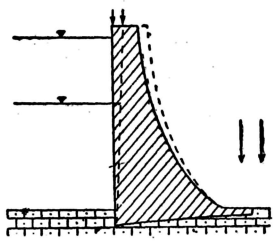
JULIUSZ KÖHSLING

LABORATORYJNE WYZNACZANIE MODUŁU SPRĘŻYSTOŚCI SKAŁ

W obliczeniach stateczności dużych budowli inżynierskich oraz obudowy wyrobisk górniczych ważną wielkością jest moduł sprężystości skały znajdującej się w podłożu, czyli moduł Younga (E). Skały bowiem — podobnie jak metale — w pewnych przedziałach obciążeń wykazują odkształcenie sprężyste i takie obciążenia nazwiemy dopuszczalnymi. Obciążenie przekraczające wartość dopuszczalną może spowodować zniszczenie struktury skalnej i trwałe odkształcenie skał podłoża, powodując nieraz katastrofy budowlane.

Problem wyznaczenia dopuszczalnych obciążeń podłoża i modułów sprężystości skał występuje najostrzej w budownictwie wysokich zapór wodnych. Obciążenia jednostkowe na podłoże dochodzą tu — w zależności od rodzaju skały i typu zapory — do 40 kg/cm² i więcej. Oprócz tego obciążenia dodatkowe, zależne od wysokości piętrzenia wody w zbiorniku, powodują zmiany w rozkładzie naprężeń w podłożu zapory. Wahania wysokości piętrzenia wody w różnych zbiornikach sięgają kilkudziesięciu metrów, co jest przyczyną zmiany obciążenia zapory, a więc i jej podłoża. Wyrazem tych zmian są rejestrowane przesunięcia koron zapór wodnych, zależnie od stanu napełnienia zbiornika. Dla przykładu podamy, że np. korona zapory w Pilchowicach na Bobrze ma wahania rzędu 60 cm. Część tych ruchów przenosi korpus zapory (w podanym przykładzie beton), a część podłoże skalne w zakresie swych odkształceń sprężystych. Dlatego w budownictwie wodnym dąży się do jak najstaranniejszego wyznaczenia modułów sprężystości i dopuszczalnych obciążeń skał podłoża, dobierając typ zapory do wytrzymałościowych własności podłoża.



Ryc. 1. ↓↓ — przesunięcie korony zapory, ▼ — poziom piętrzenia wody w zbiorniku

Ryc. 1. ↓↓ — displacement of the dam crown, ▼ — level of the head water in the reservoir

Najdokładniejsze wiadomości o własnościach sprężystych podłoża i przestrzennym rozmieszczeniu stref skalnych o jednakowym module Younga otrzymujemy z polowych badań sejsmicznych lub z polowych pomiarów odkształceń skał w sztolniach (moduł deformacji). Jeżeli jednak nie mamy możliwości do przeprowadzenia badań polowych, musimy moduł sprężystości skał podłoża wyznaczyć laboratoryjnie — na próbkach wyciętych z calizny skalnej.

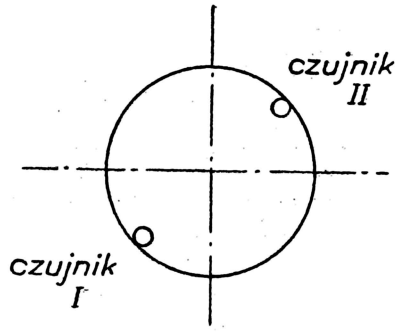
Moduł Younga wyznaczamy z podstawowego wzoru wynikającego z prawa Hooke'a

$$E = \frac{P}{F} \cdot \frac{l}{\Delta l}$$

E = moduł Younga
P = siła
F = powierzchnia
l = wysokość próbki
Δl = zmiana wysokości próbki

Musimy zatem pomierzyć jednocześnie siłę wywieraną na próbkę oraz odkształcenia tej próbki, a następnie sporządzamy wykres zależności $\sigma = f(\varepsilon)$, czyli siły ściskającej i odpowiadającego jej zmniejszenia wysokości próbki, po czym obliczamy (E).

