



Filtracyjno-konsolidacyjne właściwości ilów mio-pleceńskich z rejonu Bud Mszczonowskich w warunkach stale wzrastającego obciążenia

Piotr Stajszczak¹



Consolidation and filtration properties of Mio-Pliocene clays from the Budy Mszczonowskie region obtained during consolidation tests with constant rate of loading. *Prz. Geol.*, 66: 558–568; doi: 10.7306/2018.6

Abstract. The article presents the results of CRL tests obtained for Mio-Pliocene clays from the area of Budy Mszczonowskie. For the evaluation of consolidation and filtration properties, both undistributed samples and soil pastes were used. It has been stated that factors showing an influence on the consolidation parameters of the studied clays during CRL tests are: rate of loading and soil structure. Values of filtration and consolidation parameters obtained during CRL tests for Mio-Pliocene clays from the Budy Mszczonowskie region are characteristic of those obtained by other authors for Mio-Pliocene clays from the area of Poland.

Keywords: Mio-Pliocene clays, consolidation CL, permeability, CRL tests

Konsolidacja gruntów spoistych w geologii-inżynierskiej jest rozumiana jako proces, w trakcie którego objętość masywu gruntowego zmniejsza się w czasie pod wpływem zaistniałych obciążeń. W trakcie konsolidacji zachodzi zmniejszenie objętości porów z jednoczesnym odprowadzaniem wody występującej w przestrzeni porowej gruntu (Kaczyński, 2017). Osiadaniem w czasie, związanym z rozpraszaniem ciśnień porowych oraz ich związkiem z dystrybucją naprężeń efektywnych w podłożu gruntowym, zajmuje się teoria konsolidacji. Została ona sformułowana w XX w. przez austriackiego inżyniera Karla Terzaghiego (Glazer, 1985; Wilun, 1987).

Charakterystykę procesu konsolidacji gruntów spoistych w warunkach laboratoryjnych uzyskuje się podczas badań edometrycznych, interpretując otrzymane dane m.in. metodami graficznymi Taylora lub Cassagrande'a (Pająk, Dobak, 2012). W bardziej zaawansowanych analizach jest jednak konieczne określenie rodzaju dystrybucji ciśnienia porowego w trakcie procesu konsolidacji, co niestety jest niemożliwe podczas wykonywania badań laboratoryjnych w standardowych edometrach. Z tego też względu w ostatnim czasie coraz szerzej do praktyki laboratoryjnej jest wprowadzany konsolidometr Bardena-Rowe'a. Postępujący rozwój aparatury badawczej, oprócz tradycyjnego sposobu zadawania obciążenia (*incremental loading* – IL), umożliwia także wykonywanie badań konsolidometrycznych z ciągłym przyrostem obciążenia (*continous loading* – CL) (Head, 1986). Badania konsolidacji CL mogą być przeprowadzone w warunkach stałego przyrostu odkształcenia (badania CRS – *Constant Rate of Strain*) lub stałego przyrostu obciążenia (CRL – *Constant Rate of Loading*). Stanowią one narzędzie przyszłościowe zarówno w pracach teoretycznych, jak i doskonaleniu metod prognozowania odkształceń ośrodka gruntowego (Lowe i in., 1969; Smith, Wahls, 1969; Aboshi i in., 1970; Wisia i in., 1971; Dobak, 1999, 2008; Kowalczyk, 2007; Soumaya, Kempfert, 2010; Majer, Białobrzeski, 2015). Niewątpliwą zaletą badań tego typu jest krótki czas procedury laboratoryjnej, określenie właściwości odkształceniowych bada-

nych gruntów w szerokim zakresie naprężeń, a przede wszystkim ciągły pomiar ciśnienia porowego w trakcie stale wzrastającego obciążenia.

Poprawna ocena właściwości filtracyjnych oraz konsolidacyjnych gruntów spoistych stanowi bardzo często istotny element rozważań naukowych i praktycznych. Grunty spoiste, ze względu na niską przepuszczalność, w praktyce inżynierskiej często stanowią bariery izolacyjne dla wszelkiego rodzaju składowisk odpadów pochodzenia antropogenicznego (Łuczak-Wilamowska, 1997, 2002a, b; Łuczak-Wilamowska, Dobak, 2002; Izdebska-Mucha, Korzeniowska-Rejmer, 2009; Dragowski, Łuczak-Wilamowska, 2005; Wysokiński, 2007). Obecnie projektowane uszczelnienia składowisk odpadów formowane z gruntów spoistych muszą spełniać odpowiednie kryteria, które w sposób szczegółowy reguluje Rozporządzenie Ministra Środowiska z dn. 30 kwietnia 2013 r. w sprawie składowisk odpadów (Rozporządzenie, 2013). Według zapisów w nim zawartych, minimalna miąższość i wartość współczynnika filtracji naturalnej bariery geologicznej, w zależności od rodzaju składowanych materiałów, powinna wynosić: miąższość H : 1–5 m, współczynnik filtracji $k < 1,0E-07$ – $1,0E-09$ m/s. W miejscach, w których budowa geologiczna nie spełnia wymogów stawianych naturalnym barierom geologicznym, we wspomnianym akcie prawnym zaleca się wybudowanie sztucznej bariery geologicznej o minimalnej miąższości 0,5 m. Sztuczna bariera geologiczna powinna się odznaczać przepuszczalnością nie większą niż zalecana dla barier naturalnych i być zbudowana w taki sposób, żeby osiadanie składowiska nie spowodowało jej zniszczenia.

Wymagania stawiane barierom geologicznym w zakresie wartości współczynnika filtracji wskazują, że gruntami predysponowanymi do uszczelnień składowisk odpadów pochodzenia antropogenicznego, w ujęciu normy PN-88/B-04481, mogą być grunty zwięzłe oraz bardzo spoiste, które zawierają co najmniej 20–30% frakcji ilowej. Kryteria te spełniają ropy mio-pleceńskie z rejonu Bud Mszczonowskich, które wytypowano do badań w

¹ Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; piotr.stajszczak@student.uw.edu.pl.

ramach niniejszej pracy (Łuczak-Wilamowska, 1997; Gawriuczenkow, 2001; Izdebska-Mucha, 2003; Gawriuczenkow, Wójcik, 2013; Stajszczyk, 2017).

Rozpatrywane w niniejszym artykule iły mio-pliedzeńskie występują w rejonie Bud Mszczonowskich i należą do północno-wschodniej części neogeńskiego basenu sedymentacyjnego (woj. mazowieckie). Nie są one ściśle związane z utworami neogeńskimi *in situ*, lecz występują w postaci kry glacictektonicznej zalegającej w utworach plejstocenu (Szalewicz, Włodek, 2009). Złoże iłów serii poznańskiej w rejonie Bud Mszczonowskich jest eksploatowane od 1963 r. przez Przedsiębiorstwo Kruszyw Lekkich *Keramzyt Sp. z o.o.* Dotychczas surowiec był wydobywany głównie na potrzeby związane z produkcją kruszywa keramzytowego oraz elementów ściennych i stropowych. W przyszłości zarówno powstałe wyrobisko poeksploatacyjne, jak i dostępny materiał ilasty mogą zostać wykorzystane do prac mających na celu ochronę środowiska przyrodniczego, np. budowę sztucznych i naturalnych barier geologicznych.

CELE BADAWCZE

Artykuł ten jest kontynuacją prac badawczych prowadzonych przez autora na iłach mio-pliedzeńskich z rejonu Bud Mszczonowskich (Stajszczyk, 2017). Celem pracy jest określenie właściwości filtracyjno-konsolidacyjnych iłów mio-pliedzeńskich z rejonu Bud Mszczonowskich w warunkach stale wzrastającego obciążenia (konsolidacja CL). Głównymi celami badawczymi, których realizację przyjęto na etapie planowania prac laboratoryjnych było:

- określenie dystrybucji ciśnienia porowego iłów mio-pliedzeńskich z rejonu Bud Mszczonowskich w warunkach stale wzrastającego obciążenia (konsolidacja CL);

- zbadanie wpływu przyjmowanej w trakcie badań CRL prędkości przyrostu obciążenia na rozkład wartości współczynnika konsolidacji c_v oraz filtracji k badanych iłów mio-pliedzeńskich;

- określenie wpływu przyjmowanej w trakcie badania CRL prędkości przyrostu obciążenia na wiarygodność otrzymywanych wartości c_v oraz k iłów występujących w rejonie Bud Mszczonowskich. Wiarygodność tę w badaniach konsolidometrycznych ze stale wzrastającym obciążeniem warunkuje przede wszystkim osiągnięcie fazy ustalonej konsolidacji CL (Dobak, 1999).

Do badań laboratoryjnych wytypowano zarówno próbki iłów mio-pliedzeńskich o nienaruszonej strukturze, jak i zhomogenizowane pasty gruntowe. Dzięki temu było możliwe uwzględnienie wpływu zniszczenia naturalnej struktury badanego ośrodka gruntowego na uzyskiwane wartości parametrów filtracji oraz konsolidacji CL.

MATERIAŁ I METODYKA

Próbki iłów mio-pliedzeńskich o nienaruszonej strukturze zostały pozyskane ze ścian wyrobiska tych utworów, które znajduje się w miejscowości Budy Mszczonowskie (ryc. 1, 2 – patrz str. 586). Poboru próbek dokonano przy użyciu prostych narzędzi terenowych (nóż, szpadel, saperka). Iły do badań zostały wycięte ze ściany wyrobiska w postaci monolitów o kształcie prostopadłościanów. Pobrane monolity zostały natychmiast odpowiednio ponumerowane, podpisane oraz szczelnie owinięte folią i zamknięte w torebkach hermetycznych. Dzięki takiemu zabezpieczeniu próbek ryzyko zmian wilgotności i struktury pobranych

gruntów w trakcie transportu do laboratorium zmniejszono do minimum. Na podstawie przeprowadzonych badań makroskopowych (wg PN-88/B-04481) pobrane grunty zostały uznane za ił występujący w stanie twardestywnym, mało wilgotny, bezwapnisty o barwie szarej, z licznymi plamami oraz smugami koloru brązowego.

Łącznie w wyniku przeprowadzonych prac terenowych pobrano 17 monolitów iłów mio-pliedzeńskich o wymiarach $20 \times 20 \times 30$ cm. Pobrane próbki omawianych gruntów spójnych pierwotnie występowały na głębokości 11,0 m p.p.t. Wartości współczynnika prekonsolidacji OCR prezentowanych iłów, obliczone na podstawie wyników badań CRL, mieszczą się w zakresie wartości 1,1–2,1 (grunty przekonsolidowane) i są charakterystyczne dla iłów mio-pliedzeńskich występujących w rejonie Warszawy (Kaczyński, 2007).

