

**Mirosław J. LIPIŃSKI, Małgorzata K. WDOWSKA**

Katedra Geoinżynierii SGGW  
Department of Geotechnical Engineering WAU

## **Wpływ niepełnego nasycenia na charakterystyki przepuszczalności gruntów spoistych\***

### **Influence of not full saturation on permeability of cohesive soils**

**Słowa kluczowe:** grunty spoiste, przepuszczalność, niepełne nasycenie  
**Key words:** cohesive soils, permeability, not full saturation

#### **Wprowadzenie**

Środowiskowy aspekt działalności inżynierskiej zyskuje w ostatnich latach coraz więcej uwagi projektantów. Surowe wymagania wynikające z potrzeby ochrony środowiska powodują zwiększone zainteresowanie poprawną oceną parametrów geotechnicznych. Ze względu na fakt, że wszystkie analizy migracji zanieczyszczeń opierają się w dużej mierze na charakterystyce przepuszczalności ośrodka gruntowego jest rzeczą bardzo istotną poznanie me-

chanizmów determinujących charakterystyki przepływu w różnych gruntach i w różnych warunkach.

Zdecydowana większość zagadnień przedstawianych w podręcznikach mechaniki gruntów dotyczy ośrodka z porami całkowicie wypełnionymi wodą. Pomimo że na przestrzeni ostatnich lat przeprowadzono wiele badań laboratoryjnych i terenowych na nienasyconych gruntach naturalnych i zagęszczanych, w środowisku geotechnicznym dominuje pogląd, że właściwości gruntów nienasyconych nie są jeszcze wystarczająco poznane.

W artykule przedstawiono zagadnienie wyznaczania przewodności hydraulicznej gruntów spoistych badanych w warunkach pełnego i niepełnego nasycenia porów wodą. Przedstawiono

---

\*Badania wykonane w ramach niniejszej pracy sponsorowane były przez Ministerstwo Nauki i Informatyzacji w ramach projektu badawczego 5T07E03824.

metodykę pomiaru przepuszczalności w gruntach spoistych oraz wyniki badań dokumentujące znaczenie pełnego nasycenia w ocenie charakterystyk przepływu.

### **Rola nasączenia gruntu w ocenie przepuszczalności gruntów spoistych**

W ośrodku dwufazowym (zawierającym jedynie szkielet gruntowy i wodę) obowiązuje liniowe prawo Darcy'ego. Zakłada się, że znając współczynnik filtracji ( $k$ ) można obliczyć prędkość filtracji ( $v$ ) dla każdej wartości gradientu ( $i$ ) odpowiadającej ruchowi laminarnemu. Współczynnik  $k$  charakteryzuje więc ośrodek gruntowy pod względem jego przepuszczalności, a jego wartość w danych warunkach jest stała.

W gruntach nienasyconych (zawierających trzy fazy, tj. szkielet, wodę i gaz) przepływ wody odbywa się według zmodyfikowanego prawa Darcy'ego opisanego przez równania Richardsa i Ficka. W gruntach nasyconych prawo Darcy'ego zachowuje swoją ważność, jednakże w ośrodku trójfazowym współczynnik przepuszczalności zależy od stopnia wilgotności gruntu ( $S_r$ ).

W gruncie nienasyconym współczynnik filtracji maleje wraz ze zmniejszeniem stopnia wilgotności. Przy niskim stopniu wilgotności większość porów wypełnia powietrze, które rozpuszcza się w przepływającej przez grunt wodzie. W związku z tym objętość wprowadzonej do próbki wody jest inna niż ilość wody wypływającej,

a przepływ jest nieustalony w czasie. W gruntach całkowicie nasączonych wszystkie pory wypełnione są wodą, w związku z czym objętość wody przepływającej przez próbkę nie ulega zmianie, a przepływ jest ustalony.

