

Zmiany ciśnienia porowego w warunkach stałego wzrostu obciążenia i ich wpływ na konsolidację CL na przykładzie wybranych gruntów spoistych centralnej Polski

Piotr Stajszczyk¹, Paweł Dobak²



P. Stajszczyk



P. Dobak

Pore pressure changes during consolidation tests with the constant rate of loading and their influence on CL consolidation, as exemplified by selected cohesive soils from central Poland. Prz. Geol., 69: 873–883; doi: 10.7306/2021.49

Abstract. The article presents the results of CRL tests of cohesive soils of different origins and grain size compositions. The aim of the work is to investigate the relation between the physical properties of cohesive soil and the course of loading and the nature of pore pressure changes during CL consolidation. The implemented program of laboratory tests confirms the significant role of pore water pressure in the assessment of seepage and consolidation parameters. The CRL research was supplemented by observations in a scanning electron microscope.

Keywords: pore water pressure, CRL test, CL consolidation, cohesive soils

Zmiany ciśnienia porowego rejestrowane w trakcie laboratoryjnych badań konsolidometrycznych (CL – *continuous loading*) mogą stanowić ważne narzędzie diagnozowania wpływu właściwości fizycznych oraz cech strukturalnych gruntu na ocenę zachowań konsolidacyjno-filtracyjnych. Charakterystyka zmian ciśnienia porowego zależy od prędkości przykładania obciążenia, co w powiązaniu z jej opcjonalnym programowaniem daje istotne informacje o wrażliwości struktury gruntu na nadwyżki ciśnienia powstające w fazie ciekłej na skutek zwiększającego się obciążenia i ich rozpraszanie. Wybór do tych analiz badań typu CL wynika z faktu obligatoryjnego wyznaczania zmian ciśnienia porowego u_b przy podstawie próbki, a także większej precyzji pomiaru, wynikającej z kumulacji wartości u_b w toku badania, oraz ciągłości aplikowania obciążenia zewnętrznego.

Rozwijanie badań konsolidometrycznych ma także duże znaczenie praktyczne. W dokumentacjach geologiczno-inżynierskich sporządzanych na potrzeby posadowienia obiektów budowlanych w złożonych oraz skomplikowanych warunkach gruntowych charakterystyka procesu konsolidacji gruntów spoistych jest uzyskiwana w laboratorium najczęściej poprzez wykonanie badań ściśliwości typu IL (Head, 1986; PN-88/B-04481; PN-EN ISO 17892-5). Zaletą tej metody jest to, że uwzględnia ona proces pełzania pod stałym obciążeniem, wadą natomiast – dłuższy, niekiedy znacząco, czas wykonywania badań oraz problemy z wiarygodnym określeniem wartości współczynnika konsolidacji, najczęściej wynikające z prowadzenia jedynie pomiarów przebiegu odkształcenia (Duncan, 1993). W tej sytuacji stosowanie badań typu CL daje możliwość miarodajniejszego określania filtracyjnych uwarunkowań procesu konsolidacji. Natomiast problemem może być nadal niewystarczające rozpowszechnienie krytycznego interpretowania uzyskiwanych wyników pomiarów w nawiązaniu do teoretycznego modelu dystrybucji ciśnienia porowego w warunkach rosnącego obciążenia (Rowe, Barden, 1966; Dobak, 1999, 2008; Woźniak, 2001; Kowalczyk, 2007;

Dobak i in., 2015; Stajszczyk, 2018, 2021; Stajszczyk i in., 2020).

Niewątpliwą zaletą badań CL są także krótki czas realizacji przyjętej procedury laboratoryjnej, ciągły pomiar ciśnienia porowego oraz możliwość sporządzenia charakterystyk odkształceniowych badanych gruntów w szerokim zakresie naprężenia. Wobec wymaganej liczby próbek przeznaczonych do badań laboratoryjnych w ramach realizacji założeń projektów robót geologicznych rekomendacja badań CL może nie tylko usprawnić przebieg prac w laboratorium, ale również zwiększyć wiarygodność uzyskiwanych parametrów filtracji oraz konsolidacji na potrzeby identyfikowania warunków geologiczno-inżynierskich podłoża gruntowego.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie doświadczeń metodycznych i interpretacyjnych z wykonanej serii badań pod kątem możliwości oceny:

- zgodności przebiegu konsolidacji w realizowanych programach badawczych z dotychczasowymi rozwiązaniami teoretycznymi;
- wpływu właściwości fizycznych, składu mineralnego i granulometrycznego oraz cech strukturalnych badanych gruntów spoistych na przebieg zmian ciśnienia porowego w trakcie stałego zwiększania obciążenia;
- zmian filtracyjno-konsolidacyjnych cech gruntów w zależności od przyjmowanej w programie badawczym prędkości obciążania.

Badania wykonano w Zakładzie Geologii Inżynierskiej oraz w Środowiskowym Laboratorium Niskotemperaturowej Skaningowej Mikroskopii Elektronowej *Cryo-SEM* na Wydziale Geologii Uniwersytetu Warszawskiego.

METODYKA BADAWCZA

Przeprowadzono badania:

- właściwości fizycznych gruntów zgodnie ze specyfikacjami technicznymi PN-CEN ISO/TS oraz z uwzględ-

¹ Geoteko Projekty i Konsultacje Geotechniczne Sp. z o.o., ul. Wałbrzyska 14/16, 02–739 Warszawa; piotrek25104@wp.pl

² Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02–089 Warszawa; p.dobak@uw.edu.pl

nieniem klasyfikacji wg PN-88/B-04481 oraz PN-EN ISO 14688-1 i PN-EN ISO 14688-2;

- składu mineralnego metodą termiczną w derywografii *Q600* firmy *TA*, a interpretację wyników wykonano wg zaleceń metodycznych Kościółko i Wyrwickiego (1996);
- konsolidacji typu CL w aparacie Bardena-Rowe'a z zastosowaniem doświadczeń metodycznych wg: Rowe'a, Bardena, 1966; Wissa i in., 1971; Vu Cao Minh'a, 1977; ASTM D 4186-89; Dobaka, 1999, 2008; Woźniaka, 2001; Kowalczyka, 2007; Dobaka i in., 2015; Stajszczyka, 2018, 2021; Stajszczyka i in., 2020;
- mikrostruktur gruntów w mikroskopie skaningowym *Jeol JSM 6380 LA* wg metodyki opisanej w pracach Grabowskiej-Olszewskiej (1998), Trzcinińskiego (1998) i Stajszczyka (2019) z zastosowaniem analizy ilościowej obrazów w programie *STIMAN*.

Badaniom poddano:

- nieskonsolidowane ły zastoiskowe (warwowe) występujące wzdłuż krawędzi tarasu błońskiego w nieprzerwanym powierzchniowo kompleksie od Plecewicy do miejscowości Kampinos w woj. mazowieckim (Haisig, Wilanowski, 2008);
- skonsolidowane gliny lodowcowe zlodowacenia odry (Sarnacka, 1979) występujące na powierzchni wysoczyzny warszawskiej, m.in. w rejonie Fortu Służew w Warszawie.

Wybór tych dwóch typów gruntów był podyktowany zamiarem oceny właściwości konsolidacyjnych ośrodków o znacząco odmiennych warunkach genezy, depozycji oraz przekształceń postsedymentacyjnych (Lindner, 1992; Kaczyński, 2017; Zawrzykraj i in., 2017). Uzyskane charakterystyki mogą mieć także znaczenie aplikacyjne, gdyż badane typy litogenetyczne są regionalnie rozpowszechnione i stanowią podłoże wielu obiektów budowlanych. Dokonany wybór materiału gruntowego pozwolił zatem uwzględnić wpływ zróżnicowania właściwości inherentnych (m.in. składu granulometrycznego oraz mineralnego) badanych ośrodków gruntowych na przebieg mobilizacji oraz dyssypacji ciśnienia porowego w warunkach stale wzrastającego obciążenia.

Próbki glin lodowcowych (Sarnacka, 1979) o nienaruszonej strukturze pobrano z wykopów fundamentowych osiedla mieszkaniowego Fort Służew przy zbiegu ulicy Nowoursynowskiej i Dolinki Służewieckiej, z głębokości ok. 5–7 m p.p.t.

Próbki łąw zastoiskowych, przeznaczone do badań, wycinano w formie monolitów ze ścian kopalni odkrywkowej w Plecewicach koło Sochaczewa. Znaczna wrażliwość strukturalna pobranych monolitów łąw warwowych uniemożliwiła jednak pozyskanie reprezentatywnych próbek o nienaruszonej strukturze (NNS), wymaganych do badań w konsolidometrze.

Program badawczy zakładał ocenę wpływu stanu i cech strukturalnych gruntu na kształtowanie się zmian właściwości filtracyjno-konsolidacyjnych. W nawiązaniu do tego przeprowadzono badania próbek glin o stanie naturalnym (półzwardym lub twaroplastycznym) i nienaruszonej strukturze, a także materiału pozbawionego naturalnych więzi poprzez sporządzenie miękoplastycznych past gruntowych – zarówno z glin zwałowych, jak i materiału zastoiskowego. Przygotowywanie past przeprowadzono

według procedury opisanej przez Kowalczyka (2007) oraz Stajszczyka (2019). Materiał gruntowy pobrany w warunkach *in-situ* poddano procedurze wysuszenia, rozcierania, mieszania z wodą, a później wstępnej, 5-tygodniowej konsolidacji pod naprężeniem 20 kPa.

Z past oraz próbek NNS wycinano walcowe próbki o średnicy $D = 63$ mm oraz wysokości $h = 25$ mm, które poddawano badaniom konsolidometrycznym typu CRL (*constant rate of loading*). W zależności od stanu i struktury gruntu stosowano prędkości obciążania:

- past gruntowych z łąw zastoiskowych i glin lodowcowych – 12,5; 25; 50 oraz 100 kPa/h;
- próbek NNS glin lodowcowych – 50, 100 oraz 150 kPa/h.

