

## LABORATORYJNE BADANIE SZTYWNOŚCI GRUNTU WEDŁUG EUROKODU 7

Wojciech Sas, Katarzyna Gabryś, Alojzy Szymański

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

**Streszczenie.** Laboratoryjne badanie sztywności gruntu w przedziale małych odkształceń jest zadaniem niezwykle trudnym ze względu chociażby na niewystarczającą rozdzielczość i niezadowalającą dokładność urządzeń do pomiaru obciążeń oraz przemieszczeń. Istnieją możliwości regularnego przeprowadzania analiz sztywności gruntu dla małych odkształceń w aparacie trójosiowego ściskania z lokalnym pomiarem przemieszczeń. Niestety metoda ta ze względu na wysokie koszty stosowana jest zazwyczaj tylko w projektach badawczych. Dodanie elementów *bender* do aparatu trójosiowego znacznie ułatwiło przeprowadzanie badań prędkości rozchodzenia się fali ścinającej, a w konsekwencji – początkowego modułu ścinania. Badania te stały się proste i opłacalne, wykonywane powszechnie w laboratoriach geotechnicznych na całym świecie. W wymaganiach Eurokodu 7 brak jest obszernego, dokładnego opisu tej techniki badawczej, tym niemniej zasygnalizowane zostały specjalistyczne badania sztywności gruntu, na przykład wykorzystujące pomiar prędkości fal sejsmicznych, zwłaszcza w przypadku małych odkształceń (tj. mniejszych niż 0,1%). Dlatego też za właściwe uznano wyjaśnienie idei badań elementami *bender*. W artykule zaprezentowano zwięzłą metodykę badań w aparacie trójosiowego ściskania wyposażonym w piezoelementy typu *bender*, związaną z pomiarem prędkości fali ścinającej, wraz z przykładowymi wynikami badań doświadczalnych przeprowadzonymi na wybranym gruncie spoistym pochodzącym z terenu Warszawy. Ponadto wyznaczono zależności prędkości fali ścinającej oraz wartości początkowego modułu ścinania w funkcji na przykład średniego ciśnienia efektywnego.

**Słowa kluczowe:** sztywność gruntu, badania laboratoryjne, elementy *bender*, Eurokod 7

### WSTĘP

Zagadnienia inżynierii geotechnicznej zawarte zostały w Normie Europejskiej (EN) o numerze 1997, którą powszechnie nazywa się Eurokodem 7. Projektowanie geotechniczne. Jest to swoisty zbiór zasad i pewnych reguł stosowania. Składa się on z dwóch części o statucie Normy Polskiej. Część pierwsza, tj. PN-EN 1997-1, charakteryzuje

---

Adres do korespondencji – Corresponding author: Wojciech Sas, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Laboratorium – Centrum Wodne, ul. Ciszewskiego 6, 02-776 Warszawa, e-mail: wojciech\_sas@sggw.pl

zasady ogólne związane z projektowaniem obiektów geotechnicznych, uwzględniając dwa stany graniczne: nośności i użyteczności. Część druga, tj. PN-EN 1997-2, zawiera zalecenia dotyczące rozpoznania oraz badania podłoża gruntowego, wykorzystując przy tym zarówno metody polowe, jak i laboratoryjne. W artykule tym skupiono się na wyznaczeniu sztywności gruntu badaniami laboratoryjnymi w ujęciu Eurokodu 7. Z większą uwagą przestudiowano drugą część Normy Europejskiej, poświęconą właśnie badaniom. Aczkolwiek już w pierwszej części pojawia się definicja sztywności, którą to nazywa się opór materiału przeciwko odkształceniom. Sztywność gruntu zaliczona jest tu do grupy parametrów koniecznych do wyznaczenia w trakcie badań, choć jej wiarygodne pomiarzenie z badań *in-situ* bądź laboratoryjnych jest zadaniem niezwykle trudnym. Problemy z pomiarem związane są z naruszeniem struktury próbki tudzież innych efektów, co w konsekwencji może prowadzić do rozbieżności wyników uzyskanych z badań laboratoryjnych i polowych. Tym niemniej w przypadku zwłaszcza fundamentów konstrukcji poddanych drganiom lub obciążeniom dynamicznym wymagane są badania sztywności gruntu i analiza drgań celem takiego ich zaprojektowania, by drgania te nie spowodowały nadmiernych osiadań. Eurokod 7, część druga, zaleca użycie specjalistycznej aparatury laboratoryjnej do badania sztywności gruntu w zakresie odkształceń mniejszych niż 0,1%, tak by zapewnić odpowiednio dokładny pomiar naprężenia oraz odkształcenia oraz uzyskanie wyników o właściwie wysokiej rozdzielczości. W tej części Normy Europejskiej znalazły się również propozycje metod wyznaczania początkowych wartości modułów odkształcenia, a mianowicie wykorzystanie techniki propagacji fali ścinającej czy techniki badań dynamicznych.

