

## UWARUNKOWANIA DOBORU METODY OKREŚLANIA WSPÓŁCZYNNIKA FILTRACJI W GRUNTACH SPOISTYCH

Małgorzata K. Wdowska<sup>✉</sup>, Mirosław J. Lipiński, Łukasz Jaroń

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

### STRESZCZENIE

Artykuł dotyczy możliwości określenia współczynnika filtracji gruntów spoistych na podstawie różnych podejść. W przypadku metod terenowych przedstawiono jedynie techniki sondowań bezotworowych, które nie wymagają działań administracyjnych w postaci projektu prac geologicznych. W pracy w szczególności zwrócono uwagę na dostosowanie techniki badania laboratoryjnego do rodzaju gruntu w odniesieniu do bezpośrednich i pośrednich metod wyznaczania współczynnika filtracji. Zwrócono uwagę na warunki, jakie powinny być spełnione, aby wynik badania był wiarygodny. Przedstawiono wyniki badań ilustrujące zmiany parametrów filtracji gruntów nieznacznie różniących się pod względem uziarnienia.

**Słowa kluczowe:** współczynnik filtracji, grunty spoiste, dobór metody, jakość wyników badania

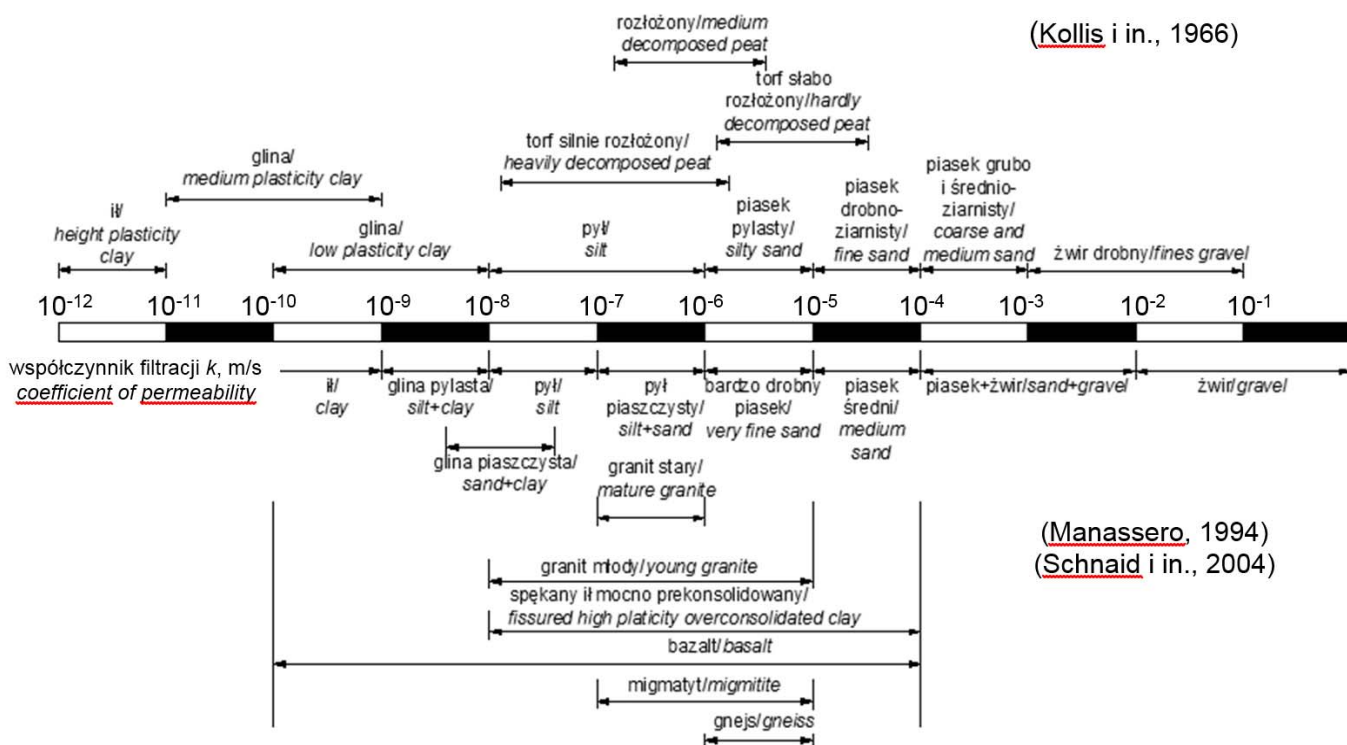
### WSTĘP

Zagadnienie wyznaczania współczynnika filtracji gruntu znacznie rzadziej stanowi przedmiot zlecenia w dokumentacjach geologiczno-inżynierskich czy projektach geotechnicznych aniżeli parametry wytrzymałościowe czy odkształceniowe. Jedną z przyczyn jest fakt, że dla mniejszych budowli bardzo często wielkość współczynnika filtracji określana jest na podstawie zestawień tabelarycznych znajdujących się w podręcznikach hydrogeologii lub gruntoznawstwa. Dopiero w przypadku dużych budowli (zapory wodne, linie metra) określenie współczynnika filtracji stanowi przedmiot zlecenia. Ponadto podział na grunty niespoiste i spoiste jest znacznie bardziej istotny ze względu na metody wyznaczania współczynnika filtracji aniżeli w przypadku wyznaczania wytrzymałości lub parametrów sztywności. W przypadku gruntów niespoistych w dużych projektach stosuje się metody terenowe z uwagi na fakt, że uwzględniają niejednorodność budowy podłoża, a ich wynik stanowi górne oszacowanie parametru filtracji, które jest bardziej istotne ze względu na zaprojektowanie odwodnienia. W małych projektach często korzysta się ze wzorów empirycznych bazujących na średnicach miarodajnych. Warto podkreślić, że chociaż baza danych na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat znacznie się poszerzyła, to podejście do wyznaczenia współczynnika filtracji w gruntach niespoistych w zasadzie nie zmieniło się.

