2001 Nr kol. 1517

Jan BIAŁEK, Ryszard MIELIMĄKA, Marek WESOŁOWSKI Politechnika Śląska, Gliwice

# SYMULACJA METODĄ ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH WIELOETAPOWEGO PROCESU OBNIŻEŃ TERENU GÓRNICZEGO

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki modelowania metodą elementów skończonych deformacji górotworu poddanego wpływom eksploatacji górniczej. Symulacja komputerowa obejmowała eksploatację zawałową czterech ścian prowadzonych na głębokości od 580 m do 700 m. Górotwór potraktowano jako liniowo-sprężysty ośrodek transwersalnie anizotropowy. Porównanie wyników obliczeń numerycznych z wynikami pomiarów geodezyjnych przedstawiających obniżenia po wybraniu kolejnych ścian, wykazało możliwość dosyć dokładnego opisu obniżeń powierzchni terenu za pomocą przyjętego modelu numerycznego.

# SIMULATION OF MULTI-STAGE SUBSIDENCE PROCESS OF MINING AREA USING THE FINITE ELEMENT METHOD

**Summary.** The paper presents the modeling results of the deformation of rockmass subjected to the influence of mining process, using the finite element method. The computer simulation involved the fall-of-roof mining of four longwalls carried out at the depth from 580m to 700m. The rockmass was treated as a linearly elastic medium transversally anisotropic. The comparison of numerical calculations with the results of geodesic measurements presenting the subsidence after mining out subsequent longwalls has showed that it is possible to describe the subsidence of mining area fairly accurately using the applied numerical model.

## 1. Wprowadzenie

Aktualnie w Polsce, jak również poza jej granicami [6], do prognozowania deformacji terenu górniczego wykorzystuje się powszechnie metody geometryczno-całkowe. Metody te charakteryzują się nie tylko znaczną prostotą, ale także pozwalają na uzyskanie stosunkowo

dobrych opisów rzeczywistych deformacji. Jednakże w przypadku modelowania procesu deformacji we wnętrzu górotworu, a także gdy mamy do czynienia z górotworem znacznie zaburzonym, zastosowanie tych metod nie daje zadowalających rezultatów. Dlatego też w ostatnim czasie rozwinął się nowy kierunek badań, który do opisu zjawisk deformacyjnych, zachodzących w górotworze, wykorzystuje modele numeryczne oparte na takich metodach jak: metoda różnic skończonych, metoda elementów skończonych, metoda elementów brzegowych oraz stosowana od niedawna metoda elementów odrębnych. Metody te pozwalają zarówno na uwzględnienie złożonej budowy geologicznej, skomplikowanych kształtów wyrobisk górniczych, jak i różnorodnych własności mechanicznych górotworu [3].

Zasadniczym problemem związanym z modelowaniem numerycznym jest zbudowanie modelu, który możliwie dokładnie opisywałby wszystkie etapy procesu deformacji górotworu. Większość dotychczasowych prac dotyczących modelowania ruchów górotworu dotyczyła opisu przemieszczeń i naprężeń w bezpośrednim sąsiedztwie pojedynczych wyrobisk korytarzowych i komorowych. Bardzo nieliczne są prace [8, 9, 10] dotyczące opisu ruchów górotworu i powierzchni terenu np. wskutek eksploatacji ścianowej. Uzyskiwane w wyniku modelowania numerycznego metodą elementów skończonych niecki osiadania dla górotworu traktowanego jako ośrodek sprężysto – liniowy – izotropowy, znacznie różniły się od wyznaczanych z pomiarów geodezyjnych [2, 7]. Niecki te okazywały się zbyt rozległe i charakteryzowały się znacznie mniejszym (nawet 2,5-krotnie) nachyleniem zboczy w stosunku do niecek rzeczywistych.

Skłoniło to M. Wesołowkiego [8] do przetestowania szeregu modeli matematycznych, opisujących własności mechaniczne górotworu pod kątem zgodności z pomiarami geodezyjnymi obniżeń powierzchni terenu górniczego.

