

Wskaźnik zmian przepuszczalności gruntów słabonośnych

Marzena Jaromińska

*Zakład Geotechniki i Budownictwa Drogowego, Instytut Budownictwa,
Wydział Geodezji, Inżynierii Przestrzennej i Budownictwa, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski,
e-mail: marzena.jarominska@gmail.com*

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki analiz tendencji zmian przepuszczalności gruntów organicznych pod obciążeniem. Analizie poddano 10 próbek torfów oraz gytii pochodzących z terenu województwa warmińsko-mazurskiego. Opisano metodykę badań i przeanalizowano zależność $e - \log k$ przy pięciu stopniach obciążenia. Do analiz wykorzystano wyniki wieloletnich badań gruntów organicznych prowadzonych w laboratorium Zakładu Geotechniki i Budownictwa Drogowego na UWM w Olsztynie. W wyniku przeprowadzonej analizy stwierdzono duży rozrzut wartości wskaźnika zmian przepuszczalności w zależności od rodzaju gruntu i stopnia obciążenia. Takie wyniki sugerują, poza błędami pomiarowymi, bardzo duży wpływ mikrostruktury gruntów organicznych na wartość współczynnika filtracji, a tym samym i tendencje zmian tego parametru w procesie konsolidacji. Dokładne rozpoznanie zależności współczynnika filtracji k od wskaźnika porowatości e oraz znajomość tendencji zmian przepuszczalności gruntu wraz ze zmianą wskaźnika porowatości lub porowatości pozwoli przewidywać wartość współczynnika filtracji k przy różnych wartościach osiadań, umożliwi określenie przepuszczalności na podstawie jego parametrów początkowych.

Słowa kluczowe: grunty organiczne, współczynnik filtracji, wskaźnik zmian przepuszczalności

1. Wprowadzenie

Rozwój miast wymusza poszerzanie ich granic, a tym samym, niejednokrotnie konieczność wkraczania na tereny o niekorzystnych warunkach gruntowo-wodnych. Obszary występowania gruntów słabonośnych coraz częściej są uwzględniane w procesie projektowania inwestycji budowlanych. Dzięki bardzo dużej dynamice rozwoju nauk technicznych, w tym geotechniki i geoinżynierii, już na etapie projektowania możemy zdecydować o sposobie stabilizacji i wzmocnienia gruntów słabonośnych. W konsekwencji jednak, musimy bardzo dokładnie poznać parametry słabego podłoża.

Grunty organiczne, takie jak torf czy różnego rodzaju gytie cechują bardzo niekorzystne parametry geotechniczne. Wykazują one duże zróżnicowanie cech fizyko-mechanicznych, zależnych od ilości i rodzaju części organicznych oraz mineralnych. Są bardzo ściśliwe, mało nośne, mają niską gęstość objętościową, szkielet gruntowy składa się z części mineralnych i organicznych a pory wypełnione są wodą i rozproszonymi w niej drobnymi cząstkami organicznymi. Cechuje je mała wytrzymałość, bardzo małe naprężenia efektywne, duża przepuszczalność początkowa, malejąca wraz z procesem ściśliwości. W gytii wapiennej dodatkowo mamy jeszcze do czynienia z wzajemnym oddziaływaniem fitoklastów, węgla wapnia i wody [1, 2, 3, 4, 5]. Tak szczególne cechy mają bardzo duży wpływ na wodoprzepuszczalność tych gruntów.

Tradycyjnie już grunty organiczne uznawane są za słabe podłoże, słabe bo słabonosiwe, bardzo ściśliwe. W jednej grupie znajdują się tak różne grunty, jak torfy i gytie. Z powodu tej wspólnej przynależności początkowo analizowano w podobny sposób torfy oraz gytie detrytusowe, wapienne oraz mineralno-organiczne. Z powodu jednak dużych różnic strukturalnych szczegółowej analizie przebiegu zmian przepuszczalności w czasie konsolidacji poddano tylko próby gytii mineralno-organiczej. Włóknista lub amorficzno-włóknista struktura torfu powoduje, że grunty te charakteryzują się zupełnie innymi współczynnikami filtracji, i inaczej wygląda przebieg zmian przepuszczalności tych gruntów w czasie ich konsolidacji. Bardzo duża ściśliwość powoduje, że już przy niewielkich obciążeniach osiadanie gruntu jest znaczne. Stosowane w badaniach edometrycznych naprężenia powodowały bardzo szybkie ściskanie próbek, co uniemożliwiło ich obserwację w sposób porównywalny do gytii mineralno-organiczej. Szybkie załamanie struktury powodowało bardzo dużą zmienność przepuszczalności, jednak krótki czas badania uniemożliwił ustabilizowanie się parametrów i określenie tendencji ich zmian.

