

Emil SOBÓL¹, Wojciech SAS², Alojzy SZYMAŃSKI¹

¹Katedra Geoinżynierii, ²Laboratorium – Centrum Wodne

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

¹Department of Geotechnical Engineering, ²Water Center Laboratory

Warsaw University of Life Sciences – SGGW

Zastosowanie kolumny rezonansowej do określenia reakcji gruntów drobnoziarnistych obciążonych dynamicznie The use of resonant column to determine the response of dynamically loaded fine grained soils

Słowa kluczowe: kolumna rezonansowa, rodzaje kolumny rezonansowej, współczynnik tłumienia (D), moduł odkształcenia postaciowego (G), liczba cykli, czas oscylacji

Key words: resonant column, types of the resonant column, damping factor (D), shear modulus (G), number of cycles, time of oscillation

Wstęp

Zagadnienie małych odkształceń w inżynierii lądowej nabiera coraz większego znaczenia, ze względu na rosnącą świadomość wpływu drgań na przewidywanie zachowań się przyszłych budowli i zrozumienie zjawisk występujących w aktualnie eksploatowanych obiektach. Kwestia ta obejmuje użytkowe obciążenia budowli, mogące prowadzić do problemów geotechnicznych, które wymagają ustalenia parametrów dynamicz-

nych gruntu w zakresie małych odkształceń (Bajda, 2009), jak również odnoszą się do nośności podłoża i jego reakcji na obciążenia dynamiczne oraz reakcji fundamentów maszyn poddanych obciążeniom cyklicznym (Gabryś i inni, 2013), współpracy ośrodka gruntowego z obudowami tuneli podczas drgań generowanych na skutek ruchu pojazdów, trzęsień ziemi. Problem ten dotyczy także większości budowli ziemnych takich jak nasypy, wały czy zapory, które są narażone nie tylko na oddziaływania wywołane wstrząsami sejsmicznymi, ale także parasejsmicznymi drganiami od poruszających się pojazdów kolejowych lub kołowych. Dlatego w ostatnim czasie tak duży nacisk położono na rozwój badań, które prowadzą do wyznaczenia charakterystyki naprężenie – odkształcenie w zakresie odkształceń rzędu $10^{-4}\%$

i mniejszych (Sas i inni, 2013a). Dynamiczny postęp można zaobserwować zarówno w technikach badań laboratoryjnych, jak i terenowych, dzięki którym pomiar dynamicznych parametrów gruntowych stał się łatwiejszy i dokładniejszy. Wszystkie techniki pomiaru mają swoje zalety i ograniczenia. Jedne mają zasadność stosowania w zakresie małych, inne powszechnie używane są dla średnich i dużych odkształceń (Das i Ramana, 2011). Porównywanie metod polowych i laboratoryjnych prowadzi do powstania związków korelacyjnych (Godlewski i Szczepański, 2011). Umożliwia to wiarygodniejszą diagnostykę dynamiczną konstrukcji podziemnych (Kawecki, 2005), jak również stwarza możliwości dokładniejszej analizy numerycznej np. dla tunelu metra (Kawecki i inni, 1991) bądź gazociągu (Waran i Zięba, 1994).

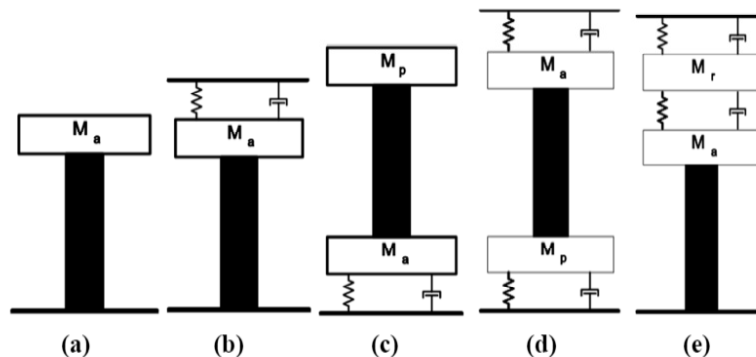
Artykuł ma na celu przedstawienie i zaprezentowanie kolumny rezonansowej jako urządzenia do badań dynamicznej odpowiedzi gruntu na zadane obciążenia dynamiczne. Czytelnikowi zostanie przybliżony krótki rys historyczny, rodzaje, właściwości i procedury stosowane podczas badania kolumną rezonansową. Zostaną przedstawione dynamiczne parametry, które można uzyskać z takiego badania laboratoryjnego, ze szczególnym naciskiem na współczynnik tłumienia (D). Następnie zostanie przedstawiona metodyka badań własnych, materiał badawczy, wyniki i krótka dyskusja nad uzyskanymi parametrami.

