

METODYKA OBLICZENIA WSPÓŁCZYNNIKA SZTYWNOŚCI PODŁOŻA POD TOROWISKIEM

W artykule zaprezentowano metodykę obliczeniową współczynnika sztywności podłoża pod torowiskiem. Omówiono przygotowanie modeli numerycznych oraz wyznaczenie współczynnika sztywności za pomocą analiz numerycznych. Przedstawiono zależności pomiędzy generowaniem drgań w funkcji przekroju konstrukcyjnego torowiska oraz parametrów materiałowych poszczególnych warstw podbudowy.

WSTĘP

Każdy ośrodek sprężysty odkształca w skutek działającego nań obciążenia w zależności od typu i wartości sił (obciążenie skupione, ciągłe, impulsowe, o charakterze jednorazowym, harmonicznym, okresowym czy stochastycznym itd.) a do nich należy układ podłoża torowiska pojazdów szynowych. Ośrodki o budowie litej (skały) odkształcają się stosunkowo niewiele, ale z dużą intensywnością, szybko. Odkształcenia te są praktycznie rzecz biorąc całkowicie odwracalne (jeżeli pozostają w zakresie odkształceń sprężystych i nie powodują utraty ciągłości ośrodka). Ośrodki rozdrobnione (spękane skały, grunty) do których zaliczyć możemy podtorza, odkształcają się znacznie i stosunkowo wolno, w zależności od rozdrobnienia, porowatości i spójności ośrodka oraz wartości działających na nie sił. Odkształcenia te są tylko częściowo odwracalne. Ośrodek rozdrobniony charakteryzuje się istnieniem dużych porów między ziarnami i sił wewnętrznych które wpływa znacznie na rozproszenie energii przekazywanej bezpośrednio od pojazdu szynowego. Nieregularny układ ziaren i cząstek powoduje, że przy czystym ściskaniu niektóre elementy są bardziej obciążone, co prowadzi do wzajemnego trwałego przemieszczenia ziaren i cząstek, a więc do nieliniowych i najczęściej nieodwracalnych odkształceń ośrodka rozdrobnionego. Należy także pamiętać, że w punktach kontaktu ziaren lub cząstek występują znacznie większe naprężenia obliczeniowe, odniesione do całego przekroju gruntu. W ośrodkach gruntowych między odkształceniami i naprężeniami nie ma zależności liniowej. Dla odróżnienia parametrów odkształcalności gruntów od ciał sprężystych wprowadzony został:

1. moduł odkształcenia E – w warunkach jednoosiowego ściskania i swobodnej bocznej rozszerzalności gruntu,
2. moduł ściśliwości (edometryczny) M – w warunkach jednoosiowego ściskania, bez możliwości bocznej rozszerzalności próbki gruntu.

Przy powtórnych obciążeniach i odciążeniach krzywe odkształcalności gruntu są powtarzalne i równoległe do siebie – można więc założyć że istnieje pewna sprężystość gruntu.

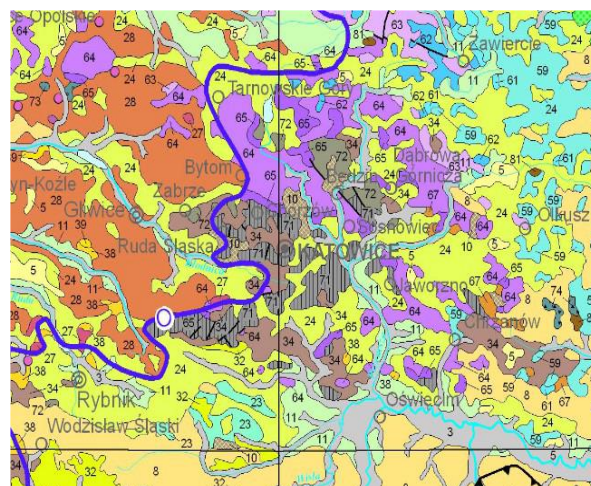
Zagadnienie, które jest tematem artykułu to wyznaczenie współczynnika sztywności podłoża pod torowiskiem pojazdu szynowego. Istniejące metody doświadczalne są oparte na badaniach laborato-

ryjnych i polegają na wyznaczeniu modułu Younga E i modułu edometrycznego M , który jest również modułem Younga wyznaczonym z pewnymi ograniczeniami, które nie pozwalają rozszerzalność objętościową. Stąd też idea aby wyznaczyć sztywność podłoża torowiska z wykorzystaniem analizy numerycznej, jako podejścia systemowego do dróg transportu szynowego i ich oddziaływania dynamicznego na otoczenie oraz doboru systemów wibroizolacji.

