

## **OCENA MODUŁU SZTYWNOŚCI GRUNTU NA PODSTAWIE POMIARU DRGAŃ POWIERZCHNIOWYCH**

Wojciech Gosk, Krzysztof Czech  
Politechnika Białostocka, Białystok

**Streszczenie.** Celem pracy jest wyznaczenie modułu sztywności piaszczystego podłoża gruntowego na podstawie analizy danych zarejestrowanych podczas pomiaru drgań na powierzchni gruntu. Wykonano badania terenowe, polegające na rejestracji przyspieszeń drgań w punktach pomiarowych zlokalizowanych w odległości 5 m i 10 m od źródła wibracji. Wzbudnikiem drgań o dużej powtarzalności parametrów impulsu była lekka płyta dynamiczna. Pomiar przyspieszeń realizowano przy wykorzystaniu układu pomiarowego firmy Brüel & Kjær. Na podstawie uzyskanych wyników dokonano oceny sztywności podłoża gruntowego dwoma sposobami. Metoda pierwsza opierała się na pomiarze czasu przejścia fali Reyleigha pomiędzy punktami pomiarowymi. Metoda druga polegała na przeprowadzeniu analizy wstecznej za pomocą autorskiego programu obliczeniowego. Program oparty był na metodzie różnic skończonych i umożliwiał opis falowy zachowania gruntu obciążonego udarowo.

**Słowa kluczowe:** sztywność gruntu, drgania powierzchniowe, pomiar drgań, propagacja drgań

### **WSTĘP**

Modelowanie zagadnień geotechniki dotyczących propagacji drgań w ośrodku gruntowym wymaga przyjęcia miarodajnych parametrów podłoża [Łupieżowicz i Pradelok 2013]. Za najbardziej właściwe do uzyskania niezbędnych stałych fizycznych ośrodka są uważane stosowane w geofizyce badania sejsmiczne, opierające się na wyznaczeniu prędkości rozchodzenia się fali poprzecznej w gruncie. Pozwalają one na wyznaczenie modułu ścinania ( $G$ ) oraz odkształcenia ( $E$ ) na podstawie zależności znanych z teorii sprężystości. W geotechnice metoda *down-hole*, znana z geofizyki, została zaaplikowana

---

Adres do korespondencji – Corresponding author: Wojciech Gosk, Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Zakład Geotechniki, ul. Wiejska 45E, 15-351 Białystok, e-mail: w.gosk@pb.edu.pl

© Copyright by Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2016

do badań penetracyjnych (inwazyjnych) typu DMT i CPTU, tworząc metody SDMT i SCPTU. Innym podejściem w obszarze badań *in situ* jest zastosowanie metod powierzchniowych (nieinwazyjnych) typu SASW, CSWS lub MASW [Godlewski i Szczepański 2015].

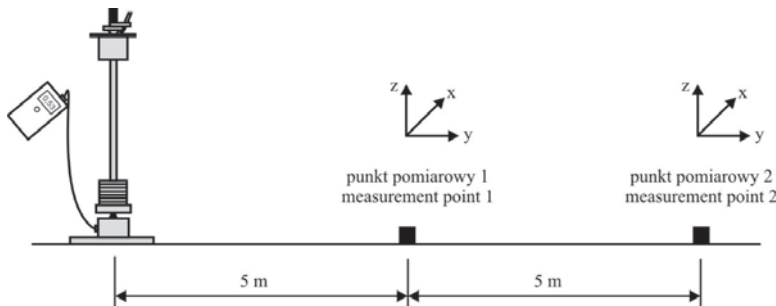
Głównym zamierzeniem pracy jest wyznaczenie uśrednionego modułu sztywności piaszczystego podłoża gruntowego na podstawie analizy danych zarejestrowanych podczas pomiaru drgań powierzchniowych gruntu. Proponowana w pracy procedura przypomina w pewnym stopniu metodę sejsmiki powierzchniowej SASW. Zasadniczą różnicą metody proponowanej w stosunku do metody SASW jest użycie innego rodzaju wymuszenia podłoża, zastosowanie akcelerometrów zamiast geofonów oraz posłużenie się analizą wsteczną w miejsce stosowanej najczęściej metody stałego podziału fali.

## METODYKA

Badania polowe wykonano na terenie wyrobiska żwirowni w pobliżu miejscowości Bobrowa, położonej niedaleko Białegostoku. Teren badań został wybrany z uwagi na dużą jednorodność podłoża, w którym na znacznym obszarze stwierdzono mało wilgotne piaski fSa/siSa ( $P_d/P_\pi$ ) w stanie średnio zagęszczonym. Swobodne zwierciadło wody gruntowej znajdowało się na głębokości dwóch metrów. Poletko badawcze było płaskie i wyrównane. Badania były wykonywane w czasie, gdy na terenie żwirowni nie pracowały żadne maszyny wywołujące drgania.

