

Wrocław, dnia 7.05.2012 r.

Prof. dr hab. inż. Piotr Konderla
Instytut Inżynierii Lądowej
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
Politechniki Wrocławskiej



RECENZJA

pracy doktorskiej mgr inż. Magdaleny Mrozek
pt. „ Numeryczna symulacja wzmocnienia konstrukcji murowych z cegły
matami CFRP”

1. Podstawa formalna

Recenzja została wykonana na zlecenie Dziekana Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej pismem z dnia 19 kwietnia 2012 r.

2. Treść i zakres pracy

Praca doktorska w formie maszynopisu zawarta jest na 165 stronach i składa się z 5-ciu rozdziałów oraz bibliografii zawierającej 291 pozycji literatury.

Przedmiotem badań Autorki dysertacji doktorskiej są konstrukcje murowe poddane obciążeniom dynamicznym. Motywacją podjęcia badań były udokumentowane obserwacje postępującej degradacji konstrukcji murowych obiektów zabytkowych, które nie są odporne na oddziaływania dynamiczne. W celu przywrócenia właściwych parametrów technicznych, konstrukcje te są wzmocniane. W pracy doktorskiej szerokiej analizie poddano wzmocnienie konstrukcji matami kompozytowymi CFRP. W szczególności analizowano optymalny geometryczny rozkład pasm kompozytu na powierzchni konstrukcji murowej z uwagi na nośność konstrukcji.

Na wstępie Autorka pracy dokonuje w rozdziale 2 przeglądu literatury pod kątem przedmiotu swoich badań koncentrując się na pracach dotyczących:

- skutków obciążeń sejsmicznych i parasejsmicznych na budowle,
- sposobów zabezpieczania konstrukcji murowych przed niekorzystnymi skutkami obciążeń dynamicznych,
- wzmocnienia konstrukcji materiałami kompozytowymi w ujęciu technologicznym, badań eksperymentalnych oraz modelowania fizycznego.

Rozdział 3 poświęcony jest opisowi stosowanych modeli materiału oraz modelom konstrukcji wzmocnianego muru. Mur, jako ośrodek ciągły, modelowano zmodyfikowanym Modelem Barcelony, natomiast matę kompozytową stanowiącą wzmocnienie konstrukcji traktowano jako ciało izotropowe. Dużo uwagi poświęcono doborowi modelu samej wzmocnionej konstrukcji murowej jako ośrodkowi ciągłemu dwu lub trójfazowego. Analizowano szereg sposobów modelowania połączenia muru z matą kompozytową. Analizy numeryczne były wykonywane dla reprezentatywnego fragmentu modelu konstrukcji murowej o wymiarach $1 \times 1 \text{ m}^2$. Obciążeniem były wymuszenia kinematyczne wywołujące jednokierunkowe ściskanie

i ścinanie konstrukcji. Tego typu zestawienia obciążeń występują w konstrukcji narażonej na obciążenia sejsmiczne. W pracy analizowano zachowanie się konstrukcji w dwóch zakresach obciążeń: zakres inżynierski i zakres mechaniki zniszczenia, które są skojarzone odpowiednio ze sprężystą pracą konstrukcji oraz ze stanem granicznym.

Wykonane w rozdziale 3 analizy numeryczne miały generalnie na celu:

- wybór optymalnego modelu numerycznego,
- dobór właściwych parametrów materiału i wzajemnej relacji sztywności materiałów mając na uwadze wielowarstwowość analizowanego obszaru,
- zdefiniowanie obciążeń i określenie zakresów analizy.

Rozdział 4 zawiera opis i syntetyczne opracowanie wyników dużej liczby analiz numerycznych wzmocnionych konstrukcji murowych, w szczególności obejmowały one:

- analizy weryfikujące zachowanie się przyjętego modelu konstrukcji w stosunku do wyników badań laboratoryjnych,
- analizy numeryczne modeli ściany wybranej kondygnacji budynku o konstrukcji mурowej wzmocnianej matami kompozytowymi,
- analizy numeryczne reprezentatywnego wycinka muru wzmocnionego systemowo matami kompozytowymi.