Zgodnie z prawem Darcy'ego przepływ wody przez grunt uzależniony jest od spadku hydraulicznego, powierzchni przez którą przepływ się odbywa i od współczynnika filtracji. Spadek hydrauliczny i przekrój, przez który odbywa się przepływ są wielkościami niezależnymi od rodzaju gruntu. Wielkością charakterystyczną dla danego gruntu jest natomiast współczynnik filtracji k . Wyraża on sumę oporów napotykanym przez wodę w czasie jej przepływu przez grunt. Opory te zależą od wielkości powierzchni kontaktu cząstek wody z cząstkami gruntu i od wielkości porów w gruncie. Najczęściej w podejściu inżynierskim opory filtracji uzależnia się od objętości porów w gruncie, określoną porowatością n , lub wskaźnikiem porowatości e . Chcąc określić wpływ objętości porów gruntu na współczynnik filtracji przeanalizowano zależność współczynnika filtracji od wskaźnika porowatości, a więc wskaźnik zmian przepuszczalności badanych utworów organicznych. Analiza tych badań przedstawiona jest w postaci zamieszczonych dalej wykresów.

2. Podstawy teoretyczne

Analiza przepływu wody w gruntach opiera się na równaniu Darcy'ego, którym określa się liniową zależność między spadkiem hydraulicznym i a prędkością przepływu wody w gruncie v :

$$v = k \cdot i \quad [\text{m/s}] \quad (1)$$

gdzie: v – prędkość przepływu wody, rozumiana jako stosunek objętościowego natężenia przepływu Q do powierzchni przekroju poprzecznego A strumienia (powierzchni porów i ziaren):

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{V}{t \cdot A} \quad [\text{m/s}] \quad (2)$$

V – objętość wody przepływającej przez przekrój strumienia o powierzchni A [m^2] w czasie t [s]; i – spadek hydrauliczny (liczba niemianowana), wyrażony stosunkiem $i = \Delta H/l$, tj. przyrost naporu hydrodynamicznego ΔH [m] do długości drogi przesączania l ; k – współczynnik filtracji (wodoprzepuszczalności), mający miano prędkości, np. [m/s].

Jest to zależność fenomenologiczna, którą ustalił Darcy, badając zjawisko przesączania wody przez rzeczne piaski średnioziarniste. Przepuszczalność w tym równaniu zależy nie tylko od właściwości porowatego ośrodka, ale również od właściwości przepływającej cieczy [6], tj.

$$k = \kappa \cdot \frac{\rho \cdot g}{\eta} \quad (3)$$

gdzie: κ – współczynnik przepuszczalności, uzależniony tylko od właściwości gruntu, [cm^2] lub [darcy] ($1 \text{ cm}^2 = 1,01 \cdot 10^8$ darcy)

$$\kappa = \frac{Q \cdot \eta}{A \cdot \frac{dp}{dl}} \quad (4)$$

ρ – gęstość wody, [g/cm^3], η – lepkość dynamiczna wody, [Pa·s], g – przyspieszenie ziemskie [$9,81 \text{ m/s}^2$], p – ciśnienie, [Pa], l – długość drogi filtracji, [m].

Przepływ wody w gruntach spoistych utrudnia woda błonkowata, która zwykle całkowicie wypełnia pory. W takich warunkach filtracja może nastąpić dopiero wtedy, gdy naprężenie ścinające, wywołane spadkiem hydraulicznym, w błonkach wody przekroczy jej opór na ścinanie. Opór na ścinanie wody błonkowej zależy od lepkości, która jest tym większa, im cieńsze są błonki wody. Początkowy spadek jest więc tym większy, im drobniejsze jest uziarnienie. Badania Dubin'a oraz Moulin'a [7] oraz później Hansbo [8, 9] dowodzą, że w gruntach bardzo drobnoziarnistych, przy małym spadku hydraulicznym, zależność między prędkością przepływu a gradientem hydraulicznym nie jest liniowa. Taką nieliniową zależność prędkości przepływu od gradientu hydraulicznego w gruntach słabo przepuszczalnych opisuje Hansbo [8, 9] równaniami:

$$v = \kappa i^n, \text{ gdy } i \leq i_1 \quad (5)$$

$$v = \kappa n i_1^{n-1} (i - i_0), \text{ gdy } i \geq i_1 \quad (6)$$

gdzie: κ – przepuszczalność gruntu opisana zależnością eksponentyjną, i_0, i_1 – gradienty hydrauliczne, i_0 – początkowy gradient hydrauliczny:

$$i_0 = i_1 (n-1) / n \quad (7)$$

przy czym $i_0 = 1/4$ dla $n = 1,5$

i_1 – wartość gradientu wymagana do całkowitego pokonania oporu lepkości wody:

$$i_1 = i_0 n / (n-1) \quad (8)$$

n – parametr obliczeniowy.

Matematyczna analiza przepływu przez ośrodek porowaty, podobnie jak wyniki doświadczalne badań gruntów organicznych, pozwalają stwierdzić, że wodoprzepuszczalność jest determinowana przede wszystkim przez wielkość poszczególnych porów, ich kształt oraz całkowitą objętość porów przypadającą na jednostkę objętości gruntu. Rozmiar cząstek gruntu (wynikający ze składu mineralnego) oraz zawartość części organicznych determinują kształt porów w gruncie. Rozmiar cząstek, ich kształt i rozmieszczenie oraz stopień rozłożenia materii organicznej razem determinują porowatość.

Wskaźnik porowatości e zmienia się wraz z naprężeniem efektywnym σ' , a współczynnik filtracji k zmienia się wraz z e , stąd i k zmienia się w zależności od σ' .

