

Bernard DRZEŻŁA, Marek WESOŁOWSKI

## OKREŚLENIE STREF DEFORMACJI W GÓROTWORZE W CZASIE ROZRUCHU WYROBISKA ŚCIANOWEGO

Część I:

### OGÓLNE ZASADY NUMERYCZNEGO MODELOWANIA GÓROTWORU

**Streszczenie.** W artykule przedstawiona została ogólna metodyka numerycznego modelowania górotworu. Podany poniżej sposób budowy modelu wraz z doбором jego parametrów posłuży w dalszej kolejności do rozwiązywania konkretnego zadania. Rozpatrzono następujące zagadnienia: dobór modelu ośrodka, metodykę wyznaczania parametrów modelu reologicznego oraz górotworu, modelowanie górotworu oraz opis warunków brzegowych.

## DESIGNATION OF THE DEFORMATION ZONES IN THE ROCK MASS DURING STARTING THE WALL PASSAGE

Part I:

### GENERAL PRINCIPLES OF THE NUMERICAL MODELLING OF THE ROCK MASS

**Summary.** This article describes general methodics of numerical modelling of the rock mass. The way of building the model, mentioned below, together with selection of its parameters will later be used for solving concrete problem. Following problems were examined: selection of the model of environment, methods of marking parameters of the rheologic model and ground, modelling rock mass and description of the border conditions.

## 1. Wstęp

Opis zjawisk zachodzących w górotworze będącym pod wpływem eksploatacji górniczej stanowił od lat przedmiot wielu badań. Prowadzone pomiary i obserwacje dołowe, jak również badania laboratoryjne miały na celu stworzenie modelu fizycznego, będącego w stanie możliwie dokładnie zobrazować przebiegające w górotworze procesy. Owocem wspomnianych prac było powstanie szeregu modeli stanowiących wyidealizowane odwzorowanie rze-

czywistego ośrodka skalnego. Matematyczna analiza przyjętego modelu pozwalała na przybliżony opis rozpatrywanego zjawiska. Dalsze prace badawcze miały na celu zwiększenie dokładności wykonywanych badań modelowych ośrodków skalnych. Doprowadziło to do stworzenia coraz bardziej skomplikowanych modeli fizycznych, które uwzględniają większą liczbę parametrów, mających istotny wpływ na zachowanie się rzeczywistego ośrodka.

Dynamiczny rozwój w ostatnich kilku latach technik numerycznych pozwolił w znacznym stopniu przybliżyć model teoretyczny do warunków rzeczywistych. Dzieje się tak za sprawą wysoce wyspecjalizowanych programów komputerowych, pozwalających na uwzględnienie większej liczby istotnych elementów górotworu, dotychczas zaniedbywanych.

Istotną częścią procesu numerycznego jest właściwy dobór matematycznego modelu ośrodka oraz prawidłowe ustalenie warunków brzegowych właściwych dla rozpatrywanego rejonu górotworu. Biorąc pod uwagę powyższe stwierdzenie, celowe wydaje się przedstawienie metodyki postępowania w modelowaniu rzeczywistego górotworu.

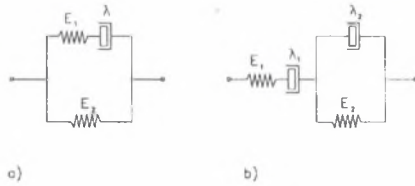
## 2. Charakterystyka modelu górotworu

Jednym z najważniejszych kroków jest właściwy dobór modelu mechanicznego, który oddawałby najistotniejsze procesy zachodzące w górotworze będącym pod wpływem eksploatacji górniczej.

Jak wiadomo, zjawiska zachodzące w rzeczywistym ośrodku skalnym charakteryzują się wysokim stopniem złożoności, co w zasadzie uniemożliwia jego dokładne odwzorowanie w procesie rozważań teoretycznych. Dlatego też analizuje się tylko wybrane własności górotworu, które opisane za pomocą wybranego modelu mechanicznego są w stanie uwzględnić najistotniejsze własności rozpatrywanego ośrodka.

Obserwując zjawiska zachodzące w górotworze będącym pod wpływem eksploatacji górniczej, należy zauważyć istotny wpływ czasu na pojawiające się zmiany w stanie naprężeniowo-odkształceniowym masywu skalnego. Niejednokrotnie zmiany naprężenia lub odkształcenia wykazują powolny proces stabilizacji, dążąc asymptotycznie do wartości granicznych ( $\sigma = \text{const}$  lub  $\varepsilon = \text{const}$ ).

