

OKREŚLANIE PARAMETRÓW FILTRACYJNYCH IŁÓW KRAKOWIECKICH Z BADAŃ W KONSOLIDOMETRZE ROWE'A

**Permeability parameters of Krakowiec clays evaluated in Rowe's
consolidometer tests**

Rafał PAJĄK¹ & Paweł DOBAK²

¹*Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska;
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków;
e-mail: ralphp7@interia.pl*

²*Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii;
al. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa;
e-mail: P.Dobak@uw.edu.pl*

Treść: Iły krakowieckie postrzegane są nie tylko jako surowiec ceramiczny, ale coraz częściej jako bariery geologiczne chroniące środowisko przed przenikaniem zanieczyszczeń w głąb masywu gruntowego. Ocena izolacyjności tych gruntów napotyka szereg trudności z uwagi na odmienną w stosunku do gruntów niespoistych specyfikę procesu filtracji. Określenie współczynnika filtracji zależy więc w znaczącym stopniu od zmian naporu hydraulicznego i warunków drenażu wód porowych. Duże możliwości programowania badań w konsolidometrze Rowe'a pozwalają na monitorowanie warunków konsolidacji i filtracji. Ocena miarodajności uzyskiwanych parametrów filtracyjnych wymaga porównania przebiegu odkształcenia i dystrybucji ciśnienia porowego z rozwiązaniami teorii konsolidacji. W pracy przedstawiono ocenę charakteru przebiegu odkształcenia gruntu i rozpraszania ciśnienia porowego w próbkach iłów krakowieckich z wybranych stanowisk. Interpretacja obejmuje ocenę zmienności parametrów konsolidacyjnych i filtracyjnych rzutującą na miarodajność uzyskiwania wyników.

Słowa kluczowe: przepuszczalność gruntów spoistych, badania konsolidacji IL, konsolidometr Rowe'a, iły krakowieckie

Abstract: Krakowiec clays are perceived not only as a ceramic raw material, but more and more often as geological barriers protecting the natural environment against penetration of contaminations to the soil. A number of difficulties are encountered when evaluating permeability of these clays due to specific nature of their seepage process when compared with non-cohesive soils. That is why evaluation of permeability coefficient depends on the changes of pore water pressure and drainage conditions to a large extent. A versatility of Rowe's consolidometer tests allows for monitoring consolidation and permeability. The comparison of the strain changes in time and variability of pore water pressure with the consolidation theory is required to assess the reliability of the obtained permeability parameters. The evaluation of the character of the soil strain and pore water pressure distribution for Krakowiec clays samples from selected sites is presented in the paper. Interpretation comprises of evaluation of the variability of consolidation and permeability parameters having an impact on reliability of the obtained results.

Key words: permeability of cohesive soils, consolidation tests IL, Rowe's consolidometer, Krakowiec clays

WPROWADZENIE

Iły krakowieckie są najważniejszym surowcem ceramiki na południu Polski. Występują one w Zapiadlisku Przedkarpackim, Kotlinie Sądeckiej i na Wyżynie Śląsko-Krakowskiej. Iły te stratygraficznie reprezentują górny torton (warstwy chodenickie, grabowieckie), dolny torton oraz dolny sarmat (rejon Dąbrowy Tarnowskiej). W ostatnich latach wzrasta świadomość roli gruntów ilastych jako barier geologicznych zapobiegających przenikaniu zanieczyszczeń powierzchniowych do niżej położonych warstw gruntów. Stąd też znaczenia nabierają badania właściwości izolacyjnych utworów z takich formacji.

Przedmiotem badań i analiz prezentowanych w niniejszym artykule jest ocena cech izolacyjnych iłów oparta na wyznaczaniu wartości ich współczynnika filtracji na podstawie przebiegu konsolidacji. W obciążanym gruncie powstaje źródłowe pole filtracji, a zmiana objętości porów i rozpraszanie ciśnienia wody w porach może być zgodnie z rozwiązaniami teorii konsolidacji podstawą do określania współczynnika filtracji gruntu. Wykorzystanie badań konsolidacyjnych umożliwia stosunkowo szybkie określanie parametrów filtracyjnych słabo przepuszczalnych gruntów, co stanowi podstawową przesłankę wdrażania tej metody do oceny właściwości izolacyjnych.

PREZENTACJA MATERIAŁU BADAWCZEGO

Analizowane osady miocenu wykształcone są jako iły oraz iły pylaste barwy szarej, niebieskawoszarej lub ciemnoszarej. Miejscami zawierają wtrącenia piaszczyste, przeławiczone niekiedy rumoszem skalnym oraz domieszki rozproszonego węgla wapnia o zawartości dochodzącej niekiedy do kilkunastu procent. Zmienność właściwości fizyczno-mechanicznych iłów krakowieckich zależy w znacznym stopniu od ich pozycji facjalnej w obrębie zbiornika sedymentacyjnego (Kaczyński 1981). Do badań wybrano grunty pochodzące z klasycznych odsłonień, jakimi są czynne wyrobiska kopalni iłów (Fig. 1, Tab.1).



