

Ryszard MIELIMAŁA, Marek WESOŁOWSKI
Politechnika Śląska, Gliwice

ZASTOSOWANIE NUMERYCZNEGO MODELU OŚRODKA SKALNEGO DO PRZESTRZENNEGO OPISU PROCESU DEFORMACJI TERENU GÓRNICZEGO W NIEPEŁNEJ NIECCE OBNIŻENIOWEJ W WARUNKACH KWK BUDRYK

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki modelowania metodą elementów skończonych deformacji górotworu poddanego wpływowi eksploatacji górniczej. Symulacja komputerowa obejmowała eksploatację zawałową ściany B-2 w KWK Budryk. Górotwór potraktowano jako ośrodek transwersalnie anizotropowy o niezmiennych parametrach. Porównanie wyników obliczeń numerycznych z wynikami pomiarów 2 linii obserwacyjnych 700 i 800, przedstawiających obniżenia i odkształcenia poziome po wybraniu ściany B-2, wykazało możliwość dosyć dokładnego opisu deformacji powierzchni terenu za pomocą przyjętego przestrzennego modelu numerycznego.

APPLICATION OF A NUMERICAL MODEL OF ROCK MEDIUM FOR THE SPATIAL DESCRIPTION OF MINING AREA DEFORMATION PROCESS IN INCOMPLETE SUBSIDENCE TROUGH IN THE CONDITIONS OF COAL MINE BUDRYK

Summary: The paper presents the modelling results of rockmass subjected to mining works, with the finite elements method being applied. The computer simulation covered the working with caving of the longwall B-2 in Coal Mine "Budryk". The rockmass was treated as transversally anisotropic medium of constant parameters. The comparison of the results of numerical calculations with the measurement results of 2 observation lines 700 and 800, which present the subsidence and horizontal strain after the excavation of longwall B-2, allowed to obtain a relatively precise description of surface ground deformation using the accepted spatial numerical model.

1. Wprowadzenie

Od kilku lat autorzy prowadzą badania nad zastosowaniem metody elementów skończonych do opisu deformacji terenu górniczego. Dotychczasowym efektem tych prac jest wypracowanie metodyki postępowania przy opisie końcowych przemieszczeń poziomych i pionowych. Udało się uzyskać w płaskim i przestrzennym wariancie metody elementów skończonych zgodny z obserwacją opis obniżeń, zaś w płaskim wariancie tej metody – jednoczesny opis obniżeń i odkształceń poziomych dla eksploatacji w kształcie półpłaszczyzny, a także dla wieloetapowej eksploatacji kilkoma ścianami.

W artykule przedstawiono wyniki prac badawczych przeprowadzonych na kolejnym etapie badań nad tym zagadnieniem. W ich ramach przetestowano opracowaną metodykę postępowania przy jednoczesnym opisie obniżeń i odkształceń poziomych metodą elementów skończonych rozszerzając ją na wariant przestrzenny tej metody. Przeprowadzono to opierając się na symulacji komputerowej eksploatacji zawałowej ściany B-2 w KWK Budryk. Do weryfikacji otrzymanych rezultatów modelowania posłużono się wynikami obserwacji geodezyjnych z dwóch prostopadłych do siebie linii pomiarowych przedstawiających obniżenia i odkształcenia poziome powierzchni terenu po zakończeniu eksploatacji tej ściany. Obliczenia realizowano przy użyciu programu COSMOSM.

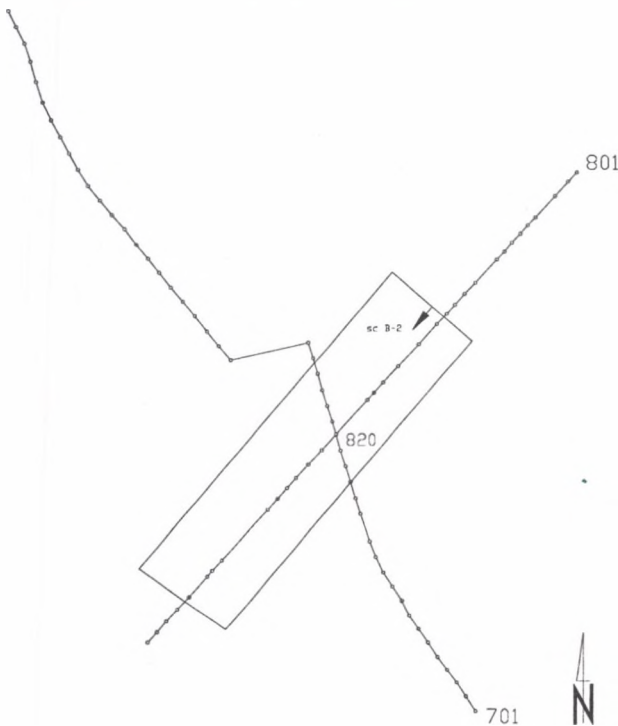
2. Warunki górniczo-geologiczne i prowadzone pomiary geodezyjne

Do budowy modelu ośrodka skalnego oraz weryfikacji wyników uzyskiwanych w trakcie prowadzonych obliczeń numerycznych, wykorzystano dokumentację geologiczno-górnica z rejonu ściany B-2 w pokładzie 338/2 KWK Budryk oraz wyniki pomiarów geodezyjnych przeprowadzonych na liniach pomiarowych 700 i 800 zastabilizowanych nad tą eksploatacją. Eksploatacja ściany B-2 prowadzona była w typowych, jak na warunki GOP, warstwach geologicznych, charakteryzujących się średniej grubości nadkładem, w którym występują skały czwartorzędowe o miąższości ok. 30 m i triasowe o miąższości ok. 65 m oraz karbonem, który – w rozpoznanych warstwach orzeskich oraz w górnej części warstw rudzkich – zbudowany jest z naprzemianległych warstw iłowców, mułowców, piaskowców i pokładów węgla (o numerach od 320 do 364/2). W rejonie oddziaływania wpływów

eksploatacji nie występują przy tym większe dyslokacje tektoniczne, mogące w sposób istotny wpływać na przebieg deformacji powierzchni terenu.

Eksploatacja ściany B-2 w pokładzie 338/2 odbywała się w warunkach górotworu nienaruszonego wcześniejszymi eksploatacjami. Była prowadzona systemem zawałowym w okresie od 1.05.2001 r. do 1.07.2002 r., na głębokości od 530 m do 570 m. Długość ściany wynosiła ok. 250 m, zaś jej wybieg ok. 920 m. Nachylenie pokładu w rejonie tej ściany waha się od 6° do 8° , a jego wysokość, równa wysokości ściany, zmienia się w przedziale od 2,4 m do 2,9 m.

Wpływy eksploatacji ściany B-2 w pokładzie 338/2 były obserwowane na dwóch liniach pomiarowych zastabilizowanych poprzecznie (700) oraz wzdłuż (800) wybiegu ściany (rys. 1). Linie te składają się odpowiednio z 48 i 34 punktów.



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

Wysokości punktów obserwacyjnych na liniach 700 i 800 określano metodą niwelacji precyzyjnej w dowiązaniu do reperów państwowych II klasy 661, 0603 i 2011. Punkty te znajdowały się poza strefą wpływu dotychczasowej eksploatacji. Pomiar wykonano

niwelatorem kodowym DI-101 firmy Topcon z zastosowaniem łań inwarowych. Sieć niwelacyjną złożoną z ciągów nawiązanych, kontrolnych i na liniach obserwacyjnych wyrównano programem „Geonet”. W wyniku wyrównania otrzymano średnie błędy wyznaczenia wysokości punktów, mieszczące się w granicach od 1,6 mm do 2,9 mm.

Pomiary długości odcinków linii pomiarowych wykonywano tachimetrem GTS 601 firmy Topcon z zastosowaniem pionowników optycznych do centrowania instrumentu i sygnałów. Długość każdego odcinka była mierzona dwukrotnie, z obu jego końców.

Wykonano 7 cykli obserwacyjnych, przy czym do porównania z rezultatami modelowania numerycznego wykorzystano wyniki cyklu ostatniego przeprowadzonego po w zasadzie całkowitym ujawnieniu się wpływów eksploatacji ściany B-2 w pokładzie 338/2.

3. Model górotworu

Dla opisanych wyżej warunków górniczo-geologicznych zbudowano numeryczny model górotworu wraz z eksploatacją. Model ten przedstawia przestrzenną bryłę górotworu, której podstawa ma wymiary 1925 m × 1250 m oraz wysokość (głębokość) 650 m (rys. 2).

W modelu tym pokład węgla, odpowiadający pokładowi 338/2, zamodelowano na średniej głębokości wynoszącej 500 m. Powyżej niego umieszczono 11 warstw górotworu karbońskiego oraz trzy warstwy nadkładowe. Spąg pokładu opisano za pomocą czterech warstw. Każda z przyjętych w modelu warstw reprezentuje zastępczy ośrodek dla wyodrębnionych z profilu litologicznego zespołów warstw skalnych cechujących się zbliżonymi parametrami wytrzymałościowymi, a wartości tych parametrów dobrano jako średnie z całego pakietu skalnego [11].

Przyjęto, że spąg pokładu i warstwa stropowa będą stanowić ośrodek sprężysto-kruchy, zaś pozostałe warstwy – ośrodek liniowo-sprężysty ortotropowy [3, 4, 9]. Dobór kolejnych cech tych ośrodków ma następujące uzasadnienie:

- ośrodek ciągły – liniowy – tylko taki ośrodek umożliwia wykonanie obliczeń dla dużych trójwymiarowych modeli górotworu,
- ośrodek transwersalnie anizotropowy – zastosowanie modelu anizotropowego było konieczne do opisu profili obniżenia końcowych zgodnych z obserwacją. Gdy górotwór zamodelujemy jako ośrodek izotropowy, to uzyskamy zbyt płaskie profile niecek obniżeniowych,

- ośrodek sprężysto-kruchy – uwzględnienie wyężenia górotworu jest konieczne dla opisu wpływu kierunku eksploatacji na kształt niecki obniżeniowej.

Wszystkie wyróżnione w modelu warstwy stanowią odrębne części połączone pomiędzy sobą elementami typu „GAP” [1, 10]. Spójność płaszczyzn rozdziału dobrana została na podstawie kryterium opadu nie podpartych skał stropowych przy wykorzystaniu profilu oporów rozwarstwienia [7] i dla wszystkich płaszczyzn wynosi 0,4 [MPa].

Parametry materiałowe warstw wyznaczone zostały na podstawie profilu litologicznego oraz wyników badań laboratoryjnych udostępnionych przez KWK Budryk [2]. Zakres zmienności parametrów materiałowych warstw skalnych przedstawiono w tablicy nr 1.

Tablica 1

Zakres zmienności parametrów warstw

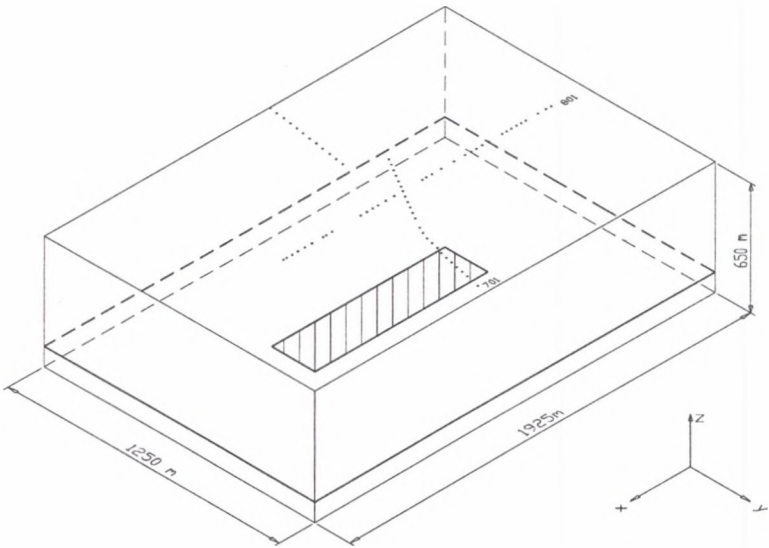
	E_x, E_y [MPa]	E_z [MPa]	ν [-]	ρ [kg/m ³]	R_c [MPa]	R_r [MPa]
Gleba	80–120	8–12	0,25–0,3	2000–2200	1–1,5	0,01–0,015
Piaskowce	8000–14000	800–1400	0,12–0,15	2400–2500	60–80	6–8
Mułowce	6000–6600	600–660	0,13–0,15	2400–2450	50–60	5–6
Iłowce	7000–8500	700–850	0,12–0,13	2450–2550	60–70	6–7
Węgiel	1100–1500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

W części centralnej modelu symulowano eksploatację górnictwem z zawładem skał stropowych dla ściany B-2. Skrajne części modelu stanowią rejon wyłączony spod bezpośredniej eksploatacji górnictwem.

Na powierzchni modelu odwzorowano dokładne położenie punktów pomiarowych znajdujących się na liniach 700 i 800 (rys. 2).

Dla wykonania obliczeń metodą elementów skończonych 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 [5, 6].

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 według klasycznej teorii sprężystości [8].



Rys. 2. Model górotworu
Fig. 2. Rockmass model

4. Wyniki symulacji komputerowej

Na bazie przedstawionego powyżej modelu przeprowadzona została symulacja komputerowa eksploatacji górniczej z zawalem skał stropowych w polu ściany B-2. Wyniki symulacji komputerowej oraz odpowiadające im wyniki pomiarów geodezyjnych prowadzonych przy okazji rzeczywistej eksploatacji przedstawiają rysunki 3 do 6.

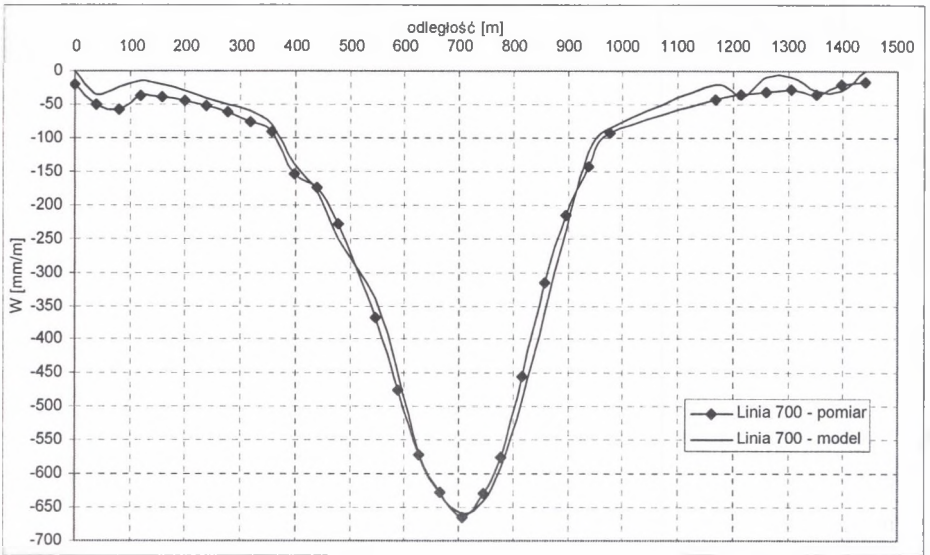
Opierając się na uzyskanych wynikach obliczeń numerycznych można stwierdzić, że:

1. Uzyskane na drodze modelowania numerycznego profile niecek teoretycznych wzdłuż linii 700 i 800 charakteryzuje znaczna dokładność dopasowania do profili niecek wyznaczonych z pomiarów geodezyjnych (rysunki 3 i 5). Dokładność ta jest praktycznie jednakowa dla linii pomiarowej biegnącej wzdłuż wybiegu ściany i dla linii prostopadłej. Różnica maksymalnych obniżen teoretycznych i wyznaczonych z obserwacji geodezyjnych nie przekracza 1 % maksymalnych obniżen pomierzonych na liniach 700 i 800.
2. W profilu niecki zarejestrowanej pomiarami geodezyjnymi na linii 800 (rys. 5) wyraźnie widoczna jest asymetria wpływów, co świadczy o wpływie kierunku eksploatacji na jego kształt. Maksymalne nachylenie zbocza tej niecki położonego nad krawędzią rozruchu ściany B-2 jest większe od maksymalnego nachylenia zbocza usytuowanego nad

miejszem zakończenia eksploatacji w tym wyrobisku. Różne jest także przesunięcie skrzydeł profilu niecki w kierunku przestrzeni wybranej. Podobny stopień asymetrii uzyskano w wyniku obliczeń numerycznych dzięki zastosowaniu modelu sprężysto-kruchego do modelowania warstwy stropowej i pokładu węgla.

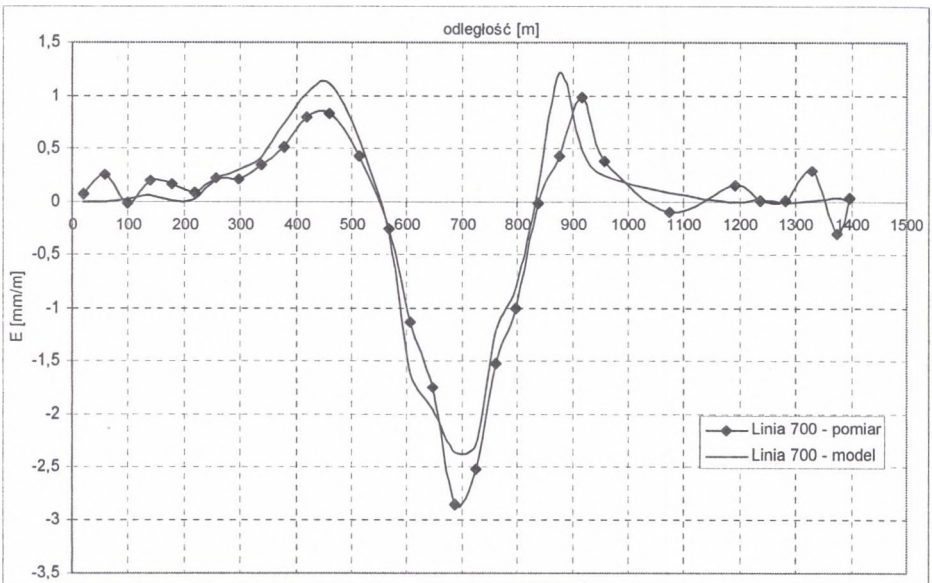
3. Przesunięcie punktu o wartości $0,5 W_{\max}$ w kierunku zrobów ściany B-2 wynosi na linii 800 ok. $0,10h$ dla krawędzi rozpoczęcia eksploatacji oraz ok. $0,37h$ dla miejsca zatrzymania eksploatacji. Przesunięcie to w przypadku mniej więcej prostopadłej do kierunku eksploatacji linii 700 jest jednakowe dla obydwu krawędzi tej eksploatacji i wynosi ok. $0,23h$. Jest to wartość średnia z przesunięć w stronę zrobów zboczy niecki otrzymanych z pomiarów na linii 800.
4. Odształcenia poziome wyznaczone na drodze modelowania numerycznego metodą elementów skończonych nieznacznie gorzej opisują odształcenia poziome pomierzone, niż ma to miejsce w przypadku obniżeń. Wynika to z większej roli czynnika losowego przy kształtowaniu się tego wskaźnika deformacji. Dokładność opisu odształceń poziomych za pomocą modelowania numerycznego jest jednakże wystarczająca dla celów praktycznych i jest porównywalna do dokładności opisu modelami geometryczno-całkowymi.
5. Przebieg teoretycznych odształceń poziomych wzdłuż obydwu linii pomiarowych dobrze odwzorowuje przebieg odształceń poziomych wyznaczonych pomiarami geodezyjnymi. W przypadku linii 700 (rys. 4) ekstremalne wartości odształceń poziomych wyznaczonych z modelowania numerycznego są w strefach rozciągania większe od wartości pomierzonych o ok. 20 %, natomiast w strefie ściskania wartości obliczone są mniejsze od pomierzonych o ok. 20 %. W przypadku linii 800 (rys. 6) rozbieżności pomiędzy ekstremalnymi wartościami odształceń poziomych teoretycznymi i pomierzonymi są znacznie mniejsze.
6. Podobnie jak w przypadku obniżeń, odształcenia poziome pomierzone na linii 800 cechuje wyraźna asymetria w stosunku do punktu środkowego niecki (rys. 6) wynikająca z wpływu kierunku eksploatacji na ich wielkość. Ekstremalne wartości zarówno odształceń poziomych rozciągających, jak i ściskających są większe przy krawędzi ruchowej ściany, niż przy krawędzi ją zamykającej. Asymetrię tę udało się opisać dzięki zastosowaniu modelu sprężysto-kruchego do modelowania warstwy stropowej i pokładu węgla.

Asymetria w przebiegu odształceń poziomych pomierzonych nie występuje, gdy rozpatrujemy je wzdłuż linii prostopadłej do kierunku eksploatacji (rys. 4).



