

WALDEMAR ŚWIDZIŃSKI*, JACEK MIERCZYŃSKI*

BADANIA REAKCJI SPRĘŻYSTEJ GRUNTÓW
NIESPOISTYCH ZA POMOCĄ POMIARU PRĘDKOŚCI FALI
SEJSMICZNEJINVESTIGATIONS OF ELASTIC RESPONSE
OF NON-COHESIVE SOILS BY SEISMIC WAVES

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań doświadczalnych związanych z pomiarem prędkości fali ścinającej przeprowadzonych na piasku „Skarpa”. Badania wykonano w aparacie trójosiowego ściskania wyposażonym w elementy typu bender. Omówiono metodę wyznaczania właściwości sprężystych gruntu na podstawie pomiaru prędkości fali sejsmicznej oraz przeanalizowano różne sposoby interpretacji wyników w celu wyznaczenia rzeczywistego czasu przejścia fali przez próbkę gruntu. Wyznaczono zależności prędkości fali ścinającej oraz wartości modułów ścinania w funkcji zagęszczenia i średniego ciśnienia efektywnego.

Słowa kluczowe: badania laboratoryjne, grunty niespoiste, reakcja sprężysta, fale sejsmiczne

Abstract

The results of measurements of shear wave velocity of „Skarpa” sand in triaxial apparatus are presented. The method of determination of elastic response of non-cohesive soils by seismic waves is described. Various test interpretation procedures and its influence on the results are discussed. The relations between shear wave velocity and shear moduli, soil density and mean effective stress are determined and analysed.

Keywords: laboratory tests, non-cohesive soils, elastic response, seismic waves

* Dr hab. inż. Waldemar Świdziński, dr Jacek Mierczyński, Zakład Geomechaniki, IBW PAN.

1. Wstęp

Problem właściwej oceny reakcji gruntu na przyłożone obciążenie wiąże się nierozłącznie z wyznaczeniem rzeczywistych odkształceń rozwijanych w ośrodku gruntowym. Z pomiarów w warunkach *in situ* wynika, że w zdecydowanej większości obserwowane deformacje podłoża gruntowego obciążonego różnego rodzaju konstrukcjami nie przekraczają wartości 10^{-3} [1, 14, 15]. Tak więc z inżynierskiego punktu widzenia kluczowe jest wyznaczenie sztywności ośrodka gruntowego w zakresie małych odkształceń ok. 10^{-5} – 10^{-3} . Poziom ten jest nie tylko charakterystyczny dla deformacji podłoża gruntowego wywołanych obciążeniem statycznym, lecz również w zdecydowanej większości dla tych, powstających w wyniku oddziaływań dynamicznych będących skutkiem drgań przenoszonych przez ośrodek gruntowy w czasie trzęsień ziemi, wybuchów, czy powstałych wskutek pracy maszyn bądź ruchu pojazdów. Przyjmuje się, że zakres małych odkształceń odpowiada sprężystej reakcji gruntu na przyłożone obciążenie zewnętrzne.

Eksperymentalna izolacja sprężystej odpowiedzi ośrodka gruntowego w warunkach laboratoryjnych nie jest zadaniem prostym, gdyż podczas obciążania próbki gruntu mamy do czynienia zarówno z deformacjami odwracalnymi, jak i nieodwracalnymi, które rozwijają się praktycznie od samego początku, nawet przy niewielkich naprężeniach, a charakterystyka naprężenie–odkształcenie rzadko kiedy jest czysto sprężysta. Reakcja sprężysta jest przy tym stosunkowo niewielka w porównaniu z wartością odkształceń plastycznych.

Główną grupę metod izolacji reakcji sprężystej w laboratorium stanowią metody opierające się na bezpośrednim pomiarze deformacji. Najczęściej charakterystyki naprężenie–odkształcenie, służące do oceny reakcji materiału na przyłożone obciążenie, wyznacza się w edometrze lub aparacie trójosiowego ściskania. Bezpośredni pomiar przemieszczeń jest realizowany za pomocą różnego rodzaju czujników, których dokładność i rozdzielczość wpływa na dokładność i jakość wyznaczonych deformacji. W ostatnich dwóch dekadach wzrosło bardzo zapotrzebowanie na dokładne pomiary charakterystyk naprężenie–odkształcenie w zakresie małych odkształceń (ok. 10^{-4} i mniejszych), co zaowocowało rozwojem różnych technik i urządzeń pomiarowych do pomiaru deformacji gruntów w warunkach laboratoryjnych. Dotyczy to szczególnie czujników służących do lokalnego pomiaru przemieszczeń, które są w chwili obecnej powszechnie stosowane praktycznie we wszystkich laboratoriach geotechnicznych znaczących ośrodków naukowych na świecie. Szczegółowy przegląd metod wyznaczania reakcji sprężystej dla gruntów niespoistych na podstawie badań edometrycznych oraz prowadzonych w aparacie trójosiowego ściskania można znaleźć w pracach [13, 11].

Pomimo wielu różnych propozycji wyznaczania reakcji sprężystej za pomocą bezpośredniego pomiaru reakcji gruntu na przyłożone obciążenie, poruszanie się w zakresie bardzo małych odkształceń oraz rozwój odkształceń plastycznych praktycznie od samego początku, nawet przy niewielkich naprężeniach, powodują, że nie ma wśród badaczy konsensusu co do poprawności takiego podejścia. Skutkowało to rozwojem innych metod opartych na pomiarach pośrednich, zwanych nieinwazyjnymi, wykorzystujących np. zależność właściwości ośrodka gruntowego od prędkości propagacji fal sejsmicznych. Ze względu na to, że fale sejsmiczne rozchodzące się w ośrodku gruntowym wywołują bardzo małe odkształcenia, ok. 10^{-5} i mniejsze [2] zakłada się, że w trakcie propagacji takich fal ośrodek zachowuje się sprężysto, a wyznaczone na podstawie prędkości propagacji cechy ośrodka reprezentują jego właściwości sprężyste.

W artykule przedstawiono wyniki badań właściwości sprężystych gruntów wyznaczonych na podstawie pomiaru prędkości fali ścinającej generowanej w cylindrycznej próbce gruntu umieszczonej w aparacie trójosiowego ściskania wyposażonym w specjalne piezoelementy typu bender (z jęz. ang. *bender elements*). Omówiono pokrótce podstawowe cechy zjawiska generacji fali sejsmicznej za pomocą impulsu elektrycznego przyłożonego do piezoelementu oraz zasady pomiaru prędkości propagowanej fali w ośrodku gruntowym. Przeanalizowano sposoby różnej interpretacji sygnału odbiorczego i jej wpływ na otrzymywane wyniki. Zbadano zależność prędkości propagacji od zagęszczenia ośrodka, wartości średniego ciśnienia efektywnego oraz nawodnienia.

2. Metoda pomiaru prędkości fali sejsmicznej w warunkach laboratoryjnych

Wyznaczanie właściwości sprężystych ośrodka gruntowego na podstawie prędkości propagacji fali sejsmicznej oparte jest na znanym zjawisku fizycznym związanym z rozchodzeniem się takich fal w ciałach fizycznych z różnymi prędkościami w zależności od właściwości ośrodka. W przypadku ośrodka gruntowego, pod pojęciem „fale sejsmiczne” rozumie się drgania o małej amplitudzie generowane w szkielecie gruntowym wskutek przejścia fali wywołanej czynnikami zewnętrznymi. Drgania generowane w jednym punkcie ośrodka są progresywnie transmitowane przez poszczególne cząstki, poprzez ich powierzchnie kontaktu.

Fale sejsmiczne mogą propagować się w ciałach stałych w dwóch różnych postaciach i w związku z tym wyróżnia się dwa podstawowe typy fal:

- fale ścinające (typu S) zwane również „falami poprzecznymi”, które rozchodzą się w ośrodku w wyróżnionym kierunku wywołując drgania cząstek w kierunku prostopadłym do kierunku propagacji,
- fale ciśnieniowe (typu P) zwane również „falami podłużnymi” lub „objętościowymi”, propagujące się w wyróżnionym kierunku, wywołując drgania cząstek równoległe do kierunku propagacji.

W uproszczeniu, w czasie propagacji fal ścinających cząstki tworzące ośrodek przekazują drgania cząstkom sąsiadującym prostopadle do kierunku propagacji, natomiast dla fal ciśnieniowych sąsiadujące ze sobą cząstki „popychają się i ciągną” jedna drugą w kierunku propagacji. Wskutek różnych mechanizmów propagacji parametry fal typu S i P znacznie się różnią. Fale ciśnieniowe rozchodzą się z dużą wyższą prędkością niż fale ścinające (około 1,7 razy szybciej).