Przed badaniami konsolidometrycznymi i po nich z past łąw zastoiskowych pobierano próbki sześciennie ($V = 1$ cm³), których powierzchnie poddawano procedurom umożliwiającym skaningowe obrazowanie mikrostrukturalne. Wyniki badań mikrostruktury glin lodowcowych z Fortu Służew przedstawiono w pracy Stajszczyka i in. (2020).

Model badań CRL

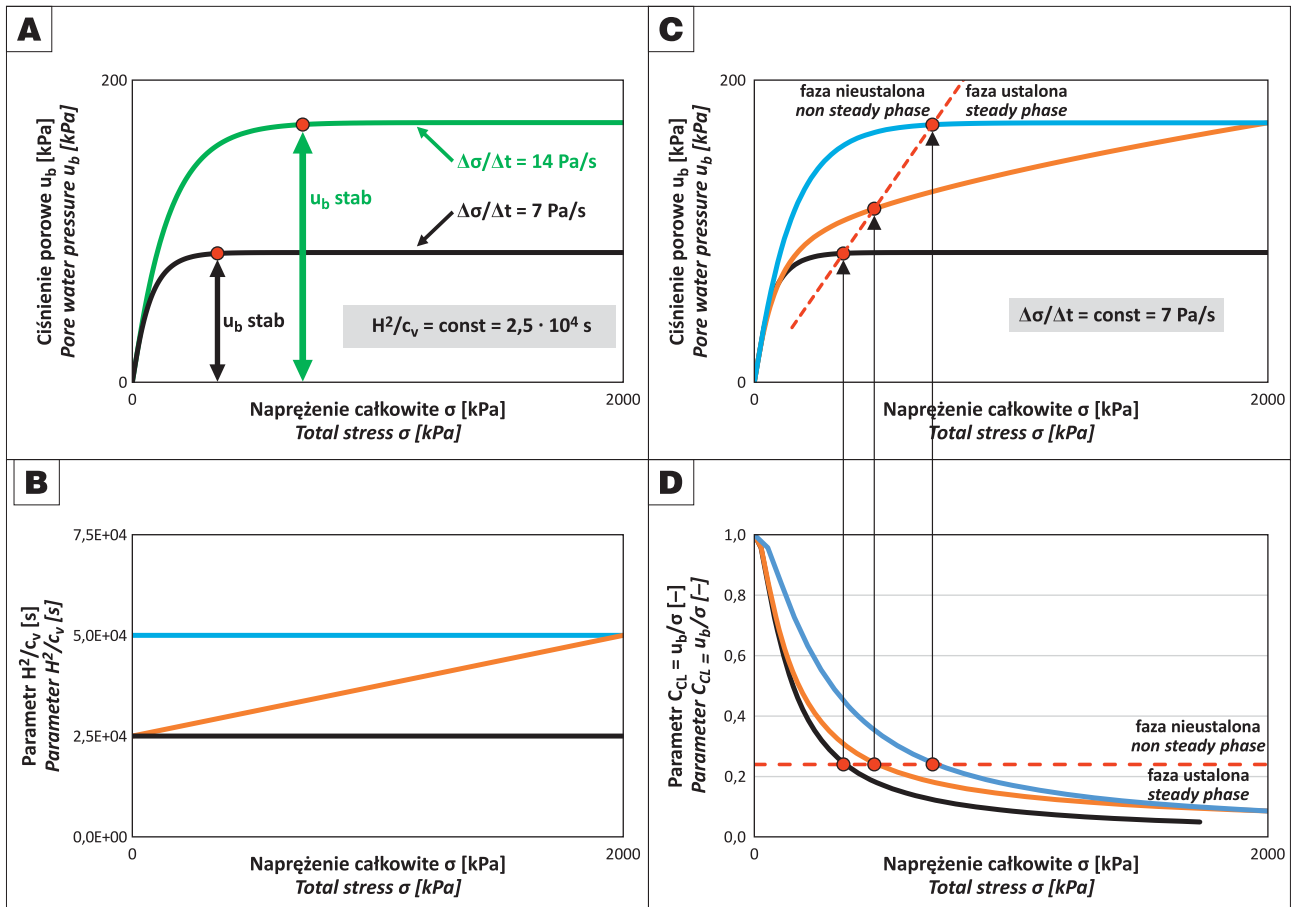
W trakcie badania CRL w funkcji czasu są rejestrowane: wzrastające liniowo pionowe naprężenie całkowite σ_i , zmniejszająca się na skutek tego wysokość próbki gruntu H_i oraz zmiany ciśnienia porowego u_{bi} , mierzonego przy dolnej, nieprzepuszczalnej podstawie konsolidometru. Rozpraszanie ciśnienia porowego odbywa się przez górny, porowaty tłok, przez co jest wymuszany jeden kierunek drenażu wód porowych od spągu do stropu. Realizowane w ten sposób pomiary pozwalają wyznaczyć parametry, których zmienność w przebiegu badania charakteryzuje filtracyjno-konsolidacyjną reakcję gruntu na wzrastające w sposób ciągły obciążenie. Zróżnicowane reakcje, w zależności od cech strukturalnych gruntu oraz zaprogramowanych prędkości obciążania, odzwierciedlają się w charakterystykach zmian modułu ściśliwości M_0 oraz współczynników konsolidacji c_v i przepuszczalności k . W tab. 1 zdefiniowano parametry stosowane w dalszych analizach wyników przeprowadzonych badań.

Tab.1. Parametry definiujące przebieg konsolidacji CL
Table 1. Parameters defining the course of CL consolidation

Parametr <i>Parameter</i>	Wzór <i>Formula</i>
Naprężenie efektywne [kPa] <i>Effective stress [kPa]</i>	$\sigma' = \sigma - \frac{2}{3} u_b$
Moduł ściśliwości [kPa] <i>Modulus of compressibility [kPa]</i>	$M_0 = \frac{\Delta\sigma' \times H_{i-1}}{H_{i-1} - H_i}$
Parametr ciśnienia wody w porach [-] <i>Parameter of pore water pressure [-]</i>	$C_{cl} = \frac{u_b}{\sigma}$
Współczynnik konsolidacji [m ² /s] <i>Coefficient of consolidation [m²/s]</i>	$c_v = \frac{\Delta\sigma \times H^2}{\Delta t \times 2 \times u_b}$
Współczynnik filtracji [m/s] <i>Coefficient of permeability [m/s]</i>	$k = \frac{c_v \times \gamma_w}{M_0}$

Objaśnienia symboli: H – droga drenażu [m], γ_w – ciężar objętościowy wody [kN/m³], u_b – ciśnienie porowe [kPa], σ – naprężenie całkowite [kPa], σ' – naprężenie efektywne [kPa]

Explanations: H – length of drainage path [m], γ_w – unit weight of water [kN/m³], u_b – pore water pressure [kPa], σ – total stress [kPa], σ' – effective stress [kPa]



Ryc. 1. Modelowy przebieg konsolidacji CL z uwzględnieniem: **A** – wpływu prędkości obciążania; **B** – opcjonalnych wartości H^2/c_v ; **C** – wpływu właściwości konsolidacyjnych gruntu; **D** – zmian bezwymiarowego parametru ciśnienia wody w porach $C_{CL} = u_b/\sigma$
Fig. 1. Model course of the CL consolidation, involving: **A** – influence of loading rate; **B** – options of H^2/c_v values; **C** – influence of soil consolidation properties; **D** – changes in the pore water pressure parameter $C_{CL} = u_b/\sigma$

Badania typu CL powodują specyficzną, odrębną w stosunku do badań IL, reakcję gruntu na postępujące wymuszenie (σ). Stąd interpretacja przebiegu uzyskiwanych charakterystyk doświadczalnych wymaga porównania ich z modelowymi rozwiązaniami wyprowadzonymi na podstawie adaptacji teorii Terzagiego (Dobak, 1999).

Ciągły przyrost obciążenia w trakcie badań powoduje różny przebieg zmian ciśnienia porowego w zależności od zastosowanych opcjonalnych stałych prędkości obciążania oraz właściwości filtracyjno-konsolidacyjnych gruntu, scharakteryzowanych stosunkiem wartości H_i^2/c_{vi} który stanowi syntetyczny wskaźnik równoczesnych zmian długości drogi drenażu H_i , modułu ścisłości M_0 oraz współczynnika filtracji k w trakcie badania.

Teoretyczne modele zmian ciśnienia porowego w toku badań CRL obliczono w nawiązaniu do założonych, różnych prędkości obciążania $\Delta\sigma/\Delta t$ (ryc. 1A), a także opcjonalnych wartości stosunku $H_i^2/c_{vi} = const$ lub też rosnącego liniowo w funkcji wzrostu naprężenia (ryc. 1B). Ten drugi przypadek odpowiada sytuacjom, w których zaznacza się ograniczenie przepuszczalności na skutek zmian porowatości ściskanego gruntu, a także wzrostu ciśnienia u_{bi} , co przejściowo może redukować efektywne wymiary przeszerzenia porowej (kontrakcja).

Modelowe charakterystyki zmian ciśnienia porowego, wyrażane wartościami u_{bi} [kPa] oraz parametrem $C_{CL} = u_{bi}/\sigma$, przedstawiono na ryc. 1A, C, D w nawiązaniu do opcjo-

nalnych prędkości obciążania i zmian konduktywności (przepuszczalności) ośrodka gruntowego.

