

Natalia Jędrzyśiak, Irena Bagińska***

ROZPOZNANIE PODŁOŻA GRUNTOWEGO SONDĄ SCPTU

1. Wstęp

Eurokod 7 w części 2 [4] dotyczącej rozpoznania i badania podłoża gruntowego przedstawia ogólny opis dziewięciu powszechnie stosowanych badań polowych. Wśród nich na pierwszym miejscu wymienione zostało sondowanie statyczne CPTU jako jedno z podstawowych badań zarówno na etapie badań wstępnych, rozpoznania do celów projektowych, jak i badań kontrolnych podłoża gruntowego. Sondowanie sejsmiczne zostało zakwalifikowane do grupy metod uzupełniających.

Sondowaniu statycznemu sondą stożkową bez pomiaru i z pomiarem ciśnienia wody w porach poświęcony jest w całości załącznik informacyjny D Eurokodu 7 cz. 2 [4]. Przytoczono w nim przykładowe korelacje pomiędzy wielkościami pomierzonymi w trakcie badania, a wyprowadzonymi parametrami mechanicznymi. W Eurokodzie znalazły się również powołania normatywne na normy EN-ISO 22476 część 1 i 12, które w sposób szczegółowy mają określać metodykę badania i interpretacji sondowania statycznego sondą statyczną z końcówką odpowiednio elektryczną i mechaniczną. Niestety do chwili obecnej nie została zatwierdzona norma dotycząca sondowań statycznych z końcówką elektryczną, dlatego w artykule posłużono się nadal obowiązującą normą dotyczącą badań polowych PN-B-04452 z 2002 roku [5].

W pracy zaprezentowano możliwe rozpoznanie cech podłoża gruntowego za pomocą statycznej sondy CPTU wyposażonej w moduł sejsmiczny SCPTU. Ocenę wykonano w oparciu o obowiązujące Normy Polskie oraz powszechnie stosowane korelacje zaczerpnięte z literatury. Badania opisane w niniejszym artykule przeprowadzono za pomocą sondy typu GEOTECH 220-04, wyposażonej w analogowy system przesyłania mierzonych wielkości „po kablu”. Sygnały z elektrycznego stożka sondy odbierane przez interfejs rejestrowa-

* Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wrocławska, Wrocław

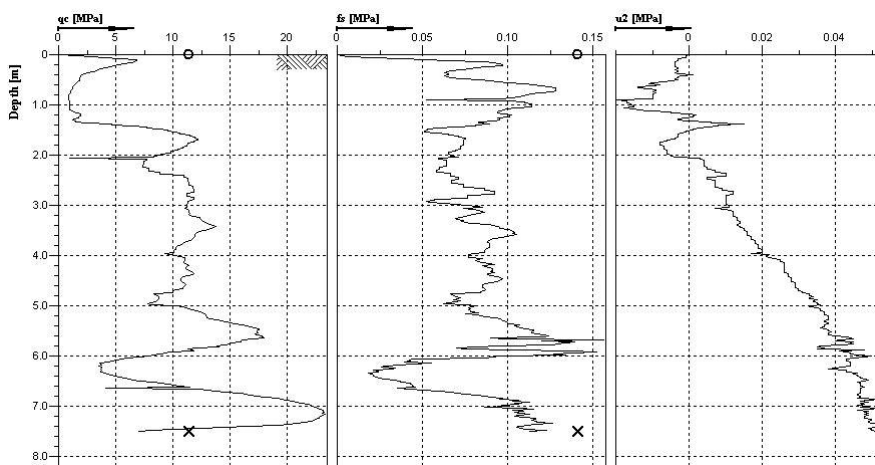
** Instytut Geotechniki i Hydrotechniki, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wrocławska, Wrocław

no w czasie rzeczywistym w pamięci komputera, co umożliwiło bezpośrednią obserwację rejestrowanych wielkości.

2. Metodyka badań

Rozpoznaniu poddano teren polderu rzeki Odry znajdujący się w południowo wschodniej części obszaru miasta Wrocław. Równoległe z badaniami statycznymi przeprowadzono wiercenia geologiczne celem weryfikacji otrzymanych wyników badań *in situ*. Podczas sondowania statycznego co metr dokonywano rejestracji fali sejsmicznej wzbudzonej na powierzchni terenu młotem.

