



Jarosław BEDNARZ

# ZASTOSOWANIE METODY ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH W ANALIZIE DRGAŃ GRUNTU

### *Streszczenie*

*W dzisiejszych czasach wiele z nowoprojektowanych dróg zlokalizowanych będzie w gęsto zabudowanych terenach mieszkaniowych, a także na obszarach, gdzie istnieją budynki zabytkowe. Dlatego już na etapie wstępnego projektowania dróg należy wziąć pod uwagę wpływ propagacji fali drganiowej spowodowane przez ruch pojazdów na budynki znajdujących się w bezpośrednim sąsiedztwie projektowanej drogi. Jedną z metod, która może być zastosowana do określenia wpływu ruchu pojazdów po nowoprojektowanej drodze na budynki jest metoda elementów skończonych. W artykule przedstawiono zastosowanie metody elementów skończonych do oszacowania wpływu drgań wymuszonych przez ruch pojazdów po nowoprojektowanej drodze znajdującej się w centrum dużego miasta na znajdujące się w pobliżu budynki mieszkalne. Metoda elementów skończonych została wykorzystana do modelowania gruntu w miejscu planowanej budowy drogi oraz budynków znajdujące się w jej bezpośrednim sąsiedztwie. W procesie modelowania gruntu wykorzystano badania geologiczne oraz wyniki pomiarów drgań gruntu wymuszonych poprzez ruch walca wibracyjnego po trasie planowanej inwestycji drogowej. W związku z tym możliwe było dostrojenie opracowanego modelu elementów skończonych gruntu oraz budynków. Proponowana w artykule metoda analizy drgań gruntu pozwala skrócić czas potrzebny do zaprojektowania układów wibroizolacji, które będą chronić budynki oraz ludzi w nich przebywających przed niekorzystnym wpływem drgań spowodowanych ruchem pojazdów po nowoprojektowanej drodze. Prace były prowadzone w ramach projektu badawczego 4875/B/TO2/2010/38 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.*

### **WSTĘP**

W artykule przedstawiono analizę propagacji fali drganiowej wzbudzonej przez ruch walca wibracyjnego w miejscu planowanej się budowy nowej drogi. Do wyznaczenia maksymalnych amplitud przyspieszenia drgań gruntu w miejscu planowanej drogi oraz w budynkach zlokalizowanych w jej pobliżu zastosowano Metodę Elementów Skończonych (MES).

Na wstępnym etapie prac należało określić lokalizację przekrojów i warunki przeprowadzenia pomiarów drgań, które były niezbędne do wykonania jakiegokolwiek analizy prognostycznej rozprzestrzeniania się drgań w gruncie i ich oddziaływaniu na otoczenie. Po przeprowadzeniu wizji lokalnych na miejscu inwestycji ustalono ilość przekrojów pomiarowych na 8, które zaznaczono kolorem niebieskim, na rysunku 1.



fundamentu (w naszym przypadku planowanej drogi - rysunek 2), wywołanych przez pionowe (poziome) drgania wymuszone fundamentu (planowanej drogi) określa się orientacyjnie, niezależnie od rodzaju podłoża gruntowego wg zależności:

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

gdzie:

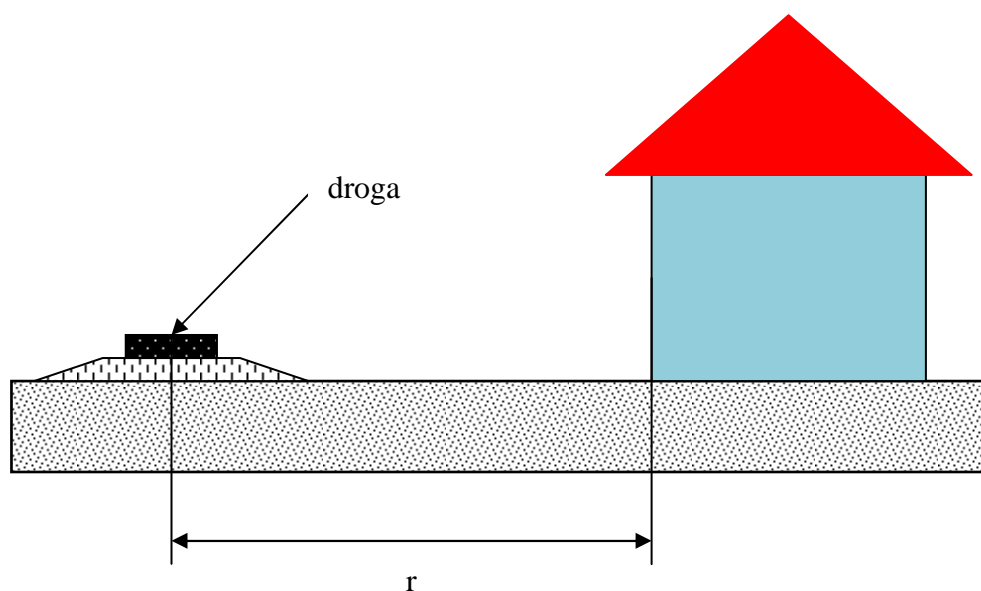
$A_0$  – amplituda drgań wymuszonych od pojazdów poruszających się na drodze,

