# Badania gruntu w aparacie skrętnego ścinania RC/TS. Część 2.

# Dr inż. Ireneusz Dyka, dr hab. inż. Piotr E. Srokosz Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Wydział Nauk Technicznych

Aparat RC/TS jest to dwufunkcyjny aparat badawczy służący do cyklicznego ścinania skrętnego próbek gruntu lub działający jako kolumna rezonansowa. W pierwszej części artykułu, który poświęcony był opisowi teoretycznych podstaw badania w wymienionym aparacie, stwierdzono, że metoda RC/TS jest obecnie uważana za jedną z najbardziej miarodajnych metod laboratoryjnych służących do oznaczania modułu ścinania G oraz współczynnika tłumienia D gruntów i innych materiałów [6]. Parametry te sa potrzebne do modelowania zjawisk zachodzacych w podłożu gruntowym budowli poddanym oddziaływaniom sejsmicznym oraz innym oddziaływaniom dynamicznym. Głównym powodem wyznaczania modułów sprężystości dla bardzo małych odkształceń była potrzeba wyznaczania w pełni odwracalnej reakcji gruntów i wynikających z niej typowo sprężystych zachowań materiałów. Jednocześnie stwierdzono, że w zakresie małych odkształceń wielkości parametrów dynamicznych pokrywają się z wielkościami parametrów statycznych [7]. Spowodowało to szansę szerszego wykorzystania aparatów badawczych służących do tej pory do rozwiązywania zagadnień dynamicznych.

W pierwszej części artykułu [6] przedstawiono między innymi zarys historyczny ewolucji konstrukcji kolumn rezonansowych rozwijanych sukcesywnie w USA oraz Japonii. Jednym z głównych ośrodków zajmujących się udoskonalaniem konstrukcji aparatu było laboratorium prowadzone przez profesora Stokoe w University of Texas w Austin. Kierunek tych prac jest kontynuowany w Uniwersytecie w Neapolu, gdzie powstała konstrukcja aparatu o nazwie THOR [9]. Aparat WF8500 oparty na tej konstrukcji jest produkowany przez brytyjski koncern Wykeham Farrance, którego przedstawicielem handlowym jest firma Controls. Aparat WF8500 od 2011 roku stanowi wyposażenie Laboratorium Geotechnicznego Katedry Geotechniki i Budownictwa Drogowego Wydziału Nauk Technicznych Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie. Budowę aparatu oraz podstawy teoretyczne wykonywanych pomiarów przedstawiono w pierwszej części niniejszego artykułu. Celem drugiej części jest przedstawienie praktycznych zasad wykonywania badań wymienionym aparatem, począwszy od procedur kalibracyjnych do badań zasadniczych, ukazanych na podstawie wyników pomiarów wykonanych na próbkach nienasyconego gruntu niespoistego.

Możliwości badawcze aparatu RC/TS przedstawiono na podstawie serii badań wykonanych na próbce z piasku średniego MSa o stopniu zagęszczenia  $I_D = 0,50$  i parametrach zestawionych w tabl. 1. Krzywą uziarnienia badanego gruntu przedstawiono na rys. 1. Badania wykonano na próbce walcowej o średnicy 70 mm i wysokości 140 mm.

Próbkę uformowano w silikonowej osłonie na cokole podstawy aparatu, który stanowi podparcie dla całego układu napędowego i pomiarowego (rys. 2). Po dokładnym ustawieniu rotora z magnesami względem statora z cewkami został on przykręcony precyzyjnie do głowicy opartej na górnej powierzchni próbki.

Tabl. 1. Parametry badanego gruntu niespoistego

ρ	ρ	w	S <sub>r</sub>	е	e <sub>max</sub>	e <sub>min</sub>	<i>d</i> <sub>50</sub>	$C_{u} = d_{60}/d_{10}$
2,650	1,656	12,0	0,53	0,603	0,730	0,474	0,285	1,45
g/cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	%	-	-	-	-	mm	-



Rys. 1. Wyniki analizy granulometrycznej badanego gruntu niespoistego



Rys. 2. Etapy przygotowania próbki do badań w aparacie RC/TS

Następnie zamontowano pozostałe części systemu napędowego i pomiarowego, podłączono odpowiednie przewody i nałożono cylinder zewnętrzny, który po przykryciu płytą górną skręcono za pomocą 6 śrub (rys. 2). Po wypełnieniu cylindra wewnętrznego odpowietrzoną wodą zadano izotropowe ciśnienie konsolidujące. W tym przypadku pominięto procedurę saturacji próbki za pomocą ciśnienia wyrównawczego, a badania wykonywano na próbkach nienasyconych. Ciśnienie konsolidujące  $\sigma_c = p$  zadawano za pomocą ciśnienia powietrza poprzez płaszcz wodny otaczający próbkę.