Sondowanie statyczne CPTU polega na wciskaniu pionowo w grunt, ze stałą prędkością (2 cm/s), za pomocą kolumny żerdzi znormalizowanej sondy stożkowej. W trakcie badania w czasie rzeczywistym co 1 sekundę, czyli 2 cm wępu rejestrowane są trzy wielkości: opór zagłębienia stożka (q_c), tarcie na tulei ciernej (f_s) oraz pomiar ciśnienia porowego wody (u_2). Zarejestrowane wielkości pokazano na rysunku 1.

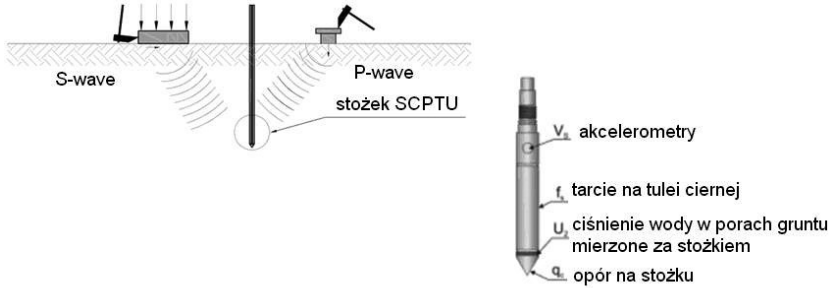


Rys. 1. Wykresy zarejestrowanych wartości q_c , f_s i u_2

Zmienność i losowość podłoża, a także jakość sprzętu i poprawność wykonania badania, może mieć znaczny wpływ na dokładność mierzonych wartości. Poprawność wykonanych pomiarów można zweryfikować poprzez przeprowadzanie „testów zero” stożka przed i po badaniu. Wskazania powinny zarejestrować podobne wartości q_c i f_s . Należy zadbać, aby temperatura stożka podczas odczytu zerowego przed i po badaniu była zbliżona do temperatury badanego gruntu.

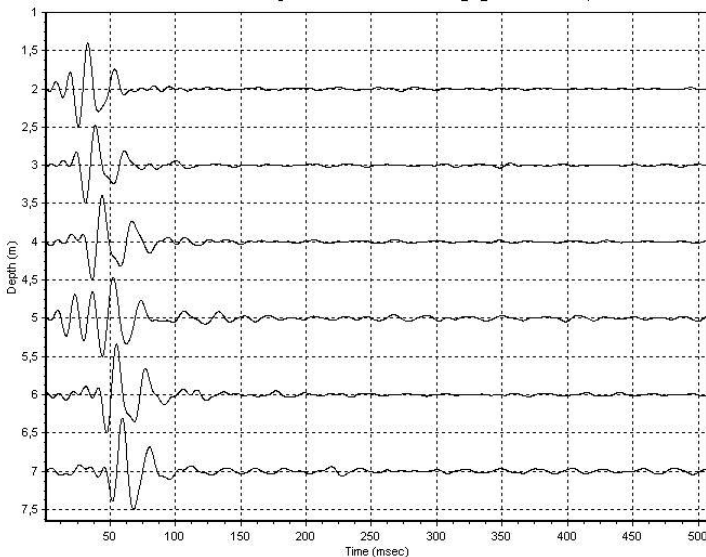
Podczas badania każdy moment dokręcenia kolejnej metrowej żerdzi wykorzystywany został do przeprowadzenia pomiaru sejsmicznego. W zastosowanym typie sondy moduł sejsmiczny umieszczony jest bezpośrednio nad stożkiem pomiarowym. W jego wnętrzu

znajdują się trzy akcelerometry rejestrujące w trzech płaszczyznach wzbudzoną na powierzchni terenu falę sejsmiczną. Na rysunku 2 przedstawiono schemat pomiaru prędkości fali sejsmicznych.



