

日射量・熱伝導・2次元弾塑性弱連成解析による有道床軌道のふく進解析プログラム

(公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 ○浦川 文寛
(公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 渡辺 勉

1. はじめに

既往研究では、①日射量解析、②熱伝導解析、③弾塑性解析の弱連成解析を行い、有道床軌道のレール温度、軸力、及びふく進（軌道長手方向のレール塑性変位）の分布を、建物等の日陰を考慮して計算するプログラム（以降「既往プログラム」）を開発した¹⁾²⁾。しかしながら、③は軌道長手方向の一次元解析であり²⁾、曲線や軌道の横変位、日陰による左右レールの温度差等、軌道の塑性変位に影響すると思われる種々の条件を再現できなかった。本稿では、前述の条件を再現し、日陰等に伴うレール温度差によるレール軸力とふく進を精緻にモデル化するため、水平方向2次元の静的弾塑性 FEM 解析プログラム（以降「開発プログラム」）を GNU Fortran にて開発した。

2. 解析モデル（開発プログラム）の概要

図 1(a)に示すとおり、レールとまくらぎをオイラー梁要素、レール締結装置を並進と回転方向のばね要素、道床を並進方向のばね要素でモデル化する。レール締結装置のばね要素はレールとまくらぎの節点を結合し、道床のばね要素はまくらぎの節点と不動点を結合する。軌道下り方向に位置番号 ix ($=1, 2, \dots, nx$) を与え、レール要素 ix は、 ix と $ix+1$ のレール節点から成る要素とする（図 1(a)）。実軌道ではレール締結装置部でもふく進を生じうるが、「レール締結装置の抵抗力 $\gg$ 道床の抵抗力であるため、ふく進は道床部のみで生じる」という従来のロングレールの設計法を踏襲し、レール締結装置のばね要素は弾性線形ばね、道床のばね要素は降伏荷重と降伏変位で定義される弾塑性バイリニアばねとする（図 2）。荷重条件は図 1(b)に示すとおり、左右レール要素 ix に熱伝導解析で得られたレール温度 ($T_{Rl}(ix, it)$, $T_{Rr}(ix, it)$) を与える。拘束条件は図 1(b)に示すとおり、モデル両端 ($ix=1, nx$) の左右レール節点を完全固定とする。

プログラム上の操作としては、位置 ix における左右レールの節点座標、レール温度、及び軌道の各種パラメータ（表 1）を読み込み、時間ステップ it 毎に立てた剛性方程式を解き、レールとまくらぎの変位、及びレール軸力を求める。

3. 開発プログラムの妥当性検証

ここでは、延長 200m の軌道に対し、理想的な直線（左右レールが平行、曲率がゼロ）かつ左右レール温度が等

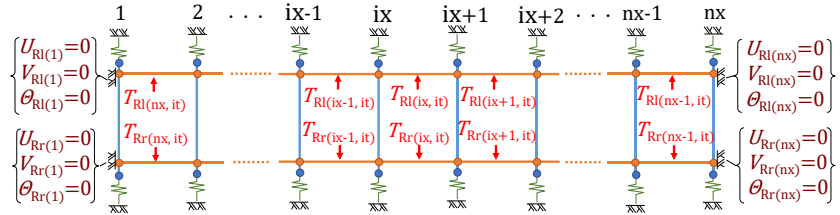
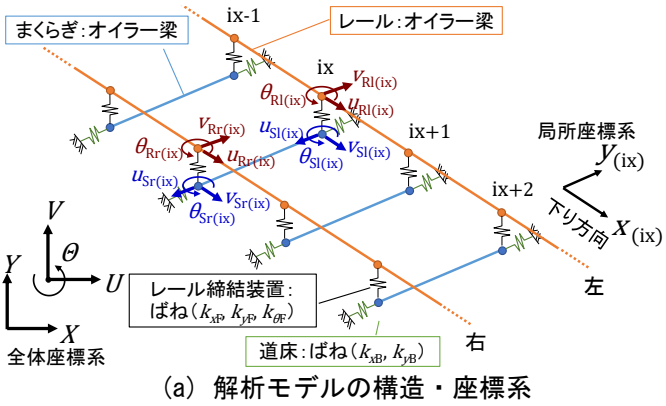


