

Leszek SZOJDA¹

ANALIZA NUMERYCZNA ZMIAN NAPRĘŻEŃ W KONSTRUKCJI ŚCIANY WYWOŁANYCH NIECIĄGLYMI DEFORMACJAMI PODŁOŻA GÓRNICZEGO

Efektom podziemnej eksploatacji kopalni na powierzchni terenu są osiadania powierzchni. W większości przypadków są to deformacje tzw. ciągłe, które ujawniają się w postaci łagodnej niecki obniżenia, jednak w określonych przypadkach mogą się pojawić deformacje nieciągłe. Ich sposób ujawniania się jest gwałtowny, a zabezpieczenie konstrukcji znajdującej się na powierzchni terenu jest trudne.

W referacie przedstawiono analizę numeryczną układu budowla-podłoże obciążonej ujawniającymi się nieciągłymi deformacjami podłoża. Analizę przeprowadzono z wykorzystaniem niekomercyjnego oprogramowania MAFEM3D, które zostało opracowane przez prof. Majewskiego. Program stosuje przyrostowo-iteracyjną procedurę MES z wykorzystaniem sprężysto-plastycznego modelu materiałowego z izotropowym wzmocnieniem i osłabieniem. Zastosowanie tego modelu materiałowego umożliwiło opracowanie modelu konstrukcji muru ceglanego oraz podłoża, który został obciążony nieciągłą deformacją terenu. Analizę przeprowadzono dla jednego geometrycznego modelu ściany z różnymi wykorzystanymi materiałami konstrukcyjnymi i elementami wzmacniającymi. Obciążenia zostały zaimplementowane jako próg terenowy, który obejmował różną długość fundamentu. W trakcie analizy wyników brano pod uwagę były zmiany naprężeń w konstrukcji i podłożu. Poziom wytyżenia każdego elementu skończonego przedstawia strefy wyczerpania nośności, co może wskazywać na powstanie zarysowań w konstrukcji lub uplastycznień w podłożu.

Wyniki analiz numerycznych dają obiecujące rezultaty, które jednak należy ograniczyć do konkretnej konstrukcji ściany. Dalsze etapy analiz powinny zostać rozszerzone na pełną analizę trójwymiarową i przestrzenną współpracę elementów konstrukcyjnych (ściany, płyty stropowe). Należy również rozważyć różny rodzaj parametrów gruntowych oraz lokalizacji progu w stosunku do fundamentów. Przedstawiona analiza jest wstępna, a wyniki mają charakter jakościowy.

Słowa kluczowe: nieciągłe deformacje podłoża, układ budowla-podłoże, analiza MES, sprężysto-plastyczny model materiałowy

¹ Leszek Szojda, Politechnika Śląska, Katedra Inżynierii Budowlanej, ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice
tel. 32 237 25 92; leszek.szojda@polsl.pl

1. Wprowadzenie

Inżynierskie odejście do projektowania konstrukcji budowlanych sprowadza się do spełnienia warunku Stanów Granicznych, w których oddziaływania zewnętrzne nie wywołują skutku większego niż nośność elementów konstrukcyjnych. Zadaniem projektanta jest właściwe zebranie wszystkich obciążeń działających na obiekt i ułożenie ich w odpowiednie kombinacje zgodne z normami [1], co jest kluczem do poprawnego zaprojektowania konstrukcji. Całe oddziaływanie konstrukcji należy bezpiecznie sprowadzić na podłoże projektując właściwe fundamenty. Można znaleźć jednak przypadki kiedy podłoże staje się aktywnym oddziaływaniem wywołującym obciążenia konstrukcji. Sytuacja taka występuje w rejonach aktywności górniczej, gdzie na skutek podziemnej eksploatacji złoża powstają pustki poeksploatacyjne, które zostają wypełnione nadległymi skałami, a na powierzchni pojawia się strefa obniżeń. Polskie warunki geologiczne oraz znaczna głębokość eksploatacji złóż wywołują łagodne strefy obniżeń [2, 3, 4]. Określane są one jako ciągłe deformacje podłoża. Oddziaływań tych jednak nie można pominąć w procesie projektowania obiektów w takiej strefie, gdyż w skrajnych przypadkach mogą doprowadzić do uszkodzeń wyłączających obiekt z eksploatacji. Znacznie bardziej niebezpieczne i obciążające konstrukcje są nieciągłe deformacje podłoża. Zalicza się do nich efekty uaktywnienia i wypełnienia podziemnych pustek położonych blisko powierzchni terenu (jaskiń lub starych wyrobisk górniczych) lub progów terenowych czy uskoków. Należy jednak zauważyć, że eksploatacja górnicza prowadzona jest w głębiej położonych warstwach skalnych skorupy ziemskiej, a obiekty budowlane posadowione są w warstwie skał rozdrobnionych – gruntów spoistych i niespoistych. Warstwa ta spełnia rolę swoistego amortyzatora i częściowo łagodzi efekty zjawisk krawędziowych deformacji nieciągłych. Analiza zachowania konstrukcji poddanej działaniu takiej deformacji podłoża powinna być prowadzona zarówno w odniesieniu do konstrukcji jak i do podłoża, a więc należy rozpatrywać tzw. układ budowla-podłoże.

