

Mgr inż. PAWEŁ OKROJ (ORCID: 0009-0009-9607-2458)

Wibro-Projekt Tychy

Prof. dr hab. inż. JACEK HULIMKA (ORCID: 0000-0002-7798-4277)

Politechnika Śląska

Wydział Budownictwa

Analiza numeryczna ekranowania drgań przenoszonych przez podłoże gruntowe

Numerical analysis of shielding of vibrations transmitted through the ground

STRESZCZENIE: Artykuł poświęcono numerycznej analizie redukcji drgań w gruncie. Omówiono zasady obliczeń skuteczności tłumienia na przykładzie sztywnej, betonowej bariery w gruncie niespoistym. Przyjęto różne częstotliwości wymuszeń harmoniczných i różne głębokości barier. Analizując uzyskane wyniki, wykazano wyraźne tendencje wpływu przyjętych zmienných na skuteczność ekranowania drgań przez zamodelowaną barierę.

Słowa kluczowe: drgania gruntu, tłumienie drgań, analiza MES, bariera w gruncie, rozchodzenie się fal sprężystych w gruncie.

ABSTRACT: The paper discusses a method for the numerical analysis of vibration reduction in soil. Using the example of a rigid concrete barrier in non-cohesive soil, the principles of damping effectiveness calculations are presented. Different harmonic excitation frequencies and different barrier depths were assumed. Analysis of the results showed clear trends in the influence of the assumed parameters on the effectiveness of vibration shielding by the modelled barrier.

Keywords: ground vibrations, vibration damping, FEM analysis, ground barrier, elastic wave propagation in the ground.

Opis problemu

Idea redukcji drgań mechanicznych, obok ingerencji w ich źródło lub/i w odbiornik [1, 2], przewiduje także ingerencję w drogę rozchodzenia się fali pomiędzy źródłem a odbiornikiem drgań. Intuicyjnie jest oczywiste, że wprowadzenie na tej drodze przeszkody powinno ograniczyć przepływ energii transportowanej falą, czego przykładem może być rozwiązanie zaproponowane w pozycji [3]. Poziom wspomnianego ograniczenia można opisać jako skuteczność tej przeszkody/bariery lub skuteczność ekranowania drgań. I tak, wspomnianą skuteczność należy rozważać w dwóch aspektach: w funkcji nakładów finansowych oraz w funkcji rodzaju środków technicznych wykorzystanych podczas realizacji bariery ochronnej. Jako przykład oceny nakładów finansowych można podać pozycję [4], gdzie opisana jest konkretna realizacja bariery wraz z informacją o skuteczności ekranowania drgań na poziomie 50%, przy akceptowalnym do poniesienia zwiększeniu kosztów przedsięwzięcia. Trzeba jednak pamiętać, że koszty są na pewno istotne, jednak nadrzędnym celem jest uzyskanie redukcji drgań do przyjętego, akceptowalnego ich poziomu. Drugi z wymienionych aspektów, to jest zaangażowanie środków technicznych, jest obecnie moż-

liwy do dość dokładnej oceny. W szczególności możliwe jest wiarygodne oszacowanie skuteczności ekranowania drgań przy użyciu modeli cyfrowych wygenerowanych w stosownym oprogramowaniu. W artykule zaproponowano podejście polegające na szacowaniu skuteczności przyjętego typu ekranu (na wybranym przykładzie) w drodze analizy modelu cyfrowego – w oderwaniu od kosztów danego rozwiązania. W uogólnieniu jest jednak możliwa taka analiza wielu rozwiązań i wybranie takiego, które będzie spełniało założone warunki techniczne (odpowiednią skuteczność) przy akceptowalnych kosztach realizacji.

Opis proponowanej metody

Rozważania niniejsze prowadzono, analizując wybrany efekt parasejsmiczny. Aby ograniczyć liczbę rozwiązań, ograniczono się do źródła drgań stacjonarnych, niezmienną swego położenia w czasie. Założono, że wymuszenie będzie miało charakter harmoniczných (quasi-harmoniczných), o skończonej liczbie wartości częstotliwości powodujących największe utrudnienie w redukcji powstałych drgań.

Wymuszenie takie, jak wszystkie wymuszenia parasejsmiczne (z wyjątkiem eksploatacji górniczej), wzbudza w górnej warstwie podłoża gruntowego fale zwane po-

wierzchniowymi. Ich szczegółowa teoria została już wielokrotnie przedstawiona w literaturze, przykładowo w pozycjach [5, 6]. Uznano zatem, że nie ma potrzeby powtarzania tu podstawowych wiadomości, jakkolwiek, w miarę potrzeb, będą one przywoływane w odpowiednich fragmentach tekstu.

Opisana metoda, jak każda związana z modelowaniem, jest dwuetapowa: etap pierwszy obejmuje budowę odpowiedniego modelu i przeprowadzenie obliczeń, a etap drugi jest sprawdzeniem prawidłowości modelu przez porównanie rezultatów analiz numerycznych z wynikami pomiarów in situ.

Podstawę realizacji pierwszego etapu (budowy odpowiedniego modelu i przeprowadzenia obliczeń) przyjęto w postaci przedstawionych niżej założeń.

- Model zagadnienia (dla maksymalnego uproszczenia, lecz bez utraty dokładności rozwiązań) powinien mieć wymiar 2D (przy odległości poziomej modelu zorientowanej w kierunku przebiegu fali). Założenie takie wywołuje następujące konsekwencje:

- obliczenia będą prowadzone w stanie „Płaski Stan Odształceń”,

- akceptowana jest konieczność szacowania fal Rayleigha, jako najbardziej szkodliwych (co jest zgodne z prawdą), przy wyłączeniu możliwości szacowania fal Love’a.

- Założono, że obliczenia będą prowadzone metodą elementów skończonych.

