
BADANIA LABORATORYJNE

4.1. Zakres i rodzaje badań

Badania laboratoryjne stanowią uzupełnienie terenowych badań „in situ” prowadzących do rozpoznania budowy litologicznej podłoża oraz wyznaczenia parametrów geotechnicznych poszczególnych warstw gruntowych.

Dla potrzeb budowy nasypów badania laboratoryjne powinny dostarczyć parametrów umożliwiających:

- ocenę stanu i historii naprężenia gruntu warunkującą programowanie dalszych badań laboratoryjnych i prognozę odkształcalności gruntu,
- ocenę wytrzymałości gruntu określaną kątem tarcia wewnętrznego ϕ i spójnością c w warunkach bez odpływu i z pełnym odpływem,
- prognozę odkształcalności gruntów przy obciążeniu i odciążeniu podłoża,
- prognozę stateczności nasypu w trakcie budowy i eksploatacji,
- prognozę zmian właściwości gruntów i parametrów geotechnicznych, spowodowanych zmianami stanu naprężenia w gruncie w trakcie wznoszenia nasypu.

Zatem w laboratorium powinny być wykonane następujące badania:

- badania właściwości fizycznych gruntów,
- badania ścisłości,
- badania charakterystyk odkształceniowych gruntu,
- badania wytrzymałości gruntu na ścinanie.

Ponadto, w przypadkach szczególnych, kiedy występuje konieczność dokładnej analizy odkształcenia gruntu w sąsiedztwie budowli towarzyszących, ww. badania należy rozszerzyć o:

- pomiar w laboratorium współczynnika parcia bocznego w spoczynku K_0 , warunkującego zdefiniowanie początkowego stanu naprężenia w obliczeniach numerycznych odkształceń,
- badania modułu odkształcenia E w zakresie małych odkształceń.

Ze względu na duże trudności pomiaru parametrów K_0 i E (dla małych odkształceń) metodykę ich wyznaczania przedstawiono przy założeniu, że te badania możliwe są do wykonania jedynie w specjalistycznych laboratoriach geotechnicznych dysponujących odpowiednią aparaturą pomiarową.

Wszystkie badania laboratoryjne prowadzące do wyznaczenia parametrów mechanicznych gruntów powinny być wykonywane na próbkach o nienaruszonej strukturze NNS dobrej jakości. Zatem przed zasadniczym badaniem pobrane w terenie próbki powinny być poddane ocenie naruszenia struktury gruntu. Od jakości próbek stosowanych w badaniach zależy bowiem wiarygodność uzyskanych wyników.

4.2. Ocena stanu naruszenia gruntu pobranego do badań

4.2.1. Czynniki warunkujące stopień naruszenia struktury gruntu

Rozwój technik badania gruntu w laboratorium sprawił, że krytycznym elementem prawidłowego wyznaczenia parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych stało się naruszenie struktury gruntu podczas pobierania próbek oraz przygotowania ich do badań. Stopień naruszenia struktury zależy przede wszystkim od:

- rodzaju gruntu,
- mechanicznego naruszenia wynikającego z niedoskonałości techniki pobierania gruntu,
- zmiany istniejącego w próbce stanu naprężenia podczas wykonania otworu, wprowadzania i wyprowadzania próbnika,
- warunków transportu i przechowywania próbek,
- sprawności przygotowania próbek do badań.

Spośród pięciu ww. czynników szczegółowego wyjaśnienia wymagają drugi i trzeci, ponieważ pozostałe czynniki nie budzą wątpliwości co do warunków ich prawidłowego spełnienia. W gruntach organicznych możliwe jest pobieranie próbek gruntu NNS o należytej jakości jedynie z utworów amorficznych, tj. łąk organicznych, gyttii, torfów rozłożonych. W gruntach o strukturze włóknistej pobieranie próbek gruntu NNS do badań parametrów mechanicznych jest często kwestionowane ze względu na duże naruszenie struktury podczas pogrążania próbnika (Landva i in. 1986).

4.2.2. Wstępna ocena naruszenia struktury gruntu

Wstępną ocenę jakości próbek użytych do badań można uzyskać na podstawie znajomości kształtu i wymiarów cylindrów użytych do ich pobierania. Najczęściej wykorzystywanymi parametrami geometrycznymi próbników (rys. 4.1), których używa się do obliczania wielkości charakteryzujących je pod względem jakości, są:

○ współczynnik powierzchni AR (area ratio):

$$AR = \frac{D_s^2 - D^2}{D^2} \quad (4.1)$$

gdzie:

D_s – największa zewnętrzna średnica próbника,

D – wewnętrzna średnica próbника przy krawędzi tnącej,

○ współczynnik pasowania CR (clearance ratio):

$$CR = \frac{D_i - D}{D} \cdot 100\% \quad (4.2)$$

gdzie:

D_i – wewnętrzna średnica cylindra,

D – jw.,

○ wskaźnik jakości:

$$\frac{D_s}{t} \quad (4.2.3)$$

gdzie:

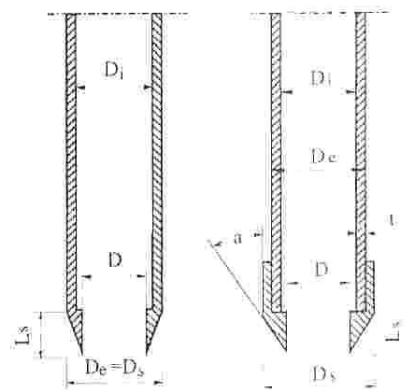
t – grubość ścianki próbника,

○ kąt krawędzi tnącej (w stopniach).

Stopień naruszenia struktury gruntu rośnie proporcjonalnie do wielkości współczynnika powierzchni, maleje natomiast przy wzroście wskaźnika jakości.

Wysoka jakość stali pozwala na zmniejszenie grubości ścianek próbника oraz znaczne zmniejszenie tarcia na zewnętrznej (niekiedy stosuje się pierścienie o nieco większej średnicy niż zewnętrzna średnica próbника) i wewnętrznej pobocznicy.

W czasie przechowywania próbki gruntu często zachodzi proces utleniania stali wskutek reakcji chemicznych z gruntem. Zjawisko to jest przyczyną znacznego zwiększania składowych naprężenia stycznego podczas wypychania gruntu z cylindra. Należy podkreślić, że powszechnie stosowana metoda dynamicznego pograżania próbника w grunt znacznie zwiększa stopień naruszenia



Rysunek 4.1. Charakterystyczne wymiary najczęściej stosowanych próbników (Lancellotta 1987)

jego struktury i w związku z tym nie powinna być stosowana. Nawet przy zastosowaniu wysokiej jakości cylindrów ($D_s/t = 40$) pobieranie próbek może spowodować duże naruszenie struktury gruntu prekonsolidowanego i niedopuszczalne (z punktu widzenia oceny parametrów) naruszenie struktury w gruntach normalnie skonsolidowanych. Z tego względu w praktyce przed przystąpieniem do wyznaczenia parametrów mechanicznych należy ocenić jakość próbek, na których wykonuje się badania laboratoryjne.

4.2.3. Ocena stopnia naruszenia struktury na podstawie badań laboratoryjnych

Grunt podczas obciążenia i odciążenia wykazuje dużą nieliniowość charakterystyk, a zmiany odpowiadające nawet bardzo małym odkształceniom (mniejszym niż powstałe podczas pobierania próbek) są nieodwracalne. W celu zilustrowania zakresu odkształceń można posłużyć się opisem zaproponowanym przez Jardine i in. (1990). Według ich propozycji, zachowanie gruntu można podzielić na cztery fazy odpowiadające poszczególnym zakresom odkształcenia.

Faza I – zakres liniowo sprężysty, odpowiadający odkształceniom postaciowym

$$\varepsilon_s = \frac{2}{3}(\varepsilon_1 + 2\varepsilon_3) \quad \varepsilon_s = 10^{-5} \div 10^{-4}\% \quad (4.4)$$

Faza II – zachowanie gruntu jest nieliniowe w procesie obciążania i odciążania, charakteryzuje się pewną histerezą, lecz jest odwracalne. Maksymalną granicą odkształceń postaciowych, po przekroczeniu której w gruncie następują procesy nieodwracalne, nazywa się odkształceniami krytycznymi $\varepsilon_{kryt.}$ ($\varepsilon_{kryt.} = 10^{-3} \div 10^{-2}$).

Faza III – grunt wchodzi w fazę odkształceń nieodwracalnych, których procentowy udział zwiększa się z procesem obciążenia. Zakres odkształceń w tej fazie zależy od rodzaju gruntu i wynosi ok. 0,5÷10%.

Faza IV – zniszczenie gruntu.

Odształcenie pionowe przy pobieraniu gruntu może sięgać kilku procent, a zatem całkowicie znajduje się w fazie III. Zjawisko naruszenia struktury gruntu podczas pobierania ze złoża jest nieuniknione, pozostaje jedynie określić stopień naruszenia struktury, aby uwzględnić go przy ocenie wyznaczanych parametrów.

Dotychczasowe doświadczenia dotyczące znajomości mechanizmu powodującego naruszenie struktury wskazują na zmniejszenie naprężeń efektywnych

jako źródła zmiany charakterystyk wytrzymałościowo-odkształceniowych przy pobieraniu gruntu z podłoża. Na rysunku 4.2 literą „a” oznaczono charakterystykę odkształceniową z badania trójosiowego dla naprężenia całkowitego działającego na próbkę „in situ”. W rzeczywistości takiej próbki nie można uzyskać, gdyż pobranie, wycięcie i przygotowanie próbki do badania w aparacie trójosiowym wiąże się z nieuniknionym zanikiem naprężenia całkowitego, co z kolei jest przyczyną zmiany naprężenia efektywnego, a w konsekwencji sztywności gruntu. Jeżeli w procesie pobierania próbki nie zaszłyby żadna inna przyczyna powodująca naruszenie struktury gruntu, niż ta związana z zanikiem naprężenia całkowitego, to wówczas schemat naprężenia oraz przewidywana charakterystyka odpowiadałaby linii oznaczonej literą

„b” na rysunku 4.2. Próbkę taką można by nazwać „idealnie pobraną”. Ostatni przypadek – „c” odpowiada warunkom rzeczywistym, czyli dotyczy próbki o tzw. nienaruszonej strukturze i różni się od przypadku „b” tym, że zmiana struktury spowodowana jest nie tylko zanikiem naprężenia całkowitego, ale także naruszeniem gruntu przy pobieraniu, transportem i zakładaniem próbki.

W ocenie jakości pobranych próbek mogą być wykorzystane następujące metody:

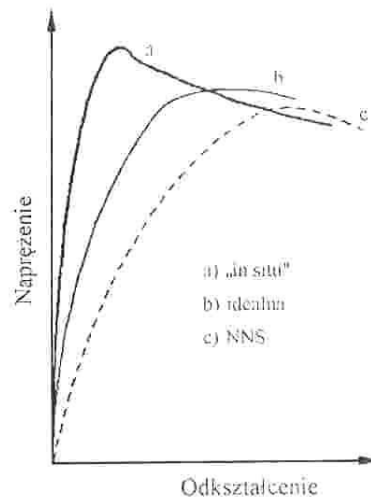
- pomiaru naprężenia rezydualnego,
- pomiaru odcieku po rekonsolidacji,
- pomiaru zmiany modułu E_{50} .

Metoda pomiaru naprężenia rezydualnego jest metodą dokładną i umożliwia obliczenie stopnia naruszenia struktury gruntu zgodnie z definicją:

$$R = \frac{\sigma_{ps}}{\sigma_s} \quad (4.5)$$

Wartość naprężenia rezydualnego odpowiadającego idealnie pobranej próbce σ_{ps} można obliczyć według formuły:

$$\sigma_{ps} = \{K_o + A_p \cdot (1 - K_o)\} \cdot \sigma_{1c} \quad (4.6)$$



Rysunek 4.2. Relacja pomiędzy charakterystykami odkształceniowymi gruntu a możliwością pobierania próbek do badań

gdzie:

- K_o – współczynnik parcia bocznego w spoczynku,
 σ_{1e} – pionowa składowa naprężenia efektywnego normalnego przed obciążeniem gruntu (odpowiadającego naprężeniu „in situ”),
 A_p – współczynnik ciśnienia wody w porach odpowiadający odciążeniu gruntu obliczany dla odciążenia w aparacie trójosiowym ze wzoru:

$$A_p = \frac{\Delta u - \Delta \sigma_3}{\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3} \quad (4.7)$$

Gdy współczynnik parcia spoczynkowego jest różny od jedności, to wielkość współczynnika A_p należy wyznaczyć z badania trójosiowego z odciążeniem na specjalnie przygotowanych próbkach. Jeżeli jednak można założyć, że współczynnik K_o jest równy jedności, to wyznaczenie naprężenia rezydualnego σ_{ps} znacznie się upraszcza i odpowiada naprężeniu pionowemu po rekonsolidacji, a przed odciążeniem.

W celu wyznaczenia wartości σ_s należy:

- przygotować próbkę jak do standardowego badania w aparacie trójosiowym,
- nasączyć ją (metodą ciśnienia wyrównawczego – parametr Skemptona B powinien być bliski jedności),
- zrekonsolidować przy naprężeniu izotropowym σ_{1e} ,
- po zakończeniu rekonsolidacji odciążyć w warunkach bez odpływu (zredukować naprężenie całkowite do zera),
- pomierzyć wielkość podciśnienia rezydualnego $u_s = \sigma_s$.

Mając wartości σ_{ps} oraz σ_s można obliczyć stopień naruszenia struktury gruntu R . Dla próbki idealnie pobranej $R = 1$. W celu oceny stopnia naruszenia badanych próbek można posłużyć się następującą skalą:

próbka bardzo dobra	$1 \leq R < 1,2$
próbka dobra	$1,2 \leq R < 1,8$
próbka zła	$1,8 \leq R < 4$

Metoda pomiaru odcieku po rekonsolidacji jest znacznie prostsza od wcześniejszej, gdyż nie wymaga dodatkowych specjalnych badań. Objętość wody, która będzie wyciśnięta z próbki podczas procesu rekonsolidacji odniesiona do początkowej jej objętości stanowi kryterium oceny stopnia naruszenia struktury gruntu:

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0} \cdot 100\% \quad (4.8)$$

Wykorzystuje się tu następującą skalę:

próbka bardzo dobra	< 1%
próbka dobra	1÷2%
próbka dość dobra	2÷4%
próbka zła	4÷8%
próbka bardzo zła	> 8%

Metoda pomiaru zmiany modułu E_{50} opiera się na badaniach Okamury (1974) i Nakase (1985), którzy znaleźli następującą funkcyjną zależność:

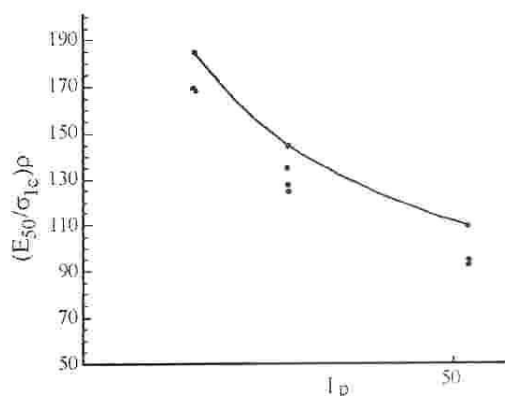
$$R = \frac{E_{50}}{\sigma_{1c}} \quad (4.9)$$

gdzie:

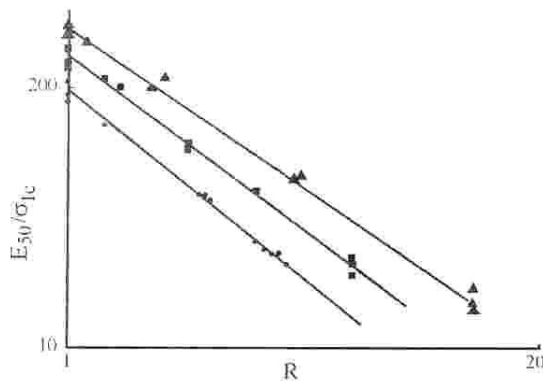
E_{50} – wartość siecznego modułu odkształcenia odpowiadająca połowie mobilizacji dewiatora maksymalnego,

σ_{1c} – pionowa składowa efektywnego naprężenia konsolidującego dla próbki idealnie pobranej.

W celu wykorzystania ww. metody należy wykonać badania rozpatrywanych gruntów w liczbie wystarczającej do sporządzenia wykresów analogicznych do przedstawionych na rysunkach 4.3 i 4.4 (badania Nakase 1985). Dysponując danymi gruntów o różnym wskaźniku plastyczności najpierw sporządza się hiperbolę (jak na rysunku 4.3), opisującą zmianę znormalizowanego modułu siecznego E_{50} próbek idealnych przy różnym wskaźniku plastyczności I_p . Następnie dla tych gruntów wykonuje się badania trójosiowe w warunkach bez odpływu, tak aby na podstawie wyników można było wykonać wykres taki jak na rysunku 4.4.



Rysunek 4.3. Zmiana znormalizowanego modułu siecznego E_{50} próbek idealnie pobranych w zależności od wskaźnika plastyczności (Nakase i in. 1985)



Rysunek 4.4. Zmiana znormalizowanego modułu siecznego E_{50} próbek NNS w zależności od stopnia naruszenia struktury gruntu (Nakase i in. 1985)

Zależność E_{50}/σ_{1c} od stopnia naruszenia struktury gruntu R może być wyrażona przez równanie:

$$\log\left(\frac{E_{50}}{\sigma_{1c}}\right) = a - b \cdot \log R \quad (4.10)$$

gdzie a i b są stałymi zależącymi od wskaźnika plastyczności. Ponieważ 10^6 jest równa wartości E_{50}/σ_{1c} dla idealnie pobranej próbki, to powyższe równanie można zapisać w postaci:

$$\log\left(\frac{E_{50}}{\sigma_{1c}}\right)_s = \log\left(\frac{E_{50}}{\sigma_{1c}}\right)_p - \log R^{-b} \quad (4.11)$$

gdzie $(E_{50}/\sigma_{1c})_p$ i $(E_{50}/\sigma_{1c})_s$ są współczynnikami z charakterystyk otrzymanych odpowiednio dla próbek idealnie pobranych i NNS.

Przekształcając powyższe równanie otrzymuje się wzór na stopień naruszenia struktury gruntu R :

$$R = \left[\frac{\left(\frac{E_{50}}{\sigma_{1c}}\right)_p}{\left(\frac{E_{50}}{\sigma_{1c}}\right)_s} \right]^{\frac{1}{b}} \quad (4.12)$$

Dane do takiego wykresu są wynikiem trudnych i pracochłonnych badań przeprowadzonych w gruntach o różnym wskaźniku plastyczności. Jednakże po sporządzeniu takiego wykresu na podstawie jednego badania trójosiowego

można ocenić wartość stopnia naruszenia struktury gruntu R dla każdej z badanych próbek.

Spośród istniejących metod oceny stopnia naruszenia struktury gruntu na podstawie badań laboratoryjnych najmniej skomplikowaną metodą, którą można zastosować do gruntów organicznych, jest metoda pomiaru odcieku po rekonsolidacji, lecz biorąc pod uwagę zakres prac związanych z badaniami laboratoryjnymi parametrów mechanicznych, w dużych przedsięwzięciach wykonywanych na łożach organicznych i gytiach najodpowiedniejszą metodą jest metoda pomiaru zmiany modułu E_{50} .

W badaniach laboratoryjnych gruntów wykorzystywane były przez Katedrę Geoinżynierii SGGW dwie metody, tj. pomiaru naprężenia rezydualnego i pomiaru odcieku. Wyniki uzyskane z obu metod wskazują na ich przydatność w ocenie jakości próbek pobieranych do badań (Lipiński 1994).

4.3. Oznaczenie właściwości fizycznych

W celu dokonania identyfikacji gruntów organicznych wykonywane są badania laboratoryjne służące oznaczeniu ich właściwości fizycznych. Określenie właściwości fizycznych umożliwia również lepsze zrozumienie ich zachowania się pod obciążeniem i pozwala na wykorzystanie istniejących empirycznych zależności pomiędzy właściwościami fizycznymi a parametrami mechanicznymi opracowanymi dla różnych rodzajów gruntów organicznych. Do podstawowych właściwości fizycznych charakteryzujących grunty organiczne należą: gęstości (objętościowa, objętościowa szkieletu gruntowego, właściwa), wilgotność, granice konsystencji, zawartość części organicznych, zawartość węgla wapnia, stopień rozkładu i skład botaniczny torfów.

4.3.1. Gęstość gruntu

Gęstość objętościową gruntu ρ wyznacza się ze stosunku masy nie naruszonej próbki gruntu do jej objętości przy wilgotności naturalnej:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4.13)$$

gdzie:

m – masa gruntu,

V – objętość gruntu.

Gęstość objętościową gruntu w stanie suchym ρ_d i wilgotność naturalną w_n , można określić przez suszenie i ważenie próbki korzystając ze wzorów:

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} \quad (4.14)$$

$$w_n = \frac{m_w}{m_s} \cdot 100\% \quad (4.15)$$

gdzie:

m_s – masa cząstek stałych,

V – pierwotna objętość próbki,

m_w – masa wody ($m_w = m - m_s$).

Suszenie odbywa się zwykle w suszarce w temperaturze 105°C. Do gruntów silnie organicznych zaleca się często przeprowadzanie suszenia w temperaturze niższej niż 85°C, aby zapobiec stratom materii organicznej.

Gęstość właściwą ρ_s określa się zwykle w piknometrze. W gruntach organicznych woda zamieniana jest na naftę, a podgrzewanie zastępuje się podciśnieniem:

$$\rho_s = \frac{m_s \cdot \rho_f}{m_s - m_1 + m_2} \quad (4.16)$$

gdzie:

m_s – masa szkieletu,

m_1 – masa butelki z płynem i gruntem,

m_2 – masa butelki wypełnionej płynem o określonej temperaturze,

ρ_f – gęstość właściwa płynu o określonej temperaturze.

Z zależności między wilgotnością naturalną, gęstością objętościową gruntu w stanie suchym i gęstością właściwą, a także z innych właściwości, takich jak stopień nasycenia S_r , można obliczyć wskaźnik porowatości e i porowatość n :

$$S_r = \frac{V_w}{V_p} \quad (4.17)$$

$$e = \frac{V_p}{V_s} = \frac{\rho_s (w_n + 1)}{\rho} - 1 \quad (4.18)$$

$$n = \frac{V_p}{V} = 1 - \frac{\rho}{\rho_s (w_n + 1)} \quad (4.19)$$

gdzie:

V_w – objętość wody,

V_p – objętość porów,
 V_s – objętość części stałych,
 V – całkowita objętość ($V = V_s + V_p$).

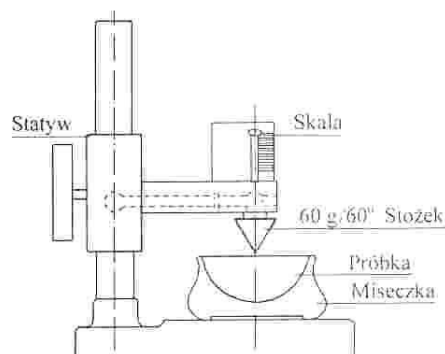
4.3.2. Granice konsystencji

Granice Atterberga stosowane są do opisu konsystencji naruszonej próbki gruntu przy różnej wilgotności. Granicę płynności w_L wyznacza się w aparacie Casagrande'go lub za pomocą laboratoryjnej sondy stożkowej (rys. 4.5). Do tego celu najczęściej w gruntach organicznych zgodnie z praktyką szwedzką stosuje się stożek o kącie wierzchołkowym 60° i masie 60 g. Granicę płynności przyjmuje się równą wilgotności, gdy głębokość penetracji stożka wynosi 10 mm. Praktycznie stosuje się metodę jednopunktowej interpretacji pod warunkiem, że głębokość penetracji wynosi 7–15 mm, na podstawie której można obliczyć granicę płynności ze wzoru:

$$w_L = M \cdot w_n + N \quad (4.20)$$

gdzie:

M i N określa się z tabeli 4.1.