Parametry charakteryzujące właściwości geologiczno-inżynierskie badanych iłów mio-pliedzeńskich (wilgotność, granice konsystencji, skład granulometryczny, gęstość objętościowa) zostały oznaczone zgodnie z zaleceniami polskiej normy PN-88/B-04481. W celu uwzględnienia wpływu czynników tekstualno-strukturalnych na uzyskiwane wartości parametrów filtracji oraz konsolidacji, badania konsolidometryczne przeprowadzono zarówno na próbkach o nienaruszonej strukturze, jak i na pastach gruntowych. Pasty gruntowe przygotowywano, umieszczając w plastikowym pojemniku 8 z 17 próbek NNS pobranych w Budach Mszczonowskich. Próbki te po ręcznym rozdrobieniu zalano wodą dejonizowaną i pozostawiono na 7 dni w celu rozmoknięcia. Iły te w dalszym etapie przygotowań po upływie jednego tygodnia od zalania wodą dejonizowaną były mieszane ręcznie przez okres dwóch tygodni po ok. 30–60 minut dziennie – etap homogenizacji. Po procesie homogenizacji przygotowane pasty gruntowe poddawano wstępnej konsolidacji pod stałym obciążeniem konsolidacyjnym wynoszącym 20 kPa. Konsolidację tę przeprowadzono w cylindrach wykonanych z tworzywa sztucznego, których wysokość wynosiła 15 cm, natomiast średnica nie przekraczała 10 cm. Sposób przykładania obciążenia oraz wartość naprężenia konsolidacyjnego przyjęto zgodnie z procedurą opisaną w pracach Barańskiego (2000) i Kowalczyka (2007). W trakcie wstępnej konsolidacji past gruntowych próbki iłów mio-pliedzeńskich przez cały czas były zalane wodą dejonizowaną, dzięki czemu zabezpieczono je przed procesem wysychania. W trakcie wstępnej konsolidacji past gruntowych nie prowadzono pomiarów ciśnienia porowego oraz zmian miąższości przygotowanych próbek. Parametry te rejestrowano w trakcie właściwych badań konsolidometrycznych. Po upływie pięciu tygodni z wstępnie skonsolidowanych past gruntowych wycięto próbki do badań CRL.

Badania konsolidometryczne zostały przeprowadzone w konsolidometrze Bardena-Rowe'a, będącym na wyposażeniu Laboratorium Zakładu Geologii Inżynierskiej Wydziału Geologii Uniwersytetu Warszawskiego. Wykorzystana do badań komora Bardena-Rowe'a umożliwiła badanie próbek w kształcie walca o średnicy 65 mm oraz wysokości 25 mm. W przeprowadzonych badaniach ciśnienie zwrotne (*back pressure*) oraz obciążenia osiowe próbki były zadawane przy wykorzystaniu kontrolerów ciśnienia i objętości wyprodukowanych przez firmę GDS Instruments. Badania konsolidacji przeprowadzono metodą swobodnego nacisku z zastosowaniem systemu obciążenia typu CRL (*constant rate of loading*). Podczas wykonywania badań dla próbek NNS oraz past gruntowych przyjęto następujące prędkości przyrostu obciążenia: 25, 50 oraz 100 kPa/h.

Łącznie w ramach tych analiz wykonano dwie serie pomiarów w konsolidometrze Bardena-Rowe'a (po jednej serii dla past gruntowych oraz po jednej dla próbek NNS). W ramach jednej serii pomiarów konsolidometrycznych wykonywano trzy badania CRL, które różniły się zadaną prędkością przyrostu obciążenia ($\Delta\sigma/\Delta t$: 25, 50, 100 kPa/h). Maksymalna wartość naprężenia całkowitego przekazywanego na powierzchnię badanych próbek iłów mio-plioceńskich w trakcie każdego badania CRL wynosiła 1970 kPa. Po zrealizowaniu opisanej procedury badawczej było możliwe wyznaczenie dla iłów mio-plioceńskich z rejonu Bud Mszczonowskich podstawowych parametrów charakteryzujących przebieg konsolidacji CL. Parametrami tymi są (Dobak, 1999): umowny czas konsolidacji $t_{(\sigma=1)}$, względny czas konsolidacji T_{CL} , parametr ciśnienia wody w porach C_{CL} , współczynnik konsolidacji c_v . Współczynnik filtracji badanych próbek obliczono w sposób pośredni na podstawie teorii konsolidacji filtracyjnej. Zastosowane w obliczeniach formuły obliczeniowe prezentowanych parametrów konsolidacji CL oraz filtracji zostały przedstawione w tabeli 1.

WYNIKI BADAŃ

Grunty spoiste prezentowane w niniejszej pracy pod względem granulometrycznym są iłami o średniej zawartości frakcji iłowej – na poziomie ok. 61,0%. Wilgotność naturalna badanych iłów mio-plioceńskich mieści się w zakresie 26,7–34,1% i jest o ok. 21,2–27,5% niższa niż wilgotność początkowa przygotowanych past gruntowych. Przy średniej wartości granicy plastyczności 27,6% oraz granicy płynności 78,7% stwierdzono, że próbki o nienaruszonej strukturze przed badaniami CRL znajdowały się na

pograniczu stanu półzwarłego i twaroplastycznego, natomiast pasty gruntowe ze względu na wyższą wilgotność przed badaniami CRL przyjmowały wartości stopnia plastyczności charakterystyczne dla stanu miękoplastycznego (I_L : 0,52–0,54) – wg PN-88/B-04481. Gęstość objętościowa przygotowanej pasty gruntowej przed badaniami konsolidometrycznymi wynosiła 1,68–1,69 Mg/m³ i była niższa od wartości uzyskanych dla próbek o nienaruszonej strukturze (tab. 2). Skład mineralny badanych iłów mio-plioceńskich charakteryzuje się dominacją minerałów iltowych, głównie beidelitu (54,7%) i kaolinitu (10,4%). W dalszej kolejności występują minerały nieaktywne termicznie w tym kwarc (31,5%) oraz getyt (3,4%) (Stajszczak, 2017).

Zaletą badań przeprowadzanych w konsolidometrze Bardena-Rowe'a jest ciągły pomiar ciśnienia porowego u . W badaniach CRL wykonanych na próbkach iłów mio-plioceńskich z rejonu Bud Mszczonowskich wartości ciśnienia porowego w zależności od zadanej prędkości przyrostu obciążenia wykazują trend ciągle rosnący bądź rosnący z quasi-stabilizacją w zaawansowanym etapie badania. Ciśnienie porowe iłów mio-plioceńskich z rejonu Bud Mszczonowskich mierzone w trakcie badań CRL, z udziałem próbek NNS dla przyjętych prędkości przyrostu obciążenia, przyjmują wartości maksymalne w przedziale 269–1321 kPa i jest wyższe niż rejestrowane w badaniach past gruntowych, dla których wartości maksymalne omawianego parametru nie przekraczają 199–885 kPa (ryc. 3A).

Generowane w trakcie badań CRL wartości ciśnienia porowego w sposób bezpośredni wpływają na uzyskiwane w czasie rozkładu wartości parametru ciśnienia wody w porach C_{CL} , który wyraża udział fazy stałej gruntu w przenoszeniu zadawanych naprężeń całkowitych. Parametr C_{CL} w zrealizowanym programie badawczym przyjmuje najwyższe wartości w analizach przeprowadzonych z udziałem past gruntowych. Maksymalne zarejestrowane wartości parametru ciśnienia wody w porach C_{CL} dla próbek rekonstruowanych odpowiadają jedności i są obserwowane na początku badania konsolidometrycznego. Wraz ze wzrostem naprężeń całkowitych w przeprowadzonych badaniach konsolidometrycznych na pastach gruntowych można obserwować sukcesywne zmniejszanie wartości parametru ciśnienia wody w porach, który w zależności od zadanej prędkości przyrostu obciążenia w chwili zakończenia badania CRL osiąga wartość minimalną na poziomie 0,10–0,46 [–]. Próbki NNS iłów mio-plioceńskich z rejonu Bud Mszczonowskich, obciążane z tymi samymi prędkościami przyrostu obciążenia co pasty gruntowe, na początku przeprowadzonych badań CRL wykazują wartości parametru ciśnienia wody w porach C_{CL} niższe od jedności (C_{CL} : 0,41–0,71 [–]). Podobnie jak w przypadku past gruntowych, w początkowych etapach wszystkich badań konsolidometrycznych przeprowadzonych z udziałem próbek o nienaruszonej strukturze jest obserwowany spadek wartości parametru C_{CL} . Spadek ten jednak nie jest

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

Parametr Parameter	Wzór Formula	Jednostka Unit
Umowny czas konsolidacji Specific time of consolidation	$t_{(\sigma=1)} = \frac{H^2}{c_v} = \frac{H^2 \cdot \gamma_w}{k \cdot M_0}$	[s]
Względny czas konsolidacji Relative consolidation time	$T_{CL} = \frac{t}{t_{(\sigma=1)}} = \frac{t \cdot c_v}{H^2}$	[–]
Parametr ciśnienia wody w porach Parameter of pore water pressure	$C_{CL} = \frac{u}{\sigma}$	[–]
Współczynnik konsolidacji Coefficient of consolidation	$c_v = \frac{\Delta\sigma \cdot H^2}{\Delta t \cdot 2 \cdot u_H}$	[m ² /s]
Współczynnik filtracji Coefficient of permeability	$k = \frac{c_v \cdot \gamma_w}{M_k}$	[m/s]
Współczynniki korekcyjne wg Janbu i in. (1980) Correction coefficients according to Janbu et al. (1980)	$\alpha_k = \frac{2[\cosh(a_j) - 1]}{(a_j) \sinh(a_j)}$	[–]
	$\alpha_{c_v} = \frac{2[\cosh(a_j) - 1]}{(a_j)^2 \cosh(a_j)}$	
	$a_j = \text{ar cosh}\left(\frac{1}{1 - \lambda}\right)$	
	$\lambda = \frac{\Delta u}{\Delta\sigma}$	

Objaśnienia: H – droga drenażu [m], γ_w – ciężar objętościowy wody [kN/m³], M_0 – moduł ściśliwości [kPa], t – czas od chwili rozpoczęcia badania CRL [s], u – ciśnienie porowe [kPa], σ – naprężenie zewnętrzne [kPa].

Explanations: H – length of drainage path [m], γ_w – unit weight of water [kN/m³], M_0 – modulus of compressibility [kPa], t – time from beginning of CRL test [s], u – pore water pressure [kPa], σ – applied external stress [kPa].

