

OBCIĄŻENIA CYKLICZNE GRUNTU SPOISTEGO W WARUNKACH BEZ ODPLYWU

Andrzej Głuchowski, Wojciech Sas, Jacek Bąkowski,
Alojzy Szymański

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Streszczenie. Obciążenia cykliczne charakteryzują się często nieniszczącym działaniem. Deformacje powstające przy obciążeniu cyklicznym różnią się od deformacji przy obciążeniu statycznym. Reakcja gruntu na obciążenia cykliczne wymaga innego opisu z powodu możliwości wyróżnienia wielkości deformacji plastycznych i sprężystych w jednym cyklu obciążenia. Na reakcję gruntu spoistego obciążonego cyklicznie ma wpływ wiele czynników, takich jak: stan nasycenia ośrodka gruntowego, stopień prekonsolidacji czy spoistość. Warunki, w których znajduje się grunt poddany obciążeniu, takie jak: wielkość naprężenia głównego (σ_3), wartość naprężenia dewiatorowego (q_{max}) czy amplituda naprężenia (σ_a), w przypadku obciążeń powtarzalnych prowadzą do różnej reakcji gruntu spoistego. W artykule przedstawiono wyniki badań na gruncie spoistym – ile piaszczysto-pyłastym. Badania przeprowadzono za pomocą aparatu cyklicznego trójosiowego ściskania. Celem badań była charakterystyka naprężenia powodująca różną reakcję gruntu spoistego. W artykule przedstawiono metodykę badań oraz analizę zachowania się ośrodka gruntowego. Zaproponowano także równanie empiryczne pozwalające na określenie przyrostu odkształceń trwałych w kierunku pionowym w kolejnych cyklach obciążenia.

Słowa kluczowe: obciążenia cykliczne, odkształcenia trwałe, warunki bez odpływu, kryterium dostosowania

WSTĘP

Ośrodek gruntowy jest obecnie coraz częściej poddawany obciążeniom cyklicznym. Zjawiska takie, jak: trzęsienia ziemi, ruch drogowy i fale morskie, czy też konstrukcje obciążone wiatrem, są źródłem obciążeń cyklicznych o różnej charakterystyce. Zjawisko deformacji gruntu w wyniku obciążeń powtarzalnych jest tematem wielu badań

Adres do korespondencji – Corresponding author: Andrzej Głuchowski, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Laboratorium Centrum Wodne, ul. Ciszewskiego 6, 02-757 Warszawa, e-mail: andrzej_głuchowski@sggw.pl

© Copyright by Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2016

w kraju [Kalinowska i Jastrzębska 2014, Sas i in. 2014, Świdziński i Mierczyński 2015, Głuchowski i in. 2015, Przewłócki i in. 2015] i za granicą [Abdelkrim i in. 2003, Li i in. 2011, Jiang i Cai 2012, Cai i in. 2012, Guo i in. 2013]. Badania te dotyczyły zarówno gruntów niespoistych, jak i spoistych. W przypadku gruntów spoistych badania zjawiska cyklicznego obciążenia dotyczyły zagadnienia odpowiedzi gruntu w postaci odkształceń plastycznych w warunkach z odpływem [Seed i in. 1955, Anderson i in. 1980, Ansal i Erken 1989, Zhou i Gong 2001, Wichtmann i in. 2005, Tang i in. 2008]. Obecnie w wyniku wzrostu możliwości technicznych aparatury pomiarowej wprowadza się nowe techniki badawcze uwzględniające częściowy odpływ, badania w cylindrycznym aparacie skrętnym bądź stosowanie zmiennego naprężenia głównego (σ_3) [Sun i in. 2015, Wang i in. 2013, Cai i in. 2013, 2015].

Grunty spoiste były dotychczas badane w warunkach konsolidacji izotropowej. Jednak grunt spoisty *in situ* charakteryzuje konsolidacja w warunkach anizotropowych, lepiej oddająca naturalny proces sedymentacji i rzeczywisty stan naprężenia w gruncie. Dotychczasowe prace przeprowadzone w tego typu warunkach wykonano, kontrolując stosunek naprężenia pionowego i poziomego. Obecnie możliwości aparatury pozwalają na konsolidację anizotropową poprzez kontrolę zmiany średnicy próbki (zmianę jej objętości czy też bezpośrednio średnicy) [Guo i in. 2016].

Przeprowadzone badania gruntu spoistego w warunkach anizotropowej konsolidacji przy cyklicznym obrocie kierunków naprężenia głównego za pomocą cylindrycznego aparatu skrętnego wykazały wpływ wielkości cyklicznego naprężenia na wielkość odkształceń pionowych. Większe naprężenie pionowe powodowało większe odkształcenia zarówno plastyczne, jak i sprężyste. Ponadto zaobserwowano zmianę wielkości pętli histerezy. W przypadku gdy cyklicznie działające naprężenie pionowe było małe (10 kPa), pętla histerezy była prawie zamknięta. Wraz ze zwiększaniem się wartości naprężenia pionowego pętla histerezy stawała się coraz bardziej otwarta, co oznacza większy przyrost odkształceń plastycznych w kolejnych cyklach [Guo i in. 2016].

Obciążenia cykliczne pochodzenia antropogenicznego mają zwykle charakter długotrwały. Jeśli obciążenia te nie prowadzą w ciągu kilku bądź kilkudziesięciu cykli do zniszczenia gruntu, to mogą wywołać skrócenie czasu eksploatacji budowli ziemnej. Powodem owego skrócenia czasu może być przekroczenie dopuszczalnego osiadania lub zniszczenie części konstrukcji przy naprężeniach o wartości mniejszej niż przy statycznej wytrzymałości materiału. Zmniejszenie wytrzymałości materiału wywołane obciążeniami cyklicznymi jest definiowane jako wytrzymałość zmęczeniowa. Proces zmęczenia materiału wywołany jest rozwojem uszkodzeń w materiale [Kowalewski i in. 2014].

W przypadku obciążeń cyklicznych zmęczenie materiału jest przyczyną zniszczenia konstrukcji, a w przypadku gruntów – zwiększonego osiadania, co skutkować może przekroczeniem stanu granicznego użyteczności konstrukcji posadowionej na gruncie. Osiadanie gruntu, które doprowadzi do przekroczenia stanu granicznego użyteczności, może zostać osiągnięte po określonej liczbie cykli, która z kolei zależy od charakteru, sekwencji i czasu trwania obciążeń [Kowalewski 2011].

Zagadnienie obciążenia cyklicznego gruntów spoistych rozwijane było dotychczas w zakresie małej liczby cykli, gdzie obciążenie to prowadziło do zniszczenia próbki gruntu [Vucetic i Dobry 1988, Hyde i in. 1993]. Jednak już niewielkie wartości naprężenia dewiatorowego powodują powstanie odkształceń plastycznych. Odkształcenia pla-

styczne i ich charakter mają decydujący wpływ na zachowanie się gruntu. Odształcenia plastyczne powstają, gdy podczas obciążenia cyklicznego część energii mechanicznej ulega rozproszeniu. Wielkość energii rozproszonej opisywana jest polem powierzchni wewnątrz pętli histerezy. Zmiany wartości pola powierzchni pozwalają na opis makroskopowy zmian w materiale [Birgisson i in. 2007, Daum 2008].

Pętle histerezy otrzymane na podstawie badań będą zmieniały swój kształt wraz z kolejnymi cyklami. Deformacje powstałe jako reakcja na obciążenie cykliczne będą wskazywały na dwa zjawiska: osłabienie i wzmocnienie.

W badaniach przy stałej amplitudzie naprężenia efekt osłabienia obserwowany jest jako zwiększenie się amplitudy odształcenia. Efekt wzmocnienia z kolei obserwowany jest jako zmniejszanie się amplitudy odształcenia w kolejnych cyklach. W wyniku zjawiska wzmocnienia gruntu obserwowana szerokość pętli histerezy jest na tyle mała, że obserwowane zmiany można przyjąć w przybliżeniu jako stałe. Materiały takie w mechanice zmęczenia materiałów nazywane są cyklicznie stabilnymi [Kowalewski 2011].

Zjawisko wzmocnienia i osłabienia w wyniku obciążenia cyklicznego gruntów spoistych w warunkach stałej amplitudy naprężenia obserwowane było już wcześniej. W warunkach bez odpływu grunt spoisty reaguje na działające cyklicznie naprężenie w postaci wzmocnienia, by następnie ulec efektowi osłabienia [Sas i Głuchowski 2013, Guo i in. 2013, Głuchowski i in. 2015]. Zjawisko to w ujęciu dziedziny zmęczenia materiałów nazywane jest nasyceniem. W stanie nasycenia obserwowana pętla histerezy nie ulega dalszej zmianie. Stan ten jest osiąganym zwykle po kilkudziesięciu cyklach, jednak nie później niż po przeprowadzeniu 1/2 liczby cykli koniecznych do wywołania zniszczenia [Rutecka i in. 2015].