Niniejszy referat ma za zadanie przybliżenie i przedstawienie zachowania się konstrukcji oraz podłoża w procesie ujawniania się krawędzi deformacji nieciągłych. Analiza numeryczna została przeprowadzona dla jednego elementu konstrukcyjnego budynku mieszkalnego jakim jest ściana. Obciążenia w postaci progu terenowego zostały przyłożone w różnym miejscu na długości fundamentu, a analizie poddano również zmianę naprężeń w podłożu. Można było tego dokonać dzięki zastosowaniu zaawansowanego modelu numerycznego materiału w doniesieniu zarówno do konstrukcji, jak i do podłoża.

2. Przyjęty model materiałowy

Model materiałowy zastosowany w obliczeniach numerycznych ma bardzo istotne znaczenie dla wyników obliczeń. W przedstawionym zagadnieniu ko-

nieczne jest przyjęcie układu budowla-podłoże i odpowiednie wprowadzenie obciążeń, które są w tym przypadku przemieszczeniami podłoża. Dla rozważenia tego zagadnienia posłużono się niekomercyjnym pakietem programów o nazwie MAFEM3D autorstwa prof. S. Majewskiego z częścią do prezentacji wyników autorstwa dr G. Wandzika. Dokładny opis modelu przedstawiono w pracach [5] i [6]

Obliczenia numeryczne zostały wykonane z wykorzystaniem sprężysto-plastycznego modelu materiałowego ze stowarzyszonym prawem płynięcia i dwuparametrowym, izotropowym prawem wzmocnienia względnie osłabienia. Model ten zalicza się do grupy nasadkowych modeli sprężysto-plastycznych (*cap model*) bez punktów osobliwych z rozmytym obrazem zarysowania (*smearred crack*).

W obszarze sprężystym założono nieliniową sprężystość charakteryzowaną stycznymi: modułem sprężystości E_t i współczynnikiem Poissona ν_t , zależnymi od poziomu wyężenia. Wspomniany stopień wyężenia (oznaczany e_{lev} *effort level*) rozumiany jest jako iloraz odległości mierzonej od osi naprężeń średnich do punktu reprezentującego aktualny stan naprężenia, w stosunku do odległości mierzonej od tej samej osi do punktu leżącego na powierzchni granicznej, odpowiadającego aktualnej wartości naprężenia średniego.

Sprężyste zachowanie materiału w przestrzeni naprężeń oktaedrycznych jest ograniczone powierzchnią plastyczności (*yield surface*) oraz ograniczającą (*boundary surface*). W przedstawionym zagadnieniu przyjęto dla zastosowanych materiałów założenie upraszczające o nie domknięciu powierzchni w strefie dużych ściskań. Założenie to przyjęto ze względu na zakres hydrostatycznych naprężeń ściskających, które nie pojawiają się w trakcie analiz typowych konstrukcji budynków. Dla betonu i muru ceglanego przyjęto dodatkowe założenie o pokrywaniu się obydwu powierzchni, natomiast dla elementów podłoża gruntowego powierzchnia plastyczności znajduje się wewnątrz powierzchni granicznej. W trakcie występowania przyrostu obciążenia, gdy naprężenia osiągają powierzchnię plastyczności, powierzchnia ta powiększa się i w ostatecznym przypadku może osiągnąć powierzchnię stanu granicznego. Z tego też powodu, pomimo że charakter powierzchni dla obu rodzajów materiałów jest podobny, mają one różne charakterystyki w obszarze poza sprężystym.

Określenie stanu naprężenia w elemencie w przestrzeni naprężeń oktaedrycznych jest prezentowane w walcowym układzie współrzędnych [7], którego wartości są wyznaczone przez σ_{oct} (normalne naprężenie oktaedryczne) (1), τ_{oct} (styczne naprężenie oktaedryczne) (2) oraz Θ (kąt Lodego) (3). Do wyznaczenia tych zmiennych wykorzystano drugi J_2 (4) oraz trzeci niezmiennik dewiatora stanu naprężenia J_3 (5).

