

## POZASPRĘŻYSTA NUMERYCZNA ANALIZA MURÓW WZMOCNIONYCH MATAMI WĘGLOWYMI

ANDRZEJ WAWRZYNEK, MAGDALENA MROZEK, DAWID MROZEK

*Katedra Teorii Konstrukcji Budowlanych, Politechnika Śląska*

*e-mail: andrzej.wawrzynek@polsl.pl, magdalena.mrozek@polsl.pl, dawid.mrozek@polsl.pl*

Streszczenie. Przedmiotem niniejszej pracy jest ocena wyężenia i poziomu degradacji muru wzmocnionego matami z włókien węglowych. W pierwszym etapie badań opracowano numeryczny model wzmocnionej próbki muru poddanej obciążeniu stale przyrastającemu aż do całkowitego jej zniszczenia. Rozpatrzono dwa układy mat: krzyżowy oraz równoległy, poziomy. Własności mechaniczne muru opisano modelem plastyczno-degradacyjnym, a elementów wzmacniających - liniowo-sprężystym. Założono, że mata CRFP współpracuje z murem bez odrywania aż do chwili jego zniszczenia.

### 1. WSTĘP

Konstrukcje murowe należą do konstrukcji o stosunkowo niskiej odporności na obciążenia dynamiczne, sejsmiczne lub parasejsmiczne (np. wstrząsy górnicze lub komunikacyjne) – o ile nie zostaną wcześniej odpowiednio zaprojektowane i wykonane. Jednym ze sposobów zabezpieczania budynków na etapie ich powstawania jest m.in. zastosowanie wzmocnień w postaci wkładek zbrojeniowych wewnątrz muru lub usztywnienia żelbetowymi ramami. W budynkach murowych, wzniesionych bez odpowiednich zabezpieczeń, możliwe jest późniejsze wzmocnienie poprzez zastosowanie mat (taśm), np. z włókien węglowych (CFRP), przyklejanych na przedniej i/lub tylnej powierzchni muru.

Głównym celem prowadzonych badań jest ocena efektywności różnych sposobów zabezpieczania konstrukcji murowych poddanych oddziaływaniom dynamicznym. Podstawowym narzędziem tej oceny jest analiza numeryczna odpowiednich modeli badanych obiektów. Na obecnym etapie podjęto próbę numerycznej symulacji stosunkowo prostych doświadczeń laboratoryjnych w celu określenia, na ile możliwe jest odtworzenie mechanizmu i poziomu zniszczenia próbek murowych z/bez wzmocnienia usytuowanego na ich powierzchniach.

W pracy analizowany jest jeden rodzaj próbek murowych odpowiadający rzeczywistym badaniom opisanym stosunkowo dokładnie w literaturze [4]. Założono, że wzmocnienie muru w postaci mat może być opisane liniowo-sprężystym modelem materiału, a mur – sprężysto-plastyczno-degradacyjnym modelem znanym w literaturze jako *Barcelona Model (BM)*– [1, 2, 3].

W komputerowej symulacji eksperymentu założono monotonicznie rosnące obciążanie próbek murowych. Symulacja kończyła się każdorazowo, gdy próbka ulegała zniszczeniu,

tj. występowały stosunkowo duże obszary o znacznym poziomie degradacji lub programowym przerwaniu obliczeń ze względu na brak zbieżności rozwiązania.

Rozpatrzono dwa układy mat odpowiadające opisanym w pracy [4] eksperymentom. Obliczenia przeprowadzono, korzystając z profesjonalnego pakietu programowego metody elementów skończonych o nazwie *ABAQUS*, wykorzystując zaimplementowany i zmodyfikowany (tak, aby odpowiadał charakterystyce muru konstrukcyjnego) plastyczno-degradacyjny model *BM*. Założono, że elementy wzmacniające (maty) w trakcie całego procesu obciążania próbek testowych są sztywno (ściśle, bez odrywania) połączone z murem aż do chwili zniszczenia próbek, co można było zaobserwować podczas badań laboratoryjnych [4, 5].

