

Model numeryczny nawierzchni kolejowej i podtorza - badania wstępne

Ewelina Kwiatkowska, Jakub Lewandowski

Praca badawcza jest poświęcona opracowaniu modelu numerycznego nawierzchni kolejowej. Opracowanie obejmuje analizę obciążeń nawierzchni kolejowej zbudowanej z podkładów strunobetonowych i strunobetonowych z dwoma typami warstwy izolacji antywibracyjnej. Badania wykonano z wykorzystaniem metody elementów skończonych analizując wpływ typu podkładów kolejowych na podtorze kolejowe. Analiza obejmowała redukcję naprężeń w podtorzu w wyniku zastosowania izolacji antywibracyjnej na spodniej powierzchni podkładu.



mgr inż.
Ewelina Kwiatkowska
Politechnika Wrocławska
Wydział Budownictwa
Lądowego i Wodnego
Zakład Infrastruktury
Transportu Szybnego



mgr inż.
Jakub Lewandowski
Politechnika Wrocławska
Wydział Budownictwa
Lądowego i Wodnego
Instytut Inżynierii Lądowej
Zakład Wytrzymałości
Materiałów

Wstęp

Prezentowane wyniki badań wstępnych stanowią kontynuację programu badawczego innowacyjnych materiałów antywibracyjnych stosowanych na liniach kolejowych. Podjęte zagadnienie ochrony antywibracyjnej toru kolejowego stanowi ważne zagadnienie w programie modernizacji i poprawy bezpieczeństwa na polskich liniach kolejowych.

Zarządca infrastruktury, jakim są Polskie Linie Kolejowe dąży w wyniku prowadzących prac modernizacji infrastruktury do poprawy bezpieczeństwa podróżujących koleją, zwiększenia prędkości pociągów towarowych i pasażerskich, zmniejszenia emisji hałasu na obszarach zurbanizowanych i objętych ochroną w ramach programu Natura 2000. Prowadzone inwestycje infrastrukturalne poddawane są programowi kontroli w ramach TSI nakładających na projektantów modernizacji linii kolejowych i wykonawców prac budowlanych zapewnienie realizacji inwestycji zgodnie z ustawodawstwem Unii Europejskiej i polskimi przepisami prawa.

Dążąc do zapewnienia bezpieczeństwa podróży poprzez prawidłowe utrzymanie nawierzchni kolejowej w okresie eksploatacji i utrzymania maksymalnych prędkości jazdy pociągów kolej staje się alternatywą dla komunikacji samochodowej. Zmniejszając emisję hałasu generowanego przez pociągi pasażerskie i towarowe w obszarach zurbanizowanych może skutecznie konkurować z innymi środkami transportu lądowego. Polskie Linie Kolejowe wprowadzając kolejnictwo polskie w XXI wiek zobligowane są do wprowadzania innowacyjnych materiałów budowlanych w konstrukcji nawierzchni i na linii kolejowej.

W niniejszej pracy zostanie omówione wstępne zagadnienie projektowania modelu numerycznego nawierzchni kolejowej zbudowanej z innowacyjnych na rynku polskim podkładów strunobetonowych z izolacją antywibracyjną. Izolacja antywibracyjna stosowana w postaci mat jest montowana w konstrukcji podkładu strunobetonowego na etapie produkcji w wytwórni [1].

Podkłady strunobetonowe z sprężystymi podporami antywibracyjnymi

Podkłady strunobetonowe z izolacją antywibracyjną stosowaną na styku podkładu i podsypki tłuczniowej stosowane są powszechnie na liniach kolejowych niemieckich i austriackich. Podkłady ze sprężystymi podporami w postaci mat antywibracyjnych stosowanych na spodniej powierzchni stosowane są w celu zmniejszenia oddziaływań akustycznych na otoczenie linii kolejowej przez obniżenie propagacji drgań przekazywanych przez nawierzchnię do podtorza i dalej na konstrukcje budynków w terenach zurbanizowanych.

Warstwa izolacji antywibracyjnej stosowana na styku podkładu z podsypką zwiększa również w istotny sposób siły oporu nawierzchni na przesuw poprzeczny. W szczególności na liniach kolejowych o wąskich łukach mniejszych niż 300 metrów zalecane stosowanie jest izolacji antywibracyjnej w celu zmniejsze-

nie deformacji toru w kierunku poprzecznym wywołanych siłami odśrodkowymi.

