

Edyta MALINOWSKA, Alojzy SZYMAŃSKI, Wojciech SAS

Katedra Geoinżynierii SGGW
Department of Geotechnical Engineering WAU

Wyznaczanie charakterystyk przepływu wody w gruntach organicznych metodą flow-pump

Determination of water flow characteristics in organic soils by the flow-pump technique

Słowa kluczowe: przepływ wody, grunt organiczny, metoda flow-pump, konsolidacja

Key words: water flow, organic soil, flow-pump technique, consolidation

Przegląd metod badań przepływu wody w gruntach

Metody wyznaczania parametrów przepływu stosowane w geotechnice można podzielić na trzy grupy: metody

wykorzystujące wzory empiryczne oraz badania terenowe i laboratoryjne gruntu. Z kolei wśród badań laboratoryjnych stosowane są dwie techniki, tj. pośrednie i bezpośrednie metody pomiaru parametrów przepływu (tab. 1).

Znaczące różnice między przepływem wody w gruntach niespoistych i spoistych organicznych wymagają stosowania innych metod i innej aparatury badawczej.

TABELA 1. Laboratoryjne metody wyznaczania parametrów przepływu
TABLE 1. Laboratory methods of flow parameters determination

Metody pośrednie Indirect methods		Metody bezpośrednie Direct methods		
I. Badania ilościowe mikrostruktury gruntu SEM	II. Konsolidacja próbki wzdłuż prawa Terzaghiego	I. Badania ze stałym ciśnieniem wody	II. Badania ze zmiennym ciśnieniem wody	III. Badania ze stałym wymuszonym przepływem
a) wykorzystanie mikroskopu elektronowego	a) edometr	a) aparat Wysockiego i Łukasika	a) rurka Kamińskiego	a) system Trautwein
	b) konsolidometr	b) aparat Wiłuna	b) specjalnie przystosowany edometr	b) aparat Olsena
	c) komora Rowe'a	c) specjalnie przystosowana komora trójosiowa	c) aparat Remy'ego d) zmodyfikowany aparat Wiłuna	c) system kontrolno-pomiarowy z zastosowaniem flow-pump

Bezpośrednie badania laboratoryjne przepływu wody w gruntach sprowadzają się do metod stało- i zmiennogradientowych. Jednakże w ostatnich latach coraz częściej znajduje zastosowanie trzecia metoda – stałego, wymuszonego przepływu.

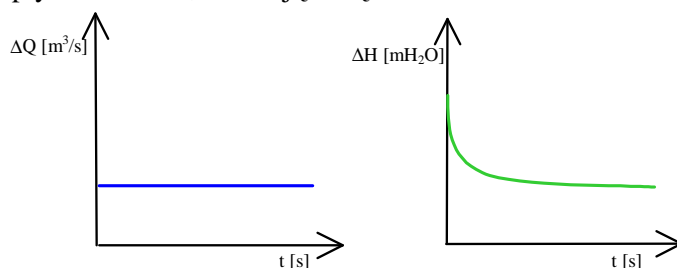
W metodzie stałogradientowej zadaje się wartość stałą naporu hydraulicznego na dolną powierzchnię próbki. Różnica ciśnień przechodząca przez próbkę zmniejsza się w czasie aż do osiągnięcia stanu równowagi natężenia (rys. 1).

W metodzie zmiennogradientowej gradient hydrauliczny zmniejsza się wraz z upływem czasu, zbliżając się

asymptotycznie do określonego poziomu (rys. 2). Świadczy to o tym, że siła przepływu wody maleje w czasie trwania doświadczenia.

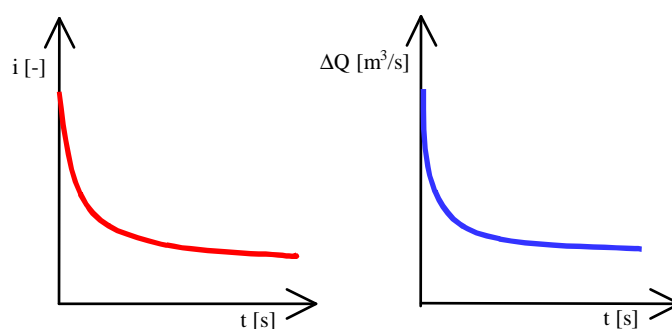
W metodzie badania ze stałym wymuszonym przepływem wymusza się stałą prędkość przepływającej przez próbkę wody (rys. 3). Dla danego badania mierzy się napór hydrauliczny (ΔH) na wlocie i na wylocie próbki, aż do osiągnięcia momentu, gdy przepływ stanie się ustalony i wówczas można obliczyć współczynnik filtracji ze wzoru:

$$k = \frac{Q \cdot l}{F \cdot t \cdot \Delta h} = \frac{Q}{F \cdot t \cdot i} \quad [\text{cm/s}]$$