Fig. 1. Szkic lokalizacyjny miejsc opróbowania

Fig. 1. Location sketch of sampling sites

Tabela (Table) 1

Podstawowe parametry fizyczne badanych gruntów

Basic physical properties of soils

Parametry <i>Parameters</i>	Symbol <i>Symbol</i>	Jednostka <i>Unit</i>	Miejsce opróbowania <i>Place of sampling</i>			
			Zesławice	Hadykówka	Bonarka – Łagiewniki	Wola Rzędzińska
Wilgotność naturalna <i>Water content</i>	w_n	%	22.3	17.9	21.0	16.4
Gęstość objętościowa <i>Bulk density</i>	ρ	Mg/m ³	2.10	2.17	2.10	2.23
Gęstość właściwa <i>Density of solid particles</i>	ρ_s	Mg/m ³	2.75	2.67	2.72	2.73
Granica plastyczności <i>Plastic limit</i>	w_p	%	38.2	22.7	34.9	35.3
Granica płynności <i>Liquid limit</i>	w_L	%	73.7	51.7	76.1	79.8
Wskaźnik plastyczności <i>Plasticity index</i>	I_p	%	35.5	29.0	41.2	44.5
Aktywność Skemptona <i>Skempton activity</i>	A	–	0.93	0.97	0.98	1.09
Zawartość frakcji iłowej <i>Clay content</i>	f_i	%	38	30	42	41

METODYKA BADAŃ

Badania konsolidacji przeprowadzono na pastach o wilgotności zbliżonej do granicy płynności (w_L), sporządzonych z iłów pobranych z wyżej wymienionych odsłonieć. Podejmując badania na pastach, kierowano się przesłankami zarówno teoretycznymi, jak i praktycznymi. Pasta posiada jednorodną strukturę i umożliwia badanie ośrodka składającego się w zasadzie z dwóch faz: stałej i ciekłej, co odpowiada warunkom klasycznej teorii konsolidacji filtracyjnej wg Terzagiego. Jednocześnie przerobione strukturalnie i doprowadzone do optymalnych warunków ily są wykorzystywane jako materiał dla formowania sztucznych barier gruntowych np. w podłożu składowisk.

Do scharakteryzowania procesu konsolidacji niezbędna jest ocena przebiegu odkształcenia próbki i rozpraszania ciśnienia porowego. Analiza tych obydwóch składowych pozwala określić ich wzajemne relacje oraz ich wpływ na charakter procesu. Zastosowanie konsolidometru Rowe'a umożliwia jednocześnie oznaczenie współczynnika konsolidacji w oparciu o metody bazujące na analizie odkształceń oraz pomiarze ciśnienia porowego.

Badania przeprowadzono w konsolidometrze Rowe'a w komorze o średnicy 151.4 mm. We wstępnym etapie, poprzez zastosowanie techniki *back pressure*, uzyskiwano wymagany stopień wypełnienia porów wodą (S_r). Wykorzystano parametr $B = \left(\frac{\Delta u}{\Delta \sigma} \right)$ Skemptona, któ-

rego wartość ≥ 0.95 przyjmowana jest zgodnie z normą (BS 1377: Part 6) jako kryterium nasycenia próbki. Po uzyskaniu takiego stanu przystępowano do właściwego etapu badań konsolidacji.

Zastosowano system podwajanej wartości stałego obciążenia (IL), poczynając od naprężenia konsolidacyjnego 12.5 kPa aż do 200 kPa, wyjątkowo 400 kPa, co w pełni pokrywa się z wielkościami naprężeń występujących nawet pod wysokimi składowiskami.

Podczas wykonywania badania parametry charakteryzujące przebieg procesu konsolidacji są automatycznie mierzone i rejestrowane w stacji dokującej (ADU) sterowanej za pomocą programu komputerowego (DataSystem 6). Pomiar naprężeń obejmuje: ciśnienie w komorze przekazywane na grunt poprzez membranę i płytę sztywną, ciśnienie wody w porach gruntu u mierzone u podstawy próbki oraz ciśnienie zwrotne (*back pressure*) u_b (Fig. 2).

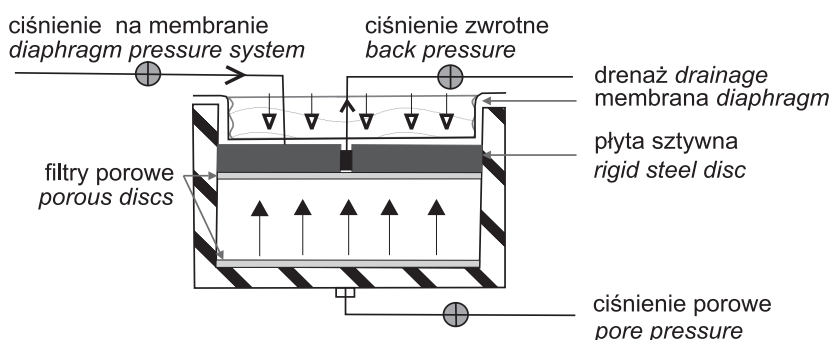


Fig. 2. Schemat badania z równomiernym odkształceniem w warunkach drenażu pionowego – jednostronnego przy przepływie z dołu do góry