Rys. 2. Schemat pomiaru prędkości fali sejsmicznej

Testy prowadzono, wzbudzając falę sejsmiczną dwoma sposobami. Pierwszy zwany S-wave polega na wzbudzeniu fali poprzecznej poprzez uderzenie poziomym młotem masywnego stalowego bloku dociśniętego do gruntu. Drugi test zwany jest P-wave i polega na wzbudzeniu fali podłużnej poprzez uderzenie pionowe młotem stalowego postumentu zagłębionego w gruncie. Rejestrowany jest moment wzbudzenia oraz fale sejsmiczne docierające do akcelerometrów rozmieszczonych w trzech płaszczyznach X, Y i Z. Wykres zarejestrowanych fal sejsmicznych na poszczególnych głębokościach przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Wykresy zarejestrowanych fal sejsmicznych testu S-wave

Na poprawność przeprowadzonych badań oraz analizy interpretacyjnej duży wpływ ma dokładność ich wykonania. Zniekształcać pomiar mogą zakłócenia zewnętrzne oraz niewłaściwe uderzenia w stalowy blok czy postument. Zarejestrowane fale podlegają przefiltrowaniu dla uzyskania wygładzonego wykresu. Podczas badania ważne jest właściwe ustawienie czułości instrumentów pomiarowych dla zarejestrowania zmieniających się z głębokością warunków pomiaru. Na danej głębokości badanie można przeprowadzać wielokrotnie dostrajając parametry pomiarowe akcelerometrów.

W trakcie badania rejestrowano inklinometrem odchylenie stożka sondy od pionu, co pozwoliło na uwzględnienie w pomiarach głębokości jego rzeczywistego położenia.

Badania uzupełniono odwiertem geologicznym. Wiercenia wykonano mechanicznie, świdrem z żerdziami spiralnymi. Ustalono profil geologiczny składający się z humusu do 0,4 m, kolejno nawiercono glinę piaszczystą zwięzłą o miąższości około 1 m. Następnie występowały przewarstwienia piasków średnich, grubych i pospółki. Położenie zwierciadła wody gruntowej ustalono na głębokości 2 m p.p.t.

3. Opracowanie wyników badań

3.1. Ustalenie profilu geologicznego

Na podstawie parametrów wiodących q_c i f_s można ustalić bezpośrednio profil geologiczny badanego podłoża [5].

Obecnie rozpowszechnione są klasyfikacje postępujące się parametrami pochodnymi ustalonymi na podstawie q_c i f_s z uwzględnieniem ciśnienia porowego wody oraz całkowitego naprężenia pionowego w gruncie. Ustalenie profilu geologicznego będzie odbywać się na podstawie parametrów pochodnych Q_t , F_r i B_q , które opisane są następującymi wzorami:

$$Q_t = \frac{q_t - \sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}}, \text{ to znormalizowany opór na stożku,}$$

$$F_r = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{vo}}, \text{ to znormalizowany współczynnik tarcia,}$$

$$B_q = \frac{u - u_o}{q_t - \sigma_{vo}}, \text{ to znormalizowany współczynnik ciśnienia wody w porach gruntu,}$$

$$q_t = q_c + u(1 - a), \text{ to skorygowany całkowity opór stożka (netto),}$$

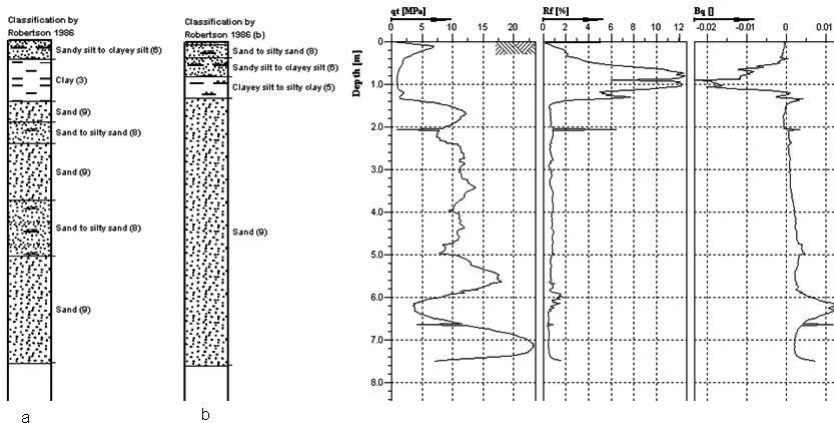
gdzie:

- u — ciśnienie porowe wody mierzone za stożkiem,
- (u_2) , a — współczynnik powierzchni stożka podany przez producenta,
- σ_{vo} — całkowite naprężenie pionowe w gruncie,
- σ'_{vo} — efektywne naprężenie pionowe w gruncie,
- u_o — wartość hydrostatycznego ciśnienia wody w porach gruntu.