1. MODEL NUMERYCZNY

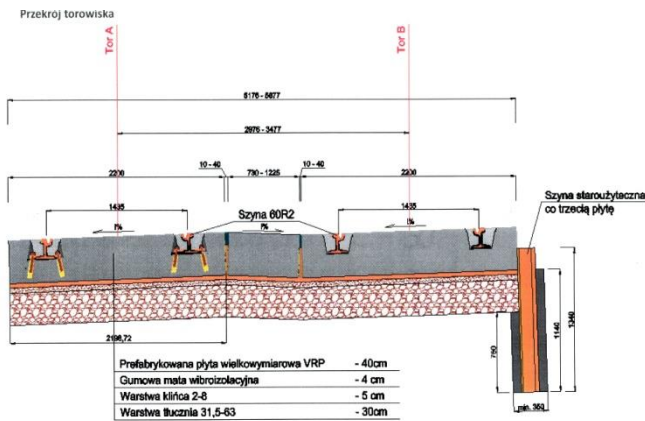
1.1. Konstrukcja podtorza

W celu przeprowadzenia symulacji rozchodzenia się drgań w gruncie [7] przyjęto model obliczeniowy odwzorowujący usytuowanie torowiska pojazdu szynowego, budowę jego podtorza oraz strukturę geologiczną np. dla obszaru Górnego Śląska przedstawioną na rysunku 1.



Rys. 1. Mapa geologiczna Polski – obszar aglomeracji śląskiej w skali 1:500 000

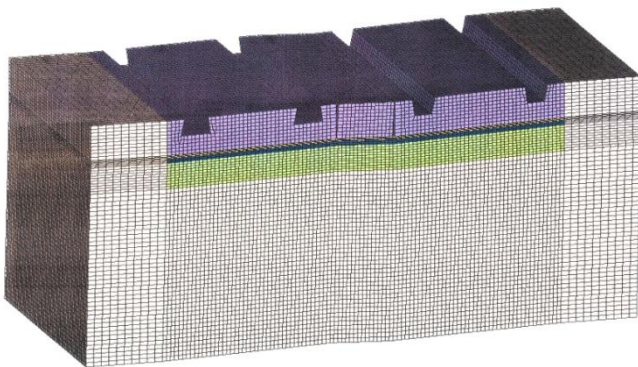
Siatka elementów skończonych została przygotowana w taki sposób, aby stosunkowo niskim nakładem pracy można ją było zaadoptować do każdego innego rozwiązania systemu torowiska bez i z wibroizolacją. Na rysunku 2 przedstawiono typowy przekrój poprzeczny torowiska z jego elementami konstrukcyjnymi.



Rys. 2. Przekrój torowiska pojazdu szynowego

1.2. Siatka modelu numerycznego

W celu przeprowadzenia symulacji rozchodzenia się drgań od torowiska tramwajowego przyjęto jego model obliczeniowy, w postaci siatki, która odwzorowuje typowe usytuowanie torowiska pojazdu szynowego przedstawionego na rysunku 3. Model może uwzględniać różne rodzaje i typy gruntu.



Rys. 3. Szczegółowa siatka modelu numerycznego torowiska tramwajowego

Czas całkowania został tak dobrany, aby zachowane zostało kryterium Courant'a przy możliwie małym skalowaniu masy (<2.5%). Dodatkowo została określona maksymalna długość elementu, aby poprawnie odwzorować zjawiska falowe w wyższych częstotliwościach [2].

1.3. Materiałowe dane obliczeniowe dla modelu numerycznego

Dane materiałowe gleby zostały opracowane na podstawie badań geologicznych. Ze względu na stosunkowo duże różnice gleb składowych pomiędzy poszczególnymi otworami pomiarowymi, do obliczeń przyjęto średnie wartości sztywności materiału na podstawie Dz.U. z 1999 nr 43 poz. 430, który zawiera dane materiałowe nawierzchni drogowych przyjęte do obliczeń. Tłumienie i sztywność użyte w analizach przyjęto na podstawie publikacji [5] oraz [6]. Zestawienie danych materiałowych przedstawiono w tabeli 1.

