

Prof. zw. dr hab. inż. Romuald Orłowicz
Katedra Budownictwa Ogólnego
Wydział Budownictwa i Architektury
Zachodniopomorski Uniwersytet Techniczny w Szczecinie

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza Bukowskiego

pt. „*ANALIZA ZACHOWANIA MURÓW W ZŁOŻONYM STANIE NAPRĘŻEN*”

1. Podstawa i przedmiot recenzji

Recenzja została przygotowana na zlecenie Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej w Gliwicach pismem z dnia 30 czerwca 2016r. podpisanym przez Pana Dziekana prof. dr hab. inż. Jana Ślusarka, zgodnie z uchwałą Rady Wydziału Budownictwa z dnia 22 czerwca 2016r. w dyscyplinie budownictwo.

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska autorstwa mgra inż. Łukasza Bukowskiego pt.: „Analiza zachowania murów w złożonym stanie naprężeń”, której promotorem jest dr hab. inż. Leszek Szojda, prof. nzw. w Pol. Śl.

Praca ma objętość 120 stron i zawiera 5 rozdziałów, podsumowanie, wnioski oraz spis literatury zawierający 61 pozycji. Zagadnie nośności konstrukcji murowych pracujących w złożonym stanie naprężeń, jak dotychczas nie jest w pełni rozstrzygnięte. Próbę i sposób rozwiązywania tego zagadnienia przez autora zostało wyraźnie sformułowane w tezach pracy.

2. Struktura rozprawy doktorskiej

W rozdziale 2 dokonano analizy stanu wiedzy dotyczącej wyników badań, zarówno doświadczalnych jak i teoretycznych wytrzymałości muru w złożonym stanie naprężenia. Rozpatrzono głównie badania mające na celu rozpoznanie pracy muru w warunkach szczególnych obciążeń. Spośród prac badawczych szczególnie analizowano badania przeprowadzone na Politechnice Śląskiej, zwłaszcza testy trójosiowego obciążenia próbek zaprawy i cegły. Teoretyczne powierzchnie graniczne (hipotezy) analizowano w aspekcie ich rozwoju historycznego. Stwierdzono, że wadą wielu z tych modeli jest konieczność każdorazowego przeprowadzenia szerokiego programu badawczego w celu określenia wszystkich parametrów powierzchni granicznej. Ponadto w podanych modelach nie uwzględnia się zasadniczej cechy muru, jaką jest jego ortotropowy charakter. Ostatnie stwierdzenie zdaniem recenzenta nie jest do końca słuszne, ponieważ efekt anizotropii wytrzymałości muru rozpatrywano w szeregu pracach badawczych np. autorstwa L. Małyszko. Warto również nadmienić, że jak na razie nie ma możliwości (jak i potrzeby) budowy uniwersalnego kryterium wytrzymałości muru uwzględniającego wszystkie możliwe

stany naprężeń, które mogą występować w konstrukcjach murowych. Tym niemniej podjęta przez autora próba sformułowania modelu materiałowego muru, który „byłby możliwy do wygodnego zastosowania w analizach numerycznych, nie ograniczał się do płaskiego stanu naprężenia oraz uwzględniał często pomijaną cechę muru, jaką jest ortotropia” jest nie tylko pożądana, ale również bardzo ambitna. Zaproponowany model materiałowy muru został sformułowany w oparciu o powierzchnię graniczną Willama - Warnke z modyfikacją w postaci nasadki parabolicznej zaproponowanej przez S. Majewskiego i później wykorzystany do analizy konstrukcji murowych przez L. Szojda. Teoretyczne aspekty tego zagadnienia zawiera rozdział 3, w którym omówiono stan naprężenia elementu, jego niezmienniki oraz układy współrzędnych w przestrzeni naprężeń. Bardzo szczegółowo został wyjaśniony proponowany model materiałowy muru.

