

## KIERUNKI ROZWOJU I WYKORZYSTANIA BADAŃ *IN-SITU* W GEOTECHNICE – CZĘŚĆ 1

Zbigniew Młynarek, Sławomir Gogolik

Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

**Streszczenie.** W artykule sformułowano tezy, które stanowią podstawę dla kierunków rozwoju badań *in situ* do oceny budowy i właściwości podłoża budowlanego. Omówiono nowe osiągnięcia technologiczne, do których zalicza się system Icone w metodzie statycznego sondowania firmy ap van den Berg z Holandii. Skomentowano konstrukcje, które stanowią hybrydowe układy do wykonywania sondowań statycznych i wierceń badawczych w trudnych warunkach gruntowych oraz hybrydowy model sondy cylindrycznej połączonej z badaniem sejsmicznym. Przedstawiono także nowe konstrukcje do wykonywania badań dylatometrem sejsmicznym na morzu i w strefach przybrzeżnych. W artykule omówiono również niepewność pomiarową w badaniach *in situ* i laboratoryjnych oraz jej wpływ na ocenę parametrów mechanicznych gruntów podłoża.

**Słowa kluczowe:** sondowanie statyczne, badanie dylatometryczne, test replikacyjny

### WSTĘP

Badania *in situ* stanowią współcześnie wiodącą pozycję w programie badań podłoża budowlanego. Robertson [2009] twierdzi, że prawie 90% zadań geotechnicznych można rozwiązać na podstawie wyników badań z metody statycznego sondowania, a szczególnie wtedy, jeśli to badanie uzupełnione jest badaniem dylatometrycznym. Rozwój technik badania podłoża w warunkach *in situ* wytyczają zawsze dwa kierunki badań. Pierwszym z nich jest uzyskanie nowych parametrów, które lepiej opisują i dostarczają dodatkowych informacji o właściwościach mechanicznych podłoża, drugim jest udoskonalenie technik pomiaru i zminimalizowanie niepewności pomiarowej.

Aktualną sytuację badań *in situ* charakteryzuje po pierwsze fakt, że potencjał badań *in situ* jest znaczący. Do dyspozycji geotechnika jest wiele urządzeń, które posiadają mniej lub bardziej zaawansowane podstawy teoretyczne dla interpretacji uzyskanych z tych badań charakterystyk [Młynarek 2007]. Po drugie zaś – z dostępnych urządzeń tyl-

ko niektóre wyznaczają parametry mechaniczne gruntu w bezpośredni sposób. Fakt ten wymusza poszukiwanie tzw. *interrelationships*, stanowiących najczęściej związki empiryczne, na podstawie których wyznacza się inne, niż wyznaczone z danego urządzenia, parametry geotechniczne gruntów.

Inspiracją dla kierunków rozwoju metod *in situ*, oprócz wspomnianych wyżej elementów, mogą być trzy tezy sformułowane przez Jamiolkowskiego [2012], a mianowicie:

- badania podłoża *in situ* i badania laboratoryjne odnoszą się do początkowego stanu fizycznego gruntu oraz do początkowego stanu naprężenia w podłożu przed rozpoczęciem robót fundamentowych, roboty te mogą w istotny sposób zmieniać ten stan,
- dla zwiększenia wiarygodności stosowanych metod obliczeniowych niezbędna jest ich kalibracja poprzez monitoring obiektu,
- w ostatniej dekadzie obserwuje się bardzo znaczący spadek jakości dokumentacji geotechnicznych.

Stwierdzenie przedstawione w punkcie drugim obejmuje także wyznaczenie tzw. wiarygodnego parametru geotechnicznego [Karlsrud i in. 2005]. Stwierdzenie to rekomenduje także bardziej powszechne stosowanie metod zarządzania ryzykiem w projektowaniu geotechnicznym [Van Staaveren 2006, 2008, Młynarek 2009].

Wiele informacji na temat potencjalnych kierunków badań związanych z technikami *in situ* i ich wykorzystaniem można znaleźć w materiałach z ostatnich dwóch ważnych konferencji poświęconych tej tematyce: CPT-10 w Los Angeles (2010) i konferencji ISC-4 w Recife (2012). Prace wygłoszone na tych konferencjach wyeksponowały także problem badania gruntów, które znajdują się między gruntami, gdzie dyssypacja ciśnienia porowego pod obciążeniem odbywa się bardzo szybko (*coarse grained soils* – piaski, żwiry), i gruntami podłoża, w których proces dyssypacji ciśnienia porowego jest procesem długotrwałym (*fine grained soils* – ły) [Lunne i in. 1997, Schnaid 2009]. Grunty te kwalifikuje się współcześnie jako grunty przejściowe [Lunne i in. 1997, Mayne 2006, Robertson 2009]. Do tej grupy zaliczają się osady aluwialne uformowane w postaci pyłów oraz grunty innych formacji geologicznych o uziarnieniu od piasków gliniastych do glin piaszczystych.

W podsumowaniu przedstawionego komentarza kierunki rozwoju badań *in situ* oraz ich wykorzystanie w geotechnice można pogrupować następująco:

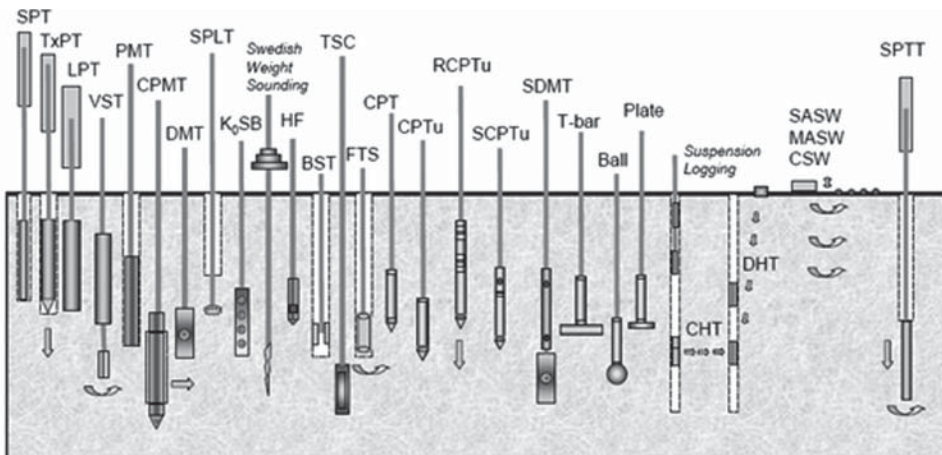
- konstruowanie nowych lub modyfikacja istniejących urządzeń celem wyznaczenia dodatkowych parametrów gruntów w podłożu,
- badania nad ustaleniem czynników wpływających na jakość parametru geotechnicznego z badań *in situ* i ustalenie kryteriów dla zdefiniowania jakości (np. kryteria statystyczne),
- budowanie zależności typu „*interrelationships*” z różnych technik badań *in situ* i tzw. regionalnych zależności korelacyjnych,
- ustalenie procedur dla interpretacji badań CPTU, SCPTU, DMT, SDMT dla gruntów „przejściowych”, organicznych i tzw. gruntów niestandardowych – *nontextbook soils* [Lunne i in. 1997],
- wykorzystanie parametrów z badań *in situ* do wymiarowania fundamentów bezpośrednich i pośrednich oraz innych projektów geotechnicznych,

- wykorzystanie parametrów uzyskanych głównie z badań CPTU i DMT do konstruowania tzw. jednorodnych warstw podłoża, które stanowią podstawę do budowy modelu stratygraficznego podłoża i modelu sztywności podłoża.

