

WYBRANE STANDARDY OKREŚLANIA PARAMETRÓW GEOTECHNICZNYCH NA PODSTAWIE BADAŃ LABORATORYJNYCH

Mirosław J. Lipiński, Małgorzata Wdowska

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Streszczenie. W ostatnim okresie rozwoju geotechniki w Polsce można zauważyć pewne standardy, jakie obecnie funkcjonują w odniesieniu do sposobów określania parametrów geotechnicznych, a także interpretacji wyników badań laboratoryjnych. W artykule pokrótce scharakteryzowano te standardy wraz z próbą racjonalizacji ich istnienia. Następnie zwrócono uwagę na najbardziej istotne elementy badań, wpływające na końcową wartość parametrów. Posługując się przykładami, przedstawiono najbardziej popularną metodę wyznaczania jakości próbek uzyskanych do badań oraz najbardziej istotne czynniki wpływające na ich jakość. Odniesiono się również do problemu interpretacji badań wytrzymałościowych, a także przedstawiono podejście określania sztywności gruntu, uwzględniające zakres odkształceń i stan naprężenia.

Słowa kluczowe: badania laboratoryjne, procedury, wytrzymałość, sztywność gruntu

WSTĘP

Znaczenie terminu „określanie parametrów geotechnicznych” zmienia się w zależności od zawodu, wiedzy i doświadczenia osoby, która słyszy takie zdanie. Inaczej jest ono rozumiane przez dziennikarza, architekta, urzędnika administracji zatwierdzającej dokumentację, geologa, projektanta, osobę zajmującą się modelowaniem komputerowym, a jeszcze inaczej przez osobę zajmującą się badaniami geotechnicznymi. Doświadczenie wskazuje, że występuje tutaj pewna prawidłowość, która polega na tym, że im dana osoba ma bardziej mętne pojęcie o badaniach geotechnicznych, tym bardziej jednoznaczne są jej skojarzenia z tym terminem. I odwrotnie, im większe ma doświadczenie związane z badaniami geotechnicznymi, tym większą ma skłonność do niuansowania zagadnienia i wprowadzania kryteriów określania tych parametrów w celu osiągnięcia jednoznacznie identyfikowalnego standardu badań, prowadzącego do bardziej realistycznego opisu

Adres do korespondencji – Corresponding author: Małgorzata Wdowska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Katedra Geoinżynierii, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa, e-mail:małgorzata_wdowska@sggw.pl

zachowania się ośrodka gruntowego. O ile w międzynarodowym środowisku geotechnicznym, którego rdzeniem są Komitety Techniczne ISSMGE, wypracowywane są takie standardy, to jednak perspektywa krajowa oglądana z jednej strony z pozycji uczestników realizacji części projektowej i wykonawczej inwestycji budowlanej, a z drugiej strony z pozycji kariery uczelnianej wygląda już nieco inaczej. Różnice w sposobie podejścia do wyznaczania parametrów geotechnicznych są tak duże, że utrudniają, a czasami uniemożliwiają wzajemne porozumienie. Te różnice w znacznie większym stopniu dotyczą badań laboratoryjnych niż badań terenowych, co łatwo wytłumaczyć. Procedury badań terenowych są daleko bardziej zestandaryzowane i zwykle prostsze niż metodyka badań laboratoryjnych. Wynika to z konieczności kontroli warunków brzegowych ze względu na stan naprężenia, odkształcenia i warunki odpływu. Dodatkowo istnieje problem reprezentatywności gruntu do badań, który prowadzi do określenia stopnia naruszenia struktury gruntu w przypadku gruntów naturalnych lub do określenia reprezentatywności struktury w przypadku gruntów rekonstruowanych w laboratorium. Te wymagania generują konieczność wprowadzania procedur zapewniających spełnienie tych warunków. Stąd znacznie większa różnorodność standardów wykonywania i określania badań laboratoryjnych niż terenowych. Standard wykonywania sondowania jest zwykle jeden, a jeżeli są dwa, to zwykle ze względu na typ sondy (np. mechaniczny i elektryczny stopek sondy CPT). Natomiast standardów wykonywania na przykład badań trójosiowych jest wiele. Do tego dochodzą różne schematy badań i interpretacje wyników. Pomimo tych ewidentnych różnic wiele osób niemających doświadczenia w wykonywaniu badań nie jest w stanie rozpoznać różnych standardów ich wykonywania i dlatego przyswajają sobie najprostsze i najbardziej dla nich wygodne schematy myślenia, dotyczące zagadnień określania parametrów. W dalszej części artykułu zostaną krótko scharakteryzowane najczęściej występujące podejścia do określania parametrów geotechnicznych w Polsce. Następnie, na przykładzie badania trójosiowego, przedstawione zostaną rekomendowane standardy wykonywania badań i określania parametrów. W szczególności dotyczą one jakości próbek, wybranych aspektów procedury badania, wytrzymałości i sztywności.

RÓŻNE PODEJŚCIA DO OKREŚLANIA PARAMETRÓW GEOTECHNICZNYCH

W okresie ostatnich czterdziestu lat można zauważyć, jak zmieniają się podejścia do określania parametrów geotechnicznych. Związane jest to z ewolucją roli geotechniki w Polsce. Przed 1989 rokiem, w sytuacji braku funduszy na rozwój badań, korzystano głównie z literatury rosyjskojęzycznej, ze wzorami, które jednakże nie posiadały istotnych walorów aplikacyjnych. Podręczniki do geotechniki, pochodzące ze strefy anglojęzycznej, stawały na stronę praktyczną i można było tam znaleźć wiele zagadnień dotyczących badań i ich interpretacji. W sytuacji rachitycznych laboratoriów badawczych pojawienie się normy dotyczącej posadowienia bezpośredniego budowli PN-81/B-03020 wraz z nomogramami do wyznaczania parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych w bardzo dużej mierze wypełniło lukę związaną z zapotrzebowaniem na parametry i stanowiło ważny punkt odniesienia dla różnych parametrów wyznaczanych z badań. Szczegółowe omówienie tych parametrów zasługuje na oddzielne opracowanie. Niewątpli-