Mając na uwadze powyższe stwierdzenie, przyjęto, że do opisu zjawisk zachodzących w górotworze stosuje się najczęściej modele sprężysto-lepkie: „standard” (rys.1a) oraz model Burgersa (rys.1b). Stosowanie modeli reologicznych o większym stopniu skomplikowania stwarza dodatkowe trudności z wyznaczaniem stałych reologicznych dla tych modeli.



Rys. 1. Schemat modeli reologicznych: a) model Zenera - Standard, b) model Burgersa  
Fig.1. Rheological models scheme: a) Zener's-Standard model, b) Burgers's model

Moduł sprężystości elementu Hooke'a zastosowany w powyższych modelach, a oznaczony symbolem  $E_2$ , odpowiada nieskończeniu długiemu czasowi relaksacji. Proces odkształceń dla obu modeli jest opisany wg wzorów, odpowiednio:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\lambda_2} t\right) \right] \quad (1)$$

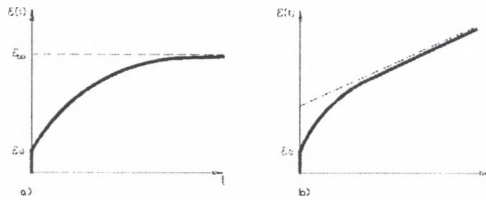
$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\lambda_2} t\right) \right] + \frac{\sigma_0}{\lambda_1} t \quad (2)$$

gdzie:

- $E_1, E_2$  - moduły sprężystości liniowej poszczególnych gałęzi modelu,
- $\lambda_1, \lambda_2$  - współczynniki lepkości liniowej poszczególnych gałęzi modelu,
- $\sigma_0, \varepsilon_0$  - wartości naprężeń i odpowiadających im odkształceń sprężystych.

Zarówno dla modelu Zenera – Standard, jak i dla modelu Burgersa charakterystyczne są natychmiastowe odkształcenia sprężyste  $\varepsilon_0$ . Dalszy proces odkształceń ma charakter reologiczny i zdąża do pewnego ustalonego odkształcenia końcowego  $\varepsilon_\infty$  - w przypadku modelu Zenera lub do nieskończoności według krzywej posiadającej asymptotę w postaci prostej - w przypadku modelu Burgersa.

Graficzną interpretację zależności (1) i (2) przedstawiono na rys.2.



Rys.2. Wykresy  $\epsilon(t)$  dla przyjętych modeli reologicznych: a) dla modelu Zenera - Standard, b) dla modelu Burgersa

Fig.2.  $\epsilon(t)$  graphs for carried rheological models: a) for Zener's-Standard model, b) for Burgers's model

### 3. Parametry materiałowe

Własności mechaniczne skał otaczających rozpatrywane wyrobisko lub tworzących wybrany do analizy rejon górotworu wpływają w zasadniczy sposób na otrzymywane wyniki symulacji komputerowej. Z tego też względu bardzo istotny wydaje się sposób wyznaczania własności mechanicznych skał.

W praktyce najczęściej stosuje się trzy metody wyznaczania parametrów materiałowych:

- 1) metodę laboratoryjną,
- 2) metodę inwersji,
- 3) metodę bezpośrednią.

**Metoda laboratoryjna** polega na wyznaczeniu parametrów materiałowych na podstawie badań laboratoryjnych próbek skalnych pobranych z rozpatrywanego rejonu górotworu. Badanie najczęściej prowadzi się w prasie hydraulicznej poddając próbkę jednoosiowemu ścisaniu. Określenie parametrów mechanicznych dla warstwy skalnej określa się uśredniając wyniki badań wielu próbek. Zasadniczą wadą metody laboratoryjnej jest określanie parametrów materiałowych dla jednoosiowego stanu naprężeń, podczas gdy w rzeczywistości materiał znajduje się w złożonym stanie naprężenia.

W celu „dopasowania” wyznaczonych laboratoryjnie parametrów materiałowych do rzeczywistych warunków panujących w rzeczywistym ośrodku skalnym stosuje się odpowiednie współczynniki przeliczeniowe. Zastosowanie takiej metody nie zapewnia jednak dostatecznej dokładności prowadzonych obliczeń.

**Metoda inwersji** stanowi metodę doboru parametrów materiałowych opartą na pomiarach dołowych rzeczywistego ośrodka. Polega ona na odpowiednim przekształcaniu wzorów matematycznych lub wzorów, na których oparto algorytm obliczeń numerycznych, aby otrzymać zależność parametrów mechanicznych i reologicznych od pomierzonych wartości przemieszczeń punktu pomiarowego. Metoda ta uwzględnia rzeczywisty stan naprężeń w ośrodku skalnym.

