

NUMERYCZNA ANALIZA PRACY ŚCIAN MUROWYCH Z ZASTOSOWANIEM MODELU SPRĘŻYSTO-PLASTYCZNEGO Z DEGRADACJĄ

MAREK BARTOSZEK¹, JAN FEDOROWICZ¹

¹*Katedra Teorii Konstrukcji Budowlanych, Politechnika Śląska
e-mail: marek.bartoszek@polsl.pl, jan.fedorowicz@polsl.pl*

Streszczenie. W pracy omówiono problemy budowy i specyfikacji numerycznego modelu obliczeniowego trzech dużych fragmentów muru o różnych proporcjach wymiarów przy modelowaniu ich pracy za pomocą modelu sprężysto-plastycznego z degradacją. Przeanalizowano wpływ: degradacji materiału, usztywnienia, dodatkowego obciążenia pionowego konstrukcji, gęstości siatki dyskretnej, charakteru przebiegu charakterystyk σ – ε materiału przy ściskaniu i rozciąganiu oraz kształtu funkcji degradacji na nośność i odkształcalność analizowanych fragmentów muru poddanych poziomemu ścinaniu.

1. WSTĘP

Posadowienie budowli o konstrukcji murowej na podłożu silnie odkształcalnym wymaga rozwiązania problemu oceny wytrzymałości konstrukcji murowej poddanej złożonym stanom obciążenia. Podobne zjawiska występują w konstrukcjach posadowionych w pobliżu wykonywanych głębokich wykopów, w obrębie zasięgu wpływu prac związanych z budową tuneli lub przejść podziemnych, a także w przypadku lokalizacji konstrukcji murowej w obrębie wpływów eksploatacji górniczej. W myśl standardów współczesnych analiz obliczeniowych można przyjąć, że w takich wypadkach właściwa ocena zachowania konstrukcji murowej wymaga analizy numerycznej z zastosowaniem zaawansowanych modeli konstytutywnych. W analizach inżynierskich obecnie skutki takich wpływów ocenia się w konstrukcji dwojako:

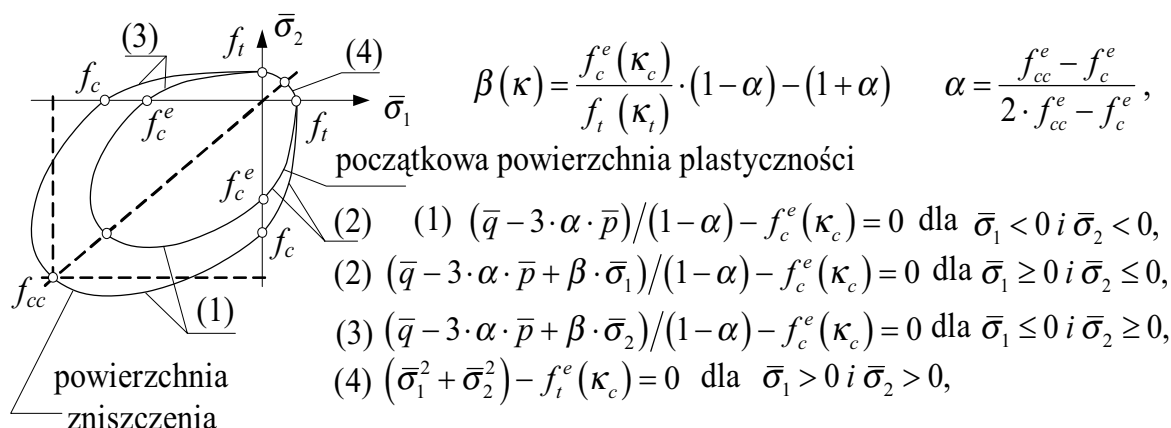
- w sposób klasyczny
- numerycznie w modelach MES.