Wszystkie analizy numeryczne zostały wykonane i opracowane dla dwóch zakresów obciążenia - zakresu inżynierskiego i zakresu mechanizmów zniszczenia, a podstawowym zmiennym parametrem tych analiz było topologiczne rozmieszczenie mat kompozytowych na powierzchni wzmocnianego muru.

W rozdziale 5-tym sformułowano wnioski oraz nakreślono kierunki dalszych badań.

3. Uwagi ogólne i dyskusyjne

- 1) Badania podjęte w pracy doktorskiej dotyczą ważnego i aktualnego problemu inżynierskiego. Konstrukcje murowe, między innymi, są istotną częścią materialną dziedzictwa narodowego, tym samym wymagają szczególnej ochrony przed wszelkimi czynnikami powodującymi degradację konstrukcji, w tym obciążeniami typu sejsmicznego, które są szczególnie destrukcyjne dla tego typu konstrukcji.
- 2) W pracy doktorskiej skoncentrowano się na jednej metodzie zabezpieczenia konstrukcji murowych - za pomocą mat kompozytowych typu CFRP. W rozdz. 2 Autorka przekonująco uzasadniła wyższość tej metody nad innymi stosowanymi dotychczas tradycyjnymi sposobami wzmocniania konstrukcji murowych. W tym kontekście sformułowała dwa pytania, które można traktować jako tezy pracy:
 - a) Czy istnieje możliwość na drodze analiz numerycznych określenia efektywnego wzmocnienia konstrukcji murowych w dwóch wyróżnionych zakresach pracy konstrukcji: w zakresie inżynierskim i w zakresie mechanizmu zniszczenia?
 - b) Czy można dobrać układy mat kompozytowych różne od całkowitego pokrycia konstrukcji, których efektywność wzmocnienia byłaby porównywalna do wzmocnienia matami na całej powierzchni muru?

Na tak postawione pytania Doktorantka dała odpowiedź twierdzącą i swoją odpowiedź przekonująco uzasadniła przeprowadzając szerokie badania. Należy stwierdzić, że same pytania nie były zbyt wymagające i takiej a nie innej odpowiedzi należało się spodziewać. Natomiast ważniejsze jest uzasadnienie tych odpowiedzi w sensie ilościowym, do czego w pracy przyłożono szczególną uwagę.

