

Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences (2019), 28 (3), 405–416
Sci. Rev. Eng. Env. Sci. (2019), 28 (3)
Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska (2019), 28 (3), 404–416
Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. (2019), 28 (3)
<http://iks.pn.sggw.pl>
DOI 10.22630/PNIKS.2019.28.3.38

Zdzisław SKUTNIK, Marcin BILINIAK, Emil SOBÓL, Wojciech SAS

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie
Faculty of Civil and Environmental Engineering, Warsaw University of Life Sciences – SGGW

Zastosowanie piezoelementów typu bender do oceny sztywności początkowej gruntu nienasyconego z kontrolowanym ciśnieniem ssania

Application of bender-type piezoelements for assessment of initial unsaturated soil stiffness with controlled suction

Słowa kluczowe: piezoelementy typu bender, sztywność w zakresie małych odkształceń, grunt nienasycony, ssanie macierzyste
Key words: bender elements, small-strain stiffness, unsaturated soil, matric suction

Wprowadzenie

Inżynierowie budownictwa stale borykają się z problemami związanymi z budową nasypów drogowych, zapór ziemnych, wałów przeciwpowodziowych czy fundamentów na podłożu, które pozostaje w stanie niepełnego nasycenia lub ten stan ulega okresowym zmianom (grunt wbudowany w konstrukcję ziemną; wał przeciwpowodziowy; zapora uszczelniona rdzeniem). Szczególnie grunt spoisty zaraz po zagęszczeniu znajduje się w stanie niepeł-

nego nasycenia. Należy o tym pamiętać na etapie projektowania, a także w czasie budowy i eksploatacji zwłaszcza budowli hydrotechnicznych (Leong, Rahardjo i Fredlung, 2001; Skutnik, 2002; Skutnik, Lendo-Siwicka i Garbulewski, 2010). W ostatnich dekadach badania gruntów nienasyconych zyskały na znaczeniu na całym świecie, ułatwiając dokładniejsze poznanie kluczowych właściwości hydromechanicznych gruntów nienasyconych na potrzeby modelowania ich zachowania. W odróżnieniu od gruntów w pełni nasyconych wodą, gdzie występują tylko dwie fazy, właściwości gruntów nienasyconych nie mogą być analizowane tylko na podstawie jednej zmiennej stanu naprężenia, tj. naprężenia efektywnego, $\sigma' = \sigma - u_w$. Wynika to z zupełnie innego oddziaływania na

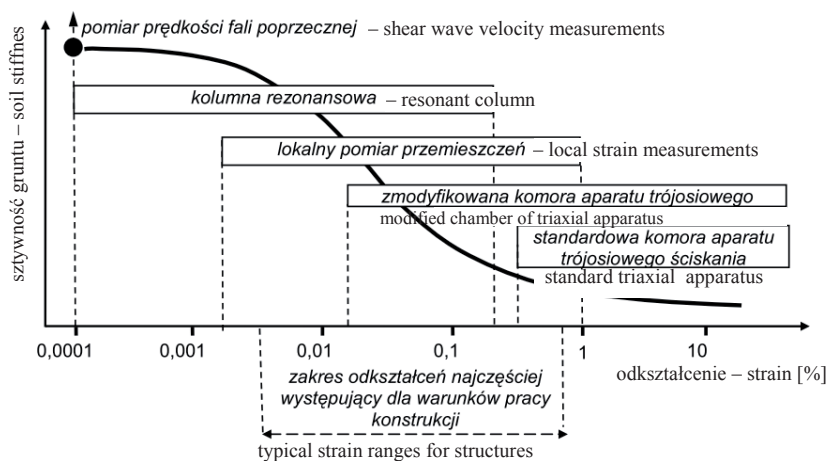
szkielet gruntowy naprężenia od zewnętrznych obciążeń i ssania macierzystego fazy ciekłej wypełniającej tylko częściowo pory gruntowe (Fredlund i Rahardjo, 1993; Lu i Likos, 2004; Skutnik, 2015; Skutnik, Biliniak i Szymański, 2015).

Nie uwzględnienie wpływu stanu nasycenia może prowadzić do błędnej oceny sztywności i ostatecznie zbyt konserwatywnych rozwiązań projektowych. Konieczne jest zatem określenie wpływu ciśnienia ssania na sztywność konstrukcji ziemnej i podłoża szczególnie w zakresie małych odkształceń.

Sztywność gruntu w zakresie małych odkształceń

W latach siedemdziesiątych XX wieku zaczęto zwracać uwagę na to, że wartości prognozowanych osiadań są znacząco wyższe od tych pomierzonych w terenie (Kiriegel i Weisner, 1973). Zosta-

ło to szczegółowo opisane przez Burlanda (1989), który potwierdził silną nieliniowość tych zależności w warunkach *in situ*, wykonując próbne obciążenia podłoża sztywną płytą. Obecnie przyjmuje się, że deformacje podłoża obciążonego różnego rodzaju konstrukcjami osiągają wartości znacznie poniżej 1%, co więcej zazwyczaj mieszczą się one w przedziale 10^{-5} – 10^{-3} (Truty, 2008; Jastrzębska, 2010; Świdziński i Mierczyński, 2010; Lipiński 2013). Z inżynierskiego punktu widzenia do obliczeń stanu granicznego użyteczności istotne jest wyznaczenie wartości modułów odpowiadających rzeczywistym warunkom pracy konstrukcji (Atkinson i Sallfors, 1991). Doświadczenia zdobyte przez naukowców na przestrzeni lat pozwalają przypisać aparaturę laboratoryjną do zakresów odkształceń, dla których wyznacza się sztywność gruntu (rys. 1). Za najbardziej uniwersalną aparaturę, pozwalającą wyznaczyć sztywność gruntu w zakresie największej zmienności, czyli do odkształceń



