

WYKORZYSTANIE SONDY CPTU 15 cm² DO BADAŃ PODŁOŻA GRUNTOWEGO

Marek Bajda, Marcin Biliniak, Mariusz Lech

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Streszczenie. Wyznaczenie geotechnicznych warunków posadowienia obiektów budowlanych obejmuje profesjonalne badania terenowe i laboratoryjne gruntu. W praktyce inżynierskiej coraz bardziej popularnym urządzeniem stosowanym do badań terenowych podłoża gruntowego jest sonda statyczna CPTU. Wytyczne i zalecenia dotyczą tylko sondy o powierzchni stożka 10 cm², ale dopuszczają też do użycia m.in. sondę o powierzchni stożka 15 cm². W przypadku wykorzystywania stożków CPTU o różnych rozmiarach pojawia się problem wpływu wielkości sondy na uzyskiwane w trakcie sondowania wyniki. W artykule przedstawiono oraz przeanalizowano wyniki uzyskane w trakcie badań dwiema końcówkami piezometrycznymi: standardową o powierzchni stożka 10 cm² oraz sondą o powierzchni stożka 15 cm².

Słowa kluczowe: badania terenowe, sondowania CPTU, CPTU 15 cm²

WSTĘP

W praktyce inżynierskiej coraz bardziej popularnym urządzeniem stosowanym do badań terenowych podłoża gruntowego jest sonda statyczna CPT/CPTU. Wynika to z faktu, że sondowania wykonywane są dla naturalnego stanu naprężenia, uziarnienia, przy zachowaniu istniejących warunków wilgotnościowych. Metodę tę cechuje także powtarzalność wyników, wysoki stopień zgodności danych, jak również aspekty ekonomiczne. Na uwagę zasługuje fakt, iż sondowania statyczne dostarczają informacji o ciągłym profilu i fakt ten stanowi bezspornie o przewadze tej klasy metod badań polowych.

Badania gruntu za pomocą sondowań statycznych (CPT, CPTU) dają możliwość szybkiego rozpoznania profilu gruntowego pod kątem stratyfikacji poszczególnych warstw oraz parametrów fizykomechanicznych tych warstw. Metody analizy oraz interpretacji wyników badań uzależnione są od rodzaju końcówki pomiarowej oraz rodzaju gruntów

zalegających w podłożu. Zróżnicowanie w rodzajach i wielkościach sond daje duże możliwości stosowania tej metody w różnych warunkach gruntowych.

Powszechnie stosowane sondy CPT/CPTU o powierzchni stożka 10 cm^2 na przestrzeni lat udowodniły swoją niezawodność i skuteczność, jednak szybki postęp zarówno w technologii, jak i metodyce interpretacji wymaga od geotechników ciągłego rozwoju oraz podążania za nowymi rozwiązaniami technicznym umożliwiającymi szybsze i dokładniejsze określenie parametrów geotechnicznych.

Wytyczne i zalecenia zawarte w IRTP [1999] oraz w normie PN-B-04452:2002 dotyczą tylko sondy o powierzchni stożka 10 cm^2 , ale dopuszczają do użycia (IRTP) sondy o powierzchniach od 5 cm^2 do 20 cm^2 . Wynika to z faktu, że stożki o różnej powierzchni pozwalają na osiągnięcie odmiennych efektów [Lunne i in. 1997, Tumay i in. 2001]: większe stożki są bardziej stabilne i mogą dawać dokładniejsze wartości q_c w gruntach słabych, natomiast mniejsze stożki mogą lepiej wykrywać cienkie przewarstwienia w podłożu gruntowym.

