

Jarosław BEDNARZ¹
Grzegorz BROŻEK²
Jan TARGOSZ³

METODA ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH W ANALIZIE DRGAŃ GRUNTU

Celem artykułu jest przedstawianie metody analizy rozprzestrzeniania się fali drganiowej wymuszonej przez ruch tramwajów w gruncie, na którym planowane jest posadowienie wielokondygnacyjnego budynku mieszkalnego. Do wyznaczenia poziomu amplitudy drgań wykorzystano metodę elementów skończonych (MES) typu explicit. W analizie wykorzystano wyniki pomiarów amplitud przyspieszenia drgań wykonanych przez pracowników Katedry Robotyki i Mechatroniki AGH w ramach projektu MNiSW o numerze 4875/B/TO2/2010/38 oraz wyniki wierceń badawczych wykonanych w celu zidentyfikowania składu gruntu w planowanym miejscu posadowienia budynku.

FINITE ELEMENTS METHOD FOR ANALYSIS OF SOIL VIBRATION

This article presents analysis of propagation of vibration wave excited by the movement of trams in the soil on which is planned to built multi-storey residential building. To determine the amplitude of vibration the finite element method (FEM) explicit was used. The analysis uses the results of measurements of vibration acceleration amplitudes done by employees of the Department of Robotics and Mechatronics AGH during the works on government research project 4875/B/TO2/2010/38 and the results of drilling carried out to identify the composition of the soil at the planned place of foundation building.

1. WPROWADZANIE

W artykule przedstawiono sposób symulacyjnego wyznaczania poziomu amplitudy przyspieszenia drgań fundamentów planowanego budynku mieszkalnego wielokondygnacyjnego zlokalizowanego w odległości około 25 metrów od torów tramwajowych w Krakowie. Do wyznaczenia poziomu amplitudy drgań wykorzystano metodę elementów skończonych (MES) typu explicit. W ramach badań symulacyjnych

¹ Akademia Górniczo-Hutnicza; Katedra Robotyki i Mechatroniki; al. Mickiewicza 30; 30-059 Kraków; tel. +48 12 617-35-11; e-mail: bednarz@agh.edu.pl

² EC Engineering Sp. z o.o.; ul. Lublańska 34; 31-476 Kraków; tel. +48 12 627 77 03; e-mail: gbrozek@ec-e.pl

³ Akademia Górniczo-Hutnicza; Katedra Robotyki i Mechatroniki; al. Mickiewicza 30; 30-059 Kraków; tel. +48 12 617-36-75; e-mail: jantargosz@interia.pl

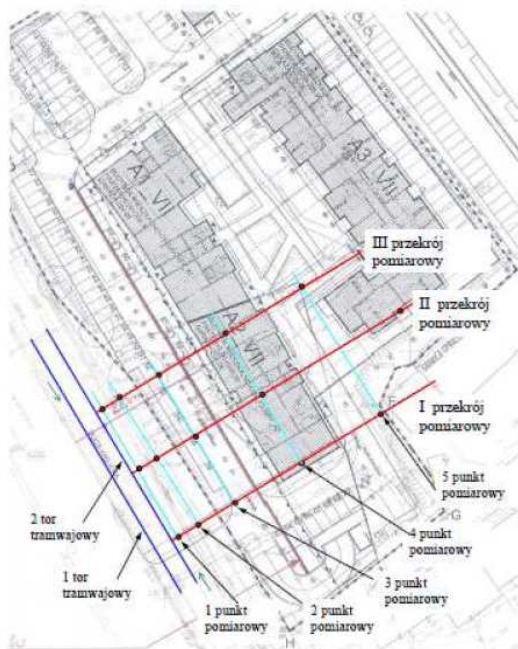
analizowano przejazd pierwszego wózka tramwaju przez zamodelowany piętnastometrowy odcinek torów. Do analizy wykorzystano wyniki pomiarów przyspieszeń drgań gruntu wykonanych przez pracowników Katedry Robotyki i Mechatroniki AGH oraz wyniki wierceń badawczych wykonanych w celu określenia składu gruntu w planowanym miejscu posadowienia budynku.

