

Warunki obciążania jako czynnik rzutujący na odkształcalność osadów deltowych z zachodniej części Żuław Wiślanych

Tomasz Białobrzeski¹, Paweł Dobak¹, Tomasz Szczepański¹, Piotr Zawrzykraj¹



T. Białobrzeski

P. Dobak

T. Szczepański

P. Zawrzykraj

Conditions of loading as a factor affecting compressibility behavior of soils from western part of Vistula Delta “Żuławy”. *Prz. Geol.*, 65: 756–764

Abstract. Results of a series of CRL-type consolidation tests on alluvial deposits from Vistula Delta “Żuławy”, conducted with diverse load rates are shown. Such approach revealed diversified strain response of tested material. Dividing loading into stages has made increasing of stiffness, which may be applicable on the practice field.

Keywords: *compressibility, consolidation, CRL, loading rate*

Odształcalność normalnie konsolidowanych, młodych osadów madowych z domieszką substancji organicznych jest w znacznie większym stopniu niż w typowych gruntach mineralnych zależna od przebiegu ich obciążania. Określanie parametrów odkształcalności w nawiązaniu do opcjonalnych programów obciążania jest niezbędne w szeregu zastosowaniach praktycznych. Dotyczy to m.in. etapowego wznoszenia nasypów z zachowaniem quasi-jednoosiowego stanu odkształcenia. Istotną rolę w reakcji gruntu na rosnące obciążenie odgrywa zmienny udział filtracyjnych i reologicznych uwarunkowań konsolidacji.

Opis zachowań osadów o znacznej ściśliwości wymaga uwzględnienia wydłużonego czasu konsolidacji oraz zastosowania nieliniowych modeli odkształcalności. W klasycznych badaniach, pod stałym obciążeniem (typu IL) jest niezbędne długotrwałe oczekiwanie na osiągnięcie umownych stabilizacji odkształceń, co nierzadko implikuje znaczne błędy wynikające z trudnych do pełnego wyeliminowania wpływów zaburzeń powstających w laboratorium (mikrowstrząsy, zmiany wilgotności i temperatury).

Problemy te są zminimalizowane w badaniach odkształcalności jednoosiowej, prowadzonych ze stałym wzrostem obciążenia (CRL). Jednocześnie możliwość stosowania różnych prędkości obciążenia pozwala oceniać jej wpływ na charakterystyki odkształcalności gruntu uzyskiwane przy porównywalnych zakresach obciążenia. W zależności od zaaplikowanej prędkości przyrostu naprężenia zmienia się udział ciśnienia porowego w przenoszeniu obciążeń oraz rola odkształceń o charakterze reologicznym. Ocena tych czynników jest niezbędna dla programowania badań odkształcalności z uwzględnieniem zróżnicowanych scenariuszy wymuszeń procesu konsolidacji.

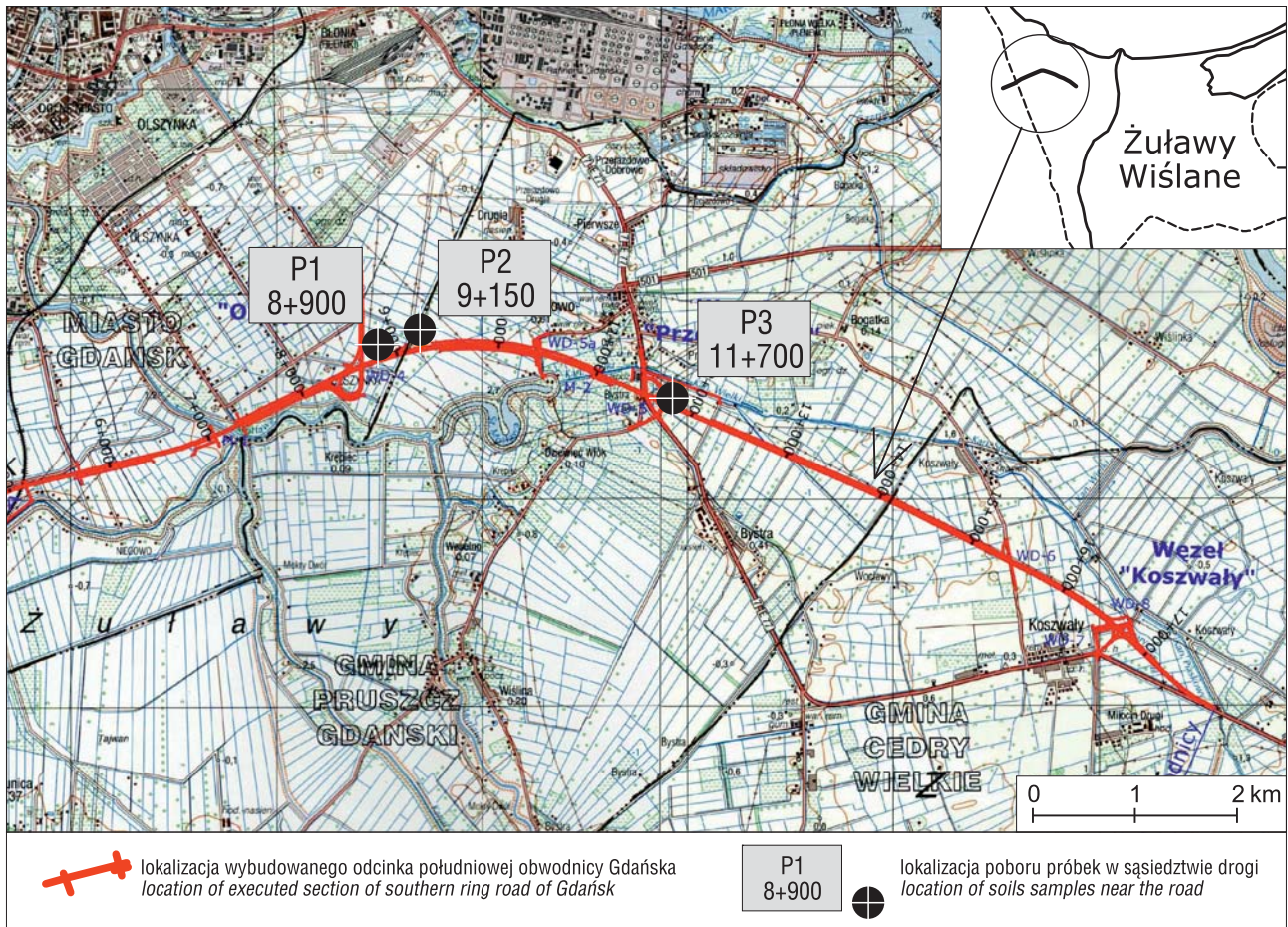
Celem artykułu jest zatem ocena wpływu obciążeń pierwotnych i wtórnych na zmiany charakteru i czynników odkształcalności młodych osadów organiczno-madowych z Żuław Wiślanych, w perspektywie określania parametrów podłoża do projektowania obiektów drogowych.

