

## WPŁYW METOD INTERPRETACJI BADAŃ KONSOLIDACYJNYCH TYPU IL NA ZMIENNOŚĆ OZNACZEŃ PRZEPUSZCZALNOŚCI IŁÓW KRAKOWIECKICH

### METHODS OF IL-TESTS CONSOLIDATION ANALYSIS AND THEIR SIGNIFICANCE IN ESTIMATION OF KRAKOWIEC CLAY PERMEABILITY

RAFAL PAJAK<sup>1</sup>, PAWEŁ DOBAK<sup>2</sup>

**Abstract.** Określanie właściwości izolacyjnych iłów ma kluczowe znaczenie w ocenie efektywności barier geologicznych. Badania konsolidacyjne stanowią pośrednią, ale bardzo efektywną metodę interpretacji parametrów filtracyjnych gruntów słabo przepuszczalnych. Miarydajność oznaczeń zależy od wyboru najbardziej optymalnych dla tych celów metod interpretacji badań konsolidacyjnych. W artykule przeanalizowano przykłady zastosowania zarówno klasycznych, jak i nowych autorskich metod interpretacji badań konsolidacji iłów krakowieckich, obciążanych w systemie IL. Przeprowadzona analiza i porównanie z wynikami badań permeometrycznych umożliwia sformułowanie wskazówek metodycznych dla doboru optymalnej metodyki określania izolacyjności gruntów słabo przepuszczalnych przy zastosowaniu badań konsolidacyjnych.

**Słowa kluczowe:** grunty słabo przepuszczalne, właściwości izolacyjne, współczynnik konsolidacji, iły krakowieckie.

**Abstract.** Determining the properties of clay is essential to evaluate the effectiveness of geological barriers. Consolidation tests can provide an indirect, but very effective method of interpreting the parameters of poorly permeable soil. The reliability of determinations depends on the use of the most optimal methods of interpretation of consolidation tests. The present article is analysing examples, both classic and the new author's methods of interpreting the result of incremental loading (IL) consolidation tests of the Krakowiec Clays. The analysis and the comparison with the permeametric results, allows formulating methodological guidelines for the selection of the optimum methodology for determining the poorly permeable soil using consolidation tests.

**Key words:** poorly permeable soils, insulating properties, coefficient of consolidation, Krakowiec Clays.

## WSTĘP

Ocena właściwości izolacyjnych gruntów spoistych stanowi znaczące wyzwanie zarówno pod względem odwołania się do najbardziej adekwatnego modelu teoretycznego opisu procesu filtracji w ośrodkach słabo przepuszczalnych, jak i metod wyznaczania parametrów charakteryzujących bariery geologiczne. Zastosowanie warstw izolacyjnych z odpowiednio dobranych i przerobionych pod względem struk-

turalnym gruntów spoistych wymaga bezpiecznej oceny ich przepuszczalności. Znaczenie bezpieczeństwa podkreślają odpowiednie przepisy zarówno międzynarodowe (m.in. Dyrektywy Rady Europy i Parlamentu Europejskiego, wydawane i rozwijane sukcesywnie, począwszy od 1975 r.), jak i polskie. W rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 24 marca 2003 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczą-

<sup>1</sup> Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Oddział Karpacki, ul. Skrzatów 1, 31-560 Kraków; e-mail: rafal.pajak@o2.pl

<sup>2</sup> Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii, Instytut Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; e-mail: P.Dobak@uw.edu.pl

cych lokalizacji, budowy, eksploatacji i zamknięcia, jakim powinny odpowiadać poszczególne typy składowisk odpadów (Dz.U. 2003.61.549) zawarty jest wymóg, by pomiary współczynnika filtracji  $k$  naturalnej lub sztucznej bariery geologicznej określone były co najmniej dwiema metodami, w tym jedną połową, w zależności od warunków geologiczno-inżynierskich.

Badania laboratoryjne mają szczególne znaczenie w przypadku projektowania barier sztucznych, gdzie istotnym efektem jest optymalizacja właściwości geologiczno-inżynierskich. Dla tej optymalizacji niezbędna jest wiedza o zakresie zmienności wyników i wiarygodności różnych metod stosowanych w ocenach przepuszczalności, a tym samym także izolacyjnych właściwości gruntów. Zmienność

wyników w tej dziedzinie jest znacząca i uzależniona zarówno od metod badań, interpretacji, jak i charakterystyki geologicznej badanego ośrodka gruntowego.

Określanie współczynnika filtracji w sposób pośredni na podstawie charakterystyk konsolidacji ośrodka gruntowego wymaga starannego odwołania się do oceny przebiegu procesu, a w szczególności rzeczywistych rozbieżności z modelem teoretycznym. Z drugiej strony, oznaczenia parametrów konsolidacji wykonywane są od wielu lat, przede wszystkim na potrzeby prognozowania przebiegu osiadań podłoża gruntowego i wykorzystanie istniejących danych może mieć duże znaczenie na etapie wstępnej oceny i doboru potencjalnie najlepszych materiałów gruntowych z uwzględnieniem dostępnych charakterystyk archiwalnych.

## BADANIA KONSOLIDACJI

Przedstawione w niniejszym artykule analizy wykonano na podstawie wyników badań prowadzonych na pastach gruntowych sporządzonych z ilów krakowickich. Ta powszechnie występująca w zapadlisku przedkarpackim formacja stanowi obiecujące źródło doboru optymalnego materiału na sztuczne bariery geologiczne, tak potrzebne szczególnie w silnie zindustrializowanych obszarach Śląska i Małopolski. Studialne analizy przeprowadzono na podstawie badań gruntów pochodzących z odsłoneń w Bonarce, Zesławicach, Hadykówce oraz Woli Rzędzińskiej.