$A_r$  - amplituda drgań gruntu w odległości  $r$  od osi drogi,

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

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

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



**Rys. 2.** Schemat modelu obliczeniowego

Przyjmując tą metodę jako podstawową wyznaczona została prognozowana maksymalna amplituda drgań, która będzie przekazywana od nowoprojektowanej drogi na jeden z budynków mieszkalnych zlokalizowanych w jej bezpośrednim sąsiedztwie.

Według planu sytuacyjnego z lutego 2012 r. ustalono, że odległość budynku mieszkalnego od osi drogi wynosi  $r=35$  m, powierzchnia obciążenia zestawu kołowego  $F=0,8$  m<sup>2</sup> (wyznaczona na podstawie wymiarów geometrycznych walca), obliczono wartość  $r_0=0,504$  m oraz  $\beta=69,44$ . Podstawiając te wartości do wzoru (1) wyznaczamy współczynnik  $\rho$ , który wynosi  $\rho=0,114$ . Przyjmując wartość maksymalną amplitudy wymuszenia otrzymaną z wyników pomiarów przyspieszenia drgań gruntu w miejscu projektowanej drogi w odległości 3,5 m od wymuszenia wynoszącą około 0,76 m/s<sup>2</sup>, wówczas wartości amplitudy drgań zarówno pionowych jak i poziomych (w budownictwie one odgrywają główną rolę chociaż drgania pionowe mogą wywołać niekorzystny moment wywrotowy) wyznaczonych teoretycznie przekazywanych na projektowany budynek mieszkalny wynosi  $A_r=0,086$  m/s<sup>2</sup>.

Zgodnie z PN-85/B-02170 pkt.4.3. wpływ drgań przekazywanych przez podłoże na budynek można pominąć w tych przypadkach, gdy udział tego obciążenia konstrukcji jest znikomy i orientacyjnie można przyjąć, że amplituda przyspieszeń ruchu poziomego podłoża ( $a_p$ ) w miejscu posadowienia budynku spełnia warunek  $a_p < 0,005 g$  ( $0,05 m/s^2$ ). W rozważanym przypadku prognozowane drgania na budynek przekraczają wartości dopuszczalne normą i należy uwzględnić potrzebę zastosowania na nowoprojektowanej drodze zabezpieczeń ograniczających rozchodzenie się drgań do środowiska.

## **2. OCENA ROZPRZESTRZENIANIA SIĘ DRGAŃ W OPARCIU O METODĘ ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH**

### **2.1 Opis przeprowadzonych badań drgań gruntu w miejscu planowanej budowy drogi**

Głównym celem prowadzonych badań była ocena wpływu fali drganiowej wymuszonej przez ruch pojazdów po nowoprojektowanej drodze w jednym z głównych polskich miast na środowisko oraz budynki mieszkalne znajdujące się w jej bezpośrednim sąsiedztwie. Ponieważ droga jest jeszcze w trakcie budowy w celu wymuszenia drgań gruntu wykorzystano walec wibracyjny (rys. 3) o regulowanej częstotliwości wymuszenia do 38 H i regulowanej sile wymuszającej do 15kN.



**Rys. 3.** Zdjęcie walca wibracyjnego w czasie pomiarów

Zadaniem walca było wymuszenie drgań na poszczególnych przekrojach na trasie planowanej inwestycji. W pewnych przypadkach, w celu uzyskania dodatkowych informacji dynamicznych, wykonywał przejazdy pomiędzy planowaną inwestycją a zabudowaniami mieszkalnymi.