Rozpatrując równania 3.32 – 3.39 dla każdego z południków autor analizuje możliwości uwzględnienia anizotropowych właściwości muru poprzez wprowadzenie współczynnika redukcyjnego, regulującego wielkość powierzchni granicznej w zależności od kierunku działania obciążenia w stosunku do płaszczyzny spoin wspornych. Na tej podstawie autor proponuje zmiany w modelu zastosowanym przez L. Szojda. W celu określenia, przebiegu południków powierzchni granicznej sugeruje się ustalenie wytrzymałości muru na jednoosiowe ściskanie i rozciąganie oraz dwuosiowe ściskanie. Fikcyjną wartość wytrzymałości materiału na jednoosiowe rozciąganie proponuje się określać na podstawie przebiegu południka rozciągania wyznaczonego w aparacie trójosiowego ściskania. Autor proponuje również zmodyfikowanie nasadki zamykającej powierzchnię graniczną od strony naprężeń rozciągających. Na tej podstawie zaproponowano łatwe do rozwiązania układy 3.40 i 3.41.

W rozdziale 4 zostały opisane badania przeprowadzone oddzielnie zaprawy i elementów murowych w postaci cegły, na podstawie, których wyznaczono przebiegi południków powierzchni granicznej dla poszczególnych składowych muru. Na wstępie zostały przeanalizowane wyniki obszernych badań w stanie trójosiowego ściskania przeprowadzone przez L. Szojda, Ł. Drobca i R. Jasińskiego. Dalej szczegółowo omówiono metodologię przeprowadzonych przez autora badań. Wyniki badań elementów murowych i zaprawy zawierają szczegółową informację o przebiegu mechanizmu zniszczenia próbek. Przebieg zależności pomiędzy naprężeniami pionowymi i poziomymi podano w formie tabelarycznej oraz graficznie na wykresach. Ponadto ścieżkę obciążenia przedstawiono w przestrzeni naprężeń głównych. W celu umożliwienia analizy danych badań przeprowadzonych na elementach różnych klas wyniki przedstawiono również w sposób bezwymiarowy tzn. przez ich dzielenie przez wytrzymałość na ściskanie badanych elementów. Na podstawie przeprowadzonych badań podjęto próbę wyznaczania południków ściskania dla cegły i zaprawy (z wykorzystaniem badań L. Szojda, Ł. Drobca i R. Jasińskiego). Stwierdzono, że najlepszym dopasowaniem przebiegu południka ściskania jest krzywa opisana wielomianem drugiego rzędu. Sugerowano również wniosek, że różna wytrzymałość na ściskanie cegły skutkuje nie tylko zmianą wielkości powierzchni granicznej, ale również zmianą przebiegu ich południków. Natomiast nierozwiązany pozostał problem właściwego wyznaczania przebiegu południków powierzchni granicznej muru na podstawie wyników badań jego składowych. W tym celu autor sugeruje konieczność przeprowadzenia

dotatkowych badań doświadczalnych zarówno składowych muru jak i jego wycinków w złożonym stanie naprężenia.

W rozdziale 5 została przytoczona kalibracja i weryfikacja modelu materiałowego na podstawie analizy numerycznej fragmentów muru z wykorzystaniem programu Mafem 3D autorstwa S. Majewskiego. Do kalibracji użyto wyników badań doświadczalnych A.W. Pagea. W modelu obliczeniowym MES mur przedstawiono, jako materiał homogeniczny. Natomiast stałe materiałowe określające związek pomiędzy stanem naprężeń a stanem odkształceń uwzględniały właściwości ortotropowe muru. Powierzchnia graniczna została wprowadzona do programu poprzez wpisanie współczynników równań, określających przebieg jej głównych południków. Wybrane wyniki analizy numerycznej przedstawiono w postaci map naprężeń i wyężenia oraz liczbowo w tabeli 5.3.