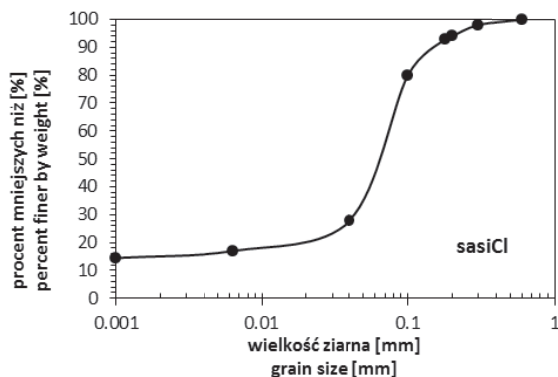
Reakcja gruntu na dużą liczbę cykli obciążenia może być scharakteryzowana jako zmęczenie materiału, ale także jako dostosowanie. Gdy odształcenia plastyczne w każdym cyklu są coraz mniejsze, a w efekcie prędkość odształceń plastycznych jest równa zero, obserwuje się zjawisko dostosowania [Garcia-Rojo i Herrmann 2005].

Celem badań była charakterystyka naprężenia, powodująca różną reakcję gruntu spoistego. W artykule przedstawiono metodykę badań oraz analizę zachowania się ośrodka gruntowego. Zaproponowano także kryterium analizy obciążeń cyklicznych za pomocą metody aplikacji kryterium dostosowania.

MATERIAŁY I METODY

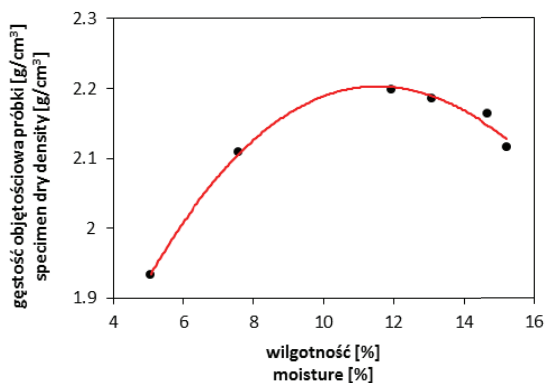
Na podstawie analizy sitowej określono krzywą uziarnienia (rys. 1). Grunt rozpoznano jako łą pylasto-piaszczysty (sasiCl) zgodnie z normami Eurocod 7 [PN-EN ISO 14688-2:2006, PN-EN 1997-2:2009]. Grunt zawierał ziarna w przedziale od 0,6 do 0 mm.

Ponadto wykonano badanie Proctora, według PN-88/B-04481, metodą I, standardowym ubijakiem 2,5 kg, w dużym cylindrze 1,0 dm³. Energia jednostkowa zagęszczania wynosiła $E_z = 0,95 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-3}$. Uzyskana wilgotność optymalna wynosiła $w_{\text{opt}} = 11,8\%$, a gęstość objętościowa szkieletu gruntowego – $2,2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Wyniki badań przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 1. Krzywa uziarnienia badanego gruntu

Fig. 1. Gradation curve of tested soil



Rys. 2. Wyniki badań wilgotności optymalnej metodą Proctora

Fig. 2. Results of Proctor test

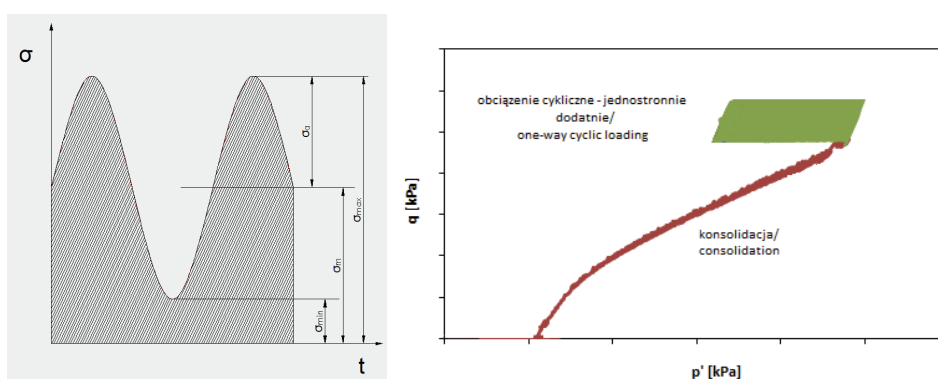
Dla badanego gruntu wykonano także oznaczenie granicy płynności. Badania wykonano w aparacie Casagrandego. W wyniku przeprowadzonych badań otrzymano granicę płynności $w_L = 25,9\%$.

Dodatkowo wyznaczono prędkość fali poprzecznej (V_S) oraz podłużnej (V_P). Badania wykonano za pomocą piezoelementów typu „Bender” po zakończeniu etapu konsolidacji. Badanie przeprowadzono metodą *peek to peek*, przy amplitudzie 10 V [Sas i in. 2016]. Wynikiem badań jest wartość prędkości fali poprzecznej (V_S) równa $198,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ i prędkość fali podłużnej (V_P) równa $1189,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Grunt użyty do badań był gruntem sztucznie zagęszczonym. W celu otrzymania żądanych wymiarów próbek do dalszych badań wycięto grunt zagęszczony w cylindrze do badań Proctora o wilgotności równej wilgotności optymalnej. Następnie wycięte próbki o wymiarach $d = 7,0 \text{ cm}$ i wysokości $h = 14,0 \text{ cm}$ umieszczono w aparacie cyklicznego trójosiowego ściskania. Pierwszym etapem było usunięcie z przewodów oraz z próbki pęcherzyków gazu (*flushing*). Nasączenie próbki gruntu do stanu pełnego nasycenia prze-

prorowadzono metodą ciśnienia wyrównawczego. Etap ten trwał do momentu osiągnięcia wartości parametru Skemptona B równej 0,92.

Kolejnym etapem była konsolidacja anizotropowa wykonana metodą stałej objętości próbki. Metoda ta polega na konsolidacji gruntu poprzez kontrolę zmiany objętości próbki w czasie konsolidacji anizotropowej. Na podstawie zmiany objętości program oblicza nową teoretyczną wartość wysokości próbki, a przez to zapewnia stałą średnicę próbki gruntu. Po zakończeniu etapu konsolidacji wykonano cykliczne badania trójosiowego ściskania. Charakterystykę badań przedstawia tabela 1. Badania przeprowadzono w warunkach bez odpływu (badania typu TXCAU). Cykliczne obciążenie zadano w sposób jednostronny dodatni (*one-way test*). Na rysunku 3 przedstawiono schemat obciążenia cyklicznego w czasie.



Rys. 3. Schemat funkcji obciążenia cyklicznego w funkcji czasu oraz schemat badania w układzie p' - q

Fig. 3. Schema of cyclic loading function in time argument and schema of test in p' - q function

Zastosowane obciążenia miały charakter sinusoidalny. Obciążenia te można scharakteryzować następującymi parametrami [Kowalewski 2011]:

- amplituda naprężenia w jednym cyklu

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (1)$$

- zakres zmian naprężenia

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = 2\sigma_a \quad (2)$$

- współczynnik asymetrii cyklu

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (3)$$

- współczynnik stałości obciążenia

$$\chi = \frac{\sigma_m}{\sigma_a} = \frac{1+R}{1-R} \quad (4)$$

gdzie: σ_{\max} – naprężenie maksymalne,
 σ_{\min} – naprężenie minimalne,
 σ_a – amplituda naprężenia,
 σ_m – naprężenie średnie.

Wartości wyżej wymienionych parametrów prezentuje tabela 1.