Badania drgań przeprowadzono w siedmiu przekrojach pomiarowych zlokalizowanych wzdłuż trasy planowanej inwestycji. W każdym przekroju pomiarowym wykonano pomiary drgań w gruncie w kilku punktach w różnych odległościach od drogi, po której poruszał się walec wibracyjny, który stanowił wymuszenie drgań, oraz na fundamencie istniejących budynków. W miarę możliwości przeprowadzono także pomiary wewnątrz budynków.

Czas pomiaru w każdym punkcie wynosił 180 s. Na podstawie tych pomiarów określono maksymalną wartość przyspieszenia drgań, która została wykorzystana do strojenia modelu MES gruntu oraz budynków



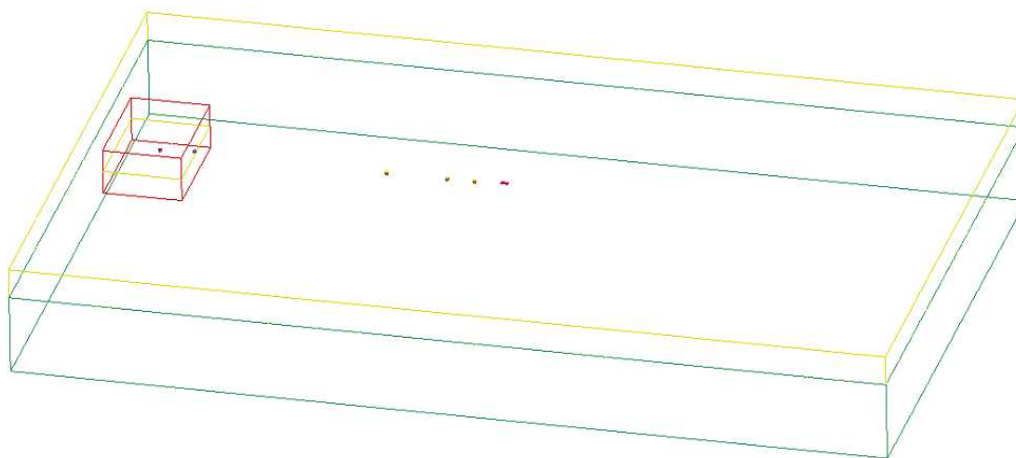
## 2.2 Analiza drgań gruntu z wykorzystaniem MES

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).

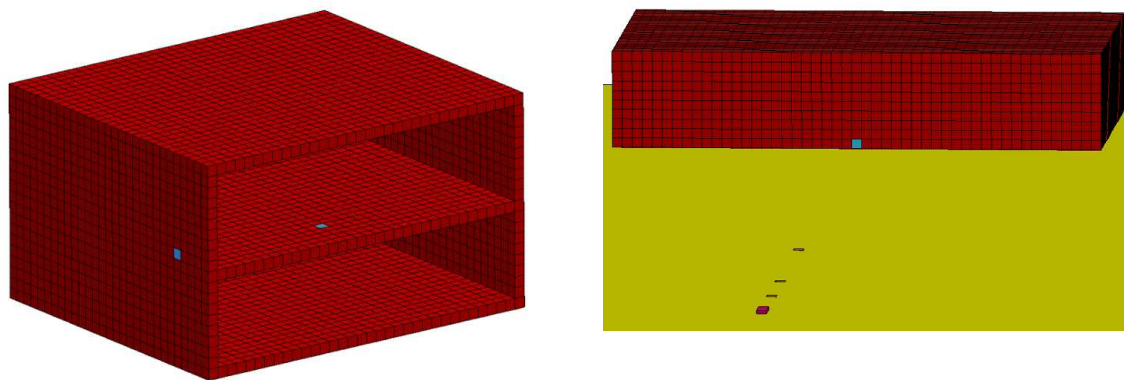
Celem analizy jest pokazanie możliwości wykorzystanie metod numerycznych do weryfikacji rozwiązań związanych z propagacją fali i jej oddziaływaniem m.in. na budynki. Prawidłowe odwzorowanie takiego zjawiska wymaga zbudowania dokładnego modelu numerycznego, który wymaga bardzo dokładnych danych materiałowych 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.

Zbudowany model numeryczny obejmował obszar o rozmiarach 114m x 72m x 14m 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, 5, 7 oraz 15 metrów 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. Na rysunkach 4 i 5 pokazane są szczegóły modelu numerycznego z widocznymi punktami pomiarowymi.



**Rys. 4.** Widok modelu numerycznego o wymiarach 114m x 72m x 14m z zaznaczonymi punktami pomiarowymi oraz punktem wymuszenia.



