ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1980

Seria: GÓRNICTWO z. 107 Nr kol. 661

KAZIMIERZ PODGÓRSKI, HENRYK KLETA

OKREŚLANIE STANU NAPRĘŻENIA W MASYWIE SKALNYM PRZY UWZGLĘDNIENIU RUCHÓW GÓROTWÓRCZYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono sposób określenia stanu naprężenia w masywie skalnym przy uwzględnieniu ruchów górotwórczych. Wykorzystując wyniki badań próbek skalnych w trójosiowym stanie naprężenia podano sposób tworzenia się uskoków i płaszczyzn kliważu. Wyprowadzono zależności pozwalające określić stan naprężenia w masywie skalnym przed i po wystąpieniu uskoków oraz płaszczyzn kliważu.

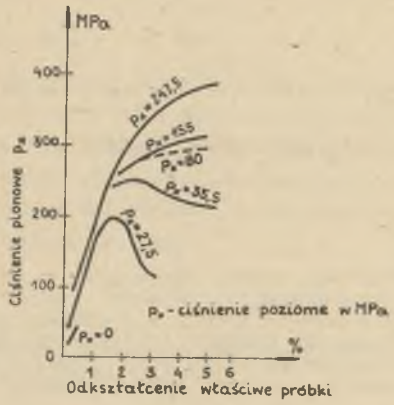
1. Wstęp

Przy projektowaniu i wykonywaniu wyrobisk górniczych należy uwzględnić rzeczywisty stan naprężenia w masywie skalny, który wynika z oddziaływania skał nadległych, jak również nagromadzonej energii pochodzącej od ruchów górotwórczych. Problemem powstawania uskoków oraz określeniem stanu naprężenia w masywie skalnym zajmowało się szereg badaczy [6]. Według Jaegera i Cooka [5,6] płaszczyzna uskoku może powstać pod kątem $\psi < 45^{\circ}$ do kierunku maksymalnego naprężenia σ_1 i prostopadle do płaszczyzny głównych naprężeń σ_1 i σ_3. N.J. Price [6,8] zakładając brak przemieszczeń poziomych uzyskał warunek $\sigma_2 > \sigma_1 \geqslant \sigma_3$ przy którym, może powstać uskok poziomy. McKinstry w pracy [6,7] analizuje spękania (uskoki) wtórne powstające wskutek redystrybucji naprężeń w wyniku wytworzenia się uskoku głównego. Stan naprężenia wynikający przez oddziaływanie ruchów górotwórczych można wyznaczyć na drodze badań "in situ" lub na podstawie rozważań teoretycznych.

Bezpośrednie pomiary prowadzone w masywie skalnym są kosztowne i trudne oraz związane w większości z małymi głębokościami. Istnieje więc potrzeba przybliżonego określenia wpływu ruchów górotwórczych na wielkość naprężeń w masywie skalnym nienaruszonym wpływami eksploatacji górniczej.

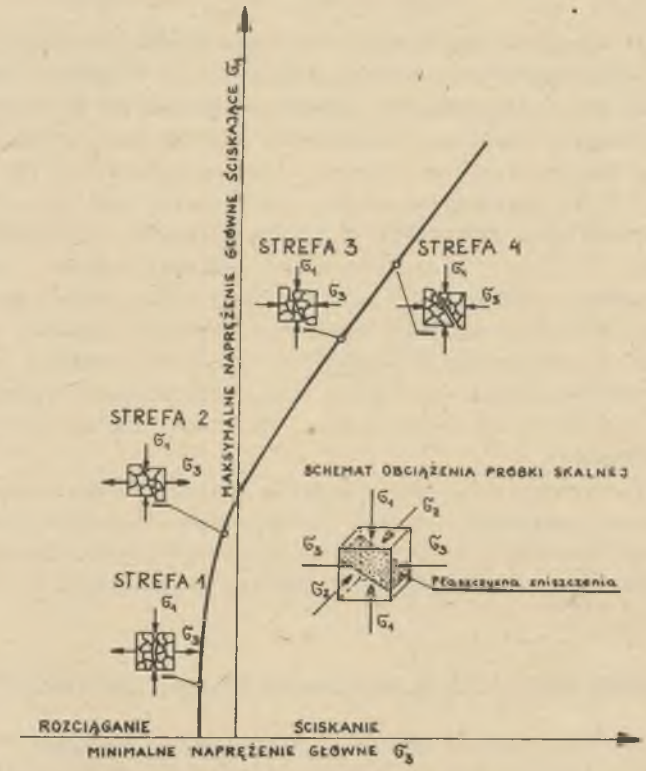
2. Wpływ ruchów górotwórczych na stan naprężenia w masywie skalnym