**Metoda bezpośrednia** oparta jest na iteracyjnej zmianie parametrów mechanicznych i reologicznych przyporządkowanych konkretnemu, przyjętemu do obliczeń modelowi, tak aby w efekcie otrzymać wartości możliwie najbardziej zbliżone do rzeczywistych wartości przemieszczeń punktów pomiarowych. Podobnie jak w przypadku metody inwersji istnieje możliwość uwzględnienia rzeczywistego stanu naprężeń pierwotnych.

#### 4. Modelowanie numeryczne górotworu

Rozwiązywanie zagadnień związanych z procesami zachodzącymi w górotworze za pomocą metody elementów skończonych jest znacznie tańsze w stosunku do prowadzenia badań dołowych rzeczywistego ośrodka. Ponadto ogromną zaletą tej metody jest możliwość powtarzalności prowadzenia obliczeń w celu wyboru optymalnego rozwiązania. Należy w tym miejscu podkreślić, iż niejednokrotnie proces powtarzalności w przypadku rzeczywistych badań dołowych byłby niemożliwy do przeprowadzenia.

Rozważając geometrię wybranego ośrodka, zagadnienia dotyczące określenia pól przemieszczeń oraz naprężeń w otoczeniu wyrobisk górnictwa można podzielić na:

- zadania płaskie,
- zadania przestrzenne,
- zadania osiowosymetryczne.

**Zadania płaskie** charakteryzują się dwuwymiarowym stanem naprężenia i przemieszczenia. Trzeci kierunek traktowany jest jako kierunek zerowy.

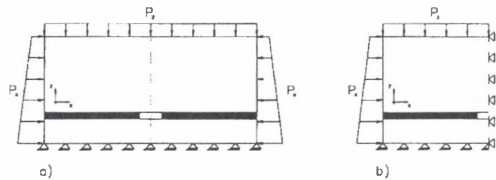
**Zadaniem przestrzennym** będziemy określać trójosiowy stan naprężenia oraz przemieszczenia. Układ przestrzenny charakteryzuje się sześcioma niezerowymi składowymi stanu naprężenia oraz odkształcenia.

Przypadek, w którym możemy wyróżnić oś symetrii modelu dotyczącą zarówno geometrii ośrodka, jak i zjawisk w nim zachodzących, określać będziemy mianem **zadania osiowosymetrycznego**. W zadaniu takim możemy dokonać zastąpienia modelu podstawowego przez model zastępczy.

Z uwagi na duży stopień skomplikowania najtrudniej jest odwzorować zagadnienie przestrzenne. Jest to związane z anizotropią wynikającą zarówno ze struktury modelowanych warstw, jak również z anizotropią parametrów reologicznych. Najczęściej spotykanymi modelami są zagadnienia uwzględniające izotropię w obrębie poszczególnych warstw budujących górotwór.

Celem poprawnego wyznaczenia rozkładu naprężeń i przemieszczeń w górotworze otaczającym wyrobisko górnicze należy określić optymalne wymiary wycinka górotworu lub w przypadku płaskim wymiary tarczy górotworu. Brak jest jak dotąd jednoznacznego sposobu określania optymalnych wymiarów tarczy górotworu. Należy jednak pamiętać, że w przypadku zbyt małej odległości pomiędzy krawędzią tarczy a wyrobiskiem mogą wystąpić zakłócenia, spowodowane wpływem podpór przypisanych tej krawędzi. Przyjęcie do rozważań numerycznych zbyt dużych gabarytów tarczy górotworu spowoduje niepotrzebne wydłużenie czasu prowadzenia obliczeń.

Ustalając gabaryty wycinka górotworu, warto pamiętać, że jeżeli w modelowej tarczy można wyróżnić oś symetrii, to do obliczeń należy przyjąć tzw. model zastępczy (rys.3).



Rys.3. Schemat tworzenia modeli zastępczych: a) model pierwotny tarczy górotworu, b) model zastępczy po uwzględnieniu osi symetrii

Fig.3. Substitution models creation scheme: a) rock mass shield primary model, b) substitution model after symmetrical axis consideration

Stosowanie tej zasady pozwoli na:

- zmniejszenie liczby równań potrzebnych do opisanie modelu,
- lepsze opisanie modelu przy stałej liczbie równań, co wpłynie na uzyskanie dokładniejszych wyników.

