

Określanie przepuszczalności gruntów spoistych w badaniach konsolidacji z ciągłym przyrostem obciążenia

Paweł Dobak*



Evaluation of cohesive soils permeability by continuous loading consolidation tests. Prz. Geol., 55: 126–132.

S u m m a r y. Evaluation of permeability by direct methods involves very long laboratory procedures and leads to considerable differences in final results. Application of indirect methods based on consolidation analysis provides a faster solution. Analyses of laboratory conditions show that consolidation test with continuous loading (CL) depends significantly on the filtration factor. Proper interpretation of CL tests requires considering several parameters: steady phase of process, quasi-linear changes of the consolidation coefficient, saturation of pore space with water and optimization of the velocity test. The paper proposes practical criteria for the test analysis, leading to evaluation results consistent with theoretical solutions of the consolidation process.

Key words: consolidation, CL (continuous loading) tests, permeability, cohesive soils

Wyznaczanie parametrów przepuszczalności gruntów zaliczanych do spoistych jest niewdzięcznym zadaniem laboratoryjnym, a uzyskiwane rezultaty często są niejednoznaczne. W szerokiej klasie gruntów spoistych (zawartość frakcji ilowej > 10%) mieszczą się pyły zaliczane do gruntów półprzepuszczalnych, gliny określane jako słabo przepuszczalne oraz ły, które często traktuje się jako nieprzepuszczalne. Praktycznie jednak żaden ośrodek gruntowy nie jest w pełni szczelny, na co wskazują zarówno wyniki badań nad właściwościami izolacyjnymi barier geologicznych (Garbulewski, 2000; Łuczak-Wilamowska, 2002), jak i bilanse zasilania dużych jednostek hydrogeologicznych, takich jak oligoceński zbiornik mazowiecki (Macioszczyk, 1997). Oczywiście, przyczyny ograniczenia właściwości izolacyjnych w różnych zagadnieniach praktycznych są odmienne. W barierach gruntowych na składowiskach odpadów istotną rolę w zmianach parametrów filtracyjnych może odgrywać sposób formowania bariery, skład chemiczny odcieków itd. Natomiast właściwości naturalnych kompleksów izolacyjnych zbiorników wód podziemnych są znacząco modyfikowane przez cechy strukturalne, takie jak istniejące spękania masywu oraz litologiczne zmiany facjalne.

Filtracja wody w gruntach słabo przepuszczalnych

Fundamentalnym zagadnieniem jest odrębność fizyczna procesu filtracji w gruntach spoistych w stosunku do przepuszczalności w piaskach, dla których Darcy wprowadził w połowie XIX wieku klasyczne dziś pojęcia. Dlatego współczynnik filtracji (lub przepuszczalności), nadal stosowany jako podstawowy parametr, w badaniach gruntów spoistych wymaga podawania dodatkowych warunków, wynikających z wartości stosowanych spadków hydraulicznych.

Do uruchomienia przepływu fazy ciekłej w gruntach spoistych niezbędne jest przede wszystkim pokonanie początkowych oporów ośrodka gruntowego. Znalazło to odzwierciedlenie we wprowadzonym pojęciu tzw. wartości krytycznej spadku hydraulicznego I_0 , poniżej której przyjmuje się, że filtracja nie występuje. Poglądy w tej sprawie są zróżnicowane. Dla gruntów twardoplastycznych i pół-

zwartych najpierw arbitralnie przyjmowano wartość $I_0 = 10$ (Roza, 1950). Później wypracowano ogólną formułę powiązaną z wartością współczynnika filtracji k [m/s]:

$$I_0 = b / (k^{0.5}) \quad (1)$$

gdzie, przyjmując współczynnik empiryczny $b = 1,5 \cdot 10^{-4}$ [(m/s)^{0.5}] według Bondarenki (1973) lub dwukrotnie wyższy $b = 3 \cdot 10^{-4}$ [(m/s)^{0.5}] według Kovácsa (1981), uzyskuje się odpowiednio dla łąw wartości I_0 od 5 do 10, natomiast dla glin mniejsze od 1. Wiłun (2001) dla skonsolidowanej gliny zwięzłej przyjmował $I_0 = 5$.

Te stosunkowo wysokie wartości I_0 należy wiązać z koniecznością pokonania dużych początkowych oporów występujących na drodze filtracji na skutek skonsolidowanej struktury analizowanych gruntów, a także z niepełnym nasyceniem porów wodą. Natomiast w badaniach past kaolinowych, a więc ośrodka dwufazowego (woda-szkielet) o niezwiązany układzie strukturalnym, Ossowski (1985) uzyskał już bardzo znikome wartości I_0 , w przedziale od 0 do 0,1.

Konsekwencją istnienia omawianego oporu w przepływie wody w przestrzeni porowej gruntów spoistych jest prelinearna faza filtracji, w trakcie której prędkość przepływu wody, a zatem i wartość współczynnika filtracji, wzrasta krzywoliniowo w funkcji spadku hydraulicznego I , co można opisać następującą formułą (Macioszczyk & Szestakow, 1983):

$$v = 0,71 k \cdot (I - I_0)^{1,1} \cdot I_0^{-0,1} \quad (2)$$

Krzywoliniowa zależność była wyjaśniana przez badaczy różnymi efektami fizykochemicznymi, takimi jak: zmiany grubości związanej adhezyjnie warstewki wody gruntowej (Kovács, 1958) i jej nienuwtonowskimi właściwościami (Low, 1961), energią potrzebną do uruchomienia strumienia dyfuzyjnego (Hassenpatt i in., 1989) i elektrycznego, efektami elektrokinetycznymi i osmotycznymi oraz ich wzajemnymi oddziaływaniami (Michalak, 1985).

Przyjmuje się, że prelinearna część procesu występuje w przedziale inicjalnego spadku hydraulicznego od I_0 do $12 I_0$, następnie przechodzi w etap linearny, gdzie współczynnik filtracji powinien już być stały i niezależny od wartości naporu hydraulicznego.