#### BADANIA W KOLUMNIE REZONANSOWEJ (RC)

Klasyczne badanie przy użyciu kolumny rezonansowej (RC) ma na celu wyznaczenie prędkości propagacji fali ścinającej (poprzecznej)  $V_s$  wzbudzonej w próbce gruntu, a przy znanej wartości gęstości objętościowej badanego materiału  $\rho$  – wyznaczenie wartości modułu sprężystości postaciowej G.

Częstość własną drgającego układu próbka + układ napędowy aparatu RC można w sposób przybliżony wyrazić metodą Rayleigh'a za pomocą następującej zależności:

$$\omega_n^2 = \frac{K}{\left(\frac{I}{3} + I_0\right)} = \frac{G \cdot J}{\left(\frac{I}{3} + I_0\right) \cdot L} = \frac{V_s^2 \cdot \rho \cdot J}{\left(\frac{I}{3} + I_0\right) \cdot L}$$
(1)

gdzie:

- K sztywność skrętna próbki gruntu,
- J biegunowy moment bezwładności próbki gruntu,
- I masowy, biegunowy moment bezwładności próbki gruntu,
- $I_0$  masowy moment bezwładności układu napędowego,

 $\omega_n$  – kołowa częstość własna całego układu próbka + układ napędowy, który poddany jest drganiom wymuszonym przez harmonicznie zmienny moment skręcający,

L-wysokość próbki.

W badaniu RC prędkość fali poprzecznej  $V_s$  wyznacza się na podstawie równania:

$$\frac{I}{I_0} = \frac{\omega_n \cdot L}{V_S} \cdot \tan\left(\frac{\omega_n \cdot L}{V_S}\right) \quad \text{lub} \quad \frac{I}{I_0} = \beta \cdot \tan(\beta)$$
(2)

Wyprowadzenie tego równania przedstawiono w [6]. Przy znanych wartościach masowych momentów bezwładności próbki *I* oraz układu napędowego  $I_0$  z równania (2) wyznacza się wartość kąta  $\beta$  [rad]. W celu otrzymania prędkości fali ścinającej  $V_s$  wystarczy wyznaczyć częstotliwość drgań własnych całego układu (próbki i wszystkich elementów składowych układu napędowego)  $f_a$ :

$$V_{s} = \frac{\omega_{n} \cdot L}{\beta} = \frac{2\pi \cdot f_{n} \cdot L}{\beta}$$
(3)

Uwzględniając zjawisko tłumienia, otrzymuje się zależność na częstotliwość rezonansową systemu:

$$f_r = f_n \sqrt{1 - D^2} \tag{4}$$

gdzie: *D* – współczynnik tłumienia próbki gruntu.

Według równania (4) różnica między częstotliwością drgań własnych a częstotliwością rezonansową jest tym większa, im większy jest współczynnik tłumienia materiału. Jednakże współczynniki tłumienia typowych materiałów gruntowych osiągają wartości mniejszych od 20%, co prowadzi do zależności  $f_r = 0.980 f_n$ . Zatem, w praktycznych badaniach wartość

częstotliwości drgań własnych  $f_n$  zastępuje się wartością częstotliwości drgań w stanie rezonansu  $f_r$ :

$$V_{S} = \frac{2\pi \cdot f_{r} \cdot L}{\beta} \tag{5}$$

Po wyznaczeniu częstotliwości rezonansowej  $f_r$  wyznacza się wartość modułu sprężystości postaciowej (poprzecznej) na podstawie zależności:

$$G = \rho \frac{4\pi^2 f_r^2 L^2}{\beta^2} \tag{6}$$

Wszystkie parametry we wzorze (6), za wyjątkiem częstotliwości rezonansowej, mogą być wyznaczone w bezpośrednim pomiarze, dlatego w celu obliczenia modułu ścinania próbki należy oznaczyć tylko częstotliwość rezonansową materiału gruntowego za pomocą badania w kolumnie rezonansowej.

