

ANALIZA STATYCZNA UKŁADU MAT Z WŁÓKIEN WĘGLOWYCH WZMACNIAJĄCYCH ŚCIANĘ MUROWĄ

MAGDALENA MROZEK

*Katedra Teorii Konstrukcji Budowlanych, Politechnika Śląska
e-mail: magdalena.mrozek@polsl.pl*

Streszczenie. Artykuł zawiera analizę porównawczą płaskiej niezbrojonej ściany murowej (bez wzmocnienia) z tą samą konstrukcją, lecz wzmocnioną różnymi układami mat z włókien węglowych. Celem pracy jest analiza wzmocnienia, realizowana poprzez porównanie map sumarycznej degradacji, naprężenia oraz wykresów zależności sumarycznej reakcji górnej krawędzi stropu, zlokalizowanego nad środkową kondygnacją, do wprowadzonego przemieszczenia, a także dobór układu mat, tak by miało to również uzasadnienie ekonomiczne (minimalizacja powierzchni).

1. WSTĘP

Konstrukcje murowe charakteryzują się niską odpornością na obciążenia dynamiczne, do których należą wstrząsy sejsmiczne i parasejsmiczne. W niektórych sytuacjach wymagane jest ich wzmocnienie. Najlepszym rozwiązaniem jest uwzględnienie takiego rodzaju oddziaływania na konstrukcję już na etapie projektowania, dzięki czemu, oprócz standardowej procedury wymiarowania konstrukcji murowej, można uwzględnić również jej wzmocnienie w postaci zbrojenia wkładkami stalowymi bądź usztywnienie jej żelbetowymi ramami. Istnieje jednak szereg obiektów murowych niezbrojonych, również o dużej wartości historycznej, które wymagają zastosowania odpowiedniego wzmocnienia, zabezpieczającego je przed skutkami wstrząsów. Wadą niektórych metod wzmocnienia jest zwiększenie ciężaru i/lub znaczące pogorszenie estetyki budowli. W ostatnich latach rozwinęła się technika wzmocniania konstrukcji murowych i betonowych za pomocą mat oraz taśm z włóknami węglowymi lub szklanymi, których zaletami są: duża wytrzymałość przy jednocześnie niskim ciężarze właściwym oraz wysoka odporność na korozję.

W pierwszym etapie badań (por. [8]) otrzymano ilościową zgodność wyników obliczeń (symulacji) numerycznych z rezultatami testów laboratoryjnych, zaczerpniętymi z literatury [7]. Obliczenia dotyczyły eksperymentów prowadzonych na typowych próbkach murowych wzmocnionych matami z włókien węglowych (w skrócie CFRP). Kolejny etap badań to analiza różnych wariantów wzmocnienia typowych konstrukcji murowych lub ich elementów w celu znalezienia najbardziej efektywnych (ze względu na poziom wyężenia i pośrednio - ze względu na koszty) rozwiązań technicznych.

Przedmiotem niniejszej pracy jest porównanie płaskiej, niezbrojonej ściany murowej (bez wzmocnienia) z tą samą konstrukcją, lecz wzmocnioną różnymi układami mat z włókien węglowych. Obliczenia przeprowadzono, korzystając z pakietu programowego MES o nazwie ABAQUS. Model numeryczny ściany jest realizowany jako PSN, co jest pewnego rodzaju

uproszczeniem, jednak otrzymanie zbliżonych rozwiązań obliczeń numerycznych (również PSN) z eksperymentem [8], skłania do przyjęcia takiego założenia. W obliczeniach numerycznych zastosowano plastyczno-degradacyjny model materiałowy ściany, znany pod nazwą *Barcelona Model*. Maty, będące elementami wzmacniającymi, pracują jak materiał liniowo-sprężysty i są trwale połączone ze ścianą murową (brak możliwości odspojenia).

Do oceny poziomu wzmocnienia ściany wykorzystano: a) mapy sumarycznej degradacji materiału, b) mapy niektórych składowych tensora naprężenia, c) wykresy zależności sumarycznej reakcji górnej krawędzi stropu nad środkową kondygnacją od wprowadzonego przemieszczenia.

