

Wykorzystanie czteroelektrodowego stożka CPTU 15 cm² do oceny wybranych parametrów podłoża gruntowego

Dr inż. Marek Bajda, dr inż. Mariusz Lech, dr inż. Zdzisław Skutnik
SGGW w Warszawie, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

Badania gruntu za pomocą sondowań statycznych (CPT, CPTU) dają możliwości szybkiego rozpoznania profilu gruntowego pod kątem stratyfikacji poszczególnych warstw oraz parametrów fizyko-mechanicznych tych warstw. Ponadto, połączenie w jedno urządzenie pomiarowe klasycznego sondowania statycznego CPTU z pomiarem przewodności właściwej ośrodka gruntowego zaowocowało powstaniem stożka RCPTU, który umożliwia szybką i dokładną ocenę stanu środowiska i wpływu budowl i inżynierskich na środowisko.

Powszechnie stosowane sondy CPT/CPTU o powierzchni podstawy stożka 10 cm² na przestrzeni lat udowodniły swoją niezawodność i skuteczność. Jednakże w celu szybszego, dokładniejszego i bardziej szczegółowego rozpoznania podłoża gruntowego są poszukiwane nowe i doskonalone istniejące techniki pomiarowe.

Wytyczne i zalecenia zawarte w IRTP [4] oraz w normie PN-B-04452:2002 [8] dotyczą sondy o wymiarach stożka 10 cm², ale dopuszczają do użycia (IRTP) sondy o powierzchniach podstawy stożka od 5 cm² do 20 cm². Wynika to z faktu, że stożki o różnej powierzchni pozwalają na osiągnięcie odmiennych efektów [6, 12]: większe stożki są bardziej stabilne i dają dokładniejsze wartości q_c w gruntach słabych, natomiast stożki o mniejszych średnicach lepiej wykrywają cienie przewarstwienia w podłożu gruntowym.

Badaniem wpływu rozmiaru sondy na uzyskiwane wyniki zajmowali się Vreugdenhil i in. [13]. Analizując wyniki uzyskane z badań stożkami o powierzchni od 5 cm² do 15 cm² Lunne i in. [6], wykazali, że wpływ wielkości stożka na uzyskane wyniki jest pomijalny w warstwach gruntowych o grubości zbliżonej do średnicy stożka, tzn. opór na stożku oraz nadwyżka ciśnienia wody w porach nie zależą od wielkości stożka CPTU. Wpływ wielkości stożka na wartość ciśnienia wody w porach opisali Hird i in. [2], przedstawiając wyniki dla piezostożków o powierzchni 1 cm² i 5 cm² otrzymane w badaniach modelowych. Powell i Lunne [9] przedstawili wyniki uzyskane z badań penetrometrami o powierzchni stożka 10 cm² i 15 cm² w gruntach spoistych. Hird i Springman [3] w swojej pracy zestawili wyniki sondowań stożkami 5 cm² i 10 cm² uzyskane podczas badań w utworach zastoiskowych (jeziornych). Campanella i Howie [1] zwracają uwagę na fakt, że stożki 15 cm² dają wyniki zbliżone do standardowych piezostożków pod warunkiem zachowania przez producentów reżimu geometrycznego, tj. stosunku wymiarów stożka do tulei czarnej. W pracy Liu i in.

[5] przedstawiono wyniki uzyskane sondą CPT o powierzchni stożka 15 cm².

Niestandardowa sonda statyczna CPTU o powierzchni stożka 15 cm² znalazła swoje zastosowanie za granicami naszego kraju, jednakże w Polsce jest ciągle mało popularna. W artykule opisano wady oraz zalety tej niestandardowej końcówki pomiarowej, a także przedstawiono wyniki wykonanych sondowań.

