

Marzena JAROMIŃSKA*
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski

BADANIA WSPÓLCZYNNIKA FILTRACJI GRUNTÓW SŁABO PRZEPUSZCZALNYCH

Streszczenie. W pracy przedstawiono schemat nowego doświadczalnego stanowiska do pomiarów przepuszczalności gruntów drobnoziarnistych. Opisano budowę i zasady działania zmodyfikowanej komory trójosiowej.

THE INVESTIGATIONS OF THE COEFFICIENT OF PERMEABILITY OF FAINTLY-PERMEABLE SOILS

Summary. In the paper is presented the basic scheme of new experimental set's measuring system of the permeability of natural fine-grained soils. There are written the construction and the operation of the modified triaxial cell.

1. Wprowadzenie

Przepuszczalność albo filtracja, przepuszczalność hydrauliczna, przewodność hydrauliczna - to wszystko określenia obecne w literaturze, opisujące zdolność przepływu cieczy w ośrodku gruntowym. Inżynierowie budownictwa nazywają tradycyjnie współczynnik k w równaniu (1) współczynnikiem przepuszczalności lub współczynnikiem filtracji, natomiast gleboznawcy i hydrogeolodzy zwykle nazywają współczynnik k przepuszczalnością hydrauliczną [3]. Często też o przepuszczalności lub filtracji mówi się w przypadku przepływu cieczy w ośrodku gruntowym w stanie pełnego nasycenia, natomiast o przewodności hydraulicznej w przypadku gruntów nienasyconych [4]. W niniejszym opracowaniu będzie stosowana nazwa „przepuszczalność”, a ściślej „wodoprzepuszczalność” lub „filtracja” w odniesieniu do badanych gruntów nasyconych.

*Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Eugeniusz Dembicki

Analiza przepływu wody w gruntach opiera się na równaniu H. Darcy'ego (1856), którym określa się zależność między spadkiem hydraulicznym i a prędkością przepływu wody w gruncie v :

$$v = k \cdot i, \quad (1)$$

gdzie:

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

$$v = \frac{Q}{A}, \quad (2)$$

i - spadek hydrauliczny (liczba niemianowana), wyrażony stosunkiem $i = \Delta H / l$, tj. przyrostu naporu hydrodynamicznego ΔH do długości drogi przesączania l ;

k - współczynnik filtracji (wodoprzepuszczalności), tj. stała Darcy'ego, mająca miano prędkości, np. m/s.

Jest to zależność liniowa, którą ustalił Darcy, badając zjawisko przesączania wody przez piaski średnioziarniste. Przepuszczalność w tym równaniu zależy nie tylko od właściwości porowatego ośrodka, ale również od właściwości przepływającej cieczy. Prawo Darcy'ego stosuje się do ruchu laminarnego. Przepływ w gruntach spoistych nie przebiega jednak zgodnie z tym prawem, gdyż filtracja wody występuje tu dopiero po przekroczeniu początkowego spadku hydraulicznego. Spadek hydrauliczny jest odwrotnie proporcjonalny do współczynnika filtracji, co oznacza, że w utworach o dobrej przepuszczalności, jak żwiry i gruboziarniste piaski, spadki przy tej samej prędkości filtracji muszą być mniejsze niż w utworach trudno przepuszczalnych. Przyjmuje się, iż początkowe spadki hydrauliczne w gruntach spoistych wynoszą ponad 10, a w łałach przekraczają nawet 30. Przepływ wody w tych gruntach utrudnia woda błonkowata, która zwykle całkowicie wypełnia pory gruntu. W takich warunkach filtracja może nastąpić dopiero wtedy, gdy napężenie 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.

Zagadnieniem granicy stosowalności prawa Darcy'ego zajmowało się bardzo wielu badaczy. Oprócz uwzględnienia w odpowiednich wzorach współczynnika porowatości i średnicy efektywnej d_{10} , próbowano ustalić zależność od innych parametrów, jak np.

współczynnika filtracji, współczynnika porowatości, współczynnika odsączalności itp. Próby te nie dały niestety jednoznacznych wyników. V. Pane i in. [6] wykazują, że przez zastosowanie zgeneralizowanej formy prawa Darcy'ego definicja wodoprzepuszczalności ośrodka porowatego może być zastosowana dla zawiesiny gruntowo-wodnej. Takie zgeneralizowane prawo Darcy'ego opisywał już Gersevanov [6] równaniem:

$$n(v_s - v_w) = \frac{k(n)}{\gamma_w} \frac{\delta \cdot u}{\delta \cdot x}, \quad (3)$$

gdzie:

n - porowatość,

v_s - objętość szkieletu gruntowego,

v_w - objętość wody w porach gruntu,

k - współczynnik filtracji,

γ_w - ciężar właściwy wody,

δ - osiadanie zawiesiny,

u - ciśnienie wody w porach gruntu,

x - współrzędna Eulerowska (zgodna z grawitacją) [6].

Wprowadzenie względnej prędkości w powyższym równaniu rozszerza prawo Darcy'ego na różne procesy związane ze względnym przepływem między dwiema fazami – cząstkami szkieletu gruntowego i porami gruntu wypełnionymi wodą. W rezultacie możemy zapisać:

$$v_s = -v_f = \gamma^* k(n)(1-n) = \gamma^* \frac{k(e)}{(1+e)}, \quad (4)$$

gdzie:

v_s - prędkość sedymentacji,

v_f - prędkość przepływu,

γ^* - stała bezwymiarowa,

$$\gamma^* = (\gamma_s - \gamma_w) / \gamma_w$$

γ_s - ciężar właściwy szkieletu gruntowego,

γ_w - ciężar właściwy wody,

k - współczynnik filtracji,

n - porowatość,

e - wskaźnik porowatości [6].

W praktyce, w badaniach laboratoryjnych najczęściej określamy nie prędkość przepływającej wody, lecz jej objętość. Między objętością wody Q , współczynnikiem filtracji k , przekrojem przepływu A i spadkiem hydraulicznym i istnieje zależność, wyrażająca się wzorem:

$$Q = v \cdot t \cdot A = k \cdot i \cdot t \cdot A, \quad (5)$$

w którym:

Q - objętość przefiltrowanej wody (wydatek przepływu), w m^3 ,

v - prędkość filtracji, w m/s ,

k - współczynnik filtracji, w m/s ,

i - spadek hydrauliczny (liczba niemianowana),

t - czas przepływu, w s ,

A - powierzchnia przekroju gruntu prostopadła do kierunku przepływu, w m^2 .

Mając więc zmierzone doświadczalne wartości Q , t i A oraz spadek hydrauliczny i , można obliczyć stałą k .

2. Metody badań

Pomiary filtracji gruntów słabo przepuszczalnych są coraz częściej prowadzone w laboratoriach mechaniki gruntów. Wodoprzepuszczalność jest jedną z najbardziej zmiennych cech gruntu. Zmienia się w zakresie ponad 10 bilionów wartości od około 10^{-14} m/s do 10^3 m/s . Ten wysoki stopień zmienności powoduje wiele problemów przy określaniu przepuszczalności gruntów w laboratorium, szczególnie gruntów słabo przepuszczalnych. Nieznaczne zmiany w sposobie badania czy w aparaturze pomiarowej mogą w następstwie spowodować olbrzymie zmiany w otrzymywanych wartościach wodoprzepuszczalności. Dlatego też pomiary filtracji gruntów słabo przepuszczalnych wymagają bardzo czułych, precyzyjnych urządzeń. W ostatnich latach zaczęto stosować aparaty, których działanie opiera się na jednej z kilku podstawowych zasad. Są to przyrządy grawimetryczne, diafragmy (membrany) walcowe, biurety, naczynia z rtęcią i serwomechanizmy. Każdy z nich ma swoje zalety, ale i niemałe wady. Metoda grawimetryczna jest stosunkowo łatwa do zastosowania i precyzyjna, ale przetworniki siły są zbyt drogie. Urządzenia z membraną walcową posiadają

niewystarczającą rozdzielczość i wykazują mechaniczną histerezę. Z kolei system biuret jest wolny od mechanicznej histerezy, jednak powietrze, które dostaje się tu wraz z ciśnieniem wstecznym, może rozchodzić się w trakcie badania i wpływać na obniżenie wiarygodności wyników. Naczynia z rtęcią są bardzo niebezpieczne w pracy rutynowej. Serwomechanizm wymaga specjalistycznego projektu, ma skomplikowane działanie i jest drogi [1].

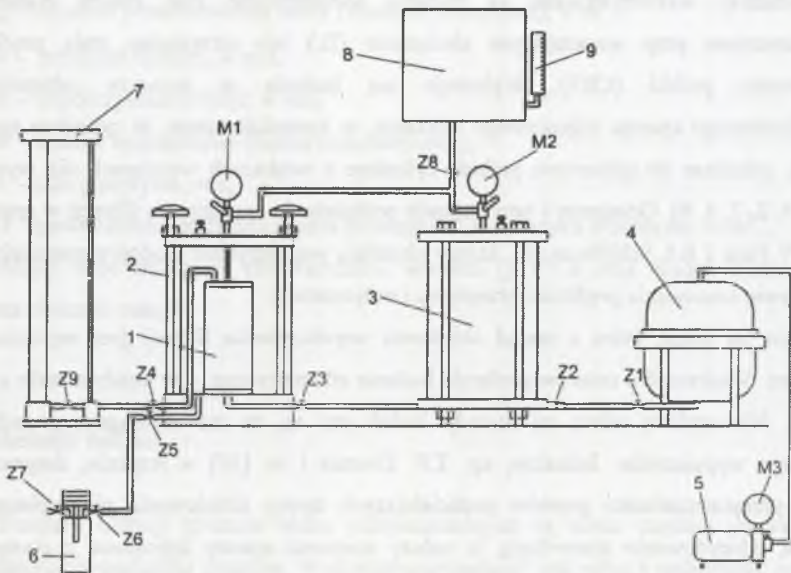
Wykorzystywanie powyższych zasad, jednej z nich lub łącząc kilka, może rozwijać coraz lepsze metody określania współczynnika filtracji. Ciągłe jeszcze stosuje się standardowe badania edometryczne przy zmiennym ciśnieniu hydrostatycznym i wzrastającym obciążeniu (IL). Rzadziej wykorzystywane są badania edometryczne pod stałym ciśnieniem hydrostatycznym przy wzrastającym obciążeniu (IL) lub utrzymując stałą prędkość, odkształcanie próbki (CRS). Wykonuje się badania w komorze odpowiednio zmodyfikowanego aparatu trójosiowego ściskania, w konsolidometrze, w cylindrze aparatu Proctora, cylindrze do pobierania próbek, cylindrze o większych wymiarach niż wymiary próbki [9, 2, 7, 5, 8]. Odmienne i nowy sposób podejścia do zagadnienia filtracji w gruntach opisują V.Pane i R.L.Schiffman [6], którzy określają współczynnik wodoprzepuszczalności na podstawie szacowania prędkości przepływu i sedymentacji.

Zdania na temat, która z metod określania współczynnika filtracji jest najlepsza, są podzielone. Większość z autorów preferuje badania edometryczne, a w każdym razie z nich korzysta. Niewątpliwą zaletą tej metody badań jest to, że nie wymaga ona żadnego specjalnego wyposażenia. Jednakże, np. T.F. Zimmie i in. [10] w artykule, dotyczącym badania przepuszczalności gruntów podścielających tereny składowania niebezpiecznych odpadów, zdecydowanie stwierdzają, iż należy stosować aparaty trójosiowe z elastyczną membraną. Jest to, wg autora, najlepsza droga do wyeliminowania bocznego przepływu wzdłuż próbki – ważnego źródła błędów pomiarowych.