Zagadnienie to przedstawiono dla Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Zagłębie to ma w ogólnym zarysie kształt nieregularnej niecki, której brzeg południowy ukryty jest pod nasunięciem karpackim. W obrębie tej niecki



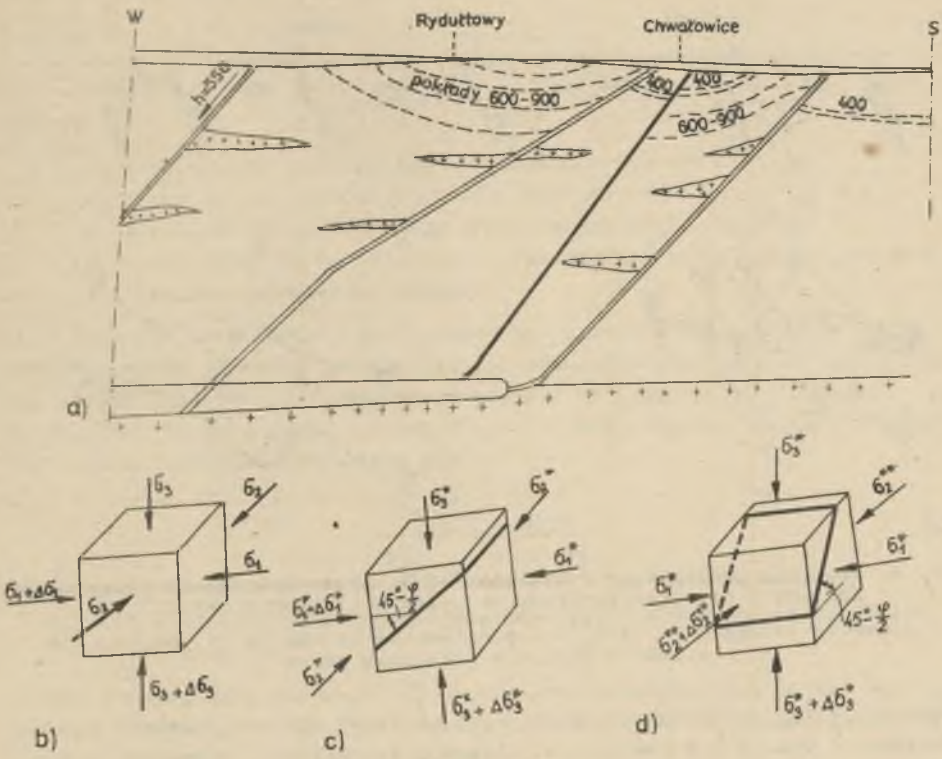
Rys. 1. Wpływ stanu naprężeń na odkształcenie i wytrzymałość piaskowca [1]

wyróżnia się szereg elementów tektonicznych ułożonych w dwóch głównych kierunkach sudeckim i świętokrzyskim. W zachodniej części zagłębia, która jest silniej zaburzona tektonicznie dominuje kierunek sudecki. W wyniku ruchów górotwórczych wystąpiły sfałdowania, uskoki, kliważ i mikrokliważ. Zagadnienie tworzenia się uskoków i płaszczyzn kliważu rozpatrzono na podstawie analizy ściskania próbek skalnych w trójosiowym stanie naprężenia. Poniżej przytoczono wyniki badań piaskowca (rys. 1). Z badań tych wynika, że przy naprężeniach poziomych 27,5 MPa próbki odkształcały się plastycznie do wartoś-



Rys. 2. Rodzaje zniszczenia skał zwięzłych, zawierających dowolnie rozmieszczone nieciągłości, przedstawione na wykresie niszczących naprężeń głównych [4]:

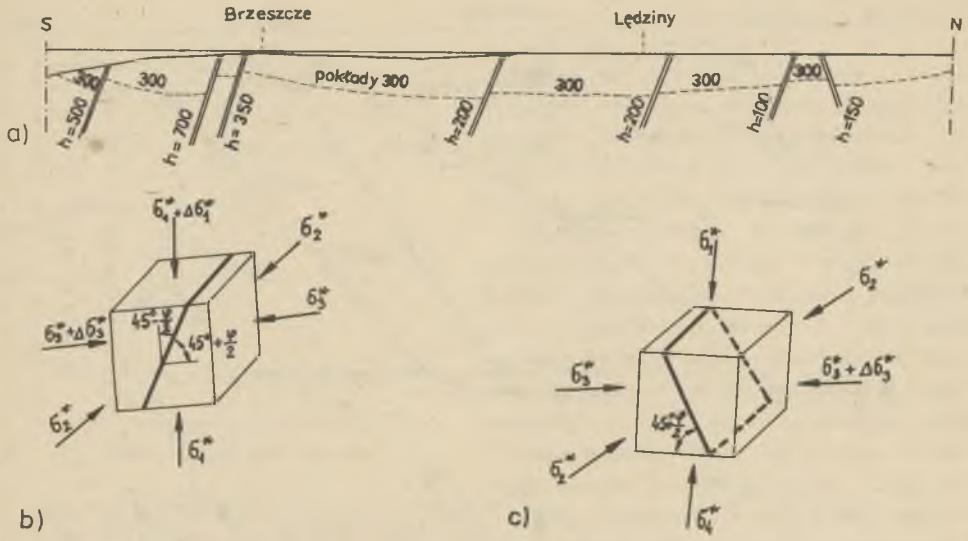
Strefa 1 - zniszczenie na skutek rozrywania, Strefa 2 - zniszczenie na skutek rozciągania-ściskania, Strefa 3 - zniszczenie na skutek ścinania z dylatacją, Strefa 4 - ścięcie nienaruszonej próbki



Rys. 3. Przekrój geologiczny o kierunku W-S przez Nieckę Chwałowicką z podaniem rozkładu naprężeń w otoczeniu uskoku

a - przekrój geologiczny, b - rozkład naprężeń przed powstaniem uskoku, c - powstawanie uskoku z nasunięciem, d - powstawanie uskoku z nasunięciem o kierunku prostopadłym do uskoku c

ci $\varepsilon = 3\%$, gdy naprężenia poziome wynosiły 150 MPa piaskowiec zachowywał się jak ciecz lepka i próbka nie ulegała spękaniu. Z obserwacji zachowania się skorupy ziemskiej wynika, że im mniejsza prędkość obciążenia tym większe deformacje może znieść skała bez powstania w niej pęknięć. Uwidacznia się tu duży wpływ pełzania masywu skalnego na wielkość deformacji. Jak wynika z badań [4] im mniejsze naprężenia poziome tym powierzchnia ścięcia próbki jest bardziej nieregularna, co przedstawiono na rys. 2. Przeprowadzone badania laboratoryjne [2] wskazują, że na dużych głębokościach górotwór odkształca się plastycznie. Natomiast im bliżej powierzchni ziemi tym w większym zakresie uwidaczniają się jego nieciągłe deformacje. Nad odkształcającymi się plastycznie warstwami skały głębinowe w otoczeniu tworzących się gór ulegają wydźwignięciu i sfałdowaniu. Powstałe sfałdowania powodowały w procesie przemieszczania, ścięcia i wydź-



Rys. 4. Przekrój geologiczny o kierunku S-N przez Górnośląskie Zagłębie Węglowe z podaniem rozkładu naprężeń w otoczeniu uskoku

a - przekrój geologiczny [10], b - powstawanie uskoku ze zrutem, c - powstawanie uskoku w otoczeniu progu

wignięcie wyżej leżących warstw skalnych. Schemat takiego procesu przedstawiono na rys. 3 i 4 które m.in. obrazują działalność sudeckich ruchów górotwórczych, a następnie karpackich. Przemieszczający się fałd masywu skalnego powoduje dalsze deformacje, a w granicznym stanie naprężenia powstanie uskoku. Wraz ze zmniejszaniem się prędkości przemieszczania fałdu rośnie odległość pomiędzy tworzącymi się uskokami. Z chwilą powstania płaszczyzn uskoków i kliważu oraz ustania działalności ruchów górotwórczych wystąpiło w wyniku pełzania górotworu zmniejszenie naprężeń. Wpływ pełzania na zmianę doraźnej wytrzymałości skał został stwierdzony również na drodze badań laboratoryjnych [9] i tak np. dla piaskowca stosunek wytrzymałości trwałej R_∞ do chwilowej R_0 wynosi $\alpha = 0,72$; łupku ilastego $\alpha = 0,68$; węgla $\alpha = 0,69$.

