

SEBASTIAN CZYPIONKA, JERZY MARKOWSKI,
JÓZEF ULIASZ

WPLYW BUDOWY GÓROTWORU I SPOSOBU PROWADZENIA BADAŃ
NA WARTOŚCI STAŁYCH MATERIAŁOWYCH SKAŁ

Streszczenie. W pracy omówiono wpływ na wartość wyznaczanych modułów sprężystości i wsp. Poissona: niejednorodności i szczelinowatości materiału skalnego, wielkości badanych próbek oraz prędkości obciążenia. Omówiono określanie modułów sprężystości metodami in situ.

1. Wiadomości wstępne

Własności mechaniczne górotworu na większych głębokościach stanowią bardzo złożony czynnik determinujący metody i sposoby wybierania kopalin użytecznych. W związku z tym wymaga się obecnie coraz obszerniejszych wiadomości o wytrzymałości skał i odkształcaniu całych kompleksów skalnych.

Zachowanie się obciążonego ciała sprężystego charakteryzują dwie wartości liczbowe: moduł sprężystości E i współczynnik Poissona ν , zwane stałymi sprężystości lub stałymi materiałowymi.

Między naprężeniami a odkształceniami danego ciała sprężystego istnieje ścisła zależność. Określa ją prawo Hooke'a, wyrażające związek między naprężeniami σ w przekroju poprzecznym a odkształceniem właściwym ϵ w postaci funkcji liniowej $\epsilon = \frac{\sigma}{E}$ gdzie E jest modułem sprężystości (modułem Younga). Doświadczalnie stwierdzono, że stosunek właściwego odkształcenia poprzecznego do właściwego odkształcenia podłużnego jest liczbą stałą ν , właściwą danemu materiałowi, przy czym $0 < \nu < 0,5$. Liczba ν zwana liczbą Poissona jest drugą stałą materiału izotropowego niezależną od liczby E . Obie stałe E oraz ν w zupełności określają zależność odkształceń sprężystych od naprężeń w materiałach izotropowych w granicach ważności prawa Hooke'a. Stałe sprężystości E oraz ν mają dla pewnych materiałów jak np. dla stali, jednakowe wartości przy rozciąganiu i przy ścisnieniu; dla innych materiałów np. dla skał, wielkości te są różne.

Na kształtowanie się wielkości stałych materiałowych skał wpływa szereg czynników, które można przedstawić w trzech zasadniczych grupach:

- wpływ niejednorodności i szczelinowatości badanego materiału,
- wpływ wielkości próbek,
- wpływ prędkości obciążenia skały.

2. Wpływ szczelinowatości na wartości modułów odkształcenia

Wpływ poszczególnych rodzajów szczelinowatości na odkształcalność skalnego masywu można przedstawić za pomocą równań, pozwalających wyliczyć moduł odkształcenia szczelinowatego ośrodka dla różnych typów geometrii szczelin, które przytoczono w pracy [1].

Podstawowy przypadek $l > L$

(Długość szczelin większa od charakterystycznego wymiaru bloku, szczeliny posiadają charakter ciągły)

- otwarte szczeliny

$$E_1 = \frac{E_1}{1 + \sum_1^n \eta_1 (1 - \sin^4 \theta_1)}$$

gdzie:

$$\eta_1 = \frac{\delta_1}{\xi_1 h_1} \quad \text{lub} \quad \eta_1 = \frac{\delta_{01} E_1}{h_1 (\xi_{01} E_1 + \sigma)}$$

δ_1 - szerokość otwarcia i-tej szczeliny,

h_1 - grubość warstwy nieneruszonego materiału przypadającego na tę szczelinę,

ξ_1 - współczynnik skalnego kontaktu w danej szczelinie, także i uogólnione charakterystyki odnoszące się do i-tego systemu szczelin, wypełnione szczeliny.

