



Ścisłość wybranych gruntów drobnoziarnistych z centralnej Polski w warunkach stałego przyrostu obciążenia

Piotr Stajszczyk¹



Compressibility of fine-grained soils from central Poland during constant rate of loading tests. *Prz. Geol.*, 70: 503–512; doi: 10.7306/2022.16

Abstract. The article presents the results of CRL research on Mio-Pliocene clay and glacial till. The research has shown that the compressibility of fine-grained soils during a constant rate of loading tests depends on the physical properties of the soil and the adopted loading velocity. The research made it possible to determine the role of pore pressure in shaping the values of parameters describing the compressibility of cohesive soils.

Keywords: CRL test, compressibility, cohesive soils, pore pressure

W mechanice gruntów ścisłość gruntu jest rozumiana jako zmniejszenie objętości ośrodka gruntowego w następstwie zmiany stanu naprężenia. Zmiana objętości gruntu pod wpływem zwiększenia obciążenia jest spowodowana zmniejszeniem objętości przestrzeni porowej wskutek wzajemnego przemieszczenia cząstek i ziaren, zmniejszenia grubości podwójnej warstwy elektrycznej, odkształcania się cząstek oraz kruszenia poszczególnych ziaren frakcji grubszych (Glazer, 1985; Wiłun, 1987; Kaczyński, 2017). Wśród czynników wpływających na ścisłość ośrodka gruntowego należy wymienić jego właściwości fizyczne (skład granulometryczny gruntu, porowatość, wilgotność, skład mineralny frakcji ilowej), historię obciążania (prekonsolidacja) oraz cechy mikrostrukturalne (typ mikrostruktury, obecność lub brak cementacji szkieletu gruntowego, wzmocnienie struktury wskutek starzenia się gruntu; Grabowska-Olszewska, 1977; Holtz, Kovacs, 1981; Szczepański, 2005).

Na skutek ścisłości gruntu zachodzi proces zwany osiadaniem. W praktyce inżynierskiej osiadanie jest uwzględniane na etapie projektowania inwestycji poprzez wykonanie obliczeń stanu granicznego użyteczności (PN-B-03020:1981, PN-EN 1997-1:2008). W obliczeniach tych przyjmuje się parametry gruntu oznaczone w trakcie prac geologicznych, których wyniki są przedstawiane w dokumentacjach geologiczno-inżynierskich lub geotechnicznych dokumentacjach badań podłoża gruntowego.

Odkształcalność gruntów stanowiących podłoże fundamentów obiektów budowlanych można badać w warunkach laboratoryjnych, oceniając ich ścisłość w urządzeniach zwanych edometrami lub konsolidometrami. W badaniach odkształcalności ośrodka gruntowego stosuje się dwa sposoby zadawania obciążenia (Lowe i in., 1969; Smith, Wahls, 1969; Aboshi i in., 1970; Wisa i in., 1971; Head, 1986; Dobak, 1999; Soumaya, 2005; Soumaya, Kempfert, 2010):

□ skokowy przyrost obciążenia – IL (*incremental loading*);

□ ciągły przyrost obciążenia – CL (*continuous loading*).

Badania edometryczne z zastosowaniem skokowego zwiększania obciążenia próbki gruntu (IL) ze względu na ich prostą procedurę laboratoryjną, łatwość interpretacji pomiarów oraz stosunkowo niewielki koszt są obecnie najczęściej stosowaną, laboratoryjną metodą oceny ścisłości gruntów drobnoziarnistych na potrzeby dokumentowania warunków geologiczno-inżynierskich (PN-B-04481:1988, ASTM D2435-04, PN-EN ISO 17892-5:2017).

Zaletą stosowania metody badań IL jest możliwość rozpoznania procesu pełzania szkieletu gruntowego pod stałym obciążeniem, wadą natomiast dłuższy, niekiedy znacząco, czas wykonywania badań oraz występowanie odkształceń własnych aparatury badawczej i ich wpływ na wyniki pomiarów.

Rozwój dostępnych technologii oraz chęć wyeliminowania niedoskonałości badań edometrycznych ze skokowym przyrostem obciążenia sprawiły, że w drugiej połowie XX w. do praktyki laboratoryjnej wprowadzono badania konsolidometryczne typu CL (Lowe i in., 1969; Smith, Wahls, 1969; Aboshi i in., 1970; Wisa i in., 1971). Badania te charakteryzują się dużo krótszą procedurą laboratoryjną niż tradycyjne pomiary IL oraz mniejszym wpływem odkształceń własnych aparatury pomiarowej na uzyskiwane wartości parametrów gruntu. Czynniki te stanowią niewątpliwą zaletę badań CL. Problemem może być natomiast nadal brak krytycyzmu w interpretowaniu wyników pomiarów.

Badania CL (z ciągłym przyrostem obciążenia) można prowadzić w konsolidometrach, których konstrukcja umożliwia uzyskanie (Head, 1986; ASTM D4186-06):

□ stałej prędkości odkształcania CRS (*constant rate of strain*);

□ stałej prędkości obciążenia CRL (*constant rate of loading*);

□ kontrolowanego gradientu ciśnienia porowego CG (*controlled gradient*).

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

Pomyślna aplikacja badań CRL do oceny filtracyjno-konsolidacyjnych właściwości gruntów drobnoziarnistych sprawia, że mogą być one również przydatnym narzędziem do sporządzania charakterystyk odkształceniowych ośrodka gruntowego na potrzeby dokumentowania warunków geologiczno-inżynierskich (Dobak, 2008; Stajszczak i in., 2020).

Celem niniejszej pracy jest ocena:

- ściśliwości wybranych gruntów drobnoziarnistych z centralnej Polski w warunkach stałego przyrostu obciążenia, tj. łąw mio-plioceńskich oraz glin lodowcowych;
- wpływu prędkości obciążania na uzyskiwane wartości parametrów opisujących ściśliwość ośrodka gruntowego (moduł ściśliwości, wskaźnik ściśliwości);
- wpływu struktury gruntów drobnoziarnistych oraz ich właściwości inherentnych na uzyskiwane charakterystyki ściśliwości w warunkach stałego przyrostu obciążenia;
- przydatności badań konsolidometrycznych typu CRL do wiarygodnej oceny ściśliwości ośrodka gruntowego.

METODYKA

Do badań ściśliwości gruntów w warunkach ciągłego przyrostu obciążenia wytypowano próbki łąw mio-plioceńskich z rejonu Bud Mszczonowskich k. Żyrardowa (woj. mazowieckie) oraz glin lodowcowych zlodowacenia Odry z osiedla Fort Służew na warszawskim Ursynowie. Są to grunty drobnoziarniste o odmiennej genezie, warunkach depozycji oraz różnym wpływie przekształceń postsedymentacyjnych (Lindner, 1992; Kaczyński, 2017). Taki wybór materiału badawczego umożliwił uwzględnienie wpływu zróżnicowania właściwości inherentnych ośrodka gruntowego (tzn. składu granulometrycznego oraz mineralnego) na przebieg zmian wskaźnika porowatości oraz parametrów ściśliwości (moduł ściśliwości, wskaźnik ściśliwości) w warunkach stale wzrastającego obciążenia (tab. 1).

Próbki glin lodowcowych (Sarnacka, 1979) pobrano z wykopów fundamentowych pod budynki osiedla mieszkaniowego przy zbiegu ulicy Nowoursynowskiej i Dolinki Służewieckiej w Warszawie. Głębokość poboru próbek wynosiła ok. 5–7 m p.p.t. (Stajszczak i in., 2020).

Próbki łąw mio-plioceńskich pobrano z kopalni odkrywkowej w Budach Mszczonowskich k. Mszczonowa, gdzie łąwy występują w postaci kry glacitektonicznej na polodowcowej Wysoczyźnie Rawskiej (Szalewicz, Włodek, 2009; Łuczak-Wilamowska, 2002).

Próbki łąw oraz glin wycięto (ze ściany wyrobiska lub ściany wykopu fundamentowego) w postaci monolitów o kształcie prostopadłościanu (wg PN-EN 1997-2:2009 są to próbki kategorii A1 – czyli o nienaruszonej strukturze). Natychmiast po wycięciu monolity te oznaczono oraz zabezpieczono, dzięki czemu do minimum zmniejszono ryzyko zmian wilgotności i struktury pobranych gruntów w trakcie transportu do laboratorium.

