

Propagacja drgań powstających podczas wbijania pali

Dr inż. Marian Łupieżowiec, dr inż. Stefan Pradelok
Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa

Większości obecnie realizowanych robót związanych z wykonywaniem wzmocnienia podłoża, do którego należy również zaliczyć instalację pali wbijanych, towarzyszą wstrząsy destrukcyjnie oddziaływujące na otoczenie. Oddziaływania te mogą powodować zarysowanie lub nawet zniszczenie pobliskich konstrukcji. Ponieważ technologie te są bardzo skuteczne i zwykle zapewniają optymalne posadowienie konstrukcji, szczególnie ważna jest możliwość oszacowania zasięgu wpływu wstrząsów i amplitud rozchodzących się drgań. Najistotniejsze przy monitorowaniu wpływu robót są badania terenowe [9], które pozwalają na pomiar *in situ* wielkości rozchodzących się wstrząsów, na podstawie których będzie możliwa analiza dynamiczna konstrukcji w świetle jej wrażliwości na zarysowania i powstałe w związku z tym awarie. Nie mniej ważna jest również możliwość prognozy oddziaływań na otoczenie poprzez analizę teoretyczną zagadnienia rozchodzenia się drgań w podłożu gruntowym na podstawie rozpoznanych warunków gruntowych oraz parametrów przyjętej technologii wzmocnienia.

W artykule przedstawiono analizę numeryczną zagadnienia propagacji drgań wywołanych wstrząsami powstałymi podczas wbijania pali. W analizie tej wykorzystano metodę elementów skończonych, a w obliczeniach szczególną uwagę zwrócono na opis mechanizmu tłumienia, który ma decydujący wpływ na zasięg niekorzystnych oddziaływań. Przeprowadzono również dyskusję doboru wartości parametrów modelu obliczeniowego. Uzyskane wyniki analiz numerycznych porównano z wynikami pomiarów przeprowadzonych w terenie przy użyciu akcelermetrów.

WSTRZĄSY TOWARZYSZĄCE WYKONYWANIU ROBÓT GEOINŻYNIERYJNYCH

Propagację drgań w sąsiedztwie robót geoinżynierskich, przy których wykorzystuje się udary, można podzielić na dwie grupy. Pierwsza z nich to wykorzystanie wibracji, które towarzyszą przy zagęszczaniu gruntów walcami, wzbrowywaniu grodzic stalowych w podłożu, itp. Oddziaływania te odznaczają się relatywnie małymi amplitudami przyspieszeń oraz wysokimi częstotliwościami drgań. Jednak zasięg ich oddziaływania jest niewielki (zwykle od kilku do kilkunastu metrów [2]). Drugim źródłem powstawania wstrząsów są udary towarzyszące konsolidacji dynamicznej, formowaniu kolumn kamiennych metodą dynamicznej wymiany oraz wbijaniu pali lub elementów ścianek szczelnych. Tutaj drgania są wywołane przez uderzenia o znacznej energii, co bezpośrednio generuje drgania szkodliwe dla otoczenia. Wywoływane amplitudy przyspieszeń nierzadko przekraczają 1 m/s^2 , a obszar oddziaływania może sięgać od kilkudziesięciu do nawet kilkuset metrów [3].

Propagacja fal w podłożu jest zależna od rodzaju gruntów. Jej zasięg jest tym większy, im ośrodek gruntowy odznacza się większą sztywnością. Ważna jest również częstotliwość, przy jakiej następuje propagacja wstrząsów. Zwykle wynosi ona od

kilku do kilkunastu herców. Zdarza się, że pokrywa się ona z częstotliwością drgań własnych konstrukcji zlokalizowanej w pobliżu. Może to być powodem zarysowania, a nawet awarii tego obiektu budowlanego [11].

Posadowienie pala w podłożu gruntowym przez wbijanie umożliwia mu przejmowanie znacznych obciążeń zarówno wciągających, jak i wyciągających. Jest to zatem korzystna technologia formowania pali, gdyż zapewnia w miarę jednorodne posadowienie fundamentu konstrukcji. Nie powoduje rozluźnień gruntu wokół pala, co jest mankamentem pali wierconych. Ponadto wpływa na dodatkowe zagęszczenie gruntu, szczególnie pod podstawą pala. Nie bez znaczenia jest również fakt, że każdy z wykonanych pali jest podczas procesu wbijania automatycznie kontrolowany pod względem jego nośności [4, 5].

W celu oceny ewentualnych zagrożeń związanych z wbijaniem pali prefabrykowanych prowadzi się monitoring drgań istniejących konstrukcji zlokalizowanych w bliskim sąsiedztwie. Do monitoringu wykorzystuje się najczęściej akcelerometry mierzące przyspieszenia w poszczególnych kierunkach. Są one mocowane do zagrożonego obiektu. Często monitoruje się również drgania terenu w kilku punktach położonych na odcinku łączącym wbijany pal z najbliższym mu elementem istniejącej budowli. Pomiar przyspieszeń poziomych w tych punktach umożliwia ocenę propagacji fal w podłożu gruntowym, a tym samym zagrożeń monitorowanej budowli [6].