wie parametry wytrzymałościowe i odkształceniowe, jakie można odczytać z nomogramów znajdujących się w normie, zasługują na obszerną krytykę, jednakże należy pamiętać, że od jej ostatniego wydania minęło ponad 30 lat, a od pierwszego, z 1974 roku, prawie 40. W tym czasie wiedza na temat badań wytrzymałościowych, a zwłaszcza odkształceniowych i wynikających z nich charakterystyk i parametrów znacznie się zmieniła. Dostępność literatury geotechnicznej i większa możliwość zdobywania funduszy na aparaturę wykreowała drugi sposób podejścia do określania parametrów geotechnicznych, który wytworzył się w jednostkach budżetowych, w tym głównie na uczelniach. Okolicznością sprzyjającą temu stał się model kariery akademickiej, który nagradza promotorów za wypromowanie doktoranta. W tej sytuacji stworzenie prostego algorytmu: zakup komercyjnie dostępnej aparatury + + człowiek = doktorat, było już tylko kwestią krótkiego czasu. Naturalnie im bardziej skomplikowana i droga aparatura, tym znacząco zwiększa się prawdopodobieństwo powodzenia całego przedsięwzięcia. Należy zaznaczyć, że podejścia tego nie należy oceniać naganie pod warunkiem, że w tym algorytmie wystąpi również gruntownie przyswojona wiedza, pomysł i rygorystyczne przestrzeganie procedur badania. Należy zaznaczyć, że podejście to w warunkach dużego nacisku na zdobywanie punktów powoduje powstawanie dużej liczby artykułów, przez co znacząco może kształtować wyobrażenie o sposobie określania badań osób, które pierwszy raz spotykają się z danym rodzajem badań.

Następnym istotnym punktem odniesienia dla wykonywania badań stało się wprowadzenie Eurokodu 7, czyli normy PN-EN 1997-2:2009 dotyczącej rozpoznania i badań podłoża gruntowego. W szczególności istotne są odniesienia do specyfikacji technicznych (TC), gdyż to one uszczegółwiają procedury badań. Warto jednakże podkreślić, że Eurokod 7 nie zastępuje budowania warsztatu badawczego, który powinien być wypracowany, poprawiany zgodnie z postępowaniem wynikającym z rozwoju badań opisywanym w literaturze geotechnicznej. Eurokod 7 opisuje jedynie pewien standard wykonywania i interpretacji badań, stanowiący punkt odniesienia i platformę ułatwiającą porozumienie. Nie należy Eurokodu 7 traktować jako „książki kucharskiej” na potrzeby wykonywania badań, ponieważ stopień uszczegółowienia procedur nie jest wystarczający dla całkowicie poprawnego wykonania badania.

OKREŚLENIE JAKOŚCI PRÓBEK Z GRUNTU SPOISTEGO

Rozwój technik badania gruntu w laboratorium sprawił, że krytycznym elementem prawidłowego wyznaczenia parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych stało się naruszenie struktury gruntu podczas pobierania go z podłoża. Stopień naruszenia struktury zależy przede wszystkim od następujących czynników [Barański i in. 1990]:

- rodzaju gruntu,
- mechanicznego naruszenia wynikającego z niedoskonałości techniki pobierania gruntu (decydującą rolę odgrywa tutaj kształt, wymiary oraz jakość użytego próbnika),
- zmiany istniejącego w próbce stanu naprężenia podczas wykonania otworu, wprowadzenia i wyprowadzania próbnika,
- warunków transportu i przechowywania próbek.

W związku z powyższym w przypadku wykonywania specjalistycznych badań laboratoryjnych, które powinny być prowadzone na próbkach reprezentatywnych, konieczne

jest przeprowadzenie oceny jakości pobranego gruntu, co uzyskuje się przez ocenę naruszenia jego struktury. Niestety ten element rzadko występuje nie tylko w badaniach komercyjnych, ale także w pracach wykonywanych dla celów badawczych. Częściowo wynika to z faktu, że brakuje uniwersalnych procedur określania stopnia naruszenia struktury gruntu podczas pobierania.

Najprostszym sposobem jest procedura od dawna stosowana w Norweskim Instytucie Geotechnicznym [Andresen i Kolstad 1979], a polegająca na pomiarze zmian wskaźnika porowatości podczas rekonsolidacji gruntu. Podobne w swej istocie kryterium, lecz odnoszące się do odkształcenia objętościowego i nazwane wskaźnikiem jakości próbki *SQD* (*specimen quality designation*), można znaleźć w publikacji sygnowanej przez Terzaghiego i innych [1996]. Obydwa kryteria zebrane przez DeGroota i Landa [2007] zostały przedstawione w tabeli 1. Należy zauważyć, że prezentowane kryteria jakości próbek dotyczą gruntów słabych. Pierwotnie kryterium NGI zostało opracowane dla gruntów normalnie skonsolidowanych i o wskaźniku prekonsolidacji nie większym niż 2. Następnie zostało rozszerzone dla gruntów o nieznacznie większym wskaźniku prekonsolidacji – w zakresie 2–4 [Lunne i in. 1997], co jednakże istotnie zmieniało zakresy wskaźników porowatości. Powstaje w związku z tym pytanie, jak w praktyce sprawdza się kryterium względnej zmiany wskaźnika porowatości w zastosowaniu do gruntów naturalnych.

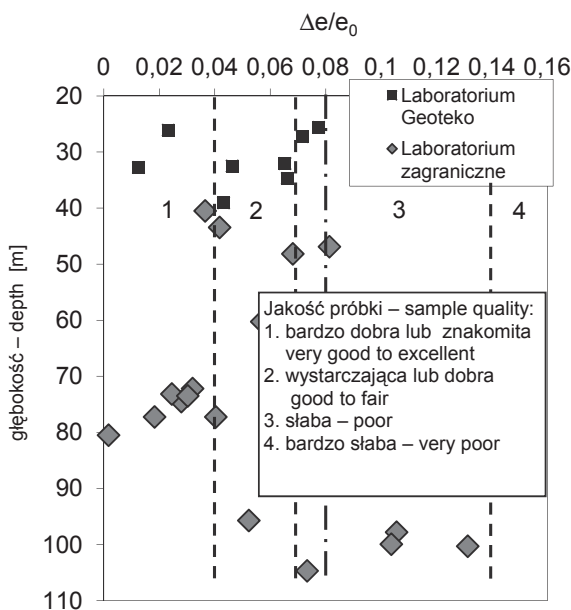
Tabela 1. Ocena naruszenia próbki na podstawie zmiany objętości podczas rekonsolidacji
Table 1. Quantification of sample disturbance based on specimen volume change during laboratory preconsolidation to σ'_{v0} [DeGroot i Landon 2007]

Wskaźnik jakości próbki Specimen quality designation <i>SQD</i> [Terzaghi i in. 1996]		Kryterium $\Delta e/e_0$ $\Delta e/e_0$ criteria [Lunne i in. 1997]		Ocena ^a Rating ^a
Odkształcenia objętościowe Volumetric strain [%]	<i>SQD</i>	<i>OCR</i> = 1–2 $\Delta e/e_0$	<i>OCR</i> = 2–4 $\Delta e/e_0$	
< 1	A	< 0,04	< 0,03	bardzo dobra very good to excellent
1–2	B	0,04–0,07	0,03–0,05	wystarczająca good to fair
2–4	C	0,07–0,14	0,05–0,10	słaba poor
4–8	D	> 0,14	> 0,10	bardzo słaba very poor
> 8	E			

^a Odnosi się do wykorzystania próbek do badań właściwości mechanicznych.