3. Nowe stanowisko pomiarowe do badań przepuszczalności gruntów

W ramach realizacji programu badań Katedry Geotechniki UWM w Olsztynie wykonywane są laboratoryjne pomiary wodoprzepuszczalności gruntów słabo przepuszczalnych. Stosuje się tu, obok tradycyjnych metod badań w edometrach, zmodyfikowaną komorę aparatu trójosiowego ściskania i system biuret.

Stanowisko pomiarowe do badań współczynnika filtracji pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Doświadczalne stanowisko pomiarowe przepuszczalności gruntów drobnociążystych
Fig. 1. Experimental set-up for measurement of permeability of fine-grained soils

1. próbka gruntu, 2. zbiornik wody otaczający próbkę, 3. zbiornik wody przetłaczanej przez próbkę,
4. akumulator powietrzno – hydrauliczny, 5. sprężarka, 6. urządzenie numnikowe, 7. układ pomiarowy
8. zbiornik wody, 9. wskaźnik poziomu wody w zbiorniku, Z – zawory; M – manometry pomiarowe.

Do przeprowadzenia badań współczynnika filtracji niezbędna jest naturalnie odgazowana woda, która magazynowana jest w zbiorniku (8) zaopatrzonego we wskaźnik jej poziomu (9).

Jedną z pierwszych czynności, jakie należy wykonać podczas badania, jest założenie próbki (1). W tym celu zdejmuje się obudowę zbiornika (2). Po założeniu próbki należy ponownie zmontować obudowę zbiornika, tak by zapobiec przechyleniom próbki w trakcie badań. Następnie należy uzupełnić wodę w układzie i napelnić urządzenie nurnikowe (nurnik ustawić w górne położenie).

Po wykonaniu kilku pomiarów przepływu należy uzupełnić wodę w akumulatorze (4).

Zadawanie ciśnienia odbywa się za pomocą urządzenia nurnikowego. Ciśnienie na zewnątrz próbki zadawane jest poprzez położenie obciążników na talerz nurnika, a jego wartość wskazywana jest przez manometr M1. Po zbadaniu ciśnienia nurnik powinien mieć możliwość dalszego ruchu w dół.

Ciśnienie wody przepływającej przez próbkę wytwarzane jest przez sprężarkę. Wartość ciśnienia zadanego w układzie odczytywana jest z manometru M2.

Z uwagi na możliwość przepływu wody pomiędzy próbą a membraną należy pamiętać o tym, że ciśnienia muszą spełniać warunek:

$$p_2 > p_1,$$

gdzie:

p_2 – ciśnienie zewnętrzne,

p_1 – ciśnienie wewnętrzne.

Do badań własnych współczynnika filtracji zostały użyte ciśnienia $p_2 > p_1 \approx 100\text{kPa}$. Aby zminimalizować zmiany objętości gruntu w aparaturze oraz zmiany lepkości wody w porach gruntu, właściwe dla zmian temperatury, utrzymywano stałą temperaturę w laboratorium w granicach $\pm 1,0^\circ\text{C}$.

Komorę z zamieszczoną w niej próbą można uważać za przygotowaną do badań, gdy pomiędzy gumową membraną a próbą nie będzie pęcherzy powietrza w postaci jasnych plam oraz gdy w przewodzie odprowadzającym wodę z próbki nie zauważymy pęcherzyków powietrza. W celu odpowietrzenia próbki stosuje się tu standardową już procedurę, tj. należy podawać na podstawę próbki, w krótkich odstępach czasu, ciśnienie wyższe od ciśnienia panującego w komorze aparatu. Czynność tę powtarza się do momentu, aż przewód odprowadzający wodę z górnej części próbki oczyści się z pęcherzyków powietrza. Dopiero wówczas można uznać stan próbki za odpowiadający jej

całkowitemu nasyceniu wodą. Czas potrzebny na pełne nasycenie próbki gruntu w naszych badaniach wynosił 4 – 6 dni.

