

Robert Siata

ZASTOSOWANIE METODY PŁYTKIEJ REFRAKCJI SEJSMICZNEJ DO OKREŚLANIA WŁASNOŚCI FIZYCZNYCH WARSTW CZWARTORZĘDOWYCH

Streszczenie

Metodę płytkiej refrakcji stosuje się standardowo do obliczania granic litologicznych. W artykule przedstawiono możliwość jej dodatkowego wykorzystania do obliczania stałych materiałowych. Na podstawie wykonanych badań obliczono dynamiczne moduły sprężystości dla utworów czwartorzędowych, wykształconych w postaci piasków (suchych i zawodnionych), gliny i iltu.

Najmniejsze wartości prędkości propagacji fal sejsmicznych stwierdzono w piaskach suchych ($V_p = 410$ m/s, $V_s = 280$ m/s), te same piaski ale zawodnione (poniżej poziomu zwierciadła wód gruntowych) charakteryzowały się prędkościami: $V_p = 1600$ – 2000 m/s, $V_s = 500$ – 600 m/s. Nieco większe prędkości (w stosunku do suchych piasków) zanotowano w przypadku glin: $V_p = 700$ m/s, $V_s = 500$ m/s.

Application of the method of shallow seismic refraction in determining physical properties of Quaternary strata

Abstract

The method of shallow refraction is commonly used to determine the lithological boundaries. The paper presents the possibility of its additional application to determine the material constants. On the basis of performed investigations, the dynamic moduli of elasticity were determined for Quaternary formations, developed in the form of sands (dry and watered), clay and silt.

The lowest values of propagation velocity of seismic waves were found in the dry sands ($V_p = 410$ m/s, $V_s = 280$ m/s). The same sands, but watered, (below the underground water table) were characterised by the velocities $V_p = 1600$ – 2000 m/s, $V_s = 500$ – 600 m/s. Slightly higher velocities (in relation to those of dry sands) were recorded in the case of clays $V_p = 700$ m/s, $V_s = 500$ m/s.

1. WSTĘP

Określenie własności fizycznych ośrodka skalnego, na przykład jego jakości i wytrzymałości, ma duże znaczenie w:

- budownictwie podziemnym i lądowym,
- prognozowaniu zagrożeń naturalnych,
- rozpoznawaniu budowy geologicznej,
- modelowaniu analitycznym.

Jedną z metod określania stałych materiałowych ośrodka jest metoda sejsmiczna, która umożliwia wyznaczenie parametrów dynamicznych (modułów sprężystości postaciowej i objętościowej, współczynnika Poissona, współczynnika dobroci) na podstawie zmierzonych prędkości propagacji podłużnych i poprzecznych fal sprężystych i znanej gęstości ośrodka.

Prędkości fal sprężystych i wyznaczone na ich podstawie stałe materiałowe wykorzystuje się, między innymi do: modelowania, obliczania współczynnika wzmocnienia (amplifikacji) drgań, klasyfikacji masywu skalnego na podstawie skal opracowanych przez, między innymi Bartona [1], Bieniawskiego [3], Bestyńskiego [2] (dla fliszu karpackiego).

Zaletą metody jest wyznaczanie parametrów dynamicznych skał *in situ*, w istniejących warunkach naprężeniowo-deformacyjnych, bez naruszania struktury ośrodka. Wadą jest mniejsza dokładność pomiarów (w porównaniu na przykład ze stosowaniem metody ultradźwiękowej) oraz całościowe traktowanie większej objętości masywu, bez możliwości wydzielenia mniejszych fragmentów (przy prędkości fali sejsmicznej 4000 m/s i częstotliwości fali 200 Hz rozdzielczość przestrzenna metody wynosi 5–10 m).

