

Właściwości tłumienia naturalnych gruntów spoistych w zakresie małych odkształceń

Dr inż. Wojciech Sas, dr inż. Katarzyna Gabryś, prof. dr hab. inż. Alojzy Szymański, mgr inż. Emil Soból
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

Jednym z nurtów rozwojowych inżynierii jest zagadnienie odpowiedzi gruntu na zadawane obciążenia dynamiczne w zakresie małych odkształceń. Małe odkształcenia na styku konstrukcji i gruntu powstają w wyniku wibracji rozchodzących się w gruncie, których źródłem może być jadący samochód, prace związane z budową nowej konstrukcji w bezpośrednim sąsiedztwie z analizowaną, prace górnicze, które mogą prowadzić do wstrząsów sejsmicznych o magnitudzie dochodzącej do 6 [20] lub pociąg metra poruszający się pod powierzchnią terenu. Zagadnienia, o których mowa są bardzo ważne na terenach Śląska i gęstej zabudowy miejskiej. Tego rodzaju wibracje mogą prowadzić do powstania odkształceń na styku grunt – konstrukcja osiągających wielkość $10^{-3}\%$ i mniejszych [13]. Rosnąca świadomość tego zagadnienia doprowadziła do szybkiego rozwoju laboratoryjnych technik badawczych mających na celu poznanie

charakterystyk naprężenie – odkształcenie w wyżej wymienionym zakresie deformacji [5, 12, 14]. Wiarygodne określenia dynamicznych parametrów gruntowych pozwalają na dokładniejszą analizę numeryczną, np. tunelu metra [9] lub gazociągu [17]. Powszechnie badanymi i wykorzystywanymi właściwościami dynamicznymi jest moduł ścinania G i moduł sprężystości podłużnej E . Niewielu badaczy podejmuje się badań i interpretacji współczynnika tłumienia D , który również jest parametrem opisującym dynamiczne właściwości gruntu.

Prezentowany artykuł dotyczy właściwości tłumienia gruntu spoistego, jakim jest il pylasto-piaszczysty. Autorzy dokonali przeglądu literatury, zaprezentowali urządzenie firmy GDS, na którym wykonywali badania własne i sporządzili wnioski na podstawie uzyskanych wyników.

PRZEGLĄD LITERATURY

Pierwsze użycie kolumny rezonansowej do badań dynamicznych właściwości gruntów miało miejsce w 1937 roku w Japonii za sprawą inżynierów Ishimoto i Iida. Jednak popularyzacja oraz ulepszanie metodyki badawczej przypadła dopiero na lata sześćdziesiąte XX wieku. W tym okresie zajęli się tym głównie: Drnevich, Hall, Richar i Black. W latach siedemdziesiątych i osiemdziesiątych głównymi prekursorami w tej dziedzinie byli: Anderson, Allen i Stokoe [19].

Badanie w kolumnie rezonansowej jest uważane obecnie za jedno z najbardziej wiarygodnych sposobów pozyskiwania dynamicznych parametrów gruntowych. Jednak znaków zapytania związanych z przeprowadzaniem badania i kalkulacją parametrów nadal jest wiele, o czym świadczą liczne prace powstające na ten temat.

Standardowo przez grunt w kolumnie rezonansowej przepuszcza się falę sinusoidalną. W 1996 roku Zhang badał wpływ kształtu fali na uzyskiwane wyniki tłumienia. Próbkę suchego piasku były wprawiane w drgania za pomocą fali sinusoidalnej, impulsu i losowego wzbudzenia. Okazało się, że przy małych odkształceniach współczynnik tłumienia D jest taki sam dla wszystkich rodzajów obciążenia. Wzrost deformacji natomiast spowodował pojawienie się znaczących różnic w parametrze D w zależności od kształtu fali. Największe wartości tłumienia uzyskano przy impulsowym wzbudzeniu, a najmniejsze przy sinusoidalnym [21].

Również w 1996 roku przeprowadzono badania wpływu temperatury na dynamiczne parametry gruntów. Przebadano glinę zamrożoną i o temperaturze naturalnej. Na podstawie wykonanych badań stwierdzono, że zamrożona glina ma prawie dwukrotnie wyższy współczynnik tłumienia, a moduł ścinania większy od 30 do 50 razy od gruntu badanego w temperaturze pokojowej [1].