Metodyka oznaczenia częstotliwości rezonansowej  $f_r$  polega na wzbudzaniu w próbce drgań o skokowo lub płynnie (technika *chirp*) narastających wartościach częstotliwości. Dane rejestruje się w postaci zależności amplitudy od czasu (górny wykres na rys. 3). Po wykreśleniu zależności pomiędzy wartościami amplitud i częstotliwościami drgań identyfikuje się wartość częstotliwości, dla której wzbudzono maksymalny kąt skręcenia (dolny wykres na rys. 3). Poza standardową analizą opierającą się na zmienności amplitudy drgań, oprogramowanie aparatu WF8500 umożliwia jeszcze przeprowadzenie analizy na podstawie bezpośrednio mierzonych wielkości fizycznych, tzn. na podstawie zmian wartości przyspieszenia rejestrowanego przez akcelerometr zainstalowany w rotorze układu napędowego aparatu. W celu wyznaczenia kąta  $\beta$  z wzoru (2) konieczna jest znajomość wartości masowych momentów bezwładności próbki oraz układu napędowego. Masowy, biegunowy moment bezwładności próbki walcowej o średnicy *d* i masie *m* oblicza się według wzoru:

$$I = \frac{1}{8}m \cdot d^2 \tag{7}$$

Biegunowy moment bezwładności układu napędowego można obliczyć matematycznie, uwzględniając geometrię i rozkład wszystkich elementów składowych głowicy rotora. Jest to jednak sposób pracochłonny i obarczony dużym prawdopodobieństwem popełnienia błędu w obliczeniach. Bardziej praktycznym sposobem jest wyznaczenie wartości masowego momentu bezwładności metodą kalibracji wykonanej przy użyciu prętów o znanej sztywności skrętnej (K=GJ/L), niewielkim momencie bezwładności I i pomijalnie małym tłumieniu ( $D \cong 0$ ). Pręty kalibracyjne umieszczamy w komorze aparatu RC w miejsce próbki gruntu.

Poza wartością modułu Kirchhoffa G badanie RC dostarcza dane umożliwiające oszacowanie wartości współczynnika tłumienia D [6]. Chcąc określić wartość tego współczynnika na podstawie widma drgań przedstawionego w funkcji częstotliwości (rys. 3), należy zastosować metodę analizy szerokości pasma połowy mocy (*half-power bandwidth*). Metoda ta polega na określeniu dwóch granicznych częstotliwości w otoczeniu częstotliwości rezonansowej, w zakresie których układ oddaje przynajmniej połowę całkowitej mocy generowanej podczas wymuszanych drgań. Amplituda drgań  $\Theta$  w ustalonej chwili *t* 







Rys.4. Idea metody half-power bandwidth (analityczna symulacja badania RC [15])

i przy stałej częstości  $\omega$  jest liniowo zależna od momentu skręcającego T ([6], wyprowadzenie w [15]). Biorąc pod uwagę fakt, że moment skręcający T jest wprost proporcjonalny do siły elektrodynamicznej  $F_{ED}$  cewek statora oddziałujących na magnesy rotora układu napędowego aparatu RC/TS:

$$T = F_{ED} \cdot \xi \tag{8}$$

gdzie:

 $\xi$  – stałe ramię działania siły  $F_{ED}$ ,

a siła  $F_{ED}$  jest wprost proporcjonalna do natężenia prądu  $I_E$  przepływającego przez cewki statora i uwzględniając liniowe prawo Ohma można stwierdzić, że amplituda drgań jest proporcjonalna do napięcia elektrycznego  $U_E$  przyłożonego do układu cewek statora (na podstawie danych kalibracyjnych zawartych w [11]). Z definicji mocy elektrycznej:

$$P = U_E \cdot I_E = \frac{U_E^2}{Z} \tag{9}$$

gdzie:

Z-impedancja uzwojeń statora,

wynika, że połowa mocy:

$$\frac{1}{2}P = \frac{\left(\frac{1}{\sqrt{2}}U_E\right)^2}{Z} \tag{10}$$

jest uzyskiwana przez obniżenie wartości napięcia  $U_E$  o  $\sqrt{2}$ . Proporcjonalność napięcia elektrycznego i amplitudy drgań pozwala na zastosowanie takiego samego dzielnika w stosunku do maksymalnej wartości amplitudy uzyskanej z badań (rys. 4). Punkty powstałe z przecięcia obniżonego poziomu amplitudy (pozioma, przerywana linia na rys. 4) z wykresem widma częstotliwościowego zarejestrowanych drgań wyznaczają dwie wartości częstotliwości:  $f_1$  i  $f_2$  (pionowe, kropkowane linie na rys.4) stanowiące granice szerokości pasma połowy mocy. Zgodnie z ideą metody [10] współczynnik tłumienia wyznacza się z relacji:

$$D = \frac{f_2 - f_1}{2f_r}$$
(11)

Przedstawioną metodykę interpretacji można zastosować również w przypadku analizy uzyskanych wyników badań techniką szybkiej transformacji Fouriera (FFT). W wyniku analizy FFT uzyskuje się częstotliwościowe widmo mocy zarejestrowanych drgań, z którego odczytuje się granice pasma w połowie wartości maksymalnej mocy [15].