Uzyskane wyniki analiz numerycznych – mechanizm zniszczenia (jakościowo) i poziom wzmocnienia (ilościowo) muru są zgodne ze wspomnianymi wynikami eksperymentalnymi. Tym samym uzasadnione staje się przejście do analizy numerycznej różnych innych wariantów wzmacniania próbek murowych, a także całych konstrukcji murowych. Opisany w pracy etap badań obejmuje wyłącznie analizę obiektów nieuszkodzonych.

## 2. OPIS MODELI NUMERYCZNYCH

### 2.1. Modele materiałowe

Model materiałowy zastosowany w trakcie analizy numerycznej elementów murowych to *Barcelona Model (BM)*. Model ten łączy w sobie cechy modeli charakterystycznych mechaniki plastycznego zniszczenia (przyrostowej teorii plastyczności) oraz kontynualnej mechaniki zniszczenia. Takie połączenie pozwala na rozpatrywanie wpływu przyrastającego zniszczenia materiału na odpowiedź materiału w trakcie kolejnych cykli obciążenie-odciążenie. *MB* stanowi rozszerzenie klasycznego modelu Druckera-Pragera i charakteryzuje się m.in. niekołowym przekrojem dewiatorowym powierzchni plastyczności. Równania konstytutywne wyrażone są poprzez naprężenia efektywne. Złożoność opisu *BM* wynika także z zastosowania niestowarzyszonego prawa płynięcia oraz nieliniowego wzmocnienia izotropowego typu dwumechanizmowego (różne charakterystyki ściskania i rozciągania). Degradację materiału opisują dwa zmienne parametry stosowane w kontynualnej mechanice zniszczenia: w przypadku rozciągania jest to parametr  $d_t$ , a w przypadku ściskania -  $d_c$ . Przyjmują one wartości z przedziału  $\langle 0,1 \rangle$ , przy czym wartość zero oznacza brak degradacji, wartość jeden - całkowite zniszczenie materiału. Istnieje możliwość powiązania tych zmiennych, określanych na podstawie niezależnych funkcji zniszczenia materiału, tak aby jedna zmienna była zależna od drugiej po zmianie znaku naprężenia.

Przeprowadzane analizy uwzględniają pozasprężystą pracę konstrukcji murowej opisaną modelem Barcelona. Model ten, dotyczący betonu, został sformułowany przez Lubliner [1] oraz zmodyfikowany przez Lee [2]. Propozycję adaptacji modelu w przypadku konstrukcji murowych zaproponował Ciñcio [3]. Model materiałowy wzmocnień w postaci mat z włókien węglowych został zdefiniowany jako liniowo-sprężysty. Przyjęcie takiej charakterystyki podyktowane zostało różnicą modułu Younga (49-krotnie) oraz wytrzymałości na rozciąganie (8750-krotnie) w odniesieniu do konstrukcji murowej.

### 2.2. Budowa analizowanych modeli

Przeprowadzone testy numeryczne mają na celu ocenę możliwości częściowego zastąpienia czasochłonnych i kosztownych badań laboratoryjnych symulacją komputerową. Szeroki

