

WŁAŚCIWOŚCI GEOTECHNICZNE PIASKOWCÓW FLISZOWYCH (WARSTWY KROŚNIEŃSKIE) W ŚWIEŁLE BADAŃ AKUSTYCZNYCH

Z doświadczeń projektowych dla wielu obiektów inżynierskich na fliszu wynika, że istotną rolę przy właściwym wyborze lokalizacji budowy odgrywa dokładne i prawidłowe wstępne rozpoznanie geologiczno-inżynierskie. Jednocześnie w warunkach fliszu (skomplikowana tektonika, występowanie zwietrzelin, koluwiów itp.) znaczną rolę w zakresie rozpoznania wstępnego odgrywają badania geofizyczne. Rozpoznanie to jednak powinno być opatrzone wnikliwą i właściwą interpretacją geotechniczną. W wielu wypadkach znajomość ośrodka skalnego nie jest wystarczająca, aby na podstawie pomiarów geofizycznych scharakteryzować jego właściwości mechaniczne. Pomocne są tu geofizyczne badania laboratoryjne prowadzone na próbkach skalnych o znanych cechach strukturalno-teksturalnych. Dzięki odpowiedniemu dobraniu próbek do badań modelować można warunki występujące w masywie skalnym, a następnie porównywać z danymi uzyskanymi w terenie.

Laboratoryjne badania geofizyczne pozwalają również na empiryczne wyprowadzenie związków korelacyjnych między cechami strukturalno-teksturalnymi ośrodka skalnego, jego właściwościami fizycznymi a akustycznymi. Pozwalają też na szczegółową obserwację przebiegu deformacji w procesie obciążania próbki. Na podstawie tych badań uzyskać więc można znaczną ilość informacji o właściwościach ośrodka skalnego, co w etapach wstępnego rozpoznania ma bardzo duże znaczenie.

Prawidłowe prowadzenie badań geofizycznych na małej próbce w laboratorium wymaga jednak, aby została zachowana właściwa proporcja wymiarów ośrodka, tzn. aby próbka w stosunku do długości propagowanej w niej fali spełniała rolę ośrodka nieorganicznego, tak jak spełnia to masyw skalny. Warunek ten wymaga zastosowania impulsów o odpowiedniej częstotliwości. Stąd więc w laboratoryjnych badaniach geofizycznych badania prowadzone np. metodą przechodzenia impulsów dźwiękowych prowadzić należy przy zastosowaniu fal ultradźwiękowych.

UKD 624.131.251:551.263.23:551.781.5:550.834.023(438-12 Sanok)

Metoda badań ultradźwiękowych stosowana jest szeroko w metaloznawstwie, w przemyśle budowlanym, a w zastosowaniu do laboratoryjnego badania próbek skalnych zaczyna być stosowana coraz częściej (W. Kołtoński — 3, L. Szaumian — 6, J. Jureczko, E. Konstantynowicz, M. Żmij — 2, J. Pinińska — 4).

Zastosowanie fal o dużej częstotliwości pozwala na stosowanie próbek niewielkich rozmiarów na prowadzenie badań bezpośrednio na rdzeniach wiertniczych. Metoda ta daje również możliwość nieograniczonego powtarzania badań w sposób szybki, co pozwala na zwiększenie dokładności wyników. Pozwala ona również prowadzić badania przy różnym ciśnieniu i temperaturze. Polega ona na założeniu, że w każdym ośrodku sprężystym, w zależności od jego cech, fala dźwiękowa propaguje się z sobie właściwą prędkością. Stąd prędkość propagacji fali w danym ośrodku charakteryzuje jego cechy sprężyste.