#### Kalibracja kolumny rezonansowej

W aparacie RC/TS WF8500 wartość masowego momentu bezwładności głowicy napędowej  $I_0$  wyznacza się w procesie kalibracji z użyciem prętów o średnicy d = 8 mm wykonanych ze stali i mosiądzu. Procedura kalibracyjna wymaga użycia dodatkowej masy o znanym, masowym momencie bezwładności  $\Delta I = 4,1$  kg·cm<sup>2</sup>, umieszczanej na swobodnym końcu pręta kalibracyjnego (rys. 5). Dzięki małej średnicy pręta można zaniedbać jego masowy moment bezwładności we wzorze na częstość kołową drgań własnych:

$$\omega_n^2 = \frac{K}{I_0} = \omega_r^2 \quad \rightarrow \quad K = I_0 \cdot \omega_r^2 \tag{12}$$

Procedura kalibracyjna polega na pomiarze częstotliwości rezonansowej dwóch pobudzonych do drgań układów:

- układu składającego się z rotora przymocowanego do pręta kalibracyjnego,
- układu składającego się z rotora przymocowanego do dodatkowej masy o znanym momencie bezwładności (Δ*I*) umieszczonej na pręcie kalibracyjnym.



Rys. 5. Stalowy pręt kalibracyjny d = 8 mm z dodatkową masą

Tabl. 1. Wpływ wartości parametru Io na wyniki oznaczeń w aparacie RC

	$I_0 = 12,0$	$I_0 = 12,5$	$I_0 = 13,0$	$I_0 = 13,5$	$I_0 = 14,0$	$I_0 = 14,5$	$I_0 = 15,0$
β [rad]	0,6306	0,6196	0,6092	0,5992	0,5898	0,5807	0,5721
$f_r$ [Hz]	171,45	171,45	171,45	171,45	171,45	171,45	171,45
$V_{s}$ [m/s]	238,76	242,99	247,16	251,28	255,30	259,29	263,20
G [MPa]	95,214	98,625	102,03	105,47	108,87	112,29	115,71

W obu pomiarach skręcany jest ten sam pręt o sztywności *K*. Porównując ze sobą wyrażenia na sztywność skrętną odpowiadającą pomiarom 1 i 2, wyznacza się szukaną wielkość masowego momentu bezwładności rotora, który następnie będzie wzbudzać drgania skrętne w badanej próbce gruntu:

$$K = I_0 \cdot \omega_{r_1}^2 = (I_0 + \Delta I) \cdot \omega_{r_2}^2 \to I_0 = \frac{\Delta I \cdot \omega_{r_2}^2}{(\omega_{r_1}^2 - \omega_{r_2}^2)}$$
(13)

gdzie:

 $\Delta I$  – masowy moment bezwładności dodatkowej masy znajdującej się na pręcie kalibracyjnym,

 $\omega_{r1}$  – kołowa częstość rezonansowa układu 1: pręt + układ napędowy,

 $\omega_{\rm r2}^{}-$  kołowa częstość rezonansowa układu 2: pręt + dodatkowa masa + układ napędowy.

Wartość wyznaczonego masowego momentu bezwładności  $I_0$  jest istotna ze względu na jej znaczący wpływ na wartości wyników pomiaru: kąta  $\beta$ , prędkości fali poprzecznej  $V_s$  i ostatecznie modułu sprężystości poprzecznej *G*. W dotychczasowych doświadczeniach, w zależności od rodzaju pręta kalibracyjnego, miejsca usytuowania aparatu oraz czasu wykonania kalibracji, uzyskiwano wartości  $I_0$  mieszczące się w przedziale  $12 \div 15$  kg·cm<sup>2</sup>. W tabl. 2 zestawiono wyniki badania RC próbki piasku, stosując w procesie interpretacji różne wartości masowego momentu bezwładności  $I_0$ .

Wyniki przedstawione w tabl. 2 wskazują na konieczność precyzyjnego określenia wartości masowego momentu bezwładności głowicy napędowej. Kalibrację aparatu należy wykonywać każdorazowo przed każdym cyklem badań lub po jego zakończeniu, jeśli wartości prędkości fali poprzecznej oraz modułu odkształcenia obliczamy sami na podstawie uzyskanych wyników pomiaru częstotliwości rezonansowej. Należy zwrócić przy tym uwagę, że sama wartość częstotliwości rezonansowej  $f_r$  nie zależy od wielkości  $I_0$  a zależą od niej wartości pochodne, czyli  $\beta$ ,  $V_s$  oraz G.

