

POMIAR CIŚNIENIA WODY W PORACH METODĄ SONDOWANIA STATYCZNEGO W ASPEKTCIE OCENY WYTRZYMAŁOŚCIOWEJ GRUNTÓW

Wojciech Tschuschke

Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Streszczenie. Obecnie metoda sondowania statycznego posiada już na tyle ugruntowaną pozycję wśród badań geotechnicznych, że często wskazywana jest jako badanie wiodące. Bywa niekiedy, że odwołując się do statusu badania, nadinterpretowuje się jego wyniki, szczególnie w sytuacji gdy dokonuje się oceny wytrzymałościowej podłoża jedynie na podstawie wyników testu CPT. W warunkach badania z odpływem wody i nośnego podłoża problem jest nieistotny, natomiast nabiera znaczenia, gdy w warunkach ograniczonego odpływu wody lub jego braku w ocenie wytrzymałościowej podłoża nie uwzględnia się rejestracji nadwyżki ciśnienia wody w porach. Kwestia wyboru wiarygodnej procedury interpretacyjnej stanowi kluczowy element we właściwej analizie wyników badania statycznego sondowania. W pracy przedstawiono ograniczenia i kryteria różnicujące wybór procedury interpretacyjnej do oceny parametrów wytrzymałości na ścinanie oraz porównano wyniki analizy wytrzymałościowej gruntów podłoża w zależności od rodzaju wykonanego badania CPT i CPTU.

Słowa kluczowe: CPT, CPTU, wytrzymałość na ścinanie

WSTĘP

Dobór właściwej metody badawczej w celu rozstrzygnięcia konkretnego problemu geotechnicznego poprzedzony powinien być zawsze wnikliwą analizą uwarunkowań techniczno-ekonomicznych badania oraz wstępnym rozpoznaniem ośrodka gruntowego, w którym badanie będzie realizowane. Praktyka inżynierska wskazuje jednak na wiele ewidentnych przykładów niekompetentnych lub nietrafnych decyzji, skutkujących błędnym wnioskowaniem o wynikach badań. Doskonale zagadnienie to zilustrować można na przykładzie metody sondowania statycznego. Z jednej strony bowiem najprostsze i zarazem najtańsze badanie CPT stożkiem mechanicznym z reguły nie będzie wystar-

czająco wiarygodne do oceny parametrów mechanicznych większości gruntów budowlanych, z drugiej zaś zastosowanie piezostożka sejsmicznego (SCPTU) do kontroli jakości zagęszczenia budowli ziemnych byłoby ekonomicznie nieuzasadnione. W rzeczywistości Polski problem ten nabiera szczególnego znaczenia, gdyż w ostatnich dwóch dekadach wiele krajowych firm geotechnicznych i geologicznych nabyło sondy statyczne i za pomocą tego sprzętu realizuje badania gruntów na potrzeby przyszłych inwestycji. W wielu przypadkach, bez względu na zastosowaną technikę badań (CPT, RCPT, CPTU, SCPTU) i system rejestracji danych (mechaniczny czy elektryczny), stosuje się te same formuły interpretacyjne, nie respektując ograniczeń wynikających z zastosowanej metody badań.

Zasadniczym celem niniejszej pracy było udzielenie odpowiedzi na pytanie, w jakich warunkach gruntowych dopuszczalne jest stosowanie techniki CPT, a w jakich techniki CPTU, żeby ocena wytrzymałościowa gruntu była wiarygodna.