Celem pracy było ukazanie idei oznaczania początkowej wartości modułu odkształcenia postaciowego ( $G_0$  lub  $G_{\max}$ ) za pomocą pomiaru prędkości fali ścinającej ( $V_S$ ), z wykorzystaniem elementów rodzaju *bender*. W artykule przedstawiono zwięzłą charakterystykę metodyki badań elementami *bender*, omówiono pokrótce badania własne i zaprezentowano przykładowe wyniki dokonanych analiz. Badania laboratoryjne określania sztywności przeprowadzono na wybranych gruntach spoistych o nienaruszonej strukturze, pochodzących z terenu miasta stołecznego Warszawy.

## TECHNIKA BADANIA PRZETWORNIKAMI BENDER

Badania elementami *bender* należą do grupy badań nieinwazyjnych i są jedną z najpowszechniejszych metod w laboratoriach geotechnicznych na świecie, służących do określania modułu ścinania w zakresie małych odkształceń ( $G_0$ ). Przetworniki *bender* tworzy para piezoelektrycznych bimorficznych elementów: nadajnik oraz odbiornik, które najczęściej umiejscowione są w kopułkach komór trójosiowego ściskania (rys. 1). Nadajnik, umieszczony w próbce gruntu, zostaje obciążony sygnałem elektrycznym o nieustalanej amplitudzie napięcia, zwykle jest to około 10 V. Efektem dostarczenia zmiennego napięcia do nadajnika jest cykliczne wyginanie piezoelementu i emisja fali mechanicznej w postaci fali odkształcenia sprężystego przez grunt ( $V_S$  lub  $V_P$ ). Odbiornik, znajdujący się również w próbce gruntu, ale na jej przeciwległym końcu, wykrywa drgania propagowane przez materiał badawczy, powodujące jego wygięcie (rys. 2). Wygięcie drugiej płytki piezoceramicznej skutkuje wytworzeniem napięcia elektrycznego, które następnie rejestruje oscyloskop [Lee i Santamarina 2005, Chan 2010].

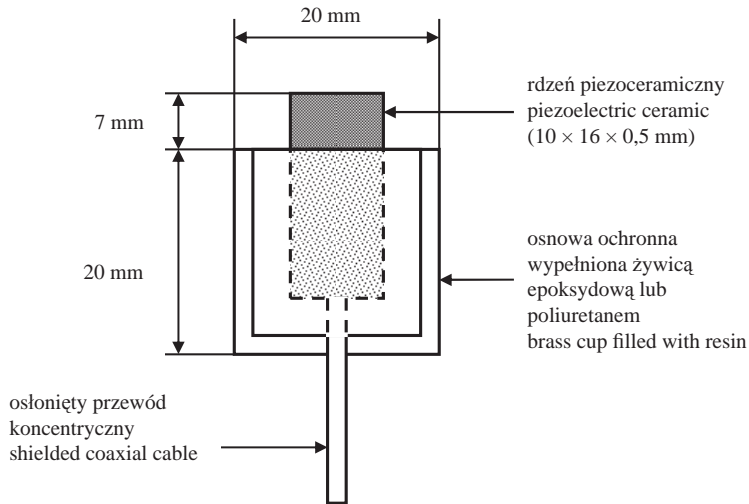
Rys. 1. Schemat elementu *bender* (na podstawie Chan [2010])

Fig. 1. Schematic illustration of a bender element (based on Chan [2010])

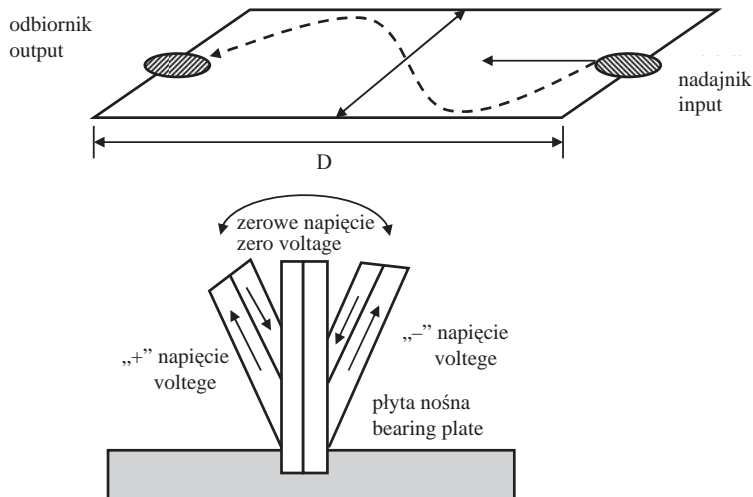
Rys. 2. Idea działania elementów *bender* (na podstawie Kramer [1996])

Fig. 2. Operating idea of bender elements (based on Kramer [1996])

Rosnące zainteresowanie badaniami elementami *bender* można przypisać stosunkowo szybkiej oraz prostej procedurze testowej. Ponieważ ta sama próbka gruntu może być badana wielokrotnie (np. w różnych odstępach czasu), więc nie potrzeba stosowania dużej ilości materiału badawczego. Dodatkowo najnowsze osiągnięcia, dotyczące jakości odbieranego sygnału, jak również bardzo zaawansowane metody interpretacji wyników spowodowały dużą popularność tej techniki badawczej w ostatnich dziesięcioleciach.