Tab.1. Dane materiałowe użyte w obliczeniach numerycznych

	Podkładka wibroizolująca	Tłuczeń granitowy	Kliniec	Płyta dociskowa
Gęstość [t/mm ³]	1,20E-09	2,0E-09	2,20E-09	2,5E-09

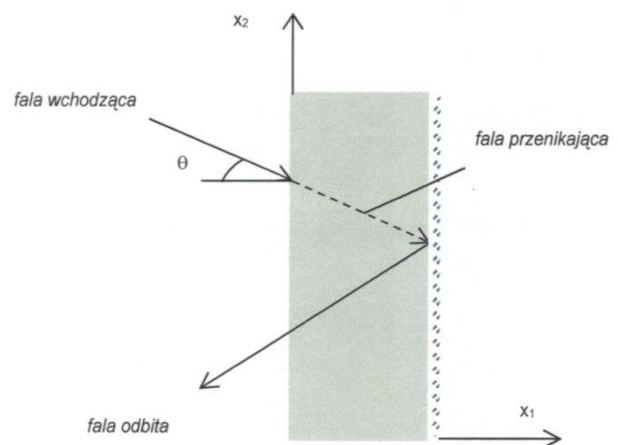
Tab.1. Dane materiałowe użyte w obliczeniach numerycznych

	Podkładka wibroizolująca	Tłuczeń granitowy	Kliniec	Płyta dociskowa
Współczynnik tłumienia krytycznego	0,05	0,03	0,02	0,02
Współczynnik Poisson'a	0,49	0,3	0,2	0,2
Moduł edometryczny [MPa]	-	-	-	-
Moduł Younga [MPa]	3,204E+05	200	12900	34000
Prędkość dźwięku [mm/s]	7,2	3,187E+05	2,552E+06	3,887E+06

	Gleba
Gęstość [t/mm ³]	1,80E-09
Współczynnik tłumienia krytycznego	0,03
Współczynnik Poisson'a	0,25
Moduł edometryczny [MPa]	84,98
Prędkość dźwięku [mm/s]	2,173E+05
Moduł Younga [MPa]	70,81

1.4. Warunki brzegowe dla modelu numerycznego

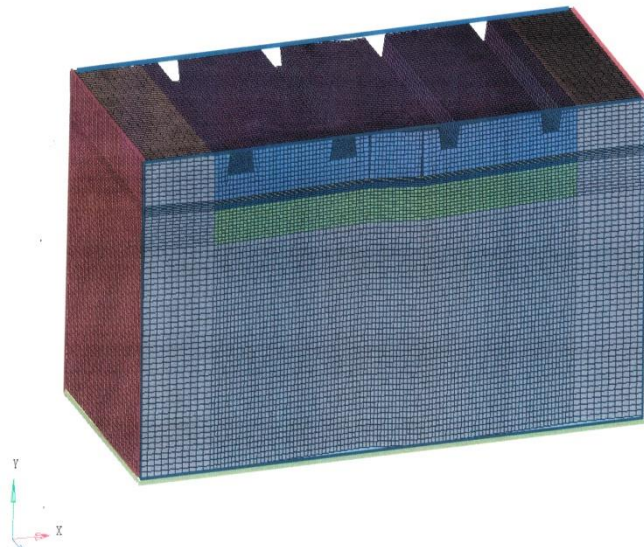
Ponieważ analizy geomechaniczne wiążą się z nieograniczoną domeną obliczeniową, w modelu numerycznym musi ona zostać ograniczona, aby osiągnąć racjonalne czasy obliczeń. W celu ograniczenia brzegu domeny zostały użyte specjalne warunki brzegowe, nie odbijające fal – model PML (ang. perfectly matching layer) [3] według założeń przedstawionych na rysunku 4.