Te fizyczne uwarunkowania filtracji w gruntach spoistych rzutują na uzyskiwane wartości współczynnika k i sprawiają, że wyniki badań przepuszczalności, prowadzonych

*Katedra Ochrony Środowiska i Zasobów Naturalnych, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; P.Dobak@uw.edu.pl

różnymi metodami, nie są w pełni porównywalne, a często nie są nawet zbliżone. Istotnym ograniczeniem metodycznym w określaniu przepuszczalności gruntów ilastych jest długotrwałość procesu filtracji, którą w różnych metodach badawczych skraca się poprzez modelowanie przepływu fazy ciekłej wzdłuż zredukowanej drogi drenażu lub stosowanie zwiększonego spadku hydraulicznego wymuszającego filtrację, co nie zawsze jest zgodne z rzeczywistością występującymi warunkami przepływu. W tej sytuacji istotny jest dobór metod i programów badań dostosowanych do wartości naporu hydraulicznego i ewentualnych prędkości ich zmian w rozpatrywanym zadaniu projektowym. Wymaga to często bardzo złożonego oprzyrządowania, spełnienia wielu warunków laboratoryjnych, a także zazwyczaj długotrwałego cyklu badawczego.

Badania konsolidacji

Na tym tle interpretacje przepuszczalności uzyskiwane w badaniach konsolidacji są szybką i ekonomiczną metodą szacowania współczynnika filtracji w szerokim przedziale zmian naprężenia i porowatości gruntu. Należy jednak zaznaczyć, że na podstawie tych badań określa się przepuszczalności gruntu metodą pośrednią, wynikającą z teorii konsolidacji filtracyjnej. Wyznaczanie współczynnika k powinno więc zależeć od oceny zgodności zachowania się gruntu z rozwiązaniami teoretycznymi, którą przeprowadza się na podstawie analizy przebiegu odkształcenia gruntu i dystrybucji ciśnienia porowego.

W dalszych rozważaniach ograniczymy się do konsolidacji jednoosiowej, jako najczęściej analizowanej i pozwalającej na uzyskiwanie wyników obarczonych mniejszą zmiennością i niepewnością oznaczeń niż w przypadku badań trójosiowych.

W prowadzonych w większości laboratoriów badaniach konsolidacji stosuje się dwa systemy zadawania obciążenia: IL (*incremental loading* — stopniowy przyrost obciążenia) oraz CL (*continuous loading* — ciągły przyrost obciążenia).

System IL polega na stopniowym zwiększaniu obciążenia i obserwacji przebiegu odkształcenia gruntu aż do pełnej lub umownej stabilizacji. Ten tradycyjny schemat (nazywany badaniami edometrycznymi) wymaga długotrwałego, nieraz kilkudniowego oczekiwania na zakończenie osiadania próbki. W badaniach konsolidacji systemem IL trudno jest uzyskać miarodajne wyniki zarówno konsolidacji filtracyjnej, jak i w konsekwencji współczynnika filtracji. Najczęściej bowiem nie uzyskuje się zgodności przebiegu osiadania z założeniami teorii konsolidacji filtracyjnej, co wynika ze znacznego udziału czynnika pełzania szkieletu gruntowego i nie jest odpowiednio odwzorowane w klasycznych równaniach teorii konsolidacji filtracyjnej. Wydzielenie wyłącznie składowej filtracyjnej wymaga albo zastosowania specjalnych, opartych na dodatkowych założeniach metod interpretacji (Dobak, 2000), albo prowadzenia badań z pomiarem ciśnienia porowego (np. w edometrze Rowe'a).

W tej sytuacji należy rekomendować metodę badań CL, w której obciążenie wzrasta w sposób ciągły, przy czym stosuje się kilka wariantów sterowania przebiegiem badania, przyjmując na przykład stałą prędkość obciążenia (tzw. CRL — *constant rate of loading*), stałą prędkość odkształcenia (tzw. CRS — *constant rate of strain*), utrzymywanie kontrolowanego gradientu ciśnienia porowego w trakcie badania (tzw. CG — *controlled gradient of pore water pressure*) oraz inne schematy pośrednie. Zaletą

badania CL jest nie tylko krótkotrwałość procedury laboratoryjnej (rzędu kilku godzin), ale także silnie zaznaczony udział filtracji w przebiegu procesu. W badaniach CL nie oczekujemy bowiem na rozproszenie ciśnienia porowego, lecz w warunkach stale rosnącego obciążenia zewnętrznego uzyskujemy coraz wyższe wartości ciśnienia porowego, a w ślad za tym znacznie wyższy spadek hydrauliczny aniżeli w wyżej omawianej fazie prelinearnej.

Typ pól przepływu i konsolidacja infiltracyjna

Przepływ wody w gruncie jest opisywany jako pole wektorowe o kierunkach i zwrotach wyznaczonych przez prędkość przepływu \vec{v} . Iloczyn skalarny $(\nabla \cdot \vec{v})$ operatora ∇ i wektora prędkości \vec{v} natomiast jest polem skalarnym, nazywanym dywergencją pola wektorowego \vec{v} . Wielkość ta umożliwia ocenę istnienia źródeł pola. Gdy $\text{div } \vec{v} = 0$ pole jest bezźródłowe, gdy $\text{div } \vec{v} \neq 0$ pole nie jest bezźródłowe (Glazer, 1985). Ten teoretyczny opis znajduje odzwierciedlenie w różnych warunkach filtracji. W klasycznych badaniach permeametrycznych przepływ fazy ciekłej wymusza się z zewnątrz ciśnieniem wody, jest on więc bezźródłowy tzn. przepływająca woda jest uzupełniana spoza analizowanego ośrodka gruntowego.

Tak zainicjowany przepływ wody jest nośnikiem energii zużywanej w pewnej części na przebudowę struktury szkieletu, prowadzącą do zmniejszenia porowatości gruntu, a w ślad za tym wyciskania pewnej ilości wody znajdującej się w przestrzeni porowej. Przepływ zaczyna być mieszany — bezźródłowy-źródłowy, co wyraża się we włączeniu tzw. konsolidacji infiltracyjnej. Jej efekty, w badaniach z wymuszonym przepływem oraz z obniżonym naporem hydraulicznym, były analizowane przez Pane'a i in. (1983). Z kolei Ossowski (1985), badając pasty kaolinowe obciążane naporem trzymetrowego słupa wody (spadek hydrauliczny $I = 30$), uzyskał odkształcenia infiltracyjne rzędu 80% wartości osiadań spowodowanych działaniem obciążenia zewnętrznego przekazywanego gruntowi przez tłok.

