

WALDEMAR ST. SZAJNA \*

## WYKORZYSTANIE BADAŃ CPTU DO WYZNACZANIA PARAMETRÓW GRUNTU W ANALIZIE STATECZNOŚCI SKARP GŁĘBOKICH WYKOPÓW

### *Streszczenie*

*W celu sprawdzenia stateczności skarp głębokich wykopów, konieczna jest znajomość efektywnych wartości parametrów mechanicznych podłoża. W pracy przedstawiono możliwości i ograniczenia związane ze stosowaniem badań CPTu do wyznaczania efektywnych wartości parametrów gruntów spoistych i mało spoistych.*

Słowa kluczowe: sondowania statyczne CPTu, obciążenie z drenażem, parametry efektywne, stateczność skarp, Eurokod 7

### Wprowadzenie

Rozwój infrastruktury drogowej wiąże się z koniecznością budowy nasypów drogowych oraz prowadzenia dróg w wykopach. W każdym z tych przypadków istnieje konieczność sprawdzenia stateczności projektowanych skarp. Sprawdzenie takie jest możliwe po wyznaczeniu odpowiednich parametrów mechanicznych podłoża tworzącego korpus skarpy oraz podłoża bezpośrednio poniżej postawy skarpy. W obszarze, w którym potencjalnie może powstać powierzchnia poślizgu konieczne jest ponadto rozpoznanie warunków wodnych. Cechy podłoża oraz ciśnienia porowe wywołane występowaniem wód gruntowych, należy wyznaczyć w odpowiednich badaniach.

W celu racjonalizacji środków przeznaczony na badania, norma Eurokod 7 wprowadza pojęcie kategorii geotechnicznej obiektu. Kategoria zależna jest od stopnia skomplikowania warunków gruntowo – wodnych, obciążeń działających na układ a także wielkości i konsekwencji zniszczenia projektowanej konstrukcji [Orr&Farrell 1999]. Sposób wyznaczania parametrów oraz metoda projektowania powinny być dostosowane do kategorii geotechnicznej obiektu.

---

\* Instytut Budownictwa Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zakład Geotechniki i Geodezji, ul. Z. Szafrana 1, 65-516 Zielona Góra, W.Szajna@ib.uz.zgora.pl

W przypadku pierwszej kategorii geotechnicznej odnoszącej się do prostych układów, nie jest konieczne podawanie ilościowych cech podłoża a wystarczają badania jakościowe. Dla obiektów kategorii drugiej wymagane są standardowe badania. Kategoria trzecia, dotycząca układów skomplikowanych, wymaga stosowania specjalnych badań. Do III kategorii geotechnicznej [Wysokiński 2006] zalicza: głębokie wykopy, nasypy powyżej 8m oraz zbocza o nachyleniu większym niż  $15^{\circ}$  przeznaczone do zagospodarowania obiektami budowlanymi. Dla obiektów takich wymagane są badania laboratoryjne i polowe, opracowanie dokumentacji geologiczno-inżynierskiej, a także prowadzenie monitoringu metodami geodezyjnymi lub geofizycznymi. Parametry mogą być także wyznaczane na podstawie analizy wstecznej osuwisk występujących w regionie.

