

OCENA WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH IŁÓW ZASTOISKOWYCH OKOLIC RADZYMINA NA PODSTAWIE SONDOWAŃ SEJSMICZNYCH SCPTU

EVALUATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF VARVED CLAY FROM RADZYMIN TEST SITE USING SEISMIC CONE PENETROMETER

KAMIL KIELBASIŃSKI¹, PIOTR ZAWRZYKRAJ¹

Abstrakt. W artykule zaprezentowano wyniki sondowań sejsmicznych typu SCPT, przeprowadzonych w iłach warwowych okolic Radzymina. Badania wykonano za pomocą aparatury SCPTu firmy Geotech. Rezultaty pomiarów poddano analizie statystycznej w celu opracowania zależności korelacyjnej prędkości fali ścinającej V_s od oporu na stożku q_t . Analizy odniesiono do obowiązujących w światowych badaniach związków korelacyjnych wiążących prędkość fali ścinającej z parametrami penetracji sondowań statycznych.

Słowa kluczowe: stożek sejsmiczny, iły warwowe, prędkość fali podłużnej, prędkość fali poprzecznej, moduł ścinania, badania polowe.

Abstract. This paper presents a method of seismic piezocone tests. It presents a brief description of the SCPTu Geotech testing apparatus and testing methodology. The results obtained at Mokre test site from in situ measurements of seismic wave velocity in varved clays are presented and analyzed. Local statistical correlations between shear wave velocity V_s and cone resistance q_t are presented in this paper.

Key words: seismic piezocone, varved clay, compression wave velocity, shear wave velocity, shear modulus, field tests.

WSTĘP

Już w początkach lat osiemdziesiątych zespół badaczy z Kanady pod kierownictwem R.G. Campanelli przedstawił urządzenie do pomiarów sejsmicznych podczas statycznych badań CPTU (Campanella i in., 1986). Od czasu pierwszych badań powstało na świecie wiele ośrodków zajmujących się badaniami sejsmicznymi przy wykorzystaniu stożków (SCPT) bądź dylatometrów sejsmicznych (SDMT). Tego typu metody badawcze są często wykorzystywane w regionach zagrożonych oddziaływaniami sejsmicznymi ze względu na dużą przydatność przy ocenie zagrożenia wystąpieniem procesu upłynnienia gruntu. W Polsce ze względu na niemal asejsmiczny charakter regionu metody sejsmiczne typu SCPT, SDMT większą popularność zyskały dopiero w ostatnich latach.

Obecnie projektowanie obiektów inżynierskich różni się znacznie od projektowania sprzed 20 lat. Dużo większą uwagę przywiązuje się do ekonomicznego wykorzystania materiałów oraz ekonomicznego gospodarowania powierzchnią. Buduje się coraz wyższe obiekty, w coraz większym zagęszczeniu. Proces ten szczególnie jest widoczny w dużych aglomeracjach miejskich. Do określenia współpracy budynek–grunt stosuje się zaawansowane metody obliczeniowe, z wykorzystaniem metod elementów skończonych. Aby wyniki tych obliczeń jak najlepiej opisywały zachowanie się gruntu pod wywieranym obciążeniem, niezbędne jest poznanie charakterystyki naprężenie–odkształcenie w całym zakresie odkształceń. Metody sejsmiczne, a szczególnie metoda SCPT, pozwalają na określenie modułu ścinania G_0 ,

¹ Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii, Instytut Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; k.kielbasinski@uw.edu.pl; piotr.zawrzykraj@uw.edu.pl

stosowanego w opisie odkształcenia gruntu w zakresie bardzo małych odkształceń.

Przedmiotem weryfikacji możliwości tego rodzaju badań były ility zastoiskowe okolic Radzimina z okresu zlodowacenia północnopolskiego. Osady te są wykształcone w postaci tłustych iłów warwowych, których struktura i tekstura wynika

ze specyficznych warunków sedymentacji. Ich miąższość w okolicach Warszawy waha się od kilku do kilkunastu metrów. Omawiane ility warwowe należą do tzw. zastoiska warszawskiego i według aktualnych danych geologicznych nie były już obciążone ładolodem, zatem z punktu historii geologicznej obciążen są gruntami normalnie skonsolidowanymi.

CHARAKTERYSTYKA TERENU BADAŃ

Badania przeprowadzono na terenie cegielni Michała Smoronia znajdującej się w miejscowości Mokre, około 4 km na północ od Radzimina.

