



Załącznik 2T

Opis badań laboratoryjnych

1	KATEGORIE PRÓBEK GRUNTU	127
2	WYTYCZNE DOTYCZĄCE PRÓBEK	127
3	BADANIA LABORATORYJNE.....	128
3.1	OZNACZANIE WILGOTNOŚCI NATURALNEJ	128
3.2	ANALIZA GRANULOMETRYCZNA.....	129
3.3	GĘSTOŚĆ WŁAŚCIWA SZKIELETU GRUNTOWEGO	131
3.3.1	Metodą piknometru cieczowego	131
3.3.2	Metodą piknometru gazowego	132
3.4	ZAWARTOŚĆ CZĘŚCI ORGANICZNYCH	132
3.5	GRANICE ATTERBERGA.....	134
3.6	WODOPRZEPUSZCZALNOŚĆ	136
3.6.1	Metody pośrednie	136
3.6.1.1	Analiza sitowa.....	136
3.6.1.2	Badania edometryczne.....	137
3.6.2	Metody bezpośrednie	137
3.6.2.1	Badania ze stałym gradientem hydraulicznym	137
3.6.2.2	Badania ze zmiennym gradientem hydraulicznym	138
3.7	MINIMALNA I MAKSYMALNA GĘSTOŚĆ OBJĘTOŚCIOWA	139
3.8	BADANIE EDOMETRYCZNE	140
3.9	BADANIE W APARACIE BEZPOŚREDNIEGO ŚCINANIA	142
3.10	BADANIE W APARACIE TRÓJOSIOWEGO ŚCISKANIA.....	143
3.10.1	Badania typu UU.....	143
3.10.2	Badania typu CU	144
3.10.3	Badania typu CD	145
3.10.4	Zaawansowane badania trójosiowe.....	147



Opis badań laboratoryjnych jako powinny być stosowane w określaniu rodzaju i przynależności gruntu do odpowiedniej warstwy litologicznej. .

1 Kategorie próbek gruntu

Istnieją trzy metody pobierania próbek : A, B i C według PN-EN ISO 22475-1. Pozwalają one pobierać próbki w pięciu kategoriach jakości 1-5.

- Metody A – pobieranie próbek nienaruszonym, o zachowanej wilgotności naturalnej, wskaźniku porowatości i składzie chemicznym; jako jedyne pozwalają na otrzymanie próbek pierwszej i drugiej klasy (klasy 1-5);
- Metody B – pobieranie próbek o naruszonej strukturze, ale z zachowaną wilgotnością naturalną oraz składem chemicznym (klasy 3-5)
- Metody C – pobieranie próbek o naruszonej strukturze i naruszonej wilgotności (klasa 5).

2 Wytyczne dotyczące próbek

Pobrane próbki należy numerować, rejestrować i oznaczać etykietą natychmiast po pobraniu z otworu wiertniczego lub wykopu.

Etykieta próbki powinna zawierać następujące dane:

- datę pobrania próbki
- numer otworu wiertniczego
- głębokość pobrania próbki
- numer identyfikacyjny

Rdzenie po pobraniu powinny zostać natychmiast zabezpieczone w celu zachowania ich naturalnej wilgotności. Próbki powinny być prawidłowo oznaczone, informując gdzie znajduje się część górna, a gdzie podstawa próbki. Rdzenie powinny być przenoszone



i magazynowane w taki sposób, aby nie naruszyć ich struktury. Próbkę należy chronić przed upałem, mrozem, wibracją i wstrząsami podczas transportu i magazynowania.

Szczególnie należy chronić próby o strukturze nienaruszonej, by zapobiec ich odkształceniom i stratom wody (zmianie wilgotności). Materiał, z którego wykonane są pojemniki do przechowywania prób, nie powinien reagować z zawartym w nich gruntem.

Do badań powinna być wzięta, w miarę możliwości, reprezentatywna próbka gruntu z pobranej próby. Klasyfikację, oznaczenie i opis gruntu należy wykonać zgodnie z EN ISO 14688-1 i EN ISO 14688-2.

3 Badania laboratoryjne

3.1 Oznaczanie wilgotności naturalnej

Wymagana kategoria: 1-3

Cel: metoda pozwala oznaczyć wilgotność naturalną gruntu rozumianą jako stosunek masy wody gruntu do masy gruntu wysuszonego, wyrażony w procentach. Jeśli próba zawiera więcej niż jeden rodzaj gruntu, wilgotność powinna być oznaczana na próbkach reprezentujących poszczególne rodzaje gruntów.

Szczególną uwagę powinno zwracać się na temperaturę suszenia, gdyż zbyt wysoka może mieć szkodliwy wpływ na mierzone wartości. Optymalna temperatura to 105°C.

