

軌道の振動応答を考慮した軌道曲線部バラスト道床沈下解析

新潟大学大学院自然科学研究科 学生員 ○井上 翔陽
新潟大学工学部 正会員 紅露 一寛

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。しかしながら、車両の走行に伴う繰り返し荷重の作用によって、バラスト道床には道床沈下等の漸進的な不可逆変位が発生・進展する¹⁾。これまで、本研究室をはじめ国内外の研究者・技術者によって車両・軌道系の連成振動解析モデルが提案され、数値シミュレーションを行い、バラスト道床による不可逆変形の定量的な評価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った。軌道曲線部にはカントが存在するため、三次元解析が避けられず、軌道曲線部の道床の不可逆変形予測は未着手となっている。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の開発を行い、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行う。

2. 軌道振動解析と道床沈下解析との連成手法

本研究では、軌道曲線部のまくらぎ・道床間の作用力を評価するための車両・軌道系の振動解析と道床の残留変位を評価するためのバラスト道床の弾塑性有限要素解析とを組み合わせ弱連成解析²⁾を行う。

(1) 連成解析の流れ

連成解析の流れは、以下に示す通りである。

Step.1 最初に、道床沈下解析により自重沈下による沈下量の評価する。その時の道床上面における位置を初期位置(沈下量が0)とする。

Step.2 道床沈下解析で求めたまくらぎ底面下での道床上面沈下量をバラスト上面の初期沈下量として軌道振動解析を実行する。振動解析によって車輪走行時のレール・まくらぎ間作用力(軌道パッド作用力)の時刻歴を評価し、その最大作用力を抽出する。

Step.3 道床沈下解析における繰り返し荷重1回目として、単調载荷モデルを用いて無荷重状態から**Step.2**の軌道振動解析で得られた最大表面力が作用している状態までの载荷過程におけるつり合い解を求める。

Step.4 繰り返し荷重2回目以降の沈下解析では、繰り返し

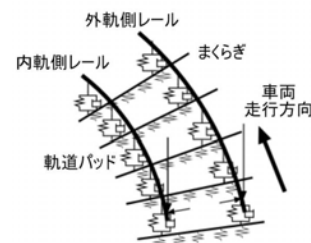


図1 軌道モデル

し载荷モデルにより最大表面力が作用した状態における道床沈下を行う。なお、応力積分における積分サイクル幅は ΔN とする。

Step.5 载荷回数が所定の繰り返しサイクル数 ΔN_c に達したら、再び単調载荷モデルにより、今度は最大表面力から無荷重状態までの除荷過程におけるつり合い解を求め、最大表面力を完全に除荷した状態での道床の残留変位を評価する。

(2) 軌道振動解析

今回の振動解析では、図1に示す解析モデルを用いる。車両・車輪からレールに作用する輪重と横圧は、本来であれば車輪とレールとの接触解析等で評価すべきであるが、今回は鉄道構造物設計標準(軌道構造)¹⁾の推定式を用いて算出し、レールに作用させることとした。レールは軸力・曲げ・ねじりを考慮した3次元骨組構造と仮定し、モデル化を行う。なお、軌道曲線部は曲率半径が大きく、レールの変形に対する曲率の影響を無視できるため、はりの長軸を円周方向、残り2つの座標軸をカント傾斜接軌方向と法線方向とに設定した上で、軸力・曲げ・ねじりを考慮したはりとして動的応答をモデル化する。軌道パッド作用力は、集中力3成分とモーメント3成分の計6成分を考慮し、いずれもVoigtユニットでモデル化することとした。まくらぎは、レールと同様に軸力・曲げ・ねじりを考慮した3次元骨組としている。振動解析により求めたレール・まくらぎ間作用力(軌道パッド作用力)は、道床沈下解析の作用外力として、まくらぎ上の軌道パッド配置位置に作用させることとする。

