

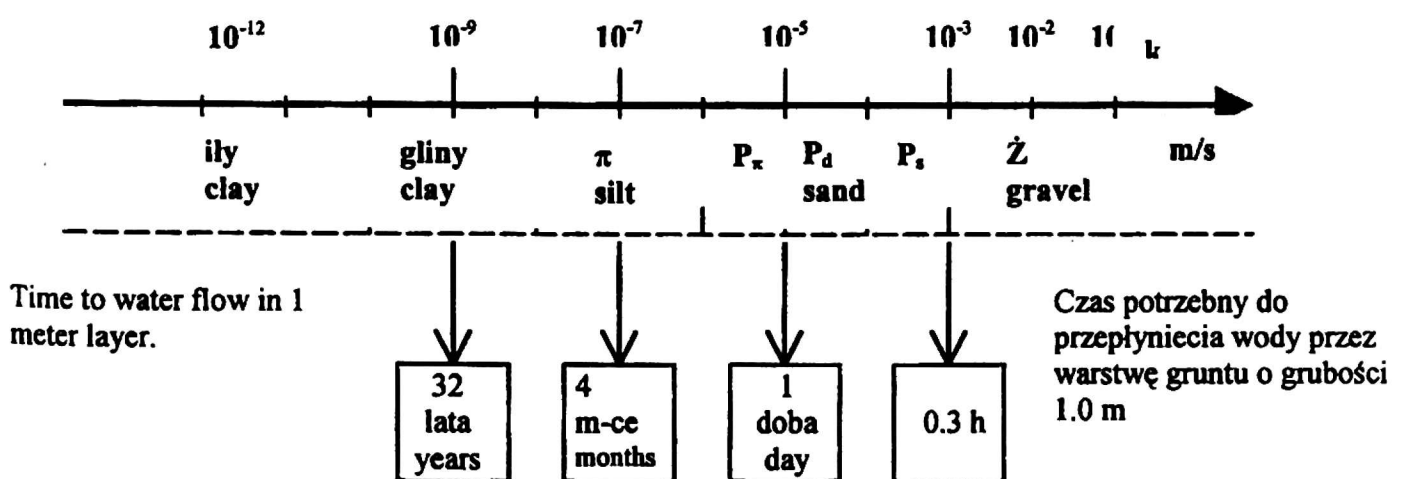
OCENA PRZEPUSZCZALNOŚCI GRUNTÓW SPOISTYCH NA PODSTAWIE BADAŃ IN SITU

ESTIMATION OF PERMEABILITY CHARACTERISTICS IN COHESIVE SOILS ON THE BASIC OF IN SITU TESTS

Mariusz Sobolewski, Alojzy Szymański
Katedra Geotechniki
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego

Wstęp

Grunt jako ośrodek porowaty posiada zdolność przewodzenia wody wolnej, która jest definiowana jako przepuszczalność hydrauliczna lub wodoprzepuszczalność. W zależności od składu granulometrycznego grunt jest ośrodkiem dobrze przepuszczalnym dla wody (grunty niespoiste) lub słabo przepuszczalnym (grunty spoiste). Zróżnicowanie budowy poszczególnych gruntów powoduje, że ich przepuszczalność jest zróżnicowana (rys. 1)



Rys. 1. Charakterystyka przepuszczalności ośrodka dla poszczególnych rodzajów gruntu.

Fig. 1. Permeability characteristic for different kind of soils.

Pokazana na rysunku 1 charakterystyka przepływu wody w gruncie wskazuje, że wprowadzanie granicy pomiędzy gruntami przepuszczalnymi i nieprzepuszczalnymi jest umowne. Przy konstrukcji rysunku wykorzystano klasyfikację gruntów w zależności od wartości współczynnika filtracji k , zaproponowaną przez Terzagiego i Pecka (1967), oraz cytowaną między innymi przez Lambe'a i Whitmana (1988).

