

Charakterystyka odkształceniowa gruntu spoistego obciążonego cyklicznie w warunkach bez odpływu wody z porów

Dr inż. Andrzej Głuchowski, dr inż. Emil Soból, prof. dr hab. Alojzy Szymański, dr hab. inż. Wojciech Sas
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

Grunty spoiste normalnie skonsolidowane stanowią podłoże gruntowe większości budowli w północnej i centralnej Polsce. Grunty te, ze względu na swoją genezę, często mają niekorzystne właściwości (wysoka plastyczność) i znajdują się w stanie częściowego lub pełnego nasycenia wodą. Praktyka wskazuje, że dobrym zabiegiem jest zagęszczenie mechaniczne tych gruntów, przez co otrzymuje się większą gęstość objętościową i wskaźnik zagęszczenia. Możliwość zagęszczenia tego rodzaju gruntów wynika ze składu uziarnienia, który zawiera dużo frakcji piaszczystej tworzącej szkielet gruntowy i frakcję pylastą oraz ilową, które wypełniają pory gruntowe wytworzone przez frakcję piaszczystą. Z punktu widzenia projektanta konstrukcji drogowej lub innej konstrukcji narażonej na działanie eksploatacyjnych obciążeń cyklicznych należałoby unikać tego rodzaju obciążeń transmitowanych w głąb spoistego podłoża gruntowego. Niemniej jednak, takie postępowanie wiąże się ze zwiększeniem miąższości nasypu, a przez to z wydłużeniem czasu konsolidacji i narażeniem konstrukcji na nierównomierne osiadania. Dobrym rozwiązaniem w takim przypadku jest dopuszczenie do przeniesienia obciążenia cyklicznego na podłoże gruntowe. Jed-

nak, aby być pewnym, że dodatkowe obciążenie nie spowoduje osiadania podłoża gruntowego i przez to przekroczenia stanu granicznego użyteczności, należy scharakteryzować reakcję gruntu spoistego na tego rodzaju obciążenie. Aby odpowiedzieć na pytanie, jaką reakcję gruntu spoistego w postaci przemieszczenia wywoła obciążenie cykliczne, przedstawiono w tym artykule wyniki badań gruntu spoistego w cyklicznym aparacie trójosiowego ściskania. Badania przeprowadzono na gruncie zagęszczonym metodą Proctora w warunkach zbliżonych do wilgotności optymalnej. Następnie grunt skonsolidowano anizotropowo oraz wykonano kilkanaście tysięcy cykli obciążenia.

ZJAWISKO OBCIĄŻENIA CYKLICZNEGO W KONSTRUKCJI DROGOWEJ

Przed przystąpieniem do badań laboratoryjnych gruntów spoistych poddanych obciążeniu cyklicznemu należy rozważyć rozkłady naprężeń *in situ* w podłożu gruntowym zbudowanym z gruntu spoistego. Przeprowadzone przez [10, 16] badania

podłoża gruntowego obciążonego ruchem kołowym na różnych głębokościach w profilu gruntowym pozwoliły na scharakteryzowanie stanu naprężenia. Określono, że na głębokości 0,5 m poniżej powierzchni terenu obciążenie gruntu spoistego kołem wywołującym naprężenie 44,5 kPa (pojazdem o masie 50 ton) będzie skutkowało wartością naprężenia równą 40 kPa, a na głębokości 1,5 m – 18 kPa. Według tych badań można stwierdzić, że przedział naprężeń pionowych działających na podłoże gruntowe nie będzie większy niż 40 kPa. Grunty w takich warunkach są często obciążone przy różnych częstotliwościach. Wang i in. [16] stwierdzają, że częstotliwości przejazdu kolei metra koncentrują się w dwóch zakresach; $2,4 \div 2,6$ Hz i $0,4 \div 0,6$ Hz. W przypadku pojazdów poruszających się z prędkością 30 km/h częstotliwość obciążenia wynosi około 1 Hz. Fundamenty przemysłowe mogą być obciążone z różną częstotliwością, która zależy od czasu oscylacji maszyny, jej masy itd. Przyjmuje się, że wartości tych częstotliwości zmieniają się w granicach od 0,1 Hz do 50 Hz [3, 17]. W związku z tym, autorzy zdecydowali się wybrać w tej pracy stałą wartość częstotliwości f , wspólną dla wszystkich wyżej wymienionych zastosowań równą 1,0 Hz.

