NUMERYCZNA SYMULACJA DZIAŁANIA WSTRZĄSU SEJSMICZNEGO NA BUDYNEK MUROWY Z ZASTOSOWANIEM PLASTYCZNO-DEGRADACYJNEGO MODELU MATERIAŁU

ANDRZEJ CIŃCIO, MAGDALENA MROZEK, DAWID MROZEK

Katedra Teorii Konstrukcji Budowlanych, Politechnika Śląska e-mail: <u>andrzej.cincio@polsl.pl, magdalena.mrozek@polsl.pl</u>, <u>dawid.mrozek@polsl.pl</u>

<u>Streszczenie</u>. W artykule przedstawiono symulację działania wstrząsu sejsmicznego, realizowanego jako czasowa analiza dynamiczna (całkowanie równań ruchu), na płaski tarczowy model dwumateriałowej (mur, beton) ściany budynku oraz przestrzenny model budynku niskiego. Zamieszczono wybrane wyniki analiz z zastosowaniem modelu Barcelona (m.in. mapy zniszczenia materiału i mapy rozkładu naprężeń) oraz porównano je z wynikami uzyskanymi z zastosowaniem liniowosprężystego modelu materiału.

1. WSTĘP. SKRÓCONY OPIS MODELU BARCELONA

Problematyka modelowania budynków murowych należy do stosunkowo złożonych zadań numerycznych. Spowodowane jest to niewątpliwie złożonością przestrzennego modelu geometrycznego budynku, który w metodzie elementów skończonych może być konstruowany z zastosowaniem powłokowych elementów skończonych. Dodatkowa trudność dotyczy modelowania materiału konstrukcyjnego budynków wykonanych elementów Z drobnowymiarowych. Złożone fizykalno-mechaniczne właściwości muru konstrukcyjnego, będącego materiałem typu kompozytowego, składającego się z dwóch różniących się (m.in. modułem odkształcalności oraz wytrzymałością) materiałów tj. drobnowymiarowych ceramicznych cegieł połączonych wapienną lub cementowo-wapienną zaprawą, wymaga zastosowania bardziej wyrafinowanego modelu. W przypadku obciażeń o charakterze cyklicznym, w tym także obciążeń typu sejsmicznego, niezbędne jest uwzględnienie przyrostu odkształceń niesprezystych oraz opisanie progresywnego przyrostu zniszczenia materiału. W artykule mur konstrukcyjny traktowany jest jako materiał homogeniczny z uwzględnieniem właściwości pozasprężystych.

W obliczeniach wykorzystano plastyczno-degradacyjny model betonu znany w literaturze jako Model Barcelona (MB), sformułowany przez Lublinera i in. 1989 [1] oraz zmodyfikowany przez Lee i in. [2]. Propozycję adaptacji modelu do opisu muru konstrukcyjnego podał A. Cińcio [3]. Model Barcelona wywodzi się z plastycznej mechaniki zniszczenia (kombinacji przyrostowej teorii plastyczności oraz kontynualnej mechaniki zniszczenia), dzięki czemu możliwe jest uwzględnienie wpływu przyrastającego zniszczenia materiału na odpowiedź modelu w kolejnych cyklach obciążenia. Osiągane jest to poprzez odpowiadającą bieżącej wielkości zniszczenia redukcję wartości parametrów materiałowych.

Sprzężenie sprężysto - plastycznej charakterystyki materiału z opisem jego zniszczenia zrealizowane jest poprzez wyrażenie równań konstytutywnych teorii plastyczności za pomocą naprężeń efektywnych.

