

**PROBLEMY METODYKI BADANIA ZMIAN  
POROWATOŚCI GRUNTÓW I SKAŁ PIASZCZYSTYCH  
PRZY ZASTOSOWANIU FAL SPRĘŻYSTYCH**

UKD 550.834.015.2+550.832.41:624.131.431.2:624.131.212/213+624.131.261+552.513+552.517.4

Dla określenia porowatości skał wykorzystuje się najczęściej w geofizyce stosowanej metody akustyczne i radiometryczne. Wyniki pomiarów wykonywanych w otworach wiertniczych odnoszą się do bezpośredniego otoczenia otworu. Zasięg pomiarowy profilowania otworów tymi metodami wynosi od kilku do kilkudziesięciu centymetrów w płaszczyźnie poziomej. Można zatem powiedzieć, że metody pomiarów porowatości skał geofizyki wiertniczej mają charakter punktowy.

Istnieje jednak często potrzeba oceny porowatości ośrodka geologicznego o znacznie większych rozmiarach. Ma to miejsce przy poszukiwaniach geologicznych, a szczególnie w geofizyce inżynierskiej. Chodzi zatem o takie metody pomiaru, których zasięg penetracji byłby przynajmniej o dwa rzędy większy w stosunku do metod geofizyki wiertniczej i wynosiłby od kilku do kilkudziesięciu metrów. Jedynie metody sejsmiczne czynią zadość tym wymaganiom. Za ich pomocą można uzyskać uśrednioną charakterystykę prędkościową ośrodka na ogół na dowolnych głębokościach i znacznych odległościach. Poniżej przeanalizowano na przykładzie gruntów piaszczystych niektóre zagadnienia metodyczne śledzenia zmian porowatości.

**PODSTAWY TEORETYCZNE**

Podstawą wykorzystania metod sejsmicznych dla śledzenia zmian porowatości skał jest stwierdzona

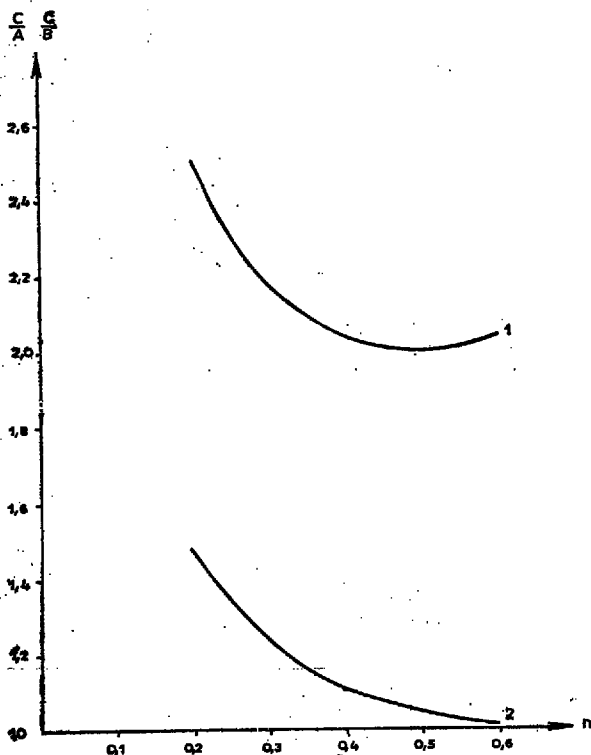
teoretycznie i praktycznie zależność prędkości fal sprężystych od porowatości. Dotyczy to przede wszystkim ośrodków piaszczystych. Najbardziej rozwiniętą i najbliższą rzeczywistości warunkom, istniejącym w takich ośrodkach jest teoria Brandta (2) analizowana również w pracy W. Kołtońskiego (3). Teoria ta, opracowana dla ośrodka złożonego z cząstek kulistych jednakowej wielkości, została dostosowana następnie do ośrodka zbudowanego z ziaren o dowolnym kształcie i wielkościach i wypełnionego substancją gazową lub ciekłą. Końcowe wzory na prędkość fali sprężystej wiążą ze sobą różne parametry charakteryzujące ośrodek i poszczególne jego składowe.