Rok 1998 stał się rokiem przełomowym w badaniach w kolumnie rezonansowej. Wtedy to właśnie Cascante, Santamarina i Yassir [4] zmodyfikowali kolumnę rezonansową tak, aby możliwe było nie tylko skręcanie, ale także i zginanie próbki podczas badania. Był to duży postęp, ponieważ stało się możliwe wyznaczenie prędkości fali podłużnej z wibracji zginających po uprzednim skalibrowaniu urządzenia. Naukowcy badali głównie współczynnik tłumienia D piasków przy wibracjach skrętnych i zginających. Okazało się, że suche próbki mają w obu przypadkach wzbudzenia bardzo zbliżone wartości parametru D , jednak wraz z zwiększaniem wilgotności próbki gruntu tłumienie fal zginających wzrastało, osiągając nawet 3,5 razy większe wartości niż fali skręcających [4].

W 2009 roku Kallioglou [8] zajął się zagadnieniami dotyczącymi dynamiki gruntów organicznych. Badano wpływ zawartości części organicznych na sztywność tych gruntów i współczynnik tłumienia. Na podstawie przeprowadzonych badań wywnioskowano, że jedynie zawartość części organicznych przekraczająca 25% ma istotny wpływ na wartości modułu G i parametru D [8].

O rosnącej popularności badań w kolumnie rezonansowej może świadczyć mnogość wykonywanych w niej badań na różnorodnych materiałach. W 2012 roku Anastasiadis [2] zbadał mieszaninę piasku i gumowych ścinków pochodzących z opon. Dodatek gumy miał znaczący wpływ na parametry dynamiczne takiego materiału. Rok później Wichtmann [18] porównał parametry dynamiczne wulkanicznych gruntów niespoistych i piasków kwarcowych. Badania wykazały, że zależność znormalizowanego modułu ścinania i wskaźnika tłumienia od odkształcenia postaciowego ma bardziej liniowy przebieg w piaskach wulkanicznych. Właściwości dynamiczne piasku kwarcowego zbadano także pod kątem zawartości frakcji poniżej 0,063 mm. Przeprowadzono 130 badań rezonansowych na piaskach o zawartości frakcji drobnej od 0 do 35%. Zauważono znaczne zmniejszenie się wartości modułu G wraz z wzrostem zawartości cząstek o średnicy $d < 0,063$ mm, natomiast krzywa zmniejszania się sztywności badanego materiału ($G_{(v)}/G_{MAX}$) pozostawała niezależna od tej cechy [18].

Mimo intensywnego postępu technik badawczych i rozwoju samej kolumny rezonansowej nadal powstają ulepszenia, które pozwalają badaczom symulowanie bardziej skomplikowanych warunków terenowych. Kolumna rezonansowa z nakładką do gruntów nienasyconych umożliwia badanie sztywności i modelowanie w laboratorium pracy zapór ziemnych i wałów przeciwpowodziowych. Przeprowadzone badania na piasku pylastym [7] wykazały silną zależność częstotliwości rezonansowych od ciśnienia ssania.

Porównywanie wyników z różnych badań dynamicznych doprowadziło do zmodyfikowania kopulek kolumny rezonansowej oraz wyposażenia ich w piezoelementy bender. Stosując takie połączenie, stało się możliwe badanie fali o określonej częstotliwości dzięki mechanizmowi napędzającemu kolumnę rezonansową i odbieranie sygnału w górnej i dolnej części próbki za pomocą elementów bender. Dowiedziono, że tego rodzaju badania mogą być kompletnym narzędziem do badań dynamicznych właściwości gruntów w zakresie małych odkształceń [3].

Na podstawie dokonanego przeglądu literatury wyraźnie widać, że mimo obszernych badań nad dynamicznymi właściwościami gruntu, brakuje prac podejmujących tematykę tłumienia w gruntach spoistych, dlatego autorzy tego artykułu podjęli się tego wyzwania.

