

**Katarzyna MARKOWSKA-LECH**

Katedra Geoinżynierii SGGW  
Department of Geotechnical Engineering WAU

## **Przegląd metod wyznaczania modułu ścinania ( $G_0$ ) z badań terenowych i laboratoryjnych na przykładzie ilów pliocenijskich**

### **Estimation of shear modulus ( $G_0$ ) in laboratory and in situ tests for Pliocene clays**

**Słowa kluczowe:** moduł ścinania, SCPTU, badania trójosiowe, piezoelementy, grunty spoiste

**Key words:** shear modulus, SCPTU, triaxial tests, piezoelements, cohesive soils

#### **Wprowadzenie**

W ośrodku gruntowym pod działaniem obciążenia o określonej wielkości i kierunku powstaje pewien stan naprężenia i odkształcenia, którego znajomość ma istotne znaczenie dla właściwego projektowania obiektów posadowionych na gruncie. Grunt nie jest materiałem sprężystym, a jego osiadania pod wpływem przyłożonego obciążenia są sumą odkształceń sprężystych i trwałych. W celu ułatwienia obliczeń inżynierskich w geotechnice zakłada się sprężystość gruntu i stosuje się modele gruntowe wykorzystujące wzory teorii sprężystości. Rozwój technik badań terenowych i laboratoryjnych gruntów

zmierza do uzyskania pomiarów parametrów gruntowych przy jak najmniejszych odkształceniach. Wyniki badań uzyskanych w ten sposób na naturalnych gruntach są najbardziej zbliżone do przyjętych założeń. 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 ściśliwości oraz moduły sprężystości. Dla bardzo małych odkształceń stosowane są początkowy moduł odkształcenia  $E_0$  ( $E_{\max}$ ) i moduł ścinania  $G_0$  ( $G_{\max}$ ). Wielkości te można określić na podstawie prędkości fali poprzecznej ( $V_s$ ), którą uzyskuje się w badaniach.

Moduł odkształcenia ( $E_0$ ) obliczany jest ze wzoru:

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

natomiast moduł ścinania ( $G_0$ ):

$$G_0 = \rho V_s^2 \quad (2)$$

gdzie:

$\rho$  – gęstość objętościowa gruntu,  
 $V_s$  – prędkość fali poprzecznej,  
 $\nu$  – współczynnik Poissona.

Pomiędzy powyższymi modułami zachodzi zależność, która po przyjęciu współczynnika Poissona równego 0,5 wygląda następująco:

$$E_0 = 3G_0 \quad (3)$$

Istnieje wiele urządzeń służących uzyskiwaniu wartości modułów gruntu, a niniejszy artykuł przybliży tylko niektóre z nich.

## Badania terenowe

Spśród metod terenowych, pozwalających na uzyskanie początkowych wartości modułu ścinania, wyróżnia się metody otworowe (crosshole i downhole), metody bezotworowe (sondowania SCPTU i SDMT) oraz metody powierzchniowe (SASW). Wszystkie opierają się na pomiarze prędkości fal akustycznych, propagujących się przez badany grunt od nadajnika do odbiornika.

Badanie crosshole przebiega w orurowanych otworach wiertniczych (co najmniej dwóch). Polega na pomiarze czasu propagacji fali pomiędzy punktami w gruncie wzdłuż kierunku poziomego. Prędkość fali poprzecznej oblicza się na podstawie czasu jej propagacji pomiędzy otworami rozmieszczonymi w znanej odległości. Jeden z otworów służy jako źródło impulsu, w pozostałych na tych samych głębokościach

(zakłada się poziomą ścieżkę propagacji fali) znajdują się geofony – odbiorniki sygnału. Zarówno źródło impulsu, jak i odbiorniki muszą mieć dobry kontakt z badanym gruntem. Konieczne jest również zachowanie pionowości wykonywanych otworów (zachowanie drogi propagacji fali). W tym celu wykonuje się pomiary inklinometryczne dla każdego otworu wiertniczego (Andreasson 1979).

