

TARGOSZ Jan

METODY OGRANICZANIA WPLYWU DRGAŃ PODŁOŻA NA KONSTRUKCJE INŻYNIERSKIE

Streszczenie

Problem ograniczenia wpływu drgań podłoża na konstrukcje inżynierskie, jest niezwykle złożony, głównie z powodu braku ścisłego opisu matematycznego uwzględniającego niejednorodność gruntu. Powoduje to, że sposób rozchodzenia się fali drganiowej w podłożu od źródła drgań do obiektu inżynierskiego, nie jest w pełni poznany. W pracy przedstawiono metodologię podejścia do analizy propagacji fali drganiowej w gruncie, możliwości ograniczenia wpływu drgań podłoża na konstrukcje inżynierskie oraz stosowane rozwiązania systemów wibroizolacji w kraju i na świecie.

WSTĘP

Problem rozprzestrzeniania się fali drganiowej w gruncie i oddziaływań dynamicznych na konstrukcje inżynierskie, wymuszonych głównie przez transport szynowy i samochodowy, jest z punktu widzenia teoretycznego niezmiernie skomplikowany [4]. Przyczyną tego stanu jest niejednorodność gruntu, jego historia oraz warunki hydrologiczne i atmosferyczne. Grunt stanowiący naturalne podłoże wszystkich konstrukcji inżynierskich jest dla tych konstrukcji jedynym elementem sprężysto-tłumiącym posiadającym tą własność że fala drganiowa wywołana przez jeden z obiektów inżynierskich jest istotna dla tego obiektu ale również dla obiektów znajdujących się w pewnym (nawet dość) dużym oddaleniu. Druga istotna cecha gruntu jest mechanizm jego odkształcania się. Wynika to z tego, że czas trwania oddziaływań dynamicznych obiektów inżynierskich, wywołujących falę drganiową, jest znacznie krótszy od możliwego czasu powstawania w gruntach odkształceń trwałych, co skutkuje tym, że istotny wpływ na fale drganiową rozchodzącą się w gruncie będą miały jego cechy sprężysto-tłumiące zmieniające się w określonym czasie.

Grunt, będąc ciałem stałym, różni się w sposób zasadniczy od pojęcia ciała stałego rozważanego w zagadnieniach mechaniki. Jest on ciałem rozdrobnionym, złożonym ze stosunkowo drobnych nie związanych ze sobą cząstek, pomiędzy którymi znajdują się przestrzenie wypełnione powietrzem, wodą, bądź częściowo powietrzem lub wodą. To powoduje, że grunt na ogół nie ma zdolności zachowania kształtu w takim stopniu jak ciało stałe rozważane w zagadnieniach mechaniki. Jak wspomniano powyżej podstawową cechą gruntu jest jego rozdrobnienie ale kolejnymi są jego porowatość (jednakowa postać ziaren i jednakowe rozmiary mogą zajmować różne objętości) której miarą jest zagęszczenie, wilgotność oraz makroporowatość. Kolejnym elementem mającym istotny wpływ na rozchodzenie się fali drganiowej w gruncie są jego cechy wytrzymałościowe takie jak ściśliwość, tarcie między cząsteczkami gruntu, moduły sprężystości, liczba Poissona. Te i inne niewymienione cechy powodują, że modele rozchodzenia się fal w gruncie są bardzo złożone i wymagają wielu danych otrzymanych w wyniku badań doświadczalnych i opracowanych statystycznie. Wymagają stworzenia baz danych zarówno parametrów

drganiowych różnego rodzaju gruntów, jak również baz obiektów inżynierskich które wymuszają jego drgania jak również obiektów na które fale drganiowe oddziałują. Rozprzestrzenianie się drgań teoretycznie opisywane jest przez fale powierzchniowe Rayleigha lub gdy warstwa sprężysta spoczywa na ośrodku sztywniejszym, poprzez fale Love'a. Teoretycznie fale powierzchniowe stanowią pewne całości szczególnie okresowych rozwiązań równania bifalowego, spełniającego określone warunki brzegowe tzn. swobodnego brzegu półprzestrzeni sprężystej. Stąd też rozwiązania te charakteryzują się prędkością fali wzdłuż powierzchni półprzestrzeni oraz co stanowi ich najistotniejszą cechę, szybkim zanikaniem amplitudy wraz z odległością i głębokością od powierzchni. Zanikanie to nie jest wynikiem tłumienia, może być, ale specyficznym oddziaływaniem wzajemnym fal podłużnych i poprzecznych. Takie podejście do zagadnień oceny rozprzestrzeniania się drgań w gruncie i ich wpływu na konstrukcje inżynierskie jest mało efektywne, stąd też opracowano metody prognozy rozprzestrzeniania się drgań w gruncie, lecz wyniki otrzymywane są mało zadawalające i zdecydowanie różnią się z rzeczywistością. To jest powodem, że zjawiska rozchodzenia się fali drganiowej wymagają stworzenia modeli analitycznych oraz numerycznych fal drganiowych gruntu jednorodnego i uwarstwionego uwzględniających takie zjawiska jak:

