

PRACE ORYGINALNE ORIGINAL PAPERS

Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska nr 71, 2016: 3–12
(Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. 71, 2016)
Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences No 71, 2016: 3–12
(Sci. Rev. Eng. Env. Sci. 71, 2016)

Katarzyna MARKOWSKA-LECH¹, Marek BAJDA²

¹Laboratorium Centrum Wodne, ²Katedra Geoinżynierii
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

¹Laboratory of Water Center, ²Department of Geotechnical Engineering
Warsaw University of Life Sciences – SGGW

Wyznaczanie modułu odkształcenia postaciowego G_0 w ilach Estimation of shear modulus G_0 for clays*

Słowa kluczowe: moduł odkształcenia postaciowego, SCPTU, badania trójosiowe, piezoelementy, kolumna rezonansowa, grunty spójne
Key words: shear modulus, SCPTU, triaxial tests, piezoelements, resonant column, cohesive soils

Wprowadzenie

Znajomość stanu naprężenia i odkształcenia powstającego w ośrodku gruntowym po przyłożeniu określonego obciążenia ma istotne znaczenie dla właściwego projektowania obiektów posadowionych na gruncie. W celu umożliwienia obliczeń inżynierskich w geotechnice zakłada się sprężystość gruntu i stosuje się modele gruntowe wykorzystujące wzory teorii sprężystości, co z kolei wymusza rozwój technik badań i urządzeń umożliwiających otrzymanie „prawdziwych” parametrów gruntowych, czyli

uzyskanych przy możliwie najmniejszych odkształceniach i spełniających przyjęte założenia. Zainteresowanie technikami pomiaru o dużej rozdzielczości wynika również z nieliniowości zależności naprężenie – odkształcenie w gruntach, zwłaszcza w zakresie małych odkształceń. W opisie odkształcenia gruntu używane są wskaźniki ściślności oraz moduły sprężystości. Dla zakresu bardzo małych odkształceń stosowany jest początkowy (lub maksymalny) moduł odkształcenia postaciowego G_0 (G_{\max}), który zgodnie z teorią sprężystości można wyliczyć ze wzoru wykorzystującego prędkość fali poprzecznej (V_s):

$$G_0 = \rho \cdot V_s^2$$

gdzie:

ρ – gęstość objętościowa gruntu,
 V_s – prędkość fali poprzecznej.

*Badania zaprezentowane w pracy zostały częściowo wykonane w ramach projektu badawczego finansowanego przez NCN (umowa 0467/B/T02/2011/40).

Spośród metod terenowych pozwalających na uzyskanie początkowych wartości modułu odkształcenia postaciowego wyróżnia się metody otworowe (crosshole i downhole), metody bezotworowe (sondowania SCPTU i SDMT) oraz metody powierzchniowe (CSWS, SASW, MASW). Wszystkie wykorzystują pomiar prędkości fal akustycznych propagujących się przez badany grunt od nadajnika do odbiornika.

W laboratorium podstawowym sprzętem do badania zależności naprężenie – odkształcenie w gruncie jest aparat trójosiowego ściskania. Standardowe badanie, polegające na hydraulicznym zadawaniu naprężeń aż do momentu ścięcia próbki przy jednoczesnych pomiarach jej odkształceń za pomocą czujnika umieszczonego na zewnątrz komory, pozwala na sporządzenie zależności naprężenie – odkształcenie w zakresie odkształceń rzędu 0,1–0,5%.

W celu wyznaczenia parametrów przy mniejszych odkształceniach do komory aparatu wprowadzane są różnego specjalistyczne urządzenia pozwalające uzyskać lepszą dokładność wyników badań, np. lokalne czujniki przemieszczeń czy piezoelementy. Modyfikacja polegająca na umieszczeniu w kopułkach aparatu piezoelementów, które poprzez wykorzystanie zjawiska piezoelektryczności umożliwiają pomiar prędkości fal, pozwala na uzyskanie parametrów w zakresie odkształceń 10^{-4} %. Piezoelementy znalazły zastosowanie również w innych urządzeniach laboratoryjnych, ponieważ bez zakłócania standardowo wykonywanych badań pozwalają na szybki pomiar prędkości poprzecznej i podłużnej fali. Kolumna rezonansowa jest aparatem umożliwiającym pomiar odkształceń

rzędu 10^{-4} – 10^{-1} %. Ze względu na duże koszty aparatury brakuje takich urządzeń w laboratoriach geotechnicznych i nadal do określania zależności naprężenie – odkształcenie w całym zakresie małych odkształceń najczęściej wykorzystywanych jest kilka uzupełniających się wzajemnie metod.

