

Edyta MALINOWSKA

Katedra Geoinżynierii SGGW
Department of Geotechnical Engineering WAU

Badania zmian współczynnika filtracji na potrzeby oceny odkształceń konsolidacyjnych gruntów słabonośnych* **Investigation of permeability coefficient and its variability in consolidation of soft soils**

Słowa kluczowe: współczynnik filtracji, konsolidacja gruntu, grunt słabonośny, technika badania flow-pump

Key words: permeability coefficient, consolidation, organic soil, flow-pump technique

Wprowadzenie

Posadawianie budowli inżynierskich na słabonośnych gruntach organicznych stwarza istotne problemy inżynierskie z uwagi na ich małą wytrzymałość i dużą ściśliwość. Włókniste grunty organiczne charakteryzują się także dużą wilgotnością i anizotropią strukturalną, co wpływa na zmianę wartości współczynnika filtracji pionowej i poziomej w zależności od stanu naprężenia gruntu poddanemu obciążeniu.

Analiza wyników badań wskazuje, że najczęściej poszczególne fazy odkształceń, tj. natychmiastowe, konsoli-

dacyjne i wtórne, nakładają się na siebie i przebiegają równocześnie (Koda 1990, Szymański 1991). Zasadniczą część osiadań podłoża stanowią odkształcenia konsolidacyjne, które zależą głównie od przyrostu naprężenia efektywnego w podłożu, czyli od prędkości rozpraszania nadwyżki ciśnienia porowego. Prawa ruchu fazy ciekłej uwzględnia teoria konsolidacji. Dlatego określenie charakteru i udziału efektów filtracyjnych w procesie odkształceń konsolidacyjnych jest niezmiernie ważne.

Znaczne różnice pomiędzy współczynnikami filtracji gruntów mineralnych i organicznych wymagają stosowania innych metod i innej aparatury badawczej. Stąd też nie zawsze można ściśle stosować metody badań określone normami geotechnicznymi, lecz trzeba je dostosowywać do specyfiki gruntów organicznych.

Z uwagi na fakt, że włóknista struktura gruntów organicznych, szczególnie torfów, może zostać uszkodzona przy zadawaniu zbyt dużego naprężenia lub

*Praca naukowa sfinansowana ze środków budżetowych na naukę w 2005 roku jako projekt badawczy 2P 06F 028 28.

ciśnienia wody w porach, w niniejszej pracy zostanie przedstawiona metodyka badania nowoczesną techniką stałego, wymuszonego przepływu, tzw. flow-pump.

Charakterystyka metody badań współczynnika filtracji z wykorzystaniem techniki flow-pump

W metodzie badania techniką kontrolowanego przepływu wymusza się stałą prędkość przepływającej przez próbkę wody. Dla danego badania mierzy się napór hydrauliczny (ΔH) na wlocie i na wlocie próbki, aż do osiągnięcia momentu, gdy przepływ stanie się ustalony i wówczas można obliczyć współczynnik filtracji ze wzoru:

$$k = \frac{Q \cdot l}{F \cdot t \cdot \Delta h} = \frac{Q}{F \cdot t \cdot i} \quad (1)$$

System wykorzystujący technikę stałego kontrolowanego przepływu (rys. 1) składa się z pompki infuzyjnej o ruchu posuwisto-zwrotnym (1), czujnika różnicowego ciśnienia (2), panelu sterującego (3), systemu rejestrującego (4), a także komory trójosiowej (6) z czujnikami: ciśnienia w komorze, z systemem zapisu (5), ciśnienia wody w porach oraz przemieszczeń.