Rysunek 4.5. Laboratoryjna sonda stożkowa (Karlsson 1981)

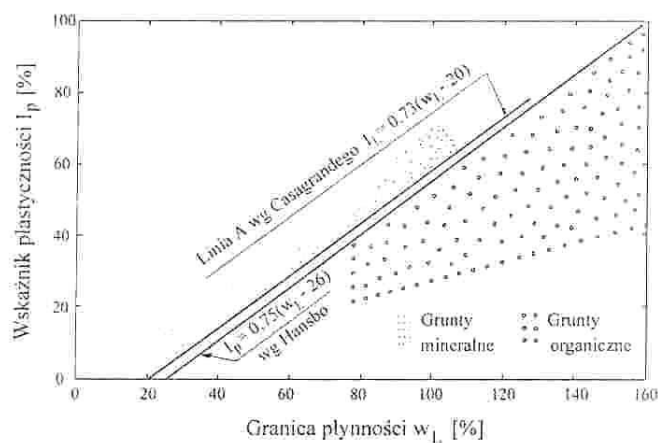
Granica płynności określona zgodnie ze szwedzką praktyką odpowiada wytrzymałości na ścinanie próbki naruszonej równej 1,6 kPa. W innych krajach stosuje się stożki o innej geometrii i masie, z wykorzystaniem wykresów zbliżonych do wykresów stosowanych w metodzie Casagrande'go. Kryterium granicy płynności odpowiadającej wytrzymałości na ścinanie próbki naruszonej, równej 1,6 kPa, jest podobne.

Granicę plastyczności w_p definiuje się jako najniższą wilgotność, przy której próbka gruntu może być wałeczkowana do średnicy 3 mm bez pęknięć. Określenie granicy plastyczności często jest trudne w gruntach organicznych szczególnie w przypadku struktury włóknistej.

Tabela 4.1. Zależność pomiędzy zagłębieniem stożka (o kącie wierzchołkowym 60° i masie 60 g) a wartościami M i N (d_r – głębokość penetracji stożka)

d_r [mm]		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
7.	M	1,21	1,20	1,19	1,18	1,17	1,16	1,15	1,14	1,14	1,13
	N	-3,5	-3,4	-3,2	-3,0	-2,9	-2,7	-2,6	-2,5	-2,3	-2,2
8.	M	1,12	1,11	1,11	1,10	1,10	1,09	1,08	1,07	1,07	1,06
	N	-2,1	-1,9	-1,8	-1,7	-1,6	-1,4	-1,3	-1,2	-1,1	-1,0
9.	M	1,05	1,05	1,04	1,04	1,03	1,03	1,02	1,01	1,01	1,0
	N	-0,9	-0,8	-0,7	-0,6	-0,5	-0,4	-0,3	-0,3	-0,2	-0,1
10.	M	1,00	1,00	0,99	0,99	0,98	0,98	0,97	0,97	0,96	0,96
	N	± 0	+0,1	+0,2	+0,2	+0,3	+0,4	+0,5	+0,5	+0,6	+0,7
11.	M	0,96	0,95	0,95	0,94	0,94	0,94	0,93	0,93	0,93	0,92
	N	+0,7	+0,8	+0,9	+0,9	+1,0	+1,1	+1,1	+1,2	+1,3	+1,3
12.	M	0,92	0,92	0,91	0,91	0,91	0,90	0,90	0,90	0,89	0,89
	N	+1,4	+1,4	+1,5	+1,5	+1,6	+1,7	+1,7	+1,8	+1,8	+1,9
13.	M	0,89	0,88	0,88	0,88	0,88	0,87	0,87	0,87	0,87	0,86
	N	+1,9	+2,0	+2,0	+2,1	+2,1	+2,2	+2,2	+2,2	+2,3	+2,3
14.	M	0,86	0,86	0,86	0,85	0,85	0,85	0,85	0,84	0,84	0,84
	N	+2,4	+2,4	+2,5	+2,5	+2,5	+2,6	+2,6	+2,7	+2,7	+2,7

Karta plastyczności Casagrande’go stosowana jest do podziału gruntów na kategorie na podstawie ich granice konsystencji (rys. 4.6). Linia A oznacza granicę między czysto mineralnymi gruntami a gruntami z zawartością części organicznych. Położenie linii A może się nieco zmieniać w zależności od regionu. Na rysunku 4.6 przedstawiono również zmodyfikowane położenie linii A uzyskane w gruntach szwedzkich (Hansbo 1957).



Rysunek 4.6. Karta plastyczności Casagrande’go z podziałem na grunty mineralne i organiczne ze zmodyfikowaną linią A przez Hansbo (1957)

Granice konsystencji można stosować do większości drobnoziarnistych i organicznych gruntów z wyjątkiem włóknistego torfu o niskim stopniu humifikacji.

4.3.3. Zawartość części organicznych

Zawartość części organicznych określa się przez spalanie suchej lub mokrej substancji organicznej. Najczęściej stosowana jest metoda, w której próbka jest najpierw suszona i ważona (m_1), a następnie substancja organiczna jest wyżarzana w wysokiej temperaturze ($550 \pm 25^\circ\text{C}$). Po wystygnięciu próbka jest ważona ponownie (m_2) a następnie określana jest wartość strat przy wyżarzeniu. Zawartość części organicznych I_{om} oblicza się z wzoru:

$$I_{om} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100\% \quad (4.21)$$

W gruntach wysokoorganicznych, takich jak torf, używa się zwykle popielności zamiast zawartości części organicznych jako miary zawartości części mineralnych w gruncie:

$$p = \frac{m_2}{m_1} \cdot 100\% = 100 - I_{om} \quad (4.22)$$

W gruntach organicznych zawierających ponad 5% węglanów zawartość części mineralnych bezwapiennych oblicza się z wzoru:

$$P_m = P - \% \text{CaCO}_3 = 100 - I_{om} - \% \text{CaCO}_3 \quad (4.23)$$

gdzie:

$\% \text{CaCO}_3$ – procentowa zawartość węglanu wapnia.

Istnieją sprzeczne opinie dotyczące temperatury oraz odpowiedniego czasu wyżarzania. W wyższych temperaturach ulega spalaniu nie tylko substancja organiczna, ale również zachodzą zmiany w masie składników mineralnych. Z drugiej strony, wysokie temperatury są wymagane do spalenia wszystkich rodzajów substancji organicznej. Błędy w ocenie strat przy wyżarzeniu wzrastają wraz ze wzrostem zawartości części mineralnych oraz w przypadku gruntów zawierających węglany i siarczki. Do tych gruntów zaleca się spalanie w temperaturze 450°C przez 5 godzin (Mac Farlane 1981).

W gruntach o dużej zawartości części mineralnych oraz w gruntach wapiennych można określić zawartości części organicznych metodą kolorymetryczną. Suchą, sproszkowaną próbkę miesza się z roztworem dwuchromian

potasu ($K_2Cr_2O_7$). Następnie dodaje się skoncentrowany kwas siarkowy, za pomocą którego usuwana jest substancja organiczna. Utlenianie organicznego węgla powoduje zmianę koloru utleniającej cieczy z pomarańczowego na zielony. Prosty, ale wiarygodny pomiar zawartości węgla organicznego uzyskuje się z oceny intensywności zielonego koloru na kolorymetrze, zaopatrzonym w filtr o długości fali 620 nm. Kolorymetr jest wyskalowany według określonych zawartości węgla organicznego. Główne źródło błędów w tej metodzie, stanowi stosunkowo mała wielkość próbki w każdym badaniu i fakt, że przelicznik, stosowany przy przejściu z zawartości węgla organicznego na zawartość części organicznych, może ulegać zmianom. Ogólnie przyjmuje się, że substancja organiczna zawiera 58% węgla organicznego.

Inne sposoby mokrego spalania z miareczkowaniem lub suchego spalania z określeniem wydzielającego się dwutlenku węgla mogą być również stosowane, ale są one bardziej skomplikowane, droższe i wymagają specjalnie przeszkolonego personelu. Wszystkie wykazują te same niedociągnięcia jak metoda kolorymetryczna a w praktyce nie dają większej dokładności. Metoda kolorymetryczna może być więc zalecana w celu określania zawartości części organicznych w gruntach o niskiej lub średniej zawartości części organicznych oraz w wysokoorganicznych gruntach węglanowych. Metodę tę szczegółowo opisał Larsson (1987).

4.3.4. Zawartość węglanu wapnia

Zawartość węglanu wapnia oznacza się zwykle za pomocą mokrego spalania kwasem solnym i oblicza się jako stosunek masy tego węglanu w próbce do masy szkieletu gruntowego. Można stosować wszystkie metody spalania z pomiarem wydzielającego się dwutlenku węgla. Zawartość węglanów można także określić, porównując straty przy wyżarzaniu podczas ogrzewania w temperaturze 800°C próbek, w których węglany zostały usunięte za pomocą kwasu solnego. Alternatywną metodę stanowi porównywanie strat przy wyżarzaniu podczas ogrzewania do 550°C i 800°C. W większości tych badań zakłada się, że nie występują inne węglany oprócz węglanów wapnia. W przypadku dużej zawartości dolomitu lub syderytu powstają znaczne błędy. Wstępne oznaczenie zawartości węglanu wapnia przeprowadza się obserwując reakcję gruntu na działanie 20-procentowym kwasem solnym. Silne i długotrwałe burzenie oznacza zawartość węglanu wapnia powyżej 5%.

Do prostych metod służących ilościowej oceny zawartości węglanu wapnia za pomocą mokrego spalania można zaliczyć oznaczanie w aparacie Scheiblera (Myślińska 1992) lub aparacie Passona (Thalme i Almen 1975). Oznaczenie zawartości węglanu wapnia metodą Scheiblera polega na pomiarze ilości dwu-

tlenku węgla wydzielającego się podczas reakcji CaCO_3 zawartego w wysuszonym gruncie z kwasem solnym. Zawartość węglanu wapnia w suchej masie grunty oblicza się ze wzoru:

$$\text{CaCO}_3 = \frac{0,16 \cdot V_t \cdot P_x}{a(273 + t)} \quad (4.24)$$

gdzie:

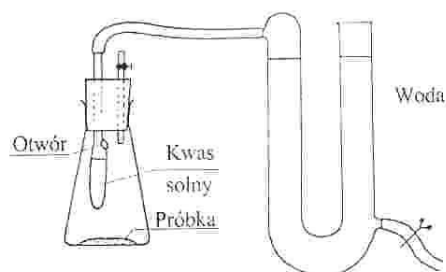
V_t – objętość CO_2 ,

P_x – ciśnienie barometryczne,

a – masa gruntu wysuszonego,

t – temperatura w pomieszczeniu w czasie badania.

W badaniu w aparacie Passona próbka polewana jest kwasem solnym. Po reakcji mierzy się ilość wydzielonego gazu w U-rurce, gdzie ciśnienie jest początkowo wyrównywane poprzez wypuszczanie wody w obu ramionach U-rurki (rys. 4.7). Z 1 mola CaCO_3 otrzymujemy 1 mol CO_2 , zawartość węglanów można obliczyć na podstawie objętości wydzielonego gazu.



Rysunek 4.7. Aparat Passona (Thalme i Almen 1975)

4.3.5. Stopień rozkładu i skład botaniczny torfu

Stopień rozkładu masy torfowej określa się na podstawie oceny wyglądu próbki w stanie naturalnym, jej struktury, obecności w niej humusu oraz ilości i barwy wody wyciskanej z próbki. Określa się go jako procentowy stosunek amorficznej, rozłożonej masy do całkowitej masy próbki torfu (Maksimow 1965).

Zestawienie cech identyfikujących stopień rozkładu torfu podano w tabeli 4.2 przy wykorzystaniu 10-stopniowej skali von Posta, 3-stopniowej skali Okruszki i procentowej skali stosowanej w mikroskopowym oznaczaniu stopnia rozkładu (Okruszko 1984). Stopień rozkładu oznacza się tylko w torfach niezamulonych, nisko popielnych zawierających nie więcej niż 25% części mineralnych.

Skład botaniczny torfu można określić makroskopowo na podstawie szczątków roślin tworzących masę torfową oraz ich struktury i barwy zgodnie z tabelą 4.3. Dokładniejsze oznaczenie przeprowadza się metodą mikroskopową.

Tabela 4.2. Zestawienie cech identyfikujących stopień rozkładu torfu (Okruszko 1984)

Stopień rozkładu torfu w skali			Struktura i wygląd masy torfowej	Obecność i wygląd humusu	Ilość i wygląd wody
makro- skopo- wej	von Posta	mikro- skopo- wej			
Torf słabo rozłożony R ₁	H1–H3	do 30	struktura gąbczasta lub włóknista, masa torfowa składa się z silnie powiązanych ze sobą szczątków roślinnych, których rozpoznanie jest dość łatwe ze względu na dobry stan ich zachowania, masa torfowa dość elastyczna, zwięzła	humusu w torfie nie widać lub jest go niewiele w postaci rozproszonej, ciemnej masy nasycającej i barwiącej szczątki roślinne	wody w torfie dużo, wyciska się łatwo, przeważnie strumyczkiem, jest prawie czysta lub nieco zabarwiona na brunatno, może zawierać ciemne punkciki humusu
Torf średnio rozłożony R ₂	H4–H6	30–60	struktura amorficzno-włóknista, w masie humusu torfów zielonych i mszystych występują liczne szczątki roślinne różnej wielkości, torf drzewny cechuje natomiast pewna kruchość, wynikająca z występowania resztek drewna w amorficznym humusie, próbka ugniatana w palcach przekształca się w bezpostaciową, plastyczną masę	humus wyraźnie widoczny, tworzy ciemne tło, na którym widoczne są szczątki roślinne, substancja humusowa wyciska się zazwyczaj między palcami zaciśniętej dłoni, nie więcej jednak niż 1/3 ilości pobranego torfu	w torfie z terenów bagiennych woda wyciska się lub wypływa nielicznymi kroplami, przeważnie gęsta i ciemna od humusu, w torfie z terenów odwodnionych (z warstw nad poziomem wody) woda jest zwykle słabo zabarwiona humusem, który uległ koagulacji na skutek częściowego podsuszenia
Torf silnie rozłożony R ₃	H7–H10	> 60	struktura kawałkowo-amorficzna, główną masę torfu tworzy humus, w przypadku struktury kawałkowo-amorficznej występują większe fragmenty szczątków roślinnych (głównie drewno, kłącza trzciny, większe korzonki itp.), masa torfowa jest krucha, rozpada się pod naciskiem; w przypadku zaś struktury amorficznej masa torfowa jest silnie plastyczna z występującymi sporadycznie większymi szczątkami roślin	humus w formie jednolitej masy wyciska się między palcami dłoni w ilości pół do całej pobranej próbki	wody nie można z torfu wycisnąć, zamiast niej wyciska się masa humusowa

Tabela 4.3. Zestawienie cech rozpoznawczych rodzajów torfów wg ich składu botanicznego

Rodzaj torfu i jego oznaczenie	Wygląd próbki	Charakterystyka szczątków roślin przewodnich
Mechowiskowy – Me (niski)	masa torfowa tworzy zbitą pilśń zbudowaną z drobnych korzonków turzyc oraz listków i lodyżek mchów, elastyczną, gdyż ma zwykle niewielki stopień rozkładu, struktura gąbczasta, a przy większej domieszce mchów łuskowato włóknista, w torfach mszystych o poziomym układzie, barwa szara lub brunatna, nie zmienia się po wyschnięciu	drobne korzonki turzyc, szarobiałe, przy dokładnym rozpatrywaniu, ewentualnie pod lupą, widoczne drobne ulistnione resztki mchów, często domieszka nasion bobrka (spłaszczonej czerwono-brązowych), w torfach mszystych ulistnione lodyżki mchów zbite są w jednolitą masę, z której łatwo wydzielić pojedyncze egzemplarze
Turzycowiskowy – Tu (niski)	masa torfowa w formie szarej mozaiki tworzonej przez jasne korzonki na czarnym lub brunatnym tle humusu, dość jednolita, włóknista, główny rodzaj włókna torfowego to korzonki tworzące zbitą masę drobnowłóknistą, masa ta staje się coraz mniej elastyczna (sprężysta) w miarę wzrostu stopnia rozkładu wahałego się w szerokich granicach, częsta domieszka resztek trzciny w postaci włókna większych rozmiarów, zależnie od stopnia rozkładu struktura bywa włóknista lub amorficzno-włóknista, barwa szara lub szarobrunatna, ciemniejsza na powietrzu	korzonki turzyc drobne, lekko skędzierzawione, o barwie szarobiałej, ponadto często kłącza trzciny, resztki bobrka w postaci soczewkowatych ziurenek oraz niekiedy szara kora i drewno łoży lub cząstki innych roślin drzewiastych
Szuwarowy Sz (niski)	torf zbudowany jest z trzech wyróżniających się komponentów: 1) szerokich i długich szczątków trzciny, 2) drobnych licznych korzonków (przeważnie trzciny) tworzących luźną siatkę, 3) brunatnej lub czarnej masy amorficznego humusu, sporadycznie spotyka się ponadto czarne, błyszczące fragmenty kłączy skrzypu; struktura masy grubowłóknista lub amorficzno-włóknista, torf przy nacisku łupie się poziomo (tendencja do struktury płytkowej), barwa od brunatno-brązowej do smolistoczarnej; barwa brunatna ciemnieje na powietrzu, często zapach siarkowodoru, duża rozpiętość stopnia rozkładu	kłącza trzciny szerokości do 20 mm, spłaszczone, żółtawe lub brunatnobłyszczące, różnej długości, korzonki trzciny splecione o zabarwieniu żółtawozielonkawym, kłącza skrzypu czarne, błyszczące, korzonki turzyc szare
Olesowy Ol (niski)	masa torfowa niejednolita, składa się z mieszaniny kawałków wielkości od kilku do kilkunastu mm, szczątki roślinne o różnym stopniu rozkładu od amorficznego humusu do dobrze zachowanych resztek kory lub drewna; struktura krucha, amorficzno-kawałkowa (torf łożowy), barwa ciemnobrązowa, prawie czarna (torf brzozy) albo o czerwonym zabarwieniu	rozpoznawalne resztki kory i drewna, kora dobrze zachowana, twarda, łupie się na płytki drobne, gąbczaste, zbutwiałe, rozciera się w palcach na jednolitą masę; ołcha: kora szara czerniawa, chropowata, drewno po roztarciu ma odcień czerwonoawaminowy; brzoza: kora biaława, z charaktery-

	(torf olchowy), czasem szarobrunatna (torf lozowy), stopień rozkładu całej masy torfowej przeważnie duży	stycznym rysunkiem, dobrze zachowana, drewno szare, włókniste; łoża: kora szara, drewno szarobrunatne, miękkie, rozdrobnione
Mszarny Msz. (przejęciowy lub wysoki)	masa torfowa barwy jasnej, gąbczasta z tendencją do rozpadania się (torf sfagnowy, turzycowy przejęciowy) lub silnie włóknista (wełniankowy) lub wełniasto-gąbczasta (wełniankowo-sfagnowy, mszysty przejęciowy); barwa jasnożółta, jasnobrunatna, jasnoszara. Tylko torf wełniankowy ma barwę ciemnobrunatną	szezętki mchów sfagnowych, włókna wełnianki. W torfach przejęciowych domieszki włóknistych resztek zielonych oraz szarych komórek turzyc
Bór bagienny	masa torfowa, barwy ciemnej lub brunatnej. Struktura plastyczna lub rozdrobniona, tylko torf drzewno-sfagnowy przejęciowy ma strukturę nieco włóknistą; torf zazwyczaj dobrze rozłożony	szezętki drewna i kory (brzozy, sosny), domieszki korzonków i krzewinek wrzosowatych i włókien wełnianki; w torfach przejęciowych widoczne korzonki turzyc, mchów sfagnowych

4.3.6. Określenie właściwości fizycznych na podstawie zależności empirycznych

W celu wstępnego oszacowania właściwości fizycznych gruntów organicznych możliwe jest wykorzystanie opracowanych nomogramów i zależności empirycznych.

Gęstość objętościowa gruntów organicznych w zasadniczym stopniu zależy od zawartości i składu części organicznych i mineralnych. Biorąc pod uwagę fakt, że gęstość właściwa masy organicznej wynosi około $1,45 \text{ t/m}^3$, masy mineralnej bezwapiennej około $2,65 \text{ t/m}^3$, węgla wapnia około $2,7 \text{ t/m}^3$ i wody około $1,0 \text{ t/m}^3$, gęstość objętościowa gruntu organicznego będzie wyższa w miarę wzrostu zawartości cięższych składników, a więc masy mineralnej i węglanów, a niższa w przypadku wzrostu zawartości lżejszych składników, czyli masy organicznej i wody. W przypadku torfów gęstość objętościowa rośnie wraz ze wzrostem stopnia rozkładu.

Wilgotność naturalna gruntów organicznych jest wielokrotnie większa w stosunku do gruntów mineralnych. Wilgotność gruntów organicznych o zawartości części organicznych 3–20% (namuły) zawiera się w granicach 50–150%, a dla gruntów o zawartości części organicznych ponad 75% przekracza 350%, dochodząc czasami do 1500%. Torfy i muły zamulone charakteryzują się wilgotnością zawierającą się między podanymi powyżej skrajnymi wartościami, w przypadku silnie zamulonych 150–250% a dla słabo zamulowanych 250–350%. Największe rozpiętości wilgotności notowane są dla gytii od 20 do 1000%.

Gęstość właściwą gruntów organicznych można określić na podstawie zależności empirycznych między gęstością właściwą a popielnością (Zawadzki 1970, Zawadzki i Okruszko 1980, Mioduszewski 1983) lub zawartością części organicznych (Hobbs 1986, Landva 1983). Marcinek i Spychalski (1987) proponują określenie gęstości właściwej ρ_s w pełnym zakresie zawartości części organicznych z zależności:

$$\rho_s = \frac{1}{0.376 + 0.00293 \cdot I_{om}} \quad (4.25)$$

gdzie:

I_{om} – procentowa zawartość części organicznych.

Zestawienie zależności empirycznych służących określeniu gęstości właściwej, opracowanych z podziałem na rodzaj gruntu i zakres popielności, zamieszczono w tabeli 4.4 (Gołębiewska i in. 1990).

Tabela 4.4. Zależności empiryczne służące określeniu gęstości właściwej ρ_s gruntów organicznych (Gołębiewska i in. 1990)

Zakres popielności P [%]	Rodzaj gruntu	Wzór obliczeniowy
0–25	torfy włókniste	$\rho_s = 1,49 + 0,0076 \cdot P$
	torfy średnio rozłożone	$\rho_s = 1,42 + 0,0092 \cdot P$
	torfy amorficzne	$\rho_s = 1,40 + 0,0080 \cdot P$
	gytie	$\rho_s = 1,35 + 0,0060 \cdot P$
25–50	torfy zamulone	$\rho_s = 1,50 + 0,012 (P - 25)$
	gytie	$\rho_s = 1,50 + 0,010 (P - 25)$
50–80	gytie i namuły	$\rho_s = 1,75 + 0,0167 (P - 50)$
80–90	gytie i namuły	$\rho_s = 2,25 + 0,020 (P - 80)$
90–97	gytie i namuły	$\rho_s = 2,45 + 0,021 (P - 90)$

Zestawienie wybranych właściwości fizycznych gruntów organicznych opracowane przez Zawadzkiego (1970) przedstawiono w tabeli 4.5.