Tabela 1. Właściwości fizyczne oraz mechaniczne iltu piaszczysto-pylastego użytego do badań
 Table 1. Physical and mechanical properties of sandy silty clay samples in this study

Właściwości Properties	A.1	B.1	B.2
σ'_3 [kPa]	125	45	45
K_0 [-]	0,62	0,49	0,49
ν [-]	0,38	0,33	0,33
F [Hz]	1	1	1
N [-]	10^5	$0,5 \cdot 10^5$	$0,5 \cdot 10^5$
M [-]	0,9	1,2	1,2
e_0 [-]	0,40	0,39	0,39
σ_{\max} [kPa]	101	117	122
σ_{\min} [kPa]	74	94	82
σ_a [kPa]	13,5	11,5	20
$\Delta\sigma$ [kPa]	27	23	40
R [-]	0,73	0,80	0,67
χ [-]	6,48	9,17	5,10

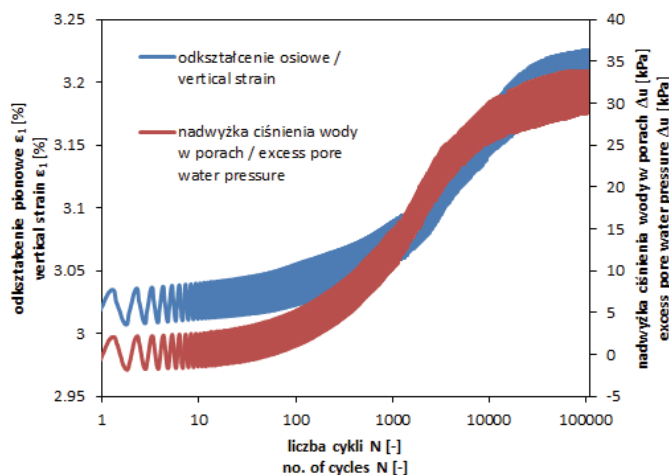
Oznaczenia: σ'_3 – naprężenie główne, K_0 – stosunek naprężeń poziomych i pionowych, ν – współczynnik Poissona, e_0 – początkowy wskaźnik porowatości, F – częstotliwość, N – liczba cykli, M – nachylenie linii stanu krytycznego, σ_{\max} – naprężenie maksymalne, σ_{\min} – naprężenie minimalne, σ_a – amplituda naprężenia, $\Delta\sigma$ – zakres zmian naprężenia, R – współczynnik asymetrii cyklu, χ – współczynnik stałości obciążenia.

Explanations: σ'_3 – minor normal stress, K_0 – ratio of horizontal to vertical stress, ν – Poisson ratio, e_0 – initial void ratio, F – frequency, N – number of cycles, M – critical state line, σ_{\max} – maximal stress, σ_{\min} – minimal stress, σ_a – stress amplitude, $\Delta\sigma$ – stress difference, R – coefficient of cycle asymmetry, χ – coefficient of steady load.

WYNIKI

Wyniki badań dla próbki A.1 przedstawiają rysunki 4, 5 i 6. Próbką A.1 została skonsolidowana anizotropowo do wartości naprężenia głównego (σ_3) wynoszącego 125 kPa. Następnie zadano obciążenie cykliczne w sposób jednostronny dodatni o amplitudzie $\sigma_a = 13,5$ kPa. Wartość maksymalnego naprężenia dewiatorowego, oznaczonego jako σ_{\max} , wynosiła 101 kPa. Wykonano 10^5 cykli o częstotliwości 1 Hz.

Rysunek 4 przedstawia zmianę wartości odkształcenia pionowego (ε_1) oraz zmianę wartości ciśnienia wody w porach (u) w trakcie badania. Badana próbka w pierwszym etapie badania akumulowała odkształcenia trwałe w kierunku pionowym do około 10^3 cyklu, gdzie zmiana odkształcenia stopniowo zwolniła. Charakterystyczną



Rys. 4. Charakterystyka zmiany ciśnienia wody w porach (Δu) oraz odkształcenia pionowego (ε_1) w funkcji liczby cykli (N) dla badania A.1

Fig. 4. Plot of excess water pressure (Δu) and axial vertical strain (ε_1) versus number of cycles (N) for A.1 test

odpowieź próbki gruntu w tym badaniu w postaci odkształcenia poprzedziła zmiana wartości ciśnienia wody w porach (u). Podczas pierwszej fazy cyklicznego obciążenia zauważono najpierw nagły przyrost wartości ciśnienia wody w porach, a następnie jego stabilizację. Wraz ze zmianą przyrostu ciśnienia wody w porach spada prędkość odkształceń trwałych w kierunku pionowym, by osiągnąć liniowy charakter przyrostu w kolejnym etapie obciążenia cyklicznego. Pierwszy etap obciążenia można opisać funkcją liniową:

$$\varepsilon_p = 0,00004 \cdot N + 3,036 \quad (5)$$

gdzie: ε_p – odkształcenia trwałe w kierunku pionowym,
 N – numer cyklu.

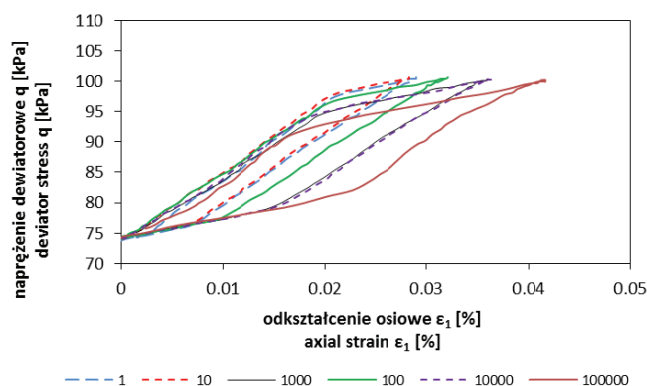
Po około 10^2 cyklu rozpoczyna się faza przejściowa, gdzie obserwuje się spadek wartości przyrostu odkształceń trwałych w kierunku pionowym. Trzeci etap rozpoczyna się w momencie zakończenia procesu zmniejszania się przyrostów odkształceń trwałych w kierunku pionowym. Etap ten można rozpoznać jako dostosowanie się gruntu do obciążenia cyklicznego. Odkształcenia trwałe w kierunku pionowym nie są obserwowane w pojedynczych cyklach obciążeń. Analizując większy zbiór cykli, obserwuje się jednak pewien wzrost nieodwracalnych odkształceń próbki. Zjawisko to jest przykładem stanu ustalonego, a w przypadku obciążeń cyklicznych nazywane jest plastycznym dostosowaniem. Dla tego etapu przyrost odkształceń trwałych w kierunku pionowym można opisać ponownie funkcją liniową:

$$\varepsilon_p = 0,0000004 \cdot N + 3,140 \quad (6)$$

W ciągu 10^5 cykli wartość ciśnienia wody w porach zwiększa się, osiągając nadwyżkę o wartości około 30 kPa. Nadwyżka ciśnienia wody w porach (Δu) koresponduje

z charakterystyką wzrostu odkształcenia pionowego (ε_1) w kolejnych cyklach obciążenia. Wzrost odkształceń trwałych w kierunku pionowym w tym przypadku poprzedza przyspieszenie generowania ciśnienia wody w porach. W końcowej fazie cyklicznego obciążenia obserwuje się ustabilizowanie wartości nadwyżki ciśnienia wody w porach (Δu), a następnie spadek prędkości odkształceń trwałych w kierunku pionowym.

Na rysunku 5 przedstawiono pętle histerezy dla wybranych cykli obciążenia. Wraz z kolejnymi cyklami zaobserwować można spadek modułu odkształcenia w fazie odciążenia w warunkach obciążenia cyklicznego (M_R). Moduł M_R charakteryzuje wielkość odkształcenia odwracalnego (ε_r) w cyklu obciążenia o określonym zakresie zmian naprężenia ($\Delta\sigma$). Wraz z kolejnymi cyklami obciążeń obserwuje się wzrost wartości odkształcenia odwracalnego. Pętle histerezy przedstawione na rysunku 5 są zamknięte. Spadek nachylenia pętli histerezy wraz z kolejnymi cyklami jest efektem degradacji właściwości mechanicznych gruntu. Zjawisko degradacji w wyniku obciążeń cyklicznych dla gruntu spoistego spowodowane jest wzrostem ciśnienia wody w porach. Obserwuje się także związane z tym zjawiskiem zmniejszenie wartości modułu odkształcenia w fazie odciążenia w warunkach obciążenia cyklicznego oraz wzrost odkształceń odwracalnych w warunkach bez odpływu.



