



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ
I ŚRODOWISKA



Recenzja spełnia wymagania formalne

Katedra Konstrukcji Inżynierskich
dr hab. inż. Maciej Niedostatkiwicz, prof. PG

31.05.2023r.

I.dz. 12/05/2023/KKI

Recenzja rozprawy doktorskiej pt.

The behavior of masonry stiffening walls based on the full-scale research

Zachowanie się murowanych ścian usztywniających na podstawie badań pełnoskalowych

autorstwa **mgr inż. Krzysztofa Grzyba**

wykonanej na Wydziale Budownictwa Politechniki Śląskiej
w dyscyplinie „Inżynieria lądowa, geodezja i transport”

1. Podstawa opracowania

Podstawą sporządzenia recenzji jest pismo Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny „Inżynieria lądowa, geodezja i transport” dr hab. inż. Marcina Stańka, Prof. PŚ z dnia 12 maja 2023r. (I. dz. RDILT.512.4.22023) i dołączona do niego rozprawa doktorska mgr inż. Krzysztofa Grzyba pt. „*The behavior of masonry stiffening walls based on the full-scale research*” („*Zachowanie się murowanych ścian usztywniających na podstawie badań pełnoskalowych*”) wykonana pod kierunkiem dr hab. inż. Radosława Jasińskiego, Prof. PŚ jako Promotora.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy bardzo aktualnej współcześnie tematyki wpływu murowanych ścian usztywniających na sztywność przestrzenną budynku. Praca jest napisana w języku angielskim. Dysertacja ma postać wydawnictwa zwartej, zbroszuowanego. Rozprawa doktorska liczy 265 numerowane strony formatu A4 i składa się z 10 Rozdziałów poprzedzonych spisem oznaczeń stosowanych w rozprawie doktorskiej (List of basic symbols):

- (1) *Introduction,*
- (2) *Motivation and assumption of the dissertation,*
- (3) *Evaluation of the state of knowledge,*
- (4) *Experimental research,*
- (5) *Behavior of the masonry stiffening walls,*
- (6) *Crack morphology,*
- (7) *Numerical analysis,*
- (8) *Discussions,*
- (9) *Conclusions.*

Wpłynęło dnia 7.06.2023 r.

W pracy znajduje się ponadto

(10) Bibliography (Spis literatury) podzielony na Publications (Wykaz publikacji) oraz Standards (Wykaz norm) (przepisów normowych)).

Elementy pracy stanowią również *Streszczenie (w języku polskim)*, *Abstract (w języku angielskim)*, *Streszczenie poszerzone (w języku polskim)* oraz *Appendix – supplementary materials (w języku angielskim)*.

Bibliografia obejmuje 167 pozycje literatury. Na uwagę zasługuje fakt, że znaczna część pozycji literaturowych wykorzystanych jako literatura przedmiotu to publikacje zagraniczne pochodzące z ostatniego okresu. Bardzo cennym elementem jest wyodrębnienie jako osobnego zestawienia spisu przepisów normowych do których odniósł się Autor w treści rozprawy doktorskiej.

Załącznik czyli *Appendix – supplementary materials* zawiera rysunki szczegółów stanowiska badawczego, co jest bardzo cenne, gdyż umożliwia to potencjalne wykorzystanie zastosowanych podczas badań doświadczalnych rozwiązań w pracach prowadzonych przez innych badaczy (eksperymentatorów). Takie podejście świadczy o otwartości i gotowości na współpracę badawczą Autora recenzowanej rozprawy doktorskiej.

W pracy brak jest wyodrębnionego oddzielnego spisu publikacji Autora, w szczególności tych, które powstały podczas prac badawczych realizowanych w ramach doktoratu.

Powyższy fakt nie wpływa w jakikolwiek sposób na wartość naukową recenzowanej rozprawy doktorskiej.

3. Treść rozprawy

Rozdział 1 (*Introduction*) stanowi wprowadzenie w tematykę rozprawy doktorskiej z uwzględnieniem aktualnych, dla okresu gdy powstawała rozprawa doktorska, uwarunkowań społeczno – gospodarczych i rynkowych dotyczących branży budowlanej.

W Rozdziale 2 (*Motivation and assumption of the dissertation*) przedstawiono uzasadnienie podjęcia tematu roli ścian usztywniających w budynku oraz zamieszczono sformułowane cele i tezy, jak również w sposób precyzyjny określono zakres pracy.