2. OPIS MODELI NUMERYCZNYCH

2.1. Modele materiałowe

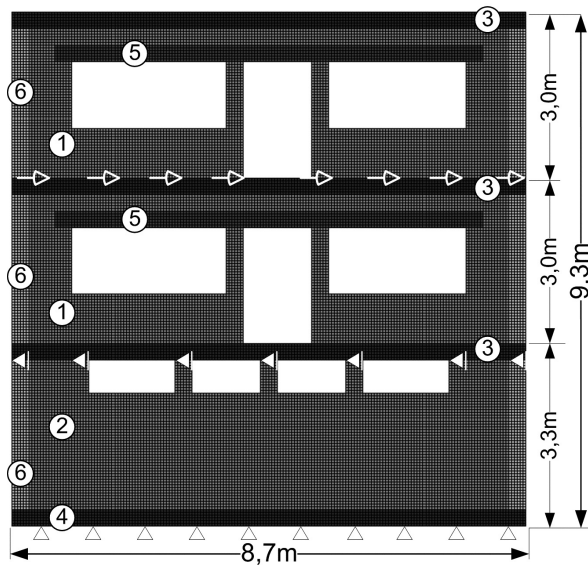
Części betonowe (stropy) analizowanej ściany, jak również elementy zastępujące ściany prostopadłe (wykonane z muru), a także maty CFRP pracują jak materiały liniowo-sprężyste. Natomiast część właściwa ściany murowej opisana jest plastyczno-degradacyjnym modelem materiałowym, zwanym *Barcelona Model* (w skrócie *BM*). Opisany model został stworzony, z myślą o betonie, przez J. Lubliner [4], a następnie zmodyfikowany przez J. Lee [3]. Adaptację modelu na potrzeby konstrukcji murowych zaproponował A. Ciñco [1].

Zastosowany model materiałowy łączy w sobie elementy przyrostowej teorii plastyczności z kontynuálną mechaniką zniszczenia. Takie sprzężenie możliwe jest dzięki wprowadzeniu naprężeń efektywnych do równań przyrostowej teorii plastyczności. Umożliwia to analizę nie tylko odkształceń plastycznych, ale również postępującą wraz z obciążeniem degradację materiału (obserwowaną w postaci zmniejszania się wartości modułu sprężystości). *BM* stanowi rozszerzony model Druckera-Pragera, o niekołowym przekroju dewiatorowym powierzchni plastyczności oraz niestowarzyszonym prawie płynięcia i wzmocnieniu izotropowym typu dwumechanizmowego (dwie zmienne wzmocnienia – osobno dla ściskania i rozciągania). Za degradację materiału w *BM* odpowiedzialne są dwie niezależne zmienne degradacji: d_t - w przypadku rozciągania oraz d_c - w przypadku ściskania. Zmienne te o wartościach z przedziału $<0; 1>$ narastają monotonicznie, przy czym wartość zero oznacza brak degradacji, a wartość 1, odpowiada całkowitej degradacji materiału. Istnieje również połączenie tych dwóch zmiennych degradacji poprzez wprowadzenie sumarycznej zmiennej degradacji d (w programie ABAQUS nazwanej jako SDEG), która uwzględni przejście ze stanu rozciągania do ściskania i odwrotnie.

