

## **OCENA EFEKTYWNOŚCI WYZNACZANIA WSPÓLCZYNNIKA FILTRACJI METODAMI POŚREDNIMI W RÓŻNYCH GRUNTACH DROBNOZIARNISTYCH**

Małgorzata K. Wdowska, Mirosław J. Lipiński  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

**Streszczenie.** Artykuł dotyczy zakresu stosowalności określania współczynnika filtracji na podstawie charakterystyk konsolidacji ze względu na uziarnienie badanego gruntu. Omawiane podejście pośrednie oparto na metodach Casagrande'a i Taylora wyznaczenia współczynnika konsolidacji ( $c_v$ ). Badania przeprowadzono na sześciu rodzajach gruntu o zróżnicowanej zawartości frakcji drobnej z zakresu 9–99,5%. Próbki były rekonstruowane w wielkowymiarowym konsolidometrze, a następnie obciążane. Niezależnie, dla każdego materiału, na koniec konsolidacji wyznaczono współczynnik filtracji metodą bezpośrednią, stosując technikę stabilizującego się gradientu przy stałym wymuszonym przepływie. Przyjęte kryterium zbieżności wyników metody bezpośredniej i opartej na założeniach teorii konsolidacji było podstawą do określenia zakresu stosowalności metod pośrednich wyznaczenia współczynnika filtracji ze względu na skład granulometryczny.

**Słowa kluczowe:** współczynnik filtracji, metody pośrednie, metoda stabilizującego się gradientu przy ustalonym przepływie, zawartość frakcji drobnej

### **WSTĘP**

W większości zagadnień inżynierskich wymagana jest znajomość współczynnika filtracji analizowanych warstw gruntów. W przypadku gruntów spoistych oraz pylastych wyznaczanie parametrów przepływu, zwłaszcza współczynnika filtracji, odbywa się na drodze badań laboratoryjnych. Jednakże w przypadku typowych zadań inżynierskich badania parametrów filtracji rzadko kiedy traktowane są jako osobne zlecenie. Wówczas możliwym rozwiązaniem jest wyznaczenie współczynnika filtracji w sposób pośredni, na podstawie przebiegu procesu konsolidacji. W takich sytuacjach powstaje jednakże py-

---

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

tanie o wiarygodność wyników badań. Stopień wiarygodności takich badań można określić na podstawie porównania z wynikami badań bezpośrednich. Dobór metody takiego badania zależy od przewidywanego zakresu określanego współczynnika filtracji. W pyłach i glinach piaszczystych można stosować konwencjonalne metody stałego gradientu, natomiast w ilach należy stosować metody, przy których wymusza się stały przepływ, a gradient określa się po ustabilizowaniu wartości ciśnienia na wejściu próbki (np. technika *flow pump*).

Celem badań, których wyniki przedstawiono w artykule, jest określenie zakresu uziarnienia gruntów, dla których mogą być wykorzystane pośrednie metody określania współczynnika filtracji oparte na charakterystykach konsolidacji wyznaczanych w konsolidometrze.

## UWARUNKOWANIA DOBORU METODY OKREŚLANIA WSPÓŁCZYNNIKA FILTRACJI

### Czynniki wpływające na wartość parametrów filtracji

Powszechnie znana jest analogia przepływu wody w ośrodkach porowatych do przepływu prądu elektrycznego. W obydwu przypadkach w podstawowych prawach fizycznych określających przepływ wody i przepływ prądu (odpowiednio prawo Darcy'ego i prawo Ohma) występują wielkości, które określane są jako stałe materiałowe. W przypadku tych stałych również występuje analogia, ponieważ jak się im przyjrzeć uważnie, to wielkości, które nazywane są stałymi, nie są stałe. Stałą określającą wielkość natężenia prądu elektrycznego jest opór elektryczny, na który składają się, oprócz oporności właściwej (najważniejszej, ponieważ charakteryzującej ośrodek), również długość przewodu oraz jego przekrój. Podobnie w przypadku współczynnika filtracji, oprócz najważniejszej cechy, tj. rodzaju gruntu, na opór przepływu wody składają się jeszcze: stan wypełnienia porów wodą, wskaźnik porowatości oraz stan naprężenia z nim związany. Oczywiście największy wpływ na wartość współczynnika filtracji ma rodzaj gruntu, aby jednak skwantyfikować to wyrażenie w odniesieniu do przepuszczalności, należałoby się odnieść do relacji objętości wody związanej i wolnej. Wartość ta zmienia się istotnie wraz ze zmianą uziarnienia w szerokim zakresie średnic charakterystycznych. Największe przyrosty tych wartości znajdują się w strefie średnic najmniejszych i dlatego wartość tego ilorazu dobrze koreluje z zawartością frakcji ilowej. Z tego względu właśnie zawartość frakcji ilowej, jako łatwo określana w laboratorium, jest przyjmowana jako czynnik, który decyduje o zdolności do przepuszczania wody. Można to łatwo zaobserwować na przykładzie piasków pylastego i gliniastego, które pod względem całej krzywej uziarnienia i parametrów wytrzymałościowych są bardzo zbliżone, natomiast różne pod względem przepuszczalności. Wiedzą o tym bardzo dobrze inżynierowie mający doświadczenie w projektowaniu drenaży. Pozostałe czynniki, jak stopień wilgotności ( $S_r$ ) i wskaźnik porowatości, w mniejszym stopniu wpływają na przepuszczalność. W zasadzie pojęcie filtracja odnosi się do pełnego nasycenia. Jeżeli pory nie są całkowicie wypełnione wodą, wówczas zdolność gruntu do przepuszczania wody maleje. Oczywiście w miarę postępowania przepływu stopień wilgotności będzie wzrastał, zwłaszcza w warunkach

