

Marek POZZI, Tadeusz MZYK
Politechnika Śląska, Gliwice

WYKORZYSTANIE SONDOWANIA STATYCZNEGO CPTU DO OCENY PARAMETRÓW GEOTECHNICZNYCH PODŁOŻA GRUNTOWEGO

Streszczenie. W artykule przedstawiono możliwości wykorzystania sondowania CPTU do wydzielenia warstw geotechnicznych oraz interpretację wyników sondowania wykonanego sondą statyczną TG63-150sCPTU, będącą w dyspozycji Instytutu Geologii Stosowanej Politechniki Śląskiej. Przedstawione wyniki pozwalają stwierdzić, że sondowanie statyczne z bezpośrednim pomiarem ciśnienia wody w porach gruntu (CPTU) pozwala, po zastosowaniu odpowiednich klasyfikacji i wzorów korelacyjnych, uzyskać precyzyjne wydzielenie warstw i dobre oszacowanie stanów gruntów oraz ich parametrów mechanicznych.

TO TAKE ADVANTAGE OF STATIC PENETRATION TEST CPTU FOR RATING OF GEOTECHNICAL GROUND CONDITIONS

Summary. The paper presents possibility to take advantage of penetration of CPTU to dispense geotechnical layer and interpretation results of static penetration probe TG63-150sCPTU to be in order of Silesian Technical University - Institute of Applied Geology. Presenting results permit to state cone penetration test with pore pressure measurement (CPTU) allow to get precision of layer determination and estimate of ground mechanical condition after use of adequate classification and formulas.

1. Wprowadzenie

Ustalanie parametrów geotechnicznych podłoża gruntowego w projektowaniu posadowień obiektów budowanych w Polsce odbywało się z reguły na podstawie przeprowadzonego sondowania dynamicznego w terenie i określenia na podstawie liczby uderzeń stopnia zagęszczenia I_D lub stopnia plastyczności I_L badanego gruntu [2, 3]. Wymagania z zakresu badań polowych oraz

laboratoryjnych w dokumentowaniu geotechnicznym, w polskich warunkach, regulowane były przez normy: PN-86/B-04481 oraz PN-74/B-04452.

Ujednolicone ogólnoeuropejskie standardy projektowania oraz dokumentowania warunków gruntowo-wodnych podane zostały w normach tzw. eurokodach (Eurocode 7: *Geological design* – w szczególności ENV 1997-3:1999 *Part 3 Design assisted by field testing*). Wytyczne dotyczące zakresu badań wymaganych dla obiektów budowlanych wprowadzono w Polsce w roku 2002 normą PN-B-04452:2002. Norma ta w zasadniczej części określa procedury badawcze, podstawowe wymagania dotyczące sprzętu oraz sposoby interpretacji wyników badań i sondowań [3, 7, 10]. Zmiany, w stosunku do wymagań PN-74/B-04452 oraz częściowo PN-86/B-04481, miały na celu dostosowanie polskiej praktyki badań polowych do zasad podanych w ENV 1997-3:1999 [7, 11, 12].

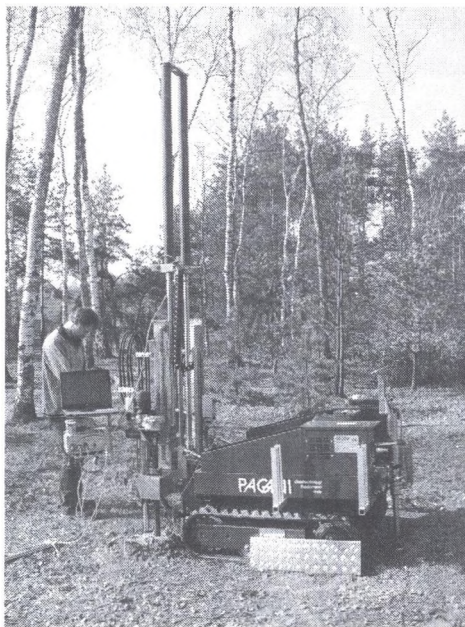
Zgodnie z wymogami Eurokodów ważne jest, żeby dokumentacja geotechniczna zawierała przynajmniej wyniki badań *in situ* metodą sondowania [8]. Normy europejskie wymagają, by obliczenia konstrukcyjne posadowienia obiektów budowlanych uwzględniały naprężenia efektywne (efektywne wartości kąta tarcia wewnętrznego Φ' i spójności c' gruntu) [8, 9]. Wprowadzona zasada obliczeń wymaga zmiany sposobu przeprowadzania badań polowych i laboratoryjnych parametrów podłoża gruntowego [8]. Obligatoryjne sondowanie prowadzone *in situ*, np. sondowanie statyczne z bezpośrednim pomiarem ciśnienia wody w porach gruntu (CPTU), pozwala, po zastosowaniu odpowiednich klasyfikacji i wzorów korelacyjnych, uzyskać precyzyjne wydzielenie warstw i dobre oszacowanie stanów gruntów oraz ich parametrów mechanicznych [1, 5, 6, 10].

