2003 Nr kol. 1574

Marek BAJDA, Katarzyna MARKOWSKA Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego

## WYKORZYSTANIE SONDOWAŃ SCPTU DO WYZNACZANIA MODUŁU ŚCIŚLIWOŚCI M W GRUNTACH SPOISTYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono przykład zastosowania pomiaru prędkości fal akustycznych w terenie do wyznaczania modułu ściśliwości w gruntach spoistych. Po scharakteryzowaniu techniki pomiaru prędkości fal akustycznych in situ opisany został poligon doświadczalny Stegny, na którym przeprowadzono badania sondą SCPTU. Artykuł zawiera opis metodyki badań oraz analizę uzyskanych wyników.

# THE USE OF SEISMIC CONE PENETRATION TESTS FOR ESTIMATION OF OEDOMETRIC MODULUS M IN COHESIVE SOILS

Summary. The paper presents an example of in situ measurements of seismic wave velocity for determination of oedometric modulus M in cohesive soils. In situ measurements of seismic wave velocity performed at Stegny test site are described. A geological description of the test site, the test procedure and the analysis of obtained results are presented in this paper.

#### 1.Wstęp

Na podstawie pomierzonych in situ wartości oporu stożka można oszacować następujące parametry odkształceniowe: moduł ściśliwości M, moduł odkształcenia E oraz moduł ścinania G (Młynarek i in., 1995). Zastosowanie w badaniach stożka sejsmicznego pozwala na precyzyjne określenie wartości parametrów odkształceniowych.

Zasadniczą zaletą badań sejsmicznych, decydującą o ich wzrastającej popularności, jest możliwość określenia parametrów charakteryzujących właściwości sprężyste ośrodka gruntowego. Wynika to z faktu, że opis propagacji powstałych drgań opiera się na teorii ruchu falowego dla ośrodka liniowo–sprężystego. Oprócz piezostożka z geofonami sprzęt do pomiaru fal poprzecznych składał się z dwukanałowego oscyloskopu i komputera, na którym zainstalowane było oprogramowanie do obsługi oscyloskopu. Na każdej głębokości pomiarowej podczas przerwania penetracji na powierzchni generowana jest fala poprzeczna. Impuls fali dociera najpierw do górnego geofonu, zostaje on zapisany w pamięci oscyloskopu i następuje automatyczne wyzwolenie podstawy czasu. Drugi kanał oscyloskopu rejestruje sygnał, który dociera do geofonu umieszczonego poniżej (rys. 4).



Rys. 3. Schemat stożka sejsmicznego Fig. 3. The seismic cone



Zaletą sondy sejsmicznej z dwoma geofonami w konfiguracji z dwukanałowym oscyloskopem jest wyeliminowanie części dodatkowego osprzętu w postaci wyzwalacza, który w stożkach zawierających jeden geofon sprzężony jest ze źródłem impulsu wysyłanego z powierzchni ziemi. Przy badaniu sondą dwugeofonową impuls dociera do pierwszego, górnego geofonu i dopiero wtedy automatycznie wyzwalana jest podstawa czasu do pomiaru prędkości fali. Pozwala to na uniknięcie błędów w rejestracji czasu przebiegu fali od źródła do geofonu znajdującego się w badanym gruncie. Ponadto, przy pomiarach sondą z dwoma geofonami zawsze badana jest warstwa gruntu o miąższości 1m, ponieważ otrzymuje się dokładnie różnicę pomiędzy czasami dotarcia impulsu do górnego i dolnego geofonu.

10

Znajdując  $\Delta t$  z analizy dwóch kształtów fal ścinających oraz odległości L między dwoma geofonami, określa się prędkości fali ścinającej za pomocą równania:

$$V_s = L/\Delta t.$$
(1)

Po zarejestrowaniu kształtu fal poprzecznych i odczytaniu czasu ∆t stożek sejsmiczny instaluje się na określonej głębokości do nowego pomiaru. Po zakończeniu badań otrzymuje się wstępny wykres prędkości fali poprzecznej w funkcji głębokości.

#### 4. Analiza wyników badań

Na podstawie wielkości pomierzonych w terenie sondą CPTU zostały obliczone, przy zastosowaniu wzorów empirycznych wybranych z literatury, parametry charakteryzujące badany grunt. Jako przykład pokazane zostały wykresy modułu ściśliwości uzyskane ze wzorów proponowanych przez Sennesta i in. (1982, 1989) dla prekonsolidowanych gruntów spoistych:

$$M = \alpha (q_t - \sigma_{vo}), \qquad (2)$$

przy czym  $\alpha$  zmienia się od 5 do 15 dla zakresu naprężeń poniżej  $\sigma'_{p}$  i od 4 do 8 dla zakresu naprężeń powyżej  $\sigma'_{p}$ ;

oraz Kulhawy i Mayne (1990) dla gruntów spoistych:

$$M = 8,25 \cdot (q_t - \sigma_{vo}), \qquad (3)$$

gdzie:  $q_t - znormalizowany$  opór stożka,  $\sigma_{vo} - pionowe$  naprężenie geostatyczne,  $\sigma'_p - naprężenie prekonsolidacji.$ 

Analiza wyników wskazuje, że wartości otrzymane ze wzorów do obliczeń modułu ściśliwości proponowanych w literaturze odbiegają od wartości otrzymanych z badań edometrycznych. Wynika stąd konieczność opracowania wzorów mających charakter regionalny, opisujących badane iły trzeciorzędowe. Ze względu na wykonanie pomiarów sondą sejsmiczną podjęta została próba uzyskania zależności łączących moduł ściśliwości z wielkościami uzyskiwanymi bezpośrednio z badań terenowych sondą CPTU i SCPTU, a zwłaszcza włączenia prędkości fali poprzecznej V<sub>s</sub>.

W przeprowadzonej analizie zostało założone, że odkształcalność gruntu może być opisywana za pomocą modułu ściśliwości M będącego funkcją dwóch wielkości mierzonych w terenie – oporu stożka  $q_c$  i prędkości fali poprzecznej  $V_s$ :  $M = f(q_c, V_s)$ . Dodatkowo

11

zbadana została możliwość uzależnienia modułu od ciśnienia wody w porach gruntowych mierzonego w trakcie penetracji stożkiem sejsmicznym  $u_2$ :  $M = f(u_2, V_s)$ .

W opracowaniu postaci proponowanej zależności została wykorzystana metoda analizy regresji krokowej, polegającej na wprowadzaniu zmiennych niezależnych aż do uzyskania najlepszego równania. Jako wyniki referencyjne posłużyły wyniki badań edometrycznych. Badania przeprowadzono stosując skokowy przyrost obciążenia. Na podstawie otrzymanych krzywych ściśliwości wyznaczono moduł styczny przy naprężeniu odpowiadającym wartości naprężenia in situ  $\sigma'_{V0}$ . Przy opracowaniu odpowiednich zależności służących do wyznaczenia modułów na podstawie badań terenowych przy uwzględnieniu dwóch czynników przyjęto dwa równania:

liniowe jednoczynnikowe  $M = \alpha_0 + \alpha_1 X_1$ , (4)

liniowe dwuczynnikowe  $M = \alpha_0 + \alpha_1 X_1 + \alpha_2 X_2,$  (5)

gdzie: X1, X2 - czynniki, a0, a1, a2 - współczynniki.

Charakterystyki zmian modułu ściśliwości zależnego od składowych mierzonych w terenie ( $q_c$ , i V<sub>s</sub>) posłużyły do uzyskania następujących zależności:

$$M = 154 + 1000 \cdot \sigma'_{VO} - 1.2 \cdot V_{s}, \tag{6}$$

$$M = 92,5 + 350 \cdot (\sigma_{vo} - u_2) - 0,7 \cdot V_s.$$
(7)

Wartości uzyskanych współczynników dla analizy jedno- i dwuczynnikowej w postaci funkcji liniowej dla iłów trzeciorzędowych z poligonu badawczego Stegny przedstawiono w tablicy 4.1.

Do analizy wybrane zostały tylko wzory zależne od dwóch wielkości mierzonych w terenie: oporu stożka  $q_c$  i prędkości poprzecznej fali sejsmicznej  $V_s$  oraz ciśnienia wody w porach gruntowych mierzonego w trakcie penetracji  $u_2$  i prędkości poprzecznej fali sejsmicznej  $V_s$ .

Tablica 4.1

Wartości współczynników uzyskanych z analizy jedno- i dwuczynnikowej w postaci funkcji liniowej dla iłów trzeciorzędowych występujących w podłożu poligonu badawczego Stegny w Warszawie

Równanie	Parametry				R <sup>2</sup>
	α	α1	α2	α3	[%]
$M = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot Vs$	8,7	0,14	-	-	7,2
$M = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot \sigma'_{v0} + \alpha_2 \cdot q_c$	10	400	-6,4	-	67,8
$M = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot \sigma'_{v0} + \alpha_2 \cdot Vs$	154	1000	-1,2		82,1
$\mathbf{M} = \boldsymbol{\alpha}_0 + \boldsymbol{\alpha}_1 \cdot \mathbf{q}\mathbf{c} + \boldsymbol{\alpha}_2 \cdot \mathbf{V}\mathbf{s}$	-72,3	-8	0,7	-	17,1
$\mathbf{M} = \boldsymbol{\alpha}_0 + \boldsymbol{\alpha}_1 \cdot \boldsymbol{\sigma}_{v0}' + \boldsymbol{\alpha}_2 \cdot \mathbf{V}\mathbf{s} + \boldsymbol{\alpha}_3 \cdot \mathbf{q}\mathbf{c}$	80,8	1000	-0,7	-7	89,8
$M = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot (\sigma_{v0} - u_2) + \alpha_2 \cdot Vs$	92,5	350	-0,7		84,8



Rys. 5. Wykresy modułów ściśliwości otrzymane ze wzorów podanych w literaturze i proponowanych przez autorów



Przy obliczeniu modułu ściśliwości z zależności (6) popełnia się błąd względny rzędu 7%, a wartość  $R^2$  wynosi 83% (tabl. 4.1). Podobne wartości błędów - błąd względny 7%,  $R^2$ =85% uzyskuje się dla wzoru (7). Podane wielkości błędów dotyczą wartości prognozowanych. Takie wartości charakterystyk statystycznych świadczą o dużej korelacji pomiędzy zmiennymi mierzonymi w terenie zastosowanymi w proponowanych zależnościach a wielkościami referencyjnymi. Można wnioskować, że postaci funkcji zostały wybrane prawidłowo. Proponowane zależności znacznie lepiej charakteryzują badane grunty z poligonu Stegny niż wzory podane w literaturze. Wartości błędów statystycznych są znacznie mniejsze niż w tradycyjnych obliczeniach.

### 5. Wnioski

Proponowane wzory empiryczne dają wiarygodne wyniki dla lokalnych warunków gruntowych, iłów trzeciorzędowych, o czym świadczy korelacja  $R^2 > 80\%$  pomiędzy wartościami otrzymanymi z obliczeń i wynikami badań laboratoryjnych. Dokładność wyników obliczeń z proponowanych przez autorów zależności w porównaniu z tradycyjnymi

znacznie poprawia wprowadzenie zmiennej w postaci prędkości fali poprzecznej. Proponowane zależności charakteryzują niewielkie wartości błędów i prostą postać funkcji – mała ilość parametrów liczbowych. Należy kontynuować badania ukierunkowane na wykorzystanie fali poprzecznej do oceny innych właściwości gruntów niż analizowane w niniejszym artykule.

#### LITERATURA

- 1. Kulhaw.y F.H., Mayne P.H.: Manual on estimating soil properties for foundation design. Electric Power Reserch Institute, EPRI 1990.
- Lipiński M.J.: Pomiar prędkości fal akustycznych in situ dla określenia parametrów geotechnicznych. Jubileuszowa Sesja Naukowa Geotechnika w Budownictwie i Inżynierii Środowiska poświęcona 47-leciu pracy naukowej i 70-leciu urodzin Profesora Eugeniusza Dembickiego. Gdańsk 2000.
- 3. Lunne T., Robertson P.K., Powell J.J.M.: Cone penetration testing in geotechnical practice. Blackie Academic and Professional. London 1997.
- Młynarek Z., Tschuschke W., Sanglerat G., Tomaszewski M.: Evaluation of soil strenght parametersby the CPTU method. Archive of Hydrotechnics, Polish Academy of Sciences. Vol.XXXVIII, No. 3-4, 1991, p. 17-34.
- Młynarek Z., Tschuschke W., Wierzbicki J.: CPT National Report-Poland. International Symposium on Cone Penetration Testing, CPT, Linköping, Sweden, Vol. 1, 1995, p. 157-166.
- Senneset K., Janbu N., Svanø G.: Strength and deformation parameters from cone penetration tests. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> European Symposium on Penetration Testing, ESOPT-II, Amsterdam, 2, 863-70, Balkema Pub., Rotterdam 1982.
- Senneset K., Sandven R., Janbu N.: The evaluation of soil parameters from piezocone tests. Transportation Research Record, No. 1235, 1989, p. 24-37.

Recenzent: Prof. zw. dr hab. inż. Zbigniew MŁYNAREK

#### Abstract

Deformation parameters required for calculation of structures settlement are related to the soil model used in calculation. These parameters are estimated from the results obtained in laboratory or field tests. This paper presents the results of SCPTU tests performed in cohesive soils, while laboratory tests comprised oedometer procedure. The results were used to define relationships between oedometric modulus M and in situ readings using statistical analysis. The tests were carried out in pliocene clays located in the Warsaw region. Empirical correlations proposed by the authors give good results for tested soils.