図 1 解析モデルの概要

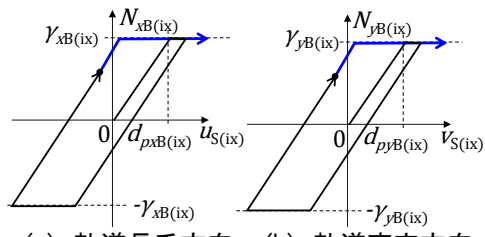


図 2 道床のばね特性

表 1 軌道のパラメータ

部材	記号	項目	設定値	単位
レール	E_R	ヤング率	206×10^9	N/m ²
	A_R	断面積	0.00775	m ²
	I_R	断面 2 次モーメント	5.12×10^6	m ⁴
	β_R	線膨張係数	1.14×10^{-5}	/°C
	T_{OR}	中立温度	30	°C
まくらぎ	E_S	ヤング率	88×10^6	N/m ²
	A_S	断面積	0.033	m ²
	I_S	断面 2 次モーメント	3.4×10^4	m ⁴
レール締結装置	k_{xF}	ばね定数_軌道長手方向	62.5×10^6	N/m
	k_{yF}	ばね定数_軌道直交方向	31.3×10^6	N/m
	$k_{\theta F}$	ばね定数_回転方向	4.33×10^4	rad/m
道床	γ_{xB}	降伏荷重_軌道長手方向	8000	N
	γ_{yB}	降伏荷重_軌道直交方向	4000	N
	d_{pXB}	降伏変位_軌道長手方向	0.002	m
	d_{pYB}	降伏変位_軌道直交方向	0.002	m

キーワード ふく進, 日陰, 2次元弾塑性解析, GIS, ロングレール, FEM
連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2 丁目 8-38
(公財) 鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 軌道力学 TEL042-573-7291

しい条件で解析を行い、既往プログラムを用いた一次元解析との比較より妥当性の検証を行う。

3.1 解析条件

開発プログラムの解析パラメータは表 1 を用いた。既往プログラムでも同様の解析パラメータを使用するが、レールは梁ではなく軌道長手方向のばね要素であるため、ばね定数は $E_{R(ix)}A_{R(ix)}/L$ ($=0.00775\text{m}^2 \times 206 \times 10^9\text{N/m}^2 / 1\text{m} = 1.60\text{MN/m}$) とした。ここで、 L はレールの長手方向節点間距離である。レール温度は、日射量・熱伝導の連成解析により、日陰を考慮して算出した図 3 の値を用いた。

3.2 解析結果

図 4(a),(b)に、レールの軌道長手方向の変位と軸力の解析結果をそれぞれ示す。ここで、本章の解析条件下では左右レールの解析結果に差が生じないため、左レールの解析結果のみ記載する。レール変位について、図 4(a)より、開発プログラムと既往プログラムを比較すると、距離方向の波形のずれが若干見られるものの、両者の値はほぼ等しい。距離方向の波形のずれは、レールの温度応力計算の際、既往プログラムではレール梁要素 ix を構成するレール節点 ix と $ix+1$ の温度の平均値 $(T_{R(ix)} + T_{R(ix+1)})/2$ を使用しているのに対し、開発プログラムでは $T_{R(ix)}$ を使用していることが原因と思われる。また、レール軸力について、図 4(b)より、開発プログラムと既往プログラムの解析結果は一致していることが分かる。以上、開発プログラムと既往プログラムの解析結果では、レールの温度応力計算法の違いによりレール変位に距離方向のずれが若干生じるものの、レールの変位と軸力は概ね一致することから、開発プログラムは適切であることが分かった。

