

Czesław KRÓLIKOWSKI, Stanisław SMAGAŁA

Wyznaczanie modułu statycznego skał metodami sejsmiczno-akustycznymi

ZWIĄZKI MIĘDZY STATYCZNYM A DYNAMICZNYM MODUŁEM SPRĘŻYSTOŚCI

Statyczny i dynamiczny moduł sprężystości jest definiowany zazwyczaj w ten sam sposób. Jest to stosunek naprężenia normalnego do wywołanej deformacji względnej. Inny jest sposób pomiarów każdego z modułów. Metodyka pomiaru modułu dynamicznego zapewnia, że cały proces naprężeń i deformacji przebiega w sposób adiabatyczny tzn., że czas przebiegu tych procesów jest tak krótki, iż nie zachodzi wymiana ciepła z otoczeniem. Ponadto wielkości naprężeń i deformacji są tak małe, że zapewniona jest liniowość ich zależności. Pomiar statycznego modułu sprężystości trwa zazwyczaj od kilku minut do kilku godzin, a wartości naprężeń i deformacji są znacznie większe i różne w zależności od zastosowanej metodyki i rodzaju skały.

Wielu badaczy zajmujących się pomiarami modułu statycznego i dynamicznego oraz ustaleniem związków między nimi stwierdza zgodnie, że moduł statyczny jest zawsze mniejszy od dynamicznego (B. Kujundzić, N. Grujic, 1966; H. Link, 1968; H. Linowski, 1969; H. Masuda, 1964; A. Dvorak, 1970; A. I. Sawicz, B. I. Koptiew, B. I. Nikitin, Z. G. Jaszczenko, 1969). W pracy autorów radzieckich (A. I. Sawicz i in., 1969) podano, iż największe różnice (kilkakrotne nawet) sygnalizują ci autorzy, którzy dokonują pomiarów w warunkach naturalnych. Pomiary modułów na próbkach w warunkach laboratoryjnych prowadzą natomiast do niewielkich różnic, w granicach od kilku do kilkudziesięciu procent. Te duże różnice między modułem statycznym i dynamicznym powodowane są przede wszystkim tym, iż każdy z nich charakteryzuje całkiem inną objętość ośrodka skalnego. Można więc porównywać jedynie te moduły, których sposoby pomiarów odnoszą się do tej samej skali ośrodka. W wymienionej pracy podano metody, które mogą być porównywane (tab. 1).

Podane w tabeli 1 metody wyznaczania modułu dynamicznego i statycznego są porównywalne w ograniczonym zakresie, a mianowicie: a

Tabela 1

| Moduł dynamiczny | Moduł statyczny |
|---|---|
| Badania na podstawie próbek | |
| a. Metoda rezonansu b. Metoda ultradźwiękowa $\lambda = 0,5 \div 1,0d$, gdzie d — średnica próbki, $\lambda = 2,0 \div 10,0$ cm | 1. Optyczna metoda Martensa 2. Metoda tensometryczna |
| Badania w warunkach naturalnych | |
| c. Metoda ultradźwiękowa $\lambda = 5,0 \div 20$ cm d. Metoda akustyczna $\lambda = 0,5 \div 5$ m e. Metoda sejsmiczna $\lambda = 5,0 \div 50$ m | 3. Badania presjometryczne w otworach o małej średnicy D 4. Metoda próbnych obciążeń o małej powierzchni nacisku $D \leq 0,5$ m 5. Metoda próbnych obciążeń $D > 1,0$ m 6. Metoda stempli hydrostatycznych w wyrobiskach i otworach o dużej średnicy |

z 1 i 2; b z 1 i 2; c z 3; d z 4 i 5; e z 5 i 6. Należy tu zwrócić uwagę, że metoda presjometryczna dostarcza tzw. modułu presjometrycznego, który jest zazwyczaj mniejszy od modułu ściśliwości. Zatem porównywanie tych metod jest problematyczne.

Ogólnie można powiedzieć, że wymagania dotyczące jednolitej skali metod porównywalnych stawiają warunek, aby stosowane fale sprężyste miały długość 2 ÷ 4 razy większą od wymiarów liniowych objętości skały ulegającej deformacji przy pomiarach statycznych.

Na wielkość statycznego modułu wpływa również sposób obliczania modułu na podstawie krzywej naprężenia — deformacja — oraz strefa odprężenia skały w wyrobiskach, gdzie odbywają się pomiary. Jeśli do obliczeń modułu statycznego przyjmuje się względne deformacje przy obciążaniu, to otrzymuje się moduł deformacji, jeśli natomiast przy odciążeniu, to w rezultacie wyznacza się moduł sprężystości. Stosunek modułu sprężystości do modułu deformacji może wynosić 2 do 3, przy próbnych obciążeniach (np. dla skał wapiennych z rejonu Nidzicy, K. Thiel, 1968). W przypadku badania próbek stosunek tych modułów jest znacznie mniejszy. Wynosi on dla norytów 1,0 ÷ 1,1, dla mułowców i iłowców 1,0 ÷ 1,4, dla skał wapiennych 1,0 ÷ 1,6 (C. Królikowski, S. Smagała, 1972, 1973). Wpływy strefy odprężenia mogą sięgać na odległość ok. $2r$ (A. I. Sawicz, 1965) od ściany sztolni, jeśli r jest promieniem przekroju sztolni.