BADANIA POLOWE

Obok istniejącego mostu drogowego wznoszona jest w bliskim sąsiedztwie kładka dla pieszych [10]. Zaprojektowano ją jako ustrój o konstrukcji podwieszanej do jednego pylonu, który jest zamocowany w zamkniętej skrzyni fundamentowej. Posadowienie skrzyni zaprojektowano jako pośrednie na wbijanych



Rys. 1. Maszyna palująca JUNTAN PM20, zainstalowany pal prefabrykowany i istniejący most drogowy

palach prefabrykowanych o przekroju 40×40 cm i długości do 13,6 m. W płycie dolnej skrzyni w 6 rzędach zakotwiono 42 prefabrykowane pale żelbetowe (po 7 pali w rzędzie).

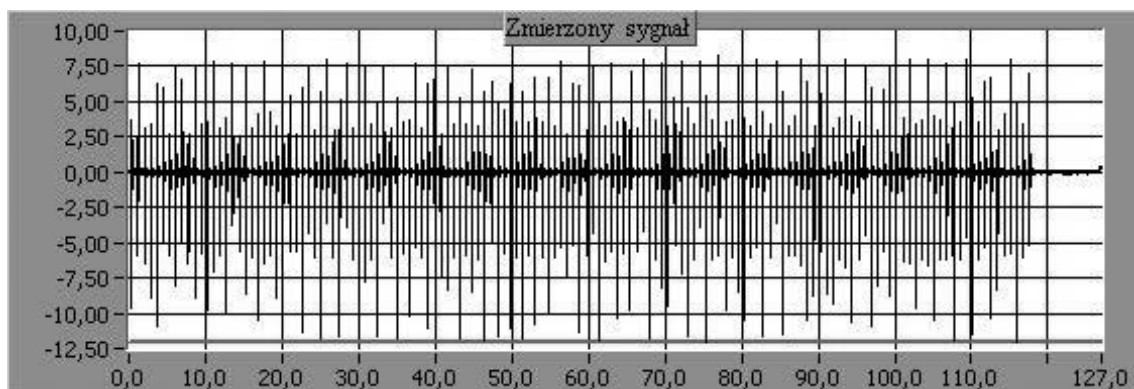
Instalacja pali prefabrykowanych odbywała się za pomocą maszyny palującej wyposażonej w kafar hydrauliczny. Użyto maszynę JUNTAN PM20 wyposażoną w młot hydrauliczny HHKA o masie 5 ton. Wzajemne położenie istniejącego mostu drogowego względem fundamentu pylonu budowanej kładki dla pieszych przedstawiono na rys. 1.

Badania polowe przeprowadzono w dniach 12 i 13 czerwca 2012 roku przez Zespół Badań Terenowych Katedry Dróg i Mostów Politechniki Śląskiej. Obejmowały one między inny-

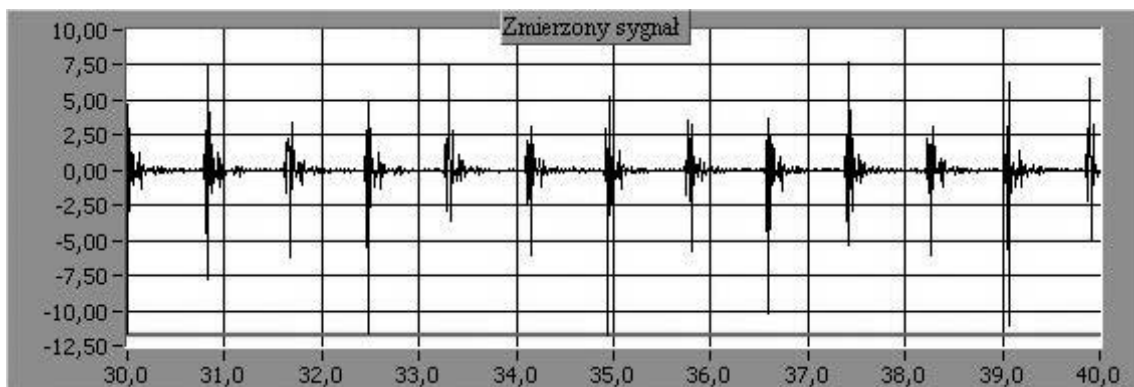
mi pomiar drgań poziomych siedmiu punktów na powierzchni terenu zlokalizowanych na odcinku łączącym wbijany pal z najbliższym narożem istniejącego mostu drogowego [9].