Jak już wspomniano, podczas ruchów górotwórczych powstają uskoki, kliważ i mikrokliważ w płaszczyznach, których następuje duże zmniejszenie kohezji. W zależności od rozkładu naprężeń powierzchnia ścięcia może być gładka lub nieregularna, tak że, przy dalszym procesie ściskania występuje zgniecenie i ścięcie nierówności i tworzy się druzgot tektoniczny. Zależność między naprężeniami w stanie sprężystym i plastycznym można opisać stosując hipotezę Coulomba-Mohra lub ustalić na podstawie badań laboratoryjnych dla poszczególnych rodzajów skał. Paraboliczne równanie stanu granicznego po szeregu przekształceniach posiada postać:

$$\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\cos\varphi\right)^2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} R_c \sin\varphi_o - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\sin\varphi\, R_c \sin\varphi_o - R_r\, R_c \sin\varphi_o \quad (1)$$

gdzie:

$\sigma_1; \sigma_3$ - największe i najmniejsze naprężenie główne,
φ_o - kąt tarcia wewnętrznego przy naprężeniu; $\sigma_3 = 0$; $\sigma_1 = R_c$,
φ - kąt tarcia wewnętrznego przy naprężeniach, σ_1, σ_3,
$R_c; R_r$ - wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie próbki skalnej w jednoosiowym stanie naprężenia.

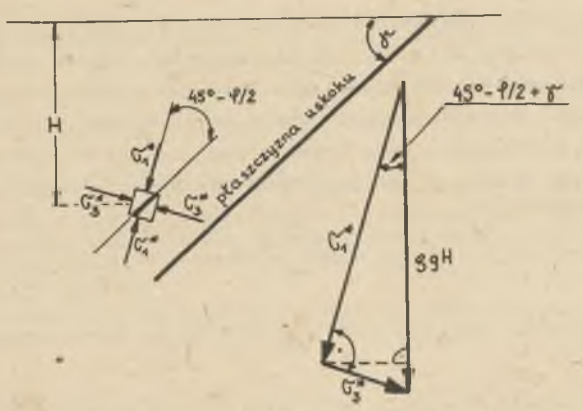
W dalszych rozważaniach zastosowano uproszczenie zastępując warunek Cuolomba-Mohra o postaci parabolicznej, równaniem prostej oraz przyjmując że, zmiana kąta tarcia wewnętrznego przed i po ścięciu jest nieduża. Po wystąpieniu ścięcia kohezja skały spada do zera, wówczas warunek stanu granicznego Cuolomba-Mohra posiada postać

$$\frac{\sigma_1^*}{\sigma_3^*} = \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \quad (2)$$

gdzie:

σ_1^* ; σ_3^* - największe i najmniejsze naprężenie główne po wystąpieniu ścięcia.

Wielkość naprężenia głównego σ_1^* wyznaczono uwzględniając ciężar skał nadległych w oparciu o położenie płaszczyzn uskokowych dla rozpatrywanej głębokości (rys. 5).



Rys. 5. Wyznaczenie kierunków i wielkości naprężeń głównych na podstawie: nachylenia płaszczyzny uskokowej lub kliważu, wielkości kąta tarcia wewnętrznego, naprężenia pochodzącego od oddziaływania ciężaru własnego skał

$$\sigma_1^* = \frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot (1 + \sin\varphi)}{(1-\sin\varphi)\cos(45^o - \varphi/2 + \gamma) + (1+\sin\varphi)\cos(45^o + \varphi/2 - \gamma)} \quad (3)$$

gdzie:

ρ - gęstość przestrzenna skał,

g - przyśpieszenie ziemskie,

ϑ - kąt nachylenia płaszczyzn uskokowych,

H - głębokość rozpatrywanego punktu.

W warunkach dużych naprężeń można przyjąć, że występują głównie odkształcenia postaciowe, wówczas

$$\sigma_1^* + \sigma_2^* + \sigma_3^* = 0 \tag{4}$$

Z równania 4 wynika, że w procesie ruchów górotwórczych mogą wystąpić odkształcenia rozciągające, które są przyczyną powstania płaszczyzn kliważu. W wyniku ścięć występuje rozładowanie naprężeń rozciągających i można przyjąć, że występują głównie naprężenia ściskające. Wielkość tych naprężeń określa się z warunku stanu granicznego, który posiada postać:

$$\frac{\sigma_2^{**}}{\sigma_3^{**}} = \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \tag{5}$$

gdzie:

σ_2^{**} - największe naprężenie główne po wystąpieniu płaszczyzn kliważu.

Przyjmując, że w procesie powstawania uskoków i kliważu nie ulega zmianie kąt tarcia wewnętrznego skał to z równań 2 i 5 wynika

$$\sigma_3^* = \sigma_3^{**} \; ; \qquad \sigma_1^* = \sigma_2^{**} \tag{6}$$

Tak zaistniały stan naprężenia w masywie skalnym ulega zmianie w wyniku pełzania skał i wpływu wilgotności. Ponieważ naprężenie σ_1^* zależy głównie od oddziaływania ciężaru skał nadległych to można przyjąć, że nie ulega ono zmianie i określone jest równaniem 3. Natomiast naprężenie σ_2^{**} znajdujące się w otoczeniu stanu granicznego ulega wpływowi pełzania skał. W analogii do badań nad pełzaniem próbek skalnych [9] wielkość naprężenia σ_{2t}^{**} w czasie wynosi:

$$\sigma_{2t}^{**} = \sigma_2^{**} \cdot \alpha_2 \tag{7}$$

gdzie:

α_2 - współczynnik pełzania skał wyznaczany na drodze badań laboratoryjnych.

