

**D Z I E K A N
I R A D A W Y D Z I A Ł U
B U D O W N I C T W A I A R C H I T E K T U R Y
Z A C H O D N I O P O M O R S K I E G O U N I W E R S Y T E T U T E C H N O L O G I C Z N E G O
W S Z C Z E C I N I E**

zapraszają na

PUBLICZNĄ OBRONĘ PRACY DOKTORSKIEJ

mgr inż. RAFAŁA NOWAKA

która odbędzie się w dniu **1 października 2014 r. (środa) o godz. 10⁰⁰**
w sali 302 gmachu Wydziału Budownictwa i Architektury
przy al. Piastów 50 w Szczecinie

Temat pracy doktorskiej:

**„Analiza Nośności i mechanizmów uszkodzeń odcinkowych
ceglanych nadproży łukowych”**

Promotor:	<i>prof. dr hab. inż. Romuald Orłowicz</i>	<i>Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie</i>
Recenzenci:	<i>prof. dr hab. inż. Jerzy Jasieńko</i> <i>dr hab. inż. Leszek Szojda, prof. nadzw.</i>	<i>Politechnika Wrocławska</i> <i>Politechnika Śląska w Gliwicach</i>

Z pracą doktorską i opiniami Recenzentów zapoznać się można
w Czytelni Wydziału Budownictwa i Architektury
Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie,
mieszczącej się w Budynku Jednostek Międzywydziałowych, przy al. Piastów 48, sala 524, V piętro.
Streszczenie rozprawy doktorskiej w języku polskim i w języku angielskim oraz recenzje
dostępne są na stronie: <http://wbia.zut.edu.pl/wbia/awanse-naukowe/doktoraty/budownictwo.html>

D Z I E K A N

dr hab. inż. Maria Kaszyńska
profesor nadzwyczajny ZUT

ANALIZA NOŚNOŚCI I MECHANIZMÓW USZKODZEŃ ODCINKOWYCH CEGLANYCH NADPROŻY ŁUKOWYCH

Przeprowadzona analiza stanu wiedzy o projektowaniu ceglanych nadproży łukowych wykazała, iż jest to zagadnienie nie do końca poznane. Autor dotarł jedynie do informacji o metodzie uproszczonej dobierania kształtu łuku poprzez metodę stanów granicznych kalibrowaną doświadczalnie. W pracy dokonano przeglądu ciekawszych badań doświadczalnych i numerycznych odnośnie omawianego zagadnienia. Dodatkowo dokonano analizy stanu technicznego obecnych budynków z czasów przedwojennych wraz z wykonaniem klasyfikacji typowych uszkodzeń. Na tej podstawie wykazano aktualność oraz potrzebę poruszonego tematu.

Wykonano analizę dostępnych kryteriów nośności dla podobnych zagadnień wraz z podaniem uzasadnienia własnego wyboru dla dalszych badań numerycznych. Wykonano analizy mikro oraz makro modelowania oraz uzasadniono wybór izometrycznego modelu materiału modelu makroskopowego dla dalszych głównych badań.

Wykonano szereg badań doświadczalnych na próbkach różnego rodzaju w celu dostarczenia niezbędnych parametrów do dalszego modelowania numerycznego. Dla głównych modeli nadproży wyniki weryfikacji były zadowalające, dla wyodrębnionych łuków nie udało się uzyskać zbieżności. Wyniki badań doświadczalnych dla głównych modeli nadproży wykazały, iż bardzo duże znaczenie na nośność ceglanych nadproży mają warstwy muru ponad nim, zwiększające znacząco ich ostateczną nośność.

Stworzono autorski program komputerowy do przedmiotowych analiz ze zintegrowanym kryterium nośności głównych naprężeń rozciągających, który wykorzystano do późniejszych analiz. Otrzymane wyniki zostały zweryfikowane z wynikami z badań doświadczalnych.

Wykonano liczne badania numeryczne dla różnych kształtów łuków, rozpiętości oraz dla różnych typów obciążeń. Analizowano różnice jakie wynikają z wprowadzonych zmian na stan wyłączenia łuku oraz warstw muru ponad łukiem.

W pracy dokonano wdrożenia prowadzonych badań poprzez stworzenie narzędzia do przedmiotowych analiz oraz zaproponowanie licznych sposobów napraw, które były publikowane w licznych czasopismach. Jedno z rozwiązań zostało zastosowane w budynku w Szczecinie.