W przypadku gruntów spoistych sytuacja jest odmienna. Tutaj na przestrzeni lat dokonał się istotny postęp w badaniach zarówno terenowych, jak i laboratoryjnych. Znaczne poszerzenie bazy danych na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat w stosunku do wszystkich rodzajów gruntów i skał zaowocowało przesunięciem granic współczynnika filtracji dla poszczególnych rodzajów gruntu. Przykładem tego jest porównanie wartości współczynników filtracji ( $k$ ) dla różnych materiałów geologicznych z lat sześćdziesiątych (Kollis, Wolski, Herfurt, Kowalski, Mikucki, Mioduszeński, ... i Żbikowski, 1966) i dziewięćdziesiątych (Manassero, 1994)

<sup>✉</sup>malgorzata\_wdowska@sggw.pl

poprzedniego stulecia (rys. 1). Dane zostały uzupełnione o wartości współczynnika filtracji dla skał (Schnaid, Lehane i Fahey, 2004). Jak wynika z przytoczonego porównania, zakresy  $k$  dla poszczególnych rodzajów gruntu różnią się istotnie, zwłaszcza jeżeli chodzi o grunty spoiste.



**Rys. 1.** Typowe wartości współczynnika filtracji w gruntach naturalnych

**Fig. 1.** Typical values of coefficient of permeability in natural soils

W artykule przedstawiono możliwości określenia współczynnika filtracji gruntów spoistych na podstawie różnych podejść. Spośród metod terenowych omówiono tylko sondowania bezotworowe. W przypadku metod laboratoryjnych szczególną uwagę zwrócono na prawidłowy dobór metody badania ze względu na zakres współczynnika filtracji, a także na zapewnienie wysokiej jakości badania wynikającej z warunków, jakie powinny być spełnione podczas jego przeprowadzania.

## METODY

### Metody terenowe

Największą zaletą określania współczynnika filtracji metodami terenowymi jest to, że pomiary wykonywane są *in situ*, a zatem reprezentatywność obszaru poddanego badaniu jest zachowana. Wartość współczynnika filtracji uzyskana w laboratorium jest zazwyczaj mniejsza od współczynnika filtracji określonego metodami terenowymi. Wynika to z jakości oraz wielkości próby gruntu poddanej badaniu w laboratorium, gdzie używa się jednorodnej, najczęściej niespękanej próbki gruntu. W pomiarach *in situ* badaniem objęta jest dużo większa objętość gruntu, która często ma liczne spękania i przewarstwienia. Ze względu na kosztochłonność terenowe metody otworowe, np. metoda próbnego pompowania dla stanu ustalonego lub różne wersje metody zalewania

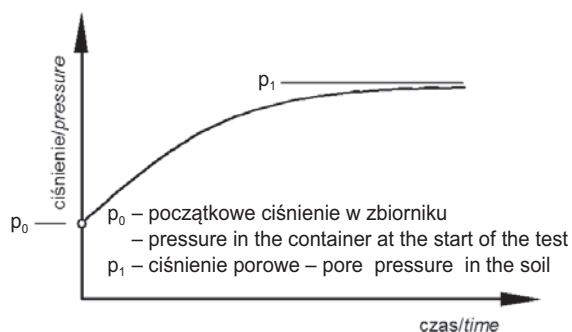
otworu, można wykonywać w ramach dużych projektów. Ponadto wykonanie otworu wiąże się z czynnościami administracyjnymi (np. złożeniem projektu prac geologicznych), a także wprowadzeniem dodatkowego ryzyka, gdyż jakiegokolwiek zmiany położenia zwierciadła wody w obszarze gęstej zabudowy powodują dodatkowe oddziaływanie na otoczenie. W tej sytuacji coraz częściej w praktyce inżynierskiej określenie współczynnika filtracji metodami terenowymi sprowadza się do wykorzystania wyników sondowań BAT, CPTU i DMT, z których można uzyskać szacowaną wartość współczynnika filtracji. Spośród wymienionych technik terenowych jedynie sonda BAT jest urządzeniem szczególnie dedykowanym do wyznaczania współczynnika filtracji. W przypadku sondowań statycznych CPTU i DMT wyznaczanie współczynnika filtracji nie jest głównym przeznaczeniem urządzenia, a jedynie dodatkową funkcjonalnością. Poniżej zostaną krótko scharakteryzowane sposoby wyznaczania współczynnika filtracji przy wykorzystaniu wymienionych trzech rodzajów sondowań.

**Sondowanie BAT.** Sonda BAT jest urządzeniem dedykowanym do pomiaru współczynnika filtracji w gruntach słabo przepuszczalnych o wartościach współczynnika filtracji mniejszych niż  $10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . W końcówce sondy wciskanej w grunt znajduje się system pomiarowy, na który składa się zestaw membran, igieł oraz pojemników na gaz/wodę (Torstensson, 1984). W zależności od stopnia wypełnienia porów wodą w gruncie badanie może być wykonywane w warunkach dostarczania (*inflow*) lub odpływu (*outflow*) wody z końcówki sondy. W każdym układzie jest to rodzaj badania ze zmiennym gradientem. Biorąc za podstawę prawo Boyle’a Mariotte’a oraz mierząc wartości ciśnienia i objętości, wartość współczynnika filtracji można określić z następującego wzoru (Torstensson i Petsonk, 1986):

$$k = \frac{p_0 V_0}{Ft} \left( \frac{1}{p_1 p_0} - \frac{1}{p_1 p_t} + \frac{1}{p_1^2} \left( \frac{\ln(p_0 - p_1)}{p_0} \cdot \frac{p_t}{p_t - p_1} \right) \right) \quad (1)$$

gdzie:  $k$  – współczynnik filtracji [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ],  
 $p_0$  – początkowe ciśnienie w zbiorniku [ $\text{mH}_2\text{O}$ ],  
 $p_t$  – ciśnienie w zbiorniku po czasie  $t$  [ $\text{mH}_2\text{O}$ ],  
 $p_1$  – ciśnienie porowe [ $\text{mH}_2\text{O}$ ]  
 $t$  – czas [s],  
 $V_0$  – objętość gazu w jednostce czasu [ $\text{m}^3$ ],  
 $F$  – współczynnik przepływu charakteryzujący wymiary filtra [m].