Z punktu widzenia przyrostowej teorii plastyczności MB charakteryzuje powierzchnia plastyczności (patrz rys.1) będącą rozszerzeniem klasycznego stożka modelu Druckera-Pragera, w którym przekrój dewiatorowy jest niekołowy oraz występuje niestowarzyszone prawo płynięcia i nieliniowe prawo izotropowego zniszczenia. Natomiast w aspekcie kontynualnej mechaniki zniszczenia BM charakteryzuje bidysypacyjna, izotropowa degradacja materiału, opisana dwoma skalarnymi zmiennymi degradacji materiału: d_t i d_c , odpowiednio dla stanu rozciągania i ściskania, przyjmującymi wartości z przedziału <0,1>

(0- oznacza brak zniszczenia, 1 - całkowite zniszczenie). Zmienne te, określane na podstawie niezależnych funkcji zniszczenia materiału, mogą zostać ze sobą powiązane, opisując w modelu - potwierdzony doświadczalnie - wpływ degradacji materiału ściskanego d_c na wielkość degradacji materiału rozciąganego d_t , po zmianie znaku naprężenia.



Rys.1. Powierzchnia plastyczności: a) w płaszczyźnie (s_1, s_2), b) w przekroju merydialnym (p,q - niezmienniki tensora naprężenia, α, β, K_c – parametry modelu)

Implementacja modelu Barcelona w programie ABAQUS wymaga określenia, oprócz granic plastyczności (jednoosiowej na rozciąganie i ściskanie oraz dwuosiowej na ściskanie), także prawa płynięcia, w postaci dwóch funkcji wzmocnienia materiału (niezależnie dla rozciągania i ściskania). Niezbędna jest również definicja powierzchni potencjału plastycznego dla niestowarzyszonego prawa płynięcia, w postaci zmodyfikowanej parabolicznej wersji klasycznego stożka Druckera-Pragera. Natomiast dla specyfikacji prawa zniszczenia konieczne jest określenie dwóch niezależnych funkcji degradacji materiału (dla rozciągania i ściskania). Wymienione funkcje wzmocnienia materiału i jego degradacji określa się w programie ABAQUS w prosty sposób, poprzez podanie skończonego zbioru wartości funkcji.

2. PREZENTACJA MODELI OBLICZENIOWYCH

Symulację działania wstrząsu sejsmicznego na budowle przeprowadzono na dwóch typach modeli: płaskiej (2D) tarczowej ściany oraz przestrzennego (3D) powłokowego modelu budynku. W obu przypadkach uwzględniono zarówno elementy betonowe (tj. betonowe stropy, nadproża i wieńce) jak również elementy o parametrach materiałowych charakteryzujących mur konstrukcyjny (ściany zewnętrzne i wewnętrzne).

2.1. Tarczowy model płaskiej ściany budynku

Wymieniony model stanowi wydzieloną ścianę frontową z przestrzennego modelu budynku niskiego. Kształt ściany oraz podział na strefy materiałowe przedstawiono na rys. 2a. Natomiast na rys. 2b pokazano przyjętą w analizach regularną siatkę dyskretyzacyjną MES składającą się z 4-węzłowych elementów skończonych płaskiego stanu naprężenia o wymiarze 10x10 cm. Regularna siatka dyskretyzacyjna pozwala zminimalizować wpływ kształtu i wielkości ES na rozkład zniszczenia modelu. Ogółem model zawiera 6039 ES, co daje 13008 stopni swobody.



Rys.2 a) Geometria modelu 2D tarczowej ściany, b) siatka MES o wymiarach ES 10x10 cm

2.2. Przestrzenny model budynku niskiego

Przestrzenny model budynku niskiego (rys.3) o gabarytach 8,7 x 8,7 x 9,4 m charakteryzuje się brakiem symetrii. Dyskretyzację w MES przeprowadzono za pomocą kwadratowych (15 x 15 cm) 4-węzłowych elementów powłokowych typu S4R o łącznej liczbie 25 504 ES, co daje 154 446 stopni swobody.



Rys.3. Siatka ES 15x15 cm modelu budynku przestrzennego

Rozważano dwa warianty modeli budynku, różniących się sposobem modelowania połączenia stropów ze ścianami (połączenie typu przegubowego oraz pełne utwierdzenie). Nie stwierdzono znaczących różnić w odpowiedzi tych modeli, dlatego w dalszej części artykułu zaprezentowano wybrane wyniki obliczeń dla wariantu z połączeniem sztywnym stropów i ścian budynku.