1. fale podłużne,
2. fale poprzeczne,
3. fale powierzchniowe Rayleigha,
4. fale Love'a,
5. zagadnienie Szermana

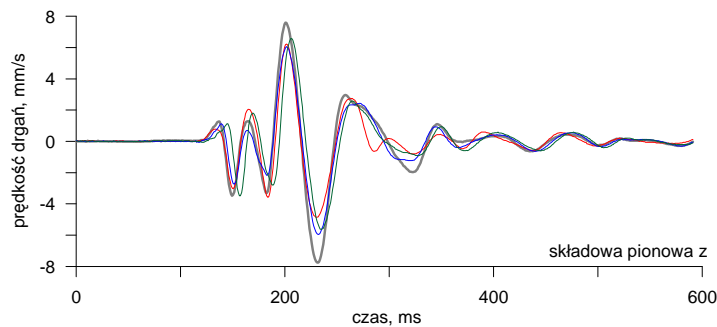
z uwzględnieniem zakłóceń, tarcia wewnętrznego, uszczelnienia, zagęszczenia i rozluźnienia gruntu w oparciu zbudowane bazy danych. Dostępna literatura jest podstawową w tym zakresie ale jej zakres nie wyczerpuje w pełni możliwości opracowania nowych, doskonalszych modeli, które to nowo opracowane modele poddane zostaną weryfikacji eksperymentalnej a następnie opracowany zostanie algorytm rozchodzenia się fali drganiowej od konstrukcji inżynierskiej i metody oszacowania skutków jej działania wraz z możliwością prognozowania i przewidywania wyboru metody ochrony aktywnej lub pasywnej istniejących i nowoprojektowanych konstrukcji inżynierskich. W chwili obecnej prowadzone wstępne prace badawcze, które mogą wpłynąć korzystnie na proces projektowania konstrukcji inżynierskich, znacznie go przyspieszając jak również pozwolą przewidzieć rozchodzenie się fali drganiowej i zastosować odpowiednie przeszkody pionowe lub poziome pozwalające ograniczyć np. poziom drgań budynków w których przebywają ludzie.

Zapobieganie procesowi rozprzestrzeniania się oddziaływań dynamicznych poprzez grunt na konstrukcje inżynierskie, emisji dźwięku lub drgań materiałowych wymaga zastosowania nowych rozwiązań zarówno materiałowych jak i konstrukcyjnych, które spełniają warunki izolacji drganiowej pomiędzy źródłem emisji drgań a otoczeniem. Aby ocenić prawidłowość doboru metody ograniczenia wpływu drgań gruntu na konstrukcje inżynierskie należy przeprowadzić wstępne badania rozchodzenia się fali drganiowej w gruncie, przyjęc model rozchodzenia się fali w gruncie, przeprowadzić jego symulację dla parametrów fizycznych gruntu a następnie zweryfikować na obiekcie rzeczywistym.

1. WSTĘPNE BADANIA ROZCHODZENIA SIĘ FALI DRGANIOWEJ W GRUNCIE

Wstępne badania rozchodzenia się fal drganiowych w gruncie przeprowadzono w Krakowie, Wrocławiu, Puławach na wytypowanych przekrojach pomiarowych w 3 do 5 punktach w trzech kierunkach wzajemnie prostopadłych kierunkach. Zgodnie z wytycznymi zawartymi w polskich normach odległość punktu pomiarowego od źródła drgań wynosiła 2, 4, 8, 16 oraz 32 [m]. Wartością mierzoną były przebiegi czasowe amplitudy prędkości lub

przemieszczenia drgań gruntu (rys. 1) w oparciu o które identyfikowano podstawowe parametry podłoża takie jak sztywność i tłumienie.



Rys. 1. Przykładowy przebieg amplitudy prędkości drgań na kierunku pionowym w jednym punkcie pomiarowym w odległości 2 m od wymuszenia

Źródło: opracowanie własne autora

Następnie w oparciu o tak wyznaczone parametry należy przyjąć model propagacji fali drganiowej w celu dokonania oceny prognostycznej jej wpływu na ludzi i konstrukcje inżynierskie.