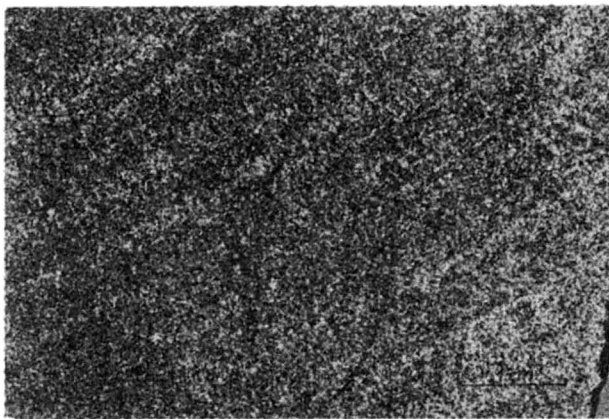
Dla ośrodka nieograniczonego, izotropowego i sprężystego znane związki pomiędzy prędkością rozchodzenia się fal dźwiękowych poprzecznych (V_s) i podłużnych (V_p) a stałymi materiałowymi są następujące:

$$V_p = \sqrt{\frac{[E_d(1-\nu)]}{(1+\nu)(1-2\nu)\gamma}}$$

$$V_s = \sqrt{\frac{E_d}{2(1+\nu)\gamma}}$$

gdzie:

E_d — dynamiczny moduł sprężystości,
 γ — gęstość objętościowa skały,
 ν — współczynnik Poissona.



1a



1c

Ryc. 1. Przykłady struktury i tekstury w badanych próbkach piaskowców krosnieńskich.

a — piaskowce grubolawicowe, b — piaskowce cienkolawicowe, c — piaskowce skorupowe.



1b

Fig. 1. Examples of structures and textures of Krosno sandstones from the samples studied.

a — thick-bedded sandstones, b — thin-bedded sandstones, c — corrugated sandstones.

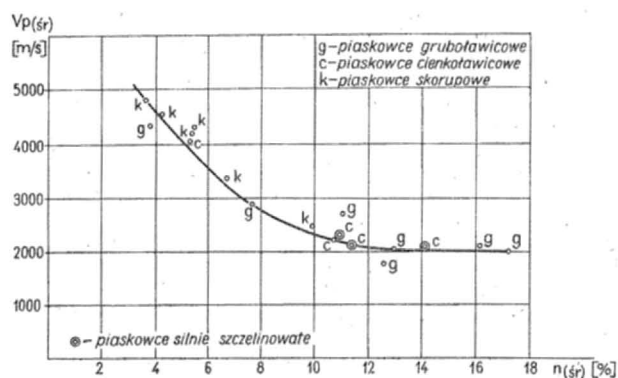
Przy założeniu, że skała reprezentuje ośrodek sprężysty pomiar prędkości poprzecznej i podłużnych fal ultradźwiękowych pozwala na określenie dynamicznego modułu sprężystości (E_d) i współczynnika Poissona (ν).

Ponieważ skały nie są w pełni ośrodkiem jednorodnym i sprężystym prędkość rozchodzenia się fal ultradźwiękowych będzie również od takich cech, jak: skład mineralny, struktura, tekstura, stopień spękania. W materiale drobnoziarnistym fale przebiegają z większą prędkością niż w materiale gruboziarnistym, a wszelkie powierzchnie foliacji, uławiczenia, nieciągłości, powodują tłumienie fali. Anizotropia ośrodka skalnego jest z kolei przyczyną różnic w prędkości propagacji fali w zależności od kierunku prowadzenia pomiaru.

Pomimo tych zastrzeżeń, na podstawie pomiaru prędkości fali podłużnej i poprzecznej w próbce określić można ze znaczną dokładnością, zależną od dokładności aparatury, stałe materiałowe: E_d i ν , tak istotne dla oceny geotechnicznych właściwości ośrodka skalnego.

Przykładem spostrzeżeń wynikających z tego rodzaju badań są dane uzyskane dla piaskowców fliaszowych (warstwy krosnieńskie). Do doświadczeń wytypowano próbki piaskowców z różnych punktów płaszczowiny śląskiej i skolskiej w rejonie Sanoka. W sposób zamierzony dobrano próbki charakteryzujące się zbliżonym składem mineralnym, natomiast różniące się cechami strukturalno-teksturalnymi, gęstością objętościową i stopniem spękania.