ODKSZTAŁCALNOŚĆ GRUNTÓW SPOISTYCH OBCIĄŻONYCH CYKLICZNIE

Zjawisko deformacji gruntów obciążonych cyklicznie obserwuje się jako akumulację odkształceń plastycznych ośrodka gruntowego od pierwszego cyklu obciążenia. Wielkość odkształceń plastycznych w kolejnych cyklach jest zwykle coraz mniejsza [1, 7, 8, 9] dla małych wartości naprężenia pionowego. Pierwszą propozycją opisu tego zjawiska było zaproponowane przez Barksdale [1, 2] równanie uzależniające sumę odkształceń plastycznych od liczby cykli. Swoją propozycję oparł na badaniach przeprowadzonych na gruntach niespoistych obciążonych 10^5 razy. Równanie to ma następującą postać (1):

$$\varepsilon_p = a + b \cdot \log(N) \quad (1)$$

gdzie:

ε_p – odkształcenie plastyczne w cyklu N ,
 a, b – stałe wyznaczone na podstawie badań,
 N – numer cyklu.

Dalsze badania Barksdale pozwoliły na modyfikację równania (1). Równanie to, zakładało liniową zależność odkształcenia plastycznego ε_p w argumentie liczby cykli N na wykresie podwójnie logarytmicznym (2):

$$\log(\varepsilon_p) = a + b \cdot \log(N) \quad (2)$$

Kolejne prace skupiały się na znalezieniu zależności akumulacji odkształceń plastycznych wraz z liczbą cykli od takich czynników jak: naprężenie dewiatorowe, obrót kierunków naprężeń głównych czy od wartości naprężenia konsolidacji σ'_v , a także wilgotności i zawartości frakcji ilastej [9, 19].

Prace, które skupiały się na analizie przebiegu akumulacji odkształceń plastycznych podłoża gruntowego pod fundamentami przemysłowymi wraz z liczbą cykli, doprowadziły do zaproponowania przez Goldscheidera i Gudehusa [5] trzech rodzajów reakcji gruntu na obciążenie cykliczne. Na rys. 1 przedstawiono schematycznie zaproponowane charakterystyki odkształcenia plastycznego ε_p lub deformacji plastycznych d w funkcji liczby cykli N .

Dla przypadku przedstawionym na rys. 1a, przy wysokiej wartości obciążenia cyklicznego (ponad 80% maksymalnej wartości wytrzymałości na ścinanie), obserwuje się stały przyrost odkształcenia. Po kilku cyklach obciążenia dochodzi do zniszczenia konstrukcji posadowionej na tego rodzaju podłożu gruntowym. Przy niskiej wartości obciążenia cyklicznego można z kolei zaobserwować odkształcenia plastyczne w ciągu kilku pierwszych cykli obciążenia. Odkształcenia te jednak szybko zmniejszają swoją wartość i ostatecznie nie obserwuje się ich w kolejnych cyklach obciążenia. Reakcja tego rodzaju nazywana jest dostosowaniem, a grunt ulegający temu zjawisku po początkowym okresie akumulacji deformacji plastycznych będzie przejawiał właściwości ciała sprężystego (rys. 1b) [4, 11, 21, 22]. Trzecim rodzajem reakcji gruntu jest wygaszanie odkształceń. W tym przypadku grunt poddany obciążeniu cyklicznemu będzie akumulował deformacje plastyczne, jednak ich wartość w kolejnych cyklach będzie coraz mniejsza. Nieznana jest liczba cykli, po których akumulacja deformacji plastycznych zatrzyma się (rys. 1c).