2. OCENA ROZPRZESTRZENIANIA SIĘ DRGAŃ W GRUNCIE

Do oszacowania rozprzestrzeniania się drgań w gruncie istnieje wiele modeli z których najczęściej używane są [4]:

1. ocena rozprzestrzenia się drgań wg polskiej normy PN-80/B-03040,
2. metoda Golicyna,
3. ocena rozprzestrzenia się fali drganiowej z wykorzystaniem symulacji za pomocą metody elementów skończonych (MES).

2.1. Ocena rozprzestrzenia się drgań wg polskiej normy PN-80/B-03040

Według modelu przyjętego w normie amplituda drgań pionowych (poziomych) podłoża gruntowego A_r w odległości r od środka ciężkości fundamentu (w naszym przypadku podtorza tramwajowego - rys. 1), wywołanych przez pionowe (poziome) drgania wymuszone fundamentu może być orientacyjnie, niezależnie od rodzaju gruntu podłoża, wyznaczona według zależności:

$$A_r = A_0 \rho \quad (1)$$

gdzie:

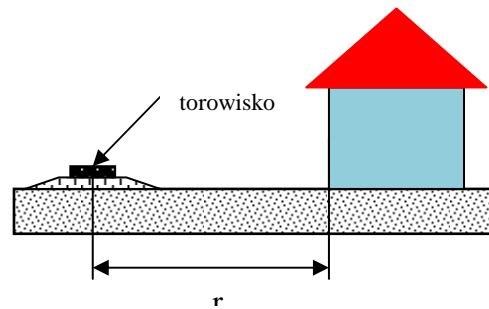
A_0 – amplituda drgań wymuszonych przejazdami tramwajów

A_r - amplituda drgań gruntu w odległości r od osi torowiska,

$$\rho = \sqrt{\frac{1}{\beta} - 0,4 \left[\frac{1}{\beta} - \left(\frac{1}{\beta} \right)^2 \right]}$$

$$\beta = \frac{r}{r_0},$$

$$r_0 = \sqrt{\frac{F}{\pi}}$$



Rys. 2. Schemat obliczeniowy
Źródło: [2]

Przyjmując, że odległość fundamentu konstrukcji inżynierskiej od źródła wymuszenia wynosi $r=20$ [m], a powierzchnia rozłożonego wymuszenia $F=0,51$ [m²], obliczamy $r_0=0,16$ [m], $\beta=50$. Podstawiając te wartości do zależności 2 wyznaczamy współczynnik ρ , który wynosi 0,133. Zakładając ponadto, że amplituda wymuszenia od przejazdu pojedynczego tramwaju, mierzona na podkładzie wynosi około 1 [m/s²] wówczas wartość amplitudy drgań pionowych i poziomych wyznaczony teoretycznie (w budownictwie one odgrywają główną rolę chociaż drgania pionowe mogą wywołać niekorzystny moment wywrotowy) przekazywanych na projektowany budynek mieszkalny wynoszą $A_r=0,133$ [m/s²]. Według normy PN-85/B-02170 punkt 4.3 wpływ drgań przekazywanych przez grunt na fundament konstrukcji inżynierskiej można pominąć w tych przypadkach, gdy amplituda przyspieszeń ruchu poziomego gruntu miejscu położenia fundamentu konstrukcji nie przekracza wartości $a_p < 0,05$ g [m/s²].

2.2. Ocena rozprzestrzenia się drgań w oparciu o metodę Golicyna

Weryfikację przeprowadzono wykorzystując podawaną w literaturze [4] zależność rozprzestrzenia się fal w gruncie, zwaną modelem Golicyna. Jest jednak obciążona błędami ale dla tego typu prognozy drganiowej jest prosta w użyciu oraz wystarczająco wygodna do weryfikacji. Ponadto w przypadku, mając dodatkowo na uwadze możliwość ingerencji w trakcie budowy nowo projektowanego obiektu inżynierskiego poprzez zastosowanie prawidłowo dobranych zabezpieczeń np. izolacja pionowa lub pozioma, można ograniczyć wpływ rozprzestrzenia się fali drganiowej w gruncie. Zależność ta ma następującą postać:

$$A_r = A_0 \sqrt{\frac{r_0}{r}} e^{-\alpha(r-r_0)} \quad (2)$$

gdzie:

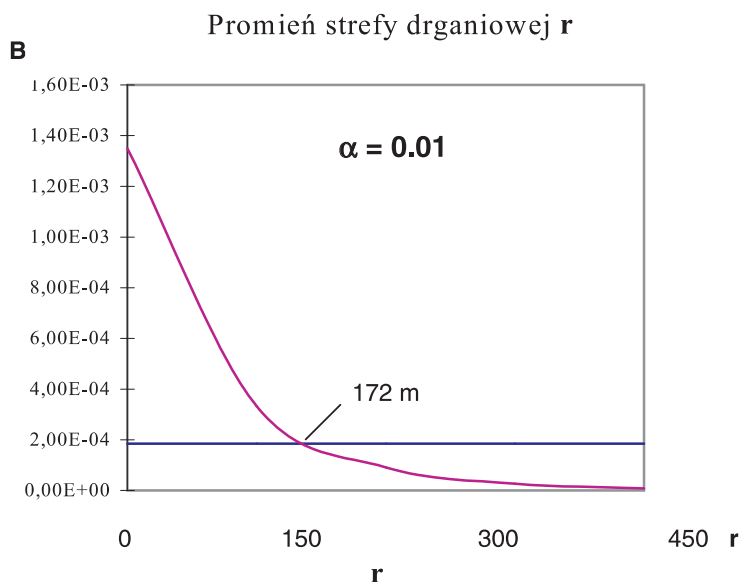
A_r, A_0 - amplitudy drgań gruntu w odległościach r i r_0 (rys.1),
 α - współczynnik absorpcji (pochłaniania) energii drganiowej fal.

Równanie (2) można przekształcić do następującej postaci, która umożliwia określenie strefy zagrożenia falą drganiową:

$$B = \frac{1}{r} e^{-2\alpha r} = \frac{1}{r_0 e^{2\alpha r_0}} \cdot \left(\frac{A_r}{A_0} \right)^2 \quad (3)$$

Rozwiązania równania (3) można dokonać metodą graficzną. Dla przykładu przyjmując następujące wartości parametrów: $r_0 = 5$ [m], $A_r = 0,04$ [m/s²], $A_0 = 1,25$ [m/s²] i rozwiązując je w funkcji współczynnika absorpcji α , dla którego przyjęto wartość 0,01 (grunty słabe, nasycone wodą, drobne i średnie oraz pylaste piaski, gliny piaszczyste i gliny).

otrzymujemy jako rozwiązanie odległość (rys. 3), do której amplituda drgań gruntu przekracza wartość dopuszczalną przez normę.



Rys. 3. Promień dopuszczalnej amplitudy drgań gruntu

Źródło: opracowanie własne autora

W oparciu o nią oraz informację o podłożu geologicznym gruntu można określić strefę drganiową zależności od amplitudy wymuszenia gruntu. Oczywiście w praktyce odległość strefy jest znacznie mniejsza z wielu powodów np. niejednorodności gruntu, itp.

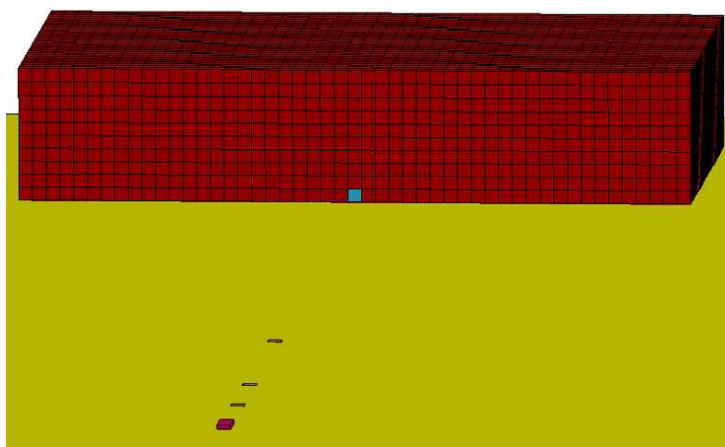
2.3. Ocena rozprzestrzenia się fali drganiowej z wykorzystaniem symulacji za pomocą metody elementów skończonych (MES)

Analiza numeryczna rozchodzenia się fali drganiowej wykorzystuje metodę elementów skończonych typu explicit. Metoda ta jest szeroko wykorzystywana do analizy zjawisk krótkotrwałych takich jak analizy zderzeń czy wybuchów. W analizowanym przypadku pozwala w dokładny sposób odwzorować sposób rozchodzenia się fali drganiowej wzbudzonej przez dowolne wymuszenie oraz określić szereg wielkości takich jak przyspieszenia lub prędkości w dowolnym punkcie modelu numerycznego jak również określić charakter mechanizmu przenoszącego drgania (fala Rayleigh'a lub inny mechanizm) [3, 5, 8, 9, 10].