ZAKRES BADAŃ I CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU

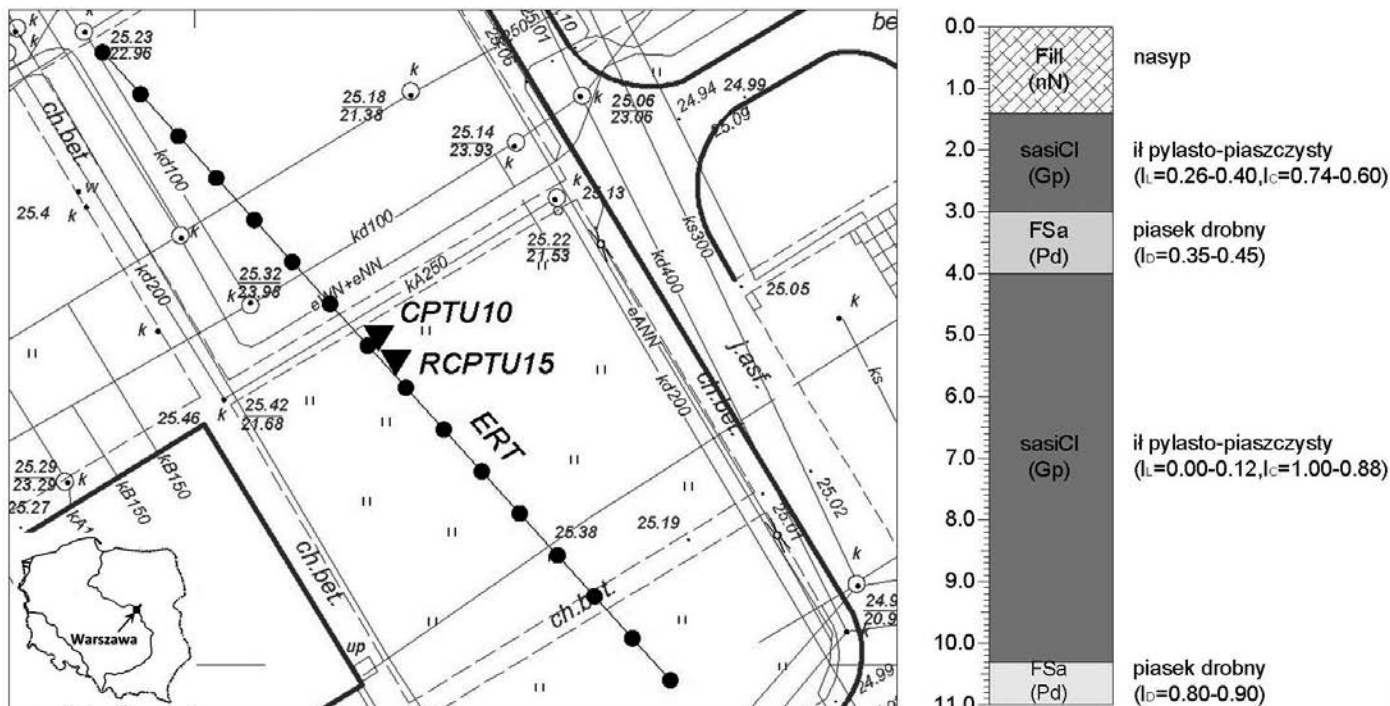
Prace badawcze przeprowadzono na terenie Kampusu SGGW. Obejmowały one analizę materiałów archiwalnych (wiercen i sondowań wykonanych na potrzeby projektowania obiektów Kampusu SGGW) oraz sondowania stożkami elektrycznymi z możliwością pomiaru ciśnienia wody w trakcie penetracji CPTU o powierzchni 10 cm² i RCPTU o powierzchni 15 cm². W celu porównania i weryfikacji uzyskanych z badań rodzaju RCPTU wartości przewodności właściwej ośrodka gruntowego na analizowanym terenie wykonano powierzchniowe badania geofizyczne metodą tomografii elektrooporowej ERT.

Mapę dokumentacyjną przedstawiającą rodzaj i lokalizację poszczególnych badań zamieszczono na rys. 1.

W podłożu analizowanego terenu do głębokości około 10,4 m zalegają plejstoceny gliny piaszczyste (zwałowe) w stanie półzwałowym, twaroplastycznym i plastycznym (lokalnie zawierające soczewki zawodnionego piasku drobnego w stanie średniozagęszczonym). Gliny te są podścielone osadami rzeczno-facji korytowej z okresu interglacjału mazowieckiego, wykształconymi w postaci zagęszczonych piasków drobnych. Osady lodowcowe w strefie przypowierzchniowej są w wielu miejscach silnie przeobrażone antropogenicznie. W warstwie przypowierzchniowej występują nasypy o zmiennej miąższości. Są to przeważnie piaski pylaste i pyły ze zmienną domieszką substancji humusowych. Schemat budowy geologicznej obszaru badań zamieszczono na rys. 1. Podstawowe właściwości gruntów spoistych przedstawiono w tabl. 1.

