

Wpływ zanieczyszczenia produktami ropopochodnymi na zmiany ściśliwości ilów mio-pliocenicznych z rejonu Bud Mszczonowskich w warunkach ciągłego przyrostu obciążenia

Piotr Stajszczyk¹



Influence of oil contamination on changes in the compressibility of Mio-Pliocene clays from the Budy Mszczonowskie region, observed during CRL tests. Prz. Geol., 71: 447–460; doi: 10.7306/2023.35

Abstract. The article presents the results of CRL (Constant Rate of Loading) tests on Mio-Pliocene clays contaminated with Jet A1 aviation fuel and mineral oil 15W40. The study has shown that the compressibility of fine-grained soils contaminated with hydrocarbons during a constant rate of loading tests depends on the adopted loading velocity, as well as on properties of oil contaminants and their content in the soil pores. The implemented laboratory test program shows that the contamination of fine-grained soils with hydrocarbons increases their compressibility. Moreover, it has been stated that the CRL test method may be recommended in the compressibility research of fine-grained soils contaminated with hydrocarbons.

Keywords: CRL test, soil compressibility, hydrocarbons, Mio-Pliocene clay

Rozwój przemysłowo-gospodarczy oraz towarzysząca mu rozbudowa infrastruktury przyczyniają się do podniesienia standardów życia społeczeństwa, czemu towarzyszy stale rosnące zapotrzebowanie na ropę naftową i jej pochodne. Z tego względu produkty ropopochodne stanowią grupę zanieczyszczeń, które w obecnych czasach mogą być realnym zagrożeniem dla środowiska przyrodniczego, w tym dla podłoża obiektów inżynierskich. Wyniki badań nad wpływem węglowodorów na zachowanie się gruntów mineralnych wskazują, że gdy związki te występują w przestrzeni porowej ośrodka gruntowego, w znaczący sposób modyfikują jego właściwości geologiczno-inżynierskie (Barański, 2000; Ahmed i in., 2009; Kermani, Ebadi, 2012; Khosravi, 2013; Echeverri-Ramirez i in., 2015; Izdebska-Mucha, Trzeźniński, 2021; Stajszczyk, 2021; Dobak i in., 2022). Modyfikacje te są wyrażone zmianą wartości poszczególnych parametrów fizycznych oraz mechanicznych gruntu zanieczyszczonego, często w kierunku mniej korzystnym z punktu widzenia projektanta. Poprawnie wykonana ocena warunków geologiczno-inżynierskich powinna uwzględnić ściśliwość ośrodka gruntowego, która jest definiowana jako zdolność gruntu do zmniejszenia objętości w następstwie zmiany stanu naprężenia (Holtz, Kovacs, 1981; Glazer, 1985; Wiłun, 1987). Opublikowane dotychczas wyniki badań gruntów mineralnych, które zanieczyszczono paliwami ropopochodnymi, dowodzą, że w środowisku cieczy niepolarnych zarówno grunty spoiste, jak i niespoiste, wykazują wzrost odkształcalności, a obserwowane zmiany w znacznym stopniu są uzależnione od rodzaju oraz zawartości zanieczyszczenia w przestrzeni porowej gruntu, jak również jego właściwości inherentnych (Meegoda, Ratnaweera, 1994; Srivastawa, Pandey, 1997; Barański, 2000; Olchawa, Kumor, 2007; Karkush i in., 2013).

Ściśliwość gruntu można określić, przeprowadzając w laboratorium badania w edometrze lub konsolidometrze. W trakcie tych badań próbkę gruntu umieszcza się w metalowym pierścieniu, uniemożliwiając jej rozszerzenie się

w kierunku prostopadłym do kierunku działania obciążenia. W ten sposób w trakcie badań ściśliwości osiągnięty zostaje jednoosiowy stan naprężenia, a rejestrowane odkształcenia są wyrażone zmianami wysokości badanej próbki gruntu. Zmianę stanu naprężenia uzyskuje się poprzez zwiększanie obciążenia działającego na powierzchnię badanego gruntu w sposób skokowy (*incremental loading test* – badanie IL) lub ciągły (*continuous loading test* – badanie CL; Lowe i in., 1969; Smith, Wahls, 1969; Aboshi i in., 1970; Wisa i in., 1971; Head, 1986; Dobak, 1999; Soumaya, 2005; Soumaya, Kempfert, 2010; Stajszczyk, 2022). Stopniowy sposób przykładania obciążenia jest obecnie najczęściej stosowaną laboratoryjną metodą oceny ściśliwości gruntu, wykorzystywaną na potrzeby dokumentowania warunków geologiczno-inżynierskich. Zazwyczaj wybór tej metody jest uwarunkowany względami ekonomicznymi oraz niezbyt skomplikowaną procedurą wykonania badania IL w edometrze (PN-88/B-04481, ASTM D2435-04, PN-EN ISO 17892-5). Badania CL wymagają zastosowania bardziej zaawansowanej aparatury pomiarowej niż klasyczne badania IL. Z tego względu wykonuje się je w konsolidometrach umożliwiającym rejestrację zmian ciśnienia porowego w trakcie prowadzenia pomiarów. W ten sposób można precyzyjniej scharakteryzować stan naprężeń efektywnych na poszczególnych etapach badania konsolidometrycznego, niż w trakcie badań wykonywanych w klasycznych edometrach. Niewątpliwą zaletą konsolidometrów stosowanych w badaniach typu CL jest możliwość wykonania badań ściśliwości w sposób klasyczny, tj. ze stopniowym przyrostem obciążenia (badanie IL).

Badania ściśliwości typu CL mogą być przeprowadzone w warunkach stałego przyrostu obciążenia (*constant rate of loading* – badanie CRL) lub w warunkach stałego przyrostu odkształcenia (*constant rate of strain* – badanie CRS). Różnica pomiędzy badaniem CRL oraz CRS dotyczy przyjętego systemu zwiększenia obciążenia. W trakcie badań CRL prędkość obciążenia jest stała w czasie pomia-

¹ Geoteko Projekty i Konsultacje Geotechniczne Sp. z o.o., ul. Wałbrzyska 14/16, 02-739 Warszawa; piotrek25104@wp.pl; ORCID ID: 0009-0002-4587-6463

rów, natomiast zmienna jest prędkość odkształcenia, która w znacznym stopniu zależy od ściśliwości oraz przepuszczalności badanego gruntu drobnoziarnistego. W badaniach CRS w trakcie procedury laboratoryjnej jest zadawana stała prędkość odkształcenia, a rejestrowane wartości obciążenia oraz ciśnienia porowego zależą od warunków badania (prędkości odkształcenia) oraz właściwości geologiczno-inżynierskich badanego gruntu, takich jak odkształcalność oraz przepuszczalność (Dobak, 1999; ASTM D4186-12). Ze względu na specyfikę badania CRS wykonuje się w konsolidometrach wyposażonych w sztywną prasę, której konstrukcja umożliwia utrzymanie stałej prędkości odkształcenia w trakcie pomiarów (Head, 1986).

Ważnym aspektem badań konsolidometrycznych typu CL, który należy wziąć pod uwagę podczas ich planowania, jest odpowiedni dobór prędkości odkształcenia (badanie CRS) lub prędkości obciążania (badanie CRL). Pomocna jest tu analiza zmian ciśnienia porowego (u_b) w trakcie ciągłego przyrostu obciążenia (Smith, Wahls, 1969; Gorman, 1976; Dobak, 1999). Projektując badania CRS, można korzystać z zaleceń normy ASTM D4186-12, aby prędkość odkształcenia przyjęta w trakcie pomiarów powodowała mobilizację ciśnienia porowego w zakresie od 3 do 15% całkowitego obciążenia przekazywanego w danej chwili na powierzchnię badanego gruntu. Ponadto można korzystać z zaleceń metodycznych dotyczących wykonywania badań CRS (Smith, Wahls, 1969; Gorman, 1976; 1981). W przypadku planowania badań CRL należy przyjąć taką prędkość obciążania, pod wpływem której mobilizacja ciśnienia porowego pozwoli spełnić zaproponowany przez Dobak (1999) warunek fazy ustalonej konsolidacji CL. Dobak (1999, 2008) wykazał, że wartości parametrów filtracyjno-konsolidacyjnych oraz odkształceniowych ośrodka gruntowego, oznaczone w warunkach ciągłego przyrostu obciążenia, są najbardziej zbliżone do wartości rzeczywistych, gdy w trakcie badania CRL parametr ciśnienia wody w porach $C_{CL} = u_b/\sigma$ jest niższy niż 0,24, natomiast względny czas konsolidacji $T_{CL} = t \times c_v/H^2$ przyjmuje wartości większe od 2.

Należy zauważyć, że badania z ciągłym przyrostem obciążenia trwają krócej niż tradycyjne pomiary wykonywane przy użyciu edometrów oraz charakteryzują się mniejszym wpływem odkształceń własnych aparatury pomiarowej na uzyskiwane wartości parametrów gruntu, niż podczas badań edometrycznych. Czynniki te stanowią niewątpliwą zaletę badań tego typu.

Pomyślna aplikacja badań CRL do oceny ściśliwości gruntów drobnoziarnistych wskazuje, że metoda ta mogłaby być również przydatnym narzędziem wykorzystywanym w badaniach gruntów drobnoziarnistych zanieczyszczonych produktami ropopochodnymi (Soumaya, Kempfert, 2010; Stajszczyk, 2022). Z tego względu celem niniejszej pracy jest:

- zbadanie wpływu wybranych produktów ropopochodnych na zmiany ściśliwości gruntów drobnoziarnistych w warunkach ciągłego przyrostu obciążenia na przykładzie łąw mio-pliocenkich z rejonu Bud Mszczonowskich (woj. mazowieckie);
- ocena wpływu właściwości fizycznych produktu ropopochodnego oraz jego zawartości w przestrzeni porowej ośrodka gruntowego na zmiany wartości parametrów opisujących ściśliwość gruntu w warunkach ciągłego przyrostu obciążenia;
- ocena przydatności badań konsolidometrycznych z ciągłym przyrostem obciążenia do oceny ściśliwości

ośrodka gruntowego zanieczyszczonego produktami ropopochodnymi.

Badania prezentowane w niniejszej pracy zostały wykonane w Laboratorium Geologii Stosowanej na Wydziale Geologii Uniwersytetu Warszawskiego.

METODYKA

Do badań laboratoryjnych wytypowano łąw mio-pliocenkie występujące koło Żyrardowa (woj. mazowieckie). Próbkę tych gruntów o nienaruszonej strukturze pobrano z kopalni odkrywkowej w Budach Mszczonowskich. W rejonie tej miejscowości łąw występują w postaci kry glaukitektonicznej, która zalega na polodowcowej Wysoczyźnie Rawskiej (Szalewicz, Włodek, 2009; Łuczak-Wilamowska, 2002). Wybór łąw mio-pliocenkich do realizacji programu badań laboratoryjnych był podyktowany pospolitym występowaniem tych gruntów na terenie kraju, przez co bardzo często stanowią one podłoże obiektów inżynierskich. Ponadto należy podkreślić, że łąw te charakteryzują się bardzo dobrymi właściwościami izolacyjnymi i z tego powodu stanowią materiał, który w przyszłości może być zastosowany do budowy barier izolacyjnych w rejonach zagrożonych zanieczyszczeniem podłoża gruntowego różnymi substancjami, w tym produktami ropopochodnymi.