W ramach prac laboratoryjnych określono:

- właściwości fizyczne gruntów zgodnie z normami PN-EN ISO 17892-1:2015, PN-EN ISO 17892-2:2015, PN-EN ISO 17892-4:2017 i PN-EN ISO 17892-12:2018

oraz z opcjonalnym uwzględnieniem klasyfikacji wg PN-B-04481:1988 i PN-EN ISO 14688-1,2:2018;

- skład mineralny metodą termiczną w derywatografie Q600 firmy TA i zinterpretowano wyniki wg zaleceń metodycznych Kościówko i Wyrwickiego (1996);

□ ściśliwości w warunkach ciągłego przyrostu obciążenia w konsolidometrze Bardena-Rowe'a z zastosowaniem doświadczeń metodycznych wg: Rowe'a i Barden'a, 1966; Wissa i in., 1971; Vu Cao Minha, 1977; ASTM D 4186-06; Dobaka, 1999, 2008; Kowalczyka, 2007; Dobaka i in., 2015; Stajszczaka, 2018, 2021 oraz Stajszczaka i in., 2020.

Przeprowadzono badania ściśliwości próbek o nienaruszonej strukturze i w stanie naturalnym (półzwartym lub twaroplastycznym), a także badania past gruntowych wykonanych z badanych gruntów (pozbawionych naturalnej struktury i więzi).

Pasty gruntowe przygotowano według procedury opisanej w pracach Kowalczyka (2007) oraz Stajszczaka (2019). Materiał gruntowy pobrany w warunkach *in-situ* poddano procedurze wysuszenia, rozcierania, mieszania z wodą, a później wstępnej konsolidacji pod naprężeniem 20 kPa. Wstępną konsolidację past gruntowych prowadzono przez ok. 5 tygodni. Z past oraz próbek o nienaruszonej strukturze wycinano próbki w kształcie walca o średnicy $d = 63$ mm oraz wysokości $h = 25$ mm, które następnie poddano badaniom konsolidometrycznym typu CRL (*constant rate of loading*). W zależności od stanu, struktury oraz przepuszczalności gruntu zastosowano różne prędkości obciążania:

- pasty gruntowe (łąwy zastoiskowe i gliny lodowcowe) – 12,5; 25; 50 oraz 100 kPa/h;
- próbki kategorii A1 łąw mio-plioceńskich – 25, 50 oraz 100 kPa/h;
- próbki kategorii A1 gliny lodowcowej – 50, 100 oraz 150 kPa/h.

W ten sposób oznaczono wartości parametrów definiujących ściśliwość gruntów drobnoziarnistych, a także oszacowano wpływ struktury ośrodka gruntowego oraz jego właściwości inherentnych na ściśliwość w warunkach ciągłego przyrostu obciążenia.

Odształcalność badanych gruntów drobnoziarnistych oceniono na podstawie osiowego odkształcenia ϵ ich próbek, konsolidometrycznego modułu ściśliwości M_o oraz wskaźnika ściśliwości C_c (tab. 1).

Wielkością mierzoną obligatoryjnie podczas badań ściśliwości CRL jest zmiana wysokości próbki gruntu w następstwie zwiększenia jej obciążenia. Wartość ta służy do szacowania odkształceń osiowych gruntów drobnoziarnistych.

Tab. 1. Parametry definiujące ściśliwość gruntu podczas badania CRL
Table 1. Parameters defining compressibility of soil during CRL test

Parametr Parameter	Wzór Formula
Odształcenie osiowe [%] <i>Axial strain</i>	$\epsilon = \frac{\Delta H}{H_i} \cdot 100$
Moduł ściśliwości [MPa] <i>Modulus of compressibility</i>	$M_o = \frac{\Delta \sigma' \cdot H_{i-1}}{H_{i-1} - H_i}$
Wskaźnik ściśliwości [-] <i>Compression index</i>	$C_c = - \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'}$

Objaśnienia symboli: H – wysokość próbki [m], σ' – naprężenie efektywne [kPa], e – wskaźnik porowatości [-]

Explanations: H – sample height [m], σ' – effective stress [kPa], e – void ratio [-]

nistych na poszczególnych etapach badania konsolidometrycznego (tab. 1). Maksymalne odkształcenia gruntów drobnoziarnistych zależą od przeszłości geologicznej ośrodka gruntowego (środowisko sedymentacji, cementacja, prekonsolidacja), która warunkuje jego właściwości inherentne, a także stan i strukturę.

W ocenie odkształcalności ośrodka gruntowego są stosowane moduł ściśliwości M_k oraz wskaźnik ściśliwości C_c (PN-EN ISO 17892-5:2017), który uwzględnia zmiany wskaźnika porowatości gruntu spowodowane przyrostem naprężenia efektywnego w zakresie obciążeń pierwotnych (tab. 1). Wartości wskaźnika ściśliwości wyznaczono w przedziale naprężeń efektywnych odpowiadających ściśliwości pierwotnej gruntu, którą na krzywych ściśliwości wyraża liniowa zależność $e-\log\sigma'$.

Uzupełnieniem przeprowadzonych analiz było podjęcie próby wyznaczenia naprężenia prekonsolidacji badanych gruntów drobnoziarnistych z uwzględnieniem różnych prędkości obciążania. Do wyznaczenia wartości

naprężenia prekonsolidacji zastosowano metodę Casagrande'a (PN-EN ISO 17892-5:2017).

WYNIKI BADAŃ

Badania fizyczne

Zarówno ility mio-pliocenijskie z Bud Mszczonowskich (I wg PN-88/B-04481), jak i gliny lodowcowe z Fortu Służew w Warszawie (ił z piaskiem wg PN-EN ISO 14688-1 i PN-EN ISO 14688-2) są gruntami drobnoziarnistymi (tab. 2). Skład granulometryczny i mineralny tych gruntów odzwierciedla odmienne warunki ich sedymentacji. Badane ility mio-pliocenijskie zawierają prawie dwukrotnie więcej frakcji ilowej niż gliny lodowcowe z Fortu Służew w Warszawie. W glinach zawartość frakcji pyłowej i piaskowej jest podobna (tab. 2). Skład granulometryczny badanych gruntów przyczynia się do zróżnicowania ich właściwości fizycznych. Wilgotność naturalna iltów mio-pliocenijskich

Tab. 2. Parametry fizyczne badanych gruntów spoistych oznaczone przed rozpoczęciem badań CRL
Table 2. Physical parameters of tested soils obtained before CRL tests

Parametr / Parameter	Gлина lodowcowa – Warszawa (Ursynów)* Glacial till – Warsaw (Ursynów)*		Iły mio-pliocenijskie – Budy Mszczonowskie** Mio-Pliocene clays – Budy Mszczonowskie**	
	Próbki o nienaruszonej strukturze Intact samples	Pasty gruntowe Soil pastes	Próbki o nienaruszonej strukturze Intact samples	Pasty gruntowe Soil pastes
Wilgotność / Moisture content w [%]	15,3–18,9	36,8–39,7	26,8–34,1	54,3–55,4
Granica plastyczności / Plastic limit w_p [%]	15,1–18,0	–	24,7–29,4	–
Granica płynności / Liquid limit w_L [%]	40,3–46,2	–	65,0–88,0	–
Stopień plastyczności / Liquidity index I_L [–]	–0,06–0,11	0,74–0,85	0,01–0,11	0,49–0,53
Wskaźnik konsystencji / Consistency index I_c [–]	0,89–1,06	0,15–0,26	0,82–0,99	0,47–0,51
Gęstość właściwa / Density ρ_s [Mg/m ³]	2,66	–	2,69	–
Gęstość objętościowa / Bulk density ρ [Mg/m ³]	2,10–2,16	1,83–1,86	1,92–2,06	1,68–1,69
Porowatość / Porosity n [–]	0,30–0,33	0,49–0,51	0,39–0,47	0,59–0,60
Wskaźnik porowatości / Void ratio e [–]	0,43–0,50	0,96–1,04	0,64–0,89	1,47–1,49
Stopień wilgotności / Degree of saturation S_r [–]	0,97–1,00	1,00	0,95–1,00	1,00
Frakcja ilowa / Clay fraction f_i [%]	31–44		51–66	
Frakcja pyłowa / Silt fraction f_π [%]	22–38		31–40	
Frakcja piaskowa / Sand fraction f_p [%]	27–39		3–9	
Skład mineralny [%] / Mineral composition [%]				
Beidelit / Beidellite	17,6		54,7	
Illit / Illite	10,6		–	
Kaolinit / Kaolinite	3,2		10,4	
Węglany / Carbonates	5,6		–	
Goethyt / Goethite	–		3,4	
Kwarc i inne / Quartz and others	63,0		31,5	

*wg Stajszczyka i in. (2020) / after Stajszczyk et al. (2020)

** wg Stajszczyka (2017, 2018) / after Stajszczyk (2017, 2018)

wynosi od 26,8 do 34,1%. Ich nasycenie wodą (S_r) jest szacowane na $>0,95$. Wilgotność naturalna glin lodowcowych była mniejsza niż ilów z rejonu Bud Mszczonowskich i mieściła się w przedziale 15–19%, a nasycenie porów wodą (S_r) przekraczało 0,97 (tab. 2). Dwukrotne różnice wilgotności naturalnej, udokumentowane w badanych typach genetycznych gruntów drobnoziarnistych, można wiązać z odmiennym udziałem frakcji ilowej i jej składem mineralnym. Zawartość frakcji ilowej w składzie granulometrycznym ośrodka gruntowego oraz jej skład mineralny determinują jego hydrofilność i w rozpatrywanym przypadku sprawiają, że wartości granic konsystencji i wskaźnika plastyczności ilów mio-pliocenских w stosunku do glin lodowcowych są niemal dwukrotnie większe (tab. 2).