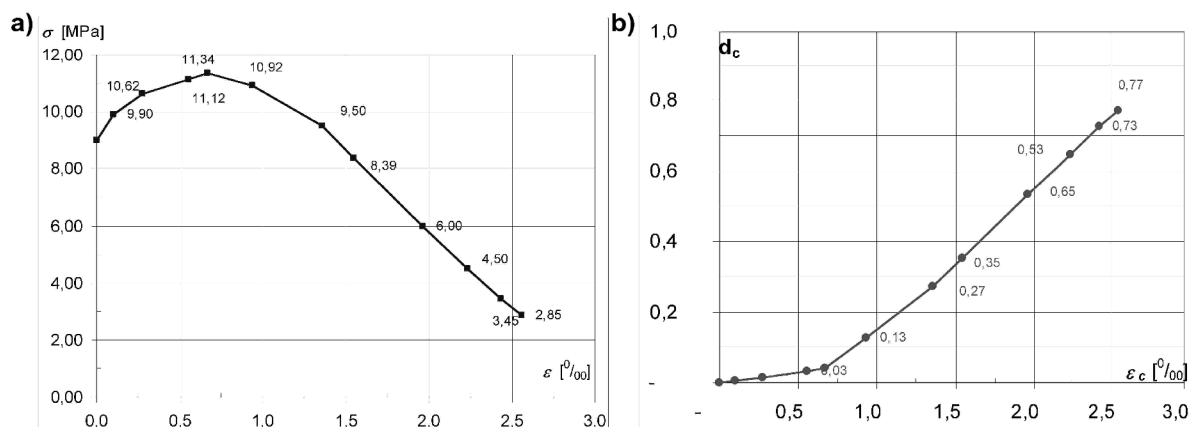
przegląd literatury (oraz wyników badań laboratoryjnych), dotyczący konstrukcji murowych ze wzmocnieniem (ale również bez wzmocnienia), nie zawiera zbyt wiele przykładów dobrze opisanych doświadczeń, które mogłyby posłużyć jako bazowe dla obliczeń numerycznych. Najczęściej są to opisy i ilustracje różnych mechanizmów zniszczenia oraz poziomu obciążenia niszczącego. Autorzy pracy, jako bazowe doświadczenia, wybrali eksperymenty przedstawione w pracy [4], w której opisano serię pomiarów testowych elementów murowych. Pozycja ta zawiera wyznaczone eksperymentalnie współczynniki wzrostu maksymalnej siły ścinającej w przypadku zastosowania mat wzmacniających. W przypadku próbek murowych z dodatkowymi matami diagonalnymi opisywany wcześniej wzrost wyniósł 1,84, natomiast wzmocnienie poziome pozwoliło na osiągnięcie poziomu 1,61. Pozycja [5] zawiera przegląd wykonanych i opisanych eksperymentów wzmacniania konstrukcji murowych matami z włókien polimerowych (z ang. FRP), na jego podstawie określono poziom wzrostu maksymalnej siły ścinającej. Wielkość tego wzrostu uzależniona jest od przyjętej geometrii elementów wzmacniających i zawiera się w przedziale  $1,1 \div 3,0$  w odniesieniu do muru bez wzmocnienia.

Zastosowanie modelu plastyczno-degradacyjnego wymaga dość dokładnego wyznaczenia parametrów opisujących ten model, co w przypadku muru, ze względu na niejednorodność jego własności fizycznych, jest bardzo trudne. Z tego powodu uzyskanie numerycznie wiernego odtworzenia uszkodzeń i rzeczywistych spękań opisanych w [4] próbek nie jest możliwe. Za cel symulacji postawiono sobie jakościowe odtworzenie mechanizmu zniszczenia oraz osiągnięcie porównywalnego poziomu wzmocnienia (rozumianego jako stosunek nośności próbki ze wzmocnieniem taśmami do próbki bazowej – bez wzmocnienia) uzyskiwanego w rzeczywistych i „numerycznych” murach.

Na tym etapie badań założono, że analizowane elementy murowe mogą być modelowane jako płaskie, pracujące w płaskim stanie naprężenia. Stanowią one obszary kwadratowe o boku 2 m, wykonane z cegły pełnej o grubości 0,14 m. Analizy numeryczne próbek wzmocnionych uwzględniały dwa układy mat. Pierwszy (rys. 2b) stanowi wzmocnienie przekątniowe o szerokości pasa 30 cm, w kształcie litery „X” na obu powierzchniach. Drugi (rys. 2c) sprowadza się do ukształtowania trzech poziomych pasów (o szerokości 15 cm) symetrycznie po obu stronach muru. Dalej wzmocnienia są oznaczone odpowiednio jako typu „X” i typu „P”. Przyjęto, za [4], że grubość mat wynosi 0,13 mm.

Ponieważ autorzy [4] nie podali dokładnych cech mechanicznych muru, analizy numeryczne prowadzono dla charakterystyki muru uzyskanej niezależnie w próbach laboratoryjnych ściskania i rozciągania w Laboratorium Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej. Krzywe wzmocnienia oraz degradacji przy ściskaniu muru przedstawiono na rys. 1., gdzie na osiach odciętych mamy część odkształcenia związanego z degradacją.