Fig. 2. Scheme of one-way consolidation test with rigid loading and drainage from bottom to top

Do pomiaru pionowego odkształcenia osiowego próbki (osiadania) służy czujnik rejestrujący przemieszczenia z dokładnością 0.002 mm, co umożliwia określenie stabilizacji osiadań na kolejnych stopniach obciążenia. Za kryterium względnej stabilizacji przyjęto uzyskanie prostoliniowego odcinka na krzywej konsolidacji – $h = f(\sqrt{t})$, oraz rozproszenie ciśnienia porowego do ustabilizowanej, niewielkiej wartości. Warunki te przyjmowane są jako zakończenie fazy konsolidacji pierwotnej (filtracyjnej).

Wartości c_v określano na podstawie obserwacji przebiegu osiadania gruntu w czasie przy zastosowaniu klasycznych metod Casagrande'a i Taylora, w odniesieniu do których zebrano liczne doświadczenia interpretacyjne i istnieje bogata baza porównawcza wyników (Duncan 1993). Niezależnie wykorzystano obserwacje przebiegu rozpraszania ciśnienia porowego w warunkach stałego obciążenia gruntu. Wymagało to porównania doświadczalnych charakterystyk konsolidacji z rozwiązaniami teoretycznymi i przyjęcia odpowiednich założeń interpretacyjnych.

CHARAKTERYSTYKA PRZEBIEGU KONSOLIDACJI

Według teoretycznych założeń w chwili przyłożenia naprężenia prawie całe obciążenie przekazywane na ośrodek gruntowy powinno być przejęte przez wodę. Z badań doświadczalnych wynika, że nawet w dwufazowych pastach, gdzie rola wiązań i oporów strukturalnych jest zredukowana do minimum, nie uzyskuje się takiego modelowego zachowania gruntu.

W praktyce od momentu przyłożenia na grunt obciążenia obserwuje się początkowo wzrost ciśnienia porowego u . Charakter tego wzrostu w badaniach typu IL (*incremental loading*) uzależniony jest zarówno od wartości i przyrostu naprężenia konsolidacyjnego (σ_n oraz $\Delta\sigma_{n-1}$), jak i od właściwości gruntu warunkujących opóźnione przenoszenie obciążenia przez fazę ciekłą. Wśród właściwości tych uwzględnia się m.in. skład granulometryczny (rozmiar, kształt ziaren) charakter połączeń mikroporów, zawartość minerałów pęczniejących np. bentonitu. Czynnikiem wpływającym na przewodność hydrauliczną gruntów praktycznie nieprzepuszczalnych jest skład chemiczny oraz zdolność do wymiany kationów (CEC) (Young & Warkentin 1975, van Olphen 1977, Mitchell 1993). Na opóźnienie w mobilizacji ciśnienia porowego po przyłożeniu obciążenia ma wpływ również niedostateczna sztywność systemu pomiarowego, którą można zmniejszyć poprzez dokładne odpowietrzenie układu pomiarowego (Woźniak 2004).

Wzrost ciśnienia porowego w początkowej fazie badań IL powiązany jest w specyficzny sposób z rejestrowanymi odkształceniami jednoosiowymi gruntu. Wynikają one ze zmniejszania wielkości porów; w ślad za tym wzrasta ich wypełnienie fazą ciekłą. W efekcie uzyskuje się maksymalną w danym badaniu wartość ciśnienia porowego, przy czym stosunek $\Delta u/\Delta\sigma$ nie osiąga zazwyczaj modelowej wartości 1, co spowodowane jest większą niż przewiduje teoria, rolą wiązań strukturalnych, nawet w pastach gruntowych. Dopiero po osiągnięciu $(u/\sigma)_{\max}$, w warunkach nadal postępującego zmniejszania wielkości porów, ciśnienie wody ulega rozpraszaniu zgodnie z przewidywaniami teorii konsolidacji filtracyjnej.

Na figurze 3 zilustrowano charakterystyki osiadań i rozpraszania ciśnienia porowego. Osiadanie w czasie zilustrowano zmianami stosunku $[(e_t - e_{f,n})/e_{0,n}]$ obliczonymi na podstawie wartości wskaźnika porowatości odpowiadających początkowi $e_{0,n}$ końcowi $e_{f,n}$ konsolidacji filtracyjnej na rozpatrywanym stopniu obciążenia n . Wartość stosunku obliczona przy wartościach wskaźnika porowatości e_t zmieniających się w czasie t odpowiada wartości stopnia konsolidacji U . Z kolei w charakterystyce filtracyjnej procesy stosunek wartości ciśnienia porowego u_t (w chwili t) odnoszony do stałej na danym n stopniu obciążenia wartości naprężenia σ_n obrazuje opisane wyżej zmiany dystrybucji ciśnienia porowego w toku badania. Wartość $(u/\sigma)_{\max}$ wyznacza punkt referencyjny, dla początku procesu konsolidacji filtracyjnej analizowanego w funkcji zmian ciśnienia porowego.