- Grunt jest półprzestrzenią nieograniczoną, ale w związku z wykorzystaniem do obliczeń metody elementów skończonych można założyć, że jest on ograniczony krawędziami aproksymacyjnymi, z odmiennymi warunkami brzegowymi dla analiz statycznych i dynamicznych [7]. W niniejszym przypadku przyjęto taką jego geometrię, by wykluczyć wpływ warunków brzegowych, i za [7] zamodelowano go „metodą bezpośrednią”, czyli na całym obszarze, aż do krawędzi zewnętrznych, zadeklarowano elementy skończone. Wspomniane krawędzie zewnętrzne mają za zadanie umożliwienie sztywnego podparcia masywu z wykluczeniem przemieszczenia (statyka), a także sprężystego podparcia, z pochłanianiem docierających do krawędzi fal, co uzyskano przez zaopatrzenie ich w tłumiki lepkie i sprężyny (dynamika).

- Wnętrze masywu gruntowego należy tak dobrać, by w żądanym rejonie można było istniejący wstępnie grunt opcjonalnie zastępować barierą o zmiennej głębokości oraz odmiennej od gruntu strukturze materiałowej. Komentarz: Mimo uwagi w pozycji [4]: „Najbardziej efektywne są bariery przekazujące minimum energii fal – takimi są przegrody w postaci pustych szczelin”, na obecnym etapie skupiono się na ekranach wypełnionych materiałem gwarantującym minimum odształceń sąsiadującego gruntu – tu: betonem. Jako rozwiązanie materiałowo konkurencyjne można także rozważać betony modyfikowane dodatkami lub produkt powstały w technologii „upłynniania gruntu rodzimego”, mogący finalnie także stanowić ekran w gruncie [8÷10].

- Na potrzeby prowadzenia obliczeń metodą elementów skończonych odbędzie się zastąpienie ośrodka ciągłego (rzeczywistego) odpowiednio skalibrowanym modelem

dyskretnym. Wtedy też wielkości fizyczne tego modelu będą skupione w dopasowanych podobszarach powstałych wskutek dyskretyzacji, zamiast przedstawiać ośrodek ciągły, co znacznie upraszcza zamierzone obliczenia. Należy pamiętać, by maksymalna wielkość elementów skończonych została dopasowana do oczekiwanej długości fali, spełniając warunki opisane w pracy [7], gdzie wymagane są elementy skończone o wymiarach liniowych nie większych niż połowa długości fali.

- Ponieważ wierzchnia płaszczyzna masywu jest równomierna, a przyjęty materiał bariery jest sztywny, nie dopuszcza się do powstawania nadmiernych przemieszczeń czy uplastycznień. Powtarzając za pozycją [11]: „W ośrodku gruntowym zachodzi silna nieliniowość modułu odkształcenia, w zależności od poziomu odkształcenia. W obiektach, gdzie do współpracy włączone są duże obszary gruntów, a odkształcenia w nich są małe, np. w ścianach szczelinowych głębokich wykopów, obudowach tuneli, poprawna prognoza zachowania (przemieszczeń) wymaga wyznaczania wartości modułów w zakresie sprężystym”, akceptuje się model konstytutywny gruntu jako sprężysty. Takie założenie pozwala na prowadzenie analiz obliczeniowych w trybie liniowym.

- Geotechniczne parametry poszczególnych warstw należy pozyskiwać z dokumentacji geologiczno-inżynierskiej dla rozważanego rejonu, a w przypadku jej braku – na podstawie wartości podanych w pozycji [12], jako charakterystycznych.

- W ramach obciążeń należy rozważać ciężar własny modelu oraz obciążenie dynamiczne o zróżnicowanej skokowo wartości widma sygnału, dopasowanej do odpowiadającej częstotliwości wymuszenia.

- Tłumienie w modelu należy deklarować poprzez specyfikację tłumienia materiałowego oraz powiązanego z nim tłumienia proporcjonalnego. Do obliczeń, za [13]: „...wykorzystano tłumienie Rayleigha opisane wzorem: $C = \alpha [M] + \beta [K]$, w którym C oznacza symetryczną macierz tłumienia, $[M]$ macierz masową, $[K]$ macierz sztywności. Współczynniki α i β są określane dla danego materiału na podstawie danych literaturowych oraz wykorzystaniu tłumienia modalnego”. Należy tu zdawać sobie sprawę z faktu, że stosowany algorytm macierzy tłumienia dopuszcza niedokładności podczas obliczania tłumienia modalnego [14], będące jednak, przy innych zastosowanych niedokładnościach, akceptowalne.

- Układ równań ruchu powinien być rozwiązywany metodą bezpośredniego całkowania, zgodnie z sugestią zawartą w pozycji [15].

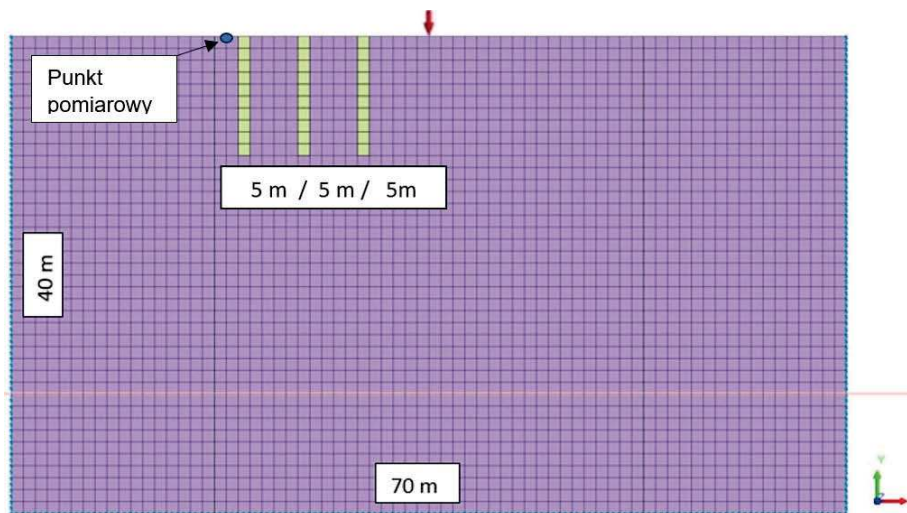
- W ramach analiz szacowana powinna być propagacja parasejsmiczna w gruncie, opcjonalnie pozbawionym bariery lub zaopatrzonym w barierę, charakteryzowana za [16] jako: „prędkość [m/s] rozchodzenia się fal poprzecznych w gruncie”. Jest to słuszne założenie, co przekazano w pracy [17]: „...prędkość drgań w punkcie stanowi jedno z podstawowych kryteriów propagacji drgań”.