Wraz ze zmniejszeniem się naprężeń poniżej stanu granicznego maleje wpływ pełzania skał. Współczynnik pełzania dla naprężeń $\sigma_3^* = \sigma_3^{**}$ oznaczono przez α_3. Stosunek naprężeń σ_{2t}^{**} i σ_{3t}^{**} określa zależność

$$\frac{\sigma_{2t}^{**}}{\sigma_{3t}^{**}} = \frac{\sigma_2^{**}\,\alpha_2}{\sigma_3^{**}\,\alpha_3} = \xi \tag{8}$$

gdzie:

ξ - współczynnik nierównomierności naprężeń w masywie skalnym.

Jeżeli wielkość naprężenia σ_2^* nie przekroczyła stanu granicznego określonego równaniem 6 to ulega ono zmniejszeniu pod wpływem pełzania skał i wynosi

$$\sigma_{2t}^{**} = \sigma_2^* \alpha_2 \tag{9}$$

Zjawisko pełzania skał zależy w dużej mierze od rodzaju skał i stanu naprężenia. Skały głębinowe, wylewne i metamorficzne ulegają w małym zakresie pełzaniu tak, że wielkość naprężeń poziomych jest większa od naprężeń pionowych. Natomiast skały osadowe ulegają w większym zakresie pełzaniu, można więc przyjąć, że naprężenia pionowe są największe, naprężenia równoległe do uskoku średnie, natomiast prostopadłe do płaszczyzny uskoku najmniejsze.

Wyznaczone wielkości naprężeń w masywie skalnym mogą być wykorzystane przy prognozowaniu stateczności wyrobisk górniczych oraz ustalaniu obciążeń obudowy górniczej.

LITERATURA

[1] Borecki M., Chudek M.: Mechanika górotworu. Wyd. Śląsk, 1972.

[2] Chudek M., Moroz R.: Badanie skał karbońskich w trójosiowym stanie naprężeń. Przegląd Górniczy, nr 9 1970.

[3] Czubaszek J., Szuścik W.: Zniszczenie skał o ortotropowych preferowanych systemach spękań i osłabień. Z.N.Pol.Śl. s. Górnictwo, z. 71, Gliwice 1976.

[4] Czubaszek J.: Zniszczenie skał o dowolnie nachylonych i ortogonalnych systemach nieciągłości. Komunikat nr 152, Instytut Geotechniki Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1976.

[5] Jaeger J.C., Cook N.G.W.: Fundamentals of Rock Mechanics, London 1969.

[6] Kisiel I.: Reologia skał. Podstawy Naukowe. Wyd.PAN, 1973.

[7] McKinstry H.E.: Shears of the second order. Am.J.Sci., v. 251, 1953.

[8] Price N.J.: Mechanics of jojnting in rock. Geol.Mag. v. 96, 1959.

[9] Praca zbiorowa: Kryteria współpracy układu obudowa - górotwór oraz metody obliczania podstawowych parametrów wzajemnego oddziaływania w wyrobiskach korytarzowych. Problem resortowy nr 125, IPBKiOP, Gliwice 1974 - nie publikowana.

[10] Praca zbiorowa: Systemy eksploatacji węgla kamiennego. Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1968.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТОЯНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В МАССИВЕ ГОРНОЙ ПОРОДЫ ПРИ УЧЁТЕ ГОРООБРАЗОВАНИЙ

Р е з ю м е

В статье рассматривается способ определения состояния напряжения в массиве горной породы при учёте горообразования. Пользуясь результатами иссле-

дований каменных образцов в трёхосевом состоянии напряжения, приводится способ образования сброса и плоскостей кливажа. Выводятся зависимости, позволяющие определить состояние напряжения в массиве горной породы перед и после выступлением сброса, а также плоскостей кливажа.

THE DETERMINATION OF THE STATE OF STRESS IN THE ROCK MASS WITH THE ACCOUNT OF ROCK MOVEMENTS

S u m m a r y

The paper presents the method for determining the state of stress in the rock mass with the account of rock movements. By using the analysis results of samples in the triaxial state of stress, leaps and cleavage planes formation is explained. They enable to determine the state of stress in the rock mass before and after leaps and cleavage planes formation.