W pierwszym przypadku przy tworzeniu schematów obliczeniowych budowla-podłoże górnicze wykorzystywane są metody mechaniki budowli [11, 12, 14,], w drugim wykorzystywane są na ogół liniowo-sprężyste związki konstytutywne w opisie konstrukcji i podłoża. Przykładowo dla konstrukcji ścianowych na terenach górniczych zgodnie z [11] ocenę zagrożenia zarysowaniem (spękaniem) ścian konstrukcji wyraża się przez sprawdzenie warunku – nieprzekroczenia pewnej wartości odkształcenia postaciowego ścian θ_b konstrukcji. Potrzebne w takiej analizie bezpieczeństwa konstrukcji wielkości powstających odkształceń, a w szczególności ekstremalne wartości θ_b oraz ich lokalizację, można uzyskać, wykorzystując numeryczne modele MES.

W pracy przedstawia się próbę oceny zachowania się dużych fragmentów muru o różnych proporcjach wymiarów w przypadku modelowania ich pracy przy poziomym ścinaniu za pomocą modelu sprężysto-plastycznego z degradacją. Omówione zostaną wyniki obliczeń – wpływu degradacji na wyężenie i deformację muru, wpływu usztywnienia i dodatkowego obciążenia pionowego oraz wpływu gęstości siatki dyskretnej oraz charakteru przebiegu charakterystyk σ – ε i funkcji degradacji.

2. KRÓTKA CHARAKTERYSTYKA MODELU

W pracach [16, 17, 19] przedstawiono zastosowanie nowego sprężysto – plastyczno – kruchego modelu materiału z degradacją. Jego udoskonaloną wersję (po wprowadzeniu dwóch zmiennych zniszczenia d_t i d_c , umożliwiających zróżnicowanie odpowiedzi materiału na rozciąganie oraz ściskanie) zaimplementowano w komercyjnym pakiecie *MES ABAQUS* pod nazwą *Damage Concrete Model* [10]. W dalszej części pracy będzie on nazywany (e-p-d). Jest to model trzyparametrowy z niestowarzyszonym prawem płynięcia o nieliniowym wzmocnieniu izotropowym typu dwumechanizmowego, opartym na hipotezie wzmocnienia odkształceniowego. Powierzchnię plastyczności (rys. 1) stanowi rozszerzenie powierzchni klasycznego modelu *Druckera-Pragera* [10, 16, 17, 19].



Rys.1. Powierzchnia plastyczności i powierzchnia zniszczenia modelu (e-p-d) dla płaskiego stanu naprężenia

Podstawą teoretyczną modelu (e-p-d) jest plastyczna mechanika zniszczenia. Sprężenie sprężysto - plastycznej charakterystyki materiału z opisem jego zniszczenia realizowane jest poprzez wyrażenie równań konstytutywnych teorii plastyczności za pomocą naprężeń efektywnych. Model (e-p-d) charakteryzuje izotropowa degradacja materiału, opisana dwoma zmiennymi degradacji materiału: d_t i d_c , odpowiednio dla stanu rozciągania i ściskania. Zmienne te, wyznaczone na podstawie niezależnych funkcji zniszczenia materiału, są ze sobą powiązane. Opisują one w modelu dwa zjawiska: zarówno potwierdzony doświadczalnie wpływ degradacji materiału ściszanego d_c , na wielkość degradacji materiału rozciąganego d_t , po zmianie znaku naprężenia; jak i częściowe odtwarzanie pierwotnej sztywności materiału, przy przejściu z rozciągania do ściskania materiału, wynikające z zamykania się rys powstałych w materiale kruchym.

Po przejściu w stan niesprężystej pracy materiału funkcja wzmocnienia determinuje dalszą ewolucję naprężeń w modelu, natomiast niemalejąca funkcja degradacji (rys. 4) określa wielkość zniszczenia materiału. Zadanie odciążenia powoduje powrót do stanu sprężystego,

przy czym zapamiętywana jest ostatnia konfiguracja powierzchni obciążenia oraz końcowe wartości zmiennych degradacji d_c i d_t , a następnie modyfikowana jest sztywność materiału poprzez redukcję modułu sprężystości.