Historycznie to Lawrence [1963, 1965] był najprawdopodobniej pionierem w zastosowaniu przetworników piezoelektrycznych w geotechnice. Swoje testy przeprowadzał zarówno na próbkach gliny, jak i piasku, z piezoelementami umiejscowionymi w kopułce górnej i postumencie urządzenia trójosiowego. Następnie Shirley i Anderson [1975] wykorzystali elementy *bender* w swoich badaniach na suchym piasku. Dzięki technice piezoelementów możliwe stało się wzmocnienie generowanych sygnałów nawet przy przyłożeniu niewielkiego napięcia. Dyvik i Madshus [1985] z sukcesem rozwinęli ideę przetworników elektrycznych do badań gruntów całkowicie nasyconych wodą. Wprowadzili oni osłonę epoksydową jako ochronę przed przewodnością gruntów, która mogłaby w negatywny sposób oddziaływać na otrzymane sygnały. Wynalezienie osłony ochronnej doprowadziło do jeszcze większego rozpowszechnienia badań elementami *bender*. Według Jovičić i innych [1996] warunkiem koniecznym do polepszenia technik pomiarowych prędkości fali odkształcenia sprężystego stała się poprawa jakości odbieranego sygnału. Lepszą jakość sygnału zapewniło zabezpieczenie przewodów łączących elementy *bender*, pozwalające na wyeliminowanie zewnętrznych zakłóceń. Dzięki temu wysłane impulsy nie wymagały żadnego dodatkowego wzmocnienia, filtracji czy późniejszego uśredniania otrzymanych danych. Ponadto okazało się, iż do odebrania czytelnego sygnału z nadajnika stosowniejsze jest wysłanie impulsu w postaci fali sinusoidalnej aniżeli prostokątnej [Jovičić i in. 1996]. Fale prostokątne są zbyt skomplikowane do analizy, a ze względu na szerokie spektrum częstotliwościowe istnieje prawdopodobieństwo wystąpienia tzw. efektu bliskości pola (*near-field effect*). Efekt ten polega na nakładaniu się na odbierany sygnał różnych składowych nadawanej fali. Zasięg zaburzenia dla fal elektromagnetycznych równy jest odległości od nadajnika w wysokości 1,5–2 razy długość nadawanej fali. Gdy mamy do czynienia z falami mechanicznymi, możliwe jest całkowite ukrycie momentu przybycia fali ścinającej do odbiornika przez zaburzone składowe sygnały, gdy odbiornik zlokalizowany jest w odległości od nadajnika nie większej niż 4 długości propagowanej fali [Viaggiani i Atkinson 1995].

## MATERIAŁ BADAWCZY I METODYKA BADAŃ WŁASNYCH

Badania własne zostały wykonane w Pracowni do Badań Właściwości Mechanicznych Gruntów i Skał, w Laboratorium-Centrum Wodne Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie. Wykorzystano aparat trójosiowego ściskania wraz z wmontowanymi w kopułkę górną oraz piedestał piezoelementami *bender* produkcji brytyjskiej firmy GDS Instruments (rys. 3).

Pomiary prędkości fali poprzecznej ( $V_S$ ) przeprowadzono na gruncie spoistym o strukturze nienaruszonej, pochodzącym z trasy ekspresowej nr S2, między dwoma jej węzłami Konotopa – Lotnisko, w okolicy nasypu drogowego nr WD-18 (km 464). Cechy fizyczne badanych próbek zestawiono w tabeli 1, a na rysunku 4 zaprezentowano ich skład granulometryczny. Do analizy sztywności gruntu w zakresie małych odkształceń wybrano 3 próbki, które zostały poddane badaniom mechanicznym we wspomnianym wcześniej aparacie trójosiowego ściskania.

Na wybranych próbkach gruntu wykonano badania trójosiowego ściskania z konsolidacją izotropową oraz ścinaniem w warunkach umożliwionego odpływu (CID). Pomiaru



Rys. 3. Stanowisko badawcze z aparatem trójosiowego ściskania oraz przetworniki rodzaju *bender* (fot. autorów)

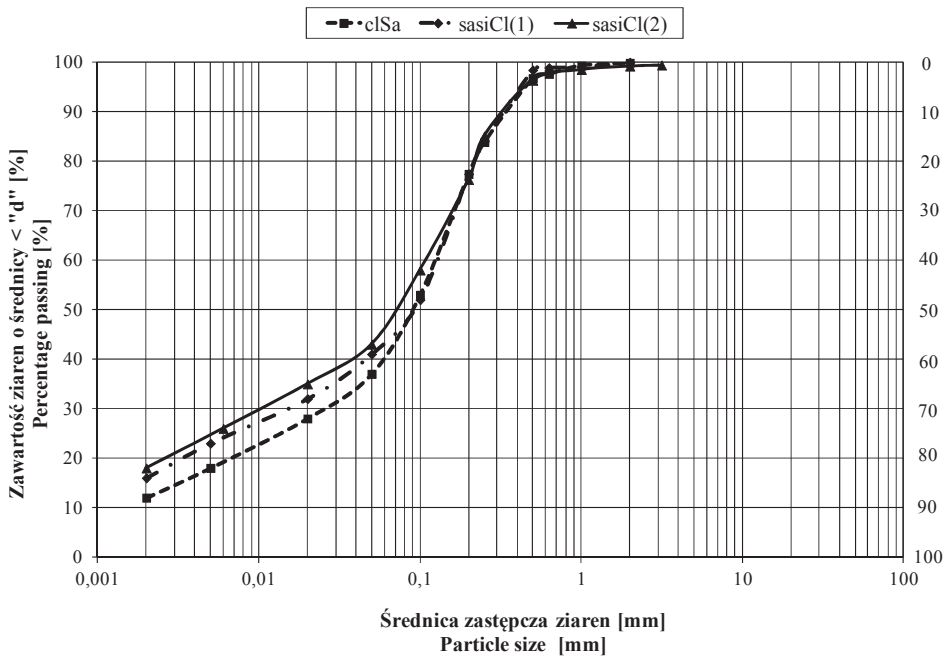
Fig. 3. Laboratory test post with triaxial apparatus and bender elements (authors' photography)