Rys. 5. Pętle histerezy dla wybranych cykli obciążenia, próbka A.1
Fig. 5. Hysteresis loops for selected cycles of loading, sample A.1

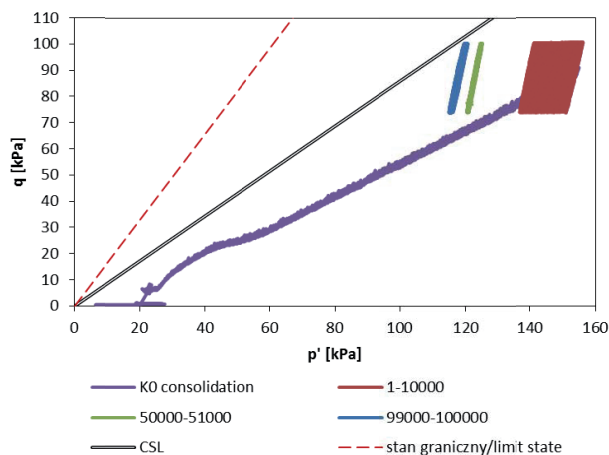
Na rysunku 6 przedstawiono ścieżki naprężenia efektywnego w układzie osi p^* - q oraz kolejne etapy badania, konsolidację anizotropową, a następnie kolejne ścieżki cykli obciążenia. Przedstawiono także linię stanu krytycznego (M) oraz linię stanu granicznego według Argyrisa (A) [Dołżyk 2011], której nachylenia obliczono za pomocą następujących równań:

$$K_0 = 1 - \sin\phi' \quad (7)$$

$$M = \frac{6 \sin\phi'}{3 - \sin\phi'} \quad (8)$$

$$A = \frac{6 \sin\phi'}{3 - \sin\phi' \sin 3\theta} \quad (9)$$

gdzie: φ' – efektywny kąt tarcia wewnętrzznego,
 θ – kąt Lodego (dla badania trójosiowego ściskania $\theta = \pi/6$).



Rys. 6. Ścieżki naprężenia efektywnego dla badania A.1; konsolidacja anizotropowa oraz obciążenie cykliczne o maksymalnej wartości naprężenia $\sigma_{\max} = 101$ kPa i amplitudzie $\sigma_a = 13,5$ kPa

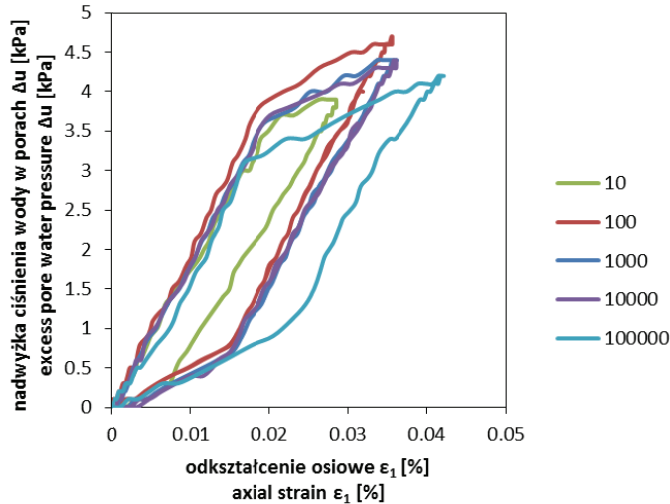
Fig. 6. Stress paths for A.1 test; anisotropic consolidation and cyclic loading characterized by maximal stress equal to 101 kPa and stress amplitude equal to 13.5 kPa

Przedstawione na rysunku ścieżki naprężenia efektywnego dla ostatnich 10^3 cykli charakteryzują zmianę odpowiedzi gruntu na obciążenie cykliczne w trzeciej fazie. W tej fazie nie obserwuje się zmiany ciśnienia wody w porach oraz odkształceń trwałych w kierunku pionowym.

Spadek sztywności gruntu w badaniu A.1 związany jest ze zbliżaniem się ścieżki naprężeń efektywnych do linii stanu krytycznego. Jednak wzrost ciśnienia wody w porach w kolejnych cyklach jest mniejszy niż przedstawiono na rysunku 4, co może doprowadzić do zatrzymania się ścieżki naprężeń efektywnych w kierunku osi dewiatora naprężenia (q), przez co stan graniczny nie zostaje osiągnięty, a co za tym idzie – nie dochodzi do zniszczenia.

Na rysunku 7 przedstawiono zmianę odkształcenia pionowego (ε_1) w funkcji nadwyżki ciśnienia wody w porach (Δu) dla wybranych cykli obciążenia. Rysunek ten wyjaśnia mechanizm generacji ciśnienia wody w porach oraz powstawania odkształceń. W pierwszych kilku cyklach obciążenia wraz ze zwiększającym się obciążeniem obserwuje się początkowo powstanie odkształceń przy małym wzroście ciśnienia wody w porach (bądź jego braku), a następnie wzrost ciśnienia wody w porach. Podczas procesu odciążania próbki ciśnienie wody w porach zmienia się najpierw w niewielkim stopniu wraz ze zmniejszającym się odkształceniem próbki, by następnie szybko spaść do początkowej wartości. Charakterystyka tej zmiany ulega ewolucji wraz z kolejnymi cyklami obciążenia. W ostatnim cyklu obciążenia odkształcenia generują się przy mniejszym niż poprzednio przyroście ciśnienia wody w porach. Reakcja gruntu na obciążenia cykliczne w postaci odkształcenia w warunkach bez odpływu dąży do zmniejszenia amplitudy

ciśnienia wody w porach. Aby to zjawisko mogło mieć miejsce, amplituda odkształceń całkowitych musi rosnąć, co przedstawia rysunek 7.



Rys. 7. Zmiana odkształcenia pionowego i nadwyżki ciśnienia wody w porach dla wybranych cykli obciążenia, próbka A.1

Fig. 7. Axial strain versus excess pore water pressure for selected cycles of loading, sample A.1

Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono zmianę ciśnienia wody w porach oraz odkształcenia pionowego (ε_1) dla testów B.1 oraz B.2. Badania te przeprowadzono na tej samej próbce gruntu. Pierwszym etapem było obciążenie gruntu do wartości $\sigma_{\max} = 117$ kPa oraz amplitudy naprężenia $\sigma_a = 11,5$ kPa. Następnie po wykonaniu $0,5 \cdot 10^5$ cykli zmieniono wartości obciążenia do $\sigma_{\max} = 122$ kPa i $\sigma_a = 20$ kPa.

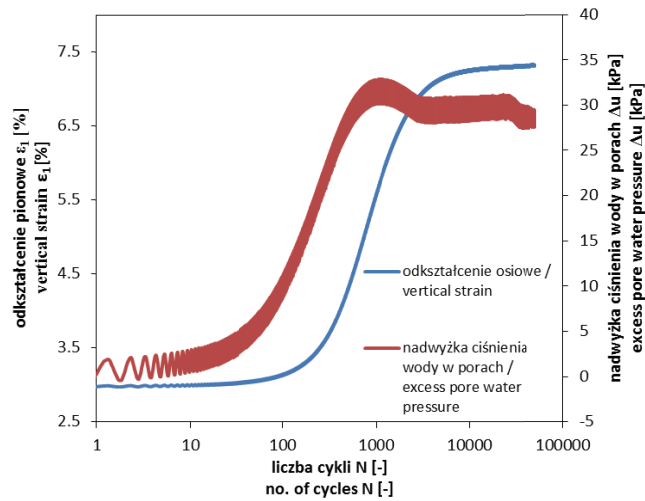
Rysunek 8 przedstawia podobne zjawisko, które zaobserwowano w poprzednim badaniu (rys. 4). Pierwsza faza obciążenia trwała do momentu osiągnięcia przez ciśnienie wody w porach wartości maksymalnej. Drugi etap charakteryzował się stopniowym spadkiem ciśnienia wody w porach (Δu) do 30 kPa oraz ustabilizowaniem się odkształceń trwałych w kierunku pionowym. Pierwszy etap obciążenia można opisać funkcją liniową:

$$\varepsilon_p = 0,0028 \cdot N + 2,8574 \quad (10)$$

Po około 10^3 cyklu rozpoczyna się faza przejściowa, gdzie obserwuje się zmniejszenie wartości przyrostu odkształceń trwałych w kierunku pionowym. Trzecia faza obciążenia cyklicznego również charakteryzuje się liniowym przebiegiem:

$$\varepsilon_p = 0,000005 \cdot N + 7,1819 \quad (11)$$

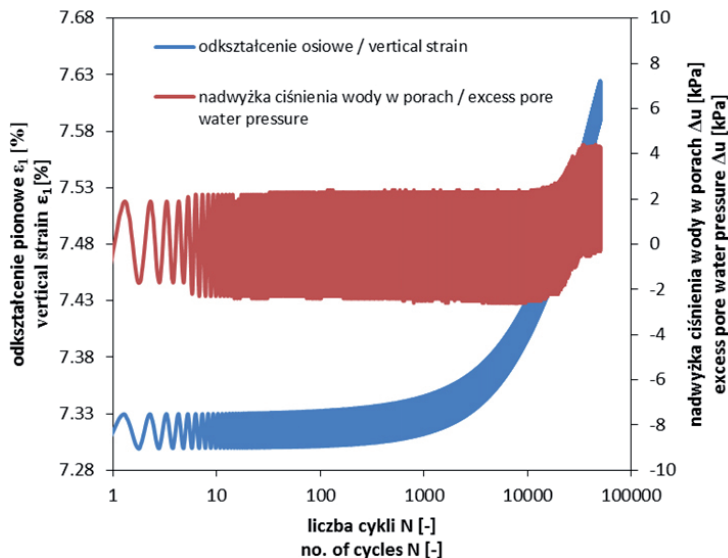
Badanie B.2 charakteryzowało się innym przebiegiem (rys. 9). Przez $5 \cdot 10^4$ cykli ciśnienie wody w porach oscylowało wokół stałego początkowego poziomu. Amplituda zmiany ciśnienia wody w porach wynosiła około 2,2 kPa. Po przekroczeniu 10^4 cyklu wartość ciśnienia średniego, wokół którego ciśnienie wody w porach oscylowało, zaczęło rosnąć. Przyrost odkształceń trwałych w kierunku pionowym miał jednak charakter liniowy.