Wykorzystany w badaniach zestaw pomiarowy zbudowano w Katedrze Dróg i Mostów Politechniki Śląskiej w ramach działalności naukowo-badawczej. Składa się on z:

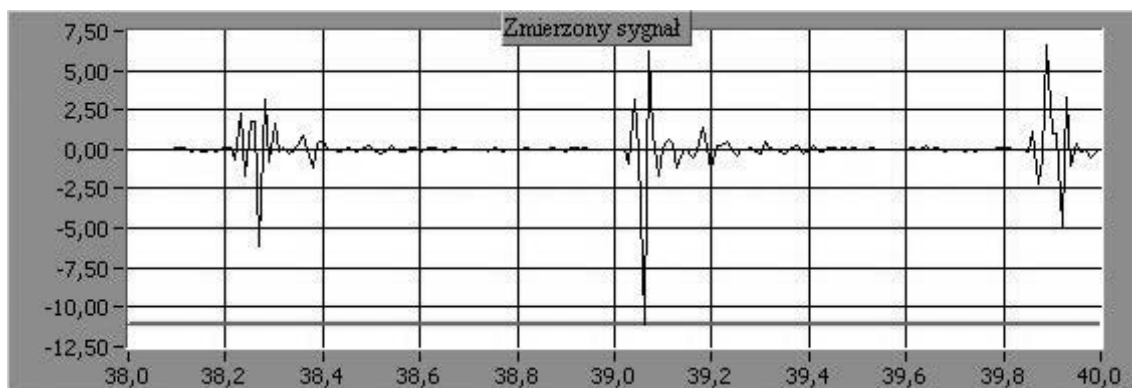
- komputera przenośnego Acer TravelMate 4050,
- 16-bitowej karty pomiarowej PCMCIA typu DAQCAR-D-AI-16XE-50,
- karty zbiorczej,
- trzech czujników przyspieszeń o zakresie przyspieszeń ± 5 g i zakresie częstotliwości $1 \div 40$ Hz.



Rys. 2. Przykładowe przyspieszenia poziome zarejestrowane w punkcie pomiarowym T6
Oś pionowa – przyspieszenie [m/s²]. Oś pozioma – czas [s]



Rys. 3. Dziesięciosekundowy fragment przyspieszenia poziomego zarejestrowany w punkcie pomiarowym T6
Oś pionowa – przyspieszenie [m/s²]. Oś pozioma – czas [s]



Rys. 4. Dwusekundowy fragment sygnału zarejestrowany w punkcie pomiarowym T6.
Oś pionowa – przyspieszenie [m/s²]. Oś pozioma – czas [s]

Wykorzystana karta pomiarowa jest narzędziem uniwersalnym i konieczne było jej programowe przystosowanie do potrzeb badań mostów. W tym celu utworzono specjalne oprogramowanie do rejestracji, monitoringu oraz analizy danych z zarejestrowanych przebiegów czasowych. Zastosowano do tego graficzny język programowania zintegrowanego systemu LabVIEW firmy National Instruments, który umożliwia skorzystanie z gotowych funkcji i procedur przygotowanych w postaci tak zwanych przyrządów wirtualnych.

Organia poziome terenu rejestrowano na jego powierzchni. Akcelerometry montowano do stalowego kątownika $L40 \times 40 \times 4$ o długości 0,71 m wbijanego w grunt na głębokość 0,57 m. Rejestrowano przyspieszenia w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach poziomych: w kierunku podłużnym (łączącym środek wbijanego pala z narożem mostu) oraz w kierunku poprzecznym.

Organia gruntu rejestrowano w drugim dniu pomiarowym. W trakcie rejestracji wykonano już pierwszy rząd pali. Zarejestrowane wyniki dotyczą zatem drgań gruntu podczas wbijania pali prefabrykowanych w drugim rzędzie. Ekstremalne wartości podłużnych przyspieszeń poziomych ($a_{\max}$ i $a_{\min}$) gruntu wraz z ich rozpiętością (λa) zestawiono w tabl. 1. Usytuowanie punktów pomiarowych T1 ÷ T7 pokazano na rys. 5a i 5b.

Maksymalna rozpiętość tych przyspieszeń gruntu w punkcie pomiarowym zlokalizowanym przy narożu mostu drogowego (punkt pomiarowy T1, odległość od wbijanego pala 18,80 m) wynosi $\lambda a = 0,599 \text{ m/s}^2$. W miarę zbliżania się punktów pomiarowych do wbijanego pala prefabrykowanego rejestrowane wartości wzrastają. Największą rozpiętość przyspieszeń poziomych gruntu zarejestrowano w punkcie T6 (odległość od wbijanego pala 4,00m), gdzie $\lambda a = 20,343 \text{ m/s}^2$. Można zaobserwować również spadek rejestrowanych wartości w punktach zlokalizowanych za istniejącą ścianą oporową (punkt T3, odległość od wbijanego pala 11,00m) oraz za wykonanym już pierwszym rzędem pali prefabrykowanych (punkt T7, odległość od wbijanego pala 1,50m). Zebrane w tabl. 1 wartości (λa) przyspieszeń przedstawiono na wykresie (rys. 6). Przykładowe zmiany przyspieszeń poziomych zarejestrowane w punkcie pomiarowym T6 przedstawiono na rys. 2.