Z pobranych próbek ilów sporządzono pasty gruntowe (tab. 1), które następnie poddano badaniom w konsolidometrze Rowe'a w systemie podwajanego obciążenia (*incremental loading* – IL), stosując następujące naprężenia  $\sigma$ : 12,5; 25; 50; 100; 200 i wyjątkowo 400 kPa.

Stosowanie stopniowego przyrostu naprężenia prowadzi w toku konsolidacji do przekształceń struktury ośrodka gruntowego. Odzwierciedleniem tego są zmiany stopnia plastyczności (tab. 1) oraz charakter wykresu modułu ściśliwości  $M_0$  w funkcji naprężenia  $\sigma$  (fig. 1). Potęgowa aproksymacja tej zależności w postaci  $M_0 = A\sigma^B$ , uzyskana z odkształceń przy 50, 100 i 200 kPa, wykazuje bardzo dobre dopasowanie. Odchylenia danych doświadczalnych od aproksymowanych kształtowały się w przedziale od 2 do 14%. Natomiast przedstawione dodatkowo na wykresie (fig. 1) wartości modułu ściśliwości uzyskane pod obciążeniem 25 kPa są zdecydowanie mniejsze od wyników omawianej aproksymacji, co odzwierciedla dużą rolę przebudowy struktury szkieletu w początkowych etapach obciążenia. Stąd też w dalszych analizach przebiegu konsolidacji ograniczono się do przebiegu procesu pod obciążeniem  $\sigma = 100$  i 200 kPa. Wyni-

Tabela 1

Właściwości fizyczne badanych gruntów  
The physical properties of soil tested

Parametry	Symbol	Jednostka	Zesławice	Bonarka – Łągowie	Wola Rzędzińska	Hadykówka
Wilgotność past	$w$	%	68 – 36	0	58 – 29	47 – 28
Gęstość objętościowa	$\rho$	g/cm <sup>3</sup>	1,66 – 1,96	1,58 – 1,94	1,70 – 2,02	1,83 – 2,12
Gęstość właściwa	$\rho_s$	g/cm <sup>3</sup>	2,75	2,72	2,73	–
Granica plastyczności	$w_p$	%	38,2	34,9	35,3	22,7
Granica płynności	$W_L$	%	73,7	76,1	79,8	51,7
Wskaźnik plastyczności	$I_p$	%	35,5	41,2	44,5	29
Stopień plastyczności	$I_L$	[–]	0,83 – (–0,06)	0,72 – 0,06	0,50 – (–0,14)	0,83 – 0,20
Aktywność wg Skemptona	$A$	[–]	0,93	0,98	1,09	0,97
Zawartość frakcji ilowej	$f_i$	%	38	42	41	30

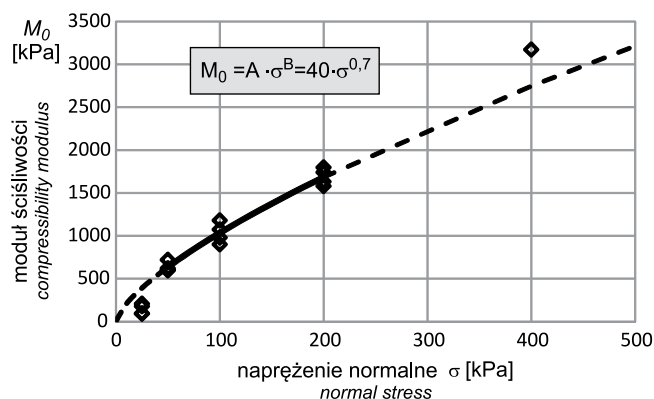


Fig. 1. Zmiany modułu ściśliwości w funkcji naprężenia – badania pasty ilu krakowieckiego z Zesławic i Bonarki

Changes of the compressibility modulus in the function of stress of the paste of Krakowiec Clay from Zesławic and Bonarka

ki te są zazwyczaj adekwatne do obciążeń występujących w sztucznych barierach u podstawy składowisk o wysokości od 10 do 30 m.

Wartości parametru ciśnienia wody w porach kształtowały się w sposób zróżnicowany w toku badań (fig. 2), przy czym podkreślić należy dwa aspekty:

- po przyłożeniu obciążenia ciśnienie porowe  $u_b$  wzrastało w czasie od 1 do około 1,5 godziny, a stosunek  $C_{IL} = u_{bmax}/\sigma$  osiągał maksymalne wartości od 0,24 do 0,34;
- następnie ciśnienie porowe zmniejszało się, realizując definicyjny etap konsolidacji właściwej, co w analizowanych badaniach trwało od 9 do 72 godzin.