Punktem wyjścia do analitycznego opisu przepływu wody przez ośrodek nienasączony jest równanie Poiseuille'a dla przepływu przez kapilarę. Wykorzystując to, Taylor (1948) wykazał, że dla jakiegokolwiek przekroju kapilary wielkość przepływu ( $q_C$ ) można określić na podstawie następującego równania:

$$q_C = C_F \frac{\gamma_w R_H^2}{\mu} ia \quad (1)$$

gdzie:

$C_F$  – stała określająca kształt ziaren,

$R_H$  – promień hydrauliczny kapilary,

$\mu$  – lepkość płynu,

$\gamma_w$  – ciężar właściwy cieczy,

$a$  – przekrój, przez który odbywa się przepływ.

Zakładając prawdziwość prawa Darcy'ego oraz przyjmując pewne dodatkowe założenia Mitchell i inni (1965) podali formułę uzależniającą wartość współczynnika filtracji od stopnia wilgotności ( $S_r$ ) w postaci:

$$k = \left( \frac{\gamma_w}{\mu} \right) \frac{C_F V_S^2}{A_S^2} \frac{e^3}{1+e} S_r^3 \quad (2)$$

gdzie:

$A_S$  – zwilżony przekrój poprzeczny pory,

$V_S$  – objętość szkieletu gruntowego,

$e$  – wskaźnik porowatości.

Z równania (2) wynika, że dla danego rodzaju gruntu przewodność hydrauliczna ośrodka zmienia się proporcjonalnie do trzeciej potęgi stopnia wilgotności.

gotności ( $S_r$ ). Wniosek ten może być przyjęty jako wstępny, ponieważ założenie prostego modelu opartego na zjawisku kapilarności nie oddaje złożoności zjawiska przepływu wody w gruntach słabo przepuszczalnych i może powodować znaczące błędy w ocenie przepływu (Leonards 1962, Olsen i Morin 1962). Z drugiej jednakże strony, badania wykonane dla zagęszczanej gliny pylastej (Mitchell i in. 1965) dla różnych wilgotności zdają się całkowicie potwierdzać słuszność wzoru (2). Wyniki tych badań przedstawiono na rysunku 1.

W świetle przytoczonych wyników wydaje się, że niepełne nasycenie gruntu w sposób znaczący może zmienić wartość przewodności hydraulicznej. Dodatkowo należy podkreślić, że przytoczone wyniki badań odnoszą się do jednego rodzaju gruntu zagęszczanego w laboratorium. Z tego względu istotne

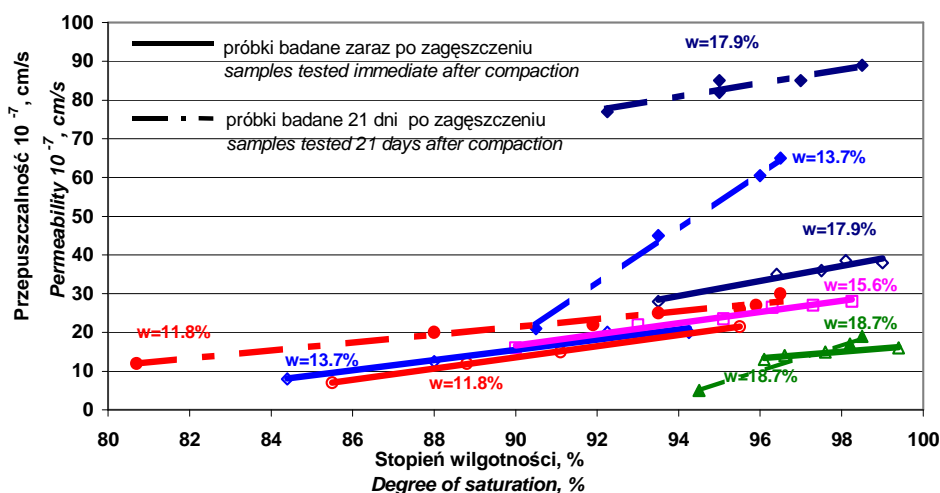
jest, aby na drodze eksperymentalnej określić, jak zmienia się przepuszczalność w zależności od stopnia wilgotności w różnych gruntach, zwłaszcza naturalnych.