3. ZACHOWANIE KONSTRUKCJI MUROWEJ W MODELU (e-p-d)

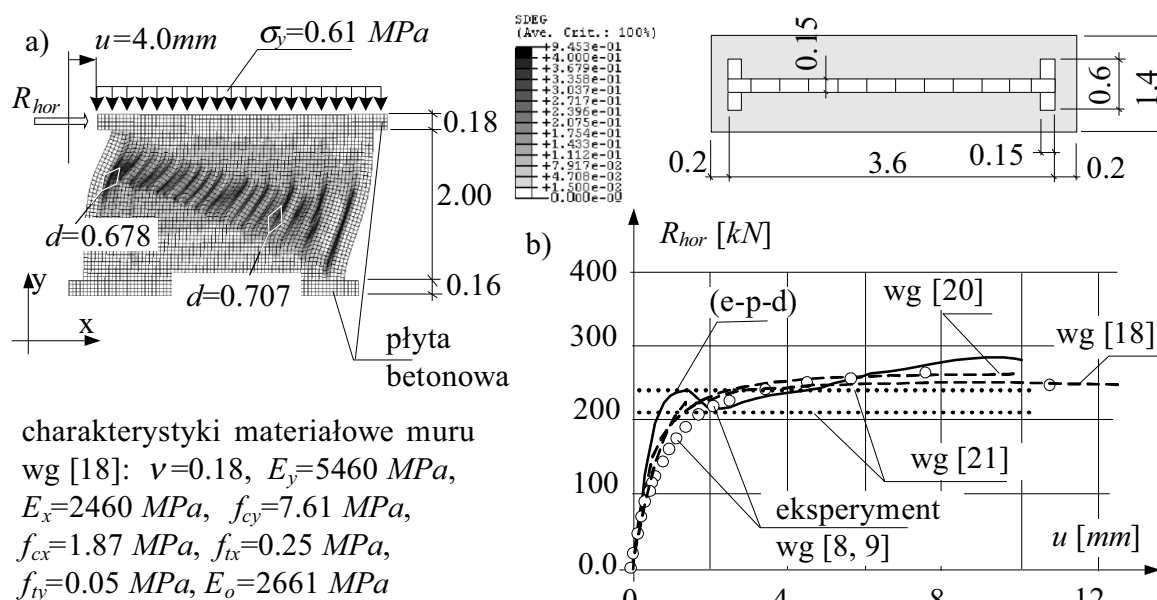
3.1. Analizy podstawowe

Opis pracy muru z wykorzystaniem stosowanego modelu sprężysto-plastycznego z degradacją (e-p-d), niesie ze sobą szereg uproszczeń w opisie rzeczywistości. Uzasadnieniem dopuszczalności takiego postępowania są dotychczasowe wyniki uzyskane w modelu (e-p-d) w analizach konstrukcji murowych – m.in. [1÷7, 22].

Procedura numerycznego odtworzenia w modelu (e-p-d) laboratoryjnych testów ścinania modeli murowych (z [13]) została szczegółowo przedstawiona w [1, 5, 6, 7]. Wyniki testów parametrycznych potwierdziły, że model (e-p-d) umożliwia oszacowanie stanów wyęteżenia i degradacji w murowej konstrukcji ścianowej doznającej odkształceń postaciowych.

Wybrane wyniki badania numerycznego ilustrujące możliwości odtworzenia w modelu badań laboratoryjnych elementów konstrukcji pracujących w złożonych stanach naprężenia i odkształcenia przedstawia rys. 2.

Na rys. 2 pokazano wyniki obliczeń numerycznych zadania wielokrotnie powtarzanego w literaturze. Pokazane na rys. 2 wybrane wyniki badań laboratoryjnych jednej ze ścian murowych zostały wykonane pod koniec lat 80. ubiegłego wieku przez dwóch badaczy szwajcarskich (Ganz H. R., Thürlimann B) [8, 9]. Opis obliczeń numerycznych, odtwarzających te badania wykonywane przez różnych badaczy za pomocą różnych modeli konstytutywnych (w tym również modeli ortotropowych), można znaleźć w [1, 4].