Szczeliny wypełnione materiałem o współczynniku Poissona $\nu_2 = 0,5$. (wypełniacz twardy lub półtwardy)

$$E_1 = \frac{E_1}{1 + \eta (1 - \sin^4 \theta + \frac{2\nu_2}{1-\nu_2} \eta \cos^4 \theta)}$$

Obecność twardego wypełniacza w szczelinach o dużej szerokości otwarcia, a także miękkiego wypełniacza w warunkach szybkiego obciążania uwzględnia parametr η określony według równania:

$$\eta = \frac{f}{h} = \frac{E_1}{E_2}$$

gdzie:

E_2 - moduł odkształcenia materiału wypełniacza.

Obecność miękkiego wypełniacza o wysokiej porowatości w warunkach powolnego obciążenia uwzględnia się przez wprowadzenie zależności $\Delta \sigma(\delta)$, otrzymanej z krzywej kompresji. Przy tym

$$\eta = \frac{\Delta \sigma(\delta)}{h} \cdot \frac{E_1}{\sigma}$$

Przy współczynniku Poissona $\nu_2 = 0,5$ obliczenia prowadzi się według równania

$$E_1 = \frac{E_1}{1 + 2 \sum_1^n \eta_i \cos^2 \theta_i}$$

- Szczelinowatość chaotyczna.

- Systemy szczelin przykładowo równej wielkości, oraz $\bar{\delta}_i < h_i$. Moduł odkształcenia oblicza się według równania:

$$E_0 = \frac{E_1}{1 + \frac{1}{8} n \eta}$$

gdzie:

E_0 - przytoczony moduł odkształcenia,

n - liczba systemów szczelin

$$\eta = \frac{\bar{\delta}}{\bar{h}}$$

$\bar{\delta}$ - średnia szerokość otwarcia szczelin,

\bar{h} - średnia długość nienaruszonego materiału, przypadająca na jedną szczelinę.

- Ośrodek sypki

Dla ośrodka sypkiego obliczenia prowadzi się według równania:

$$E_0 = 1,6 \left(1 + \frac{1}{K}\right) E$$

gdzie:

K - stosunek objętości pustek do objętości materiału.

-Systemy wyklinowujących się szczelin.

Cechą wyklinowania okazuje się spełnienie zależności $l_0 < L$, gdzie l_0

- długość rzutu szczeliny na płaszczyznę poziomą, L - liniowy wymiar rozpatrywanej części skalnego masywu.

- Niewypełnione wyklinowujące się szczeliny.

Przy równomiernym rozkładzie obciążeń obliczenia prowadzi się według równania:

$$E_1 = \frac{E_1}{1 + \sum_1^n \eta_i (1 - \sin^4 \theta_i) \frac{l_i}{L} \cos \theta_i}$$

Jeżeli na rozpatrywany ośrodek działa sztywny stojak, to przytoczony moduł jest równy średnio ważonemu modułowi, otrzymanemu przez uśrednienie E , według kilku cięć pionowych. W przypadku dwóch cięć obliczenia prowadzi się według równania:

$$E_L = E_L' + (E_L' - E_L'') \frac{l_0}{L}$$

- Wypełnione wyklinowujące się szczeliny pod działaniem obciążenia. Obliczenia prowadzi się według równania:

$$E_1 = \frac{E_1}{1 + \eta (1 - \sin^4 \theta) + \frac{2\sqrt{2}}{1 - \sqrt{2}} \eta \cos^4 \theta}$$

Wartość η_i powiększa się o $\frac{l_i}{L} \cos \theta_i$.

- Masyw złożony z bloków skalnych.

Dla systemów szczelin kolejności l_1, l_2, l_3 itd. gdzie: l - długość szczelin; obliczenia modułu E prowadzi się kolejno:

$$E'_1 = \frac{E_1}{1 + \eta^*}; \quad \eta^* = \sum_1^k \eta_1 (1 - \sin^4 \theta);$$

$$E''_1 = \frac{E'_1}{1 + \eta^* + \eta_2};$$

Jeżeli część szczelin wyklinowuje się, to η^* równa się:

$$\eta^* = \sum_1^k \eta_k (1 - \sin^4 \theta_k) \frac{l_k}{L_1} \cos \theta_k.$$