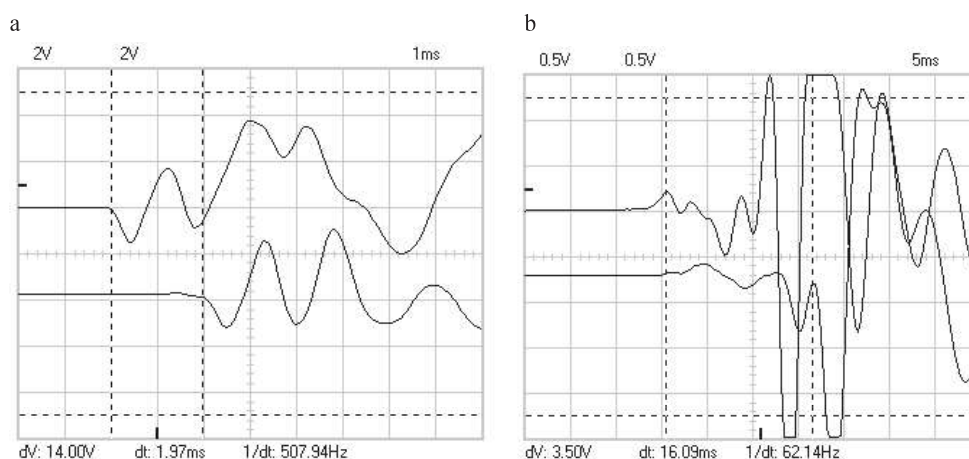
W niniejszym artykule zostaną przedstawione wyniki badań modułu odkształcenia postaciowego G_0 uzyskane z terenowych sondowań SCPTU oraz wyniki badań laboratoryjnych uzyskanych z badań trójosiowych z wykorzystaniem piezoelementów oraz w kolumnie rezonansowej.

Metoda badań terenowych

Badania terenowe zostały wykonane sondą statyczną SCPTU – Seismic Cone Penetration Test, będącą na wyposażeniu Katedry Geoinżynierii SGGW. Sonda ma dwa geofony rozmieszczone na stożku w odległości 1 m od siebie. Badanie sejsmiczne SCPTU polegało na wciskaniu w grunt stożka wraz z zestawem żerdzi, z osią geofonów zorientowaną równolegle do belki – źródła impulsu, ze stałą prędkością około $2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. Podczas wciskania sondy mierzony był opór na stożku, tarcie na tulei, ciśnienie porowe, pochylenie i inne parametry jak w standardowym badaniu CPTU. Po zatrzymaniu penetracji co 1 m załączany był oscyloskop. Po pojedynczym uderzeniu belki impuls docierający do pierwszego (górnego) geofonu był zapisywany w pamięci oscyloskopu i następowało automatyczne wyzwolenie podstawy czasu. Następnie drugi kanał oscyloskopu rejestrował sygnał, który docierał do

drugiego (dolnego) geofonu. Na podstawie znajomości różnicy w czasach dotarcia sygnałów do obu geofonów obliczana była prędkość fali poprzecznej. Po pomiarze prędkości fali kontynuowano sondowanie CPTU do osiągnięcia kolejnego poziomu badania sejsmicznego. Schemat stożka SCPTU oraz szczegółowy opis zasady pomiaru prędkości fali poprzecznej można znaleźć w pracach Bajdy i Markowskiej (2003a, b). Przykładowe wyniki pomiarów prędkości fali sondą SCPTU przedstawiono na rysunku 1.