INTERPRETACJA WYNIKÓW SONDOWANIA STATYCZNEGO

Standardowe badanie metodą sondowania statycznego przewiduje w przypadku testu CPT rejestrację dwóch parametrów penetracji: oporu stożka (q_c) i tarcia na tulei ciernej (f_s), natomiast testu CPTU – dodatkowo trzeciej charakterystyki penetracji – nadwyżki ciśnienia wody w porach (u_c). W przypadku pierwszym możliwa jest rejestracja parametrów testu stożkiem mechanicznym z częstotliwością odczytów wyników badania co 20 cm przyrostu głębokości sondowania lub znacznie bardziej precyzyjny pomiar stożkiem elektrycznym, metodą quasi-ciągłą, z automatycznym pomiarem parametrów testu co 2 cm przyrostu głębokości sondowania. W badaniu CPTU stosuje się wyłącznie stożki elektryczne [Lunne i in. 1997, IRTP 1999, Sikora 2006, PN-EN 1997-2 2007].

Potencjalnie wyniki badania CPT umożliwiają oszacowanie parametrów wytrzymałości na ścinanie gruntów na podstawie oporu stożka. Praktycznie warunki badania ograniczają interpretację do wiarygodnej identyfikacji kąta tarcia wewnętrznego. Zgodnie z procedurą Robertsona [1990] kryterium warunkującym taką interpretację są warunki z odpływem wody. Brak możliwości weryfikacji tego warunku bezpośrednio w badaniu CPT, w którym nie rejestruje się ciśnienia wody w porach, spowodował potrzebę wyznaczenia identyfikatora zastępczego. Powszechnie stosowanym identyfikatorem uziarnienia, który wykorzystuje się w systemach klasyfikacyjnych dla badania CPT jest współczynnik tarcia (R_f):

$$R_f = \frac{f_s}{q_c} \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie: f_s – rejestrowana w badaniu wartość tarcia na tulei ciernej,
 q_c – zarejestrowana wartość oporu stożka.

Większość systemów klasyfikacyjnych utożsamia warunki z odpływem z takim uziarnieniem gruntu, które wyrażone współczynnikiem tarcia spełnia warunek $R_f < 1,0\%$, identyfikując takie grunty jako tzw. czyste piaski. W tego rodzaju ośrodku gruntowym miarodajnym parametrem wytrzymałości na ścinanie jest efektywny kąt tarcia wewnętrznego, przy jednoczesnym założeniu, że efektywna spójność $c' = 0$. Literatura tego zagad-

nienia dokumentuje kilkanaście rozwiązań empirycznych i semiempirycznych, umożliwiających oszacowanie kąta tarcia wewnętrznego na podstawie oporu stożka. Jednym z rekomendowanych jest rozwiązanie Kulhawego i Mayne [1990] opracowane dla wysokiej jakości próbek mrożonych 24 różnych piasków kwarcowych, badanych w aparacie trójosiowego ściskania i komorach kalibracyjnych:

$$\varphi' = 17,6^\circ + 11,0^\circ \log \sqrt{\frac{q_c}{\sigma_{atm} \cdot \sigma'_{vo}}} \quad (2)$$

gdzie: σ'_{vo} – składowa pionowa efektywnego naprężenia geostatycznego,
 σ_{atm} – ciśnienie odniesienia, które odpowiada ciśnieniu atmosferycznemu $\sigma_{atm} = 100$ kPa.

Rejestracja w badaniu CPTU trzeciej charakterystyki sondowania w postaci nadwyżki cieniienia wody w porach umożliwia w znacznie bardziej wiarygodny sposób ocenę warunków odpływu wody w podłożu gruntowym, w którym realizowane jest badanie. Wbudowanie filtra w konstrukcję stożka powoduje, że ciśnienie wody w porach mierzone przez filtr wpływa na rejestrowany pomiar oporu stożka. W celu wyeliminowania tego wpływu opór stożka normalizuje się zgodnie z formułą:

$$q_t = q_c + (1 - a) u_c \quad (3)$$

gdzie: q_t – znormalizowany opór stożka,
 q_c – wartość oporu stożka zarejestrowana podczas badania,
 a – współczynnik powierzchni stożka netto,
 u_c – zarejestrowane w badaniu ciśnienie wody w porach.