Czas stabilizacji ciśnienia (rys. 2), który jest najważniejszym czynnikiem określającym czas trwania badania, zależy od współczynnika filtracji. Orientacyjne jego wartości wynoszą:  $k \sim 10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ : 1 min;  $k \sim 10^{-8} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ : 10 min;  $k \sim 10^{-9} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ : 1 godz.;  $k \sim 10^{-10} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ : 10 godz.



**Rys. 2.** Stabilizacja ciśnienia podczas badania sondą BAT z dostarczaniem wody do końcówki

**Fig. 2.** Stabilization of pressure during BAT inflow test

**Sondowania CPTU i DMT.** Współczynnik filtracji może być również określony na podstawie sondowań statycznych CPTU i DMT. Należy jednakże podkreślić, że w obydwu przypadkach jest to związane z wykonywaniem dodatkowych procedur, które nie są konieczne podczas realizacji standardowego badania. W przypadku obu rodzajów sondowań wykorzystuje się fakt, że charakterystyki przepuszczalności i konsolidacji są ze sobą związane następującą zależnością:

$$k_h = \frac{C_h \gamma_w}{M_h} \quad (2)$$

gdzie:  $k_h$  – współczynnik filtracji poziomej [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ],  
 $C_h$  – współczynnik konsolidacji w kierunku poziomym [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ],  
 $\gamma_w$  – ciężar objętościowy wody [ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ ],  
 $M_h$  – moduł ściśliwości [ $\text{kPa}$ ].

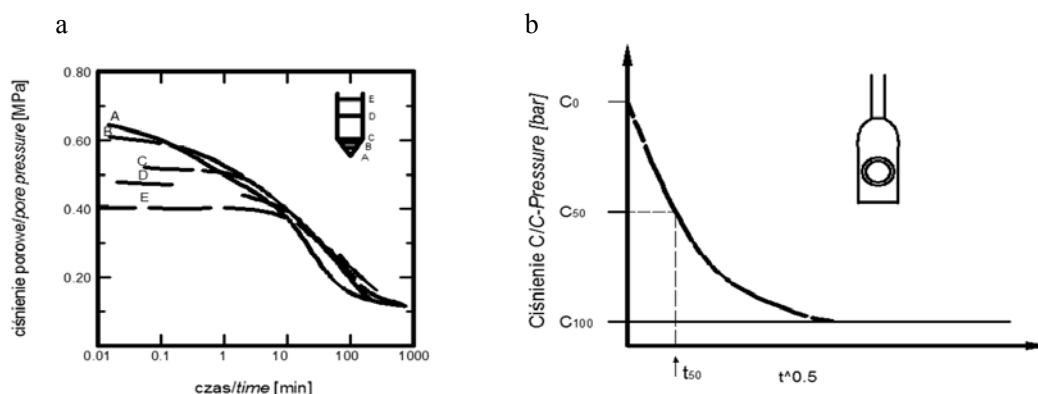
Indeksy oznaczające kierunek filtracji są ważne, a wynikają nie tylko z budowy końcówek sond DMT i CPTU, które umożliwiają wyznaczenie mierzonych parametrów właśnie w tym kierunku, ale przede wszystkim dlatego, że wartość współczynnika filtracji w kierunku poziomym ( $k_h$ ) może być kilkukrotnie większa niż w kierunku pionowym ( $k_v$ ). Warto również zaznaczyć, że wartość modułu ściśliwości ( $M$ ) powinna być zróżnicowana w zależności od tego, czy pomiar odnosi się do obciążenia gruntu normalnie skonsolidowanego (słabego), czy do odciążenia i powtórnego obciążenia gruntu prekonsolidowanego (relatywnie mocniejszego). Wartość modułu ściśliwości ( $M$ ) jest standardowo wyznaczana w przypadku badania płaskim dylatometrem Marchettiego i może być uznana jako miarodajna. W przypadku badania CPTU oszacowana wartość modułu ściśliwości na podstawie współczynnika proporcjonalności do oporu penetracji ( $q_c$ ) jest znacznie mniej wiarygodna, ale w przypadku braku innych wyników badań może być wykorzystana. W związku z tym, zgodnie ze wzorem (2), w przypadku obydwu sondowań zagadnienie określenia współczynnika filtracji ( $k_h$ ) sprowadza się do wyznaczenia współczynnika konsolidacji poziomej ( $c_h$ ). Parametr ten można określić na podstawie następującej zależności:

$$C_h = \Lambda \left( \frac{T_{50}}{t_{50}} \right) \quad (3)$$

gdzie:  $T_{50}$  – czynnik czasu [s],  
 $t_{50}$  – czas potrzebny do osiągnięcia 50% stanu zaawansowania konsolidacji [s],  
 $\Lambda$  – parametr zależny od kształtu i wymiarów końcówki sondy.

Czynnik czasu ( $T_{50}$ ) jest wielkością zależną od stosunku sztywności, reprezentowanej przez moduł odkształcenia ( $E$ ) lub moduł sprężystości poprzecznej ( $G$ ), do wytrzymałości w warunkach bez odpływu ( $S_u$ ). Wraz ze wzrostem wskaźnika sztywności czynnik  $T_{50}$  zwiększa się.