Przepuszczalność gruntów i ich właściwości filtracyjne mają podstawowe znaczenie przy geotechnicznej i hydrogeologicznej ocenie terenu dla potrzeb lokalizacji inwestycji mających wpływ na środowisko (Öberg 1995). W zagadnieniach geotechnicznych wielokrotnie określają one współpracę układu obiekt inżynierski a podłoże budowlane. Miarą przepuszczalności hydraulicznej gruntów jest współczynnik filtracji, którego wartość liczbowa zależy od uziarnienia i porowatości gruntu oraz stopnia zmineralizowania i temperatury wody.

Wzrost zainteresowania parametrami przepuszczalności gruntów słabo przepuszczalnych związany jest z koniecznością prowadzenia obserwacji położenia zwierciadła wód podziemnych i stanu ich zanieczyszczenia w terenach lokalizacji inwestycji wpływających na stan środowiska terenów przyległych np. składowiska odpadów, stacje paliw itp. W warunkach naturalnych ocena przepuszczalności hydraulicznej (identyfikacja wartości współczynnika filtracji) jest wymuszona koniecznością określenia strefy i głębokości transferu a także określenia kontaktu pomiędzy poziomami wodonośnymi. Proces przemieszczania się zanieczyszczeń w wodach podziemnych przebiega bowiem zgodnie z kierunkiem przepływu strumienia, a prędkość przemieszczania się wód skażonych jest zależna od prędkości filtracji (Kaczyński i inni 1997, Krogulec 1992).

W artykule przedstawiono wyniki terenowych badań parametrów przepływu wykonane z zastosowaniem nowoczesnej sondy BAT oraz wyniki badań laboratoryjnych na próbkach o nienaruszonej strukturze NNS. Na wybranych poligonach doświadczalnych zlokalizowanych w rejonie Warszawy wykonano serię badań terenowych uzupełnionych badaniami w laboratorium na próbkach pobranych z głębokości odpowiadających badaniom sondy BAT. Porównanie uzyskanych w terenie wyników z wynikami badań laboratoryjnych pozwoliło na przeprowadzenie weryfikacji przyjmowanych dotychczas parametrów oraz podanie praktycznych zaleceń do metodyki badań współczynnika filtracji k sondą BAT.

Charakterystyka warunków geotechnicznych podłoża na poligonie badawczym

Terenowe badania przepuszczalności gruntów spoistych przeprowadzono na poligonie badawczym Stegny zlokalizowanym w Warszawie przy ulicy Warneńskiej. Warunki geologiczne podłoża w rejonie Warszawy są zróżnicowane. Najczęściej występują tu grunty pochodzenia lodowcowego, zwykle o zaburzonym

układzie warstw i przeważnie silnie prekonsolidowane. Tworzą je gliny w stanie twardoplastycznym do zwartej oraz piaski i żwiry zagęszczone. Prekonsolidowane ropy, występujące pod warstwami lodowcowymi, są gruntami wrażliwymi i zwykle pęczniejącymi. Jednorodny ropy plicieński są słabo przepuszczalne i nie ulegają łatwo zawilgoceniu, zwłaszcza w złożu. Ropy te mogą być spękane, co powoduje zmniejszenie wytrzymałości gruntu w masynie w stosunku do określonej na nienaruszonych próbkach, a także ułatwia przepływ wody gruntowej. Podłoże poligonu badawczego Stegny zbudowane jest z utworów czwartorzędowych, wykształconych w postaci zagęszczonych piasków podścielonych od głębokości 7 m utworami trzeciorzędowymi (rys. 2). Pokłady plicocenu stanowią ropy i ropy pylaste dochodzące do 146 m.p.p.t.

Badania przepuszczalności systemem BAT wykonano w ropy plicieńskich na głębokościach 6.25 m, 7.20 m oraz 8.25 m.