Tabela 4.5. Zestawienie właściwości fizycznych gruntów organicznych (Zawadzki 1970)

Grupa	Rodzaj gruntu	Zawartość części organicznych (%)	Gęstość właściwa ($t \cdot m^{-3}$)	Gęstość objętościowa szkieletu gruntowego ($t \cdot m^{-3}$)	Porowatość (%)	Wskaźnik porowatości
I	mineralny właściwy	< 3	> 2,60	> 1,20	< 55	< 1,2
II	mineralny próchniczny	3–10	2,44–2,60	0,75–1,20	55–70	1,2–2,2

tab. 4.5 cd.

1	2	3	4	5	6	7
III	mineralno- -organiczny	10–20	2,30–2,44	0,55–0,75	70–77	2,2–3,2
IV	organiczny silnie zamulony	20–50	2,00–2,30	0,36–0,55	77–83	3,2–4,5
V	organiczny slabo zamulony	50–75	1,75–2,00	0,24–0,36	83–86	4,5–6,4
VI	organiczny niezamulony	> 75	< 1,75	< 0,24	> 86	> 6,4

4.4. Określenie historii naprężenia

4.4.1. Naprężenie prekonsolidacji

Efekt prekonsolidacji gruntów słabych, wyrażający się zmianami charakterystyk ścisłości gruntu, jest wynikiem następujących głównych czynników: obciążenia, wtórnej ścisłości, tiksotropowego wzmocnienia, struktury i cementacji (Silvestri 1981). Powoduje to przenoszenie przez grunt obciążenia równego $\Delta\sigma = \sigma'_p - \sigma'_{vo}$ bez znaczących odkształceń.

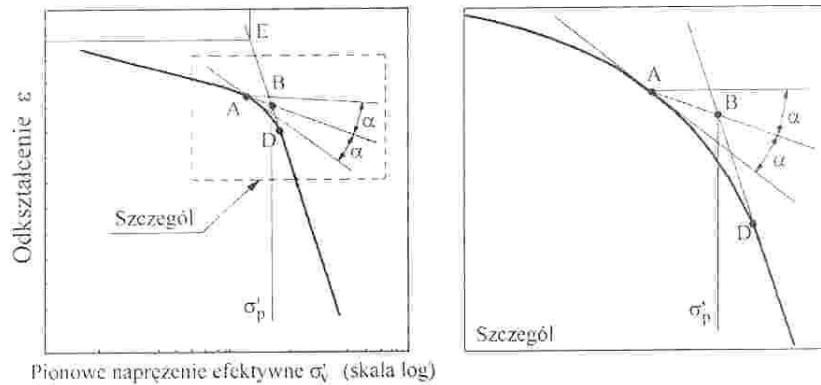
Wartość naprężenia prekonsolidacji σ'_p określa się metodami wykorzystującymi edometryczne krzywe ścisłości. Metody te zostały podane przez Casagrande'go (1936), Sällfors (1975) i Leroueil i in. (1981, 1983).

W praktyce szerokie zastosowanie znalazła metoda Casagrande'go określania naprężenia prekonsolidacji σ'_p . Metodę tę przedstawiono na rysunku 4.8. Opiera się ona na analizie krzywej ścisłości w skali półlogarytmicznej, uzyskanej z badań edometrycznych IL (ze stopniowo wzrastającym obciążeniem).

W przypadku badań edometrycznych CRS (przy stałym przyroście odkształcenia) uzyskaną krzywą ścisłości analizuje się za pomocą metody Sällfors (1975). Dwie prostoliniowe części krzywej naprężenie-odkształcenie przedłuża się aż do ich przecięcia. Pomiędzy liniami a krzywą ścisłości tworzy się trójkąt równoramienny (rys. 4.9). Punkt przecięcia podstawy trójkąta z górną linią odpowiada naprężeniu prekonsolidacji σ'_p .

Dobór wartości naprężenia prekonsolidacji σ'_p na potrzeby odtworzenia historii naprężenia podłoża organicznego wymaga określenia wartości naprężenia prekonsolidacji σ'_p w warunkach „in situ”, która różni się znacznie od wartości naprężenia prekonsolidacji σ'_{lab} uzyskanej z badań edometrycznych. Problem ten badany był przez Leroueil i in. (1983) na podstawie wyników badań laboratoryjnych i polowych. W pracy Leroueil zamieszczono sposób

określania naprężenia prekonsolidacji „in situ” na podstawie laboratoryjnych badań konsolidacji. Zgodnie z tą procedurą, należy uwzględnić pewną liczbę czynników przy sprowadzaniu wartości laboratoryjnego naprężenia prekonsolidacji do warunków terenowych. Są to: jakość próbki, ścieżka naprężenia mogąca różnić się w warunkach laboratoryjnych i polowych oraz prędkość przyrostu naprężenia.



Rysunek 4.8. Metoda Casagrande’go określenia naprężenia prekonsolidacji (Casagrande 1936)

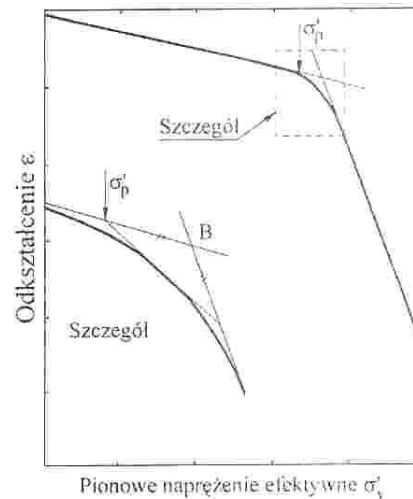
Wartość σ'_p „in situ”, stosowaną w rozwiązaniach inżynierskich, określa się zgodnie z metodą Leroueil’a i in. (1983) wg równania:

$$\sigma'_p = \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right) \sigma'_{lab} \quad (4.26)$$

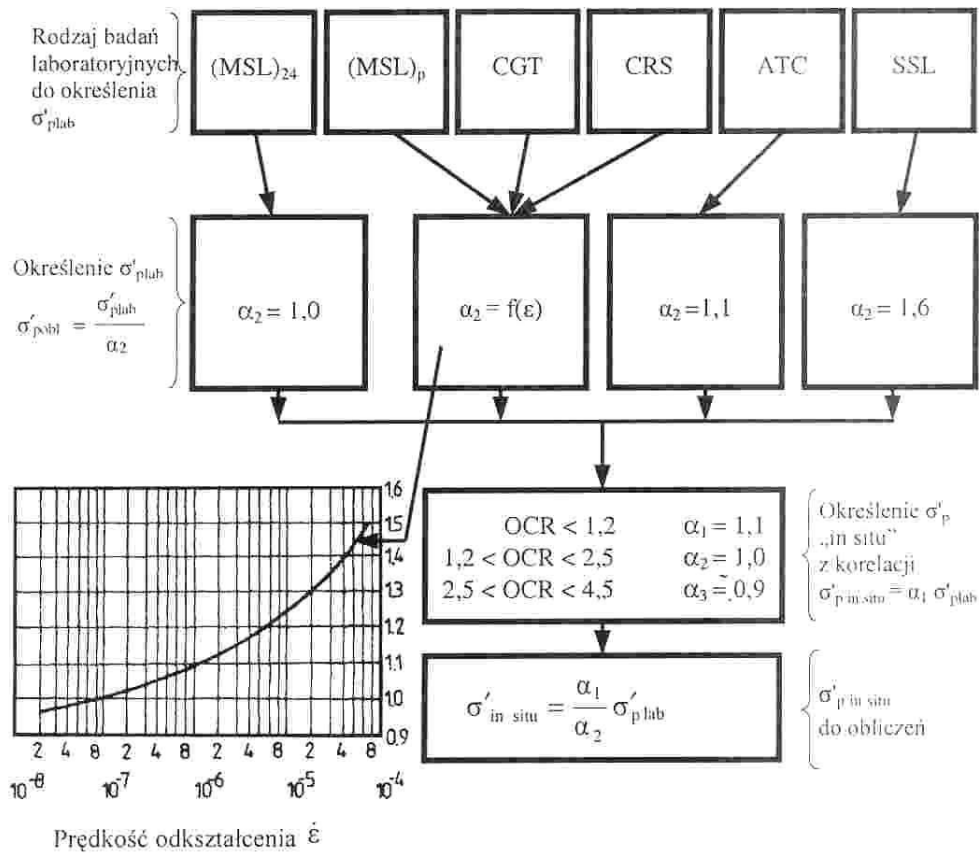
gdzie:

- σ'_{lab} – naprężenie prekonsolidacji uzyskane z badań edometrycznych,
- α_1 – współczynnik sprowadzający naprężenie prekonsolidacji σ'_p „in situ” do warunków laboratoryjnych,
- α_2 – współczynnik empiryczny sprowadzający σ'_{plab} uzyskane ze specjalnych badań konsolidacyjnych do σ'_{lab} uzyskanego z konwencjonalnych badań edometrycznych.

Empiryczną metodę określenia naprężenia prekonsolidacji „in situ” zaproponowaną przez Leroueil’a i in. przedstawiono



Rysunek 4.9. Metoda Sällfors’a określenia naprężenia prekonsolidacji (Sällfors 1975)



Rysunek 4.10. Procedura określania naprężenia prekonsolidacji „in situ” (Leroueil i in. 1983)

na rysunku 4.10. W gruntach organicznych, podobnie jak w wielu słabych gruntach mineralnych, określanie σ'_p na podstawie wyników badań edometrycznych zgodnie z metodą Casagrande'go czy Sällforsa nie jest jednoznaczne ze względu na trudności w identyfikacji krzywizny krzywej ściśliwości. Dlatego też określanie naprężenia prekonsolidacji często uzupełniane jest empirycznymi zależnościami Skempton (1954) i Hansbo (1957). Wzorem Skempton określa się zależność między naprężeniem prekonsolidacji σ'_p a wytrzymałością na ścinanie bez odpływu τ_{fu} i wskaźnikiem plastyczności I_p :

$$\sigma'_p = \tau_{fu} (0,11 + 0,37I_p) \quad (4.27)$$

Hansbo uzależnia naprężenie prekonsolidacji σ'_p od wytrzymałości na ścinanie bez odpływu τ_{fu} i granicy płynności w_L uzyskanej z badań spadającym stożkiem:

$$\sigma'_p = \frac{\bar{\tau}_{fu}}{(0,45w_L)} \quad (4.28)$$

Stosowanie powyższych wzorów do włóknistego torfu o stopniu humifikacji mniejszym od 30% może prowadzić do błędnych wyników ze względu na trudności w ocenie podstawowych właściwości tego gruntu w laboratorium, jak również ze względu na istnienie zjawiska wzmocnienia strukturalnego, powodującego wzrost wartości naprężenia prekonsolidacji σ'_p .

4.4.2. Współczynnik parcia bocznego gruntu w spoczynku

Pierwotny stan anizotropii naprężenia w podłożu w warunkach „in situ” określany jest zwykle za pomocą współczynnika parcia bocznego gruntu w spoczynku K_o . Parametr ten jest istotny przy projektowaniu badań laboratoryjnych, mających na celu uzyskanie charakterystyk odkształceniowych i wytrzymałościowych, jak również w obliczeniach numerycznych wykorzystujących bardziej złożone modele gruntu.

Określenie współczynnika K_o wymaga pomiaru składowych pionowej i poziomej naprężenia w badaniach laboratoryjnych bez odkształceń bocznych próbki. Wyniki badań edometrycznych lub trójosiowych można analizować zgodnie z propozycją Sällforsa (1975) za pomocą wykresu ścieżki naprężenia (rys. 4.11). Stroma część krzywej odzwierciedla wzrost składowej poziomej naprężenia, spowodowany wzrostem składowej pionowej naprężenia w obszarze prekonsolidacji. Nachylenie drugiej części krzywej przedstawia przyrost składowej poziomej naprężenia, spowodowany przyrostem składowej pionowej naprężenia w obszarze gruntu normalnie skonsolidowanego ($\Delta\sigma'_h/\Delta\sigma'_v = K_o^{nc}$).

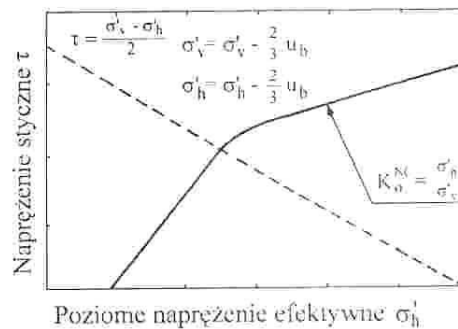
Współczynnik K_o w warunkach naprężeń „in situ” gruntu prekonsolidowanego można określić wg empirycznej zależności od OCR podanej przez Schmidta (1966):

$$K_o^{oc} = K_o^{nc} OCR^{\alpha} \quad (4.29)$$

gdzie:

α – empiryczny współczynnik; przyjmuje się często, że jest on równy $\sin\phi'$.

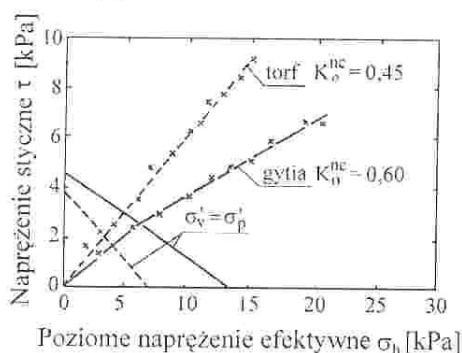
Statystyczna analiza danych laboratoryjnych przeprowadzona przez



Rysunek 4.11. Określanie współczynnika K_o na podstawie wyników badań laboratoryjnych (Sällfors 1975)

Mayne'a i Kulhavy'ego (1982), oparta w dużej mierze na wynikach badań uzyskanych przez Adamsa (1965), Edila i Dhowiana (1981), wykazała zmienność tego parametru w torfach w granicach $0,09 \div 0,18$, a w glinach $0,3 \div 0,5$.

Wyniki badań trójosiowych i edometrycznych (edometr Sällforsa) przeprowadzonych na próbkach prekonsolidowanych gruntów organicznych (torf i gytia) pochodzących z Antonin wykazały, że aparaturę laboratoryjną można stosować do pomiaru poziomej i pionowej składowej naprężenia w celu wyznaczenia współczynnika K_o w gruntach organicznych. Przykład wyników badań współczynnika K_o prekonsolidowanego amorficznego torfu i gytii wapiennej w edometrze Sällforsa przedstawiono na rysunku 4.12. Wyniki te wskazują na możliwość stosowania aparatury laboratoryjnej do badania anizotropii naprężenia w podłożu złożonym z gruntów organicznych. Jednakże zastosowanie tych metod do określania współczynnika K_o wymaga takiego przeprowadzenia badań laboratoryjnych, aby próbki były obciążone bez możliwości odkształcenia bocznego. Realizowane są więc warunki zerowego odkształcenia bocznego, tak jak ma to miejsce w podłożu. Należy jednak pamiętać, że pomiar odkształcenia bocznego, a raczej jego braku, stwarza poważne trudności techniczne.



Rysunek 4.12. Wyniki badań K_o przeprowadzonych w edometrze Sällforsa na próbkach torfu i gytii z Antonin (Szymański 1991)

4.5. Wyznaczenie parametrów odkształceniowych i konsolidacyjnych w badaniach edometrycznych

4.5.1. Badania edometryczne ze stopniowo wzrastającym obciążeniem II

Głównymi charakterystykami, niezbędnymi w obliczeniach osiadań i wzrostu naprężenia efektywnego, są: zależności naprężenie-odkształcenie oraz rozwój odkształceń w czasie. W szeroko stosowanej jednowymiarowej analizie konsolidacji podstawowe parametry, takie jak: moduł ścisłości M , będący odwrotnością współczynnika zmian objętościowych m_v , wskaźnik ścisłości pierwotnej C_r , współczynnik filtracji k , współczynnik wtórnej ścisłości C_α , mogą być wyznaczone z badań edometrycznych IL (stopniowy wzrost obciążenia) lub CL (ciągły wzrost obciążenia).

Konwencjonalna procedura wykonywania badania IL, polegająca na tym, że każdy przyrost obciążenia równy jest aktualnemu obciążeniu, a kolejne przyrosty obciążenia przykładane są co 24 godziny, została zaproponowana przez Terzaghi'ego w 1925 roku i jest stosowana również obecnie. Jednakże dla gruntów organicznych badanie to pochłania zbyt dużo czasu, a duży rozrzut punktów na krzywej naprężenie-odkształcenie powoduje znaczną swobodę w wykreślaniu krzywej. Spowodowało to tendencje zastępowania procedury IL procedurą CL.

Ze względu jednak na dostępność aparatury laboratoryjnej do przeprowadzania badań IL stosowane są one często jako podstawowe i jedyne w laboratoriach usługowych. W celu uzyskania większej liczby punktów na krzywej naprężenie-odkształcenie w badaniach IL można stosować mniejsze przyrosty obciążenia niż te, które zaproponował Terzaghi. Ponadto, celem skrócenia czasu trwania badania, można zmieniać obciążenie próbek po zakończeniu pierwotnej konsolidacji.

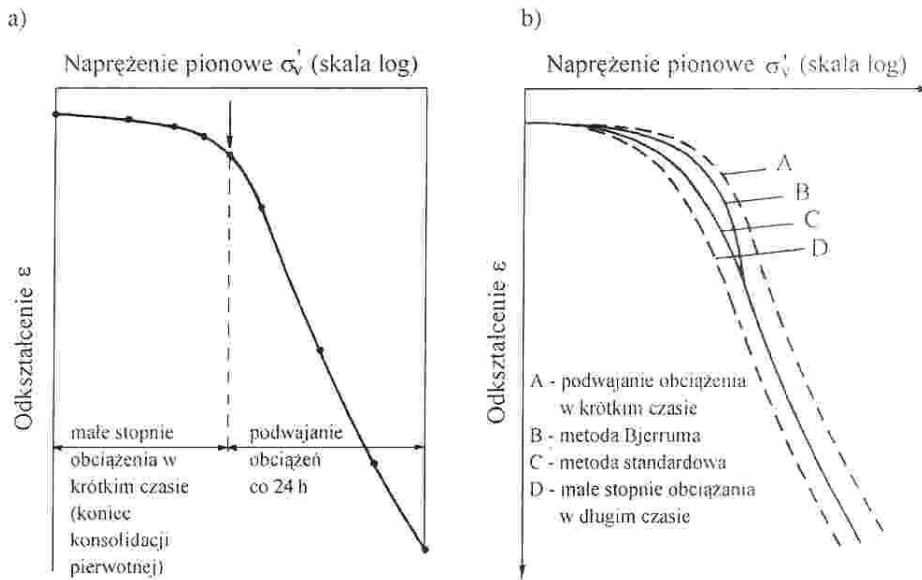
Inną procedurę wykonywania badań IL przedstawił Bjerrum (1972). Metoda ta opiera się na zredukowanych przyrostach obciążenia aż do momentu osiągnięcia naprężenia prekonsolidacji. Czas między kolejnymi przyrostami obciążeń jest na tyle długi, że zapewnia osiągnięcie 100% pierwotnej konsolidacji (rys. 4.13a). Po przekroczeniu naprężenia prekonsolidacji badania prowadzi się ze zwiększonymi dwukrotnie przyrostami obciążenia przez 24 godziny.

W przypadku kiedy maleje wartość przyrostu obciążenia i czas trwania każdego obciążenia, zmniejszają się także wartości osiadań próbki, co powoduje uzyskanie nieco wyższych wartości naprężenia prekonsolidacji i modułu ściśliwości (rys. 4.13b).

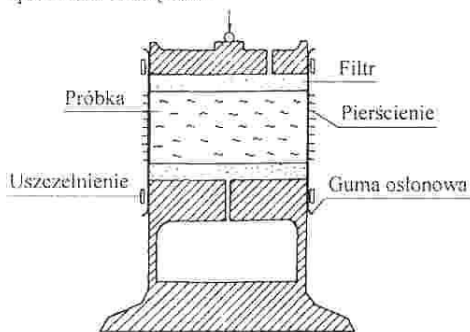
Należy pamiętać, że odkształcenie pionowe w gruntach organicznych (szczególnie w torfie) jest prawie proporcjonalne do logarytmu czasu, gdy przyrost obciążenia wynosi $1/3$ i $1/2$. W takim przypadku trudno jest zdefiniować koniec czasu pierwotnej konsolidacji (Kogure i in. 1986b). Dlatego też przyrost obciążenia powinien być większy od 100%; czas odpowiadający końcowi pierwotnej konsolidacji można wtedy określić metodą Casagrande'go.

Uwzględniając wymienione wyżej zasady, można stwierdzić, że badania edometryczne typu IL mogą być przeprowadzane zgodnie z metodą Terzaghi'ego w celu określenia parametrów odkształceniowych i konsolidacyjnych lub według metody Bjerruma celem określenia naprężenia prekonsolidacji. Należy pamiętać, że w badaniach edometrycznych, wykonywanych zwykle w pierścieniu metalowym, z umożliwiającym drenażem od góry i od dołu przez dwie płytki porowate, pojawia się tarcie między próbką a pierścieniem. Ważne jest zminimalizowanie tego tarcia przez stosowanie bardzo gładkiego pierścienia i smaru (pasty silikonowej) lub (w przypadku torfu włóknistego) przez

użycie kompresjometru (Larsson 1981). W kompresjometrze (rys. 4.14) pierścieni metalowy zastąpiono gumową membraną, a bocznym odkształceniom zapobiegają cienkie pierścienie, rozmieszczone tak, aby obciążenie pionowe nie mogło być przekazywane pomiędzy nimi.



Rysunek 4.13. Krzywe ściśliwości: a – krzywa ilustrująca sposób obciążania zaproponowany przez Bjerruma (1972); b – krzywe uzyskane z edometrycznych badań IL przeprowadzonych przy różnych sposobach obciążania



Rysunek 4.14. Kompresjometr (Larsson 1981)

4.5.2. Badania edometryczne z ciągłym wzrostem obciążenia CL

Standardowe badania IL, w których stosuje się wzrastające przyrosty obciążenia, wymagają długiego okresu obserwacji (2 tygodnie lub więcej). Potrzeba skrócenia czasu badań przyczyniła się do rozwoju badań edometrycznych typu

CL, wykonywanych jako: CRS – stała prędkość odkształcenia (Smith i Wahls 1969); CRL – stała prędkość obciążania (Aboshi i in. 1970); CG – stały gradient (Lowe i in. 1969) oraz CC – badanie przy stałej konsolidacji (Tokheim i Janbu 1980). Główna zaleta tych badań polega na uzyskaniu ciągłych zależności naprężenie-odkształcenie i ciągłej zmienności parametrów konsolidacyjnych w zależności od naprężenia efektywnego.