Aby wyznaczyć czas odpowiadający połowie okresu konsolidacji ( $t_{50}$ ), należy przeprowadzić specjalne procedury, inne dla każdego rodzaju sondowania. W przypadku sondowania CPTU w tym celu wykonuje się test dyssypacji. Polega on na zatrzymaniu sondy w miejscu, gdzie planuje się wykonanie pomiaru, a następnie rejestrowana jest w czasie zmiana wartości ciśnienia wody, wygenerowanego podczas penetracji. Rozpraszanie nadwyżki ciśnienia wody w porach trwa do czasu, aż jego wartość zmniejszy się do wielkości ciśnienia *in situ* przed penetracją. Wartość rejestrowanego ciśnienia (zwłaszcza w początkowej fazie dyssypacji) zależy od lokalizacji filtra w końcówce sondy. Przykładowy rozkład dyssypacji ciśnienia wody w porach w czasie dla różnych lokalizacji filtra w końcówce sondy CPTU przedstawiono na rysunku 3a (Lunne, Robertson i Powell, 1997). W przypadku sondowania DMT rejestracji w czasie podlegają odczyty DMTC (Schmertmann, 1988) lub



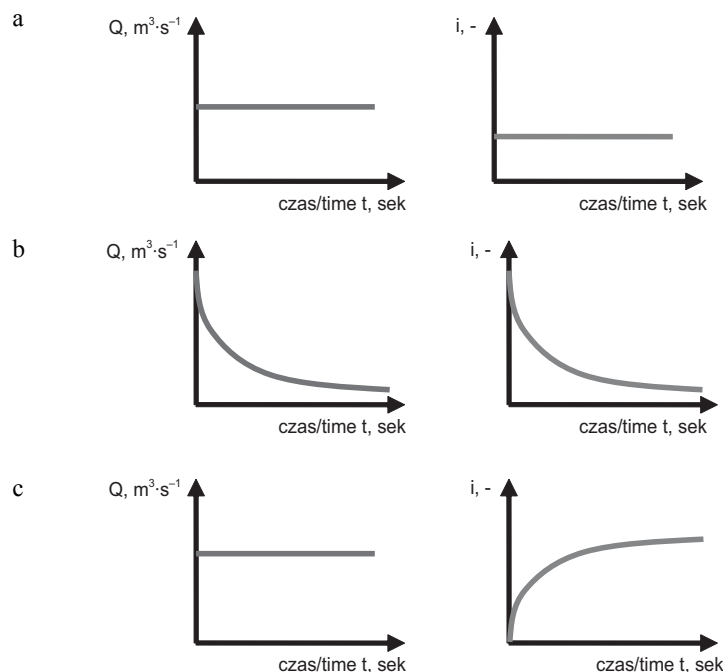
**Rys. 3.** Przykładowe charakterystyki rozpraszania do określenia czasu  $t_{50}$  na podstawie sondowań: a – CPTu, b – DMT  
**Fig. 3.** Examples of dissipation characteristics for determination of  $t_{50}$  on the basis of: a – CPTu, b – DMT tests

DMTA (Marchetti i Totani, 1989). Na rysunku 3b przedstawiono procedurę wyznaczania wartości  $t_{50}$  na podstawie rejestracji odczytów DMTC. Wartości  $C_0$  i  $C_{100}$  są odczytami  $C$  dylatometru, odpowiadającymi największej i najmniejszej wartości ciśnienia działającego na membranę, natomiast określana z krzywej wartość  $C_{50}$  wyznacza wartość  $t_{50}$ .

### Metody laboratoryjne

Laboratoryjne metody badania współczynnika filtracji można ogólnie podzielić na metody stało- i zmiennogradientowe. Metody stałogradientowe (rys. 4a), w których utrzymywany jest stały napór hydrauliczny podczas pomiaru przepływu wody, mogą być wykorzystywane w badaniach gruntów o dużej przepuszczalności. W gruntach drobnoziarnistych czas potrzebny do uzyskania warunków równowagi dopływu i odpływu wody z próbki jest tak długi, że ten typ badań jest bardzo rzadko stosowany w gruntach słaboprzepuszczalnych. Badania współczynnika filtracji metodą stałogradientową najczęściej wykonuje się w komorze Rowe'a, aparacie ZW-K2 czy też systemem Trautwein. Metody zmiennogradientowe (rys. 4b), w których wielkością mierzoną podczas badania są zmieniające się gradienty, znajdują zastosowanie przy wyznaczaniu parametrów filtracyjnych gruntów słaboprzepuszczalnych, w których otrzymani wartości przepływu są bardzo małe i znajdują się poniżej zdolności pomiarowych. Jedną z najbardziej rozpowszechnionych metod wyznaczania współczynnika filtracji metodą zmiennego gradientu jest metoda rurki Kamieńskiego czy też zmodyfikowany edometr uzupełniony o biuretę o znanej powierzchni przekroju i określaniu w określonych przedziałach czasu wartości naporów hydrodynamicznych.

Jednakże należy zaznaczyć, że standardowe metody wykorzystujące technikę zmiennego gradientu nie spełniają podstawowego warunku, jaki stawiany jest technikom laboratoryjnym, tj. nie zapewniają kontroli nad wykonywanym doświadczeniem, a dokładnie kontroli warunków brzegowych ze względu na wielkość przepływu. Wpływają na to dwie okoliczności. Pierwsza z nich wynika z braku możliwości wykluczenia tzw. uprzywilejowanych dróg filtracji, które mogą przybierać formy mikroszczelin umiejscowionych między ścianką cylindra a próbką. Druga z nich odnosi się do niepełnego nasycenia porów próbki wodą. W badaniach przy zastosowaniu standardowych metod zmiennogradientowych nigdy nie ma pewności, że pory są całkowicie wypełnione wodą. Pozostałe źródła błędów w badaniach przepuszczalności hydraulicznej podali: Daniel (1994), Sharma i Lewis (1994), Lipiński i Wdowska (2005), Wdowska i Lipiński (2005). Metodą, która jest pozbawiona wad metod stało- i zmiennogradientowych jest metoda stabilizującego się gradientu (rys. 4c) przy ustalonym przepływie (technika *flow-pump*), w której wymusza się stałą prędkość przepływającej przez próbkę wody, a mierzy różnicę ciśnień na końcach próbki. Woda ze stałą prędkością podawana jest do dołu próbki, a napór hydrauliczny na



