HENRYK LINOWSKI
Przedsiębiorstwo Poszukiwań Geofizycznych

ZASTOSOWANIE METODY SEJSMICZNEJ DO OKREŚLANIA MODUŁÓW YOUNGA SKAŁ

UKD 550.834:624.131.4:539.32

W ostatnim dziesięcioleciu zaznaczył się w świecie wzrost zainteresowania sejsmicznymi metodami określania modułów sprężystości skał dla potrzeb geologii inżynierskiej. Zwłaszcza metoda sejsmiczno-inżynierska znalazła zastosowanie przy rozpoznawaniu terenów pod zapory wodne, tunele podziemne, lotniska, naftociągi, wielkie obiekty przemysłowe itp. oraz w górnictwie. Wiąże się to z tym, że przyjęte dotychczas metody oznaczania własności sprężystych skał mogą dawać wyniki obarczone sporymi błędami. Praktycznie określanie parametrów sprężystości odbywa się w laboratorium za pomocą badań na próbkach z rdzeni wiertniczych lub za pomocą specjalnych próbnych obciążeń in situ w wyznaczonych punktach terenu badań.

W szczególności rozróżniamy cztery podstawowe typy modułów Younga (E) w zależności od sposobu ich wyznaczania, a mianowicie:

Pomiary	laboratoryjne	polowe (in situ)
statyczne	E_{sl}	E_{sp}
dynamiczne	E_{dl}	E_{dp}

Moduły wyznaczone za pomocą metody sejsmicznej są modułami dynamicznymi, polowymi. Na powstawanie błędów i niedokładności konwencjonalnych metod określania modułów sprężystości skał (E_{sl}, E_{sp}, E_{dl}) wpływa wiele czynników, jak np.:

1. Rozmiary badanego obszaru lub próbki rdzenia są często zbyt małe w porównaniu do względnej niejednorodności terenu, objętego badaniami.
2. Trudno jest dokładnie odtworzyć w laboratorium wpływ środowiska geologicznego na próbkę.
3. Do laboratorium dostaje się tylko najbardziej zwięzły materiał, gdyż mniej lity rozpada się w czasie wiercenia i pobierania próbek, a pozostały materiał posiada już naruszoną strukturę.
4. Własności próbki ulegają w miarę upływu czasu zmianom wskutek wysychania, wietrzenia itp. mimo stosowanych środków ostrożności.
5. Badania statyczne mniej zwięzłych utworów są trudne do wykonania, ponieważ w czasie badania łatwo można przekroczyć granice sprężystości.
6. Metody laboratoryjne nie pozwalają określić anizotropii skał.
7. W przypadku statycznych badań in situ w sztolniach (próbne obciążenia) uzyskane wyniki mogą dotyczyć tylko strefy naruszonej, tuż przy powierzchni badanej skały. Strefa taka powstaje wskutek ciśnienia górotworu na ściany sztolni i robót górniczych przy jej drążeniu. Szczególnie dotyczy to przypadków, gdy miąższość strefy naruszonej jest porównywalna z wymiarami powierzchni próbnego obciążenia (8).
8. Badania statyczne in situ nie pozwalają określić współczynnika Poissona.

Stosując metodę sejsmiczną do określania modułów sprężystości można ustrzec się niedokładności i braków metod konwencjonalnych. Ponadto metoda sejsmiczna jest szybsza i tańsza w porównaniu do metod statycznych in situ. Według W. N. Nikitina (5, 6) jest ona 16 razy tańsza od metod statycznych. To się zgadza mniej więcej z naszymi obliczeniami.

Poza wymienionymi dodatnimi cechami metoda sejsmiczna posiada również i ujemne. Do nich należy przede wszystkim trudność wydzielenia w ośrodku stref o odmiennych charakterystykach sprężystości mniejszych niż 10—15 m. Obliczone moduły sprężystości są średnimi wartościami dla wydzielonych kompleksów skał. Większą zdolność rozdzielczą można uzyskać przez zastosowanie metody sejsmoakustycznej, lecz osiąga się to kosztem zmniejszenia zasięgu głębokościowego badań.