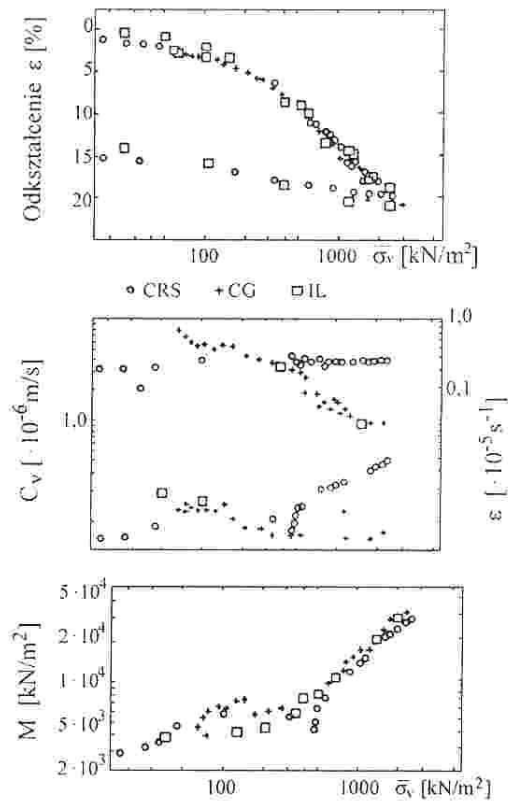
Interpretacja wyników badań edometrycznych typu CL opiera się na rozwiązaniu klasycznego równania konsolidacji. Wyniki badań dostarczają parametry ściśliwości i konsolidacji (np.: M , m_v , C_c , k) bez uwzględniania ściśliwości wtórnej. Procedura obliczeniowa parametrów jest ważna jedynie przy małych wartościach ciśnienia wody w porach (Sällfors 1975, Tokheim i Janbu 1980, Larsson 1981, Szymański i Lechowicz 1987b). Przy tego rodzaju badaniach laboratoryjnych (CL), prędkość przyrostu obciążenia powinna być na tyle mała, aby ciśnienie wody w porach w próbce podczas badania nie przekraczało 15% obciążenia.

Badania edometryczne typu CL, nawet gdy nie uzyskuje się z nich parametrów ściśliwości wtórnej dla celów analizy odkształceń gruntów organicznych, są powszechnie stosowane w laboratoriach usługowych ze względu na liczne zalety. Przedevším wszystkim nie zajmują dużo czasu (tzn. 6÷48 godz. – badanie CL; 3÷10 dni – badanie IL), umożliwiają lepsze zdefiniowanie naprężenia prekonsolidacji σ'_p oraz określenie wpływu struktury gruntu i przyrostu odkształceń na jednowymiarową ściśliwość gruntu.

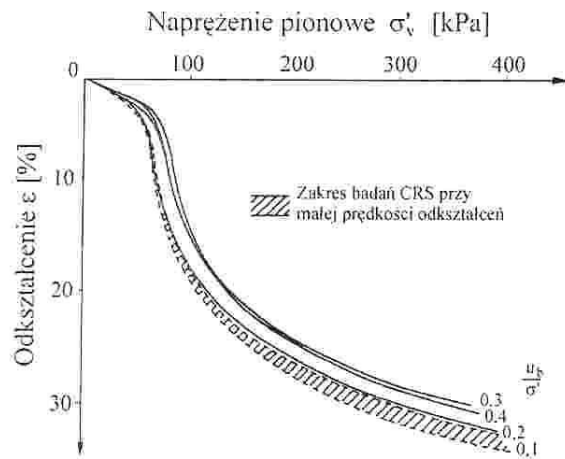
Analiza wyników badań edometrycznych gruntów słabych, przeprowadzonych przez Jamiolkowskiego i in. (1981), Larssona i Sällforsa (1985) oraz Szymańskiego i Lechowicza (1987), wykazuje mało znaczące różnice w krzywych ściśliwości i w zmienności parametrów konsolidacyjnych z badań typu IL i CL (rys. 4.15 i 4.16) w przypadku odpowiednio dobranej metodyki badań.

Należy zauważyć, że dobre korelacje między wynikami różnych rodzajów badań edometrycznych uzyskano przy przyroście odkształcenia $v = 0.012\%/min$ w badaniach CRS i przy gradiencie $\Delta u = 15$ kPa w badaniach CG, zapewniających nieprzekroczenie wartości ciśnienia wody w porach w próbce równego 15% obciążenia (rys. 4.17 i 4.18). Kiedy przyrost odkształceń lub stosunek u_d/σ'_v stawał się większy, zmniejszało się odkształcenie pionowe próbki, co powoduje uzyskanie zawyżonych wartości naprężenia prekonsolidacji i modułów ściśliwości.

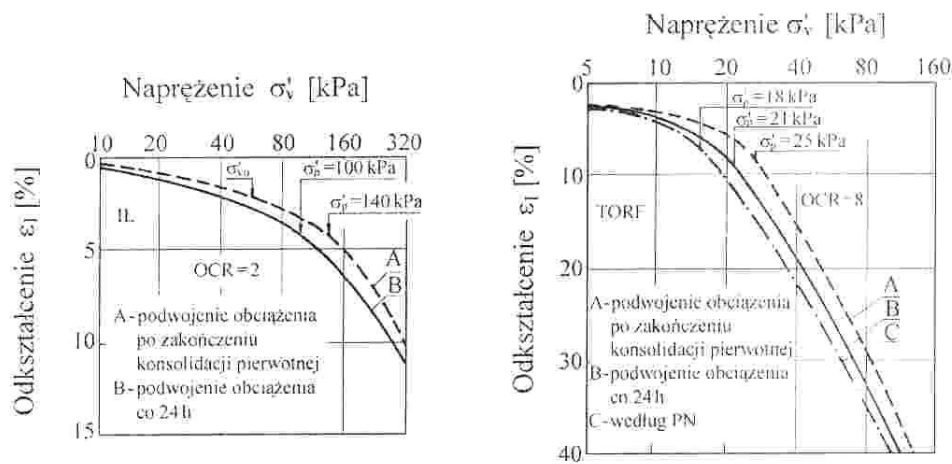
Analiza zastosowania różnych rodzajów badań edometrycznych typu CL w gruntach słabych, wskazuje na możliwość stosowania każdej z istniejących metod badań laboratoryjnych gruntów organicznych. Jednak ze względu na możliwości przystosowania aparatu trójosiowego do badań CRS ten rodzaj badań wydaje się być najbardziej użyteczny w laboratoriach usługowych.



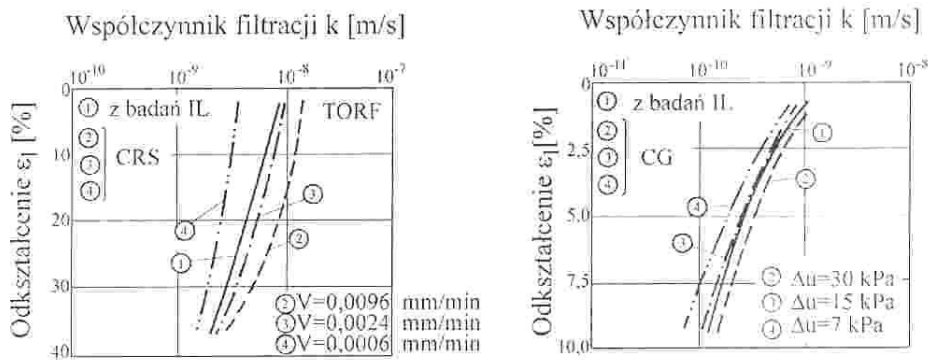
Rysunek 4.15. Wyniki uzyskane z różnych badań edometrycznych przeprowadzonych na próbkach gliny pylastej (Jamiołkowski i in. 1981)



Rysunek 4.16. Porównanie wyników badań edometrycznych CC przy różnych stosunkach u_s/σ' i CRS (Larsson i Sällfors 1985)



Rysunek 4.17. Wpływ sposobu obciążania na krzywą ścisłości iltu i torfu (Szymański i Lechowicz 1987)

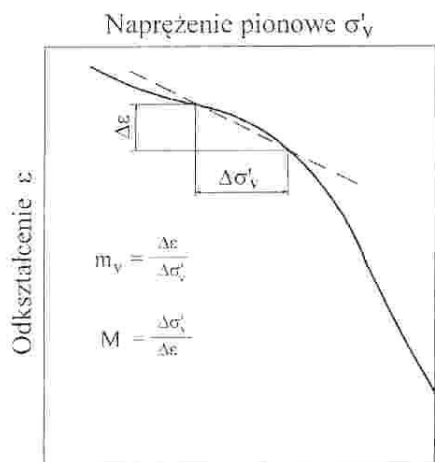


Rysunek 4.18. Wpływ metody badania na wartość współczynnika filtracji torfu i iltu (Szymański i Lechowicz 1987)

4.5.3. Wyznaczenie parametrów

Wyznaczenie parametrów z badań IL. Obliczenia odkształceń podłoża pod nasypem wymagają określenia parametrów gruntu z krzywej ścisłości uzyskanej z badań edometrycznych.

Wyniki badań edometrycznych IL przedstawiane są zwykle w postaci zależności między wskaźnikiem porowatości e lub odkształceniem ϵ i składową pionową naprężenia efektywnego σ'_v . Na tym wykresie składowa pionowa naprężenia efektywnego wykreślana jest w skali arytmetycznej w celu określenia współczynnika zmian objętościowych m_v i modułu edometrycznego M



Rysunek 4.19. Określanie współczynnika zmian objętościowych gruntu m_v i modułu ścisłości M

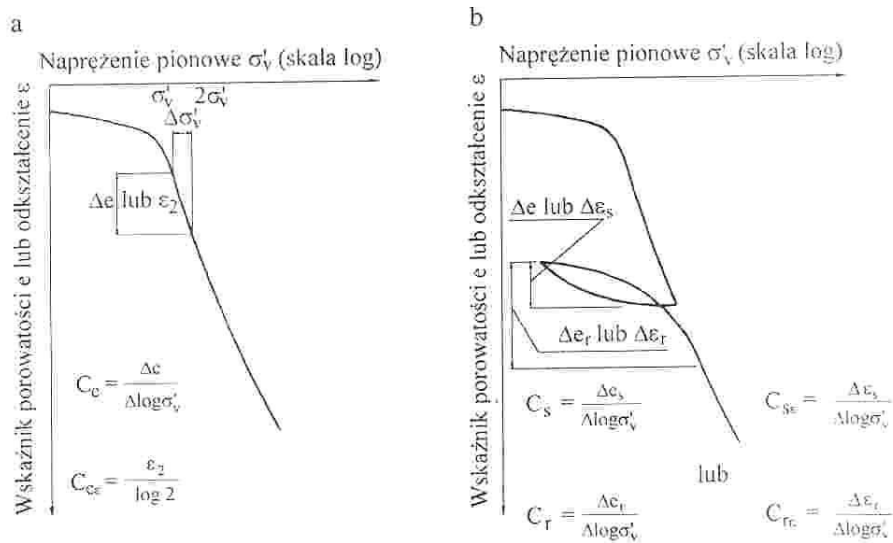
(rys. 4.19) lub w skali logarytmicznej (rys. 4.20) celem określenia wskaźnika ścisłości C_c i C_{ce} , gdzie: $C_{ce} = C_c / (1 + e_0)$.

W przypadku krzywej otrzymanej z badań edometrycznych typu IL, z odciążeniem i powtórным obciążeniem, parametry odnoszące się do części krzywej ścisłości w zakresie odprężenia (C_s lub C_{se}) i w zakresie powtórного obciążenia (C_r lub C_{re}) można obliczyć zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 4.20b.

W analizie odkształceń należy pamiętać, że różnorodność materiału, z którego powstają grunty organiczne (jako wynik rozkładu roślin i planktonu wodnego), powoduje duże różnice w zachowaniu

tych gruntów pod obciążeniem w stosunku do gruntów mineralnych. Opis zachowania się gruntów organicznych za pomocą równań konstytutywnych opartych na teorii sprężystości i plastyczności jest trudny. Wyniki badań przeprowadzonych przez różnych autorów (Ozden i Wilson 1970, Berry i Poskitt 1972, Edil i Dhowian 1979, Szymański i in. 1983) wskazują, że w gruntach organicznych (mieszanina włókien organicznych, cząstek koloidalnych, wody i pęcherzyków gazu), proces odkształcenia składa się ze sprężystych odkształceń gazu, sprężysto-plastycznych odkształceń gruntu i z lepko-plastycznego pełzania szkieletu gruntowego. Ponadto, obserwuje się więcej niż jedną fazę procesu ścisłości w badaniach konsolidacji gruntów organicznych, przebiegających bardzo często równolegle, co ma znaczący wpływ na otrzymywaną z badań edometrycznych charakterystykę napężenie-odkształcenie. Dlatego trudno jest podać wartości parametrów ścisłości i konsolidacji do określonych etapów odkształcenia.

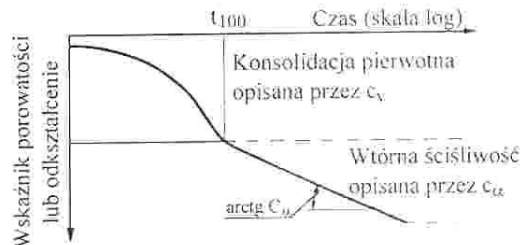
W praktyce, ze względu na łatwość w definiowaniu parametrów, stosuje się liniową jednowymiarową teorię konsolidacji zaproponowaną przez Terzaghi'ego; w szczególnych przypadkach stosuje się analizę opartą na modelu reologicznym (Gibson i Lo 1961b, Berry i Poskitt 1972) celem obliczenia przebiegu procesu odkształcenia. Znacząca ścisłość wtórna gruntów organicznych wymaga zastosowania nieliniowych teorii konsolidacji. Parametry reologiczne używane do opisu pełzania szkieletu gruntowego określa się na podstawie wyników badań edometrycznych typu IL.



Rysunek 4.20. Określanie wskaźników C_r , C_v , C_s z krzywej ściśliwości

Parametry konsolidacyjne c_v i C_α mogą być wyznaczone na podstawie długotrwałych edometrycznych badań typu IL, wykonywanych do każdego przyrostu obciążenia, aż do zakończenia znaczącej części wtórnej ściśliwości (rys. 4.21). Współczynnik konsolidacji c_v , będący funkcją współczynnika filtracji k i modułu ściśliwości M ($c_v = kM/\gamma_w$), określa się na podstawie dwóch powszechnie stosowanych metod: metody Casagrande’go i metody Taylora, prezentowanych w podręcznikach mechaniki gruntów.

Rysunek 4.21. Krzywa konsolidacji z badań edometrycznych IL



Współczynnik wtórnej ściśliwości C_α określa się z nachylenia krzywej konsolidacji po zakończeniu pierwotnej konsolidacji jako:
 $C_\alpha = de/d \log t$, kiedy krzywą konsolidacji przedstawia zależność e - $\log t$.
 $C_{\alpha w} = dc/d \log t$, kiedy krzywą konsolidacji przedstawia zależność e - $\log t$.
 Zależność między C_α i $C_{\alpha w}$ jest następująca: $C_\alpha = C_{\alpha w} (1 + e_0)$.

W badaniach edometrycznych gruntów organicznych bardzo ważnym problemem jest wyznaczenie końcowej części krzywej konsolidacji z powodu występowania tzw. trzeciorzędowej ściśliwości, obserwowanej w badaniach laboratoryjnych o długim czasie trwania (Edil i Dhowian 1979). Trzeciorzędowa ściśliwość obserwowana jest jako zmiana krzywizny części krzywej konsolidacji, odnoszącej się do zjawiska długotrwałego pełzania.

Uwzględnianie całej krzywej konsolidacji może spowodować poważne błędy w oszacowaniu prędkości osiadań wynikających z wtórnej ściśliwości, która jest zwykle niższa od ściśliwości trzeciorzędowej (Edil i Mochar 1984). Dlatego też część krzywej konsolidacji odpowiadająca trzeciorzędowej ściśliwości powinna być pominięta przy określaniu parametrów, nie jest ona obserwowana na krzywych konsolidacji uzyskiwanych w warunkach polowych. Uważa się, że zjawisko to spowodowane jest efektem skali (mała próbka używana w badaniach laboratoryjnych) oraz wykreślaniem krzywych konsolidacji w skali logarytmicznej. Należy również pamiętać, że przyrosty wtórnych odkształceń są niezależne od wielkości próbki, ich wartości bezwzględne zmieniają się zgodnie z wartościami przyłożonego naprężenia pionowego. Przebieg wtórnej ściśliwości gruntów organicznych powinien więc być analizowany na podstawie wyników długotrwałych badań konsolidacji, prowadzonych przy zgodności przyrostów obciążenia z przyrostami obciążenia w warunkach polowych.

Wyznaczanie parametrów z badań CL. Edometryczne krzywe ściśliwości uzyskiwane są z badań CL jako ciągła zależność między naprężeniem efektywnym i odkształceniem oraz przepuszczalnością. Średnie naprężenie efektywne w próbce obliczane jest zgodnie z założeniem parabolicznego rozkładu ciśnienia wody w porach wg równania:

$$\sigma'_v = \frac{P}{A} - 2 \frac{u_b}{3} \quad (4.30)$$

gdzie:

P – przyłożona siła pionowa,

A – pole przekroju poprzecznego próbki,

u_b – ciśnienie wody w porach przy niedrenowanej dolnej podstawie.

Po uwzględnieniu warunku, że ciśnienie wody w porach nie może przekroczyć wartości 15% obciążenia, co ogranicza błąd wynikający z równania (4.30), współczynnik filtracji można obliczyć z następującej zależności:

$$k_v = \frac{g\rho_w H}{2u_b} \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (4.31)$$

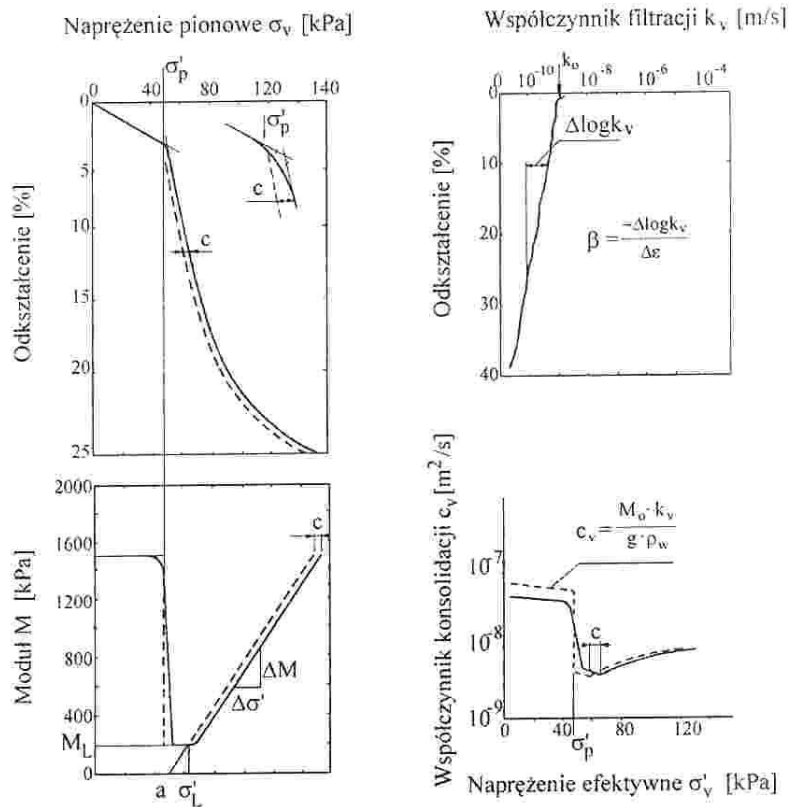
a współczynnik konsolidacji:

$$c_v = \frac{k_v M}{\rho_w g} \quad (4.32)$$

gdzie:

- ρ_w – gęstość wody,
- H – wysokość próbki,
- de/dt – przyrost odkształcenia pionowego w czasie,
- g – przyspieszenie ziemskie.

Ciągła krzywa ściśliwości uzyskana z edometrycznych badań typu CL umożliwia wyznaczenie naprężenia prekonsolidacji σ'_p za pomocą metody Sällforsa oraz zmienności modułów edometrycznych, zgodnie z podziałem na trzy części naprężeń efektywnych (rys. 4.22). Początkowy (pierwotny) stały moduł M

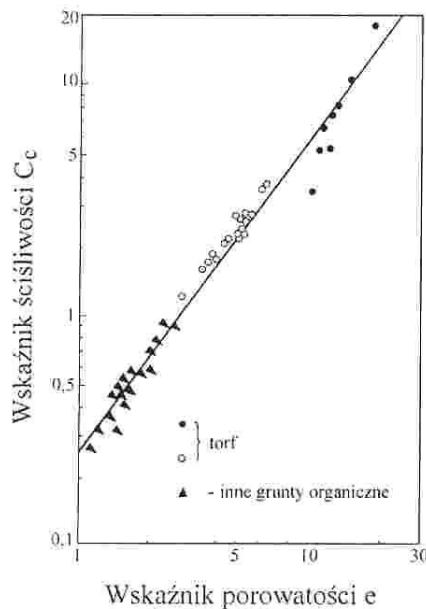


Rysunek 4.22. Interpretacja wyników badań CRS (Larsson i Sällfors)

występuje do naprężenia prekonsolidacji σ'_p . Następnie wartość modułu spada i osiąga drugą stałą wartość M_L . Część krzywej, gdzie moduł wzrasta liniowo z naprężeniem efektywnym, przesuwa się o wartość c [kPa] w lewo. Naprężenie w punkcie przecięcia stałego modułu σ'_L i modułu M' przyjmuje się do wykresu moduł-naprężenie.

Przepuszczalność określa się, korzystając z uproszczenia, jakim jest przyjęcie liniowego wykresu przepuszczalności w skali logarytmicznej. Pierwotna przepuszczalność k_v określana jest z punktu przecięcia linii prostej i linii poziomej $\varepsilon = 0$. Spadek przepuszczalności wynikający ze ściśliwości gruntu wyraża parametr: $\beta = -\Delta \log(k_v) / \Delta \varepsilon$.

Współczynnik konsolidacji oblicza się zgodnie z równaniem (4.32) i korzysta wg rysunku 4.22.



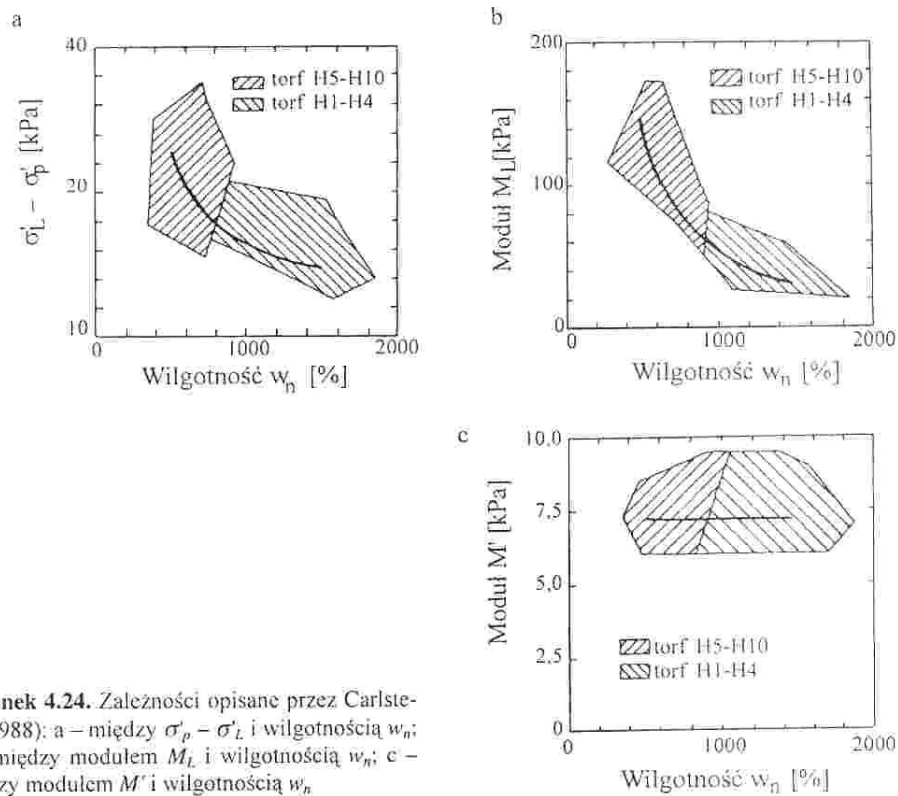
Rysunek 4.23. Zależność pomiędzy C_c i wskaźnikiem porowatości e (Kogure i in. 1986a)

Empiryczna ocena parametrów.

