

Filip PACHLA*
Politechnika Krakowska

NUMERYCZNA OCENA EFEKTYWNOŚCI TŁUMIENIA DRGAŃ POWIERZCHNIOWYCH PRZEZ PRZEGRODY UMIESZCZANE W GRUNCIE

Streszczenie. W pracy przedstawiono wstępne wyniki obliczeń dotyczących efektywności różnych typów przegród umieszczanych w gruncie na redukcję drgań powierzchniowych. Obliczenia przeprowadzono systemem metody elementów skończonych Algor FEA. Problem analizowano w dziedzinie czasu. Wymuszenie przyjęto jako harmoniczne o częstotliwościach odpowiadających dominującym częstotliwościom drgań gruntu wzbudzanych przejazdami pojazdów samochodowych i tramwajów. Równanie ruchu rozwiązywano metodą bezpośredniego całkowania. Grunt w postaci jednorodnej warstwy modelowano jako płaską tarczę o właściwościach przyjętych na podstawie normy. Analizowano zmianę wartości maksymalnych przemieszczeń i przyspieszeń składowej pionowej oraz poziomej drgań na powierzchni gruntu w różnych odległościach od źródła wzbudzania drgań i przegrody oraz w poziomie posadowienia budynków. Porównanie wartości maksymalnych przemieszczeń i przyspieszeń stanowiło podstawę do wstępnej oceny efektywności rozpatrywanych typów przegród wibroizolacyjnych.

NUMERICAL ESTIMATION OF EFFECTIVENESS OF SURFACE VIBRATION DAMPING DUE TO BARRIERS PLACED IN THE GROUND

Summary. The study refers to preliminary estimation of effectiveness of surface vibrations damping due to barriers placed in the ground. Frequencies of harmonic excitations correspond to domain frequencies of transportation – related vibrations. The homogeneous shield model has been adopted. The ground properties have been assumed using Polish code. The maximal values of displacements and accelerations calculated at different distances from source of excitation and barriers as well as in different depth of the model are the base for estimation of effectiveness of the proposed solutions.

* Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Tadeusz Tatar, prof. Politechniki Krakowskiej.

1. Wstęp

Realizacja ciągów komunikacyjnych w miastach i w obszarach zurbanizowanych prowadzi do działania drgań powierzchniowych na zabudowę powierzchniową i skargi mieszkańców na uciążliwość tych drgań. Drgania powierzchniowe wzbudzone są przez przejazdy pojazdów samochodowych i szynowych. W celu ograniczenia negatywnego działania drgań komunikacyjnych proponuje się różnego typu rozwiązania podtorza i układania torów tramwajowych. Jednym z takich rozwiązań jest tzw. tramwaj ekologiczny [4]. Ograniczenie poziomu drgań powierzchniowych przekazywanych na budynki może być realizowane także za pomocą przegród antywibracyjnych umieszczanych pomiędzy źródłem drgań a obiektem odbierającym te drgania. Przykładowo skuteczność przegrody zbudowanej z rur PCV była oceniana na podstawie pomiarów wykonanych in-situ [3]. Obliczenia miały na celu porównanie wyników uzyskanych dla przyjętego modelu z otrzymanymi z pomiarów.

Do opisu propagacji drgań w gruncie stosuje się przestrzenne modele osiowo-symetryczne [5] oraz model tarczy [2, 6]. Przydatność modelu tarczowego do opisu propagacji drgań w gruncie była oceniana przez porównanie wyników obliczeń modelu z wynikami badań przeprowadzonych in-situ [2]. W pracy [6] analizowano również przydatność modelu tarczowego z umieszczoną przegrodą; weryfikowano przyjęty model na podstawie wyników badań przeprowadzonych w pobliżu projektowanej stacji metra.

Celem niniejszej pracy jest numeryczne określenie efektywności różnych typów przegród antywibracyjnych umieszczonych w gruncie na redukcję drgań powierzchniowych. Do realizacji zadania przyjęto model tarczowy gruntu.