Tabl. 1. Właściwości gruntów spoistych analizowanego podłoża

Rodzaj gruntu	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. 1. Mapa dokumentacyjna obszaru badań i schemat budowy geologicznej podłoża

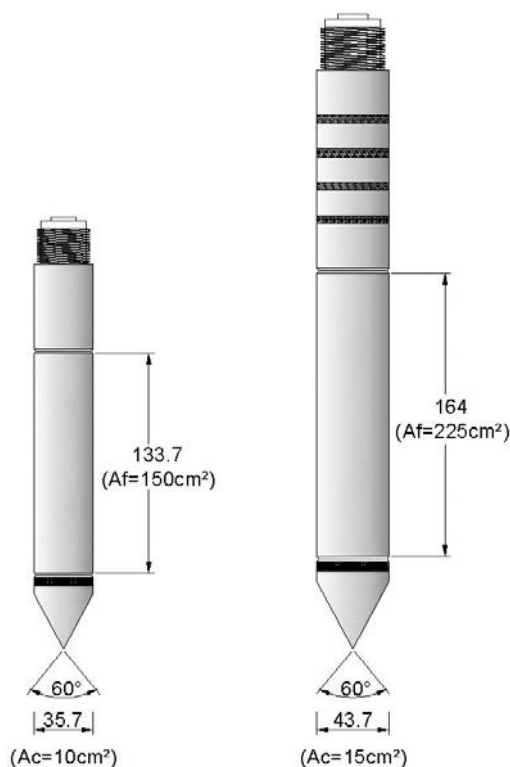
METODYKA BADAŃ

W badaniach terenowych wykorzystano standardowy stożek elektryczny CPTU o powierzchni 10 cm² oraz czteroelektrodowy piezostożek z możliwością pomiaru przewodności właściwej ośrodka gruntowego RCPTU o powierzchni stożka 15 cm².

Aparatura wykorzystywana do badań podłoża gruntowego metodą CPTU składa się z penetrometru stożkowego, urządzenia wciskającego oraz systemu odczytu i zbierania danych pomiarowych. 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. Z sondowania statycznego otrzymuje się bezpośrednio, w zależności od rodzaju zastosowanej do badań końcówki, następujące parametry sondowań:

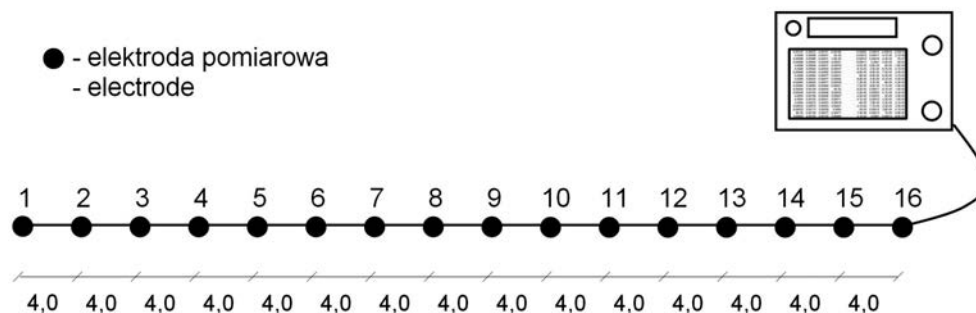
- wartości jednostkowych oporów stożka q_c ,
- wartości jednostkowych oporów tarcia gruntu na tulei ciernej f_s ,
- wartości ciśnienia wody w porach gruntu w trakcie sondowania u_z .