Figura 3 ilustruje bardzo dobrą zbieżność charakterystyk osiadania i rozpraszania ciśnienia porowego po przekroczeniu $(u/\sigma)_{\max}$.

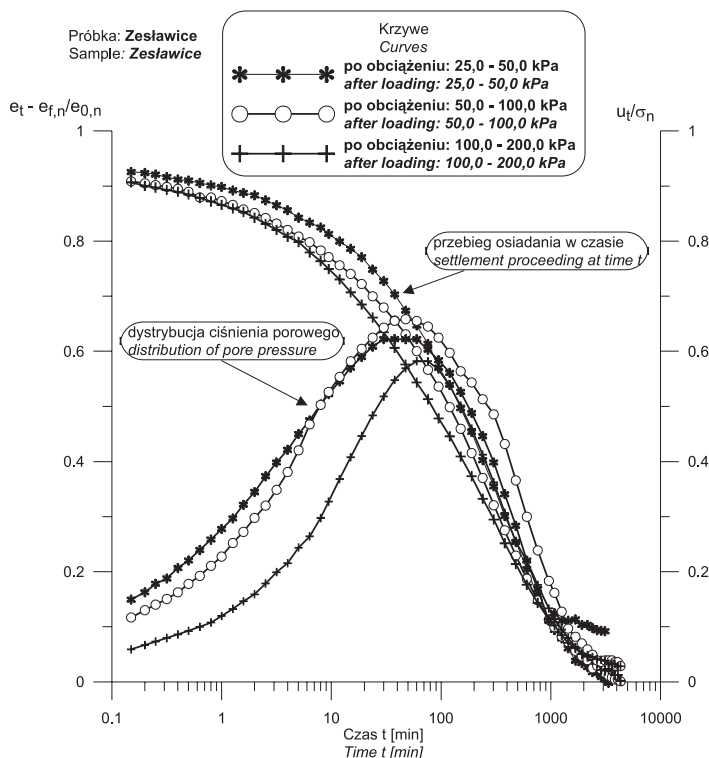


Fig. 3. Warunki występowania zbieżności rozkładów ciśnienia porowego i osiadania w funkcji czasu t : $e_{0,n}$ – początkowa wartość wskaźnika porowatości na analizowanym stopniu obciążenia, $e_{f,n}$ – końcowa wartość wskaźnika porowatości na analizowanym stopniu obciążenia, e_t – wartości wskaźnika porowatości w czasie t , σ_n – napężenie całkowite (const) na n -tym stopniu obciążenia, u_t – wartości ciśnienia wody w porach w czasie t

Fig. 3. Conditions of similarity of pore water pressure distribution and settling as a function of time t : $e_{0,n}$ – initial value of void ratio in each degree of loading, $e_{f,n}$ – final value of void ratio in each degree of loading, e_t – values of void ratio in time t , σ_n – constant stress in any n -degree of loading, u_t – values of pore water pressure in time t

Analiza zapisów pomiarowych z wykonanych badań pokazuje jednocześnie zróżnicowanie zachowań ośrodka gruntowego, które wymagają często zindywidualizowanej fizycznej interpretacji, niezbędnej dla uniknięcia błędów w wyznaczaniu miarodajnych wartości parametrów konsolidacyjnych i filtracyjnych.

Niepełne nasycenie gruntu wodą powoduje uzyskiwanie zaniżonych wartości ciśnienia porowego i kolejne rozbieżności w przebiegu badania w stosunku do założeń teoretycznych. Pomiar ciśnienia porowego w aparacie Rowe'a odbywa się poprzez porowaty filtr w dolnej – centralnej części próbki. Pozwala to na rejestrowanie maksymalnych wartości ciśnienia

porowego. Wymuszenie pionowej drogi drenażu wpływa na tempo i charakter rozpraszania ciśnienia porowego odrębne np. w stosunku do schematów badawczych z radialnym drenażem. Przy kolejnych wyższych stopniach obciążenia rejestruje się często zmniejszenie wartości $(u/\sigma)_{\max}$. Wynikać to może z czynników strukturalnych i charakteru wiązań cząstek gruntu. Przypuszcza się, że wzrost naprężenia modyfikuje strukturę, co niekiedy może ułatwiać drogę filtracji. Zmiany struktury uzależnione są od przyłożonego obciążenia oraz od konsystencji. Przykładowo zaobserwowano, że w stanie miękkoplastycznym istotne zmiany strukturalne występują już przy naprężeniu $\sigma = 25$ kPa, natomiast dla osiągnięcia podobnych efektów w gruncie plastycznym/twardoplastycznym konieczne jest naprężenie $\sigma = 200$ kPa.