Celem analizy jest pokazanie możliwości wykorzystanie metod numerycznych do weryfikacji rozwiązań związanych z propagacją fali i jej oddziaływaniem m.in. na budynki. Prawidłowe odwzorowanie takiego zjawiska wymaga zbudowania dokładnego modelu numerycznego, który wymaga bardzo dokładnych danych materiałowych oraz dokładnego odwzorowania określonego obszaru w którym występuje propagacja fali jak również korelacji wyników z badaniami eksperymentalnymi. Poprawnie zbudowany model pozwala badać zachowanie się np. budynku na różne wymuszenia (różna częstotliwość oraz amplituda sygnału) lub np. badać wpływ materiałów wibroizolacyjnych na redukcję drgań bez potrzeby wykonywania długotrwałych oraz kosztownych badań eksperymentalnych.

Opisana analiza wykorzystywała uproszczone podejście i ma charakter pokazowy. Nie może w obecnym stanie służyć do weryfikacji wyników badań eksperymentalnych. Niemniej

zarówno charakter jak i rząd wielkości odpowiedzi został zachowany. Przykładowo zbudowano model numeryczny wraz z punktami pomiarowymi, który przedstawiono na rys.4.



Rys. 4. Widok modelu numerycznego z zaznaczonym punktem pomiarowym (kolor niebieski) oraz źródłem wymuszenia (kolor czerwony)

Źródło: [1]

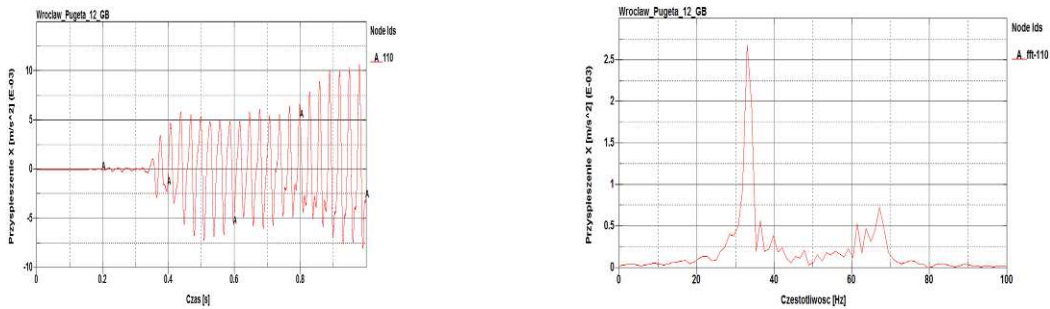
Ze względu na ograniczoną wielkość modelu bardzo istotne jest wykorzystanie jednego z wbudowanych mechanizmów w użytym oprogramowaniu pozwalające na zapobieganie odbijaniu się fali od skrajnych powierzchni ograniczających model numeryczny.

Jednym z najważniejszych aspektów jest modelowanie materiałów, w szczególności modelowanie zachowanie się gruntu, który w głównej mierze odpowiada za propagowanie fali oraz jej tłumienie. Został wykorzystany model materiałowy Druckera-Pragera, który jest szeroko wykorzystywany w metodach numerycznych do symulowania zachowania się różnego rodzaju gleb. Dodatkowo przygotowane dane materiałowe dla gruntów pozwalały wykorzystać je wprost w użytym modelu materiałowym. Zarówno obiekt inżynierski jak i stal (płytką wymuszająca) były uwzględnione z użyciem izotropowego modelu materiałowego.

Znaczący wpływ na jakość analizy ma przyjęty model tłumienia drgań. Wykorzystano tłumienie Rayleigha opisany 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.

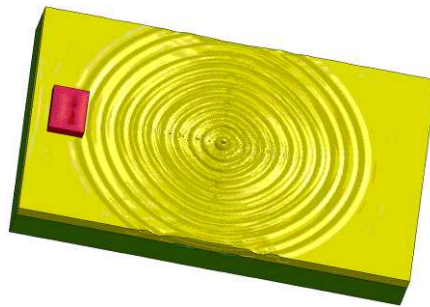
Model składa się z 4.3 mln elementów skończonych o kształcie sześcianu. Wielkość elementu została ustalona na 300 [mm]. Wartość ta wynika z przyjętej maksymalnej częstotliwości, dla której wyniki są analizowane i wynosiła 100 [Hz] ze względu na weryfikację wyników analiz eksperymentalnych pokazujących największe wymuszenia w obszarze częstotliwości 33 [Hz] (częstotliwość wymuszenia) oraz 66 [Hz] (druga harmoniczna sygnału wymuszenia). Dla przyjętej częstotliwości 100 [Hz] określono minimalną długość fali propagowanej w danym ośrodku (na bazie sztywności oraz gęstości ośrodka) i przyjęto 10 elementów skończonych na długość fali (3 [m] dla gruntu) w celu prawidłowego odwzorowania sinusoidalnego kształtu fali.

