

WPŁYW WSKAŹNIKA PLASTYCZNOŚCI NA PARAMETRY WYTRZYMAŁOŚCIOWE GRUNTÓW

Wojciech Tymiński, Tomasz Kiełczewski

Geoteko Projekty i Konsultacje Geotechniczne Sp. z o.o.

Streszczenie. W artykule opisano wyniki badań przeprowadzonych w aparacie trójosiowego ściskania na próbkach gruntów spoistych o nienaruszonej strukturze. Dla gruntów o szerokim zakresie zmienności wskaźnika plastyczności wykonano kilkadziesiąt oznaczeń parametrów wytrzymałościowych – kąta tarcia wewnętrznego (ϕ') i spójności (c'), oraz wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odpływu (c_u). Na podstawie analizy wyników badań w odniesieniu do dotychczas stosowanych norm i literatury przedstawiono zależność między wskaźnikiem plastyczności gruntów a kątem tarcia wewnętrznego. Zwrócono również uwagę na przyczyny zawyżania wartości spójności gruntów, przyjmowanej do obliczeń geotechnicznych. Przywołano kilka zaleceń normy Eurokod 7, dotyczących interpretacji wyników badań wytrzymałościowych.

Słowa kluczowe: parametry wytrzymałościowe, badania trójosiowe, kąt tarcia wewnętrznego, spójność, wytrzymałość na ścinanie w warunkach bez odpływu

WSTĘP

Parametry geotechniczne umożliwiają jakościowy i ilościowy opis ośrodka gruntowego. W celu wyznaczenia cech fizycznych i mechanicznych gruntu wykonuje się szereg badań laboratoryjnych i terenowych. Zachowanie się ośrodka gruntowego opisywane jest przez parametry wytrzymałościowe i odkształceniowe. W projektowaniu geotechnicznym najczęściej stosowanymi parametrami wytrzymałościowymi są kąt tarcia wewnętrznego i spójność.

W minionych latach norma PN-81/B-03020 Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli stanowiła swego rodzaju punkt odniesienia, jeśli chodzi o dobór parametrów geotechnicznych. Parametry wytrzymałościowe i odkształceniowe zamieszczone w tej normie zostały odniesione do stanu gruntu. Oznaczenie właściwości fizycznych gruntu jest tańsze i możliwe do wykonania w znacznie krótszym terminie

niż przeprowadzenie i interpretacja badań wytrzymałościowych. Rozwój technik badawczych oraz lepsze poznanie mechaniki gruntów pozwoliło na zweryfikowanie parametrów określonych w normie PN-81/B-03020.

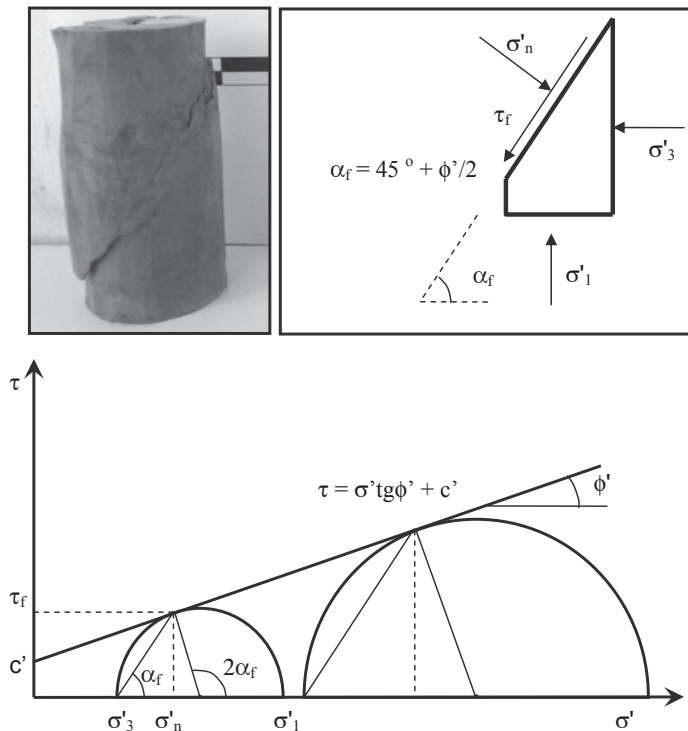
Norma PN-EN 1997-2:2009 Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego nie zawiera gotowych zależności umożliwiających wyznaczenie parametrów właściwości mechanicznych gruntów. Norma ta zawiera wiele wskazówek, wymogów i uwag dotyczących przeprowadzania badań oraz oceny i wykorzystania ich wyników.

