

BEDNARZ Jarosław

MODELOWANIE PROPAGACJI FALI DRGANIOWEJ W PODŁOŻU

Streszczenie

Modelowanie propagacji fali drganiowej jest skomplikowane ze względu na niejednorodność gruntu. W artykule przedstawiono metodologię modelowania zjawisk drganiowych w gruncie z wykorzystaniem metody elementów skończonych. W artykule przedstawiono 2 przykłady modelowania propagacji fali drganiowej w podłożu, jej wpływu na konstrukcje inżynierskie oraz bierne i aktywne metody ograniczania dynamicznych oddziaływań fali drganiowej od transportu kołowego i szynowego na otoczenie.

WSTĘP

W obecnych czasach ze względu na gęstość sieci kolejowych i tramwajowych coraz częściej budynki przemysłowe lokalizowane są w pobliżu szlaków kolejowych i tramwajowych. Takie umiejscowienie niesie ze sobą problemy związane z propagacją fali drganiowej w gruncie wywołanej przejazdami pojazdów szynowych, co może prowadzić do powstawania uszkodzeń budynków oraz niekorzystnie wpływać na niezawodność maszyn i urządzeń w nich zainstalowanych. Dlatego istnieje konieczność uwzględnienia w procesie projektowania budynków położonych blisko torowisk wpływu drgań wywołanych przejazdem pojazdu szynowego na ich konstrukcję. W artykule przedstawiono przykłady zastosowania metody elementów skończonych w analizie propagacji fali drganiowej w gruncie [2, 3, 5, 6] wywołanej przejazdami pojazdów szynowych. W artykule przedstawiono również przegląd metod ograniczenia wpływu dynamicznego od transportu na konstrukcje budowlane.

1. WYKORZYSTANIE MES W MODELOWANIU PROPAGACJI FALI DRGANIOWEJ W PODŁOŻU

Analiza numeryczna rozchodzenia się fali drganiowej w podłożu wykorzystuje metodę elementów skończonych typu explicit [9, 10]. Metoda ta jest szeroko wykorzystywana do analizy zjawisk krótkotrwałych takich jak analizy zderzeń czy wybuchów. Metoda ta 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 Rayleigha lub inny mechanizm).

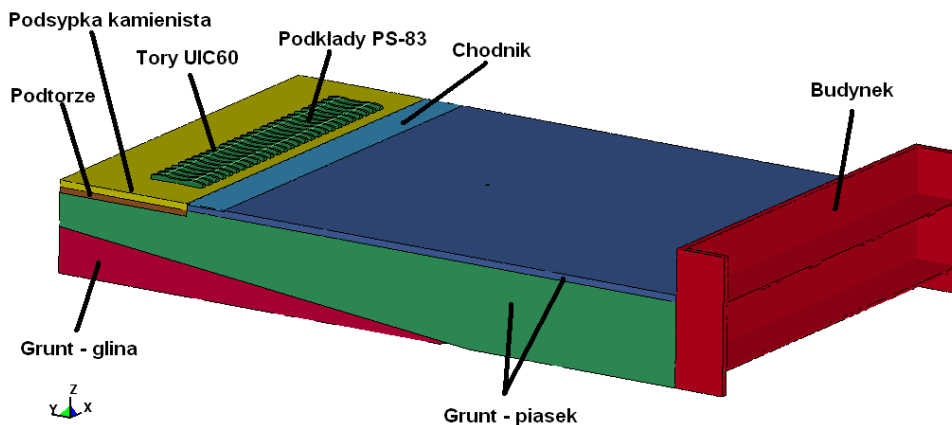
W rozdziale pokazane zostaną możliwości wykorzystania metod numerycznych do weryfikacji rozwiązań związanych z propagacją fali i jej oddziaływaniem m.in. na budynki. Prawidłowe odwzorowanie takiego zjawiska wymaga zbudowania dokładnego modelu numerycznego, który wymaga bardzo dokładnych danych materiałowych oraz dokładnego odwzorowania określonego obszaru, w którym występuje propagacja fali jak również

korelacji wyników z badaniami eksperymentalnymi. Poprawnie zbudowany model pozwala badać zachowanie się projektowanego budynku na różne wymuszenia (różna częstotliwość oraz amplituda sygnału) oraz na zbadanie wpływu materiałów wibroizolacyjnych na redukcję drgań bez potrzeby wykonywania długotrwałych oraz kosztownych badań eksperymentalnych.