Zmniejszenie deformacji toru kolejowej uzyskane w wyniku stosowania izolacji antywibracyjnej wpływa na zwiększenie powierzchni kontaktu toru z ziarnami podsypki tłuczniowej. Zwiększenie powierzchni kontaktu podkładu z podsypką tłuczniową wpływa na zmniejszenie degradacji ziarna tłucznia wydłużając okres eksploatacji toru. Wydłużenie okresów między naprawczych wydatnie zmniejsza koszty eksploatacji toru kolejowego.

Izolacja antywibracyjna zmniejsza przeciążenia dynamiczne, jakim jest poddawany tor kolejowy w wyniku obciążeń od pociągu pasażerskiego. Przeciążenia dynamiczne na poziomie podtorza kolejowego przy zastosowaniu izolacji antywibracyjnej z porównaniu z torem o podkładach bez izolacji antywibracyjnej są dwa razy mniejsze. Świadczą o tym średnie przyspieszenia drgań mierzonych w podtorzu. Mniejsze przeciążenia na poziomie podtorza wpływają na zmniejszenie odkształceń nawierzchni poprawiając bezpieczeństwo i komfort podróżujących koleją [2]

Cel badawczy

Niniejsza praca ma na celu opracowanie wstępnego modelu numerycznego nawierzchni kolejowej i podtorza. Analizie poddane zostaną, deformacje jakim ulega nawierzchnia kolejowa zbudowana z podkładów strunobetonowych oraz wpływ zastosowanych izolacji antywibracyjnych na spodniej powierzchni podkładów strunobetonowych na redukcję naprężeń w podtorzu kolejowym. Opracowany model na celu porównanie wyników symulacji komputerowych degradacji toru kolejowego w zależności od nawierzchni z wynikami pomiarów propagacji drgań realizowanych na torze kolejowym.

Opracowany model nawierzchni kolejowej ma na celu porównanie wyników oddziaływań nawierzchni na podtorze w zależ-

ności od typu podkładów kolejowych oraz stworzenie narzędzia do projektowania izolacji antywibracyjnej dostosowanej do obciążenia linii kolejowej, w celu uzyskania najefektywniejszych oddziaływań na poziomie podtorza kolejowego.

Symulacje komputerowe nawierzchni kolejowej umożliwią pracę na zmiennych parametrach technicznych zamodelowanego materiału podkładów kolejowych i izolacji antywibracyjnej. W wyniku kalibracji modelu zostanie opracowany sposób oceny doboru paramentów technicznych modelu w zależności typu obciążenia [3].

Metoda badawcza

W pracy wykorzystano oprogramowanie komputerowe bazujące na metodzie elementów skończonych (MES). MES jest numeryczną metodą rozwiązywania układów równań różniczkowych. MES jest alternatywą do metod analitycznych, bardziej pracochłonnych, wymagających wprowadzenia ograniczających założeń w celu uzyskania rozwiązania. MES ma powszechne zastosowanie w różnych dziedzinach nauki, m.in. w mechanice, budownictwie, energetyce. Metodę elementów skończonych wykorzystuje się do rozwiązywania zagadnień statyki i dynamiki konstrukcji przestrzennych.

W programie Abaqus 6.12, wykorzystującym MES, opracowano trójwymiarowy model nawierzchni kolejowej oraz podtorza, który umożliwia wyznaczenie naprężeń w podtorzu w zależności od przyjętego materiału podkładów oraz wibroizolacji. Konstrukcję poddano działaniu obciążenia statycznego [4].

Opis modelu MES

Do modelu wykorzystano odcinek toru kolejowego. W prezentowanych wstępnych wynikach badań odcinek zbudowany jest z 6 podkładów strunobetonowych PS 94, dwóch typów podkładek izolacyjnych pod podkładami grubości 10 mm, warstwa tłuczni granitowego grubości 35 cm, spoczywającego na podtorzu.

Ze względu na wstępny charakter pracy odcinek toru dostosowano do założeń prowadzonych prac badawczych. W wyniku kalibracji modelu uwzględniono zanikające oddziaływanie na końcach odcinka, potwierdzając poprawność przyjętej długości modelu.