Wśród minerałów ilastych badanych gruntów drobnoziarnistych dominuje beidelit. Zawartość beidelitu w ilach z rejonu Bud Mszczonowskich jest trzykrotnie większa, niż w utworach glacialnych zlodowacenia Odry w rejonie Warszawy (Stajszczak, 2017, 2018; Stajszczak, Dobak, 2021).

Na podstawie badań własnych oraz dostępnych danych archiwalnych stwierdzono, że ility mio-pliocenские (zarówno próbki kategorii A1, jak i pasty gruntowe) mają większą porowatość (ok. 1,2–1,4 raza) oraz wyższy wskaźnik porowatości (ok. 1,4–1,8 raza) niż gliny lodowcowe z osiedla Fort Służew w Warszawie. Znaczny udział przestrzeni porowej w ilach z rejonu Bud Mszczonowskich sprawia, że mają one mniejszą gęstość objętościową aniżeli badane gliny lodowcowe. Natomiast większy udział frakcji ilowej w ilach mio-pliocenских sprawia, że ich gęstość właściwa jest większa aniżeli glin lodowcowych, w których ilościowo dominuje kwarc (tab. 2).

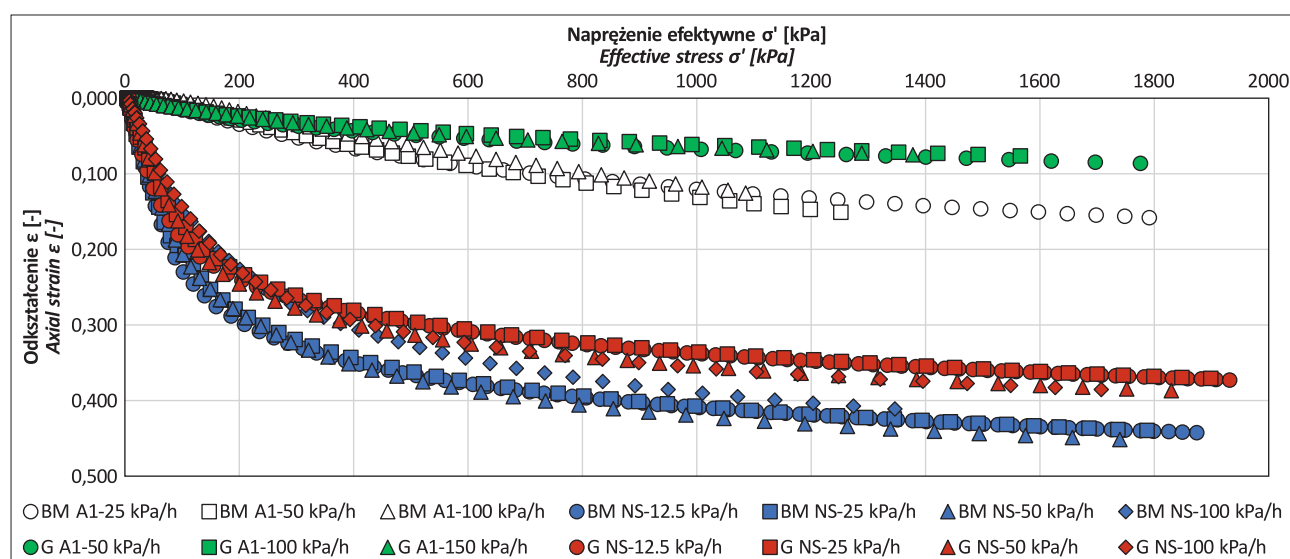
Pasty gruntowe przygotowane z badanych ilów i gliny, pozbawione geologicznie ukształtowanych więzi strukturalnych, miały prawie dwukrotnie większą wilgotność oraz dużo większy wskaźnik porowatości niż próbki o naturalnej strukturze. Próbki o naruszonej strukturze, przygoto-

wane do badań CRL, były w stanie miękkoplastycznym (PN-B-02480:1986), konsystencji od bardzo miękkoplastycznej do plastycznej (PN-EN ISO 14688-2:2018) i charakteryzowały się pełnym nasyceniem wodą ($S_r = 1$). Stanowiły więc doskonały materiał referencyjny do doświadczalnej oceny ściśliwości i porównania zachowań modelowego układu dwufazowego z gruntami o naturalnej strukturze.

Badania ściśliwości

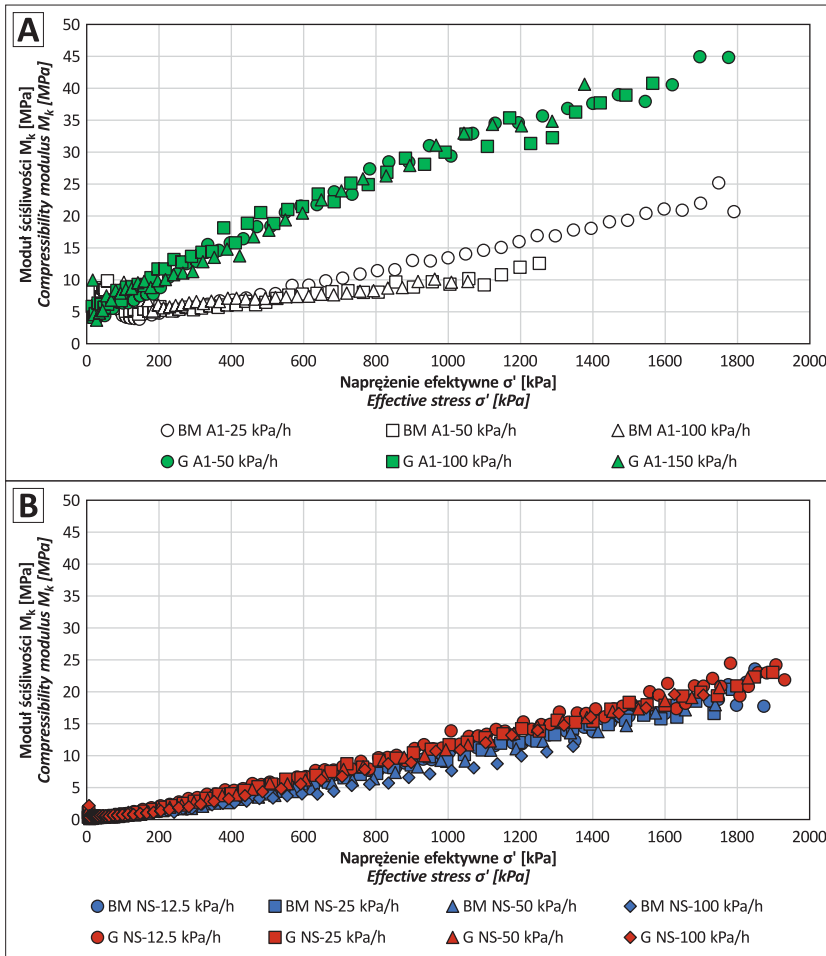
Maksymalne odkształcenia osiowe próbek kategorii A1 gliny lodowcowej zlodowacenia Odry wyniosły od 0,075 do 0,086 i były 4–5 razy mniejsze niż maksymalne odkształcenia past gruntowych (ryc. 1). W badaniach CL maksymalne odkształcenia osiowe próbek ilów mio-pliocenских o nienaruszonej strukturze z rejonu Bud Mszczonowskich wyniosły od 0,126 do 0,158 i były od 1,5 raza do 2 razy większe niż odkształcenia glin lodowcowych z osiedla Fort Służew w Warszawie. Pasty gruntowe sporządzone z ilów miały większą ściśliwość niż próbki ilów o naturalnej strukturze. W przyjętym zakresie naprężeń efektywnych (10–1932 kPa) ich odkształcenia osiowe ϵ_{max} mieściły się w zakresie 0,411–0,452 (ryc. 1).