W próbce pasty sporządzonej z ilu z Bonarki uzyskano znaczne końcowe rozproszenie ciśnienia porowego (rzędu

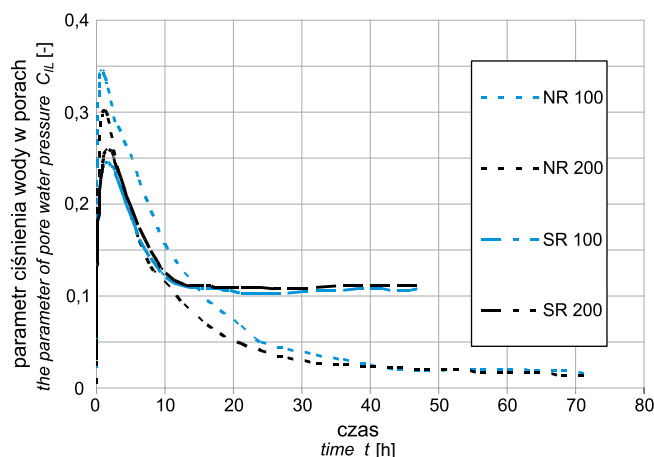


Fig. 2. Rozkłady parametru ciśnienia wody w porach w toku konsolidacji IL pasty ilu krakowieckiego z Bonarki i Zesławic

Distribution of pore water pressure during IL consolidation test of Krakowiec Clay from Bonarka and Zesławic

u 2–3% wartości naprężenia konsolidacyjnego). W innych badaniach obserwowano stabilizację ciśnienia porowego, przeciętnie na poziomie około 10% wartości naprężenia przyłożonego na grunt, co świadczy o braku wyraźnych oznak zakończenia etapu konsolidacji filtracyjnej. Udokumentowane w ten sposób hydrauliczne opory filtracji świadczyć mogą o trudnościach pełnego rozproszenia ciśnienia porowego związanych zarówno z przebudową struktury gruntu, jak i możliwymi błędami pomiarowymi. Wobec niejednoznaczności zapisów rozpraszania ciśnienia porowego ocenę parametrów konsolidacyjnych ograniczono w niniejszym artykule do analizy przebiegu odkształcenia jednoosiowego.

## METODY WYZNACZANIA WSPÓŁCZYNNIKA KONSOLIDACJI

W tradycji ugruntowane jest określanie współczynnika konsolidacji na podstawie metod Cassagrande'a i Taylora, opartych na wyznaczeniu charakterystycznych punktów, odpowiadających wartościom 50 i 90% stopnia konsolidacji.

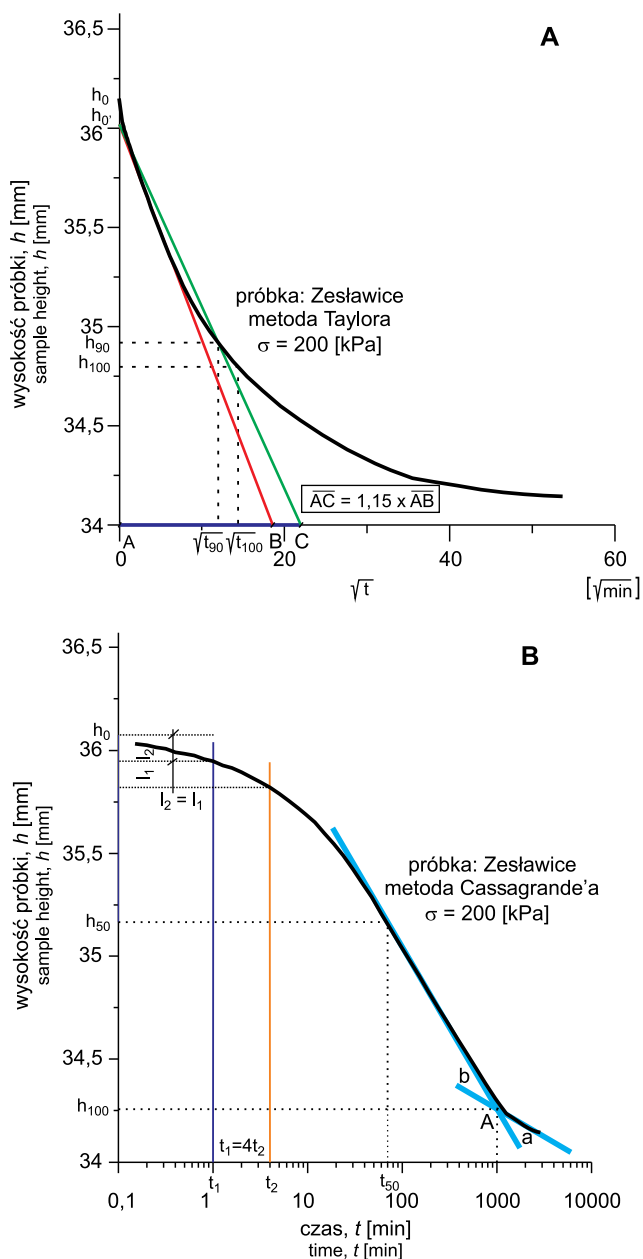
Zasady konstrukcji graficznych (fig. 3) wyprowadzone na podstawie modelowej charakterystyki przebiegu konsolidacji prowadzą do wyznaczenia wybranych punktów, których współrzędne określa się jako  $(t_{50}, h_{50})$  oraz  $(t_{90}, h_{90})$ . W rzeczywistości, w większości przypadków punkty te odpowiadają odkształceniom mniejszym niż 50 i 90%, co wyjaśniane jest jako efekt nie uwzględniania konsolidacji wtórnej. Zagadnienia te były wielokrotnie sygnalizowane (m.in. Duncan, 1993), przy czym trudno jest zdecydować, która z metod daje wyniki bardziej adekwatne dla scharakteryzowania procesu konsolidacji.

W innych ujęciach są analizowane nie wybrane punkty, lecz przebieg krzywej konsolidacji (m.in. Scott, 1961; Parkin, 1978; Dobak, Pająk, 2011). Takie podejście pozwala

ocenić także, w której części procesu odchylenia od modelowych rozwiązań są największe.