Program badań laboratoryjnych obejmował oznaczenie parametrów fizycznych łąw mio-pliocenkich z rejonu Bud Mszczonowskich zgodnie ze standardami zamieszczonymi w obowiązujących normach serii PN-EN ISO 17892 oraz z opcjonalnym uwzględnieniem klasyfikacji według PN-88/B-04481 i PN-EN ISO 14688-1,2. Parametry fizyczne badanych gruntów drobnoziarnistych stanowiły tło dla badań ściśliwości, które wykonano w warunkach ciągłego przyrostu obciążenia (badania CRL). Badania CRL przeprowadzono w konsolidometrze Bardena-Rowe'a z zastosowaniem doświadczeń metodycznych wg: Rowe'a, Bardena (1966); Wissa i in. (1971); Vu Cao Minha (1977); ASTM D 4186 – 12; Dobaka (1999, 2008); Kowalczyka (2007); Dobaka i in. (2015); Stajszczyka i in. (2020); Stajszczyka (2018, 2022). Badania konsolidometryczne próbek past gruntowych niezanieczyszczonych oraz zanieczyszczonych produktami ropopochodnymi wykonano z prędkością obciążania 25, 50 oraz 100 kPa/h.

Podczas opracowywania programu badań laboratoryjnych na potrzeby niniejszej pracy założono, że spełnienie warunku fazy ustalonej konsolidacji CL (wyrażone wartościami $C_{CL} < 0,24$) będzie możliwe, gdy w badaniach CRL grunt będzie obciążany z prędkością 25 oraz 50 kPa/h (Stajszczyk, 2022). Przeprowadzenie badań CRL z zastosowaniem prędkości obciążania 100 kPa/h będzie miało na celu jedynie zebranie odpowiedniej ilości danych umożliwiających jak najdokładniejsze opisanie wpływu prędkości obciążania na zachowanie past gruntowych po zanieczyszczeniu produktami ropopochodnymi o odmiennych właściwościach fizykochemicznych (tab. 1).

Pasty gruntowe przygotowano według procedury opisanej w pracach Kowalczyka (2007) oraz Stajszczyka (2019). W pierwszym etapie prac materiał gruntowy pobrany w warunkach *in-situ* doprowadzono do stanu powietrzno-suchego, następnie rozdrobniono go na mniejsze fragmenty i zalano wodą dejonizowaną w takiej ilości, aby wilgotność badanych próbek przyjmowała wartości rzędu 1,0–1,1 w_L . Równoległe do próbek niezawierających węglowodorów w przestrzeni porowej przygotowano pasty łąw mio-pliocenkich z dodatkiem paliwa lotniczego

Tab. 1. Wybrane parametry fizyczne produktów ropopochodnych użytych w trakcie badań laboratoryjnych
Table 1. Selected physical parameters of petroleum products used during laboratory tests

Cecha Parameter	Paliwo lotnicze Jet A1 Aviation fuel JET A1	Olej mineralny 15W40 Mineral oil 15W40	Woda Water
Barwa Colour	jasnożółta light yellow	brązowożółta brown-yellow	bezbarna colourless
Stan skupienia w temperaturze pokojowej Physical state at room temperature	ciecz liquid		
Gęstość [g/cm ³] Density [g/cm ³]	0,77–0,84	0,88	1,00
Lepkość kinematyczna [mm ² /s] Kinematic viscosity [mm ² /s]	1,2–1,7 temperatura 20–40°C temperature 20–40°C	13,5–16,3 temperatura 100°C temperature 100°C	1,0 temperatura 20°C temperature 20°C
Temperatura zapłonu [°C] Flash-point [°C]	> 38	>215	–
Rozpuszczalność w wodzie Water solubility	nie rozpuszczalny i nie mieszalny insoluble and not miscible		
Stała dielektryczna Dielectric constant	~2		~80

Jet A1 oraz oleju mineralnego 15W40. Produkty ropopochodne dodawano do próbek ilów mio-plecieńskich wysuszonych w temperaturze pokojowej, które roztarto tłuczkiem z gumową nasadą. Zawartość paliwa lotniczego Jet A1 w badanych próbkach gruntu drobnoziarnistego (spoiстого) wynosiła 2, 5, 10 oraz 20%. Zawartość oleju mineralnego 15W40 w przygotowanych pastach gruntowych nie przekraczała 5% masy szkieletu gruntowego. Po zanieczyszczeniu próbek gruntu węglowodorami pozostawiono je w szczelnie zamkniętych pojemnikach na czas 4–5 tygodni (etap homogenizacji), po czym materiał gruntowy zalewano wodą dejonizowaną w tej samej ilości co próbki niezanieczyszczone węglowodorami. Tak przygotowany materiał gruntowy poddano wstępnej konsolidacji, zadając naprężenie całkowite 20 kPa. Zastosowane w badaniach produkty ropopochodne wykazują odmienne właściwości fizykochemiczne (lepkość, gęstość). W analizie zmian ścisłości badanych próbek gruntów drobnoziarnistych możliwe było uwzględnienie tej zmienności (tab. 1).

Pasty gruntowe, które przygotowano według opisanej procedury, poddano badaniom konsolidometrycznym z ciągłym przyrostem obciążenia. W trakcie badań CRL rejestrowano naprężenie całkowite, wysokość badanej próbki gruntu drobnoziarnistego, ciśnienie porowe oraz czas pomiarów. Na podstawie tych danych obliczono parametry umożliwiające ocenę ścisłości badanych past gruntowych przed oraz po zanieczyszczeniu węglowodorami. Stan nasycenia próbek o naruszonej strukturze (pasty gruntowe) oceniono na podstawie wartości parametru C_{CL} , które oznaczono w chwili rozpoczynania badania CRL. Parametr ten przyjmuje wartości w zakresie 0–1, przy czym wartość równa 1 wskazuje na stan pełnego nasycenia porów gruntu wodą (Dobak, 1999). Do oceny ścisłości ośrodka gruntowego zastosowano: odkształcenie osiowe, moduł ścisłości, wskaźnik ścisłości i wskaźnik zmiany modułu ścisłości (tab. 2).

Przyjęty program badań laboratoryjnych umożliwił uwzględnienie w ocenie zmian ścisłości ośrodka gruntowego na skutek zanieczyszczenia produktami ropopochodnymi wpływu takich czynników, jak:

- właściwości fizykochemiczne fazy zanieczyszczającej;

Tab. 2. Parametry definiujące ścisłość gruntu podczas badania CRL

Table 2. Parameters defining compressibility of soil during CRL test

Parametr Parameter	Wzór Formula
Odształcenie osiowe [–] Axial strain [–]	$\epsilon = \frac{\Delta H}{H_i}$
Moduł ścisłości [MPa] Compressibility modulus [MPa]	$M_k = \frac{\Delta \sigma' \cdot H_{i-1}}{H_{i-1} - H_i}$
Wskaźnik ścisłości [–] Compression index [–]	$C_c = -\frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'}$
Wskaźnik zmiany modułu ścisłości [–] Compressibility modulus ratio [–]	$CM_R = \frac{M_{UP}}{M_p}$

Objaśnienia symboli: H – wysokość próbki [m], σ' – naprężenie efektywne [kPa], e – wskaźnik porowatości [–], M_{UP} – moduł ścisłości oznaczony podczas badania CRL gruntu niezanieczyszczonego, M_p – moduł ścisłości oznaczony podczas badania CRL gruntu zanieczyszczonego węglowodorami

Explanations: H – sample height [m], σ' – effective stress [kPa], e – void ratio [–], M_{UP} – compressibility modulus determined during CRL test of unpolluted soil sample, M_p – compressibility modulus determined during CRL test of soil sample polluted with hydrocarbons

- zawartość produktu ropopochodnego w przestrzeni porowej gruntu drobnoziarnistego;
- prędkość obciążenia przyjęta w trakcie badania CRL.

Do badań CRL wybrano pasty gruntowe, ze względu na ich jednorodność pod względem granulometrycznym oraz mineralnym, a także zapewnienie równomiernego rozmieszczenia fazy zanieczyszczającej w przestrzeni porowej ośrodka gruntowego.

WYNIKI BADAŃ

Parametry fizyczne ilów mio-plecieńskich

Badane ily mio-plecieńskie z rejonu Bud Mszczonowskich zostały opisane jako ił bezwapnisty o barwie szarzielonej z wtrąceniami koloru brązowego, występujący na pograniczu stanów twaroplastycznego oraz półzwarłego

(PN-EN ISO 14688-1:2018). Wilgotność próbek o nienaruszonej strukturze mieściła się w zakresie 26,8–34,1% i była dwa razy mniejsza niż wilgotność przygotowanych past gruntowych. Zarówno próbki o nienaruszonej strukturze, jak i pasty gruntowe miały wysoki stopień wilgotności S_r (S_r : 0,95–1,00), świadczący o pełnym nasyceniu przestrzeni porowej fazą ciekłą (tab. 3). Na podstawie oznaczeń granic konsystencji oraz wskaźnika konsystencji I_c stwierdzono, że w warunkach *in situ* badane grunty drobnoziarniste mają konsystencję twardoplastyczną (PN-EN ISO 14688-2:2018). Wskaźnik konsystencji past gruntowych przyjmuje wartości w przedziale 0,47–0,51, co pozwala przyjąć, że ich konsystencja jest na pograniczu miękkoplastycznej oraz plastycznej (tab. 3). Stopień plastyczności (I_L) obliczony w warunkach wilgotności naturalnej badanych ilów mio-pliocenów, przyjmuje wartości w zakresie od 0,01 do 0,11, co w ujęciu klasyfika-

cji zgodnej z normą PN-86/B-02480 pozwala opisać stan badanych próbek jako twardoplastyczny oraz twardoplastyczny na pograniczu ze stanem półzwardym. Stopień plastyczności past gruntowych jest dużo wyższy niż próbek ilów o wilgotności naturalnej – odpowiada on stanowi plastycznemu oraz miękkoplastycznemu (tab. 3). Wyniki badań właściwości fizycznych dowodzą, że pasty gruntowe mają mniejszą gęstość objętościową oraz większy wskaźnik porowatości i porowatość niż próbki ilów mio-pliocenów o nienaruszonej strukturze. Obserwowane różnice należy wytłumaczyć zniszczeniem naturalnych więzi strukturalnych w trakcie przygotowywania pasty gruntowej oraz przyjęciem w programie badań laboratoryjnych wartości naprężenia wstępnej konsolidacji mniejszej, niż wartość naprężenia uplastycznienia σ'_p próbek o nienaruszonej strukturze (σ'_p : 195–310 kPa za Stajszczakiem, 2022).