PARAMETRY WYTRZYMAŁOŚCIOWE GRUNTU W UJĘCIU EUROKODU

W geotechnice w celu opisanie zmian wytrzymałości gruntu często stosuje się kryterium Coulomba-Mohra. Obwiednia zniszczenia wyznaczona na podstawie kół Mohra (rys. 1) opisywana jest równaniem Coulomba (1776 r.):

$$\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg} \phi + c \quad (1)$$

gdzie: τ – wytrzymałość na ścinanie,
 σ – średnie naprężenie normalne.



Rys. 1. Schemat rozkładu naprężeń na powierzchni zniszczenia oraz obwiednia zniszczenia wyznaczona na podstawie kół Mohra

Fig. 1. Stresses on the failure surface and Mohr's circles envelope

Parametrami wytrzymałościowymi wyznaczanymi na podstawie tego kryterium są kąt tarcia wewnętrznego (ϕ , ϕ') i spójność (c , c'). Parametry te można wyznaczyć w odniesieniu do naprężeń całkowitych (ϕ , c) lub efektywnych (ϕ' , c'). Kąt tarcia wewnętrznego jest parametrem charakteryzującym siły tarcia (naprężenia styczne), występujące między cząsteczkami gruntu. Spójność odpowiada wytrzymałości na ścinanie, przy zerowej wartości średniego naprężenia efektywnego, i zależy od historii naprężenia, przedziału naprężeń, dla którego została wyznaczona, stanu gruntu i czynników chemicznych oddziałujących na grunt (np. cementacji).

Poniżej przywołano i skomentowano kilka wybranych istotnych zagadnień, na które zwrócono uwagę w Eurokodzie 7 PN-EN 1997-2:2009.

Dotychczas w Polsce parametry wytrzymałościowe c' i ϕ' wyznaczano na podstawie wyników badań trójosiowych z konsolidacją i ścinaniem, w warunkach z odplywem lub bez odplywu. Eurokod 7 PN-EN 1997-2:2009 precyzuje, że kąt tarcia wewnętrznego i spójność mogą być wyznaczane z badań ze ścinaniem w warunkach z odplywem, natomiast z badań w warunkach bez odplywu powinno określać się wytrzymałość na ścinanie w warunkach bez odplywu (c_u). Warto zwrócić uwagę również na to, że parametry wyznaczone z badań w warunkach bez odplywu są bardziej wrażliwe na wpływ naruszenia struktury gruntu niż parametry wyznaczone z badań w warunkach z odplywem.

Innym ciekawym zagadnieniem, na które zwraca uwagę Eurokod 7 PN-EN 1997-2:2009 jest nieliniowość obwiedni zniszczenia gruntów. Należy pamiętać, że liniowa ekstrapolacja wyników badań może dać błędne wartości wytrzymałości gruntu, ponieważ obwiednia wytrzymałości nie jest linią prostą, zwłaszcza przy małych wartościach naprężeń normalnych.

Według Eurokodu 7 PN-EN 1997-2:2009 istnieje konieczność odnoszenia parametrów wytrzymałościowych do przedziału naprężeń, w którym zostały one określone. Oznacza to, że obwiednia zniszczenia wyznaczona na podstawie liniowego kryterium Coulomba-Mohra jest pewnym uproszczeniem. W tym miejscu należy również dodać, że w badaniach z konsolidacją i ścinaniem w warunkach bez odplywu zmiana konsolidującego naprężenia efektywnego nie spowoduje wprost proporcjonalnej zmiany wytrzymałości gruntu na ścinanie.