- Dobór programu obliczeniowego powinien być uzależniony od możliwości spełnienia powyższych założeń, co pozwoli na prowadzenie dalszych rozważań opartych na analizie rozchodzenia się fal sprężystych.

Podstawą realizacji drugiego etapu (identyfikacji prawdziwości modelu poprzez porównanie wyników numerycznych z wynikami pomiarów in situ) jest dobór odpowiedniego profilu pomiarowego na gruncie w rejonie wymuszenia, umożliwiającą weryfikację prawdziwości analitycznie obliczonej prędkości fal w gruncie. Istotną kwestią jest tu konieczność „sztywnego” stabilizowania stanowiska pomiarowego na wierzchniej płaszczyźnie gruntu – za [15, 19] uznano, że najwierniejszy obraz drgań podłoża gwarantuje masywna stalowa płyta stabilizowana w gruncie wbijanymi do niego prętami mocującymi.

Przykład praktyczny

Zdecydowano, by model do niniejszego przykładu kształtować w programie MIDAS GTS NX, dedykowanym rozwiązaniom geotechnicznym i umożliwiającym spełnienie koniecznych założeń. Na rysunku 1 przedstawiono finalny szkic modelu. Wymiary elementów skończonych przyjęto jako $1,0 \times 1,0$ m.



Rys. 1. Masyw gruntowy, ze strefami opcjonalnych barier (kolor zielony) oraz z siłą dynamiczną (czerwona strzałka)

Zamodelowano masyw gruntowy o wymiarach 70×40 m, o jednolitym podziale na elementy skończone. W jego wnętrzu wydzielono wstępnie trzy strefy (kolor zielony), którym przypisano możliwość niezależnego zmieniania głębokości oraz rodzaju (parametrów) materiału, na potrzeby swobodnej deklaracji opcjonalnego występowania barier zabudowanych w gruncie. Finalnie przyjęto, że opcjonalna zabudowa bariery będzie realizowana w strefie położonej po lewej stronie modelu. Docelowe wypełnienie bariery stanowić będzie beton o atrybutach pozyskanych z literatury, o szerokości 1 m oraz skokowo zmiennej głębokości: 10, 8, 6 i 4 m. Pozostałe strefy pozostaną bez zmian – będą miały atrybuty masywu gruntowego. Model konstytutywny wszystkich materiałów przyjęto jako sprężysty. Geotechniczne parametry masywu (piasek drobny średnio zagęszczony, bez wody gruntowej), ujednoczone, przyjęto z literatury.

W ramach obciążeń rozważono ciężar własny modelu oraz obciążenie dynamiczne, realizowane siłą pionową

harmoniczną o skokowo zmiennej częstotliwości od 5 do 35 Hz, co 10 Hz. Dobór rozważanych częstotliwości był efektem przyjętego charakteru wymuszenia, czyli wibracyjnego pograżania grodzic w podłożu. W przypadku występującego zagospodarowania terenu, by zminimalizować wpływy dynamiczne, do prac stosowane są zwykle wibromoty wysokoczęstotliwościowe, pracujące nominalnie na poziomie 38 Hz. Podczas wnikania grodzicy w podłożu, w zależności od stanu gruntu oraz stanu zamków grodzic (czyli w zależności od oporów), częstotliwość ta jest redukowana. I tak, im większy opór, tym częstotliwość wbijania maleje, jakkolwiek do wartości nie mniejszej niż około $20 \div 25$ Hz. Oznacza to, że dla praktycznego rozważania wpływu pracy wibromotów wystarczający byłby zakres analizy od 20 do 35 Hz, lecz w celach poznawczych postanowiono prześledzić także niższe widma, rozszerzając wspomniany zakres „w dół”, do 5 Hz. Wartość „skoku” (10 Hz) dobrano w celu przedstawienia problemu oraz udowodnienia możliwości jego rozwiązania, w tym w zakresie wpływu częstotliwości wymuszeń na uzyskane efekty tłumienia.

Wymuszenie ma nagły start oraz nagłe zatrzymanie i jest zlokalizowane na powierzchni gruntu, w odległości 15 m od prawej elewacji skrajnej lewej bariery. Wyniki, jako przykładowe, pokazano dla przypadku bariery o głębokości 10 m. Tłumienie i metodę analizy opisano wcześniej, w założeniach.

Analizy statyczne prowadzono w dwóch trybach: bez bariery oraz z opisaną wyżej jedną barierą. Ich wyniki służyły weryfikacji modelu i, z racji ich oczywistości, zostały tu pominięte.

Analizy dynamiczne także realizowano w dwóch zasadniczych trybach: bez bariery i z jedną barierą.