Istotność normalizacji tego parametru sondowania ma tym większe znaczenie, im mniejsze są mierzone wartości oporów stożka oraz im większe są rejestrowane nadwyżki ciśnienia wody w porach. W warunkach z odpływem wody normalizacja oporu stożka ze względu na wpływ ciśnienia wody w porach zazwyczaj może być pominięta.

Zmiany stanu naprężenia w podłożu, wynikające ze zmieniającej się głębokości sondowania, uwzględnia się, normalizując opór stożka przez składową pionową naprężenia geostatycznego do postaci bezwymiarowego wskaźnika (Q_t):

$$Q_t = \frac{q_t - \sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \quad (4)$$

gdzie: σ_{vo} – składowa pionowa całkowitego naprężenia geostatycznego,
 σ'_{vo} – składowa pionowa efektywnego naprężenia geostatycznego.

Powszechnie stosowanym identyfikatorem warunków odpływu, jak również rodzaju gruntów występujących na drodze penetracji stożka jest parametr ciśnienia porowego wyrażany również w postaci bezwymiarowego wskaźnika (B_q):

$$B_q = \frac{u_2 - u_o}{q_t - \sigma_{vo}} \quad (5)$$

gdzie: u_2 – ciśnienie wody w porach rejestrowane przez filtr umieszczony bezpośrednio za ostrzem stożka,

u_o – ciśnienie wody w porach *in situ* w poziomie penetracji stożka przed badaniem,

$$\sigma_{vo} = \sigma'_{vo} + u_o$$

Wskaźniki Q_t i B_q w przypadku gruntów „mieszanych”, do których kwalifikują się między innymi tzw. grunty przejściowe charakteryzujące się warunkami częściowego odpływu, zdaniem Mayne i Campanelli [2005], mogą być wykorzystywane do oszacowania wartości efektywnego kąta tarcia wewnętrznego, przy założeniu braku w gruntach efektywnej spójności ($c' = 0$), według równania:

$$\varphi = 29,5^\circ B_q^{0,121} [0,256 + 0,336 B_q + \log Q_t] \quad (6)$$

gdzie: φ' – efektywny kąt tarcia wewnętrznego,

B_q – parametr ciśnienia porowego,

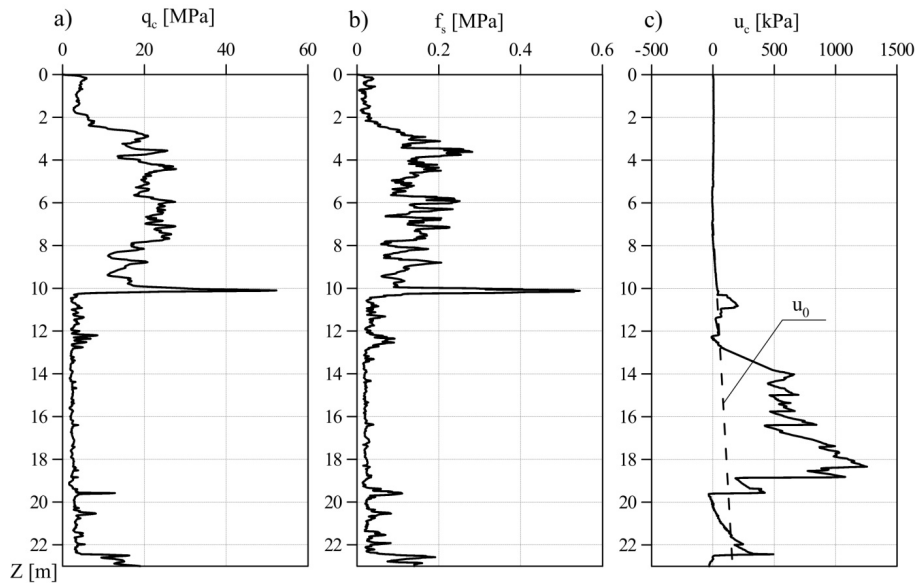
Q_t – znormalizowany bezwymiarowy opór stożka.