CHARAKTERYSTYKA BADANYCH GRUNTÓW

Przedstawione we wstępie zagadnienia przeanalizowano na przykładzie badań spoistych osadów madowych zawierających materię organiczną. Próbkę do badań pobrano w zachodniej części Żuław Wiślanych w bliskim sąsiedztwie Południowej Obwodnicy Gdańska (POG), gdzie monitoring osiadań podłoża pod nasypami pozwala na oceny odkształcalności w warunkach polowych. Próbkę o nienaruszonej strukturze (NNS) uzyskano z trzech punktów zlokalizowanych w odległości ok. 50 m od podstawy nasypu na odcinku od 8 +900 do 11 +800 kilometrażu POG (ryc. 1). Miejsca poboru próbek wytypowano ze względu na stosunkowo płytkie zaleganie mad spoistych. Są to grunty normalnie konsolidowane pod wpływem ciężaru własnego i warstwy piasków przypowierzchniowych o niewielkich miąższościach nieprzekraczających 3 m. Wybór miejsc opróbowania odzwierciedlał litogenetyczne zróżnicowanie gruntów, stwierdzone w trakcie specjalistycznych badań prowadzonych w Laboratorium Hydrogeologicznym i Geologiczno-Inżynierskim PIG-PIB (Frankowski i in., 2010) na potrzeby dokumentowania warunków geologiczno-inżynierskich POG. Interpretacje uzyskanych wyników badań wskazują na rozbieżności zachowań analizowanych gruntów w stosunku do teoretycznego modelu konsolidacji wg. Terzaghiego. Przykładowo w badaniach IL niskoorganicznych namulów pobranych w rejonie 8 +900 km drogi nie stwierdzano S-kształtnego wykresu osiadania w funkcji logarytmu czasu, odpowiadającego konsolidacji warunkowanej filtracją lecz quasi-liniowy przebieg wskazujący na dominację procesu pełzania.

Także w trakcie badań CRS próbek namulów pochodzących z odcinka 9 +150 km POG zaobserwowano odmienne niż teoretycznie oczekiwane zmiany ciśnienia wody w porach. W początkowej fazie udział ciśnienia wody w przenoszeniu obciążeń C_{CL} nie był większy niż 0,6 (zamiast wartości zbliżonych do 1), a później występowała stabilizacja bezwymiarowego parametru C_{CL} na poziomie

¹ Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; tombialobrzeski@gmail.com.



Ryc. 1. Lokalizacja punktów opróbowania (na podstawie Ciesielskiego i in., 2009 – częściowo zmienione)
Fig. 1. Location of soil sampling (after Ciesielski et al., 2009 – partly modified)

od 0,35 do 0,22. W związku z rozbieżnościami wyników doświadczalnych w stosunku do rozwiązań teoretycznych miarodajność uzyskiwanych parametrów konsolidacji wymaga krytycznej interpretacji.

Delta Żuław jest wypełniona holoceniowymi osadami aluwialnymi o zmiennych miąższościach i wykształceniu litologicznym (Mojski, 1981). Według propozycji Augustowskiego (1976) można tu wyróżnić trzy rodzaje warunków facjalnych:

- korytowo-rzeczne (potamogeniczne) – piaski i rzadziej spotykane frakcje grubsze (żwiry) we współczesnych oraz starszych korytach rzecznych;
- jeziorno-bagiennie – utwory ilaste, wapienia łąkowego, gytii jeziornych i torfów, występujące w obniżeniach;
- powodziowe – najszerzej rozprzestrzenione jako namuły, przekraczające tarasy i obniżenia w obrębie aluwów żuławskich.

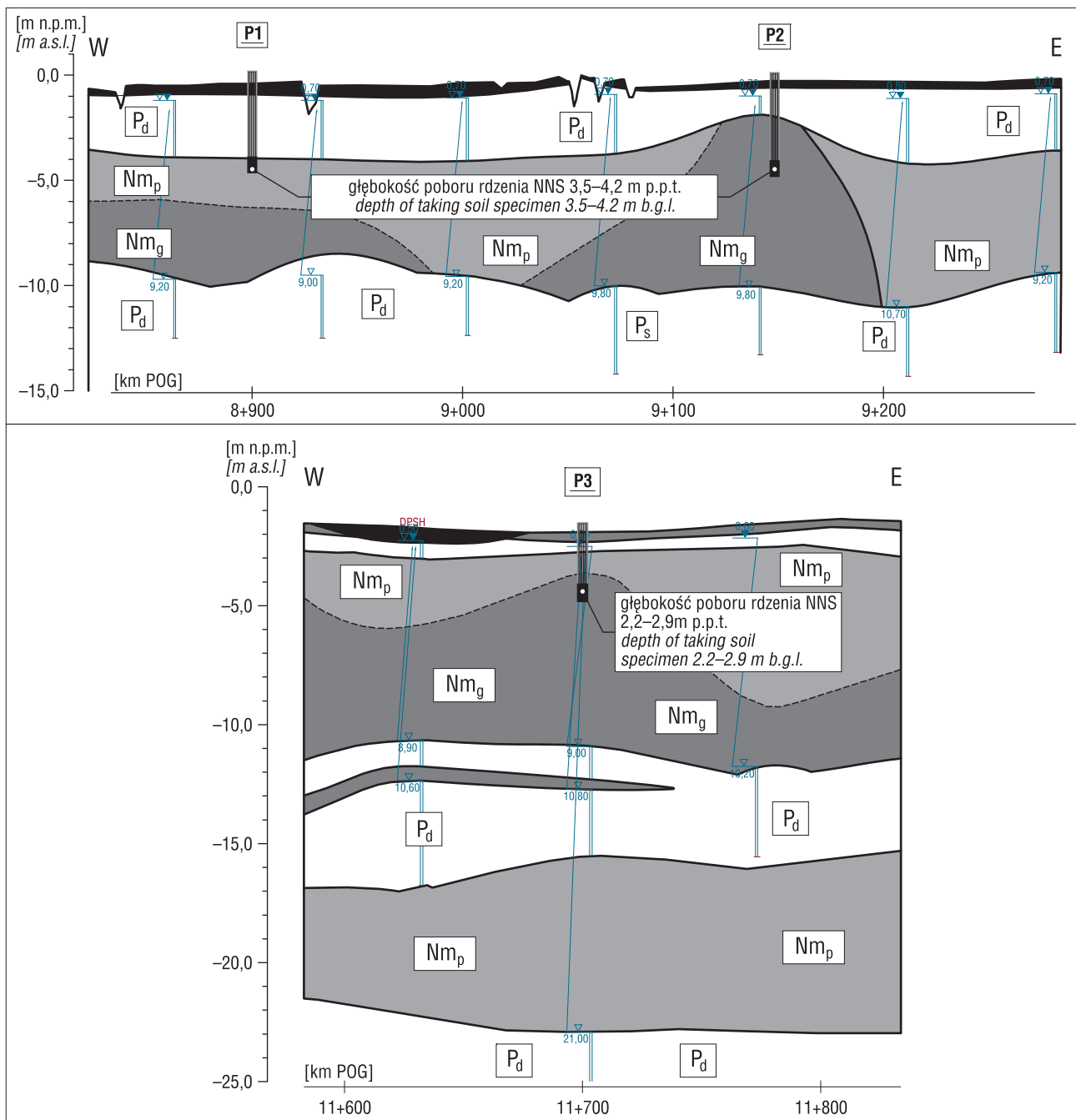
Konsekwencją zróżnicowania warunków sedymentacji w holoceniowej historii delty jest wyraźnie zaznaczona zmienność parametrów fizyczno-mechanicznych gruntów zarówno w profilach pionowych, jak i lateralnie.

W obrębie analizowanego obszaru problematyczne, z inżynierskiego punktu widzenia, są przede wszystkim słabonośne namuły sedymentacji powodziowej, które zazębiają się i przewarstwiają z piaszczystymi osadami rzecznyymi.