Źródłem drgań wykorzystywanym podczas badań była lekka płyta dynamiczna typu ZFG-01 firmy ZORN. W standardowym podejściu urządzenie to służy do wyznaczania modułu odkształcenia podłoża gruntowego ( $E_{vD}$ ) oraz pośrednio – do kontroli zagęszczenia nasypów. Przyrząd ten jest przede wszystkim wykorzystywany w budownictwie komunikacyjnym. Płyta dynamiczna stanowi stabilne i powtarzalne źródło drgań impulsowych, co w przypadku przedmiotowych badań było niewątpliwym atutem. Urządzenie generuje pojedyncze impulsy w wyniku kontrolowanego spadku masy 10 kg z wysokości 0,83 m. Udar jest amortyzowany za pomocą specjalnej sprężyny talerzowej. Przyrząd podlega obowiązkowej systematycznej kalibracji.

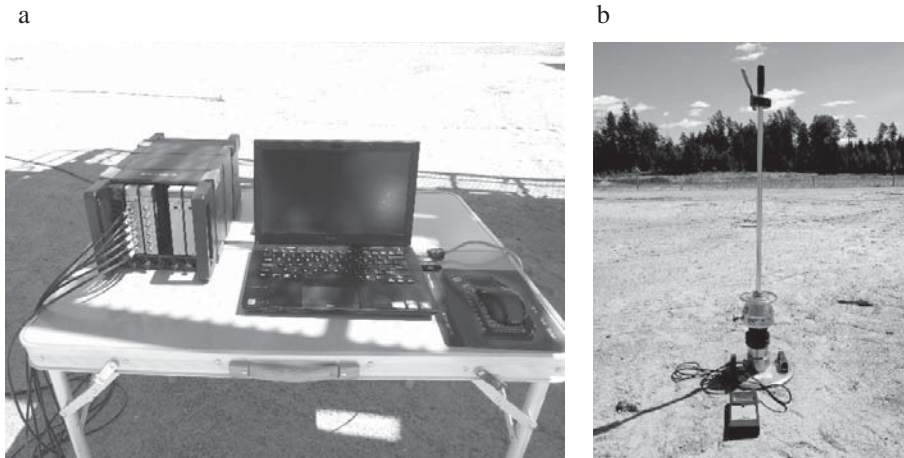
Zasadnicze pomiary drgań wykonano w dwóch punktach oddalonych o 5,0 i 10,0 m od źródła wymuszenia na powierzchni terenu. W miejscu ustawienia lekkiej płyty dynamicznej rejestrowano ponadto amplitudy jej przemieszczenia w celu wyznaczenia modułu  $E_{vD}$  podłoża. Schematycznie teren badań przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat badania polowego  
Fig. 1. The scheme of field test

Sprzęt pomiarowy stanowił system firmy Brüel & Kjær typu LAN-XI. Rejestracja drgań odbywała się na trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach: radialnym ( $x$  – prostopadle do przyjętego profilu pomiarowego), promieniowym ( $y$  – w kierunku przyjętego profilu pomiarowego) oraz w kierunku pionowym ( $z$ ). Na każdym kierunku mocowano do specjalnie przygotowanych podstaw pierścieniowych piezoelektryczne czujniki sejsmiczne przyspieszeń drgań typu 3187D firmy Dytran. Podstawy były zakotwiczone w gruncie za pomocą trzech zaostrzonych prętów długości 30 cm. Czulość czujników wynosiła 500 mV/g, a zakres pomiarowy wynosił  $\pm 10$  g w przedziale częstotliwości 0,48–1000 Hz.

Układ pomiarowy LAN-XI oraz użytą płytę dynamiczną przedstawiono na rysunku 2. Natomiast sposób mocowania czujników na powierzchni terenu za pomocą podstawy pierścieniowej pokazano na rysunku 3.



Rys. 2. Aparatura badawcza: a – układ pomiarowy typu LAN-XI firmy Brüel&Kjær, b – lekka płyta dynamiczna typu ZFG-01

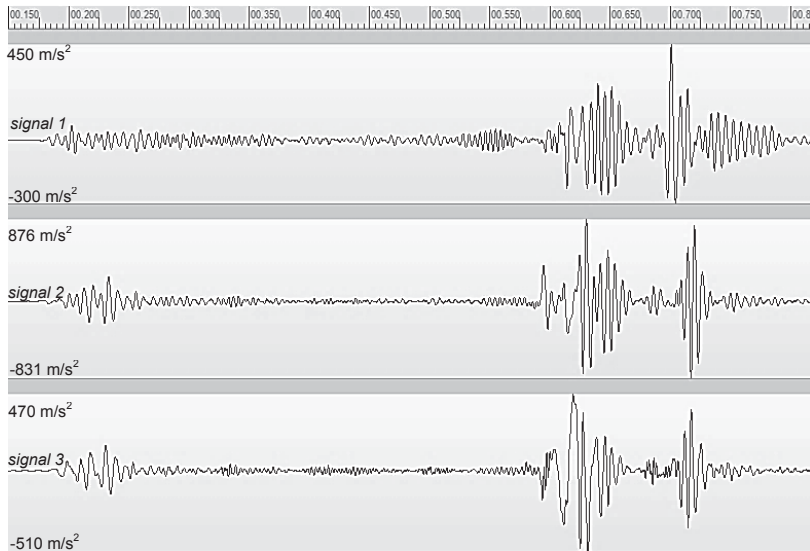
Fig. 2. Test equipment: a – measuring system Brüel&Kjær LAN-XI type, b – Light Falling Weight Deflectometer ZFG-01 type