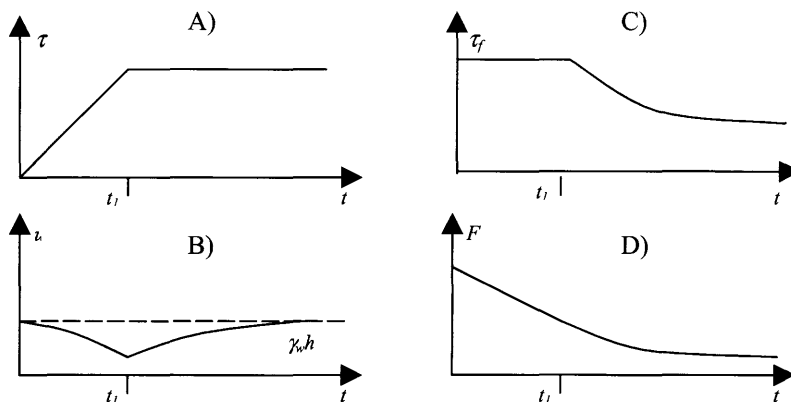
Przy wyborze metody obliczeń stateczności, Eurokod 7 pozwala na stosowanie zarówno metod analitycznych takich jak metody równowagi granicznej i metody granicznego stanu naprężenia jak i metod numerycznych, wśród których wykorzystywana jest głównie elementów skończonych. W analizie należy uwzględnić sytuacje obliczeniowe krótko- i długotrwałe. Należy wziąć pod uwagę warstwowanie podłoża oraz rozkład ciśnienia wody w porach gruntu. Przegląd metod stosowanych do sprawdzania stateczności skarp przedstawiła np. [Stilger-Szydło 2005]. Inżynierskie metody równowagi granicznej omówione są w większości podręczników mechaniki gruntów. Przykład zastosowania MES do analizy stateczności skarp wykopu przedstawił [Szajna 2007]. W pracy tej omówiono zalety stosowania metody w gruntach zaburzonych glacictektonicznie. W przypadku stosowania MES konieczna jest znajomość parametrów wytrzymałości i sztywności gruntu, natomiast stosując metody równowagi granicznej wystarczająca jest znajomość parametrów wytrzymałości. Ponieważ znajomość wytrzymałości gruntów wymagana jest we wszystkich stosowanych metodach, w dalszej części pracy rozważany będzie problem wyznaczania tych parametrów dla skarp wykopów.

Dobłą aparaturą do badań polowych gruntu są sondowania statyczne CPTu. Pozwalają one na ustalenie profilu podłoża, a przez zależności korelacyjne umożliwiają wyznaczenie parametrów stanu gruntu oraz parametrów mechanicznych. Możliwości i ograniczenia stosowania tych badań do określania parametrów efektywnych wytrzymałości, są przedmiotem dalszej części pracy.

## **Naprężenia i wytrzymałość gruntu w trakcie wykonywania wykopu**

Utrata stateczności skarp jest wynikiem dwóch nakładających się procesów: z jednej strony następuje wzrost naprężeń stycznych w korpusie skarpy – w wyniku wykonywania wykopu, zwykle następuje także zwiększanie obciążenia w koronie skarpy, z drugiej strony wytrzymałość gruntu na ścinanie

w korpusie zmniejsza się. Koncentrując się na drugim z wymienionych procesów należy stwierdzić, że podstawowym czynnikiem redukującym wytrzymałość gruntu na ścinanie jest w tym przypadku wzrost ciśnienia porowego. Prześledźmy bardziej szczegółowo poszczególne fazy tego procesu, a mianowicie: fazę wykonywania wykopu ( $0 < t < t_1$ ) oraz fazę po zakończeniu prac ( $t > t_1$ ), gdzie  $t_1$  jest czasem zakończenia odciążenia związanego z wykonywaniem wykopu - rys.1.



Rys. 1. Schemat zmian zachodzących w gruncie w trakcie wykonywania wykopu.

Zmiany: A) naprężeń stycznych, B) ciśnienia porowego, C) wytrzymałości gruntu na ścinanie, D) współczynnika stateczności skarpy [Das 1985]

Fig. 1. Diagram of changes in soil due to excavation. Variation of: A) effective stresses, B) pore water pressures, C) shear strength of soil, D) factor of safety of the slope [Das 1985]

W wyniku wykonywania wykopu następuje wzrost naprężeń stycznych w korpusie skarpy (rys. 1A) oraz odciążenie układu i redukcja naprężeń całkowitych. W przypadku gruntów spoistych prowadzi to do redukcji ciśnień porowych poniżej wartości hydrostatycznych (rys.1B). Odciążony grunt odpręża się a jego porowatość nieznacznie wzrasta. Zmniejszaniu ciśnienia porowego towarzyszy zwiększenie efektywnych naprężeń normalnych. Ponieważ naprężenia efektywne mogą maleć w wyniku redukcji obciążenia, zaś zmniejszanie ciśnienia porowego może powodować ich wzrost, na schemacie przyjęto stałą wartość wytrzymałości na ścinanie w czasie  $t < t_1$  (rys.1C). Ostatecznie wzrost naprężeń stycznych przy stałej wartości wytrzymałości na ścinanie powoduje zmniejszanie się globalnego współczynnika stateczności  $F$  skarpy w czasie odciążania układu ( $t < t_1$ ) –rys.1D.