Tabl. 1. Ekstremalne wartości zarejestrowanych poziomych przyspieszeń podłużnych gruntu

Punkt pomiarowy	Odległość od pala [m]	Poziome przyspieszenie podłużne gruntu		
		$a_{\max}$ [m/s ²]	$a_{\min}$ [m/s ²]	λa [m/s ²]
T1	18,80	0,363	-0,236	0,599
T2	14,00	1,119	-0,812	1,931
T3	11,00	0,669	-0,626	1,295
T4	8,00	4,787	-2,892	7,679
T5	6,00	11,832	-6,205	18,037
T6	4,00	8,311	-12,032	20,343
T7	1,50	8,380	-5,197	13,577

Trudno jednak przeprowadzić analizę zarejestrowanych przyspieszeń przedstawionych na rys. 2. Widoczne są jedynie, co pewien czas, duże amplitudy przyspieszeń oraz czas, w którym zaprzestano wbijania pala. Dopiero po wycięciu dziesięciosiekundowego fragmentu z zarejestrowanego sygnału i rozciągnięciu wykresu wzdłuż osi czasu (oś pozioma) można wyraźnie zauważyć uderzenia młota wbijającego pal (rys. 3).

W ciągu 10 sekund młot uderzył 12 razy. Daje to częstotliwość wbijania pali $f = 12/10 = 1,20 \text{ Hz}$.

Analiza dwusekundowego fragmentu zarejestrowanego sygnału (rys. 4) ukazuje momenty uderzenia młota wbijającego pal. Można określić również częstotliwość wbijania pali na około 1,20 Hz, ujawnia się jednak przede wszystkim bardzo duże tłumienie gruntu. Przy każdym uderzeniu zarejestrowano dwie znaczące amplitudy przyspieszeń o przeciwnych znakach oraz kilka następnych, szybko gasnących, o znacznie mniejszych wartościach.

ANALIZA NUMERYCZNA PROPAGACJI FAL W PODŁOŻU

Zagadnienie propagacji fal w ośrodku gruntowym może być analizowane poprzez rozwiązanie początkowo-brzegowego zagadnienia opisywanego równaniem ruchu [12]:

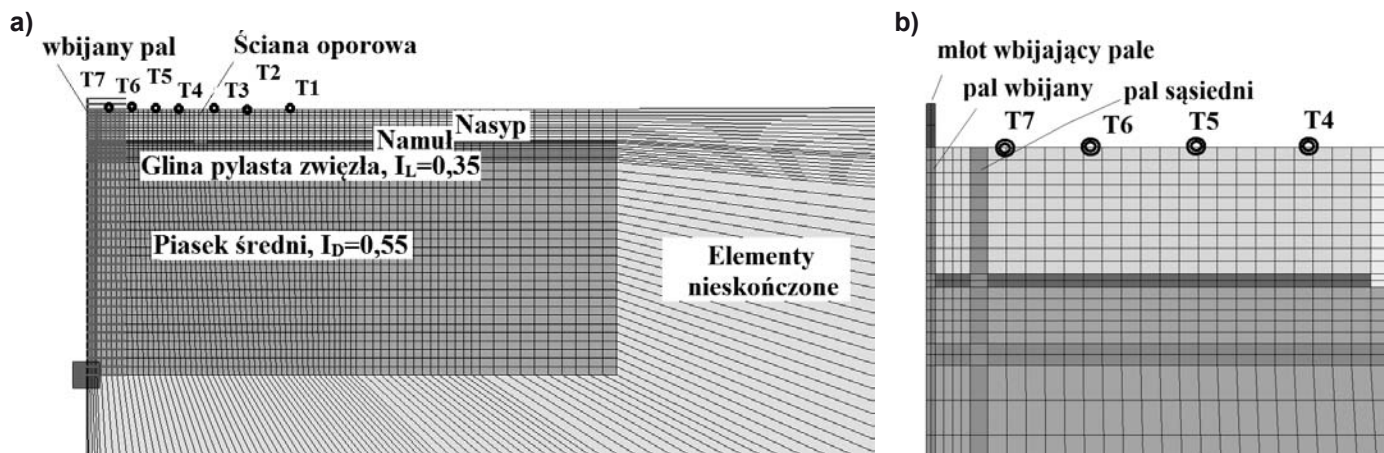
$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{u} = \mathbf{P}(t) \quad (1)$$