Główne wnioski z analizy rozwiązań modelowych są następujące:

- w przypadku $H_i^2/c_{vi} = const$ – wartość ciśnienia porowego u_{bi} początkowo wzrasta, a następnie stabilizuje się;
- ta modelowa charakterystyka pozwala wyróżnić fazę nieustaloną konsolidacji CL, a następnie ustaloną (Vu Cao Minh, 1977);
- stosowanie większych prędkości wzrostu naprężenia $\Delta\sigma/\Delta t$ skutkuje osiąganiem fazy ustalonej pod wpływem wyższych wartości u_{bi} oraz większych naprężeń σ ;
- w przypadku H_i^2/c_{vi} rosnącego liniowo w funkcji wzrostu naprężenia nie uzyskuje się stabilizacji ciśnienia porowego, lecz jego ciągły, chociaż coraz bardziej łagodny, przyrost.

Z dalszych modelowych analiz, uogólnionych w formie charakterystyk bezwymiarowych, wynika (Dobak, 1999), że w badaniach CRL (*constant rate of loading*) granica między fazą ustaloną a nieustaloną odpowiada wartości parametru $C_{CL} = 0,24$ we wszystkich wymienionych przypadkach. Przyjmowanie tego kryterium jest o tyle istotne, że w fazie nieustalonej, gdy $0,24 < C_{CL} < 1$ i ciśnienia porowe nie stabilizują się, wartości c_{vi} obliczane ze standardowego wzoru (tab. 1) są zawyżone.

WYNIKI BADAŃ

Właściwości fizyczne

Wyniki badań laboratoryjnych wskazują, że zarówno łyły zastoiskowe, jak i gliny lodowcowe pod względem granulometrycznym są klasyfikowane jako grunty bardzo sposte – łyły (I wg PN-88/B-04481; C1 wg PN-EN ISO 14688-1 i PN-EN ISO 14688-2). Ich odrębność makroskopowa, fizyczna i mechaniczna wynika z genezy i warunków sedymentacji. W utworach warwowych z rejonu Plecewic silniej lub słabiej zaznacza się struktura warstwowa z laminami jasnymi i ciemnymi, co jest efektem spokojnej, zastoiskowej sedymentacji w plejstocenijskich zbiornikach wodnych na przedpolu łądolodu (Lindner, 1992). Natomiast próbki ciemnobrązowych, mało wilgotnych glin lodowcowych z Fortu Służew, których stan w warunkach naturalnych jest na pograniczu półzwarłego oraz twardeplastycznego, makroskopowo były jednorodne.

Odmienność genezy badanych gruntów odzwierciedla się też w składzie granulometrycznym i mineralnym. łyły zastoiskowe z rejonu Plecewic zawierają blisko dwukrot-

nie więcej frakcji łyłowej niż gliny lodowcowe z rejonu Fortu Służew. Zdecydowana dominacja frakcji łyłowej w utworach z Plecewic jest zapewne efektem sortującej roli sedymentacji zastoiskowej. Z kolei materiał w glinach, transportowany przez łądolód i później wytapiany, pod względem granulometrycznym jest przestrzennie niewysortowany. W glinach z okolicy Fortu Służew w Warszawie zawartość frakcji pyłowej i piaskowej jest podobna, a udział frakcji łyłowej nieznacznie większy (tab. 2).

Na podstawie oznaczeń składu mineralnego fazy stałej łył zastoiskowych i glin lodowcowych zidentyfikowano w nich ten sam jakościowo zespół minerałów, jednak stwierdzono, że ich udział ilościowy w obu gruntach jest wyraźnie odmienny (tab. 2). We frakcji łyłowej utworów zastoiskowych z Plecewic dominuje illit (41,6%), natomiast w glinach lodowcowych beidelit (17,6%). Udział kaolinitu w łyłach zastoiskowych (7,7%) jest dwukrotnie większy niż w glinach lodowcowych (3,2%). W utworach zastoiskowych dwukrotnie większa jest również zawartość węglanów (11%). Zawartość minerałów nieaktywnych termicznie (kwarc, skalenie, minerały ciężkie) oszacowano na 24–63%. W derywogramie glin lodowcowych

Tab. 2. Parametry fizyczne i skład mineralny łyłu zastoiskowego z rejonu Plecewic oraz gliny lodowcowej z okolic Fortu Służew w Warszawie
Table 2. Physical parameters and mineral composition of ice-dammed lake clays from Plecewice, and glacial till from the area of Fort Służew in Warsaw

Parametry Parameters	Gлина lodowcowa – Warszawa (Fort Służew)* Glacial till – Warsaw (Fort Służew)*		łł zastoiskowy – Plecewice Ice-dammed lake clays – Plecewice	
	Próbki NNS Undisturbed samples	Pasty gruntowe Soil paste	Próbki NNS** Undisturbed samples**	Pasty gruntowe Soil paste
Wilgotność / Moisture content w [%]	15,3–18,9	36,8–39,7	27,7–32,4	65,8–72,6
Granica plastyczności / Plastic limit w _p [%]	15,1–18,0		25,7–28,5	
Granica płynności / Liquid limit w _L [%]	40,3–46,2		70,2–79,6	
Stopień plastyczności / Liquidity index I _L [–]	–0,06–0,11	0,74–0,85	0,01–0,13	0,81–0,95
Gęstość właściwa / Density ρ, [Mg/m ³]	2,66		2,67–2,72	
Gęstość objętościowa / Bulk density ρ [Mg/m ³]	2,10–2,16	1,83–1,86	1,88–1,92	1,60–1,64
Porowatość / Porosity n [–]	0,30–0,33	0,49–0,51	0,44–0,48	0,63–0,66
Wskaźnik porowatości / Void ratio e [–]	0,43–0,50	0,96–1,04	0,78–0,91	1,72–1,92
Stopień wilgotności / Degree of saturation S _r [–]	0,97–1,00	1,00	0,94–1,00	1,00
Frakcja łyłowa / Clay fraction f _i [%]	31–44		72–84	
Frakcja pyłowa / Silt fraction f _n [%]	22–38		15–27	
Frakcja piaskowa / Sand fraction f _p [%]	27–39		0–1	
Skład mineralny [%] / Mineral composition [%]				
Beidelit / Beidelite	17,6		14,9	
Illit / Illite	10,6		41,6	
Kaolinit / Kaolinite	3,2		7,7	
Węglany / Carbonates	5,6		11,0	
Kwarc i inne / Quarz and others	63,0		23,8	

* wg Stajszczaka i in., 2020 / after Stajszczak et al., 2020; ** wg Stajszczaka, 2021 / after Stajszczak, 2021

asymetryczna endoderma z maksimum w temperaturze 573°C wskazuje na znaczną zawartość kwarcu, przekraczającą 40% – czyli w glinach jest go ponad dwukrotnie więcej aniżeli w ilach zastoiskowych.

Skład mineralny badanych gruntów rzutuje na zróżnicowanie ich właściwości fizycznych. Wilgotność naturalna ilów zastoiskowych wynosiła od 28 do 32%, a glin lodowcowych była znacząco mniejsza – od 15 do 19%. Dwukrotnie większą wilgotność naturalną ilów należy wiązać z większym udziałem w nich frakcji ilowej i jej składem mineralnym. Czynniki te determinują dużą hydrofilność ilów i niemal dwukrotnie większe wartości wskaźników granic konsystencji i wskaźnika plastyczności w ilach zastoiskowych w stosunku do glin lodowcowych.

Konsolidacja jest bezpośrednio warunkowana przez porowatość oraz relacje pomiędzy fazami gruntu – stałą oraz ciekłą, a w przypadku niepełnego nasycenia wodą – także gazową.

Na podstawie wyników badań własnych oraz dostępnych danych archiwalnych stwierdzono, że zarówno próbki NNS, jak i pasty gruntowe z ilów zastoiskowych mają większą porowatość (o ok. 1,3–1,5 raza) oraz wyższy wskaźnik porowatości (o ok. 1,3–1,8 raza) niż gliny lodowcowe występujące w podłożu osiedla mieszkaniowego Fort Służew w Warszawie. Znaczny udział przestrzeni porowej w próbkach z rejonu Plecewicz sprawia, że grunty te mają mniejszą gęstość objętościową aniżeli badane próbki glin

lodowcowych. Z kolei wzrost udziału frakcji ilowej powoduje większą gęstość właściwą ilów zastoiskowych z Plecewic aniżeli glin lodowcowych, w których ilościowo dominuje kwarc.