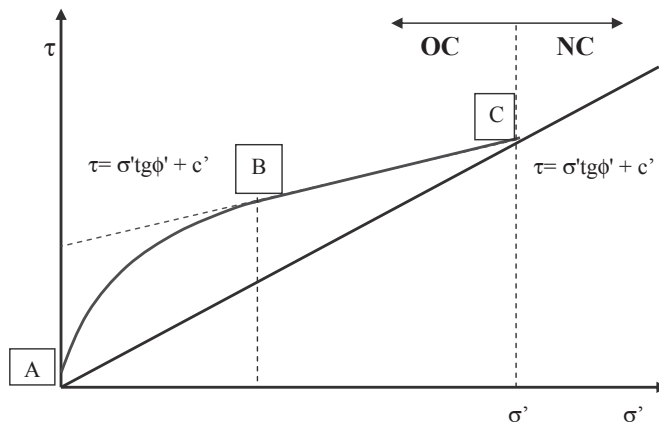
Analizując kształt „prawdziwej” obwiedni zniszczenia, można wyznaczyć kilka charakterystycznych punktów (rys. 2):

- A – wytrzymałość na ścinanie odpowiadająca zerowej wartości naprężenia efektywnego,
- B – wartość naprężenia efektywnego, powyżej której obwiednia zniszczenia wpisuje się w linię prostą,
- C – wartość naprężenia prekonsolidacji.

Jednoznaczne wyznaczenie położenia wszystkich punktów A, B i C jest zazwyczaj trudne, szczególnie dla gruntów naturalnych.

Na nieliniowe zachowanie się obwiedni zniszczenia gruntów prekonsolidowanych uwagę zwracają w swoich publikacjach m.in.: Kulhawy i Mayne [1990], Jamiolkowski i inni [1991] oraz Terzaghi i inni [1996].

Należy tu podkreślić, że parametry wytrzymałościowe wyznaczane na podstawie zależności podawanych w normie PN-81/B-03020 nie uwzględniają zachowań gruntu opisanych powyżej.



Rys. 2. Schemat obwiedni zniszczenia dla gruntów prekonsolidowanych i normalnie skonsolidowanych

Fig. 2. Failure envelopes for overconsolidated and normally consolidated soils

BADANIA W APARACIE TRÓJOSIOWEGO ŚCISKANIA

Istnieje wiele metod badawczych, które ciągle ulegają unowocześnianiu i ulepszeniu. Każda metoda ma swoje wady, zalety i ograniczenia. Ograniczenia wynikają zarówno z rozwiązań technicznych zastosowanych w danym urządzeniu, jak i z sensu wykorzystywania poszczególnych metod badań w danych warunkach geotechnicznych. Dotyczy to i metod laboratoryjnych, i terenowych. Biorąc pod uwagę jedynie aspekty merytoryczne, można powiedzieć, że zaletą badań laboratoryjnych jest możliwość kontrolowania warunków brzegowych (np. wilgotności, działających sił, wymiarów próbki) i możliwość obserwacji reakcji ośrodka na działanie czynników zewnętrznych, takich jak naprężenia i zmiany temperatury. Wadami tych badań są: naruszenie struktury gruntu, problem z oznaczeniem stopnia reprezentatywności próbki gruntu i długi czas potrzebny na wykonanie badań.

Wyniki badań opisane w niniejszej publikacji zostały uzyskane na podstawie badań trójosiowych z izotropową konsolidacją i ścinaniem w warunkach z odpływem (TXCID) lub bez odpływu (TXCIU). Badania zostały wykonane na gruntach spoistych.

Procedury badań trójosiowych obejmowały następujące etapy: nasączenie grawitacyjne, nasączenie metodą ciśnienia wyrównawczego (*back pressure*), izotropową konsolidację oraz ścinanie w warunkach z odpływem lub bez odpływu prowadzone ze stałą wartością deformacji, według ścieżki standardowej, tj. przy stałej wartości ciśnienia w komorze i wzrastającej wartości naprężenia pionowego.

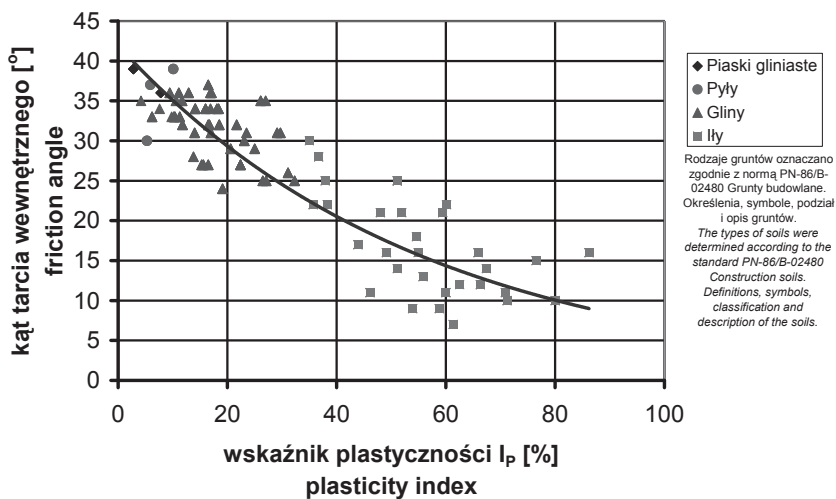
Dla każdego badanego gruntu wykonywano komplet badań właściwości fizycznych: analizę uziarnienia, granice konsystencji (w_L i w_p) oraz wilgotność naturalną.

WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Na podstawie wyników badań trójosiowych przedstawiono zależności między właściwościami mechanicznymi i fizycznymi badanych gruntów. Jako najbardziej miarodajny

czynnik charakteryzujący zmienność parametrów mechanicznych w stosunku do właściwości fizycznych gruntów przyjęto wskaźnik plastyczności (I_p).

Na rysunkach 3 i 5 przedstawiono zależność między wartościami kąta tarcia wewnętrznego i spójności uzyskanymi z badań (TXCID) a wskaźnikiem plastyczności. Badania były wykonywane przy różnych przedziałach średnich naprężeń efektywnych na koniec etapu konsolidacji, jednak wartości naprężeń nie przekraczały 550 kPa. Przedstawiony wykres (rys. 3) obrazuje zmienność kąta tarcia wewnętrznego względem spoistości gruntu. Podobne zależności w swoich pracach zaprezentowali m.in. Holtz i Kovacs [1981] oraz Jamiolkowski i inni [1991]. Odnosząc wartości tarcia wewnętrznego uzyskane z badań do wartości wyznaczanych na podstawie normy PN-81/B-03020 (rys. 4), można zauważyć, że szczególnie istotne różnice występują w przypadku gruntów o wskaźniku plastyczności poniżej 20%. Według zależności z normy PN-81/B-03020 żadne grunty spoiste nie charakteryzują się kątem tarcia wewnętrznego większym niż 25°.

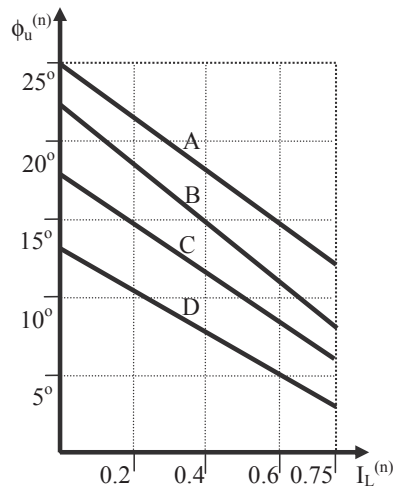


Rys. 3. Zależność między wartościami kąta tarcia wewnętrznego uzyskanymi z badań (TXCID) a wskaźnikiem plastyczności

Fig. 3. Relationship between internal friction angle from triaxial tests (TXCID) and plasticity index

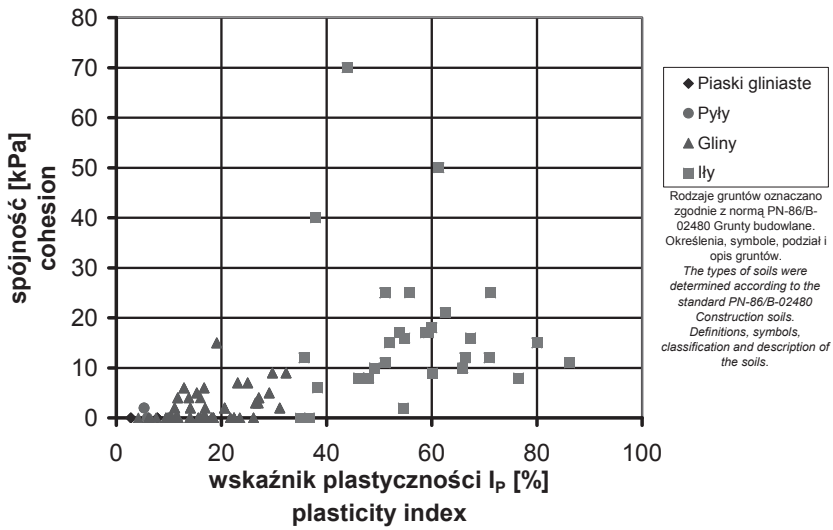
Rysunek 5 przedstawia zależność między spójnością gruntu a wskaźnikiem plastyczności. Warto tutaj zwrócić uwagę, że rysunek ten jest pewnym uproszczeniem, a wartość spójności gruntu w dużym stopniu zależy od jego stanu i historii naprężenia. Wartości spójności zostały określone dla liniowych obwiedni zniszczenia, które wyznaczono na podstawie wyników badań wykonywanych w różnych przedziałach średnich naprężeń efektywnych. Jak widać z rysunku 5, przyjmując liniową obwiednię zniszczenia, można uzyskać bardzo duże wartości spójności. W wielu przypadkach przyjęcie tak dużych wartości jest niebezpieczne [Horodecki i Dembicki 2009].