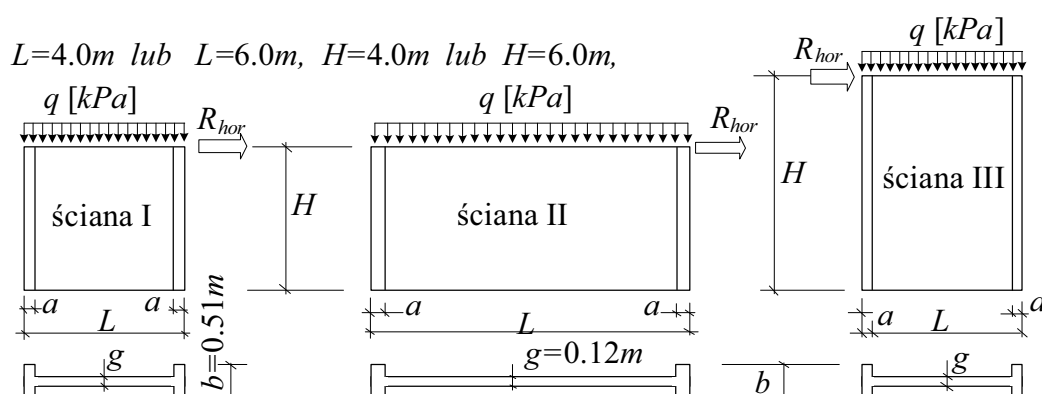
Rys. 2. Numeryczne odtworzenie zadania Gansa- Thürlimanna [8,9]

Omawianą ścianę obliczono numerycznie w modelu MES z kwadratowych czterowęzłowych elementów skończonych o wymiarach $0.5 \times 0.5 \text{ m}$ z zastosowaniem modelu (e-p-d). Na rys. 2a pokazano mapę degradacji materiału przy przesunięciu poziomo górnej płyty względem dolnej o 4 mm, a na rys. 2b wykres zmian wartości siły poziomej potrzebnej

do przesunięcia górnej płyty przy pionowym obciążeniu powodującym stan naprężenia w ścianie na poziomie $\sigma_y = 0.61 \text{ MPa}$. Tłem otrzymanego rozwiązania są podawane w literaturze wyniki obliczeń numerycznych innych badaczy otrzymanych za pomocą innych modeli konstytutywnych.

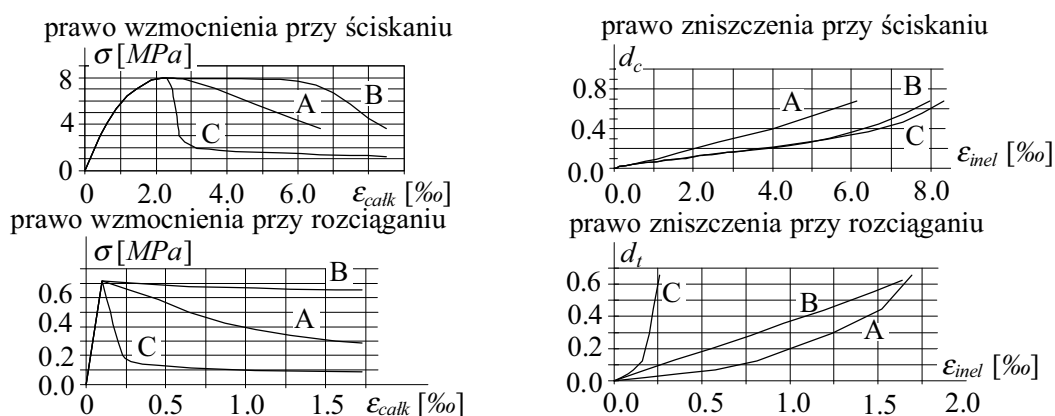
3.2. Charakterystyka analizowanych ścian murowanych

Analizowano trzy wolno stojące ściany z cegły pełnej wzmocnione na pionowych brzegach pilastrami i oznaczone jako ściana I, ściana II i ściana III (rys. 3). Obciążenie ścian stanowiły: ciężar własny $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$, wstępne dociążenie pionowe q oraz wymuszone przemieszczenie poziome δ górnego brzegu tarczy. Założono przy tym, że górny brzeg ściany ma ograniczenia swobody pionowego przemieszczania się w trakcie dokonywania przemieszczeń poziomych.



Rys.3. Geometria i obciążenie analizowanych ścian

Zadanie rozwiązano metodą elementów skończonych z wykorzystaniem modelu sprężysto-plastycznego z degradacją (e-p-d). Do budowy modelu obliczeniowego wykorzystano elementy skończone kwadratowe czterowęzłowe z redukcją punktów całkowania.