Tabela 1. Podstawowe właściwości fizyczne badanych próbek gruntu

Table 1. Basic physical properties of tested specimens

| Rodzaj gruntu<br>Soil type | Wilgotność naturalna<br>Water content | Gęstość właściwa<br>Specific density | Gęstość objętościowa<br>Bulk density | Gęstość objętościowa szkieletu gruntowego<br>Dry bulk density | Porowatość<br>Porosity | Granica płynności<br>Liquid limit | Granica plastyczności<br>Plasticity limit | Wskaźnik plastyczności<br>Plasticity index | Stopień plastyczności<br>Liquidity index |
|----------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---|------------------------|-----------------------------------|---|--|--|
|                            | $w$                                   | $\rho_s$                             | $\rho$                               | $\rho_d$  | $e$                    | $w_L$                             | $w_P$                                     | $I_P$                                      | $I_L$                                    |
|                            | [%]                                   | [Mg·m <sup>-3</sup> ]                | [Mg·m <sup>-3</sup> ]                | [Mg·m <sup>-3</sup> ]   | [-]                    | [%]                               | [%]                                       | [%]  | [-]                                      |
| clSa                       | 13,30                                 | 2,68                                 | 2,19                                 | 1,93  | 0,3886                 | 30,30                             | 12,24                                     | 18,06                                      | 0,059                                    |
| sasiCl(1)                  | 14,41                                 | 2,68                                 | 2,15                                 | 1,88  | 0,4255                 | 41,60                             | 14,35                                     | 27,25                                      | 0,020                                    |
| sasiCl(2)                  | 14,28                                 | 2,68                                 | 2,12                                 | 1,86  | 0,4409                 | 37,86                             | 13,34                                     | 24,52                                      | 0,038                                    |

prędkości fali sejsmicznej, tj. prędkości tylko fali poprzecznej, dokonano po etapie nasączenia próbek, kiedy wartość parametru Skemptona ( $B$ ) spełniała warunek  $B \geq 0,9$ , oraz po każdym etapie konsolidacji. Próbkę konsolidowano przy różnych izotropowych naprężeniach efektywnych, przy czym pierwsze naprężenie efektywne odpowiadało naprężeniu efektywnemu od ciężaru nadkładu w miejscu pobrania próbki ( $\sigma'_{v0}$ ), następne zaś naprężenia było odpowiednio większe od  $\sigma'_{v0}$ . Ostatnim etapem każdego badania było ścinanie próbek. Pomiar prędkości fali opierał się na wysłaniu impulsu elektrycznego z generatora fal do jednego z piezoelementów, pełniącego funkcję nadajnika. Nadajnik