Tab. 3. Parametry fizyczne ilów mio-pliocenów oznaczone przed rozpoczęciem badań CRL

Table 3. Physical parameters of Mio-Pliocene clay determined before CRL tests

Parametr Parameter	Próbka o nienaruszonej strukturze (wg Stajszczaka, 2022) <i>Intact sample</i> (acc. to Stajszczak, 2022)	Pasta gruntowa / <i>Soil paste</i>		
		Niezanieczyszczona (wg Stajszczaka, 2022) <i>Unpolluted</i> (acc. to Stajszczak 2022)	Zanieczyszczona paliwem lotniczym JET A1 <i>Polluted with JET A1 aviation fuel</i>	Zanieczyszczona olejem mineralnym 15W40 <i>Polluted with mineral oil 15W40</i>
w [%]	26,8–34,1	54,3–55,4	68,1–82,7	63,2–64,3
w_p [%]	24,7–29,4		–	–
w_L [%]	65,0–88,0		–	–
I_L [–]	0,01–0,11	0,49–0,53	–	–
I_c [–]	0,82–0,99	0,47–0,51	–	–
ρ_s [Mg/m ³]	2,69		2,57–2,60	2,39
ρ [Mg/m ³]	1,92–2,06	1,68–1,69	1,47–1,59	1,55–1,57
n [–]	0,39–0,47	0,59–0,60	0,65–0,70	0,64–0,65
e [–]	0,64–0,89	1,47–1,49	1,86–2,34	1,80–1,84
S_r [–]	0,95–1,00	1,00	1,00	1,00
f_i [%]	51–66		34–40	33
f_π [%]	31–40		54–60	54
f_p [%]	3–9		2–6	13
Zawartość węglowodorów w porach gruntu [%] <i>Hydrocarbons content in the pores of soil [%]</i>	0		2:5:10:20	5
Nazwa gruntu wg PN-EN ISO 14688-1:2018 <i>Name of soil acc. to PN-EN ISO 14688-1:2018</i>	IŁ <i>CLAY</i>		IŁ <i>CLAY</i>	IŁ <i>CLAY</i>
Skład mineralny (wg Stajszczaka, 2018)* <i>Mineral composition (acc. to Stajszczak 2018)*</i>				
Beidelit / <i>Beidellite</i>			54,7	
Kaolinit / <i>Kaolinite</i>			10,4	
Goethyt / <i>Goethite</i>			3,4	
Kwarc i inne / <i>Quartz and others</i>			31,5	

Objaśnienia: w – wilgotność, w_p – granica plastyczności, w_L – granica płynności, I_L – stopień plastyczności, I_c – wskaźnik konsystencji, ρ_s – gęstość właściwa, ρ – gęstość objętościowa, n – porowatość, e – wskaźnik porowatości, S_r – stopień wilgotności, f_i – frakcja ilowa, f_π – frakcja pyłowa, f_p – frakcja piaszkowa

Explanations: w – moisture content, w_p – plastic limit, w_L – liquid limit, I_L – liquidity index, I_c – consistency index, ρ_s – density, ρ – bulk density, n – porosity, e – void ratio, S_r – degree of saturation, f_i – clay fraction, f_π – silt fraction, f_p – sand fraction

Zanieczyszczenie past gruntowych produktami ropopochodnymi zmieniło ich właściwości fizyczne. Wszystkie badane próbki pasty gruntowej po zanieczyszczeniu ich węglowodorami wykazywały pozorne zmniejszenie zawartości frakcji ilowej, a także zwiększenie zawartości frakcji pyłowej oraz piaskowej. Po wprowadzeniu do przestrzeni porowej próbek past gruntowych paliwa lotniczego Jet A1 oraz oleju mineralnego 15W40 porowatość tych past zwiększyła się o 0,04 do 0,11, a wskaźnik porowatości o 0,31–0,87 (tab. 3). W konsekwencji gęstość objętościowa past gruntowych zanieczyszczonych paliwem lotniczym Jet A1 oraz olejem mineralnym 15W40 zmniejszyła się o około 0,09–0,21 Mg/m³ w porównaniu z próbkami niezanieczyszczonymi. Pasty gruntowe zanieczyszczone paliwem lotniczym Jet A1 mają mniejszą gęstość objętościową (ρ : 1,53–1,55 Mg/m³) niż pasty gruntowe w równym stopniu zanieczyszczone olejem mineralnym 15W40 (ρ : 1,55–1,57 Mg/m³).

Badania konsolidometryczne z ciągłym przyrostem obciążenia

Przyrost obciążenia w trakcie badania CRL powoduje zmniejszenie objętości badanej próbki gruntu drobnoziarnistego, które w głównej mierze jest spowodowane zamykaniem przestrzeni porowej ośrodka gruntowego oraz wzajemnym przemieszczaniem cząstek i ziaren tworzących fazę stałą gruntu. Maksymalne odkształcenia osiowe (ϵ_{max}) past gruntowych, które nie zostały zanieczyszczone węglowodorami, osiągnęły wartości w przedziale od 0,411 do 0,452. Odkształcenia takich past są 2,8–3,3 razy większe niż próbek ilów o nienaruszonej strukturze (Stajszczak, 2022). Po wprowadzeniu produktów ropopochodnych do przestrzeni porowej ośrodka gruntowego następuje wzrost jego odkształcalności. Próbki zanieczyszczone paliwem lotniczym oraz olejem mineralnym wykazywały odkształcenia ϵ_{max} 1,05–1,13 razy większe niż próbki niezanieczyszczone węglowodorami, a obserwowane różnice zwiększały się wraz ze wzrostem zawartości produktu ropopochodnego w przestrzeni porowej gruntu (ryc. 1). Maksymalne odkształcenia osiowe past gruntowych zanieczyszczonych paliwem lotniczym Jet A1 wynoszą od 0,433 do 0,525, natomiast zanieczyszczonych olejem mineralnym 15W40 mieszczą się w zakresie 0,464–0,492. Pasty gruntowe ulegają większym odkształceniom ϵ_{max} , gdy fazą zanieczyszczającą jest olej mineralny 15W40 (ryc. 1).

Parametrem obligatoryjnie wyznaczanym w ocenie ścisłości ośrodka gruntowego jest moduł ścisłości (M). W badaniach CRL parametr ten określa wzajemną relację pomiędzy stale wzrastającym naprężeniem efektywnym oraz postępującym odkształceniem osiowym próbki gruntu drobnoziarnistego (tab. 2). W przeprowadzonych badaniach konsolidometrycznych najmniejsze wartości modułu ścisłości past gruntowych udokumentowano w początkowej fazie pomiarów, zarówno próbek niezanieczyszczonych węglowodorami, jak również zanieczyszczonych paliwem lotniczym lub olejem mineralnym. Wraz z postępującym badaniem CRL we wszystkich badanych próbkach iltu mio-pleioceńskiego zwiększały się wartości modułu ścisłości – wartości maksymalne rejestrowano w chwili zakończenia badania konsolidometrycznego.

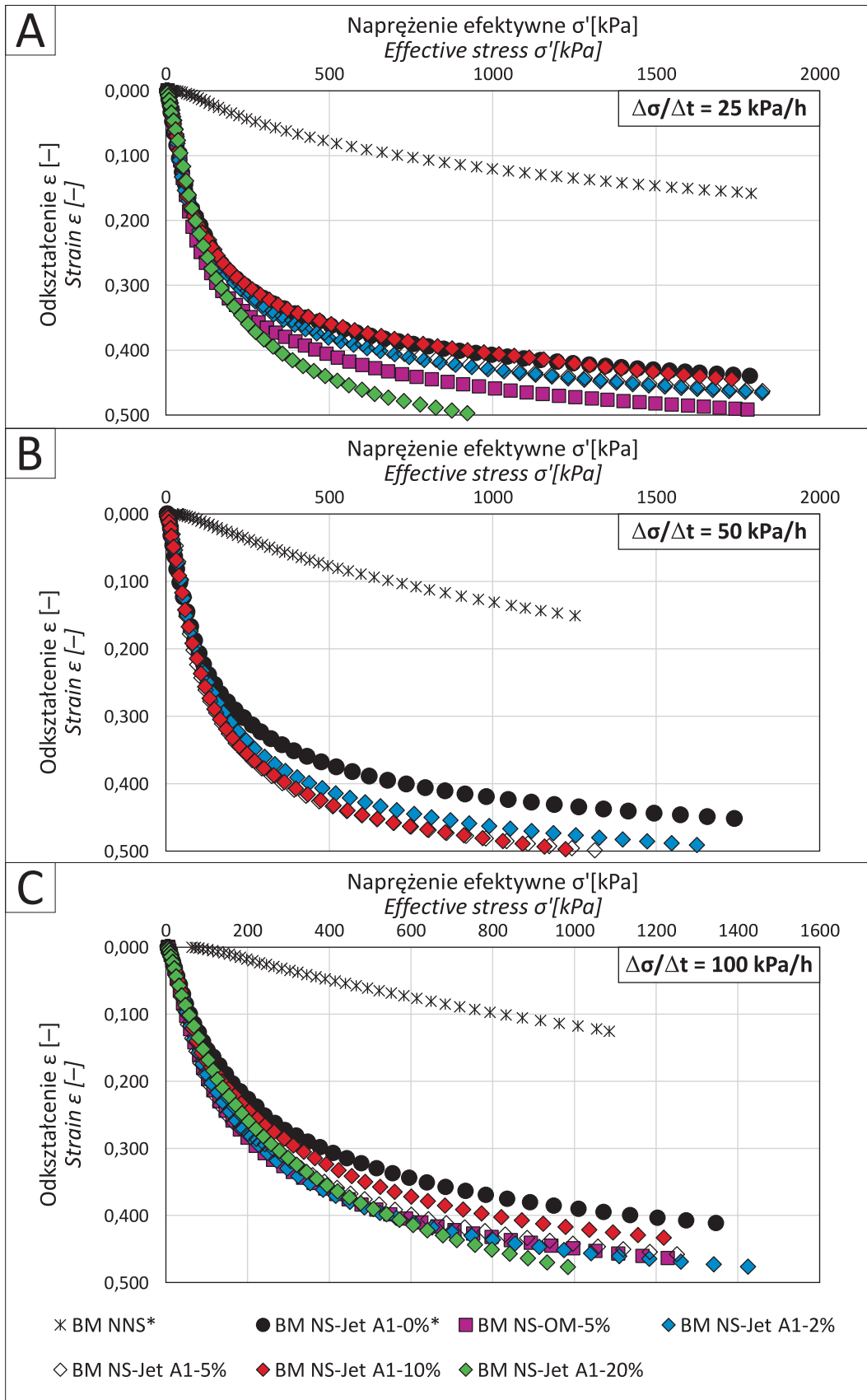
Należy zatem stwierdzić, że pod względem jakościowym zarówno grunty drobnoziarniste zanieczyszczone węglowodorami, jak również niezanieczyszczone, w warunkach ciągłego przyrostu obciążenia będą się zachowywały w podobny sposób.

Produkty ropopochodne obecne w przestrzeni porowej past gruntowych istotnie zmieniają ich ścisłość (ryc. 2). Wśród próbek o naruszonej strukturze największe wartości maksymalne modułu ścisłości (M_{max}) udokumentowano w trakcie badań CRL past gruntowych, które nie zostały zanieczyszczone węglowodorami (M_{max} : 11,5–20,4 MPa). Po zanieczyszczeniu badanych próbek gruntów drobnoziarnistych paliwem lotniczym Jet A1 oraz olejem mineralnym 15W40 wartości parametru M_{max} zmniejszyły się 1,1–2,7 razy (M_{max} : 4,2–19,0 MPa). Ponadto na podstawie wyników badań CRL należy stwierdzić, że zmniejszenie wartości M_{max} po zanieczyszczeniu past gruntowych paliwem lotniczym jest tym znaczniejsze, im większa jest zawartość produktu ropopochodnego w przestrzeni porowej gruntu. Podobne wnioski można sformułować po porównaniu wpływu prędkości obciążania na uzyskiwane maksymalne wartości modułu ścisłości M_{max} (ryc. 2).