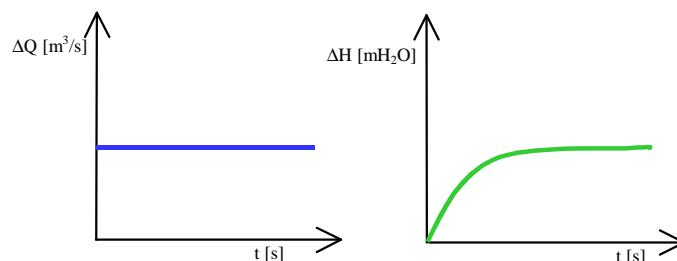
RYSUNEK 1. Charakterystyka zmian zależności przepływu i gradientu w czasie w metodzie stałogradientowej

FIGURE 1. Relationship between discharge capacity and hydraulic gradient in constant-gradient methods



RYSUNEK 2. Charakterystyka zmian zależności gradientu i przepływu w czasie w metodzie zmiennogradientowej

FIGURE 2. Relationship between discharge capacity and hydraulic gradient in nonconstant-gradient methods



RYSUNEK 3. Charakterystyka zmian zależności przepływu i gradientu w czasie w metodzie stałego, wymuszonego przepływu
 FIGURE 3. Relationship between discharge capacity and hydraulic gradient in constant-flow methods

Ze względu na to, że wyniki badań przedstawione w niniejszym artykule zostały uzyskane za pomocą metody ze stałym wymuszonym przepływem, opis metodyki jest ograniczony do badań techniką flow-pump.

Metodyka badań przepływu z wykorzystaniem metody flow-pump

Z uwagi na fakt, że włóknista struktura gruntów organicznych, szczególnie torfów, może zostać uszkodzona przy zadawaniu zbyt dużego naprężenia lub ciśnienia wody w porach, nie wszystkie metody badania charakterystyk przepływu wody mogą być zastosowane w tych gruntach.

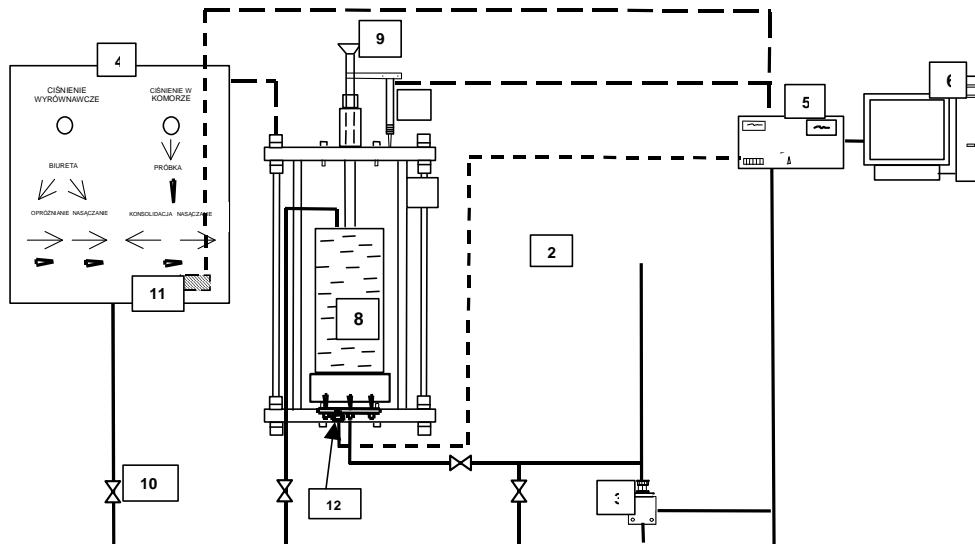
Stąd też, mając na uwadze zachowanie nienaruszonej struktury gruntów organicznych, badania zostały wykonane w udoskonalonym aparacie Olsena, techniką flow-pump (rys. 4). Metoda ta polega na zadawaniu stałego przepływu wody przez próbkę gruntu.

