

井桁状まくらぎの浮きを考慮したレール継目部軌道振動解析

[土] 〇紅露一寛 (新潟大), [土] 阿部和久 (新潟大)

Vibration analysis of ballasted track with a railjoint considering contact with a grid-shape sleeper and ballast

〇 Kazuhiro KORO (Niigata University)

Kazuhiisa ABE (Niigata University)

We investigate the influence of consideration of contact with a grid-shape sleeper and ballast on the simulated dynamic response of ballasted track with a railjoint. The simulation method for wheel-track vibration of ballasted track with a railjoint and a grid-shape sleeper is developed using beams, lumped masses, springs and dashpots. The wheel-rail contact force is evaluated in consideration of contact state at railjoint. The grid-shape sleepers are used to prevent ballast settlement and horizontal displacement around a railjoint, and are modeled as a Bernoulli-Euler beam on elastic foundation. The reaction from the elastic foundation is approximated with piecewise constant functions.

Key words : grid-shape sleeper, railjoint, wheel-track vibration, contact with a grid-type sleeper and ballast

1. はじめに

井桁状まくらぎ¹⁾は、レール継目部のような列車通過時の衝撃輪重発生箇所での軌道破壊抑制を目的として、横まくらぎ2~3本分を2本のレール直下に配置した縦まくらぎで連結した、コンクリート製の井の字型形状のまくらぎである。井桁状まくらぎは、特に急曲線部のレール継目近傍における軌道破壊の抑制効果が報告されており¹⁾、軌道設計手法の確立が望まれている。そのため本研究室では、井桁状まくらぎ敷設軌道の連成振動解析法を提案し、特に井桁状まくらぎのモデル化とバラスト道床の数理モデル選択が輪重や軌道パッド作用力、まくらぎ鉛直加速度に及ぼす影響について検討している²⁾。これまでの研究では、井桁状まくらぎは弾性床上の変断面はりとしてモデル化していたが、まくらぎの運動によるバラスト道床との接触状態の喪失する場合を考慮できていなかった。そこで本研究では、井桁状まくらぎと道床との接触を考慮した軌道振動解析を試み、接触状態の取り扱いが振動解析結果に及ぼす影響について検討する。

2. 車輪・レール・軌道パッドおよび通常まくらぎの振動解析モデル

本研究では、鉛直方向の軌道振動応答の評価を目的として、図1の振動解析モデルを用いる²⁾。車両の応答は、質点でモデル化した車輪に上載死荷重を作用させ、一定速度 c で移動させることで表現する。レールは Euler ばりでモデル化し、次式を有限要素法で離散化する。

$$\int_0^L EI \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \delta u}{\partial x^2} dx + \int_0^L \rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \delta u dx = \sum_{i=1}^{N_w} \delta u(x_i + ct) P_{c,i}(t) - \sum_{j=1}^{N_s} \delta u(a_j) F_{rp,j}(t) \quad (1)$$

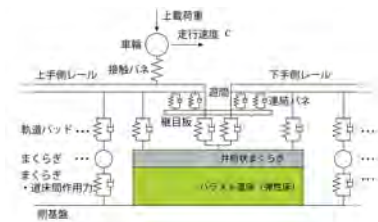


図 1 レール継目部のモデル

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、遊間を挟んで存在する2本のレール (Euler ばり) と継目板 (Euler ばりでモデル化) 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 (図1参照)。

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。なお、レール継目部では、車輪とレールとの接触状態において、遊間が存在することでレールの不連続箇所が存在するために、Hertz の接触理論の半無限体近似が成立しない場合がある。また、車輪とレールの運動状態によっては、レール角部との接触が生じ得る。そこで、車輪とレールとの運動状態に応じて幾何学的関係から定まる車輪・レール間相対変位 δ_c を適切に評価する。その上で、欠損する接触領域の長さに基づく接触バネの低減率 κ ($0 \leq \kappa \leq 1$) を考慮し、車輪・レール接触力 P_c を次式によって評価する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、 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。

レールは、継目直下は井桁状まくらぎ、それ以外の区間では通常の横まくらぎを配置する。通常の横まくらぎ(以下、通常まくらぎ)は質点の鉛直振動を考慮する。

$$m_{slp,j} \ddot{u}_{slp,j} = F_{rp,j} - F_{sb,j} + m_{slp,j} g \quad (3)$$

ここで、 $m_{slp,j}$ 、 $u_{slp,j}$ はそれぞれ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。