Do oceny ścisłości ośrodka gruntowego oprócz odkształceń osiowych (ϵ) oraz modułu ścisłości (M) można stosować także wskaźnik ścisłości (C_c). Parametr ten uwzględnia zmiany wskaźnika porowatości gruntu spowodowane zwiększeniem obciążenia i w trakcie interpretacji wyników badań laboratoryjnych powinien być wyznaczony w zakresie naprężeń efektywnych odpowiadających ścisłości pierwotnej badanego gruntu drobnoziarnistego. W opisywanych w niniejszej pracy badaniach CRL wartości wskaźnika ścisłości (C_c) wyznaczano na etapie, w którym zostały spełnione następujące warunki (Dobak, 2008; Stajszczak, 2022):

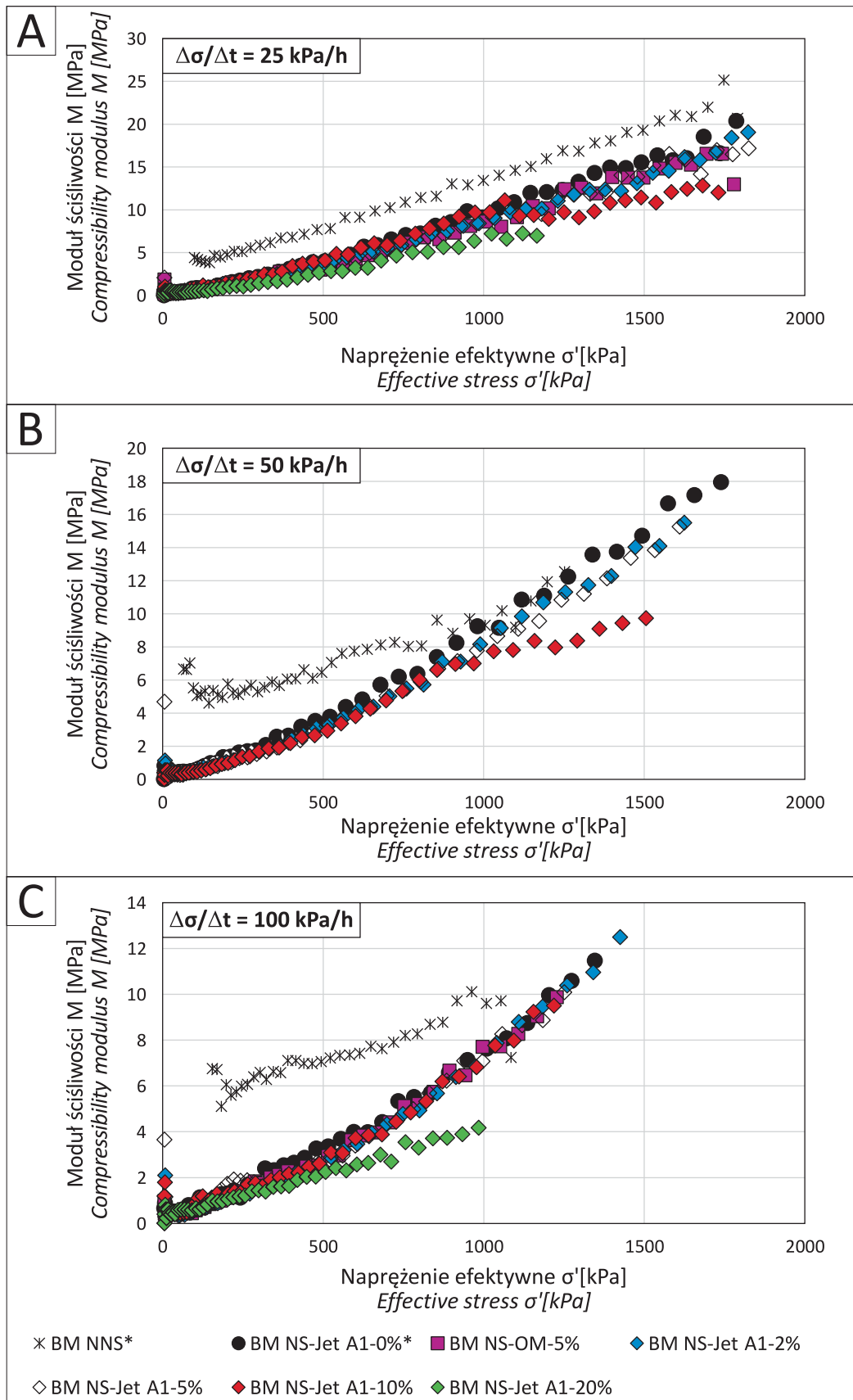
- zależność e - $\log \sigma'$ przyjmowała postać funkcji liniowej (ścisłość pierwotna gruntu);
- badanie CRL przebiegało w fazie ustalonej konsolidacji CL wyrażonej wartościami parametru ciśnienia wody w porach $C_{CL} < 0,24$ oraz względnego czasu konsolidacji $T_{CL} > 2$ (Dobak, 1999, 2008).

Na podstawie wyników badań CRL past gruntowych sporządzonych z iltów mio-pleioceńskich stwierdzono, że po spełnieniu wymienionych warunków w trakcie ciągłego przyrostu obciążenia wskaźnik ścisłości zmienia się quasi-liniowo, wykazując nieznaczny trend malejący (ryc. 3). Pod względem jakościowym pasty gruntowe niezanieczyszczone oraz zanieczyszczone węglowodorami wykazują podobne charakterystyki zmian wartości wskaźnika ścisłości, dostrzegalne różnice pojawiają się jednak w ujęciu ilościowym. Najmniejsze wartości tego wskaźnika udokumentowano w trakcie badań CRL past iltów mio-pleioceńskich, które nie zostały zanieczyszczone węglowodorami. Mieszczą się one w zakresie 0,270–0,425 i są w przybliżeniu 1,2–1,5 razy większe niż wartości wskaźnika ścisłości udokumentowane w trakcie badań CRL próbek o nienaruszonej strukturze (Stajszczak, 2022). Po zanieczyszczeniu przygotowanych past gruntowych paliwem lotniczym oraz olejem mineralnym obserwowano wzrost wartości wskaźnika ścisłości, co wskazuje na zwiększenie ścisłości badanych gruntów drobnoziarnistych. Wskaźnik ścisłości past gruntowych zanieczyszczonych paliwem lotniczym Jet A1 przyjmował wartości od 0,340 do



Ryc. 1. Odształcenie osiowe oznaczone w trakcie badań CRL: **A** – prędkość obciążenia 25 kPa/h; **B** – prędkość obciążenia 50 kPa/h; **C** – prędkość obciążenia 100 kPa/h; **NNS** – próbka o nienaruszonej strukturze; **NS** – pasta gruntowa; **BM** – iły mio-plioceniczne z Bud Mszczonowskich; **Jet A1** – paliwo lotnicze; **OM** – olej mineralny; * – wg Stajszczyka (2022)

Ryc. 1. The axial strain obtained during CRL tests: **A** – loading velocity 25 kPa/h; **B** – loading velocity 50 kPa/h; **C** – loading velocity 100 kPa/h; **NNS** – intact sample; **NS** – soil paste; **BM** – Mio-Pliocene clay from Budy Mszczonowskie region; **Jet A1** – aviation fuel; **OM** – mineral oil; * – acc. to Stajszczyk (2022)



Ryc. 2. Zmiany modułu ściśliwości w trakcie badań CRL: **A** – prędkość obciążenia 25 kPa/h; **B** – prędkość obciążenia 50 kPa/h; **C** – prędkość obciążenia 100 kPa/h; NNS – próbka o nienaruszonej strukturze; NS – pasta gruntowa; BM – ropy mio-plioceniczne z Bud Mszczonowskich; Jet A1 – paliwo lotnicze; OM – olej mineralny; * – wg Stajszczyka (2022)

Fig. 2. Changes in the compressibility modulus during CRL tests: **A** – loading velocity 25 kPa/h; **B** – loading velocity 50 kPa/h; **C** – loading velocity 100 kPa/h; NNS – intact sample; NS – soil paste; BM – Mio-Pliocene clay from Budy Mszczonowskie region; Jet A1 – aviation fuel; OM – mineral oil; * – acc. to Stajszczyk (2022)

0,595, a zanieczyszczonych olejem mineralnym nie przekraczała 0,334–0,458.

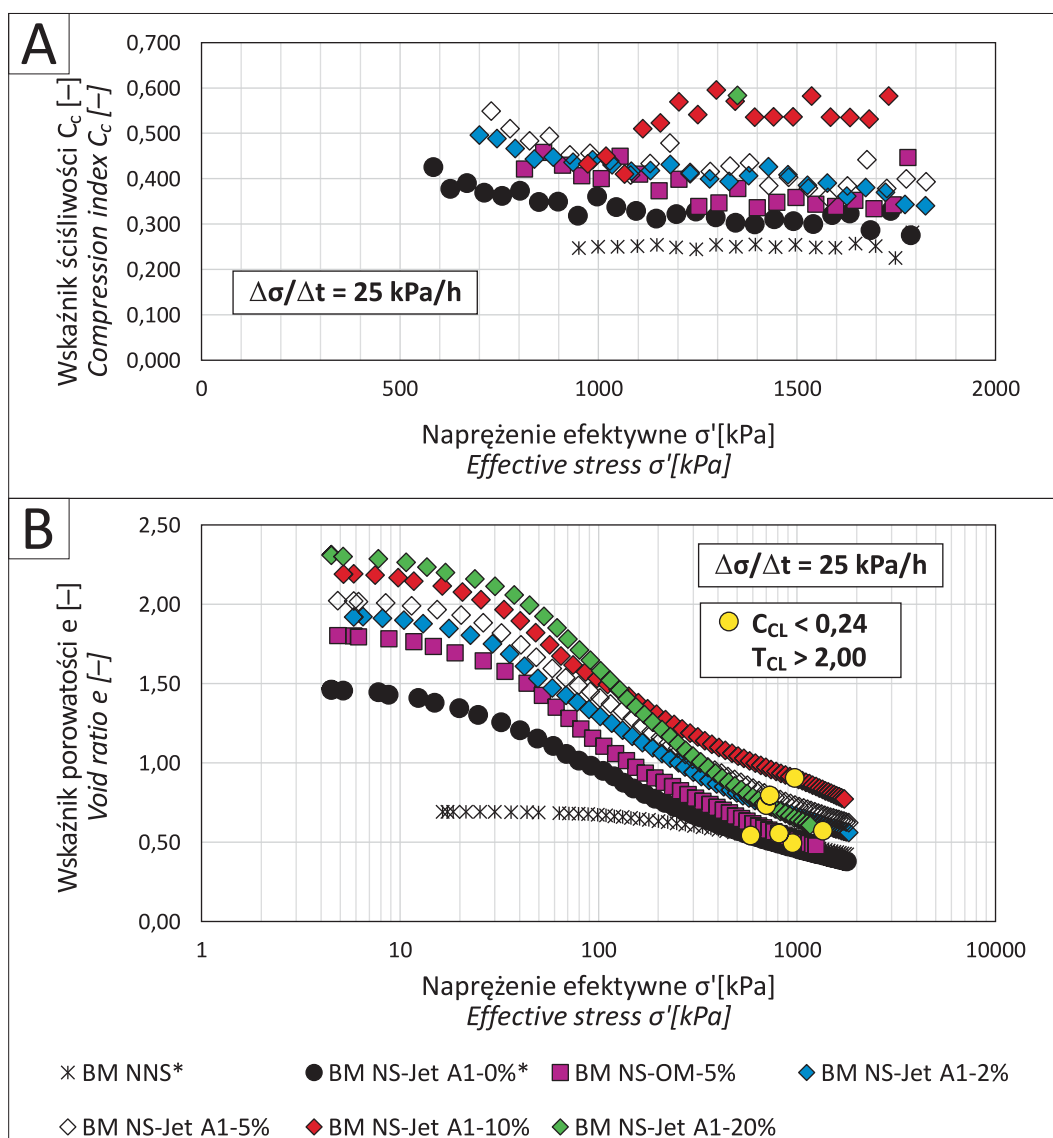
W warunkach ciągłego przyrostu obciążenia, wraz ze wzrostem zawartości produktu ropopochodnego w przestrzeni porowej ośrodka gruntowego będzie następował wzrost wartości wskaźnika ścisłości (ryc. 3).