2. Sformułowanie problemu i przyjęty model obliczeniowy

Zadanie polega na wyznaczeniu przy użyciu MES wartości przemieszczeń i przyspieszeń składowych pionowych oraz poziomych drgań w węzłach siatki elementów od wymuszenia siłą harmoniczną o zadanej amplitudzie i częstotliwości drgań. Obliczenia przeprowadzono systemem Algor FEA. Cały problem przeanalizowano w dziedzinie czasu, a równanie ruchu rozwiązano metodą bezpośredniego całkowania. Do opisu tłumienia przyjęto macierz Rayleigha. W zadaniu grunt zamodelowano jako jednorodną płaską tarczę. Do opisu gruntu przyjęto model liniowo-sprężysty opisany przez trzy stałe materiałowe E , ν , ρ . Przyjęte

w obliczeniach stałe materiałowe gruntu przedstawiono w tabeli 1. W obliczeniach nie uwzględniono zmiany modułu Younga dla gruntu wraz z głębokością.

Tabela 1

Przyjęte stałe materiałowe gruntu

Rodzaj gruntu	Moduł Younga E [kPa]	Wsp. Poissona ν [-]	Ciężar własny ρ [kg/m ³]	Prędkość fali podłużnej [m/s]
Piasek drobny	60000	0,30	2040	198,98

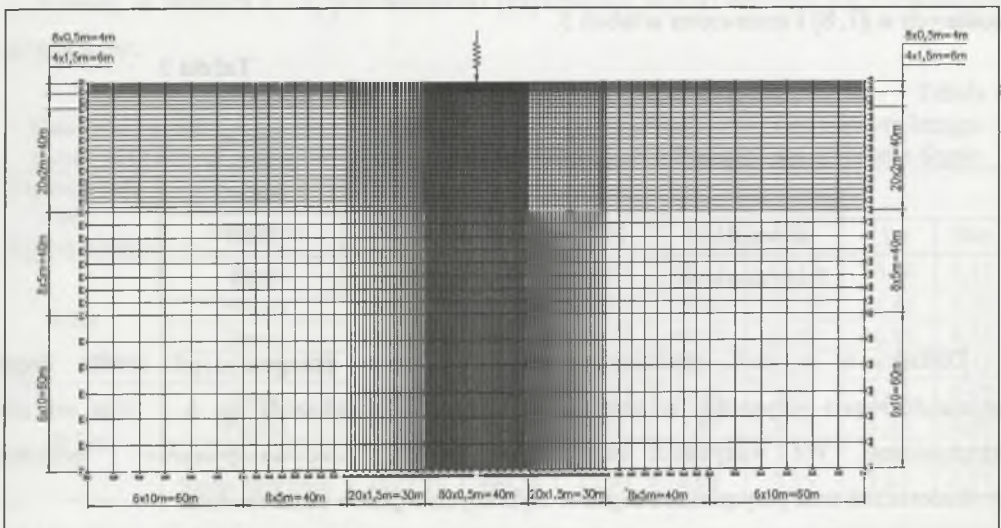
Model oraz dyskretyzację elementami skończonymi przedstawiono na rys. 1. W celu minimalizacji wpływu odbicia fali od krawędzi modelu, długość tarczy dobrano na podstawie prędkości rozchodzenia się fal podłużnych w przyjętym ośrodku gruntowym, według zależności [1]:

$$V_r = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, \tag{1}$$

gdzie:

$$\mu = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}, \quad \lambda = \frac{\nu \cdot E}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}. \tag{2}$$

W modelu założono, że węzły na górnym brzegu tarczy są wolne, zaś krawędzie boczne i krawędź dolna mają odebrane po jednym stopniu swobody prostopadłym do krawędzi tarczy – por. rys. 1.