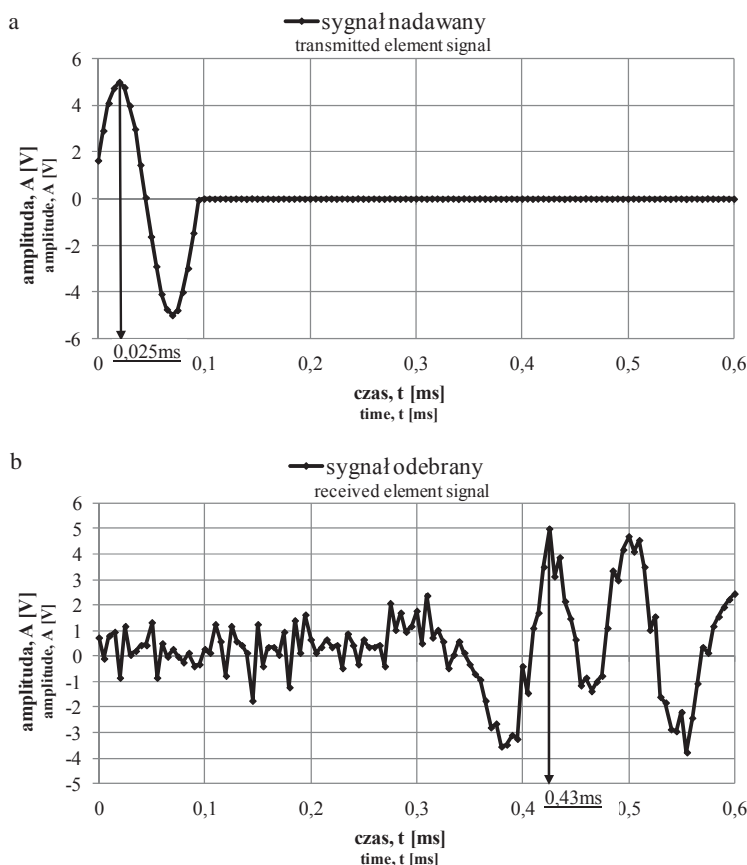


Rys. 4. Wynik analizy uziarnienia próbek gruntu

Fig. 4. Grain size distribution of tested specimens

po odebraniu sygnału zaczął drgać, a wywołane drgania były stopniowo przekazywane na materiał badawczy umieszczony w komorze i docierały do drugiego piezoelementu – odbiornika. Następowala zamiana energii mechanicznej na elektryczną, która w postaci impulsu docierała do wzmacniacza selektywnego. Następnie wzmożony sygnał pojawiał się na ekranie komputera. Wysyłana fala zawsze miała kształt sinusoidalny. Jej wyświetlany obraz pozwalał na odczytanie czasu jej propagacji ( $\Delta t$ ) między elementami *bender*, czyli czasu dotarcia od nadajnika do odbiornika.

Jako metodę interpretacji wyników wybrano metodę detekcji szczytowych wartości sygnałów (*peak to peak*), należąca do grupy badań prowadzonych techniką pojedynczego impulsu [Chan 2010]. Nie wymaga ona żadnej szczególnej analizy, jedynie wizualnego wskazania na ekranie komputera dwóch charakterystycznych punktów, a mianowicie wartości szczytowej w nadawanym sygnale (pierwszy *peak*) oraz pierwszej wartości szczytowej w odebranym sygnale (drugi *peak*) – rysunek 5. Metoda ta ma jedną zasadniczą wadę; w przypadku gruntów charakteryzujących się znaczną niejednorodnością w odebranej fali może wystąpić kilka blisko siebie położonych wartości szczytowych, o niedużych różnicach amplitudy. Trudno jest wówczas dokładnie zidentyfikować pierwszą wartość maksymalną w odebranym sygnale. Ponieważ taka sytuacja miała miejsce w badaniach własnych autorów, więc prędkość fali poprzecznej mierzono kilkakrotnie. Każda seria testowa składała się z dziesięciu pomiarów, na podstawie których otrzymywano pomiar średni. Jeżeli jednak analizowany obraz nadal budził wątpliwości, to zwracano uwagę na zgodność faz sygnału nadawanego oraz odbieranego. Jako określenie



Rys. 5. Przykładowy wynik: a – sygnału nadawanego, oraz b – odbieranego, z zaznaczonymi punktami szczytowymi;  $t_{pp} = 0,43 - 0,025 = 0,405$  ms

Fig. 5. The example of: a – the transmitted, and b – the received element signal with peak points;  $t_{pp} = 0,43 - 0,025 = 0,405$  ms

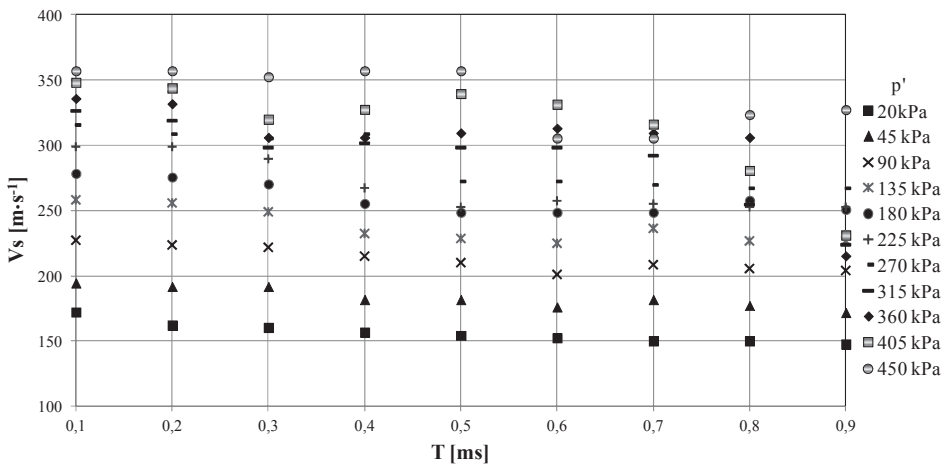
drogi propagacji fali w prezentowanych badaniach zastosowano metodę *tip-to-tip* [Viaggiari i Atkinson 1995]. *The tip-to-tip distance*, czyli odległość między zainstalowanymi elementami *bender*, tj. odległość, jaką musi pokonać wzbudzona fala, obliczono, odejmując od wysokości próbki wysokość występu piezoelementów, która wynosi 1,5 mm dla każdego.