^a Refers to use of samples for measurement of mechanical properties.

W tym celu na rysunku 1 przedstawiono wynik pomierzonej względnej zmiany wskaźnika porowatości dla próbek łąw o zróżnicowanej plastyczności, pobranych próbkiem Shelby z głębokiego prekonsolidowanego podłoża o dużej miąższości. W celu zwiększenia obiektywności prezentowane wyniki dotyczą badań wykonywanych przez dwie firmy – polską i zagraniczną.

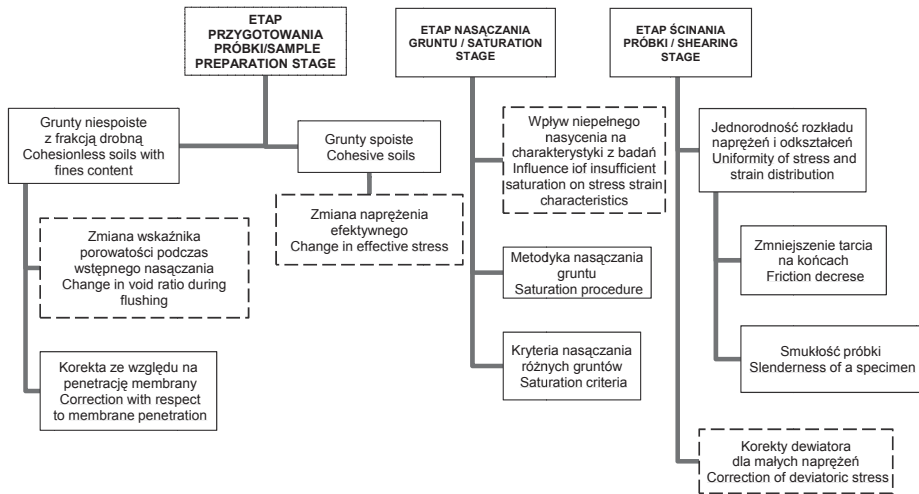


Rys. 1. Ocena naruszenia struktury gruntu prekonsolidowanego pobranego z dużej głębokości
 Fig. 1. Evaluation of specimens disturbance of overconsolidated soil sampled in deep subsoil

Z rozkładu prezentowanych punktów wynika, że jedynie około połowa próbek mogłaby być zakwalifikowana do grupy A i B, czyli nadających się do badań zaawansowanych pod względem stopnia skomplikowania. Wynika z tego, że wykonywanie oceny jakości próbek o tzw. nienaruszonej strukturze powinno być realizowane zawsze w przypadkach testów wykonywanych dla celów badawczych. Należy również zauważyć, że powyższa metoda oceny naruszenia struktury gruntu oparta na względnej zmianie wskaźnika porowatości podczas rekonsolidacji nie jest jedyna. Obecnie znacznie bardziej obiecujące wyniki, również dla gruntów o większych wskaźnikach prekonsolidacji, uzyskuje się na podstawie metod wykorzystujących pomiary ciśnienia ssania i prędkości fali poprzecznej [np. Tanaka i Horng 2010, Hight 2013].

WYBRANE ELEMENTY PROCEDURY WPLYWAJĄCE NA JAKOŚĆ BADANIA

Badania komercyjne zasadniczo nie wymagają specjalnych zabiegów zwiększających ich dokładność. Jednakże w badaniach przeprowadzanych dla celów naukowych konieczne jest przeprowadzenie pewnych analiz, które umożliwią pełną kontrolę nad prowadzonym eksperymentem. Na rysunku 2 przedstawiono zagadnienia istotne z punktu widzenia dokładności określenia charakterystyki naprężenie – odkształcenie. Tematy wyróżnione na schemacie zostaną pokrótce scharakteryzowane w dalszej części tego rozdziału.

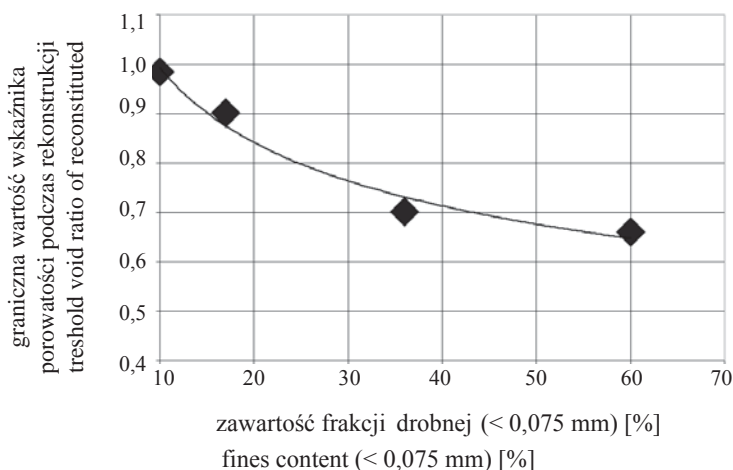


Rys. 2. Identyfikacja zagadnień eksperymentalnych istotnych z punktu widzenia dokładności badań [Lipiński 2013]

Fig. 2. Identification of experimental issues relevant with respect to accuracy of soil [Lipiński 2013]

