

## OCENA MOŻLIWOŚCI WYZNACZENIA MODUŁÓW SZTYWNOŚCI I WSPÓŁCZYNNIKA POISSONA GRUNTU NA PODSTAWIE POMIARU PRZYSPIESZEŃ DRGAŃ POWIERZCHNIOWYCH\*

Wojciech Gosk<sup>✉</sup>, Krzysztof R. Czech

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, Białystok

### STRESZCZENIE

Celem pracy jest ocena sztywności piaszczystego podłoża gruntowego na podstawie analizy drgań zarejestrowanych na powierzchni badanego obszaru o wymiarach  $10 \times 10$  m. Przeprowadzono badania polowe, które polegały na pomiarze przyspieszeń drgań w dziewięciu punktach rozłożonych równomiernie na założonej siatce kwadratowej. Jako źródła drgań użyto lekkiej płyty dynamicznej. Przyspieszenia drgań rejestrowano z użyciem systemu pomiarowego firmy Brüel&Kjær. Na podstawie otrzymanych wyników wyznaczono moduły sztywności przypowierzchniowych warstw podłoża gruntowego ( $G_0$  i  $E_0$ ) oraz wartości współczynnika Poissona ( $\nu$ ) gruntu na badanym obszarze. Metoda wyznaczania wymienionych parametrów polegała na pomiarze czasu przejścia fali podłużnej i fali Rayleigha pomiędzy punktami pomiarowymi. Potwierdzono możliwość zastosowania proponowanej procedury do oceny sztywności gruntów nasypowych. Metoda może umożliwić szybką kontrolę zagęszczenia przypowierzchniowych warstw gruntu.

**Słowa kluczowe:** sztywność gruntu, moduł sztywności, drgania powierzchniowe, propagacja drgań

### WSTĘP

Problematyka sztywności podłoża gruntowego jest aktualnie jednym z głównych nurtów badań i analiz prowadzonych w inżynierii geotechnicznej. W związku z tym, że sztywność gruntu nie jest stała i zmienia się wraz z poziomem odkształcenia, właściwa ocena modułów sztywności jest problemem dość złożonym. Projektant, który prowadzi analizy z uwzględnieniem interakcji budowla – podłoże gruntowe, staje przed dylematem odpowiedniego przyjęcia parametrów deformacyjnych modelowanego podłoża. W przypadku analizy zagadnień statyki o potrzebie doboru właści-

wych parametrów sztywności decyduje zastosowany model konstytutywny ośrodka. Z reguły należy w tym przypadku przyjąć odpowiednie tzw. moduły operacyjne podłoża (Popielski, 2012), będące wynikiem dostosowania ich wartości do poziomu odkształceń w różnych strefach analizowanego podłoża gruntowego będącego w interakcji z budowlą. W rzeczywistości ostateczne sprawdzenie, czy zastosowano właściwy moduł operacyjny, jest możliwe w trakcie realizacji budowli i ciągłego monitoringu jej osiadania. Można wtedy dokonać porównania zgodności w tym zakresie modelu obliczeniowego z obiektem rzeczywistym. W przypadku zagadnień dynamiki, w tym dotyczących

\*Badania zostały zrealizowane w ramach pracy statutowej S/WBiIŚ/2/2018 realizowanej na Politechnice Białostockiej i sfinansowane ze środków na naukę MNiSW.

✉w.gosk@pb.edu.pl

propagacji drgań w ośrodku gruntowym, problem wydaje się być bardziej oczywisty, gdyż wymagana jest znajomość tzw. sztywności początkowej (maksymalnej) gruntu. Do wyznaczenia niezbędnych parametrów sztywności podłoża można posłużyć się metodami laboratoryjnymi lub polowymi. W przypadku metod laboratoryjnych można skorzystać z dość szerokiego wachlarza możliwości badawczych. W pierwszej kolejności należy tu wymienić badania w komorze aparatu trójosiowego ściskania wyposażonej w elementy typu *bender* (BET). Ponadto można posłużyć się kolumną rezonansową (RCT) lub tzw. aparatem skrętnym (HCT). Badania polowe to metody z grupy inwazyjnych, które są klasyfikowane jako otworowe (DownHole, CrossHole, UpHole) i penetracyjne (SCPTU, SDMT). W ostatnich latach opublikowano wiele prac z zakresu zastosowania w geoinżynierii polowych metod nieinwazyjnych SASW, MASW i CSWS (Foti, Lai, Rix i Strobbia, 2015; Godlewski i Szczepański, 2015), nazywanych powszechnie metodami sejsmiki powierzchniowej.