Rozdział 3 (*Evaluation of the state of knowledge*) obejmuje analizę aktualnego stanu wiedzy w odniesieniu do przepisów normowych oraz krajowych i zagranicznych publikacji naukowych, jak również naukowo – technicznych. W Rozdziale przedstawiono wybrane, reprezentatywne dla zagadnienia stanowiącego przedmiot rozprawy doktorskiej wyniki badań konstrukcji murowych, omówiono i scharakteryzowano aktualne, jak również te stosowane powszechnie do dnia dzisiejszego w praktyce inżynierskiej procedury i algorytmy obliczeniowe. Na uwagę zasługuje fakt, że analiza procedur obliczeniowych nie została ograniczona jedynie do norm EC6 oraz PN-B-03002:2007, ale przeanalizowano również wymagania oraz zasady konstruowania ścian usztywniających przedstawione w normach niemieckiej, szwajcarskiej, rosyjskiej, brytyjskiej, kanadyjskiej i amerykańskiej, jak również w rzadko przywoływanych w literaturze przedmiotu normach hinduskiej oraz chińskiej. W Rozdziale omówiono też stosowane w obliczeniach numerycznych podejścia w zakresie modelowania konstrukcji murowych.

W Rozdziale 4 (*Experimental research*) przedstawiono założenia autorskiego programu badań doświadczalnych obejmujących badania laboratoryjne pełnoskalowych modeli budynków murowanych. W Rozdziale przedstawiono opis stanowiska badawczego, jak również opis wykorzystywanych metod pomiarowych.

Rozdział 5 (*Behavior of the masonry stiffening walls*) zawiera główne wyniki badań i opis faz zachowania się ścian usztywniających, zarówno w zakresie sprężystym, jak również nieliniowym.

W rozdziale 6 (*Crack morphology*) opisano wyniki analizy morfologii rys i pęknięć ścian.

Rozdział 7 (*Numerical analysis*) obejmuje wyniki wykonanych obliczeń numerycznych.

W Rozdział 8 (*Discussions*) przedstawiono w sposób zwięzły dyskusję wyników przeprowadzonych badań w zakresie: a) wyznaczania sztywności ścian w fazie sprężystej i post-sprężystej (z uwzględnieniem ich zarysowania), b) położenie środka skręcania budynku oraz c) uproszczonej (inżynierskiej) metody analizy numerycznej ścian.

Rozdziale 9 (*Conclusions*) zebrano wnioski wynikające z przeprowadzonych analiz.

4. Ocena rozprawy

Problemem naukowym, będącym celem pracy było określenie rzeczywistego udziału murowanych ścian usztywniających w zapewnieniu geometrycznej niezmienności budynku.

W ocenie Recenzenta podjęta w pracy tematyka jest aktualna i ważna z praktycznego punktu widzenia, a zakres pracy łączy badania doświadczalne i analizy teoretyczne.

Zdaniem Recenzenta za podjęciem badań stanowiących przedmiot rozprawy doktorskiej przemawiały następujące fakty:

- brak spójnych i jednoznacznych procedur projektowania murowanych ścian usztywniających co jest szczególnie niebezpieczne ze względu na utrzymującą się tendencje rynkową do negatywnej optymalizacji konstrukcji poprzez zmniejszanie przekroju poprzecznego ścian,
- nie do końca rozpoznany pod względem ilościowym wpływ perforacji ścian murowanych na sztywność przestrzenną konstrukcji budynku,
- niedostateczne rozpoznanie badawcze przedmiotowej tematyki na modelach pełnoskalowych.

Zakres, jaki obejmuje rozprawa doktorska związany jest z celem pracy i można go przedstawić w następujących punktach:

- dokonanie krytycznego przeglądu literaturowego w zakresie zasad projektowania murowanych ścian usztywniających,
- próba usystematyzowania bazy wiedzy dotyczącej roli murowanych ścian usztywniających na podstawie badań doświadczalnych wykonanych przez innych badaczy,
- stworzenie i wdrożenie do realizacji własnego (autorskiego) programu badań laboratoryjnych przeprowadzonych na modelach pełnoskalowych,

- przeprowadzenie analiz numerycznych z wykorzystaniem komercyjnego programu opartego na Metodzie Elementów Skończonych (MES),
- przeprowadzenie analiz teoretycznych uwzględniających możliwość szacowania: a) sztywności ścian w fazie sprężystej i post-sprężystej (z uwzględnieniem ich zarysowania) oraz b) położenia środka skręcania budynku oraz c) uproszczonej (inżynierskiej) metody analizy numerycznej ścian.