- 3) Same sformułowanie tez pracy wskazuje na aplikacyjny, inżynierski charakter badań. Tymczasem badania prezentowane w pracy są natury rozważań akademickich dosyć dalekich od bezpośrednich zastosowań w praktyce inżynierskiej. Już same podstawowe terminy wprowadzone na wstępie: zakres inżynierski oraz zakres mechanizmu zniszczenia są pojęciami nieostryimi i wieloznacznymi. Co prawda tzw. zakres inżynierski kojarzony jest z quasi liniowym zachowaniem się konstrukcji, jednakże brak jest definicji miary tego zakresu. Z kolei termin „zakres mechanizmu zniszczenia” kojarzony jest ze stanami pozasprężystymi konstrukcji aż do osiągnięcia stanu granicznym. Z punktu widzenia praktyki inżynierskiej poszczególne zakresy analizy można domyślnie związać z określonymi metodami wymiarowaniem konstrukcji, jednakże w pracy nie nawiązuje się do tego problemu.
- 4) Merytoryczna część pracy doktorskiej zawarta jest w dwóch rozdziałach trzecim i czwartym. W rozdziale 3 rozważa się problem modelowania analizowanej klasy konstrukcji. Autorka przedstawia ten problem w ujęciu tzw. mechaniki komputerowej co w ostatnich latach staje się niestety standardem. Przy klasycznym poprawnym podejściu wyróżnia się wyraźnie dwa etapy modelowania: modelowanie fizyczne (matematyczne) a następnie modelowanie numeryczne. W pierwszym etapie definiuje się analityczne modele materiału i konstrukcji natomiast w dopiero w drugim etapie dobiera się właściwą metodę numerycznego rozwiązania problemu zdefiniowanego w etapie pierwszym. Nie trzeba w tym miejscu podkreślać, że modelowanie na etapie 1 decyduje o jakości uzyskiwanego rozwiązania, natomiast etap 2 spełnia rolę wyłącznie „usługową” w stosunku do etapu 1. Jedyną kwestią techniczną jest sformułowanie takiego algorytmu w ramach obranej metody numerycznej, aby błąd przybliżonego rozwiązania był na akceptowalnym poziomie. W opiniowanej pracy nie wyróżnia się dwóch etapów modelowania mimo, że w poszczególnych podpunkty tego rozdziału są wyłącznie poświęcone modelom fizycznym. Układ treści tego rozdziału wskazują na inną hierarchię wartości. Cały pierwszy punkt 3.1 jest „hymnem pochwalnym” metod komputerowych. Tymczasem kolejne punkty tego rozdziału dotyczą wyłącznie modeli fizycznych opisanych związkami analitycznymi, które jako takie z metodami komputerowymi nie mają nic wspólnego. Metody komputerowe pojawiają się w tle dopiero na etapie uzyskiwania wyników numerycznych – innymi słowy na etapie przybliżonego rozwiązywania problemu opisanego określoną strukturą matematyczną zbudowaną w trakcie modelowania fizycznego. Zrozumienie hierarchii modelowania jest ważne z uwagi na obserwowaną wśród młodego pokolenia adeptów nauki powszechność bezrefleksyjnego posługiwania się systemami komputerowymi, w których modele fizyczne są co prawda zaimplementowane, ale jednocześnie nie poddające się bezpośrednio weryfikacji przez użytkownika.
- 5) Mur modelowano wieloparametrowym ciałem ciągłym sprężysto-plastyczno-degradacyjnym zwanym w literaturze jako Model Barcelony. Model ten w wersji oryginalnej używany jest do modelowania betonu, natomiast w tej pracy użyto modyfikacji tego modelu dostosowanego do konstrukcji murowych. W ograniczonym zakresie odkształceń model zachowuje się sprężyste i wówczas współczynnik degradacji jest równy zeru co odpowiada inżynierskiemu zakresowi pracy konstrukcji. Materiał kompozytowy w postaci maty kompozytowej CFRP modelowano jako ciało izotropowe liniowo sprężyste w całym zakresie odkształceń. W pracy brak bliższych danych na temat modelowanych materiałów kompozytowych. Nie jest to wyraźnie określone, ale

wyduje się, że we wszystkich analizach (za wyjątkiem analiz w p. 3.4.4) stosowano ten sam materiał kompozytowy o parametrach zdefiniowanych w p.4.1.

W pracy analizowano szereg modeli połączeń maty kompozytowej z murem wyczerpując wszystkie racjonalne możliwości.

- 6) Należałoby postawić pytanie, czy przyjęte w pracy modele materiału i konstrukcji i ich szczegółowe implementacje są przyjęte właściwe z punktu widzenia postawionych celów pracy. W mojej opinii modele materiału poszczególnych składników konstrukcji zostały przyjęte prawidłowo. Natomiast miałbym zastrzeżenia do przyjętych implementacji tych modeli, przez co rozumiem dobór szczegółowych parametrów materiału. Analizy konstrukcji zostały wykonane przyjmując dosyć przypadkowe parametry materiałów. Brak jest racjonalnego uzasadnienia, że do analiz należy przyjąć parametry muru S2, M1, M2, M3 i betonu B. Podobnie bez racjonalnego uzasadnienia przyjęto ustalone parametry maty kompozytowej.

