

Ryszard MIELIMAŁA, Marek WESOŁOWSKI
Politechnika Śląska, Gliwice

MODELOWANIE DEFORMACJI TERENU GÓRNICZEGO Z WYKORZYSTANIEM PRZESTRZENNEGO WARIANTU METODY ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki modelowania numerycznego deformacji powierzchni terenu górniczego pod wpływem wieloetapowej eksploatacji górniczej. Do budowy numerycznego modelu ośrodka skalnego wykorzystano dokumentację górniczo – geologiczną dla rejonu ścian 001, 002, 005 i 007 w pokładzie 338/2 KWK "Budryk". Górotwór traktowano jako ośrodek liniowo-sprężysty o ortotropowej budowie warstw. Połączenia międzywarstwowe opisane zostały za pomocą elementów kontaktowych. Uzyskane w wyniku modelowania numerycznego wyniki obniżeń oraz odkształceń poziomych porównane zostały z wynikami geodezyjnych pomiarów deformacji terenu górniczego.

MODELLING OF DEFORMATION MINING SURFACE WITH THE USE OF THE SPATIAL VARIANT OF FINITE ELEMENT METHOD

Summary. The paper presents the results of numerical modeling of the deformation of mining ground subjected to multi-stage mining process. For the construction of the numerical model of rock medium we used the mining-geological documentation for the area of longwalls 001, 002, 005, and 007 in the seam 338/2 of Coal Mine "Budryk". The rockmass was treated as linear-elastic medium of orthotropic layer structure. The interlayer connections were described by means of contact elements. The results of subsidence and of horizontal strains obtained through numerical modeling were compared to the results of geodesic measurements of mining ground deformation.

1. Wprowadzenie

Od kilku lat autorzy prowadzą badania nad wykorzystaniem metody elementów skończonych do modelowania deformacji terenu górniczego. W przeciwieństwie do metod geometryczno-całkowych pozwala ona uwzględnić w procesie modelowania złożoną budowę

geologiczną, skomplikowany kształt wyrobisk górniczych i różnorodne własności górotworu [9].

Podstawowym problemem, jaki występuje przy wykorzystaniu metody elementów skończonych do opisu deformacji terenu górniczego, jest taki dobór modeli ośrodka opisującego górotwór, by wyniki modelowania przemieszczeń górotworu i powierzchni terenu były zgodne z wynikami obserwacji. W rezultacie realizacji kolejnych etapów badań nad tym zagadnieniem dokonano następujących ustaleń:

- Najprostszym ośrodkiem zapewniającym jakościowo i ilościowo dobry opis obniżeń jest ośrodek sprężysty, ortotropowy, czyli ośrodek sprężysty posiadający inne własności w kierunku poziomym oraz inne w kierunku pionowym. Ośrodek ten zapewnia uzyskanie maksymalnych nachyleń charakteryzujących nieckę obniżeniową zgodnych z obserwacjami [6]. Istotnie odbiegające od wyników pomiarów geodezyjnych są jednakże wyznaczone przy jego zastosowaniu rozkłady ruchów poziomych.
- Obserwowaną w praktyce asymetrię niecki względem pola wybrania związaną z wpływem kolejności i kierunku eksploatacji można otrzymać opisując pokład węgla oraz warstwę stropową tego pokładu nieliniowym ośrodkiem sprężysto-kruchym, a pozostałe warstwy modelu ośrodkiem sprężystym ortotropowym [6].
- Jednoczesny dobry opis obniżeń i odkształceń poziomych uzyskuje się stosując model górotworu będący układem warstw ortotropowych połączonych pomiędzy sobą elementami kontaktowymi, pozwalającymi na symulację poślizgów międzywarstwowych oraz tworzenie się pustek pomiędzy współpracującymi warstwami modelu. Zostało to sprawdzone dla wariantu płaskiego metody elementów skończonych [7, 8], a także dla wariantu przestrzennego, gdy modeluje się deformacje wzdłuż linii usytuowanej prostopadle do wybiegu kolejno eksploatowanych ścian [6].

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki dalszych prac nad weryfikacją opracowanej metodyki postępowania przy jednoczesnym opisie obniżeń i odkształceń poziomych przestrzennym wariantem metody elementów skończonych. W tym celu posłużono się symulacją komputerową zawałowej eksploatacji ścian 001, 002, 005 i 007 w pokładzie 338/2 KWK „Budryk”. Otrzymane rezultaty modelowania porównywano z obniżeniami i odkształceniami poziomymi pomierzonymi po zakończeniu eksploatacji każdej z nich na trzech liniach pomiarowych, z których jedna usytuowana była poprzecznie a dwie podłużnie do tej eksploatacji.

