

PRACE ORYGINALNE

ORIGINAL PAPERS

Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska nr 59, 2013: 3–13
(Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. 59, 2013)

Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences No 59, 2013: 3–13
(Sci. Rev. Eng. Env. Sci. 59, 2013)

Katarzyna GABRYŚ, Wojciech SAS, Alojzy SZYMAŃSKI

Katedra Geoinżynierii SGGW w Warszawie
Department of Geotechnical Engineering WULS – SGGW

Kolumna rezonansowa jako urządzenie do badań dynamicznych gruntów spoistych

Resonant Column Apparatus as a device for dynamic testing of cohesive soils

Słowa kluczowe: kolumna rezonansowa, badania dynamiczne, grunty spoiste

Key words: resonant column apparatus, dynamic tests, cohesive soils

Wprowadzenie

Wiele problemów praktycznej inżynierii geotechnicznej wymaga wiedzy z zakresu zachowania się ośrodka gruntowego w zmiennym reżimie obciążenia, inaczej – w warunkach obciążeń cyklicznych (Werno, red. 1985). Zagadnienia te obejmują kwestie dynamicznej nośności fundamentów, reakcji fundamentów maszyn poddanych obciążeniom cyklicznym, interakcji struktury gruntu z otaczającą infrastrukturą podczas propagacji fal generowanych na skutek trzęsienia ziemi oraz odporności na zniszczenie zapór, nasypów i wałów w trakcie trzęsienia ziemi. Dlatego obserwuje się intensywny rozwój metod badań labora-

toryjnych i terenowych, specjalnie opracowanych w celu pomiaru dynamicznych właściwości gruntów. Każda z tych technik pomiaru ma swoje zalety, jak również pewne ograniczenia. Niektóre z metod są odpowiednie do analizy parametrów odkształceniowych w zakresie małych odkształceń, inne zaś są bardziej właściwe dla średnich i dużych odkształceń (Das i Ramana 2011).

Badania terenowe są niezwykle cenne ze względu na możliwość przeprowadzenia ich w warunkach rzeczywistych, które w laboratorium nie zawsze mogą zostać w pełni odtworzone. Zaletami analiz terenowych, w porównaniu z badaniami laboratoryjnymi, są mniejsze koszty i krótszy czas trwania. Ograniczeniem stosowalności są natomiast trudności w określeniu warunków brzegowych – naprężenia panujące w gruncie oraz jego odkształcenia (Markowska 2001). Grupa geofizycznych metod polowych

oznaczenia parametrów dynamicznych obejmuje: sondowania (sejsmiczny dylatometr Marchetiego SDMT, sejsmiczny stożek SCPT), metody otworowe (Down Hole, Up Hole, Cross Hole) oraz sejsmikę powierzchniową. W tej ostatniej grupie pojawiają się różne modyfikacje i zestawienia sprzętowe, które określane są różnymi nazwami. Historycznie oraz koncepcyjnie pierwszym systemem był SASW (Spectral Analysis of Surface Waves – Heisey i in. 1982). Wśród metod laboratoryjnych na uwagę zasługują: badanie w cyklicznym aparacie skrętnym, badanie w kolumnie rezonansowej oraz w aparacie trójosiowym z wewnętrznym pomiarem mikroprzemieszczeń (Bender Elements Tests).

Artykuł ma na celu krótki opis oraz przybliżenie czytelnikowi nieznanego dotąd w Polsce urządzenia do badań laboratoryjnych właściwości dynamicznych gruntów, jakim jest kolumna rezonansowa. Praca zawiera krótki rys historyczny dotyczący prezentowanego urządzenia, wyjaśnia, na czym polega jego unikatowość, przedstawia metodykę badań własnych wraz z przykładowymi wynikami możliwymi do uzyskania z przeprowadzanych eksperymentów. Artykuł zamyka krótkie podsumowanie.

Badania gruntów w kolumnie rezonansowej

Potrzeba określenia zmian sztywności gruntu w zakresie małych odkształceń 10^{-6} – 10^{-2} (odkształcenia względne w przedziale 0,0001–1%) pojawiła się już na początku XX wieku i wymagała opracowania nowych technik laboratoryjnych. Prawidłowe określenie charak-