RYSUNEK 1. Możliwości aparaturowe odniesione do zakresu odkształceń wyznaczania sztywności gruntu (Lipiński, 2013)

FIGURE 1. Measuring range of the equipment related to the range of deformations of soil stiffness determination (Lipiński, 2013)

sięgających 0,3%, uznaje się kolumnę rezonansową (Lipiński, 2013; Soból, Sas i Szymański, 2015). Ze względu na duży koszt urządzenie to posiadają nieliczne laboratoria w kraju. Tańszym urządzeniem jest zmodyfikowany aparat trójosiowy, wyposażony w wewnętrzkomorowy system pomiaru przemieszczeń oraz system pomiaru prędkości fali poprzecznej wewnątrz próbki.

Metody wyznaczania początkowego modułu sztywności (G_0) na podstawie pomiaru prędkości fali poprzecznej

Nowoczesne metody badawcze umożliwiające wyznaczenie modułów sztywności w zakresie bardzo małych odkształceń opierają się na pomiarze prędkości propagacji fal mechanicznych w ośrodku gruntowym. Fale sejsmiczne rozchodzące się w gruncie generują odkształcenia rzędu 10^{-4} %, dlatego też zakłada się, że są to odkształcenia całkowicie odwracalne. W związku z tym do wyznaczenia modułu G_0 można wykorzystać liniową teorię sprężystości (Świdziński i Mierczyński, 2010; Lipiński, 2013). Metody pomiaru modułu G_0 można podzielić na badania polowe, do których należą inwazyjne otworowe (DownHole, CrossHole, UpHole), inwazyjne penetracyjne (SDMT, SCPTU), nieinwazyjne (sejsmika powierzchniowa: SASW, CSWS i MASW) oraz badania laboratoryjne, do których należą: urządzenia z piezoelementami *bender element test* – BET i kolumna rezonansowa – RCA (Godlewski i Szczepański, 2011).

W literaturze prezentowane są wyniki terenowych i laboratoryjnych metod wyznaczania modułu G_0 stosowa-

nych w praktyce inżynierskiej (Barański i Szczepański, 2007; Bajda i Skutnik, 2010; Markowska-Lech, Lech, Bajda i Szymański, 2013; Bajda, Markowska – Lech, Lech i Skutnik, 2016). Większość z tych metod (poza RCA) polega na pomiarze czasu (t) propagacji fali poprzecznej przez ośrodek gruntowy, pomiędzy źródłem fali a odbiornikiem, oddalonymi od siebie o znaną odległość (l). Prędkość fali poprzecznej (V_s) obliczania jest ze wzoru (1).

$$V_s = \frac{l}{t} \quad (1)$$

gdzie:

V_s – prędkość fali poprzecznej [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],
 l – odległość pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem fali [m],
 t – czas propagacji [s].

Na podstawie teorii rozchodzenia się fal w ośrodku sprężystym wartość maksymalnego modułu ścinania wyznacza się z następującej zależności (2):

$$G_{\max} = \rho V_s^2 \quad (2)$$

gdzie:

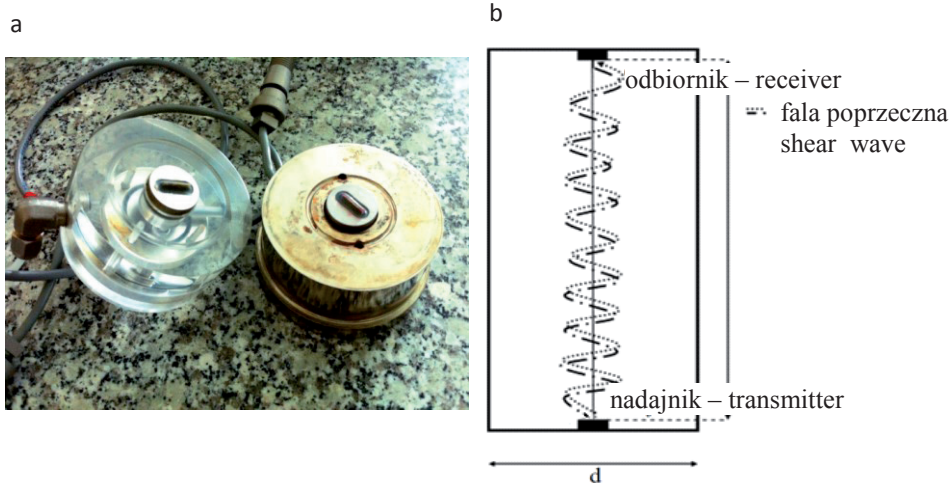
G_{\max} – maksymalny moduł ścinania ośrodka,
 ρ – całkowita gęstość ośrodka [$\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$],
 V_s – prędkość fali poprzecznej [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$].

