

## LABORATORYJNE OZNACZENIE PRĘDKOŚCI FALI PODŁUŻNEJ I POPRZECZNEJ W GRUNCIE

Wojciech SAS<sup>a</sup>, Katarzyna GABRYŚ<sup>b\*</sup>, Alojzy SZYMAŃSKI<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Laboratorium Centrum Wodne Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, ul. Ciszewskiego 6, 02-776 Warszawa

<sup>b</sup> Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Katedra Geoinżynierii, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa

**Streszczenie:** W artykule przybliżono teoretyczne podstawy propagacji fali w ośrodku sprężystym i zaprezentowano wybrane metody pomiaru prędkości fali sejsmicznej w warunkach laboratoryjnych. Omówiono badania w aparacie trójosiowego ściskania wyposażonym w specjalne piezoelementy. Przedstawiono pokrótce metodykę badań w kolumnie rezonansowej znajdującej się wraz z przykładowymi wynikami właściwości sprężystych gruntów. Jako materiał badawczy wykorzystano naturalny grunt spoisty pochodzący z rejonu powstającej trasy ekspresowej S2, pobrany z odcinka „Konotopa-Lotnisko” (okolice km 464). Zaprezentowano wyznaczone prędkości fali podłużnej oraz poprzecznej uzyskane na podstawie teorii falowej.

*Słowa kluczowe:* fale sejsmiczne w gruncie, badania laboratoryjne, kolumna rezonansowa.

### 1. Wprowadzenie

Problemy geotechniczne, które mogą pojawiać się na skutek użytkowych obciążeń gruntu przez różne obiekty inżynierskie, wymagają ustalenia sprężystych odkształceń podłoża gruntowego, również w zakresie tak zwanych małych odkształceń (Bajda, 2009). Przyjmuje się, że zakres małych odkształceń odpowiada właśnie sprężystej reakcji gruntu na zadane obciążenie zewnętrzne.

Izolacja sprężystej reakcji ośrodka gruntowego na podstawie eksperymentów wykonanych w laboratorium nie jest prosta, gdyż po obciążeniu materiału badawczego pojawiają się zarówno deformacje odwracalne, jak i nieodwracalne. Obydwa typy odkształceń rozwijają się od samego początku, nawet gdy przyłożymy niewielkie obciążenia, tym samym bardzo rzadko można otrzymać czysto sprężystą charakterystykę naprężenie-odkształcenie. Ponadto, w porównaniu z wartością odkształceń plastycznych odpowiedź sprężysta jest stosunkowo niewielka. W ostatnich dwóch dekadach położono szczególny nacisk na dokładne pomiary charakterystyki naprężenie-odkształcenie w zakresie odkształceń  $10^{-4}$  i mniejszych. Zaowocowało to dynamicznym rozwojem różnych technik i urządzeń badawczych służących pomiarom deformacji gruntów w warunkach laboratoryjnych. Odnosi się to w szczególności do czujników mierzących lokalnie przemieszczenia,

obecnie znajdujących powszechne zastosowanie niemal we wszystkich laboratoriach geotechnicznych znaczących światowych ośrodków naukowych. Obok mnogości różnych metod bezpośrednich definiowania reakcji sprężystej ośrodka gruntowego, rozwijają się także techniki pośrednie, czyli nieinwazyjne, oparte o pomiar prędkości propagacji fal sejsmicznych (Świdziński i Mierczyński, 2010).

Główną zaletą badań sejsmicznych, która decyduje o ich wciąż rosnącej popularności, jest możliwość wyznaczenia parametrów odnoszących się do sprężystych właściwości ośrodka. Ta funkcja pomiarów sejsmicznych wynika z opisu propagacji powstałych w gruncie wibracji, w oparciu o teorię ruchu falowego dla liniowo-sprężystego ośrodka. Fale sejsmiczne rozchodzące się w ośrodku gruntowym wywołują bardzo małe deformacje, rzędu  $10^{-5}$  oraz mniejsze.

W ośrodku o cechach sprężystych rozchodzenie się fal jest spowodowane mechanicznym zaburzeniem fragmentu tego ośrodka. Jeśli wychylimy jakiś fragment ośrodka sprężystego z jego położenia równowagi to w następstwie będzie on wykonywał drgania wokół tego położenia. Wibracje te, dzięki właściwościom sprężystym ośrodka, są przekazywane na kolejne jego części, które również zaczynają drgać. W ten oto sposób zaburzenie przechodzi przez cały ośrodek. Zakłada się, że oszacowane cechy ośrodka na podstawie prędkości przepływu przez niego

\* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: katarzyna\_gabrys@o2.pl

fali reprezentują jego właściwości sprężyste (Dyvik i Madshus, 1985).