Skrócony opis: Rekomendowana wielkości próbki do badania zależy od maksymalnej wielkości ziaren:

- 0,063 mm – 30g
- 2,0 mm – 100 g
- 10,0mm – 500g
- 31,5mm – 3000g
- 63 mm – 21000g



Przed badaniem należy dokładnie umyć i wysuszyć naczynka wagowe oraz pokrywki. Następnie należy zważyć czyste, suche i chłodne naczynka wraz z pokrywką z dokładnością 0,01g i umieścić odważoną próbkę gruntu w naczynku wagowym wraz z pokrywką. Naczynko z gruntem umieszcza się w suszarce i suszy w temperaturze 105°C do stałej masy. Kontrolę suszenia przeprowadza się po 16 h, po czym ponownie umieszcza się naczynko w suszarce na 1h. Po upływie 1h, przekłada się je do eksykatora i po ostygnięciu waży. Jeśli masa nie zmieniła się, to proces suszenia można uznać za zakończony i obliczyć wilgotność. Procedurę należy powtórzyć dwukrotnie i wyciągnąć wartość średnią.

Normy odniesienia: *PKN-CEN ISO/TS 17892-1:2009* lub *PN-B-04481:1988*.

3.2 Analiza granulometryczna

Wymagana kategoria: 1-4

Cel: metoda pozwala określić skład granulometryczny gruntu, co umożliwia również jego klasyfikację. Dla gruntów zawierających mniej niż 10% cząstek drobnych ($<0,0063$) stosuje się metodę sitową. Dla gruntów o zawartości cząstek drobnych większej niż 10% ($>0,0063$) można stosować połączenie metody sitowej i areometrycznej.

Skrócony opis: rekomendowana wielkość próbki, po wysuszeniu do stałej masy :

- 250 g – piasek drobny
- 250 – 500 g – piasek średni
- 500 – 5000 g – piasek gruby, pospółki i żwir

Grunt zawierający powyżej 10% cząstek drobnych należy przygotować na mokro, tj. przemyć przed przeprowadzeniem analizy sitowej. Wysuszony materiał przesiać przez zestaw co najmniej 12 sit o wielkości od 0,063 mm do 125 mm. Czas przesiewania ręcznego to co najmniej 2 min, na wstrząsarce 10 min. Następnie należy zważyć materiał pozostały na kolejnych sitach oraz pozostały na denku. Masy



pozostałe na sitach nie powinny przekraczać podanych wartości, aby sito nie było przeciążone (dla sita o średnicy 300 mm)

- 0,063 – 0,50 kg
- 0,125 – 0,75 kg
- 0,250 – 1,2 kg
- 0,500 – 2,2 kg
- 1,18 – 3,5 kg

Na koniec należy obliczyć łączną masę gruntu pozostałą na każdym sicie i denku. Jeżeli różni się od początkowej masy o >1%, należy powtórzyć przesiewanie.

W przypadku badań areometrycznych, należy przygotować dla :

- Gruntów piaszczystych próbkę o wielkości do 75 g
- Gruntów spoistych z małą ilością piasku lub bez piasku próbkę o wielkości 30 – 50 g
- Plastycznych i miękkoplastycznych ilów próbkę o wielkości do 10-30 g

Przed badaniem areometrycznym należy oznaczyć wilgotność, oznaczyć gęstość właściwą stosując oddzielną próbkę oraz usunąć części organiczne lub węglany, jeśli ich ilość jest znacząca (stosując kwas solny (0,2M(+/-1%))). Próbkę umieszcza się w kolbie stożkowej, dodając 100 ml czynnika rozpraszającego (heksametafosforan sodu 40 g/l lub pirofosforan sodu 20g/l). Następnie należy wstrząsać do całkowitego rozproszenia oraz przemyć na sicie 0,0063mm, tak, aby strumień wody nie przekraczał 800 ml. Zawiesinę przechodzącą przez sito przenosi się do cylindra pomiarowego i uzupełnia ilość roztworu do 1 l. Materiał na sicie przenosi się do parowniczk i suszy, a po ostygnięciu materiał przesiewa przez sito o najmniejszych oczkach. Materiał przechodzący przez sito należy dodać do cylindra sedimentacyjnego. Zawiesina powinna zostać nienaruszona przez co najmniej 12 h. Należy przygotować także roztwór odniesienia. Następnie zawiesinę należy energicznie wstrząsnąć do momentu całkowitego zawieszenia cząsteczek, cylinder odstawić i rozpocząć mierzenie czasu. Areometr zanurza w wodzie tak, aby



mógł się swobodnie unosić. Odczyt przeprowadza się z menisku górnego z dokładnością do 0,001 g/ml. Areometr wyjmuje się powoli, a następnie płucze i umieszcza w roztworze odniesienia, a odczytaną wartość zapisuje jako R_0 . Tak należy postępować dla zapisu dla 30s, 1min i 2 min Areometr należy ponownie włożyć do zawiesiny w odpowiednich przedziałach czasu, około 15 s przed odczytem (4, 8, 30, 60, 120, 480 min i 24h).

Po 15 min należy odnotować temperaturę zawiesiny, a później powtarzać odczyt po każdym odczycie areometru.

Uwagi: Wykres składu granulometrycznego pozwala, poza klasyfikacją gruntu : umożliwia obliczenie współczynników filtracji oraz podział gruntu w odniesieniu do jego wysadzinowości.