**Rys. 4.** Schematy metod stosowanych do wyznaczenia współczynnika filtracji w laboratorium: a – metoda stałogradientowa, b – metoda zmiennogradientowa, c – metoda stabilizacji gradientu

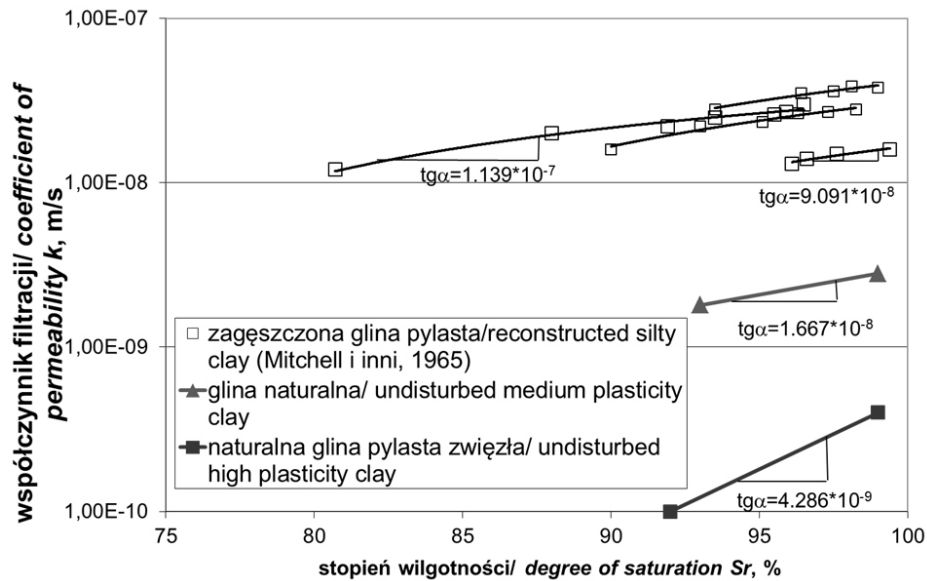
**Fig. 4.** Approaches used for determination of coefficient of permeability in laboratory: a – constant gradient method, b – nonconstant gradient method, c – flow-pump method

dolną powierzchnię wzrasta aż do ustabilizowania się różnicy ciśnień pomiędzy dołem a górą próbki. Dodatkową zaletą tej metody jest współpraca pompy przepływu z próbką umieszczoną w aparacie trójosiowego ściskania lub w konsolidometrze, co daje możliwość nasączenia próbki metodą ciśnienia wyrównawczego (Lipiński i Wdowska, 2004, 2010) a pomiar przepuszczalności następuje w warunkach zadawania ciśnienia wyrównawczego, co sprawia, że powietrze, które się rozpuściło podczas nasączenia, nie ulegnie dekondensacji.

### Reprezentatywność badanego gruntu

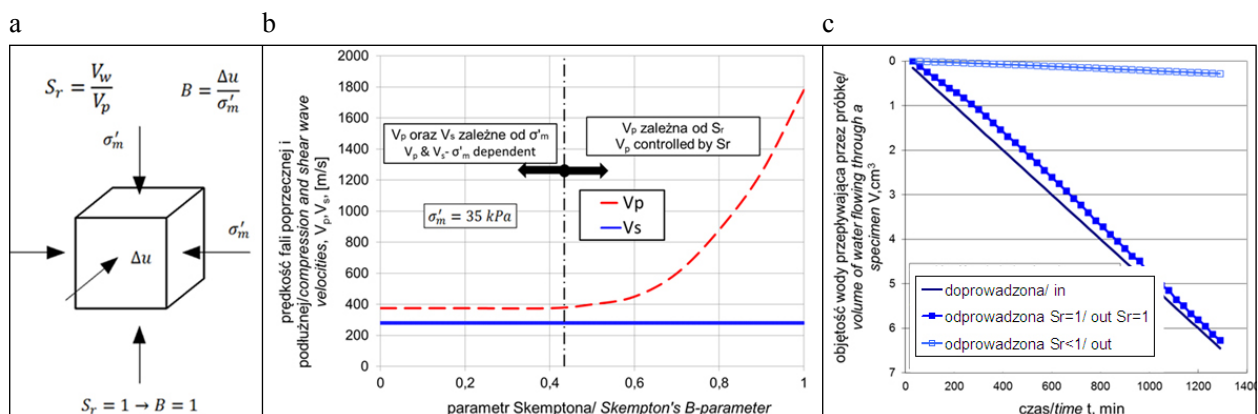
**Stopień wilgotności.** Z danych przedstawionych na rysunku 5 (Mitchell, Hooper i Campanella, 1965, uzupełnione wynikami badań własnych) wynika, że stopień wypełnienia porów wodą ma istotny wpływ na wartość współczynnika przepuszczalności. Ze względu na fakt, że przepuszczalność gruntu przy pełnym nasyceniu jest większa aniżeli w ośrodku trójfazowym, w celu jednoznacznego ustalenia właściwości ośrodka badania laboratoryjne powinny być wykonywane na gruncie, w którym wszystkie pory są całkowicie wypełnione wodą. W związku z tym prawidłowo przeprowadzone wyznaczenie współczynnika filtracji powinno być wykonane na materiale, co do którego nie ma wątpliwości, że jest w pełni nasycony. W przypadku gruntów spoistych uzyskanie ich pełnego nasycenia w warunkach laboratoryjnych możliwe jest poprzez zastosowanie metody ciśnienia wyrównawczego (Lipiński i Wdowska, 2004, 2010). Metoda ta jest stosowana rutynowo w prawidłowo prowadzonych badaniach trójosiowych i konsolidometrycznych. W zależności od rodzaju aparatury i wielkości ciśnień zadawanych do urządzeń stosowane są systemy pneumatyczne lub hydrauliczne.