zmianę wysokości próbki) bezpośredni pomiar prędkości fali poprzecznej w próbce gruntu umożliwiały elementy piezoceramiczne typu bender, będące na wyposażeniu Laboratorium Centrum Wodne SGGW. Przetworniki zbudowane z piezoceramicznego materiału, który zamienia energię mechaniczną na energię elektryczną i na odwrót, pozwalały na wysłanie przez generator fal impulsu elektrycznego, który powodował drgania nadajnika. Drgania przenoszone dzięki sprężystym właściwościom gruntu do odbiornika były zamieniane na



RYSUNEK 1. Przykładowe wyniki badań terenowych sondą SCPTU (metoda odczytu czasu propagacji fali poprzecznej: a – first deflection, b – peak-to-peak)
 FIGURE 1. The example of SCPTU test results (the travel time estimation by: a – first deflection, b – peak-to-peak method)

Metodyka badań laboratoryjnych

Podczas standardowo wykonywanych badań trójosiowych (każde badanie obejmowało trzy podstawowe etapy: nasączenie, konsolidację i ściskanie; konsolidacja prowadzona była etapowo w warunkach izotropowych; na każdym etapie badania kontrolowano

impuls elektryczny, który następnie był wzmacniany i przesyłany do oscyloskopu. Wejście sygnału widoczne na ekranie oscyloskopu odpowiadało wejściu sygnału do próbki. Pomiar prędkości fali poprzecznej przeprowadzony został dla sześciu różnych wartości naprężenia efektywnego. Podczas każdego pomiaru analizowany był na ekranie oscylosko-

pu zarówno wysyłany, jak i odbierany sygnał przy częstotliwościach od 1,1 do 10 kHz nadawanego sygnału, amplituda sygnału nadawanego wynosiła 10 V dla wszystkich częstotliwości.

Prędkość fali poprzecznej obliczana była na podstawie czasu przejścia impulsu od nadajnika do odbiornika z zależności:

$$V_s = \frac{h}{t}$$

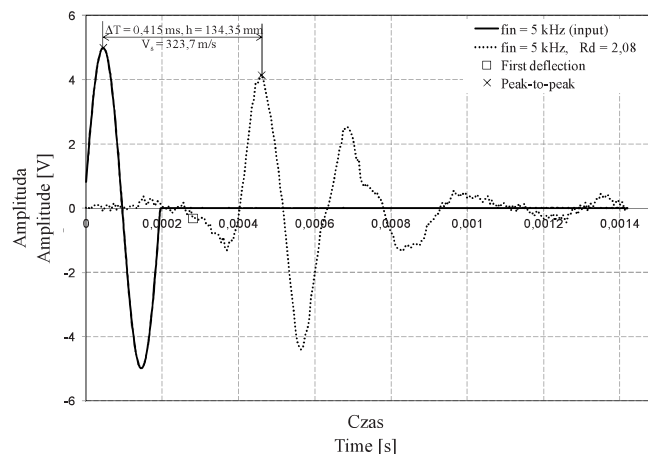
gdzie:

h – odległość między nadajnikiem i odbiornikiem; w badaniach SCPTU wynosiła 1 m (odległość między górnym i dolnym geofonem); w badaniach laboratoryjnych – wysokość próbki pomniejszona o głębokość wejścia piezoelementów w grunt (dla piezoelementów stosowanych w badaniach 3 mm), (Viggiani i Atkinson, 1995),

t – czas przejścia fali przez badany grunt; w prezentowanych badaniach czas propagacji fali określany był metodą peak-to-peak lub first deflection w zależności od rodzaju uzyskanego obrazu fali; więcej informacji na temat metod identyfikacji sygnału odbieranego po przejściu przez próbkę gruntu, czyli określania czasu propagacji fali można znaleźć w pracy Markowskiej-Lech i innych (2015).

