

Analiza zjawiska rozchodzenia się drgań powodowanych przez udarowe wzmacnianie podłoża gruntowego

Dr inż. Marian Łupieżowiec

Politechnika Śląska w Gliwicach, Wydział Budownictwa

Do najbardziej efektywnych metod wzmocnienia podłoża gruntowego wykorzystuje się drgania i wibracje. Jak wiadomo, do skutecznego wykonania tego rodzaju robót konieczne jest dostarczenie odpowiedniej energii, która zapewni lepsze upakowanie ziaren, co ma bezpośredni wpływ na nośność i odkształcalność ośrodka gruntowego. Jest to szczególnie ważne w świetle możliwości przenoszenia obciążeń przekazywanych przez fundamenty. Energia potrzebna do zmniejszenia objętości porów w ośrodku jest dostarczana bardzo często w sposób dynamiczny, co powoduje, że stosowana technologia jest optymalna dla gruntów ziarnistych i grubookruchowych. Jednak efektem ubocznym tych metod jest wytworzenie wstrząsów, które są przyczyną propagacji drgań szkodliwych dla sąsiednich budynków oraz elementów infrastruktury [2].

W celu sprawdzenia czy prowadzone roboty nie powodowały zniszczeń w pobliżu miejsca ich realizacji, w praktyce prowadzi się monitoring polegający na pomiarze *in-situ* drgań wzbudzanych na elementach konstrukcyjnych [5]. Jednak z punktu widzenia projektanta szczególnie ważna jest możliwość właściwej prognozy przyszłych oddziaływań. Niniejszy artykuł podejmuje przedstawiony problem poprzez stworzenie skutecznego modelu, który będzie w stanie ująć opisane zjawisko rozchodzenia się drgań i pozwoli na ocenę zasięgu oddziaływania wstrząsów na otoczenie. W ramach wykonywanych analiz uwaga będzie skupiona na opisie zjawiska propagacji w ośrodku gruntowym, ze szczególnym uwzględnieniem sztywności oraz właściwości tłumiących ośrodka.

PROPAGACJA DRGAŃ W OŚRODKU GRUNTOWYM

Drgania powstałe przy wykonywaniu wzmocnienia podłoża gruntowego można generalnie podzielić na dwie grupy. Do pierwszej z nich można zaliczyć oddziaływania mające charakter pojedynczych impulsów. Przykładem może być konsolidacja dynamiczna (zrzuty ciężkich ubijaków), formowanie kolumn kamiennych wbijanych, wbijanie pali prefabrykowanych [8], ścianek szczelnych [4], itp. W tym przypadku jest wykorzystywana bardzo duża energia, która pozwala na zagęszczenie okruchów lub ziaren gruntów zalegających w podłożu, względnie umożliwia wbicie elementów wzmacniających w masyw gruntowy. Wywoływane udary powodują powstanie wstrząsu, który jest całkowicie wygaszany po co najwyżej kilku cyklach przemieszczeń (prędkości, przyspieszeń) przez ośrodek gruntowy [6]. Drgania rozchodzą się z częstotliwością około 10 Hz [7], która może być bliska rezonansowej dla konstrukcji budowlanych narażonych na to oddziaływanie. Pojedyncze impulsy są powtarzane aż do uzyskania przewidywanego efektu wzmocnienia. Można przyjąć, że są one od siebie niezależne. Zasięg oddziaływania robót na otoczenie może sięgać maksymalnie kilka-

set metrów, jednak realne zagrożenie dla konstrukcji budynków to kilkadziesiąt metrów [m].

Drugą grupę oddziaływań powodują technologie wykorzystujące wibracje. Do tego rodzaju technologii należy zaliczyć wykorzystanie walców wibracyjnych [9], a także wwibrowywanie w podłoże grodzie stalowych, pali, itp. W tym przypadku energia powodująca drgania jest co najmniej o rząd mniejsza niż przy technologiach z grupy pierwszej, jednak impulsy te występują przez dłuższy czas. Powstałe drgania charakteryzują się relatywnie niewielkimi amplitudami przyspieszeń oraz wysokimi częstotliwościami wynoszącymi kilkadziesiąt herców. Oddziaływania te mają zwykle mniejszy zasięg w porównaniu do technologii impulsowych, jednak ich specyficzna częstotliwość przekraczająca częstotliwość drgań własnych ośrodka gruntowego może także powodować uszkodzenia elementów konstrukcyjnych [2].