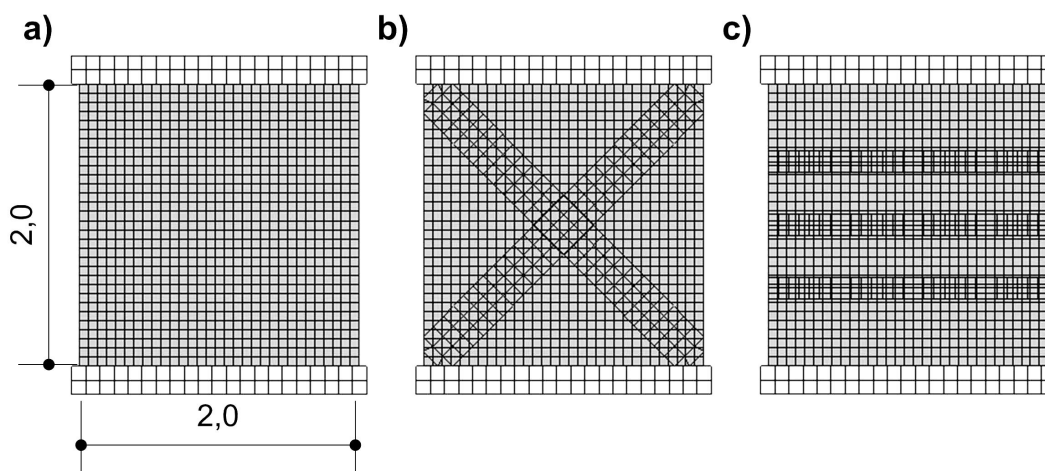
Obciążenie we wszystkich przypadkach zostało przyłożone do sztywnej belki betonowej, a następnie przekazane poprzez kontakt (o dużym współczynniku tarcia) na element murowy. Parametry takiego kontaktu zapewniają możliwość separacji krawędzi podczas odkształcania. Każdorazowo pierwszym etapem oddziaływania było obciążenie statyczne imitujące ciężar trzech kondygnacji budynku ponad analizowanym elementem murowym. Następnie wprowadzano przemieszczenie poziome powodujące ścinanie próbki.



Rys.1. Charakterystyka muru S4 przy ściskaniu a) krzywa wzmocnienia b) krzywa degradacji

Fizyczne, rzeczywiste połączenie elementu murowego z matą wzmacniającą odbywa się przy użyciu kleju (np. epoksydowego). Jak wykazują badania laboratoryjne [4, 5] częstą postacią zniszczenia elementów wzmocnionych nie jest zniszczenie (ściananie) warstwy klejącej, lecz degradacja powierzchniowa struktury muru (odrywanie maty wraz z fragmentami muru). Dlatego też modele numeryczne ze wzmocnieniem typu „X” i „P” posiadają trwałe połączenie muru z matą.

Modele numeryczne utworzone zostały z wykorzystaniem kwadratowych, czterowęzłowych płaskich elementów skończonych (przy założeniu płaskiego stanu naprężenia). Długość boku kwadratowych elementów skończonych wynosi 6,5cm.