2.1. Budowa modelu numerycznego

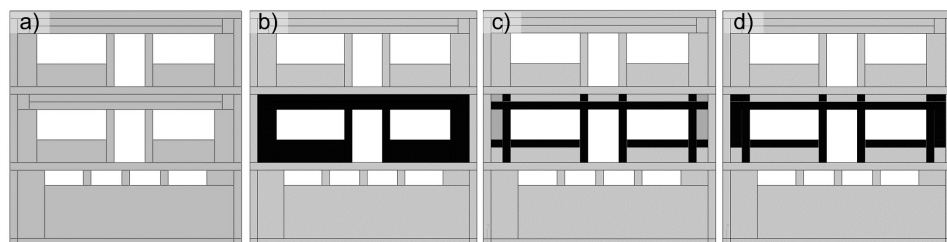
Przedmiotem analizy numerycznej jest płaska ściana, wydzielona z wirtualnego budynku jednorodzinego. Jej geometria wraz z wymiarami pokazana jest na rys. 1. Ściana wykonana jest z muru, przy czym dwie górne kondygnacje (nr 1 na rys. 1) mają grubość 0,25 m, natomiast dolna (nr 2 na rys. 1) - 0,38m. Stropy (nr 3 na rys. 1), fundament (nr 4 na rys. 1) oraz nadproża (nr 5 na rys. 1) są wykonane z betonu, a ich wymiar poprzeczny to odpowiednio: 2,0 m, 0,7 m oraz 0,25 m. Aby praca modelu płaskiego była jak najbardziej zbliżona do pracy modelu przestrzennego (z którego została wydzielona ściana), uwzględniono w nim również wpływ współpracujących ścian poprzecznych (nr 6 na rys. 1), wprowadzając elementy murowe o grubości 1,5 m. Odpowiedni dobór wymiarów stropów i ścian współpracujących pozwala uzyskać odpowiedzi statyczną oraz dynamiczną modelu tarczowego zbliżoną do odpowiedzi analizowanej ściany modelu przestrzennego. Algorytm

budowy modelu 2D wydzielonego z modelu 3D został przedstawiony w [5] i [6]. Model ściany nie uwzględnia podatności gruntu, jego krawędź dolna jest utwierdzona. Ze względu na to, że w trakcie obciążenia dynamicznego najbardziej wyętzona jest kondygnacja środkowa rozpatrywanego obiektu, zadanie uproszczono do analizy jedynie wymienionej kondygnacji. Ściana obciążona jest w dwóch krokach obliczeniowych – w pierwszym przykładany jest ciężar własny, natomiast w drugim wymuszane jest przemieszczenie (2 mm) górnej krawędzi stropu nad kondygnacją środkową (rys. 1), przy jednoczesnym zablokowaniu poziomego przemieszczenia dolnej krawędzi. Drugi krok obliczeniowy ma na celu wyętzanie tylko i wyłącznie środkowej kondygnacji tak, aby możliwa była analiza różnych układów wzmocnienia przy jednoczesnym zmniejszeniu rozmiarów zadania. Modele numeryczne utworzone zostały z wykorzystaniem czworokątnych, czterowęzłowych elementów skończonych płaskiego stanu naprężenia. Długość boku kwadratowych elementów skończonych wynosiła 5 cm.



Rys.1. Geometria analizowanej ściany

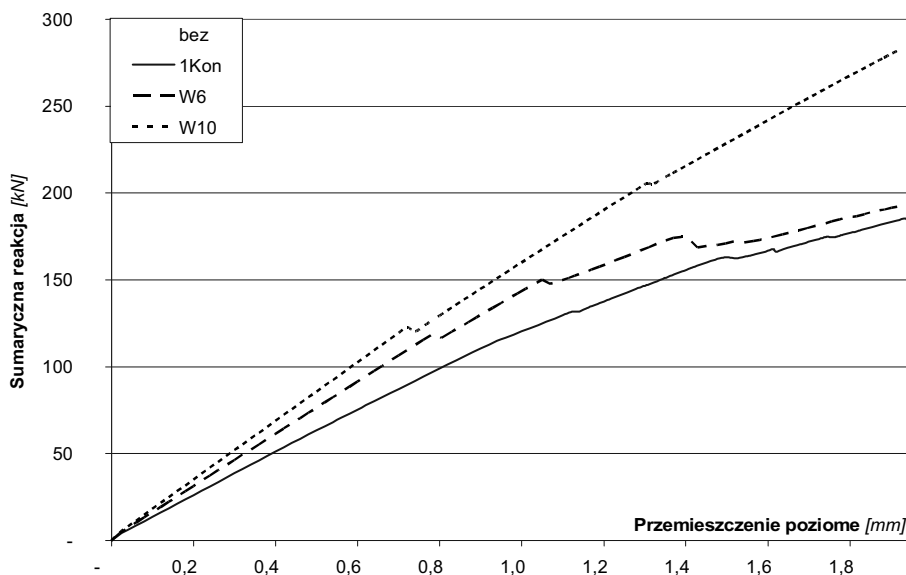
Maty zostały trwale połączone z murem, bez możliwości odrywania. Do analizy przyjęto cztery rodzaje modeli. Pierwszy z nich to ściana bez wzmocnienia matą (rys. 2a), opisywany w tekście w skrócie jako *brak*. Kolejne to modele wzmocnione matami. Rys. 2b przedstawia ścianę, której środkowa kondygnacja w całości pokryta jest matą CFRP, w tekście oznaczana jako *1 kon*. Pozostałe modele zawierają układy mat, pokrywające fragmenty analizowanej kondygnacji, przy czym szerokości mat są stałe i wynoszą 30 cm, zgodnie z modułem, jaki można spotkać w sprzedaży. Układy te są przedstawione na rys. 2c oraz 2d - oznaczane jako *W6* oraz *W10*.