Przegląd literatury

Mimo iż badania w kolumnie rezonansowej zostały spopularyzowane stosunkowo niedawno, to jej historia się

ga 1937 roku kiedy to po raz pierwszy użyli jej japońscy inżynierowie Ishimato i Iida. Aparatura była trudna w obsłudze i mało dokładna, dlatego następny postęp w tej dziedzinie nastąpił dopiero w latach 60. XX wieku. W tym okresie rozwojem kolumny rezonansowej zajmowali się głównie: Drnevich, Hall, Richart i Black. Jednak dopiero w 1967 roku Drnevichowi udało się wprowadzić znaczące usprawnienie, a mianowicie użył do badania próbek wydrążanych, a także zadawał stałe odkształcenia postaciowe. Następne usprawnienie miało miejsce dopiero w 1978 roku. Anderson i Stoke wprowadzili możliwość zadawania znacznie większych odkształceń. Kolejny krok postawił w 1980 roku Isenhower, który jako pierwszy badał odkształcenia postaciowe podczas testów rezonansowych. Dalszy rozwój technik badawczych w kolumnie rezonansowej przypadł na 1982 rok, kiedy to Allen i Stoke wprowadzili możliwość anizotropowego obciążania próbki. Ważne ulepszenia miało miejsce w 1994 roku, kiedy Hardin umożliwił badanie przy bardzo dużych naprężeniach efektywnych. Równoległe do technik badawczych rozwijany był także model matematyczny, którym zajmował się Drnevich (Yu, 2013).

Stworzono wiele różnych typów kolumn rezonansowych. Na rysunku 1 zaprezentowano ich schematy. Każdy typ ma swoje zalety, ale posiada także pewne ograniczenia. Aparatura ukazana na rysunku 1a to najbardziej rozpowszechniona kolumna rezonansowa typu fixed – free, spód próbki jest przytwierdzony do dolnej kopytki, góra zaś wprowadzana w drgania. Takiego rodzaju sprzętu użyli autorzy artykułu w badaniach własnych.



RYSUNEK 1. Rodzaje kolumn rezonansowych: (a) fixed – free, (b) fixed – base spring – top, (c) free – free, (d) spring – base spring – top, (e) fixed – base spring – reaction mass – spring – top, M_a , M_p , M_r oznaczają masy napędu, pasywnego końca i odbiornika (Yu, 2013)

FIGURE 1. Types of resonant column: (a) fixed – free, (b) fixed – base spring – top, (c) free – free, (d) spring – base spring – top, (e) fixed – base spring – reaction mass – spring – top, M_a , M_p , M_r denote masses of the active (driven), passive (non-driven) and reaction platens (Yu, 2013)

Zostanie ona dokładniej opisana w następnym rozdziale. Schemat pokazany na rysunku 1b przedstawia kolumnę typu Hardina (fixed – base spring – top), różnice w porównaniu z aparatem fixed – free są niewielkie. Główną z nich jest inny sposób wyznaczania parametrów. Sprzęt 1c to tzw. kolumna typu free – free, której używa się głównie podczas badania dużych próbek i skał. Typy 1d i 1e służą do badania próbek, które nie przylegają dokładnie do kopulek (Yu, 2013).

Chociaż Polska nie jest aktywna sejsmicznie, to na obszarze Śląska występują wstrząsy górnicze o magnitudzie dochodzącej do 5 a nawet 6 (Zembaty, 2010). Mogą one być przyczyną zarysowań i pęknięć na istniejących lub przyszłych budynkach, dlatego powinno badać się dynamiczne parametry gruntowe także w naszym kraju. W tych rejonach zaleca się uwzględnienie w projektach normy Eurokod 8 – Projektowanie sejsmiczne. Znajomość współzależności między EC 7 i EC 8 jest ważna w podejściach projektowych, ponieważ chroni

i zabezpiecza projektanta przed wyżej wymienionymi czynnikami sejsmicznymi (Pinto, 2008). Wybór odpowiednich parametrów dynamicznych do obliczeń projektowych powinien być potwierdzony badaniami laboratoryjnymi. Mimo iż znanych jest wiele różnych schematów kolumn rezonansowych a metodyka badania i obliczania parametrów mogą się różnić w szczegółach, to większość naukowców bazuje na procedurze według ASTM-D4015-92.

Kolumna rezonansowa daje możliwość badania modułu odkształcenia postaciowego (moduł Kirchhoffa, G), modułu odkształcalności linowej (moduł Younga, E), współczynnika tłumienia, D , a także po kalkulacji współczynnika Poissona, ν . Głównym założeniem kolumny rezonansowej jest znalezienie częstotliwości rezonansowej. Taka częstotliwość przy zadanej amplitudzie powoduje największe odkształcenia. Wyznaczone wartości częstotliwości i odkształcenia wykorzystuje się w obliczaniu prędkości fal poprzecznej i podłużnej, dzięki

czemu wyznaczamy wyżej wymienione parametry.

W przypadku kalkulacji modułów G , E i współczynnika D zakres wykonanych doświadczeń dla gruntów gruboziarnistych jest obszerny. Zhang i Aggour podjął się zbadania wpływu kształtu fali na parametry. Do badań przyjęto falę sinusoidalną, impuls i falę wygenerowaną losowo (Zhang i Aggour, 1996). Analiza dynamiczna gruntów gruboziarnistych objęła także wpływ uziarnienia na wartości uzyskiwanych modułów (Wichtmann i Triantafyllidis, 2013), porównano różne metody laboratoryjne (Youn i inni, 2008) i otrzymywane z nich wyniki. Analizowano również wpływ nasycenia wodą na dynamiczną odpowiedź gruntu (Hoyos i inni, 2013). Podjęto także próbę sprawdzenia wpływu różnych dodatków do piasku na parametry dynamiczne. Do gruntów niespoistych dodawano granulaty gumowy wykonany z opon (Anastasiadis i inni, 2012), a także zaczyn cementowy, mineralny i krzemianowy zaczyn (Delfosse-Ribay, 2004). Zmienność parametrów dynamicznych zbadano również dla różnej zawartości części organicznych (Kallioglou i inni, 2009). Mimo rozwoju technik badawczych w kolumnie rezonansowej nadal prowadzone są badania mające na celu usprawnienie i udoskonalenie jej działania. Coraz częściej wykorzystuje się połączenie kolumny rezonansowej i piezoelementów bender (Camacho-Tauta, 2014). Modyfikacji uległa również analiza błędów i obliczanie parametrów na podstawie uzyskanych wyników (Yuan i inni, 2006).