Rys.4. Charakterystyki materiałowe dla muru

Zadanie rozwiązywano wielokrotnie dla różnych kombinacji obciążenia p , różnych geometrii ściany oraz zastosowanej różnej gęstości podziału na elementy skończone. Szczegółową specyfikację parametrów przyjętych do analiz numerycznych podano w tabelicy 1.

Własności wytrzymałościowe i odkształceniowe muru wynikające z wytrzymałości cegły i zaprawy przyjęto jak dla materiału zhomogenizowanego. Przyjęte do obliczeń wartości tych

parametrów podano na rys. 5, a wykresy charakterystyk naprężenie-odkształcenie, prawa wzmocnienia i funkcje degradacji materiału opracowane na podstawie badań opisanych w [4] pokazano dla ściskania i dla rozciągania na rys. 4.

Tabela 1 Oznaczenia modeli i specyfikacja parametrów do analizy numerycznej

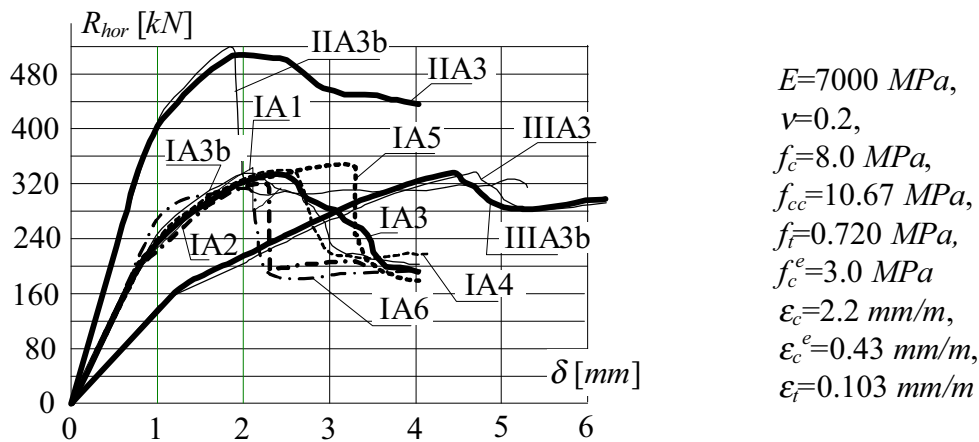
Model	H/L	degradacja	q [kPa]	a [m]	siatka MES [m]	materiał rys. 4
IA1	1	Tak	100	0.12	0.05 x 0.05	A
IA2	1	Tak	100	0.12	0.10 x 0.10	A
IA3	1	Tak	100	0.12	0.17 x 0.17	A
IA3b	1	Tak	200	0.12	0.17 x 0.17	A
IA4	1	Tak	100	0.12	0.24x 0.24	A
IA5	1	Nie ma	100	0.12	0.17 x 0.17	A
IA6	1	Tak	100	0.24	0.17 x 0.17	A
IIA3	0.667	Tak	100	0.12	0.17 x 0.17	A
IIA3b	0.667	Tak	200	0.12	0.17 x 0.17	A
IIIA3	1.5	Tak	100	0.12	0.17 x 0.17	A
IIIA3b	1.5	Tak	200	0.12	0.17 x 0.17	A
IB3	1	Tak	100	0.12	0.17 x 0.17	B
IB3b	1	Tak	200	0.12	0.17 x 0.17	B
IIB3	0.667	Tak	100	0.12	0.17 x 0.17	B
IIB3b	0.667	Tak	200	0.12	0.17 x 0.17	B
IIIB3	1.5	Tak	100	0.12	0.17 x 0.17	B
IIIB3b	1.5	Tak	200	0.12	0.17 x 0.17	B
IC3	1	Tak	100	0.12	0.17 x 0.17	C
IC3b	1	Tak	200	0.12	0.17 x 0.17	C
IIC3	0.667	Tak	100	0.12	0.17 x 0.17	C
IIC3b	0.667	Tak	200	0.12	0.17 x 0.17	C
IIIC3	1.5	Tak	100	0.12	0.17 x 0.17	C
IIIC3b	1.5	Tak	200	0.12	0.17 x 0.17	C