## 5. Określenie warunków brzegowych

Zasadniczym elementem procesu modelowania numerycznego ośrodka skalnego, jaki stanowi wycinek górotworu, jest określenie w możliwie dokładny sposób warunków brzegowych. Przy rozwiązywaniu konkretnego problemu numerycznego opis warunków brzegowych ośrodka sprowadza się w głównej mierze do:

- zadania kierunków przemieszczeń,
- określenia naprężeń,
- powiązania naprężeń z przemieszczeniami.

Przyjmuje się, że naprężenia pierwotne w górotworze są sumą naprężeń pochodzących od sił grawitacyjnych  $p_g$  oraz naprężeń pochodzących od sił tektonicznych  $p_t$ . Uwzględniając powyższe stwierdzenie, pierwotny stan naprężeń w górotworze można przedstawić w postaci zależności (3)

$$p_p = p_k + p_t \quad (3)$$

Pole naprężeń pierwotnych pochodzących wyłącznie od sił grawitacyjnych można zapisać w postaci tensorowej:

$$p_k = \begin{bmatrix} p_x & 0 & 0 \\ 0 & p_y & 0 \\ 0 & 0 & p_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

W przypadku modelowania numerycznego składową pionową naprężeń pierwotnych  $p_z$  określić można na podstawie znanej zależności:

$$p_z = - \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i \quad (5)$$

gdzie:

$\gamma_i$  - ciężar objętościowy  $i$ -tej warstwy tworzącej górotwór,

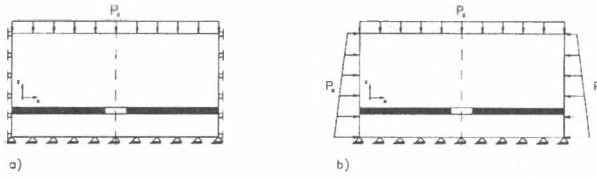
$h_i$  - grubość  $i$ -tej warstwy skalnej.

Wartość składowych poziomych  $p_x$  oraz  $p_y$  dla przypadku górotworu warstwowo izotropowego można wyznaczyć na podstawie wzoru:

$$p_x = p_y = \frac{\nu}{1-\nu} p_z \quad (6)$$

gdzie  $\nu$  oznacza współczynnik Poissona warstwy skalnej.





Rys.4. Modelowanie pierwotnego stanu naprężeń w górotworze  
 Fig.4. Rock mass primary stress conditions modelling

W przypadku górotworu składającego się z warstw słabo nachylonych i nieznacznie zdeformowanych tektonicznie można przyjąć, że składowe naprężeń grawitacyjnych  $p_z$  oraz  $p_y$  są wystarczające do ustalenia warunków brzegowych.

Na rys.4a przedstawiono tarczę górotworu obciążoną składową pionową  $p_z$ . Składową poziomą  $p_x$  naprężenia uzyskujemy na podstawie reakcji podpór ruchomych. Innym sposobem modelowania pierwotnego stanu naprężeń dla tarczy górotworu jest zastąpienie ruchomych podpór wartościami naprężenia poziomego  $p_x$  (rys.4b).

Znacznie bardziej skomplikowanym zadaniem jest wyznaczenie drugiego ze składników naprężenia pierwotnego, wynikającego z procesów tektonicznych zachodzących w górotworze  $p_t$ .

W górotworze o złożonej budowie geologicznej silnie zaburzonym tektonicznie często z warstwami skalnymi nachylonymi pod znacznymi kątami występują naprężenia pierwotne, w których przeważający udział mają naprężenia tektoniczne. Są one niejednokrotnie kilka razy większe od naprężeń grawitacyjnych. Składową naprężenia pierwotnego opisującą naprężenia tektoniczne podobnie jak w przypadku składowej grawitacyjnej można zapisać w postaci tensorowej:

$$P_t = \begin{bmatrix} p'_{xx} & p'_{xy} & p'_{xz} \\ p'_{xy} & p'_{yy} & p'_{yz} \\ p'_{xz} & p'_{yz} & p'_{zz} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Wyznaczenie wartości tensora naprężeń tektonicznych jest jednak zadaniem niezwykle złożonym. Na stopień trudności wpływa przede wszystkim brak znajomości warunków i czasu tworzenia się podstawowych deformacji górotworu.

W przypadku górotworu silnie pofałdowanego i poprzecinanego licznymi uskokami uwzględnienie składowej naprężenia tektonicznego jest konieczne do prawidłowego określenia warunków brzegowych modelowanej tarczy.