Wstępne oszacowanie parametrów ściśliwości można przeprowadzić za pomocą wzorów empirycznych, sformułowanych na podstawie badań laboratoryjnych. W większości przypadków moduł edometryczny określa się z zależności: $M_o = 250\tau_{fit}$ lub: $M = 50\sigma'_p$ (Larsson 1986); wskaźnik ściśliwości C_c ze wzoru: $C_c = 0,0115w_n$ (Azzouz i in. 1976) lub z zależności między C_c i wskaźnikiem porowatości e (rys. 4.23) przedstawionej przez Kogure i in. (1986a).

Ponadto, współczynnik zmian objętościowych m_v i moduł edometryczny M do poszczególnych zakresów obliczeń można określić dla torfu z wykresów empirycznych przedstawiających zależność m_v (rys. 4.23) lub $\sigma'_p - \sigma'_L$ (rys. 4.24a) i modułu M_L (rys. 4.24b) od wilgotności w_n i stopnia rozkładu H (Flaate 1968, Carlsten 1988).

Korzystanie z zależności podanych przez Carlstena (rys. 4.24) jest utrudnione ze względu na konieczność każdorazowego określania trzech wartości modułu M , tj. M_o , M_L i M' , przy dużej zmienności zarówno zakresu naprężeń $\sigma'_p - \sigma'_L$, jak też i wartości modułu M .



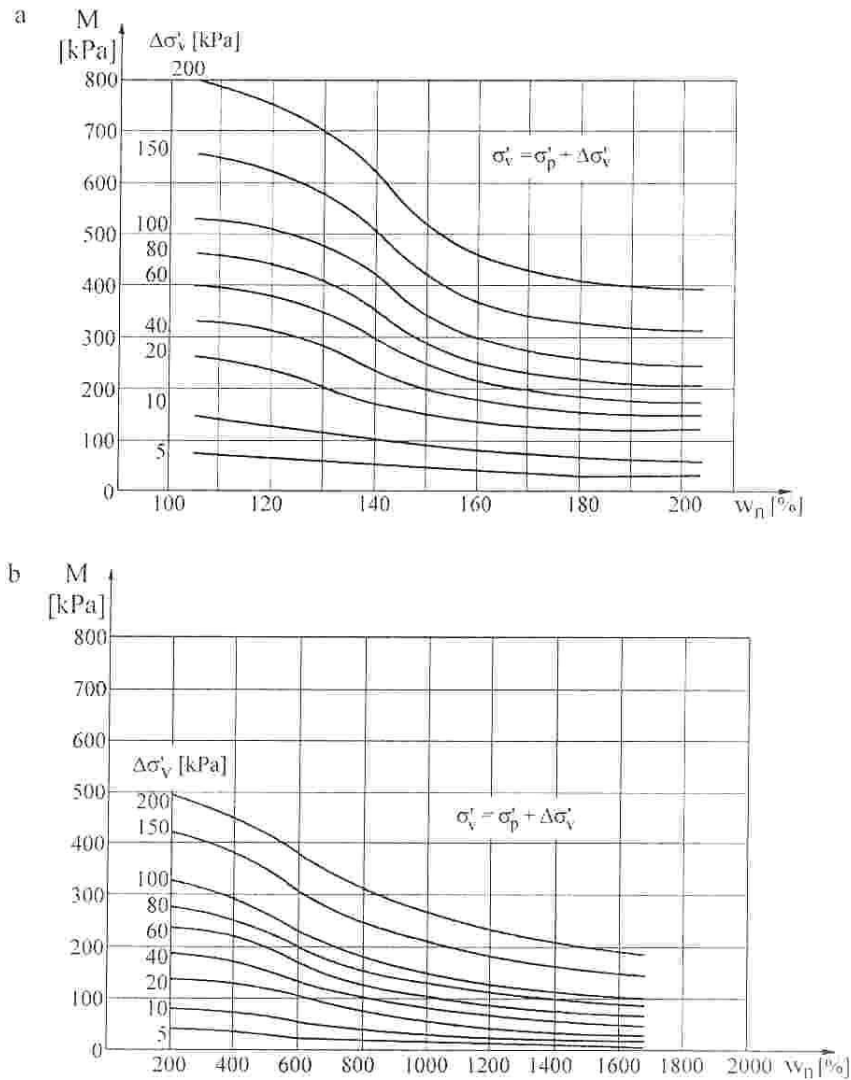
Rysunek 4.24. Zależności opisane przez Carlstena (1988): a – między $\sigma'_p - \sigma'_L$ i wilgotnością w_n ; b – między modułem M_L i wilgotnością w_n ; c – między modułem M' i wilgotnością w_n

Analiza terenowych i laboratoryjnych badań gruntów organicznych przeprowadzonych na gruntach pochodzących z obiektów doświadczalnych Katedry Geoinżynierii SGGW oraz analiza wyników badań prowadzonych w Szwedzkim Instytucie Geotechnicznym pozwoliła na podanie zależności edometrycznego modułu ścisłości M (w zakresie naprężenia: $\sigma'_v > \sigma'_p$) od wilgotności naturalnej w_n torfu (rys. 4.25a) oraz gytii (rys. 4.25b) w poszczególnych zakresach obciążenia $\Delta\sigma'_v$. Obserwacja zmienności modułu ścisłości M_o (w zakresie naprężenia: $\sigma'_{vo} > \sigma'_v \leq \sigma'_p$) wykazała, że w badanych gruntach organicznych: $M_o = 30\sigma'_p$ w przypadku torfu oraz: $M = 35\sigma'_p$ w przypadku gytii.

Celem określenia przebiegu odkształceń w czasie oraz efektywnej ścieżki naprężenia w podłożu pod nasypem konieczne jest wyznaczenie parametrów konsolidacyjnych lub charakterystyk konsolidacyjnych.

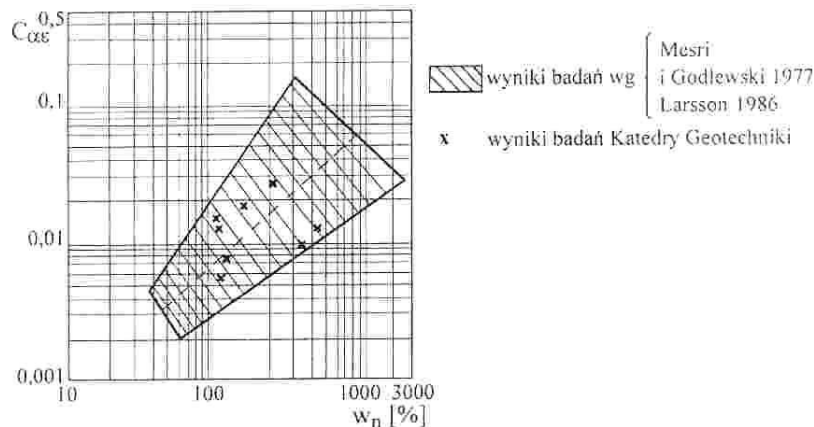
W kompleksowej analizie odkształceń należy pamiętać, że zmienność materiału, z którego powstał grunt organiczny powoduje, że jego zachowanie pod obciążeniem w istotny sposób różni się od zachowania gruntu mineralnego.

Wyniki badań ścisłości (Ozden i Wilson 1970, Berry i Poskitt 1972, Edil i Dhowian 1979, Szymański i in. 1983, Hobbs 1986) wykazują, że w gruntach organicznych wszystkie fazy odkształceń obserwowane są równocześnie przy zmiennej wartości ciśnienia wody w porach. Z tego powodu występuje duża trudność w określeniu zarówno teoretycznych, jak też i empirycznych zależności charakteryzujących poszczególne etapy odkształcenia.



Rysunek 4.25. Zależność modułu ścisłości M od wilgotności w_n (a – gytii; b – torfu) i przyrostu pionowej składowej naprężenia $\Delta\sigma'$ ponad naprężenie prekonsolidacji σ'_p (Szymański 1991)

Kompleksowa analiza wyników badań przeprowadzona przez Mesri'ego (1973) oraz Mesri'ego i Godlewskiego (1977) wykazała, że współczynnik ściśliwości wtórnej C_{α} , podobnie jak wskaźnik ściśliwości C_c , zależy w głównej mierze od wilgotności w_n (rys. 4.26). Zależność ta została również potwierdzona badaniami na próbkach iłów szwedzkich (Larsson 1981, 1986) oraz badaniami na gruntach organicznych prowadzonymi przez Szymańskiego (1991).



Rysunek 4.26. Zależność współczynnika wtórnej ściśliwości C_{α} od wilgotności naturalnej w_n (Szymański 1991)

Wyniki te wskazują, że średni stosunek C_{α}/C_c dla gruntów organicznych zawiera się w przedziale: $0,035 \div 0,1$, gdzie małe wartości odnoszą się do torfu amorficznego i innych gruntów organicznych, a większe do torfu włóknistego.

4.6. Wyznaczenie wytrzymałości na ścinanie

4.6.1. Określenie wytrzymałości na ścinanie na podstawie zależności empirycznych

W literaturze podane są różne zależności empiryczne, przedstawiające wytrzymałość na ścinanie uzależnioną od wybranej cechy fizycznej gruntu organicznego. Należy podkreślić, że zależności empiryczne opracowane nawet dla wąskiego zakresu zmienności gruntów organicznych charakteryzują się stosunkowo małym współczynnikiem korelacji, ponieważ wytrzymałość na ścinanie jednocześnie zależy od wielu czynników. Biorąc powyższe pod uwagę, przy korzystaniu z zależności empirycznych należy liczyć się z bardzo przybliżonym charakterem wyznaczonych wartości.

Na podstawie badań wytrzymałości na ścinanie przeprowadzonych polowa sondą krzyżakową na wielu torfowiskach w byłym ZSRR Amaryan i in. (1972) opracowali dla torfów zależność empiryczną wytrzymałości na ścinanie τ_{fv} od wilgotności naturalnej i stopnia rozkładu, która ma postać:

$$\tau_{fv} = \frac{140}{w_n} \cdot (100 - 1,1 \cdot R) \quad (4.33)$$

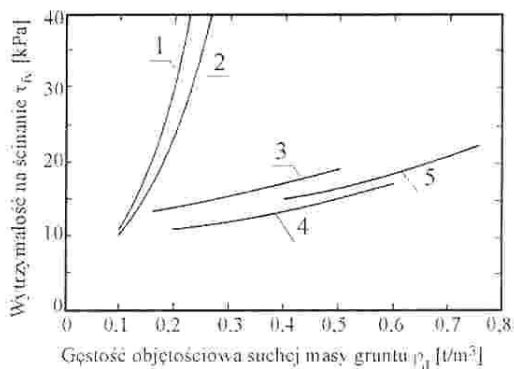
gdzie:

τ_{fv} – wytrzymałość na ścinanie określona sondą krzyżakową [kPa],

w_n – wilgotność naturalna [%],

R – stopień rozkładu [%].

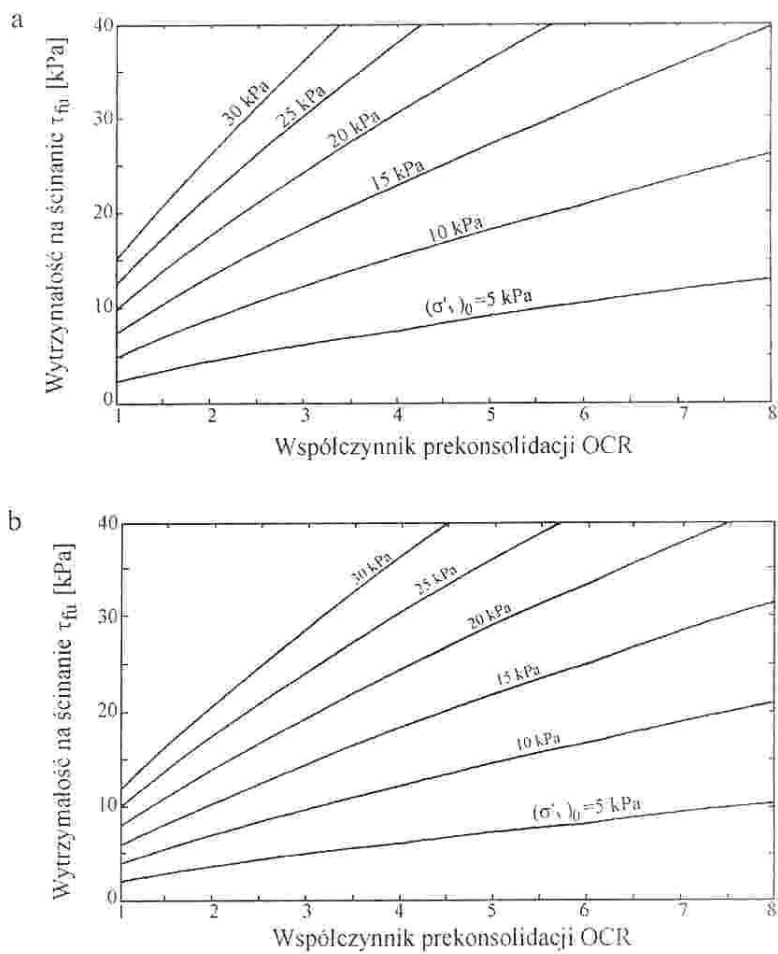
Badania wytrzymałości na ścinanie przeprowadzone laboratoryjną sondą krzyżakową zostały wykorzystane przez Gołębiewską (1976) do opracowania zależności wytrzymałości na ścinanie τ_{fv} od gęstości objętościowej suchej masy gruntu ρ_d . Otrzymane zależności empiryczne dla torfów słabo rozłożonych, średnio rozłożonych i zamulonych oraz gytii organicznych i mineralnych przedstawiono na rysunku 4.27. Wytrzymałość na ścinanie τ_{fv} uzyskana z wymienionych zależności przed wykorzystaniem w analizie stateczności powinna być pomnożona przez odpowiedni współczynnik poprawkowy μ . Zalecenia dotyczące sposobu określenia współczynnika poprawkowego μ podano w rozdziale 3.4.



Rysunek 4.27. Zależność wytrzymałości na ścinanie τ_{fv} od gęstości objętościowej szkieletu gruntowego ρ_d (Gołębiewska 1976)

Wyniki terenowych i laboratoryjnych badań gruntów organicznych pochodzących z obiektów doświadczalnych Katedry Geoinżynierii SGGW oraz wyniki badań udostępnione przez Szwedzki Instytut Geotechniczny pozwoliły na opracowanie nomogramów do określania wytrzymałości na ścinanie bez

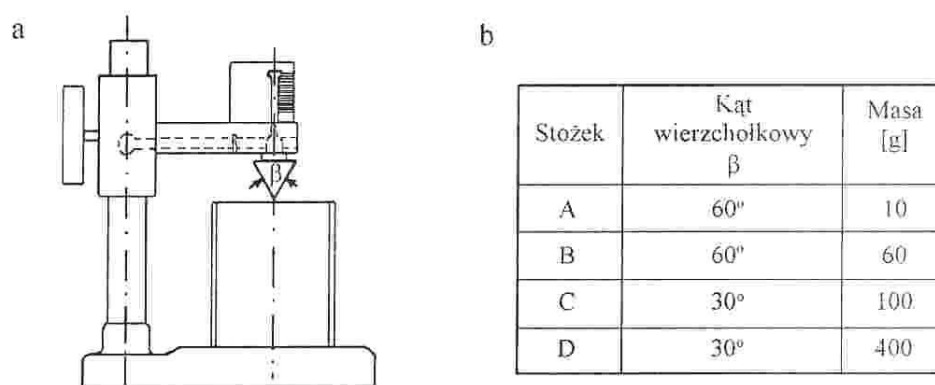
odpływu τ_{fu} dla torfów i gytii z uwzględnieniem efektu prekonsolidacji. W opracowanych nomogramach wytrzymałość na ścinanie zależy od stanu naprężenia efektywnego „in situ” oraz od współczynnika prekonsolidacji OCR (rys. 4.28). W tym miejscu należy przypomnieć, że przyczyną występowania w gruntach organicznych naprężenia prekonsolidacji σ'_p jest nie tylko prekonsolidacja mechaniczna, ale przede wszystkim prekonsolidacja strukturalna – pozorna (Wolski 1988). Fakt ten powoduje, że większość gruntów organicznych wykazuje charakter zachowania gruntów prekonsolidowanych.



Rysunek 4.28. Nomogram do określenia wytrzymałości na ścinanie bez odpływu τ_{fu} gruntów organicznych w zależności od współczynnika prekonsolidacji OCR i składowej pionowej naprężenia efektywnego „in situ” $(\sigma'_v)_0$: a – dla torfów, b – dla gytii (Lechowicz 1992)

4.6.2. Badanie laboratoryjną sondą stożkową

Jedną z najprostszych metod określania wytrzymałości na ścinanie bez odpływu jest badanie laboratoryjną sondą stożkową. Często połączone jest ono z wyznaczaniem cech fizycznych gruntu (Wood 1982). Sonda stożkowa jest zwykle wyposażona w cztery różne stożki (rys. 4.29). Stożek o masie 60 g i kącie wierzchołkowym 60° został wybrany jako wzorcowy do określania granicy płynności w_L .



Rysunek 4.29. Laboracyjna sonda stożkowa: a – schemat aparatu, b – dane dotyczące stosowanych stożków (Lechowicz 1992)

Badanie laboratoryjną sondą stożkową wykorzystywane jest również do określenia wrażliwości gruntu S_s , zdefiniowanej jako stosunek wytrzymałości na ścinanie gruntu o strukturze nienaruszonej do wytrzymałości na ścinanie gruntu o strukturze zniszczonej.

Na podstawie porównania wyników badań laboratoryjną sondą stożkową z wynikami badań sondą krzyżakową Hansbo (1957) podał zależność na określenie wytrzymałości na ścinanie τ_{fc} :

$$\tau_{fc} = \frac{K_c \cdot m_c \cdot g}{d_c^2} \quad (4.34)$$

gdzie:

τ_{fc} – wytrzymałość na ścinanie określona laboratoryjną sondą stożkową [kPa],

K_c – stała zależna od kąta wierzchołkowego stożka i rodzaju gruntu,

m_c – masa stożka [g],

g – przyspieszenie ziemskie [m/s^2],

d_c – głębokość penetracji stożka [mm].

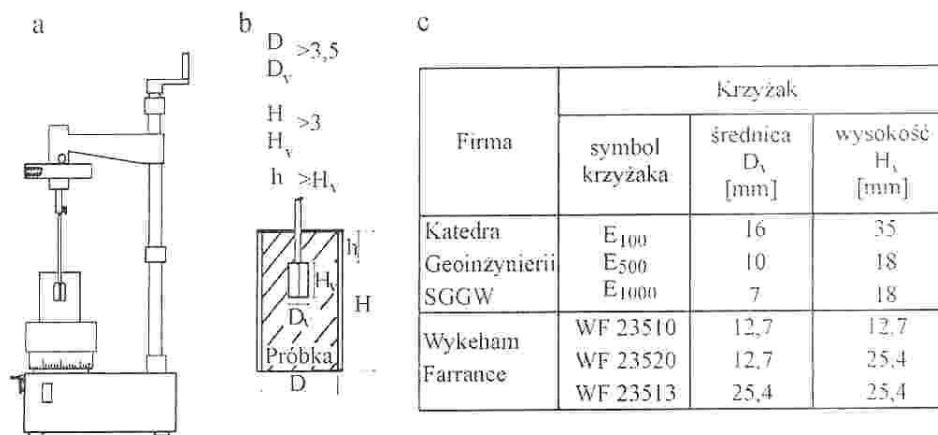
Na podstawie badań przerobionej gliny Hansbo (1957) zaproponował stałą $K_c = 0.25$ dla stożka o kącie wierzchołkowym 60° . Dla próbek o strukturze nienaruszonej wartość K_c przy stożku o kącie wierzchołkowym 30° była w przybliżeniu 4-krotnie większa. Podane przez innych autorów (Garneau i Lebihan 1977, Houlsby 1982, Wiesel i in. 1985, Wasti i Bezirci 1986) wartości stałej K_c dla tego stożka mieszczą się w przedziale 0,8–1,2.

Zgodnie z praktyką szwedzką, wartości wytrzymałości na ścinanie uzyskane z badań laboratoryjną sondą stożkową powinny być skorygowane w taki sam sposób, jak wartości uzyskane sondą krzyżakową. Zalecenia dotyczące sposobu określenia współczynnika poprawkowego μ podano w rozdziale 3.4.

Wyniki doświadczeń wskazują, że zastosowanie sondy stożkowej do badań włóknistego torfu o stopniu rozkładu mniejszym niż H3 według skali von Posta jest wątpliwe (Landva 1986).

4.6.3. Badanie laboratoryjną sondą krzyżakową

Inną prostą metodą wyznaczania wytrzymałości na ścinanie bez odpływu gruntów organicznych jest badanie laboratoryjną sondą krzyżakową. Schemat laboratoryjnej sondy krzyżakowej wykonanej w Katedrze Geoinżynierii SGGW (Gołębiewska 1976) przedstawiono na rysunku 4.30. Sonda ta jest wyposażona w wymienne końcówki krzyżakowe, których wymiary w przypadku aparatu wykonanego w Katedrze Geoinżynierii SGGW oraz aparatu firmy Wykeham Farrance podano przykładowo na rysunku 4.30.



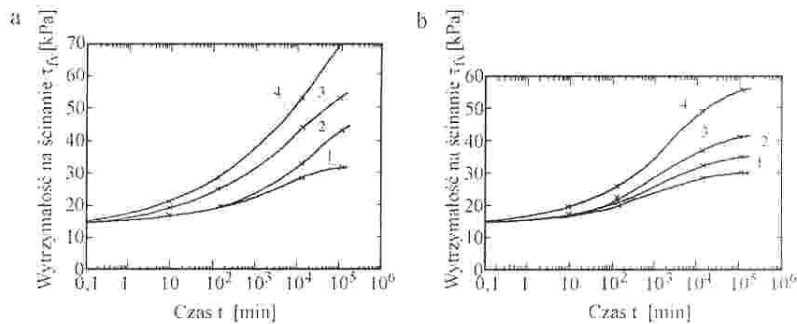
Rysunek 4.30. Laboratoryjna sonda krzyżakowa: a – schemat aparatu, b – wymagania dotyczące minimalnych wymiarów badanej próbki, c – dane dotyczące stosowanych krzyżaków (Lechowicz 1992)

Badanie laboratoryjną sondą krzyżakową przeprowadza się zwykle na próbce pozostającej w cylindrze próbnika. Zmniejsza to do minimum czas przygotowania próbki, ale badanie jest wykonywane bez możliwości kontrolowania stanu naprężenia i warunków odpływu. Celem uniknięcia wpływu brzegów na uzyskany wynik Gołębiowska (1976) zaleca minimalne wymiary średnicy i wysokości badanej próbki oraz zagłębienia krzyżaka podane na rysunku 4.30.