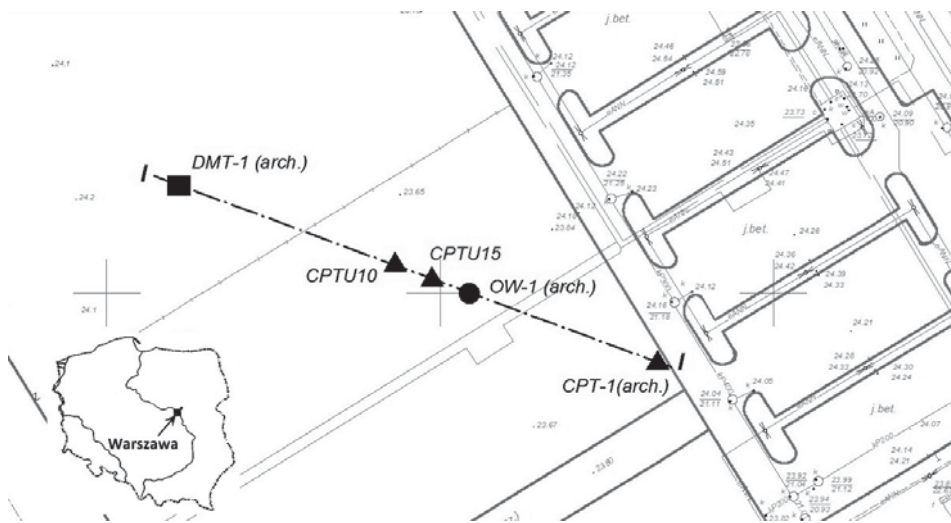
W przypadku wykorzystywania stożków CPTU o różnych rozmiarach pojawia się problem wpływu wielkości sondy na uzyskiwane w trakcie sondowania wyniki. Wielkość stożka ma znaczący wpływ na wyniki uzyskiwane w trakcie badań bardzo przewarstwowanego podłoża gruntowego. Zagadnieniem tym zajmowali się Vreugdenhil i inni [1994]. Analizując wyniki uzyskane z badań stożkami o powierzchni od 5 do 15 cm^2 Lunne i inni [1997] wykazali, że wpływ wielkości stożka na uzyskane wyniki jest pomijalny w warstwach gruntowych o grubości proporcjonalnej do średnicy stożka, tzn. opór na stożku oraz nadwyżka ciśnienia wody w porach nie zależą od wielkości piezostożka. Wpływ wielkości stożka na wartość ciśnienia wody w porach opisali Hird i inni [2003], przedstawiając wyniki dla piezostożków o powierzchni 1 i 5 cm^2 otrzymane w badaniach modelowych. Powell i Lunne [2005] przedstawili wyniki uzyskane z badań penetrometrami o powierzchni stożka 10 i 15 cm^2 w gruntach spoistych. Hird i Springman [2006] w swojej pracy zestawili wyniki sondowań stożkami 5 i 10 cm^2 uzyskane podczas badań w utworach zastoiskowych (jeziornych). Campanella i Howie [2005] zwrócili uwagę na fakt, że stożki 15 cm^2 dają wyniki zbliżone do standardowych piezostożków pod warunkiem zachowania przez producentów reżimu geometrycznego. W pracy Liu i innych [2010] przedstawione zostały wyniki uzyskane sondą CPT o powierzchni stożka 15 cm^2 .

Niestandardowa sonda statyczna CPTU o powierzchni stożka 15 cm^2 znalazła swoje zastosowanie za granicami naszego kraju, jednakże w Polsce jest mało popularna. W artykule zostaną opisane wady oraz zalety tej niestandardowej końcówki pomiarowej, a także przedstawione zostaną wyniki badań otrzymanych podczas sondowań.

ZAKRES BADAŃ I CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU

Celem prac badawczych było udokumentowanie możliwości zastosowania pomiarów niestandardową sondą statyczną CPTU o powierzchni stożka 15 cm^2 na tle pomiarów wykonanych standardowym stożkiem pomiarowym CPTU. Prace badawcze przeprowa-

dono na terenie Kampusu SGGW i obejmowały one analizę materiałów archiwalnych (wierceń i sondowań wykonanych w ramach projektowanych obiektów Kampusu SGGW) oraz sondowania stożkami elektrycznymi z możliwością pomiaru ciśnienia wody w trakcie penetracji CPTU o powierzchni 10 i 15 cm². Mapa dokumentacyjna, przedstawiająca zakres i lokalizację poszczególnych badań, została zamieszczona na rysunku 1.