Badania autorów objęły pomiar czasu propagacji fali poprzecznej ( $V_S$ ) przez próbki wybranych gruntów spoistych dla dziewięciu różnych częstotliwości drgań nadajnika: 10,0, 5,0, 3,3, 2,5, 2,0, 1,7, 1,4, 1,25 i 1,1 kHz. Pomiary były dokonywane w warunkach następujących stanów naprężenia:  $p' = 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315, 360, 405$  i 450 kPa. Wstępne badania prędkości fali scinającej wykazały amplitudę napięcia w wysokości 10 V jako optymalną dla przeprowadzanych testów.



## WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

Na rysunku 6 przedstawiono zależność prędkości fali ścinającej ( $V_S$ ) od okresu drgań ( $T$ ), a co za tym idzie – od częstotliwości wzbudzenia ( $f$ ). Przy opisie metodyki badań wspomniano o stosowaniu różnych częstotliwości wzbudzenia, co miało na celu sprawdzenie istnienia ewentualnej korelacji między prędkością fali a częstotliwością drgań nadajnika. Test ten wykazał, iż badanie przy okresie drgań  $T \geq 0,6$  ms (tj.  $f \leq 1,7$  kHz) daje dość duże zakłócenia o charakterze szumu, prowadzące w konsekwencji do problemów w identyfikacji szczytowych wartości sygnałów. Kłopoty ze wskazaniem miejsca, który byłby początkiem wyraźnego przebiegu falowego, wpłynęły następnie na błędne określenie wartości  $V_S$ . Stąd też znaczne rozbieżności w otrzymanych prędkościach fali poprzecznej. Aby zminimalizować efekt bliskości pola, z którym autorzy artykułu mieli do czynienia podczas przeprowadzania prezentowanych badań, zdecydowano się, iż do dalszych analiz zostaną wybrane wyniki otrzymane przy częstotliwości wzbudzenia  $f = 10,0$  kHz.



Rys. 6. Prędkość fali poprzecznej otrzymana dla różnych okresów drgań próbki gruntu przy różnych stanach naprężenia

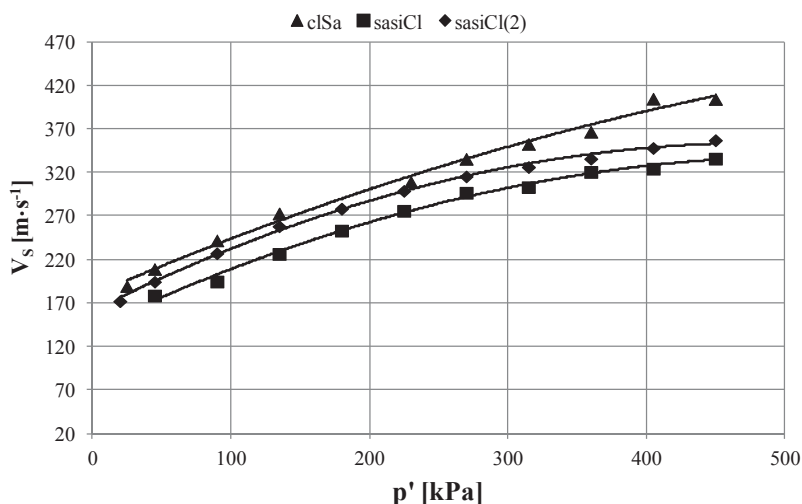
Fig. 6. The shear wave velocity received for different oscillation periods at various stress states

Rysunek 7 obrazuje zależność między prędkością fali poprzecznej ( $V_S$ ) a średnim naprężeniem efektywnym ( $p'$ ). Na wykresie tym umieszczono punkty otrzymane z pomiarów podczas nasączania i kolejnych etapów konsolidacji oraz linie trendu. Jako funkcję dopasowania wybrano regresję nieliniową typu wielomianowego, o dwóch stopniach swobody. Wyraźnie widać rosnący charakter funkcji, których przebieg dla wszystkich analizowanych gruntów jest zbliżony. Przyrost naprężenia w badanych gruntach spolistych powoduje jednoznaczny wzrost prędkości fali ścinającej ( $V_S$ ). Wzrost w wartościach  $V_S$  przekłada się następnie na otrzymane wartości początkowego modułu ścinania ( $G_{\max}$ ), obliczane zgodnie z zależnością:

$$G_{\max} = \rho \cdot V_S^2 \quad (1)$$

gdzie:  $\rho$  – gęstość objętościowa gruntu.

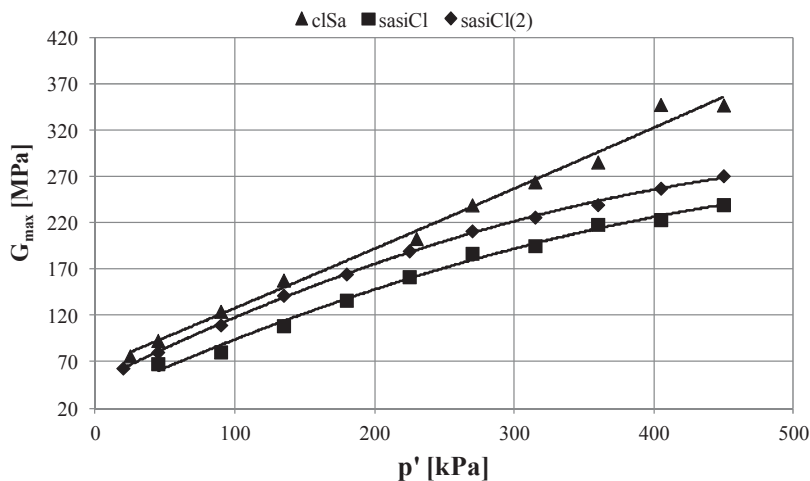




Rys. 7. Zależność prędkości fali poprzecznej od stanu naprężenia w badanych gruntach  
 Fig. 7. The shear wave velocity via stress state in the analyzed soils

