

レール継目部衝撃応答の低減に対する井桁状まくらぎ敷設効果の解析的検討

[土] ○紅露一寛（新潟大），[土] 河野昭子（鉄道総研），[土] 阿部和久（新潟大）

FE simulation on force and vibration reduction of jointed railway track using grid-type sleepers

○ Kazuhiro KORO (Niigata University)

Akiko KONO (RTRI)

Kazuhisa ABE (Niigata University)

We develop the FE-based simulation method of wheel-track vibration phenomena of jointed railway track with grid-type sleepers. Two rails are connected by a supported joint or a suspended joint, and supported by PC sleepers or grid-type sleepers. The vibration of a grid-type sleeper is modeled as a non-prismatic beam supported by elastic foundation. The railjoint supported by a grid-type sleeper enables us to reduce the ballast traction and vertical acceleration because of high stiffness and heavy weight of the grid-type sleeper. The maximum normal stress acting on the surface of a ballast layer is reduced to 50 - 60 % of the maximum stress for the jointed track with normal-shape sleepers.

Key words : grid-type sleeper, wheel-track vibration, railjoint, FEM

1. はじめに

今日、大都市の通勤・通学の大量輸送や、大都市間の高速大量輸送においては、鉄道輸送が主力となっている。鉄道には、鋼製レール上に鋼製の車輪が走行する構造上、軌道には必ずレール継目が存在する。レール継目では、軌道剛性の不連続性や継目部の遊間の存在ゆえに、車輪がレール継目を通過する際には大きな衝撃力が発生する¹⁾。そのため、レール継目近傍はバラスト道床沈下が顕著に進展する箇所の一つであり、その低減のために特殊まくらぎの敷設や、まくらぎ裏面への低弾性衝撃吸収材の貼付、重量の大きなまくらぎの敷設や高剛性の井桁状まくらぎの敷設などが実施されている²⁾。これらの効果は現場での有効性が確認されており、今後、数値シミュレーションの積極的な活用を含めた合理的な設計法の確立が望まれる。特に、井桁状まくらぎについては、軌道振動解析におけるモデル化や、数値解析による井桁まくらぎ敷設箇所の軌道振動応答の定量評価については、検討が始まったところである。

そこで本研究では、レール継目部を対象とした既存の振動解析手法³⁾をもとに、井桁状まくらぎ敷設時における車輪・軌道連成振動解析を試みる。井桁状まくらぎについては、変断面はりモデルでその振動応答を考慮することで、既存の振動解析手法に簡易に実装できる利点を有している。数値実験を通して、特に、レール継目構造の違いがレール継目部の振動応答、特にまくらぎ加速度やまくらぎ・道床間に作用する垂直応力に及ぼす影響について検討する。

2. 車輪・軌道系の連成振動解析モデル

2.1 車輪・レールおよびレール継目部

本研究では、レール継目部の衝撃応答を評価するために、図1に示す車輪・軌道系の連成振動解析モデル³⁾を用いる。Eulerはりでモデル化したレール上を一つの車輪が一定速度 c で走行する場合を考え、質点で表現した車輪には時間変動のない上載荷重が作用するものとする。車輪・レール接触力は、Hertzの弾性接触理論に基づく非線形接触バネでモデル化する。レールの運動に関する次式の弱形式を有限要素法で離散化する。

$$\begin{aligned} & \int_0^L EI u'' \delta u'' dx + \int_0^L \rho A \ddot{u} \delta u dx \\ &= \sum_{i=1}^{N_w} \delta u(x_i + ct) P_c^{(i)}(t) - \sum_{j=1}^{N_s} \delta u(a_j) F_{rp}^{(j)}(t) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 t 、 x はそれぞれ時間変数とレール長手方向の位置変数、 u 、 δu はそれぞれレールのたわみとその仮想たわみ、 EI 、 ρ 、 A はそれぞれレールの曲げ剛性、密度、断面積である。また、 N_w 、 N_s はそれぞれ車輪とまくらぎの総数、 x_i は各車輪の初期位置、 $P_c^{(i)}$ は各車輪からの接触力、 $F_{rp}^{(j)}$ は各まくらぎからの反力である。

レール継目が存在する場合、継目構造は、図1に示すように遊間を挟んで存在する2本のレール（Eulerはり）と継目板（Eulerはりでモデル化）とをボルト位置で線形バネにより連結したモデルで表現する。なお、レール継目部における車輪とレールとの接触状態においては、レールの不連続箇所の存在によりHertzの接触理論の半無限体近似が成立しない場合や、レール角部での接触が生じ得る。そこで、車輪・レール接触力 P_c は、車輪とレールとの接触状態に応じて、幾何学的関係から定まる車輪・レー