Wielkości statyczne charakteryzujące cechy mechaniczne głowicy napędowej (np.  $I_0$ ) zmieniają się wraz ze zmianą miejsca usytuowania aparatu, zmianą warunków w pomieszczeniu laboratoryjnym oraz z upływem czasu, biorąc pod uwagę naturalne zużycie części składowych głowicy napędowej. Ze względu na dużą liczbę elementów składowych rotora, które każdorazowo trzeba przykręcać śrubami o różnej wielkości, wartość masowego momentu bezwładności zależy również od dokładności i siły przykręcenia tych elementów, a więc również od osoby wykonującej kalibrację oraz badania zasadnicze.

#### Badanie zasadnicze w kolumnie rezonansowej

Badanie zasadnicze w kolumnie rezonansowej polega na przeszukiwaniu założonego pasma częstotliwości w celu zidentyfikowania częstotliwości rezonansowej *f*, pobudzonego do drgań układu. Wymuszenie drgań następuje w wyniku wygenerowania siły elektrodynamicznej będącej skutkiem przepływu przemiennego prądu elektrycznego o ustalonej amplitudzie napięcia przez zespół cewek statora, którego pole magnetyczne oddziałuje z zespołem magnesów NeFeB rotora. Parametrami badania ustalanymi w programie sterującym są: amplituda napięcia elektrycznego V oraz częstotliwość początkowa i końcowa, które definiują przeszukiwane pasmo. Częstotliwość rezonansowa będzie osiągnięta przy pewnym skręceniu próbki  $\Theta$ , które jest obliczane w czasie rzeczywistym badania na podstawie przyspieszenia rejestrowanego przez akcelerometr.

Odkształcenie postaciowe  $\gamma$  odpowiadające częstotliwości rezonansowej  $f_{,,}$  a przez to mierzonemu modułowi sprężystości poprzecznej G, określane jest na podstawie zależności (rys. 5 według [6]):

$$\gamma = \operatorname{arc} \operatorname{tg}\left(2\frac{r}{H} \cdot \sin\left(\frac{1}{2}\Theta\right)\right) \tag{14}$$

gdzie : H – wysokość próbki,

r – odległość pomiędzy analizowanym punktem a osią próbki.

Przy małych wartościach kąta skręcenia, które rejestruje się w badaniach RC, wzór (14) upraszcza się do postaci [16]:

$$\gamma = \frac{r \cdot \Theta}{H} = \frac{\kappa \cdot R}{H} \cdot \Theta \tag{15}$$

gdzie:

κ – współczynnik określający wartość promienia r próbki o średnicy 2R.

Według amerykańskiej normy ASTM D 4015 – 92 obliczeniowe odkształcenie postaciowe jest wartością średnią badanej próbki. Według zaleceń tej normy, zakładając liniową zmienność kąta obrotu wzdłuż wysokości próbki, średnią wartość odkształcenia uzyskuje się dla  $\kappa = 0.8$ , zakładając, że odkształcenia nie przekraczają 0,001 %. W praktyce badań RC wartość  $\kappa$  określająca promień obliczeniowy próbki (*equivalent average radius*) waha się od 0,62 przy odkształceniach rzędu 0,1 % do 0,82 przy odkształceniach rzędu 0,001% [3]. Producent aparatu WF8500 zaleca stosowanie  $\kappa = 2/3$  [13].

# BADANIA W APARACIE SKRĘTNEGO SCINANIA (TS)

Badanie w aparacie RC/TS w trybie cyklicznego, skrętnego ścinania (TS), analogicznie do trybu RC, ma na celu wyznaczenie wartości modułu sprężystości postaciowej G oraz współczynnika tłumienia D. Polega ono na cyklicznym obciążaniu próbki momentem skrętnym o zmieniającej się harmonicznie wartości, o częstotliwości zmian poniżej 10 Hz (w praktyce poniżej 1 Hz), wywołującym w materiale próbki składową styczną stanu naprężenia według zależności:



Rys. 6. Analityczna symulacja badania TS [16]

$$\tau(t) = \frac{r \cdot T}{J} = \frac{\kappa \cdot R}{J} \cdot T = \frac{\kappa \cdot R}{J} \cdot T_0 \sin(\omega \cdot t) = \tau_0 \sin(\omega \cdot t)$$
(16)  
gdzie:

J – geometryczny, biegunowy moment bezwładności przekroju walcowej próbki.