Zgodnie z teorią rozchodzenia się fal w izotropowym, jednorodnym ośrodku sprężystym, kwadrat prędkości propagacji fal typu S i P jest wprost proporcjonalny do sztywności materiału i odwrotnie proporcjonalny do jego gęstości

$$v_s = \sqrt{\frac{G_{\max}}{\rho}}; \quad v_p = \sqrt{\frac{M}{\rho}} \quad (1)$$

gdzie:

- v_s i v_p – odpowiednie prędkości rozchodzenia się fali ścinającej i ciśnieniowej,
- G_{\max} – maksymalny moduł ścinania danego ośrodka,
- M – moduł edometryczny,
- ρ – całkowita gęstość ośrodka.

Oznacza to, że prędkość propagacji jest wyższa w ośrodkach o mniejszej gęstości i większej sztywności.

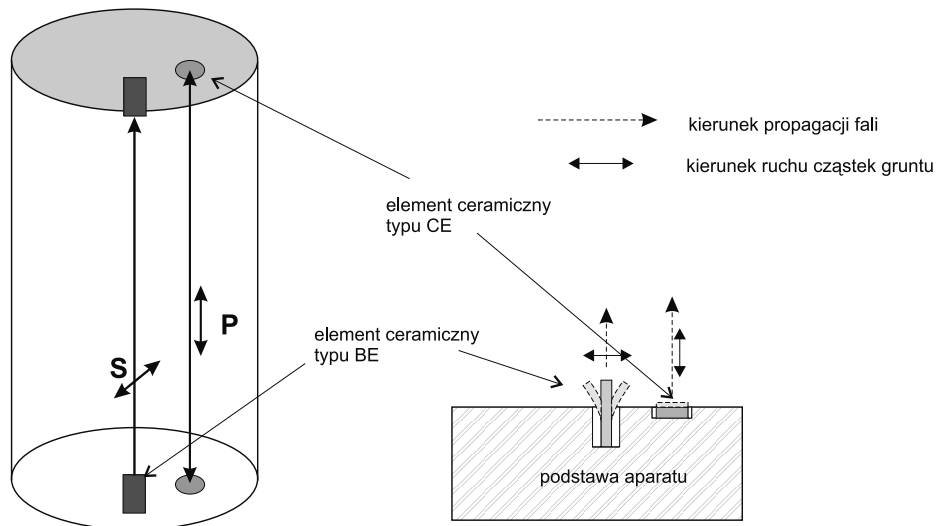
Do wytwarzania i odbierania impulsu fali ścinającej i ciśnieniowej wykorzystuje się elementy piezoelektryczne. Są to elementy ceramiczne, których konstrukcja opiera się na zjawisku piezoelektryczności. Polega ono na powstaniu polaryzacji elektrycznej w elemencie ściskanym lub rozciągany. Właściwość ta jest zwrotna, tzn. że element poddany działaniu zewnętrznego pola elektrycznego będzie ulegać deformacji i odwrotnie. Elementy te mogą więc zarówno deformować się pod wpływem przyłożonego napięcia, generując impuls w postaci fali, lub deformować się w wyniku odebrania impulsu takiej fali, wywołując odpowiednie napięcie elektryczne. Zjawisko to wykorzystano do pomiaru prędkości fal rozchodzących się w próbce gruntu umieszczonej w komorze aparatu trójosiowego ściskania. Jeden z elementów ceramicznych zwany „elementem typu BE” (ang. *bender element*) służy do generacji i odbioru fal ścinających a drugi zwany „elementem typu CE” (ang. *compression element*) do fal ciśnieniowych.

Metoda wyznaczania wartości maksymalnego modułu ścinania G_{\max} za pomocą pomiaru prędkości fali ścinającej generowanej przez elementy typu BE została opracowana w 1977 roku przez Shirleya i Hamptona, za Jovicicem i innymi [6]. Elementy te można instalować również w innych aparatach stosowanych w laboratorium geotechnicznym, niemniej najbardziej wszechstronne zastosowanie mają w przypadku zainstalowania ich do aparatu trójosiowego ściskania.

Typowy element typu BE składa się z dwóch cienkich sklejonnych ceramicznych płytek o niewielkich wymiarach. W przypadku elementów wykorzystanych do prezentowanych poniżej badań wymiary te wynosiły 20 mm × 10 mm × 2 mm. W wyniku przyłożonego napięcia elementy te mogą się zginać, generując falę ścinającą. Z kolei elementy typu CE, mające kształt krążka o niewielkich wymiarach (10 mm średnicy i 2mm grubości), w wyniku przyłożonego napięcia zwiększają swoją grubość, generując falę objętościową.

W przypadku aparatu trójosiowego ściskania piezoelementy instaluje się w podstawie oraz korku zamykającym próbkę od góry, tak jak to pokazano na rys. 1. Elementy typu BE wystają ponad płaszczyzny korka i podstawy około 3 mm umożliwiając penetrację w głąb próbki gruntu. Wskutek zginania elementów BE przez przyłożenie odpowiedniego napięcia do płytek wyzwała się impuls fali ścinającej, która propaguje się w kierunku pionowym wzdłuż wysokości próbki, wywołując zarazem drgania cząstek gruntu w kierunku poziomym, tak jak to pokazano na rys. 1.

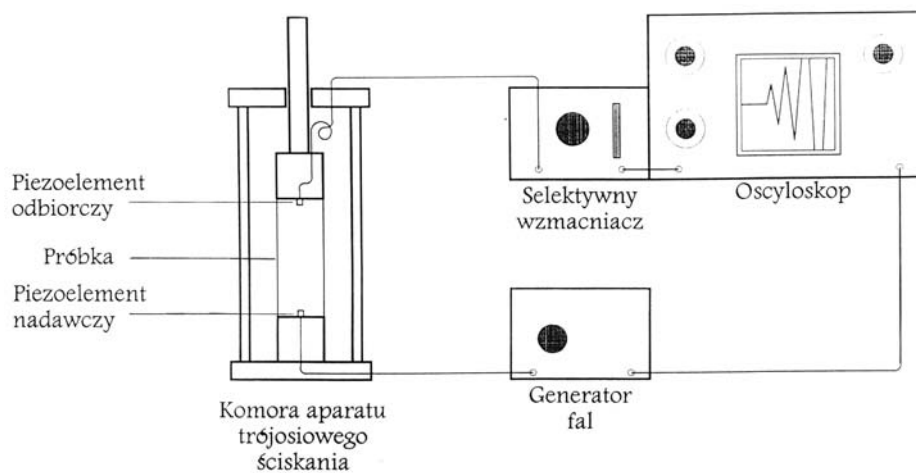
Z kolei elementy typu CE są również zagłębione w podstawie i górnym korku, z tym że zewnętrzne płaszczyzny czujników pokrywają się z płaszczyznami podstawy i korka. Są to zarazem powierzchnie styku czujników z gruntem (rys. 1). Czujniki te przez swoje rozszerzanie i kurczenie generują impuls fali ciśnieniowej (podłużnej), która rozchodzi się również pionowo, wywołując drgania cząstek gruntu w kierunku równoległym do kierunku propagacji. Tak jak wspomniano, czujniki piezoelektryczne są w swojej funkcji odwracalne, tzn. ruch czujnika wywołany odebrany sygnałem generuje niewielkie napięcie i odwrotnie, odpowiednio duże napięcie generuje ruch czujnika.



Rys. 1. Schemat dwóch podstawowych typów fal sejsmicznych generowanych za pomocą ceramicznych czujników piezoelektrycznych w aparacie trójosiowego ściskania

Fig. 1. Two basic types of seismic waves generated by piezoceramic transducers in triaxial cell

Oprócz elementów piezoelektrycznych, zestaw pomiarowy do wyznaczania właściwości gruntu na podstawie pomiaru prędkości fal sejsmicznych musi być uzupełniony o urządzenia elektroniczne w postaci generatora funkcji, wzmacniacza sygnału oraz oscyloskopu dwukanałowego do rejestracji sygnału generowanego i odbieranego przez czujniki piezoceramiczne. Pełen zestaw aparatury pomiarowej pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Schemat aparatury do pomiaru prędkości fal sejsmicznych

Fig. 2. Seismic waves velocity test set-up

Generator funkcyjny służy do wyzwolenia sygnału w postaci pojedynczej fali o dowolnym kształcie (np. prostokątnym, trójkątnym czy sinusoidalnym). W celu wywołania mechanicznego ruchu czujników piezoelektrycznych sygnał taki musi być odpowiednio wzmocniony, jak również wzmocnienia wymaga niewielkie napięcie spowodowane przez odebrany sygnał. Funkcję tę spełnia wzmacniacz sygnału. Wysyłane i odbierane sygnały są wyświetlane w czasie rzeczywistym na ekranie odpowiednio czułego, dwukanałowego oscyloskopu, co umożliwi określenie czasu przejścia sygnału przez próbkę i obliczenie prędkości propagacji fali.