$$\sigma_{oct} = \sigma_m = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (1)$$

$$\tau_{oct} = \sqrt{\frac{2}{3} J_2} = \sqrt{\frac{1}{3} [(\sigma_1 - \sigma_m)^2 + (\sigma_2 - \sigma_m)^2 + (\sigma_3 - \sigma_m)^2]} \quad (2)$$

$$\cos 3\Theta = \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{J_2^{3/2}} \quad (3)$$

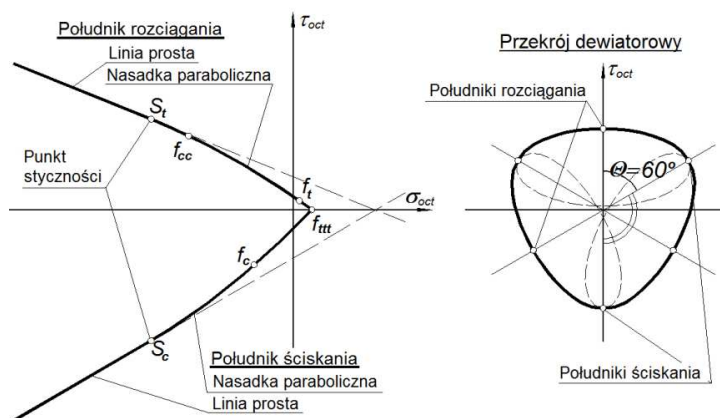
$$J_2 = \frac{1}{2} [(\sigma_x - \sigma_m)^2 + (\sigma_y - \sigma_m)^2 + (\sigma_z - \sigma_m)^2] + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 \quad (4)$$

$$J_3 = \begin{vmatrix} \sigma_x - \sigma_m & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y - \sigma_m & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z - \sigma_m \end{vmatrix} \quad (5)$$

Powierzchnia plastyczności oraz powierzchnia graniczna zostały zdefiniowane jako stożki, których osie pokrywają się z osią normalnych naprężeń oktaedrycznych σ_{oct} . Wierzchołek tego stożka znajduje się po stronie naprężeń dodatnich (rozciągających) w tym układzie współrzędnych. W przekroju dewiatorowym ślad stożka powierzchni ma kształt wygładzonej linii elips przechodzących przez sześciokąt modelu Coulomba-Mohra. Zastosowanie elips zostało zaczerpnięte z modelu [8]. W strefie rozciągań powierzchnia ograniczona jest stycznie połączoną nasadką. Tworzące stożka wyznaczone są zatem przez linie proste w strefie naprężeń ściskających σ_{oct} , natomiast w strefie początku układu współrzędnych oraz naprężeń rozciągających przez parabole. Przejście pomiędzy paraboliczną i prostoliniową częścią południków znajduje się w tzw. punkcie styczności (S_i). Wszystkie tworzące stożka przecinają się w jednym punkcie na osi σ_{oct} , który określany jest jako wytrzymałość w stanie równomiernego trójosiowego rozciągania (f_m). Brak danych doświadczalnych nie pozwala określić przecięcia w strefie naprężeń ściskających (f_{cc} – wytrzymałość w stanie równomiernego trójosiowego ściskania) i powierzchnia pozostaje w tej strefie otwarta. Ślad powierzchni w układzie południków głównych oraz w przekroju dewiatorowym przedstawiono na rys. 1.

Ze względu na charakterystyczny kształt powierzchni w przekroju dewiatorowym można wyznaczyć dwie grupy południków głównych – południk rozciągania i południk ściskania. W walcowym układzie współrzędnych położenie tych południków powtarza się co 120° , a południki ściskania są odchyłone od południków rozciągania o kąt 60° . Na południkach tych położone są punkty charakterystyczne, i tak: południk ściskania zawiera punkt określający wytrzymałość materiału w stanie jednoosiowego ściskania (f_c), natomiast na południku rozciągania znajduje się wytrzymałość w stanie jednoosiowego rozciągania (f) oraz wytrzymałość w stanie równomiernego dwuosiowego ściskania (f_{cc}).

Każdy z materiałów opisany został za pomocą południków różniących się między sobą. Południki dla betonu i gruntu zostały przyjęte na podstawie [5], natomiast ujednocicone parametry dla muru składającego się z zaprawy i cegły przyjęto na podstawie badań przedstawionych w [9].



Rys. 1. Ślad powierzchni granicznej w płaszczyźnie południków głównych oraz przekroju dewiatorowym
 Fig. 1. Trace of boundary surface in main meridian plane and in deviatoric cross-section

Kształt powierzchni dla materiału konstrukcji został przyjęty na podstawie badań własnych przedstawionych w [9] wykonanych w złożonym stanie naprężenia. Parametry opisujące model betonu oraz gruntu zaczerpnięto z literatury [5] i [6].