W celu pokazania możliwości, jakie daje analiza propagacji fali drganiowej w podłożu z wykorzystaniem MES rozpatrzone zostały dwa przypadki:

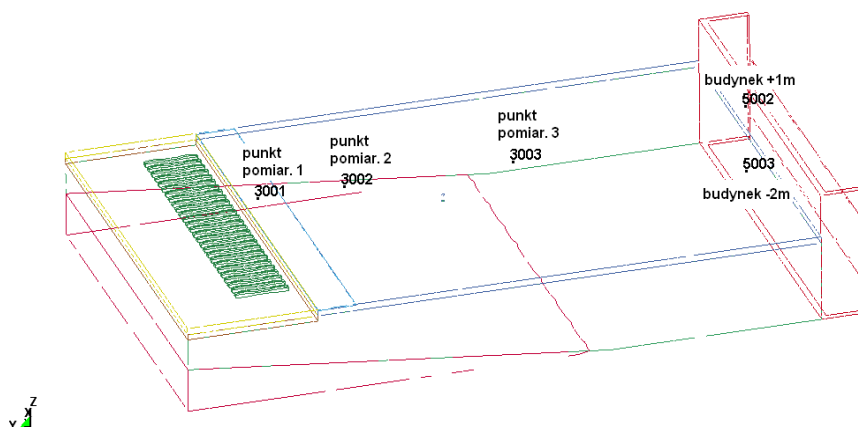
1. analiza rozchodzenia się fali drganiowej od ruchu tramwajów na nowoprojektowany budynek,
2. oszacowanie wpływu drgań od nowoprojektowanej drogi szybkiego ruchu na istniejącą już zabudowę.

W pierwszym przypadku model obliczeniowy (rys. 1) obejmował prostopadłościan o wymiarach 30x19x4 m składający się z torów UIC60, podkładów strunobetonowych typu PS-83, podsypki kamienistej o grubości 300 mm, podtorza o grubości 300 mm gruntu, chodnika o grubości 50 mm oraz fragmentu budynku [1].



Rys. 1. Budowa modelu obliczeniowego [4]

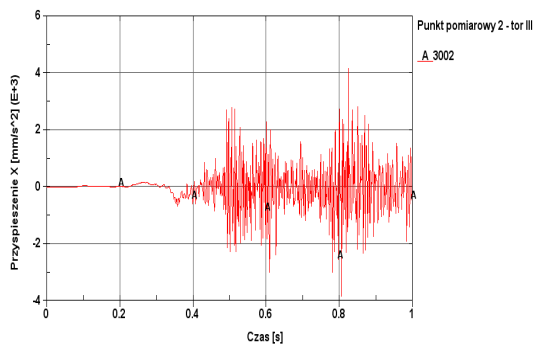
Wyniki zostały przedstawione w postaci wykresów przyspieszenia w dwóch kierunkach pomiarowych (X, Y). Punkty pomiarowe 1, 2, 3 odpowiadały punktom pomiarowym 1, 2, 3 w jednym z przekrojów pomiarowych (rys.2).



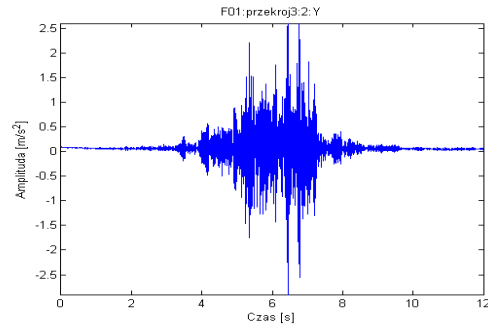
Rys. 2. Rozmieszczenie punktów pomiarowych na modelu [4]

Dla tak przygotowanego modelu przeprowadzono symulację drgań gruntu spowodowanych przejazdem pojedynczego tramwaju a porównanie wyników dla punktu pomiarowego numer 2 w kierunku osi Y przedstawiono na rysunku 3.

a)