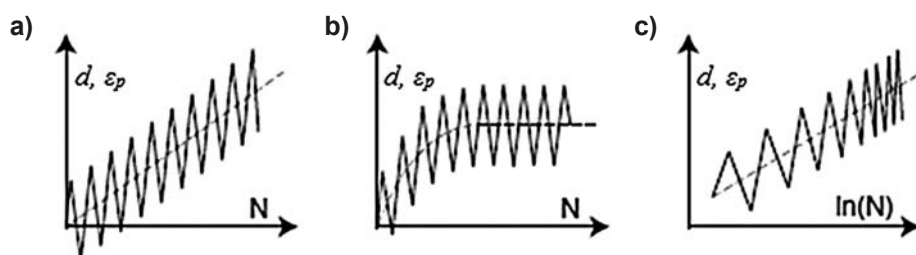
Wraz z rozwojem wiedzy na temat reakcji gruntu na obciążenie cykliczne zaproponowano kolejne modele, w tym hiperboliczny model, w którym wartość odkształcenia plastycznego dążyła do pewnej asymptoty [8, 11, 20]. Przykładem tego rodzaju modelu jest model zaproponowany przez Paute [12] (3):

$$\varepsilon_p^* = A \left(1 - \left(\frac{N}{100} \right)^{-B} \right) \quad (3)$$

gdzie:

ε_p^* – osiowe względne odkształcenie plastyczne w cyklu $N = 100$ traktowanym jako zerowy,
 A i B – stałe modelu.

W równaniu (3) parametr A jest maksymalną wartością, jaką może osiągnąć odkształcenie plastyczne [18].



Rys. 1. Schemat reakcji podłoża gruntowego na obciążenie cykliczne fundamentów
 a) nadmierny przyrost odkształceń – zniszczenie, b) dostosowanie, c) wygaszanie [19]

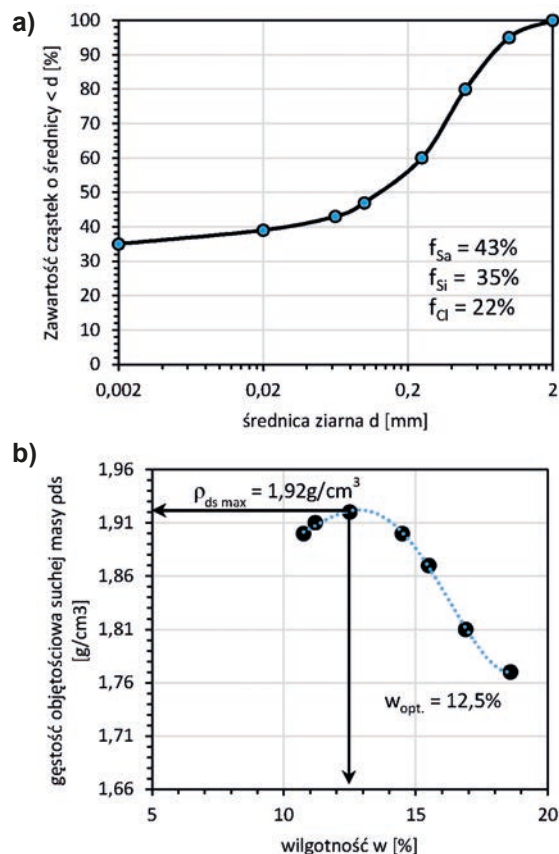
MATERIAŁY I METODY

Na podstawie analizy sitowej badanego gruntu wynika, że grunt ten stanowi mieszaninę frakcji piaskowych, pyłowych i ilastych, z dominacją frakcji piaskowej. Analizę sitową wykonano zgodnie z obowiązującymi normami [13]. Rozpoznano grunt spoisty jako glinę ilastą (sasiCl) na podstawie (krajowego trójkąta [14]). Wyniki badania przedstawiono na rys. 2a. Badania granic Atterberga pozwoliły na wyznaczenie granicy płynności $w_L = 38,7\%$ i granicy plastyczności $w_p = 15,2\%$. Na tej podstawie określono wartość wskaźnika plastyczności $I_p = 23,5\%$ oraz aktywność koloidalną $A_c = 1,07$, co klasyfikuje ten grunt jako utwór lodowcowy. Wszystkie rodzaje gruntu spoistego znajdują się w pobliżu linii średnich wartości wskaźników plastyczności, najczęściej spotykanych gruntów spoistych w Polsce [20]. W związku z powyższym, klasyfikując spoistość badanego gruntu, można go zaklasyfikować jako grunt spoisty ciężki ($f_i < 30\%$ i $I_p < 30\%$). Grunt ten pobrano z głębokości około 1,5 m pod powierzchnią terenu, gdzie wykonywano konstrukcję drogową na terenie Warszawy.