Artykuł ma na celu krótki opis oraz przybliżenie czytelnikowi metod pomiaru prędkości fali sejsmicznej w warunkach laboratoryjnych, ze szczególnym naciskiem na kolumnę rezonansową, mało znane dotąd w Polsce urządzenie do badań laboratoryjnych właściwości dynamicznych gruntów. Praca zawiera również omówione pokrótce teoretyczne podstawy propagacji fali w ośrodku sprężystym wraz z przykładowymi wartościami prędkości fali, jakie wyznaczono na podstawie badań. Otrzymane prędkości pozwoliły w dalszej kolejności na obliczenie parametrów sprężystych gruntów na podstawie wzorów teorii sprężystości.

## 2. Podstawy teoretyczne propagacji fali w ośrodku sprężystym

Fale powstające w ośrodkach sprężystych nazywane są falami mechanicznymi. Energią fal jest energia kinetyczna oraz potencjalna cząsteczek ośrodka. Fale mogą służyć do przekazywania energii na duże odległości, przy czym charakterystyczne dla fal jest to, iż przenoszą one energię poprzez sam ośrodek, za pomocą przemieszczania się zaburzenia w ośrodku, nie zaś dzięki ruchowi postępowemu samego ośrodka. Tym samym, do rozchodzenia się fal mechanicznych niezbędne jest medium. To właśnie sprężystość ośrodka ma wpływ na prędkość propagacji w nim fal.

Ze względu na kierunek drgań elementów ośrodka względem kierunku ruchu fali, fale dzieli się na podłużne oraz poprzeczne. Z falą podłużną mamy do czynienia, gdy kierunek wibracji cząstek ośrodka będzie równoległy do kierunku rozchodzenia się fali oraz jednocześnie kierunku transportu energii. Przykładem tego rodzaju fal są na przykład fale dźwiękowe w powietrzu, bądź drgania naprzemiennie rozciąganej i ściskanej sprężyny. Fala jest poprzeczna, gdy elementy medium drgają prostopadle do kierunku rozchodzenia się fali (transportu energii). Drgania naprężonego sznura, cyklicznie poruszanego w górę i w dół za jeden koniec, są przykładem fali poprzecznej (Słownik fizyczny, 1984).

Fale podłużne P (inaczej fale ciśnieniowe albo objętościowe) powiązane są z czasowymi zmianami gęstości ośrodka i mogą rozprzestrzeniać się we wszystkich ośrodkach, które charakteryzuje sprężystość objętości, to jest w ciałach stałych, ciekłych oraz gazowych. Okresowa zmiana gęstości jest spowodowana odkształceniem objętości i zależy od modułu ściśliwości ośrodka. Fala podłużna bardzo dobrze propaguje przez wodę, stąd jej prędkość uzależniona jest od wypełnienia porów gruntowych wodą. W przypadku gruntów całkowicie nasyconych wodą prędkość fali podłużnej osiąga wartości zbliżone do tych otrzymywanych przy przepływie przez wodę. Prawdziwe wydaje się zatem stwierdzenie, iż sam szkielet gruntowy nie ma większego wpływu na prędkość rozchodzenia się fali podłużnej. Propagacja tej fali w ośrodku nienasyconym jest znacznie słabsza.

Fale poprzeczne S (zwane też falami ścinającymi) natomiast powodują deformacje kształtu ośrodka nie wpływając na jego objętość. Rozprzestrzeniają się jedynie w materiałach, które cechuje sprężystość postaci, zależna od modułu sztywności. Podczas rozchodzenia się tego rodzaju fali ośrodek ulega odkształceniu postaciowemu. Z odkształceniem postaciowym mamy do czynienia tylko w ciałach stałych o module sprężystości poprzecznej różnym od zera. Wyjątkiem od tej reguły jest propagacja fali poprzecznej na powierzchni cieczy. Ciecz nie posiada sprężystości postaci, jednakże jej powierzchnia swobodna, pod działaniem siły grawitacyjnej oraz napięcia powierzchniowego wykazuje właściwości zbliżone do sprężystości postaci (Gabryś, 2013).

Z powodu różnych mechanizmów wytwarzania parametry fal typu P i S znacznie się od siebie różnią. Fale ścinające rozchodzą się z dużo mniejszą prędkością niż fale ciśnieniowe (około 1,7 razy wolniej). W tabeli 1 zestawiono typowe wartości prędkości fali poprzecznej oraz podłużnej przechodzącej przez różne rodzaje gruntów i skał.

Tab. 1. Typowe wartości VS i VP (Das i Ramana, 2011).