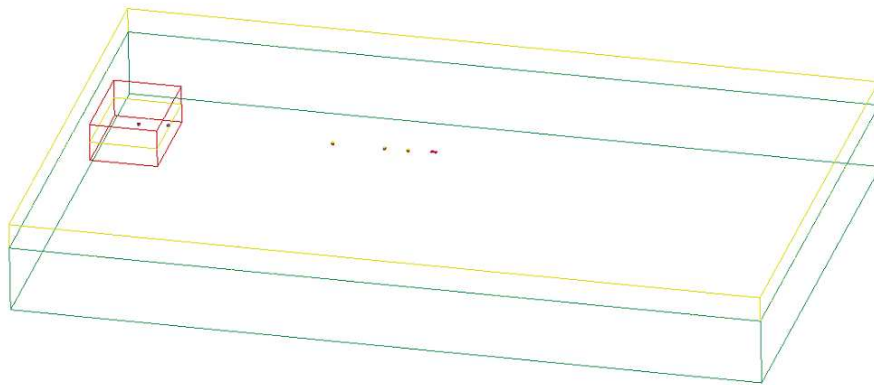


b)

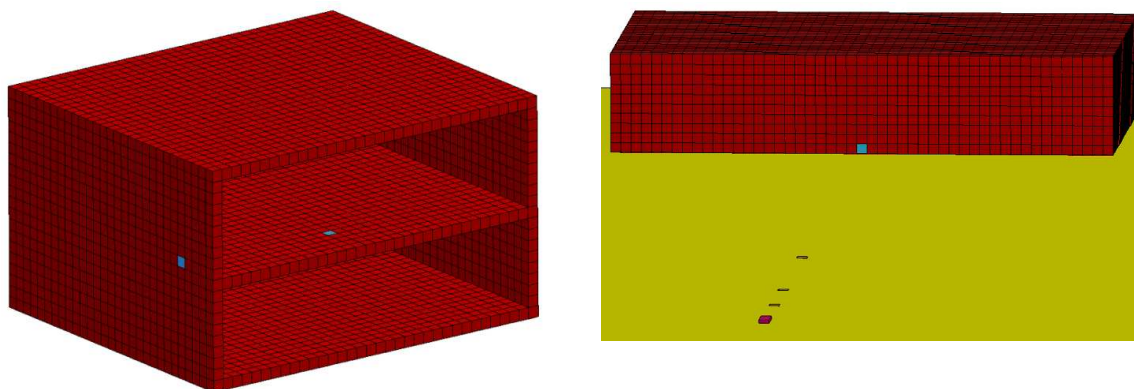


Rys. 3. Porównanie sygnału przyspieszenia na kierunku Y dla punktu pomiarowego 2 z symulacji (a) oraz pomiarów (b) [4]

Druga z analiz dotyczyła analizy wpływu drgań od ruchu walca wibracyjnego po trasie nowoplanowanej drogi na istniejące zabudowania mieszkalne. W tym celu zbudowano model numeryczny obejmował obszar o rozmiarach 114x72x14 m przybliżony do sytuacji występującej na jednym z przekrojów pomiarowych. Na model składały się dwie warstwy gruntu występujące w tej okolicy określone na podstawie pomiarów geologicznych oraz uproszczony model budynku betonowego z podpiwniczeniem. W centralnym punkcie modelu został umieszczony punkt obciążony sygnałem sinusoidalnym o częstotliwości 33 Hz i amplitudzie 15 kN symulując wymuszenie pochodzące od walca wibracyjnego. W odległości 3 m, 5 m, 7 m i 15 m i w dwóch punktach na budynku - na fundamencie oraz w jednym z pomieszczeń - były odczytywane dane pomiarowe w postaci przyspieszeń w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach zgodnych z przyjętym układem współrzędnych (rys. 4). Na rysunku 5 pokazane są szczegóły modelu numerycznego z widocznymi punktami pomiarowymi.



Rys. 4. Widok modelu numerycznego o wymiarach 114x72x14 m z zaznaczonymi punktami pomiarowymi oraz punktem wymuszenia [3]



Rys. 5. Szczegóły modelu numerycznego pokazujące przybliżenie na uwzględnionych budynek wraz z punktami pomiarowymi (niebieskie elementy) [3]