Po zakończeniu prac ( $t > t_1$ ), gdy nie występują już zmiany obciążenia, ciśnienia porowe stopniowo powracają do wartości hydrostatycznych, powodując redukcję normalnych naprężeń efektywnych a stąd redukcję wytrzymałości gruntu na ścinanie  $\tau$ . Proces ten powoduje dalszy spadek współczynnika stateczności  $F$  skarpy.

Z przedstawionego rozumowania wynika konieczność wykonania analizy stateczności skarp wykopu w gruntach spoistych, przyjmując efektywne wartości naprężeń i efektywne parametry gruntu. Miarodajną sytuacją obliczeniową w sensie Eurokodu 7 będzie przypadek działania obciążeń długotrwałych.

### Parametry gruntu uzyskiwane w badaniach CPTu

Sondowanie statyczne polega na wciskaniu w podłoże ze stałą prędkością 2 cm/s, walcowej końcówki pomiarowej zakończonej w dolnej części stożkiem. W trakcie badania CPTu, mierzony jest opór wciskania  $q_c$  na stożku, jednostkowy opór  $f_s$  tarcia na tulei –poboczniczy walcowej końcówki pomiarowej oraz ciśnienie porowe  $u_i$  ( $i=1, 2, 3$ ; zależnie od położenia filtra do pomiaru ciśnienia piezometrycznego). Dla filtra umieszczonego bezpośrednio nad stożkiem  $i=2$ .

Opór stożka korygowany jest ze względu na jego geometrię wg wzoru

$$q_t = q_c + u_2(1 - a), \quad (1)$$

gdzie:  $q_t$  jest całkowitym skorygowanym oporem stożka,  $a$  jest współczynnikiem powierzchni netto stożka (stałą stożka).

Na podstawie mierzonych parametrów, wyznaczane są następujące parametry pochodne [Lunne, *et al.* 1997], pozwalające wnioskować o rodzaju badanego gruntu, jego stanie i wartościach parametrów wytrzymałościowych. Są to odpowiednio:

1) znormalizowany bezwymiarowy opór stożka

$$Q_t = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}}, \quad (2)$$

gdzie:  $\sigma'_{v0}$  oraz  $\sigma_{v0}$  są odpowiednio efektywnym i całkowitym pierwotnym naprężeniem pionowym,

2) znormalizowany współczynnik tarcia [%]

$$F_r = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{v0}} 100\%, \quad (3)$$

