

Ryszard MIELIMAŁA, Marek WESOŁOWSKI
Politechnika Śląska, Gliwice

JEDNOCZESNY OPIS OBNIŻEŃ I ODKSZTAŁCEŃ POZIOMYCH TERENU GÓRNICZEGO PRZESTRZENNYM WARIANTEM METODY ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki modelowania przestrzennym wariantem metody elementów skończonych deformacji górotworu poddanego wpływowi wieloetapowej eksploatacji górniczej. Symulacja komputerowa obejmowała zawałową eksploatację ścian 1, 2 i 3 w pokładzie 354 w KWK „Chwałowice”. Górotwór potraktowano jako ośrodek transwersalnie anizotropowy o niezmiennych parametrach, w którym poszczególne warstwy połączone są elementami typu GAP. Porównanie wyników obliczeń numerycznych z wynikami pomiarów przedstawiających obniżenia i odkształcenia poziome po wybraniu poszczególnych ścian wykazało możliwość dosyć dokładnego opisu deformacji powierzchni terenu za pomocą przyjętego przestrzennego modelu numerycznego.

SIMULTANEOUS DESCRIPTION OF SUBSIDENCE AND HORIZONTAL STRAINS WITH THE USE OF THE SPATIAL VARIANT OF FINITE ELEMENT METHOD

Summary. In this article results of modelling performed using the spatial variant of finite element method of deformations of rock mass influenced by multistage mining have been presented. The computer simulation included: controlled caving of longwalls 1, 2, 3 in seam 354 of “Chwałowice” coalmine. The rock mass has been treated as a transversal-anisotropic medium of constant parameters, in which individual layers are interconnected with the use of GAP type elements. The comparison of results of numerical calculations and geodesic measurements describing subsidences and horizontal strains after exploitation of individual longwalls has showed the possibility of quite accurate description of terrain surface deformation with the use of described spatial numerical model.

1. Wprowadzenie

Podstawowym problemem, jaki występuje w modelowaniu numerycznym, jest właściwy dobór modelu ośrodka opisującego górotwór, tak by wyniki były zgodne z obserwacjami. Dotychczasowe badania prowadzone przez autorów nad tym zagadnieniem pozwoliły stwierdzić, że najprostszym ośrodkiem zapewniającym jakościowo i ilościowo dobry opis obniżeń jest ośrodek ortotropowy, czyli ośrodek posiadający inne własności w kierunku poziomym oraz inne w kierunku pionowym. Ośrodek ten zapewnia dobry opis maksymalnych nachyleń charakteryzujących nieckę obniżeniową [2].

Obserwowaną w praktyce asymetrię niecki względem pola wybrania, związaną z wpływem kolejności i kierunku eksploatacji, uzyskano opisując pokład węgla oraz warstwę stropową tego pokładu nieliniowym ośrodkiem sprężysto-kruchym [2, 5].

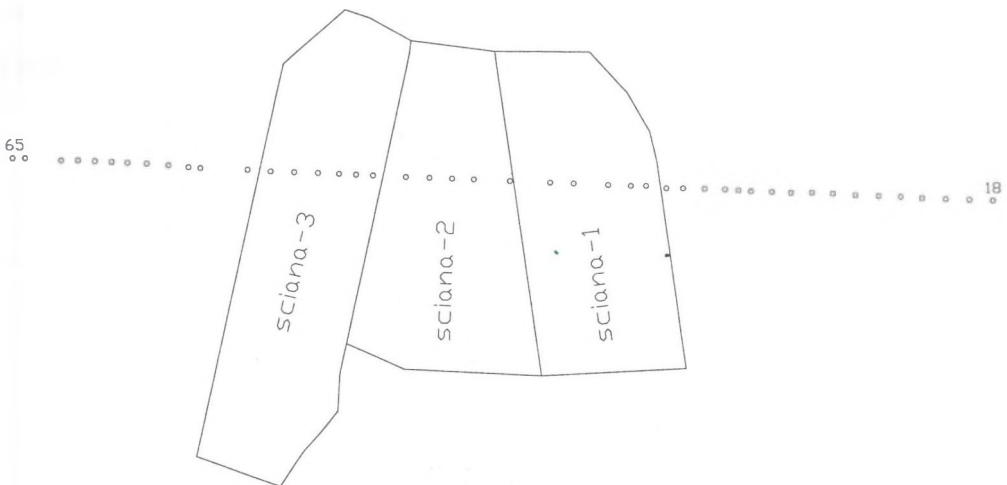
Dla uzyskania dobrego opisu zarówno ruchów poziomych, jak i pionowych zastosowano model górotworu będący układem ortotropowych warstw połączonych pomiędzy sobą elementami typu „GAP”, pozwalającymi na symulację poślizgów międzywarstwowych oraz tworzenie się pustek pomiędzy współpracującymi warstwami modelu. W pracy [5] pokazano, że, stosując taki model górotworu, jest możliwy jednoczesny dobry opis obniżeń i odkształceń poziomych dla wariantu płaskiego metody elementów skończonych.