Badane piaskowce były to piaskowce szarogłazowe, kwarcowe, ciemnoszare, zawierające 33–47% kwarcu, od kilku do kilkunastu procent skaleni oraz do 19% łyszczyków, głównie muskowitu, który nadaje tym skałom charakterystyczny połysk, spoiwo skały było



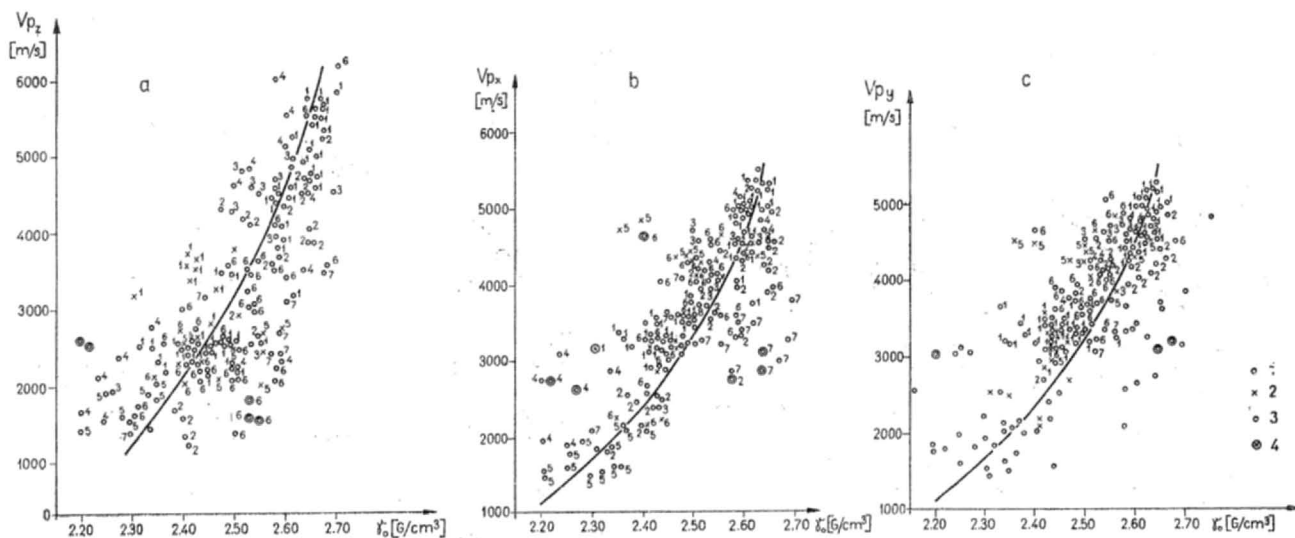
Ryc. 2. Zależność prędkości rozchodzenia się fali podłużnej (V_p) od porowatości (n) w piaskowcach krosnieńskich.

Fig. 2. Dependence of velocity of propagation of longitudinal wave (V_p) on porosity (n) for Krosno sandstones.

głównie węglanowe. Do badań pobierano piaskowce o teksturze beładnej, zbitej, drobnowarstwowej lub spływowej.

Wymienione typy tekstury związane były z piaskowcami grubolawicowymi — tekstura beładna (ryc. 1a), cienkolawicowymi — równoległa bądź zbita (ryc. 1b) i skorupowymi — spływowa, konwolucyjna (ryc. 1c).

Na podstawie wstępnych, poprzedzających badania akustyczne, oznaczeń cech fizycznych stwierdzo-



Ryc. 3. Zależność prędkości rozchodzenia się fali podłużnej (V_p) od gęstości objętościowej (γ).
1 — piaskowce gruboławicowe, 2 — piaskowce cienkoławicowe, 3 — piaskowce skorupowe, 4 — występowanie szczelin.

Fig. 3. Dependence of velocity of propagation of longitudinal wave (V_p) on volume density (γ).
1 — thick-bedded sandstones, 2 — thin-bedded sandstones, 3 — corrugated sandstones, 4 — fissures.