Metody wykorzystujące piezoelementy typu bender do wyznaczania początkowej sztywności gruntu

Możliwe jest rozszerzenie standardowego badania w aparacie trójosiowego ściskania o nieinwazyjny pomiar

prędkości fali poprzecznej z zastosowaniem BET. Są one instalowane w kopolce oraz podstawie aparatu trójosiowego ściskania. Ich zasada działania wykorzystuje zjawisko piezoelektryczności (Świdziński i Mierczyński, 2010). System pomiarowy umożliwia wyznaczenie czasu przejścia fali od nadajnika do odbiornika (rys. 2).

z wykorzystaniem BET szczególnie nacisk kładzie się na interpretację czasu propagacji (przejścia) fali oraz dobór częstotliwości fali użytej w badaniu (Szczepański i Godlewski, 2017). Wśród powszechnie znanych metod określenia czasu dojścia fali do odbiornika można wydzielić metody oparte na analizie spektralnej czyli interpretacji sygnału w dziedzinie



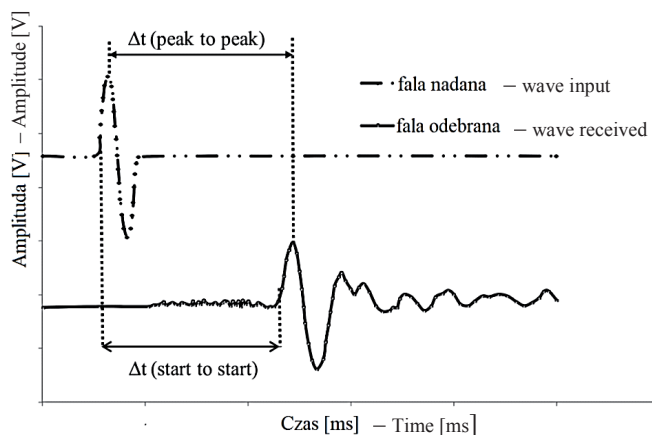
RYSUNEK 2. Piezoelementy zainstalowane w podstawie i kopolce aparatu trójosiowego ściskania (a) oraz schemat propagacji fali poprzecznej wewnątrz próbki (b) (Sas, Gabryś i Szymański, 2014)
 FIGURE 2. Piezoelements installed in the base and cap of the triaxial compression apparatus (a) and the scheme of propagation of shear wave inside the sample (b) (Sas, Gabryś & Szymański, 2014)

Autorem pierwszych publikacji opisujących zastosowanie piezoelementów do pomiaru prędkości fali w piaskach i iłach był Lawrence (1963, 1965). Usystematyzowaną metodykę badań z wykorzystaniem elementów typu bender można znaleźć w pracy Shirleya (1978). Z kolei praca Dyvika i Madhusa (1985) spopularyzowała tę technikę, czyniąc ją dokładniejszą i bardziej wiarygodną. W metodologii wyznaczania sztywności początkowej gruntu na podstawie pomiaru prędkości fali poprzecznej

częstotliwości (ang. *frequency domain*), wykorzystujące złożone algorytmy matematyczne oraz metody obserwacyjne polegające na analizie sygnału w dziedzinie czasu (ang. *time domain*). Metody obserwacyjne polegają na identyfikacji charakterystycznych punktów na krzywej sygnału odebranego, gdzie na osi pionowej widnieją wartości amplitudy sygnału, a na osi poziomej – czas. Pierwsza technika polega na znalezieniu szczytu fali odebranej i odniesieniu go do szczytu fali nadanej (ang. *peak to peak*),

odległość pomiędzy szczytami wyznacza czas propagacji. W drugiej metodzie chodzi o odnalezienie punktu, w którym fala „wchodzi do odbiornika” i odniesieniu go do początku sygnału (ang. *start to start*). Odległość punktów początkowych wyznacza czas propagacji (rys. 3).

niektórych autorów stosunek ten powinien mieścić się w przedziale od 2 do 9. Liczne badania przeprowadzone przez Godlewskiego, Szczepańskiego i Bogusza (2015) oraz Sasa, Gabryś, Sobóla i Szymańskiego (2016) wykazały, że stosunek L do λ powinien być większy niż



RYSUNEK 3. Metody interpretacyjne w domenie czasu (Sas, Soból, Gabryś i Markowska-Lech, 2016)

FIGURE 3. Methods of interpretation in the domain of time (Sas, Soból, Gabryś & Markowska-Lech, 2016)

Ważne jest dostosowanie częstotliwości fali generowanej przez nadajnik. Na skutek zmian częstotliwości zmienia się prędkość propagacji fali. Jednak ze względu na różnice konstrukcyjne aparatury oraz zróżnicowanie badanych gruntów nie ma możliwości jednoznacznego określenia, jaka częstotliwość jest właściwa. W literaturze branżowej powszechnie znane są wytyczne określające użyteczny zakres częstotliwości (Camacho-Tauta, Cascante, da Fonseca i Santos, 2015). Jest to taka częstotliwość, dla której stosunek długości drogi (odległość pomiędzy piezoelementami) do długości fali (L/λ) jest większy niż 2. W zależności od rodzaju gruntu według

3, ze względu na zaburzenia odbieranego sygnału znane jako *near field effect*. Od lat osiemdziesiątych XX wieku powstały liczne publikacje poświęcone konstrukcji piezoelementów, a także metodyce wykonywania badań oraz interpretacji wyników. Wielu naukowców próbowało usystematyzować te kwestie (Viggiani i Atkinson, 1995; Lee i Santamarina, 2005; Leong, Yeo i Rahardjo, 2005).