2. KINEMATYCZNE PARAMETRY PROPAGACJI FAL SEJSMICZNYCH

Podstawą wyznaczania własności fizycznych ośrodka jest założenie, że zachowuje się on sprężysto w zakresie odkształceń wywołanych propagacją fal sprężystych. Z rozwiązania równania różniczkowego ruchu falowego w ośrodku sprężystym dla fal podłużnych i poprzecznych otrzymuje się ich prędkości wyrażone zależnościami [4]:

$$V_P = \sqrt{\frac{\lambda + 4G/3}{\rho}}$$

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

gdzie:

- V_P – prędkość fali podłużnej,
- V_S – prędkość fali poprzecznej,
- λ – moduł sprężystości objętościowej,
- G – moduł sprężystości postaciowej,
- ρ – gęstość ośrodka.

Fale podłużne w ośrodku izotropowym są falami kulistymi, w których ruch cząstek ośrodka jest zgodny z kierunkiem ich propagacji i polega na zmianie objętości ośrodka. Fale poprzeczne powodują zmianę postaci ośrodka, a ruch cząsteczek odbywa się w kierunku prostopadłym do kierunku rozchodzenia się drgań. Fale poprzeczne nie propagują w płynach ($G = 0$).

Prędkości fal podłużnych i poprzecznych są związane zależnością

$$V_P = V_S \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}}$$

Stała Poissona ν zmienia się w zakresie od 0 do 0,5, z czego wynika, że prędkość fal podłużnych jest zawsze większa od prędkości fal poprzecznych.

Dla typowych skał krystalicznych $v = 0,25$, co daje stosunek prędkości $k = V_P/V_S = 1,73$. Dla utworów luźnych stosunek ten zmienia się w zakresie od 3 do 12.

Znajomość prędkości propagacji fal podłużnych i poprzecznych pozwala na wyznaczenie dynamicznych stałych sprężystych, na przykład z następujących zależności [4]:

$$\lambda_d = \rho \left(V_P^2 - \frac{4V_S^2}{3} \right)$$

$$G_d = \rho V_S^2$$

$$E_d = \rho V_S^2 \frac{3k^2 - 4}{k^2 - 1}$$

$$v_d = 0,5 \frac{k^2 - 2}{k^2 - 1}$$

gdzie:

V_P – prędkość fali podłużnej,

V_S – prędkość fali poprzecznej,

$k = V_P/V_S$,

λ_d – dynamiczny moduł sprężystości objętościowej,

G_d – dynamiczny moduł sprężystości postaciowej,

E_d – dynamiczny moduł sprężystości,

v_d – dynamiczny współczynnik Poissona,

ρ – gęstość ośrodka.

3. PŁYTKIE BADANIA REFRAKCYJNE

3.1. Dane ogólne

Warstwy górotworu, leżące najpłycej, utworzone są najczęściej z osadów trzecio- i czwartorzędowych oraz utworów zwietrzałych. Warstwa, w której prędkości fal sejsmicznych są najmniejsze, jest strefą małych prędkości (SMP); tworzą ją grunty nieskonsolidowane lub utwory zwietrzałe. Strefa ta charakteryzuje się małymi wartościami prędkości poniżej 1000 m/s, podczas gdy twarde podłoże charakteryzuje się prędkościami większymi od 1500 m/s (2000 m/s). Dodatkowym czynnikiem wpływającym na prędkość fal sejsmicznych w ośrodku jest poziom zwierciadła wód gruntowych. SMP charakteryzuje się wzrostem prędkości wraz z głębokością, lecz może również charakteryzować się jedną wartością prędkości. Przypadek taki występuje na przykład w warstwach piasków.

3.2. Metoda pomiaru

Przeprowadzono rozpoznanie prędkości fal sejsmicznych w warstwach zalegających nad twardym podłożem metodą płytkiej refrakcji. Na profilach sejsmicznych rozmieszczono 24 geofony w odległości co trzy metry. Falę sejsmiczną wzbudzano po obydwu stronach profilu w odległości 5 m od ostatniego geofonu, co umożliwiło uzyskanie hodografów zbieżnych.

Profile sejsmiczne zostały wykonane w następujących rejonach:

- Leśniaki (gmina Kleszczów),
- Chabielice,
- Stróża,
- Rząśnia.

Miejsca pomiarowe wybrane zostały w pobliżu otworów wiertniczych, których dane geologiczne były dostępne.

