

## STATYSTYCZNE IDENTYFIKACJE WARSTW GRUNTÓW<sup>1</sup> NA PODSTAWIE SONDOWAŃ GEOTECHNICZNYCH

Simon Rabarijoely, Paweł Sujka

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

**Streszczenie.** W artykule przedstawione zostały ogólne zasady wydzielenia warstw gruntów na podstawie sondowań geotechnicznych. Zestawiono wyniki badań CPT oraz DMT z kampusu SGGW, a także wyznaczono w podłożu warstwy geotechniczne. Na podstawie wyników z badań laboratoryjnych, przede wszystkim analizy uziarnienia, rozpoznano rodzaj gruntu i porównano z danymi określonymi w badaniach terenowych. Przeprowadzono również analizę statystyczną danych z badań terenowych. Dodatkowo przedstawiono różnice w klasyfikacji gruntów według polskiej normy PN-86/B-02480 i normy europejskiej PN-EN ISO 14688.

**Słowa kluczowe:** klasyfikacja gruntów, sondowania CPT i DMT, analiza statystyczna

### WSTĘP

W praktyce inżynierskiej bardzo ważne jest prawidłowe rozpoznanie podłoża gruntowego, bowiem każdy obiekt budowlany, bez względu na swoje gabaryty, musi zostać posadowiony na gruncie. Problem właściwej identyfikacji gruntu obejmuje nie tylko obiekty budowlane (kubaturowe), ale także obiekty inżynieryjne, czyli wszelkiego rodzaju drogi, linie kolejowe, mosty czy tunele. W zasadzie w każdej dziedzinie budownictwa inżynierowie mają styczność z gruntem. Niestety badania gruntowe są w praktyce minimalizowane, co przyczynia się do problemu z późniejszym użytkowaniem danego obiektu. Aby obiekt budowlany spełniał swoje przeznaczenie użytkowe, musi być właściwie zaprojektowany pod względem posadowienia, a z tym wiąże się prawidłowa identyfikacja

---

<sup>1</sup> Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009–2014 z dwóch projektów badawczych NCN: N N506 218039 i Grant Umowa nr UMO-2011/03/D/ST8/04309.

podłoża. Celem niniejszego artykułu jest wykonanie klasyfikacji gruntów na podstawie sondowań geotechnicznych. Klasyfikacja została wykonana na podstawie wyników badań z sondowania CPT i DMT oraz badań laboratoryjnych, które zostały przeprowadzone na terenie kampusu Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego. Dodatkowo dokonano analizy statystycznej wyników badań terenowych, która jest metodą bardziej obiektywną i również pozwala na klasyfikowanie gruntów. Artykuł zawiera również wprowadzenie w zagadnienia klasyfikacji, rodzaje i parametry gruntów oraz metody badań terenowych i laboratoryjnych. Obejmuje także analizę porównawczą klasyfikacji według polskiej normy PN-86/B-02480 i europejskiej PN EN ISO 14688.

## PODSTAWY TEORETYCZNE

W marcu 1986 roku Polski Komitet Normalizacyjny opublikował i zatwierdził normę dotyczącą gruntów budowlanych PN-86/B-02480 Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów. Zastąpiła ona starszą wersję normy gruntowej PN-74/B-02480 Grunty budowlane. Podział, nazwy, symbole i określenia, która zawierała informacje na temat nazwy gruntów oraz ich definicji, podziału gruntów naturalnych i ich właściwości fizycznych, a także opis gruntów.

W ramach ujednoczenia symboli i opisów gruntów Komitet Techniczny ISO/TC 182 „Geotechnics” wraz z Komitetem Technicznym CEN/TC 341 „Geotechnical Investigation and Testing” opracował nową dwuczęściową normę europejską. Pierwsza część normy dotyczy przebiegu makroskopowego opisu gruntów i została zatwierdzona przez CEN (Comite Europeen de Normalisation) w 2002 roku jako norma międzynarodowa. Druga część uzyskała akceptację w 2004 roku i obejmuje zasady klasyfikacji gruntów. Oficjalne wersje norm opublikowane zostały w trzech językach: angielskim, niemieckim i francuskim. Wersja może zostać przetłumaczona na odpowiedzialność danego członka CEN na inny język, a po zatwierdzeniu przez Centrum Zarządzania CEN uzyskuje taki sam status jak wersje oficjalne.

Jako że każdy kraj europejski musi uznać tekst norm ISO 14688-1:2002 i ISO 14688-2:2004, w Polsce zdecydowano się wprowadzić angielskie kopie norm międzynarodowych: EN ISO 14688-1:2002 oraz EN ISO 14688-2:2004. Normy te razem z normą EN ISO 14689-1:2003, dotyczącą oznaczenia i klasyfikacji skał, mają zastąpić normę PN-86/B-02480.