Zmiana wskaźnika porowatości podczas wstępnego nasączenia

W przypadku wykonywania badań na rekonstruowanych w laboratorium gruntach niespoistych należy zwrócić szczególną uwagę na możliwość popełnienia błędu w określeniu wskaźnika porowatości. W standardowych badaniach, ze względu na obecność powietrza w porach podczas rekonstrukcji próbki i jej wstępnego nasączenia, nie ma żadnej kontroli nad jej objętością, a przez to również nad wskaźnikiem porowatości. Taką kontrolę można uzyskać przez zastosowanie wewnątrzkomorowego systemu do pomiaru przemieszczeń próbki. System taki umożliwia monitorowanie zmian objętości próbki na każdym etapie jej przygotowania. Zagadnienie to jest szczególnie istotne w przypadku gruntów niespoistych zawierających frakcje drobną. Wynika to z podsiąku kapilarnego, który zależy od wielkości ziaren i porów. Kształt menisków wody, tworzącej front zwilżania, a wynikający z podsiąku kapilarnego, powoduje ujemne ciśnienie wody w porach, co zgodnie z zasadą Terzagiego jest przyczyną wzrostu naprężeń efektywnych, a w konsekwencji – zmniejszenia objętości wskutek ściśliwości. Naturalnie zmiana wskaźnika porowatości jest tym większa, im większa jest jego wartość początkowa. Należy zauważyć, że na zmianę wskaźnika porowatości (e) najbardziej podatne są grunty o dużej wartości początkowej e . Na rysunku 3 przedstawiono graniczne wartości wskaźników porowatości ze względu na wstępne nasączenie, w zależności od zawartości frakcji drobnej. Graniczna wartość w tym przypadku oznacza taką wartość e , poniżej której w trakcie wstępnego nasączenia nie nastąpią niekontrolowane zmiany objętości gruntu wywołane podsiąkiem kapilarnym.

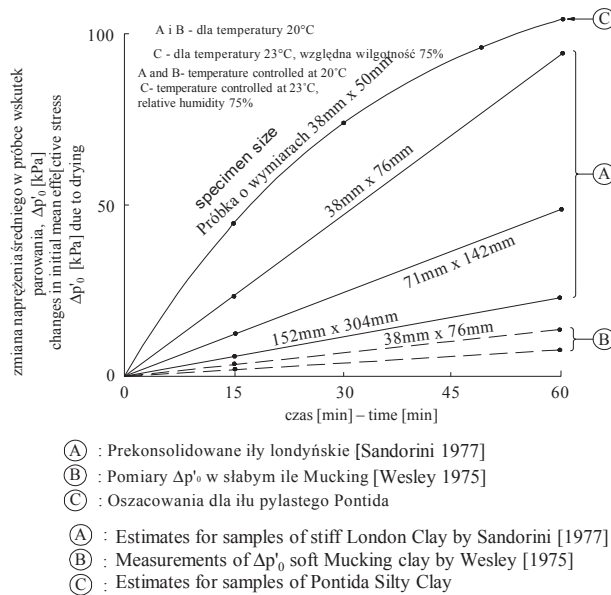


Rys. 3. Graniczna wartość wskaźnika porowatości ze względu na wstępne nasączenie dla gruntów o różnej zawartości frakcji drobnej

Fig. 3. Threshold void ratio during flushing of reconstituted soil of various fines content [Lipiński 2013]

Zmiana naprężenia efektywnego wskutek wysuszenia

Etap przygotowania próbki jest również bardzo istotny w przypadku gruntów spoiowych. Biorąc pod uwagę fakt, że wszystkie zmiany, jakie zachodzą w gruncie, są wynikiem zmiany naprężeń efektywnych, w pierwszej kolejności należałoby zidentyfikować czynniki, które w procesie badania gruntu mogą mieć wpływ na wartość naprężenia efektywnego. Szczegółowa analiza czynników wpływających na wartość naprężenia efektywnego wykazuje, że jego zmniejszenie może być spowodowane wieloma czynnikami na etapie pobierania gruntu, transportu do laboratorium, przygotowywania próbki i założenia jej do aparatu. Natomiast głównym czynnikiem zwiększającym wartość naprężenia jest wysuszenie, które może się pojawić zarówno na etapie przechowywania gruntu, jak i przygotowywania próbki. Warto bliżej przyjrzeć się zagadnieniu wysuszenia, ponieważ ma ono niezwykle duży wpływ na wyniki badania. Jednym z bardziej istotnych, a niedocenianych czynników wpływających na stan gruntu jest wysuszenie podczas przygotowania próbki. Stan próbki z gruntu spoiowego podczas przygotowania zmienia się, jeżeli wycięta próbka nie jest zabezpieczona membraną lub nie jest umieszczana w komorze stałej wilgotności. Wówczas w wyniku parowania zmniejsza się wilgotność próbki, co powoduje powstawanie ciśnienia ssania, a zatem przy braku zmian naprężenia całkowitego – zmianę wartości naprężenia efektywnego. Zmiana ta może być zmierzona za pomocą czujnika ciśnienia ssania. Wartości w ten sposób pomierzone okazują się być dosyć duże, jak wykazują badania Wesleya [1975] i Sandoriniego [1977]. Z wykresu przedstawionego przez Baldiego i innych [1988], a przedstawionego na rysunku 4, wynika, że wartość naprężenia efektywnego zależy istotnie od wymiarów próbki, a precyzyjniej – od stosunku między jej powierzchnią i objętością. Ważna jest również ściśliwość gruntu, a także temperatura otoczenia, wilgotność względna i czas ekspozycji.

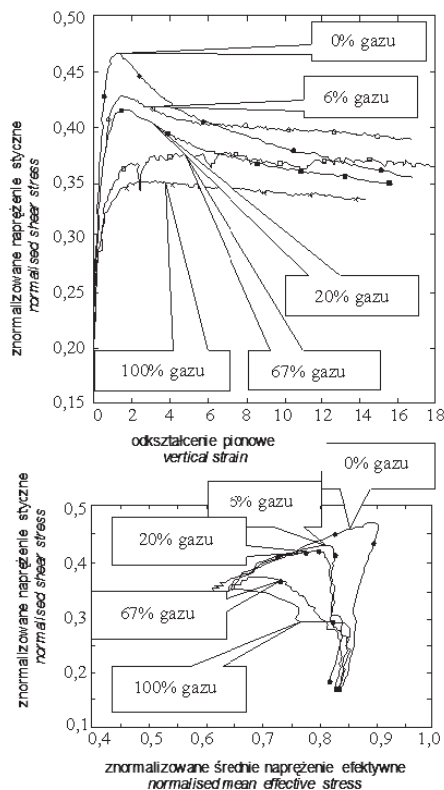


Rys. 4. Wpływ czasu ekspozycji niezabezpieczonej próbki z gruntu spoistego na zmianę początkowego naprężenia średniego wskutek wysychania [Baldi i in. 1988]