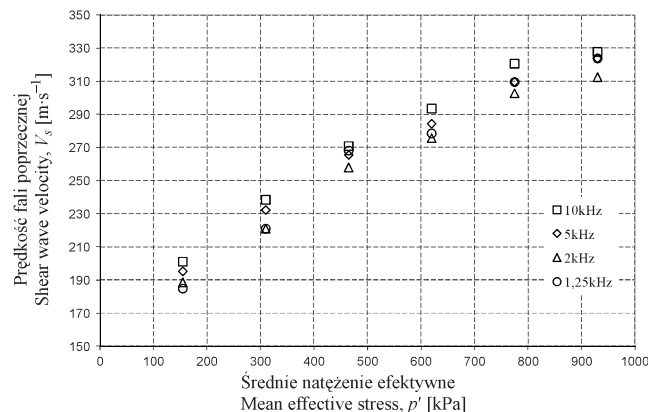
Przykładowe wyniki uzyskane w badaniach laboratoryjnych z wykorzystaniem piezoelementów znajdują się na rysunkach 2 i 3.

W kolumnie rezonansowej cylindryczna próbka, przy stałym naprężeniu bocznym, poddawana jest drganiom skrętnym lub pionowym za pomocą elektromagnetycznego systemu obciążania, których częstotliwość i amplituda jest kontrolowana. Częstotliwość zadawanych drgań jest stopniowo zwiększana, aż do uzyskania częstotliwości



RYSUNEK 2. Przykładowy wynik badania w aparacie trójosiowym z wykorzystaniem piezoelementów typu bender (metoda odczytu czasu propagacji fali poprzecznej: first deflection i peak-to-peak – oznaczenia na rysunku)

FIGURE 2. The example of triaxial tests using bender elements (the travel time estimation by first deflection and peak-to-peak method – explanations on figure)



RYSUNEK 3. Przykład zależności między prędkością fali poprzecznej i napięciem efektywnym przy różnej częstotliwości nadawanego sygnału dla próbki pobranej z głębokości 7,75 m – metoda peak-to-peak (Markowska-Lech i in., 2015)

FIGURE 3. The example of the correlation between shear wave velocity and mean effective stress for various frequency of input signal from 7.75 m depth soil sample – peak-to-peak method (Markowska-Lech et al., 2015)

rezonansowej próbki. Przy znajomości częstotliwości rezonansowej i geometrii próbki można obliczyć moduł odkształcenia postaciowego, według wzoru:

$$G_0 = \rho V_s^2 = \rho \frac{4\pi^2 f^2 h^2}{\beta^2}$$

gdzie:

f – częstotliwość rezonansowa,

h – wysokość próbki,

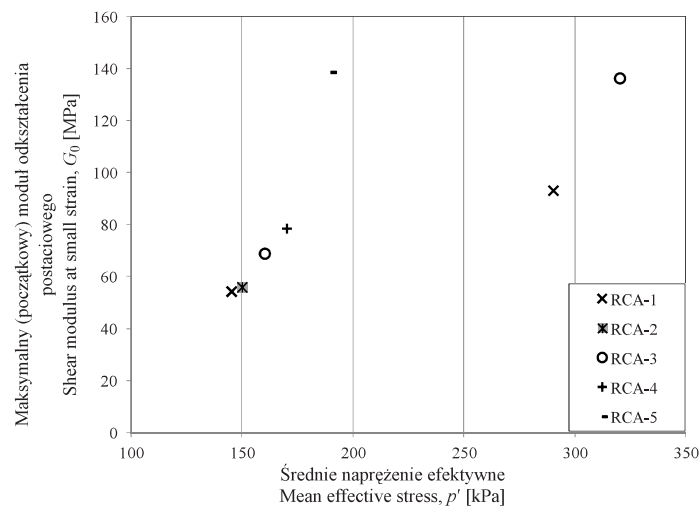
β – bezwymiarowy współczynnik zależny od polarnych momentów bezwładności próbki gruntu i systemu napędowego kolumny.

Przykładowe wyniki badań wykonanych w kolumnie rezonansowej znajdują się na rysunku 4.