Głównym celem pracy jest wyznaczenie uśrednionej sztywności przypowierzchniowych warstw piaszczystego podłoża gruntowego. Ocenie podlegało podłoże gruntowe na założonym poletku badawczym. Przedmiotowe badania zrealizowano z użyciem sprzętu pomiarowego dostępnego w Katedrze Geotechniki i Mechaniki Konstrukcji Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Białostockiej. Proponowane podejście przypomina w pewnym stopniu metodę sejsmiki powierzchniowej SASW. Wykorzystany sprzęt nie stanowi jednak typowej, dedykowanej aparatury stosowanej w geofizyce. Zasadniczą różnicą metody proponowanej w stosunku do metody SASW jest zastosowanie akcelerometrów zamiast geofonów i użycie innego rodzaju wymuszenia podłoża.

## MATERIAŁ I METODY

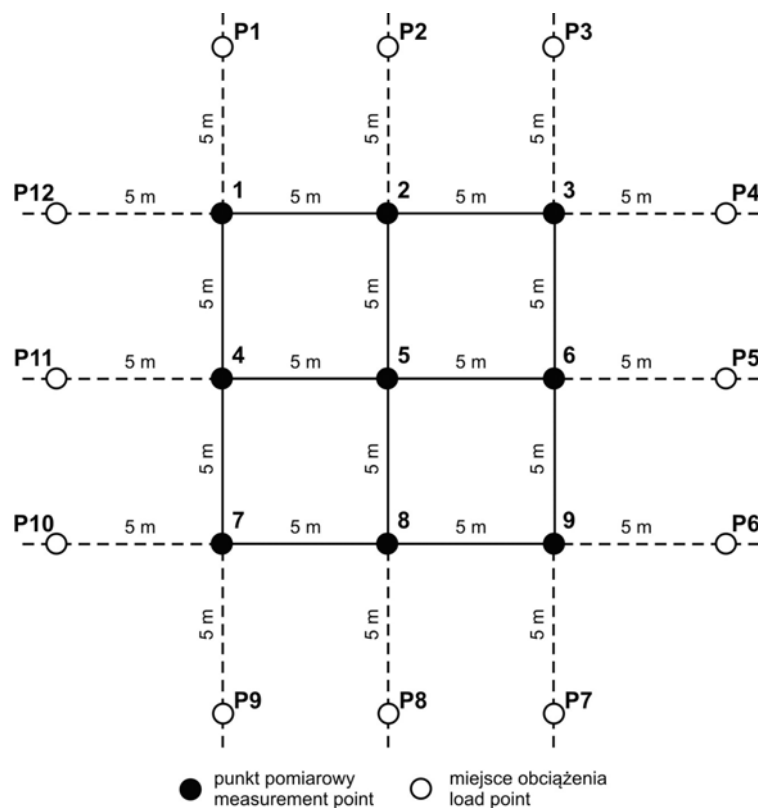
Badania polowe wykonano na terenie Centrum Logistycznego Łosośna zlokalizowanego w pobliżu miejscowości Kuźnica Białostocka. Teren badań wytypowano, biorąc pod uwagę dużą jednorodność podłoża. Na badanym obszarze znajdują się na znacznej powierzchni niekontrolowane nasypy zbudowane z równoziarnistych i mało wilgotnych piasków grubych

CSa ( $P_r$ ) w stanie luźnym i średnio zagęszczonym. Swobodne zwierciadło wody gruntowej znajdowało się na głębokości 1,9 m. Teren badań był płaski i wyrównany. Badania były wykonywane w znacznej odległości od linii kolejowej i bocznic przeładunkowych znajdujących się w centrum logistycznym. Ponadto pomiary przeprowadzono w czasie, gdy na terenie bazy nie odbywał się ruch pociągów i nie rejestrowano żadnych niepożądanych wpływów dynamicznych wynikających z pracy maszyn.

Wzбудnikiem drgań podczas wykonywanych badań była lekka płyta dynamiczna firmy Zorn. Przyrząd umożliwia uzyskiwanie powtarzalnych uderzeń o określonej charakterystyce – znana jest amplituda obciążenia (7,07 kN), przebieg wymuszenia w czasie (pół sinusoidy) i czas przyłożenia obciążenia (18 ms). Udar spadającej masy (10 kg) jest amortyzowany za pomocą sprężyny talerzowej, a impuls siłowy jest przekazywany na podłoże za pomocą płyty naciskowej o średnicy 30 cm (tak jak w płycie obciążanej statycznie VSS). Typowe zastosowanie lekkiej płyty dynamicznej to wyznaczenie modułu  $E_{vd}$  podłoża gruntowego oraz pośrednio kontrola zagęszczenia gruntu w nasypach.