Przeprowadzone w ramach realizacji niniejszej rozprawy doktorskiej badania pozwoliły w pełni udzielić wyczerpujących odpowiedzi na tezy pracy:

- sztywność poszczególnych części konstrukcji determinuje wielkość redystrybucji sił wewnętrznych w budynku murowanym – teza znalazła odzwierciedlenie w wynikach badań laboratoryjnych,
- sprężysty zakres pracy konstrukcji murowej jest niewielki i stanowi ~30% nośności – co zostało potwierdzone podczas badań eksperymentalnych,
- ściany usztywniające poddane ścinaniu ulegają znacznej degradacji swojej sztywności – powszechnie znana prawda inżynierska została potwierdzona doświadczalnie,
- położenie środka skręcania budynku wynika z rozkładu sztywności poszczególnych elementów konstrukcyjnych (ścian) – opracowana metoda analityczna posłużyła do weryfikacji zmian położenia środka skręcania budynku pomierzonego w ramach badań doświadczalnych,
- budynek, w którym występuje niesymetryczny rozdział sztywności elementów usztywniających, na skutek działania obciążenia poziomego, ulega przesunięciu (translacji) oraz skręceniu (obrotowi) – spodziewane inżyniersko zachowanie konstrukcji znalazło potwierdzenie w przeprowadzonych badaniach,
- dobór metody homogenizacji (rozumianej jako walidacja modelu) konstrukcji murowej wpływa na dokładność numerycznego odwzorowania pracy konstrukcji – znalazło to odzwierciedlenie w wykonanych uproszczonych obliczeniach numerycznych.

Recenzent ma nieodparte wrażenie, że wyniki przeprowadzonych prac badawczych, w szczególności badań laboratoryjnych wykonanych na elementach pełnoskalowych przedstawione w pracy stanowią jedynie fragment wieloetapowego programu badawczego nad zachowaniem się ściennych konstrukcji murowych który powinien być kontynuowany.

W odczuciu Recenzenta za najważniejsze oryginalne elementy rozprawy można uznać:

- uporządkowany i bardzo szczegółowy przegląd literatury tematycznie związanej z przedmiotem rozprawy doktorskiej umożliwiający już na wstępnym etapie czytania pracy wyrobienie sobie opinii o aktualnym poziomie wiedzy (informacji) odnośnie roli murowanych ścian usztywniających w budynku,
- próbę uporządkowania zasad projektowania murowanych ścian usztywniających określonych w różnych przepisach normowych, zarówno cywilnych, jak również odnoszących się do projektowania obiektów o znaczeniu militarnym,
- wykonanie wybitnie wysokojakościowych badań doświadczalnych na podstawie rozbudowanego autorskiego programu badawczego obejmującego testy na elementach pełnoskalowych, w których konstrukcja węzła stopowo – ściennego oraz przyjęte otworzenia w zakresie okien i drzwi odpowiadają wymiarom stosowanym powszechnie we współczesnym budownictwie,

- zastosowanie w badaniach doświadczalnych optoelektronicznej metody pomiaru odkształceń znanej jako PIV (Particle Image Velocimetry) lub DIC (Digital Image Correlation) której zakres wykorzystania uwzględnił możliwość szczegółowego przeanalizowania ścieżki powstawania rys i pęknięć konstrukcji murowych,
- wykonanie wstępnych obliczeń numerycznych przy krytycznym uwzględnieniu ich niedoskonałości polegającej na braku satysfakcjonującej zbieżności zachowania się modelu numerycznego w odniesieniu do wyników badań doświadczalnych będącej konsekwencją kalibracji w oparciu o energię pęknięcia w celu uzyskania zbieżności pomiędzy symulowanym numerycznie obrazem uszkodzeń ścian murowanych a morfologią uszkodzeń uzyskaną podczas badań doświadczalnych, przy jednoczesnym powstaniu rozbieżności pomiędzy obliczeniami numerycznymi a badaniami doświadczalnymi w zakresie sił niszczących,
- świadome zastosowanie w wykonanych obliczeniach numerycznych inżynierskiego uproszczenia w celu prowadzenia obliczeń z zastosowaniem modelu sprężystego, bez modelowania otworów i ich zastąpienie poprzez redukcje sztywności.

5. Uwagi ogólne

Poniżej zamieszczono uwagi ogólne odnoszące się do całości opracowanej rozprawy doktorskiej.