Charakterystyka badanych gruntów i uzyskane wyniki

Badania początkowego modułu ściania (G_0) gruntów wykonane zostały

w Katedrze Geotechniki oraz Laboratorium Centrum Wodne SGGW na gruntach spoistych zalegających na głębokości poniżej 4 m od poziomu terenu w warszawskiej dzielnicy Stegny (Bajda i Markowska, 2003; Lech i Bajda, 2004; Markowska-Lech, 2006). W profilu gruntowym na głębokości od 4,3 do 6,8 m p.p.t. znajduje się warstwa ciemnoszarego i brązowego łu w stanie twardoplastycznym, a poniżej głębokości 7,7 m zalega warstwa łu płomienistego (rdzawo-czerwonego) w stanie twardoplastycznym. W spągu tych osadów występuje wkładka łu pylastego pstrego, koloru żółtego, o miąższości około 1,2 m. Od głębokości 8,9 m zaczynają się ły pstre ze znaczną ilością jaskrawych plam koloru żółtego, w których wyodrębniono dwie warstwy ze względu na odmienne charakterystyki parametrów geotechnicznych. Granica rozdzielająca te warstwy przebiega na głębokości 10,0–10,5 m p.p.t. ły pstre są w stanie twardoplastycznym i przechodzą w stan półzwały (tab. 1).



RYSUNEK 4. Przykładowe wyniki badań w kolumnie rezonansowej (Gabryś 2014)
 FIGURE 4. The example results from resonant column test (Gabryś, 2014)

TABELA 1. Właściwości fizyczne badanych gruntów spoistych – Stegny, Warszawa (Lech i Bajda, 2004)

TABLE 1. Index properties of tested cohesive soils – Stegny, Warszawa (Lech and Bajda, 2004)

Grunt Soil	Głębokość Depth	FC^*	w_n	w_L	I_p	ρ
	m	%	%	%	%	$t \cdot m^{-3}$
II (Cl)	4,3–7,7	68–80	26–34	77–98	52,6–76,4	2,0–2,1
II pylasty (siCl)	7,7–8,9	30–34	19–25	56–76	39,3–55,6	2,0–2,4
II (Cl)	8,9–12	32–46	19–27	86–110	61,9–84,0	2,0–2,1

*Fine content/zawartość cząstek <0,002 mm

Próbki gruntów o nienaruszonej strukturze badane w laboratorium miały wilgotność naturalną (w_n) w granicach od 20,3 do 32,1%, wskaźnik plastyczności (I_p) zawierał się w granicach od 32,7 do 43,1%. Początkowe wartości wskaźnika porowatości (e) wynosiły od 0,6 do 0,93, natomiast po konsolidacji miały wartości 0,78–0,51. Gęstość objętościowa (ρ) badanych gruntów wynosiła od 1,84 do 2,08 $t \cdot m^{-3}$ (tab. 2).