Głębokość h [m]	0.4	Nasyp
Depth h [m]	2.8	Piasek drobny
	3.0	Piasek średni
		▽
	4.3	Piasek grubo
	5.0	ropy szary
		ropy pstry
		Δ BAT 6.25
		Δ BAT 7.2
		Δ BAT 8.25

Rys. 2. Przekrój geotechniczny podłoża na poligonie badawczym Stegny
Fig. 2. Geotechnical cross-section at Stegny site.

Zakres wykonanych badań

Obecnie stosowane metody określania współczynników filtracji można podzielić na następujące grupy:

1. ze zmiennym gradientem, na podstawie zaobserwowanej w czasie wielkości obniżenia poziomu wody w rurce piezometrycznej,
 2. ze stałym ciśnieniem wody z równania wydatku,
 3. z konsolidacją próbki w oparciu o prawo konsolidacji filtracyjnej Terzagiego.
- Zastosowany do pomiaru przepuszczalności gruntów system monitoringu wód podziemnych BAT jako piezometr zamknięty po raz pierwszy został wprowadzony

do badań w Szwecji i swoją nazwę wywodzi od nazwiska twórcy (B-A. Torstenssona 1984). Sonda BAT umożliwia przeprowadzanie szerokiego zakresu badań obejmujących monitoring jakości wód podziemnych oraz terenową ocenę wartości współczynnika filtracji k_b w kierunku poziomym (w strefie pełnego i niepełnego nasycenia gruntu) przy zmiennym gradiencie.

Biorąc pod uwagę ograniczenia badań *in situ* i badań laboratoryjnych prowadzono je łącznie traktując uzyskane wyniki jako wzajemnie uzupełniające się. Stąd też przeprowadzone badania geotechniczne obejmowały:

- a) wiercenia połączone z pobieraniem próbek NNS do badań laboratoryjnych,
- b) pomiary sondą BAT ciśnienia porowego w strefie aeracji i saturacji,
- c) pomiary wartości współczynników filtracji k_b ,
- d) określenie głębokości zalegania zwierciadła wody gruntowej,
- e) pomiary wartości ciśnienia wywołującego przebicie hydrauliczne,
- f) laboratoryjne badania współczynnika filtracji gruntu pobranego z odpowiednich głębokości

Porównanie uzyskanych w terenie wyników badań terenowych z wynikami badań laboratoryjnych pozwoliło na przeprowadzenie weryfikacji przyjmowanych dotychczas wartości współczynnika filtracji k dla iłów plioceńskich oraz dostosowanie metodyki badań *in situ* systemem BAT do badań przepuszczalności silnie prekonsolidowanych gruntów spoistych występujących w rejonie Warszawy.

Budowa aparatu i sposób przeprowadzenia badań sondą BAT

Zasadniczą częścią sondy BAT jest zainstalowana w gruncie stożkowa końcówka zawierająca porowaty filtr, który w trakcie badania znajduje się w bezpośrednim kontakcie z gruntem (rys 3). Kończówka filtrująca zagłębianą jest bezpośrednio w podłoże od powierzchni terenu lub instalowana w dnie otworu wiertniczego. Jego konstrukcja, odpowiedni filtr oraz zakończona gumową uszczelką dysza pozwalają na przeprowadzenie badań przepuszczalności gruntu. W celu umieszczenia piezometru BAT w gruncie na żądanej głębokości przytwierdza się go do odpowiedniego zestawu żerdzi o długości 1 m łączonych ze sobą gwintem. Wewnątrz układu żerdzi wprowadza się i opuszcza zestaw pomiarowy BAT połączony z cyfrowym czytnikiem ciśnienia. Zestaw pomiarowy jest to odpowiednio wykonany system membran i igieł wraz z szklanym zbiornikiem oraz z przetwornikiem ciśnienia stanowiący jednostkę pomiarową. W zależności od wykonywanego badania stosuje się różną konfigurację jednostki pomiarowej.