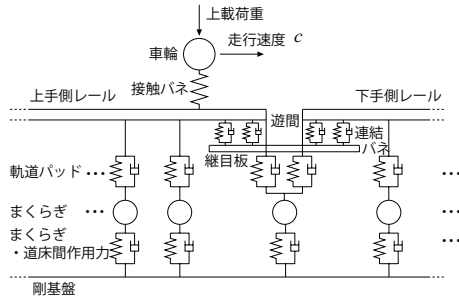


図1 レール継目部のモデル（通常の横まくらぎの場合）

ル間相対変位 δ_c を適切に評価した上で、欠損する接触領域の長さに基づく接触バネの低減率 κ を考慮した次式により簡易評価する³⁾。

$$P_c = \begin{cases} \kappa \cdot k_c \delta_c^{\frac{3}{2}} & (\delta_c > 0) \\ 0 & (\delta_c \leq 0) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 $0 \leq \kappa \leq 1$ であり、 δ_c は車輪・レール間相対変位、 k_c は車輪とレールの Young 率と Poisson 比、接触面の曲率によって定まる接触バネ定数である。

2.2 軌道パッド作用力

レール・まくらぎ間の相互作用力（軌道パッドの作用力）は、Voigt ユニットを用いてモデル化し、次式で与えられる。

$$F_{rp}^{(j)} = k_{rp}^{(j)} \delta_{rp}^{(j)} + \eta_{rp}^{(j)} \dot{\delta}_{rp}^{(j)}, \quad (3)$$

ここで、 $k_{rp}^{(j)}$ 、 $\eta_{rp}^{(j)}$ 、 $\delta_{rp}^{(j)}$ はそれぞれ j 番目の軌道パッドのバネ定数と減衰係数、レール・まくらぎ間の相対変位である。レール・まくらぎ間の相対変位の評価に際し、まくらぎ変位については、通常まくらぎは次小節に示すように質点の鉛直運動を考慮することから、まくらぎ質点の鉛直変位で与える。一方、井桁状まくらぎについては、軌道パッド挿入位置中心点での井桁状まくらぎ・はり要素節点変位で与えるものとする。

2.3 通常まくらぎ、および通常まくらぎ・道床間作用力

今回の解析では、継目直下では井桁状まくらぎ、それ以外の箇所では通常の横まくらぎが敷設される場合を対象とすることから、通常の横まくらぎの振動解析モデルも考えておく。通常の横まくらぎ（以下、通常まくらぎ）の動的応答は、質点の鉛直振動として考慮し、運動方程式は次式で与えられる。

$$m_{slp}^{(j)} \ddot{u}_{slp}^{(j)} = F_{rp}^{(j)} - F_{sb}^{(j)} + m_{slp}^{(j)} g \quad (4)$$

ここで、 $m_{slp}^{(j)}$ 、 $u_{slp}^{(j)}$ はそれぞれ j 番目の通常まくらぎの質量と鉛直変位、 $F_{sb}^{(j)}$ は通常まくらぎ・道床間作用力である。

通常まくらぎ・道床間作用力は、Voigt ユニットを用いてモデル化し、それぞれ次式で与えられる。

$$F_{sb}^{(j)} = k_{sb}^{(j)} \delta_{sb}^{(j)} + \eta_{sb}^{(j)} \dot{\delta}_{sb}^{(j)}, \quad (5)$$

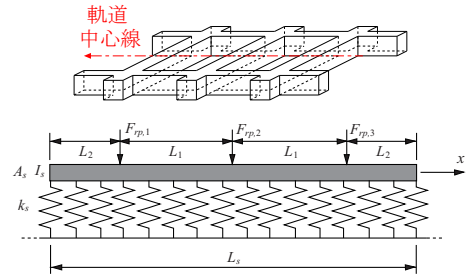


図2 井桁状まくらぎとその振動解析モデル

ここで、 $k_{sb}^{(j)}$ 、 $\eta_{sb}^{(j)}$ はそれぞれ j 番目のまくらぎ・道床間の接触バネ定数、減衰係数であり、 $\delta_{sb}^{(j)}$ はまくらぎ・道床間相対変位である。本研究では、井桁状まくらぎが弾性床に敷設されているものとしているため、通常まくらぎについてもその条件に対応するように、道床上面変位が生じないものとして、まくらぎ・道床間相対変位を評価することとしている。