Rodzaj gruntu	Prędkość fali poprzecznej	Prędkość fali podłużnej
	$V_S$	$V_P$
	[m/s]	[m/s]
Piasek drobny	90 - 150	300
Piasek zagęszczony	230	460
Żwir	180 - 215	762
Gлина wilgotna	150	1220 - 1370
Granit	2130 - 3350	3960 - 5490
Piaskowiec	610 - 2130	1370 - 3960

Fale sprężyste można także sklasyfikować biorąc pod uwagę kierunek rozchodzenia się ich w przestrzeni. Wyróżniamy wówczas:

- fale liniowe rozchodzące się wzdłuż jednego kierunku,
- fale powierzchniowe rozchodzące się po powierzchni,
- fale przestrzenne, które rozchodzą się w przestrzeni.

Prędkość rozprzestrzeniania się fal w ośrodku gruntowym może zależeć od jego składu mineralnego, gęstości i porowatości, głębokości zalegania oraz stanu nasylenia wodą. Wraz ze wzrostem przebytej przez falę drogi maleje jej amplituda, co wynika bezpośrednio ze strat energii pochłanianej na: powiększanie się czoła fali, rozpraszanie i pokonanie tarcia wewnętrznego. Stąd, dla różnych rodzajów gruntów oraz skał występują różne współczynniki tłumienia fali sejsmicznej. Dany ośrodek, charakteryzujący się określoną budową geologiczną, część drgań budujących falę sprężystą przenosi dalej, a drugą część tłumi. Zjawisko tłumienia sprzyja niejednorodności ośrodka. Silniej tłumione są fale o wysokiej częstotliwości niż te o niższej; słabiej tłumione są fale podłużne w porównaniu z falami poprzecznymi czy powierzchniowymi.

Prędkości fal poprzecznej oraz podłużnej można wykorzystać do zapisania zależności teorii sprężystości (ASTM–D4015-92, 2003). Zgodnie z tym, początkowe moduły sprężystości, które w zakresie małych odkształceń są nie tylko stałe, lecz również największe, wynoszą:

$$G_0 = \rho \cdot V_S^2 \quad (1)$$

$$E_0 = 2 \cdot \rho \cdot V_S^2 (1 + \nu) \quad (2)$$

$$K_0 = \rho \cdot \left( V_P^2 - \frac{4}{3} V_S^2 \right) \quad (3)$$

$$\nu = \frac{0,5 \left( \frac{V_P}{V_S} \right)^2 - 1}{\left( \frac{V_P}{V_S} \right)^2 - 1} \quad (4)$$

gdzie:  $\rho$  jest gęstością objętościową gruntu,  $V_S$  jest prędkością fali poprzecznej,  $V_P$  jest prędkością fali podłużnej, natomiast  $\nu$  współczynnikiem Poissona.

Wyznaczone w ten sposób moduły, ze względu na niewielkie odkształcenia gruntu wywołane przepuszczaną falą, traktowane są jako początkowe, sprężyste parametry gruntu (Gabryś i Szymański, 2012).

### 3. Metody pomiaru prędkości fali sejsmicznej w warunkach laboratoryjnych

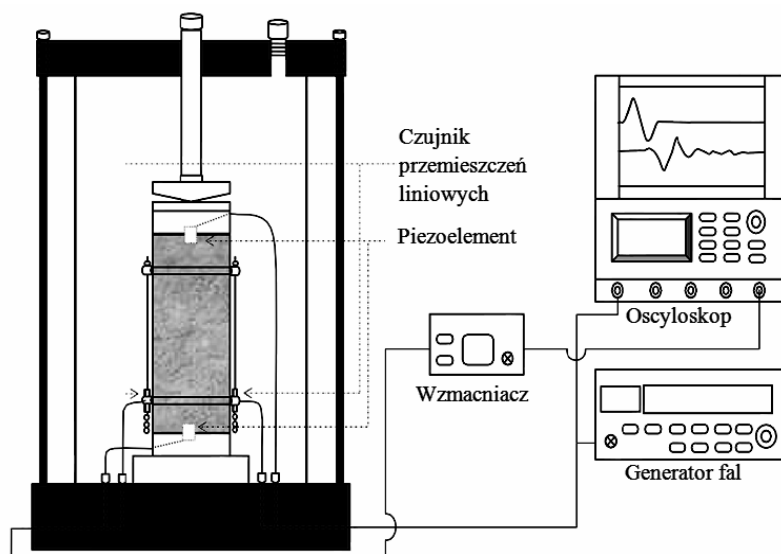
W warunkach laboratoryjnych konwencjonalną i często stosowaną techniką pomiaru prędkości fal sprężystych jest użycie piezoelementów (ang. *bender element*), ze względu na łatwość i dużą wiarygodność tego badania. *Bender element* jest dynamiczną, nieniszczącą metodą oszacowania sztywności gruntu w zakresie małych odkształceń. W roku 1978 Shirley i Hampton po raz pierwszy zastosowali piezoelementy w badaniu prędkości

fali poprzecznej propagującej przez próbkę kaolinitu. W krótkim czasie piezoelementy zyskały na popularności, a ich wynalezienie i wykorzystanie w eksperymentach zostały uznane za znaczące osiągnięcia w rozwoju geotechnicznych badań laboratoryjnych.