Badania te jednak skupiają się głównie na gruntach niespoistych. Zakres wykonanych doświadczeń dla grun-

tów spoistych jest ograniczony. Jedne z pierwszych prób określenia reakcji wcześniej wspomnianych gruntów na obciążenia dynamiczne podjęto we wcześniejszych pracach autorów (Sas i Gabryś, 2012, Gabryś i inni, 2013, Sas i inni, 2013b). Dotychczasowe artykuły skupiają się głównie wokół modułu odkształcenia postaciowego (G) i modułu odkształcalności liniowej (E). Współczynnik tłumienia (D) jest często pomijany w badaniach ze względu na trudną interpretację i niedoskonałą metodykę badania. Autorzy tego artykułu przedstawili uzyskane wyniki modułu G , zaproponowali metodykę badania współczynnika D , zbadali wpływ czasu obciążania próbki i liczbę cykli branych do kalkulacji na uzyskiwany współczynnik tłumienia.

Material, sprzęt, metodyka badawcza

Materiałem badawczym określonym według PN-EN ISO 14688 był ilt pylasto piaszczysty (sasiCl) pobrany z terenu Warszawy z okolic powstałej trasy ekspresowej S2, między węzłami „Okęcie” i „Konotopa”. Właściwości fizyczne badanego gruntu podane zostały w tabeli 1.

Badania wykonano w Szkole Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie na Wydziale Budownictwa i Inżynierii Środowiska w Laboratorium – Centrum Wodne na kolumnie rezonansowej zaprojektowanej i wykonanej przez firmę GDS Instruments Ltd. Kolumna rezonansowa będąca na wyposażeniu SGGW jest przykładem urządzenia typu fixed – free. W praktyce oznacza to, że dół cylindrycznej próbki

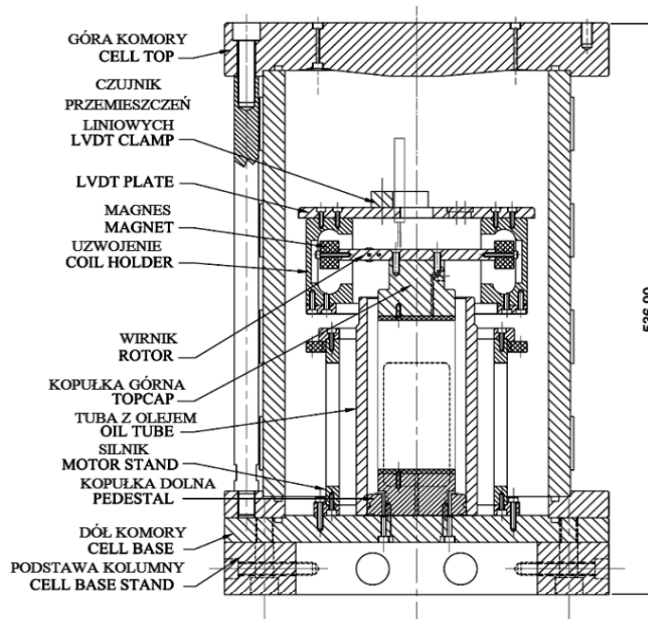
TABELA 1. Właściwości fizyczne badanego gruntu
 TABLE 1. Physical properties of the tested soil

Rodzaj gruntu	W [%]	ρ_s [$\frac{g}{cm^3}$]	ρ [$\frac{g}{cm^3}$]	ρ_d [$\frac{g}{cm^3}$]	e [-]	w_l [%]	w_p [%]	I_p [%]	I_L [-]
ł pylasto piaszczysty (sasiCl)	17,41	2,66	2,10	1,79	0,49	35,55	14,7	20,85	0,13

na stałe przymocowany jest do dolnej kopolki (fixed), natomiast górna część przymocowana jest do układu napędowego (free) składającego się z czterech magnesów wprawiających próbkę w wibrację. Schemat ideowy urządzenia przedstawiono na rysunku 2.

zaangażowane są cztery magnesy, a podczas drgań zginających dwa. Schemat pracy kolumny rezonansowej przedstawiono na rysunku 3.