Badania laboratoryjną sondą krzyżakową wykonywane są przy standardowo przyjmowanej wartości prędkości obrotowej ścinania równej 5°/min. Celem zapewnienia warunków bez odpływu prowadzenie badań przy tej prędkości, ze względu na stosunkowo małe wymiary laboratoryjnej sondy, uzasadnione jest dla gruntów organicznych o małej przepuszczalności. W przypadku wykonywania badań przy standardowej prędkości obrotowej ścinania na gruntach organicznych o większym współczynniku konsolidacji poziomej należy liczyć się z zawyżeniem pomierzonej wartości wytrzymałości na ścinanie, wynikającym z częściowego odpływu wody z porów podczas ścinania.

Wartość wytrzymałości na ścinanie τ_v obliczana jest na podstawie wzoru odnoszącego się do połowej sondy krzyżakowej (rozd. 3.4). Wyniki badań laboratoryjną sondą krzyżakową powinny być skorygowane zgodnie z metodą stosowaną do połowej sondy krzyżakowej (rozd. 3.4).

Przez połączenie laboratoryjnej sondy krzyżakowej z komorą trójosiową można prowadzić badania na próbkach w znanych warunkach naprężenia efektywnego przy kontrolowanym odpływie (Law 1979). Laboratoryjną sondę krzyżakową można także połączyć z komorą konsolidacyjną, co pozwala na pomiar zmian wytrzymałości na ścinanie bez odpływu podczas konsolidacji w stanie jednowymiarowym (Lechowicz 1982, Kirkpatrick i Khan 1984). Wyniki badań wytrzymałości na ścinanie bez odpływu gruntów organicznych z obiektu Białośliwie przeprowadzonych laboratoryjną sondą krzyżakową w komorze konsolidacyjnej przedstawiono na rysunku 4.31.



Rysunek 4.31. Wyniki badań laboratoryjną sondą krzyżakową wytrzymałości na ścinanie τ_v gruntów organicznych z obiektu Białośliwie: a – dla torfu, b – dla gytii; 1 – $\sigma = 20$ kPa, 2 – $\sigma = 35$ kPa, 3 – $\sigma = 50$ kPa, 4 – $\sigma = 70$ kPa (Lechowicz 1982)

4.6.4. Badanie prostego ścinania

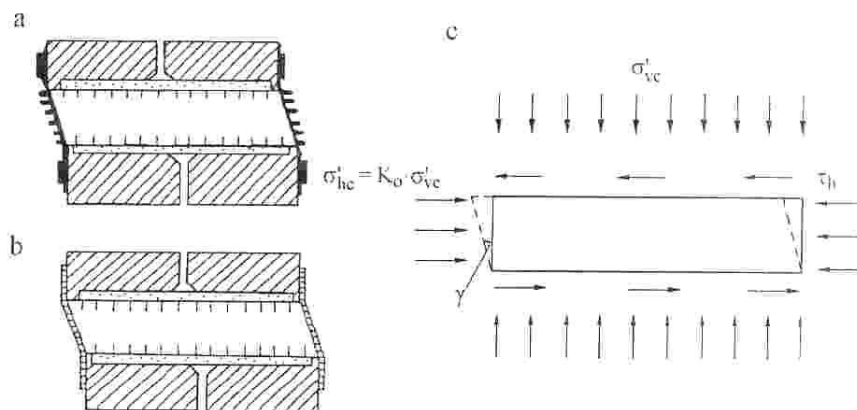
Jednym z badań laboratoryjnych umożliwiających wyznaczenie wytrzymałości na ścinanie, przy wierniejszym modelowaniu stanów naprężenia w podłożu wywołanych obciążeniem budowli, jest badanie w aparacie prostego ścinania. Warunki modelowane w badaniu prostego ścinania mogą być porównywalne do zachowania się gruntu podczas ścinania w stosunkowo cienkiej, słabej warstwie podłoża (Jardine i Hight 1987). Wytrzymałość na ścinanie wyznaczana w ten sposób jest wykorzystywana w analizie stateczności nasypów do środkowej części powierzchni poślizgu lub jako średnia wytrzymałość na ścinanie w całej powierzchni poślizgu. Ponadto, wytrzymałość na ścinanie otrzymana z badania prostego ścinania na próbkach konsolidowanych do stanu naprężenia efektywnego „in situ” jest zwykle bardzo bliska skorygowanej wytrzymałości na ścinanie, uzyskanej z połowej sondy krzyżakowej.

W ostatnich latach badanie prostego ścinania zostało skrytykowane, głównie ze względu na wywoływany w próbce niejednorodny stan naprężenia, mimo to w wielu laboratoriach aparat prostego ścinania jest nadal dość często stosowany (Saada i Townsend 1981, La Rochelle 1981). Dzieje się tak ze względu na stosunkowo niski koszt tego badania, wynikający z nieskomplikowanej metodyki oraz krótkiego czasu konsolidacji, spowodowanego małą wysokością próbki (Ladd 1981). Jednak decydującą rolę w obecnym stosowaniu badania prostego ścinania odgrywają zgromadzone doświadczenia w pomyślnym wykorzystywaniu w analizie stateczności wyników badań w doborze wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odpływu.

W badaniach prostego ścinania najszersze zastosowanie znalazły dwa rozwiązania konstrukcyjne zabezpieczające próbkę przed bocznymi odkształceniami (rys. 4.32). W rozwiązaniu wprowadzonym przez Szwedzki Instytut Geotechniczny próbka gruntu średnicy 50 mm i wysokości 20 mm jest otoczona gumową membraną i zestawem cienkich, równomiernie rozmieszczonych pierścieni (Kjellman 1951, Larsson 1977). W aparacie Norweskiego Instytutu Geotechnicznego (średnicy 80 mm i wysokości 16 mm) w celu zapewnienia stałej średnicy próbki wykorzystano gumową membraną wzmocnioną wtopionym drutem (Bjerrum i Landva 1966). W celu wyeliminowania poślizgu próbki podczas ścinania górną i dolną część obudowy wyposażono w krótkie igły wchodzące w próbkę.

Zgodnie z powszechnie stosowaną metodyką, próbka w jednowymiarowym stanie odkształcenia konsolidowana jest przez 24 godziny. Ścinanie próbki odbywa się przez przemieszczanie górnej obudowy poziomo ze stałą prędkością, podczas gdy dolna obudowa aparatu jest zamocowana (rys. 4.32). Ścinanie próbki gruntu może być przeprowadzone w warunkach bez odpływu lub

z odpływem. Prędkość ścinania w badaniach bez odpływu wynosi najczęściej 0,6% wysokości próbki na godzinę. W przypadku gruntów organicznych o małej przepuszczalności w badaniach z odpływem prędkość ta często jest zbyt duża, aby zapewnić warunki swobodnego odpływu.



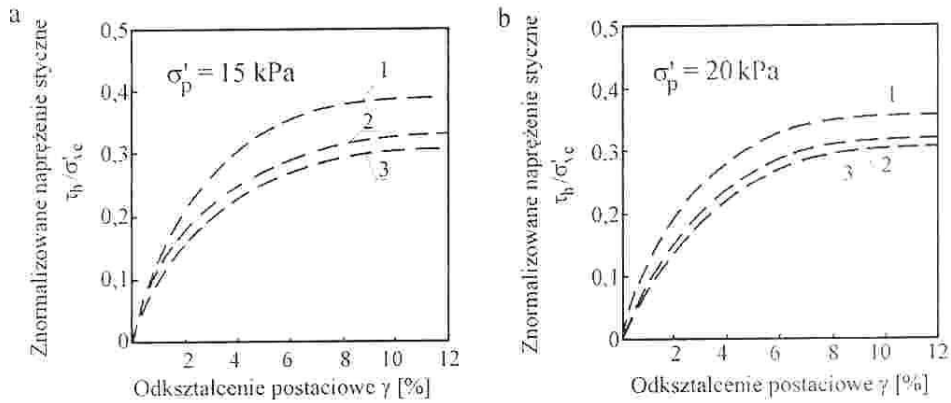
Rysunek 4.32. Aparat prostego ścinania. Próbkę otoczoną: a – gumową membraną i zestawem równomiernie rozmieszczonych pierścieni, b – gumową membraną wzmocnioną drutem; c – warunki naprężenia i odkształcenia podczas ścinania

W aparacie prostego ścinania w standardowej konfiguracji nie jest możliwe wykonanie prawdziwych badań w warunkach bez odpływu z pomiarem ciśnienia wody w porach. Dlatego też, aby wyznaczyć wytrzymałość na ścinanie w warunkach bez odpływu, badania prostego ścinania są często prowadzone w warunkach z odpływem przy stałej objętości próbki (Airey i Wood 1987). Przedstawione przez Dyvika i in. (1987) porównanie między prawdziwymi badaniami prostego ścinania bez odpływu a konwencjonalnymi badaniami przy stałej objętości próbki wskazuje na dobrą zbieżność wyników otrzymanych z obu metod.

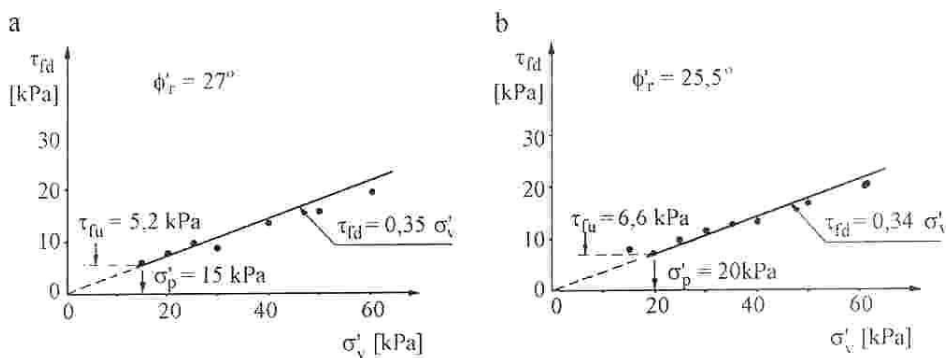
Wyniki badań prostego ścinania torfu i gytii z Antonin (rys. 4.33) wskazują, że znormalizowana wytrzymałość na ścinanie gruntów organicznych normalnie skonsolidowanych nie jest stała, lecz maleje wraz ze wzrostem składowej pionowej naprężenia efektywnego. Znormalizowana wytrzymałość na ścinanie prekonsolidowanych gruntów organicznych także nie jest stała, lecz wzrasta wraz ze wzrostem współczynnika prekonsolidacji *OCR*.

Efektywne parametry wytrzymałościowe uzyskane z badań prostego ścinania z odpływem gruntów organicznych z Antonin przedstawiono na rysunku 4.34. Wartości kąta tarcia wewnętrznego ϕ' otrzymano po skorygowaniu wyników badań, ze względu na zmiany objętościowe, zgodnie z zaleceniami Bishopa

(1954). Wartość kąta ϕ' wyznaczona z badań prostego ścinania w warunkach z odpływem jest zwykle nieco mniejsza od analogicznej wartości otrzymanej z badań trójosiowych w takich samych warunkach.



Rysunek 4.33. Wyniki badań prostego ścinania w warunkach bez odpływu normalnie skonsolidowanych gruntów organicznych z Antonin: a – dla torfu, b – dla gytii; 1 – $\sigma'_{vz} = 20$ kPa, 2 – $\sigma'_{vz} = 60$ kPa, 3 – $\sigma'_{vz} = 80$ kPa (Lechowicz 1992)



Rysunek 4.34. Wyniki badań prostego ścinania w warunkach z odpływem normalnie skonsolidowanych gruntów organicznych z Antonin: a – torfu, b – gytii (Lechowicz 1992)

4.6.5. Badanie trójosiowe

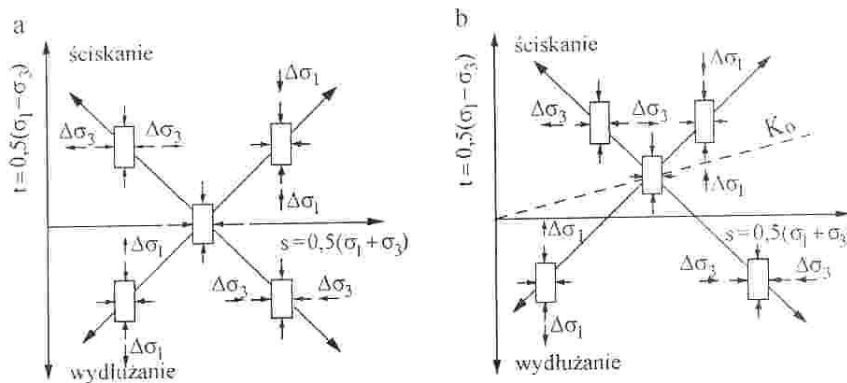
W ostatnich latach badania wytrzymałościowe w aparacie trójosiowym, ze względu na dodatkowe możliwości wierniejszego modelowania przebiegu zmian obciążenia w warunkach naturalnych, zyskały znaczną przewagę nad innymi rodzajami laboratoryjnych badań wytrzymałościowych. Fakt ten wynika przede wszystkim z wprowadzenia w konstrukcji aparatu wielu udoskonaleń, jak również z zastosowania dodatkowego wyposażenia, umożliwiającego roz-

szerzenie zakresu dotychczas wykonywanych badań. Najważniejsze z wprowadzonych udoskonaleń to możliwość pomiaru naprężenia pionowego wewnątrz komory oraz bardziej niezawodne rozwiązania konstrukcyjne połączeń i zaworów. Dodatkowe wyposażenie aparatu trójosiowego stanowią układy do pomiaru odkształceń objętościowych i bocznych próbki oraz automatycznej regulacji stosunku naprężenia osiowego i bocznego. Zastosowanie czujników elektronicznych do pomiaru ciśnienia wody w porach i wartości poszczególnych obciążeń pozwoliło na znaczną poprawę dokładności pomiarów. Wyposażenie aparatu trójosiowego w układ do wywoływania w próbce przeciwcisnienia (tzw. back pressure), umożliwiającego utrzymanie stanu nasycenia próbki podczas badania, daje możliwość wierniejszego odwzorowania stanu gruntu w warunkach terenowych.

W badaniu trójosiowym konsolidacja próbki może być przeprowadzona przy wybranym stosunku naprężenia osiowego i bocznego. W celu odwzorowania wywoływanego w podłożu stanu naprężenia zazwyczaj wymagane jest, aby konsolidacja próbki przeprowadzona była przy anizotropowym stanie naprężenia efektywnego. Ze względów praktycznych, w przypadku gdy współczynnik parcia gruntu w spoczynku K_v jest większy od 0,8, konsolidację próbki można przeprowadzić przy izotropowym stanie naprężenia (Jamiołkowski i in. 1981, Sivakugan i in. 1988).

Ścinanie próbki w badaniu trójosiowym można prowadzić przy wybranym stosunku składowych głównych naprężenia lub przy stałym naprężeniu średnim. Ścieżki naprężenia, stosowane najczęściej w modelowaniu warunków obciążenia podczas ścinania w badaniach trójosiowych przy ściskaniu i przy wydłużaniu, przedstawiono na rysunku 4.35. Należy zauważyć, że w modelowaniu stanów naprężenia w podłożu, wywołanych wzrastającym obciążeniem nasypu, wykorzystywane są głównie dwie ścieżki naprężenia. W jednej z nich zwiększanie naprężenia dewiatorowego uzyskuje się przez zwiększanie naprężenia osiowego przy stałym naprężeniu bocznym (strefa ściskania), natomiast drugą ścieżkę naprężenia otrzymuje się przez zwiększanie naprężenia bocznego przy stałym naprężeniu osiowym (strefa wydłużania). Celem odwzorowania połowych warunków odpływu badania trójosiowe prowadzi się przez przyłożenie naprężenia dewiatorowego w warunkach z odpływem lub bez odpływu (Head 1986).

Do przygotowania i umieszczenia próbki w aparacie trójosiowym często wymagane jest zastosowanie specjalnego oprzyrządowania ze względu na wrażliwość gruntów organicznych na naruszenie struktury. Z powodu trudności w przygotowaniu próbek o dużej zawartości nierozłożonych części organicznych w badaniach trójosiowych stosowane są próbki o średnicy większej niż w badaniach standardowych (Landva i in. 1986).



Rysunek 4.35. Ścieżki naprężenia stosowane w modelowaniu warunków obciążenia podczas ścinania w badaniach trójosiowych przy ściskaniu i przy wydłużaniu. Próbką przed ścinaniem konsolidowana: a – izotropowo, b – anizotropowo

Próbka w komorze trójosiowej powinna być otoczona gumową membraną o bardzo dobrych właściwościach mechanicznych, w istotnym stopniu eliminujących przecieki wody nawet przy dużych ciśnieniach. Celem dodatkowego ograniczenia przecieków przez gumową membranę komora trójosiowa może być wypełniona ciekłą parafiną (Berre 1981) lub olejem (Tavenas i in. 1978).

Papierowe dreny umieszczone na bocznej powierzchni próbki ułatwiają wyrównywanie ciśnienia wody w porach i zapewniają krótszą drogę odpływu. W przypadku małej przepuszczalności gruntów organicznych umożliwia to zarówno skrócenie czasu konsolidacji, jak również zwiększenie prędkości odkształcenia osiowego podczas ścinania, szczególnie w badaniach z odpływem. Celem zredukowania wpływu drenów bocznych na rozkład naprężenia papierowe dreny powinny być umieszczone spiralnie wokół próbki z nachyleniem 1:1,3 w badaniach trójosiowych przy ściskaniu oraz 1:1,5 w badaniach przy wydłużaniu (Berre 1981).

Obciążanie próbki podczas ścinania w warunkach bez odpływu w badaniu trójosiowym przy ściskaniu powinno być prowadzone przy prędkości umożliwiającej wyrównywanie ciśnienia wody w porach wzdłuż całej wysokości próbki. Natomiast ścinanie z odpływem powinno być prowadzone na tyle wolno, aby umożliwić odpływ wody z próbki przy mało znaczących wartościach ciśnienia wody w porach.

Największą prędkość przemieszczenia osiowego v_{1max} podczas ścinania w badaniach trójosiowych oblicza się z zależności:

$$v_{1max} = \frac{H \cdot \varepsilon_{1f}}{t_{100} \cdot \theta} \quad (4.35)$$

gdzie:

H – wysokość próbki [mm],

ϵ_{lf} – przewidywane odkształcenie osiowe w momencie zniszczenia.

t_{100} – czas potrzebny do wystąpienia 100% konsolidacji pierwotnej [min],

θ – współczynnik zależny od rodzaju badania i warunków odpływu.

Określenie czasu t_{100} można przeprowadzić na podstawie pomiarów zmiany objętości próbki w trakcie etapu konsolidacji. W tabeli 4.6 zamieszczono wartości współczynnika θ przy ścinaniu w warunkach bez odpływu i z odpływem. Zestawione wartości współczynnika θ odpowiadają czterem różnym warunkom odpływu w etapie konsolidacji, przy określonym stosunku wysokości próbki H do średnicy próbki D . Wartości współczynnika θ obliczono, przyjmując założenie, że w przypadku badań w warunkach z odpływem następuje rozpraszanie nadwyżki ciśnienia wody w porach w 95% (Head 1986). Natomiast w przypadku badań w warunkach bez odpływu wykorzystano podane przez Bligha (1964) zależności oparte na założeniu, że podczas ścinania następuje wyrównywanie nadwyżki ciśnienia wody w porach w 95%.

Tabela 4.6. Wartości współczynnika θ do określenia prędkości odkształcenia podczas ścinania w badaniu trójosiowym

Warunki odpływu podczas konsolidacji	Wartości współczynnika θ			
	ściananie bez odpływu		ściananie z odpływem	
	$H/D = s$	$H/D = 2$	$H/D = s$	$H/D = 2$
Z jednej podstawy	$0,0318 \cdot s^4$	0,509	$0,531 \cdot s^4$	8,5
Z dwóch podstaw	$0,0318 \cdot s^4$	0,509	$0,531 \cdot s^4$	8,5
Z jednej podstawy i bocznej powierzchni próbki	$0,398 \cdot s^2$	1,59	$0,141 \cdot s^2(1 + 2s)^2$	14,2
Z dwóch podstaw i bocznej powierzchni próbki	$0,443 \cdot s^2$	1,77	$0,158 \cdot s^2(1 + 2s)^2$	15,8

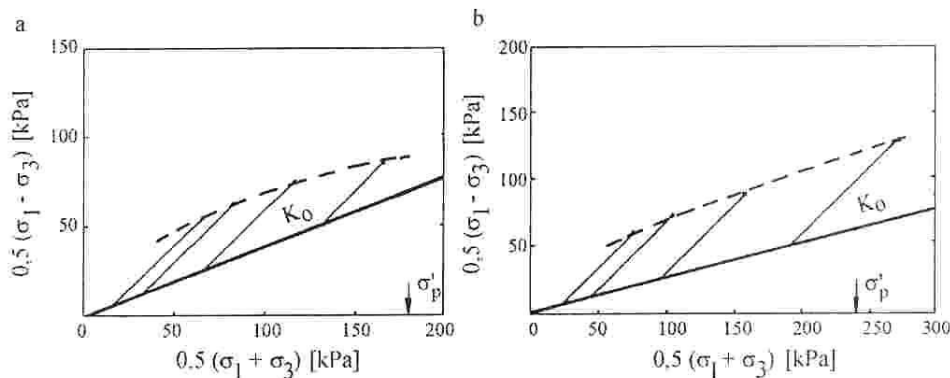
W badaniach trójosiowych w warunkach bez odpływu, prowadzonych na próbkach o $H/D = 2$, standardowo przyjmowana prędkość odkształcenia podczas ścinania gruntów o współczynniku konsolidacji większym od $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ wynosi 0,5% na godzinę. Współczynnik konsolidacji silnie rozłożonych torfów oraz gytii, szczególnie przy większych wartościach naprężenia, jest zazwyczaj mniejszy.

W przypadku badań bez odpływu tych gruntów, wykonywanych celem wyznaczenia efektywnych parametrów wytrzymałościowych, prędkość odkształcenia często powinna być 10 razy mniejsza i wynosić 0,05% na godzinę. Dopro-

wadzenie próbki do ścięcia przy tej prędkości wymaga kilku dni. Ze względów praktycznych badania w warunkach bez odpływu gruntów organicznych o małej przepuszczalności często wykonywane są przy prędkości standardowej (0,5% na godzinę). W tym wypadku należy pamiętać, że uzyskane parametry są zawyżone i wymagają zastosowania współczynników poprawkowych.

Badania trójosiowe z odpływem gruntów organicznych, wykonywane nawet przy zapewnieniu drenażu z powierzchni bocznej i obu podstaw próbki, wymagają zastosowania prędkości odkształcenia podczas ścinania mniejszej od 0,5% na godzinę. W przypadku gruntów organicznych o małej przepuszczalności prędkość odkształcenia często powinna być mniejsza od 0,05% na godzinę. Ze względu na trudności zapewnienia stałych warunków oraz braku przecieków podczas badania zalecane jest, aby ścinanie nie trwało dłużej niż kilka dni.