Rysunek 1 przedstawia schemat typowego systemu z piezoelementami zainstalowanego w aparacie trójosiowego ściskania. Zasadniczo układ pomiarowy składa się dwóch piezoelementów, to jest modułów ceramicznych o konstrukcji opierającej się o zjawisko piezoelektryczności. Każdy element zbudowany jest z dwóch cienkich sklejonych ceramicznych płytek niewielkich rozmiarów. Jeden z piezoelementów jest odpowiedzialny za wytwarzanie impulsu fali, drugi zaś za jego odbiór, stąd zazwyczaj są one umiejscowione naprzeciwko siebie, w podstawie oraz korku zamykającym próbkę od góry (rys. 1). Cechą charakterystyczną piezoelementów jest możliwość deformacji na skutek przyłożonego napięcia, z równoczesnym generowaniem impulsu w postaci fali, bądź też możliwość odkształcenia w wyniku odebrania fali wraz z wywołaniem napięcia elektrycznego. Fala poprzeczna  $V_S$  przemieszcza się przez całą próbkę powodując wibracje w odbiorniku, a czas jej przejścia od nadajnika do odbiornika jest rejestrowany przy pomocy oscyloskopu. Dzięki temu, iż generator wysyła sygnał jednocześnie do piezoelementu oraz bezpośrednio do oscyloskopu, można w sposób dokładny oszacować opóźnienie dojścia sygnału do odbiornika  $t_S$ . Tym samym, prędkość tej fali  $V_S$  jest liczona zgodnie z formułą:

$$V_S = \frac{L_{tt}}{t_S} \quad (5)$$

gdzie  $L_{tt}$  jest długością drogi przejścia fali przez próbkę, czyli odległością między końcami piezoelementów, które penetrują w głąb próbki (Viggiani i Atkinson, 1995; Świdziński i Mierczyński, 2010).



Rys. 1 Schemat aparatury do pomiaru prędkości fal sejsmicznych (opracowanie autorów na podstawie Ibrahim i in., 2011)

Maksymalne odkształcenie postaciowe otrzymywane z testów przy użyciu *Bender element* przyjmuje wartości mniejsze niż  $10^{-5}$  (0,001%), dlatego też moduł odkształcenia postaciowego  $G$  wyznaczony techniką piezoelementów odnosi się do zakresu małych odkształceń. Wówczas największą jego wartość  $G_0$  można obliczyć (Ibrahim i in., 2011) korzystając z równania (1).

Alternatywnym urządzeniem, dzięki któremu możliwe jest określenie prędkości fali sejsmicznej w warunkach laboratoryjnych jest kolumna rezonansowa (rys. 2). Ogólna zasada działania tej aparatury polega na wprowadzeniu w drgania jednorodnej, cylindrycznej próbki gruntu, umiejscowionej w trójosiowej komorze. Na podstawie uzyskanej częstotliwości rezonansowej badanego materiału  $f_n$ , można wyznaczyć prędkość przepuszczanych przez niego fal. Próbkę gruntu, przy stałym bocznym naprężeniu, wprowadzają w drgania pionowe (podłużne) bądź rotacyjne (skrętne), dając tym samym odpowiednio prędkości: VP i VS. Kolumna rezonansowa została po raz pierwszy zastosowana do analizy dynamiki gruntów z Japonii przez Ishimoto i Iida w 1937 roku. Od tego czasu jest powszechnie używana w wielu krajach na całym świecie, z kilkoma modyfikacjami, przy różnych sposobach ograniczenia próbki gruntu. Dokładniejszy opis metodyki pomiarów w kolumnie rezonansowej, jak również przedstawienie urządzenia wykorzystywanego przez autorów artykułu w badaniach własnych jest dostępny w pracach (Sas i in., 2012a; Gabryś i in., 2013).