Wymienione czynniki należą do najważniejszych, ale nie tylko one wpływają na powstawanie różnic między modułem statycznym i dynamicznym. Właściwe ustalenie zależności tych modułów napotyka zatem na poważne trudności, szczególnie w badaniu w warunkach naturalnych. Ponadto moduł dynamiczny, wyliczany najczęściej z prędkości fal podłużnych i założonych wartości prędkości fal poprzecznych oraz gęstości

ośrodka, obarczony jest z tego powodu znacznymi błędami. Nawet w przypadku korzystania z fal podłużnych i poprzecznych należy więc przyjąć jakąś uśrednioną wartość gęstości dla obliczenia modułu. A zatem procedura wyznaczania modułu dynamicznego z połowych pomiarów prędkości fal, a następnie korelowania z modułem statycznym określanym w warunkach naturalnych zawiera dużo etapów pośrednich, z których każdy dorzuca nowe błędy do ostatecznego wyniku.

Ponieważ istnieje wyraźna i ścisła korelacja między prędkością fal podłużnych a modułem dynamicznym, wydaje się, iż bardziej skuteczna i dokładna jest metoda ustalania bezpośredniej korelacji prędkości fal podłużnych i modułu statycznego. W zależnościach tych niejako automatycznie uwzględnia się wpływ zmian stałej Poissona i gęstości ośrodka. Jeśli natomiast pomiary wykonywane są jednocześnie na tych samych próbkach, jak to miało miejsce w pracach Instytutu Geologicznego, to na ustaloną korelację nie wpływa ani niejednorodność, ani anizotropia, ani wreszcie różnica skał badanego ośrodka. Wpływ tych czynników jest wyeliminowany. Tak ustalona korelacja może być następnie wykorzystana w badaniach sejsmicznych dla oceny modułów statycznych w danej grupie skał. W ten sposób ujęte zagadnienie zostanie niżej szczegółowo omówione na przykładzie skał wapiennych.

BADANIA LABORATORYJNE PRÓBEK SKALNYCH

Pobieranie i formowanie próbek. Dla ustalenia korelacji między modułem statycznym a prędkością fal niezbędne są reprezentatywne próbki skał z obszaru badań sejsmicznych. Istotną sprawą jest reprezentatywność próbek w stosunku do ośrodka skalnego, który jest bezpośrednim przedmiotem charakterystyki prędkościowej w badaniach sejsmicznych. Sposoby pobierania próbek zależą od zastosowanej metody pomiarów sejsmicznych. Mogą to być następujące sytuacje:

— W przypadku charakterystyki utworów skalnych występujących bezpośrednio przy powierzchni ziemi, jak to miało miejsce w pracy tu przedstawionej, gdy stosowane są powierzchniowe pomiary sejsmiczne bądź to metodą refrakcyjną, bądź też metodą prześwietleń, próbki pobierane są z istniejących odkrywek, kamieniołomów lub płytkich otworów wiertniczych. W naszym przypadku próbki pochodziły z odkrywek i kamieniołomów.

— W przypadku badania utworów głębiej zalegających, gdzie pomiary sejsmiczne wykonywane są z wykorzystaniem otworów, szybów lub sztolni, próbki powinny być pobierane z tych właśnie wyrobisk.

Przy pobieraniu próbek z odsłoneń naturalnych i sztucznych stosowano następującą procedurę:

— próbki pobierano z tych warstw, dla których wykonywano pomiary prędkości fal sprężystych metodą sejsmiczną;

— w typowaniu odpowiedniego bloku skalnego kierowano się wynikami pomiarów współczynnika odbicia przy zastosowaniu młotka Schmidta (O. Haase, 1962; A. Kidybiński, 1967);

— do obróbki brane były świeżo odsłonięte bloki skalne cechujące się średnimi wartościami własności fizykomechanicznych.

Dla pomiarów prędkości fal, modułu odkształcenia i wytrzymałości na ściskanie formowano próbki w kształcie walca (stosunek długości do średnicy $1,5 \div 2,0$), bez naruszania struktury skały. Ażeby to osiągnąć używano wiertarki z końcówką pierścieniową i koronką diamentową oraz piły tarczowej i szlifierki. Próbki cechowały się równoległością płaszczyzn podstaw, prostopadłością osi próbki do płaszczyzn podstaw.

Pomiary niektórych parametrów fizycznych. Dla wszystkich warstw badanego profilu wyznaczono zgodnie z obowiązującymi normami: ciężar objętościowy, ciężar właściwy i porowatość całkowitą. Oznaczenia wykonywano dla nie uformowanych próbek pochodzących z pobranego bloku.

Pomiar prędkości fal sprężystych. Pomiary prędkości prowadzono za pomocą aparatury ultradźwiękowej produkcji krajowej. Częstotliwość drgań w impulsie wynosiła 30 kHz. Za pomocą głowicy nadawczej (magnetostrykcyjnej) i odbiorczej (piezoelektrycznej) prześwietlano próbkę i na podstawie opóźnienia fali pierwotnej — po przebyciu drogi o znanej długości — wyznaczano prędkość fali sprężystej w próbce. W czasie pomiarów zabezpieczona była odpowiednia jakość kontaktu płaszczyzn próbki i głowic. Pomiary prędkości wykonywane były w pierwszej kolejności, ponieważ ich oddziaływanie na strukturę próbki nie ma charakteru niszczącego.