Normy odniesienia: PKN-CEN ISO/TS 17892-4:2009 lub PN-B-04481:1988

3.3 Gęstość właściwa szkieletu gruntowego

3.3.1 Metodą piknometru cieczowego

Wymagana kategoria: 1-4

Cel: Określenie gęstości właściwej szkieletu gruntowego badanego gruntu

Skrócony opis:

Reprezentatywną próbkę gruntu o zmierzonej masie wynoszącej powyżej 10g należy umieścić wewnątrz piknometru o znanej objętości. Grunty o zamkniętych porach należy uprzednio rozkruszyć w moździerzu. Następnie należy dolać wody destylowanej do piknometru, tak aby jej poziom był o około 10-20 mm powyżej poziomu gruntu. Po odpowietrzeniu próbki poprzez mieszanie, podgrzewaniu lub użycie podciśnienia należy uzupełnić ilość płynu wewnątrz piknometru i zważyć go.

Gęstość właściwa jest określana na podstawie różnicy pomiędzy masą piknometru z próbką i wodą destylowaną, a masą piknometru wypełnionego wyłącznie wodą destylowaną.



Jeśli próbka gruntu nie została wysuszona przed badaniem gęstości właściwej należy określić wilgotność próby po badaniu. Na potrzeby obliczeń brana pod uwagę jest wyłącznie masa sucha gruntu.

Gęstość właściwą szkieletu gruntowego należy oznaczyć co najmniej dwukrotnie. Jeśli różnica pomiędzy kolejnymi oznaczeniami wynosi powyżej $0,03 \text{ g/cm}^3$ badanie powinno być powtórzone.

Normy odniesienia: PN-EN-ISO 17892-3

3.3.2 Metodą piknometru gazowego

Wymagana kategoria: 1-4

Cel: Określenie gęstości właściwej szkieletu gruntowego badanego gruntu

Skrócony opis:

Grunt przed badaniem gęstości właściwej szkieletu gruntowego należy wysuszyć i rozetrzeć w moździerzu. Próbkę o znanej masie należy umieścić wewnątrz komory pomiarowej urządzenia, tak by wypełnić ją co najmniej w 75%. Następnie do komory wtłaczany jest gaz. Gęstość właściwa szkieletu gruntowego określana jest na podstawie różnicy ciśnień pomiędzy pomiarem komory pustej, a z próbką gruntu. Obliczenia należy wykonywać zgodnie z zaleceniami producenta sprzętu pomiarowego.

Gęstość właściwą szkieletu gruntowego należy oznaczyć co najmniej trzykrotnie. Jeśli różnica pomiędzy kolejnymi oznaczeniami wynosi powyżej $0,03 \text{ g/cm}^3$ badanie powinno być powtórzone.

Normy odniesienia: PN-EN-ISO 17892-3

3.4 Zawartość części organicznych

Wymagana kategoria: 1-4

Cel: Określenie ustalonymi metodami zawartości części organicznych w gruncie



Oznaczanie strat masy przy prażeniu wg PN-88/B-04481

Skrócony opis: Metoda polega na rozkładzie termicznym substancji organicznej przeprowadzonym w piecu elektrycznym.

Z próbki o masie 30-50g wysuszonej do stałej masy w 105°C należy odważyć około 10g gruntu, wsypać do suchego tygielka i zważyć z dokładnością do 0,01g. Tygielkę wraz z gruntem należy przez co najmniej 4h prażyć w temperaturze 600-800°C. Po ostudzeniu w eksykatorze tygielkę z zawartością należy zważyć z dokładnością 0,01g i ponownie prażyć przez dalsze 3-4h. Czynności te należy powtarzać aż do uzyskania stałej masy. Zawartość części organicznych oblicza się przez porównanie masy próbki wysuszonej do stałej masy przed jej spalaniem i po jej spalaniu (prażeniu).

Uwagi: Jeśli w próbce występują węglany, siarczki lub minerały ilaste to ostateczny wynik będzie sumą strat masy wywołanej spalaniem substancji organicznej oraz rozpadem minerałów ilastych, węglanów i siarczków.

Inne warunki stosowane przy oznaczaniu strat masy przy prażeniu wg. norm zalecanych przez Eurokod 7 przedstawiono w tabeli poniżej:

Norma	Temperatura suszenia [°C]	Temperatura prażenia [°C]
ASTM D2974-87	105	440±25
BS 1377-3:1990	50	440±25
DIN 18128:1990-11	60	550

Normy odniesienia: PN-88/B-04481, PN-EN 1997-2

Oznaczanie zawartości substancji organicznej metodą utleniania

Skrócony opis: Zasada oznaczania zawartości części organicznych polega na określeniu straty masy gruntu wysuszonego w temperaturze 105-110°C powstałej na skutek oddziaływania 30% roztworu nadtlenu wodoru na próbkę gruntu.