Odształcenia osiowe postępujące w toku stałego zwiększania obciążenia próbek gruntu wpływają na wartość konsolidometrycznego modułu ściśliwości M_k . Najmniejsze wartości modułu ściśliwości M_k udokumentowano na początkowym etapie badania CRL wszystkich badanych próbek gruntów drobnoziarnistych. Wraz ze zwiększaniem obciążenia wartość tego modułu sukcesywnie wzrastała, wskazując na stopniowe zmniejszanie się odkształcalności ośrodka gruntowego (ryc. 2). Próbki o nienaruszonej strukturze charakteryzowały się większym modułem ściśliwości (M_{kmax} od 10 do 45 MPa). Wartości modułu M_k past gruntowych były mniejsze (ok. 24–25 MPa). Zniszczenie naturalnej struktury glin lodowcowych spowodowało większe zmniejszenie wartości modułu



Ryc. 1. Odształcenia osiowe próbek o nienaruszonej strukturze oraz past gruntowych w trakcie badań CRL: A1 – próbka o nienaruszonej strukturze, NS – pasta gruntowa, BM – ility mio-pliocenские z Bud Mszczonowskich, G – gliny lodowcowe z rejonu Warszawy

Fig. 1. The axial strain of undisturbed samples and ground pastes obtained during CRL tests: A1 – undisturbed sample, NS – soil paste, BM – Mio-Pliocene clays from the Budy Mszczonowskie area, G – glacial till from the Warsaw area



Ryc. 2. Wartości modułu ścisłości uzyskane w trakcie badań CRL próbek o nienaruszonej strukturze (A) oraz past gruntowych (B): A1 – próbka o nienaruszonej strukturze, NS – pasta gruntowa, BM – ropy mio-pliocenię z Bud Mszczonowskich, G – gliny lodowcowe z rejonu Warszawy

Fig. 2. The values of compressibility modulus obtained during CRL tests of undisturbed samples (A) and ground pastes (B): A1 – undisturbed sample, NS – soil paste, BM – Mio-Pliocene clays from Budy Mszczonowskie area, G – glacial till from the Warsaw area

(pasty gruntowe). Innym zmianom podlegał wskaźnik ścisłości próbek kategorii A1 ropy mio-pliocenię, obciążanych z prędkością 50 oraz 100 kPa/h (ryc. 3). Ponadto stwierdzono, że szybciej obciążane próbki ropy mio-pliocenię charakteryzują się większym wskaźnikiem ścisłości (C_c), którego wartości niekiedy mogą być znacząco zawyżone (ryc. 3B – badanie pasty gruntowej BM NS-100 kPa/h). W badaniach CRL prędkość obciążania próbek gruntu słabiej oddziałuje na wskaźnik ścisłości C_c glin lodowcowych niż

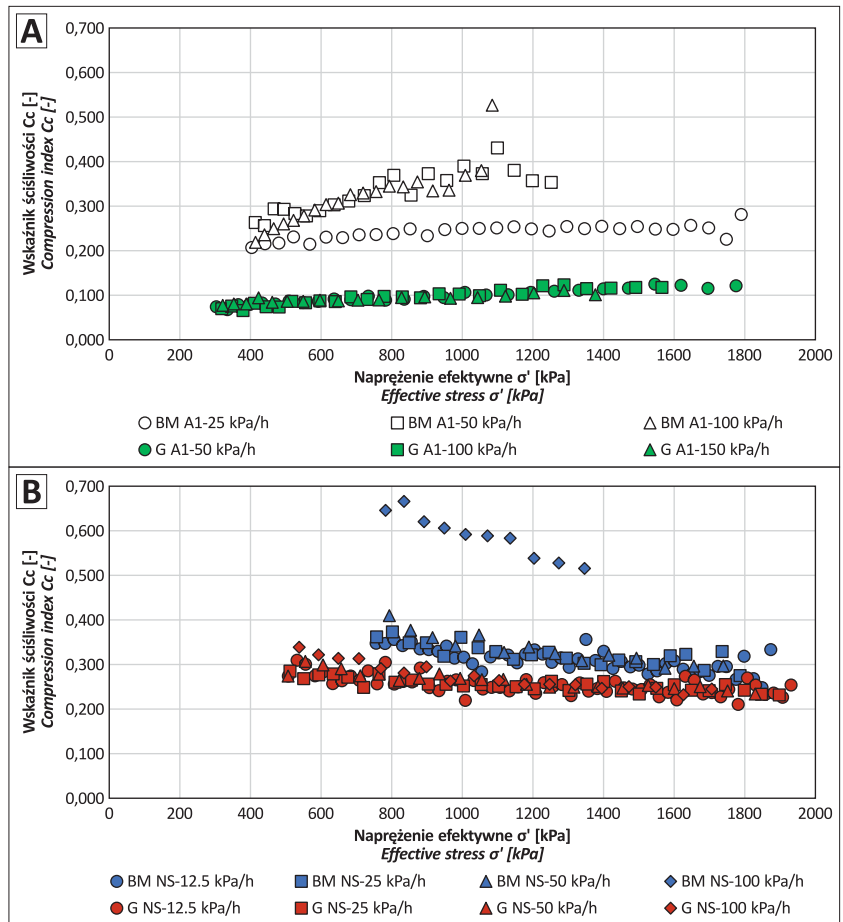
ścisłości (ok. 2–4 razy) niż zniszczenie naturalnej struktury ropy mio-pliocenię (ryc. 2).

Wyniki badań konsolidometrycznych CRL wskazują, że w zakresie obciążeń odpowiadających ścisłości pierwotnej gruntu (gdzie napężenia efektywne są większe niż oszacowane napężenie prekonsolidacji) i w warunkach stałego zwiększania obciążenia wskaźnik ścisłości zmienia się quasi-liniowo (ryc. 3) i charakteryzuje nieznacznym trendem wzrastającym (próbki o nienaruszonej strukturze) lub malejącym



Ryc. 3. Wartości wskaźnika ścisłości uzyskane w trakcie badań CRL próbek o nienaruszonej strukturze (A) oraz past gruntowych (B): A1 – próbka o nienaruszonej strukturze, NS – pasta gruntowa, BM – ropy mio-pliocenię z Bud Mszczonowskich, G – gliny lodowcowe z rejonu Warszawy

Fig. 3. The values of compression index obtained during CRL tests of undisturbed samples (A) and ground pastes (B): A1 – undisturbed sample, NS – soil paste, BM – Mio-Pliocene clays from the Budy Mszczonowskie area, G – glacial till from the Warsaw area



iłów z Bud Mszczonowskich. Wskaźnik ścisłości próbek kategorii A1 glin lodowcowych z terenu Warszawy (0,065–0,125) jest mniejszy od wskaźnika ścisłości past gruntowych (0,210–0,338), zatem ropy mio-pliedeńskie z rejonu Bud Mszczonowskich wykazują większą ścisłość niż gliny lodowcowe z rejonu Warszawy (ryc. 3).

