dr hab. inż. Leszek SZOJDA, prof. nzw. w Pol. Śl.
Katedra Inżynierii Budowlanej,
Wydziału Budownictwa,
Politechniki Śląskiej

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra inż. Rafała NOWAKA

p.t.: **Analiza nośności i mechanizmów uszkodzeń odcinkowych ceglanych nadproży łukowych**

1. Podstawa recenzji

Recenzja została przygotowana na zlecenie Wydziału Budownictwa i Architektury Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technicznego w Szczecinie pismem WBiA-A/131/2013/14 z dnia 20 maja 2014r. podpisanym przez Panią Dziekan dr hab. inż. Marię Kaszyńską, prof. nzw. ZUT, zgodnie z uchwałą Rady Wydziału Budownictwa i Architektury z dnia 14 maja 2014 r.

2. Przedmiot recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska autorstwa mgra inż. Rafała Nowaka pt.: "Analiza nośności i mechanizmów uszkodzeń odcinkowych ceglanych nadproży łukowych", której promotorem jest p. prof. dr hab. inż. Romuald Orłowicz.

Rozprawa została zawarta w jednym tomie formatu A4 i została przedstawiona w 8 rozdziałach, wraz z podsumowaniem i osobnym wykazem cytowanych publikacji. Publikacje zawierają zestaw 87 pozycji naukowych i naukowo-technicznych w tym tylko 28 w języku polskim, 11 norm polskich i zagranicznych oraz 8 powołań na strony internetowe. Całość pracy została przedstawiona na 112 stronach oraz wzbogacona nośnikiem cyfrowym w postaci płyty CD.

2.1. Motywacja doktoranta

Motywację analizy problemu zachowania się nadproży ceglanych w budynkach murowanych Doktorant przedstawił w dwu pierwszych rozdziałach rozprawy – w Wprowadzeniu oraz Celu, tezie i zakresie pracy. Zauważył ważny problem dość ostrożnego przyjmowania wymiarów ceglanych naproży łukowych, które ograniczają się jedynie do rozważań łuków z pominięciem współpracujących warstw muru, co prowadzi do zaniżenia

nośności tych pierwszych. Wykazanie tych rozbieżności wykazał na podstawie badań laboratoryjnych oraz obliczeń numerycznych. Z punktu widzenia praktycznego jest to znaczący problem w analizie i obliczeniach nowych, a także remontowanych budynków murowych.

2.2. Struktura rozprawy doktorskiej

Struktura pracy została podzielona na osiem rozdziałów. Dwa pierwsze stanowią Wprowadzenie oraz Cel rozprawy (przedstawione powyżej). W **rozdziale 3** Doktorant przedstawił stan wiedzy dotyczący ceglanych nadproży łukowych. Rozpoczął analizy geometrii najczęściej stosowanych konstrukcji, a także podał historyczne sposoby określenia kształtu łuku na podstawie linii ciśnień. W dalszą część poświęcił najczęściej spotykanym rodzajom uszkodzeń nadproży łukowych z ilustracjami i fotografiami. Kolejną, najistotniejszą część rozdziału stanowi nawiązanie do metod obliczeń nadproży od końca XIX wielu, po wytyczne normowe. Przedstawił również najbardziej istotne badania laboratoryjne obce. Rozdział ten stanowi dobre wprowadzenie do dalszych analiz.