Pomiary statycznego modułu deformacji. Do pomiarów wykorzystano urządzenie zbudowane w Instytucie Geologicznym zgodnie z normą amerykańską pomiaru stałych sprężystych betonu (ASTMC-469-65). Szczegółowy opis urządzenia można znaleźć w innej pracy autorów (C. Królikowski, S. Smagała, 1971). Aparat pozwala mierzyć deformacje podłużne i poprzeczne powstające w czasie działania naprężeń na próbkę.

Obciążenia wywołano w prasie hydraulicznej. Próbki obciążane były trzykrotnie. Pierwsze obciążenie miało charakter próbny. Obliczenia oparte były na danych z dwóch następnych obciążeń. Obciążenia i odciążenia przebiegały w sposób jednostajny. Wielkość maksymalnego obciążenia dla danej próbki nie przekraczała 50% jej wytrzymałości na ściskanie. Dla uzyskania większej dokładności pomiar deformacji wykonywano jednocześnie przy użyciu tensometrów oporowych naklejanych na próbki. Wyniki zapisywane były w sposób ciągły przy zastosowaniu aparatury Kelvin and Hyghes. Moduły deformacji obliczane były z zależności naprężenie—deformacja, jako kąt nachylenia uśredniającej prostej, łączącej punkt maksymalnej wartości deformacji z początkiem układu współrzędnych. Stałą Poissona obliczano korzystając z deformacji poprzecznych i podłużnych powstających w czasie obciążenia.

POŁOWE POMIARY PRĘDKOŚCI FAL METODAMI SEJSMICZNYMI

W sąsiedztwie odkrywki (najczęściej kamieniołomów) wykonywano pomiary sejsmiczne aparaturą jednokanałową o ręcznym wzbudzeniu drgań. Stosowano różną metodykę w zależności od warunków terenowych. Najczęściej były to sondowania refrakcyjne wykonywane z nienaruszo-

nej powierzchni ziemi w bezpośrednim sąsiedztwie wyrobiska, skąd pobierano próbki do badań laboratoryjnych. Przedmiotem pomiarów sejsmicznych były prędkości graniczne dla warstw załamujących.

W warunkach odpowiedniego dostępu wykonywano również pomiary prędkości metodą prześwietlania. W tych przypadkach geofony umieszczano w wykutych w skale otworach i mocowano do skały zaprawą gipsowo-cementową. Prędkości fal wyznaczano bądź to ze znanych wzorów dla metody refrakcyjnej, bądź też bezpośrednio z czasu przebiegu fali w przypadku prześwietlania.

WYZNACZENIE KORELACJI MIĘDZY MODUŁEM STATYCZNYM A PRĘDKOŚCIĄ FAL PODŁUŻNYCH NA PODSTAWIE PRÓBEK

Sposób pomiarów prędkości i modułu statycznego został opisany wyżej. Wyniki pomiarów podano w tabeli 2 i na fig. 1 w skali logarytmicznej. Sam rozkład punktów wskazuje na istnienie zależności zbliżonej do liniowej (w przyjętej skali). Istnieje zatem podstawa, ażeby przyjąć ten sam charakter zależności, jaki stwierdzono między prędkością fal podłużnych a modułem dynamicznym, a mianowicie:

$$\log E_{\text{def.}} = a \log v + b \quad (1)$$

Po wykonaniu odpowiednich obliczeń (na e.m.c.) równanie regresji przyjęło postać:

$$\log E_{\text{def.}} = 2,52 \log v + 4,06 \quad (2)$$

gdzie: v — prędkość w km/s; $E_{\text{def.}}$ — moduł deformacji w kG/cm². Współczynnik korelacji $r = 0,958$, a przedziały ufności z prawdopodobieństwem 95% miały wartość $0,941 \leq r \leq 0,975$. Przedziały ufności dla indywidualnych wartości $E_{\text{def.}}$ z prawdopodobieństwem 95% wyniosły $\pm \pm 2Sy = \pm 2 \cdot 0,146$, gdzie: Sy — jest błędem standardowym indywidualnej wartości $E_{\text{def.}}$ wyznaczonej z tej zależności. Można więc sądzić, że 95% wszystkich wyników powinno się znaleźć w przedziale o szerokości $\pm 64\%$. Jest to rozrzut dość znaczny, ale w praktyce pomiarów modułów statycznych czy dynamicznych należy go uznać za normalny.

Ustalono więc zależność między prędkością fal sprężystych podłużnych a statycznym modułem deformacji. Pomiary obydwu parametrów wykonywane były dla tych samych próbek. Częstotliwość fal wynosiła 30 kHz, zaś długości tych fal, w zakresie interwału zmian prędkości od 1500 do 6000 m/s, zawierają się w przedziale 5 ÷ 20 cm. Można więc powiedzieć, że spełniony był warunek $\lambda \gg \delta$ (gdzie: λ — długość fali; δ — średni wymiar ziarna w skale).

Wielkość rozrzutu wyników w ustalonej zależności wywołana jest błędami pomiarów oraz łącznym potraktowaniem różnych rodzajów skał wapiennych. Różna budowa tych skał (struktura, tekstura) ma istotny wpływ na stosunki między parametrami wytrzymałościowymi ich szkieletu. Jednak motorem zmian — zarówno prędkości fal jak i modułu deformacji — jest przede wszystkim porowatość. Wskazuje na to stwierdzona zależność prędkości od porowatości (C. Królikowski, S. Smagała, 1973).