W zależności tej $\mathbf{u}$ jest poszukiwanym polem przemieszczeń w dowolnej chwili czasu t , natomiast wielkości $\mathbf{M}$, $\mathbf{C}$ i $\mathbf{K}$ odpowiednio macierzami bezwładności, tłumienia i sztywności. Wektor siły $\mathbf{P}(t)$ jest wymuszeniem, które w omawianym przypadku jest spowodowane powstaniem wstrząsu od młota spadającego na wbijany pal. Niezwykle ważne jest odpowiednie opisanie mechanizmu tłumienia, które ma decydujący wpływ na zanik drgań w podłożu, co bezpośrednio wpływa na zasięg oddziaływania wstrząsów na sąsiedztwo. W wielu analizach dynamicznych tłumienie to można przyjąć w postaci zaproponowanej przez Rayleigha [12]:

$$\mathbf{C} = \alpha \cdot \mathbf{M} + \beta \cdot \mathbf{K} \quad (2)$$

W tej zależności stałe α i β są parametrami tłumienia. Analizę wpływu wartości tych parametrów na otrzymywane wyniki analiz przeprowadzono w [8], gdzie zwrócono uwagę na relatywnie dużą łatwość w kalibracji modelu na podstawie dostępnych badań terenowych. W dalszych analizach założono, że $\alpha = 1,0 \text{ s}^{-1}$ oraz $\beta = 0,03 \text{ s}$.

Do rozwiązania postawionego zagadnienia wykorzystano metodę elementów skończonych, a obliczenia prowadzono przy użyciu pakietu Z_Soil [12]. Model numeryczny analizowanego problemu przedstawiono na rys. 5. Postawiony problem polega na znalezieniu przemieszczeń w poszczególnych punktach przyjętego modelu w dowolnej chwili czasu. Na ich podstawie będzie możliwe wyznaczenie pola prędkości oraz przyspieszeń podczas przechodzenia fali powstającej od wstrząsu. Budując model numeryczny, uwzględniono rząd już wykonanych pali w odległości 1,0 m oraz żelbetową ścianę oporową w odległości 11 m od wbijanego pala. Elementy te, ze względu na znacznie większą sztywność niż otaczający je grunt, mogą mieć wpływ na uzyskiwane wyniki. Podłoże gruntowe jest zbudowane w wierzchniej



Rys. 5. Zagadnienie początkowo brzegowe problemu (a); miejsca instalacji punktów pomiarowych T1 ÷ T7 (b)

części z gruntów nasypowych, pod którymi znajdują się cienkie warstwy namułu (0,3 m) oraz zwięzłej plastycznej gliny pylastej (0,5 m), przedzielone warstwą (1,3 m) średniozagęszczonych piasków średnich, które również znajdują się poniżej. Na rys. 5 zaznaczono także miejsca usytuowania akcelerometrów pomiarowych (T1 ÷ T7). W punktach tych porównań wyniki analizy teoretycznej z wynikami zarejestrowanymi w pomiarach terenowych.

W symulacjach założono osiową symetrię zagadnienia, przyjmując, że oddziaływanie na otoczenie będzie rozchodzić się wzdłuż powierzchni w kierunku radialnym od miejsca uderzenia młota o pal. Przyjęty do analizy model ma wymiary 50 m w kierunku poziomym oraz 25 m w głąb podłoża. Warunki brzegowe są standardowymi warunkami geotechnicznymi (zablokowano możliwość przemieszczeń we wszystkich kierunkach w węzłach na dolnej krawędzi modelu oraz w kierunku prostopadłym do powierzchni bocznej w znajdujących się tam węzłach). Warunek początkowy elementów młota to prędkość, z którą uderza on w pal (5,4 m/s – wynikająca ze spadku z wysokości 1,2 m), natomiast w pozostałych węzłach wszystkie składowe przemieszczenia i prędkości w chwili $t = 0$ są zerowe. W celu zapobieżenia odbiciu się propagującej fali od brzegów modelu, gdzie w węzłach zadawane są nieskończenie sztywne podpory, w analizach zastosowano tzw. elementy nieskończone, których zadaniem jest symulacja pochłaniania energii po przejściu fali.

Do analizy zagadnienia wykorzystano liniowo-sprężysty model materiałowy ośrodka gruntowego, z zachowaniem warstw, które stwierdzono podczas rozpoznawania warunków gruntowych. Najważniejszym parametrem tego modelu jest moduł odkształcenia (sprężystości) E . Przyjęcie do obliczeń właściwej wartości tego parametru jest zadaniem niezwykle trudnym, gdyż ośrodek gruntowy wykazuje dużą zmienność wartości modułu w przedziale małych odkształceń, które występują przy propagacji drgań [1]. Wartości E w tym zakresie są niekiedy wielokrotnie większe od tych, które są charakterystyczne na przykład w analizach osiadania fundamentów. Ponadto, najczęściej nie wykonuje się szczegółowych badań właściwości poszczególnych warstw gruntowych, poprzestając na prostych badaniach określających rodzaj i stan gruntów, a wartości parametrów modeli obliczeniowych przyjmuje się z normy PN-81/B-03020. Takie postępowanie, choć jest sprzeczne z duchem normy Eurokod 7, jest niestety standardem przy rozwiązywaniu zagadnień

Tabl. 2. Wartości modułów odkształcenia przyjęte do analizy

Rodzaj gruntu	Grunt nasypowy	Namuł, pl	Głina pylasta zwięzła, $I_L = 0,35$	Piasek średni, $I_D = 0,55$	Ośrodek gruntowy otaczający model (elementy nieskończone)
Moduł odkształcenia E [MPa]	30	10	30	150	200

geotechnicznych w Polsce [7]. W analizowanym przypadku najbardziej wiarygodne byłyby wyniki badań wykonanych metodami sejsmicznymi, np. SCPTU. Dlatego też przyjęte do analizy wartości parametrów (tabl. 2) mogą być obarczone dużą niepewnością i powinny być traktowane jako orientacyjne. Jednak ze względu na brak jakichkolwiek innych możliwości oszacowania wartości parametrów do obliczeń, autorzy zostali zmuszeni do przyjęcia wartości normowych.

Przyjęcie do obliczeń modelu liniowo-sprężystego, mimo niezbyt dobrego opisu zachowania się ośrodka gruntowego, można uznać w analizowanym przypadku za właściwe, gdyż zasięg oddziaływania wstrząsów na otoczenie zależy przede wszystkim od tłumienia materiału, w którym następuje propagacja fal. Powstawanie odkształceń plastycznych i związana z tym redystrybucja naprężeń, ma w tym przypadku znaczenie drugorzędne. Ważne jest przede wszystkim przyjęcie odpowiedniej wartości modułów odkształcenia, które powinny odpowiadać wartościom odkształceń. Odkształcenia te w przypadku propagacji fal w ośrodku gruntowym zwykle nie przekraczają 10^{-4} .

Obliczenia numeryczne wykonano w sposób przyrostowo-iteracyjny. Całkowanie równań ruchu prowadzono przy wykorzystaniu niejawnego schematu Newmarka. W schemacie tym poszukiwane przemieszczenia w chwili czasu t_n wyznacza się z następującej zależności [12]:

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{u}}_{n+1} + (1 + \alpha) \cdot \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{u}}_{n+1} - \alpha \cdot \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{u}}_n + (1 + \alpha) \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{u}_{n+1} - \alpha \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{u}_n = \mathbf{F}(t_{n+\alpha}) \quad (3)$$

We wzorze (3) indeks n oznacza poprzedni krok czasowy, w którym wszystkie wielkości już wyznaczono, natomiast $n+1$ to krok bieżący, w którym wartości te są poszukiwane. Do obli-

ceń przyjęto $\alpha = 1/3$ (schemat całkowania w pełni niejawny). Rozwiązując postawione zagadnienie, analizowano odpowiedź ośrodka gruntowego na wywołany pojedynczy impuls w ciągu 10 sekund od jego wystąpienia, a przyjęty krok czasowy wynosił 0,01 s. W symulacjach pominięto fakt, że po danym impulsie występuje kolejny od następnego uderzenia młota.

WYNIKI ANALIZ NUMERYCZNYCH

Z przeprowadzonych symulacji otrzymano wartości przemieszczeń wszystkich węzłów siatki w każdym z rozważanych kroków czasowych. Na tej podstawie w każdym kroku obliczeniowym było możliwe wyznaczenie prędkości oraz przyspieszeń w kierunku podłużnym (kierunku rozchodzenia się drgań) oraz w kierunku pionowym. Z powodu przyjętego uproszczenia (stan osiowo-symetryczny) nie ma możliwości analizy przyspieszeń poziomych w kierunku prostopadłym do propagacji oddziaływań. Uzyskane maksymalne wartości (amplitudy) przyspieszeń w każdym z 7 miejsc zamocowania akcelerometrów pomiarowych porównano z wartościami uzyskanymi z pomiarów polowych (por. rys. 6). Porównywane wartości przyspieszeń podłużnych λa to różnica między maksymalną i minimalną wartością przyspieszenia w rozpatrywanym punkcie i stanowi rzeczywiste oddziaływanie wstrząsu na obiekty znajdujące się w sąsiedztwie. Uzyskano dosyć dobrą zgodność wyników symulacji z pomiarami w zakresie amplitud przyspieszeń poziomych w kierunku podłużnym (jedyne wielkości, które tutaj mogą być porównane). Różnica między wartościami pomierzonymi i obliczeniami nie przekracza 10%, co jest rezultatem bardzo dobrym. Nieco gorszą zbieżność obserwuje się w przypadku przyspieszeń w kierunku poziomym, szczególnie w sąsiedztwie już wykonanych pali. Przyczynę tego stanu rzeczy można upatrywać w anizotropii ośrodka gruntowego, której nie brano pod uwagę w wykonanych analizach. Należy zwrócić uwagę na uzyskany na obydwu charakterystykach (numerycznej oraz uzyskanej z pomiarów) wpływ sztywnych elementów wbudowanych w ośrodek gruntowy (rzęd wcześniej wykonanych pali oraz ściana oporowa) na uzyskiwane wartości maksymalnych amplitud. Świadczy to

