

**Edyta MALINOWSKA, Alojzy SZYMAŃSKI**

Katedra Geoinżynierii SGGW w Warszawie

Department of Geotechnical Engineering WULS – SGGW

## **Analiza zmian gradientu hydraulicznego w charakterystykach przepływu słabonośnego podłoża The analysis of hydraulic gradient changes in the flow characteristics of the soft soil**

**Słowa kluczowe:** gradient hydrauliczny, przepływ, naprężenie konsolidacyjne, grunty słabonośne, metoda flow-pump

**Key words:** hydraulic gradient, water flow, consolidation stress, soft soils, flow-pump methods

### **Wprowadzenie**

Intensywny wzrost inwestycji w budownictwie komunikacyjnym coraz częściej zmusza inżynierów do lokalizowania obiektów drogowych na słabonośnym podłożu organicznym. Problemy inżynierskie, jakie napotykamy w bardziej rozłożonych gruntach organicznych o małej przepuszczalności, przypominają problemy, jakie często występują w słabych gruntach mineralnych. Niemniej jednak są one bardziej uwydatnione ze względu na większą ścisłość, wzmożony wpływ pełzania, małą wytrzymałość, bardzo małe naprężenie efektywne, dużą przepuszczalność początkową gruntu, znacznie malejącą z postępują-

cym procesem ścisłości (Szymański 1991, Sas 2001, Malinowska 2005) oraz nieliniową zmienność przepuszczalności (Malinowska 2001) gruntu wraz ze zmianą gradientu i porowatości gruntu.

W gruncie obciążonym powstaje stan naprężenia, powodujący jego odkształcanie, którego wartość zależy od parametrów ścisłości gruntu i wielkości obciążenia. Natomiast przebieg odkształcenia w czasie uzależniony jest od przepuszczalności gruntu i warunków odpływu oraz od właściwości lepkich gruntu warunkujących proces pełzania szkieletu (Szymański i Sas 2000).

Zasadniczą część osiadań podłoża stanowią odkształcenia konsolidacyjne. Zatem przebieg procesu odkształcenia gruntu zależy głównie od przyrostu naprężenia efektywnego w podłożu, a więc od prędkości rozpraszania nadwyżki ciśnienia porowego. Podstawowa teoria konsolidacji Terzaghi'ego (1924) została oparta na prawie zachowania masy, gdzie założono wiele „uproszczeń”. Między innymi to, że obowiązuje liniowe prawo

przepływu Darcy'ego, zależność naprężenie – odkształcenie ma charakter liniowy, występują małe przemieszczenia, parametry gruntowe nie zmieniają się w procesie konsolidacji, występują jedynie odkształcenia w kierunku pionowym, wynikające wyłącznie z konsolidacji filtracyjnej. Niemniej jednak wiele z tych założeń jest obecnie analizowanych oraz omawianych w publikacjach naukowych.

Badania do niniejszego artykułu mogły zostać uzupełnione dzięki dofinansowaniu MEiN z grantu N N506 397135.

### **Charakterystyki przepływu warunkujące przebieg konsolidacji**

Większość z istniejących teorii konsolidacji opartych jest na założeniach, że prawo Darcy'ego jest obowiązujące bez względu na wielkość gradientu hydraulicznego. Niemniej jednak m.in.: Hansbo (1960, 2001, 2003), Miller i Low (1963), Holtz i Broms (1972), Dubin i Moulin (1985) dowiedli w serii badań odstępstwa od przepływu Darcy'ego dla uziarnionych gruntów. Udowodnili oni, że w glinach o bardzo małym gradiencie hydraulicznym zależność między prędkością przepływu a gradientem hydraulicznym jest nieliniowa.

Gdy grunt poddany jest dodatkowemu obciążeniu, następuje zmniejszenie objętości porów oraz wyciskanie zgromadzonej w nich wody. Podczas odpływu wody następuje przekazywanie obciążenia na szkielet gruntowy, co powoduje wzrost naprężeń efektywnych w gruncie oraz zmianę porowatości. Powoduje to znaczną zmianę cech fizyko-

-mechanicznych. Jak wykazały badania Mesri i Godlewskiego (1977), Tavenasa i innych (1979), Szymańskiego (1982), w szczególności zmienia się współczynnik filtracji. Wyniki tych badań wskazują nieliniową zależność współczynnika filtracji od odkształcenia i aktualnego naprężenia efektywnego.

Już w 1912 roku, Krasnopolskij (Macioszczyk 1973, Wosiewicz 1986) zasugerował formę zmodyfikowanego prawa Darcy'ego dla przepływu nieliniowego. Natomiast Davis i Raymond (1965) jako pierwsi zastosowali analityczne rozwiązanie dla warunków stałego obciążenia oparte na przypuszczeniach, że spadek przepuszczalności jest proporcjonalny do spadku ściśliwości.

Zmiana przepuszczalności podczas ściśliwości ma znaczący wpływ na wskaźnik konsolidacji (Kogure 1999). W stanie naturalnym większość gruntów organicznych ma dużą porowatość i dużą przepuszczalność. Z tego powodu początkowa ściśliwość gruntów organicznych pojawia się tuż po przyłożeniu obciążenia i gwałtownie redukowana jest przepuszczalność gruntu w procesie ściskania. Nawet pod obciążeniem zmiana przepuszczalności może być wielokrotnie większa.

Szczególnie istotne jest poszukiwanie prawa przepływu dokładnie opisującego ruch wody w porowatym ośrodku gruntowym, ponieważ, jak twierdzi Glazer (1985), w rzeczywistości trudno jest znaleźć warstwę gruntu o identycznej porowatości w każdym punkcie i stałej wartości współczynnika filtracji.