Badania zagęszczalności przeprowadzono za pomocą metody Proctora [15], określono gęstości objętościowe szkieletu gruntowego ρ_d i ustalono wilgotność, przy której uzyskano maksymalną gęstość objętościową szkieletu gruntowego $\rho_{d\max}$ równą $1,92 \text{ g/cm}^3$ nazywaną wilgotnością optymalną w_{opt} równą $12,5\%$. Wyniki badania Proctora przedstawiono na rys. 2b.

W pełni nasyconą glinę ilastą poddano obciążeniu powtarzalnemu w cyklicznym aparacie trójosiowego ściskania, na próbkach o wymiarach $70 \times 140 \text{ mm}$. Badania wykonano na próbkach przerobionych, zagęszczonych metodą Proctora przy energii zagęszczania równej $E_z = 0,59 \text{ J/cm}^3$. Próbkę gruntu w pierwszym etapie badania podano nasycaniu metodą ciśnienia wyrównawczego. Nasycenie próbki kontrolowane było poprzez określenie wartości współczynnika Skemptona B . Próbkę gruntu uznano za wystarczająco nasyconą przy wartości $B = 0,95$.

Każdą próbkę następnie poddano konsolidacji anizotropowej lub izotropowej. Początkowy stan naprężenia badanego gruntu i właściwości fizyczne próbek gruntu przedstawiono w tabl. 2. Po zakończeniu etapu konsolidacji przystąpiono do zadawania obciążenia cyklicznego gruntu.



Rys. 2. Właściwości fizyczne gruntu spoistego
a) krzywa uziarnienia, b) krzywa zagęszczalności

Obciążenie powtarzalne wykonywano przy stałej częstotliwości $f = 1 \text{ Hz}$ oraz przy stałej wartości ciśnienia w komorze aparatu trójosiowego ściskania. Założoną wartość amplitudy naprężenia wykonano przy sinusoidalnej zmianie opisanej jako:

$$q = q_m + \Delta\sigma_1 \sin(\omega t) \quad (4)$$

gdzie:

$\omega = 2\pi f$ i $\Delta\sigma_1$ – amplituda pionowej składowej naprężenia,

q_m – wartość początkowa obciążenia, która jest stała podczas całego programu obciążenia cyklicznego.

Szczegółowe wartości początkowe przedstawiono w tabl. 1.

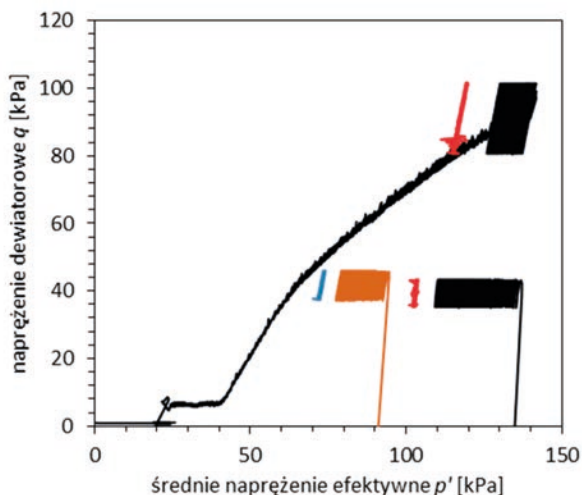
Tabl. 1. Właściwości fizyczne próbek gruntu spoistego oraz plan obciążenia w cyklicznym aparacie trójosiowego ściskania

Właściwości	1.1	1.2	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5
Wilgotność w [%]	12,62	14,33	12,34	11,14	12,66	6,07	9,38
Gęstość objętościowa suchej masy ρ_d [g/cm³]	1,95	1,89	1,96	1,92	1,94	2,10	1,91
Początkowy wskaźnik porowatości e_0 [–]	0,345	0,412	0,333	0,399	0,379	0,276	0,400
Plan obciążenia powtarzalnego							
Maksymalna wartość naprężenia dewiatorowego $q_{\max}$ [kPa]	46,0	43,2	117,3	100,9	101,5	169,9	79,6
Minimalna wartość naprężenia dewiatorowego $q_{\min}$ [kPa]	37,0	35,2	96,0	74,0	80,7	138,3	53,1
Średnie naprężenie dewiatorowe q_m [kPa]	41,5	39,2	106,7	87,5	91,1	154,1	66,4
Amplituda naprężenia $\Delta\sigma_1$ [kPa]	4,5	4,0	10,7	13,5	10,4	15,8	13,3
Efektywne naprężenie boczne σ'_3 [kPa]	90,0	135,0	65,0	125,0	139,7	94,2	44,9
Współczynnik naprężenia cyklicznego CSR [–]	0,256	0,160	0,902	0,403	0,363	0,901	0,886

WYNIKI BADAŃ OBCIĄŻENIA CYKLICZNEGO W WARUNKACH TRÓJOSIOWEGO ŚCISKANIA

Badania w cyklicznym aparacie trójosiowego ściskania przeprowadzono na pięciu próbkach skonsolidowanych anizotropowo oraz dwóch próbkach skonsolidowanych izotropowo. We wstępie literaturowym zaznaczono, że grunt spoisty obciążony cyklicznie będzie mieć maksymalną amplitudę w zakresie do 18 kPa na głębokości 1,5 m. W celu lepszego scharakteryzowania badanego gruntu niż w podanym zakresie zdecydowano się na szerszy plan badawczy. Na rys. 3 przedstawiono ścieżki naprężenia z badania w cyklicznym aparacie dla próbek skonsolidowanych dwiema metodami.

Ze względu na to, że wszystkie badania wykonano w warunkach bez odpływu, ścieżka naprężenia we wszystkich przypadkach zmierza w kierunku osi naprężenia dewiatorowego, co oznacza, że wzrasta ciśnienie wody w porach. W tego rodzaju warunkach doszło do akumulacji odkształcenia plastycznego, którego przebieg przedstawiono na rys. 4. Przyrost odkształceń plastycznych w przypadku próbek skonsolidowanych izotropowo wyniósł poniżej 1%, gdzie dla próbki 1.2 zaobserwowano przyrost odkształcenia w cyklu 10000 równy 0,544%, a w przypadku próbki 1.1 przyrost odkształceń plastycznych był równy 0,856%. W tym przypadku pierwszy cykl obciążenia miał największy wpływ na ogólną wartość zakumulowanego odkształcenia (0,705% dla próbki 1.1 i 0,396% dla próbki 1.2). Grunty te następnie reagowały na obciążenie cykliczne w sposób opisany w pracach [4,5,6] jako odkształcenia wygaszanie. W przypadku próbek gruntu skonsolidowanego w sposób anizotropowy można rozpoznać podobną charakterystykę jak w przypadku konsolidacji izotropowej w badaniach od 2.2 do 2.4. Badania 2.1 i 2.5 przebiegały w sposób odmienny od poprzednich. W badaniach tych zaobserwowano duży przyrost odkształceń plastycznych w porównaniu do pozostałych próbek gruntu. Jako przyczynę takiej reakcji można przyjąć dużą wartość współczynnika naprężenia cyklicznego CSR, którą zdefiniowano jako $CSR = q_{max} / \sigma'_3$, dodatkowo należy zaznaczyć, że w przypadku próbek gruntu 2.1 i 2.5 wartość początkowego wskaźnika porowatości e_0 jest wysoka.



Rys. 3. Wybrane ścieżki naprężenia z cyklicznego badania trójosiowego (próbki 1.1, 1.2 i 2.3)

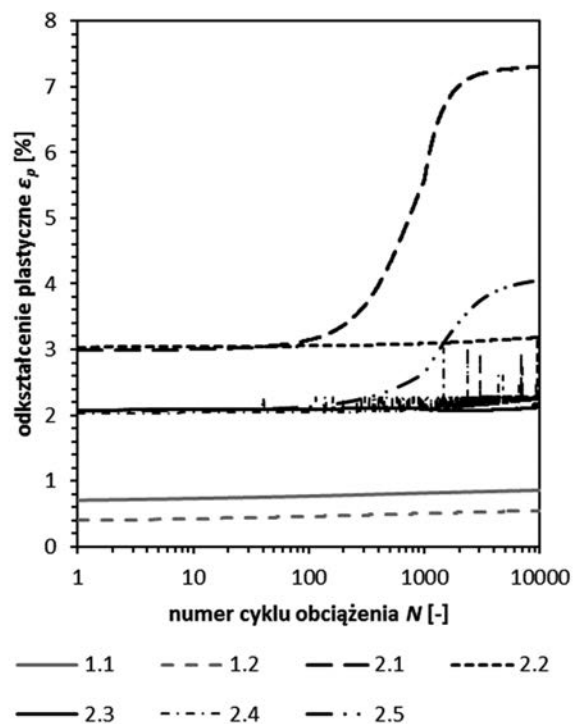
Dla przedstawionych wyników badań wykonano analizę przyrostu odkształceń plastycznych w postaci charakterystyki prędkości odkształceń plastycznych w kolejnych cyklach, w których za krok czasowy przyjęto numer cyklu. Prędkość odkształcenia w N -tym cyklu jest zdefiniowana jako:

$$\Delta \varepsilon_{pN_i} = \frac{\varepsilon_{pN} - \varepsilon_{pN_i}}{N - N_i} \quad (5)$$

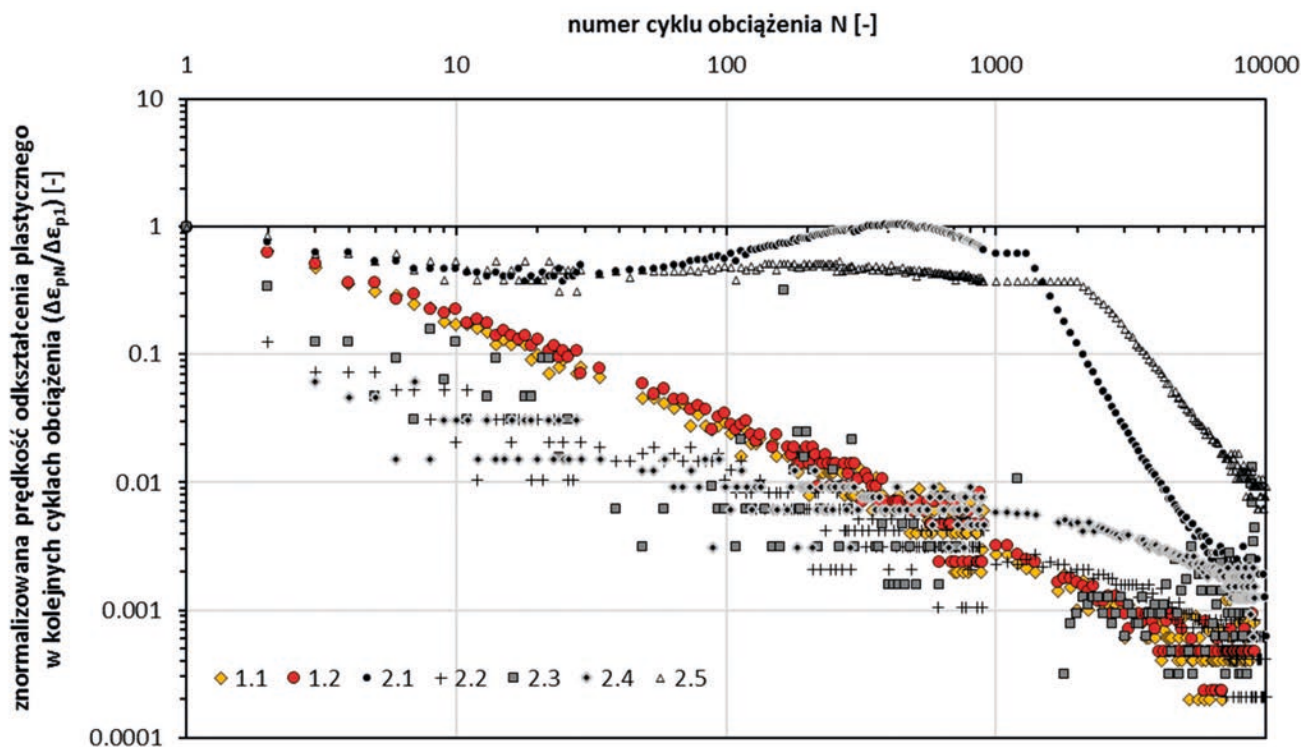
gdzie:
 $N_i < N$.

Dla otrzymanych w ten sposób wyników analizy przeprowadzono ich normalizację w stosunku do przyrostu odkształcenia w pierwszym cyklu $\Delta \varepsilon_{pN} / \Delta \varepsilon_{p1}$. Wyniki przedstawiono na rys. 5.