W badaniach wykorzystano czteroelektrodowy 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 był wyposażony w przewodowy system rejestracji danych rodzaju Touch-Screen. Wyniki sondowania rejestrowano przy użyciu programu Gorilla (firmy van den Berg), natomiast opracowanie



Rys. 2. Wymiary końcówek pomiarowych

i interpretację wyników badań wykonano przy użyciu programu CPT-pro (firmy Geosoft). Badania wykonano zgodnie z normą [8] oraz wytycznymi IRTP [4]. Tolerancja prędkości pogrążania wynosiła $\pm 2 \text{ mm/s}$. Jako badanie referencyjne wykonano sondowanie stożkiem elektrycznym CPTU o powierzchni $A_c = 10 \text{ cm}^2$ i powierzchni tulei ciernej $A_f = 150 \text{ cm}^2$. Obydwa wykorzysty-



Rys. 3. Schemat lokalizacji elektrod pomiarowych

wane w badania piezostozki były wyposażone w filtry w lokalizacji u_2 . Wymiary wykorzystanych w badaniach końcówek pomiarowych przedstawiono na rys. 2. Przed wykonaniem badania filtry oraz cały układ pomiarowy ciśnienia wody w porach odpowietrzono odpowiednio oraz w pełni nasyciono. Podczas badań korzystano z żerdzi pomiarowych o średnicy 36 mm i długości 1 m, co w przypadku pomiarów stożkiem CPTU o powierzchni 15 cm² i średnicy 43,7 mm umożliwiło znaczną redukcję tarcia gruntu na zewnętrznych ścianach żerdzi pomiarowych.

Metodyka sondowań CPT i CPTU, budowa końcówek pomiarowych oraz interpretacja wyników badań była wielokrotnie prezentowana w literaturze krajowej i zagranicznej [6, 7, 10, 11].

Porównawcze badania geofizyczne przeprowadzono techniką tomografii elektrooporowej (ERT) urządzeniem włoskiej firmy PASI. Urządzenie to składa się z jednostki centralnej z zainstalowanym oprogramowaniem, skrzynek połączeniowych, aktywatora, trzydziestu dwóch elektrod oraz zestawu przewodów umożliwiających połączenie całego układu pomiarowego.

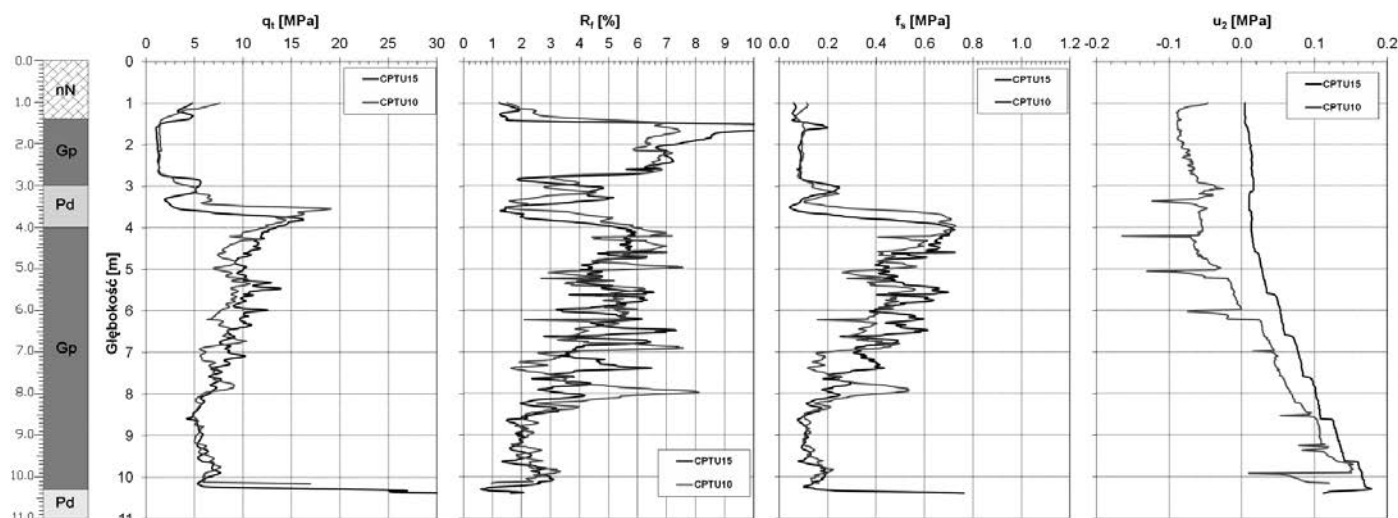
W metodzie tomografii elektrooporowej prąd elektryczny przepływa pomiędzy dwoma elektrodami prądowymi A i B, natomiast elektrodami M i N mierzy się potencjał pola elektrycznego w gruncie. Od rozmieszczenia elektrod względem siebie zależy sposób prowadzenia pomiarów i interpretacja wyników badań. Najczęściej wykorzystywany w praktyce jest układ Wennera, który zastosowano w badaniach. Pomiar oporności elektrycznej (ERT) wykonano przy użyciu 16 elektrod oddalonych