Rys.2. Przyjęte układy mat: a) bez maty - brak, b) mata na całej kondygnacji - 1 kon, c) mata o układzie W6, d) mata o układzie W10

2. ANALIZA WZMOCNIENIA MURU MATAMI CFRP

W artykule przedstawione są jedynie wyniki wybranych układów tych mat, których zastosowanie umożliwia uzyskanie najlepszych rezultatów wzmocnienia. Pierwsza analiza wzmocnienia odbywa się poprzez porównanie zmian sumarycznych reakcji na krawędzi stropu (w skrócie *SR*), spowodowanych zmianą poziomego przemieszczenia tego stropu. Wykresy zawierające wspomniane zależności w przypadku ściany bez wzmocnienia oraz trzech ścian zawierających różne układy mat (zgodnie z rys. 2) są przedstawione na rys. 3.



Rys.3. Relacja sumarycznej reakcji do zadanego przemieszczenia

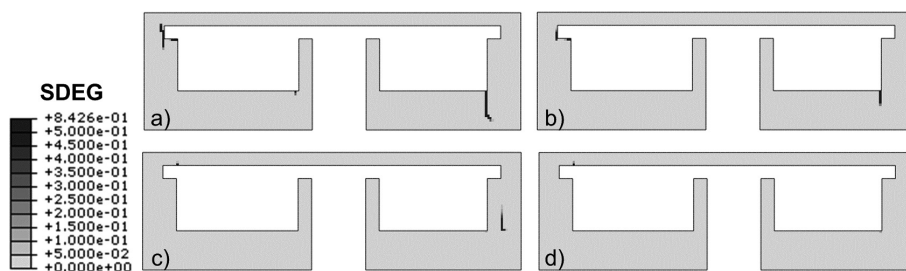
Szaryą ciągłą linią przedstawiona jest relacja *SR* do wartości przemieszczenia poziomego modelu bez mat. Wartość *SR* przy przemieszczeniu o wartości 2mm w tym przypadku wynosi 143 kN. Czarna linia ciągła odnosi się do modelu, w którym mata CFRP pokrywa całą kondygnację. W tym przypadku wartość *SR*, w analogicznym miejscu, wynosi 186 kN. Wzrost wartości reakcji ściany wzmocnionej w porównaniu do ściany, która nie posiada wzmocnienia, wynosi 30%. Oznacza to, że uzyskanie tej samej wartości przemieszczenia krawędzi ściany wiąże się z przyłożeniem siły większej o 30%. Kolejne relacje dotyczą