2. Warunki geologiczno-górniczne i prowadzone pomiary geodezyjne

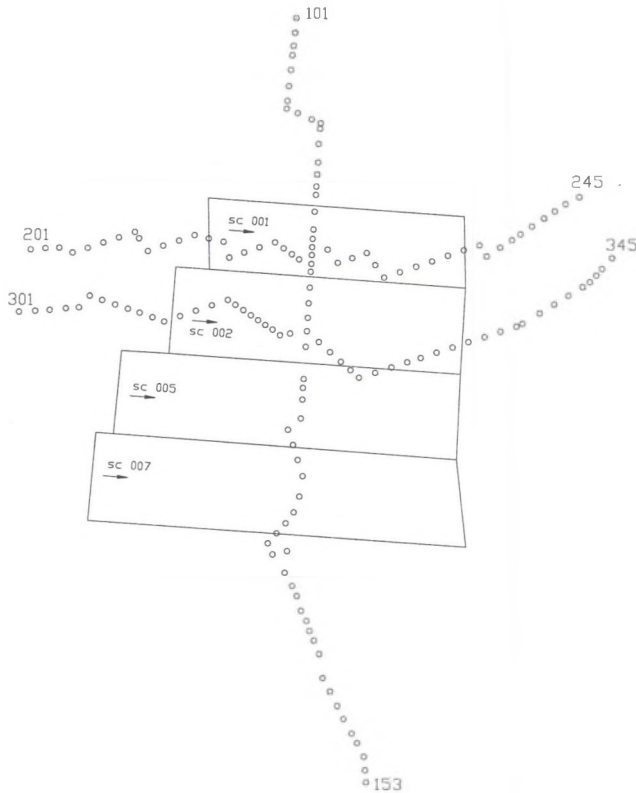
Do budowy numerycznego modelu ośrodka skalnego, modelowania procesu deformowania tego ośrodka oraz weryfikacji wyników wykorzystano dokumentację górnictwo-geologiczną dla rejonu ścian 001, 002, 005 i 007 w pokładzie 338/2 KWK "Budryk" oraz wyniki pomiarów geodezyjnych przeprowadzonych na liniach pomiarowych zastabilizowanych nad tą eksploatacją. Eksploatacja prowadzona była w typowych jak na GOP warunkach geologicznych charakteryzujących się średniej grubości nadkładem, w którym występują skały czwartorzędowe o miąższości ok. 50 m i triasowe o miąższości ok. 10 m oraz karbonem, który zbudowany jest z naprzemianległych warstw iłowców, mułowców, piaskowców i pokładów węgla. W rejonie oddziaływania wpływów eksploatacji nie występują przy tym większe dyslokacje tektoniczne, mogące w sposób istotny wpływać na przebieg deformacji powierzchni terenu.

Eksploatacja ścian 001, 002, 005 i 007 w pokładzie 338/2 była prowadzona systemem zawałowym w okresie od 1.03.1994 r. do 1.12.1996 r. w kolejności zgodnej z numeracją na głębokości od 580 m do 700 m. Długość tych ścian wynosiła ok. 250 m, zaś ich wybiegi zwiększały się od 750 m dla ścian 001 do 1080 m w przypadku ściany 007. Nachylenie pokładu w rejonie tych ścian waha się od 6° do 8° , a jego wysokość, równa w zasadzie wysokości tych ścian, wynosi 1,8 m (ściana 005) i 2,0 m (ściany pozostałe).

Wpływy eksploatacji pokładu 338/2 rozpatrywanymi ścianami były obserwowane na trzech liniach pomiarowych o numerach 1, 2 i 3, zastabilizowanych poprzecznie (linia 1) oraz wzdłuż (linie 2 i 3) wybiegu tych ścian (rys.1). Linie te składają się odpowiednio z 58, 45 i 45 punktów, założonych w odległościach co 24 m i 48 m. Linia 1 biegnie z północy na południe zgodnie z południowym kierunkiem upadu pokładu przez środek pola wybrania, zaś linie 2 i 3 położone są wzdłuż ścian 001 (linia 2) i 002 (linia 3).

Na liniach tych prowadzone były cykliczne (w okresach jednomiesięcznych i dwumiesięcznych) obserwacje wysokościowe metodą precyzyjnej niwelacji geometrycznej nawiązanej do reperów położonych poza wpływami eksploatacji oraz pomiary długości odcinków precyzyjnym dalmierzem elektronicznym.

Do analizy wybrano cztery cykle obserwacyjne przedstawiające w zasadzie statyczne niecki obniżeniowe, jakie powstały na powierzchni terenu po wybraniu kolejno rozpatrywanych ścian.