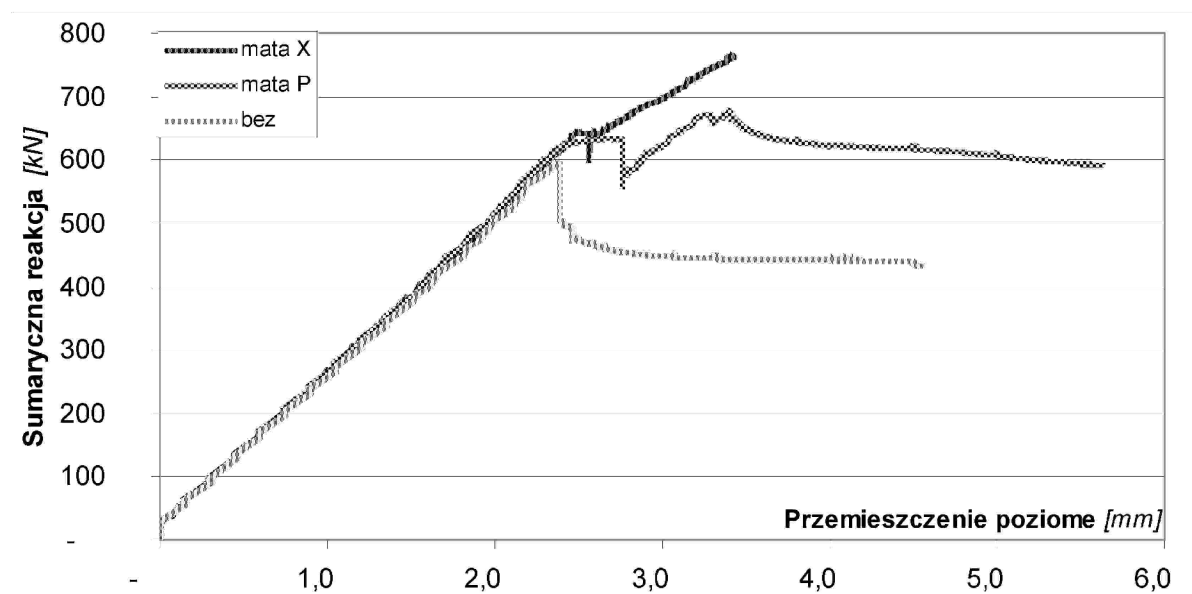
Rys.2. Modele numeryczne elementów murowych: a) bez wzmocnienia, b) wzmocnienie typu „X”, c) wzmocnienie typu „P”

### 3. ANALIZA WZMOCNIENIA MURU MATAMI CFRP

#### 3.1. Wybrane wyniki analiz numerycznych

Zachowanie elementów murowych (z matami i bez nich) pod wpływem obciążenia pionowego i poziomego scharakteryzowano poprzez określenie zależności pomiędzy poziomym przemieszczeniem  $U$  górnej belki betonowej (traktowanej jako sztywna) a sumaryczną reakcją ( $SR$ ) górnej krawędzi belki betonowej, będącej odpowiedzią na zadane

przemieszczenie poziome. Zależność  $SR$  od odpowiadającego mu przemieszczenia przedstawiają krzywe zamieszczone na rys. 3, gdzie uwzględniono wszystkie trzy rodzaje próbek murowych.



Rys.3. Zależność sumarycznej reakcji od zadanego przemieszczenia

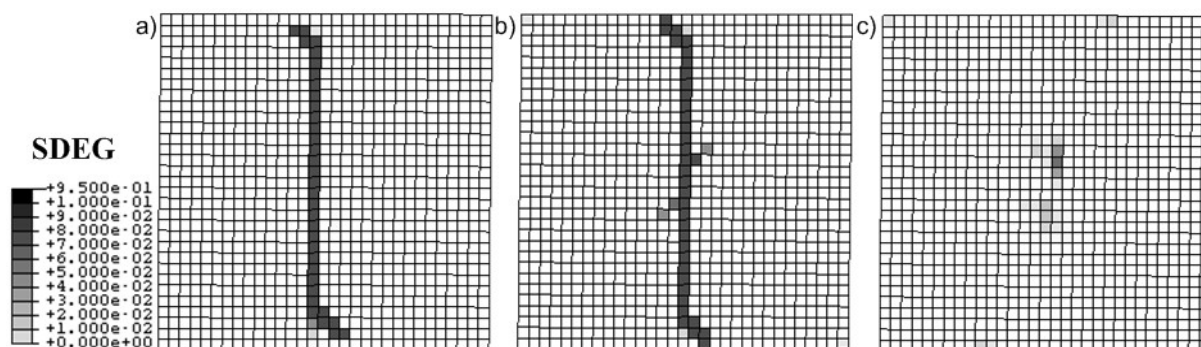
Wszystkie trzy zależności są liniowe i prawie identyczne do chwili, gdy  $U$  osiąga wartość około 2,4 mm (przy  $SR = 600$  kN), czyli do osiągnięcia przez mur bez wzmocnienia maksymalnej wartości reakcji, po której przekroczeniu rozpoczyna się gwałtowny spadek  $SR$ . Od tego momentu następuje intensywna degradacja muru rozpoczynająca się od środka próbki i trwa do momentu ustabilizowania się wartości sumarycznej reakcji, gdy wzrost zniszczenia również jest bardzo powolny. Wykorzystywane oprogramowanie MES umożliwia obserwowanie zmian poziomu trzech lokalnych parametrów degradacji materiału: 1) degradacji powodowanej tylko rozciąganiem (parametr  $d_t$ ); 2) degradacji wywołanej tylko ściskaniem – parametr  $d_c$  oraz 3) poziomu całkowitej degradacji (parametr SLEG lub  $d$ ), gdzie uwzględnia się częściowe odtwarzanie wytrzymałości na ściskanie podczas zamykania rys spowodowanych rozciąganiem materiału.