Rozdział 4 obejmuje analizę teoretyczną zagadnienia, która rozpoczyna się przedstawieniem związków konstytutywnych w płaskim stanie naprężenia. Założono również, że konieczne jest uzależnienie parametrów materiałowych od kierunku obciążenia, ze względu na anizotropowe właściwości muru, a także przedstawiono elementy macierzy sztywności dla elementów zakrzywionych. Przedstawiono również zależności odkształceń w kierunku równoległym i prostopadłym do spoin wspornych przeprowadzone na podstawie analiz numerycznych normowego elementu murowego, który został poddany ściskaniu. Opierając się na zależności podanej przez Lechnickiego [34], która zaleca przyjęcie własności izotropowych dla materiału warstwowego, gdy odpowiednie stosunki modułów sprężystości Younga spełniają zależność $\left(E_x/E_y \leq 4\right)$, a takie wartości otrzymano z obliczeń. Dalej porównując modelowanie mikroskopowej i makroskopowej struktury materiału łuku nadproża stwierdzono, że przy odpowiednio dobranych parametrów materiałowych można otrzymać 95% zgodność w zakresie naprężeń i 81% zgodność w zakresie przemieszczeń. Kolejnym krokiem analizy było określenie rozkładu naprężeń na długości styku łuku nadproża z warstwami cegły ułożonymi powyżej dla zmiennych kształtów nadproża oraz rodzaju i miejsca przyłożenia obciążenia. Ostatnią częścią tego rozdziału jest wybór kryterium wytężenia muru, które zostanie przyjęte do obliczeń numerycznych. Po przedstawieniu zależności powierzchni granicznych wg normy szwajcarskiej (Ganza-Thürilmanna), jej modyfikacji wg Mojsilovica-Martiego, dalej Lourenco, Rotsa, Symankezisa

i Asterisa, niemieckiej normy DIN 1053 oraz Kubicy, Doktorant zdecydował się na przyjęcie kryterium największego naprężenia rozciągającego. Przyjęcie tak dość uproszczonego kryterium Doktorant oparł na poczynionych obserwacjach i ograniczył je do nadproży, stwierdzając jego dobre odzwierciedlenie w kryteriach nośności granicznej.

Rozdział 5 poświęcony jest badaniom doświadczalnym wykonanym przez Doktoranta, które podzielono na kilka części. W pierwszej części Doktorant wykonał badania pomocnicze mające na celu określenie wartości wytrzymałości i parametrów materiałowych cegły, zaprawy i całego muru. Przeprowadzono jedenaście rodzajów różnych testów, w większości zgodnych z normami polskimi (PN-EN 772-1, PN-EN 1015-11, PN-EN 1052-1, PN-EN 1052-2), ale także wg RILEM LUMB6 1991 dla dwu rodzajów zaprawy i cegły. Pozwoliło to na przyjęcie zmienności kryterium wytrzymałości muru według głównych naprężeń rozciągających w zależności od nachylenia tego wektora w stosunku do spoin. W kolejnej części przedstawił wyniki badań laboratoryjnych odcinkowych nadproży łukowych o rozpiętości 1,00m. Wykonano w sumie osiem próbek, które różniły się między sobą zastosowaną zaprawą o słabszej przyczepności (cztery modele A) oraz wyższej (cztery modele B). Kolejnym czynnikiem zmiennym była część muru nad samą konstrukcją nadproża, a także miejsce przyłożenia obciążenia skupionego. W każdym teście ograniczano możliwość odkształcenia nadproża w kierunku poziomym (rozpór), a test prowadzono monotonicznie do zniszczenia, notując poziomy wystąpienia zarysowania. Notowane były również odkształcenia na wysokości łuku nadproża w strzałce i przy podporach. Wielkości te pozwoliły wykonać analizy fragmentu muru z nadprożem oraz samej konstrukcji nadproża łukowego, które zostały obciążone siłami zgodnie z modelami numerycznymi (w środku rozpiętości i w odległości l/4 od podpory). Doktorant uznał za zadowalającą różnicę wyniki obliczeń numerycznych z badaniami laboratoryjnymi, która wynosiła do 20%.

W **rozdziale 6** Doktorant przedstawił analizę numeryczną przeprowadzoną własnym, autorskim programem wykorzystującym MES. W pierwszej części tego rozdziału została pokazana pewnego rodzaju walidacja wyników autorskiego programu obliczeniowego i komercyjnego systemu Abaqus, którą przeprowadzono na podstawie elementu tarczowego. Wyniki w obu analizach były zgodne w ramach naprężeń σ_1 i σ_x, a największe rozbieżności dało porównanie naprężeń σ_y, które wynosiło jedynie 4%. Dobra zgodność wyników obu programów obliczeniowych pozwoliła na przeanalizowania wycinku muru ceglanego obejmującego nadproże, mur współpracujący powyżej oraz fragment filarka międzyokiennego. Analizowane warianty pracy obejmowały obciążenie rozłożone filarków ponad rozważanym fragmentem muru, siłę skupioną w obrębie muru ponad nadprożem