Wraz z postępującą konsolidacją gruntu wpływ efektów infiltracyjnych się zmniejsza. Wyniki badań prowadzonych na Uniwersytecie Warszawskim w zespole Z. Glazera pokazały jednak, że grunty z podłoża elektrowni Bełchatów, po zakończeniu osiadania pod obciążeniem 800 kPa, ulegały dalszemu odkształceniu osiowym, gdy zastosowano dodatkowo podciśnienie 50 kPa. Takie podciśnienie, w próbkach około 2 cm wysokości, odpowiada bardzo dużemu spadkowi hydraulicznemu (I rzędu 200). Dodatkowe odkształcenia, wynikające z wymuszonej w ten sposób konsolidacji infiltracyjnej, wynosiły w glinie zwałowej 0,1% wysokości próbki, a w utworach organicznych, takich jak namuły i ziemiste węgle brunatne — od 0,3 do 1%.

Podsumowując wyniki tych obserwacji, należy stwierdzić, że przepływ wody w próbce powoduje częściowe wyciskanie wody z przestrzeni porowej zagęszczonego ośrodka gruntowego. Pole przepływu jest więc kształtowane przez dwie składowe: bezźródłową (woda dostarczana z zewnątrz) i źródłową (woda występująca przed rozpoczęciem procesu w porach gruntu).

W klasycznych badaniach konsolidacji uruchamiany jest tylko drenaż wód porowych, a obszar źródłowy przepływu obejmuje w różnym stopniu cały konsolidowany ośrodek gruntowy. Uzyskiwane w badaniach CL ciśnienie porowe wzrasta od bardzo małych wartości do kilkudziesięciu, kilkuset kPa.

Zastosowanie w badaniach konsolidometrycznych (CL) krótkiej drogi drenażu (rzędu 2 cm) powoduje, że do uruchomienia procesu filtracji i przejścia przez początkowe, nieliniowe fazy są wymagane niewielkie wartości ciśnienia porowego, niekiedy poniżej granicy dokładności pomiarów. Zagadnienie to zilustrowano przykładowym oszacowaniem granicznego spadku hydraulicznego i odpowiadającego mu ciśnienia porowego (tab. 1). W praktyce więc wyniki badań konsolidometrycznych są interpretowane w obszarze poza wstępnym, inicjującym proces filtracji spadkiem hydraulicznym i powinny odwzorowywać zaawansowany proces filtracji.

$\Delta\sigma$ — przyrost naprężenia całkowitego [kPa],
 $\Delta\sigma'$ — przyrost naprężenia czynnego (efektywnego) [kPa],
 H_{i-1}, H_i — długość drogi drenażu (wysokość próbki), odpowiednio na początku i na końcu analizowanego przedziału naprężenia [m],

Δt — czas, w którym nastąpił przyrost naprężenia $\Delta\sigma$ [s],
 u_b — ciśnienie wody w porach gruntu mierzone u podstawy próbki (w ukierunkowanych warunkach drenażu od podstawy ku górze) [kPa].

Przedziały, w których interpretuje się przyrosty naprężenia i odkształcenia, są dobierane dowolnie. Niekiedy w celach porównawczych nawiązuje się do przedziałów

Tab. 1. Wartości ciśnienia porowego w badaniach CL odpowiadające granicznemu spadkowi hydraulicznemu I_{gr} przyjmowanemu w fazie prelinearnej

Table 1. Values of pore water pressure corresponding to hydraulic gradient I_{gr} limited prelinear phase in CL tests

Oszacowanie początkowego spadku hydraulicznego I_0 wg: <i>Estimate of initial gradient I_0 by:</i>	Rodzaj ośrodka gruntowego <i>Types of soils</i>	Spadek hydrauliczny <i>Hydraulic gradient [-]</i>		Ciśnienie porowe odpowiadające spadkowi hydraulicznemu: <i>Pore water pressure corresponds to gradient: [kPa]</i>	
		I_0	$I_{gr} = 12 I_0$	I_0	$I_{gr} = 12 I_0$
Rozy (1950) <i>Roza (1950)</i>	Gliny twardoplastyczne i półzwarte <i>Stiff soils</i>	10	120	2	24
Wiłuna (2001) <i>Wilun (2001)</i>	Gliny pylaste skonsolidowane <i>Consolidated clays</i>	5	60	1	12
Bondarenki (1973) <i>Bondarenko (1973)</i>	Grunty spoiste: <i>Cohesive soils:</i> $k = 10^{-9}$ m/s	4,7	57	0,9	11
	$k = 10^{-8}$ m/s	1,5	18	0,3	4
	$k = 10^{-7}$ m/s	0,5	6	0,1	1
Kovacs (1981) <i>Kovacs (1981)</i>	Grunty spoiste: <i>Cohesive soils</i> $k = 10^{-9}$ m/s	9,6	115	1,9	23
	$k = 10^{-8}$ m/s	3,0	36	0,6	7
	$k = 10^{-7}$ m/s	0,9	11	0,2	2
Ossowskiego (1985) <i>Ossowski (1985)</i>	Pasty kaolinitowe <i>Kaolinite remoulded clays</i>	0,1	1,2	0,02	0,24

Określanie współczynnika filtracji w badaniach CL

Zgodnie z założeniami teorii konsolidacji współczynnik filtracji k jest powiązany z parametrami charakteryzującymi przebieg odkształcenia gruntu następującą zależnością:

$$k = c_v \cdot \gamma_w / Mo \quad (3)$$

gdzie:

c_v — współczynnik konsolidacji [m^2/s],

Mo — moduł ściśliwości [kPa],

γ_w — ciężar objętościowy cieczy (wody) w przestrzeni porowej [kN/m^3].

Powyższe parametry oblicza się na podstawie następujących wzorów:

$$c_v = \Delta\sigma \cdot H_i / 2 u_b \cdot \Delta t \quad (4)$$

$$Mo = \Delta\sigma' \cdot H_{i-1} / (H_{i-1} - H_i) \quad (5)$$

$$\sigma' = \sigma \cdot 2 u_b / 3 \quad (6)$$

gdzie:

stosowanych w tradycyjnych badaniach typu IL. Ogólnie jednak jest wskazany taki dobór szerokości przedziałów, by odzwierciedlał zmiany zasadniczych wielkości (naprężenia, odkształcenia, ciśnienia porowego) w przebiegu badania. W praktyce zazwyczaj prowadzi się obliczenia w przedziałach wyznaczanych przez kolejne odczyty podstawowych wielkości, wykonywane np. co 2 min lub 5 min, przy przeciętnie stosowanej prędkości obciążenia rzędu 0,1–1 kPa/s. W badaniach konsolidometrycznych z użyciem zespołu napędowego i systemów pomiarowych stosowanych w aparatach trójosiowych przeciętne błędy oznaczeń współczynnika konsolidacji są rzędu kilku, kilkunastu procent (Dobak, 1984).