Opierając się na teorii propagacji fali przez próbkę gruntu umieszczoną w kolumnie rezonansowej, przy założeniu, że kolumna ta jest w konfiguracji *fixed-free*, można zapisać następującą zależność na obliczenie prędkości rozchodzenia się fali poprzecznej  $V_S$  w gruncie:

$$V_S = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot H}{\beta} \quad (6)$$

gdzie:  $f_n$  oznacza naturalną częstotliwością wibrującego systemu podaną w Hz,  $H$  jest wysokością lub długością badanej próbki gruntu, a  $\beta$  jest współczynnikiem oszacowanym na podstawie funkcji:

$$\frac{I}{I_0} = \beta \cdot \tan \beta \quad (7)$$

gdzie:  $I$  jest polarnym momentem bezwładności próbki,  $I_0$  jest polarnym momentem bezwładności kolumny rezonansowej. Parametr  $I$ , biorąc pod uwagę kształt próbki w cylindrze, oblicza się w następujący sposób:

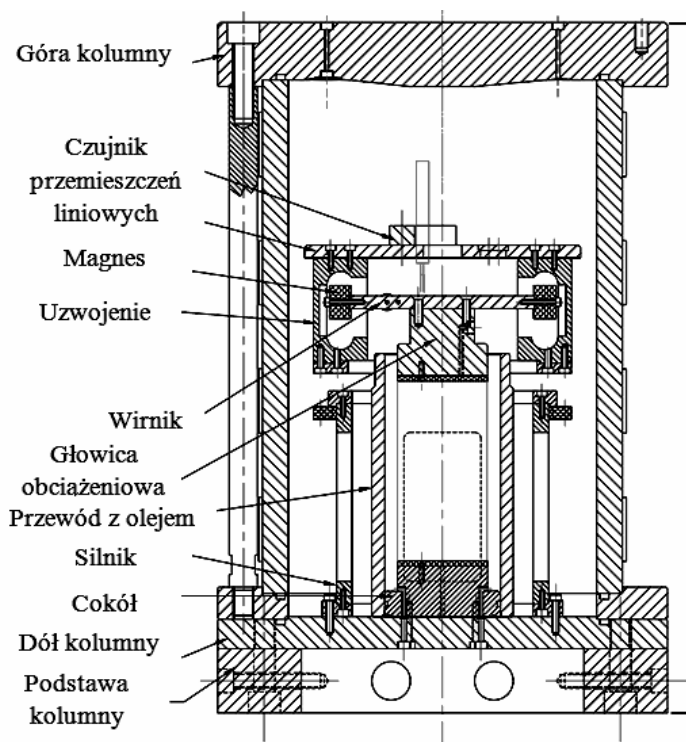
$$I = \frac{md^2}{8} \quad (8)$$

gdzie:  $m$  jest masą gruntu, a  $d$  jest średnicą badanej próbki.

Polarny moment bezwładności układu napędowego kolumny  $I_0$  jest sumą momentów bezwładności wszystkich jego komponentów i szacuje się go na podstawie równania:

$$I_0 = \sum_{i=1}^n I_i \quad (9)$$

gdzie:  $i$  jest numerem kolejnego komponentu,  $n$  jest liczbą wszystkich komponentów, a  $I_i$  jest polarnym momentem bezwładności  $i$ -tego komponentu połączonego do górnego końca próbki.



Rys. 2 Schemat kolumny rezonansowej wykorzystanej w badaniach własnych (Gabryś i in., 2013).

Faktycznie bardzo trudno jest obliczyć polarny moment bezwładności kolumny rezonansowej korzystając z równania (9) z powodu nieregularnych form i różnych wymiarów części składowych jej układu napędowego. Stąd też, wartość  $I_0$  uzyskuje się najczęściej z testów kalibracyjnych na próbce o znanych właściwościach. Ostatnim poszukiwanym parametrem jest naturalna częstotliwość wibrującego systemu  $f_n$ . W praktyce, naturalną częstotliwość można zastąpić częstotliwością rezonansową  $f_r$ , pozyskiwaną z testów rezonansowych. W teorii, zastąpienie  $f_n$  przez  $f_r$  w równaniu (6) jest dokładne i właściwe pod warunkiem, że brak jest tłumienia w materiale testowym.

Prędkość fali podłużnej  $V_P$  propagowanej przez próbkę gruntu można wyznaczyć posługując się formułą:

$$V_P = V_{rod} \cdot \sqrt{\frac{1-\nu}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)}} \quad (10)$$

gdzie:  $V_{rod}$  jest prędkością fali podłużnej w ograniczonym medium, a  $\nu$  jest współczynnikiem Poissona. Wielkości te można obliczyć z zależności:

$$V_{rod} = \sqrt{\frac{E_{flex}}{\rho}} \quad (11)$$

$$\nu = \frac{1}{2} \cdot \frac{V_{rod}^2}{V_S^2} - 1 \quad (12)$$

gdzie:  $E_{flex}$  jest parametrem wyznaczonym na podstawie kalibracji urządzenia, a  $\rho$  jest gęstością objętościową badanego materiału (GDS, 2010).

#### 4. Wyniki doświadczeń

Badania prędkości fali sejsmicznej przeprowadzono na gruntach pochodzących z terenu Warszawy, to jest z rejonu budowanej trasy ekspresowej S2, między dwoma jej węzłami „Konotopa” i „Lotnisko” (okolice km 464).