no również, że materiał osadzony w grubych ławicach jest skałą bardziej porowatą, luźniej „upakowaną” niż materiał z cienkich ławic oraz, że największą kompaktację materiału obserwuje się w piaskowcach skorupowych. Stąd najwyższą gęstością objętościową charakteryzują się piaskowce skorupowe, następnie cienkoławicowe. Relatywnie najniższą gęstość objętościową występuje w piaskowcach gruboławicowych. Od zasad tych odbiegały próbki wykazujące spękania, często obserwowane makroskopowo. Dzięki takiemu zróżnicowaniu cech osadu o dość jednorodnym składzie mineralnym zróżnicowane były również cechy akustyczne badanych próbek. Badania cech akustycznych prowadzono metodą przechodzenia impulsu przez próbkę mierząc czas przejścia fali podłużnej (V_p) i poprzecznej (V_s), zgodnie z zasadami podanymi przez L. Filipczyńskiego, Z. Pawłowskiego, J. Wehry (1). Zróżnicowane cechy budowy wewnętrznej osadu (struktura, tekstura, wielkość porów) powodowały, że przy zbliżonym składzie mineralnym w badanych piaskowcach czas przejścia fali przez próbki był różny i wynosił dla fali podłużnej 1000–6250 m/s, a uzyskane pomiarem prędkości dla fali poprzecznej wynosiły 1680–3390 m/s.

Pomiary prędkości fali podłużnej prowadzono przy częstotliwości 180 kHz — 2 Mhz, przy czym w tym zakresie nie stwierdzono dyspersji fali i nie napotkano na większe trudności pomiarowe nawet przy próbkach z istniejącymi, makroskopowo widocznymi spękaniem.

Pomiar fali poprzecznej, prowadzony przy użyciu defektoskopu produkcji radzieckiej DUK 68, przy wyższej częstotliwości narażał na znaczne trudności techniczne ze względu na zbyt małą energię generatora fali. Fala poprzeczna jest bowiem silniej tłumiona w skale niż fala podłużna i przy stosowanej obecnie aparaturze pomiarowej w ośrodkach skalnych o porowatości powyżej 12% wyznaczenie prędkości fali poprzecznej jest obciążone znacznym błędem lub często niemożliwe (5).

Porowatość badanych próbek piaskowców krosieńskich wahała się od 3,50 do 17,01% średnio, a gęstość objętościowa od 2,0 do 2,72 G/cm³. Stwierdzono, że wraz ze wzrostem porowatości skały fala ulega w skale silnemu tłumieniu. Uzyskaną na drodze doświadczalnej zależność prędkości fali podłużnej (V_p) i porowatości całkowitej (n) przedstawiono na ryc. 2. Jak z niej wynika w piaskowcach krosieńskich silne tłumienie fali następuje przy wzroście porowatości w przedziale 3–8%. Przeprowadzone badania pozwalają również na analizę związku prędkości fali z gęstością objętościową piaskowców. Analizę taką przeprowadzono na podstawie pomiarów prędkości fali

w tych samych próbkach w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach: z — prostopadle do uławicenia oraz x i y — równolegle do uławicenia. Stwierdzono, jak to było do przewidzenia, rosnącą prędkość propagacji fali wraz ze wzrostem gęstości objętościowej dla wszystkich kierunków pomiaru (ryc. 3). Wyniki badań wskazują jednak wyraźnie na anizotropię ośrodka, szczególnie w odniesieniu do próbek z wyraźnymi szczelinami.

Uzyskane dla piaskowców krosieńskich wyniki badań akustycznych wskazują, że na podstawie znajomości prędkości fali wnioskować można co do ich gęstości objętościowej i porowatości oraz czy są to silnie porowate piaskowce gruboławicowe o teksturze bezładnej i o niewysokich prędkościach 1,500–4,500 m/s, czy charakteryzujące się silną anizotropią prędkości fali piaskowce cienkoławicowe o teksturze równoległej, o wartościach V_p 2500–4500 m/s, lub też piaskowce skorupowe, w których fala ultradźwiękowa (V_p) propaguje się z prędkością 3000–6250 m/s.

Jeżeli dla próbek piaskowców krosieńskich danego typu uzyskuje się niższe wartości prędkości, świadczy to na ogół o spękaniu materiału. Na podstawie pomiarów prędkości określić więc można stopień spękania skały.

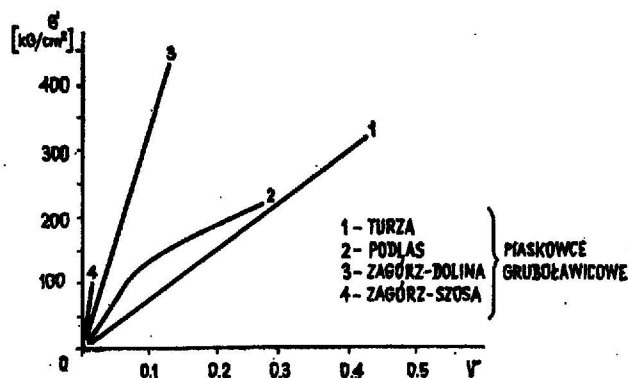
Dla celów projektowych istotną rolę odgrywa również znajomość cech mechanicznych, z których na główną uwagę zasługuje moduł sprężystości i współczynnik Poissona.