Rys. 8. Charakterystyka zmiany ciśnienia wody w porach (Δu) oraz odkształcenia pionowego (ϵ_1) w funkcji liczby cykli (N) dla badania B.1

Fig. 8. Changes of excess water pressure (Δu) and axial vertical strain (ϵ_1) versus number of cycles (N) for B.1 test

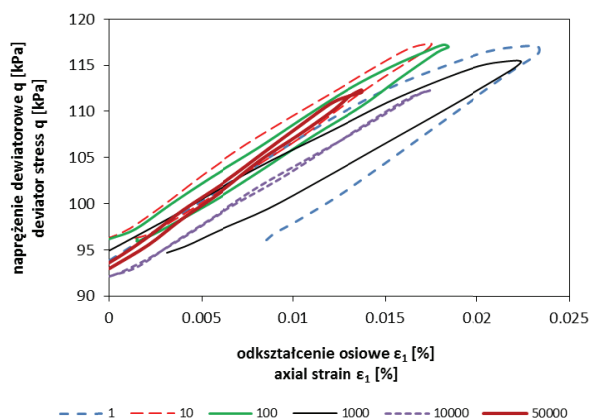
Rysunek 8 przedstawia podane zależności w skali półlogarymicznej ze względu na większą czytelność podanych wyników badań. Nie zaobserwowano wpływu zmiany ciśnienia wody w porach na odkształcenia trwałe w kierunku pionowym.



Rys. 9. Charakterystyka zmiany ciśnienia wody w porach (Δu) oraz odkształcenia pionowego (ϵ_1) w funkcji liczby cykli (N) dla badania B.2

Fig. 9. Changes of excess water pressure (Δu) and axial vertical strain (ϵ_1) versus number of cycles (N) for B.2 test

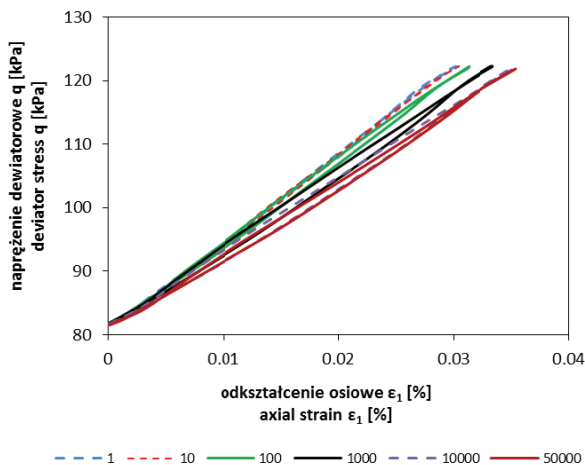
Na rysunku 10 przedstawiono pętle histerezy dla wybranych cykli obciążenia dla badania B.1. Wraz z kolejnymi cyklami zaobserwować można spadek modułu odkształcenia w fazie odciążenia w warunkach obciążenia cyklicznego (M_R). Obciążenie cykliczne wywołało w pierwszych kilku powtórzeniach reakcję gruntu w postaci odkształceń trwałych. Wraz z przyrostem odkształceń trwałych wartość modułu odkształcenia w fazie odciążenia w warunkach obciążenia cyklicznego rośnie, co oznacza, że grunt ulega plastycznemu wzmocnieniu. Cykl 10^4 , gdzie nie zanotowano odkształceń trwałych w kierunku pionowym, charakteryzował się mniejszym modułem odkształcenia w fazie odciążenia w warunkach obciążenia cyklicznego (M_R).



Rys. 10. Pętle histerezy dla wybranych cykli obciążenia, próbka B.1

Fig. 10. Hysteresis loops for selected cycles of loading, sample B.1

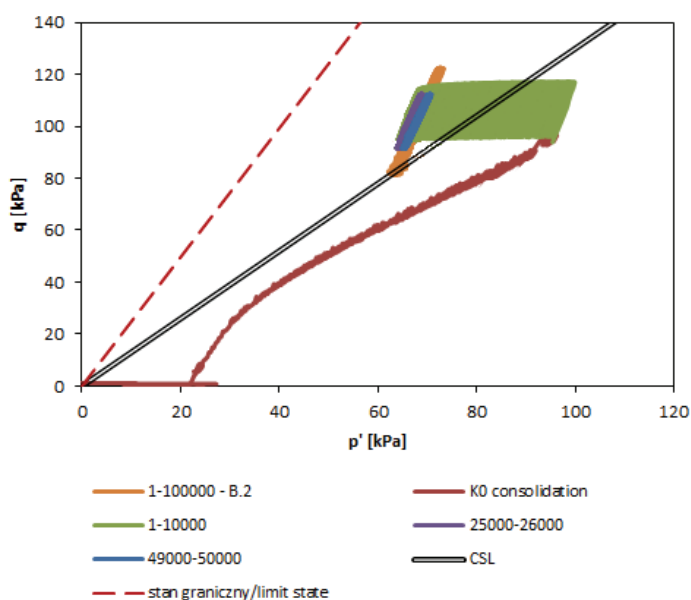
Na rysunku 11 przedstawiono wybrane pętle histerezy dla badania B.2. Odkształcenia trwałe nie są tu obserwowane w pojedynczych cyklach. Obserwuje się jednak ten sam mechanizm redukcji sztywności gruntu, który zaobserwowano podczas badania A.1.



Rys. 11. Pętle histerezy dla wybranych cykli obciążenia, próbka B.2

Fig. 11. Hysteresis loops for selected cycles of loading, sample B.2

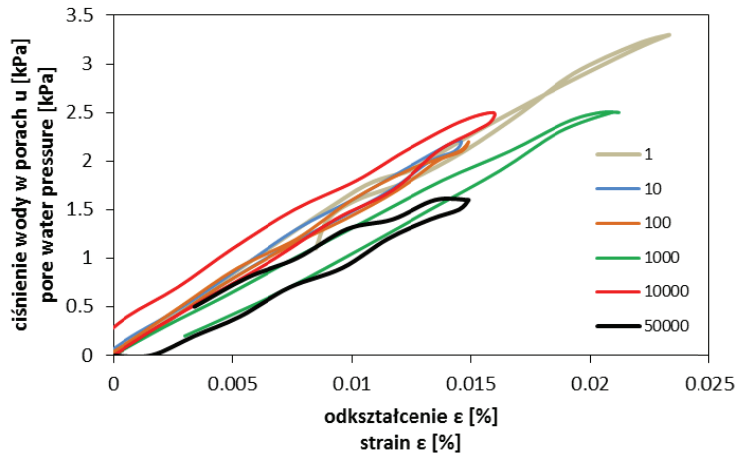
Na rysunku 12 przedstawiono ścieżki naprężeń efektywnych dla badań B.1 i B.2. Podczas badania B.1 doszło do akumulacji odkształceń trwałych w kierunku pionowym w pierwszych 10^3 cyklach. Wynikiem tego była szybka generacja nadwyżki ciśnienia wody w porach (rys. 8). Obciążenie cykliczne zadane w tym badaniu spowodowało przekroczenie przez ścieżki naprężenia efektywnego linii stanu krytycznego. Po przekroczeniu tej wartości ciśnienie wody w porach zaczęło się stabilizować. Zarówno w przypadku badania A.1, jak i badań B.1 i B.2 zauważyć można ten sam mechanizm przyrostu ciśnienia wody w porach w czasie badania cyklicznego obciążania. Grunt spoisty dąży do osiągnięcia stanu ustalonego. Za osiągnięcie stanu ustalonego uważa się brak zmiany wartości nadwyżki ciśnienia wody w porach w kolejnych cyklach. Na podstawie badań zauważyć można tendencję do zmniejszania się wartości przyrostu ciśnienia wody w porach pomiędzy poszczególnymi cyklami [Li i Meissner 2002].