Badania wykonano w Centrum Wodnym Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska SGGW w Warszawie. Opis materiału testowego wraz z prezentacją procedur badawczych można znaleźć w pracy autorów (Sas i in., 2012b). Najważniejsze właściwości fizyczne analizowanych próbek zestawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Właściwości fizyczne badanych naturalnych gruntów spoistych

Gęstość właściwa	$\rho_s$ (Mg·m <sup>-3</sup> )	2,68
Gęstość objętościowa	$\rho$ (Mg·m <sup>-3</sup> )	2,23 - 2,24
Granica płynności	$w_L$ (%)	31 - 32
Granica plastyczności	$w_P$ (%)	12 - 13
Wskaźnik plastyczności	$I_P$	18 - 19
Wilgotność naturalna	$w_n$ (%)	12 - 13

Tabele 3 i 4 zawierają podsumowanie uzyskanych wyników. Tabela 3 przedstawia odpowiednio wartości prędkości fali poprzecznej  $V_S$  oraz oszacowany na podstawie zależności (1) początkowy moduł odkształcenia postaciowego  $G_0$  dla zakresu małych odkształceń, natomiast tabela 4 – wartości prędkości fali podłużnej  $V_P$  oraz obliczony na jej podstawie, z zastosowaniem formuły (2) początkowy moduł odkształcenia  $E_0$  dla zakresu małych odkształceń. Badania wykonano przykładając na uzwojenia napięcie o wartości 0,1 V, generując tym samym najmniejsze możliwe dla tej aparatury drgania. Ponadto, każdy eksperyment charakteryzowało inne średnie naprężenie efektywne  $p'$ , przy którym konsolidowano próbki, a następnie poddawano testom dynamicznym w kolumnie rezonansowej.

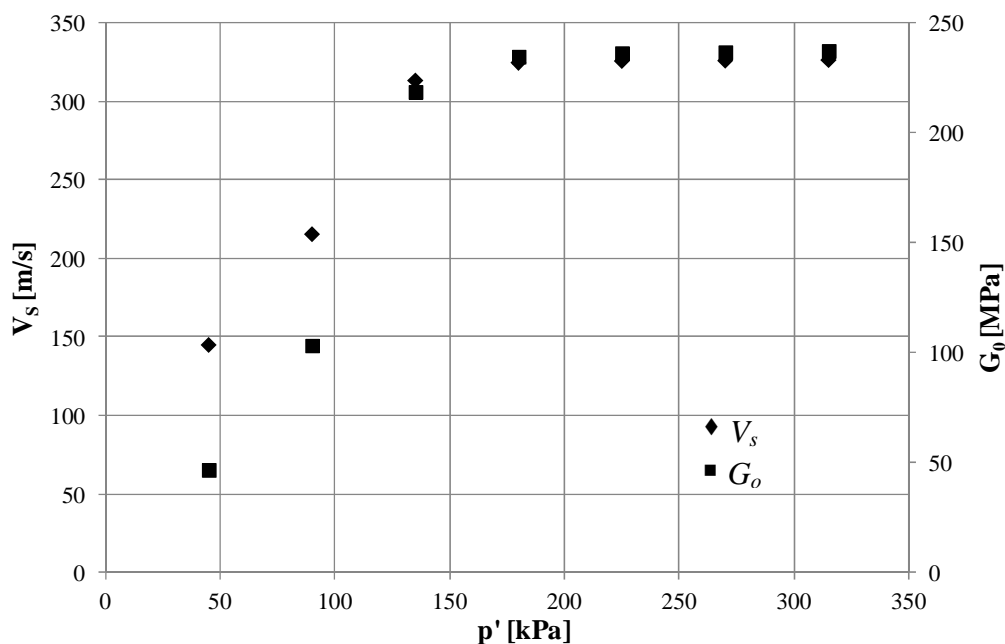
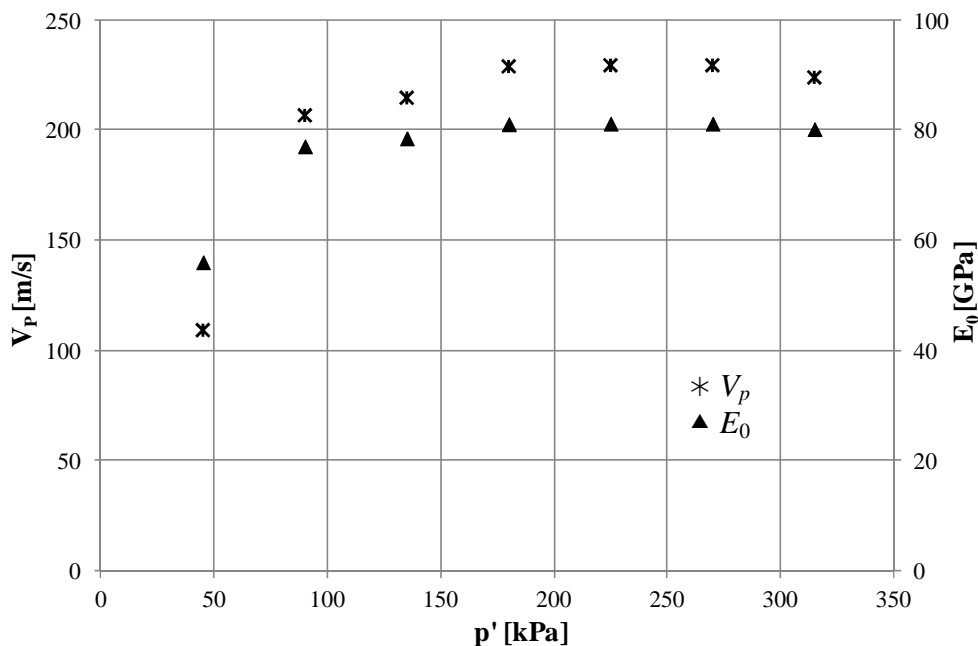
Graficzną interpretację danych z tabel 3 i 4 przedstawiono na rysunkach 3 i 4.