Tab. 2. Parametry fizyczne iłów mio-pleceńskich z rejonu Bud Mszczonowskich oznaczone przed rozpoczęciem badań CRL
Table 2. Physical parameters of Mio-Pliocene clays from the area of Bud Mszczonowskie obtained before CRL tests

Parametr Parameter	Próbki NNS Intact sample	Pasty gruntowe Soil pastes
w [%]	26,8–34,1	54,3–55,4
I_L [-]	0,01–0,11	0,49–0,53
ρ_s [Mg/m ³]	2,69	
ρ [Mg/m ³]	1,92–2,06	1,68–1,69
n [-]	0,39–0,47	0,59–0,60
e [-]	0,64–0,89	1,47–1,49
S_r [-]	0,95–1,00	1,00
f_i [%]	51–66	
f_{π} [%]	31–40	
f_p [%]	3–9	

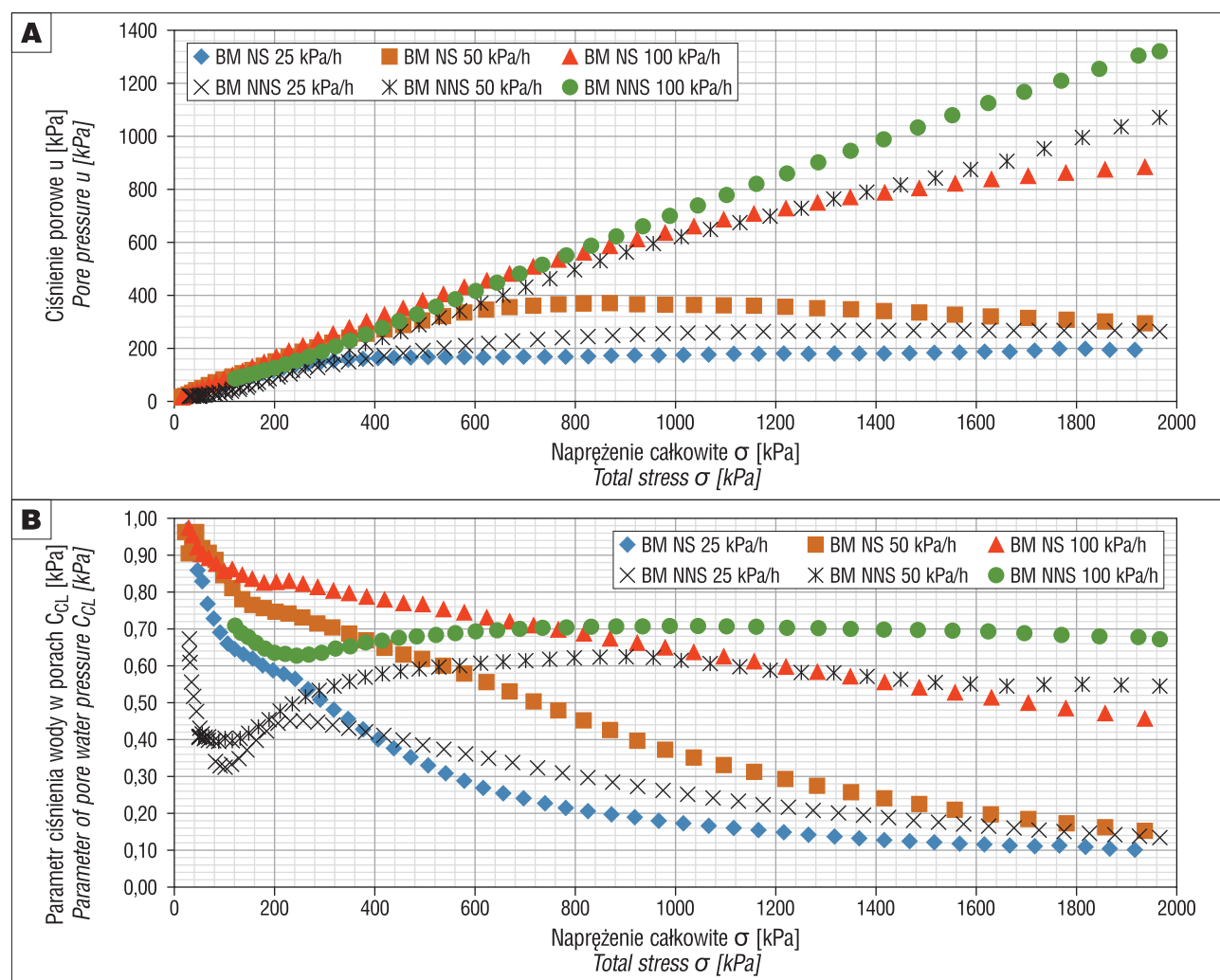
Objaśnienia: w – wilgotność, ρ – gęstość objętościowa, ρ_s – gęstość właściwa, f_i – frakcja iłowa, f_{π} – frakcja pyłowa, f_p – frakcja piaskowa, I_L – stopień plastyczności, e – wskaźnik porowatości, n – porowatość, S_r – stopień wilgotności.

Explanations: w – moisture content, ρ – bulk density, ρ_s – density, f_i – clay fraction, f_{π} – silt fraction, f_p – sand fraction, I_L – liquidity index, e – void ratio, n – porosity, S_r – degree of saturation.

widoczny przez cały czas trwania badania CRL, lecz do osiągnięcia wartości minimalnej. Po osiągnięciu wartości minimalnej w badaniach z udziałem próbek NNS następuje chwilowy wzrost parametru C_{CL} , po którym można zauważyć ponowny spadek wartości ($\Delta\sigma/\Delta t$: 25 kPa/h) lub ich quasi-stabilizację ($\Delta\sigma/\Delta t$: 50 oraz 100 kPa/h) (ryc. 3B). W chwili zakończenia badań CRL wartości parametru C_{CL} pobranych próbek NNS są wyższe niż wartości minimalne oznaczone dla past gruntowych i mieszczą się w przedziale 0,13–0,63 [-].

W celu dokonania oceny filtracyjno-konsolidacyjnych cech ośrodka gruntowego należy wyznaczyć współczynnik konsolidacji c_v . Parametr ten zależy od przepuszczalności oraz odkształcalności ośrodka gruntowego (Glazer, 1985; Wiłun, 1987). Wzrost wartości współczynnika konsolidacji wskazuje na skrócenie czasu potrzebnego do rozproszenia wygenerowanej nadwyżki ciśnienia porowego, natomiast jego spadek (np. spowodowany zmianami porowatości) będzie prowadził do wydłużenia procesu konsolidacji filtracyjnej w czasie (Dobak, 1999).

W przeprowadzonych badaniach konsolidometrycznych ze stale wzrastającym obciążeniem (CRL) oznaczone wartości współczynnika konsolidacji iłów mio-pleceńskich z rejonu Bud Mszczonowskich zarówno w badaniach past gruntowych, jak i próbek o naturalnej strukturze, wykazują



Ryc. 3. Rozkłady wartości ciśnienia porowego (A) oraz parametru ciśnienia wody w porach (B) uzyskane w trakcie badań CRL iłów mio-pleceńskich z rejonu Bud Mszczonowskich. Objasnienia: NS – pasta gruntowa, NNS – próbka nienaruszona

Fig. 3. Values of pore pressure (A) and parameter of pore water pressure (B) obtained for Mio-Pliocene clays from the area of Budy Mszczonowskie during CRL tests. Explanations: NS – soil paste, NNS – intact sample

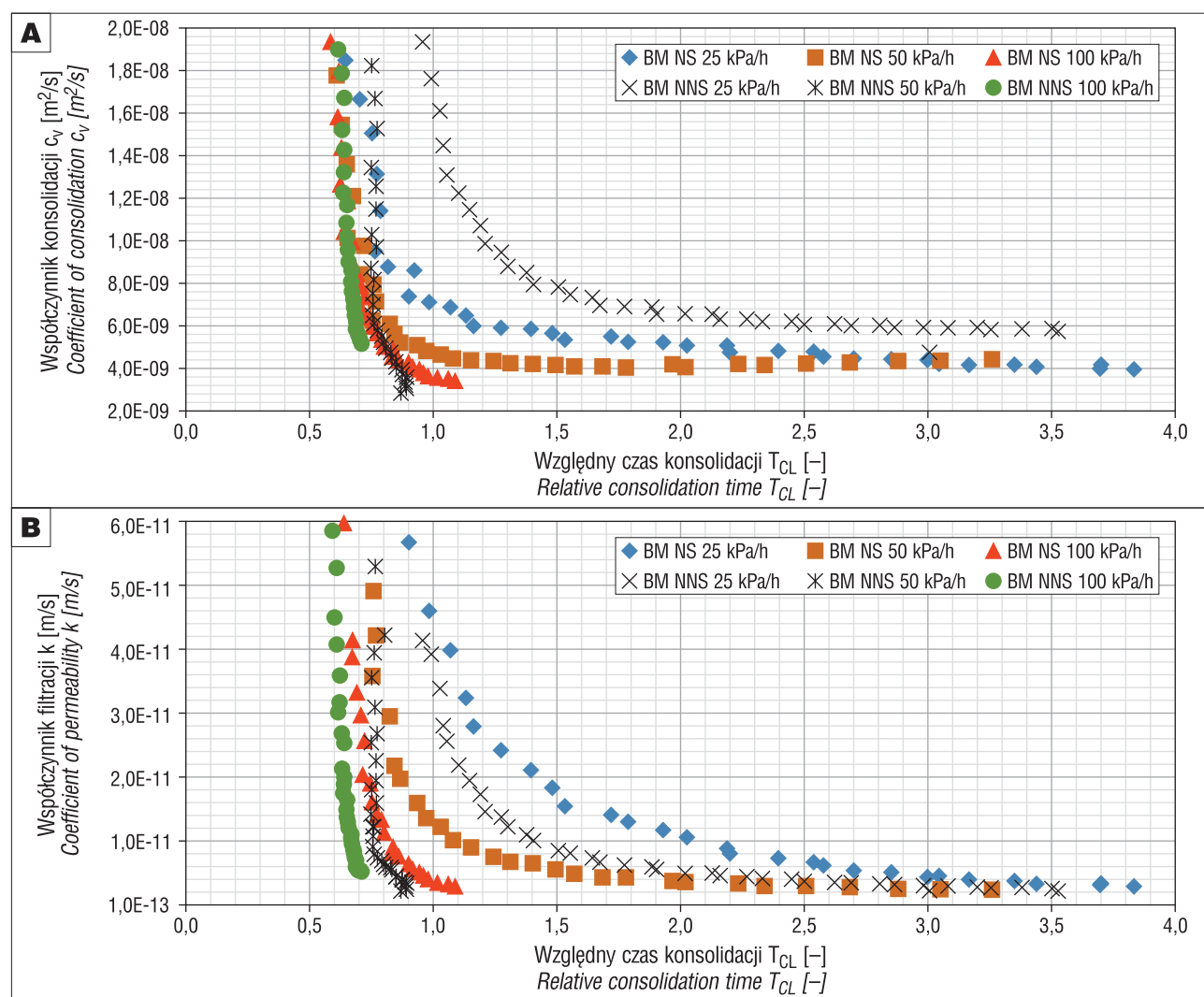
szeroki zakres zmienności (współczynnik zmienności v : 0,93–1,88 [–]). Współczynnik konsolidacji próbek NNS dla przyjętych prędkości przyrostu obciążenia przyjmuje wartości w przedziale od 2,84E-09 do 1,80E-07 m²/s. Omawiany parametr dla próbek rekonstruowanych (past gruntowych) wykazuje podobny rząd wielkości, przyjmując wartości w zakresie od 3,41E-09 do 5,55E-07 m²/s. Najwyższe wartości współczynnika konsolidacji we wszystkich przeprowadzonych badaniach CRL obserwowano na początku pomiarów. Wraz ze wzrastającym obciążeniem za każdym razem następowało zmniejszenie wartości c_v oraz następująca po nim quasi-stabilizacja w zaawansowanym etapie badania konsolidometrycznego (ryc. 4A).