Im większy jest wskaźnik porowatości e tym szybszy jest przepływ wody przez grunt, współczynnik filtracji k ma wyższą wartość i zachodzą większe zmiany w przebiegu przepuszczalności. W miarę postępu konsolidacji e jest coraz mniejsze, przepuszczalność jest coraz mniejsza i coraz mniejsze są zmiany w przebiegu przepływu wody przez grunt.

Większość aproksymacji $e - \log k$ dla gruntów drobnoziarnistych, ilastych ma liniowy przebieg [10]. Również badania prowadzone przez Clarke'a i in. [11] dla gliny zwalowej i kaolinu wykazały, że istnieje liniowa zależność pomiędzy współczynnikiem filtracji i wskaźnikiem porowatości, a więc i naprężeniami efektywnymi (między ziarnami) i to zarówno podczas normalnego ściskania, jak i pęcznienia i wtórnego ściskania.

Wyniki badań doświadczalnych nie zawsze potwierdzają istnienie takiej zależności liniowej. W przypadku analizowanej gytii mineralno-organicznej znacznie lepsze dopasowanie daje funkcja wykładnicza. Nieliniowość zależności wskazuje, że o przebiegu zmian przepuszczalności decydują poza wskaźnikiem porowatości, a więc objętością porów, jeszcze inne czynniki. Wielu autorów wskazuje na dużą rolę nie tylko rozmiaru ale i kształtu ziaren, sposób połączeń mikroporów, zawartość minerałów pęczniących [12] a także skład chemiczny i zdolność kationów do wymiany [13, 14, 15]. Różnice pomiędzy wskaźnikiem zmian przepuszczalności C_k dla torfów i gytii świadczą o tym, że bardzo duże znaczenie ma struktura gruntu.

3. Badania własne

3.1. Metodyka badań laboratoryjnych

Celem badań było określenie współczynnika, który pozwoliłby na szybkie oszacowanie wskaźnika zmian przepuszczalności na podstawie początkowego wskaźnika porowatości gruntu e . Badania zostały przeprowadzone w klasycznych edometrach, przystosowanych do badań przepuszczalności gruntu. Metodę tę wybrano, ponieważ pozwala ona na śledzenie zmian wysokości próbki, a tym samym umożliwia ciągłą rejestrację zmiany wskaźnika porowatości. Do analizy wskaźnika zmian przepuszczalności gruntów organicznych użyto 10 prób gruntów, w tym trzy próbki torfów i siedem prób gytii. Wszystkie próby pochodzą z terenu województwa warmińsko-mazurskiego. Próby gytii pobierane były z głębokości 1,0-1,5 [m], a próby torfów z głębokości 2,0-5,0 [m].

Zastosowano pięć kolejnych stopni obciążenia: (1) 0-12,5 [kPa]; (2) 12,5-25,0 [kPa]; (3) 25,0-50,5 [kPa]; (4) 50,0-100,0 [kPa] i (5) 100,0-200,0 [kPa].

W laboratorium Zakładu Geotechniki i Budownictwa Drogowego (UWM Olsztyn) określono właściwości fizyczne analizowanych gruntów, których zestawienie przedstawiono w tabeli nr 1. Badania obejmowały doświadczalne określenie: gęstości objętościowej gruntu ρ , gęstości właściwej szkieletu gruntowego ρ_s , wilgotności naturalnej w oraz zawartości części organicznych C_{OM} na podstawie normy PN-88/B-04481. Porowatość n i wskaźnik porowatości e oraz stopień wilgotności S_r obliczono na podstawie ogólnie znanych zależności [16].

3.2. Przebieg badań

Badania filtracji przeprowadzone były w trakcie II etapu badań ściśliwości i konsolidacji. Badania wykonano w edometrach przy użyciu wody destylowanej, metodą o zmiennym naporze. Początkowy spadek hydrauliczny zmienił się od 30 do 120 w zależności od miąższości badanej próbki. Kierunek przepływu wody wymuszony był od dołu do góry. Obniżanie się poziomu wody w rurce pomiarowej rejestrowano w systemie 5/5, tzn. w pięciu seriach pomiarowych – w każdej serii 5 odczytów w stałych odstępach czasowych (co 2, 5 10, 20 i 40 minut) [16].

Obliczenia współczynnika filtracji przy danej temperaturze $k_{(t)}$ przeprowadzono wg wzoru, który uwzględnia parametry próbki oraz zmiany wysokości słupa wody na początku badania i na końcu:

$$k_{(t)} = \frac{al}{A(t_2 - t_1)} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad [\text{m/s}] \quad (9)$$

gdzie: a – pole przekroju rurki filtracyjnej, $[\text{m}^2]$, l – wysokość próbki gruntu, $[\text{m}]$, A – pole przekroju próbki gruntu, $[\text{m}^2]$, $t_2 - t_1 = t$ – przedział czasu, w którym obserwowany jest spadek poziomu wody, $[\text{s}]$, h_1 – początkowy poziom wody w rurce, $[\text{m}]$, h_2 – poziom wody w rurce po upływie czasu t , $[\text{m}]$.