Wartość współczynnika filtracji wyznacza się ze wzoru:

$$k = \frac{Q \cdot L}{A \cdot t \cdot h_w}, \quad (6)$$

gdzie:

- k – współczynnik filtracji,
- Q – objętość przefiltrowanej wody,
- L – wysokość próbki gruntu,
- t – czas trwania badania,
- A – pole przekroju próbki,
- h_w – wysokość ciśnienia hydraulicznego.

4. Wnioski

Celem tego artykułu było zaprezentowanie nowego stanowiska pomiarowego do badań właściwości filtracyjnych gruntów słabo przepuszczalnych. W związku z potrzebą określania cech gruntów stosowanych jako izolacyjne bariery geologiczne badaniom poddano ility zastoiskowe z rejonu Olsztyna. Uzyskane wyniki badań, rzędu $n \times 10^{-11}$ m/s, są porównywalne z wynikami badań prowadzonych równolegle w standardowym aparacie trójosiowym firmy Wykeham Farrance (Katedra Geotechniki PG). Jest to bardzo precyzyjny aparat, wyposażony w urządzenie do pomiaru niewielkich zmian objętości wody przepływającej przez próbkę gruntu, podłączony do systemu automatycznego zbierania i gromadzenia danych pomiarowych. Porównywalność tych wyników badań potwierdza możliwość wykorzystania nowego aparatu do oceny właściwości filtracyjnych gruntów słabo przepuszczalnych.

LITERATURA

1. Araruna J.T., Jr., Harwood A.H., Clarke B.G.: A practical, economical and precise volume change measurement device, *Geotechnique* 45, No.3, 1995, pp. 541-544.
2. Daniel D.E., State-of-the-art.: Laboratory hydraulic conductivity tests for saturated soils, Hydraulic conductivity and waste contaminant transport in soils, ASTM STP 1142 (D.E.Daniel and S.J.Trautwein, eds), ASTM, Philadelphia 1994.
3. Garbulewski K.: Dobór i badania gruntowych uszczelnień składowisk odpadów komunalnych, Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2000.
4. Kaczyński R. i in.: Współczynnik filtracji gruntów spoistych wyznaczony różnymi metodami, Aktualne problemy geologiczno-inżynierskich badań podłoża budowlanego i zagospodarowania terenu, Warszawa listopad 1999, str.59-70.
5. Marciniak M., Przybyłek J., Herzig J., Szczepańska J.: Badania współczynnika filtracji utworów półprzepuszczalnych, Wydawnictwo Sorus, 1999.
6. Pane V. i Schiffman R.I.: The permeability of clay suspensions, *Geotechnique* 47, No.2, pp. 273-288, 1997.
7. Sharma H.D., Lewis S.P.: Waste Containment Systems, Waste Stabilization and Landfills, Design and Evaluation, John Wiley and Sons, Inc., 1994.
8. Wysokiński L., Łukasik S.: Badania szczelności izolacji mineralnych składowisk odpadów, Instrukcja ITB 339/96, Warszawa 1996.
9. Yong R.N., Mohamed A.M.O., Warkentin B.P.: Principles of Contaminant Transport in Soils, Developments in Geotechnical Engineering, 73, Elsevier Science Publisher B.V., 1996.
10. Zimmie T.F., Doynow J.S. i Wardell J.T.: Permeability testing of soils for hazardous waste disposal sites, Proceedings of the 10th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm 1982, vol.2, pp. 403-406.

Recenzent: Dr hab. Zbigniew Lechowicz, prof. SGGW

Abstract

In recent years, the permeability of natural fine-grained soils is a problem of growing importance in geotechnical engineering. The permeability is a dominant parameter in the

design of waste disposal facilities involving burial in natural weak soil deposits or the use of weak soil liners in surficial or underground reservoirs. The permeability is also a key element in the analysis of groundwater regimes in slopes or in the design of water retaining structures.

In laboratory, the new system recently developed in the Department of Geotechnics was applied. In the paper there are presented new experimental set's measuring system of the permeability of faintly-permeable soils. The use of modified triaxial cell for measuring permeability was proposed. The permeability of clay obtained using new methods is in range of $n \times 10^{-11}$ m/s.