

ANALIZA WPŁYWU ZMIAN GEOMETRII NA PRACĘ OBCIĄŻONEGO USTROJU ŚCIANOWEGO W MODELU SPRĘŻYSTO – PLASTYCZNYM Z DEGRADACJĄ

MAREK BARTOSZEK, JAN FEDOROWICZ

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

Streszczenie. Praca poświęcona jest analizie numerycznej konstrukcji murowej, w której po zadaniu złożonego stanu obciążenia w zakresie poza sprężystym pracy materiału dokonuje się zmian jej geometrii przez wprowadzenie dużych otworów. Analizę numeryczną pracy statycznej oraz ocenę zachowania się konstrukcji murowej przeprowadzono na dużych fragmentach muru z wykorzystaniem sprężysto-plastycznego modelu z degradacją w programie Abaqus.

1. WSTĘP

W pracach [1] i [2] przeprowadzono numeryczne analizy zachowania się dużych fragmentów ścian murowych, poddanych najpierw pionowemu obciążeniu ściskającemu a następnie poziomemu ścinaniu, zrealizowanemu poprzez wymuszone przesunięcie poziome górnej krawędzi ściany względem dolnej. Obliczenia prowadzono dla obciążenia przekraczającego sprężysty zakres pracy materiału, wykorzystując sprężysto-plastyczny model z degradacją (e-p-d) [3].

W niniejszej pracy poszerzono zakres analizy numerycznej ścian rozpatrywanych w [1, 2] symulując zmianę ich geometrii. Takie sytuacje występują w przypadku wykonywania wszelkiego rodzaju remontów, rozbudowy, dobudowy bądź szeroko zakrojonych prac adaptacyjnych, przebudowy konstrukcji i remontów konstrukcji [4]. W takich przypadkach, pomimo dokonywania niejednokrotnie dość zasadniczych zmian w geometrii głównych, ścianowych elementów nośnych konstrukcji, w analizach statycznych nie uwzględnia się faktu, że zmiany te często przeprowadzane są pod częściowym lub nawet pełnym obciążeniem konstrukcji. W pracy założono, że zmian geometrii dokonuje się w ścianach obciążonych w sposób powodujący złożony stan wyężenia o intensywności przekraczającej sprężysty zakres pracy materiału ściany. Analizowano przy tym wpływ:

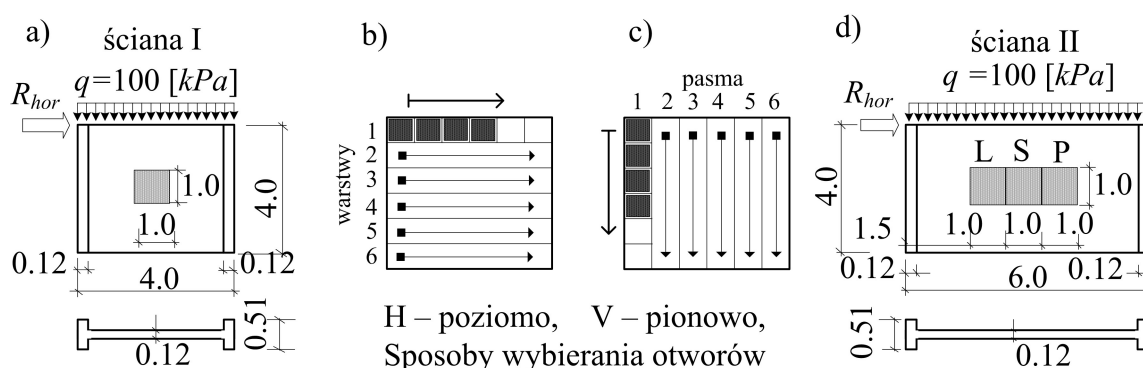
- zmian geometrii obciążonej ściany przez wycięcie w niej otworu,
- sposobu realizacji wycinania otworu (kolejności i kierunku wycinania poszczególnych elementów skończonych w modelu ściany),
- położenia otworu,

na ogólnie ocenianą nośność ściany i jej sztywność.