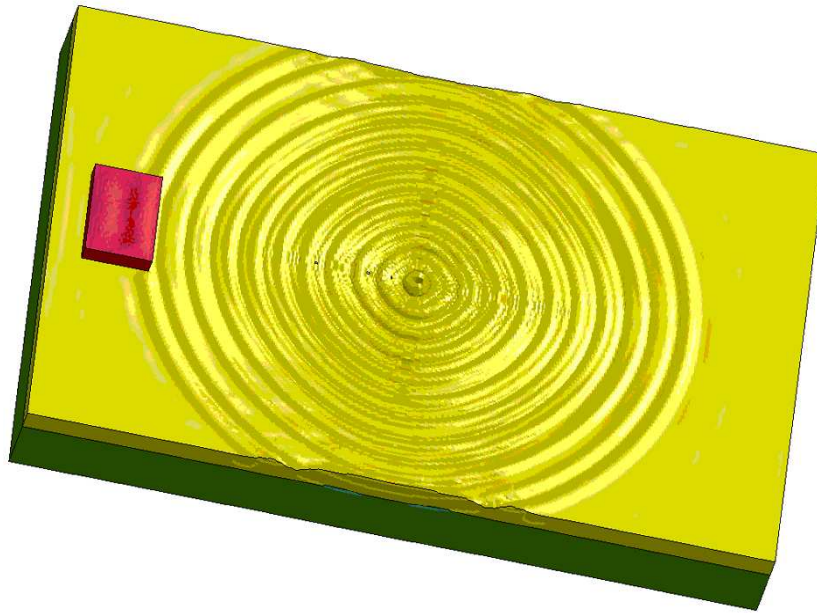
Ze względu na ograniczoną wielkość modelu bardzo istotne jest wykorzystanie jednego z wbudowanych mechanizmów w użytym oprogramowaniu pozwalające na zapobieganie odbijaniu się fali od skrajnych powierzchni ograniczających model numeryczny [12].

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 [8], 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 beton (budynek) 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 sześciangu. 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.

Analiza numeryczna została przeprowadzona na komputerze klasy PC z wykorzystaniem 8 procesorów klasy Intel Xeon i trwała około 24 h dla zdarzenia o czasie trwania 1 s. Analiza dłuższego czasu trwania wymaga proporcjonalnie większego czasu niemniej dla potrzeb pokazania możliwości analiz numerycznych taki czas był wystarczający i obejmował moment dotarcia fali drganiowej do budynku. Przyjęty krok czasowy to $1.25e-5$ s co odpowiada częstotliwości próbkowania 80 kHz i jest ustalona prze program na podstawie największej prędkości rozchodzenia się fali w dowolnym ośrodku użytym w modelu oraz na podstawie wymiarów najmniejszego elementu skończonego użytego w modelu. Takie podejście wynika z matematycznego ujęcia rozwiązywania równań algebraicznych i zapewnia odpowiednią stabilność rozwiązania. Na rysunku 6 przedstawiony został sposób rozprzestrzeniania się fali drganiowej jak i charakter takiego zjawiska.



Rys. 6. Widok kształtu oraz charakteru fali drganiowej po czasie 0.3 s od momentu pierwszego wymuszenia (deformacja przeskalowana ze współczynnikiem 50000) [3]

Wyniki analizy w pełni potwierdziły możliwości zastosowania numerycznego modelowania zjawisk propagacji fali drganiowej jako narzędzia, które znacząco pomaga przyspieszyć i zweryfikować prace projektowe związane z tego typu zjawiskami (wibroizolacja).

2. METODY OGRANICZENIA DRGAŃ

Rozwiązania techniczne zabezpieczające budynki przed drganiami, które odnoszą się bezpośrednio do torowisk i jego okolic można wyróżnić zasadniczo na trzy sposoby [7]:

1. wibroizolacja drgań drogi
2. korzystanie z ekranów antywibracyjnych,
3. konstruowanie budynków z wbudowanymi zabezpieczeniami antywibracyjnymi.

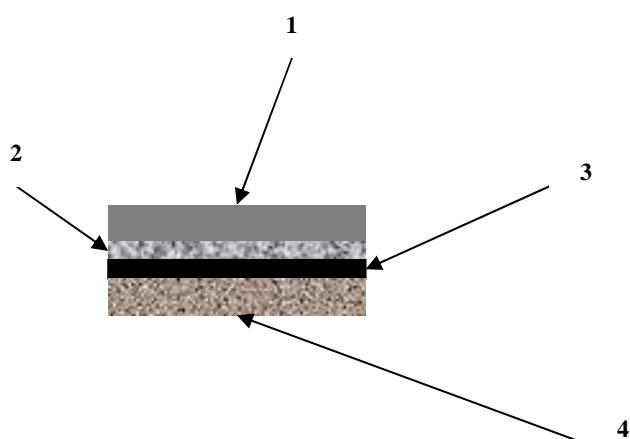
Jak wykazują ponad 30- letnie doświadczenia, jedną z najbardziej skutecznych metod ograniczających drgania jest stosowanie układów wibroizolujących [11]. Skuteczność wibroizolacji, której miarą jest stosunek amplitud drgań (przemieszczeń, prędkości, przyspieszeń) przed wibroizolacją i po zastosowaniu wibroizolacji może osiągnąć wartość ponad 80%. Stosowanie wibroizolacji w przypadku dróg dla komunikacji samochodowej jest w pełni uzasadnione.