od siebie o 4 m przy całkowitej długości ciągu równej 60 m (rys. 3).

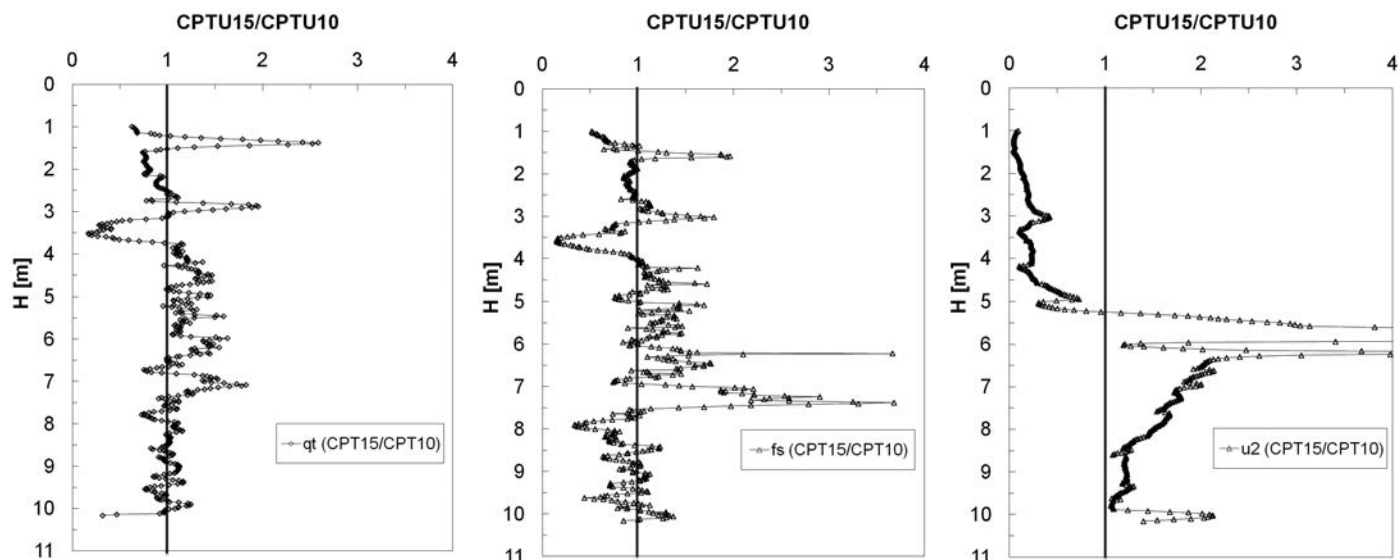
ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Na podstawie przeprowadzonych badań uzyskano rozkład mierzonych w trakcie sondowań wielkości w funkcji głębokości. Wielkości te to opór na stożku q_c , tarcie na tulei ciernej f_s , ciśnienie wody w porach w trakcie penetracji u_2 oraz w przypadku sondowania RCPTU przewodność właściwa gruntu ρ . Uzyskane z badań wartości q_c skorygowano ze względu na wpływ wartości ciśnienia wody w porach. Wyniki uzyskane w dwóch sondowaniach zestawiono i przedstawiono na rys. 4. Dodatkowo obliczono współczynnik tarcia R_f . Odległość pomiędzy sondowaniami wynosiła około 3 m. Rodzaj gruntu w poszczególnych warstwach określono na podstawie wierceń i według klasyfikacji Robertsona z 1990 roku.

