



Wpływ sposobu mocowania akcelerometrów na poziom rejestrowanych drgań powierzchniowych ośrodka gruntowego

KRZYSZTOF ROBERT CZECH¹, WOJCIECH GOSK²

Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska,
¹Katedra Mechaniki Konstrukcji, ²Zakład Geotechniki,
15-351 Białystok, ul. Wiejska 45E, k.czech@pb.edu.pl, w.gosk@pb.edu.pl

Streszczenie. W pracy prezentowane są wyniki badań terenowych polegających na pomiarze przyspieszeń drgań rejestrowanych na powierzchni ośrodka gruntowego. Źródłem drgań o wysokiej powtarzalności parametrów impulsu była lekka płyta dynamiczna ZFG-01. Pomiary przyspieszeń drgań realizowano przy wykorzystaniu najwyższej klasy i dokładności układu pomiarowego firmy Brüel & Kjær. Akcelerometry montowano na powierzchni gruntu piaszczystego w punktach pomiarowych rozmieszczonych promieniście w odległości 5 m i 10 m od źródła drgań. W pracy analizowano wpływ sposobu mocowania akcelerometrów na gruncie na poziom rejestrowanych wartości przyspieszeń drgań. Wykazano, że sposób mocowania czujników do powierzchni terenu ma kluczowe znaczenie z punktu widzenia wiarygodności realizowanych pomiarów.

Słowa kluczowe: geotechnika, drgania powierzchniowe, ośrodek gruntowy, pomiar drgań

DOI: 10.5604/12345865.1116829

1. Wstęp

Gwałtowny rozwój przemysłu obserwowany na całym świecie w ostatnich dziesięcioleciach sprawia, że coraz częściej w praktyce inżynierskiej mamy do czynienia z negatywnymi skutkami oddziaływań dynamicznych propagowanych drogą gruntową do otoczenia. Źródłem tych oddziaływań mogą być: prowadzone w pobliżu prace budowlane, np. praca walców lub innego typu urządzeń wibracyjnych mających zagęścić podłoże gruntowe, zagęszczanie mieszanek z kompozytów cementowych lub asfaltowych; wbijanie pali, ścianek szczelnych; drgania

towarzyszące pracy specjalistycznych urządzeń (np. pras, młotów udarowych); drgania towarzyszące kontrolowanym wybuchom ładunków wybuchowych (np. odstrzały w kamieniołomach, wyburzanie budynków), niekontrolowanym wybuchom gazu (np. gazu w budynkach); drgania generowane przejazdami pojazdów kołowych i szynowych itp. Działania, które mogą być podjęte w celu minimalizacji tego typu wpływów na otoczenie, wymagają szczegółowych informacji o poziomie i charakterze propagowanych drgań. Problem w tym, że nie istnieją jednolite wytyczne odnośnie do sposobu, w jaki tego typu drgania powinny być rejestrowane, aby mogły być powszechnie uznane za wiarygodne. Brak szczegółowych wytycznych w tym względzie może prowadzić do znacznych rozbieżności w wynikach badań prowadzonych w identycznych lokalizacjach pomiarowych przy porównywalnych warunkach gruntowo-wodnych (rodzaj, stan i uwarstwienie gruntu, wilgotność, stopień zagęszczenia itp.) i warunkach atmosferycznych (temperatura i wilgotność powietrza). Dlatego też niektórych wyników badań nie powinno się brać pod uwagę przy formułowaniu lub weryfikacji modeli teoretycznych związanych z propagacją drgań w ośrodku gruntowym. Dotyczy to zwłaszcza tych opracowań, w których w sposób szczegółowy nie przedstawiono sposobu, w jaki drgania były rejestrowane, jak i tych, w których nie sprecyzowano wykorzystanej w trakcie prowadzonych badań aparatury pomiarowej. Użycie nawet najdoskonalszej aparatury rejestrującej nie gwarantuje uzyskania wiarygodnych wyników badań, jeśli wykorzystano czujniki pomiarowe nieodpowiednie pod względem zakresu, częstotliwości lub czułości pomiarowej.

Z punktu widzenia wpływu drgań propagowanych drogą gruntową na budynki i ich użytkowników oraz urządzenia wrażliwe na drgania zlokalizowane wewnątrz budynku — najistotniejsze są drgania powierzchniowe, w ujęciu fizycznym nazywane falami, które charakteryzują się znacznie większymi amplitudami niż fale sejsmiczne (materialne) — propagowane w ośrodku gruntowym w postaci *fal podłużnych* i *poprzecznych*. Amplitudy fal powierzchniowych, propagowanych w ośrodku gruntowym w głównej mierze w postaci *fal Rayleigha* (w znacznie mniejszym stopniu w postaci *fal Love'a* i fal stożkowych — nazywanych także czołowymi falami poprzecznymi), zanikają asymptotycznie do zera wraz z głębokością, przy czym składowa pozioma *R-fali* zanika bardzo szybko przy powierzchni, podczas gdy składowa pionowa początkowo nieznacznie rośnie wraz z głębokością (uzyskując maksimum na głębokości $z \approx 0,076 \lambda_R$ [1], gdzie λ_R — długość *R-fali* [m]). Z tego powodu tego typu drgania powinny być rejestrowane na powierzchni lub w warstwie przypowierzchniowej gruntu, przy zastosowaniu specjalnie skonstruowanych podstaw pomiarowych zapewniających odpowiedni stopień „związania” czujników z gruntem.