Niezależnie od wykorzystywanej aparatury immanentną cechą procedury nasączenia jest sprawdzenie stanu nasączenia próbki. Najbardziej rozpowszechnioną metodą sprawdzenia, jak bardzo stopień wilgotności ( $S_r$ ) jest



**Rys. 5.** Wpływ niepełnego nasycenia na wartość współczynnika filtracji gruntu  
**Fig. 5.** Influence of insufficient saturation on value of coefficient of permeability

bliski wartości maksymalnej, jest wyznaczenie wartości parametru  $B$  ze wzoru Skemptona (1954). Wartość tego parametru wyznacza się w trakcie kolejnych etapów zadawania ciśnienia wyrównawczego poprzez izotropowe ściskanie próbki w warunkach zamknięcia próbki wraz z czujnikiem ciśnienia. Zmiana ciśnienia wody w porach ( $\Delta u$ ) wywołana przyrostem naprężenia izotropowego ( $\sigma'_m$ ) określa wartość parametru  $B$  (rys. 6a). Wartość parametru  $B$  przekraczająca 0,95 jest wystarczająca dla uznania, że grunt dla celów wyznaczania współczynnika filtracji jest w pełni nasączony. Inną możliwością sprawdzenia stanu wypełnienia porów wodą, która może być przeprowadzona niezależnie od pomiaru parametru  $B$ , jest pomiar prędkości fali podłużnej w badanej próbce. Obecnie,



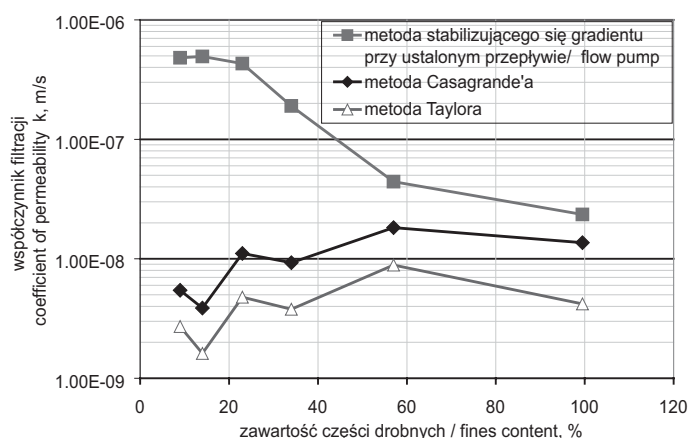
**Rys. 6.** Możliwość kontroli pełnego nasycenia w warunkach laboratoryjnych: a – sprawdzenie parametru Skemtona  $B$ , b – pomiar prędkości fali podłużnej ( $V_p$ ), c – bilans objętości wody  
**Fig. 6.** Capability of full saturation check in laboratory: a –  $B$ -check, b –  $P$ -waves velocity measurement, c – balance of water volume

kiedy coraz więcej laboratoriów dysponuje sprzętem do pomiaru prędkości fal mechanicznych, tego rodzaju pomiar może być wykonany na każdym etapie badania. Wprawdzie większość komercyjnie dostępnego sprzętu wyposażona jest tylko w piezoelementy do generacji fal poprzecznych, ale one również mogą być wykorzystane do generacji fali podłużnej, chociaż nie z tak dobrym skutkiem jak osobne piezoelementy do generacji i odbioru tylko fali typu  $P$ . Wykorzystanie pomiaru prędkości fali podłużnej do określenia pełnego nasycenia wynika z faktu, że prędkość propagacji tego typu fali znacząco wzrasta (około pięciokrotnie do prawie ustalonej wartości, przekraczającej  $1540 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), gdy pory są całkowicie wypełnione wodą. Według Vale-Molina (2006) i Stokoe i Vale-Molina (2012) tylko w zakresie małych wartości naprężenia efektywnego wielkość prędkości fali podłużnej i poprzecznej jest kontrolowana przez szkielet gruntowy (rys. 6b). Dla większych wartości stopnia wilgotności ( $S_r$ ), a zatem także parametru Skemptona  $B$ , prędkość fali podłużnej zależy już tylko od stopnia wilgotności, podczas gdy prędkość fali poprzecznej zależy głównie od stanu naprężenia efektywnego. Atrakcyjność tej metody wynika z faktu, że odczyt czasu propagacji fali podłużnej jest bardzo jednoznaczny dla pełnego nasycenia porów wodą.

Inną metodą sprawdzenia, czy pory gruntu są w pełni nasycone wodą, stosowaną właśnie w badaniach przepuszczalności, jest porównanie objętości wody dopływającej i odpływającej z próbki (rys. 6c). Porównanie przepływów dla próbki nasączonej i nienasączonej wyraźnie wskazuje, że objętość wody wchodzącej i wychodzącej z próbki nienasączonej nie bilansuje się, co oznacza, że warunki przepływu są nieustalone.