Aparat, wykorzystujący technikę flow-pump składa się z pompki infuzyjnej o ruchu posuwisto-zwrotnym (2), przewodów wysokociśnieniowych o małym

przekroju poprzecznym z zaworami (10), czujnika różnicowego ciśnienia (3), panelu sterującego (4) z systemem rejestrującym (5) oraz system zapisu z komputerem stacjonarnym (6), a także komory trójosiowej (1) z czujnikami: ciśnienia w komorze (11), ciśnienia wody w porach (12) oraz czujnikiem przemieszczeń (7), co jest przedstawione na rysunku 4.

Pompka składa się ze stalowej komory w kształcie strzykawki, gdzie wewnętrzna średnica tłoka ma średnicę 10 mm, a długość 180 mm; całkowita objętość komory tłocznej wynosi 14,14 cm³. Pompka podłączona jest z jednej strony do obsługującego ją panelu sterującego, a z drugiej do komory aparatu trójosiowego.

Przepływ cieczy z komory tłocznej do aparatu trójosiowego odbywa się poprzez małośrednicowe przewody. Dolna podstawa próbki połączona jest z jednym końcem czujnika różnicowego ciśnienia, natomiast górna podstawa połączona jest z drugim końcem tego czujnika (3). W panelu sterującym możliwe jest ustawienie prędkości przepływu cieczy w zakresie od 0,001 do 80 cm³/h. Urządzenie to może zarówno tłoczyć, jak i zasysać wodę w podanych



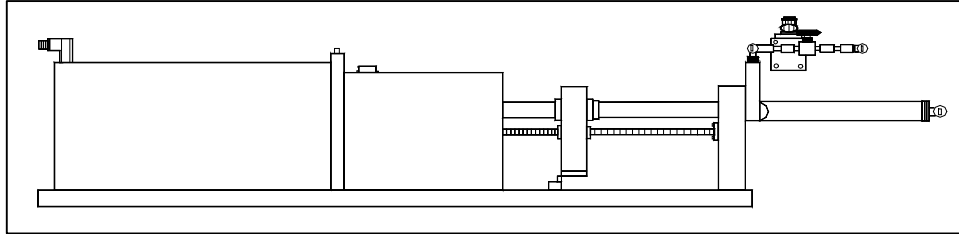
RYSUNEK 4. Schemat stanowiska do badania przepływu techniką flow-pump
 FIGURE 4. Scheme of system for permeability test by flow-pump technique

granicach prędkości. System sterujący (5) kontroluje czas w sekundach od początku badania oraz wartości całkowitego przepływu, z dokładnością do $0,001 \text{ cm}^3$. Na wyświetlaczu cyfrowym możliwy jest także odczyt różnicy ciśnienia na obu końcach próbki, podawany w kilopaskalach. Czujnik różnicowy ciśnienia (3) – model DP 15-52 umożliwia pomiar ciśnienia w zakresie od 0 do 150 kPa z dokładnością do 0,1 kPa. Panel sterujący wyposażony jest także w dwa wyjścia z sygnałem elektrycznym pochodzącym z dwóch końców próbki. Za pomocą tych wyjść możliwe jest połączenie z komputerem stacjonarnym, przez co istnieje ciągła rejestracja i zapis wyników pomiaru poprzez program GeoSys 2000. Wyniki są zbierane i zapisywane w postaci cyfrowej, następnie są przenoszone do arkusza kalkulacyjnego Microsoft Excel.

Pierwszym etapem badania przepływu metodą stałego wymuszonego przepływu jest wybór prędkości pracy

pompki, czyli prędkości przepływu wody tłoczonej z pompki do próbki gruntu. Wybór ten jest uzależniony od wstępnego oszacowania wodoprzepuszczalności badanego gruntu. Niemniej jednak badanie powinno być rozpoczęte od możliwie najmniejszych wartości tak, aby została zachowana pewna prawidłowość wyniku.