Ruch wody w porowatym ośrodku gruntowym uwarunkowany jest siłami działającymi na wodę, a zwłaszcza ciężkości, ciśnienia, tarcia, bezwładno-

ści, powierzchniowymi, działającymi na kontakcie fazy stałej i ciekłej (kapilarne i adsorpcji). Siły wywołujące ruch wody rozkładają się na całej drodze przepływu równomiernie (o ile opory są wszędzie jednakowe), dlatego przepływ wody zależy od gradientu hydraulicznego (Kowalski 1998).

Podstawowym i koniecznym warunkiem istnienia przepuszczalności jest występowanie w gruncie łączności między wolnymi przestrzeniami, porami i szczelinami o wymiarach co najmniej kapilarnych. Zasadnicze znaczenie ma tu wielkość, kształt i rodzaj wolnych przestrzeni, a nie ogólna ich objętość. Lambe i Whitman (1978) twierdzą, że przepływ przez jeden duży kanalik będzie znacznie większy niż przez kilka kanalików o tym samym łącznym polu przekroju. Istniejące w gruncie wolne przestrzenie mogą mieć różne wymiary, kształt i objętość. Ma to wpływ zarówno na sposób przepływu wody w gruncie, jak i na jej gromadzenie się. Jak dowodzą Pazdro i Kozierski (1990), porowatość zmniejsza się wraz z głębokością na wskutek bardziej ściśłego ułożenia ziaren wskutek ciśnienia warstw wyżej leżących.

Ruch wody w porowatym ośrodku gruntowym zmienia się w zależności od wielkości współczynnika filtracji i gradientu hydraulicznego. Prawie we wszystkich gruntach przepływ wody jest laminarny, szczególnie w gruntach spoistych.

Przyczyny odstępstw po stronie dolnej i górnej granicy stosowalności prawa Darcy'ego są różne, a ich natura jest tak bardzo skomplikowana, że istnieją znaczące różnice w poglądach różnych badaczy. Przy dużych prędkościach przepływu odstępstwa od liniowego prawa Darcy'ego wywołane są wpływem siły

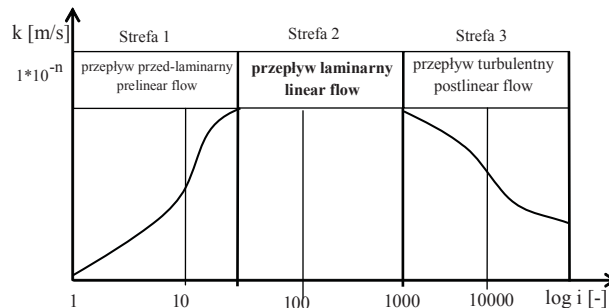
inercji, a przy bardzo dużych pojawiają się siły turbulencji.

Kollis (1961) uważa, że w gruntach bardzo drobnoziarnistych odchylenia od prawa Darcy'ego należy oczekiwać zarówno przy dużych, jak i małych gradientach. Natomiast Macioszczyk (1973) podaje, że strefa filtracji przejściowej (mieszanej) jest bardzo szeroka i kilkakrotnie przekracza zakres strefy Darcy'ego.

Podstawą klasyfikacji reżimu ruchu wody była z reguły wartość umownie zdefiniowanej bezwymiarowej liczby Reynoldsa oraz współczynnik oporu. Niemniej jednak z uwagi na to, iż na przykład w gruntach organicznych określenie liczby Reynoldsa jest niemożliwe, to takie kryterium rozdziału nie może być zawsze stosowane. Macioszczyk (1973) jako kryterium rozgraniczenia przyjmuje wartość krytyczną gradientu hydraulicznego. Natomiast Kany i Herrmann (1987) schematycznie przedstawiają zależność współczynnika filtracji wody od gradientu hydraulicznego w gruntach spoistych z podziałem na strefy ruchu wody porowej (rys. 1).

### **Gradient hydrauliczny w charakterystykach przepływu**

W gruntach słabo i bardzo słabo przepuszczalnych zapoczątkowanie filtracji możliwe jest dopiero po wystąpieniu pewnej granicznej wartości gradientu hydraulicznego ( $i_0$ ). Powoduje to, że wykres  $V = f(i)$  nie wychodzi z początku układu, a nawet w początkowym okresie wykazuje krzywoliniowość wywołaną stopniowym narastaniem przepuszczalności. Taką filtrację nazwano filtracją



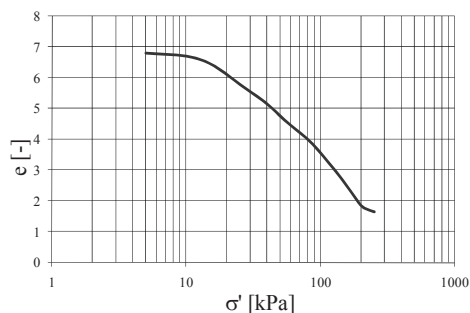
RYSUNEK 1. Zależność współczynnika filtracji wody od gradientu hydraulicznego w gruntach spodystych

FIGURE 1. The relationship between the filtration and hydraulic gradient (Kany i Herrmann 1987)