Piezoelektryczne właściwości czujników ceramicznych pozwalają na stosunkowo prosty pomiar prędkości fali tylko przy wykorzystaniu interpretacji sygnału elektrycznego, obserwowanego na ekranie oscyloskopu. Dzięki temu, iż generator jednocześnie wysyła sygnał do piezoelementu i bezpośrednio do oscyloskopu, można dokładnie ocenić opóźnienie, z jakim sygnał dochodzi do elementu odbiorczego, a w konsekwencji wyznaczyć prędkość propagacji fali. Prędkość fali poprzecznej, która jest ściśle związana ze sztywnością gruntu, może być obliczona na podstawie wzoru

$$v_s = \frac{h_p - 2b}{t_s} \quad (2)$$

gdzie:

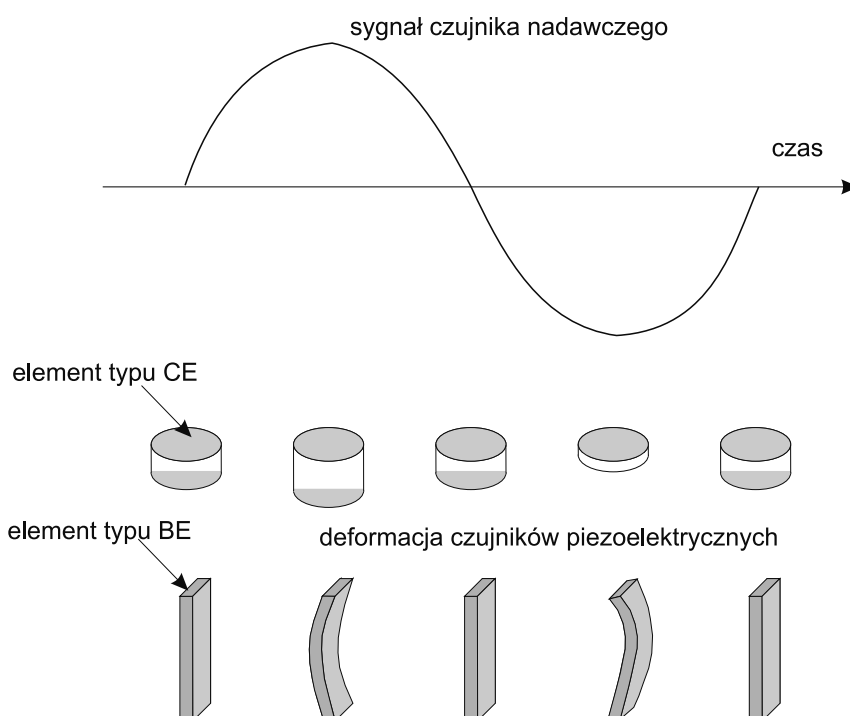
- h_p – wysokość próbki,
- b – zagłębienie piezoelementu w próbce,
- t_s – czas przejścia fali.

Należy zwrócić uwagę, że zgodnie ze wzorem (2) efektywna długość drogi przejścia fali przez próbkę nie odnosi się do całkowitej jej wysokości, lecz do odległości pomiędzy końcami piezoelementów, które penetrują w głąb próbki [16].

Ze względu na trudności interpretacyjne wyników (będzie to szerzej omówione w następnym rozdziale), najczęściej stosowanym impulsem do czujnika nadawczego jest impuls w postaci jednego pełnego okresu sinusoidy. Odpowiada ona różnym fazom deformacji elementów piezoelektrycznych, co pokazano schematycznie na rys. 3 [3].

Istotną rolę związaną z prawidłowym przebiegiem badania oraz wiarygodnością otrzymanych wyników pełni właściwe ustawienie obu par elementów piezoelektrycznych względem siebie (muszą być jednakowo spolaryzowane, tzn. ustawione w jednej osi i płaszczyźnie), jak też dobór odpowiedniej częstotliwości dla emitowanego sygnału. W przypadku elementów typu BE częstotliwość ta może się zmieniać w zakresie od 2 do 30 kHz, podczas gdy dla fal ciśnieniowych (elementy typu CE) częstotliwości sygnału nadawczego muszą być znacznie wyższe (powyżej 100 kHz). Każdorazowo pomiaru prędkości dokonuje się dla różnych częstotliwości sygnału nadawczego, poszukując tej, dla której odpowiedź układu jest najlepsza.

Czujniki piezoelektryczne instaluje się również w skrętnych aparatach postaciowych oraz w edometrach, jednakże ze względu na duże trudności z precyzyjnym określeniem dystansu, który pokonuje fala sejsmiczna w tych aparatach, wyniki w nich otrzymano mogą być obarczone błędem [14, 15]. Są już także propozycje wykorzystania czujników ceramicznych do pomiaru prędkości fal poziomych, umożliwiającego badanie własności anizotropowych ośrodka gruntowego w zakresie sprężystym, jak też oszacowanie anizotropii wymuszonej stanem naprężenia czy anizotropii wewnętrznej [4].



Rys. 3. Fazy deformacji elementów piezoelektrycznych typu CE i BE dla impulsu sinusoidalnego

Fig. 3. Deformations of CE and BE elements for the sinusoidal pulse excitation

Pomimo że metoda wyznaczania własności sprężystych gruntów na podstawie pomiaru fal sejsmicznych należy do grupy metod bardziej zaawansowanych technologicznie ze względu na wykorzystywane urządzenia elektroniczne, jest ona stosunkowo dobrze rozpoznana, chociaż jej popularność i stosowność w warunkach polskich jest dość ograniczona. Wynika to głównie z braku odpowiedniej aparatury pomiarowej. Jeszcze kilka lat temu w Polsce badania takie prowadził tylko jeden ośrodek naukowy, a w chwili obecnej trzy. Pionierem w implementacji tej metody w warunkach polskich był Lipiński z SGGiW, który po raz pierwszy zastosował ją do oceny właściwości sprężystych odpadów poftłocacyjnych rudy miedzi [7], a następnie rozwijał i stosował dla innych rodzajów gruntów [8].

3. Badania prędkości rozchodzenia się fali sejsmicznej – dla piasku „Skarpa”

Jedną z serii badań prędkości rozchodzenia się fali sejsmicznej dotyczyła gruntu niespoistego, reprezentowanego przez piasek „Skarpa”, który obok piasku „Lubiatowo” jest drugim modelowym piaskiem w laboratorium geotechnicznym IBW PAN. Podstawowe charakterystyki fizyczne i wytrzymałościowe dla piasku „Skarpa” zestawiono w tabeli 1.

Zestawienie podstawowych charakterystyk piasku „Skarpa”

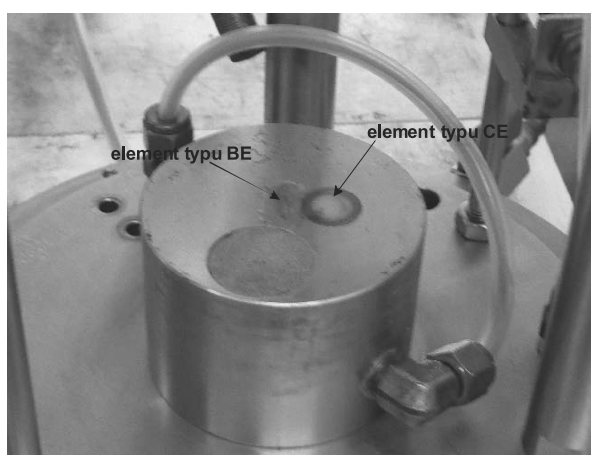
Piasek	Rodzaj	D_{50} [mm]	$\phi^{(*)}$ (luźny)	$\phi^{(*)}$ (zag.)	U	$e_{\min}^{(**)}$	$e_{\max}^{(**)}$	Stopień obtroczenia ziaren
„Skarpa”	średni, kwarcowy	0.42	34.2°	41.2°	2.5	0.432	0.677	nieobtroczone

(*) – średnie wartości wyznaczone z trzech niezależnych badań trójosiowego ściskania

(**) – wartości wyznaczone metodami normowymi

Badania przeprowadzono w aparacie trójosiowego ściskania włoskiej firmy Enel Hydro, w którym można ścinać próbki w warunkach trójosiowych zarówno przy obciążeniu monotonicznym, jak i cyklicznym. Aparat ten, należący do laboratorium geotechnicznego IBW PAN, został wyposażony w piezoelektryczne elementy typu bender (BE), jak i czujniki ciśnieniowe (CE), umieszczone parami w podstawie i tłoczysku zamykającym próbkę od góry (rys. 4). Komora aparatu trójosiowego umożliwia badanie próbek o średnicy 70 mm i wysokości 140 mm. W aparacie tym długość piezoelementu penetrującego próbkę wynosi $b = 3.77$ mm (patrz wzór 2).