Właściwym byłoby dobór reprezentatywnych parametrów materiału, następnie wybór wiodących parametrów projektowych i wykonanie analiz pokrywających pewną przestrzeń tych parametrów projektowych.

Wydaje się, że dobierając parametry modelu muru wynikające z konkretnych badań Doktorantka sądziła, że wówczas otrzymane wyniki będą w pewnym sensie użyteczne w praktyce projektowej. Przy tak złożonych modelach nie jest to możliwe i jednocześnie nie ułatwia (a raczej wprost przeciwnie) osiągnięcie celów pracy.

Za tak postawionym wnioskiem przemawia pośrednio analiza porównawcza badań laboratoryjnych z wynikami analiz numerycznych w p.4.1. Porównania ilościowego tych wyników nie udało się osiągnąć, ograniczając się jedynie do porównania jakościowego.

- 7) Niezależnie od powyższych zastrzeżeń, raczej natury metodologicznej niż merytorycznej, w mojej opinii Autorka wykazała dużo inwencji w modelowaniu konstrukcji. Przyjęte modele materiałów, geometria reprezentatywnego fragmentu modelu wzmocnionej konstrukcji murowej oraz proponowane zakresy analiz są właściwe i mogły stanowić właściwą podstawę prowadzenia dalszych przedmiotowych badań w pracy.

- 8) Analizy numeryczne, których wyniki są zamieszczone w rozdz. 4 dotyczą kilku odrębnych zagadnień spełniających określoną rolę:

AN1) weryfikacja i porównanie wyników laboratoryjnych i analiz numerycznych;

AN2) analizy numeryczne modeli wycinka budynku o konstrukcji murowej,

AN3) analizy parametryczne modelu reprezentatywnego wycinka prostokątnego wzmocnionej konstrukcji murowej bez otworu i z otworem.

- 9) Weryfikacja i porównanie wyników laboratoryjnych i analiz numerycznych AN1 jest raczej nieudana, między innymi z przyczyn podanych w p.6 recenzji. Sztywność muru przyjęta w analizach numerycznych jest znacznie większa niż to wynikało z badań laboratoryjnych. Wartości przemieszczeń górnej belki w badaniach laboratoryjnych rzędu do 10 mm wskazują, że końcowe wyniki odnoszą się do zakresu mechanizmu zniszczenia. Nie jest zrozumiałe, dlaczego w analizach numerycznych nie przyjęto zgodnego z badaniami laboratoryjnymi obciążenia pionowego rzędu 100 kN. Gdyby w pracy przyjąć parametryczny model MB to wówczas weryfikację prezentowaną w tej pracy można by połączyć z zagadnieniem identyfikacji.

- 10) Spośród wykonanych analiz w p.4 jedynie analizy AN3 mają istotną wartość poznawczą,

których wyniki dają się ująć syntetycznie. Analizy AN2, aczkolwiek pozwalające na sformułowanie użytecznych z inżynierskiego punktu widzenia wniosków, generalnie nie dają się uogólnić.

Wydaje się, że w pracy brakuje właściwej koncepcji prowadzenia analiz numerycznych. Sformułowany program badań obejmował bardzo dużą liczbę analiz, przy czym w mojej opinii, liczba wyników nie przekładała się jakoś syntetycznych wniosków z nich wynikających. Jestem przekonany, że można dobrać odmienny, racjonalny zbiór parametrów pozwalający przy tej samej liczbie analiz uzyskać jakościowo lepsze i ogólniejsze wyniki. Jako ilustrację właściwego doboru parametrów weźmy pod uwagę analizy dla zmieniających się proporcji modułów Younga maty i muru opisane w p.3.4.4. Proporcje sztywności materiałów będących elementami składowymi jednej konstrukcji mają decydujący wpływ na pracę konstrukcji. W pracy jako zmienny parametr przyjęto iloraz modułów Younga maty kompozytowej i muru co nie jest najlepszym wyborem. Zamiast tego parametru należałoby przyjąć iloraz sztywności warstw maty i muru, bo taki parametr jest odpowiedzialny za redystrybucję sił wewnętrznych pomiędzy poszczególne warstwy. Przy okazji należy zauważyć, że generalnie w pracy zbyt mało uwagi przypisywano temu zagadnieniu.