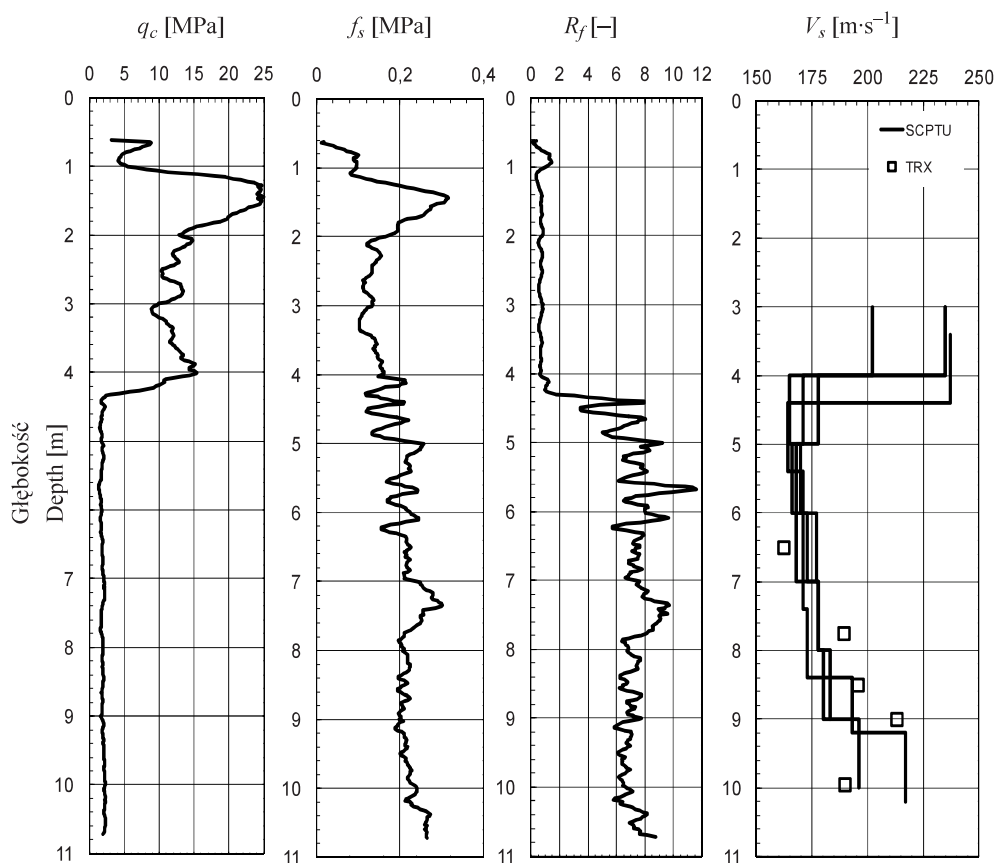
Wyniki badań terenowych i laboratoryjnych przedstawiono na wspólnych

wykresach w formie zależności prędkości fali poprzecznej (V_s), modułu odkształcenia postaciowego (G_0) od głębokości (rys. 5 i 6).

Uzyskiwane wartości prędkości fali poprzecznej w badaniach sondą SCPTU zawierają się w granicach od 160 do 240 $m \cdot s^{-1}$. Na wykresach obrazujących zmienność mierzonych w trakcie sondowania parametrów, tj. q_c , f_s , R_f , wyraźnie widoczne jest przejście między warstwami gruntów niespoistych – piasków i gruntów spoistych – ilów. Na wykresie

TABELA 2. Właściwości fizyczne gruntów spoistych badanych w laboratorium
 TABLE 2. Index properties of laboratory tested soils

Pomiar Measurement	Głębokość Depth	w_n	Δe	ρ
	m	%	–	t·m ⁻³
1	6,50	21,83	0,595–0,5097	2,08
2	7,75	22,14	0,657–0,542	2,00
3	8,50	20,35	0,784–0,699	1,84
4	9,00	32,05	0,929–0,782	1,86
5	9,95	27,85	0,833–0,713	1,90



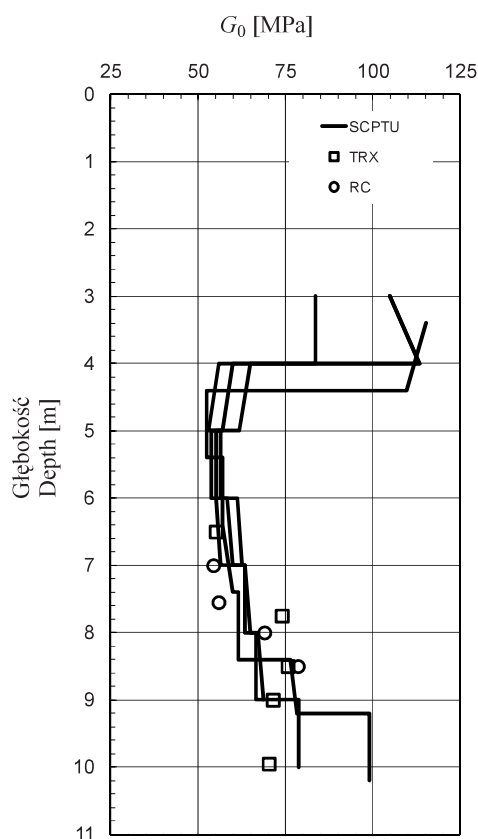
RYSUNEK 5. Wyniki badań terenowych i laboratoryjnych
 FIGURE 5. The field and laboratory tests results