Wygodnym sposobem zobrazowania stanu elementu w trakcie wzrostu obciążeń jest tzw. stopień wyciężenia (e_{lev}) (6). W ogólnym przypadku w elemencie skończonym występuje złożony stan naprężeń, który można zobrazować, jako punkt w przestrzeni naprężeń. Z fizycznego punktu widzenia stan naprężenia w elemencie nie może przekroczyć powierzchni granicznej, natomiast może powodować powiększanie się powierzchni plastyczności do osiągnięcia powierzchni granicznej. Proces ten nazywany jest wzmocnieniem materiału i w przedstawionym zagadnieniu dotyczy elementów gruntowych. Stopień wyciężenia podawany w procentach, jest wartością obrazującą wielkość aktualnych stycznych naprężeń oktaedrycznych (τ_{oct}) do naprężeń znajdujących się na powierzchni granicznej ($\tau_{oct,lim}$) przy tym samym poziomie normalnych naprężeń oktaedrycznych (σ_{oct}) oraz kącie Lodego (Θ). Za zniszczenie materiału elemencie uważa się gdy $\tau_{oct} = \tau_{oct,lim}$, wtedy $e_{lev} = 1,00$. Wartość ta nazywana jest dalej poziomem wyciężenia.

$$e_{lev} = \frac{\tau_{oct}(\sigma_{oct}, \Theta)}{\tau_{oct,lim}(\sigma_{oct}, \Theta)} \quad (6)$$

3. Model obliczeniowy budowla-podłoże

Analizie numerycznej z przedstawionym powyżej modelem materiałowym poddano układ ściany typowego budynku mieszkalnego wraz fundamentem oraz podłoża gruntu. Konstrukcja ściany zamodelowana została w różny sposób, od całkowicie niezabezpieczonej, wykonanej z muru ceglanego, do konstrukcji o znacznej sztywności wykonanej z elementami z betonu zbrojonego. Głównym obciążeniem przyłożonym do konstrukcji jest deformacja podłoża w postaci proggu terenowego.

Model obliczeniowy składał się ze ściany o wymiarach 600x300x25cm oraz ławy fundamentowej o przekroju 50x30cm na całej długości ściany. W celu lepszego zobrazowania rozkładu napreżeń w ścianie w zależności od zastosowanych materiałów i elementów konstrukcyjnych przedstawiono trzy układy konstrukcja-podłoże o tych samych wymiarach geometrycznych:

- Model 1 – konstrukcja ściany i fundamentu z muru ceglanego;
- Model 2 – konstrukcja ściany murowana z elementami żelbetowymi wieńca, rdzeni oraz ławy fundamentowej;
- Model 3 – konstrukcja ściany jak w przypadku drugim z otworami – okiennym i drzwiowym.

Geometria układów konstrukcyjnych dla przypadku z otworami okiennym i drzwiowym wraz z podłożem przedstawiona jest na rys. 2. Parametry materiałowe zastosowane do obliczeń pokazano w tablicy 1. W modelu 2 i 3 zastosowano zbrojenie w narożach przekrojów betonowych prętami 4φ16 ze stali klasy A-II.

Tablica 1. Parametry zastosowanych materiałów w obliczeniach numerycznych

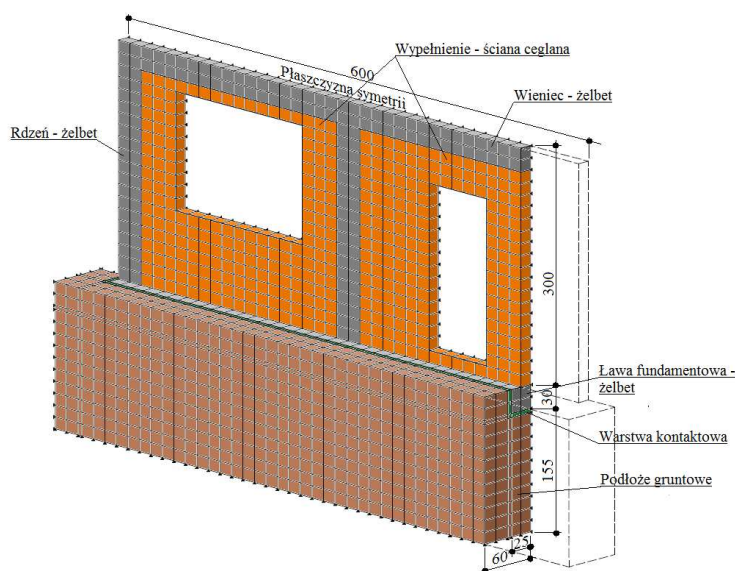
Table 1. Material parameters used in numerical calculation

	Mur ceglany			Beton			Stal zbrojeniowa	
	f_c [MPa]	E_o [GPa]	ν [-]	f_c [MPa]	E_o [GPa]	ν [-]	f_y [MPa]	E_o [GPa]
Model 1	6,5	2,1	0,22	-	-	-	-	-
Model 2 i 3	6,5	2,1	0,22	33,0	22,0	0,2	240,0	200,0

Druga część układu budowla-podłoże odwzorowywała grunt o parametrach kąta tarcia wewnętrznego $\varphi=40^\circ$ i spójność $c=0$. Odpowiada to bardzo nośnemu gruntowi niespoistemu, który został wprowadzony dla lepszego zobrazowania zachodzących zjawisk pod fundamentem.