Podczas degradacji muru bez wzmocnienia pozostałe dwie próbki są w stanie przenieść większą reakcję sumaryczną. Krótkotrwałego zmniejszenia wartości reakcji doznaje mur z matami diagonalnymi (typ „X”). Z przebiegu charakterystyki wynika, że jest to najefektywniejsza metoda wzmocnienia ze względu na omawiany tutaj sposób obciążenia. Jak widać, maty przejmują obciążenie niemal natychmiast po osłabieniu muru. Reakcja  $SR$  może nadal znacząco wzrastać.

Ponowny spadek  $SR$  następuje w przypadku muru wzmocnionego typu „P”. Wtedy, podobnie jak w przypadku muru bez wzmocnienia, rozpoczyna się szybka degradacja niektórych obszarów modelu. Towarzyszy temu zjawisku spadek  $SR$  do momentu osiągnięcia ponownie wartości wynoszącej 598,66kN. Dalsze zwiększanie przemieszczenia poziomego prowadzi do ponownego wzrostu  $SU$ . Wzrost ten wynika z włączenia się mat wzmacniających do przenoszenia obciążenia. Dopiero następny znaczny wzrost degradacji powoduje spadek  $SR$  (dla  $U = 5,72$  mm).

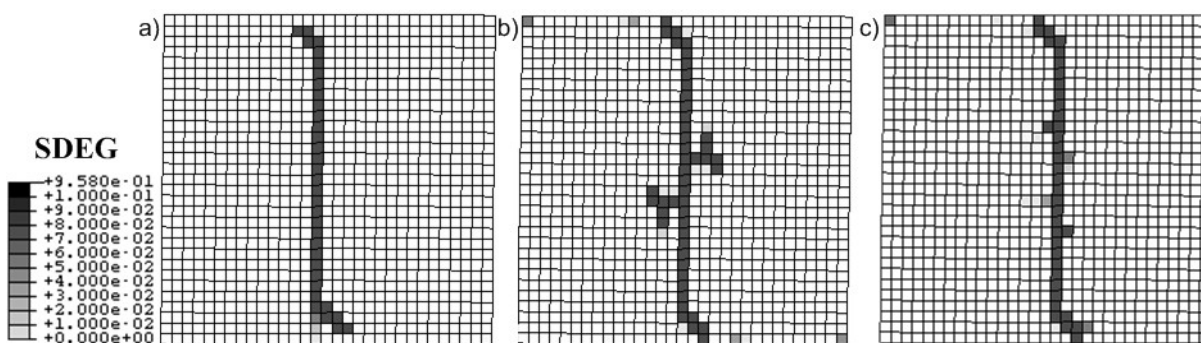
Rys. 4. umożliwia porównanie map degradacji wszystkich modeli w momencie tuż przed osiągnięciem przez mur typu „P” pierwszego maksimum sumarycznej reakcji (tj. przy

$U = 2,76$  mm). Największe zniszczenie występuje w modelu muru bez wzmocnienia oraz wzmocnionego matami typu „X”. Obszarowo degradacja obu murków jest podobna - rysy przebiegają przez środek murów, a wartości parametru sumarycznej degradacji SDEG różnią się nieznacznie (oba w okolicy 90%). Najmniejsze zniszczenie uzyskuje się w odniesieniu do modelu z matami typu „P”, gdzie wartość sumarycznego zniszczenia nie przekracza 10%, również znacznie mniejsza jest liczba zdegradowanych elementów skończonych.