Podstawowym obszarem zastosowań sondowań statycznych jest określenie stratyfikacji warstw gruntu wraz z oszacowaniem parametrów geotechnicznych podłoża gruntowego w sposób ciągły. Badanie CPTU jest sprawdzone i bardzo efektywne, szczególnie w gruntach słabo- i średnioślitych. Natomiast w gruntach piaszczystych stosuje się z reguły sondowanie CPT (CPTU) bez pomiaru ciśnienia porowego [5, 9].

2. Opis sondowania statycznego metodą CPTU

W trakcie sondowania statycznego metodą CPTU w podłożu gruntowe wciskana jest ze stałą normową prędkością 2 cm/s sonda stożkowa wyposażona w elektroniczne układy miernicze. W trakcie penetracji mierzona jest siła oporu penetracji względem powierzchni przekroju poprzecznego końcówki stożka q_c , siła tarcia względem powierzchni bocznej

końcówki znajdującej się bezpośrednio za stożkiem f_s oraz ciśnienie porowe generowane na powierzchni stożka w trakcie sondowania u_2 . Odczyt dokonywany jest metodą elektroniczną, poprzez ciągły pomiar napięcia na czujnikach umieszczonych w sondzie i przekazywany z końcówki sondy do specjalnego odbiornika, co pozwala na bezpośrednie, tj. w czasie rzeczywistym, wykreślenie trzech ciągłych krzywych przedstawiających mierzone wartości w zależności od głębokości penetracji [1, 4, 5, 10]. Każdy mierzony parametr zapisywany jest w odrębnym kanale, w programie rejestrującym dane w postaci pliku, co umożliwia późniejsze jego opracowanie (interpretację) [1, 10].



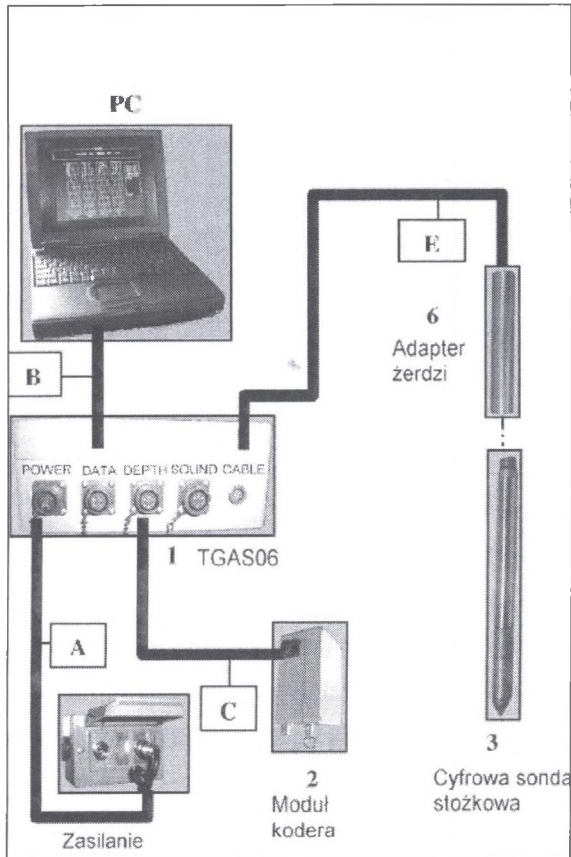
Fot. 1. Sonda statyczna TG63-150sCPTU - własność Instytutu Geologii Stosowanej Politechniki Śląskiej
Photo 1. Static probe TG63-150sCPTU - property of Silesian Technical University - Institute of Applied Geology