Rys. 3. Podstawa pierścieniowa z czujnikami przyspieszeń

Fig. 3. The ring base with acceleration sensors

We wszystkich punktach badawczych rejestrowano po 6 jednosekundowych przebiegów czasowych przyspieszeń drgań. Przykładowe przebiegi zmienności przyspieszenia w czasie na kierunkach  $x$ ,  $y$  i  $z$  przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Przykład wyników pomiarowych – zmienność w czasie zarejestrowanych przyspieszeń drgań

Fig. 4. The example of the measurement results – variation in time of the recorded vibration acceleration

Część badań polowych, będących podstawą analiz, została już wykorzystana we wcześniejszych rozważaniach autorów [Gosk i Czech 2015]. Niniejsza praca prezentuje dalsze wyniki analiz wykonanych na podstawie zrealizowanych pomiarów powierzchniowych.

W pracy przyjęto założenie, że największy wpływ na rozchodzenie się drgań mają fale powierzchniowe Reyleigha. Nie uwzględniono więc wzrostu sztywności początkowej gruntu wraz z głębokością. Zaniedbano również fakt obecności zwierciadła wody gruntowej i prawdopodobnego większego zróżnicowania w zakresie stanu gruntu niż wstępnie ustalono.

Impuls malejącej masy inicjował drgania rozprzestrzeniające się zarówno do wnętrza ośrodka gruntowego, jak i powierzchniowo. Aparatura pomiarowa umożliwiała dokładny pomiar przyspieszeń w punktach pomiarowych przyjętych na powierzchni terenu. Ponadto istniała możliwość dokładnego wyznaczenia czasu, jaki upływał podczas przemieszczania się fali powierzchniowej Reyleigha między punktem pomiarowym 1 i 2. Wyznaczenie prędkości fali powierzchniowej nie stanowiło w związku z tym żadnego problemu. Ta prosta idea zainspirowała autorów do próby wyznaczenia modułu sztywności podłoża za pomocą znanych w mechanice falowej zależności wiążących moduły sprężystości ośrodka z prędkością propagacji fal. Metodę tą nazwano dalej w pracy *peak to peak*.

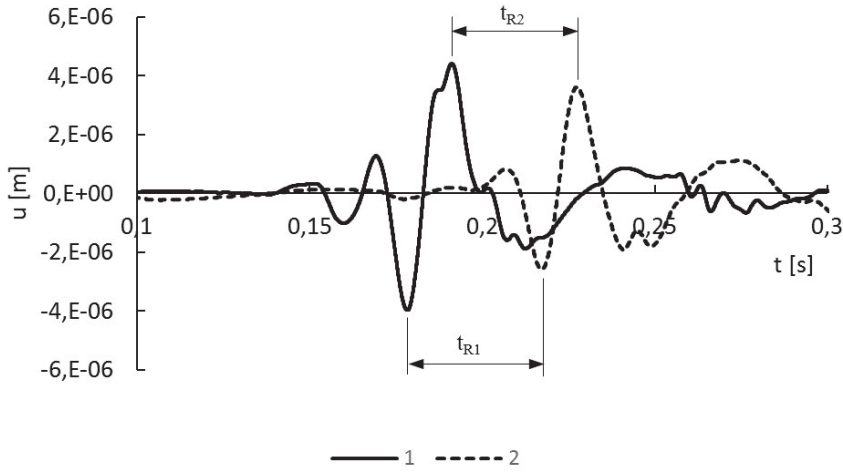
Innym sposobem wyznaczenia modułów sztywności podłoża jest zastosowanie metod inwersyjnych, opartych na specjalistycznym oprogramowaniu bazującym najczęściej na metodzie elementów skończonych. Z uwagi na duży stopień skomplikowania tej metody i jej czasochłonność najczęstszym sposobem interpretacji wyników badań uzyskiwanych przy zastosowaniu sejsmiki powierzchniowej stała się jednak metoda podziału fali. Metoda ta z uwagi na dość prosty algorytm postępowania umożliwia uzyskanie wyników praktycznie natychmiast w czasie badań terenowych. Przez niektórych autorów uważana jest jednak za najmniej dokładną [Godlewski i Szczepański 2015]. W związku z tym faktem w niniejszej pracy zdecydowano się na zastosowanie metodyki z użyciem analizy wstecznej. Autorzy nie korzystali jednakże z oprogramowania MES, tylko z programu komputerowego opartego na algorytmie metody różnic skończonych, który został opisany w pracy Szczepańskiego [1999]. Oprogramowanie zostało stworzone przy założeniu osiowej symetrii obrotowej z uwagi na charakter przekazywania obciążenia na podłoże za pośrednictwem kołowej płyty naciskowej. Model przyrządu – lekkiej płyty dynamicznej, został również zaimplementowany do oprogramowania. Zastosowano prosty, ale skuteczny model oscylatora sprężystego, dobrze opisujący impulsowy sposób obciążenia podłoża. Główne oprogramowanie powstało w celu realizacji rozprawy doktorskiej jednego ze współautorów pracy [Gosk 2006], tam też można odnaleźć szczegóły związane z rozwiązywanym problemem brzegowym. Zmodyfikowana wersja programu została skutecznie wykorzystana do identyfikacji modułu sztywności podłoża w pracy Goska [2012] oraz Goska i Czecha [2015].