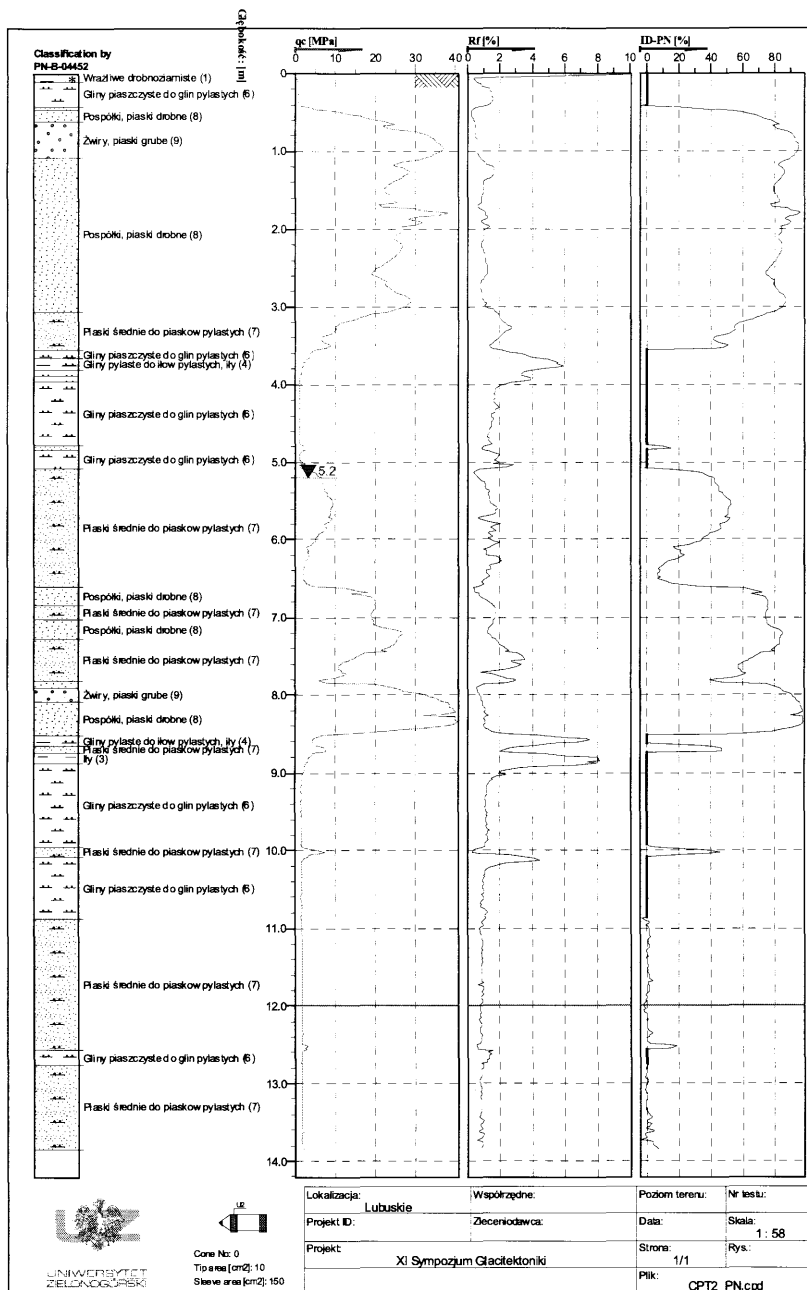
3) współczynnik ciśnienia wody w porach gruntu

$$B_q = \frac{u_2 - u_0}{q_t - \sigma_{v0}}. \quad (4)$$

Wynikiem sondowania może być przybliżone określenie rodzaju gruntu, jednakże nie na podstawie jego składu granulometrycznego, lecz na podstawie reakcji na obciążenie stożkiem –jest to tzw. *Soil Behaviour Type* (SBT). Wieloletnie badania naukowe potwierdziły zasadność stosowania kilku metod określania rodzaju gruntu na podstawie sondowania statycznego. Do najbardziej znanych na świecie metod należy klasyfikacja Robertsona z 1990 roku [Lunne, *et al.* 1997]. Dużą rolę odgrywają także klasyfikacje uwzględniające doświadczenia regionalne. W Polsce opracowana została klasyfikacja Młynarka *et al.* z 1997 roku, przyjęta w normie PN-B-04452:2002.