Wibroizolacja drogi pozwala na znaczne ograniczenie oddziaływań dynamicznych pochodzących od ruchu samochodowego na podłoże, a poprzez to na zwiększenie jego żywotności oraz znacznie mniejsze osiadanie drogi w gruncie jednocześnie zapewniając ciągłość przejazdu transportu samochodowego.

W badaniach teoretycznych dotyczących minimalizacji drgań należy rozróżnić izolację otoczenia od oddziaływań dynamicznych przy niskich częstotliwościach ($f < 50$ Hz) oraz izolację elementów konstrukcyjnych ze względu na wysokie częstotliwości drgań materiałowych tzw. dźwiękoizolację.

Wibroizolację dzielimy na siłową i przemieszczeniową. Pierwsza z nich dotyczy ograniczenia oddziaływań dynamicznych na podłoże, druga ma na celu ograniczenie drgań przenoszonych od podłoża do obiektu. W przypadku maszyn i urządzeń transportowych, dotyczy to głównie podtorzy pojazdów szynowych mamy w zasadzie do czynienia

z wibroizolacją siłową. Na rysunku 7 przedstawiono ideę wibroizolacji dróg komunikacji samochodowej.



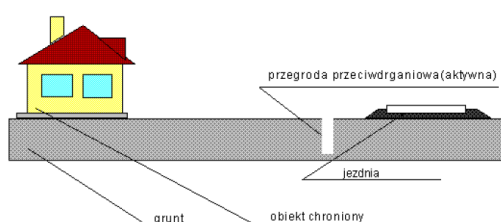
1. Masa inercyjna będąca jednocześnie jezdnią
2. Płyty gumowe perforowane stanowiące układ wibroizolacji.
3. Płyta betonowa denna lub podbudowa wyrównawcza z asfaltobetonu.
4. Utwardzone podłoże jezdni.

Rys. 7. Schemat drogi wibroizolowanej [1]

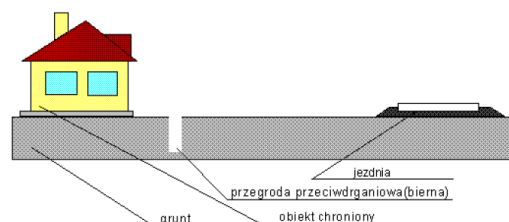
Drugą metodą ograniczającą rozchodzenia się drgań pochodzących od komunikacji drogowej jest stosowanie ekranów (przegród) przeciwdrganiowych. Ekranowanie może spowodować redukcję drgań przenoszonych na izolowany obiekt, ale można spotkać się z niepowodzeniami w tym względzie. Problem ekranowania fal 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).

Aktywna izolacja drgań jest przeszkodą przy źródle dla ograniczenia emitowanej energii od źródła na zewnątrz (rys. 8). Bierną izolację (rys. 9). stanowi przeграда odsunięta od źródła drgań i umieszczona bliżej miejsca, w którym amplitudy drgań mają być zredukowane. Skuteczność izolacji aktywnej jest najlepsza, gdy szczelina otacza źródło drgań. Można stosować szczeliny będące wycinkiem łuku okręgu, lecz kąt środkowy nie może być mniejszy niż 90° . Takie rozwiązanie jest praktycznie niemożliwe w przypadku drgań pochodzących transportu drogowego, gdyż źródła są ruchome, i nie są one punktowe. Stąd też do praktycznych zastosowań pozostaje izolacja bierna.



Rys. 8. Aktywna izolacja drgań [1]



Rys. 9. Bierna izolacja drgań [1]

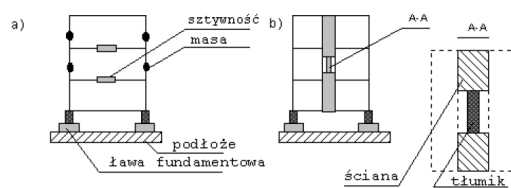
Na podstawie badań, przyjmuje się, że izolacja bierna jest skuteczna, gdy stosunek głębokości szczeliny H do długości fali λ wynosi $1,2 \div 1,5$. Dla przykładu, przyjmując że prędkość rozchodzenia się fali drgającej wynosi 200 m/s to długość fali dla częstotliwości $f=10 \text{ Hz}$ wynosi $\lambda=20 \text{ m}$, wówczas głębokość szczeliny dla skutecznej izolacji winna wynosić $24 \div 30 \text{ m}$. 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 w trakcie ich projektowania zastosować podejście inżynierskie oparte zarówno na wiedzy jak i doświadczeniu.