W czerwcu 2006 roku Polski Komitet Normalizacyjny zatwierdził przetłumaczone obie części normy: PN-EN ISO 14688-1 oraz PN-EN ISO 14688-2. Podstawową różnicą w klasyfikacji gruntów według PN-86/B-02480 i PN-EN ISO 14688, cz. 1 i 2, jest to, że nowa klasyfikacja jest w zasadzie makroskopowa. Dodatkowo frakcje drobne (*fine*), czyli pylista i ilasta traktowane są identycznie. Zmianie uległy również granice frakcji klasyfikacyjnych. Do określenia rodzaju gruntu według PN-86/B-02480 stosuje się trójkąt Fereta, z kolei w normie PN-EN ISO 14688-2 przyjęto klasyfikację skandynawską (trójkąt i kwadrat). W praktyce uproszczono tę metodę tylko do trójkąta wraz z nowymi nazwami gruntów. Zmieniono też liczbę rodzajów gruntów. W starej normie wyróżniono 20 gruntów, a w nowej jest ich 32. Wprowadzono również nowe symbole gruntów, tak żeby można było łatwo je zrozumieć w całej Europie.

Wszystkie różnice w obu klasyfikacjach przedstawiono w publikacji „Geoinżynieria – drogi, mosty, tunele” [Gołębiewska i Wudzka 2006].

## OPIS OBIEKTU

Rozpatrywany w tym artykule obiekt należy do Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego, a dokładniej – jest to fragment Kampusu SGGW, który znajduje się w południowej części Warszawy, na Ursynowie. Obszar ten od zachodu ograniczony jest aleją Jana Rodowicza „Anody”, od południa ulicą Ciszewskiego, natomiast od północy i wschodu ulicą Nowoursynowską. Na rysunku 1 przedstawiono teren kampusu SGGW i miejsca badań.

Cały teren SGGW znajduje się na wysoczyźnie polodowcowej, dzięki czemu nie posiada dużych zniesień i spadków. W wyniku rozbudowy Kampusu SGGW naturalna rzeźba uległa zmianie. Rzędne terenu wahają się od 24,0 do 28,0 m nad poziom „0” Wisły, czyli 102,0–106,0 m n.p.m.



Rys. 1. Zdjęcie satelitarne Kampusu SGGW z naniesionymi miejscami badań: A – aula wielofunkcyjna SGGW, B – przejście podziemne, C – parking podziemny SGGW, D – budynek 37 – Wydział Rolniczy, E – budynek 34 – Wydział Leśny oraz Wydział Technologii Drewna, F – drugi budynek biblioteki SGGW

Fig. 1. SGGW Campus satellite image with the point tests sites: A – SGGW Multifunctional Hall, B – underground passages, C – SGGW underground parking, D – building 37 – Faculty of Horticulture and Landscape Architecture, E – Building 34 – Faculty of Forestry and Wood Technology Department, F – Second Warsaw University of Life Sciences, library building

W celu określenia rodzaju gruntu i parametrów gruntowych wykonano następujące prace badawcze: badanie CPT, badanie DMT oraz wiercenia.

Łącznie wykonano 29 sondowań CPT: 7 dla obiektu A, 7 dla obiektu C, 5 dla obiektu D, 6 dla obiektu E oraz 4 dla obiektu F. Sondowania przeprowadzono do głębokości około 9–11 m, oprócz obiektu F, gdzie głębokość sondowań wynosi 5–7 m. Otrzymano parametry  $q_c$  w przedziałach do około 20 MPa (czasem 30 MPa), a sondowanie kończono przy wartościach powyżej 60 MPa.

Wykonano 17 badań dylatometrycznych DMT, z czego 6 na obiekcie A, 2 na obiekcie B, 2 na obiekcie C, 3 na obiekcie D, 3 na obiekcie E oraz 1 na obiekcie F. Badania wykonywano do głębokości około 8–12 m. Uzyskano parametr gruntowy  $I_D$  do 4 (czasem 6) oraz  $E_D$  przeważnie do 80–100 MPa (czasem 150 MPa).

Pod badane obiekty wykonano badania laboratoryjne próbek gruntu z 24 wierceń, z czego 11 odbyło się na obiekcie A, 3 na obiekcie B, 6 na obiekcie C i 4 na obiekcie E.

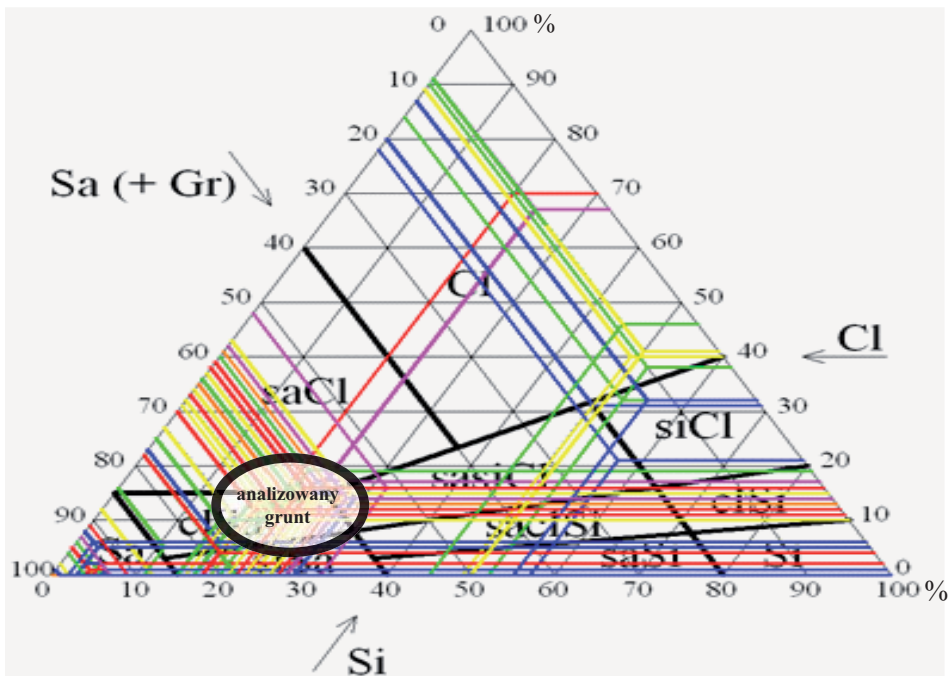
## OPRACOWANIE WYNIKÓW I ANALIZA STATYSTYCZNA