レール・通常まくらぎ間の相互作用力(軌道パッドの作用力)、および通常まくらぎ・道床間における相互作用力は、それぞれ式(4)、(5)で表せる。

$$F_{rp,j} = k_{rp,j} \delta_{rp,j} + \eta_{rp,j} \dot{\delta}_{rp,j} \quad (4)$$

$$F_{sb,j} = \begin{cases} k_{sb,j} \delta_{sb,j} & (\delta_{sb,j} > 0) \\ 0 & (\delta_{sb,j} \leq 0) \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 $k_{rp,j}$ 、 $\eta_{rp,j}$ 、 $\delta_{rp,j}$ はそれぞれ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。また、 $k_{sb,j}$ はまくらぎ・道床間の接触バネ定数、 $\delta_{sb,j} (= u_{slp,j} - u_{blup,j})$ はまくらぎ・道床間相対変位である。 $u_{blup,j}$ はバラスト上面鉛直変位であり、今回は 0 で与えることとした。

3. 井桁状まくらぎの振動解析モデル

井桁状まくらぎは、Euler はりとして、弾性床で支持されているが、浮きを考慮するものとする。井桁状まくらぎの支配方程式は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} & \int_0^{L_{gs}} E_s I_s(x) u_{gs}'' \delta u_{gs}'' dx + \int_0^{L_{gs}} \rho_s A_s(x) \ddot{u}_{gs} \delta u_{gs} dx \\ & = - \int_0^{L_{gs}} f_s(x) \delta u_{gs} dx + \sum_{m=1}^3 \int_{a_m}^{b_m} \frac{F_{rp,m}}{l_{rp}} \delta u_{gs} dx \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 E_s 、 $I_s(x)$ 、 ρ_s 、 $A_s(x)$ は、それぞれ井桁状まくらぎの Young 率、断面 2 次モーメント、質量密度、断面積である。また、 l_{rp} は m 番目の軌道パッドの載荷幅であり、 u_{gs} 、 δu_{gs} は、それぞれ井桁状まくらぎのたわみとその仮想成分である。 $F_{rp,m}(x)$ は m 番目の軌道パッド作用力である。

井桁状まくらぎの弾性床反力 $f_s(x)$ は、図 2 に示すように、まくらぎ下面で区間一定分布で与えられるものとし、まくらぎの浮きを表現できるように、以下のように与える。

$$f_s(x) = \sum_{e=1}^{N_{sb}} \phi_{sb,e}(x) f_{s,e} \quad (7)$$

$$\phi_{sb,e}(x) = \begin{cases} 1, & \frac{L_{gs}(e-1)}{N_{sb}} \leq x < \frac{L_{gs}e}{N_{sb}} \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (8)$$

$$f_{s,e} = \begin{cases} k_s u_{gs}(x_m^{(e)}), & u_{gs}(x_m^{(e)}) \geq 0 \\ 0, & u_{gs}(x_m^{(e)}) < 0 \end{cases} \quad (9)$$

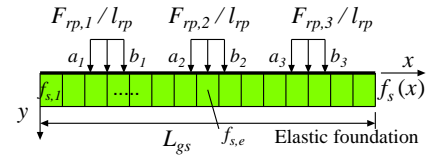


図 2 井桁状まくらぎの載荷状態。

表 1 軌道振動解析の物性値

(a) レール		(b) 継目板	
E	210 (GPa)	E	210 (GPa)
ρ	7880 (kg/m ³)	ρ	7850 (kg/m ³)
A	64.05×10^{-4} (m ²)	A	67.72×10^{-4} (m ²)
I	1960×10^{-8} (m ⁴)	I	606×10^{-8} (m ⁴)
R	0.3 (m)		
(c) 軌道パッド		(e) 車輪	
k_{rp}	110 (MN/m)	E	210 (GPa)
η_{rp}	98 (kNsec/m)	ν	0.30
(d) 通常まくらぎ		m_w	350 (kg)
m_{slp}	80 (kg)	R_w	0.43 (m)

なお、 k_s はまくらぎと道床との接触ばね定数であり、 $x_m^{(e)} = L_{gs}(2e-1)/(2N_{sb})$ は f_s の各一定区間の中点である。

式(7)-(9)を式(6)に代入し、有限要素近似と直接時間積分法を適用し、Newton-Raphson 法を適用すること、井桁状まくらぎのたわみに関する線形化方程式を得る。この方程式を軌道各部の方程式と連立して解くことで、車輪・軌道系の連成振動応答を逐次評価できる。

4. 解析条件

軌道振動解析では、1 車輪が 50N レール上を定速で走行する場合を考える。井桁状まくらぎはレール継目直下に敷設し、それ以外の区間では通常まくらぎを 0.6(m) 間隔で配置する。解析区間にはまくらぎを上手側・下手側レールに各 10 本ずつ配置するものとした。軌道の各構成要素の物性値は、表 1 に示す通りである。解析結果については、講演会当日に会場にて示す。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 22K04282 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 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マクラギの開発, JR EAST Technical Review, No.39, pp.63-66, 2012.
- 2) 紅露一寛, 河野昭子, 阿部和久: 井桁状まくらぎ敷設軌道のための車輪・軌道系連成振動解析法, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.77(2), 1-239-1-249, 2022.
- 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.