Rys. 1. Mapa dokumentacyjna obszaru badań – Kampus SGGW

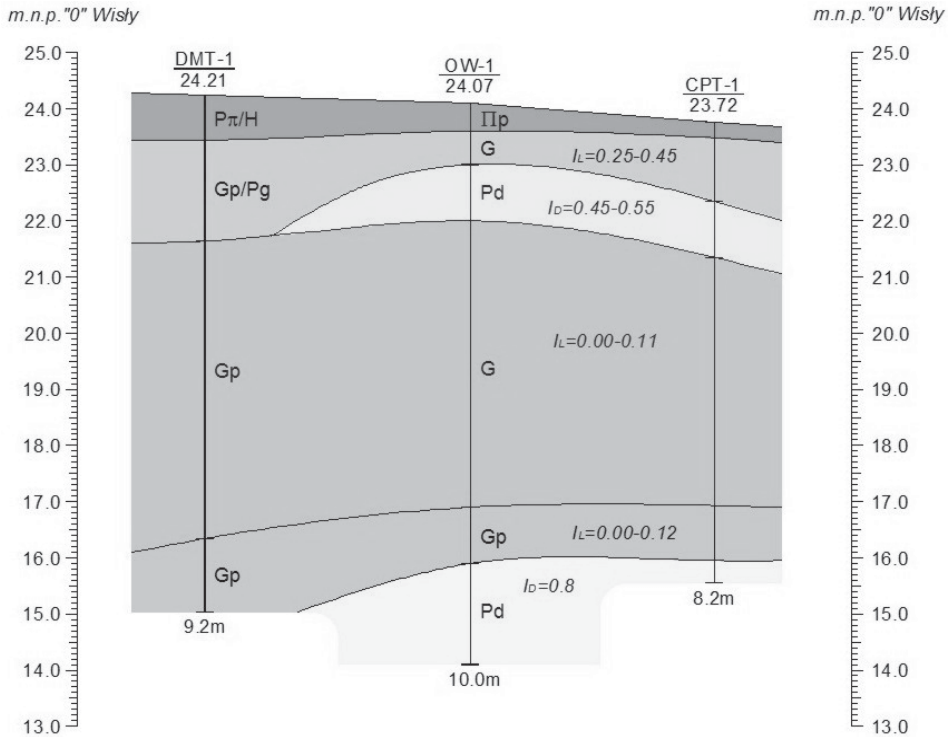
Fig. 1. Location map of tested profiles of the site

W podłożu analizowanego terenu do głębokości około 8,5 m zalegają plejstocenijskie gliny piaszczyste zwałowe w stanie twaroplastycznym i plastycznym (lokalnie zawierające soczewki zawadzionego piasku drobnego w stanie średniozagęszczonym). Gliny te podścielone są osadami rzeczno-jeziorowymi facji korytovej z okresu interglacjału mazowieckiego, wykształconymi w postaci zagęszczonych piasków drobnych. Osady lodowcowe w strefie przypowierzchniowej są w wielu miejscach silnie przeobrażone antropogenicznie. Na powierzchni terenu występują powszechnie nasypy o zmiennej miąższości. Są to przeważnie piaski pylaste i pyły z różną domieszką substancji humusowych. Przekrój geologiczny obszaru badań zamieszczony został na rysunku 2. Podstawowe właściwości gruntów spoistych przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Właściwości gruntów spoistych analizowanego podłoża

Table 1. Index properties of the tested soils

Rodzaj gruntu Soil type	w_n [%]	w_L [%]	w_p [%]	I_p [%]	γ [kN·m ⁻³]
G, Gp	9,0–10,8	25,8–28,2	10,61–11,77	15,19–16,43	20–21