Dla piasków suchych (mało wilgotnych) wzór na prędkość fali podłużnej ma postać:

$$C = \left[ \frac{2g}{3\rho_s n (1-n) \left( \frac{1-\sigma_0}{1+\sigma_0} \right)} \right]^{1/2} P_0^{1/\sigma_0 k-1/3} \quad [1]$$

gdzie:

- C — prędkość fali podłużnej,
- g — przyspieszenie ziemskie,
- $\rho_s$  — gęstość materiału ziaren,
- n — porowatość ośrodka,
- $\sigma_0$  — stała Poissona,
- $P_0$  — ciśnienie zewnętrzne na szkielec,
- k — stała zależna od materiału budującego ziarna ośrodka.



Ryc. 1. Zależność prędkości fal w jednostkach względnych od porowatości dla gruntów piaszczystych suchych (krzywa 1) i zawodnionych (krzywa 2).

Fig. 1. Dependence of velocity of waves on porosity in the case of dry (curve 1) and wet (curve 2) sandy soils in relative units.

Przyjmując w pierwszym przybliżeniu, że stała Poissona nie zależy od porowatości oraz  $P_0$  jest stałe dla danej głębokości wzór [1] przyjmie postać:

$$C = [(n1 - n)]^{1/2} A \quad [2]$$

gdzie:

$$A = \left( \frac{2g}{3 \rho_c} \frac{1 - \sigma_c}{1 + \sigma_c} \right)^{1/2} p^{1/6} k^{-1/3} \text{ jest stałe}$$

Dla piasków zawodnionych Brandt otrzymał wyrażenie:

$$C = \frac{1,1 (P_0 - P_c)^{1/6}}{n^{1/2} [\rho_c - n (\rho_c - \rho_c)]^{1/2} k^{1/3}} \times \frac{[1 + 17,5 B_c^{3/2} k (P_0 - P_c)^{1/2}]^{5/6}}{[1 + 26,3 B_c^{3/2} k (P_0 - P_c)^{-1/2}]^{1/2}} \quad [3]$$

gdzie:

$P_c$  — ciśnienie na ciecz,  
 $B_c$  — moduł ściśliwości objętościowej cieczy,  
 $\rho_c$  — gęstość cieczy.

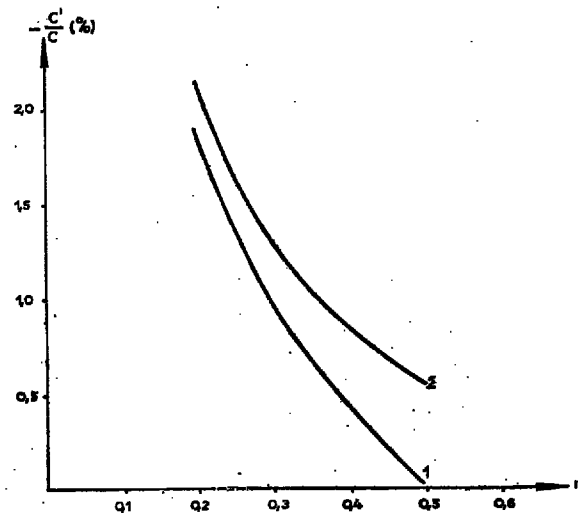
Przyjmując jak poprzednio wszystkie parametry równania [3], z wyjątkiem porowatości  $n$ , za stałe można wyrażenie [3] napisać w postaci:

$$C = n (\rho_c - \rho_c n + n \rho_c)^{-1/2} B \quad [4]$$

gdzie:

$$B = \frac{1,1 (P_0 - P_c)^{1/6} [1 + 17,5 B_c^{3/2} k (P_0 - P_c)^{-1/2}]^{5/6}}{k^{1/3} [1 + 26,3 B_c^{3/2} k (P_0 - P_c)^{-1/2}]^{1/2}}$$

jest wartością stałą dla danej głębokości.



Ryc. 2. Zmiana prędkości fal w (%) przypadająca na zmianę porowatości o 1% w zależności od porowatości dla gruntów piaszczystych suchych (krzywa 1) i zawodnionych (krzywa 2).