Założenia modelu: szynę zamodelowano jako belkę o przekroju prostokątnym, którego moment bezwładności odpowiada momentowi bezwładności szyny 60E1. Zastosowano element skończony Abaqus'a o nazwie B31. Pozostałe elementy:

Tabela 1. Charakterystyka materiałów poszczególnych elementów zdefiniowanych w modelu

Element	Moduł Younga [MPa]	Współczynnik Poissona [-]
Szyna 60 E1	210 000	0,3
Podkład strunobetonowy PS 94	70 000	0,3
Izolacja typ 1	1	0,3
Izolacja typ 2	2	0,3
Podsypka tłuczniowa	150	0,35
Podtorze	120	0,3

podkłady, izolację, warstwę podsypki, tłuczni oraz gruntu modelowano jako 8-węzłowe elementy przestrzenne C3D8R. Materiał wszystkich elementów jest izotropowy.

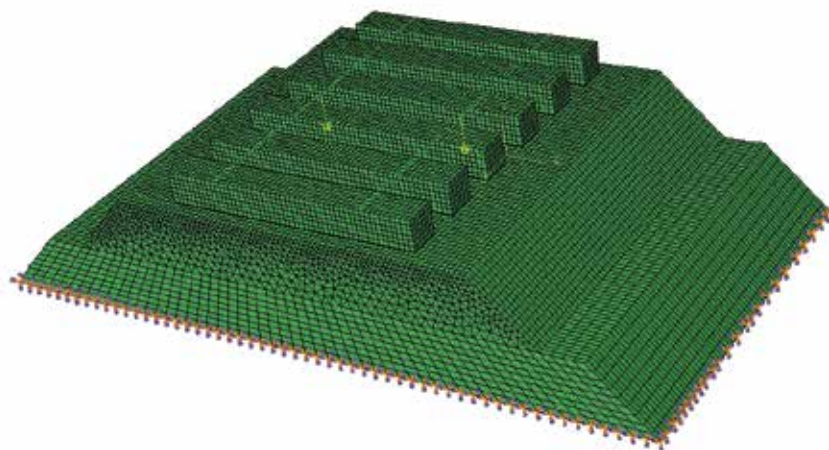
Następnie na wszystkie elementy nałożono takie siatki MES, aby uzyskać ich zgodność po połączeniu elementów. Zgodność siatek na powierzchni połączenia między różnymi elementami jest wymagana dla zachowania ciągłości modelu. Każdy węzeł elementu belkowego opisuje 6 parametrów (3 przemieszczenia i 3 obroty), natomiast zastosowane elementy przestrzenne (stanowiące podkład) mają 3 parametry węzłowe (3 przemieszczenia). Niniejsza praca poświęcona jest analizie naprężeń w podtorzu kolejowym w wyniku czego pominięto szczegółowe opisywanie elementów konstrukcyjnych nawierzchni w celu optymalizacji rozwiązania numerycznego. Założono sztywne połączenie pomiędzy wszystkimi elementami. Pominięto warstwę tłuczni

ponad podstawą podkładu kolejowego.

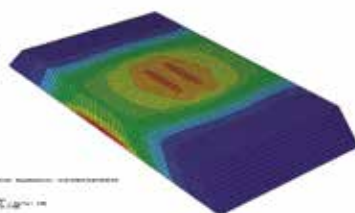
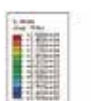
Obciążenie stanowią dwie siły skupione o wartości 55kN, symulujące nacisk osi pociągu na tor. Siły te są przyłożone w połowie rozpiętości modelowanej szyny. Podparcie modelu zapewniono poprzez zablokowanie przesułów (X,Y,Z) na powierzchni dolnej warstwy gruntu.