ANALYSIS OF STRENGTH AND CRACK PATTERN OF BRICK SEGMENTAL ARCHED LINTELS

Conducted analyse of the knowledge of design brick arched lintels shows lack of information about the mentioned process. The only piece of information, reached by the author, includes simplified matching method of arch's shape by empirical use of ultimate limit state method. Presented paper contains review of more interesting empirical and numeric research. Additionally, the analyse of technical state of pre-war buildings (including typical damages classification) was conducted. Topicality and necessity of the paper's research was based on premises mentioned above.

The paper contains analyse of available load capacity criterion for similar problems, along with substantiation further numeric research. The author conducted analyse of micro and macro modelling and substantiated choice of material isometric macroscopic model for further research.

Series of empirical tests on various samples were conducted, in order to supply necessary parameters for further numeric modelling. Verification results for main lintels models were satisfactory, however no convergence for separated arches could be proved. Results of empirical tests for main lintel models showed that great importance for capacity load of brick arched lintels have brick levels above lintel.

The author created computer programme for analyse the paper's topic. The programme includes integrated load capacity criterion for main tensile stresses. Received results were verified with results from empirical tests.

Many numeric research for various arch's shapes, various extents, various types of load were conducted. Analyse concerns differences from incorporated changes on arch effort state and on brick level above lintel.

Implementation conducted research was achieved by creating analytical tool as well as by proposing numerous repair methods, which were also published in many periodicals. One of the proposed solutions was applied on a building in the city of Szczecin.

Prof. dr hab. inż. Jerzy Jasieńko

Instytut Budownictwa

Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

Politechnika Wrocławska

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Rafała Nowaka pt.: „Analiza nośności i mechanizmów uszkodzeń odcinkowych, ceglanych nadproży łukowych” opracowanej na Wydziale Budownictwa i Architektury Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, w Katedrze Budownictwa Ogólnego pod kierunkiem Pana prof. dr hab. inż. Romualda Orłowicza.

1. Podstawa Opracowania recenzji

Podstawą opracowania recenzji jest zlecenie Dziekana Wydziału Budownictwa i Architektury Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie Pani Prof. Marii Kaszyńskiej zawarte w piśmie WBiA/-A/132/2013/14.

2. Charakterystyka i treść rozprawy

Rozprawa składa się z ośmiu rozdziałów uzupełnionych o bibliografię – łącznie 107 pozycji, w tym 67 obcojęzycznych, w znakomitej większości przywołanych właściwie z punktu widzenia zakresu i celu rozprawy oraz wykazu ważniejszych oznaczeń.

W rozdziale pierwszym („Wstęp”) Autor przedstawił ogólnie tematykę rozprawy i jej znaczenie w kontekście poszerzenia wiedzy zorientowanej na poznanie mechanizmów destrukcji murów ceglanych w obszarze nadproży łukowych.

W rozdziale 2 („Cel, teza i zakres pracy”) sformułował główny cel rozprawy związany z analizą czynników mających wpływ na nośność nadproży łukowych, opracowaniem metody oceny ich nośności oraz sposobów wzmacniania, oraz następującą tezę rozprawy:

„Istotnym czynnikiem mającym wpływ na nośność ceglanych nadproży łukowych są warstwy muru ponad łukiem, przy czym, początkowe zarysowania i spękania nadproża nie są jeszcze

symptodem stanu awaryjnego, gdyż nadproże w takim stanie może mieć jeszcze duże zapasy nośności”, z którą, co do istoty problemu, należy się zgodzić jakkolwiek sformułowania: „początkowe zarysowania i spękania” czy „duże zapasy nośności” należałoby podać bardziej precyzyjnie. Następnie Autor szczegółowo opisał zakres pracy, w którym za kluczowe obszary należy uznać próbę klasyfikacji zarysowań nadproży, wybór modelu materiału oraz kryterium nośności granicznej, analizy prowadzone na bazie badań doświadczalnych własnych i obcych, weryfikujące analizy numeryczne oraz propozycje sposobów wzmacniania ceglanych nadproży łukowych.

Rozdział 3 („Stan wiedzy”) ma charakter studialny i obejmuje znane obecnie modele teoretyczne obliczania łuków, specyfikację rodzajów zarysowań nadproży oraz analizę badań obcych.