Uzyskane wyniki uśredniono. Ostateczną, średnią wartość współczynnika filtracji przy danej temperaturze $k_{(t)}$ sprowadzono do warunków standardowych, obliczając $k_{(10)}$ wg wzoru:

$$k_{(10)} = \frac{k_{(t)}}{0,7 + 0,03T} \quad [\text{m/s}] \quad (10)$$

gdzie: $k_{(10)}$ – współczynnik filtracji obliczony dla temperatury $T = 10^\circ\text{C}$, $[\text{m/s}]$, $k_{(t)}$ – współczynnik filtracji obliczony przy danej temperaturze T , $[\text{m/s}]$, T – temperatura, w której badano przepuszczalność, $[\text{C}^\circ]$.

Badania ściśliwości i konsolidacji przeprowadzono zgodnie z normą PN-88/B-04481, w warunkach pod wodą i w temperaturze $12\text{--}15^\circ\text{C}$. Badania współczynnika filtracji przeprowadzono przed przyłożeniem obciążenia, po przyłożeniu obciążenia w trakcie procesu konsolidacji oraz po zakończeniu konsolidacji, przy każdym stopniu obciążenia. Badanie po zakończeniu konsolidacji przy danym stopniu obciążenia przeprowadzano przy zablokowanym obciążeniu, po upływie pięciu dób od momentu zablokowania. Celem było uzyskanie rozproszenia nadwyżki ciśnienia wody w porach, a więc pewność otrzymania w efekcie rzeczywistego współczynnika filtracji przy danej wysokości próbki, a co za tym idzie przy danym wskaźniku porowatości. Zwiększenie obciążenia nastąpiło po umownej stabilizacji osiadań ($\leq 0,003 \text{ mm}$). Wartość współczynnika filtracji określono w $[\text{m/s}]$.

4. Omówienie wyników badań

Analizowane grunty charakteryzują się diametralnie inną zawartością części organicznych (tabela 1). Torfy, gytia wapienna i detrytusowa składają się głównie ze szczątków roślinnych, przeważnie dobrze rozpoznawalnych, humusu i detrytus. Części organiczne w ich składzie stanowią od 74 do 89% masy gruntu. Gytia mineralno-organiczna w podobnej proporcji składa się z części ilastych. Tylko średnio 25% jej składu to części organiczne. Taka budowa gruntu determinuje mazistą strukturę gytii mineralno-organicznej i zdecydowanie inny przebieg zmian przepuszczalności w czasie konsolidacji gruntu.

Badane torfy o strukturze włóknistej i amorficzno-włóknistej, o wyraźnej anizotropii strukturalnej charakteryzują się wysoką początkową przepuszczalnością. Pomimo zastosowania niewielkich naprężeń można zaobserwować, że współczynniki filtracji maleją wraz z postępem konsolidacji, a więc i wpływ struktury będzie mały. Gytie zbudowane z substancji organicznej znacznie bardziej rozłożonej wykazują znacznie niższą początkową przepuszczalność. Po przyłożeniu obciążenia przepuszczalność jest redukowana w sposób indywidualny dla każdej próby. Wyniki badań współczynnika filtracji przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 1. Zestawienie właściwości fizycznych analizowanych gruntów.

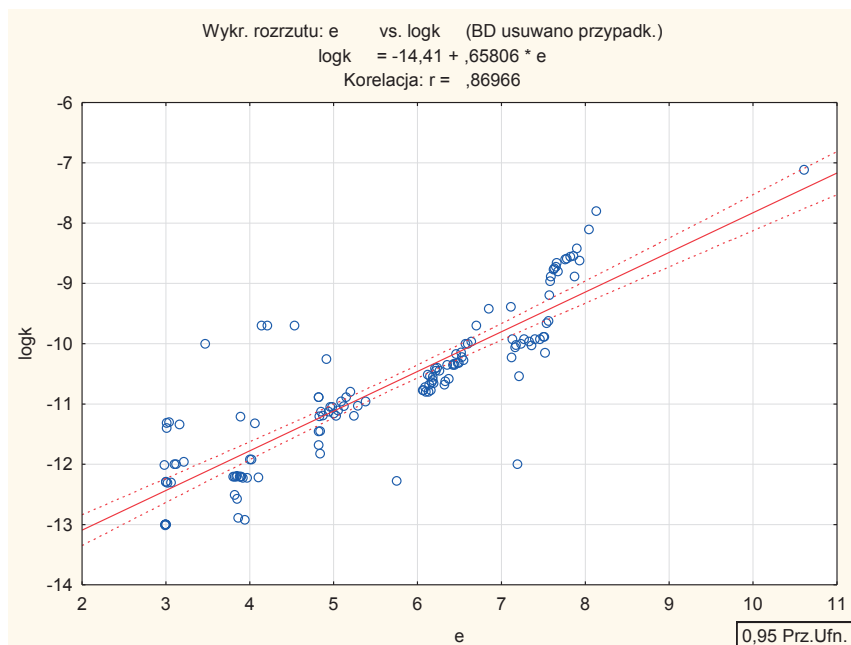
Nr próbki		ρ [g/cm ³]	ρ_s [g/cm ³]	ρ_d [g/cm ³]	w [%]	n [-]	e [-]	C_{OM} [%]	S_r [-]
P1	Torf (struktura włóknista i amorficzno-włóknista)	0,975	2,064	0,250	289,36	0,878	7,256	74,31	0,823
P2		0,994	1,507	0,140	608,24	0,907	9,764	85,88	0,938
P3		0,987	1,512	0,109	804,29	0,928	12,871	88,94	0,944
P4	Gytia wapienna (struktura łupkowa)	1,117	2,037	0,273	308,02	0,866	6,461	75,49	0,971
P5	Gytia detrytusowa (struktura galaretowata)	1,025	1,456	0,109	837,23	0,925	12,357	84,85	0,986
P6		1,009	1,483	0,140	616,32	0,905	9,592	88,51	0,952
P7	Gytia mineralno-organiczna (struktura mazista)	1,120	2,090	0,230	385,00	0,890	8,090	24,00	0,995
P8		1,070	1,990	0,190	459,80	0,900	9,470	27,10	0,966
P9		1,080	2,060	0,160	575,60	0,920	11,870	26,89	0,998
P10		1,090	2,090	0,180	500,60	0,910	10,610	30,41	0,986