### Wyznaczanie współczynnika filtracji na podstawie metod pośrednich

Wyznaczenie współczynnika filtracji w sposób pośredni na podstawie analizy przebiegu procesu konsolidacji w jednoosiowym stanie odkształcenia można przeprowadzić z zastosowaniem m.in. metod Casagrande'a i Taylora. Należy jednak 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 nasączania gruntu. W celu określenia efektywności wyznaczania współczynnika filtracji metodami pośrednimi Wdowska i Lipiński (2016) przeprowadzili badania w konsolidometrze wielkowymiarowym na sześciu rodzajach gruntu o zróżnicowanej zawartości frakcji drobnej. 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*. Na rysunku 7 przedstawiono porównanie wyników



**Rys. 7.** Możliwości określenia współczynnika filtracji metodami pośrednimi w laboratorium

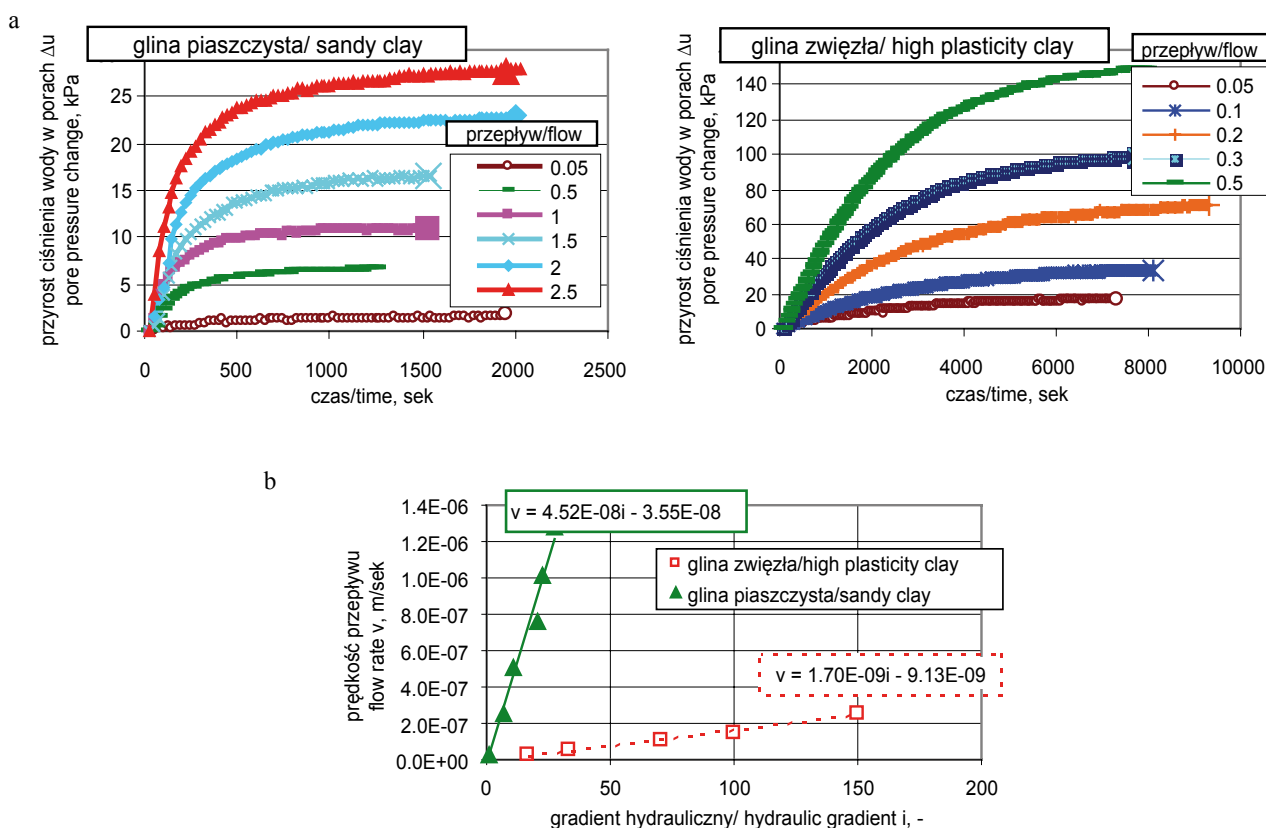
**Fig. 7.** Indirect approaches for evaluation of coefficient of permeability in laboratory



badania, z których jednoznacznie wynika, że miarodajność określania współczynnika filtracji na podstawie danych z konsolidacji zmienia się wraz z uziarnieniem, a im większa jest zawartość frakcji drobnej tym bardziej wielkości określone na podstawie metod pośrednich zbliżone są do wartości pomierzonych bezpośrednio.

### Wyznaczanie współczynnika filtracji w glinach piaszczystych i glinach zwięzłych

W celu porównania przebiegu badania współczynnika filtracji techniką *flow-pump* w glinach piaszczystych i glinach zwięzłych na rysunku 8a przedstawiono charakterystyki przyrostu ciśnienia wody w porach przy danym przepływie. Przebieg stabilizacji gradientu w zależności od rodzaju gruntu dla tych samych przepływów ( $Q = 0,05$  i  $0,5 \text{ mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) różni się zasadniczo. W przypadku glin piaszczystych ciśnienia stabilizują się relatywnie szybko (około 20 min), natomiast w glinie zwięzłej czas potrzebny do ustabilizowania ciśnienia wody w porach wynosi ponad 130 minut. Podobny przebieg stabilizacji gradientów dla odpowiadających sobie wielkości przepływu różni się wartością ustabilizowanego gradientu (zdecydowanie mniejsze dla glin piaszczystych). W celu porównania charakterystyk przepuszczalności dla badanych gruntów na rysunku 8b przedstawiono zależność prędkości przepływu od ustalonego gradientu hydraulicznego. Przedstawione zależności wskazują zasadnicze różnice w charakterystykach przepuszczalności, które dotyczą zarówno wartości gradientu początkowego, jak i współczynnika filtracji.