W warunkach ciągłego przyrostu obciążenia oprócz maksymalnego naprężenia efektywnego, przenoszonego przez grunt w historii procesów postsedymentacyjnych, czynnikiem wpływającym na uzyskiwaną wartość naprężenia prekonsolidacji σ'_p jest przyjęta prędkość obciążania $\Delta\sigma/\Delta t$. Zarówno w badaniach glin lodowcowych, jak i ropy mio-pliedeńskich wraz ze wzrostem prędkości obciążania obserwowano wzrost wartości naprężenia prekonsolidacji, które w niniejszej pracy oszacowano poprzez analizę krzywych ścisłości z zastosowaniem metody graficznej Casagrande'a (tab. 3). Warto zauważyć, że w odniesieniu do zadanej prędkości obciążania udokumentowano większy wzrost wartości naprężenia prekonsolidacji σ'_p ropy mio-pliedeńskich niż glin lodowcowych (tab. 3). W badaniach ropy mio-pliedeńskich (zarówno past gruntowych, jak i próbek o nienaruszonej strukturze) zwiększenie prędko-

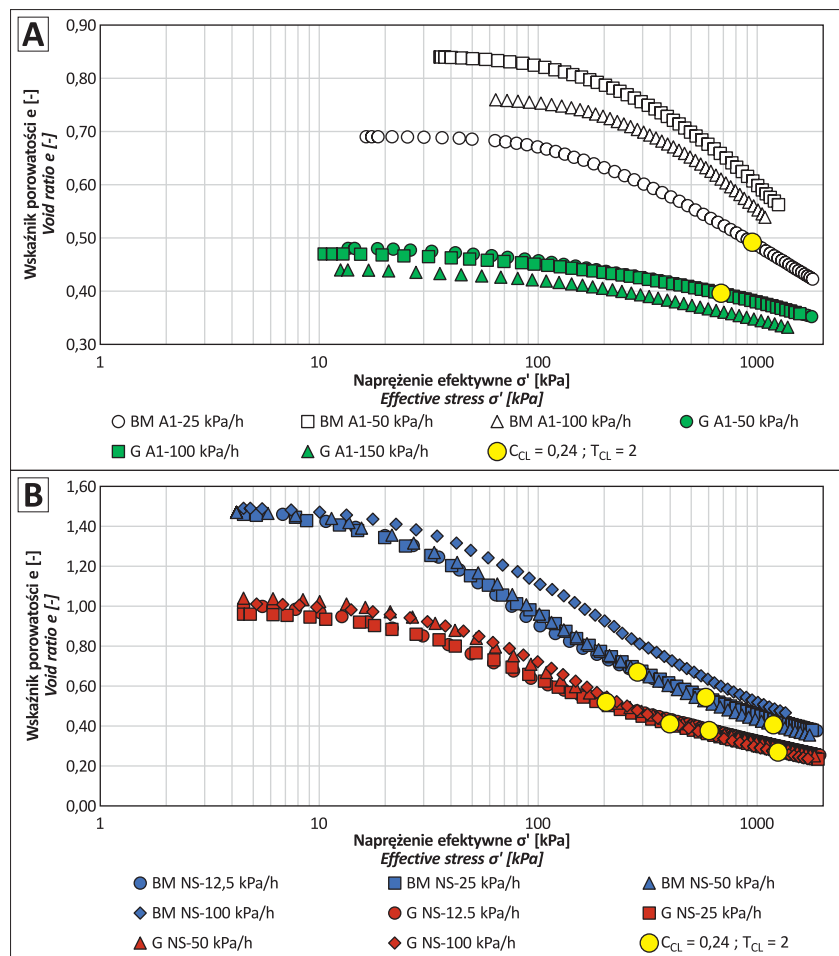
ści obciążania powodowało przesunięcie krzywej ścisłości w prawą stronę. W badaniach glin lodowcowych podobnemu przesunięciu w prawo uległa jedynie krzywa obrazująca ścisłość pasty gruntowej (ryc. 4). Wzrost szacowanej wartości naprężenia prekonsolidacji wraz ze wzrostem zastosowanej prędkości obciążania należy, zdaniem autora, wytłumaczyć mobilizacją wysokich wartości ciśnienia porowego u_b w trakcie badań CRL.

ropy mio-pliedeńskie z rejonu Bud Mszczonowskich mają niższy współczynnik filtracji niż gliny lodowcowe z obszaru Warszawy, co zostało wykazane we wcześniejszych pracach autora (Stajszczak, 2018; Stajszczaka i in., 2020). Z tego względu zwiększenie uzyskiwanych wartości ciśnienia porowego w trakcie badań CRL o wysokiej prędkości obciążania jest znaczniejsze w badaniach ropy

→

Ryc. 4. Krzywe ścisłości uzyskane w trakcie badań CRL próbek o nienaruszonej strukturze (A) oraz past gruntowych (B): A1 – próbka o nienaruszonej strukturze, NS – pasta gruntowa, BM – ropy mio-pliedeńskie z Bud Mszczonowskich, G – gliny lodowcowe z rejonu Warszawy, C_{CL} – parametr ciśnienia wody w porach, T_{CL} – względny czas konsolidacji

Fig. 4. Compressibility curves obtained during CRL tests of undisturbed samples (A) and ground pastes (B): A1 – undisturbed sample, NS – soil paste, BM – Mio-Pliocene clays from the Budy Mszczonowskie area, G – glacial till from the Warsaw area, C_{CL} – pore water pressure, T_{CL} – relative consolidation time



Tab. 3. Wartości naprężenia prekonsolidacji oznaczone na podstawie wyników badań CRL
Table 3. The values of pre-consolidation pressure obtained based on results of CRL tests

Grunt / Soil	Rodzaj próbki Type of sample	Nazwa próbki Name of sample	Prędkość obciążania $\Delta\sigma/\Delta t$ Loading velocity $\Delta\sigma/\Delta t$ [kPa/h]	Naprężenie prekonsolidacji σ'_p Pre-consolidation pressure σ'_p [kPa]
Gлина lodowcowa z Warszawy Glacial till from Warsaw area	Próbka o nienaruszonej strukturze Intact sample	G A1-50	50	237
		G A1-100	100	259
		G A1-150	150	260
ropy mio-pliedeński z rejonu Bud Mszczonowskich Mio-pliocene clay from Budy Mszczonowskie area		BM A1-25	25	195
BM A1-50		50	270	
BM A1-100		100	310	

DYSKUSJA

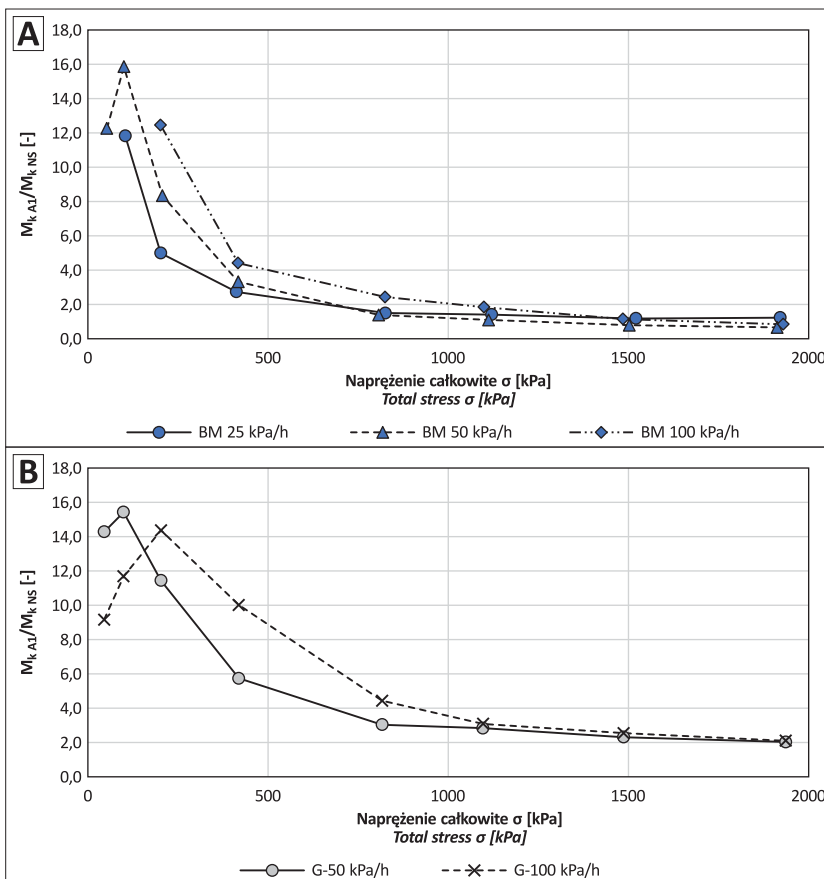
mio-plioceńskich. Następnym zadaniem w trakcie badań CRL zbyt dużej prędkości obciążania jest wydłużenie fazy nieustalonej konsolidacji CL, przesunięcie krzywej ścisłości w prawą stronę na wykresie $e-\log\sigma'$ oraz oszacowanie zawyżonej wartości naprężenia prekonsolidacji σ'_p (ryc. 4A). Potwierdzają to krzywe ścisłości uzyskane w trakcie badań CRL past gruntowych (ryc. 4B). Należy zauważyć, że na początkowym etapie badań konsolidometrycznych wszystkich past gruntowych przesunięcie krzywej ścisłości w prawą stronę jest tym znaczniejsze, im większa jest prędkość obciążania. Wraz z postępem badania CRL różnice w przesunięciu krzywych ścisłości stopniowo się zmniejszają, a ostatecznie kształt linii na wykresie ulega ujednoczeniu. W toku badań past gruntowych sporządzonych z ilów mio-plioceńskich oraz glin lodowcowych ujednoczenie to nastąpiło w czasie rozpoczęcia fazy ustalonej konsolidacji CL, którą wyrażają: parametr ciśnienia wody w porach $C_{CL} < 0,24$ oraz względny czas konsolidacji $T_{CL} > 2$ (Dobak, 1999).