laboratoryjnych, gdzie stosowane gradienty są większe niż w terenie. W każdym razie w gruntach odpowiadającym glinom pylastym wielkości współczynnika przepuszczalności przy niepełnym nasyceniu mogą być nawet trzykrotnie mniejsze [Mitchel i in. 1965].

Następnym w kolejności czynnikiem jest wskaźnik porowatości. Jego istotność dla wartości współczynnika filtracji zależy od rodzaju gruntu i jego stanu. W normalnie skonsolidowanych iłach i glinach oraz w jeszcze większym stopniu w gruntach organicznych początkowe wartości wskaźnika porowatości przyjmują bardzo duże wartości. W tej sytuacji przy bardzo dużych przyrostach naprężenia zmiana współczynnika filtracji może wynosić co najmniej jeden rząd wielkości. Są to jednak sytuacje wyjątkowe. W Polsce zdecydowana większość gruntów istotnych z punktu widzenia inżynierskiego to grunty prekonsolidowane, w których zmiany wskaźnika porowatości w wyniku obciążenia są niewielkie, a zatem jego wpływ na współczynnik filtracji jest również mały. W takiej sytuacji wzrost naprężenia wpływa na sztywność gruntu i współczynnik konsolidacji przy relatywnie niezmiennym współczynniku filtracji.

### **Dobór metody wyznaczania parametrów filtracji**

Istnieje wiele metod wyznaczania współczynnika filtracji, poczynając od mało skomplikowanych obliczeń, a kończąc na złożonych metodach terenowych i laboratoryjnych. Każda z metod daje mniej lub bardziej zbliżone do rzeczywistości wyniki, a wybór metody określania współczynnika filtracji w największym stopniu zależy od rodzaju gruntu, ponieważ uzależniona od niego prędkość filtracji może przy niektórych metodach powodować uzyskanie błędnych wyników lub sprawić, że badanie będzie niewiarygodne.

Załącznik S do normy Eurokod 7 [PN-EN 1997-2:2009] wyróżnia cztery metody badań współczynnika filtracji, tj. badania polowe, empiryczne korelacje ze składem granulometrycznym, badania laboratoryjne oraz szacowanie z badania edometrycznego [Parylak i in. 2013]. Parametry przepuszczalności w gruntach niespoistych w zasadzie powinny być wyznaczone głównie w warunkach *in situ* metodami terenowymi (np. próbnę pompowanie, zalewanie otworu). Niejednorodność budowy geologicznej oraz inherentna anizotropia przewodności hydraulicznej warstw geologicznych w terenie sprawia, że przy dużych wartościach współczynnika filtracji (lub ogólnej przepuszczalności) laboratoryjne metody badań nie są w stanie odzwierciedlić wyniku reprezentatywnego dla danych warunków terenowych. Jednak ze względu na stosunkowo złożony charakter tych badań, ich czasochłonność i wysokie koszty mogą być one stosowane w przypadku ważniejszych obiektów. W związku z tym w gruntach niespoistych najczęściej określa się współczynnik filtracji na podstawie zależności empirycznych zgodnie z zakresem stosowalności danej formuły. Na podstawie wzorów empirycznych wartość współczynnika filtracji oblicza się, uwzględniając uziarnienie gruntu (najczęściej średnicę miarodajną  $d_{10}$ ). W niektórych wzorach niezbędna jest też znajomość porowatości czy powierzchni właściwej gruntu. Formuły empiryczne nie uwzględniają jednak wpływu struktury gruntu ani też anizotropii przepuszczalności, a współczynnik filtracji tego samego gruntu obliczony na podstawie różnych zależności empirycznych może się różnić nawet o dwa rzędy wielkości. Współczynniki filtracji określone wzorami empirycznymi można stosować w prostych i nieskomplikowanych zagadnieniach inżynierskich, ponieważ wyniki są

mało dokładne, a zatem otrzymywane na ich podstawie wartości parametru można uznać za przybliżone. Mimo że sposób ten jest powszechnie uważany za mało dokładny, bardzo często traktowany jest jako wygodne narzędzie, głównie ze względu na łatwość określania cech uziarnienia, jak również metod obliczeń [Szymkiewicz i Kryczka 2011].