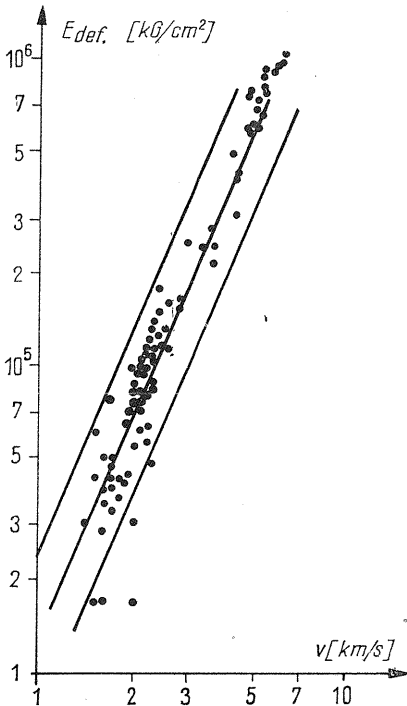


Fig. 1. Zależność modułu deformacji od prędkości fali podłużnej
Relationship between the modulus of deformation and the velocity of longitudinal wave

wydarza się dostatecznie uzasadnione przyjęcie (dla wyznaczenia statycznego modułu deformacji na podstawie pomierzonych metodą sejsmiczną prędkości fal podłużnych) tej samej zależności (2), którą otrzymano w pomiarach laboratoryjnych. Wyniki obliczeń tego modułu dla wyznaczonych prędkości sejsmicznych podaje tabela 3 oraz fig. 2.

OCENA DOKŁADNOŚCI PODANEGO SPOSOBU WYZNACZANIA STATYCZNEGO MODUŁU DEFORMACJI

Dokładność ta określona jest w zasadzie szerokością przedziału ufności podanego dla indywidualnych wartości krzywej regresji wynikającej z równania (2). W wartościach bezwzględnych — jako błąd standardowy wychylenia indywidualnej wartości $E_{def.}$ od linii regresji — wynosi ona $\pm 0,33 E_{def.}$ (czyli ok. 15% wartości modułu), natomiast szerokość przedziału ufności z 95% prawdopodobieństwem znalezienia się wartości $E_{def.}$ w tym przedziale równa się ok. $\pm 66\%$ wartości modułu.

Omówione wyżej pomiary przeprowadzono na próbkach o wymiarach kilku centymetrów. Stanowiły one jednolite i względnie jednorodne fragmenty skały, pozbawione spękań, szczelin itp. Można więc powiedzieć, że te własności skały jako górotworu nie znalazły odzwierciedlenia w wynikach pomiarów na próbkach. Dla ustalenia parametrów wytrzymałościowych górotworu w skali wymiarów dużych obiektów budowlanych (od kilku do kilkudziesięciu metrów) należy wziąć pod uwagę również stopień szczelinowatości. Tych możliwości dostarcza metoda sejsmiczna pozwalająca mierzyć prędkości fal sprężystych w wymaganej skali odległości. Zakładając, że system szczelin i spękań — przy odpowiednio dużych bazach pomiarów sejsmicznych i długości fal znacznie przewyższającej wymiary bloków skalnych wydzielonych siatką spękań i szczelin — nie spowoduje utraty izotropowości w sensie makrostrukturalnym, powinien zostać zachowany ten sam typ zależności między modułem deformacji a prędkością sejsmiczną w tej znacznie większej skali pomiarów polowych. Dlatego

Tabela 2

Wyniki pomiarów gęstości ρ , prędkości modułu deformacji $E_{\text{def.}}$ i stałej Poissona na próbkach oraz prędkości sejsmicznej v_m w warunkach *in situ*