Tabela 2. Zbiorcze zestawienie wyników badań współczynnika filtracji k [m/s].

Nr próby	Rodzaj gruntu	Obciążenie [kPa]					
		0	12.5	25	50	100	200
P1	Torf	8,8E-03	6,3E-03	1,0E-03			
P2		9,0E-03	6,4E-03	3,8E-03			
P3		5,9E-03	5,8E-03				
P4	Gytia wapienna	9,0E-04	2,0E-04	1,0E-05			
P5	Gytia detrytusowa	7,2E-03	1,0E-05				
P6		1,1E-04	1,0E-05	1,0E-06			
P7		1,37E-07	1,15E-07	5,4E-08	4,2E-08	3,1E-08	1,8E-08
P8	Gytia mineralno-organiczna	2,4E-08	5,9E-10	6,1E-11	7,9E-11	1,3E-12	2,6E-13
P9		6,9E-08	5,8E-11	1,3E-11	6,2E-12	1,0E-13	7,8E-14
P10		7,7E-08	5,9E-11	1,7E-11	1,3E-11	6,2E-13	9,8E-14

W początkowej fazie badania następuje odkształcenie próbki gruntu, tj. dopasowanie się próbki do pierścienia. Powoduje to wzrost porowatości efektywnej. W kolejnej fazie w związku z wzrostem ciśnienia wody w porach gruntu wartości współczynnika filtracji maleją. Dzieje się tak aż do rozproszenia nadwyżki ciśnienia wody w porach gruntu i zakończenia procesu konsolidacji filtracyjnej.

Dla każdej z analizowanych prób zbadano zależność $e - \log k$ przy każdym kolejnym obciążeniu. Na rysunku 1 przedstawiono tę zależność dla jednej z prób gytii mineralno-organiczej.



Rys. 1. Zależność $e - \log k$: gytia mineralno-organiczna, p.10

Wartość współczynnika korelacji na poziomie 0,87 świadczy o istnieniu stosunkowo silnej zależności liniowej pomiędzy badanymi cechami. Zmienność $\log k$, w tym przypadku, w 75% wyjaśniona jest zmiennością wskaźnika porowatości.

Największy rozrzut $e - \log k$ zaobserwowano dla dwóch stopni obciążenia, tj. 50 [kPa] i 200 [kPa]. Ze względu na dużą podatność współczynnika korelacji na skrajne obserwacje, przeanalizowano również siłę zależności liniowej $e - \log k$ osobno dla każdego obciążenia. Badania potwierdziły istnienie zależności liniowej pomiędzy wskaźnikami porowatości e i logarytmem współczynnika filtracji przy obciążeniu 12,5 [kPa] oraz 25 [kPa]. Zmienność $\log k$ jest tu wyjaśniona zmiennością e w 53% na początku badania do 87% przy obciążeniu 25 [kPa]. Kolejny stopień obciążenia (50 kPa) to najprawdopodobniej czas niszczenia struktury. Po zakończeniu tego etapu o przepuszczalności decyduje już granulometria gruntu.

Tabela 3. Współczynniki korelacji $e - \log k$, gytia mineralno organiczna, p.10

Obciążenie [kPa]	Współczynnik korelacji Pearsona $r(X, Y)$	Współczynnik determinacji r^2
12,5	0,73	0,53
25	0,94	0,87
50	-0,007	0,000051
100	0,68	0,46
200	0,40	0,16

Konsekwencją relacji $e - \log k$, w której zmienna niezależna e jest wyrażona w zakresie zmiennej zależnej k , jest wartość wskaźnika zmian przepuszczalności C_k .