DYSKUSJA

Właściwości fizyczne badanych gruntów

Wyniki badań laboratoryjnych, które przeprowadzono z udziałem iłów mio-pliocenicznych z rejonu Bud Mszczonowskich, potwierdzają opisany w literaturze wpływ produktów ropopochodnych na właściwości geologiczno-inżynierskie ośrodka gruntowego (Meegoda, Ratnaweera, 1994; Barań-

ski, 2000; Chen i in., 2000; Khomehchiyan i in., 2007; Ahmed i in., 2009; Gupta i in., 2009; Nasehi i in., 2016; Dobak i in., 2022). Badane iły mio-plioceniczne po zanieczyszczeniu paliwem lotniczym Jet A1 oraz olejem mineralnym 15W40 wykazywały zmiany składu granulometrycznego, co jest bezpośrednio powiązane ze zmianą wartości parametrów opisujących przestrzeń porową ośrodka gruntowego (porowatość, wskaźnik porowatości). Pozorne zmiany składu granulometrycznego gruntu drobnoziarnistego (spoiстого) po zanieczyszczeniu go produktami ropopochodnymi są spowodowane procesami zachodzącymi na pograniczu fazy stałej gruntu (szkielet mineralny) oraz ciekłej (woda, produkt ropopochodny). Jak wiadomo, powierzchniowy ładunek elektryczny poszczególnych cząstek minerałów ilastych wpływa na rozkład dipoli oraz jonów obecnych w roztworze wypełniającym przestrzeń



Ryc. 3. Wskaźnik ścisłości (A) oraz krzywe ścisłości (B) otrzymane w trakcie badań CRL przeprowadzonych z prędkością obciążania 25 kPa/h: NNS – próbka o nienaruszonej strukturze; NS – pasta gruntowa; BM – iły mio-plioceniczne z Bud Mszczonowskich; Jet A1 – paliwo lotnicze; OM – olej mineralny; C_{CL} – parametr ciśnienia wody w porach; T_{CL} – względny czas konsolidacji; * – wg Stajszczaka (2022)
Fig. 3. The compression index (A) and compressibility curves (B) obtained during CRL tests performed with loading velocity of 25 kPa/h: NNS – intact sample; NS – soil paste; BM – Mio-Pliocene clay from Budy Mszczonowskie region; Jet A1 – aviation fuel; OM – mineral oil; C_{CL} – parameter of pore water pressure; T_{CL} – relative consolidation time; * – acc. to Stajszczak (2022)

porową gruntu (Wiłun, 1987). W ten sposób na pograniczu fazy stałej oraz fazy ciekłej gruntu zostaje uformowana tzw. podwójna warstwa elektryczna (Birdi, 2003). Obecność w przestrzeni porowej gruntu cieczy niepolarniej o małej wartości stałej dielektrycznej prowadzi do zmniejszenia grubości podwójnej warstwy elektrycznej (Kaya, Fang, 2000, 2005). W konsekwencji przyciągające siły Van der Waalsa zaczynają przeważać nad odpychającymi siłami elektrostatycznymi. W ten sposób w środowisku cieczy niepolarniej zostaje zapoczątkowany proces flokulacji minerałów ilastych (łączenia się cząstek ilastych oraz ich mikroagregatów w większe aglomeraty), a zaawansowanie tego procesu jest tym większe, im mniejszą wartość stałej dielektrycznej ma faza ciekła wypełniająca przestrzeń porową ośrodka gruntowego (Stoch, 1974; Kaya, Fang, 2005). Zmniejszenie grubości podwójnej warstwy elektrycznej w następstwie zanieczyszczenia gruntu drobnopowodnymi produktami ropopochodnymi prowadzi do agregacji minerałów ilastych oraz przebudowy mikrostruktury gruntu (Tuncan, 1997; Izdebska-Mucha, Trzciniński, 2011; Khosravi i in., 2013; Stajszczak, 2019; Dobak i in., 2022). Mechanizm ten tłumaczy zmiany zawartości frakcji ilowej oraz pyłowej łu mio-plioceńskiego z rejonu Bud Mszczonowskich, które stwierdzono w toku badań po zanieczyszczeniu próbek past gruntowych paliwem lotniczym Jet A1 oraz olejem mineralnym 15W40 (tab. 3).

Zmiany zachodzące w mikrostrukturze gruntu drobnopowodnym na skutek zanieczyszczenia go węglowodorami udokumentowano w toku przeprowadzonych badań laboratoryjnych w sposób pośredni, poprzez stwierdzenie zmian gęstości objętościowej próbek pasty gruntowej (parametr ten oznaczono przed oraz po kontaminacji produktami ropopochodnymi). Gęstość objętościowa wszystkich próbek pasty łu mio-plioceńskiego po zanieczyszczeniu ich paliwem lotniczym Jet A1 oraz olejem mineralnym 15W40 była mniejsza od gęstości próbek niezanieczyszczonych węglowodorami (tab. 3). Zmniejszenie gęstości objętościowej pasty łu mio-plioceńskiego po zanieczyszczeniu jej paliwem lotniczym oraz olejem mineralnym zostało spowodowane przez małą gęstość produktów ropopochodnych (tab. 1). Gęstość objętościowa pasty gruntowej zanieczyszczonej paliwem lotniczym Jet A1 jest mniejsza niż gęstość objętościowa próbek łu mio-plioceńskiego, które zanieczyszczono olejem mineralnym 15W40 (tab. 3). Fakt ten należy wytłumaczyć m.in. tym, że paliwo lotnicze ma mniejszą gęstość niż olej mineralny (tab. 1). Czynnikiem, który może mieć istotny wpływ na zmiany gęstości objętościowej gruntów drobnopowodnych po zanieczyszczeniu ich węglowodorami, jest także zmiana porowatości ośrodka gruntowego spowodowana flokulacją minerałów ilastych. W przeprowadzonych badaniach laboratoryjnych wskaźnik porowatości oraz porowatość past gruntowych, które sporządzono z łu mio-plioceńskich, po zanieczyszczeniu ich węglowodorami zwiększały się wraz ze wzrostem zanieczyszczenia gruntu. W konsekwencji zmniejszał się udział fazy stałej gruntu przypadający na jednostkę jego objętości, co prowadziło do zmniejszenia gęstości objętościowej zanieczyszczonych próbek past gruntowych (tab. 3).

Wpływ zanieczyszczenia węglowodorami na ściśliwość gruntu drobnopowodnym w warunkach ciągłego przyrostu obciążenia

Zmiana właściwości fizycznych łu mio-plioceńskich z rejonu Bud Mszczonowskich po zanieczyszczeniu ich produktami ropopochodnymi ma bezpośredni wpływ na przebieg badań konsolidometrycznych z ciągłym przyrostem obciążenia. Powszechnym trendem, obserwowanym podczas badań CRL gruntów drobnopowodnych, jest stale rosnący, zazwyczaj nieliniowy wzrost odkształcenia osiowego oraz modułu ściśliwości w funkcji rosnącego naprężenia. Odkształcenie osiowe próbek niezanieczyszczonych oraz zanieczyszczonych węglowodorami w warunkach ciągłego przyrostu obciążenia wzrasta z różną prędkością. Z tego względu zasadne jest graficzne prezentowanie zależności, jakie występują w toku badań CRL pomiędzy wskaźnikiem porowatości i modułem ściśliwości a naprężeniem całkowitym działającym na powierzchnię próbki gruntu drobnopowodnego.

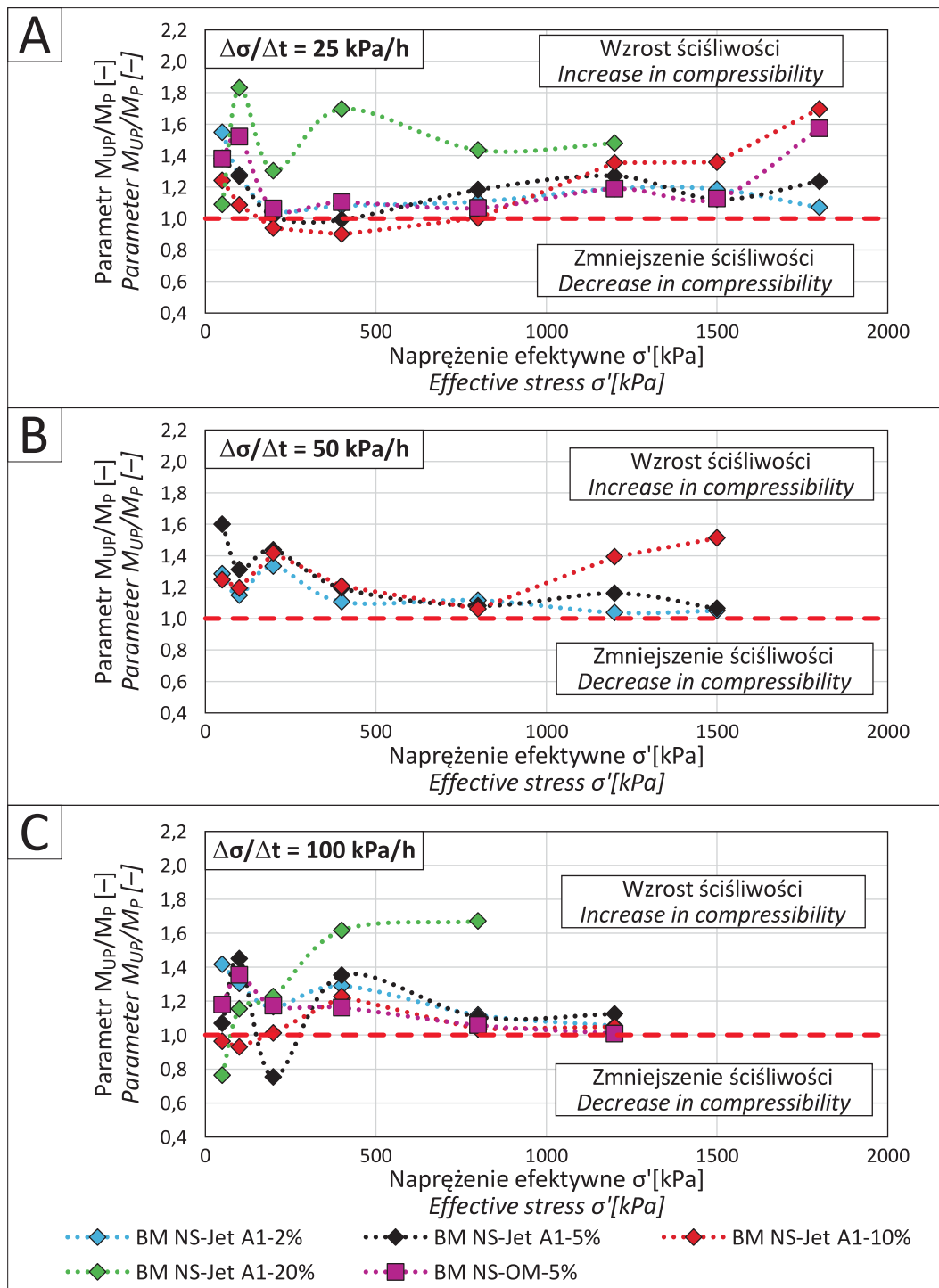
Drugim czynnikiem kształtującym ściśliwość gruntów drobnopowodnych w warunkach ciągłego przyrostu obciążenia są jego właściwości geologiczno-inżynierskie warunkowane składem granulometrycznym, konsystencją, strukturą oraz genezą. W realizowanym programie badań laboratoryjnych należało również uwzględnić obecność lub brak produktu ropopochodnego w przestrzeni porowej ośrodka gruntowego, jego rodzaj oraz zawartość w odniesieniu do masy szkieletu gruntowego.