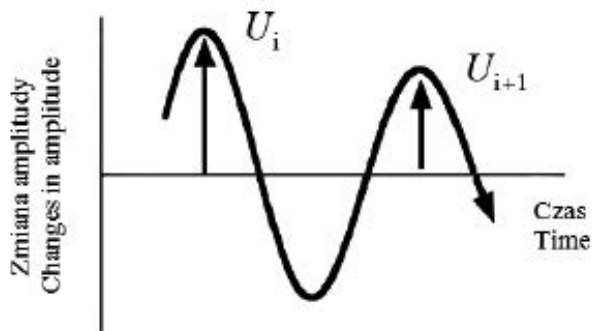
MATERIAŁY I METODY

Materiałem badawczym według [11] był ilt pylasto-piaszczysty (sasiCl), który pobrano z okolic trasy S2 w Warszawie. Właściwości badanego materiału podano w tabl. 1.

Badania w ramach niniejszej pracy wykonano w kolumnie rezonansowej firmy GDS Instruments Ltd., będącej na wyposażeniu Laboratorium Centrum – Wodne Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska SGGW w Warszawie. Urząd-

Tabl. 1. Właściwości fizyczne badanego gruntu

Rodzaj gruntu	w [%]	ρ_s [g/cm ³]	ρ [g/cm ³]	ρ_d [g/cm ³]	e [-]	w_L [%]	w_p [%]	I_p [%]	I_L [-]
Il pylasto-piaszczysty (sasiCl)	17,12	2,67	2,15	1,84	0,45	34,68	13,82	20,86	0,16



Rys. 1. Definicja logarytmicznego dekrementu tłumienia w drganiach harmonicznym [21]

dzienie to jest przykładem kolumny rodzaju „fixed – free”, co oznacza pasywny, utwierdzony spód próbki i aktywną, wprawianą w drgania jej górną część. Omawiana aparatura ma możliwość wprawiania próbki w dwa rodzaje drgań: skrętne (*torsional*), podczas których są zaangażowane cztery magnesy oraz zginające (*flexural*), do których używane są dwie cewki. Istotą badania w kolumnie rezonansowej jest znalezienie takiej częstotliwości, przy której grunt, przy danej amplitudzie, odkształca się najbardziej. Taka częstotliwość jest nazywana częstotliwością rezonansową. Kolejnym krokiem jest badanie tłumienia próbki przy wyznaczonej wcześniej częstotliwości rezonansowej. Grunt jest wprawiany w drgania skrętne lub zginające w czasie określonym przez badacza, a następnie wyłączają się napęd. Wówczas gasnące swobodne drgania są rejestrowane przez akcelerometr w postaci malejących amplitud, tworząc krzywą zaniku swobodnych drgań (rys. 1), z której wyznacza się tzw. dekrement logarytmiczny (σ), a na jego podstawie współczynnik tłumienia D z wzoru:

$$D = \sqrt{\frac{\sigma^2}{4\pi^2 + \sigma^2}}$$

Jedną z kluczowych kwestii jest odpowiedni dobór liczby cykli do wyznaczenia dekrementu logarytmicznego.

Badanie w kolumnie rezonansowej przeprowadzono na walcowej próbce o wymiarach 140×70 mm, po uprzednim nasączeniu i konsolidacji materiału badawczego przy naprężeniu

in situ równym 100 kPa. Następnym krokiem było znalezienie częstotliwości rezonansowych w zakresie amplitud od 0,1 do 0,7 V (skok co 0,1 V). Znając częstotliwości rezonansowe, przystąpiono do badania współczynnika tłumienia D podczas skręcania (*torsional*) i zginania (*flexural*), biorąc pod uwagę czas wprawiania próbki w drganie, który wynosił odpowiednio 2, 4 i 6 s, a także liczba cykli uwzględnianych w obliczeniach wskaźnika tłumienia (od 10 do 50 cykli, skok co 10).