Bezpośredni wpływ zdolności filtracyjnych ośrodka gruntowego na jego charakterystykę konsolidacyjną w przeprowadzonych badaniach CRL potwierdzają uzyskane rozkłady wartości współczynnika filtracji k . Parametr ten obliczony w sposób pośredni (tab. 1), podobnie jak współczynnik konsolidacji c_v , wykazuje najwyższe wartości w początkowych etapach badania konsolidometrycznego. Wraz ze wzrastającym obciążeniem zarówno w badaniach próbek NNS, jak i past gruntowych jest obserwowany intensywny spadek wartości k (nawet o dwa rzędy wielkości) oraz quasi-stabilizacja na zaawansowanym etapie ba-

dania CRL (ryc. 4B). Wartości współczynnika filtracji ilów mio-pliocenijskich z rejonu Bud Mszczonowskich, oznaczone w próbkach o naturalnej strukturze w trakcie całego procesu obciążenia, mieszczą się w przedziale od 2,45E-10 do 2,26E-12 m/s i pod względem wielkości są zbliżone do wartości oznaczonych w badaniach CRL past gruntowych, w których parametr ten wynosi od 1,74E-12 do 5,23E-09 m/s.

DYSKUSJA

Wyniki badań CRL ilów mio-pliocenijskich z rejonu Bud Mszczonowskich potwierdzają dane literaturowe, wskazujące, że oprócz inherentnych właściwości ośrodka gruntowego (skład granulometryczny, skład mineralny) istotnym czynnikiem wpływającym na filtracyjno-konsolidacyjną specyfikę gruntu spoistego w warunkach stale wzrastającego obciążenia jest nie tylko zadana prędkość przyrostu obciążenia, ale również struktura badanego gruntu (naturalna, rekonstruowana) (Kowalczyk, 2007; Dobak i in., 2015). Charakterystyka filtracyjno-konsolidacyjna gruntów spoistych, przeprowadzana w trakcie badań konsolidometrycznych ze stale wzrastającym obciążeniem, za każdym razem zależy od uzyskiwanych rozkładów



Ryc. 4. Rozkład wartości współczynnika konsolidacji c_v (**A**) oraz współczynnika filtracji k (**B**) ilów mio-pliocenijskich z rejonu Bud Mszczonowskich otrzymane w trakcie badań CRL. Objaśnienia: NS – pasta gruntowa, NNS – próbka nienaruszona

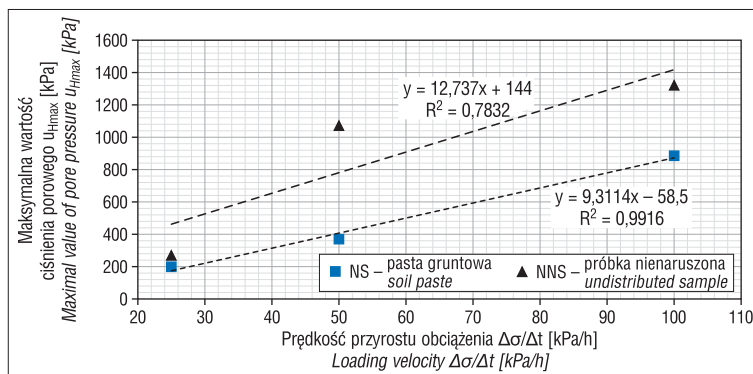
Fig. 4. Values of coefficients of: consolidation c_v (**A**) and permeability k (**B**) obtained for Mio-Pliocene clays from the area of Budy Mszczonowskie during CRL tests. Explanations: NS – soil paste, NNS – intact sample

ciśnienia porowego, naprężenia działającego na grunt, jak również postępującego odkształcenia jednoosiowego, które wyraża zachodzące zmiany porowatości. Dane zamieszczone w literaturze (Sinha, Bhargava, 1991; Dobak, 1999; Kowalczyk, 2005, 2007; Win Bo, 2008; Dobak, Kowalczyk, 2008, 2010; Soumaya, Kempfert, 2010; Kowalczyk i in., 2013; Dobak i in., 2015) oraz wyniki badań CRL iłów mio-plioceńskich z rejonu Bud Mszczonowskich prezentowane w niniejszej pracy dowodzą, że na początkowych etapach badania CRL przyrost ciśnienia porowego jest zazwyczaj bardzo szybki po czym stopniowo zaczyna maleć aż do momentu uzyskania wartości maksymalnej u_{Hmax} . Po osiągnięciu maksymalnej wartości ciśnienia porowego z reguły następuje stabilizacja rejestrowanych odczytów, pomimo nadal postępującego przyrostu obciążenia (Dobak, 1999). Taki modelowy rozkład wartości ciśnienia porowego w trakcie badań CRL iłów mio-plioceńskich z rejonu Bud Mszczonowskich jest szczególnie dobrze widoczny w analizach przeprowadzonych z udziałem past gruntowych (ryc. 3A). Obserwowana stabilizacja wartości ciśnienia porowego na zaawansowanych etapach badania CRL spowodowana jest tym, że nowe przyrosty omawianego parametru, będące następstwem stale wzrastającego obciążenia, zastępują już rozproszoną w wyniku postępującej konsolidacji nadwyżkę ciśnienia porowego, która została wygenerowana na wcześniejszych etapach badania CRL (Vu Cao Minh, 1976; Dobak, 1999). Niezwykle istotnym czynnikiem zewnętrznym, który w warunkach stale wzrastającego obciążenia wpływa na rejestrowane wartości ciśnienia porowego, jest przyjęta prędkość przyrostu obciążenia. Przy stosowaniu wyższych prędkości przyrostu obciążenia zarówno spodziewane, maksymalne wartości ciśnienia porowego, jak i naprężenia całkowite, przy których następuje stabilizacja rejestrowanych odczytów dla próbek tego samego gruntu, powinny być odpowiednio wyższe (Dobak, 1999; Kowalczyk, 2007; Win Bo, 2008; Kowalczyk i in., 2013; Dobak i in., 2015). W przypadku iłów mio-plioceńskich z rejonu Bud Mszczonowskich oczekiwania te są zgodne z obserwacjami doświadczalnymi udokumentowanymi w literaturze. Zarówno w przeprowadzonych badaniach CRL na próbkach o nienaruszonej strukturze, jak i na próbkach past gruntowych zależność pomiędzy maksymalną wartością ciśnienia porowego oraz zadaną prędkością przyrostu obciążenia przyjmuje rozkład liniowy o wartościach stopnia korelacji R^2 rzędu 0,78–0,99 (ryc. 5). Wyższa wartość parametru R^2 zarejestrowana dla past gruntowych wynika z wierniejszego odwzorowania założeń teorii konsolidacji filtracyjnej, tj. izotropii próbki gruntu oraz pełnym nasyceniem porów fazą ciekłą (Glazer, 1985).

Czynnikiem, który obok zadanej prędkości przyrostu obciążenia w przeprowadzonych badaniach CRL miał wpływ na dystrybucję ciśnienia porowego iłów mio-plioceńskich z rejonu Bud Mszczonowskich, była struktura badanych próbek (naruszona/nienaruszona). Jak można zauważyć na rycinie 3A wartości ciśnienia porowego próbek NNS przy prędkościach przyrostu obciążenia wynoszących 50 oraz 100 kPa/h przez cały czas trwania pomiarów wykazują trend rosnący, bez przewidywanej w rozważaniach teoretycznych wyraźnej stabilizacji wartości (Dobak, 1999). Taki, ciągle rosnący rozkład wartości ciśnienia porowego wg Dobaka (1999) odzwierciedla pogorszenie procesu

filtracji fazy ciekłej w konsolidowanej próbce gruntu spoistego i zazwyczaj jest spowodowany aplikowaniem zbyt szybkiego przyrostu obciążenia lub znacznym zmniejszeniem przestrzeni porowej w gruntach ściśliwych (Dobak, 1999). Zaproponowane przez wspomnianego badacza wytłumaczenie rejestrowanych w trakcie badań gruntów bardzo spoistych stale rosnących rozkładów wartości ciśnienia porowego dla przeprowadzonych analiz z udziałem iłów mio-plioceńskich z rejonu Bud Mszczonowskich jest szczególnie trafne. Trafność tę potwierdza udokumentowana na rycinie 3A stabilizacja wartości ciśnienia porowego u w badaniu próbki NNS, które przeprowadzono z prędkością przyrostu obciążenia równą 25 kPa/h. Rozkłady wartości ciśnienia porowego past gruntowych, które charakteryzowały się strukturą naruszoną, w większym stopniu wykazują zgodność z przewidywaniami teoretycznymi opracowanymi przez Dobaka (1999) niż rozkłady tego parametru obserwowane w trakcie badań CRL, przeprowadzonych z udziałem próbek NNS. Wyraźne rozdzielanie etapów mobilizacji oraz quasi-stabilizacji wartości ciśnienia porowego przy tych samych prędkościach przyrostu obciążenia, które okazały się zbyt szybkie w badaniach próbek NNS ($\Delta\sigma/\Delta t$: 50–100 kPa/h), należy wiązać z większą podatnością cząstek szkieletu gruntowego pasty gruntowej do wzajemnej reorientacji na skutek stale wzrastającego obciążenia względem cząstek budujących naturalną strukturę próbek NNS. Naturalna struktura gruntów spoistych jest następstwem procesów geologicznych (sedymentacja, cementacja, prekonsolidacja), jakim był poddawany ośrodek gruntowy od chwili sedymentacji do momentu pobrania próbek w terenie (Kaczyński, 2017). Obecność bardziej trwałych wiązań strukturalnych w omawianym przypadku mogła się przyczynić do uzyskiwania w badaniach CRL próbek NNS wysokich wartości ciśnienia porowego mimo niższej, w porównaniu do past gruntowych, początkowej wilgotności pobranych próbek (tab. 2).

Dystrybucja ciśnienia porowego w trakcie trwania badania CRL w bezpośredni sposób wpływa na uzyskiwane wartości parametru ciśnienia wody w porach C_{CL} . W przeprowadzonych badaniach iłów mio-plioceńskich z rejonu Bud Mszczonowskich wszystkie próbki rekonstruowane cechowały się wysokim stopniem nasycenia porów wodą, przez co początkowe wartości parametru C_{CL} w chwili rozpoczęcia badania CRL prawie zawsze były zbliżone bądź równe jedności (ryc. 3B). Całkowite nasycenie porów wodą oraz jednorodność przygotowanych past gruntowych



Ryc. 5. Zależność pomiędzy prędkością przyrostu obciążenia a maksymalną wartością ciśnienia porowego otrzymana dla iłów mio-plioceńskich z rejonu Bud Mszczonowskich w toku przeprowadzonych badań CRL

Fig. 5. The relationship between the velocity of loading and the maximum value of pore pressure obtained for Mio-Pliocene clays from the area of Budy Mszczonowskie during CRL tests

pełniej niż badane próbki o nienaruszonej strukturze odpowiadały założeniami teorii konsolidacji filtracyjnej sformułowanej przez Terzagiego (1925). Z tego względu wykresy zależności $C_{CL}-\sigma$ sporządzone dla past gruntowych w klasyfikacji zaproponowanej przez Dobaka (1999) reprezentują rozkład quasi-teoretyczny QT (ryc. 3B). Rozkłady wartości parametru C_{CL} względem działającego naprężenia całkowitego we wszystkich przeprowadzonych badaniach CRL były uzależnione od zadanej prędkości przyrostu obciążenia, co jest zgodne z rozważaniami teoretycznymi (Dobak, 1999) oraz danymi doświadczalnymi (Dobak, 1999; Kowalczyk, 2005, 2007; Dobak, Kowalczyk, 2008; Kowalczyk i in., 2013; Dobak i in., 2015). Im wyższą prędkość przyrostu obciążenia zadawano w trakcie badania konsolidometrycznego, obserwowano tym większy udział fazy ciekłej gruntu w przenoszeniu zadawanych naprężeń całkowitych (co w przeprowadzonych badaniach zostało wyrażone uzyskiwaniem wyższych wartości parametru ciśnienia wody w porach – ryc. 3B).