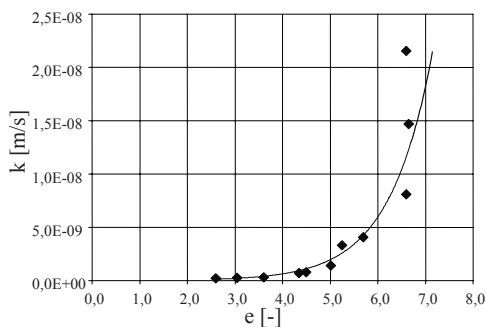
prelinearną. Aby zapoczątkować ruch wody związanej, naprężenie progowe ( $\tau_0$ ) musi być pokonane przez naprężenie styczne ( $\tau$ ) – Kowalski (1998). Wytrzymałość  $\tau_0$  ma rozkład równomierny na przekroju poru w gruncie i jest rzędu  $10^{-7}$  kPa. Siły wiązania wody przez szkielet gruntowy rosną przy zbliżaniu się do powierzchni cząstek mineralnych, a tym samym zmieniają się wartości naprężenia progowego (Hauryszkiewicz 1996, Kowalski 1998). Wynika stąd, że czynny przekrój porów jest wielkością dynamiczną, zależną od gradientu ciśnienia wody w porach. Posiadanie przez wodę porową wytrzymałości na ścinanie jest faktem empirycznym. Do osiągnięcia gradientu początkowego niezbędne jest odpowiednie (wystarczająco wysokie) ciśnienie wody porowej. Gdy gradient hydrauliczny przewyższy określoną wartość  $i_0$ , większa część wody związanej w gruncie porusza się razem z wodą wolną. Wraz ze wzrostem gradientu hydraulicznego uruchamiana jest coraz większa część wody związanej, a czynny przekrój porów zwiększa się. Zerwanie wiązań wody błonkowej, a następnie higroskopowej powoduje zmianę

właściwości tej wody. Woda porowa staje się wodą newtonowską, w której  $\tau_0 = 0$ . Aby przemieścić wodę związaną, należy przyłożyć pewne ciśnienie równe  $i_0$ . W takich warunkach filtracja może nastąpić dopiero wtedy, gdy naprężenia ścinające, wynikające z gradientu hydraulicznego w błonkach wody, przekroczą jej opór na ścinanie. Opór ten zależy od lepkości, a ta z kolei jest tym większa, im cieńsze są błonki wody (Kutilek 1969, Skawiński 1974, Wosiewicz 1986, Harder i Blumel 1990).

Shackelford i Glade (1994) oraz Bartholomeeussen i inni (2001) przeprowadzili badania na próbkach popiołu wymieszanego w różnych proporcjach z piaskiem i bentonitem, których wskaźnik przepuszczalności jest zbliżony do badanych torfów, oraz na próbkach łu. Badania te były wykonane techniką flow-pump i wskazywały na nieliniowość wskaźnika przepuszczalności w zależności od objętości porów. Malinowska (2005) oraz Malinowska i inni (2006) dowiedli w serii badań na gruntach słabonośnych, że zarówno zależność wskaźnika porowatości od naprężenia efektywnego (rys. 2), jak i od przepuszczalności jest nieliniowa (rys. 3).

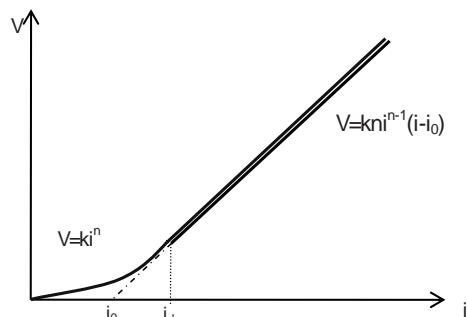


RYSUNEK 2. Zależność wskaźnika porowatości od naprężenia efektywnego  
FIGURE 2. The relationship between void ratio and effective stress



RYSUNEK 3. Zależność wskaźnika porowatości od współczynnika filtracji  
FIGURE 3. The relationship between the void ratio and filtration

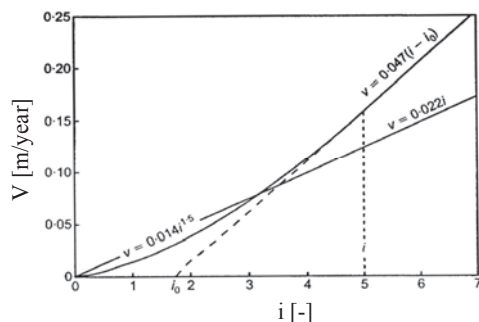
Hansbo (1960, 1997, 2001) na podstawie serii badań dowiódł, że przepływ wody przez próbkę gruntu jest nieliniowy (rys. 4). Udowadnia on, że rozwiązanie oparte na wykładniczej korelacji ( $V = ki^n$ ) między przepływem wody w porach a gradientem hydraulicznym może zastąpić równanie oparte na przepływie Darcy'ego ( $V = ki$ ). Zaprezentowane nowe równanie konsolidacji z zastosowaniem nieliniowego prawa Darcy'ego opisuje dobrze zarówno wykładniczą, jak i liniową korelację między gradientem hydraulicznym i prędkością przepływu.



RYSUNEK 4. Potęgowa zależność między prędkością przepływu a gradientem hydraulicznym  
FIGURE 4. The relationship between flow velocity and hydraulic gradient in non-Darcian flow (Hansbo 2001)

Następnie w 2003 roku Hansbo potwierdził swoją teorię w badaniach wykonanych w Szwedzkim Geotechnicznym Uniwersytecie z zastosowaniem drenów pionowych. Udowodnił on, że wyniki badań opartych na teorii nie-Darcy'ego przepływu (non-Darcian flow) są porównywalne z badaniami wykonanymi w terenie w różnych miejscach na świecie. Wyniki otrzymane z badań bez użycia drenów były drugim dowodem na nieważność zastosowania prawa Darcy'ego w przypadku małych gradientów. Graniczna wartość gradientu hydraulicznego, dla którego przepływ opisany przez równanie wykładnicze przechodzi w liniowe, jest różna dla różnych rodzajów gruntów. Niemniej jednak zmiana w ograniczeniach rzędu od  $i_1 = 3$  do  $i_1 = 5$  jest stosunkowo mała, jak pokazuje rysunek 5.