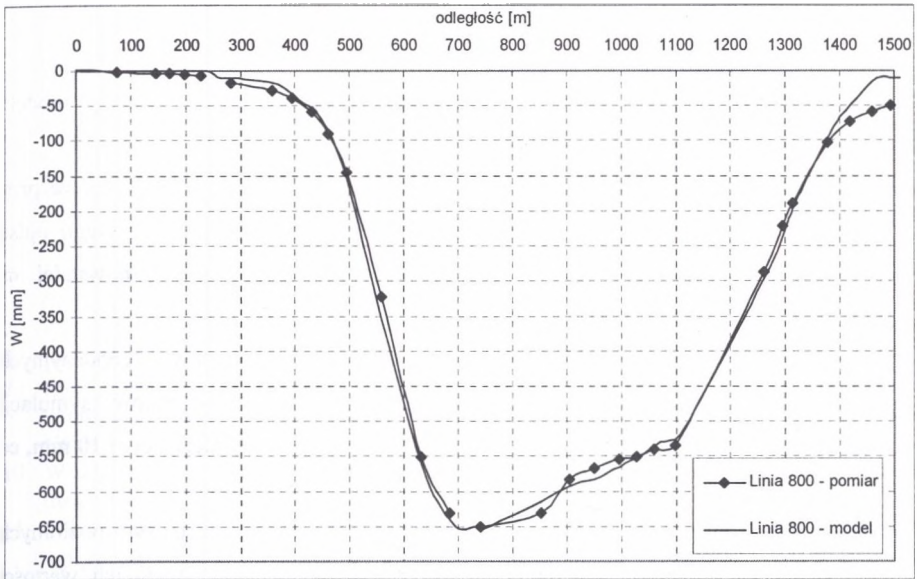
Rys. 3. Porównanie niecki teoretycznej wyznaczonej na podstawie modelowania numerycznego z odpowiadającą jej niecką pomiarzoną – linia 700

Fig. 3. Comparison of the theoretical trough determined on the basis of numerical modelling with the corresponding to it measured trough – line 700



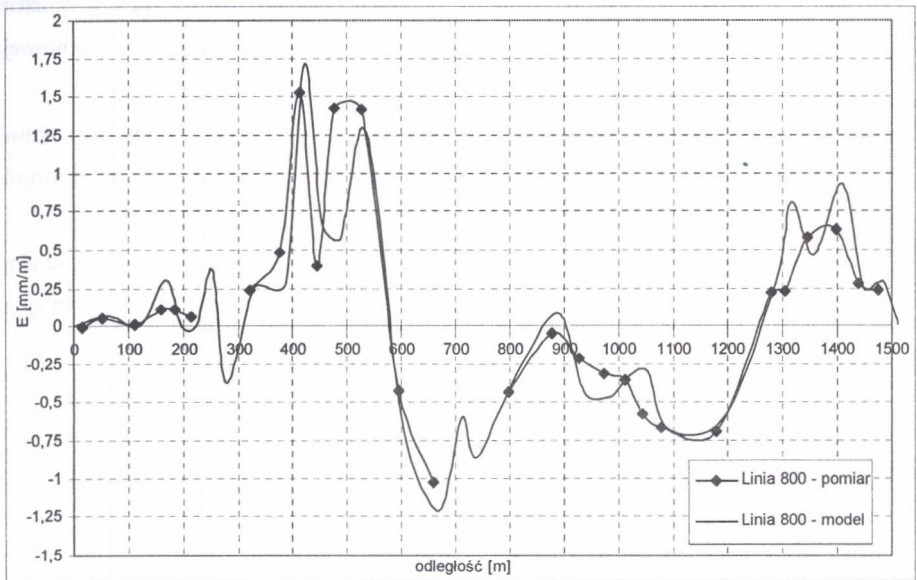
Rys. 4. Porównanie odkształceń poziomych wyznaczonych na drodze modelowania numerycznego z odkształceniami poziomymi wynikającymi z pomiarów geodezyjnych – linia 700

Fig. 4. Comparison of horizontal strains determined through numerical modelling with the horizontal strains taken from geodesic measurements – line 700



Rys. 5. Porównanie niecki teoretycznej wyznaczonej na podstawie modelowania numerycznego z odpowiadającą jej niecką pomiarową – linia 800

Fig. 5. Comparison of the theoretical trough determined on the basis of numerical modelling with the corresponding to it measured trough – line 800