### Metodyka określania przepuszczalności w gruntach spolistych

**Uwarunkowania wyboru metody badań.** Najczęściej stosowane laboratoryjne metody badania współczynnika filtracji stosowane w geotechnice wykorzystują następującą aparaturę:

- aparat o zmiennym naporze,
- aparat o stałym naporze,
- bezpośrednie lub pośrednie pomiary podczas badania edometrycznego.

Bezpośrednie metody badania współczynnika filtracji w warunkach laboratoryjnych sprowadzają się do



RYSUNEK 1. Wpływ stopnia wilgotności na przepuszczalność zagęszczanej gliny pylastej (Mitchell i in. 1965)  
 FIGURE 1. Influence of degree of saturation on permeability of compacted silty clay (Mitchell et al. 1965)

metod stało- i zmiennogradientowych. Metody stałogradientowe znajdują zastosowanie w przypadku gruntów o dużej przepuszczalności natomiast zmiennogradientowe w przypadku gruntów słabo przepuszczalnych. Dzieje się tak dlatego, że w przypadku gruntów o małej przepuszczalności uzyskiwane wartości przepływu (pomiar objętości w czasie) są tak małe, że znajdują się poniżej jakichkolwiek zdolności pomiarowych. Z tego względu stosuje się metody zmiennogradientowe, w których wielkością mierzoną są zmieniające się gradienty. Jednakże należy zaznaczyć, że standardowe metody wykorzystujące technikę zmiennego gradientu nie spełniają podstawowego warunku, jaki stawiany jest technikom laboratoryjnym, tj. nie w pełni zapewniają pełną kontrolę nad wykonywanym doświadczeniem, a dokładnie kontrolę warunków brzegowych ze względu na wielkość przepływu. Wynika to z dwóch okoliczności. Pierwsza z nich wynika z braku możliwości wykluczenia tzw. uprzywilejowanych dróg filtracji, które mogą przybierać formę mikroszczelin umiejscowionych pomiędzy 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 gruntu są całkowicie wypełnione wodą. Te dwa zastrzeżenia powodują, że istnieje potrzeba zastosowania metody pomiaru współczynnika filtracji, która byłaby pozbawiona wad standardowych metod. Taka metoda przedstawiona została poniżej.

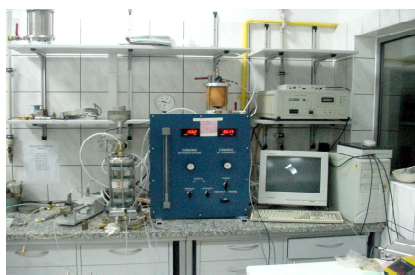
**Metoda stabilizacji gradientu (flow pump).** Technika flow pump

w wersji pierwotnej została wprowadzona na początku lat osiemdziesiątych przez Olsena i Morina (1984). W następnych latach ulepszana, zaczęła być wykorzystywana w najlepszych laboratoriach geotechnicznych na świecie. Podstawową zaletą tej metody jest to, że jest ona pozbawiona wad innych metod. W metodzie tej zmienione zostało podejście do określania parametrów przepływu podczas badania. Wymusza się stałą prędkość przepływającej wody przez próbkę, a mierzy różnicę ciśnień na końcach próbki. W ten sposób pomiar jest jednoznaczny i bardziej dokładny, gdyż ciśnienia rzędu dziesiątek kPa są łatwiejsze do pomierzenia niż przepływy rzędu tysięcznych części  $\text{cm}^3/\text{h}$ . Zakres przepływu jest na tyle szeroki, że technika ta nadaje się do określania współczynnika filtracji we wszystkich gruntach spoistych. Woda ze stałą prędkością podawana jest do dołu próbki, w związku z tym napór hydrauliczny na dolną powierzchnię próbki stopniowo wzrasta. Intensywność wzrostu ciśnienia zależy od wzajemnej relacji pomiędzy wielkością nastawionego (wymuszanego) przepływu, a przepuszczalnością ośrodka. W tej fazie przepływ nie jest ustalony w czasie. Możliwość ustawienia bardzo szerokiego zakresu przepływu powoduje, że stosunkowo łatwo jest dobrać jego wielkość tak, aby nawet przy bardzo słabo przepuszczalnych gruntach okres stabilizacji ciśnienia był stosunkowo krótki (kilka do kilkudziesięciu minut), a ustabilizowana różnica ciśnień pomiędzy dołem a górą próbki nie przekraczała 150 kPa, czyli zakresu pomiarowego różnicowego czujnika ciśnienia.