Pomiary drgań przeprowadzono w dziewięciu punktach rozłożonych równomiernie na założonej siatce kwadratów o podstawowym wymiarze komórki wynoszącym 5,0 m. Punkty pomiarowe pokrywały obszar badawczy w kształcie kwadratu o wymiarach boków  $10 \times 10$  m. Źródło drgań ustawiano w dziewięciu miejscach, każdorazowo oddalając się od zasadniczego pola badawczego o 5,0 m. Całkowita powierzchnia poletka badawczego miała więc wymiary  $20 \times 20$  m. Rozmieszczenie punktów pomiaru przyspieszeń drgań oraz miejsca wywoływania impulsów uderzających przedstawiono na rysunku 1. W miejscach, gdzie ustawiona była płyta dynamiczna, rejestrowano również amplitudy jej przemieszczenia w celu wyznaczenia modułu  $E_{vd}$  podłoża według typowej procedury zgodnie z instrukcją przyrządu (TP BF-StB Teil B 8.3, 2003).

Pomiar przyspieszeń drgań był realizowany za pomocą systemu pomiarowego firmy Brüel&Kjær typu LAN-XI. W każdym z dziewięciu punktów pomiarowych rejestrowano pionową składową przyspieszeń drgań. Czujniki sejsmiczne przyspieszeń drgań



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

(akcelerometry typu 8340 firmy Brüel&Kjær) mocowano do specjalnie przygotowanych podstaw płytowych z głowicą duraluminiową, które były kotwione w gruncie za pomocą trzech gwintowanych wkrętów o długości 30 cm. Czułość użytych czujników wynosiła  $10 \text{ V} \cdot \text{g}^{-1}$ , zakres pomiarowy  $\pm 0,5 \text{ g}$  w przedziale częstotliwości 0,1–1500 Hz.

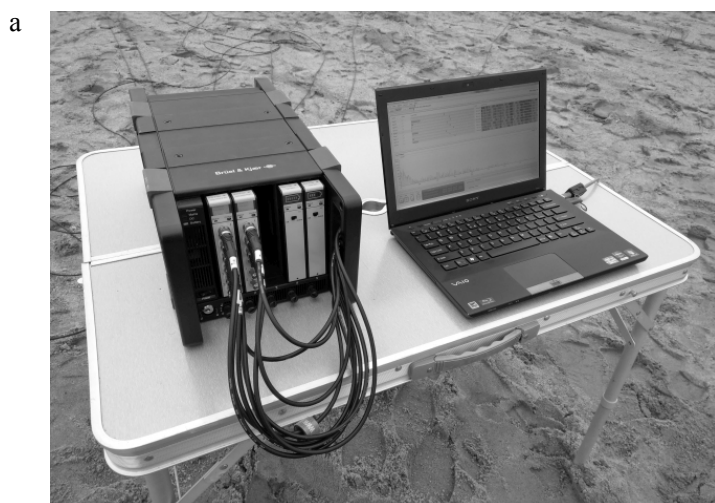
Układ pomiarowy LAN-XI oraz płytę dynamiczną pokazano na rysunku 2, a czujnik przyspieszeń drgań przymocowany do podstawy płytowej na rysunku 3.

W każdym punkcie badawczym rejestrowano po sześć dwusekundowych przebiegów czasowych przyspieszeń drgań. Łącznie otrzymano więc 54 wibrogramy, z których do dalszej analizy wytypowano dziewięć – po jednym dla każdego punktu pomiarowego.

Podstawą analiz w niniejszej pracy były wibrogramy umożliwiające wyznaczenie prędkości propagacji fali podłużnej ( $v_p$ ) i powierzchniowej fali Rayleigha ( $v_R$ ). Zgodnie z teorią drgań rozprzestrzeniających się

w izotropowym, jednofazowym ośrodku sprężystym rozchodzenie się impulsu falowego na powierzchni terenu ma swój uporządkowany przebieg (Prakash, 1981). Najszybciej od źródła drgań do miejsca obserwacji docierają fale podłużne (P – ang. *primary*), następnie fale poprzeczne (S – ang. *shear*), a najwolniej przemieszczają się fale powierzchniowe, w tym fale Rayleigha (R). Schematycznie zagadnienie przedstawiono na rysunku 4.