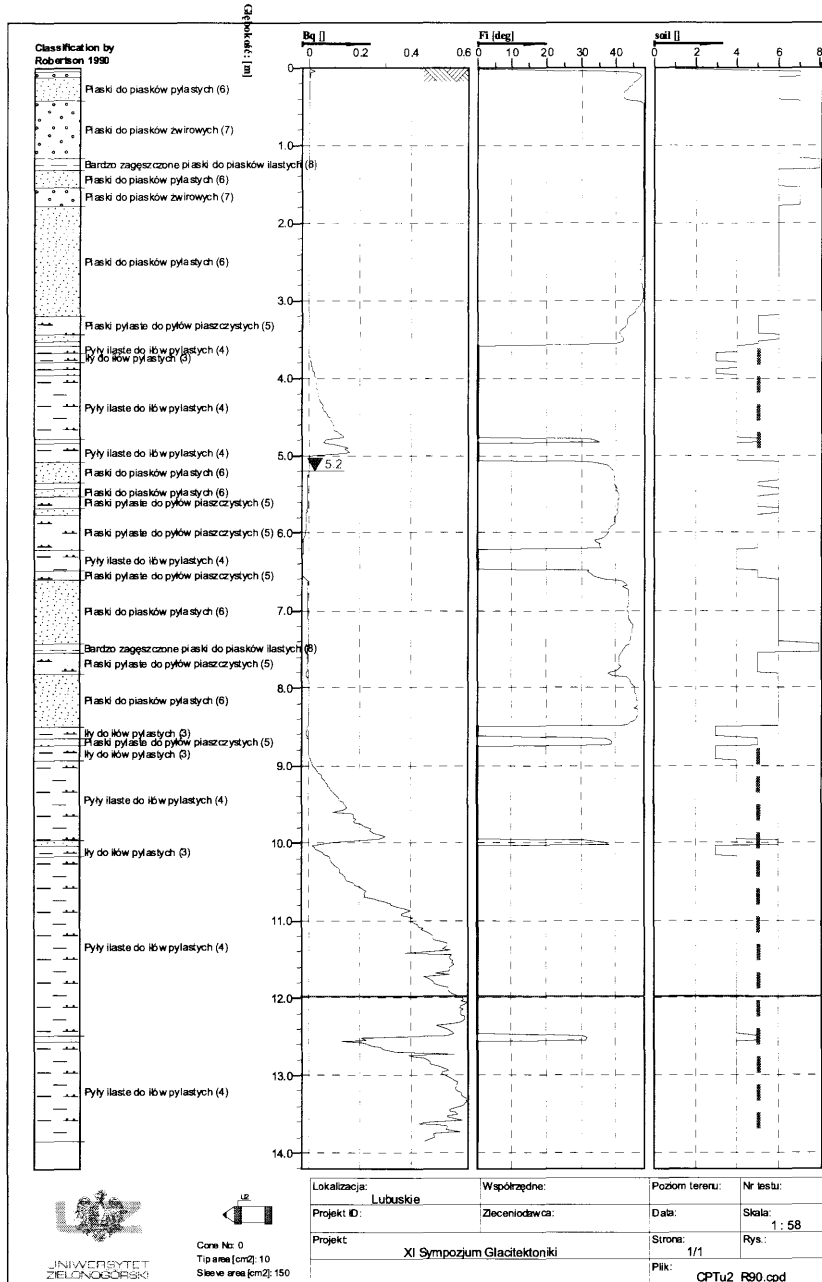
Na rys. 2 pokazano wyniki sondowania CPTu wraz z interpretacją rodzaju gruntu i stopnia zagęszczenia  $I_D$  gruntów niespoistych wg PN-B-04452:2002. Na rys. 3 pokazano interpretację tego samego sondowania, przyjmując klasyfikację Robertsona 1990. Porównanie opisu rodzaju gruntów, w lewej części każdego z rysunków, wskazuje na znaczne różnice w obu klasyfikacjach. Pełnej zgodności nie można oczekiwać gdyż pierwsza z nich dzieli grunty na 11 grup, druga zaś jedynie na 9 –patrz rys. 4. Określenie rodzaju gruntu odgrywa ważną, chociaż nie pierwszoplanową rolę w tych badaniach. Zasadnicze znaczenie ma wyznaczenie parametrów stanu i parametrów mechanicznych gruntu na podstawie reakcji podłoża na obciążenie stożkiem. Do oszacowania parametrów mechanicznych z równań korelacyjnych, ważne jest ustalenie, czy przemieszczający się stożek wywołuje obciążenie badanego gruntu z odpływem czy bez odpływu. Obciążenia te nazywane są także odpowiednio obciążeniem z drenażem i bez drenażu. Należy ponadto mieć świadomość, że poszukiwane parametry sztywności czy wytrzymałości nie są mierzone bezpośrednio, lecz wyznaczane są na podstawie zależności korelacyjnych otrzymanych z porównania sondowań statycznych i odpowiednich badań laboratoryjnych. Określone zależności korelacyjne obowiązują jedynie dla gruntów odpowiedniej grupy i w tym sensie potrzebne jest wyznaczenie rodzaju gruntu.

Prędkość wciskania stożka 2 cm/s nie powoduje wzrostu ciśnienia porowego w deformowanym gruncie gruboziarnistym o dużej wartości współczynnika filtracji. Obciążenie takie traktowane jest jako obciążenie z drenażem, a wyznaczone wartości parametrów mogą być korelowane z parametrami efektywnymi. Wciskanie stożka z taką prędkością w grunty spoiste, a w szczególności łą o bardzo małej wartości współczynnika filtracji, powoduje zmiany ciśnienia porowego i wynikające stąd zmiany cech gruntu. Przykładowo wzrost ciśnienia porowego powoduje obniżenie jego wytrzymałości. Obciążenie takie traktowane jest jako obciążenie bez drenażu i pozwala na wyznaczenie parametrów gruntu bez drenażu. Sytuacja komplikuje się w przypadku gruntów o pośredniej wartości współczynnika filtracji. Grunty takie nazywane są w literaturze dotyczącej sondowania statycznego, gruntami mieszanymi (głównie są to gliny i pyły). Problemem jest także wyznaczanie parametrów z drenażem w gruntach spoistych. Analizy takie są bardziej