W metodzie downhole wykonuje się jeden orurowany otwór badawczy do żądanej głębokości. Na powierzchni terenu zlokalizowane jest źródło, które wytwarza fale. Mierzony jest czas przebiegu fali poprzecznej pomiędzy źródłem sygnału zlokalizowanym na powierzchni i odbiornikiem znajdującym się na określonej głębokości. Znając czas przebiegu fali oraz dystans, jaki musiała pokonać, oblicza się jej prędkość (Andreasson 1979).

Dwa przedstawione sposoby badań uległy modyfikacji, polegającej na bezotworowym wykonywaniu tych badań przez wykorzystanie sond geotechnicznych wyposażonych w końcówki przystosowane do pomiaru fal sejsmicznych.

Sonda statyczna CPTU została wyposażona w geofony nadawcze i odbiorcze. Stosowane są sondy jedno- i dwugefonowe (SCPTU – Seismic Cone Penetration Test). W skład standardowego wyposażenia sprzętu do wykonania badania wchodzi: piezostóżek z wbudowanym geofonem (geofonami), oscyloskop o wysokiej rozdzielczości połączony z komputerem oraz źródło sygnału podłączonego do wyzwalacza. Stożek sejsmiczny wciskany jest w grunt, a penetracja wstrzymywana jest co 1 m. Podczas penetracji mierzony jest opór na stożku, tarcie na tulei,

ciśnienie porowe, pochylenie i możliwe inne parametry jak w zwykłym badaniu CPTU. Podczas zatrzymania fala generowana jest z powierzchni ziemi, a czas jej dotarcia do stożka sejsmicznego jest zapisywany (stożek jednogefonowy – Campanella i in. 1986). W przypadku stożka dwugefonowego czas propagacji fali mierzony jest od momentu przybycia fali poprzecznej do pierwszego, górnego geofonu.

W literaturze można znaleźć przykłady użycia dwóch stożków zainstalowanych na ciężarówkach (jeden ze źródłem sygnału, drugi z odbiornikiem). Badanie wykazało zgodność z tradycyjną metodą crosshole (Baldi i in. 1988).

Podobnie został zmodyfikowany dylatometr Marchettiego DMT – do standardowego wyposażenia dodany został geofon. Badanie dylatometrem SDMT (Seismic Dilatometer) polega na pogrążaniu łopatki w podłoże gruntowe ze stałą prędkością. W celu dokonania pomiarów penetracja sondy jest zatrzymywana co 0,2 m. Wykonywane są trzy odczyty: A, B i C. Odczyt A odpowiada wartości ciśnienia sprężonego powietrza otrzymanej w początkowej fazie ruchu membrany dylatometru, prowadzącej do kontaktu z otaczającym gruntem. Odczyt B odpowiada ciśnieniu sprężonego powietrza, które powoduje przemieszczenie środka membrany o mniej więcej 1,1 mm w kierunku gruntu (Marchetti i Crapps 1981). Odczyt C odpowiada ciśnieniu gazu po powrocie membrany do jej początkowej pozycji osiągniętej przy odczycie A. Dodatkowo co 1 m odbywa się pomiar czasu propagacji fali od nadajnika znajdującego się na powierzchni terenu do dwóch odbiorników umieszczonych na pierwszej żerdzi

dylatometru (Mayne i in. 1999). Prędkość fali poprzecznej odnosi się, podobnie jak w badaniu SCPTU, do jednorodnej warstwy gruntu (eliminacja wpływu warstw leżących powyżej).