Zastosowana aparatura pomiarowa umożliwiła bardzo dokładny pomiar przyspieszeń drgań na powierzchni terenu. Możliwy był również dokładny pomiar czasu przejścia fali Rayleigha pomiędzy założonymi punktami pomiarowymi. Taki sposób oceny sztywności podłoża gruntowego, nazwany metodą *peak to peak*, został dość skutecznie zastosowany we wcześniejszych pracach autorów (Gosk i Czech, 2015; 2016). W niniejszej pracy metodyka ta została rozbudowana. Ocena sztywności podłoża została



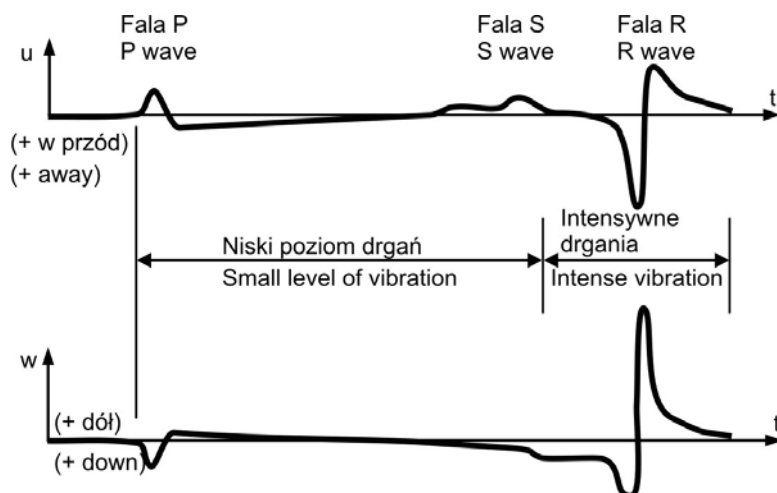
**Rys. 2.** Aparatura badawcza: a – układ pomiarowy typu LAN-XI firmy Brüel&Kjær, b – lekka płyta dynamiczna typu ZFG-01

**Fig. 2.** Test equipment: a – measuring system Brüel&Kjær LAN-XI type, b – light falling weight deflectometer ZFG-01 type



**Rys. 3.** Podstawa płytowa z czujnikiem przyspieszenia

**Fig. 3.** The plate base with acceleration sensor



**Rys. 4.** Rozchodzenie się fal z punkowego źródła drgań w ośrodku jednorodnym (opis w tekście)

**Fig. 4.** Wave system from surface point source in ideal medium (description in the text)

rozszerzona na większy obszar obejmujący dziewięć punktów pomiarowych (w cytowanych pracach analiza bazowała tylko na dwóch punktach). Postanowiono również bardziej wnikliwie przyjrzeć się wibrogramom i ocenić, czy możliwe jest określenie czasu

przejścia fali podłużnej. Fale podłużne, rejestrowane na powierzchni ośrodka gruntowego, charakteryzują się znacznie mniejszymi wartościami amplitud drgań niż fale Rayleigha (rys. 4). Wcześniejsze doświadczenia autorów wskazywały na znaczne trudności w tym

zakresie z uwagi na problem dokładności pomiarowych. Okazało się jednak, że odpowiednie przygotowanie sprzętu i oprogramowania umożliwiło również ocenę czasu przejścia fali podłużnej.

## WYNIKI

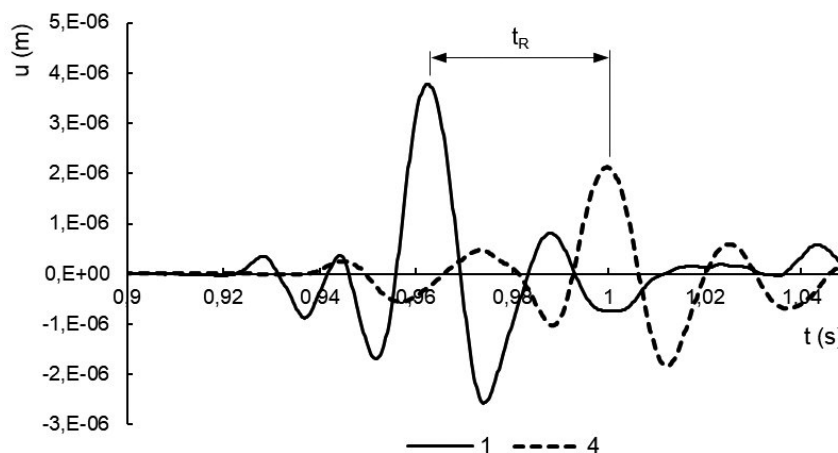
### Ocena prędkości fali powierzchniowej Rayleigha

Czasy przejścia fali powierzchniowej Rayleigha wyznaczono pomiędzy punktami pomiarowymi leżącymi obok siebie (rys. 1). W tym celu posłużono się wspomnianą wcześniej metodą *peak to peak*. Zasadniczymi jej elementami są wibrogramy przemieszczeń drgań uzyskane w wyniku podwójnego całkowania zarejestrowanych przyspieszeń. Na rysunku 5 przedstawiono przebiegi czasowe otrzymanych przemieszczeń drgań rozchodzących się pomiędzy wybranymi przykładowo punktami pomiarowymi 1 i 4 (rys. 1).