Z analizy rozkładu wartości R_f widać, że analizowane profile gruntowe nieznacznie różnią się od głębokości około 8 m pomimo niewielkiej odległości. Różnica ta wynika z pochodzenia geologicznego analizowanych gruntów. Są to spoiste utwory zastoiskowe i zwałowe różniące się zawartością frakcji ilowej i piaskowej z soczewkami gruntów niespoistych. Poniżej tej głębokości zalegają jednorodne warstwy spoiste. Dlatego do dalszej analizy statystycznej wykorzystano pomiary z głębokości od 8 do 10 m.



Rys. 4. Wyniki sondowań CPTU



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

W celu określenia różnicy pomiędzy wartościami uzyskanymi z badań CPTU 15 cm² i CPTU 10 cm² obliczono współczynnik (tj. stosunek wartości danego parametru) CPTU15 do CPTU10 dla q_t , f_s i u_2 . Rozkład współczynnika w funkcji głębokości dla poszczególnych pomierzonych wielkości przedstawiono na rys. 5. Linia pokazująca wartość 1 obrazuje teoretyczną sytuację, w której wyeliminowano zmienność gruntu, oraz przy stwierdzonym braku wpływu wielkości stożka na pomiary. Z analizy otrzymanych wartości współczynników wynika (przy założonej jednorodności gruntu w dwóch sąsiednich profilach pomiarowych w przedziale głębokości od 8 do 10 m), że dla danych warunków gruntowych i sprzętowych wielkość stożka ma wpływ na uzyskane wartości f_s oraz u_2 . Dla analizowanych wartości (q_t , f_s i u_2) współczynnika CPTU15 do CPTU10 obliczono wartość średnią oraz odchylenie standardowe.

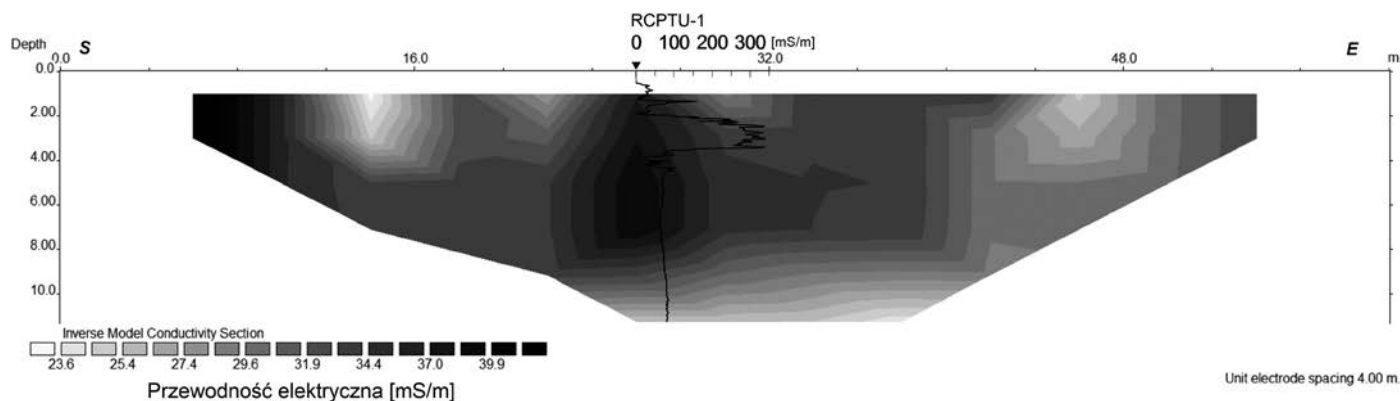
Średnie wartości współczynnika do q_t zawierają się w przedziale od 0,92 do 1,08, średnie wartości współczynnika do f_s zawierają się w przedziale od 0,78 do 1,09 natomiast średnia wartość współczynnika do u_2 wynosi 1,25. Odpowiednio wartości odchylenia standardowego wynoszą 6%, 12% i 17%.