Należy podkreślić, że stosowanie bardzo częstych odczytów, np. w systemach z automatycznym zapisem, prowadzi do wyeksponowania efektów wnioskujących z drobnych błędów aparatury. Jest to szczególnie niekorzystne w przypadku dalszych interpretacji z użyciem formuł obliczeniowych zawierających elementy różnicowe ($\Delta\sigma$, Δt). Uzyskuje się wtedy znaczny rozrzut wyników. Wymagane jest wówczas przybliżanie przebiegu zmian wielkości podstawowych funkcjami, co niepotrzebnie wydłuża (a niekiedy zniekształca) interpretację wyników badań.

Kryteria miarodajności wyników oznaczeń parametrów filtracji w badaniach konsolidacji CL

Oznaczanie parametrów filtracji na podstawie badań CL jest metodą pośrednią, opartą na założeniach teorii konsolidacji. W interpretowaniu wyników głównym zagadnieniem jest więc porównanie zachowania się gruntów z założeniami teoretycznymi. W tym celu określa się zmiany 3 parametrów: współczynnika konsolidacji c_v , ciśnienia porowego u_b oraz tzw. bezwymiarowego parametru ciśnienia wody w porach, oznaczonego w badaniach konsolidometrycznych CL jako:

$$C_{CL} = u_b / \sigma \quad (7)$$

Określanie ustalonej fazy badania

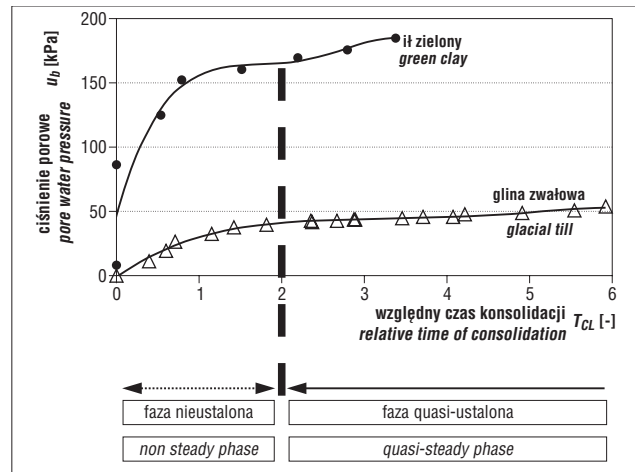
Analiza przebiegu zmian C_{CL} i c_v pozwala na wyróżnienie w badaniu CL dwóch faz: początkowej — niestabilnej — oraz zaawansowanej — ustalonej. Prawidłowe wyznaczenie fazy ustalonej konsolidacji CL ma bardzo duże znaczenie, gdyż, jak podkreślają różni badacze (Wissa i in, 1971; Vu Cao Minh, 1976; Glazer & Dobak, 1979), dopiero w tej fazie uzyskuje się miarodajne parametry konsolidacyjne badanego gruntu.

Osiągnięcie fazy ustalonej wiąże się z przyrostem ciśnienia porowego w trakcie badania. W tzw. niestabilnej fazie badania, w warunkach obciążenia wzrastającego ze stałą prędkością i przy założeniu niezmiennych właściwości filtracyjnych gruntu, ciśnienie porowe u_b mierzone u podstawy próbki powinno wzrastać. Wejście w ustaloną fazę badania zaznacza się ustabilizowaniem wartości ciśnienia porowego, które pomimo ciągle wzrastającego obciążenia nie powinno się zwiększać. Dzieje się tak, gdyż nowe przyrosty $\Delta u_{b, stab}$ w pełni zastępują rozproszone składowe przyrosty Δu_b , będące rezultatem wcześniej przykładanego, stale wzrastającego obciążenia. To swoiste przesunięcie czasowe efektów przyrostu obciążenia w wartościach ciśnienia wody jest teoretycznie dokładnie określone (Dobak, 1999), gdy tzw. względny czas konsolidacji CL, oznaczony dalej jako T_{CL} , osiąga wartość 2, przy czym ten nowo wprowadzony, bezwymiarowy parametr wyznacza się z zależności:

$$T_{CL} = (t_{CL} \cdot c_v) / H^2 \quad (8)$$

gdzie t_{CL} oznacza czas, jaki upłynął od początku badania CL.

W prowadzonych badaniach laboratoryjnych nie rejestruje się jednak zazwyczaj pełnej stabilizacji ciśnienia porowego (ryc. 1). W wielu przypadkach w zaawansowanych etapach badania uzyskuje się jedynie zmniejszenie wartości przyrostów $\Delta u_b / \Delta \sigma$. Często, szczególnie w słabo przepuszczalnych ilach, tempo przyrostu ciśnienia porowego wzrasta w trakcie badania. Takiej reakcji ośrodka gruntowego nie można jednak utożsamiać z nieosiągnięciem ustalonej fazy badania, nierealistyczne jest bowiem założenie, że grunt w trakcie badania nie zmniejsza swojej przepuszczalności. Brak pełnej stabilizacji wartości ciśnienia porowego w fazie ustalonej może więc być spowodowany słabnięciem filtracji (zmniejszeniem efektywnej wielkości porów na skutek postępującego odkształcenia gruntu lub dławienia przepływu przy wyższym ciśnieniu wody w porach). Utrzymywanie wzrostu ciśnienia porowego występuje także w przypadku rosnącego tempa przyrostu



Ryc. 1. Określanie quasi-ustalonej fazy w badaniach CL
Fig. 1. The evaluation of quasi-steady phase for CL tests

naprężenia. Taki stan występuje najczęściej w badaniach konsolidometrycznych prowadzonych z zaadaptowaniem elementów konstrukcyjnych aparatu trójosiowego. Stała prędkość ruchu zespołu napędowego rozkłada się bowiem na dwie składowe przemieszczenia: odkształceń jednoosiowych gruntu oraz odkształceń dynamometru opartego o sztywną ramę. Wraz ze zmniejszeniem odkształcalności gruntu proporcjonalnie wzrasta bowiem prędkość odkształcenia dynamometru. Uzyskuje się wówczas model badania z rosnącą prędkością obciążenia. W sytuacji braku stabilizacji ciśnienia porowego kryterium wstępnym osiągnięcia fazy ustalonej jest $T_{CL} > 2$.