(symbolizującą belkę stropową) oraz nierównomierne osiadanie konstrukcji (pionowe przemieszczenie jednego filarka okiennego). W każdym z przypadków obliczenia obejmowały zmienność wysokości strzałki (wyniesienia) łuku od nadproża płaskiego do łuku półkolistego oraz zależność wielkości współpracujących filarków między okiennych przyjętych do analizy zadania. Analizy wykonano dla stałych wielkości obciążeń filarków (q=100kN/m), siły skupionej belki stropowej (P=1kN) oraz osiadania podpór (Δ=0,01mm), a parametrem porównawczym był poziom wytężenia w elementach modelu, który był daleki od wyczerpania nośności elementów.

Rozdział 7 zawiera zastosowanie badań. W rzeczywistości zostały tu zebrane sposoby naprawy łukowych nadproży ceglanych jakie można zastosować w praktyce. Jedynie na stronie 98 pokazano zastosowanie analizy numerycznej do określenia najbardziej zagrożonych fragmentów analizowanego fragmentu muru dzięki zobrazowaniu kierunków występowania naprężeń głównych (ściskających σ_3 i rozciągających σ_1) dla przedstawionych przykładowych obciążeń (z rozdziału 6). Dla tej analizy zaproponowano układ wzmocnienia matami węglowymi. W końcu rozdziału zostały zebrane tabelarycznie sposoby napraw nadproży w zależności od rodzaju uszkodzeń. Krótkie podsumowanie pracy przedstawiono w **rozdziale 8**.

3. Ocena rozprawy

3.1. Ocena merytoryczna

3.1.1. 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 zastosowania autorskiego programu obliczeniowego, który posłużył do analizy wycinka muru wraz z nadprożem jest nowym ujęciem znanego problemu. Zastosowanie kryterium największego naprężenia rozciągającego jest nowum w tym zakresie. Aktualność i ważność tematyki analiz numerycznych dla rozwoju współczesnych konstrukcji budowlanych nie budzą wątpliwości.

3.1.2. Ocena podejścia do problemu

Próba podejścia Doktoranta do analiz numerycznych własnym programem obliczeniowym jest krokiem odważnym. Krok ten jednak został wykonany z należytą ostrożnością i rozwagą.

Głównym problemem analiz numerycznych jest przyjęcie właściwego modelu materiałowego analiz. Mur ceglany jest materiałem niewdzięcznym 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 odpowiednie podstawowe doświadczenia laboratoryjne zalecanie przez normy w celu określenia wytrzymałości na ściskanie, rozciąganie i ścinanie. Badania przeprowadzono zarówno dla elementów składowych muru (zaprawy i cegły) jak i całych elementach murowych. Na podstawie tych wyników opracowano model mikroskopowy, a następnie makroskopowy struktury próbek muru. Kolejne badania laboratoryjne dotyczyły elementów naprożу i fragmentów muru współpracującego. To dało dopiero asumpt do stworzenia modelu obliczeniowego nadproża w różnych konfiguracjach przyłożenia obciążenia.

Taki sposób postępowania jest ze wszech miar uzasadniony. Umożliwia to właściwe modelowanie konstrukcji i kontrolę jej zachowania w czasie całego doświadczenia. Stanowi to wpisujący się w obecny trend analiz konstrukcji murowych w złożonym stanie obciążenia. Jest to sposób rozwiązania złożonego problemu inżynierskiego zaawansowanymi metodami obliczeniowymi.

4. Uwagi ogólne i szczegółowe

4.1. Uwagi ogólne

W czasie czytania pracy autorowi recenzji nasunęły się pewne uwagi natury ogólnej, które powinny być asumptem do polemiki z Doktorantem w poruszanych kwestiach.