Testy te wykazały, że w przypadku modelu liniowo-sprężystego o ortotropowej (transwersalnie anizotropowej) budowie warstw możliwe jest uzyskanie z obliczeń numerycznych w miarę dokładnego przybliżenia rzeczywistych deformacji powierzchni terenu górniczego. W artykule przedstawiono wyniki modelowania pomierzonych obniżeń terenu górniczego powstałych wskutek eksploatacji prowadzonej przez KWK "Budryk". Obliczenia realizowano przy użyciu programu COSMOSM, wykorzystując metodę elementów skończonych [1].

### 2. Opis pomiarów geodezyjnych

Do budowy numerycznego modelu ośrodka skalnego, modelowania procesu deformowania tego ośrodka oraz weryfikacji wyników wykorzystano sytuację geologiczno-górniczą eksploatacji pokładu 338/2 ścianami 001, 002, 005 i 007 KWK "Budryk" oraz wyniki pomiarów geodezyjnych przeprowadzonych na liniach pomiarowych zastabilizowanych nad tą eksploatacją. Eksploatacja prowadzona jest tutaj w typowych jak na warunki 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 karbon, 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 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. Linia 1, z której wyniki obserwacji zostały wykorzystane w omawianych badaniach, składa się z 54 punktów założonych w odległościach co 24 m i 48 m i biegnie z północy na południe zgodnie z południowym kierunkiem upadu pokładu przez środek pola wybrania (rys 1).

Na linii tej prowadzone były cykliczne (w okresach jednomiesięcznych i dwumiesięcznych) obserwacje wysokościowe metodą precyzyjnej niwelacji geometrycznej, nawiązanej do reperów położonych poza wpływami eksploatacji. Sieć ta była każdorazowo wyrównywana ściśle programem GEONET, a uzyskane w wyniku wyrównania błędy średnie wyznaczenia wysokości poszczególnych punktów nie przekroczyły ±0,7 mm.



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

Do analizy wybrano cztery cykle obserwacyjne przedstawiające w zasadzie statyczne niecki obniżeniowe, jakie powstały na powierzchni terenu po wybraniu kolejnych ścian. Wyniki tych obserwacji zostały przedstawione na rys. 3. Należy przy tym zauważyć, że dopiero po wybraniu ściany 005 ukształtowaną nieckę można w przybliżeniu uznać za nieckę pełną.

#### 3. Model górotworu

Na podstawie przedstawionego powyżej opisu warunków górniczo-geologicznych, zbudowany został numeryczny model ośrodka skalnego. Stanowi on fizykalne oraz strukturalne odwzorowanie górotworu w rejonie pola eksploatacyjnego ścian 001, 002, 005 i 007 w pokładzie 338/2 KWK "Budryk". Model ten przedstawia płaską tarczę górotworu o szerokości 3000 m oraz wysokości (głębokości) 1000m (rys.2). W stosunku do eksploatacji górniczej wspomniany model zorientowany został w kierunku prostopadłym do wybiegu ścian 001, 002, 005 i 007 wzdłuż linii pomiarowej I. Powyżej eksploatowanego pokładu 338/2 zamodelowano kolejno 11 warstw górotworu karbońskiego oraz trzy warstwy nadkładowe. Spąg pokładu opisano za pomocą czterech 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-plastyczno-kruchym. Pozostałe warstwy tworzące model opisane zostały modelem liniowo-sprężystym [11].

Parametry materiałowe wszystkich warstw wyznaczone zostały na podstawie profilu litologicznego oraz wyników badań laboratoryjnych udostępnionych przez KWK "Budryk". Zakres zmienności parametrów materiałowych warstw skalnych przestawiono w tab. nr 1.

Tabela 1

	Zakres zmienności parametrów warstw					
	Ex	Ez	v	ρ	R <sub>c</sub>	R,
	[MPa]	[MPa]	[]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[MPa]	[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
Howce	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

Zakres zmienności parametrów warstw

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

Przedstawiony model podzielony został siatką elementów prostokątnych oraz trójkątnych. Budując siatkę elementów modelu górotworu przyjęto zasadę, że punkty węzłowe znajdujące się na skrajnych krawędziach bocznych tarczy mogą przemieszczać się jedynie wzdłuż osi Z (pionowa oś głębokości). Punkty węzłowe, które znajdują się na dolnej krawędzi tarczy, mogą natomiast przemieszczać się jedynie wzdłuż kierunku wyznaczonego przez poziomą oś X. Pozostałe węzły przynależne do modelu mogą swobodnie przemieszczać się w dowolnym kierunku płaszczyzny X-Z [3, 5].