2. OPIS ZASTOSOWANEGO MODELU MES

Model obliczeniowy obejmował prostopadłościan o wymiarach 30x19x4 m składający się z następujących części:

1. Tory UIC60 zamodelowane z elementów belkowych o zastępczym przekroju prostokątnym.
2. Podkłady strunobetonowe typu PS-83 zamodelowane z elementów bryłowych ośmiowęzłowych w podziałce 670 mm.
3. Podosypka kamienista o grubości 300 mm poniżej podkładów kolejowych zamodelowana z elementów bryłowych czterowęzłowych. Pomiędzy podsypką a szyną nie było kontaktu.
4. Podtorze o grubości 300 mm zamodelowano z elementów bryłowych czterowęzłowych.
5. Grunt zamodelowano z elementów bryłowych czterowęzłowych.
6. Chodnik o grubości 50mm zamodelowano z elementów bryłowych czterowęzłowych.
7. Fragment budynku zamodelowano z elementów bryłowych czterowęzłowych.

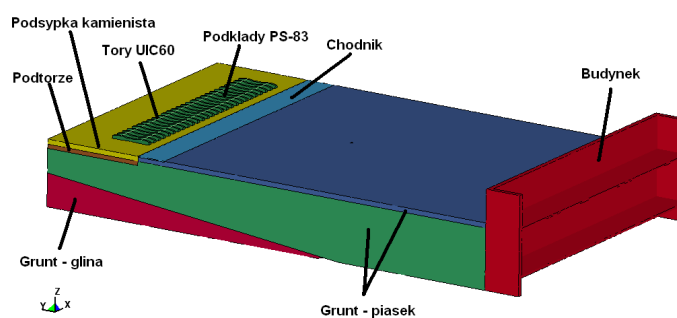
Model obejmował fragment torów leżący na wysokości III przekroju pomiarowego (Rys.1).



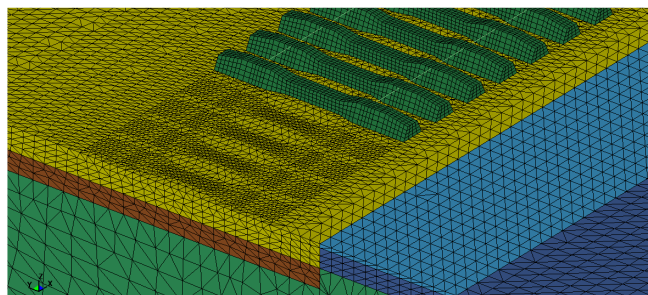
Rys.1. Umiejscowienie modelu obliczeniowego względem planowanego budynku

2.1 Model elementów skończonych gruntu

W celu przeprowadzenia symulacji rozchodzenia się drgań w gruncie przyjęto jego model obliczeniowy, którego schemat przedstawiono na rysunku 2. Na jego podstawie zbudowano model elementów skończonych gruntu przedstawiony na rysunku 3, dla którego wykonano analizę rozchodzenia się w nim fali drganiowej



Rys.2. Przyjęty model obliczeniowy



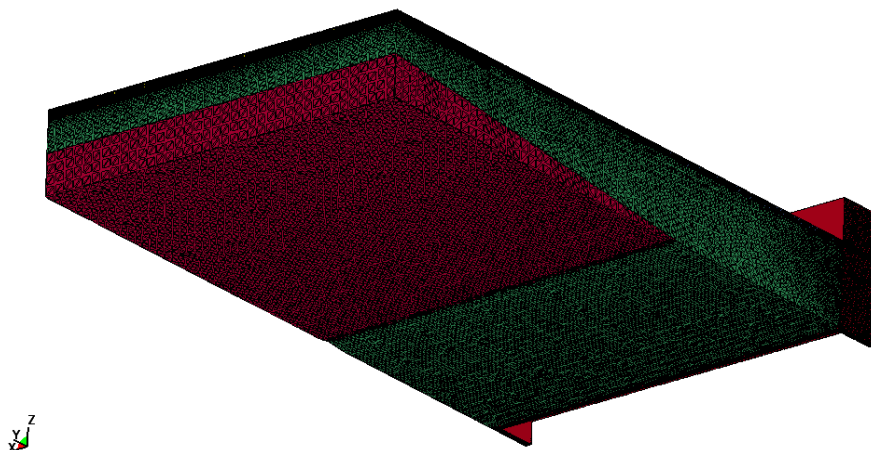
Rys.3. Model elementów skończonych zbudowany dla potrzeb badań symulacyjnych