- W chwili obecnej najpowszechniej stosowanymi klasyfikacjami w Polsce są:
- klasyfikacja Robertsona z 1986 roku [2],
 - klasyfikacja Robertsona z 1990 roku [2, 7],
 - klasyfikacja Młynarka i zespołu z 1997 roku [3] (będąca zmodyfikowaną klasyfikacją Robertsona) [5],
 - klasyfikacja Marra z 1981 roku [5].

Wykorzystując powyższe klasyfikacje, ustalono profil geologiczny badanego podłoża gruntowego korzystając z programu interpretacyjnego CPT-pro.

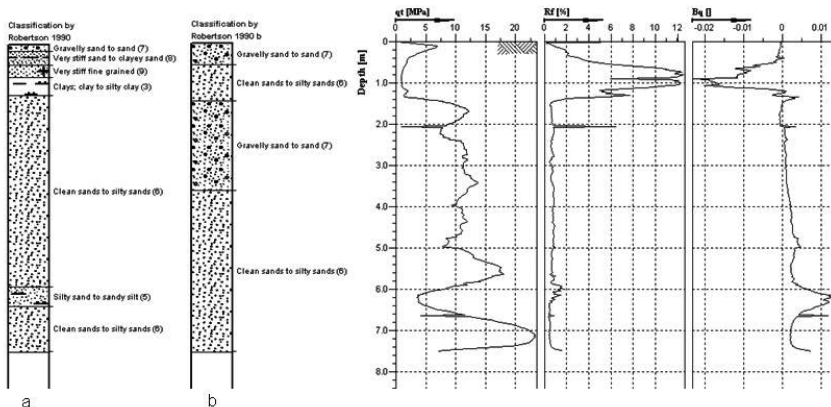
Według interpretacji Robertsona z 1986 roku do głębokości ok. 1,5 m napotykamy prze-warstwienia pyłów, piasków drobnej frakcji oraz glin zarówno z uwzględnieniem jak i bez, ciśnienia porowego. Kolejno do głębokości 7,5 m występują piaski z piaskami pylastymi. W interpretacji uwzględniającej ciśnienie porowe na tych głębokościach występują wyłącznie piaski. Profile otrzymane na podstawie klasyfikacji Robertsona z 1986 przedstawione są na rysunku 4.



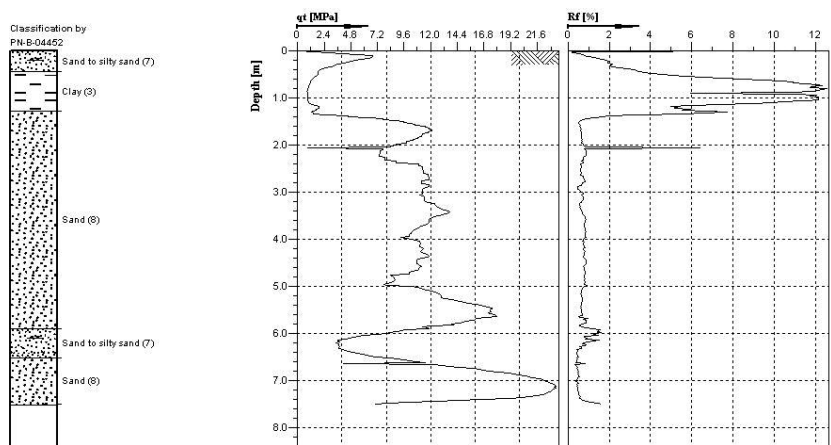
Rys. 4. Profil geologiczny wg klasyfikacji Robertsona z 1986 roku: a) bez uwzględnienia ciśnienia porowego, b) z uwzględnieniem ciśnienia porowego

Podobne rozpoznanie daje klasyfikacja Robertsona z 1990 roku, która również na większych głębokościach wykazuje występowanie głównie piasków i piasków pylastych, natomiast uwzględniając ciśnienie porowe profil pokazuje znaczną miąższość żwirów do piasków w stanie zagęszczonym. Do głębokości 1,5 m występują żwiry do piasków w stanie zagęszczonym i grunty prekonsolidowane lub scementowane dla profilu a), piaski i żwiry do piasków w stanie zagęszczonym dla profilu b), które przedstawia rysunku 5.