W przypadku trybu obliczeń „bez bariery” obliczenia prowadzono dla częstotliwości od 5 do 35 Hz, co 10 Hz. Ich wyniki służyły weryfikacji poprawności przyłożonego obciążenia dynamicznego, weryfikacji symetryczności rozchodzenia się fali i szacowaniu prędkości powierzchniowej fali poprzecznej o polaryzacji pionowej (fala Rayleigha) w gruncie. Jej znajomość pozwalała na określenie długości fali, czyli efektywnej głębokości oddziaływania wpływów dynamicznych dla danego widma wymuszenia. W tabelicy 1 zestawiono długości fal Rayleigha

Tabela 1. Długości fal w gruncie, w funkcji częstotliwości generowanych wymuszeń

Częstotliwość wymuszenia [Hz]	Długość fali Rayleigha [m]
5	16,7
15	6,5
25	4,0
35	3,0

w gruncie, generowane opisanymi wymuszeniami. Jak widać, wymiary elementów skończonych spełniają opisane wcześniej warunki (są mniejsze niż połowa długości fali).

Potwierdzeniem prawidłowości tych obliczeń może być prezentowany na rys. 2, dla przykładowego wymuszenia 5 Hz, wykres prędkości z graficzną interpretacją zasięgu „czoła” fali w głąb gruntu (tu: ≈ 17 m).

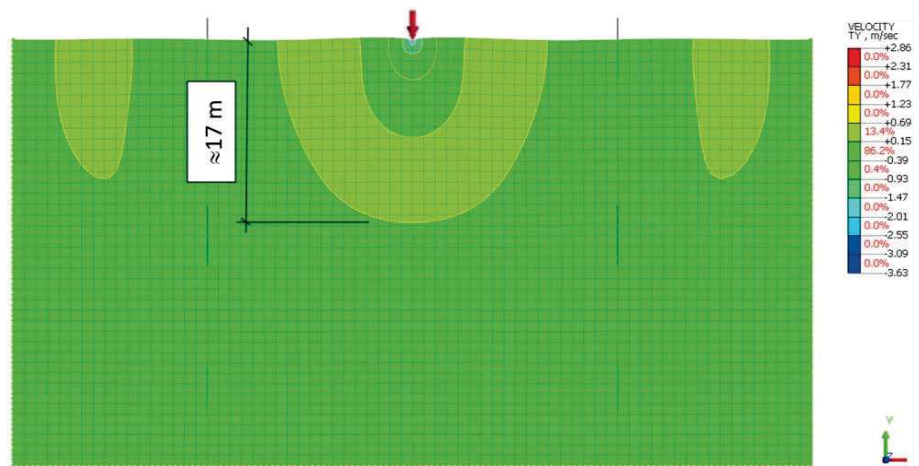
Obliczenia „z barierą” prowadzone były dla widm jak wyżej, przy zmieniającej się głębokości bariery: 10, 8, 6 i 4 m i stałej jej odległości od punktu aplikacji wymuszenia, wynoszącej 15 m (licząc od prawej krawędzi bariery). Punkt pomiarowy, w którym badano efekt ekranowania drgań, zlokalizowano na powierzchni terenu, 1 m poza lewą elewacją tej bariery. Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono amplitudy przemieszczeń punktu „za barierą” (kolor zielony) i punktu w odbiciu lustrzanym do niego względem miejsca aplikacji siły dynamicznej, czyli „bez bariery” (kolor czerwony), przy wymuszeniu o częstotliwości 5 Hz, zakładając istnienie bariery o głębokości 10 m.

Podobny zakres obliczeń dla bariery o głębokości 10 m wykonano dla pozostałych częstotliwości (15, 25 i 35 Hz).

Na rysunku 5 przedstawiono wpływ częstotliwości wymuszenia na redukcję przemieszczeń punktu „za barierą” i punktu w odbiciu lustrzanym do niego względem miejsca aplikacji siły dynamicznej, czyli „bez bariery”, przy głębokości bariery wynoszącej 10 m.

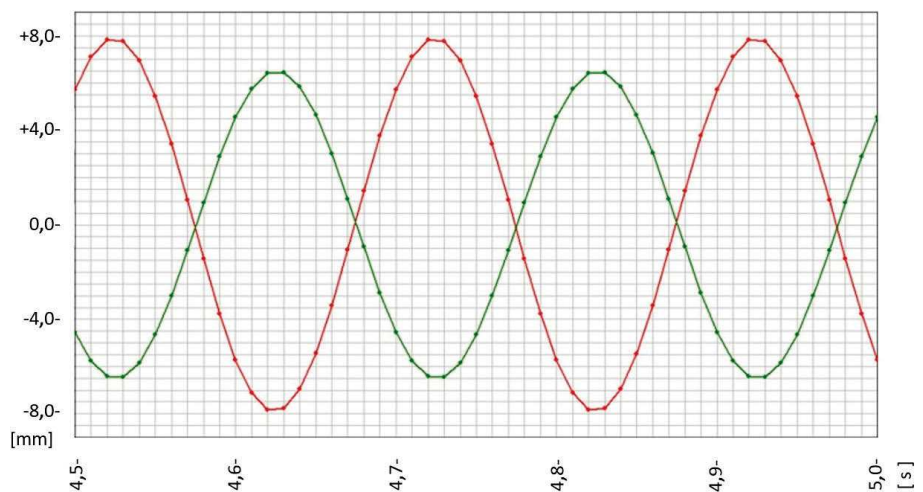
Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono, kolejno, skuteczność bariery o głębokości 10 m w redukcji przemieszczeń poziomych i pionowych dla różnych częstotliwości wymuszeń oraz w redukcji przemieszczeń sumarycznych (rozumianych tu jako wartości wypadkowe, wyliczone jako pierwiastek z sumy kwadratów wzajemnie prostopadłych przemieszczeń poziomych i pionowych). Odpowiadające wielkości procentowe pokazano w tabl. 2.

Wykresy przedstawione na rysunkach 6 i 7 oraz w tabelicy 2 odnoszą się do bariery o głębokości 10 m. Na podstawie wyników uzyskanych dla barier o innych głębokościach (8, 6 i 4 m) opracowano zależność wpływu częstotliwości wymuszenia na redukcję przemieszczeń – przy założonej głębokości bariery.