Rys. 2. Schemat budowy geologicznej podłoża w rejonie badań

Fig. 2. Geological cross-section of tested site

METODYKA BADAŃ

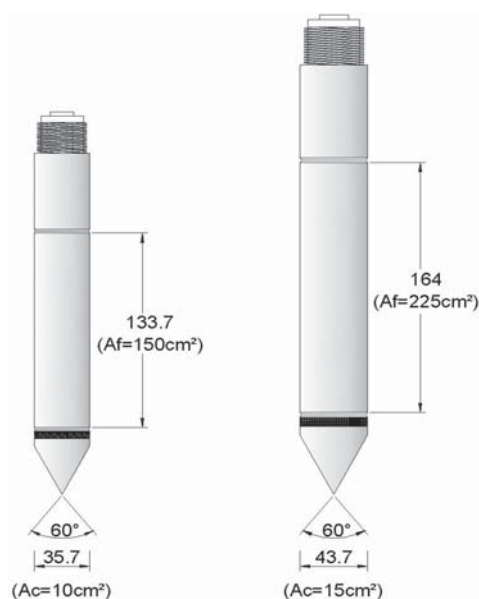
W badaniach terenowych wykorzystano standardowy piezostopek CPTU o powierzchni 10 cm² oraz piezostopek CPTU o powierzchni 15 cm².

Aparatura wykorzystywana do badań podłoża gruntowego metodą CPTU składa się z penetrometru stożkowego, urządzenia wciskającego oraz systemu odczytu danych. Standardowy penetrometr stożkowy, zgodnie z normą PN-B-04452:2002 oraz wytycznymi IRTP, składa się ze stożka o kącie wierzchołkowym równym 60° i polu podstawy 10 cm² oraz z tulei ciernej o powierzchni 150 cm², która znajduje się za stożkiem. Do pogrążania końcówek pomiarowych stosuje się sprzęt wciskający zapewniający stałą prędkość sondowania 2 cm·s⁻¹. Z sondowania statycznego otrzymuje się bezpośrednio, w zależności od typu zastosowanej do badań końcówki, następujące parametry sondowań:

- wykres jednostkowych oporów stożka (q_c),
- wykres jednostkowych oporów tarcia gruntu na tulei ciernej (f_s),
- wykres ciśnienia wody w porach gruntu w trakcie sondowania (u_2).

W badaniach wykorzystano penetrometr stożkowy z możliwością pomiaru ciśnienia wody w porach CPTU, o powierzchni stożka $A_c = 15 \text{ cm}^2$ i powierzchni tulei ciernej $A_f = 225 \text{ cm}^2$ oraz sprzęt wciskający Hyson 200 kN holenderskiej firmy A.P. van den

Berg. Zestaw pomiarowy wyposażony był w przewodowy system rejestracji danych typu Touch-Screen. Wyniki sondowania rejestrowano przy użyciu programu Gorilla (firmy van den Berg), natomiast opracowanie i interpretację wyników badań wykonano przy użyciu programu CPT-pro (firmy Geosoft). Badania zostały wykonane zgodnie z normą PN-B-04452:2002 oraz wytycznymi IRTP. Tolerancja prędkości pogrążania wynosiła $\pm 2 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Jako badanie referencyjne wykonano sondowania stożkiem CPTU o powierzchni $A_c = 10 \text{ cm}^2$ i powierzchni tulei ciernej $A_f = 150 \text{ cm}^2$. Oba stożki wyposażone były w filtry w lokalizacji u_2 . Wymiary wykorzystanych w badaniach końcówek piezometrycznych przedstawiono na rysunku 3. Przed wykonaniem badania filtry oraz cały układ pomiarowy ciśnienia wody w porach zostały w pełni nasycone oraz odpowiednio odpowietrzone. Podczas badań korzystano z 1 m żerdzi pomiarowych o średnicy 36 mm, co w przypadku pomiarów stożkiem CPTU o powierzchni 15 cm² i średnicy 43,7 mm daje znaczną redukcję tarcia na żerdziach pomiarowych.