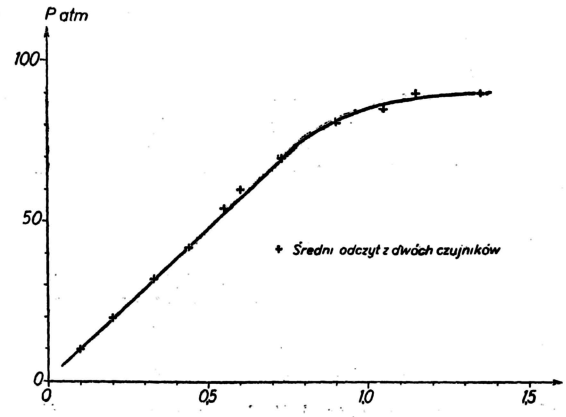
W laboratorium mechaniki gruntu byłego Przedsiębiorstwa Geologiczno-Inżynierskiego Energetyki rozwiązano to zadanie, wprowadzając przy zgniataniu próbek skalnych — fotograficzną, punktową rejestrację wskazań: a) manometrów rejestrujących ciśnienie wywierane na próbkę przez tłok prasy hydraulicznej oraz b) czujników wykazujących przesunięcia ruchomego tłoka prasy, a zatem — zmiany wysokości próbki.



Ryc. 2
Fig. 2.

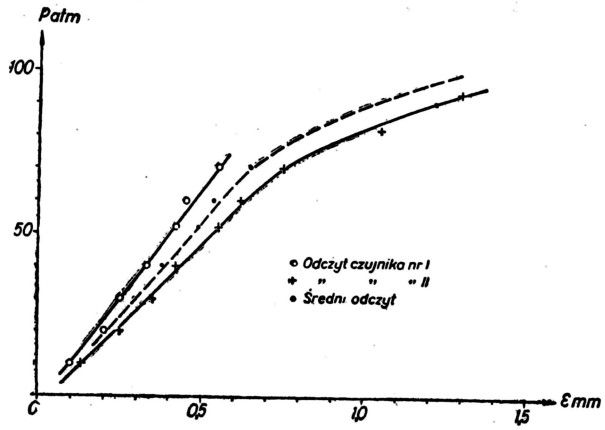
Dla dokładności pomiaru zastosowano odczyt dwóch manometrów oraz dwóch czujników umieszczonych na dwu przeciwległych sobie punktach tłoka prasy. Wykonano dwie serie pomiarów: 1) na próbkach piaskowca z warstw dolnokrośnieńskich oraz 2) na próbkach z piaskowca triasowego z piętra pstrego piaskowca. Próbki piaskowca z warstw krośnieńskich przygotowano w postaci sześcianów o boku 61 mm, natomiast próbki czerwonego piaskowca triasowego były odcinkami rdzenia wiertniczego o średnicy 90 mm i różnej długości, średnio 75 mm. Po zgnieceniu próbek odczytane z filmu wartości nanosimy na wykres, jak ilustrują to ryc. 3, 4, 5, 6, 7.

Ryc. 3, 4, 5 odnoszą się do piaskowca z warstw krośnieńskich. Jest to piaskowiec drobno- i średnioziarnisty o spoiwie węglanowo-ilastym, z częściowo przekrystalizowanym kalcytem. Stąd wynika jego wysoka wytrzymałość na zgniatanie, wyróżniająca go spośród piaskowców krośnieńskich. W składzie petrograficznym przeważa kwarc (50—60% ziarn), oprócz którego występują: skalenie z przewagą silnie zwietrzałych plagioklazów (ok. 2%), glaukonit (ok. 1%), nieduże ilości łyszczyków, tlenki żelaza



