



Jarosław BEDNARZ

DRGANIA GRUNTU WYWOŁANE PRZEJAZDAMI POJAZDÓW SZYNOWYCH

Streszczenie

W pracy przedstawiono problemy związane z propagacją drgań gruntu wywołanych przejazdami pojazdów szynowych. W artykule przedstawiono stan wiedzy w dziedzinie badań propagacji fali drganiowej oraz na przykładzie konkretnego zadania praktycznego możliwości rozwiązania zagadnienia drgań przekazywanych na nowoprojektowany budynek.. W pracy rozważono propagację fali drganiowej na fundament budynku mieszkalnego w oparciu o symulację propagacji fali drganiowej metodą elementów skończonych. Praca była prowadzona w ramach projektu badawczego 4875/B/TO2/2010/38 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

WSTĘP

Ogromny postęp cywilizacji w XX i XXI wieku, związany ściśle z rozwojem techniki i przemysłu, był i jest przyczyną powstania wielu znakomitych rozwiązań technicznych, ale również nasilenia zjawisk stanowiących zagrożenie dla naturalnych elementów środowiska człowieka. Znaczący udział w zagrożeniu ma stale wzrastający się ruch pojazdów szynowych stanowiący jeden z ważniejszych warunków rozwoju gospodarczego państw oraz towarzyszący mu rozwój sieci dróg komunikacji szynowej. W krajach Europy Zachodniej, Japonii, USA i innych, charakteryzujących się dynamicznym rozwojem transportu szynowego oraz Kolei Dużych Prędkości (KDP) obserwuje się zjawiska podnoszenia protestów przez szereg organizacji społecznych odnośnie zagrożeń związanych z rozwojem transportu kolejowego o znaczącej ilości głosów poparcia, które coraz częściej są uwzględniane w procesie planowania nowych linii kolejowych.

Drogi transportu szynowego w sposób jednoznaczny dzielą teren przez który przebiegają zajmując stosunkowo znaczne powierzchnie gruntów oraz wywierając niekorzystny wpływ na środowisko, głównie wywołując drgania różnego typu konstrukcji inżynierskich nawet znacznie oddalonych od trasy linii kolejowej. Drgania te mają istotny wpływ na konstrukcję budynków powodując ich uszkodzenia, których konsekwencją są częstsze remonty, a w drastycznych przypadkach, w wyniku zaniedbania ze strony służb publicznych, mogą doprowadzić nawet do katastrofy budowlanej [4]. Należy również wspomnieć, że drgania są źródłem emisji hałasu wpływającego szkodliwie na środowisko wywołując niekorzystne odczucia z punktu widzenia komfortu psychicznego. Ponieważ szeroko rozumianemu transportowi nieodłącznie towarzyszy niekorzystne oddziaływanie dynamiczne do środowiska wywołujące drgania różnego typu konstrukcji inżynierskich dążenie do minimalizacji ich szkodliwego działania jest koniecznością i w konsekwencji musi prowadzić do powstania nowych rozwiązań elementów konstrukcyjnych biorących udział w transporcie kolejowym

ograniczających emisję sygnałów wibroakustycznych. W celu minimalizacji niekorzystnego wpływu oddziaływań dynamicznych konieczne jest stosowanie złożonych układów wibroizolacji stanowiących przeszkodę w rozprzestrzenianiu się fali drganiowej do otoczenia oraz konstruowanie obiektów inżynierskich niewrażliwych na tego typu fale. W kolejnych latach istniejący już w Polsce problem wpływu dróg szynowych na środowisko naturalne w miarę budowy nowych tras transportu szynowego (trasy kolejowe, tramwajowe oraz metro) i modernizacji już istniejących pod kątem ich dostosowania do KDP będzie się pogłębiał.