Poniżej przedstawiono komentarz do poszczególnych zagadnień, który zawiera najbardziej istotne informacje na ten temat.

## KONSTRUKCJE NOWYCH I MODYFIKACJE URZĄDZEŃ DO BADAŃ *IN-SITU*

Geotechnik dysponuje współcześnie znacznym potencjałem sprzętu do wyznaczania parametrów geotechnicznych gruntów w warunkach *in situ* (rys. 1). Potencjał ten dobrze ilustruje diagram opracowany przez Mayne [2006].



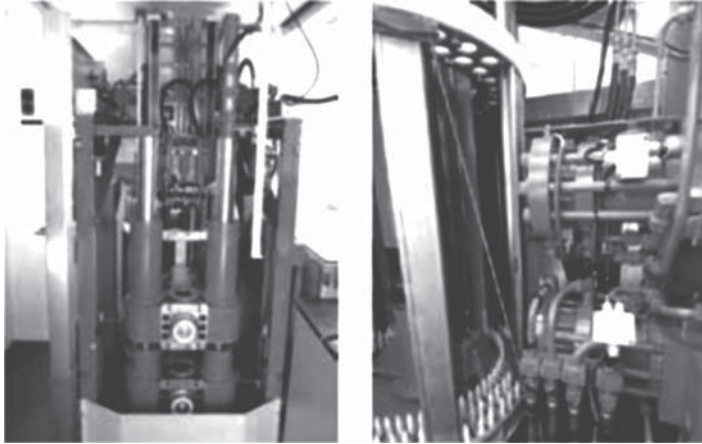
Rys. 1. Dostępne techniki badań terenowych dla oceny parametrów geotechnicznych gruntów [Mayne 2006]

Fig. 1. Available *in-situ* geotechnical tests for determination of soil parameters [Mayne 2006]

Możliwości wykorzystania tego sprzętu do pozyskania odpowiednich parametrów geotechnicznych zostały przedstawione w tabeli opracowanej przez Lunne i innych [1997]. Z rysunku 1 oraz wspomnianej tabeli wynika bardzo istotny wniosek, który wcześniej skomentowano, że tylko niektóre urządzenia pozwalają wprost wyznaczyć parametry geotechniczne gruntów w podłożu. Ten fakt wytycza kierunek rozwoju nowych urządzeń lub ich modyfikacji. Drugi kierunek badań jest związany ze zwiększeniem dokładności pomiaru parametrów w czasie badania i ograniczeniem niepewności pomiarowej. Osiągnięcia tych dwóch kierunków rozwoju technik *in situ* można przedstawić na kilku najbardziej istotnych przykładach.

Za podstawową metodę badań podłoża uważa się w tej chwili metodę statycznego sondowania. Z tego powodu producenci penetrometrów sukcesywnie wprowadzają nowe systemy pomiarowe i usprawnienia techniczne. W tej technice badania osiągnięcia technologiczne są najbardziej spektakularne. Osiągnięcia te można przedstawić na bazie

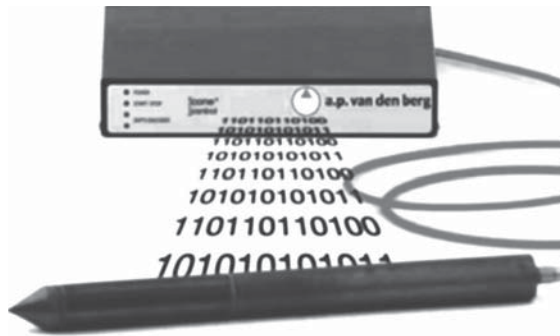
sprzętu oferowanego przez czołowego w świecie producenta sond statycznych – firmę ap van den Berg z Holandii. Firma oferuje bardzo szeroką gamę penetrometrów do badań na lądzie i morzu. Pełną automatyzację badania można uzyskać, stosując do wprowadzania żerdzi w podłoże zestaw typu robot (rys. 2). Ten system wymaga obsługi tylko jednego operatora.



Rys. 2. System automatycznego sondowania – robot firmy ap van den Berg  
Fig. 2. Fully automated Cone Penetration Testing (ap van den Berg)

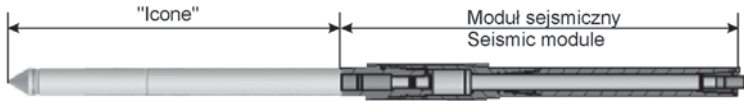
Za znaczące osiągnięcie należy uznać technikę pomiaru w systemie CPTU Icone (rys. 3), gdzie rejestracja parametrów penetracji odbywa się numerycznie. System ten ma następujące zalety:

- stożek Icone jest około 40% silniejszy mechanicznie od stożka analogowego,
- jest bardziej dokładny i wiarygodny w rejestracji parametrów  $q_c$ ,  $f_s$ ,  $U_2$ ,
- sygnał numeryczny nie może być w czasie pomiaru zablokowany, połączenie kabli nie ma wpływu na rejestrację wyników, co ma miejsce w systemie analogowym,
- jest bardzo łatwy w montażu,
- stożek automatycznie przechowuje dane z kalibracji,
- nie ma ograniczeń w liczbie danych przesyłanych do rejestracji.



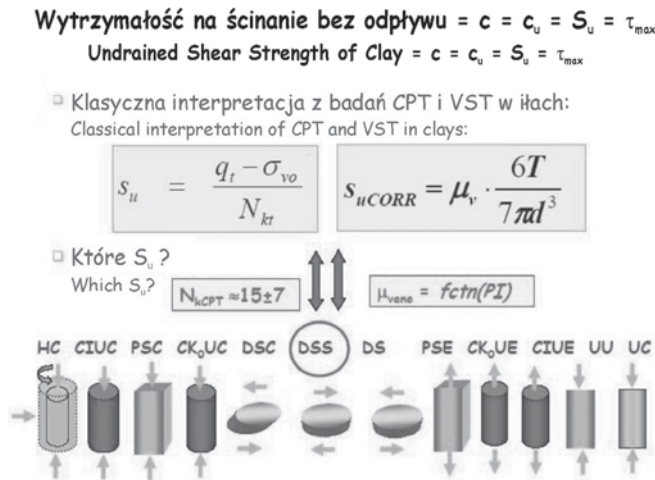
Rys. 3. Stożek cyfrowy typu Icone firmy ap van den Berg  
Fig. 3. Digital cone – Icone (ap van den Berg)

Obecnie największe oczekiwania wiąże się z techniką badań sejsmicznych [Jamiołkowski 2011, 2012]. Z tego powodu producenci sond statycznych, a także dylatometrów opracowują końcówki, które umożliwiają wykonanie standardowego badania CPTU lub DMT i pomiaru sejsmicznego (rys. 4). Badania te umożliwiają wyznaczenie modułu ścinania poprzez bezpośredni pomiar, a także za pomocą funkcji kalibracyjnej – modułu ściśliwości, modułu sprężystości, współczynnika Poissona i porowatości oraz gęstości gruntu. W przypadku nowej konstrukcji stożka Icone wystarczy zestaw penetracyjny tylko uzupełnić modułem sejsmicznym (rys. 4). Zalety tej konstrukcji są następujące: możliwość pomiaru fali sejsmicznej kompresyjnej i ścinającej, bardzo łatwy montaż modułu i przeprowadzenie ciągłego badania dla parametrów  $q_c, f_s, U_2$ .