Na zasięg oddziaływania drgań w ośrodku gruntowym ma wpływ zarówno sztywność gruntów, jak i ich właściwości tłumiące. Ta pierwsza z cech ośrodka, w którym propagują się drgania, ma wpływ na wielkości amplitud przyspieszeń powstałych w rozpatrywanym oddaleniu od źródła wstrząsów [7], co również przekłada się na bezpieczeństwo konstrukcji w sąsiedztwie. Szczególnie ważne jest tłumienie ośrodka, w którym rozchodzi się fala. Nietrudno zauważyć [6], że w sytuacji, gdy grunty zalegające w podłożu odznaczają się dużą plastycznością, z której wynikają ich właściwości lepkie, powstałe oddziaływania są całkowicie tłumione bardzo blisko miejsca ich wywołania. Natomiast, gdy podłoże jest zbudowane z silnie zagęszczonych grunów ziarnistych, zasięg szkodliwości oddziaływań może być znacznie większy. Na zasięg ten ma wpływ także obecność wody gruntowej, która odznacza się praktycznie zerową ściśliwością (bardzo duża wartość modułu ściśliwości). O szkodliwości oddziaływań decyduje również częstotliwość, przy jakiej następuje propagacja wstrząsów. W przypadku oddziaływań mających charakter pojedynczych impulsów powstające drgania odznaczają się częstotliwością równą od kilku do kilkunastu herców i zależy ona od cech ośrodka (sztywności i gęstości objętościowej). W przypadku obciążeń wibracyjnych, które występują przez dłuższy czas (np. zagęszczanie walcami), na częstotliwość propagującej fali ma również wpływ częstotliwość wymuszeń [2].

Analizując propagację drgań w ośrodku gruntowym, można wyodrębnić dwa rodzaje powstałych fal [7]. Pierwsze z nich to tzw. fale objętościowe charakteryzujące się tym, że kierunek ich rozchodzenia jest promienisty na zewnątrz od źródła oddziaływań. Są to fale rodzaju *P*, gdzie odkształcenia mają charakter zmniejszania i zwiększania objętości, oraz fale rodzaju *S*, gdzie obserwowane deformacje to odkształcenia postaciowe. Fale te w głównej mierze propagują w głąb masywu gruntowego, odbierając energię oddziaływania. Mogą one jednak ulegać odbiciu

od zalegających głębiej warstw gruntów o znacznie większej sztywności lub skał. Odbicie to może dawać dodatkowe oddziaływanie, których charakter jest zbliżony do wstrząsów sejsmicznych. Jednak główną rolę przy ocenie zasięgu oddziaływań mają fale rozchodzące się po powierzchni terenu wokół źródła. Na pierwszy plan wyłaniają się tutaj fale Rayleigha, kiedy podczas ich propagacji elementy gruntowe poruszają się po okręgach, a deformacje podłoża rozchodzą się w postaci podniesienia i obniżania powierzchni terenu. Miąższość warstwy, która bierze udział w propagacji, jest odwrotnie proporcjonalna do częstotliwości fali i najczęściej wynosi kilkadziesiąt centymetrów. Fale Rayleigha są obserwowane najczęściej podczas stosowania uderowych metod wzmocnienia podłoża gruntowego i ich rozchodzenie się zwykle decyduje o skali oddziaływań na sąsiednie konstrukcje budowlane [7]. Falami powierzchniowymi również destrukcyjnymi dla otoczenia są fale Loeva. Podczas ich rozchodzenia się obserwuje się ruch cząstek gruntowych w kierunku pionowym (góra – dół).