Przepływ wody warunkuje proces konsolidacji gruntu. Dlatego problem nieliniowości przepływu pozostaje nadal istotny i jest on szczególnie niezdefiniowany w porowatych, mało wytrzymałych i bardzo ściśliwych gruntach organicznych.



RYSUNEK 5. Zależność między gradientem hydraulicznym a prędkością przepływu (Hansbo 2003)

FIGURE 5. The relationship between flow velocity and hydraulic gradient

### Wyniki badań zmian gradientu hydraulicznego w charakterystykach przepływu

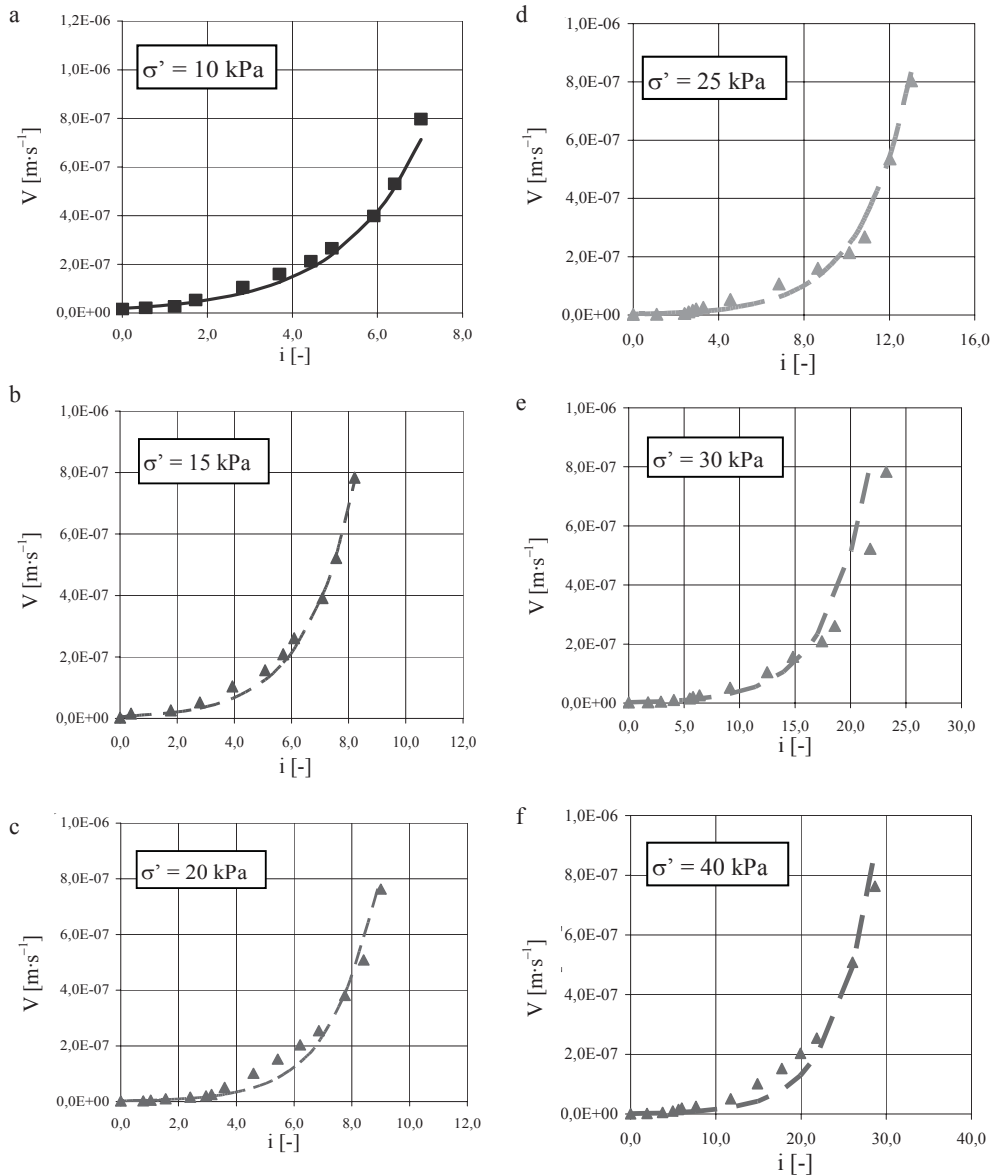
Do wyznaczenia charakterystyk przepływu w słabonośnym podłożu organicznym obciążonym nasypem wykorzystano badania wykonane techniką flow-pump, tj. stałego, wymuszonego przepływu (Malinowska 2005). Technika flow-pump pozwala na przeprowadzenie badań w stosunkowo krótkim czasie i w systemie zamkniętym, przy bardzo niewielkich prędkościach przepływu i małych gradientach występujących zwykle *in situ*. Pane i inni (1983), Daniel (1994), Zhang i inni (1998) 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.

Badania zostały wykonane na próbkach torfu pobranych z poligonu doświadczalnego „Kampus SGGW”. Przeprowadzono 349 badań przepływu na 14 próbkach, przy 13 różnych stanach naprężenia gruntu.

Otrzymane z metody bezpośredniej wyniki badań laboratoryjnych wskazują wyraźną nieliniowość charakterystyk przepływu dla gruntów organicznych poddanych naprężeniom konsolidacyjnym, odpowiadającym obciążeniom nasypu drogowego (rys. 6). Jak obrazują wykresy, zapoczątkowanie filtracji jest możliwe przy bardzo małych wartościach gradientu hydraulicznego ( $i$ ). Powoduje to, że wykres  $V = f(i)$  już w początkowym okresie wykazuje krzywoliniowość wywołaną stopniowym narastaniem objętości przepływu. Taką zależność nazwano prelinearną i jest ona szczególnie widoczna przy małych wartościach gradientu hydraulicznego.