(3) 道床沈下解析

バラスト道床沈下解析は、弾塑性連続体モデルに基づく有限要素法を用いて行う。弾塑性構成則は、繰り返し負荷

Key Words: バラスト軌道、軌道振動、バラスト道床沈下、弾塑性有限要素法

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

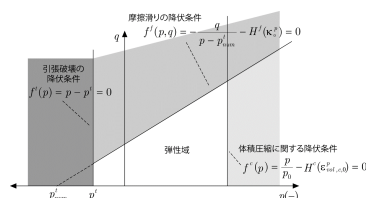


図2 単調载荷モデルの降伏曲面

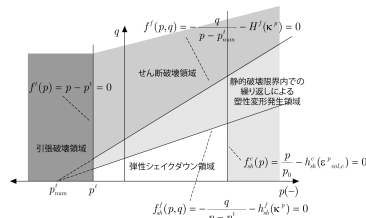


図3 繰り返し载荷モデルの破壊規準

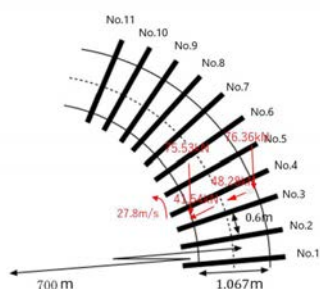


図4 解析例とした曲線軌道

時の計算負荷にも留意し、Cyclic densification モデル³⁾を用いる。Cyclic densification モデルは、単調载荷モデルと繰り返し载荷モデルの2つの構成モデルを併用する。単調载荷モデルは、無荷重状態から最大表面力の作用状態時に至る過程、および最大表面力の作用状態時から無荷重状態に至る除荷間のつり合い状態を表現するモデルである。当該モデルでは、Drucker-Prager の降伏曲面の上端と下端を体積圧縮破壊と引張破壊に関する2平面で閉じた多曲面からなる古典的弾塑性モデルを用いる(図2参照)。繰り返し载荷モデルでは、応力テンソル σ_{ij} が繰り返しサイクル数 N に関する履歴依存性を有するものとした垂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、シェイクダウン応力は単調载荷モデルの降伏関数と同様、修正 Drucker-Prager 型の円錐面と2平面の組み合わせ(図3参照)により与える。

3. 解析条件

今回の解析では、図4に示した曲率半径 $R = 700(\text{m})$ 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)に配置す

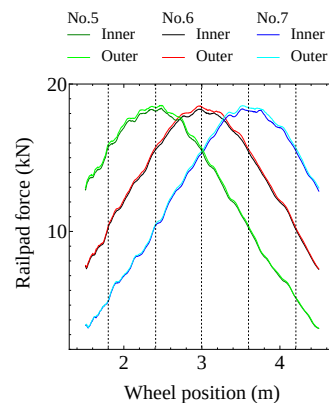


図5 軌道パッド作用力(カント部走行面法線成分)と車輪走行位置。

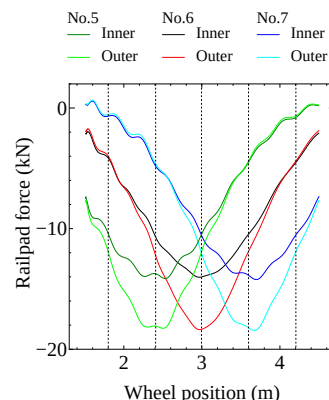


図6 軌道パッド作用力(カント走行面接線成分)と車輪走行位置。

る。なお、曲線軌道では車輪とレールとの間に横圧が作用していることから、軸重を150(kN)と設定し、輪重・横圧の推定式により外軌側輪重を76.36(kN)、内軌側輪重を75.53(kN)、外軌側横圧を48.28(kN)、内軌側横圧を41.57(kN)となる。また走行速度は27.8(m/s)、カントは120(mm)とする。

4. 解析結果

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位置(軌道中心線での円周方向座標値)との関係を図5、図6に示す。軌道パッド作用力のうち、カント法線方向成分、接線方向成分とも、作用力の観測まくらぎ直上付近に輪重および横圧がレールに作用したとき、最大荷重が観測される。作用力の最大値は、観測位置を軌道端部からある程度離れた地点ではいずれのまくらぎ位置でもほぼ同様になる。道床沈下解析結果は講演会当日に示す。

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) 紅霧一寛、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。