

直線軌道の模型座屈実験と FEM 解析による再現

(公財)鉄道総合技術研究所 正会員 ○西宮 裕騎
 (公財)鉄道総合技術研究所 非会員 平出 壮司
 (公財)鉄道総合技術研究所 正会員 片岡 宏夫

1. はじめに

急曲線では軌道の横変形に伴って変化する軌道の総エネルギー変化量を考慮して必要道床横抵抗力を高めてロングレールの安全性を確保しているが¹⁾、直線区間では曲線区間と比較して余裕度があることが想定される。このため許容レール温度上昇量の緩和の余地があると考えられるので、ロングレール敷設範囲の拡大や設定替えの合理化などが期待できる。しかし、既往の軌道座屈安定に関する研究の多くは曲線区間を対象としており²⁾、直線区間に関する検討例は少ない。本研究では、直線区間におけるロングレールの合理的な敷設条件の検討に用いるため、模型軌道による座屈実験と FEM 解析による検証を行った。

2. 模型座屈実験

(1) 実験条件

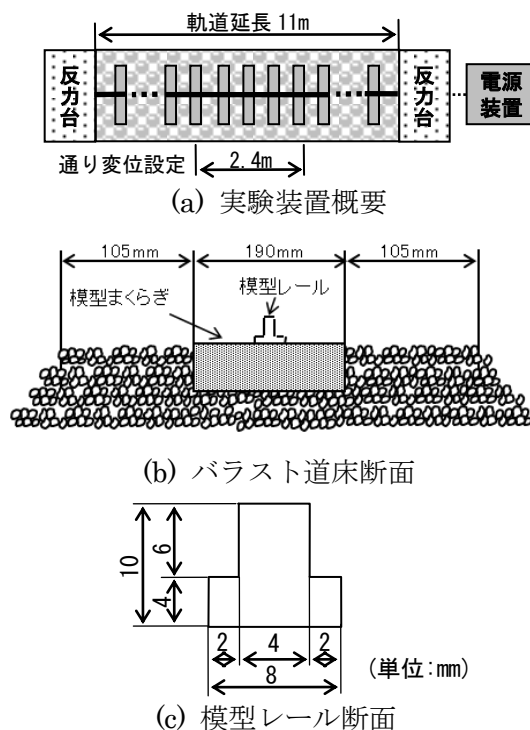
模型軌道座屈実験に使用する装置を図 1 (a) に示す。模型軌道は片側レール分とし、レール端部に変位が生じないように両端に反力受けとして鉄筋コンクリートブロックを設けた。この模型レールに電流を流し、温度を上昇させて軸力を高め、座屈を発生させる。模型軌道の形状と諸元を図 1 (b) (c) および表 1 に示す。絶縁のため、レールの締結にはフェノール樹脂製のレール締結板(厚さ 6mm、ねじ止め)を用いた。表 1 に示す所定の線形が得られるように軌道整備を行い、軌道変位を測定した。測定間隔は、中央±2m の区間は 50mm 間隔、それ以外の区間は 100mm 間隔とした。座屈後の軌道変位も同様に測定した。レール軸力は、レール端部の荷重計 2 点と、軌道中央部のレール側面に貼り付けたひずみゲージ 3 点で測定した。また、レール横変位の測定箇所以外における座屈を防止するために、中央部から±2m の区間を除き、道床横抵抗力の大きい座屈防止板付きのまくらぎを使用した。過去の知見から、レール両端部の軸力がレール中央部より低くなるため、通電前にレール両端に予備荷重 1kN を作用させた。

(2) 道床横抵抗力

実験で用いた模型まくらぎの横抵抗力を把握するため、まくらぎ 5 本分の模型軌きょうを用いて横引き実験を実施した(図 2)。模型軌きょうおよびバラストは模型座屈実験と同じものを使用した。表 2 に各実験で得られた特性を近似式(式(1))で回帰分析した係数を示す。

$$g = g_0 y / (y + a) \cdots \cdots (1)$$

ただし、 g : まくらぎ横抵抗力、 g_0 : 最終まくらぎ横抵抗力、 y : まくらぎ横変位、 a : 係数($g=g_0/2$ の横変位)である。なお、回帰分析にあたっては影響度の観点から、まくらぎ横変位 10mm 以下のデータを対象とした。



(c) 模型レール断面

図 1 模型軌道座屈実験

表 1 模型実験条件

項目	値
軌道線形	直線
レール	材質 SS400
	長さ 11m
まくらぎ	材質 SS400
	間隔 60mm
通り変位 (目標値)	波形 第Ⅱ波形
	波長 2.4m
	波高 2.0mm

キーワード ロングレール, 軌道座屈, FEM 解析, 弧長増分法

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 (公財) 鉄道総合技術研究所 TEL 042-573-7275