Przekroje wykonane w ramach dokumentacji geologiczno-inżynierskiej na potrzeby budowy POG (Ciesielski

i in., 2009) ilustrują zróżnicowanie przestrzenne występowania tych utworów. Na rycinie 2a i b pokazano modele jedno- i dwuwarstwowego występowania ściśliwych kompleksów organiczno-spoistych. Wyróżnienie to ma istotne znaczenie ze względu na kształtowanie się naturalnych warunków drenażu konsolidowanego ośrodka gruntowego.

Czynnikiem, rzutującym na stan pierwotnych naprężeń w utworach słabonośnych, jest miąższość przypowierzchniowych piasków przykrywających strop utworów organiczno-spoistych. W miejscu poboru rdzenia P1 udokumentowana miąższość piasków drobnych jest największa spośród omawianych trzech lokalizacji i wynosi ok. 3 m. Pod piaskami zalegają mady określane w dokumentacji (Ciesielski i in., 2009) jako namuły piaszczyste, z których do badań konsolidacji pobrano próbki gruntu z głębokości 3,5 m p.p.t. Strop spoistych mad podnosi się w kierunku wschodnim. W rejonie wybranym do pobrania rdzenia P2 występuje lokalne ich wyniesienie (ok. 1,5 m p.p.t.), a dalej w punkcie P3 namuły występują tylko pod cienką ok. 0,5 m warstwą piasków. W przeciwieństwie do rdzenia P1, w dwóch pozostałych lokalizacjach nie pobrano próbek NNS w obrębie namulów piaszczystych, lecz gliniastych, które występują bezpośrednio pod piaskami, jak w P2, lub (jak w lokalizacji P3) są oddzielone od piasków namułami piaszczystymi. Zróżnicowanie udziału frakcji ilowej, pyłowej oraz ilości substancji organicznych znajduje odzwierciedlenie w zachowaniach konsolidacyjnych badanych gruntów.



Ryc. 2. Przekroje geologiczne w rejonach opróbowania (na podstawie Ciesielskiego i in., 2009 – częściowo zmienione). Pd – piaski drobnoziarniste, Nm_p – mady piaszczyste, Nm_g – mady ilaste

Fig. 2. Geological cross section with sampling locations (after Ciesielski et al., 2009 – partly modified). Pd – fine-grain sands, Nm_p – sandy mud, Nm_g – clayey mud

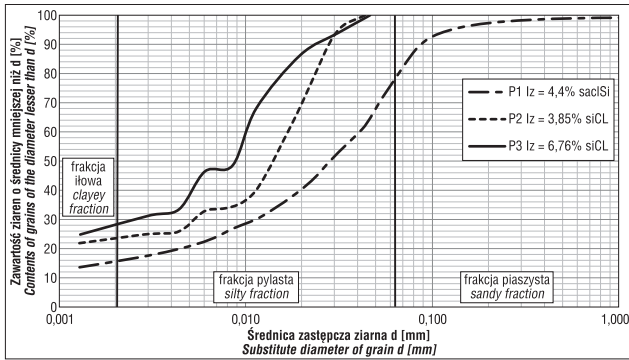
Pozyskanie wrażliwych strukturalnie próbek gruntów do badań laboratoryjnych wymagało szczególnej staranności. Wykorzystano cienkościennie próbniki typu Shelby w kształcie tulei o długości ok. 70 cm, średnicy zewnętrznej 88,9 mm i grubości ścianki 1,5 mm. Umożliwiło to pobieranie próbek gruntów klasy A1. Próbniki wprowadzano w podłoże dzięki zastosowaniu systemu rosnącego statycznego nacisku.

Cechy fizyczne badanych gruntów charakteryzuje zmienność będąca odzwierciedleniem warunków osadzania materiału w strefie brzegowej delty. Krzywe uziarnienia gruntów pochodzących z tych trzech punktów wykazują odrębności świadczące o zróżnicowanej dynamice sedymentacji, co

szczególnie odzwierciedla się w zróżnicowanej zawartości frakcji ilowej, pyłastej i piaszczystej (ryc. 3).

Próbka P1 wykazuje największe zapieszczenie ($f_p = 32,0\%$), zawartość frakcji pyłowej jest największa w próbce P2 ($f_\pi = 77,0\%$), a w próbce P3 szczególnie istotny jest udział frakcji ilowej ($f_i = 28,5\%$) i substancji organicznej ($I_z = 6,9\%$), co powoduje generowanie większego ciśnienia wody w porach w trakcie badań konsolidometrycznych. Zawartość substancji organicznych I_z , określona metodą strat prażenia, jest typowa dla mad (Myślińska, 2001).

W świetle normowych kryteriów klasyfikacyjnych próbki P1 i P2 można zaliczyć do glin pyłastych oraz glin pyłastych zwięzłych niskoorganicznych, natomiast próbkę



Ryc. 3. Krzywe uziarnienia na podstawie analizy areometrycznej
Fig. 3. Grain size distribution curves based on hydrometer method

P3 należy traktować jako gliny pylaste związane średnioorganiczne. Z punktu widzenia genetycznego uzasadnione jest łączne określenie badanych osadów jako mady.

Charakterystyczne cechy właściwości fizycznych analizowanych gruntów ilustrują zależności między wilgotnością a gęstością objętościową badanych próbek. Generalnie wyróżnić tu można dwa przedziały wartości rozpatrywanych parametrów. Wilgotności od 42 do 52% próbek z punktów P1 i P2 stanowią wyraźnie rozłączny zbiór w stosunku do znacząco wyższych wilgotności próbek z P3 (wartości od 60 do 75%). Jednocześnie gęstości objętościowe próbek z rdzeni P1 i P2 są wyższe (średnia wartość $\rho = 1,71 \text{ Mg/m}^3$ przy współczynniku zmienności $\nu = 3\%$) w stosunku do wyników oznaczeń próbek z punktu P3 ($\rho = 1,58 \text{ Mg/m}^3$, $\nu = 2\%$). Korelacja między wilgotnością a gęstością objętościową w całym zbiorze jest stosunkowo słaba ($R^2 < 0,6$), jednak głównie ze względu na nieuporządkowany charakter relacji tych parametrów w prób-

kach z rdzeni P1 i P2. W przypadku podzbioru z badań P3 zaznacza się bardzo dobra liniowa korelacja ($R^2 = 0,99$) między wartościami ρ i w_n . Warto także zwrócić uwagę (ryc. 4) na wyraźne zbliżone do siebie liniowe trendy zmniejszania się gęstości objętościowej w funkcji wilgotności zarówno dla całego zbioru, jak i średnioorganicznych mady o dużej spoistości pobranych z punktu P3.

Wzajemne związki analizowanych parametrów fizycznych ilustruje także porównanie ze składem granulometrycznym i stratami prażenia (tab. 1). Zasygnalizowana w wynikach badań cech fizycznych wyraźna dwudzielność analizowanego materiału badawczego znalazła odzwierciedlenie w ich właściwościach konsolidacyjno-odkształceniowych.

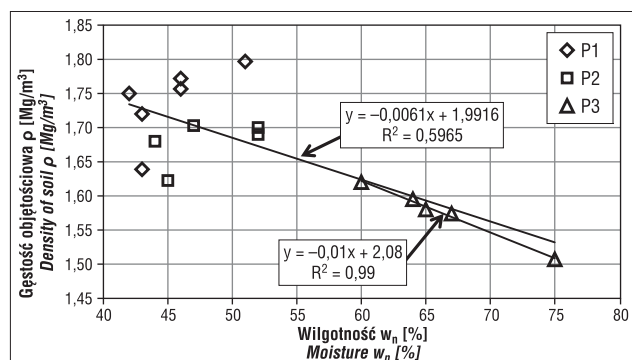
PROGRAM BADAŃ KONSOLIDOMETRYCZNYCH

Badania jednoosiowej odkształcalności wykonywano w komorze Bardena-Rowe'a, uzyskując cyfrowe zapisy zmian naprężenia, odkształcenia oraz ciśnienia porowego, w systemie aplikowania dla każdej próbki stałej prędkości obciążania (CRL – *constant rate of loading*).