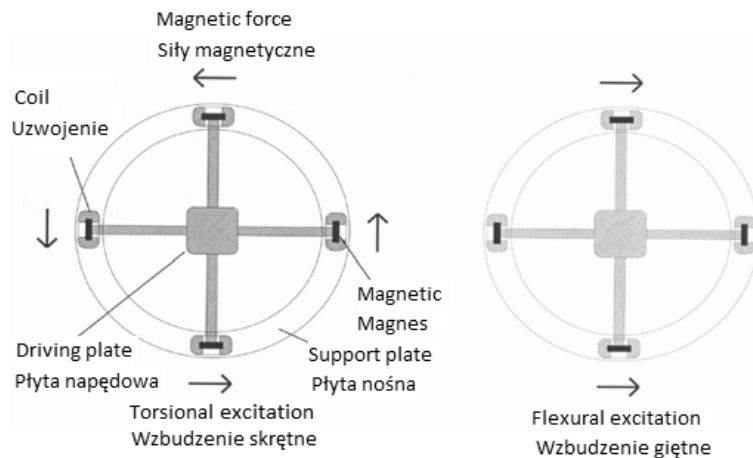
Na podstawie znalezionej częstotliwości rezonansowej dla danej amplitudy i odczycie z akcelerometru oblicza się



RYSUNEK 2. Schemat ideowy kolumny rezonansowej firmy GDS (GDS, 2010)
 FIGURE 2. Schematic diagram of the GDS resonant column (GDS, 2010)

W kolumnie firmy GDS badany materiał można wprawić w dwa rodzaje wibracji: wibrację skrętną (torsional) oraz wibrację zginającą (flexural). Podczas skręcania do wywołania odkształcenia

prędkość fali poprzecznej podczas skręcania i prędkość fali podłużnej podczas zginania, następnie dla tak znalezionych prędkości można obliczyć moduł odkształcenia postaciowego (G), mo-



RYSUNEK 3. Schemat pracy kolumny rezonansowej firmy GDS (GDS, 2010)
 FIGURE 3. Schematic operation of the GDS resonance column (GDS, 2010)

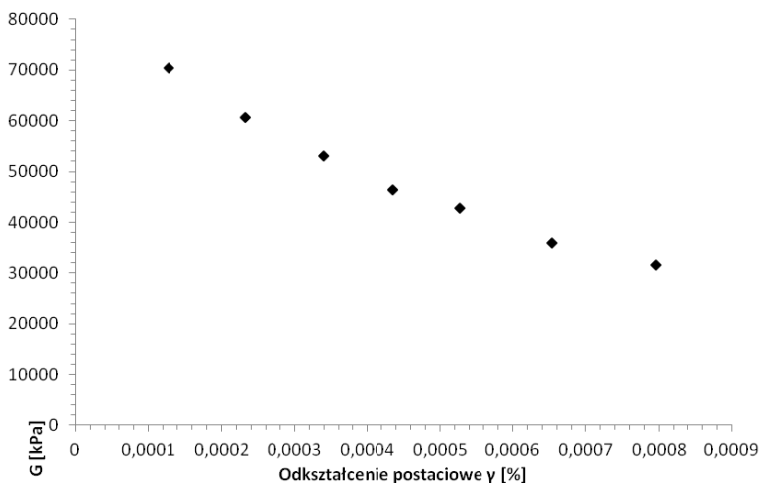
duł odkształcalności liniowej (E) oraz współczynnik Poissona (ν). Współczynnik tłumienia (D) oblicza się z krzywej tłumienia swobodnych drgań próbki metodą dekrementacji logarytmicznej.

Przed przystąpieniem do badań dynamicznych parametrów badanego gruntu określono jego właściwości fizyczne. Badanie w edometrze wykazało, że badany materiał nie ulega zjawisku pęcznienia, a jego naprężenie prekonsolidacji wynosi 90 kPa. Następnie przygotowano cylindryczną próbkę 70×140 mm, gdzie pierwszy wymiar to średnica, drugi wysokość. Tak przygotowany grunt umieszczono w kolumnie rezonansowej. Przeprowadzono wstępne przepuszczenie wody przez przewody i próbkę, aby wyeliminować powietrze znajdujące się w całym układzie oraz między membraną a gruntem. Kolejnym krokiem było nasączenie próbki, które zakończyło się, gdy autorzy osiągnęli wartość parametru Skemptona na poziomie 0,95. Następnie przeprowadzono konsolidację przy wyznaczonym w edometrze naprężeniu

prekonsolidacji 90 kPa. Po rozproszeniu się nadwyżki ciśnienia wody w porach przystąpiono do testów rezonansowych, które obejmowały wyznaczenie częstotliwości rezonansowej w zakresie amplitudy fali od 0,1 do 0,7 V (skok co 0,1 V) przy wibracjach skrętnych (torsional). Następnie przy danych częstotliwościach rezonansowych badano współczynnik tłumienia (D), biorąc pod uwagę liczbę cykli uwzględnianych w kalkulacji od 10 do 50 (skok co 10 cykli) oraz czas oscylacji próbki od 2 do 6 s (skok co 2 s). Wyniki badań przedstawiono w następnym rozdziale.

Wyniki

Wyznaczenie modułu odkształcenia postaciowego i odkształcenia postaciowego przeprowadzono na podstawie doświadczeń własnych, zaleceń i procedur opisanych w Gabryś i inni (2013), GDS (2010) oraz ASTM (2003). Na rysunku 4 przedstawiono zależność między wartościami G a γ .