Należy odważyć w zlewce około 10g wysuszonego gruntu i całość zważyć z dokładnością do 0,01g. Do zlewki wlać około 30cm³ 30% roztworu nadtlenu wodoru, przykryć zlewkę szkiełkiem zegarkowym i podgrzewać stopniowo do temperatury



60oC. Należy zwrócić uwagę by wartość zlewki nie pieniała się zbyt silnie i nie przyskała. Podgrzewanie należy prowadzić w ciągu około 3h, aż do chwili, gdy po dodaniu kolejnych 10cm³ roztworu nadtlenu wodoru nie będą się już wydzielały pęcherzyki gazu. Po zakończeniu podgrzewania zawartość zlewki należy gotować aż do uzyskania zawiesiny o gęstej konsystencji. Następnie zlewkę wstawić do suszarki i suszyć do stałej masy w temperaturze 105-110oC. Po ochłodzeniu w eksykatorze do temperatury pokojowej zlewkę wraz z zawartością należy zważyć z dokładnością do 0,01g i obliczyć procentową zawartość części organicznych.

Uwagi: Metody nie można stosować w przypadku gruntów o zawartości substancji organicznej ponad 10% lub gdy badany grunt zawiera makroskopowo widoczne części drewna, roślin itp. Zaleca się wtedy stosowanie metody prażenia.

3.5 Granice Atterberga

Wymagana kategoria: 1-4

Cel: Określenie konsystencji gruntu oraz jego granicy płynności i plastyczności.

Skrócony opis: Granice konsystencji obejmują granicę płynności, granicę plastyczności i granicę skurczalności.

Przygotowanie pasty gruntowej

Z dostarczonego do badania gruntu należy pobrać reprezentatywną próbkę o masie około 200g przechodzącego przez sito 0,4 mm lub 300g gruntu w przypadku stosowania metody przesiewania „na mokro”. W przypadku gdy grunt zawiera grubsze ziarna należy je w miarę możliwości usunąć ręcznie z badanej próbki. Masę próbki należy oznaczyć z dokładnością do 0,01g. Na kolejnej, reprezentatywnej próbce tego samego gruntu należy oznaczyć jej wilgotność. Zważoną próbkę należy umieścić w parownicy i zalać całkowicie wodą, a następnie mieszać aż do uzyskania zawiesiny. Zawiesinę przelać przez sito o oczkach 2mm, umieszczone na sicie o wymiarze oczek 0,4mm lub zbliżonym. Należy użyć minimalnej ilości wody destylowanej do wypłukania cząstek gruntu z sit, aż do momentu, gdy woda przechodząca przez sito 0,4mm stanie się wizualnie czysta. Wszystkie produkty przemycia należy zebrać. Materiał pozostały na sitach należy wysuszyć w 105°C i



zważyć z dokładnością do 0,01g. Zebrane produkty przemycia pozostawić na czas ich sedimentacji, a czystą wodę znad osadu odlać. Zawiesinę należy osuszyć aż do uzyskania pasty gruntowej.

Oznaczenie granic płynności metodą penetrometru stożkowego

Pastę gruntową należy dokładnie wymieszać, aż do uzyskania konsystencji odpowiadającej danej penetracji wstępnej. Do przygotowania pasty stosować wodę destylowaną. Oczekiwane parametry penetracji stożka podano w poniższej tabeli.

Oczekiwane parametry penetracji stożka	80g/30°	60g/60°
Penetracja wstępna	około 15mm	około 7 mm
Zasięg penetracji	od 15 do 25 mm	od 7 do 15 mm
w _L oznacza się dla penetracji równej	20 mm	10 mm

Przygotowaną pastą gruntową należy napęlić pierścień, a następnie przy użyciu noża wyrównać powierzchnię gruntu. Należy zwrócić uwagę by nie dopuścić do uwiecznienia w gruncie pęcherzyków powietrza. Pierścień z pastą gruntową należy umieścić na podstawie penetrometru, a następnie zablokowany stożek obniżyć tak, by dotykał on powierzchni gruntu w pierścieniu. Stożek należy uwolnić powodując jego swobodny spadek. Pograżenie stożka w gruncie należy odczytać z dokładnością do 0,1 mm. Następnie pastę gruntową należy powtórnie wymieszać i ponownie wykonać czynności w celu uzyskania drugiej wartości zagłębienia stożka. Jako wielkość miarodajną należy przyjąć średnią arytmetyczną obu wartości, jeśli ich różnica nie jest >0,5 mm. Z pozostałego gruntu należy pobrać próbkę o masie ok. 10g do oznaczenia wilgotności. Wszystkie czynności należy powtórzyć tak, by uzyskać co najmniej 4 punkty w zasięgu penetracji zależnym od rodzaju użytego stożka. Wilgotności próbki nie należy naprzemiennie zwiększać i zmniejszać w danym badaniu, lecz stopniowo zwiększać ją albo zmniejszać. Aby zwiększyć wilgotność należy dodać wody destylowanej i dokładnie zmieszać z gruntem. W celu



obniżenia wilgotności należy rozłożyć (rozsmarować) próbkę na płytce lub w parownicze i ostrożnie przemieszać szpachelką.