Rozwój szeroko dostępnych narzędzi obliczeniowych umożliwia, przy użyciu standardowych programów, przeprowadzanie analiz aproksymacyjnych polegających na poszukiwaniu teoretycznych krzywych konsolidacji o jak najmniejszej rozbieżności w stosunku do zapisów odkształcenia z badań laboratoryjnych. Przedstawiona w niniejszym artykule metoda aproksymacyjna (AM) polega na wyznaczeniu rodziny krzywych konsolidacji w nawiązaniu do standardowej zależności: stopień konsolidacji  $U$  – bezwymiarowy czynnik czasu  $T$ , wyprowadzonej dla przypadku równomiernego (prostokątnego) rozkładu nadwyżki ciśnienia wody w porach.

Wybór tej charakterystyki, aczkolwiek dyskusyjny, w zaawansowanych etapach procesu (gdzie występuje raczej rozkład paraboliczny) uzasadnia tradycja, gdyż do wartości  $T$  z rozkładu prostokątnego odwołują się klasyczne, punktowe metody Taylora i Cassagrande'a.



**Fig. 3. Przykładowe określenie wartości współczynnika konsolidacji  $c_v$**

**A** – metoda Taylora; **B** – metoda Cassagrande’a

A model determining the value of the consolidation coefficient  $c_v$

**A** – Taylor’s method; **B** – Cassagrande’s method

Zapis przebiegu konsolidacji zachodzącej na każdym rozpatrywanym obciążeniu, wyrażanym naprężeniem  $\sigma$ , obejmuje wartości:

- $h_0$  – wysokość początkową próbki,
- $t_i$  – czas, jaki upłynął od chwili przyłożenia obciążenia,
- $h_i$  – wysokość próbki w analizowanej chwili badania,
- $h_k$  – wysokość końcową próbki, odpowiadającą przyjętej stabilizacji odkształcenia.

Z doświadczalnego zapisu badania określa się wartości stopnia konsolidacji  $U_{exp}$  wg wzoru:

$$U_{exp,i} = \frac{h_0 - h_i}{h_0 - h_k} \quad [1]$$

Dalsze obliczenia mają na celu określenie teoretycznych przebiegów procesu konsolidacji w nawiązaniu do doświadczalnych zapisów wartości czasu  $t_i$  oraz wysokości próbki  $h_i$ , charakteryzującej aktualną długość drogi jednoosiowego, pionowego drenażu.

Wyznacza się teoretyczne wartości bezwymiarowego czynnika czasu  $T_i$ :

$$T_i = \frac{c_{v,opc} \cdot t_i}{h_i^2} \quad [2]$$

dla kilku opcjonalnych wartości  $c_{v,opc}$  przyjmowanych z uwzględnieniem oszacowania wartości wyników uzyskiwanych metodami tradycyjnymi. Na podstawie tak określonych wartości  $T_i$  określa się z klasycznej, teoretycznej zależności  $T_i - U$  (Taylor, 1948) wartości  $U_{teor}$ .

Porównanie przebiegu badania z rozwiązaniem teoretycznym polega na zestawieniu krzywej doświadczalnej  $U_{exp} - t$  oraz modelowych krzywych  $U_{teor} - t$ , wyznaczanych dla zakładanych wartości  $c_{v,opc}$ .

Określenie, która z modelowych krzywych jest najbardziej zbliżona do zapisu doświadczalnego wymaga wyboru odpowiednich kryteriów porównawczych. W niniejszej analizie, jako kryterium przyjęto wskaźnik  $d_U$ :

$$d_U = \frac{\sum \frac{|U_{exp} - U_{teor}|}{U_{exp}}}{n_i} \quad [3]$$

gdzie:

$n_i$  – liczba analizowanych wartości pomiarowych  $i$ .

Jako najlepiej dopasowaną modelową krzywą wybiera się tę, dla której  $d_U$  uzyskuje najmniejszą wartość. Wartość współczynnika konsolidacji wyznaczona proponowaną metodą AM jest równa wartości  $c_v$ , odpowiadającej najlepiej dopasowanej krzywej.

Na figurze 4A przykładowo przedstawiono doświadczalny przebieg konsolidacji na tle modelowych wykresów obliczonych dla wybranych wartości  $c_{v,opc}$ . Na figurze 4B pokazano zmianę wskaźnika  $d_U$  w funkcji przyjmowanych wartości  $c_{v,opc}$ . Wyraźnie zaznaczone minimum  $d_U$  odpowiada wartości  $c_v$ , przy której modelowa krzywa jest w świetle przyjętego kryterium najbardziej zbliżona do przebiegu doświadczalnego.

Tak wyznaczoną według zaproponowanej metody aproksymacyjnej (AM) wartość współczynnika konsolidacji  $c_{v(AM)}$  można traktować jako miarodajne przybliżenie warunków konsolidacji filtracyjnej do opisu zachowań badanego gruntu.