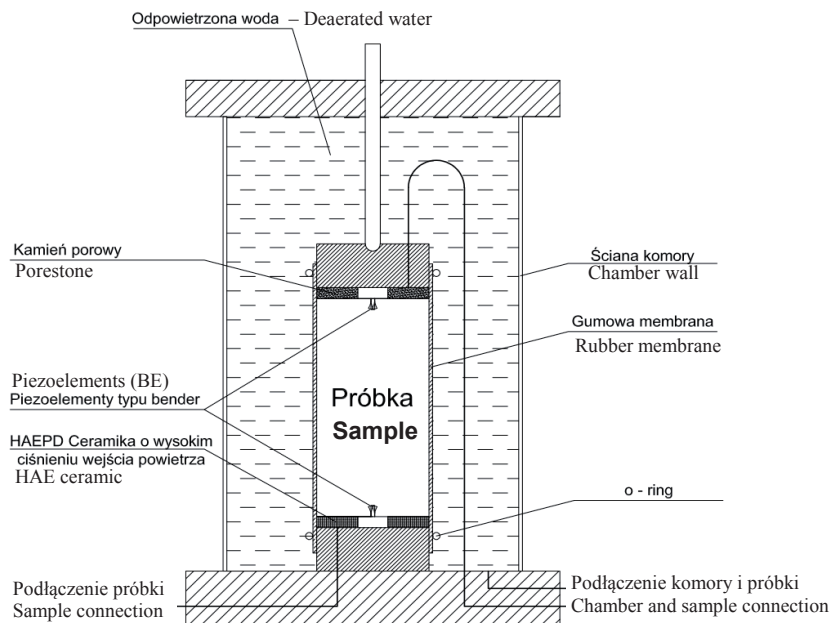
Aparatura badawcza i metodyka badań

Badania na potrzeby niniejszej publikacji przeprowadzono w nowoczesnym, zmodyfikowanym aparacie trójosiowego

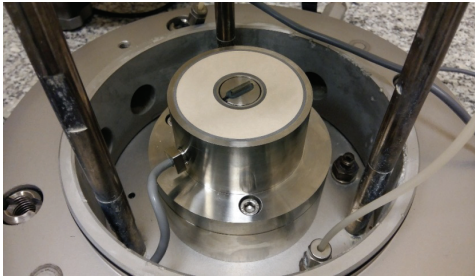
ściskania przystosowanym do badania gruntów nienasyconych z możliwością pomiaru prędkości fali poprzecznej wewnątrz próbki. W odróżnieniu od standardowego aparatu trójosiowego ściskania próbka gruntu umieszczona jest na ceramicznym dysku o wysokim ciśnieniu wejścia powietrza (500 kPa), który pozwala na wytworzenie ssania macierzystego poprzez zastosowanie techniki translacji osi (ang. *axis translation technique*). Technika ta polega na translacji ciśnienia powietrza (u_a) i ciśnienia wody w porach (u_w) w zakresie wartości dodatnich $u_a > u_w$, tak aby ssanie macierzyste (s) w próbce było stałe, niezależnie od ciśnienia atmosferycznego, od którego próbka jest szczelnie odizolowana. Schemat aparatu przedstawiono na rysunku 4.

Inne urządzenia niezbędne do prowadzenia badań z kontrolowanym stanem nasycenia (ciśnieniem ssania) to bardzo precyzyjne kontrolery ciśnienia/objętości wody, będące źródłem ciśnienia wyrównawczego (ang. *back pressure*), ciśnienia w komorze (σ_3), oraz służące do pomiaru zmiany objętości wody w próbce. Kontroler ciśnienia/objętości powietrza jest źródłem ciśnienia powietrza w porach próbki gruntu oraz służy do pomiaru zmian objętości powietrza w próbce. Do pomiaru prędkości fali poprzecznej wewnątrz badanej próbki wykorzystano piezoelementy typu bender (BE) zainstalowane w podstawie (rys. 5) oraz kopoluce.

Do badań wykorzystano grunt pobrany podczas badań kontrolnych rdzenia zapory ziemnej w Świnnej Porębie.



RYSUNEK 4. Schemat aparatu trójosiowego ściskania do badań gruntów nienasyconych wyposażonego w piezoelementy typu bender (BE)
 FIGURE 4. Scheme of a triaxial compression apparatus for the study of unsaturated soils equipped with piezoelements of the bender type (BE)



RYSUNEK 5. Podstawa aparatu trójosiowego wyposażona w piezoelement typu bender (BE) oraz dysk ceramiczny o wysokim ciśnieniu wejścia powietrza (HAEPD)

FIGURE 5. The base of a triaxial apparatus equipped with piezoelectric elements of bender type (BE) and high-air entry pressure ceramic disc (HAEPD)