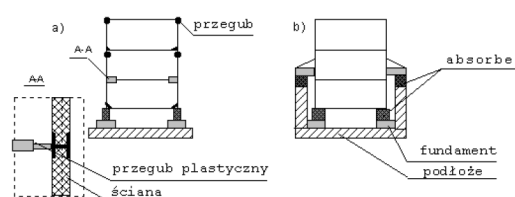
Oprócz stosowania ekranów przeciwdrganiowych stosowane są również różnego rodzaju rozwiązania techniczne zabezpieczające konstrukcje budynków przed drganiami. Rozwiązania te można sklasyfikować w następujący sposób:

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

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 odchylenia 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 rysunkach 10 i 11 przedstawiono wybrane metody modyfikacji konstrukcji na etapie projektowania. Na rysunku 10a przedstawiono model konstrukcji budowlanej, w której przeprowadzono modyfikację jego sztywności i masy, a na rysunku 10b model konstrukcji w której zastosowano tłumik.



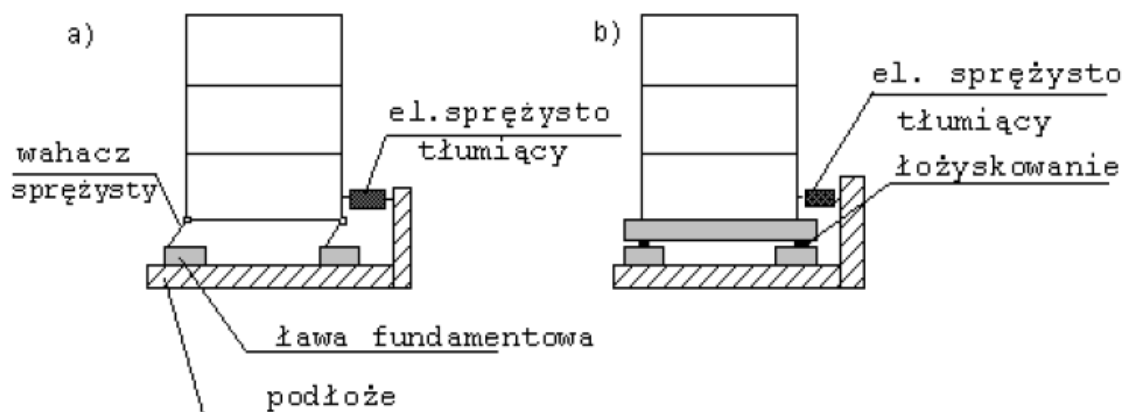
Rys. 10. Metody modyfikacji konstrukcji budynków [1]



Rys. 11. Konstrukcje z elastycznymi przegubami [1]