W tabeli 1 zestawiono najważniejsze dane materiałowe elementów składowych modelu MES gruntu. Dane te zostały przyjęte na podstawie dostępnej literatury oraz wykonanych badań geologicznych terenu.

Tab. 1 Dane materiałowe przyjęte do obliczeń

	Tory UIC60 stal	Podkład PS-83 strunobeton
Gęstość [t/mm³]	7.86E-09	2.55E-9
Współczynnik tłumienia wiskotycznego	0.02	0.05
Współczynnik Poissone	0.3	0.3
Moduł Younga [MPa]	2.10E+05	47500
	Podsypka kamienista	Podtorze - piasek
Gęstość [t/mm³]	2.20E-09	2.05E-09
Współczynnik tłumienia wiskotycznego	0.05	0.05
Współczynnik Poissone	0.35	0.3
Moduł Younga [MPa]	4900	70
	Chodnik – asfalt	Ziemia – piasek
Gęstość [t/mm³]	2.50E-09	2.05E-09
Współczynnik tłumienia wiskotycznego	0.04	0.05
Współczynnik Poissone	0.3	0.3
Moduł Younga [MPa]	28000	70
	Ziemia – glina	
Gęstość [t/mm³]	2.3E-09	
Współczynnik tłumienia wiskotycznego	0.05	
Współczynnik Poissone	0.32	
Moduł Younga [MPa]	47	

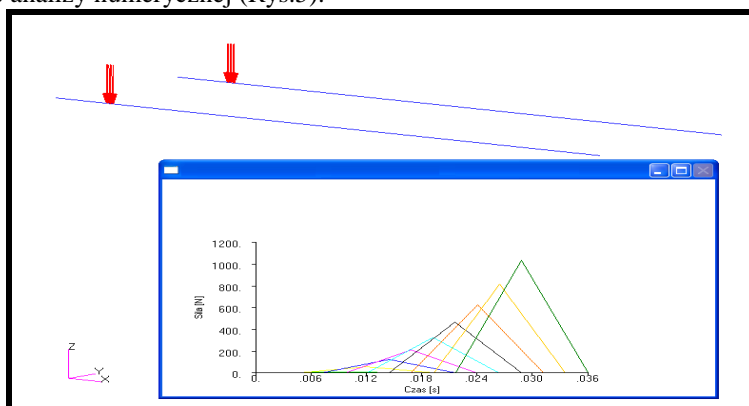
Model został utwierdzony za pomocą specjalnych warunków brzegowych nie odbijających fal dochodzących do granic modelu. Warunki te umożliwiają ograniczenie wielkości modelu obliczeniowego, głównie w przypadku modelowania ziemi. Szczególną cechą tych warunków jest utwierdzenie węzłów modelu leżących na wskazanych powierzchniach w kierunku normalnym do płaszczyzny na której się znajdują. Zaznaczone zostały wszystkie powierzchnie modelu będące granicą odcięcia modelu od reszty otoczenia z uwzględnieniem fragmentu budynku (Rys. 4).