Występujące niekiedy załamania wzrostu ciśnienia porowego świadczą o nadzwyczajnym udroźnieniu przepływu cieczy w porach gruntu. Może to niekiedy przybierać formę przebicia hydraulicznego w obrębie masy gruntowej lub na kontakcie próbki ze ścianką boczną komory. Występuje wówczas znacznie szybsza stabilizacja ciśnienia porowego, co zaburza ocenę rzeczywistej izolacyjności nienaruszonego strukturalnie ośrodka. Z drugiej strony przebicie hydrauliczne wewnątrz próbki wskazują na konieczność wolniejszego, stopniowego obciążania gruntu i uzyskiwania w ten sposób wzmocnienia jego struktury, jednocześnie bez przekraczania wartości krytycznych ciśnień porowych.

WYNIKI OZNACZEŃ PARAMETRÓW KONSOLIDACYJNYCH I WSPÓŁCZYNNIKA FILTRACJI

Współczynnik filtracji k wyznacza się z badań konsolidacji jednoosiowej na podstawie zależności

$$k = c_v \cdot m_v \cdot \gamma_w = c_v \cdot \gamma_w / M_0 \quad (1)$$

gdzie:

- c_v – współczynnik konsolidacji jednoosiowej,
- m_v – współczynnik ścisłości objętościowej definiowany jako odwrotność edometrycznego modułu ścisłości ogólnej M_0 wyznaczanego w warunkach jednoosiowego odkształcenia,
- γ_w – ciężar właściwy fazy ciekłej czyli wody.

Na zmiany wartości k rzutuje zatem zmienność c_v oraz M_0 . Jak pokazano na figurze 4, w przeprowadzonych badaniach wartości M_0 wzrastały niemal liniowo w funkcji naprężenia konsolidacyjnego, a współczynnik zmienności wartości modułów przyjmowany jako stosunek odchylenia standardowego do średniej arytmetycznej kształtował się na poziomie od około 60% przy początkowych stopniach obciążenia (25 kPa), 30% przy obciążeniu $\sigma = 50$ kPa do około 20% przy naprężeniach 100, 200 i 400 kPa (Fig. 4).

Wraz ze wzrostem obciążenia obserwujemy krzywoliniowy spadek wskaźnika porowatości uwarunkowany postępującym przy wyższych stopniach obciążenia ograniczeniem możliwości przebudowy struktury gruntu.

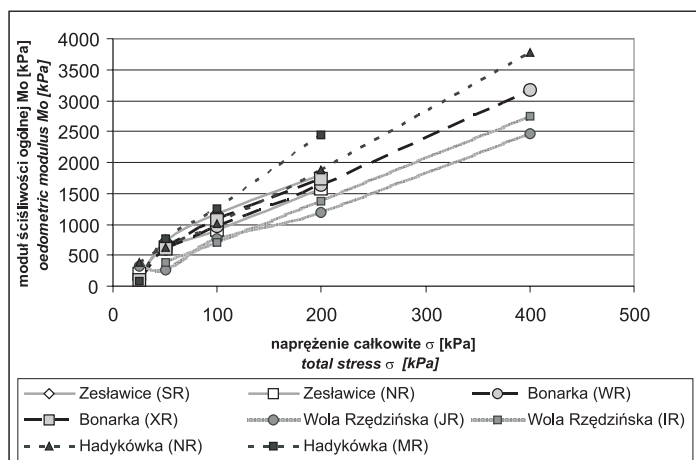


Fig. 4. Charakter zmian modułu ścisłości iłłów w badaniach konsolidacji IL

Fig. 4. Character of compressibility modulus changes in consolidation tests IL

Wartości współczynnika konsolidacji c_v początkowo rosną a następnie stabilizują się przy wyższych stopniach obciążenia (po przekroczeniu stopnia obciążenia $\sigma = 200$ kPa) wykazują quasi-stabilizację (Fig. 5).