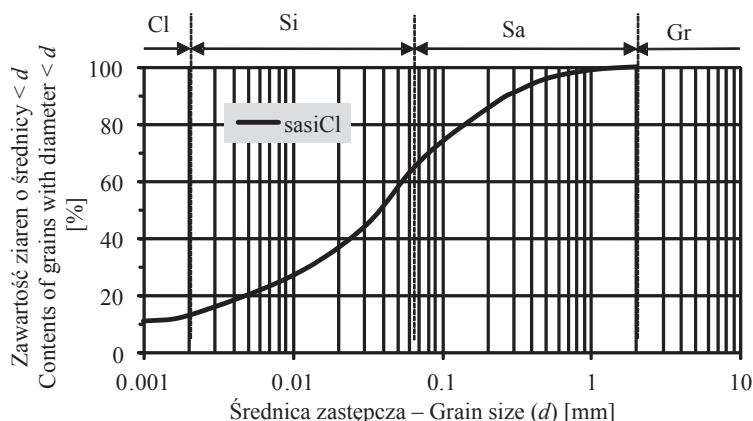
Badany grunt to według klasyfikacji PN-86/B-2480 glina, a według obowiązującej normy PN-EN ISO 14688 sklasyfikowano jako sasiCl – il pylasto-piaszczysty. Krzywą uziarnienia badanego gruntu przedstawiono na rysunku 6.

Próbki do badań zagęszczono w laboratorium przy wilgotności bliskiej optymalnej według normalnej metody Proctora, a następnie wycięto specjalnym cylinderkiem za pomocą prasy

hydraulicznej próbkę w kształcie walca o wysokości 140 mm i średnicy 70 mm. Dla każdej z nich określono gęstość objętościową oraz wilgotność początkową gruntu. Parametry początkowe badanych próbek iltu sasiCl były następujące: gęstość objętościowa zawierała się w przedziale od 2,15 do 2,21 t·m⁻³, a wilgotność zmieniała się od 11,5 do 14,4 %.

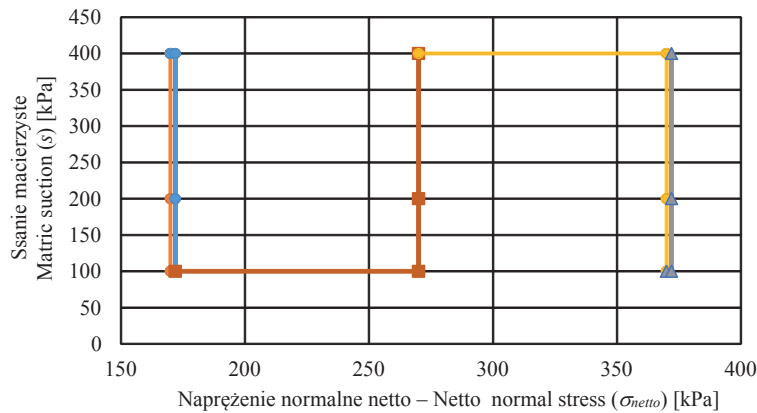
Każda próbka po umieszczeniu w komorze była nasycona wodą metodą ciśnienia wyrównawczego (Lipiński i Wdowska, 2004). W poszczególnych etapach nasączenia kontrolowano parametr Skemptona B. Następnie próbka została skonsolidowana do żądanej wartości naprężenia efektywnego. Kolejnym krokiem po zakończeniu konsolidacji było zastąpienie źródła wody podłączonego na górze próbki źródłem powietrza w celu wygenerowania ciśnienia ssania, zgodnie z etapami przedstawionymi na rysunku 7.

Osiągnięcie zadanych wartości ciśnienia ssania (100, 200 oraz 400 kPa) uzyskiwano przy stałym ciśnieniu wody w porach, poprzez zwiększanie ciśnie-



RYSUNEK 6. Krzywa uziarnienia badanego gruntu

FIGURE 6. Grain size distribution curve of the tested soil



RYSUNEK 7. Etapy napężenia normalnego netto oraz ciśnienia ssania macierzystego podczas badania
 FIGURE 7. Net normal stress path and matric suction pressure during the test

nia powietrza wewnątrz próbki gruntu. Zwiększając ciśnienie powietrza, monitorowano odpływ wody z próbki. Moment zatrzymania odpływu oznaczał osiągnięcie stanu równowagi, czyli stabilizację ssania wewnątrz próbki. Dla różnych wartości napężenia normalnego netto oraz ciśnienia ssania wyznaczono wartości początkowego modułu ścinania (G_0) na podstawie pomiaru prędkości fali poprzecznej w badanej próbce. Czas propagacji fali wyznaczono za pomocą BE metodą obserwacyjną, analizując w dziedzinie czasu odległości pomiędzy szczytem fali nadanej i odebranej (metoda *peak to peak*). Częstotliwość sygnału dobrano tak, aby wartość współczynnika L/λ była większa niż 3.

Wyniki badań

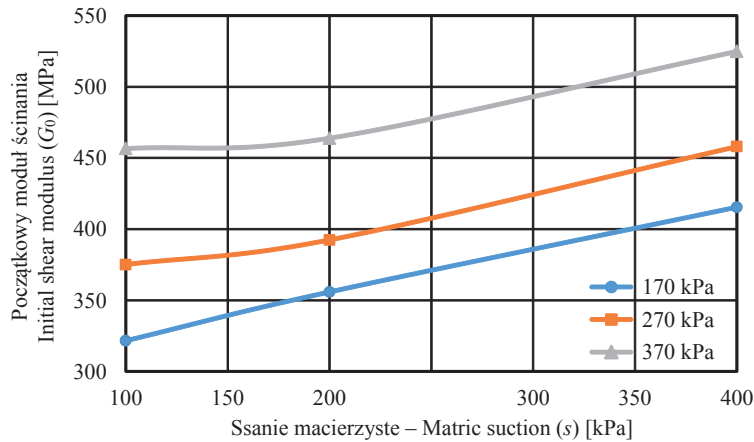
Na podstawie przeprowadzonych pomiarów wyznaczono zależność między wartościami ciśnienia ssania i początkowego modułu ścinania (G_0) – rysunek 8. Uwzględniając zmianę wskaźnika porowatości oraz zmianę objętości wody

w próbce, wyznaczono zależność początkowego modułu ścinania (G_0) od stopnia nasycenia (S_r) – rysunek 9.

