

# 曲線軌道の振動応答を考慮したバラスト道床繰返し変形解析

新潟大学工学部

正会員 紅露 一寛

新潟大学大学院 (研究当時)

非会員 井上 翔陽

## 1. はじめに

国内外の鉄道では、砕石粒子の集合体からなるバラスト軌道が多用されている。バラスト道床は、荷重分散や振動低減の機能を持ち、経済性や排水性、施工性に優れているものの、車両の走行に伴う繰返し荷重の作用によって道床沈下等の軌道破壊が発生・進展する<sup>1)</sup>。これまで、軌道系の振動応答を考慮したバラスト道床沈下解析が試みられてきたが、いずれの評価も直線軌道を対象としたものであり、曲線軌道は対象外であった。そこで、本研究では、軌道曲線部の車輪・軌道系の振動解析とバラスト道床の沈下解析の2つの解析を組み合わせた連成解析手法を開発し、軌道曲線部におけるバラスト道床の不可逆変形の定量的な評価を試みる。

## 2. 軌道振動解析

軌道振動解析は、車両走行時の各まくらぎでのレール・まくらぎ間作用力(軌道パッド作用力)の最大値の評価のために行なう。図1に示すように、レールとまくらぎを3次元骨組要素、軌道パッド作用力をVoigtユニットでモデル化し、まくらぎは弾性床上に置かれているものとしている。車両の動的応答については、本来であればレールと車輪との動的接触解析を行なうことが望ましいが、今回は簡便のために鉄道構造物設計標準(軌道構造)<sup>1)</sup>の推定式を用いて輪重と横圧を算出し、レールに定速での移動荷重として作用させる。

3次元骨組要素でモデル化したレールは、曲線部において曲率半径が大きいことに留意し、レールの変形に対する曲率の影響を無視する。骨組の長軸  $x$  軸を円周方向、残り2つの座標軸  $y, z$  軸を軌道横断方向と鉛直方向に設定すると、次式のレール運動方程式を得る。

$$\begin{aligned}
 & \int_0^l (\rho A \delta u \ddot{u} dx + \rho A \delta v_s \ddot{v}_s + \rho A \delta w_s \ddot{w}_s + \rho I_{\psi} \delta \psi_s \ddot{\psi}_s) dS \\
 & + \int_0^l E (A \delta u' u' + I_{yy} \delta v_s'' + I_{zz} \delta w_s'' w_s'') dS \\
 & + \int_0^l (E I_{\omega}^{(s)} \delta \psi_s'' \psi_s'' + G J \delta \psi_s' \psi_s') dS \\
 & = \int_0^l (q_x \delta u + q_y \delta v_s + q_z \delta w_s \\
 & + (m_{yz} + q_y e_z + q_z e_y) \delta \psi_x) dS
 \end{aligned} \quad (1)$$