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

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.

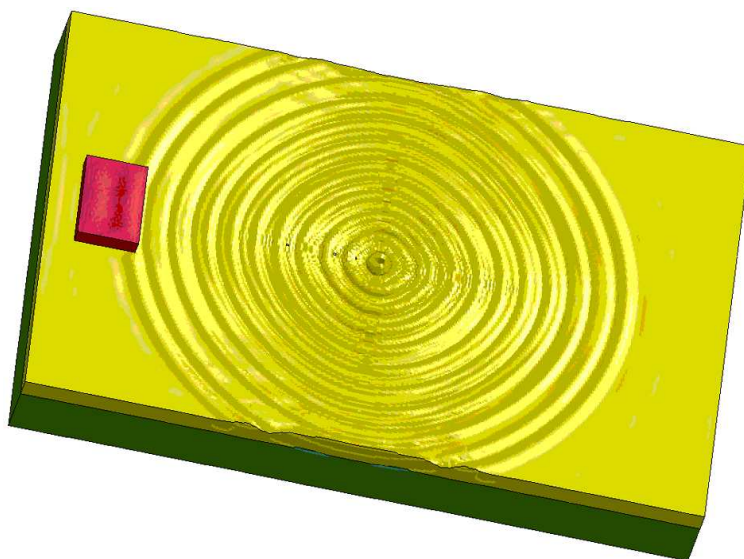
Jednym z najważniejszych aspektów jest modelowanie materiałów, w szczególności modelowanie zachowanie się gruntu, który w głównej mierze odpowiada za propagowanie fali oraz jej tłumienie. Został wykorzystany model materiałowy Druckera-Pragera, który jest szeroko wykorzystywany w metodach numerycznych do symulowania zachowania się różnego rodzaju gleb. Dodatkowo przygotowane dane materiałowe dla gruntów pozwalały wykorzystać je wprost w użytym modelu materiałowym. Zarówno beton (budynek) jak i stal (płytki 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  $\alpha$  i  $\beta$  są określane dla danego materiału na podstawie danych literaturowych oraz wykorzystaniu tłumienia modalnego.

Model składa się z 4.3 mln elementów skończonych o kształcie sześciianu. 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 1s. 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  $1.25e-5$  co odpowiada częstotliwości próbkowania 80 kHz i jest ustalona przez 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.

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).



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

## PODSUMOWANIE

Przeprowadzone pomiary drgań i ich analiza potwierdziły poprawność przeprowadzonej oceny prognostycznej za pomocą symulacji metodą MES rozprzestrzenia się fali drganiowej do otoczenia. Stąd wniosek, że tego typu symulacje należy przeprowadzać na etapie projektowania nowej drogi, co pozwoli na znaczne ograniczenie ilości przeprowadzonych pomiarów drgań. Symulacja cyfrowa propagacji fali drganiowej w gruncie przeprowadzona już na etapie wstępnego projektowania pozwala na znaczne ograniczenie ilości przekroi pomiarowych, na których będą prowadzone pomiary, a w związku z tym można ograniczyć koszty realizacji projektu i skrócić czas potrzebny na jego wykonanie.

## APPLICATION OF FINITE ELEMENTS METHOD IN THE ANALYSIS OF WAVE PROPAGATION IN THE SOIL

### *Abstract*

*Nowadays, many of the designed road are located through the densely built-up residential areas, and even the areas where there are historic buildings. Therefore, already at the stage of preliminary road design one should take into account the effects of vibration wave propagation caused by movement of vehicles on buildings located in the immediate vicinity of designed road. One of the methods that can be used to determine the dynamic effects of designed road for residential buildings is the finite element method. This paper presents an application of the finite element method for the estimation of the dynamic interaction of designed road located in the centre of a major city in the nearby residential buildings. Finite element method was used to model the land and buildings located near the designed road. In the process of land modelling the geological studies of ground and*

*measurements of soil vibrations caused by the vibratory road roller rides conducted by the authors were used. Thus it was possible to tune the developed finite element model. Proposed in this paper method of analysis of ground vibrations reduce the time needed to design a vibration isolating elements that will protect people and buildings from the destructive effects of vibration caused by vehicles movement the designed road. 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.: *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.
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., 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.
4. Ciesielski R., Maciąg E.: *Drgania drogowe i ich wpływ na budynki,* WKiŁ, Warszawa 1990.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Lipiński J.: *Fundamenty pod maszyny.* Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1985.
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