Aparat jest wyposażony dodatkowo w system czujników do lokalnego pomiaru deformacji próbki, dwie pary do pomiaru lokalnych przemieszczeń pionowych oraz jedna para do lokalnego pomiaru przemieszczeń bocznych cylindrycznych próbek gruntu. Są to bezkontaktowe czujniki zbliżeniowe, umożliwiające precyzyjny pomiar deformacji z dokładnością do 1 μm . W omawianych badaniach czujniki te wykorzystano do dokładnego określania zmian początkowego zagęszczenia badanego piasku w wyniku zmiennego ciśnienia izotropowego. Szczegółowy opis cyklicznego aparatu trójosiowego ściskania wykorzystanego do badań można znaleźć np. w pracy [12].

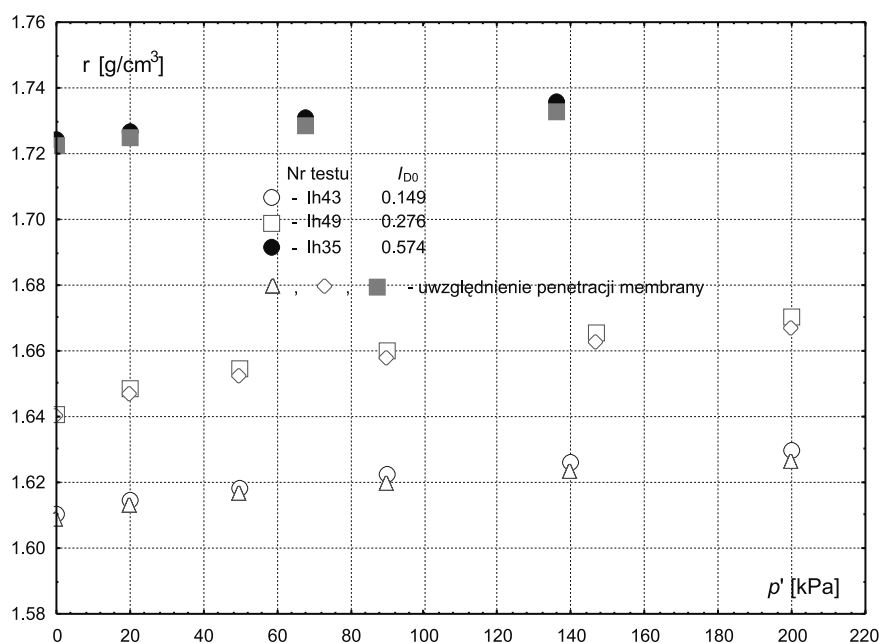


Rys. 4. Widok piezoelementów typu BE i CE zainstalowanych w podstawie aparatu trójosiowego ściskania

Fig. 4. BE and CE piezoceramic elements installed in the bottom pedestal of triaxial cell

Próbki gruntu, w których mierzono czas przejścia fali ścinającej pomiędzy elementami typu bender, były przygotowywane do różnego rodzaju badań, w których poddawano je różnym stanom obciążenia. Pomiar prędkości fali odbywał się, jak gdyby przy okazji mając miejsce w początkowej fazie badania głównego, w której próbka była poddawana założonemu ciśnieniu izotropowemu. Ciśnienie to przykładano do próbki stopniami, od 2 do 5 stopni dla danego badania, w zakresie od 20 do 200 kPa, rejestrując przy tym deformacje próbki za pomocą lokalnych czujników przemieszczeń. Dla kolejnych stopni obciążania próbki ciśnieniem izotropowym dokonywano pomiarów sejsmicznych.

Pomiar deformacji piasku spowodowanych działaniem średniego ciśnienia efektywnego pozwolił na obliczenie zmian zagęszczenia początkowego próbki. W obliczeniach tych uwzględniano również zmiany objętości próbki wynikające z penetracji membrany. Umożliwiło to bardzo precyzyjne wyznaczenie rzeczywistego zagęszczenia gruntu, dla którego dokonywano danego pomiaru prędkości fali ścinającej, co miało wpływ na dokładność wyznaczenia maksymalnego modułu ścinania G_{max} , patrz równanie (1). Przykładowe zmiany zagęszczenia początkowego w funkcji ciśnienia izotropowego pokazano na rys. 5.



Rys. 5. Zmiany zagęszczenia początkowego w funkcji ciśnienia izotropowego

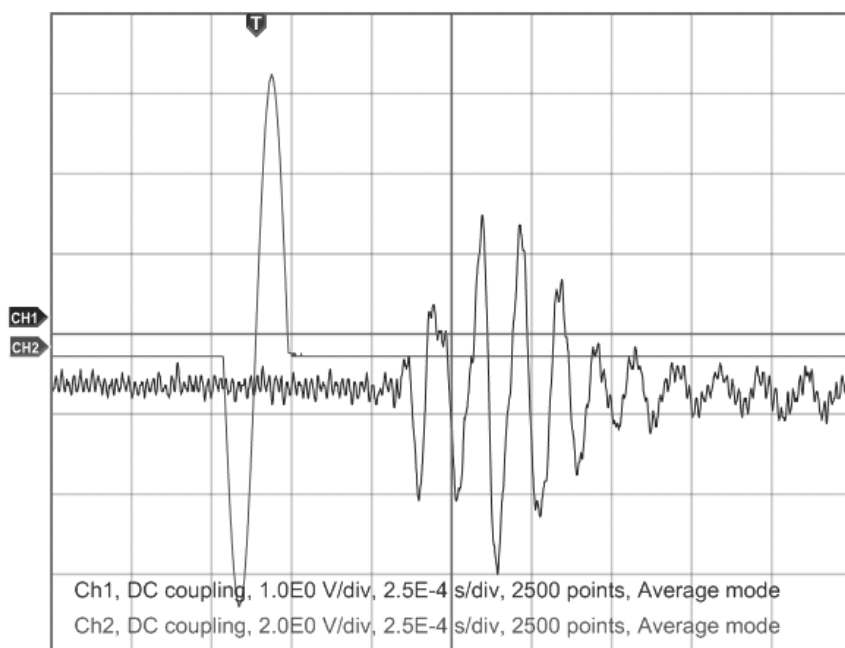
Fig. 5. Variation of initial density with confining pressure

W związku z różnorodnością prowadzonych badań zasadniczych, badania prędkości rozchodzenia się fali sejsmicznej były wykonywane zarówno dla gruntu suchego, jak i w pełni nawodnionego, dla różnych zagęszczeń początkowych piasku oraz przy różnym ciśnieniu izotropowym. Badania te wykonywano głównie dla fali ścinającej, gdyż celem było wyznaczenie maksymalnego modułu ścinania G_{max} , zgodnie ze wzorem (1).

Przygotowując próbki do badań zarówno na gruncie suchym, jak i nawodnionym, dużą uwagę poświęcano zapewnieniu maksymalnej jednorodności badanej próbki. W przypadku próbek suchych, średnio zagęszczonych i zagęszczonych, formowano je techniką depozycji na sucho, natomiast w przypadku próbek luźnych, zarówno suchych, jak i nawodnionych, stosowano technikę ubijania na mokro. Ta ostatnia technika pozwala na formowanie próbek o początkowym stanie bardzo luźnym, jak też zapewnia znaczną jednorodność próbki oraz stosunkowo dużą powtarzalność początkowego stanu gruntu. Dokładny opis tych technik można znaleźć w pracy [12].

Istotną rolę w uzyskaniu wiarygodnego sygnału odbiorczego w metodzie pomiaru prędkości fali sejsmicznej w gruncie jest zapewnienie dokładnego kontaktu gruntu z elementami piezoelektrycznymi na całej powierzchni tych elementów. Jest to szczególnie ważne w przypadku gruntów spoistych o dużej spoistości i niskim wskaźniku plastyczności. W mniejszym stopniu dotyczy to gruntów niespoistych, choć problem może również wystąpić w przypadku ich bardzo luźnej struktury. W celu eliminacji tego problemu, przed każdym badaniem piezoelementy smarowano specjalnym żelem wykorzystywanym w badaniach USG.