Wyniki zostały przedstawione w postaci przykładowego przebiegu przyspieszeń w kierunku poziomym wybranego punktu pomiarowego zarówno w dziedzinie czasu jak i w dziedzinie częstotliwości (w zakresie do 100 [Hz]) bez użycia dodatkowych filtrów sygnału (rys. 5). Dodatkowo pokazano sposób rozprzestrzeniania się fali drganiowej jak i charakter takiego zjawiska (rys. 6).



Rys. 5. Przebieg przyspieszenia dla czasu 1 [s] dla punktu pomiarowego w dziedzinie czasu oraz częstotliwości (charakterystyka widmowa do 100 [Hz])

Źródło: [1]



Rys. 6. Widok kształtu oraz charakteru fali drganiowej po czasie 0.3 [s] od momentu pierwszego wymuszenia (deformacja przeskalowana ze współczynnikiem 50000)

Źródło: [1]

Wyniki analizy w pełni potwierdziły możliwości zastosowania numerycznego modelowania zjawisk propagacji fali drganiowej jako narzędzia, które znacząco mogą pomóc przyspieszyć i zweryfikować prace projektowe związane z ograniczeniem wpływu drgań gruntu na konstrukcje inżynierskie.

3. METODY ZABEZPIECZEŃ PRZECIWDRGANIOWYCH

W rozwiązaniach technicznych zabezpieczających konstrukcje inżynierskie przed drganiami, można wyróżnić zasadniczo dwie metody:

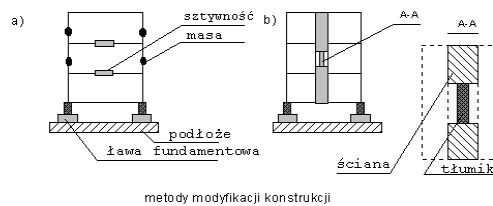
1. wibroizolacja drogi (wibroizolacja pozioma),
2. stosowanie ekranów (przegród) przeciwdrganiowych (wibroizolacja pionowa).

Rozwiązania techniczne zabezpieczające konstrukcje inżynierskie drganiami można sklasyfikować w następujący sposób:

1. kształtowanie antydrganiowe konstrukcji budynku na etapie projektowania, a w tym:
 - dobór najkorzystniejszych parametrów dynamicznych konstrukcji, takich jak: sztywność, tłumienie, masa, aby ograniczyć możliwość zaistnienia stanów rezonansowych,
 - stosowanie materiałów plastycznych,
 - prawidłowe rozwiązanie połączeń i węzłów,
2. wprowadzenie elementów wibroizolujących do konstrukcji budynku,
3. izolacja całego budynku przed oddziaływaniem drgań,
4. wibroizolacja pomiędzy fundamentem a budynkiem drogą stosowania wibroizolatorów sprężynowych, gumowych lub elastomerów poliuretanowych.

Najbardziej efektywnym sposobem zapobiegania drganiom konstrukcji budynku pochodzącym od otoczenia jest przewidzenie możliwości ich wystąpienia, już na etapie projektowym. W oparciu o znajomość warunków sejsmicznych (drgania pochodzące od wstrząsów) lub parasejsmicznych (drgania pochodzące od komunikacji drogowej i szynowej)

można tak modyfikować konstrukcję, (drogą doboru sztywności, tłumienia materiałowego, plastyczności materiałów, rozwiązań konstrukcyjnych węzłów przenoszących obciążenia dynamiczne czy wibroizolacji aktywnej lub pasywnej), że prawdopodobieństwo wystąpienia stanów rezonansowych obiektów budowlanych jest ograniczone do minimum. Oczywiście nie oznacza to, że konstrukcja w przypadku wystąpienia wstrząsów nie będzie wykazywała odchyżeń od swojego położenia równowagi. Kosztem tych modyfikacji istnieje możliwość, że obiekt będzie charakteryzował się amplitudami przemieszczeń o niskich częstościach, co dla konstrukcji z punktu widzenia nie jest niebezpieczne, gdyż jest to jej naturalny stopień swobody. Na rysunku 7 przedstawiono jedną z metod modyfikacji konstrukcji na etapie projektowania. Na rysunku 7a przedstawiono model konstrukcji budowlanej, w której przeprowadzono modyfikację sztywności i masy, a na rysunku 7b model konstrukcji w której zastosowano tłumienie.