3. Ocena rozprawy

3.1. Aktualność tematu

Analizy numeryczne złożonych problemów konstrukcyjnych stają się podstawowym źródłem wiedzy na temat pracy konstrukcji budowlanych. Ma to szczególne znaczenie w przypadku stosowania konstrukcji murowych, które ze względu na swą strukturę wytwarzania od samego początku charakteryzują się właściwościami anizotropowymi. Podjęta przez Doktoranta próba opisu złożonego stanu naprężenia w murze ceglany zasługuje na docenienie i jest nowym ujęciem znanego problemu. Zastosowanie izotropowego modelu materiałowego z modyfikacjami kształtu powierzchni granicznej jest nowym w tym zakresie. Aktualność i ważność tematyki analiz numerycznych dla rozwoju współczesnych konstrukcji budowlanych nie budzą wątpliwości.

3.2. Ocena podejścia do problemu

Połączenie laboratoryjnych testów materiałów tworzących mur w aparacie trójosiowego ściskania oraz analizy numerycznej muru przy obciążeniu w jego płaszczyźnie z próbą walidacji na podstawie badań obcych jest godne podkreślenia. Podejście to zostało wykonane z należytą ostrożnością i rozważą. Mur ceglany jest materiałem trudnym do dokładnego opisanego numerycznego ze względu na złożony charakter struktury. Te uwarunkowania są znane Doktorantowi, który dokonał przeglądu aktualnego stanu wiedzy w zakresie obliczania i projektowania konstrukcji murowych oraz kryteriów wytrzymałościowych, jakie są stosowane do rozwiązania tego typu problemów. Doktorant jest świadomy trudności określenia właściwych parametrów numerycznego modelu materiałowego i przeprowadził własne doświadczenia laboratoryjne, jak i wykorzystał badania wykonane wcześniej. Pozwoliło to na określenie powierzchni granicznej modelu w szerszym zakresie pracy materiału. Autorska próba wprowadzenia modyfikacji powierzchni granicznej materiału izotropowego w wyniku zmiany kierunku naprężeń głównych jest interesującym zabiegiem numerycznym. Przedstawienie wyników tych zabiegów w postaci map naprężeń analizowanych wycinków murów było kolejnym etapem pracy. Porównanie wyników analiz z wynikami badań laboratoryjnych jest bardzo interesujące. Taki sposób postępowania jest ze wszech miar uzasadniony. Stanowi to wpisujący się w obecny trend analiz konstrukcji murowych w złożonym stanie obciążenia. Jest to sposób rozwiązania złożonego problemu

inżynierskiego zaawansowanymi metodami obliczeniowymi, a podsumowanie i wnioski w całości odzwierciedlają główny wynik przeprowadzonych badań oraz poprawność sformułowanych tez naukowych.

4. Uwagi ogólne i szczegółowe

4.1. Uwagi ogólne

Praca została napisana poprawnym językiem. W czasie zapoznawania się z pracą autorowi recenzji nasunęły się pewne uwagi natury ogólnej, które powinny być asumptem do polemiki z Doktorantem w poruszanych kwestiach.