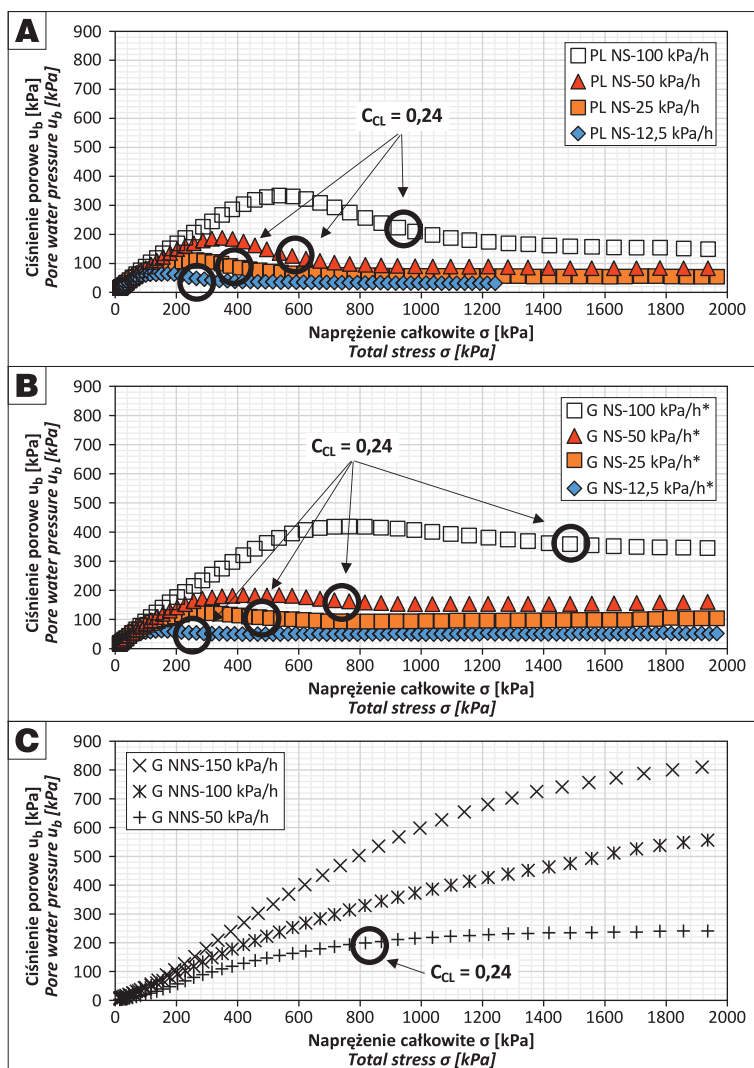
Pasty gruntowe w pełni nasycone wodą, nie posiadające geologicznie ukształtowanych więzi strukturalnych, lecz jedynie inicjalne więzi powstające podczas wstępnej konsolidacji (pod naprężeniem około 20 kPa), mają ponad dwukrotnie większą wilgotność oraz wskaźnik porowatości w stosunku do próbek o naturalnej strukturze. Takie miękkoplastyczne, w pełni nasycone wodą próbki odpowiadały modelowym założeniom teorii konsolidacji filtracyjnej. Stanowiły więc doskonały materiał referencyjny do teoretycznych i doświadczalnych ocen przebiegu konsolidacji na podstawie zmian parametrów ciśnienia wody w porach, a dalej do porównywania modelowego układu dwufazowego z zachowaniem gruntów o naturalnej strukturze.

Przebieg konsolidacji CL

Zmiany ciśnienia porowego w badaniach CL zależą od stosowanych prędkości zwiększania obciążenia zewnętrznego oraz inherentnych cech ośrodka gruntowego. Aspekty te czytelnie ilustruje przebieg przeprowadzonych, wielowariantowych badań.

Rozpatrując zmiany ciśnienia porowego w trakcie badań, zauważono znaczące różnice między reakcją gruntów pozbawionych genetycznie ukształtowanych więzi strukturalnych, czyli past (ryc. 2A, B), a glinami lodowcowymi o nienaruszonej strukturze (ryc. 2C).

Słabe więzi strukturalne na kontaktach cząstek szkieletu mineralnego powodują, że reakcja wody porowej na wzrost obciążenia jest niemal natychmiastowa i pełna. W efekcie początkowa wartość parametru ciśnienia porowego, zgodnie z modelem teoretycznym, wynosi $C_{CL} = 1$ (ryc. 3A), a następnie w trakcie postępującego obciążania gruntu sukcesywnie zmniejsza się. Następnstwo udokumentowanych zmian nie jest jednak w pełni zgodne z modelem teoretycznym, na co wskazują różnice w przebiegu zależności $C_{CL} - \sigma$ oraz $u_b - \sigma$ w stosunku do modelowych rozwiązań. W badaniach past początkowo zaobserwowano oczekiwany modelowo wzrost ciśnienia porowego, aż do wartości maksymalnych u_{bmax} , proporcjonalnych do



Ryc. 2. Ciśnienie porowe w badaniach CRL ilów zastoiskowych z Plecewic (A) oraz glin lodowcowych z Warszawy (B i C): NS – pasta gruntowa; NNS – próbka o naturalnej strukturze; * wg Stajszczaka i in., 2020

Fig. 2. Pore pressure values obtained during CRL tests of ice-dammed lake clays from Plecewicz and glacial tills from Warsaw (B and C): NS – soil paste; NNS – undisturbed sample; *acc. to Stajszczak et al., 2020

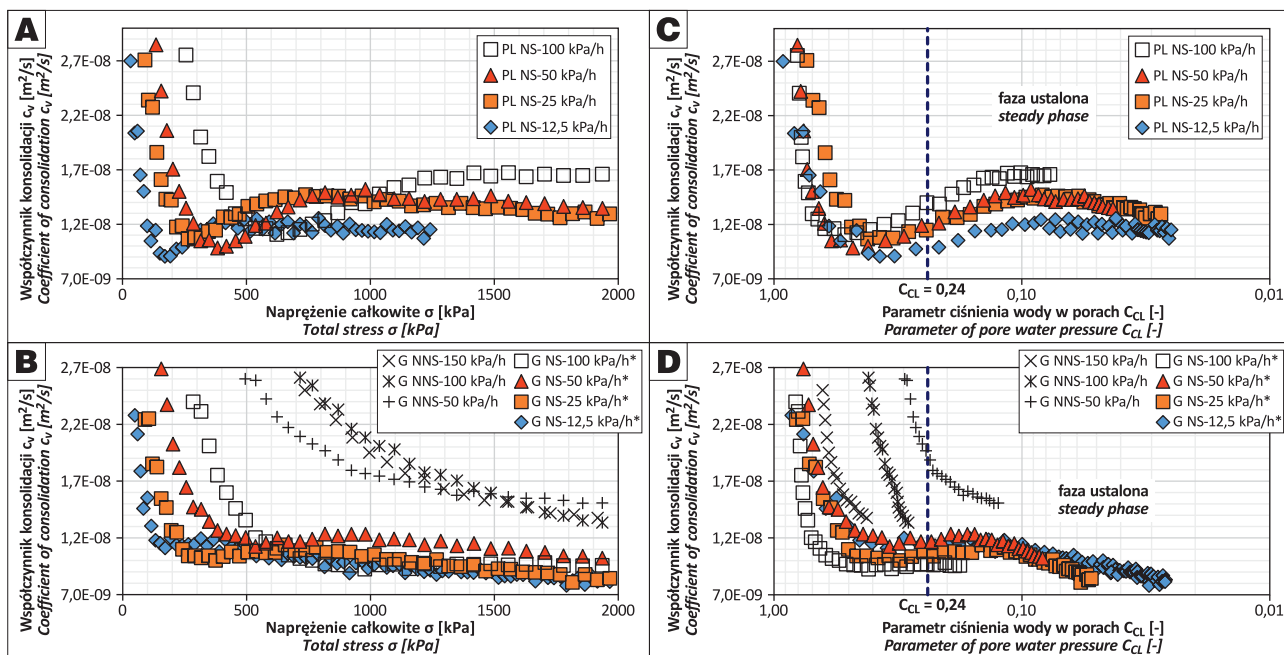
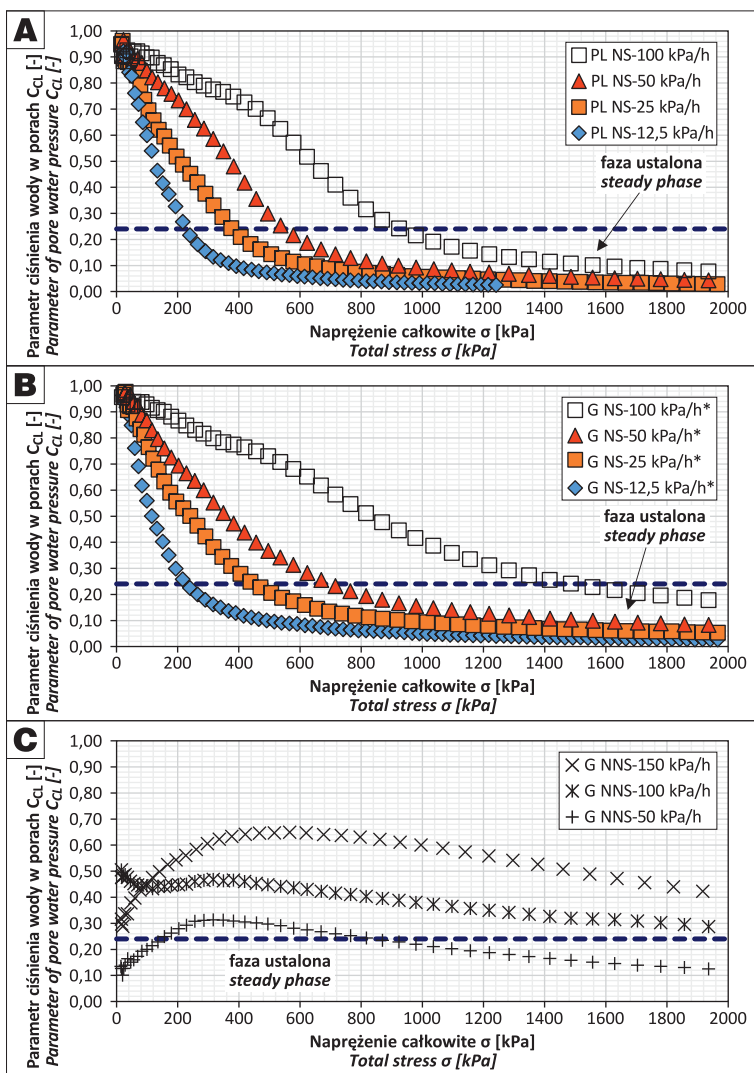


Ryc. 3. Ciśnienie wody w porach w badaniach CRL iłów zastoiskowych z Plecewicz (A) oraz glin lodowcowych z Warszawy (B i C): NS – pasta gruntowa; NNS – próbka o naturalnej strukturze; * wg Stajszczaka i in., 2020

Fig. 3. Water pressure obtained during CRL tests of ice-dammed lake clays from Plecewicz (A) and glacial tills from Warsaw (B and C): NS – soil paste; NNS – undisturbed sample; *acc. to Stajszczak et al., 2020