| Lp. | Nr próbki | ρ | ν | $E_{\text{def.}}$ | δ | v_m |
|-----|-----------|-------------------|-------|--------------------|----------|-------|
| | | G/cm ³ | km/s | kG/cm ² | 1 | km/s |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | 1/1 | 1,72 | 2,270 | 120 000 | — | — |
| 2 | 1/5 | 1,72 | 2,190 | 55 600 | — | — |
| 3 | 3/1 | 1,89 | 2,140 | 71 590 | 0,16 | 1,050 |
| 4 | 3/2 | 1,89 | 2,560 | 131 000 | 0,16 | 1,050 |
| 5 | 3/3 | 1,89 | 2,400 | 178 000 | 0,16 | 1,050 |
| 6 | 4/2 | 2,15 | 4,310 | 415 000 | 0,36 | — |
| 7 | 4/5 | 2,15 | 4,360 | 411 000 | 0,24 | — |
| 8 | 4/6 | 2,15 | 4,200 | 495 000 | 0,28 | — |
| 9 | 5/1 | 1,86 | 2,770 | 166 300 | — | 1,500 |
| 10 | 5/2 | 1,86 | 2,580 | 160 500 | 0,41 | 1,500 |
| 11 | 5/4 | 1,86 | 2,950 | 257 000 | 0,32 | 1,500 |
| 12 | 6/1 | 2,06 | 3,500 | 276 000 | — | 0,890 |
| 13 | 6/2 | 2,06 | 3,570 | 241 000 | — | 0,890 |
| 14 | 6/3 | 2,06 | 3,580 | 212 500 | — | 0,890 |
| 15 | 7/1 | 2,39 | 2,770 | 152 700 | 0,28 | 1,520 |
| 16 | 7/2 | 2,39 | 2,250 | 196 600 | 0,24 | 1,520 |
| 17 | 7/3 | 2,39 | 2,330 | 131 400 | — | 1,520 |
| 18 | 8/1 | 2,39 | 4,330 | 306 400 | — | 1,540 |
| 19 | 9/1 | 1,66 | 1,990 | 83 700 | 0,26 | 1,570 |
| 20 | 9/4 | 1,66 | 2,120 | 99 500 | 0,18 | 1,570 |
| 21 | 9/5 | 1,66 | 2,170 | 109 900 | 0,26 | 1,570 |
| 22 | 10/1 | 1,62 | 2,410 | 125 400 | 0,15 | 1,380 |
| 23 | 10/6 | 1,62 | 3,300 | 242 000 | 01,8 | 1,380 |
| 24 | I 1/1 | 1,43 | 2,000 | 31 100 | — | 0,590 |
| 25 | I 1/2 | 1,43 | 2,040 | 17 600 | — | 0,590 |
| 26 | I 2/1 | 1,57 | 1,530 | 17 000 | — | — |
| 27 | I 3/1 | 1,28 | 2,340 | 111 000 | 0,13 | — |
| 28 | I 4/1 | 1,35 | 1,580 | 39 700 | 0,30 | 0,280 |
| 29 | I 4/2 | 1,35 | 1,640 | 36 100 | — | 0,280 |
| 30 | I 5/1 | 1,50 | 2,340 | 104 400 | — | — |
| 31 | I 5/2 | 1,50 | 2,260 | 109 600 | 0,34 | — |
| 32 | I 5/3 | 1,50 | 2,130 | 101 000 | 0,24 | — |
| 33 | I 6/2 | 1,52 | 2,000 | 75 400 | — | — |
| 34 | I 6/3 | 1,52 | 2,130 | 76 100 | 0,17 | — |
| 35 | I 7/1 | 1,39 | 2,550 | 115 200 | — | 0,480 |
| 36 | I 7/4 | 1,39 | 2,340 | 103 800 | — | 0,480 |
| 37 | I 7/5 | — | 2,330 | 111 100 | — | 0,480 |
| 38 | I 8/1 | 1,46 | 2,330 | 89 200 | 0,40 | 0,491 |
| 39 | I 8/2 | 1,46 | 2,250 | 63 000 | 0,35 | 0,491 |
| 40 | I 8/3 | 1,46 | 2,280 | 47 600 | 0,36 | 0,491 |
| 41 | I 9/1 | 1,43 | 1,990 | 83 400 | 0,33 | — |
| 42 | I 10/1 | 1,50 | 2,160 | 93 200 | 0,35 | 0,570 |

c. d. tab. 2

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----|-----------|-------|-------|-----------|------|-------|
| 43 | I 10/2 | 1,50 | 2,180 | 62 400 | 0,40 | 0,570 |
| 44 | I 10/3 | 1,50 | 2,060 | 54 400 | 0,29 | 0,570 |
| 45 | I 10/4 | 1,50 | 2,060 | 88 000 | 0,31 | 0,570 |
| 46 | III 11/7 | 1,40 | 2,020 | 72 200 | — | — |
| 47 | III 11/9 | 1,40 | 1,960 | 102 600 | — | — |
| 48 | III 11/10 | 1,40 | 2,180 | 97 600 | — | — |
| 49 | III 11/12 | 1,40 | 1,970 | 71 700 | — | — |
| 50 | III 12/1 | 1,47 | 2,130 | 99 900 | — | 0,700 |
| 51 | IV 1/2 | 2,48 | 5,000 | 690 000 | — | — |
| 52 | IV 1/3 | 2,48 | 5,350 | 800 000 | — | — |
| 53 | IV 2/7 | 2,65 | 5,390 | 780 000 | — | — |
| 54 | IV 3/1 | 2,63 | 4,670 | 770 000 | — | — |
| 55 | IV 3/2 | 2,63 | 4,960 | 704 300 | — | — |
| 56 | IV 4/1 | 2,66 | 5,620 | 900 000 | — | 1,910 |
| 57 | IV 4/2 | 2,66 | 5,800 | 950 000 | — | 1,910 |
| 58 | IV 6/1 | 2,66 | 4,690 | 600 000 | — | 2,290 |
| 59 | IV 6/6 | 2,62 | 1,670 | 586 000 | — | 2,290 |
| 60 | IV 6/8 | 2,62 | 4,990 | 715 200 | — | 2,290 |
| 61 | IV 7/6 | 2,65 | 6,070 | 970 000 | — | 1,560 |
| 62 | IV 12/1 | 2,60 | 5,260 | 898 400 | — | — |
| 63 | IV 12/2 | 2,60 | 6,110 | 1 009 600 | — | — |
| 64 | IV 12/3 | 2,60 | 5,360 | 929 000 | — | — |
| 65 | IV 13/1 | 2,78 | 5,240 | 652 700 | — | — |
| 66 | IV 13/2 | 2,78 | 4,810 | 594 700 | — | — |
| 67 | R-1 p.7 | 1,58 | 1,630 | 17 000 | 0,19 | — |
| 68 | R-1 p.17 | — | 1,740 | 79 000 | — | — |
| 69 | R-1 p.18 | 1,60 | 1,800 | 43 000 | — | — |
| 70 | R-1 p.19 | 1,69 | 1,770 | 41 000 | 0,13 | — |
| 71 | R-1 p.19a | 1,69 | 1,670 | 40 000 | 0,13 | — |
| 72 | R-1 p.20 | 1,77 | 2,190 | 80 000 | — | — |
| 73 | R-1 p.20a | 1,77 | 2,530 | 117 000 | — | — |
| 74 | R-1 p.21 | 1,50 | 2,420 | 150 000 | — | — |
| 75 | R-1 p.21a | 1,50 | 2,290 | 82 000 | 0,14 | — |
| 76 | R-1 p.22 | 1,38 | 1,410 | 31 000 | — | — |
| 77 | R-1 p.22a | 1,38 | 1,660 | 39 000 | 0,14 | — |
| 78 | R-1 p.23 | — | 1,800 | 37 000 | — | — |
| 79 | R-1 p.23a | — | 1,880 | 65 000 | 0,31 | — |
| 80 | R-1 p.24 | — | 1,680 | 50 000 | 0,17 | — |
| 81 | R-3 p.1 | 2,25 | 2,290 | 140 000 | 0,15 | — |
| 82 | R-3 p.2 | 1,58 | 1,750 | 43 000 | — | — |
| 83 | R-3 p.2a | — | 1,550 | 34 000 | — | — |
| 84 | R-3 p.3 | 1,49 | 1,750 | 44 000 | 0,13 | — |
| 85 | R-3 p.8 | 1,44 | 1,740 | 47 000 | — | — |
| 86 | R-3 p.4 | 1,530 | 1,530 | 43 500 | 0,15 | — |
| 87 | R-3 p.5 | 1,40 | 1,460 | 62 000 | 0,20 | — |
| 88 | R-3 p.7 | 1,45 | 1,610 | 51 000 | 0,20 | — |