Kolejnym elementem ustalania warunków brzegowych dla przyjętego modelu obliczeniowego jest określenie możliwości przemieszczeń poszczególnych punktów siatki górotworu. Najczęściej przyjmuje się, że punkty węzłowe znajdujące się na krawędziach pionowych tarczy, lub w przypadku zagadnienia przestrzennego na skrajnych płaszczyznach pionowych, mają swobodę przemieszczania się w kierunku pionowym. Zgodnie z rys.4. mogą one się przemieszczać wzdłuż kierunku wyznaczonego przez oś Z. Przemieszczenia węzłów w kierunku poziomym (zgodnym z osiami X oraz Y) są równe zero.

Węzły przyporządkowane dolnej krawędzi tarczy, lub w przypadku modelu przestrzennego skrajnej dolnej płaszczyźnie, mają możliwość przemieszczania się jedynie w kierunku poziomym (zgodnym z kierunkami osi X i Y).

Pozostałe punkty węzłowe posiadają możliwość swobodnego przemieszczania się w dowolnym kierunku.

## 6. Podsumowanie

Przedstawiony w powyższym opracowaniu schemat budowy modelu numerycznego górotworu posłuży w dalszej części do wyznaczenia pól przemieszczeń i naprężeń przy użyciu metody elementów skończonych. Stosując metodę elementów skończonych jako podstawy rozwiązywania problemu można uwzględnić znacznie większą liczbę czynników wpływających na zachodzące procesy w górotworze niż w przypadku standardowych metod matematycznych. Należy w tym celu dysponować sprzętem komputerowym o odpowiedniej pojemności pamięci oraz prędkości obliczeniowej.

Analizując schemat budowy modelu numerycznego należy stwierdzić, że o poprawności prowadzonego procesu obliczeniowego decyduje wiele czynników, z których najistotniejsze to parametry materiałowe, oraz właściwie zadane warunki brzegowe. Zarówno parametry materiałowe, jak i warunki brzegowe dla modelu górotworu można częściowo określić stosując opisaną w opracowaniu metodę odwrotną. Konieczne jest w takim przypadku korzystanie z pomiarów prowadzonych w rzeczywistym ośrodku.

Jednym z istotniejszych etapów tworzenia modelu reologicznego, który nie został omówiony w powyższej pracy, jest etap tworzenia siatki elementów. W przypadku prostych siatek, jednorodnych pod względem własności fizykomechanicznych, czynność ta ma charakter au-

tomatycznego generowania. W przypadku bardziej skomplikowanym proces ten ma charakter indywidualny, zależny od geometrii ośrodka, a także od rozpatrywanego zjawiska.

Reasumując, proces numerycznego modelowania górotworu otwiera nowe możliwości prognozowania zjawisk towarzyszących eksploatacji górniczej. Rozwiązywanie zagadnień związanych z mechaniką górotworu przy użyciu metody elementów skończonych jest znacznie tańsze i szybsze w stosunku do poszukiwania rozwiązań na drodze badań dołowych.

## LITERATURA

1. Drzęźła B.: Wpływ prędkości wybierania i zmian prędkości wybierania (postojów ścian) na obiekty powierzchni w świetle przyjętych modeli teoretycznych. Materiały Szkoły Eksploatacji Podziemnej. 1996.
2. Kidybiński A.: Podstawy geotechniki kopalnianej. Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1982.
3. Kłeczek Z.: Geomechanika górnicza. Śląskie Wydawnictwo Techniczne. Katowice 1994.
4. Kowalski A.: Wpływ prędkości eksploatacji na deformacje powierzchni na przykładzie eksploatacji KWK Staszic. Materiały Szkoły Eksploatacji Podziemnej. 1996.
5. Kwaśniewski M., Wang J.: Analiza numeryczna deformacji górotworu wywołanych eksploatacją górniczą. Materiały Szkoły Eksploatacji Podziemnej. 1996.
6. Filcek H., Walaszczyk J., Tajduś A.: Metody komputerowe w geomechanice górniczej. Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice 1994.

Recenzent: Prof. dr hab.inż. Józef Dubiński

## Abstract

Rules of creating numerical models of rock environment creating the rock mass are the basis for solving concrete practical problems. The first point of this study characterises the rheological model describing the rock environment together with methods of marking basic parameters of the model. Next, the authors of this study have submitted the way of construct-

ing the ground's shield and methods of its simplification. The closing stage of numerical modelling of the formation is defining and modelling border conditions for given environment's shield.

One of more vital stages of making rheological model, which is not described in this study is the stage of creating the net of elements. For simple nets physico-mathematically homogeneous this activity is based on automatic generating. In more complicated cases this process has got an individual character which depends on the geometry of the environment and examined phenomenon. The way of creating the net of elements will be closer characterised in the second part of this study which, is being prepared.