Rozdział 4 („Wstępna analiza teoretyczna”) zawiera głównie założenia do obliczeń analitycznych. W rozdziale przedstawiono ponadto dyskusję na temat roli mikromodelowania i makromodelowania w analizie numerycznej konstrukcji murowanych. Na uwagę zasługuje tu syntetyczny podrozdział dotyczący powszechnie stosowanych hipotez wyężeniowych.

Rozdział 5 („Badania doświadczalne”) obejmuje opis i wyniki badań materiałowych a także modeli nadproży (modele typu A i B) z uwzględnieniem wpływu warstw muru nad łukiem. W końcowej części rozdziału przedstawiono analizę porównawczą wyników badań doświadczalnych oraz numerycznych wykonanych w środowisku Abaqus.

Rozdział 6 („Badania numeryczne”) jest kontynuacją rozdziału 5-ego. W rozdziale przedstawiono założenia a następnie wyniki i wnioski z zastosowania w badaniach numerycznych do obliczeń konstrukcji murowanych przy użyciu metody elementów skończonych (MES-FEM), indywidualnie opracowanego programu komputerowego. Prowadząc analizę zbieżności (siatki) Autor odnosi się tu, w pewnym stopniu, do środowiska Abaqus na którego tle przedstawia swój autorski program.

Wyniki analiz przedstawiono w oparciu o badanie numeryczne fragmentu ściany numerowanej z nadprożem łukowym obciążonym siłą skupioną. Wydaje się, że bardziej przydatnym byłoby tu środowisko programu ANSYS, zwłaszcza przy mikromodelowaniu, gdzie podstawą jest interakcja pomiędzy zaprawą a elementem oraz analiza stanu naprężenia w samej cegle i zaprawie (prace P.B. Lourenço czy R. van der Pluijm’a). W przyszłych pracach ważne byłoby pogłębione opisanie modelu materiałowego (np.: Willam-Warnke’a oraz kryterium zniszczenia (np.: Manna-Müller’a) oraz przyjęcie modelu muru ze spoinami jako continuum.

W rozdziale 7 („Zastosowanie wyników badań”) Autor głównie zajmuje się przedstawieniem metod naprawy i wzmacniania zarysowanych nadproży łukowych oraz przedstawia własną specyfikację sposobów napraw przyporządkowanych typowym uszkodzeniom nadproży.

Rozdział 8 („Wnioski”) zawiera podsumowanie studiów oraz wyników badań doświadczalnych i numerycznych prowadzonych przez Autora oraz bardzo ogólne wskazanie dalszych kierunków badań.

3. Ocena merytoryczna rozprawy – uwagi polemiczne i krytyczne

Podjęta w rozprawie tematyka jest ważna i aktualna zarówno ze względów naukowych (poznawczych) jak i praktycznych. Waler praktyczny występuje tu w rozumieniu wykorzystania przedstawionych badań w interwencjach konserwatorskich – głównie chodzi tu o konserwację konstrukcyjną. Rozprawa z tego powodu, powinna w jeszcze większym stopniu nawiązywać do konserwacji zabytków oraz do głównych zasad doktryny konserwatorskiej, mocniej akcentując te zasady w związku z koniecznością dbałości o zachowanie charyzmy oryginału i nie zacieranie, w wyniku działań konstrukcyjnych, odbioru jego historycznych, technologicznych i formalnych rozwiązań (Rozdział 7).

Rozprawa jest napisana, na ogół, poprawnym językiem, jakkolwiek zawiera pewną ilość uchybień stylistycznych, gramatycznych czy terminologicznych, które, zdaniem recenzenta, nie wpływają na wartość merytoryczną pracy.

3.1. Uwagi szczegółowe

- a) Rozdział 8 („Wnioski”) ma, zdaniem recenzenta, charakter zbyt ogólny i jest, w zasadzie, podsumowaniem rozprawy. Z punktu widzenia wartości naukowej rozprawy w rozdziale tym należało przedstawić, w sposób pogłębiony, wnioski szczegółowe, formułowane w innym charakterze we wcześniejszych rozdziałach rozprawy.