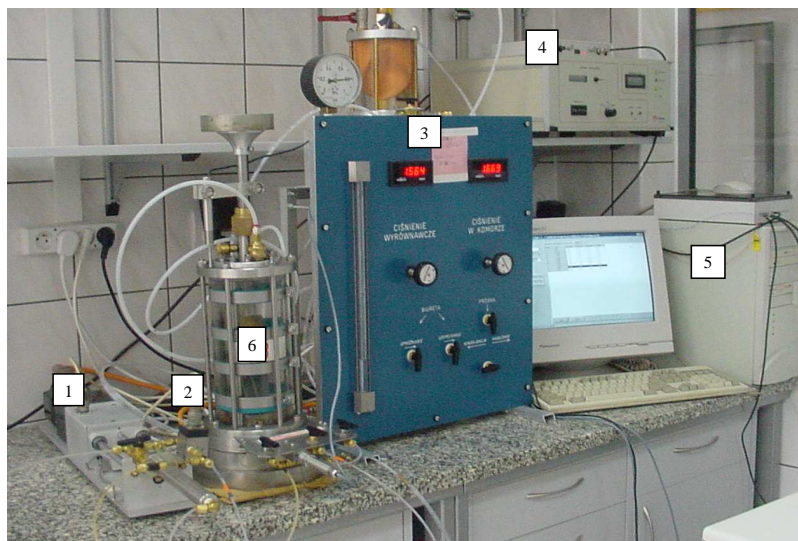
Jest to metoda, która daje możliwość generowania stałego przepływu przez próbkę gruntu poprzez użycie pompki oraz pomiaru różnicy ciśnień wytwarzanej przez czujnik różnicowy. Technika ta została zaakceptowana przez ASTM Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductiv-

ity of Saturated Porous Materials Using Flexible Wall Permeameter (D5084-90) w 1990 roku.

W badaniach laboratoryjnych należy w miarę możliwości wyeliminować błędy, które w zależności od swojej wagi mają wpływ na przepływ cieczy przez próbkę gruntu. Sharma i Lewis (1994) przedstawili źródła błędów w badaniach laboratoryjnych przepuszczalności hydraulicznej, z których wynika, że największy wpływ na zmianę wartości przepuszczalności ma rozwój mikroorganizmów przy długotrwałych badaniach.

Podstawową korzyścią tej techniki w porównaniu z metodą stało- lub zmiennie-gradientową jest to, że przepływ hydrauliczny może być otrzymywany dużo szybciej ze znacznie mniejszym gradientem hydraulicznym (Olsen i in. 1985, 1988, 1991, Aiban i Znidaric 1989).

Z uwagi na zasadnicze zalety badań w aparacie z możliwością odkształceń bocznych próbek gruntu, które są niezwykle ważne w analizie przebiegu procesu konsolidacji (tj. z pomiarem i kontrolą stanu naprężenia gruntu, ciśnienia wody w próbce i w komorze, zmiana przemieszczeń i odcieku) w pracy zastosowano komorę trójosiową. W 1994 roku Olsen i inni uzyskali wyniki, które wskazują, że technika flow-pump z zastosowaniem komory trójosiowej pozwala mierzyć przepływ w bardzo krótkim czasie, tj. dla $k > 10^{-8}$ m/s czas pomiaru wynosi kilka minut, dla $10^{-10} \leq k \leq 10^{-11}$ m/s – czas pomiaru wynosi kilka godzin, a dla $10^{-12} \leq k \leq 10^{-13}$ m/s czas pomiaru wynosi kilka dni.



RYSUNEK 1. Schemat stanowiska do badania przepływu techniką flow-pump: 1 – pompka infuzyjna, 2 – czujnik różnicowy ciśnienia, 3 – panel sterujący, 4 – system rejestracji, 5 – system zapisu, 6 – komora trójosiowa

FIGURE 1. Scheme of apparatus for permeability test by flow – pump technique: 1 – infusion pump, 2 – pressure demodulator, 3 – steering panel, 4 – registration system, 5 – recording system, 6 – triaxial cell

Badanie współczynnika filtracji techniką kontrolowanego przepływu z zastosowaniem komory trójosiowej umożliwia pomiar w przypadku bardzo sztywnych gruntów lub gruntów o nieregularnej strukturze (np. z występowaniem włókien), ciągłą rejestrację i zapis pionowego naprężenia efektywnego, kontrolę i zapis ścieżki odkształcenia, pomiar przy różnym stopniu nasyczenia próbki lub też w przypadku gruntów nienasączonych, ale o współczynniku filtracji nie mniejszym niż 10^{-10} cm/s.

Metoda stałej prędkości przepływu unika bezpośredniego pomiaru prędkości przepływu i związanych z tym błędów pomiarowych występujących w innych metodach.