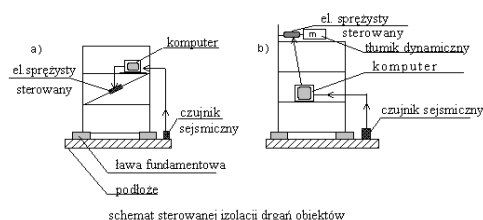


Rys. 7. Metody modyfikacji konstrukcji

Źródło: [1]

Innymi rozwiązaniami są konstrukcje inżynierskie z elastycznymi lub uplastycznionymi węzłami i przegubami. Kształtowanie się podatności konstrukcji polega na ułatwieniu tworzenia przegubów plastycznych w przypadku krótkotrwałego obciążenia dynamicznego. Nie są to klasyczne przeguby ale tzw. przeguby ograniczone umożliwiające przejście pewnych, z góry zadanych, momentów zginających. Ponadto obiekty te można i należy posadawiać na wibroizolatorach, który przyjmuje rolę filtra średnich częstotliwości. Istnieją koncepcje posadowienia obiektu budowlanego na wiotkiej dolnej kondygnacji, które są stosowane w USA, a polegają one na posadowieniu miski fundamentu na łożyskach, której możliwość przemieszczania ograniczona jest przez elementy sprężysto - tłumiące. Rozwiązania te wymagają niezwykle starannych i żmudnych prac projektowo-konstrukcyjnych z uwzględnieniem wpływu drgań gruntu i ogromnego doświadczenia, gdyż jak uczy praktyka mogą wystąpić problemy techniczne w trakcie eksploatacji tych rozwiązań.

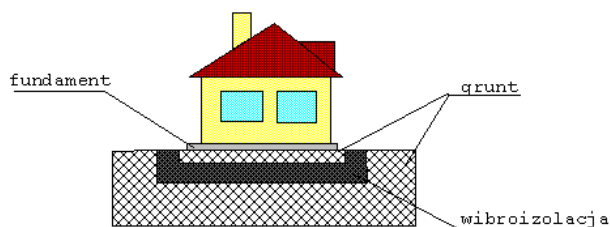
Na rysunku 8 przedstawiono schematy najnowocześniejszych rozwiązań, których zadaniem jest ochrona budynków od drgań. Rozwiązania te są stosowane na obszarach zagrożonych trzęsieniami ziemi; Japonia, USA. Działanie ich polega na sterowaniu parametrami sztywności i tłumienia sygnałem wychodzącym z czujnika drgań.



Rys.8. Konstrukcja budynku posadowiona na elementach elastycznych

Źródło: [1]

Jeżeli obiekt inżynierski już istnieje, a zmieniają się warunki sejsmiczne lub parasejsmiczne, np. powstała kopalnia, droga lub zmieniło się natężenie ruchu na istniejącej drodze, mając do dyspozycji pomiary drgań obiektu oraz rozchodzenia się drgań w gruncie można zastosować wibroizolację pomiędzy fundamentem a ścianami nośnymi [6]. Na rysunku 9 przedstawiono ideę posadowienia obiektu na wibroizolacji wykonanej z wykorzystaniem elementów sprężystych, którymi mogą być sprężyny lub elastomery wprowadzone pomiędzy ławy fundamentowe a ściany konstrukcyjne.



wibroizolacja obiektu pod ławami fundamentowymi

Rys. 9. Koncepcja wibroizolacji budynku

Źródło: [1]

Drugą metodą ograniczającą rozchodzenia się drgań pochodzących od komunikacji drogowej jest stosowanie ekranów (przegród) przeciwdrganiowych. Ekranowanie może spowodować redukcję drgań przenoszonych na izolowany obiekt, ale można spotkać się z niepowodzeniami w tym względzie. Problem ekranowania fal sprężystych za pomocą szczelin, szczeliną może być na przykład rów odwadniający, można podzielić na dwa rodzaje:

1. izolację aktywną (izolacja przy źródle drgań),
2. izolację bierną (dalej od źródła drgań, a bliżej izolowanego obiektu).