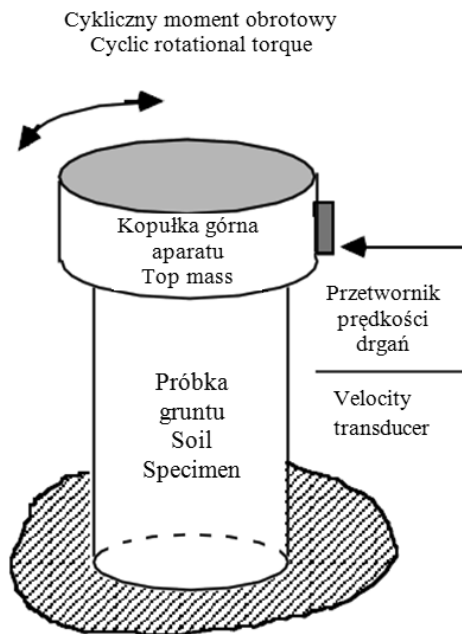
terystryki gruntu naprężenie – odkształcenie, zwłaszcza w zakresie małych odkształceń, okazało się niezwykle trudne. Rozwiązanie tego problemu stało się możliwe wraz z wynalezieniem kolumny rezonansowej.

Pierwsze wzmianki o kolumnie rezonansowej pojawiły się w latach 30. XX wieku za sprawą japońskiego naukowca K. Iida (GDS 2010). Wzrost jej popularności przypada zaś na lata 50. ubiegłego wieku. Inżynierowie Ishimoto i Iida w latach 1936–1937 rozwinęli zarówno teorię dotyczącą testów rezonansowych, jak i samo urządzenie, w którym częstotliwość obciążania przy maksymalnym wzbudzeniu została wykorzystana do określenia sprężystych właściwości gruntu. Początkowe eksperymenty nie przewidywały konsolidacji materiału badawczego przy użyciu ciśnienia otaczającego, zatem próbki gruntu przeznaczone do analiz musiały zawierać dużo frakcji drobnej i charakteryzować się dużą wilgotnością naturalną, by zachować swój kształt podczas badań bez aplikacji tego ciśnienia. Następnie Iida w 1938 roku przeprowadzał testy na suchym piasku, zabezpieczonym arkuszami celofanu. Zakres pomierzonych wówczas wartości prędkości poprzecznej fali (V_S) propagowanej w gruncie wahał się w granicach od 50 do 200 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ i został uznany za przedział niewielkich prędkości (Towhata 2008).

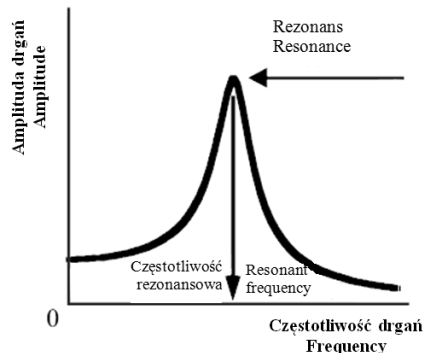
Technika kolumny rezonansowej zakłada cykliczne przykładanie siły na próbkę z różnymi częstotliwościami. Dynamiczna odpowiedź materiału badawczego na przyłożoną siłę jest mierzona jako prędkość i/lub przyspieszenie drgań. Dokładny pomiar przemieszczeń gruntu, zwłaszcza bardzo małych, jest trudny, ła-

twiejsze jest natomiast zbadanie prędkości oraz przyspieszenia oscylacji gruntu przy wysokich częstotliwościach obciążenia. Różnicowanie tych częstotliwości pozwala na uzyskanie zależności między częstotliwością a zmianą amplitudy wibracji. Na rysunku 1 przedstawiono koncepcję testu rezonansowego, na rysunku 2 – przykład otrzymanego wyniku (Towhata 2008).

Próbka gruntu, jak pokazano na rysunku 1, jest na stałe przymocowana do podstawy aparatu, a od góry poddawana mechanizmowi skręcania. Zastosowanie koncepcji propagacji fali podczas skręcania badanej próbki pozwala na znalezienie teoretycznej (naturalnej) wartości częstotliwości rezonansowej. Porównując ze sobą teoretyczną oraz



RYSUNEK 1. Cylindryczna próbka poddana testowi rezonansowemu
 FIGURE 1. Cylindrical specimen undergoing resonant column test



RYSUNEK 2. Interpretacja testu rezonansowego
 FIGURE 2. Interpretation of resonant column test

eksperymentalną wartość częstotliwości rezonansowej (rys. 2), można wyliczyć moduł odkształcenia postaciowego (G). Dokładny opis idei testów rezonansowych jest zawarty m.in. w pracy Takka-butr (2006).

Dla przykładu przeanalizowano następującą sytuację. Założono, iż kopułka górna aparatu (rys. 1) zostaje całkowicie wyeliminowana, wówczas naturalny okres drgań badanego materiału (T_n) podczas ścinania skrętnego jest dany równaniem:

$$T_n = \frac{4H}{V_S} \quad (1)$$

gdzie:

H – wysokość próbki,
 V_S – prędkość fali poprzecznej.