Rys. 12. Ścieżki naprężenia efektywnego dla badania B.1 i B.2; konsolidacja anizotropowa oraz obciążenie cykliczne o maksymalnej wartości naprężenia $\sigma_{\max B.1} = 117$ kPa i amplitudzie $\sigma_a B.1 = 11,5$ kPa oraz $\sigma_{\max B.2} = 122$ kPa i amplitudzie $\sigma_a B.2 = 20,0$ kPa

Fig. 12. Stress paths for B.1 and B.2 tests; anisotropic consolidation and cyclic loading characterized by maximal stress $\sigma_{\max B.1} = 117$ kPa and stress amplitude $\sigma_a B.1 = 11,5$ kPa and maximal stress $\sigma_{\max B.2} = 122$ kPa and stress amplitude $\sigma_a B.2 = 20,0$ kPa

Na rysunku 13 przedstawiono zmianę ciśnienia wody w porach i zmianę odkształcenia w czasie badania B.1. Kształt pętli histerezy jest zależny od pierwszych kilku cykli, co przedstawia zarówno rysunek 13, jak i rysunek 7. Jednak w obu przypadkach obserwuje się spadek amplitudy ciśnienia wody w porach wraz z kolejnymi cyklami. Duża wartość naprężenia dewiatorowego w tym badaniu spowodowała reakcję gruntu w postaci odkształceń trwałych. Pierwsze cykle obciążenia można scharakteryzować liniową zależnością pomiędzy przyrostem ciśnienia wody w porach a odkształceniem.



Rys. 13. Zmiana odkształcenia pionowego i nadwyżki ciśnienia wody w porach dla wybranych cykli obciążenia, próbka B.1

Fig. 13. Axial strain versus excess pore water pressure for selected cycles of loading, sample B.1

ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Na podstawie wyników badań scharakteryzowano wpływ czynników, takich jak: ciśnienie wody w porach (u), naprężenie mniejsze normalne (σ_3) oraz wartość naprężenia dewiatorowego (q) na reakcję gruntu spoistego w postaci odkształcenia.

Naprężenie dewiatorowe (q) powoduje reakcję gruntu w postaci wzrostu ciśnienia wody w porach oraz odkształcenia trwałego i odwracalnego. Przebieg cyklicznie działającego obciążenia w funkcji czasu można opisać następującym równaniem:

$$q(t) = \sigma_m + \sigma_a F(t) \quad (12)$$

gdzie $F(t)$ – funkcja zmiany naprężenia:

$$F(t) = (\omega t + \varphi) \quad (13)$$

gdzie: ω – częstość kołowa zmian naprężenia,
 φ – kąt fazy początkowej.

W wyniku obciążenia pionowego naprężenie przenoszone przez szkielet gruntowy powoduje wzrost ciśnienia wody w porach. Zmiana ciśnienia wody w porach (Δu) może być w przypadku badań trójosiowego ściskania w warunkach bez odpływu traktowana jako reakcja gruntu na obciążenie cykliczne, a co za tym idzie – zmiana ciśnienia wody w porach w trakcie cyklicznego obciążenia będzie powiązana ze zmianą odkształceń trwałych w gruncie.

Na wzrost ciśnienia wody w porach ma wpływ cyklicznie działające naprężenie dewiatorowe w kierunku pionowym, które opisano wzorem (13).

Odształcenie trwałe w kierunku pionowym (ε_p [-]) można zatem opisać za pomocą następującego równania:

$$\varepsilon_p(N) = \frac{u_N}{M_U} \quad (14)$$

gdzie: u_N – parametr ciśnienia wody w porach w N -tym cyklu [kPa],

M_U – moduł odkształcenia w warunkach bez odpływu dla obciążenia cyklicznego [kPa].

Ponieważ wartość odkształceń trwałych zależy od zmiany ciśnienia wody w porach, jak wykazano w artykule, wprowadzono do podanego modelu empirycznego moduł odkształcenia w warunkach bez odpływu dla obciążenia cyklicznego (M_U). Wzrost ciśnienia wody w porach zależy od działającego naprężenia dewiatorowego i jego charakterystycznych wartości opisowych, a także od naprężenia głównego (σ_3). Zależności te wykorzystano do obliczenia parametru ciśnienia wody w porach (u_N).

Wartość parametru ciśnienia wody w porach (u_N) dla N -tego cyklu obliczyć można na podstawie równania empirycznego:

$$u_N = \frac{\left(2000 \cdot \ln \left(\frac{\sigma'_3 \cdot R}{q(t)^2 \cdot \sigma_m} \right) \cdot 500 \right) \cdot N}{\left(\left(\frac{\chi^3}{\sigma'_3} \cdot 45 \right) - 75 \right) + N} \quad (15)$$

gdzie: σ'_3 – wartość efektywnego mniejszego naprężenia głównego przed rozpoczęciem cyklicznego obciążenia,

R – współczynnik asymetrii cyklu,

χ – współczynnik stałości obciążenia,

σ_m – wartość średnia naprężenia dewiatorowego,

$q(t)$ – wartość pola pod wykresem naprężenia dewiatorowego w połowie cyklu w funkcji czasu, w tym badaniu $q(0,5)$.

Wartość modułu odkształcenia w warunkach bez odpływu dla obciążenia cyklicznego (M_U) przedstawia równanie:

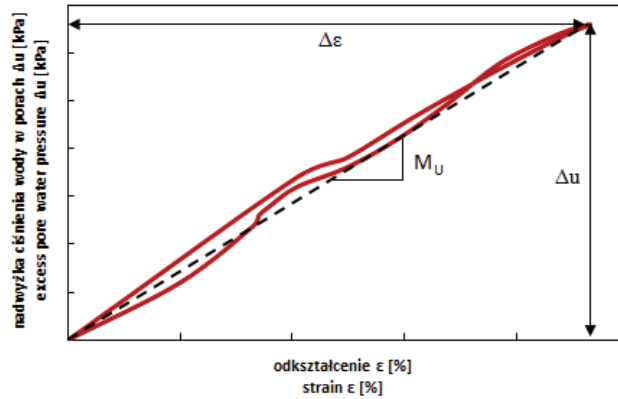
$$M_U = \frac{\Delta u}{\Delta \varepsilon} \quad (16)$$

gdzie: Δu – wartość nadwyżki ciśnienia wody w porach w cyklu N ,

$\Delta \varepsilon$ – wartość odkształcenia całkowitego w cyklu N .

Rysunek 14 przedstawia sposób wyznaczenia modułu ciśnienia wody w porach.

Na podstawie wyników badań (rys. 7 i 13) można przyjąć stałe nachylenie charakterystyki zmiany ciśnienia wody w porach w funkcji odkształcenia, stąd wartość M_U można obliczyć dla pierwszego cyklu obciążenia.



Rys. 14. Charakterystyka modułu odkształcenia w warunkach bez odpływu dla obciążenia cyklicznego (M_U)

Fig. 14. The characteristics of strain modulus in undrained conditions (M_U)

Tabela 2 przedstawia wartości parametrów dla trzech badań, które zostały użyte do określenia wartości przyrostu odkształceń trwałych w kolejnych cyklach obciążenia na podstawie równania (13).

Tabela 2. Wartości parametrów wykorzystane do obliczenia odkształceń trwałych dla próbek użytych w badaniach

Table 2. The values of parameters for soil samples in this study utilized in permanent strain calculations

Parametr Parameter	A.1	B.1	B.2
σ'_3	125	45	45
R	0,73	0,8	0,67
χ	6,48	9,17	5,1
σ_m	87,5	105,5	102
$q(0,5)$	45,9	54,6	0,40
M_U	13,50	15,72	12,56

Na podstawie parametrów umieszczonych w tabeli 2 oraz równań od (14) do (16) obliczono wartość przyrostu odkształceń trwałych w kierunku pionowym. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 15. Parametr $q(t)$, oznaczający wartość pola pod wykresem naprężenia dewiatorowego w funkcji czasu, został dla badania B.2 obliczony jako różnica $q(t)_1$ i $q(t)_2$. Przedstawione równanie pozwala na obliczenie zmiany odkształceń nieodwracalnych także w kilku etapach. W takim przypadku przyrost odkształceń trwałych i ciśnienia wody w porach traktuje się nie jako nowe obciążenia, ale jako kontynuację poprzedniej serii obciążeń.