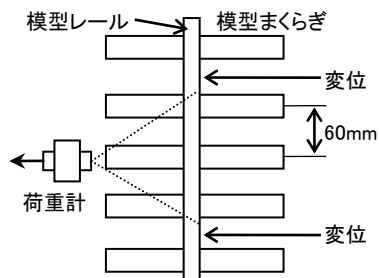


図2 模型軌きょうの横引き実験

表2 模型まくらぎの横抵抗力

実験 No.	g_0 (N/本)	a (mm)
1	11.1	0.12
2	11.2	0.28
3	10.0	0.12
平均	10.8	0.17

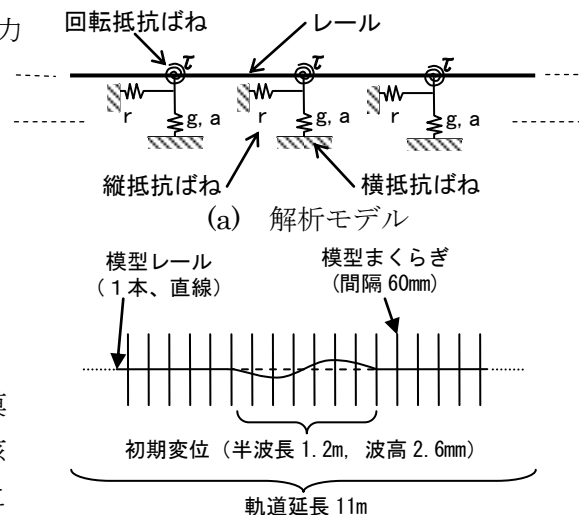


図3 FEM解析条件

表3 FEM解析諸元

部 材	項 目	値
模型 レール	縦弾性係数	206GPa
	ポアソン比	0.3
	線膨張係数	1.14×10^{-5}
	断面積	56mm ²
まくらぎ	横抵抗力 g	$g_0 = 9, 10, 11 \text{ N/本}$ $a = 0.1, 0.3 \text{ mm}$ $g = g_0 \times y / (y + a)$
	縦抵抗力 r	$r_0 = 17 \text{ N/本}$ $r = r_0 \times x / (x + 0.2)$
レール 締結装置	回転ばね 定数 τ	$7.9 \times 10^4 \text{ Nmm/rad}$

3. FEM 解析

過去に構築した弧長増分法による FEM 解析手法³⁾を用いて模型実験を模擬する解析を行い、実験結果と比較することで当該条件下での解析の妥当性を確認する。解析モデルを図 3 (a) に示す。本手法ではレール 1 本分を梁要素でモデル化し、道床抵抗力とレール締結装置の回転抵抗を非線形ばねでモデル化した。但し、図 3 で g : 道床横抵抗力、 a : 道床横抵抗力の係数、 r : 道床縦抵抗力、 τ : レール締結装置回転ばねである。軌道条件および解析諸元は模型軌道座屈実験と同等となるように設定し、それぞれ図 3 (b)、表 3 に示す。道床横抵抗力については、模型まくらぎの横抵抗力特性実験結果を参考に 6 通り設定した。また、模型実験と同等の境界条件となるようレール端部を拘束し、レールに温度荷重を与えた。この解析モデルを用いて非線形静解析 (大変形) を実施し、座屈後の挙動を求めるために弧長増分法を用いた。

4. 結果と考察

実験結果と FEM 解析結果を図 4 に示す。実験結果はレール軸力の平均値を温度上昇量に換算した値を示す。実験と FEM 解析で得られた結果を比較したところ、模型実験では座屈直前のレール横変位が大きい傾向がみられた。模型実験における通り変位の不整、不均一な道床抵抗力、および軌きょうの浮き上がり等の影響で差異が出たものと考えられる。しかし、図 4 に示す通り、4 回の模型実験における座屈発生点の平均レール温度上昇量 Ta は 35.2°C、FEM 解析では 27.9~35.7°C であり、実験との誤差は 2~22% 程度であった。よって、FEM 解析は模型実験を概ね模擬していると考えられる。

5. まとめ

直線区間におけるロングレールの合理的な敷設条件の検討に用いるため、模型軌道による座屈実験と FEM 解析による検証を行った。その結果、直線区間における座屈時の温度上昇量を把握し、FEM 解析の妥当性を確認した。今後、実験と FEM 解析を継続して実施し、合理的な座屈安定性の評価法の検討を進める予定である。

参考文献

- 1) 三浦重、柳川秀明：急曲線へのロングレールの適用、鉄道総研報告、Vo1. 6、No. 6、1992. 6
- 2) 柳川秀明、三浦重：曲線軌道の座屈に関する模型実験、土木学会第 48 回年次学術講演会、IV-176、pp. 388-389、1993.
- 3) 岩佐裕一、片岡宏夫、柳川秀明：横圧に対する軌道の座屈安定性評価、鉄道総研報告、Vo1. 19、No. 2、2005. 2

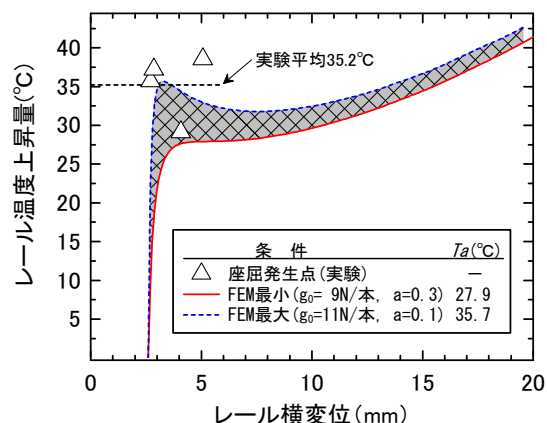


図4 模型実験と FEM 解析結果