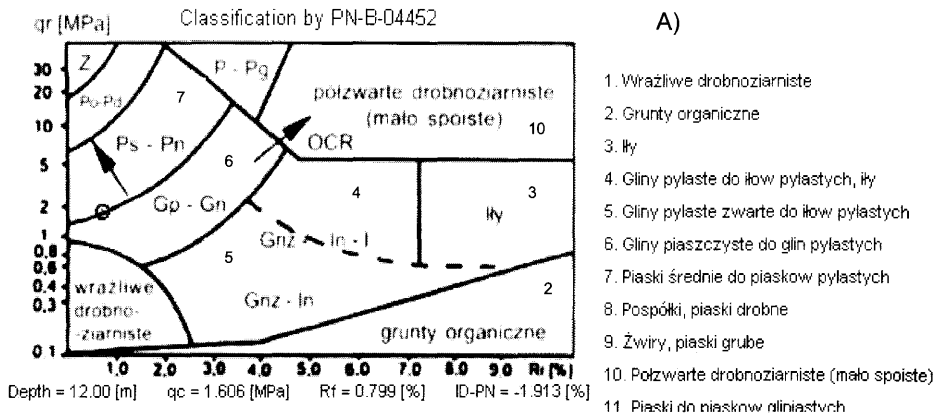


Rys. 2. Interpretacja wyników sondowania wg PN-B-04452:2002

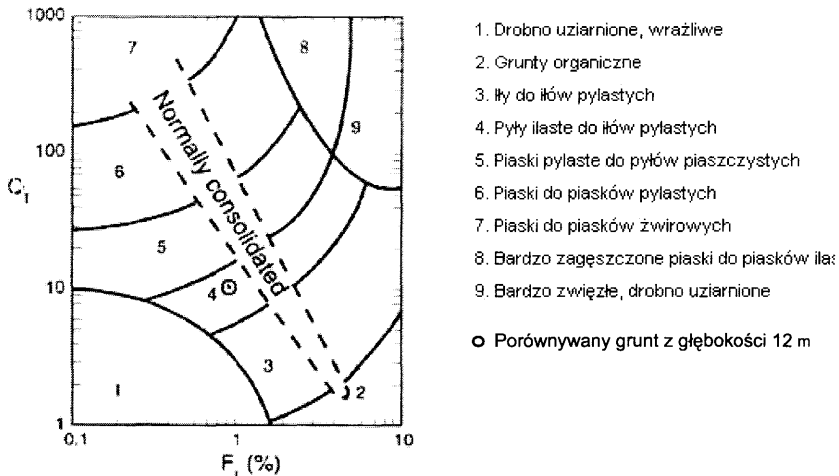
Fig. 2. Interpretation of CPTu according to PN-B-04452:2002



Rys. 3. Interpretacja wyników sondowania wg Robertsona 1990  
 Fig. 3. Interpretation of CPTu according to Robertson 1990



Classification by Robertson 1990



Rys. 4. Klasyfikacja gruntów: A) wg PN-B-04452:2002, B) wg Robertsona 1990

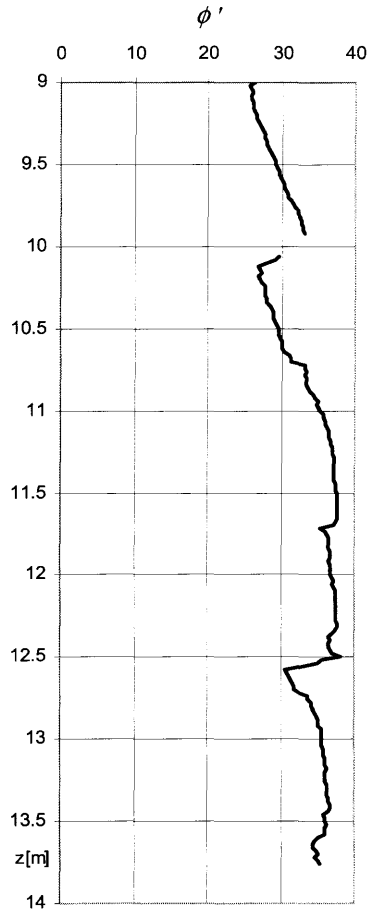
Fig. 4. Soil classification acc. to: A) PN-B-04452:2002, B) Robertson 1990