Wytrzymałość na ścinanie w warunkach bez odpływu (c_u) z badań TXCIU określano jako wartość połowy dewiatora, odpowiadającą odkształceniu próbki, przy którym stosunek efektywnych naprężeń głównych jest maksymalny (rys. 6 i 7). Badania wykonano



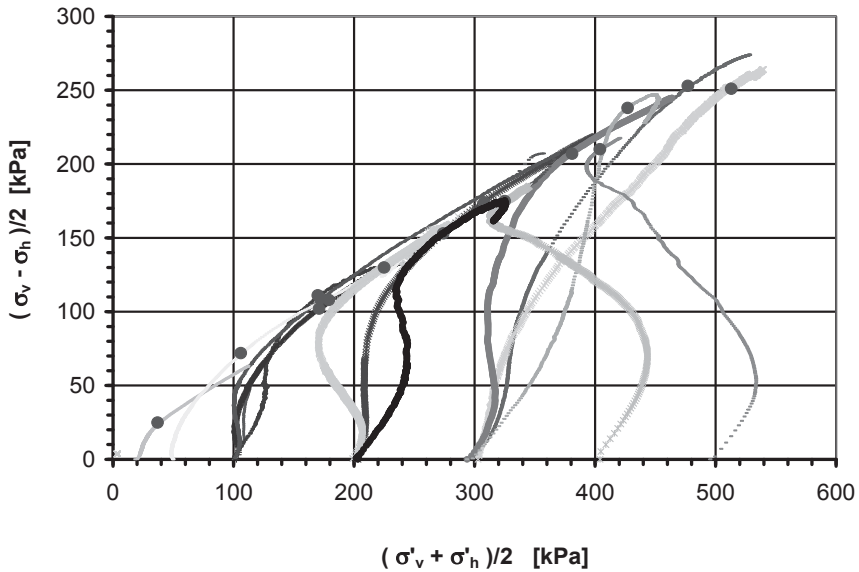
Rys. 4. Schemat pokazujący zależność między kątem tarcia wewnętrznego a stopniem plastyczności według PN-81/B-03020

Fig. 4. Relationship between internal friction angle and liquidity index according to PN-81/B-03020



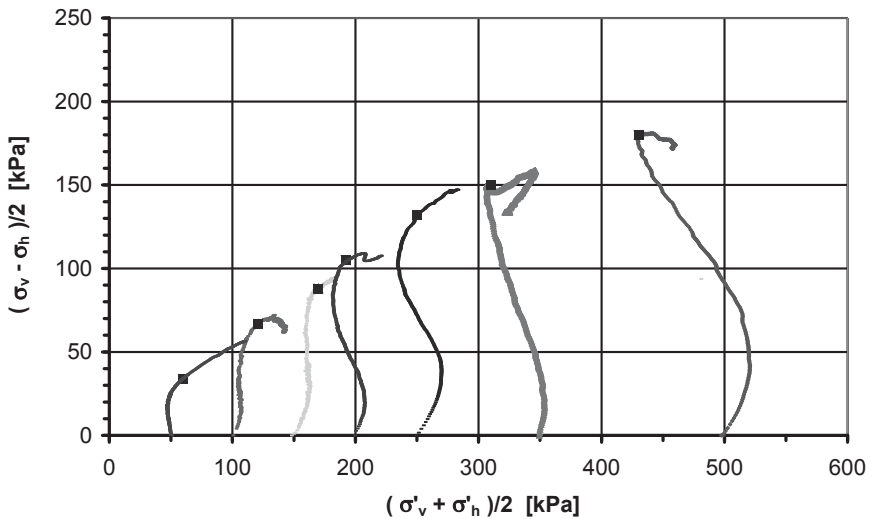
Rys. 5. Zależność między wartościami spójności uzyskanymi z badań (TXCID) a wskaźnikiem plastyczności