Wyniki badań

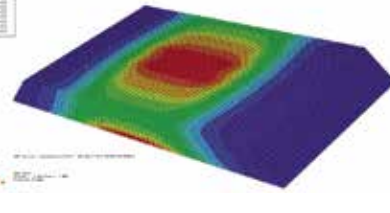
Analizie poddano wyniki obciążenia statycznego nawierzchni dwoma siłami skupionymi przyłożonymi pionowo w środku badanego odcinka toru kolejowego. Przyłożono dwie siły pionowe o wartości 55 kN prostopadle do szyny nad podkładem. Model obciążenia zastosowano w trzech badanych typach nawierzchni. Analizie porównawczej poddano dwa typy izolacji antywibracyjnej na spodniej powierzchni podkładów i nawierzchnię bez izolacji na



1. Schemat statyczny konstrukcji



2. Naprężenia na poziomie podtorza kolejowego. Nawierzchnia z podkładami strunobetonowymi z izolacją antywibracyjną typu 1



3. Naprężenia na poziomie podtorza kolejowego. Nawierzchnia z podkładami strunobetonowymi z izolacją antywibracyjną typu 2

Tabela 2. Wpływ zastosowania izolacji antywibracyjnej na zmniejszenie naprężeń w torze w porównaniu z brakiem izolacji pod podkładami

Naprężenia w:	Izolacja antywibracyjna typu 1 [kPa]	Izolacja antywibracyjna typu 2 [kPa]
osi toru	0,25	1,28
na końcach podkładów	0,18	0,867

styku podkładu i podsypki. Analizie poddano wyniki naprężeń zarejestrowanych na styku podsypki z podtorzem kolejowym. W opracowanym modelu nawierzchni toru i obciążenia szczególną uwagę poświęcono naprężeniom w podtorzu kolejowym przyjmując uproszczony model toru.

Wyniki badań dla pierwszego modelu

Pierwszy model umożliwiał analizę statyczną naprężeń w podtorzu kolejowym dla nawierzchni kolejowej o podkładach strunobetonowych PS94 z izolacją typu 1. Zastosowana izolacja ma grubość 10 mm i moduł Younga 1 MPa. Przyjęte obciążenie stanowi połowę maksymalnego obciążenia dla linii kolejowej wynoszące 110 kN na oś.

Maksymalne naprężenia w podtorzu kolejowym zarejestrowano w osi toru wynoszące 15,89 kPa. W osi szyny naprężenie wynosi 14,58 kPa, na końcach podkładów z żelówkami 10,64 kPa (rys.2).

Wyniki badań dla drugiego modelu

Drugi model umożliwiał analizę statyczną naprężeń w podtorzu kolejowym dla nawierzchni kolejowej o podkładach strunobetonowych PS94 z izolacją typu 2. Zastosowana izolacja ma grubość 10 mm i moduł Younga 2 MPa. Przyjęte obciążenie stanowi połowę maksymalnego obciążenia dla linii kolejowej wynoszące 110 kN na oś.

Maksymalne naprężenia w podtorzu kolejowym zarejestrowano w osi toru wynoszące

14,86 kPa. W osi szyny naprężenie wynosi 13,63 kPa, na końcach podkładów z żelówkami 9,953 kPa (rys.3).

Analizie poddano dwa typy izolacji antywibracyjnej o grubości 10 mm. Parametrem zmiennym przy modelowaniu parametrów technicznych izolacji był moduł Younga. Przyjęto moduł dla izolacji pierwszego równy 1 MPa, a dla izolacji typu 2 przyjęto wartość 2 MPa. Przy zastosowaniu izolacji o dwukrotnie większym module uzyskano zmniejszenie naprężeń w podtorzu wynosząco 0.103 e⁴ Pa.

Wyniki badań dla trzeciego modelu.

Trzeci model umożliwiał analizę statyczną naprężeń w podtorzu kolejowym dla nawierzchni kolejowej o podkładach strunobetonowych PS94 bez wibroizolacji. Przyjęte obciążenie stanowi połowę maksymalnego obciążenia dla linii kolejowej wynoszące 110 kN na oś.

Maksymalne naprężenia w podtorzu kolejowym zarejestrowano w osi toru wynoszące 16,14 kPa. W osi szyny naprężenie wynosi 14,81 kPa, na końcach podkładów strunobetonowego bez żelówki 10,82 kPa (rys.4).