Celem programu badawczego było określenie wpływu trzech cykli obciążania i odprężania na zmiany odkształcalności gruntów madowych. Stosowano także różne prędkości przyrostu naprężenia w celu oceny ich wpływu na zmiany odkształcalności i zachowań konsolidacyjnych. Założono, że pobrane grunty po zdeponowaniu nie były konsolidowane naprężeniami większymi niż nacisk młodszego nadkładu. Maksymalne naprężenia które zadawano w pierwszym etapie obciążenia programowano opcjonalnie. W badaniach próbek z punktu P2 zastosowano najniższe naprężenia do 100 kPa w pierwszym cyklu, aplikując dwu- i więcej-krotne

Tab. 1. Wyniki badań właściwości fizycznych mady
Table 1. Basic physical characteristics of tested soils

Nazwa próbki Sample name	Granulometria Granulometry			Substancja organiczna Organic substance	Symbol gruntu wg: Soil symbol according to:		Gęstość właściwa Density of soil particles	Gęstość objętościowa Density of soil	Wilgotność Moisture
	zawartość frakcji grain size distribution			I_z	PN-B-02480: 1986	PN-EN ISO 14688-2:2006			
	f_p	f_π	f_i				ρ_s	ρ	w_n
	[%]					[Mg/m ³]		[%]	
P1	32,00	51,00	17,00	4,40	Nmp G _{π}	niskoorganiczne siltSi	2,65	1,64	43
								1,72	43
								1,75	42
								1,76	46
								1,77	46
P2	1,00	77,00	22,00	3,80	Nmg G _{π}	niskoorganiczne siltCL	2,58	1,62	45
								1,68	44
								1,69	52
								1,70	52
								1,70	47
P3	1,00	70,50	28,50	6,90	Nmg G _{πz}	średnioorganiczne siltCL	2,60	1,51	75
								1,57	67
								1,58	65
								1,60	64
								1,62	60



Ryc. 4. Zmienność gęstości objętościowej w zależności od wilgotności
 Fig. 4. Moisture content vs density of soil relationship

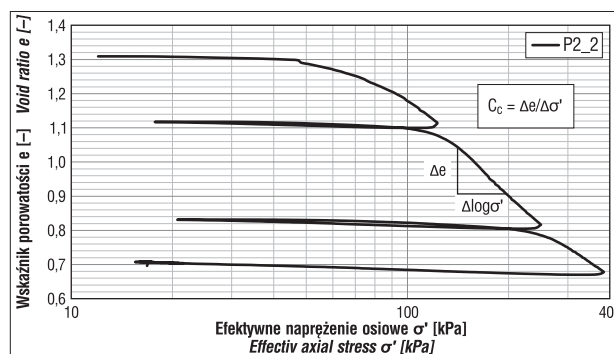
wartości w kolejnych cyklach. Prędkości obciążania w tych badaniach, 25 kPa/h oraz 50 kPa/h, były najniższe w całym programie badawczym. Przykładowy charakter okształcalności uzyskiwany w 3 cyklach obciążania i odprężania próbki P2_1 ilustruje rycina 5. Zwracają uwagę bardzo małe zmiany wskaźnika porowatości w trakcie odprężania oraz ich powtarzalność na pętlach histerezy.

Schematy obciążeń w badaniach kolejnych próbek indywidualizowano w nawiązaniu do obserwowanych zachowań badanych gruntów i ich cech fizycznych. W szczególności znikome ciśnienia wody w porach były przesłanką zarówno do zastosowania wyższych wartości maksymalnych naprężeń w kolejnych cyklach obciążenia–odprężenia, jak i większych prędkości obciążania. Celem tych modyfikacji programu badawczego było różnicowanie wzrostu ciśnienia porowego i ocena jego wpływu na charakter okształcalności.

Program badań konsolidacyjnych z zestawieniem przyjętych cykli obciążenia–odciążenia oraz prędkości badań dla poszczególnych próbek przedstawiono w tabeli 2

Naprężenia uplastycznienia σ'_{vy} metodą Casagrande'a określono na podstawie wyników badań najbardziej spitych gruntów (rdzeń P3). Punktem wyjściowym do tych analiz było przyjęcie ciężaru objętościowego 15,7 kN/m³ i głębokości położenia gruntu w profilu 2,7 m, co dało naprężenie *in situ* ok. 42 kPa. W tabeli 3 zestawiono naprężenia uplastycznienia uzyskane przy kolejnych etapach obciążania.

Z krzywej ściśliwości pierwszego stopnia obciążania określono σ'_{vy} , które odniesione do naprężenia *in situ* dały wartości wskaźnika uplastycznienia YSR rzędu 2. Autorzy celowo i konsekwentnie nie używają terminu wskaźnik prekonsolidacji OCR (mimo że liczbowo jest on równy YSR), ponieważ jest on rozumiany zbyt wąsko jako obrazujący tylko wpływ naprężenia na efekt pozornej prekonsolidacji (Burland, 1990). Tymczasem wiadomo, że na ten efekt mają wpływ także inne czynniki, a naprężenie uplastycznienia (kiedyś nazywane prekonsolidacji) jest wypadkową procesów i zjawisk daleko wykraczających poza obciążenie mechaniczne (m.in. strukturalne „starzenie się” osadu). Stąd też nie dziwi fakt uzyskiwania w pierwszych cyklach obciążania wartości YSR w granicach 2, mimo że nie ma przesłanek geologicznych, które wykazywałyby na istnienie znaczącego nadkładu w miejscu występowania badanych osadów. Oczywiście dynamika obszaru dolinnego na odcinku deltowym nie wyklucza zaistnienia w przeszłości dodatkowego niewielkiego obciążenia od przemieszczeń



Ryc. 5. Przebieg jednoosiowych okształceń pierwotnych i wtórnych w cyklach wielokrotnych obciążeń i odprężen
 Fig. 5. Compressibility curve depicting loading–unloading cycles of test program