Aby określenie modułu sprężystości na drodze badań geofizycznych było prawidłowe konieczne jest ustalenie współczynnika Poissona (ν) danej skały bądź na podstawie badań statycznych, bądź na podstawie pomiaru prędkości fali poprzecznej (V_s) w danej próbce, co wynika ze wzorów:

$$E_d = \frac{V_p^2 (1 + \nu) (1 - 2\nu) \gamma}{1 - \nu}$$

$$\nu = \frac{0,5 - \left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2}{1 - \left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2}$$

Przyjmowanie do obliczeń wartości współczynnika Poissona (ν) z tabel prowadzi do znacznych uogólnień i błędów w określaniu modułu sprężystości. Wartość ν jest bowiem zależna od cech danej próbki, od jej spękania, od kierunku pomiaru, jest też różna zależnie od wartości obciążenia wywieranego na



Ryc. 4. Zależność współczynnika Poissona (ν) od obciążenia (p) w piaskowcach krosnieńskich.

Fig. 4. Dependence of Poisson coefficient (ν) on loading (p) for Krosno sandstones.

próbkę (ryc. 4). Z tego względu obliczenia wartości modułu sprężystości wymagają szczegółowego i wnikliwego pomiaru prędkości fali podłużnej i poprzecznej dla tych samych próbek w jednakowym kierunku, przy zachowaniu jednakowego stanu naprężeń, szczególnie gdy brak jest danych o współczynniku Poissona z badań statycznych.

Stosując się do tych zasad ustalono współczynnik Poissona dla piaskowców krosnieńskich w kierunku prostopadłym do uławicenia.

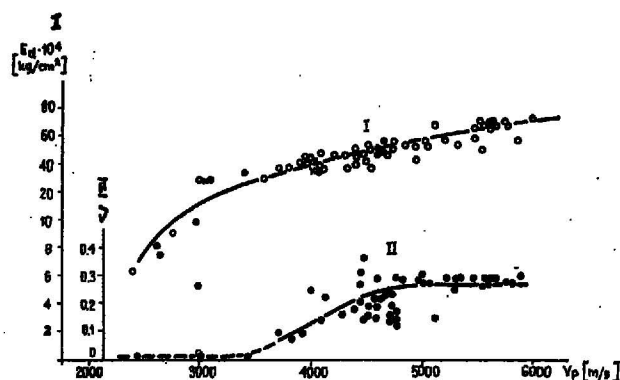
Ustalono na drodze bezpośrednich pomiarów wartości współczynnika Poissona dla badanych skał wynoszą 0,02–0,37. Zróżnicowanie takie wynika ze zróżnicowania cech strukturalnych skał oraz związane jest ze spekaniami skały. Jak zauważono rozważając szczegółowo piaskowce skorupowe (4) wartości niższe należy przyporządkować próbkom ze spekaniami (średnio 0,07), a wartości wyższe (średnio 0,27) próbkom niespekanym.

Dysponując oznaczeniami współczynnika Poissona wyznaczyć można dynamiczny moduł sprężystości (E_d). Dla piaskowców krosnieńskich dynamiczny moduł sprężystości wyznaczono dla kierunku prostopadłego do uławicenia posługując się oznaczonymi przez bezpośrednie badanie dla danej próbki wartościami współczynnika Poissona.

Wartość E_d wynosiła $0,63\text{--}6,91 \cdot 10^5$ kg/cm², przy czym jak stwierdzono wyższe wartości modułu wykazują piaskowce skorupowe niż cienkoławicowe i gruboławicowe.