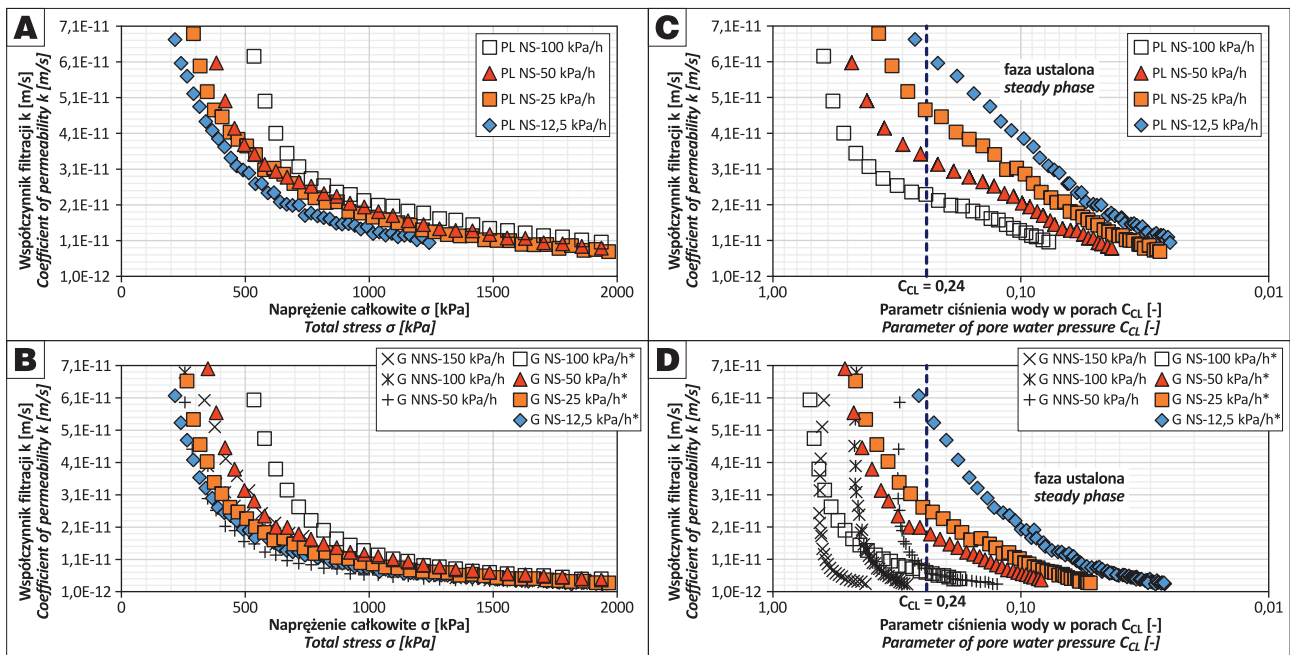
zastosowanej prędkości obciążania. Zaznaczone na wykresach $u_b - \sigma$ punkty odpowiadające granicy między fazą nieustaloną i ustaloną ($C_{CL} = 0,24$) pokazują jednak, że wartości u_{bmax} pojawiają się jeszcze w trakcie fazy nieustalonej. Następnie obserwuje się istotną rozbieżność w stosunku do modelu teoretycznego, polegającą na zmniejszaniu się wartości u_b w stosunku do u_{bmax} i dopiero później pojawiającej się quasi-stabilizacji (ryc. 2A, B). Tego rodzaju efekty mogą wskazywać na oddziaływanie rosnącego ciśnienia porowego na słabo związaną strukturę i lokalne zwiększenie konduktywności gruntu. Wskazuje to na zmiany przepuszczalności.

Warto zwrócić także uwagę, że w przeprowadzonych badaniach uzyskano wyższe wartości ciśnienia porowego w pastach z glin lodowcowych aniżeli z iłów zastoiskowych.



Ryc. 4. Wartości współczynnika konsolidacji w badaniach CRL iłów zastoiskowych z Plecewicz (A i C) oraz glin lodowcowych z Warszawy (B i D): NS – pasta gruntowa; NNS – próbka o naturalnej strukturze; * wg Stajszczaka i in., 2020

Fig. 4. The values of coefficient of consolidation and coefficient of permeability, obtained during CRL tests of ice-dammed lake clays from Plecewicz (A and C) and glacial tills from Warsaw (B and D): NS – soil paste; NNS – undisturbed sample; * acc. to Stajszczak et al., 2020



Ryc. 5. Wartości współczynnika filtracji w badaniach CRL iłów zastoiskowych z Plecewicz (A i C) oraz glin lodowcowych z Warszawy (B i D): NS – pasta gruntowa; NNS – próbka o naturalnej strukturze; * wg Stajszczyka i in., 2020
Fig. 5. The values of coefficient of permeability, obtained during CRL tests of ice-dammed lake clays from Plecewicz (A and C) and glacial tills from Warsaw (B and D): NS – soil paste; NNS – undisturbed sample; * acc. to Stajszczyk et al., 2020

Może to być spowodowane większą początkową gęstością objętościową oraz mniejszą porowatością past z glin i wskazywać na ich lepsze upakowanie strukturalne. Skutkiem tego mogą być większe opory w rozpraszaniu ciśnienia porowego.

Obraz zmian ciśnienia porowego w badaniach CRL próbek glin lodowcowych o nienaruszonej strukturze jest odmienny od wyników badań past sporządzonych z tego gruntu (ryc. 2C). W próbkach NNS obserwuje się mniejszą konduktywność fazy ciekłej i znacząco opóźnioną reakcję na sukcesywnie aplikowany wzrost obciążenia. W efekcie parametr C_{CL} wzrasta wolno od początku badania, osiągając z opóźnieniem C_{CLmax} w przedziale od 0,32 do 0,65, proporcjonalnie do stosowanych prędkości obciążania (ryc. 3C). Następnie obserwuje się na tyle powolne zmniejszanie wartości C_{CL} , że granice fazy nieustalanej i ustalonej uzyskano po osiągnięciu naprężenia σ_i około 800 kPa w badaniu przeprowadzonym z zastosowaniem najmniejszej prędkości obciążania, wynoszącej 50 kPa/h. Stosując prędkości 100 i 150 kPa/h nie uzyskiwano fazy ustalonej aż do końca badania, co wskazuje na zaprogramowanie zbyt szybkiego przyrostu obciążenia ($\Delta\sigma/\Delta t$).

Zmiany ciśnienia porowego pod wpływem rosnącego obciążenia (zarówno wartości C_{CL} , jak i u_b) wskazują nie tylko na znaczący wpływ cech strukturalnych oraz prędkości obciążania na właściwości filtracyjno-konsolidacyjne badanych gruntów, ale także stanowią ważną przesłankę odnośnie miarodajności określania wartości współczynnika konsolidacji c_v oraz pośrednio przepuszczalności k . Zmiany wartości c_v oraz k na tle bezwymiarowego parametru ciśnienia porowego C_{CL} (ryc. 4 i 5) bezpośrednio wskazują na zakres fazy nieustalanej, z której nie należy wyznaczać współczynnika konsolidacji i filtracji wzorami wg tab. 1. Do wyznaczania współczynnika konsolidacji i filtracji w fazie nieustalanej badania CL może być rekomen-

dowane stosowanie korekt zaproponowanych przez Janbu i in. (1980). Alternatywną metodą może być wyznaczanie wartości c_v w nawiązaniu do rozwiązań wyprowadzonych z teoretycznych, bezwymiarowych rozkładów parametru ciśnienia porowego (Dobak, 1999, 2008).

Uzyskane w toku przeprowadzonych badań CRL wartości współczynnika konsolidacji są zmienne. Wykres modelowej zależności $c_v - \sigma$ jest krzywoliniowy i obrazuje bardzo wysokie (niemiarodajne) wartości c_v w początkowej, nieustalanej fazie badania. Później linia wykresu powinna przybierać kształt quasi-prostoliniowy i asymptotycznie zmierzać w kierunku poziomej osi naprężeń całkowitych. Jednak przegląd doświadczalnych oznaczeń c_v wskazuje na wiele anomalii:

□ w badaniach próbek NNS glin zwałowych obserwuje się stosunkowo szybkie zmniejszanie wartości c_v , ale analiza tej zmienności na tle wartości C_{CL} pokazuje, że w badaniach próbek o naturalnej strukturze nie uzyskiwano fazy ustalonej (za wyjątkiem badania CRL o prędkości obciążenia 50 kPa/h). Wartości współczynnika konsolidacji c_v wydają się zbyt wysokie, co wiąże się z trójfazowością twaroplastycznego gruntu i oporami naturalnej, prekonsolidowanej struktury w przewodzeniu zmian ciśnienia porowego podczas obciążania gruntu;

□ w toku badania past sporządzonych z glin zwałowych oraz iłów zastoiskowych na ustalonym odcinku wykresu uzyskano znacząco niższe wartości współczynnika konsolidacji c_v i zaobserwowano ich tendencję do dalszego zmniejszania się. Udokumentowane zmiany współczynnika konsolidacji w fazie ustalonej konsolidacji CL są warunkowane dość znaczącą redukcją porowatości, postępującą wraz ze wzrostem obciążenia gruntu. Warto zaznaczyć, że w nieustalanej fazie badań past uzyskiwano też ekstremalnie małe wartości c_v , będące odbiciem osiągnięcia u_{bmax} . Później jednak następowało częściowe rozpraszanie