Trzecim czynnikiem wpływającym na ściśliwość gruntu drobnopowodnego w warunkach ciągłego przyrostu obciążenia jest prędkość obciążania zaaplikowana w trakcie badania CRL. Należy pamiętać, że w badaniach tego typu konsekwencją przyjęcia dużej prędkości obciążania gruntu jest mobilizacja znacznych wartości ciśnienia porowego (u_b), co w wielu przypadkach prowadzi do rejestracji mniejszych wartości odkształcenia osiowego niż w warunkach, w których następuje całkowite rozproszenie ciśnienia porowego (klasyczne badanie IL – *incremental loading test*).

Wyniki badań CRL past gruntowych przygotowanych z łu mio-plioceńskich z rejonu Bud Mszczonowskich dowodzą, że zanieczyszczenie ośrodka gruntowego produktami ropopochodnymi może zwiększyć jego ściśliwość. Wzrost ściśliwości przygotowanych past gruntowych po zanieczyszczeniu paliwem lotniczym oraz olejem mineralnym został wyrażony zmniejszeniem maksymalnych wartości modułu ściśliwości M_{max} (ryc. 2), czemu towarzyszył jednoczesny wzrost wartości wskaźnika ściśliwości C_c oraz maksymalnego odkształcenia osiowego ε_{max} (ryc. 1 oraz 3A). Podczas przeprowadzonych badań CRL wartości modułu ściśliwości próbek past gruntowych zanieczyszczonych węglowodorami, podobnie jak próbek niezanieczyszczonych, zwiększały się wraz ze wzrostem naprężenia efektywnego. Na tej podstawie można stwierdzić, że zachowanie gruntu drobnopowodnego zanieczyszczonego produktami ropopochodnymi w warunkach stale wzrastającego obciążenia jest podobne do zachowania gruntu niezanieczyszczonego. Różnią się natomiast ilościowe charakterystyki obu rodzajów gruntu (ryc. 2). Wyniki badań wskazują, że obecność paliwa lotniczego oraz oleju mineralnego w przestrzeni porowej łu mio-plioceńskich może spowodować prawie dwukrotny wzrost ich ściśliwości (ryc. 4). Jednocześnie należy mieć na uwadze, że prze-

budowa struktury gruntu spoistego w warunkach ciągłego przyrostu obciążenia będzie zależała nie tylko od właściwości inherentnych ośrodka gruntowego, ale również od wartości ciśnienia porowego (u_b), które rejestrowano w

trakcie badania CRL. Ciśnienie porowe mierzone w trakcie badania CRL w znacznej mierze zależy od właściwości geologiczno-inżynierskich badanego gruntu, prędkości obciążania, właściwości fizycznych produktu ropopochod-



Ryc. 4. Wartości współczynnika modułu ścisłości obliczone na podstawie wyników badań CRL: **A** – prędkość obciążania 25 kPa/h; **B** – prędkość obciążania 50 kPa/h; **C** – prędkość obciążania 100 kPa/h; M_P – moduł ścisłości oznaczony podczas badania CRL gruntu zanieczyszczonego węglowodorami; M_{UP} – moduł ścisłości oznaczony podczas badania CRL gruntu niezanieczyszczonego; **NNS** – próbka o nienaruszonej strukturze; **BM** – iły mio-plioceńskie z Bud Mszczonowskich; **Jet A1** – paliwo lotnicze; **NS** – pasta gruntowa; **OM** – olej mineralny

Fig. 4. The values of compressibility modulus ratio calculated on the basis of CRL tests: **A** – loading velocity 25 kPa/h; **B** – loading velocity 50 kPa/h; **C** – loading velocity 100 kPa/h; M_P – compressibility modulus determined during CRL test of soil sample polluted with hydrocarbons; M_{UP} – compressibility modulus determined during CRL test of unpolluted soil sample; **NNS** – intact sample; **BM** – Mio-Pliocene clay from Budy Mszczonowskie region; **Jet A1** – aviation fuel; **NS** – soil paste; **OM** – mineral oil

nego oraz jego zawartości w porach gruntu (Dobak, 1999; Stajszczyk, 2021; Dobak i in., 2022). W trakcie badania CRL intensywna mobilizacja ciśnienia porowego prowadzi zazwyczaj do zwiększenia sztywności badanego gruntu drobnoziarnistego. Pozorny wzrost sztywności badanych past gruntowych po zanieczyszczeniu ich węglowodorami nastąpił na początkowym etapie badania konsolidometrycznego i został wyrażony wartościami wskaźnika zmiany modułu ściśliwości CM_R mniejszymi niż 1 (ryc. 4A i 4C). Na zaawansowanym etapie badania CRL mobilizacja ciśnienia porowego jest zazwyczaj mniejsza niż na początku pomiarów. Z tego względu wraz z postępem zaawansowania badania konsolidometrycznego wzrasta udział szkieletu gruntowego w przenoszeniu stale wzrastającego obciążenia, które jest przekazywane na powierzchnię badanej próbki gruntu drobnoziarnistego. Na tym etapie badań CRL próbki past gruntowych sporządzonych z ilów mio-plioceńskich, które zanieczyszczono paliwem lotniczym lub olejem mineralnym, były bardziej ściśliwe niż próbki niezanieczyszczone, co potwierdzały wartości parametru CM_R większe niż 1 (ryc. 4).

Rola ciśnienia porowego w ocenie ściśliwości gruntów drobnoziarnistych zanieczyszczonych węglowodorami

Wskaźnik zmian modułu ściśliwości (CM_R), który wykorzystano do oceny zmian ściśliwości gruntu drobnoziarnistego na skutek zanieczyszczenia węglowodorami, na zaawansowanym etapie badań CRL przyjmował wartości większe niż 1 (ryc. 4). Było to spowodowane mobilizowaniem większego ciśnienia porowego (u_b) po zanieczyszczeniu przygotowanych past gruntowych paliwem lotniczym Jet A1 oraz olejem mineralnym 15W40. Jak zauważył Wiłun (1987), generowanie wysokich wartości spadku hydraulicznego w trakcie badań ściśliwości może powodować nagłe zniszczenie struktury badanego gruntu, zwiększając tym samym jego ściśliwość. W przeprowadzonych badaniach CRL wyznacznikiem wygenerowanego spadku hydraulicznego są pomierzone wartości ciśnienia porowego (u_b). Na podstawie wyników tych badań należy stwierdzić, że w gruntach drobnoziarnistych zanieczyszczonych węglowodorami maksymalne wartości ciśnienia porowego (u_{bmax}), generowane w następstwie ciągłego przyrostu obciążenia, są tym znaczniejsze (ryc. 5), im większa jest:

- zadana prędkość obciążania;
- zawartość produktu ropopochodnego w porach gruntu;
- gęstość raz lepkość fazy zanieczyszczającej ośrodek gruntowy.

Na podstawie tych spostrzeżeń należy przypuszczać, że przebudowa struktury past gruntowych w wyniku wygenerowania znacznego spadku hydraulicznego w toku przeprowadzonych badań CRL mogła stanowić jeden z czynników powodujących wzrost ich ściśliwości po zanieczyszczeniu paliwem lotniczym Jet A1 oraz olejem mineralnym 15W40. Potwierdzają to analizy zmian wartości ciśnienia porowego (ryc. 5A–C). Wraz ze wzrostem zawartości paliwa lotniczego Jet A1 w porach badanych próbek ilu mio-plioceńskiego następował wzrost maksymalnych wartości ciśnienia porowego (u_{bmax}), które zarejestrowano w trakcie badań CRL o porównywalnej prędkości obciążania. Trend ten utrzymuje się bez względu na zaaplikowaną

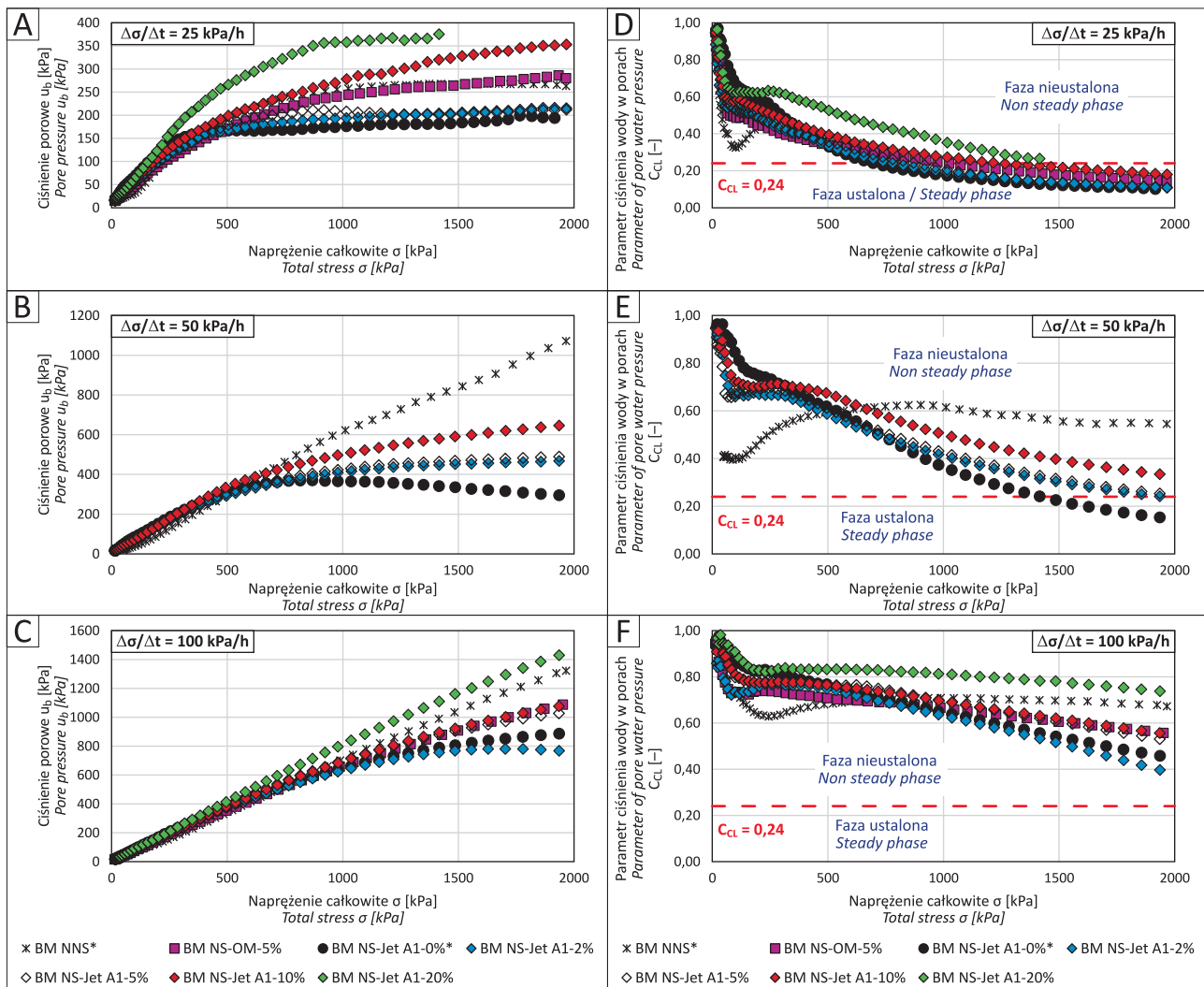
prędkość obciążania. Podczas badań CRL gruntów drobnoziarnistych, które nie zostały zanieczyszczone węglowodorami, ten sam efekt można uzyskać poprzez zwiększenie prędkości obciążania.