W przypadku próbek gruntu skonsolidowanych izotropowo można zaobserwować liniową charakterystykę na podwójnie logarytmicznym wykresie. Jest to bardzo dobry przykład opisany jako wygaszanie, gdzie wraz z kolejnymi cyklami obciążenia maleje wartość przyrostu odkształceń plastycznych. Dla gruntu skonsolidowanego anizotropowo charakterystyka ta nie ma tak wyraźnej liniowej przebiegu, nawet w przypadku próbek, dla których nie zaobserwowano dużego przyrostu odkształceń plastycznych. Niezależnie od sposobu skonsolidowania gruntu po 1000 cyklach obciążenia można zaobserwować wyraźną tendencję stałego spadku wartości odkształceń plastycznych. Z tego wynika też, że na wartość przyrostu odkształcenia plastycznego mają wpływ przede wszystkim pierwsze cykle obciążenia. Próbkę skonsolidowaną izotropowo można w tym przypadku uznać jako materiał wzorcowy, w którym proces konsolidacji przebiegał w sposób jednorodny we wszystkich kierunkach. Z tego powodu charakterystykę znormalizowanej prędkości odkształcenia plastycznego dla próbek skonsolidowanych izotropowo wykorzystano jako granicę między reakcją



Rys. 4. Charakterystyka przyrostu odkształceń plastycznych dla próbek gruntu skonsolidowanych izotropowo i anizotropowo



Rys. 5. Charakterystyka znormalizowanej prędkości odkształcenia plastycznego w kolejnych cyklach obciążenia

gruntu na obciążenie cykliczne w postaci nadmiernego przyrostu odkształceń plastycznych. Równanie opisujące tę granicę ma następującą postać:

$$\frac{\Delta \varepsilon_{pN}}{\Delta \varepsilon_{p1}} = \frac{2}{N+1} \quad (6)$$

Na podstawie powyższego równania można prognozować reakcję gruntu na obciążenie cykliczne przez analizę kilku pierwszych cykli obciążenia. Zagęszczony grunt spoisty skonsolidowany anizotropowo będzie reagował na obciążenie cykliczne w postaci nadmiernych odkształceń plastycznych, jeżeli spełniona będzie poniższa nierówność:

$$\frac{\Delta \varepsilon_{pN}}{\Delta \varepsilon_{p1}} > \frac{2}{N+1} \quad (7)$$

Ze względu na to, że do określenia charakterystyki zmiany znormalizowanej prędkości odkształcenia plastycznego wystarczy około 10 cykli obciążenia, równanie (7) można uprościć do następującej postaci:

$$\frac{\Delta \varepsilon_{p10}}{\Delta \varepsilon_{p1}} > 0,1818 \quad (8)$$

Na podstawie powyższej nierówności można prognozować, czy w analizowanym przypadku obciążenia powtarzalnego dojdzie do nadmiernego przyrostu odkształceń plastycznych.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Badania reakcji zagęszczonego gruntu spoistego na obciążenie cykliczne w warunkach bez odpływu wody z porów pozwoliły na scharakteryzowanie obrazu tej reakcji w przypadku konsolidacji izotropowej i anizotropowej. Dla próbek obciążonych

nadmiernie zaobserwowano większe odkształcenia plastyczne w porównaniu do próbek obciążonych z mniejszą amplitudą obciążenia cyklicznego. Analiza przyrostu odkształceń plastycznych pozwoliła na wyznaczenie charakterystyki prędkości obciążenia plastycznego w kolejnych cyklach obciążenia.

Uzyskane wyniki badań przeprowadzone na próbkach gruntu spoistego wskazują, że zarówno w przypadku gruntu skonsolidowanego izotropowo, jak i anizotropowo, można zaobserwować zjawisko wygaszania odkształceń plastycznych a tym samym spadek wartości odkształcenia plastycznego wraz z wzrostem liczby cykli. Grunt skonsolidowany izotropowo rozpatrzono w tym artykule jako grunt, którego charakterystyka prędkości odkształcenia plastycznego jest granicą pomiędzy reakcją gruntu spoistego w postaci dużej lub małej prędkości odkształceń plastycznych gruntu skonsolidowanego anizotropowo. Na tej podstawie wyznaczono charakterystykę prędkości odkształcenia plastycznego gruntu normalnie skonsolidowanego i na jej podstawie zaproponowano kryterium, które po 10 cyklach obciążenia pozwala prognozować, jaki będzie przebieg przyrostu odkształceń plastycznych. Należy podkreślić, że kryterium to wymaga jeszcze zdecydowanego potwierdzenia kolejnymi badaniami.