W rozdziale tym Autor pisze m.in. „...pracę łuku ceglanego przejmuje powstający, wtórny łuk w warstwach muru powyżej nadproża”. Co do istoty zjawiska należy się zgodzić ze sformułowaniem Autora. Od wieków znane są wprost rozwiązania przy użyciu tzw. „łuków odciążających” natomiast w badaniach Autora te rozwiązania nie są analizowane, stąd analitycznie, obserwacja ta, powinna zostać we wnioskach rozbudowana z wyraźnym

określeniem stref murów nad łukami nadprożowymi, współpracujących w przenoszeniu obciążeń różnego typu.

W tym samym rozdziale Autor również napisał: „Nierównomierne osiadanie fundamentów nie ma znaczącego wpływu na pracę łuku ceglanego...”. Sformułowanie to jakkolwiek może być, w pewnych przypadkach, prawdziwe, w kontekście badań Autora z oczywistych względów, zorientowanych na jedynie pewien typ ceglanych nadproży łukowych, nie powinno być uogólnieniem. Ocena wpływu osiadania na zarysowanie i spękanie nadproży ceglanych łukowych jest zagadnieniem rozbudowanym, wrażliwym m.in. na indywidualny charakter osiadania, geometrię łuku nadprożowego, strzałkę jego wyniesienia, układ cegieł w kluczu i węzłowie nadproża czy wzajemną relację parametrów mechanicznych elementów składowych nadproża.

- b) W rozdziale 5, podrozdziale 5.1 („Badania pomocnicze”) nie wskazano jednoznacznie jaki typ zaprawy został przyjęty (skład) – wskazano jedynie klasę zaprawy i producenta (Atlas, Quick-Mix).

W rozdziale 5, podrozdział 5.2 („Metoda badań doświadczalnych fragmentów murów”) opisywane są dwa modele doświadczalne: model A – o niskiej przyczepności zaprawy do cegły oraz model B – o wysokiej przyczepności zaprawy do cegły, przy czym nie podano jednoznacznie założeń do wykonania wspomnianych typów zapraw. Przyczepność zaprawy do cegły może zależeć od wielu czynników, m.in. konsystencji, składu, technologii murowania, etc. Istotne byłoby również przyjęcie definicji opisującej pojęcia: zaprawa o niskiej i wysokiej przyczepności. Zgodnie z rys.5.20 i 5.23 w modelach o wysokiej przyczepności zaprawy do cegły praktycznie nie wystąpiły rysy ukośne a schemat zniszczenia bazuje na rozwarstwieniu spoin wspornych. Przydatna dla wniosków szczegółowych, co do wzmacniania, byłaby tu analiza przyczyn obserwowanych różnic w destrukcji oparta na zbudowaniu modeli fizycznych i analitycznych opisujących badane zjawiska.

- c) Autor, na str. 26 rozprawy przywołuje badanie sklepień kolebkowych (walcowych) przy współpracy zasyпки i odnosi się do warstw murów ponad nadprożem łukowym. W przypadku zasyпки istotną rolę odgrywa kąt tarcia wewnętrznego materiału (współczynnik Coulomba) – w przypadku warstw muru analogiczną rolę pełnić będzie przyczepność zaprawy do cegły, co Autor zauważa w rozdz. 5.2. Występuje tu jednak złożony stan odkształceń i naprężeń, ponadto zróżnicowanych dla różnych, możliwych do wystąpienia układów sił. Stąd ważna byłaby tu analiza oparta na modelach fizycznych, dla różnych przypadków obciążenia.
- d) W rozdziale 4.4. („Ustalenie rozkładu obciążeń na łuk ceglany”) przedstawiono wykresy naprężeń kontaktowych. Zasadne byłoby powiązanie wyników tych analiz z przypadkami

zarysowania nadproży w różnych układach obciążeń. Za kluczowe należałoby tu przyjąć statyczne analizy teoretyczne wpływu wyniesienia łuku na stan naprężeń i zasięg przemieszczeń w kluczu. Prace podnoszące ten problem były w przeszłości publikowane w materiałach Światowej Konferencji SAHC: Structural Analysis of Historical Constructions” a ostatnio w materiałach Konferencji PROHITEC 2014: International Conference on Protection of Historical Constructions, która odbyła się w Antalyi, w Turcji w tym roku.