- 11) Nie do końca zrozumiałem potrzebę wyraźnego przeciwstawnego opisu zachowania się konstrukcji w zakresie inżynierskim i zakresie mechanizmów zniszczenia. Przykładowo: co wynika z następującego wniosku: „W zakresie inżynierskim efektywność wzmocnienia rośnie, jeżeli szerokość pasów mat maleje, natomiast przeciwną tendencję obserwuje się w zakresie mechanizmów zniszczenia”. Podobnych szczegółowych wniosków jest cały szereg. Z poznawczego punktu widzenia może to być ciekawe, natomiast w pracy nie przedstawiono wyraźnej koncepcji wykorzystania tych informacji w praktyce inżynierskiej.

4. Uwagi szczegółowe

Poniżej wymienionych jest kilka uwag szczegółowych o charakterze merytorycznym.

- 1) W opisie badań laboratoryjnych w p. 4.1. mowa jest o taśmach kompozytowych. Podane parametry tego materiału wskazują, że była to z pewnością mata kompozytowa. Produkcowane taśmy kompozytowe mają zgoła odmienne parametry wymiarów.
- 2) W analizach numerycznych stosuje się matę o grubości 0,13 mm. Nie sprecyzowano, że jest to grubość ekwiwalentna po uwzględnieniu przekrojów samych włókien. Należałoby również podać, że włókna o takim przekroju występują na dwóch prostopadłych kierunkach maty. Wówczas w przybliżeniu można przyjąć dla maty model izotropowy. Produkcowane są również maty w których nośne włókna występują tylko w jednym kierunku.
- 3) W analizach numerycznych schematy statyczne układu nie są w pełni zdefiniowane. Dotyczy to warunków brzegowych na bocznych krawędziach; nieprecyzyjnie określone jest obciążenie pionowe.
- 4) Tytuł podrozdziału 3.4.2. „Numeryczne połączenie kompozytu z murem” jest klasycznym przykładem myślenia kategoriami tzw. mechaniki komputerowej. W rozumieniu mechaniki ośrodków ciągłych połączenie dwóch ciał-ośrodków rozumiane jest jako zdefiniowanie warunków ciągłości, które z „numeryką” nie ma nic wspólnego. Natomiast „wyznawcy” mechaniki komputerowej zwykle na konstrukcję patrzą nie jako na ośrodek ciągły ale

jako granulat nazywany elementami skończonymi, które są zespolone punktowo. Model połączenia sztywnego muru z matą, wydawać się mogło banalny w opisie, w pracy opisywany jest następująco: „Model B – wykonany z zastosowaniem połączenia sztywnego (typu TIE w programie ABACUS), który gwarantuje pełne przekazanie przemieszczenia muru na matę.” Jest to barwny opis, niestety niewiele mający wspólnego z mechaniką ośrodka ciągłego. Nie jest to traktowane jako błąd w sensie merytorycznym, ponieważ mając rozeznanie w temacie przyjmujemy domyślnie, że połączenie typu TIE w ABACUSIE jest warunkiem ciągłości na wspólnym brzegu obszaru muru i maty postaci: przemieszczenia punktów obszaru muru i maty o tych samych współrzędnych w układzie współrzędnych materialnych są sobie równe – tak należałoby warunek sformułować w kategoriach MOC, ale czy tak aby na pewno interpretuje to ABACUS?

Na szczęście w pracy występują jedynie nieliczne tego typu ściśle zespolenia pojęciowe modelu ciała ciągłego z programem komputerowym.