Dla każdego stopnia obciążenia ciśnieniem izotropowym pomiaru prędkości rozchodzenia się fali ścinającej dokonywano poprzez generowanie z generatora funkcji impulsu elektrycznego w postaci pojedynczej sinusoidy lub impulsu prostokątnego. Zarówno sygnał nadawczy, jak i odbiorczy były rejestrowane i wyświetlane w czasie rzeczywistym na ekranie oscyloskopu dwukanałowego. Przykład takiej rejestracji pokazano na rys. 6.



Rys. 6. Typowy zapis sygnału nadanego i odebranego na ekranie oscyloskopu

Fig. 6. Typical oscilloscope records of transmitted and received signals

4. Wyznaczanie czasu przejścia fali przez próbkę

Tak jak pisano w poprzednim rozdziale, wiarygodna odpowiedź układu w postaci wyraźnego sygnału odbiorczego zależy jest między innymi od częstotliwości sygnału. W związku z tym każdorazowo poszukiwano takiej rejestracji, która pozwalała na najlepszą identyfikację sygnału odbiorczego i wyznaczenie czasu transmisji fali t_s – przez całą wysokość próbki h_p . W przypadku badanego piasku „Skarpa” zakres przeszukiwań częstotliwości dla fali ścinającej wahał się pomiędzy 2 a 20 kHz.

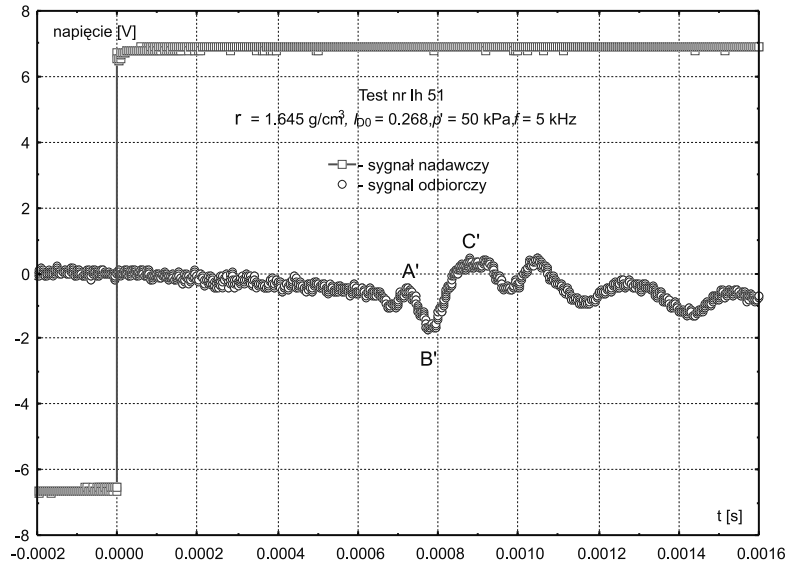
Dla każdego badania wyniki pomiarów w postaci sygnału nadawczego i odbiorczego w funkcji czasu były przekazywane z oscyloskopu do komputera i tam zapisywane.

Pomimo stosunkowo dużej prostoty badania prędkości fali sejsmicznej metoda ta stwarza pewne trudności interpretacyjne, które są związane z precyzyjnym określeniem czasu dojścia sygnału do odbiornika. Wiąże się to z faktem, że wyizolowana fala ścinająca, czy to w formie pojedynczej sinusoidy, czy też fali prostokątnej, propaguje się przez ośrodek gruntowy w postaci dominującej fali ścinającej, jak też składowej fali ciśnieniowej. Ponieważ prędkość tej drugiej fali jest ponad 1,5 razy większa niż prędkość fali ścinającej, dociera ona do odbiornika szybciej, zniekształcając sygnał odbiorczy w czasie, który nie odpowiada rzeczywistemu czasowi propagacji dla fali ścinającej. Jest to określane w literaturze jako efekt bliskiego pola, podczas gdy oddziaływanie czystej fali ścinającej efektem dalekiego pola [6, 16]. Ma to bezpośredni i znaczący wpływ na dokładność wyznaczania wartości maksymalnego modułu ścinania. Wpływ ten potęguje się dla gruntów o dużej sztywności.

Na rysunku 7 pokazano przykładowy wynik badania dla piasku poddanemu średniemu ciśnieniu efektywnemu wynoszącemu $p' = 50$ kPa i gęstości $\rho = 1.645$ g/cm³, co odpowiadało zagęszczeniu początkowemu wynoszącemu $I_D = 0.268$. Impuls nadawczy w postaci fali ścinającej, przyłożonej do próbki przez piezoelement umieszczony w podstawie aparatu (rys. 4) wygenerował impuls w postaci pojedynczego prostokąta. Jak widać z rysunku, odpowiedź układu w formie drgania, które doszło do piezoelementu umieszczonego w korku zamykającym próbkę od góry, jest mocno nieregularna i nie pozwala jednoznacznie ocenić czasu dojścia sygnału do odbiornika.

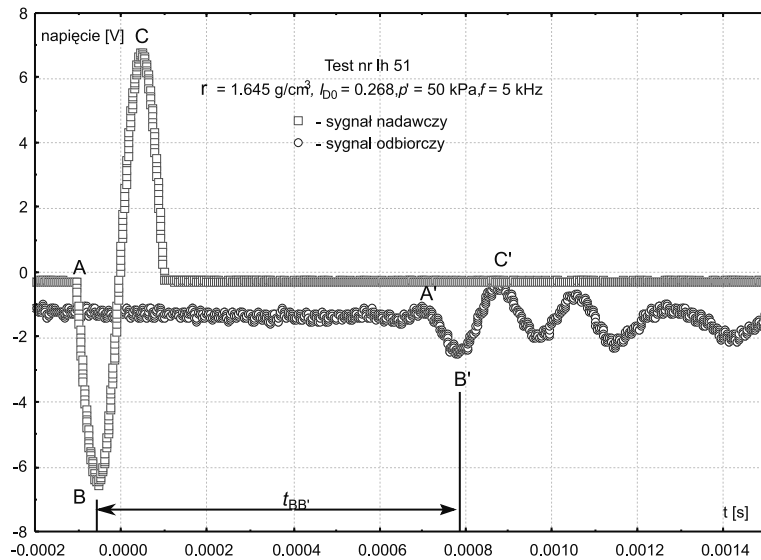
Jako pierwsze zniekształcenie sygnału odbiorczego można przyjąć punkt A'. W kolejnych przyrostach czasu zniekształcenie to stopniowo się zwiększa, co reprezentują punkty zwrotne B' i C'. Dla tych punktów wyznaczono odpowiadające im czasy przejścia fali ścinającej przez badaną próbkę, przyjmując czas początku impulsu w punkcie nagłego wzrostu napięcia, co odpowiada czasowi $t = 0$. Wyniki pomiarów zestawiono w tabeli 2. Jak widać z przedstawionych w tabeli wartości, poszczególne czasy przejścia, w zależności od wyboru pary punktów, dość znacznie się różnią, istotnie wpływając na obliczane na tej podstawie wartości maksymalnego modułu ścinania, por. wzór (1).

Dodatkowo dla tej samej próbki oraz tych samych warunków wygenerowano sygnał nadawczy w postaci pojedynczej fali sinusoidalnej. Wyniki badania pokazano na rys. 8.



Rys. 7. Przykładowy wynik badania czasu przejścia fali ścinającej w formie fali prostokątnej dla piasku o gęstości $\rho = 1.645 \text{ g/cm}^3$, $I_{D0} = 0.268$, $p' = 50 \text{ kPa}$

Fig. 7. Example result of BE test with square input wave



Rys. 8. Przykładowy wynik badania czasu przejścia fali ścinającej w postaci pojedynczej, regularnej sinusoidy dla piasku o gęstości $\rho = 1.645 \text{ g/cm}^3$, $I_{D0} = 0.268$, $p' = 50 \text{ kPa}$, $f = 5 \text{ kHz}$

Fig. 8. Example result of BE test with sinusoidal input wave

W tym przypadku impuls nadawczy w postaci fali ścinającej o częstotliwości $f = 5$ kHz, przyłożonej do próbki, tak jak poprzednio, przez piezoelement umieszczony w podstawie aparatu (rys. 4) wygenerował falę odpowiadającą pojedynczej, regularnej sinusoidzie. Dla fali sinusoidalnej odpowiedź układu w formie drgania, które doszło do piezoelementu umieszczonego w korku zamykającym próbkę od góry, jest już bardziej regularna niż dla fali prostokątnej. Pierwsze zniekształcenie sygnału odbiorczego wystąpiło w punkcie A', by stopniowo się zwiększać do punktu B' i C'. Punkty te odpowiadają punktom A, B i C sygnału nadawczego. W tabeli 2 zestawiono pomierzone wartości czasu przejścia fali przez próbkę dla poszczególnych par punktów. Przedstawione wyniki pokazują, że wartości poszczególnych czasów przejścia, w zależności od wyboru pary punktów też się różnią, choć już nieznacznie.