skomplikowane, a wyniki mniej wiarygodne. Na rys. 3 przedstawiono wartości efektywnego kąta tarcia dla gruntów niespójnych –metoda Lancellotty [Lunne, *et al.* 1997].

Zgodnie z rozważaniami przedstawionymi w punkcie drugim, w przypadku projektowania skarp wykopów konieczne jest określenie parametrów efektywnych gruntu i wykonanie analizy stateczności z drenażem. W Polsce brak jest metod szacowania parametrów mechanicznych gruntów mieszanych w oparciu o klasyfikację PN-B-04452 i doświadczenia regionalne. Jeżeli więc



korpus skarpy tworzą grunty mieszane lub spoiste, to w celu określenia parametrów efektywnych konieczne jest wykorzystanie klasyfikacji Robertsona i metod wykorzystujących tę klasyfikację. Sytuacja taka występuje w sondowanym profilu w przedziale głębokości 3,6 – 5m oraz poniżej głębokości 8,6m. W celu wyznaczenia potrzebnych parametrów efektywnych przyjęto klasyfikację Robertsona 1990, oraz metodykę zaproponowaną w pracy [Mayne 2007], po wcześniejszym obliczeniu parametrów pomocniczych z równań (2) oraz (4).



Rys. 5. Kąt  $\phi'$  dla gruntów mieszanych

Fig. 5. Friction angle  $\phi'$  for mixed soil

Zanim przejdziemy do wyznaczenia parametrów efektywnych w gruntach mieszanych, warto porównać jak grunty z interesujących nas głębokości klasyfikowane są wg PN-B-04452 i Robertsona. Porównania gruntu

z głębokości 12,0m klasyfikowanego według obu metod dokonano odpowiednio na rys. 4A i 4B. Grunt przedstawiono w postaci punktu na każdym z nomogramów. W przypadku klasyfikacji polskiej normy, punkt leży na pograniczu grupy (6) stanowiącej gliny piaszczyste do glin pylastych i grupy (7), którą tworzą piaski średnie do piasków pylastych. Według interpretacji Robertsona, grunt z rozważanej głębokości należy do grupy (4) –pyły ilaste do ilów pylastych.

Efektywny kąt tarcia wewnętrznego dla gruntu mieszanego można wyznaczyć z następującej formuły [Mayne 2007]:

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

Wzór ma zastosowanie gdy  $0,1 < B_q < 1,0$ .

Wykres współczynnika ciśnienia wody w porach gruntu  $B_q$  określony ze wzoru (4), pokazano dla całego profilu sondowania na rys. 3. Analizowany grunt zarówno górnej jak i dolnej warstwy podłoża, klasyfikowanej do grupy (4), spełnia powyższy warunek.

Wartości efektywnego kąta tarcia wewnętrznego wyznaczone ze wzoru (5) pokazano na rys. 5. Nieciągłość wykresu widoczna na głębokości około 10m wynika z występowania warstwy piasku –gruntu grupy (6) dla którego nie obowiązuje formuła (5). Z wykresu wynika, że obliczone wartości kąta wahają się w granicach  $25^\circ - 37^\circ$ .