Następną zaletą tej metody jest możliwość współpracy pompy z próbką badaną w aparacie trójosiowego ściskania lub w konsolidometrze. Daje to możliwość nasączenia próbki metodą ciśnienia wyrównawczego, co eliminuje niepewności związane z brakiem kontroli pełnego nasycenia gruntu. Spełnienie wymogu pełnego nasycenia gruntu jest warunkiem koniecznym poprawnego wykonania badania dla próbek nasycanych. Metoda ciśnienia wyrównawczego oraz kryteria, jakie powinny być spełnione przy nasączaniu prekonsolidowanych gruntów spoistych zostały przedstawione przez autorów (Lipiński i Wdowska 2004).

Widok stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 2, natomiast schemat badania przy wykorzystaniu metody stabilizacji przepływu na rysunku 3.

Należy podkreślić, że (jak wynika ze schematu) wykonanie pomiaru przepuszczalności metodą stabilizacji gradientu następuje w warunkach zadawania ciśnienia wyrównawczego. Wynika z tego, że powietrze, które rozpuściło się podczas nasączania nie ulegnie decondensacji.



RYSUNEK 2. Widok stanowiska badawczego  
FIGURE 2. View of laboratory set up

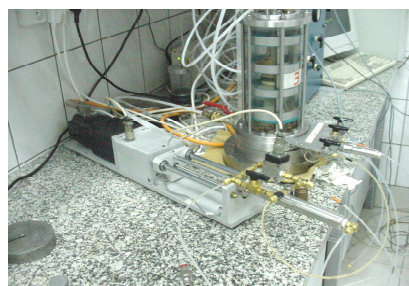
**Przygotowanie próbek do badania przepuszczalności.** Próbki badano w seriach dla warunków pełnego i niepełnego nasycenia gruntu wodą. Próbki poddane procedurze ciśnienia wyrównawczego, które osiągnęły wymaganą wartość parametru Skemptona, były uznane za w pełni nasączone. Następnie poddawano je konsolidacji. Po zakończeniu konsolidacji można było podłączyć pompę przepływu do panelu sterowania i rozpocząć badanie.

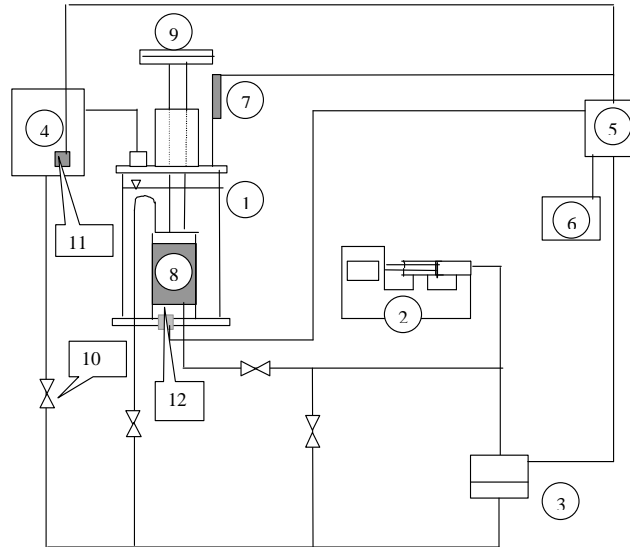
## Wyniki badań i ich analiza

**Badany materiał.** Badania wykonano na próbkach NNS pochodzących z projektowanej trasy II i III linii metra warszawskiego. Badane grunty to gliny i gliny pylaste zwięzłe, charakteryzujące się następującymi wartościami wskaźników plastyczności i stopniami plastyczności:

- gliny  $I_p = 20,9\%$ ,  $I_L = 0,47$ ,
- gliny pylaste zwięzłe  $I_p = 26,1\%$ ,  $I_L = 0,015$ .