Pompka (2) podłączona jest z jednej strony do obsługującego ją panelu sterującego (5), a z drugiej, za pomocą przewodu, z dolną podstawą próbki (8), znajdującą się w komorze trójosiowego ściskania (1). Także za pomocą tego połączenia do pompki zadawane jest ciśnienie wyrównawcze, jakie było podawane do próbki podczas konsolidacji. Ciśnienie wody zarówno tłoczonej od dołu próbki, jak i wychodzącej od góry próbki jest mierzone przez różnicowy czujnik (3), będący głównym elementem aparatu VRDM 397/50 LWC (rys. 5).



RYSUNEK 5. Schemat aparatu VRDM 397/50 LWC
 FIGURE 5. Scheme of apparatus for permeability test by flow-pump, type VRDM 397/50 LWC

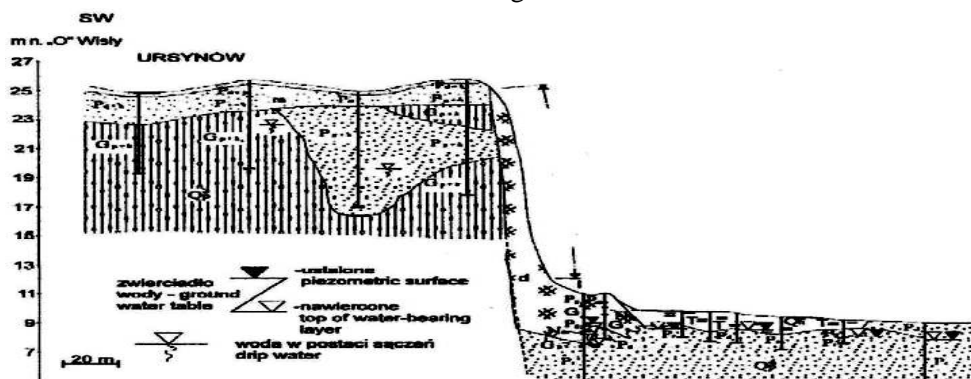
Podczas badania woda ze stałą wymuszoną prędkością (2) podawana jest poprzez czujnik różnicowy (3) do dołu próbki. W związku z tym napór hydrauliczny na dolną powierzchnię próbki stopniowo rośnie, a w trakcie badania mierzona jest różnica ciśnień wody w porach na górze i na dole próbki. Ciśnienie wody w porach przewyższa w końcu siły oddziaływania międzycząsteczkowego i następuje przepływ.

W czasie jednego badania przez próbkę przepuszcza się wodę o kilku różnych wydatkach (Q) i dla każdego rejestruje się wyniki pomiarów. Podczas badania rejestrowany jest czas i wielkość ciśnienia różnicowego (ΔH) aż do momentu ustabilizowania się tej wartości.

Zakres przeprowadzonych badań

Badania charakterystyk przepływu przeprowadzono na próbkach gruntu organicznego pobranych ze skarpy ursynowskiej na terenie Kampusu SGGW. Sytuację geologiczną Skarpy Ursynowskiej, która jest fragmentem Skarpy Warszawskiej dokumentuje przekrój geologiczny przez osady czwartorzędowe (rys. 6). Badanie każdej próbki poprzedzono oznaczeniem jej właściwości fizycznych, podanymi w tabeli 2.

Badania charakterystyk przepływu zostały wykonane techniką stałego, wymuszonego przepływu wody przez próbkę torfu, przy całkowitym nasączeniu gruntu.



RYSUNEK 6. Przekrój geologiczny przez osady czwartorzędowe skarpy ursynowskiej (Wienclaw 1998)
 FIGURE 6. Geological section of quaternary sediments of Ursynów Slope (Wienclaw 1998)

TABELA 2. Właściwości fizyczne torfów warszawskich ze skarpy ursynowskiej
TABLE 2. Physical properties of Warsaw peats

Właściwości Properties	Symbol Symbol	Jednostka Unit	Torf Peat
Wilgotność / Water content	w	%	360–420
Gęstość właściwa Particle density	ρ_s	g/cm^3	1,58
Gęstość objętościowa Bulk density	ρ	g/cm^3	0,95–1,40
Gęstość objętościowa szkieletu Dry density	ρ_d	g/cm^3	0,20–0,33
Zawartość części organicznych Organic content	I_{OM}	%	60–80
Stopień rozkładu Degree of humification	R	%	60,0

W czasie pomiaru utrzymywane było ciśnienie wyrównawcze, czyli zastosowano tzw. back pressure. Badania były wykonywane po uprzednim odpowietrzeniu systemu pomiarowego oraz z wykorzystaniem wody odpowietrzonej.