Metoda SASW (Spectral Analysis of Surface Waves) wykorzystuje powierzchniowe fale Rayleigha. Badanie polega na wystaniu sygnału o różnej długości fali z nadajnika, który zostaje odebrany przez kilka odbiorników rozmieszczonych w linii na powierzchni terenu. Odległość między źródłem a pierwszym odbiornikiem jest równa odległości między kolejnymi odbiornikami. Badanie przeprowadzane jest dwukrotnie na tej samej linii pomiarowej, jedynie źródło impulsu przenoszone jest tak, że ostatni odbiornik w pierwszym badaniu staje się pierwszym odbiornikiem w drugim badaniu, a wyniki badań są uśredniane. Głębokość penetracji gruntu uwarunkowana jest długością fali: fale krótkie służą do badania warstw przypowierzchniowych, fale dłuższe – do warstw głębiej zalegających. Metoda SASW pozwala na wyodrębnienie poziomych warstw gruntu.

Metody bezotworowe pomiaru prędkości fal poprzecznych są bardziej obiektywne niż wykonywane w otworach wiertniczych, mają większą powtarzalność i dzięki dużej automatyzacji pomiaru są wykonywane w znacznie krótszym czasie.

## **Badania laboratoryjne**

Podstawowym aparatem do badania zależności naprężenie-odkształcenie w gruncie jest aparat trójosiowego ściskania. Badanie polega na poddawaniu

próbki w kształcie walca, umieszczonej w gumowej membranie, naprężeniom – pionowym i poziomym, zadawanym hydraulicznie, aż do momentu ścięcia próbki. Wzrost naprężeń wywołuje odkształcenia pionowe i poziome badanej próbki. Pomiar zadawanych naprężeń oraz zmiany wysokości próbki, a więc odkształceń pionowych, odbywa się za pomocą czujnika umieszczonego na zewnątrz komory. Pozwala to na sporządzenie zależności naprężenie-odkształcenie w zakresie odkształceń rzędu 0,1–0,5%, a następnie oszacowanie modułu odkształcenia (Head 1986).

Aparat trójosiowego ściskania z lokalnym pomiarem przemieszczeń powstał w celu eliminacji błędów związanych z zewnętrznym pomiarem przemieszczeń. Wewnętrzny pomiar odkształceń próbki wykonuje się za pomocą czujników przemieszczeń o dużej rozdzielczości (1 mikron), które pozwoliły uzyskać dużo większe (w zakresie odkształceń 0,001–0,1%) wartości modułu odkształcenia gruntu w porównaniu z badaniem standardowym.

Charakterystyka rozkładu modułu odkształcenia gruntu otrzymana z badania z lokalnym pomiarem przemieszczeń jest zbliżona do charakterystyki tego samego gruntu, zbadanego w kolumnie rezonansowej, która uważana jest za miarodajną (Jamiolkowski i in. 1994).

Kolejna modyfikacja aparatu trójosiowego polega na umieszczeniu wewnątrz komory piezoelementów, które poprzez wykorzystanie zjawiska piezoelektryczności umożliwiają pomiar prędkości fal akustycznych. Prędkość fali poprzecznej obliczana jest na podstawie czasu przejścia impulsu od nadajnika do odbiornika umieszczonych

w kopułkach aparatu lub bezpośrednio na próbce gruntu po przeciwnych jej stronach. Piezoelementy znalazły zastosowanie również w innych urządzeniach laboratoryjnych, ponieważ bez zakłócania standardowo wykonywanych badań pozwalają na szybki pomiar prędkości fali poprzecznej.

Inna modyfikacja aparatu trójosiowego – cylindryczny aparat skrętny, umożliwia automatyczne zadawanie obciążeń cyklicznych. Układ zadający naprężenia pionowe pozwala na zwiększanie i zmniejszanie pionowego naprężenia z różną częstotliwością. Dodatkowe zalety aparatu skrętnego to możliwość równoczesnego zadawania momentu obrotowego i siły pionowej przy kontrolowanych przemieszczeniach oraz zmiana kierunków głównych zadawania naprężeń (Shibuya i in. 2001). Jednak urządzenie to wymaga skomplikowanej metodyki badań, która uniemożliwia stosowanie go w praktyce.