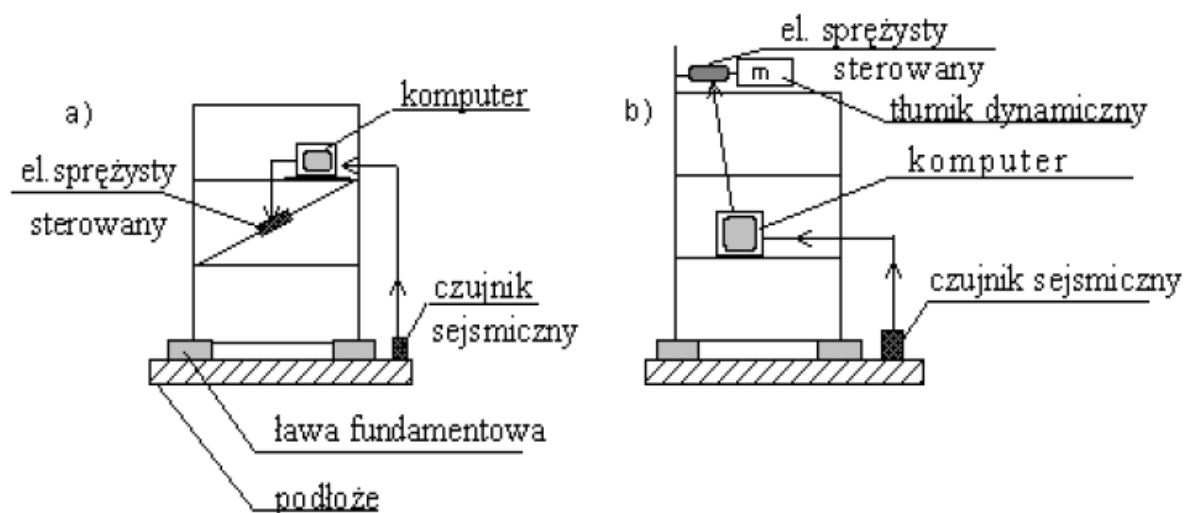
Na rysunku 11a przedstawiono konstrukcję ramową w której zastosowano przeguby oraz uplastycznienie węzłów. Kształtowanie się podatności konstrukcji polega na ułatwieniu tworzenia przegubów plastycznych w przypadku krótkotrwałego obciążenia dynamicznego. Nie są to klasyczne przeguby ale tzw. przeguby ograniczone umożliwiające przejście pewnych, z góry zadanych, momentów zginających. Na rysunku 11b przedstawiono schemat posadowienia obiektu budowlanego na czterech absorberach, który przyjmuje rolę filtra średnich częstotliwości.

Na rysunku 12 przedstawiono koncepcje posadowienia obiektu budowlanego na wiotkiej dolnej kondygnacji, które są stosowane w USA, a polegają one na posadowieniu misy fundamentu na łożyskach, której możliwość przemieszczania ograniczona jest przez elementy sprężysto-tłumiące. Rozwiązania te wymagają niezwykle starannych i żmudnych prac projektowo-konstrukcyjnych i ogromnego doświadczenia, gdyż jak uczy praktyka mogą wystąpić problemy techniczne w trakcie eksploatacji tych rozwiązań.



Rys. 12. Konstrukcja budynku posadowiona na elementach elastycznych [1]

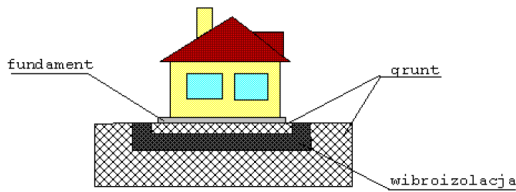
Na rysunku 13 przedstawiono schematy najnowocześniejszych rozwiązań, których zadaniem jest ochrona budynków od drgań. Rozwiązania te są stosowane na obszarach zagrożonych trzęsieniami ziemi; Japonia, USA. Działanie ich polega na sterowaniu parametrami sztywności i tłumienia sygnałem wychodzącym z czujnika drgań.



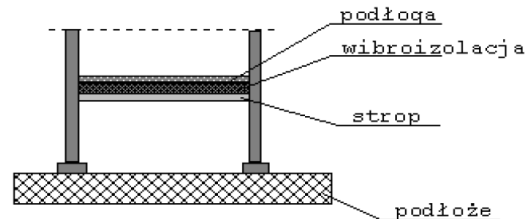
Rys. 13. Schemat sterowanej izolacji drgań obiektów [1]

Jeżeli obiekt budowlany 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. Na rysunku 14 przedstawiono ideę posadowienia obiektu na wibroizolacji wykonanej z wykorzystaniem elementów sprężystych, którymi mogą być sprężyny lub elastomery wprowadzone pomiędzy

ławy fundamentowe a ściany konstrukcyjne. Rozwiązaniem pozwalającym ograniczyć wpływ drgań od pojazdów samochodowych na ludzi przebywających w budynkach oraz urządzenia i maszyny w zakładach produkcyjnych jest również tzw. pływająca podłoga, której idea przedstawiona jest na rysunku 15.