- 5.1 Badania doświadczalne przeprowadzone zostały na stanowisku badawczym którego konstrukcja odpowiada budynkowi jednokondygnacyjnemu. Zasymulowane zostało obciążenie poziome przy niewielkim obciążeniu pionowym murów odpowiadającym spływowi obciążeń z wyższych kondygnacji, co skutkowało niewielkim poziomem wyężenia w ścianach usztywniających. Wskazana byłaby kontynuacja badań w układzie obciążeń odpowiadającym budynkom wielokondygnacyjnym, przy uwzględnieniu konieczności obciążania krawędzi płyty, a nie zwiększaniu obciążenia stropu.
- 5.2 Stanowisko badawcze skonstruowane zostało dla rozpiętości stropu 400 cm. Jest to rozpiętość w praktyce nie stosowana w budynkach wielorodzinnych, rzadko stosowana również w budynkach jednorodzinnych. Interesujące pod względem spodziewanych wyników było by zwiększenie rozpiętości stropu do 600 cm przy jednoczesnym zachowaniu przyjętej wysokości kondygnacji 285 cm, odpowiadającej współczesnym standardom średniojakościowego budownictwa wielorodzinnego.
- 5.3 Program badań eksperymentalnych nie uwzględniał przypadku nierównomiernego osiadania budynku. Takie badania, nawet o charakterze rozpoznawczym byłyby wskazane do przeprowadzenia chociażby dla przypadku ścian pełnych w celu pokazania wpływu np. szkód górniczych na sztywność przestrzenną budynku.
- 5.4 Ograniczeniem wykonanych badań doświadczalnych, co należy po raz kolejny podkreślić charakteryzujących się bardzo wysokim poziomem przygotowania zarówno technicznego (obejmującego zastosowany sprzęt pomiarowo – badawczy) oraz technologicznego (obejmującego metodologie badań) jest ich wykonanie jedynie dla przypadku murów o grubości 18 cm, co z jednej strony jest zgodne z trendem negatywnej optymalizacji materiałowej obecnej na współczesnym rynku budowlanym, ale z drugiej strony ogranicza możliwości wnioskowania na temat roli grubości muru w przypadku ścian z otworami okiennymi, w szczególności w przypadku silnie obciążonych smukłych

filarków okiennych. Wskazane było by uwzględnienie aspektu przynajmniej w ograniczonym zakresie w dalszych badaniach.

- 5.5 Wykonanie badań z zastosowaniem techniki PIV (DIC) tylko przy pomocy jednego programu nawet bez jakościowej weryfikacji wyników przy pomocy drugiego narzędzia symulacyjnego stanowi niedoskonałość, aczkolwiek nie obniża wartości naukowej pracy jako całości.
- 5.6 Wnioski sformułowane na podstawie przeprowadzonych badań mają charakter opisowy (beletrystyczny), a nie inżynierski. Wpływ poszczególnych czynników na podatność ścian usztywniających określony został w sposób jakościowy a nie ilościowy. Utrudnia to sformułowanie własnych wątpliwości i zapytań po zapoznaniu się z treścią całości rozprawy doktorskiej.
Przykładem takiej sytuacji jest brak szczegółowego, lub choćby przybliżonego, ilościowego opisu wpływu niesymetrycznego rozdziału sztywności elementów usztywniających budynku, który w wyniku działania obciążenia poziomego, ulega przesunięciu (translacji) oraz skręceniu (obrotowi).
- 5.7 We wnioskach podsumowujących prace trudno odnaleźć opis inżynierskiego zastosowania opracowanej metody szacowania położenie środka skręcania budynku wynikającego z rozkładu sztywności poszczególnych elementów konstrukcyjnych (ścian).
- 5.8 Dysertacja nie zawiera zestawienia publikacji Autora, które powstały w okresie przygotowywania rozprawy doktorskiej, co uniemożliwia ocenę stopnia dotychczasowej naukowej komercjalizacji uzyskanych podczas pracy nad doktoratem wyników.

6. Uwagi szczegółowe

Poniżej zamieszczono uwagi szczegółowe odnoszące się do opracowanej rozprawy doktorskiej

- 6.1 W pracy brak jest informacji na temat kalibracji (ewentualnej autokalibracji) siłownika wymuszającego przemieszczenie poziome,
- 6.2 W rozprawie nie podano rozdzielczości, nie wykazano w jako sposób rejestrowane były deformacje ścian: czy w sposób kontynuacyjny czy z krokiem czasowym. Brak jest informacji czy w przypadku rejestracji w systemie kontynuacyjnym do analizy wykorzystywano każde z zdjęć, a w przypadku zdjęć wykonywanych z krokiem czasowym w jakich odstępach były one wykonywane. Ponadto brak jest informacji czy przeanalizowano wpływ zwiększenia kroku czasowego na jednoznaczność wizualizacji morfologii uszkodzeń.
- 6.3 W pracy nie określono wielkości analizowanego pola badawczego dla poszczególnych przypadków, podane są jedynie wielkości graniczne (od 150×170 mm do 215×2485 mm) co uniemożliwia, przy założeniu że rozdzielczość aparatu (rodzielczość zdjęć) była stała, określenie wpływu wielkości pikseli na jakość uzyskanych wyników.
- 6.4 W rozprawie nie można odnaleźć dyskusji na temat wpływu sposobu markowania pola roboczego dla metody PIV (DIC) tzw. AOI (Area of Interest) na wiarygodność (rozumianą jako powtarzalność) wyników.