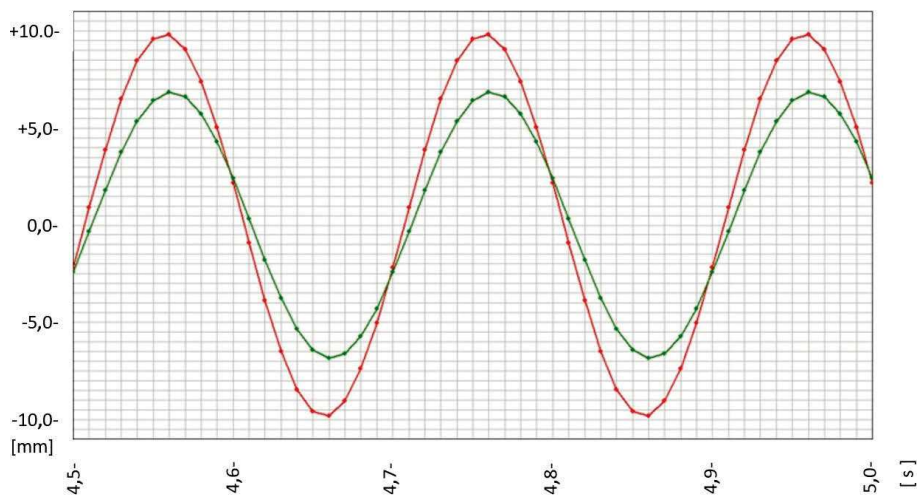


Rys. 2. Zasięg „czoła” fali w głąb gruntu od wymuszenia 5 Hz

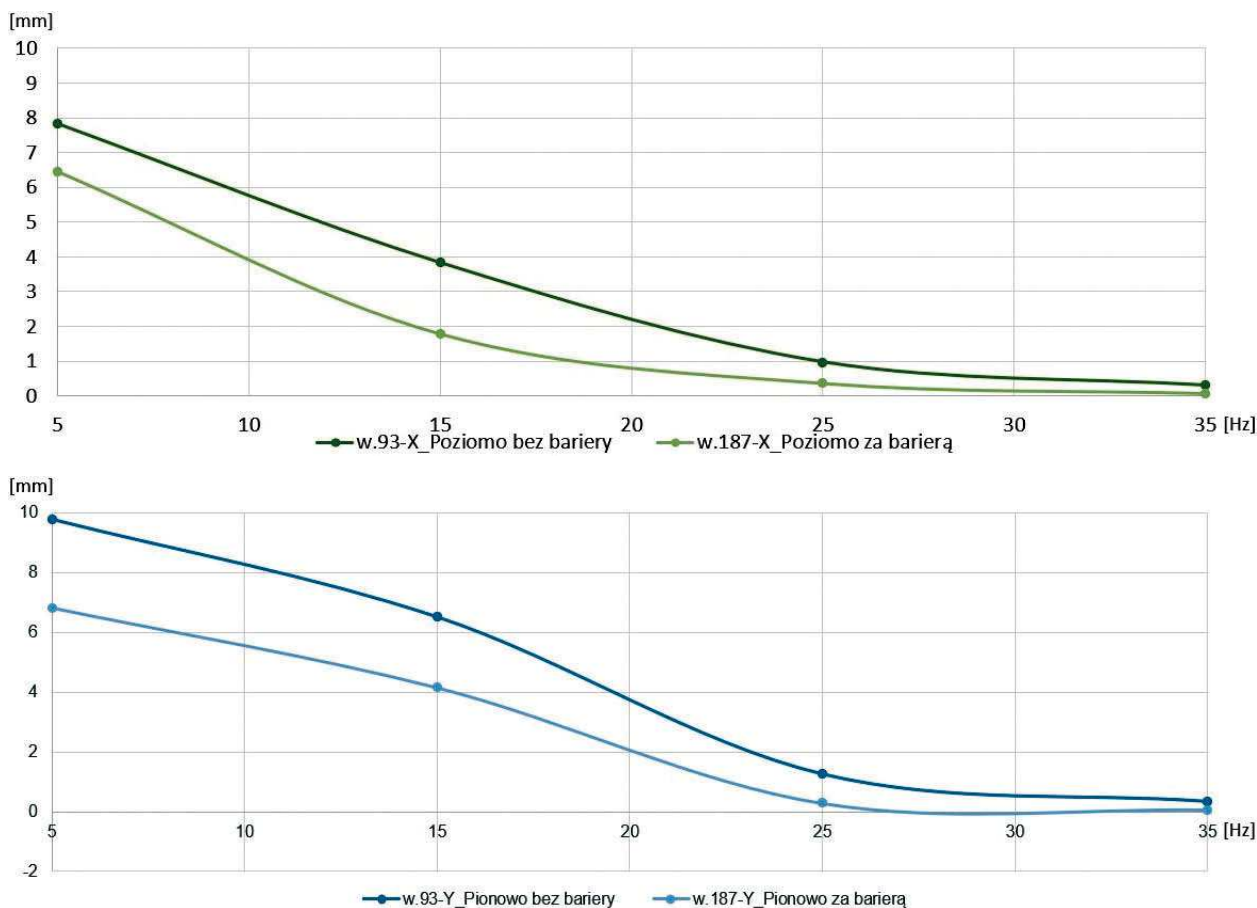
Zebrane wyniki pozwoliły na przygotowanie także nieco innej niż wyżej zależności, mianowicie wpływu głębokości bariery na redukcję przemieszczeń – przy założonej częstotliwości wymuszenia. Jako przykładowe, na rys. 8, 9 i 10 oraz w tabl. 3 pokazano wyniki dla częstotliwości wymuszenia 5 Hz.