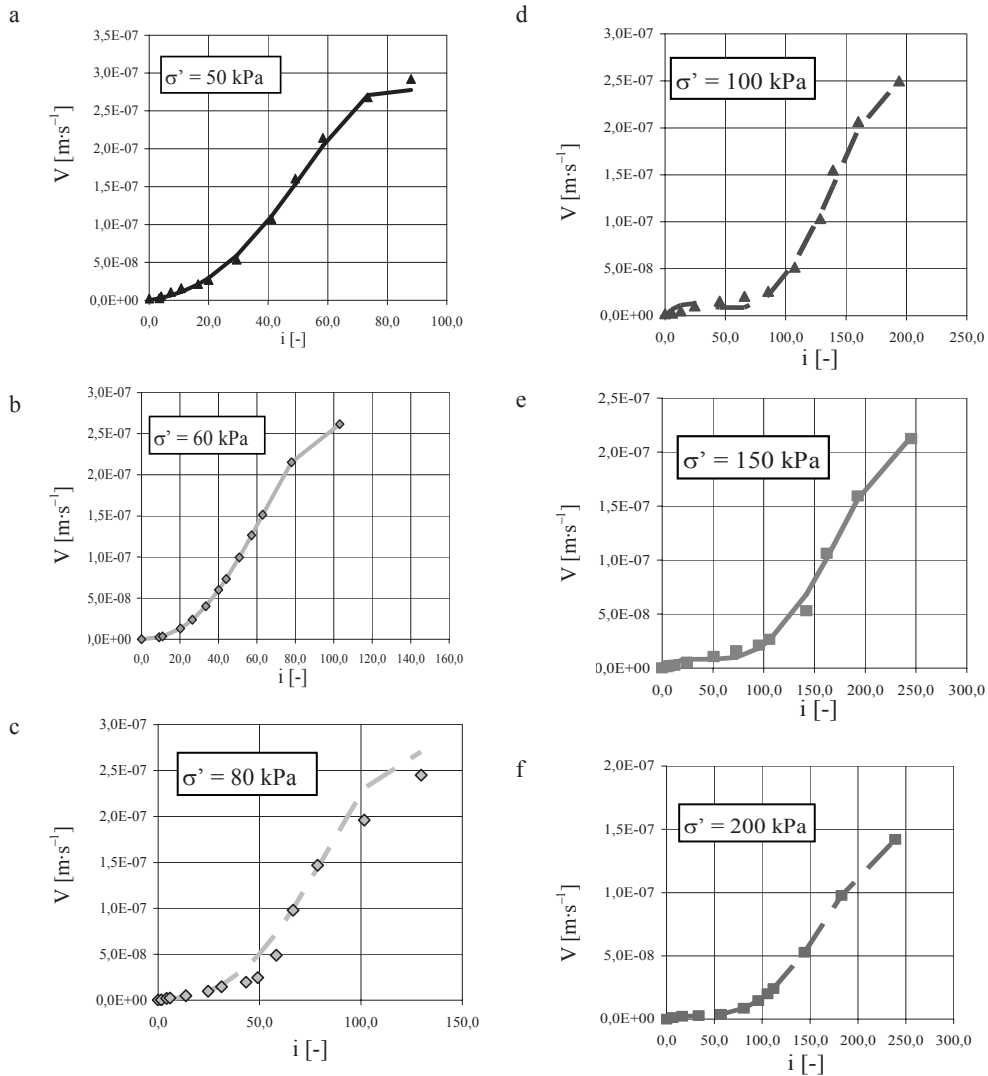
Przy dużych prędkościach przepływu odstępstwa od liniowego prawa Darcy’ego wywołane mogą być wpływem siły inercji, a przy bardzo dużych pojawiają się siły turbulencji. Taką fazę nazywamy postlinearną. Ruch taki może odbywać się także wtedy, gdy w gruncie nastąpi przebicie hydrauliczne. Podobne zjawisko można było zaobserwować przy badaniu charakterystyk przepływu w słabonośnych torfach, gdy naprężenie konsolidacyjne było tak duże, że wywołało bardzo dużą wartość gradientu hydraulicznego, niespotykaną w terenie.

Rysunek 7 przedstawia zależność prędkości przepływu od gradientu hydraulicznego dla dużych wartości obciążających.



RYSUNEK 6. Zależność prędkości przepływu od gradientu hydraulicznego wyznaczona z badań techniką stałego, kontrolowanego przepływu dla odpowiednich naprężeń konsolidacyjnych wywołanych obciążeniem: a –  $\sigma'_k = 10$  kPa, b –  $\sigma'_k = 15$  kPa, c –  $\sigma'_k = 20$  kPa, d –  $\sigma'_k = 25$  kPa, e –  $\sigma'_k = 30$  kPa, f –  $\sigma'_k = 40$  kPa.

FIGURE 6. The relationship between flow velocity and hydraulic gradient for different value of effective stress in soft soils



RYSUNEK 7. Zależność prędkości przepływu od gradientu hydraulicznego wyznaczona z badań techniką stałego, kontrolowanego przepływu dla odpowiednich naprężeń konsolidacyjnych wywołanych obciążeniem: a –  $\sigma'_k = 50$  kPa, b –  $\sigma'_k = 60$  kPa, c –  $\sigma'_k = 80$  kPa, d –  $\sigma'_k = 100$  kPa, e –  $\sigma'_k = 150$  kPa, f –  $\sigma'_k = 200$  kPa

FIGURE 7. The relationship between flow velocity and hydraulic gradient for different value of effective stress in soft soils



**Analiza zmian gradientu hydraulicznego w charakterystykach przepływu słabonośnego podłoża organicznego obciążonego nasypem**

Zjawisko konsolidacji definiowane jest jako przebiegające w czasie zagęszczenie układu szkieletu gruntowego sprzężone z ruchem cieczy i gazu w przestrzeni porowej (Terzaghi 1924, Kisiel i in. 1982, Fredlund i Rahardjo 1993). Dlatego określenie charakteru i udziału przepływu cieczy w badaniach laboratoryjnych jest szczególnie ważne przy prognozowaniu prędkości osiadań ośrodka gruntowego pod obciążeniem.