Rys. 1. Przyjęty model obliczeniowy
Fig. 1. Accepted calculation model

W obliczeniach przyjęto wymuszenie harmoniczne przyłożone na górnym brzegu tarczy. Obliczenia przeprowadzono uwzględniając dwa wymuszenia harmoniczne w kierunku pionowym. Kryterium doboru amplitudy i częstotliwości siły wymuszającej stanowiły drgania parasejsmiczne wywołane ruchem samochodów i tramwajów. Dominujące częstotliwości przebiegów drgań pochodzących zarówno od samochodów ciężarowych załadowanych i pustych oraz z przyczepami i bez, jak i autobusów pozostają w wąskim paśmie 8,0 - 14,5 Hz [1]. Przejazdy tramwajów typu GT6+B4 wywołują drgania gruntu o dominujących częstotliwościach 55 Hz [4]. Na podstawie prac [1, 4] przyjęte do obliczeń siły wymuszające zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2

Przyjęte siły wymuszające

Nr	Częstotliwość [Hz]	Amplituda siły [kN]	Opis
1	8	110	Samochód ciężarowy
2	55	230	Tramwaj typu GT6+B4

W celu oceny efektywności przegród rozważano cztery przypadki:

- grunt bez przegrody,
- grunt z przegrodą w postaci pustki powietrznej (głębokość 4 m),
- grunt z przegrodą betonową (głębokość 4 m),
- grunt z przegrodą w postaci 3 płyt ze szkła akrylowego grubości 2 cm (głębokość 4 m).

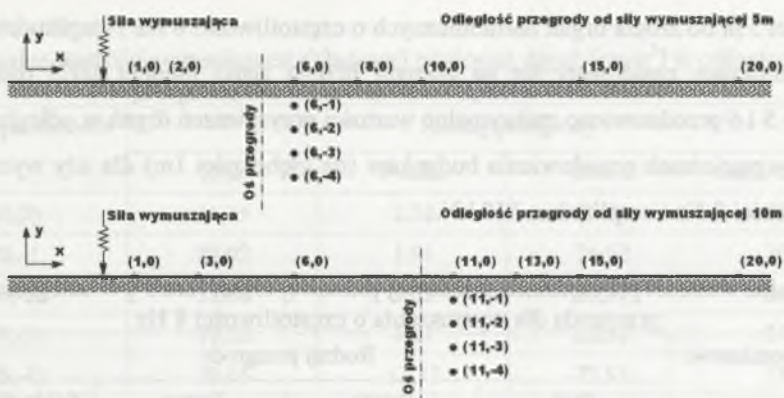
Właściwości fizyczne i mechaniczne rozpatrywanych przegród przyjęto na podstawie danych podanych w [7, 8] i zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3

Przyjęte stałe materiałowe rozpatrywanych przegród

Użyty materiał	Moduł Younga [MPa]	Współczynnik Poissona ν [-]	Ciężar własny ρ [kg/m ³]
Beton B15	27000	0,2	2500
Szkoło akrylowe	3,3	0,37	1,19

Dodatkowo w celu zbadania wpływu odległości przegrody od źródła drgań przeanalizowano przypadki, w których oś przegrody znajdowała się 5 i 10 m od siły harmoniczej. We wszystkich przypadkach badano składowe pionowe i poziome przemieszczeń oraz przyspieszeń drgań w wybranych węzłach siatki modelu.



Rys. 2. Rozmieszczenie wyróżnionych punktów na powierzchni i po wysokości modelu-przegroda w odległości 10 m od źródła drgań

Fig. 2. Arrangement of selected points on the surface and in the depth of the model – barrier placed 5 and 10 m respectively from the source of vibrations

Na rys. 2 pokazano odległości wyróżnionych punktów odpowiadających węzłom górnym siatki oraz w warstwie przypowierzchniowej (do 4 m głębokości) w bliskiej odległości za przegrodą przyjętego modelu obliczeniowego – przegroda znajduje się w odległości odpowiednio 5 i 10 m od źródła drgań.

3. Wyniki obliczeń

Poniżej, w tabelach 4 – 8, przedstawiono przykładowe wyniki obliczeń dla rozważanych przypadków.