Ponieważ istnieje możliwość przekształcenia kolei w Polsce w środek transportu konkurujący zarówno z transportem samochodowym jak i lotniczym, zarówno pod względem komfortu jak i ochrony środowiska, niezbędne są nie tylko prace innowacyjne nad taborem ale również nad konstrukcjami podtorzy dla tych pojazdów. Budowa podtorzy linii KDP pozwoli na wykorzystanie i wprowadzenie najnowszych technologii do polskiego kolejnictwa i wyznaczy standardy dla modernizacji istniejącej już sieci tras kolejowych. W świetle powyższego problem ograniczenia oddziaływań dynamicznych do otoczenia od transportu szynowego stanowi jeden z najpoważniejszych problemów współczesnej nauki i stanowi podstawowy problem występujący przy projektowaniu dróg transportu szynowego. Zagadnienie to winno być rozwiązywane kompleksowo tzn. powinna być przeprowadzona analiza dynamiczna modelu zawierającego w sobie zarówno dynamikę pojazdów (pojazd szynowy, pojazd samochodowy) jak i dynamikę propagacji fali drganiowej w podłożu z uwzględnieniem elementów jakim są układy ograniczające ich wpływ na konstrukcje inżynierskie np. wibroizolacja pozioma lub pionowa. Do chwili obecnej zagadnienia te są rozwiązywane oddzielnie, niezależnie rozpatruje się dynamikę pojazdu na torze, dynamikę podtorza lub drogi oraz niezależnie rozpatruje się propagację fali drganiowej wywołanej transportem szynowym lub drogowym. Zupełnie niezależnie analizuje się lub projektuje układy ograniczające wpływ drgań (układy aktywnej i biernej wibroizolacji) wywołanych propagacją falą drganiowej na obiekty inżynierskie. W obecnej chwili większość budynków mieszkalnych projektuje się w dalszym ciągu metodami w których nie uwzględnia się oddziaływań dynamicznych od dróg transportu przebiegających blisko ich posadowienia. Taki stan rzeczy wymusza opracowanie przez środowiska naukowe nowych i skutecznych metod oceniających wpływ fali drganiowej na istniejące i nowoprojektowane konstrukcje inżynierskie pozwalające jednocześnie na opracowanie zupełnie nowych konstrukcji podtorzy pojazdów szynowych, układów izolacyjnych zabezpieczających te obiekty jak również nowego podejścia do projektowania obiektów budowlanych zarówno obiektów infrastruktury inżynierskiej (wiadukty, mosty, tunele, itp.) jak i obiektów mieszkalnych. Projekty tych konstrukcji muszą być poprzedzone pracami zarówno teoretycznymi jak i badawczymi, zarówno z wykorzystaniem metod analitycznych jak i technik symulacji komputerowej, zezwalających na ocenę własności dynamicznych podtorza szynowego i oddziaływań dynamicznych na środowisko oraz konstrukcje inżynierskie [5, 6]. Jednym z najważniejszych elementów tego systemu projektowania konstrukcji budowlanych jest opracowanie metodologii badania propagacji fali drganiowej od podtorza pojazdu szynowego do obiektu chronionego, gdyż w oparciu o tą wiedzę możliwe będzie ograniczenia do minimum wpływu fali drganiowej na obiekt z wykorzystaniem najefektywniejszych rozwiązań zarówno ze względów technicznych jak i ekonomicznych.

1. PODSTAWY TEORETYCZNE ROZPRZESTRZENIANIA SIĘ DRGAŃ W GRUNCIE

Problem rozprzestrzeniania się fali drganiowej wymuszonej przez ruch pojazdów szynowy w gruncie jest z punktu widzenia teoretycznego niezmiernie skomplikowany. Przyczyną tego stanu jest niejednorodność gruntu, nieznaną jego historia oraz zmienność warunków hydrologicznych i atmosferycznych. 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) znacznym oddaleniu od źródła fali. Drugą istotną cechą gruntu jest mechanizm jego odkształcania się. Mechanizm odkształcania związany jest z tym, że czas trwania oddziaływań dynamicznych powodowanych przez obiekty inżynierskie, wywołujących falę drganiową, jest znacznie krótszy od możliwego czasu powstawania w gruntach odkształceń trwałych. Skutkiem tej właściwości gruntu jest to, że istotny wpływ na falę drganiową rozchodzącą się w gruncie będą miały cechy sprężysto-tłumiące gruntu 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 lub częściowo mieszkanką powietrza z 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 o jednakowych rozmiarach może 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 ścisłość, tarcie między cząsteczkami gruntu, moduł sprężystości oraz 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. Proces modelowania gruntu wymaga stworzenia baz danych zarówno parametrów materiałowych i drganiowych różnego rodzaju gruntów, jak również baz obiektów inżynierskich, które wymuszają jego drgania i obiektów na które fale drganiowe mają wpływ z punktu widzenia ich bezpieczeństwa.