3.3. Interpretacja

Na podstawie analizy hodografów zbieżnych wyznaczono prędkości i miąższości poszczególnych warstw metodą średnich arytmetycznych (sposób t_0). Metoda ta jest powszechnie stosowana do interpretacji hodografów związanych z granicami refrakcyjnymi, których promień krzywizny jest znacznie większy od głębokości występowania granicy sejsmicznej. W metodzie tej pomijane jest zjawisko przenikania fal i nie może być ona stosowana przy gwałtownych zmianach prędkości granicznych wzdłuż profilu sejsmicznego.

3.4. Wyniki pomiarów

Rejon Leśniaki (Ujęcie Stanisławów)

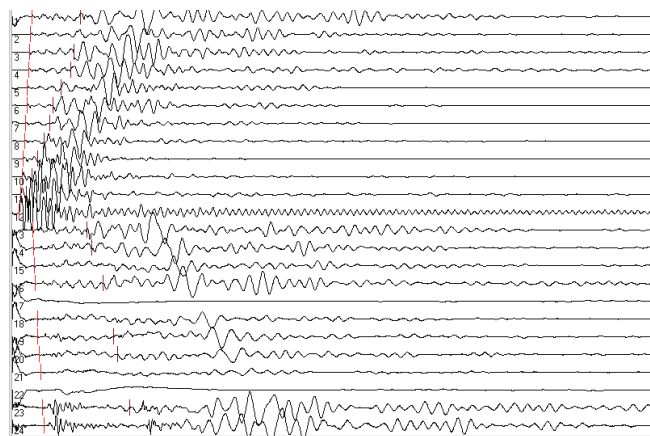
Dane z otworu PVII/VIII-8:

- 0–2 m – piasek żółty i rdzawy, drobnoziarnisty, średnio wysortowany,
- 2–3 m – glina rdzawobrazowa, piaszczysta,
- 3–17 m – glina zwałowa, ciemnoszara z pojedynczymi otoczkami,
- 17–27 m – piasek jasnoszary, średnioziarnisty, źle wysortowany,
- 27–37 m – mułek niebieskoszary.

MODEL SEJSMICZNY OŚRODKA

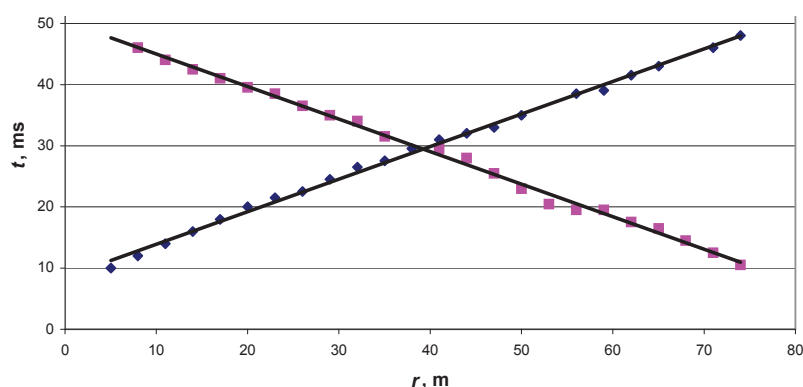
Na profilu sejsmicznym nie uzyskano fal refrakcyjnych typu P, prędkość fali tego typu jest stała i wynosi około 1880 m/s. Było to prawdopodobnie spowodowane zawodnieniem piasku znajdującego się na nieprzepuszczalnej glinie. W występującej sytuacji geologicznej nie obserwowano wzrostu prędkości z głębokością (w warstwach przypowierzchniowych), a warstwa zawodnionego piasku tworzyła swoisty ekran sejsmiczny.

Prędkość poprzecznej fali sejsmicznej zmieniała się od około 320 m/s w przypadku utworów najpłycej zalegających do 440 m/s w przypadku zalegających głębiej, które należy korelować z glinami. Przykładowe sejsmogramy oraz hodografy zbieżne fali P dla tego rejonu przedstawiają rysunki 1 i 2. Wyniki przedstawiono w tablicy 1.