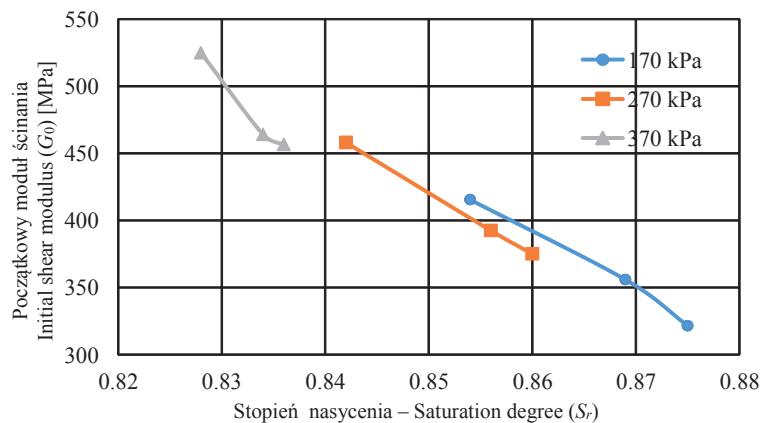
Analizując uzyskane zależności, należy mieć na uwadze, że zmiana stopnia nasycenia powoduje zmianę ciśnienia ssania, które obok napężenia normalnego netto jest jedną ze zmiennych stanu napężenia gruntu nienasyconego. Zatem przyczyną zmiany sztywności gruntu nie jest sama zmiana „ilości” wody w porach gruntu, a zmiana stanu napężenia.

Podsumowanie i wnioski

Badania sztywności początkowej gruntu w stanie niepełnego nasycenia wykonane przez autorów wykazały, że wzrost ciśnienia ssania powoduje wzrost sztywności początkowej gruntu, co znajdują potwierdzenie w literaturze (Yang, Lin, Kung i Liao, 2008; Asslan i Wuttke, 2012; Heitor, Indraratna i Rujikiatkamjorn, 2012). W praktyce inżynierskiej na potrzebę skomplikowanych projektów geotechnicznych wykorzystuje się zaawansowane narzędzia modelowa-



RYSUNEK 8. Zależność początkowego modułu ścinania (G_0) od ssania macierzystego (s) dla różnych wartości naprężenia normalnego netto
 FIGURE 8. The relationship of the initial shear modulus (G_0) to the matric suction (s) at various net normal stress values



RYSUNEK 9. Zależność początkowego modułu ścinania (G_0) od stopnia nasycenia (S_r) dla różnych wartości naprężenia normalnego netto
 FIGURE 9. The relationship of the initial shear modulus (G_0) to the saturation degree (S_r) for various net normal stress values

nia numerycznego, w których implementowane są modele uwzględniające nieliniową charakterystykę sztywności gruntu, np. model *hardening soil-small* (Truty i Podleś, 2010; Kanty, Podleś, Truty i Warchal, 2016). Uzyskane cha-

rakterystyki – zależności początkowego modułu ścinania (G_0) od stopnia nasycenia (S_r), dla różnych wartości naprężenia normalnego netto mogą być wykorzystane do obliczeń numerycznych odkształceń budowli ziemnych i podłoża.

