

Małgorzata K. WDOWSKA, Mirosław J. LIPIŃSKI

Katedra Geoinżynierii SGGW
Department of Geotechnical Engineering WAU

Ocena przepuszczalności gruntu antropogenicznego w świetle badań laboratoryjnych*

Evaluation of permeability of man made soil by means of laboratory tests

Słowa kluczowe: popiół, przepuszczalność, warunki badania

Key words: coal ash, permeability, test conditions

Wprowadzenie

Przepuszczalność ośrodka jest jednym z najważniejszych parametrów geotechnicznych. Stwierdzenie to w szczególności odnosi się to gruntów antropogenicznych, które odgrywają bardzo istotną rolę w zagadnieniach związanych z inżynierią środowiska. Charakterystyki geotechniczne tego rodzaju gruntów często znacznie odbiegają od charakterystyk i parametrów otrzymywanych dla gruntów mineralnych. Z tego względu istnieje potrzeba obiektywnej oceny charakterystyk przepuszczalności i analizy czynników je okre-

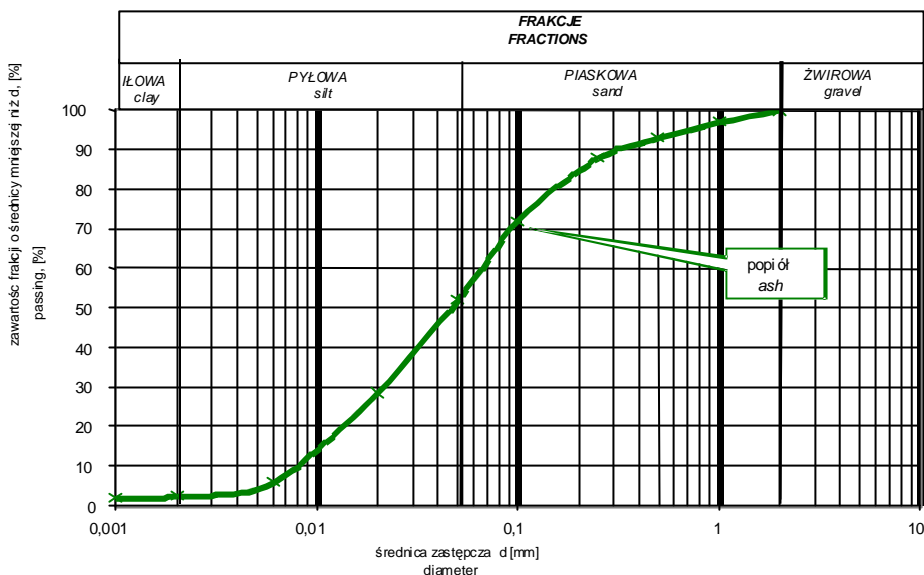
ślających w tego rodzaju materiałach. Jednym z bardziej istotnych czynników, jaki może kształtować przepuszczalność, jest stopień wypełnienia porów wodą. Wyeliminowanie niepewności co do wpływu tego czynnika na przepuszczalność materiału nie jest proste, gdyż wymaga zastosowania aparatury, która umożliwiłaby przeprowadzenie testów dla próbek całkowicie nasączonych. Takie badania można przeprowadzić w aparacie trójosiowego ściskania lub konsolidometrze, które można podłączyć do systemu nasączania gruntu metodą ciśnienia wyrównawczego. W dalszej części artykułu przedstawiono wyniki takich badań przy zastosowaniu stało- i zmiennogradientowej techniki badania oraz unikatowej w kraju aparatury, tj. komory Rowe'a i techniki „flow pump”.

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

Badany materiał

Badany materiał to popiół węglowy pochodzący z elektrociepłowni. Skład granulometryczny tego materiału przedstawiono w postaci krzywej uziarnienia pokazanej na rysunku 1. Z punktu widzenia granulometrycznego badany popiół można sklasyfikować jako pył piaszczysty. Jako materiał antropogeniczny charakteryzuje się on odmiennymi właściwościami niż grunt mineralny o podobnym składzie granulometrycznym.

Z charakterystyki wynika, że wilgotność optymalna wynosi 41%. Jest to wartość znacznie odbiegająca od wartości wilgotności optymalnej dla gruntów mineralnych o podobnym uziarnieniu. Należy w tym miejscu zaznaczyć, że odmiennosc właściwości popiołów od gruntów mineralnych nie jest przedmiotem niniejszej pracy. Z tego względu właściwości fizyczne inne niż przedstawione nie będą tutaj szczegółowo omawiane. Rozważania dotyczące tego tematu można znaleźć w pracy Kucowski i inni (1994).