Fig. 5. Relationship between cohesion from triaxial tests (TXCID) and plasticity index



Rys. 6. Ścieżki naprężeń efektywnych uzyskane z badań trójosiowych (TXCIU) na gruntach spójnych o wskaźniku plastyczności (I_p) z przedziału 6–17%

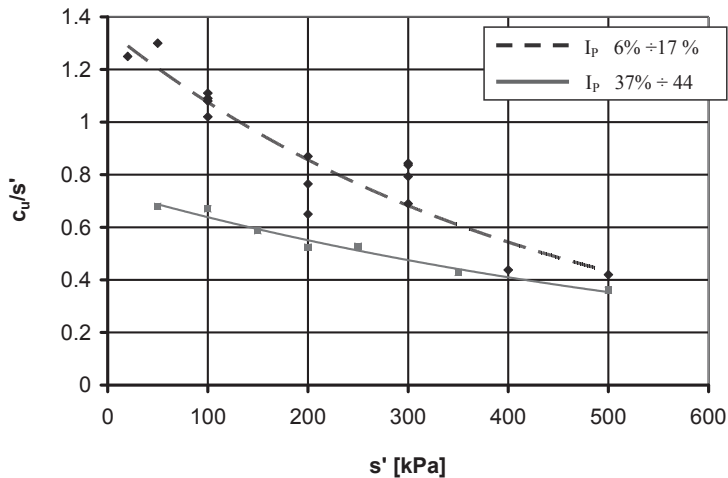
Fig. 6. Effective stress paths from triaxial tests (TXCIU) for cohesive soils (plasticity index 6–17%)



Rys. 7. Ścieżki naprężeń efektywnych uzyskane z badań trójosiowych (TXCIU) na gruntach spójnych o wskaźniku plastyczności (I_p) z przedziału 37–44%

Fig. 7. Effective stress paths from triaxial tests (TXCIU) for cohesive soils (plasticity index 37–44%)

w zakresie naprężeń 20–500 kPa. Uzyskane wartości wytrzymałości znormalizowano ze względu na średnie naprężenie efektywne na koniec etapu konsolidacji. Na rysunku 8 przedstawiono wpływ naprężenia na wartość znormalizowanej wytrzymałości. Zmiana wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odpływu nie jest wprost proporcjonalna do zmiany naprężenia efektywnego na koniec konsolidacji. Wartość wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odpływu należy zawsze odnosić do naprężenia efektywnego, dla którego została ona wyznaczona.



Rys. 8. Wpływ naprężenia efektywnego na zmienność znormalizowanej wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odpływu (c_u/s') dla gruntów o różnej spoiwości

Fig. 8. Influence of effective stress on normalized undrained shear strength for soils of different values of plasticity index

PODSUMOWANIE

Eurokod 7 PN-EN 1997-2:2009 pokazuje wiele ważnych, dotychczas nieuwzględnianych w Polsce czynników, na które należy zwrócić uwagę przy wykonywaniu i interpretacji badań.

Wartości parametrów wytrzymałościowych wyznaczanych na podstawie normy PN-81/B-03020 różnią się znacznie od wartości uzyskiwanych ze współczesnych badań, jak również nie znajdują potwierdzenia w założeniach teoretycznych (np. uzależnienie wartości kąta tarcia wewnętrznego od stanu gruntu). Udoskonalenie aparatury laboratoryjnej i metod badawczych umożliwiło wyeliminowanie wielu czynników wpływających negatywnie na jakość badań trójosiowych (np. stosowanie przy nasączaniu metody ciśnienia wyrównawczego).