Wartość nadwyżki ciśnienia wody w porach (Δu) obliczyć można na podstawie poniższego równania:

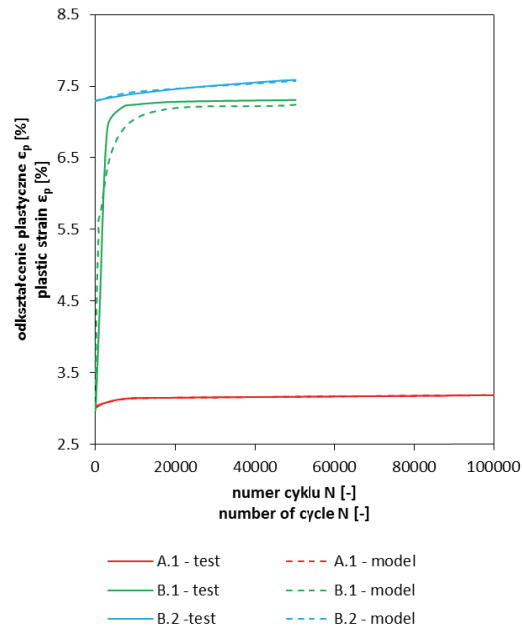
$$\Delta u (N) = (\varepsilon_p \cdot k_u) + \Delta u_0 \quad (17)$$

gdzie: $\varepsilon_p(N)$ – odkształcenie trwałe (13),

Δu_0 – wartość ciśnienia wody w porach po zakończeniu pierwszego cyklu obciążenia,

k_u – parametr zależny od naprężenia dewiatorowego

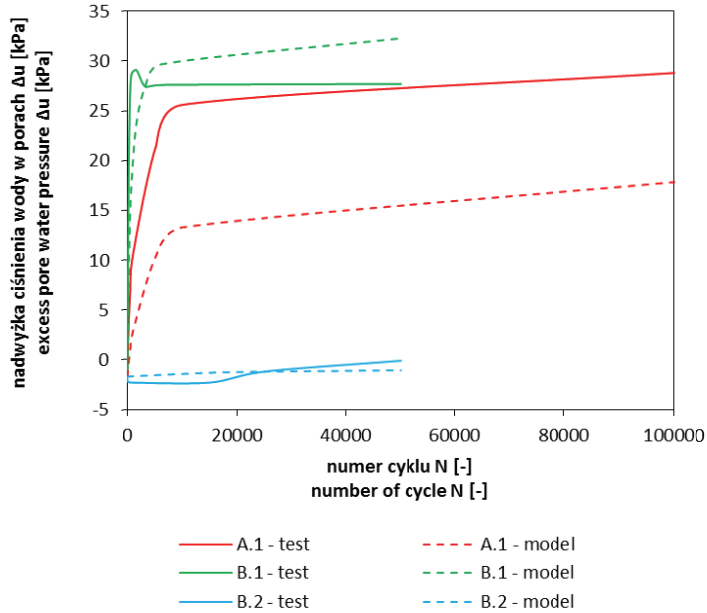
$$k_u = 0,2 \cdot e^{\frac{\chi}{R}} \quad (18)$$



Rys. 15. Zmiana odkształcenia trwałego – wyniki badań i obliczeń
 Fig. 15. Permanent strain change – results of tests and calculations

Na podstawie równania (17) obliczono wartość nadwyżki ciśnienia wody w porach. Wyniki obliczeń przedstawia rysunek 16.

Wartości przyrostu odkształceń trwałych obliczonych za pomocą równań opracowanych na podstawie wyników badań dla gruntu spoistego skonsolidowanego w warunkach anizotropowych są bliskie wartościom otrzymanym z badań cyklicznego trójosiowego ściskania. Wartości nadwyżki ciśnienia wody w porach (rys. 16), poza badaniem A.1, również prawidłowo opisują pierwszy etap gromadzenia nadwyżki ciśnienia wody w porach. Ciśnienie to w drugim etapie obciążania cyklicznego ulega stabilizacji, co wiązać się może z procesem nasycenia. Prawidłowy opis tego zjawiska wymaga jednak dodatkowych badań.



Rys. 16. Zmiana nadwyżki ciśnienia wody w porach dla badań A.1, B.1, B.2 – wyniki badań i obliczeń

Fig. 16. Changes of excess pore water pressure versus number of cycle for samples A.1, B.1 and B.2 – test results and empirical model

PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono wyniki badań cyklicznego trójosiowego ściskania gruntu spoistego w warunkach bez odpływu. Badanie poprzedzone zostało etapem konsolidacji anizotropowej. Próbkę gruntu spoistego o zniszczonej strukturze przed badaniem zostały ponownie zagęszczone przy wilgotności optymalnej w aparacie Proctora. Uzyskane wyniki i ich analiza pozwoliły na wysunięcie następujących wniosków:

1. Wyniki badań cyklicznego obciążania wykazują spadek sztywności gruntu w trzech badaniach. Jest to związane ze zbliżaniem się ścieżki naprężeń efektywnych do linii stanu krytycznego. Wraz z kolejnymi cyklami obciążenia obserwowany wzrost ciśnienia wody w porach jest mniejszy, co może doprowadzić do powstania stanu ustalonego i zjawiska plastycznego dostosowania przy obciążeniu cyklicznym.

2. Wraz z kolejnymi cyklami obciążenia zaobserwować można spadek modułu odkształcenia w fazie odciążenia (M_R). Obciążenie cykliczne wywołało w pierwszych kilku powtórzeniach reakcję gruntu w postaci odkształceń trwałych. Wraz z przyrostem odkształceń trwałych wartość cyklicznego modułu sprężystości wzrasta, co oznacza, że grunt ulega plastycznemu wzmocnieniu. Około cyklu 10^3 – 10^4 dla trzech przedstawionych wyników badań nie obserwuje się odkształceń trwałych w pojedynczych cyklach obciążenia.

3. Analiza wybranych pętli histerezy obrazuje dostosowanie plastyczne gruntu spoistego, które definiowane jest jako brak udziału odkształceń trwałych w kierunku pionowym w jednym cyklu. Obserwuje się także spadek sztywności gruntu w dalszych cyklach obciążania cyklicznego.

4. Spadek sztywności gruntu związany może być ze zjawiskiem zmęczenia. Obserwowane pętle histerez w kolejnych cyklach są zamknięte, a co za tym idzie – odkształcenia trwałe nie są obserwowane. W wyniku długotrwałego obciążenia cyklicznego przy stałej amplitudzie zamknięta pętla histerezy w kolejnych cyklach zmniejsza swoje nachylenie. Spowodowane jest to zwiększaniem się odkształceń odwracalnych. Wraz ze zwiększaniem się odkształceń odwracalnych obserwuje się także spadek ciśnienia wody w porach.

5. Podczas badania B.1 obciążenie cykliczne doprowadziło do reakcji gruntu w postaci akumulacji odkształceń trwałych w pierwszych 10^3 cyklach. Wraz z tym zjawiskiem zaobserwowano szybką generację nadwyżki ciśnienia wody w porach. Obciążenie cykliczne zadane w tym badaniu spowodowało przekroczenie przez ścieżki naprężenia efektywnego linii stanu krytycznego. Po przekroczeniu tej wartości ciśnienie wody w porach zaczęło się stabilizować. Zaobserwowano mechanizm, który prowadzi do osiągnięcia stanu ustalonego przez kompozyt woda – szkielet gruntowy. Za osiągnięcie stanu ustalonego uważa się brak zmiany wartości nadwyżki ciśnienia wody w porach w kolejnych cyklach. Na podstawie badań zauważyć można tendencję do zmniejszania się wartości przyrostu ciśnienia wody w porach pomiędzy poszczególnymi cyklami

6. Na podstawie wyników badań scharakteryzowano wpływ czynników, takich jak: ciśnienie wody w porach (u), naprężenie mniejsze normalne (σ_3) oraz wartość naprężenia dewiatorowego (q) na reakcję gruntu spoistego w postaci odkształcenia. W wyniku obciążenia pionowego naprężenie przenoszone przez szkielet gruntowy powoduje wzrost ciśnienia wody w porach. Zmiana ciśnienia wody w porach (Δu) może być w przypadku badań trójosiowego ściskania w warunkach bez odpływu traktowana jako reakcja gruntu na obciążenie cykliczne, a co za tym idzie – zmiana ciśnienia wody w porach w trakcie cyklicznego obciążenia będzie powiązana z przyrostem odkształceń trwałych w gruncie. Zaproponowano równania empiryczne, które pozwalają na obliczenie wartości odkształcenia trwałego w kierunku pionowym w kolejnych cyklach oraz nadwyżki ciśnienia wody w porach.