W Polsce opracowano dotychczas dwie dokumentacje sejsmiczno-inżynierskie, dotyczące m. in. określenia dla podłoża skalnego parametrów sprężystości (moduł Younga, współczynnik Poissona) oraz szereg prac doświadczalnych.

PARAMETRY SPRĘŻYSTOŚCI JAKO FUNKCJE PRĘDKOŚCI FAL POPRZECZNYCH I PODŁUŻNYCH

U podstaw teorii parametrów sprężystości leży prawo Hooke'a określające związek między naprężeniami a deformacjami dla danego ośrodka. Według tego prawa wielkość deformacji ośrodka jest liniowo zależna od działającego naprężenia (7, 10). Realność tego prawa dla małych deformacji została potwierdzona licznymi doświadczeniami. Współczynniki proporcjonalności liniowych związków między naprężeniami a deformacjami nazywamy modułami sprężystości.

Zgodnie z teorią rozchodzenia się fal w ośrodkach sprężystych jednorodnych i izotropowych, parametry charakteryzujące własności sprężyste tych ośrodków wyrażają się jako funkcje prędkości fal podłużnych, poprzecznych oraz gęstości, a mianowicie:

$$\sigma = \frac{v_p^2 - 2v_s^2}{2(v_p^2 - v_s^2)} \quad \ldots\ldots \quad [1]$$

$$E = 2a\varrho v_s^2(1+\sigma) \quad \ldots\ldots \quad [2]$$

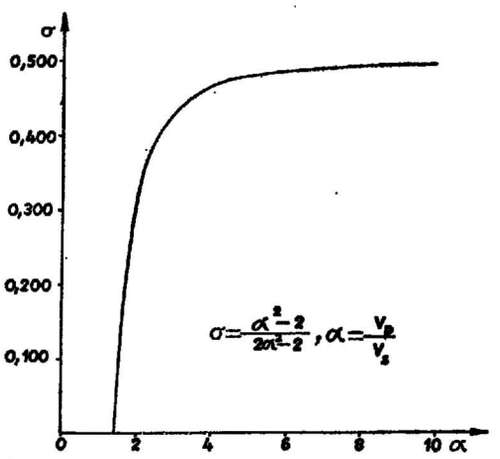
$$E = a\varrho v_p^2 \frac{2\sigma^2 + \sigma - 1}{\sigma - 1} \quad \ldots\ldots \quad [3]$$

gdzie $a = 1{,}01936 \cdot 10^{-2}$ jest współczynnikiem proporcjonalności w systemie metrycznym,

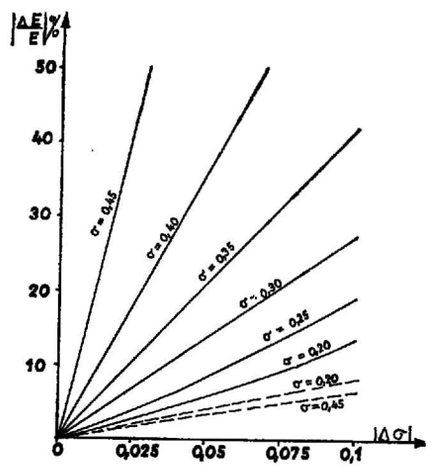
σ — współczynnik Poissona,
E — moduł Younga w kG/cm²,
ϱ — gęstość w g/cm³,
V_p — prędkość fali podłużnej w m/sek,
V_s — prędkość fali poprzecznej w m/sek.

Aby wyznaczyć parametry sprężystości ośrodka należy dokładnie określić prędkość rozchodzenia się fali podłużnej i poprzecznej oraz gęstość ośrodka. Wyznaczenie prędkości fali podłużnej P nie nastręcza żadnych trudności. Metody jej oznaczania są dobrze znane.

Gęstość ośrodka wystarczająco dokładnie można określić na podstawie pomiarów laboratoryjnych. Co prawda, są opracowane empiryczne wzory, które podają zależność między gęstością skały a prędkością fali podłużnej (1). Jednak ze względu na ich przybliżony charakter gęstość ośrodka określa się na podstawie wyników laboratoryjnych pomiarów z pobranych próbek w rejonie badań.