Zakres zmian modułu ścinania ( $G_{\max}$ ) wynosi od około 170 MPa dla próbki sasiCl do około 270 MPa dla próbki cISa (rys. 8). Jak wynika z analizy rysunku 8, na początkowy moduł odkształcenia postaciowego badanych gruntów znacząco wpływa średnie naprężenie efektywne.

W tabeli 2 ukazano wybrane zależności funkcyjne (regresja nieliniowa typu wielomianowego) między prędkością fali poprzecznej ( $V_s$ ), początkowym modułem ścinania ( $G_{\max}$ ) a zmienną – średnim naprężeniem efektywnym ( $p'$ ) wraz z miarami dopasowania uzyskanymi dla badanych funkcji.



Rys. 8. Zależność początkowego modułu ścinania od stanu naprężenia w badanych gruntach  
 Fig. 8. The small-strain shear modulus via stress state in the analyzed soils

Tabela 2. Wartości współczynników i miary dopasowania dla funkcji  $V_S = f(p')$  oraz  $G_{\max} = f(p')$   
 Table 2. Coefficients and fittings of functions  $V_S = f(p')$  oraz  $G_{\max} = f(p')$

| Postać funkcji<br>Form function      | Rodzaj gruntu<br>Soil type | Współczynniki<br>Coefficients |         |         |          |        |         | R <sup>2</sup><br>[-] | R<br>[%] | RMSE<br>[-] |
|--------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|---------|---------|----------|--------|---------|-----------------------|----------|-------------|
|                                      |                            | $a_0$                         | $s$     | $a_1$   | $s$      | $a_2$  | $s$     |                       |          |             |
| $V_S = a_0 + a_1 p'^2 + a_2 p'$      | clSa                       | 178,73                        | 6,68276 | -0,0004 | 1,51E-04 | 0,6867 | 0,07156 | 0,9922                | 99,61    | 7,76452     |
|                                      | sasiCl                     | 140,41                        | 5,68825 | -0,0007 | 1,04E-04 | 0,7527 | 0,05279 | 0,9941                | 99,71    | 4,83632     |
|                                      | sasiCl(2)                  | 160,46                        | 3,01995 | -0,0008 | 6,53E-05 | 0,7967 | 0,03109 | 0,9974                | 99,87    | 3,59708     |
| $G_{\max} = a_0 + a_1 p'^2 + a_2 p'$ | clSa                       | 64,40                         | 9,34915 | 0,00004 | 2,12E-04 | 0,6279 | 0,10011 | 0,9907                | 99,53    | 10,86253    |
|                                      | sasiCl                     | 29,96                         | 6,95871 | -0,0005 | 1,27E-04 | 0,6874 | 0,06458 | 0,9927                | 99,64    | 5,91651     |
|                                      | sasiCl(2)                  | 47,91                         | 1,84866 | -0,0006 | 4,00E-05 | 0,7551 | 0,01903 | 0,9992                | 99,96    | 2,20195     |

Jako podstawową miarę dokładności dopasowania zaproponowanych funkcji regresji do danych uzyskanych z badań wybrano współczynnik determinacji ( $R^2$ ), który zgodnie z definicją zawiera się w przedziale  $\langle 0, 1 \rangle$  i informuje, jaka część zaobserwowanej w próbie całkowitej zmienności  $y$  została wyjaśniona regresją liniową względem  $x$ . Duże wartości  $R^2$ , bliskie jedności, dla wszystkich analizowanych funkcji mogą świadczyć o tym, że znalezione funkcje wyjaśniają około 99% zmienności  $V_S$  bądź  $G_{\max}$ . Kolejną wybraną miarą dopasowania funkcji jest współczynnik korelacji ( $R$ ), który służy do analizy współzależności między zmienną zależną a zmiennymi niezależnymi. Ponieważ dla wszystkich przypadków otrzymano współczynnik korelacji bliski 100%, oznacza to korelację bliską doskonałej dodatniej. Prędkość fali poprzecznej oraz początkowy moduł ścinania są silnie zależne od stanu naprężenia. Ponadto tabelę 2 uzupełniono o wartości błędu standardowego ( $s$  – błąd średniowy) wyznaczonego dla każdej wartości współczynnika funkcji oraz o wartości pierwiastka z błędu średniokwadratowego ( $RMSE$ ). Niewielkie wartości  $RMSE$  wskazują na dobrze dobrany model.