Rys. 4. Stożek Icone połączony z modułem sejsmicznym firmy ap van den Berg  
Fig. 4. Digital cone with seismic module (ap van den Berg)

Jednym z głównych celów badania CPTU jest wyznaczenie wytrzymałości na ścinanie bez odpływu dla gruntów spoistych [Lunne i in. 1997, Młynarek 2007, Robertson 2009]. Problemem w wyznaczaniu tego wytrzymałościowego parametru jest odniesienie uzyskanego parametru z badania CPTU do stanu naprężenia i odkształcenia, w jakim ta wytrzymałość jest wyznaczona i zdefiniowana (rys. 5).

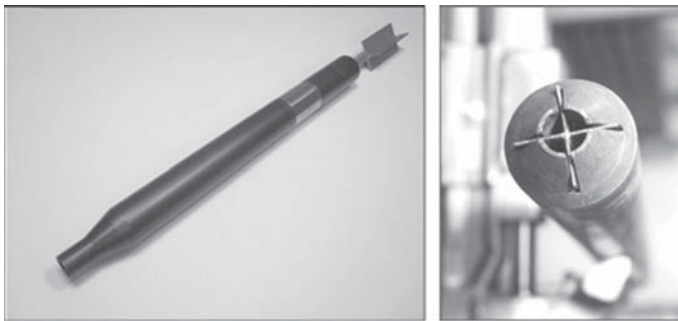


Rys. 5. Dylemat w przyjęciu modelu badania laboratoryjnego dla określenia współczynnika  $N_{kt}$  przy wyznaczeniu wytrzymałości na ścinanie bez odpływu z badania CPTU i VT [Mayne 2006]  
 Fig. 5. Dilemma in matching laboratory benchmark mode for undrained shear strength ( $S_u$ ) with in-situ CPT and VST tests [Mayne 2006]

Najczęściej wytrzymałość na ścinanie wyznaczona z badania CPTU odnosi się do wytrzymałości z badania sondą obrotową VT [Lunne i in. 1997]. Ze względu na znaczną liczbę zmiennych, które mają wpływ na wyniki obydwu badań [Młynarek 2007], najko-

rzystniej jest, aby przeprowadzić obydwie badania na tym samym poziomie naprężeń geostatycznych. Tego typu propozycję konstrukcji *cone-vane* przedstawił Młynarek [1987]. W tej chwili ten w pewnym sensie unikalny system pomiarowy jest w ofercie firmy ap van den Berg (rys. 6). Zalety tego systemu są następujące:

- czujniki pomiaru momentu ścinającego oraz prędkości ścinania położone są bezpośrednio nad końcówką (krzyżakiem),
- żerdzie i końcówka są zabezpieczone tuleją,
- nie jest konieczne przygotowanie końcówki do badania na powierzchni terenu, jeśli zamierza się wykonać głębokie badanie,
- badanie ścinania może być wykonane przy różnych prędkościach: 0,1°, 0,2°, 6° i 12° na sekundę.
- w celu zabezpieczenia urządzenia, jeśli występują duże momenty obrotowe, to system elektroniczny wyłącza się automatycznie,
- urządzenie może być stosowane w badaniu na lądzie i morzu do głębokości wody –3000 m,
- dostępne są różne wymiarowo końcówki.



Rys. 6. Sonda obrotowa z cyfrową rejestracją danych – Icone Vane firmy ap van den Berg

Fig. 6. Vane tester with digital data processing – Icone Vane (ap van den Berg)

W badaniach środowiskowych często wykorzystuje się końcówki, tzw. *conductivity* lub *envirocone*, które montowane są na penetrometrach. W tych końcówkach, w porównaniu z okresem ich powstania (lata osiemdziesiąte ubiegłego stulecia), zwiększono zakres pomiarów, a przede wszystkim ulepszono system rejestracji danych. Przykładem takiej końcówki jest stożek firmy ap van den Berg (rys. 7). Za pomocą tego stożka można zidentyfikować zasolenie warstw gruntów lub inne zanieczyszczenia, a także szacunkowo wyznaczyć ciężar objętościowy lub porowatość gruntu. Za interesującą końcówkę należy uznać „magneto-modules” (rys. 8). Końcówka ta za pomocą 3-wymiarowego pola magnetycznego umożliwi określenie położenia i głębokości ścianki szczelnej w podłożu oraz pali fundamentowych w odległości 1,5 m od stożka.

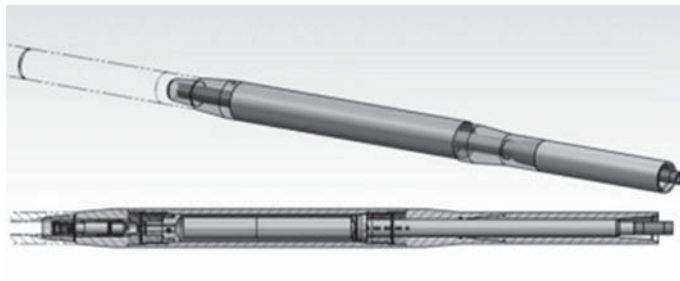
Za znaczące osiągnięcie ostatnich lat należy uznać konstrukcję urządzeń, które pozwalają przeprowadzić badania *in situ* w trudnych warunkach geotechnicznych. Ta sytuacja stanowiła wyzwanie dla skonstruowania urządzeń, które reprezentują systemy hybrydowe, na przykład połączenie badania CPTU z wierceniem czy badania CPTU z sondowaniem dynamicznym. Przykładem tego typu konstrukcji jest system CPTWD, którym jest





Rys. 7. Stożki do badań środowiskowych – *conductivitycone* (góra), *envirocone* (dół) – ap van den Berg

Fig. 7. Cones for environmental analysis – *conductivitycone* (top), *envirocone* (down) – ap van den Berg



Rys. 8. Stożek CPTU z modulem pomiaru 3-wymiarowego pola magnetycznego – ap van den Berg

Fig. 8. CPTU cone with 3-dimensional detection of the magnetic field – ap van den Berg

hybrydowy układ sondowania statycznego CPT i systemu wiertniczego (rys. 9). Badania tym systemem zostały z sukcesem przeprowadzone na barce w bardzo sztywnym podłożu sklasyfikowanym jako „nienadające się do penetracji” [Sacchetto i Trevisan 2012].



Rys. 9. System CPTWD zainstalowany na barce [Sacchetto i Trevisan 2012]

Fig. 9. CPTWD mounted on a barge [Sacchetto and Trevisan 2012]

Do oryginalnych osiągnięć zalicza się również wykonanie badań dna nadbrzeża portowego w porcie Genova (Włochy) za pomocą dylatometru sejsmicznego (SDMT) [Cavallaro i in. 2012] – rysunek 10.