Wskaźnik zmian przepuszczalności rozumiany jako zależność pomiędzy przyrostem wskaźnika porowatości i przyrostem współczynnika filtracji opisuje równanie [17]:

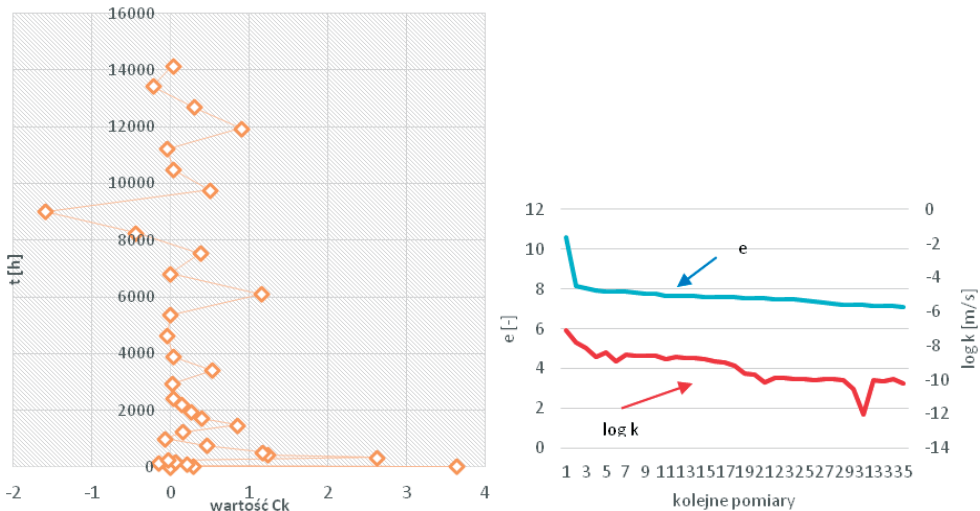
$$C_k = \frac{\Delta e}{\Delta \log k} \quad (11)$$

gdzie: e – wskaźnik porowatości [-], k – współczynnik filtracji [m/s].

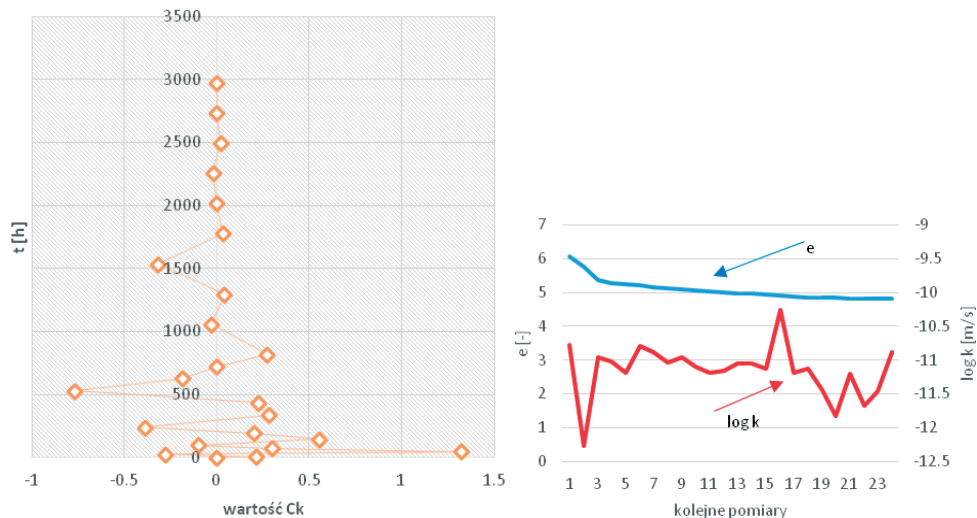
Uzyskane wskaźniki zmian przepuszczalności podano w tabeli 4 a przebieg zmian C_k w czasie na rysunkach 2-3.

Tabela 4 Zestawienie wskaźników zmian przepuszczalności C_k dla pięciu kolejnych stopni obciążenia.

Nr próbki	e_0	C_k				
		12,5 kPa	25,0 kPa	50,0 kPa	100,0 kPa	200,0 kPa
P1	7,26	0,82	8,09			
P2	9,76	7,79	5,34			
P3	12,87	4,33				
P4	6,46	1,45	9,96			
P5	12,54	2,22				
P6	9,59	2,61	2,44			
P7	8,09	0,37	0,63	0,95	1,37	0,94
P8	9,47	0,97	0,16	0,49	0,093	0,0025
P9	11,87	1,18	0,45	0,70	0,13	0,73
P10	10,61	0,47	0,32	0,24	0,12	0,07