Przeprowadzając analizę porównawczą wyników naprężeń odczytanych na poziomie podtorza kolejowego na styku podsypki tłuczniowej z podtorzem stwierdzono, że zastosowanie żelówki pod podkładem typu pierwszego wpływa na zmianę rozkładu naprężeń w podtorzu w porównaniu z nawierzchnią bez żelówek i zmieszenie naprężeń o 0,25 kPa

w osi toru, zmniejszenie naprężenie na końcach podkładów wynosi 0,18 kPa. Przy zastosowaniu żelówki typu drugiego zmniejszenie poziomu naprężeń w osi toru wynosi 1,28 kPa, zmniejszenie naprężenie na końcach podkładów wynosi 0,867 kPa (tab.2)

Podsumowanie

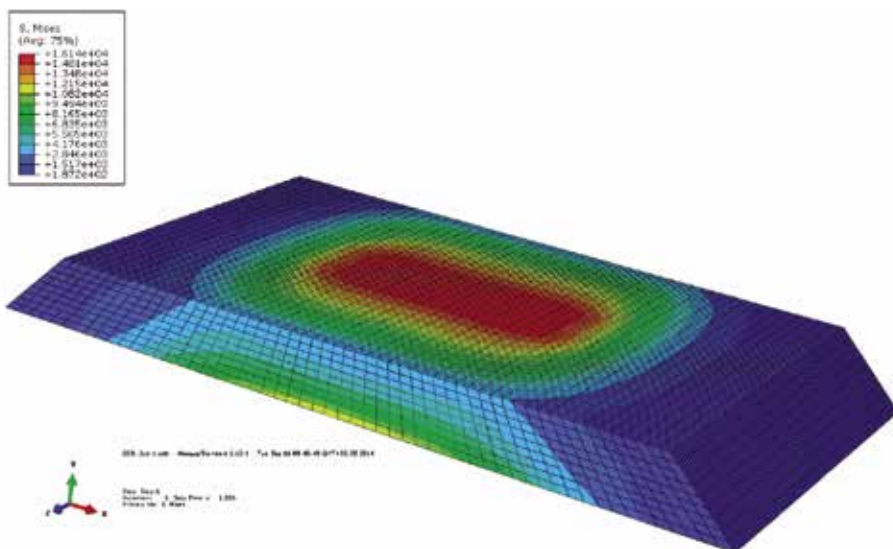
Wyniki badań wstępnych wykazały znaczący wpływ zastosowania izolacji antywibracyjnej na spodniej powierzchni podkładów strunobetonowych na poziom naprężeń w podtorzu kolejowym. Wielkość naprężeń odczytanych na poziomie kontaktu podsypki tłuczniowej z podtorzem zależy od typu zastosowanej izolacji antywibracyjnej na spodniej powierzchni podkładu strunobetonowego. W badaniach wstępnych zastosowania dwa typy izolacji antywibracyjnej o stałej grubości i o zmiennym module Younga, wykazując wpływ typu izolacji antywibracyjnej zastosowanej na spodniej powierzchni podkładu na naprężenia w podtorzu kolejowym.

Ograniczenie naprężeń w podtorzu kolejowym ma wpływ na trwałość podtorza i w konsekwencji na degradację nawierzchni kolejowej. Zmniejszenie naprężeń w podtorzu kolejowym wpłynie na wydłużenie okresów między naprawczych linii kolejowej, utrzymując niezmienną geometrię toru kolejowego, zmniejszając koszty utrzymaniowe infrastruktury [5].

Planowane są dalsze prace nad modelem numerycznym nawierzchni kolejowej z wykorzystaniem metody elementów skończonych, wprowadzając obciążenie dynamiczne nawierzchni. Prowadzić to będzie do doprecyzowania metody doboru izolacji antywibracyjnej stosowanej w podkładach strunobetonowych w celu ochrony antywibracyjnej nawierzchni kolejowej i podtorza oraz zmniejszenia emisji akustycznej. ◀

Materiały źródłowe:

- [1] Kwiatkowska E. Innowacyjne badania podtorza kolejowego, Technika transportu szynowego 4/2013,
- [2] Kwiatkowska E. Betonowe podkłady z wibroizolacją, Badania i analizy wybranych zagadnień z budownictwa, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej Gliwice 2011,
- [3] Krużyński M., Kwiatkowska E., Zwolski J. Badania dynamiczne toru kolejowego, Przegląd komunikacyjny 11/2012,
- [4] Skrzyński E.: Podtorze kolejowe, KOW, Warszawa 2010,
- [5] Krużyński M., Kwiatkowska E., Ochorna torowiska w efekcie stosowania wibroizolacji podkładów kolejowych.



4. Naprężenia na poziomie podtorza kolejowego. Nawierzchnia z podkładami strunobetonowymi bez izolacji antywibracyjnej