Fig. 4. Effects of drying on the initial mean effective stress in cohesive soils [Baldi et al. 1988]

Wpływ niepełnego nasycenia gruntu na charakterystyki z badań

Grunt spoisty zalegający w złożu podczas pobierania próbek ulega odciążeniu, w wyniku czego stopień wilgotności takiego materiału spada i wówczas w porach gruntu znajdują się zarówno woda, jak i gaz. W wyniku odciążenia gruntu powstaje destruktywizacja spowodowana powrotem uprzednio rozpuszczonego gazu do fazy gazowej wraz z następującymi po niej procesami desaturacji i dekonsolidacji. Obecność gazu w porach wpływa na potencjalny przebieg charakterystyki naprężenie – odkształcenie i ścieżek naprężeń efektywnych. Ilustracją tego mogą być wyniki badań przeprowadzone w aparacie trójosiowym w warunkach bez odpływu pokazane na rysunku 5 [Lunne i in. 2001]. Na szczególną uwagę zasługuje prześledzenie ścieżki naprężeń efektywnych dla próbki posiadającej w porach 100% gazu. W przebiegu ścieżki widać wyraźnie nieciągłość – poziomy odcinek spowodowany przyrostem ciśnienia wody w porach, niewynikającym z przyrostu naprężenia stycznego. Przyrost ten wynika właśnie ze zmiany struktury gruntu spowodowanej zmianą objętości największych porów, wywołanej powrotem rozpuszczonego gazu do fazy gazowej i rekonsolidacją gruntu. Zakres przyrostu ciśnienia wody w porach w badaniach bez odpływu wynika z początkowej koncentracji gazu, a zatem pośrednio od stopnia naruszenia struktury gruntu. Dowodzi to jednoznacznie, że po umieszczeniu próbki w aparacie należy odtworzyć jej stan wypełnienia porów wodą w taki sposób, aby charakterystyki uzyskiwane z badań były miarodajne. W tym celu należy próbkę poddać procesowi nasycania metodą ciśnienia wyrównawczego [Lipiński i Wdowska 2004].

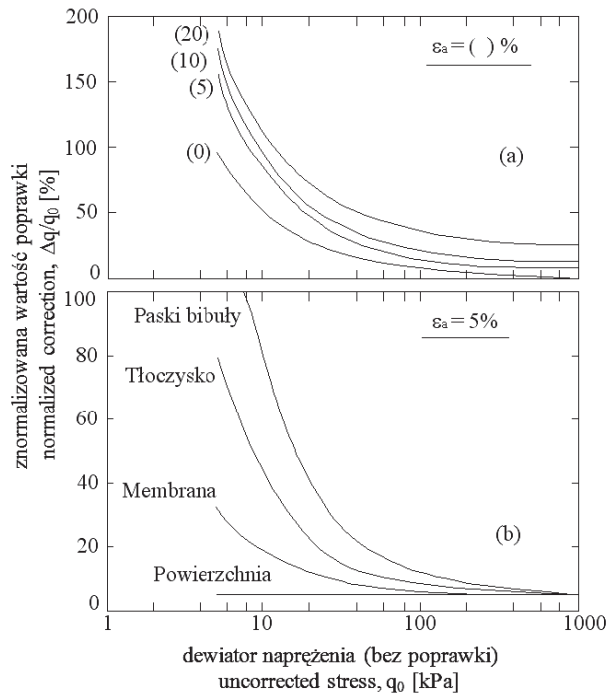


Rys. 5. Wpływ obecności gazu w porach gruntu na charakterystyki naprężenie – odkształcenie i ścieżki naprężenia efektywnego [Lunne i in. 2001]

Fig. 5. Influence of gas pressure in pores on stress paths and stress-strain characteristics of soil [Lunne et al. 2001]

Korekta dewiatora podczas ścinania

Zaawansowane procedury badań wymagają uwzględnienia wielu poprawek na etapie ścinania gruntu, które wynikają z różnych czynników. Ważniejsze z nich dotyczą korekty ze względu na zakres odkształcenia, zastosowany drenaż w postaci pasków bibuły filtracyjnej, tarcie tłoka, membrany czy obliczenia powierzchni. Szczegółowe omówienie przyczyn konieczności wprowadzania tych poprawek przedstawione zostało przez Germaine i Ladda [1988]. Wartość poprawki określa się w postaci korekty dewiatora naprężenia znormalizowanego ze względu na jego wartość, ponieważ wartości poprawek zmieniają się wraz ze stopniem mobilizacji dewiatora naprężenia. Na rysunku 6 przedstawiono za Germainem i Laddem relatywny wpływ poszczególnych czynników na wartość poprawki koniecznej do uwzględnienia. Analiza danych na rysunku jednoznacznie wskazuje na konieczność stosowania tego rodzaju poprawek, zwłaszcza dla gruntów słabych i przy małych wartościach dewiatora naprężenia.



Rys. 6. Wpływ różnych czynników na wymaganą wielkość korekty dewiatora naprężenia zadawanego w trakcie ścinania [Germaine i Ladd 1988]

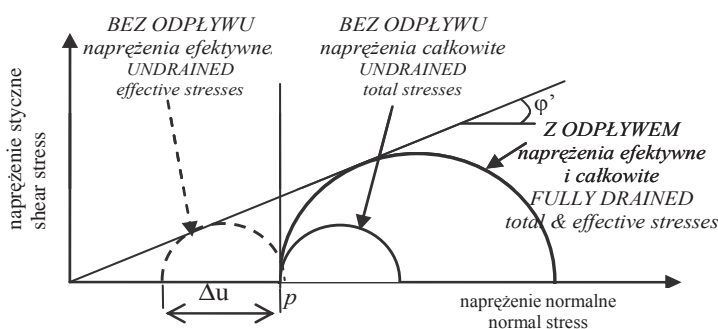
Fig. 6. Influence of various corrections on computed shear stress for constant volume triaxial compression [Germaine and Ladd 1988]

WYTRZYMAŁOŚĆ GRUNTU

W przypadku wytrzymałości dla danego rodzaju gruntu najważniejszymi czynnikami determinującymi jej wartość są historia stanu naprężenia i warunki odplywu. Te dwa czynniki powodują, że istnieje pewne zamieszanie w odniesieniu do interpretacji wyników badania wytrzymałości. Eurokode 7 jednoznacznie reguluje tę kwestię, formułując jasno, że wytrzymałość określana na podstawie badań z odplywem jest reprezentowana przez kąt tarcia wewnętrznego (φ') i spójność (c'). Oczywiście jest, że wielkości te są odniesione do naprężeń efektywnych. W przypadku badań bez odplywu wytrzymałość jest reprezentowana przez jedną wielkość, która jest określana jako wytrzymałość w warunkach bez odplywu i oznaczana jako c_u lub τ_{fu} . Ze względu na fakt, że wartość wytrzymałości bez odplywu zależy od naprężenia efektywnego poprzedzającego etap ścinania, często otrzymaną wartość normalizuje się ze względu na pionowe naprężenie efektywne.