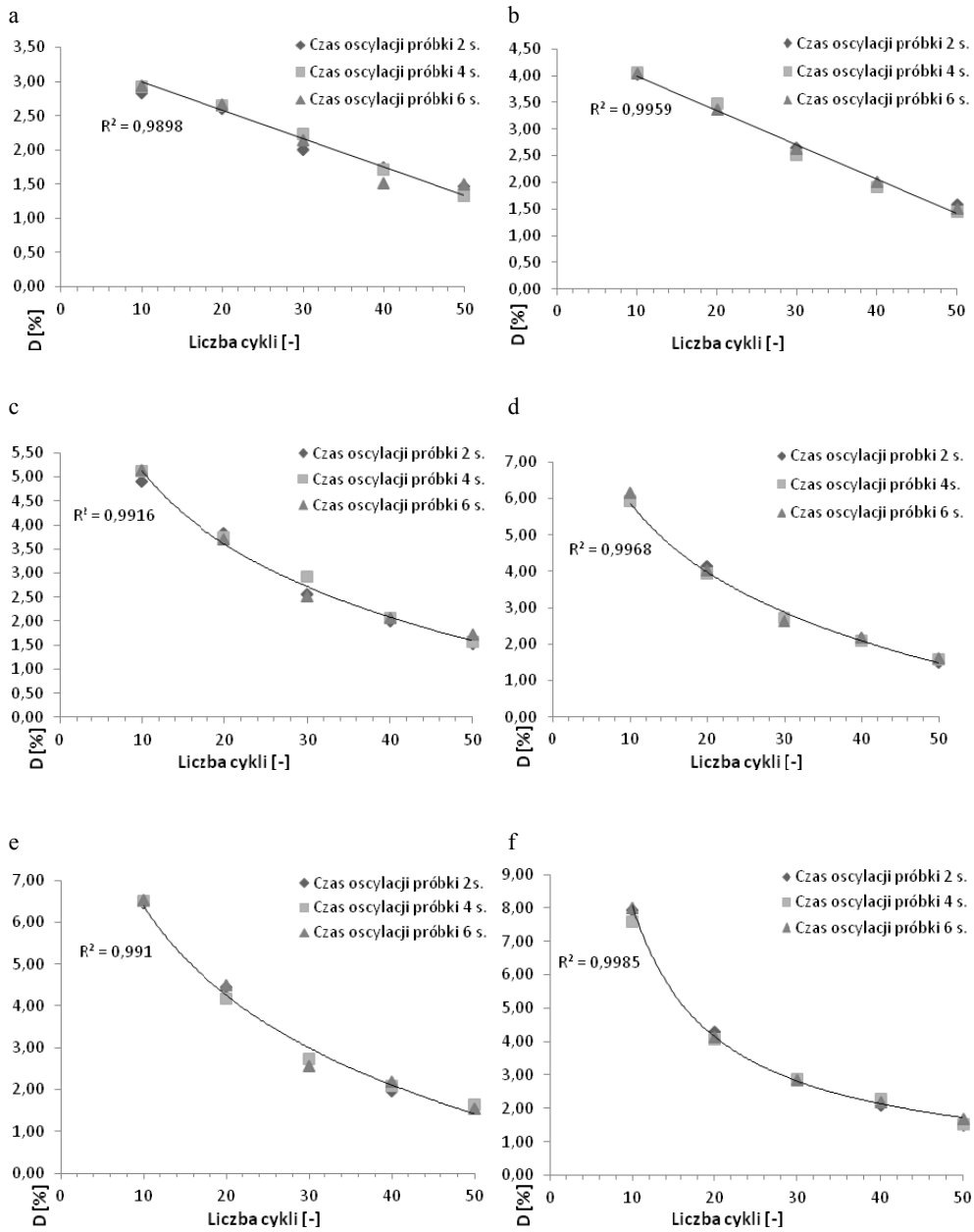
RYSUNEK 4. Moduł odkształcenia postaciowego (G) od odkształcenia postaciowego (γ) przy $\sigma'_p = 90$ kPa

FIGURE 4. The shear modulus (G) against shear strain (γ) at $\sigma'_p = 90$ kPa

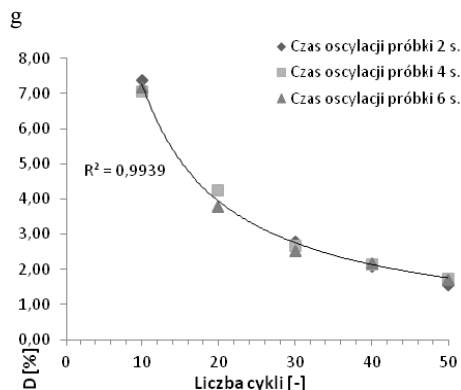
Zgodnie z wiedzą literaturową, otrzymany moduł G maleje krzywoliniowo wraz z przyrostem odkształceń postaciowych. W prezentowanych wynikach badań nie otrzymano charakterystycznego poziomego przebiegu krzywej w początkowym stadium, przez co nie można stwierdzić, że uzyskany przy odkształceniu $1,3 \cdot 10^{-4}\%$ moduł ścinania to G_{MAX} badanego gruntu. Podczas badań częstotliwości rezonansowych autorzy na bieżąco kontrolowali także inne parametry próbki, takie jak: wysokość, ciśnienie wody w porach oraz odpływ wody z próbki. Przy odkształceniu $8 \cdot 10^{-4}\%$ nastąpiło zmniejszenie wysokości próbki o około 0,5 mm, wzrost ciśnienia wody w porach i gwałtowny odpływ wody z badanego gruntu. Autorzy zinterpretowali powyższe zjawiska jako przekroczenie granicy odkształceń sprężystych i wkroczenie w strefę odkształceń plastycznych, dlatego zakończono badanie. Przy każdej z siedmiu częstotliwości rezonansowych autorzy badali współczynnik tłumienia

(D) dla wibracji skrętnych. Na rysunku 5 można zaobserwować zależność tego parametru w zależności od liczby cykli branych do kalkulacji oraz czasu wprawiania próbki w drgania.