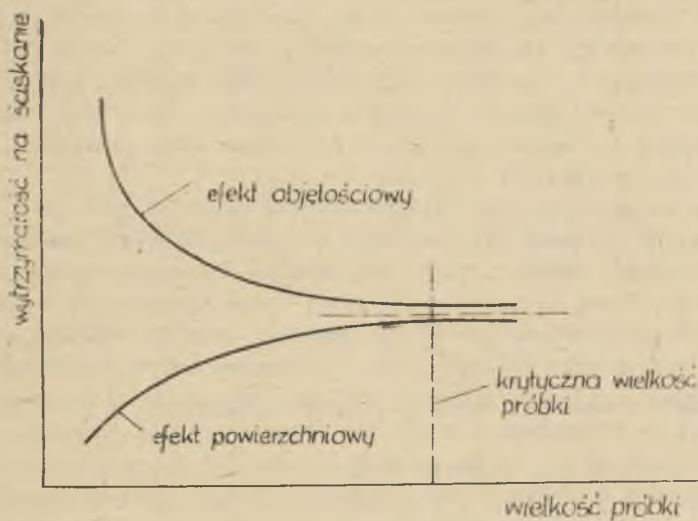
3. Wpływ wielkości próbek na charakterystyki wytrzymałościowe skał

Wielkość próbki wywiera istotny wpływ na wartość wytrzymałości na ściskanie i tym samym na wartości stałych materiałowych. Zależność wytrzymałości na ściskanie od wielkości próbki przedstawia rys. 1 [3].

Przebieg tej zależności jest taki, gdyż:

- wytrzymałość zwiększa się ze wzrostem wielkości próbek (efekt powierzchniowy),
- wytrzymałość zmniejsza się ze wzrostem wielkości próbek (efekt objętościowy).

Stwierdzono, że obydwa efekty obowiązują dla pewnego określonego zakresu wielkości próbek. Główny wpływ wywołany jest tzw. efektem objętościowym, uzależnionym od obecności miejsc lub powierzchni zaburzeń w objętości próbki. Ze wzrostem wielkości próbki wzrasta prawdopodobieństwo uchwycenia takiego słabego miejsca. Wytrzymałość na ściskanie próbki mniejszej może być przez to większa. Z drugiej strony tzw. efekt powierzchniowy powoduje, że ze wzrostem wielkości próbki rośnie również wytrzymałość jej na ściskanie. Tłumaczy się to tym, że wskutek obróbki mechanicznej powstaje na powierzchni bocznej próbek pewien rodzaj strefy wpływu (mikrospeknięcia, chropowatości). Przy określonym sposobie obróbki strefa ta jest zaw-



Rys. 1. Schemat ilustrujący efekt skali

sze mniej więcej jednakowo głęboka, tak że jej wpływ w przypadku większych próbek nie obniża tak wytrzymałości jak u próbek mniejszych. Począwszy od pewnej określonej wielkości próbki ("krytyczna wielkość próbki", która zależy od rodzaju skały), obydwa efekty przestają działać, znaczy to, że określa się wówczas reprezentatywną dla danego materiału wartość "rzeczywistą".

Aby uzyskać wartościowe dane liczbowe, dotyczące własności skał, które mogą być użyte dla celów projektowania, można przyjąć jedynie wyniki badań, prowadzonych na dużą skalę in situ. Np. badania takie były prowadzone przez Z.T. Biemowskiego na węglu [4] i [5].

Badania te wykazały, że ze wzrostem wielkości próbek wytrzymałość próbki zmniejsza się i osiąga wartość asymptotyczną dla wielkości krawędzi sześciianu próbki równej 1,5 m.

4. Wpływ metody określania stałych materiałowych na ich wartości

Moduły sprężystości określa się za pomocą metod, które można zasadniczo podzielić na dwie grupy:

- metody statyczne,
- metody dynamiczne.

Ujemną stroną statycznych metod badań jest to, że aby otrzymać wystarczająco dokładny wynik, trzeba wywołać większe odkształcenie. Istnieje wtedy możliwość przekroczenia zakresu odkształceń sprężystych, nie mówiąc już

o zjawiskach niesprężystości, występujących przy naprężeniach nie przekraczających granicy sprężystości. Dynamiczne metody wyznaczania modułu sprężystości odznaczają się większą czułością niż metody statyczne i nie wymagają wywoływania większych odkształceń. Odkształcenie sprężyste zdąży więc zajść w całej badanej objętości materiału, nawet przy dużej szybkości obciążania w procesie pomiaru, a to dzięki dużej prędkości rozchodzenia się fal sprężystych w badanym ośrodku.