2. CHARAKTERYSTYKA ANALIZOWANYCH ŚCIAN

Dla dwóch ścian wybranych spośród analizowanych w [1, 2], pokazanych na rys. 1a i rys. 1d, przeprowadzono w pracy analizę wpływu zmian ich geometrii na sztywność i ogólną nośność ściany.

Obciążenie analizowanych ścian stanowiły: ciężar własny $\gamma=20 \text{ kN/m}^3$, wstępne dociążenie pionowe $q=100 \text{ kPa}$, 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. Zadanie rozwiązano metodą MES z wykorzystaniem dla materiału ściany modelu sprężysto-plastycznego z degradacją (e-p-d). Do budowy modelu obliczeniowego wykorzystano elementy skończone kwadratowe czterowęzłowe z redukcją punktów całkowania o wymiarach $0.17 \times 0.17 \text{ m}$.



Rys.1. Geometria, obciążenie i sposoby wybierania otworów w analizowanych ścianach:
a) geometria i obciążenie ściany I, b) wybieranie otworu poziomo warstwami, c) wybieranie otworu pionowo pasmami d) geometria i obciążenie ściany II

Zadanie w obu przypadkach rozwiązywano wielokrotnie. W pierwszej kolejności rozwiązywano ścianę pełną obciążoną ciężarem własnym poddaną obciążeniu pionowemu, a następnie ścinaną poziomo. Następnie rozwiązywano ścianę z otworem obciążoną ciężarem własnym, poddaną obciążeniu pionowemu i ścinaną poziomo. Kolejno w ścianie pełnej obciążonej ciężarem własnym i obciążeniem pionowym q poddanej poziomemu ścinaniu wycinano otwór. W przypadku ściany I otwór zlokalizowano w środku ściany, a dla ściany II w trzech różnych położeniach L, S i P - rys. 1d. Przeanalizowano trzy różne sposoby wycinania otworu: usuwanie elementów z całej powierzchni otworu równomiernie, usuwanie elementów warstwami poziomymi (rys. 1b) i usuwanie elementów pasmami pionowymi (rys. 1c). Analizę wpływu stanu wyężenia konstrukcji na skutki wycięcia otworu przeprowadzono, rozpoczynając wycinanie otworu dla różnych wartości poziomego przesunięcia δ górnej krawędzi ściany. Rozważono również wpływ powiększenia o 85% powierzchni otworu.

3. KRÓTKA CHARAKTERYSTYKA STOSOWANEGO MODELU MATERIAŁU

Ogólną postać warunku plastyczności stosowanego modelu materiału (e-p-d) wyrażoną za pomocą niezmienników (\bar{p}, \bar{q}) tensora naprężeń efektywnych $\bar{\sigma}$ przedstawia równanie:

$$f(\sigma, \kappa) \equiv \frac{1}{1-\alpha} \left(\bar{q} - 3 \cdot \alpha \cdot \bar{p} + \beta(\kappa) \cdot \langle \bar{\sigma}_{\max}^* \rangle - \gamma \cdot \langle -\bar{\sigma}_{\max}^* \rangle \right) - f_c^e(\kappa_c) = 0 \quad (1)$$

gdzie:

$\bar{\sigma}_{max}^*$ – oznacza maksymalną algebraicznie wartość składowej tensora naprężenia efektywnego, przy czym symbol $\langle f \rangle$ jest tzw. nawiasem Macauleya zdefiniowanym jako: $\langle f \rangle = (|f| + f)/2$,