Tab. 2. Programy bagań CRL
 Table 2. CRL test schemes

Kod badania Name of specimen	Schemat cykli obciążenia i odciążenia (naprężenia w kPa) w badaniach konsolidacji CRL Burden cycle of specimen – consolidation test CRL	Prędkość obciążania Velocity of burden [kPa/h]
P1 – km 8 +900, głębokość pobrania 3,5–4,2 m p.p.t. depth of taking specimen 3.5–4.2 m b.g.s.		
P1_1	15 – 100–15–200–15–300–15–400	25
P1_2	15 – 100–15–200–15–300–15–400–15–500–900	25
P1_3	15 – 400–15–600–15–800–15	100
P1_5	15 – 100–15–200–15–300–15–400–15–500	200
P1_4	15 – 400–15–600–15–800–15	200
P2 – km 9 +150, głębokość pobrania 3,5–4,2 m p.p.t. depth of taking specimen 3.5–4.2 m b.g.s.		
P2_1	15 – 100–15–200–15–300	25
P2_2	15 – 130–15–260–15–390–15–520	25
P2_4	15 – 100–15–200–15–300	50
P2_5	15 – 100–15–200–15–300	50
P3 – km 11 +700, głębokość pobrania 2,0–2,7 m p.p.t. depth of taking specimen 2.0–2.7 m b.g.s.		
P3_1	15 – 400–15–600–15–800–15	100
P3_2	15 – 400–15–600–15–800–15	100
P3_4	15 – 400–15–600–15–800–15	150
P3_5	15 – 400–15–600–15–800–15	150
P3_3	15 – 400–15–600–15–800–15	200

osadów przypowierzchniowych oraz wód wezbraniowych. W kolejnych wierszach tabeli 3 wartości σ'_{vy} , oraz YSR są uwarunkowane osiągniętymi na poprzednich etapach naprężeniami efektywnymi. W większości są one zbieżne z zadanymi obciążeniami wtórnymi, chociaż zdarzają się wyjątki, dokumentujące niezgodności wartości uzyskanej z oczekiwaną (na podstawie znanego naprężenia prekonsolidacji). Rozbieżności te mogą wynikać z ograniczeń metody Casagrande'a w przypadkach, gdy krzywa ściśliwości ma bardzo zaokrąglony kształt i nie jest możliwe precyzyjne określenie kluczowego dla tej metody punktu maksymalnej krzywizny. Tym niemniej większość oznaczeń YSR z wtórnych cykli obciążeń oscyluje zgodnie z oczekiwaniami wokół wartości 1.

Tab. 3. Wartości naprężenia uplastycznienia i wskaźnika uplastycznienia, w odniesieniu do naprężeń *in situ* oraz naprężeń osiągniętych w trakcie badania próbek serii P3**Table 3.** Yield stress and Yield Stress Ratio values referred to in-situ stress and stress applied during test stages in series P3

P3_1			P3_2			P3_3			P3_4			P3_5		
σ'	σ'_{vy}	YSR	σ'	σ'_{vy}	YSR	σ'	σ'_{vy}	YSR	σ'	σ'_{vy}	YSR	σ'	σ'_{vy}	YSR
[kPa]		[-]	[kPa]		[-]	[kPa]		[-]	[kPa]		[-]	[kPa]		[-]
42	84	2,0	42	93	2,2	42	90	2,1	42	85	2,0	42	87	2,1
400	420	1,1	369	360	1,0	250	250	1,0	160	162	1,0	380	402	1,1
600	590	1,0	600	580	1,0	420	460	1,1	381	480	1,3	560	525	0,9

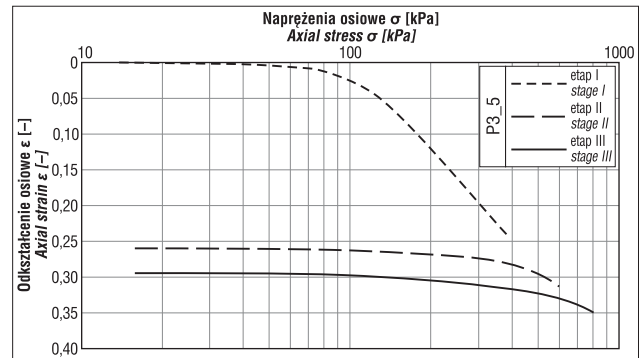
ZMIANY ODKSZTAŁCALNOŚCI WARUNKOWANE PROGRAMEM OBCIĄŻEŃ

Przy rosnącym obciążeniu σ jednoosiowe odkształcenia gruntów są uwarunkowane zmniejszającą się porowatością gruntów. Charakter tych zmian zależy od dotychczasowej historii obciążenia, a także sprężystej składowej odprężania i relacji pomiędzy fazami gruntu, wyrażonej zmianami ciśnienia wody w porach gruntu. Efektem zmniejszania się przestrzeni porowej w toku obciążania jest znaczne zwiększenie modułów ściśliwości M_i , co może być charakteryzowane funkcją potęgową $M_i = A \cdot \sigma^B$, gdzie wartość wykładnika B jest wskaźnikiem historii obciążenia. W gruntach przekonsolidowanych uzyskuje się $B < 1$ natomiast, w gruntach, które po raz pierwszy są obciążane, obserwuje się w niewielkich przedziałach wzrostu obciążenia charakterystyki $M_i = f(\sigma)$ zbliżone do liniowych (Dobak, 1990). Klasykiem, chociaż trudniejszym w zastosowaniu do obliczeń osiadań, parametrem jest wskaźnik ściśliwości C_c określany na podstawie zmian porowatości Δe , odnoszonych do odpowiedniego dla nich przedziału zmian naprężenia efektywnego σ' , wg wzoru:

$$C_c = -\frac{\Delta e}{\log \Delta \sigma'}$$

W literaturze (Wiłun, 1987; Coduto i in., 2011) przyjmuje się dwa quasi-prostoliniowe odcinki zależności $e - \log \sigma'$, odpowiadające tzw. krzywej ściskania wtórnego (*recompression curve*) oraz krzywej odnoszonej do naprężeń po raz pierwszy aplikowanych na badany grunt (*virgin curve*). Ta ostatnia powinna w koncepcji modelowej zachowywać w przybliżeniu stałe nachylenie, nawet przy kilkukrotnym przekroczeniu naprężeń prekonsolidacyjnych (*yield pressure*). Twórcy tej koncepcji (Cassagrande, 1936; Terzaghi, 1941, 1943) odnosili ją do gruntów w stanie plastycznym lub miękoplastycznym. Stała wartość C_c , szczególnie na odcinku *virgin curve*, zakłada logarytmiczny charakter zależności $e = f(\log \sigma')$, a także możliwość kontynuacji nachylenia charakteryzowanego przez C_c w kolejnym cyklu przy naprężeniach wyższych od uprzednio osiągniętych (ryc. 5).

Analiza badań CRL ściśliwych osadów madowych o znacznej spoistości wskazuje na bardziej złożony obraz modelowych zależności. W badaniach prowadzonych przy prędkościach obciążenia od 100 do 150 kPa/h na wykresach, odnoszonych porównawczo do logarytmu wartości naprężeń całkowitych, uzyskano wyraźne zmniejszanie się