Literatura

- Asslan, M. i Wuttke, F. (2012). Wave velocity change and small-strain stiffness in unsaturated soils: experimental investigation. W C. Mancuso, C. Jommi, F. D'Onza (red.), *Unsaturated soils: research and applications* (strony 355-362). Springer: Berlin, Heidelberg.
- Atkinson, J.H. i Salfors, G. (1991). Experimental determination of soil properties (stress-strain-time). *Proceedings of 10th ECSMFE*, 3, 915-956.
- Bajda, M., Markowska-Lech, K., Lech, M. i Skutnik, Z. (2016). Terenowe badania sejsmiczne w praktyce geotechnicznej. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN*, 93, 95-107.
- Bajda, M. i Skutnik, Z. (2010). Ocena modułu ścinania gytii na podstawie geotechnicznych badań terenowych. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 4, 507-511.
- Barański, M. i Szczepański, T. (2007). Zastosowanie metod sejsmiki powierzchniowej do oceny modułu G gruntu. *Czasopismo Techniczne. Środowisko*, 104, 17-25.
- Burland, J.B. (1989). Ninth Laurits Bjerrum Memorial Lecture: "Small is beautiful" – the stiffness of soils at small strains. *Canadian Geotechnical Journal*, 26(4), 499-516.
- Camacho-Tauta, J.F., Cascante, G., da Fonseca, A.V. i Santos, J.A. (2015). Time and frequency domain evaluation of bender element systems. *Géotechnique*, 65, 548-562.
- Dyvik, R. i Madshus, C. (1985). Lab measurements of G_{max} using bender elements. W V. Khosla (red.), *Proceedings ASCE Annual Convention: Advances in the Art of Testing Soils under Cyclic Conditions* (strony 186-197). Detroit: American Society of Civil Engineering.
- Fredlund, D.G. i Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
- Godlewski, T. i Szczepański, T. (2011). Nieliniowa charakterystyka sztywności gruntu (G_0) – metody oznaczania i przykłady zastosowań. *Górnictwo i Geoinżynieria*, 35, 243-250.
- Godlewski, T., Szczepański, T. i Bogusz, W. (2015). Stosowalności wybranych metod określania modułu sztywności G_0 gruntów w praktyce geotechnicznej. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 3, 371-376.
- Heitor, A., Indraratna, B. i Rujikiatkamjorn, C. (2012). Characterising compacted soil using shear wave velocity and matric suction. *Australian Geomechanics Journal*, 47(2), 79-86.
- Jastrzębska, M. (2010). *Badania zachowania się gruntów spoistych poddanych obciążeniom cyklicznym w zakresie małych odkształceń*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- Kanty, P., Podleś, K., Truty, A. i Warchal, T. (2016). Wzmocnienie podłoża gruntowego pod fundamentami turbozespołu bloków 5 i 6 w PGE Elektrownia Opole SA. *Acta Scientiarum Polonorum. Architectura*, 15(4), 91-102.
- Kriegel H.J. i Weisner H.H. (1973). Problems of stress strain conditions in subsoil. W *Proceedings 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1(3), 133-141.
- Lawrence, F.V. (1963). *Propagation of Ultrasonic Waves through Sand*. Research Report R63-08. Cambridge, MA, USA: Massachusetts Institute of Technology.
- Lawrence, F.V. (1965). *Ultrasonic Shear Wave Velocity in Sand and Clay*. Research Report R65-05. Cambridge, MA, USA: Massachusetts Institute of Technology.
- Lee, J.S. i Santamarina, J.C. (2005). Bender elements: performance and signal interpretation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(9), 1063-1070.
- Leong, E.C., Rahardjo, H. i Fredlund, D.G. (2001). Application of unsaturated soil mechanics in geotechnical engineering. W *Proceedings of the 8th East Asian Pacific Conference on Structural Engineering and Construction: challenges in the 21st century*. Singapore. Nanyang Technological University [CD].
- Leong, E.C., Yeo, S.H. i Rahardjo, H. (2005). Measuring shear wave velocity using bender elements. *Geotechnical Testing Journal*, 28(5), 488-498.
- Lipiński, M.J. (2013). *Kryteria wyznaczania parametrów geotechnicznych* (rozprawa habilitacyjna). Warszawa: SGGW.
- Lipiński, M.J. i Wdowska, M.K. (2004). Kryteria nasączenia gruntów prekonsolidowanych metodą ciśnienia wyrównawczego. W *Materiały II Problemowej Konferencji Geotechniki „Współpraca budowlanej z podłożem gruntowym”* (strony 71-81). Białystok–Białowieża.

- Lu, N. i Likos, W. (2004). *Unsaturated soil mechanics*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
- Markowska-Lech, K., Lech, M., Bajda, M. i Szymański, A. (2013). Small strain stiffness in overconsolidated Pliocene clays. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW. Land Reclamation*, 45(2), 169-181.
- PN-86/B-2480. Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów.
- PN-EN ISO 14688. Badania geotechniczne. Oznaczenie i klasyfikowanie gruntów.
- Sas, W., Gabryś, K., Soból, E. i Szymański, A. (2016). Dynamic Characterization of Cohesive Material Based on Wave Velocity Measurements. *Applied Sciences*, 6(2), 49. DOI: 10.3390/app6020049
- Sas, W., Gabryś, K. i Szymański, A. (2014). Comparison of resonant column and Bender elements tests on selected cohesive soil from Warsaw. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities. Series Civil Engineering*, 17(3), #7.
- Sas, W., Soból, E., Gabryś, K. i Markowska-Lech, K. (2016). Study of the cohesive soil stiffness in a modified resonant column. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN*, 93, 21-33.
- Shirley, D.J. (1978). An improved shear wave transducer. *Journal of the Acoustical Society of America*, 63, 1643-1645.
- Skutnik, Z. (2002). *Weryfikacja parametrów geotechnicznych rdzenia zapory nasypowej na podstawie badań prowadzonych podczas budowy* (praca doktorska). Warszawa: SGGW.
- Skutnik, Z. (2015). Badania gruntów nienasyconych – dotychczasowe doświadczenia i perspektywy rozwoju. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 3, 176-183.
- Skutnik, Z., Biliniak, M. i Szymański, A. (2015). Badania wpływu ciśnienia ssania na wytrzymałość i sztywność gruntu spoistego i niespoistego. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 3, 216-221.
- Skutnik, Z., Lendo-Stiwicka, M. i Garbulewski, K. (2010). Assessment of the c_v coefficient for unsaturated Warsaw Clay. W *Proceedings of the 5th International Conference on Unsaturated Soils*. Tom 1 (strony 371-380). Barcelona. Boca Raton: CRC Press/Balkema.
- Soból, E., Sas, W. i Szymański, A. (2015). Zastosowanie kolumny rezonansowej do określenia reakcji gruntów drobnoziarnistych obciążonych dynamicznie. *Scientific Review Engineering and Environmental Sciences*, 24(2), 133-144.
- Świdziński, W. i Mierczyński, J. (2010). Badania reakcji sprężystej gruntów niespoistych za pomocą pomiaru prędkości fali sejsmicznej. *Czasopismo Techniczne. Środowisko*, 107 (1-Ś), 63-82.
- Szczepański, T. i Godlewski, T. (2017). Wybrane aspekty prawidłowego doboru parametrów badania i weryfikacji wyników oznaczeń dla określania modułu sztywności (G_0) w metodzie BET. *Scientific Review Engineering and Environmental Sciences*, 26(1), 75-84.
- Truty, A. (2008). Sztywność gruntów w zakresie małych odkształceń. Aspekty modelowania numerycznego. *Czasopismo Techniczne. Środowisko*, 105(3-Ś), 107-126.
- Truty, A., i Podleś, K. (2010). Zastosowanie modelu hardening soil-small do analizy problemów interakcji konstrukcji budowlanych z podłożem. *Czasopismo Techniczne. Środowisko*, 107, 117-134.
- Viggiani, G. i Atkinson, J.H. (1995). Interpretation of bender element tests. *Géotechnique*, 45, 149-154.
- Yang, S.R., Lin, H.D., Kung, J.H.S. i Liao, J.Y. (2008). Shear wave velocity and suction of unsaturated soil using bender element and filter paper method. *Journal of GeoEngineering*, 3(2), 67-74.