Pobrano próbki gruntów z wybranej głębokości. Następnie wykonano badania w laboratorium w celu uzyskania poszczególnych frakcji gruntów. Wyniki badań laboratoryjnych z analizowanych obiektów wraz z rodzajami gruntów oraz frakcje z poszczególnych próbek naniesiono na trójkątach z polskiej normy PN-86/B-02480 i z załącznika do normy PN-EN ISO 14688. Na rysunku 2 przedstawiono wyniki badań próbek gruntu z laboratorium. Z głębokości, z której została pobrana próbka, zestawiono zawartość procentową poszczególnych frakcji (piaskową, pyłową, iłową i żwirową z kamienistą). Poszczególne próbki zaznaczono różnymi kolorami. Następnie na trójkąt z załącznika do polskiej normy PN EN ISO 14688 naniesiono linie odpowiadające kolorami do danej próbki i wyznaczono rodzaj gruntu. Na rysunku 2 zestawiono frakcje klasyfikacyjne ze wszystkich opracowywanych terenów na trójkątach z poszczególnych norm. Na trójkącie z PN-EN ISO 14688 poszczególne frakcje zawierają się w piaskach ilastych, iłach piaszczystych, piaskach i iłach.

Wszystkie wyniki badań CPT zebrano na nomogramie Robertsona i innych [1986] i pokazano na rysunku 3a. Z rysunku widać, że przeważająca część wyników sondowań waha się w granicach około 10 MPa (opór stożka) i 1–6% (współczynnik tarcia). Wynika z tego, że są to grunty drobnoziarniste zagęszczone, gliny piaszczyste, piaski gliniaste i piaski pylaste.

Do analizy wyników badania CPT niezbędna była wartość oporu stożka ( $q_c$ ) oraz współczynnika tarcia ( $R_f$ ). Oba te parametry dla danego sondowania przedstawiono na wykresach w zależności od głębokości. Następnie wartości z tych samych głębokości naniesiono na nomogram Robertsona [Robertson i in. 1986]. Aby wykres był bardziej czytelny, wyniki przedstawiono kolorami oraz dla poszczególnych głębokości zmieniono znaczniki (co 1 m głębokości zmienia się kolor i znacznik).

Rysunek 3b przedstawia wyniki badań DMT na nomogramie Marchettiego i Crappsa [1981]. Z nomogramu wynika, że na badanych terenach znajdują się głównie: bardzo