Rys. 1. Położenie punktów linii pomiarowych w stosunku do krawędzi eksploatacji
 Fig. 1. Location of the points of measurement lines with respect to mining edge

3. Model górotworu

Dla opisanych warunków górnictwo-geologicznych zbudowano numeryczny model górotworu rejonu prowadzonej eksploatacji górniczej. Model ten przedstawia przestrzenną bryłę górotworu, której podstawa ma wymiary 2250 m x 2250 m oraz wysokość (głębokość) 1000 m (rys. 2). Na głębokości od 580 m do 700 m zamodelowano pokład węgla 338/2, który w rejonie prowadzonej eksploatacji górniczej ma grubość ok. 1,8 m ÷ 2,0 m. Powyżej eksploатовanego pokładu 338/2 zamodelowano kolejno 11 warstw górotworu karbońskiego oraz trzy warstwy nadkładowe. Spąg pokładu opisano za pomocą czterech warstw. Każda z wyodrębnionych w modelu warstw reprezentuje zastępczy ośrodek dla zespołów warstw skalnych cechujących się zbliżonymi parametrami wytrzymałościowymi, a wartości parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych dobrano jako średnie z całego pakietu skalnego [3, 5].

Budując model przyjęto, że pokład 338/2 oraz warstwa stropowa tego pokładu będą stanowić ośrodek sprężysto-kruchy, zaś pozostałe warstwy - ośrodek liniowo-sprężysty ortotropowy [6]. Parametry materiałowe wszystkich warstw wyznaczone zostały w oparciu o profil litologiczny oraz wyniki badań laboratoryjnych udostępnionych przez KWK „Budryk”. Zakres zmienności parametrów materiałowych warstw skalnych przedstawiono w tab. 1.

W części centralnej modelu symulowano eksploatację górnictw z zawalem skał stropowych ścianami 001, 002, 005 oraz 007. Skrajne części modelu stanowią rejon wyłączony spod bezpośredniej eksploatacji górnictw.

W celu wykonania obliczeń metodą elementów skończonych analizowaną bryłę górotworu podzielono siatką elementów prostopadłościennych. Budując siatkę elementów modelu górotworu przyjęto zasadę, że punkty węzłowe znajdujące się na skrajnych płaszczyznach bocznych oraz podstawie modelu mogą przemieszczać się jedynie w obrębie tych płaszczyzn. Pozostałe węzły modelu mogą swobodnie przemieszczać się w dowolnym kierunku [1, 2].

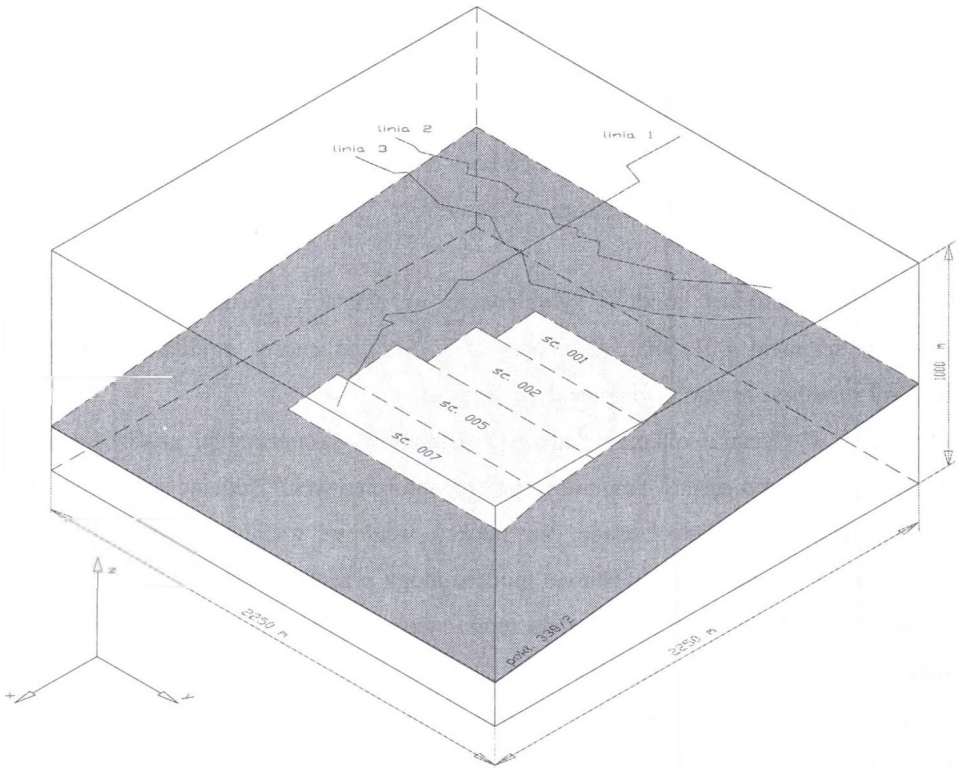
Wszystkie wyróżnione w modelu warstwy stanowią odrębne części połączone pomiędzy sobą elementami typu „GAP” [1, 8]. Spójność płaszczyzn rozdziału dobrana została na podstawie o kryterium opadu nie podpartych skał stropowych przy wykorzystaniu profili oporów rozwarstwienia [3] i dla wszystkich płaszczyzn wynosi 0.4 [MPa].