2.3. Charakterystyka obciążenia oraz przyjętych parametrów materiałowych

W analizach numerycznych uwzględniono obciążenie ciężarem własnym konstrukcji (pierwszy krok - analiza statyczna), a następnie przeprowadzono symulację działania wstrząsu sejsmicznego (drugi krok - analiza dynamiczna), określonego w modelu wymuszeniem kinematycznym podpór zgodnym z akcelerogramem trzęsienia ziemi zarejestrowanego w 1967r. w indyjskim mieście Koyna (rys. 4a i b). Sygnał ten charakteryzuje się 10 sek przebiegiem oraz magnitudą równą 6,5 w skali Richtera. Zadanie rozwiązano z zastosowaniem metody całkowania równań ruchu układu dynamicznego w MES, przy przyjęciu dyskretyzacji czasu (kroku czasowego) równego 0,01 sek, co odpowiada częstotliwości próbkowania akcelerogramu.



Rys.4. Akcelerogramy przyjęte w symulacji działania wstrząsu sejsmicznego: a) składowa pozioma, b) składowa pionowa

Założono w modelu tłumienie materiałowe określone za pomocą współczynnika tłumienia odpowiadającego wartości 5% tłumienia krytycznego. Wartości wybranych parametrów materiałowych modelu Barcelona dla muru i betonu podano w tabeli 1, w tym odpowiednie granice plastyczności (jedno i dwuosiowa na ściskanie, jednoosiowa na rozciąganie) specyfikujące kształt powierzchni plastyczności oraz kąt dylatacji i współczynnik *e* determinujące kształt powierzchni potencjału plastycznego, niezbędnej dla określenia niestowarzyszonego prawa płynięcia. Dodatkowo dla porównania rozwiązano oba modele numeryczne przy założeniu liniowosprężystego modelu materiału.

Tabela 1. Zestawienie parametrów materiałówo-nzycznych			
PARAMETR		MUR	BETON
Gęstość [kg/m ³]	ρ	1800	2500
Moduł Younga [GPa]	E	2,1	30
Współczynnik Poisona	n	0,25	0,17
Granica plastyczności przy jednoosiowym ściskaniu [MPa]	S_{c0}	1,407	5,333
Granica plastyczności przy dwuosiowym ściskaniu [MPa]	S_{b0}	1,871	6,186
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	S_{cu}	2,1	16,0
Granica plastyczności przy jednoosiowym rozciąganiu [MPa]	S_{t0}	0,4	1,6
Kąt dylatacji [°]	У	25	15
Współczynnik kształtu południków powierzchni potencjału	e	0,1	0,1

Tabela 1. Zestawienie parametrów materiałowo-fizycznych

Ze względu na ograniczoną objętość artykułu nie zamieszczono przyjętych wykresów funkcji wzmocnienia i degradacji materiału; można je odnaleźć w pracy [6]

3. PREZENTACJA WYBRANYCH WYNIKÓW PRZEPROWADZONYCH ANALIZ

3.1. Mapy degradacji materiału

Plastyczno - degradacyjny model materiału (MB) pozwala na określenie obszarów modelu w pierwszej kolejności narażonych na powstanie zarysowań i pięknieć. Obszary te na mapach zniszczenia (rys. 5 i 6) uwidocznione są poprzez zaciemnienie (im bliżej czerni tym zniszczenie większe). Na rys. 5. przedstawiano mapy degradacji dla modelu 2D tarczowej ściany na końcu wymuszenia, opisane niemalejąca zmienną zniszczenia przy rozciąganiu d_t , zmienną zniszczenia przy ściskaniu d_c oraz zmienną sumarycznego zniszczenia d (oznaczoną SDEG) wynikającej z obu wcześniej wymienionych zmiennych. W wyniku przeprowadzonych analiz numerycznych zaobserwowano, że najczęstszym miejscem pojawienia się rys i pęknięć są obszary przylegające do otworów okiennych i drzwiowych, a także okolice filarków międzyokiennych. Zauważono również, że pionowa składowa wstrząsu generuje w modelu pojawienie się pionowych rys w betonowych nadprożach.