**Rys. 8.** Porównanie charakterystyk przepuszczalności z badań glin piaszczystych i glin zwięzłych  
**Fig. 8.** Comparison permeability characteristics of sands and medium plasticity clays

## PODSUMOWANIE

Rozwój badań eksperymentalnych w geotechnice, jaki dokonał się w ciągu ostatnich 50 lat, zmienił znacząco wiedzę o właściwościach mechanicznych gruntu. Pomimo że parametry określające przepuszczalność gruntu nie są w głównym nurcie danych potrzebnych do tworzenia złożonych modeli gruntu, to jednak bez ich poprawnego określenia nie jest możliwe wiarygodne rozwiązanie zagadnień konsolidacji koniecznych do wyznaczenie stanu naprężenia efektywnego w gruncie. Z przedstawionego w artykule porównania wartości współczynników filtracji określanych na przestrzeni co najmniej 30 lat wynika, że wielkości te różnią się istotnie. Dotyczy to głównie gruntów spoistych, gdzie postęp w rozwoju technik eksperymentalnych dotyczących wyznaczania parametrów filtracji był większy aniżeli w gruntach niespoistych.

W artykule przedstawiono najbardziej efektywne techniki badań terenowych i laboratoryjnych dotyczące gruntów spoistych. W odniesieniu do badań laboratoryjnych, którym poświęcono więcej uwagi, przedstawiono uwarunkowania poprawnego doboru techniki badania ze względu na rodzaj materiału. Dotyczy to zarówno pośrednich, jak i bezpośrednich metod wyznaczania parametrów przepuszczalności. Wskazano również wymagania jakościowe w odniesieniu do procedury badań, które wpływają na ostateczny rezultat. Przedstawione przykładowe wyniki badań pozwoliły na zwrócenie uwagi na istotne różnice w wartościach parametrów filtracji przy niewielkich różnicach w charakterystykach uziarnienia.

## PIŚMIENNICTWO

- Daniel, D. E. (1994). *State of the art. Laboratory hydraulic conductivity tests for saturated soils*. Hydraulic conductivity and waste contaminant transport in soils. ASTM Philadelphia.
- Kollis, W., Wolski, W., Herfurt, S., Kowalski, W., Mikucki, Z., Mioduszewski, W., Żbikowski, A. (1966). *Gruntoznawstwo techniczne*. Warszawa: Arkady.
- Lipiński, M. J. i Wdowska, M. K. (2004). *Kryteria nasączenia gruntów prekonsolidowanych metodą ciśnienia wyrównawczego. Współpraca budowli z podłożem gruntowym*. II Problemowa Konferencja Geotechniczna Białystok – Białowieża, 2, 71–81.
- Lipiński, M. J. i 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. i Wdowska, M. (2010). Saturation criteria for heavy overconsolidated cohesive soils. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Land Reclamation, 42(2)*, 295–302.
- Lunne, T., Robertson, P. K. i Powell, J. J. M. (1997). *Cone penetration testing in geotechnical practice*. New York: Blackie Academic, EF Spon/Taylor i Francis Publ.
- Manassero, M. (1994). Hydraulic Conductivity Assessment of Slurry Wall Using Piezocone Test. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE 120 (10)*, 1725–1746.
- Marchetti, S. i Totani, G. (1989).  $C_u$  Evaluations from DMTA Dissipation Curves. Proc. XII ICSMFE, Rio de Janeiro, 1, 281–286.
- Mitchell, J. K., Hooper, D. R., Campanella, R. G. (1965). *Permeability of compacted clay*. Soil mechanics and foundations division ASCE.
- Schmertmann, J. H. (1988). *Guidelines for Using the CPT, CPTU and Marchetti DMT for Geotechnical Design*. Rept. No. FHWA-PA-87-022+84-24 to PennDOT, Office of Research and Special Studies, Harrisburg, PA, in 4 volumes with the 3 below concerning primarily the DMT: I – Summary; III – DMT Test Methods and Data Reduction; IV – DMT Design Method and Examples.
- Schnaid, F., Lehane, B. M. i Fahey, M. (2004). *In situ test characterisation of unusual geomaterials*. 2<sup>nd</sup> International Conference on Site Characterisation, Milpress, Porto, 1, 49–74.
- Sharma, H. D. i Lewis, S. P. (1994). *Waste Containment Systems, Waste Stabilization and Landfills. Design and Evaluation*. New York: John Wiley and Sons, Inc.
- Skempton, A. W. (1954). The pore-pressure coefficients A and B. *Géotechnique, 4*, 143–147.

- Stokoe, K. H. i Valle-Molina, C. (2012). Seismic measurements in sand specimens with varying degrees of saturation using piezoelectric transducers. *Canadian Geotechnical Journal*, 49, 6, 671–685.
- Torstensson, B. A. (1984). A new system for Groundwater Monitoring System. *Groundwater Monitoring Review*, 4 (4), 131–138.
- Torstensson, B. A. i Petsonk, A. (1986). *A device for in situ measurement of hydraulic conductivity*. Proc. 4<sup>th</sup> Int. Geotechnical Seminar on Field Instrumentation and in situ Measurements. Singapore.
- Valle-Molina, C. (2006). *Measurements of  $V_p$  and  $V_s$  in dry, unsaturated and saturated sand specimens with piezoelectric transducers*. (PhD thesis). University of Texas at Austin, Austin, TX, USA.
- Wdowska, M. K. i 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.
- Wdowska, M. K. i Lipiński, M. J. (2016). Ocena efektywności wyznaczania współczynnika filtracji metodami pośrednimi w różnych gruntach drobnoziarnistych. *Acta Scientiarum Polonorum Architectura*, 15 (4), 79–89.

## **SELECTION OF A METHOD FOR DETERMINATION OF PERMEABILITY CHARACTERISTICS OF COHESIVE SOILS**

### **ABSTRACT**

The paper concerns the possibility of determination of the coefficient of permeability of cohesive soils on the basis of various approaches. In case of field tests only methods based on nondestructive static probes were described since they do not require any borehole and thus administrative work. Special attention was drawn to proper adjustment of a laboratory method to the soil kind. It refers to direct and indirect methods as well. Test conditions which should be fulfilled to ensure the proper quality of a test results were emphasized. Exemplified results which show change in permeability characteristics due to small differences in granulometry of soil were presented.

**Key words:** coefficient of permeability, cohesive soils, test method selection, quality of test results