Uwagi: Granica płynności jest równa wilgotności, przy której grunt zmienia swoją konsystencję z plastycznej na płynną. Granica plastyczności gruntu jest to najniższa wilgotność, przy której grunt pozostaje w stanie plastycznym. Alternatywną metodą do użycia penetrometru stożkowego jest metoda Casagrande'a, ale jej wyniki są silniej zależne od sposobu prowadzenia badania i oceny osoby je wykonującej, dlatego też zalecane jest użycie metody penetrometru stożkowego. Metoda ta daje bardziej wiarygodne wyniki, szczególnie dla gruntów o małej wartości wskaźnika plastyczności.

Do badania można używać stożka 60g/60° lub 80g/30°.

W przypadku gruntów zawierających dużą ilość cząstek gruboziarnistych bardziej właściwe może okazać się obliczenie stopnia plastyczności i wskaźnika konsystencji w oparciu o wilgotność frakcji przechodzącej przez sito 0,4 mm.

Normy odniesienia: PKN-CEN ISO/TS 17892-12:2009 lub PN-B-04481:1988.

3.6 Wodoprzepuszczalność

3.6.1 Metody pośrednie

3.6.1.1 Analiza sitowa

Wymagana kategoria: 1-4

Cel: Określenie współczynnika wodoprzepuszczalności

Skrócony opis:

Możliwe jest określenie przybliżonego współczynnika wodoprzepuszczalności dla gruntów niespoistych na podstawie składu granulometrycznego. Istnieje wiele wzorów empirycznych opisujących wskaźnik filtracji na podstawie krzywej uziarnienia. Jednym z najczęściej używanych jest wzór USBC („wzór amerykański”) uzależniający współczynnik filtracji od średnicy zastępczej d_{20} :

$$k = 0,0036 \cdot d_{20}^{2,3}$$



Specyfikacja techniczna **PN-CEN ISO/TS 17892-4** nie określa jednak jakiego wzoru powinno używać się do obliczeń.

3.6.1.2 Badania edometryczne

Wymagana kategoria: 1 (1-4 dla prób odtworzonych)

Cel: Określenie współczynnika wodoprzepuszczalności

Skrócony opis:

Współczynnik wodoprzepuszczalności można określić w sposób przybliżony przy okazji wykonywania badań edometrycznych. Na podstawie kształtu krzywych konsolidacji można określić współczynnik konsolidacji (c_v). Do jego określenia najczęściej wykorzystuje się graficzne metody Casagrande'a oraz Taylora. Współczynnik filtracji jest również zależny od edometrycznego modułu ścisłości pierwotnej (M_0) oraz gęstości wody.

Powyższe zależności opisane są wzorem:

$$k = \frac{c_v \cdot \gamma_w}{M_0}$$

3.6.2 Metody bezpośrednie

3.6.2.1 Badania ze stałym gradientem hydraulicznym

Wymagana kategoria: 1 (1-4 dla prób odtworzonych)

Cel: Określenie współczynnika wodoprzepuszczalności

Skrócony opis:

Stosunek prędkości przepływu do gradientu hydraulicznego, w przypadku przepływu laminarnego, zgodnie z prawem Darcy'ego, nazywamy współczynnikiem filtracji. Jedną z dwóch podstawowych metod wyznaczenia współczynnika filtracji jest metoda stałego gradientu hydraulicznego.

Próbka przed badaniem powinna zostać nasycona wodą.. W czasie badania różnica ciśnień pomiędzy końcami próbki powinna być stała. Większe ciśnienie powinno być aplikowane u spodu próbki, by wymusić ruch wody ku górze. Współczynnik filtracji określa się na



podstawie ilości wody jaka przepłynęła przez próbkę o określonych wymiarach w czasie, przy założonym gradiencie hydraulicznym .

$$k = \frac{Q \cdot l}{A \cdot h}$$

Gdzie:

Q – wydatek (ilość wody jaka przepłynęła przez próbkę do czas)

l – wysokość próbki

A - powierzchnia przekroju poprzecznego

P – różnica ciśnień

Obliczenia prowadzi się dla okresu, w którym następował przepływ ustalony

Badanie ze stałym spadkiem hydraulicznym może być wykonywane w różnych urządzeniach takich jak: permametr, aparat trójosiowego ściskania, konsolidometr.

Dobór właściwego aparatu do badań jest zależny od rodzaju gruntu.

Współczynnik filtracji jest zależny od temperatury w jakiej prowadzone są badania, oraz naprężania konsolidacyjnego jakiemu poddana została próbka przed badaniem.

Współczynnik filtracji powinien zostać przeliczony do temperatury odniesienia równej 10°C

Norma: **PKN-CEN ISO/TS 17892-11**

3.6.2.2 Badania ze zmiennym gradientem hydraulicznym

Wymagana kategoria: 1 (1-4 dla prób odtworzonych)

Cel: Określenie współczynnika wodoprzepuszczalności

Skrócony opis:

Stosunek prędkości przepływu do gradientu hydraulicznego, w przypadku przepływu laminarnego, zgodnie z prawem Darcy'ego, nazywamy współczynnikiem filtracji. Jedną z dwóch podstawowych metod wyznaczenia współczynnika filtracji jest metoda zmiennego gradientu hydraulicznego.