- W obliczeniach numerycznych modelu makroskopowym użyto parametrów sprężystych materiału muru jako wartości uśrednionych z wartości parametrów zaprawy i cegły. *W jaki sposób osiągnięto wartość ostateczną modułu sprężystości E oraz współczynnika Poissona v?* Wartości współczynnika Poissona elementów muru są znacznie różne od przyjętej wartości (str. 34).
- Wykresy naprężeń σ_y przedstawiono bez jednostek. Należy domyślać się, że zostało to wyrażone w MPa. *Z jakiego powodu nie zamieszczono wyników (map naprężeń) poszczególnych przypadków obciążenia i kształtu łuku, skoro obliczenia zostały wykonane w programie Abaqus?* (str. 38).

- W testach przedstawionych w rozdziale 5.1 wyznaczono zmienność modułu sprężystości Younga (rys. 5.11) między innymi dla zaprawy. *Czy wyznaczenie tej wielkości jest wystarczająco dokładne? W badaniach pokazanych na rys. 5.5 tensometr mierzący odkształcenia obejmuje również cegłę. Czy przy wyznaczeniu wartości E uwzględniono różne parametry materiałów sumarycznie mierzonego odkształcenia?*
- W badaniach modeli łuków A i B zastosowano ściągi (rozdział 5.1 i 5.2), które miały zastępować wartość sił rozporu *H* jaki generują nadproża łukowe. *Czy w czasie testów były mierzone odkształcenia w tych elementach oraz przemieszczenia podpór?* Ma to szczególne znaczenie dla pracy łuku, a co za tym idzie właściwego doboru modelu obliczeniowego. Brak uwzględnienia tego efektu może być powodem powstawania rozbieżności obliczeń numerycznych w stosunku do badań laboratoryjnych.
- W obliczeniach numerycznych zastosowano kryterium największego naprężenia rozciągającego, jako determinujące. Dla obciążenia siłą skupioną bezpośrednio łuku może dawać dobre wyniki, ze względu na znaczne zaburzenia naprężeń w miejscu przyłożenia siły. Znaczne zmniejszenie tego efektu jest widoczne gdy obciążenie nie jest przykładane bezpośrednio do łuku, a w warstwach muru powyżej. Obciążenie skupione zaczyna być rozkładane na coraz większym odcinku, a więc obciąża łuk bardziej równomiernie. W takim przypadku praca jest zbliżona do tej, dla której łuk był projektowany – ściskanie na całej długości łuku i w całym przekroju. *Czy pominięcie ograniczenia ekstremalnego odkształcenia przy ściskaniu jest właściwe w takim kryterium materiałowym dla ogólnego modelu nadproża i obciążenia? Czy nie należałoby nałożyć ograniczeń stosowania proponowanego kryterium zniszczenia do szczególnych przypadków obciążeniowych?*
- W pracy doktorant dokonuje obliczeń numerycznych stosując własny program obliczeniowy. Nie jest wyraźnie zdefiniowany algorytm programu, ale należy spodziewać się, że jest to program wykorzystujący Metodę Elementów Skończonych. Jeżeli tak jest, to *proszę przedstawić jaką metodą wykonywane jest rozwiązanie głównego układu równań zagadnienia.*
- Prezentowany program obliczeń konstrukcji ogranicza się do elementów tarczowych. Jest to zrozumiałe w przypadku analizowania ścian jako niezależnych

elementów. Czy doktorant zastanawiał się nad pracą całego ustroju budynku, który obciążony jest w złożony sposób. *Połączenie elementów ściennych spowoduje zaburzenia w pracy ustroju i wywoła przestrzenny stan naprężeń. Jaki wówczas model materiałowy programu obliczeniowego należałoby przyjąć?*