Rys. 1. Przykładowe sejsmogramy zarejestrowane wzdłuż profilu w miejscowości Leśniaki

Fig. 1. Exemplary seismograms recorded along the profile at Leśniaki location



Rys. 2. Przykładowe hodografy zbieżne fali P (brak fal refrakcyjnych z większych głębokości):
 r – odległość od punktu wzbudzenia, t – czas

Fig. 2. Exemplary convergent hodographs of wave P (lack of refraction waves from greater depths),
 r – distance from the point of excitation, t – time

Tablica 1. Wyniki pomiarów sejsmicznych

Numer warstwy	Prędkość fali		Dynamiczny moduł sprężystości			Dynamiczny współczynnik Poissona
	poprzecznej V_p , m/s	podłużnej V_s , m/s	objętościowej K_d , GPa	postaciowej G_d , GPa	E_d , GPa	
1	1880	320	9,1	0,3	0,9	0,48
2	1880	440	8,9	0,5	1,5	0,47

Rejon Chabielice (Młynki)

Dane z otworu Ps 20A

0–7 m – glina zwałowa szara z otoczkami,

7–13 m – piasek jasnoszary z domieszką żwiru,
 13–15 m – glina zwałowa szara z otoczkami,
 15–21 m – żwir różnoziarnisty,
 21–53 m – piasek jasnoszary drobnoziarnisty z domieszką żwiru.

MODEL SEJSMICZNY OŚRODKA

Na profilu nie uzyskano wyraźnej fali refrakcyjnej typu P, co było prawdopodobnie spowodowane brakiem wzrostu prędkości z głębokością i izolacją płytkich piasków przez gliny oraz brakiem ich zawodnienia.

Prędkość poprzecznej fali sejsmicznej zmieniała się od około 360 m/s dla utworów najpłycej zalegających do 510 m/s. Wyniki przedstawia tablica 2.

Tablica 2. Wyniki pomiarów sejsmicznych

Numer warstwy	Prędkość fali		Dynamiczny moduł sprężystości			Dynamiczny współczynnik Poissona
	poprzecznej V_p , m/s	podłużnej V_s , m/s	objętościowej K_d , GPa	postaciowej G_d , GPa	E_d , GPa	
1	515	360	0,24	0,36	0,7	0,006
2	695	510	0,37	0,7	1,3	–

Warstwę pierwszą stanowiła glina, natomiast drugą – glina lub piasek, prawdopodobnie częściowo zawodniony. Dla warstwy drugiej współczynnik Poissona traci sens fizyczny. Jest to prawdopodobnie wynikiem błędu wyznaczenia prędkości fali poprzecznej.

Rejon Stróża (Wola Wydrzana)

Dane z otworu PVI/VII-4-1

0–3 m – glina ciemnożółta, piaszczysta,
 3–12 m – piasek żółty drobnoziarnisty,
 12–33 m – piasek szary, średnioziarnisty,
 23–40 m – ił szaroniebieski, piaszczysty.

MODEL SEJSMICZNY OŚRODKA

Na profilu sejsmicznym uzyskano wyraźną falę refrakcyjną typu P związaną z zawodnionymi piaskami (poziom wód gruntowych).

Prędkość poprzecznej fali sejsmicznej zmieniała się od około 300 m/s dla utworów najpłycej zalegających do 640 m/s dla iłów. Wyniki przedstawia tablica 3.

Tablica 3. Wyniki pomiarów sejsmicznych

Numer warstwy	Prędkość fali		Dynamiczny moduł sprężystości			Dynamiczny współczynnik Poissona
	poprzecznej V_p , m/s	podłużnej V_s , m/s	objętościowej K_d , GPa	postaciowej G_d , GPa	E_d , GPa	
1	580	310	0,46	0,21	0,56	0,3
2	2030	495	8,4	0,54	1,6	0,47
3	2030	640	7,9	0,9	2,6	0,44

Rejon Rzańnia (Ujście Rzańnia)

Dane z otworu P_{RZ}-1

0–19 m – piasek szarobrazowy i szarobeżowy,

19–20 m – glina,
20–24 m – piasek jasnoszary,
24–39 m – piasek.