Według Mayne i Campanelli [2005], oszacowania kąta tarcia wewnętrznego według zależności wyrażonych równaniami (2) i (6) są zbieżne wówczas, gdy $B_q \approx 0$, natomiast wykazują tym większe zróżnicowanie, im większe są wartości rejestrowanych nadwyżek ciśnienia wody w porach. Ograniczeniem dla stosowania zależności wyrażonej równaniem (6) jest wartość parametru ciśnienia porowego, która powinna mieścić się w przedziale $0,1 < B_q < 1,0$. Przy założeniu braku spójności ($c' = 0$) uzyskuje się oszacowanie efektywnego kąta tarcia wewnętrznego w zakresie zmienności od 20 do 45°.

Analiza wyników badań

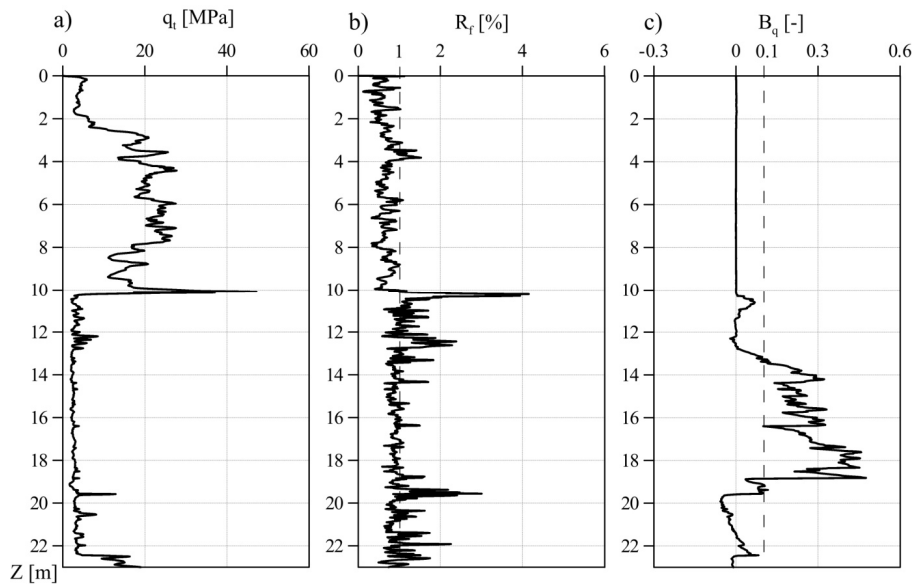
W celu odpowiedzi na pytanie sformułowane we wstępie pracy do analizy wytypowano przykład wyników badań zrealizowanych na potrzeby jednej z wielu inwestycji drogowych w kraju. Analizie porównawczej poddano wyniki interpretacji badań sondowania statycznego wykonanych technikami CPT oraz CPTU w obrębie tego samego węzła badawczego. Zarejestrowane w badaniach charakterystyki penetracji przedstawiono graficznie na rysunku 1.

W przypadku analizy wyników testu CPT do dyspozycji interpretatora pozostają dwie charakterystyki penetracji: rozkłady z głębokością zarejestrowanych wartości oporów stożka i tarcia na tulei czarnej (rys. 1a i b). Charakterystyki te umożliwiają dodatkowo wyznaczenie w analizowanym profilu rozkładu z głębokością współczynników tarcia (rys. 2b). Przeprowadzenie oceny wytrzymałościowej gruntów podłoża poprzedzone musi być ustaleniem ogólnej charakterystyki gruntów (rodzaju, warunków odpływu wody) celem określenia dla wydzielonych grup osadów miarodajnych dla nich parametrów wytrzymałości na ścinanie. Identyfikacji tej służą zazwyczaj systemy klasyfikacyjne, wśród których szczególną pozycję zajmuje trójparametrowy system klasyfikacyjny Robertsona [1990]. Lokalizacja na diagramie klasyfikacyjnym wyników sondowań CPT (rys. 3a) wskazuje, że podłoże budują dwie zasadnicze formacje osadów: w strefie stropowej „czystych piasków” w stanie zagęszczonym (obszar nr 9) oraz w głębszym podłożu piasków pylastych w stanie luźnym (obszar nr 7). Taka identyfikacja gruntów podłoża pozwala przyjąć dla nich warunki z odpływem oraz wskazać jako miarodajny parametr