Z powyższych wykresów widać niewielkie różnice we współczynniku tłumienia w zależności od czasu oscylacji próbki, co może wynikać z błędów w pomiarach, niedokładności sprzętu lub niejednorodności gruntu. Na wykresach 5a i 5b widać liniowy spadek współczynnika tłumienia (D), co najlepiej obrazuje aproksymacja liniowa. Na rysunkach 5c, 5d i 5e najlepsze dopasowanie uzyskano za pomocą logarymicznej linii trendu. Na wykresach 5f i 5g prawidłowa okazała się aproksymacja potęgowa. Zastosowana optymalizacja pozwoliła osiągnąć współczynnik dopasowania wszystkich linii trendu na poziomie $R^2 = 0,99$. Można zauważyć wyraźną zależność kształtu linii trendu od odkształcenia. Ze wzrostem odkształcenia zależność prostopadła zmienia się w krzywoliniową,



RYSUNEK 5.
FIGURE 5.

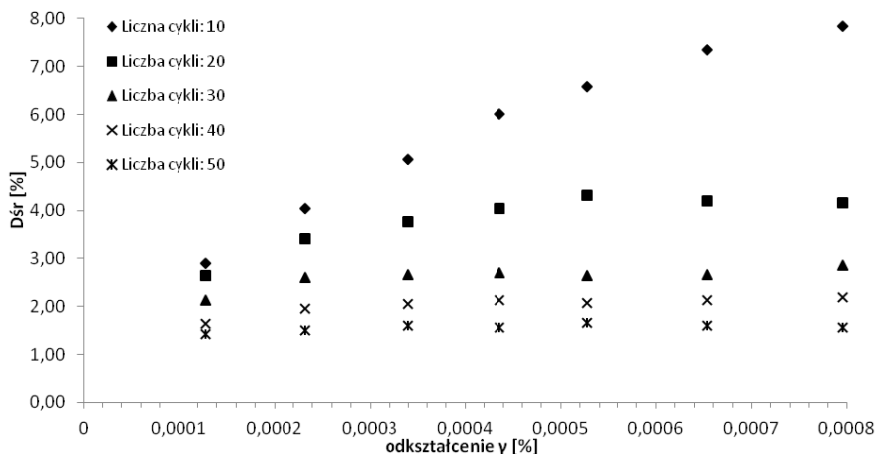


RYSUNEK 5. Współczynnik tłumienia – D [%] w zależności od liczby cykli uwzględnianych w kalkulacji [-] i czasu trwania oscylacji próbki: (a) przy odkształceniu postaciowym $\gamma = 1,3 \cdot 10^{-4}\%$, (b) przy odkształceniu postaciowym $\gamma = 2,3 \cdot 10^{-4}\%$, (c) przy odkształceniu postaciowym $\gamma = 3,4 \cdot 10^{-4}\%$, (d) przy odkształceniu postaciowym $\gamma = 4,4 \cdot 10^{-4}\%$, (e) przy odkształceniu postaciowym $\gamma = 5,3 \cdot 10^{-4}\%$, (f) przy odkształceniu postaciowym $\gamma = 6,5 \cdot 10^{-4}\%$, (g) przy odkształceniu postaciowym $\gamma = 8 \cdot 10^{-4}\%$
 FIGURE 5. Damping ratio – D [%] against the number of cycles included in to the calculation and against the oscillation time of the sample: (a) at shear strain $\gamma = 1.3 \cdot 10^{-4}\%$, (b) at shear strain $\gamma = 2.3 \cdot 10^{-4}\%$, (c) at shear strain $\gamma = 3.4 \cdot 10^{-4}\%$, (d) at shear strain $\gamma = 4.4 \cdot 10^{-4}\%$, (e) at shear strain $\gamma = 5.3 \cdot 10^{-4}\%$, (f) at shear strain $\gamma = 6.5 \cdot 10^{-4}\%$, (g) at shear strain $\gamma = 8 \cdot 10^{-4}\%$

a pogłębiającą się krzywiznę obrazując zmianę linii trendu z logarytmicznej na wykładniczą. Prostoliniowy przebieg linii trendu na wykresach 5a i 5b uniemożliwia jednoznaczne stwierdzenie,

w którym miejscu fala jest wytłumiona, co utrudnia interpretację badań.