Tab. 3. Wartości prędkości fali poprzecznej oraz początkowego modułu sztywności w badaniu w kolumnie rezonansowej

Parametr	Po nasączeniu	Średnie naprężenie efektywne $p'$ (kPa)						
		45	90	135	180	225	270	315
$V_S$ (m·s <sup>-1</sup> )	119,3	144,9	215,3	313,0	324,3	325,4	325,7	326,1
$G_0$ (MPa)	31,7	46,8	103,3	218,5	234,5	236,1	236,5	237,1

Tab. 4. Wartości prędkości fali podłużnej oraz początkowego modułu odkształcenia w badaniu w kolumnie rezonansowej

Parametr	Po nasączeniu	Średnie naprężenie efektywne $p'$ (kPa)						
		45	90	135	180	225	270	315
$V_P$ (m·s <sup>-1</sup> )	116,7	139,9	192,5	196,1	202,6	202,8	202,8	200,3
$E_0$ (GPa)	30,3	43,6	82,6	85,8	91,5	91,7	91,7	89,5

Rys. 3.  $V_s$  oraz  $G_0$  w funkcji  $p'$ Rys. 4.  $V_p$  oraz  $E_0$  w funkcji  $p'$ 

## 5. Podsumowanie i wnioski końcowe

Porównując ze sobą wyniki zawarte w tabeli 1, obejmującej typowe uzyskiwane z badań wartości prędkości fal sejsmicznych, z wynikami badań autorów zestawionymi w tablicach 3 i 4, można zauważyć podobieństwo w otrzymanych wartościach prędkości fali poprzecznej  $V_s$  dla gliny wilgotnej. Użyty bowiem w doświadczeniach laboratoryjnych autorów rodzaj gruntu to według PN-86/02480 glina piaszczysta Gp. Natomiast wartości prędkości fali podłużnej  $V_p$  różnią się między tabelami 1 i 4. Może być to spowodowane błędami obliczeniowymi, bowiem różnica ta dotyczy jednego rzędu wielkości. Jednak z drugiej strony, nie błędy obliczeniowe, ale niedostateczne nasycenie

wodą materiału badawczego, mogło mieć wpływ na otrzymane rozbieżności między danymi literaturowymi, a wynikami badań autorów. Jak zostało zasygnalizowane w rozdziale 2 niniejszej pracy, fala podłużna jest szczególnie wrażliwa na poziom nasycenia. Jednocześnie, na podstawie klasyfikacji gruntów według PN-EN ISO 1488-2, użyty w doświadczeniach materiał badawczy to piasek ilasty (clSa). Można zatem sądzić, iż dokonano porównania z niewłaściwym rodzajem gruntu z tabeli 1. Analizując wartości prędkości fal sejsmicznych podanych w tabeli 1 można przypuszczać, że badane grunty bliższe są ilom niż glinie wilgotnej. Konieczne wydaje się zatem przeprowadzenie kolejnych analiz uzyskanych wyników, jak również dalszych badań i późniejszych ich weryfikacji.