W wykorzystywanej w Instytucie Geologii Stosowanej Politechniki Śląskiej sondzie typu TG63-150sCPTU (fot. 1) rejestracja danych pomiarowych odbywa się poprzez specjalny zespół TGAS06, który gromadzi mierzone przez sondę wartości i przekazuje je do komputera klasy PC. Zespół TGAS06 składa się z sondy piezometrycznej, modułu kodera służącego do pomiaru głębokości oraz modułu gromadzącego dane z sondy i z kodera głębokości i przekazującego je do komputera (rys. 1) [10].

Każda sonda służąca do pomiarów CPTU posiada określoną charakterystykę, która uwzględnia wszystkie czynniki konstrukcyjne mające wpływ na wartości mierzone. Przed przystąpieniem do pomiarów w programie rejestrującym są wczytywane charakterystyki czujników końcówki sondy i wykonywany jest tzw. „odczyt zerowy” (przy niezadawanych

obciążeniach) uwzględniający warunki atmosferyczne i wpływ innych czynników na charakterystykę czujników sondy. Po zakończonym badaniu wykonywany jest odczyt końcowy i w przypadku zmiany charakterystyk czujników końcówki sondy odpowiednio korygowane są zmierzone wartości „ q_c ”, „ f_s ” i „ u_2 ” [10].

W trakcie badania śledzi się rozkład mierzonych parametrów bezpośrednio na ekranie komputera; w przypadku natrafienia na warstwę nawodnioną widoczny jest znaczny wzrost ciśnienia porowego „ u_2 ”. Ponieważ wtedy mierzone ciśnienie porowe jest większe od rzeczywistego, gdyż wzrost ciśnienia jest generowany dodatkowo przez wciskaną końcówkę, wykonuje się tzw. „test rozpraszania ciśnienia” (dissipation test), który pozwala skorygować odczytane wartości ciśnienia porowego do wartości rzeczywistych. Testy rozpraszania ciśnienia podczas sondowania wykonuje się dla każdej warstwy nawodnionej, a każdy jest przypisany głębokości (warstwie), na której został przeprowadzony [10].



Rys. 1. Schemat urządzenia pomiarowo - rejestrującego w metodzie CPTU
 Fig. 1. Scheme of measurement - registration - system in CPTU test

Pozyskane informacje (wartości „ q_c ”, „ f_s ” i „ u_2 ”) są przetwarzane i zapisywane w bazie danych badania za pomocą oprogramowania TGSW03. Bezpośrednio w trakcie wykonywania badania możliwe jest obserwowanie na monitorze komputera PC wykresów oraz wartości liczbowych napływających danych [1, 5, 10].

3. Wyniki sondowania metodą CPTU

Wynikiem sondowania jest więc baza zawierająca zbiory danych zmierzonych w trakcie sondowania wartości „ q_c ”, „ f_s ” i „ u_2 ”.

3.1. Sposób interpretacji sondowań CPTU

W różnych krajach warunki gruntowo-wodne są zróżnicowane, w związku z czym wykorzystanie zależności pomiędzy mierzonymi w sondowaniu CPTU wartościami a parametrem geotechnicznym wymaga pewnych korekt wynikających z lokalnych uwarunkowań. Od kilkunastu lat prowadzone są w Polsce prace doświadczalne, które pozwoliły na ustalenie skorygowanych zależności uwzględniających specyficzne - polskie warunki gruntowo-wodne [2, 10].

Procedura interpretacji sondowań CPTU przebiega dwufazowo. W pierwszej fazie następuje podstawowa obróbka danych i wydzielenie rodzaju gruntu według wybranej metody (klasyfikacji). W fazie drugiej następuje interpretacja w zakresie wybranych cech wytrzymałościowych i fizycznych wydzielonych warstw gruntu, w zależności od wybranych związków korelacyjnych pomiędzy mierzonymi parametrami a wartościami parametrów geotechnicznych [1, 10].