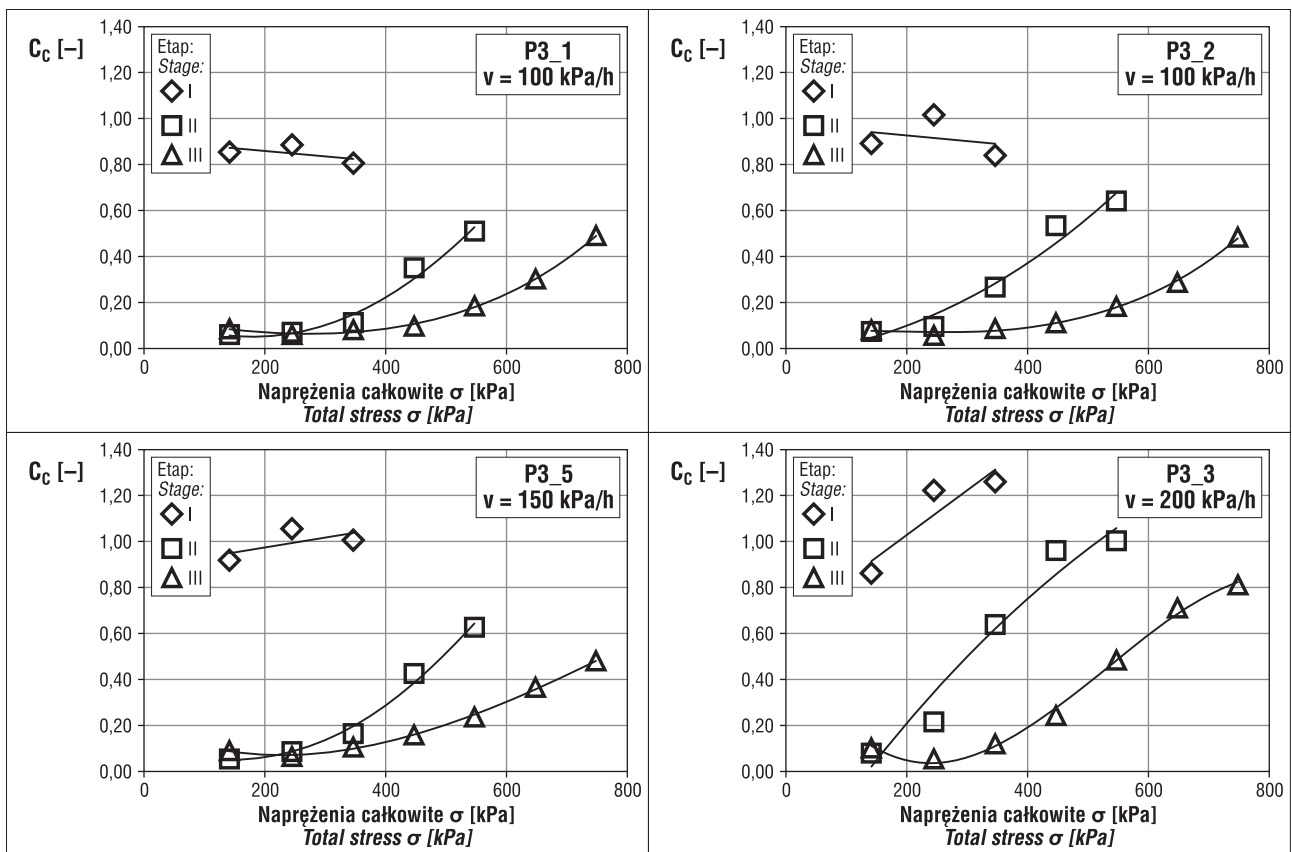
**Ryc. 6.** Przykładowa zmiana przebiegu odkształcenia w kolejnych etapach obciążenia badaniami próbki P3_5**Fig. 6.** Compressibility curves for subsequent load stages, example sample P3_5

ich nachylenia w kolejnych etapach obciążenia aplikowanych po odciążeniu (ryc. 6).

W celu ilościowej weryfikacji zmian charakteru odkształcalności w kolejnych cyklach obciążenia wyznaczono wartości parametru C_c (z uwzględnieniem naprężeń efektywnych σ') w przedziałach σ o szerokości 100 kPa. Obliczenia C_c prowadzono dla aproksymowanych quasi-prostoliniowych odcinków $e - \log \sigma'$ o wysokich wskaźnikach liniowej korelacji $R_2 > 0,98$. Wyniki badań prowadzonych przy różnych prędkościach obciążenia przedstawiono na rycinie 7.

Etap obciążenia pierwotnego przy najmniejszych stosowanych w tej serii prędkościach obciążenia $v = 100$ kPa/h charakteryzował się niewielkim zmniejszaniem wartości C_c . Wskazuje to na sukcesywny wzrost sztywności gruntu na skutek zmniejszania porowatości. Natomiast po zastosowaniu większych prędkości obciążenia obserwuje się wzrost wartości C_c . W cyklach obciążenia wtórnych odnotowuje się kilku- do kilkunastokrotny spadek wartości C_c w trakcie kolejnego etapu obciążania próbek. Następnie wartości wskaźnika ściśliwości C_c sukcesywnie krzywoliniowo wzrastają, nie osiągając jednak, nawet przy podwojeniu obciążenia do 800 kPa, poziomu C_c uzyskiwanego podczas pierwotnego obciążenia (400 kPa).

Wyznaczone wartości wskaźnika ściśliwości C_c ilustrują znaczącą rolę obciążenia pierwotnych w zwiększaniu sztywności ośrodka gruntowego w kolejnych cyklach odciążenia-obciążenia. Jednocześnie warto zauważyć, że wzrost prędkości obciążenia do poziomu 200 kPa/h powoduje zmianę trendu wzrostu wartości C_c . Wyjaśnienie tych różnic w zachowaniach gruntu należy wiązać z rosnącą rolą ciśnienia porowego generowaną wraz ze wzrostem prędkości obciążenia.

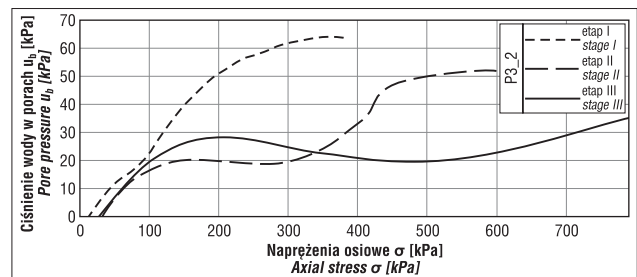


Ryc. 7. Zmiany wskaźnika ściśliwości C_c w zależności od etapów obciążeń i prędkości prowadzenia badań CRL
 Fig. 7. C_c changeability with relations to load stages and load rate in CRL tests

WPLYW ZMIAN CIŚNIENIA POROWEGO NA CHARAKTER ODKSZTAŁCALNOŚCI

Istotnym czynnikiem rzutującym na odkształcenia gruntu jest wpływ ciśnienia porowego charakteryzowany zależnościami $u_b = f(\sigma)$ i względnie $C_{CL} = f(\sigma)$. Model zachowań gruntu w trakcie badań CRL przewiduje, że wartość ciśnienia porowego w fazie nieustalonej wzrasta krzywoliniowo przy malejącym stosunku $\Delta u_b / \Delta \sigma$, a następnie w fazie ustalonej osiąga $u_{b_{max}} = \text{const}$. W praktyce występuje zazwyczaj faza quasi-ustalona, w której obserwuje się kontynuację niewielkiego wzrostu ciśnienia porowego w funkcji naprężenia. Wynika to z sukcesywnego zmniejszania wielkości porów i pogarszania właściwości filtracyjnych konsolidowanego ośrodka. W przeprowadzonych badaniach ten stosunkowo prosty model zachowań został znacząco rozwinięty, dzięki uwzględnieniu zarówno wpływu różnych prędkości obciążenia, jak i rozpatrywaniu zmian zachowań gruntu w powtarzalnych przedziałach naprężeń pierwotnych i wtórnych.