Opisane powyżej podejście jak do tej pory nie jest zbyt popularne w Polsce. Wynika to z faktu, że projektanci przyzwyczajeni są do wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności, niezależnie od warunków odplywu. Taka sytuacja jest poniekąd usprawiedliwiona, ponieważ w literaturze geotechnicznej można znaleźć różne interpretacje. Przykładowo w znakomitej monografii Bishopa i Henkela z 1962 roku poświęconej badaniom trójosio-

wym można znaleźć interpretację badań z odplywem i bez odplywu na jednym wykresie, z którego wynika, że badania bez odplywu można również wyrażać za pomocą kąta tarcia wewnętrznego (φ') – rysunek 7. Z wykresu wynika, że kąt tarcia wewnętrznego dla obydwu rodzajów badań (z odplywem i bez odplywu) jest taki sam. Ta pozorna zgodność wynika z faktu, że w przeszłości podręczniki do mechaniki gruntów opisywały zachowanie się gruntów słabych, czyli normalnie skonsolidowanych i lekko prekonsolidowanych, jako powodujących największe problemy nośności i odkształcalności. Dla tego rodzaju gruntów ścieżki naprężeń efektywnych z obydwu rodzajów badań są bardzo zbliżone i w związku z tym istnieje nacisk ze strony projektantów, aby wyniki badań wytrzymałości w warunkach bez odplywu interpretować w kategoriach kąta tarcia wewnętrznego i spójności.



Rys. 7. Koła Mohra dla badań z odplywem i bez odplywu na próbkach normalnie skonsolidowanych do takiego samego naprężenia [Bishop i Henkel 1962]

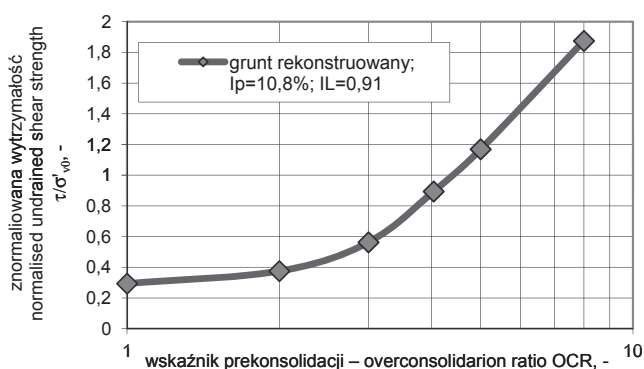
Fig. 7. Mohr stress circles for both drained and undrained tests on samples consolidated under the same all-round pressure p [Bishop and Henkel 1962]

Jednakże sytuacja zmienia się znacząco, jeżeli uwzględnimy historię stanu naprężenia. Wytrzymałość w warunkach bez odplywu gruntów spoistych zależy od tych samych czynników co wytrzymałość w warunkach z pełnym odplywem, jednakże czynnik historii naprężenia jest jeszcze bardziej uwidoczniwy. Wyidealizowane zachowanie się gruntów normalnie skonsolidowanych oraz prekonsolidowanych w warunkach bez odplywu przedstawiono na rysunku 8. W przypadku próbek normalnie skonsolidowanych w warunkach bez odplywu ścieżka naprężeń efektywnych odchyła się w lewą stronę wskutek kontraktywnego zachowania, a tym samym generowania nadwyżki ciśnienia wody w porach o wartości dodatniej. Ścieżka ta stanowi jednocześnie graniczną powierzchnię stanu dla danej wartości porowatości. Natomiast w warunkach z odplywem ścieżka naprężeń efektywnych układa się na granicznej powierzchni stanu, przy czym jednocześnie próbka zmniejsza swoją objętość. Zmniejszenie objętości oraz generowanie dodatniej nadwyżki ciśnienia wody w porach jest konsekwencją tego, że punkt początkowy ścieżki naprężeń efektywnych na etapie ścinania znajduje się na prawo od linii stanu krytycznego, czyli po jej tzw. mokrej stronie.

W przypadku gruntów lekko prekonsolidowanych obserwuje się analogiczne zachowanie do opisanego powyżej, co skutkuje tym, że ścieżka naprężenia znajduje się po „mokrej” stronie linii stanu krytycznego.

główne rośnie, czyniąc tym samym je bardziej wytrzymałymi i mniej odkształcalnymi niż w warunkach z odplywem.

O tym, jak bardzo wytrzymałość bez odplywu zależy od historii stanu naprężenia, można się przekonać, analizując zależność znormalizowanej wartości wytrzymałości w zależności od wskaźnika prekonsolidacji OCR , wyznaczoną dla średnio plastycznego iltu, a przedstawioną na rysunku 9. Wszystkie próbki były przygotowywane z pasty gruntowej, a następnie prekonsolidowane mechanicznie i po zakończeniu konsolidacji odciążane. Po ustabilizowaniu odkształceń próbka była ścinana w warunkach bez odplywu. Warto zaznaczyć, że analogiczne wykresy dla gruntów naturalnych mają istotnie różniący się przebieg. Należy również zauważyć, że dla gruntów naturalnych parametrem opisującym historię stanu naprężenia jest wskaźnik prekonsolidacji właściwej YSR .