Pierwszym krokiem w interpretacji sondowań CPTU jest redukcja zdarzających się, nierzeczywistych pomiarów, np. w trakcie dokładania kolejnych żerdzi. Redukcji takiej dokonuje się przez zastąpienie wszystkich wartości pomiarów mniejszych od zadanej wartości wartościami średnimi, obliczonymi w otoczeniu punktu, w którym zarejestrowano wartość „zerową”. W dalszej kolejności dokonuje się eliminacji pomiarów będących wynikiem wpływu czynników zewnętrznych i niereprezentujących rzeczywistych własności gruntu. Przykładem może być zarejestrowana wartość oporu stożka „ q_c ” przy natrafieniu na mały kamień. W początkowej fazie mierzone wartości wykazują znaczny wzrost, by po przepchnięciu lub rozkruszeniu przeszkody zmaleć do wartości poprzednich. Wprowadzona

do procedury interpretacyjnej wysoka wartość „ q_c ” dałaby w efekcie fałszywy wynik, przez co powinna być wcześniej wyeliminowana [1].

Następnie przeprowadza się właściwą interpretację rodzaju gruntu na podstawie wybranej klasyfikacji. Często interpretacja sondowań CPTU oparta jest na dodatkowych parametrach pomocniczych i pochodnych od mierzonych wartości „ q_c ”, „ f_s ” i „ u_2 ”.

Najczęściej wykorzystywana jest klasyfikacja Robertsona z 1986 i 1990 roku [10] oraz, dostosowana do warunków polskich, zmodyfikowana klasyfikacja Robertsona podana w PN-B-04452:2002 [7].

Drugim krokiem w interpretacji sondowań CPTU jest interpretacja w zakresie wybranych cech fizycznych i wytrzymałościowych wydzielonych warstw gruntu. W polskich warunkach sprawdzone i potwierdzone zostały zależności korelacyjne, które pozwalają określić [1]:

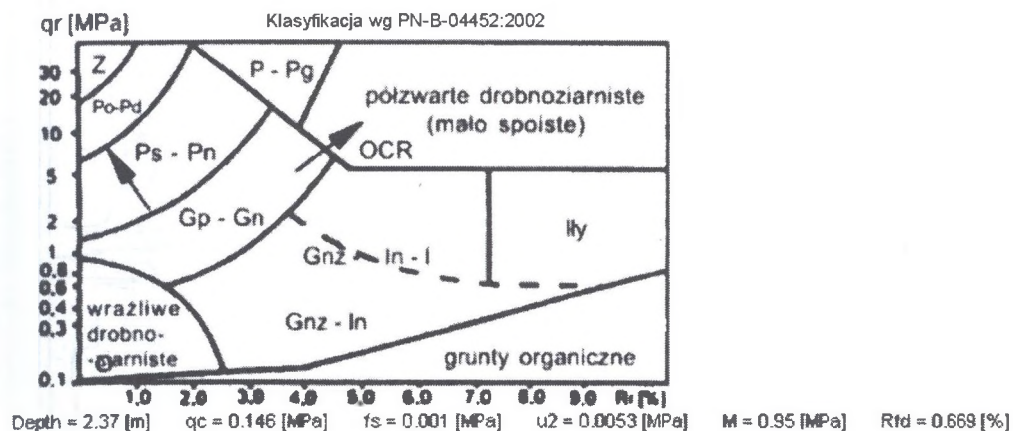
- ciężar objętościowy gruntu γ ,
- współczynnik prekonsolidacji OCR ,
- współczynnik konsolidacji c ,
- wytrzymałość gruntu na ścinanie w warunkach bez odpływu s_u ,
- współczynnik parcia spoczynkowego K_o ,
- stopień plastyczności w gruntach spoistych I_L ; oraz stopień zagęszczenia w gruntach niespoistych I_D ,
- moduł ściśliwości wtórnej M ,
- moduł odkształcenia sprężystego w warunkach bez odpływu E_u (moduł Younga),
- kąt tarcia wewnętrznego ϕ ,
- współczynnik filtracji k .