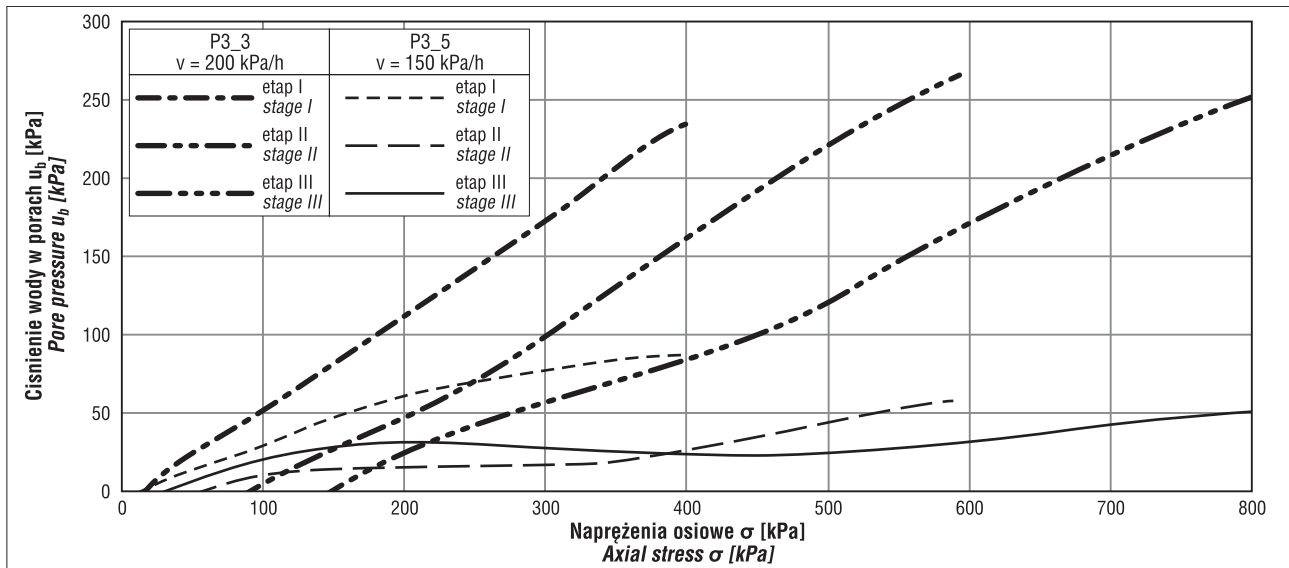
Charakter zmian ciśnienia porowego jest najlepiej czytelny w gruntach o największej zawartości frakcji ilowej ($f_i = 28,5\%$ – seria P3). Przy prędkościach 100 kPa/h obserwowano tendencję do początkowego wzrostu, a następnie quasi-stabilizacji ciśnienia porowego w pierwotnych zakresach obciążeń. Po odciążeniu, a następnie powtórnym obciążeniu, ciśnienie porowe początkowo wzrasta, lecz stabilizuje się przy znacząco niższych wartościach w stosunku do uzyskiwanych podczas obciążenia pierwotnego. Przekroczenie w cyklu wtórnym poprzednio osiągniętego naprężenia skutkuje ponownym, chociaż znacznie mniejszym krzywoliniowym wzrostem ciśnienia porowego. W trzecim etapie obciążenia obserwowano nieregularności w postaci obniżenia wartości ciśnienia porowego, a następnie ponownego wzrostu (ryc. 8). Może to świadczyć o wytworzeniu się w



Ryc. 8. Przebieg zmian ciśnienia porowego w badaniach CRL przy prędkości obciążenia 100 kPa/h
 Fig. 8. Excess pore pressure changes during CRL test with load rate 100kPa/h

Tab. 4. Wartości ciśnienia porowego [kPa] osiągnięte przy obciążeniu zewnętrznym 400 kPa
 Table 4. Excess pore pressure values [kPa] reached under 400 kPa axial stress, in tests with different load rates

Prędkość obciążenia v Velocity of burden v	Cykle obciążenia Burden cycles		
	pierwszy first	wtórne secondary	
[kPa/h]	I	II	III
100	49–63	15–30	12–20
150	87	22	22
200	235	160	80



Ryc. 9. Zmiany przyrostu ciśnienia porowego podczas badań CRL w zależności od prędkości obciążenia
 Fig. 9. Excess pore pressure distribution during CRL test (loading for different max axial stress), with different load rates

gruncie lokalnych stref o lepszej przepuszczalności, co potwierdzają mikroskopowe obrazy struktur uzyskiwane techniką SEM.

Zastosowanie większych prędkości obciążenia skutkuje osiąganiem wyższych wartości ciśnienia porowego zarówno w cyklach pierwotnych jak i wtórnych. Ilustrują to porównawcze dane analizowane przy 400 kPa naprężenia pionowego, co w większości przeprowadzonych badań odpowiadało zakończeniu pierwszego etapu obciążenia (tab. 4).

W toku obciążeń wtórnych uzyskuje się mniejsze wartości ciśnienia porowego. Jednocześnie należy podkreślić, że zwiększenie wartości ciśnienia porowego u_b było nieznaczne przy prędkościach obciążenia $V = 100$ i 150 kPa/h natomiast zastosowanie $V = 200$ kPa/h powodowało kilkukrotny wzrost wartości u_b , co świadczy o przekroczeniu swoistego progu reakcji trójfazowego ośrodka gruntowego, uwarunkowanego zapewne jego cechami strukturalnymi oraz przepuszczalnością.

Tendencję tę dobrze ilustrują dwie grupy wykresów u_b do σ przedstawione na rycinie 9. Przy prędkości 150 kPa/h zaznacza się tendencja do stabilizacji ciśnienia porowego, charakterystyczna dla fazy ustalonej konsolidacji. W fazie tej przepuszczalność gruntu umożliwia sukcesywne rozładowanie nadwyżek ciśnienia porowego.

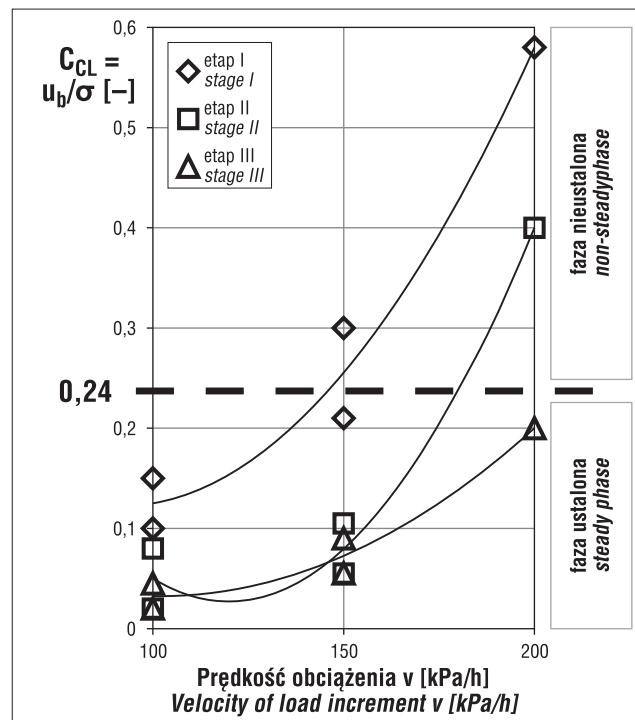
Niewielki wzrost prędkości obciążenia ze 150 do 200 kPa/h spowodował istotną zmianę reakcji ciśnienia porowego u_b przy porównywalnych naprężeniach zewnętrznych. Wartości u_b wzrastają niemal liniowo w funkcji naprężenia i czasu. Wyjaśnieniem tego charakteru zależności może być analiza zmian wartości bezwymiarowego parametru ciśnienia wody w porach $C_{CL} = u_b/\sigma$, pełniącego ważną rolę diagnostyczną w ocenie etapów konsolidacji CL.

Przy stałej prędkości obciążenia (CRL) granicę między fazą ustaloną oraz nieustaloną badania wyznacza bowiem wartość $C_{CL} = 0,24$ (Dobak, 2008).