W budowie profilu gruntowego główny udział ma seria zastoiskowa, która osiąga tu miąższość od 6 do 8 m i jest reprezentowana przez ility warwowe szare. W stropie serii zastoiskowej występują piaski fluwialne i eoliczne, żółte, bardzo drobnoziarniste i pylaste, niekiedy zailone, miąższości ok. 2 m. Poniżej piasków występuje ok. 20 cm warstwa pyłu niewarstwowanego barwy szarej, o strukturze gruzełkowej. Od głębokości ok. 2,5 m występują ility warwowe o wyraź-

nych, lecz nieregularnych miąższościach warw, najczęściej kilkumilimetrowych, przechodzące stopniowo w pyły niewykazujące struktury warwowej. Warstwa ta osiąga ok. 1,5 m miąższości. Na głębokości ok. 3,8 m znajduje się charakterystyczna warstwa piasku drobnego barwy szarej, zailonego, około 30 cm miąższości. Poniżej tej warstwy rozpoczyna się główna seria iłów warwowych i występuje ona do głębokości ok. 10 m. Stanowią ją ility warwowe barwy szarej, o zmiennej miąższości warw. W stropie seria ta charakteryzuje się strukturą gruzełkową (Zawrzykraj, 2004).

METODYKA BADAŃ

Do określenia prędkości rozprzestrzeniania się fali podłużnej „kompresyjnej” V_p oraz poprzecznej „ścinającej” V_s w iłach warwowych wykorzystano stożek CPTu firmy Geotech, z dodatkowym modułem sejsmicznym.

Końcówki do badań SCPT zwykle wyposażone są w dwa typy czujników, w zależności od mierzonej wielkości fizycznej. W przypadku pomiaru prędkości stosowane są geofony, natomiast w przypadku pomiaru przyspieszenia – akcelerometry. W prowadzonych badaniach zastosowano sondę wyposażoną w trójosiowy czujnik akcelerometryczny, wbudowany w przedłużkę umieszczoną bezpośrednio za standardową końcówką do badań statycznych z pomiarem ciśnienia porowego CPTu (fig. 1).

Takie rozwiązanie pozwala na rejestrację przyspieszenia drgań cząstek gruntu w trzech kierunkach (składowa X, składowa Y, składowa Z). Metodyka pomiaru przypomina standardowe badanie CPTu, podczas którego otrzymujemy podstawowe parametry penetracji, takie jak opór na stożku, opór na poboczniczy czy nadwyżkę ciśnienia porowego. Jedyną modyfikacją metodyki badania jest konieczność przerywania penetracji w interwałach co 0,5 lub co 1,0 m w celu dokonania wzbudzenia oraz rejestracji fali ścinającej i kompresyjnej metodą *down hole* (fig. 2).

Metoda ta polega na generacji fal podłużnych i poprzecznych z powierzchni terenu oraz ich rejestracji w otworze na różnych głębokościach. Zaletą tego rozwiązania jest to, że rejestrowane są tylko fale bezpośrednie i przechodzące, czyli

fale sprężyste przechodzące przez środowisko geologiczne, niepodlegające przy tym zjawisku odbicia. Źródłem sygnału są stalowe płyty, mocno dociśnięte do podłoża ciężarem penetrometru. Kluczową rolę w prawidłowej generacji fali pełni dobry kontakt powierzchni płyt z podłożem. Aby ten warunek był spełniony, płyty wkopywano w grunt poniżej warstwy humusu, następnie dociskano masztem penetrometru

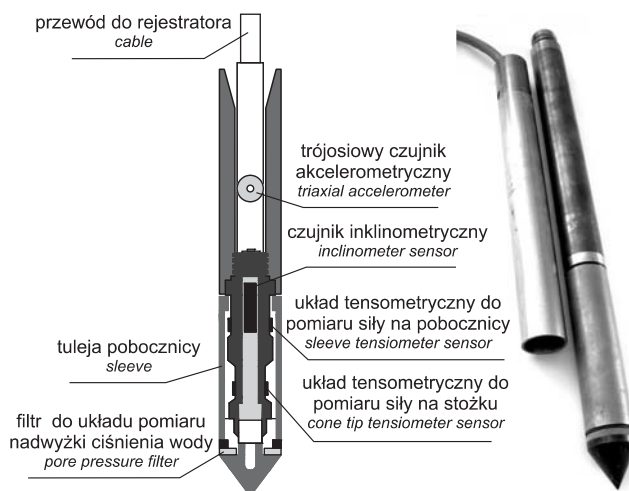
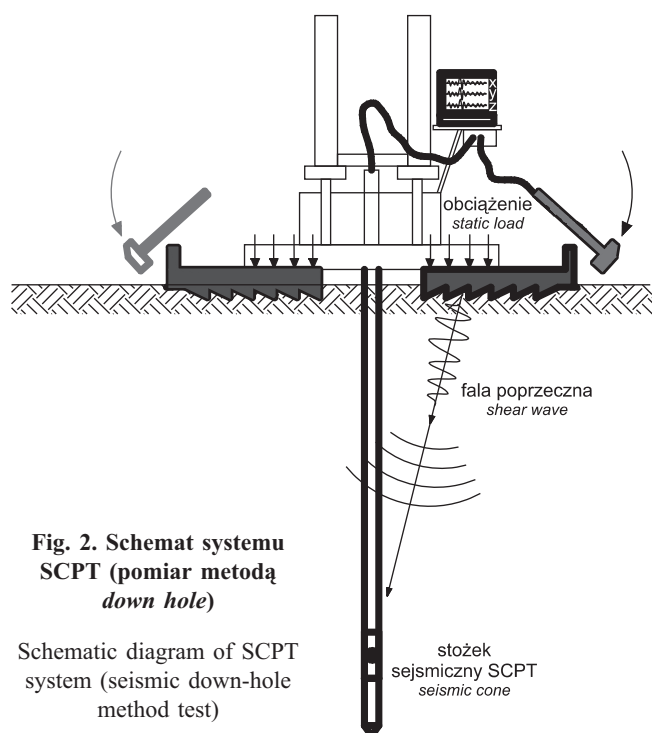


Fig. 1. Stożek CPTu z przedłużką do badań sejsmicznych

CPTu-probe with seismic adapter



o masie własnej przekraczającej 2 tony. Po tym zabiegu penetrometr był kotwiony do gruntu w czterech punktach, dzięki czemu zwiększano dodatkowo docisk masztu. Takie rozwiązanie pozwoliło na generację fal umożliwiających badanie do głębokości 9 m, tj. do spągu badanej warstwy łu.

Zastosowany zestaw do badań SCPT wyposażony jest w trzy płyty (fig. 3). Dwie z nich służą do generacji fali ścinającej, natomiast jedna do generacji fali podłużnej. W przypadku uderzenia młota w płytę w kierunku poziomym wytwarzana jest fala ścinająca (V_s), natomiast w przypadku uderzenia pionowego w płytę umieszczoną przed penetrometrem generowana jest fala kompresyjna (V_p). Dzięki zastosowaniu dwóch płyt rozmieszczonych po obu stronach urządzenia możliwa jest generacja fali ścinającej o dwóch przeciwnych polaryzacjach. Taki zabieg pozwala na weryfikację jakości sygnału, jak również ułatwia późniejszą interpretację. W literaturze spotyka się różnego typu rozwiązania techniczne umożliwiające generację fal. Przede wszystkim są to płyty, pręty i kształtowniki, w które uderza się młotem w celu wzbudzenia fali (Bajda, 2009). Zastosowanie mają również zautomatyzowane źródła drgań w postaci dużych wibratorów sejsmicznych. Dużą zaletą źródeł zmechanizowanych jest powtarzalność generacji fali. W przypadku metod młotkowych problemem jest uzyskanie powtarzalnego sygnału, który w jednoznaczny sposób umożliwi interpretację badania. Powtarzalność generacji sygnału przy zastosowaniu ręcznego młota zobrazowano na figurze 4.

Jak już wspomniano, rejestracja fal odbywa się na wyselekcjonowanych głębokościach, po zatrzymaniu penetracji. Prędkość fal sprężystych oblicza się z ilorazu różnicy odległości pomiędzy kolejnymi pomiarami (zwykle jest to interwał od 0,5 do 1,0 m) do odstępów czasowych. Odstęp cza-



Fig. 3. Penetrometr Geotech 220-04 z zestawem SCPT (na zdjęciu moment generacji fali poprzecznej)

Geotech 220-04 rig with SCPT apparatus
(the picture of S-wave triggering moment)

owy określa się porównując zarejestrowane sygnały na dwóch sąsiednich głębokościach. W przypadku zastosowania stożka sejsmicznego z pojedynczym akcelerometrem lub geofonem dopiero dwa sąsiednie pomiary na różnych głębokościach pozwalają na obliczenie średnich prędkości fali sprężystych w warstwie gruntu zawartej pomiędzy tymi pomiarami (metoda pseudointerval). Realizuje się to w następujący sposób. Po zagłębieniu stożka na przyjętą głębokość dokonuje się pomiaru czasu dojścia fali od źródła sygnału umieszczonego na powierzchni do czujnika zagłębionego w gruncie. Następnie kontynuuje się penetrację, zmieniając zagłębienie stożka o przyjęty interwał, i ponownie dokonuje się pomiaru czasu dojścia fali do czujnika. Na podstawie tych dwóch pomiarów określa się różnicę w czasie zwaną odstępem czasowym. Określenie odstępów czasowych wymaga sygnału o dobrej jakości. W praktyce stosowane są dwie metody określenia odstępów czasowych. Jedną z nich polega na analizie pojedynczego, charakterystycznego i często najsilniejszego sygnału (piku), na podstawie którego nakładając na siebie zapisy przyspieszeń drgań lub prędkości drgań z dwóch analizowanych głębokości można określić odstęp czasowy. Podstawą drugiej metody, zwanej korelacją krzyżową, jest statystyczna analiza pary sygnałów polegająca na najlepszym dopasowaniu kilku charakterystycznych pików bądź całego zapisu drgania. Na tej podstawie dopiero określany jest odstęp czasowy. Metoda ta automatyzuje proces interpretacji, jednak ma też swoje wady. Wykres analizowanego sygnału to wykres drgania o przebiegu sinusoidalnym z tłumieniem. Przy różnych wzmocnieniach sprzętowych analizowane sygnały mogą mieć wizualnie podobny przebieg przy przesunięciu w fazie, co spowoduje błędne określenie odstępów czasowych.

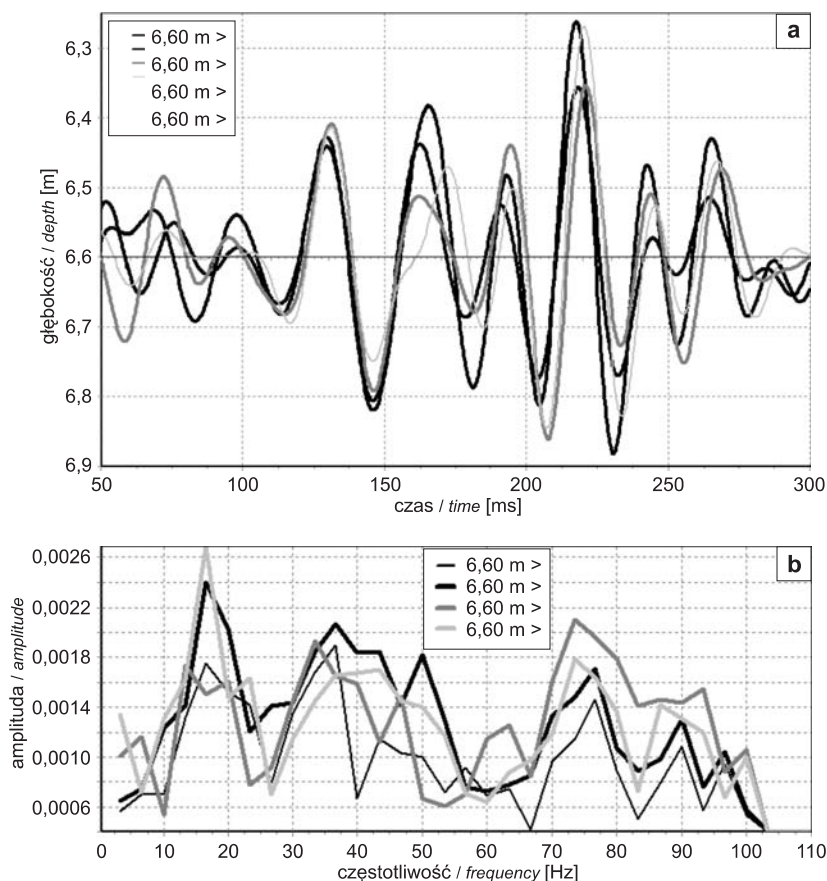


Fig. 4. a – Zapis drgań (składowa X – głębokość 6,60 m) – cztery powtórne wyzwolenia, b – Spectra częstotliwości drgań dla powtórnych uderzeń młota

a – Waves recordings for 4 hummer strikes at the same depth (X component – at depth 6.60 m),
b – Frequency spectrum to show the repeatability of manual hummer strike

Zastosowany w badaniach stożek pozwala na rejestrację drgań w pasmie częstotliwości od 0,5 Hz do 10 kHz. Zarejestrowany surowy sygnał wymaga odfiltrowania szumów. Jest to możliwe dzięki zastosowaniu filtrów pasmowych, odcinających wybrane pasma częstotliwości. Szumy wewnętrzne generowane przez system rejestracji oraz szumy z otoczenia przy dużych głębokościach penetracji, wymagających stosowaniu sprzętowego wzmacniania sygnału, znacznie utrudniają interpretację. Dlatego analiza sondowań sejsmicznych wymaga umiejętnego stosowania filtrów.

Podobnie jak w przypadku standardowych sondowań statycznych, wynik pomiaru prędkości fali ścinającej obciążony jest wpływem stanu naprężeń w ośrodku gruntowym i wymaga normalizacji ze względu na głębokość penetracji. Wpływ ten koryguje się wg wzoru podanego przez Robertson i in. (1992):

$$V_{sN} = V_s \left(\frac{P_a}{\sigma'_{vo}} \right)^{0,25} \quad [1]$$

gdzie:

- V_{sN} – znormalizowana prędkość fali sejsmicznej, [m/s],
- σ'_{vo} – naprężenie geostatyczne, [kPa],
- P_a – ciśnienie atmosferyczne, w przybliżeniu 100 kPa.

Określenie prędkości fali ścinającej V_s i kompresyjnej V_p umożliwia wyznaczenie charakterystyk deformacji w postaci takich parametrów, jak początkowy moduł ścinania G_0 oraz moduł ścisłości edometrycznej M_0 .

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

$$M_0 = \rho(V_p)^2 \quad [3]$$

gdzie:

- G_0 – początkowy moduł ścinania przy małych odkształceniach, [MPa],
- M_0 – moduł ścisłości edometrycznej, [MPa],
- ρ – gęstość objętościowa, [Mg/m^3],
- V_s – prędkość fali poprzecznej, [m/s],
- V_p – prędkość fali podłużnej, [m/s].

Prędkość fali sejsmicznej w gruncie i związany z nią moduł ścinania G_0 zależą od wielu czynników, takich jak: średnie naprężenie efektywne, wskaźnik porowatości, naprężenie styczne, stopień wilgotności, temperatura, historia naprężeń, częstotliwość drgań czy amplituda odkształcenia (Markowska-Lech, 2006).

WYNIKI BADAŃ

W ramach badań wykonano trzy sondowania SCPT w rozstawie 10–15 m (Mokre 1, Mokre 2, Mokre 3). Miejsce do badań wybrano ze względu na dużą miąższość warstwy ilów warwowych, która przekracza 7 m. Jest to niemal ciągła warstwa, przecięta jedynie warstwą piasków drobnych, wyraźnie zaznaczającą się na wykresach wynikowych sondowań CPTu na głębokości 3,5–4,0 m (fig. 5).

Analizę pomiarów sondowań sejsmicznych wykonano stosując oprogramowanie SCPT-Analys firmy Geotech oraz oprogramowanie Seismic firmy Geosoft. Podczas analizy zapisów fal podłużnych napotkano duże problemy związane z ustaleniem odstepu czasowego. Przyczyny tych problemów należy upatrywać w źródle fali podłużnej, którym jest oddzielna, nieobciążona płyta. Kontakt płyty z gruntem w tym przypadku może być niewystarczający, aby generować czysty i powtarzalny sygnał. Dlatego uzyskane wartości prędkości fali podłużnej w przeprowadzonych badaniach

mogą być obarczone błędem. W przyszłości należy liczyć się z koniecznością zmiany źródła fali podłużnej na powtarzalne źródło mechaniczne. Uzyskane znormalizowane wartości prędkości fali poprzecznej zawierają się w przedziale od 150 do 245 m/s. Natomiast obliczone na podstawie zmierzonych prędkości fali poprzecznej V_s wartości modułów sztywności G_0 mieszczą się w przedziale od 50 do 110 MPa i wzrastają wraz z głębokością (fig. 6).

Analizując wyniki sondowań statycznych i wyniki sondowań SCPT można zauważyć, że prędkość fali poprzecznej V_s wzrasta wraz z głębokością oraz wzrasta liniowo wraz ze wzrostem oporu na stożku. Fakt ten potwierdzają inni badacze, m.in. Hegazy, Mayne oraz Rix (Hegazy, Mayne, 1995; Mayne, Rix, 1993), którzy wiążą parametry oporu na stożku q_t i tarcia na pobocznicy f_s z prędkością fali ścinającej. Według Hegazy zależność prędkości fali poprzecznej V_s dla gruntów spoistych można przedstawić w postaci równania:

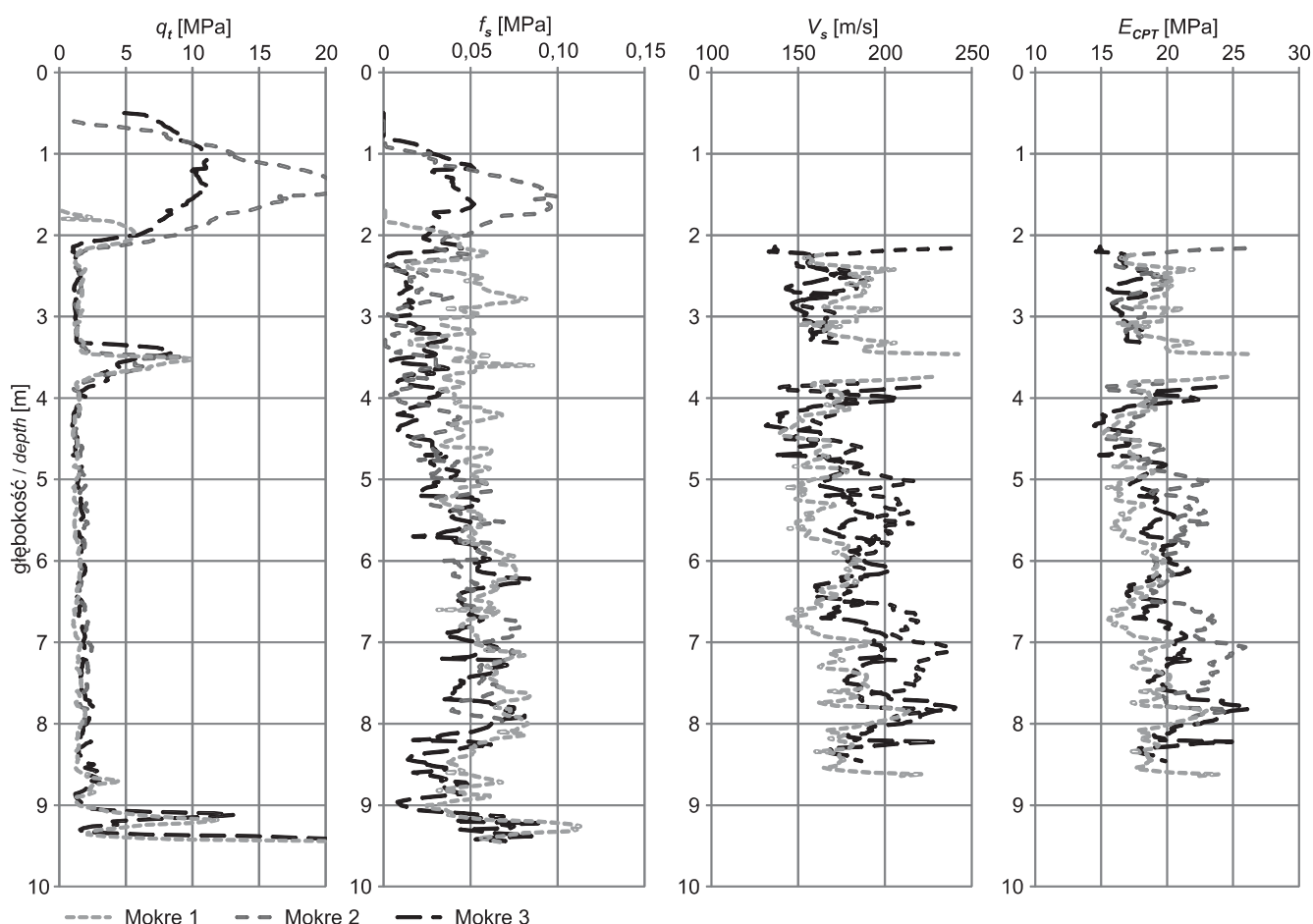


Fig. 5. Wyniki sondowań statycznych CPTu

q_t – opór na stożku, f_s – tarcie na pobocznicy, V_s – prędkość fali poprzecznej, E_{CPT} – moduł odkształcenia

Static cone penetration test results

q_t – cone tip resistance, f_s – friction sleeve, V_s – shear wave velocity, E_{CPT} – deformation modulus

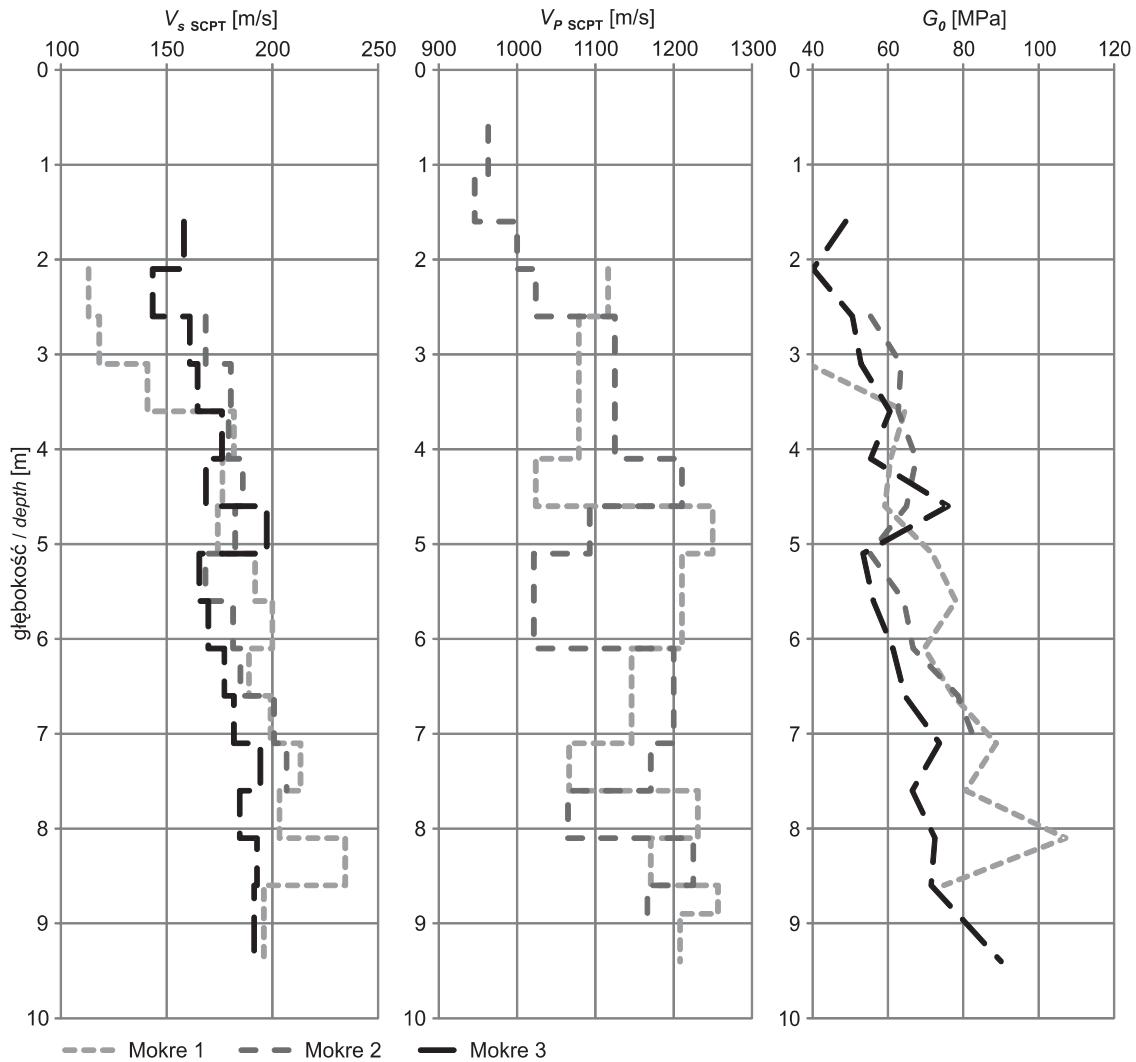


Fig. 6. Wyniki sondowań sejsmicznych SCPT

V_s – prędkość fali poprzecznej, V_p – prędkość fali podłużnej, G_0 – moduł ścinania

Seismic cone penetration results

V_s – shear wave velocity, V_p – compression wave velocity, G_0 – shear modulus

$$V_s = q_t^{0,549} f_s^{-0,025} \quad [4]$$

gdzie:

- V_s – prędkość fali poprzecznej, [m/s],
- q_t – opór na stożku netto, [kPa],
- f_s – tarcie na poboczniczy, [kPa].

Na podstawie parametrów sondowań CPT, korzystając z powyższej zależności określono prędkości fali poprzecznej V_s . Obliczenia przeprowadzono dla warstwy łąw warwowych z pominięciem warstw piaszczystych (fig. 5). Prędkości fali poprzecznej V_s obliczone na podstawie wzoru [4], mieszczą się w przedziale 140–240 m/s.

Wzory empiryczne, pozwalające na wyznaczenie prędkości fali na podstawie standardowych parametrów sondowań statycznych, zostały sformułowane na podstawie lokalnych korelacji. W tym przypadku rozbieżności pomiędzy prędkością po-

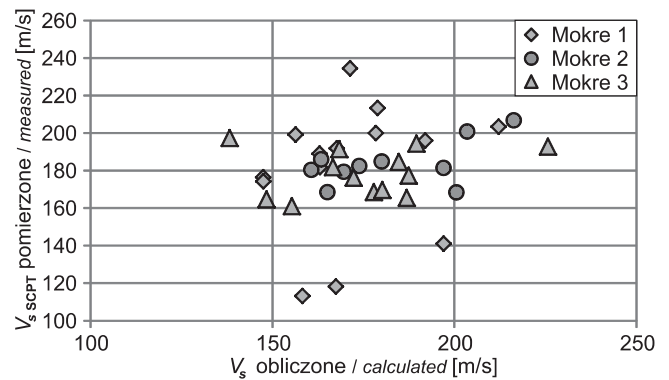


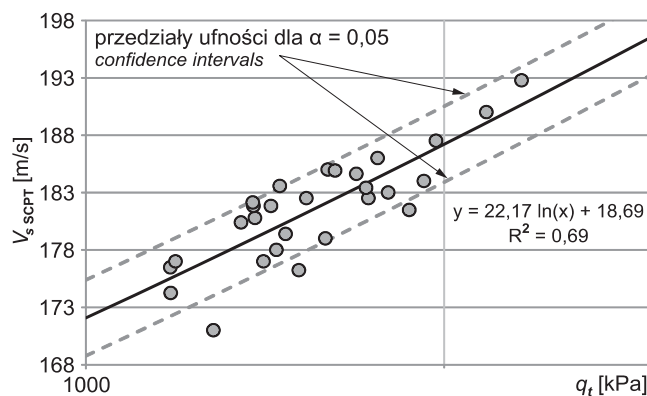
Fig. 7. Porównanie wyników pomierzonych z wyznaczonymi z zależności [4]

Comparison between measured shear wave velocity and velocity calculated from equation [4]

Fig. 8. Zależność pomiędzy oporem na stożku (q_t) a prędkością fali poprzecznej (V_s)

Correlation between cone tip resistance (q_t) and shear wave velocity (V_s)

mierzona i określona za pomocą zależności [4] dochodzą nawet do 60 m/s (fig. 7). Ze względu na duże różnice pomiędzy szacowanymi a pomierzonymi prędkościami na podstawie analizy statystycznej ustalono równanie dla normalnie skonsolidowanych iltów warwowych, bazujące na oporze stożka q_t (fig. 8). Współczynnik determinacji równania wyniósł $R^2 = 0,69$. Równanie zostało ustalone na zbyt małej liczbie



sondowań, dlatego może być stosowane jedynie w celu orientacyjnego określenia prędkości fali poprzecznej w gruntach typu iltów warwowych.

PODSUMOWANIE

Metody sejsmiczne są coraz częściej wykorzystywane w badaniach polowych. Stożek CPTu jest urządzeniem dostarczającym wielu parametrów gruntowych, a rozbudowanie go o moduł sejsmiczny znacząco powiększa jego możliwości w badaniu gruntów w zakresie bardzo małych odkształceń. Niewątpliwymi zaletami badań z wykorzystaniem stożka SCPTu są:

- szybka i efektywna metoda pomiaru prędkości fal podłużnych i poprzecznych metodą typu *down hole*;
- pomiar fal bezpośrednich i przechodzących z pominięciem fal odbitych, co ułatwia interpretację;
- zastosowanie CPTu w połączeniu z końcówką SCPT umożliwi standardową interpretację parametrów fizyczno-mechanicznych związanych z sondowaniami statycznymi, rozszerzoną o prędkości fali i parametry sprężyste w tym samym otworze podczas równoległe prowadzonego testu;
- możliwość zastosowania w interpretacji metod statystycznych typu korelacji krzyżowej, automatyzującego pracę i usuwającego błędy człowieka z procesu interpretacji.

W artykule przedstawiono wybrane parametry gruntów uzyskane z badań SCPT i jest to tylko ułamek możliwości aparatury w ocenie właściwości gruntów. Zgodnie z trendami światowymi, coraz częściej wykonuje się kompleksowe badania *in situ*, aby jak najwierniej opisywać zachowanie się gruntów w całym zakresie obciążeń. Również w Polsce wiele ośrodków badawczych rozpoczyna pracę z aparaturami typu SCPT. Przy obecnym postępie technologicznym niewykluczone, że badania SCPT w niedługim czasie będą wykorzystywane rutynowo przy pomiarach typu CPTu.

Przeprowadzenie badań było możliwe dzięki zakupowi aparatury typu SCPT, finansowanemu przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach projektu badawczego pt. Geologiczno-inżynierska ocena statystycznego i dynamicznego zachowania się gruntów występujących w przekroju doliny Wisły w Warszawie na wysokości Mokotów–Ursynów.

LITERATURA

- BAJDA M., 2009 — Źródło generacji fali sejsmicznej w sondowaniach SCPT. *Prz. Nauk. Inż. Kształ. Środ.*, **46**: 57–66.
- CAMPANELLA R.G., ROBERTSON P.K., GILLESPIE D., 1986 — Seismic cone penetration test. Use of in situ tests in geotechnical engineering. *ASCE GSP*, **6**: 116–130.
- HEGAZY Y.A., MAYNE P.W., 1995 — Statistical correlations between V_s and cone penetration data for different soil types. *Mat. konf. Cone Penetration Testing (CPT'95)*: 173–178. Swedish Geotechnical Society.
- MARKOWSKA-LECH K., 2006 — Analiza czynników wpływających na prędkość fali poprzecznej w gruntach spoistych. *Zesz. Nauk. P.Białost., Budownictwo*, **29**: 161–171.
- MAYNE P.W., RIX G.J., 1993 — Correlations between shear wave velocity and cone tip resistance in natural clays. *Soils and Foundations*, **35**: 107–110.
- ROBERTSON P.K., WOELLER D.J., FINN W.D.L., 1992 — Seismic cone penetration test for evaluating liquefaction potential under cyclic loading. *Can. Geotech. J.*, **29**: 686–695.
- ZAWRZYKRAJ P., 2004 — Analiza stanu skonsolidowania iltów warwowych w rejonie Sochaczewa i Radzyna. Praca doktorska. Arch. Wydz. Geologii UW, Warszawa.

SUMMARY

The methodology of the SCPTu is discussed using recent case studies of a ground investigation. The use of geophysics in ground investigation is generally well established and documented, as it is for the conventional CPTu. However the SCPTu is a new technique in Poland that integrates geophysical investigation methods with the CPT or CPTu. The aim of the SCPTu is to obtain the shear and compression wave velocity with the depth profile. Knowing compression and shear wave velocities we can calculate the small strain shear modulus G_0 and the constrained modulus. Also a few other parameters like bulk density, Young modulus and Poisson's ratio can be calculated. The SCPTu testing apparatus made by Geotech was used in these tests. Each of the three tests was established in Mokre test site located near Radzymin

city in Poland. Seismic waves velocities were calculated using a pseudo-interval technique. Typical results of calculated seismic velocities obtained from Mokre test site are presented graphically in Fig. 6. The average S-waves velocity for all soundings performed during this study was 180–240 m/s. Some difficulty was experienced during identifying the compression wave arrivals and average P-wave velocity results shown in Fig. 6 can be encumbered with error. Also local statistical correlations between shear wave velocity V_s and cone resistance q_t for varved clays was established. The SCPTu is a cost effective and simple addition to the standard CPTu test and it is expected to become a standard in *in situ* ground investigation. It allows obtaining useful *in situ* measurements of soil properties.