Ryc. 3. Próbka 354 a
Fig. 3. Sample 354 a

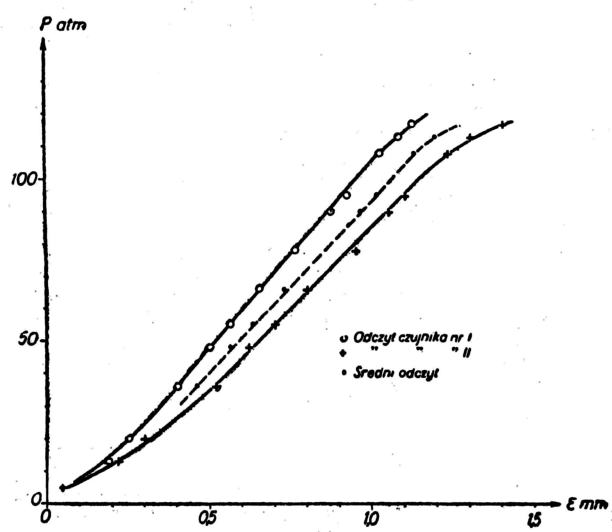
i minerały ciężkie. Spoiwo stanowi 32—40% Wielkość ziarn waha się od 0,02 mm do 2 mm. Ciężar właściwy: 2,67—2,69 g/cm³, ciężar objętościowy 2,59—2,60 g/cm³, porowatość 2—4% w stanie niezwietrzałym. Piaskowiec ten tworzy gruby kompleks na granicy utworów dolno- i środkowokrośnieńskich. Zalega w ławicach o miąższości do kilkunastu metrów, cały kompleks z przewarstwieniami łupków ma ok. 60 m.



Ryc. 4. Próbka 355 c.
Fig. 4. Sample 355 c

Widzimy, że pierwsze odcinki odkształceń wysokości próbek są proporcjonalne do wzrastającego nacisku na nie — wykres tworzy linię prostą. Po przekroczeniu pewnych obciążeń różnych dla każdej próbki następuje jakby płynięcie materiału w miarę dalszego wzrostu nacisku (prawe części wykresów). Pod koniec każdego doświadczenia próbka zaczyna pękać, wreszcie rozsypuje się. Powyższe wykresy otrzymano przy szybkim zgniataniu próbek, zgniatanie jednej próbki trwało 45 do 60 sek. Przy zastosowaniu dłuższego czasu obciążania próbki pękają już przy dużo niższym ciśnieniu, niż pokazane na wykresach.

Ryc. 6 przedstawia wykres zgniatania piaskowca z formacji triasowej. Piaskowiec pochodzi z dolnych pięter pstrego piaskowca. Jest to osad lądowy o czerwonym zabarwieniu. Głównym składnikiem są drobne ziarna kwarcu słabo spojone, spoiwo żelaziste (ok. 10%). Piaskowiec ten, o małej wytrzymałości na zgniatanie, daje cały wykres zgniatania krzywoliniowy, z tym że w początkowym okresie zgniatania następuje jak gdyby wzrost wytrzymałości na zgniatanie, a zatem wzrost modułu sprężystości. W miarę dalszego wzrostu ciśnienia piaskowiec wykazuje bardzo małą odporność na zgniatanie.



Rys. 5. Próbka 372
Fig. 5. Sample 372

Ogólnie można stwierdzić, że uzyskane wykresy deformacji próbek skalnych są prawidłowe i odpowiadają wykresom podawanym w literaturze. Obserwujemy na nich, że moduł sprężystości dla obciążeń do ok. 70 atm. (dla piaskowca o dużej wytrzymałości kostkowej) jest w przybliżeniu linią prostą, a więc w tych granicach obciążeń mamy odkształcenia sprężyste próbek skalnych. Niemniej wartość modułu Younga wyrażająca się dla skał wzorem $E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$, a więc obliczana dla poszczególnych punktów, w naszych doświadczeniach zmienia się nieznacznie również i w zakresie wprostproporcjonalnego wykresu $\sigma = f(\varepsilon)$. Natomiast po przekroczeniu granicy proporcjonalnych odkształceń wartość E maleje. Cyfrowo ujmują to zestawienia podane poniżej.