Zakres i wyniki przeprowadzonych badań

Badania współczynnika filtracji przeprowadzono na próbkach gruntu organicznego pobranych z podłoża skarpy ursynowskiej, na terenie Kampusu SGGW. Badanie każdej próbki poprzedzono oznaczeniem jej właściwości fizycznych, podanymi w tabeli 1.

Otrzymane z badań laboratoryjnych wyniki zestawiono w tabelach, a następnie stworzono graficzną postać zależności współczynnika filtracji od naprężenia konsolidacyjnego i współczynnika filtracji od wskaźnika porowatości. Z uwagi na to, że większość gruntów organicznych nie ma znaczącej

TABELA 1. Właściwości fizyczne torfów warszawskich z podnóża skarpy ursynowskiej
TABLE 1. Physical properties of Warsaw peat

Właściwości / Properties	Symbol Symbol	Jednostka Unit	Torf/ Peat
Wilgotność / Water content	w	%	390–410
Gęstość właściwa / Particle density	ρ_s	g/cm^3	1,58
Gęstość objętościowa / Bulk density	ρ	g/cm^3	1,00–1,40
Gęstość objętościowa szkieletu / Dry density	ρ_d	g/cm^3	0,20–0,35
Zawartość części organicznych / Organic content	I_{OM}	%	60–80
Stopień rozkładu / Degree of humification	R	%	65–70

historii obciążenia naprężenie efektywne in situ jest stosunkowo małe ze względu na duży poziom wody gruntowej i niewielką gęstość gruntów organicznych.

Badania zostały przeprowadzone w zakresie zmian naprężenia efektywnego od 10 do 200 kPa. Zależności przedstawione na rysunkach 2 i 3 zostały wyznaczone z badania techniką flow-pump przy stałym przepływie wody równym $2,78 \cdot 10^{-11}$ m/s.

Zależności przedstawione na rysunkach 4 i 5 wskazują na zmianę wartości współczynnika filtracji w zależności od wielkości zadanego przepływu wody przez ośrodek gruntowy w zakresie od $Q = 2,78 \cdot 10^{-10}$ m³/s do $Q = 2,78 \cdot 10^{-12}$ m³/s.

Współczynnik filtracji słabonośnych gruntów organicznych zmienia się w zakresie od $2,50 \cdot 10^{-10}$ m/s do $8,5 \cdot 10^{-9}$ m/s w zależności od efektywnego naprężenia konsolidacyjnego. Przy określaniu współczynnika filtracji techniką flow-pump możliwy jest także pomiar parametrów niezbędnych do określenia wskaźnika porowatości, którego wartość zmieniała się w zakresie od 2,0 do 5,5.

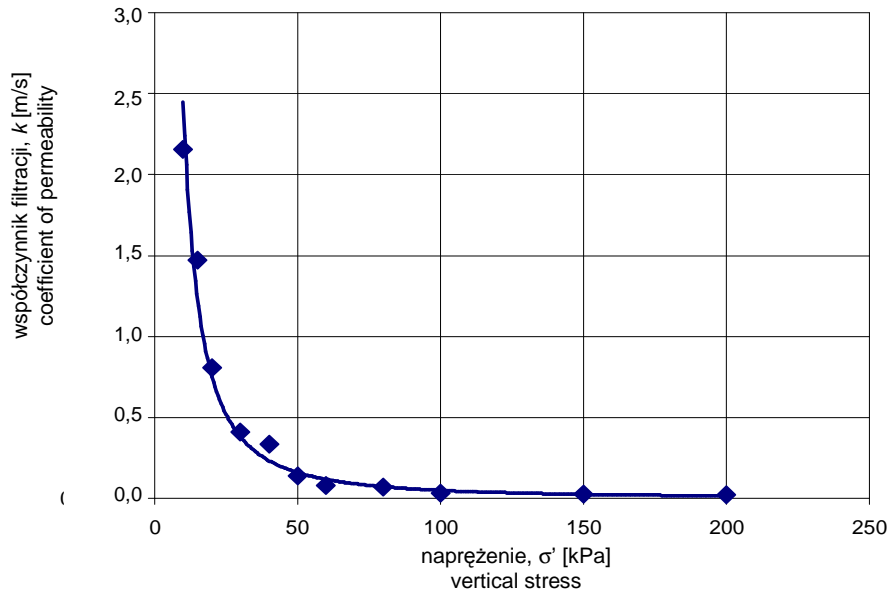
Wyniki badań zostały wstępnie zweryfikowane statystycznie. Analizu-

jąc je pod kątem najmniejszego błędu średniego oraz najwyższego współczynnika korelacji, wybrano typ funkcji potęgowej dla dwóch zmiennych o $R^2 > 97\%$ i $MRE \leq 35\%$.

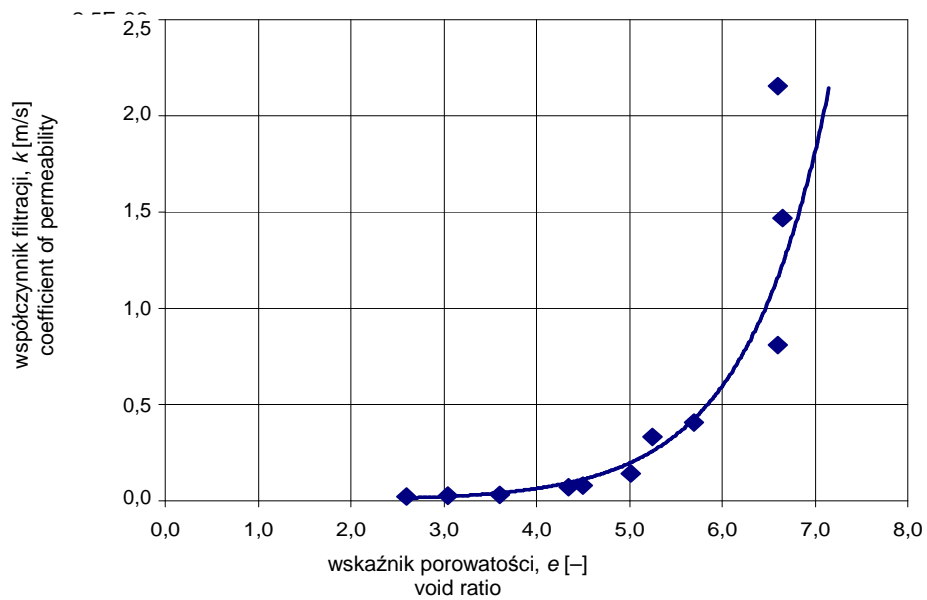
Wykonane w laboratorium Geoinżynierii SGGW w Warszawie badania współczynnika filtracji wody przez wybrany grunt organiczny pozwoliły zaobserwować jego silną zmienność w zależności od zastosowanego obciążenia. Na szczególną uwagę zasługuje fakt, iż wszystkie badania potwierdzają nieliniową zależność współczynnika filtracji od naprężenia i od wskaźnika porowatości. Podobne zależności przedstawiali Mesri i Godlewski (1977), Tavenas i in. (1979), Szymański (1982), jednakże ich badania były wykonane mniej precyzyjną i wolniejszą techniką badań.

Wnioski

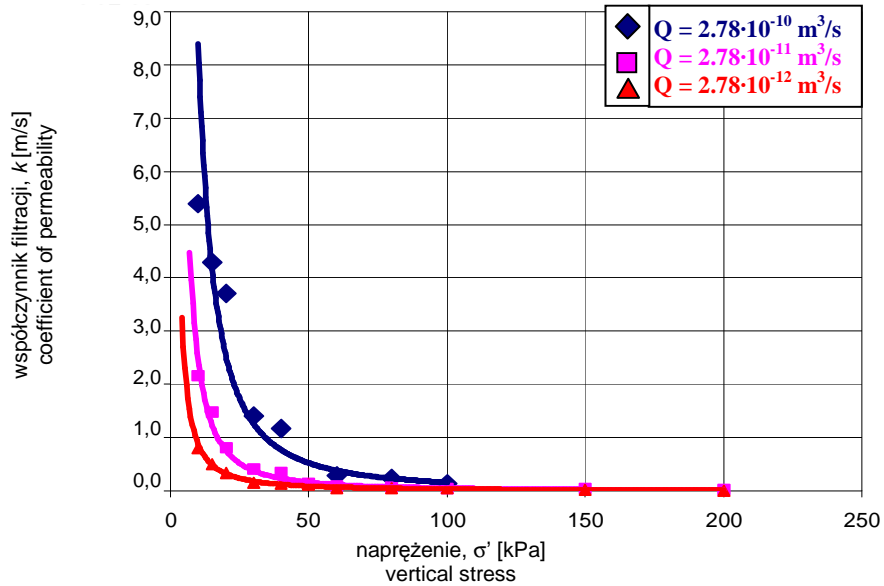
Zastosowany do badań współczynnika filtracji system flow-pump pozwala na przeprowadzenie badań w stosunkowo krótkim czasie przy pełnym nasyceniu gruntu oraz bardzo niewielkich



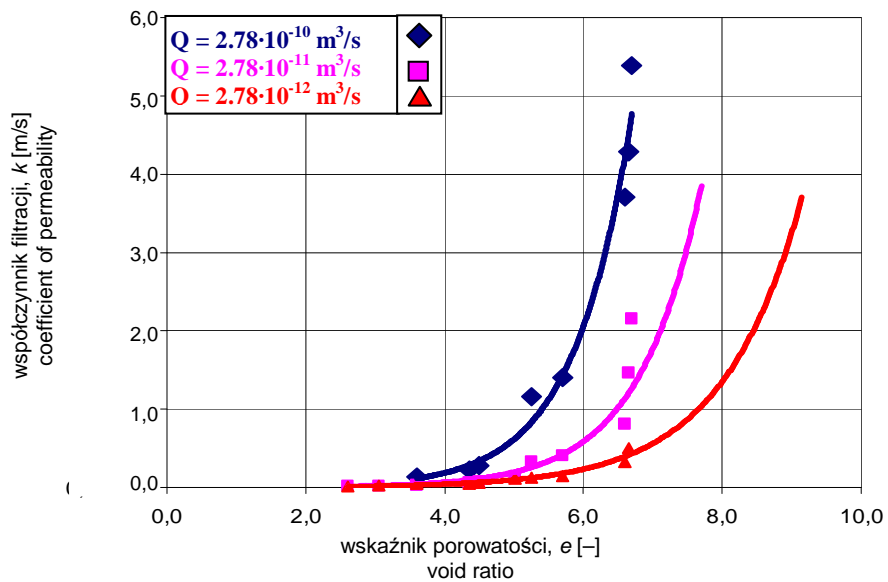
RYSUNEK 2. Zmiana współczynnika filtracji w zależności od napężenia dla badań wykonanych techniką kontrolowanego przepływu
 FIGURE 2. Relationship between coefficient of permeability and vertical stress by flow-pump test



RYSUNEK 3. Zmiana współczynnika filtracji w zależności od wskaźnika porowatości dla badań wykonanych techniką kontrolowanego przepływu
 FIGURE 3. Relationship between coefficient of permeability and void ratio by flow-pump test



RYSUNEK 4. Zmiana współczynnika filtracji w zależności od napężenia dla badań wykonanych techniką kontrolowanego przepływu
 FIGURE 4. Relationship between coefficient of permeability and stress by flow-pump test



RYSUNEK 5. Zmiana współczynnika filtracji w zależności od napężenia dla badań wykonanych techniką kontrolowanego przepływu
 FIGURE 5. Relationship between coefficient of permeability and stress by flow-pump test

prędkościach przepływu i małych gradientach występujących zwykle w terenie. Pane i inni (1983) oraz Olsen i inni (1985) uważają, że w badaniach laboratoryjnych powinny być użyte bardzo małe gradienty hydrauliczne ze względu na zminimalizowanie błędów pojawiających się przy przepływie wywołującym konsolidację. Ponadto nowoczesna technika przedstawiona w niniejszym artykule pozwala na jednoczesne kontrolowanie w zamkniętym systemie przemieszczeń, odcieku, odkształceń, zmian objętości, ciśnienia wyrównawczego i ciśnienia w komorze podczas badania.

Z uwagi na fakt, że zjawisko konsolidacji przebiega w czasie, następuje zagęszczenie układu szkieletu gruntowego w sprzężeniu z ruchem cieczy i gazu w przestrzeni porowej (Terzaghi 1924, Florin 1937, Kisiel i 1967). Określenie charakteru odkształceń i przepływu cieczy w badaniach laboratoryjnych jest szczególnie ważne przy prognozowaniu prędkości osiadań ośrodka gruntowego pod obciążeniem. Poprawność prognozy odkształceń zależy więc przede wszystkim od prawidłowej oceny prędkości przepływu cieczy w procesie konsolidacji. Ocena taka jest najbardziej miarodajna poprzez wykonanie i odpowiednią interpretację badań laboratoryjnych metodą bezpośrednią, do której należy m.in. technika flow-pump.