Kiedy pojawia się rezonans bądź maksymalne wzmocnienie częstotliwości podczas obciążania (T_n^*), następuje zrównanie wartości eksperymentalnej z teoretyczną (Towhata 2008):

$$T_n^* = \frac{4H}{V_S} \quad (2)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \frac{4H}{T_n^*} \quad (3)$$

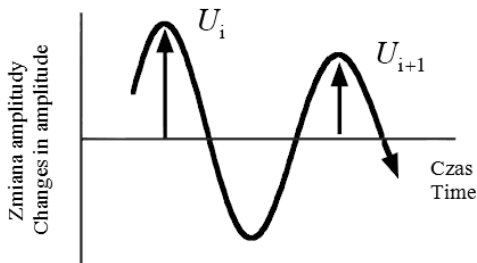
stąd

$$G = \rho \cdot \left(\frac{4H}{T_n^*} \right)^2 \quad (4)$$

gdzie:

G – moduł odkształcenia postaciowego,
 ρ – ciężar objętościowy gruntu.

Jedną z funkcji kolumny rezonansowej jest określenie współczynnika tłumienia (D) dla badanej próbki gruntu. Wyróżnia się dwie odmienne techniki pomiarowe współczynnika tłumienia, mianowicie: metodę przepustowości wykorzystującą krzywą charakterystyki częstotliwościowej z testów rezonansowych i metodę dekrementacji (δ) – z krzywej gaśnięcia swobodnych drgań próbki (rys. 3). Krzywą gaśnięcia swobodnych drgań próbki uzyskuje się dzięki zapisowi amplitudy drgań (U) przez akcelerometr zamontowany na płycie systemu napędowego urządzenia. W momencie osiągnięcia oscylacji o stałej mocy (lub o stałym sygnale) produkcja drgań zostaje wyłączona, a powoli gasnące vibracje



RYSUNEK 3. Definicja logarytmicznego dekrementu tłumienia w drganiach harmonicznym (Towhata 2008)

FIGURE 3. Definition of logarithmic decrement in free vibration (Towhata 2008)

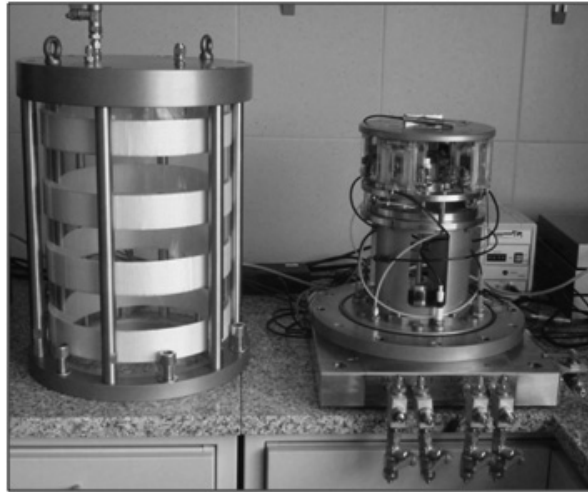
próbki są stale rejestrowane na monitorze komputera. Stąd wyznaczyć można tzw. dekrementację logarytmiczną, a na jej podstawie D według równania:

$$D = \sqrt{\frac{\delta^2}{4\pi^2 + \delta^2}} \quad (5)$$

Warto zauważyć, że testy wykonane w kolumnie rezonansowej pozwalają na obliczenie parametru G po powtórzeniu zazwyczaj większej liczby cykli obciążeniowych (od 50 do 100), inaczej niż podczas większości zdarzeń sejsmicznych (trzęsienia ziemi), gdzie liczba cykli obciążeniowych jest zdecydowanie mniejsza. Liczba cykli obciążeniowych jest zatem pewnym ograniczeniem tego urządzenia. Ponadto może wystąpić niebezpieczeństwo upłynięcia gruntów niespoistych w trakcie analiz nasyconych wodą próbek poddanych dużym amplitudom odkształcenia. To zjawisko jest spowodowane uniemożliwionym odpływem wody porowej na skutek wysokiej częstotliwości drgań (Ellis i in. 2000).

Metodyka badań własnych

Kolumna rezonansowa użyta w badaniach została opracowana przez brytyjską firmę GDS Instruments Ltd. (rys. 4). Jest to przykład kolumny typu Hardin-Drnevich „fixed-free”. Zastosowana aparatura służy do pomiarów dynamicznych właściwości gruntów. Podstawowa zasada jej działania polega na wprawieniu w drgania cylindrycznej próbki gruntu. Badania w kolumnie rezonansowej firmy GDS umożliwiają zastosowanie dwóch rodzajów vibracji: vibracji skrętniej (rotacyjnej) lub vibra-



RYSUNEK 4. Kolumna rezonansowa firmy GDS Instruments Ltd. Widok na stanowisko badawcze w Centrum Wodnym SGGW (fotografia autorów)
 FIGURE 4. The GDS Instruments Ltd. Resonant Column Apparatus. View of the laboratory work station in Water centre WULS (Authors' photography)

cji w kierunku pionowym (podłużnej). Jednorodna pod względem rodzaju próbki gruntu o kształcie walca (typowe wymiary badanej próbki: 50×100 mm oraz 70×140 mm, gdzie pierwszy wymiar to średnica, drugi – wysokość) poddawana drganiom umiejscowiona jest w cylindrycznej trójosiowej komorze. Próbkę w komorze otacza powietrze, którego maksymalne ciśnienie może sięgać 1 MPa. Próbka poddawana jest izotropowemu naprężeniu bocznemu (σ_0) i ciśnieniu „back pressure” (u_b). Dolny koniec próbki przytwierdzony jest do stałej podstawy dolnej i tworzy wraz z nią tzw. pasywny koniec aparatu („fixed”). Drgania próbki wywoływane są przez elektromagnetyczny system napędowy, składający się z zestawu czterech magnesów i czterech uzwojeń. System napędowy przytwierdzony jest do pokrywy górnej aparatu i połączony z górą próbki za pomocą kopułki górnej,

tworząc tzw. aktywny koniec („free”). Wibracje pola elektromagnetycznego wywołanego przez system napędowy przenoszone są na wolny koniec próbki (jej górną część). Częstotliwość oraz amplituda drgań podczas przeprowadzania testów są kontrolowane, przy czym częstotliwość jest stopniowo zwiększana aż do momentu uzyskania częstotliwości rezonansowej danej próbki gruntu przez wolny jej koniec. Typowy zakres częstotliwości, w którym następuje poszukiwanie częstotliwości rezonansowej, to 10–200 Hz, a rozpiętość amplitudy napięcia przykładanego na cewki w celu wzbudzenia pola elektromagnetycznego waha się w granicach 0,1–1,0 V.

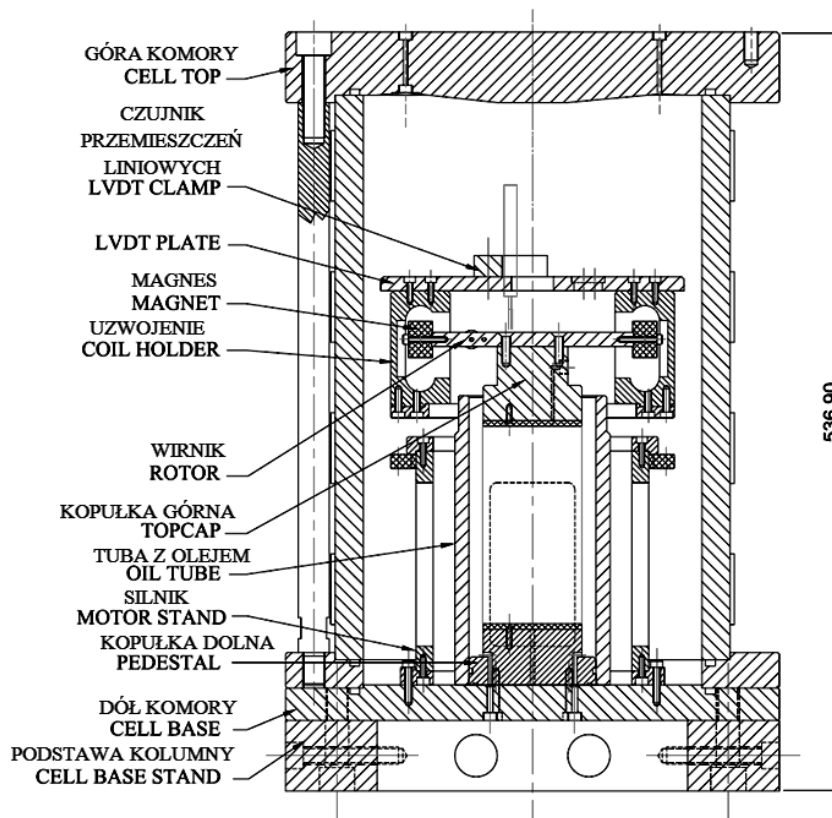
Do elementów składowych systemu kolumny rezonansowej należą: standardowa kolumna o możliwości utrzymania ciśnienia do 1 MPa, elektromagnetyczny system napędowy składający się z precyzyjnie nawiniętych zwojów oraz zbioru

magnesów, wewnętrzna kolumna (tuba) wypełniona olejem silikonowym – pomoc w uszczelnieniu membrany przy dłuższej trwających badaniach (ok. 3 miesięcy), kopułki: górna i dolna, wewnętrzny czujnik do pomiaru przemieszczeń liniowych, LVDT (do pomiaru odkształceń osiowych próbki), przyspieszoniomierz do pomiaru mechanizmu skręcania (przyspieszenia drgań), wewnętrzna przeciwwaga dla przyspieszoniomierza, wzmacniacz do napędzania całego systemu, jednostka komputerowa do zbierania danych oraz karta sterująca wraz z panelem sterującym, trzy pary dysków przej-

ściowych dla różnego rodzaju gruntów: spoistych, niespoistych oraz bardziej sztywnych materiałów, zestaw trzech drążków do kalibracji o różnej sztywności wraz z trzema sztabkami, regulator sprężonego powietrza otaczającego próbkę w komorze oraz ciśnienia „back pressure”, czujnik do pomiaru ciśnienia wody w porach.

Na rysunku 5 zaprezentowano schemat ideowy kolumny rezonansowej wykorzystywanej w badaniach własnych.

Zakres analiz możliwych do przeprowadzenia na podstawie eksperymentów



RYСУNEK 5. Schemat ideowy kolumny rezonansowej firmy GDS (GDS 2010)
 FIGURE 5. Schematic diagram of the GDS RCA (GDS 2010)

w kolumnie rezonansowej przedstawia się następująco:

1. Analiza sztywności gruntu, polegająca na określeniu:
 - modułu odkształcenia postaciowego (G),
 - modułu odkształcenia (E).
2. Analiza odkształcenia gruntu:
 - badanie odkształcenia przy ścinaniu (γ),
 - badanie odkształcenia przy zginaniu (ε).
3. Wyznaczanie i analiza prędkości fali podłużnej (V_p) oraz poprzecznej (V_s).
4. Analiza tłumienia, polegająca na określeniu współczynnika tłumienia (D lub ζ) fal elektromagnetycznych rozchodzących się w gruncie.

Przed przystąpieniem do wykonywania właściwych pomiarów dynamicznych konieczne jest odpowiednie przygotowanie próbki. Początkowe etapy badania, pozwalające na odwzorowanie warunków naturalnych, w których znajdowała się próbka gruntu w terenie, obejmują: „flushing”, nasączenie, sprawdzenie parametru Skemptona (B) i konsolidację.

Pierwszy stopień nasączenia próbek przeprowadza się przy grawitacyjnym przepływie wody (flushing), dalsze zaś stopnie wykonuje się metodą ciśnienia wyrównawczego (back pressure), która polega na włączaniu odpowietrzonej wody do próbki za pośrednictwem zamkniętego układu połączonego z dołem próbki. Ciśnienie wyrównawcze oraz ciśnienie w komorze zwiększa się równocześnie tak, aby izotropowe naprężenie efektywne w próbce nie zmieniło się. Każdy stopień obciążenia przy nasączeniu utrzymuje się przez okres około 1 godziny, po czym następuje kontrola

stopnia nasycenia próbki poprzez określenie parametru Skemptona zgodnie ze wzorem:

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_0} \quad (6)$$

gdzie:

Δu – przyrost ciśnienia wody w porach,
 $\Delta \sigma_0$ – przyrost ciśnienia w komorze.

Oznaczenie B polega na niewielkim wzroście ciśnienia w komorze (σ_0) – przy spełnieniu warunku $\Delta \sigma_1 = \Delta \sigma_3$, gdzie σ_1 to składowa pionowa naprężenia, a σ_3 – składowa pozioma naprężenia – i pomiarze przyrostu ciśnienia wody w porach. Etap nasączenia uznaje się za zakończony, gdy parametr Skemptona jest większy niż 0,92.