Rys.4. Mapy degradacji przy przemieszczeniu 2,76mm murów: a) bez wzmocnienia, b) ze wzmocnieniem typu „X”, c) ze wzmocnieniem typu „P”

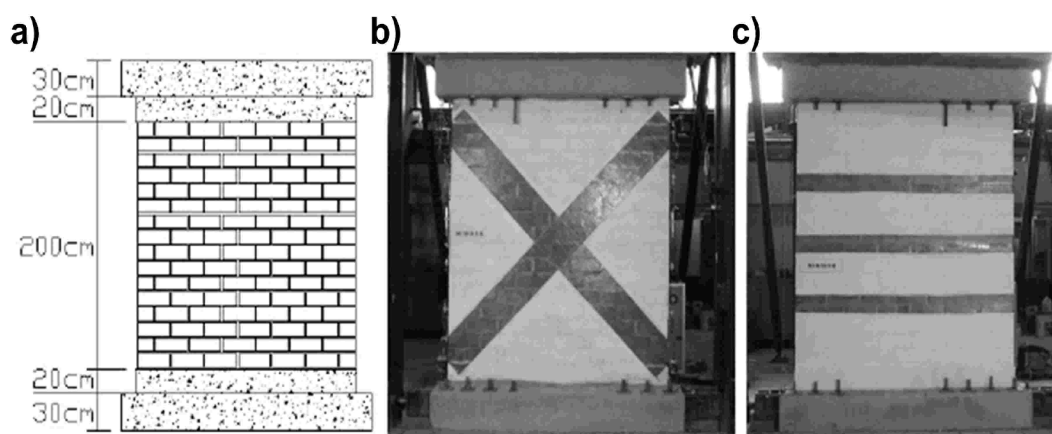
Rys. 5. przedstawia mapy parametru SDEG trzech murów, gdy poziome przemieszczenie górnej belki wynosi  $U = 3,40$  mm, tj. gdy obliczenia zostały przerwane ze względu na brak zbieżności rozwiązania spowodowaną znacznym poziom degradacji modelu muru typu „X”. Jak łatwo zauważyć, sposób i obszary zniszczenia są zbliżone (czego należało się spodziewać), jednakże towarzyszą im różne poziomy SR. Najwyższą wartość  $SR = 780$  kN osiąga mur typu „X”. Dojściu do tej wartości towarzyszy stopniowe narastanie degradacji muru. Wzrastanie SR wynika z przejścia obciążenia przez maty CRFP typu „X”.



Rys.5. Mapy degradacji przy przemieszczeniu 3,40 mm murów: a) bez wzmocnienia, b) ze wzmocnieniem typu „X”, c) ze wzmocnieniem typu „P”

### 3.2. Porównanie wyników numerycznych z eksperymentem

W literaturze dostępne są wyniki przeprowadzanych eksperymentów mających na celu badania murów wzmocnionych matami z włókien polimerowych [4, 5]. Wspomniane prace zawierają omówienie wyników rzeczywistych eksperymentów laboratoryjnych, gdzie celem było określenie wzrostu wytrzymałości poprzecznej elementu murowego. W artykule [4] przeprowadzone zostało badanie próbek murowych niewzmocnionych oraz wzmocnianych matami z włóknami węglowymi (rys. 6).



Rys.6. Badana próbka murowa za [4]: a) bez wzmocnienia, b) z matami typu „X”, c) z matami typu „P”

W analizie numerycznej wymiary próbek oraz rodzaj i parametry wytrzymałościowe mat z włókien węglowych zaczerpnięto z badań laboratoryjnych. Wzrost wartości sumarycznej reakcji górnej krawędzi z zastosowaniem mat ułożonych na przekątnych próbki murowej wyniósł 71% w analizie numerycznej, podczas gdy w czasie eksperymentu laboratoryjnego zanotowano wzrost nośności o 84%. Wzmocnienie muru typu „P” podczas trwania analizy wyniosło 52%, odpowiada temu 61% wzmocnienie w badaniach laboratoryjnych.