Drugim, podstawowym efektem działania momentu T jest skręcenie swobodnego końca próbki, które pozostaje w stałej relacji z odkształceniami postaciowymi według formuły (15). Przebieg zmian wartości kąta skręcenia, odkształcenia postaciowego i składowej stycznej naprężenia w funkcji czasu przedstawiono na rys. 6. Eliminując zmienną czasową t, można wyznaczyć bezpośrednią zależność pomiędzy składową styczną τ a odkształceniem postaciowym  $\gamma$  [16]:

> $\tau(\gamma) = \tau_0 \sin\left(\arcsin\left(\frac{\gamma}{\gamma_0}\right) + \phi\right)$ (17)

gdzie:

$$\phi = \operatorname{arc} \operatorname{tg}\left(\frac{C\omega}{K - I_0 \omega^2}\right) \tag{18}$$

$$\gamma_0 = \frac{\kappa \cdot R}{H} \Theta_0 \tag{19}$$

Zależność  $\tau(\gamma)$  przedstawiono na rys. 6. Ze względu na występowanie zjawiska tłumienia, wykresy zmienności  $\Theta(t)$  i  $\gamma(t)$ są przesunięte w fazie względem wykresu  $\tau(t)$  o kąt  $\phi$ , którego efektem jest wywołanie histerezy uwidocznionej w graficznej

reprezentacji zależności  $\tau(\gamma)$ . Zatem, znając wartość momentu wymuszenia T (na podstawie zadanego napięcia elektrycznego), kąta skręcenia Θ (zmierzonego czujnikami zbliżeniowymi) oraz wymiary geometryczne próbki, można na podstawie (16) i (15) obliczyć i wykreślić relację  $\tau(\gamma)$ , z której odczytuje się wartości  $\gamma_{max}$  i  $\tau(\gamma_{max})$  niezbędne do wyznaczenia modułu G:

$$G = \frac{\tau(\gamma_{\max})}{\gamma_{\max}}$$
(20)

Z kolei współczynnik tłumienia D<sub>TS</sub>, wyznaczany bezpośrednio z wyników badania TS, jest zdefiniowany w postaci [1]:

$$D_{TS} = \frac{1}{2\pi} \frac{W_D}{E_P} \tag{21}$$

gdzie

W<sub>p</sub>- energia pochłaniana przez materiał podczas cyklicznego skręcania, energia rozpraszana.

 $E_p$  – energia potencjalna, kumulowana w materiale podczas odkształceń sprężystych, w pełni odwracalnych, energia odkształceń.

Wytracana cyklicznie energia  $W_p$  jest uzupełniania w systemie przez zewnętrzną pracę wykonywaną przez moment T na kącie skręcenia  $\Theta$ . Energię tę można zdefiniować wzorem:

$$W_D = \oint_{V} \tau(\gamma) d\gamma \tag{22}$$

gdyż zgodnie z interpretacją geometryczną zagadnienia tłumienia (rys. 6) wartość energii  $W_p$  jest reprezentowana przez pole



Rys. 7. Analityczna symulacja badania FD [14]





histerezy opisanej zależnością funkcyjną  $\tau(\gamma)$ . Z kolei odzyskiwana energia potencjalna  $E_p$ , charakteryzująca chwilową kumulację energii sprężystej przez materiał w stanie maksymalnego odkształcenia  $\gamma_{max}$ , jest zdefiniowana polem pod wykresem liniowo-sprężystej reakcji materiału badanej próbki, zaznaczonym na rys. 6. Pole to można wyrazić wzorem

$$E_{P} = \frac{1}{2} \tau(\gamma_{\max}) \gamma_{\max}$$
(23)

Można wykazać analitycznie [1, 16], że wartość współczynnika tłumienia D uzyskana z badań RC odpowiada połowie wartości współczynnika  $D_{TS}$  uzyskanego z badań TS, tj.:

$$D = \frac{1}{2}D_{TS} = \frac{1}{4\pi}\frac{W_D}{E_P}$$
(24)

# BADANIA W TRYBIE DRGAŃ SWOBODNYCH (FD)

Aparat RC/TS udostępnia dodatkowo opcję przeprowadzania badań w trybie gasnących drgań swobodnych (FD). Tryb ten ma na celu wyznaczenie wartości logarytmicznego dekrementu tłumienia  $\delta$ , który umożliwia oszacowanie wartości współczynnika tłumienia *D* według formuły (35) z pierwszej części artykułu [6]. Badanie w trybie FD polega na "rozkołysaniu" próbki kilkoma cyklami wymuszeń momentem skręcającym *T* (ustawianym wartością napięcia elektrycznego) do momentu uzyskania amplitudy drgań  $\Theta_0$  na tyle dużej, aby po ustaniu zewnętrznego wymuszenia próbka wykonała jeszcze przynajmniej kilkanaście pełnych cykli drgań o wystarczająco dużych wartościach  $\Theta$  (zatem i przyspieszeniach), aby akcelerometr mógł je zarejestrować. Pomiar kilku (zwykle sześciu) kolejnych wartości szczytowych  $\Theta$  (rys. 7) pozwala na obliczenie logarytmicznego dekrementu tłumienia, zdefiniowanego zależnością:

$$\delta = \ln\left(\frac{\Theta_1}{\Theta_2}\right) \approx \ln\left(\frac{\Theta_2}{\Theta_3}\right) \approx \dots \approx \ln\left(\frac{\Theta_{n-1}}{\Theta_n}\right)$$
(25)