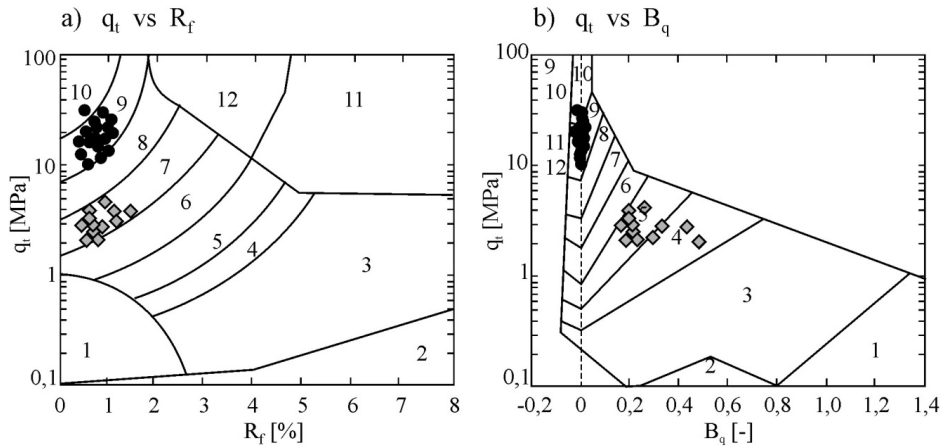
Rys. 1. Parametry penetracji rejestrowane w badaniu sondowania statycznego

Fig. 1. Measured parameters from cone penetration test



Rys. 2. Znormalizowane parametry penetracji z badania sondowania statycznego

Fig. 2. Normalized parameters from cone penetration test

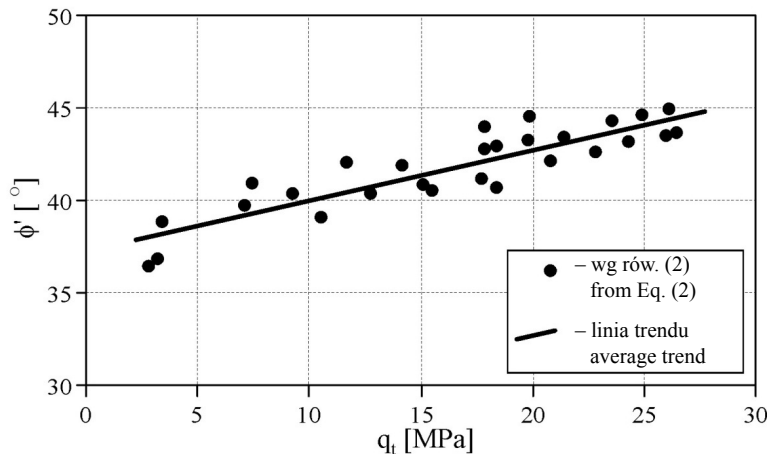


System klasyfikacyjny SBT (The Soil Behavioral Type): 1 – sensitive clay, 2 – organic soil, 3 – clay, 4 – silty clay, 5 – clayey silt, 6 – sandy silt, 7 – silty sand, 8 – sand to silty sand, 9 – sand, 10 – gravelly sand, 11 – very stiff fine grained soil, 12 – sand to clayey sand

Rys. 3. Lokalizacja analizowanych gruntów w systemie klasyfikacyjnym badania CPTU