Poprawę miarodajności współczynnika filtracji określonego dla etapu, w którym ciśnienie porowe wzrasta, można uzyskać poprzez zastosowanie poprawki według Janbu i in. (1981). Gdy wzrost ciśnienia porowego określa się jako współczynnik λ :

$$\lambda = \Delta u_b / \Delta \sigma \quad (9)$$

wówczas obliczamy parametr

$$a_j = \ar \cosh [1 / (1 - \lambda)] \quad (10)$$

a następnie współczynnik korekcyjny

$$\alpha_k = [2 \cosh (a_j) - 1] / [a_j \sinh (a_j)] \quad (11)$$

Skorygowaną według propozycji Janbu i in. (1981) wartość współczynnika filtracji k_j wyznacza się, wykorzystując poprzednio uzyskaną według (3) wartość k :

$$k_j = \alpha_k \cdot k \quad (12)$$

Ponieważ wartości α_k mieszczą się przedziale od 0 do 1, więc współczynniki filtracji uzyskane na podstawie wzoru (12) są odpowiednio mniejsze od uzyskiwanych według podstawowego wyrażenia (3).

Quasi-liniowe zmiany parametrów konsolidacyjno-filtracyjnych

Istotnym elementem określania miarodajności wyników badania konsolidometrycznego jest analiza zależności $c_v = f(\sigma)$ lub $c_v = f(t_{CL})$. Rozpatrując wzór (4), zauważamy, że gdy prędkość obciążenia zmienia się nieznacznie,

a zmniejszenie długości drogi drenażu jest rzędu kilku procent, wartość c_v zmienia się przede wszystkim na skutek rosnącego ciśnienia porowego. Zależności $c_v = f(u_b)$, ale także $c_v = f(t_{CL})$ oraz $c_v = f(\sigma)$ są hiperboliczne, a wartości c_v początkowo szybko się zmniejszają, by dopiero w zaawansowanym etapie badania przejść w pozornie prostoliniowy odcinek asymptotycznie zmierzający do poziomej osi wykresu u_b lub t_{CL} albo σ . Na tym właśnie odcinku uzyskuje się miarodajne pod względem fizycznym parametry zarówno konsolidacji, jak i przepuszczalności, gdyż wykres zmian współczynnika filtracji k , wyznaczanego w przebiegu badań konsolidometrycznych, również jest hiperboliczny (ryc. 2). Warto zwrócić uwagę, że początek prawie liniowych zależności $c_v = f(\sigma)$ oraz $k = f(\sigma)$ nie zawsze jest skorelowany z wejściem w fazę ustaloną. Natomiast w interpretowaniu wyników badań jest wskazane łączne spełnienie warunku ustalonego etapu procesu oraz quasi-liniowej zmienności c_v lub k . W przypadku badania, w którym T_{CL} nie osiąga wartości 2 należy podczas interpretowania współczynnika k odwoływać się do poprawek zaproponowanych przez Janbu i in. (1981). Ogólnie poprawki te dotyczą wszystkich sytuacji, w których ciśnienie porowe nie stabilizuje się, a więc, gdy $\Delta u_b / \Delta \sigma > 0$.

Układ dwufazowy: szkielet gruntowy-woda

Trzecim czynnikiem, który musi być analizowany w trakcie badań konsolidacyjnych, jest problem dwufazowości ośrodka gruntowego w warunkach pełnego lub prawie pełnego nasycenia porów wodą. Metodą diagnozy wejścia w etap dwufazowego układu gruntu może być porównanie teoretycznego rozkładu parametru ciśnienia wody w po-

rach w postaci wykresu $C_{CL} = f(T_{CL})$ z przebiegiem doświadczalnym.

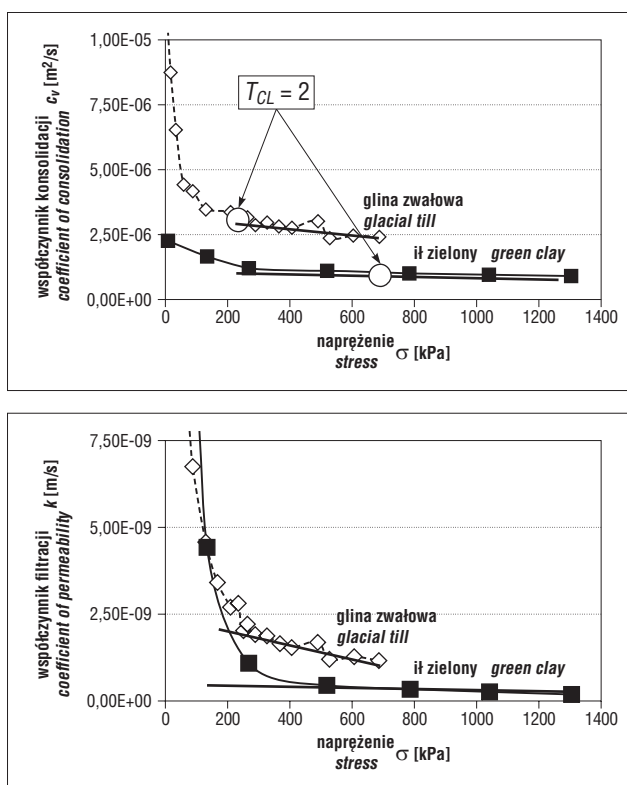
Obliczenia prowadzone dla różnych wariantów badań konsolidometrycznych wykazały (Dobak, 1999), że wykres $C_{CL} = f(T_{CL})$ zależy wyłącznie od sposobu obciążania gruntu. W sytuacji, gdy program obciążenia można opisać funkcją potęgową $\sigma = a \cdot t^n$, przebieg rozkładu $C_{CL} = f(T_{CL})$ zależy wyłącznie od wartości wykładnika potęgowego n (ryc. 3). Wszystkim badaniom typu CRL odpowiada zatem wartość $n = 1$ oraz jeden teoretyczny wykres $C_{CL} = f(T_{CL})$. Badaniom, w których prędkość obciążenia wzrasta ($n > 1$), rozkład $C_{CL} = f(T_{CL})$ można w przybliżeniu dobrać na podstawie rodziny krzywych teoretycznych (Dobak, 1999) lub obliczyć według algorytmu dostosowanego do możliwości arkusza kalkulacyjnego Excel.