**Charakterystyki stabilizacji gradientu dla gruntów nasączonych i nienasączonych.** W celu uzyskania



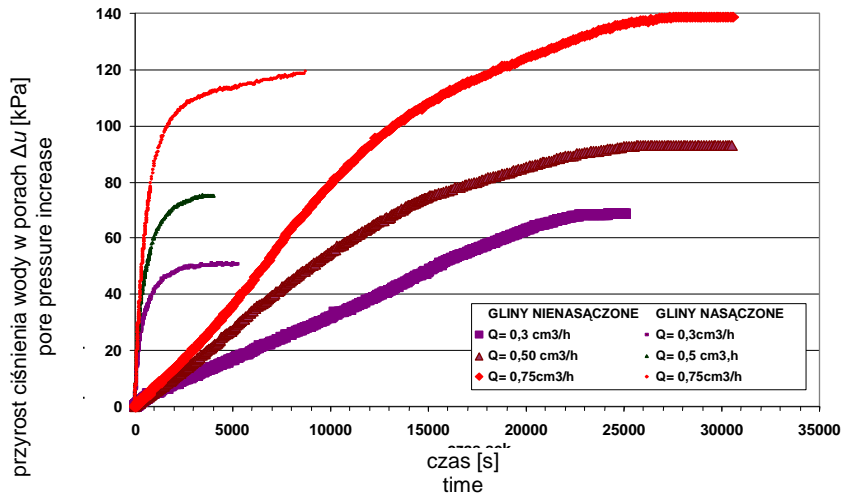


RYSUNEK 3. Schemat stanowiska do badania przepuszczalności metodą stabilizacji gradientu: 1 – komora aparatu trójosiowego ściskania przystosowana do pomiaru współczynnika filtracji, 2 – pompa przepływu o dużej rozdzielczości, 3 – czujnik różnicowy ciśnienia, 4 – panel sterujący, 5, 6 – system rejestrujący, 7 – czujnik przemieszczeń, 8 – badana próbka, 9 – obciążenie pionowe, 10 – zawór kulowy, 11 – czujnik ciśnienia w komorze, 12 – czujnik ciśnienia wody w porach  
 FIGURE 3. Laboratory set up for determination of permeability characteristics with use of flow pump method: 1 – triaxial cell, 2 – high resolution flow pump, 3 – differential pressure trasducer, 4 – control panel, 5, 6 – data logging system, 7 – deformation transducer, 8 – a specimen, 9 – vertical loading, 10 – ball valve, 11 – cell pressure transducer, 12 – pore pressure transducer

pełnej charakterystyki prędkości przepływu od gradientu dla każdej próbki wykonywano po kilka testów stabilizacji gradientu przy danym przepływie. Przebieg stabilizacji gradientu zależy w dużej mierze od stanu nasycenia porów wodą. Na rysunku 4 przedstawiono przykładowe charakterystyki stabilizacji gradientów przy trzech różnych przepływach dla glin nasączonych i nienasączonych. Przebiegi stabilizacji ciśnienia dla gruntu nasączonego i nienasączonego dla tych samych przepływów różnią się zasadniczo. W przypadku próbek nasączonych ciśnienia stabilizują się relatywnie szybko. Daje się zauważyć tendencja do wydłużania okresu

stabilizacji gradientu wraz ze wzrostem przepływu. Ciśnienia dla próbek nienasączonych ustalają się znacznie wolniej niż w próbkach nasączonych. Różnice są kilkukrotne. Przykładowo dla najmniejszego przepływu  $0,3 \text{ cm}^3/\text{h}$  czas stabilizacji gradientu dla próbki nienasączonej wynosi około 7 godzin i jest prawie dziesięciokrotnie dłuższy niż dla próbki nasączonej (ok. 40 minut).