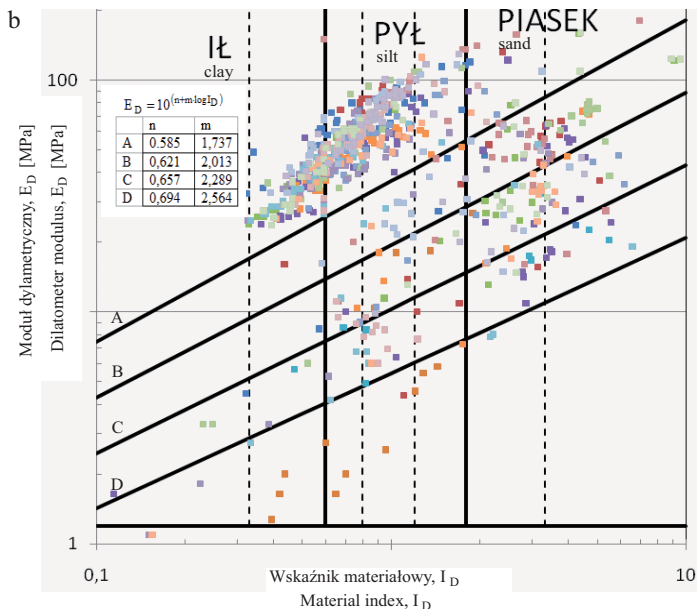
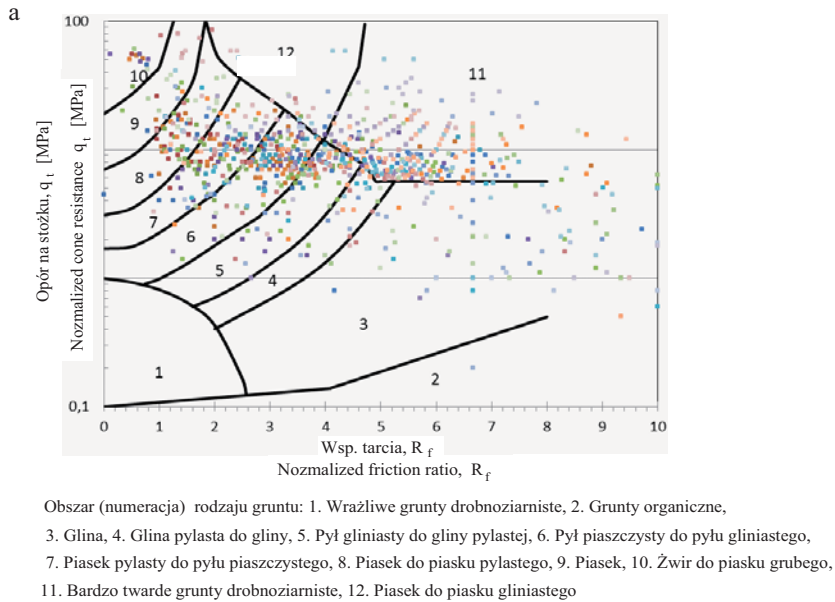
Rys. 2. Zestawienie zbiorcze wyników badań laboratoryjnych z terenów auli wielofunkcyjnej, przejścia podziemnego, parkingu podziemnego, budynku 34 oraz biblioteki na trójkącie z załącznika normy PN-EN ISO 14688

Fig. 2. A summary of results from laboratory tests of the SGGW Multifunctional Hall, Underground passages, SGGW Underground parking, Building 34 – Faculty of Forestry and Wood Technology Department, Warsaw University of Life Sciences library building of the triangle with an attachment from the PN-EN ISO 14688

zagęszczone pyły, pyły ilaste i ily pylaste oraz średnio zagęszczone i zagęszczone piaski i piaski pylaste.

Analizę badania DMT przeprowadzono analogicznie do badania CPT. Wyznaczono parametry wskaźnika materiałowego ( $I_D$ ) oraz modułu dylatometrycznego ( $E_D$ ). Wartości tych parametrów zaprezentowano na wykresach w zależności od głębokości, a następnie naniesiono na nomogram klasyfikacyjny Marchettiego [Marchetti i Crapps 1981] i odczytano rodzaj gruntu.

Przeprowadzono analizę statystyczną wybranego sondowania CPT i DMT, na podstawie której wyznaczono jednolite jednostki stratygraficzne gruntu (HSU – *homogeneous soil units*). Następnie za pomocą regresji metody najmniejszych kwadratów wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odpływu  $S_u = \tau_{fv}$  z wyników sondowań CPT i edometrycznego modułu ściśliwości ( $M$ ) z badań DMT, wykonano linię trendu całych profili oraz poszczególnych warstw HSU.



Rys. 3. Zestawienie wyników badań z terenów auli wielofunkcyjnej, parkingu podziemnego, budynku 34 i 37 SGGW oraz biblioteki SGGW: a – CPT na nomogramie Robertsona i in. [1986, za Robertsonem 2010], b – DMT na monogramie Marchettiego i Crapps [1981]

Fig. 3. Summary results of Hall multifunctional areas, underground car park, No. 34 and No. 37 of the Building and Warsaw University of Life Sciences library building SGGW: a – CPT based on CPT Soil Behavior Type (SBT) chart [Robertson et al 1986, updated by Robertson 2010], b – of DMT the chart of Marchetti and Crapps [1981]

Do wykonania analizy statystycznej danych geotechnicznych z sondowania CPT niezbędne są: opór stożka ( $q_c$ ) oraz tarcie na tulei ( $f_s$ ), a w przypadku badania CPTU – także ciśnienie wody w porach ( $u_2$ ). Do analizy statystycznej stosuje się następujące zależności:

- wskaźnik ciśnienia wody w porach

$$B_q = \frac{u_2 - u_0}{q_t - \sigma_{v0}} \quad (1)$$

w którym  $u_0$  to ciśnienie wody w porach w stanie równowagi,  $\sigma_{v0}$  to całkowite pionowe naprężenie, a  $q_t$  – skorygowany opór stożka obliczany ze wzoru:

$$q_t = q_c + (1 - a_c)u_2 \quad (2)$$

(dla stożka  $a_c = 0,80$ ); w przypadku badania CPT, gdzie niemierzone jest ciśnienie wody w porach, wartość  $B_q = 0$ , a  $q_t = q_c$ ,

- znormalizowany opór stożka

$$Q_c = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma_{v0} - u_0} \quad (3)$$

- znormalizowany współczynnik tarcia

$$F_r = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{v0}} \quad (4)$$

- wskaźnik klasyfikacji zachowania gruntu zdefiniowany na podstawie  $Q_c$  i  $F_r$

$$I_c \sqrt{(3,47 - \log Q_c)^2 + (1,22 + \log F_r)^2} \quad (5)$$

Badanie CPT zapewnia prawie ciągły profil gruntu. Dlatego nadaje się do określenia w gruncie jednolitych jednostek stratygraficznych (HSU – *homogeneous soil units*). Aby profile gruntowe z badania CPT były mniej subiektywne, można zastosować analizę statystyczną. Wykonuje się ją bezpośrednio do jednej lub wielu własności gruntu lub pośrednio za pomocą korelacji.