Obciążenie konstrukcji przyjęto jako sumaryczne obciążenie stropu 4kN/m² o rozpiętości 5m w każdą ze stron i przyłożono w sposób liniowy na górnej krawędzi ściany. Założono, że pod ścianą powstanie deformacja nieciągła w formie proggu terenowego o zrzucie 15cm, którego położenie będzie zmienne. W ramach tego obciążenia przemieszczano węzły modelu, natomiast parametry materiałowe gruntu są jednakowe dla wszystkich elementów.

W modelowaniu wykorzystano symetrię układu wzdłuż płaszczyzny pionowej i stąd model obliczeniowy składał się z 4208 elementów prostokątnych, które rozmieszczone zostały pomiędzy 5962 węzłami. Elementy prętowe miały 292 szt. i ułożone były w narożach elementów betonowych. Pomiedzy elementy fundamentu i podłoża zostały założone elementy kontaktowe o parametrach podłoża zredukowanych do $\frac{1}{4}$. Przemieszczenia podłoża (próg terenowy) podzielono na 45 kroków, co dla jednego kroku obliczeniowego dawało przemieszczenie 0,33cm. Obliczenia wykonywano przy założeniu, że próg terenowy obejmował różną część fundamentu w granicach od 45 do 495cm długości ławy.



Rys. 2. Model układu budowla-podłoże przyjęty do analizy numerycznej

Fig. 2. Model of soil-structure system for numerical analysis

4. Wyniki analizy numerycznej

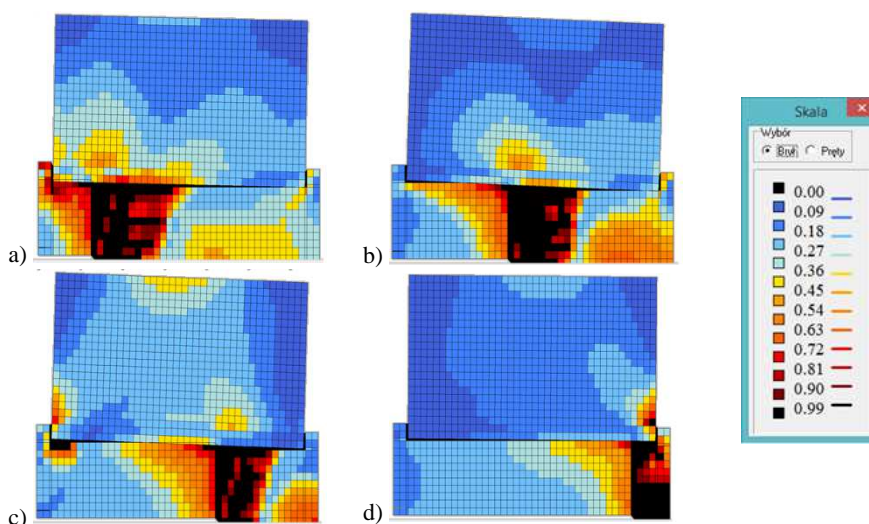
Analizę numeryczną przeprowadzono zwracając szczególną uwagę na dwie właściwości: zmianę naprężeń, a dokładniej poziomu wyężenia elementów e_{lev} konstrukcji ściany oraz zmianę naprężeń pionowych σ_z w podłożu pod fundamentem na długości ławy.

4.1. Poziom wyężenia w elementach konstrukcji ściany

Do analizy wyników obliczeń numerycznych wykorzystano poziom wyężenia (6). Rezultaty obliczeń w postaci barwnych map elementów brylowych poka-

ziano dla ostatniego kroku obliczeniowego, w przypadku gdy próg terenowy obejmował 7,5%; 32,5%; 57,5% i 82,5% procent długości ściany – odpowiada to progowi znajdującemu się w odległości 45cm, 195cm, 345cm i 495cm licząc od prawego końca ławy. Kolory ciepłe oznaczają wzrost wyężenia, a czarny wyczerpanie nośności w danym elemencie. Na rysunkach o numerach 3, 4 i 5 przedstawiono zmiany wyężenia elementów w odpowiednio Modelach 1, 2 i 3 przy proggu terenowym obejmującym odpowiednią długość ławy fundamentowej.