Przebiegi stabilizacji gradientów dla odpowiadających sobie wielkością przepływu próbek różnią się również co do wielkości ustabilizowanego gradientu. Ustabilizowane gradienty dla próbek nienasączonych są większe niż dla próbek nasączonych. Dla badanych grun-



RYSUNEK 4. Przykładowe wyniki stabilizacji ciśnienia dla nasączonych i nienasączonych próbek gliny  
 FIGURE 4. Achievement of steady flow conditions for saturated and not fully saturated clay

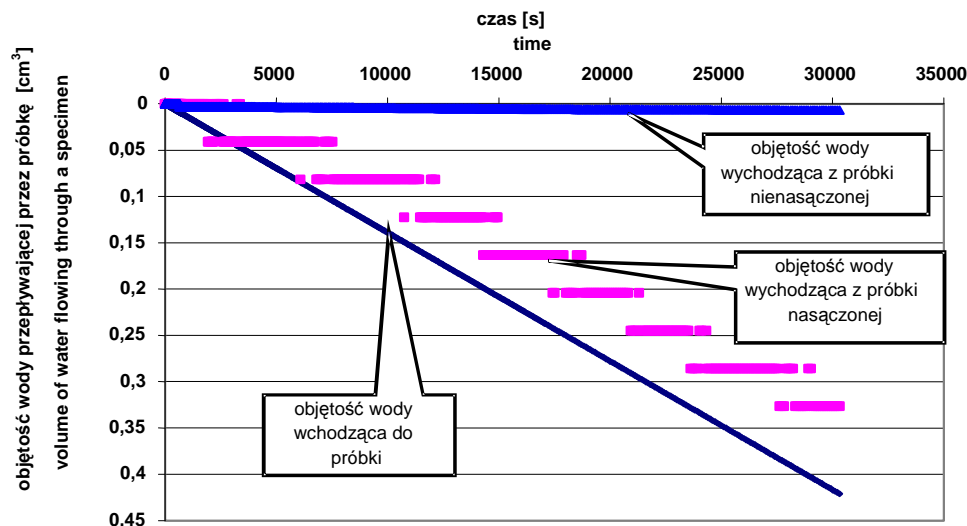
tów różnice w analogicznych gradientach często przekraczały 20.

**Weryfikacja warunków przepływu ustalonego.** Przedstawione powyżej przykładowe wyniki badań jednoznacznie wskazują, że proces stabilizacji gradientu różni się znacznie dla próbek nasączonych i nienasączonych. Wynika to z faktu, że dla próbek nienasączonych przepływ wody odbywa się w warunkach filtracji nieustalonej. W celu weryfikacji tej tezy układy pomiarowe podczas badania połączono w taki sposób, aby był możliwy pomiar objętości wody wpływającej do próbki i wypływającej z niej w tym samym czasie. Porównanie tych przepływów dla próbki nasączonej i nienasączonej pokazano na rysunku 5. Z przedstawionych wykresów wyraźnie wynika, że dla próbek gruntów nienasączonych ilość wody wchodzącej i wychodzącej z

próbki nie bilansują się, co oznacza, że warunki przepływu są nieustalone.

Poza tym należy uwzględnić to, że w trakcie badania stopień wilgotności próbki wzrasta, co dodatkowo niweluje początkową różnicę w warunkach wypełnienia porów wodą.

**Charakterystyki przepuszczalności.** W celu porównania charakterystyk przepuszczalności dla badanych gruntów nasączonych i nienasączonych wykonano wykresy prędkości przepływu w zależności od ustalonego gradientu hydraulicznego i przedstawiono na rysunku 6 odpowiednio dla glin i glin pylastych zwięzłych. Należy zwrócić uwagę na fakt, że prezentowane wyniki nie są oparte na pojedynczych pomiarach, które mogą być obciążone błędem, ale pozwalają na śledzenie funkcji  $v = f(i)$  w szerokim zakresie zmienności gradientu.