Do otrzymanych wyników należy podchodzić z ostrożnością. W gruntach grupy (4) klasyfikacji Robertsona, sonda przemieszczająca się z prędkością 2 cm/s stanowi obciążenie bez drenażu. Na tej podstawie, wykorzystując badania porównawcze Mayne'a, wyznaczono parametry efektywne –z drenażem. Wobec powyższego przed wykorzystaniem w projektowaniu odpowiedzialnych konstrukcji otrzymane rezultaty wymagają dodatkowego potwierdzenia

### Podsumowanie i wnioski

Sondowania statyczne z pomiarem ciśnienia porowego CPTu, są nowoczesną metodą rozpoznania podłoża gruntowego. Pozwalają na identyfikację warstw gruntu oraz przewarstwień nawet o kilkucentymetrowej miąższości. Umożliwiają także wyznaczanie parametrów mechanicznych podłoża potrzebnych w projektowaniu. Szczególnie dobrze nadają się do wyznaczania efektywnych parametrów wytrzymałości w gruntach niespoistych oraz wyznaczania wytrzymałości na ścinanie bez drenażu w gruntach spoistych. Wyznaczanie parametrów odbywa się na podstawie zależności korelacyjnych, a nie przez bezpośrednie pomiary poszukiwanych wielkości. Metodologia taka

stwarza pewne problemy przy szacowaniu parametrów efektywnych w gruntach spoistych oraz wszelkich parametrów w gruntach mieszanych.

W przypadku projektowania stateczności skarp wykopów, miarodajną sytuacją obliczeniową jest działanie obciążeń długotrwałych. Konieczna jest więc znajomość parametrów efektywnych podłoża. Na świecie opracowywane są procedury wyznaczania parametrów efektywnych w gruntach mieszanych i spoistych przy pomocy badań CPTu. W chwili obecnej, ze względu na małe doświadczenia regionalne, wiarygodność tych procedur jest ograniczona.

Przedstawiony w pracy przykład wyznaczenia efektywnego kąta tarcia wewnętrznego gruntu wymagałby dodatkowej weryfikacji, przed wykorzystaniem obliczonych wartości parametrów w projektowaniu bardzo odpowiedzialnych konstrukcji. Wielkości wyznaczonych parametrów mogłyby być wykorzystane w projektowaniu obiektów drugiej kategorii geotechnicznej.

Dla obiektów kategorii trzeciej, dla których zgodnie z normą Eurokod 7 wymagane są badania specjalne, uzyskane w poprzednim punkcie przedstawione na rys. 5 wartości parametrów efektywnych powinny być potwierdzone w laboratoryjnych badaniach trójosiowego ściskania z pomiarem ciśnienia porowego w próbce gruntu.

## Literatura

- DAS B.M.: *Principles of geotechnical engineering*, PWS-KENT Publ. Comp. Boston 1985
- LUNNE T., ROBERTSON P.K., POWELL J.J.M.: *Cone penetration testing in geotechnical practice*. Blackie Academic, Chapman Hall, London 1997
- MAYNE P.W.: *Cone penetration testing. A synthesis of highway practice*. NCHRP Synthesis 368. Transportation Research Board, National Academies Press, Washington D.C 2007
- ORR T.L., FARRELL E.R.: *Geotechnical design to Eurocode 7*. Springer – Verlag, London 1999
- PN-B-04452:2002 *Geotechnika. Badania polowe*. PKN, Warszawa
- PN-EN 1997-1:2008 Eurokod 7 *Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne*. PKN, Warszawa
- STILGER-SZYDŁO K.: *Posadowienie budowli infrastruktury transportu lądowego*, DWE, Wrocław 2005
- SZAJNA W.St.: *Numeryczna analiza stateczności skarp podczas wykonywania wykopu w gruntach zaburzonych głaciciektonicznie*. Zeszyty Naukowe UZ, Nr 134, Inżynieria Środowiska 14, Zielona Góra, 167-177, 2007
- WYSOKIŃSKI L.: *Ocena stateczności skarp i zboczy*. Instrukcje, Wytyczne, Poradniki, 424/2006, ITB, Warszawa 2006

## APPLICATION OF CPTU IN DETERMINATION OF SOIL PARAMETERS IN SLOPE STABILITY ANALYSIS OF DEEP EXCAVATIONS

### *S u m m a r y*

*The paper presents the problem of determination of soil parameters with the use of Cone Penetration Tests with pore pressure measurement (CPTu). To solve the cut slope stability problem, according to the Eurocode 7, it is required to estimate the values of effective parameters of the subsoil. The determination of these parameters by CPTu is a standard task for granular soil. The paper describes their determination for mixed soils and discusses the advantages and limitations of the used method.*

**Key words:** cone penetration tests CPTu, drained loading, effective parameters, slope stability, Eurocode 7