Rys. 6. Porównanie odkształceń poziomych wyznaczonych na drodze modelowania numerycznego z odkształceniami poziomymi wynikającymi z pomiarów geodezyjnych – linia 800

Fig. 6. Comparison of horizontal strains determined through numerical modelling with the horizontal strains taken from geodesic measurements – line 800

5. Podsumowanie i wnioski

Na podstawie uzyskanych rezultatów symulacji komputerowej trójwymiarowego modelu górotworu metodą elementów skończonych można stwierdzić:

1. W artykule, posługując się przypadkiem rzeczywistej eksploatacji, pokazano, że przy stosowaniu metody elementów skończonych istnieje możliwość jednoczesnego opisu obniżeń i odkształceń poziomych w niepełnej niecce obniżeniowej, powstałej na powierzchni po wybraniu pojedynczego wyrobiska ścianowego.
2. Różnica obniżeń maksymalnych wyznaczonych z pomiarów geodezyjnych przeprowadzonych na liniach pomiarowych 700 i 800 i wyników symulacji komputerowej charakteryzuje się maksymalnym błędem nie przekraczającym 10 mm, co stanowi ok. 1 % obniżeń maksymalnych.
3. Maksymalny błąd dopasowania ekstremalnych wartości odkształceń poziomych uzyskanych na drodze modelowania numerycznego wyniósł ok. 30 % ich wartości pomierzonych. Tak duży błąd dopasowania dotyczy przede wszystkim odkształceń rozciągających na linii 700. W przypadku linii 800 rozbieżności pomiędzy pomiarami a wynikami modelowania numerycznego są dużo mniejsze.
4. Autorzy nie znają opisanego w literaturze przypadku stosunkowo dobrego, a zarazem jednoczesnego opisu obniżeń i odkształceń poziomych w niepełnej niecce obniżeniowej, uzyskanego przy wykorzystaniu tego samego modelu numerycznego.
5. Na podkreślenie zasługuje prostota przyjętego modelu. Dzięki temu można stosunkowo szybko wykonać wielowariantowe analizy deformacji przestrzennego modelu górotworu, wynikających z prowadzonej eksploatacji górniczej.
6. Przedstawione symulacje pokazały, że przyjęty model górotworu w sposób naturalny uwzględnia obrzeże eksploatacyjne oraz asymetrię wpływów eksploatacji w miejscu rozpoczęcia i zakończenia prowadzonej eksploatacji.

LITERATURA

1. COSMOS/M version 1.75. Podręcznik użytkownika.
2. Materiały źródłowe KWK Budryk.
3. Białek J., Mielimaka R., Wesołowski M.: Ein linear, transversal-anisotropisches Gebirgsmodell zur Modellierung abbaubedingter Gebirgsbewegungen. Schriftenreihe des

- Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie der TU Bergakademie Freiburg, heft 1, 2002.
4. Białek J., Mielimąka R., Wesołowski M.: Zastosowanie transversalnie anizotropowego modelu górotworu do opisu wieloetapowego procesu obniżenia terenu górniczego. Materiały Konferencji nt. „Aktualni problémy dulniho merictvi a geologie”, Destne w Orlických Horach (Czechy), 27–29 listopad 2001. Str. 29 – 38. ISBN 80-248-005-5.
 5. Drzęzła B., Wesołowski M.: Określenie stref deformacji w górotworze w czasie rozruchu wyrobiska ścianowego. Część I: Ogólne zasady numerycznego modelowania górotworu. Zesz. Nauk. Pol. Śl. Z. 239, Gliwice 1999.
 6. Filcek H., Wałaszczuk J., Tajduś A.: Metody komputerowe w geomechanice górniczej. Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice 1994.
 7. Kidybiński A.: Podstawy Geotechniki Kopalnianej. Wydawnictwo Śląsk 1982.
 8. Kłeczek Z.: Geomechanika górnicza. Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice 1994.
 9. Mielimąka R., Wesołowski M.: Modelowanie metodą elementów skończonych wieloetapowego procesu obniżenia i odkształceń poziomych terenu górniczego. Zesz. Nauk. Pol. Śl. Gliwice 2004.
 10. Wesołowski M.: Numeryczny model wyrobiska korytarzowego w górotworze uwarstwionym. Zesz. Nauk. Pol. Śl. Gliwice 2002. Z. 254.
 11. 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