ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2002
Seria: GÓRNICTWO z. 254 Nr kol. 1563

Marek WESOŁOWSKI
Politechnika Śląska, Gliwice

NUMERYCZNY MODEL WYROBISKA KORYTARZOWEGO W GÓROTWORZE UWARSTWIONYM

Streszczenie. W artykule przedstawiona została analiza porównawcza stanu wytężenia i przemieszczenia górotworu warstwowego wokół wyrobiska korytarzowego. Opierając się na dwóch niezależnych modelach numerycznych zbudowanych na bazie tej samej struktury górotworu określono wpływ spójności płaszczyzn rozdziału międzywarstwowego na wielkość deformacji konturu wyrobiska oraz stref zniszczeń górotworu w jego bezpośrednim sąsiedztwie.

NUMERIC MODEL OF CORRIDOR HEADING IN STRATIFIED ROCK MASS

Summary. The article presents a comparative analysis of the state of strain and dislocation of stratified rock mass around a corridor heading. Using two independent numerical models developed on the basis of the same rock mass structure, the effect of cohesion of separation planes on the size of excavation contour deformation and rock mass destruction in its immediate vicinity has been determined.

1. Wprowadzenie

Jednym z podstawowych problemów związanych z numerycznym modelowaniem ośrodków skalnych jest prawidłowe odwzorowanie warstwowej budowy górotworu. Etap ten najczęściej realizowany jest poprzez budowę jednolitego modelu dyskretnego, a następnie przyporządkowanie poszczególnym elementom siatki parametrów wytrzymałościowych charakterystycznych dla różnych warstw skalnych. Kontakt pomiędzy sąsiednimi warstwami opisany jest w takim przypadku poprzez tzw. węzły zależne, co oznacza, że przemieszczenia wyznaczane dla warstw słabszych będą uzależnione od parametrów wytrzymałościowych

warstw mocniejszych. Uzyskane w ten sposób wyniki mogą być obarczone pewnym błędem. W poniższej pracy przedstawiono odmienny sposób modelowania warstwowej budowy górotworu wykorzystując do tego celu płaszczyzny rozdziału, charakteryzujące się określoną spójnością. Rozwiązanie takie umożliwia wyznaczenie niezależnych przemieszczeń dla wszystkich warstw w modelu oraz określenie rozwarstwień w przypadku przekroczenia spójności międzywarstwowej.

2. Model górotworu

Model górotworu, na podstawie którego prowadzona będzie analiza numeryczna, stanowi płaską tarczę o wymiarach 105 m w kierunku poziomym oraz 70 m w kierunku pionowym. Na głębokości 650 m zamodelowano prostokątne wyrobiska górnicze o szerokości 4 m i wysokości 2.6 m. Obudowę wyrobiska korytarzowego zamodelowano przy użyciu zespołu sił działających w kierunku prostopadłym do wewnętrznych krawędzi wyłomu wyrobiska.

Bezpośrednim otoczeniem wyrobiska jest pokład węgla o grubości 2 m. Strop pokładu stanowi 11 naprzemianległych warstw łupku piaszczystego oraz piaskowca o miąższości od 0.5 m do 6 m. Spąg pokładu odwzorowano za pomocą 9 warstw o miąższości od 0.25 m do 8.5 m. Podobnie jak w przypadku pakietu stropowego spąg tworzą naprzemianległe warstwy łupku piaszczystego oraz piaskowca. Schemat modelu górotworu przedstawiono na rys. 1.

Warstwom tworzącym model górotworu przyporządkowano nieliniowy model sprężysto-kruchy. Wytrzymałość graniczną opisano warunkiem wytrzymałościowym Hoeka i Browna [3]:

$$\sigma_{1\max} = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_c\sigma_{3\min} + s\sigma_c^2}$$

lub warunkiem największego naprężenia rozciągającego [6]:

$$\sigma_{3\min} = -\sigma_T$$

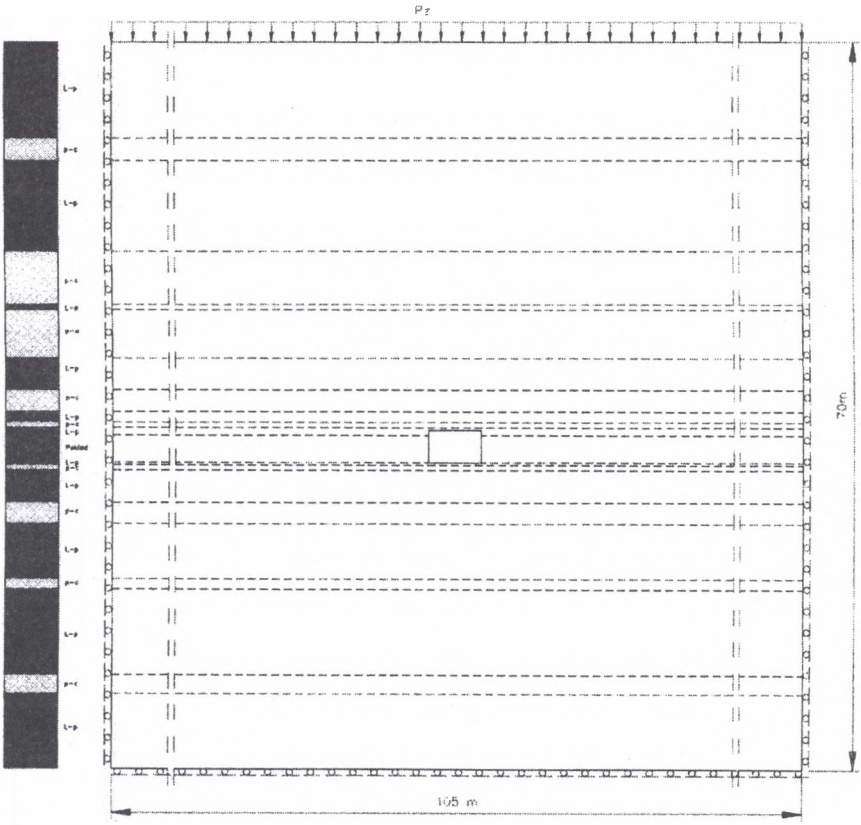
gdzie:

σ_c - wytrzymałość graniczna na jednoosiowe ściskanie,

σ_T - wytrzymałość graniczna na jednoosiowe rozciąganie,

m, s - stałe warunku wytrzymałościowego Hoeka i Browna.

Parametry wytrzymałościowe warstw skalnych przyjęte do obliczeń zestawiono w tabeli 1 [6].



Rys. 1. Model górotworu
Fig. 1. Rockmass model

Tabela 1

Parametry wytrzymałościowe warstw

Parametry	Ex [MPa]	ν [-]	ρ [kg/m3]	Rc [MPa]	Rr [MPa]	m [-]	s [-]
Piaskowiec	10000	0.15	2450	85	7.0	7.5	0.1
Łupek piaszczysty	6000	0.125	2570	75	6.25	5.0	0.1
Węgiel	2200	0.28	1400	22	1.6	1.0	0.001

Spójność płaszczyzn rozdziału dobrana został zgodnie z kryterium opadu nie podpartych skał stropowych przy wykorzystaniu profili oporów rozwarstwienia [4] i dla wszystkich płaszczyzn wynosi 0.4 [MPa][1].

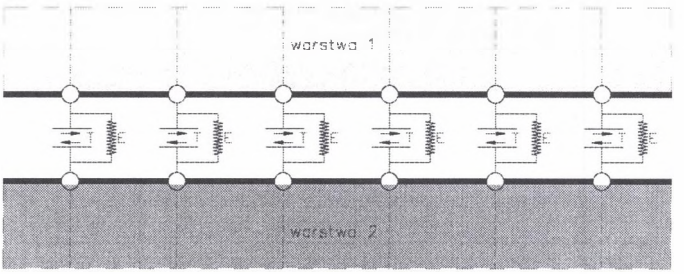
Określając warunki brzegowe założono, że górna krawędź modelu obciążona będzie ciśnieniem pionowym Pz=16 [MPa], wynikającym z głębokości górnej krawędzi modelu

1 Spójność płaszczyzn rozdziału wykorzystana została tylko w przypadku modelu 1.

w górotworze. Wartość pierwotnych naprężeń pionowych σ_z w tarczy powiększona została o ciężar warstw budujących model. Poziome naprężenie pierwotne zostało wyznaczone zgodnie z klasyczną teorią sprężystości i stanowi ułamek właściwy naprężenia pionowego (zależny od współczynnika Poissona). W przypadku górotworu niezaburzonego tektonicznie, założenie takie jest warunkiem wystarczającym do określenia początkowych warunków symulacji komputerowej [1, 2, 5].