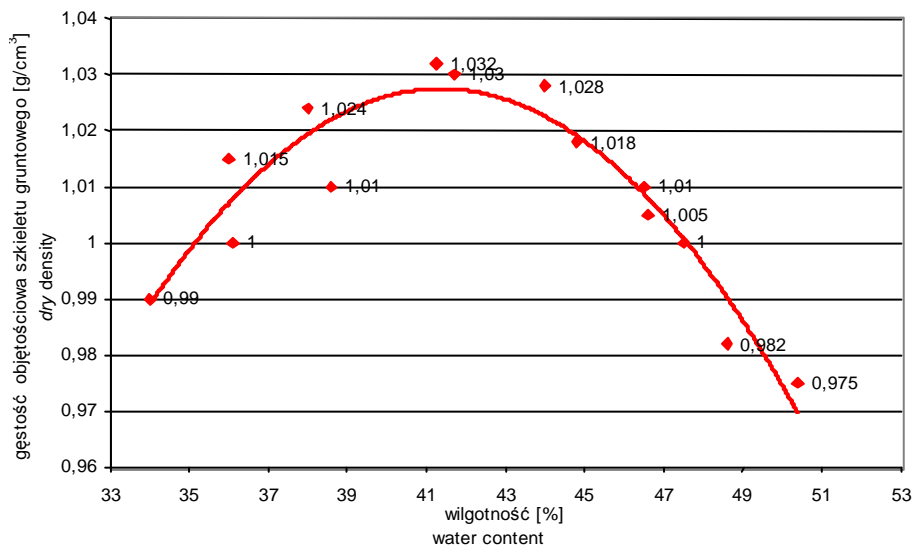


RYSUNEK 1. Rozkład uziarnienia badanego popiołu
FIGURE 1. Grain size distribution of tested ash

Z uwagi na składowanie popiołu jedną z podstawowych właściwości tego rodzaju materiału jest charakterystyka jego zagęszczalności. Wyniki badania zagęszczalności popiołu przeprowadzone w aparacie Proctora przy zastosowaniu standardowej energii przedstawiono na rysunku 2.

Metodyka badań

Badania przy zastosowaniu metody stało-gradientowej. Komora Rowea jest rodzajem konsolidometru zaprojektowanego przez profesora P.W. Rowea z Uniwersytetu w Manchesterze na początku lat sześćdziesiątych XX wieku.



RYSUNEK 2. Wyniki badań zagęszczalności dla badanego popiołu
 FIGURE 2. Results of compactibility tests on tested ash

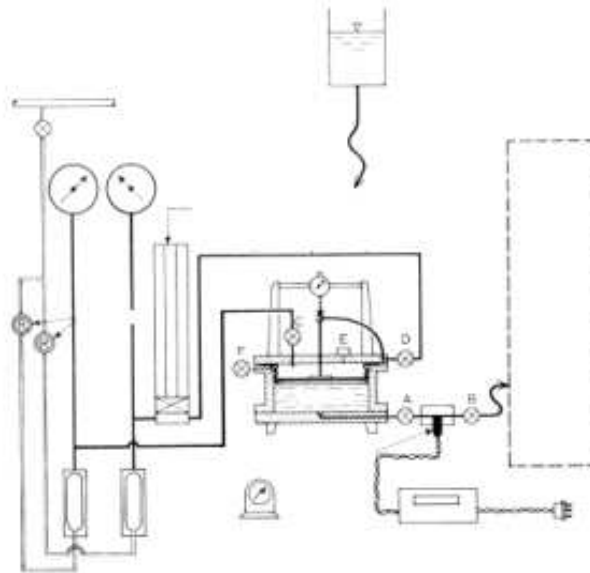
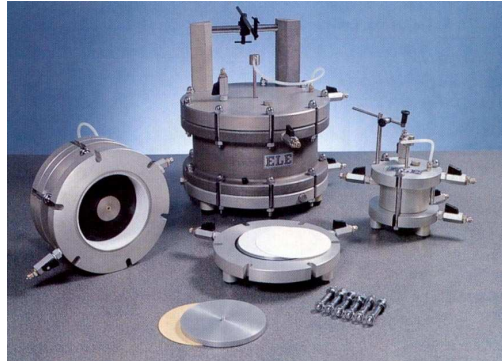
Jej konstrukcja została pomyślana jako urządzenie, które miałyby spełniać funkcje edometru, jednakże nie powinno posiadać jego wad. Zasadniczo urządzenie jest przeznaczone do badania gruntów drobnoziarnistych o małej przepuszczalności. Największy typ komory umożliwia badania na próbkach o średnicy 25 cm. Komora wykorzystywana w badaniach, których wyniki zamieszczono w pracy, umożliwiała badanie próbek o średnicy 15 cm. Rysunek 1 przedstawia widok trzech typów komór o różnych średnicach (Head 1986).