Tabela 4

Maksymalne wartości przyspieszeń składowej pionowej drgań [cm/s²] na górnym brzegu tarczy dla różnych wariantów przegród umieszczonych w odległości 5m od źródła drgań

Częstotliwość siły wymuszającej	Rodzaj przegrody	Odległość od siły wymuszającej						
		1m	2m	6m	8m	10m	15m	20m
8 Hz	Brak	351,56	185,87	62,97	43,61	32,52	16,88	9,15
	Pustka	347,09	185,47	33,87	29,60	23,52	11,42	5,30
	Beton	352,89	184,11	56,72	41,77	32,02	16,95	9,24
	Szko akrylowe	351,44	186,46	58,60	42,96	32,30	16,78	9,13
55 Hz	Brak	1427,67	390,70	20,35	6,09	3,67	1,62	0,97
	Pustka	1425,63	388,89	4,04	3,42	2,73	1,18	0,66
	Beton	1428,41	391,01	14,95	5,85	3,53	1,64	0,98
	Szko akrylowe	1427,79	390,58	15,93	4,08	3,55	1,61	0,97

W tabeli 4 przedstawiono maksymalne wartości przyspieszeń składowych pionowych drgań z obliczonego jednosekundowego przebiegu drgań przy założeniu przegrody

w odległości 5 m do źródła drgań harmonicznych o częstotliwości 8 Hz i amplitudzie 110 kN. Punkty pomiarowe znajdowały się na górnym brzegu siatki modelu MES (por. rys. 2). W tabelach 5 i 6 przedstawiono maksymalne wartości przyspieszeń drgań w odległości 1m za przegrodą w poziomach posadowienia budynków (na głębokości 1m) dla siły wymuszającej o częstotliwości 8 Hz i amplitudzie 110 kN.

Tabela 5

Maksymalne wartości przyspieszeń składowej pionowej drgań [cm/s^2] w odległości 1m za przegrodą dla wymuszenia o częstotliwości 8 Hz

Punkty pomiarowe	Rodzaj przegrody			
	Brak	Pustka	Beton	Szkoło akrylowe
(6,0)	62,97	33,87	56,72	58,59
(6,-1)	64,27	33,26	58,22	60,32
(6,-2)	60,56	31,75	56,85	57,90
(6,-3)	54,13	31,34	54,22	53,46
(6,-4)	47,43	30,97	49,59	48,29

Tabela 6

Maksymalne wartości przyspieszeń składowej poziomej drgań [cm/s^2] w odległości 1m za przegrodą dla wymuszenia o częstotliwości 8 Hz

Punkty pomiarowe	Rodzaj przegrody			
	Brak	Pustka	Beton	Szkoło akrylowe
(6,0)	52,03	16,89	51,07	50,39
(6,-1)	26,66	17,99	29,68	26,86
(6,-2)	22,01	17,76	21,85	23,07
(6,-3)	30,13	17,14	30,03	30,74
(6,-4)	36,77	25,88	41,50	37,00

W tabelach 7 i 8 zestawiono maksymalne wartości przyspieszeń dla warunków jak wyżej, z uwzględnieniem siły wymuszającej o częstotliwości 55 Hz i amplitudzie 230 kN.

Tabela 7

Maksymalne wartości przyspieszeń składowej pionowej drgań [cm/s^2] w odległości 1m za przegrodą dla wymuszenia o częstotliwości 55 Hz

Punkty pomiarowe	Rodzaj przegrody			
	Brak	Pustka	Beton	Szkoło akrylowe
(6,0)	20,35	4,04	14,95	15,93
(6,-1)	23,09	3,89	18,03	19,29
(6,-2)	19,73	4,00	17,63	17,72
(6,-3)	13,70	5,55	15,52	13,91
(6,-4)	10,13	6,44	10,55	10,00

Tabela 8

Maksymalne wartości przyspieszeń składowej poziomej drgań [cm/s^2] w odległości 1m za przegrodą dla wymuszenia o częstotliwości 55Hz

Punkty pomiarowe	Rodzaj przegrody			
	Brak	Pustka	Beton	Szkoło akrylowe
(6,0)	31,35	2,22	32,44	29,71
(6,-1)	20,02	1,91	24,62	20,44
(6,-2)	18,66	2,62	21,37	20,69
(6,-3)	19,32	4,41	22,31	21,33
(6,-4)	19,05	13,32	22,91	19,28