Na rysunku 6 przedstawiono zależność między uśrednionym współczynnikiem tłumienia w zależności od



RYSUNEK 6. Zależność uśrednionego współczynnika tłumienia – D od odkształcenia postaciowego – γ dla różnej liczby cykli przy $\sigma'_p = 90$ kPa
 FIGURE 6. Averaged damping ratio – D depending on the shear strain – γ for different cycle number at $\sigma'_p = 90$ kPa

odkształcenia postaciowego. Wartość średnią współczynnika D otrzymywano z różnych wartości czasów oscylacji próbki przy wyznaczonym odkształceniu. Według literatury współczynnik tłumienia powinien rosnąć krzywoliniowo wraz z odkształceniem postaciowym. Taką wyraźną zależność można zaobserwować dla współczynników tłumienia obliczonych dla 10 cykli. Pewien nieznaczny wzrost współczynnika D do odkształcenia około $6 \cdot 10^{-4}\%$ jest widoczny dla punktów uzyskanych z obliczeń dla 20 cykli. Pozostałe punkty można aproksymować poziomą linią prostą. Oznacza to, że fala między 20. a 30. cyklem jest całkowicie wytłumiona, a współczynnik tłumienia nie wykazuje żadnych zależności poza dalszym spadkiem wraz ze zwiększaniem liczby cykli uwzględnianych w obliczeniach, co skutkuje jego błędnym zaniżeniem. Na podstawie rysunku 6 należy stwierdzić, że nawet przy małych odkształceniach, takich jak przedstawionych na rysunkach 5a i 5b, liczba cykli branych pod uwagę przy wyznaczaniu współczynnika tłumienia nie powinna przekraczać 20.

Wnioski

Przeprowadzone badania na ile pylasto piaszczystym (sasiCl) pozwoliły na przedstawienie następujących wniosków:

1. W badanym gruncie drobnoziarnistym (sasiCl) osiągnięcie maksymalnego modułu odkształcenia postaciowego okazało się niemożliwe ze względu na przyjęty zakres rozpatrywanych amplitud fali. Do wyznaczenia modułu G_{MAX} autorzy zalecają rozszerzenie zakresu badanych amplitud.

2. Podczas badań w kolumnie rezonansowej istnieje ryzyko przekroczenia granicy odkształceń plastycznych, dlatego autorzy zalecają kontrolowanie na bieżąco podczas badania częstotliwości rezonansowej parametrów umożliwiających zidentyfikowanie tego zjawiska.
3. Czas oscylacji w zakresie od 2 do 6 s nie wpływa na wartość współczynnika tłumienia w badanym gruncie drobnoziarnistym.
4. Dalsze badania powinny koncentrować się na wydłużeniu czasu oscylacji próbki, dzięki czemu zostanie potwierdzony brak wpływu ww. czynnika na parametr D .
5. Wzrost odkształcenia postaciowego zmienia charakterystykę spadku parametru D w zależności od liczby cykli z prostoliniowej na krzywoliniową.
6. Z przebiegu uśrednionego współczynnika tłumienia w stosunku do odkształcenia postaciowego autorzy wnioskuje, że prawidłowa liczba cykli uwzględniana w wyznaczaniu parametru tłumienia badanego gruntu znajduje się między 10. a 20. cyklem.
7. W przebadanym zakresie odkształceń błędne jest zakładanie większej liczby cykli niż 20 do obliczania współczynnika tłumienia, ponieważ fala za tą wartością jest wytłumiona.
8. Po analizie wyników autorzy dochodzą do wniosku, że do poprawnego wyznaczenia współczynnika tłumienia nie powinno zakładać się „z góry” liczby cykli uwzględnianej w wyznaczaniu ww. parametru, tylko dobierać ją odpowiednio do krzywej gaśnięcia swobodnych drgań próbki, co pozwoli uniknąć błędów związanych z zaniżaniem jego wartości.

9. Należy kontynuować badania nad współczynnikiem tłumienia gruntów drobnoziarnistych, aby możliwe było wysnucie szerszych, popartych statystyką wniosków.