#### PRZYKŁADOWE WYNIKI BADAŃ

Na rys. 8, 11 i 13 przedstawiono okna aplikacji sterującej aparatem WF8500 zawierające wyniki badań przeprowadzonych na próbce średnio zagęszczonego piasku MSa. Badania zasadnicze przeprowadzono, wykorzystując wszystkie możliwe tryby pracy aparatu opisane w artykule. Pomiary wykonano przy różnych ciśnieniach w komorze p (kolejno: p = 150, 200, 250,





Rys. 10. Zestawienie wyników zinterpretowanych wartości D otrzymanych na podstawie badania RC





300 kPa) bez saturacji, w warunkach "z odpływem" ( $u \cong 0$ ), przy różnych wartościach zadawanego momentu wymuszenia, generowanego zakresem napięcia elektrycznego od 0,1 do 10 V.

Wyznaczone częstotliwości rezonansowe  $f_r$  w trybie RC posłużyły do obliczenia wartości modułów sprężystości poprzecznej *G* na podstawie wzoru (6). Określenie szerokości czę-



Rys. 12. Wyniki wykonanych badań TS w zestawieniu z wynikami otrzymanymi na podstawie badania RC



Rys. 13. Wyniki badania FD

stotliwościowego pasma połowy mocy pozwoliło na obliczenie współczynnika tłumienia D na podstawie wzoru (11). Wyniki zinterpretowanych badań zestawiono na rys. 9 i 10 w postaci zależności G-log( $\gamma$ ) i D-log( $\gamma$ ).

Na podstawie wykresów przedstawionych na rys. 9 i 10 można zauważyć wyraźną zależność wartości modułu odkształcenia oraz współczynnika tłumienia od wielkości odkształcenia oraz naprężenia konsolidującego. Uzyskane zależności mogą okazać się bardzo użyteczne w modelowaniu mechanicznego zachowania gruntów w różnych fazach obciążenia podłoża przez konstrukcje. Wyniki tych badań uzupełnione o badania w aparacie trójosiowego ściskania mogą posłużyć do weryfikacji i opracowania analitycznych funkcji zmienności G- $\gamma$ , które są niezwykle istotne w procesie analitycznego szacowania osiadania podłoża gruntowego i przemieszczeń konstrukcji, zobacz [4, 5].

Badania w trybie TS zidentyfikowały zjawisko histerezy wywołane właściwościami lepko-sprężystymi badanego materiału, rys. 11. Na podstawie kształtu i wymiarów uzyskanej pętli histerezy wyznaczono wartości modułu *G* z formuły (20) i współczynnika *D* z wzoru (24). Porównanie wartości *G* uzyskanych z badań w trybie RC i TS dla wybranych ciśnień *p* przedstawiono na rys. 12.

Analizując porównywane zależności *G*-logy, można wywnioskować, że wynik badania w trybie TS jest obarczony błędem związanym z gruboziarnistą strukturą badanego materiału. Próbki z gruntów niespoistych podczas badania w trybie TS nie zachowują się jak ośrodki ciągłe, gdyż nie zachowują liniowej zmienności odkształcenia postaciowego  $\gamma(x)$ , rys.5 w pierwszej części pracy [6]. Badanie TS doskonale uzupełnia analizę RC w przypadku materiałów o strukturach drobnoziarnistych (tzn. gruntów spoistych) [4] oraz stanowi doskonały aparat badawczy modelujący zachowanie tych gruntów w przypadku cyklicznego obciążenia siłą ścinającą (poprzecznym momentem skręcającym).

Badania w trybie FD dostarczają informacji o wartości dekrementu tłumienia (rys. 13), na podstawie którego wyznacza się współczynnik tłumienia *D*. Na rys. 14 przedstawiono przykładowe wyniki uzyskane z badania w trybie FD w porównaniu do wartości *D* uzyskanych w trybie RC za pomocą metody *half-power bandwidth*. Należy zwrócić uwagę, że wartości odkształcenia postaciowego w trybie FD na rys. 14 odpowiadają maksymalnej amplitudzie uzyskanej w trakcie procesu wymuszania drgań (przed uwolnieniem drgań swobodnych). Wartości D w trybie FD określane są dla szerokiego zakresu odkształceń (np. 10<sup>-5</sup>÷10<sup>-3</sup> %) ze względu na zmniejszającą się amplitudę drgań w czasie ich wygaszania (rys.7).