W badaniach CRL wykonanych na próbkach o naturalnej strukturze (NNS) obserwowane w początkowych etapach badania CRL wartości parametru ciśnienia wody w porach C_{CL} są niższe niż 1, co przy znacznym nasyceniu porów wodą (Sr: 0,95–1,00 [–]) należy wiązać ze znacznym udziałem szkieletu gruntowego w przenoszeniu zadawanych naprężeń całkowitych. Obecność trwałych wiązań strukturalnych pomiędzy cząstkami elementarnymi szkieletu gruntowego iłów mio-plioceńskich z rejonu Bud Mszczonowskich sprawia, że obserwowane dla próbek NNS rozkłady wartości parametru C_{CL} wg klasyfikacji Dobaka (1999) są reprezentowane przeważnie przez rozkład nieregularny zmienny NZ (ryc. 3B).

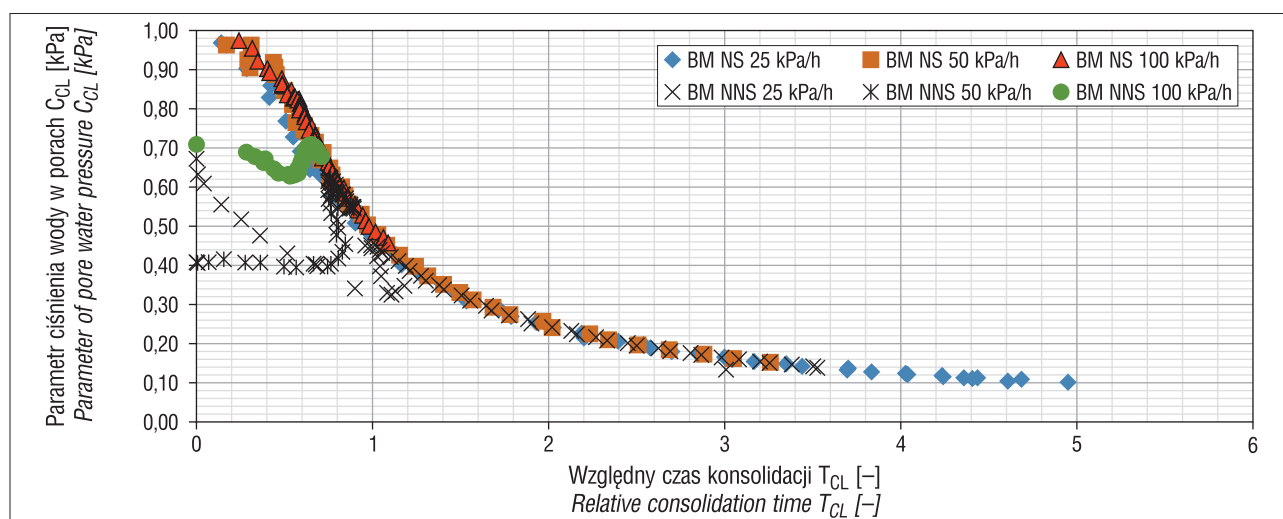
W badaniach ściśliwości ze stopniowym wzrostem obciążenia (badania IL) zaawansowanie procesu konsolidacji można ocenić na podstawie uzyskiwanych wartości stopnia konsolidacji S_k , który określa aktualną wartość osiadania odniesioną do osiadania całkowitego badanej próbki gruntu spoistego (Glazer, 1985; Duncan, 1993; Pająk, Dobak, 2008, 2011, 2012; Dobak, Gaszyński, 2014, 2015; Kaczyński, 2017). W badaniach konsolidometrycznych z ciągłym przyrostem obciążenia (badania CL) nie obserwuje się, jak to ma miejsce w przypadku badań edometrycznych (badania IL), końcowego odkształcenia badanej próbki gruntu spoistego. Z tego względu w warunkach stale wzrastającego obciążenia niemożliwe jest stosowanie stopnia konsolidacji w celu dokonania oceny zaawansowania procesu konsolidacji CL (Dobak, 1999; Kowalczyk, 2005). Do oceny stopnia zaawansowania rozpraszania nadwyżki ciśnienia porowego w trakcie badań CRL bardziej zasadne jest stosowanie względnego czasu konsolidacji T_{CL} , który stanowi ekwiwalent stosowanego w interpretacjach badań IL bezwymiarowego czynnika czasu T_v (Dobak, 1999; Kowalczyk, 2007).

Według rozwiązań teoretycznych opracowanych przez Dobaka (1999) oraz danych doświadczalnych zamieszczonych w literaturze (Dobak, 1999; Kowalczyk, 2007; Kowalczyk i in., 2013; Dobak i in., 2015) wiadomo, że przedstawienie na jednym wykresie wartości parametrów C_{CL} oraz T_{CL} pozwala uniezależnić wyniki przeprowadzonych badań CRL od zadawanej prędkości przyrostu obciążenia. Niezależność ta jest wyrażona sprowadzeniem różnych rozkładów parametru ciśnienia wody w porach C_{CL} do postaci jednej krzywej, która może być zastosowana do oceny faz oraz stopnia zaawansowania procesu konsolidacji CL (Dobak, 1999). Rozkłady wartości parametru ciś-

nienia wody w porach C_{CL} oraz względnego czasu konsolidacji T_{CL} uzyskane w trakcie przeprowadzonych badań CRL iłów mio-plioceńskich z rejonu Bud Mszczonowskich dla past gruntowych oraz próbek o nienaruszonej strukturze, zgodnie z rozwiązaniami teoretycznymi (Dobak, 1999), po zestawieniu na jednym wykresie (z wyłączeniem początkowych etapów badania CRL próbek NNS wyrażonych wartościami T_{CL} : 0–1 [–]) tworzą jednolitą, uniwersalną krzywą (ryc. 6). Sporządzenie wykresu $C_{CL}-T_{CL}$ dla iłów mio-plioceńskich z rejonu Bud Mszczonowskich pozwoliło zatem nie tylko uniezależnić otrzymywane wartości parametru C_{CL} od zadanej prędkości przyrostu obciążenia, ale również w pewnym stopniu od struktury badanych próbek.

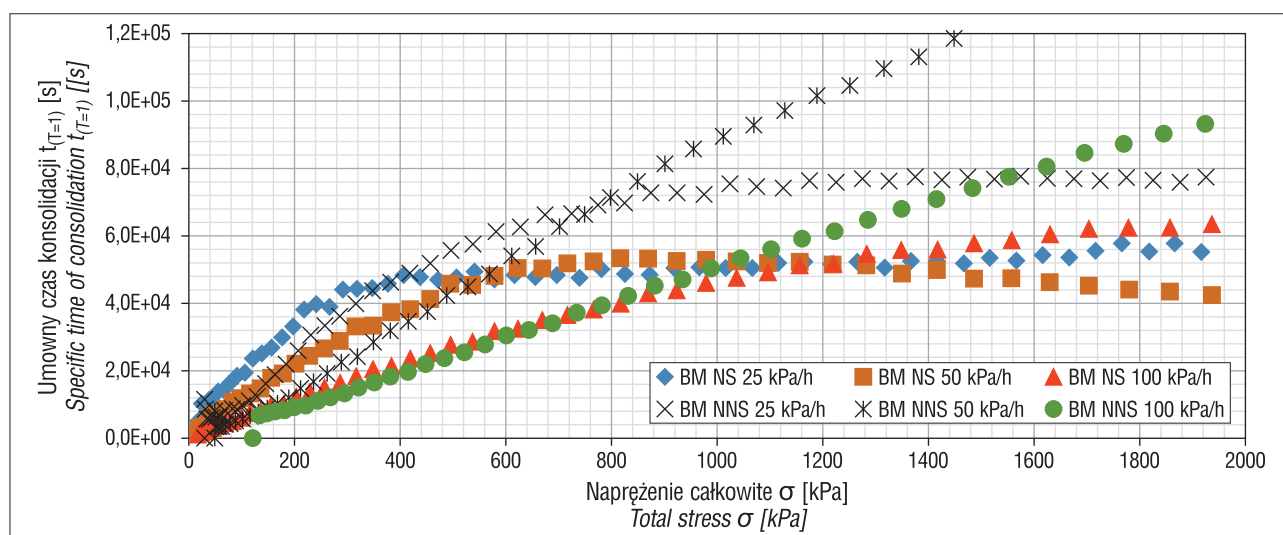
Ocena zaawansowania procesu konsolidacji filtracyjnej w trakcie badań CRL, dokonywana na podstawie zunifikowanej krzywej zależności $C_{CL}-T_{CL}$, ma na celu wydzielenie fazy nieustalonej oraz ustalonej badania konsolidometrycznego, a więc etapów procesu konsolidacji CL, niezwykle istotnych przy ocenie miarodajności otrzymywanych wartości współczynnika konsolidacji c_v oraz obliczanego w sposób pośredni współczynnika filtracji k . W niniejszej pracy dokonując oceny zaawansowania procesu konsolidacji CL, za każdym razem przyjmowano, że faza ustalona badania CRL występuje, gdy parametr $C_{CL} < 0,246$ a $T_{CL} > 2$. Po osiągnięciu podanych wartości parametrów C_{CL} oraz T_{CL} w trakcie badań CRL obserwuje się zazwyczaj stabilizację odczytów ciśnienia porowego u , a otrzymywane na tym etapie wartości współczynnika konsolidacji oraz filtracji są najbardziej zbliżone do wartości rzeczywistych (Dobak, 1999).