Jak widać, badany grunt w początkowym etapie procesu wykazuje szybsze osiadanie aniżeli przewiduje to krzy-

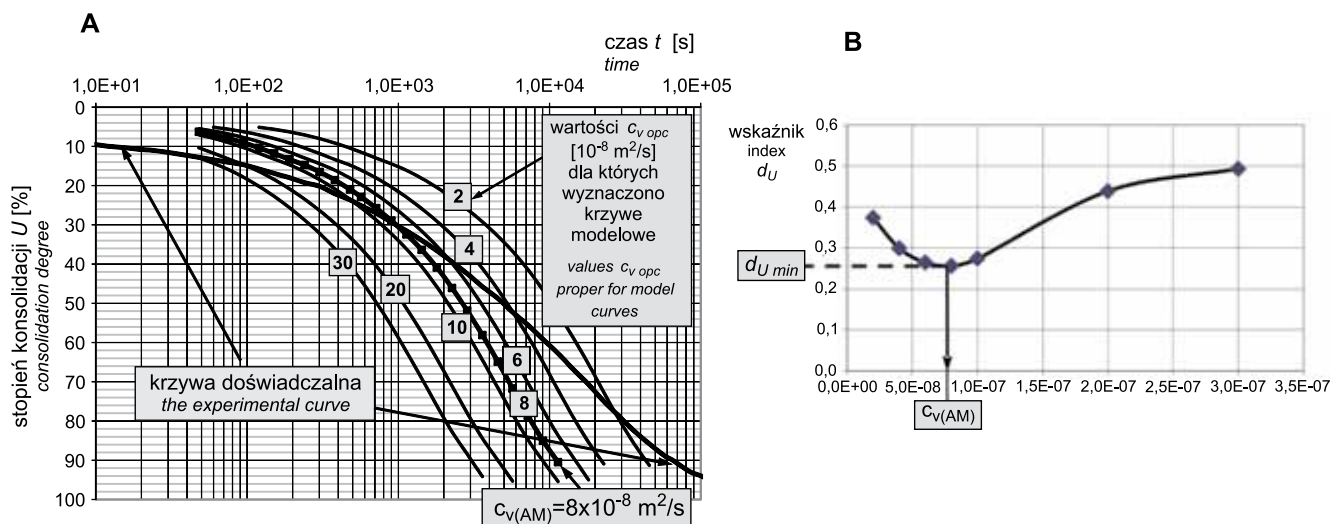


Fig. 4. A. Przebieg konsolidacji doświadczalnej na tle wykresów modelowych  
 B. Zmiana wskaźnika  $d_U$  na tle przyjmowanych wartości  $c_{v,opc}$

A. Course of experimental consolidation relating to model graphs  
 B. Change of the  $d_U$  indicator vs the assumed values  $c_{v,opc}$

Tabela 2

Ocena zmienności współczynnika konsolidacji  $c_v$  wyznaczanego metodą aproksymacyjną (AM) na tle oznaczeń tradycyjnymi metodami Taylora (T) i Cassagrande'a (C)

Assessment of variability of the consolidation coefficient  $c_v$  estimated by the (AM) approximation procedure relating to determinations of Taylor's (T) and Cassagrande's (C) standard methods

Miejscowość	Symbol próbki	Wskaźnik porowatości	Napężenie konsolidacyjne	Moduł ścisłości	Współczynnik konsolidacji $c_v$ wyznaczany metodą			Stosunki wartości $c_v$ wyznaczanych analizowanymi metodami		
		E	$\sigma$	$M_0$	AM – aproksymacyjną	T – Taylora	C – Cassagrande'a	T/C	AM/T	AM/C
		[-]	kPa	kPa	$m^2/s$	$m^2/s$	$m^2/s$	[-]	[-]	[-]
Bonarka	WR	1,21	100	979	$4,60 \cdot 10^{-8}$	$7,33 \cdot 10^{-8}$	$3,26 \cdot 10^{-8}$	2,25	0,63	1,41
		1,08	200	1632	$6,90 \cdot 10^{-8}$	$1,10 \cdot 10^{-7}$	$4,63 \cdot 10^{-8}$	2,37	0,63	1,49
	NR	1,17	100	899	$6,00 \cdot 10^{-8}$	$4,94 \cdot 10^{-8}$	$3,06 \cdot 10^{-8}$	1,61	1,22	1,96
		1,03	200	1580	$8,30 \cdot 10^{-8}$	$9,91 \cdot 10^{-8}$	$3,95 \cdot 10^{-8}$	2,51	0,84	2,10
Zesławice	XR	1,09	100	1073	$3,70 \cdot 10^{-8}$	$6,89 \cdot 10^{-8}$	$2,62 \cdot 10^{-8}$	2,63	0,54	1,41
		0,97	200	1741	$5,20 \cdot 10^{-8}$	$8,45 \cdot 10^{-8}$	$4,28 \cdot 10^{-8}$	1,98	0,62	1,21
	SR	1,20	100	1180	$7,10 \cdot 10^{-8}$	$8,09 \cdot 10^{-8}$	$4,15 \cdot 10^{-8}$	1,95	0,88	1,71
		1,08	200	1799	$8,30 \cdot 10^{-8}$	$1,20 \cdot 10^{-7}$	$5,60 \cdot 10^{-8}$	2,14	0,69	1,48
Hadykówka	NR_H	0,825	100	1007	$7,70 \cdot 10^{-8}$	$1,21 \cdot 10^{-7}$	$3,56 \cdot 10^{-8}$	3,40	0,64	2,16
		0,728	200	1888	$8,10 \cdot 10^{-8}$	$6,64 \cdot 10^{-8}$	$4,49 \cdot 10^{-8}$	1,48	1,22	1,81
	MR	0,715	100	1253	$2,60 \cdot 10^{-7}$	$2,73 \cdot 10^{-7}$	$1,71 \cdot 10^{-7}$	1,60	0,95	1,52
		0,645	200	2446	$2,80 \cdot 10^{-7}$	$2,81 \cdot 10^{-7}$	$1,97 \cdot 10^{-7}$	1,43	1,00	1,42
Wola Rzędzińska	IR	0,895	100	703	$4,50 \cdot 10^{-9}$	$1,02 \cdot 10^{-8}$	$3,53 \cdot 10^{-9}$	0,01	0,44	1,28
		0,758	200	1375	$6,10 \cdot 10^{-9}$	$3,28 \cdot 10^{-9}$	$4,51 \cdot 10^{-9}$	0,02	1,86	1,35
	JR	0,974	100	764	$9,00 \cdot 10^{-10}$	$1,49 \cdot 10^{-8}$	$3,44 \cdot 10^{-9}$	4,34	0,06	0,26
		0,808	200	1194	$3,40 \cdot 10^{-9}$	$1,43 \cdot 10^{-8}$	$5,30 \cdot 10^{-9}$	2,70	0,24	0,64
Średnia wartość parametru				1345	$7,59 \cdot 10^{-8}$	$9,18 \cdot 10^{-8}$	$4,88 \cdot 10^{-8}$	2,02	0,78	1,45
Odchylenie standardowe				457	$7,90 \cdot 10^{-8}$	$7,91 \cdot 10^{-8}$	$5,38 \cdot 10^{-8}$	1,05	0,41	0,47
Współczynnik niejednorodności				0,34	1,04	0,86	1,10	0,52	0,53	0,32