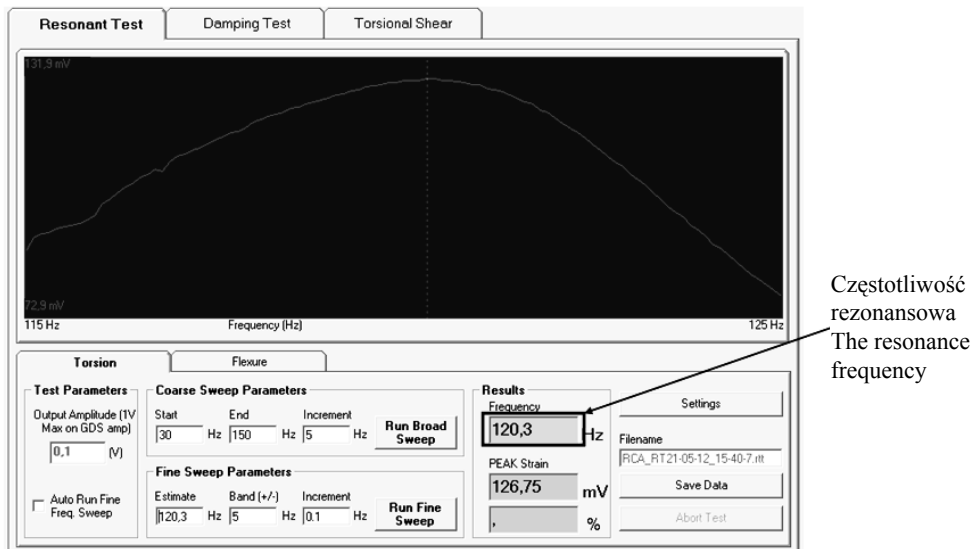
Kolejnym krokiem jest konsolidacja próbek. Podczas tego procesu ciśnienie wody w porach jest równe ciśnieniu wyrównawczemu z ostatniego stopnia nasączenia. Konsolidacja polega na zadawaniu stałego ciśnienia w komorze i ciśnienia wyrównawczego oraz równoczesnemu monitorowaniu zmian objętości próbki gruntu. Konsolidację gruntów naturalnych przeprowadza się najczęściej przy różnych wartościach izotropowych naprężeń efektywnych aż do momentu rozproszenia nadwyżki ciśnienia wody w porach.

Tak przygotowany materiał badawczy można poddać testom dynamicznym, które polegają głównie na wzbudzeniu sinusoidalnych drgań, dzięki elektromagnetycznemu systemowi napędowemu. Moment obrotowy jest przykładany do próbki poprzez zastosowanie sinusoidalnego napięcia na cewkach, co z kolei prowadzi do wprowadzenia w drgania płyty napędowej. Drgania te są wyni-

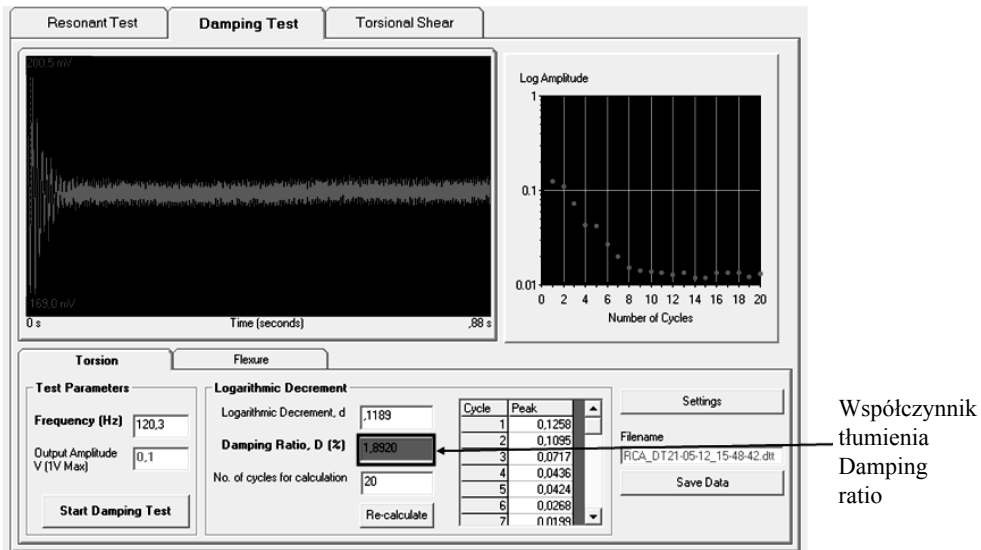
kiem powstałego pola magnetycznego. Kontrola częstotliwości oraz amplitudy przykładanego napięcia pozwala na znalezienie częstotliwości rezonansowej (f) próbki gruntu. Amplituda wibracji jest zmierzona przez moc wyjściową na przyspieszeniomierzu, który umiejscowiony jest na płycie napędowej, w trakcie zadawania częstotliwości z ich ustalonego zakresu. Po wykonaniu testów rezonansowych skręcania bądź zginania można przejść do testów tłumienia. Wyznaczona wcześniej częstotliwość rezonansowa zostanie automatycznie zaktualizowana w zestawie parametrów testu tłumienia. Po upływie określonego czasu (domyślnie 2 sekundy) cewki zostają całkowicie wyłączone, a system napędowy pozostawiony do swobodnej wibracji. Następuje pomiar powstałej krzywej tłumienia.