Rys. 14. Koncepcja wibroizolacji budynku [1]



Rys. 15. Pływająca podłoga [1]

WNIOSKI

Zaprezentowana w artykule metodologia szacowania wpływu oddziaływań dynamicznych od środków transportu pokazuje, że jej stosowanie znacznie skraca czas projektowania zabezpieczeń wibroakustycznych nowopowstających konstrukcji budowlanych. Na podstawie przeprowadzonych rozważań można stwierdzić, że metoda elementów skończonych może być z powodzeniem stosowana w badaniu propagacji fali drganiowej w gruncie. Porównując zarejestrowany przebieg amplitudy przyspieszenia drgań gruntu z przebiegiem otrzymanym na podstawie symulacji można stwierdzić o prawidłowości przyjętego modelu do badania rozprzestrzeniania się drgań w gruncie. Wartości amplitud przyspieszeń drgań są do siebie zbliżone. Podobnie jest w przypadku amplitud drgań w innych punktach pomiarowych, innych przekrojach oraz innych kierunkach drgań (oś X, Y). Niewielkie różnice wynikają z niejednorodności parametrów gruntu, który jest zmienny i zmiana tych parametrów wpływa wyraźnie na wyniki badań pomiarowych.

Dzięki zastosowaniu proponowanej metodologii badań znacznemu skróceniu ulega czas potrzebny na wykonanie badań eksperymentalnych - wystarczy dokonać pomiarów amplitudy przyspieszenia drgań tylko w kilku punktach w miejscu planowanej inwestycji. Niemniej jednak w celu ochrony planowanego budynku oraz urządzeń w nim rozmieszczonych przed drganiami należy zastosować rozwiązania przedstawione w rozdziale 2 niniejszego artykułu. Ponieważ wieloletnie doświadczenia wykazały, że przegrody pionowe tzw. ekrany przeciwdrganiowe nie zawsze się sprawdzają zastosowanie przegród poziomych tzn. wibroizolacji torowisk jest najlepszym rozwiązaniem. Prawidłowy dobór wibroizolacji musi wykonać doświadczony zespół na podstawie obliczeń i dostępnych materiałów o prawidłowych parametrach fizyko-mechanicznych takich jak sztywność, tłumienie, trwałość mrozoodporność oraz szereg innych, które mają wpływ na skuteczność działania opracowanego rozwiązania.

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, Targosz J., *Finite elements method in analysis of propagation of vibrations wave in the soil*, Journal of KONES Powertrain and Transport, vol. 18 no. 3 str. 19–25, 2011.

3. Bednarz J., Brożek G., Targosz J., *Application of finite elements method in the design of road located in the densely built-up residential area*, Journal of KONES Powertrain and Transport, vol. 19, no. 4, str. 31-31, 2012.
4. Bednarz J., Brożek J., Targosz J., *Metoda elementów skończonych w analizie drgań gruntu*, Logistyka, nr 6, str. 195-203, 2010.
5. Bednarz J., Targosz J., *Eksperymentalna analiza rozchodzenia się drgań w gruncie wywołanych przejazdem pojazdów szynowych*, Logistyka, nr 6, str. 153-160, 2011.
6. Bednarz J., *Zastosowanie metody elementów skończonych w analizie drgań gruntu*, TTS - Technika Transportu Szynowego, nr 9, str. 2215-2222, 2012.
7. Ciesielski R., Maciąg E., *Drgania drogowe i ich wpływ na budynki*, WKŁ, Warszawa 1990.
8. Drucker, D. C., Prager, W., *Soil mechanics and plastic analysis for limit design*, Quarterly of Applied Mathematics, vol. 10, no. 2, str. 157–165, 1952.
9. Gerolymos N., Gazetas G., *Static and dynamic response of massive caisson foundations with soil and interface nonlinearities - validation and results*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 26, str. 377-394, 2006.
10. Hassen G, de Buhan P, Abdelkrim M., *Finite element implementation of a homogenized constitutive law for stone column-reinforced foundation soils, with application to the design of structures*, Computers and Geotechnics, vol. 37, str. 40-49, 2010.
11. Lipiński J., *Fundamenty pod maszyny*, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1985.
12. Mulliken J.S., Karabalis D.L. *Discrete models for through-soil coupling of foundations and structures*, Earthquake Engineering Structural Dynamics, vol. 27, str. 687–710, 1998.

MODELING OF VIBRATIONAL WAVE PROPAGATION IN THE GROUND

Abstract

Modelling of vibration wave propagation is complicated by the heterogeneity of the soil. A methodology for modelling of ground vibration using finite element method is presented in the paper. Two examples of vibration wave propagation modelling in the ground, its impact on engineering structures and passive and active methods for reducing dynamic wave vibration impacts from rail and road transport on the environment are also presented in the article.

Autor:

dr inż. **Jarosław Bednarz** – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Katedra Robotyki i Mechatroniki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: bednarz@agh.edu.pl