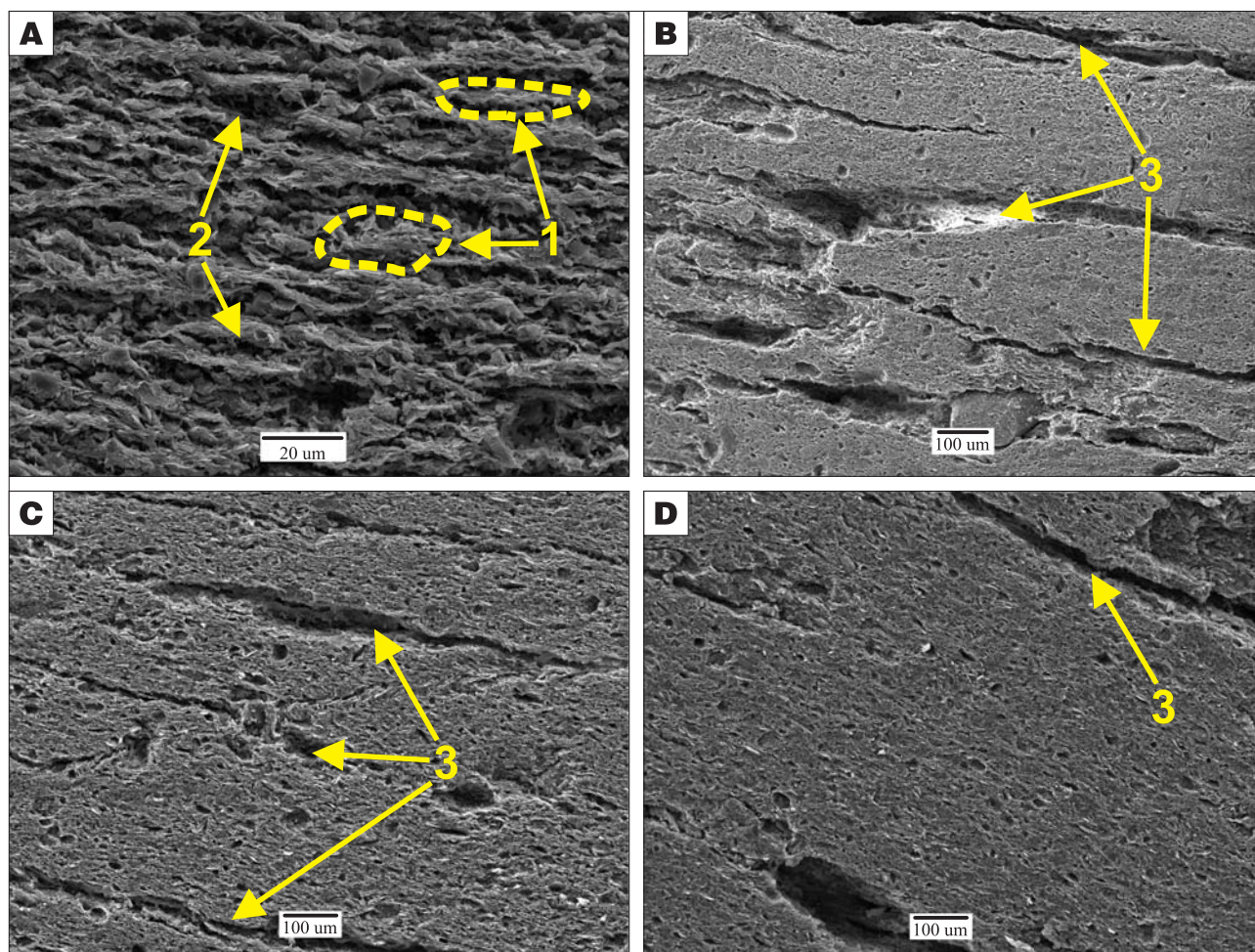
ciśnienia porowego i wynikający z tego rozproszenia lokalny wzrost c_v , który dopiero przy małych wartościach ciśnienia wody w porach gruntu (C_{CL}) wpisuje się w oczekiwaną tendencję spadkową wartości współczynnika konsolidacji c_v , co jest konsekwencją sukcesywnego zmniejszania porowatości i konduktywności materiału gruntowego.

Stwierdzone anomalie przebiegu zmian współczynnika konsolidacji c_v są warunkowane zmianami ciśnień porowych i cechami strukturalnymi gruntu. Bezpośrednią zależność zdolności filtracyjnych ośrodka gruntowego od współczynnika konsolidacji odzwierciedlają charakterystyki zmian wartości współczynnika filtracji k . Na wartości liczbowe tego parametru, wyznaczone pośrednią metodą obliczeniową (tab. 1), oprócz zmian wartości współczynnika konsolidacji c_v (najczęściej zmniejszania się ich), wpływa także sukcesywny wzrost wartości modułu ścisłości M_θ . Skutkuje to kompensacją anomalii wynikających z niemodelowych zmian wartości ciśnienia porowego, spowodowanych efektami strukturalnymi. Wartość współczynnika filtracji zmniejsza się wraz ze wzrostem naprężenia całkowitego, co szczególnie wyraźnie widać na tle zmian parametru ciśnienia wody w porach C_{CL} . Najmniejsze wartości współczynnika filtracji k towarzyszą

największym prędkościom obciążania. Znaczą to, że chwilowe efekty ograniczenia przepuszczalności gruntu mogą być związane z większą nadwyżką ciśnienia porowego, powodującą tzw. dławienie (kontrakcję) przepływu w przestrzeni porowej.

Badania mikrostruktury

Pasty gruntowe przygotowane z ilów zastoiskowych po zakończeniu wstępnej konsolidacji wykazują mikrostrukturę laminarną (Sergeyev i in., 1980; Sokolov, 1990). Obrazy uzyskane za pomocą mikroskopu skaningowego potwierdzają znaczny udział minerałów ilastych w składzie granulometrycznym takich ilów. Po zakończeniu wstępnej konsolidacji minerały ilaste tworzą podłużne agregaty o orientacji poziomej. Dominującymi typami kontaktów pomiędzy poszczególnymi cząstkami ilastymi są kontakty typu płaszczyzna–płaszczyzna (E–E – *edge-edge*). Pory przyjmują kształt anizometryczny, są równomiernie rozłożone pomiędzy mikroagregatami minerałów ilastych i wykazują wydłużenie zgodne z obserwowanym warstwowaniem elementów składowych szkieletu gruntowego, co skutkuje znacząco lepszą konduktywnością poziomą aniżeli pionową (ryc. 6A).



Ryc. 6. Mikrostruktura pasty gruntowej ilu zastoiskowego z rejonu Plecewice: **A** – próbka przed badaniem CRL; **B** – próbka po badaniu CRL 12,5 kPa/h; **C** – próbka po badaniu CRL 50 kPa/h; **D** – próbka po badaniu CRL 100 kPa/h; **1** – mikroagregaty minerałów ilastych, **2** – pory, **3** – drogi filtracji

Fig. 6. Microstructure of soil paste prepared from ice-dammed lake clays from Plecewice: **A** – soil paste before CRL test; **B** – soil paste after CRL test 12.5 kPa/h; **C** – soil paste after CRL test 50 kPa/h; **D** – soil paste after CRL test 100 kPa/h; **1** – microaggregates of clay minerals, **2** – pores, **3** – filtration paths

Obrazy mikrostruktury past ilów zastoiskowych uzyskane po zakończeniu badań CRL dokumentują obecność licznych szczelin, które powstały w matrycy ilastej. Szczeliny te, najczęściej równoległe do powierzchni konsolidowanej próbki gruntu spoistego, komunikują się i przyjmują zróżnicowane kształty (ryc. 6B, D). Uwidocznione formy szczelinowe należy wiązać z uprzywilejowanymi drogami filtracji, którymi woda mogła być odprowadzana z przestrzeni porowej gruntu spoistego w trakcie badania CRL. Może na to wskazywać zmniejszenie wartości u_b po osiągnięciu u_{bmax} (ryc. 2A). W mikrostrukturze próbek obciążonych pomiędzy minerałami ilastymi dominują kontakty typu płaszczyzna–płaszczyzna (E–E), a ułożenie poszczególnych cząstek jest równoległe do przebiegu form szczelinowych. Nie ma wyraźnych granic pomiędzy poszczególnymi mikroagregatami. Pory międzyagregatowe występują rzadko, a ich kształty są wydłużone zgodnie z wymuszoną orientacją poszczególnych cząstek (ryc. 6B, D). Mikrostruktura past gruntowych sporządzonych z ilów zastoiskowych po obciążeniu wykazuje cechy charakterystyczne dla mikrostruktury matrycowej.

Wyniki ilościowej analizy obrazów mikrostruktury gruntów, przeprowadzonej w programie *STIMAN*, wykazały, że przed rozpoczęciem badań CRL porowatość n oraz średnia średnica porów D_{av} badanych próbek była o około 1 do 3 razy większa od wartości, które oznaczono po przeprowadzeniu badań CRL. W następstwie zadanego obciążenia zmniejszeniu uległa zarówno średnia powierzchnia porów S_{av} (od 3 do 10 razy), jak i średni obwód porów P_{av} (od 2 do 3 razy; tab. 3).

Parametrem geometrycznym umożliwiającym ocenę zorientowania elementów szkieletu gruntowego jest wskaźnik anizotropii mikrostruktury K_α . Parametr ten w badaniach past gruntowych sporządzonych z ilów zastoiskowych przyjmuje duże wartości, co wskazuje na dobre zoriento-

wanie mikrostruktury badanych próbek. Typ zmian wartości K_α po konsolidacji wskazuje, że obciążenie może powodować różnokierunkową reorientację elementów mikrostruktury ilów zastoiskowych (tab. 3).