W przypadku analiz teoretycznych mechanizm propagacji fali drganiowej w gruncie opisywany jest przez fale powierzchniowe Rayleigha lub, gdy warstwa sprężysta spoczywa na ośrodku sztywniejszym, poprzez fale Love'a. Ponieważ dokładne rozwiązanie analitycznie równań różniczkowych związanych z propagacją fali drganiowej w gruncie jest bardzo czasochłonne w praktyce wykorzystuje się przybliżone metody prognozowania rozprzestrzeniania się fali drganiowej w gruncie. Niestety wyniki otrzymywane z ich wykorzystaniem są mało zadawalające i zdecydowanie różnią się z rzeczywistością. Istnieje więc konieczność opracowania nowych metod analizy propagacji fali drganiowej w gruncie w oparciu o dostępne obecnie narzędzia pomiarowe oraz symulacje komputerowe [1, 2, 3, 7, 8, 9]. Opracowane modele powinny być poddane weryfikacji eksperymentalnej, a następnie powinien zostać opracowany algorytm badania rozchodzenia się fali drganiowej od konstrukcji podtorza oraz metoda oszacowania skutków jej działania. Dodatkowo, już na etapie wstępnego projektowania, powinna istnieć możliwość wyboru metody ochrony aktywnej lub pasywnej istniejących i nowoprojektowanych konstrukcji inżynierskich oraz oceny skuteczności działania wybranego rozwiązania.

W procesie budowania takich modeli należy uwzględnić następujące zjawiska związane z ruchem pojazdów szynowych:

1. powstawanie sił o charakterze dynamicznym na styku koło-szyna,
2. generowanie drgań konstrukcji podtorza przez siły dynamiczne przenoszone z pudła pojazdu, które na zasadzie sprzężenia zwrotnego wpływają na drgania pojazdu oraz przekazywanie tych drgań do gruntu pod i w otoczenie podtorza,
3. rozchodzenie się drgań w podłożu gruntowym,
4. przenoszenie się drgań z gruntu na obiekty zlokalizowane w otoczeniu podtorza, które pozostają w zasięgu propagowanych drgań,

5. dynamiczne odpowiedzi obiektów na przekazywane drgania.

Powyższe zjawiska związane z ruchem pojazdów szynowych powinno się rozważać pod kątem szkodliwego wpływu drąn na ludzi, budynki oraz zainstalowane w tych budynkach urządzenia. Na rysunku 1 przedstawiono schematycznie współzależności pomiędzy tymi zjawiskami.



Rys. 1. Schemat współzależności zjawisk w wyniku powstałych drgań

W trakcie przejazdu pojazdu transportu kolejowego generowane są drgania w podtorzu, jego otoczeniu i sąsiadujących obiektach budowlanych. Czynnikiem wzbudzającymi drgania są:

1. zmiana sił kontaktowych między kołami pojazdu i szyną powodujące powstawanie w podtorzu oscylacyjnej fali naprężeniowej, która jest przenoszona przez grunt do sąsiadujących z podtorzem obiektów budowlanych,
2. uderzenia spowodowane zerwaniem kontaktu kół z szyną na skutek nierówności szyny,
3. ciśnieniowa fala powietrzna powstająca w wyniku przejazdu pojazdu,
4. infradźwięki.

Fale spowodowane zmianą ciśnienia przekazywane przez powietrze mogą spowodować ruch wiotkich elementów budynków np. okien i drzwi, jednak z reguły nie wywołują uszkodzeń strukturalnych budynków i w dalszych rozważaniach będą pominięte. Zmiany sił kontaktowych między kołami i powierzchnią drogi spowodowane są następującymi przyczynami:

1. przekazywaniem niezrównoważonych sił generowanych wewnątrz pojazdu np. z silnika i niewyważonych kół,
2. reakcją pojazdu wynikającą z przejazdu kół po szynie.