(V_s) obecność warstw piasku zalegającego nad ilami widoczny jest w postaci znacznie większych wartości prędkości fali w górnej części wykresu – wartości są tu uśredniane w jednometrowych warstwach (co jest uwarunkowane konstrukcją modułu sejsmicznego stożka SCPTU). Poniżej głębokości około 4,5 m, a więc w gruntach spoistych, prędkość fali poprzecznej wykazuje tendencję wzrostową (zarówno dla badań terenowych, jak i laboratoryjnych). Jest to wpływ stanu naprężenia panującego w gruncie, który można wyeliminować poprzez znormalizowanie wyników względem naprężenia *in situ*. Jednak ze względu na porównywanie różnych technik pozyskiwania modułu odkształcenia postaciowego, autorzy podjęli decyzję o przedstawieniu uzyskanych wyników, zarówno badań terenowych, jak i laboratoryjnych, bez normalizacji.

Uzyskane w badaniach laboratoryjnych wartości prędkości fali poprzecznej w granicach od 160 do 215 $m \cdot s^{-1}$, zbliżone są do wartości prędkości pomierzonych w warunkach *in situ*. Obliczone na podstawie prędkości wartości początkowego modułu odkształcenia postaciowego z badań laboratoryjnych nie są znacząco niższe niż te z pomiarów terenowych. Prawdopodobnie taką można natomiast znaleźć w literaturze w wynikach badań innych gruntów spoistych (np. Hight, 1993; Silvestri i in., 2006). Naruszenie struktury oraz odprężenie gruntu podczas pobierania i transportu próbek, którym przypisywany jest niewątpliwie wpływ na zmniejszenie wartości początkowego modułu odkształcenia postaciowego, nie są wartościami dającymi się łatwo oszacować, stąd prawdopodobnie uzyskane różnice. Na prezentowane wy-

niki wpływa również, niejednokrotnie podnoszona, subiektywność identyfikacji sygnału, zwłaszcza w badaniach terenowych, gdzie możliwość zakłóceń z otoczenia jest bardzo prawdopodobna. Badania laboratoryjne zostały w znacznej części zautomatyzowane.

Wartości G_0 obliczone na podstawie V_s (rys. 6) zawierały się w granicach od 50 do 100 MPa z badań terenowych oraz od 50 do 80 MPa z badań laboratoryjnych i wykazywały tendencję wzrostową, po-



RYSUNEK 6. Początkowy moduł odkształcenia postaciowego otrzymany z badań terenowych (SCPTU) i laboratoryjnych (TRX i RC)

FIGURE 6. Shear modulus at very small strain G_0 from field (SCPTU) and laboratory (TRX and RC) tests

dobnie jak prędkość fali poprzecznej, wraz z głębokością.

Wnioski

Wartości prędkości fali poprzecznej uzyskane z metod laboratoryjnych i terenowych nie różnią się znacznie od siebie. Przekłada się to oczywiście na wartości początkowego modułu odkształcenia postaciowego. Świadczy to o poprawnym przeprowadzeniu obu badań z wykorzystaniem fal mechanicznych, co potwierdzają również wyniki badań w kolumnie rezonansowej.

Poprawne oszacowanie wartości prędkości fali poprzecznej umożliwia uzyskanie miarodajnych wartości parametrów odkształceniowych gruntów w zakresie małych odkształceń, w tym początkowego modułu odkształcenia postaciowego. Wartości uzyskanych w ten sposób modułów można uznać za referencyjne dla potrzeb poszukiwania empirycznych zależności o charakterze regionalnym umożliwiających oszacowanie wartości początkowych parametrów odkształceniowych bez konieczności wykorzystywania sprzętu do badań sejsmicznych.