Rys. 4. Widok powierzchni utwardzonych za pomocą specjalnych warunków brzegowych

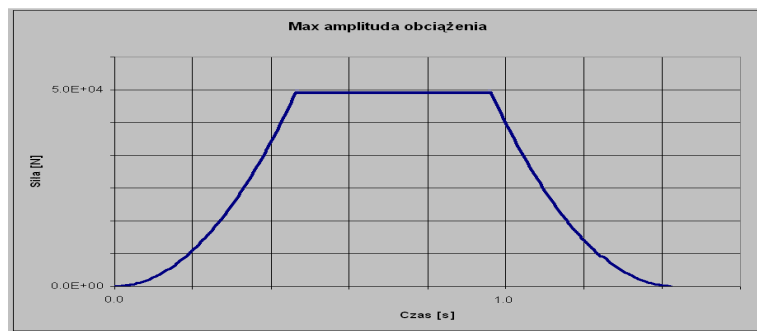
Dla zbudowanego modelu elementów skończonych przyjęto obciążenie związane z przejazdem tramwaju z maksymalną zmierzoną prędkością tj. 45 km/h (12.5 m/s). Analizę przeprowadzono dla tramwaju Bombardier NGT-6 jako najbardziej krytycznego przypadku ze względu na największy dopuszczalny nacisk na oś 10t. Dla tego tramwaju rozstaw osi wózka wynosi 1800 mm.

Przeprowadzone symulacje dotyczyły przejazdu jednego wózka tramwaju przez model elementów skończonych gruntu. W związku z tym przygotowano model obciążenia, który odpowiada przejazdowi jednego wózka przez zamodelowany odcinek torów. Do węzłów torów została przyłożona siła o trójkątnym przebiegu amplitudy oraz czasem trwania odpowiednim dla zamodelowania przejazdu wózka z prędkością 12.5 mm/s. Amplituda obciążenia zmieniała się od wartości zerowej do wartości maksymalnej a następnie ponownie do wartości zerowej w celu odwzorowania przejazdu pociągu oraz ze względu na stabilność analizy numerycznej (Rys.5).



Rys.5. Przykład rozkładu amplitudy siły dla kilku węzłów szyny

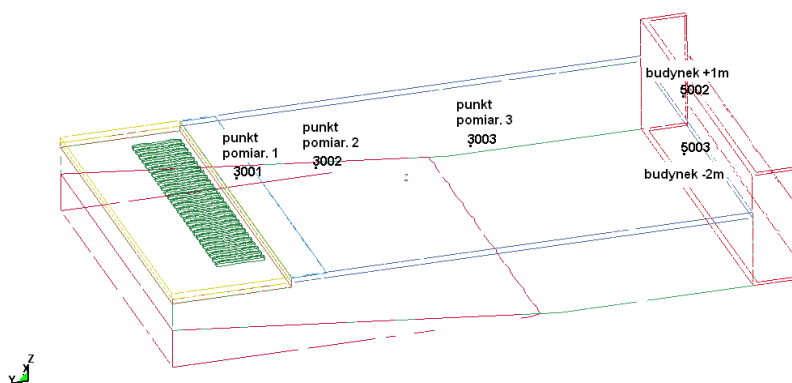
Charakterystyka obciążenia pojedynczego węzła została pokazana na rysunku 6.



Rys. 6. Wartość maksymalna amplitudy obciążenia w funkcji czasu

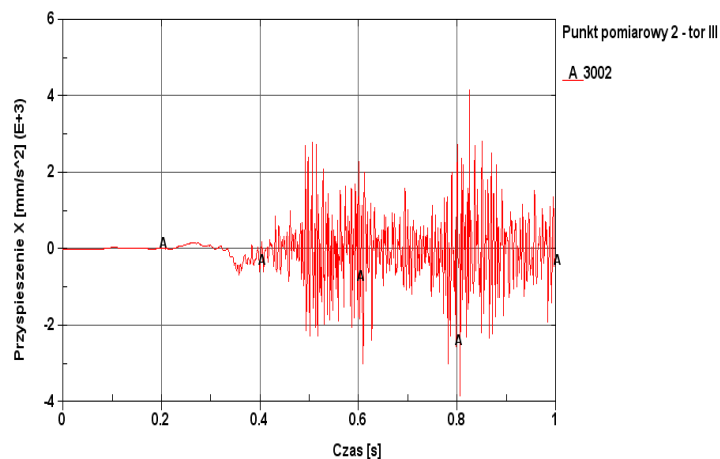
3. WYNIKI ANALIZY DYNAMICZNEJ ROZCHODZENIA SIĘ DRGAŃ W GRUNCIE

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 III przekroju pomiarowym (Rys.7).