Rysunek 3. (Model 1) przedstawia ścianę wykonaną wyłącznie z elementów murowych. Uwagę zwraca podniesiony poziom wyężenia w dolnych elementach ściany do wyczerpania nośności w miejscu połączenia ławy i ściany na krawędzi (rys. 3d). Nie nastąpiło uszkodzenie pionowe ściany, pomimo że deformacja wywołana proggiem terenowym była pod środkiem długości ściany.



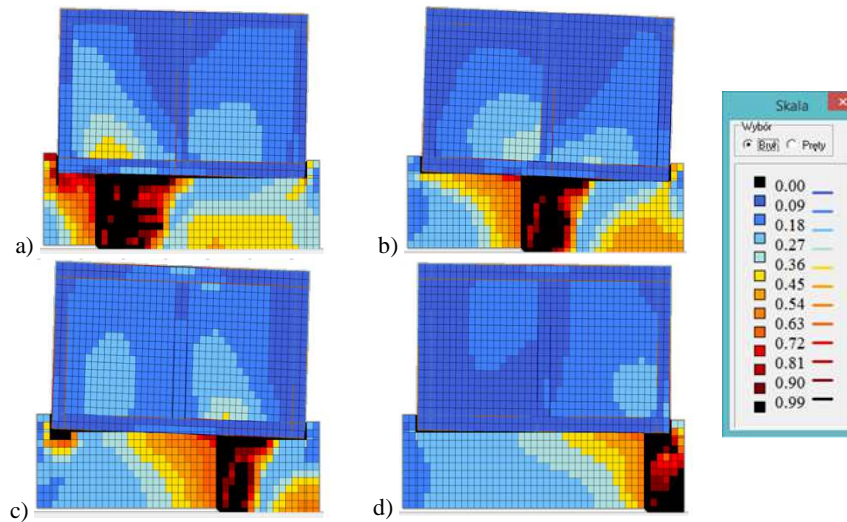
Rys. 3. Wyężenie w elementach Modelu 1 (ściana ceglana) przy proggu obejmującym długości ławy: a) 495cm (82,5%); b) 345cm (57,5%); c) 195cm (32,5%); d) 45cm (7,5%)

Fig. 3. Effort level for FE of Model 1 (brick-wall) for a fault including the footing length: a) 495cm (82,5%); b) 345cm (57,5%); c) 195cm (32,5%); d) 45cm (7,5%)

Model 2 (rys. 4.) przedstawia konstrukcję ściany wzmocnioną żelbetowymi rdzeniami, ławą i wieńcem. Beton i zbrojenie wydatnie redukują odkształcenia ściany i tym samym wzrost naprężeń oraz wyężień – nie przekracza on 50%.

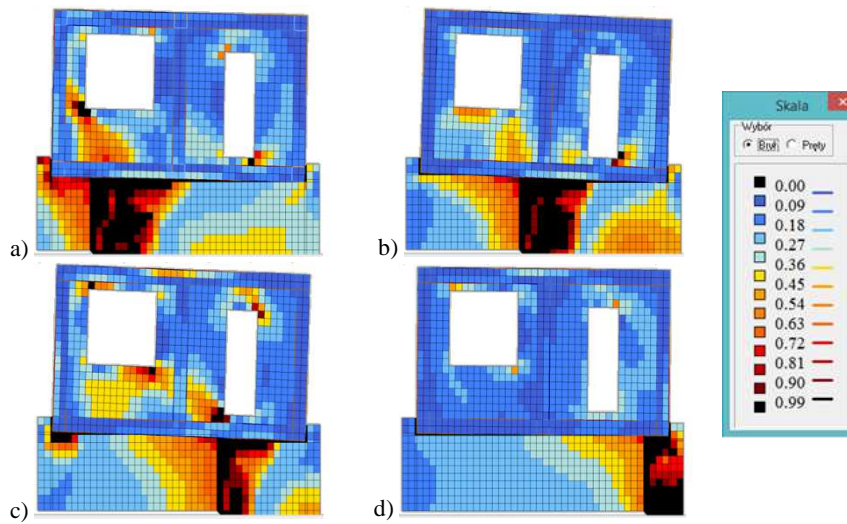
Ściana perforowana otworami (Model 3) poddana jest znacznym wyężeniom. Związane jest to z mniejszą sztywnością konstrukcji i częściowym dopasowaniem się ściany do deformacji terenu, pomimo zastosowania wzmocnień żelbetowych. Na szczególną uwagę zasługuje rys. 5a i 5c, gdzie pojawiły się strefy wyczerpania nośności w narożach otworów. Odkształcenia wywołują zmianę kształtu otworów z prostokątnego na równoległoboczny, a w miejscach

powstania kąta rozwartego w narożach występuje rozciąganie, co świadczy o potencjalnej możliwości pojawienia się rysy w kierunku diagonalnej do otworu.