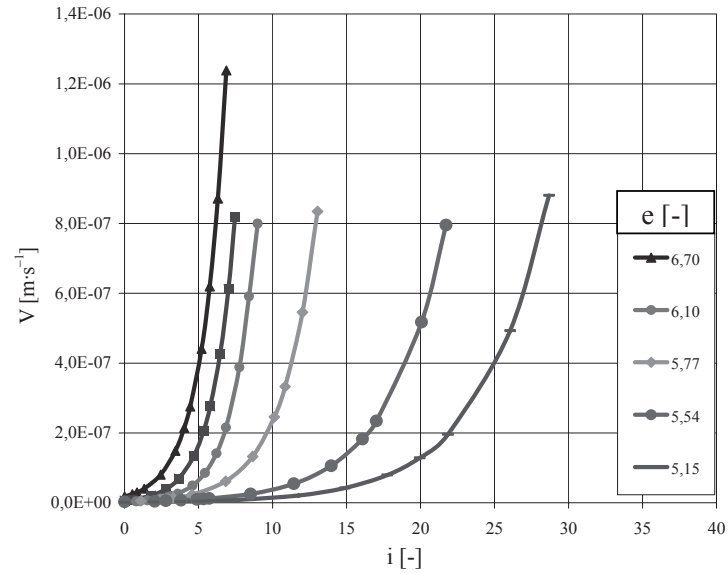
Większość z istniejących teorii konsolidacji opartych jest na wielu założeniach, na przykład że prawo Darcy'ego obowiązuje bez względu na wielkość gradientu hydraulicznego, zależność naprężenie – odkształcenie ma charakter liniowy, występują małe przemieszczenia, parametry gruntowe nie zmieniają się w procesie konsolidacji. Niemniej jednak wiele publikacji naukowych dowodzi, iż założenia te nie mogą być stosowane do wszystkich rodzajów gruntów, a w szczególności duże odstępstwa zaobserwowano w przypadku słabonośnych gruntów organicznych, tj. torfów i gyttii, poddanych obciążeniom od nasypów ziemnych czy drogowych. Między innymi Szymański i Lechowicz (Szymański 1982, Szymański 1984, Lechowicz i Szymański 1984, Lechowicz 1992) dowodzą w serii badań wykonanych na poligonach doświadczalnych SGGW, iż przemieszczenia podłoża organicznego

są znaczące oraz zależność naprężenie – odkształcenie ma charakter nieliniowy (Szymański 1991, Szymański i Sas 2000, Sas 2001). Szymański (1991) i Malinowska (2005, 2006) oraz Malinowska i inni (2005, 2007) i Szymański i inni (2006) dowodzą, iż w słabonośnym podłożu organicznym podczas procesu konsolidacji porowatość zmienia się znacząco, co ma duży wpływ na charakterystyki przepływu. Ponadto Hansbo (1960), Miller i Low (1963), Holtz i Broms (1972), Dubin i Moulin (1985) dowiedli w serii badań odstępstwa od przepływu Darcy'ego nawet dla gruntów dobrze uziarnionych. Udowodnili oni, że w glinach o bardzo małym gradiencie hydraulicznym zależność między prędkością przepływu a gradientem hydraulicznym jest nieliniowa.

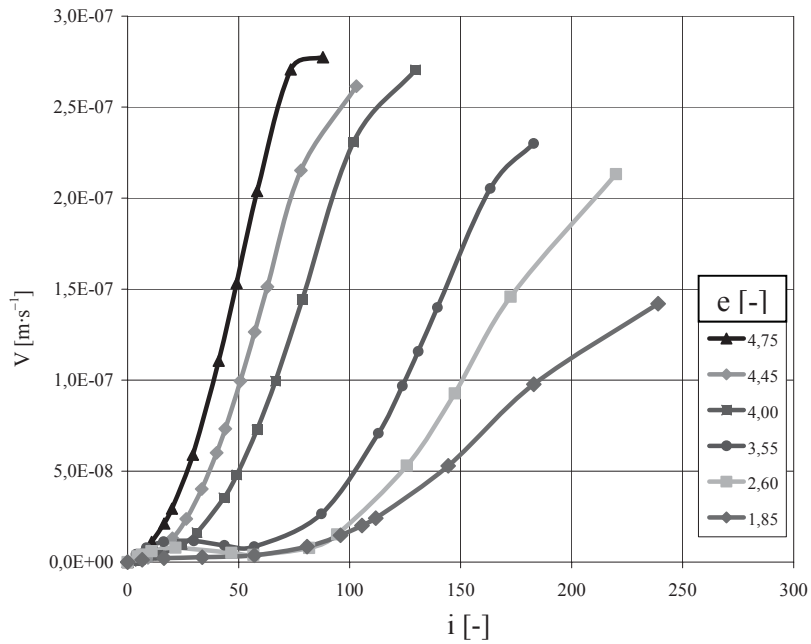
Wyniki badań wykonane na reprezentatywnych próbkach gruntu organicznego wskazują, że zależność prędkości przepływu od gradientu hydraulicznego ma charakter nieliniowy (rys. 6 i 7).

Wyraźny jest podział krzywej charakterystyki prędkość przepływu – gradient hydrauliczny na fazę prelinearną oraz postlinearną.