Celem niniejszej pracy jest przeanalizowanie wpływu sposobu mocowania czujników pomiarowych do gruntu na poziom amplitud drgań powierzchniowych rejestrowanych w ośrodku gruntowym — w szczególności wpływu rodzaju zastosowanej podstawy pomiarowej i długości prętów wprowadzanych w grunt.

2. Wybór rodzaju podstaw pomiarowych wiążących czujniki z podłożem

Znane rozwiązania wykorzystywane do realizacji pomiarów parametrów drgań powierzchniowych propagowanych w ośrodku gruntowym i rejestrowanych w wybranym punkcie wzdłuż przyjętego profilu pomiarowego polegają na pomiarze bezwzględnych przemieszczeń, prędkości lub przyspieszeń drgań:

- a) przy wykorzystaniu jedno- lub trójosiowych czujników ustawianych bezpośrednio na gruncie (m.in.: [1, 7]);
- b) za pośrednictwem masywnych podstaw w formie stalowych okrągłych płyt lub gotowych elementów z kompozytów cementowych — takich jak płytki chodnikowe (np. tzw. „trylinka”), ustawianych bezpośrednio na wcześniej wyrównanym fragmencie podłoża gruntowego lub częściowo czy też całkowicie w nim zagłębionych, do których górnych powierzchni następnie mocowane są jedno- lub trójosiowe czujniki pomiarowe (m.in. [4]);
- c) za pośrednictwem zagłębianych w grunt pojedynczych bolców o przekroju kołowym [4], sześciokątnym lub innym, do których górnej, wystającej z ośrodka gruntowego części mocowane są czujniki jw.;
- d) za pośrednictwem masywnych podstaw połączonych w sposób sztywny z jednym lub kilkoma prętami (zwykle o przekroju kołowym) zagłębianymi w gruncie, do których górnej powierzchni przykręcane są czujniki jw. [3];
- e) za pośrednictwem podstaw w formie stalowych lub aluminiowych krzyżaków z czterema prętami zagłębianymi w grunt i aluminiową głowicą, do której następnie przykręcane są jedno- lub trójosiowe czujniki drgań jw. (m.in. [4, 5]);
- f) za pośrednictwem podstaw w formie pierścieni stalowych (bezpośrednio do których przykręcane są czujniki pomiarowe) z trzema bolcami zagłębianymi w gruncie [2];
- g) oraz przy wykorzystaniu geofonów lub jedno- i trójosiowych bezwzględnych czujników przemieszczeń, prędkości lub przyspieszeń drgań zakopywanych w gruncie.

W pracy przyjęto, że badania terenowe zostaną przeprowadzone dla następujących sposobów pomiaru drgań na gruncie:

- 1) czujniki mocowane do aluminiowych głowic przykręcanych do pojedynczych prętów zagłębianych w gruncie,
- 2) czujniki mocowane bezpośrednio do stalowych pierścieni z trzema prętami zagłębianymi w gruncie,
- 3) oraz czujniki mocowane do aluminiowych głowic przykręcanych do stalowych krzyżaków z czterema prętami zagłębianymi w gruncie.

W przypadku sposobów nr: 1), 2) i 3) użyto zróżnicowanych długości prętów zagłębianych w gruncie ($L_1 = 15$ cm oraz $L_2 = 30$ cm). Zastosowane rodzaje podstaw pokazano na rysunku 1.

a)



b)



c)



d)



Rys. 1. Podstawy pomiarowe wykorzystane w badaniach terenowych: a) widok ogólny rozmieszczenia podstaw; b) podstawa pierścieniowa; c) podstawa krzyżakowa z głowicą aluminiową; d) podstawa w formie pojedynczego pręta z głowicą aluminiową

Ze względu na niewystarczające „związanie” podstaw pomiarowych z ośrodkiem gruntowym w badaniach z góry pominięto możliwość wykorzystania podstaw pomiarowych opisanych w podpunktach a) i b), gdyż czujniki ustawione na gruncie (nawet jeśli są wystarczająco masywne) lub przykręcone do masywnych podstaw ustawionych bezpośrednio na gruncie, ze względu na możliwość przemieszczania się zastosowanego układu pomiarowego względem podłoża — zarówno w płaszczyźnie pionowej, jak i poziomej (ograniczone jedynie siłami docisku i tarcia pomiędzy czujnikami lub masą z przykręconymi czujnikami a podłożem), nie są w stanie zapewnić rejestracji wiarygodnych przebiegów drgań.