Głównymi zaletami tej komory jest możliwość odprowadzenia odpływu wody z próbki w różnych kierunkach, pneumatyczno-hydrauliczny system zadawania obciążenia oraz możliwość mierzenia ciśnienia wody w porach. Ta właściwość pozwala na podłączenie komory do panelu sterującego, takiego jak w przypadku aparatu trójosiowego

ściskania, i wykonywania badania w warunkach zadawania ciśnienia wyrównawczego. Najczęściej wykorzystywany schemat konfiguracji stanowiska, w którym wykorzystywana jest komora, przedstawiono na rysunku 2. Widok charakterystycznych elementów wykorzystywanego stanowiska pokazano na rysunku 3.

Próbki do badania były zagęszczane w aparacie Proctora przy uprzednio ustalonej wilgotności, a następnie były przekładane do komory. Po przeprowadzeniu procedury nasączenia w analogiczny sposób jak dla próbek w aparacie trójosiowego ściskania, tzn. przy zastosowaniu metody ciśnienia wyrównawczego, próbki konsolidowano, zadając naprężenie pionowe przez system hydrauliczno-pneumatyczny. Po zakończeniu konsolidacji rozpoczynano procedurę pomiaru przepuszczalności. Podstawowe założenie, jakie należało spełnić,

FOTOGRAFIA 1. Komora Rowe'a o różnych średnicach
PHOTO 1. Rowe's cells of various diameters



RYSUNEK 2. Schemat stanowiska badawczego do badania przepuszczalności w komorze Rowe'a (Head, 1986)
FIGURE 2. Laboratory setup for permeability tests in Rowe's cell (Head, 1986)



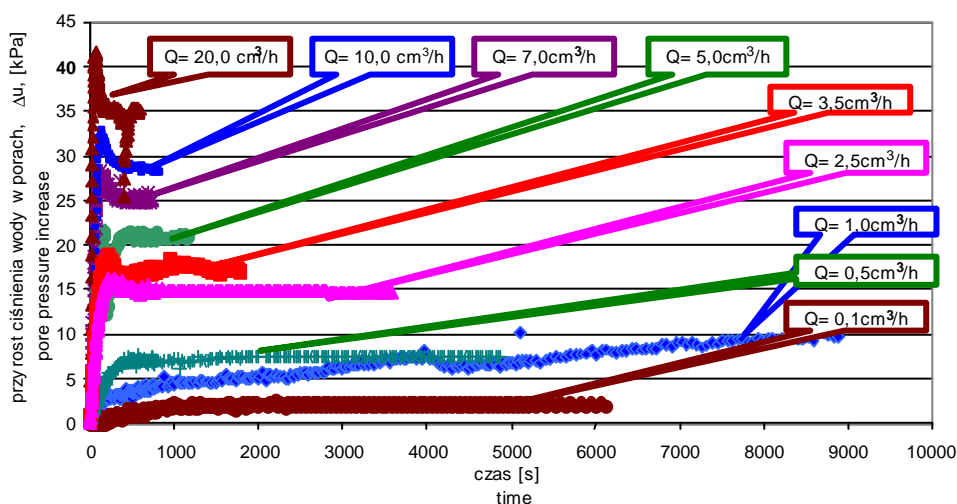
FOTOGRAFIA 2. Charakterystyczne elementy stanowiska do wykonywania badań w komorze Rowe'a
PHOTO 2. View of major equipment for permeability test with use of Rowe's cell

które zresztą stanowiło warunek konieczny poprawności wykonania badania, to stwierdzenie pełnego nasycenia gruntu. Założenie to weryfikowano na podstawie wartości parametru Skemptona B uzyskiwanego podczas nasączania gruntu. Następnie do podstawy próbki było podłączane górne naczynie przelewowe, którego położenie w stosunku do położenia naczynia dolnego określało wielkość spadku hydraulicznego. Przewody połączone z górą próbki podłączano do urządzenia rejestrującego objętość wody. Próbką podczas całego badania poddana była ciśnieniu wyrównawczemu. System zbierania danych rejestrował wszystkie wielkości pomiarowe w czasie rzeczywistym, tj.:

- ciśnienia zadawane do komory,
- ciśnienie wyrównawcze,
- przemieszczenie pionowe próbki,
- objętość wody wypływającej z próbki.