Analiza statystyczna opiera się na rozpiętości wartości  $B_q$  (tj. różnicy między największą a najmniejszą wartością w próbce) oraz współczynnika zmienności  $I_c$  (tj. stosunku między odchyleniem standardowym próbki a wartością oczekiwaną). Aby zaliczyć dany przedział do HSU (jednolitych warstw gruntowych) muszą być spełnione dwa warunki: 1 – rozpiętość ( $B_q$ )  $\leq 0,6$ ; 2 –  $\text{cov}(I_c) \leq 0,05$ . Przyjęto również minimalną miąższość warstwy gruntu równą 0,6 m.

Współczynnik zmienności ( $I_c$ ) liczy się z następującego wzoru:

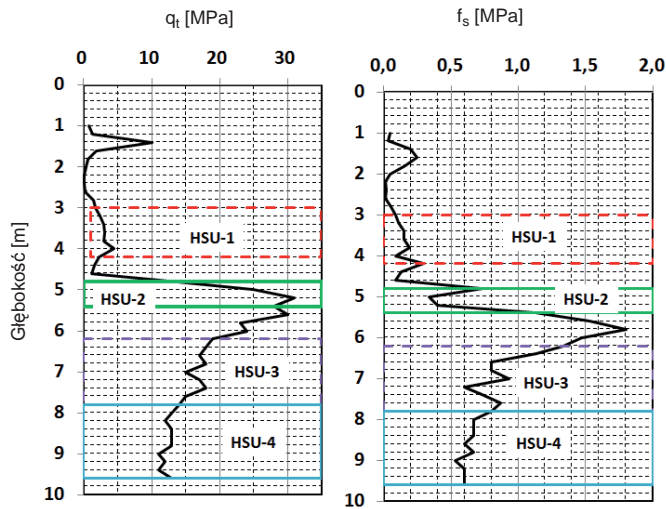
$$\text{cov}(I_c) = \frac{s(I_c)}{m(I_c)} \quad (6)$$

gdzie: standardowe odchylenie  $I_c - s(I_c) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (I_{ci} - m(I_c))^2}$

$$\text{średnia arytmetyczna } I_c - m(I_c) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{ci}$$

Do analizy wykorzystano dane z sondowania CPT1/H (budynek 34). Wyniki obliczeń analizy statystycznej przedstawiono na rysunku 4 i w tabeli 1. Wartość odczytu ( $q_t$ ) przy badaniu CPT została przyjęta jako wartość  $q_c$ , ponieważ niemierzone jest ciśnienie wody w porach. Natomiast wartość  $B_q$  z tego samego powodu jest cały czas stała i równa 0. Wartości  $F_r$ ,  $Q_t$  i  $I_c$  policzone zostały z powyższych wzorów. W ostatniej kolumnie tabeli 1 znajduje się współczynnik zmienności parametru  $I_c$ . Widać z niej, które zbiory wartości  $I_c$  spełniły warunek 2 i zostały oznaczone jako jednolite jednostki stratygraficzne (HSU). Z tego profilu wyróżniono 4 warstwy takich jednostek, które na rysunku 4 zostały wzięte w ramki i nazwane odpowiednio: HSU-1, HSU-2, HSU-3 i HSU-4. Następnie każdą warstwę scharakteryzowano i rozpoznano rodzaj gruntu za pomocą nomogramu Robertsona (1990). Warstwa pierwsza, według nomogramów, były to ły piaszczyste lub pyły ilaste, warstwa druga to piasek lub piasek pylasty, natomiast warstwy 3 i 4 okazały się gruntami drobnoziarnistymi bardzo twardymi.

Na rysunku 4 przedstawiono dwa wykresy parametrów  $q_t$  i  $f_s$ , w zależności od głębokości sondowania. Na wykresy naniesiono dodatkowo jednolite warstwy gruntu (HSU), które zostały policzone z analizy statystycznej. Rysunek 4 przedstawia profile znormalizowanego



Rys. 4. Wykresy  $q_t$  i  $f_s$  sondowania CPT1/H z naniesionymi warstwami HSU

Fig. 4. Profile of  $q_t$  and  $f_s$  from CPT1/H tests with HSU layers

Tabela 1. Zestawienie parametrów jednorodnych warstw gruntu (HSU)

Table 1. List of parameters of homogeneous layers of soil (HSU)