4. Podsumowanie

W pracy przeanalizowano efektywność przegrody wibroizolacyjnej uwagi na redukcję drgań powierzchniowych w gruncie. Porównanie wartości maksymalnych przemieszczeń i przyspieszeń drgań stanowiło podstawę do wstępnej oceny efektywności rozpatrywanych typów przegród wibroizolacyjnych. Analiza całości wyników pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

1. Najskuteczniejsza okazała się przegroda w postaci pustki powietrznej. Obliczenia wykazały jej wysoką skuteczność we wszystkich niemal przypadkach obliczeń. Pusty rów w odległości 5 m od źródła drgań redukował nawet o 93% wartości maksymalnych poziomych przyspieszeń drgań wywołanych wymuszeniem o częstotliwości 55 Hz i amplitudzie 230 kN. Przegroda ta najlepiej redukowała przemieszczenia zarówno pionowe i poziome na powierzchni, jak i w poziomach posadowienia budynków.
2. Przy zastosowaniu przegrody z betonu w odległości 5 m od źródła drgań następuje redukcja przemieszczeń drgań na powierzchni gruntu do 10% przy wymuszeniu o częstotliwości 8 Hz i sile wymuszającej 110 kN. Redukcja poziomu drgań wynosi nawet 26% przy wymuszeniu siłą o częstotliwości 55 Hz i amplitudzie 230 kN. Niestety efektywność tej przegrody maleje po odsunięciu przegrody od źródła drgań. Stwierdzono jednak, że przegroda betonowa w zaledwie małym stopniu redukuje przemieszczenia i przyspieszenia poziome na powierzchni gruntu, prowadząc niekiedy nawet do wzrostu maksymalnych ich wartości.
3. Przegroda ze szkła akrylowego, potocznie nazywanego pleksiglas, okazała się zbliżona właściwościami wibroizolującymi do przegrody z betonu. Stwierdzono, że redukuje ona

poziom drgań prawie o 22% przy wymuszeniu o częstotliwości 55 Hz i amplitudzie 230 kN. Ponadto, w przeciwieństwie do betonu, znacznie lepiej redukuje przyspieszenia i przemieszczenia składowej poziomej drgań na powierzchni gruntu.

Przyjęty w obliczeniach model numeryczny może być dodatkowo udoskonalany m.in. przez precyzyjniejszy opis tłumienia drgań w gruncie, przyjęcie do opisu gruntu dokładniejszych modeli oraz zastosowania elementów brzegowych pochłaniających fale.

LITERATURA

1. Ciesielski R., Maciąg E.: Drgania drogowe i ich wpływ na budynki. WKiŁ, Warszawa 1990.
2. Ciesielski R., Masłowski R., Zięba A.: Badanie przydatności numerycznego, tarczowego modelu do opisu powierzchniowej propagacji drgań w podłożu gruntowym. Materiały Sympozjum „Wpływy sejsmiczne i parasejsmiczne na budowlę”, Politechnika Krakowska, Kraków 1991, s. 89-102.
3. Domski W., Szypuła K.: Dobór modelu numerycznego do opisu propagacji drgań w podłożu gruntowym z przegrodą. Materiały Sympozjum „Wpływy sejsmiczne i parasejsmiczne na budowlę”, Politechnika Krakowska, Kraków 1994, s. 285-292.
4. Tataro T.: Badanie skuteczności dynamicznej nowego rozwiązania ułożenia torów tramwajowych. Inżynieria i Budownictwo, nr 4, 2004, s. 206-212.
5. Tataro T., Dieterman H.A.: Numerical investigations of wave propagation in a layer between two half-spaces. TU-Delft report 25.2.92.2.8., May 1992.
6. Winowski J., Wrana B.: Numeryczne wyznaczanie propagacji fal w podłożu gruntowym dla stacji metra A-9 w Warszawie. V Sympozjum „Wpływy sejsmiczne i parasejsmiczne na budowlę”, Kraków, listopad 1988, s. 79-87.
7. PN-B-03264:2002 „Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie”.
8. www.matweb.com.