Aparatem, który umożliwia pomiar bardzo małych odkształceń (w zakresie  $10^{-4}$ – $10^{-1}\%$ ) jest kolumna rezonansowa. Jednolita próbka, przy stałym naprężeniu bocznym, poddawana jest drganiom skrętnym lub pionowym za pomocą elektromagnetycznego systemu obciążania – najczęściej harmonicznym obciążeniom, których częstotliwość i amplituda są kontrolowane. Częstotliwość zadawanych drgań jest stopniowo zwiększana, aż do uzyskania częstotliwości rezonansowej próbki. Znając częstotliwość rezonansową i geometrię próbki można obliczyć prędkość fali poprzecznej i podłużnej propagującej przez próbkę, a następnie moduły odkształcenia. Wyniki badań uzyskiwanych w laboratorium dla małych od-

kształceń odnosi się do wyników uzyskanych z badań przeprowadzonych w kolumnie rezonansowej, która jest uznawana za punkt odniesienia. Dotychczas w Polsce z powodu wysokich kosztów aparatury nie ma kolumny rezonansowej, dlatego wykorzystywane są inne, uzupełniające się wzajemnie, laboratoryjne metody określania zależności naprężenie-odkształcenie w całym zakresie.

## Metodyka badań

Badania początkowego modułu ścinania ( $G_0$ ) gruntów zostały przedstawione na przykładzie badań z wykorzystaniem prędkości fali poprzecznej. Wykonane zostały w Katedrze Geotechniki na warszawskich łąkach plicieńskich.

Badania terenowe zostały przeprowadzone przy użyciu sondy z dwoma geofonami SCPTU, badania laboratoryjne – przy użyciu zmodyfikowanego aparatu trójosiowego ściskania z piezoelementami.

Badanie sejsmiczne SCPTU polegało na wciskaniu w grunt stożka wraz z zestawem żerdzi, z osią geofonów zorientowaną równoległe do belki – źródła impulsu, ze stałą prędkością około 2 cm/s. Po zatrzymaniu penetracji 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 geofonu umieszczonego głębiej. Na podstawie znajomości różnicy w czasie dotarcia

sygnałów do obu geofonów oscyloskop automatycznie obliczał prędkość fali poprzecznej. Po pomiarze prędkość fali wznawiany był program rejestrujący pograżanie i stożek był wciskany w dół do następnego poziomu badania sejsmicznego. Schemat stożka SCPTU oraz zasada pomiaru prędkości fali poprzecznej pokazano na rysunkach 1 i 2.

Podczas standardowo wykonywanych badań laboratoryjnych w aparacie trójosiowego ściskania bezpośredni pomiar prędkości fali poprzecznej ( $V_s$ ) w próbce gruntu umożliwiały elementy piezoceramiczne typu bender (rys. 3). Przetworniki zbudowane z piezoceramicznego materiału, który zamienia energię mechaniczną (drżania) na energię elektryczną i na odwrót, pozwalały na wysłanie przez generator fal impulsu elektrycznego, który powodował drżania nadajnika. Drżania przenoszone dzięki sprężystym właściwościom gruntu do odbiornika były zamieniane na impuls elektryczny, który następnie był wzmacniany i przesyłany do oscyloskopu. Wejście sygnału, widoczne na ekranie oscyloskopu, odpowiadało wejściu sygnału do próbki.