W niniejszym 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. Przeprowadzono to na podstawie symulacji komputerowej zawałowej eksploatacji ścian 1, 2 i 3 w pokładzie 354 w kopalni „Chwałowice”. Do weryfikacji otrzymanych rezultatów modelowania posłużono się wynikami obserwacji geodezyjnych z linii pomiarowej usytuowanej poprzecznie do kierunku wybiegu tych ścian. Przedstawiają one obniżenia i odkształcenia poziome powierzchni terenu po zakończeniu eksploatacji każdej z nich. Modelowanie numeryczne realizowano przy użyciu programu COSMOSM [1].

2. Warunki górniczo-geologiczne i prowadzone pomiary geodezyjne

KWK „Chwałowice” prowadziła w latach 1968 ÷ 71 eksploatację pokładu 354 systemem ścianowym z zawałem skał stropowych. Pokład w analizowanym rejonie miał miąższość ok. 1,7 m i zalegał praktycznie poziomo na głębokości 270-320 m. Górotwór nadległy tworzą warstwy piasków, żwirów, glin czwartorzędowych, iłów i piasków miocenijskich o łącznej miąższości 220 m oraz warstwy brzeskie wykształcone w postaci facji łupkowo-piaskowcowej ze zdecydowaną przewagą łupków.

Nad rejonem eksploatacji założono linię pomiarową 1A usytuowaną prostopadłe do wybiegu ścian 1, 2 i 3 w pokładzie 354 (rys. 1). Linia ta składała się z punktów zastabilizowanych w odległościach wynoszących od 20 m do 30 m. Wpływy eksploatacji obserwowane były pomiarami geodezyjnymi prowadzonymi na tej linii w cyklach miesięcznych i dwumiesięcznych. W okresie wybierania przedmiotowych ścian wykonano 14 cykli pomiarów wysokościowych i pomiarów długości odcinków linii. Do modelowania numerycznego przyjęto wyniki obserwacji z trzech cykli pomiarowych wykonanych po zakończeniu eksploatacji w poszczególnych ścianach.



Rys. 1. Położenie linii pomiarowej 1A w stosunku do ścian 1, 2 i 3 w pokładzie 354

Fig. 1. Position of measurement line 1A in relation to longwalls 1, 2, and 3 in seam 354

3. Model górotworu

Na podstawie przedstawionego wcześniej opisu warunków górnictwo-geologicznych zbudowany został numeryczny model ośrodka skalnego. Stanowi on fizykalne oraz strukturalne odwzorowanie górotworu w rejonie eksploatacji ścian 1, 2 oraz 3 w pokładzie 354 w KWK "Chwałowice". Model ten przedstawia przestrzenną bryłę górotworu, którego podstawa ma wymiary 1040 m x 1000 m oraz wysokość (głębokość) 450 m (rys. 2).

Powyżej eksploatowanego pokładu 354 zamodelowano kolejno 7 warstw zastępczych, będących odpowiednikiem górotworu karbońskiego oraz nadkładu. Spąg pokładu opisano za pomocą dwóch warstw. Wszystkie wyróżnione w modelu warstwy są jednorodnymi ośrodkami ortotropowymi i stanowią ekwiwalent dla pakietu cienkich warstw skalnych. Pokład węgla oraz warstwa stropowa tego pokładu opisane zostały nieliniowym modelem sprężysto-kruchym. Pozostałe warstwy tworzące model opisane zostały modelem liniowo-sprężystym - ortotropowym [2].

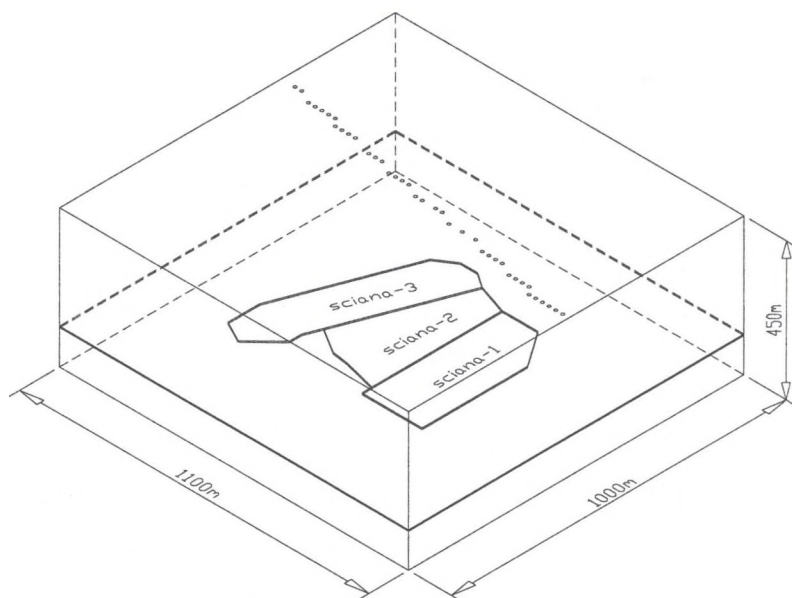
Parametry materiałowe wszystkich warstw wyznaczone zostały na podstawie wyników badań laboratoryjnych udostępnionych przez KWK „Chwałowice”. Brakujące parametry odkształceniowe warstw skalnych przyjęto z literatury [4]. Zakres zmienności parametrów materiałowych warstw skalnych przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 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	9000÷15000	800÷1400	0,12÷0,15	2400÷2500	50÷90	5÷9
Mułowce	5000÷6600	600÷660	0,13÷0,15	2400÷2450	40÷60	4÷6
Iłowce	7000÷8500	700÷850	0,12÷0,13	2450÷2550	60÷80	6÷8
Węgiel	1100÷2200	110÷220	0,25÷0,28	1400	10÷22	1,0÷2,2

Wszystkie wyróżnione w modelu warstwy stanowią odrębne części połączone pomiędzy sobą elementami typu „GAP”[6]. Zastosowanie tego typu połączeń pozwala na symulację poślizgów międzywarstwowych oraz tworzenie się pustek pomiędzy współpracującymi warstwami modelu. Spójność płaszczyzn rozdziału dobrana została na podstawie kryterium opadu niepodpartych skał stropowych, przy wykorzystaniu profili oporów rozwarstwienia [4] i dla wszystkich płaszczyzn wynosi 0.4 [MPa].



Rys. 2. Przestrzenny model górotworu

Fig. 2. Spatial model of rock mass

Przedstawiony powyżej model podzielony został siatką elementów prostopadłościennych, których wymiary zależne są od opisywanej warstwy górotworu. Budując siatkę elementów modelu górotworu, przyjęto zasadę, że punkty węzłowe znajdujące się na skrajnych płaszczyznach bocznych modelu mogą przemieszczać się jedynie w obrębie tych płaszczyzn. Punkty węzłowe, które znajdują się na podstawie, mogą natomiast przemieszczać się jedynie w obrębie płaszczyzny X-Y. Pozostałe węzły przynależne do modelu mogą swobodnie przemieszczać się w dowolnym kierunku [2, 3].

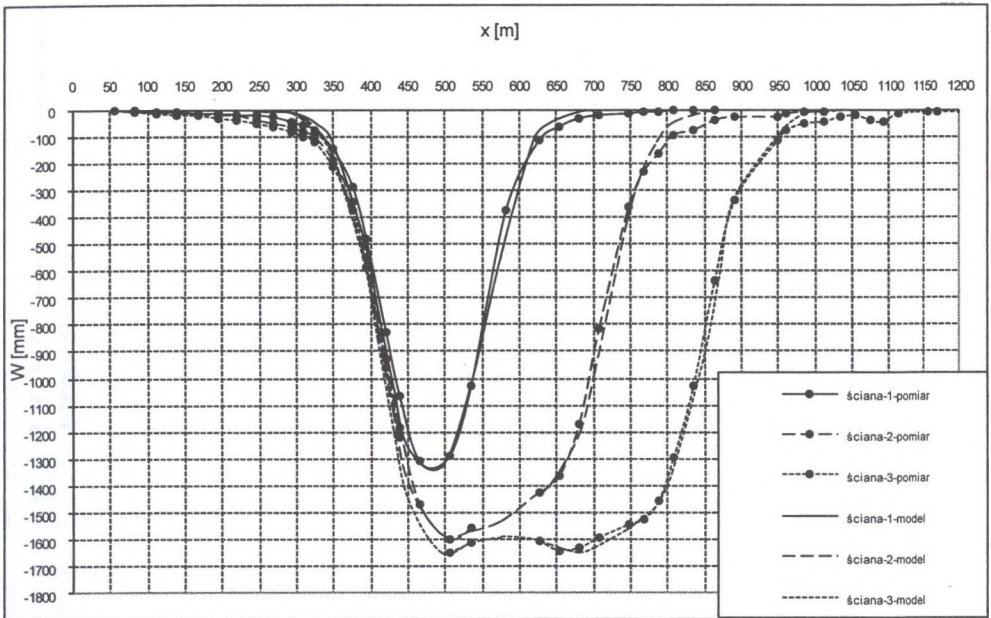
Określając warunki brzegowe, założono, że wartość pierwotnych naprężeń w górotworze pochodzi jedynie od sił grawitacyjnych. W przypadku górotworu niezaburzonego tektonicznie założenie takie jest warunkiem wystarczającym do określenia początkowych warunków symulowanej eksploatacji.