Rys.4. Schemat działania warunku brzegowego PML

Poprzez zastosowanie specjalizowanych warunków brzegowych w oparciu o rysunek 4. wyniki obliczeń nie zostaną zaburzone przez zjawiska takie jak odbicie czy interferencja fal. Rysunek 5 zamieszczony poniżej przedstawia domenę obliczeniową wraz z warunkami brzegowymi symulacji. Model został podparty na każdej po-

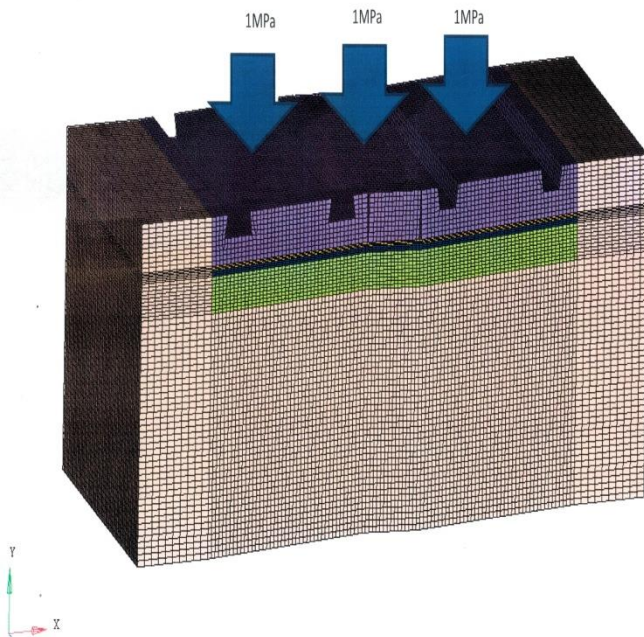
wierzchni w kierunku normalnym do powierzchni ograniczającej domenę obliczeniową. Kolory odpowiadają osiom układu współrzędnych w kierunku których zostały odebrane stopnie swobody.



Rys.5. Schemat podparcia modelu

1.5. Wymuszenie drgań – obciążenia przyjęte jako parametr wejściowy do symulacji

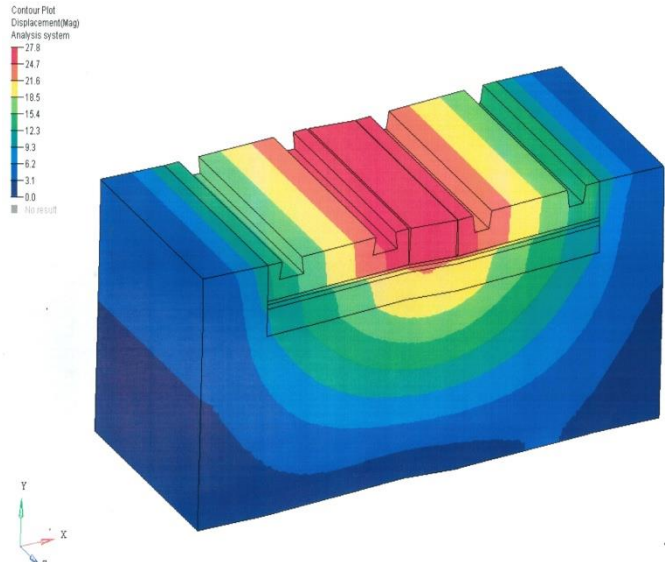
W celu wyznaczenia parametru sztywności objętościowej podłoża pod torowiskiem powierzchnie płyt dociskowych torowiska obciążono ciśnieniem 1 MPa jak przedstawiono na rysunku 6.



Rys.6. Schemat obciążenia modelu

2. WYNIKI OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH

Wyniki analiz numerycznych zaprezentowano w postaci rozkładu przemieszczeń (odkształceń) na rysunku 7.



Rys.7. Rozkład amplitud przemieszczeń podłoża pod torowiskiem

Wyniki obliczeń podstawowych parametrów do wyznaczenia sztywności objętościowej podłoża pod torowiskiem przedstawione są w tabeli 2

Tab.2. Dane do obliczeń numerycznych i wyniki obliczeń numerycznych podstawowych parametrów podłoża niezbędnych do wyznaczenia sztywności

Opis	Symbol	Wartość	Jednostka	Komentarz
Nacisk na oś	N	120	kN	Wartość założona
Wymiar płyty	A	0,6	m	Dane producenta
Wymiar płyty	B	2,2	m	Dane producenta
Moduł Younga gleby	E	70000	kPa	Dane referencyjne
Współczynnik α	α	0,9		Dane dla gliny
Ciężar objętościowy gruntu	γ	18	kN/m ³	Dane referencyjne
Obciążenie płyty	σ	91	kPa	Wzór 1
Zasięg przemieszczeń podłoża	z_0	0,68	m	Wzór 2