W niniejszym artykule prezentowane są wyniki, obrazujące zmienność charakterystyk przepływu w zależności od prędkości przepływu, gradientu hydraulicznego i naprężenia konsolidującego.

Wyniki badań

Otrzymane z badań laboratoryjnych wyniki zestawiono w tabelach, a następnie stworzono graficzną postać zależności prędkości przepływu od gradientu przy danym naprężeniu konsolidującym. Większość gruntów organicznych nie ma znaczącej historii obciążenia. Dlatego naprężenie efektywne *in situ* jest stosunkowo niskie ze względu na wysoki poziom wody gruntowej

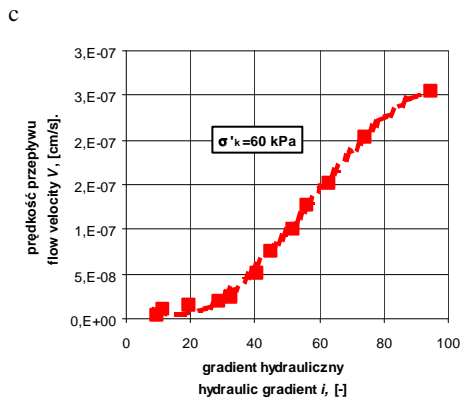
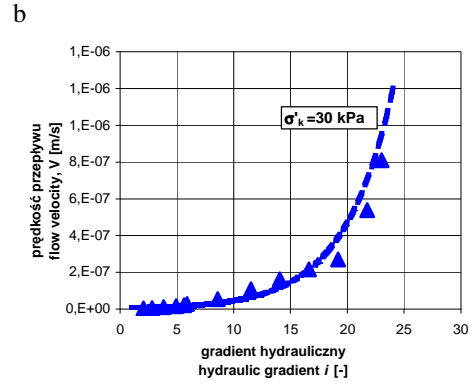
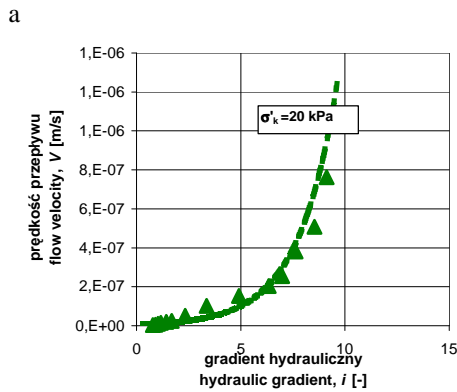
i niewielką gęstość gruntów organicznych.

Jednakże w celu efektywniejszej analizy zachowania się torfów pod obciążeniem niniejszy artykuł przedstawia zależności prędkości przepływu wody w badanych torfach od gradientu hydraulicznego dla naprężeń konsolidujących 20, 30, 60 kPa (rys. 7).

Wyniki badań zostały wstępnie zwerifikowane statystycznie za pomocą programu Microsoft Excel. Analizując je tylko pod kątem najwyższego współczynnika korelacji, wybrano typ funkcji potęgowej i wielomianowej o R^2 w zakresie od 89 do 96%.

Wnioski

Wykonane w laboratorium Geoinżynierii SGGW w Warszawie badania przepływu wody w wybranych gruntach organicznych pozwoliły zaobserwować silną zmienność tych charakterystyk w zależności od zastosowanego obciążenia i prędkości przepływu. Na szczególną



RYSUNEK 7. Zależność prędkości przepływu wody w torfie od gradientu hydraulicznego przy naprężeniu konsolidującym: a – 20 kPa, b – 30 kPa, c – 60 kPa

FIGURE 7. Relationship between water flow velocity and hydraulic gradient for consolidation stress equal: a – 20 kPa, b – 30 kPa, c – 60 kPa

uwagę zasługuje fakt, iż wszystkie badania potwierdzają nieliniową zależność prędkości przepływu od gradientu hydraulicznego w pewnym zakresie jego zmienności, tj. od 5 do 25.