Po osiągnięciu warunków filtracji ustalonej można obliczyć współczynnik filtracji (k) materiału, znając przepływ, powierzchnię próbki oraz zadawany spadek.

Badania przy zastosowaniu metody stabilizacji gradientu. Zastosowanie metody stabilizacji gradientu możliwe jest przy wykorzystaniu pompy przepływu (technika „flow pump”). Zalety tej metody w odniesieniu do gruntów spoistych zostały przedstawione przez Lipińskiego i Wdowską (2005). Jedną z podstawowych zalet tej metody jest możliwość uzyskania dodatkowej informacji co do czasu stabilizacji gradientu. Przykładowe charakterystyki stabilizacji przyrostów ciśnienia, występujące przy różnych wielkościach wymuszanego przepływu wody, przedstawiono na rysunku 4. Z wykresów wynika, że w przypadku popiołu węglowego czas stabilizacji gradientu jest wyraźnie



RYSUNEK 4. Ustalanie się generowanego ciśnienia podczas badania nasączonych popiołów metodą stabilizacji gradientu

FIGURE 4. Achievement of steady flow conditions in saturated coal ash tested with use of flow pump technique

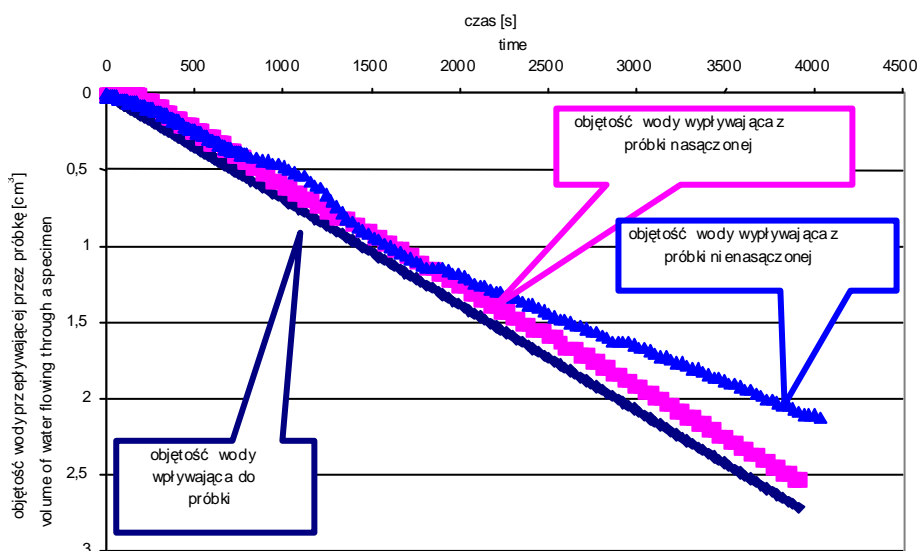
różny (znacznie krótszy) niż dla gruntów spoistych (Lipiński i Wdowska 2005). Ten czas stabilizacji jest również pośrednim wskaźnikiem pełnego nasycenia próbki. Wynika to z faktu, że dla próbek nienasączonych przepływ wody odbywa się w warunkach filtracji nieustalanej. W celu weryfikacji tej tezy układy 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 popiołu nasączonego i nienasączonego pokazano na rysunku 5. Z przedstawionych wykresów wynika, że dla próbek gruntów nienasączonych ilości wody wchodzącej i wychodzącej z próbki nie bilansują się, co oznacza, że warunki przepływu są nieustalone. Różnice w przepływach nie są tak duże jak dla gruntów mineralnych (Lipiński

i Wdowska 2005), ale są widoczne. Wynika to z większej przepuszczalności popiołu, a ponadto należy uwzględnić, że w trakcie badania stopień wilgotności próbki wzrasta, co dodatkowo niweluje początkową różnicę w warunkach wypełnienia porów wodą.