Zwiększenie ciśnienia porowego po zanieczyszczeniu past ilu mio-plioceńskiego paliwem lotniczym oraz olejem mineralnym można wytłumaczyć pogorszeniem przepuszczalności ośrodka gruntowego. Pogorszenie to zostało spowodowane na skutek wyłączenia części porów z procesu filtracji przez produkty ropopochodne, które charakteryzują się większą lepkością niż woda (zmniejszenie porowatości efektywnej gruntu). Lepkość oleju mineralnego jest większa niż lepkość paliwa lotniczego – z tego względu ciśnienie porowe, a co za tym idzie również wartości spadku hydraulicznego, rejestrowane podczas badań CRL próbek zanieczyszczonych olejem mineralnym, są większe niż próbek o podobnej zawartości paliwa lotniczego (ryc. 5A i 5C).

Zmiany przepuszczalności past gruntowych ilu mio-plioceńskiego z rejonu Bud Mszczonowskich, udokumentowane po zanieczyszczeniu ich węglowodorami, istotnie wpływają na parametr ciśnienia wody w porach $C_{CL} = u_b/\sigma$. Fazę ustaloną konsolidacji CL osiągnano przeważnie w tych badaniach CRL, które przeprowadzono zadając prędkość obciążania 25 kPa/h (ryc. 5D–F). Pogorszenie zdolności filtracyjnych ośrodka gruntowego na skutek zanieczyszczenia go produktami ropopochodnymi sprawiło, że ciśnieniu wody w porach C_{CL} , pod wpływem którego rozpozniała się faza ustalonej konsolidacji CL ($C_{CL} = 0,24$), towarzyszyły wyższe wartości naprężenia całkowitego (ryc. 5D) niż w badaniach próbek niezanieczyszczonych lub zanieczyszczonych w mniejszym stopniu.

Wpływ właściwości fizycznych produktu ropopochodnego na ściśliwość gruntu drobnoziarnistego

Oprócz prędkości obciążania istotny wpływ na ściśliwość gruntów spoistych zanieczyszczonych produktami ropopochodnymi mają w badaniach CRL właściwości fizyczne fazy zanieczyszczającej. Oddziaływanie tych właściwości można określić w sposób pośredni, analizując wartości ciśnienia porowego zarejestrowane w trakcie badań past gruntowych niezanieczyszczonych oraz zanieczyszczonych produktami ropopochodnymi. W trakcie badań CRL past gruntowych, które zanieczyszczono olejem mineralnym 15W40, rejestrowane wartości ciśnienia porowego były większe niż udokumentowane w trakcie badania pasty gruntowej zanieczyszczonej paliwem lotniczym Jet A1 (ryc. 5A–C). Z tego względu należałoby się spodziewać, że pasty gruntowe zanieczyszczone olejem mineralnym będą wykazywały większą ściśliwość niż próbki zanieczyszczone paliwem lotniczym. Udokumentowane wartości modułu ściśliwości oraz wskaźnika ściśliwości (ryc. 1–3) wskazują jednak, że ściśliwość past gruntowych wykonanych z ilów mio-plioceńskich zanieczyszczonych paliwem lotniczym Jet A1 lub olejem mineralnym 15W40 jest zbliżona. Zjawisko to należy wytłumaczyć różną lepkością produktów ropopochodnych użytych do badań laboratoryjnych. Lepkość oleju mineralnego 15W40 jest około 10 razy większa od lepkości paliwa lotniczego Jet A1. Z tego powodu olej mineralny wykazywał w trakcie badania CRL mniejszą zdolność do przemieszczania się w porach gruntu niż



Ryc. 5. Zmiany ciśnienia porowego oraz ciśnienia wody w porach zarejestrowane w trakcie badań CRL: **A i D** – prędkość obciążania 25 kPa/h; **B i E** – prędkość obciążania 50 kPa/h; **C i F** – prędkość obciążania 100 kPa/h; NNS – próbka o nienaruszonej strukturze; NS – pasta gruntowa; BM – łył mio-pliocenięskie z Bud Mszczonowskich; Jet A1 – paliwo lotnicze; OM – olej mineralny; C_{CL} – parametr ciśnienia wody w porach; * – wg Stajszczyka (2022)

Fig. 5. The values of pore pressure and parameter of pore water pressure recorded during CRL tests: **A and D** – loading velocity 25 kPa/h; **B and E** – loading velocity 50 kPa/h; **C and F** – loading velocity 100 kPa/h; NNS – intact sample; NS – soil paste; BM – Mio-Pliocene clay from Budy Mszczonowskie region; Jet A1 – aviation fuel; OM – mineral oil; C_{CL} – parameter of pore water pressure; * – acc. to Stajszczyk (2022)

paliwo lotnicze Jet A1, co w pewnym stopniu przeciwdziało zmianom strukturalnym wynikającym z mobilizacji wysokiej wartości ciśnienia porowego oraz spadku hydraulicznego.

Istotną rolę właściwości produktu ropopochodnego w kształtowaniu ścisłości zanieczyszczonego nim ośrodka gruntowego potwierdzają również analizy wykresów ścisłości próbek past gruntowych (ryc. 3B). W toku przeprowadzonych badań CRL wprowadzenie paliwa lotniczego oraz oleju mineralnego do przestrzeni porowej past gruntowych wykonanych z łył mio-pliocenięskiego spowodowało przesunięcie wykresów ścisłości próbek zanieczyszczonych węglowodorami względem krzywej, która odpowiada próbce gruntu niezanieczyszczonego. Przesunięcie to wiąże się ze zmianą wartości wskaźnika porowatości gruntu po zanieczyszczeniu węglowodorami (proces flokulacji minerałów łyłstych). W początkowym etapie badań CRL wartości wskaźnika porowatości próbek zanieczyszczonych paliwem lotniczym Jet A1 były większe niż próbek zanieczyszczonych olejem mineralnym

15W40 (ryc. 3B). Wskazuje to na znacznie większą przebudowę struktury pasty łył mio-pliocenięskiego po zanieczyszczeniu paliwem lotniczym Jet A1. Ta znacznie większa przebudowa wiąże się z większą mobilnością tego produktu ropopochodnego w przestrzeni porowej gruntu niż oleju mineralnego 15W40.

Jak wspomniano, wyłączenie części porów z procesu filtracji po zanieczyszczeniu gruntu drobnoziarnistego węglowodorami powoduje opóźnienie momentu osiągnięcia fazy ustalonej konsolidacji CL, które wyrażają parametr ciśnienia wody w porach $C_{CL} < 0,24$ oraz względny czas konsolidacji $T_{CL} > 2,0$ (Dobak, 2008). W miarę postępu zaawansowania badania CRL stopniowo zmniejszają się różnice w przebiegu wykresów ścisłości próbek pasty gruntowej niezanieczyszczonej węglowodorami oraz zanieczyszczonych paliwem lotniczym Jet A1 i olejem mineralnym 15W40, a wykres zależności e - $\log \sigma'$ przyjmuje przebieg liniowy (ryc. 3B). Warto podkreślić, że w trakcie badań CRL próbek łył mio-pliocenięskiego, które zostały zanie-

czyszczone produktami ropopochodnymi, liniowa zależność relacji $e\text{-log}\sigma'$ następuje w fazie ustalonej konsolidacji CL, co jest zgodne z wynikami wcześniejszych badań Stajszczaka (2022).

WNIOSKI

W artykule podjęto próbę oceny wpływu zanieczyszczenia paliwem lotniczym Jet A1 oraz olejem mineralnym 15W40 na zmiany ściśliwości iłu mio-plioceńskiego z rejonu Bud Mszczonowskich. W tym celu przygotowano pasty gruntowe, które po zanieczyszczeniu produktami ropopochodnymi poddano badaniom konsolidometrycznym ze stale wzrastającym obciążeniem. Na podstawie wyników badań właściwości fizycznych badanego gruntu oraz pomiarów wykonanych w konsolidometrze wyciągnięto następujące wnioski:

1) Wraz z postępowaniem zaawansowania badania CRL ściśliwość gruntu drobnoziarnistego zanieczyszczonego oraz niezanieczyszczonego węglowodorami ulega stopniowemu zmniejszeniu. Świadczy o tym udokumentowany w toku badań wzrost wartości modułu ściśliwości oraz stopniowe zmniejszanie się przyrostu odkształcenia osiowego w funkcji stale wzrastającego naprężenia osiowego. Wartości modułu ściśliwości oraz maksymalnego odkształcenia osiowego, oznaczone w warunkach stałego przyrostu obciążenia, zależą od właściwości geologiczno-inżynierskich badanego gruntu, jego struktury, zadanej prędkości obciążenia, właściwości fizykochemicznych fazy zanieczyszczającej oraz jej zawartości w porach gruntu.

2) Zanieczyszczenie iłów mio-plioceńskich paliwem lotniczym Jet A1 oraz olejem mineralnym 15W40 powoduje zwiększenie ściśliwości tych gruntów. W zrealizowanym programie badań laboratoryjnych wzrost ściśliwości próbek zanieczyszczonych węglowodorami został wyrażony 1,1-krotnym wzrostem maksymalnej wartości odkształcenia osiowego (ϵ_{max}), a także 1,1–2,7-krotnym zmniejszeniem maksymalnej wartości modułu ściśliwości (M_{max}).