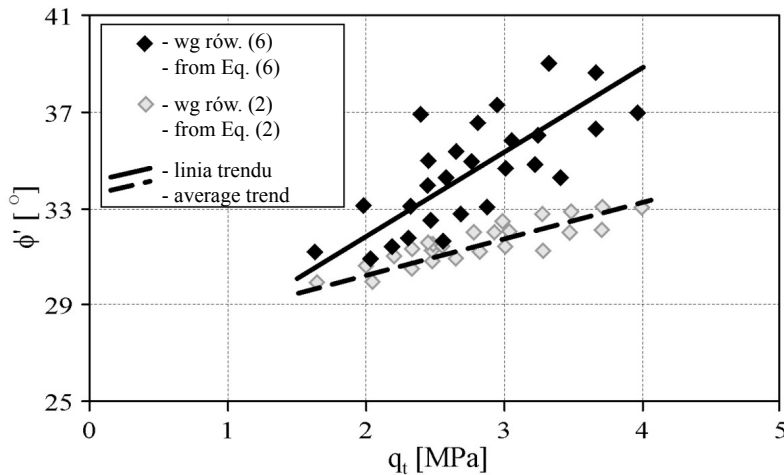
Fig. 3. Location of analyzed soils in the soil behavior type classification system from CPTU data

wytrzymałości na ścinanie kąt tarcia wewnętrznego. Dla badania typu CTP nieprzydatny jest drugi diagram systemu klasyfikacyjnego (rys. 3b). Korzystając z zależności wyrażonej równaniem (2), oszacowano zakresy zmienności kątów tarcia wewnętrznego dla gruntów dwóch analizowanych stref podłoża. W strefie stropowej zagęszczonych „czystych piasków” wartości szacowanego parametru zmieniają się w zakresie od 37 do 45° (rys. 4), natomiast w strefie drugiej, gruntów zakwalifikowanych na podstawie badania CPT do piasków pylastych – w zakresie od 29 do 33° (rys. 5).



Rys. 4. Zależność między efektywnym kątem tarcia wewnętrznego i oporem stożka dla warunków z odpływem wody (równanie 2)

Fig. 4. Relationship between effective friction angle and cone resistance for full drainage conditions (Equation 2)

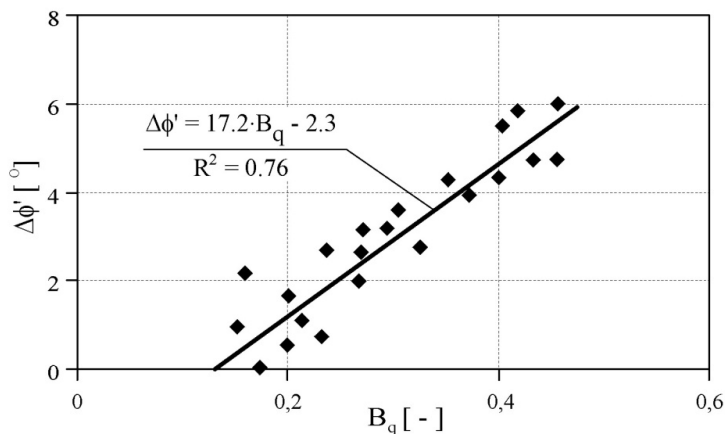


Rys. 5. Porównanie oszacowania kąta tarcia wewnętrznego uwzględniającego warunki z odpływem (równanie 2) i ograniczonego odpływu wody (równanie 6)

Fig. 5. Comparison of estimation of the effective friction angle consideration full drainage (Equation 2) and partial drainage conditions (Equation 6)