Wyniki badań

Metoda stałogradientowa jest najczęściej wykorzystywanym sposobem badania przepuszczalności ośrodków dobrze i średnio-przepuszczalnych. Z tego względu, w pierwszej kolejności należy przeanalizować wyniki uzyskane na podstawie badań wykonywanych w komorze Rowea przy wykorzystaniu tej metody. Wyniki badania przepuszczalności ośrodka całkowicie nasyconego zwykle podaje się w postaci współczynnika filtracji określonego jako



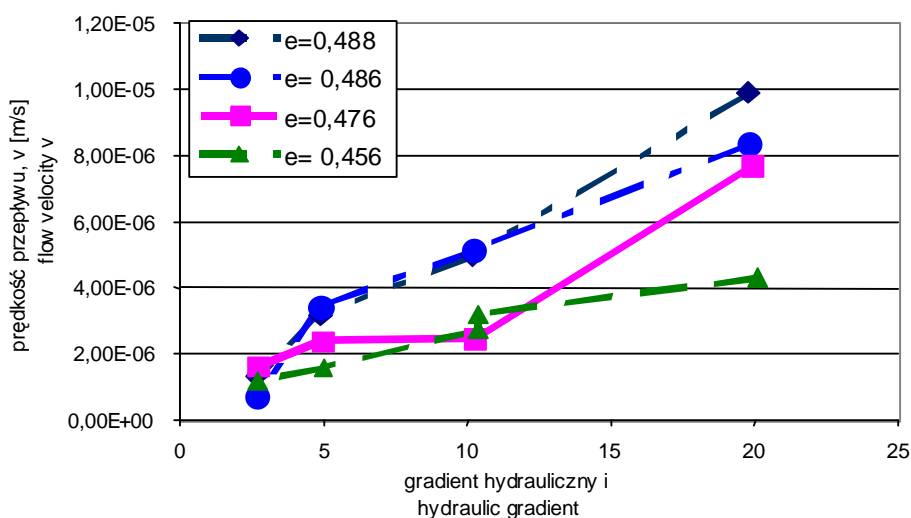
RYSUNEK 5. Weryfikacja warunków filtracji ustalonej dla próbki nasączonej i nienasączonej
 FIGURE 5. Verification of steady flow conditions for saturated and not fully saturated sample

prędkość filtracji odniesioną do gradientu ją wywołującego. Wydaje się jednak, że pojedynczy pomiar nie może być całkowicie reprezentatywny. W celu określenia konstytutywnej charakterystyki przepływu należy rozważyć prędkość przepływu w szerokim zakresie zadawanych gradientów. Przykładowe wyniki badań popiołu przedstawiono w ten sposób na rysunku 6. Wyniki badań przedstawiono dla czterech wartości gradientów (od 2,5 do 20), a także przy różnych wielkościach wskaźnika porowatości (e).

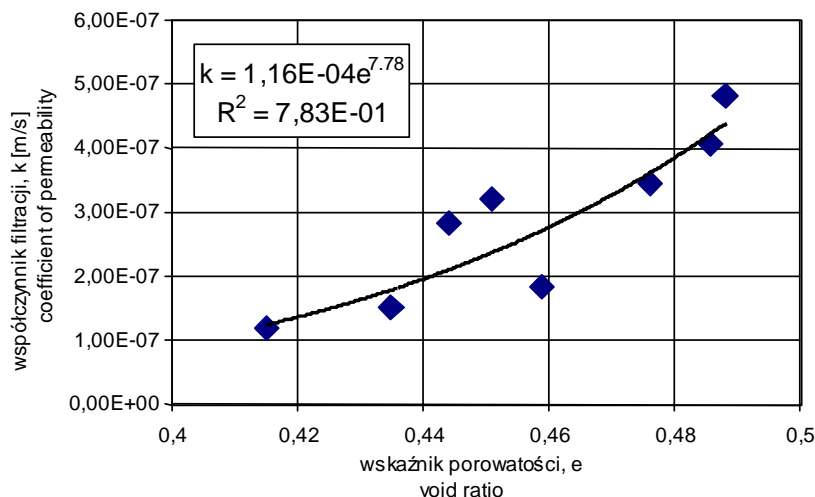
Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że zasadniczo trendy obserwowane w badaniach są prawidłowe, tzn. zgodne z oczekiwaniami. Dla większych wartości gradientów obserwowane są większe wielkości przepływów. Gdyby zależność była idealnie liniowa, wówczas tangens nachylenia linii prostej wyznaczałby do-