Fig. 2. Change in velocity of waves (in percents) corresponding to 1-percent change of porosity in dependence on porosity of dry (curve 1) and wet (curve 2) sandy soils.

Na ryc. 1 podano przebieg zależności prędkości, wyrażonej w jednostkach względnych A i B, od porowatości. Dla piasków suchych (krzywa 1) obserwuje się wyraźny wzrost prędkości dopiero przy porowatościach mniejszych niż 40%. Dla gruntów piaszczystych luźnych o porowatościach większych niż 40% zmiany prędkości są już nieuchwytnie. Dla piasków zawodnionych (krzywa 2) zmienność prędkości z porowatością jest nieco większa i nawet w przedziale porowatości 0,4—0,6 jest wyraźna.

Dla ilościowej oceny tych zmian obliczono pochodne prędkości (wyrażenia 2 i 4) w funkcji porowatości, a następnie przedstawiono je w formie ilorazu pochodnej prędkości do prędkości:

$$\frac{C'}{C} = - \frac{0,5 (1 - 2n)}{n (1 - n)} \quad [5]$$

dla gruntów piaszczystych suchych i

$$\frac{C'}{C} = - \frac{-0,5 (\rho_c - 2n \rho_c + 2n \rho_c)}{n (\rho_c - n \rho_c + n \rho_c)} \quad [6]$$

dla gruntów piaszczystych zawodnionych.

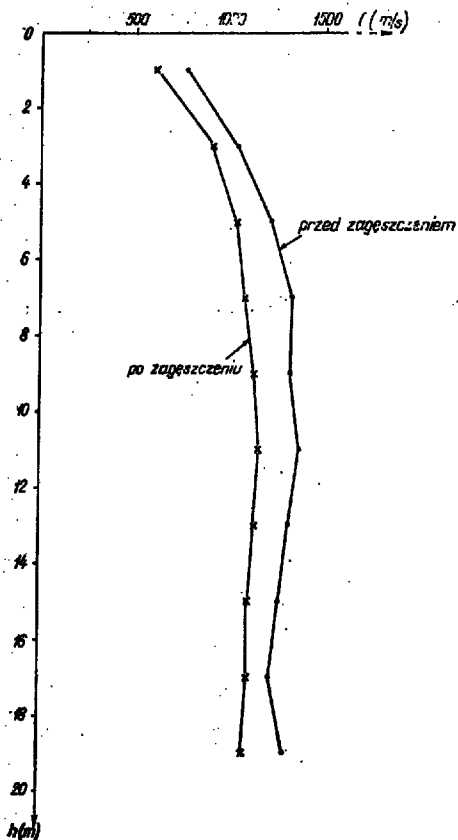
Po podstawieniu  $\rho_c = 2,65 \text{ G/cm}^3$  i  $\rho_0 = 1 \text{ G/cm}^3$  wyrażenie [6] przyjmie postać:

$$\frac{C'}{C} = - \frac{1,325 - 1,65 n}{n (2,65 - 1,65 n)} \quad [6']$$

Iloraz pochodnej prędkości do prędkości wyraża zmianę prędkości w procentach przypadającą na zmianę porowatości o 1% w funkcji porowatości. A zatem równania [5] i [6'] określają w analitycznej formie czułość metody sejsmicznej na śledzenie zmian porowatości gruntów piaszczystych. Wyprowadzono je na podstawie teorii Brandta.

Krzywe na ryc. 2 są graficznym przedstawieniem równań [5] i [6']. Dla piasków suchych czułość metody wynosi 0,4% przy porowatości 0,4 i 1,0% przy porowatości 0,3. Nieco większą czułość wykazuje metoda w piaskach zawodnionych; odpowiednie wartości wynoszą tu 0,8% i 1,3%.

Powyzsza analiza dotyczy gruntów piaszczystych suchych i zawodnionych, a więc dwóch skrajnych wy-



Ryc. 3. Zmiana prędkości z głębokością na polu doświadczalnym w Kozienicach.