Wyniki badań

Wykres przedstawiający maksymalną wartość sygnału na przyspieszeniomierzu w funkcji częstotliwości przykładanego napięcia pozwala na łatwe zidentyfikowanie częstotliwości rezonansowej (częstotliwość rezonansowa zaznaczona w ramce – rys. 6). Na rysunku 7 pokazane zostały wyniki dla typowego testu tłumienia wykonanego na próbce piasku ilastego (clSa), pochodzącego z budowanej trasy ekspresowej S2, między węzłami „Puławska” – „Lotnisko”. Logarytmiczny dekrement tłumienia jest obliczany z nachylenia krzywej: logarytm z amplitudy drgań – liczba cykli obciążeniowych, a na jego podstawie zostaje wyznaczony poszukiwany współczynnik tłumienia materiału (D lub ζ , zaznaczony w ramce – rys. 7), opisany we wcześniejszej części pracy.



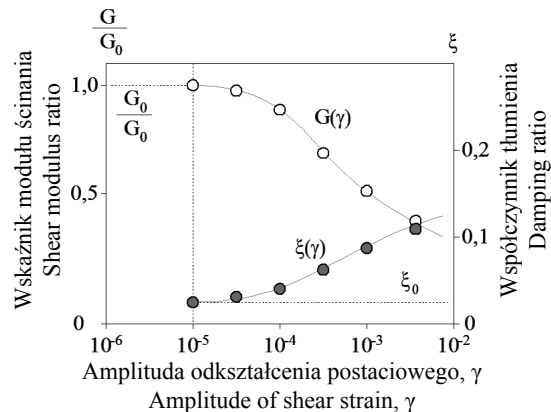
RYSunEK 6. Znalezienie częstotliwości rezonansowej dla próbki piasku ilastego (fot. autorzy)
FIGURE 6. Detecting the resonance frequency for a sample of silty sand (Authors' photo)



RYSUNEK 7. Przykład testu tłumienia dla próbki piasku ilastego (fot. autorzy)
 FIGURE 7. An example of damping test for a sample of silty sand (Authors' photo)

Znając wartość częstotliwości rezonansowej (f), możliwe jest obliczenie prędkości fal: poprzecznej (V_S) oraz podłużnej (V_P), propagowanych przez badany materiał, a tym samym wyznaczenie poszukiwanych wartości modułów odkształceniowych (G_0 – wzór 4, oraz E_0). Odpowiednie formuły pozwalające na oszacowanie wyżej wymienionych

parametrów zostały omówione w pracy Sasa i innych (2012). Analizy te przeprowadza się przy znanej geometrii próbki oraz znanych warunkach zamocowania podstaw próbki, tj. konfiguracji urządzenia (np. fixed-free). Typowy, przykładowy rezultat testów rezonansowych przeprowadzonych na kolumnie rezonansowej ilustruje rysunek 8.



RYSUNEK 8. Typowy rezultat testów rezonansowych (Lunne i in. 2008)
 FIGURE 8. Typical results of resonant tests (Lunne i in. 2008)

Podsumowanie

W artykule zaprezentowano kolumnę rezonansową jako jeden z nowoczesnych aparatów służących do oszacowania parametrów odkształceniowych podłoża gruntowego w zakresie małych odkształceń. Jest to urządzenie laboratoryjne zaprojektowane specjalnie do pomiarów dynamicznych właściwości gruntów. Aparat ten pozwala na określenie modułu odkształcenia postaciowego gruntu z przedziału 10^{-6} – 10^{-2} oraz jego właściwości tłumienia (ASTM-D4015-92 2003). Zastosowany w badaniach test rezonansowy jest w zasadzie nieinwazyjny, nieniszczący, dlatego dynamiczne właściwości gruntu mogą być wyznaczone przy różnych wartościach ciśnienia otaczającego próbkę. Obliczone wartości odkształcenia postaciowego, odnoszącego się do zakresu małych odkształceń, zgadzają się z wartościami otrzymanymi przy wykorzystaniu terenowych badań geofizycznych, co potwierdza praca Clayton (2011).