Ryc. 1. Wykres wartości współczynnika Poissona.
Fig. 1. Diagram of the value of Poisson's ratio.



Ryc. 2. Wykres wartości błędów określania modułów Younga.
1, — — — — — — wg wzoru [4], 2. ———— wg wzoru [5].

Fig. 2. Diagram of the value of errors in determination of Young's moduluses.
1. — — — — — — according to the formula 4; 2 ———— according to the formula 5.

Największą trudność sprawia określenie prędkości fali poprzecznej. W związku z tym powstało szereg metod wyznaczania modułów Younga. Jedną ze stosowanych jeszcze obecnie metod określania modułów Younga jest obliczanie ich ze wzoru [3] przy założeniu znanej gęstości i przyjęciu współczynnika Poissona (3,4). Wykres wartości współczynnika Poissona σ przedstawiono na ryc. 1. Widać, że dla $\alpha = \frac{V_p}{V_s}$ zawartego w przedziale $\sqrt{2}$–3 wartość σ bardzo szybko rośnie. Przy dalszym wzroście α współczynnik Poissona dąży wolno do wartości 0,5. Taką wartość σ osiąga dla ośrodka płynnego. W ośrodku płynnym fale poprzeczne nie rozchodzą się. Aby określić σ dla utworów zwięzłych (małe wartości σ) należy dokładnie znać prędkość fali P i S, gdyż niewielki błąd w określeniu α znacznie wpływa na powstawanie dużych błędów przy określeniu wartości σ.

Metoda określania modułów E ze wzoru [3] jest niedokładna i może być stosowana tylko dla skał bardzo zwięzłych. Aby to udowodnić zbadamy wielkość błędów, jakie mogą być popełnione przy określaniu wartości E w przypadku stosowania wzoru [2] lub [3]. Ograniczymy się tu tylko do zbadania wpływu współczynników Poissona na dokładność określenia E. Wpływu błędów gęstości i prędkości fal na dokładność obliczenia E nie analizujemy, gdyż zgodnie z wzorami [2] i [3] wielkości te w jednakowym stopniu wpływają na dokładność określenia modułu E. Oczywiście, zakłada się nie bez uzasadnienia, iż dokładność określenia prędkości fali podłużnej i poprzecznej jest praktycznie taka sama.

Po zróżnicowaniu wzorów [2] i [3] względem zmiennej σ i odpowiednim przekształceniu otrzymuje się następujące wzory na wielkość względnych błędów E:

$$\left|\frac{\Delta E}{E}\right|_s = \left|\frac{1}{1+\sigma}\right| |\Delta\sigma| \quad \ldots\ldots \quad [4]$$

$$\left|\frac{\Delta E}{E}\right|_p = \left|\frac{2\sigma(\sigma-2)}{(\sigma-1)(2\sigma^2+\sigma-1)}\right| |\Delta\sigma| \quad [5]$$

Z wykreślonych na podstawie wzorów [4] i [5] wykresów (ryc. 2) obliczono błędy, jakimi mogą być obarczone wartości modułów Younga, w przypadku określenia ich na podstawie wzoru [3]; są one bardzo duże, zwłaszcza dla skał o słabych własnościach sprężystych, tzn. dla dużych wartości σ. Jedynie dla małych wartości σ dokładność określenia modułów Younga na podstawie wzoru [3] jest niewiele mniejsza od dokładności, jaką można uzyskać obliczając E ze wzoru [2].

Ponieważ żąda się od badań sejsmiczno-inżynierskich dokładnego określenia wartości E oraz ze względu na to, iż rośnie potrzeba budowy zapór wodnych i wielkich obiektów przemysłowych w rejonach, gdzie występują skały o słabych własnościach sprężystych, konieczne staje się obliczanie modułów E na podstawie wzoru [2] przy dokładnej znajomości fali podłużnej i poprzecznej.

WYZNACZANIE PARAMETRÓW SPRĘŻYSTOŚCI SKAŁ PODŁOŻA LITEGO

W 1964 r. zostały wykonane przez autora pomiary sejsmiczno-inżynierskie w rejonie Porąbki-Żaru w celu określenia parametrów sprężystości skał podłoża dla posadowienia zbiornika górnego projektowanej elektrowni. Następnie w 1955/66 r. zostały przeprowadzone podobne pomiary w większym zakresie dla zapory czołowej na Dunajcu.