Rys. 10. Badania SDMT w porcie Genova (Włochy) [Cavallaro i in. 2012]

Fig. 10. Seismic dilatometer tests carried out in the Genova harbor [Cavallaro et al. 2012]

Nilsson i Löfroth [2012] przedstawili urządzenie do przeprowadzania badań w osadach, w których dominującymi gruntami były pospółki, żwiry oraz silnie zagęszczone pyły. System nazwany *soil-rock total sounding CPTU* jest skutecznym sposobem wykonania badania w bardzo trudnych warunkach gruntowych (rys. 11).

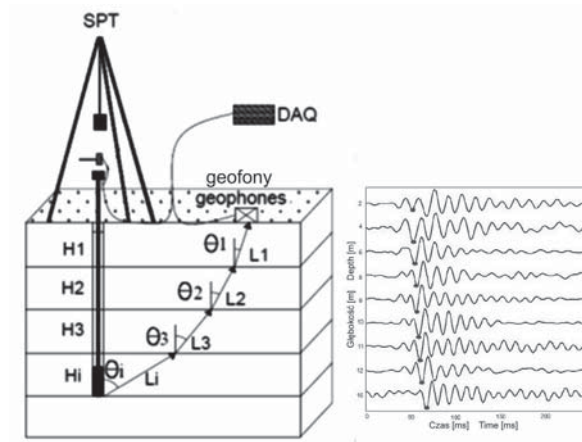


Rys. 11. System *soil-rock total sounding CPTU* [Nilsson i Löfroth 2012]

Fig. 11. Soil-rock total sounding method [Nilsson and Löfroth 2012]

Badanie sondą cylindryczną posiada duże predyspozycje do wykonywania testu sejsmicznego. Oryginalne rozwiązanie zaproponowali Pedrini i Giacheti [2012], w którym fala sejsmiczna jest rejestrowana na powierzchni terenu za pomocą systemu DAQ (rys. 12).





Rys. 12. Schemat badania sejsmicznego z wykorzystaniem sondy cylindrycznej [Pedrini i Giachetti 2012]

Fig. 12. Schema of an S-SPT test [Pedrini and Giachetti 2012]

Do grona oryginalnych rozwiązań, które pozwalają przeprowadzić badanie penetracyjne w żwirach i pospółkach, należy zaliczyć sondę statyczno-dynamiczną firmy Andina [Sanglerat 1972]. Penetracja w silnie zagęszczonych piaskach i żwirach odbywa się w pierwszym etapie za pomocą stożka o większej średnicy metodą dynamicznego sondowania, a w strefie słabych gruntów – stożkiem o mniejszej średnicy metodą CPT (rys. 13).



Rys. 13. Sonda statyczno-dynamiczna firmy Andina [Sanglerat 1972]

Fig. 13. Static-dynamic penetrometer – Andina [Sanglerat 1972]

## BADANIA NAD USTALENIEM CZYNNIKÓW WPŁYWAJĄCYCH NA JAKOŚĆ PARAMETRU GEOTECHNICZNEGO

Na jakość dokumentacji geotechnicznej, względnie obniżenie jej jakości, co zaakcentował Jamiolkowski [2012], mają wpływ dwa czynniki: niepewność pomiarowa związana z wyznaczeniem parametrów geotechnicznych w warunkach *in situ* i w badaniu laboratoryjnym oraz poziom interpretacji wyników badań *in situ*.

Zagadnienie oceny niepewności pomiarowej, o czym wcześniej wspomniano, kwalifikuje się współcześnie do najważniejszych problemów badawczych. Niepewność pomiarowa związana jest z dwoma czynnikami: naturalną losowością właściwości gruntu, który występuje w podłożu, oraz niepewnością, która występuje w procesie badania terenowego lub laboratoryjnego.

Badania nad losowością parametru geotechnicznego, które jest wynikiem naturalnej zmienności właściwości gruntów, prowadzono już w latach sześćdziesiątych ubiegłego stulecia [np. Schultze 1967]. Tematyka ta dość często pojawiała się także na licznych międzynarodowych konferencjach (np. Application of Statistics and Probability in Civil Engineering). Identyfikacja niepewności pomiarowej, która łączy się z procesem badania, stanowiła tematykę badań w latach osiemdziesiątych ubiegłego stulecia, ale dynamicznie rozwinęła się po 2000 roku [np. Lumb 1974, Młynarek 2010]. Kluczowym problemem dla obydwu kwestii jest to, że nie można rozdzielić losowości parametru geotechnicznego, która łączy się z naturalną zmiennością właściwości gruntów, od precyzji badania [Lacasse i Nadim 1994]. Wpływ niepewności pomiarowej na losowość parametru geotechnicznego wyznacza się poprzez test replikacyjny i przyjęcie miar dla precyzji badania.

Zasadniczy wpływ na jakość dokumentacji geotechnicznej ma drugi ważny element, tj. poziom interpretacji wyników badań *in situ*. W tym kontekście warto przytoczyć dwa kluczowe stwierdzenia sformułowane przez Jamiolkowskiego [2011]:

- interpretacja powinna opierać się na fizycznym zrozumieniu analizowanych właściwości gruntów, w odniesieniu do wyników badań *in situ*,
- interpretacja powinna być wyrażona w bezwymiarowych zmiennych (*non-dimensional products*) [Langhaar 1964], zaletą tej interpretacji jest uwzględnienie efektu skali w mechanice ośrodków ciągłych.

Bezwymiarowe produkty pozwalają wprowadzić do rozwiązań efekt podobieństwa kinematycznego i geometrycznego [Młynarek 2007]. Tego typu podejście jest już powszechnie stosowane w badaniu statycznego sondowania [Robertson 2009].

Punktem wyjścia dla identyfikacji niepewności pomiarowej oraz przeprowadzenia interpretacji według rekomendacji Jamiolkowskiego jest utworzenie funkcji, która opisuje proces badania *in situ*. Funkcja, względnie funkcjonal, pozwala bowiem zidentyfikować zmienne, które mogą mieć wpływ na mierzone parametry w procesie badania. Dla trzech podstawowych badań *in situ*, tj. metody statycznego sondowania CPTU, badania dylatometrycznego DMT i badania sondą obrotową VT, funkcjonały te przedstawiają się następująco:

1. Badanie CPTU [Młynarek 1978, 2007]

$$F(P, v_p, \theta_1, \theta_2) = 0 \quad (1)$$

gdzie:  $P$  – mierzony parametr procesu (np.  $q_c, u_2$ ),

$v_p$  – prędkość penetracji,

$\theta_1$  – cechy ośrodka gruntowego,

$\theta_2$  – cechy stożka

Parametr  $\theta_1$  jest funkcją wielu zmiennych niezależnych, które opisują ośrodek gruntowy:

$$\theta_1 = f(x_1, \dots, x_{10}) \quad (2)$$

gdzie:  $x_1$  – zawartość frakcji ilastej w gruncie,  
 $x_2$  – zawartość frakcji pylastej w gruncie,  
 $x_3$  – zawartość frakcji piasków w gruncie,  
 $x_4$  – gęstość,  
 $x_5$  – współczynnik lepkości,  
 $x_6$  – kąt tarcia wewnętrznego,  
 $x_7$  – spójność lub ekwiwalentny parametr według przyjętej koncepcji opisu wytrzymałości na ścinanie,  
 $x_8$  – struktura gruntu,  
 $x_9$  – moduł odkształcenia.