	Obciążenie całkowite atom	Obciążenie jednostkowe kg/cm²	E kg/cm²
wykres nr 1 próbka nr 354a	30	320	63 000
	50	551	64 600
	70	774	64 600
	80	880	61 000
	90	1005	45 100
wykres nr 2 próbka nr 355c	30	320	65 000
	50	551	71 500
	70	774	72 500
	80	880	67 400
	100	1110	53 400
wykres nr 3 próbka nr 372	30	320	48 800
	50	551	57 500
	80	880	61 600
	100	1110	63 800
wykres nr 4 próbka nr 1	20	129	12 700
	30	192	14 700
	42	266	14 000
	50	321	18 000

Przeanalizujmy wartość modułów sprężystości otrzymanych w laboratorium przez zgniatanie próbek skalnych.

1. Zasadniczą nieścisłością, jaką popełniamy w opisanych pomiarach, jest różnica warunków badania i pracy podłoża skalnego: badanie odbywa się przy jednoosiowym nacisku, próbka ma możliwość swobodnego odkształcania się bocznego. Natomiast taki sam element skały w caliźnie przy obciążeniu górnym podlega trójosiowemu stanowi napięcia. Inaczej zatem przebiegają odkształcenia poszczególnych cząstek.

2. Autorzy angielscy P. Oberti, R. Jones i inni zwracają ponadto uwagę na fakt, że próbka skalna wycięta z calizny ulega odprężeniu, a odkształcenie długości zaobserwowane w czasie zgniatania jest częściowo powrotem do pierwotnego stanu napięcia, jaki panował w nienaruszonej skale. Odnosi się to zwłaszcza do młodych skał osadowych, które znajdowały się pod wysokim ciśnieniem lodowców lub ulegały działalności tektonicznej.

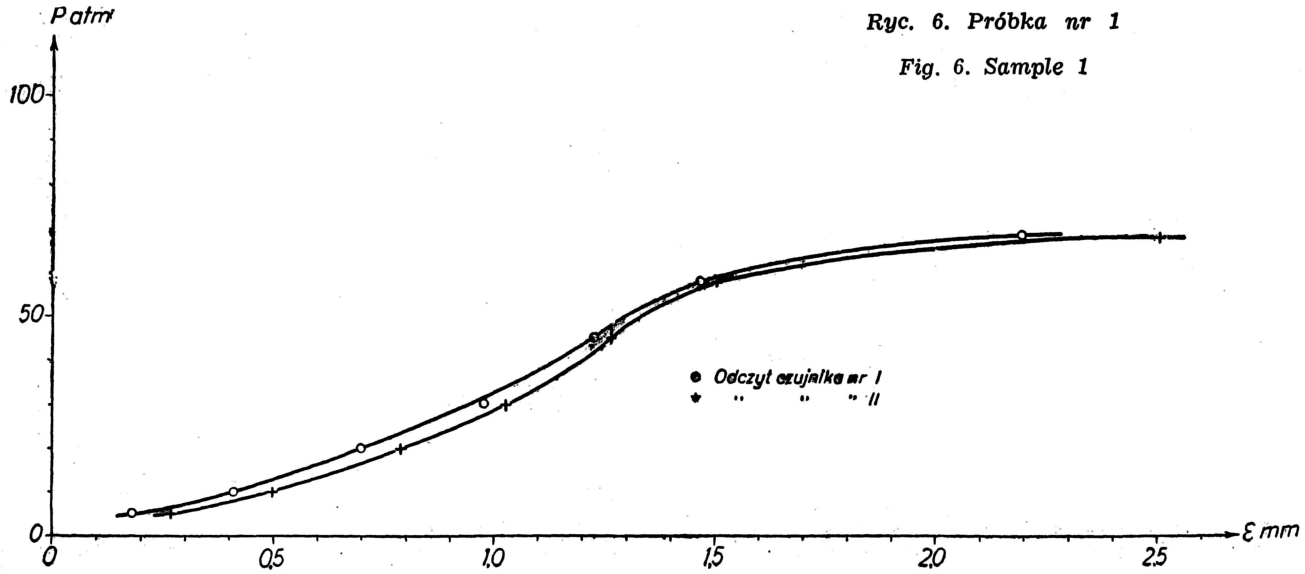
Z tych dwu przyczyn laboratoryjne wielkości modułów sprężystości skał powinny być niższe niż rzeczywiste wielkości (E) mierzone w skałach in situ.