Czasy przejścia fali Rayleigha ( $t_R$ ) dla 12 badanych odcinków pomiędzy sąsiadującymi punktami pomiarowymi poletka doświadczalnego zostały wyznaczone pomiędzy dodatnimi amplitudami przemieszczeń (rys. 5). Na podstawie wyznaczonych czasów obliczono odpowiednie prędkości fali Rayleigha. Prędkości fali Rayleigha dla badanych odcinków przedstawiono na rysunku 7 wraz z wyznaczonymi w następnym rozdziale niniejszej pracy prędkościami fali podłużnej.

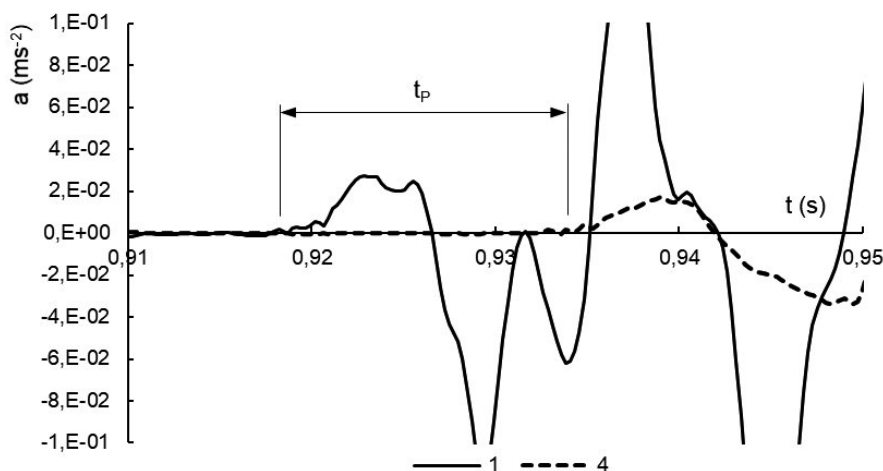
### Ocena prędkości fali podłużnej

Czasy przejścia fali podłużnej wyznaczono dla tych samych odcinków poletka badawczego, jak w przypadku analizy propagacji fali Rayleigha. Problem stanowiła interpretacja wyników, które zawierały wibrogramy. W przypadku oceny czasu przejścia fali Rayleigha sytuacja była dość oczywista, ponieważ maksymalne amplitudy przemieszczenia, które ewidentnie należy utożsamiać z tym typem fali, były bardzo wyraźne w każdym badanym przypadku. Wyznaczając czas przejścia fali podłużnej ( $t_p$ ), należało zmienić koncepcję postępowania z dwóch powodów. Po pierwsze amplitudy drgań na powierzchni, będące wynikiem przejścia fali podłużnej, mają znacznie mniejsze wartości. Po drugie bardzo szybko na wibrogramach zaczynają ujawniać się efekty kolejnych typów fal i analiza typu *peak to peak* staje się dość kłopotliwa interpretacyjnie. Uznano więc, że fizykę badanego zjawiska najlepiej odzwierciedli podejście polegające na ustaleniu momentu, w którym pojawia się mierzalna wartość przyspieszenia drgań, wskazująca na to, że do punktu badawczego dotarła najszybsza z fal. Uznano również, że inaczej niż w przypadku analizy propagacji fali Rayleigha, najbardziej efektywne będzie wykorzystanie akceleroqramów. Sposób, w jaki określono czas przejścia fali podłużnej, przedstawiono na rysunku 6. Na rysunku 7 pokazano uzyskane z obliczeń wartości prędkości fali podłużnej dla poszczególnych odcinków pomiarowych.