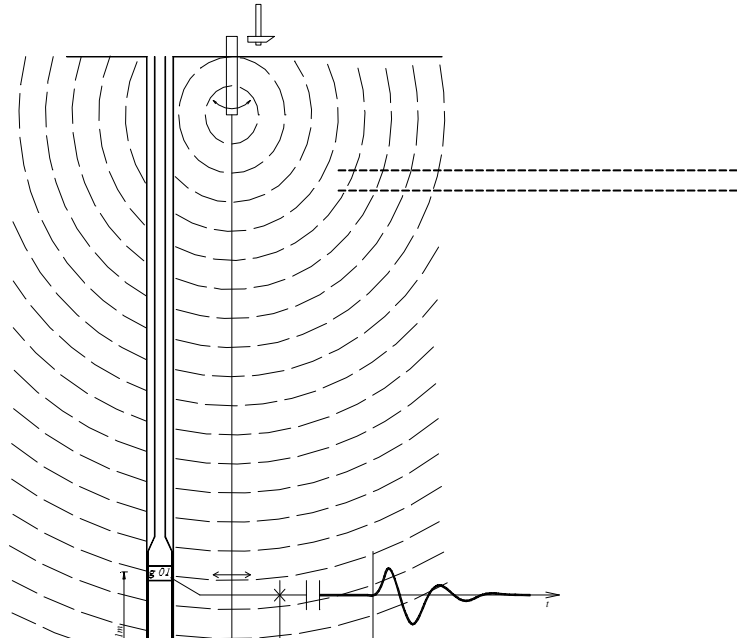
Prędkość fali propagującej się przez grunt obliczana była z zależności:

$$V = \frac{h}{t} \quad (4)$$

gdzie:

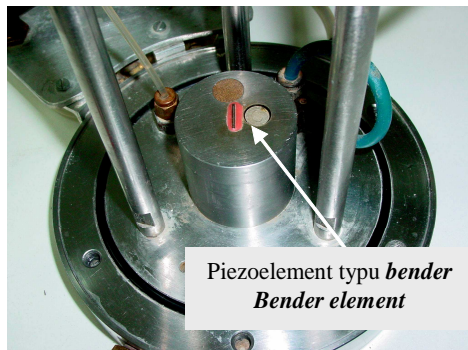
$h$  – odległość między nadajnikiem i odbiornikiem; w badaniach SCPTU wynosiła 1 m (odległość między górnym i dolnym geofonem), w badaniach laboratoryjnych – wysokość próbki pomniejszona o głębokość wejścia piezoelementów w grunt (Viggiani i Atkinson 1995),

$t$  – czas przejścia fali przez badany grunt.



RYSUNEK 1. Schemat stożka sejsmicznego  
FIGURE 1. The seismic cone

RYSUNEK 2. Schemat pomiaru prędkości fali ( $V_s$ )  
FIGURE 2. Measurement of shear wave velocity



RYSUNEK 3. Aparat trójosiowy z przetwornikami do pomiaru fali poprzecznej i podłużnej  
FIGURE 3. Triaxial apparatus with piezoelements

### Badane grunty i uzyskane wyniki

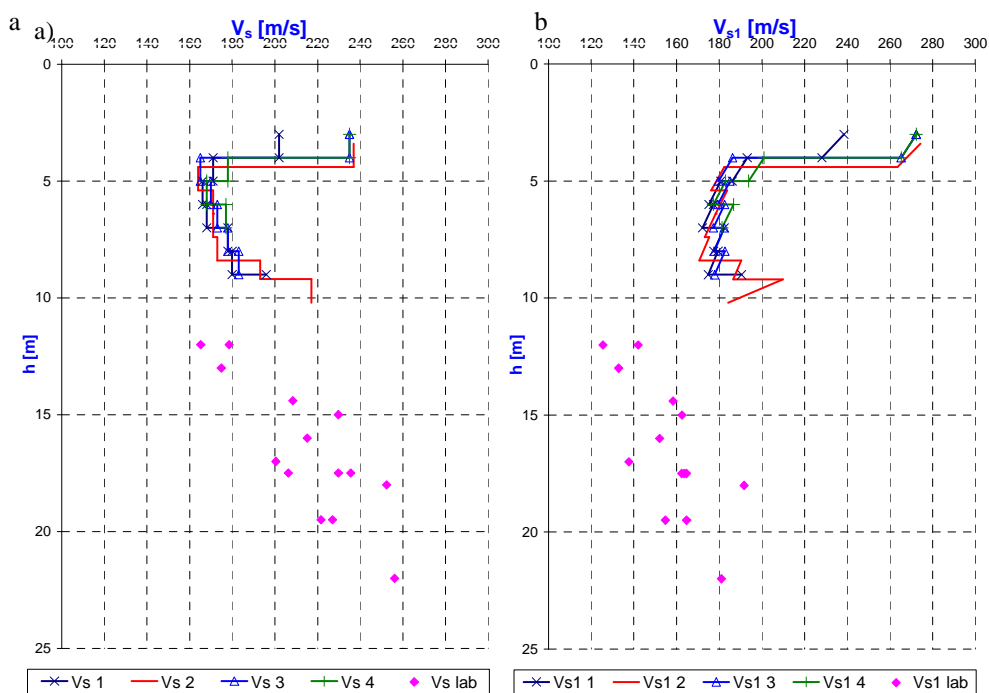
Badania zostały wykonane na gruntach z terenu Warszawy. Badania terenowe sondą SCPTU przeprowadzone