Sama metoda pomiaru — przez zgniatanie próbki — powoduje jednak zawyżenie wartości modułu sprężystości z następującej przyczyny na powierz-

chniach styku próbki skalnej z płaszczyznami tłoków prasy zgniatającej występują duże siły tarcia, utrudniające równomierne rozszerzanie się próbki i w dużym stopniu zmieniające stan napięcia w próbce, który odbiega wtedy od układu jednoosiowego (A. Sałustowicz — Mechanika górotworu). Obliczona z pomiarów wytrzymałość kostkowa próbki skalnej jest wtedy większa od rzeczywistej. Wytrzymałość kostkowa $\left(\frac{P}{F}\right)$ jest zaś jednym z członów wzoru na obliczenie modułu sprężystości.

potliwe (próbne obciążenia), opisana wyżej metoda laboratoryjnego pomiaru modułu Younga skał jest zupełnie tania i wystarczająca do otrzymania przybliżonych wielkości tej własności fizycznej badanego podłoża budowli inżynierskiej.

Pomiar zakresu odkształceń 0,03—0,20 mm (przy wysokości próbki ok. 60 mm, co stanowi 0,05—0,3‰) jest osiągalny z dużą dokładnością za pomocą odpowiednich czujników, a pomiar wywieranego ciśnienia nie nastręcza żadnych trudności. Fotograficzna rejestracja pozwala na zarejestrowanie do-

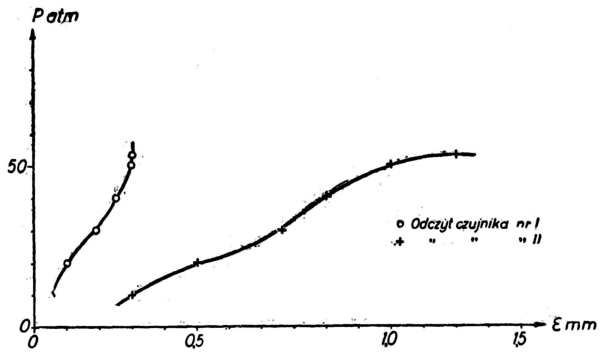


Ryc. 6. Próbka nr 1

Fig. 6. Sample 1

Autorzy radzieccy W. N. Nikitin, S. A. Rosa podają, na podstawie porównania polowych i laboratoryjnych badań modułu sprężystości skał, że uzyskane z badań laboratoryjnych wartości (E) są zawyżone w stosunku do modułów uzyskanych z badań sejsmicznych. Jako przykład służą badania skał podłoża Zapory Bratskiej na Angarze, gdzie skałą badaną były diabazy strefami zwietrzałe i rozluźnione. Moduły laboratoryjne były rzędu $1000 \cdot 10^3$ kg/cm², polowe — $350 \cdot 10^3$ do $900 \cdot 10^3$ kg/cm². Różnice pochodzą głównie stąd, że do badań laboratoryjnych wybiera się próbki ze skały zdrowej, gdy tymczasem badania polowe obejmują całą masę skalną dając średnie wartości badanych utworów. Do badań bierze się próbki wymiarów 10—25 cm, natomiast sejsmiczne badania polowe obejmują odcinki 100—300 m. Jest to więc jedna ze stałych przyczyn różnic wyników laboratoryjnych i polowych.

Biorąc pod uwagę fakt, że polowe badania modułu sprężystości (sejsmiczne) są drogie lub bardzo kło-



Ryc. 7. Próbka 370

Fig. 7. Sample 370

wolnej ilości odczytów dla wykreślenia krzywej $\sigma = f(\varepsilon)$.