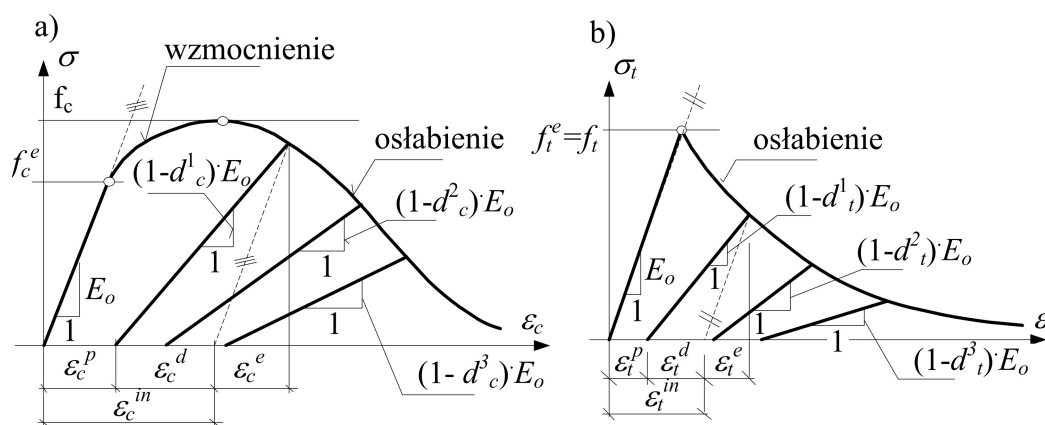
α, β, γ – są bezwymiarowymi parametrami charakteryzującymi materiał,

(\bar{p}, \bar{q}) – oznacza wartości efektywne niezmienników (p, q) zależne od stopnia degradacji materiału,

κ – jest oznaczeniem zmiennej wzmocnienia, wyrażonej przez dwie, niezależne zmienne wzmocnienia odpowiednio dla rozciągania i ściskania: $\{\kappa\} = \{\kappa_t, \kappa_c\}^T$,

$f_c^e(\kappa_c)$ – funkcja określająca aktualną granicę sprężystości w zależności od wartości parametru wzmocnienia na ściskanie.

Jest to model trzyparametrowy (α, β, γ) z niestowarzyszonym prawem płynięcia o nieliniowym wzmocnieniu izotropowym typu dwumechanizmowego, opartym na hipotezie wzmocnienia odkształceniowego. Przykładową ewolucję funkcji wzmocnienia pokazano na rys. 2. Model (e-p-d) charakteryzuje izotropowa degradacja materiału, opisana dwoma zmiennymi degradacji materiału: d_t i d_c , odpowiednio dla stanu rozciągania i ściskania (rys. 2). Te dwie, związane ze sobą, zmienne wyznaczone są na podstawie niezależnych funkcji zniszczenia materiału, w układzie naprężenie – część niesprężysta odkształcenia (ε_{inel}) (rys. 2). Opisują one w modelu dwa zjawiska: potwierdzony doświadczalnie wpływ degradacji materiału ściskanego d_c , na wielkość degradacji materiału rozciąganego d_t , po zmianie znaku naprężenia a także częściowe odtwarzanie pierwotnej sztywności materiału, wynikające z zamykania się rys powstałych w materiale kruchym przy przejściu z rozciągania do ściskania.