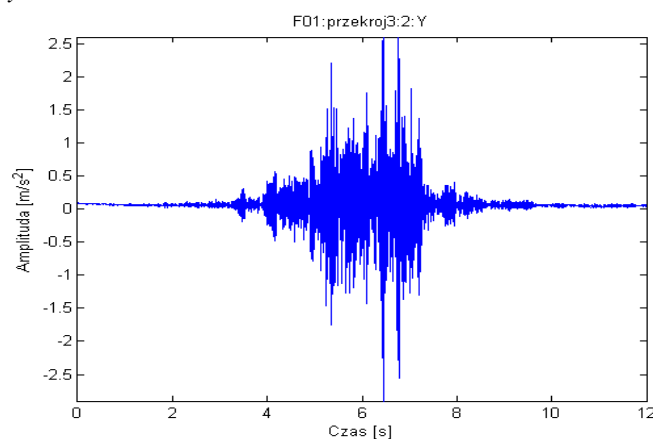


Rys. 7. Rozmieszczenie punktów pomiarowych na modelu.

Na rysunku 8 przedstawiono przebieg czasowy amplitudy przyspieszenia drgań gruntu w punkcie pomiarowym 2 uzyskany na podstawie przeprowadzonej symulacji, na rysunku 9 – przebieg drgań zarejestrowany w trakcie prowadzonych badań eksperymentalnych.



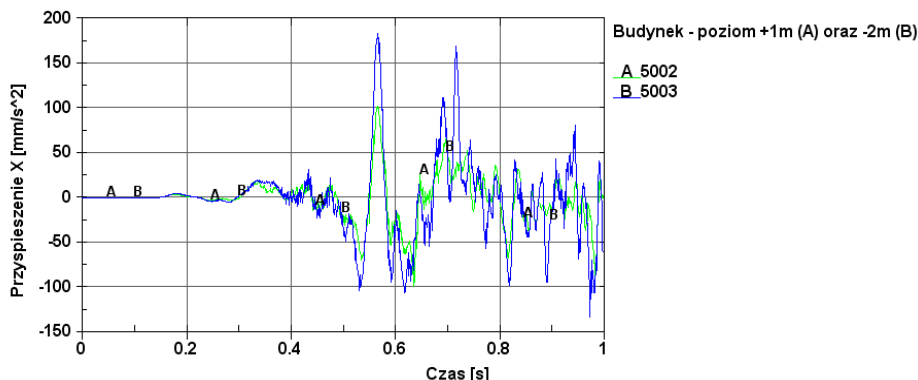
Rys. 8. Przebieg symulowanego przyspieszenia na kierunku Y dla punktu pomiarowego 2 tor pomiarowy III



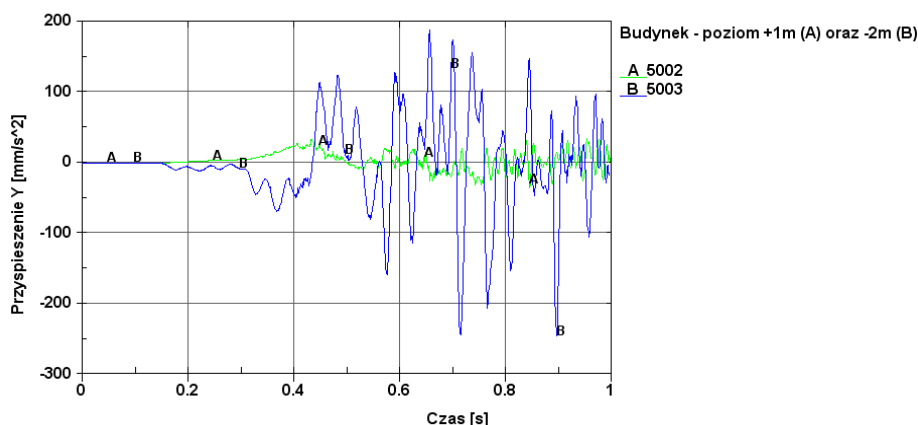
Rys. 9. Przebieg zmierzonej wartości amplitudy przyspieszeń drgań w czasie Y dla punktu pomiarowego 2 tor pomiarowy III.