Poziome naprężenia pierwotne σ_x oraz σ_y zostały wyznaczone na podstawie klasycznej teorii sprężystości i stanowią ułamek właściwy naprężenia pionowego (zależny od współczynnika Poissona) [2, 3, 6].

4. Wyniki symulacji komputerowej

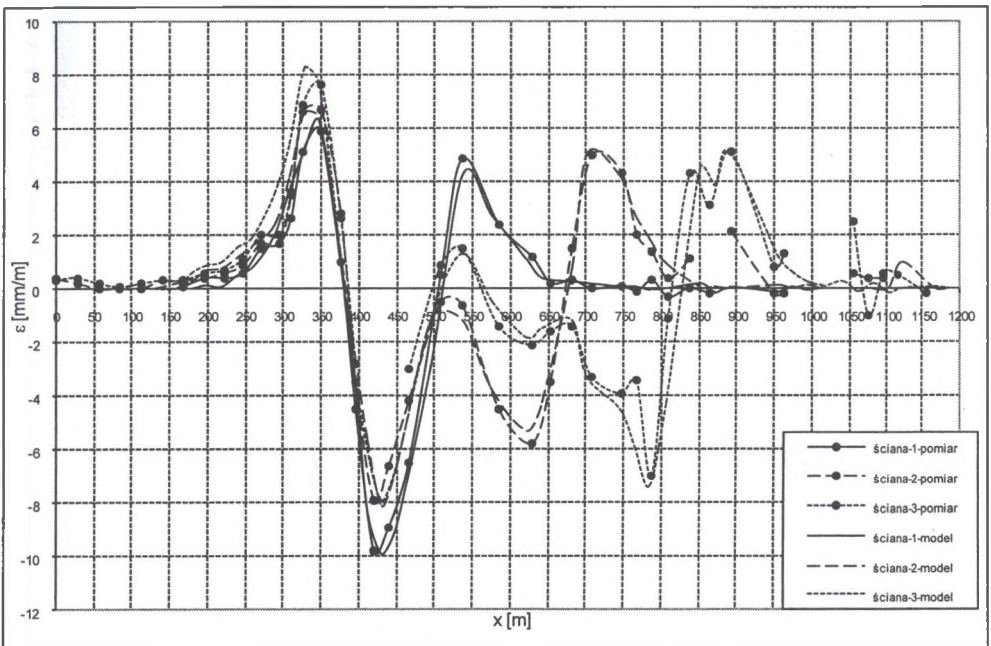
Na podstawie przedstawionego wcześniej modelu górotworu przeprowadzona została wieloetapowa symulacja eksploatacji górniczej w ścianach 1, 2 oraz 3. Porównanie wyników symulacji komputerowej z pomiarami geodezyjnymi prowadzonymi przy okazji rzeczywistej eksploatacji na linii pomiarowej biegnącej prostopadle do kierunku jej prowadzenia przedstawiono na rysunkach 3 i 4. Na rysunku 5 pokazane zostały mapy obniżeń i przemieszczeń poziomych powierzchni modelu wyznaczone dla kolejnych etapów obliczeń numerycznych. Opierając się na uzyskanych wynikach obliczeń numerycznych można stwierdzić, że:

1. Otrzymane na drodze modelowania numerycznego profile niecek teoretycznych wzdłuż linii pomiarowej charakteryzuje znaczna dokładność dopasowania do profili niecek wyznaczonych z pomiarów geodezyjnych (rys. 3). Dokładność ta jest praktycznie jednakowa dla wszystkich etapów eksploatacji. Różnica maksymalnych obniżeń teoretycznych i wyznaczonych z obserwacji geodezyjnych nie przekracza 1%.
2. W profilach niecek osiadania, jakie ukształtowały się na powierzchni po wybraniu ściany drugiej i trzeciej, widoczna jest asymetria obniżeń w stosunku do przestrzeni wybranej, co świadczy o wpływie kierunku eksploatacji na ich kształt. Maksymalne nachylenie zbocza niecki położonego w rejonie ściany 1 (zbocze statyczne) jest większe od maksymalnego nachylenia zbocza zmieniającego swe położenie po kolejnych etapach eksploatacji. Podobny stopień asymetrii uzyskano w wyniku obliczeń numerycznych dzięki zastosowaniu modelu sprężysto-kruchego do modelowania warstwy stropowej i pokładu węgla.
3. Odształcenia poziome wyznaczone na drodze modelowania numerycznego metodą elementów skończonych nieznacznie gorzej opisują odształcenia poziome pomierzone, niż ma to miejsce w przypadku obniżeń. Dokładność opisu odształceń poziomych za pomocą modelowania numerycznego jest jednakże wystarczająca dla celów praktycznych i jest porównywalna do dokładności opisu modelami geometryczno - całkowymi.
4. Podobnie jak w przypadku obniżeń, odształcenia poziome cechuje wyraźna asymetria (rys. 4), wynikająca z wpływu kierunku prowadzenia eksploatacji. Ekstremalne wartości zarówno odształceń poziomych rozciągających, jak i ściskających są większe w rejonie ściany 1 niż w rejonie ściany 3.



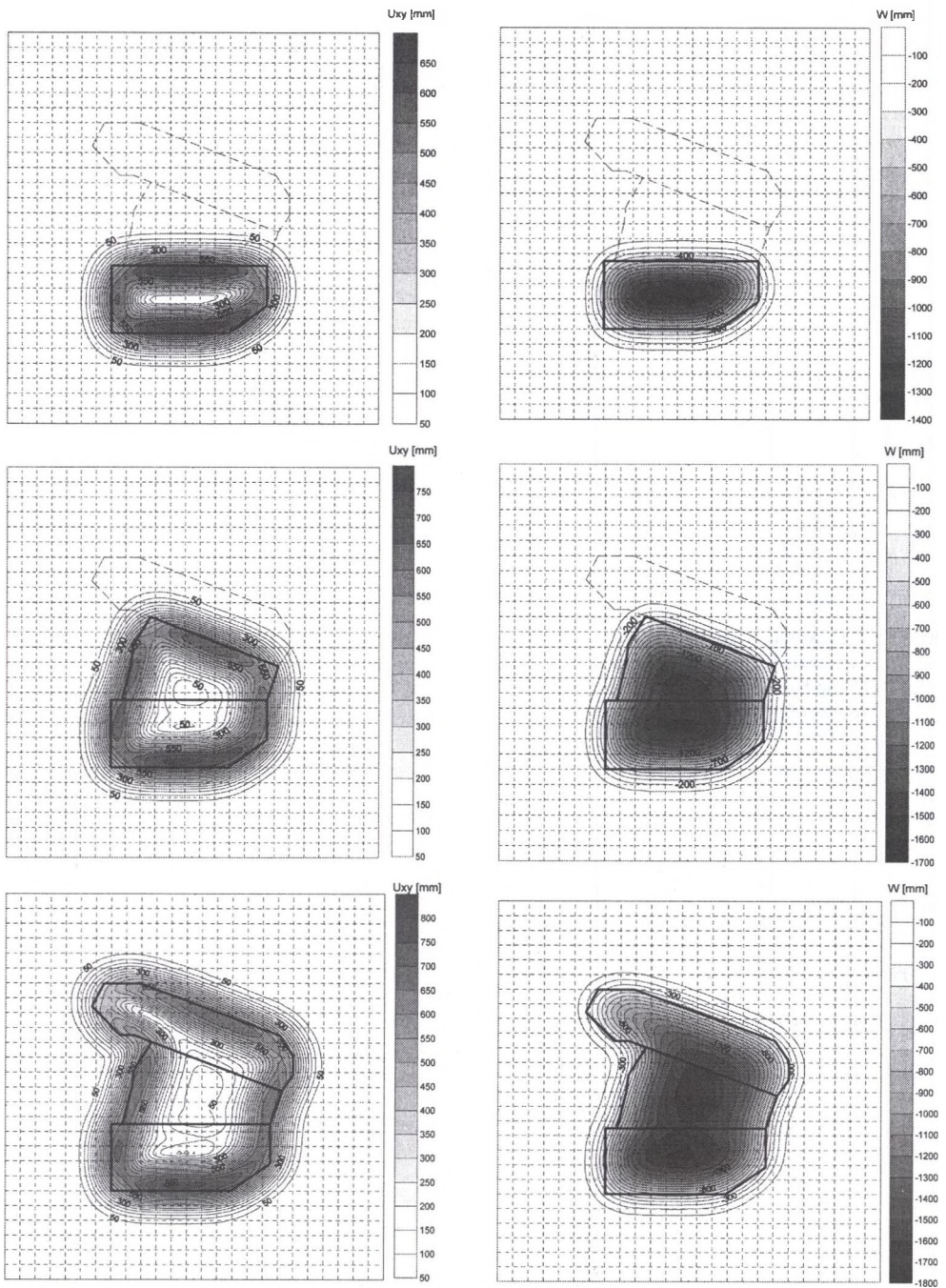
Rys. 3. Zestawienie niecek teoretycznych wyznaczonych na podstawie modelowania numerycznego i odpowiadające im wyniki pomiarów geodezyjnych