Rys. 2. Zmiana przepuszczalności w czasie pod obciążeniem 12,5 [kPa] – P10



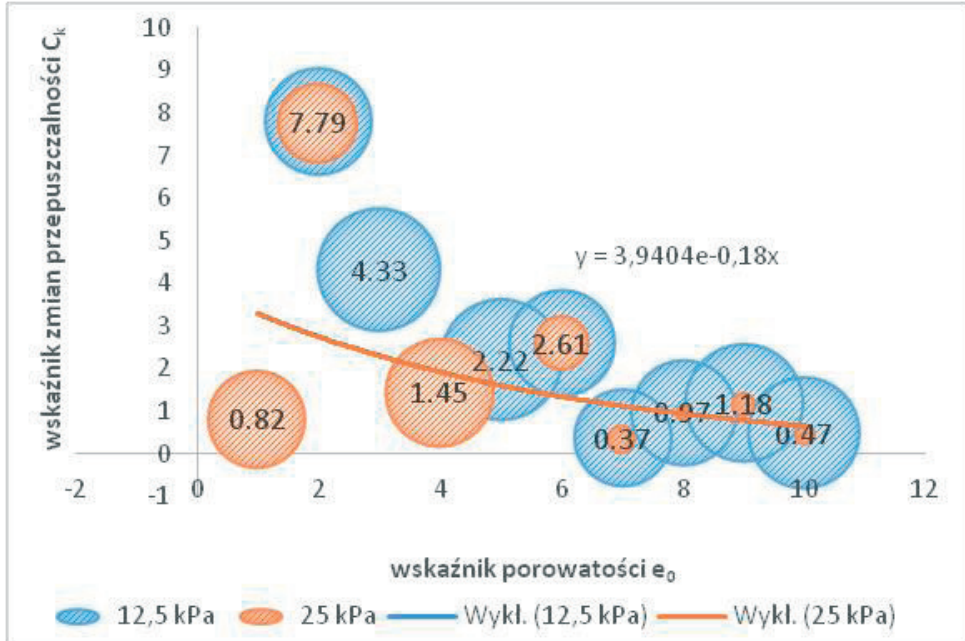
Rys. 3. Zmiana przepuszczalności w czasie pod obciążeniem 50 [kPa] – P10: $C_k = 0,24$; $k = 1,3e-11$ [m/s], $C_k = 0,47$; $k = 5,9e-11$ [m/s]

Największe zmiany w przepuszczalności zachodzą po przyłożeniu obciążeń 12,5 oraz 25 kPa. W tym czasie jeszcze o wielkości przepuszczalności decyduje struktura gruntu. W zależności od wielkości porów woda w gruncie krąży mniej lub bardziej swobodnie. Istnieje liniowa zależność pomiędzy wskaźnikiem porowatości e i $\log k$. Dopiero po przyłożeniu obciążenia 50 kPa struktura zostaje załamana i o przepuszczalności decyduje już granulometria gruntu. Jest to moment najmniej stabilnego przepływu, dużych zmian przepuszczalności niezależnych od stałego nieznacznego zmniejszania się wartości wskaźnika porowatości. Obciążenie 100 kPa powoduje ponowne ujawnienie się słabej zależności liniowej $e - \log k$. Zmienność $\log k$ wyjaśniona jest w 46% zmiennością wskaźnika porowatości. Przepływ jest już bardzo słaby, $k = 6,2e-13$ m/s. Duże zmiany przepuszczalności w czasie pod obciążeniem 200 kPa nie zależą już od niemal stałej wartości wskaźnika porowatości.

Mesri [17] w swoich badaniach dotyczących iłłów określił empiryczną zależność pomiędzy C_k i e_0 jako $C_k = 0,5 e_0$. W przypadku analizowanych gruntów organicznych dla wszystkich gytii oraz torfu o strukturze amorficznej możemy tę zależność określić jako $C_k = 0,2 e_0$ (rys. 4).

Zależność ta jednak jest prawdziwa tylko dla pierwszego obciążenia 12,5 [kPa]. Każde kolejne obciążenie powoduje zmniejszanie się zmian w przebiegu przepuszczalności gruntu.

Ostatecznie, w przypadku gytii mineralno-organicznej, po uśrednieniu początkowych wskaźników porowatości i uzyskanych wskaźników zmian przepuszczalności, uzyskano zależność $C_k = 0,1e_0$. Zależność ta opisuje zmiany przepuszczalności gruntu w czasie konsolidacji aż do ustabilizowania osiadań. Zastosowanie poniższej formuły dla wszystkich analizowanych gruntów organicznych o podobnych strukturach okazało się być zbliżonym z wartością, którą uzyskano dla gytii mineralno-organicznej już przy pierwszym obciążeniu. Może to oznaczać, że badanie większej ilości prób o bardzo zbliżonych cechach pozwoli na określenie stałej tendencji zmian C_k pod obciążeniem i umożliwi przewidywanie wartości współczynnika filtracji gruntu pod obciążeniem na podstawie jego parametrów początkowych.



Rys. 4. Empiryczna zależność wskaźnika zmian przepuszczalności C_k od wskaźnika porowatości e_0 dla gytii i amorficznego torfu.

5. Wnioski

1. Struktura gruntu organicznego determinuje przebieg zmian przepuszczalności gruntu w czasie konsolidacji.
2. Torfy o strukturze włóknistej lub amorficzno-włóknistej charakteryzują się wysokimi współczynnikami filtracji i dużą zmiennością przepuszczalności w czasie. Zmiany te zależą tylko od struktury gruntu.
3. Zależność pomiędzy e i $\log k$ jest zależnością liniową dla obciążenia 12,5 oraz 25 [kPa]. Wskaźnik zmian przepuszczalności obniża się wraz z konsolidacją.
4. Największe zmiany w przepuszczalności gytii mineralno-organiczej zachodzą po przyłożeniu obciążeń 12,5 oraz 25 [kPa]. W tym czasie o przepuszczalności decyduje struktura gruntu.
5. Obciążenie na poziomie 50 [kPa] powoduje załamanie struktury. O przepuszczalności decyduje już granulometria gruntu.
6. Zmiana przepuszczalności analizowanych gytii oraz torfu o strukturze amorficznej może być opisana stałą zależnością $C_k = 0,2e_0$. Zależność ta jest prawdziwa dla obciążeń 0-12,5 [kPa].
7. W przypadku gytii mineralno organicznej ustalono stałą zależność $C_k = 0,1e_0$. Jest to stała tendencja zmian przepuszczalności od 0 do 200 kPa.
8. Badania C_k na większej liczbie prób pozwolą na określenie empirycznych zależności $e - \log k$ w poszczególnych grupach gruntów.
9. Znajomość tendencji zmian przepuszczalności gruntu pod obciążeniem umożliwi przewidywanie cech gruntu po ustabilizowaniu osiadań, na podstawie jego parametrów początkowych