Rys. 3. Wymiary końcówek pomiarowych
Fig. 3. Dimensions of piezocones

Jak pokazują dotychczasowe badania, wygenerowane w trakcie penetracji ciśnienie wody wpływa na wartość otrzymanych podczas sondowania wyników [Lunne i in. 1997]. Ze względu na wewnętrzną budowę piezostożka otaczające ciśnienie wody działa na poziome powierzchnie bezpośrednio za stożkiem i za tuleją cierną. W literaturze zjawisko to określane jest efektem różnych powierzchni. W przypadku oporu na stożku różnicę powierzchni stożka określa się przez współczynnik powierzchni (a), który w przybliżeniu jest równy stosunkowi pola powierzchni przekroju poprzecznego netto stożka (A_n) do całkowitego pola powierzchni stożka (A_c). Skorygowany całkowity opór na stożku (q_t) oblicza się wtedy według wzoru:

$$q_t = q_c + u_2(1-a) \quad (1)$$

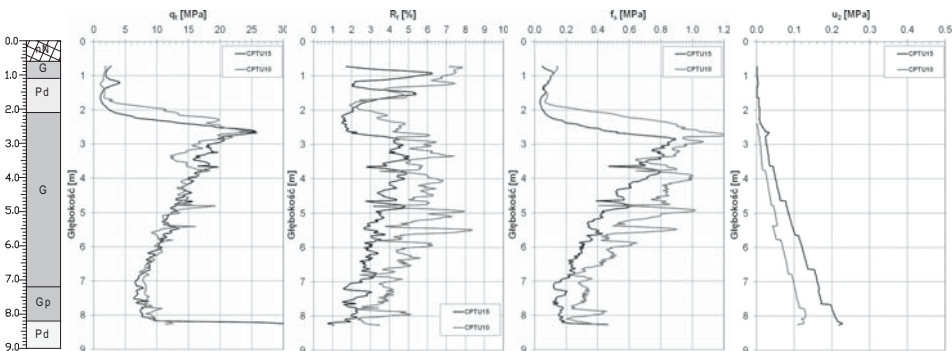
gdzie: q_c – opór na stożku,

u_2 – ciśnienie wody mierzone za stożkiem.

Metodyka sondowań CPT i CPTU, budowa końcówek pomiarowych oraz interpretacja wyników badań były wielokrotnie prezentowane w literaturze krajowej i zagranicznej [Lunne i in. 1997, Szymański i Bajda 2004, Sikora 2006, Młynarek 2010].

ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Na podstawie przeprowadzonych badań uzyskano rozkład mierzonych w trakcie sondowań wartości w funkcji głębokości. Wielkości te to opór na stożku (q_c), tarcie na tulei ciernej (f_s) oraz ciśnienie wody w porach w trakcie penetracji (u_2). Uzyskane z badań wartości q_c skorygowano ze względu na wpływ wartości ciśnienia wody w porach zgodnie z równaniem (1). Wyniki uzyskane dla dwóch sondowań zestawiono na rysunku 4. Dodatkowo obliczony został współczynnik tarcia (R_f). Odległość między sondowaniami wynosiła około 3 m. Rodzaj gruntu w poszczególnych warstwach określony został na podstawie wierceń i według klasyfikacji Robertsona z 1990 roku.