Metody badania współczynnika filtracji w warunkach laboratoryjnych sprowadzają się do metod stało- i zmiennogradentowych. W przypadku gruntów o dużej przepuszczalności wykorzystuje się metody stałogradentowe, w których z założenia utrzymywany jest stały napór hydrauliczny na powierzchnię próbki podczas pomiaru przepływu wody. W przypadku gruntów słaboprzepuszczalnych do określania współczynnika filtracji stosuje się metody zmiennogradentowe, w których wartością mierzoną są zmieniające się gradienty. Jednakże należy zaznaczyć, że standardowe metody wykorzystujące technikę zmiennego gradientu nie zapewniają kontroli warunków brzegowych ze względu na wielkość przepływu z powodu możliwości pojawienia się uprzywilejowanych dróg filtracji oraz niepełnego nasycenia porów próbki wodą [Lipiński i Wdowska 2005]. Najodpowiedniejszą techniką badania gruntów spoistych o niskim współczynniku filtracji jest technika *flow pump* wprowadzona na początku lat osiemdziesiątych XX wieku przez Olsena i Morina [1984]. W metodzie tej wymusza się stałą prędkość przepływającej wody przez próbkę i mierzy różnicę ciśnień na jej końcach. Podczas badania istnieje możliwość współpracy pompy przepływu z próbką badaną w aparacie trójosiowego ściskania lub w konsolidometrze. Daje to możliwość nasączenia próbki metodą ciśnienia wyrównawczego (*back pressure*), co eliminuje niepewność związaną z brakiem kontroli pełnego nasycenia gruntu [Lipiński i Wdowska 2010].

Określanie współczynnika filtracji na podstawie metod pośrednich opiera się na analizie procesu konsolidacji w jednoosiowym stanie odkształcenia, z zastosowaniem m.in. metod Casagrande'a i Taylora opartych na wyznaczeniu charakterystycznych punktów na krzywej konsolidacji, tj. odpowiadającym 50 lub 90% zaawansowania procesu. Jednakże należy zauważyć, że badania procesu konsolidacji wykonuje się przede wszystkim w celu prognozowania przebiegu osiadania gruntu, jednak istnieje pokusa, aby również na ich podstawie wyznaczyć współczynnik filtracji. Należy jednakże pamiętać, że w standardowym badaniu edometrycznym nie ma możliwości pełnego nasycenia próbki, co jest warunkiem koniecznym do określania wiarygodnych parametrów przepuszczalności gruntu, dlatego też bardziej wskazane są badania konsolidometryczne z zastosowaniem metody ciśnienia wyrównawczego do nasączenia gruntu.

## METODYKA BADAŃ I MATERIAŁY

### Badania w konsolidometrze z wykorzystaniem techniki *flow pump*

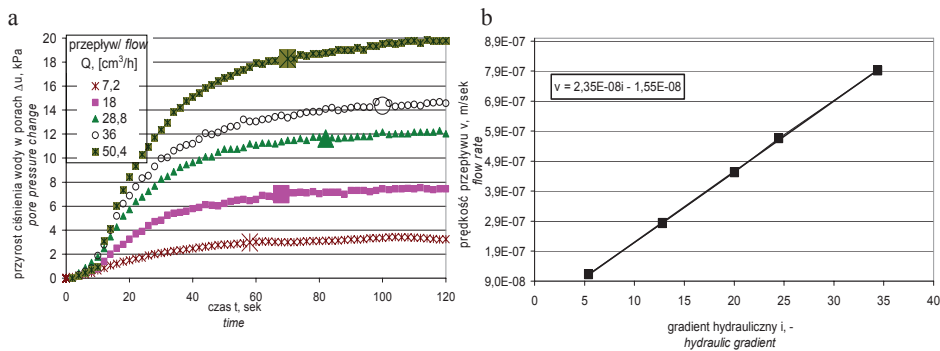
Badania przeprowadzono w konsolidometrze na próbkach o średnicy 150 mm i wysokości 60 mm. Badano sześć próbek gruntów drobnoziarnistych o różnej zawartości frakcji drobnej (definiowanej jako cząstki o średnicy  $<0,063$  mm), wynoszącej od 9 do 99,5%, których podstawowe właściwości fizyczne przedstawiono w tabeli 1.