Rys. 5. Mapy degradacji materiału w modelu tarczowym na końcu analizy (t=10sek) określone zmienną zniszczenia: a) SDEG, b) d_c , c) d_t

Podobny obraz zniszczenia zaobserwowano w przypadku 3D modelu budynku. Rys. 6. przedstawia mapę degradacji wyróżnionej z budynku ściany frontowej, w chwili czasowej t=3,4 sek odpowiadającej ekstremum odpowiedzi przemieszczeniowej modelu. W stosunku do niezamieszczonej w artykule mapy degradacji na końcu analizy (t=10 sek), która jest względnie symetryczna, mapy zniszczenia na rys. 6. są bardziej niesymetryczne, z przewagą zniszczenia po stronie prawej. Zauważyć można również częściową redukcję degradacji materiału, w historii analizy, powstałej podczas rozciągania przy przejściu w stan ściskania, co znajduje potwierdzenie w badaniach laboratoryjnych.



Rys. 6. Mapy degradacji materiału w 3D modelu budynku dla chwili czasowej t=3,4 sek określone zmienną zniszczenia: a) SDEG, b) d_c , c) d_t

3.2. Mapy rozkładu naprężeń

Istotne różnice pomiędzy odpowiedzią dwóch wariantów modelu budynku różniących się przyjętymi konstytutywnymi modelami materiałowymi (liniowosprężystym i MB) można zaobserwować porównując mapy naprężeń poziomych S_{11} i pionowych S_{22} . Na rys. 6. przedstawiono wymienione porównanie map rozkładu naprężeń poziomych dla 3D modelu budynku z wyłączeniem elementów betonowych w chwili czasowej t=3,4 sek. Skalę map naprężeń dobrano tak, aby wyróżnić obszary, w których występują naprężenia rozciągające (stopień szarości koloru odpowiada wielkości naprężenia). Możemy zaobserwować, że w modelu liniowosprężystym (rys. 7a), występują obszary o naprężeniach przekraczających wartość granicy plastyczności przy rozciąganiu dla muru (oznaczone ciemnym kolorem). W przypadku analogicznej mapy naprężeń nie występują przekroczenia dozwolonej granicy plastyczności S_{t0} .



Rys. 7. Mapy naprężeń poziomych w 3D modelu budynku dla chwili czasu t=3,4sek i modelu materiałowego: a) liniowosprężystego, b) modelu Barcelona

Na kolejnym rysunku (rys. 8) przestawiono porównanie map naprężeń pionowych w tarczowym modelu ściany z wyłączeniem elementów betonowych na końcu analizy (t=10 sek) dla dwóch wymienionych modeli konstytutywnych materiału. Mapy te odpowiednio wyskalowano tak, aby zobrazować wyłącznie rozkład naprężeń ściskających. Jak można zauważyć, w przypadku modelu plastyczno - degradacyjnego (MB), na końcowy stan naprężenia wpływ ma cała historia obciążenia, dlatego uzyskiwany końcowy poziom wytężenia prezentowanej ściany budynku jest większy aniżeli w przypadku modelu liniowosprężystego.



Rys. 8. Mapy naprężeń pionowych w modelu tarczowym dla 10 sek: a) model liniowosprężysty, b) model Barcelona

3.3. Odpowiedź przemieszczeniowa

Przedstawiony na rys. 8 wykres odpowiedzi przemieszczeniowej modelu liniowosprężystego oraz modelu opisanego modelem Barcelona stanowi względną wartość przemieszczenia poziomego węzła dyskretnego znajdującego się w prawym, górnym narożu ściany frontowej (rys. 2a) w stosunku do wymuszanego przemieszczenia kinematycznego podpór modelu. Jak nietrudno zauważyć, odpowiedź modelu z zastosowaniem MB, dzięki uwzględnieniu rozproszenia części energii wstrząsu na odkształcenia pozasprężyste, pozwala uzyskać (po upływie 2 sek) bardziej korzystną odpowiedź przemieszczeniową, wyrażoną mniejszymi chwilowymi wartościami przemieszczeń.