Analizę wyników testu CPTU w stosunku do badania CPT uzupełniają charakterystyka zmian ciśnienia wody w porach (rys. 1c). Znajomość tego parametru testu pozwala dodatkowo na wyznaczenie rozkładów z głębokością znormalizowanych parametrów penetracji: znormalizowanego oporu stożka (rys. 2a) oraz parametru ciśnienia porowego (rys. 2c). Wykorzystanie znormalizowanych parametrów penetracji do klasyfikacji analizowanych gruntów umożliwia weryfikację wyników klasyfikacji wstępnej (rys. 3a). W przypadku analizowanych gruntów potwierdzono wyniki oceny wstępnej dla piasków budujących stropową strefę podłoża (ten sam obszar wydzielenia – nr 9 na rys. 3a i b), utrzymując przyjęte dla tej strefy podłoża warunki z odpływem ($B_q \approx 0$) oraz zmieniając wyniki wstępnej klasyfikacji dla piasków pylastych zidentyfikowanych w dolnej strefie profilu. Wprowadzenie do systemu klasyfikacyjnego parametru ciśnienia porowego spowodowało inną niż na podstawie współczynnika tarcia identyfikację rodzaju gruntu. Przesunięcie na systemie klasyfikacyjnym lokalizacji punktów identyfikujących analizowane grunty z obszaru nr 7 (rys. 3a) do obszaru nr 5 (rys. 3b) wskazuje na zmianę warunków odpływu wody. Stosunkowo małe wartości współczynnika tarcia $R_f < 1\%$, przy jednocześnie dużych wartościach parametru ciśnienia porowego $B_q > 0,1$, są charakterystyczne dla gruntów o uziarnieniu odpowiadającym zaglinionym piaskom lub piaskom gliniastym.

Uwzględnienie w analizie wytrzymałościowej ciśnienia wody w porach nie zmienia oceny efektywnego kąta tarcia wewnętrznego w piaskach charakteryzujących się warunkami z odpływem (rys. 4) oraz przeciwnie – różnicuje tę ocenę w piaskach zaglinionych, w których podczas sondowania rejestrowano nadwyżki ciśnienia wody w porach (rys. 5). Różnica w ocenie kątów tarcia wewnętrznego zwiększa się proporcjonalnie wraz ze wzrostem parametru ciśnienia porowego (rys. 6). Dla parametru ciśnienia porowego o wartości $B_q = 0,5$ oszacowany efektywny kąt tarcia wewnętrznego zmienia się z warto-



Rys. 6. Zależność między różnicą oszacowania efektywnego kąta tarcia wewnętrznego a parametrem ciśnienia porowego

Fig. 6. Relationship between the difference of effective friction angle estimation and pore pressure parameter

ści 33° do wartości 39° . Ta pozornie nieduża zmiana wartości kątów tarcia wewnętrznego, w przełożeniu na ocenę nośności podłoża, powoduje około dwukrotny wzrost współczynników nośności.

W omawianym przykładzie inwestycji drogowej dla mniej korzystnego układu warstw gruntów nie należy kierować się wyłącznie kryteriami ceny, gdyż wybór tańszej metody badania – techniką CPT, skutkowało niedoszacowaniem parametrów wytrzymałościowych gruntów, prowadząc w konsekwencji do błędnej decyzji o konieczności wzmocnienia podłoża budowlanego.

PODSUMOWANIE

Przedstawiona w pracy analiza wyników badań wskazuje, że wybór rodzaju testu sondowania statycznego, skutkujący zastosowaniem w badaniu stożka o określonej konstrukcji oraz właściwych formuł interpretacyjnych, jest istotnym czynnikiem wpływającym na poprawność i wiarygodność oceny wytrzymałościowej gruntów podłoża.

Wybór adekwatnej, w stosunku do rozpatrywanego zagadnienia geotechnicznego, metody badawczej powinien zostać poprzedzony ustaleniem warunków odpływu wody gruntów zalegających w podłożu. Kryterium klasyfikacyjnym, na którego podstawie określa się warunki odpływu, powinna być wartość bezwymiarowej nadwyżki ciśnienia wody w porach, którą wyznacza się na podstawie analizy krzywej dyssypacji ciśnienia [Tschuschke 2006]. W przypadku braku testów dyssypacji ciśnienia wody w porach wyznacznikiem umożliwiającym przyjęcie odpowiedniego warunku odpływu wody może być parametr ciśnienia porowego lub pośrednio współczynnik tarcia. Wyniki przeprowadzonej analizy upoważniają do sformułowania kilku wniosków.