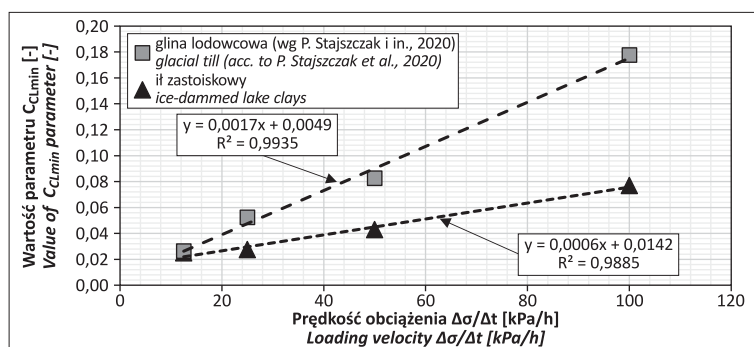
DYSKUSJA

Wyniki przeprowadzonych badań wskazują na rozbieżności w przebiegu konsolidacji gruntów o różnym składzie, genezie i strukturze z modelowymi założeniami procesu. Odrębność charakterystyk doświadczalnych wynika z nie uwzględniania aspektów strukturalnych w przyjmowanych założeniach teoretycznych. Dotyczy to zarówno próbek prekonsolidowanej gliny lodowcowej w stanie naturalnym, jak i zróżnicowania składu granulometrycznego oraz stanu badanych past gruntowych, mających *ex definitione* odpowiadać założeniom przyjmowanym w teorii konsolidacji. Wyjaśnienia efektów niezgodnych z modelem, obserwowanych w przebiegu badań CL, można szukać nie tylko w zróżnicowaniu cech strukturalnych badanych gruntów, ale także w przyjmowanych prędkościach obciążania, wpływających na formę wymuszenia procesu konsolidacji w badaniach typu CL.

W obciążanych pastach gruntowych na początkowym etapie wzrastania ciśnienia porowego, wydawałoby się zgodnym z modelem, zaobserwowano istotną anomalię, wyrażoną osiągnięciem wartości u_{bmax} , która następnie ulega pewnej redukcji, a stabilizacja ciśnienia porowego następuje pod wpływem mniejszego obciążenia aniżeli oczekiwane. Efekt ten można wyjaśniać brakiem wystarczająco silnych wiązań strukturalnych w pastach gruntowych. Rosnące ciśnienie porowe dąży do jak najszybszego rozproszenia. Słabe wiązki strukturalne w pastach sprzyjają w takich warunkach przebudowie układu strukturalnego fazy stałej poprzez wytworzenie lokalnych stref rozluźnień.

Tab. 3. Wyniki ilościowej analizy mikrostruktury pasty gruntowej sporządzonej z ilu zastoiskowego z rejonu Plecewice
Table 3. Results of quantitative microstructural analysis of soil paste prepared from ice-dammed lake clays from Plecewice

Parametr Parameter	Pasta gruntowa sporządzona z ilów zastoiskowych Soil paste prepared from ice dammed lake clays				
	R	PL12,5 kPa/h	PL25 kPa/h	PL50 kPa/h	PL100 kPa/h
Prędkość obciążania [kPa/h] Loading velocity [kPa/h]	przed obciążeniem before loading	12,5	25	50	100
Porowatość obliczona w programie <i>STIMAN</i> [%] Porosity calculated in <i>STIMAN</i> [%]	31,2	10,6	9,6	15,7	12,1
Porowatość obliczona w trakcie badań laboratoryjnych n [%] Porosity calculated during laboratory tests n [%]	63,3–65,8	–	45,8	45,9	46,4
Średnia średnica porów D_{av} [um] Average pore diameter D_{av} [um]	1,67	0,66	0,89	1,04	0,95
Całkowita powierzchnia porów $S_i \times 10^3$ [um ²] Total pore area $S_i \times 10^3$ [um ²]	721	160	146	231	181
Średnia powierzchnia porów S_{av} [um ²] Average pore area S_{av} [um ²]	11,6	1,1	1,8	3,2	2,4
Całkowity obwód porów $P_i \times 10^3$ [um] Total pore perimeter $P_i \times 10^3$ [um]	792	607	470	507	484
Średni obwód porów $P_{av} \times 10^3$ [um] Average pore perimeter $P_{av} \times 10^3$ [um]	13	4	6	7	6
Średni współczynnik formy porów K_{fav} [–] Average form index of pores K_{fav} [–]	0,43	0,43	0,42	0,33	0,38
Wskaźnik anizotropii mikrostruktury K_α [%] Microstructure anisotropy index K_α [%]	60	52	57	73	62



Ryc. 7. Zależność pomiędzy minimalnym ciśnieniem wody w porach C_{CLmin} a prędkością obciążenia $\Delta\sigma/\Delta t$ otrzymaną podczas badań CRL. Objasnienia skrótów: PL – il zastoiskowy z rejonu Plecewice, G – glina lodowcowa z rejonu Warszawy, NS – pasta gruntowa

Fig. 7. Relationship between the minimum value of water pressure parameter C_{CLmin} and loading velocity $\Delta\sigma/\Delta t$, obtained during CRL tests. Explanations: PL – ice-dammed lake clays from Plecewice, G – glacial till from Warsaw, NS – soil paste

Porównanie obrazów mikrostrukturalnych próbek przed i po przeprowadzeniu badań CRL ujawnia powstawanie uprzywilejowanych dróg filtracji w postaci szczelin występujących w matriksie ilastym. Potwierdzają to wyniki analiz ilościowych mikrostruktury obciążonych past gruntowych próbek ilów zastoiskowych, które przeprowadzono w programie *STIMAN*. Wrz ze wzrostem prędkości obciążania w obrazach SEM próbek poddanych badaniom CRL rejestruje się wzrost wartości parametrów opisujących przestrzeń porową gruntu (tab. 3), tj.: średniej średnicy porów (D_{av}), średniego obwodu porów (P_{av}) oraz średniej powierzchni porów (S_{av}). Utrudnienia w zmniejszaniu drożności poszczególnych porów w ściskanym gruncie, spowodowane mobilizacją wysokich wartości ciśnienia porowego, oraz słabe więzi pasty z ilów zastoiskowych (brak cementacji) sprzyjały przebudowie struktury pasty i powstawaniu uprzywilejowanych dróg filtracji. Efekty te nie były obserwowane w mikrostrukturach past gruntowych sporządzonych z glin lodowcowych zlodowacenia odry (Stajszczyk i in., 2020).

Zróznicowanie warunków drenażu zależy m.in od składu granulometrycznego gruntu. Przykładowo w badaniach past sporządzonych z glin lodowcowych (Stajszczyk i in., 2020) słabiej zaznaczało się zmniejszanie ciśnienia porowego (u_b) po osiągnięciu wartości maksymalnej (u_{bmax}) aniżeli w utworach zastoiskowych z Plecewice. Może to wynikać z większej zawartości frakcji pyłowej oraz piaskowej w glinach lodowcowych aniżeli w ilach zastoiskowych. Ziarna tych frakcji lepiej stabilizują strukturę pasty gruntowej (ryc. 2A, B), ograniczając tym samym zakres jej przebudowy na skutek dużego ciśnienia porowego (Stajszczyk, 2018; Stajszczyk i in., 2020).

Warto podkreślić, że reakcja past gruntowych w pełni nasyconych wodą spełnia teoretyczne założenia procesu konsolidacji, wyrażane zmieniającym się udziałem fazy ciekłej i szkieletu gruntowego w przenoszeniu obciążeń. W chwili rozpoczynania badania wyraża się to początkową wartością parametru $C_{CL} = 1$. Natomiast dalsze zmniejszanie wartości tego parametru nie zawsze daje modelowo oczekiwany efekt. Szybki wzrost obciążenia może powodować odchylenia wykresu C_{CL} od kształtu modelowego,

co wiąże się z opóźnionym rozpraszaniem ciśnienia porowego. Wynikać to może z powstania w przestrzeni porowej przejściowych warunków do dławienia przepływu (Nash i in., 1992; Dobak, 1999). Sytuacje takie mogą stanowić jedną z przesłanek do wnioskowania o możliwej niemiarodajności wyników w takiej części eksperymentu.

Istotnym i ciekawym zagadnieniem są warunki, w jakich jest osiągane maksymalne ciśnienie porowe (u_{bmax}) i rozpoczyna się proces tworzenia alternatywnych dróg drenażu. Wyniki badania wskazują, że większe wartości u_{bmax} występują po zastosowaniu większych prędkości $\Delta\sigma/\Delta t$ oraz ciśnienia σ , 150–550 kPa. Obserwacja ta wskazuje, że lokalne pokonywanie więzi strukturalnych jest warunkowane także wielkością zmian naprężenia w funkcji czasu (prędkość badania). Stan naprężenia współkształtuje więc możliwość przełamania słabych więzi strukturalnych. Zatem w warunkach szybszych przyrostów naprężenia chwilowo jest utrzymywana pierwotna izolacyjność ośrodka gruntowego, której podtrzymywanie w danym stanie naprężenia ulega jednak wyczerpaniu. Następująca w efekcie degradacja więzi strukturalnych prowadzi do lepszej wodoprzewodności ośrodka poprzez tworzenie w nim gęstszych i szerszych dróg dodatkowego drenażu.

Inny typ rozbieżności z modelem teoretycznym zaobserwowano w toku badań próbek o nienaruszonej strukturze oraz niecałkowitym, naturalnym nasyceniu wodą przestrzeni porowej. Wynika on z opóźnienia początkowej mobilizacji ciśnienia porowego w mniej konduktywnej, silnie powiązanej strukturze. W efekcie wartości C_{CLmax} są mniejsze od 1 i bywają osiągane niekiedy z dość znaczącym opóźnieniem. O pozyskiwaniu miarodajnych parametrów konsolidacji quasi-dwufazowej można wnioskować dopiero wtedy, gdy C_{CL} wpisuje się w ścieżkę malejących wartości. Zatem także w gruntach o naturalnej strukturze i niepełnym nasyceniu analiza zależności $u_b - \sigma$ oraz $C_{CL} - \sigma$ pozostaje ważnym narzędziem do określania obszaru miarodajności uzyskiwanych wyników.

Obserwowane rozbieżności danych doświadczalnych w stosunku do założeń modelowych są związane głównie z występującą na początku badań CRL fazą nieustaloną konsolidacji CL. Potwierdzają to wykresy zmian parametrów wynikowych, jakimi są współczynniki: konsolidacji c_v i przepuszczalności k . Przebieg ich zmian w funkcji σ_b a także C_{CL} wykazują oczekiwane quasi-liniowe, lekko malejące trendy dopiero w fazie ustalonej, gdy $C_{CL} < 0,24$.