Celem określenia wpływu połączeń międzywarstwowych na wielkość deformacji konturu wyrobiska oraz stref zniszczeń górotworu zbudowano dwa numeryczne modele górotworu:

Model 1. Wszystkie wyróżnione w modelu warstwy stanowią odrębne części połączone pomiędzy sobą elementami typu „GAP" (rys. 2). Zastosowanie tego typu połączeń pozwala na symulację poślizgów międzywarstwowych oraz tworzenie się pustek pomiędzy współpracującymi warstwami modelu.

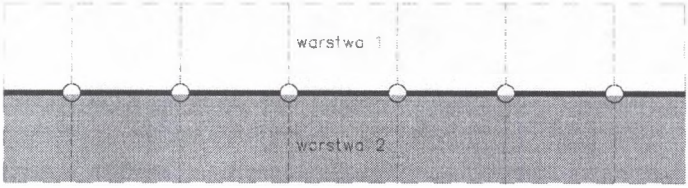


Rys. 2. Schemat połączenia międzywarstwowego w modelu
Fig. 2. The connection diagram between stratified in model

W górotworze nienaruszonym pomiędzy współpracującymi elementami kontaktu występuje opór rozwarcia oraz tarcie. Siły te zanikają w chwili wystąpienia rozwarstwień. Wielkość otwarcia szczelin pomiędzy współpracującymi warstwami kontrolowana jest w sposób ciągły przez stosowany program komputerowy. Ponowne zamknięcie szczelin przywraca w modelu jedynie tarcie.

Model 2. Wszystkie warstwy w modelu opisane zostały za pomocą siatki tzw. węzłów zależnych (rys. 3). Warstwową budowę górotworu odwzorowano poprzez przyporządkowanie poszczególnym elementom różnych parametrów wytrzymałościowych.

Struktura warstwowa, wymiary elementów siatki oraz parametry wytrzymałościowe skał są jednakowe dla obu modeli. Założenie takie umożliwia przeprowadzenie analizy porównawczej uzyskanych wyników.



Rys. 3. Klasyczny opis warstwowej budowy górotworu (węzły zależne)
Fig. 3. The classic description of stratified building of rock mass (the dependent nodes)

3. Dyskusja wyników obliczeń

Na bazie przedstawionych powyżej modeli górotworu przeprowadzona została symulacja komputerowa obejmująca ocenę stanu wytężenia i przemieszczenia wokół wyrobiska korytarzowego. Opierając się na uzyskanych wynikach obliczeń numerycznych stwierdzono, że:

W przypadku **modelu 1** największe zniszczenia struktury skalnej zostały wyznaczone dla stropu wyrobiska. Głębokość zniszczeń w tej części górotworu wynosi ok. 3.5 m. Ponadto w stropie wyrobiska wystąpiły oddzielne strefy zniszczeń, które bezpośrednio nie wpływają na obudowę wyrobiska. W przypadku prowadzonej eksploatacji górniczej wzrost naprężeń może spowodować połączenie się tych stref, co w konsekwencji może doprowadzić do gwałtownego wzrostu obciążeń obudowy podporowej wyrobiska.

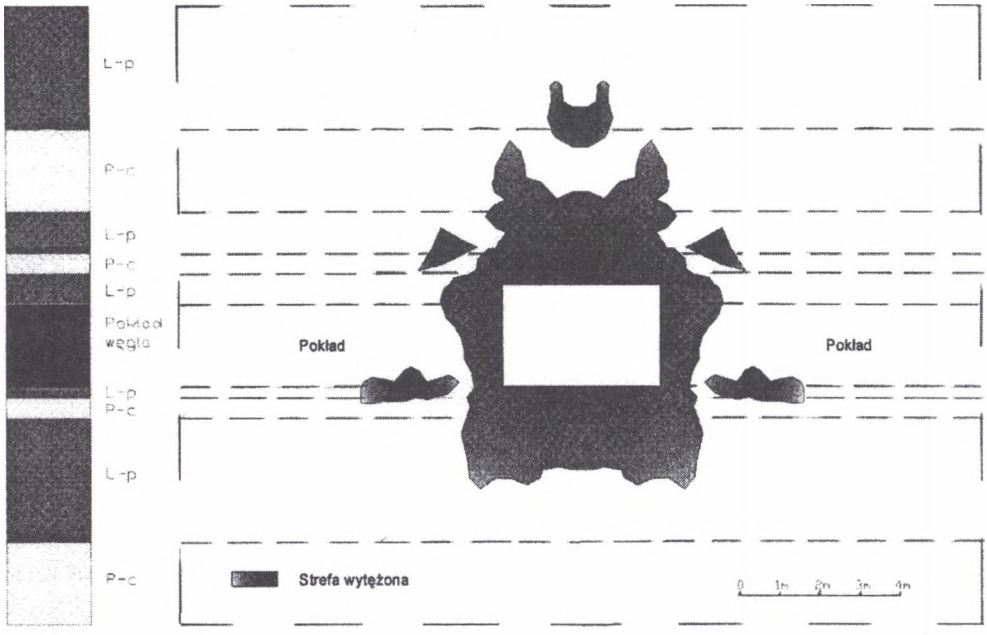
W ociosach największe zniszczenia struktury skalnej wystąpiły w części stropowej pokładu węgla, a ich głębokość wynosi ok. 1.7 m. Podobnie jak w przypadku warstw stropowych, odnotowano również oddzielne strefy zniszczeń. Propagacja tych stref w trakcie prowadzonej eksploatacji górniczej może w istotny sposób wpłynąć na stabilność obudowy podporowej oraz wielkość wypiętrzenia spągu wyrobiska.