RYSUNEK 5. Weryfikacja warunków filtracji ustalonej dla próbek nasączonych i nienasączonych  
 FIGURE 5. Verification of steady flow conditions for saturated and not fully saturated sample

Przedstawione na wykresach zależności dla gruntów mineralnych wskazują, że zasadnicze różnice w charakterystykach przepuszczalności między próbkami gruntów nasączonych i nienasączonych polegają na różnicach w czasie stabilizacji i występowaniu większego gradientu początkowego dla gruntów nienasączonych. Ogólnie przepuszczalność w gruntach nie w pełni nasączonych jest mniejsza. Przedstawione na rysunku 6 wzory opisują regresję liniową otrzymaną z badań punktów wraz z miarą niedopasowania. Dokładne wartości otrzymanych na podstawie równań wielkości współczynników przepuszczalności oraz gradientów początkowych są szczegółowo przedstawione poniżej.

Gradienty początkowe odpowiednio wynoszą:

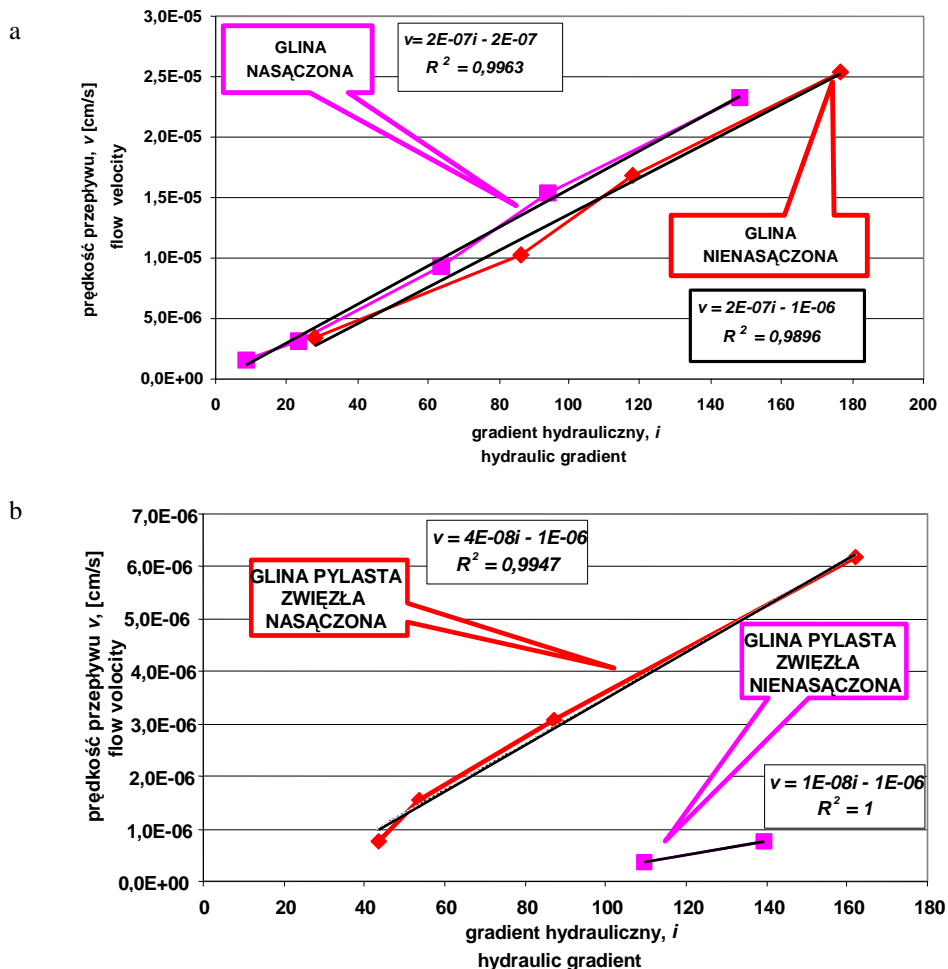
- dla glin  
 $S_r < 1 i_o = 10$ ;  $S_r = 1 i_o = 1,5$