Pierwszym etapem badań jest określenie wartości ciśnienia porowego na danej głębokości w podłożu. Pomiar ciśnienia wody w porach przeprowadza się poprzez opuszczenie wewnątrz rur instalacyjnych końcówki zestawu pomiarowego do końcówki piezometrycznej. Igła penetruje umieszczoną w końcówce zestawu pomiarowego uszczelkę gumową piezometru łącząc go z elektrycznym przetwornikiem ciśnienia a cyfrowy czytnik ciśnienia rejestruje wartość ciśnienia wody w porach. Wielkość u_0 otrzymuje się z zależności:

$$u_0 = (A + B - C) + 0.2 \quad (1)$$

gdzie: A – odczyt na stożku, B – odczyt zerowy, C – poziom odniesienia,
0.2 – poprawka ze względu na poziom wody w stożku.



Rys. 3. Piezometr BAT

Fig. 3. The BAT piezometer

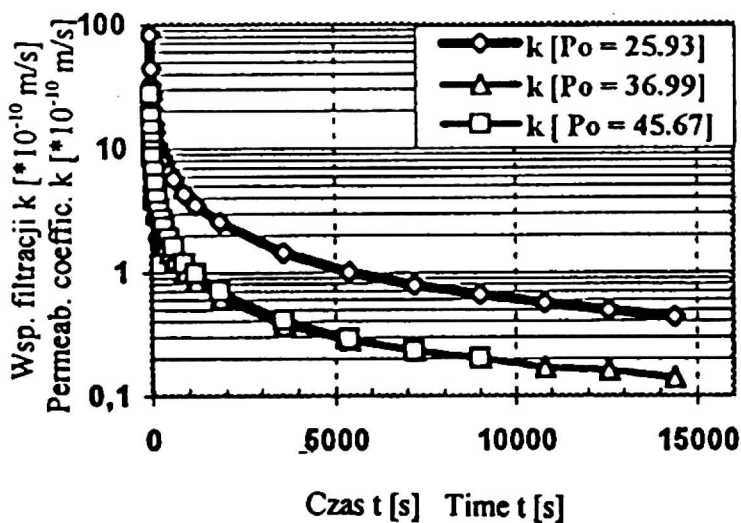
Kolejnym etapem pomiaru jest badanie wartości współczynnika filtracji. Badanie to polega na połączeniu końcówki zestawu pomiarowego zawierającej szklany pojemnik, w którym przed badaniem wytwarzane jest nadciśnienie (ciśnienie wyższe od pomierzonego ciśnienia porowego) z przetwornikiem ciśnienia, a następnie pomiarze zmian ciśnienia wewnątrz układu. Zmiany tego ciśnienia w trakcie badania, zależne od przepuszczalności hydraulicznej ośrodka gruntowego w którym zainstalowany jest piezometr są rejestrowane i służą do obliczenia wartości współczynnika filtracji. Pomiaru dokonuje się po wyrównaniu temperatury zestawu pomiarowego z temperaturą w otworze. Wykorzystując wzór oparty na teorii Hvorsleva (1956) oraz zależność pomiędzy ciśnieniem panującym w szklanym zbiorniku a jego objętością (prawo Boyla–Mariotte'a, Bengtsson) (Torstensson B.A. 1984) oblicza się wartość współczynnika filtracji w kierunku poziomym ze wzoru:

$$k_h = \frac{P_0 * V_0}{F * t} \left[\frac{1}{u_0 * P_0} - \frac{1}{u_0 * P_t} + \frac{1}{u_0^2} \ln \left(\frac{P_0 * u_0 * P_t}{P_0 * P_t - u_0} \right) \right] \quad (2)$$

gdzie: P_0 – początkowe ciśnienie w zbiorniku, P_t – ciśnienie w zbiorniku po czasie t
 u_0 – ciśnienie porowe, t – czas, V_0 – objętość gazu w zestawie pomiarowym,
 F – współczynnik przepływu – stała filtru piezometru,