Również klasyfikacja Młynarka i zespołu wykazuje w badanym gruncie przewagę gruntów piaszczystych. Do głębokości 1,5 m zaobserwowano występowanie piasku z piaskiem pylastym oraz gliny. Natomiast na większych głębokościach widać, że występują wyłącznie piaski z niewielkim przewarstwieniem piasków pylastych.



Rys. 5. Profil geologiczny wg klasyfikacji Robertsona z 1990 roku:
a) bez uwzględnienia ciśnienia porowego, b) z uwzględnieniem ciśnienia porowego



Rys. 6. Profil geologiczny wg klasyfikacji Młynarka i zespołu z 1997 roku

3.2. Ustalenie stanu gruntu

W rozpatrywanym przekroju przewagę stanowią grunty sypkie, dlatego szczegółowemu ustaleniu podlegać będzie określenie stopnia zagęszczenia.

Ustalono stopień zagęszczenia korzystając z dwóch następujących korelacji I_D od q_c :

- wg Borowczyka [5],
- wg Lancellotta [za 8].

Metoda Borowczyka przytoczona jest w Polskiej Normie [5] i opisana jest wzorem:

$$I_D = 0,709 \log q_c - 0,165 \quad (1)$$

gdzie q_c — opór na stożku [t/m^2].

Metoda przeznaczona jest do oceny stanu zagęszczenia piasków drobno-, średnio- i gruboziarnistych o wskaźnikach różnoziarnistości $U > 3$. W rozpatrywanym przekroju ustalono, że stopień zagęszczenia I_D waha się w granicach od 0,55 do 0,75. Pozwala to na wydzielenie dwóch stref zagęszczenia gruntu sypkiego: płycej jako średnio zagęszczonego, głębiej jako zagęszczonego z osłabieniem na poziomie 6 m p.p.t.

Stopień zagęszczenia ustalony wg zależności Lancellotta [8] opisany jest następującą zależnością:

$$I_D \cong -98 + 66 \log\left(\frac{q_c}{\sqrt{\sigma'_{vo}}}\right) \quad (2)$$

gdzie:

q_c — opór na stożku [t/m²],

σ'_{vo} — pionowa składowa naprężenia efektywnego [t/m²].

Ustalony stopień zagęszczenia na podstawie powyższej zależności dał przedział od 0,73 do 0,88. Pozwala to ocenić grunt syпки sklasyfikować jako zagęszczonego oraz bardzo zagęszczonego według PN-EN ISO 14688-2 [6].

3.3. Ustalenie parametrów odkształceniowych

Ciało liniowo sprężyste potrafi przenosić drgania sprężyste zwane falami sejsmicznymi. Przyjmując, iż grunt w zakresie małych odkształceń jest ciałem sprężystym, na podstawie określonej prędkości rozchodzenia się w gruncie podłużnej i poprzecznej fali sejsmicznej, możliwe jest określenie wartości parametrów odkształceniowych gruntu [1].

Początkową wartość modułu ścinania można określić na podstawie prędkości fali poprzecznej oraz gęstości ośrodka gruntowego z następującej zależności [1, 2]:

$$G_o = \rho(V_s)^2 \quad (3)$$

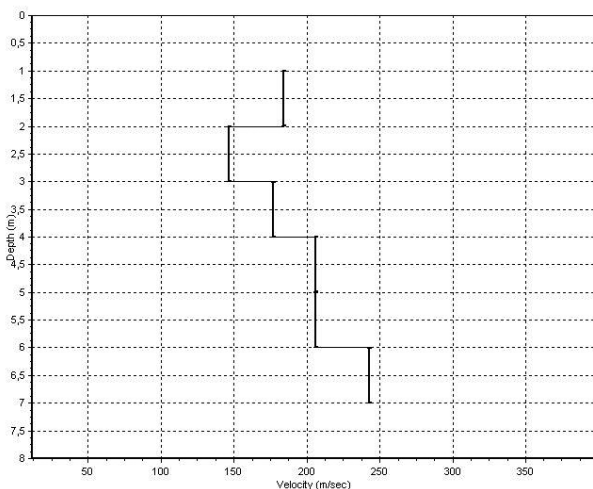
Natomiast moduł ściśliwości określa się na podstawie znajomości prędkości fali podłużnej i gęstości ośrodka gruntowego [2]:

$$M_o = \rho(V_p)^2 \quad (4)$$

Ostatecznie analizie poddano jedynie wyniki testów S-wave. Otrzymano zmianę z głębokością prędkości fali poprzecznej (rys. 2). Porównywano pomiary fal na sąsiednich głębokościach, biorąc pod uwagę różnicę czasów nadejścia czoła fali do akcelerometrów na różnych poziomach. Przy określaniu wartości prędkości sejsmicznej fali poprzecznej wykorzystano program interpretacyjny SCPT-Analys.