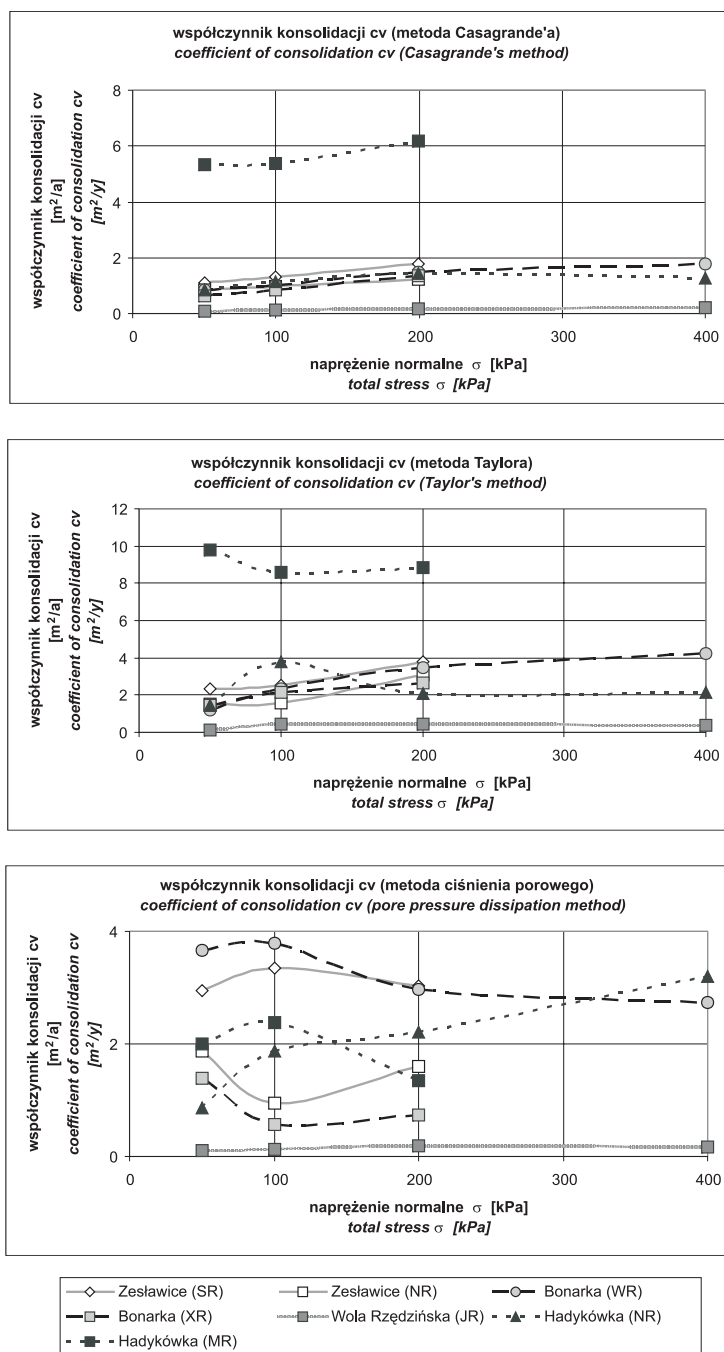
Współczynnik zmienności uzyskiwanych wartości c_v w badanych próbkach gruntu (wyznaczony z wykorzystywaniem różnych metod) jest większy niż w przypadku modułów i kształtuje się na poziomie kilkudziesięciu procent, co jest typowe dla tego parametru (Ingles 1979, Biernatowski 1984). Wynika to zarówno z bardzo znacznej wrażliwości c_v na zmiany warunków drenażu w konsolidowanym ośrodku gruntowym, wysokiej ścisłości gruntu, jak i często obserwowanych niezgodności doświadczalnych zachowań z teoretycznymi rozwiązaniami konsolidacji, na których oparte są obliczenia c_v .

Przeprowadzone analizy przebiegu badań konsolidacyjnych wskazują, że wyniki obliczeń współczynnika filtracji przy początkowym stopniu obciążenia traktować należy jako mało miarodajne, zarówno z uwagi na wysokie wartości wyjściowego parametru, jakim jest c_v , jak i znaczną zmienność wyników, co uwarunkowane jest niestabilnym układem strukturalnym gruntu.

Kolejnym zagadnieniem w ocenie miarodajności oznaczania przepuszczalności na podstawie badań konsolidacyjnych jest określenie wpływu metody wyznaczania c_v na estymowane później wartości współczynnika filtracji. Na figurze 6 przedstawiono wyniki obliczeń współczynnika filtracji na tle wartości początkowego wskaźnika porowatości przy kolejnych (z pominięciem pierwszego) stopniach obciążenia.

Aproksymacja liniowa ilustruje wpływ zastosowanej metody oznaczenia c_v na obliczone wartości współczynnika filtracji.

Wartości uzyskiwane z interpretacji metodą Taylora są wyższe w porównaniu z wartościami otrzymanymi przy zastosowaniu metody Cassagrande'a, co potwierdza tendencję odnotowaną przez Duncana (1993).

Fig. 5. Charakterystyka zmian współczynnika konsolidacji c_v w funkcji napężeniaFig. 5. Typical changes in consolidation coefficient c_v as a function of stress