Ponieważ, jak stwierdzono, w wielu wypadkach pomiar prędkości fali poprzecznej jest utrudniony na ryc. 5 przedstawiono zależność uzyskanych na drodze pomiaru fali podłużnej i poprzecznej wartości E_d i ν od prędkości fali podłużnej. Te zależności doświadczalne umożliwiają orientacyjną interpolację wartości ν i E_d dla piaskowców krosnieńskich w przypadku, gdy brak jest pomiaru prędkości fali poprzecznej. Z doświadczeń więc wynika, że przy wartości V_p 3500 m/s w piaskowcach krosnieńskich ma się do czynienia z wyraźnym spadkiem wartości modułu sprężystości i współczynnika Poissona. To obniżenie wartości parametrów E_d i ν ujawnione na drodze zmniejszonej prędkości fali związane jest w znacznej mierze z istnieniem spekań w niektórych próbkach. Wartości V_p 3500 m/s wskazują więc, że mamy do czynienia z ośrodkiem bądź silnie porowatym, bądź spekanym.

Jak z przedstawionych rozważań wynika, dla celów wstępnego rozpoznania można z wystarczającą dokładnością określić gęstość objętościową, porowatość, kierunki spekań, współczynnik Poissona i dynamiczny moduł sprężystości znając prędkość fali oraz rodzaj skały. Dla pełnej charakterystyki geotechnicznej ośrodka laboratoryjne badania akustyczne powinny być prowadzone jednocześnie z badania-



Ryc. 5. Zależność dynamicznego modułu sprężystości (E_d) i współczynnika Poissona (ν) od prędkości fali podłużnej (V_p).

Dla I: ● piaskowce gruboławicowe, × piaskowce cienkoławicowe, ○ piaskowce skorupowe.

Fig. 5. Dependence of dynamic elasticity modulus (E_d) and Poisson coefficient (ν) on velocity of longitudinal wave (V_p). For I: ● thick-bedded sandstones, × thin-bedded sandstones, ○ corrugated sandstones.

mi typu PAT lub PAP lub z badaniami sejsmicznymi. Możliwe jest wtedy na bieżąco kontrolowanie wyników badań terenowych oraz ich właściwa interpretacja. Ogólnie można powiedzieć, że wartości parametrów powinny być uzyskane na drodze akustycznych badań laboratoryjnych oraz badań terenowych, które można następnie porównywać z badaniami sejsmicznymi po analizie geotechnicznej.

Według badaczy radzieckich (6) dane dotyczące prędkości fali w masywie skalnym są zawsze niższe. Różnice w stosunku do badań laboratoryjnych wynoszą: 5% dla masywów niespekanych, 10% dla słabo spekanych, powyżej 25% dla masywu silnie spekanego. Należy jednak pamiętać, że w masywie poniżej zwierciadła wody następuje zwiększenie prędkości propagacji fali wskutek nawodnienia, co zbliża wyniki pomiarów „in situ” do danych uzyskanych w laboratorium dla próbek powietrzno-suchych. Prowadzenie tego rodzaju badań wymaga jednak szczegółowych danych z profilu geologicznego, aby interpretacja mogła być jednoznaczna.

Wstępne porównanie takich danych laboratoryjnych i akustycznych badań w otworze wiertniczym uzyskano dla piaskowców z warstw inceramowych z otworu wiertniczego Brzegi Dolne, gdzie prowadzone było profilowanie akustyczne przy użyciu aparatury ŁAK przez PGGN — Poznań. Dla piaskowców gruboławicowych z głębokości ≈ 990 m uzyskano wartości V_p w przedziale 3300 m/s—4000 m/s. Wartości te odpowiadają próbkom niespekanym lub słabo spekanym. Te wstępne porównanie wykazuje, że akustyczne badania laboratoryjne i „in situ” są w dużym stopniu porównywalne.

Jednocześnie należy zaznaczyć, że porównując dane dotyczące wartości dynamicznego modułu sprężystości E_d z modułem uzyskanym na drodze badań statycznych (E_{st}) można stwierdzić, że dla piaskowców krosnieńskich wartości $E_d = E_{st}$ w przypadkach, gdy wartości te są wysokie, tj. $> 10^5$ kg/cm². Przy wartościach niższych zauważa się, że moduł dynamiczny E_d jest 1–1,5 rzędu wielkości wyższy od modułu sprężystości uzyskanego na drodze badań statycznych. Należy więc przy analizie i porównywaniu wyników uzyskanych w różny sposób stosować odpowiednią ich interpretację.