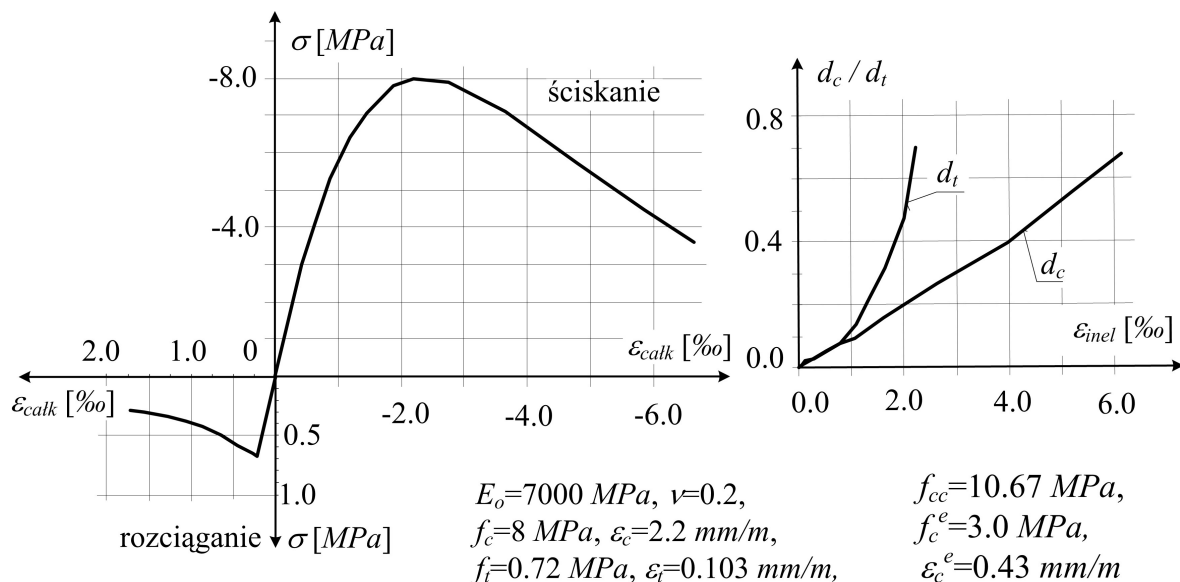


Rys.2. Charakterystyka σ - ε materiału w procesie jednoosiowego testu w modelu (e-p-d) dla:
a) ściskania, b) rozciągania

Po przejściu w stan niesprężystej pracy materiału funkcja wzmocnienia determinuje dalszą ewolucję naprężeń w modelu, natomiast niemalejąca funkcja degradacji (rys. 3b) określa wielkość zniszczenia materiału. Zadanie odciążenia powoduje powrót do stanu sprężystego – rys. 2, 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. Szczegółowo model ten opisano w [4÷12].

Własności wytrzymałościowe i odkształceniowe muru wynikające z wytrzymałości cegły i zaprawy przyjęto jak dla materiału zhomogenizowanego. Przyjęte do obliczeń wartości tych parametrów podano za [1, 2] na rys. 3. Na rys. 3. podano również funkcje charakterystyk

naprężenie-odkształcenie, prawa wzmocnienia i funkcje degradacji materiału dla ściskania i dla rozciągania opracowane na podstawie badań opisanych w [8, 12].



Rys.3. Charakterystyki wzmocnienia σ - ϵ oraz funkcje zniszczenia przy ściskaniu d_c i rozciąganiu d_t materiału analizowanych ścian

4. WYNIKI OBLICZEŃ

Wybrane wyniki obliczeń zestawiono na rysunkach 4÷9. Na rysunkach tych zestawiono wykresy zmian poziomej siły R_{hor} potrzebnej do przemieszczenia poziomego górnego brzegu względem dolnego o wartość δ . Szczegółową specyfikację rozwiązanych zadań wraz z opisem oznaczeń stosowanych na rysunkach 4÷7 podano w tabelicy 1. Przyjęto przy tym, że we wszystkich przypadkach podstawowe obciążenie ściany stanowi ciężar własny oraz dodatkowe pionowe obciążenie $q=100 \text{ kPa}$ górnego poziomego brzegu. Ścinanie poziome realizowane jest poprzez poziome przesunięcie poziomego górnego brzegu względem dolnego o wartość δ .

Na rys. 4 podano podstawowe wyniki dla ściany I. Jak widać, spadek reakcji poziomej na górnej krawędzi jest tym większy, im bliżej ekstremum krzywej dla ściany pełnej rozpoczęto wycinanie otworu (wykresy I-1mm-o, I-1.6mm-o, I-2mm-1, I-2.5mm-o, I-3mm-o). Równocześnie otrzymane rozwiązania wskazują, że im mniejsze jest wyężenia ściany w momencie rozpoczęcia operacji wycinania otworu, tym większy zapas nośności wykazuje ściana po wycięciu otworu. Jeżeli odkształcalność ściany mierzyć wielkością poziomego przemieszczenia górnej krawędzi ściany w stosunku do dolnej, to z wykresów z rys. 4 wynika, że wycięcie otworu w ścianie wyężonej zwiększa jej odkształcalność w odniesieniu do ściany z otworem istniejącym przed obciążeniem tym bardziej, im bardziej ściana jest wyężona w momencie rozpoczęcia wycinania, przy czym przyrosty odkształcalności maleją w miarę zwiększania wyężenia ściany.

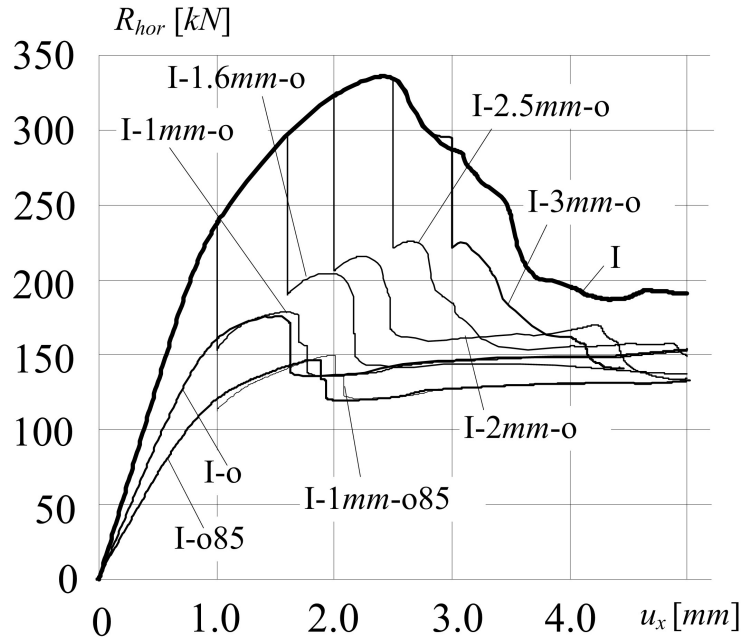
Obwiednia nośności muru po wykonaniu otworów (niezależnie od momentu rozpoczęcia wycinania) tworzy krzywą nawiązującą do krzywej uzyskanej w modelu z otworem wykonanym przed obciążeniem. Zależność ta potwierdza się również w przypadku zmiany wymiarów wycinanego otworu (wykresy I-o85, I-1mm-o85).

Tabela. 1 Znaczenie symboli opisujących wyniki analizy numerycznej na rys. 4÷7

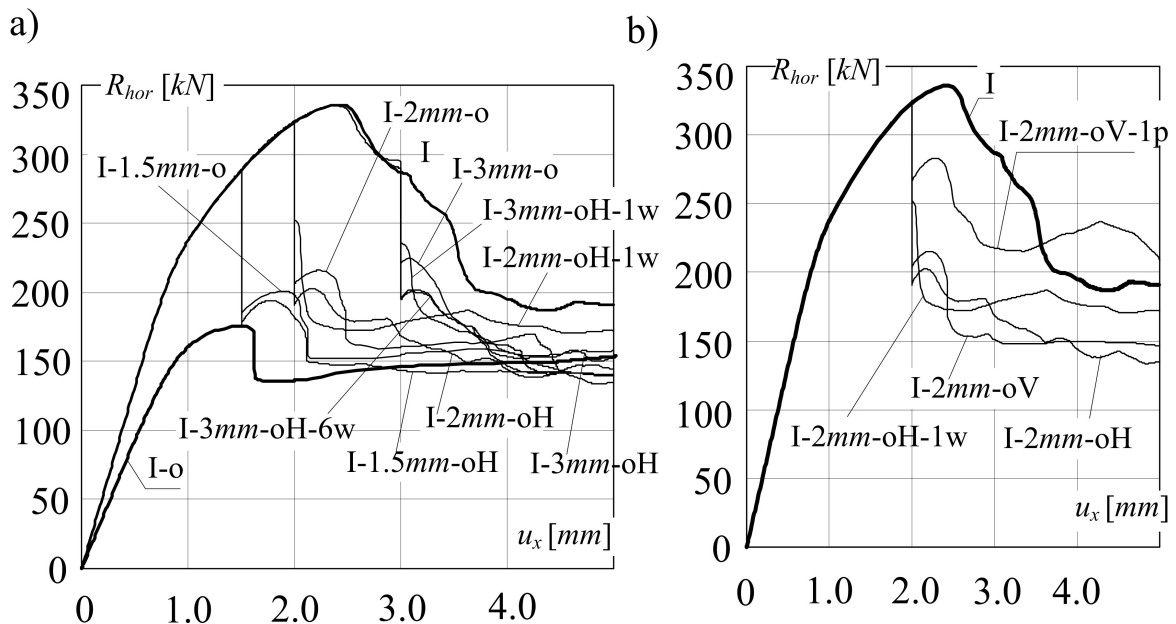
L.p.	opis rozwiązane zadania	symbol na rysunkach
1	ściana I pełna	I
2	ściana II pełna	II
3	ściana I z otworem o wymiarach 1x1 m w środku powierzchni	I-o
4	ściana I z dużym otworem o wymiarach 1.36x1.36 m w jej środku	I-o85
4	ściana I – $\delta=1$ mm, następnie wycięty otwór 1.36x1.36 m w środku	I-1mm-o85
4	ściana I – $\delta=1, 1.6, 2, 2.5, 3$ mm, następnie wycięty w jej środku cały otwór 1x1	I- δ mm-o
5	ściana I – $\delta=1.5, 2, 3$ mm, następnie wycinany w jej środku otwór 1x1 m – stopniowo poziomymi warstwami	I- δ mm-oH
6	ściana I – $\delta=2, 3$ mm, następnie wycinany w jej środku otwór 1x1 m, tylko pierwsza pozioma warstwa – stopniowo element po elemencie	I- δ mm-oH-1w
7	ściana I – $\delta=2$ mm, następnie wycinany w jej środku otwór 1x1 m, tylko pierwsze pionowe pasmo – stopniowo element po elemencie	I-2mm-oV-1p
8	ściana I – $\delta=2, 3$ mm, następnie wycinany w jej środku otwór 1x1 m – stopniowo pionowymi pasmami	I- δ mm-oV
9	ściana I – $\delta=3$ mm, następnie wycinany w jej środku otwór 1x1 m, poziomo wszystkie 6 warstw – stopniowo element po elemencie	I-3mm-oH-6w
9	ściana II z otworem Lewym 1x1 m	II-oL
9	ściana II z otworem Środkowym 1x1 m	II-oS
10	ściana II z otworem Prawym 1x1 m	II-oP
11	ściana II – $\delta=0.75, 1.5, 2$ mm, następnie wycięty w całości otwór	II- δ mm-oL
10	ściana II – $\delta=1.5$ mm, następnie wycięty w całości otwór	II-1.5mm-oS
11	ściana II – $\delta=1.5$ mm, następnie wycięty w całości otwór	II-1.5mm-oP
12	ściana I – $\delta=3$ mm, następnie wycinany w jej środku otwór 1x1 m – stopniowo poziomymi warstwami przy zagęszczonej siatce	I-3mm-oH-zs
13	ściana I – $\delta=3$ mm, następnie wycinany w jej środku otwór 1x1 m – stopniowo pionowymi pasmami przy zagęszczonej siatce	I-3mm-oV-zs
14	ściana I – bez otworu i przy zagęszczonej siatce	I-zs

Na rys. 5 pokazano otrzymane wyniki dla ściany I przy zastosowaniu różnych sposobów wycinania otworu. Przykładowo dla wyteżenia ściany odpowiadającego przesunięciu $\delta=3$ mm otwór wykonano na sześć sposobów:

- wykonując od razu otwór w całości (wykresy: I-1.5mm-o, I-2mm-1, I-3mm-o),
- wykonując cały otwór stopniowo warstwami poziomymi (wykresy: I-1.5mm-oH, I-2mm-oH, I-3mm-oH),
- wykonując wycięcia tylko pierwszej warstwy poziomo – element po elemencie (wykres: I-3mm-oH-1w),
- wykonując cały otwór stopniowo wycinając poziomo element po elemencie (I-3mm-oH-6w),
- wykonując cały otwór stopniowo wycinając pionowo pasmami (I-2mm-oV).
- wycinając tylko pierwsze pionowe pasmo (I_2mm_oV-1p)



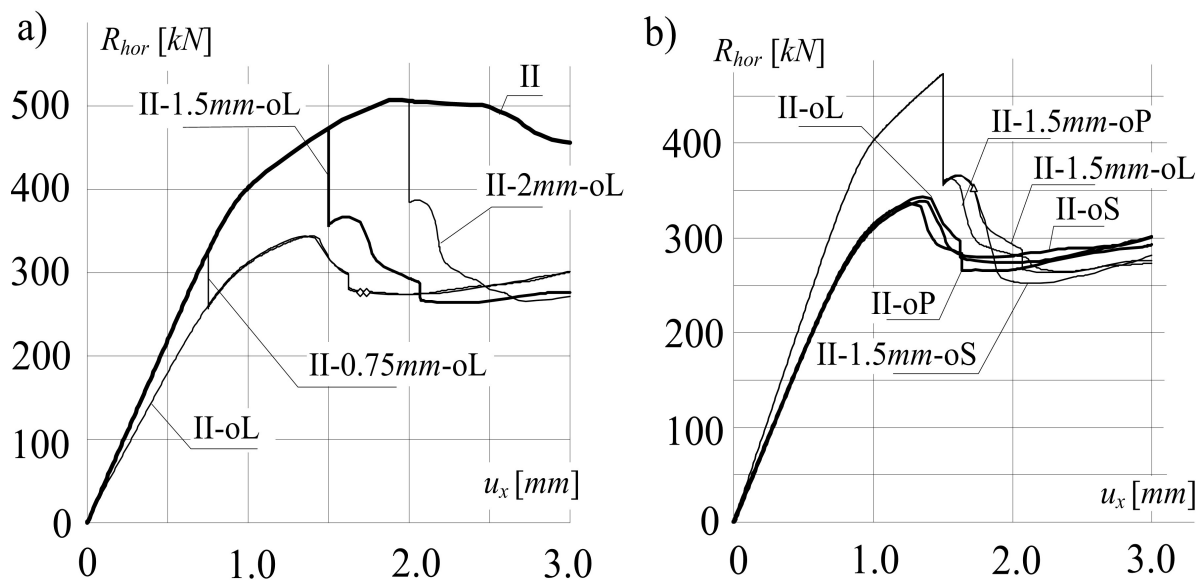
Rys.4 Wybrane wyniki analizy ściany I – badanie wpływu wyteżenia ściany w momencie rozpoczęcia wycinania otworu na nośność ściany



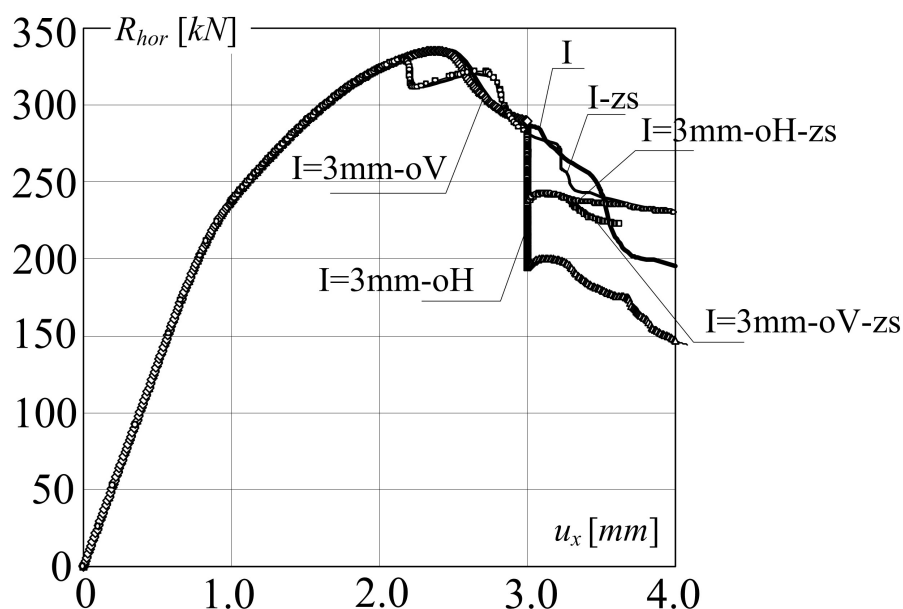
Rys.5 Wybrane wyniki analizy ściany I – wpływ sposobu wycinania otworu