Podłoże skalne (lite) w rejonie Porąbki-Żaru jest utworzone z fliszu karpackiego (piaskowce i łupki), natomiast w rejonie projektowanej zapory z utworów wapiennych o stromym ustawieniu warstw oraz margli i łupków.

Przeprowadzone badania pozwoliły określić parametry sprężystości (E, σ) dla skał podłoża litego słabo zwietrzałego oraz dla kompleksów podłoża niezwietrzałego, które występują głębiej. Poza tym została określona na odcinkach badań miąższości nadkładu* i strefy słabego zwietrzenia skał podłoża.

Dla określenia miąższości nadkładu oraz modułów sprężystości przystropowych partii podłoża zastosowano metodę ciągłego profilowania refrakcyjnego za pomocą fal podłużnych i poprzecznych. Natomiast dla określenia parametrów sprężystości kompleksów podłoża, znajdujących się na większych głębokościach, przeprowadzono pomiary sejsmiczne za pomocą fal bezpośrednich P i S w otworach wiertniczych oraz sztolniach. W ten sposób te trzy metody sejsmiczne (powierzchniowa, otworowa i sztolniowa) pozwoliły określić parametry sprężystości skał podłoża w sposób przestrzenny.

Ze względu na płytkie występowanie podłoża (średnio 3—4 m) fale sejsmiczne wzbudzano za pomocą metody udarowej bez używania materiałów wybuchowych.

Prędkości fal podłużnych w przypadku pomiarów powierzchniowych określano na podstawie fal refrakcyjnych typu PPP, a prędkości fal poprzecznych na

* Nadkład rozumiany jest tu jako utwory czwartorzędowe (aluwia) plus silnie zwietrzałe podłoże skalne.

podstawie fal typu SSS(SH) i PSP. Fale PPP i PSP rejestrowano w układzie pomiarowym ZZ, to znaczy, że kierunek wzbudzania (uderzenia młotem) i rejestracji był pionowy. Natomiast fale typu SH rejestrowano w układzie YY (wzbudzanie i rejestracja w kierunku prostopadłym do linii profilu). Fale poprzeczne pod ziemią w sztolniach rejestrowano w układzie ZZ jako fale bezpośrednie typu SV.

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów sejsmiczno-inżynierskich na górze Zar stwierdzono, że wartości wahały się w granicach od 10 000 kG/cm² do wartości E dla skał podłoża wynosiły od 15 000 kG/cm² do 85 000 kG/cm².

Badania otworowe pozwoliły określić moduły Younga dla skał w strefie słabego zwietrzenia, których 23 000 kG/cm², przy czym średnia wartość E dla tej strefy, określona na podstawie pomiarów w kilkunastu otworach wynosiła 17 500 kG/cm². Według tych samych badań otworowych wartości E dla podłoża niezwietrzałego, występującego głębiej, wahały się w granicach 22 000 kG/cm² do 68 000 kG/cm² o średniej wartości E = 37 400 kG/cm².

Wartości E wyznaczone z badań refrakcyjnych wzdłuż kierunku uwarstwienia (kierunek horyzontalny) dla przystropowych partii podłoża wahały się od 33 000 kG/cm² do 85 000 kG/cm².

Prace sejsmiczno-inżynierskie (refrakcyjne) wykazały, że jedna strona góry Żar posiada wyższe wartości E, niż przeciwległa. Średnie wartości E dla poszczególnych stron wynosiły odpowiednio 54 500 kG/cm² i 41 500 kG/cm².

Wykonane prace sejsmiczno-inżynierskie w rejonie projektowanej zapory wodnej pozwoliły wydzielić obszary, różniące się między sobą charakterystykami sprężystości. I tak dla obszaru środkowej skałki wapieni w dnie doliny Dunacja średnia wartość modułu Younga wynosiła ok. 204 000 kG/cm², a dla skał na prawym przyczółku, znajdującym się powyżej dna doliny, wielkość ta wynosiła ok. 110 000 kG/cm². Niezależnie od wydzielenia tych dużych jednostek uzyskane wyniki pozwalają wydzielić strefy mniejsze w granicach tych jednostek. Strefy o różnych własnościach sprężystości zostały wydzielone głównie na podstawie badań refrakcyjnych.