wybranych układów mat, które tylko fragmentarycznie pokrywają analizowaną kondygnację i składają się z pasów o szerokości 30cm. Pierwszy przedstawiony przypadek układu mat (*W6*), opasa otwory okienne i drzwiowe, co odpowiada przerywanej linii na rys. 3. Ostateczna wartość *SR* (przy przemieszczeniu 2 mm) wynosi 195 kN i jest o 36% większa od uzyskanej w modelu bez wzmocnienia. Widać, że wystarczy zastosować maty jedynie na odpowiednich fragmentach kondygnacji (w przypadku analizowanej ściany), aby uzyskać podobną lub nawet większą wartość reakcji, jak w przypadku, gdy mata pokrywa całą kondygnację. Jednak wzmocnienie omawianym układem mat najlepsze rezultaty daje do wartości przemieszczenia ok. 1,3 mm, potem wartość *SR* przypadku *W6* zbliża się do analogicznej wartości modelu *1kon*. Ostatnim przedstawionym przypadkiem jest układ mat, który jest rozbudowanym przypadkiem *W6* i jego charakterystyka na wykresie oznaczona jest linią kropkowaną. Wartość *SR* przy przemieszczeniu wynoszącym 2 mm, równa się 285 kN i jest aż o 99% większa od wartości tej samej wielkości fizycznej modelu bez wzmocnienia. Zastosowanie ostatniego z wymienionych układów mat pozwala na otrzymanie największego wzrostu *SR*, co oznacza, że jest to najbardziej efektywne wzmocnienie spośród trzech tutaj przedstawionych. Porównanie wartości reakcji przy przemieszczeniu o wartości 2 mm zestawiono w tabeli 1.

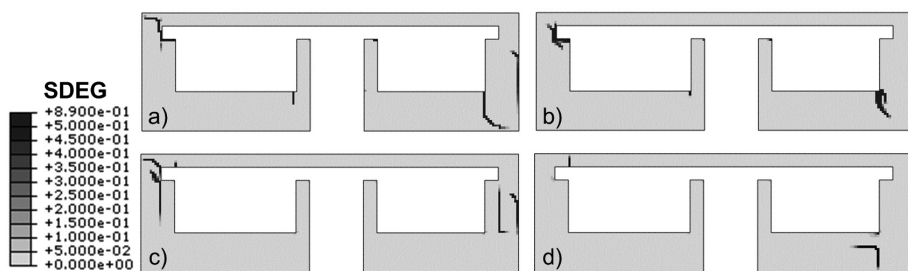
Tabela 1. *SR* przy przemieszczeniu o wartości 2 mm

Rodzaj wzmocnienia	Sumaryczna reakcja [kN]	Wzrost <i>SR</i> [%]
Bez wzmocnienia	143	0
<i>1kon</i>	186	30
<i>W6</i>	195	36
<i>W10</i>	285	99

Kolejny etap analizy wzmocnienia odbywa się poprzez porównanie map sumarycznej degradacji *SDEG*. Skala barw na mapach rozpoczyna się kolorem jasnoszarym i poprzez coraz to ciemniejsze odcienie kończy się na kolorze czarnym, który oznacza wartość sumarycznej zmiennej degradacji przekraczającej 0,5. W miejscach, w których występują ciemniejsze obszary, istnieje duże prawdopodobieństwo wystąpienia rys w ścianie, wywołanych danym obciążeniem. Prezentację map degradacji ograniczono jedynie do analizowanej środkowej kondygnacji. Pierwsze porównanie map degradacji odbywa się przy przemieszczeniu poziomym wynoszącym 1,1 mm i przedstawione jest na rys. 4.

Rys.4. Mapy *SDEG* przy przemieszczeniu poziomym równym 1,1 mm: a) brak, b) *1kon*, c) *W6*, d) *W10*