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

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 naprężenie pierwotne  $\sigma_x$  zostało wyznaczone na podstawie klasycznej teorii sprężystości i stanowi ułamek właściwy naprężenia pionowego (zależny od współczynnika Poissona) [4].

#### 4. Dyskusja wyników symulacji komputerowych

Na podstawie przedstawionego powyżej modelu górotworu przeprowadzona została wieloetapowa symulacja eksploatacji górniczej w ścianach 001, 002, 005 oraz 007. Wyniki symulacji komputerowej oraz wyniki pomiarów geodezyjnych prowadzonych przy okazji rzeczywistej eksploatacji przedstawiają rys. 3 i 4.

Na podstawie uzyskanych rezultatów symulacji komputerowej można stwierdzić:

Zastosowany numeryczny model górotworu pozwala na dosyć dokładny opis obniżeń terenu górniczego pod wpływem wieloetapowej eksploatacji górniczej. Błąd średni opisu obniżeń wynosi tu ok. 30 mm, co stanowi ok. 2% obniżeń maksymalnych.

Dobry opis obniżeń pomierzonych dotyczy kolejno wszystkich 4 etapów eksploatacji. Opis ten uzyskano dla nie zmienionych w czasie parametrów charakteryzujących własności mechaniczne ośrodka skalnego.

Opis obniżeń dla obydwu skrzydeł niecek obniżeniowych położonych zarówno po stronie wzniosu, jak i po stronie upadu cechuje podobna dokładność. Świadczy to o możliwości dość dokładnego uwzględnienia wpływu nachylenia pokładu na kształt niecki obniżeniowej.

Zwraca uwagę możliwość dobrego opisu zarówno niepełnych niecek obniżeniowych powstałych po wybraniu pierwszej ściany, jak i praktycznie pełnej nieceki obniżeniowej, która wykształciła się po wybraniu wszystkich 4 ścian. Jest tu uwzględniony w naturalny sposób mechanizm "obrzeża eksploatacyjnego".

Zarówno teoretyczne niecki, jak i niecki obserwowane cechuje podobny zasięg wpływów.



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

Maksymalne nachylenie profilu obliczeniowego pełnej niecki osiadania osiągało wartość  $T_{max}=(2.3 \text{ do } 2.8) \text{ w}_{max}/\text{h}$ , co oznacza, że stosując do opisu tych niecek wzór S. Knothego należało by przyjąć tg $\beta=2.3$  do 2.8.

Zastosowany liniowo-sprężysty ortotropowy (transwersalnie anizotropowy) model ośrodka skalnego (podobnie jak wszystkie całkowo geometryczne teorie wpływów) nie opisuje lokalnych nierówności dna niecki obniżeniowej. Te na pozór drobne nierówności dna niecki mogą być przyczyną znacznych krzywizn profilu niecki obniżeniowej, co zdaniem ekspertów budowanych jest jedną z istotniejszych przyczyn uszkodzeń budowli na terenach górniczych.



Rys. 4. Porównanie nachyleń teoretycznych i rzeczywistych profili niecek obniżeniowych Fig. 4. Comparison of the theoretical and true slopes of subsidence trough profiles

#### 5. Podsumowanie

Przedmiotem niniejszej pracy jest numeryczna analiza deformacji zachodzących na powierzchni terenu pod wpływem eksploatacji górniczej. Górotwór traktowano w pracy jako warstwowy ośrodek ciągły o ortotropowej budowie warstw. Układ warstw, struktura modelu górotworu oraz schemat eksploatacji przyjęto został na podstawie opisu eksploatacji pokładu 338/2 w polu eksploatacyjnym ścian 001, 002, 005 i 007 KWK "Budryk". Analiza numeryczna została wykonana za pomocą programu COSMOSM, który do obliczeń wykorzystuje metodę elementów skończonych.