Propagacja drgań w ośrodku gruntowym stanowi zagrożenie dla elementów konstrukcyjnych budynków znajdujących się w pobliżu. Rodzaje tych zagrożeń szczegółowo opisano w normach [11, 12] i w wielu publikacjach dotyczących tego problemu (np. [2, 5, 7]). Szkodliwe oddziaływania mogą: być nieszkodliwe dla obiektu (strefa I), powodować tylko zniszczenie elementów wykończeniowych (strefa II), być powodem powstania zarysowań i spękań elementów konstrukcyjnych (strefa III), wreszcie stanowić ryzyko zniszczenia całości lub części budynku (strefy IV i V). Zaklasyfikowanie do danej strefy zagrożenia następuje na podstawie pomierzonych wartości amplitud przyspieszeń (niekiedy prędkości lub przemieszczeń) powstałych na konstrukcji w zależności od towarzyszącej im częstotliwości. Jeżeli uznać, że dopuszcza się wystąpienie strefy II, to występujące przyspieszenia powinny być nie większe niż kilkadziesiąt mm/s² przy f wynoszącym kilka do kilkunastu herców. W takim przypadku zasięg oddziaływania zależy od właściwości ośrodka gruntowego (głównie charakterystyk tłumiących), a także parametrów odkształceniowych, odległości od źródła i wielu innych. W praktyce zasięg ten szacuje się na podstawie badań *in situ* przyspieszeń wywoływanych na elementach konstrukcyjnych [5].

Nie wolno zapominać, że o zasięgu szkodliwych oddziaływań decyduje, w sposób nie mniej istotny niż propagacja drgań w podłożu, także zachowanie się samej konstrukcji budynku poddanej oddziaływaniom. Przede wszystkim ważne są wartości przyspieszeń obserwowane na elementach konstrukcyjnych [5]. Do tych wielkości odnosi się często stosowana przez inżynierów skala SWD [11]. Ważny jest również sposób przekazywania drgań na konstrukcję (właściwy opis interakcji fundament – podłoże), a także charakterystyki samej konstrukcji (głównie częstotliwości rezonansowe). Przytoczone zagadnienia są rozważane przez konstruktorów i nie będą analizowane w niniejszym artykule, gdzie główny nacisk jest położony na opis samego zjawiska propagacji oddziaływań w podłożu gruntowym.

MODELOWANIE ZJAWISKA PROPAGACJI FAL W PODŁOŻU

Zagadnienie rozchodzenia się fal w ośrodku gruntowym jest opisane równaniem różniczkowym ruchu:

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

W powyższym wyrażeniu $\mathbf{u}$ jest poszukiwanym polem przemieszczeń w dowolnej chwili czasu t , natomiast wielkości $\mathbf{M}$, $\mathbf{C}$ i $\mathbf{K}$ to odpowiednio: macierze bezwładności, tłumienia i sztywności. Wektor siły $\mathbf{P}(t)$ jest wymuszeniem, które w omawianym przypadku będzie spowodowane powstaniem wstrząsu od walca wibracyjnego lub ubijaka stosowanego do konsolidacji dynamicznej. W pierwszym przypadku zadawane będzie wymuszenie drgającej masy walca przez pewien okres czasu, a w drugim – pojedynczy impuls od uderzenia ubijaka w podłoże gruntowe. Mechanizm tłumienia, który ma decydujący wpływ na zanikanie drgań w podłożu i bezpośrednio wpływa na zasięg oddziaływania wstrząsów, przyjęto w postaci zaproponowanej przez Rayleigha [10]:

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

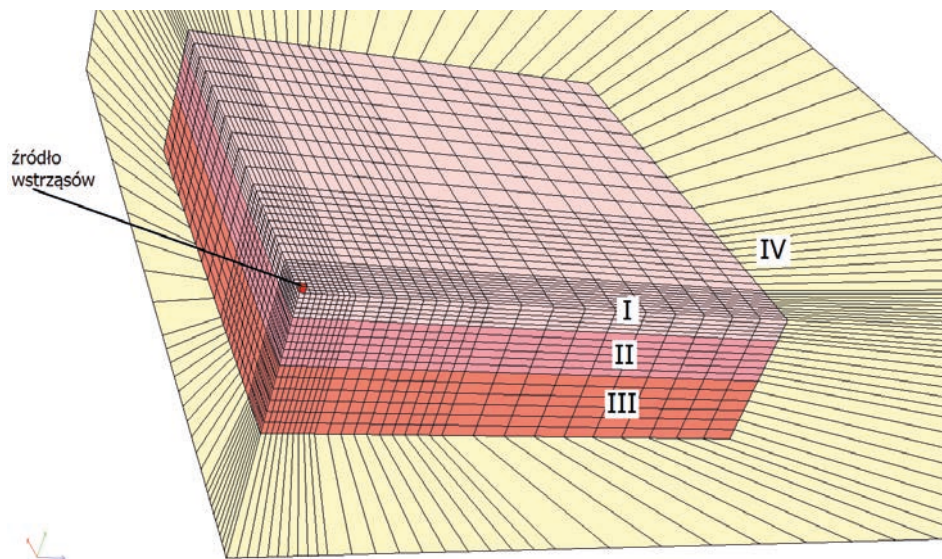
Stałe α i β są parametrami tłumienia. Analiza wpływu wartości tych parametrów na otrzymywane wyniki analiz przeprowadzono w [6]. W dalszych analizach założono, że $\alpha = 1,0 \text{ s}^{-1}$ oraz $\beta = 0,02 \text{ s}$.

Do rozwiązania postawionego zagadnienia będzie wykorzystana metoda elementów skończonych, a obliczenia będą prowadzone przy użyciu pakietu Z_Soil [10]. Model numeryczny analizowanego problemu przedstawiono na rys. 1. 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 powstałej od wymuszenia uderowego. Przyjęto, że podłoże gruntowe jest zbudowane w wierzchniej części z pięciometrowej warstwy gruntów słabszych (warstwa I), która jest zagęszczana (walcami lub ubijakiem). Poniżej znajduje się dziesięciometrowa warstwa mocniejsza (II), która jest podścielona gruntami o bardzo dużej sztywności (III). Analizowany model ma wymiary 100 m (długość) $\times$ 100 m (szerokość) $\times$ 30 m (głębokość). Rozwiązywano pełne zagadnienie trójwymiarowe. Wykorzystano symetrię modelu względem dwóch pionowych płaszczyzn wzajemnie prostopadłych, które przechodzą przez miejsce, gdzie znajduje się źródło drgań. Na zewnątrz modelu zastosowano elementy nieskończone, których zadaniem jest tłumienie drgań na brzegach modelu oraz zapobieganie zjawisku odbicia fali w miejscach podparcia.