kładnie wartość współczynnika filtracji. Zależność ta nie jest idealnie liniowa, chociaż współczynnik korelacji jest wysoki (powyżej 0,94). Bardziej miarodajne wyniki uzyskiwane są dla większych gradientów, natomiast dla małych gradientów zależności nie są jednoznaczne. Również badania przy różnych wskaźnikach porowatości wykazują tę samą tendencję. Współczynniki kierunkowe linii regresji liniowych są mniejsze dla mniejszych wskaźników porowatości, chociaż różnice we wskaźnikach porowatości są małe. Charakterystyki przepływu dla różnych wskaźników porowatości mogą być podstawą do określenia zmienności współczynnika filtracji w zależności od stanu gruntu reprezentowanego przez wskaźnik porowatości. Tego rodzaju zależność przedstawiono na rysunku 7.

Pomimo stosunkowo niewielkiej zmienności wskaźnika porowatości



RYSUNEK 6. Charakterystyki prędkości przepływu w zależności od zadawanego gradientu dla nasączonych popiołów uzyskane na podstawie metody stało-gradientowej
 FIGURE 6. Flow velocity against hydraulic gradient for saturated ash determined by fixed gradient method



RYSUNEK 7. Zależność współczynnika filtracji popiołu od wskaźnika porowatości określona w komorze Rowe'a metodą stałego gradientu
 FIGURE 7. Coefficient of permeability against void ratio for coal ash determined in Rowe's cell by fixed gradient method

($\Delta e = 0,075$) daje się zauważyć potęgowej charakter krzywoliniowej zależności w stosunku do współczynnika filtracji. Tak niewielkiemu zakresowi zmienności wskaźnika porowatości towarzyszy prawie pięciokrotna zmiana współczynnika filtracji, który można opisać poniższą zależnością:

$$k = 0,00012e^{7,8} \quad (1)$$

Większe zmiany współczynnika filtracji obserwowane są dla materiału luźniejszego. Wynika z tego, że w przypadku popiołu zagęszczenie materiału ma znacznie większe znaczenie niż w przypadku gruntu mineralnego o porównywalnym zakresie współczynnika filtracji.

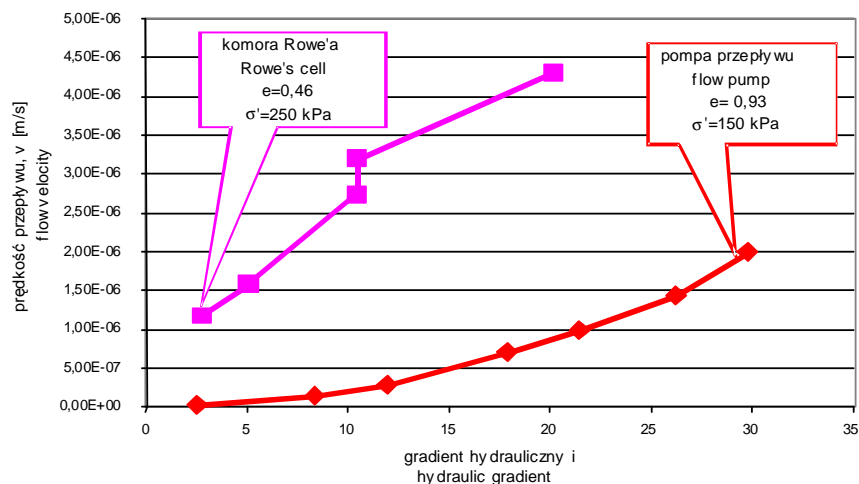
W celu porównania dwóch technik badania przepuszczalności gruntu, tj. metody stabilizacji gradientu („flow pump”) oraz badania przy stałej wartości gradientu w komorze Rowe'a, przy-

kładowe wyniki badania naniesiono na jednym wykresie pokazanym na rysunku 8. Należy na wstępie zaznaczyć, że wartości wskaźników porowatości badanych gruntów różnią się istotnie. Niemniej, różnice w pokazanych charakterystykach nie wydają się wynikać jedynie z różnic we wskaźnikach porowatości, ponieważ dla większej wartości wskaźnika porowatości uzyskano mniejszą (choć niewiele) przepuszczalność materiału.