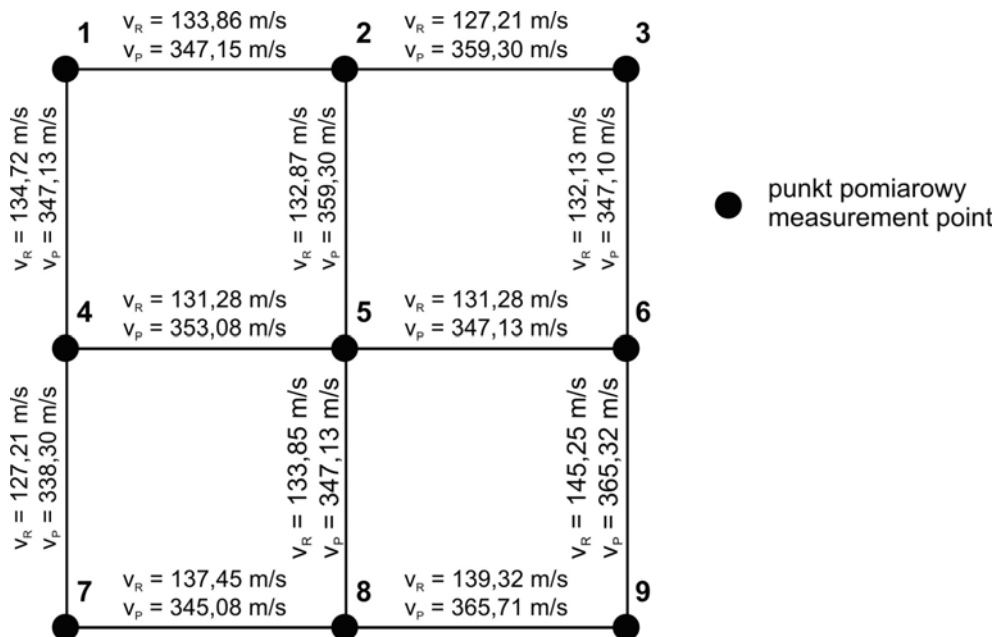


**Rys. 5.** Zmienność w czasie przemieszczenia pionowego punktów pomiarowych 1 i 4

**Fig. 5.** Variation in the time of the vertical displacements in measurement points 1 and 4



**Rys. 6.** Zmienność w czasie przyspieszenia pionowego punktów pomiarowych 1 i 4  
**Fig. 6.** Variation in the time of the vertical acceleration in measurement points 1 and 4



**Rys. 7.** Prędkości fali Rayleigha i fali podłużnej  
**Fig. 7.** Velocities of Rayleigh wave and primary wave

### Wyznaczenie wartości modułów $G_0$ i $E_0$ oraz współczynników Poissona

Ocena sztywności podłoża gruntowego polega w niniejszej pracy na analizie rozchodzenia się fal sejsmicznych, otrzymywane moduły należy więc

utożsamiać ze sztywnością początkową gruntu. Podstawą wyznaczenia poszukiwanych parametrów podłoża gruntowego była zależność wiążąca prędkość fali Rayleigha ( $v_R$ ) z prędkością fali poprzecznej ( $v_S$ ) (Achenbach, 1973):

$$v_R = \frac{0,862 + 1,14\nu}{1 + \nu} v_S \quad (1)$$

Biorąc pod uwagę, że

$$\frac{v_P}{v_S} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \quad (2)$$

do wyznaczenia współczynnika Poissona można posłużyć się zależnością:

$$\frac{v_R}{v_P} = \frac{0,862 + 1,14\nu}{(1 + \nu) \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}}} \quad (3)$$

Prędkości fali Rayleigha i fali podłużnej były wyznaczane na podstawie analizy wibrogramów, a wartości współczynnika Poissona obliczano (z uwagi na formę zależności 3) iteracyjnie. Następnie, po ustaleniu prędkości fali poprzecznej, wartości poszukiwa-

nych modułów sztywności wyznaczano na podstawie zależności znanych z teorii sprężystości (gęstość objętościowa gruntu  $\rho = 1844 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ):