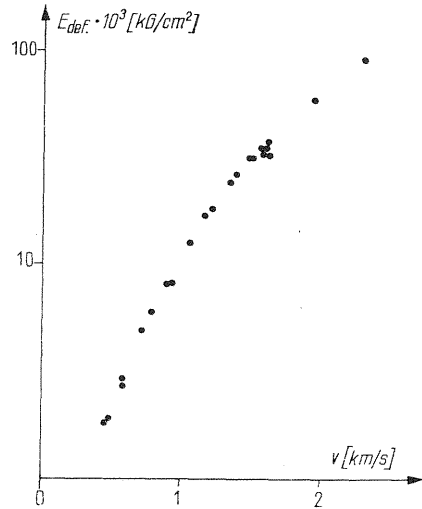


Fig. 2. Wartości modułu deformacji wyznaczonego na podstawie prędkości sejsmicznych

The value of the modulus of deformation determined on the basis of seismic velocities

Tabela 3

Wyniki pomiarów prędkości fal w odkrywkach oraz odpowiadające im prędkości fal i ciężary objętościowe pobranych próbek

| Miejscowość | Skała | v m/sek | v m/sek | ρ g/cm ³ | δ | $E_{\text{def}} \cdot 10^3$ kG/cm ² |
|--------------------|------------|--------------|--------------|-----------------------------|----------|---|
| Wierzchowiska | wapień | 1050 | 2560 | 1,80 | 0,18 | 12,3 |
| Kocudza Górna | wapień | 1500 | 2950 | 1,80 | 0,27 | 31,7 |
| Żelebsko | piaskowiec | 1520 | 2770 | 2,28 | 0,28 | 32,0 |
| | wapnisty | 1150 | 2770 | 2,28 | — | 16,2 |
| Goraj Radzięcin | wapień | 1330 | 4330 | 2,31 | — | 23,5 |
| | | 1540 | 4330 | 2,31 | — | 34,6 |
| Wola Radziencka | wapień | 1520 | 2170 | 1,66 | 0,26 | 32,0 |
| | | 1570 | 2170 | 1,66 | — | 35,0 |
| | | | | | | |
| Janów Lubelski | piaskowiec | 1210 | 3300 | 1,59 | 0,27 | 18,3 |
| | wapnisty | 1380 | 3300 | 1,59 | — | 26,0 |
| Rudnik | margiel | 590 | 2040 | 1,49 | — | 2,7 |
| Żurawnica | margiel | 280 | 1640 | 1,35 | — | 0,5 |
| Białka | opoka | 480 | 2550 | 1,36 | 0,21 | 2,1 |
| Łopiennik Podleśny | opoka | 490 | 2330 | 1,45 | 0,24 | 2,1 |
| Siedliszków | opoka | 570 | 2180 | 1,48 | 0,36 | 2,7 |
| Kocudza Górna II | wapień | 890 | 3570 | 2,16 | 0,33 | 8,2 |
| Gliniska | wapień | 870 | 3570 | 2,42 | — | 8,2 |
| Józefów | wapień | 1670 | 4360 | 1,80 | 0,27 | 37,0 |
| Nowiny | wapień | 780 | 4900 | 2,50 | 0,22 | 5,8 |
| Karczmiska | opoka | 700 | 2130 | 1,44 | — | 4,8 |
| Dezyderów | wapień | 1910 | 5800 | 2,66 | 0,17 | 59,0 |
| Chałupki | wapień | 1480 | 3900 | 3,61 | — | 31,0 |
| Wola Dębska | wapień | 2290 | 4990 | 2,62 | 0,19 | 93,0 |
| Chełmce | wapień | 1560 | 6070 | 2,64 | 0,19 | 35,0 |

Dla oceny zakresu stosowalności ustalonej zależności (2) zestawiono wartość modułu deformacji z modułem dynamicznym wyznaczonym na podstawie znanego wzoru z teorii sprężystości:

$$E_d = \frac{v^2 \rho (1 + \mu) (1 - 2\mu)}{1 - \mu} \quad (3)$$

gdzie: v — prędkość fal podłużnych,

ρ — gęstość ośrodka,

μ — stała Poissona.