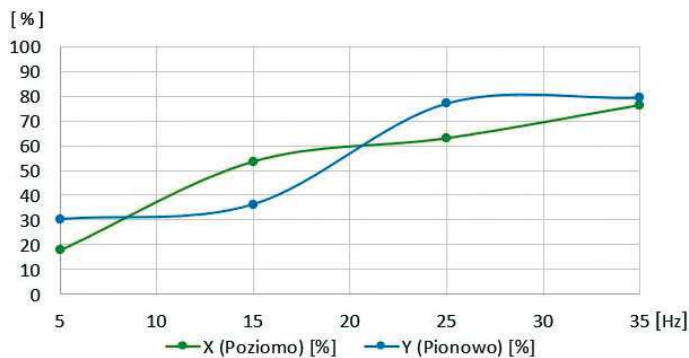
Rys. 3. Przemieszczenia poziome [mm] przy wymuszeniu 5 Hz i barierze o głębokości 10 m



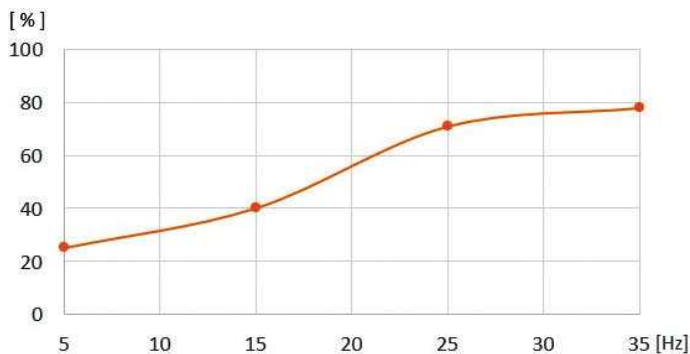
Rys. 4. Przemieszczenia pionowe [mm] przy wymuszeniu 5 Hz i barierze o głębokości 10 m



Rys. 5. Przeszaczenia poziome i pionowe [mm] w funkcji częstotliwości wymuszenia; bariera o głębokości 10 m



Rys. 6. Skuteczność bariery o głębokości 10 m w redukcji przeszaczeń składowych



Rys. 7. Skuteczność bariery o głębokości 10 m w redukcji przeszaczeń sumarycznych (wypadkowych)

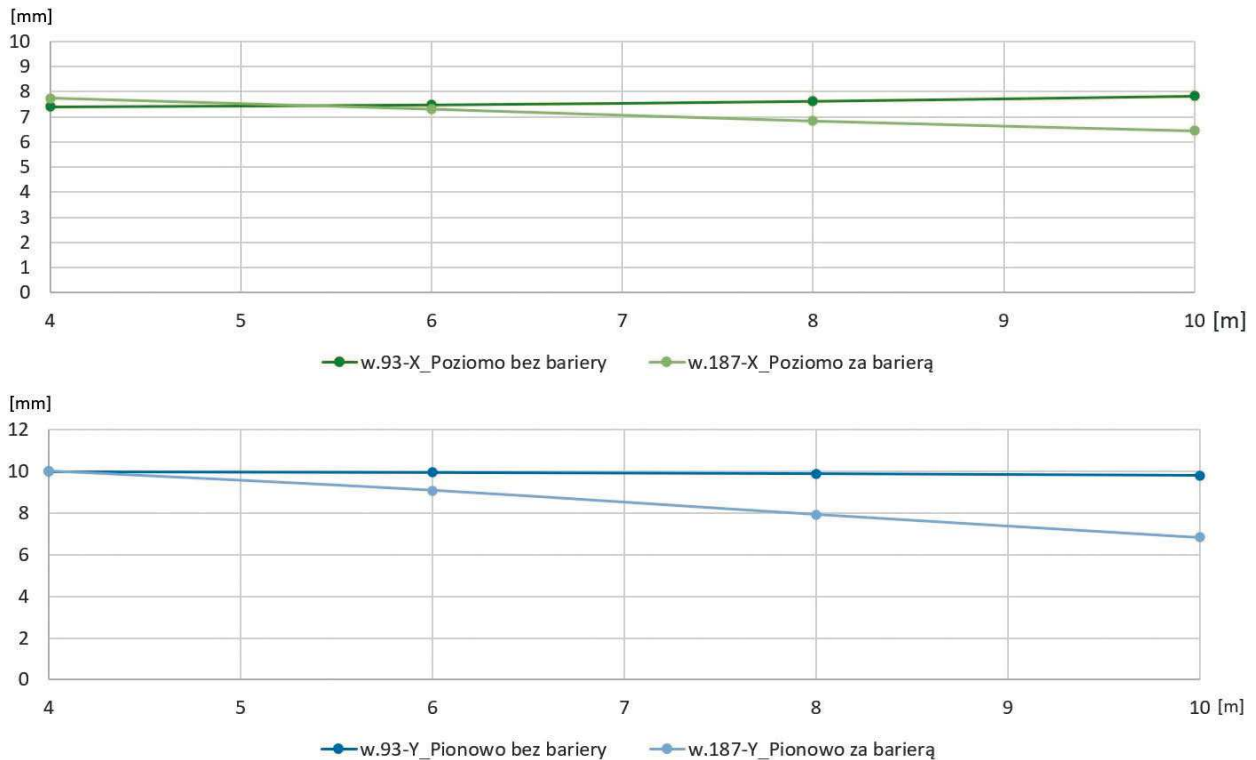
Tablica 2. Skuteczność bariery betonowej o głębokości 10 m w redukcji przeszaczeń

Częstotliwość wymuszenia [Hz]	Skuteczność bariery w redukcji przeszaczeń [%]		
	poziomych X	pionowych Y	sumarycznych
5	17,8	30,2	25,1
15	53,5	36,2	40,2
25	62,9	77,0	70,9
35	76,3	79,2	77,9

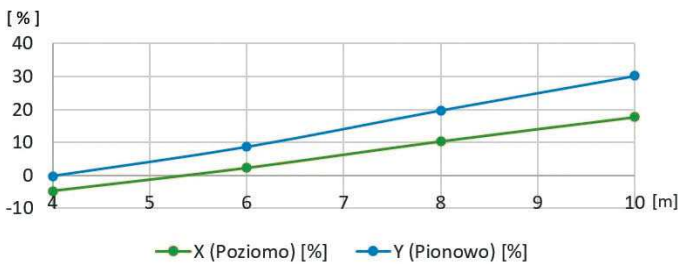
Wnioski z wykonanych analiz obliczeniowych

Bazując na analizach otrzymanych wyników, opracowano przedstawione niżej wnioski.