Parametr  $\theta_2$  jest zapisany funkcją:

$$\theta_2 = f(x_1^c, \dots, x_{10}^c) \quad (3)$$

gdzie:  $x_1^c$  – zmienna opisująca geometrię stożka (np.  $h$  – wysokość,  $d$  – średnica),  
 $x_2^c$  – szorstkość materiału stożka,  
 $x_3^c$  – moduł odkształcenia materiału stożka.

## 2. Badanie DMT [Młynarek i in. 2008]

$$F(P_d, V_d, \theta_1, \theta_2) = 0 \quad (4)$$

gdzie:  $P_d$  – mierzony parametr procesu (np. ciśnienie  $p_0$ ,  $p_1$  lub  $(p_0 - p_1)$ ),  
 $V_d$  – prędkość zadanego ciśnienia na membranę łopatkę dylatometru,  
 $\theta_1$  – zmienna zapisana funkcją, która określa zmienne niezależne związane z łopatką dylatometru,  
 $\theta_2$  – określa zmienne losowe związane z ośrodkiem gruntowym, opisane równaniem (3);

$$\theta_1 = x(x_1^d, x_2^d, x_3^d) \quad (5)$$

gdzie:  $x_1^d$  – zmienna opisująca geometrię membrany (np. średnica),  
 $x_2^d$  – sztywność membrany,  
 $x_3^d$  – szorstkość membrany.

W przypadku badania gruntów organicznych zmienne w równaniu (3) należy uzupełnić o zawartość części organicznych, stopień rozkładu i zawartość węglanów [Młynarek i in. 2008].

## 3. Badanie VT [Stroganov 1967]

$$n = \frac{2\alpha}{r \cdot t} = (\sigma_h + \sigma_n) \operatorname{tg} \varphi - \tau_n \left( \frac{D}{r} \right)^2 \quad (6)$$

gdzie:  $\alpha$  – kąt obrotu końcówki,  
 $\eta$  – współczynnik lepkości gruntu,  
 $\tau_n$  – mierzone naprężenie ścinające na powierzchni cylindrycznej wokół końcówki,  
 $\sigma_n$  – naprężenie normalne do powierzchni cylindra,  
 $\sigma_h$  – naprężenie hydrostatyczne równe spójności gruntu,

- $t$  – czas lub prędkość ścięć,  
 $r$  – promień strefy uplastycznionej,  
 $D$  – promień odpowiadający szerokości końcówki

Dla współcześnie bardzo ważnych i często wykorzystywanych badań SCPTU i SDMT funkcję, która zapisuje związek między modułem ścinania ( $G_0$ ) i zmiennymi losowymi wpływającymi na ten parametr, podał Hardin [1978].

$$G/G_0 = f(\sigma'_{v0}, e_0, OCR, S_r, C, K, T) \quad (7)$$

gdzie:  $\sigma'_{v0}$  – efektywna pionowa składowa naprężenia geostatycznego,  
 $e_0$  – początkowy wskaźnik porowatości,  
 $OCR$  – współczynnik prekonsolidacji,  
 $S_r$  – stopień nasycenia,  
 $C$  – parametr charakteryzujący uziarnienie,  
 $K$  – struktura,  $T$  – temperatura.

Ogólne rozwiązania równań (1), (4), (7) i (8) nie są znane. Dla poszczególnych metod zostały jednak wyznaczone mniej lub bardziej rozwinięte równania cząstkowe – szczególnie. W przypadku metody CPTU są to rozwiązania z metody stanów granicznych, teorii *expansion of cavity* i innych (np. Durgunoglu i Mitchell 1973, Lunne i in. 1997, Mayne 2006, Młynarek 2007). W przypadku metody DMT znaczna liczba parametrów została uwzględniona poprzez współczynniki podane przez Marchettiego dla poszczególnych grup gruntów [Marchetti 1980, 1992]. Dla modułu ścinania ( $G_0$ ) można przytoczyć cząstkowe rozwiązanie podane przez:

– Hardina [1978]

$$G_0 = C \cdot f(e) \cdot \sigma_c'^n \cdot \sigma_r'^{(1-n)} \cdot OCR^k \quad (8)$$

gdzie:  $C$  – stała empiryczna,  
 $f(e)$  – funkcja wskaźnika porowatości,  
 $\sigma_c'$  – efektywne naprężenie graniczne,  
 $\sigma_r'$  – naprężenie odniesienia,  
 $OCR$  – współczynnik prekonsolidacji,  
 $n$  i  $k$  – współczynniki zależne od rodzaju gruntu,

– Jamiolkowskiego i innych [2012]

$$G_0 = 480e^{(-1,43)} \sigma_{v0}'^{0,22} \sigma_{h0}'^{0,22} p_a^{(1-0,44)} \quad (9)$$

gdzie:  $e$  – wskaźnik porowatości,  
 $p_a$  – ciśnienie atmosferyczne,  
 $\sigma_{h0}'$  – składowa pozioma naprężeń efektywnych,  
 $\sigma_{v0}'$  – składowa pionowa naprężeń efektywnych.

Dla oceny niepewności pomiarowej równania (1), (4), (7) i (8) mają istotne znaczenie. Test replikacyjny należałoby przeprowadzić w podłożu, w którym zmienne zawarte w równaniu (3), związane z ośrodkiem gruntowym, utrzymane są na stałym poziomie

(np. wartości średnich), wówczas mierzony parametr w czasie badania będzie uzależniony tylko od składowych naprężenia geostatycznego:  $\sigma'_{v0}$ ,  $\sigma'_{p0}$  lub  $\sigma'_0$  (średnie naprężenie geostatyczne). Związek między mierzonym parametrem a naprężeniem geostatycznym nazywany jest trendem [Lee 1974, Młynarek i in. 1983]. Danych na temat oceny niepewności pomiarowej z badań *in situ* jest niewiele. Należy także zaznaczyć, że jedynie dla metody CPTU została przygotowana przez Komitet Techniczny TC-16 (obecnie TC-102) ISSMGE instrukcja, która definiuje klasyfikację penetrometru i wymagania ich kalibracji (International Reference Test Procedure for Cone Penetration Test – CPT, and Cone Penetration Test with Pore Pressure Measurement – CPTU).

Podstawy teoretyczne interpretacji testu replikacyjnego podał Lumb [1974]. Jeśli test wykonany jest przez jednego operatora na jednym urządzeniu, to dla  $i$ -tej replikacji testowany parametr  $x_i$ , mierzonego w badaniu np. CPTU lub DMT, może być zapisany jako:

$$x_i = \alpha \cdot \xi + \beta + \delta_i \quad (10)$$

gdzie  $\delta_i$  jest zmienną losową o średniej zero i wariancji  $V(\delta_i)$ . Wartość oczekiwaną dla dużej liczby testów określa zależność:

$$E(x) = \alpha \cdot \xi + \beta \quad (11)$$

gdzie:  $\alpha$  i  $\beta$  wyznaczają poziom lub brak dokładności, a  $V(\delta_i)$  oznacza poziom precyzji, im większa wariancja tym mniejsza precyzja.