PIŚMIENNICTWO

- Abdelkrim, M., Bonnet, G., De Buhan, P. (2003). A computational procedure for predicting the long term residual settlement of a platform induced by repeated traffic loading. *Computers and Geotechnics*, 30 (6), 463–476.
- Anderson, K.H., Pool, J.H., Brown, S.F., Rosenbrand, W.F. (1980). Cyclic and static laboratory tests on Drammen Clay. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 106 (GT5), 499–529.
- Ansal, A., Erken, A. (1989). Undrained Behavior of Clay Under Cyclic Shear Stresses. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 115 (7), 968–983.
- Birgisson, B., Sangpetngam, B., Roque, R., Wang, J. (2007). Numerical implementation of a strain energy-based fracture model for a HMA materials. *International Journal of Road Materials and Pavement Design*, 8 (1), 7–45.

- Cai, Y., Gu, C., Wang, J., Juang, C.H., Xu, C., Hu, X. (2012). One-way cyclic triaxial behavior of saturated clay: comparison between constant and variable confining pressure. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139 (5), 797–809.
- Cai, Y., Gu, C., Wang, J., Juang, C., Xu, C., Hu, X. (2013). One-Way Cyclic Triaxial Behavior of Saturated Clay: Comparison between Constant and Variable Confining Pressure. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, ASCE, 10, 797–809.
- Cai, Y., Sun, Q., Guo, L., Juang, C. H., Wang, J. (2015). Permanent deformation characteristics of saturated sand under cyclic loading. *Canadian Geotechnical Journal*, 52 (6), 795–807.
- Daum, M. (2008). Simplified Presentation of the Stress-Energy Method for General Commercial Use. *Journal of Testing and Evaluation*, 36 (1), 100–102.
- Dołżyk, K. (2011). Warunki stanu granicznego dla ośrodków rozdrobnionych. *Civil and Environmental Engineering*, 2, 123–128.
- García-Rojo, R., Herrmann, H.J. (2005). Shakedown of unbound granular material. *Granular matter*, 7 (2–3), 109–118.
- Głuchowski, A., Szymański, A., Sas, W. (2015). Repeated Loading of Cohesive Soil-Shakedown Theory in Undrained Conditions. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 37 (2), 11–16.
- Guo, L., Wang, J., Cai, Y., Liu, H., Gao, Y., Sun, H. (2013). Undrained deformation behavior of saturated soft clay under long-term cyclic loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 50, 28–37.
- Guo, L., Chen, J., Wang, J., Cai, Y., Deng, P. (2016). Influences of stress magnitude and loading frequency on cyclic behavior of K 0-consolidated marine clay involving principal stress rotation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 84, 94–107.
- Hyde, A.F., Yasuhara, K., Hirao, K. (1993). Stability criteria for marine clay under one-way cyclic loading. *Journal of Geotechnical Engineering*, 119 (11), 1771–1789.
- Jiang, M., Cai, Z. (2012). Stiffness Degradation of Soft Marine Clay under Uniaxial Cyclic Loading. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17, 3887–3895.
- Kalinowska, M., Jastrzębska, M. (2014). Behaviour of cohesive soil subjected to Low-Frequency Cyclic Loading in Strain-Controlled Tests. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 36 (3), 21–35.
- Kowalewski, Z.L. (2011). Zmęczenie materiałów – podstawy, kierunki badań, ocena stanu uszkodzenia. Siedemnaste Seminarium „Nieniszczące badania materiałów”, Zakopane, 1–21.
- Kowalewski, Z.L., Szymczak, T., Maciejewski, J. (2014). Material effects during monotonic-cyclic loading. *International Journal of Solids and Structures*, 51, 740–753.
- Li, L.L., Dan, H.B., Wang, L.Z. (2011). Undrained behavior of natural marine clay under cyclic loading. *Ocean Engineering*, 38 (16), 1792–1805.
- Li, T., Meissner, H. (2002). Two-surface plasticity model for cyclic undrained behavior of clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128 (7), 613–626.
- PN-88/B-04481:1988. Grunty budowlane. Badania próbek gruntu.
- PN-EN 1997-2:2009. Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne – Część 2: Rozpoznawanie i badanie podłoża gruntowego.
- PN-EN ISO 14688 2:2006. Badania geotechniczne. Oznaczenie i klasyfikacja gruntów – Część 2: Zasady klasyfikowania.
- Przewłócki, J., Świdziński, W., Górski, J. (2015). Probabilistyczna analiza osiadania gruntu obciążonego w sposób cykliczny. XI Konferencja „Nowe kierunki rozwoju mechaniki”. Red. Ł. Bohdal, Piotr Zmuda-Trzebiatowski. Koszalin – Sarbinowo. Politechnika Koszalińska, Koszalin, 81–83.
- Rutecka, A., Kowalewski, Z.L., Makowska, K., Pietrzak, K., Dietrich, L. (2015). Fatigue damage of Al/SiC composites – macroscopic and microscopic analysis. *Archives of Metallurgy and Materials*, 60 (1), 101–105.
- Sas, W., Głuchowski, A. (2013). Application of cyclic CBR test to approximation of subgrade displacement in road pavement. *Acta Scientiarum Polonorum, Architectura*, 12 (1), 51–61.

- Sas, W., Gluchowski, A., Szymański, A. (2014). Cyclic Behavior of Recycled Concrete Aggregate Improved with Lime and Gypsum Addition. Fourth International Conference on Geotechnique "Construction Materials and Environment", Brisbane, 196–201.
- Sas, W., Gabryś, K., Soból, E., Szymański, A. (2016). Dynamic Characterization of Cohesive Material Based on Wave Velocity Measurements. *Applied Sciences*, 6 (2), 49.
- Seed, H.B., Chan, C.K., Monismith, C.L. (1955). Effects of repeated loading on the strength and deformation of compacted clay. *Highway Research Board Proceedings*, 34, 541–558.
- Sun, L., Gu, C., Wang, P. (2015). Effects of cyclic confining pressure on the deformation characteristics of natural soft clay. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 78, 99–109.
- Świdziński, W., Mierczyński, J. (2015). Reakcja nawodnionych osadów poflotacyjnych na obciążenia cykliczne w warunkach bez odpływu wody z porów. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 36 (3), 466–473.
- Tang, Y.Q., Cui, Z.Q., Zhang, X., Zhao, S.K. (2008). Dynamic response and pore pressure model of the saturated soft clay around the tunnel under vibration loading of Shanghai subway. *Engineering Geology*, 98 (3/4), 126–132.
- Vucetic, M., Dobry, R. (1988). Degradation of marine clays under cyclic loading. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 114 (2), 133–149.
- Wang, J., Guo, L., Cai, Y., Xu, C., Gu, C. (2013). Strain and pore pressure development on soft marine clay in triaxial tests with a large number of cycles. *Ocean Engineering*, 74, 125–132.
- Wichtmann, T., Niemunis, A., Triantafyllidis, T. (2005). Strain accumulation in sand due to cyclic loading: drained triaxial tests. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25 (12), 967–979.
- Zhou, J., Gong, X-N. (2001). Strain degradation of saturated clay under cyclic loading. *Canadian Geotechnical Journal*, 38 (1), 208–212.

THE COHESIVE SOIL CYCLIC TRIAXIAL LOADING IN UNDRAINED CONDITIONS

Abstract. Cyclic loads frequently are a non-destructive operation. The resulting deformations of the cyclic load is different from the static load deformation. The reaction of the soil to cyclic loading requires a different description because of the possibility to differentiate the size of plastic deformation and elastic in one load cycle. The reaction of cyclically loaded cohesive soil is affected by many factors such as the degree of saturation, over-consolidation ratio or density. Conditions in which the soil is subjected to a load such as the size of the principal stress (σ_3), value of the deviatoric stress (q_{max}) or stress amplitude (σ_d) in the case of repeated loads lead to different reaction cohesive soil. The article presents results of research on cohesive soil namely sandy – silty caly. The study was conducted using a cyclic triaxial apparatus. The objective of this study was to characterize the stress causes a different reaction cohesive soil. The article presents the methodology of research and analysis of the behavior of the soil. Also it proposed empirical equation for determining the growth of plastic deformation in subsequent cycles load.

Key words: cyclic loading, plastic strain, undrained conditions, shakedown criterion

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 31.08.2016

Cytowanie: Gluchowski, A., Sas, W. Bąkowski, J., Szymański, A. (2016). Obciążenia cykliczne gruntu spoistego w warunkach bez odpływu. *Acta Sci. Pol. Architectura*, 15 (4), 57–77.