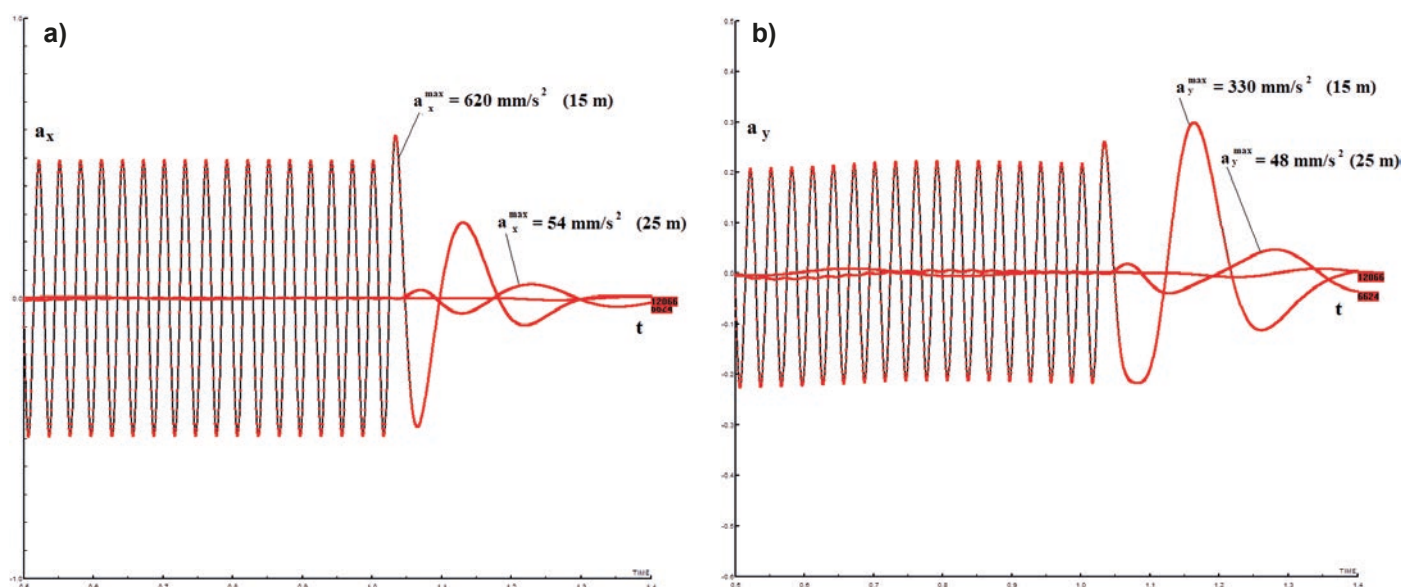
Jako model konstytutywny gruntów tworzących podłoże przyjęto liniowo-sprężystą zależność naprężenie – odkształcenie. Wartości modułów odkształcenia (sprężystości) w poszczególnych warstwach przedstawiono w tabl. 1. Należy tutaj zwrócić uwagę na fakt, że wartość modułu E powinna odpowiadać małym odkształceniom, które występują podczas propagacji fal w podłożu. Wybór tak prostego modelu wynikał z założenia, że na propagację fal w ośrodku gruntowym ma wpływ zarówno

Tabl. 1. Wartości modułów odkształcenia przyjęte do analizy

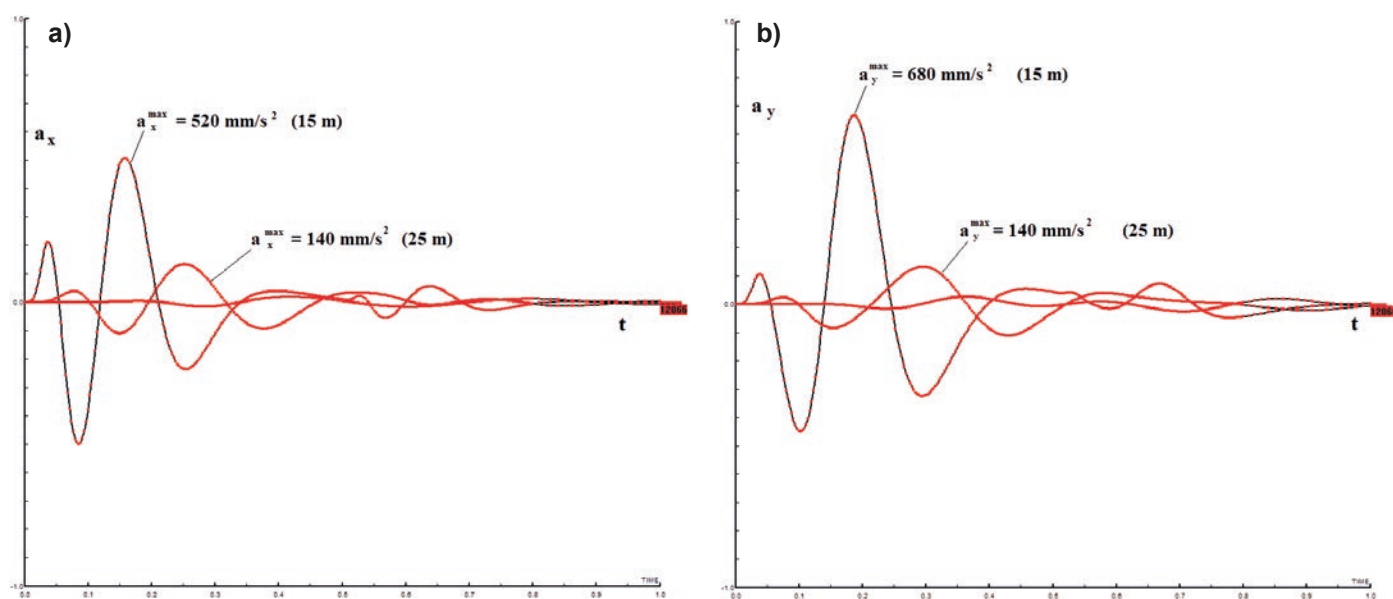
Strefa materiałowa	Grunt I	Grunt II	Grunt III	Elementy nieskończone
Moduł odkształcenia E [MPa]	30	50	100	250