Analizując otrzymane z badań laboratoryjnych techniką stałego, wymuszonego przepływu wyniki, wydzielono zakres naprężeń konsolidacyjnych, które mogą być rozpatrywane w fazie prelinearnej oraz postlinearnej (rys. 8 i 9). Podział taki może być przyjęty tylko dla słabonośnych gruntów organicznych o podobnych właściwościach fizyczno-inżynierskich.



RYSUNEK 8. Zależność prędkości przepływu od gradientu hydraulicznego w fazie prelinearnej  
 FIGURE 8. The relationship between flow velocity and hydraulic gradient in prelinear phase



RYSUNEK 9. Zależność prędkości przepływu od gradientu hydraulicznego w fazie postlinearnej  
 FIGURE 9. The relationship between flow velocity and hydraulic gradient in postlinear phase

## Podsumowanie

Słabonośne grunty organiczne charakteryzują się bardzo dużą początkową przepuszczalnością, która znacząco maleje wraz ze wzrostem wielkości obciążenia. Zjawisko to jest jedną z trudności, jakie napotyka się przy prognozowaniu wielkości odkształceń dla celów budowy konstrukcji inżynierskich.

Zapoczątkowanie filtracji w słabonośnych gruntach organicznych możliwe jest dopiero po wystąpieniu pewnej granicznej wartości gradientu hydraulicznego ( $i_0$ ). Powoduje to, że zależność prędkości przepływu od gradientu nawet w początkowym okresie wykazuje krzywoliniowość wywołaną stopniowym narastaniem przepuszczalności. Taką fazę nazwano prelinearną i opisano funkcją wykładniczą zależności prędkości przepływu od gradientu hydraulicznego.

Przy dużych wartościach naprężenia konsolidacyjnego zaobserwowano duże wartości gradientów hydraulicznych, możliwe tylko przy wystąpieniu przebiecia hydraulicznego w gruncie. Zjawisko takie nazwano fazą postlinearną. W fazie tej następuje przegięcie krzywej charakteryzującej przepływ, tak że najbardziej prawdopodobny opis tej charakterystyki jest wielomianem czwartego stopnia.

Zmianę gradientu hydraulicznego w charakterystykach przepływu uzależniono od głównego parametru wpływającego na wagę zjawiska, jakim jest naprężenie konsolidacji. Wraz ze wzrostem naprężenia konsolidacji maleje wskaźnik porowatości, który bardzo dokładnie opisuje stan naprężenia w gruncie.

Przepływ wody warunkuje proces konsolidacji gruntu. W dotychczasowej literaturze w równaniach konsolidacji

charakterystykę przepływu wody opisywano związkiem liniowym. Natomiast charakter krzywych przepływu uzyskany z badań laboratoryjnych metodą flow-pump wskazuje na nieliniowość charakterystyk w procesie konsolidacji. Zatem istnieje potrzeba uwzględnienia tego faktu w opisie konsolidacji w gruntach organicznych.

Charakterystyki zmian prędkości przepływu od gradientu hydraulicznego oraz wskaźnika porowatości mogą posłużyć do wyznaczenia związku między tymi wielkościami.

## Literatura

- BARTHOLOMEEUSEN G., ZNIDARCIC D., HWANG Ch., SILLS G.C. 2001: Seepage Induced Consolidation Test. University of Colorado. UK. Materiały ze stron internetowych.
- DANIEL D.E. 1994: State of the art: Laboratory hydraulic conductivity tests for saturated soils. Hydraulic conductivity and waste contaminant transport in soils. ASTM STP 1142.
- DAVIS E.H., RAYMOND G.P. 1965: A non-linear theory of consolidation. *Geotechnique* 1(2): 161–173.
- DUBIN B., MOULIN G. 1985: Influence of a critical gradient on the consolidation of clays. In: Consolidation of soils: testing and evolution (STP 892). ASTM: 354–77.
- FREDLUND D.G., RAHARDJO H. 1993: Soil Mechanics for Unsaturated Soil. John & Sons, New York.
- GLAZER Z. 1985: Mechanika gruntów. Wydaw. Geologiczne, Warszawa.
- HANSBO S. 1960: Consolidation of clay with special reference to influence of vertical sand drains. Doctoral Thesis, Swedish Geotechnical Institute, Proceedings, 18, Stockholm.
- HANSBO S. 1997: Aspects of vertical drain design: Darcian or non-Darcian flow. *Geotechnique* 47, 5: 983–992.