Wyniki te pozwoliły na wyciągnięcie wniosku, że możliwe jest inżyniersko wiarygodne numeryczne badanie murów (ściśle próbek murowych) ze wzmocnieniami, pracującymi w zakresie pozasprężystym, oraz częściowe zastąpienie badań laboratoryjnych obliczeniami z zastosowaniem odpowiednich, złożonych modeli materiałowych. Tabela 1 zawiera zestawienie poziomu wzrostu wytrzymałości elementu murowego na podstawie analizy sumarycznej reakcji.

Tabela 1. Wzrost wartości siły możliwej do przejścia przez próbkę murową

Rodzaj wzmocnienia	Wzrost wartości sumarycznej reakcji:	
	Analiza numeryczna	Eksperyment
Mur bez wzmocnienia	1,00	1,00
Mur typu „X”	1,71	1,84
Mur typu „P”	1,52	1,61

### 3. PODSUMOWANIE

Alternatywną metodą wzmocniania konstrukcji murowych poddanych oddziaływaniom sejsmicznym, w relacji do stosowanych wkładek stalowych, są maty z włókien węglowych. Niewątpliwą zaletą tego typu wzmocnień jest możliwość wzmocnienia - zapobiegawczego - nieuszkodzonych elementów konstrukcyjnych już istniejących.

Wykazano, że istnieje możliwość przeprowadzenia analiz numerycznych muru (wzmocnionego matami CFRP) w zakresie pozasprężystym aż do znacznego poziomu jego zniszczenia, a uzyskane wyniki dobrze opisują rzeczywistość fizyczną. Zaprezentowane na rys. 3 charakterystyki potwierdzają współpracę maty z włókien węglowych (traktowanej jako

materiał liniowo sprężysty) z murem opisanym modelem plastyczno-degradacyjnym. Powstanie uszkodzeń w konstrukcji murowej (obserwowane w eksperymencie laboratoryjnym i jego symulacji numerycznej) powoduje „przejęcie” obciążenia przez wzmocnienie. Obliczenia (również te niezamieszczone w pracy) wykazały, że możliwe jest wiarygodne oszacowanie poziomu wzmocnienia konstrukcji, a także opisanie mechanizmu jej zniszczenia. Dla przypadku opisanego wyżej, zastosowanie mat z włókien węglowych powoduje wzmocnienie poprzez zwiększenie wartości sumarycznej reakcji na górnej krawędzi o 71% (w eksperymencie - [4] - 84%) w przypadku mat ułożonych przekątniowo oraz o 52% ([4]- 61%) w przypadku trzech mat przyklejonych poziomo po obu stronach próbki murowej.

## LITERATURA

1. 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.
2. Fenves L., Lee J.: A plastic-damage concrete model for earthquake analysis of dams. “Earthquake Eng. and Structural Dynamics” 1998, Vol. 27, p. 937-956.
3. Cińcio A.: Numeryczna analiza dynamicznej odporności niskiej zabudowy na wstrząsy parasejsmiczne z zastosowaniem przestrzennych modeli wybranych obiektów. Praca doktorska. Gliwice: Pol. Śl., 2004.
4. Santa Maria H., Alcaino P., Luwers C.: Experimental response of masonry walls externally reinforced with carbon fiber fabrics. Proceedings of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, San Francisco 2006, Paper No. 1402
5. 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.
6. Kubica J., Seweryn I., Wawrzynek A.: Behaviour and characteristic of clay brick masonry wallttes subjected to compressive cyclic loads. Proc. 14th Int. Brick & Masonry Conference, Sydney, Australia, 2008.

## INELASTIC NUMERICAL ANALYSIS OF THE CARBON FIBBER REINFORCED WALLS

Summary. Evaluation of the effort and level of the degradation of carbon fiber reinforced masonry structure is presented in this paper. A numerical model of the realistic wall specimen, subjected to monotonously increasing load (till total failure), is analysed. Two configurations of reinforcement- diagonal and parallel, corresponding to the experimental tests described in literature, are considered. It is assumed that masonry can be modelled by *Barcelona Model*. Additionally, during the whole loading process, the reinforcement can be treated as an elastic material and contact between masonry and carbon fibber ribbons is not damaged.