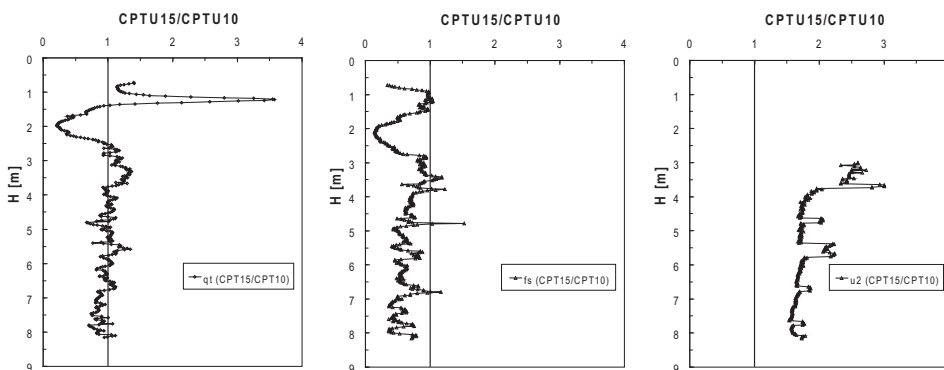
Rys. 4. Wyniki sondowań CPTU

Fig. 4. CPTU test results

Z analizy rozkładu wartości R_f widać, że badane profile gruntowe różnią się w górnej warstwie (do głębokości około 3 m). Różnica ta wynika z przebiegu stropu występującej lokalnie warstwy piasku drobnego. Poniżej tej głębokości zalegają jednorodne warstwy spoiste. Stąd do dalszej analizy statystycznej wykorzystano pomiary z głębokości od 3 do 8 m.

W celu określenia różnicy między wartościami uzyskanymi z badań CPTU 15 cm² i CPTU 10 cm² obliczono współczynnik CPTU15 do CPTU10 dla q_t , f_s i u_2 . Rozkład tego współczynnika w funkcji głębokości dla poszczególnych pomierzonych wielkości przedstawiono na rysunku 5. Linia pokazująca wartość 1 obrazuje teoretyczną sytuację, w której wyeliminowana została zmienność gruntu oraz przy stwierdzonym braku wpływu wielkości stożka na pomiary. Z analizy otrzymanych współczynników wynika (przy założonej jednorodności gruntu w dwóch sąsiednich profilach pomiarowych w przedziale

głębokości od 3 do 8 m), że dla danych warunków gruntowych i sprzętowych wielkość stożka ma wpływ na uzyskane wartości f_s oraz u_2 . Dla analizowanych wielkości (q_t , f_s i u_2) współczynnika CPTU15 do CPTU10 obliczono wartość średnią oraz odchylenie standardowe. Średnia wartość współczynnika dla q_t zawiera się w przedziale od 0,88 do 1,12, średnie wartości współczynnika dla f_s zawierają się w przedziale od 0,64 do 1,13 natomiast średnia wartość współczynnika dla u_2 wynosi 1,87. Wartości odchylenia standardowego wynoszą odpowiednio: 9, 16 i 33%.



Rys. 5. Analiza statystyczna współczynników q_t , f_s i u_2

Fig. 5. Statistical analysis of q_t , f_s and u_2 ratios

Wyniki uzyskane na podstawie przeprowadzonych badań pokazują, że pomimo zachowania reżimu geometrycznego sondy CPTU o powierzchni stożka 15 cm² nie wszystkie mierzone wielkości są porównywalne z wielkościami ze standardowej sondy CPTU. Jedyłą porównywalną wielkością jest opór na stożku (q_t). Wartości dwóch pozostałych parametrów znacząco odbiegają od jedynki (rys. 5), co świadczy o małej porównywalności wartości f_s i u_2 uzyskanych z sondy CPTU15 z wartościami otrzymanymi z zalecanej CPTU10. Wartości f_s z sondy CPTU 15 cm² są zaniżone w stosunku do wartości otrzymanych z zalecanej (standardowej) sondy CPTU 10 cm², natomiast wartości u_2 są zawyżone.

PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania umożliwiły porównanie wielkości uzyskanych z sondowań CPTU piezostożkami o powierzchni stożka 10 cm² (standardowy) i 15 cm² (rys. 4).

Zestawienie na wspólnych wykresach wartości uzyskanych z badań piezostożkami pozwala zauważyć znaczne rozbieżności między wartościami f_s i u_2 . Jedyłą porównywalną wielkością uzyskaną z obu sond jest wartość oporu na stożku (q_t). Analiza otrzymanych wyników badań wskazuje, że wartości f_s i u_2 otrzymane sondą CPTU 15 cm² nie należy wykorzystywać do charakterystyk interpretacyjnych (zależności obliczeniowych) wprowadzonych dla penetrometru CPTU 10 cm².

Przyjmując, że sondowania zostały wykonane zgodnie z wszystkimi wymogami a procedura nasączania filtrów i odpowietrzania układu pomiarowego była wykonana

poprawnie dla obu końcówek pomiarowych, można uznać, że wielkość sondy nie ma wpływu na wartości oporu na stożku (q_t), natomiast ma wpływ na uzyskiwane wartości zarówno f_s , jak i u_2 .