Jak sugerują Vigianni i Atkinson [16], zastąpienie fali prostokątnej pojedynczym impulsem sinusoidalnym może przyczynić się do redukcji niepewności przy określaniu czasu przejścia fali ścinającej przez środek gruntowy do około $\pm 7\%$, co potwierdzają wyniki przedstawione na rys. 8.

Tabela 2

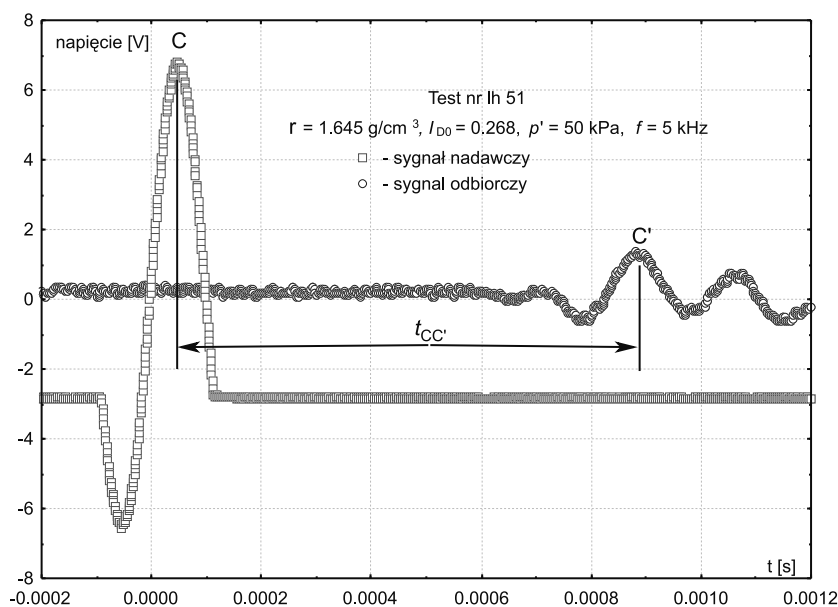
Wartości czasów przejścia fali ścinającej przez próbkę w zależności od przyjętej procedury interpretacji

Rodzaj wzbudzenia	Procedura interpretacji	Czas przejścia t [s]	
fala prostokątna	kolejne zniekształcenia sygnału odbiorczego	$t_{A'}$	0.000722
		$t_{B'}$	0.000775
		$t_{C'}$	0.000879
pojedyncza sinusoida	czas obliczany pomiędzy odpowiadającymi sobie punktami	$t_{AA'}$	0.000812
		$t_{BB'}$	0.000835
		$t_{CC'}$	0.000825

Nie rozwiązuje to jednak problemu jednoznacznego wyboru kryterium wyznaczania rzeczywistego czasu przejścia fali przez próbkę. Problem ten był przedmiotem pracy różnych badaczy zarówno pod kątem rozważań teoretycznych, jak i empirycznych. W przypadku tych pierwszych warto wspomnieć o rozwiązaniu analitycznym zaproponowanym przez Sanches-Salineru i innych [10], czy też numerycznej analizie zagadnienia opisanej przez Mancuso i innych [9], polegającej na dekompozycji sygnału odbiorczego na grupę fal harmonicznym o danej częstotliwości i amplitudzie, opierając się na szybkiej transformacji Fouriera (z jęz. ang. FFT – Fast Fourier Transformation).

W przypadku propozycji empirycznych na uwagę zasługują dwie alternatywne koncepcje zaproponowane przez Jovicica i innych [6]. Pierwsza z nich polega na znaczącym zniekształceniu sygnału nadawczego wygenerowanego w postaci pojedynczej, asymetrycznej sinusoidy, a druga na takim dobieraniu częstotliwości tego sygnału, aby wprowadzić odbiornik w jedną z częstotliwości odpowiadających drganiom własnym, wywołując zjawisko rezonansu.

Na rys. 9 pokazano wyniki propagacji fali ścinającej przez tę samą próbkę gruntu, jak na rys. 7 i 8 i dla tych samych warunków badania. W tym przypadku impuls nadawczy został wygenerowany w postaci znacząco asymetrycznej sinusoidy.



Rys. 9. Przykładowy wynik badania czasu przejścia fali ścinającej w postaci pojedynczej asymetrycznej sinusoidy dla piasku o gęstości $\rho = 1.645 \text{ g/cm}^3, I_{D0} = 0.268, p' = 50 \text{ kPa}, f = 5 \text{ kHz}$

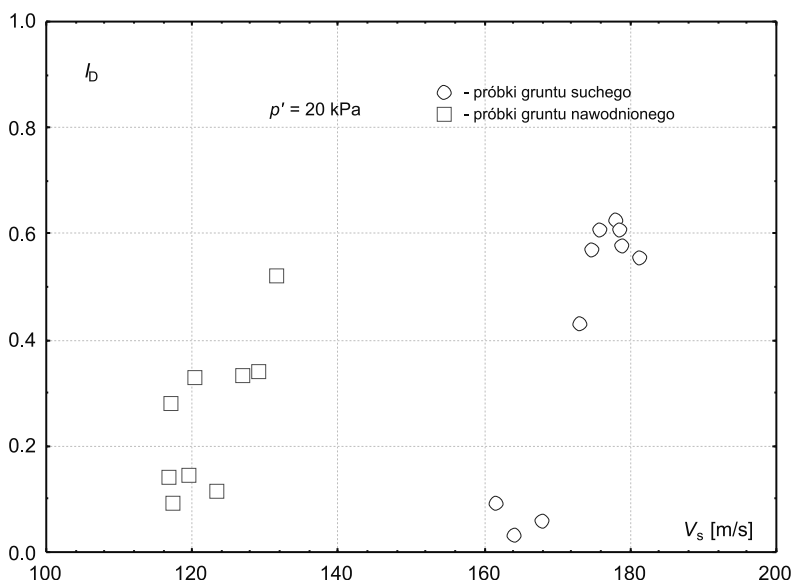
Fig. 9. Example result of BE test with asymmetric sinusoidal input wave

Otrzymana dla takiej formy sygnału nadawczego odpowiedź pozwala na znacznie bardziej precyzyjne wyznaczenie czasu przejścia, bazując na punkcie w sygnale odbiorczym odpowiadającym analogicznemu zniekształceniu jak dla sygnału nadawczego. W tym przypadku jest to punkt najwyższego wzniesienia fali odbiorczej oznaczony jako C'. Pomierzona wartość czasu pomiędzy odpowiadającymi sobie pikami sygnału nadawczego i odbiorczego wyniosła w tym przypadku $t_{CC'} = 0.000835 \text{ s}$ i jest dokładnie taka sama, jak w przypadku czasu t_{BB} dla sinusoidy regularnej, patrz tabela 2. Zgodnie z Jovicicem i innymi [6], generowanie sygnału nadawczego w postaci mocno asymetrycznej, pojedynczej sinusoidy likwiduje całkowicie efekty bliskiego pola, a wyznaczone na tej podstawie czasy przejścia fali ścinającej odpowiadają czasom rzeczywistym. Dlatego też, przy analizie wyników badań wykonanych dla innych zagęszczeń i ciśnień efektywnych czasy przejścia wyznaczano z sygnału nadawczego w postaci sinusoidy asymetrycznej lub regularnej, stosując odpowiednio czasy $t_{CC'}$ i t_{BB} (por. rys. 8 i 9).

5. Analiza otrzymanych wyników doświadczeń

Badania prędkości fali sejsmicznej prowadzono w próbkach piasku o różnym stanie początkowym charakteryzowanym przez początkowe zagęszczenie, docelowe ciśnienie konsolidujące oraz warunki nawodnienia (grunt suchy lub całkowicie nawodniony). Docelowe ciśnienie konsolidujące, którego maksymalna wartość wyniosła 200 kPa (dla części próbek, 100 i 140 kPa) były przykładane stopniowo, przy których wykonywano pomiar prędkości fali sejsmicznej. Badania te przeprowadzono ogółem dla ponad 25 różnych próbek gruntu.

Na rysunku 10 zestawiono wyniki pomiarów prędkości propagacji fali ścinającej dla 20 wybranych próbek gruntu, zarówno suchych jak i w pełni nawodnionych, każda grupa charakteryzująca się różnym zagęszczeniem początkowym, dla średniego ciśnienia efektywnego wynoszącego 20 kPa. Zagęszczenie to zmieniało się od $I_D = 0,035$ dla próbki bardzo luźnej do $I_D = 0,61$ odpowiadającej praktycznie próbce zagęszczonej. Pomimo dość znacznego rozrzutu wyników można na ich podstawie odnotować wyraźne tendencje.