Wykorzystując następnie zależności na naprężenia w postaci:

$$\sigma = \frac{N}{A * B} \quad (1)$$

oraz na zasięg przemieszczenia się podłoża według zależności przedstawionej poniżej:

$$z_0 = \frac{\alpha}{\ln\left(\frac{E}{\sigma}\right)} * \frac{\sigma}{\gamma} \quad (2)$$

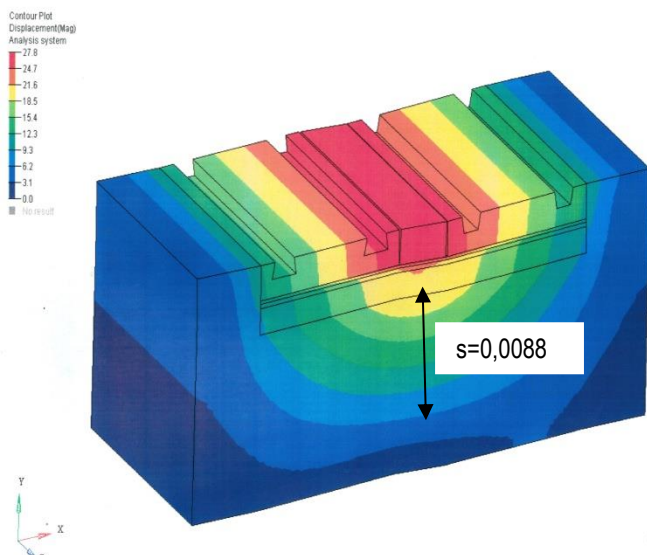
Można wyznaczyć współczynnik sztywności objętościowej według zależności:

$$k = \frac{\sigma}{s} \quad (3)$$

gdzie:

s – maksymalna amplituda (dla prowadzonych analiz s = 0,0088 m).

Stąd wartość współczynnik sztywności objętościowej podłoża pod torowiskiem, które wynosi k = 113 MN/m³. Rozkład i głębokość penetracji przemieszczeń podłoża przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Rozkład i głębokość penetracji przemieszczeń podłoża.

PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych symulacji modelu numerycznego podłoża wibroizolowanego można wnioskować że istnieje możliwość na podstawie analizy numerycznej wyznaczenia sztywności podłoża pod torowiskiem pojazdu szynowego. Przedstawiony model numeryczny należy zweryfikować doświadczalnie i może to stanowić podstawę do projektowania podłoża o ograniczonym oddziaływaniu dynamicznym.

BIBLIOGRAFIA

1. Bednarz J., *Metodologia badania drgań gruntu powodowanych ruchem pojazdów szynowych*. TTS - Technika Transportu Szynowego, R. 22 nr 12, s. 105–110, 2015.
2. LS-DYNA Theory Manual.
3. LS-DYNA User Manual.
4. Mapa geologiczna Polski 1:500 000.
5. PN-B-02480:1986 - Grunty budowlane- Określenia, symbole, podział i opis gruntów.
6. Targosz J., *Układy wibroizolacji w transporcie szynowym i samochodowym*. Rozprawy Monografie Uczelniane wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2007.
7. Bednarz J., Brożek G., Targosz J., *Symulacja rozchodzenia się fali drganiowej od torowiska tramwajowego*, Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe, 2017 nr 6, s. 518–523.

Methodology of the calculation of the rigidity coefficient of a substrate under the tracks

The article presents the calculation methodology of the substrate stiffness coefficient under the track. The preparation of numerical models and the determination of the stiffness coefficient using numerical analyzes are discussed. The relationship between generating vibrations in the function of the structural cross-section of the track and material parameters of individual foundation layers is presented.

Autorzy:

dr hab. inż. **Jan Targosz** prof. AGH – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, Katedra Robotyki i Mechatroniki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: jantargosz@interia.pl
 prof. dr hab. inż. **Jan Adamczyk** – Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa, e-mail: adamczyk@ciop.pl
 mgr inż. **Maciej Hebda** – EC Engineering Sp. z o.o., ul. Jasnogórska 9, 31-358 Kraków, e-mail: mhebda@ec-e.pl

JEL: L92 DOI: 10.24136/atest.2018.168

Data zgłoszenia: 2018.05.24 Data akceptacji: 2018.06.15