MODEL SEJSMICZNY OŚRODKA

Na profilu sejsmicznym uzyskano wyraźną falę refrakcyjną typu P związaną z zawodnionymi piaskami (poziom wód gruntowych).

Prędkość poprzecznej fali sejsmicznej wynosiła 285 m/s dla utworów najpłycej zalegających (piasek suchy) i 565 m/s dla piasków zawodnionych. Wyniki przedstawia tablica 4.

Tablica 4. Wyniki pomiarów sejsmicznych

Numer warstwy	Prędkość fali		Dynamiczny moduł sprężystości			Dynamiczny współczynnik Poissona
	poprzecznej V_p , m/s	podłużnej V_s , m/s	objętościowej K_d , GPa	postaciowej G_d , GPa	E_d , GPa	
1	410	280	0,14	0,17	0,37	0,063
2	1685	565	5,3	0,7	2,0	0,44

Warstwa pierwsza to piasek suchy, natomiast druga to piasek zawodniony (poziom wód gruntowych).

4. WNIOSKI

1. Badania sejsmiczne metodą płytkiej refrakcji wykazały, że można określić wartości dynamiczne modułów sprężystości utworów czwartorzędowych, wykształconych w postaci piasków (suchych i zawodnionych), gliny i iłu.
2. Wartości prędkości propagacji fal sejsmicznych są wyraźnie zróżnicowane. Najmniejsze wartości stwierdzono w przypadku piasków suchych ($V_p = 410$ m/s, $V_s = 280$ m/s), natomiast te same piaski zawodnione (poniżej poziomu zwierciadła wód gruntowych) charakteryzowały się prędkościami: $V_p = 1600$ – 2000 m/s, $V_s = 500$ – 600 m/s. Nieco większe prędkości (w stosunku do suchych piasków) zanotowano dla glin: $V_p = 700$ m/s, $V_s = 500$ m/s.
3. Pomiaru terenowe wykazały, że badanie własności warstw czwartorzędowych metodą płytkiej refrakcji jest utrudnione z kilku powodów, a mianowicie:
 - często prędkość fal sejsmicznych nie wzrasta znacząco z głębokością (brak fal refrakcyjnych),
 - w warstwach utworów piaszczystych rozkład prędkości fal jest zależny przede wszystkim od położenia zwierciadła wód gruntowych, poniżej którego nie zawsze można wyróżnić następane warstwy,
 - wyznaczonych dynamicznych modułów sprężystości nie można porównać ze statycznymi, gdyż dla skał nieskonsolidowanych nie można ich wyznaczyć na próbkach. Mogą one być użyte do modelowań i obliczeń wytrzymałościowych, opisując grunty nieskonsolidowane jako masyw.

4. Na podstawie wyznaczonych prędkości fal sejsmicznych i modułów dynamicznych w utworach czwartorzędowych łatwo wydzielić można strefy zawodnienia. Dla niektórych utworów uzyskiwane wartości współczynnika Poissona tracą sens, jest to prawdopodobnie efekt wyznaczenia prędkości fali poprzecznej z dużym błędem.

Literatura

1. Barton N., Loset F., Lien R., Lunde J.: *Application of the Q-system in design decision*. Bergman M. (ed.). Subsurface Space 1980 Vol. 2, s. 553-561.
2. Bestyński Z.: *Ocena własności geotechnicznych fliszu karpackiego na podstawie badań geofizycznych*. Kraków, AGH 1998 (Praca doktorska).
3. Bieniawski Z.T.: *Engineering rock mass classification*. New York, Wiley 1989.
4. Fajkiewicz Z. (red.): *Zarys geofizyki stosowanej*. Warszawa, Wydaw. Geologiczne 1972.
5. Gustkiewicz J. (red.): *Własności fizyczne wybranych skał karbońskich Górnośląskiego Zagłębia Węglowego*. Kraków, IGSMiE PAN 1999.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Józef Dubiński