Zniszczenie struktury skalnej w spągu wyrobiska ma charakter jednolitej strefy, której głębokość w narożnych częściach wyrobiska dochodzi do ok.2.5 m. Schemat wytężenia górotworu w rejonie wyrobiska wyznaczony na podstawie modelu 1 przedstawia rys. 4.

W przypadku **modelu 2**, w którym wykorzystano siatkę węzłów zależnych, największe zniszczenia struktury skalnej wystąpiły w warstwach stropowych. Głębokość zniszczeń stropowych zmienia się od ok. 2 m w narożnych częściach wyrobiska do 0.85 m w osi wyrobiska.

Znacznie mniejsze zniszczenia odnotowano również w ociosach wyrobiska. Głębokość stref wytężonych w tej części wynosi jedynie 1.3 m i zostało to odnotowane w warstwie łupku piaszczystego. Maksymalne zniszczenie pokładu węgla nie przekracza 1 m.

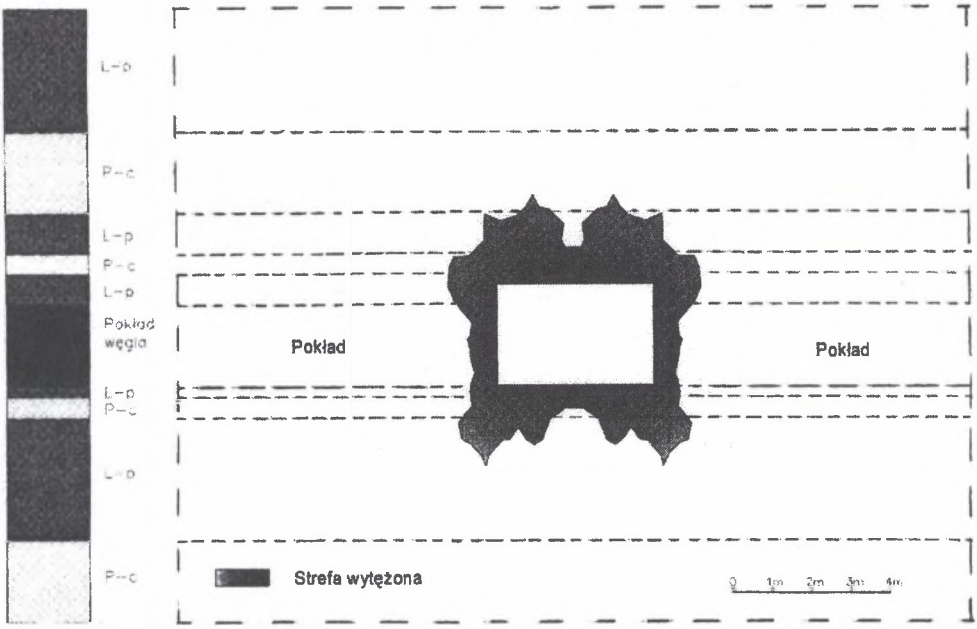
W części spągowej największe zniszczenie struktury skalnej wystąpiło w narożach wyrobiska i wynosi ok. 1.9 m. W osi wyrobiska głębokość zniszczeń ulega redukcji i wynosi jedynie ok.0.6 m. Rozkład wyznaczonego dla modelu 2 wytężenia przedstawiono na rys. 5.