Warstwa gruntu Soil layer	Zakres warstwy Range layer [m]	Wartość średnia Average value								cov
		$w_n$ [%]	$w_L$ [%]	$w_p$ [%]	$I_p$ [%]	$I_c$ [-]	$e$ [-]	$S_r$ [-]	$I_c$	
HSU-1	3,0-4,2	10,9	19,8	10,5	9,3	1,885	0,325	0,89	0,044	
HSU-2	4,8-5,4	9,4	22,1	10,5	11,6	1,256	0,325	0,77	0,044	
HSU-3	6,2-7,8	10,6	22,5	9,5	13,0	1,385	0,325	0,86	0,045	
HSU-4	7,8-9,6	10,6	22,5	9,5	13,0	1,622	0,325	0,86	0,036	



oporu stożka ( $Q_t$ ), znormalizowanego tarcia na tulei ( $F_r$ ) oraz wskaźnik klasyfikacji zachowania gruntu w zależności od głębokości. Na wykresach zaznaczone są warstwy HSU oraz wartości  $F_r$ ,  $Q_t$  i  $I_c$  w zależności od głębokości dla jednej jednolitej jednostki stratygraficznej – HSU-1. W tabeli 1 zestawiono parametry 4 warstw HSU. Pokazano zakres warstw, ich wartości, średnie parametrów oraz współczynnik zmienności parametru  $I_c$ .

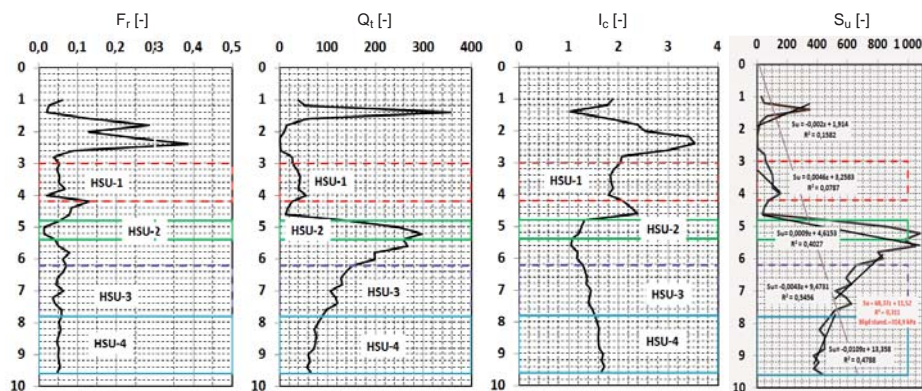
Wartość i zmienność parametrów geotechnicznych są zależne od wielu czynników. Na wytrzymałość na ścinanie bez odpływu mają wpływ takie czynniki, jak: historia naprężenia, stan gruntu czy rodzaj gruntu. W doborze parametrów gruntowych dodatkowym atutem jest korzystanie z analizy statystycznej przy użyciu zmiennych losowych, co zmniejsza jej subiektywność. Statystyka umożliwia rozpoznanie tendencji zachowania się gruntu, linii trendu właściwości geotechnicznych rozpisanych za pomocą zmiennych losowych. Najpowszechniej stosowana jest regresja najmniejszych kwadratów. Głównymi wynikami analizy regresji są parametry regresji – współczynnik determinacji (oznaczony jako kwadrat współczynnika korelacji  $R^2$ ) oraz błąd standardowy (równy odchyleniu standardowemu).

Na rysunku 5 przedstawiono wykres wytrzymałości na ścinanie gruntu w warunkach bez odpływu w zależności od głębokości (zielona linia łamana). Wyróżniono linie trendu parametru  $S_u = \tau_{fu}$  dla poszczególnych warstw gruntu (czarne proste linie), a także dla całości próbki gruntu (pomarańczowa linia prosta). Przy każdej linii znajduje się wzór linii oraz parametry regresji, czyli współczynnik determinacji ( $R^2$ ) i błąd standardowy. Naniesiono również jednorodne jednostki stratygraficzne (HSU).

Analiza statystyczna wyników badań DMT jest podobna do postępowania dla CPT, jednak nie wylicza się wartości  $F_r$  i  $Q_t$ . Jednolite jednostki stratygraficzne wyznacza się na podstawie wskaźnika zachowania gruntu ( $I_c$ ) obliczanego ze wzoru:

$$I_c = 2,5 - 1,5 \log(I_D) \tag{7}$$

gdzie:  $I_D$  – wskaźnik materiałowy.



Rys. 5. Wykresy  $F_r$ ,  $Q_t$  i  $I_c$  sondowania CPT1/H wraz z jednolitymi warstwami gruntu (HSU) oraz linie trendu parametru  $S_u = \tau_{fu}$  całego profilu gruntu oraz poszczególnych warstw  
 Fig. 5. Profile of  $F_r$ ,  $Q_t$  and  $I_c$  from CPT1/H tests with a uniform layer of soil layers (HSU) and trendlines parameter  $S_u = \tau_{fu}$  the soil profile and the individual layers

Aby warstwa gruntu była jednorodna pod względem parametrów geotechnicznych, musi być spełniony następujący warunek:

$$\text{cov}(I_c) \leq 0,05 \quad (8)$$

Współczynnik zmienności  $I_c$  liczy się z następującego wzoru:

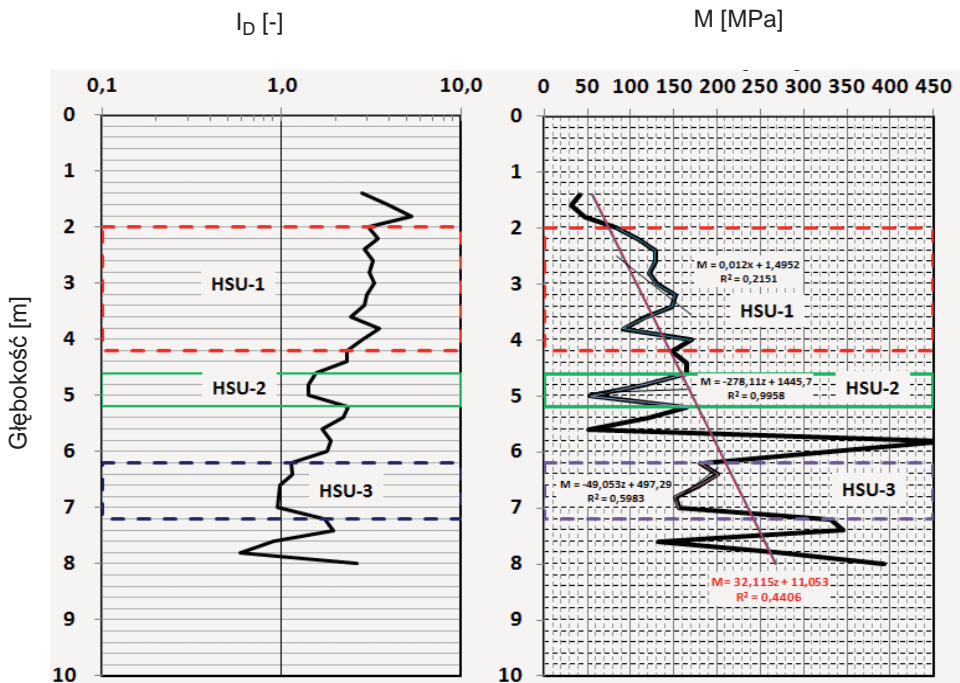
$$\text{cov}(I_c) = \frac{s(I_c)}{m(I_c)} \quad (9)$$

gdzie:

– standardowe odchylenie  $I_c - s(I_c) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (I_{ci} - m(I_c))^2}$

– średnia arytmetyczna  $I_c - m(I_c) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{ci}$

Przyjęto również minimalną miąższość warstwy gruntu równą 0,6 m.



Rys. 6. Wykres wskaźnika materiałowego ( $I_D$ ) profilu DMT4/F z warstwami HSU oraz linie trendu parametru modułu edometrycznego ( $M$ ) całego profilu gruntu oraz poszczególnych warstw

Fig. 6. Profile  $I_D$  material index from DMT4/F tests with layers of HSU and profile of trendlines of constrained modulus parameter  $M$  and the individual layers

Analizę przeprowadzono dla danych z sondowania DMT4/F (parking podziemny SGGW). Na podstawie analizy wyznaczono 3 warstwy jednorodnego gruntu (HSU) i nazwano je HSU-1, HSU-2 i HSU-3. Miąższość warstw to kolejno: 2,2 m (2,0–4,2 m), 0,6 m (4,6–5,2 m) i 1 m (6,2–7,2 m). Wyniki analizy przedstawiono na rysunku 6. Na tym rysunku przedstawiono wykres wskaźnika materiałowego  $I_D$  w zależności od głębokości wraz z naniesionymi warstwami jednorodnymi gruntu HSU wyznaczonymi z analizy statystycznej oraz wykres edometrycznego modułu ścisłości gruntu w zależności od głębokości. Wyróżniono linie trendu parametru  $M$  dla poszczególnych warstw gruntu (czarne proste linie), a także dla całości próbki gruntu (czerwona linia prosta). Przy każdej linii znajdują się wzór linii oraz parametry regresji, czyli współczynnik determinacji  $R^2$  i błąd standardowy. Naniesiono również jednorodne jednostki stratygraficzne (HSU).

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Wyniki z badań geotechnicznych w poszczególnych obiektach SGGW są powtarzalne i są porównywalne z wynikami z pozostałych pól kampusu. Po analizie danych z wszystkich rozpatrywanych obiektów można wyróżnić kilka warstw gruntowych znajdujących się na terenie kampusu SGGW. Pierwszą warstwą jest niemająca żadnych wartości budowlanych warstwa gruntu nasypowego o miąższości dochodzącej do 1 m, która nie jest uwzględniana przy badaniach terenowych. Drugą warstwą są piaski drobne i średnie, które sięgają do 3,0–3,6 m p.p.t. Kolejną warstwą są gliny piaszczyste o miąższości wynoszącej 8–10 m p.p.t. o stanie twaroplastycznym, półzwartym i zwartym. Ostatnią grupę stanowią piaski drobne, których stopień zagęszczenia mieści się w przedziale:  $I_D = 0,8–0,9$ .