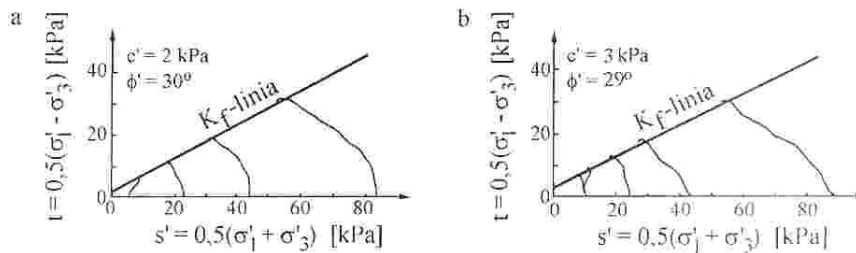
Wyniki badań trójosiowych w warunkach bez odpływu wykorzystywane są najczęściej do wyznaczenia wytrzymałości na ścinanie bez odpływu τ_{fu} . Na rysunku 4.36 pokazano ścieżki naprężenia całkowitego otrzymane z badań trójosiowych w warunkach bez odpływu prekonsolidowanych gruntów organicznych z Antonin. Uzyskane wyniki wskazują, że zależność wytrzymałości na ścinanie τ_{fu} w tych warunkach od naprężenia ma charakter nieliniowy.



Rysunek 4.36. Ścieżki naprężenia całkowitego z badań trójosiowych CK_u prekonsolidowanych gruntów organicznych z Antonin: a – torfu, b – gytii (Lechowicz 1992)

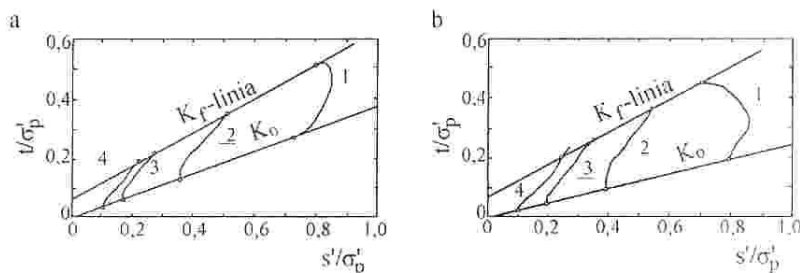
Wartości efektywnych parametrów wytrzymałościowych c' i ϕ' wyznaczone są zazwyczaj z badań trójosiowych w warunkach z odpływem, jednak stosunkowo długi czas trwania tych badań powoduje, że parametry te są częściej wyznaczone z badań w warunkach bez odpływu, prowadzonych z pomiarem ciśnienia wody w porach. Wartości parametrów wytrzymałościowych c' i ϕ' szacowane są na podstawie linii zniszczenia K_f uzyskanej z przebiegu ścieżek

naprężenia efektywnego (Sorbjan i Lechowicz 1987). Wartości efektywnych parametrów wytrzymałościowych wyznaczone z badań trójosiowych w warunkach bez odpływu i stałej objętości przy normalnie konsolidowanych gruntach organicznych z Antonin przedstawiono na rysunku 4.37.



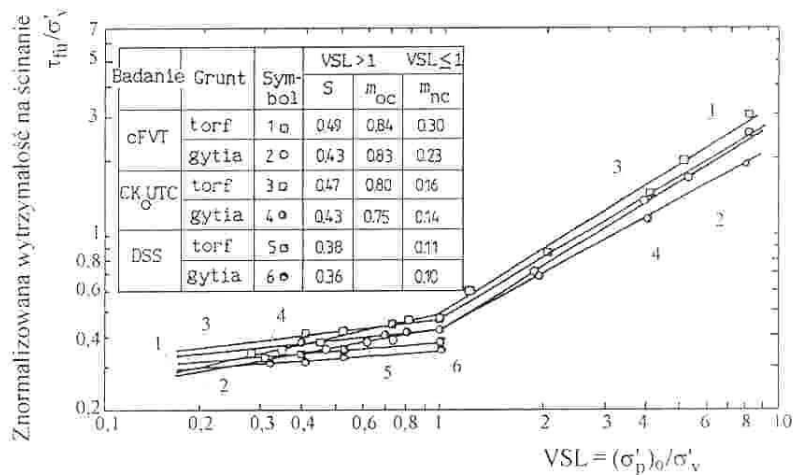
Rysunek 4.37. Wyniki badań trójosiowych w warunkach bez odpływu normalnie konsolidowanych gruntów organicznych z Antonin: a – torfu, b – gytii

Jako przykład badań trójosiowych CK_oU przeprowadzonych na gruntach prekonsolidowanych pokazano wyniki badań gruntów organicznych z Antonin. Uzyskane wyniki badań przedstawione w postaci znormalizowanej, tzn. podzielone przez naprężenie prekonsolidacji $(\sigma'_p)_o$, przy $K_o = 0,45$ dla torfu i $K_o = 0,6$ dla gytii pokazano na rysunku 4.38.



Rysunek 4.38. Wyniki badań trójosiowych CK_oU prekonsolidowanych gruntów organicznych z Antonin: a – torfu, b – gytii

Wyniki badań trójosiowych CK_oUTC przeprowadzonych na normalnie konsolidowanych i prekonsolidowanych gruntach organicznych z Antonin posłużyły do określenia zależności znormalizowanej wytrzymałości na ścinanie τ_{ij}/σ'_v od wskaźnika stanu składowej pionowej naprężenia efektywnego $VSL = (\sigma'_p)_o/\sigma'_v$ (rys. 4.39). W celu porównania zamieszczono również wyniki badań prostego ścinania (DSS) oraz skorygowane wartości, uzyskane z badań połową sondą krzyżkową (cFVT).



Rysunek 4.39. Zależność znormalizowanej wytrzymałości na ścinanie od wskaźnika naprężenia efektywnego VSL, uzyskana z badań laboratoryjnych i polowych

4.7. Określenie parametrów odkształceniowych w badaniach trójosiowych

4.7.1. Wybór metodyki badań

Podczas budowy nasypów o dużym znaczeniu, szczególnie na podłożu organicznym o dużej miąższości, wymagany jest bardziej wszechstronny opis zachowania się słabego gruntu. Często konieczne jest wówczas wykonanie obliczeń pionowych i poziomych przemieszczeń oraz stanu naprężenia w podłożu na podstawie wybranego modelu gruntu. Wymaga to przeprowadzenia badań trójosiowych do wyznaczenia parametrów zastosowanego modelu. Parametrami wymaganymi w analizie odkształceń są zwykle parametry teorii sprężystości i lepko-plastyczności. W teorii sprężystości stosowane są dwie z czterech stałych sprężystych: moduł odkształcenia Younga E , współczynnik Poissona ν lub moduł odkształcenia postaciowego G i moduł odkształcenia objętościowego K .

W większości zagadnień praktyki inżynierskiej stosowana jest pierwsza para stałych E i ν podczas gdy druga jest bardziej właściwa z matematycznego punktu widzenia, ponieważ oddziela czyste ścinanie od zmian objętościowych. W teorii lepko-plastyczności stosuje się zwykle parametry opisujące zachowanie szkieletu gruntowego w czasie (parametry pełzania) oraz odkształcenia plastyczne (obwiednie plastyczności). Metody badań gruntu muszą być ściśle powiązane z modelem gruntu założonym w obliczeniach oraz z teorią konsolidacji.

W praktyce inżynierskiej obliczenia odkształceń prowadzone są przy użyciu efektywnych lub całkowitych naprężeń. Należy zatem odróżniać parametry wyznaczone w warunkach bez odpływu od określonych w warunkach z odpływem, chociaż nie zawsze jest to spotykane w literaturze. Parametry w warunkach bez odpływu oznacza się jako E_u i v_u , w warunkach z odpływem (efektywne) – E' , v' . Symboli E , v używa się w ogólnym znaczeniu.

Parametry sprężyste E i v w praktyce są określane na podstawie wyników badań trójosiowych. Metoda badań zbliżona jest do metody określania wytrzymałości na ścinanie gruntów (rozdział 4.6). Na dokładność oznaczenia E i v największy wpływ mają następujące czynniki:

- pomiar odkształcenia pionowego ε_1 ,
- pomiar odkształcenia poziomego ε_3 ,
- dobra jakość i rekonsolidacja badanej próbki (dla odtworzenia warunków „in situ”),
- schemat i warunki badania.

Pierwszy i drugi czynnik zależy głównie od rodzaju aparatu trójosiowego oraz metody pomiaru. Metoda badania ma duży wpływ na trzeci i czwarty czynnik. Odkształcenie pionowe w standardowym aparacie trójosiowym mierzone jest czujnikiem, zainstalowanym poza komorą trójosiową. Taki sposób pomiaru w połączeniu z budową standardowej komory aparatu trójosiowego powoduje znaczące błędy, szczególnie przy małych odkształceniach pionowych ($\varepsilon_1 < 0,5\%$). Zatem badanie w standardowym aparacie trójosiowym pozwala wyznaczyć parametry przy odkształceniach większych od 1%. Wyznaczenie parametrów w zakresie mniejszych odkształceń wymaga zastosowania zmodyfikowanej komory aparatu trójosiowego oraz zainstalowania systemu wewnątrzkomorowego pomiaru odkształceń gruntu, umożliwiającego uzyskanie pełnej krzywej naprężenie-odkształcenie.

Badania trójosiowe wykonywane do uzyskania charakterystyk odkształceniowych są bardzo często przeprowadzane jako konsolidacja w badaniach wytrzymałościowych. Należy jednak pamiętać, że charakterystyka odkształceniowa zależy w głównej mierze od anizotropii i stanu naprężenia efektywnego (Jamiołkowski i in. 1981). Dlatego badania te powinny być przeprowadzane jako badanie trójosiowe z odpływem w warunkach K_u . W takim przypadku badania odkształceniowe prowadzone są ze wzrastającym obciążeniem. Podczas konsolidacji próbki można w niewielkim stopniu zwiększyć ciśnienie w komorze i obciążenie osiowe tak, aby stosunek dewiatora naprężenia q do efektywnego naprężenia średniego p' był stały przy końcu każdego przyrostu obciążenia.

Należy pamiętać, że wartości parametrów odkształceniowych zależą od warunków naprężenia, zastosowanych w badaniu. Dlatego też, badania laboratoryjne do określenia parametrów obliczeniowych powinny odwzorowywać warunki pracy podłoża.

4.7.2. Moduł Younga i współczynnik Poissona

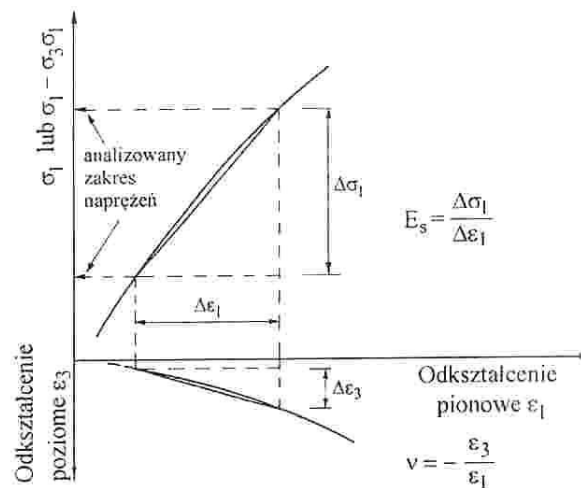
Wyniki badań trójosiowych są zwykle przedstawiane w postaci zależności między dewiatorem naprężenia i odkształceniem pionowym (rys. 4.40). Moduł sprężystości Younga E określa się jako:

$$E = \frac{\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)}{\Delta\varepsilon_1} \quad (4.36)$$

gdzie:

$\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)$ – dewiator naprężenia,

$\Delta\varepsilon_1$ – odkształcenie pionowe.



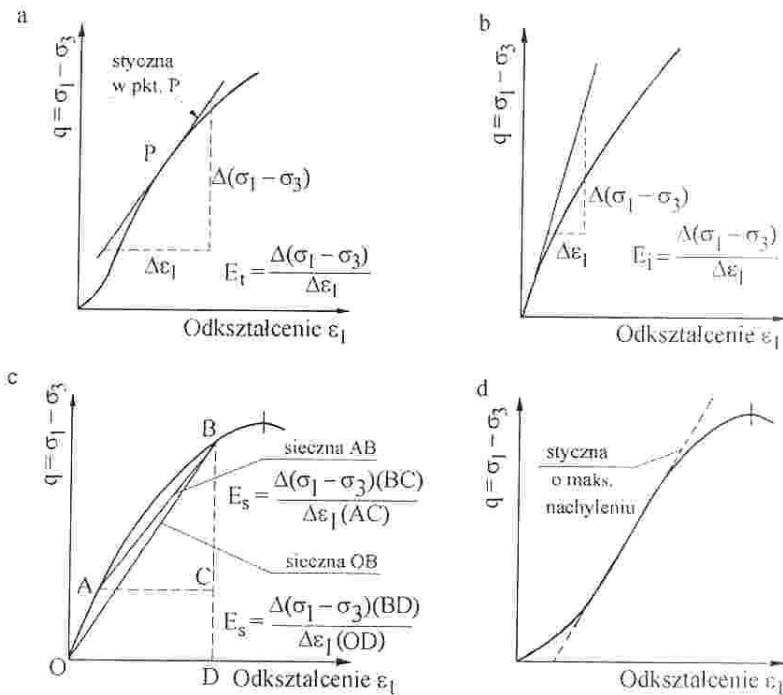
Rysunek 4.40. Typowy wykres zależności naprężenia osiowego i odkształcenia bocznego względem odkształcenia osiowego, pokazujący sposób wyznaczania modułu E i współczynnika Poissona ν (Head 1986)

W zależności od metody obliczeniowej można wyróżnić trzy rodzaje modułów sprężystości (rys. 4.41):

- początkowy moduł styczny E_t – wyrażający nachylenie stycznej w początkowym punkcie do krzywej σ - ε ,

- sieczny moduł E_s – wyrażający nachylenie linii łączącej dwa określone punkty krzywej, z których jeden może być punktem początkowym.
- moduł styczny E_t – wyrażający nachylenie linii będącej styczną do krzywej σ - ε dla określonego poziomu naprężenia lub odkształcenia.

Jak już wspomniano wyżej, dokładny pomiar odkształcenia podczas pierwotnego stanu naprężenia jest bardzo istotny do określenia modułu. Jeśli charakterystyka naprężenie-odkształcenie w początkowej fazie badania nie jest poprawna, tak jak to pokazano na rysunku 4.41, to tej części krzywej nie należy uwzględniać.



Rysunek 4.41. Wyznaczanie modułu Younga z nieliniowej zależności naprężenie-odkształcenie (Head 1986)

Stwierdzono, że początkowy moduł E_t zmienia się wraz z naprężeniem bocznym σ_3 . Zależność tę sformułował Janbu (1963) jako:

$$E_t = m \cdot p_a (\sigma_3 / p_a)^n \quad (4.37)$$

gdzie:

p_a – ciśnienie atmosferyczne,
 m, n – stałe badania.

Pionowe naprężenie ściskające σ_1 przyłożone do materiału sprężystego powoduje powstanie nie tylko pionowego odkształcenia ściskającego ε_1 , ale także bocznego przemieszczenia. Odkształcenia poziome w dwóch pozostałych kierunkach oznaczono jako ε_2 i ε_3 ; w materiale izotropowym $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$. Te odkształcenia poprzeczne są funkcją odkształcenia podłużnego:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\nu\varepsilon_1 \quad (4.38)$$

gdzie:

ν – współczynnik Poissona materiału.

Znak „-” wskazuje na rozszerzalność boczną odpowiadającą ściskaniu podłużnemu.

Współczynnik Poissona określa się ze stosunku zmierzonych odkształceń (rys. 4.40):

$$\nu = -\frac{\Delta\varepsilon_3}{\Delta\varepsilon_1} \quad (4.39)$$

Współczynnik Poissona odpowiada nachyleniu krzywej ε_1 - ε_3 , wartość obliczana jest jako styczna lub sieczna, przy zastosowaniu tych samych kryteriów jak dla modułu Younga (rys. 4.41). W warunkach bez odpływu w gruntach organicznych współczynnik Poissona równy jest 0,5.

Istnieje wiele metod określania odkształcenia poziomego próbki gruntu ε_3 . Pomiar odkształcenia poziomego wymaga dodatkowego oprzyrządowania aparatu trójosiowego. Stosowane w praktyce metody można podzielić na dwie grupy:

- pomiar kontaktowy, tzn. pomiar odkształceń poziomych czujnikami zainstalowanymi wewnątrz komory trójosiowej (np. metoda pasków pomiarowych, metoda przeciętych pierścieni metalowych, mierniki miejscowych odkształceń),
- pomiar bezkontaktowy, tzn. pomiar odkształceń poziomych czujnikami zainstalowanymi na zewnątrz komory trójosiowej (np. pomiar ultradźwiękowy, fotogrametryczny, optograficzny) (Barański i Wolski 1983).

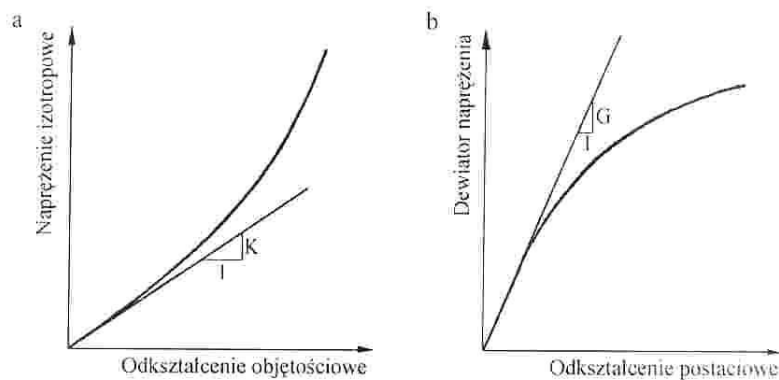
4.7.3. Moduł odkształcenia objętościowego i moduł ścinania

Moduł odkształcenia objętościowego K i moduł ścinania G bardzo często określa się na podstawie E i ν z równań:

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (4.40)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (4.41)$$

Oba moduły można także wyznaczyć z badań laboratoryjnych: moduł odkształcenia objętościowego K – na podstawie zależności izotropowego naprężenia ściskającego-odkształcenie objętościowe; moduł ścinania G – na podstawie zależności dewiator naprężenia-odkształcenie postaciowe (rys. 4.42).



Rysunek 4.42. Wyznaczanie modułów: a – odkształcenia objętościowego K , b – ścinania G

4.7.4. Parametry do modeli sprężysto-plastycznych

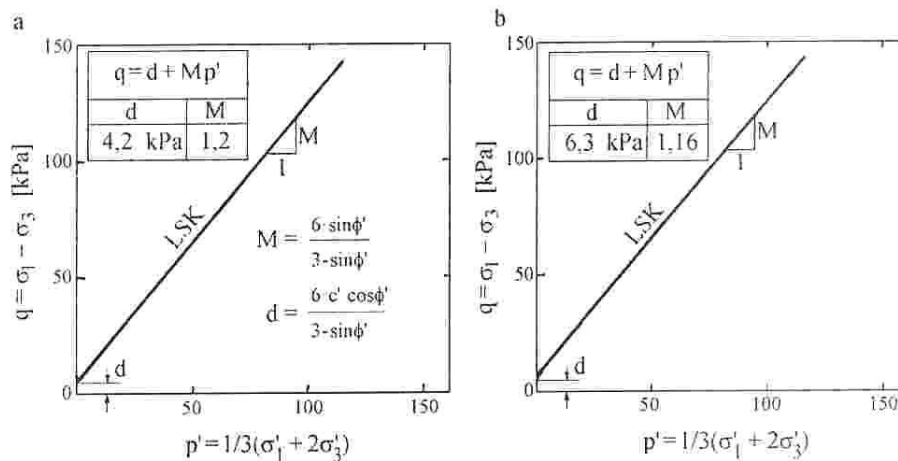
W ostatnich latach aparat trójosiowy wykorzystywany jest również do badań charakterystyk i parametrów w sprężysto-plastycznych modelach gruntu, stosowanych w analizie stanu naprężenia i odkształcenia podłoża organicznego obciążonego nasypem. Obecnie najszersze zastosowanie znajduje zmodyfikowany model Cam-Clay.

Prognoza odkształceń obciążonego podłoża, oparta na teoretycznych modelach gruntu, wymaga rozróżnienia przedziału małych odkształceń (sprężystych) i dużych odkształceń (plastycznych). Wyznaczenie obwiedni plastyczności (miejsca stanu naprężenia w przestrzeni naprężeń $q-p'$, wywołującego duże odkształcenia jako reakcje na obciążenie) jest możliwym rozwiązaniem.

W gruntach organicznych cząstki koloidalne i kontakty między nimi powodują sprężysto-lepko-plastyczny charakter odkształcenia pod obciążeniem. Do oceny parametrów opisujących lepko-plastyczny etap odkształceń potrzebne jest zastosowanie odpowiedniej metodyki w badaniach trójosiowych.

Parametry do modelu Cam-Clay. Celem oszacowania parametrów do modelu Cam-Clay wymagane jest wyznaczenie linii stanu krytycznego (LSK)

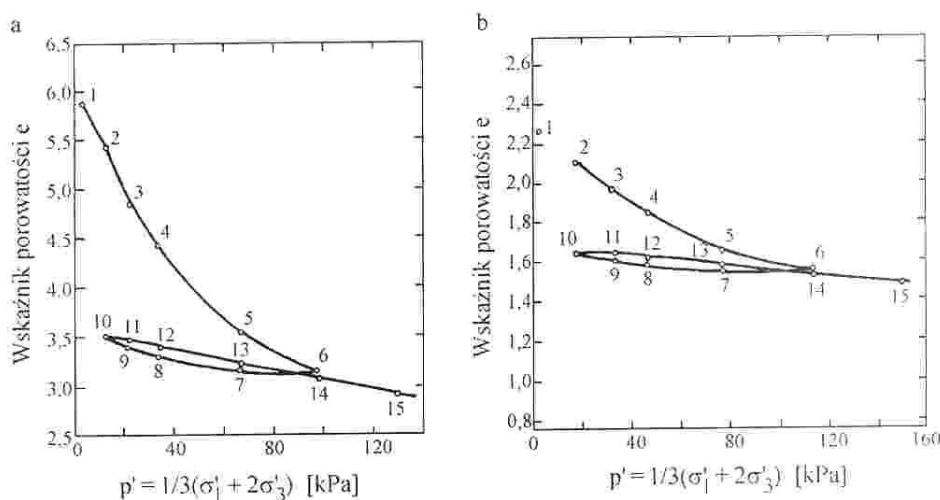
oraz linii normalnej konsolidacji (LNK) i linii konsolidacji podczas wtórnego obciążania (LKW). Linie stanu krytycznego, otrzymane z badań trójosiowych metodą CU (z konsolidacją, w warunkach bez odpływu) torfu i gytii z Antonin, przedstawiono na rysunku 4.43.



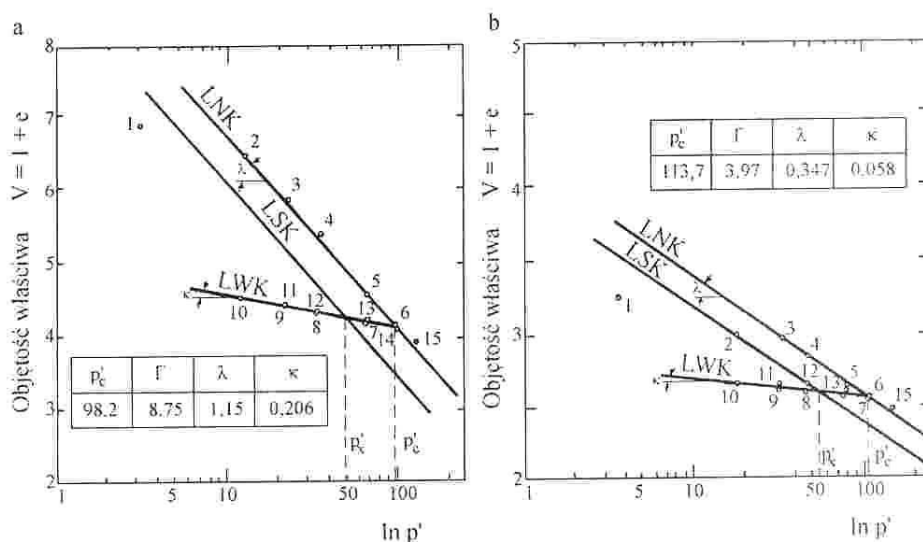
Rysunek 4.43. Linie stanu krytycznego (LSK) uzyskane z badań trójosiowych CU gruntów organicznych z Antonin: a – dla torfu, $c' = 2$ kPa i $\phi' = 30^\circ$; b – dla gytii, $c' = 3$ kPa i $\phi' = 29^\circ$ (Leechowicz 1992)

Na uwagę zasługuje fakt, że uzyskane linie stanu krytycznego nie przechodzą przez początek układu q - p' , a zatem opisane są dwoma parametrami: M i d . Przypadek ten jest charakterystyczny w gruntach prekonsolidowanych.