Zmienny gradient hydrauliczny uzyskuje się przez opadanie wody w rurce piezometrycznej znajdującej się powyżej badanej próbki. Woda powinna przepływać od dołu ku górze próbki. Należy mierzyć zmiany wysokości poziomu cieczy w rurce piezometrycznej. Współczynnik filtracji uzyskuje się z liniowej części krzywej opisanej wzorem:

$$k = \frac{a \cdot l}{A \cdot t} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2}$$

Gdzie:

- a – poprzeczne pole rurki piezometrycznej
- l – wysokości próbki w czasie badania
- A – powierzchnia przekroju poprzecznego próbki
- t – przedział czasu pomiędzy pomiarami
- h₁ – poziom piezometryczny na początku przedziału czasu
- h₂ – poziom piezometryczny na końcu przedziału czasu

Badania ze zmiennym gradientem hydraulicznym najczęściej wykonywane są w zmodyfikowanej komorze do badań edometrycznych. Możliwe jest również wykonywanie badań tego typu w innych urządzeniach takich jak aparat do badań trójosiowych.

Współczynnik filtracji jest zależny od temperatury w jakiej prowadzone są badania, oraz naprężania konsolidacyjnego jakiemu poddana została próbka przed badaniem. Współczynnik filtracji powinien zostać przeliczony do temperatury odniesienia równej 10°C

Norma: **PN-CEN ISO/TS 17892-11**

3.7 Minimalna i maksymalna gęstość objętościowa

Wymagana kategoria: 1-4

Cel: Oznaczenie gęstości odniesienia dla stopnia zagęszczenia - I_D



Skrócony opis:

Do przeprowadzenia pomiaru minimalnej i maksymalnej gęstości objętościowej gruntów niespoistych potrzeba naczynia metalowego w kształcie cylindra o pojemności około 500 cm³ wraz z tłoczkiem oraz widełek wibracyjnych i lejka. Z gruntu przeznaczonego do badań należy pobrać próbkę o objętości co najmniej 600 cm³ i wysuszyć w temperaturze 105-110 °C

Wysuszoną próbkę gruntu należy wsypać przy pomocy lejka do cylindra o znanej objętości i masie. Początkowo należy oprzeć lejek o spód naczynia, a następnie powoli podnosić. Po napełnieniu cylindra gruntem należy wyrównać powierzchnię naczynia równo z jego krawędziami przy pomocy noża o płaskim ostrzu. Na podstawie objętości naczynia i masy gruntu uzyskuje się minimalną gęstość objętościową.

Kolejnym krokiem jest umieszczenie na powierzchni gruntu tłoczka i zagęszczanie poprzez uderzanie widełkami mechanicznymi. Zagęszczanie należy prowadzić do momentu w którym tłoczek przestaje się zagłębiać. Znając zagłębienie tłoczka można obliczyć objętość jaką zajmuje grunt. Na jej podstawie, znając masę próbki uzyskuje się maksymalną gęstość objętościową.

Oznaczenie minimalnej gęstości objętościowej należy powtórzyć pięciokrotnie, za ostateczny wynik przyjmując minimalną uzyskaną wartość.

Oznaczenie maksymalnej gęstości objętościowej należy powtórzyć trzykrotnie, za ostateczny wynik przyjmując maksymalną uzyskaną wartość

Normy odniesienia: PN-B-04481:1988

3.8 Badanie edometryczne

Wymagana kategoria: 1 (1-4 dla prób odtworzonych)

Cel: Uzyskanie parametrów opisujących procesy konsolidacji gruntu.

Skrócony opis:



Przed badaniem należy zważyć i określić wymiary pierścienia użytego do pomiarów. Pierścień należy całkowicie wprowadzić we fragment gruntu o nienaruszonej strukturze, a następnie odciąć nadmiar materiału i wyrównać obie powierzchnie próbki. Możliwe jest także wykonanie badań na próbkach gruntu o strukturze odtworzonej.

Pierścień z gruntem należy umieścić w komorze konsolidacyjnej pomiędzy dwiema płytkami porowymi. Bezpośrednio pod i nad próbką powinien znajdować się także papier filtracyjny. Próbkę należy zabezpieczyć przed utratą wilgoci, co można osiągnąć przez zalanie komory wodą. W przypadku gruntów pęczniejących należy rozważyć inne formy zabezpieczenia próbki.

Płytę obciążeniową ustawia się centralnie na górnej płytce porowatej. Jeśli zastosowany jest system belkowy, to wychylenie belki w górę powinno być takie, aby w trakcie badania położenie środka było poziome, czyli musi ono odpowiadać maksymalnemu wychyleniu w dół. Ścieżka naprężeń powinna być wcześniej ustalona, a odczyty prowadzone w takich przedziałach czasu, aby było możliwe sporządzenie krzywej zależności ściśliwości od czasu. Ścieżka naprężeń powinna odpowiadać warunkom w jakich będzie pracował grunt. Dobranie złej ścieżki naprężeń powoduje uzyskanie niesatysfakcjonujących wyników.