3. Aparatura oraz metodyka prowadzenia pomiarów

Pomiary drgań powierzchniowych propagowanych w ośrodku gruntowym realizowano na terenie żwirowni zlokalizowanej w województwie podlaskim w pobliżu miejscowości Mince. Lokalizację badawczą wybrano ze względu na jednorodność

rodzaju i stanu gruntu (piasek drobny) zalegającego do co najmniej kilkumetrowej głębokości — bez widocznych przewarstwień czy innego rodzaju wtrąceń.

Rejestrację drgań prowadzono w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach (x , y i z) — odpowiednio: w poprzek (kierunek radialny) i wzdłuż (kierunek promieniowy) przyjętego profilu pomiarowego w płaszczyźnie terenu oraz w kierunku pionowym — w odległości 5 m i 10 m od źródła drgań. Źródłem drgań były pojedyncze impulsy generowane lekką płytą dynamiczną typu ZFG-01, zwaną również lekkim ugięciomierzem udarowym. Urządzenia tego typu są powszechnie wykorzystywane w badaniach modułów sztywności podłoża gruntowego i służą do kontroli zagęszczenia nasypów [6]. Realizowany w urzędzeniu kontrolowany spadek masy (10 kg z wysokości 0,83 m) stanowi odpowiednio stabilne i powtarzalne źródło drgań impulsowych niezbędnych do przeprowadzenia wiarygodnej analizy porównawczej rejestrowanych parametrów drgań.

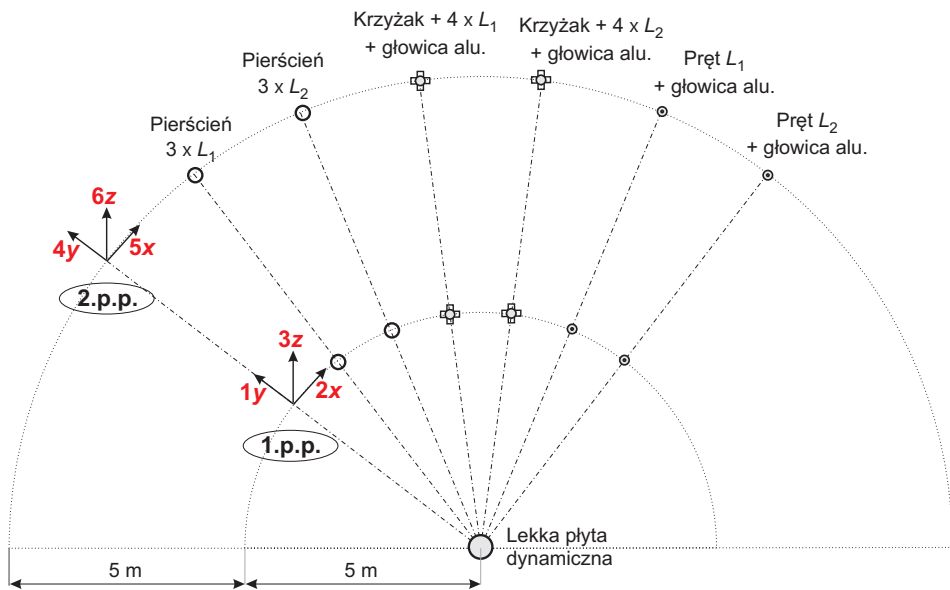
Do rejestracji drgań propagowanych w ośrodku gruntowym wykorzystano najwyższej dokładności układ pomiarowy firmy Brüel & Kjær typu LAN-XI (rys. 2) złożony z:

- dwóch 6-kanalowych, 24-bitowych modułów pomiarowych typu 3050-B-060 do prowadzenia pomiarów i analiz dynamicznych z dynamiką wejść na poziomie 160 dB i idealną liniowością oraz zgodnością fazową (z monitoringiem i sygnalizacją ewentualnych przesterowań w każdym z kanałów oraz błędów w połączeniach i zasilaniu przetworników),
- dwóch modułów baterii typu 2831-A,
- pięciomodułowej kasety typu 3660C — umożliwiającej zasilanie całego systemu pomiarowego oraz synchronizację próbkowania z poszczególnych modułów (przy wykorzystaniu protokołu IEEE 1588 — *Precision Time Protocol*),
- piezoelektrycznych czujników przyspieszeń drgań (wraz z okablowaniem):
 - 6 szt. firmy Brüel & Kjær typu 8340 (o czułości 10 V/g, zakresie pomiarowym $\pm 0,5$ g — w przedziale częstotliwości 0,1-1500 Hz),
 - 3 szt. firmy Dytran typu 3187D — wykorzystywanych do kontroli poziomu drgań generowanych w miejscu ustawienia lekkiej płyty dynamicznej (o czułości 0,5 V/g, zakresie pomiarowym ± 25 g — w przedziale częstotliwości 0,1-1500 Hz),
- oraz komputera przenośnego typu notebook z zainstalowanym oprogramowaniem rejestratora sygnałów i oprogramowaniem do analiz w czasie rzeczywistym (*PULSE* i *REFLEX*).

