3. Ściany usztywniające poddane ścinaniu ulegają znacznej degradacji swojej sztywności.
4. Położenie środka skręcania budynku wynika z rozkładu sztywności poszczególnych elementów konstrukcyjnych (ścian).
5. Budynek, w którym występuje niesymetryczny rozdział sztywności elementów usztywniających, na skutek działania obciążenia poziomego, ulega przesunięciu

(translacji) oraz skręceniu (obrotowi).

6. Dobór metody homogenizacji konstrukcji murowej wpływa na dokładność numerycznego odwzorowania pracy konstrukcji.

W trzecim rozdziale omówiono szczegółowo przegląd normatywnych przepisów dotyczących usztywnień ścian, a także wybranych badań niezbrojonych ścian murowanych

i budynków. Doktorant w tym rozdziale opisuje aktualny stan wiedzy i kierunki rozwoju procedur obliczeniowych oraz techniki numerycznej homogenizacji ścian stosowanych

w obliczeniach numerycznych.

Na podstawie przeglądu literatury stwierdzono, że:

- badania ścian usztywniających obciążonych monotonicznie należą do rzadkości,
- większość analiz niezbrojonych konstrukcji murowych dotyczy obciążeń cyklicznych,
- przemieszczenia poziome ścian usztywniających obejmują deformacje spowodowane ścinaniem (deformacje postaciowe) oraz spowodowane zginaniem (deformacje giętne),
- udział poszczególnych deformacji w całkowitym odkształceniu ścian nie zależy od wstępnego obciążenia ściskającego - zależy wyłącznie od geometrii konstrukcji,
- nośność ścian usztywniających uwarunkowana jest poziomem wstępnych naprężeń ściskających - zwiększenie naprężeń ściskających powoduje wzrost nośności ściany na ścinanie w swojej płaszczyźnie,
- wstępne naprężenia ściskające mają wpływ na morfologię zarysowania ściany, przy niewielkim obciążeniu pionowym rysy mają charakter schodkowy, przy znaczących wartościach naprężeń ściskających, rysy przebiegają ukośnie

Na podstawie przeprowadzanych studiów literatury zaproponowano przyjęty dalej

w rozprawie schemat postępowania.

W kolejnym, czwartym rozdziale opisano główne założenia procedury badawczej oraz szczegóły badań dotyczące budowy modeli, stanowiska badawczego i zastosowanych metod pomiarowych.

Rozdział piąty to badania i analizy własne Doktoranta. Doktorant przeanalizował wyniki badań w liniowych i nieliniowych fazach zachowania się ścian usztywniających.

Kolejny szósty rozdział to wykorzystanie cyfrowego systemu korelacji obrazu (DIC) do badania morfologii rys, zawarto rezultaty analiz propagacji zarysowań i uszkodzeń ścian.

W kolejnym, siódmym rozdziale, Doktorant zaproponował autorską procedurę homogenizacji muru, opierającą się na wynikach badań normowych. Podejście to zapewnia powtarzalność i dzięki temu może być weryfikowane przez innych badaczy. Ponadto wykonano analizy numeryczne z wykorzystaniem sprężysto-plastycznego

modelu materiałowego z degradacją do odzwierciedlenia zachowania się ścian usztywniających.

Rozdział 8 to krytyczna analiza wyników dotyczących obliczania ścian usztywniających i propozycja inżynierskiej metody obliczania ścian usztywniających. W rozdziale tym zawarto dyskusję wyników badań w zakresie wyznaczania sztywności ścian w fazie sprężystej i post-sprężystej z uwzględnieniem zarysowania ściany, położenie środka skręcania budynku oraz propozycję inżynierskiej metody analizy numerycznej ścian.

Ostatni dziewiąty rozdział to podsumowanie i wnioski. Doktorant sformułował szereg wniosków wynikających z przeprowadzonych badań w odniesieniu do przyjętych w pracy tez oraz wskazał kierunki dalszych badań.

Natomiast, w załączniku znajdują się szczegółowe rysunki konstrukcyjne badanych ścian, które umożliwiają powtórzenie badań.