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



Rys. 4. Porównanie odkształceń poziomych wyznaczonych na drodze modelowania numerycznego z pomiarami geodezyjnymi

Fig. 4. Comparison of horizontal strains determined through numerical modeling with geodesic measurements



Rys. 5. Uzyskane metodą elementów skończonych mapy obniżenia (kolumna prawa) oraz przemieszczeń poziomych (kolumna lewa) powierzchni modelu po wybraniu kolejnych ścian

Fig. 5. Maps of subsidences (right column) and horizontal displacements (left column) of model's surface after the exploitation of subsequent longwalls, obtained using data derived from finite element method

5. Podsumowanie i wnioski końcowe

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

1. W artykule posługując się przypadkiem rzeczywistej eksploatacji pokazano, że, stosując metodę elementów skończonych, istnieje możliwość jednoczesnego opisu obniżeń i odkształceń poziomych powstałych na powierzchni w trakcie wieloetapowej eksploatacji górniczej.
2. Uzyskane na drodze modelowania numerycznego profile niecek teoretycznych wzdłuż linii pomiarowej charakteryzuje znaczna dokładność dopasowania do profili niecek wyznaczonych z pomiarów geodezyjnych.
3. Maksymalny błąd dopasowania ekstremalnych wartości odkształceń poziomych uzyskanych na drodze modelowania numerycznego wyniósł ok. 13% ich wartości pomierzonych. Błąd ten dotyczy przede wszystkim początkowego etapu eksploatacji górniczej. Po kolejnych etapach eksploatacji rozbieżności pomiędzy pomiarami a wynikami modelowania numerycznego są mniejsze.
4. Na podkreślenie zasługuje prostota przyjętego modelu przy zachowaniu niezmienności wartości parametrów mechanicznych skał. Dzięki temu można stosunkowo szybko wykonać wielowariantowe analizy przestrzennego modelu górotworu.
5. Przedstawione symulacje pokazały, że przyjęty model górotworu w sposób naturalny uwzględnia obrzeże eksploatacyjne oraz asymetrię niecki, wynikającą z wpływu kolejności eksploatacji na jej kształt.

LITERATURA

1. Materiały źródłowe KWK „Chwałowice”.
2. Białek J., Mielimąka R., Wesołowski M.: Zastosowanie transwersalnie anizotropowego modelu górotworu do opisu wieloetapowego procesu obniżeń terenu górniczego. Materiały Konferencji nt.: „ Aktualni problemy dulniho merictvi a geologie”, Destne w Orlickych Horach (Czechy), 27 – 29 listopad a2001. ISBN 80-248-005-5.
3. Filcek H., Walaszczyk J., Tajduś A.: Metody komputerowe w geomechanice górniczej. Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice 1994.
4. Kidybiński A.: Podstawy Geotechniki Kopalnianej. Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1982.

5. Mielimaka R., Wesołowski M.: Modelowanie metodą elementów skończonych wieloetapowego procesu obniżenia i odkształceń poziomych terenu górniczego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Górnictwo, z. 261, Gliwice 2004.
6. Wesołowski M.: Numeryczny model wyrobiska korytarzowego w górotworze uwarstwionym. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Górnictwo z. 254, Gliwice 2002.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jacek Szewczyk