**Key Words:** バラスト道床沈下、曲線軌道、軌道振動解析、弾塑性有限要素法、cyclic densification model

連絡先: 〒950-2181 新潟市西区五十嵐二の町 8050 番地 TEL: 025(262)7274, FAX: 025(262)7274

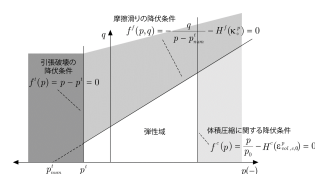


図2 単調荷重モデルの降伏曲面

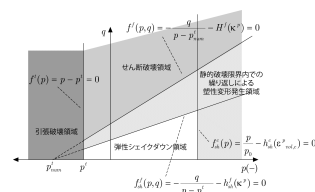


図1 軌道振動モデル

図3 繰返し荷重モデルの破壊規準

ここで、 $u$  は、 $x$  方向の平均変位、 $v_s(x)$ 、 $w_s(x)$  は  $x$  断面のせん断中心 ( $y_s, z_s$ ) での  $y, z$  方向のたわみであり、 $\psi_x$  はねじり角を表す。また、 $\rho$ 、 $A$ 、 $E$  はそれぞれ質量密度、断面積、Young 率であり、 $I_{yy}$ 、 $I_{zz}$  は断面2次モーメント、 $I_{\omega}^{(s)}$  はゆがみモーメント、 $G$ 、 $J$  はそれぞれせん断弾性係数、Saint-Venant のねじり定数を表す。 $q_y$ 、 $q_z$ 、 $m_{yz}$  は内外軌の輪重  $P_i$ 、 $P_o$  と横圧  $Q_i$ 、 $Q_o$  を移動荷重として、軌道パッド作用力  $F_{s,j}$ 、 $F_{y,j}$ 、 $F_{z,j}$ 、 $F_{t,j}$ 、 $F_{m_{y,j}}$ 、 $F_{m_{z,j}}$  ( $j = 1, 2, \dots, 2N_{slp}$ 、 $N_{slp}$ : まくらぎ本数) を集中荷重として与える。

## 3. バラスト道床の繰返し変形解析

バラスト道床の残留変位は、バラスト道床を弾塑性連続体としてモデル化し、有限要素法を適用した荷重制御条件下での準静的なつり合い問題を解くことで評価する。作用外力は、軌道振動解析により得られた軌道パッド作用力の最大値を与える。解析を行うにあたり、計算負荷の低減を目的として Cyclic densification モデル<sup>3)</sup>を用いる。Cyclic densification モデルは、単調荷重モデルと繰返し荷重モデルの2つの構成モデルからなる。単調荷重モデルは、無荷重状態から最大表面力の作用時までの荷重時と、最大表面力作用時から無荷重状態までの除荷時のつり合い状態を表現するための構成モデルであり、降伏曲面形状は図2の通りである。繰返し荷重モデルでは、応力テンソルが繰返しサイクル数  $N$  に関する履歴依存性を有するものとした亜弾性構成則を仮定し、塑性流動則として非関連流動則を適用する。塑性ひずみの大きさは塑性流動の閾値であるシェ

表 1 軌道構成要素の物性値

レール	
ヤング率 (GPa)	206
質量密度 (kg/m <sup>3</sup> )	7880
断面積 (m <sup>2</sup> )	6.40×10 <sup>-4</sup>
断面二次モーメント (水平軸)(m <sup>4</sup> )	1960×10 <sup>-8</sup>
断面二次モーメント (垂直軸)(m <sup>4</sup> )	322×10 <sup>-8</sup>
ポアソン比	0.3
まくらぎ	
ヤング率 (GPa)	78
質量密度 (kg/m <sup>3</sup> )	2677
断面積 (m <sup>2</sup> )	408×10 <sup>-4</sup>
断面二次モーメント (水平軸)(m <sup>4</sup> )	9.83×10 <sup>-5</sup>
断面二次モーメント (垂直軸)(m <sup>4</sup> )	19.58×10 <sup>-5</sup>
ポアソン比	0.17
弾性床ばね定数 (レール方向)(MN/m)	30
弾性床ばね定数 (まくらぎ軸方向)(MN/m)	30
弾性床ばね定数 (鉛直軸方向)(MN/m)	300
各種ばね定数	
レール方向ばね定数 (MN/m)	40
まくらぎ軸方向ばね定数 (MN/m)	98
軌道パッドばね定数 (MN/m)	110
レール方向回転ばね定数 (MN・m/rad)	500
まくらぎ軸方向回転ばね定数 (MN・m/rad)	200
鉛直軸方向回転ばね定数 (MN・m/rad)	200

イクダウン応力からの超過応力量に依存して決まるものとし、破壊面形状は図3の通りである。

#### 4. 解析結果

今回の解析では、半径  $R = 700$ (m)、カント 105(mm)の軌道を考える。レールは 50kgN レールをゲージ幅 1,067(mm)でまくらぎ上に置かれ、まくらぎはコンクリート製で全長 2(m)のコンクリート製まくらぎを等間隔 (0.6(m)間隔)に 11 本配置する。軸重を 150(kN)と設定した上で、輪重・横圧は推定式より外軌側輪重 86.72(kN)、内軌側輪重 80.71(kN)、外軌側横圧 27.63(kN)、内軌側横圧 25.49(kN)と設定した。走行速度は 27.8(m/s)とし、軌道振動解析で設定した物性値は表1の通りである。