Wyniki 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. Jedyną porównywalną wielkością jest opór na stożku q_t . Wartości dwóch pozostałych parametrów znacząco odbiegają od jedności (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 i u_2 z sondy CPTU 15 cm² są zawyżone w stosunku do wartości otrzymanych z zalecanej (standardowej) sondy CPTU 10 cm². Wartości u_2 uzyskane z sondy CPTU10 są dyskusyjne i wymagają dalszej wnikliwej analizy.

Wartości przewodności właściwej uzyskane z sondowań RCPTU oraz z metody ERT w analizowanym profilu pomiarowym różnią się od siebie, a różnica ta wynika z metodyki badań. W przypadku RCPTU jest to pomiar punktowy odbywający się w sposób ciągły, natomiast w przypadku tomografii elektrooporowej, gdzie wzbudzone w podłożu pole elektryczne ma kształt półsfery o znacznej objętości, otrzymane wartości przewodności elektrycznej są uśrednione. Otrzymany model przewodności elektrycznej podłoża jest wynikiem wielu czynników, które muszą być wzięte pod uwagę w trakcie interpretacji.

Niemniej jednak obie metody wykazały, że na głębokości od 3 do 5 m znajduje się strefa o podwyższonej przewodności



Rys. 6. Wyniki pomiarów przewodności elektrycznej

właściwej (warstwa gruntów spoistych w stanie plastycznym), oraz stałą wartość przewodności w utworach zwałowych poniżej 5 m.

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 pomiędzy wartościami f_s i u_2 . Jediną 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 otrzymanych z badań sondą CPTU 15 cm² nie należy wykorzystywać do charakterystyk interpretacyjnych (zależności obliczeniowych) wyprowadzonych dla penetrometru CPTU 10 cm².

Przyjmując, że sondowania wykonano zgodnie z wszystkimi wymogami, a procedura nasączania filtrów i odpowietrzania układu pomiarowego była wykonana poprawnie dla obu końcówek pomiarowych, świadczy to o tym, 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 oraz pewniejsze prowadzenie końcówki pomiarowej w gruncie.

Uzyskane z badań przewodności właściwej wyniki wskazują na poprawność uzyskiwanych wartości oraz stanowią dodatkowe narzędzie do interpretacji stanu gruntów występujących w podłożu gruntowym.

LITERATURA

1. Campanella R. G., Howie J. A.: Guidelines for the use, interpretation and application of seismic piezocone test data, The University of British Columbia, 2005.
2. Hird C. C., Johnson P., Sills G. C.: Performance of miniature piezocones in thinly layered soils. *Geotechnique* 53(10): 2003, 885-900.
3. Hird C. C., Springman S. M.: Comparative performance of 5 cm² and 10 cm² piezocones in a lacustrine clay. *Geotechnique* 56(6): 2006, 427-438.
4. IRTF. ISSMGE Technical Committee TC16 Ground Property Characterisation from In-situ Testing (1999). 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 1999, 2195-2222.
5. Liu S. Y., Cai G. J., Tong L. Y., Du, G. Y.: A comparative study of international CPTU and China double bridge CPT tests. 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach, CA, USA, 2010.
6. Lunne, T., Robertson, P. K. & Powell, J. J. M.: Cone penetration testing in geotechnical practice. Blackie Academic and Professional. London 1997.
7. Młynarek Z.: Regional Report for East European Countries. 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach, CA, USA, 2010.
8. PN-B-04452-2002 Geotechnika. Badania polowe.
9. Powell, J. J. M., Lunne T.: A comparison of different sized piezocones in UK clay. Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Osaka, Japan, 2005, 729-734.
10. Sikora Z.: Sondowania statyczne – metody i zastosowanie w geoinżynierii. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2006.
11. Szymański A., Bajda M.: Uncertainty assessment of cone penetration test results. *Annals of Warsaw Agricultural University, Land Reclamation*, no 35a, 2004, 213-220.
12. Tumay M. T., Titi H. H., Senneset K., Sandven R.: Continuous intrusion miniature piezocone penetration test in quick soil deposits. *Proc. 15th Int. Conf. Soil Mech. Geotech. Engng, Istanbul*, Vol. (1): 2001, 523-526.
13. Vreugdenhil R., Davis R. & Berrill J.: Interpretation of cone penetration tests in multilayered soils. *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech* 18(9): 1994, 585-599.