- Stwierdzono pewne rozbieżności pomiędzy przeprowadzoną analizą a wynikami badań A.W. Pagea, które występują zwłaszcza przy dwuosowym ściskaniu. W związku z tym autor proponuje wprowadzenie do funkcji współczynnika „k” dodatkowej zmiennej uwzględniającej efekt sprężenia. W rozdziale tym budzi wątpliwość poprawność określenia stanu naprężeń wg. Rysunków 5.6 i 5.7, uzyskanego odpowiednio dla kątów nachylenia spoin wspornych $67,5^\circ$ i 45° . Z przytoczonych map naprężeń $\bar{\sigma}_x$ i $\bar{\sigma}_z$ wynika ich jednorodny rozkład. Natomiast wg. teorii sprężystości materiałów anizotropowych przy pokazanych na wymienionych rysunkach warunkach brzegowych i podanych w tabeli 5.2 wartościach modułów ścisłości i ścinania stan naprężeń powinien być niejednorodny.
- W pracy bardzo często można spotkać odwołanie do materiałów źródłowych oraz jednocześnie do publikacji innych autorów. Np. na str. 26 pojawia się stwierdzenie „kryterium opracowane w Szwajcarii przez zespół Ganz i Thürlimann (GANZ THÜRLIMANN 1982, GANZ 1989, MAŁYSZKO 2005, DROBIEC i in. 2008b, 2014)”. Nie jasne, co wspólnego z autorstwem zespołu Ganz i Thürlimanna mają Małyszko, Drobiec i in.?
- W analizie stanu wiedzy nie w pełni przeanalizowano istniejące kryteria wytrzymałości zwłaszcza stosowane w obliczeniach inżynierskich np. Mann/Mullera i in.
- Warto byłoby przytoczyć kilka przykładów obliczeniowych dla realnych konstrukcji murowych jako aplikacji wyników badań.
- Ze zdania na str.110 „Przeprowadzenie weryfikacji modelu z poprawionym współczynnikiem k, na elementach o większych gabarytach i pracujących w bardziej złożonym stanie naprężenia” nie jasne co autor rozumie pod bardziej złożonym stanem naprężenia.

Prosiłbym Doktoranta do ustosunkowania się do wyżej poruszanych problemów w czasie publicznej obrony.

4.2. Uwagi szczegółowe

Doktorant nie ustrzegł się również drobnych błędów natury pisarskiej, a do drobnych uwag redakcyjnych należą:

- na str. 9 i 112 podano nazwisko Z. Jankowski (poprawnie Z. Janowski),

- rys. 2.2 nie wyraźny
- rys. 5.4, 5.5 i 5.6 napisano naprężenia σ_y gdyż układ współrzędnych przyjęto jako ZX.

5. Podsumowanie oceny pracy i wniosek końcowy

Reasumując stwierdzam, że wymienione wyżej dyskusyjne, krytyczne uwagi i zastrzeżenia nie przesłaniają końcowej pozytywnej oceny recenzowanej rozprawy. Przedstawione przez Doktoranta wyniki badań laboratoryjnych i analiz numerycznych stanowią cenny wkład do stanu wiedzy na temat współczesnych konstrukcji murowych.

Analizy numeryczne wykonane zaawansowanym niekomercyjnym programem Mafem3D z modyfikacjami Doktoranta stanowią istotny wkład w rozwój tego typu zachowania się konstrukcji. Przeprowadzone analizy numeryczne i towarzyszące badania laboratoryjne stanowią niezaprzeczalny wkład w pogłębieniu stanu wiedzy zachowania się konstrukcji murowych.

Biorąc pod uwagę zaprezentowany w rozprawie wkład Doktoranta w poszerzenie stanu wiedzy dotyczącego konstrukcji murowych oraz udokumentowaną wiedzę z tego zakresu, jeszcze raz podkreślam swą pozytywną ocenę recenzowanej pracy.

Podsumowując, stwierdzam, że praca doktorska Pana mgr inż. Łukasza Bukowskiego pod tytułem „Analiza zachowania murów w złożonym stanie naprężeń” spełnia warunki i wymagania Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595, ze zmianami w Dz. U. z 2005 r. Nr 164, poz. 1365 oraz w Dz. U. z 2011 r. Nr 84, poz. 455).

Wnioskuje o przyjęcie rozprawy doktorskiej przez Radę Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej w Gliwicach oraz dopuszczenie Pana mgr inż. Łukasza Bukowskiego do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Zachodniopomorski Uniwersytet
Technologiczny w Szczecinie
Wydział Budownictwa i Architektury
KATEDRA BUDOWNICTWA
OGÓLNEGO
70-311 Szczecin, al. Piastów 50
tel. 91 449 48 82

Prof. zw. dr hab. inż. Romuald Orłowicz

Szczecin, 3 października 2016r.