$$G_0 = \rho v_S^2 \quad (4)$$

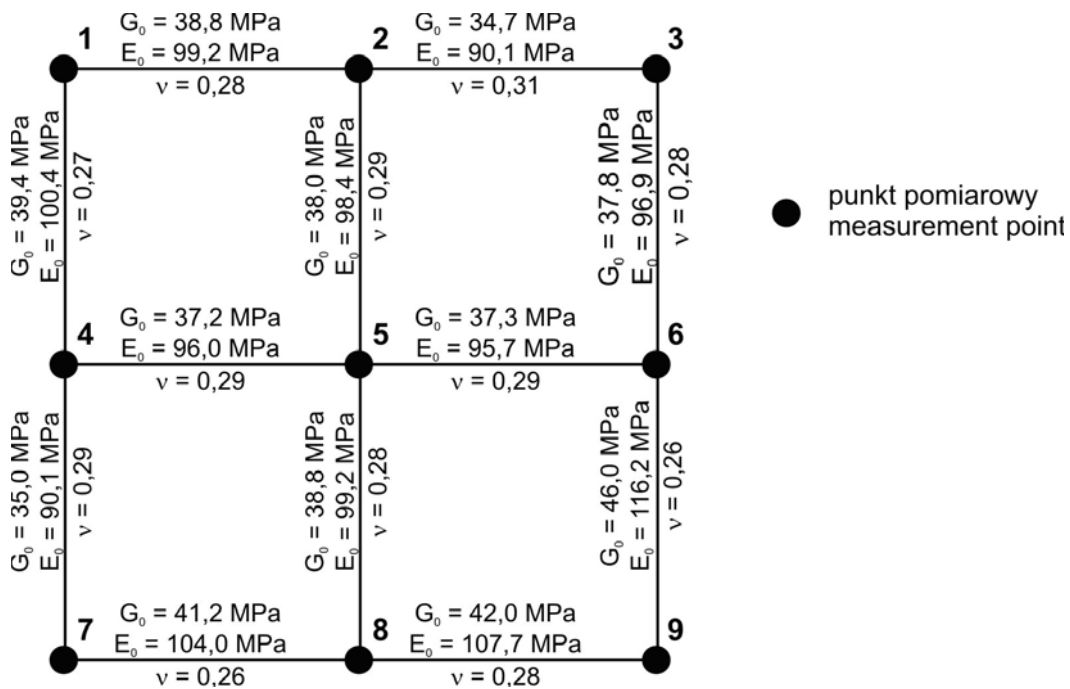
$$E_0 = 2\rho v_S^2 (1 + \nu) \quad (5)$$

Otrzymane wyniki zestawiono na rysunku 8.

### ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Zastosowana metoda, polegająca na ustaleniu czasu przejścia fali podłużnej i fali Rayleigha pomiędzy punktami pomiarowymi, umożliwiła wyznaczenie modułów sztywności podłoża  $E_0$ , których wartości wynosiły od 90,1 do 116,2 MPa. Wartości współczynników Poissona otrzymano w zakresie od 0,264 do 0,309.

Otrzymane wartości modułów sztywności cechowały się niewielką zmiennością w obszarze badania.



**Rys. 8.** Moduły  $G_0$ ,  $E_0$  oraz współczynnik Poissona

**Fig. 8.** Moduli  $G_0$  and  $E_0$  with Poisson's ratio

Można stwierdzić, że uzyskane wyniki modułów sztywności są zgodne z danymi literaturowymi (Lipiński, 2013). W cytowanej pracy można odnaleźć, że w przypadku gruntów o małej zawartości frakcji drobnej (badano podłoże z piasku grubego) i małej wartości naprężenia efektywnego (badano warstwy przypowierzchniowe) oraz dla gruntu w stanie luźnym należy spodziewać się modułu sztywności  $E_0 \approx 100$  MPa.

Wyniki badania modułu sztywności podłoża ( $E_{vd}$ ), uzyskane za pomocą lekkiej płyty dynamicznej według instrukcji jej używania (TP BF-StB Teil B 8.3, 2003), wyznaczone w punktach od P1 do P12, przyjmują wartości od 40,9 do 46,9 MPa. Rezultaty otrzymane za pomocą proponowanej w pracy metody są około dwukrotnie większe. Z podobną sytuacją mamy do czynienia, gdy otrzymane wyniki skonfrontujemy z modułem odkształcenia pierwotnego gruntu odczytanym z normy PN-81/B-03020 ( $E_0 = 58$  MPa). Należy stwierdzić, że przytoczone wyniki, uzyskane z badań płytą dynamiczną lub wyznaczone według normy PN-81/B-03020 na podstawie korelacji określonych poprzez ocenę rodzaju i stanu gruntu, nie mogą być przyjmowane do analizy rozchodzenia się drgań w gruncie i do rozwiązywania różnych zagadnień dynamiki budowli w obszarze interakcji budowla – podłoże gruntowe. W związku ze zdarzającym się w praktyce inżynierskiej zaniżaniem wartości modułów sztywności wyniki analiz z reguły są niezgodne z wartościami amplitud rejestrowanych na obiekcie rzeczywistym po jego wykonaniu. W niektórych sytuacjach takie postępowanie może prowadzić do przewymiarowania konstrukcji.

Dalej idące wnioski, wynikające z zastosowania proponowanej metody, wymagają dalszych prac związanych z jej rozwijaniem. Po zwiększeniu rozdzielczości badań zasadne wydaje się prowadzenie dalszych prac kalibracyjnych. Autorzy pracy rozważają umieszczenie czujników na różnych głębokościach. Ponadto czynione są starania w kierunku pełniejszej interpretacji zjawiska propagacji fali Rayleigha, związanej z jej dyspersyjnością w ośrodkach warstwowanych.