Dla każdego rodzaju podstaw (rozieszczonych promieniście względem lekkiej płyty dynamicznej) każdorazowo generowano sześć impulsów. Rozmieszczenie poszczególnych podstaw, numerację kierunków i punktów pomiarowych oraz kolejność realizacji pomiarów orientacyjnie pokazano na rysunku 3. Dodatkowo rejestrowano ugięcie podłoża pod lekką płytą dynamiczną.



Rys. 2. Układ pomiarowy firmy Brüel & Kjær i lekka płyta dynamiczna typu ZFG-01



Rys. 3. Szkic rozmieszczenia podstaw i czujników pomiarowych

W związku z udarowym charakterem drgań generowanych w ośrodku gruntowym zastosowano próbkowanie na poziomie 4800 próbek/sekundę.

4. Wyniki badań

Dane pozyskane w trakcie przeprowadzonych badań przeanalizowano pod kątem maksymalnych wartości przyspieszeń drgań zarejestrowanych w poszczególnych punktach i kierunkach pomiarowych, a następnie zestawiono w tabelach od 1 do 6. W ww. tabelach dodatkowo podano ugięcia gruntu pod stalową płytą lekkiego ugięciomierza udarowego.

TABELA 1

Zestawienie amplitud zarejestrowanych w przypadku podstawy w formie pojedynczego pręta długości L_1 z głowicą aluminiową

Nazwa pliku	Rodzaj podstawy, liczba i długość prętów	$L = 5,0 \text{ m (1.p.p.)}$			$L = 10,0 \text{ m (2.p.p.)}$			Ugięcie ($L = 0,0 \text{ m}$)
		1y	2x	3z	4y	5x	6z	
		[m/s ²]			[m/s ²]			
9B_PK-1	Pojedynczy pręt L_1 + głowica aluminiowa	0,772	0,293	0,861	0,306	0,076	0,266	0,28
9B_PK-2		0,760	0,410	0,875	0,310	0,104	0,270	0,28
9B_PK-3		0,789	0,321	0,885	0,315	0,070	0,272	0,29
9B_PK-4		0,799	0,266	0,895	0,315	0,071	0,268	0,29
9B_PK-5		0,777	0,317	0,879	0,311	0,078	0,272	0,28
9B_PK-6		0,769	0,309	0,865	0,307	0,079	0,272	0,28

TABELA 2

Zestawienie amplitud zarejestrowanych w przypadku podstawy w formie pojedynczego pręta długości L_2 z głowicą aluminiową

Nazwa pliku	Rodzaj podstawy, liczba i długość prętów	$L = 5,0 \text{ m (1.p.p.)}$			$L = 10,0 \text{ m (2.p.p.)}$			Ugięcie ($L = 0,0 \text{ m}$)
		1y	2x	3z	4y	5x	6z	
		[m/s ²]			[m/s ²]			
8B_PD-1	Pojedynczy pręt L_2 + głowica aluminiowa	0,592	0,329	0,653	0,287	0,141	0,196	0,28
8B_PD-2		0,601	0,360	0,664	0,299	0,141	0,193	0,29
8B_PD-3		0,586	0,350	0,657	0,297	0,135	0,195	0,29
8B_PD-4		0,590	0,356	0,662	0,299	0,138	0,197	0,29
8B_PD-5		0,595	0,353	0,660	0,301	0,136	0,195	0,28
8B_PD-6		0,608	0,356	0,663	0,300	0,136	0,196	0,29

TABELA 3

Zestawienie amplitud zarejestrowanych w przypadku podstawy w formie pierścienia z trzema prętami długości L_1

Nazwa pliku	Rodzaj podstawy, liczba i długość prętów	$L = 5,0 \text{ m (1.p.p.)}$			$L = 10,0 \text{ m (2.p.p.)}$			Ugięcie ($L = 0,0 \text{ m}$)
		1y	2x	3z	4y	5x	6z	
		[m/s ²]			[m/s ²]			
3B_PDK-1	Pierścień + 3 pręty L_1	1,060	0,562	0,994	0,226	0,133	0,220	0,32
3B_PDK-2		1,030	0,489	1,010	0,230	0,138	0,221	0,30
3B_PDK-3		1,040	0,479	1,080	0,227	0,142	0,230	0,31
3B_PDK-4		1,080	0,542	1,020	0,231	0,136	0,221	0,32
3B_PDK-5		1,080	0,609	1,040	0,230	0,143	0,227	0,31
3B_PDK-6		1,100	0,527	1,060	0,229	0,134	0,229	0,31

TABELA 4

Zestawienie amplitud zarejestrowanych w przypadku podstawy w formie pierścienia z trzema prętami długości L_2

Nazwa pliku	Rodzaj podstawy, liczba i długość prętów	$L = 5,0 \text{ m (1.p.p.)}$			$L = 10,0 \text{ m (2.p.p.)}$			Ugięcie ($L = 0,0 \text{ m}$)
		1y	2x	3z	4y	5x	6z	
		[m/s ²]			[m/s ²]			
2B_PDD-1	Pierścień + 3 pręty L_2	0,666	0,289	0,525	0,254	0,132	0,196	0,32
2B_PDD-2		0,607	0,282	0,535	0,251	0,140	0,195	0,32
2B_PDD-3		0,645	0,391	0,549	0,248	0,140	0,192	0,32
2B_PDD-4		0,631	0,262	0,559	0,258	0,154	0,195	0,32
2B_PDD-5		0,638	0,301	0,549	0,256	0,120	0,195	0,32
2B_PDD-6		0,678	0,313	0,558	0,257	0,120	0,194	0,32