Z przebiegu wykresów pokazanych na rys. 5a wynika, że stopniowe powiększanie otworu w stosunku do wykonania całego otworu daje w efekcie większy spadek nośności. Ten spadek jest tym większy im większe wyteżenie muru, w którym wykonywany jest otwór. Przykładowo dla otworu wykonanego po wymuszeniu $\delta=3\text{mm}$, wycięcie pierwszej warstwy powoduje już 50 % zmianę w nośności ściany – w stosunku do efektu końcowego. Natomiast w przypadku otworu wycinanego stopniowo nie ma znaczenia jak dużymi fragmentami otwór był wycinany.

Na rys. 5b pokazano wyniki dla przypadku wycinania otworu pionowymi pasmami. Jak widać, zmiana kierunku wycinania z poziomego na pionowy w analizowanych zadaniach nie powoduje większych zmian nośności ściany.



Rys.6 Wybrane wyniki analizy ściany II: a) wpływ wyteżenia ściany w momencie rozpoczęcia wycinania otworu, b) wpływ lokalizacji otworu w ścianie II



Rys.7 Wpływ zagęszczonej siatki na wyniki przy stopniowym wycinaniu otworu 1x1m w ścianie I

Na rys. 6 pokazano uzyskane wyniki dla ściany II. Potwierdzają one zaobserwowany wcześniej w ścianie I wpływ poziomego wyteżenia ściany w momencie rozpoczęcia procesu wycinania otworów na jej nośność (rys. 6a). Natomiast wpływ położenia wycinanego otworu na nośność ściany jest niewielki (rys. 6b).

Rys. 7 pokazuje natomiast na przykładzie ściany I wpływ zagęszczenia siatki dyskretnej na otrzymywane rozwiązania. Z przebiegu wykresów wynika, że wpływ ten jest niewielki i uwidacznia się dopiero przy wyteżeniu ściany na granicy jej nośności.

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 CE STU. Slovakia, December 4-5, Bratislava 2008, p. 22.
2. Bartoszek M., Fedorowicz J.: Numeryczna analiza pracy ścian murowych z zastosowaniem modelu sprężysto-plastycznego z degradacją. „Modelowanie Inżynierskie” 2009, nr 37, t. 6, s.27-34.
3. 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.
4. Masłowski E., Spizewska D.: Wzmacnianie konstrukcji budowlanych. Warszawa : Arkady, 2000.
5. 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.
6. 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.
7. Lubliner J., Oliver J., Oller S., Oñate E.: A plastic-damage model for concrete. “International Journal of Soils and Structures” 1989, Vol.25, p. 299÷329.
8. 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. ZN Pol. Śl. 2008 nr 1805, seria „Budownictwo”. z. 114.
9. 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.
10. Mrozek D.: Nieliniowa analiza numeryczna dynamicznej odpowiedzi uszkodzonych budynków. Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 2010.
11. 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.
12. Fedorowicz J.: Criteria for evaluation of masonry-structure behaviour in mining areas. “Architecture Civil Engineering Environment” 2008, Vol. 1, No. 2, p. 35÷42.

EFFECT OF THE GEOMETRY CHANGES ON WALL STRUCTURES BEHAVIOUR ANALYSED WITH USE OF ELASTO-PLASTIC MODEL WITH DEGRADATION

Summary. The article focuses on numerical analysis of wall structures being subjected to geometry modification – introducing large openings – after applying complex load in nonelastic stress state. Statical work of the structure is evaluated numerically on large pieces of the wall. Elasto-plastic model with degradation – so called (e-p-d) model – is being utilised.