3.3. Analiza wyników obliczeń

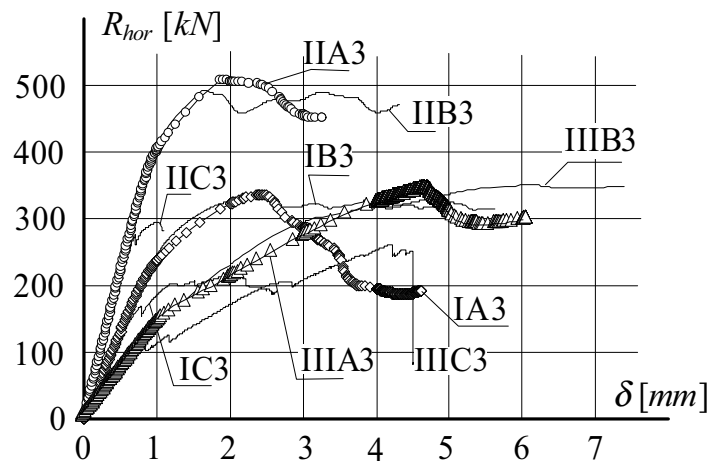
Wybrane wyniki obliczeń zestawiono na rysunkach 5÷7. Przedstawiają one wykresy zmian poziomej siły R_{hor} potrzebnej do przemieszczenia poziomego górnego brzegu względem dolnego o wartość δ . Zależności te wskazują, że pionowe dociążenie ściany z poziomu wstępnego $\sigma_y=100$ kPa do poziomu $\sigma_y=200$ kPa spowodowało jedynie nieznaczne jej usztywnienie (krzywe z oznaczeniem 'b' na rys. 5 i rys. 7). Nośność ściany nie uległa zmianie, a osiągnięcie wartości szczytowej siły R_{hor} nastąpiło wcześniej przy przesunięciu δ mniejszym o ok. 10%. Wartość obciążenia wpłynęła znacząco na nośność ściany jedynie w przypadku materiału kruchego – typu C (rys. 7b – rozwiązanie IIC3 i IIC3b), ze względu na szybko postępującą degradację przy rozciąganiu (rys. 4).

Znacznie większe znaczenie dla zachowania się ściany mają proporcje jej wymiarów. Jeżeli przyjąć ścianę (I) o proporcji $H/L=1$ jako porównawczą, to wówczas dla ściany o $H/L=1.5$ jej sztywność mierzona nachyleniem początkowej części wykresu zmalała o ok. 45% a dla ściany o $H/L=0.667$ wzrosła o ok. 21%.

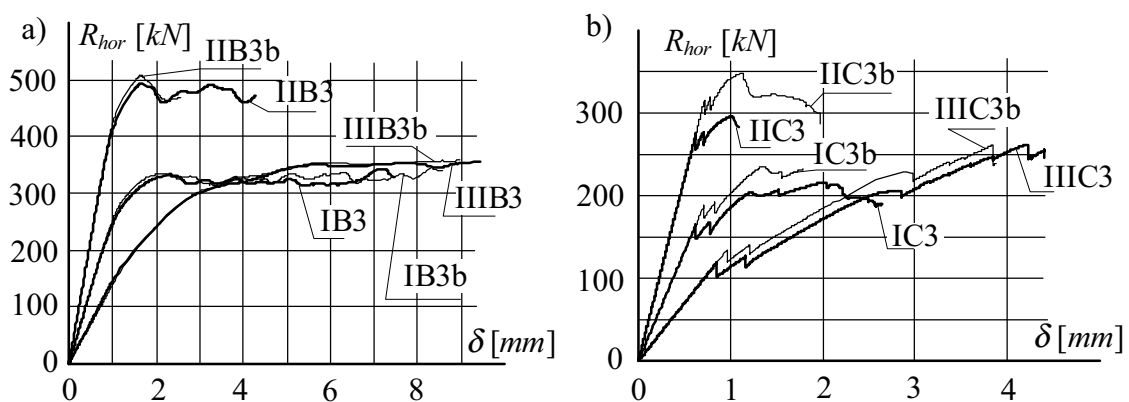
Uwzględnienie degradacji (typu modelu konstytutywnego) w obliczeniach numerycznych ściany można zaobserwować porównując wykres IA3 z wykresem IA5 (bez degradacji) na rys. 5.