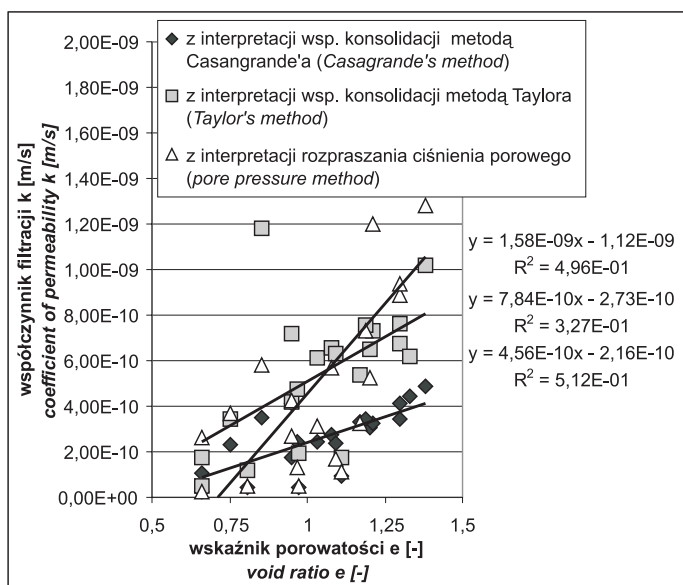


Fig. 6. Zmienność współczynnika filtracji k na tle wskaźnika porowatości e

Fig. 6. Variability of permeability coefficient k against void ratio e

Wartości k otrzymane na podstawie oceny dystrybucji ciśnienia porowego zależą w znaczącym stopniu od przyjętego sposobu interpretacji krzywej rozpraszania ciśnienia porowego. W prezentowanych badaniach współczynnik filtracji k , wyznaczony z wykorzystaniem metody ciśnienia porowego, wykazuje dużą zbieżność (przy wyższych wartościach wskaźników porowatości e) z wartościami k bazującymi na współczynniku konsolidacji c_v wyznaczonego metodą Taylora. Natomiast przy niższych wartościach e wartości współczynnika filtracji k są porównywalne z linią trendu opartą na współczynniku konsolidacji c_v oznaczonym metodą Casagrande'a (Fig. 6).

Stosunkowo niskie współczynniki dopasowania korelacji liniowej R^2 dla zależności $k - e$ odwzorowują nie tylko losową zmienność warunków drenażu i konsolidacji na kolejnych stopniach obciążenia, lecz także zróżnicowanie właściwości fizycznych i litologicznych badanych gruntów. Zachowanie iłłów z Zesławic i Bonarki – Łagiewnik wykazywało bowiem większe wzajemne podobieństwa i mniejszą zmienność w stosunku do badań iłłów z Woli Rzędzińskiej i Hadykówki.

DYSKUSJA

Generalnie można stwierdzić, że współczynniki filtracji uzyskane metodą pośrednią wykazują znaczną zmienność, jednak o podobnym zakresie zmian jak rezultaty oznaczeń k wykonywanych innymi metodami (Kaczyński *et al.* 2000). Ta znaczna zmienność jest więc charakterystyczną cechą oznaczeń współczynnika filtracji określanego w gruntach słabo przepuszczalnych.

W dyskusji na temat źródeł zmienności wyników badań podkreślić trzeba czynniki związane z adekwatnością teorii konsolidacyjnej do zachowań doświadczalnych. Zmienność współczynnika konsolidacji c_v przy zastosowaniu różnych technik interpretacyjnych wskazuje na rozbieżność postępu procesu konsolidacji z teoretycznymi założeniami Terzaghiego. Wyznaczenie h_{50} w metodzie Casagrande'a nie zawsze jest jednoznaczne i nawet zaawansowanym interpretatorom sprawia wiele trudności, często powodując znaczne różnice wyników oznaczeń c_v . Wartość współczynnika filtracji obliczona na podstawie współczynnika konsolidacji wyznaczonego metodą Casagrande'a jest niższa w porównaniu z wartościami tego parametru otrzymanymi metodą Taylora. Szczególnie trudne jest stosowanie tej metody interpretacji w przypadku bardzo spoistych gruntów, których czas konsolidacji pierwotnej przekracza dwie doby. W końcowej fazie procesu konsolidacji przy niewielkich wartościach ciśnienia porowego zaczyna dominować konsolidacja wtórna (reologiczna), której przebieg nie może być brany pod uwagę przy określaniu przepuszczalności hydraulicznej ośrodka.

Z kolei w celu przeprowadzenia poprawnej interpretacji przebiegu konsolidacji na podstawie rozpraszania ciśnienia porowego należy przyjąć założenia dotyczące zarówno początku konsolidacji filtracyjnej (wartości $u/\sigma_{\max}$), jak i jej zakończenia. Z przeprowadzonych badań wynika, że ciśnienie porowe nawet po długim czasie od chwili przyłożenia obciążenia nie rozprasza się w pełni, lecz uzyskuje stabilizację na niewysokim poziomie. Wobec niejednoznaczności tych granic w wielu praktycznych przypadkach uzyskiwane wartości parametrów konsolidacyjnych i filtracyjnych powinny być charakteryzowane jako zbiory rozmyte o zindywidualizowanych wartościach wag i prawdopodobieństw występowania.

KONKLUZJE

Metoda konsolidacyjna, jak pokazują przeprowadzone badania, może być użytecznym narzędziem do oceny przepuszczalności gruntów ilastych. Podstawowym problemem w uzyskiwaniu miarodajnych wyników z oznaczeń konsolidacyjnych jest krytyczna analiza zarówno warunków laboratoryjnych (problem nasycenia porów wodą, uniknięcia przebiegów hydraulicznych), jak i interpretacji wyników. Otrzymane w prezentowanych badaniach charakterystyki wskazują na potrzebę wypracowania dodatkowych kryteriów miarodajności oznaczeń opartych, podobnie jak w systemie obciążeń CL (Dobak 2007), na porównaniu teoretycznych i doświadczalnych charakterystyk przebiegu konsolidacji. Dotyczy to szczególnie relacji pomiędzy estymacją współczynnika konsolidacji na podstawie dwóch sprzężonych ze sobą elementów, jakimi są odkształcenie osiowe próbki i rozpraszanie ciśnienia porowego. Czynnikiem wskazującym na przydatność metody konsolidacyjnej do oznaczeń przepuszczalności gruntu jest stwierdzone zmniejszanie się zmienności parametrów odkształcalności przy wyższych stopniach obciążenia. Uzyskiwany przedział zmienności z oznaczeń opartych o różne metody interpretacji współczynnika c_v stwarza dobrą podstawę do określania tzw. parametrów wyprowadzonych. W myśl założeń Eurocodu 7 w doborze tych parametrów uwzględnia się jakościowe elementy odpowiadające warunkom prognozowanym w ośrodku gruntowym, jak i wymaganiom bezpieczeństwa. W tym ujęciu należałoby rekomendować raczej wyższe z uzyskiwanych wartości współczynnika filtracji,