Fig. 3. Change in velocity along depth established for test field at Kozienice.

padków. Dla gruntów o nasyceniu spełniającym warunek  $0 < S < 1$ , gdzie  $S$  — stopień nasycenia, właściwie brak jest zarówno opracowań teoretycznych, jak i danych eksperymentalnych. W badaniach laboratoryjnych próbek piaskowca stwierdzono (6), że prędkość fal sprężystych o częstotliwości ultradźwiękowej nie zależy od stopnia nasycenia przy zerowym ciśnieniu zewnętrznym, natomiast przy znacznym ciśnieniu zewnętrznym następuje wzrost prędkości przy wzrastającym nasyceniu. Jest to jednak wzrost niewielki, szczególnie że chodzi tu o warstwy przypowierzchniowe, gdzie panują niewielkie ciśnienia.

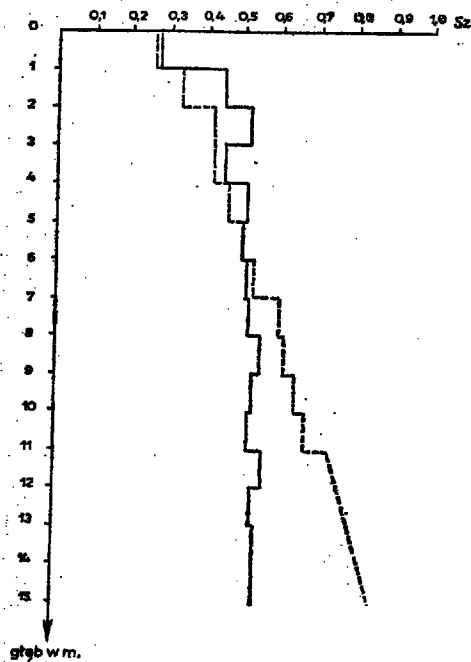
Przy analizie równania [1] założono, iż współczynnik Poissona nie zależy od porowatości. W rzeczywistości jak wykazały badania (5, 6) ze wzrostem porowatości skał suchych następuje spadek współczynnika Poissona. Dla skał zawodnionych istnieje przeciwna zależność, są to jednak zmiany niewielkie i zależne od wartości współczynnika materiału, z którego zbudowany jest szkielet.

Przedstawiona powyżej analiza równań [1] i [3] odnosi się do gruntów piaszczystych, jest ona również ważna dla skał okruchowych typu piaskowca, ponieważ w równaniu [3] wyrażenie  $P_0 - P_c$  zastępuje się tylko wyrażeniem  $P_0 - mP_c$ , gdzie  $m$  — wskaźnik cementacji.

#### NIEKTÓRE ZAGADNIENIA METODYKI POMIARÓW

W geofizyce inżynierskiej istnieje potrzeba śledzenia zmian porowatości przy zagęszczaniu gruntów piaszczystych metodą pirotechniczną (wybuchów) i metodą uderów o dużej energii. Kontrola stanu zagęszczenia w tych warunkach wymaga prędkościowej charakterystyki ośrodka, którego wymiary są porównywalne z obrysem fundamentu danego obiektu budowlanego.

Dla pomiarów prędkości rozchodzenia się fal podłużnych stosuje się aparaturę sejsmiczną zwykle



Ryc. 4. Wykresy średnich wartości stopnia zagęszczenia (na podstawie badań „GEOPROJEKTU”).

— Sz — przed zagęszczeniem (tło), --- Sz — po zagęszczeniu.

Fig. 4. Mean values of degree of compaction (on the basis of „Geoprojekt” data).

— Sz — before compaction (background), --- Sz — after compaction.

wielokanałową. Przy kontroli stanu zagęszczenia gruntów pod projektowane obiekty budowlane wielkość obszaru badań oraz interesujący zakres głębokości na ogół ogranicza się do kilkadziesiątu metrów. Istnieje zatem potrzeba wykonywania pomiarów na odległościach od kilku do kilkadziesiątu metrów. To narzuca odpowiednie wymagania tak w stosunku do aparatury, jak i stosowanej metodyki. Przeważnie stosowane są dwie metody pomiarów: — prześwietlanie sejsmiczne i mikrosejsmocarotaż.