Po zniszczeniu naturalnej struktury obu badanych gruntów drobnoziarnistych największe zmiany modułów ścisłości wykonanych z nich past nastąpiły na początku badania CRL (ryc. 5) – były one wówczas ok. 9–16 razy mniejsze od modułów ścisłości próbek kategorii A1. Wraz z przyrostem obciążania różnice te ulegały stopniowemu zmniejszeniu, co było spowodowane sukcesywnym zwiększaniem sztywności konsolidowanych past. Pod koniec badania CRL ($\sigma > 500$ kPa) moduły ścisłości M_k past gruntowych były już tylko 2–3 razy mniejsze od modułów ścisłości próbek o nienaruszonej strukturze (ryc. 5). Obserwacje te są zgodne z wynikami badań glin lodowcowych rejonu Płocka, które prowadził Barański (2000).

Odształcalność gruntów drobnoziarnistych jest uzależniona od ich właściwości fizycznych (tab. 2). Wyniki badań konsolidometrycznych typu CL (*continuous loading*) wskazują, że w warunkach stałego przyrostu obciążenia gruntów drobnoziarnistych następuje ciągły, najczęściej nieliniowy, przyrost ich odształcenia oraz zmiany wartości modułów ścisłości w funkcji naprężenia. Aplikowane naprężenie jest najistotniejszym czynnikiem odształceń, przy czym odształcenie osiowe w warunkach stałe wzrastającego obciążenia zwiększa się z różną prędkością (ryc. 1). Interpretując wyniki badań CL, w celu uwypuklenia różnic odształcalności można się odwołać także do maksymalnych wartości odształceń rejestrowanych po zadaniu największego naprężenia. Trzeba jednak pamiętać, że uzyskiwane w toku badań CL naprężenie całkowite często jest kilkakrotnie większe od naprężeń, jakie występują w podłożu obiektów inżynierskich. Drugim istotnym czynnikiem kształtującym zróżnicowanie odształcalności ośrodka gruntowego są cechy warunkowane jego składem granulometrycznym, genezą, stanem oraz strukturą; trzecim zaś jest prędkość zadawania stale rosnącego obciążenia. Konsekwencją większej prędkości obciążania jest generowanie wyższego ciśnienia porowego u_b , a w rezultacie rejestrowanie mniejszych odształceń w stosunku do warunków pełnego rozpraszania ciśnienia porowego. Zjawisko to skutkuje wyliczeniem większych wartości modułu ścisłości (Vu Cao Minh, 1977; Dobak, 1999; Dobak i in., 2015).

Na początkowym etapie obciążania gruntów drobnoziarnistych zależność ich odształcenia od naprężenia jest lokalnie dość zmienna, co wyraża się znaczącym zróżnicowaniem niewielkich wartości modułów ścisłości, przy czym reakcje badanych ilów mio-plioceńskich i gliny lodowcowej były podobne. Różnice w odształcaniu się badanych gruntów zaznaczyły się wówczas, gdy naprężenie przekroczyło 100–200 kPa.

Gliny zwalowe są mniej podatne na odształcenia – pod wpływem naprężenia 1,7 MPa ich odształcenia były niemal 2 razy mniejsze od odształceń powstałych w ilach mio-plioceńskich (ryc. 1). Także kształt krzywych ścisłości



←

Ryc. 5. Wpływ zniszczenia naturalnej struktury gruntu spoistego na wartości modułu ścisłości uzyskiwane podczas badania CRL ilów mio-plioceńskich (A) oraz glin lodowcowych (B): M_{kA1} – moduł ścisłości próbki o nienaruszonej strukturze, M_{kNS} – moduł ścisłości pasty gruntowej

Fig. 5. The impact of soil structure damage on the values of compressibility modulus of cohesive soils, obtained during CRL tests of Mio-Pliocene clays (A) and glacial till (B): M_{kA1} – compressibility modulus of intact sample, M_{kNS} – compressibility modulus of soil paste

wości obu gruntów jest odmienny – wykres ściśliwości glin zwałowych jest prawie prostoliniowy, a ilów krzywoliniowy (ryc. 3A), co oznacza, że moduł ściśliwości glin jest większy niż moduł ściśliwości ilów (ryc. 2A).

Odształcalność past wykonanych z gruntów drobnoziarnistych jest od 3 do 5 razy większa od odształcalności próbek tych samych gruntów o nienaruszonej strukturze (ryc. 1). Różnice te są spowodowane zniszczeniem naturalnej struktury gruntu drobnoziarnistego w trakcie preparatyki laboratoryjnej, zmianą jego porowatości oraz niewielkim naprężeniem prekonsolidacji (tab. 2).

Konsolidometryczne moduły ściśliwości M_k , obliczane w toku badań CRL, wyrażają stosunek zmiany naprężenia efektywnego, jaka nastąpiła w określonym czasie, do odształcenia osiowego badanej próbki gruntu drobnoziarnistego. W badaniach CL prowadzonych z udziałem próbek kategorii A1 i past gruntowych wraz ze wzrostem naprężeń efektywnych nieustannie wzrastają wartości modułu ściśliwości M_k (ryc. 2), które wskazują na sukcesywne zmniejszanie się ściśliwości badanych próbek na skutek przemieszczania się ziaren i cząstek szkieletu względem siebie i zamykania przestrzeni porowych. Oddziaływanie prędkości obciążania gruntu na wartość modułu ściśliwości jest niewielka i niejednoznaczna. Zwiększanie ciśnienia porowego w ilach mio-pliocen-skich i prędkości ich obciążania skutkowało nieznacznym zwiększeniem ściśliwości (tj. niewielkim zmniejszeniem wartości modułów M_k), co prawdopodobnie wskazuje na łatwiejsze przemieszczenia cząsteczek szkieletu gruntowego. Jak zauważa Wiłun (1987), zbyt szybkie i duże obciążenie gruntu w trakcie badania laboratoryjnego powoduje powstanie dużego spadku hydraulicznego, co z kolei może powodować szybkie niszczenie struktury cząstek i więzi cementacji.

W przeprowadzonych badaniach CRL miarą generowanych spadków hydraulicznych było ciśnienie porowe u_b , które wzrastało na skutek zwiększania prędkości obciążania (Stajszcak, 2018; Stajszcak i in., 2020). Można zatem stwierdzić, że niszczenie struktury cząstek i więzi cementacji w następstwie wygenerowania dużego spadku hydraulicznego mogło być przyczyną udokumentowania w trakcie szybkich badań CRL nieco mniejszych wartości modułu ściśliwości (ryc. 2).

Uzupełnieniem oceny ściśliwości badanych gruntów drobnoziarnistych w warunkach stałego przyrostu obciążenia było wyznaczenie wartości wskaźnika ściśliwości C_c . Znaczącą rolę tego parametru w ocenie odształcalności ośrodka gruntowego podkreśla fakt, że jest on uwzględniany w formułach obliczeniowych prognoz osiadania podłoża gruntowego pod fundamentami obiektów inżynierskich (Holtz, Kovacs, 1981; Terzaghi i in., 1996). Granicę stosowania wskaźnika ściśliwości do interpretowania wyników badań ściśliwości wyznacza naprężenie prekonsolidacji σ'_p . Wskaźnik ściśliwości C_c określa reakcję gruntu drobnoziarnistego na obciążenie pierwotne, a więc w zakresie naprężeń efektywnych o wartościach wyższych niż naprężenie prekonsolidacji (PN-EN ISO 17892-5:2017). Po przekroczeniu wartości naprężenia prekonsolidacji w badaniach ściśliwości gruntów drobnoziarnistych wykres zmian wskaźnika porowatości e względem naprężenia efektywnego, sporządzony w skali półlogarytmicznej e - $\log \sigma'$, ma przebieg liniowy. Wskaźnik ściśliwości badanego gruntu, w przeciwieństwie do modułu ściśliwości, nieza-

leżnie od obciążenia powinien przyjmować stałą wartość (Holtz, Kovacs, 1981; Glazer, 1985; Dzierwa, Zawisza, 2006; Stróżyk, 2011).