wa teoretyczna najbardziej zbliżona do wykresu doświadczalnego. W zaawansowanym etapie badania następuje natomiast opóźnienie przebiegu rzeczywistej konsolidacji gruntu w stosunku do modelu. Wskazuje to na zmniejszenie przepuszczalności gruntu wraz z jego sukcesywnym odkształceniem i zmniejszenie porowatości oraz zapewne odzwierciedla wpływ odkształceń reologicznych (konsolidacja wtórna). Ten sposób zachowań gruntu powtarza się we wszystkich badaniach, chociaż zakres rozbieżności jest różny.

Wartości stopnia konsolidacji  $U$ , przy których uzyskano przecięcie najlepiej dopasowanej krzywej modelowej z wykresem doświadczalnym kształtują się w przedziale od 20 do 40%, a więc wcześniej niż przyjęte przez Cassagrande'a wartości  $U = 50\%$  i Taylora  $U = 90\%$ . Wartości  $c_v$ ,

uzyskane metodą aproksymacyjną (AM) odpowiadają zatem lepiej warunkom występującym w początkowym etapie procesu konsolidacji, gdy przepuszczalność gruntu jest lepsza. Z możliwych opcji interpretacyjnych odwzorowują sytuację szybszego przebiegu procesu osiadań i gorszych właściwości izolacyjnych. W tabeli 2 przedstawiono wyniki oznaczeń współczynnika konsolidacji analizowanymi metodami.

Wartości współczynnika konsolidacji wyznaczone metodą Taylora są średnio dwukrotnie wyższe od wyników uzyskiwanych metodą Cassagrande'a. Natomiast stosując metodą aproksymacyjną (AM) uzyskuje się wyniki pośrednie: w przeważającej liczbie analizowanych badań niższe – średnio o około 20% od wartości  $c_v$  metodą Taylora i wyższe średnio o około 60% od wartości  $c_v$  metodą Cassagrande'a.

## OCENA PRZEPUSZCZALNOŚCI W BADANIACH KONSOLIDACYJNYCH I PERMEAMETRYCZNYCH

W tabeli 3 zestawiono wartości współczynnika filtracji  $k$  wyznaczone pośrednio na podstawie wzoru:

$$k = \frac{c_v \cdot \gamma_w}{M_0} \quad [4]$$

gdzie:

$\gamma_w$  – ciężar właściwy wody występującej w przestrzeni porowej.

Struktura wzoru (4) powoduje, że wzajemne relacje wartości  $k$  określanych na podstawie różnych metod wyznaczania współczynnika konsolidacji są takie same. Natomiast współczynniki niejednorodności  $v$ , określone jako iloraz odchylenia standardowego  $\sigma_n$  i wartości średniej parametru  $x_{sr}$

$$v = \frac{\sigma_n}{x_{sr}} \quad [5]$$

są w przypadku zbiorów współczynników filtracji nieco wyższe aniżeli w analizach zmienności współczynnika konsolidacji.

Zwraca uwagę fakt, że współczynniki filtracji wyznaczone metodą pośrednią są z reguły niższe przy wyższych naprężeniach konsolidacyjnych, gdzie grunt charakteryzuje się mniejszym wskaźnikiem porowatości w stosunku do stanu z poprzedniego stopnia obciążenia.

Z punktu widzenia praktycznego istotna jest ocena zmienności oznaczeń współczynnika filtracji określanego metodą pośrednią na podstawie przebiegu konsolidacji oraz bezpośrednimi metodami permeametrycznymi. Zmienność wartości  $k$  określonych z badań konsolidacyjnych jest około 3-krotnie większa od uśrednionych wyników uzyskiwanych w permeametrze (metoda Trautweina). Pomimo uzyskania dość rozbieżnych relacji pomiędzy wynikami oznaczeń  $k$  metodą pośrednią (konsolidacyjną) i bezpośrednią (permeametryczną) w analizowanych badaniach stwierdzono bardzo wyraźny związek określający trend tej rozbieżności. Wprowadźmy wskaźnik  $\eta$ , zdefiniowany jako stosunek war-