zostały na poligonie doświadczalnym Stegny, gdzie poniżej głębokości 4,20 m zalegają iły plioceńskie (Bajda i Markowska 2003). Próbki do badań laboratoryjnych pobrane zostały z trasy projektowanych linii metra. Wszystkie próbki pochodziły z tej samej warstwy geologicznej – silnie prekonsolidowanych osadów plioceńskich, występujących na całym obszarze Warszawy jako różnokolorowe iły zwięzłe, nazywane iłami „pstrymi”. Miąższość iłów jest bardzo różna – wynosi od 25 do 150 m, co jest spowodowane procesami glaciotektonicznymi, które doprowadziły do wypiętrzenia i pofałdowania osadów plioceńskich podczas kolejnych zlodowaceń, oraz długotrwałymi procesami erozyjnymi związanymi z okresami interglacjałów.

Próbki iłó w o nienaruszonej struktury miały wilgotność naturalną ( $w_n$ ) w granicach od 21,7 do 36,8%, wskaźnik plastyczności ( $I_p$ ) zawierał się w granicach od 30 do 60,6%. Początkowe wartości wskaźnika porowatości ( $e$ ) wynosiły 0,55–0,82, natomiast po konsolidacji miały wartości 0,47–0,75. Gęstość objętościowa ( $\rho$ ) badanych gruntów wynosiła od 1,93 do 2,05 t/m<sup>3</sup>.

Wyniki badań terenowych i laboratoryjnych przedstawione zostały na wspólnych wykresach w formie zależności prędkości fali poprzecznej ( $V_s$ ), znormalizowanej prędkości fali poprzecznej ( $V_{s1}$ ) i modułu ścinania ( $G_0$ ) od głębokości.

Uzyskiwane wartości prędkości fali poprzecznej w badaniach sondą SCPTU zawierają się w granicach od 130 do 240 m/s. Na rysunku 4 wyraźnie widoczny jest wpływ warstw piasku zalegającego nad iłami na wartość prędkości fali poprzecznej – w górnej części wykresów prędkość fali jest zdecydowanie większa niż w dolnych. Wynika to z uśredniania wyników w jednowarstwowych warstwach, co jest uwarunkowane konstrukcją stożka SCPTU. Poniżej głębokości 5 m, a więc w iłach, prędkość fali poprzecznej wzrasta (zarówno dla badań terenowych, jak i laboratoryjnych). Jest to wpływ stanu naprężenia panującego w gruncie. W celu



RYSUNEK 4. Wyniki terenowych i laboratoryjnych badań sejsmicznych: a – prędkość fali poprzecznej  $V_s$  [m/s], b – znormalizowana prędkość fali poprzecznej  $V_{s1}$  [m/s]

FIGURE 4. Tests results from in situ and laboratory tests: a – shear wave velocity  $V_s$  [m/s], b – normalized shear wave velocity  $V_{s1}$  [m/s]

jego wyeliminowania zastosowany został wzór podany przez Robertsona i in. (1992):

$$V_{s1} = V_s \left( \frac{100}{\sigma'_{vo}} \right)^{0,25} \quad (5)$$

gdzie:

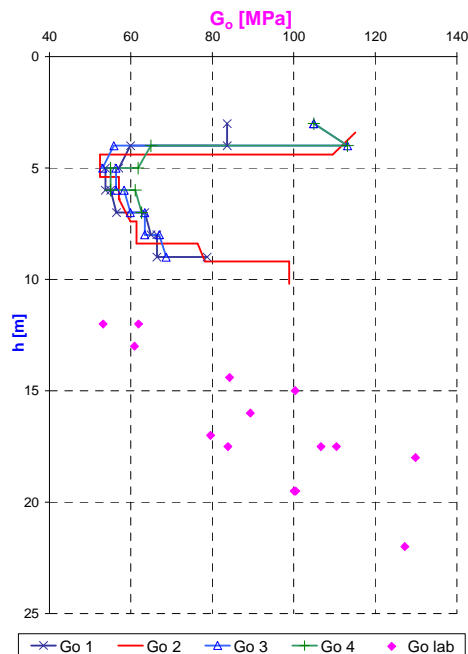
$V_{s1}$  – znormalizowana prędkość fali sejsmicznej [m/s],

$\sigma'_{vo}$  – naprężenie geostaticzne [kPa].

Po znormalizowaniu prędkości fali poprzecznej można zauważyć, że w badaniach laboratoryjnych uzyskiwane są mniejsze wartości prędkości niż w warunkach terenowych (rys. 4b). Wynika to najprawdopodobniej z naruszenia struktury oraz odprężenia gruntu podczas pobierania i transportu próbek.

Wartości modułu ścinania ( $G_0$ ) obliczone na podstawie prędkości fali poprzecznej ( $V_s$ ) zawierały się w granicach od 40 do 140 MPa i wzrastały, podobnie jak prędkość fali poprzecznej, wraz z głębokością (rys. 5). Różnica pomiędzy wartościami modułu ścinania uzyskanymi w laboratorium i w badaniach terenowych może świadczyć o potrzebie stworzenia regionalnych zależności empirycznych, które lepiej niż dostępne w literaturze opisywałyby zachowanie się badanych gruntów.

Zestawienie na wspólnym wykresie posiadanych wyników badań pokazuje, że należy je uzupełnić poprzez pobranie próbek gruntu na głębokościach odpowiadających badaniom sondą SCPTU i zbadanie ich w laboratorium przy użyciu piezoelementów. W ten sposób zostanie przeprowadzona weryfikacja otrzymanych dotychczas wyników badań.



RYSUNEK 5. Moduł okształcenia postaciowego  $G_0$  [MPa] z badań terenowych i laboratoryjnych  
 FIGURE 5. Shear modulus  $G_0$  [MPa] from laboratory and field test

Badania terenowe i laboratoryjne należy rozwijać jednocześnie i traktować jako uzupełniające się, ponieważ traktowane oddzielnie nie pozwalają na pełne poznanie środowiska gruntowego i zjawisk w nim zachodzących.

## Wnioski

Rozwój badań wynika z poszukiwania matematycznego opisu zjawisk zachodzących w otaczającym nas środowisku, który jak najwierniej, a jednocześnie jak najprościej, oddawałby rzeczywistość i pozwalał inżynierom na precyzyjne projektowanie obiektów oraz przewidywanie zachowania się



gruntu w trakcie ich eksploatacji. Widoczne są trendy poszukiwań lokalnych zależności między parametrami gruntu a wielkościami, które można łatwo pomierzyć w terenie lub laboratorium. Dlatego rozwijane są obie gałęzie badań geotechnicznych – badania terenowe ze względu na zachowanie naturalnych warunków, w jakich występują grunty, szybkość i stosunkowo mały koszt, oraz badania laboratoryjne, ponieważ dają możliwość zadawania i kontroli warunków, w jakich są one przeprowadzane.