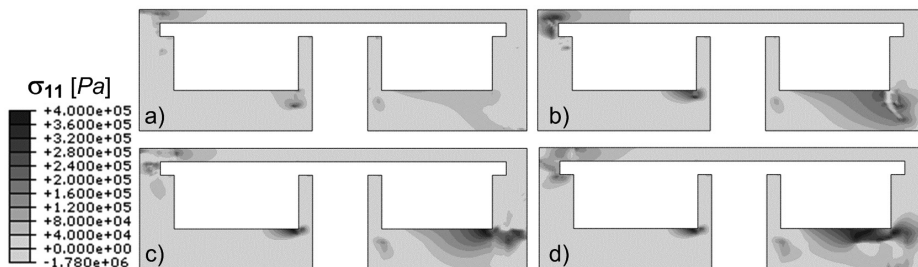
Przy wartości przemieszczenia poziomego wynoszącej 1,1 mm największa degradacja występuje w modelu, w którym brak jest wzmocnienia (rys. 4a). Zniszczenie zlokalizowane jest w obszarze lewego krańca nadproża oraz prawego narożnika otworów okiennych. Z tym, że pod lewym otworem degradacja jest niewielka, natomiast pod prawym ma postać długiej rysy, sugerującej odcięcie tej części ściany. W podobnych miejscach występuje degradacja modelu *1 kon* (rys. 4b), jednak w tym przypadku jest ona obszarowo o ok. połowę mniejsza. Układ mat wokół otworów okiennych (*W6*) spowodował, że nie wystąpiła degradacja w miejscach wcześniej opisanych, natomiast pojawiło się zniszczenie na krawędzi maty i muru, w prawej części ściany (rys. 4c). Ten typ degradacji stanowi mniejsze zagrożenie ze względu na to, że w danej chwili nie odcina fragmentu ściany od całości, jednak w dalszym etapie obciążania może być niebezpieczny. Stąd kolejnym krokiem jest dołożenie mat w miejscu występowania omawianej degradacji (*W10*), co przełożyło się na brak wystąpienia degradacji przy wartości przemieszczenia 1,1 mm (rys. 4d).



Rys.5. Mapy SDEG przy przemieszczeniu poziomym równym 2 mm: a) *brak*, b) *1 kon*, c) *W6*, d) *W10*

Rys. 5 przedstawia mapy degradacji przy wartości przemieszczenia poziomego wynoszącej 2 mm, przy której nastąpił dalszy rozwój degradacji pokazanej na rys. 4. W przypadku modelu bez maty doszło do całkowitego ścięcia lewego górnego narożnika analizowanej kondygnacji oraz jej prawej dolnej części (rys. 5a). Model *1 kon* nadal charakteryzuje się mniejszą degradacją ściany (nie występuje całkowite ścięcie – rys. 5b). W przypadku układu mat *W6* nastąpił dalszy rozwój istniejącej degradacji, a także pojawiła się nowa, dążąca do ścięcia lewej części ściany (tak jak to ma miejsce w przypadku modelu bez maty) – rys. 5c. W ostatnim układzie mat (*W10*) powstało nowe zniszczenie, zlokalizowane pod prawym otworem okiennym, na krawędzi maty i muru (rys. 5d). Po analizie map degradacji można wnioskować, że stosowanie mat CFRP zmniejsza obszar występowania degradacji. Dodatkowo widoczne jest, że przy zastosowaniu mat pokrywających fragmenty ściany degradacja rozpoczyna się przy większej wartości obciążenia w porównaniu do modelu bez wzmocnienia, a także występuje w innych miejscach muru. Na podstawie tych informacji, poprzez analizę numeryczną, można tak pokryć fragmenty ścian matami, aby opóźnić wystąpienie degradacji oraz „przenieść” ją w miejsce, w którym stanowi mniejsze zagrożenie.

W ostatniej części opisywanej analizy porównane są mapy poziomego naprężenia normalnego σ_{11} . Skala barw na mapie rozpoczyna się kolorem jasnoszarym i kończy na czarnym. Kolor najjaśniejszy dotyczy naprężeń ściskających oraz bliskich zeru, natomiast odcienie szarości po kolor czarny odnoszą się do naprężeń rozciągających (bardziej niebezpiecznych w konstrukcjach mурowych). Najciemniejszy kolor to miejsca, gdzie σ_{11} osiąga wartości bliskie granicy plastyczności muru przy rozciąganiu, którą tutaj przyjęto jako równą 400 kPa.



Rys.6. Mapy rozkładu naprężenia poziomego przy przemieszczeniu poziomym równym 2 mm: a) *brak*, b) *W6*, c) *W10*

Mapy naprężenia σ_{11} , uzyskane przy obciążeniu przemieszczeniem równym 2 mm, przedstawia rys. 6. Największe jego wartości otrzymano w modelu *W10* (rys. 6d), natomiast najmniejsze występują w modelu bez wzmocnienia matami CFRP (rys. 6a). W miejscu wystąpienia degradacji spada wartość naprężenia, co najlepiej zauważalne jest na rys. 6b, gdzie w narożu prawego otworu okiennego (miejsce wystąpienia degradacji – $SDEG > 0,5$), widoczny jest duży spadek wartości poziomego naprężenia (kolor jasnoszary).