Próbki do badań były przygotowywane w laboratorium metodą sedymentacji w warunkach bezpośrednio w pierścieniu konsolidometrycznym. Konstrukcja aparatu umożliwiła nasączenie próbek przez zastosowanie ciśnienia wyrównawczego (*back pressure*),

Tabela 1. Właściwości fizyczne badanych gruntów  
Table 1. Index properties of tested soils

Zawartość frakcji drobnej Fines content [%]	Zawartość frakcji wg PN-EN ISO 14688 [%]				Rodzaj gruntu Kind of soil	Gęstość właściwa Density of solids [ $\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	Wskaźnik porowatości Void ratio [-]	Średnice charakterystyczne Characteristic diameters [mm]			Właściwości plastyczne Atterberg limits [%]		
	Gr	Sa	Si	Cl				$d_{10}$	$d_{30}$	$d_{50}$	$w_p$	$w_L$	$I_p$
9	–	89	8	3	Pg	2,75	0,841	0,065	0,17	0,15	–	–	–
14	–	85	12	3	Pg	2,74	0,837	0,036	0,1	0,14	–	–	–
23	–	79	18	3	Pg	2,73	0,861	0,026	0,076	0,12	–	–	–
34	–	70	24	6	Pg	2,75	0,857	0,008	0,052	0,1	17,5	27,4	9,9
57	–	46	42	12	$\pi_p$	2,77	0,959	<0,001	0,021	0,042	16,0	29,1	13,1
99,5	–	7	86	13	G $\pi$	2,86	1,241	<0,001	0,0095	0,022	18,9	39,6	20,7

wyeliminowano więc najczęściej pojawiający się problem niepełnego nasycenia w badaniach przewodności hydraulicznej gruntów. Widok stanowiska badawczego i konsolidometru przedstawiono w pracy Lipińskiego i Wdowskiej [2014]. Po zakończeniu etapu nasączania następowało właściwe badanie edometryczne, w którym współczynnik przyrostu obciążeń (LIR) wynosił 1. W ramach artykułu przeanalizowano przykładowy etap konsolidacji przy naprężeniu efektywnym wynoszącym 65 kPa. Po zakończeniu konsolidacji wykonywano pomiary służące określeniu współczynnika filtracji przy zastosowaniu techniki stabilizującego się gradientu przy ustalonym przepływie (*flow pump*). W celu uzyskania pełnej charakterystyki prędkości przepływu od gradientu dla każdej próbki wykonywano pięć testów stabilizacji gradientu przy zadanym przepływie. Na rysunku 1a przedstawiono przykładowe przyrosty ciśnienia wody w porach w zależności od zadawanego przepływu dla próbki o zawartości frakcji drobnej 99,5%, natomiast na rysunku 1b



Rys. 1. Charakterystyki niezbędne do wyznaczenia współczynnika filtracji na podstawie metody stabilizującego się gradientu przy ustalonym przepływie

Fig. 1. Characteristics necessary to determine coefficient of permeability with use of flow pump technique

pokazano zależność prędkości przepływu od gradientu hydraulicznego obliczonego według procedury podanej w pracy Wdowskiej i Lipińskiego [2005], na podstawie której określano współczynnik filtracji. Analogiczne zależności sporządzono dla pozostałych próbek badanych materiałów, a określone na ich podstawie wartości współczynnika filtracji przedstawiono w dalszej części artykułu, dotyczącej wyników badań.

### Wyznaczanie współczynnika filtracji na podstawie metod pośrednich

W praktyce inżynierskiej często określa się współczynnik filtracji metodami pośrednimi na podstawie przebiegu procesu konsolidacji w jednoosiowym stanie odkształcenia. Takie podejście jest spowodowane postrzeganiem stosunkowo łatwej możliwości określenia współczynnika filtracji przy okazji wykonywania badań służących wyznaczeniu parametrów ściśliwości gruntów. Na podstawie przebiegu procesu konsolidacji można określić współczynnik konsolidacji ( $c_v$ ) za pomocą laboratoryjnych procedur, z których najczęściej wykorzystywane to metody Casagrande'a i Taylora, prezentowane w pracach Casagrande [1938] i Taylor [1948], obie opisane przez Taylora. Metody te opierają się na konstrukcjach graficznych, których właściwa interpretacja pozwala na poprawne określenie współczynnika konsolidacji. Warto w tym miejscu zauważyć, że mają one pewne ograniczenia i trudności związane z wyznaczeniem czasu konsolidacji pierwotnej (metoda Casagrande'a) lub wyznaczeniem początkowej wysokości próbki (metoda Taylora). Graficzną procedurę określania czasu  $t_{50}$  i  $t_{90}$  (odpowiadającego 50 i 90% zaawansowania procesu konsolidacji), niezbędnego do wyznaczenia współczynnika konsolidacji z zastosowaniem obu wspomnianych metod dla próbki o zawartości frakcji drobnej 99,5%, przedstawiono na rysunku 2.