W zrealizowanym programie badawczym dla próbek iłów mio-plioceńskich z rejonu Bud Mszczonowskich fazę ustaloną konsolidacji CL osiągnięto w badaniach CRL, przeprowadzonych na pastach gruntowych z przyjętą prędkością przyrostu obciążenia 25 oraz 50 kPa/h. Dla próbek NNS faza ustalona została osiągnięta jedynie w badaniu CRL, przeprowadzonym z prędkością przyrostu obciążenia wynoszącą 25 kPa/h (ryc. 6). Jak zaznacza Dobak (1999), głównymi czynnikami wpływającymi na osiągnięcie fazy ustalonej badania CRL jest zadana prędkość przyrostu obciążenia oraz zdolności filtracyjno-konsolidacyjne ośrodka gruntowego. Im niższa będzie przepuszczalność gruntu spoistego, tym później zostanie spełnione kryterium fazy ustalonej przy zachowaniu tej samej prędkości przyrostu obciążenia. Z tego względu w celu poprawnej interpretacji danych otrzymywanych w trakcie badań konsolidometrycznych ze stale wzrastającym obciążeniem uwzględnić należy również parametr określany w literaturze jako umowny czas konsolidacji $t_{(T=1)}$ (Dobak, 1999). Parametr ten w sposób bezpośredni wpływa na uzyskiwane wartości względnego czasu konsolidacji T_{CL} , uwzględniając przy tym główne cechy ośrodka gruntowego, które warunkują tempo rozpraszania nadwyżki ciśnienia porowego (tab. 1). W przeprowadzonych badaniach CRL iłów mio-plioceńskich z rejonu Bud Mszczonowskich, w których osiągnięto fazę ustaloną, umowny czas konsolidacji $t_{(T=1)}$ w początkowych etapach pomiarów wykazuje intensywny wzrost wartości oraz quasi-stabilizację w zaawansowanym etapie badania konsolidometrycznego (ryc. 7). Wspomniana quasi-stabilizacja wartości umownego czasu konsolidacji w trakcie upływającego czasu badania CRL prowadzi do sukcesywnego wzrostu wartości względnego czasu konsolidacji T_{CL} . Z kolei wzrastające wartości względnego czasu konsolidacji dokumentują zwiększający się udział



Ryc. 6. Zależność pomiędzy parametrem ciśnienia wody w porach a względnym czasem konsolidacji otrzymana dla iłłów mio-pliocenijskich z rejonu Bud Mszczonowskich w trakcie badań CRL. Objasnienia: NS – pasta gruntowa, NNS – próbka nienaruszona

Fig. 6. The relationship between the parameter of pore water pressure and relative time of consolidation obtained for Mio-Pliocene clays from the area of Bud Mszczonowskie during CRL tests. Explanations: NS – soil paste, NNS – intact sample



Ryc. 7. Wartości umownego czasu konsolidacji otrzymane dla iłłów mio-pliocenijskich z rejonu Bud Mszczonowskich w trakcie badań CRL. Objasnienia: NS – pasta gruntowa, NNS – próbka nienaruszona

Fig. 7. Values of specific time of consolidation obtained for Mio-Pliocene clays from the area of Budy Mszczonowskie during CRL tests. Explanations: NS – soil paste, NNS – intact sample

szkieletu gruntowego w przenoszeniu zadawanych naprężeń całkowitych (postęp procesu konsolidacji CL).

Badania CRL iłłów miopliocenijskich z rejonu Bud Mszczonowskich, w trakcie których nie osiągnięto fazy ustalonej ($C_{CL} > 0,246$; $T_{CL} < 2$), za każdym razem charakteryzowały się stale rosnącym rozkładem wartości ciśnienia porowego u oraz umownego czasu konsolidacji $t_{(T=1)}$ (ryc. 3A, 7). Obserwowane trendy, w przypadku badanych gruntów spoistych, wytłumaczyć należy zadaniem w trakcie prac laboratoryjnych zbyt dużych prędkości przyrostu obciążenia oraz wystąpieniem zjawiska, które w literaturze jest określane jako „dławienie przepływu” (Dobak, 1999; 2007; Dobak, Wyrwicki, 2000; Kowalczyk, 2007; Kowalczyk i in., 2013). Dławienie przepływu w trakcie badań CRL objawia się chwilowym pogorszeniem przepuszczalności ośrodka gruntowego w warunkach ciągłego przyrostu obciążenia na skutek znacznego wzrostu ciśnienia porowego (Kowalczyk i in., 2013). Jak zauważają Dobak (1999) oraz Kowalczyk (2005) proces ten w skrajnych przypadkach będzie prowadził do recesji procesu konsoli-

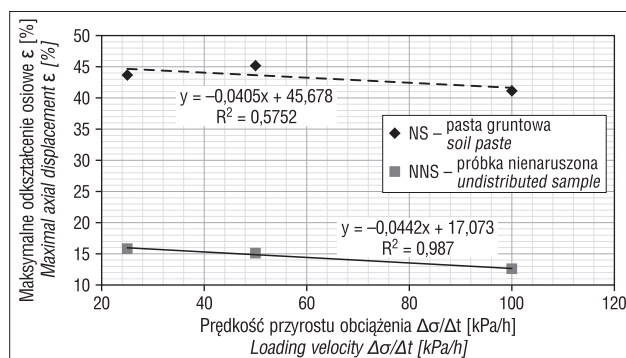
dacji CL, co zostanie wyrażone obserwowanym zmniejszaniem bądź „stagnacją” wartości względnego czasu konsolidacji T_{CL} , pomimo stale postępującego przyrostu obciążenia (Dobak, 1999, 2007; Kowalczyk, 2005, 2007).

Istotnym elementem wpływającym na właściwości geologiczno-inżynierskie ośrodka gruntowego, wyrażone m.in. uzyskiwanymi rozkładami wartości współczynnika konsolidacji, w warunkach stale wzrastającego obciążenia, jest stan ich struktury (struktura naturalna/przemodelowana) (Dobak i in., 2015). Badania CRL przeprowadzone na iłłach miopliocenijskich z rejonu Bud Mszczonowskich – próbki NNS oraz pasty gruntowe, wykazały, że na podobnych etapach zaawansowania konsolidacji CL (wyrażonych podobnymi wartościami T_{CL}) dla fazy ustalonej badania CRL ($\Delta\sigma/\Delta t$: 25 kPa/h) uzyskiwane wartości współczynnika konsolidacji próbek NNS są wyższe (c_v : 4,75–6,57E-09 m²/s) niż wartości otrzymane dla próbek rekonstruowanych (c_v : 3,41–5,09E-09 m²/s) (ryc. 4A). Obserwowane trendy są zgodne z wynikami badań prowadzonych przez Barańskiego (2000), Wesleya (2001), Kowalczyka (2007) oraz

Dobaka i in. (2015). Uzyskiwanie w toku przeprowadzonych badań CRL wyższych wartości współczynnika konsolidacji dla próbek NNS, oprócz uwarunkowań strukturalnych (wynikających z poddawania gruntu w przeszłości geologicznej procesom cementacji oraz prekonsolidacji), należy wiązać z mniejszą w stosunku do past gruntowych odkształcalnością próbek o naturalnej strukturze (ryc. 8). Początkowo, intensywny spadek wartości współczynnika konsolidacji oraz filtracji, obserwowany we wszystkich przeprowadzonych badaniach CRL na iłach mio-pleioceńskich z rejonu Bud Mszczonowskich (ryc. 4A, B), jest spowodowany zmianami porowatości badanych próbek w następstwie stale wzrastającego obciążenia oraz intensywną mobilizacją ciśnienia porowego (Dobak, 1999; Dobak i in., 2015). W fazie ustalonej badania CRL próbki iłów mio-pleioceńskich z rejonu Bud Mszczonowskich przyjmują wartości współczynnika filtracji w zakresie $2,28\text{--}5,08\text{E-}12$ m/s (współczynnik zmienności v : 0,25 [-]), natomiast pasty gruntowe, po spełnieniu warunku $C_{CL} < 0,246$, $T_{CL} > 2$, wykazują przepuszczalność na poziomie od $1,07\text{E-}11$ do $1,74\text{E-}12$ m/s (współczynnik zmienności v : 0,60 [-]). Szeroki zakres zmienności współczynnika filtracji w fazie ustalonej badania CRL past gruntowych w stosunku do próbek NNS jest związany ze znaczną odkształcalnością próbek rekonstruowanych (ryc. 8). Znacznym odkształceniom osiowym próbek iłów mio-pleioceńskich z rejonu Bud Mszczonowskich o naruszonej strukturze będą towarzyszyły proporcjonalnie duże zmiany wartości wskaźnika porowatości Δe . Zmiany te w zrealizowanym programie badawczym dla prędkości przyrostu obciążenia 25 kPa/h w fazie ustalonej badania CRL pasty gruntowej wynosiły maksymalnie $0,16$ [-] i były dwukrotnie wyższe niż zmiany wskaźnika porowatości rejestrowane w fazie ustalonej identycznego badania CRL, które przeprowadzono na próbce o zachowanej, naturalnej strukturze (Δe w fazie ustalonej badania CRL próbki NNS jest równa $0,07$ [-]).

W przypadku nieosiągnięcia fazy ustalonej konsolidacji CL zwiększenie wiarygodności otrzymywanych wartości współczynników konsolidacji c_v oraz filtracji k jest możliwe po zastosowaniu poprawek korekcyjnych zaproponowanych przez Janbu i in. (1980). Poprawki te można obliczyć wg wzorów zamieszczonych w tabeli 1. Współczynniki korekcyjne zaproponowane przez Janbu i in. (1980) dla stale wzrastających rozkładów ciśnienia porowego przyjmują zawsze wartości od 0 do 1 [-], przy czym jedność osiągnięta jest tylko wtedy, gdy w trakcie badania CRL następuje stabilizacja ciśnienia porowego ($C_{CL} < 0,246$, $T_{CL} > 2$). Z tego względu istnieje pełna zgodność parametrów konsolidacji CL obliczanych w fazie ustalonej badania CRL ze wzorów podstawowych z wartościami uwzględniającymi poprawki zaproponowane przez Janbu i in. (1980). Parametry filtracji oraz konsolidacji ośrodka gruntowego w fazie nieustalonej badania CRL po skorygowaniu będą zatem zawsze wykazywały wartości niższe niż obliczone ze wzorów ogólnych (tab. 1).