Rys.5. Wykres zależności: siła pozioma R_{hor} – przemieszczenie poziome δ dla materiału A



Rys.6. Wykres zależności: siła pozioma R_{hor} – przemieszczenie poziome δ dla ścian I, II i III oraz typu materiału A, B, i C



Rys.7. Wykres zależności: siła pozioma R_{hor} – przemieszczenie poziome δ dla ścian I, II, III przy obciążeniu muru $q=100 \text{ kPa}$ i $q=200 \text{ kPa}$ i materiale: a) typu B, b) typu C

Widać, że uwzględnienie degradacji sztywności na nośność ściany przy ścinaniu ma niewielki wpływ (ok. 2-2.5%). Uwidacznia się natomiast ten wpływ w sposób istotny w ocenie sztywności ściany w zakresie pracy poza sprężystej (ok. 40-45%).

Podobnie wpływa na pracę ściany zwiększenie przekroju poprzecznego pilastrów skrajnych (wykres IA3 oraz IA6 z dwa razy większym $a=24$ cm). Porównując natomiast rozwiązania IA1, IA2, IA3 i IA4 z rys. 5, można stwierdzić, że zwiększenie gęstości siatki uwidoczniło się przede wszystkim w ocenie sztywności ścian, w pozasprężystym zakresie ich pracy. Gęstość siatki nie wpływa natomiast na ocenę nośności ściany. Oznacza to, że najrzadszy podział (elementy 0.24×0.24 m) jest wystarczający dla oceny nośności analizowanej ściany na ścinanie. Szczegółowa analiza map zmian odkształceń plastycznych, degradacji i rozkładu maksymalnych naprężeń głównych sugeruje trzy możliwe mechanizmy zniszczenia ściany w zależności od proporcji ich wymiarów. W świetle tych wyników [1] ściany o proporcjach zbliżonych do kwadratu są ścinane w przybliżeniu po przekątnej (kąąt nachylenia płaszczyzny ścięcia jest nieco mniejszy od 45°). W ścianach wydłużonych płaszczyzna ta jest niemal pozioma. Ściany wysokie natomiast ulegają zniszczeniu w pierwszej kolejności w środkowej części swojej powierzchni w płaszczyźnie niemal pionowej.

LITERATURA

1. Bartoszek M., Fedorowicz J.: Evaluation of the efficiency of (e-p-d) model applied for masonry structures. Proceedings on CD-ROM of the International Conference 70 Years of FCE STU, Slovakia, December 4-5, Bratislava 2008, p. 22.
2. Cińcio A.: Numeryczna analiza dynamicznej odporności niskiej zabudowy na wstrząsy parasejsmiczne z zastosowaniem przestrzennych modeli wybranych obiektów. D. Phil. Thesis. Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa, Gliwice 2004.
3. Fedorowicz J.: Criteria for evaluation of masonry-structure behaviour in mining areas. "Architecture Civil Engineering Environment" 2008, Vol. 1, No. 2, p. 35÷42.
4. Fedorowicz J.: Zagadnienia kontaktowe budowla-podłoże gruntowe. Część II. Kryteria tworzenia i oceny adekwatnych modeli obliczeniowych układów konstrukcja budowlana – podłoże poddane deformacjom o charakterze górniczym. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, nr 1805, seria Budownictwo, z. 114. Gliwice 2008.
5. Fedorowicz L., Fedorowicz J., Kubica J.: Adequacy of Barcelona model for behaviour evaluation of masonry structures subsoil being strongly deformed. Proceedings of the 8th International Conference on Computational Plasticity Held in Barcelona, Spain 507 September 2005, Edited by: D.R.J Owen, E.Oñate and B.Suárez, part 2, CIMNE Barcelona, 2005, p. 1015-1018, (full text on CD-ROM).
6. Fedorowicz L., Fedorowicz J.: Rules indispensable in order to use the isotropic elastic-plastic damage model for masonry effort evaluation. Proceedings of the 4nd International Conference on "New Trends in Statics and Dynamics of Buildings". Bratislava, Slovakia, October 20-21 2005, p. 123÷126. (full text on CD-ROM).
7. Fedorowicz L., Fedorowicz J.: Applying the numerical procedures in order to reproduce some selected laboratory tests and in situ observations concerning masonry structures subjected to the subsoil displacements. Proceedings of the 5th International Conference on Analytical Models and New Concepts in Concrete and Masonry Structures, AMCM'2005, Gliwice-Ustroń, June 12-14, 2005, p. 41÷42, Full Text on CD ROM.
8. Ganz H. R., Thürlimann B.: Design of masonry walls under normal forces and shear. Proceedings of the 8th International Brick/Block Masonry Conference, Dublin, Ireland, 1988, p. 1447÷1457.
9. Ganz H. R., Thürlimann B.: Tests on masonry walls under normal and shear loading (in German). Report No.7502÷4 Zurich: ETH Zurich Institute of Structural Engineering, 1984.

10. Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.: Dokumentacja programu ABAQUS v.6.3.1, m.in: Getting Started with ABAQUS/Standard: Interactive Version; ABAQUS/Standard User's Manual; ABAQUS/CAE User's Manual, ABAQUS Example Problems Manual, ABAQUS Theory Manual, 2002.
11. Instrukcja ITB 416/2006. Projektowanie budynków na terenach górniczych. Warszawa : Wyd. Inst. Tech. Bud., 2006.
12. Kotlicki W., Bociąga A.: Wytyczne projektowania budynków posadowionych bezpośrednio na podłożach silnie odkształcalnych. PSN-4/80. Centralny Ośrodek Badawczo-Projektowy Budownictwa Ogólnego, Warszawa 1981.
13. Kubica J.: Niezbrojone ściany murowe poddane odkształceniom postaciowym wywołanym nierównomiernymi pionowymi przemieszczeniami podłoża. Zeszyty Politechniki Śląskiej, seria Budownictwo, z. 96. Gliwice, 2003.
14. Kwiatek J. i in.: Ochrona obiektów budowlanych na terenach górniczych. Katowice : Wyd. Głównego Instytutu Górnictwa, 1997.
16. Lee J., Fenves G. L.: A plastic-damage concrete model for earthquake analysis of dams. "Earthquake Engineering and Structural Dynamics" 1998, Vol.27, p. 937÷956.
17. Lee J., Fenves G. L.: Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. "Journal of Engineering Mechanics" 1998, Vol.124, No.8, p. 892÷900.
18. Lourenço P. B.: Recent advances in modelling masonry structures. "Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas" 1998, Vol. 44, p. 27÷32.
19. 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.
20. Marfia S., Sacco E.: Numerical procedure for elasto-plastic no-tension model. "International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics," 2005, Vol. 6, p. 187 ÷199.
21. Milani G., Lourenço P. B., Tralli A.: A simple micro-mechanical model for the homogenised limit analysis of masonry walls. XV Congresso Italiano di Meccanica Computazionale, AIMETA Associazione Italiana di Meccanica Teorica e Applicata, 2004, p. 1÷4.
22. Wawrzynek A., Cińcio A., Fedorowicz J.: Numerical verification of the Barcelona model adapted for brick walls. Proceedings of the 7th International Masonry Conference – 2006 (7IMC), 30/31 October – 1 November, London 2006, p. 84.

NUMERICAL MODELING AND EFFORT-ANALYSES OF THE MASONRY WALLS USING ELASTIC-PLASTIC MODEL WITH DEGRADATION

Summary. Problems of building up numerical model utilising elastic-plastic material model with degradation were discussed. Three fragments of walls that differ in proportion of the spatial dimensions were tested under complex stress state. Focus was on influence of some factors on the deformability and load carrying capacity of the analysed fragments of walls. Those factors were: material degradation, finite mesh density, shape of constitutive model curves σ - ε (different for tension and compression). Additional vertical loading and vertical edges strengthening were also taken into consideration.