Na wyniki badań statycznych wpływają takie czynniki jak: prędkość obciążania, zmiana wartości wytrzymałości w czasie, wielkość zawilgocenia, temperatura, sposób interpretacji, dla wyznaczania modułu sprężystości.

Wpływ prędkości obciążania na wyniki badań statycznych został wykazany przez M.P. Mochnacziwa i N.W. Gronowa [6]. Badania wykazały, że dla wszystkich badanych skał obserwuje się regularność zwiększania się granicznej wytrzymałości, ze zwiększeniem prędkości rozciągania. Intensywność narastania jej ze zwiększeniem szybkości obciążania jest różna dla każdej skały. Im słabsza skała, im mniejsza graniczna wytrzymałość, tym odpowiednio wyższa granica zniszczenia, ze zwiększeniem prędkości obciążania.

Badania statyczne nie pozwalają na bezpośrednie wyznaczenie wartości modułu E , dla badanego materiału skalnego, lecz umożliwiają jedynie wyznaczenie charakterystyki "naprężenie - odkształcenie".

Dlatego koniecznym jest przyjęcie jednolitego sposobu interpretacji powyższej charakterystyki. K. Wenzel [7] na podstawie przeprowadzonych badań uzasadnił, że jedynie słusznym jest przyjęcie, jako statycznego modułu sprężystości, nachylenia stycznej do krzywej "naprężenie - odkształcenie", otrzymanej w procesie odciążania od wartości krytycznej obciążenia do zera.

Kształtowanie się wielkości stałych materiałowych w zależności od statycznego lub dynamicznego sposobu prowadzenia badań, przedstawiają badania R.B. Sutherlanda [8]. Badania prowadzono na próbkach ośmiu grup skalnych, wyznaczając E i G najpierw dynamiczną metodą, a następnie te same próbki badano metodą statyczną.

Dla próbek badanych ultradźwiękową metodą moduły obliczono według równań podanych przez ASTM.

$$E_{II} = \frac{4 f_1 L^2 \rho}{g}$$

$$E_I = 0,000293 \frac{L^3 T}{n^4} w f_2^2$$

$$G = \frac{4LRwf_3^2}{gA}$$

f_1 - częstotliwość podłużna rezonansowa,

f_2 - " " - poprzeczna rezonansowa,

f_3 - " " - ukośna rezonansowa,

- l - długość próbki,
 r - średnica próbki,
 A - powierzchnia przekroju poprzecznego,
 ρ - gęstość próbki,
 W - ciężar próbki,
 g - przyspieszenie ziemskie,
 R - współczynnik kształtu (tylko dla cylindrów),
 T - współczynnik poprawkowy, którego wartość zależy od stosunku $\frac{l}{r}$ i ν .

Wartości modułów E , ν i G dla prób statycznych były określane metodą przyrostową.

Porównanie wartości stałych materiałowych otrzymanych na drodze statycznych i dynamicznych badań wykazało, że:

- wartości modułu E otrzymane metodą dynamiczną są wyższe od wartości otrzymanych metodą statyczną,
- w przypadku współczynnika Poissona można zauważyć, że pomiędzy statycznymi i dynamicznymi wartościami korelacja nie występuje; przy przyjęciu ultradźwiękowej metody wartości ν bezpośrednio nie mierzy się, lecz oblicza się z zależności $\nu = \frac{E}{2G} - 1$, skąd można zauważyć, że pomyłka rzędu 2% przy wyznaczeniu E i G może spowodować błąd w określeniu współczynnika Poissona w wysokości 20%,
- wartość modułu postaciowego G określona dynamiczną metodą, była zwykle wyższa od wartości wyliczonych ze statycznych danych E i ν .