5) Szereg uwag redakcyjnych oznaczyłem w tekście.

5. Ocena pracy doktorskiej

Praca doktorska dotyczy ważnego i aktualnego problemu inżynierskiego. Z uwagi na przedmiot i zarysowany zakres badań praca obejmuje stosunkowo wąski obszar badań. Jak już wspomniano wyżej, badania podjęte w pracy mają w większości charakter akademicki i wnioski, które zostały sformułowane w tej pracy trudno bezpośrednio wykorzystać w praktyce inżynierskiej – co zresztą Doktorantka przyznaje w podsumowaniu.

Główna uwaga w podjętych badaniach była skoncentrowana na modelowaniu przedmiotu badań jakim była konstrukcja murowa wzmocniana matami CFRP oraz wykonaniu i opracowaniu dużej liczby analiz numerycznych. Wyniki tych analiz pozwoliły pozytywnie odpowiedzieć na postawione na wstępie pracy pytania w formie tez pracy doktorskiej.

Doktorantka wykazała się dużą wiedzą i pomysłowością w formułowaniu modeli w ramach mechaniki ośrodków ciągłych, jak również wykazała się dużą sprawnością i umiejętnościami wykorzystania systemów komputerowych w celu wykonania analiz numerycznych. Przedłożona mi do recenzji praca jest na dobrym poziomie co świadczy, że Doktorantka dysponuje już pewnym ugruntowanym warsztatem naukowym. Wskazane przeze mnie wcześniej błędy metodologiczne związane z tzw. mechaniką komputerową w mojej opinii obniżają wartość tej pracy, jednakże niejakiem usprawiedliwieniem może tu być pewna fascynacja młodych ludzi techniką komputerową, wszechobecną w naszym życiu codziennym, a w szczególności w działalności naukowej.

Do oryginalnych elementów pracy można zaliczyć:

- Dobór optymalnego modelu konstrukcji murowych wzmocnionych taśmami kompozytowymi spełniający racjonalne kryteria.
- Opracowanie szerokiego programu analiz numerycznych ujmujących wszystkie istotne aspekty związane z przedmiotem i celami badań.
- Wykonanie i opracowanie oryginalnych analiz numerycznych w dwóch zakresach pracy konstrukcji.
- Opracowanie wniosków wynikających z przeprowadzonych badań, które mogą być dobrym punktem startu do dalszych badań. Przeprowadzone badania mają charakter otwarty wnosząc znaczący wkład do mechaniki konstrukcji murowych.

W mojej opinii wszystkie elementy pracy doktorskiej są w zasadzie poprawne pod

względem merytorycznym, uwzględniając zastrzeżenia wymienione wyżej, tym niemniej należy wskazać na pewne niedostatki warsztatu naukowego. W pracy brakuje właściwej koncepcji prowadzenia analiz numerycznych o czym szerzej było w p. 3 recenzji. Przedmiotem badań jest konkretny problem inżynierski, a tym samym kierunek badań powinien mieć na uwadze możliwość implementacji wyników badań do praktyki projektowej. W niniejszej pracy taka możliwość istnieje, jednakże wprowadzenie nowych pojęć związanych z zakresami analiz znacznie to komplikuje – pojęcia te nie występują w normach projektowania.

Praca napisana jest poprawną polszczyzną. Układ pracy oraz forma graficzna jest poprawna.

W podsumowaniu uważam, że mgr inż. Magdalena Mrozek wykonała pracę doktorską samodzielnie rozwiązując problem naukowy będący oryginalnym rozwiązaniem autorki oraz wykazała się umiejętnościami rozwiązywania problemów naukowych, co w myśl Ustawy „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” z roku 2003, upoważnia mnie do postawienia wniosku przyjęcia pracy doktorskiej oraz dopuszczenia jej do publicznej obrony.

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized, cursive letters, likely representing the name of the reviewer or the author.