Literatura

- Anastasiadis, A., Senetakis, K., i Pitilakis, K. (2012). Small-strain shear modulus and damping ratio of sand-rubber and gravel-rubber mixtures. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30(2), 363-382.
- ASTM-D4015-92 2003. Test Methods for Modulus And Damping of Soils by the Resonant – Column Method. *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM International, West Conshohocken, PA, Vol. 4 (08), 473-494.
- Bajda, M. (2009). Źródła generacji fali sejsmicznej w sondowaniach SCPT. *Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 4(46), 57-66.
- Camacho-Tauta, J., Santos, J.A., i da Fonseca, A.V. (2014). Two Bender Receivers Frequency Domain Analysis in Resonant Column Tests. *W Advances in Soil Dynamics and Foundation Engineering*. (Strony 72-82). ASCE.
- Das, B.M. i Ramana, G.V. (2011). *Principles of Soil Dynamics*. Stamford: Cengage Learning Publishers.
- Delfosse-Ribay, E., Djeran-Maigre, I., Cabrillac, R., and Gouvenot, D. (2004). Shear modulus and damping ratio of grouted sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(6), 461-471.
- EN 1998-1 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings.
- Gabryś, K., Sas, W. i Szymański, A. (2013). Kolumna rezonansowa jako urządzenie do badań dynamicznych gruntów spoistych. *Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 59, 3-13.
- GDS Instruments Ltd. (2007). *GDS Resonant Column: The GDS Resonant Column System Handbook* (Version 2.2.2010). London: GDS Instruments Ltd.
- Godlewski, T. i Szczepański, T. (2011). Nieliniowa charakterystyka gruntu (G_0) – metody oznaczania i przykłady zastosowań. *Górnictwo i Geoinżynieria*, 2(35), 243-250.
- Hoyos, L.R., Cruz, J.A., Puppala, A.J., Douglas, W.A., i Suescún, E.A. (2013). Dynamic shear modulus and damping of compacted silty sand via suction-controlled resonant column testing. W P. Delage i inni (red.). *Challenges and innovations in geotechnics: proceedings of the 18th International Geotechnical Conference on soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. (strony 1125-1128). Paris: ISSMGE.
- Kallioglou, P., Tika, T., Koninis, G., i Pitilakis, K. (2009). Shear modulus and damping ratio of organic soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 27(2), 217-235.
- Kawecki, J. (2005). Diagnostyka dynamiczna konstrukcji zagłębionych w gruncie. W *XX Ogólnopolska Konferencja Warsztatów Pracy Projektanta Konstrukcji, Wisła-Ustroń*. (strony 261-272). Katowice: PZITB.
- Kawecki, J., Masłowski, R. i Stypuła, K. (1991). Zastosowanie metody spektrum odpowiedzi w obliczeniach obudowy tunelu metra na działanie sejsmiczne. W *Materiały VI Sympozjum: Wpływy Sejsmiczne i Parasejsmiczne na Budowlę*. (strony 177-185). Kraków: IMB PK.
- Pinto, P.S. (2008). Interaction Between Eurocode 7 – Geotechnical Design and Eurocode 8 – Design for Earthquake Resistance of Foundations. W H. Liu i inni (red.). *Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation*. (strony 37-65). Berlin, Heidelberg: Springer.
- PN-EN 1997-1 Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne. Część 1. Zasady ogólne.
- PN-EN ISO 14688-1: 2006. Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 1. Oznaczanie i opis.
- Sas, W., Gabryś, K. i Szymański, A. (2013a). Laboratoryjne oznaczenie prędkości fali podłużnej i poprzecznej w gruncie. *Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, 4, 151-157.
- Sas, W., Szymański, A. i Gabryś, K. (2013b). The behaviour of natural cohesive soils under dynamic excitations. W P. Delage i inni (red.). *Challenges and innovations in geotechnics: proceedings of the 18th International Geotechnical Conference on soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. (strony 2-6). Paris: ISSMGE.

- Sas, W. i Gabryś, K. (2012). Laboratory measurement of shear stiffness in resonant column apparatus. *Acta Scientiarum Polonorum, Architectura, 11(4)*, 29-39.
- Waran, B. i Zięba, A. (1994). Porównanie odpowiedzi podziemnego gazociągu na różne typy wymuszeń uderowych. *Materiały VII Sympozjum: Wpływy Sejsmiczne i Parasejsmiczne na Budowlę*. (strony 253-260). Kraków: IMB PK.
- Wichtmann T. i Triantafyllidis, T. (2013). Small-strain constrained elastic modulus of clean quartz sand with various grain size distribution. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 55*, 130-139.
- Youn, J.U., Choo, Y.W. i Kim, D.S. (2008). Measurement of small-strain shear modulus G_{max} of dry and saturated sands by bender element, resonant column, and torsional shear tests. *Canadian Geotechnical Journal, 45(10)*, 1426-1438.
- Yu, B. (2013). *Advancements in resonant column testing of soils using random vibration techniques*. (Rozprawa doktorska). Iowa: Iowa State University.
- Yuan, X., Sun, J., i Sun, R. (2006). A Modified approach for calculating dynamic shear modulus of stiff specimens by resonant column tests. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 5*, 143-150.
- Zembaty, Z. (2010). Zastosowanie normy sejsmicznej "Eurokod 8" w projektowaniu budowli narażonych na działanie wstrząsów górniczych. *Czasopismo Techniczne, 11(107)*, 173-180.
- Zhang, X.J., i Aggour, M.S. (1996). Damping determination of sands under different loadings. W *11th World Conf. on Earthquake Engineering*. Pobrano z lokalizacji Elsevier Science: www.iitk.ac.in/nicee/wcee/eleventh_conf_Mexico.

Streszczenie

Zastosowanie kolumny rezonansowej do określenia reakcji gruntów drobnoziarnistych obciążonych dynamicznie. Artykuł dotyczy kolumny rezonansowej użytej

w badaniach własnych. Jest to urządzenie stworzone przez firmę GDS Instruments Ltd. I jest typem kolumny „fixed – free”. W artykule przedstawiono rys historyczny urządzenia, jego typy, przykładowe zastosowanie dynamicznych parametrów gruntu, a także zaprezentowano procedury stosowane podczas przeprowadzania badań dynamicznych. Przedstawiono metodykę badań własnych ze szczególnym uwzględnieniem współczynnika tłumienia (D). Ponadto zaprezentowano wyniki przeprowadzonych badań i wysnuto na ich podstawie wnioski.

Summary

The use of resonant column to determine the response of dynamically loaded fine grained soils. The article concerns the resonant column used in the present study. The device was developed by the GDS Instruments Ltd. as a “fixed-free” type. Article historical development of the device, its types, examples of the use and the dynamic soil parameters. Standards used to dynamic tests were also presented. The methodology of tests was discussed with particular attention to damping coefficient – D . Article presents results of studies and analysis of obtained data with conclusion.

Authors' address:

Emil Soból, Wojciech Sas, Alojzy Szymański
 Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
 Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska
 Katedra Geoinżynierii
 ul. Nowoursynowska 159, 02-787 Warszawa
 Poland
 e-mail: emil_sobol@sggw.pl
wojciech_sas@sggw.pl
alozzy_szymanski@sggw.pl