Współczynnik konsolidacji ( $c_v$ ) na podstawie metody Casagrande'a wyznacza się z zależności (1) natomiast z metody Taylora – z zależności (2):

$$c_v = T_v \frac{h^2}{t_{50}} \quad (1)$$

$$c_v = T_v \frac{h^2}{t_{90}} \quad (2)$$

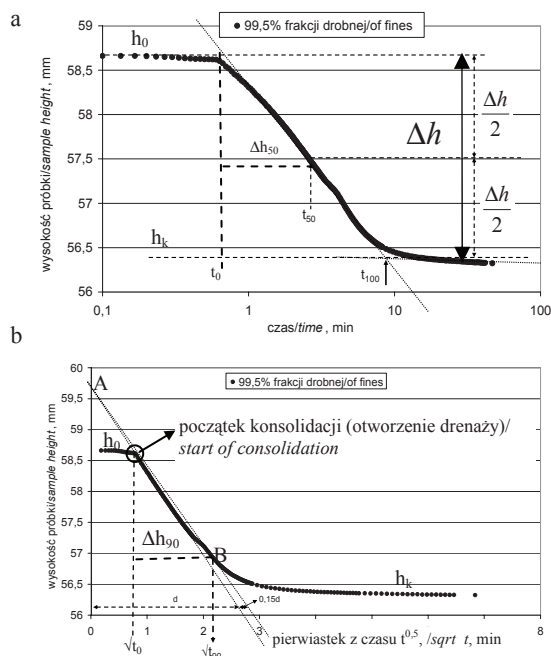
gdzie:  $T_v$  – bezwymiarowy współczynnik czasu wynoszący 0,196 (dla  $U = 50\%$  – metoda Casagrande'a) i 0,848 (dla  $U = 90\%$  – metoda Taylora),

$h$  – połowa średniej wysokości próbki (droga drenażu) według Wiłuna [1982] [mm],

$t_{50;90}$  – czas odpowiadający 50 i 90% zaawansowania procesu konsolidacji [min].

Na podstawie obliczonych współczynników konsolidacji po przeliczeniu na jednostki układu SI oblicza się współczynnik filtracji ( $k$ ) odniesiony do temperatury warunków laboratoryjnych (20°C):

$$k = \frac{c_v \cdot M_0}{\gamma_w} \quad (3)$$



Rys. 2. Procedura wyznaczania współczynnika konsolidacji: a – Casagrande’a, b – Taylora  
 Fig. 2. Procedure to calculate coefficient of consolidation: a – Casagrande, b – Taylor

gdzie:  $\gamma_w$  – ciężar objętościowy wody [ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ ],

$$M_0 \text{ – edometryczny moduł ściśliwości pierwotnej [kPa]; } M_0 = \frac{\Delta\sigma \cdot h_0}{\Delta h},$$

$\Delta\sigma$  – zmiana pionowej składowej naprężenia efektywnego [kPa],

$h_0$  – początkowa wysokość próbki [mm],

$\Delta h$  – zmiana wysokości próbki [mm].

## PORÓWNANIE WYNIKÓW BADAŃ POŚREDNICH I BEZPOŚREDNICH DLA GRUNTÓW O RÓŻNYM UZIARNIENIU

Przeprowadzone badania pozwoliły na określenie zmienności współczynnika konsolidacji ( $c_v$ ) w zależności od zawartości frakcji drobnej w badanych materiałach przy zastosowaniu metod pośrednich oraz na podstawie wyznaczonej w trakcie badań, z zastosowaniem metody stabilizującego się gradientu przy ustalonym przepływie, wartości współczynnika filtracji (tab. 2). Z przedstawionych na rysunku 3 zależności wynika, że współczynnik konsolidacji ( $c_v$ ) gruntu zmniejsza się wraz z zawartością frakcji drobnej. Zależność ta jest widoczna zarówno dla współczynników wyznaczanych z badań bezpośrednich z wykorzystaniem techniki *flow pump*, jak i określanych na podstawie metody Casagrande’a i Taylora. Współczynniki konsolidacji obliczone na podstawie wyznaczonego z badań bezpośrednich współczynnika filtracji zmieniają się niemalże o trzy rzędy