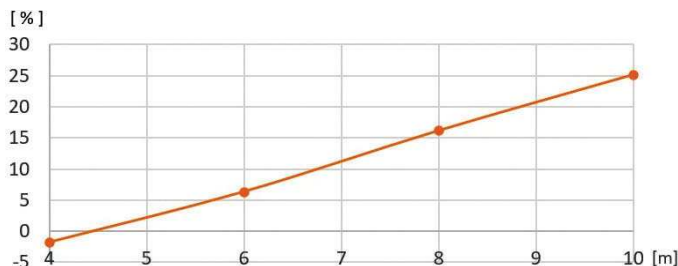
- Wzrost częstotliwości wymuszenia bez względu na istnienie bariery powoduje zmniejszanie zasięgu fali w gruncie. W efekcie wraz z tym wzrostem powstaje stosunkowo płynna redukcja przeszaczeń gruntu w kierunku poziomym i pionowym. Jedynym odstępstwem od tego zjawiska, odnośnie do przeszaczeń pionowych, jest rejon pasma rezonansowego gruntu w kierunku pionowym, gdzie obserwuje się zaburzenie nadmienionej płynności redukcji (lokalny wzrost przeszaczeń). Uwaga: Przy okazji analizy rozchodzenia się fal sprężystych w ośrodku gruntowym stwierdzono,



Rys. 8. Przemieszczenia poziome i pionowe w funkcji głębokości bariery, dla wymuszenia o częstotliwości 5 Hz



Rys. 9. Skuteczność barier w redukcji przemieszczeń składowych, w funkcji głębokości bariery, dla wymuszenia o częstotliwości 5 Hz



Rys. 10. Skuteczność barier w redukcji przemieszczeń sumarycznych (wypadkowych), w funkcji głębokości bariery, dla wymuszenia o częstotliwości 5 Hz

Tablica 3. Skuteczność barier betonowych o różnych głębokościach w redukcji przemieszczeń, przy wymuszeniu o częstotliwości 5 Hz

Głębokość bariery [m]	Skuteczność bariery w redukcji przemieszczeń [%]		
	poziomych X	pionowych Y	sumarycznych
10	17,8	30,2	25,1
8	10,4	19,7	16,1
6	2,3	8,7	6,3
4	-4,7	-0,2	-1,8

że wykres przemieszczeń pionowych w funkcji częstotliwości może stanowić skuteczne narzędzie w szacowaniu częstotliwości rezonansowych pionowych gruntu w przypadku braku jego obciążenia zewnętrznego innymi konstrukcjami, podczas którego zwykła analiza modalna jest nieefektywna.

- Wzrost częstotliwości wymuszenia (5÷35 Hz) przy stałej głębokości bariery niemal zawsze powoduje spadek przemieszczeń punktu na powierzchni gruntu bezpośrednio chronionego tą barierą, w stosunku do punktu równoodległego od miejsca aplikacji siły dynamicznej i niechronionego barierą (uwaga: rozważana tu była bariera wypełniona materiałem sztywnym o gęstości większej niż gęstość gruntu). Skuteczność redukcji przemieszczeń sumarycznych punktu bezpośrednio chronionego barierą przedstawić można następująco:

- przy głębokości bariery 4 m skuteczność rośnie szybko wraz ze wzrostem częstotliwości wymuszenia (5÷35 Hz), lecz od poziomu bardzo niskiego (tu: 0%), osiągając finalnie stosunkowo wysoki poziom (tu: około 60%);

- przy głębokości bariery 10 m skuteczność rośnie powoli wraz ze wzrostem częstotliwości wymuszenia (5÷35 Hz), od poziomu niskiego (tu: około 25%), osiągając finalnie wysoki poziom (tu: około 80%).

- Wzrost głębokości bariery przy stałej częstotliwości wymuszenia niemal zawsze powoduje spadek przemieszczeń punktu na powierzchni gruntu bezpośrednio chronionego tą barierą, w stosunku do punktu równoodległego od miejsca aplikacji siły dynamicznej i niechronionego barierą (uwaga: należy pamiętać, że rozważana tu była bariera wypełniona materiałem sztywnym o gęstości większej niż gęstość gruntu; głębokość barier: 4÷10 m). Skuteczność

redukcji przemieszczeń sumarycznych punktu bezpośrednio chronionego barierą przedstawić można następująco:

– przy częstotliwości 5 Hz skuteczność rośnie szybko ze wzrostem głębokości bariery (4÷10 m), lecz od poziomu bardzo niskiego (tu: 0%), osiągając finalnie niski poziom (tu: około 25%);

– przy częstotliwości 35 Hz skuteczność rośnie powoli wraz ze wzrostem głębokości bariery (4÷10 m), lecz już od poziomu wysokiego (tu: około 60%), osiągając finalnie jeszcze wyższy poziom (tu: około 80%).

Tyle odnośnie do wyników analiz obliczeniowych w modelu numerycznym. Aby obdarzyć je zaufaniem, pozostaje jedynie potwierdzenie zgodności rozważanego modelu z rzeczywistością. Wykonać zatem należy odpowiedni pomiar drgań na powierzchni gruntu, przy wymuszeniach o znanych atrybutach, a otrzymane wyniki odpowiedzi dynamicznej gruntu porównać z wynikami uzyskanymi z analiz obliczeniowych.