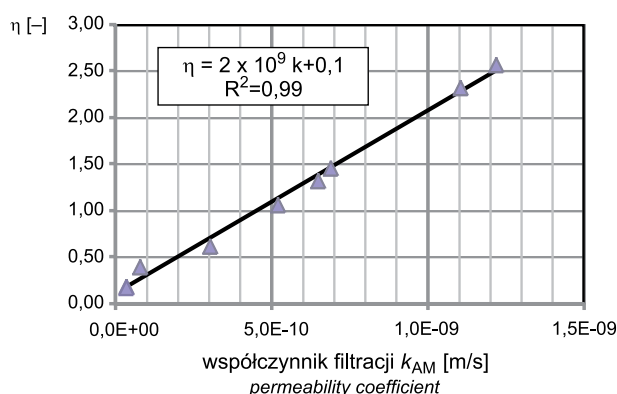
tości  $k_{AM}$  określanego z badań konsolidacyjnych oraz  $k_{sr;perm}$  z badań w aparacie Trautweina:

$$\eta = \frac{k_{AM}}{k_{sr;perm}} \quad [6]$$

Tak wyznaczony współczynnik  $\eta$ , zestawiony na tle wartości  $k_{AM}$  obliczonych na podstawie rekomendowanej w niniejszym artykule metody aproksymacyjnej (AM) określania  $c_v$ , daje bardzo dobrą korelację liniową (fig. 5). Chcąc uzyskać oszacowanie  $k$  zbliżone do metod permeametrycznych stosować należy w przeliczaniu:

$$k_{sr;perm} = \frac{k_{AM}}{\eta} \quad [7]$$

Dla wartości  $k_{AM}$  mniejszych od  $4,5 \cdot 10^{-10}$  m/s, otrzymanych z analizy krzywej konsolidacji, wartości  $\eta$  są



**Fig. 5. Liniowy charakter zmienności wskaźnika  $\eta$  w funkcji współczynnika filtracji  $k_{AM}$  wyznaczonego na podstawie określenia współczynnika konsolidacji metodą aproksymacyjną**

Linear character of  $\eta$  index changes as the function of permeability coefficient  $k_{AM}$  estimated from consolidation coefficient determined by the approximation method



Tabela 3

**Ocena zmienności współczynnika filtracji  $k$  wyznaczanego na podstawie różnych metod określania współczynnika konsolidacji  $c_v$ , oraz na tle wyników oznaczeń w aparacie Trautweina**

Assessment of variability of the permeability coefficient  $k$  determined from the consolidation coefficient  $c_v$ , evaluated by different methods and on the background of test results in Trautwein apparatus

Miejsce pobrania próbek	Symbol próbki	Napężenie konsolidacyjne $\sigma$ [kPa]	Współczynnik filtracji $k$ [m/s] określany na podstawie			
			wartości $c_v$ wyznaczanych metodą:			w aparacie Trautwein'a (wartości uśrednione)
			AM – aproksymacyjną	T – Taylora	C – Cassagrande'a	
Bonarka	WR	100	$4,61 \cdot 10^{-10}$	$7,34 \cdot 10^{-10}$	$3,27 \cdot 10^{-10}$	$4,93 \cdot 10^{-10}$
		200	$4,15 \cdot 10^{-10}$	$6,61 \cdot 10^{-10}$	$2,78 \cdot 10^{-10}$	
	NR	100	$6,55 \cdot 10^{-10}$	$5,39 \cdot 10^{-10}$	$3,34 \cdot 10^{-10}$	
		200	$5,15 \cdot 10^{-10}$	$6,15 \cdot 10^{-10}$	$2,45 \cdot 10^{-10}$	
Zesławice	XR	100	$3,38 \cdot 10^{-10}$	$6,30 \cdot 10^{-10}$	$2,40 \cdot 10^{-10}$	-
		200	$2,93 \cdot 10^{-10}$	$4,76 \cdot 10^{-10}$	$2,41 \cdot 10^{-10}$	
	SR	100	$5,90 \cdot 10^{-10}$	$6,73 \cdot 10^{-10}$	$3,45 \cdot 10^{-10}$	
		200	$4,53 \cdot 10^{-10}$	$6,54 \cdot 10^{-10}$	$3,05 \cdot 10^{-10}$	
Hadykówka	NR_H	100	$7,50 \cdot 10^{-10}$	$1,18 \cdot 10^{-9}$	$3,47 \cdot 10^{-10}$	$4,77 \cdot 10^{-10}$
		200	$4,21 \cdot 10^{-10}$	$3,45 \cdot 10^{-10}$	$2,33 \cdot 10^{-10}$	
	MR	100	$2,04 \cdot 10^{-9}$	$2,14 \cdot 10^{-9}$	$1,34 \cdot 10^{-9}$	
		200	$1,12 \cdot 10^{-9}$	$1,13 \cdot 10^{-9}$	$7,90 \cdot 10^{-10}$	
Wola Rzędzińska	IR	100	$6,28 \cdot 10^{-11}$	$1,45 \cdot 10^{-10}$	$4,93 \cdot 10^{-11}$	$2,00 \cdot 10^{-10}$
		200	$4,35 \cdot 10^{-11}$	$2,39 \cdot 10^{-11}$	$3,22 \cdot 10^{-11}$	
	JR	100	$1,16 \cdot 10^{-11}$	$1,91 \cdot 10^{-10}$	$4,42 \cdot 10^{-11}$	
		200	$2,79 \cdot 10^{-11}$	$1,17 \cdot 10^{-10}$	$4,35 \cdot 10^{-11}$	
Średnia wartość $k$		m/s	$5,22 \cdot 10^{-10}$	$6,52 \cdot 10^{-10}$	$3,25 \cdot 10^{-10}$	$3,90 \cdot 10^{-10}$
Odchylenie standardowe		m/s	$4,96 \cdot 10^{-10}$	$5,10 \cdot 10^{-10}$	$5,12 \cdot 10^{-10}$	$3,16 \cdot 10^{-10}$
Współczynnik niejednorodności		[-]	0,95	0,78	0,81	0,97

mniejsze od 1, a więc będziemy otrzymywali oszacowanie współczynnika  $k$  o wyższych wartościach – bezpieczniejsze z punktu widzenia prognozowania izolacyjności barier gruntowych.