W zrealizowanym programie badawczym poprawki zaproponowane przez Janbu i in. uwzględniano w obliczeniach za każdym razem, gdy w badaniu CRL nie osiągnięto fazy ustalonej. Wartości współczynnika konsolidacji iłów mio-pleioceńskich z rejonu Bud Mszczonowskich po zastosowaniu poprawek korekcyjnych zgodnie z oczekiwaniami ulegają zmniejszeniu względem wartości obliczonych wg wzorów podstawowych o ok. $11\text{--}79\%$ (c_v po uwzględnieniu poprawek korekcyjnych: od $1,54\text{E-}9$ do $3,59\text{E-}07$ m²/s). W przypadku współczynnika filtracji różnice te są mniej-



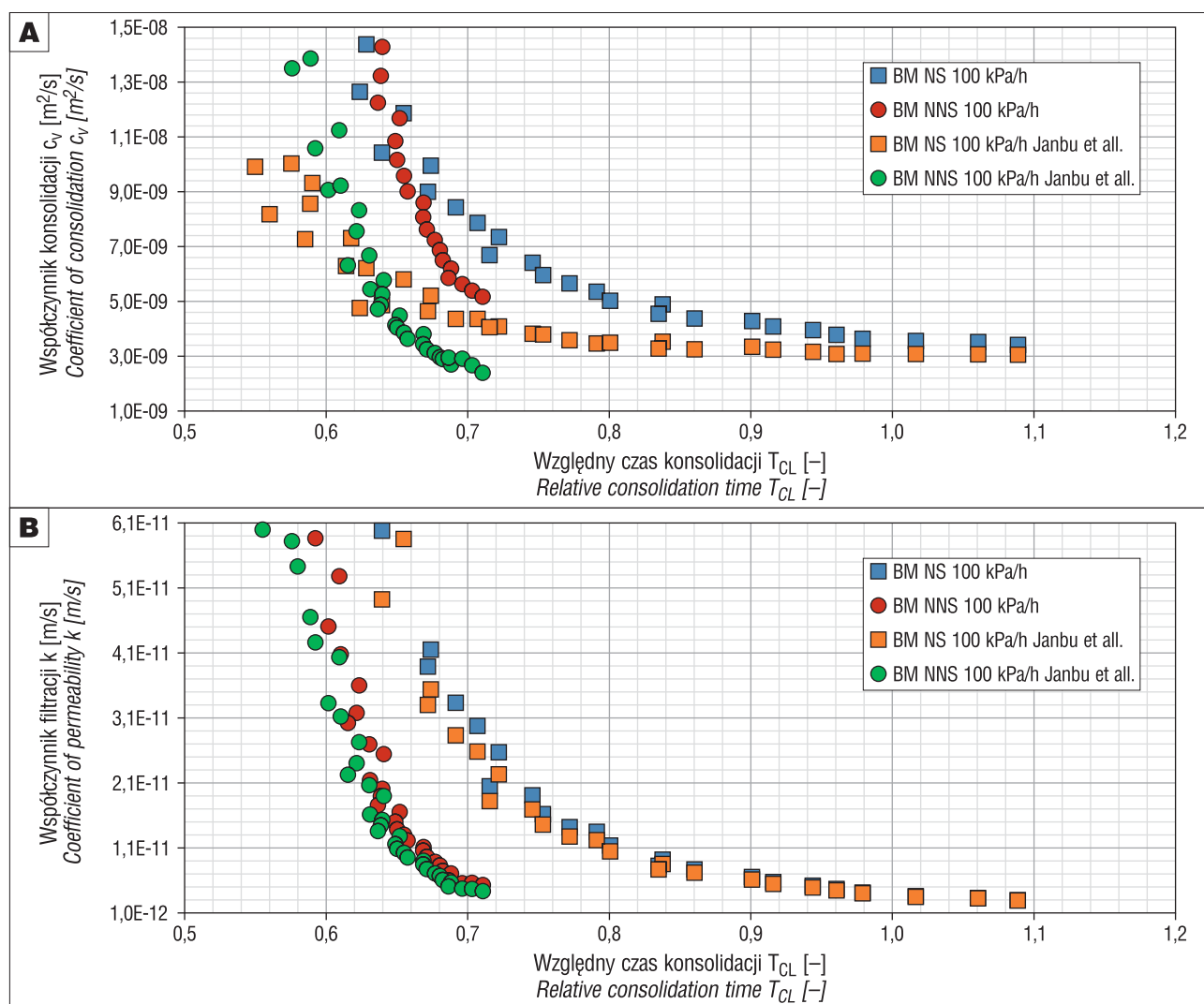
Ryc. 8. Maksymalne wartości odkształcenia osiowego zarejestrowane w trakcie badań CRL iłów mio-pleioceńskich z rejonu Bud Mszczonowskich

Fig. 8. Maximum values of axial displacement obtained for Mio-Pliocene clays from the area of Budy Mszczonowskie during CRL tests

sze i nie przekraczają $2\text{--}38\%$ (k po uwzględnieniu poprawek korekcyjnych – od $5,23\text{E-}09$ do $2,02\text{E-}12$ m/s). Jak można zaobserwować na rycinie 9A i B, redukcja wartości parametrów opisujących filtracyjno-konsolidacyjne właściwości iłów mio-pleioceńskich z rejonu Bud Mszczonowskich po uwzględnieniu poprawek korekcyjnych jest tym mniejsza, im wyższe wartości przyjmuje względny czas konsolidacji T_{CL} (a więc im wyższy jest proces zaawansowania konsolidacji CL), co jest zgodne z założeniami teoretycznymi zawartymi w pracach Janbu i in. (1980) oraz Dobaka (1999).

Prezentowane w niniejszej pracy wartości parametrów opisujących filtracyjno-konsolidacyjne właściwości iłów mio-pleioceńskich z rejonu Bud Mszczonowskich, oznaczone w warunkach stale wzrastającego obciążenia, pod względem ilościowym wykazują zgodność z wynikami badań archiwalnych, które w rozpatrywanym rejonie prowadzili Łuczak-Wilamowska (1997, 2002b) oraz Wysokiński (2007). Jak zaznaczają cytowani autorzy, współczynnik filtracji omawianych gruntów spoistych w przeprowadzonych przez nich badaniach nie przekraczał wartości od $7,30\text{E-}10$ do $3,51\text{E-}08$ m/s, natomiast współczynnik konsolidacji mieścił się w zakresie od $1,48\text{E-}05$ do $2,29\text{E-}07$ m²/s (Łuczak-Wilamowska, 1997). Obserwowane, niższe względem danych archiwalnych, minimalne wartości parametrów filtracji i konsolidacji iłów mio-pleioceńskich z rejonu Bud Mszczonowskich, oznaczone w zaawansowanych etapach przeprowadzonych badań konsolidometrycznych, są związane z przyjęciem w obecnym programie badawczym dużo wyższych wartości maksymalnego naprężenia całkowitego niż miało to miejsce w pracach archiwalnych, po osiągnięciu którego kończono badanie CRL (σ_{max} : 1960–1970 kPa).

Porównując dane zgromadzone dotychczas w pracach dotyczących iłów mio-pleioceńskich z rejonu Bud Mszczonowskich (Łuczak-Wilamowska, 1997; Wysokiński, 2007) z wartościami współczynnika filtracji oraz konsolidacji iłów poznańskich obszaru Polski, można dostrzec wyraźne podobieństwo. Jak podkreślał Gawriuczenkow (2001), ily mio-pleioceńskie zalegające na terenie kraju bez względu na typ oraz rejon występowania charakteryzują się bardzo niską przepuszczalnością, którą wyrażają wartości współczynnika filtracji rzędu od 10^{-11} do 10^{-10} m/s (Gawriuczenkow, 2001). Spostrzeżenia te potwierdził Kaczyński (2007, 2017), podając przy tym, że grunty te w skali kraju przyjmują wartości współczynnika konsolidacji w zakresie od $4,5\text{E-}08$ do $4,0\text{E-}06$ m²/s. Na podstawie danych udokumentowanych w literaturze oraz wyników badań



Ryc. 9. Zmiany wartości współczynników konsolidacji (A) oraz filtracji (B) iłów mio-pliocenicznych z rejonu Bud Mszczonowskich obserwowane po uwzględnieniu współczynników korekcyjnych zaproponowanych przez Janbu i in. (1980). Objasnienia: NS – pasta gruntowa, NNS – próbka nienaruszona

Fig. 9. Changes in the values of coefficients of: consolidation (A) and permeability (B) of Mio-Pliocene clays from the area of Budy Mszczonowskie after taking into account correction coefficients proposed by Janbu et al. (1980). Explanations: NS – soil paste, NNS – intact sample

własnych można zatem stwierdzić, że łył mio-plioceniczne występujące w rejonie Bud Mszczonowskich, podobnie jak łył tej formacji występujące w innych rejonach Polski, w ujęciu klasyfikacji opracowanej przez Pazdro (1983) będą uznane za grunty nieprzepuszczalne. Tym samym łył te występując w rejonie Bud Mszczonowskich, spełniają kryterium izolacyjności ustanowione w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dn. 30 kwietnia 2013 r. w sprawie składowisk odpadów (Rozporządzenie, 2013), co w przyszłości predysponuje je do potencjalnego wykorzystania na potrzeby ochrony środowiska, wyrażone budową zarówno sztucznych, jak i mineralnych barier izolacyjnych.

WNIOSKI

Program badań CRL wykonany na łyłach mio-pliocenicznych z rejonu Bud Mszczonowskich pozwala sformułować następujące wnioski:

1. Właściwości filtracyjno-konsolidacyjne łył mio-pliocenicznych z rejonu Bud Mszczonowskich, określane w warunkach stałe wzrastającego naprężenia, w sposób bezpośredni zależą od przyjętej w trakcie procedury labo-

ratoryjnej prędkości przyrostu obciążenia. Im wyższa będzie prędkość przyrostu obciążenia, tym niższe będą uzyskiwane w trakcie badania CRL wartości współczynnika konsolidacji oraz filtracji. Zależność otrzymywanych parametrów ośrodka gruntowego od zadawanej prędkości przyrostu obciążenia w przypadku badanych łył mio-pliocenicznych wynika bezpośrednio z generowania w trakcie „szybkich” badań konsolidometrycznych znacznych wartości ciśnienia porowego u (dławienie przepływu). Zależność pomiędzy maksymalną wartością ciśnienia porowego oraz zadaną prędkością przyrostu obciążenia w badaniach CRL łył mio-pliocenicznych z rejonu Bud Mszczonowskich przyjmuje postać funkcji liniowej o wartościach stopnia korelacji R^2 rzędu 0,78–0,99.

2. Istotnym czynnikiem wpływającym na charakterystykę filtracyjno-konsolidacyjną łył mio-pliocenicznych z rejonu Bud Mszczonowskich jest ich struktura. Próbkę rekonstruowane (pasty gruntowe) w przeprowadzonych badaniach CRL wykazują ok. 11–62% niższe wartości współczynnika konsolidacji niż próbki o naturalnej strukturze. Obserwowane różnice wartości wspomnianego parametru wynikają z dużej odkształcalności przygotowanych

past gruntowych (ϵ : 41–45%), co w przyjętym zakresie naprężeń całkowitych (σ : 15–1970 kPa) w trakcie trwania konsolidacji CL prowadzi do znacznego skrócenia drogi drenażu próbek rekonstruowanych.

3. Współczynnik filtracji iłów mio-pliocenkich z rejonu Bud Mszczonowskich, oznaczony w warunkach stale wzrastającego obciążenia, przyjmuje wartości od 10^{-9} do 10^{-12} m/s, co sprawia, że grunty te zarówno w warunkach naturalnych, jak i poza miejscem ich naturalnego występowania będą spełniały wymagania stawiane naturalnym oraz sztucznym barierom izolacyjnym. Kryterium izolacyjności w przeprowadzonym programie badawczym zostało osiągnięte w ustalonej i nieustalonej fazie konsolidacji CL.

4. Badania CRL wykonane na iłach mio-pliocenkich z rejonu Bud Mszczonowskich potwierdzają skuteczność badań konsolidometrycznych ze stale wzrastającym obciążeniem przy realizacji analiz laboratoryjnych, mających na celu szybką, a zarazem wiarygodną ocenę właściwości filtacyjno-konsolidacyjnych cech ośrodka gruntowego, który w ogólnej opinii jest uważany za praktycznie nieprzepuszczalny.