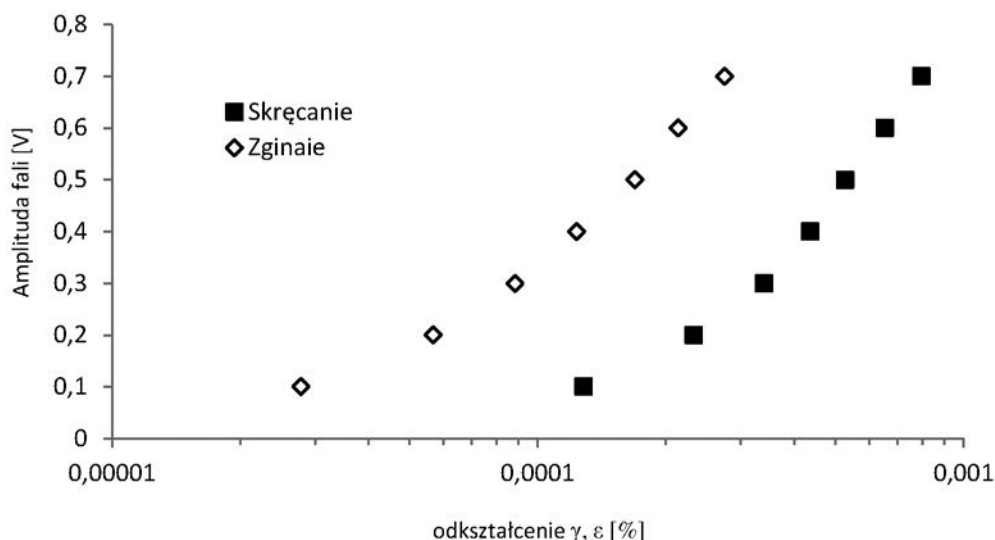
WYNIKI

Wyniki przeprowadzonych badań przedstawiono na rys. 2 ÷ 4. Na rys. 2 przedstawiono zależność amplitudy fali od uzyskanego odkształcenia drgań skręcających i zginających. Widać wyraźnie, że przy takich samych wartościach amplitudy wibracje zginające powodują znacznie mniejsze odkształcenia od drgań skręcających w całym zakresie przebadanych amplitud.

