

NOWE KONCEPCJE WYKORZYSTANIA WYNIKÓW BADAŃ IN SITU W GEOTECHNICE – CZĘŚĆ II

Zbigniew Młynarek, Sławomir Gogolik

Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Streszczenie. W artykule przedstawiono podstawy teoretyczne dla konstruowania lokalnych zależności empirycznych oraz tzw. *interrelationships* z badań CPTU, SCPTU, SDMT i VT (badanie sondą obrotową). Zamieszczone zostały także przykłady zależności korelacyjnych dla prekonsolidowanych osadów oraz normalnie konsolidowanych gruntów z grupy „przejściowych” z obszaru Polski. Drugą część artykułu poświęcono wykorzystaniu metody CPTU i DMT do wydzielenia w podłożu jednorodnych warstw podłoża, w kontekście budowy stratygraficznej podano zasady konstrukcji modeli 1-D, 2-D i quasi-3-D. W artykule zamieszczono także przykłady i skomentowano podstawy teoretyczne dla konstrukcji modeli sztywności podłoża w układzie 2-D i quasi-3-D. Do konstrukcji modeli wykorzystano moduł ściśliwości. Wartości tego modułu wyznaczono z charakterystyk penetracji z badania CPTU i DMT.

Słowa kluczowe: sondowanie statyczne, zależności empiryczne, modele sztywności

WSTĘP

W publikacji „Kierunki rozwoju wykorzystania badań *in-situ* w geotechnice – część 1” [Młynarek i Gogolik 2013] przedstawiono kierunki rozwoju badań *in situ* oraz wyniki badań wielu ośrodków naukowych na temat czynników wpływających na jakość oceny parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych z badań *in situ* i badań laboratoryjnych. Podkreślano także, że kluczowymi zagadnieniami współczesnej geotechniki są problemy związane z konstruowaniem współzależności z różnych technik badania *in situ* i tzw. lokalnych zależności korelacyjnych. Ten problem dla gruntów z obszaru Polski można uznać za niezwykle ważny, gdyż wiele firm geotechnicznych, a także ośrodków naukowych stosuje najnowsze techniki badań *in situ*, do których zaliczają się sondowania statyczne CPTU i SCPTU oraz badania dylatometryczne DMT i SDMT. Stosunkowo

nieduża baza danych badań podłoża z wykorzystaniem tych technik oraz ogromna różnorodność osadów występujących w podłożu na obszarze Polski i brak badań kalibracyjnych powoduje, że wiele firm i ośrodków naukowych do interpretacji charakterystyk z badań CPTU, SCPTU i SDMT wykorzystuje zależności korelacyjne podane w literaturze. Zależności te zostały sformułowane dla gruntów najczęściej o innej genezie i makrostrukturze.

Celem tego artykułu jest zwrócenie uwagi na konieczność i zasady konstruowania zależności do wyznaczania parametrów geotechnicznych z wyników badań CPTU, SCPTU i SDMT dla niektórych osadów z obszaru Polski. Drugim ważnym zagadnieniem jest wykorzystanie parametrów uzyskanych z badań SCPTU i SDMT do konstruowania tzw. jednorodnych warstw podłoża oraz budowy modelu stratygraficznego i sztywności podłoża. Obydwie wymienione wyżej kwestie stanowią temat niniejszego artykułu.

WSPÓLZALEŻNOŚCI RÓŻNYCH TECHNIK BADANIA PODŁOŻA, LOKALNE ZALEŻNOŚCI KORELACYJNE

Rola zależności, na podstawie których można wyznaczyć parametry mechaniczne gruntów z dwóch różnych technik badania podłoża, jest znacząca. Zależności te uzupełniają tzw. lokalne zależności korelacyjne. Konieczność budowania tych zależności wynika z faktu, że tylko niektóre techniki badania wyznaczają bezpośrednio poszczególne parametry mechaniczne gruntów. Lokalne zależności korelacyjne eksponują natomiast szczególne cechy podłoża, które nie zostały zapisane w postaci zmiennych niezależnych w ogólnych zależnościach korelacyjnych. W przypadku lokalnych zależności korelacyjnych niezbędne jest wyznaczenie funkcji kalibracyjnych, które pozwolą przejść z zapisanego związku empirycznego dla wyznaczenia parametru mechanicznego (np. związek między wytrzymałością na ścinanie bez odplywu a oporem stożka z metody CPTU) na zależność empiryczną dla badanego podłoża o odmiennej strukturze czy genezie.

Celem tworzenia współzależności i lokalnych zależności korelacyjnych jest:

1. Weryfikacja lub kalibracja urządzenia, które nie wyznacza bezpośrednio oczekiwanego parametru mechanicznego gruntu za pomocą urządzenia, które umożliwi wyznaczenie tego parametru. Przykładem tego typu zależności jest wyznaczenie modułu ściśliwości z metody CPTU i przeprowadzenie kalibracji uzyskanych wartości z badania DMT lub wyznaczenie modułu ścinania metodą CPTU poprzez kalibrację metodą SCPTU lub SDMT.

2. Uzyskanie ciągłego obrazu zmian parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych, co umożliwi badanie CPTU, poprzez kalibrację wyników z badania DMT (badanie punktowe). Znane są też kalibracje zależności z badania CPTU i DPH (badanie sondą dynamiczną) [Giżyński 2002].

3. Skonstruowanie zależności empirycznych, które modyfikują zależności wyznaczone dla gruntów o odmiennej genezie, strukturze i współczynniku prekonsolidacji.

4. Skonstruowanie lokalnych zależności empirycznych poprzez kalibrację laboratoryjną lub *in situ* dla wyznaczenia parametrów, których za pomocą zastosowanej techniki badania nie można wyznaczyć. Przykładem takiej zależności jest związek między oporem stożka (Q_t) i modułem ścinania (G_0) lub parametrami p_0 , p_1 z badania DMT i wytrzymałością na ścinanie bez odplywu (S_u).

Zastosowanie funkcji kalibracyjnych i lokalnych zależności pozwala wyznaczyć dokładne wartości współczynników, które znajdują się w zależnościach empirycznych i są definiowane szerokim przedziałem zmienności. Przykładem mogą być powszechnie stosowane współczynniki N_{kr} lub N_c do wyznaczania wytrzymałości na ścinanie bez odpływu (S_u) na podstawie wartości oporu stożka (q_c , q_t lub Q_t). Przedział zmienności tego współczynnika obejmuje zakres od 9 do 40!

Ze względu na obszerną literaturę tego tematu poniżej przedstawiono tylko niektóre rozwiązania dla gruntów z obszaru Polski. Warto podkreślić, że tego typu badania prowadzone są przez zespół prof. Lechowicza i innych [2011], a wyniki kalibracji można znaleźć także w monografii Wysokińskiego i innych [2011].

Poniżej przedstawiano kilka przykładów określania lokalnych i globalnych zależności do wyznaczenia parametrów mechanicznych z dwóch technik badania *in situ* – CPTU i SDMT za pomocą funkcji kalibracyjnych. Przykłady dotyczą gruntów z obszaru Polski o zróżnicowanych wartościach współczynnika prekonsolidacji OCR .

Procedurę lokalnej kalibracji do wyznaczenia modułu ścinania (G_0) za pomocą badania CPTU i SDMT dla podłoża o złożonej budowie w ujęciu litologicznym i stratygraficznym przedstawili Młynarek i inni [2012]. Badane podłoże składa się w strefie przypowierzchniowej z glin piaszczystych o współczynniku OCR między 1 i 3, natomiast głębokie podłoże stanowiły niejednorodne gliny pylaste i piaszczyste o innej genezie i współczynniku prekonsolidacji OCR w przedziale od 3 do 6. Do kalibracji modułu G_0 , wyznaczonego z formuły Hegazy-Mayne [Hegazy i Mayne 1995, 2002], wykorzystano bezpośrednie wartości G_0 wyznaczone z badania SDMT (dylatometr sejsmiczny Marchettiego):

$$G_0 = \rho \left(14,13 q_t^{0,359} e^{(-0,473)} \right)^2 \quad (1)$$

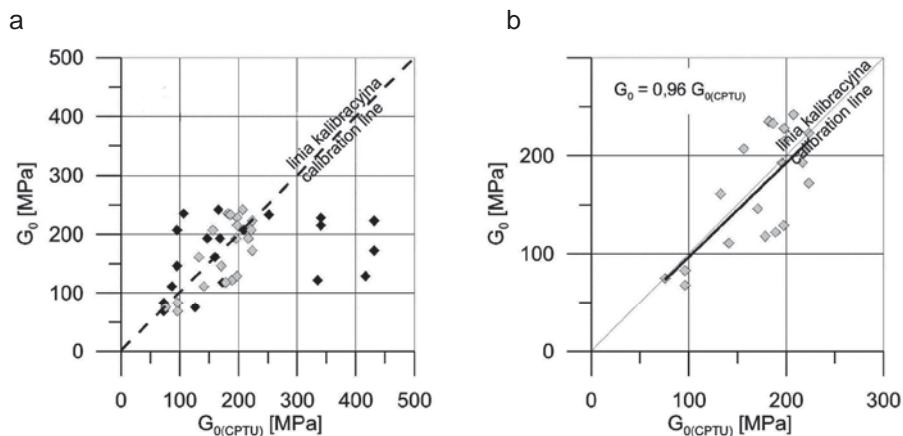
gdzie: ρ – gęstość objętościowa gruntu [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$],
 q_t – opór stożka netto [MPa].

Dla oceny zmian modułu G_0 z badania SDMT na badanym terenie skonstruowano model:

$$G_0 = 361 - 323,23 LI - 0,323 \sigma'_{v0} - 0,125 \sigma'_p \quad (2)$$

gdzie: $LI = I_L$ – stopień plastyczności [-],
 σ'_p – naprężenie prekonsolidacji [kPa].

Na rysunku 1a pokazano omówioną zależność przed kalibracją, a na rysunku 1b – po kalibracji. Przeprowadzona kalibracja pozwoliła wyznaczyć ciągłą zmianę wartości modułów G_0 w podłożu za pomocą zmian oporu stożka i stworzenie modelu sztywności podłoża opartego na module G_0 .



Rys. 1. Zależność między modułami G_0 wyznaczonymi z badań sejsmicznych i obliczonymi na podstawie badań CPTU w gruntach spoiстых: a – przed kalibracją, b – po kalibracji [Młynarek i in. 2013]

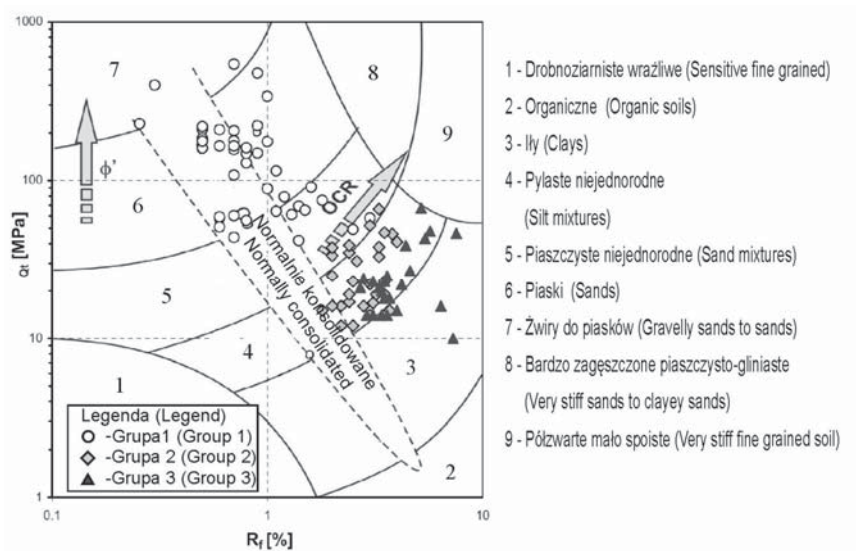
Fig. 1. Relationship between shear modulus G_0 from seismic tests and CPTU tests in cohesive soils: a – before calibration, b – after calibration [Młynarek et al. 2013].

W pewnym sensie globalnie przeprowadzenie kalibracji modułu G_0 i modułu M_0 , odpowiadającemu modułowi edometrycznemu z badań CPTU i SDMT, przedstawili Młynarek i inni [2013] dla podłoża z 11 lokalizacji na obszarze Polski. Celem uwzględnienia większej liczby parametrów kalibrację przeprowadzono dla 3 grup gruntów (rys. 2).

Pierwszą grupę stanowią osady o warunkach pełnego odpływu (natychmiastowej dysypacji ciśnienia wody w porach – *drained condition*) [Lunne i in. 1997, Mayne 2006a, Robertson 2009]. Grupę tę stanowią grunty gruboziarniste (*coarse grained soils*). Do drugiej grupy zaliczają się tzw. grunty przejściowe (pyły, piaski gliniaste, gliny piaszczyste), a trzecią stanowią ły (zakres frakcji ilastej powyżej 20% – *fine grained soils*).

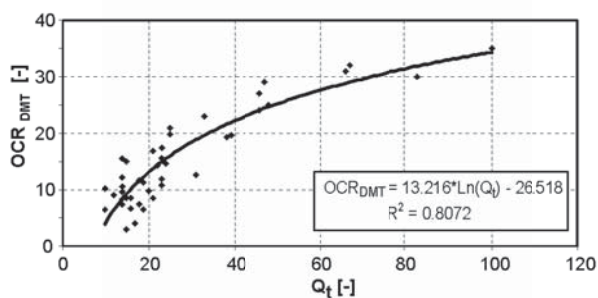
Punktem wyjścia dla globalnej kalibracji jest wyznaczenie współczynnika OCR i przyporządkowanie wydzielonej warstwy gruntu za pomocą wartości Q_t i R_f (współczynnik tarcia – metoda CPTU) do jednej z wyżej podanych grup gruntów. Do zastosowania tej procedury można wykorzystać system klasyfikacyjny Robertsona [1990]. Na rysunku 2 pokazano położenie badanych gruntów w tym systemie.

Funkcję kalibracyjną do wyznaczenia OCR na podstawie oporu stożka (q_t) i OCR_{DMT} (badanie dylatometryczne) pokazano na rysunku 3. Podstawą do wyznaczenia tego związku było przeprowadzenie kalibracji między współczynnikiem OCR wyznaczonym z badania CPTU i DMT. Wartości OCR z badania CPTU wyznaczono z zależności Mayne [2006a], a z badania DMT – z oryginalnej formuły Marchettiego i innych [1999].



Rys. 2. Położenie wydzielonych grup gruntów na systemie klasyfikacyjnym Robertsona [Młynarek i in. 2013]

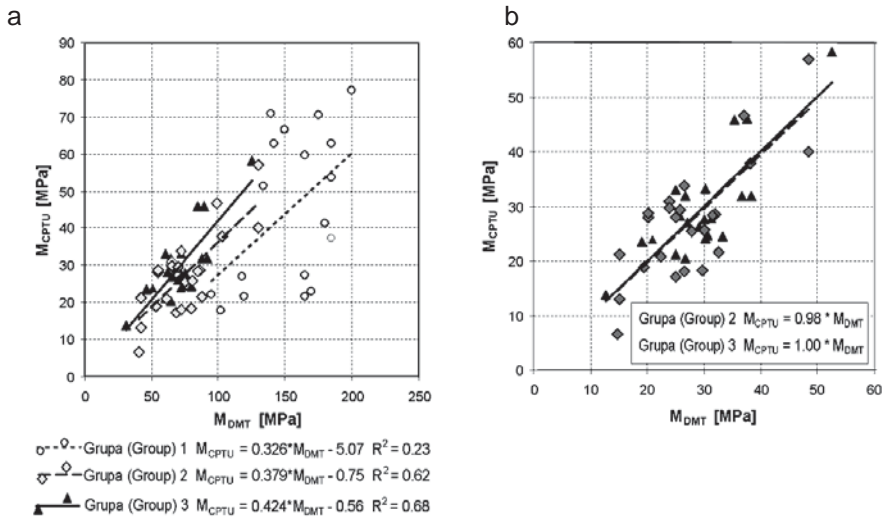
Fig. 2. Location of investigated soils on Robertson classification chart [Młynarek et al. 2013]



Rys. 3. Zależność między oporem stożka (Q_t) i współczynnikiem prekonsolidacji OCR_{DMT} [Młynarek i in. 2013]

Fig. 3. Relationship between cone resistance (Q_t) and OCR_{DMT} coefficient [Młynarek et al. 2013]

Kalibracja modułów ścisłości z badania CPTU i SDMT dla II i III grupy gruntów została pokazana na rysunku 4. Moduły ścisłości z badania CPTU określono z formuły Mayne [2006b] skalibrowanych poprzez badanie edometryczne, a moduł z badania SDMT – według oryginalnej formuły Marchettiego [Merchetti i in. 1999].



Rys. 4. Zależność między modułami ścisłości (M_0) wyznaczonymi z badań CPTU i DMT: a – przed kalibracją, b – po kalibracji [Młynarek i in. 2013]

Fig. 4. Relationship between constrained modulus (M_0) from CPTU and DMT tests: a – before calibration, b – after calibration [Młynarek et al. 2013]

Oryginalne funkcje kalibracyjne, które reprezentują lokalne zależności korelacyjne i dotyczą silnie prekonsolidowanych glin z różnych części Warszawy i normalnie konsolidowanych gruntów ilastych, zostały podane przez Lechowicza i innych [2011] – dla modułu edometrycznego, oraz Galasa [2013]. Formuły te warto przedstawić, gdyż zależności empiryczne Galasa dotyczą wyznaczania wytrzymałości na ścinanie bez odplywu za pomocą parametrów z badania SDMT:

– Lechowicz i inni [2011]

$$M = R_M \cdot E_D \quad (3)$$

$$R_M = 0,14 + 1,6 \cdot \log(K_D)$$

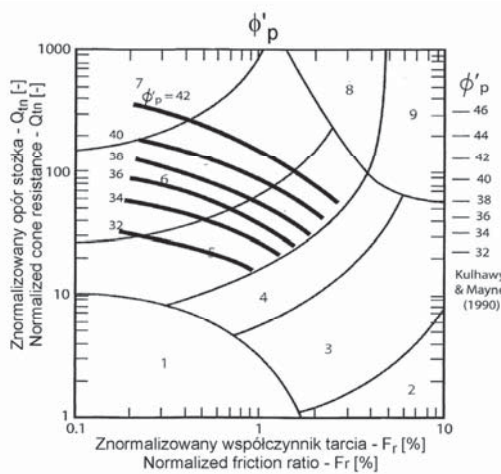
– Galas [2013]

$$\frac{\tau_{fu}}{\sigma'_{v0}} = 0,164 \left(\frac{p_0 - u_0}{\sigma'_{v0}} \right) \cdot \left(\frac{p_1 - u_0}{\sigma'_{v0}} \right)^{0,544} \quad (4)$$

$$\frac{\tau_{fu}}{\sigma'_{v0}} = 0,190 \left(\frac{p_0 - u_0}{\sigma'_{v0}} \right)^{0,515} \cdot (I_p)^{-0,331} \quad (5)$$

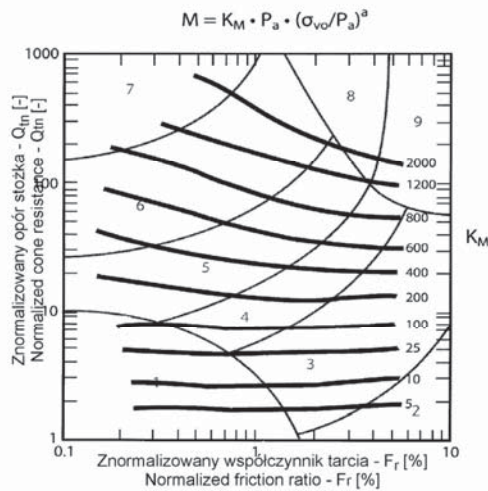
$$\frac{\tau_{fu}}{\sigma'_{v0}} = 0,153 \left(\frac{p_0 - u_0}{\sigma'_{v0}} \right)^{0,151} \cdot \left(\frac{p_1 - u_0}{\sigma'_{v0}} \right)^{0,566} \cdot \left(\frac{V_s}{100} \right)^{0,350} \quad (6)$$

Znakomitym przykładem wykorzystania bezwymiarowych produktów, które zostały skonstruowane z parametrów badania CPTU do wyznaczenia parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych podłoża, są nomogramy opracowane przez Robertson [2009]. W tych nomogramach znajduje się system klasyfikacyjny CPTU, który uwzględnia dane z 6 różnych zmiennych, które mają wpływ na opór stożka i interpretację wyników. Rodzaj gruntu zdefiniowany jest przez Robertsona za pomocą współczynnika materiałowego (I_c) i współczynnika prekonsolidacji (OCR). Dwa takie systemy do wyznaczenia maksymalnej wartości kąta tarcia wewnętrznego (*peak friction angle*) i modułu ściśliwości (M) pokazano na rysunkach 5 i 6.



Rys. 5. Diagram do wyznaczenia maksymalnej wartości kąta tarcia wewnętrznego [Robertson 2009]

Fig. 5. Chart for peak friction angle determination [Robertson 2009]



Rys. 6. Diagram do wyznaczenia modułu ściśliwości [Robertson 2009]

Fig. 6. Chart for constrained modulus M determination [Robertson 2009]

NOWE KONCEPCJE WYKORZYSTANIA WYNIKÓW Z BADAŃ CPTU I DMT

Wykorzystanie wyników badań *in situ* do przygotowania dokumentacji geotechnicznej uważa się powszechnie za główny cel tych badań. Nowoczesne techniki badania, jak metody CPTU i DMT, znalazły już, także w Polsce, zastosowanie do oceny nośności pali [np. Gwizdała 2013], wymiarowania fundamentów bezpośrednich [np. Młynarek i Waliński 2004], obliczenia osiadań fundamentów itd.

W Polsce za podstawę do przygotowania dokumentacji geotechnicznej lub geologiczno-inżynierskiej uznaje się wiercenia badawcze. Taki sposób pozyskiwania danych o budowie podłoża generuje jednak znaczną niepewność pomiarów. Van Tol [van Staveren 2008] stwierdził, że co najmniej 50% awarii budowlanych spowodowanych jest brakiem zgodności budowy i właściwości podłoża wykazanej w dokumentacji geotechnicznej z budową podłoża stwierdzoną w warunkach *in situ*. Podobna sytuacja jest w Polsce [Młynarek 2009]. Jest to jeden z elementów, które są spójne ze stwierdzeniem Jamiolkowskiego [2011] o niskiej i stale obniżającej się jakości dokumentacji geotechnicznej.

Znaczną poprawę jakości dokumentacji można uzyskać poprzez wprowadzenie do badań *in situ* technik takich, jak badanie CPTU i DMT. Szczególne predyspozycje w tej kwestii ma metoda CPTU, w której podczas pomiaru parametrów sondowania uzyskuje się bardzo dużą liczbę obserwacji rejestrowanych automatycznie co 2,0 cm. Jest to jeden z nowych kierunków wykorzystania tych dwóch technik badania, stąd poniżej przedstawiono współczesną koncepcję dokumentowania budowy podłoża i konstruowania modeli sztywności podłoża za pomocą tych badań. Krótki komentarz odnośnie do metod tworzenia przekrojów geotechnicznych i geologiczno-inżynierskich pozwoli także wyeksponować różne rodzaje niepewności pomiarowej, jakie mogą się pojawić w wyniku stosowania różnych metod wydzielenia jednorodnych warstw podłoża.

Koncepcje dokumentowania budowy podłoża

Wyznaczone parametry geotechniczne różnymi technikami *in situ* są zbiorem punktów zorientowanych, najczęściej za pomocą współrzędnych kartezjańskich, w trójwymiarowej półprzestrzeni podłoża. Standardowym podejściem do grupowania tych punktów jest wydzielenie tzw. jednorodnych geotechnicznie warstw podłoża. Ogólnie wiadomo, że kryteria grupowania są bardzo zróżnicowane. Za najprostsze uważa się tworzenie warstw na podstawie zmian uziarnienia gruntów, z uwzględnieniem aspektu morfologicznego (reżim geologiczny). Za najbardziej wartościowe dla projektanta jest kryterium, które reżim geologiczny uzupełnia cechami punktów definiujących wytrzymałość i odkształcalność gruntów podłoża. Generalnie dokumentowanie można podzielić na dwa etapy – dokumentowanie ogólne i lokalne.

Dokumentowanie ogólne stanowią tzw. mapy geologiczne, które dostarczają informacji o budowie podłoża w kontekście powstawania osadów. Materiałem do tworzenia tych map są najczęściej dane z wierceń geologicznych, wsparte obszernymi informacjami z dziedziny geologii. Celem drugiej koncepcji dokumentowania jest tworzenie w obrębie najczęściej aglomeracji miejskiej tzw. map geologiczno-inżynierskich. Danymi dla tych map są wyniki różnych badań *in situ*, najczęściej wierceń, które wykonano dla celów

rozpoznania budowy podłoża pod planowaną inwestycję. Jakość tych danych jest bardzo różna, szczególnie niepewna wtedy, jeśli tego typu mapy zawierają informacje o parametrach wytrzymałościowych gruntów. W Polsce w ostatnich kilku latach tego typu mapy zostały opracowane dla większych aglomeracji miejskich. W tworzeniu map według pierwszej i drugiej koncepcji nie wykorzystuje się żadnej z metod statystycznego grupowania danych. Trzecią koncepcją stanowią mapy dokumentujące warunki hydrologiczne. Ostatnie dwie kategorie map to mapy dokumentujące skażenie podłoża i uzbrojenie (infrastrukturę podziemną) w podłożu. Mapy dokumentujące zasięg przestrzenny skażenia podłoża mają współcześnie bardzo istotne znaczenie, szczególnie wtedy, jeśli na tym terenie zamierza się realizować inwestycje budowlane, gdyż problem ten wkracza w strefę zagadnień prawnych.

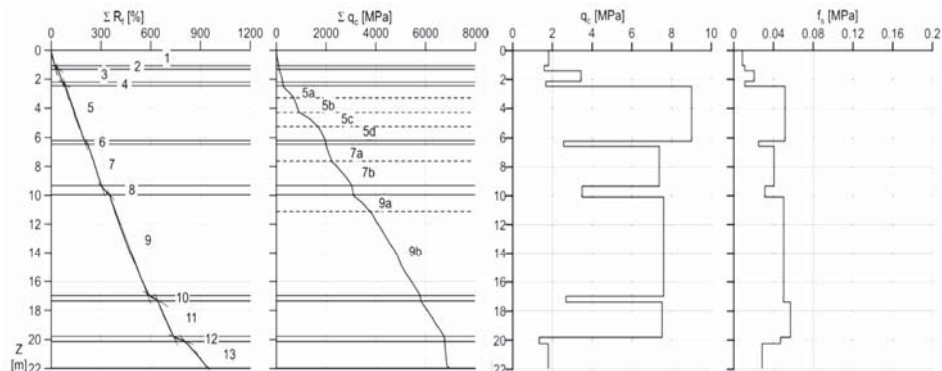
Strategia wydzielenia jednorodnych warstw podłoża metodami CPTU i DMT

Strategia grupowania danych jest ściśle związana z zastosowaną techniką badania *in situ*. Szczególnie korzystną metodą jest badanie CPTU, uzupełnione badaniem SCPTU lub SDMT. Z testów CPTU uzyskuje się bowiem bardzo dużo danych, a badania SDMT uzupełniają punktową ocenę parametrów podłoża i mogą także stanowić element kalibracji dla obydwu badań, zwiększając tym samym wiarygodność obserwacji wprowadzonych do grupowania. Strategia powinna być oparta na generalnej zasadzie, że grupowanie powinno rozpoczynać się od modelu jednoosiowego (1-D), poprzez model płaski (2-D), aż do modelu przestrzennego (3-D). Model przestrzenny daje trójwymiarowy obraz zmian właściwości podłoża i jest najbardziej oczekiwanym modelem w projektowaniu posadowienia obiektu.

Model interpolacyjny 1-D

Punktem wyjścia dla utworzenia jednorodnych warstw gruntów jest parametr lub kilka parametrów mierzonych podczas wykonywania badania *in situ*. Jeśli badanie przeprowadzone jest sondą statyczną CPTU, wówczas najkorzystniej dla grupowania jest, aby rejestrować 3 standardowe charakterystyki, a mianowicie zmiany z głębokością q_c (q_t), R_f , u_2 . Dla zadania jednoosiowego grupowania wykorzystuje się procedurę Hardera-Bloha [Harder i Bloh 1988] lub metodę teorii skupień [Młynarek i Lunne 1987, Hegazy i Mayne 2002, Facciorusso i Uzielli 2004]. Główną koncepcją w tych metodach jest grupowanie parametrów badania CPTU poprzez badanie statystycznej istotności różnic między cosinusami prostych regresji, tzw. krzywych kumulacyjnych. Krzywe kumulacyjne można konstruować dla wartości oporu stożka (q_c lub q_t) w zależności od tego, jaki system klasyfikacyjny zamierza się zastosować dla identyfikacji gruntów występujących na drodze penetracji. Przykład wykorzystania zmodyfikowanej procedury Hardera-Bloha dla identyfikacji zmienności uziarnienia osadów poflotacyjnych wbudowanych w obwałowania składowiska Żelazny Most pokazano na rysunku 7.

Uzyskane reprezentatywne parametry z badania CPTU mogą być wykorzystane do konstruowania modelu 2-D, typu wytrzymałościowego lub odkształceniowego podłoża.



Rys. 7. Krzywe kumulacyjne z wyników badań CPTU oraz parametry reprezentatywne w wydzielonych warstwach osadów połotacyjnych składowiska Żelazny Most [Młynarek 2007]

Fig. 7. Cumulation curves for CPTU characteristics and representative parameters for selected layers in mine tailings from Żelazny Most Reservoir [Młynarek 2007]

Model interpolacyjny 2-D

Charakterystyczną cechą modelu 2-D jest to, że jest konstruowany na wyselekcjonowanych w modelu 1-D poziomach naprężeń geotechnicznych (σ'_{vo}), które rozdzielają jednorodne warstwy, według kryteriów konstruowania modelu 1-D. Model 2-D jest punktem wyjścia dla opisu przestrzennej budowy podłoża. Konstrukcja modelu 2-D jest więc bardzo elastyczna, gdyż model ten może dokumentować zmiany rodzaju gruntów występujących w podłożu, jeśli model 1-D skonstruowany został na podstawie parametrów q_c , q_f , R_f . Model wytrzymałościowy podłoża lub model definiujący sztywność podłoża można skonstruować wtedy, jeżeli wykorzysta się uzyskane reprezentatywne parametry z badania CPTU z modelu 1-D, a następnie skorzysta z wyznaczonych parametrów mechanicznych dla wydzielonych warstw podłoża.

Miary i metody konstruowania modeli 2-D. Miara podobieństwa, a w zasadzie brak podobieństwa, jest podstawowym elementem analizy skupień. Miarą niepodobieństwa obiektów (np. mierzonych parametrów badania *in situ*) nazywa się funkcję:

$$\rho: X \times X \rightarrow R \quad (7)$$

jeśli:

1. $\rho(x_r, x_s) \geq 0$
2. $\rho(x_r, x_s) = 0$ wtedy i tylko wtedy, gdy $x_r = x_s$
3. $\rho(x_r, x_s) = \rho(x_s, x_r)$

gdzie: x_r, x_s – ρ -wymiarowe wektory obserwacji r -tego i s -tego obiektu ($r, s = 1, 2, \dots, n$).

Szczegółowe omówienie różnych miar niepodobieństwa można znaleźć w wielu pracach [np. Kaufman i Rousseeuw 1990]. Spośród licznych miar niepodobieństwa warto wymienić dwie, które najczęściej wykorzystuje się w hierarchicznych metodach skupień:

- odległość euklidesową

$$\rho_1(x_r, x_s) = \left((x_r - x_s)' (x_r - x_s) \right)^{1/2} = \left(\sum_{i=1}^p (x_{ri} - x_{si})^2 \right)^{1/2} \quad (8)$$

- odległość Mahalanobisa, która uwzględnia korelacje między cechami

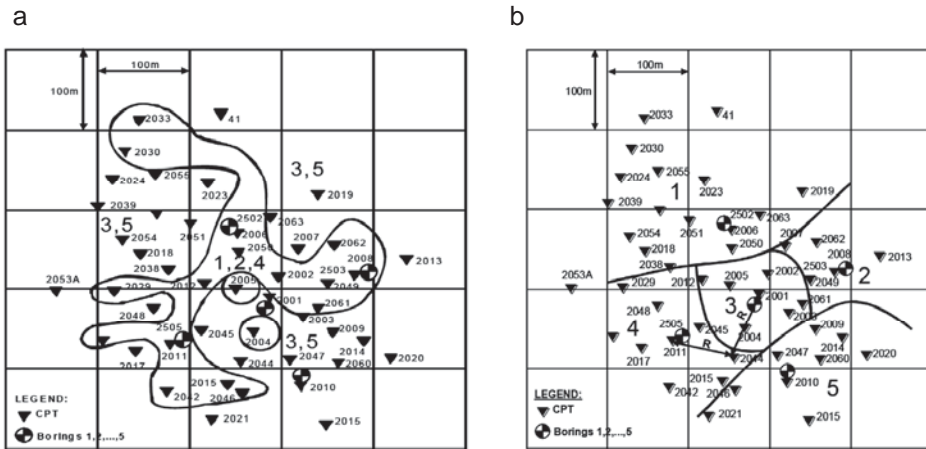
$$\rho_2(x_r, x_s) = (x_r - x_s)' (x_r - x_s) = \sum_{i=1}^p (x_{ri} - x_{si})^2 \quad (9)$$

gdzie: ρ – estymator macierzy kowariancji.

Generalną zasadą analizy skupień, którą wykorzystuje się w wydzieleniu jednorodnych geotechnicznie warstw w podłożu, jest zasada, aby obiekty należące do danego skupienia były „podobne” do siebie, a obiekty należące do różnych skupień powinny być możliwie mocno „niepodobne” do siebie. Najprostszym algorytmem grupowania cech podłoża, według metod analizy skupień (*cluster analysis*), jest przyjęcie liczby skupień oraz optymalnego podziału obiektów. Tego typu koncepcja oznacza, że w wydzieleniu warstw podłoża strategia grupowania powinna być przeprowadzona etapowo, poczynając od modelu 1-D, co wyjaśniono wcześniej. Istotnym problemem jest wybór końcowej liczby skupień. Ten problem może być rozwiązany poprzez bezpośrednią ingerencję geotechnika, który uważa uzyskany podział podłoża za wystarczająco efektywny dla rozwiązania posadowienia obiektu. Drugim sposobem ustalenia końcowej liczby skupień mogą być formuły statystyczne, na przykład Caliński-Harabosz index oraz Hashe, Tibshirani, Walther index [Krzyśko i in. 2008].

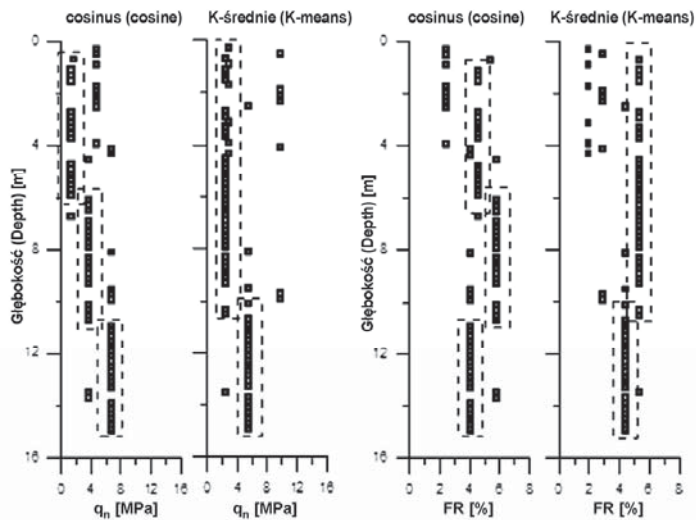
Miary niepodobieństwa wykorzystywane są w trzech podstawowych grupach metod: hierarchicznej analizie teorii skupień, niehierarchicznej analizie teorii skupień oraz w metodzie, której podstawowym zadaniem jest założenie dotyczące rozkładu prawdopodobieństwa obserwowanych zmiennych (np. algorytm EM). W pierwszej grupie są metody: najbliższego sąsiada, najdalszego sąsiada, metoda średniej mediany, metoda Warda i metoda centroidalna. Przedstawicielem drugiej grupy metod jest algorytm *K*-średnich i metoda kriegingu. Trzecią grupę stanowią algorytmy, w których podstawowym zadaniem jest założenie dotyczące rozkładu prawdopodobieństwa obserwowanych zmiennych (np. algorytm EM). Na rysunku 8a pokazano interesujący przykład wykorzystania metody centroidalnej do badań podłoża na Morzu Północnym [Młynarek i Lunne 1987]. Badania CPT miały stanowić podstawę do oceny wytrzymałościowej i odkształceniowej podłoża, a także dla ustalenia miejsca pobrania próbek do badań laboratoryjnych dla projektu budowy platformy wiertniczej. Rysunek 8b pokazuje rezultat rutynowego grupowania badań CPT według kryterium najmniejszej odległości od usytuowanego w podłożu wiercenia.

Za ciekawą adaptacją modelu 1-D do guasi-modelu 2-D można uznać konstrukcję tzw. przekroju geotechnicznego. Przekrój geotechniczny łączy modele 1-D wyznaczone w podłożu między co najmniej dwoma badaniami *in situ*. W modelu tym przebieg jednorodnych warstw odbywa się graficznie, na ogół bez uzasadnienia statystycznego. Procedurę konstruowania tego typu przekroju na bazie modelu 1-D i danych z badania CPTU przedstawiono w pracy Młynarka [2007]. Rysunek 9 pokazuje podział podłoża na jednorodne strefy ze względu na q_n , opór stożka netto, współczynnik F_R oraz uwidacznia efektywność podziału podłoża za pomocą metody cosinusów i *K*-średnich.



Rys. 8. Podział podłoża na aglomeracje: a – według metody centroidalnej [Młynarek i Lunne 1987], b – metodą najmniejszej odległości R do wiercenia identyfikującego [Młynarek i in. 1984]

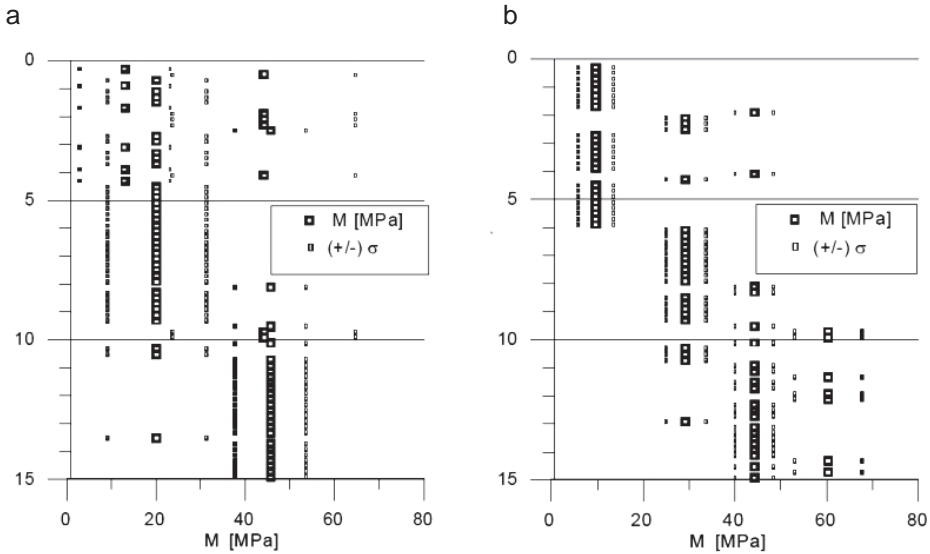
Fig. 8. Subsoil division on agglomerations: a – according to the centroid method [Młynarek and Lunne 1987], b – according to the method of min. value of the distance R to identifying boring [Młynarek et al. 1984]



Rys. 9. Reprezentatywne wartości oporu stożka (q_n) i współczynnika tarcia (F_R) wyznaczone metodami cosinusową i K -średnich (pierwszy etap konstruowania przekroju geotechnicznego) [Młynarek i in. 2007]

Fig. 9. The representative values of q_n and F_R obtained after cluster cosine method and K -means method (first step for construction of geotechnical cross-section) [Młynarek et al. 2007]

Rysunek 10 przedstawia podział podłoża ze względu na moduł ścisłości (M). Wartości modułów zostały przyporządkowane do poszczególnych warstw gruntów, które wyznaczono w pierwszym etapie grupowania.



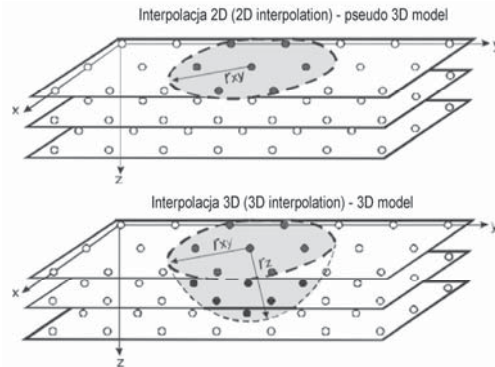
Rys. 10. Porównanie reprezentatywnych wartości modułu ścisłości (M), wyznaczonego na podstawie: a – pierwszego etapu grupowania, b – drugiego etapu grupowania [Młynarek i in. 2007]

Fig. 10. Comparison between representative values of constrained modulus M : a – obtained on the basis of 1-st step of clustering, b – 2-nd step of clustering [Młynarek et al. 2007]

3-D Model interpolacyjny

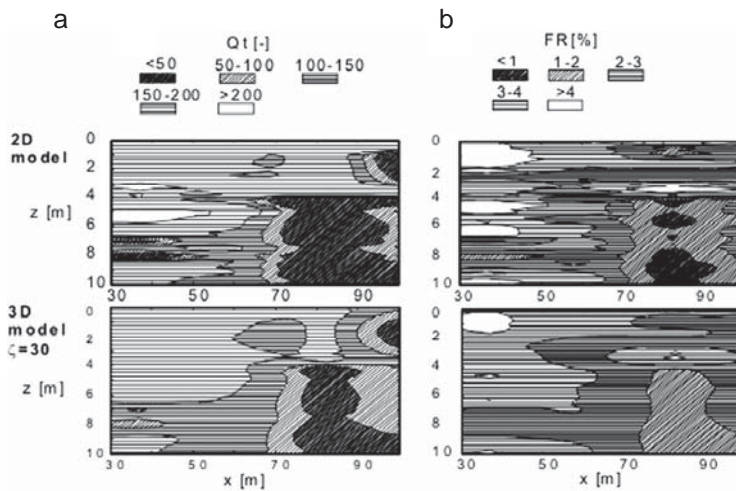
Sukcesywne konstruowanie modelu dwuwymiarowego na kolejnych płaszczyznach σ'_{vo} (quasi-3-D model) może symulować trójwymiarową zmienność parametrów z badania CPTU i w konsekwencji trójwymiarową zmienność parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych podłoża. Model ten nie uwzględnia jednak wpływu przestrzennej zmienności rejestrowanych parametrów między miejscami wykonanych badań CPTU. Różnice między quasi-3-D modelem i 3-D modelem oraz koncepcje konstrukcji modelu 3-D pokazuje rysunek 11. Koncepcję i autorską modyfikację tej metody przedstawiono w pracy Młynarka i innych [2007].

Na rysunku 12 pokazano efekt konstrukcji jednorodnych stref oporu stożka (Q_i) i współczynnika F_R w podłożu za pomocą modeli quasi-2-D i quasi-3-D w ustalonym przekroju. Model 3-D jest bardziej obiektywnym i efektywnym modelem niż 2-D. Model 3-D, podobnie jak 2-D, daje podstawę do przejścia z parametrów badania CPTU – Q_i , F_R , poprzez identyfikację gruntów w podłożu za pomocą dobrego systemu klasyfikacyjnego [Lunne i in. 1997], do konstrukcji modelu wytrzymałościowego i odkształceniowego podłoża. Podany przykład konstrukcji budowy podłoża dotyczył podłoża zbudowanego z prekonsolidowanych glin piaszczystych i piasków wodnolodowcowych. Uzyskana interpretacja budowy podłoża była wysoce zgodna z rezultatami wykonanych na tym terenie wierceń badawczych [Młynarek 2007].



Rys. 11. Schemat quasi-3D modelu i 3D modelu dla interpretacji wyników badań CPTU [Młynarek i in. 2007]

Fig. 11. Scheme of quasi-3D model and 3D model for interpretation of CPTU data [Młynarek et al. 2007]



Rys. 12. Profil jednorodnych stref na płaszczyźnie Q_i i F_R oraz płaszczyźnie x - z na ustalonej współrzędnej $y = 45$ m, zgodnie z 2D i 3D modelami [Młynarek i in. 2007]

Fig. 12. The profile of homogenous zones of Q_i and F_R in the plane x - z at fixed $y = 45$ m, according to 2D and 3D models [Młynarek et. al 2007]

PODSUMOWANIE

Sytuację związaną z badaniami podłoża w warunkach *in situ* z jednej strony bardzo dobrze definiuje stwierdzenie Yu [2004]: „rozwój metod interpretacji badań *in situ* jest procesem ciągłym i w najbliższej przyszłości należy spodziewać się różnych nowych publikacji na ten temat”. Z drugiej strony aktualną sytuację badań *in situ* charakteryzują dwa ważne elementy:

1. Kontakt inżynierów – projektantów i geotechników z zaawansowanymi teoretycznymi metodami interpretacji różnych technik badań *in situ* jest raczej ograniczony i stawia ich w bardzo trudnej sytuacji. W wielu przypadkach projektant otrzymuje bardzo różną dokumentację z badań *in situ* i o zróżnicowanej jakości.

2. W wielu krajach, niezależnie od rozwoju zaawansowanych technik badawczych (np. CPTU, SCPTU, SDMT), za priorytetowe uznaje się także badania, które uważa się za „tradycyjne”. Badania te mają bardzo solidny materiał dokumentacyjny i dobrze zweryfikowane formuły empiryczne. Przykładem mogą tu być wciąż stosowane badania sondą dynamiczną w Niemczech, presjometrami we Francji czy sondą cylindryczną w Stanach Zjednoczonych. W krajach tych wyniki z tych badań wykorzystuje się często do weryfikacji wyników otrzymywanych z zaawansowanych technik badania. Taka sytuacja ma również miejsce w Polsce. Zdarza się jednak, że niektóre z zaawansowanych technik badań podłoża (np. *telecone*) nie znajdują szerszego zastosowania.

Ciągły rozwój metod interpretacji badań *in situ* wpływa w istotny sposób na wspomnianą już jakość dokumentacji geotechnicznych. Często oficjalne dokumenty rekomendują do interpretacji wyników z nowoczesnych technik badań (np. CPTU) stosowanie w pewnym sensie ogólnych, przestarzałych formuł, w których zaleca się wykorzystanie oporu stożka (q_c) do wyznaczenia parametrów mechanicznych gruntów grupy trzeciej, tj. ilów i glin spoistych zwięzłych. Opór stożka (q_c) jest uważany obecnie jako mierzony parametr i musi być, poprzez standaryzację i normalizację, doprowadzony do parametru interpretacyjnego [Lunne i in. 1997, Mayne 2006b, Robertson 2009].

Przedstawiane syntetycznie kierunki rozwoju badań *in situ*, a przede wszystkim materiały z konferencji CPT-10 w Los Angeles oraz cytowanej wcześniej Konferencji Site Characterization w Recife (2012) dochodzą, że wyzwaniem dla geotechnika zajmującego się badaniami *in situ* jest interpretacja tych badań w ośrodku anizotropowym (np. ily warwowe, osady aluwialne) oraz w gruntach organicznych. Do tej grupy zagadnień kwalifikuje się także konstruowanie za pomocą metod statystycznych jednorodnych warstw gruntów w ujęciu licznych kryteriów, na przykład litologicznych, wytrzymałościowych czy odkształceniowych.

PIŚMIENNICTWO

- Facciorusso J., Uzielli M., 2004. Stratigraphic profiling by cluster analysis and fuzzy soil classification from mechanical cone penetration tests. Proceedings of ISC-2 on Geotechnical and Geophysical Site Characterization, Porto, Millpress, Rotterdam, 905–912.
- Galas P., 2013. Wyznaczanie wytrzymałości na ścinanie gruntów spoistych na podstawie badań dylatometrycznych SDMT. Praca doktorska. SGGW, Warszawa.
- Gizyński T., 2002. Zastosowanie sondowań dynamicznych do oceny nośności niespoistego podłoża gruntowego obciążonego fundamentem bezpośrednim lub na palach. Praca doktorska. Politechnika Gdańska, Gdańsk.
- Gwizdała K., 2013. Fundamenty palowe. Badania i zastosowania. T. 2. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Harder H., von Bloh G., 1988. Determination of representative CPT-parameters. Proceedings of International Conference "Penetration testing in the UK". Thomas Telford, London, 237–240.

- Hegazy Y.A., Mayne, P.W., 1995. Statistical correlations between Vs and CPT data for different soil types. Proceedings of Symposium on Cone Penetration Testing (CPT'95). Swedish Geotechnical Society, Linköping, 2, 173–178.
- Hegazy Y.A., Mayne P.W., 2002. Objective Site Characterization Using Clustering of Piezocone Data. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engg. 12.
- Jamiolkowski M., 2011. Trevi Group Seminar Foundation Engineering and Soil Improvement, Warsaw.
- Kaufman L., Rousseeuw P.J., 1990. Finding Groups in Data. An introduction to cluster analysis. J. Wiley & Sons, New York.
- Krzyżko M., Wołyński W., Górecki T., Skorzybut M., 2008. Systemy uczące się – rozpoznawanie wzorców, analiza skupień i redukcja wymiarowości. WNT, Warszawa.
- Lechowicz Z., Rabarijoely S., Galas P., Kiziewicz D., 2011. Settlement evaluation of spread foundations on heavily preconsolidated cohesive soils. Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Land Reclamation 43 (2), 113–120.
- Lunne T., Robertson P.K., Powell J.J.M., 1997. Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice. Blackie Academic EF Spon/Routledge Publishers, New York.
- Marchetti S., Monaco P., Calabrese M., Totani G., 1999. The flat dilatometer test. A report to the ISSMGE Committee TC-16.
- Mayne P.W., 2006a. Interrelationships of DMT and CPT readings in soft clays. Proceedings 2nd International Conference on DMT, Washington, 231–236.
- Mayne P. W., 2006b. In-situ test calibration for evaluating soil parameters. In-situ testing. Singapore Workshop, Singapore.
- Młynarek Z., 2007. Site investigation and mapping in urban area. Proceedings of 14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Madrid, Millpress, 1.
- Młynarek Z., 2009. Subsoil contribution to construction failures. Proceedings of XXIV Conference “Awary budowlane”, Międzyzdroje [in Polish].
- Młynarek Z., Gogolik S., 2013. Kierunki rozwoju i wykorzystania badań in situ w geotechnice – część 1. Acta Scientiarum Polonorum, Architectura 12 (4), 41–59.
- Młynarek Z., Lunne T., 1987. Statistical estimation of homogeneity of a North Sea overconsolidated clay. Proceedings of 5th International Conference on Application of Statistics and Probability in Soil and Structural Engineering, Vancouver, 961–968.
- Młynarek Z., Waliński M., 2004. Przykład wykorzystania metody statycznego sondowania w projektowaniu fundamentu bezpośredniego. Inżynieria i Budownictwo 6, 332–334.
- Młynarek Z., Lunne T., Sanglerat G., 1984. Grouping theory methods application in identification of subsoil parameters by means of CPT method. Proceedings of 3rd Polish – French Colloquium, Gdańsk.
- Młynarek Z., Wierzbicki J., Wołyński W., 2007. Efficiency of selected statistical criteria in determination of geotechnical parameters from CPTU. Proceedings 3rd International Seminar on Soil Design Parameters from In-Situ and Laboratory Tests. Studia Geotechnica et Mechanica 1–2. Technical University, Wrocław.
- Młynarek Z., Wierzbicki J., Stefaniak K., 2012. Deformation characteristics of overconsolidated subsoil from CPTU and SDMT tests. Proceedings of 4th International Conference on Site Characterization, ISC-4, Recife.
- Młynarek Z., Gogolik S., Sanglerat G., 2013. Interrelationship between deformation moduli from CPTU and SDMT tests for overconsolidated soils. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris.
- Robertson P.K., 1990. Soil classification using the cone penetration test. Canadian Geotechnical Journal 27 (1), 151–158.
- Robertson P.K., 2009. Interpretation of cone penetration tests – a unified approach. Canadian Geotechnical Journal 46 (11), 1337–1355.

- van Staveren M., 2008. Innovation with risk management. International Seminar 40 years of ap. van den Berg. Heerenveen (materiały niepublikowane).
- Wysokiński L., Kotlicki W., Godlewski T., 2011. Projektowanie geotechniczne według Eurokodu 7. Wydawnictwo Instytutu Techniki Budowlanej, Warszawa.
- Yu H.S., 2004. In-situ soil testing from mechanics to interpretation. J.K. Mitchell Lecture. Proceedings of International Conference "Geotechnical and geophysical site characterization". Porto, Millpress, Rotterdam, 3–38.

NEW CONCEPTS OF USING THE RESULTS FROM IN SITU INVESTIGATIONS IN GEOTECHNICS

Abstract. The paper presents theoretical basis for the construction of local empirical relationships and so-called "interrelationships" from CPTU, SCPTU, SDMT tests and VT (vane test). There are also examples of correlations for overconsolidated and normally consolidated sediments from the group of "transition" soils from the area of Poland. The second part of the paper is dedicated to the use of CPTU and DMT methods in separation of homogenous layers of the subsoil, in the context of stratigraphy, rules are given for construction of model 1-D, 2-D and 3-D quasi. The paper also contains examples and comments on the theoretical basis for the construction of stiffness models of the subsoil in 2-D and quasi-3-D. For the construction of the models, constrained modulus which corresponds to the oedometric modulus was used. The values of this module were determined from the characteristics of penetration from CPTU and DMT tests.

Key words: cone penetration test, empirical relationships, stiffness models

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 5.02.2014