Fale powierzchniowe propagowane z podtorza na sąsiednie obszary i docierające do obiektów budowlanych, zawierają składowe poziome drgań. W części prac uważa się, że składowe poziome drgań są bardziej szkodliwe dla budynków. Takie podejście do zagadnienia wynika z założenia, że wzbudzenie fundamentów konstrukcji pochodzi od sił bezwładności gruntu zgodnych z kierunkiem rozchodzenia się fali. Nie uwzględnia się w tym podejściu możliwości wzbudzenia drgań konstrukcji budynku momentem pochodzącym od pionowych sił bezwładności gruntu, który w konsekwencji wzbudza te same postacie drgań konstrukcji jak siły poziome. Stąd też wydaje się, że należy na równi traktować zarówno składowe drgań poziomych jak i pionowych.

Przyjmuje się, że pojazd obciąża nawierzchnię toru siłami punktowymi, ruchomymi, o stałej lub prawie stałej wartości. To założenia wynikają z wieloletnich badań doświadczalnych, które wykazały, że na torze o prawidłowej równości, siły oddziaływania na podtorze zmieniają się w zakresie do 15 % obciążenia kół. Wynika stąd, że najbardziej istotne są siły kontaktu, wynikające z jazdy po nierównościach. Siły te są zmienne i wymuszają drgania o najwyższym poziomie. Takie obciążenie wywołuje drgania, niekiedy kilkakrotnie przewyższające drgania powstające podczas jazdy po równej powierzchni.

Pojazdy wywołują też sprężyste osiadanie gruntu pochodzące od masy pojazdów, które powstaje pod i dookoła całego pojazdu niezależnie od tego czy pojazd stoi czy porusza się. W czasie ruchu pojazdu szynowego ugięcia podtorza i podłoża przemieszczają się. Ruch gruntu jest wówczas odmienny od wcześniej omawianego, mającego charakter oscylacyjny. Sprężyste ugięcia, w czasie ruchu pojazdu mają charakter nieharmoniczny, z dominującą niską częstotliwością będącą ułamkiem herca. Podczas jazdy pustego pojazdu, mogą być wzbudzone drgania o niskiej częstotliwości 3÷4 Hz, będące wynikiem drgań nadwozia na jego zawieszeniu sprężystym.

1.1. Sposoby przenoszenia drgań w otoczenie podtorza

Zmienne obciążenia dynamiczne podtorza wywołane ruchem pojazdów szynowych generują fale naprężeń, które przenoszą się do podłoża jej sąsiedztwa, co schematycznie przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat rozchodzenia się drgań

Najbardziej właściwą formą ustalania rozchodzenia się drgań w gruncie, do chwili obecnej, są badania doświadczalne. Na podstawie badań można przyjąć, że grunt ma pewną naturalną częstotliwość drgań i w przypadku obciążeń impulsowych mogą się rozprzestrzeniać drgania o tej częstotliwości. Częstotliwości odpowiadające maksymalnym amplitudom zależą od cech gruntu oraz od masy i właściwości mechanicznych układu wywołującego drgania, od rozkładu obciążeń oraz od wzajemnych oddziaływań układu: pojazd – jezdnia - podłoże. Uwarstwienia konstrukcji drogi oraz niejednorodności gruntu występującego pod podtorzem i w jego sąsiedztwie powodują, że fale powstające na styku koła z szyną mają złożony charakter. Na styku warstw podtorza i gruntu następują odbicia, załamania i nakładanie się fal, tak że w bliskim sąsiedztwie drogi brak jest możliwości rozróżnienia typu fal. Składowe poszczególnych fal rozchodzą się z różnymi prędkościami, ich składowe obrazują złożony przebieg zjawiska, dlatego przyjęto je nazywać falami powierzchniowymi w odróżnieniu od fal Rayleigh'a a sposób rozchodzenia się ich jest dokładnie opisany w literaturze. Fale powierzchniowe charakteryzują się tym, że mają

mniejszą prędkość od fal sejsmicznych podłużnych i poprzecznych, posiadają większą amplitudę ale jednocześnie są znacznie szybciej tłumione. Rejestrując przebieg drgań np. po wybuchu lub trzęsieniu ziemi można zidentyfikować poszczególne rodzaje fal. W pierwszej kolejności rejestrowane są małe drgania od fal podłużnych, następnie małe drgania od fal poprzecznych a dopiero w dalszej kolejności fale powierzchniowe o dużych amplitudach.