Prześwietlanie sejsmiczne polega na pomiarze czasu przebiegu fal bezpośrednich przechodzących przez grunt między punktami wzbudzenia i odbioru. Najczęściej są to dwa otwory, z których jeden służy do wzbudzenia fal, drugi do ich rejestracji. Mogą to być również dwie przeciwne strony nasypu, gdzie wzbudzenie i odbiór fal odbywa się na powierzchni ziemi (1). Odległość między punktami wzbudzenia i odbioru zależy od zadania, jakie stoi przed badaniami, mianowicie jak dokładną charakterystykę prędkościową należy uzyskać. I tak, jeśli chcemy otrzymać informację o przewarstwieniach rzędu 1 m odległość ta nie może przekraczać 3—5 m (4). Im większa odległość tym mniejsza jest zdolność rozdzielcza metody. Badanie na odległościach rzędu 10 m wymaga od aparatury odpowiednio wysokiej dokładności pomiaru czasu. Dla piasków suchych (mało wilgotnych), gdzie można przyjąć prędkość fal równą 500 m/s pomiar prędkości z dokładnością 2% przy bezbłędnym pomiarze odległości wymaga pomiaru czasu z dokładnością  $\pm 0,4$  ms. Dla piasków zawodnionych przy prędkościach rzędu 1500 m/s dokładność ta nie może być mniejsza niż 0,1 ms. Osiągnięcie takiej dokładności wymaga użycia specjalnej aparatury wysokoczęstotliwościowej.

Mikrosejsmocarotaż polega na pomiarze czasu przebiegu fal w gruncie wzdłuż osi otworu. Punkt wzbudzenia znajduje się na powierzchni ziemi w pobliżu otworu, a odbiór fal odbywa się w otworze na różnych jego głębokościach, może być również od-

wrotnie. Odnosnie do dokladnosci aparatury sa te same wymagania co i w metodzie przeswietlania.

Zeby odpowiedziec na pytanie — z jaka dokladnoscia nalezy wykonywac pomiary predkosci trzeba znac wielkosc zmian porowatosci, ktore sa przedmiotem pomiarow. Przy zagęszczaniu gruntow piaszczystych chodzi zwykle o zmianę stanu zagęszczenia z luznego lub srednio zagęszczonego do zagęszczonego. Jak wykazują laboratoryjne pomiary stopnia zagęszczenia, w pierwszym przypadku zmiana porowatosci zawiera się w granicach 8—12%, a w drugim w granicach 4—7%. Sa to dane orientacyjne i zaleza od szeregu parametrów fizycznych osrodka. Procesy te zachodzą najczesciej w zakresie 40 — 30% porowatosci.

Przyjmując więc, że zadaniem jest pomiar 5% zmiany porowatosci w zakresie 40—30% latwo wyznaczyc na podstawie ryc. 2, że będzie to odpowiadalo zmianom predkosci fal spręzystych jak ponizej:

przedzial zmiany porowatosci	grunt	zmiana predkosci w %
40—35%	suchy	2,8
	zawodniony	4,6
35—30%	suchy	4,0
	zawodniony	5,7

Z powyższego wynika, że dokladnosć pomiaru predkosci nie moze być mniejsza niz 2%, a to stawa odpowiednio wymagania w stosunku do stosowanej aparatury, co omowiono juz powyzej.

#### POMIARY NA POLU DOSWIADCZALNYM W KOZIENICACH

Pierwsze prace doswiadczone metodą sejsmiczną dla kontroli stanu zagęszczenia gruntow piaszczystych wykonalo Przedsiębiorstwo Poszukiwań Geofizycznych na terenie elektrowni w Kozienicach. Pracom tym towarzyszyły jednocześnie pomiary geotechniczne, których wykonawcą był „Geoprojekt”. Pomiary sejsmiczne prowadzono zarówno metodą przeswietlania, jak i mikrosejsmocarotazu przy użyciu aparatury sejsmicznej adaptowanej do badania strefy malych predkosci. Proces zagęszczenia wywołano używając materiały wybuchowe, których detonacje odbywały się na głębokości 7 m od powierzchni w odpowiednio rozmieszczonych otworach wiertniczych. Pomiary sejsmiczne i geotechniczne wykonywano dwukrotnie w tych samych warunkach, przed zagęszczaniem i po zagęszczaniu.