Wymienione wartości parametrów geotechnicznych mogą być obliczone jedynie dla określonego rodzaju gruntu, w związku z czym są obliczane dla określonego przedziału głębokościowego (wydzielonej w pierwszym kroku warstwy).

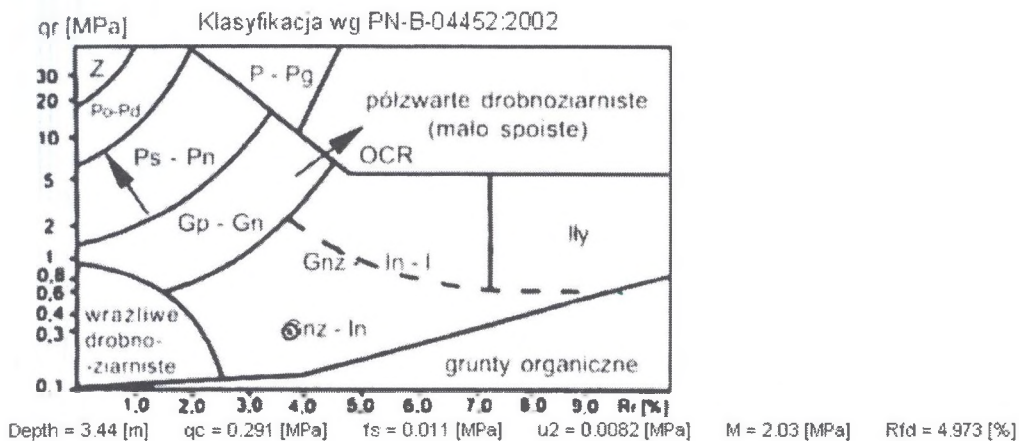
3.2. Przykładowa interpretacja sondowania CPTU

W celu zaprezentowania możliwości wykorzystania sondowania CPTU do wydzielenia warstw geotechnicznych poniżej przedstawiono interpretację wyników sondowania wykonanego sondą statyczną TG63-150sCPTU, będącą w dyspozycji Instytutu Geologii Stosowanej Politechniki Śląskiej. Sondowanie wykonano w dniu 18 maja 2007 roku w rejonie budynku Wydziału Górnictwa i Geologii do głębokości 5,3 m p.p.t. (fot. 1). Uzyskany wynik sondowania przedstawiono na rysunku 3. Interpretację sondowania, z zachowaniem zasad przedstawionych w rozdziale 3.1, przeprowadzono w programie CPT-pro wer. 5.42 firmy

GEOSOFIT. Zastosowano klasyfikację Robertsona, dostosowaną do warunków polskich przedstawioną w PN-B-04452:2002. Uzyskany wynik klasyfikacji wraz z profilem gruntowym przedstawia rysunek 4 i 2, na których widoczny jest sposób klasyfikacji warstwy gruntu z głębokości 2, 37 i 3,44 m.