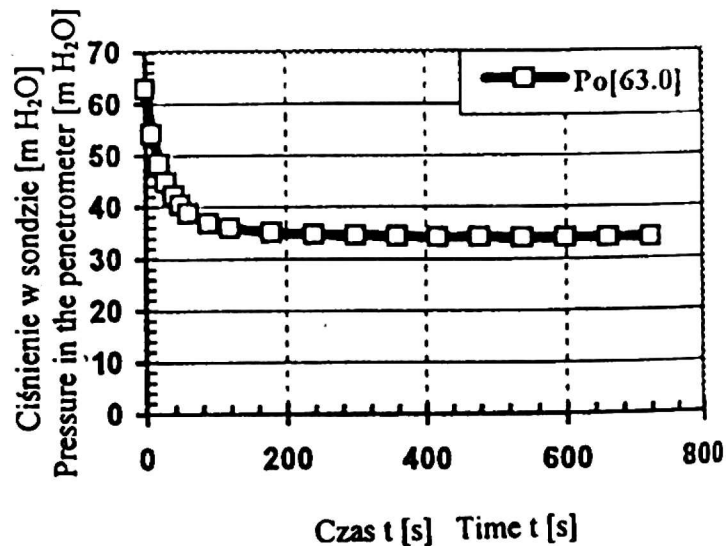
Zaobserwowane wielkości ciśnień wewnątrz pojemnika szklanego zmniejszające się w czasie (w poszczególnych krokach czasowych), pozwalają na określenie zmieniającego się ciśnienia P_t od czasu t . Na podstawie tej zależności określa się zmienność wartości k_h od czasu t (rys.4).

Podczas badań polowych przepuszczalności gruntów mogą wystąpić pęknięcia hydrauliczne. Zjawisko te powstaje w wyniku nadmiernego ciśnienia wody w odniesieniu do naprężeń panujących w gruncie i prowadzi często do błędnych wyników i nieprawidłowej oceny przepuszczalności. Przy badaniu tego zjawiska stosuje się taką samą konfigurację zestawu pomiarowego jak przy badaniu współczynnika filtracji. Różnica w przeprowadzeniu badania polega na tym, że przy badaniu przebiecia hydraulicznego w układzie wytwarza się ciśnienie kilkakrotnie wyższe od porowego u_0 oraz przewyższające spodziewaną wielkość mniejszego naprężenia głównego. Wysokie ciśnienie P_0 powoduje, że wokół filtru piezometru powstają szczeliny i pęknięcia przez które przepływa woda. Wyniki badań przebiecia hydraulicznego przedstawiono na rys. 5.



Rys. 4. Wyniki badań współczynnika k w iłach pliczeńskich (gł. 8.25 m)

Fig. 4. Results of permeability tests performed in plicene clay (depth 8.25m)



Rys. 5. Wyniki badań przebiecia hydraulicznego w iłach pliczeńskich (gł. 6.25 m)

Fig. 5. Results of piping test in plicene clay (depth 6.25 m)