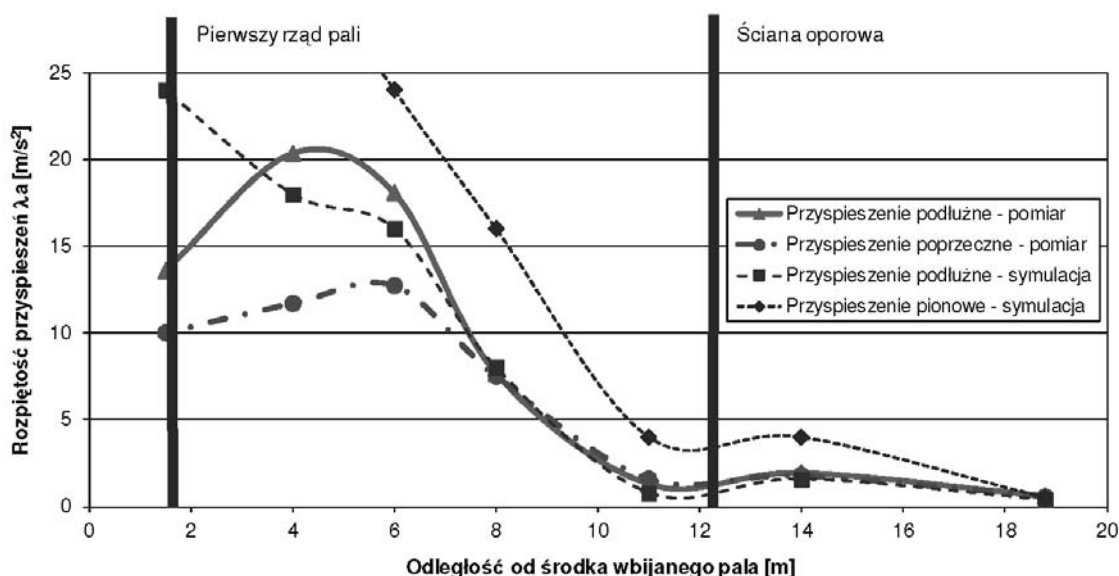
o tym, że w materiale o większej sztywności lepiej propagują się wstrząsy. Ponadto na rys. 6 zamieszczono charakterystykę zależności maksymalnych wartości przyspieszeń w funkcji odległości od źródła wstrząsów (dane z badań) oraz przyspieszeń pionowych (wyniki obliczeń). Przyspieszenia pionowe są szczególnie niekorzystnie odbierane przez ludzi znajdujących w sąsiedztwie wywoływanych wstrząsów, jednak nie stanowią tak istotnego zagrożenia dla konstrukcji budowlanych, jak przyspieszenia w kierunku poziomym [2].

Inne otrzymane z obliczeń numerycznych rezultaty to prędkość rozchodzenia się drgań powstałych od wstrząsów, która wynosi około 120 m/s, co jest zgodne z wartościami podanymi w [11]. Należy również zwrócić uwagę na wartość częstotliwości drgań cząstek ośrodka gruntowego podczas propagacji fali, która wynosi około 12 Hz. Ewentualna jej bliskość pierwszej częstotliwości drgań własnych znajdującego się w pobliżu mostu drogowego (7,07 Hz [10]) mogłaby stanowić potencjalne zagrożenie dla tej konstrukcji. Badania i analizy numeryczne tytułowych wstrząsów mają szczególne znaczenie w świetle zapewnienia bezpieczeństwa konstrukcji. Zasięg oddziaływania wstrząsów przy założeniu warunku $|a_{\max}| \leq 0,02 \text{ m/s}^2$ wynosi 30 m. Wartości przemieszczeń występujących podczas propagacji wstrząsów są niewielkie i wynoszą maksymalnie kilka milimetrów, jednak towarzyszące im przyspieszenia mogą stanowić zagrożenie dla obiektów budowlanych.

WNIOSKI

Przeprowadzone analizy dotyczyły rozchodzenia się drgań w ośrodku gruntowym oraz zasięgu ich oddziaływania. Nie analizowano zachowania się samych konstrukcji budowlanych poddanych wymuszeniom dynamicznym wskutek propagacji wstrząsów, do których to rozważań wyniki przeprowadzonych analiz są danymi wejściowymi.