Streszczenie

Zastosowanie piezoelementów typu bender do oceny sztywności początkowej gruntu nienasyconego z kontrolowanym ciśnieniem ssania. W artykule podjęto próbę oceny wpływu stopnia nasycenia gruntu wodą na jego sztywność w zakresie małych odkształceń. Właściwa analiza interakcji konstrukcji budowlanej z gruntem przeprowadzana z wykorzystaniem metod numerycznych wymaga znajomości parametrów, w szczególności charakterystyk sztywności

w zakresie odkształceń odpowiadających rzeczywistym warunkom pracy tej konstrukcji. Zazwyczaj odkształcenia podłoża gruntowego wywołane obciążeniem od budowli nie przekraczają wartości 10^{-3} , w związku z czym szczególnie ważne dla inżyniera geotechnika jest określenie sztywności gruntu w zakresie odkształceń 10^{-5} – 10^{-3} . W celu wyznaczenia charakterystyk sztywności gruntu spoistego wykorzystano aparat trójosiowego ściskania wyposażony w piezoelementy typu bender, umożliwiające pomiar prędkości fali poprzecznej wewnątrz próbki. Podstawa opisywanego aparatu trójosiowego jest wyposażona w ceramikę o wysokim ciśnieniu wejścia powietrza (HAEV), co pozwoliło, wykorzystując technikę „translacji osi”, wykonać badania dla zmiennego (kontrolowanego) stopnia nasycenia próbki gruntu wodą. W literaturze stopień nasycenia (S_r) i wilgotność gruntu są wymieniane jako jedne z wielu czynników, które obok właściwości fizycznych, wartości naprężeń efektywnych, wskaźnika porowatości, historii naprężenia i innych wpływają na prędkość propagacji fali w gruncie. W publikacji opisano metodykę badań oraz przedstawiono wyniki badań własnych.

Summary

Application of bender-type piezoelements for assessment of initial unsaturated soil stiffness with controlled suction. The paper presents an evaluation of the influence of the degree of saturation of soil with water on its stiffness in the range of small deformations. Appropriate analysis of the interaction of the building structure with the subsoil carried out with the use of numerical methods requires the knowledge of parameters, in particular stiffness characteristics in the range of deformations corresponding to the actual

conditions of the structure's work. Usually the deformations of the subsoil caused by the structure do not exceed 10^{-3} , therefore it is particularly important for the geotechnical engineer to determine the soil stiffness in the range of deformations 10^{-5} – 10^{-3} . In order to determine the stiffness characteristics of cohesive subsoil, a triaxial compression apparatus equipped with piezoelectric elements of bender type was used, enabling the measurement of the transverse wave velocity inside the sample. The base of the described triaxial apparatus is equipped with high-pressure air entry ceramics (HAEV), which allowed to use the technique of “axis translation” to perform tests for variable (controlled) degree of saturation of the soil sample with water. In the literature, the degree of saturation (S_r) and soil moisture are mentioned as one of many factors which, apart from physical properties, values of effective stresses, voids index, stress history and others, influence the velocity of wave propagation in the ground. The publication describes the methodology of research and presents the results of own research.

Authors' address:

Zdzisław Skutnik
(<https://orcid.org/0000-0003-3228-4936>)
Marcin Biliniak
Emil Soból
(<https://orcid.org/0000-0001-9766-090X>)
Wojciech Sas
(<https://orcid.org/0000-0002-5488-3297>)
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
w Warszawie
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska
Katedra Geoinżynierii
ul. Nowoursynowska 159, 02-787 Warszawa
Poland
e-mail: zdzislaw_skutnik@sggw.pl
marcin_biliniak@sggw.pl
emil_sobol@sggw.pl
wojciech_sas@sggw.pl