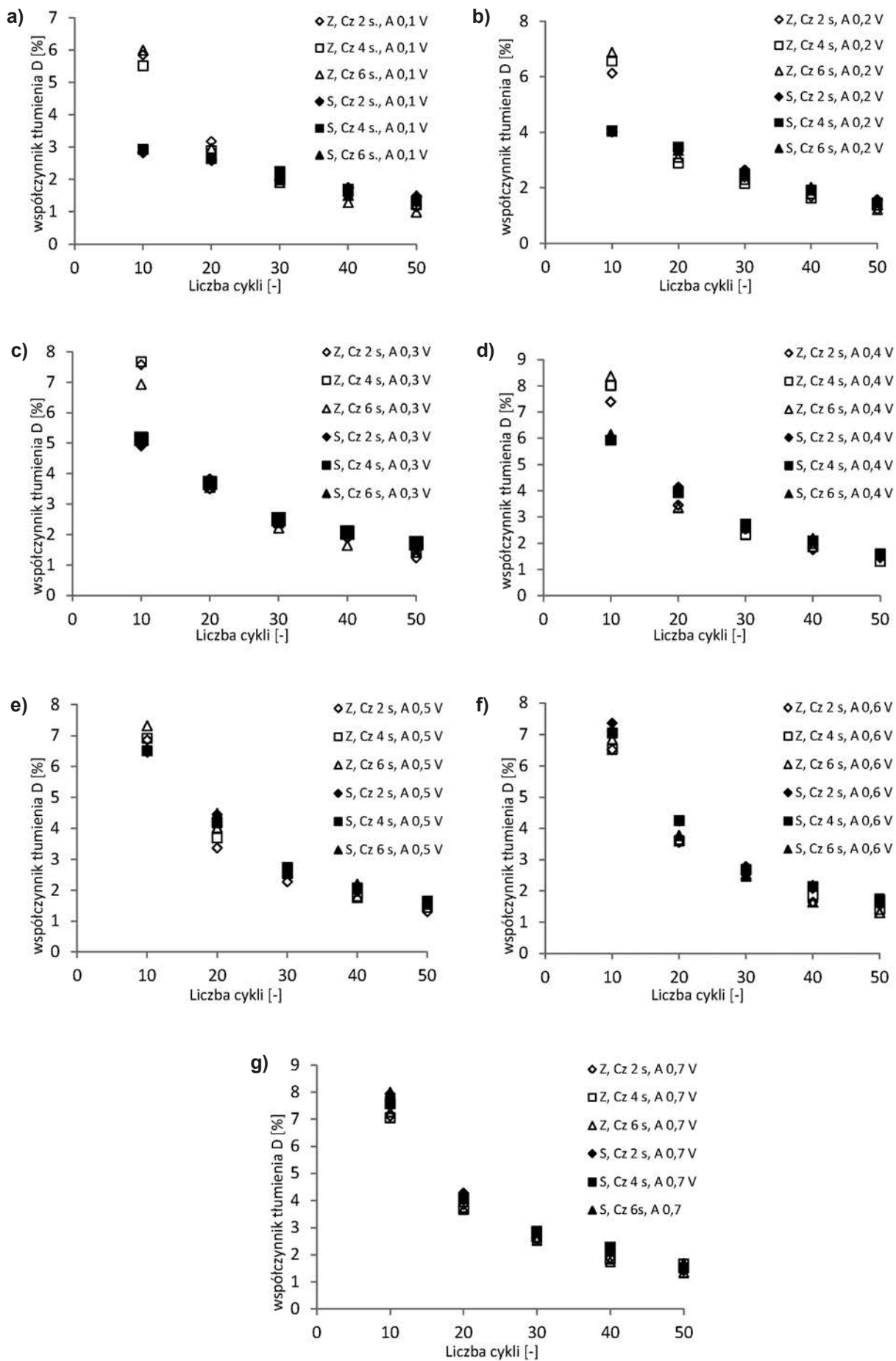
Na rys. 3 a ÷ g przedstawiono zależność uzyskanego współczynnika tłumienia od liczby cykli dla różnych czasów drgań próbki (C_z), dla zginania (Z) i skręcania (S) oraz przy określonej amplitudzie fali (A).

Analizując wykresy na rys. 3 a ÷ d, można zaobserwować, że współczynnik D przy 10 cyklach jest wyraźnie mniejszy przy skręcaniu niż zginaniu. Jednak gdy w obliczeniach uwzględnimy 20 i więcej cykli, uzyskujemy tłumienie o podobnych wartościach, mimo znacznej różnicy w odkształceniach pomiędzy rodzajem drgań. Na rys. 3 e ÷ g uzyskany parametr D w całym zakresie obliczeń, niezależnie od rodzaju wibracji, przyjmuje podobne wartości. Warto zwrócić uwagę, że w całym przebadanym zakresie odkształceń, zarówno przy skręcaniu, jak i przy zginaniu, gdy do obliczania współczynnika tłumienia bierzemy od 30 do 50 cykli, uzyskane wartości D niezależnie od odkształcenia wahają się od 1 do 3%. Warty odnotowania jest także znikomy wpływ czasu wprawiania próbki w drgania na uzyskany parametr D zarówno przy zginaniu, jak i przy skręcaniu.