- HANSBO S. 2001: Consolidation equation valid for both Darcian and non-Darcian flow. *Geotechnique* 51, 1: 51–54.
- HANSBO S. 2003: Deviation from Darcy's law observed in one-dimensional consolidation. *Geotechnique* 53, 6: 601–605.
- HARDER H., BLUMEL W. 1990: On the permeability of fine grained soils. *Mat. na IX Kraj. Kont. Mech. Grunt. i Fund.*, Kraków 1: 83–89.
- HAURYSZKIEWICZ J. 1996: Analiza rozkładu relikowego ciśnienia porowego w warstwie jednoosiowej konsolidowanej. *Zesz. Nauk. Polit. Koszalińskiej* 12: 7–49.
- HOLTZ R.D., BROMS B.B. 1972: Long-term loading tests at Ska-Edeby, Sweden. Proceedings of the ASCE Specialty Conference on Performance of Earth and Earth-Supported Structures, Purdue University: 435–464.
- KANY M., HERRMANN R. 1987: Water motion in soils based on a diffusion theory of mixtures (part 2). *Proc. of the 9<sup>th</sup> Europ. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng.* Dublin 1.
- KISIEL I., DERSKI W., IZBICKI R., MRÓZ Z. 1982: *Mechanika techniczna. T. VII: Mechanika skał i gruntów*. PWN, Warszawa.
- KOGURE K. 1999: Consolidation and settlement of peat under loading. *Problematic soils. Yanagisawa, Moroto & Mitachi*, Rotterdam.
- KOLLIS W. 1961: Wpływ metody wyznaczania współczynnika przepuszczalności na dokładność wyników w warunkach aluwiiów dennych Wisły. *Archiwum Hydrotechniki* 2, 8: 179–246.
- KOWALSKI J. 1998: *Hydrogeologia z podstawami geologii*. Wydaw. AR, Wrocław.
- KUTILEK M. 1969: Nedorayovske proudeni vody v zeminach v laminarni oblasti. *Yodohosp. Casopis*. 17(5): 403–423.
- LAMBE T.W., WHITMANN R.V. 1978: *Mechanika gruntów T. 1 i 2*. Arkady, Warszawa.
- LECHOWICZ Z. 1992: Ocena wzmocnienia gruntów organicznych obciążonych nasypem. *Rozpr. Nauk. Monogr.* 162. Wydaw. SGGW, Warszawa.
- LECHOWICZ Z., SZYMAŃSKIA. 1984: Prediction of consolidation of organic soil. *Annals of Warsaw Agricultural University of Life Sciences – SGGW* 20: 55–59.
- MACIOSZCZYK T. 1973: Zmienność parametrów nieliniowej filtracji wód podziemnych. *Biul. Geol.* 15: 5–85.
- MACIOSZCZYK T., SZESTAKOW W.M. 1983: *Prawo filtracji, hydrauliczne charakterystyki strumienia, filtracja ustalona. Dynamika wód podziemnych – metody obliczeń*. Wydaw. Geologiczne, Warszawa.
- MALINOWSKA E. 2005: Analiza odkształceń wybranych gruntów organicznych z uwzględnieniem nieliniowych charakterystyk przepływu. Wydaw. SGGW, Warszawa.
- MALINOWSKA E. 2006: Charakterystyki przepływu w procesie konsolidacji gruntów organicznych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej* 29: 149–160.
- MALINOWSKA E., SZYMAŃSKI A., SAS W. 2005: Wyznaczanie charakterystyk przepływu wody w gruntach organicznych metodą flow-pump. *Przegląd Naukowy Inżynierii i Kształtowania Środowiska* 1 (31): 114–121.
- MALINOWSKA E., SAS W., SZYMAŃSKI A. 2007: Nonlinear water flow characteristics describing soil consolidation. *Electronic journal of polish agricultural universities, civil engineering* 10, 4 # 41.
- MESRI G., GODLEWSKI P.M. 1977: Time – and stress compressibility interrelation. *J. Geot. Eng. Div. GT.* 5.
- MILLER R.J., LOW P.F. 1963: Threshold gradient for water flow in clay system. *Proceedings of Soil Science Society of America* 27 (6): 605–609.
- OLSEN H.W., NICHOLS R.W., RICE T.L. 1985: Low gradient permeability measurements in triaxial system. *Geotechnique* 35, 2: 145–157.
- 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.
- PAZDRO Z., KOZERSKI B. 1990: *Hydrogeologia ogólna*. Wydaw. Geologiczne, Warszawa.
- SAS W. 2001: Modelowanie odkształceń gruntów organicznych z uwzględnieniem zmian właściwości ośrodka. *Rozprawa doktorska*. SGGW, Warszawa.
- SHACKELFORD C.D., GLADE M.J. 1994: Constant-flow and constant-gradient permeability tests on sand-bentonite-fly ash mixtures. *Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil*. ASTM STP 1142. Philadelphia.

- SKAWIŃSKI R. 1974: Mechanizm przepływu cieczy w ośrodkach porowatych w świetle badań eksperymentalnych. *Zesz. Nauk. AGH Górnictwo* 60.
- 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.
- SZYMAŃSKI A., SAS W., DRÓZDŹ A., MALINOWSKA E. 2006: The factors determining consolidation performance in prediction of soft subsoil improvement. XIII Danube-European Conference on Geotechnical Engineering Ljubljana: 131–136.
- 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 spannungserscheinungen und ihr erbautechnisches anwendungsgebiet. Proc. of 1st Inter. Conf. of App. Mech. 1; Delft Netherlands: 288–294.
- WOSIEWICZ B. 1986: Analiza zagadnień filtracji ustalonej z nieliniowymi równaniami konstytutywnymi. Rozpr. Nauk. AR 162, Poznań.
- WOSIEWICZ B. 1986: Analiza zagadnień filtracji ustalonej z nieliniowymi równaniami konstytutywnymi. Rozpr. Nauk. AR, Poznań
- ZHANG M., TAKAHASHI M., MORIN R.H., ESAKI T. 1998: Theoretical Evaluation of the Transient Response of Constant Head and Constant Flow Rate Permeability Tests. *Geot. Testing J.* 21, 1: 52–57.

## Summary

**The analysis of hydraulic gradient changes in the flow characteristics of the soft soil.** In this review paper the changes of hydraulic gradient in the flow characteristics is presented. The analysis has been obtained in the value of loaded effective stress in soft soil. The relationship between flow velocity and hydraulic gradient is nonlinear. The results of soft soils used to the analysis were obtained in laboratory using the flow-pump technique. To describe the permeability characteristics the prelineary and postlineary phases should be considered. The prelineary phase characterises the flow at very low hydraulic gradient which usually appears in situ. The permeability characteristics show the strong changes of hydraulic gradient under different values of effective stress.

### Authors' address:

Edyta Malinowska, Alojzy Szymański  
 Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
 Wydział Inżynierii i Kształtowania Środowiska  
 Katedra Geoinżynierii  
 ul. Nowoursynowska 159, 02-787 Warszawa  
 Poland  
 e-mail: edyta\_malinowska@sggw.pl  
 alojzy\_szymanski@sggw.pl