Rys. 4. Wytężenie w elementach Modelu 2 (ściana ceglana z elementami żelbetowymi) – a), b), c), d) – jak w rys. 3.

Fig. 4. Effort level for FE of Model 2 (brick-wall with RC elements) – a), b), c), d) – as in fig. 3

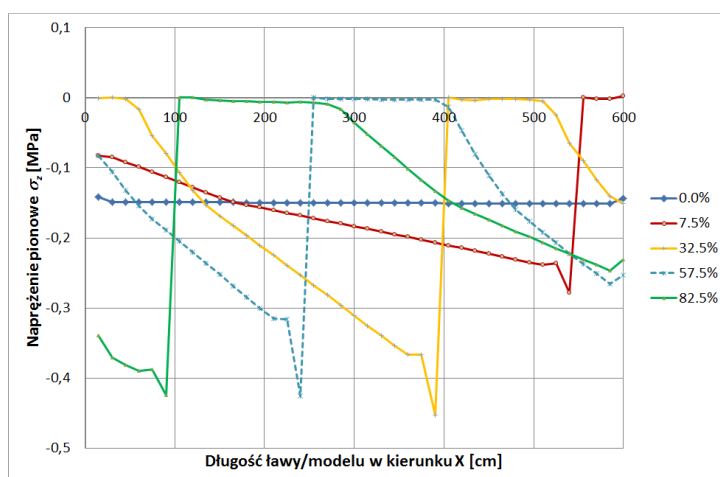


Rys. 5. Wytężenie w elementach Modelu 3 (ściana ceglana z elementami żelbetowymi i otworami okiennymi i drzwiowymi) – a), b), c), d) – jak w rys. 3.

Fig. 5. Effort level for FE of Model 3 (brick-wall with RC elements and openings) – a), b), c), d) – as in fig. 3

4.2. Zmiany naprężeń pionowych w podłożu pod fundamentem

Wyteżenia elementów gruntowych są znacznie większe niż elementów konstrukcji. Występuje to szczególnie w miejscu wymuszenia przemieszczeń progów terenowego. W strefie, gdzie następuje obniżenie, elementy przylegające bezpośrednio do warstwy progów ulegają uplastycznieniu (wyteżenie 99% - kolor czarny) ze względu na wzajemną interakcję. Z punktu widzenia stanu konstrukcji istotne jest jednak stwierdzenie zmiany naprężeń pionowych σ_z w podłożu, których wzrost może wywołać uplastycznienie elementów, co będzie skutkowało ewentualnym osiadaniem. Na rysunku 6. przedstawiono jak zmieniają się one przy różnym położeniu progów terenowego w stosunku do długości fundamentu oraz porównano je z naprężeniami pod ławą bez wpływów deformacji podłoża.



Rys. 6. Zmienność naprężeń σ_z pod ławą fundamentową w zależności od położenia progów terenowego

Fig. 6. Soil stress σ_z variability under footing for different fault position

Dla małego zakresu osiadań (7,5% i 32,5% długości) można zaobserwować zawieszenie fundamentu – redukcja naprężeń σ_z do zera, a dla większego zakresu (57,5% i 82,5% długości) zaraz przy progów następuje redukcja. W miarę jednak oddalania się od progów następuje wzrost naprężeń. W pierwszym przypadku ściana pracuje wspornikowo, a następnie w charakterze belki-tarczy (dwa punkty podparcia). We wszystkich przypadkach następuje znaczny wzrost naprężeń przy krawędzi progów w części, która nie osiadła. W prezentowanym przypadku wzrost jest ponad dwukrotny – 0,15MPa dla przypadku bez deformacji podłoża oraz ponad 0,4MPa dla progów terenowego obejmującego ponad 30% długości.

5. Podsumowanie i wnioski

Deformacje nieciągłe pochodzenia górniczego występują na powierzchni terenu znacznie rzadziej niż deformacje typu ciągłego. Intensywność oraz szybkość ich ujawniania się wywołuje bardzo gwałtowne obciążenie konstrukcji obiektów. Budynki i obiekty niezabezpieczone na przejście takich wpływów w zasadzie nie są w stanie przenieść dodatkowych oddziaływań bez znacznych uszkodzeń, do zniszczenia konstrukcji włącznie.