wielkości wraz ze wzrostem zawartości frakcji drobnej. W zakresie zawartości frakcji drobnej od 14 do 57% zmiana współczynnika konsolidacji w kierunku pionowym wynosi dwa rzędy wielkości. W przypadku metod pośrednich zmienność współczynnika konsolidacji ( $c_v$ ) jest niewielka i wraz ze wzrostem zawartości frakcji drobnej zmienia się zaledwie kilkukrotnie. Mając na uwadze fakt, że badane materiały różniły się znacząco wartością średnicy charakterystycznej  $d_{10}$  (od 0,001 do 0,065 mm), która decyduje o przepuszczalności badanego materiału, tak niewielka zmienność wyznaczonego parametru może oznaczać małą wiarygodność otrzymanego wyniku. Warto również zwrócić uwagę, że  $c_v$  jest współczynnikiem proporcjonalności w równaniu konsolidacji, a zatem opisuje intensywność rozpraszania nadwyżki ciśnienia wody w porach. Biorąc pod uwagę doświadczenia z testów dyssypacji prowadzonych podczas badań CPTu, wartości z metod pośrednich dla gruntów o zawartości do 60% frakcji drobnej są niewiarygodne. Wartości  $c_v$  obliczone na podstawie pomierzonych bezpośrednio współczynników filtracji zdecydowanie bardziej odpowiadają danym otrzymywanym w badaniach terenowych [Opracowanie Geoteko 2015].

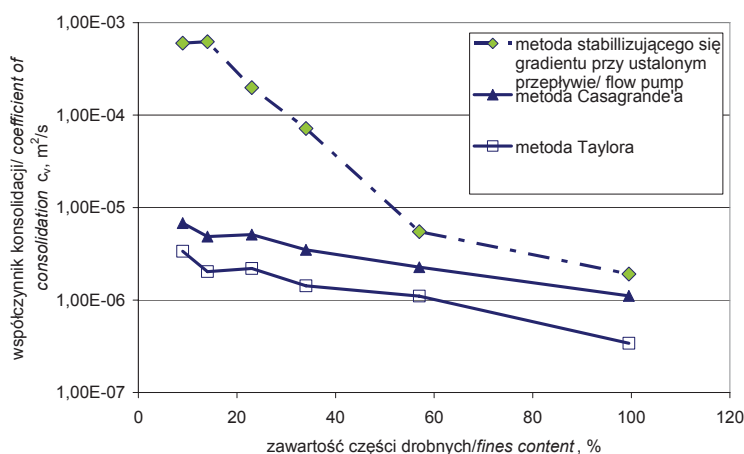
W tabeli 2 przedstawiono wyniki badań współczynnika konsolidacji ( $c_v$ ) i współczynnika filtracji ( $k$ ) w zależności od zastosowanej metody określania parametru dla badanych gruntów. Podano również wartość modułu ściśliwości pierwotnej, wyznaczonego z badań konsolidometrycznych, obliczonego jako moduł odpowiadający przyrostowi naprężenia wywołującego konsolidację.

Tabela 2. Parametry  $c_v$  i  $k$  określone według różnych metod laboratoryjnych  
Table 2. Parameters  $c_v$  and  $k$  determined during tests by different lab procedures

Zawartość frakcji drobnej Fines content	Współczynnik konsolidacji, $C_v$ [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ] Coefficient of consolidation			Współczynnik filtracji, $k$ [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ] Coefficient of permeability			$M_0$ [kPa]
	pomiar bezpośrednie technika <i>flow pump</i>	metoda Casagrande'a	metoda Taylora	pomiar bezpośrednie technika <i>flow pump</i>	metoda Casagrande'a	metoda Taylora	
9	$6,01 \cdot 10^{-4}$	$6,79 \cdot 10^{-6}$	$3,38 \cdot 10^{-6}$	$4,82 \cdot 10^{-7}$	$5,45 \cdot 10^{-9}$	$2,71 \cdot 10^{-9}$	12 470
14	$6,21 \cdot 10^{-4}$	$4,87 \cdot 10^{-6}$	$2,03 \cdot 10^{-6}$	$4,94 \cdot 10^{-7}$	$3,87 \cdot 10^{-9}$	$1,61 \cdot 10^{-9}$	12 570
23	$1,98 \cdot 10^{-4}$	$5,10 \cdot 10^{-6}$	$2,20 \cdot 10^{-6}$	$4,31 \cdot 10^{-7}$	$1,11 \cdot 10^{-8}$	$4,78 \cdot 10^{-9}$	4600
34	$7,16 \cdot 10^{-5}$	$3,49 \cdot 10^{-6}$	$1,43 \cdot 10^{-6}$	$1,90 \cdot 10^{-7}$	$9,28 \cdot 10^{-9}$	$3,79 \cdot 10^{-9}$	3770
57	$5,50 \cdot 10^{-6}$	$2,27 \cdot 10^{-6}$	$1,10 \cdot 10^{-6}$	$4,42 \cdot 10^{-8}$	$1,82 \cdot 10^{-8}$	$8,87 \cdot 10^{-9}$	1240
99,5	$1,91 \cdot 10^{-6}$	$1,11 \cdot 10^{-6}$	$3,41 \cdot 10^{-7}$	$2,35 \cdot 10^{-8}$	$1,36 \cdot 10^{-8}$	$4,19 \cdot 10^{-9}$	810