Wspólnym początkiem wszystkich teoretycznych wykresów jest punkt o współrzędnych $C_{CL} = 1$, $T_{CL} = 0$. Od tego punktu, zgodnie z założeniami teorii konsolidacji, bezpośrednio po przyłożeniu obciążenia jest ono w całości przenoszone przez fazę ciekłą (wodę).

Badania CL zazwyczaj są prowadzone w gruntach, w których przestrzeń porowa początkowo nie jest w pełni nasycona wodą i stopień wilgotności $S_r < 1$. Dopiero w trakcie pionowego odkształcania próbki następuje zmniejszenie wielkości przestrzeni porowej, redukcja fazy gazowej oraz uruchomienie drenażu wód porowych. Stąd w praktyce nieczęsto się zdarza, że wartość początkowa $C_{CL} = 1$. Na ogół początkowe CL jest mniejsze od 1, dalej stopniowo wzrasta, co odpowiada fazie względnego zwiększania stopnia wilgotności gruntu, a dopiero później przechodzi w etap zmniejszania wartości C_{CL} , odpowiednio do wykresu teoretycznego. Wtedy też dopiero grunt zachowuje się zgodnie lub prawie zgodnie z rozwiązaniami teorii na tym etapie można wyznaczać miarodajne wartości współczynników: konsolidacji oraz filtracji.

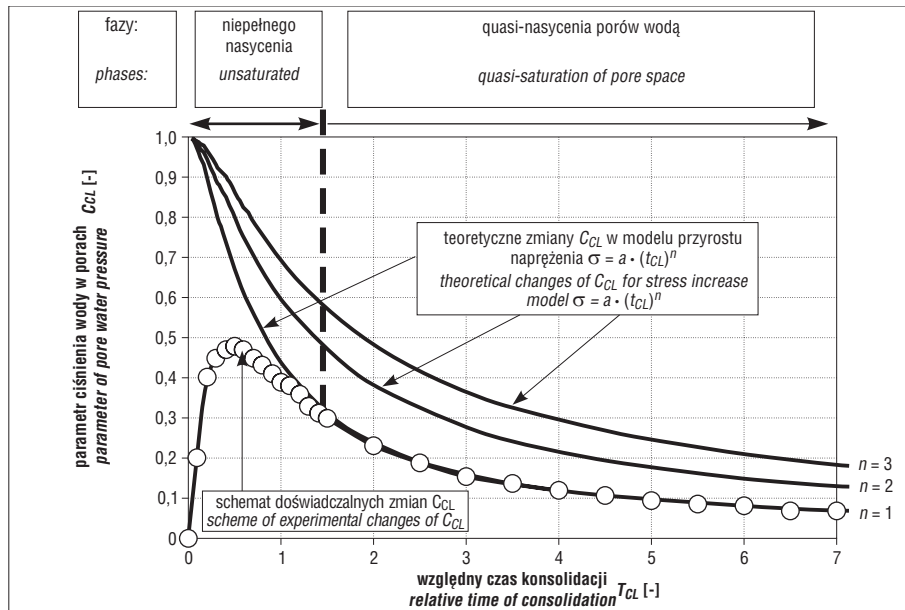
Recesja zaawansowania konsolidacji CL i dławienie przepływu wody

Innym objawem wskazującym na pewną niezgodność z założeniami teoretycznymi może być zjawisko recesji zaawansowania konsolidacji w warunkach obciążania systemem CL. Klasyczny opis konsolidacji zakłada rozpraszanie ciśnienia porowego w czasie. Taki model jest jednak związany z konsolidacją pod stałym obciążeniem (badania IL). W przypadku, gdy obciążenie stale wzrasta, obserwuje się zmniejszanie parametru C_{CL} , gdyż przepuszczalność gruntu jest na tyle duża, że pozwala na rozpraszanie ciągle wymuszanego przyrostu ciśnienia wody w porach. W badaniach CL w trakcie ściskania próbki znacząco się zmniejsza wielkość porów, a w ślad za tym możliwości filtracyjne gruntu. Stąd w badaniach CL obserwuje się niekiedy początkowy spadek wartości C_{CL} zgodny z modelowym przebiegiem procesu, później jednak ciśnienie porowe wzrasta na tyle, że punkty doświadczalne na teoretycznym rozkładzie $C_{CL} = f(T_{CL})$ będą powracać wzdłuż linii teoretycznej (ryc. 3). Obserwuje się więc zjawisko swoistej recesji zaawansowania konsolidacji. Takie efekty mogą występować w warunkach szybkiego obciążania ośrodka gruntowego i dopiero po zaprzestaniu przykładania obciążenia przechodzi się do fazy rozpraszania ciśnienia porowego. Występowanie recesji wiąże się z odpowiednio dużą prędkością obciążenia. Jej zastosowanie może jednak być uzasadnione, jeśli wynika z analizy ścieżki prędkości obciążenia, dostosowanej do realnych warunków konsoli-



Ryc. 2. Określenie zakresu quasi-liniowej zmiany parametrów konsolidacyjnych i filtracyjnych

Fig. 2. The evaluation of quasi-linear range in changes of consolidation and permeability parameters