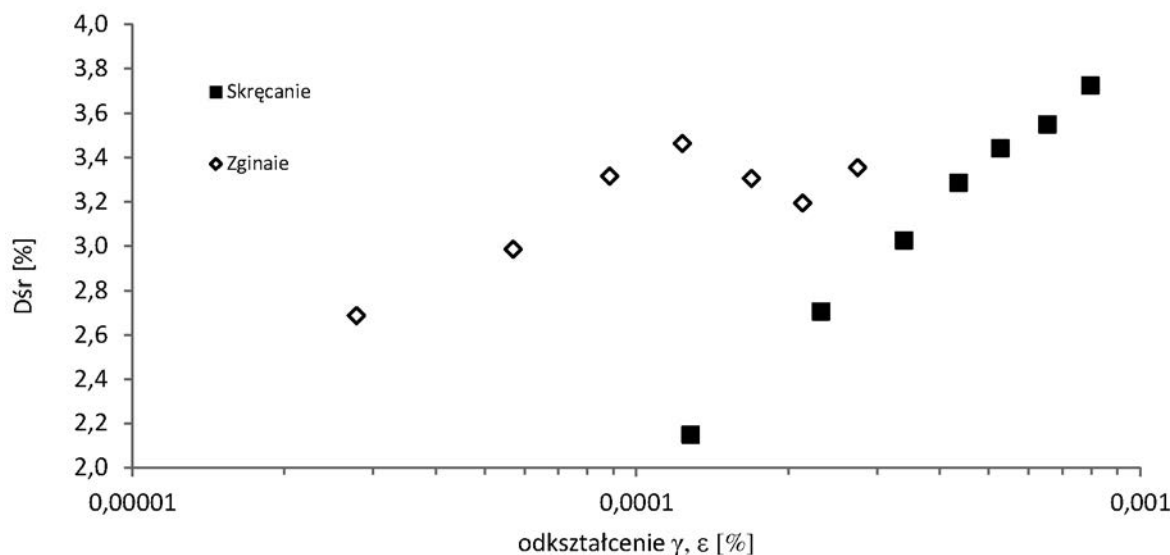
Na rys. 4 zaprezentowano zależność uśrednionych współczynników tłumienia w zależności od odkształcenia podczas badań zginania i skręcania.



Rys. 2. Zależność amplitudy fali od uzyskanego odkształcenia przy wibracjach skręcających i zginających



Rys. 3. Wykresy zależności parametru D od liczby cykli przy zginaniu (Z) i skręcaniu (S), przy różnym czasie drgania (Cz) oraz danych amplitudach (A)



Rys. 4. Zależność średniego współczynnika tłumienia D_{sr} [%] od odkształcenia γ, ϵ [%] przy skręcaniu i zginaniu

Na podstawie rys. 4 można zauważyć ciągły wzrost średniego parametru D przy skręcaniu wraz z przyrostem odkształceń, co znajduje swoje uzasadnienie w literaturze [10]. Przebieg współczynnika tłumienia przy zginaniu jest odmienny i powyżej odkształcenia 0,0001% jego wartość zaczyna zmniejszać się, by przy odkształceniu rzędu około 0,0003 uzyskać ostatecznie wartość w przybliżeniu 3,3%.

WNIOSKI

Dokonany przegląd literatury i przeprowadzone badania tłumienia pozwoliły autorom na wyciągnięcie następujących wniosków:

1. Wibracje zginające powodują znacznie mniejsze odkształcenia niż drgania skręcające przy takiej samej amplitudzie fali.
2. Zakładanie 10 cykli do obliczeń parametru D zawyża jego wartość, ponieważ fala nie jest wytłumiona w pełni.
3. Zakładanie ponad 30 cykli do obliczeń współczynnika tłumienia D zaniża jego wartość, ponieważ powyżej tej wartości fala jest już wytłumiona, a tym samym zmiana amplitudy jest nieznaczna.
4. Autorzy uważają, że odpowiednia liczba cykli uwzględniana w wyznaczeniu parametru D znajduje się w przedziale między 10 a 30, lecz nie należy jej z góry zakładać, tylko dobierać odpowiednio do uzyskanej krzywej zaniku swobodnych drgań.
5. Czas drgania próbki nie wpływa istotnie na uzyskane wartości parametru D .
6. Zastosowanie badań zginających w obliczeniu tłumienia wydają się być błędne, ponieważ wszystkie źródła literaturowe wskazują na krzywoliniowy wzrost parametru D wraz z odkształceniem, co przy zginaniu nie miało miejsca.
7. Konieczne wydaje się kontynuowanie badań współczynnika tłumienia gruntów spoistych uwzględniając odpowiednią liczbę cykli, a także wydłużając czas drgania próbki.