WNIOSKI

1. Dla celów wstępnej identyfikacji geotechnicznej skał z dużym powodzeniem dają się wykorzystać metody dynamiczne przy zastosowaniu pomiaru prędkości przechodzenia impulsów o dużej częstotliwości (ultradźwięków) w próbce o znanych wymiarach.

2. Badania ultradźwiękowe pozwalają na wielokrotne powtarzanie badań w sposób szybki oraz na wykorzystanie ograniczonych na ogół rdzeni wiertniczych do innych badań laboratoryjnych.

3. Porównanie wyników dynamicznych badań laboratoryjnych z wynikami badań geofizycznych w terenie pozwala na wyjaśnienie i naświetlenie wielu cech strukturalno-teksturalnych masywu skalnego i ułatwia interpretację geotechniczną. Wpływa to w dalszej kolejności na ułatwienie prawidłowego doboru lokalizacji obiektów już w okresie wstępnego rozpoznania.

4. W analizowanym przypadku piaskowców krosieńskich na drodze doświadczalnej określono zależności pomiędzy parametrami fizycznymi: gęstością objętościową, porowatością i prędkością propagacji fali podłużnej w próbce. Pomiarы pozwoliły również na określenie parametrów sprężystości: modułu sprężystości (E_d) i współczynnika Poissona (ν).

5. Na podstawie przeprowadzonych badań możliwe jest wstępne określenie parametrów geotechnicznych piaskowców w masywie skalnym, gdyż zaobserwowane na małych próbkach prawidłowości odnoszą

się w podobnej proporcji do ośrodka skalnego z wystarczającą dla wstępnego rozpoznania dokładnością.

LITERATURA

1. Filipczyński L., Pawłowski Z., Wehr J. Ultradźwiękowe metody badań materiałów. WNT, Warszawa, 1963.
2. Jureczko J., Konstantynowicz E., Zmij M. — Niektóre własności fizyczne skał złożeń rud miedzi monokliny przedsudeckiej. Pr. nauk. Inst. Gór. P. Wroc., 1974, nr 12.
3. Kołtoński W. — O możliwościach zastosowania fal ultradźwiękowych w geologii i górnictwie. Prz. geol., 1955, nr 7.
4. Pinińska J. — Właściwości akustyczne i mechaniczne piaskowców skorupowych warstw krosieńskich. Tech. Poszuk., 1974, nr 4.
5. Pinińska J., Drescher E. — Laboratoryjne badania akustyczne skał. Ibidem, 1977, nr 2.
6. Szaumian L. — Fiziko-mechaniczskie strojstwa massiwowo-skalnych gornych porod. „Nauka”, Moskwa, 1972.

SUMMARY

The paper deals with the analysis of geotechnical properties of flysch sandstones. The analysis primarily concerned dynamic elasticity modulus and Poisson coefficient obtained in the course of laboratory acoustic surveys. The studies have shown that the volume density, porosity, directions of fractures, Poisson coefficient and dynamic elasticity modulus may be estimated with accuracy sufficient for preliminary recognition of geological-engineering conditions on the basis of measurements of velocity of wave propagation made on samples in the laboratory. The studies are easily repeatable, easy and accurate, do not lead to destruction of core material covered by them, make possible direct observation of rock sample studied and markedly facilitate appropriate geotechnical interpretation of studies carried out in the fields.

The advantages of this method of surveying rock properties include: repeatability.

РЕЗЮМЕ

В статье описан анализ геотехнических свойств флишевых песчаников, а прежде всего динамического модуля упругости и числа Пуассона, полученных на основании лабораторных акустических исследований. Эти исследования были проведены на образцах флишевых песчаников из окрестностей города Санок. Автор приходит к выводу, что для предварительной разведки геолого-инженерных условий можно достаточно точно определить: объёмную плотность, пористость, направления трещин, число Пуассона и динамический модуль упругости — на основании измерений скорости распространения волны на образцах в лаборатории. Эти исследования — благодаря возможности многократного повторения, точности измерений, неразрушающего употребления буровых кернов и возможности непосредственного наблюдения исследуемого образца — облегчают правильную геотехническую интерпретацию исследований проводимых в полевых условиях.