Rys. 8. Porównanie względnej odpowiedzi przemieszczeniowej wybranego punktu modelu 2D tarczowej ściany dla modelu materiałowego: liniowosprężystego oraz modelu Barcelona

4. WNIOSKI Z PRZEPROWADZONYCH ANALIZ

Przeprowadzone obliczenia prowadzą do następujących wniosków i sformułowań:

- największe obszary degradacji materiału koncentrują się wokół otworów okiennych i drzwiowych oraz w filarkach międzyokiennych,
- w modelu liniowosprężystym występują fikcyjne spiętrzenia naprężeń przekraczające wartość granicy plastyczności przy rozciąganiu,
- mapy naprężeń dla modelu liniowosprężystego na końcu analizy nie różnią się istotnie od analogicznych map na początku analizy, tj. przed przyłożeniem obciążenia dynamicznego; nie jest w tym przypadku istotna historia obciążenia,
- mniejsze wartości chwilowych przemieszczeń (rys. 8) świadczą o dyssypacji części energii wstrząsu sejsmicznego na odkształcenia plastyczne, uwzględnianej w modelu Barcelona.

Podsumowując można stwierdzić, że zastosowanie modelu plastyczno - degradacyjnego (modelu Barcelona) pozwala w sposób bardziej rzetelny uwzględnić pracę rzeczywistego

materiału, dzięki czemu możliwe jest uwiarygodnienie odpowiedzi układu dynamicznego modelu budynku poddanego działaniu wstrząsu sejsmicznego.

PODZIĘKOWANIA

Publikacja powstała przy finansowym wsparciu Komitetu Badań Naukowych w Warszawie - grant nr 1505/T07/2005/28. Obliczenia numeryczne wykonano w Akademickim Centrum Komputerowym AGH-Cyfronet na podstawie przyznanego grantu obliczeniowego nr KBN/SGI2800/PŚląska/023/2003.

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, s. 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, s. 937-956.
- 3. Cińcio A.: Numerical analysis of dynamic resistance on semi-seismic tremors of low buildings with application of spatial object models (in Polish).PhD Thesis, Gliwice 2004.
- 4. Wawrzynek A., Cińcio A.: Numerical verification of the Barcelona Model adapted for brick walls. Proc. of the 7th International Masonry Conference. London, 2006.
- Cińcio A., Mrozek M., Mrozek D.: Analiza wrażliwości odpowiedzi układu dynamicznego w zakresie pozasprężystym na gęstość podziału dyskretnego w MES, Proc. 5th International Conference on New Trends in Static and Dynamic of Buildings. Bratislava 19-20.10.2006 (Słowacja), s. 65-68.
- 6. Mrozek M., Mrozek D.: Numeryczna analiza porównawcza dynamicznej odpowiedzi modelu płaskiej ściany oraz przestrzennego budynku niskiego w zakresie pozasprężystym. Magisterska rozprawa dyplomowa promotor A. Cińcio. Gliwice, 2006.

NUMERICAL SEISMIC SIMULATION OF MASONRY BUILDING STRUCTURE WITH APPLICATION PLASTYCITY-DAMAGE MATERIAL MODEL

<u>Summary</u>. A task of modelling of building structures subjected to cyclic and dynamic loads belongs to complex numerical problems, especially when plasticity and brittle behaviour is taken into account in the computers analysis. In the paper a concrete model, based on the theory of incremental elastoplasticity and mechanics of continuum damage, was proposed by Lubliner at. al. in 1989 and modified by Lee. The model was applied to the dynamic response analysis (THA) of a wall structure and a building structure for two material models of masonry: linear-elastic and inelastic - damage one.