Jeśli test replikacyjny wykonany jest przez  $p$ -operatorów na  $q$ -penetrometrach lub innych urządzeniach, to  $k$ -ty test replikacyjny wykonany przez  $j$ -tego operatora na tym urządzeniu opisuje zależność:

$$x_{ijk} = \xi + \alpha_i + \beta_j + \gamma_{ij} + \delta_{ijk} \quad (12)$$

dla  $i$  od 1 do  $q$ ;  $j$  od 1 do  $p$ ;  $k$  od 1 do  $n$ ,

gdzie:  $\alpha_i$  – efekt penetrometru z  $E(\alpha_i) = 0$ ,

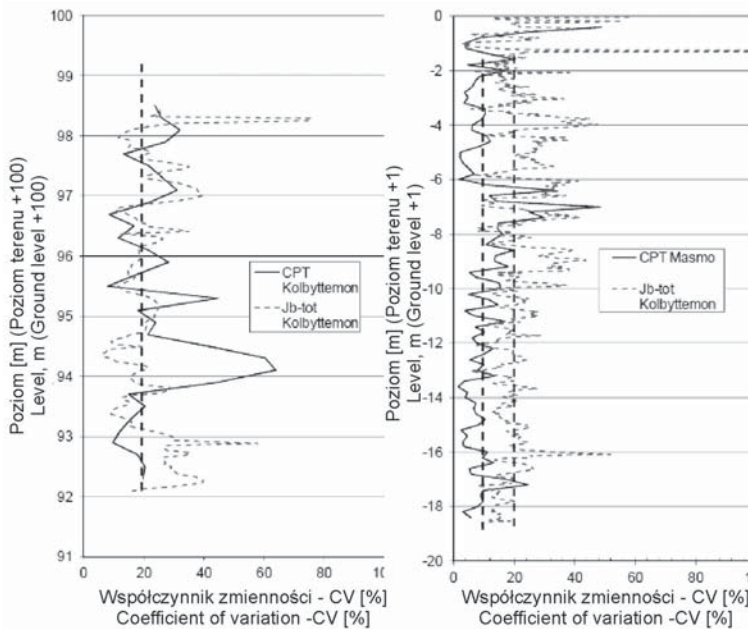
$\beta_j$  – efekt operatora  $E(\beta_j) = 0$ ,

$\gamma_{ij}$  – interakcja między operatorem i penetrometrem  $E(\gamma_{ij}) = 0$ ,

$\delta_{ijk}$  – zmienność losowa o średniej zero i wariancji  $V(\delta_{ijk})$ .

Poniżej przedstawiono kilka przykładów na testy replikacyjne wykonane przez kilku operatorów. Nilsson i Löfroth [2012] przeprowadzili testy replikacyjne w podłożu zbudowanym z warstwy pyłu i piasków pylastych wspomnianym wcześniej urządzeniem Soil-Rock Total Sounding. Z rysunku 14 można zauważyć, że fluktuacja współczynnika zmienności dla oporu stożka z głębokością jest silnie związana z makrostrukturą osadów. Wartość współczynnika zmienności średnio na poziomie 20% dowodzi o zadowalającej precyzji badania CPT, nawet w tak trudnych warunkach gruntowych.

Bardzo interesujące wyniki z testów replikacyjnych z badania SDMT, które wykonano jednym dylatometrem przez jednego operatora, przedstawił Galas [2013]. Uzyskane średnie wartości współczynnika zmienności dla pomiaru  $p_0$  w przedziale 9–14%, dla pomiaru  $p_1$  w przedziale 11–15% i prędkości fali ścinającej w przedziale 5–17% dowodzą dużej precyzji tego badania. Tego typu poziom precyzji został także udokumentowany w badaniach osadów poflotacyjnych metodą SDMT [Gogolik 2006].



Rys. 14. Współczynniki zmienności (CV) oporów stożka dla badania CPTU na lokalizacjach w Kolbytteimon (lewy) i Masmø (prawy) [Nilsson i Löfroth 2012]

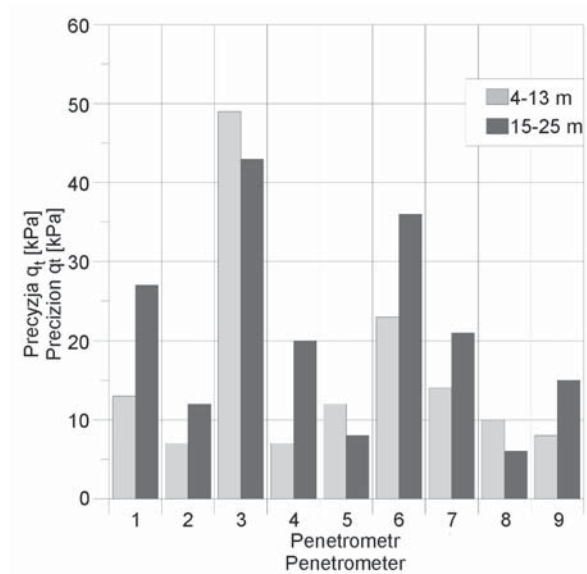
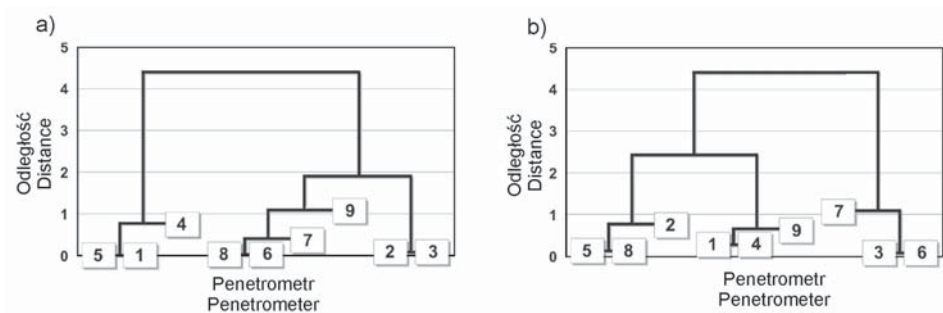
Fig. 14. Coefficient of variation (CV) of cone resistance for Kolbytteimon (left) and Masmø (right) [Nilsson and Löfroth 2012]

Test replikacyjny dla oceny jakości 9 penetrometrów wyprodukowanych przez renomowanych producentów został przeprowadzony na polietku doświadczalnym koło Oslo. W podłożu na tym obiekcie występują normalnie konsolidowane „iły z Onsøy”. Jednorodność parametrów fizycznych i mechanicznych iłów była przedmiotem licznych badań Norweskiego Instytutu Geotechnicznego [Lunne i in. 2003]. Na rysunku 15 pokazano precyzję oceny oporu stożka netto ( $q_t$ ) dla poszczególnych penetrometrów w dwóch przedziałach głębokości – od 4–13 m i od 15–25 m [Młynarek i in. 2013]. Na rysunku 15 można zauważyć bardzo duże zróżnicowanie w jakości pomiaru  $q_t$  przez poszczególne penetrometry, przy czym niektóre z nich wykazywały błąd systematyczny w pomiarze.