Pośród rozwijanych technik badań jeden z głównych kierunków stanowią badania z wykorzystaniem prędkości fali sejsmicznej. Przetworniki do nadawania i odbioru fal sejsmicznych można łatwo zamontować w standardowych urządzeniach laboratoryjnych i terenowych, przez co otrzymywane wartości modułu ścinania można zweryfikować z wynikami uzyskiwanymi z badań dotychczas stosowanymi metodami (Bajda i Markowska 2003). Większe wartości modułów uzyskane z badań terenowych pozwalają przypuszczać, że zachowanie badanych gruntów jest charakterystyczne dla warszawskich iłów pliczeńskich i należy poszukiwać regionalnych zależności je opisujących.

Tematyka dotycząca badań zależności naprężenie-odkształcenie w gruntach oraz analiza czynników wpływających na jej rozkład ciągle się rozwija, czego dowodzą konferencje oraz liczne publikacje naukowe poświęcone nowym urządzeniom służącym do pomiarów odkształceń, metodyce badań i sposobie interpretacji uzyskiwanych wyników.

## Literatura

- ANDREASSON B. 1979: Deformation characteristics of soft high-plastic clays under dynamic loading conditions. Department of Geotechnical Engineering Chalmers University of Technology, Göteborg
- BAJDA M., MARKOWSKA K. 2003: Wykorzystanie badań in situ do wyznaczania modułu ścinania  $G_0$  w gruntach spoistych. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska* 2(27): 48–55.
- BALDI G., BRAZZI D., SUPERBO S., BATTAGLIO M., JAMIOLKOWSKI M. 1988: Seismic cone in Po River sand. Penetration Testing 1988, ISOPT-1, De Ruiter, Rotterdam.
- CAMPANELLA R.G., ROBERTSON P.K., GILLESPIE D. 1986: Seismic cone penetration test. Proceedings of the Special Conference In Situ'86. Use of In Situ Testing in Geotechnical Engineering. Blacksburg, Virginia, USA, 116–130.
- HEAD K.H. 1986: Soil laboratory testing. Pentech Press.
- JAMIOLKOWSKI M., LANCELLOTTA R., LO PRESTI D.C.F., PALLARA O. 1994: Stiffness of Toyoura sand at small and intermediate strain. Proceedings of XIII ICSMFE, New Delhi. Oxford & IBH Publishing Co. PVT. Ltd, Vol. 1
- MARCHETTI S., CRAPPS D.K. 1981: Flat dilatometer manual. Internal report of GPE.
- MAYNE P.W., SHNEIDER J.A., MARTIN G.K. 1999: Small- and large-strain soil properties from seismic flat dilatometer tests. Pre-failure Deformation characteristics of Geomaterials, Balkema, Rotterdam.
- ROBERTSON P.K., WOELLER D.J., FINN W.D.L. 1992: Seismic cone penetration test for evaluating liquefaction potential under cyclic loading. *Canadian Geotechnical Journal* 29(3): 686–695.
- SHIBUYA S., YAMASHITA S., KOHATA Y., KAWAGUCHI T. 2001: International Round-Robin Test Organized by TC-29. Advanced Laboratory Stress-Strain Testing of Geomaterials. Swets & Zeitlinger Publishers Lisse.
- VIGGIANI G., ATKINSON J.H. 1995: Interpretation of bender element tests. *Geotechnique* 45(1): 149–154.

## Summary

**Estimation of shear modulus  $G_0$  in laboratory and in situ tests for Pliocene clays.** In recent years the investigations were carried out to obtain the reliable stress-strain relationships in the cohesive soil, especially at the elastic range. The paper presents the advanced methods and devices using in measurement of shear waves velocity to estimate the shear modulus. A combination of field and laboratory tests was used to characterise the behaviour of a Pliocene overconsolidated clay. The soil shear modulus at very small strain range  $G_0$  was estimated from both the SCPTU and the bender elements tests.

## Author's address:

Katarzyna Markowska-Lech  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
Katedra Geoinżynierii  
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa  
Poland  
e-mail: markowska@alpha.sggw.waw.pl