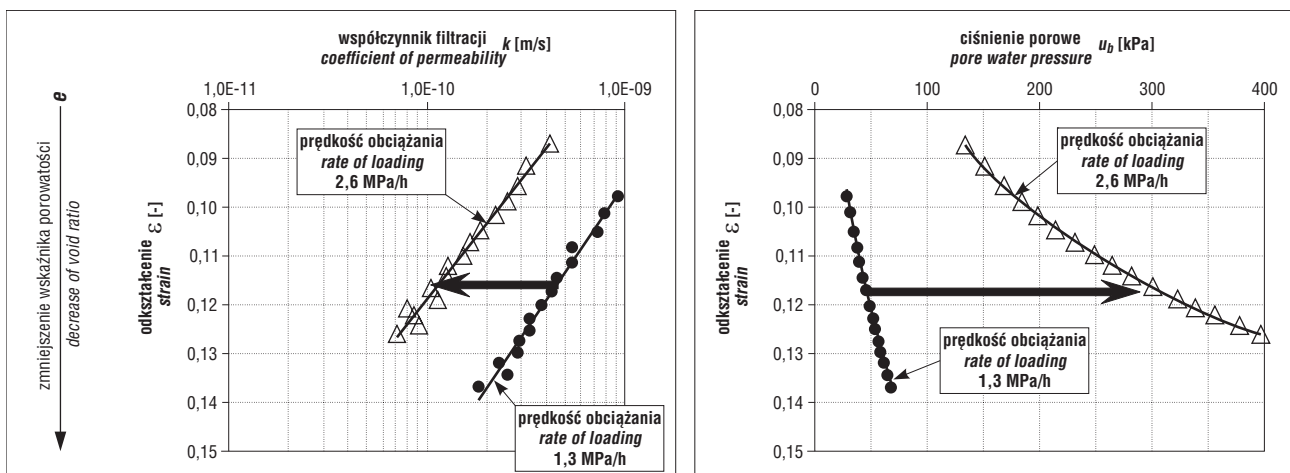


Ryc. 3. Schemat wyznaczenia zakresu niepełnego nasycenia porów wodą na podstawie porównania zmian C_{CL}

Fig. 3. Scheme of evaluation of non-saturation range in CL tests based upon the comparison of changes in C_{CL}

dacji masywu gruntowego (Dobak, 1995, 1999, 2003). Należy jednak pamiętać, że w przypadku występowania recesji uzyskujemy zaniżone wartości współczynnika filtracji, co może np. prowadzić do zbyt optymistycznych ocen właściwości izolacyjnych gruntu. Dodatkowym czynnikiem, który zaniża wartości współczynnika filtracji, może być obserwowane w niektórych badaniach zjawisko dławienia przepływu (kontrakcji) wody występującej pod dużym ciśnieniem w przestrzeni porowej. Na rycinie 4 zilustrowano sytuację, w której w badaniach ciemnych iłów neogeńskich z Bełchatowa (tzw. kompleks ilasto-węglowy) zastosowano różną prędkość przyrostu obciążenia. W rezultacie podczas szybkiego obciążania uzyskano na tyle duże wartości ciśnienia porowego, że odzwierciedliło się to w wynikach oznaczeń efektywnej przepuszczalności gruntu. W porównywalnych odkształceniach (i skorelowa-

nych z nimi wskaźnikami porowatości) około 5-krotnie wyższe ciśnienie porowe skutkuje uzyskaniem ponad 3-krotnie niższych wartości współczynnika filtracji. Wynikać to może z dławienia przepływu wody w warunkach występowania podwyższonego ciśnienia w przestrzeni porowej. Zastosowanie mniejszej prędkości przyrostu obciążenia zmniejsza te efekty. Należy jednak stwierdzić, że do uzyskania miarodajnych ocen właściwości filtracyjnych gruntu jest wskazane stosowanie na tyle dużej prędkości obciążenia, by szybko mobilizować ciśnienie porowe (zbliżone do teoretycznie oczekiwanych wartości C_{CL}). Jednocześnie, w miarę możliwości, nie należy doprowadzać do powstawania zjawiska recesji zaawansowania procesu konsolidacji oraz niekorzystnych efektów wynikających z hydraulicznego dławienia drenażu wód porowych. Ocenę tych uwarunkowań umożliwia analiza zależności $C_{CL} = f(T_{CL})$.



Ryc. 4. Zmniejszenie współczynnika filtracji na skutek dławienia przepływu przy zwiększeniu ciśnienia porowego (badania CL ciemnych iłów neogeńskich z KWB „Bełchatów”)

Fig. 4. Decrease of permeability coefficient caused by contraction of flow during increased pore pressure conditions (CL test of Neogene dark clays from lignite mine "Bełchatów")

Wnioski

1. Do oceny przepuszczalności gruntów spoistych na podstawie przebiegu konsolidacji należy rekomendować przede wszystkim metodę badań z ciągłym wzrostem obciążenia (CL), gdyż udział filtracji jest tam najsilniej zaznaczony i najłatwiejszy do bezpośredniej obserwacji. Zaletą tych badań jest szybkość ich przeprowadzania i możliwość programowania warunków brzegowych (naprężenia, odkształcenia, ciśnienia porowego w funkcji czasu).

2. Określanie współczynnika filtracji k w badaniach CL wymaga przeprowadzenia krytycznej oceny ich przebiegu. Taka analiza jest niezbędna w ocenie poprawności uzyskiwanych wyników, a także służy zmniejszeniu zmienności wartości k , która jest powszechnym utrapieniem w oznaczeniach permeometrycznych. Do uzyskania miarodajnych wartości k należy wyznaczyć fazę badania, w której są spełnione warunki:

□ pełnego nasycenia (lub quasi-nasycenia) konsolidowanego gruntu;

□ ustabilizowanych wartości współczynnika konsolidacji c_v , tylko nieznacznie się zmniejszających wraz z postępującym badaniem;

□ wejścia badania CL w fazę ustaloną.

3. Program badań, w których wyznacza się parametry konsolidacyjno-filtracyjne gruntu a także określa naprężenia i odkształcenia, musi nawiązywać do warunków, w jakich będą występowały analizowane grunty (w masywie, barierze izolacyjnej). Prędkość obciążenia w badaniu CL powinna być tak dobrana, by:

□ osiągnąć fazę quasi-liniową zmiany parametrów konsolidacyjnych i filtracyjnych badania w przedziale naprężeń i odkształceń odpowiadających warunkom terenowym;

□ uzyskać ciśnienie porowe wystarczające do określenia c_v ;

□ unikać dużego gradientu przyrostu ciśnienia porowego, który może powodować zjawisko recesji zaawansowania konsolidacji w warunkach ciągłego wzrostu obciążenia oraz efekty dławienia przepływu wody w przestrzeni porowej.