Średnią gęstości i średnią wartości stałej Poissona wyznaczono z tabeli 1: $\rho_{sr} = 1,85 \text{ G/cm}^3$, $\mu_{sr} = 0,24$. Zestawienia te podano w funkcji prędkości. Z fig. 3 widać, że statyczny moduł deformacji (podany przez równanie 2) przyjmuje niższe wartości od dynamicznego modułu sprężys-

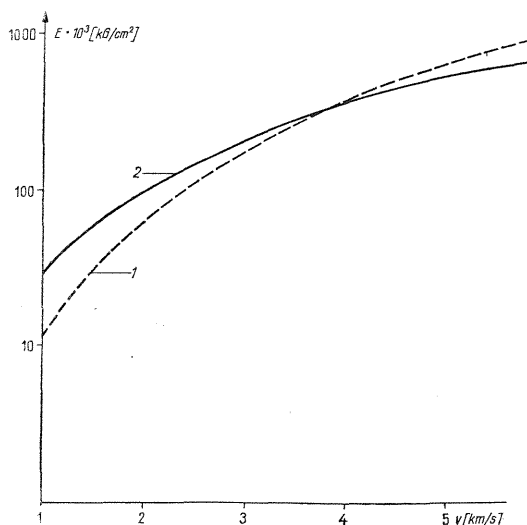


Fig. 3. Zestawienie modułów dynamicznego i deformacji w funkcji prędkości

Correlation of the dynamic modulus and deformation modulus as a function of velocity

1 — statyczny moduł deformacji; 2 — moduł dynamiczny
1 — static deformation modulus; 2 — dynamic modulus

tości w zakresie prędkości do 4000 m/s. Ponieważ wartości modułu statycznego nie mogą być wyższe od dynamicznego, należy przyjąć, że równanie (2) ważne jest w przedziale do ok. 4000 m/s, zaś dla $v > 4000 \text{ m/s}$ wartości modułu należy określić z równania

$$E_{def.} = 1,6 \cdot 10^4 v^2 \quad (4)$$

otrzymanego z równania (3) po odpowiednich podstawieniach.

WNIOSKI

Przedstawiona metodyka oceny statycznego modułu deformacji może być zastosowana również w przypadku innych typów litologicznych skał. Każdorazowo jednak muszą być określone współczynniki z równania (1) na podstawie pomiarów laboratoryjnych modułu deformacji i prędkości

fal z tych samych próbek. Różnice współczynników równania (1) pochodzą przede wszystkim z litologicznego zróżnicowania skał. Drugorzędnymi czynnikami są: wiek skał i miejsce ich występowania. Im bardziej zindywidualizowany litologicznie jest typ skał brany za podstawę do ustalenia korelacji między modułem deformacji i prędkością fal mierzonych na próbkach, tym dokładniejsza będzie metoda określania modułu na podstawie prędkości sejsmicznych.

Zakład Geofizyki i Zakład Geologii Inżynierskiej
Instytutu Geologicznego
Warszawa, ul. Rakowiecka 4
Nadesłano dnia 4 czerwca 1975 r.

PIŚMIENNICTWO

- DVORAK A. (1970) — Seismic and static modulus of rock masses. Proc. 2-n Congress Int. Soc. Rock. Mech., 2—6. Beograd.
- HAASE O. (1962) — Ein einfaches Verfahren zur Bestimmung der Festigkeit des Nebengesteine und der Kohle. Glückauf, 98, H. 10.
- KIDYBIŃSKI A. (1967) — Doraźna kontrola mechanicznych własności skał za pomocą młotka odbojnego. Prz. gór., nr 6, p. 300—304. Katowice.
- KRÓLIKOWSKI C., SMAGAŁA S. (1971) — Ustalenie korelacji między parametrami wytrzymałościowymi określonymi statycznie i za pomocą młotka Schmidta. Arch. Inst. Geol. (maszynopis). Warszawa.
- KRÓLIKOWSKI C., SMAGAŁA S. (1972) — Badania parametrów mechanicznych i ich współzależności dla niektórych typów skał. Techn. Poszuk., nr 40, p. 8—12. Warszawa.
- KRÓLIKOWSKI C., SMAGAŁA S. (1973) — Określanie własności mechanicznych skał laboratoryjnymi metodami dynamicznymi. Arch. Inst. Geol. (maszynopis). Warszawa.
- KUJUNDZIČ B., GRUJIC N. (1966) — Correlation between static and dynamic investigations of rock mass in situ. Proceed. of the I Congress of the Internat. Soc. of Rock Mechanics., VI, Lizboa.
- LINK H. (1968) — Zum Verhältnis statisch und seismisch ermittelten Elastizitätsmoduln von Fels. Felsmechanik und Ingenieurgeologie, Suppl. IV, p. 90—110. Wien — New York.
- LINOWSKI H. (1969) — On the relation between dynamic and static moduli of elasticity (Young's modulus). Acta geophys. pol., 17, nr 1, p. 53—66. Warszawa.
- MASUDA H. (1964) — Utilization of elastic longitudinal Wave velocity for determining the elastic properties of dam foundation rocks. VIII Congress Int. Grands. Barrages Edinburgh.
- THIEL K. (1968) — Metodyka określania własności fizyko-mechanicznych podłoża skalnego przy projektowaniu zapór wodnych. Wyd. „Arkady”, Warszawa.
- САВИЧ А. И. (1965) — Упругие свойства пород в массиве вблизи горных выработок. Физика Земли, № 11, стр. 20—34. Москва.
- САВИЧ А. И., КОПТЕВ Б. И., НИКИТИН Б. И., ЯЩЕНКО З. Г. (1969) — Сейсмоакустические методы изучения массивов скальных пород. Изд. Недра. Москва.