Nieco inaczej zmieniały się wartości wskaźnika ściśliwości C_c w trakcie badań CRL ilów mio-pliocen-skich z rejonu Bud Mszczonowskich. Stałą, a zarazem najbardziej wiarygodną wartość wskaźnika ściśliwości próbek kategorii A1 tych gruntów uzyskano jedynie po zadaniu prędkości obciążania 25 kPa/h. Obciążanie próbek ilów z większą prędkością sprawiło, że wartości wskaźnika ściśliwości C_c nie uległy quasi-stabilizacji i zdaniem autora zostały zawyżone (ryc. 3A). Spostrzeżenie to dotyczy np. próbki pasty gruntowej sporządzonej z ilów pobranych w rejonie Bud Mszczonowskich, którą obciążano z prędkością 100 kPa/h (ryc. 3B). Zjawisko to można wytłumaczyć znacznym wzrostem ciśnienia porowego oraz spowodowaną przez nie przebudową struktury gruntu drobnoziarnistego (Wiłun, 1987; Stajszcak, 2018; Stajszcak, Dobak, 2021). Udokumentowane zmiany wartości modułów ściśliwości oraz odształceń osiowych, potwierdzają większą ściśliwość próbek o naruszonej strukturze. Wynika ona ze zniszczenia naturalnych więzi strukturalnych gruntu w trakcie preparatyki past gruntowych oraz dużej porowatości past na początku badania CRL (ryc. 4B). Należy też zauważyć, że w toku badań CRL uzyskano mniejszy wskaźnik ściśliwości glin lodowcowych (zarówno próbek kategorii A1, jak i past gruntowych) niż ilów mio-pliocen-skich (ryc. 3). Przyczyną większej ściśliwości ilów mio-pliocen-skich jest duża zawartość frakcji ilowej w składzie granulometrycznym tych gruntów, która obok historii obciążania jest jednym z głównych czynników warunkujących porowatość ośrodka gruntowego (tab. 2). Warto podkreślić, że w warunkach stale wzrastającego obciążenia oraz towarzyszącej mu niekiedy znacznej mobilizacji ciśnienia porowego duża zawartość frakcji piaskowej w składzie granulometrycznym gruntu drobnoziarnistego stabilizuje jego strukturę, przeciwdziałając nagłej przebudowie na skutek generowanych naporów hydraulicznych (Stajszcak, Dobak, 2021). Frakcja piaskowa stanowi dominujący składnik glin lodowcowych, co w znacznym stopniu tłumaczy udokumentowaną w niniejszej pracy mniejszą ściśliwość tych gruntów względem ilów mio-pliocen-skich występujących w rejonie Bud Mszczonowskich (tab. 2).

Na podstawie wyników laboratoryjnych badań ściśliwości można oszacować przybliżoną wartość naprężenia prekonsolidacji gruntu σ'_p , nazywaną również naprężeniem uplastycznienia (PN-EN ISO 17892-5:2017). W celu określenia wartości naprężenia prekonsolidacji po zakończeniu procedury laboratoryjnej należy przeprowadzić graficzną interpretację krzywej ściśliwości gruntu. W praktyce inżynierskiej spośród różnych graficznych metod wyznaczania naprężenia uplastycznienia najpowszechniej jest stosowana metoda Casagrande'a, którą rekomenduje m.in. norma PN-EN ISO 17892-5:2017. Wyniki badań ściśliwości typu IL (*incremental loading*) dowodzą, że wartość naprężenia prekonsolidacji odczytana z krzywej ściśliwości na wykresie e - $\log \sigma'$ zależy nie tylko od obciążenia, jakiemu był poddany ośrodek gruntowy w swojej przeszłości geologicznej. Jak się okazuje, istotny wpływ na kształtowanie wartości σ'_p mają również procesy postsedymentacyjne (cementacja, starzenie gruntu), a także przyjęty sposób przykładania obciążenia oraz jego czas w

trakcie procedury laboratoryjnej (Crawford, 1964; Das, 1983; Burland i in., 1996; Boone, Lutenegeger, 1997; Zawrzykraj, 2004; Szczepański, 2005, 2007).

WNIOSKI

1) W trakcie badań CRL gruntów drobnoziarnistych stopniowo zmniejsza się ich ścisłość, co w zrealizowanym programie badań laboratoryjnych zostało potwierdzone przez wzrost wartości modułu ścisłości oraz stopniowe zmniejszanie się prędkości odkształcenia. Uzyskane wartości modułu ścisłości oraz odkształceń maksymalnych badanych gruntów drobnoziarnistych zależą od właściwości inherentnych ośrodka gruntowego, jego stanu, struktury, obciążeń przenoszonych w przeszłości oraz zadanej prędkości obciążania.

2) Wraz ze wzrostem prędkości obciążania następuje zmniejszenie maksymalnych wartości modułu ścisłości M_k maks, które należy wiązać z generowaniem wysokiego ciśnienia porowego oraz znacznych spadków hydraulicznych.

3) Wartości wskaźnika ścisłości uzyskiwane w trakcie badań CRL w zakresie naprężeń odpowiadających ścisłości pierwotnej gruntu wykazują quasi-stabilizację i nie zależą od zadanej prędkości obciążania. Warto jednak podkreślić, że zastosowanie zbyt dużej prędkości obciążania może prowadzić do uzyskania zawyżonych wartości parametru C_c oraz ich znacznej zmienności w zakresie obciążeń odpowiadających ścisłości pierwotnej gruntu.

4) Wartość naprężenia prekonsolidacji gruntu, oznaczona na podstawie wyników badań CRL, zależy nie tylko od właściwości inherentnych ośrodka gruntowego i jego historii, ale również od prędkości jego obciążania. Na skutek dużej prędkości obciążania gruntu następuje znaczna mobilizacja ciśnienia porowego, które może prowadzić do zawyżenia szacowanych wartości naprężenia prekonsolidacji. Wpływ prędkości obciążania na uzyskiwane charakterystyki e - $\log \sigma'$ zanika w fazie ustalonej konsolidacji CL.

5) Parametry gruntów oznaczone w trakcie badań CRL (odkształcenie osiowe, moduł ścisłości i wskaźnik ścisłości) wskazują, że ścisłość iłów mio-plioceńskich z rejonu Bud Mszczonowskich jest większa niż ścisłość czwartorzędowych glin lodowcowych z osiedla Fort Służew w Warszawie. Potwierdzają to maksymalne wartości modułu ścisłości iłów mio-plioceńskich, które są mniejsze o ok. 1,1–4,1 razy od modułu ścisłości glin lodowcowych. Wskaźnik ścisłości iłów z Bud Mszczonowskich jest ok. 1,2–3,2 razy większy niż badanych glin lodowcowych.

6) Większa ścisłość iłów mio-plioceńskich niż glin z Fortu Służew wynika z większej zawartości frakcji iłowej w składzie granulometrycznym. Duża zawartość frakcji iłowej zwiększa porowatość gruntu drobnoziarnistego oraz jego podatność do nagłej przebudowy struktury wskutek znacznej mobilizacji ciśnienia porowego w trakcie badania CRL. Proces ten może zwiększyć ścisłość ośrodka gruntowego.

7) Wyniki badań CRL potwierdzają, że w warunkach ciągłego przyrostu obciążania istotną rolę w kształtowaniu charakterystyk ścisłości gruntu, oprócz właściwości fizycznych gruntu, odgrywa mobilizacja ciśnienia porowego.

8) Badania konsolidometryczne CRL są przydatnym narzędziem do oceny odkształcalności ośrodka gruntowego.

9) Parametry opisujące ścisłość gruntu drobnoziarnistego przyjmują wartości najbardziej zbliżone do rzeczywistych, gdy prędkość obciążania umożliwi osiągnięcie fazy ustalonej konsolidacji CL. W celu zapewnienia wiarygodności uzyskiwanych danych za każdym razem należy starannie dobrać prędkość obciążania, uwzględniając możliwość dysypacji ciśnienia porowego. Na podstawie uzyskanych wyników badań CRL gruntów drobnoziarnistych rekomenduje się stosowanie prędkości obciążania nie większej niż 25 kPa/h.

Dziękuję Recenzentom za poświęcony czas oraz rzetelną ocenę niniejszej pracy. Opisane w niej badania zostały zrealizowane w Laboratorium Geologii Stosowanej na Wydziale Geologii Uniwersytetu Warszawskiego.