Badania w aparacie trójosiowym, prowadzone w celu wyznaczenia charakterystyk LNK i LKW, polegają na obciążaniu próbek w trzech etapach, obejmujących konsolidację, odprężanie oraz powtórna konsolidację. W celu modelowania rzeczywistych stanów naprężenia w podłożu obciążanie prowadzone jest w warunkach anizotropowego stanu naprężenia. Jako przykład przedstawiono wyniki badań trójosiowych gruntów organicznych z Antonin, w których obciążanie próbek prowadzono przy anizotropowym stanie naprężenia wzdłuż linii K_o (przy $K_o = 0,45$ dla torfu i $K_o = 0,6$ dla gytii). Wyniki badań przedstawione w postaci zależności wskaźnika porowatości e od średniego naprężenia efektywnego $p' = 1/3(\sigma_1 + 2\sigma_3)$ pokazano na rysunku 4.44. Z kolei na rysunku 4.45 przedstawiono charakterystyki LNK i LKW w postaci logarytmicznej zależności objętości właściwej $V = 1 + e$ od średniego naprężenia efektywnego p' wraz z wyznaczonymi dla tych gruntów parametrami Γ , λ i κ do modelu Cam-Clay.



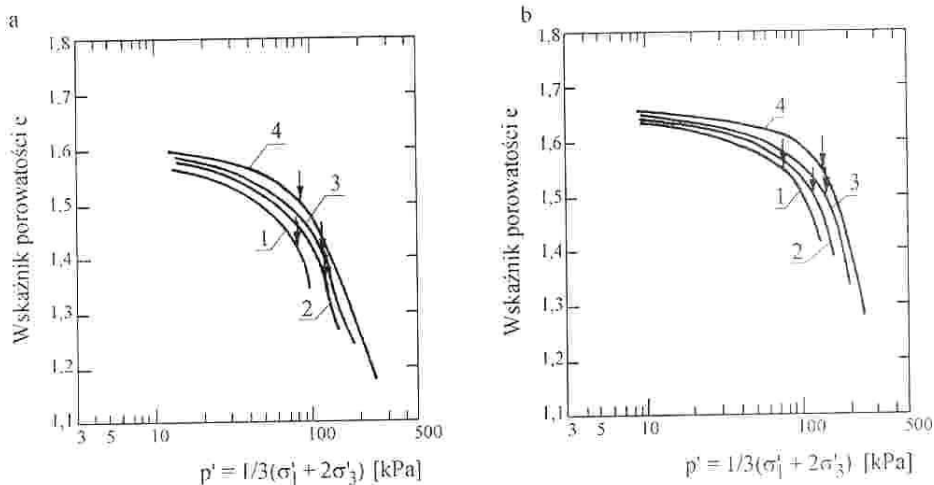
Rysunek 4.44. Wyniki badań trójosiowych podczas anizotropowej konsolidacji gruntów organicznych z Antonin: a – torf, b – gytia (Lechowicz 1992)



Rysunek 4.45. Parametry Γ , λ , κ do modelu Cam-Clay gruntów organicznych z Antonin: a – torfu, b – gytii; LNK – linia normalnej konsolidacji, LKW – linia konsolidacji podczas wtórnego obciążenia. LSK – linia stanu krytycznego (Lechowicz 1992)

Obwiednia plastyczności. Obwiednia plastyczności może być wyznaczana na podstawie standardowych badań trójosiowych CD (z konsolidacją i odpływem) (Jamiołkowski i in. 1985). Jednym ze sposobów wyznaczenia obwiedni plastyczności jest wykonanie badań trójosiowych w warunkach z odpływem

przy stałym nachyleniu ścieżki naprężenia $\eta = q/p'$. Punkty plastyczności wyznaczone na podstawie przebiegu zależności $e-\log p'$, wykorzystując metodę stosowaną przy określaniu naprężenia prekonsolidacji σ'_p z badań edometrycznych, dla gytii z Antonin przedstawiono na rysunku 4.46.



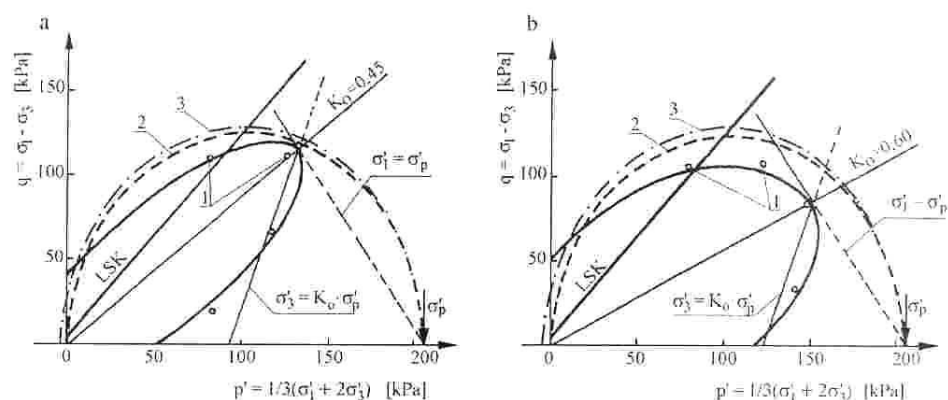
Rysunek 4.46. Punkty plastyczności określone w badaniach trójosiowych w warunkach z odpływem przy $\eta = \text{const}$ gytii z Antonin: a – $K_o = 0,45$, b – $K_o = 0,6$; 1 – $\eta = 1,313$, 2 – $\eta = 0,868$, 3 – $\eta = 0,545$, 4 – $\eta = 0,231$ (Lechowicz i Szymański 1988)

Badania laboratoryjne gruntów organicznych wykazały, że kształt obwiedni plastyczności różni się znacząco od teoretycznego kształtu materiału izotropowego.

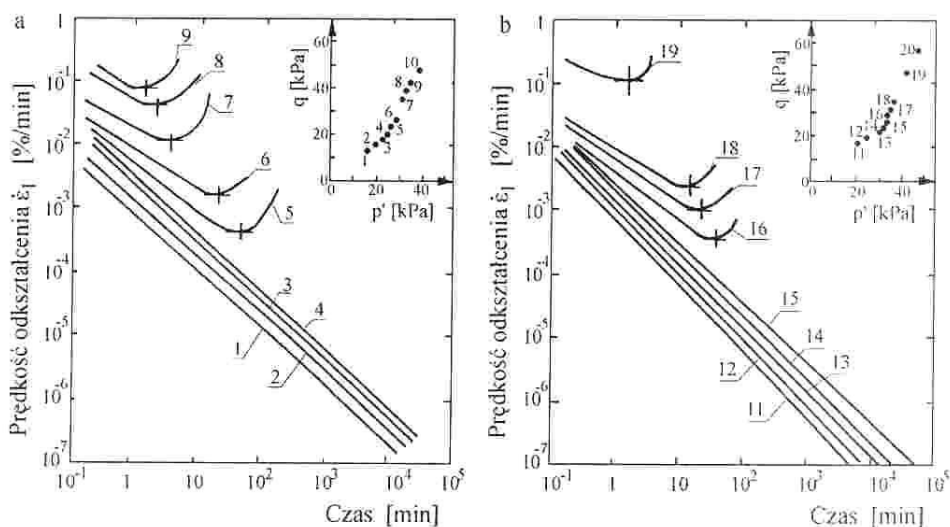
Wyniki badań trójosiowych, przeprowadzonych w celu wyznaczenia obwiedni plastyczności gruntów organicznych, wykazały istotny wpływ historii i anizotropii stanu naprężenia na położenie i kształt obwiedni plastyczności. Na rysunku 4.47 pokazano w postaci punktów w układzie $q-p'$ uzyskane stany naprężenia, wywołujące uplastycznienie gytii z Antonin.

W celu porównania na rysunku 4.47 zamieszczono również obwiednie plastyczności, obliczone z równań modelu Cam-Clay. Otrzymane wyniki wskazują, że obwiednie plastyczności gruntów organicznych, podobnie jak w przypadku mineralnych gruntów słabych (Tavenas i Leroueil 1977, Crooks 1981, Larsson i Sällfors 1981), są symetryczne względem linii K_o .

Charakterystyka pelzania. Jednym ze sposobów umożliwiających wyznaczenie charakterystyki pelzania jest badanie pelzania wykonywane w warunkach z odpływem lub bez odpływu, w komorze aparatu trójosiowego (Singh i Mitchell, 1968, Larsson, 1977). Badania gruntów organicznych wykazały szeroki przedział prędkości odkształceń w procesie anizotropowego odkształcenia (rys. 4.48). Kiedy dewiator naprężenia jest mniejszy od dewiatora niszczącego.



Rysunek 4.47. Stany naprężenia wywołujące uplastycznienie oraz obwiednie plastyczności dla gytii z Antonin: a – $K_o = 0,45$, b – $K_o = 0,6$; 1 – wyniki badań; obwiednie plastyczności obliczone z równań modelu Cam-Clay: 2 – w gruntach normalnie konsolidowanych, 3 – w gruntach prekonsolidowanych (Lechowicz i Szymański 1988a)



Rysunek 4.48. Wyniki badań pełzania przy stałym dewiatorze naprężenia w warunkach z odpływem gruntów organicznych z Antonin: a – torfu, b – gytii (Lechowicz i Szymański 1988b)

przyrost odkształceń regularnie maleje, podczas gdy naprężenie ścinające osiąga wartość wytrzymałości na ścinanie, na początku przyrost odkształceń maleje, potem raptownie wzrasta aż do maksymalnej wartości w momencie zniszczenia. Wyniki badań wskazują, że w przypadku malejących odkształceń zależność przyrostu odkształceń do czasu dla danego stałego naprężenia ścinającego

w skali logarytmicznej ma charakter liniowy. Zależność prędkości odkształceń od naprężenia w danym czasie opisana jest funkcją wykładniczą. Fakt ten wymusza stosowanie wartości składowych naprężenia w badaniach pełzania zgodnie ze ścieżką naprężeń, przewidywaną w podłożu gruntowym.

4.8. Określenie przepuszczalności

Analiza przebiegu odkształceń wymaga zastosowania teorii konsolidacji o różnym stopniu skomplikowania w zależności od charakteru zachowania podłoża gruntowego. Zastosowanie teorii konsolidacji do obliczeń przebiegu odkształceń powoduje konieczność określenia przepuszczalności gruntu oraz jej zmienności w trakcie procesu konsolidacji.

Przepuszczalność gruntu jest funkcją wskaźnika porowatości. Wielu autorów (Berry i Vickers 1975, Larsson 1981, Szymański 1982, Tavenas i in. 1983) wykazało, że do celów praktycznych przepuszczalność można przedstawić w postaci linii prostej na wykresie zależności: log współczynnika filtracji – odkształcenie, jako:

$$\log k_e = \log k_o - \beta_k \varepsilon \quad (4.42)$$

gdzie:

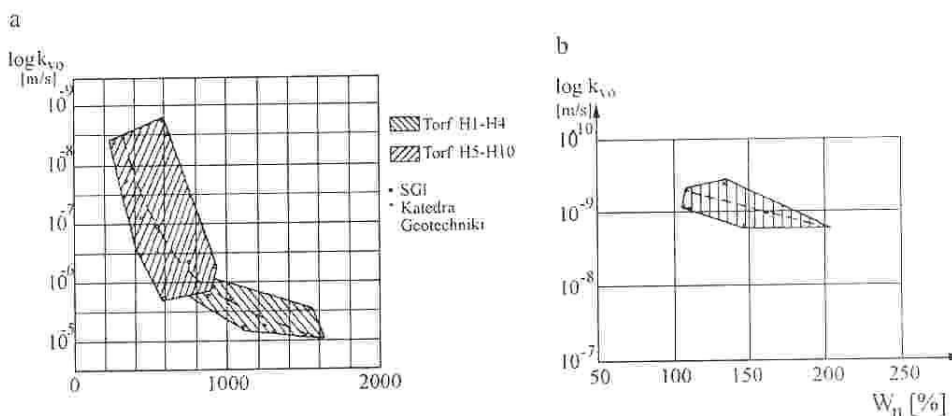
k_e – współczynnik filtracji przy odkształceniu ε ,
 k_o – początkowa wartość współczynnika filtracji,
 β_k – wskaźnik zmian przepuszczalności.

Charakterystykę tę można otrzymać jako wynik oceny empirycznej lub w wyniku pomiaru przeprowadzonego w laboratorium.

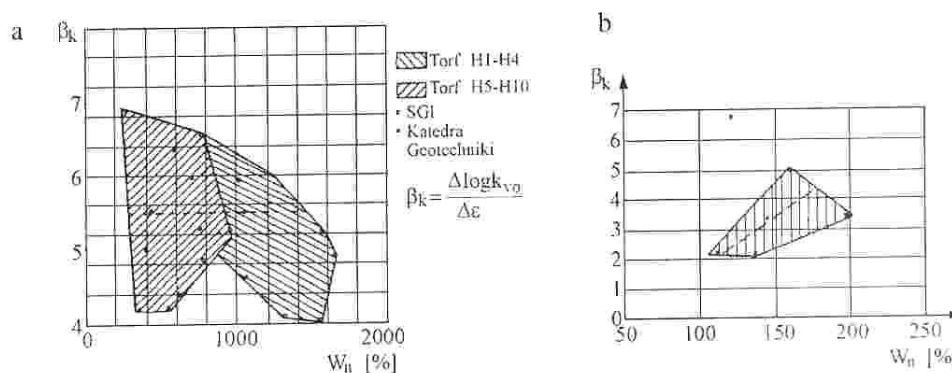
W praktyce, kiedy stosowane jest uproszczone rozwiązanie teorii konsolidacji, początkową przepuszczalność można określić z zależności empirycznych (Tavenas i in. 1983, Carlsten 1988). Zależności te, uzyskane dla badanych gruntów z obiektów doświadczalnych Katedry Geoinżynierii SGGW i Szwedzkiego Instytutu Geotechnicznego, przedstawiono na rysunku 4.49.

Analiza wskaźnika zmian przepuszczalności β_k przeprowadzona w gruntach organicznych (rys. 4.50) wykazuje brak wyraźnej zależności pomiędzy tym parametrem a wilgotnością naturalną gruntu.

Można jednak zauważyć, że wartości parametru β_k zmieniają się od 4 do 7 w przypadku torfu i od 2 do 5 w przypadku gytii. Zatem we wstępnej ocenie parametrów można przyjąć do obliczeń średnie wartości β_k , traktując je jako orientacyjne.



Rysunek 4.49. Zależność początkowego współczynnika filtracji k_{v0} od wilgotności naturalnej w_n : a – torfu; b – gytii (Szymański 1991)



Rysunek 4.50. Zależność parametru β_k od wilgotności naturalnej w_n : a – torfu; b – gytii (Szymański 1991)

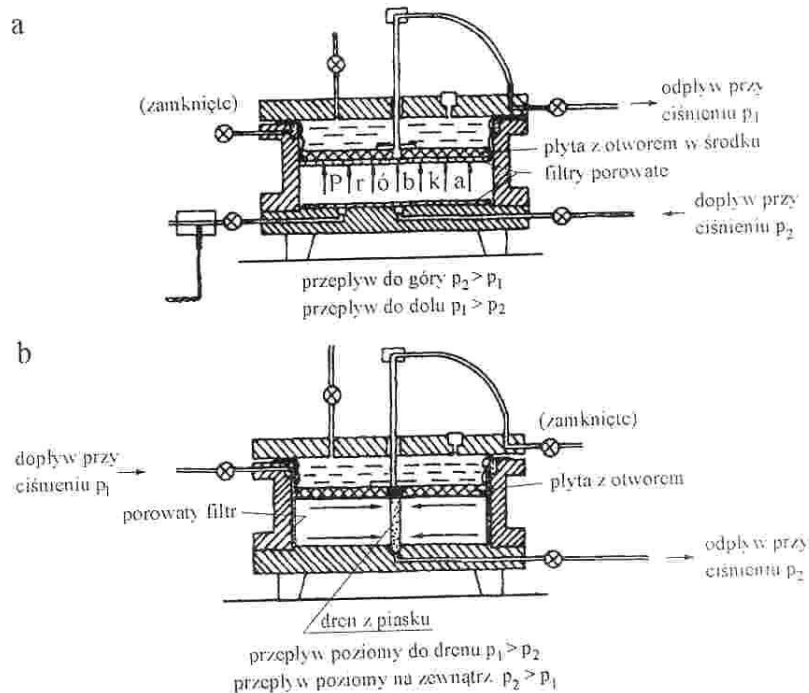
Przy doborze parametrów przepuszczalności należy również pamiętać, że podane zależności empiryczne opracowano na podstawie polowych i laboratoryjnych pomiarów dla określonego rodzaju gruntu, a więc mogą one służyć do prawidłowej prognozy przepuszczalności tylko określonego rodzaju podłoża gruntowego. Dlatego też stosowanie metod empirycznych do oceny parametrów obliczeniowych daje dość zawodne rezultaty. Aby tego uniknąć, przepuszczalność gruntu i jej zmienność w trakcie procesu odkształcenia można określać na podstawie badań laboratoryjnych.

Dobór procedury badawczej zależy głównie od przyjętej metody obliczeń projektowych i założonych warunków przepływu wody porowej w gruncie. Obliczenia przebiegu konsolidacji w podłożu pod nasypem wymagają określenia przepuszczalności pionowej k_v do oceny współczynnika konsolidacji

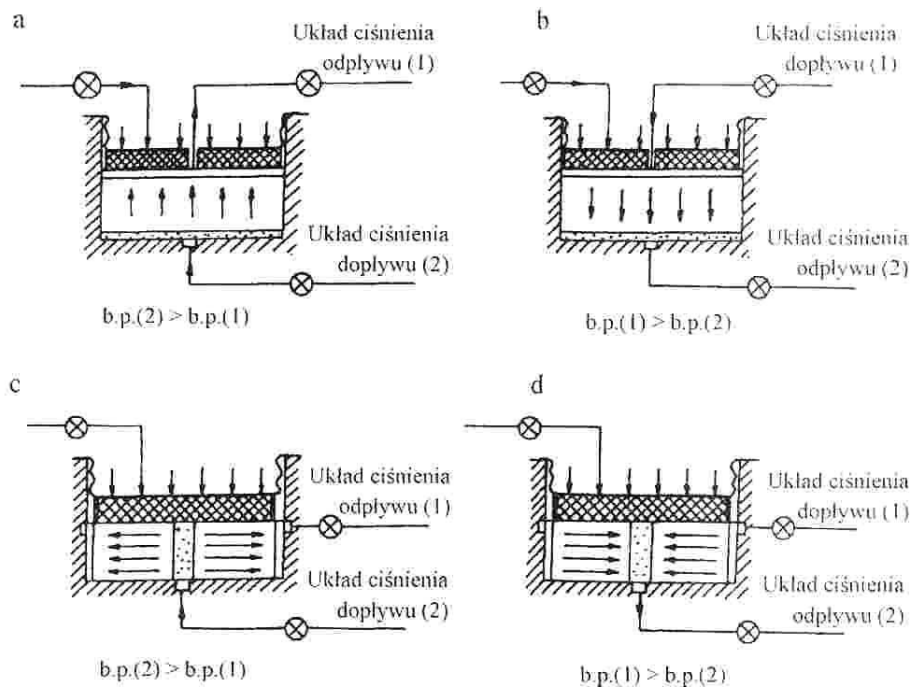
c_v ($c_v = k_v M / \gamma_w$) oraz przepuszczalności poziomej k_h do oceny współczynnika konsolidacji c_h ($c_h = k_h M / \gamma_w$) lub obu tych wartości, tj. k_h i k_v do bezpośredniej analizy konsolidacji. Wartości k_v i k_h określa się z pomiarów pionowej i poziomej przepuszczalności w badaniach edometrycznych typu IL. Sposób określania współczynnika filtracji pionowej na podstawie wyników badań edometrycznych zamieszczono w rozdziale 4.5.

Badania przepuszczalności w obu kierunkach mogą być wykonywane na próbkach NNS w komorze Rowe'a (rys. 4.51) (Rowe i Barden 1966) przy przepływie wody w kierunku pionowym (w górę i w dół) lub przy promieniowym przepływie poziomym (do wewnątrz i na zewnątrz). Badanie przepuszczalności przeprowadza się podczas badania konsolidacji IL przy końcu każdego etapu obciążenia. Badanie przepuszczalności w komorze Rowe'a może być wykonywane jedną z czterech różnych rodzajów procedur badawczych, umożliwiających przeprowadzenie pomiaru przepuszczalności (rys. 4.52):

- z przepływem wody pionowo w górę,
- z przepływem wody pionowo w dół,
- z przepływem wody poziomo na zewnątrz,
- z przepływem wody poziomo do wewnątrz.



Rysunek 4.51. Przystosowanie komory Rowe'a do badań przepuszczalności (Rowe i Barden 1966): a – przepływ pionowy; b – przepływ promieniowy



Rysunek 4.52. Warunki przepływu w badaniach przepuszczalności: a, b – przepływ pionowy; c, d – przepływ promieniowy (Head 1986)

Obliczenia przepuszczalności na podstawie badań przepływu w kierunku pionowym i poziomym wykonuje się dla każdego wymaganego odkształcenia na podstawie pomiarów przepływu wody i gradientu hydraulicznego. Przepuszczalność pionową określa się z zależności:

$$k_v = \frac{q}{Ai} \quad (4.43)$$

lub:

$$k_v = \frac{qH}{(A\Delta p)} \quad (4.44)$$

gdzie:

A – pole przekroju poprzecznego próbki,

i – gradient hydrauliczny,

q – przyrost objętości przepływu wody,

H – wysokość próbki,

Δp – różnica ciśnień wody na końcach próbki.

Przepuszczalność poziomą określa się z analizy promieniowego przepływu wody, który ma charakter osiowo-symetryczny. Współczynnik filtracji poziomej oblicza się z zależności:

$$k_h = \frac{q \rho_w g}{2\pi H \Delta p} \ln \left(\frac{D}{d} \right) \quad (4.45)$$

gdzie:

D – średnica próbki,

d – średnica drenu,

Δp – przyłożona różnica ciśnień wody w porach,

ρ_w – gęstość jednostkowa wody.

Określenie przepuszczalności w kierunku pionowym i poziomym umożliwia ocenę anizotropii przepuszczalności w podłożu gruntowym. Anizotropia przepuszczalności jest szczególnie obserwowana w torfach o niskim stopniu humifikacji. Mają one bardzo wysoką przepuszczalność poziomą k_h w porównaniu z pionową k_v . Różnica ta maleje wraz ze wzrastającym stopniem humifikacji i tak jak w jednorodnych gruntach staje się mało znacząca przy silnie rozłożonych torfach.