



MARIAN ŁUPIEŻOWIEC, *marian.lupiezowiec@polsl.pl*

Politechnika Śląska, Katedra Geotechniki

STEFAN PRADELOK, *stefan.pradelok@polsl.pl*

Politechnika Śląska, Katedra Dróg i Mostów

ANALIZA ROZCHODZENIA SIĘ WSTRZĄSÓW POWSTAŁYCH OD WBIJANIA PALI – BADANIA POŁOWE I SYMULACJA NUMERYCZNA

ANALYSIS OF IMPACTS PROPAGATION CAUSED BY DRIVING THE PILES – FIELDS TEST AND NUMERICAL ANALYSIS

Streszczenie W artykule przedstawiono model do analizy numerycznej zagadnienia rozchodzenia się drgań spowodowanych impulsem powstałym przy wbijaniu pali prefabrykowanych. Do obliczeń wykorzystano metodę elementów skończonych. Symulacje wykonano przy użyciu modelu liniowo-sprężystego z tłumieniem wg Rayleigha. Przyjęte do obliczeń wartości modułów odkształcenia dla poszczególnych gruntów zalegających w podłożu odpowiadały małym odkształceniom (rzędu 10^{-4}), które towarzyszą propagacji drgań. Ponadto w analizie wykorzystano elementy nieskończone, które symulowały pochłanianie energii na brzegach modelu. Impuls powodujący powstawanie drgań powodowany był przez zadanie prędkości początkowej elementom modelującym spadający młot. Uzyskane wyniki zostały porównane z wynikami pomiarów polowych z wykorzystaniem akcelerometrów. Uzyskano dobrą zgodność zależności amplitud przyspieszeń w kierunku rozchodzenia się drgań w zależności od odległości od miejsca wbijania.

Abstract In the article, the model of the numerical analysis the problem of propagation the vibrations caused by the impact by driving the piles was presented. It was used the finite element method in numerical calculations. The simulations were done by using the linear elastic material model with the Rayleigh's damping mechanism. Taking to the calculations values of stiffness modulus corresponded to the small stains (of the order of 10^{-4}), which accompanied the wave's propagations. Additionally it was used the infinite elements, which simulated the absorption of the energy on the border of numerical model. The impact, which caused the vibrations, was simulated by taking the initial velocity to the elements of the falling hammer. Obtained results were compared with the field measurements, which using the accelerometers. It acquired good conformity of the dependence of the acceleration's amplitudes in the direction of wave propagation versus the distance from the drive location.

1. Wstęp

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, jak i amplitud rozchodzących się drgań. Najistotniejsze przy monitorowaniu wpływu robót są badania terenowe, które pozwalają na pomiar *in-situ* wielkości rozchodzących się wstrząsów, na podstawie których możliwa będzie 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 przedstawiona będzie analiza numeryczna zagadnienia propagacji drgań wywołanych wstrząsami powstałymi podczas wbijania pali. W analizie tej wykorzystano metodę elementów skończonych. W obliczeniach szczególną uwagę zwrócono na opis mechanizmu tłumienia, który ma decydujący wpływ na zasięg niekorzystnych oddziaływań. Przeprowadzona będzie również dyskusja doboru wartości parametrów modelu obliczeniowego. Uzyskane wyniki analiz numerycznych będą porównane z wynikami pomiarów przeprowadzonych w terenie przy użyciu akcelerometrów.

2. Wstrząsy towarzyszące wykonywaniu robót geoinżynierskich

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, wwbrowywaniu grodzic stalowych w podłoże, itp. Oddziaływania te odznaczają się relatywnie małymi amplitudami przyspieszeń oraz wysokimi częstotliwościami drgań. Jednak zasięg ich oddziaływania jest niewielki (zwykle kilka do kilkunastu metrów). Drugim źródłem powstawania wstrząsów są udary towarzyszące konsolidacji dynamicznej, formowaniu kolumn kamiennych metodą dynamicznej wymiany oraz wbijaniu pali lub elementów ścianek szczelnych. Tutaj drgania wywołane są 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.

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.

Posadowienie pala w podłożu gruntowym przez wbijanie umożliwia mu przejmowanie znacznych obciążeń zarówno wciskających, jak i wrywających. Jest to więc 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.

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 co za tym idzie zagrożeń dla monitorowanej budowli.

3. Badania polowe

Obok istniejącego mostu drogowego wznoszona jest w bliskim sąsiedztwie kładka dla pieszych. Kładka ta została zaprojektowana jako ustrój o konstrukcji podwieszanej do jednego

pylonu. Pylon będzie zamocowany w skrzyni fundamentowej zamkniętej. Posadowienie skrzyni zaprojektowano jako pośrednie na wbijanych palach prefabrykowanych o przekroju 40×40 cm i długości do 13,6 m. 42 prefabrykowane pale zakotwione będą w płycie dolnej skrzyni w 6 rzędach po 7 pali.

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



Rys. 1. Widok na maszynę palującą JUNTAN PM20, zainstalowany pal prefabrykowany i istniejący most drogowy

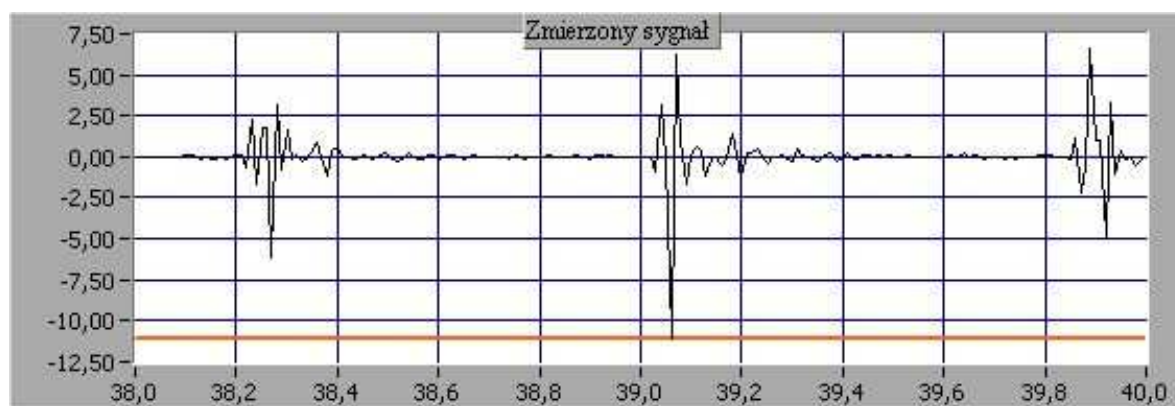
Badania polowe przeprowadzone zostały w dniach 12 i 13 czerwca 2012 r. przez Zespół Badań Terenowych Katedry Dróg i Mostów Politechniki Śląskiej. Obejmowały one między innymi pomiar drgań poziomych siedmiu punktów na powierzchni terenu zlokalizowanych na odcinku łączącym wbijany pal z najbliższym narożem istniejącego mostu drogowego.

Tablica 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]	λ_a [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

Drgania gruntu rejestrowano w drugim dniu pomiarowym. W trakcie rejestracji wykonany był już pierwszy rząd pali. Zarejestrowane wyniki dotyczą więc drgań gruntu podczas wbijania pali prefabrykowanych w drugim rzędzie. Ekstremalne wartości podłużnych przyspieszeń poziomych (a_{max} i a_{min}) gruntu wraz z ich rozpiętością (λ_a) zestawiono w tab. 1. 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 4,00 m), gdzie $\lambda_a = 20,343 \text{ m/s}^2$. Można również zaobserwować spadek rejestrowanych wartości w punktach zlokalizowanych za istniejącą ścianą oporową (punkt T3, odległość od wbijanego pala 11,00 m) oraz za wykonanym już pierwszym rzędem pali prefabrykowanych (punkt T7, odległość od wbijanego pala 1,50 m). Zebrane w tab. 1 rozpiętości (λ_a) przyspieszeń przedstawiono również na wykresie rys. 4.



Rys. 2. Dwusekundowy fragment sygnału zarejestrowany w punkcie pomiarowym T6. Oś pionowa – przyspieszenie [m/s^2]. Oś pozioma – czas [s]

Analiza dwusekundowego fragmentu zarejestrowanego sygnału (rys. 2) ukazuje momenty uderzenia młota wbijającego pal. Można również określić częstotliwość wbijania pali na około 1,20 Hz. Jednak przede wszystkim ujawnia bardzo duże tłumienie gruntu. Przy każdym uderzeniu zarejestrowane zostały dwie znaczące amplitudy przyspieszeń o przeciwnych znakach oraz kilka następujących, szybko gasnących, o znacznie mniejszych wartościach.

4. Analiza numeryczna propagacji fal w podłożu

Zagadnienie propagacji fal w ośrodku gruntowym może być analizowane poprzez rozwiązanie początkowo-brzegowego zagadnienia opisywanego przez równanie ruchu:

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

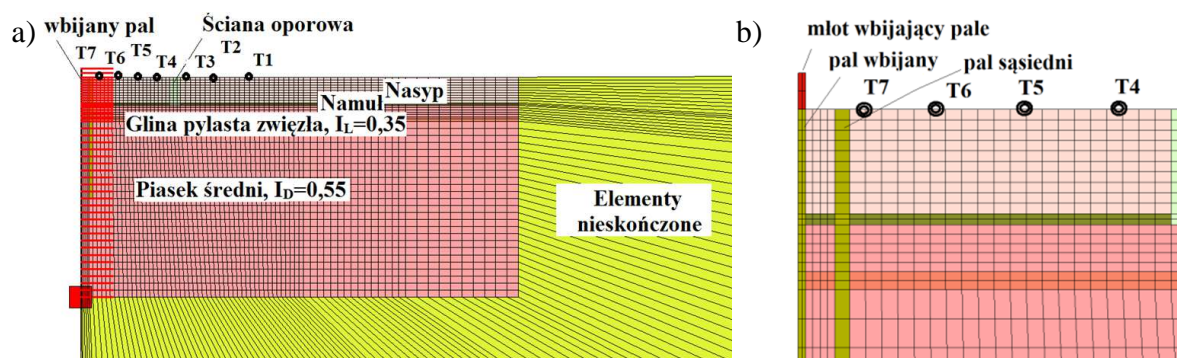
W powyższej zależności \mathbf{u} jest poszukiwanym polem przemieszczeń w dowolnej chwili czasu t , natomiast wielkości \mathbf{M} , \mathbf{C} i \mathbf{K} odpowiednio macierzami bezwładności, tłumienia i sztywności. Wektor siły $\mathbf{P}(t)$ będzie wymuszeniem, które w omawianym przypadku będzie spowodowane powstaniem wstrząsu od młota spadającego na wbijany pal. Niezwykle ważne jest odpowiednie opisanie mechanizmu tłumienia, które ma decydujący wpływ na zanikanie 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 [5]:

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

W powyższej zależności stałe α i β są parametrami tłumienia. Analiza wpływu wartości tych parametrów na otrzymywane wyniki analiz przeprowadzono w [2], 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 wykorzystana będzie metoda elementów skończonych, a obliczenia prowadzone będą przy użyciu pakietu Z_Soil [5]. Model numeryczny analizowanego problemu przedstawiony jest na rys. 3. Postawiony problem polega na znalezieniu przemieszczeń w poszczególnych punktach przyjętego modelu, w dowolnej chwili czasu. Na ich podstawie możliwe będzie wyznaczenie pola prędkości oraz przyspieszeń podczas przechodzenia fali powstałej od wstrząsu. Budując model numeryczny uwzględniono rząd już wykonanych pali w odległości 1,0 m oraz żelbetową ścianę oporową w odległości 11 m od pala wbijanego. Elementy te, ze względu na znacznie większą sztywność niż otaczający je grunt, mogą mieć wpływ na uzyskiwane wyniki. Podłoże gruntowe zbudowane jest w wierzchniej części z gruntów nasypowych, pod którymi znajdują się warstwy namułu (0,3 m) oraz plastycznej gliny pylastej zwięzłej (0,5 m), przedzielone warstwą (1,3 m) średniozagęszczonych piasków średnich, które również znajdują się poniżej. Na rys. 3 zaznaczono także miejsca usytuowania akceleratorów pomiarowych (T1÷T7). W punktach tych zostaną porównane wyniki analizy teoretycznej z wynikami zarejestrowanymi w pomiarach terenowych.



Rys. 3. a) zagadnienie początkowo brzegowe problemu; b) miejsca instalacji punktów pomiarowych T1÷T7

W symulacjach założono osiową symetrię zagadnienia, przyjmując, że oddziaływanie na otoczenie rozchodzić się będzie 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 dla elementów młota to prędkość, z którą uderza w pal (5,4 m/s – wynikająca ze spadku z wysokości 1,2 m), natomiast w pozostałych węzłach wszystkie przemieszczenia i prędkości w chwili $t = 0$ są zerowe. Aby zapobiec odbiciu się propagującej fali od brzegów modelu, gdzie w węzłach zadaje się 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 np. dla analiz osiadania fundamentów. Ponadto

najczęściej nie wykonuje się szczegółowych badań własności poszczególnych warstw grunto- wych porzeczając na prostych badaniach określających rodzaj i stan gruntów, a wartości para- metrów 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 geotechnicznych w Polsce. Dlatego też przyjęte do analizy wartości parametrów (tab. 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.

Tablica 2. Wartości modułów odkształcenia przyjęte do analizy

Rodzaj gruntu	Grunt nasypowy	Namuł, pl	Gлина 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

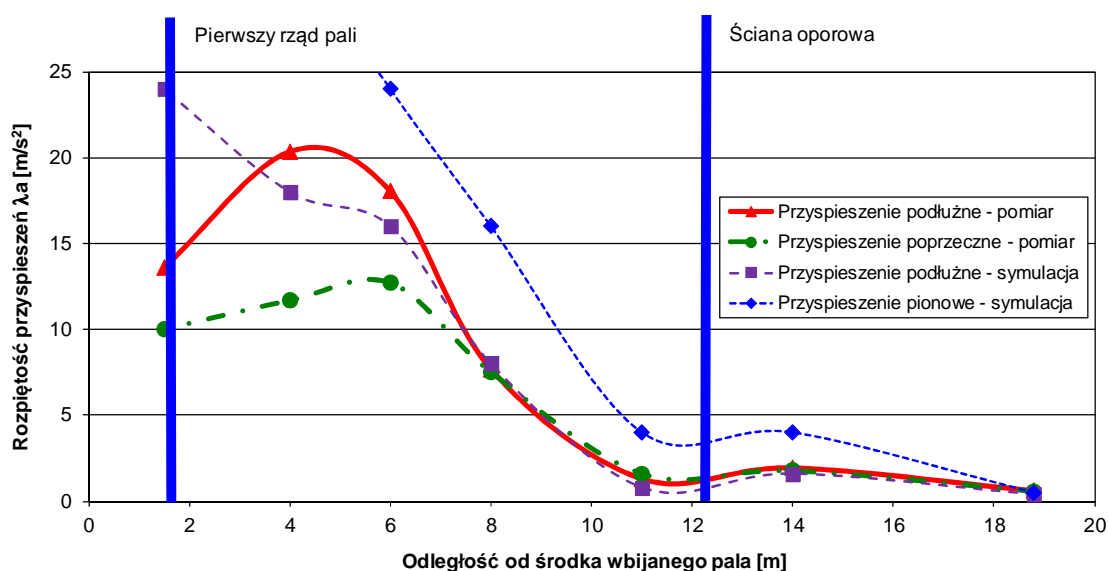
Przyjęcie do obliczeń modelu liniowo–sprężystego, mimo niezbyt dobrego opisu zachowa- nia się ośrodka gruntowego, może być tutaj właściwe, gdyż zasięg oddziaływania wstrząsów na otoczenie zależy przede wszystkim od tłumienia materiału, w którym następuje propagacja fal. Powstawanie odkształceń plastycznych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

Obliczenia numeryczne wykonane były w sposób przyrostowo-iteracyjny. Całkowanie równań ruchu prowadzone było przy wykorzystaniu niejawnego schematu Newmarka. Rozwiązując postawione zagadnienie analizowano odpowiedź ośrodka gruntowego na wywo- łany 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.

5. 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, możliwe było wyznaczenie prędkości oraz przyspieszeń w kierunku podłuż- nym (kierunku rozchodzenia się drgań) oraz kierunku pionowym. Z powodu przyjętego uproszczenia (stan osiowo-symetryczny) nie ma możliwości analizy przyspieszeń poziomych w kierunku prostopadłym do propagacji oddziaływań. Uzyskane maksymalne wartości (ampli- tudy) przyspieszeń w każdym z 7 miejsc zamocowania akcelerometrów pomiarowych zostały porównane z wartościami uzyskanymi z pomiarów polowych (rys. 4). Porównywane wartości przyspieszeń podłużnych λ_a to różnica między maksymalną i minimalną wartością przys- pieszenia 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 (jedynie wielkości, które tutaj mogą być porównane). Należy zwrócić uwagę na uzyskany na obydwu charakterystykach (numerycznej oraz uzyskanej z pomiarów) wpływ sztywnych elementów wbudowanych w ośrodek gruntowy (rząd 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. 4 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 wywołujących wstrząsów, jednak nie stanowią tak istotnego zagrożenia dla konstrukcji budowlanych, jak przyspieszenia w kierunku poziomym.



Rys. 4. Zależność amplitudy przyspieszeń od odległości od źródła impulsu – porównanie wyników symulacji numerycznych z wynikami badań terenowych

Inne otrzymane z obliczeń numerycznych rezultaty to prędkość rozchodzenia się drgań powstałych od wstrząsów, która wynosi ok. 120 m/s, co jest zgodne z wartościami podanymi w [4]. Należy również zwrócić uwagę na wartość częstotliwości drgań cząstek ośrodka gruntowego podczas propagacji fali, która tutaj wynosi ok. 12 Hz. Ewentualna jej bliskość pierwszej częstotliwości drgań własnych znajdującego się w pobliżu mostu drogowego (7,07 Hz [3]) stanowiłoby 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, $|a_{mac}| \leq 0,02 \text{ m/s}^2$, wynosi 30 m. Wartości przemieszczeń występujących podczas propagacji wstrząsów są niewielkie i wynoszą maksymalnie kilka milimetrów, jednak towarzyszące im przyspieszenia stanowią zagrożenie dla obiektów budowlanych.

6. Wnioski

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

Analiza rozchodzenia się w ośrodku gruntowym fal powstałych wskutek impulsu (wstrząsu technologicznego) jest szczególnie ważna w świetle częstego wykorzystywania metod udarowych w geotechnice, a także realizacji robót na terenach uprzednio zabudowanych. Powodem

tego stanu rzeczy jest propagacja przez ośrodek gruntowy drgań o amplitudach i częstotliwości szkodliwej dla obiektów. Przedstawiony w pracy prosty model analizowanego zjawiska jest w stanie 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.

Aby uzyskiwane wyniki były dokładniejsze, konieczne jest przyjęcie bardziej złożonego modelu mechanizmu tłumienia od wykorzystanego w tych 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 własności deformacyjne gruntu w zakresie niewielkich odkształceń. Wiarygodne wyniki w tym zakresie uzyskać można 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. Łupieżowiec M.: Modelowanie rozchodzenia się drgań powodowanych przez konsolidację dynamiczną w ujęciu MES, Inżynieria Morska i Geotechnika, 4/2012, s. 352-357.
3. 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.
4. Stypuła K.: Rola podłoża gruntowego w przenoszeniu oddziaływań parasejsmicznych na budowie, XX Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji, Wisła, 2005, 499-516.
5. Zimmermann Th., Truty A., Urbański A., Podleś K.: Z_Soil.PC 2010 3D user manual, Theory, Tutorials and Benchmarks, Data Preparation, Elmepress International&Zace Services Ltd, Switzerland, 2010.