Dokładne zinterpretowanie wyników pomiarów może nastęrczać wielu kłopotów. W dużej mierze poprawny pomiar decyduje o pomyślnej interpretacji. W analizowanym przykładzie odrzucono w trakcie analizy pomiar z głębokości 5 m (rys. 2). Zarejestrowana fala nie posiada wyraźnego pierwszego impulsu świadczącego o nadejściu czoła fali. Przyczyną wadliwego pomiaru mogły być zakłócenia zewnętrzne.

W analizowanym przekroju zarejestrowano niemalże liniowy wzrost prędkości poprzecznej fali sejsmicznej wraz z głębokością w warstwie piasku średniego (od 146 m/s do 236 m/s) (rys. 7). Na tej podstawie obliczono wartość modułu ścinającego, który zawierał się w obrębie warstwy od 43 MPa do 111 MPa.



Rys. 7. Wykresy zmiany prędkości poprzecznej fali sejsmicznej

Wyznaczone zmiany prędkości poprzecznej fali sejsmicznej mogą również posłużyć wyznaczaniu innych cech gruntu, takich jak współczynnik Poissona oraz moduł Younga [1]. Różne ośrodki sprężyste charakteryzują się różnymi prędkościami rozchodzenia się drgań wzbudzonych, co może być pomocne nawet w ocenie klasyfikacji gruntu.

4. Wnioski

Badania *in situ* sondą statyczną SCPTU pozwalają określać zarówno fizyczne, jak i mechaniczne parametry geotechniczne gruntu, dając pełne rozpoznanie podłoża gruntowego. Otrzymane rozpoznanie zostało zweryfikowane w trakcie wierceń.

Wiercenia wykazały w badanym podłożu gruntowym przewagę piasków średnich, co odpowiada rozpoznaniu wykonanemu sondą SCPTU według wszystkich rozpatrywanych klasyfikacji. W analizie brano pod uwagę wpływ ciśnienia porowego wody oraz naprężenia pierwotnego gruntu.

Podczas badań ustalono nie tylko profil geologiczny gruntu, ale również stopień zagęszczenia zgodnie z Polską Normą [5] i inną korelacją nie ujętą w normie. Dodatkowo pomiary sejsmiczne pozwoliły na ustalenie początkowego modułu ścinania.

Z uwagi na brak normowych wytycznych odnośnie wykorzystania badań sejsmicznych, do określenia wielkości modułu ścinania, przedstawione wyniki należy zweryfikować przy pomocy innych powszechnie uznanych metod badawczych na przykład laboratoryjnych. Eurokod 7 [4] dopuszcza bowiem stosowanie nowatorskich (nieujętych w normie) metod badawczych, wykonanych sondą sejsmiczną SCPTU, lecz w takich przypadkach nakazuje przeprowadzenie badań weryfikujących.

LITERATURA

- [1] *Fajkiewicz Z.* (red.): Zarys geofizyki stosowanej, Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa 1972
- [2] *Lunne T., Robertson P.K., Powell J.J.M.*: Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice, Blackie Academic and Professional, London 1997
- [3] *Młynarek Z., Tschuschke W., Wierzbicki J.*: Klasyfikacja gruntów podłoża budowlanego metodą statycznego sondowania, Materiały 11 Krajowej Konferencji Mechaniki Gruntów i Fundamentowania, tom 2. Politechnika Gdańska, 1997, s. 119–126
- [4] PN-EN 1997-2:2009 Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne — Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego
- [5] PN-B 04452:2002 Geotechnika. Badania polowe
- [6] PN-EN ISO 14688-2:2006 Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania
- [7] *Robertson P.K.*: Soil Classification System Using the Cone Penetration Test, Canadian Geotechnical Journal, 27(1), 1990, p. 151–158
- [8] *Sikora Z.*: Sondowanie statyczne metody i zastosowanie w geoinżynierii, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2006