Rys. 9. Znormalizowana wytrzymałość w warunkach bez odplywu w zależności od wskaźnika prekonsolidacji OCR

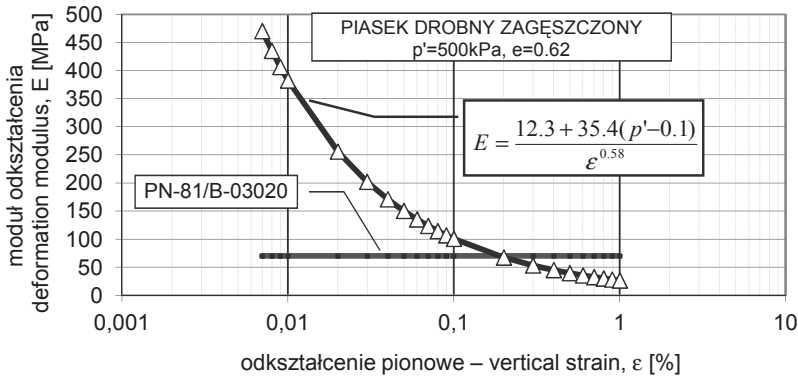
Fig. 9. Normalised undrained shear strength againsts OCR

PARAMETRY ODKSZTAŁCENIOWE

Najistotniejszymi czynnikami determinującymi wartości modułów odkształcenia są efektywne naprężenie normalne i zakres odkształcenia, do którego odnosi się parametr określający sztywność gruntu. Aby uświadomić sobie konieczność przestawienia się na myślenie o sztywności gruntu w kategoriach zakresu odkształceń, warto przyjrzeć się porównaniu wielkości modułów, zilustrowanym na rysunku 10. Na wykresie przedstawiono wartości modułów dla piasku drobnego zagęszczonego ($I_D > 0,75$) według dwóch różnych źródeł. Pierwsze odnosi się do rekomendacji pochodzącej z normy PN-81/B-03020, natomiast drugie opiera się na formule empirycznej wyprowadzonej na podstawie wysokiej jakości badań trójosiowych z zastosowaniem wewnątrzkomorowego pomiaru przemieszczeń. Formuła ta pozwala na uwzględnienie wielkości naprężenia, jak również zakresu odkształceń i ma następującą postać:

$$E = \frac{b + a(p' - p_{ref})}{\varepsilon^n} \quad (1)$$

gdzie: p' – średnie naprężenie efektywne [MPa],
 p_{ref} – średnie naprężenie odniesienia (przyjmowane 0,1 MPa),
 ε – odkształcenie pionowe [%],
 b, a, n – parametry empiryczne.



Rys. 10. Porównanie wartości modułu odkształcenia dla zagęszczonego piasku drobnego wg PN-81/B-03020 i Lipińskiego [2012]

Fig. 10. Comparison of Young's modulus distribution of fine sand according to PN-81/B-03020 and Lipinski [2012]

Wielkość parametru n zmienia się w niewielkim zakresie 0,54–0,59. Dla piasku drobnego zagęszczonego do wskaźnika porowatości 0,62 formuła przybiera następującą postać:

$$E = \frac{12,3 + 35,4(p' - 0,1)}{\varepsilon^{0,58}} \quad (2)$$

Szczegółowe wyprowadzenie powyższego wzoru można znaleźć w pracy Lipińskiego [2013]. Porównanie wartości modułów na rysunku 10 wykazuje, że w roboczym zakresie odkształceń wartości modułów pochodzących z badań mogą być nawet sześciokrotnie większe aniżeli te sugerowane przez normę PN-81/B-03020. Wartości osiadań wysokich budynków, gdzie obliczenia wykonywano na podstawie modułów określonych z badań, nie pozostawiają żadnych wątpliwości, które wartości lepiej opisują rzeczywistość.

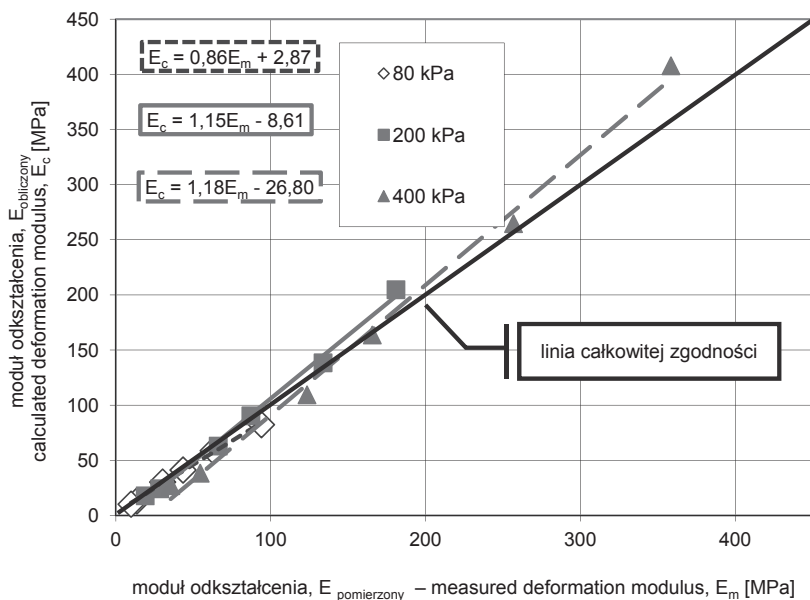
Bardzo istotny wpływ zakresu odkształceń na rozkład sztywności dotyczy także gruntów spoistych. Analiza zmienności modułu odkształcenia powinna uwzględniać najważniejsze czynniki mające wpływ na wartość tego parametru. Oprócz omawianego powyżej wpływu zakresu odkształcenia nie można nie uwzględnić dwóch pozostałych, którymi w przypadku gruntów spoistych są historia stanu naprężenia oraz jego aktualna wartość. Naturalnie obydwie wielkości odnoszą się do naprężeń efektywnych. Ze względu na fakt, że zmiana tych wielkości wzajemnie się kompensuje, wydaje się celowe zastosowanie podejścia opartego na normalizacji sztywności gruntu (w tym przypadku reprezentowanej przez moduł odkształcenia E) ze względu na jedną z tych wielkości. Opierając się

na wynikach badań przeprowadzonych dla gruntów rekonstruowanych oraz naturalnych (o nienaruszonej strukturze), można wyprowadzić wzór dla konkretnego rodzaju gruntu, który uwzględni wszystkie elementy składające się na wielkość sztywności w gruncie spoistym, tj.: składową pionową naprężenia efektywnego (σ'_{v0}), naprężenie prekonsolidacji właściwej (σ'_y) i zakres odkształcenia pionowego (ε_1).