Z różnicy czasu dojścia poszczególnych fal oraz prędkości ich rozchodzenia się można określić źródła drgań. Prędkości rozchodzenia się poszczególnego rodzaju fal określa się wg poniższych zależności:

1. fale podłużne:

$$v_l = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}} \quad (1)$$

2. -fale poprzeczne:

$$v_t = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)\rho}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2)$$

3. -fale powierzchniowe:

$$v_s = 0.96v_t = 0.96\sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (3)$$

gdzie:

E - moduł sprężystości podłużnej Younga [N/m²],

ν - liczba Poissona,

ρ - gęstość [kg/m³].

Bardzo ważnym problemem jest ocena rzeczywistego przebiegu drgań podłoża. Na podstawie prowadzonych badań wynika, że krzywa charakteryzująca zmiany wielkości amplitudy z odległością jest regularna w przypadku podłoża jednorodnego, a zaburzona przy podłożu uwarstwowionym.

Jak więc widać mechanizm przekazywania drgań jest wielce skomplikowany z kilku powodów, do których zaliczyć należy między innymi:

1. znacznej zmiany własności materiałów toru i podtorza pod wpływem zmian atmosferycznych,
2. właściwości lepko-sprężystych podtorza (zespolony moduł zależy od lokalnych naprężeń i prędkości obciążenia).

Wszystkie te okoliczności sprawiają, że aktualnie brak jest dokładnej metody opisu sposobu przenoszenia się drgań na otoczenie drogi.

2. BADANIA EKSPERYMENTALNE DRGAŃ GRUNTU WYWOŁANYCH PRZEJAZDEM POJAZDU SZYNOWEGO

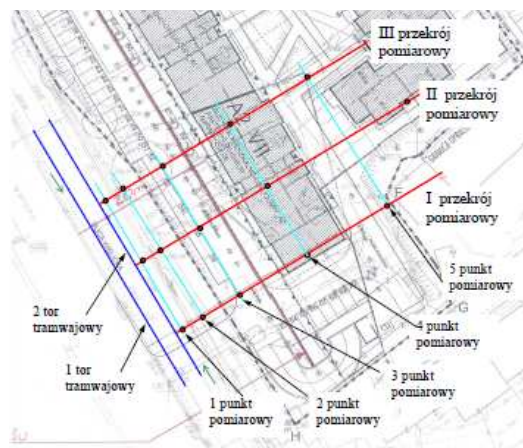
Prowadzone badania eksperymentalne związane były z analizą propagacji fali drganiowej spowodowanej przejazdami tramwajów i uzyskanie informacji o poziomie drgań w miejscu

przyszłego posadowienia projektowanego budynku mieszkalnego na poziomie gruntu oraz na głębokości 2 metrów. Zakres przeprowadzonych badań obejmował:

1. rejestrację przebiegów czasowych drgań gruntu w trakcie przejazdu tramwajów,
2. wyznaczenie maksymalnej amplitudy przyspieszenia drgań gruntu dla każdego punktu i kierunku pomiarowego
3. wyznaczenie widm zarejestrowanych sygnałów,
4. opracowanie wyników badań.

Badania przeprowadzono w siatce 15 punktów pomiarowych rozmieszczonych zgodnie z rysunkiem 3. Przyjęto następujący układ współrzędnych:

1. kierunek X – równoległe do osi torów,
2. kierunek Y – prostopadłe do osi torów w stronę działki,
3. kierunek Z – prostopadłe do osi torów w górę.

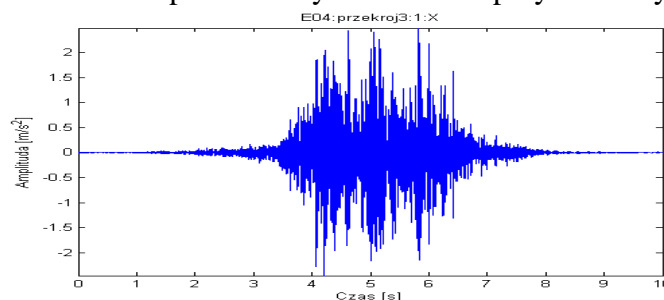


Rys. 4. Siatka punktów pomiarowych.