Na podstawie badań, przyjmuje się, że izolacja bierna jest skuteczna, gdy stosunek głębokości szczeliny H do długości fali λ wynosi od 1,2 do 1,5. Dla przykładu, przyjmując że prędkość rozchodzenia się fali drgającej wynosi 200 [m/s] to długość fali dla częstotliwości $f=10$ [Hz] wynosi 20 m, a głębokość szczeliny dla skutecznej izolacji winna wynosić 24-30 [m]. Widzimy więc, że również i w tym przypadku możliwość stosowania szczelin (ekranów) jest ograniczona.

Oczywiście w pewnych wybranych przypadkach należy stosować ekrany przeciwdrganiowe, lecz należy podejść do nich w trakcie ich projektowania bardzo rozważnie. W ostatnich rozwiązaniach stosuje się jako izolację aktywną pionowe elementy wibroizolacyjne zmiennej sztywności, które działają jak tłumiki dynamiczne. Zakłada się że taki element elastyczny współpracuje z określoną masą drgającego gruntu, której wielkość przyjmowana do obliczeń zależy od długości fali i jej intensywności.

PODSUMOWANIE

Analizując problemy przedstawione w artykule można stwierdzić, że ograniczenie wpływu fali drganiowej na konstrukcje inżynierskie jest zagadnieniem niezwykle skomplikowanym przede wszystkim ze względu na brak dokładnych modeli gruntu oraz nieznaną mechanizmów propagacji fali w nim. Stosowane dotychczas metody obciążone są niedoskonałościami i trudno na ich podstawie zaprojektować poprawnie układy wibroizolacji.

Wydaje się, że obecnie najlepszym podejściem jest analiza propagacji fali drganiowej w gruncie z wykorzystaniem modeli MES podłoża oraz konstrukcji inżynierskich oraz

projektowanie układów wibroizolacji źródła drgań czyli stosowanie systemów wibroizolacji torowisk kolejowych i tramwajowych [7].

BIBLIOGRAFIA

1. Adamczyk. J., Targosz J, Bednarz J. i inni, *Sprawozdanie z realizacji umowy nr ZP/PN/02090/03/2011: Wykonanie badań wpływu oddziaływań dynamicznych pochodzących od drogi kołowej na otoczenie w rejonie zabudowy mieszkaniowej*, Kraków 2012.
2. Bednarz J., *Metody prognostycznych w ocenie zagrożeń konstrukcji budowlanych drganiami gruntu wymuszonymi przez ruch tramwajów*, TTS - Technika Transportu Szynowego, nr 9, str. 2187-2195, 2012.
3. Bednarz J., Targosz. J., *Finite elements method in analysis of propagation of vibrations wave in the soil*, Journal of KONES Powertrain and Transport, issue 1, Warsaw 2011.
4. Ciesielski R. Maciąg E. *Drgania drogowe i ich wpływ na budynki*, WKŁ, Warszawa 1990.
5. Fialaa, P, Degrandeb G. Augusztinovicza F, *Numerical modelling of ground-borne noise and vibration in buildings due to surface rail traffic*, Journal of Sound and Vibration, vol. 301, 2007.
6. Sikora, J., *Warstwy gumowe w rozwiązaniach zabezpieczeń wibroakustycznych*, Wydawnictwa AGH, Kraków 2011.
7. Targosz, J., *Układy wibroizolacji w transporcie szynowym i samochodowym*, Wydawnictwa Naukowo- Dydaktyczne AGH, Kraków 2007.
8. Tataro T., *Dynamic effectiveness of „ecological tramway” on building vibration*, Faculty of Civil Engineering, Institute of Structural Mechanics, Tadeusz Kosciuszko Cracow University of Technology, Krakow.
9. W. Gardien, H.G. Stuit, *Modelling of soil vibrations from railway tunnels*, Journal of Sound and Vibration, vol. 267, str. 605–619, 2003.
10. Zhai, W. M., Wang, K. Y., Lin J.H., *Modelling and experiment of railway ballast vibrations*, Journal of Sound and Vibration, vol. 270, 2010.

METHODS OF REDUCTION OF GROUND VIBRATION IMPACT ON ENGINEERING CONSTRUCTIONS

Abstract

Reducing the impact of ground vibration on engineering structures is extremely complex, mainly because of the heterogeneity of soil which results in the lack of accurate mathematical description of the vibrational waves propagation in the ground from the source of vibration to the object. In the paper a methodology of approach to the analysis of vibration wave propagation in the soil, potential for reducing the impact of ground vibration on structures and engineering solutions of vibration isolation systems in the country and the world are presented.

Autor:

dr hab. inż. **Jan Targosz** – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Katedra Robotyki i Mechatroniki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: jantargosz@interia.pl