Na podstawie uzyskanych wyników symulacji komputerowych sformułowano następujące wnioski końcowe:

Przeprowadzona symulacja numeryczna wykazała, że przyjmując liniowo-sprężysty ortotropowy model ośrodka skalnego, istnieje możliwość dosyć dokładnego opisu obniżeń powierzchni terenu przy wykorzystaniu metody elementów skończonych. Potwierdzeniem tej tezy jest przeprowadzona w pracy analiza porównawcza wyników obliczeń numerycznych i pomiarów geodezyjnych.

Zaproponowany model numeryczny wraz z ustalonymi wartościami parametrów charakteryzujących średnie własności mechaniczne skał umożliwia symulację przemieszczeń i naprężeń w górotworze dla bardzo różnorodnych sytuacji górniczo-geologicznych, w których nie można stosować powszechnie używanych wzorów teorii geometryczno-całkowych.

#### LITERATURA

- 1. COSMOS/M version 1.75. Podręcznik użytkownika
- Białek J., Mielimąka R.: Weryfikacja parametrów teorii prognozowania w oparciu o rezultaty współczesnych pomiarów geodezyjnych. Materiały KN-T VI Dni Miernictwa Górniczego i Ochrony Terenów Górniczych. Ustroń 25–27 czerwiec 2001.
- Filcek H., Walaszczyk J., Tajduś A.: Metody komputerowe w geomechanice górniczej. Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice 1994.
- 4. Kłeczek Z.: Geomechanika górnicza. Śląskie Wydawnictwo Techniczne. Katowice 1994.
- Kwaśniewski M., Wang J.: Analiza numeryczna deformacji górotworu wywołanych eksploatacją górniczą. Materiały Szkoły Eksploatacji Podziemnej '96. Kraków 1996.
- Praca zbiorowa: Ochrona powierzchni przed szkodami górniczymi. Wyd. "Śląsk". Katowice 1980.
- Schenk J.: Dynamism of spatial displacements of points based on in-situ measurements and geomechanical properties of the roof. 11<sup>th</sup> International Congres of the International Society for Mine Surveying. Cracow. Poland. September 2000.

- Wesołowski M.: Wybrane aspekty modelowania numerycznego ruchów górotworu pod wpływem eksploatacji podziemnej i jej oddziaływania na obiekty. Praca doktorska (niepublikowana) Gliwice 2001.
- Pietruszka K.: Zastosowanie programów ABAQUS do badania deformacji górotworu. Materiały konferencyjne "Informatyka w geodezji górniczej". Kraków 1996.
- Chrzanowska A.: Wpływ podziemnej eksploatacji złóż o skomplikowanej geometrii na powierzchnię terenu w świetle badań metodą elementów skończonych. Praca doktorska (niepublikowana). Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Górniczy, Kraków 1989.
- 11. Kidybiński A.: Podstawy Geotechniki Kopalnianej. Wyd. "Śląsk"1982.

Recenzent: Dr inż. Piotr Trzcionka

#### Abstract

Basing on the program COSMOSM, which is using the finite element method for calculations, a numerical model reflecting the real rockmass in the vicinity of mining area of longwalls 001, 002, 005 and 007 at the seam 338/2 in the "Budryk" Coal Mine has been elaborated. The said longwalls, located at the depth from 580m to 700m were mined with the application of the fall-of-roof method. Treating the rockmass as a linearly elastic medium transversally anisotropic, the simulation of mining process of these longwalls was carried out. As reference, we accepted the results of geodesic measurements carried out from 1.03.1994 to 1.12.1996 on the measurement line No 1 which consisted of 54 measurement points. As a result of the carried out calculations we obtained subsidence trough profiles covering four subsequent stages of the mining process. Comparing the results of computer simulation with the geodesic measurements, we can state that it is possible to describe all analyzed subsidence phases of the mining surface area with fairly good accuracy, assuming that the mechanical parameters describing the rockmass are the same.