Wartości parametru C_{CL} uzyskiwane przy obciążeniu 400 kPa w omawianych wyżej badaniach zestawiono na rycinie 10. Jak widać faza ustalona konsolidacji występowała w badaniach prowadzonych z prędkością 100 kPa/h. Wzrost prędkości aplikowania obciążenia do 150 kPa/h i dalej do 200 kPa/h powoduje, że wchodzi się w obszar

warunków nieustalonych. Są one niepożądane z punktu widzenia uzyskiwania miarodajnych oszacowań parametrów konsolidacji. Jak pokazały zamieszczone w niniejszej pracy porównania, sytuacja taka jest także skorelowana z występowaniem podwyższonych wartości odkształceń gruntu, spowodowanych zapewne znaczącym udziałem fazy ciekłej w przenoszeniu obciążeń i zmniejszaniem oporów wzajemnych przemieszczeń ziaren i cząstek gruntu. Czynniki te wpływają na charakter i przebieg konsolidacji oraz rzutują na zmiany odkształcalności.

Z uzyskanych zależności wynika, że prędkość przykładowa obciążenia zarówno na próbkę gruntu w laboratorium,



Ryc. 10. Zmienność parametru ciśnienia wody C_{CL} w porach jako wskaźniki faz konsolidacji w badaniach CRL pod obciążeniem pierwotnym 400 kPa

Fig. 10. Water pressure parameter C_{CL} distribution, as an indication of steady and unsteady phase of consolidation, under 400 kPa load

jak i na podłoże w terenie, nie powinna osiągać wartości parametrów ciśnienia wody w porach, odpowiadających fazie nieustalonej. Może to bowiem prowadzić do niepożądanego wydłużenia czasu konsolidacji i niekorzystnych, z punktu widzenia zwiększenia sztywności gruntu, przekształceń jego struktury.

WNIOSKI

1. Z przeprowadzonego programu badawczego wynika, że etapowość obciążania ściśliwego podłoża oraz prędkość aplikowania wzrastających naprężeń rzutują w sposób istotny zarówno na przebieg, jak i wartości uzyskiwanych odkształceń. Etapowanie obciążeń wpływa nie tylko na znaczącą redukcję odkształcalności wtórnej, ale także powoduje wzmocnienie sztywności. Jest to wyrażone sukcesywnym zmniejszaniem wartości C_c w przedziałach obciążeń wtórnych. Z badań laboratoryjnych wynika, że sposób etapowania obciążeń znacząco wpływa na uzyskiwane charakterystyki odkształcalności ośrodka gruntowego. Teza o stałym nachyleniu wykresu e - $\log \sigma'$ w obszarze po raz pierwszy zadawanych obciążeń nie potwierdza się w przypadku gruntów młodych, normalnie skonsolidowanych, o znacznej porowatości początkowej e_0 .

2. Czynnikiem znacząco oddziaływującym na odkształcalność jest prędkość zadawania obciążenia. W przypadku gruntów spoistych o małej przepuszczalności generowanie ciśnienia porowego przypuszczalnie redukuje opory tarcia w szkielecie, sprzyjając przemieszczeniom ziaren i cząstek, a w konsekwencji większym odkształceniom. Wpływ tego mechanizmu na ostateczne wzmocnienie podłoża wymaga jednak dalszych badań dostosowanych do różnych scenariuszy obciążenia. Przedstawione w artykule wyniki odnoszą się do jednoosiowych warunków odkształcenia. W przypadku powstawania znaczących i trudnych do szybkiego rozproszenia ciśnień porowych może nastąpić zbliżenie zachowań gruntu do warunków stanu granicznego nośności, co powoduje możliwość rozwijania przemieszczeń postaciowych w podłożu.

3. Analizy wyników przeprowadzonych badań wskazują na możliwość wzmocnienia podłoża poprzez odpowiednie programowanie obciążeń (i ewentualnych), odciążeń w funkcji czasu z uwzględnieniem nieliniowych efektów zmian przepuszczalności gruntów. W toku konsolidowania mad o zawartości frakcji ilowej do ok. 20% nadwyżka ciśnienia porowego była mała. Pozwala to na stosowanie w badaniach odkształcalności większych prędkości obciążenia. Z kolei w gruntach o zawartości frakcji ilowej przekra-

czającej 25% występowało generowanie znaczących ciśnień porowych, co wydłuża czas konsolidacji, jak również może powodować przebudowę strukturalną gruntu.

4. Przedstawione czytelne zależności zmian odkształcalności od warunków obciążania wskazują, że w wyniku ukierunkowanego programowania badań laboratoryjnych można określać odpowiednie dla danego gruntu progi prędkości obciążeń, rzutujące na fazy konsolidacji. Pozwala to na sterowanie czynnikami filtracyjnymi i reologicznymi w przebiegu osiadań podłoża.

5. Przy projektowaniu metod wzmocnienia podłoża gruntowego w gruntach ściśliwych, z wykorzystaniem drenażu należy przeprowadzać interpretację badań IL lub CL w nawiązaniu do modelowych charakterystyk rozpraszania ciśnienia wody w porach oraz faz procesu konsolidacji.

Autorzy serdecznie dziękują Recenzentom za cenne uwagi, w szczególności te, które wpłynęły na czytelność artykułu.

LITERATURA

- AUGUSTOWSKI B. (red.) 1976 – Żuławy Wiślane. Gdańskie Tow. Nauk., Wydz. V Nauk o Ziemi.
- BURLAND J.B. 1990 – On the compressibility and shear strength of natural clays. *Geotechnique*, 40 (3): 329–378.
- CASSAGRANDE A. 1936 – The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. *Proc. I Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Cambridge, 3: 60–64.
- CIESIELSKI Z. i in. 2009 – Dokumentacja geologiczno-inżynierska dla budowy Południowej Obwodnicy Miasta Gdańsk, Geotech Sp. z o.o., Bydgoszcz.
- CODUTO D.P., YEUNG M.R., KITCH W.A. 2011 – *Geotechnical Engineering – Principles and Practices*. Second Edition. Pearson Education Inc., Upper Saddle River, New Jersey, s.814.
- DOBĄK P. 1990 – Określanie parametrów odkształcalności gruntów w strefie oddziaływania odwodnienia kopalni odkrywkowej. *Mat. IX Krajowej Konferencji Mechaniki Gruntów i Fundamentowania*, Kraków: 25–30.
- DOBĄK P. 2008 – Evaluation of consolidation parameters in CL tests; theoretical and practical aspects. *Geol. Quart.*, 52 (4): 397–410.
- FRANKOWSKI Z., MAJER E., PIETRZYKOWSKI P. 2010 – Badania podłoża gruntowego oraz próbek gruntów pobranych z otworów w rejonie projektowanej Południowej Obwodnicy Gdańska. *Raport z badań 1/2010*. Laboratorium Hydrogeol. i Geol.-Inż. PIG-PIB.
- MOJSKI E.J. 1981 – Objasnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski, arkusz Pruszcz Gdański (55). Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- MYŚLIŃSKA E. 2001 – *Grunty organiczne i laboratoryjne metody ich badania*. PWN, Warszawa.
- PN-B-02480:1986 – *Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów*.
- PN-EN ISO 14688-2:2006 – *Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania*.
- TERZAGHI K. 1941 – *Undisturbed clay samples and undisturbed clays*. *J. Boston Soc. Civil Engineers*, 28 (3): 211–231.
- TERZAGHI K. 1943 – *Theoretical Soil Mechanics*. Wiley, New York.
- WIŁUN Z. 1987 – *Zarys Geotechniki*. Wyd. Kom. i Łącz., Warszawa.