Analiza rozchodzenia się fal powstałych wskutek impulsu (wstrząsu technologicznego) w ośrodku gruntowym jest szczególnie ważna w świetle częstego wykorzystywania metod udar-



Rys. 6. Zależność amplitudy przyspieszeń od odległości od źródła impulsu – porównanie wyników symulacji numerycznych z wynikami badań terenowych

wych w geotechnice, a także realizacji robót na terenach uprzednio zabudowanych. Powodem tego stanu rzeczy jest propagacja przez ośrodek gruntowy drgań o amplitudach i częstotliwościach szkodliwej dla obiektów. Za pomocą przedstawionego w pracy prostego modelu analizowanego zjawiska można właściwie opisać wpływ oddziaływań na otoczenie. Mając do dyspozycji wyniki pomiarów terenowych, zaprezentowany model daje się łatwo skalibrować, co pozwala na wykonywanie wielu analiz i w miarę precyzyjne oszacowanie przewidywanych wpływów na sąsiadujące konstrukcje.

W celu uzyskiwania dokładniejszych wyników, konieczne jest przyjęcie bardziej złożonego modelu mechanizmu tłumienia od wykorzystanego w opisanych analizach. Ponadto uzyskanie amplitud przyspieszeń poziomych w kierunku prostopadłym do rozchodzenia się drgań (poprzecznym) wymaga wykonania pełnej analizy 3D. Często zdarza się, że parametry gruntów zalegających w podłożu nie są rozpoznane wystarczająco precyzyjnie. Uniemożliwia to prowadzenie szczegółowych analiz zachowania się ośrodka gruntowego poddanego złożonym oddziaływaniom. W tytułowym zagadnieniu najistotniejsze są właściwości deformacyjne gruntu w zakresie niewielkich odkształceń. Wiarygodne wyniki w tym zakresie można uzyskać na podstawie wysokiej klasy badań dylatometrycznych i sejsmicznych, które nie były w tym przypadku wykonane.

LITERATURA

1. Burland J.B.: Small is beautiful – the stiffness of soils at small strains, 9th Bjerrum Memorial Lecture. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 26, 1989, 499-516.
2. Ciesielski, R., Kwiecień, A., Stypuła, K.: Propagacja drgań w warstwach przypowierzchniowych podłoża gruntowego – badania doświadczalne in situ. Monografia, 263, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 1999.

3. Gryczmański M., Jastrzębska M., Łupieżowiec M.: A model for the forecasting of the propagation the technological impacts. *Studia Geotechnica et Mechanica*, Vol. XXX, No. 1-2, 2008, 59-66.
4. Gwizdała K.: *Fundamenty palowe*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2011.
5. Gwizdała K., Brzozowski T.: Problemy posadowienia podpór mostu drogowego na palach prefabrykowanych. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 6/2007, 379-383.
6. Jastrzębska M., Łupieżowiec M., Uliniarz R., Jaroń A.: Analysis of the vibration propagation in the subsoil. XVI French-Polish Colloquium of Soil and Rock Mechanics: Multiscale Modelling in Soil and Rock Mechanics, Montpellier, 8-10 July 2013.
7. Młynarek Z., Wierzbicki J.: Nowoczesne metody rozpoznawania podłoża budowlanego dla potrzeb budowy mostów i tuneli. *Materiały 50 Konferencji Naukowej Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN*, Krynica – Warszawa, 2014, t. 1, 217-238.
8. Łupieżowiec M.: Modelowanie rozchodzenia się drgań powodowanych przez konsolidację dynamiczną w ujęciu MES. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 4/2012, 352-357.
9. Łupieżowiec M., Pradelok S.: Analiza rozchodzenia się wstrząsów powstałych od wbijania pali – badania polowe i symulacja numeryczna. XXVI Konferencja Naukowo-Techniczna, Szczecin-Międzyzdroje, 21-24 maja 2013, 371-378.
10. Pradelok S.: Raport z monitoringu drgań wywołanych wbijaniem pali prefabrykowanych podczas budowy kładki K-1, Most M2 na drodze wojewódzkiej 728 w km 78+268,04 w Sielpii Wielkiej (sprawdzający: J. Weseli). Gliwice, 2012.
11. Stypuła K.: Rola podłoża gruntowego w przenoszeniu oddziaływań parasejsmicznych na budowlę. XX Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji, Wisła, 2005, 499-516.
12. Zimmermann Th., Truty A., Urbański A., Podleś K.: *Z_Soil.PC 2010 3D user manual. Theory, Tutorials and Benchmarks. Data Preparation*, Elsevier Press International & Zace Services Ltd, Switzerland, 2010.