Zaleca się, by w gruntach bardzo spoistych stosować możliwie małe prędkości obciążenia. W gruntach o większej przepuszczalności niezbędne jest stosowanie większej prędkości obciążenia, pozwalającej na uzyskanie koniecznej do dalszej interpretacji nadwyżki szybko rozpraszającego się ciśnienia porowego.

4. W badaniach CL zawyżenie wartości współczynnika filtracji może występować:

□ we wczesnym (nieustalonym) etapie badania;

□ przy niepełnym nasyceniu przestrzeni porowej;

□ przy zbyt małej prędkości obciążenia, która nie wytwarza odpowiedniego udziału fazy ciekłej w przebiegu konsolidacji.

Z kolei zaniżanie szacowanych wartości k w badaniach CL może być związane ze zbyt dużą prędkością badania, powodującą znaczny wzrost ciśnienia porowego i w efekcie dławienie przepływu (szczególnie w gruntach bardzo spoistych).

5. Do uzyskiwania parametrów filtracyjnych z początkowego, nieustalonego etapu badań CL zaleca się stosowanie specjalnych wzorów (Janbu i in., 1981) lub procedur korekcyjnych (Dobak, 1999). Określanie

współczynnika filtracji gruntów nie w pełni nasyconych wodą będzie wymagać adaptacji dotychczasowych osiągnięć mechaniki gruntów nienasyconych (Fredlund & Rahardjo, 1993) do warunków badań CL — przede wszystkim pomiaru ciśnienia wody oraz gazu w przestrzeni porowej konsolidowanego gruntu.

Literatura

- BONDARENKO N.F. 1973 — Fizika dźwignia podziemnych wod. Gidrometizdat. Leningrad.
- DOBĄK P. 1984 — Problemy oceny jednorodności ośrodka gruntowego na podstawie zmienności wybranych parametrów geotechnicznych. Pr. Nauk. Inst. Geotech. PWR, 44; seria Konf., 17: 23–30.
- DOBĄK P. 1995 — Filtration factor in the consolidation process. Proc. XI European Congress of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Kopenhaga, 3: 3.49–3.54.
- DOBĄK P. 1999 — Rola czynnika filtracyjnego w badaniach jednoosiowej konsolidacji gruntów. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków; seria: Studia, rozprawy, monografie, PAN IGSMiE, nr 65.
- DOBĄK P. 2000 — Metody oceny miarodajności parametrów jednoosiowej konsolidacji wyznaczanych w badaniach laboratoryjnych. [W:] Biliński W. (red.) „Metody komputerowe w projektowaniu i analizie konstrukcji hydrotechnicznych”, XII Konf. Nauk. Kraków-Korbielów, 6–9.03.2000; Wyd. PZLiTB, O, Kraków.
- DOBĄK P., 2003 — Loading velocity in consolidation analysis. Geol. Quart., 47, 1: 13–20.
- FREDLUND D.G. & RAHARDJO H. 1993 — Soil mechanics for unsaturated soils. Wiley, New York.
- GARBULEWSKI K. 2000 — Dobór i badania gruntowych uszczelnień składowisk odpadów komunalnych. Wyd. SGGW, Warszawa; seria Rozprawy naukowe i monografie SGGW, nr 235.
- GLAZER Z. 1985 — Mechanika gruntów. Wyd. Geol. Warszawa.
- GLAZER Z. & DOBĄK P. 1979 — Określanie wartości edometrycznego modułu ścisłości ogólnej z badań prowadzonych ze stałą prędkością odkształcenia. Prz. Geol., 11: 618–623.
- HASSENPAFF R., DEGEN W. & KAHR G. 1989 — Flow and diffusion in clays. Applied Clay Science, 4: 179–192.
- JANBU N., TOKHEIM O. & SENNESET K. 1981 — Consolidation tests with continuous loading. Proceedings, 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm I, 645–654.
- KOVACS G. 1958 — Theoretical Investigation in Micro-seepage. Acta Technica Academiae Scientiarum Hungarica, 21, 1–2.
- KOVACS G. 1981 — Seepage hydraulics. Akad. Kiado. Budapest.
- LOW P.F. 1961 — Physical Chemistry of Clay–Water Interaction. Advances in Agron, 13: 269–327.
- ŁUCZAK-WILAMOWSKA B. 2002 — Neogene Clays from Poland as mineral sealing barriers for landfills: experimental study. Applied Clay Science, 21: 33–43.
- MACIOSZCZYK T. 1997 — System krążenia wód podziemnych w oligoceńskim zbiorniku niecki mazowieckiej. [W:] Dowgiałło J. & Macioszczyk A. (red.) Oligoceński zbiornik wód podziemnych regionu mazowieckiego, Wyd. PAN, Warszawa: 62–87.
- MACIOSZCZYK T. & SZESTAKOW W.M. 1983 — Dynamika wód podziemnych — metody obliczeń. Wyd. Geol., Warszawa.
- MICHALAK J. 1985 — Ocena wpływu oddziaływań krzyżowych na warunki hydrodynamiczne panujące w głębokich poziomach wodonośnych na przykładzie Niecki Mazowieckiej. [W:] Modelowanie dużych regionalnych systemów hydrogeologicznych, Wyd. NOT, Warszawa: 242–260.
- OSSOWSKI J. 1985 — Wodoprzepuszczalność kaolinu. [W:] Aktualne problemy hydrogeologii, Wyd. AGH, Kraków: 545–551.
- PANE V., CROCOE P., ZNIDARCIC D., KO H.Y., OLSEN W.H. & SCHIFFMAN R.L. 1983 — Effects of consolidation on permeability measurements for soft clay. Geotechnique, 33, 1: 67–72.
- ROZA S.A. 1950 — Osadki gidrotechnicznejszych сооруżeń na glinach s małej wężnoştju. Gidrotechničeskoje stroitelstwo, 9.
- VU CAO MINH 1976 — Jednoosiowa konsolidacja gruntów z uwzględnieniem pęłzania. Arch. Wyd. Geol. UW.
- WISSA A.E.Z., CHRISTIAN J.T., DAVIS E.H. & HEIBERG S. 1971 — Consolidation at constant rate of strain. Proc. ASCE, 197, SM2: 1393–1413.
- WIŁUN Z. 2001 — Zarys geotechniki. Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa.

Praca wpłynęła do redakcji 12.09.2005 r.
Akceptacja do druku 3.08.2006 r.