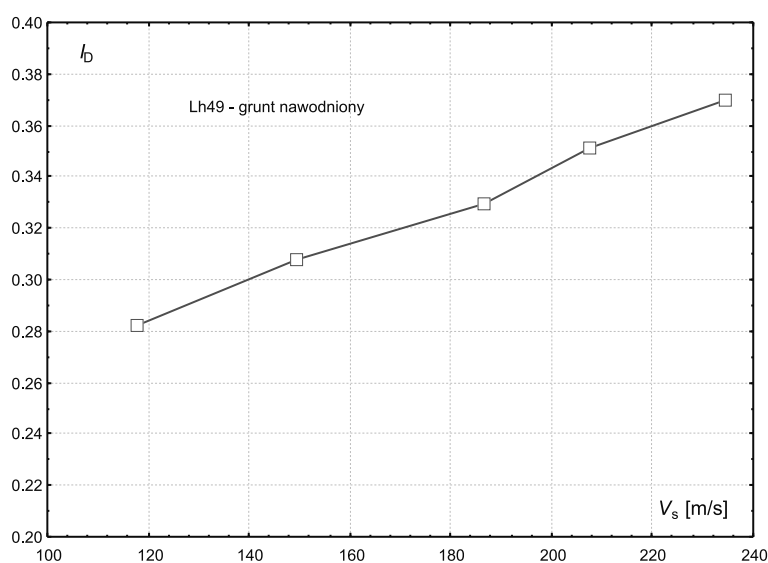


Rys. 10. Zależność prędkości fali ścinającej od stanu początkowego gruntu (zagęszczenia początkowego i nawodnienia) przy stałej wartości średniego ciśnienia efektywnego, $p' = 20$ kPa

Fig. 10. Effect of initial state of sand (initial density and saturation) on shear wave velocity for the constant mean effective pressure

Przede wszystkim przedstawione wyniki wskazują, że prędkości propagacji fali ścinającej w gruncie suchym są znacznie większe niż w tym samym gruncie, lecz całkowicie nawodnionym. Należy przy tym dodać, że całkowite nawodnienie próbki było możliwe przy zastosowaniu odpowiednich procedur, takich jak uprzednie wyparcie z próbki powietrza i zastąpienie go gazem (CO_2), czy bardzo wolne nawadnianie próbki.

Po drugie, zarówno dla gruntu suchego, jak i nawodnionego, widać wyraźną zależność wartości prędkości od zagęszczenia początkowego. Im mniejsze zagęszczenie gruntu tym mniejsza prędkość propagacji, co wydaje się rzeczą fizycznie uzasadnioną. Ta druga zależność jest dobrze widoczna na rys. 11, gdzie pokazano zmiany prędkości fali ścinającej w funkcji zmian zagęszczenia gruntu w wyniku wzrostu średniego ciśnienia efektywnego, przykładanego w pojedynczym badaniu. W tym konkretnym przypadku nawodniona próbka gruntu o zagęszczeniu początkowym wynoszącym $I_D = 0.283$ została skonsolidowana do wartości ciśnienia docelowego równego 200 kPa, stopniami pośrednimi wynoszącymi odpowiednio 20, 50, 90, 147 kPa. Punkty przedstawione na rys. 11 odpowiadają zagęszczeniu przy kolejnych stopniach konsolidacji.



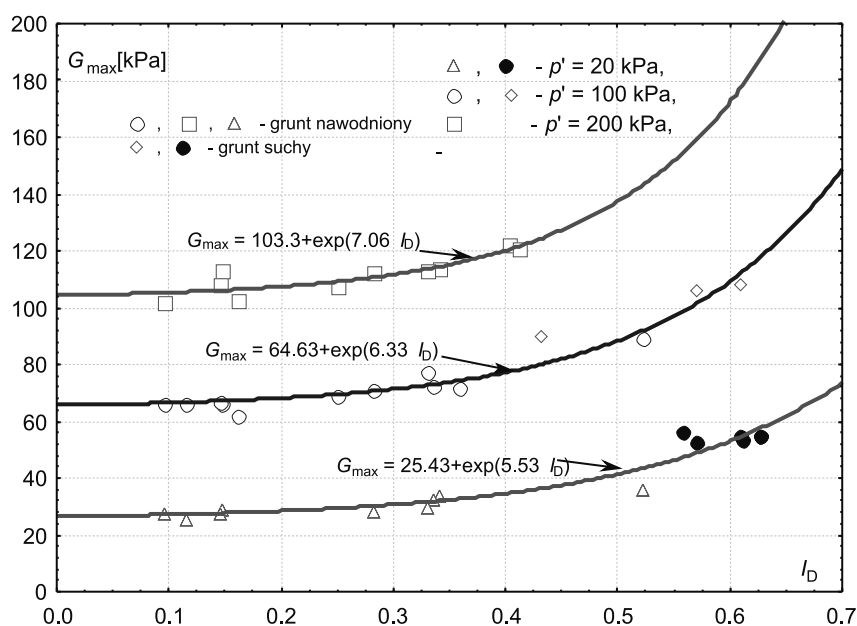
Rys. 11. Zmiany prędkości fali ścinającej przy różnych, wywołanych wzrostem ciśnienia konsolidującego, zagęszczeniach gruntu

Fig. 11. Variation of shear wave velocity with relative density, caused by increase of confining pressure

Dla analizowanej próbki z doświadczenia nr lh49, przyłożenie ciśnienia konsolidującego o wartości 200 kPa spowodowało wzrost zagęszczenia od $I_D = 0.283$ do 0.37, co z kolei przyczyniło się do prawie dwukrotnego wzrostu wartości prędkości przejścia fali ścinającej przez próbkę.

Dla danych przedstawionych na rys. 10, uzupełnionych o dane pomiaru prędkości fali ścinającej dla średniego ciśnienia efektywnego $p' = 100$ i 200 kPa, wyznaczono wartości modułu ścinania G_{max} , zgodnie ze wzorem (1). Wyniki te w funkcji zagęszczenia początkowego pokazano na rys. 12. Wartości G_{max} odpowiadające reakcji sprężystej gruntu przy średnim ciśnieniu efektywnym $p' = 20, 100$ i 200 kPa aproksymowano funkcją wykładniczą, której współczynniki wyznaczono z minimum kwadratu błędów. Z rysunku tego wynika, że znacząco różne prędkości propagacji fali ścinającej dla piasku suchego i nawodnionego po-

kazane na rys. 10 praktycznie nie wpływają na wartości modułu ścinania. Wynika to między innymi z faktu, że w przypadku gruntu nawodnionego do obliczeń G_{\max} przyjmuje się gęstość gruntu nawodnionego, która jest większa niż gęstość gruntu suchego, co niweluje różnice pomiędzy wartościami prędkości propagacji fali ścinającej w tych dwóch ośrodkach.



Rys. 12. Zmiany modułu ścinania G_{\max} w funkcji zagęszczenia początkowego, dla trzech różnych wartości średniego ciśnienia efektywnego

Fig. 12. Shear modulus G_{\max} vs. initial relative density for three values of mean effective pressure

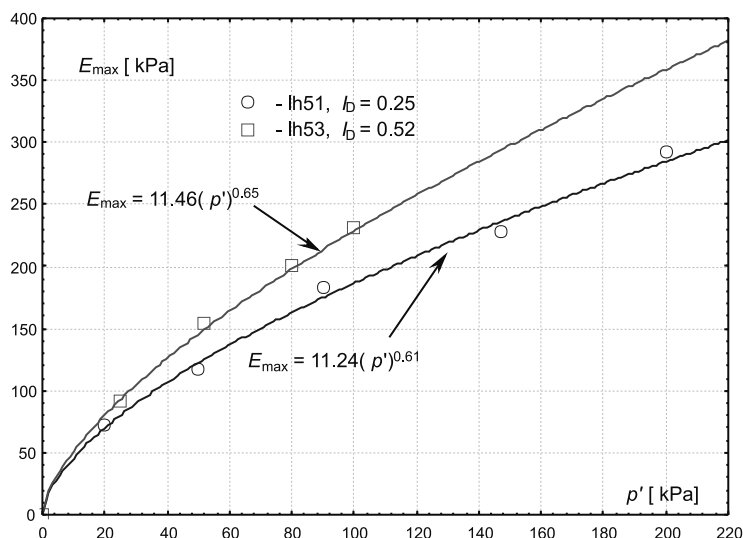
Dodatkowo z rysunku 12 wynika, że moduł ścinania jest tym wyższy, im grunt niespoisty jest bardziej zagęszczony i poddany większemu ciśnieniu efektywnemu. Pierwsza zależność wydaje się być oczywista zarówno z fizycznego punktu widzenia (większa gęstość ośrodka – większa jego sztywność), jak też w związku ze wzorem (1). Niemniej, wyniki z rys. 12 wskazują, że zależność od zagęszczenia początkowego nie jest taka silna w przypadku próbek luźnych (do $I_D < 0.5$), natomiast zwiększa się dla próbek bardziej zagęszczonych.