TABELA 5

Zestawienie amplitud zarejestrowanych w przypadku podstawy w formie krzyżaka z czterema prętami długości L_1 i aluminiową głowicą

Nazwa pliku	Rodzaj podstawy, liczba i długość prętów	$L = 5,0 \text{ m (1.p.p.)}$			$L = 10,0 \text{ m (2.p.p.)}$			Ugięcie ($L = 0,0 \text{ m}$)
		1y	2x	3z	4y	5x	6z	
		[m/s ²]			[m/s ²]			
7B_KK-1	Krzyżak + 4 pręty L_1 + głowica aluminiowa	1,010	1,000	0,532	0,385	0,192	0,184	0,29
7B_KK-2		1,050	1,050	0,528	0,384	0,200	0,191	0,29
7B_KK-3		1,030	1,040	0,519	0,392	0,202	0,186	0,28
7B_KK-4		1,040	1,040	0,519	0,401	0,201	0,190	0,29
7B_KK-5		1,040	1,020	0,521	0,396	0,199	0,190	0,29
7B_KK-6		1,060	1,030	0,518	0,388	0,199	0,190	0,28

TABELA 6

Zestawienie amplitud zarejestrowanych w przypadku podstawy w formie krzyżaka z czterema prętami długości L_2 i aluminiową głowicą

Nazwa pliku	Rodzaj podstawy, liczba i długość prętów	$L = 5,0 \text{ m (1.p.p.)}$			$L = 10,0 \text{ m (2.p.p.)}$			Ugięcie ($L = 0,0 \text{ m}$)
		1y	2x	3z	4y	5x	6z	
		[m/s ²]			[m/s ²]			
6B_KD-1	Krzyżak + 4 pręty L_2 + głowica aluminiowa	1,130	0,509	0,536	0,205	0,178	0,199	0,30
6B_KD-2		1,160	0,520	0,543	0,210	0,184	0,199	0,29
6B_KD-3		1,150	0,510	0,554	0,217	0,176	0,198	0,29
6B_KD-4		1,160	0,540	0,559	0,215	0,191	0,201	0,30
6B_KD-5		1,160	0,558	0,550	0,215	0,201	0,201	0,29
6B_KD-6		1,170	0,535	0,555	0,220	0,193	0,201	0,29

Dla danych zamieszczonych w powyższych tabelach wyznaczono uśrednione wartości amplitud przyspieszeń drgań oraz wartości odpowiadających im odchylen standardowych, które najlepiej obrazują rozrzuty zarejestrowanych danych w otoczeniu wartości średnich. Wyniki obliczeń zamieszczono w tabeli 7.

TABELA 7

Zestawienie uśrednionych wartości amplitud przyspieszeń drgań i odpowiadających im odchylen standardowych

Rodzaj podstawy, liczba i długość prętów	$L = 5,0 \text{ m (1.p.p.)}$			$L = 10,0 \text{ m (2.p.p.)}$			Ugięcie ($L = 0,0 \text{ m}$)
	1y	2x	3z	4y	5x	6z	
	Średnia arytmetyczna z 6 pomiarów [m/s ²] Odchylenie standardowe [m/s ²]						śr. aryt. [mm] (odch. stand.)
Pojedynczy pręt L_1 + głowica aluminiowa	0,778	0,319	0,877	0,311	0,080	0,270	0,28
	0,014	0,049	0,013	0,004	0,012	0,003	0,01
Pojedynczy pręt L_2 + głowica aluminiowa	0,595	0,351	0,660	0,297	0,138	0,195	0,29
	0,008	0,011	0,004	0,005	0,003	0,001	0,01
Pierścień + 3 pręty L_1	1,065	0,535	1,034	0,229	0,138	0,225	0,31
	0,027	0,048	0,032	0,002	0,004	0,005	0,01
Pierścień + 3 pręty L_2	0,644	0,306	0,546	0,254	0,134	0,195	0,32
	0,025	0,045	0,013	0,004	0,013	0,001	0,00
Krzyżak + 4 pręty L_1 + głowica aluminiowa	1,038	1,030	0,523	0,391	0,199	0,189	0,29
	0,017	0,018	0,006	0,007	0,004	0,003	0,01
Krzyżak + 4 pręty L_2 + głowica aluminiowa	1,155	0,529	0,550	0,214	0,187	0,200	0,29
	0,014	0,019	0,009	0,005	0,010	0,001	0,01

Analiza rozkładów wartości odchyłeń standardowych uśrednionych wartości amplitud przyspieszeń drgań wskazuje na znaczną jednorodność i powtarzalność zarejestrowanych danych przy bardzo dużej jednorodności wartości ugięć płyty dynamicznej.