Tabele 3 i 4 oraz rysunki 3 i 4 wskazują na zależność obliczonych parametrów  $V_S$  i  $G_0$  oraz  $V_P$  i  $E_0$  od średniego naprężenia efektywnego  $p'$ . W badaniu zagadnienia sztywności gruntów naprężenie efektywne jest najbardziej istotnym czynnikiem wpływającym na propagację fali sejsmicznej w gruncie, a tym samym na wartości początkowym parametrów odkształceniowych poszczególnych rodzajów gruntu. Spotykane w literaturze stwierdzenie, iż wraz ze wzrostem naprężenia efektywnego wzrasta sztywność początkowa gruntów, wydaje się być prawdziwe również w świetle uzyskanych wyników. Analizując rysunki 3 i 4 widać wyraźną tendencję wzrostową oszacowanych wielkości wraz ze wzrostem  $p'$ . Jednakże osiągając pewną wartość naprężenia efektywnego, około 200 kPa, wartości parametrów stabilizują się, a ich wzrost, jeśli występuje, jest już nieznaczny. Naprężenie  $p' = 200$  kPa dla badanych gruntów można uznać za naprężenie graniczne, powyżej którego wpływ stanu naprężenia na właściwości sprężyste gruntów nie jest istotny.

Na podstawie wyników doświadczeń zaprezentowanych w artykule można wysunąć następujący wniosek końcowy. Jest możliwe wyznaczenie prędkości fal sejsmicznych oraz początkowych charakterystyk odkształceniowych gruntów w zakresie małych odkształceń stosując badania w kolumnie rezonansowej. Aparatura ta może być używana jako urządzenie alternatywne do piezoelementów. Autorzy artykułu, jako kierunek dalszych badań, zamierzają wykonać analizy porównawcze wyników otrzymanych przy pomocy kolumny rezonansowej oraz piezoelementów typu *Bender*.

## Literatura

- ASTM-D4015-92 (2003). Test Methods for Modulus and Damping of Soils by the Resonant-Column Method. *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM International, West Conshohocken, PA, Vol. 4.08, 473-494.
- Bajda M. (2009). Źródło generacji fali sejsmicznej w sondowaniach SCPT. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*. Zeszyt 4(46), 57-66.
- Das B. M., Ramana G. V. (2011). Principles of Soil Dynamics, Second Edition. *International SI Edition*, United States of America.
- Dyvik R., Madshus C. (1985). Measurements of  $G_{max}$  using bender elements. *Civil Engineers Convention*, Detroit, New York, American Society of Civil Engineers, 186-196.

- Gabryś K. (2013). Zmienność charakterystyk odkształceniowych naturalnych gruntów spoistych. Rozprawa doktorska (w przygotowaniu), SGGW, Warszawa.
- Gabryś K., Sas W., Szymański A. (2013). Kolumna rezonansowa jako urządzenie do badań dynamicznych gruntów spoistych. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, Vol. 22 (1) (w druku).
- Gabryś K., Szymański A. (2012). Badania parametrów odkształceniowych gruntów spoistych w kolumnie rezonansowej. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 4/2012, 324-327.
- GDS Resonant Column (2010). The GDS Resonant Column System Handbook (Version 2.2.2010).
- Ibrahim A., Orense R., Pender M. (2011). Determination of very small strain shear modulus of Auckland residual soils using bender elements. W: *Proceedings of the 9th Pacific Conference on Earthquake Engineering*. Building an Earthquake-Resilient Society, Auckland 2011, New Zealand, paper number 147.
- Sas W., Gabryś K., Szymański A. (2012a). Analiza sztywności gruntów spoistych przy wykorzystaniu kolumny rezonansowej. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 4/2012, 370-376.
- Sas W., Gabryś K., Szymański A. (2012b). Laboratory measurement of soil stiffness in resonant column apparatus. *Acta Scientiarum Polonorum*, seria Architektura-Budownictwo (w recenzji).
- Słownik fizyczny (1984). *Wiedza powszechna*, Warszawa.
- Świdziński W., Mierczyński J. (2010). Badania reakcji sprężystej gruntów niespoistych za pomocą pomiaru prędkości fali sejsmicznej. *Czasopismo Techniczne, Środowisko*, 1-Ś/2012, Z. 16, R. 107, 63-82.
- Viggiani G., Atkinson J.H. (1995). Interpretation of bender element tests. *Géotechnique*, Vol. 45, No. 1, 149-154.

## LABORATORY DETERMINATION OF SEISMIC WAVES VELOCITIES

**Abstract:** The theoretical basis of wave propagation in the elastic medium, as well as some methods of seismic wave velocity measurements in the laboratory were presented in the paper. Experiments in the triaxial apparatus equipped with Bender element were discussed. Methodology of the research in the resonant column, together with examples of the results of the elastic properties of examined soils were summarised. As a test material natural cohesive soil from the area of emerging route S2, track between the nodes "Konotopa – Airport" (near km 464), was used. The values of the longitudinal and transversal wave velocities determined from wave theory were shown in the paper as well.