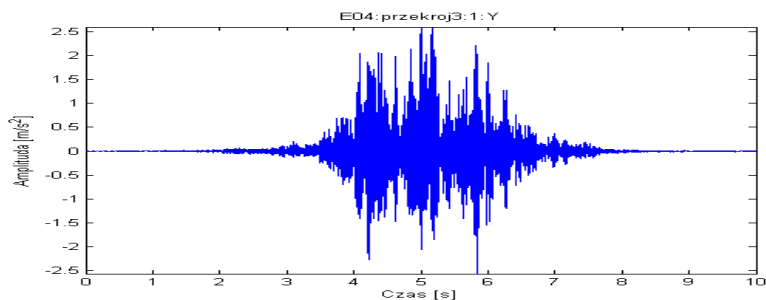
Odległość pomiędzy pierwszym i drugim przekrojem pomiarowym wynosiła 18 [m], pomiędzy drugim i trzecim – 18 [m]. Poniżej zestawiono najważniejsze cechy przeprowadzonych badań:

1. rejestrowano przebiegi czasowe przyspieszenia drgań sygnałów odpowiedzi w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach równocześnie dla wszystkich punktów pomiarowych z danego przekroju pomiarowego,
2. zastosowano filtrację dolnoprzepustową rejestrowanych sygnałów,
3. na podstawie mierzonych sygnałów pomiarowych wyznaczono maksymalne amplitudy przyspieszeń drgań dla każdego punktu i kierunku pomiarowego
4. na podstawie mierzonych sygnałów pomiarowych wyznaczono widma sygnałów przyspieszeń drgań zarejestrowanych dla każdego punktu i kierunku pomiarowego.

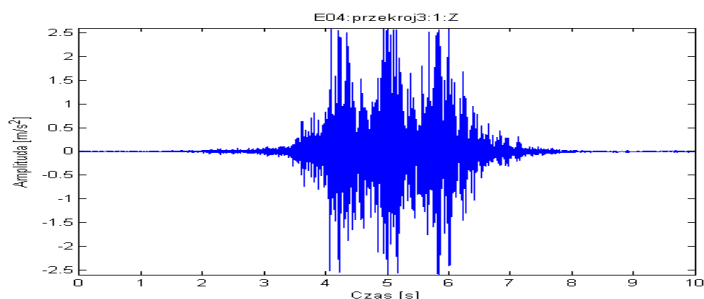
Na rysunkach 4 -6 przedstawiono przykładowe przebiegi amplitudy przyspieszenia drgań gruntu zarejestrowane w trakcie prowadzonych badań eksperymentalnych.



Rys.4. Przebieg przyspieszenia X dla punktu pomiarowego 1 przekrój III.



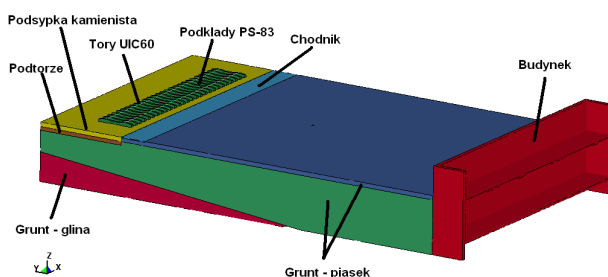
Rys.5. Przebieg przyspieszenia Y dla punktu pomiarowego 1 przekrój III.



Rys.6. Przebieg przyspieszenia X dla punktu pomiarowego 1 przekrój III.

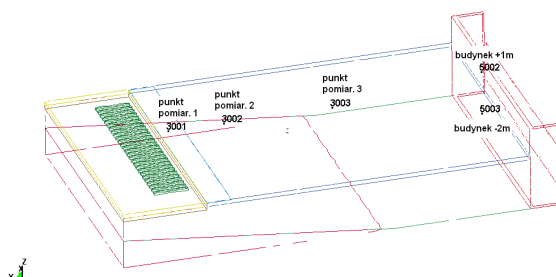
3. BADANIA SYMULACYJNE DRGAŃ GRUNTU WYWOŁANYCH PRZEJAZDEM POJAZDU SZYNOWEGO

Model obliczeniowy (rys. 7) 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 50mm oraz fragmentu budynku [1].