- W analizach numerycznych wycinak ściany z nadprożem przyjmowany był jednakowy materiał w całej objętości (tutaj – na całej powierzchni) w modelach B2 i B4. Jest to zgodne z przebiegiem funkcji na wykresie 5.10. Dla modeli B1 i B3, gdzie analizie poddano jedynie sam łuk przyjęto jednakową wartość wytrzymałości na rozciągania na poziomie 0,38MPa (str. 79, wd 2). *Czy zastosowanie jednakowego materiału w modelach B2 i B4 jest właściwe bez wyodrębnienia materiału nadproża łukowego z innym przebiegiem zmienności wytrzymałości w stosunku do spoin?*
- Niektóre wnioski wysnuwane przez Doktoranta wydają się, piszącemu te słowa, trochę zbyt daleko idące. Chodzi o stwierdzenie, że „Nierównomierne osiadanie fundamentów nie ma znaczącego znaczenia na znaczącego wpływu na pracę łuku ceglanego ..." (str. 106, wg 12 i 13). Jest to stwierdzenie dość odważne, które być może zostało wyciągnięte na podstawie obliczeń numerycznych skrępowanego fragmentu ściany z nadprożem. W rzeczywistości nierównomierne osiadanie podpór (fundamentów) jest powodem znacznych uszkodzeń budynków. *Proszę o ustosunkowanie się do wzmiankowanego cytatu.*
- Analiza zachowania się nadproży ceglanych bez odniesienia do zachowania całej ściany, a jeszcze lepiej budynku jest jedynie wyrywkowym i cząstkowym rozważaniem zagadnienia, które będzie wymagało zawsze nałożenia odpowiednich ograniczeń. Z tego powodu ostatnie zdanie pracy o dalszych kierunkach rozwoju wydaje się zbyt wąskie. *Jakie jest zdanie Doktoranta na ten temat?*

4.2. Uwagi szczegółowe

- W opisach wartości wzorów (3.2) i (3.3) (str. 14) jest błąd w opisie wartości *F*. Wartość ta jest powierzchnią przekroju, a opisano ją jako wytrzymałość dwojakiego rodzaju;
- Zastosowanie słowa „przewyższały" w stosunku do wyników obliczeń numerycznych jest trochę niewłaściwe. Lepszym określeniem w tym miejscu byłoby „dawały wyniki o większej wartości" (str. 22, wd 13);

- Użycie słowa „interfaceowych" nie jest właściwe. W języku polskim występuje słowo „interfejs" i dozwolone jest tworzenie form przymiotnikowych od tego wyrazu (str. 26, wg 13, podpis pod rys. 3.21);
- Użycie zwrotu „odkształcenia ściskające" jest niewłaściwe. Powinno być użyte stwierdzenie „odkształcenie przy ściskaniu". Odkształcenie może być liniowe, objętościowe lub postaciowe. Te pierwsze może skutkować skróceniem lub wydłużeniem, ze względu na występowanie naprężeń ściskających lub rozciągających (str. 30, podpis pod rysunkiem 4.3)
- Na stronie 39 wg 7 po raz użyto zwrotu „wytężenie". Co one oznacza w tym miejscu? Brak odniesienia lub zdefiniowania wcześniej tego określenia;
- Co oznaczają indeksy przy wartościach sił na str. 66, 67 i 70 – p1 oraz p2 – dla wartości sił obciążających, a mniejszych niż wartość niszcząca?
- W spisie literatury przytoczono 107 pozycji. Pozycje nr [31], [55], [66], [71], [87] i [104] nie zostały zacytowane w tekście rozprawy.

Uwagi przytoczone w części 4.2 świadczą o niestaranności w przygotowaniu rozprawy.

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 autorskim programem Doktoranta stanowią cenny wkład w rozwój tego typu zachowania się konstrukcji. Kompleksowe podejście do określenia złożonego zachowania się muru ceglanego w strefie nadprożowej jest wyrazem dojrzałego spojrzenia na problemy 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.

Reasumując, stwierdzam, że praca doktorska Pana mgr inż. Rafała Nowaka pod tytułem *„Analiza nośności i mechanizmów uszkodzeń odcinkowych ceglanych nadproży łukowych"* 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).

Wnioskuję o przyjęcie rozprawy doktorskiej przez Radę Wydziału Budownictwa i Architektury Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie oraz dopuszczenie Pana mgr inż. Rafała Nowaka do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

.....

dr hab. inż. Leszek Szojda, prof. nzw. w Pol. Śl.

Gliwice, 07 lipca 2014r.