5. Wyznaczanie modułów metodami in situ

Cennych informacji o kształtowaniu się wielkości modułu sprężystości masywu skalnego dostarczają badania prowadzone metodami in situ. Szczególnie cenną okazuje się możliwość określenia zastępczego modułu sprężystości górotworu według zależności otrzymanej przez profesora H. Glia [9]. Zależność ta ma postać:

$$G = \frac{E(l_0^2 + l_0 \nu T)}{4 l_0 \cdot \nu T} \left[\frac{E K - 2 \gamma H (1 + \nu)}{\nu T} \right]$$

gdzie:

- l_0 - zasięg strefy spekań w caliznie węglowej,
 νT - szerokość wybrania w pokładzie,
 $w_0 = -\nu g$ - osiadanie końcowe stropu wyrobiska, uwarunkowane sposobem kierowania stropem (ν), i grubością wybieranego pokładu (g); (znak wynika z przyjętego układu współrzędnych),
 K - stała plastyczności węgla,
 γ - ciężar właściwy górotworu,
 H - głębokość zalegania pokładu,
 n - współczynnik poziomego respierania eksł.

Zależność ta jest słuszna przy założeniu, że upłynął już dostatecznie duży okres czasu od chwili zatrzymania eksploatacji w pokładzie, tj. zakończony został proces przyrostu naprężeń w górotworze, wywołany eksploatacją.

Wśród innych metod wyznaczania modułów in situ można wyróżnić dwa następujące kierunki prowadzenia badań:

- statyczne metody badań,
- dynamiczne metody badań.

Metody statyczne realizowane są przy użyciu dylatometrów i sztywnych płaskowników rozpieranych w otworze. Opierają się one na pomiarze rzeczywistej odkształcalności skał, budujących masyw skalny. Przyjmując wartości współczynników Poissona dla poszczególnych skał, R.E. Goodman [10] ustalił (dla prowadzonych badań zarówno dylatometrem jak i sztywnym płaskownikiem otworowym) zależność dla wyznaczania modułu E ze stosunku $\frac{\Delta Q}{U_d/d}$. Dla badań przy użyciu sztywnych płaskowników zależność ta ma postać:

$$E = \frac{\Delta Q}{U_d/d} K(\nu, \beta),$$

a dla badań przy użyciu dylatometrów:

$$E = \frac{\Delta Q}{U_d/d} (1 + \nu)$$

gdzie:

- E - moduł Younga,
- ΔQ - przyrost ciśnienia,
- U_d - odkształcenie promieniowe,
- d - średnica otworu,
- $K(\nu, \beta)$ - współczynnik zależny od ν i kąta β ,
- ν - współczynnik Poissona,
- 2β - kąt środkowy określający przestrzeń pobocznicy otworu wiertniczego, na której wywoływane jest obciążenie jednokierunkowe.

Metodą dynamiczną wyznaczania stałych materiałowych metodami in situ jest metoda sejsmiczna. Wyznaczanie modułów masywu skalnego tą metodą jest realizowane przez wywołanie w masywie fal sprężystych. W oparciu o zarejestrowane prędkości rozchodzenia się fal sprężystych w badanym ośrodku, dokonuje się wyznaczenia wielkości modułów sprężystości ze wzorów:

$$E = a \cdot \rho \cdot v_p^2 \frac{2\nu^2 + \nu - 1}{\nu - 1}$$

lub

$$E = 2a \cdot \rho \cdot v_s^2 (1 + \nu)$$

$$\nu = \frac{v_p^2 - 2v_s^2}{2(v_p^2 - v_s^2)}$$

gdzie:

- E - moduł sprężystości,
- a - współczynnik proporcjonalności w systemie metrycznym równy $1,01936 \cdot 10^{-2}$,
- ρ - gęstość ośrodka,
- v_p - prędkość fali podłużnej,
- v_s - prędkość fali poprzecznej,
- ν - współczynnik Poissona.

Metoda sejsmiczna pozwala na poddanie naprężeniom znacznie większej objętości badanego masywu, aniżeli to ma miejsce przy obciążeniach statycznych, co uniezależnia jej wyniki od ujemnego wpływu robót strzałowych oraz tzw. pierścienia ciśnień wokół otworu.