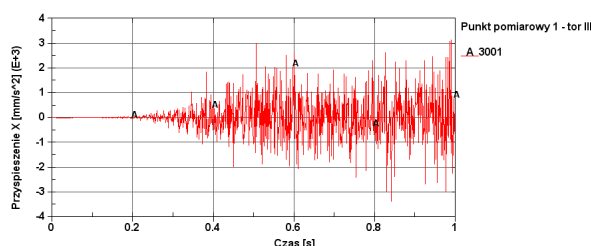
Rys.7. Budowa modelu obliczeniowego

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.8).

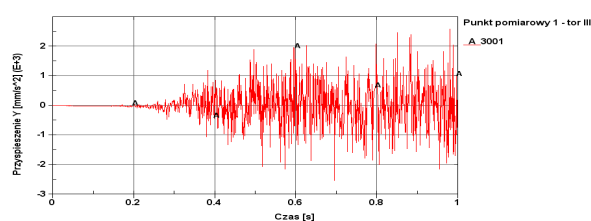


Rys. 8. Rozmieszczenie punktów pomiarowych na modelu

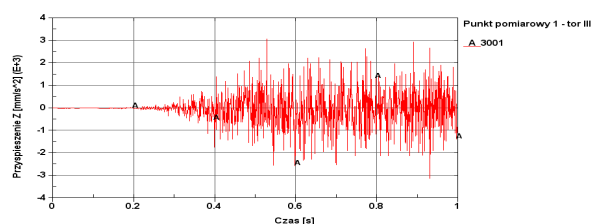
Dla tak przygotowanego modelu przeprowadzono symulację drgań gruntu spowodowanych przejazdem pojedynczego tramwaju a uzyskane wyniki dla punktu pomiarowego numer 1 w kierunku osi X, Y oraz Z przedstawiono na rysunkach 9 - 11.



Rys. 9. Przebieg przyspieszenia X dla punktu pomiarowego 1



Rys. 10. Przebieg przyspieszenia Y dla punktu pomiarowego 1



Rys. 11. Przebieg przyspieszenia Z dla punktu pomiarowego 1

PODSUMOWANIE

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 wpływa wyraźnie na wyniki badań pomiarowych. Dodatkowym problemem jest trudność związana z poprawnym zamodelowaniem zmiennego wymuszenia związanego z przejazdami tramwajów. Na zmienność wymuszenia wpływ miało przede wszystkim:

1. masa wagonów,
2. prędkość przejazdu,
3. ilość pasażerów w wagonach.

Stąd nasuwa się wniosek, że koniecznym jest zbudowanie bazy danych wymuszeń, stworzenie modeli numerycznych różnego typu fal drganiowych pochodzących od transport szynowego i samochodowego oraz przeprowadzenie wielu eksperymentów doświadczalnych, które pozwolą na opracowanie nowatorskiej metodologii prowadzenia badania propagacji fali drganiowej w gruncie.

VIBRATIONS OF A SOIL CAUSED BY A RIDES OF RAIL VEHICLES

Summary

The paper presents the problems associated with the propagation of vibration wave caused by rides of rail vehicles. In the paper the present the state of knowledge in the field of vibration and wave propagation is presented. This paper presents an application of the finite element method for the estimation of the dynamic interaction of tramway road located in the centre of a major city on the newly designed building. The work was carried out in a research project 4875/B/TO2/2010/38 financed by Ministry of Science and Higher Education.

BIBLIOGRAFIA

1. 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.
2. 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. 21-31, 2012.
3. Bednarz J.: *Experimental verification of the developed soil model describing the propagation of vibration wave in the ground*. Journal of KONES Powertrain and Transport, vol. 19, no. 3, str. 31-39, 2012.
4. Ciesielski R., Maciąg E.: *Drgania drogowe i ich wpływ na budynki*. WKiŁ, 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. Gardien W., Stuit H.G.: *Modelling of soil vibrations from railway tunnels*. Journal of Sound and Vibration, vol. 267 str. 605–619, 2003.
7. 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,.
8. 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.
9. 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.

Autor:

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