LITERATURA

- ABOSHI H., YOSHIKUMI H., MAURYAMA S. 1970 – Constant Loading Rate Consolidation Test. Soils and Foundations, 10 (1): 43–56.
- ASTM D2435-04 – Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading.
- ASTM D4186-06 – Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Saturated Cohesive Soils Using Controlled-Strain Loading.
- BARAŃSKI M. 2000 – Wytrzymałość i odkształcalność glin lodowcowych zanieczyszczonych ropopochodnym benzenem na terenie Petrochemii Płock S.A. Pr. doktorska. Wyd. Geol. UW, Warszawa.
- BOONE J., LUTENEGER J. 1997 – Carbonates and cementation of glacially derived cohesive soils in New York State and southern Ontario. Canadian Geotech. J., 34: 534–550.
- BURLAND J.B., RAMPOLLO S., GEORGIANNOU V.N., CALABRESHI G. 1996 – A laboratory study of the strength of four stiff clays. Geotech., 46 (3): 491–514.
- CRAWFORD C.B. 1964 – Interpretation of Consolidation Tests. J. of Soil Mechanics and Foundations Div., ASCE, 90 (SM 5): 87–102.
- DAS B.M. 1983 – Advanced Soil Mechanics, Hemisphere Publishing Corporation, Washington.
- DOBĄK P. 1999 – Rola czynnika filtracyjnego w badaniach jednoosiowej konsolidacji gruntów. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- DOBĄK P. 2008 – Evaluation of consolidation parameters in CL tests; theoretical and practical aspects. Geol. Quart., 52 (4): 397–410.
- DOBĄK 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.
- DZIERWA K., ZAWISZA E. 2006 – Wpływ zagęszczenia i nawodnienia na ścisłość mieszanek odpadów posodowych z popiołami lotnymi. Acta Sci., Formatio Circumiectus, 5 (5): 17–27.
- GLAZER Z. 1985 – Mechanika Gruntów, wyd. 2. Wyd. Geol., Warszawa.
- GRABOWSKA-OLSZEWSKA B. 1977 – Gruntoznawstwo. Wyd. Geol., Warszawa.
- HEAD K.H. 1986 – Manual of Soil Laboratory Testing. Pentch Press., London.
- HOLTZ R.D., KOVACS W.D. 1981 – An Introduction to Geotechnical Engineering. Prentice-Hall, New Jersey.
- KACZYŃSKI R. 2017 – Warunki geologiczno-inżynierskie na obszarze Polski, wyd. 1. Państw. Inst. Geol.-PIB, Warszawa.
- KOŚCIOŹKO H., WYRWICKI R. 1996 – Metodyka badań kopalni łąstych. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- KOWALCZYK S. 2007 – Zmiany właściwości filtracyjnych w procesie konsolidacji zielonych iłów beidelitowych z Rowu Kleszczowa. Pr. doktorska. Wyd. Geologii UW, Warszawa.
- LINDNER L. 1992 – Czwartorzęd. Wyd. PAE, Warszawa.
- LOWE J., JONAS E., OBRICANS V. 1969 – Controlled gradient consolidation tests. Proc. ASCE, 95, SM1: 1574–1578.
- ŁUCZAK-WILAMOWSKA B. 2002 – Iły serii poznańskiej jako podłoże składowisk odpadów na przykładzie odsłonięcia w Budach Mszczonowskich. Prz. Geol., 50: 966–970.
- PN-86/B-02480 – Grunty budowlane – Określenia, symbole, podział i opis gruntów.
- PN-B-03020:1981 – Grunty budowlane – Posadowienie bezpośrednie budowli – Obliczenia statyczne i projektowanie.
- PN-B-04481:1988 – Grunty budowlane – Badania próbek gruntu.

- PN-EN 1997-1:2008- Eurokod 7 – Projektowanie geotechniczne – Część 1: Zasady ogólne.
- PN-EN 1997-2:2009- Eurokod 7 – Projektowanie geotechniczne – Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego.
- PN-EN ISO 14688-1:2018-05 – Rozpoznanie i badania geotechniczne – Oznaczenie i klasyfikowanie gruntów – Część 1: Oznaczenie i opis.
- PN-EN ISO 14688-2:2018-05 – Rozpoznanie i badania geotechniczne – Oznaczenie i klasyfikowanie gruntów – Część 2: Zasady klasyfikowania.
- PN-EN ISO 17892-1:2015-02 – Rozpoznanie i badania geotechniczne – Badania laboratoryjne gruntów – Część 1: Oznaczenie wilgotności naturalnej.
- PN-EN ISO 17892-2:2015-02 – Rozpoznanie i badania geotechniczne – Badania laboratoryjne gruntów – Część 2: Oznaczenie gęstości objętościowej.
- PN-EN ISO 17892-4:2017-01 – Rozpoznanie i badania geotechniczne – Badania laboratoryjne gruntów – Część 4: Badanie uziarnienia gruntów
- PN-EN ISO 17892-5:2017-06 – Rozpoznanie i badania geotechniczne – Badania laboratoryjne gruntów – Część 5: Badanie edometryczne gruntów.
- PN-EN ISO 17892-12:2018-08 – Rozpoznanie i badania geotechniczne – Badania laboratoryjne gruntów – Część 12: Oznaczenie granic płynności i plastyczności.
- ROWE P.W., BARDEN L. 1966 – A new consolidation cell. *Geotechnique*, 16 (2): 162–170.
- SMITH R.E., WAHLS H.E. 1969 – Consolidation under constant rate of strain. *Proc. ASCE*, 95, SM2.
- SOUMAYA B. 2005 – Setzungsverhalten von Flachgründungen in normalkonsolidierten bindigen Böden. *Schriftenreihe Geotechnik Universität Kassel*, 16.
- SOUMAYA B., KEMPFERT H.G. 2010 – Verformungsverhalten weicher Böden im spannungsgesteuerten Kompressionsversuch. *Bautechnik*, 87 (2): 73–80.
- STAJSZCZAK P. 2017 – Ocena właściwości ekspansywnych iłów mio-pliocenńskich z rejonu Bud Mszczonowskich. *Prz. Geol.*, 65: 168–176.
- STAJSZCZAK P. 2018 – Filtracyjno-konsolidacyjne właściwości iłów mio-pliocenńskich 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, Warszawa.*
- STAJSZCZAK P. 2021 – Zmiany właściwości filtracyjnych mieszanki gruntowej il–piasek na skutek zanieczyszczenia produktami ropopochodnymi w aspekcie mineralnych barier izolacyjnych. *Prz. Geol.*, 69 (1): 33–42.
- STAJSZCZAK P., DOBAK P. 2021 – Zmiany ciśnienia porowego w warunkach stałego wzrostu obciążenia i ich wpływ na konsolidację CL na przykładzie wybranych gruntów spoistych centralnej Polski. *Prz. Geol.*, 69 (12): 873–883.
- 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.
- STRÓŻYK J. 2011 – Zastosowanie równań wskaźnika ścisłości Cc do oceny ścisłości iłów serii poznańskiej. *Górnictwo i Geoinżynieria*, 35 (2): 549–556.
- SZALEWICZ H., WŁODEK M. 2009 – Szczegółowa mapa geologiczna Polski 1 : 50 000, ark. Mszczonów. *Nar. Arch. Geol. PIG-PIB, Warszawa.*
- SZCZEPAŃSKI T. 2005 – Ocena stanu skonsolidowania wybranych iłów na podstawie analizy parametrów ścisłości. *Pr. doktorska. Wydz. Geol., UW, Warszawa.*
- SZCZEPAŃSKI T. 2007 – OCR a YSR, czyli klasyczne i współczesne poglądy na prekonsolidację gruntów spoistych. *Prz. Geol.*, 55 (5): 405–410.
- TERZAGHI K., PECK R.P., MESRI G. 1996 – *Soil Mechanics in Engineering Practice*. Third Edition. John Wiley & Sons Inc., New York, USA.
- VU CAO MINH 1977 – Nowa metoda badań konsolidacji gruntów. *Arch. Hydrotech.*, 24 (2): 253–265.
- WIŁUN Z. 1987 – *Zarys Geotechniki*, wyd. 3. Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa.
- WISSA A.E.Z., CHRISTIAN J.T., DAVIS E.H., HEIBERG S. 1971 – Consolidation at constant rate of strain. *Proc. ASCE*, 197, SM2: 561–563.
- ZAWRZYKRAJ P. 2004 – Analiza skonsolidowania iłów warwowych w rejonie Sochaczewa i Radzymina. *Pr. doktorska. Arch. Wydz. Geol. UW, Warszawa.*

Praca wpłynęła do redakcji 14.02.2022 r.
Akceptowano do druku 20.06.2022 r.