2.4 井桁状まくらぎ

井桁状まくらぎの動的応答は、図2に示すように軌道中心線に対して左右対称な形状を有しているとして、レール1本に対応する半分の領域を、変断面を有する Euler ばりでモデル化する。なお、井桁状まくらぎは、下面を弾性床で支持されているものとする。運動方程式は、軌道縦断方向のまくらぎの全長を L_s として次式で与えられる。

$$\begin{aligned} & \int_0^{L_s} E_s I_s(x) u_{gs}'' \delta u_{gs}'' dx + \int_0^{L_s} \rho_s A_s(x) \ddot{u}_{gs} \delta u_{gs} dx \\ &= - \int_0^{L_s} k_s(x) u_{gs} \delta u_{gs} dx + F_{rp,1} \delta u_{gs}(L_2) \\ & \quad + F_{rp,2} \delta u_{gs}(L_1 + L_2) + F_{rp,3} \delta u_{gs}(2L_1 + L_2) \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 E_s 、 ρ_s はそれぞれ井桁まくらぎの Young 率と質量密度であり、 $A_s(x)$ と $I_s(x)$ はそれぞれ断面積と断面2次モーメントである（図2参照）。また、 u_{gs} 、 δu_{gs} はそれぞれ井桁まくらぎのたわみ、および仮想たわみであり、 $k_s(x)$ は井桁まくらぎの支持ばね定数である。 $F_{rp,j}$ はレール締結位置でのレール・まくらぎ間作用力である。式(6)に有限要素近似を適用し、レールほか他の構成部材の支配方程式と同一の時間積分法を適用することで、各時刻における求解方程式が得られる。

3. 井桁状まくらぎ敷設による振動応答低減効果

3.1 解析条件

本研究では、井桁状まくらぎ敷設時の振動応答低減効果の定量的な把握を目的として、上述のモデルを用いて振動解析を行った。レール継目構造としては、レール継目直下にまくらぎを配置する「支え継ぎ」とまくらぎを配置しない「かけ継ぎ」の2種類を解析対象とした。なお、かけ継ぎ、支え継ぎともにレール継目の遊間長は5mmとし、通常まくらぎ敷設区間では0.6m間隔に同一形状のPCまくらぎを配置するものとした。走行速度は30m/secとした。軌道各部の材料物性値・形状特性値は、表に示す通りである。なお、予め車輪走行方向に対して手前側のまく

表 1 軌道各部の物性値・形状特性値

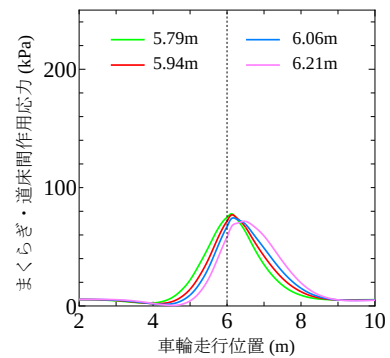
(i) レール		(ii) 継目板	
E (GPa)	206	E (GPa)	206
ρ (kg/m ³)	7850	ρ (kg/m ³)	7850
A (m ²)	64.29×10^{-4}	A (m ²)	67.72×10^{-4}
I (m ⁴)	1960×10^{-8}	I (m ⁴)	606×10^{-8}
R (m)	0.3		
(iii) 軌道パッド		(iv) 通常まくらぎ・道床間	
k_{rp} (MN/m)	110	k_{slp} (MN/m)	74
η_{rp} (kNsec/m)	98	η_{slp} (kNsec/m)	49
(v) 通常まくらぎ		(vii) 大盤まくらぎ・道床間	
m_{slp} (kg)	80	k_{slp} (MN/m)	35
(vi) 大盤まくらぎ		η_{slp} (kNsec/m)	49
m_{slp} (kg)	45		
(ix) 車輪		(x) 井桁状まくらぎ	
E (GPa)	206	E_s (GN/m ³)	33
ν	0.30	ρ_s (kg/m ³)	2.5×10^3
m_w (kg)	697	A_1 (m ²)	6.4×10^{-2}
R_w (m)	0.43	I_1 (m ⁴)	1370×10^{-7}
		k_1 (MN/m ²)	190
		A_2 (m ²)	1.2×10^{-1}
		I_2 (m ⁴)	2560×10^{-7}
		k_2 (MN/m ²)	350

らぎから, No.1, No.2, ... と昇順にまくらぎ番号を設定する. このとき, 支え継ぎの場合継目直下のまくらぎを No.11, かけ継ぎの場合では継目部前後のまくらぎを No.10, No.11 とした. 井桁状まくらぎはコンクリート製で, 支え継ぎ用, かけ継ぎ用の 2 種類を検討対象とした.