- **Ocena merytoryczna pracy**

Recenzowana praca doktorska ma charakter eksperymentalno-teoretyczny. Treść pracy odpowiada tytułowi.

Podjęty przez Doktoranta temat pracy dotyczący **zachowania się murowanych ścian usztywniających na podstawie badań pełnoskalowych** uważam za aktualny i ważny, szczególnie, że postanowienia normy Eurocod 6 ograniczają się do krótkich, niepełnych informacji dotyczących obliczeń ścian usztywniających, choć zaznaczono, że obciążenie poziome może rozkładać się na ściany usztywniające proporcjonalnie do ich sztywności, jednak nie podano, na co zwrócił uwagę Doktorant, procedury obliczeniowej oraz nie podano szczegółów dotyczących redystrybucji sił wewnętrznych.

Mimo wielu lat prowadzonych badań nad konstrukcjami murowymi, zagadnienie dotyczące zachowania się murowanych ścian usztywniających nadal nie jest jeszcze w pełni wyjaśnione. Jak wiadomo, konstrukcja murowa jest strukturą anizotropową, której cechy mechaniczne nie są prostym odzwierciedleniem parametrów mechanicznych składowych części muru, elementów murowych i zaprawy. Ponadto złożony stan naprężeń w murowanej ścianie usztywniającej wynika z jednoczesnego oddziaływania obciążenia poziomego i pionowego. Ściana usztywniająca jest jednocześnie ściskana, ścinana i zginana w swojej płaszczyźnie, co w znaczącym utrudnia badania eksperymentalne. Mimo, iż rola tych elementów jest niezwykle ważna z punktu widzenia zarówno projektowania, jak i użytkowania budynków to wyczuwalny jest brak spójnego opracowania dotyczącego szczegółowej procedury obliczeniowej ścian usztywniających.

Badania nad zachowaniem się murowanych ścian usztywniających na podstawie modeli pełnoskalowych są bardzo pracochłonne i kosztochłonne i wymagają przestrzegania odpowiedniej procedury badawczej. Z tego powodu badań tego typu jest stosunkowo mało, dlatego wkład Autora w ten obszar badawczy jest bardzo znaczący.

Należy podkreślić, że temat pracy doktorskiej jest ściśle związany z przyjętym celem badań oraz sformułowanymi tezami badawczymi.

Wszystkie części rozprawy doktorskiej są merytorycznie spójne. Dotyczy to zarówno rozdziałów przedstawiających procedury normowe, przegląd literatury, modeli obliczeniowych, jak i rozdziałów dotyczących badań oraz analiz Autora.

Badania zostały przeprowadzone bardzo starannie.

Układ pracy jest merytorycznie poprawny. Główne cele badań zostały osiągnięte, a sformułowane przez Autora tezy zostały udowodnione. Należy podkreślić, iż postawione w dysertacji tezy są poprawne, a ich uzasadnienie poszerza aktualny stan wiedzy.

Przeprowadzone przez Doktoranta badania mają charakter naukowy i mogą być aplikowane w praktyce stanowiąc istotny wkład w praktyce projektowej.

Według recenzenta, główne osiągnięcia pracy to:

- opracowanie stanowiska badawczego oraz i autorskiego programu eksperymentalnego,
- propozycja analitycznej metody wyznaczania sztywności ścian usztywniających i położenia środka skręcania budynku,
- określenie faz pracy murowanych ścian usztywniających w zakresie sprężystym i post-sprężystym.

Natomiast, za najważniejszy oryginalny dorobek poznawczy Autora uważam:

- analiza stanu wiedzy w literaturze krajowej i zagranicznej dotyczącej murowanych ścian usztywniających, w tym różnych zaleceń normowych,
- analizy numeryczne z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych (MES).

• Uwagi o charakterze dyskusyjnym

Praca stanowi interesujące, całościowe opracowanie dotyczące zachowania się murowanych ścian usztywniających na podstawie badań pełnoskalowych.

Doktorant trafnie wybrał temat pracy, bowiem ze względu na anizotropową strukturę, badania i analizy MES dotyczące tychże konstrukcji nie są tak powszechne, jak badania konstrukcji stalowych, czy żelbetowych. Mimo, iż rola murowanych ścian usztywniających jest niezwykle ważna z punktu widzenia zarówno projektowania, jak i użytkowania budynków nadal brakuje spójnego opracowania dotyczącego usztywnień konstrukcji murowych i to właśnie ten fakt skłonił Autora do podjęcia rozprawy doktorskiej poświęconej zagadnieniu murowanych ścian sztywniających.

Poprzez przeprowadzone badania Autor udowodnił, że potrafi nie tylko opracować stanowisko badawcze, ale również przeprowadzić badania eksperymentalne. Opracowane oryginalne stanowisko badawcze wnosi istotny wkład do aktualnych metod badań konstrukcji murowych. Docenić trzeba wysiłki Doktoranta, aby stanowisko odwzorowywało w jak największym stopniu warunki rzeczywiste. Zaprogramowany zakres badań uznać należy za bardzo szeroki i odpowiedni do postawionych celów pracy. Na podkreślenie zasługuje opis stanowiska badawczego oraz czytelny graficzny sposób przedstawiania badanych wariantów

budynków.

W sumie przeprowadzono badania 8 obiektów pełnoskalowych, a w badaniach wykorzystano nowoczesne metody pomiarowe. Zamieszczone w pracy wyniki badań zostały starannie i czytelnie pokazane na wykresach i w tabelach, których doktorant zamieścił aż 54.

Wnikliwa analiza geometrii i zachowania poszczególnych modeli umożliwiła Doktorantowi nie tylko określenie faz pracy murowanych ścian usztywniających w zakresie sprężystym i niesprężystym, ale opracowanie autorskiej analitycznej metody wyznaczania sztywności ścian usztywniających i położenia środka skręcania budynku. W celu poprawy jakości przeprowadzonych badań, wskazane byłoby przeprowadzenie również analiz dotyczących błędów pomiarowych.

Należy również podkreślić, że przeprowadzone przez Autora badania były pionierskimi w tym zakresie, (zgodnie z datami zamieszczonymi w pracy, Autor przeprowadził i częściowo opublikował swoje wyniki w 2022).

Podjęty przez Doktoranta problem badawczy został rozwiązany z wykorzystaniem indywidualnie opracowanego stanowiska badawczego i z wykorzystaniem nowoczesnych technik pomiarowych i modelowania numerycznego w środowisku programistycznym Atena. Na uznanie zasługuje nie tylko przeprowadzony i zrealizowany przez Autora szeroki program badawczy, ale również modelowanie numeryczne, które stanowią oryginalne i zasadnicze elementy przedstawionej do recenzji pracy.

Natomiast, zaproponowane przez Autora badania mogą stanowić podstawę do większego programu, którego celem może być rozszerzenie zakresu badań poprzez uwzględnienie w obliczeniach zaproponowanej metody wyznaczania położenia środka skręcania budynku, czego nie uwzględniono w przeprowadzonych analizach.

Mocna strona pracy to jej aplikacyjność, bowiem zaproponowana analityczna metoda wyznaczania sztywności ścian usztywniających może być powszechnie stosowana w projektowaniu.

- **Uwagi do recenzowanej pracy:**

- **Uwagi o charakterze szczegółowym**

- Jakie były przesłanki do opracowania położenia środka skręcania budynku? Czy do wyznaczenia położenia środka skręcania budynku nie można było skorzystać z powszechnie znanych obliczeniowych metod geodezyjnych?
 - Czy podczas badań stwierdzono wpływ np. wielkości pola pomiarowego, zmiany oświetlenia podczas badania, czy ustawienia aparatów względem powierzchni na niedokładności pomiarowe zastosowanego systemu DIC? Czy nie wskazane byłoby wyliczenie niepewności pomiaru?
 - Szkoda, że autor nie odwołał się do publikacji Bakeera, T, który badał globalne zachowanie konstrukcji murowych poddanych obciążeniu wiatrem oraz interakcji między elementami konstrukcyjnymi. Wykorzystując modele numeryczne,