Autor dziękuje Recenzentom za czas przeznaczony na rzetelną ocenę niniejszej pracy oraz cenne uwagi, które wpłynęły na jej jakość merytoryczną.

LITERATURA

- ABOSHI H., YOSHIKUMI H., MAURYAMA S. 1970 – Constant Loading Rate Consolidation Test. Soils Foundation., 10 (1): 43–56.
- BARAŃSKI M. 2000 – Wytrzymałość i odkształcalność glin lodowcowych zanieczyszczonych ropopochodnym benzenem na terenie Petrochemii Płock S.A. Rozpr. dokt., Wydz. Geol. UW.
- DOBAK P. 1999 – Rola czynnika filtracyjnego w badaniach jednoosiowej konsolidacji gruntów. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- DOBAK P. 2007 – Określenie przepuszczalności gruntów spoistych w badaniach konsolidacji z ciągłym przyrostem obciążenia. Prz. Geol., 55 (2): 126–132.
- DOBAK P. 2008 – Evaluation of consolidation parameters in CL tests: theoretical and practical aspects. Geol. Quart., 52 (4): 397–410.
- DOBAK P., KOWALCZYK S. 2008 – Consolidation parameters of Neogene green clays from Bełchatów – a study on CL test interpretation. Geologia, 50: 20–25.
- DOBAK P., KOWALCZYK S. 2010 – Zachowania konsolidacyjne past gruntowych jako potencjalnego materiału izolacyjnego. Prz. Geol., 58 (9/2): 903–911.
- DOBAK P., GASZYŃSKI J. 2014 – Aspects of permeability and rheology in uniaxial consolidation, considering analysis of soil deformation progress and pore pressure dissipation. Arch. Civil Eng. Environ., 4: 47–55.
- DOBAK P., GASZYŃSKI J. 2015 – Evaluation of soil permeability from consolidation analysis based on Terzaghi's and Biot's theories. Geol. Quart., 59 (2): 373–381.
- 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.
- DOBAK P., WYRWICKI R. 2000 – Hydroizolacyjne właściwości kredy jeziornej. Prz. Geol., 48 (5): 412–415.
- DRĄGOWSKI A., ŁUCZAK-WILAMOWSKA B. 2005 – Uwarunkowania stosowalności iłów jako izolacyjnych barier geologicznych na przykładzie iłów ze złoże w Budach Mszczonowskich. Prz. Geol., 53: 687–690.
- DUNCAN J.M. 1993 – Limitations of Conventional Analysis of Consolidation Settlement. J. Geotech. Eng., 119 (9): 1333–1359.
- GAWRIUCZENKOW I. 2001 – Ocena właściwości iłów serii poznańskiej jako potencjalnych, izolacyjnych barier geologicznych. Pr. dokt., Wydz. Geol. UW.
- GAWRIUCZENKOW I., WÓJCIK E. 2013 – Porównanie właściwości ekspansyjnych iłów neogeńskich z Mazowsza. Prz. Geol., 61 (4): 243–247.
- GLAZER Z. 1985 – Mechanika gruntów, wydanie drugie. Wyd. Geol., Warszawa.
- HEAD K.H. 1986 – Manual of Soil Laboratory Testing. Pentch Press. London.
- IZDEBSKA-MUCHA D., KORZENIOWSKA-REJMER E. 2009 – Wpływ zanieczyszczeń ropopochodnych na właściwości fizyczne gruntów stosowanych do budowy mineralnych barier uszczelniających składowiska odpadów. Środowisko, 106 (11): 39–54.
- IZDEBSKA-MUCHA D. 2003 – Wpływ benzyny i oleju napędowego na właściwości deformacyjne monomineralnych iłów wzorcowych oraz gruntów spoistych. Rozpr. dokt., Wydz. Geol. UW.
- JANBU N., TOKHEIM O., SENNESET K. 1980 – Consolidation tests with continuous loading. Norwegian Geotechnical Institute. Publ. No. 9, Oslo.
- KACZYŃSKI R. 2007 – Geologiczno-inżynierskie zachowanie się iłów londyńskich i warszawskich. Geologos, 11:481–489.
- KACZYŃSKI R. 2017 – Warunki geologiczno-inżynierskie na obszarze Polski. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- KOWALCZYK S. 2005 – Ocena doświadczeń rozkładów ciśnienia porowego w badaniach konsolidometrycznych typu CL. Prz. Geol., 53 (2): 162–167.
- KOWALCZYK S. 2007 – Zmiany właściwości filtracyjnych w procesie konsolidacji zielonych iłów beidelitowych z Rowu Kleszczowa. Pr. dokt., Wydz. Geologii UW.
- KOWALCZYK S., SZCZEPAŃSKI T., DOBAK P. 2013 – Charakterystyka rozkładu ciśnienia porowego w badaniach konsolidacji past gruntowych z północnopolskich glin zwałowych. Civil Environ. Eng., 4: 127–134.
- LOWE J., JONAS E., OBRICANS V. 1969 – Controlled gradient consolidation tests. Proc. ASCE, vol. 95, SM1.
- ŁUCZAK-WILAMOWSKA B. 1997 – Modelowe właściwości iłów neogeńskich z Mszczonowa jako warstw izolacyjnych. Pr. dokt., Wydz. Geol. UW.
- ŁUCZAK-WILAMOWSKA B. 2002a – Neogene clays from Poland as mineral salting barriers for landfills: experimental study. Appl. Clay Sc., 21: 33–43.
- ŁUCZAK-WILAMOWSKA B. 2002b – Iły serii poznańskiej jako podłoże składowisk odpadów na przykładzie odsłonięcia w Budach Mszczonowskich. Prz. Geol., 50 (10/2): 966–970.
- ŁUCZAK-WILAMOWSKA B., DOBAK P. 2002 – Designing of soil-mixture barriers: Application of consolidation tests. Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement. International Meeting, Reims, France.
- MAJER E., BIAŁOBRZEŃSKI T. 2015 – Oznaczanie pionowego współczynnika konsolidacji (c_v) namulów organicznych metodami IL i CL. Acta Sci. Pol. Architect., 14 (1): 15–27.
- PAJAŁ R., DOBAK P. 2008 – Określenie parametrów filtracyjnych iłów krakowieckich z badań w konsolidometrze Rowe'a. Geologia, 34 (4): 677–689.
- PAJAŁ R., DOBAK P. 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.
- PAJAŁ R., DOBAK P. 2012 – Wpływ metod interpretacji badań konsolidacyjnych typu IL na zmienność oznaczeń przepuszczalności iłów krakowieckich. Biul. Państw. Inst. Geol., 452: 217–224.
- PAZDRO Z. 1983 – Hydrogeologia ogólna. Wyd. Geol. Warszawa.
- PN-88/B-04481 – Grunty budowlane. Badania laboratoryjne.
- ROZPORZĄDZENIE Ministra Środowiska z dn. 30 kwietnia 2013 r. w sprawie składowisk odpadów. Dz.U. z 2013 r. poz. 21.
- SINHA U.N., BHARGAVA S.N. 1991 – Variation in differential pore water pressure and particle size at different constant rate of loading in an automated consolidation testing system. Geotech. Eng., 22: 47–256.
- SMITH R.E., WAHLS H.E. 1969 – Consolidation under constant rate of strain. Proc. ASCE, vol. 95, No SM2.
- SOUMAYA B., KEMPFERT H.G. 2010 – Verformungsverhalten weicher Böden im spannungsgesteuerten Kompressionsversuch. Bautechnik 87, Heft 2. Berlin.
- STAJSZCZAK P. 2017 – Ocena właściwości ekspansyjnych iłów mio-pliocenkich z rejonu Bud Mszczonowskich. Prz. Geol., 65: 168–176.
- SZALEWICZ H., WŁODEK M. 2009 – Szczegółowa mapa geologiczna Polski 1 : 50 000, ark. Mszczonów. Nar. Arch. Geol. PIB-PIB, Warszawa.
- TERZAGHI K. 1925 – Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage. Deuticke, Leipzig
- VU CAO MINH 1976 – Jednoosiowa konsolidacja gruntów z uwzględnieniem pelzania. Pr. dokt., Wydz. Geologii UW.
- WESLEY L.D. 2001 – Consolidation behavior of allophane Claus. Geotechnique, 51 (10): 901–904.
- WIŁUN Z. 1987 – Zarys Geotechniki. Wyd. Komunikacji i Łączności. Warszawa.
- WIN BO M. 2008 – Compressibility of Ultra-Soft Soil. World Scientific Publishing Co. Singapore: 178–192.
- WISSA A.E.Z., CHRISTIAN J.T., DAVIS E.H., HEIBERG S. 1971 – Consolidation at constant rate of strain. Proc. ASCE, vol. 197, No. SM2.
- WYSOKIŃSKI L. (red.) 2007 – Zasady oceny przydatności gruntów spoistych Polski do budowy mineralnych barier izolacyjnych. ITB, Warszawa.

Praca wpłynęła do redakcji 25.05.2018 r.
Akceptowano do druku 9.08.2018 r.

Filtracyjno-konsolidacyjne właściwości ilów mio-pleoceńskich z rejonu Bud Mszczonowskich w warunkach stale wzrastającego obciążenia – patrz str. 558
Consolidation and filtration properties of Mio-Pliocene clays from the Budy Mszczonowskie region obtained during consolidation tests with constant rate of loading – see p. 558



Ryc. 1. Wyrobisko ilów mio-pleoceńskich w rejonie Bud Mszczonowskich – część północna
Fig. 1. Open-cut pit of Mio-Pliocene clays located in the area of Budy Mszczonowskie – northern part



Ryc. 2. Iły mio-pleoceńskie widoczne w ścianie eksploatacyjnej wyrobiska zlokalizowanego w Budach Mszczonowskich.
Obie fot. S. Stajszczyk
Fig. 2. Mio-Pliocene clays exposed on the extraction wall of the Budy Mszczonowskie open-cut pit. Both photos by S. Stajszczyk

Filtracyjno-konsolidacyjne właściwości ilów mio-pleoceńskich z rejonu Bud Mszczonowskich w warunkach stale wzrastającego obciążenia – patrz str. 558
Consolidation and filtration properties of Mio-Pliocene clays from the Budy Mszczonowskie region obtained during consolidation tests with constant rate of loading – see p. 558



Ryc. 1. Wyrobisko ilów mio-pleoceńskich w rejonie Bud Mszczonowskich – część północna
Fig. 1. Open-cut pit of Mio-Pliocene clays located in the area of Budy Mszczonowskie – northern part



Ryc. 2. Iły mio-pleoceńskie widoczne w ścianie eksploatacyjnej wyrobiska zlokalizowanego w Budach Mszczonowskich.
Obie fot. P. Stajszczyk
Fig. 2. Mio-Pliocene clays exposed on the extraction wall of the Budy Mszczonowskie open-cut pit. Both photos by P. Stajszczyk