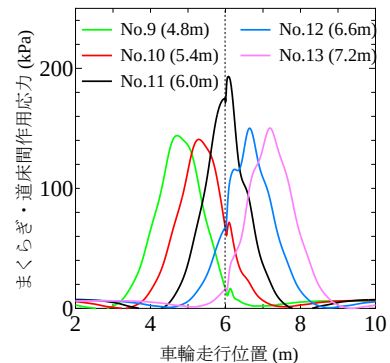
3.2 解析結果

井桁状まくらぎがレール継目部に敷設された場合の振動応答について検討する. まず, 支え継ぎまたはかけ継ぎの場合におけるまくらぎ下面垂直応力 (圧縮を正) と車輪走行位置の関係を, 図 3, 図 4 にそれぞれ示す.

支え継ぎでは, 継目下に通常まくらぎを敷設した場合, 継目直下では最大で 190kPa 程度, その他のまくらぎ位置で最大 140kPa 程度のまくらぎ下面垂直応力が観測されており, 継目直下では最大応力がその他の箇所の 30% 程度大きくなっていることが確認できる. また, いずれの位置でも最大応力が観測されているのは当該まくらぎ直上に車輪が存在する時点となっている. 井桁状まくらぎを敷設した条件下では, まくらぎ下面垂直応力の観測位置がいずれの場合においても, 最大応力は 80kPa 程度に低減されており, 通常まくらぎの場合の 50%~60% 程度を示していることがわかる. すなわち継目の前後 20cm 程度の区間では, 車輪のレール継目通過時にはほぼ同位相で下面垂直応力が増加し, 最大で 80kPa 程度の垂直応力がバラスト上面を押し付ける表面力として作用すると予測される. 一方, かけ継ぎでは, 通常まくらぎ敷設時には, レール継目直下にまくらぎが配置されていない構造のため, 継目通過後の作用力の変動が支え継ぎの場合に比べて大きくなるものの, まくらぎ下面垂直応力の最大値は,



(i) 井桁状まくらぎ



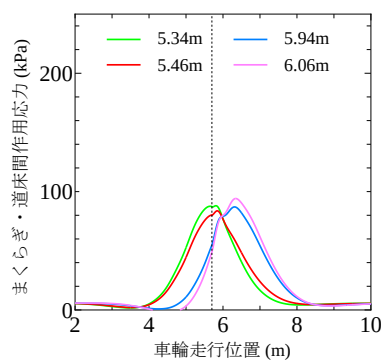
(ii) 通常まくらぎ

図 3 まくらぎ下面垂直応力と車輪走行位置の関係 (支え継ぎ, 点線は継目位置)

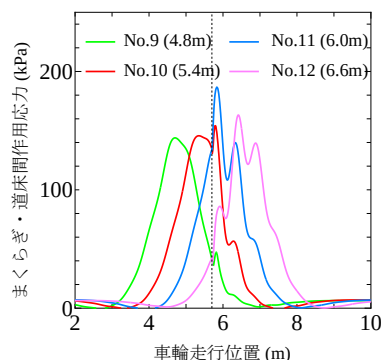
支え継ぎの場合と概ね同程度を示していることが確認できる. 井桁状まくらぎを敷設した場合には, まくらぎ下面垂直応力の最大値の発現のタイミングは各応力観測位置の直近の軌道パッド位置で概ね決まっているが, 最大応力の値は支え継ぎの場合と同様に 80kPa 程度を示しており, 井桁状まくらぎ敷設がバラスト上面への作用応力を通常まくらぎ敷設時の 50%~60% まで低減することが確認できる.