Pomiary sejsmiczne w otworach i w sztolniach pozwoliły określić parametry sprężystości kompleksów niezwietrzałego podłoża, znajdujących się na głębokości do 40 m. Utwory podłoża niezwietrzałego charakteryzują się blisko dwukrotnie większymi modułami Younga, niż utwory przystropowych partii podłoża wraz ze strefą słabego zwietrzenia. Moduły E dla tego kompleksu skał osiągają wartości do 500 000 kG/cm².

Pomiary sejsmiczno-inżynierskie wykazały, że utwory podłoża charakteryzują się anizotropią. Moduły Younga obliczone dla skał przy rozchodzeniu się fal w kierunku równoległym do uwarstwienia wykazują wyższe wartości przeciętne o 23%, niż w kierunku prostopadłym do uwarstwienia.

PORÓWNANIE DYNAMICZNYCH (SEJSMICZNYCH) MODUŁÓW YOUNGA Z MODUŁAMI STATYCZNYMI

Na górze Żar oprócz badań sejsmicznych zostały wykonane również pomiary statyczne na próbkach z rdzeni wiertniczych. Uzyskane na podstawie tych pomiarów moduły E_{sl} posiadają większe wartości od modułów sejsmicznych E_{dp}. Wartości stosunku $\frac{E_{dp}}{E_{sl}}$ dla próbek z różnych otworów wahają się od 0,2 do 0,4, przy czym średnia wartość tego stosunku dla piętnastu próbek wyniosła 0,31. Natomiast w rejonie projektowanej zapory zostały wykonane pomiary sejsmiczne i statyczne w sztolniach. Otrzymane wartości stosunku $\frac{E_{dp}}{E_{sp}}$ wynosiły od 2,34 do 7,35. Średnia wartość tego stosunku dla sześciu porównywanych pomiarów statycznych wynosiła 4,51.

Uzyskane wyniki tak w pierwszym, jak i drugim przypadku mieszczą się w granicach wartości uzyskiwanych przez wielu autorów za granicą. Np. z przytoczonych danych przez W. N. Nikitina (5, 6) wynika, że wartość stosunku $\frac{E_{dp}}{E_{sl}}$ dla utworów wapiennych waha się w granicach 0,2—0,5. Natomiast wielu autorów podaje, że wartości $\frac{E_{dp}}{E_{sl}}$ wahają się od 1 do 20 (2, 3, 4, 5, 6).

Z przytoczonych danych wynika, iż moduły Younga, wyznaczone w laboratorium na próbkach, posiadają przeważnie większe wartości od modułów wyznaczonych w terenie, bez względu na stosowaną metodę ich wyznaczania. Moduły, określane w trakcie badań polowych in situ, charakteryzują większe kompleksy skał, które są bardziej niejednorodne, spękane w postaci większych bloków i poprzecinane różnorodnymi dyslokacjami, w porównaniu do próbek, na jakich wykonuje się pomiary w laboratorium. Głównie z tych powodów moduły, wyznaczane z pomiarów in situ, mają mniejsze wartości od modułów uzyskiwanych z badań laboratoryjnych oraz lepiej charakteryzują własności sprężyste utworów geologicznych.

Z literatury i przedstawionych danych wynika, że $E_d > E_s$, przy czym w przypadku badań laboratoryjnych $\frac{E_d}{E_s}$ nie przekracza na ogół liczby 2 (5), gdy tymczasem w pomiarach in situ różnice mogą być większe. Głównym powodem różnicy między wartością E_d i E_s jest to, że czas trwania naprężenia jednego znaku i jego wielkość w przypadku fali sprężystej jest niewielki w porównaniu do tych samych wielkości, obserwowanych przy dokonywaniu pomiaru statycznego. Drugą ważną przyczyną, że $E_d > E_s$ są nieporównywalnie mniejsze siły i odkształcenia, z jakimi mamy do czynienia w przypadku rozchodzenia się fali sejsmicznej w porównaniu do badań statycznych. Z tej to przyczyny badania sejsmiczne dają rzeczywiste moduły sprężystości bez zniekształceń, spowodowanych odkształceniami niesprężystymi, towarzyszącymi pomiarom statycznym (3).