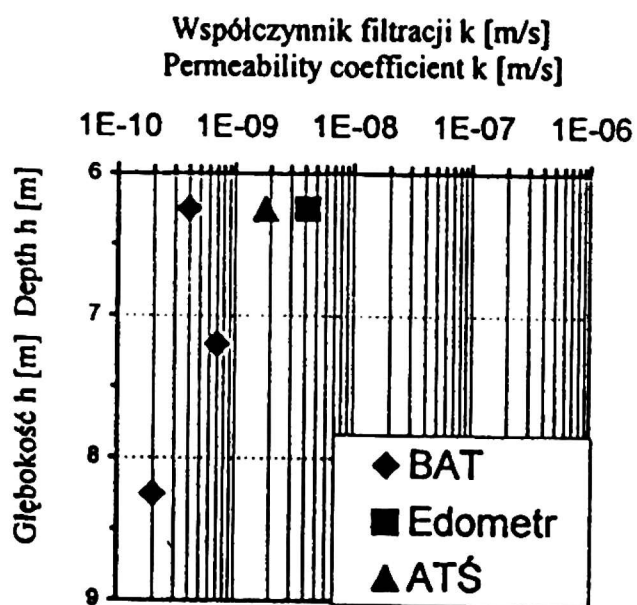
Analiza wyników badań

W celu przeprowadzenia kompleksowych badań parametrów przepuszczalności iłów pliczeńskich wytypowano poletko doświadczalne Stegny na którym wykonano pomiary na głębokościach 6.25 m, 7.20 m oraz 8.25 m. Uzyskane

wyniki badań terenowych porównano z wielkościami uzyskanymi na próbkach z laboratorium.

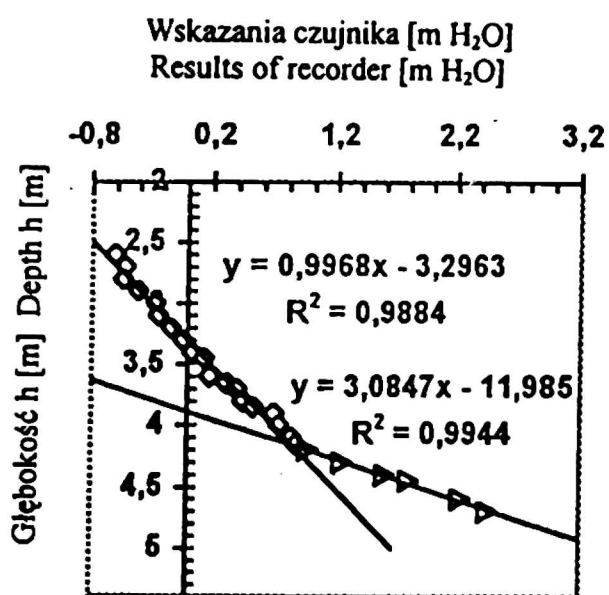
Analiza wyników badań terenowych i laboratoryjnych gruntów występujących na poligonie Stegny wskazuje, że ility plicieńskie charakteryzują się współczynnikiem filtracji w kierunku poziomym w zakresie $0.2 \times 10^{-10} \div 6.6 \times 10^{-10}$ m/s z tendencją malejących wartości wraz z głębokością (rys. 6).

Analiza wyników badań wykonanych w terenie oraz w edometrze i aparacie trójosiowego ściskania (ATŚ) wskazuje na dobrą zgodność wyników. Sonda pomiarowa BAT pozwala na identyfikację wartości współczynnika k_h w gruntach słabo przepuszczalnych. Szybkie przeprowadzanie badań stało się możliwe dzięki bardzo wysokiemu gradientowi hydraulicznemu i_0 możliwemu do wywoływania w badaniach tym instrumentem. Należy jednak unikać wartości gradientu przy którym następuje przebicie hydrauliczne w gruncie. Zadawany gradient i_0 kilkaset razy większy od stosowanego w laboratorium skraca czas pomiaru do 3÷5 godzin.



Rys. 6. Zmienność współczynnika filtracji k_h łąw plicieńskich wraz z głębokością