## PODSUMOWANIE

Jedną z laboratoryjnych metod badania sztywności gruntu, jak podaje Eurokod 7, może być pomiar prędkości fali sejsmicznej, uzyskiwany dzięki zastosowaniu techniki przetworników piezoelektrycznych. Mimo że w normie PN-EN 1997 brak jest szczegółów dotyczących tej metody badawczej, to właśnie jej użyto w badaniach własnych.

Piezoelementy typu *bender*, aktualnie powszechnie wykorzystywane w światowych laboratoriach geotechnicznych, instalowane są w standardowym aparacie trójosiowego ściskania, a zasada ich działania opiera się na tzw. prostej oraz odwróconej piezoelektryczności. Dla autorów niniejszego artykułu celem praktycznym badań z elementami *bender* stało się oznaczenie początkowej wartości modułu odkształcenia postaciowego ( $G_0$  lub  $G_{\max}$ ) za pomocą pomiaru prędkości fali ścinającej ( $V_S$ ). Zaprezentowano przykładowe wyniki badań własnych, na przykład w postaci wykresów ukazujących zależność między prędkością fali poprzecznej ( $V_S$ ) a okresem drgań ( $T$ ) czy między prędkością fali ( $V_S$ ) oraz modułem ścinania ( $G_{\max}$ ) a średnim naprężeniem efektywnym ( $p'$ ).

Stwierdzono, iż prędkość fali ścinającej propagowanej przez badane grunty, a w konsekwencji początkowy moduł odkształcenia postaciowego zależy od naprężenia efektywnego. Dla wyższych stanów naprężenia otrzymano większe wartości  $V_S$ , przeliczone następnie na wartości parametru  $G_{\max}$ . Korelację między  $V_S/G_{\max}$  a  $p'$  na podstawie analizy statystycznej uznano za silną ( $R^2 \geq 0,99$ ). Dodatkowo zaproponowano funkcje regresji w postaci wielomianu stopnia II najlepiej ilustrujące opisaną wyżej zależność dla każdej badanej próbki gruntu. Oczywiście proponowane przez autorów funkcje wymagają weryfikacji poprzez przeprowadzenie większej liczby badań na gruntach spoistych o podobnych właściwościach fizycznych oraz rozpatrzenia w analizie także innych czynników wpływających na rozkład sztywności gruntów, o których mowa jest w literaturze przedmiotu.

## PIŚMIENNICTWO

- Chan C.M., 2010. Bender element test in soil specimens: identifying the shear wave arrival time. *EJGE* 15, 1263–1276.
- Dyvik R., Madshus C., 1985. Lab measurements of  $G_{max}$  using bender elements. Proceedings of the Conference on the Advances in the Art of Testing Soil under Cyclic Conditions. ASCE Geotechnical Engineering Division, New York, 186–196.
- Jovičić V., Coop M.R., Simic M., 1996. Objective criteria for determining  $G_{max}$  from bender element tests. *Géotechnique* 46 (2), 357–362.
- Kramer S.L., 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering*. University of Washington. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Lawrence F.V., 1963. Propagation of ultrasonic waves through sand. Research Report R-63-08. Massachusetts Institute of Technology.
- Lawrence F.V., 1965. Ultrasonic shear-wave velocity in sand and clay. Research Report R-65-05. Massachusetts Institute of Technology.
- Lee J.S., Santamarina J.C., 2005. Bender elements: performance and signal interpretation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 131 (9), 1063–1070.
- Shirley D.J., Anderson A.L., 1975. Acoustical and engineering properties of sediments. Report No. ARL-TR-75-58. Applied Research Laboratories, University of Texas, Austin.
- Viaggiani G., Atkinson J.H., 1995. Interpretation of Bender element tests. *Géotechnique* 45 (1), 149–154.
- PN-EN 1997-1: 2008 Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne.
- PN-EN 1997-2: 2007 Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 2: Badania podłoża gruntowego.

## LABORATORY TESTS OF SOIL STIFFNESS BY EUROCODE 7

**Abstract.** The laboratory measurement of soil stiffness in the range of small strains is a very difficult task, due to the insufficient resolution and unsatisfactory precision of laboratory equipment for measurements of loads and displacements. There are opportunities for regular analysis of small-strain soil stiffness in the triaxial apparatus with local transducers. Unfortunately, this methods is typically used only in the research projects because of the high costs. However, using some additional equipment for triaxial apparatus: bender elements facilitated tests with propagation of the shear wave, and consequently calculation of the initial shear modulus. This technique became a simple and a cost-effective one, commonly performed in the geotechnical laboratories around the world. In the requirements of Eurocode 7 there is no comprehensive, detailed description of this research method, but some specialized studies of soil stiffness have been indicated here. For example, techniques which use the seismic wave velocity measurement, particularly for small strains, i.e. less than 0.1%. Therefore, the clear explanation of bender element tests ideas. was considered to be appropriate. This article presents a summary of research methodology in the triaxial apparatus equipped with bender elements, using for the measurements of the shear wave velocity. Examples of experimental results carried out on selected cohesive soils derived from Warsaw area are showed here as well. Moreover, equations of the shear wave velocity and the initial shear modulus as a function of the mean effective stress are proposed.

**Key words:** soil stiffness, laboratory measurements, bender elements, Eurocode 7