Wyniki badań umożliwiły także ocenę wpływu programowanej prędkości obciążania na reakcję gruntów i uzyskiwanie miarodajnych wyników. W badaniach gruntów zaliczanych do ilów (o zawartości frakcji ilowej $> 30\%$) stosowanie prędkości większych od 25 kPa/h znacząco opóźnia moment osiągnięcia fazy ustalonej konsolidacji CL. Efekty związane z tworzeniem się uprzywilejowanych dróg drenażu powodują dodatkowe zaburzenia i odcinkową niemiarodajność charakterystyk parametrów konsolidacji i przepuszczalności. Krytyczna dalsza analiza opisanych zależności jest więc niezbędnym elementem interpretacji wyników badań oraz identyfikacji procesów zachodzących w sukcesywnie obciążanym gruncie.

WNIOSKI

1) Zmiany ciśnienia porowego występujące w trakcie badań CRL są istotnym i kluczowym narzędziem identyfikowania przebudowy struktury gruntu. Przeprowadzone interpretacje ilustrują odrębność procesów zachodzących w początkowo trójfazowym gruncie o naturalnej strukturze oraz dwufazowym, miękkoelastycznym materiale pozbawionym naturalnych, geologicznie kształtowanych, więzi strukturalnych.

2) Wpływ zmian strukturalnych w obciążanym gruncie, obserwowany dzięki anomalii doświadczalnych charakterystyk ciśnienia porowego, znajduje potwierdzenie w interpretowanych jakościowo oraz ilościowo obrazach mikrostrukturalnych.

3) Zróżnicowanie wyników pomiarów ciśnienia porowego i odkształceń osiowych, rejestrowane w toku badań konsolidometrycznych, jest warunkowane składem granulometrycznym, genezą i stanem badanego materiału gruntowego.

4) Charakterystyczną oznaką zmian strukturalnych w materiale pozbawionym naturalnych więzi szkieletu gruntowego jest zwiększenie tempa rozpraszania ciśnienia porowego, wyrażone zmniejszeniem wartości u_b po osiągnięciu u_{bmax} . Występowanie tych efektów, chociaż warunkowane zmianami struktury w trakcie trwania konsolidacji CL, zależy od przyjmowanej prędkości obciążenia.

5) Wystąpienie zwiększonej dyssypacji ciśnienia porowego w trakcie trwania badania CRL bezpośrednio wpływa na uzyskiwane wartości parametrów opisujących zaawansowanie konsolidacji CL oraz parametrów definiujących filtracyjno-konsolidacyjne właściwości ośrodka gruntowego. W następstwie wytworzenia uprzywilejowanych dróg filtracji wartości współczynnika filtracji oraz współczynnika konsolidacji past gruntowych sporządzonych z ilów zastoiskowych były ok. 1,1–2,3 razy większe niż udokumentowane w trakcie prowadzonych badań past gruntowych glin lodowcowych zlodowacenia odry w Warszawie.

6) Optymalny dobór prędkości obciążania gruntu umożliwia ograniczenie nieustalonej fazy badania oraz uzyskanie charakterystyk parametrów konsolidacyjnych odpowiadających szerszemu zakresowi badania w fazie ustalonej.

7) Istotną przesłanką prowadzenia badań z zastosowaniem mniejszych prędkości obciążania jest też unikanie przejściowego dławienia przepływu wód porowych, które może powstawać na skutek zwiększonego ciśnienia porowego i zmniejszać wyznaczaną przepuszczalność gruntu.

8) Na podstawie wyników opisanych badań laboratoryjne można rekomendować metodę CRL jako wiarygodne narzędzie do oceny parametrów filtracyjno-konsolidacyjnych ośrodka gruntowego na potrzeby dokumentowania warunków geologiczno-inżynierskich. Istotną zaletą badań konsolidometrycznych jest monitoring zmian ciśnienia porowego w trakcie badań. Pozwala to na określenie charakteru i miarodajności czynnika filtracyjnego jako kluczowego w praktycznych aplikacjach teorii konsolidacji.

LITERATURA

- ASTM D 4186-89 Standard test method for one dimensional consolidation properties of soils using controlled strain loading.
- DOBAK P. 1999 – Rola czynnika filtracyjnego w badaniach jednoosiowej konsolidacji gruntów. Wyd. IGSMiE PAN Kraków.
- DOBAK P. 2008 – Evaluation of consolidation parameters in CL tests: theoretical and practical aspects. *Geol. Quart.*, 52 (4): 397–410.
- DOBAK P., SZCZEPAŃSKI T., KOWALCZYK S. 2015 – Load velocity influence on changes of soil consolidation and permeability parameters in CL-type tests. *Geol. Quart.*, 59 (2): 382–390.
- DUNCAN J.M. 1993 – Limitations of Conventional Analysis of Consolidation Settlement. *J. Geotech. Engineering*, 119 (9): 1333–1359.
- GRABOWSKA-OLSZEWSKA B. 1998 – Geologia stosowana. Właściwości gruntów nienasyconych. PWN, Warszawa.
- HASIG J., WILANOWSKI S. 2008 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1:50 000, ark. Kampinos (521). Państw. Inst. Geol.
- HEAD K.H. 1986 – Manual of Soil Laboratory Testing. Pentech Press, London.
- JANBU N., TOKHEIM O., SENNESET K. 1980 – Consolidation tests with continuous loading. *Norwegian Geotech. Inst. Publ.* 9.
- KACZYŃSKI R. 2017 – Warunki geologiczno-inżynierskie na obszarze Polski, wyd. 1. Państw. Inst. Geol. - PIB.
- KOŚCÍÓWKO H., WYRWICKI R. 1996 – Metodyka badań kopaliny ilastych. Państw. Inst. Geol.
- KOWALCZYK S. 2007 – Zmiany właściwości filtracyjnych w procesie konsolidacji zielonych ilów beidelitowych z Rowu Kleszczowa. Pr. doktorska. Arch. Wydz. Geologii UW.
- LINDNER L. 1992 – Czwartorzęd. Wyd. PAE, Warszawa.
- NASH D.F.T., SILLS G.C., DAVISON L.R. 1992 – One dimensional consolidation testing of soft clay from Bothkennar. *Geotechnique*, 42 (2): 241–256.
- PN-88/B-04481 – Grunty budowlane. Badania laboratoryjne.
- PN_EN ISO 14688-1 – Rozpoznanie i badania geotechniczne. Oznaczenie i klasyfikowanie gruntów. Część 1: Oznaczenie i opis.
- PN_EN ISO 14688-2 – Rozpoznanie i badania geotechniczne. Oznaczenie i klasyfikowanie gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania.
- PN-EN ISO 17892-5 – Rozpoznanie i badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Część 5: Badanie edometryczne gruntów.
- ROWE P.W., BARDEN L. 1966 – A new consolidation cell. *Geotechnique*, 16 (2): 162–170.
- SARNACKA Z. 1979 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1:50 000, ark. Warszawa Wschód (524). Wyd. Geol.
- SERGEYEV J.M., GRABOWSKA-OLSZEWSKA B., OSIPOV V.I., SOKOLOV V.N., RAU E.I. 1980 – The classification of microstructures of clay soils. *J. Microscopy*, 120: 237–260.
- SOKOLOV V.N. 1990 – Engineering-geological classification of clay microstructures. *Proc. 6th, Inter. IAEG Congress*, 1: 753–760.
- STAJSZCZAK P. 2018 – Filtracyjno-konsolidacyjne właściwości ilów mio-plioceńskich z rejonu Bud Mszczonowskich w warunkach stale wzrastającego obciążenia. *Prz. Geol.*, 66: 558–568.
- STAJSZCZAK P. 2019 – Wpływ zanieczyszczenia paliwami ropopochodnymi na zmiany parametrów filtracyjno-konsolidacyjnych i strukturalnych w gruntach spoistych. Pr. doktorska. Wydz. Geol. UW.
- STAJSZCZAK P. 2021 – Zmiany właściwości filtracyjnych mieszanek gruntowej il–piasek na skutek zanieczyszczenia produktami ropopochodnymi w aspekcie mineralnych barier izolacyjnych. *Prz. Geol.*, 69 (1): 33–42.
- STAJSZCZAK P., DOBAK P., GENDEK K. 2020 – Zmiany właściwości konsolidacyjnych, filtracyjnych i mikrostrukturalnych glin lodowcowych w przebiegu badań konsolidacji z ciągłym wzrostem obciążenia. *Prz. Geol.*, 68 (11): 843–852.
- TRZCIŃSKI J. 1998 – Mikrostruktury a właściwości geologiczno-inżynierskie glin lodowcowych. Pr. doktorska. Wydz. Geol. UW.
- VU CAO MINH 1977 – Nowa metoda badań konsolidacji gruntów. *Arch. Hydrotech.*, 24 (2): 253–265.
- WISSA A.E.Z., CHRISTIAN J.T., DAVIS E.H., HEIBERG S. 1971 – Consolidation at constant rate of strain. *Proc. ASCE*, 197, SM2: 1393–1413.
- WOŹNIAK H. 2001 – Zastosowanie konsolidometru hydraulicznego Rowe'a do badań odkształceń objętościowych gruntów nasyconych w wyniku zawodnienia. *Geologia*, 27, z. 2–4.
- ZAWRZYKRAJ P., RYDELEK P., BĄKOWSKA A. 2017 – Geo-engineering properties of Eemian peats from Radzymin (central Poland) in the light of static cone penetration and dilatometer tests. *Engineering Geol.*, 226: 290–300.

Praca wpłynęła do redakcji 31.05.2021 r.
Akceptowano do druku 12.08.2021 r.