Wartości spójności uzyskane z badań trójosiowych są w praktyce często błędnie interpretowane i przeszacowane. Poniżej przedstawiono kilka przyczyn przyjmowania zbyt dużych wartości spójności:

1. Zakładanie liniowej obwiedni zniszczenia przy interpretacji badań wytrzymałościowych.

2. Mała reprezentatywność próbki przeznaczonej do badań. Wartości parametrów wytrzymałościowych wyznacza się na podstawie badań próbek gruntu o niewielkich wymiarach, a określone parametry przypisuje się do wydzielonych warstw geotechnicznych, często obejmujących duże obszary. Próbkę do badań wybiera się w ten sposób, by były jak najbardziej jednorodne, lecz przy takim podejściu są one często niereprezentatywne, np. w przypadku ilów wybranie kilku próbek jednorodnych oznaczać może pominięcie występujących złożeń mających znaczny wpływ na zachowanie się całej warstwy.

3. Przyjmowanie spójności na podstawie badania w jednoosiowym stanie naprężenia w aparacie trójosiowym, tzw. badanie *unconfined*. Połowa wartości wytrzymałości na ściskanie otrzymana z takiego badania przyjmowana była często jako spójność. Badanie to jednak przeprowadza się przy zerowej wartości naprężenia całkowitego (ciśnienia w komorze), a nie naprężenia efektywnego, jak to często jest zakładane. Ze względu na ciśnienie ssania istnieje problem z wykonaniem badań trójosiowych przy zerowej wartości naprężenia efektywnego, szczególnie dla gruntów bardzo spoistych prekonsolidowanych.

Najważniejszymi czynnikami wpływającymi na wartość wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odpływu są: rodzaj gruntu, stan i historia naprężenia. Zmiana wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odpływu nie jest wprost proporcjonalna do zmiany naprężenia efektywnego na koniec konsolidacji. Związane jest to z wpływem naprężenia prekonsolidacji na zachowanie się parametru Skemptonia (A_p) – rysunki 6, 7 i 8.

Szczególnie w przypadku kąta tarcia wewnętrznego wskaźnik plastyczności jest miarodajnym czynnikiem charakteryzującym zmienność tego parametru wytrzymałościowego. Związek między spójnością a wskaźnikiem plastyczności nie jest jednoznaczny. Można zauważyć wyraźny wzrost wartości spójności wraz ze wzrostem spoistości gruntu (wskaźnika plastyczności), jednak należy pamiętać, że na wartość spójności wpływa wiele innych czynników (np. stan gruntu, historia naprężenia).

Wartości wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odpływu są wyraźnie mniejsze dla gruntów charakteryzujących się wyższym wskaźnikiem plastyczności, jednak wartości wytrzymałości należy zawsze odnosić do naprężenia efektywnego, dla którego zostały wyznaczone.

Ze względu na wiele czynników wpływających na wartości parametrów wytrzymałościowych należy pamiętać, że zależności korelacyjne są jedynie pewnym narzędziem pomocnym przy szacowaniu parametrów.

PIŚMIENNICTWO

- Holtz R.D., Kovacs W.D., 1981. An Introduction to Geotechnical Engineering. Prentice Hall., Englewood Cliffs, New York.
- Horodecki G., Dembicki E., 2009. Awaria ściany szczelinowej stanowiącej obudowę wykopu głębokiego. XXIV Konferencja Naukowo-Techniczna, Szczecin – Międzyzdroje.
- Jamiolkowski M., Leroueil S., LoPresti D.C.F., 1991. Theme lecture: Design parameters from theory to practice. Proceedings, Geo-Coast '91, Yokohama, Japan, 1–41.
- Kulhawy F.H., Mayne P.W., 1990. Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design. Cornell University, Ithaca, New York.

PN-EN 1997-2:2009 Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego.

PN-81/B-03020 Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli.

PN-86/B-02480 Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów.

Terzaghi K., Peck R.B., Mesri G., 1996. Soil Mechanics in Engineering Practice. Michigan University, Michigan.

INFLUENCE OF PLASTICITY INDEX ON SOIL SHEAR STRENGTH PARAMETERS

Abstract. The triaxial tests results, performed with use of undisturbed cohesive soils samples, were described in this paper. Shear strength parameters – internal friction angle (ϕ), cohesion (c') and undrained shear strength were evaluated for soils of various values of plasticity index. Based on tests results analysis the relationship between internal friction angle and plasticity index was presented in respect to used standards and literature. The attention was drawn to the reasons of cohesion overestimating. The recommendations of Eurocode 7 for interpretation of strength tests were evoked too.

Key words: shear strength parameters of soil, triaxial tests, internal friction angle, cohesion, undrained shear strength of soil

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 8.06.2013