6. Podsumowanie

Ze wzrostem liczby systemów szczelin moduł odkształcenia skały maleje, jednocześnie maleje i stopień anizotropii, charakteryzowany wielkością $\sqrt{\frac{E_{\max}}{E_{\min}}}$; dla liczby systemów szczelin większej niż cztery, jeżeli te systemy przecinają się pod równymi kątami, masyw staje się praktycznie izotropowy. W procesie określania modułu odkształcenia masywu skalnego, należy zwrócić szczególną uwagę na charakter i stopień wypełnienia szczelin, ich długość, liczbę i rozmiar calizny na długości szczeliny. Dla praktycznego projektowania procesów górniczych ważnych danych o wytrzymałości i odkształcalności masywu skalnego mogą dostarczyć tylko badania na wielką skalę in situ. Natomiast badania laboratoryjne na próbkach o dowolnie dużym wymiarze można stosować tylko w celach porównawczych.

Moduł sprężystości zmniejsza się wraz ze wzrostem wymiaru próbki, lecz nie obserwuje się żadnego definitywnego kierunku w przypadku współczynnika Poissona.

Wartości modułów sprężystości otrzymane w czasie dynamicznych badań są wyższe od wartości otrzymanych w wyniku badań statycznych. Dla skał bardzo twardych różnica ta jest niewielka, lecz dla skał miękkich wartości modułu E otrzymane w czasie statycznych i dynamicznych badań mogą różnić się o rząd wielkości.

LITERATURA

- [1] Ruppeniejt K.W.: Deformirnjemost massiwow trieszczinowatych gornych porod. Izdatelstwo Nedra 1975.
- [2] Baron Ł.J.: Gornotiechnologiczieskoje porodowiedienie. Przedmiot i sposoby issledowanij. Izdatelstwo Nauka, 1977.
- [3] Pfor H.: Wytyczne Międzynarodowego Biura Mechaniki Górnotworu do określenia parametrów geomechanicznych skał i górnotworu.
- [4] Bieniawski Z.T.: In situ strenght and deformation characteristics of coal. Engineering Geology 1968.
- [5] Bieniawski Z.T.: In situ large scale testing of coal. The British Geotechnical Society in London, 1969.
- [6] Mochnaczew M.P.; Gronowa N.W.: Zakonomernosti izmieniaenija pokazatickiej procznostnych i deformacjonnych swojstw gornych porod pri rasiazenii ot skorostu i prodożitielnosti nagruženija. Fiziko techniczeskije problemy razrabotki polieznnych iskopajemnych, 1970.
- [7] Wenzel K.: Die Bestimmung elastischer Eigenschaften von austehendem Pels durch Ultraschall-Sondierung. Schweizerische Bauzeitung, 1959.
- [8] Sutherland R.B.: Some dynamic and static properties of rock. [w] ROCK MECHANICS. Proc. of the 5 th Symposium on Rock Mechanics held at the Univ. of Minnesota (ed. by C. Fairhurst). 473 - 492. Pergamon Press. Oxford, London, New York, Paris, 1963.
- [9] Gil H.: Matematyczne ujęcie makroskopowego mechanizmu tapania pokładowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria: Górnictwo, Z. 70, 1976.
- [10] Goodman R., Van T., Henz'e F.: Measurement of rock deformability in boreholes. Basic and applied rock mechanics. Trans. AIME (1972) New York.

ВЛИЯНИЕ ГОРНОГО МАССИВА И СПОСОБЫ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ
НА СТОИМОСТЬ ПОСТОЯННЫХ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПОРОД

Р е з ю м е

В статье рассматривается влияние на стоимость определённых модулей упругости и восп. Пуассона: однородность и пористость породного материала, величины испытываемых образцов и скорости нагрузки. Приводится определение модулей упругости методами ин сити.

THE EFFECT OF ROCK STRUCTURE AND THE RESEARCH METHODS ON THE
MATERIAL CONSTANTS VALUES OF THE ROCK

S u m m a r y

The paper discusses the effect of heterogenity and cleavage of the rock, size of the rock samples and the loading speed on the value of the elasticity module determined and on Poisson coefficient.