Obecnie trudno jest jeszcze określić empiryczną zależność $E_d = f(E_s)$, gdyż nie ma ustalonych metod interpretacji krzywych odkształceń, otrzymywanych z pomiarów statycznych oraz ze względu na zbyt szczupły materiał doświadczalny. Jednak zależnie od przyjęcia określonej metody interpretacji różnice w określaniu wartości E_s mogą dochodzić do 50%. Natomiast E_d praktycznie nie zależy od sposobu interpretacji, gdyż metody określania prędkości fal są ściśle ustalone.

Na zakończenie należy podkreślić, że sejsmiczna metoda określania modułów Younga pozwala wnieść dużo cennych informacji, potrzebnych do wszechstronnego opracowania dokumentacji geologiczno-inżynierskiej, zwłaszcza dotyczy to obiektów budowlanych, których zaprojektowanie i trwałość wymagają dokładnego określenia warunków geologiczno-inżynierskich.

LITERATURA

1. Bierezkin W. M. — K woprosu o sootnoszeniu miežду płotnostju porod i skorostju razprostranenija uprugich wołn w nich. Razwied. i promysł. gieofiz. Wyp. 49, 1963.
2. Dvorzak A. — The Relation between Static and Seismic Elasticity Modulus of Rocks and Soils. Proceedings of the Seminar on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Łódź 1964.
3. Link H. — Evaluation of Elasticity Moduli of Dam Foundation Rock Determined Seismically in Comparison to Those Arrived at Statically. Huitiéme Congrès International des grands barrages. Edinburgh 1964.
4. Masuda H. — Utilization of Elastic Longitudinal Wave Velocity for Determining of Dam Foundation Rocks. Ibidem.
5. Nikitin W. N. — O sootnoszenii miežду dinamiczeskim i staticzeskim modułami uprugosti gornych porod. Razwied. i promysł. gieofiz. Wyp. 45. 1962.

6. Nikitin W. N. — Mietodika i rezultaty opriedielenija uprugich swojstw izwestniakow w usłowijach jestestwennogo zalieganija sejsmiczeskim i ultrazwukowym mietodami. Izw. AN SSSR, nr 8, 1962.
7. Sawarenskij E. F., Kirnos D. P. — Elemienty sejsmołogii i sejsmomietrii. Moskwa 1955.
8. Savicz A. I. — Uprugije swojstwa porod w massiwie wblizi gornych wyrabotok. Fizika Zemli, nr 11, 1965.
9. White I. E. — Seismic Waves. New York 1965.

SUMMARY

In the article are presented seismic methods determining moduluses of elasticity, and their analysis exemplified by the seismic works of this type, made for the first time in Poland.

The methods of extinction and those of recording longitudinal and transversal waves are discussed, and the results of studies on two geological-engineering objects are presented.

In addition a comparison is made of Young's seismic moduluses with static moduluses obtained during investigations in situ and in laboratory. Based on the results obtained in Poland and abroad, the author pays attention to a considerable usefulness of the seismic method of determining the Young's moduluses in the reconnaissance of the terrains destined for great constructions, mainly due to its effectiveness and quickness, as well as to the low costs effectiveness and quickness, as well as to the low costs of information.

РЕЗЮМЕ

В статье описываются сейсмические методы определения модуля упругости и их анализ на примере проведенных впервые в Польше сейсмических работ такого рода.

Рассматривается метод вызова и регистрации продольных и поперечных волн; приводятся результаты исследований двух инженерно-геологических объектов.

Проведено сопоставление сейсмических модулей Юнга со статическими модулями, определенными в лаборатории. На основании данных, полученных в Польше и за рубежом, доказывается пригодность сейсмического метода определения модуля Юнга горных пород в разведывании участков под крупные стройки в связи с большой эффективностью этого метода, быстротой определений и низкой стоимостью получения данных.