Fig. 6. Variability of permeability coefficient k_h of plicene clay with depth



Rys. 7. Wyniki badań ciśnienia hydrostatycznego w gruncie

Fig. 7. Evaluation of hydrostatic pore water pressure

Należy pamiętać, że w porach gruntów częściowo nasyconych znajduje się woda i powietrze. Z badań laboratoryjnych wynika, że maksymalny czas potrzebny do nasycenia próbek iłu wynosi cztery tygodnie. W gruntach częściowo nawodnionych, z uwagi na międzyfazowe różnice wywołane napięciem powierzchniowym, ciśnienie wody jest mniejsze od powietrza. Ciśnienie to, występujące ponad zwierciadłem wody, jest ujemne; zaś poniżej zwierciadła wody gruntowej ciśnienie wody jest dodatnie. Fakt ten potwierdzają badania BAT (rys. 7). W związku z powyższym uzyskane z badań sondą BAT wyniki pomiarów w gruntach nienasyconych nie mogą być traktowane jako miarodajne. W przypadku dużej różnicy ciśnień zjawisko wyssania wody z filtru piezometru, umożliwia wejście powietrza zakłócając wynik pomiaru. Aby temu zapobiec filtr powinien być drobnoziarnisty, przeciwdziałający ssącemu działaniu gruntu. Oznacza to, że opór wejścia powietrza na filtrze, musi być wyższy od ciśnienia ssącego w gruncie. Dlatego w iłach trzeciorzędowych oraz innych gruntach spoistych nienasyconych wyznaczenie współczynnika k wymaga wcześniejszego nasączenia strefy gruntu wokół filtru eliminując zjawisko ssania. Przeprowadzone badania wykazały celowość stosowania sondy BAT dla gruntów słabo przepuszczalnych o współczynniku filtracji $k < 10^{-7}$ m/s.

Podsumowanie

Przeprowadzona analiza wyników badań sondą BAT wykazała, że stosowana metodyka daje możliwość wiarygodnego oszacowania wartości współczynnika filtracji w iłach trzeciorzędowych oraz określenie wartości ciśnienia hydrostatycznego w gruntach nasyconych i nienasyconych.

Z uwagi na możliwość zadawania wysokich gradientów podczas badań wynik badania sondą BAT uzyskiwany jest znacznie szybciej niż w badaniach laboratoryjnych. Ponadto z badań tych uzyskuje się również wartości ciśnień wywołujące przebicie hydrauliczne w gruntach spoistych.

Literatura

- 1 Hvorslev J. 1956. Time lag and soil permeability in ground-water observations Corp of Engineers. Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss., Bull.36.
- 2 Kaczyński R. i inni 1997. Wykonanie analizy porównawczej wyników badań współczynnika „ k ” gruntów spoistych wyznaczonych różnymi metodami. Archiwum: Zakład Prac Geologicznych UW.
- 3 Krogulec E. 1992. Określenie parametrów hydrogeologicznych osadów słabo przepuszczalnych w warunkach in situ przy zastosowaniu systemu monitoringu wód podziemnych BAT. Tech. Posz. Geol. Nr 5.

- 4 Lambe T.W. Whitmaman R.V. 1988. *Mechanika gruntów t 2 Arkady W-wa.*
- 5 Öberg A.Ö. 1995. Negative pore pressures – Seasonal variation and importance in slope stability analysis. *Proceedings of the First International Conference on Unsaturated Soils Paris.*
- 6 Petsonk A.1986. *The BAT Method for in -situ Measurement of Hydraulic Conductivity in Saturated Soils. Thesis in Hydrogeotechnical University of Uppsala, Sweden.*
- 7 Torstensson B.A. 1984. *A New System for Ground Water Monitoring. Review, Vol. 4, No 4.*

Summary

Estimation of permeability characteristics in cohesive soils on the basis of in situ tests. The paper presents some results of permeability tests performed in the heavily overconsolidated pliocene clays using field and laboratory testing. The in situ permeability tests were carried out with application of BAT equipment. On the other hand the laboratory investigation of permeability characteristics have been obtained in oedometer tests.

Selected BAT and laboratory test results together with interpretation procedure are discussed in details and some suggestion are made with respect to the general methodology which should be applied when dealing with heavily overconsolidated clays.

Mariusz Sobolewski, Alojzy Szymański
Katedra Geotechniki,
Wydział Melioracji i Inżynierii Środowiska SGGW
02-787 Warszawa
ul. Nowoursynowska 166