軌道振動解析によって得られたまくらぎ No.5, No.6, No.7 における軌道パッド作用力のカント法線方向成分、接線方向成分と車輪走行経路長との関係を図4、図5に示す。軌道パッド作用力は、カント法線方向成分、接線方向成分ともに、観測対象まくらぎ直上付近に輪重および横圧が作用したときに、最大値が観測されている。軌道パッド作用力の最大値は 31.33(kN) (内軌側輪重方向)、33.62(kN) (外軌側輪重方向)、16.99(kN) (内軌側横圧方向)、17.81(kN) (外軌側横圧方向)となった。

道床沈下解析は、図6に示すまくらぎ・道床からなる平面ひずみモデルを考え、No.6 まくらぎでの軌道パッド最大作用力を外力として作用させた。材料物性値は先行研究で用いた値を与えた。図7は 1000 負荷サイクル時点での道床

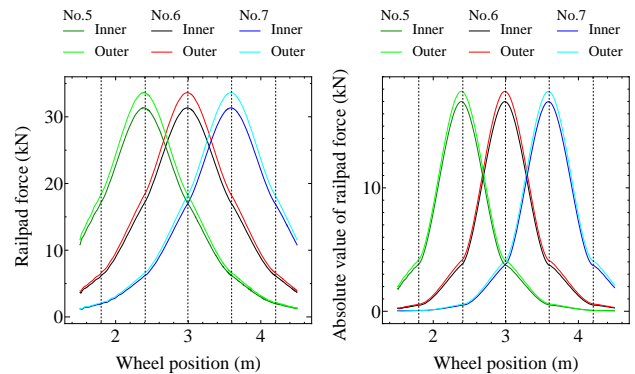


図4 軌道パッド作用力(カント法線成分)と車輪走行位置

図5 軌道パッド作用力(カント接線成分)と車輪走行位置

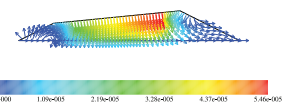


図6 道床沈下解析モデル

図7 道床断面内の変位分布

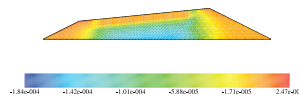


図8 道床断面内の体積ひずみ分布

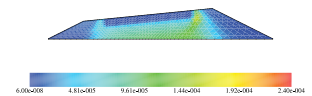


図9 道床断面内の相当ひずみ分布

断面内の最大変位ベクトル分布を示したものである。当該の条件下では、バラスト道床部に比べて剛性の高いまくらぎ上レール締結位置において、外軌側の方が内軌側よりも大きな輪重が作用することもあり、まくらぎは外軌側がより下方に沈み込むように回転するように移動し、まくらぎ下のバラスト道床は外軌側の方が下方に押し込まれるように運動している。まくらぎ端部では、まくらぎの運動によって大きなせん断変形の発生が読み取れる。図8、図9は、繰り返し負荷終了時点における最大荷重作用下での道床断面内の全体積ひずみ、全相当ひずみ分布である。体積ひずみは、外軌側レール下と外軌側まくらぎ端付近で圧縮量が大きくなる結果を得た。一方、相当ひずみは外軌側まくらぎ端付近で大きな値を示し、そこから左下方にせん断変形の卓越箇所が確認できる。

#### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 19K04572 の助成を受けたものです。

#### 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) 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。
- 3) Suiker, A.S.J. & de Borst, R: A numerical model for the cyclic deterioration of railway tracks. Int. J. Number. Meth. Engrg, Vol.57, pp.441-470, 2003。