Analiza numeryczna została przeprowadzona przy założeniu liniowo-sprężystego modelu ośrodka gruntowego. Przyjęto stałą wartość współczynnika Poissona  $\nu = 0,30$  oraz gęstość gruntu  $\rho = 1,85 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Analizowana w programie numerycznym walco-wa bryła miała średnicę  $D = 50 \text{ m}$  i wysokość  $H = 25 \text{ m}$ . Przyjęcie tak dużego obszaru gwarantowało brak wpływu ewentualnych odbić fal naprężenia od brzegów na otrzymywane wyniki obliczeń. Przeprowadzono analizę stabilności i zbieżności rozwiązania numerycznego. Stabilność zapewniano, stosując odpowiednio małe wartości kroków czasowych podczas obliczeń. Zbieżność rozwiązania sprawdzano, wykonując analizy dla różnej gęstości siatki do momentu, gdy dalsze zagęszczanie podziału przestrzennego nie wpływało na wyniki obliczeń.

## WYNIKI BADAŃ

### Ocena modułu sztywności podłoża na podstawie czasu przejścia fali Reyleigha

Wyznaczono długości czasu przejścia fali Reyleigha pomiędzy punktami pomiarowymi 1 i 2. Dokonano tego metodą, którą można nazwać *peak to peak* na podstawie profilu przemieszczeniowego uzyskanego w wyniku podwójnego całkowania zarejestrowanych przyspieszeń. Na rysunku 5 przedstawiono wibrogramy dotyczące odpowiednio punktów pomiarowych 1 i 2.



Rys. 5. Zmienność w czasie przemieszczenia pionowego punktów pomiarowych 1 i 2

Fig. 5. Variation in the time of the vertical displacements in measurement points 1 and 2

Długości czasu przejścia fali Reyleigha zmierzone zostały pomiędzy ujemnymi i dodatnimi amplitudami przemieszczeń:  $t_{R1} = 0,03892$  s,  $t_{R2} = 0,03619$  s. Odpowiednie prędkości fali Reyleigha wynoszą:  $v_{R1} = 128,5$  m·s<sup>-1</sup>,  $v_{R2} = 138,2$  m·s<sup>-1</sup>. Przyjmując wartość współczynnika Poissona  $\nu = 0,3$  i korzystając z zależności [Brunarski i Kwieciński 1971]:

$$v_R = \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu} v_s \quad (1)$$

obliczono prędkości fali poprzecznej:  $v_{s1} = 138,5$  m·s<sup>-1</sup>,  $v_{s2} = 149,0$  m·s<sup>-1</sup>

Moduły odkształcenia postaciowego wyznaczone z zależności:

$$G = \rho v_s^2 \quad (2)$$

wynoszą odpowiednio:  $G_1 = 35,47$  MPa oraz  $G_2 = 41,05$  MPa.

Moduły sprężystości wyznaczone z zależności:

$$E = 2\rho v_s^2 (1 + \nu) \quad (3)$$

wynoszą:  $E_1 = 92,22$  MPa oraz  $E_2 = 106,72$  MPa.

### Ocena modułu sztywności podłoża metodą analizy wstecznej

Kryteria identyfikacji postanowiono rozszerzyć w stosunku do analiz przeprowadzonych na użytek pracy Goska i Czecha [2015], gdzie zastosowano trzy kryteria oparte na dążeniu do uzyskania zgodności maksymalnych amplitud pionowych przyspieszeń,

prędkości i przemieszczeń drgań. W niniejszej pracy analizy rozszerzono również na kierunek poziomy, z uwagi na fakt, że wcześniejsze doświadczenia autorów wskazywały na problem postawienia odpowiedniego kryterium identyfikacji.

Tabela 1 zawiera wartości składowych pionowych przyspieszeń drgań zarejestrowanych w czasie serii pomiarowej oraz wyniki prędkości i przemieszczeń uzyskane za pomocą całkowania numerycznego. W tabeli 1 znajdują się również wyniki analiz numerycznych otrzymane przy założeniu modułu sztywności podłoża gruntowego ( $E$ ), wynoszącego: 100, 200, 300, 400 i 500 MPa.

Tabela 1. Maksymalne i minimalne amplitudy przyspieszeń, prędkości i przemieszczeń drgań oraz wyniki z numerycznej analizy wstecznej – kierunek pionowy drgań, punkty pomiarowe 1 i 2

Table 1. The maximum and minimum amplitudes of acceleration, velocity and displacement of vibration and the results of numerical back analysis – vertical direction of vibration, measurement points 1 and 2

	$L = 5 \text{ m}$ (punkt 1 – point 1)			$L = 10 \text{ m}$ (punkt 2 – point 2)		
	$a_z [\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$	$v_z [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	$u_z [\text{m}]$	$a_z [\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$	$v_z [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	$u_z [\text{m}]$
Badanie terenowe Field test	$4,94\cdot 10^{-1}$ $-4,87\cdot 10^{-1}$	$1,36\cdot 10^{-3}$ $-1,01\cdot 10^{-3}$	$4,42\cdot 10^{-6}$ $-3,97\cdot 10^{-6}$	$2,95\cdot 10^{-1}$ $-2,55\cdot 10^{-1}$	$1,01\cdot 10^{-3}$ $-6,33\cdot 10^{-4}$	$3,61\cdot 10^{-6}$ $-2,57\cdot 10^{-6}$
$E = 100 \text{ MPa}$	$1,16\cdot 10^{-1}$ $-9,39\cdot 10^{-1}$	$2,06\cdot 10^{-3}$ $-1,62\cdot 10^{-3}$	$6,22\cdot 10^{-6}$ $-2,30\cdot 10^{-6}$	$6,30\cdot 10^{-1}$ $-6,43\cdot 10^{-1}$	$1,44\cdot 10^{-3}$ $-9,94\cdot 10^{-4}$	$4,12\cdot 10^{-6}$ $-2,27\cdot 10^{-6}$
$E = 200 \text{ MPa}$	$7,95\cdot 10^{-1}$ $-6,48\cdot 10^{-1}$	$9,93\cdot 10^{-4}$ $-7,83\cdot 10^{-4}$	$2,72\cdot 10^{-6}$ $-9,13\cdot 10^{-7}$	$4,47\cdot 10^{-1}$ $-4,19\cdot 10^{-1}$	$6,54\cdot 10^{-4}$ $-5,27\cdot 10^{-4}$	$1,70\cdot 10^{-6}$ $-9,51\cdot 10^{-7}$
$E = 300 \text{ MPa}$	$6,47\cdot 10^{-1}$ $-5,08\cdot 10^{-1}$	$6,45\cdot 10^{-4}$ $-5,32\cdot 10^{-4}$	$2,03\cdot 10^{-6}$ $-5,40\cdot 10^{-7}$	$3,62\cdot 10^{-1}$ $-3,36\cdot 10^{-1}$	$4,13\cdot 10^{-4}$ $-3,44\cdot 10^{-4}$	$1,03\cdot 10^{-6}$ $-5,48\cdot 10^{-7}$
$E = 400 \text{ MPa}$	$5,60\cdot 10^{-1}$ $-4,37\cdot 10^{-1}$	$4,76\cdot 10^{-4}$ $-3,98\cdot 10^{-4}$	$1,22\cdot 10^{-6}$ $-3,62\cdot 10^{-7}$	$3,14\cdot 10^{-1}$ $-2,90\cdot 10^{-1}$	$2,98\cdot 10^{-4}$ $-2,49\cdot 10^{-4}$	$7,17\cdot 10^{-7}$ $-3,63\cdot 10^{-7}$
$E = 500 \text{ MPa}$	$5,01\cdot 10^{-1}$ $-3,89\cdot 10^{-1}$	$3,77\cdot 10^{-4}$ $-3,16\cdot 10^{-4}$	$9,82\cdot 10^{-7}$ $-2,74\cdot 10^{-7}$	$2,71\cdot 10^{-1}$ $-2,59\cdot 10^{-1}$	$2,30\cdot 10^{-4}$ $-2,08\cdot 10^{-4}$	$5,60\cdot 10^{-7}$ $-2,61\cdot 10^{-7}$
$E = 600 \text{ MPa}$	$4,57\cdot 10^{-1}$ $-3,66\cdot 10^{-1}$	$3,11\cdot 10^{-4}$ $-2,58\cdot 10^{-4}$	$8,55\cdot 10^{-7}$ $-6,79\cdot 10^{-7}$	$2,53\cdot 10^{-1}$ $-2,42\cdot 10^{-1}$	$2,09\cdot 10^{-4}$ $-1,88\cdot 10^{-4}$	$5,40\cdot 10^{-7}$ $-5,10\cdot 10^{-7}$

Analogiczne dane, ale dla składowych poziomych drgań, zestawiono w tabeli 2. Prezentowane wyniki analiz numerycznych uzyskano przy założeniu modułu sztywności podłoża gruntowego ( $E$ ), wynoszącego: 50, 100, 200 i 300 MPa. Zakres poszukiwań wartości modułu sztywności zależał od otrzymanego zakresu danych z pomiarów terenowych. Stąd przyjęto różne zakresy do analizy przeprowadzanej dla składowych pionowych i poziomych drgań.

Wartości uzyskanych modułów sztywności, będących wynikiem przeprowadzonej identyfikacji, zestawiono w tabeli 3.

Tabela 2. Maksymalne i minimalne amplitudy przyspieszeń, prędkości i przemieszczeń drgań oraz wyniki z numerycznej analizy wstecznej – kierunek poziomy drgań, punkty pomiarowe 1 i 2

Table 2. The maximum and minimum amplitudes of acceleration, velocity and displacement of vibration and the results of numerical back analysis – horizontal direction of vibration, measurement points 1 and 2

	$L = 5$ m (punkt 1 – point 1)			$L = 10$ m (punkt 2 – point 2)		
	$a_v$ [ $m \cdot s^{-2}$ ]	$v_v$ [ $m \cdot s^{-1}$ ]	$u_v$ [m]	$a_v$ [ $m \cdot s^{-2}$ ]	$v_v$ [ $m \cdot s^{-1}$ ]	$u_v$ [m]
Badanie terenowe Field test	$5,72 \cdot 10^{-1}$ $-3,92 \cdot 10^{-1}$	$8,15 \cdot 10^{-4}$ $-7,17 \cdot 10^{-4}$	$1,52 \cdot 10^{-6}$ $-2,81 \cdot 10^{-6}$	$1,95 \cdot 10^{-1}$ $-1,66 \cdot 10^{-1}$	$4,58 \cdot 10^{-4}$ $-4,27 \cdot 10^{-4}$	$9,77 \cdot 10^{-7}$ $-1,70 \cdot 10^{-6}$
$E = 50$ MPa	$8,67 \cdot 10^{-1}$ $-6,39 \cdot 10^{-1}$	$1,52 \cdot 10^{-3}$ $-1,55 \cdot 10^{-3}$	$5,44 \cdot 10^{-6}$ $-9,45 \cdot 10^{-6}$	$5,81 \cdot 10^{-1}$ $-2,18 \cdot 10^{-1}$	$1,81 \cdot 10^{-4}$ $-1,13 \cdot 10^{-3}$	$1,12 \cdot 10^{-6}$ $-5,61 \cdot 10^{-6}$
$E = 100$ MPa	$5,19 \cdot 10^{-1}$ $-3,94 \cdot 10^{-1}$	$6,97 \cdot 10^{-4}$ $-7,91 \cdot 10^{-4}$	$2,34 \cdot 10^{-6}$ $-4,40 \cdot 10^{-6}$	$3,68 \cdot 10^{-1}$ $-2,38 \cdot 10^{-1}$	$5,45 \cdot 10^{-4}$ $-6,42 \cdot 10^{-4}$	$1,76 \cdot 10^{-6}$ $-3,12 \cdot 10^{-7}$
$E = 200$ MPa	$3,64 \cdot 10^{-1}$ $-2,58 \cdot 10^{-1}$	$3,08 \cdot 10^{-4}$ $-5,92 \cdot 10^{-4}$	$1,00 \cdot 10^{-6}$ $-1,98 \cdot 10^{-6}$	$2,35 \cdot 10^{-1}$ $-1,98 \cdot 10^{-1}$	$2,41 \cdot 10^{-4}$ $-3,44 \cdot 10^{-4}$	$8,00 \cdot 10^{-7}$ $-1,433 \cdot 10^{-6}$
$E = 300$ MPa	$2,80 \cdot 10^{-1}$ $-2,08 \cdot 10^{-1}$	$1,98 \cdot 10^{-4}$ $-4,02 \cdot 10^{-4}$	$6,05 \cdot 10^{-6}$ $-1,16 \cdot 10^{-6}$	$1,84 \cdot 10^{-1}$ $-1,07 \cdot 10^{-1}$	$1,47 \cdot 10^{-4}$ $-2,34 \cdot 10^{-4}$	$5,09 \cdot 10^{-7}$ $-8,08 \cdot 10^{-7}$

Tabela 3. Wartości uzyskanych modułów sztywności podłoża ( $E$ ) z uwagi na kryterium identyfikacji

Numer punktu pomiarowego Number of measurement point	Kierunek Direction	$E$ [MPa]	$E$ [MPa]	$E$ [MPa]
		Zgodność maksymalnych przyspieszeń Compatibility of the maximum acceleration	Zgodność maksymalnych prędkości Compatibility of the maximum velocity	Zgodność maksymalnych przemieszczeń Compatibility of the maximum displacement
Punkt pomiarowy 1 Measurement point 1	kierunek pionowy vertical direction	515	150	135
	kierunek poziomy horizontal direction	85	96	140
Punkt pomiarowy 2 Measurement point 2	kierunek pionowy vertical direction	440	140	110
	kierunek poziomy horizontal direction	250	140	140



## ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Zastosowanie metody polegającej na ustaleniu czasu przejścia fali Reyleigha pomiędzy punktami pomiarowymi doprowadziło do otrzymania wartości modułów sztywności podłoża wynoszących 92,2 i 106,7 MPa. Odpowiednie wartości otrzymane podczas analiz wstecznych za pomocą programu komputerowego osiągają z kolei wartości od 85 do 515 MPa. Jednakże w tym przypadku identyfikacja przeprowadzona z uwagi na amplitudy przemieszczenia i prędkości drgań zawęża ten przedział do zakresu od 96 do 150 MPa. Wartości te są bardziej zbieżne w porównaniu z uzyskanymi na podstawie pomiaru czasu propagacji fali Reyleigha pomiędzy miejscami pomiaru.

Krytycznie należy się odnieść do wartości modułu sztywności podłoża uzyskanych podczas identyfikacji za pomocą programu komputerowego, prowadzonych na podstawie zarejestrowanych przyspieszeń drgań. Uzyskano wartości z jednej strony bardzo duże (nawet 515 MPa), z drugiej – małe (85 MPa). W tym przypadku analizy prowadzone z uwagi na chwilowe ekstremalne wartości pomierzonych przyspieszeń dały bardzo niejednoznaczne wyniki. Zdaniem autorów postawione kryterium było bardzo „ostre” i nie uwzględniało bardzo dużej zmienności rejestrowanych podczas pomiarów przyspieszeń. Niemożliwe było więc odzwierciedlenie zbieżnego z wynikami badań procesu deformacji podłoża za pomocą programu komputerowego. Oprogramowanie dążyło tylko do wyznaczenia zgodności jednej chwilowej wartości amplitudy przyspieszenia bez dbałości o jakościową zgodność pełnego procesu deformacyjnego obiektu rzeczywistego – podłoża z modelem numerycznym.

Sytuacja przedstawia się o wiele lepiej w przypadku identyfikacji prowadzonej na podstawie prędkości drgań i przemieszczeń. Tak wyrażony proces deformacyjny ma bardziej łagodną formę i jest mniej znakoprzebiegny. Dzięki temu o wiele łatwiej jest uzyskać zbieżność procesu deformacji pomiędzy modelem a obiektem rzeczywistym.

Otrzymane wyniki identyfikacji modułu sztywności podłoża gruntowego można skonfrontować z wartością modułu  $E_{v,d} = 66,18$  MPa według procedury podanej w instrukcji lekkiej płyty dynamicznej [TP BF-StB] oraz modułu odkształcenia pierwotnego gruntu  $E_0 = 40$  MPa według normy PN-81/B-03020. Należy zauważyć, że pomijając wyniki identyfikacji z uwagi na maksymalną amplitudę przyspieszenia, uzyskano w pracy wartości modułów sztywności około dwu- i trzykrotnie większe. Wskazuje to na wagę problemu właściwego przyjęcia parametrów ośrodka do analiz dynamicznych propagacji drgań w podłożu. Niewłaściwe jest oczywiście przyjęcie modułów sztywności podłoża wyznaczonych za pomocą normy PN-81/B-03020 na podstawie korelacji bazujących na ocenie rodzaju i stanu gruntu. Miary sztywności podłoża przyjmowane w taki sposób do analizy rozchodzenia się drgań są bardzo zaniżone. Wyniki analiz przeprowadzonych przy użyciu takich parametrów prowadzą do rozwiązań mających niewiele wspólnego z rzeczywistością. W praktyce inżynierskiej można się jednak spotkać z takim postępowaniem, choć jest to ewidentnie niezgodne z zapisami Eurokodu 7 [PN-EN 1997].

Zdaniem autorów wartości modułów sztywności uzyskane na podstawie wyznaczenia prędkości przejścia fali Reyleigha oraz za pomocą analizy wstecznej są zbliżone do tak zwanego modułu początkowego gruntu ( $E_{max}$ ). Na podstawie danych literaturowych można wywnioskować, że dla gruntów o małej zawartości frakcji drobnej oraz wartości  $p'$ ,

odpowiadających małej głębokości wartości modułu początkowego ( $E_{\max}$ ), wynoszą od 100 do 200 MPa [Lipiński 2013].

Sformułowanie dalej idących wniosków jest na tym etapie badań i analiz niemożliwe. Naturalne wydaje się zwiększenie rozdzielczości badań poprzez zagęszczenie punktów pomiarowych. W celu prowadzenia dalszych prac kalibracyjnych wydaje się zasadne, aby umieścić czujniki w gruncie na różnych głębokościach. Nieodzwonne byłoby również przeprowadzenie na danym terenie badań dylatometrycznych SDMT lub sejsmicznych SCPTU.

## PODSUMOWANIE

Zaproponowane metody powierzchniowe wyznaczania modułu sztywności pozwalają sformułować wnioski o uśrednionej sztywności podłoża gruntowego. Na uwagę zasługuje fakt, że zastosowana aparatura pomiarowa nie jest typowa dla praktyki badań geotechnicznych. System pomiarowy i czujniki przyspieszeń są generalnie stosowane w zagadnieniach diagnostyki dynamicznej budowli. Sprzęt pomiarowy umożliwił jednakże poprawne, zdaniem autorów, wyznaczenie modułu sztywności gruntu. Prezentowane sposoby wyznaczania parametrów sztywności podłoża mogą posłużyć do analiz poziomu drgań przekazywanych na podłoże. Mogą również stanowić podstawę do wyznaczenia niezbędnych danych do analiz interakcji budowla – podłoże w przypadku różnych problemów dynamiki budowli (np. farmy wiatrowe). Wymaga to jednakże dalszych prac w celu weryfikacji i kalibracji metody.

Na podstawie zdobytych doświadczeń planowane są dalsze etapy badań. Przewidziane jest użycie wzbudnika harmonicznego w celu opracowania metody zbliżonej do CSWS, jednakże z użyciem posiadanej aparatury bez konieczności zakupu typowego, dedykowanego i bardzo kosztownego zestawu pomiarowego. Planuje się również włączenie szerszych badań laboratoryjnych na próbkach, przede wszystkim w komorze aparatu trójosiowego ściskania wyposażonej w elementy typu bender.

## PIŚMIENNICTWO

- Brunarski, L., Kwieciński, M. (1971). Wstęp do teorii sprężystości i plastyczności. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- Godlewski, T., Szczepański, T. (2015). Metody określania sztywności gruntów w badaniach geotechnicznych. Instrukcje Wytyczne. Poradniki. ITB, Warszawa.
- Gosk, W. (2006). Identyfikacja modułu sztywności podłoża gruntowego obciążonego udarowo. Rozprawa doktorska, Białystok.
- Gosk, W. (2012). Zastosowanie metody stycznych do identyfikacji modułu sztywności podłoża gruntowego badanego płytą dynamiczną ZFG-01. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Budownictwo i Inżynieria Środowiska, 59, 33–40.
- Gosk, W., Czech, R. (2015). Drgania powierzchniowe podłoża gruntowego wywołane udarem spadającej masy – badania terenowe i identyfikacja sztywności gruntu. Inżynieria Morska i Geotechnika, 3, 229–233.
- Lipiński, M. (2013). Kryteria wyznaczania parametrów geotechnicznych. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.

- Lupieżowicz, M., Pradelok, S. (2013). Analiza rozchodzenia się wstrząsów powstałych od wbijania pali – badania polowe i symulacja numeryczna. XXVI Konferencja Naukowo-Techniczna „Awarie budowlane”, 371–378.
- PN-81/B-03020. Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i wymiarowanie.
- PN-EN 1997. Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Cz. 1 i 2.
- Szcześniak, Z. (1999). Modelowanie zachowania dynamicznego konstrukcji podziemnych w warunkach działania powietrznej fali uderzeniowej. Wydawnictwo WAT, Warszawa.
- TP BF-StB Teil B 8.3 (2003). Technische Prüfvorschrift für Boden und Fels im Straßenbau. Dynamischer Plattendruckversuch mit Hilfe des Leichten Fallgewichtsgerätes. Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, Köln.

## ADNOTACJA

Badania zostały zrealizowane w ramach pracy nr S/WBiŚ/6/2013 i sfinansowane ze środków na naukę MNiSW.

## SOIL STIFFNESS ESTIMATION ON THE BASIS OF SURFACE VIBRATION MEASUREMENT

**Abstract.** The main aim of the study was an attempt of determination of the stiffness modulus of sandy subsoil based on analysis of data recorded during the measurements of vibrations conducted at the surface of the ground. Field tests of acceleration of vibrations were carried out at measuring points located at a distance of 5 m and 10 m from the source of vibration. The Light Falling Weight Deflectometer was the source of the vibration, characterized by high repetition rate of pulse parameters. Measurements of vibration were executed using measuring system produced by Brüel & Kjær. The evaluation of the subsoil stiffness was made on the basis of obtained results in two ways. The first method was based on measuring the time of movement of the Reyleigh wave between the measuring points. The second method was to use the own author's computational program. The program based on the finite difference method enabled the description of wave propagation in the ground under impact load.

**Key words:** soil stiffness, surface vibrations, vibration measurement, vibration propagation

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 12.06.2016

Cytowanie: Gosk, W., Czech, K. (2016). Ocena modułu sztywności gruntu na podstawie pomiaru drgań powierzchniowych. *Acta Sci. Pol. Architectura*, 15 (2), 67–77.