Przedstawione analizy wskazują na znaczący wzrost odporności budynku gdzie zastosowano wzmocnienia konstrukcji elementami żelbetowymi (Model 2 – rys. 4.). Najistotniejszym wpływem deformacji podłoża jest zmiana sposobu podparcia ławy fundamentowej. Przemieszczenie pionowe części podłoża powoduje powstanie szczeliny, gdy osunięcie się podłoża obejmuje niewielką część fundamentu. Występuje wówczas również pochylenie konstrukcji proporcjonalne do wielkości koncentracji naprężeń w strefie przyprogowej gruntu. Gdy próg terenowy obejmuje większą część fundamentu znaczna koncentracja naprężeń części przyprogowej powoduje pochylenie ściany i wtórne oparcie się końca ściany znajdującego się nad częścią obniżoną podłoża. W takim przypadku elementy ściany pracują początkowo jak wsporniki, a w następnym etapie jak tarcze-belki.

Obniżenie sztywności konstrukcji powoduje powstanie koncentracji naprężeń w miejscach osłabień, narożach otworów. Obszary te są miejscami ujawniania się zarysowań konstrukcji, co jest widoczne na rys. 5. (Model 3). Analiza oddziaływania konstrukcji na grunt pokazuje koncentrację naprężeń przy krawędzi progu. Jeżeli konstrukcja jest dostatecznie sztywna, a położenie progu będzie odległe od krawędzi fundamentu, to należy spodziewać się uplastycznienia podłoża. Pokazuje to wykres zmiany naprężeń pionowych σ_z w gruncie – rys. 6.

Przedstawione powyżej obliczenia pokazują możliwość przeprowadzenia obliczeń numerycznych złożonych konstrukcji budowlanych. W niniejszych obliczeniach został zastosowany zaawansowany sprężysto-plastyczny model materiałowy z niekomercyjnego pakietu programów MAFEM3D (autorstwa S. Majewskiego), który pozwala na analizę układu budowla-podłoże-gruntowe. Przedstawione wyniki analiz są wstępem do dalszych obliczeń i mają charakter jakościowy. Przewiduje się dalsze analizy w celu określenia zależności ilościowych.

Literatura

- [1] PN-EN 1990 Eurokod. Podstawy projektowania konstrukcji.
- [2] Popiołek E.: Ochrona terenów górniczych, Wydawnictwa AGH, Kraków 2009.
- [3] Kwiatek J.: Obiekty budowlane na terenach górniczych, Główny Instytut Górnictwa, Katowice 2002.
- [4] Kwiatek J. i inni: Ochrona obiektów budowlanych na terenach górniczych, Wydawnictwo Głównego Instytutu Górnictwa, Katowice 1997.

- [5] Majewski S.: Sprężysto-plastyczny model współpracującego układu budynek-podłoże poddanego wpływom górniczych deformacji terenu, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, z. 79, Gliwice 1995.
- [6] Majewski S.: Mechanika betonu konstrukcyjnego w ujęciu sprężysto-plastycznym. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003.
- [7] Zienkiewicz O. C.: Metoda elementów skończonych, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1972.
- [8] Willam K. J., Warnke E. P.: Constitutive Models for the Triaxial Behaviour of Concrete. IABSE Seminar on Concrete Structures Subjected to Triaxial Stresses, Bergamo, IABSE Proc. vol. 19, 1974, p. 1-30.
- [9] Szojda L.: Analiza numeryczna wpływu nieciągłych deformacji podłoża na budynki ścianowe. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2009.

NUMERICAL ANALYSIS OF VARIABLE BRICK-WALL STRESS CAUSED BY NON-CONTINUOUS MINING DEFORMATION

Summary

Non-continuous mining deformations appear in mining activity regions. They are not so common as continuous ground deformations. The process of their appearing is violent and a protection of the structure is difficult.

The paper presents a numerical approach to a soil-structures interaction during the activity of ground fault – non-continuous ground deformation. The analysis was carried out by a non-commercial software MAFEM3D created by prof. Majewski. This software uses incremental-iterative procedure of FEM with elastic-plastic material model and isotropic hardening/softening of a material. It allowed to create model of brick-wall structure and the ground which was loaded by the non-continuous ground deformation. The analysis was carried out for one geometric wall shape but with different material parameters and strengthening elements. The loads were implemented as a ground fault which comprised different length of structure footing. The results of calculation were considered for stresses variability of structure and the subsoil. The effort level for finite element showed areas at risk of cracks in structure as well as the ground plasticization process on the edge of the fault.

The numerical analyses gave promising results but they were checked only for one wall structure. The further steps of analyses should be extended to real 3D structures and considered on spatial cooperation of the structural elements like walls, plates etc. In addition the different kind of ground parameters and location below the foundation should be taken in consideration.

Keywords: Non-continuous ground deformation, soil-structure interaction, FEM analysis, elastic-plastic material model

Przesłano do redakcji: 21.03.2017 r.

Przyjęto do druku: : 01.09.2017 r.