jako dokumentujące mniejszą izolacyjność bariery geologicznej i zapewniające większy margines bezpieczeństwa środowiskowego. Oznaczanie współczynnika filtracji na podstawie badań konsolidacyjnych stanowiących metodę pośrednią powinno być powiązane ze stosowaniem drugiej alternatywnej metody bezpośredniej i przeprowadzeniem odpowiednich porównań uzyskiwanych wyników.

LITERATURA

- Biernatowski K., 1984. Statystyczna charakterystyka środowiska geologiczno-inżynierskiego. *Prace Naukowe Instytutu Geotechniki Politechniki Wrocławskiej*, 44, 5–12.
- BS 1377: Part 6, 1990. *British Standard Methods of test for Soils for Civil Engineering Purposes. Part 6. Consolidation and permeability tests in hydraulic cells and with pore pressure measurement*. 1–61.
- Ingles O.G., 1979. Soil variability, construction quality control and performance reliability. *Proceedings of New South Wales*, Sydney, 1–49.
- Dobak P., 2007. Określanie przepuszczalności gruntów spoistych w badaniach konsolidacji z ciągłym przyrostem obciążenia. *Przegląd Geologiczny*, 55, 2, 126–132.
- Duncan J.M., 1993. Limitations of conventional analysis of consolidation settlement. *Journal of Geotechnical Engineering*, 119, 9, 1333–1359.
- Eurocod 7. 1994–1997. *Geotechnical design CEN*.
- Kaczyński R. *et al.*, 2000. Współczynnik filtracji gruntów spoistych wyznaczony różnymi metodami. *Materiały Seminarium Jubileuszowego Prof. W.C. Kowalskiego „Aktualne problemy geologiczno-inżynierskich badań podłoża budowlanego i zagospodarowania terenu”*, Bogucki Wyd. Nauk. S.C., Poznań, 57–65.
- Kaczyński R., 1981. Wytrzymałość i odkształcalność górnomiocennych ilów zapadliska przedkarpacciego. *Biuletyn Geologiczny UW*, 29, 105–193.
- Mitchell J.K., 1993. *Fundamentals of Soil Behaviour*. 2nd ed., John Wiley, New York, 1–437.
- Olphen H. van, 1977. *An Introduction to Clay Colloid Chemistry*. 2nd ed., John Wiley, New York, 1–318.
- Young, R.N. & Warkentin, B.P., 1975. *Soil Properties and Behaviour*. 2nd ed., Elsevier Scientific, New York, 1–463.
- Woźniak H., 2004. *Interpretacja procesu konsolidacji w oparciu o pomiary ciśnienia porowego*. AGH, Kraków, 251–259.

Summary

The results of consolidation tests of Krakowicz clays from selected sites in the area of Krakow and Tarnow (Fig. 1) are presented in the article. The test were run to evaluate the insulating properties of the soils which can be used as sealing barriers, e.g. within waste dumps. Facial variability of physical properties (Tab. 1) has also an impact on the consolidation process evaluated in the Rowe's consolidometer (Fig. 2). Tests showed that the vari-

ability of pore water pressure at the beginning of the process after application of loading was different than that predicated by Terzaghi's consolidation theory. The first phase of the test can be distinguished, in which pore water pressure ought to dissipate which does not take place, but on the contrary, the pressure rises up to the value of $(u/\sigma)_{\max}$, however, usually smaller than 1. At a later phase pore water pressure decreases and its course can be compared with the shape of soil strain curve (Fig. 3). The values of soil permeability coefficient k , calculated on the basis of consolidation tests depend on variations in compressibility (oedometric) modulus M_0 (Fig. 4) and consolidation coefficient c_v (Fig. 5). The permeability coefficient k becomes lower when void ratio e decrease (Fig. 6). The values of coefficient k are strongly dependent on the interpretation method of consolidation coefficient. Under the analyzed tests the values k determined on the basis of c_v evaluated by Taylor's method and through measurements of water pressure dissipation in soil pores are similar and upper than the values obtained from Casagrande's method. When recommending values of the parameters for designing, their obtained variability, safety requirements and results of comparison with other direct methods of determination of insulating properties of those soils should be taken into consideration.