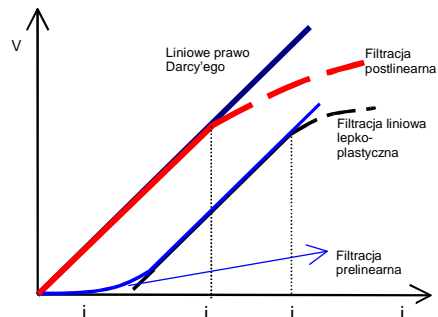
Podobne wnioski uzyskał m.in. Szymański (1982), który stwierdza, że w wyniku deformacji szkieletu gruntowego pod obciążeniem zmienia się porowatość gruntu, co powoduje znaczną zmianę cech fizyko-mechanicznych. Jak wykazały badania Mesri-Godlewskiego (1977), Tavenasa (1979), Szymańskiego (1982) w szczególności zmienia się współczynnik filtracji. Wyniki ich badań wskazują nieliniową zależność

współczynnika filtracji od odkształcenia i aktualnego naprężenia efektywnego.

Badania zostały przeprowadzone w zakresie zmian naprężenia efektywnego od 10 do 200 kPa, co pozwoliło zaobserwować tzw. filtrację preliniarną i postliniarną, podobną do zaobserwowanej przez Kannego i Herrmana (1987) oraz Macioszczyka i Szestakowa (2001) w gruntach spoistych (rys. 8).

Wyniki badań przedstawione w formie graficznej (rys. 7) wskazują na konieczność uwzględnienia nieliniowej charakterystyki przepływu w opisie procesu konsolidacji gruntów organicznych.

RYSUNEK 8. Graficzna ilustracja prawa filtracji (Macioszczyk i Szestakow 1983)
 FIGURE 8. Scheme of filtration law by Macioszczyk and Szestakow 1983



Literatura

- HANSBO S. 1997: Aspects of vertical drain design: Darcian or non-Darcian flow. *Geotechnique* 47, 5.
- KANY M., HERRMANN R. 1987: Water motion in soils based on a diffusion theory of mixtures (part 2). Proc. of the 9th Europ. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Dublin.
- MACIOSZCZYK T., SZESTAKOW W.M. 1983: Prawo filtracji, hydrauliczne charakterystyki strumienia, filtracja ustalona. Dynamika wód podziemnych – metody obliczeń. Wydaw. Geologiczne, Warszawa.
- MALINOWSKA E., HYB M. 2004: Wyznaczenie współczynnika filtracji na podstawie badań laboratoryjnych. Seminarium EU Geo-EnvNet „Geoinżynieria środowiska – Transfer doświadczeń i Dyrektyw UE do nowo przyjętych państw”.
- MESRI G., GODLEWSKI P.M. 1977: Time – and stress compressibility interrelation. *Journ. of the Geot. Eng. Div.* 103; GT. 5: 417–430.
- OLSEN H.W. 1966: Deviations from Darcy's law in saturated clays. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 29.
- SOBOLEWSKI M. 2002: Określanie charakterystyk przepływu wody w gruntach spoistych na podstawie badań in situ. Praca doktorska, SGGW Warszawa.
- 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.
- SZYMAŃSKI A., SAS W. 2000: Modelowanie procesu odkształcenia gruntów organicznych. XII Krajowa Konferencja Mechaniki Gruntów i Fundamentowania.

- TAVENAS F., MIEUSSENS C., BOURRGES F. 1979: Lateral displacements in clay foundations under embankments. *Canadian Geotechnical Journal* 16.
- WIENCLAW E. 1998: Sytuacja geologiczna Skarpy Ursynowskiej. *Przegląd Naukowy Wyzd. Melior. i Inż. Środow.* 14: 51–64.

Summary

Determination of water flow characteristics in organic soils by the flow-pump technique. In this paper, the results of permeability tests, which were done on organic soil, specifying of large strain and fiber structure are presented. In permeability tests the flow-pump technique was applied. This technique is based on the constant discharge capacity of water flow in the soils sample instead of water pore pressure used in classical method of permeability coefficient evaluation. The results obtained in laboratory investigation indicated that the relationship between water flow velocity and hydraulic gradient is non-linear and change's for different consolidation stress.

Authors' address:

Edyta Malinowska, Alojzy Szymański,
 Wojciech Sas
 Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
 Katedra Geoinżynierii
 ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa
 Poland
 e-mail: malinowskae@alpha.sggw.waw.pl
 szymanska@alpha.sggw.waw.pl
 sas@alpha.sggw.waw.pl