Autorzy zdają sobie sprawę, że zaprezentowany przykład bariery betonowej jest jednostkowy i nie porusza problemu wpływu materiału przegrody na jej efektywność. Podobnie przyjęto stałą odległość przegrody od źródła drgań oraz stałą jej grubość. Ponadto w prezentowanym opracowaniu skupiono się na materiale przegrody gwarantującym minimalne odkształcenia otaczającego ją gruntu, co pozwoliło na prowadzenie analiz liniowych. W przypadku bardziej podatnych materiałów należałoby wykorzystać analizy nieliniowe, których opis dodatkowo zwiększyłby objętość tekstu. Wymienione zagadnienia planowane są do zaprezentowania w odrębnym artykule.

Podsumowanie

W artykule omówiono metodę numerycznej analizy skuteczności stosowania bariery w gruncie, w celu redukcji drgań poza nią. Prezentowane podejście ma charakter inżynierski i pozwala na wiarygodne oszacowanie skuteczności bariery o konkretnej głębokości i lokalizacji, z uwzględnieniem materiału jej wykonania oraz parametrów gruntu, w który zostanie wbudowana. W efekcie można wyznaczyć całą grupę skutecznych rozwiązań i na tej podstawie wytypować konstrukcję optymalną z uwagi na parametry tłumienia, rozwiązanie konstrukcyjno-materiałowe i konieczne do poniesienia nakłady finansowe. Zaletą proponowanej metody jest możliwość prostej weryfikacji modeli numerycznych, przez porównanie uzyskanych wyników z łatwą do pomierzenia in-situ na po-

wierzchni gruntu odpowiedzią dynamiczną, przy zadanych, znanych wymuszeniach.

PIŚMIENNICTWO

- [1] Ciesielski R., Kawecki J., Maciąg E.: Ocena wpływu wibracji na budowie i ludzi w budynkach (diagnostyka dynamiczna). ITB, Warszawa, 1993.
- [2] Müller-Borutta F.: Ochrona przed drganiami. Elastyczne posadowienie budynków z zastosowaniem materiałów elastomerowych Calenberg (cz. 1). Przegląd Budowlany, 6/2009, s. 22-27.
- [3] Ciesielski R., Domski J., Stypuła K.: Badania doświadczalne działania przegrody wibroizolacyjnej z rur plastikowych w gruncie. VII Sympozjum: Wpływy sejsmiczne i parasejsmiczne na budowie. Kraków, 1994, s. 277-284.
- [4] Ciesielski R., Maciąg E.: Drgania drogowe i ich wpływ na budynki. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1990.
- [5] Ciesielski R.: Ocena szkodliwości wpływów dynamicznych w budownictwie. Wydział Szkolenia i Wydawnictw Biura ZG PZITB, Warszawa, 1973.
- [6] Ciesielski R., Kwiecień A., Stypuła K.: Propagacja drgań w warstwach przypowierzchniowych podłoża gruntowego. Badania doświadczalne in situ. Seria Inżynieria Lądowa, Monografia 263. Politechnika Krakowska, Kraków, 1999.
- [7] Wrana B.: Dynamika gruntów. Modele obliczeniowe. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2012.
- [8] Online: <https://rss-system.de/rss-fluessigboden/> Dostęp: 12.04.2024.
- [9] Suligowski Z.: Nowoczesna technologia instalowania rur z tworzyw sztucznych (metoda czasowego upłynnienia podłoża gruntowego). Wiadomości Projektanta Budownictwa, 12 (203)/2007, s. 8-10.
- [10] Słyś D., Dziopak J., Nalaskowski J.: Upłynniony grunt – rewolucja w budowie infrastruktury sieciowej. Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 3/2009, s. 22-25.
- [11] Godlewski T., Szczepański T.: Metody określania sztywności gruntów w badaniach geotechnicznych. Instrukcje, Wytyczne, Poradniki, 494/2015, ITB, Warszawa, 2015.
- [12] Wiłun Z.: Zarys geotechniki. WKŁ, Warszawa, 1987.
- [13] Bednarz J.: Modelowanie propagacji fali drganiowej w podłożu. Technika Transportu Szynowego, 10/2013, s. 2295-2304.
- [14] Hoszwa K., Osiński J., Osipiak M., Żach P.: Rozszerzenie możliwości zastosowania tłumienia modalnego w diagnostyce dużych obiektów. Diagnostyka'1, 37/2006, s. 23-30.
- [15] Domski W., Stypuła K.: Dobór modelu numerycznego do opisu propagacji drgań w podłożu gruntowym z przegrodą. VII Sympozjum: Wpływy sejsmiczne i parasejsmiczne na budowie. Kraków, 1994, s. 285-292.
- [16] Kogut J.: Propagacja w podłożu drgań generowanych przez koleje dużych prędkości. Zeszyty Naukowo-Techniczne SITK RP, Kraków, 2013.
- [17] Modrzejewski S.: Prędkość drgań jako wskaźnik propagacji parasejsmicznej. Górnictwo i Geoinżynieria, R. 28, Z. 3/1, 2004, s. 361-372.
- [19] Kozioł K.: Pomiary in-situ jako sposób na prognozę obciążenia dynamicznego budynków. Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury, T. XXXIV, z. 64, 2017, s. 169-176.

Szanowny Czytelniku!

Prezentuj na łamach czasopisma własne osiągnięcia, przemyślenia i propozycje.

Propaguj „Inżynierię i Budownictwo” w swoim środowisku.

Korzystaj z łamów czasopisma do zamieszczania ogłoszeń i artykułów sponsorowanych.

„Inżynieria i Budownictwo” jest naszym wspólnym dziełem i wspólnie za nie odpowiadamy.