Rys. 1. Model geometryczny analizowanego zagadnienia



Rys. 2. Przebieg przyspieszeń poziomych a_x (a) oraz pionowych a_y (b) – oddziaływanie walca ($f = 30 \text{ Hz}$)



Rys. 3. Przebieg przyspieszeń poziomych a_x (a) oraz pionowych a_y (b) – zrzucenie ubijaka

sztynność ośrodka, jak i jego właściwości tłumiące. Obydwa te aspekty mogą być ujęte przy wykorzystaniu prostego modelu zachowania się gruntów poddanych obciążeniom dynamicznym.

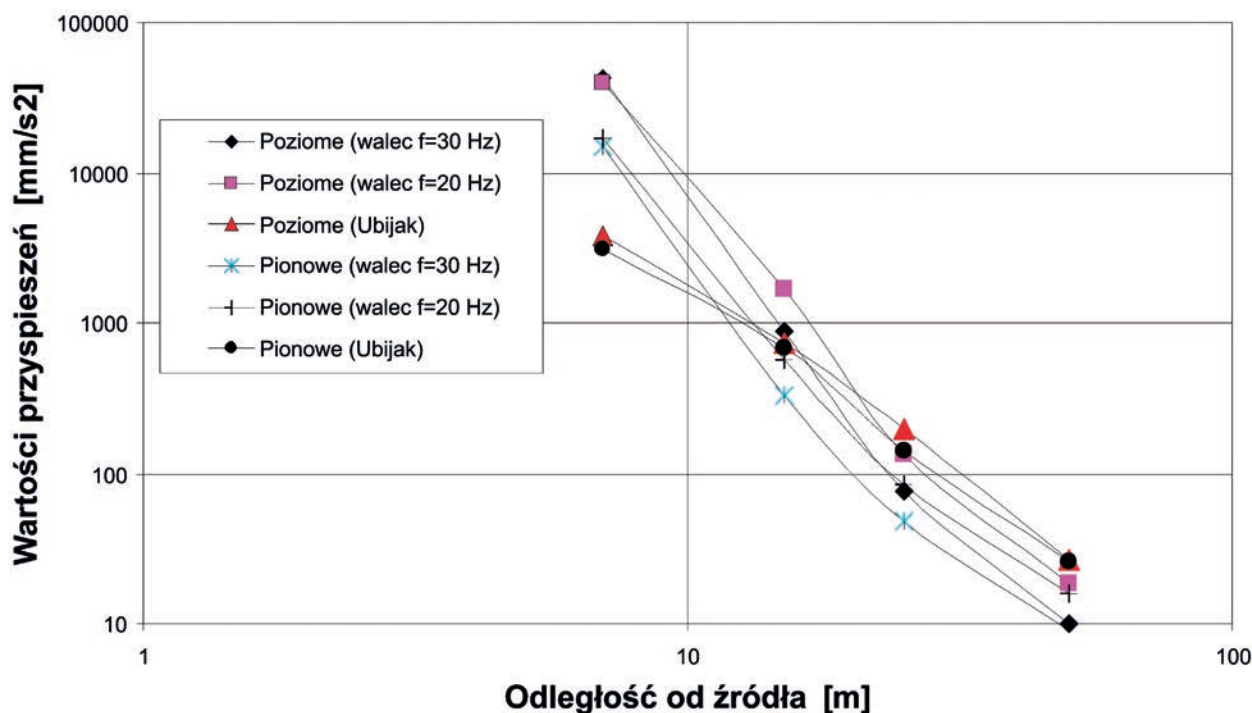
PRZEBIEG OBLICZEŃ I OTRZYMANE WYNIKI

W ramach wykonanych obliczeń analizowano odpowiedź ośrodka gruntowego na zadane wymuszenie, które wywoływało w miejscu zaznaczonym na rys. 1 poprzez element metalowy o masie odpowiadającej pracującemu urządzeniu. W przypadku walca będzie to sygnał o długości 1 s wymuszonych przemieszczeń pionowych o amplitudzie 0,4 m i częstotliwościach $f_1 = 30$ Hz oraz $f_2 = 20$ Hz [3]. Pierwsza z częstotliwości odpowiada stosowanemu obecnie, natomiast druga była wykorzystywana dawniej, jednak powodowała zbyt dużą destrukcję w pobliskich budynkach ze względu na bliskość części własnej samego ośrodka gruntowego i posadowionych na nim konstrukcji. W rozważaniach pominięto fakt, że podczas zagęszczania walec porusza się z prędkością około $1 \div 2$ m/s, gdyż nie ma to żadnego znaczenia na zachowanie się gruntów w odległości do kilkudziesięciu metrów od źródła drgań, co jest przedmiotem rozważań w artykule. W przypadku ubijaka do konsolidacji dynamicznej wywołany impuls symulowano poprzez zadanie elementowi metalowemu prędkości początkowej równej 17,1 m/s, co odpowiada swobodnemu spadkowi z wysokości 15 m. W obydwu przypadkach masa elementu stanowiącego źródło drgań wynosiła 10 ton, natomiast całkowity czas analizy to 2 s. W obliczeniach numerycznych korzystano z w pełni niejawnego schematu całkowania Hilberta-Hughesa-Taylor'a [10]. Krok całkowania wynosił, w zależności od analizowanego wariantu, od 0,0005 do 0,02 s, w zależności od zagadnienia oraz fazy analizy.