W przypadku zależności modułu ścinania od średniego ciśnienia efektywnego jest lepiej widoczna na rys. 13, gdzie pokazano z kolei zmiany maksymalnego modułu Younga w funkcji tego ciśnienia dla dwóch próbek gruntu w stanie luźnym i średnio zagęszczonym. Moduł Younga wyliczono na podstawie powszechnie znanej w teorii sprężystości zależności o postaci

$$E_{\max} = 2(1 + 2\nu)G_{\max} \quad (3)$$

gdzie ν jest współczynnikiem Poissona. Dla danych przedstawionych na rys. 13 współczynnik ten przyjęto o wartości $\nu = 0.3$, którą wyznaczono na podstawie lokalnych pomiarów odkształcenia poziomego i pionowego.

W tym przypadku zależność modułu Younga od średniego ciśnienia efektywnego aproksymowano funkcją potęgową. Zależność taką postulowano już na początku lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku [5] na podstawie wyników testów przeprowadzonych w aparacie prostego ścinania, jak też później opierając się na testach trójosiowych oraz wykonanych w kolumnie rezonansowej.



Rys. 13. Zmiany modułu Younga w funkcji średniego ciśnienia efektywnego

Fig. 13. Young modulus vs. mean effective pressure

6. Wnioski

W artykule przedstawiono wyniki badań związanych z pomiarem prędkości fali ścinającej w piasku „Skarpa”. Pomiary te realizowano w aparacie trójosiowego ściskania, wyposażonym w czujniki piezoelektryczne umożliwiające wysyłanie i odbieranie sygnału w postaci fali sejsmicznej propagującej się przez próbkę gruntu. Z analizy różnych rodzajów sygnału nadawczego wynika, że najbardziej miarodajne wyniki pomiaru uzyskuje się dla mocno asymetrycznej fali sinusoidalnej, która pozwala na stosunkowo prostą interpretację sygnału odbiorczego i wyznaczenie rzeczywistego czasu przejścia fali przez próbkę gruntu. W przypadku gdy wykorzystywane urządzenia elektronicznie uniemożliwiają wygenerowanie zniekształconego impulsu sinusoidalnego, wówczas można posłużyć się regularną pojedynczą sinusoidą, a czas przejścia wyznaczać jako odległości pomiędzy odpowiednimi dolinami sygnału nadawczego i odbiorczego. Należy przy tym pamiętać, aby poszukiwać odpowiednio wyraźnego sygnału odbiorczego przez zmianę częstotliwości sygnału nadawczego. W przypadku badanego piasku najbardziej efektywna z punktu widzenia interpretacji wyników częstotliwość wynosiła 5 kHz.

Uzyskane wyniki wskazują wyraźnie na to, że prędkość propagacji fali w suchym piasku jest znacznie większa niż w piasku w pełni nawodnionym, jak też na to, że prędkość ta jest tym większa, im większe jest zagęszczenie piasku. Pierwsza z zależności nie ma jed-

nak większego wpływu na wartości maksymalnego modułu ścinania G_{\max} wyznaczanego na podstawie prędkości propagacji fali sejsmicznej w gruncie. Zależy on natomiast mocno stanu początkowego gruntu niespoistego reprezentowanego przez zagęszczenie oraz średnie ciśnienie efektywne. Zależność modułu ścinania od zagęszczenia nie jest jednak silna dla gruntów luźnych w zakresie zagęszczenia do $I_D < 0.5$, natomiast zwiększa się znacząco powyżej tej granicy.

W przypadku zależności modułu ścinania od średniego ciśnienia efektywnego, w zakresie naprężeń stosowanych w prezentowanych badaniach (do 200 kPa), zależność ta jest silniejsza w początkowej fazie wzrostu naprężeń i maleje dla ich wyższego poziomu.

Należy stwierdzić, że wykorzystanie w laboratorium czujników ceramicznych do określania właściwości sprężystych ośrodka gruntowego jest obecnie na świecie dość powszechne, gdyż metoda ta ma wiele zalet. Podstawowe zalety to niedestruktywny charakter stosowanej metody oraz klarowność i szybkość jej użycia. Należy jednocześnie zwrócić uwagę na problemy związane z interpretacją wyników w celu dokładnego określenia czasu przejścia danej fali przez próbkę gruntu, jak też z wpływem niejednorodności ośrodka oraz przewarstwień na prędkość propagacji fali.

Literatura

- [1] Burland J.B., *Ninth Laurits Bjerrum Memorial Lecture: Small is beautiful – the stiffness of soils at small strains*, Canadian Geotechnical Journal, 26, 1989, 499-516.
- [2] Dyvik R., Madhus C., *Measurements of G_{\max} using bender elements*, Civil Engrs Convention, Detroit, New York, American Society of Civil Engineers, 1985, 186-196.
- [3] Enel Hydro, *Elastic waves velocity determination in laboratory testing*, user manual, 2000.
- [4] Fioravante V., Capoferri R., *On the use of piezoelectric transducers in triaxial testing*, złożone do druku, *On the Use of Multi-directional Piezoelectric Transducers in Triaxial Testing*, Geot. Testing Jnl, Vol. 24, 3, 2001, 243-255.
- [5] Hardin B.O., Drnevich V.P., *Shear modulus and damping in soils: design equations and curves*, ASCE Soil Mechanics and Foundations Division, Vol. 98, SM7, 1972, 667-692.
- [6] Jovicic V., Coop M.R., Simic M., *Objective criteria for determining G_{\max} from bender element tests*, Geotechnique 46, No. 2, 1996, 357-362.
- [7] Lipiński M., *Koncepcja oceny stanu odpadów poślotacyjnych ze względu na możliwość ich upłynnienia*, I Międzynarodowa Konferencja Zagospodarowania i Utylizacji Odpadów Górniczych i Hutniczych, Polanica Zdrój, 1995.
- [8] Lipiński M., *Laboratoryjne pomiary prędkości fal akustycznych dla określenia parametrów geotechnicznych*, XII Krajowa Konferencja Mechaniki Gruntów i Fundamentowania, Szczecin-Międzyzdroje, Vol. 1b, 2000, 39-48.
- [9] Mancuso C., Simonelli A.L., Vinale F., *Numerical analysis of in situ S-wave measurements*, Proc. 12th Int. Conf. Soil Mech., Rio de Janeiro 3, 1989, 277-280.
- [10] Salinero I.S., Roesset J.M., Stokoe K.H., *Analytical studies of body wave propagation and attenuation*, Report GR 86-15, University of Texas 1986.
- [11] Świdziński W., *Methods of determination of elastic constants of particulate materials – brief review*, Arch. Hydro-Eng. Environ. Mech. 47, No. 1-4, 2000, 27-50.

- [12] Świdziński W., *Mechanizmy zagęszczania i upłynniania gruntów sypkich*, Wyd. IBW PAN, Gdańsk 2006.
- [13] Tatsuoka F., Shibuya S., *Deformation characteristics of soils and rocks from field and laboratory tests*, Keynote Lecture (Session No.1), Proc. 9th Asian Regional Conf, on SMFE, Bangkok 1991, 2, 101-170.
- [14] Tatsuoka F., Jardine R.J., Lo Presti D., Di Benedetto H., Kodaka T., *Charaterising the Pre-Failure Deformation Properties of Geomaterials*, Theme Lecture for the Plenary Session, No. 1, Proc. of XIV IC on SMFE, Hamburg, September 1997, Vol. 4, 2129-2164.
- [15] Tatsuoka F., Modoni G., Jiang G.L., Anh Dan L.Q., Flora A., Matsushita M., Koseki J., *Stress-strain Behaviour at Small Strains of Unbounded Granular materials and its Laboratory Tests*, keynote lecture, proc. of Workshop on Modelling and Advanced testing for Unbounded Granular Materials, January 21 ad 22, 1999, Lisboa, (Correia eds.), Balkema, 17-61.
- [16] Viggiani G., Atkinson J.H., *Interpretation of bender element tests*, Geotechnique 45, No. 1, 1995, 149-154.