W czasie badań edometrycznych można uzyskać parametry takie jak:

- edometryczny moduł ściśliwości pierwotny (M_0)
- edometryczny moduł ściśliwości wtórny (M)
- współczynnik ściśliwości objętościowej (m_v)
- współczynnik konsolidacji (C_v)
- współczynnik filtracji (k)
- pozorne naprężenie prekonsolidacyjne (σ'_p)
- wskaźnik ściśliwości gruntu (C_c)
- wskaźnik ściśliwości odprężenia (C_s)
- współczynnik ściśliwości wtórnej (C_α)



Uwagi: Ścieżka naprężenia odpowiada jednoosiowemu odkształceniu. Drenaż próbki jest jednowymiarowy i jednoosiowy. Badanie opiera się na założeniu, że grunt jest nasycony i w innym przypadku może nie mieć sensu fizycznego. Badanie jest przydatne do obliczania wielkości i czasu osiadania w posadowieniach.

Normy odniesienia: PKN-CEN ISO/TS 17892-5:2009 lub PN-EN 4481-1988 .

3.9 Badanie w aparacie bezpośredniego ścinania

Wymagana kategoria: 1 (1-4 dla prób odtworzonych)

Cel: Oznaczenie wytrzymałości na ścinanie efektywne gruntu, szczególnie przy robotach ziemnych i fundamentowaniu.

Skrócony opis:

Próbkę należy przygotować, zważyć i umieścić w aparacie tak, aby zminimalizować ryzyko jej naruszenia lub zmiany wilgotności. Aby zapobiec tarcia między dwiema częściami skrzynki, stosuje się smar silikonowy. Po umieszczeniu próbki należy zadać ciśnienie konsolidacyjne, a następnie prowadzić odczyt zmiany jej wysokości do czasu ukończenia konsolidacji. Przed ścinaniem, skrzynkę należy rozkręcić tak, aby pojawił się prześwit między jej połowami. Próbkę należy ścinać ze stałą prędkością, która nie powinna przekraczać 0,5 mm/min dla gruntów niespoistych oraz prędkości obliczonej na podstawie przebiegu konsolidacji. Po zakończeniu badania próbkę należy zważyć, wysuszyć i oznaczyć jej wilgotność.

Badanie wykonuje się przeprowadzając ścinanie co najmniej trzech próbek przy różnych ciśnieniach konsolidacyjnych.

Uwagi: Metoda polega na poddaniu gruntu obciążeniu z odprowadzeniem wody (jeśli jest konieczne nawodnienie) lub konsolidacyjny pod obciążeniem normalnym.



Następnie jedna część skrzynki przemieszcza się względem drugiej, przy jednoczesnym pomiarze siły ścinającej oraz poziomych przemieszczeń. Ścinanie należy prowadzić na tyle wolno, aby nastąpiła dyssypacja wody w porach i naprężenia efektywne były równe całkowitym. Ze względu na brak możliwości pomiaru ciśnienia porowego ścinanie ze zbyt wysoką prędkością prowadzi do wypaczenia rezultatów badania.

Normy odniesienia: PKN-CEN ISO/TS 17892-10

3.10 Badanie w aparacie trójosiowego ściskania

3.10.1 Badania typu UU

Wymagana kategoria: 1

Cel: Oznaczenie parametrów wytrzymałościowych gruntu

Badanie polega na szybkim ścięciu (zniszczeniu) próbki gruntu w aparacie trójosiowego ściskania w warunkach bez drenażu, po 10 minutach od ustabilizowania się ciśnienia wody wewnątrz komory do badań. Symuluje to warunki w których obciążenie jest przykładane w szybkim czasie – np. montaż dużej aparatury przemysłowej przy pomocy dźwigu.

Badania typu UU wykonuje się głównie na próbach z gruntów spoistych mineralnych oraz organicznych o nienaruszonej strukturze, wilgotności i uziarnieniu. Głównym parametrem jaki uzyskuje się w czasie tego typu badania jest **Su** (oznaczane również jako **Cu**) czyli wytrzymałość na ścianie bez odpływu. Jednostką parametru **Su** jest kilopascal (kPa).

Warunkiem uzyskania prawidłowych wartości parametru **Su** jest pełne nasycenie wodą próbki. Zaleca się wykonanie badania na 3 próbkach przy różnych ciśnieniach wewnątrz komory do badań trójosiowych i przyjęcie parametru **Su** jako średniej z 3 testów.



Normy odniesienia: PKN-CEN ISO/TS 17892-8

3.10.2 Badania typu CU

Wymagana kategoria: 1 (1-4 dla prób odtworzonych)

Cel: Oznaczenie parametrów wytrzymałościowych gruntu

Badanie polega na ścięciu (zniszczeniu) w warunkach bez drenażu serii minimum trzech próbek uprzednio skonsolidowanych przy różnych ciśnieniach efektywnych.

Badania trójosiowe tego typu składa się z trzech zasadniczych etapów:

1) Saturacji – W czasie której próbka jest nasączana wodą. Warunkiem przejścia do kolejnego etapu jest osiągnięcie pełnego nasycenia próbki wodą. Jest to sprawdzane w sposób pośredni przy pomocy parametru B Skempton.