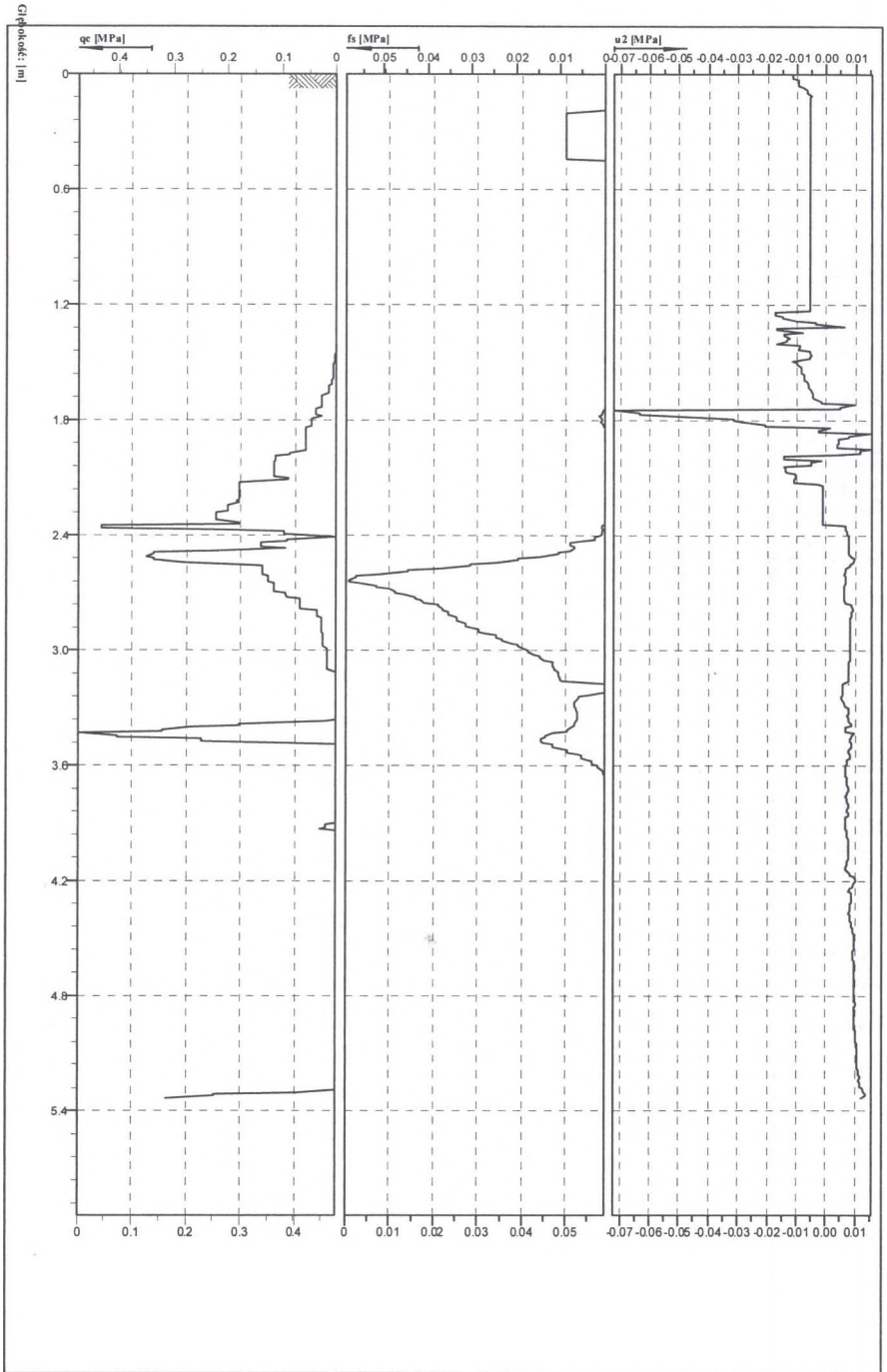
Lokalizacja: Politechnika Śląska



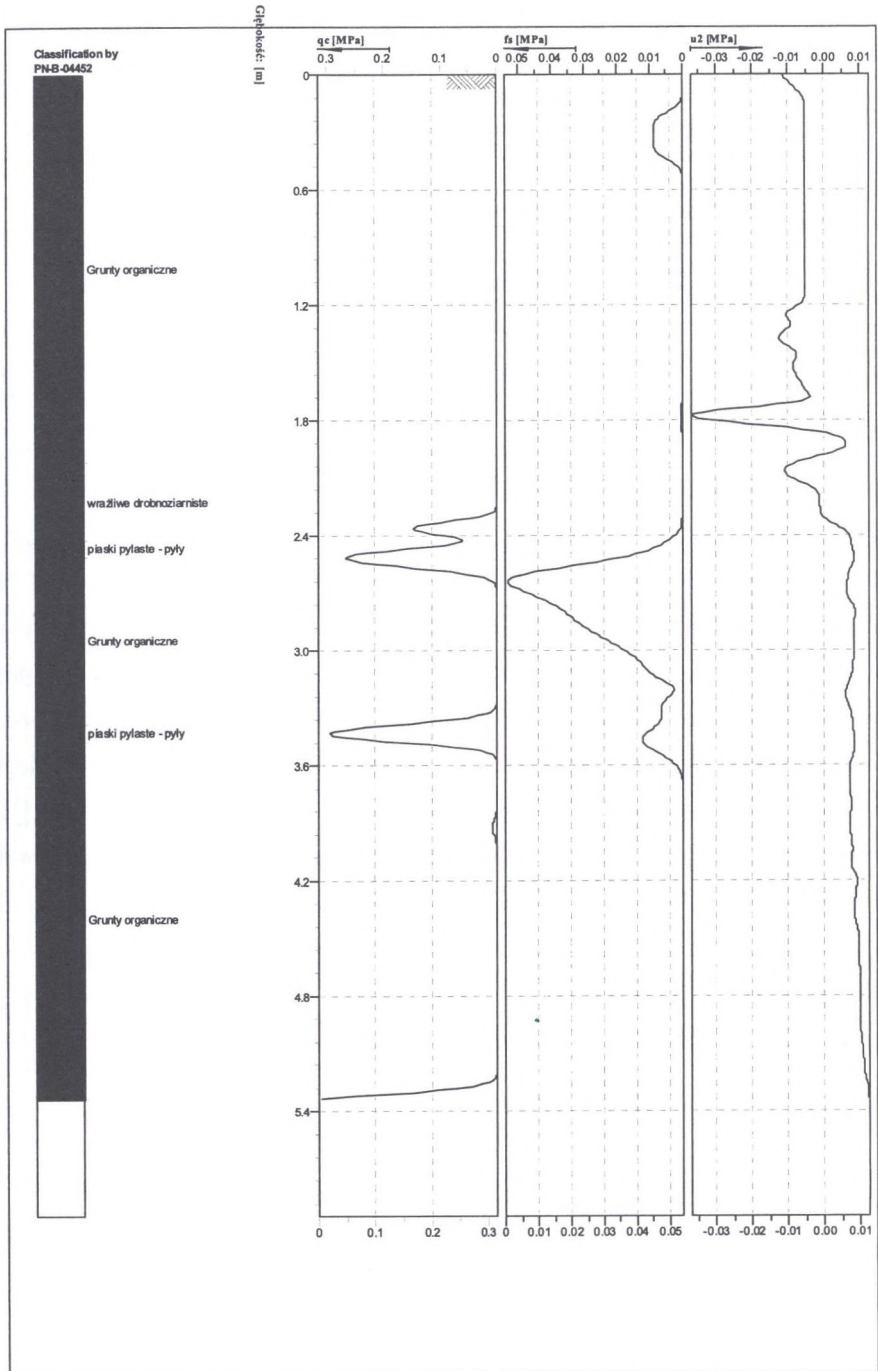
Lokalizacja: Politechnika Śląska

Rys. 2. Sposób klasyfikacji warstwy gruntu z sondowania CPTU z głębokości 2,37 i 3,44 m

Fig. 2. Method of ground classification from CPTU probe from depth 2,37 and 3,44 m



Rys. 3. Wynik sondowania sondą statyczną TG63-150sCPTU
 Fig. 3. Results of cone penetration test of TG63-150sCPTU



Rys. 4. Wynik klasyfikacji gruntu i profil gruntowy

Fig. 4. Results of grounds classification and ground section

Wyliczone z zależności korelacyjnych [1, 4, 10] wartości parametrów geotechnicznych dla wyróżnionych warstw gruntu podano w tabeli 1.

Tabela 1
Wartości parametrów geotechnicznych dla wyróżnionych warstw gruntu

Warstwa geotechniczna	Przedział głębokościowy m p.p.t.	*Moduł ściśliwości wtórnej M MPa	*Kąt tarcia wewnętrznego ϕ	Współczynnik filtracji k m/s	Wskaźnik zagęszczenia N_{60}	Współczynnik parcia spoczynkowego K_o
Grunty wrażliwe drobnoziarniste	2,01 – 2,41	0,16 – 0,98	30	$< 1 \cdot 10^{-8}$	2,58	0,38
Piaski pylaste/pyły	3,34 – 3,49	1,23 – 2,08	32	$< 1 \cdot 10^{-9}$	2,96	0,56

*wartości potwierdzone w badaniach laboratoryjnych

4. Wnioski

Wykorzystanie w praktyce budowlanej badań CPTU w istotnym stopniu ułatwia ustalenie prawidłowego zasięgu warstw geotechnicznych złożonych z gruntów o podobnych właściwościach wytrzymałościowych. Zasadniczą przewagą metody CPTU nad pozostałymi metodami badawczymi jest unikanie wydzielenia dużej ilości warstw geologicznych, niewielkiej często miąższości i o podobnych właściwościach wytrzymałościowych [10, 11].