Literatura

- 1 Dobak P., Wyrwicki R. *Hydroizolacyjne właściwości kredy jeziornej*. Przegląd Geologiczny 5:4 (2000).
- 2 Dobak P., Kowalczyk S. *Geologiczno-inżynierska analiza występowania gruntów organicznych w podłożu wybranego odcinka autostrady A2*. Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego 446 (2011) 257-264.
- 3 Malinowska E. *Analiza odkształceń wybranych gruntów organicznych z uwzględnieniem nieliniowych charakterystyk przepływu*. Wyd. SGGW, Warszawa 2005.
- 4 Sas W. *Modelowanie odkształceń gruntów organicznych z uwzględnieniem zmian właściwości ośrodka*. Rozprawa doktorska, SGGW, Warszawa 2001.
- 5 Szymański A. *Czynniki warunkujące analizę odkształcenia gruntów organicznych obciążonych nasypem*. Rozprawa habilitacyjna, SGGW, Warszawa 1991.
- 6 Strzelecki T., Kostecki S., Żak S. *Modelowanie przepływów przez ośrodki porowate*. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2008.
- 7 Dubin B., Moulin G. *Influence of a critical gradient on the consolidation of clays*. In: *Consolidation of soils: testing and evolution* (STP 892) ASTM (1985) 354-77.
- 8 Hansbo S. *Consolidation equation valid for both Darcian and non-Darcian flow*. Geotechnique. Vol. 51, No. 1 (2001) 51-54.
- 9 Hansbo S. *Deviation from Darcy's law observed in one dimensional consolidation*. Geotechnique. Vol. 53, No. 6 (2003) 601-605.
- 10 Samarasinghe A. M., Huang H., Yang F. ASCE & Drnevich V. P., M. ASCE. 1982. *Permeability and consolidation of normally consolidated soils*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, ASCE, vol. 108, No GT 6 (1982) 835-850.
- 11 Clarke B.G., Chen C.C. *Intrinsic properties of permeability*. Proceedings of the 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 6-12 September, Hamburg, Germany, 1 (1987) 259-262.
- 12 Pająk R., Dobak P. *Określanie parametrów filtracyjnych ilów krakowieckich z badań w konsolidometrze Rowe'a*. Geologia, Tom 34, Zeszyt 4 (2008) 677-689.
- 13 Mitchell J.K. *Fundamentals of soil behavior*. 2nd ed., John Wiley, New York 1993, 1-437
- 14 Olphen H. von. *An Introduction to clay colloid chemistry*. 2nd ed., John Wiley, New York 1977, 1-318.
- 15 Young R.N., Warkentin B.P. *Soil properties and behavior*. 2nd ed., Elsevier Scientific, New York 1975, 1-463.
- 16 Wiłun Z. *Zarys geotechniki*. Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa 1987.
- 17 Mesri G., Feng T.W., Ali S., Hayat T. M. *Permeability characteristics of soft clays*. Proceedings of the 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, New Delhi, India 1994, 187-192.
- 18 Polska Norma (PN-88/B-04481). *Grunty budowlane. Badania próbek gruntu*.

Permeability change index for unstable basement

Marzena Jaromińska

*Chair of Geotechnics and Road Engineering, Faculty of Geodesy, Geospatial and Civil Engineering,
University of Warmia and Mazury, ul. Heweliusza 4, 10-724 Olsztyn, Poland*

Abstract: This paper presents the results of analyses of the tendencies in the changes of organic soil permeability under load. Ten samples of peats and gyttyas from the Warmia and Mazury Province were analyzed. The research methodology was described and the $e -$

log k relationship at five load degrees was analyzed. The results of multi-year research on organic soils conducted at the laboratory of the Chair of Geotechnics and Road Engineering at the Faculty of Geodesy, Geospatial and Civil Engineering of UWM (Olsztyn) were used for the analyses. A large spread in the permeability change index value, depending on the soil type and the load degree, was found as a result of the performed analysis. Such results suggest, apart from measuring errors, a very high effect of the microstructure of organic soils on the filtration coefficient value and thus also on the tendencies in the changes of this parameter in the consolidation process. The precise identification of the dependence of the filtration coefficient k on the void ratio e and knowledge of the tendencies in soil permeability changes with changes in the void ratio or porosity will allow the value of the filtration coefficient k at different settlement values to be predicted. It will also enable the determination of permeability based on the initial soil parameters.

Keywords: organic soil, filtration coefficient, permeability change index