5. Analiza porównawcza amplitud przyspieszeń drgań

W celu przeprowadzenia analizy porównawczej zarejestrowanych wartości amplitud przyspieszeń drgań dokonano uśrednienia poszczególnych amplitud dla poszczególnych kierunków i punktów pomiarowych — uzyskując w ten sposób punkt odniesienia do dalszych analiz. W tabeli 8 zestawiono wyrażone w procentach przyrosty i spadki wartości amplitud w stosunku do przyjętego poziomu odniesienia.

TABELA 8
Zestawienie porównawcze uśrednionych wartości amplitud przyspieszeń drgań odniesionych do przyjętego poziomu odniesienia

Rodzaj podstawy, liczba i długość prętów		L = 5,0 m (1.p.p.)			L = 10,0 m (2.p.p.)			Ugięcie (L = 0,0 m)
		1y	2x	3z	4y	5x	6z	
		[m/s ²]						
Uśredniona amplituda		0,879	0,512	0,698	0,283	0,146	0,212	0,30
Przyrost/spadek amplitud przyspieszeń drgań/ugięć — w stosunku do wartości uśrednionych								
1a	Pojedynczy pręt L ₁ + głowica aluminiowa	-11,6%	-37,6%	25,6%	9,9%	-45,4%	27,3%	-4,6%
1b	Pojedynczy pręt L ₂ + głowica aluminiowa	-32,3%	-31,5%	-5,5%	5,2%	-5,5%	-7,9%	-3,5%
2a	Pierścień + 3 pręty L ₁	21,1%	4,5%	48,1%	-19,0%	-5,7%	5,9%	5,0%
2b	Pierścień + 3 pręty L ₂	-26,7%	-40,1%	-21,8%	-10,1%	-7,9%	-8,3%	7,8%
3a	Krzyżak + 4 pręty L ₁ + głowica aluminiowa	18,1%	101,3%	-25,1%	38,4%	36,3%	-11,1%	-3,5%
3b	Krzyżak + 4 pręty L ₂ + głowica aluminiowa	31,4%	3,3%	-21,3%	-24,4%	28,3%	-5,8%	-1,2%

Wartości przyspieszeń drgań rejestrowane za pomocą czujników przykręconych do poszczególnych podstaw mogą być w pewnych sytuacjach, znacząco zawyżone, jak i zaniżone. Zawyżenie rejestrowanych wartości może nastąpić na skutek wystąpienia drgań rezonansowych związanych ze zbliżonymi bądź w skrajnych przypadkach pokrywającymi się częstotliwościami drgań własnych układów pomiarowych złożonych z podstaw i przykręconych do nich czujników z częstotliwościami drgań

propagowanych w ośrodku gruntowym. Zaniżenie wartości amplitud przyspieszeń drgań może z kolei wystąpić z powodu niewystarczająco sztywnego „związania” podstaw pomiarowych z ośrodkiem gruntowym lub możliwym tłumieniem drgań w samych podstawach pomiarowych. W pracy przyjęto więc, że bardziej wiarygodne są dane zbliżone do najniższych zarejestrowanych amplitud przyspieszeń drgań, gdyż tłumienie drgań w podstawach pomiarowych wykonanych z materiału bardzo słabo tłumiącego drgania (stal, stopy aluminium itp.) jest z reguły nieznaczne i nie powinno wraz z tłumieniem konstrukcyjnym podstaw przekraczać kilku procent — oczywiście przy założeniu, że zapewniono odpowiedni stopień „związania” podstaw pomiarowych z ośrodkiem gruntowym (co z pewnością uzyskano w przypadku podstaw pomiarowych typu 2 i 3). Dane zawarte w tabeli 8 przeanalizowano pod tym kątem, a następnie kolorem czarnym dla każdego analizowanego punktu i kierunku pomiarowego wyróżniono po cztery skrajne wartości (po dwa maksymalne przyrosty wartości oraz po dwa maksymalne spadki wartości w stosunku do wartości średniej). Wartości wyrażające maksymalne spadki w stosunku do wartości średniej dodatkowo podkreślono. Uzyskane w ten sposób dane prezentowane są w tabeli 9.

TABELA 9

Zestawienie maksymalnych przyrostów/spadków uśrednionych wartości amplitud przyspieszeń drgań

Rodzaj podstawy, liczba i długość prętów		L = 5,0 m (1.p.p.)			L = 10,0 m (2.p.p.)		
		1y	2x	3z	4y	5x	6z
		[m/s ²]					
Uśredniona amplituda		0,879	0,512	0,698	0,283	0,146	0,212
Przyrost/spadek amplitud przyspieszeń drgań w stosunku do wartości uśrednionych							
1a	Pojedynczy pręt L ₁ + głowica aluminiowa	-11,6%	<u>-37,6%</u>	25,6%	9,9%	<u>-45,4%</u>	27,3%
1b	Pojedynczy pręt L ₂ + głowica aluminiowa	<u>-32,3%</u>	-31,5%	-5,5%	5,2%	-5,5%	-7,9%
2a	Pierścień + 3 pręty L ₁	21,1%	4,5%	48,1%	<u>-19,0%</u>	-5,7%	5,9%
2b	Pierścień + 3 pręty L ₂	<u>-26,7%</u>	<u>-40,1%</u>	<u>-21,8%</u>	-10,1%	<u>-7,9%</u>	<u>-8,3%</u>
3a	Krzyżak + 4 pręty L ₁ + głowica aluminiowa	18,1%	101,3%	<u>-25,1%</u>	38,4%	36,3%	<u>-11,1%</u>
3b	Krzyżak + 4 pręty L ₂ + głowica aluminiowa	31,4%	3,3%	-21,3%	<u>-24,4%</u>	28,3%	-5,8%