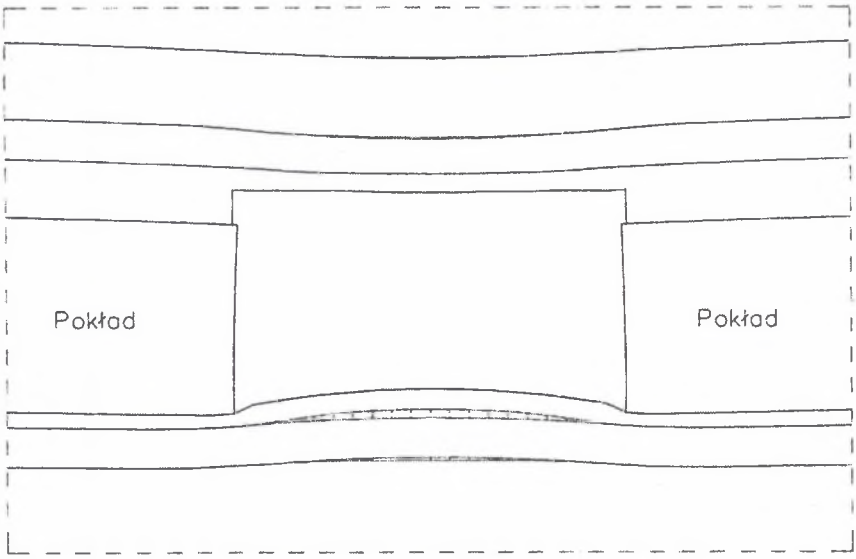
Rys. 4. Strefy wytężeń wokół wyrobiska wyznaczone na podstawie modelu 1
Fig. 4. Zone of strains of round heading appointed on the ground model 1

Na bazie przemieszczeń punktów węzłowych analizowanych modeli wyznaczone zostały również przybliżone deformacje konturu wyrobiska oraz warstw stanowiących jego bezpośrednie otoczenie (rys. 6 i 7).

Jak wynika z załączonych rysunków, znacznie większe deformacje konturu wyrobiska wyznaczone zostały zgodnie z **modelem 1**, w którym połączenia międzywarstwowe opisane zostały elementami szczelinowymi. Koncentracja naprężeń spowodowała przekroczenie oporu rozwarcia w warstwach znajdujących się w bezpośrednim sąsiedztwie wyrobiska, w skutek czego w stropie oraz spągu wystąpiło rozwarstwienie pakietu skalnego. Mniejsza wielkość rozwarstwienia pakietu stropowego jest w tym przypadku spowodowana osiadaniem skał na obudowie podporowej i wtórnym zamknięciu się szczelin. Przekroczenie oporu rozwarcia oraz sił tarcia odnotowano również w ociosie wyrobiska, w efekcie czego stropowa część pokładu węgla „wsuwa" się do przestrzeni roboczej wyrobiska.



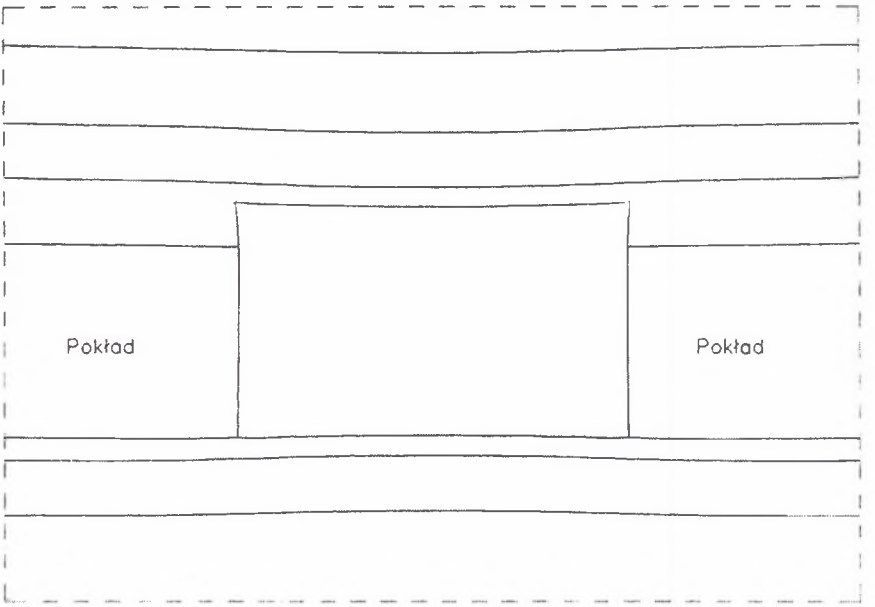
Rys. 5. Strefy wytężeń wokół wyrobiska wyznaczone na podstawie modelu 2
Fig. 5. Zone of strains of round heading appointed on the ground model 2