3. PODSUMOWANIE

Jedną z metod wzmocniania konstrukcji murowych jest naklejanie na konstrukcję lub jej fragment mat z włókien węglowych. W artykule analizowano numerycznie wzmocnienie ściany murowej pokrytej różnym układem mat CFRP. Wyniki sumarycznej reakcji górnej krawędzi stropu analizowanej kondygnacji, potwierdzają uzyskanie wzmocnienia ściany matą CFRP w zakresie 30÷99% - w zależności od układu mat CFRP, co pokazuje celowość doboru układu mat.

Na podstawie analizy relacji *SR* do poziomego przemieszczenia oraz porównania map sumarycznej degradacji, a także map rozkładu naprężeń, możliwe jest wybranie najkorzystniejszych – z punktu widzenia nośności konstrukcji – rozwiązań wzmocnienia (dobór układu mat) obiektów zagrożonych uszkodzeniem w wyniku działania poziomych obciążeń statycznych.

Dalsze analizy będą dotyczyły obiektów o innej geometrii i innych konfiguracjach wzmocnienia. Równocześnie badania będą rozszerzone o analizę dynamiczną.

LITERATURA

1. Cińcio A.: Numeryczna analiza dynamicznej odporności niskiej zabudowy na wstrząsy parasejsmiczne z zastosowaniem przestrzennych modeli wybranych obiektów. Praca doktorska. Politechnika Śl., Gliwice 2004.
2. Elgawady M.: Seismic in-plane behavior of URM walls upgraded with composites. D.Sc. Thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, À La Faculté Environnement Naturel, Architectural et Construit. Lausanne 2004.
3. Fennes L., Lee J.: A plastic-damage concrete model for earthquake analysis of dams. "Earthquake Eng. and Structural Dynamics" 1998, Vol. 27, p. 937-956.
4. Lubliner J., Oliver J., Oller S., Oñate E.: A plastic-damage model for concrete. "International Journal of Solids and Structures" 1989, Vol. 25, p. 299-329.

5. Mrozek M., Mrozek D.: Analiza porównawcza dynamicznej odpowiedzi modeli budynków 3D i 2D z uwzględnieniem podatności podłoża. Cz. 1 - opis procedury. W: IX Konferencja Naukowa Doktorantów Wydziałów Budownictwa 2008, z.113, s.193-202.
6. Mrozek M., Mrozek D.: Analiza porównawcza dynamicznej odpowiedzi modeli budynków 3D i 2D z uwzględnieniem podatności podłoża. Część 2 – wyniki obliczeń. W: IX Konferencja Naukowa Doktorantów Wydziałów Budownictwa 2008, z.113, s.203-210.
7. Santa Maria H., Alcaino P., Luwers C.: Experimental response of masonry walls externally reinforced with carbon fiber fabrics. In: Proceedings of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering. San Francisco 2006. Paper No. 1402.
8. Wawrzynek A., Mrozek M., Mrozek D.: Pozasprężysta numeryczna analiza murów wzmocnionych matami węglowymi. „Modelowanie Inżynierskie” 2009, nr 38, s.271-278.

Obliczenia numeryczne wykonano w Akademickim Centrum Komputerowym AGH-Cyfronet na podstawie przyznanych grantów obliczeniowych nr MNiSW/Sun6800/PŚląska/083/2007, MNiSW/SGI3700/PŚląska/083/2007.

ANALYSIS OF MASONRY WALL STRENGTHENED WITH DIFFERENT ARRANGEMENTS OF CFRP COMPOSITES

Summary. The paper contains comparative analysis of URM plane wall and unreinforced masonry wall strengthened with different arrangements of carbon fiber reinforced polymers sheets (URM-CFRP). The purpose of the paper is reinforcement analysis, carried out by comparing the degradation and stresses maps, as well as the relations graphs of the summary reaction of upper edge of the middle storey and the inserted displacement and also effectiveness test of the masonry reinforcement through application of different configuration of the FRP sheets.