- dla glin pylastych zwięzłych i ilów  
 $S_r < 1 i_o = 80$  (sic! tylko dwa badania);  $S_r = 1 i_o = 21$   
 Średnie współczynniki filtracji wynoszą:
- dla glin  
 $S_r < 1 k = 1,5 \cdot 10^{-7}$  cm/s  
 $S_r = 1 k = 1,6 \cdot 10^{-7}$  cm/s
- dla glin pylastych zwięzłych  
 $S_r < 1 k = 1,3 \cdot 10^{-8}$  cm/s  
 $S_r = 1 k = 4,4 \cdot 10^{-8}$  cm/s

## Wnioski

- Połączenie metody ciśnienia wyrównawczego i techniki stabilizacji gradientu (flow pump) jest bardzo efektywną i wiarygodną metodą określania przepuszczalności w prekonsolidowanych gruntach spoistych. Technika ta może być z powodzeniem wykorzystywana również w spoistych gruntach nienasączonych.





RYSUNEK 6. Charakterystyki prędkości przepływu w zależności od zadawanego gradientu dla nasączonych i nienasączonych: a – glina, b – glina pylastych zwięzłych  
 FIGURE 6. Flow velocity against hydraulic gradient for saturated and unsaturated: a – clay, b – high plasticity clay

- Charakterystyki przepuszczalności dla ośrodka dwu- i trójfazowego różnią się istotnie. Szczególnie w spoistych gruntach prekonsolidowanych niepełne nasycenie przejawia się wzrostem gradientu początkowego odpowiednio w glinach z 1,5 do 10, a w glinach, pylastych zwięzłych z 21 do 80. Współczynniki filtracji zasadniczo nie różnią się w glinach, natomiast w glinach pylastych zwięzłych maleją trzy-, czterokrotnie.
- Na obecnym etapie badań (liczba wykonanych testów na różnych gruntach) nie należy wykluczać krzywoliniowego przebiegu charakterystyki przepływu dla niedużych gradientów w przypadku gruntów nienasyconych.

## Literatura

- LEONARDS G.A. 1962: Foundation Engineering. McGraw Hill Book Co., Inc.
- LIPIŃSKI M.J., WDOWSKA M.K. 2004: Kryteria nasączania gruntów prekonsolidowanych metodą ciśnienia wyrównawczego. II Problemowa Konferencja Geotechniczna „Współpraca budowli z podłożem gruntowym”. T. 2, 71–81.
- MITCHELL J.K., HOOPER D.R., CAMPANELLA R.G. 1965: Permeability of compacted clay. Soil Mechanics and Foundations Division ASCE 91, SM4, July.
- TAYLOR D.W. 1948: Fundamentals of Soil Mechanics. John Wiley & Sons, Inc.
- OLSEN H.W., MORIN R.H. 1984: Determining Specific Storage of Sediment Using Data from a Constant Flow Rate Permeability Test. *American Geophysical Union* 65, 45.

## Summary

**Influence of not full saturation on permeability of cohesive soils.** The paper focuses on permeability characteristics of medium and high plasticity clays in fully

and not fully saturated state. Laboratory tests were carried out in triaxial apparatus capable of saturating a specimen by back pressure method. Actual permeability tests were done with use of flow pump technique. Experimental material gathered at this stage of the study explicitly shows that process of stabilising flow conditions in saturated and unsaturated clay is significantly different. This difference is directly projected on permeability characteristics. In medium plasticity clay the difference especially is marked in increase of initial gradient from 1.5 to 10, while in high plasticity clays from 21 to even 80. In the latter soil also coefficient of permeability decrease at least three times.

### Authors' address:

Mirosław J. Lipiński, Małgorzata K. Wdowska  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
Katedra Geoinżynierii  
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa  
Polska