3) Po zanieczyszczeniu próbek iłu mio-plioceńskiego paliwem lotniczym Jet A1 oraz olejem mineralnym 15W40 następuje wzrost wartości wskaźnika ściśliwości (C_c), mieszczący się w przedziale 0,058–0,170. Wzrost ściśliwości próbek zanieczyszczonych paliwem lotniczym Jet A1 jest większy niż próbek zanieczyszczonych olejem mineralnym 15W40. Potwierdzają to wartości wskaźnika ściśliwości próbek iłu mio-plioceńskiego zanieczyszczonego paliwem lotniczym Jet A1 większe o 1,1–1,2 razy od wartości wskaźnika ściśliwości próbek zanieczyszczonych olejem mineralnym 15W40.

4) Wzrost ściśliwości próbek iłu mio-plioceńskiego po zanieczyszczeniu paliwem lotniczym Jet A1 oraz olejem mineralnym 15W40 należy wyjaśnić zmianami porowatości ośrodka gruntowego, które zostały spowodowane flokulacją minerałów ilastych, jak również pogorszeniem zdolności filtracyjnych gruntu po zanieczyszczeniu węglowodorami. Wyłączenie części porów gruntu przez fazę wolną produktu ropopochodnego w warunkach ciągłego przyrostu obciążenia powoduje zwiększenie maksymalnych wartości ciśnienia porowego (u_{bmax}) oraz spadku hydraulicznego (I). Czynniki te powodują przebudowę struktury ośrodka gruntowego, zwiększając tym samym jego ściśliwość. Należy jednak mieć na uwadze, że zmiany strukturalne

spowodowane mobilizacją wysokich wartości ciśnienia porowego może w pewnym stopniu przeciwdziałać wysoka lepkość fazy zanieczyszczającej.

5) Badania konsolidometryczne typu CRL można uznać za przydatne narzędzie służące do oceny ściśliwości gruntów drobnoziarnistych, które zostały zanieczyszczone węglowodorami. W celu zapewnienia wiarygodności uzyskiwanych danych za każdym razem warunki badania konsolidometrycznego powinny być dostosowane do właściwości geologiczno-inżynierskich ośrodka gruntowego, ze szczególnym uwzględnieniem jego przepuszczalności, aby w trakcie prowadzenia pomiarów możliwe było osiągnięcie fazy ustalonej konsolidacji CL. Na podstawie wyników badań ściśliwości próbek iłów mio-plioceńskich z udziałem paliwa lotniczego Jet A1 oraz oleju mineralnego 15W40 autor rekomenduje, aby w trakcie badań CRL gruntów drobnoziarnistych zanieczyszczonych produktami ropopochodnymi nie przyjmować prędkości obciążania większej niż 25 kPa/h.

Autor dziękuje Recenzentom za poświęcony czas, cenne uwagi oraz rzetelną ocenę niniejszej pracy.

LITERATURA

- ABOSHI H., YOSHIKUMI H., MAURYAMA S. 1970 – Constant Loading Rate Consolidation Test. Soils and Foundations, 10 (1): 43–56.
- AHMED A.A., ABDELRAHMAN M.T., ISKANDER G.M. 2009 – Compressibility of contaminated sand with petroleum oil. Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. The Academia and Practice of Geotechnical Engineering, 1: 44–47.
- ASTM D2435-04 – Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading.
- ASTM D4186-12 – Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Saturated Cohesive Soils Using Controlled-Strain Loading.
- BARANSKI M. 2000 – Wytrzymałość i odkształcalność glin lodowcowych zanieczyszczonych ropopochodnym benzenem na terenie Petrochemii Płock S.A. (rozprawa doktorska). Wydział Geologii UW.
- BIRDI K. S. 2003 – Handbook of Surface and Colloid Chemistry. 2nd ed. CRC Press. Boca Raton/London/New York/Washington.
- CHEN J., ANANDARAJAH A., INYANG H. 2000 – Pore Fluid Properties and Compressibility of Kaolinite. Journ. of Geotech. and Geoinv. Eng., 126 (9): 798–807.
- DOBAK P. 1999 – Rola czynnika filtracyjnego w badaniach jednoosiowej konsolidacji gruntów. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- DOBAK P. 2008 – Evaluation of consolidation parameters in CL tests: theoretical and practical aspects. Geol. Quart., 52 (4): 397–410.
- DOBAK P., SZCZEPAŃSKI T., KOWALCZYK S. 2015 – Load velocity influence on changes of soil consolidation and permeability parameters in CL-type tests. Geol. Quart., 59 (2): 382–390.
- DOBAK P., IZDEBSKA-MUCHA D., STAJSZCZAK P., WÓJCIC E., KIEŁBASIŃSKI K., GAWRIUCZENKOW I., SZCZEPAŃSKI T., ZAWRZYKRAJ P., BĄKOWSKA A. 2022 – Effects of hydrocarbon contamination on the engineering geological properties of Neogene clays and Pleistocene glacial tills from Central Poland. Acta Geol. Pol., 72 (4), 529–555.
- ECHEVERRI-RAMIREZ Ó., VALENCIA-GONZALEZ, TOSCANO-PATINO D.E., ORDONEZ-MUNOZ F.A., ARANGO-SALAS C., OSORIO-TORRES S. 2015 – Geotechnical behavior of a tropical residual soil contaminated with gasoline. DYNA 82 (190): 31–37.
- GLAZER Z. 1985 – Mechanika Gruntów, wyd. 2. Wyd. Geol., Warszawa.
- GORMAN C.T. 1976 – Constant-Rate-of-Strain and Controlled-Gradient Consolidation Testing. Kentucky Transportation Center Research Report. 866.
- GORMAN C.T. 1981 – Strain-rate selection in the Constant-rate of strain consolidation test. Technical Report, Kentucky Transportation Program, 15.
- GUPTA M.K., SRIVASTAVA R.K., SINGH A.K. 2009 – Hydraulic Conductivity and Consolidation Behavior of Lubricant Oil Contaminated Alluvial Soils. Int. J. Earth Sc. Eng., 2 (4): 360–366.

- 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.
- IZDEBSKA-MUCHA D., TRZCIŃSKI J. 2011 – Właściwości mikrostrukturalne aluwialnych gruntów ilastych długotrwałe zanieczyszczone paliwami ropopochodnymi. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 446: 469–476.
- IZDEBSKA-MUCHA D., TRZCIŃSKI J. 2021 – Clay soil behaviour due to long-term contamination by liquid petroleum fuels: microstructure and geotechnical properties. *Bul. Eng. Geol. and the Environment.*, 80: 3193–3206.
- KARKUSH M.O., ZABOON A.T., HUSSEIN H.M. 2013 – Studying the effects of contamination on the geotechnical properties of clayey soil. *Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics. Proceedings of the International Symposium, Torino, Italy*: 599–608.
- KAYA A., FANG H. 2000 – The effects of organic fluids on physicochemical parameters of fine-grained soils. *Can. Geotech. J.*, 37: 943–950.
- KAYA A., FANG H. 2005 – Eksperymentalne dowody na zmniejszenie przyciągania i odpychania między cząstkami gliny nasączonej cieczami organicznymi. *Can. Geotech. J.*, 42: 632–640.
- KERMANI M., EBADI T. 2012 – The Effect of Oil Contamination on the Geotechnical Properties of Fine-Grained Soils. *Soil and Sediment Contamination. An. Int. Journal*, 21: 655–671.
- KHAMEHCHIYAN M., CHARKHABI A.H., TAJIK M. 2007 – Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils. *Eng. Geol.*, 89: 220–229.
- KHOSRAVI E., GHASEMZADEH H., SABOUR M.R., YAZDANI H. 2013 – Geotechnical properties of gas oil-contaminated kaolinite. *Eng. Geol.*, 166: 11–16.
- KOWALCZYK S. 2007 – Zmiany właściwości filtracyjnych w procesie konsolidacji zielonych ilów beidelitowych z Rowu Kleszczowa (praca doktorska). Wydział Geologii UW, Warszawa.
- LOWE J., JONAS E., OBRICANS V. 1969 – Controlled gradient consolidation tests. *Proc. ASCE*, 95, SM1.
- ŁUCZAK-WILAMOWSKA B. 2002 – Iły serii poznańskiej jako podłoże składowisk odpadów na przykładzie odsloneńca w Budach Mszczonowskich. *Prz. Geol.*, 50: 966–970.
- MEEGODA N.J., RATNAWEERA P. 1994 – Compressibility of Contaminated Fine-Grained Soils. *Geot. Test. J.*, 17 (1): 101–112.
- NASEHI S.A., UROMEIHY A., NIKUDEL M.N. 2016 – Influence of Gas Oil Contamination on Geotechnical Properties of Fine and Coarse-Grained Soils. *Geotech. Geol. Eng.*, 34: 333–345.
- OLCHAWA A., KUMOR M. 2007 – Compressibility of Organic Soils Polluted with Diesel Oil. *Arch. of Hydro-Eng. and Environment. Mech.*, 54 (4): 299–307.
- PN-88/B-04481:1988 – Grunty budowlane – Badania próbek gruntu.
- 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 17892-5:2017-06 – Rozpoznanie i badania geotechniczne – Badania laboratoryjne gruntów – Część 5: Badanie edometryczne gruntów.
- ROWE P.W., BARDEN L. 1966 – A new consolidation cell. *Geotech.*, 16 (2): 162–170.
- SMITH R.E., WAHLS H.E. 1969 – Consolidation under constant rate of strain. *Proc. ASCE*, 95, No SM2.
- SOU MAYA B. 2005 – Setzungsverhalten von Flachgründungen in normalkonsolidierten bindigen Böden. *Schriftenreihe Geotechnik Universität Kassel*, 16.
- SOU MAYA B., KEMPFERT H.G. 2010 – Verformungsverhalten weicher Böden im spannungsgesteuerten Kompressionsversuch. *Bautech.*, 87 (2).
- SRIVASTAVA R.K., PANDEY V.D. 1997 – Geotechnical evaluation of oil contaminated soil. *Proceedings of GREEN 2. The Second International Symposium on Geotechnics Related to the Environment. Poland, Kraków. Wyd. Thomas Telford, London.*
- STAJSZCZAK P. 2018 – Filtracyjno-konsolidacyjne właściwości ilów mio-pliocenów z rejonu Bud Mszczonowskich w warunkach stale wzrastającego obciążenia. *Prz. Geol.*, 66 (9): 558–568.
- STAJSZCZAK P. 2019 – Wpływ zanieczyszczenia paliwami ropopochodnymi na zmiany parametrów filtracyjno-konsolidacyjnych i strukturalnych w gruntach spoistych (praca doktorska). Wydz. Geol. UW.
- 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. 2022 – Ściśliwość wybranych gruntów drobnoziarnistych z centralnej Polski w warunkach stałego przyrostu obciążenia. *Prz. Geol.*, 70 (7): 503–512.
- 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.
- STOCH L. 1974 – *Minerały ilaste*. Wyd. Geol., Warszawa.
- SZALEWICZ H., WŁODEK M. 2009 – Szczegółowa mapa geologiczna Polski 1 : 50 000, ark. Mszczonów. *Nar. Arch. Geol. PIG-PIB*, Warszawa.
- TUNCAN A. 1997 – Electron microscopy studies of petroleum contaminated marine clay. *Proc. of the Inst. Phys. Conf. Ser.* 153 (11), Cambridge.
- 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, No. SM2.

Praca wpłynęła do redakcji 14.05.2023 r.
Akceptowano do druku 10.10.2023 r.