2) Konsolidacji - W czasie której następuje zagęszczanie gruntu na skutek działania ciśnienia efektywnego. W czasie konsolidacji następuje odpływ wody z próbki. Etap konsolidacji powinien trwać co najmniej do momentu zakończenia konsolidacji pierwotnej. Próbkę mogą być konsolidowane w sposób izotropowy bądź anizotropowy.

3) Ścinania- W czasie którego próbka jest niszczone poprzez ściskanie w określonym tempie. Prędkość z jaką jest ścinana próbka jest zależna od czasu konsolidacji. Z zależności pomiędzy parametrami próbki monitorowanymi w czasie etapu ścinania uzyskuje się współczynniki opisujące wytrzymałość gruntu.

Badania typu CU wykonuje się na najczęściej próbkach z gruntów spoistych mineralnych o nienaruszonej strukturze, wilgotności i uziarnieniu. Głównymi parametrami jakie uzyskuje się w czasie tego typu badania są:

- ϕ' – efektywny kąt tarcia wewnętrznego gruntu



- c' – efektywna spoistość gruntu
- E_s – sieczny moduł odkształcenia gruntu

Parametry wytrzymałościowe i odkształceniowe należy zawsze odnosić do wartości naprężeń, przy jakich zostały wyznaczone. W związku z tym konieczne jest określenie ciśnień efektywnych przy jakich będą konsolidowane próbki przed rozpoczęciem badań.

Badania typu CU można wykonywać również na próbach z gruntów spoistych o odtworzonej strukturze i wilgotności, natomiast powinno zostać to oznaczone w raporcie. Wyniki badań na próbach odtworzonych mogą różnić się w sposób znaczący od wyników na próbach nienaruszonych. Stosunek wytrzymałości próbek nienaruszonych do odtworzonych opisuje wrażliwość gruntu.

Ze względu na warunki w czasie ścinania – brak możliwości odpływu wody z próbki badania typu CU nie są zalecane dla gruntów organicznych oraz niespoistych. W przypadku gruntów organicznych zaleca się stosowanie kombinacji badań typu CD oraz UU zamiast badań typu CU. W przypadku gruntów niespoistych zaleca się wykonywanie badań typu CD zamiast CU.

Należy pamiętać, że badania trójosiowe są badaniami długotrwałymi. W skrajnych przypadkach czas badania pojedynczej próbki może wynieść nawet kilkanaście dni.

Normy odniesienia: PKN-CEN ISO/TS 17892-9

3.10.3 Badania typu CD

Wymagana kategoria: 1 (1-4 dla prób odtworzonych)

Cel: Oznaczenie parametrów wytrzymałościowych gruntu



Badanie polega na ścięciu (zniszczeniu) w warunkach z drenażem serii minimum trzech próbek uprzednio skonsolidowanych przy różnych ciśnieniach efektywnych.

Badanie typu CD składa się z trzech etapów: saturacji, konsolidacji oraz ścinania. Pierwsze dwa etapy są tożsame dla badań typu CU oraz CD. Zasadnicza różnica pojawia się natomiast na etapie ścinania. W trakcie badań typu CD dopuszczona jest możliwość odpływu i napływu wody do próbki. W celu niedopuszczenia do generowania się ciśnienia wody w porach prędkości z jakimi ścinane są próbki w badaniach z drenażem są nawet kilkunastokrotnie niższe niż dla test z brakiem możliwości odpływu wody.

Badania typu CD wykonuje się na najczęściej na próbach z gruntów spoistych mineralnych oraz organicznych o nienaruszonej strukturze, wilgotności i uziarnieniu.

Badania tego typu wykonuje się również na próbach o odtworzonej strukturze z gruntów niespoistych. W przypadku badań na tego typu gruntach ważnym jest określenie stopnia zagęszczenia próbki przed badaniem. Wyniki i sposób zachowania się gruntu w czasie badania silnie zależą od relatywnej gęstości materiału.

Głównymi parametrami jakie uzyskuje się w czasie badań typu CD są:

- ϕ' – efektywny kąt tarcia wewnętrznego gruntu
- c' – efektywna spoistość gruntu
- E_s – sieczny moduł odkształcenia gruntu

Parametry wytrzymałościowe i odkształceniowe należy zawsze odnosić do wartości naprężeń, przy jakich zostały wyznaczone. W związku z tym konieczne jest określenie ciśnień efektywnych przy jakich będą konsolidowane próbki przed rozpoczęciem badań.



Należy pamiętać, że badania trójosiowe są badaniami długotrwałymi. W skrajnych przypadkach czas badania pojedynczej próbki może wynieść nawet kilkanaście dni.

Normy odniesienia: PKN-CEN ISO/TS 17892-9

3.10.4 Zaawansowane badania trójosiowe

W ramach badań trójosiowych można uzyskiwać również parametry do bardziej zaawansowanych modeli gruntu. Wymaga to zastosowania dodatkowego oprzyrządowania bądź specjalnych procedur w czasie badania.

Przykładowo, dzięki wykonaniu dodatkowego cyklu odciążenie-obciążenie podczas ścinania próbki w ramach badania typu CD możliwe jest określenie parametrów E_{ur} oraz V_{ur} na potrzeby modelu gruntu Hardening Soil.