次に, 支え継ぎまたはかけ継ぎの場合におけるまくらぎ各位置での鉛直加速度と車輪走行位置の関係を図 5, 図 6 にそれぞれ示す. 支え継ぎでは, 通常まくらぎの場合, まくらぎ各位置における鉛直加速度は, 車輪のレール継目通過時に顕著となり, 継目通過後の過渡応答が特にレール継目下手側に位置するまくらぎ加速度観測位置で認められることがわかる. 井桁状まくらぎ敷設時にも同様の加速度応答の傾向を示すものの, 井桁状まくらぎはたわみ剛性を有し重量が大きいこともあり, 加速度応答は明確に低減しており, 継目通過後の過渡応答も短時間で確認できなくなることがわかる. 最大加速度は, 50% 程度低減されている. かけ継ぎでも同様の傾向を示しており, 最大加速度の低減効果も支え継ぎの場合と同様, 通常まくらぎの 50% 程度に抑えることが期待できる.

以上の結果を総合すると, 井桁状まくらぎの敷設は, まくらぎの動的応答を抑制し, バラスト上面に作用する圧縮応力を低減させることから, レール継目部でのバラスト道床沈下の抑制効果が期待できる. ただし, 本研究で採



(i) 井桁状まくらぎ



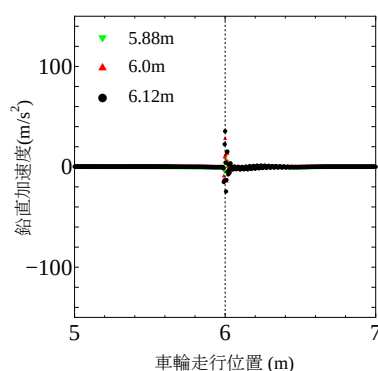
(ii) 通常まくらぎ・大判まくらぎ

図4 まくらぎ下面垂直応力と車輪走行位置の関係（かけ継ぎ，点線は継目位置）

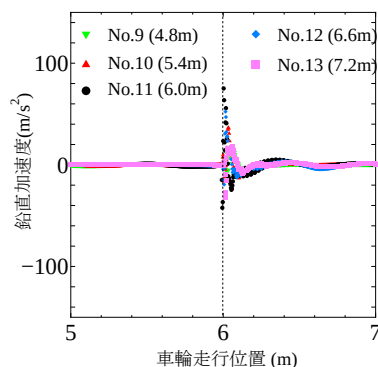
用している井桁状まくらぎの振動解析モデルについては，その妥当性の検証が十分ではないことから，今後，まくらぎ部にソリッド要素を用いた振動解析を通して，当該の解析モデルの妥当性についてさらに詳細に検討することとしたい．また，本研究においては，道床・路盤部の動的応答が考慮されていないことから，道床・路盤部の動弾性モデル化の必要性についても検討する予定である．

参考文献

- 1) 国土交通省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編：平成24年1月 鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造，丸善出版，2012.
- 2) 輪田朝亮，瀬谷 誠，原田彰久：MTT 施工可能な横圧低減継目グリッドまくらぎの開発，JR EAST Technical Review, No.39, pp.63-66, 2012.
- 3) 紅露一寛，阿部和久，石田誠，鈴木貴洋：レール継目部列車走行試験の有限要素シミュレーションとその再現性．土木学会応用力学論文集，Vol.8, pp.1037-1047, 2005.

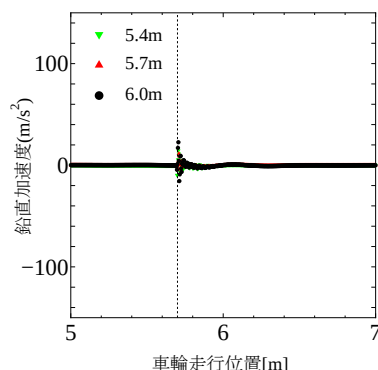


(i) 井桁状まくらぎ

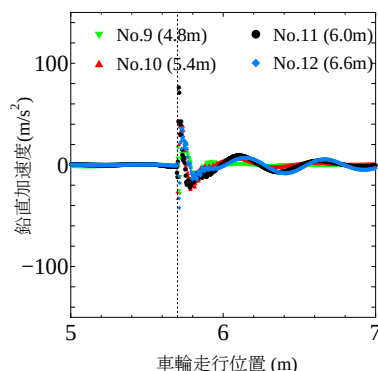


(ii) 通常まくらぎ・大判まくらぎ

図5 まくらぎ各位置の鉛直加速度と車輪走行位置の関係（支え継ぎ，点線は継目位置）．



(i) 井桁状まくらぎ



(ii) 通常まくらぎ・大判まくらぎ

図6 まくらぎ各位置の鉛直加速度と車輪走行位置の関係（かけ継ぎ，点線は継目位置）．