W celu identyfikacji rodzaju gruntu na podstawie wyników sondowania statycznego należy w miarę możliwości stosować trójparametrowe systemy klasyfikacyjne, które

w istotny sposób zwiększają wiarygodność oceny. Przykładem takim jest system klasyfikacyjny Robertsona [1990].

W gruntach charakteryzujących się warunkami z odpływem pomiar ciśnienia wody w porach jest parametrem nieistotnym w kontekście oceny wytrzymałościowej. W przypadku podłoża tego rodzaju ($R_f < 1\%$ i $B_q \sim 0$) wyniki sondowania stożkiem, bez rejestracji ciśnienia wody w porach (CPT), uznać można za wiarygodne do oceny efektywnego kąta tarcia wewnętrznego.

W ocenie wytrzymałościowej gruntów przejściowych ($0,5\% < R_f < 2,5\%$ i $B_q > 0,1$) wykazano istotne różnice w interpretacji wyników badania typu CPT i CPTU. Nieuwzględnienie wpływu ciśnienia wody w porach na oszacowanie efektywnego kąta tarcia wewnętrznego prowadzi do istotnego zaniżenia wartości tego parametru. Ograniczeniem wykorzystania rozwiązania wyrażonego równaniem (6) jest zachowanie warunku $0,1 < B_q < 1,0$. W gruntach przejściowych badaniem wiarygodnym, na którego podstawie szacowana jest wytrzymałość na ścinanie, jest wyłącznie sondowanie z pomiarem ciśnienia wody w porach (CPTU).

PIŚMIENICTWO

- IRTP – International Reference Test Procedure for the Cone Penetration Test (CPT) and the Cone Penetration, 1999. Test with pore pressure (CPTU). Report of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, TC-16 Ground Property Characterisation from In-situ Testing.
- Kulhawcy F.H., Mayne P.W., 1990. Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design. Report EPRI EL-6800. Electric Power Research Institute, Palo Alto, Calif.
- Lunne T., Robertson P.K., Powell J.J.M., 1997. Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice. Blackie Academic. EF Spon/Routledge Publishers, New York.
- Mayne P.W., 2007. Cone Penetration Testing. A Synthesis of Highway Practice. Transportation Research Board, NCHRP 368, Washington D.C.
- Mayne P.W., Campanella R.G., 2005. Versatile Site Characterization by Seismic Piezocone. Proc. of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Millpress, Rotterdam, Osaka, 2, 721–724.
- PN-EN 1997-2: 2007 Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego.
- Robertson P.K., 1990. Soil Classification Using the Cone Penetration Test. Canadian Geotechnical Journal 27, 1, 151–158.
- Sikora Z., 2006. Sondowania statyczne, metody i zastosowanie w geoinżynierii. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- Tschuschke W., 2006. Sondowania statyczne w odpadach poflotacyjnych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Budownictwo 110, Gliwice.

PORE WATER PRESSURE MEASUREMENT USING CONE PENETRATION TEST IN TERMS OF SOIL STRENGTH ASSESSMENT

Abstract. At present cone penetration test is considered to be a well-established method in geotechnical analyses to the point when it is frequently seen as a leading method. Sometimes its results are overestimated due to the status of this method, particularly when soil

strength is evaluated solely on the basis of CPT results. At full drainage and a load-bearing subsoil this problem is not significant, but it gains in importance when recorded excess pore water pressure is not included in the evaluation of soil strength under partial drainage or no drainage. The matter of selecting a reliable interpretation procedure constitutes a key element in the proper analysis of cone penetration test results. The paper presents limitations and criteria differentiating the selection of an interpretation procedure for the evaluation of shear strength parameters and a comparison of strength analyses results of soils depending on the type of applied CPT and CPTU.

Key words: CPT, CPTU, shear strength

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 8.06.2013