Określając warunki początkowe założono, że naprężenia pierwotne są wywołane siłami grawitacji, co jest na ogół słuszne dla górotworu niezaburzonego tektonicznie. Poziome naprężenia pierwotne σ_x oraz σ_y zostały wyznaczone na podstawie klasycznej teorii sprężystości [4].

Tabela 1

Zakres zmienności parametrów warstw

	Zakres zmienności parametrów warstw					
	E_x, E_y [MPa]	E_z [MPa]	ν [-]	ρ [kg/m ³]	R_c [MPa]	R_r [MPa]
Gleba	80÷120	8÷12	0,25÷0,3	2000÷2200	1÷1,5	0,01÷0,015
Piaskowce	8000÷14000	800÷1400	0,12÷0,15	2400÷2500	60÷80	6÷8
Mułowce	6000÷6600	600÷660	0,13÷0,15	2400÷2450	50÷60	5÷6
Iłowce	7000÷8500	700÷850	0,12÷0,13	2450÷2550	60÷70	6÷7
Węgiel	1100÷1500	110÷150	0,25÷0,28	1400	18÷23	1,5÷2,2



Rys. 2. Model górotworu

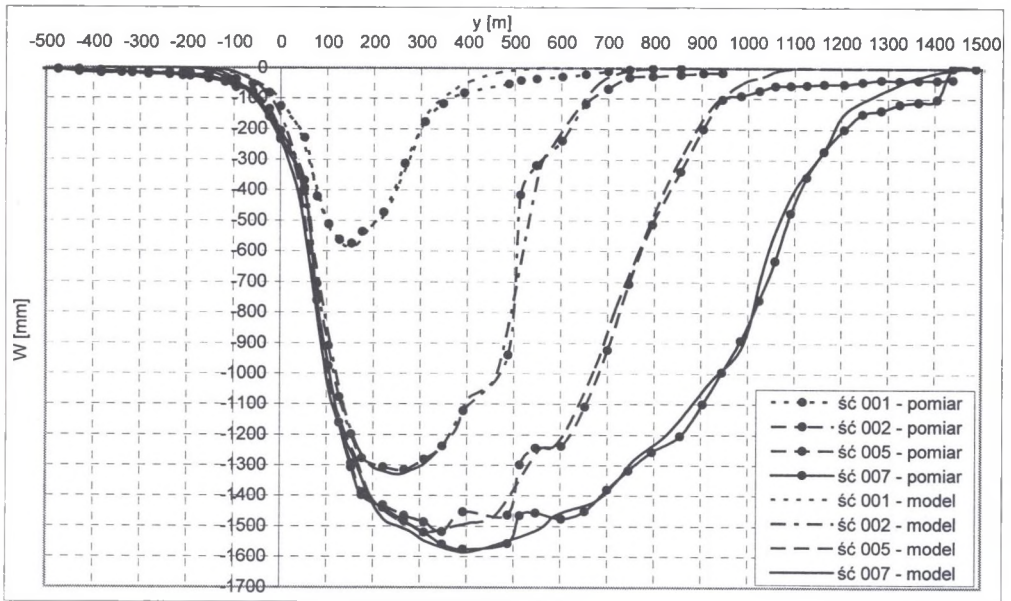
Fig. 2. Rockmass model

4. Wyniki symulacji komputerowej

Na bazie przedstawionego modelu numerycznego górotworu przeprowadzona została wieloetapowa symulacja deformacji górotworu wskutek eksploatacji górniczej ścian 001, 002, 005 oraz 007. Porównanie wyników symulacji komputerowej z pomiarami geodezyjnymi prowadzonymi przy okazji rzeczywistej eksploatacji przedstawiono na rys. 3 – 10. W oparciu o wyniki symulacji komputerowych można stwierdzić, że:

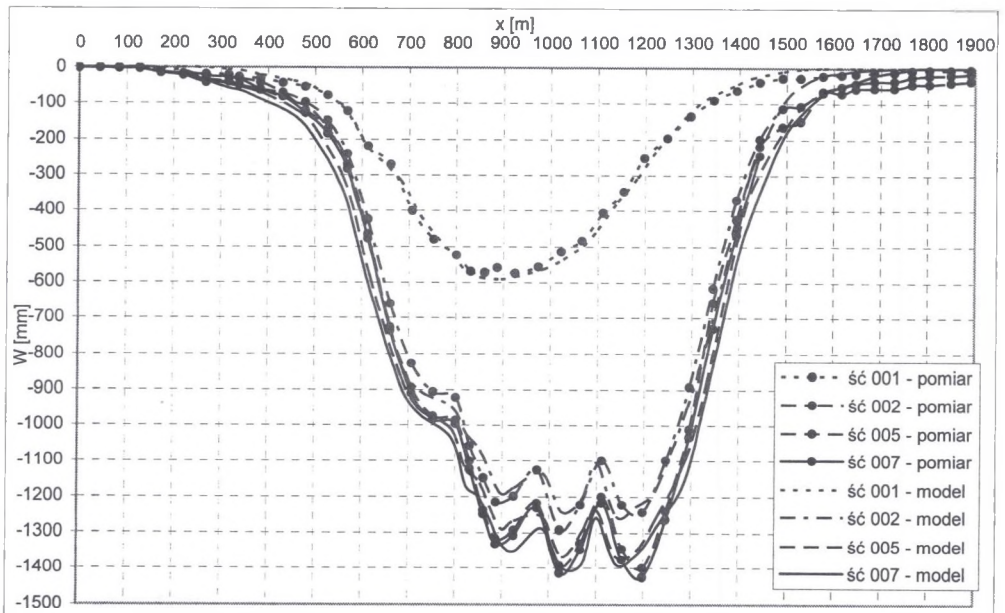
1. Uzyskane w wyniku modelowania numerycznego profile niecek teoretycznych wzdłuż rozpatrywanych linii pomiarowych 1, 2 oraz 3 charakteryzuje duża dokładność dopasowania do profili niecek wyznaczonych z pomiarów geodezyjnych (rys. 3 – 5). Dokładność ta jest praktycznie jednakowa dla wszystkich etapów eksploatacji górniczej. Różnica pomiędzy maksymalnymi obniżeniami teoretycznymi a wynikami pomiarów geodezyjnych nie przekracza 2% w odniesieniu do maksymalnych wartości obniżen wyznaczonych po każdym etapie eksploatacji górniczej.

2. Analizując linie pomiarowe 1, 2 i 3 należy zwrócić uwagę na różnice obniżeń modelowych oraz pomiarów występujące w dalszych odległościach od granic eksploatacji górniczej. Rozbieżności te spowodowane są prawdopodobnie przez czynniki nieuwzględnione w procesie modelowania.
3. Wyniki obliczeń numerycznych oraz prowadzonych pomiarów geodezyjnych wykazały, że pełna niecka obniżeniowa wykształca się dopiero po wybraniu wszystkich 4 ścian. Wcześniejsze etapy eksploatacji górniczej powodowały powstawanie na powierzchni terenu niecek niepełnych, które również udało się dość dobrze opisać w procesie symulacji komputerowej.
4. Przedstawione symulacje pokazały, że przyjęty model górotworu w sposób naturalny uwzględnia zarówno wpływ nachylenia pokładu, jak i obrzeże eksploatacyjne. Maksymalne nachylenie profilu obliczeniowego osiągało wartość $T_{max}=(2.3 \text{ do } 2.7) w_{max}/h$, co oznacza, że stosując do opisu tych niecek wzór S. Knothego należałoby przyjąć $tg\beta=2.3 \text{ do } 2.7$.
5. Odkształcenia poziome wyznaczone w wyniku modelowania numerycznego nieznacznie gorzej opisują odkształcenia poziome pomierzone, niż ma to miejsce w przypadku obniżeń. Wynika to z większej roli czynnika losowego przy kształtowaniu się tego wskaźnika deformacji. Dokładność opisu odkształceń poziomych za pomocą modelowania numerycznego jest jednakże wystarczająca dla celów praktycznych (rys. 6 do 8).
6. Oceniając ekstremalne wartości odkształceń poziomych dla wszystkich rozpatrywanych etapów symulacji komputerowych należy stwierdzić, że największy błąd pomiędzy maksymalnymi wartościami odkształceń teoretycznych (wyznaczanymi na podstawie modelu) a wartościami odkształceń uzyskanymi z pomiarów występuje po wybraniu ściany 001. Maksymalny błąd dla tego etapu eksploatacji odnotowany na linii 1 wynosi ok. 38% i dotyczy odkształceń rozciągających. W kolejnych etapach symulacji komputerowej wartość błędu odkształceń na linii 1 systematycznie maleje.
7. Podobnie jak w przypadku obniżeń odkształcenia poziome pomierzone na liniach 1, 2 oraz 3 cechuje wyraźna asymetria w stosunku do punktu środkowego niecki. Wynika to z wpływu kolejności i kierunku prowadzenia eksploatacji górniczej. Ekstremalne wartości zarówno odkształceń poziomych rozciągających, jak i ściskających są większe przy krawędzi rozruchowej ściany niż przy krawędziach zamykających eksploatację. Asymetrię tę udało się opisać dzięki zastosowaniu modelu sprężysto-kruchej do modelowania warstwy stropowej i pokładu węgla.



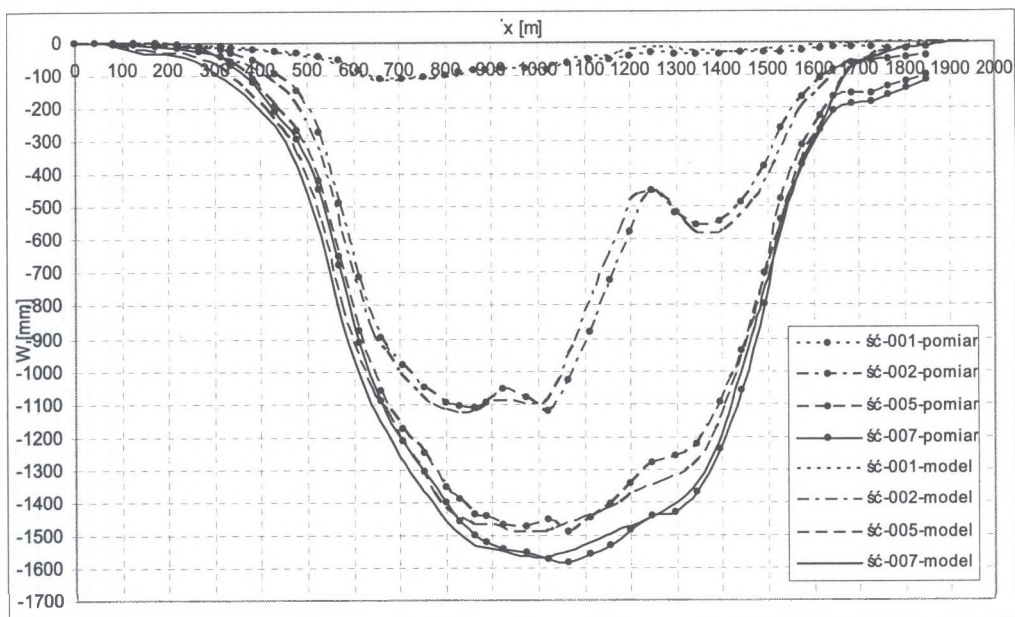
Rys. 3. Zestawienie niecek teoretycznych wyznaczonych na podstawie modelowania numerycznego i odpowiadające im wyniki pomiarów geodezyjnych – linia 1

Fig. 3. Compilation of theoretical troughs determined basing on numerical modeling with corresponding results of geodesic measurements – line 1



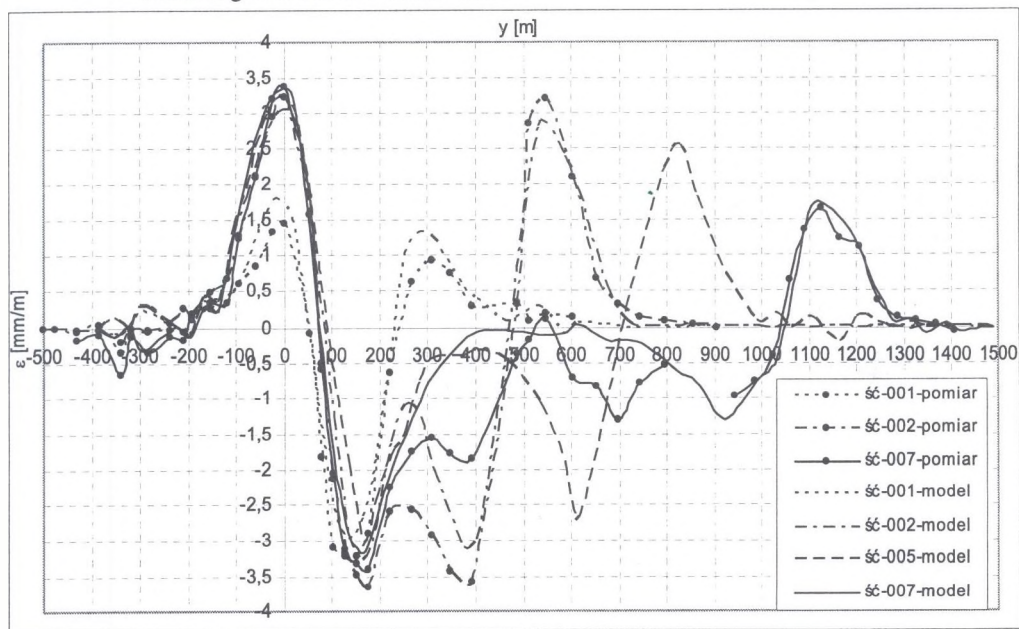
Rys. 4. Zestawienie niecek teoretycznych wyznaczonych na podstawie modelowania numerycznego i odpowiadające im wyniki pomiarów geodezyjnych – linia 2