LITERATURA

1. Al. – Hunaidi, Chen P. A., Rainer J. H., Tremblay M.: Shear moduli and damping in frozen and unfrozen clay by resonant column tests. *Can. Geotech. J.* 33, 1996, 510-514.
2. Anastasiadis A., Senetakis K., Ptilakis K.: Small – Strain Shear Modulus and Damping Ratio of Sand Rubber and Gravel – Rubber Mixtures. *Geotechnical and Geological Engineering.* 30, 2012, 363-382.
3. Camacho – Tatuá J., Santos J. A., Viana da Fonseca A.: Two – Bender Recivers Frequency Domain Analysis in Resonant – Column Tests. *Advances in Soil Dynamics and Foundation Engineering GSP 240*, 2014.
4. Cascante G., Santamarina C., Yassir N.: Flexural excitation in a standard torsional – resonant column device. *Can. Geotech. J.* 35, 1998, 478-490.
5. Gabryś K., Sas W., Szymański A.: Kolumna rezonansowa jako urządzenie do badań dynamicznych gruntów spoistych. *Prz. Nauk. – Inż. Kszt. Środ.* 59, 2013, 3-13.
6. GDS Resonant Column 2010: The GDS Resonant Column System Handbook (Version 2.2.2010).
7. Hoyos L. R., Cruz J. A., Puppala A. J., Douglas W. A., Suescun E. A.: Dynamic shear modulus and damping of compacted silty sand via suction – controlled resonant column testing. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering Paris*, 2013, 1125-1128.
8. Kallioglou P., Tika Th., Koninis G., Papadopoulos St., Ptilakis K.: Shear Modulus and Damping Ratio of Organic Soils. *Geotechnical and Geological Engineering.* 27, 2009, 217-235.
9. Kawecki J., Masłowski R., Stypuła K.: Zastosowanie metody spektrum odpowiedzi w obliczeniach obudowy tunelu metra na działanie sejsmiczne. *Materiały VI Sympozjum: Wpływy Sejsmiczne i Parasejsmiczne na Budowlę*, 1991, 177-185.
10. Lunne T., Berre T., Andersen K. H., Sjursen M., Mrtensen N.: Effect of sample disturbance on consolidation behaviour of soft marin Norwegian Clays. *Geotechnical and Geophysical Site Characterization. Proc. Of the 3rd International Conference on Site Characterization ISC'3, Taipei, Taiwan*, 2008, 1471-1479.
11. PN – EN ISO 14688

12. Sas W., Gabryś K.: Laboratory Measurement of Shear Stiffness in Resonant Column Apparatus. *ACTA Scientarum Polonorum, series Architectura Budownictwo*. 11(4), 2012, 29-39.
13. Sas W., Gabryś K., Szymański A.: Laboratoryjne oznaczenie prędkości fali podłużnej i poprzecznej w gruncie. *Budownictwo i Inżynieria Środowiska*. 4, 2013, 151-157.
14. Sas W., Szymański A., Gabryś K.: The behaviour of natural cohesive soils under dynamic excitations. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris 2013*.
15. Senetakis K., Anastasiadis A., Ptilakis K.: Normalized shear modulus reduction and damping ratio curves of quartz sand and rhyolitic crushed rock. *Soils and Foundations* 53(6), 2013, 879-893.
16. Towhata I.: *Geotechnical Earthquake Engineering*. Springer – Verlag, Berlin – Heidelberg, 2008.
17. Waran B., Zięba A.: Porównanie odpowiedzi podziemnego gazociągu na różne typy wymuszeń uderzeniowych. *Materiały VII Symposium: Wpływy Sejsmiczne i Parasejsmiczne na Budowlę*, 1994.
18. Wichtmann T., Navarrete Hernandez M. A., Triantafyllidis T.: On the influence of a non – cohesive fines content on small strain stiffness, modulus degradation and damping of quartz sand, 2015.
19. Yu B.: Advancements in resonant column testing of soils using random vibration techniques. *Graduate Theses and Dissertations*. Paper 13218, 2013.
20. Zębaty Z.: Zastosowanie normy sejsmicznej „Eurokod 8” w projektowaniu budowli narażonych na działanie wstrząsów górniczych. *Czasopismo Techniczne*. 11(107), 2010, 173-180.
21. Zhang X. J., Aggour M. S.: Damping determination of sands under different loadings. *Eleventh World Conference of Earthquake Engineering*, 1996.