Przeprowadzone badania współczynnika filtracji gruntów słabonośnych na przykładzie torfów potwierdzają ograniczenia w stosowaniu prawa Darcy'ego. Wyraźnie widoczna jest nieliniowość zależności pomiędzy współczynnikiem filtracji a efektywnym naprężeniem pionowym oraz współczyn-

nikiem filtracji a wskaźnikiem porowatości.

Literatura

- AIBAN S.A., ZNIDARCIC D. 1989: Evaluation of the flow-pump and constant head techniques for permeability measurements, *Geotechnique* 39, 4: 655–666.
- FLORIN V.A. 1937: On the problem of hydromechanics stresses in soil masses. *Hydroenergoprojekt*, G.O.N.T.1.
- KISIEL I. 1967: Zastosowanie modelu reologicznego ciała M/V w mechanice gruntów. PAN, Warszawa.
- KODA E. 1990: Wpływ drenażu pionowego na przyspieszenie konsolidacji gruntów organicznych. Rozprawa doktorska. SGGW, Warszawa.
- MESRI G., GODLEWSKI P.M. 1977: Time – and stress compressibility interrelation. *Journal of the Geot. Eng. Div.* 5.
- OLSEN R.S., MALONE P.G. 1988: Soil classification and site Characterization using the cone penetrometer test. Proc. of the Int. Sym. on Penetration Testing, Orlando.
- OLSEN H.W., NICHOLS R.W., RICET L. 1985: Low gradient permeability measurements in triaxial system. *Geotechnique* 35, 2: 145–157.
- OLSEN H.W., GILL J.D., WILLDEN A.T., NELSON K.R. 1991: Innovations In Hydraulic – Conductivity Measurements. *Geotechnical Engineering 1991*, Transportation Research Record 1309, Transportation Research Board, National Research Council.
- OLSEN H.W., WILLDEN A.T., KIUSALAAS N.J., NELSON K.R., POETER E.P. 1994: Volume – Controlled Hydrologic Property Measurements in Triaxial Systems. *Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil*, ASTM STP 1142, Philadelphia.
- PANE V., CROCE P., ZNIDARCIC D., KO H.Y., OLSEN H.W., SCHIFFMAN R.L. 1983: Effects of consolidation on permeability measurement for soft clay. *Geotechnique* 33, 1: 89.
- SHARMA H.D., LEWIS S.P. 1994: Waste Containment Systems. *Waste Stabilization and Landfills. Design and Evaluation*. John Wiley and Sons. Inc.

- SZYMAŃSKI A. 1982: Charakterystyki procesu odkształcenia pod obciążeniem wybranych rodzajów torfów. Praca doktorska. SGGW-AR, Warszawa.
- SZYMAŃSKI A. 1991: Czynniki warunkujące analizę odkształcenia gruntów organicznych obciążonych nasypem. Rozprawa habilitacyjna. SGGW, Warszawa.
- TAVENAS F., MIEUSSENS C., BOURRGES F. 1979: Lateral displacements in clay foundations under embankments. *Canadian Geotechnical Journal* 16.
- TERZAGHI K. 1924: Die theorie der hydrodynamistischen spanungserscheinungen und ihr erbautechnisches anwendungsgebiet. Proc. of the 1st Int. Conf. of App. Mech., 1. Delft Netherlands.

Summary

Investigation of permeability coefficient and its variability in consolidation of soft soils. This paper presents the method of permeability coefficient evaluation based on laboratory tests. In laboratory investiga-

tions the flow-pump technique has been chosen. In this method the constant discharge capacity of water flow in the soil was applied. The results obtained from flow-pump investigation performed on peat samples indicates non – linear relationships between permeability coefficient and vertical stress as well as void ratio. This characteristic should be taken into consideration in analysis of consolidation course in soft soils.

Author's address:

Edyta Malinowska
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
Katedra Geoinżynierii
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa
malinowskae@alpha.sggw.waw.pl
Poland