4. GIS 線路データを用いた曲線の解析例

図 5(a)に示す GIS 線路データを用いて前章と同様の解析を行った結果、レールの曲率が大きい位置で不自然な軸力変動が生じた (図 5(b))。GIS データでは、線路を直線の集合で表しているため、直線の接合部ではレールが角折れの状態となり、曲げ剛性の低下によって著大な変位が発生し、局所的な軸力の変動が生じたものと思われる。

5. まとめ

開発プログラムの妥当性を確認できた一方で、GIS 線路データに含まれる角折れにより、解析結果に不自然な変動が生じた。開発プログラムは、地理情報と関連付けた日射量解析との連成解析を前提としており、レールの位置情報として GIS データの使用は不可避である。そのため、解析を実施する前に、レール線形の平滑化や、軌道の設計形状による補正を行う等、GIS 線路データの調整が必要であることが分かった。

参考文献

- 1) 浦川文寛, 渡辺勉: 地理・気象データを使用した鉄道用レール温度予測法, 土木学会論文集 A2 (応用力学), 76 巻 2 号, pp.I_553-I_564, 2020
- 2) 浦川 文寛, 渡辺勉: 日陰等に起因するレール軸力変動の広域予測法の提案, 第 26 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集 J-RAIL2019, S2-4-2, 2019

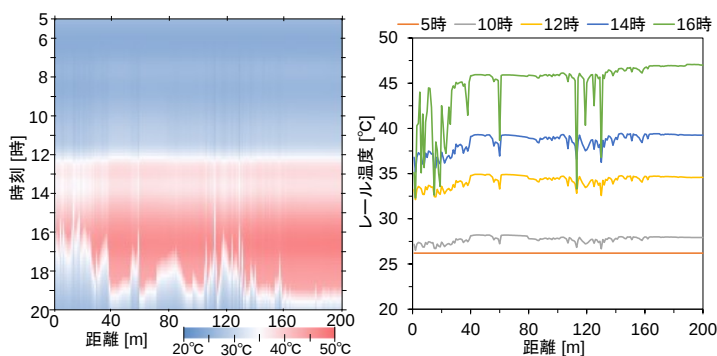


図 3 解析に用いたレール温度

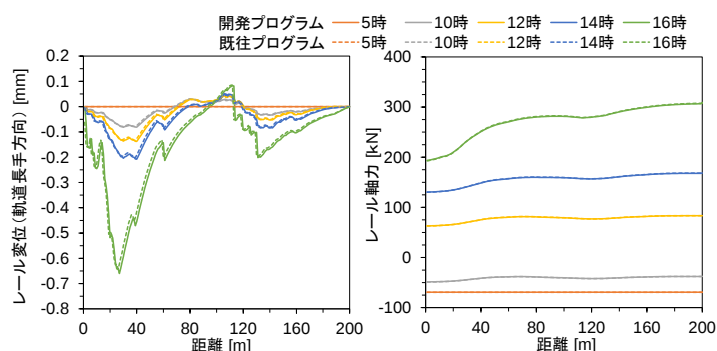


図 4 解析結果 (延長 200m の直線)

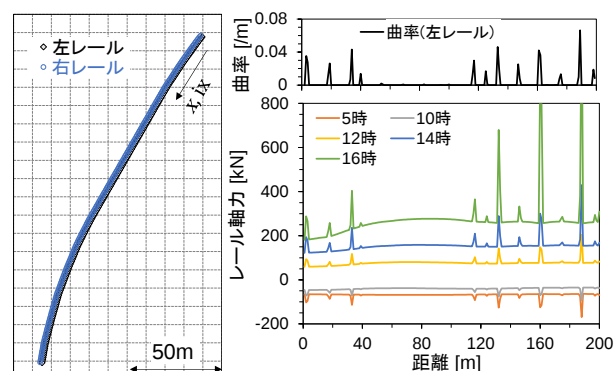


図 5 GIS 線路データを用いた解析 (曲線)