- 6.5 Oznaczenia (zakres) analizowanego obszaru w ramach stosowania metody PIV (DIC) przedstawiony na rysunkach zamieszczonych w pracy odbiega od układu i rozmieszczenia otworów okiennych i drzwiowych w ścianach budynku testowego – wynika to prawdopodobnie z rozmiaru przyjętego pola badawczego (obserwacyjnego). Ze względu na brak komentarza utrudnia to czytanie pracy co przedstawiono na Fig. 6.1 i dalszych mapach deformacji których obszar nie odpowiada rzeczywistemu wpływowi otworowania poszczególnych ścian budynku.
- 6.6 W pracy w odniesieniu do wyniku przedstawiających stosowanie metody elektrooptycznej brak jest jednoznacznych opisów przedstawionych wielkości – pozostaje jedynie domyślać się, że przedstawiony rozwój rys i pęknięć dotyczy (jest wizualizacją) odkształceń postaciowych, co przedstawiono na Fig. 6.1 i dalszych rysunkach.
- 6.7 W rozprawie odkształcenia postaciowe przedstawiające rozwój rys i pęknięć wskazane zostały z różną skalą co utrudnia szacowanie wpływu sztywności przegród pionowych na mierzone wartości – powyższą sytuację przedstawiają Fig. 6.1 oraz Fig. 6.5 i dalsze rysunki.
- 6.8 Obraz deformacji po zarysowaniu d_x , d_y oraz d_z dla różnych przypadków badawczych przedstawiony jest z zastosowaniem zmiennych skal: dla każdego z kierunków, co jest całkowicie wyłomaczone ale również w zmienionym zakresie skal dla każdego z przypadków, co utrudnia szacowanie wpływu spadku sztywności na mierzone wartości – powyższą sytuację przedstawiają Fig. 6.2, Fig. 6.3 i Fig. 6.4 oraz Fig. 6.9, Fig. 6.10 i Fig. 6.11, jak również dalsze rysunki.
- 6.9 W pracy brak jest opisanego wpływu ewentualnego braku prostopadłości osi celowej aparatu (kamery) na poprawność uzyskanych wyników – nie wiadomo czy Autor przeprowadził badania kontrolne wpływu ewentualnego braku prostopadłości osi celowej aparatu fotograficznego na wiarygodność wyników.

7. Wniosek końcowy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska świadczy o umiejętności samodzielnego formułowania i rozwiązywania problemów naukowych przez jej Autora. Pomimo sformułowanych i przedstawionych powyżej kilku uwag krytycznych oraz wątpliwości należy jednoznacznie stwierdzić, że Autor opiniowanej rozprawy doktorskiej przeprowadził badania, zarówno doświadczalne, jak i teoretyczne, na odpowiednim poziomie merytorycznym. Na szczególną uwagę zasługuje rozbudowany autorski program badań laboratoryjnych przeprowadzonych na elementach pełnoskalowych - uzyskane na ich podstawie wyniki wskazują jednoznacznie, że Autor posiada potencjał naukowy który należy rozwijać.

W mojej ocenie Autor rozprawy wykazał się dobrą znajomością aktualnego stanu wiedzy w przedmiotowym zakresie oraz umiejętnością planowania i prowadzenia zarówno badań doświadczalnych, jak również prac teoretycznych. Uzyskane wyniki pracy świadczą o jej dobrym przygotowaniu do samodzielnego prowadzenia prac naukowo - badawczych.

Recenzowana praca ze względu na poruszaną tematykę doskonale wpasowuje się w dyscyplinę „Inżynieria lądowa, geodezja i transport”.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam jednoznacznie, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez Ustawę z dnia 20 lipca 2018r. „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 dlatego stawiam wniosek o dopuszczenie pracy mgr inż. Krzysztofa Grzyba do publicznej obrony.

Jednocześnie uwzględniając treść recenzowanej rozprawy doktorskiej jako całości wnoszę o wyróżnienie opiniowanej pracy zgodnie z przyjętymi zasadami nagradzania prac naukowych obowiązującymi w Politechnice Śląskiej .

dr hab. inż. Maciej Niedostatkiwicz
prof. Politechniki Gdańskiej