W przypadku gruntów o wyższych wartościach współczynnika konsolidacji można rozważyć zastosowanie wskaźnika  $\eta > 1$ , a tym samym pewne polepszenie prognozy izolacyjności.

## WNIOSKI

1. Współczynnik filtracji w gruntach słabo przepuszczalnych wykorzystywanych jako bariery izolacyjne jest parametrem bardzo zmiennym i niejednoznacznie określonym. Zastosowanie metody pośredniej wyznaczania tego parametru na podstawie badań konsolidacyjnych wymaga starannych studiów dotyczących przebiegu konsolidacji i jej zgodności z założeniami teorii. Analiza przebiegu doświadczalnych krzywych konsolidacji w porównaniu z teoretycznymi charakterystykami modelowymi wskazuje na powtarzającą się tendencję, gdzie początek procesu konsolidacji kształtowany jest przez warunki przepuszczalności lepsze, a koniec gorsze, w stosunku do stałej wartości  $k$ , przyjmowanej w klasycznym rozwiązaniu teoretycznym.
2. Porównanie tradycyjnych, i nadal powszechnie stosowanych, metod wyznaczania współczynnika konsolidacji  $c_v$  – Taylora i Cassagrande'a wskazuje na znaczne różnice wyników, przekładające się bezpośrednio na rezultaty oszacowań współczynnika filtracji badanych gruntów. Wprowadzenie nowej, aproksymacyjnej metody wyznaczania współczynnika konsolidacji  $c_{v(AM)}$  polega na poszukiwaniu modelowej krzywej teoretycznej, najbardziej zbliżonej do przebiegu osiadania próbki, rejestrowanego w toku badań laboratoryjnych w konsolidometrze Rowe'a.

3. Określanie współczynnika filtracji z wykorzystaniem metody AM jest uzasadnione z punktu widzenia bezpiecznych oszacowań izolacyjności gruntów. Wartości  $c_v$  z metody AM odpowiadały w analizowanych badaniach doświadczalnym wartościom stopnia konsolidacji mniejszym niż 50%, a więc charakteryzującym wczesny etap, kiedy przepuszczalność jest większa, aniżeli pod koniec procesu.
4. Wprowadzony na podstawie analizowanych badań i interpretacji wskaźnik  $\eta$  umożliwia przeliczanie wartości  $k_{AM}$  otrzymywanych metodą AM na wartości uzyskiwane z badań permeometrycznych. Należy prowadzić dalsze badania porównawcze pomiędzy pośrednimi i bezpośrednimi metodami określania współczynnika filtracji gruntów słabo przepuszczalnych w celu weryfikacji zależności  $\eta - k_{AM}$ .

## LITERATURA

- DUNCAN J.M., 1993 — Limitations of conventional analysis of consolidation settlement. *J. Geotech. Engineer.*, **119**, 9: 1333–1359.
- DOBĄK P., PAJĄK R., 2011 — Określenie współczynnika konsolidacji na podstawie przebiegu jednoosiowego odkształcenia gruntu i dystrybucji ciśnienia porowego w badaniach IL prowadzonych w konsolidometrze Rowe'a. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **446**: 265–272.
- PARKIN A.K., 1978 — Coefficient of consolidation by the velocity method. *Geotechnique*, **38**, 4: 472–474.
- ROZPORZĄDZENIE Ministra Środowiska z dnia 24 marca 2003 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących lokalizacji, budowy, eksploatacji i zamknięcia, jakim powinny odpowiadać poszczególne typy składowisk odpadów, Dz.U. 2003.61.549 z późn. zm.
- SCOTT R.F., 1961 — New method of consolidation coefficient evaluation. *J. Soil Mechanics Found. Div., ASCE*, **87**, 1: 29–39.
- TAYLOR D.W., 1948 — Fundamentals of soil mechanics. John Wiley & Sons, Inc., New York.

## SUMMARY

The paper presents the analysis of selected evaluation methods of the consolidation parameter based on incremental loading test (IL) and Terzaghi's theory applications. One of aims of this analysis may be estimation of permeability and insulating property of cohesive soil's paste used as the geological barriers in landfill sites. The Krakowiec Clays from the Carpathian Foredeep were studied as the potential fine insulating materials.

Permeability tests of clays provided varied results. Comparison of different methods is necessary for obtaining proper parameters. The consolidation process depends on permeability of tested soil and it allows calculating the coefficient of permeability  $k$  using compressibility modulus  $M_0$  and consolidation coefficient  $c_v$ . Course of the tested clays consolidation is often different than theoretical solution and that's why the results of  $c_v$  obtained from the popular traditional Taylor's and Cassagrande's methods gives varied values.

A new approximation method of  $c_v$  estimation is proposed in this paper. This method is based on comparison of a theoretical course of consolidation with experimental results. The criteria of selecting the most proper  $c_v$  are the smallest mean differences between the degrees of consolidation  $U$  in noted experimental points and suitable points in a theoretical curve calculated for optional  $c_v$  values. The results of this method prefer higher values of  $c_v$  and  $k$  from the early part of the consolidation process and allows evaluating the safety values of permeability.

The comparison of permeability obtained from consolidation analysis and from direct tests in the Trautwein apparatus enables defining the well established  $\eta$  index, which may estimate the relation between the results from the analysed methods.