Analizując dane zestawione w tabeli 9, widać, że w przypadku pierwszego typu podstaw (pojedynczych prętów z głowicami aluminiowymi) uzyskano najniższe amplitudy przyspieszeń drgań w płaszczyźnie poziomej (w kierunku x w 2.p.p.

— podstawa „1a” oraz w kierunku y w 2.p.p. — podstawa „1b”). Powyższe dane są jednak mało wiarygodne, gdyż w trakcie prowadzonych pomiarów stwierdzono nieznaczną możliwość ruchu zagłębionych w gruncie podstaw typu „1” w płaszczyźnie poziomej. W kierunku pionowym uwidacznia się ewidentny wpływ długości prętów zagłębionych w gruncie. W przypadku podstawy z krótszymi prętami o długości L_1 uzyskano stanowczo zawyżone wartości amplitud przyspieszeń drgań. Większe długości prętów sprawiają, że amplitudy przyspieszeń drgań na kierunku pionowym są niższe w stosunku do wartości średnich o ok. 5 do 8%. Pod tym względem znacznie lepiej prezentują się podstawy typu „3” (podstawa krzyżakowa z czterema prętami i głowicami aluminiowymi) — zwłaszcza podstawa „3a” (wartości amplitud przyspieszeń drgań w kierunku pionowym niższe od ok. 11% w 2.p.p. do prawie 25% w 1.p.p. od wartości średnich). Niestety, jak widać w tabeli 9, w przypadku podstawy „3a” aż trzykrotnie uzyskano najwyższe wartości przyspieszeń drgań (w płaszczyźnie poziomej w kierunku x w 1. i 2. p.p. oraz w kierunku y w 2.p.p.). Tylko nieco lepiej wygląda to w przypadku podstawy 3b. Wynika z tego, że zastosowane w badaniach podstawy krzyżakowe z czterema bolcami wbijanymi w grunt i aluminiowymi głowicami pomimo bardzo dobrego związania z gruntem (o czym świadczą między innymi amplitudy w kierunku pionowym) musiały doznawać drgań rezonansowych w płaszczyźnie poziomej. Z pewnością na taki stan rzeczy wpłynął zastosowany jednopunktowy sposób mocowania aluminiowych głowic do krzyżaków stalowych.

Dalsza analiza danych zamieszczonych w tabeli 9 wskazuje w sposób jednoznaczny na przewagę podstaw pierścieniowych typu „2b” (tj. o większych długościach prętów L_2) nad innymi rodzajami wykorzystywanych w badaniach podstaw pomiarowych. W przypadku ww. podstaw uzyskano maksymalne amplitudy składowych pionowych przyspieszeń drgań tylko o 2,8-3,3% (odpowiednio w 2.p.p. i 1.p.p.) wyższe niż w przypadku podstaw krzyżakowych typu „3a” (o krótszych prętach L_1) oraz nieznacznie niższe (o 0,5-2,5% — odpowiednio w 1.p.p. i 2.p.p.) niż w przypadku podstaw krzyżakowych typu „3b” (o dłuższych prętach L_2) oraz zdecydowanie bardziej prawdopodobne wartości amplitud składowych poziomych przyspieszeń drgań — szczególnie w 1.p.p.

Podstawy pierścieniowe o mniejszych długościach prętów wprowadzanych w grunt L_1 (typu „2a”) nie są już tak dobrym rozwiązaniem. Przy ich wykorzystaniu uzyskano znacznie większe wartości składowych pionowych przyspieszeń drgań w porównaniu z podstawami krzyżakowymi z głowicą aluminiową i podstawami pierścieniowymi typu „2b” oraz tylko nieznacznie bardziej prawdopodobne rozkłady amplitud składowych poziomych w porównaniu z podstawami krzyżakowymi (typu „3”).