skonstruował różne skale typowego budynku murowanego w zabudowie szeregowej. Modele te ułatwiły badania udziału poszczególnych ścian usztywniających w całkowitej nośności konstrukcji, a także rozkładu obciążeń pionowych i poziomych. Wyniki jego prac również dostarczają cennych informacji na temat wzajemnych zależności między deformacją płyty a deformacją ściany. Zawarte w jego pracy wyniki modelowania numerycznego posłużyły do opracowania uproszczonej procedury inżynierskiej do weryfikacji ścian usztywniających, poprawiając sprężystość i bezpieczeństwo tych konstrukcji pod obciążeniem wiatrem. Przyjęte podejście u Bakeera, T jest podobne do podejścia proponowanego przez Autora. Szkoda, że nie porównano wyników obu prac i nie wskazano zasadniczych różnic między proponowanymi modelami, a także zastosowanymi narzędziami.

- **Uwagi stylistyczne i edytorskie**

-

- str.8 – „fake news” to neologizm, który raczej nie powinien być stosowany w opracowaniach o charakterze naukowym
- str. 13 – pkt. 2.4. Do opisu poszczególnych rozdziałów powinna być zastosowana strona bierna. Uwaga ta dotyczy się również kolejnych opisów zawartych w pracy, np. str. 215
- str. 21 – opis zmiennych we wzorze 34 jest mało czytelny
str. 181 - jest Fig. 18 zamiast 7.18
- str. 208 - błędnie zapisano Fig. 8.9 and 8.9 zamiast Fig. 8.9 and 8.10
- str. 230 – bibliografia, pozycja [130] zamiast Radosław J. powinno być Jasiński R.
- str. 230 – bibliografia, pozycja [131] zamiast Radosław Jasiński powinno być Jasiński R.

Należy podkreślić, że tekst zasadniczy pracy jest bez błędów językowych. Reasumując, zdaniem recenzenta, mimo drobnych błędów językowych praca napisana jest na bardzo dobrym poziomie zarówno językowym, jak i edytorskim.

- **Wniosek końcowy**

Recenzowana rozprawa doktorska jest bardzo wartościową pracą eksperymentalno-teoretyczną o znaczeniu poznawczym i praktycznym dotyczącą ścian usztywniających. Tematyka podjęta przez Doktoranta jest nowa, porównując liczbę badań w zakresie dotyczącym ścian usztywniających i badań pełnoskalowych. Istotnymi efektami pracy są: opracowane stanowisko badawcze, przeprowadzone badania pełnoskalowe oraz zaproponowana autorska procedura homogenizacji modelu ściany murowej.

- **Konkluzja**

Stwierdzam, że główny cel rozprawy doktorskiej został osiągnięty, a Doktorant wykazał się znajomością aktualnego stanu wiedzy w zakresie podjętej tematyki oraz umiejętnościami rozwiązywania problemów teoretycznych i

badawczych. Uzyskał oryginalne wyniki i wykazał, że potrafi analizować i krytycznie oceniać uzyskane rezultaty oraz formułować poprawne wnioski. Doktorant zauważa również kierunki dalszych badań w tym zakresie, co świadczy o Jego przygotowaniu do prowadzenia dalszych samodzielnych prac naukowo-badawczych.

Przedstawiona do recenzji rozprawa potwierdza, że Doktorant dysponuje bardzo dobrze rozwiniętym warsztatem badawczo-obliczeniowym oraz posiada ogólną wiedzę teoretyczną i umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Rozprawa jest opracowana na bardzo wysokim poziomie naukowym i redakcyjnym oraz wnosi istotny wkład w rozwój wiedzy w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska autorstwa mgr. inż. Krzysztofa Grzyba pt. „The behavior of masonry stiffening walls based on the full-scale research” spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz.U.2023.742, w wersji aktualnej na dzień sporządzenia niniejszej recenzji), określaną powszechnie jako Ustawa 2.0

i wnioskuję o przyjęcie rozprawy doktorskiej przez Radę Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Śląskiej oraz dopuszczenie **Pana mgr. inż. Krzysztofa Grzyba** do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Z uwagi na aktualny, ważny i bardzo interesujący temat badawczy oraz wnikliwy charakter pracy doktorskiej wnoszę również **o wyróżnienie rozprawy doktorskiej**.