Zagadnienie wpływu geometrii sondy na uzyskiwane wartości wymaga dalszych badań w celu stwierdzenia wpływu wielkości sondy na uzyskiwane wartości w innych warunkach gruntowych oraz wykonania większej liczby badań w danych warunkach gruntowych w celu określenia powtarzalności uzyskanych wyników.

Niewątpliwą zaletą wykorzystywania do badań stożka CPTU o średnicy 43,7 mm w połączeniu z żerdziami o średnicy 36 mm jest znaczna redukcja tarcia na żerdziach, umożliwiającą osiągnięcie większej głębokości pomiarowej.

PIŚMIENNICTWO

- Campanella R.G., Howie J.A., 2005. Guidelines for the use, interpretation and application of seismic piezocone test data. The University of British Columbia, Vancouver, Canada.
- Hird C.C., Johnson P., Sills G.C., 2003. Performance of miniature piezocones in thinly layered soils. *Geotechnique* 53 (10), 885–900.
- Hird C.C., Springman S.M., 2006. Comparative performance of 5 cm² and 10 cm² piezocones in a lacustrine clay. *Geotechnique* 56 (6), 427–438.
- IRTP, 1999. ISSMGE Technical Committee TC16 Ground Property Characterisation from in-situ Testing. International Reference Test Procedure (IRTP) for the Cone Penetration Test (CPT) and the Cone Penetration Test with pore pressure (CPTU). Proceedings of the XIIth ECSMGE. Amsterdam, Balkema, 2195–2222.
- Liu S.Y., Cai G.J., Tong L.Y., Du G.Y., 2010. A comparative study of international CPTU and China double bridge CPT tests. 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach, CA, USA.
- Lunne T., Robertson P.K., Powell J.J.M., 1997. Cone penetration testing in geotechnical practice. Blackie Academic and Professional, London.
- Młynarek Z., 2010: Regional Report for East European Countries. 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach, CA, USA.
- PN-B-04452: 2002 Geotechnika. Badania polowe.
- Powell J.J.M., Lunne T., 2005. A comparison of different sized piezocones in UK clay. Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Osaka, Japan, 729–734.
- Sikora Z., 2006. Sondowania statyczne – metody i zastosowanie w geoinżynierii. WNT, Warszawa.
- Szymański A., Bajda M., 2004. Uncertainty assessment of cone penetration test results. *Annals of Warsaw Agricultural University, Land Reclamation* 35a, 213–220.
- Tumay M.T., Titi H.H., Senneset K., Sandven R., 2001. Continuous intrusion miniature piezocone penetration test in quick soil deposits. *Proc. 15th Int. Conf. Soil Mech. Geotech. Engng, Istanbul* (1): 523–526.
- Vreugdenhil R., Davis, R., Berrill J., 1994. Interpretation of cone penetration tests in multilayered soils. *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech* 18 (9), 585–599.

THE USE OF 15 cm² CPTU FOR INVESTIGATIONS OF SUBSOIL

Abstract. There are several kinds of geotechnical tests that can be used for determination of stratigraphy and soil parameters. The CPTU test is one of the most powerful site investigation tools. The probe is normally available in two sizes: $A_c = 10 \text{ cm}^2$ and $A_c = 15 \text{ cm}^2$. Most of the correlations with geotechnical data were developed based on 10 cm² CPTU (CPT) results. This paper presents geological description of investigated site, test procedure and the results of geotechnical in situ investigations carried out with the use of 10cm² CPTU cone and 15 cm² CPTU cone. It contains the description of in situ measurements and presents the results of CPTU investigations at the experimental plot of Campus SGGW in Warsaw. The aim of the paper is to compare parameters measured by the 15 cm² CPTU to 10 cm² CPTU. Finally the paper presents the analysis of obtained results.

Key words: *in situ* tests, CPTU test, 15 cm² CPTU

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 21.12.2012