6. Podsumowanie i wnioski

W wyniku przeprowadzonych badań in situ pozyskano ponad 216 przebiegów czasowych przyspieszeń drgań (akcelerogramów) zarejestrowanych wzdłuż sześciu promieniście zorientowanych profili pomiarowych o dwóch punktach pomiarowych każdy (pomijając dane zarejestrowane za pomocą czujników przyspieszeń zlokalizowanych na płycie dynamicznej). Punkty pomiarowe przyjęto w odległości 5 m i 10 m (odpowiednio 1.p.p. i 2.p.p.) od źródła generowanych drgań, którym w tym przypadku była lekka płyta dynamiczna typu ZFG-01. W badaniach propagacji drgań powierzchniowych wykorzystano osiem różnego typu podstaw pomiarowych różniących się zarówno konstrukcją, jak i liczbą oraz długością prętów zagłębianych w gruncie. Pomiary realizowano przy wykorzystaniu najnowszej generacji i najwyższej dokładności układu pomiarowego typu LAN-XI firmy Brüel & Kjær. Analiza porównawcza uśrednionych rozkładów składowych pionowych i poziomych amplitud przyspieszeń drgań umożliwia sformułowanie następujących wniosków:

- przeprowadzone badania potwierdzają istotność wpływu sposobu realizacji pomiaru drgań na rejestrowane rozkłady amplitud przyspieszeń drgań rejestrowanych na gruncie;
- spośród sześciu zróżnicowanych typów podstaw pomiarowych wykorzystanych w badaniach propagacji drgań powierzchniowych najbardziej wiarygodne wartości składowych pionowych i poziomych amplitud przyspieszeń drgań uzyskano w przypadku podstawy pierścieniowej typu „2b” o dłuższych prętach zagłębianych w gruncie (L_2);
- podstawy typu „1” (czujniki mocowane do aluminiowych głowic przykręcanych do pojedynczych prętów) bez względu na rozpatrywaną w pracy długość prętów zagłębianych w gruncie nie zapewniają odpowiedniego „powiązania” układu pomiarowego z ośrodkiem gruntowym w kierunku pionowym oraz w zależności od częstotliwości propagowanych drgań są podatne na tłumienie lub intensyfikację składowych poziomych drgań w przypadku wystąpienia drgań rezonansowych charakterystycznych dla elementów typu wspornikowego;
- podstawy krzyżakowe typu „3” z czterema prętami zagłębianymi w gruncie i aluminiowymi głowicami były bardzo dobrze związane z podłożem, jednak jednopunktowy sposób mocowania aluminiowych głowic do krzyżaków stalowych powodował intensyfikację drgań w płaszczyźnie poziomej.

Ze względu na obszerność materiału, niemożliwe było w niniejszej pracy przeanalizowanie rozkładów częstotliwościowych zarejestrowanych drgań. To zagadnienie wymaga osobnego opracowania.

Praca realizowana w ramach działalności statutowej realizowanej na Wydziale Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Białostockiej finansowanej ze środków MNiSW.

W badaniach wykorzystano aparaturę pomiarową współfinansowaną ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego oraz środków budżetu państwa w ramach Programu Operacyjnego Rozwój Polski Wschodniej.

Artykuł wpłynął do redakcji 31.03.2014 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 16.06.2014 r.

LITERATURA

- [1] CIESIELSKI R., MACIĄG E., *Drgania drogowe i ich wpływ na budynki*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1990.
- [2] CZECH K.R., *Wpływ rodzaju nawierzchni drogowej i obciążeń dynamicznych od pojazdów na poziom drgań powierzchniowych propagowanych do otoczenia*, Przegląd Komunikacyjny, 9, 2013, 11-17.
- [3] JAROŃ A., *Pomiar drgań powierzchniowych w podłożu gruntowym spowodowanych wibracyjnym pogrążaniem grodziec w gruntach spoistych*, Inżynieria Morska i Geotechnika, 4, 2012, 339-343.
- [4] MACIĄG E., TATARA T., CHEŁMECKI J., *Badania drgań gruntu i niskich budynków od wpływu komunikacji miejskiej*, Inżynieria i Budownictwo, 3, 2005, 135-140.
- [5] KAWECKI J., STYPUŁA K., *Zapewnienie komfortu wibracyjnego ludziom w budynkach narażonych na oddziaływanie komunikacyjne*, Politechnika Krakowska, Kraków, 2013.
- [6] SULEWSKA M.J., *The control of soil compaction degree by means of LFW*, Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 7, 1, 2012, 36-41.
- [7] CIESIELSKI R., KWIECIEŃ A., SZYPUŁA K., *Propagacja drgań w warstwach przypowierzchniowych podłoża gruntowego — badania doświadczalne in situ*, Monografia 263 Politechniki Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki, Kraków, 1999.

K.R. CZECH, W. GOSK

The impact of accelerometer mounting methods on the level of vibrations recorded at ground surface

Abstract. The paper presents the results of field research based on the measurements of accelerations recorded at ground surface. The source of the vibration characterized by high repetition rate of pulse parameters was light falling weight deflectometer ZFG-01. Measurements of vibrations have been carried out using top quality high-precision measuring system produced by Brüel & Kjaer. Accelerometers were mounted on a sandy soil surface at the measuring points located radially at 5-m and 10-m distances from the source of vibration. The paper analyses the impact that the method of mounting accelerometers on the ground has on the level of the recorded values of accelerations of vibrations. It has been shown that the method of attaching the sensor to the surface of the ground is crucial for the credibility of the performed measurements.

Keywords: geotechnics, surface vibrations, ground, vibration measurement