Kolumna rezonansowa ma pewne ograniczenia:

1. Zastosowane testy są w zasadzie analizami wstecznymi. Dane wyjściowe nie są odpowiedzią samego materiału badawczego, ale zawierają w sobie również wpływ całej aparatury. By otrzymać prawidłowe wyniki, należy uwzględnić to oddziaływanie na przykład podczas kalibracji aparatury.

2. Kolumna rezonansowa jest użytecznym narzędziem do pomiaru dynamicznych właściwości gruntów, gdy odkształcenia osiągają wartości mniejsze niż $5 \cdot 10^{-2}\%$.

Jednakże, pomimo tych wad, pomiary w kolumnie rezonansowej uznane

są obecnie za jedną z najbardziej wiarygodnych oraz efektywnych technik badań laboratoryjnych w celu określenia modułu ścinania i współczynnika tłumienia geotekstyliów i innych materiałów.

Literatura

- 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, 4.08: 473–494.
- CLAYTON C.R.I. 2011: Stiffness at small strain: research and practice. *Géotechnique* 61, 1: 5–37.
- DAS B.M., RAMANA G.V. 2011: Principles of Soil Dynamics. International SI Edition, United States of America.
- ELLISE A., SOGAK., BRANSBY M.F., SATOM. 2000: Resonant column testing of sand with different viscosity pore fluids. *J. Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE* 126, 4: 10–17.
- GDS Resonant Column 2010: The GDS Resonant Column System Handbook (Version 2.2.2010).
- HEISEY J.S., STOKOE K.H.II, MEYER A.H. 1982: Moduli of pavement systems from spectral analysis of surface waves. *Transp. Res. Rec.* 852: 22–31.
- LUNNE T., BERRE T., ANDERSEN K.H., SJURSEN M., MORTENSEN N. 2008: Effects of sample disturbance on consolidation behaviour of soft marine Norwegian clays. Geotechnical and Geophysical Site Characterization. Proc. of the 3rd International Conference on Site Characterization ISC'3, Taipei, Taiwan: 1471–1479.
- MARKOWSKA K. 2001: Wykorzystanie badań sejsmicznych do wyznaczania parametrów geotechnicznych podłoża budowli ze szczególnym uwzględnieniem metodyki wyznaczania modułu odkształcenia. Praca magisterska. SGGW, Warszawa.
- SAS W., GABRYŚ K., SZYMAŃSKI A. 2012: Analiza sztywności gruntów spoistych przy wykorzystaniu kolumny rezonansowej. *Inżynieria Morska i Geotechnika* 4: 370–376.

- TAKKABUTR P. 2006: Experimental investigations on small-strain stiffness properties of partially saturated soils via resonant column and bender element testing. Rozprawa doktorska. The University of Texas at Arlington, USA.
- TOWHATA I. 2008: Geotechnical Earthquake Engineering. Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg.
- WERNO M. (red.) 1985: Podłoże gruntowe obciążone cyklicznie. Inżynieria komunikacyjna. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa.

Streszczenie

Kolumna rezonansowa jako urządzenie do badań dynamicznych gruntów spolistych. Artykuł dotyczy kolumny rezonansowej użytej w badaniach własnych. Jest to urządzenie opracowane przez brytyjską firmę GDS Instruments Ltd. i jest przykładem kolumny typu Hardin-Drnevich „fixed-free”. Zastosowana aparatura służy do pomiarów dynamicznych właściwości gruntów. Przedstawiono budowę kolumny rezonansowej, krótką charakterystykę zakresu jej pracy oraz zwięzłe objaśnienie procedur badawczych. Za niezbędne uznano omówienie najważniejszych parametrów, które można oszacować na podstawie przeprowadzonych testów rezonansowych. Ponadto zaprezentowano przykładowe wyniki wykonanych badań.

Summary

Resonant Column Apparatus as a device for dynamic testing of cohesive soils. This article concerns the Resonant Column Apparatus used by the authors in their researches. This device was developed by the British company GDS Instruments Ltd and is an example of the resonant column projected by Hardin and Drnevich, in the fixed-free configuration. The apparatus is used to measure the dynamic properties of the soil. In the above publication, the structure of the equipment, a short description of the scope of work as well as a brief explanation of the test procedures are presented. The most important parameters that can be estimated on the basis of resonant tests are also mentioned. Moreover, the exemplary results of the tests performed are enclosed.

Authors' address:

Katarzyna Gabrys, Wojciech Sas,
Alojzy Szymański
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
Katedra Geoinżynierii
ul. Nowoursynowska 159, 02-787 Warszawa
Poland
e-mail: katarzyna_gabrys@sggw.pl
wojciech_sas@sggw.pl
alozzy_szymanski@sggw.pl