W samym laboratorium musimy jedynie zwrócić uwagę na to, by:

a) zgniatana próbka była założona idealnie osiowo względem tłoka prasy hydraulicznej,

b) obie powierzchnie próbki przylegające do płaszczyzn tłoków (górna i dolna) były względem siebie zupełnie równoległe.

Jeżeli powierzchnie próbki nie są równoległe, zgniatanie następuje nie osiowo (mimo przegubnej górnej części pras hydraulicznych) i tłok zgniatający ulega przechyłom w granicach tolerancji elastycznych uszczelek. Próbka dostaje wtedy obciążenie na część powierzchni i pęka kawałkami w miarę wzrostu obciążenia. Wykres $\sigma = f(\varepsilon)$ dla 2 czujników przy próbce o nierównoległych płaszczyznach styku — przedstawia ryc. 7 (próbka nr 370). Otrzymany wykres jest nieczytelny i nie nadaje się do wyliczenia wartości (E). Dla uzyskania równoległych płaszczyzn należy wycinać kostki skalne piłą do cięcia kamienia o dwóch tarczach, rozstawionych na żądany rozmiar próbki.

Dla całkowitego obrazu dokładności uzyskanych w laboratorium wartości modułów Younga należy jeszcze przypomnieć, że kostki wycięte z różnych miejsc jednego monolitu skały osadowej (w opisanym przykładzie piaskowiec) wykazują nieco różne wartości (E), podobnie jak przy pomiarach ciężaru objętościowego próbek skał osadowych, pobieranych z różnych stron większej bryły tej samej skały.

W opisywanym przykładzie otrzymano z pomiaru 20 próbek tego samego piaskowca z serii dolnokrośnieńskiej wartości (E) dla obciążenia 50 atm, w granicach od 57 500 kg/cm² do 78 200 kg/cm², z przewagą wyników ok. 64 000 kg/cm². Toteż uśrednione wartości modułu Younga uzyskane w laboratorium służą jako wartości orientacyjne, lecz można je

przyjąć do obliczeń z dużym stopniem prawdopodobieństwa, podobnie jak przyjmuje się uśredniane wartości ciężarów objętościowych skał.

Na marginesie tych rozważań warto wspomnieć, że laboratoria mechaniki gruntów podają jako wytrzymałość kostkową skał wartość maksymalnego jednostkowego nacisku na próbkę uzyskaną w czasie zgniatania. Jest to o tyle niesłuszne, że przy maksymalnej wartości rejestrowanego ciśnienia następuje już zniszczenie próbki, a zatem dopuszczalne obciążenia jednostkowe leżą poniżej tej wartości. Z załączonych wykresów widzimy na przykład, że dla próbki nr 354a (ryc. 3) dopuszczalną wielkością obciążenia będzie 70 atm., tzn. ok. 770 kg/cm², i to będzie kostkowa wytrzymałość badanego piaskowca. Natomiast najwyższe zarejestrowane ciśnienie — ok. 1000 kg/cm² — spowodowało zupełne zniszczenie próbki. Dla piaskowca na ryc. 4 wartość kostkowej wytrzymałości wyniesie ok. 320 kg/cm², co było naciskiem niszczącym próbkę.

Zagadnienie to jednak z punktu widzenia praktyki inżynierskiej jest o tyle mniej ważne, że zwykle wytrzymałości kostkowe skał wysoko przekraczają wielkości potrzebne w budownictwie.

SUMMARY

During computations of static data for large engineering constructions as well as for timbering of mine workings, a very important magnitude is the modulus of elasticity of rock occurring in the substratum, i. e. Young's modulus (E).

Author presents the method of measurements of modulus on the basis of the Hook's law, in relation to the rocks, using the arrangements existing in all laboratories of soil mechanics in Poland.

РЕЗЮМЕ

Большое значение при определении стабильности крупных инженерных сооружений и креплении горных выработок имеет модуль упругости горных пород, залегающих в основании, т.е. модуль Юнга (E).

Автор описывает метод измерения модуля упругости по закону Гука, в применении к горным породам, при помощи оборудования, имеющегося в каждой лаборатории механики грунтов в Польше.