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Zastosowana metoda umożliwiła wyznaczenie modułów sztywności i wartości współczynnika Poissona przypowierzchniowych warstw gruntu. Wykorzystano metodę polegającą na analizie rozchodzenia się fal sejsmicznych, należy więc przyjąć, że otrzymano moduły, które należy utożsamiać ze sztywnością początkową gruntu dla zakresu bardzo małych odkształceń. Otrzymywane w ten sposób wyniki mogą stanowić podstawę do analiz zagadnień interakcji budowla – podłoże gruntowe różnych problemów dynamiki budowli (np. projektowanie fundamentów pod maszyny). Zdaniem autorów mają również potencjał w zakresie opracowania szybkiej metody kontroli zagęszczenia warstw nasypów budowlanych.

W dalszych pracach planowane jest udoskonalenie metody w zakresie dokładności oceny czasu przejścia fali podłużnej. Wykorzystywana aparatura daje w tym zakresie duże możliwości, co nie było oczywiste przed przeprowadzeniem analizowanej w pracy serii badań. Przewiduje się również odniesienie do wyników uzyskiwanych w badaniach laboratoryjnych w komorze aparatu trójosiowego ściskania wyposażonego w elementy typu *bender*. Nieodzowne wydaje się również wykonanie porównawczych badań polowych SDMT, SCPTU oraz SASW. Autorzy pracy mają świadomość, że podstawą zastosowanej metodyki jest analiza ośrodka jednofazowego. W rzeczywistości mamy do czynienia z ośrodkiem trójfazowym, uwzględnianie tego na obecnym etapie prac jest jednak niemożliwe.

## PIŚMIENNICTWO

- Achenbach, J.D. (1973). *Wave propagation in elastic solids*. Amsterdam – London: North-Holland Publishing Company, New York: American Elsevier Publishing Company.
- Foti, S., Lai, C.G., Rix, G.J. i Strobbia, C. (2015). *Surface Wave Methods for Near-Surface Site Characterization*. Boca Raton: CRC Press.
- Godlewski, T. i Szczepański, T. (2015). *Metody określania sztywności gruntów w badaniach geotechnicznych. Instrukcje wytyczne poradniki*. Warszawa: ITB.



- Gosk, W. i Czech, K. R. (2015). Drgania powierzchniowe podłoża gruntowego wywołane udarem spadającej masy – badania terenowe i identyfikacja sztywności gruntu. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 3, 229–233.
- Gosk, W. i Czech, K. R. (2016). Ocena modułu sztywności gruntu na podstawie pomiaru drgań powierzchniowych. *Acta Scientiarum Polonorum, Architectura – Budownictwo*, 15(2), 67–77.
- Lipiński, M. (2013). *Kryteria wyznaczania parametrów geotechnicznych*. Warszawa: Wydawnictwo SGGW.
- PN-81-B-03020. Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i wymiarowanie.
- Popielski, P. (2012). Oddziaływanie głębokich posadowień na otoczenie w środowisku zurbanizowanym. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Inżynieria Środowiska*, 61.
- Prakash, S. (1981). *Soil dynamics*. New York: McGraw-Hill.
- TP BF-StB Teil B 8.3 (2003). Technische Prüfvorschrift für Boden und Fels im Straßenbau. Dynamischer Plattendruckversuch mit Hilfe des Leichten Fallgewichtsgerätes. Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen.

## STIFFNESS MODULUS AND POISSON'S RATIO OF SOIL POSSIBILITY ASSESSMENT ON THE BASIS OF SURFACE VIBRATION ACCELERATION MEASUREMENTS

### ABSTRACT

The purpose of the work is to assess the stiffness of a sandy subsoil based on the analysis of vibrations recorded on the surface of the  $10 \times 10$  m test area. Field tests consisted of the measurements of vibration accelerations at nine points distributed evenly over the assumed square grid. The light falling weight deflectometer was the source of the vibration. Measurements of vibration accelerations were executed using measuring system produced by Brüel&Kjær. The stiffness modules of the subsurface layers  $G_0$  and  $E_0$  as well as Poisson's ratio ( $\nu$ ) of the soil were determined in the test area on the basis of the obtained results. The method of determining these parameters was based on measuring the time of passage of Rayleigh and longitudinal wave between the measurement points. The possibility of using the proposed procedure for assessing the ground stiffness in embankment was confirmed. The method can enable quick control of compaction of subsurface soil layers.

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