LITERATURA

1. Barksdale R. D.: Laboratory Evaluation of Rutting in Base Course Materials. 3rd International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, (Vol. 1), London Sept. 1972.
2. Barksdale R. D., Alba J., Khosla N. P., Kim Y. R., Lambe P. C., Rahman M. S.: Laboratory determination of resilient modulus for flexible pavement design. Final Rep., National Cooperative Highway Research Program 1-28 Project, 1997.

3. Das B. M., Ramana, G. V.: Principles of Soil Dynamics. Cengage Learning. Tang, L. S., Chen, H. K., Sang, H. T., Zhang, S. Y., Zhang, J. Y. (2015) Determination of traffic-load-influenced depths in clayey subsoil based on the shakedown concept, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 77, 2010
4. Głuchowski A., Soból E., Szymański A., Sas W.: Undrained Pore Pressure Development on Cohesive Soil in Triaxial Cyclic Loading. *Applied Sciences*, 9, 3821, 2019.
5. Goldscheider M., Gudehus G.: Einige bodenmechanische Probleme bei Kusten und Offshore-Bauwerken. *Vortrage zur Baugrundtagung. DGEG*, 1976.
6. Karg C.: Modelling of Strain Accumulation Due to Low Level Vibrations in Granular Soil. *Praca Doktorska, Gent*, 2007.
7. Lekarp F., Dawson A.: Modelling permanent deformation behavior of unbound granular materials. *Construction and Building Materials*, 12(1), 1998.
8. Lekarp, F.: Resilient and Permanent Deformation Behaviour of Unbound Aggregates under Repeated Loading. *Kungliga Tekniska Högskolan (KTH): Stockholm*, 1999.
9. Lekarp F., Isacsson U., Dawson A.: State of the Art. I: Resilient Response of Unbound Aggregates. *Journal of Transportation Engineering*, 126(1), 2000.
10. Miller G. A., The S. Y., Li D., Zaman M. M.: Cyclic Shear Strength of Soft Railroad Subgrade. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE 126(2), 2000.
11. Pande G. N.: Shakedown of foundations subjected to cyclic loads. *Soil Mechanics – Transient and Cyclic Loads*, (Editors: G. N. Pande and O. C. Zienkiewicz), 1982.
12. Paute J. L., Hornych P., Benaben J. P.: Repeated load triaxial testing of granular materials in the French Network of Laboratories des Ponts et Chaussées. *Flexible Pavements*, Edited by A.G. Correia, *Proceedings, European Symposium on Flexible Pavements, Euroflex*, 1983, Balkema, Rotterdam, 1996.
13. PKN-CEN ISO/TS 17892-4:2009 Badania geotechniczne: Oznaczanie składu granulometrycznego.
14. PN-EN ISO 14688-2:2006 Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania.
15. PN-EN 13286-2:2007 Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym – Część 2: Metody określenia gęstości i zawartości wody. Zagęszczenie metodą Proctora.
16. Wang J., Liu S., Yang W.: Dynamics shakedown analysis of slab track substructures with reference to critical speed. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 106, 2018.
17. Werkmeister S.: Permanent deformation behaviour of unbound granular materials in pavement constructions, *Praca Doktorska, Dresden University of Technology, Dresden*, 2003.
18. Wichtmann T., Niemunis A., Triantafyllidis T.: Strain accumulation in sand due to cyclic loading: drained triaxial tests. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 25(12), 2005.
19. Wiłun, Z.: *Zarys Geotechniki*, WŁiK, Warszawa, 2010.
20. Wolff H., Visser A.T.: Incorporating elasto-plasticity in granular layer pavement design. *Proceedings, Instn. Civil Engineers Transportation Journal* 105, 1994.
21. Xiao Y., Zheng K., Chen L., Mao J.: Shakedown analysis of cyclic plastic deformation characteristics of unbound granular materials under moving wheel loads. *Construction and Building Materials*, 167, 2018.