- e) e) W rozdziale 7 rozprawy Autor przedstawia głównie znane metody wzmacniania nadproży. Zasadne byłoby jednoznaczne przeniesienie wyników własnych badań doświadczalnych i numerycznych (prowadzonych w aspekcie współpracy warstw muru nad łukiem nadprożowym) na rekomendowane przez Autora rozprawy, metody wzmacniania przy uwzględnieniu stanu zarysowania konstrukcji.
- f) W rozprawie nie poruszono zagadnienia rekonstrukcji nadproży łukowych, co jest często zabiegiem koniecznym, zwłaszcza w obiektach historycznych zlokalizowanych na terenach sejsmicznych, w wykorzystaniu zbrojenia spoin przy użyciu włókien rozproszonych, stalowych cięgien wiotkich czy siatek kompozytowych (z włókien węglowych, szklanych, bazaltowych, organicznych) czy siatek stalowych SRG. Autor, jedynie bardzo lakonicznie wspomina w rozdziale 8 o Swoich przyszłych badaniach naukowych. Być może to zagadnienie – pracy statycznej (dynamicznej) nadproży rekonstruowanych mogłoby, w sposób naturalny, stać się obszarem kolejnych dociekań naukowych Autora.

W rozprawie występują, nieliczne, nieznaczące błędy, raczej o charakterze redakcyjnym. I tak, np.:

- przytaczane są wartości marki zaprawy (str.7, tab.3.2, str. 15) a następnie (rozdz.5.2) klasy zaprawy. Współczesne zaprawy klasyfikuje się używając terminu „klasa” (wg. PN-B-10104: 2014-03: „Wymagania dotyczące zapraw murarskich ogólnego przeznaczenia”);
- brak spójności w przypisie bibliograficznym na str.7 i 8 w odniesieniu do rys. 3.2, [51,63];
- błąd w opisie do rys. 3.5 (jest 3.4) – str. 12;
- brak korelacji opisu wymiaru „d” z rys. 3.7 (zgodnie z rysunkiem, $d=c+f+a$) – str.13;
- na str.7 Autor wspomina o katastrofach budowlanych, które następowały na skutek błędów w doborze kształtu nadproży łukowych nie podając jednak źródeł tych informacji.

4. WNIOSEK KOŃCOWY

Rozprawa Pana mgr inż. Rafała Nowaka dotyczy problemu, który ma istotne znaczenie poznawcze a przedstawione w rozprawie badania doświadczalne i teoretyczne mają walor aplikacyjny.

Pan mgr inż. Rafał Nowak, sformułował, opisał i rozwiązał zadanie naukowe, dobierając właściwie aktualną i ciekawą tematykę rozprawy doktorskiej oraz, na tym etapie badań, metodę.

Sformułowane powyżej uwagi merytoryczne i krytyczne, w mojej ocenie, nie podważają wartości naukowej rozprawy i mogą być wykorzystane w przyszłych publikacjach naukowych Autora.

Uważam, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Rafała Nowaka pt.: „Analiza nośności i mechanizmów uszkodzeń odcinkowych, ceglanych nadproży łukowych” spełnia wymogi stawiane przez Ustawę z dn.14 marca 2013 roku „O stopniach i tytule w zakresie sztuki” (Dz. U. nr 65 z 2003 r. z późniejszymi zmianami) i stawiam wniosek o dopuszczenie do publicznej obrony.



Prof. dr hab. inż. Jerzy Jasieńko

Wrocław, 11 sierpnia 2014 roku

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 nadproży łukowych, które ograniczają się jedynie do rozważań łuków z pominięciem współpracujących warstw muru, co prowadzi do zaniżenia

ności 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 wieku, 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 ścisłaniu. Opierając się na zależności podanej przez Lechnickiego [34], która zaleca przyjęcie własności izotropowych dla materiału warstwowego, gdy odpowiednie stosunki modułów sprężystości Younga spełniają zależność $\left(\frac{E_x}{E_y} \leq 4\right)$, 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 wyężenia 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 1/4 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 ($q=100\text{kN/m}$), siły skupionej belki stropowej ($P=1\text{kN}$) oraz osiadania podpór ($\Delta=0,01\text{mm}$), a parametrem porównawczym był poziom wyężenia 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 rozważą.

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 zalecane 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 nadproży i fragmentów muru współpracującego. To dało dopiero asumpt do stworzenia modelu obliczeniowego nadproża w różnych konfiguracjach przyłożenia obciążenia.

Taki sposób postępowania jest ze wszelkich 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 ν ?* 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 ściągę (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 ścisaniu 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 skrzepowanego 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).

Wnioskuje 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.