Sondowanie statyczne CPT lub CPTU jest jednym z najbardziej miarodajnych badań polowych dla uzyskania efektywnych wartości parametrów geotechnicznych [12]. Sondowanie statyczne z pomiarem ciśnienia wody w porach CPTU pozwala:

- uściślić dane dotyczące rodzaju i stanu gruntów, tj. stopień plastyczności w gruntach spoistych I_L oraz stopień zagęszczenia w gruntach niespoistych I_D , ciężar objętościowy gruntu γ , współczynnik filtracji k ;

oraz określić:

- efektywne parametry wytrzymałościowe, takie jak: wytrzymałość gruntu na ścinanie w warunkach bez odpływu s_u , moduły: ściśliwości wtórnej M i odkształcenia sprężystego w warunkach bez odpływu E_u (moduł Younga) oraz kąt tarcia wewnętrznego ϕ ,
- określić stan naprężenia w gruncie z uwzględnieniem historii obciążenia, poprzez współczynniki prekonsolidacji OCR i konsolidacji c ;
- współczynnik filtracji.

Obecnie sondowanie CPTU przy zastosowaniu specjalnych czujników znajduje coraz szersze zastosowanie w inżynierii budowlanej oraz w ochronie środowiska do wykrywania i monitorowania zanieczyszczeń w ośrodku gruntowym.

LITERATURA

1. Geosoft Sp. z o.o.: „CPTpro. Instrukcja obsługi.” Wer. 5.42.
2. Gryczmański M.: Współczesne kierunki rozwoju geotechniki w Polsce. Inżynieria i Budownictwo, nr 8/94, Warszawa 1994.
3. Kłosiński B.: Przegląd norm europejskich do tyjących projektowania konstrukcji geotechnicznych, Geoinżynieria i Tunelowanie, s. 18 - 27, 02/2005.
4. Lunne T., Robertson P.K., Powell J.: Cone penetration testing in geotechnical practice, E&FN Spon, London 1997.
5. Młynarek Z., Tschuschke W., Wierzbicki J., Wykorzystanie metody sondowania statycznego i badania dylatometrycznego do oceny parametrów geotechnicznych odpadów kopalnianych, Seminarium nt. Nowoczesne metody badań gruntów, 29 maja 2003, Warszawa.
6. Młynarek Z., Tschuschke W., Wierzbicki J., Wołyński W.: Wykorzystanie statystycznej analizy danych do wydzielenia geotechnicznych warstw podłoża budowlanego. Geoinżynieria i Tunelowanie, s. 14 – 17, 02/2005.
7. PN-B-04452:2002 Geotechnika. Badania polowe.
8. Projekt EN 1997-1 Eurokod 7 Projektowanie geotechniczne. Część 1, 2 i 3. Materiały konferencji w Mrągowie, Instytut Techniki Budowlanej, październik 2000.
9. Sawicki A., Świdziński W.: Moduły geotechniczne, moduły sprężystości i charakterystyki zagęszczania gruntów niespoistych. Inżynieria i Budownictwo, nr 12, Warszawa 1997.
10. Sikora Z.: Sondowanie statyczne, WNT, Warszawa 2006.
11. Wysokiński L.: Dostosowanie polskich norm w geotechnice do systemu norm europejskich. Konf. ITB Harmonizacja polskich norm geotechnicznych z systemem norm europejskich, Mrągowo listopad 2000, s. 41-66.
12. Wysokiński L.: Podstawy projektowania geotechnicznego - klasyfikacja gruntów, wydzielenie warstw, ustalanie parametrów geotechnicznych z uwzględnieniem nowych norm europejskich. XX Ogólnopolska Konferencja Warsztat pracy projektanta konstrukcji, Wisła-Ustroń, 1-4 marca 2005, tom I, s. 35-70.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Stanisław Rybicki