Przy zastosowaniu regresji liniowej wartości współczynnika filtracji wynoszą odpowiednio:

- metoda stało-gradientowa w komorze Rowe'a
 $k = 1,83 \cdot 10^{-7}$ m/s,
- metoda stabilizacji gradientu w aparacie trójosiowego ściskania
 $k = 7,15 \cdot 10^{-8}$ m/s.

Charakterystyczna wydaje się dużo większa rozdzielczość charakterystyki



RYSUNEK 8. Porównanie charakterystyk filtracji uzyskanych z badań w aparacie trójosiowego ściskania metodą stabilizacji gradientu oraz metodą stałego gradientu w komorze Rowe'a

FIGURE 8. Comparison of seepage characteristics determined in triaxial apparatus with of flow pump technique and obtained in Rowe's cell with use of fixed gradient method

określonej na podstawie metody stabilizacji gradientu niż metody stałogradientowej. Może to wynikać z różnicy wynikającej z budowy aparatów, a zatem warunków brzegowych ze względu na stan odkształcenia (osiowosymetryczny i trójosiowy). W metodzie stałogradientowej nie można wykluczyć uprzywilejowanych dróg filtracji, które przy współczynniku filtracji rzędu 10^{-7} m/s mogą się wyrażać w mniejszej rozdzielczości uzyskanych wyników. Ostateczne potwierdzenie tej hipotezy będzie możliwe po wykonaniu większej liczby badań dla obydwu metod przy różnych stanach zagęszczenia materiału.

Podsumowanie i wnioski

W artykule przedstawiono wyniki laboratoryjnych badań przepuszczalności popiołu przy zastosowaniu techniki stało- i zmienno-gradientowej oraz apa-

raty pozwalającej na kontrolę stanu pełnego nasycenia porów wodą przy wykorzystaniu metody ciśnienia wyrównawczego. Wykorzystano badania w konsolidometrze Rowe'a i w aparacie trójosiowego ściskania, co zasadniczo zwiększyło dokładność otrzymanych wyników. Przeprowadzone badania pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

1. W przypadku metody stałogradientowej bardziej miarodajne wyniki uzyskiwane są dla większych gradientów, natomiast dla małych gradientów zależności nie są jednoznaczne.
2. Pomimo stosunkowo niewielkiej zmienności wskaźnika porowatości (0,075) daje się zauważyć krzywoliniowy charakter zależności w stosunku do współczynnika filtracji.
3. W przypadku popiołu zagęszczenie materiału ma znacznie większe znaczenie niż w przypadku gruntu mi-

- neralnego o porównywalnym zakresie współczynnika filtracji.
4. Charakter związku pomiędzy prędkością filtracji a gradientem dla porośców nasyconych jest wyraźnie nieliniowy. Opis tej nieliniowości będzie pełny po uwzględnieniu wpływu stanu materiału.
 5. Na obecnym etapie badań wydaje się, że technika stabilizacji gradientu dostarcza bardziej dokładnych wyników niż metoda stało- gradientowa.

Literatura

- HEAD K.H. 1986: Manual of Soil Laboratory Testing Volume 3 Penetch Press.
- LIPIŃSKI M.J., WDOWSKA M.K. 2005: Wpływ niepełnego nasycenia na charakterystyki przepuszczalności gruntów spoistych. Przegląd Naukowy Inżynierii i Kształtowania Środowiska 1 (31): 122–131.
- KUCOWSKI J., LAUDYN D., PRZEKWAS M. 1994: Energetyka a ochrona środowiska. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa.

Summary

Evaluation of permeability of man made soil by means of laboratory tests. Environmental aspects of engineering activity has received in the last decades much

more attention. Severe requirements concerning environmental protection results in increased interest in evaluation of geotechnical parameters of man made soils. To fulfill this requirement, laboratory test programme was undertaken aimed at evaluation of permeability of man made material represented by coal ash – a waste product of electrical power station. Particular attention was focused on method of permeability determination in fully saturated material. This requirement was possible to obtain with use of triaxial apparatus and Rowe's cell, both capable of saturating a specimen by back pressure method. Actual permeability tests were done with use of flow pump technique and fixed gradient method. Experimental material gathered at this stage of the study explicitly shows that state of density projects much more on permeability of man made material than in case of mineral soil of similar granulometry. Relationships between seepage velocity and hydraulic gradient and void ratio for saturated coal ash have clearly nonlinear character. Flow pump technique carried out in triaxial apparatus seems to deliver results of higher quality than fixed gradient method executed in Rowe's cell.

Authors' address:

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