Fig. 4. Compilation of theoretical troughs determined basing on numerical modeling with corresponding results of geodesic measurements – line 2



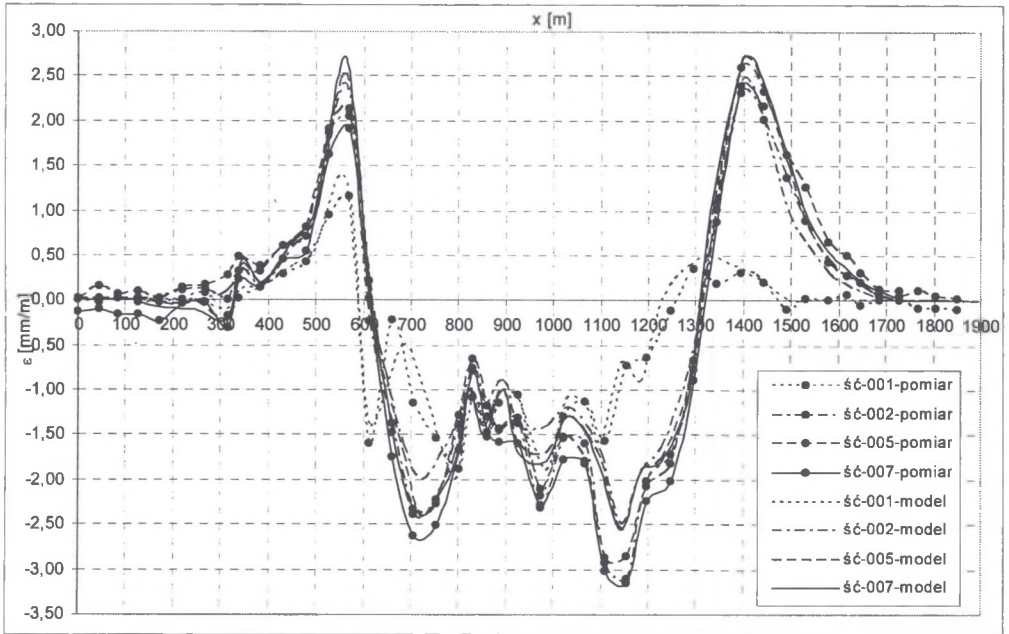
Rys. 5. Zestawienie nieek teoretycznych wyznaczonych na podstawie modelowania numerycznego i odpowiadające im wyniki pomiarów geodezyjnych – linia 3

Fig. 5. Compilation of theoretical troughs determined basing on numerical modeling with corresponding results of geodesic measurements – line 3



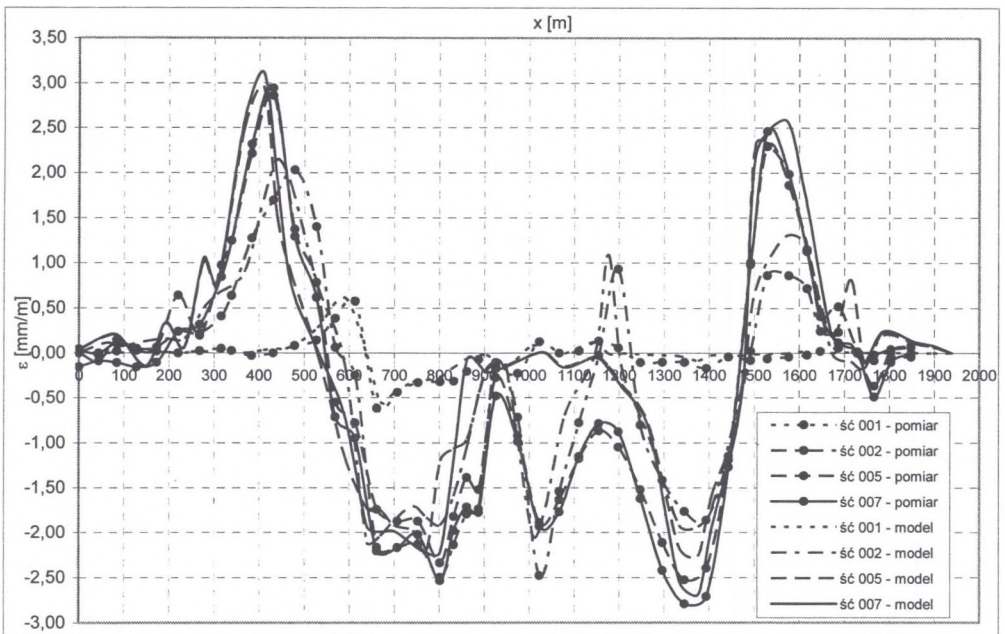
Rys. 6. Porównanie odkształceń poziomych wyznaczonych na podstawie modelowania numerycznego z pomiarami geodezyjnymi – linia 1

Fig. 6. Comparison of horizontal strains determined through numerical modeling with geodesic measurements – line 1



Rys. 7. Porównanie odkształceń poziomych wyznaczonych na podstawie modelowania numerycznego z pomiarami geodezyjnymi – linia 2

Fig. 7. Comparison of horizontal strains determined through numerical modeling with geodesic measurements – line 2



Rys. 8. Porównanie odkształceń poziomych wyznaczonych na podstawie modelowania numerycznego z pomiarami geodezyjnymi – linia 3

Fig. 8. Comparison of horizontal strains determined through numerical modeling with geodesic measurements – line 3

5. Wnioski

Przedstawiono wyniki analizy numerycznej deformacji powstałych na powierzchni terenu pod wpływem prowadzonej wieloetapowej eksploatacji górniczej. Układ warstw, strukturę modelu górotworu oraz schemat eksploatacji przyjęto na podstawie danych z KWK „Budryk”. W oparciu o uzyskane wyniki symulacji komputerowych stwierdzono, że:

1. Posługując się przypadkiem rzeczywistej eksploatacji pokazano, że istnieje możliwość opisu obniżen terenu górnicego spowodowanych wieloetapową eksploatacją górniceą. Różnica wyników pomiarów geodezyjnych dla 4 etapów eksploatacji i wyników symulacji komputerowej charakteryzuje się błędem średnim o wartości nie większej niż 30mm, co stanowi ok. 2% obniżen maksymalnych.
2. Przeprowadzona symulacja komputerowa wykazała, że przy zastosowaniu modeli numerycznych istnieje możliwość opisu zarówno pionowych, jak i poziomych ruchów górotworu wywołanych eksploatacją górniceą. Prawidłowy opis tych ruchów uzyskano wprowadzając do modelu numerycznego liniowo-sprężystego ortotropowego elementy kontaktowe do modelowania połączeń poszczególnych warstw.
3. Maksymalny bład dopasowania ekstremalnych wartości odkształceń poziomych w wyniku modelowania numerycznego względem wartości pomierzonych wyniósł na linii 1 ok. 38%. Bład taki wystąpił w rejonie południowej krawędzi ściany 1 po pierwszym etapie eksploatacji i dotyczy odkształceń poziomych rozciągających. Tak duży bład jest wynikiem zastosowania liniowo-sprężystego modelu ośrodka skalnego, który szczególnie przy niewielkim polu wybrania nie pozwala na pełne odwzorowanie zjawisk deformacyjnych. Modelując kolejne etapy eksploatacji uzyskano znacznie lepsze wyniki dopasowania ekstremalnych odkształceń poziomych, a ich błędy nie przekraczają 13% wartości pomierzonych.
4. Dużym uproszczeniem prezentowanych modeli górotworu jest liniowo-sprężysta charakterystyka ośrodka skalnego, szczególnie w odniesieniu do warstwy nadkładowej. Uwzględnienie nieliniowości parametrów mechanicznych skał oraz wytrzymałości poszczególnych warstw tworzących model może przyczynić się do poprawy dokładności opisu wielu wskaźników deformacji.

LITERATURA

1. -----: COSMOS/M version 1.75. Podręcznik użytkownika.
2. Filcek H., Walaszczyk J., Tajduś A.: Metody komputerowe w geomechanice górniczej. Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice 1994.
3. Kidybiński A.: Podstawy geotechniki kopalnianej. „Śląsk”, Katowice 1982.
4. Kłęczek Z.: Geomechanika górnicza. Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice 1994.
5. Kwaśniewski M., Wang J.: Analiza numeryczna deformacji górotworu wywołanych eksploatacją górniczą. Materiały Szkoły Eksploatacji Podziemnej’96, Kraków 1996.
6. Mielimąka R., Wesołowski M.: Modelowanie metodą elementów skończonych wieloetapowego procesu obniżen i odkształceń poziomych terenu górniczego. Zesz. Nauk. Pol. Śl., s. Górnictwo, z. 261, Gliwice 2004.
7. Praca zbiorowa: Ochrona powierzchni przed uszkodzeniami górniczymi. „Śląsk”, Katowice 1980.
8. Wesołowski M.: Numeryczny model wyrobiska korytarzowego w górotworze uwarstwionym. Zesz. Nauk. Pol. Śl., s. Górnictwo, z. 254, Gliwice 2002.
9. Wesołowski M.: Wybrane aspekty modelowania numerycznego ruchów górotworu pod wpływem eksploatacji podziemnej i jej oddziaływania na obiekty. Praca doktorska (niepublikowana), Gliwice 2001.

Recenzent: Dr hab. inż. Ryszard Hejmanowski