Rys. 6. Deformacje konturu wyrobiska wyznaczone dla modelu 1
Fig. 6. Deformations of contour appointed for model 1

W przypadku **modelu 2**, którego budowę oparto na siatce tzw. węzłów zależnych, deformacje konturu wyrobiska mają charakter bardziej równomierny. Wielkość przemieszczenia punktów węzłowych występujących na granicy dwóch warstw jest

uzależniona od parametrów wytrzymałościowych sztywniejszej warstwy tworzącej kontakt. Można zatem wnioskować, że wielkość deformacji konturu wyrobiska, a w szczególności wypiętrzenia skał spągowych, jest w takim przypadku znacznie zaniżona.



Rys. 7. Deformacje konturu wyrobiska wyznaczone dla modelu 2
Fig. 7. Deformations of contour appointed for model 2

4. Podsumowanie i wnioski

Przedmiotem niniejszej pracy była numeryczna analiza deformacji górotworu w obrębie wyrobiska górniczego. Wykorzystując do obliczeń metodę elementów skończonych podjęto próbę określenia wpływu spójności płaszczyzn kontaktu międzywarstwowego na wielkość deformacji górotworu stanowiącego bezpośrednie otoczenie rozpatrywanego wyrobiska. Opierając się na uzyskanych wynikach obliczeń numerycznych sformułowano następujące wnioski:

1. Przeprowadzona symulacja komputerowa wykazała, że istotnym czynnikiem wpływającym na wielkość oraz kształt stref zniszczeń wokół wyrobiska górniczego jest spójność płaszczyzn kontaktu międzywarstwowego. Potwierdza to analiza porównawcza wykonana dla modelu ciągłego, w którym wszystkie warstwy opisane zostały siatką tzw. węzłów zależnych.

2. Zastosowany w pracy model numeryczny uwzględniający płaszczyzny rozdziału międzywarstwowego pozwala określić skomplikowany charakter deformacji górotworu w bezpośrednim otoczeniu wyrobiska górniczego. Uwzględniając spójność i tarcie pomiędzy poszczególnymi warstwami można wyznaczyć rozwarstwienia w górotworze. Może okazać się to szczególnie przydatne w przypadku projektowania obudowy kotwiowej wyrobisk górniczych.
3. Istotnym mankamentem zaproponowanej metody modelowania numerycznego warstwowych ośrodków skalnych jest brak szczegółowych danych dotyczących spójności płaszczyzn międzywarstwowych. W przedstawionej pracy wykorzystano jedynie średnie wielkości oporów rozwarstwienia przyjęte na podstawie literatury.

LITERATURA

1. Drzęźla B., Wesołowski M.: Określenie stref deformacji w górotworze w czasie rozruchu wyrobiska ścianowego. Część I: Ogólne zasady numerycznego modelowania górotworu. Zesz. Nauk. Pol. Śl., seria Górnictwo z. 239, Gliwice 1999.
2. Filcek H., Walaszczyk J., Tajduś A.: Metody komputerowe w geomechanice górniczej. Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice 1994.
3. Hoek E., Brown E. T.: Practical Estimates of Rock Mass Strength. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 34, No 8.
4. Kidybiński A.: Podstawy geotechniki kopalnianej. Wydawnictwo „Śląsk", Katowice 1982.
5. Kłeczek Z.: Geomechanika górnicza. Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice 1994.
6. Kwaśniewski M., Wang J.: Analiza numeryczna deformacji górotworu wywołanych eksploatacją górniczą. Materiały Szkoły Eksploatacji Podziemnej'96. Kraków 1996.

Recenzent: Prof. Pedro Riesgo Fernandez

Abstract

One of the basic problems connected with numerical modelling of rock centres remains correct representation of stratified structure of rock mass. This is usually performed by building a uniform discreet model, and then assigning resistance parameters characteristic of different rock layers to particular elements of mesh. Contact between neighbouring layers is

described through so-called dependent nodes, which means that dislocations determined for weaker layers will be dependent on resistance parameters of the stronger ones. Results obtained in such a way will contain an error. This study presents a different way of modelling of rock mass stratified structure, making use of separation planes which are characterised by certain cohesion. Such a solution enables determining independent dislocations for all layers in a model and makes it possible to determine stratifications in case cohesion between layers is exceeded.