W niniejszym artykule przeprowadzono klasyfikację gruntów na podstawie badań geotechnicznych terenowych oraz laboratoryjnych. Do wykonania rozpoznania gruntowego posłużyły wyniki pomiarów CPT i DMT, a także próbek gruntów. Uwzględniono również wyniki badań *in situ* i laboratoryjne. Ze względu na ujednoczenie symboli i opisów gruntów scharakteryzowano wprowadzaną normę PN-EN ISO 14688 oraz porównano ją z aktualnie stosowaną. Dodatkowo wykonano analizę statystyczną wyników badań terenowych.

Po przeprowadzeniu analizy sformułowano następujące wnioski:

1. Badania terenowe CPT i DMT zapewniają prawie ciągły pomiar gruntu i umożliwiają rozpoznanie całego profilu gruntowego. Same badania nie są proste i najtańsze, za to w łatwy i prosty sposób umożliwiają interpretację wyników, dzięki czemu szybko można sklasyfikować badany grunt. Wyniki są powtarzalne oraz zapewniają wyznaczenie większości parametrów geotechnicznych wykorzystywanych w budownictwie. Aby zwiększyć wiarygodność wyników badań terenowych, należy dodatkowo wykonać badania laboratoryjne próbek gruntu.

2. Wprowadzana europejska norma PN-EN ISO 14688 przewiduje nową klasyfikację gruntów. Podstawowymi zmianami są granice frakcji klasyfikacyjnych, symbole oraz liczba gruntów. Zmianie uległ trójkąt Fereta do rozpoznawania rodzaju gruntu, a także zlikwidowano stabelaryzowane przedziały frakcji, umożliwiające szybkie określenie gruntu. Niestety w polskim załączniku normy pojawiło się kilka niejasności, które z pewnością utrudnią korzystanie z norm.

3. Analiza statystyczna wyników badań terenowych zapewnia mniej subiektywne określenie parametrów gruntowych oraz jednorodnych warstw gruntowych. Rozpoznanie rodzaju gruntu nie jest trudne dzięki nomogramom graficznym. Za pomocą parametrów gruntowych, zapisanych jako zmienne losowe, można wykonać linię trendu jednorodności gruntu i innych parametrów geotechnicznych.

## PIŚMIENNICTWO

- Dokumentacja geotechniczna, 2000a. Do projektu budynku nr 15 SGGW (budynek 34). Katedra Geoinżynierii SGGW, Warszawa.
- Dokumentacja geotechniczna, 2000b. Do projektu budynku nr 30 SGGW (budynek 37). Katedra Geoinżynierii SGGW, Warszawa.
- Dokumentacja geotechniczna, 2001. Dla projektowanego parkingu SGGW w Warszawie. Katedra Geoinżynierii SGGW, Warszawa.
- Dokumentacja geotechniczna, 2002. Do projektu rozbudowy Biblioteki Głównej SGGW. Katedra Geoinżynierii SGGW, Warszawa.
- Dokumentacja geotechniczna, 2004. Dla projektowanego przejścia podziemnego. Katedra Geoinżynierii SGGW, Warszawa.
- Dokumentacja geotechniczna, 2004. Do projektu Auli Wielofunkcyjnej SGGW. Katedra Geoinżynierii SGGW, Warszawa, maj.
- Gołębiewska A., Wudzka A., 2006: Nowa klasyfikacja gruntów według PN-EN ISO – Geoinżynieria drogi mosty tunele 4 (11), 44–55.
- ISO 14688-2:2004 Geotechnical investigation and testing – Identification and classification of soil – Part 2: Principles for a classification.
- ISO 14688-1:2002 Geotechnical investigation and testing – Identification and classification of soil – Part 1: Identification and description.
- Marchetti S., Crapps D.K., 1981. Flat dilatometer manual. Internal report of GPE.
- PN-86/B-02480 Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów.
- PN-EN ISO 14688-1 Badania geotechniczne. Oznaczenia i klasyfikacja gruntów. Część 1: Oznaczenia i opis.
- PN-EN ISO 14688-2 Badania geotechniczne. Oznaczenia i klasyfikacja gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania.
- Robertson P., 1990. Soil classification using the cone penetration test. Canadian Geotechnical Journal 27 (1), 151–158.
- Robertson P., Campanella R., Gillespie D., Grieg D., 1986. Use of Piezometer Cone Data. Geotechnical Special Publication 6, 1263–1280.
- Robertson P.K., 2010. Evaluation of flow liquefaction and liquefied strength using the Cone Penetration Test. ASCE, Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering 136, 6, 842–853.

## **SOIL CLASSIFICATION BASED ON CPT AND DMT TEST**

**Abstract.** This paper presents the general principles of soils grouping on the base of geotechnical soundings. The results of the CPT and DMT tests carried out in the campus of Warsaw University of Life Sciences, as well as set individual geotechnical layers were summarized. Based on the results of laboratory test, mainly grain size distribution analysis of soil, types of soils were identified and compared with data from field tests. Also a statistical analysis of data from field tests were carried out. Addition, the differences in the classification according to Polish PN-86/B-02480 and European PN-EN ISO 14688 standards were presented.

**Key words:** soil classifications, field test, CPT/DMT tests, statistical analysis

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 21.12.2012