Wyniki przeprowadzonych symulacji numerycznych przedstawiono na rys. 2 ÷ 4. Na rys. 2a i 2b przedstawiono przebiegi

przyspieszeń, odpowiednio: poziomych w kierunku osi x oraz pionowych w kierunku y , w czasie działania wymuszenia ciężkim walcem wibracyjnym o częstotliwości $f = 30$ Hz oraz krótko po jego zakończeniu. Analizowano odpowiedź w punktach zlokalizowanych w odległościach 15 m oraz 25 m od źródła wymuszenia. Nietrudno zauważyć, że przebiegi podczas działania wymuszenia odznaczają się podobnymi częstotliwościami jak samo wymuszenie, natomiast po jego zakończeniu jest obserwowane relatywnie szybkie tłumienie ruchów punktów ośrodka gruntowego. W tym czasie obserwuje się propagację oddziaływań ze znacznie mniejszą częstotliwością niż podczas działania wibracji walca. Natomiast w przypadku symulacji upadku ubijaka (pojedynczy impuls) obserwuje się jedynie tłumienie propagującej się fali. We wszystkich wariantach uzyskano wywołanie maksymalnie 2 ÷ 3 cykli przemieszczeń, po czym propagujące się drgania były całkowicie wytłumiane.

Przeprowadzone symulacje miały na celu oszacowanie zasięgu oddziaływania impulsów na otoczenie. Miara tego oddziaływania są amplitudy przyspieszeń generowanych w analizowanych odległościach od źródła drgań. Omawiane zależności zaprezentowano na rys. 4. Zastosowano logarytmiczną skalę obydwu osi układu współrzędnych, przez co uzyskano liniowe charakterystyki dla prawie wszystkich analizowanych wielkości. W przypadku walców uzyskano zarówno jakościową, jak i ilościową zgodność wyników z pomiarami terenowymi, które opublikowano w [4]. Można stwierdzić, że szkodliwy zasięg oddziaływań to kilkanaście do maksymalnie kilkudziesięciu metrów od miejsca pracy walca. Nieco większe zasięgi oddziaływania obserwuje się w przypadku zrzucania ubijaków, co, jak wspomniano na początku, ma związek ze znacznie większą energią uderu. Zarówno kształt uzyskanych charakterystyk, wartości otrzymanych przyspieszeń, jak i szacowany zasięg oddziaływania pokrywa się z obserwacjami *in situ* [4, 8].