Porównując te dwa przebiegi (z symulacji i pomiarów) można stwierdzić, że przyjęty model do badania rozprzestrzeniania się drgań w gruncie jest poprawny. 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 niejednorodnych właściwości mechanicznych gruntu, które są zmienne i wpływają wyraźnie na wyniki badań pomiarowych.

Dodatkowo przeprowadzono symulację drgań fundamentu nowoprojektowanego budynku, a uzyskane wyniki dla punktów pomiarowych leżących w osi III przekroju pomiarowego znajdujących się na wysokości fundamentu 1 m nad powierzchnią gruntu oraz 2 m pod powierzchnią gruntu w kierunku osi X i Y przedstawiono na rysunkach 10 i 11.



Rys. 10. Przebieg przyspieszenia drgań fundamentu budynku w kierunku X



Rys. 11. Przebieg przyspieszenia drgań fundamentu budynku w kierunku Y

Na podstawie uzyskanych wyników (Rys. 10 i 11) można wnioskować, że amplituda przyspieszeń drgań w kierunkach X i Y przekracza wartości dopuszczalne. Wyniki symulacji wykazały przekroczenie amplitud dopuszczalnych dla nowoprojektowanego budynku, który nie powinien przekraczać wartości 0.005g.

4. WNIOSKI

Ze względu na fakt że amplitudy przyspieszenia drgań gruntu wywołane oddziaływaniem przejazdów tramwajów wzdłuż ul. Wielickiej przekraczają wielokrotnie wartości dopuszczalne przez normę PN-85/B-02170 pt. „Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki” lokalizacja na tym terenie budynków mieszkalnych stanowi przedsięwzięcie ryzykowne i wymaga uwzględnienia w projektowaniu konstrukcji budynku obliczeń sił jego bezwładności. Należy dodatkowo na etapie projektowania uwzględnić inne środki techniczne pozwalające na ograniczenie oddziaływań dynamicznych od transportu szynowego (tramwaj takie jak:

1. wymiana i wzmocnienie gruntu (palowanie),

2. odwodnienie terenu i posadowienie płyty dennej,
3. zwiększenie masy fundamentu garaży do poziomu wytrzymałości gruntu,
4. wibroizolacja budynku w tak zwanej misce (firma GERB),
5. nowoczesna wibroizolacja torowiska,
6. zastosowanie ograniczenia prędkości tramwaju do 20 km/h na odcinku około 50 m,
7. wykonanie zagłębionego ekranu pionowego o szerokości 30 cm tak aby jego spód był poniżej fundamentów budynku mieszkalnego.

Wymienione powyżej środki techniczne wymagają jednak znacznego nakładu finansowego i znacznego wydłużenia procesu projektowania oraz budowy planowego budynku mieszkalnego.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] 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, nr 26, str. 377-394, 2006.
- [2] Goliński J.A.: *Wibroizolacja maszyn i urządzeń*, WNT warszawa 1979.
- [3] 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, nr 37, str. 40-49, 2010.
- [4] Lipiński J.: *Fundamenty pod maszyny*, Arkady, Warszawa 1985,.
- [5] Mulliken J.S., Karabalis D.L.: *Discrete models for through-soil coupling of foundations and structures*. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, nr 27, str. 687–710, 1998.
- [6] Norma PN-85/B-02170 pt: *Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki*.
- [7] Targosz J.: *Układy wibroizolacji w transporcie szynowym i samochodowym*, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, 2007.