Takie podejście zostało zrealizowane i przedstawione przez Lipińskiego i Wdowską [2012] dla silnie prekonsolidowanego gruntu spoistego o wskaźniku plastyczności z zakresu 10–20%. Ostateczny wzór na wielkość modułu odkształcenia dla tego gruntu jest następujący:

$$(E)_{OC} = \left(\frac{E}{\sigma'} \right)_{NC} \cdot \sigma_v'^{1-(0,08 \ln \varepsilon + 0,4)} \cdot \sigma_Y'^{(0,08 \ln \varepsilon + 0,4)} \quad (3)$$

Zgodność obliczonego w ten sposób modułu z jego wartościami pomierzonymi przedstawiono na rysunku 11.



Rys. 11. Porównanie wartości pomierzonych i obliczonych modułu odkształcenia przy wykorzystaniu formuły uwzględniającej zakres odkształceń i wskaźnik prekonsolidacji właściwej YSR

Fig. 11. Comparison of measured and calculated values of deformation moduli

Należy podkreślić, że wielkość naprężenia prekonsolidacji właściwej (σ'_y) do tego wzoru powinna być określona w sposób miarodajny, najlepiej na podstawie metody opartej na badaniach w aparacie trójosiowym, wykorzystującej zjawisko dylatacji gruntu [Wdowska 2010].

PODSUMOWANIE

Szybki rozwój dziedzin działalności inżynierskiej spowodował jednocześnie istnienie kilku standardów określania i interpretacji parametrów geotechnicznych. Najważniejsze z nich dotyczą norm geotechnicznych funkcjonujących przed 1989 rokiem, a także obowiązującego obecnie Eurokodu 7. Jednakże normy te nie mogą zastąpić dobrej praktyki laboratoryjnej uwzględniającej najbardziej aktualne, a jednocześnie zweryfikowane procedury badań oraz podejścia do ich interpretacji. W artykule przedstawiono najważniejsze czynniki, które powinny być uwzględnione podczas wykonywania badań laboratoryjnych na różnego rodzaju gruntach. Odniesiono się do interpretacji badań wytrzymałościowych w kontekście wymagań Eurokodu 7. Przedstawiono przykładowe zależności dla gruntu niespoistego i spoistego, pozwalające na określenie modułu odkształcenia przy uwzględnieniu zakresu odkształceń, do którego jest on określony, a także stanu naprężenia i jego historii.

PIŚMIENNICTWO

- Andresen A., Kolstad P., 1979. The NGI Samplers for Undisturbed Sampling of Clays and Representative Sampling of Coarser materials. Proceedings of the International Conference of Soil Sampling, Singapore, 1–9.
- Baldi G., Hight D.W., Thomas G.E., 1988. A reevaluation of conventional triaxial test methods. ASTM STP 977, 219–263.
- Barański T., Lipiński M.J., Wolski W., 1990. Ocena naruszenia struktury gruntów spoistych przy pobieraniu próbek NNS. IX Krajowa Konferencja Mechaniki Gruntów i Fundamentowania, Kraków, 1, 395–402.
- Bishop A.W., Henkel D.J., 1962. The measurement of Soil Properties in the Triaxial Test. Edward Arnold, London.
- DeGroot D.J., Landon M.M., 2007. Laboratory testing of undisturbed soft clay samples to determine engineering design parameters. *Studia Geotechnica et Mechanica* 1–2, 23–37.
- Germaine J.T., Ladd C.C., 1988. Triaxial testing of saturated cohesive soils: State-of-the-Art Paper. Proceedings, Symposium on Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock, ASTM, STP 977, 421–459.
- Head K.H., 1992. *Manual of Soil Laboratory Testing*. Pentech Press, London.
- Hight D.W., 2013. Assessing sample quality prior to laboratory testing. Written version of Panel presentation during the 15th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering – Geotechnics of Hard Soils – Weak Rocks. Proceedings of the conference (part 4), 285–287.
- Lipiński M.J., 2012. Wybrane kryteria określania parametrów gruntów naturalnych. *Inżynieria Morska i Geotechnika* 4, 267–277.
- Lipiński M.J., 2013. Kryteria wyznaczania parametrów geotechnicznych. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Lipiński M.J., Wdowska M.K., 2004. Kryteria nasączania gruntów prekonsolidowanych metodą ciśnienia wyrównawczego. *Współpraca budowli z podłożem gruntowym. II Problemowa Konferencja Geotechniczna, Białystok – Białowieża*, 2, 71–81.
- Lipiński M.J., Wdowska M.K., 2012. A strain dependent stiffness of stiff cohesionless and cohesive soils. *Studia Geotechnica et Mechanica* (w druku).
- Lunne T., Berre T., Strandvik S., 1997. Sample Disturbance Effects in Soft Low Plasticity Norwegian Clay. Proceedings of Conference on Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics, Rio de Janeiro, 81–102.

- Lunne T., Berre T., Strandvik S., Andersen K.H., Tjelta T.I., 2001. Deep water sample disturbance due to stress relief. Norwegian Geotechnical Institute, Oslo.
- PN-81/B-03020 Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- PN-EN 1997-2:2009 Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego.
- Sandorini S.S., 1977. The Strength of London Clay in Total and Effective Stress Terms. Ph.D. thesis. University of London, London.
- Tanaka H., Horng V., 2010. Effects of geometric designs of tube sampler on sample quality of soft clays. The 4th International Workshop on soil parameters from in situ and laboratory tests. Poznań, Poland, 423–434.
- Terzaghi K., Peck R.B., Mesri G., 1996. Soil Mechanics In Engineering Practice. John Wiley and Sons, New York.
- Wdowska M., 2010. Wpływ historii naprężenia na odkształcalność gruntów spoistych. Rozprawa doktorska. Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Warszawa.
- Wesley L.D., 1975. Influence of Stress Path and Anisotropy on the Behaviour of a Soft Alluvial Clay. Ph.D thesis. University of London, London.

SELECTED STANDARDS IN EVALUATION OF GEOTECHNICAL PARAMETERS DERIVED FROM LABORATORY TESTS

Abstract. In the last period of progress in geotechnical engineering in Poland, some existing standards concerning evaluation of soil parameters as well as interpretation of laboratory tests results can be observed. A concise characteristic of these standards including rationale of their existence is presented in the paper. Next, attention was drawn to the most important aspects of laboratory tests determining the test results. The most popular method for evaluation of sample quality was shown with use of deep subsoil example. The most important factors affecting test quality were also presented. Reference was made to interpretation of shear strength results as well as to evaluation of stiffness accounting for strain range and stress level.

Key words: laboratory tests, test procedures, shear strength, stiffness

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 5.02.2014