### PODSUMOWANIE

W niniejszej pracy przedstawiono metodykę badawczą stosowaną w aparacie WF8500 w trybach RC, TS i FD. Przeprowadzone dotychczas badania próbek gruntu wskazują na istotne zalety aparatu, do których można zaliczyć:

- możliwość prowadzenia badań symulujących wiele zjawisk naturalnych i sztucznych o charakterze dynamicznym, np. trzęsienia ziemi, szkody górnicze oraz obciążenia cykliczne szybko- i wolnozmienne od urządzeń mechanicznych,
- możliwość określania wielu wpływów, m.in.: stopnia nasycenia gruntu, naprężenia konsolidującego, ciśnienia w porach gruntu oraz wielkości amplitudy drgań na wartości cech dynamicznych badanego materiału,
- możliwość wyznaczania korelacji pomiędzy wartościami cech dynamicznych a odkształceniami postaciowymi badanego materiału,
- możliwość określania maksymalnej wartości dynamicznego modułu Kirchhoffa G<sub>max</sub><sup>2</sup>
- możliwość kalibracji metod interpretacyjnych stosowanych w badaniach elementami bender [10,11].

Porównanie wyników badań przeprowadzanych na próbkach gruntów spoistych i niespoistych wskazuje na pewne ograniczenia aparatu związane ze strukturą badanego materiału. W przypadku badań prowadzonych na próbkach gruntów niespoistych w trybie TS ich ziarnista struktura nie zachowuje podstawowego założenia dotyczącego liniowości odkształcenia wzdłuż próbki.

Szerokie możliwości badania w aparacie RC/TS stwarzają szansę realizowania wielu różnych programów badawczych mających na celu zgłębienie nieodkrytej wciąż natury gruntów podłoża budowlanego znajdujących się pod zmiennym obciążeniem.



Rys. 14. Wyniki wykonanych badań FD w zestawieniu z wynikami otrzymanymi na podstawie badania RC

#### LITERATURA

1. Bachmann H. (red.): Vibration problems in structures: practical guidelines. Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Berlin, 1995.

2. Cavallari A.: Calibrazione inerzia RC3, Controls, 2011.

3. Chen A.T.F., Stokoe K.H.: Interpretation of Strain-Dependent Modulus and Damping from Torsional Soils Tests. Report No. GS-GD-79-002, NTIS No. PB-298479, U.S. Geological Survey, Menlo Park, CA, 1979.

4. Dyka I.: Use of the laboratory tests of soil modulus in modelling pile behaviour, Studia Geotechnica et Mechanica, Vol. 34 (3), 2012, 53-61.

5. Dyka I., Srokosz P.: Obliczenia statyczne fundamentów płytowo-palowych, Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, Zeszyt 28, Tom 2, 2006, 315-324.

6. Dyka I., Srokosz P.: Badania gruntu w aparacie skrętnego ścinania RC/TS. Część 1. Inżynieria Morska i Geotechnika, 6, 2012, 700-707.

7. Massarsch, K. R.: Deformation properties of fine-grained soils from seismic tests. Keynote lecture of International Conference on Site Characterization, ISC'2, 19 - 22 Sept. 2004, Porto.

8. Moayerian S., Reipas L.K., Cascante G., Newson T.: Equipment effects on dynamic properties of soils in resonant column testing, Pan-Am CGS Geotechnical Conference, 2011.

9. d'Onofrio A., Silvestri F., Vinale F., A new torsional shear device. Geotechnical Testing Journal, Vol. 22 (2), 1999, 107-117.

10. Srokosz P.E.: Badania gruntu elementami bender, Inżynieria Morska i Geotechnika, 1, 2012, 29-38.

11. Świdziński W., Mierczyński J.: Badania reakcji sprężystej gruntów niespoistych za pomocą pomiaru prędkości fali sejsmicznej. Czasopismo Techniczne, z. 1-Ś/2010, Z. 16, R. 107, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2010, 63-82.

12. ASTM D4015-92 Standard Test Methods for Modulus and Damping of Soils by the Resonant-Column Method.

13. Basic info on the WF8500 RCTS equipment, Wykeham Farrance, 2011.

- 14. www.uwm.edu.pl/edu/piotrsrokosz/FreeDecay.pdf
- $15.\ www.uwm.edu.pl/edu/piotrsrokosz/HalfPowerRC.pdf$
- 16. www.uwm.edu.pl/edu/piotrsrokosz/TorsionalShear.pdf



Rys. 1. Możliwe przemieszczenia przyczółka mostu [3]