Tematyka dotycząca badań zależności naprężenie – odkształcenie w gruntach mocnych oraz analiza czynników wpływających na zachowanie się tych gruntów ciągle się rozwija; mimo rozwoju technik pomiarowych i stosowania skomplikowanych urządzeń nadal istnieje wiele niepewności, zwłaszcza w sposobie interpretacji uzyskiwanych wyników. Badania terenowe i laboratoryjne należy rozwijać jednocześnie i traktować jako uzupełniające się – roz-

patrywane razem dają pewność poprawności wykonywanych badań i uzyskiwanych wyników.

Literatura

- Bajda, M. i Markowska, K. (2003a). Wykorzystanie badań in situ do wyznaczania modułu ścinania G_0 w gruntach spoistych. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 2(27), 48–55.
- Bajda, M. i Markowska, K. (2003b). Wykorzystanie sondowań SCPTU do wyznaczania modułu ściśliwości M w gruntach spoistych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej*, 98, Seria Budownictwo, 7-14.
- Gabryś, K. (2014). Shear modulus of selected cohesive soils in a wide range of strain. Proceedings of the 23rd European Young Geotechnical Engineers Conference, Barcelona, 23-26.
- Hight, D.W. (1993). A review of sampling effects in clays and sands. *Offshore Site Investigation and Foundation Behaviour*, vol. 28, 115-146.
- Lech, M. i Bajda, M. (2004). Identification of geological barriers at the Stegny site. W *16th European Young Geotechnical Engineers Conference*. (strony 201-210). Vienna: Austrian Society for Engineers and Architects.
- Markowska-Lech, K. (2006). Przegląd metod wyznaczania modułu ścinania G_0 z badań terenowych i laboratoryjnych na przykładzie ilów plicieńskich. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 33, 75-84.
- Markowska-Lech, K., Bąkowski, J. i Lech, M. (2015). Interpretacja pomiarów prędkości fali poprzecznej w gruntach spoistych. W A. Podhorecki (red.), *Wybrane zagadnienia konstrukcji materiałów budowlanych oraz geotechniki*. (strony 301-308). Bydgoszcz: Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy.
- Silvestri, F., Vitone, C., D'Onofrio, A., Cotecchia, F., Puglia R. i Santucci de Magistris, F. (2006). The influence of meso-structure on the mechanical behavior of a marly clay

from low to high strains. W *Soil Stress-Strain Behavior: Measurement, Modeling and Analysis. A Collection of Papers of the Geotechnical Symposium in Roma*. (strony 333-350). Amsterdam: Springer, Netherlands.

Viggiani, G. i Atkinson, J.H. (1995). Interpretation of bender element tests. *Geotechnique* 45(1), 149-154.

Streszczenie

Wyznaczanie modułu odkształcenia postaciowego G_0 w ilach. W pracy została przedstawiona próba określenia modułu odkształcenia postaciowego silnie prekonsolidowanego gruntu spoistego – ilu pochodzącego z poletka doświadczalnego Stegny w Warszawie, z wykorzystaniem badań terenowych i laboratoryjnych. W pracy zaprezentowano i porównano wyniki badań wykonanych *in situ* stożkiem sejsmicznym SCPTU oraz wyniki badań laboratoryjnych przeprowadzonych na próbkach gruntu konsolidowanych izotropowo wykonanych w aparacie trójosiowego ściskania wyposażonym w piezoelementy i w kolumnie rezonansowej.

Summary

Estimation of shear modulus G_0 for clays. The paper presents the advanced methods and devices using to determine the shear modulus in soils. A combination of field and laboratory tests was used to characterise the behaviour of a overconsolidated clays. The soil shear modulus at very small strain range G_0 was estimated from the SCPTU and the bender elements tests as well as the resonant column tests.

Author's address:

Katarzyna Markowska-Lech
Wydział Inżynierii i Kształtowania Środowiska
SGGW
Laboratorium Centrum Wodne
02-787 Warszawa, ul. Ciszewskiego 6
Poland
e-mail: katarzyna_markowska_lech@sggw.pl

Marek Bajda
Wydział Inżynierii i Kształtowania Środowiska
SGGW
Katedra Geoinżynierii
02-787 Warszawa, ul. Nowoursynowska 159
Poland
e-mail: marek_bajda@sggw.pl