Głównym celem przeprowadzonych badań było porównanie wartości współczynników filtracji wyznaczanych na podstawie proponowanych w literaturze metod pośrednich bazujących na analizie procesu konsolidacji oraz wartości parametru wyznaczonego na podstawie badań bezpośrednich z wykorzystaniem techniki *flow pump* (rys. 4). Analizując charakterystyki przedstawione na wykresie, można zauważyć, że w materiałach o zawartości frakcji drobnej do 60% (w materiałach grubszych) wyznaczone z badań pośrednich wartości  $k$  zwiększają się, natomiast wartości współczynnika filtracji wyznaczonego na podstawie badań bezpośrednich maleją o ponad jeden rząd wielkości wraz ze wzrostem

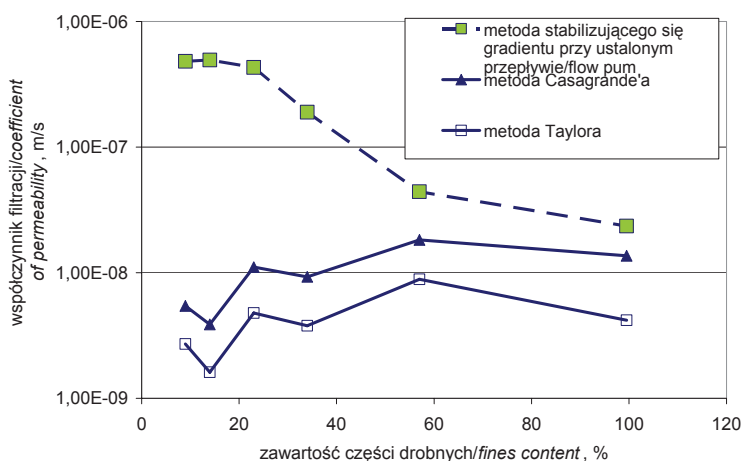




Rys. 3. Współczynnik konsolidacji ( $c_v$ ) wyznaczany według procedur Casagrande'a i Taylora oraz obliczony na podstawie pomierzonego współczynnika filtracji, w zależności od zawartości frakcji drobnej

Fig. 3. Coefficient of consolidation ( $c_v$ ) determined by Casagrande and Taylor's methods and calculated on the basis of measured coefficient of permeability shown against fines content

zawartości frakcji drobnej. Wzrost  $k$  wraz ze wzrostem zawartości frakcji drobnej, określony z metod pośrednich, oznacza, że sztywność materiału musiałaby istotnie wzrastać wraz ze wzrostem zawartości frakcji drobnej, co jest sprzeczne z powszechną wiedzą na ten temat. Należy zatem wnioskować, że standardowe procedury oparte na metodzie Casagrande'a i Taylora nie nadają się do określania współczynnika filtracji w gruntach, w których zawartość frakcji drobnej jest mniejsza niż 60%.



Rys. 4. Współczynnik filtracji wyznaczany przy zastosowaniu metod bezpośrednich i pośrednich dla materiałów o zróżnicowanej zawartości frakcji drobnej

Fig. 4. Coefficient of permeability determined directly and derived from consolidation data shown against fines content

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Artykuł dotyczy określenia zakresu składu granulometrycznego gruntów mineralnych drobnoziarnistych, w których można efektywnie wykorzystać badanie konsolidacji w jednoosiowym stanie odkształcenia do wyznaczenia współczynnika filtracji. Badania wykonano w konsolidometrze na próbkach sześciu rodzajów gruntu normalnie skonsolidowanego, różniących się od siebie zawartością frakcji drobnej. Na podstawie danych z konsolidacji próbki wywołanej pionowym naprężeniem 65 kPa określano współczynnik konsolidacji pionowej ( $c_v$ ) dwiema metodami – Casagrande’a i Taylora. Następnie na podstawie uzyskanych wartości  $c_v$  i  $M_0$  obliczano współczynnik filtracji. Niezależnie od tego, po zakończeniu konsolidacji dla każdej próbki, wyznaczano bezpośrednio współczynnik filtracji metodą stabilizującego się gradientu przy ustalonym przepływie (*flow pump*). Analiza wyników przeprowadzonych badań pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

1. Wartości współczynnika filtracji ( $k$ ) wyznaczone przy wykorzystaniu metody Casagrande’a są od 2 do 2,5 razy większe od analogicznych wartości określonych na podstawie metody Taylora.