Чеслав КРУЛИКОВСКИ, Станислав СМАГАЛА

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКОГО МОДУЛЯ ПОРОД СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Резюме

Для правильной характеристики пород, как основания под строительные объекты, кроме знания геологического строения необходимым является умение определять параметры прочности в масштабе проектируемого строительного объекта. Это возможно благодаря геофизическим методам, прежде всего инженерной сейсмологии в сочетании с лабораторным изучением образцов пород. Сейсмический метод позволяет динамически определять модуль упругости, в то время, как для целей проектирования строительства используется модуль деформации или упругости, определяемый статически. Проведенные до сих пор исследования показали значительную разницу величин этих модулей. Причиной этого различия является не только различный способ их определения, а прежде всего то, что эти модули обычно относятся к различным объемам пород. Отсюда следует вывод, что можно сравнивать те модули, измерение которых относится к одному и тому же масштабу пород.

В настоящей работе авторы приводят методику определения статического модуля деформации с использованием сейсмоакустических исследований. Она состоит в корреляции скорости продольных волн со статическим модулем в одних и тех же образцах пород, изученных в лабораторных условиях и в перенесении определенной таким образом зависимости на определение статического модуля по скорости волн, измеренной сейсмическим методом в полевых условиях. В этом методе как бы автоматически учитывается влияние неоднородности и анизотропии среды, а принимая во внимание, что измерение скорости волн сейсмическим методом производится в большом объеме пород, то и определенный таким образом модуль является средней величиной для среды в масштабе измерения.

В работе описан процесс определения статического модуля на примере известковых пород Люблинщины. В первую очередь установлена корреляция между статическим модулем и скоростью продольных ультразвуковых волн (фиг. 1), а затем, по выполненным сейсмическим измерениям, в местах отбора образцов определены величины статического модуля деформации для пород в районах исследований (фиг. 2).

Обсуждена также точность определения статического модуля по приведенной методике. Описанный метод должен иметь большое практическое значение при использовании геофизических исследований для характеристики пород, как основания под строительные объекты, при проектировке больших гидротехнических промышленных и горных сооружений в районах мелкого залегания литых пород.

Czesław KRÓLIKOWSKI, Stanisław SMAGAŁA

DETERMINATION OF THE STATIC MODULUS OF ROCKS BY MEANS OF SEISMIC-ACOUSTIC METHODS

Summary

A good characteristic of the rock medium which is to be used as a site for building purposes requires not only the knowledge of the geological structure of

that medium but also the ability of determining the strength parameters of the medium concerned on such a scale as is needed for the structure designed. This can be done by means of geophysical methods and, first of all, by engineering seismic methods combined with lab analyses of rock samples. By means of the seismic method it is possible to determine the modulus of elasticity in a dynamic way, while for the purpose of designing a structure the modulus of deformation or elasticity is determined in a static way. The studies that have so far been made show considerable differences between the values of the moduli determined by means of the two methods. These differences arise from the very fact that the moduli are determined in different ways and, above all, they usually result from differences in the volume of the medium to which the moduli refer. The obvious conclusion is that we can compare only those moduli that have been determined for media of the same scale.

In the present paper the authors describe the method of determining the static modulus of deformation by means of seismic-acoustic tests. First a correlation is established between the velocity of longitudinal waves and the static modulus in the case of the same rock samples and in laboratorial conditions. The correlation thus defined is then used for determining the static modulus, on the basis of measurements of the velocity of longitudinal waves made by means of the seismic method in natural conditions. In this method, the influence of the heterogeneity and anisotropy of the medium is, as if automatically, taken into consideration. If we also consider the fact that measurements of the velocity of the waves by means of the seismic method refer to media of considerable dimensions, then the modulus thus determined represents the mean value for the given medium on the scale on which the measurements have been made.

The authors describe the method as it was used in the case of limestone rocks in the Lublin region. First the authors determined the correlation between the static modulus and the velocity of longitudinal waves of ultrasonic frequency (Fig. 1). Then, on the basis of seismic measurements in those places where rock samples had been collected, the authors established the value of the static modulus of deformation for the rocks in the area concerned (Fig. 2).

The author deals with the problem of accuracy in determining the static module by means of the method described here. This method is expected to have considerable practical importance in geophysical studies made for the purpose of investigating the character of rock media considered as sites for the construction of large hydrotechnical, industrial and mining structures in areas where solid rocks occur at a small depth.