Metodą Warda pogrupowano penetrometry rejestrujące statystycznie podobne wartości  $q_t$  (rys. 16a) oraz wartości tarcia na tulei czarnej ( $f_s$ ) (rys. 16b). Znaczące różnice w rejestrowanych wartościach  $q_t$  i  $f_s$  doprowadziły do różnic na poziomie 47% w ocenie wytrzymałości na ścinanie bez odplywu łu z Onsøy (rys. 17a) i modułu ściśliwości (rys. 17b).

Z analizy tej wynikają dwa bardzo istotne praktycznie wnioski. Pierwszy z nich jest taki, że polskie firmy kupują penetrometry różnych producentów. Penetrometry te powinny być bezwzględnie skalibrowane. Stosowanie do interpretacji przypadkowych programów, bez stosowania procedur filtracji mierzonych parametrów i zweryfikowania formuł empirycznych poprzez badania laboratoryjne, może prowadzić do znacznego błędu w ocenie parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych gruntów podłoża. Drugi wniosek mówi, że o wykorzystaniu danych z penetrometru do oceny stratygrafii podłoża lub wyznaczeniu parametrów mechanicznych gruntów decyduje klasyfikacja penetrometru. Fakt ten jednoznacznie rozstrzyga instrukcja Komitetu TC-16 ISSMGE.



Rys. 15. Precyzja pomiaru oporu stożka ( $q_t$ ) w różnych penetrometrach [Młynarek i in. 2013]Fig. 15. Precision of cone resistance ( $q_t$ ) measurement for different CPTU penetrometers [Młynarek et al. 2013]Rys. 16. Grupowanie penetrometrów metodą Warda: a – dendrogram  $q_t$ , b – dendrogram  $f_s$  [Młynarek i in. 2013]Fig. 16. Grouping of the penetrometers based on Ward's method: a – dendrogram  $q_t$ , b – dendrogram  $f_s$  [Młynarek et al. 2013]

Niepewność pomiarowa z badań laboratoryjnych związana jest głównie z jakością próbek pobranych z podłoża. Do oceny jakości próbek wykorzystuje się najczęściej dwa kryteria:

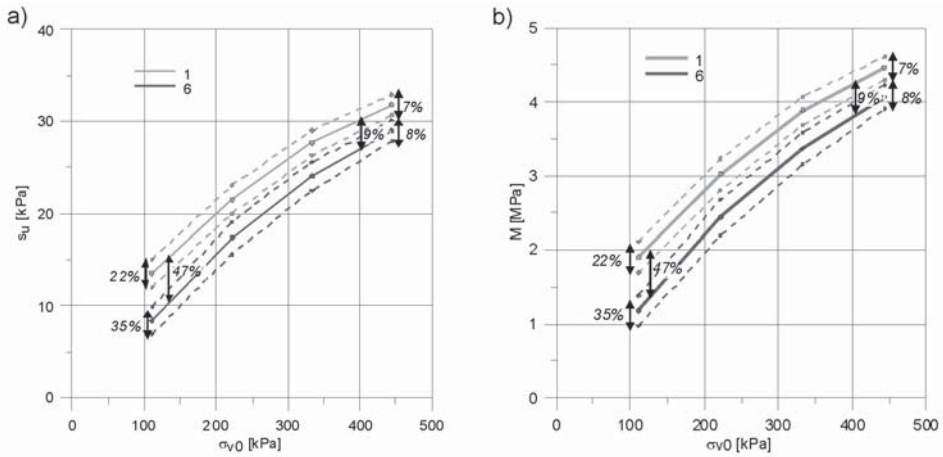
- wyznaczenie wskaźnika  $\Delta e/e_0$ , który określa redukcję wskaźnika porowatości podczas jednoosiowej rekonsolidacji próbki o nienaruszonej strukturze, w stosunku do efektywnego naprężenia geostatycznego ( $\sigma'_{v0}$ ) w warunkach *in situ* w poziomie, z którego pobrana została próbka gruntu [Lunne i in. 2005],
- wykorzystanie prędkości fali ścinającej ( $V_s$ ) w badaniu *in situ* i laboratoryjnym [Jamiołkowski 2012] i zastosowanie formuły

$$V_s^{(L)} = V_s^{(F)} \cdot \left( \frac{2 \cdot Pa}{\sigma'_{v0} + \sigma'_{h0}} \right) \quad (13)$$

gdzie:  $Pa$  – naprężenie referencyjne,  $Pa = 98$  kPa,

$V_s^{(L)}$  – prędkość fali ścinającej zmierzona w laboratorium,

$V_s^{(F)}$  – prędkość fali ścinającej zmierzona w warunkach *in situ*.



Rys. 17. Różnice w oszacowaniu wytrzymałości: a – na ścinanie bez odpływu ( $S_u$ ), b – modułu ściśliwości ( $M$ ) z dwóch penetrometrów [Młynarek i in. 2013]

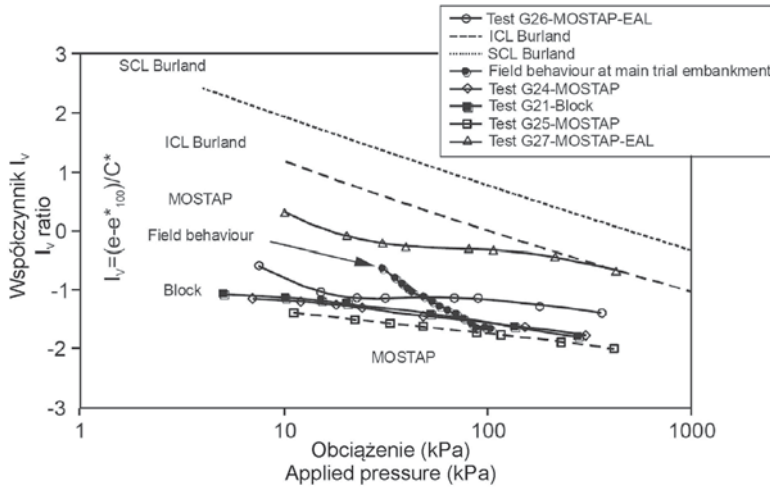
Fig. 17. Differences in estimation of: a – undrained shear strength ( $S_u$ ), b – and constrained modulus ( $M$ ) for two penetrometers [Młynarek et al. 2013]

Im bliższa jedności jest wartość  $V_s^{(L)}/V_s^{(F)}$ , tym wyższa jest jakość próbki o nienaruszonej strukturze.

W tabeli 1 podano ocenę jakości próbek według kryterium Norweskiego Instytutu Geotechnicznego, natomiast na rysunku 18 przedstawiono przykład wpływu jakości próbki na charakterystykę ściśliwości [Long 2002].

Tabela 2. Kryteria oceny jakości próbek według Norweskiego Instytutu Geotechnicznego  
Table 2. NGI's criteria for sample quality

Kryteria oceny jakości próbek – Criteria for sample quality				
OCR	$\Delta e/e_0$			
	bardzo dobre very good to excellent	dobrze do słabe good to fair	słabe poor	bardzo słabe very poor
1-2	< 0,04	0,04–0,07	0,07–0,14	> 0,14
2-4	< 0,03	0,03–0,05	0,05–0,10	> 0,10



Rys. 18. Zależność między obciążeniem i współczynnikiem  $I_V$  dla próbek szarego organicznego iłu z Athlone [Long 2002]

Fig. 18. Relationships between applied pressure and  $I_V$  ratio in Athlone grey organic clay [Long 2002]

## PIŚMIENNICTWO

- Cavallaro A., Grasso S., Maugeri M., Motta E., 2012. Site characterization by in situ and laboratory tests of the sea bed in the Genova Harbour (Italy). Proc. of 4th International Conference on Site Characterization, ISC-4, Recife.
- Durgunoglu H.T., Mitchell J.K., 1973. Static penetration resistance of soils. Geotechnical Engineering University of California, Berkley.
- Galas P., 2013. Wyznaczanie wytrzymałości na ścinanie gruntów spoistych na podstawie badań dylatometrycznych SDMT. Praca doktorska. SGGW, Warszawa.
- Gogolik S., 2006. Wytrzymałość na ścinanie osadów poflotacyjnych określona metodą sondowania statycznego typu CPTU ze stożkiem sejsmicznym. Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu, Rozprawy Naukowe AR Poznań.
- Hardin B.O., 1978. The nature of stress-strain behavior for soils. Proc. ASCE Geotechnical Div. Specialty Conf. on Earthquake Eng. and Soil Dynamics, Pasadena 1, 3–90.
- Jamiolkowski M., 2011. Trevi Group Seminar Foundation Engineering and Soil Improvement, Warsaw.
- Jamiolkowski M., 2012. Role of geophysical testing in geotechnical site characterization. Soils and Rocks International Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 2, 2, May – August.
- Karlsrud K., Lunne T., Kort D.A., Strandvik S., 2005. CPTU correlations for clays. Proc. of 16th ICSSMGE, Osaka, Millpress, Rotterdam, 693–702.
- Lacasse S., Nadim F., 1994. Reliability issues and future challenges in geotechnical engineering for offshore structures. Proceedings of the 7th International Conference “Behavior of offshore structures”. Boss94, Cambridge Massa.
- Langhaar H., 1964. Dimensional analysis and theory of models. John Wiley & Sons, London.
- Long M., 2002. The Quality of Continuous Soil Samples. Geotechnical Testing Journal 25, 3, 1–18.

- Lumb P., 1974. Application of Statistics in Soil Mechanics. In: J.K. Lee (ed.) Soil Mechanics – New Horizons. Newnes-Butterwords, London, 44–112.
- Lunne T., Robertson P.K., Powell J.J.M., 1997. Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice. Blackie Academic EF Spon/Routledge Publishers, New York.
- Lunne T., Long M., Forsberg C.F., 2003. Characterization and engineering properties of Onsrøy clay. Proc. International Workshop on Characterization and Engineering Properties of Natural Soils (Natural Soils 2002) NUS Singapore 1, 395–428.
- Lunne T., Berre T., Andersen K.H., Strandvik S., Sjørsen M., 2005. Effects of sample disturbance and consolidation procedures on measured shear strength of soft marine Norwegian clays. Canadian Geotechnical Journal
- Marchetti S., 1980. In Situ Tests by Flat Dilatometer. Journal of the Geotechnical Division, ASCE 107, GT6.
- Marchetti S., 1992. The flat dilatometer test. Department of Transportation. Publication FHWA-SA-91-044.
- Mayne P.W., 2006. In-situ test calibration for evaluating soil parameters. In-situ testing. Singapore Workshop, Singapore.
- Młynarek Z., 1978. Czynniki wpływające na opór stożka podczas statycznego sondowania gruntów spoistych. Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu, Rozprawy Naukowe. AR Poznań.
- Młynarek Z., 1987. A concept of new cone-vane penetrometer. Int. Seminar by ap van den Berg, Heerenveen.
- Młynarek Z., 2007. Site investigation and mapping in urban area. Proc. of 14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering Madrid, Millpress 1.
- Młynarek Z., 2009. Subsoil contribution to construction failures. Proc. of XXIV Conference “Awaryjne budowlane”, Międzyzdroje.
- Młynarek Z., 2010. Quality of in-situ and laboratory tests contribution to risk management. Proc. of 14th Danube European Conference on Geotechnical Engineering, Bratysława.
- Młynarek Z., Tschuschke W., Pordzik P., 1983. Variability of cone resistance in the process of static penetration of clay. Proc. of 4th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Soil and Structural Engineering, Vancouver, 1237–1246.
- Młynarek Z., Wierzbicki J., Wołyński W., 2007. Efficiency of selected statistical criteria in determination of geotechnical parameters from CPTU. Proc. 3rd International Seminar on Soil Design Parameters from In-Situ and Laboratory Tests, Poznań, Studia Geotechnica et Mechanica 1–2. Wrocław University of Technology, Wrocław.
- Młynarek Z., Wierzbicki J., Long M., 2008. Factors affecting CPTU and DMT characteristics in organic soils. Proc. of 11th Baltic Sea Geotechnical Conference, Gdańsk.
- Młynarek Z., Wierzbicki J., Lunne T., Powell J., Wołyński W., 2013. Quality of CPTU tests (przygotowany do druku).
- Nilsson G., Löfroth H., 2012. A comparative study of soil-rock total sounding and CPTu in glacial deposits. Proc. of 4th International Conference on Site Characterization, ISC-4, Recife.
- Pedrin R.A.A., Giacheti H.L., 2012. The seismic SPT to determine the maximum shear modulus R. A. Proc. of 4th International Conference on Site Characterization, ISC-4, Recife.
- Robertson P.K., 2009. Interpretation of cone penetration tests – a unified approach. Canadian Geotechnical Journal 46 (11): 1337–1355.
- Sacchetto M., Trevisan A., 2012. CPTs executed in difficult conditions using CPTWD (cone penetration test with drilling) and its future developments. Proc. of 4th International Conference on Site Characterization, ISC-4, Recife.
- Sanglerat G., 1972. The penetrometer and soil exploration. Elsevier, Amsterdam.
- Schnaid F., 2009. In-situ testing in Geomechanics. The main tests. Taylor Francis, Abington, Oxon, OX14 4RN, UK.
- Schultze E., 1967. Erdstatische Berechnungen., VGB, Aachen.
- Stroganov A.S., 1967. Niektóre problemy plastyczności gruntów. PAN, Warszawa.

van Staveren M., 2006. Uncertainty and ground conditions in risk management approach, Butterworth, Oxford.

van Staveren M., 2008. Towards risk-driven site characterization. Manuscript. GeoDelft and Delft University of Technology. Millpress, Delft.

## **DIRECTIONS OF DEVELOPMENT AND USE OF IN-SITU TECHNIQUES IN GEOTECHNICS – PART 1**

**Abstract.** The paper presents thesis which are the basis for development of new directions of in situ tests for assessment of structure and properties of the subsoil. New technologies were discussed, including Icone system in static penetration method by ap van den Berg from the Netherlands. The paper comments also constructions of hybrid systems for performance of static penetration tests with drillings and hybrid model of cylindrical penetrometer combined with seismic tests. New constructions for execution of seismic dilatometer tests on sea and coastal areas are also presented. The paper also discussed uncertainties of in situ and laboratory tests and its influence on the assessment of mechanical parameters of the subsoil.

**Key words:** cone penetration test, dilatometer test, replication test

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 20.12.2013