2. Zakres zmienności współczynnika filtracji wyznaczonego metodą bezpośrednią zmienia się wraz z zawartością frakcji drobnej. Największe zmniejszenie  $k$ , tj. o jeden rząd wielkości, występuje przy wzroście zawartości frakcji drobnej od 20 do 60%.

3. Miarodajność określania współczynnika filtracji na podstawie danych z konsolidacji zmienia się wraz z uziarnieniem. Im większa jest zawartość frakcji drobnej, tym bardziej wielkości określone na podstawie metod pośrednich zbliżone są do wartości pomierzonych bezpośrednio.

4. Dla gruntów składających się jedynie z frakcji drobnych można stosować metody pośrednie wyznaczania współczynnika filtracji bez zastrzeżeń. Dla gruntów zawierających poniżej 60% frakcji drobnej określanie współczynnika filtracji na podstawie danych z konsolidacji nie jest miarodajne.

## PIŚMIENNICTWO

- Casagrande, A. (1938). Notes on Soil Mechanics-First Semestr. Harvard University, Cambridge (unpublished).
- Lipiński, M.J., Wdowska, M.K. (2005). Wpływ niepełnego nasycenia na charakterystyki przepuszczalności gruntów spoistych. Przegląd Naukowy Wydziału Inżynierii i Kształtowania Środowiska SGGW, XIV, (31), 122–131.
- Lipiński, M.J., Wdowska, M. (2010). Saturation criteria for heavy overconsolidated cohesive soils. Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Land Reclamation, 42 (2), 295–302.
- Lipiński, M.J., Wdowska, M. (2014). Wpływ zawartości frakcji drobnej na charakterystyki konsolidacyjne i ściśliwość gruntów ziarnistych. Acta Sci. Pol. Architectura, 13 (4), 113–124.
- Mitchell, J.K., Hooper, D.R., Campanella, R.G. (1965). Permeability of compacted clay, Soil Mechanics and Foundations Division ASCE.
- Olsen, H.W., Morin, R.H. (1984). Determining Specific Storage of Sediment Using Data from a Constant Flow Rate Permeability Test. American Geophysical Union, 65 (45).

- Opracowanie Geoteko Projekty i Konsultacje Geotechniczne Spółka z o.o. (2015). Analiza wyników badań geotechnicznych osadów wykonanych dla nasypu próbnego P2.
- Parylak, K., Zięba, Z., Bułdys, A., Witek, K. (2013). Weryfikacja wyznaczania współczynnika filtracji gruntów niespoistych za pomocą wzorów empirycznych w ujęciu ich mikrostruktury. *Acta Sci. Pol. Architectura*, 12 (2), 43–51.
- PN-EN 1997-2:2009. Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego.
- PN-EN ISO 14688-1:2006. Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 1. Oznaczanie i opis.
- Szymkiewicz, A., Kryczalło, A. (2011). Obliczanie współczynnika filtracji piasków i żwirów na podstawie krzywej uziarnienia: przegląd wzorów empirycznych. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 2, 110–121.
- Taylor, D.W. (1948). *Fundamentals of Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Wdowska, M.K., Lipiński, M.J. (2005). Ocena przepuszczalności gruntu antropogenicznego w świetle badań laboratoryjnych. *Przegląd Naukowy Wydziału Inżynierii i Kształtowania Środowiska SGGW*, XIV, 2 (32), 50–59.
- Wiłun, Z. (1982). *Zarys geotechniki*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa.

## EFFECTIVENESS OF INDIRECT APPROACH OF DETERMINATION OF COEFFICIENT OF PERMEABILITY IN FINE GRAINED SOILS

**Abstract.** The paper concerns a range of applicability in evaluation of coefficient of permeability on the basis of indirect approach in various soils. Considered indirect approach is based on Casagrande and Taylor's methods of determination of coefficient of consolidation ( $c_v$ ). Tests were carried out on six kinds of soils containing various amount of fines from the range 9–99,5%. Specimens were reconstituted in medium size consolidometer and then loaded in stages. Independently, coefficient of permeability was determined directly by flow pump technique at the end of consolidation stage for each material. Convergence of results of both methods was assumed as criterion of evaluation of range of applicability of indirect approach in determination of coefficient of permeability with respect to grain size distribution.

**Key words:** coefficient of permeability, indirect approach, flow pump techniques, fines content

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 31.08.2016

Cytowanie: Wdowska, M.K., Lipiński, M.J. (2016). Ocena efektywności wyznaczania współczynnika filtracji metodami pośrednimi w różnych gruntach drobnoziarnistych. *Acta Sci. Pol. Architectura*, 15 (4), 79–89.