Uśrednione wyniki pomiarów dla całego pola doswiadczonego podano na ryc. 3 i 4. Jak wynika z ryc. 4, na której nakreślono wyniki sondowania dynamicznego, powyżej głębokości wybuchów (7 m) nastapilo rozluźnienie, ponizej zagęszczenie gruntow. Jak głęboko siega strefa zagęszczenia trudno powiedziec, poniewaz sondowania dynamiczne zakonczyły

#### SUMMARY

The paper presents the result of analysis of changes in velocity of longitudinal elastic waves in dependence on porosity. The analysis was based on the equation following from H. Brandt's theory, relevant for sandy rocks. The analysis made it possible to precise some requirements which should be fulfilled by seismic hardware used for measuring changes in porosity of sandy-gravel medium resulting from compaction. Moreover, possible reasons of failure of first experimental works carried out at Kozienice are discussed.

się niestety na głębokości 13 m. Nie wchodząc w mechanizm procesu zagęszczenia metodą pirotechniczną należy stwierdzić, że pomiary predkosci fal spręzystych nie odzwierciedlają stanu wskazanego na ryc. 4. Wykonane do głębokości 20 m pomiary wskazują na rozluźnienie gruntu. Jednocześnie wartości tych predkosci zawierają się w przedziale 1000 — 1400 m/s, co nie jest charakterystyczne dla zawodnionych gruntow piaszczystych, jakie występowały na całym profilu głębokościowym w miejscu badań. Wydaje się, że przyczyn otrzymania takich wyników należy szukać w aparaturze. Użyta aparatura posiadała dokladnosć pomiaru czasu  $\pm 1$  ms, co w piaskach zawodnionych pociaga za sobą pomiar predkosci na bazie 10 m z błędem  $\pm 15\%$ . Ponadto należy podejrzewać niestabilność pracy aparatury.

#### WNIOSKI

1. Przeprowadzona w pracy analiza wskazuje na przydatnosć stosowania metod sejsmicznych (przeswietlania i mikrosejsmocarotaz) w sledzeniu zmian porowatosci gruntow piaszczystych.

2. Do tego celu niezbędne jest użycie bardzo dokladnej aparatury z możliwością pomiaru czasu przebiegu fal z dokladnoscią  $\pm 0,1$  ms.

3. Konieczna jest stała kontrola stabilności pracy aparatury, najlepiej przez pomiary w „standaryzatorze”, w formie np. dwu otworów w osrodku piaszczystym zawodnionym o ustalonej wzajemnej odleglosci.

#### LITERATURA

- Adamczyk J. — Zastosowanie fal akustycznych do określania wskaźnika zagęszczenia. Praca doktorska. Arch. Wydz. Inż. Ładowej Polit. Warsz., 1974.
- Brandt H. — A study of the speed of sound in porous — granular media. J. Appl. Mech., 1955, nr 4.
- Koźtoński W. — Badania niektórych własności strukturalnych górotworu metodą akustyczną. Rozpr. Inż. 1965, nr 1.
- McCann D. M., McCann C., Grainger P. — Inter borehole acoustic measurements and their use in engineering geology. Proceed. 35 Meeting of the EAEG at Brighton, 1973.
- Mackenzie J. K. — The elastic constants of a solid containing spherical holes. Proc. Phys. Soc. 1950, no. 2.
- Wyllie M. R. F., Gregory A. R., Gardner L. W. — Elastic waves velocities. Geoph. 1956, no. 1.
- Sato J. — Velocity of elastic waves propagated in media with small holes. Bull. of Earthquake Research Inst. 1952, v. 30, part. 3.

#### РЕЗЮМЕ

В работе представлен анализ изменений скоростей продольных упругих волн в зависимости от пористости. В основу анализа положены уравнения, вытекающие из теории Х. Брандта, в отношении песчаных пород. На основании анализа составлены требования относительно сейсмической аппаратуры, применяющейся для определений пористости песчано-гравелитовой среды в зависимости от уплотнения. Описаны также предполагаемые причины отрицательных результатов первых опытных работ в районе Козенице.