Rys. 4. Wartości amplitud przyspieszeń w zależności od odległości od źródła drgań

PODSUMOWANIE

Na podstawie wykonanych analiz teoretycznych oraz przeprowadzonych obliczeń numerycznych można stwierdzić, że zaproponowany w pracy model propagacji drgań powstałych wskutek dynamicznego wzmacniania podłoża gruntowego jest w stanie prawidłowo ocenić zasięg wpływu na sąsiedztwo. Możliwe jest wyznaczenie przebiegów przemieszczeń, prędkości oraz przyspieszeń w dowolnym węźle modelu numerycznego, a wartości maksymalne (amplitudy) pozwolą na ocenę skali zasięgu oddziaływania. Kluczową sprawą analiz jest właściwy dobór parametrów do obliczeń, które powinny być szacowane na podstawie pomiarów *in situ*. Obecnie, oceniając zasięg oddziaływania dynamicznego na pobliskie konstrukcje, wykonuje się pomiary w trakcie robót. Tego rodzaju badania muszą być wykonane nadal, choćby w celu kalibracji i weryfikacji przedstawionego modelu. Wykorzystanie zaproponowanego narzędzia w praktyce pozwoli na zmniejszenie kosztów badań, a także umożliwi wykonywanie znacznie szerszych analiz zasięgu oddziaływania w konkretnych warunkach terenowych.

LITERATURA

1. Capraru C., Pistol J., Villwock S., Völkel W., Kopf F., Adam D.: Numerical simulation of soil compaction with oscillatory rollers, XV Danube European Conference on Geotechnical Engineering, Vienna, 2014, 283-288.
2. Ciesielski R., Kawecki J., Maciąg E.: Ocena wpływu wibracji na budowle i ludzi w budynkach (diagnostyka dynamiczna), Wyd. ITB, Warszawa, 1993.
3. Erdmann P., Adam D.: Numerical simulation of dynamic compaction with vibratory compaction equipment XV Danube European Conference on Geotechnical Engineering, Vienna, 2014, 243-248.
4. Jastrzębska M., Łupieżowiec M., Uliniarz R., Jaroń A.: Analysis of the vibration propagation in the subsoil, *Studia Geotechnica et Mechanica*, Vol. 36, No. 3, 2014, 9-18.
5. Kawecki J., Stypuła K.: Jeszcze raz o błędach w diagnozach dotyczących oceny wpływów dynamicznych na budynki oraz ludzi w budynkach, XXVI Konferencja Naukowo-Techniczna Awary Budowlane, Międzyzdroje 2013, 243-250.
6. Łupieżowiec M.: Modelowanie rozchodzenia się drgań powodowanych przez konsolidację dynamiczną w ujęciu MES, *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 4/2012, 352-357.
7. Łupieżowiec M.: Wpływ wstrząsów wywołanych konsolidacją dynamiczną na sąsiedztwo, Wydawnictwo Nauka, Przyroda, Technologie, Poznań, 2012, Tom 6, Zeszyt 2, 31-42.
8. Łupieżowiec M., Pradelok S.: Propagacja drgań powstałych podczas wbijania pali, *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 4/2014, 291-295.
9. Pistol J., Villwock S., Völkel W., Kopf F., Adam D.: Roller compaction – impact of dynamic drums in comparison, XV Danube European Conference on Geotechnical Engineering, Vienna, 2014, 201-206.
10. Zimmermann Th., Truty A., Urbański A., Podleś K.: Z_Soil.PC 2010 3D user manual, Theory, Tutorials and Benchmarks, Data Preparation, Elmeppress International&Zace Services Ltd, Switzerland, 2010.
11. PN-85/B-02170: Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki.
12. PN-88/B-02171: Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach.