

## スラブ軌道の横方向安定性に関する研究

○ [土] 片岡 宏夫 [土] 西宮 裕騎 (鉄道総合技術研究所)

[土] 島津 健 (東日本旅客鉄道株式会社) [土] 横山 拓広 (鉄道建設・運輸施設整備支援機構)

## The Evaluation of Lateral Stability of Slab Track

○ Hiroo Kataoka, Yuki Nishinomiya, (Railway Technical Research Institute)

Takeshi Shimadsu, (East Japan Railway Company)

Takuhiro Yokoyama, (Japan Railway Construction, Transport and Technology Agency)

Allowable value of an axial force in rail with continuous welded rail on the slab track induced by temperature increase was determined by reference to the lateral stability of the ballasted track. However, large lateral displacement would not be occurred until track components were broken, so the lateral stability would be maintained for the large axial force in rail. We analyzed the force acting on the circular upstand and rail fastening device for high temperature change with using FE method. The force was below the individual components strength and the allowable value of the axial force in rail would be raised.

キーワード：スラブ軌道，突起，横方向安定性

Key Words：slab track, circular upstand, lateral stability

## 1. はじめに

近年、新幹線軌道において軌道管理や材料管理のメンテナンスの低減を目的として伸縮継目の撤去が進められている。一方、寒冷地において最高気温と最低気温の差が大きい地域ではロングレールの設定温度を従来と同一に設定できない可能性が生じている。高架橋上のスラブ軌道では温度変化に応じて桁の伸縮によりレールと桁との間にレール長さ方向の力が作用し、レールに付加軸力が発生するため、桁配置に応じてレール軸力分布を計算し、温度上昇時の圧縮の最大レール軸力や低温時の破断時開口量の照査を行っている。新幹線のスラブ軌道では、バラスト軌道の座屈安定性の検討から圧縮のレール軸力の設計上の限度値を 980kN (100tf) として高架橋上のロングレールの設計に用いてきており、これがロングレール化の設計条件の一つとなっていた。

一方で、過去に在来線における急曲線のスラブ軌道の横方向安定性について、エネルギー法を用いて温度上昇時の半円突起への作用力を評価することにより検討した例があり<sup>1)</sup>、新幹線のスラブ軌道においても同様の考え方により許容レール軸力を緩和できると考えられた。

そこで、本研究では新幹線の一般区間を対象として、伸縮継目の撤去に向けた構造検討を実施し、設計条件の見直しを行った。

## 2. 検討方法

スラブ軌道の横方向安定性については、バラスト軌道と同等の荷重に耐えられるように設計を行っている。しかし、突起が破壊されない限り、著大なレール左右変位は生じないと考えられ、従来の設計によるスラブ軌道においても、相当大きなレール軸力に至るまで横方向安定性は確保されるものと推定される。そこで、有限要素解析 (以下、「解析」と称する) を用いて突起・軌道スラブ等の横方向に作用する力を算出し、部材強度に対して照査することで、横方向安定性の検討を行うこととした。

本研究では、次の 2 通りのケースを想定して解析を実施した。

- ・解析ケース 1：CAモルタルの抵抗力をモデル化せず、軌道スラブと路盤コンクリート間の摩擦抵抗を考慮しないものとする。
- ・解析ケース 2：軌道スラブと路盤コンクリート間の摩擦抵抗をばね要素でモデル化する。各物性値は実物実験等

から設定する。

上記の 2 つの解析ケースにおいて、設定した温度条件や物性値等の与え方が異なっているが、解析ケース 1 では寒冷地での温度上昇量を想定しており、安全側の解析として CA モルタルの抵抗力を見込まなかったものであり、解析ケース 2 では既設線の EJ 撤去を目的として、測定された実物の特性値に基づく検討を行ったものである。

ともスラブ軌道で一般に設定されるレール単位長さ当たりのふく進抵抗  $5\text{kN/m}$  レールから求められる 1 締結あたりのふく進抵抗を用いた。解析ケース 2 のそれ以外のばね定数と特性は試験より得た<sup>2)</sup>。軌道スラブ・路盤ばね特性は、CA モルタルがはく離し、突起が抵抗しない場合の試験より求めたものであり、レール長さ方向と横方向にそれぞれ与えた。

3. 解析手法

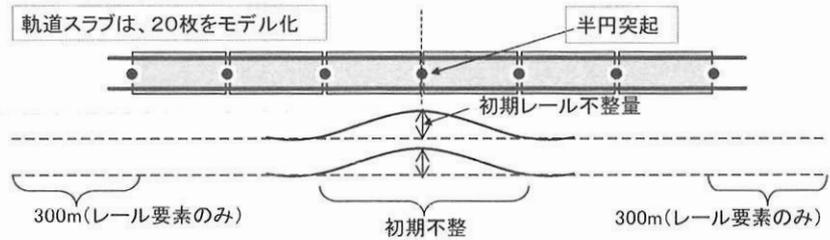
3.1 解析モデル

温度上昇に伴う突起への作用力を解析により求める。モデル化にあたり、軌道スラブをシェル要素、60kg レールを梁要素、レール締結装置はばね要素を用いてモデル化した。突起は固定点とし、充填材を模擬するばね要素で軌道スラブに接続することにより、突起にかかる作用力を求める。

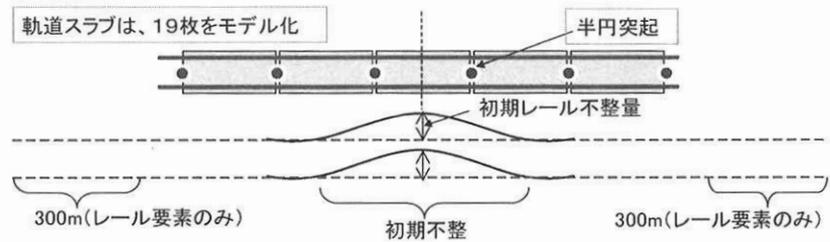
解析モデルの概略を図 1 に示す。解析モデルのレール延長は 700m とし、中央の 100m を図 2 のスラブ軌道を模擬したモデルとした。

レール変位位置は通り変位の形状を考慮して図 1 の 2 パターンを設定した。レール初期通り変位形状を図 3 と表 1 に示す。

物性値を表 2 に示す。レール締結装置のレール長さ方向ばね特性は、両解析ケース

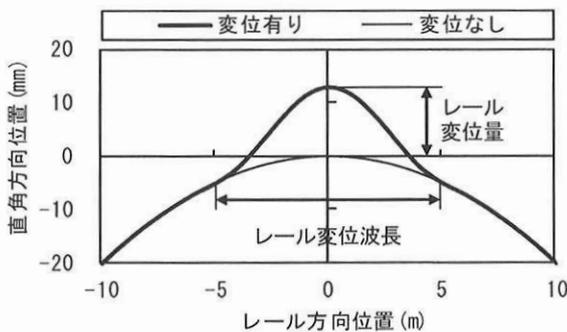


(a) 初期通り変位位置 A

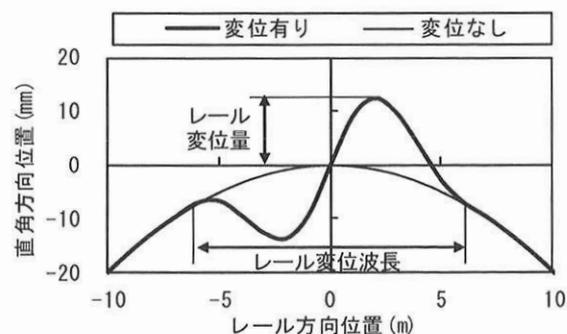


(b) 初期通り変位位置 B

図 1 解析モデルの概略



(a) 形状 1 (第 I 波形)



(b) 形状 2 (第 II 波形)

図 3 初期通り変位形状

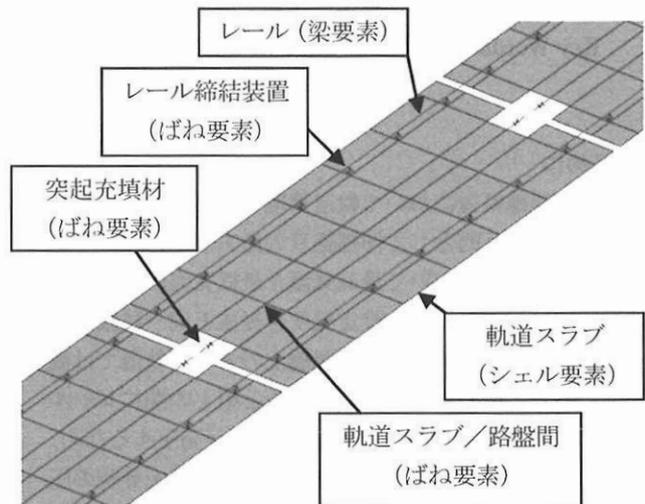


図 2 スラブ軌道の解析モデル

表 1 曲線半径および初期変位形状の設定

(a) 解析ケース 1

項目	値	
	解析ケース 1	解析ケース 2
曲線半径	2500, 4000m	700, 1000, 2500m
初期通り変位波長	第 I 波形	6, 10m
	第 II 波形	12, 15m
初期レール変位量	0~13mm	0~13mm

3.2 荷重・拘束条件

・解析ケース 1: 初期温度を 0℃として、レールに 70℃ (軸力 1274kN 相当), 50℃ (軸力 910kN 相当), 40℃ (軸力 728kN 相当) の 3 ケースの温度荷重を与えた。  
 ・解析ケース 2: 初期温度を 0℃として、レールに 72℃(軸力 1300kN 相当), 55℃ (軸力 1000kN 相当) の 2 ケースの温度荷重を与えた。

高架橋はモデル化の対象外であるが、温度上昇量を大きく与えることにより、高架橋の伸縮に伴う付加軸力を模擬した。レール端の長さ方向の拘束条件は自由端とした。レール・軌道スラブとも、鉛直方向の変位は考慮せず、二次元の平面問題として拘束条件を設定した。

3.3 解析種別・ソルバー

各非線形ばね特性を模擬するため、非線形静解析を行った。解析ソルバーには NASTRAN を用いた。

3.4 解析パターン

敷設される様々な状況を想定し、レール温度上昇量、レール初期変位の量、および曲線半径を変えたモデルを作成し、パラメータスタディを行った。

4. 解析結果と考察

解析で得られたレール横変位、レール締結装置への作用力、突起への作用力について、曲線半径、温度上昇量 (レール軸力) ごとに最大値を整理したものを表 3 に示す。なお、レール軸力は軌道スラブを模擬した区間において一定となり、ロングレールの不動区間を適切に再現していた。

解析ケース 2 の突起への作用力が解析ケース 1 と比較し低い結果が得られたが、これは図 5 から軌道スラブ・路盤間の摩擦力が大きく寄与したと推察される。

(1) 解析ケース 1

レール横変位は 0.2mm 以下となり、極めて小さかった。レール締結装置への作用力は、1 締結あたり最大 7.5kN であった。軌道スラブからの突起への作用力は 21.0kN 以下であった。

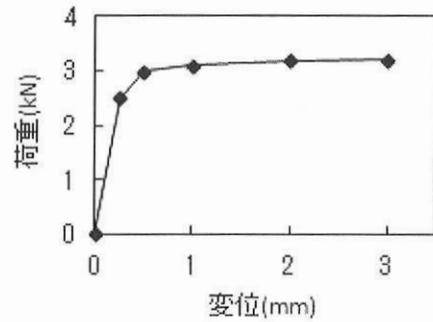
直結 8 形レール締結装置の設計においては、タイプレートの水平抵抗力は 50kN 程度としており、解析から得られた 7.5kN に比べて十分な余裕がある<sup>3)</sup>。

軌道スラブの突起の設計においては、道床横抵抗力相当分の軌道横方向の荷重は 1 軌道あたり 10kN/m で、軌道スラブ長 5m に換算すると 50kN となり、半円突起においては 25kN となる<sup>4)</sup>。解析から得られた値はこれらの想定荷重を下回っていた。

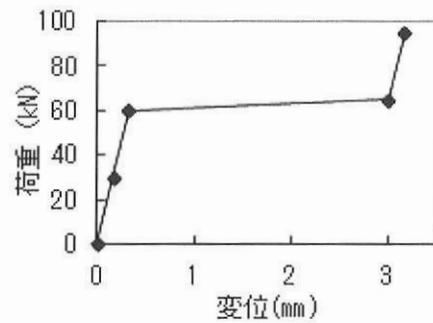
解析ケース 1 では、CAモルタルの抵抗力がないものと想定して解析を実施しているが、上に述べたように、解析

表 2 物性値一覧

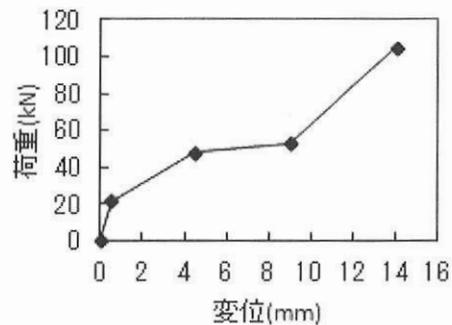
部 位		項 目	値	単 位	
60kg レール		ヤング係数	2.06 × 10 <sup>5</sup>	N/mm <sup>2</sup>	
		ポアソン比	0.3	—	
		線膨張係数	1.14 × 10 <sup>-5</sup>	/℃	
		断面積	7.75 × 10 <sup>3</sup>	mm <sup>2</sup>	
		断面二次モーメント(横)	5.12 × 10 <sup>6</sup>	mm <sup>4</sup>	
軌道スラブ		ヤング係数	35 × 10 <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	
		ポアソン比	0.1	—	
解析ケース 1	突起・軌道スラブ間ばね	ばね定数	レール長さ方向	69	kN/mm
			レール横方向	122	kN/mm
	レール締結装置ばね	ばね特性	レール長さ方向	図 4(a)(b)	—
			レール横方向	参照	—
解析ケース 2	突起・軌道スラブ間ばね	ばね定数	レール長さ方向	32.2	kN/mm
			レール横方向	16.1	kN/mm
	軌道スラブ・路盤間ばね	ばね特性	レール長さ方向	図 5 参照	—
			レール横方向	参照	—
	レール締結装置ばね	ばね特性	レール長さ方向	図 4(a)(c)	—
			レール横方向	参照	—



(a) レール長さ方向



(b) レール横方向 (解析ケース 1)



(c) レール横方向 (解析ケース 2)

図 4 レール締結装置のばね要素特性

ケース 2 においてこの抵抗力を設定した場合には、突起への作用力は小さくなる。突起への作用力が設計上の想定荷重を下回ることで、CAモルタルの抵抗力によって作用力が減少することを考慮すると、想定した範囲内においては十分なレール横方向の安定性が確保できると考えられる。

#### (2) 解析ケース 2

レール横変位は 0.3mm 以下であり、極めて小さい。レール締結装置への作用力は最大 7.7kN と算出され、解析ケース 1 と同様に直結 8 形レール締結装置のタイプレートの水平抵抗力を十分に下回っていた。解析ケース 2 では軌道スラブと路盤コンクリート間の摩擦力が寄与しているため、突起への作用力が最大 2.2kN と小さく、設計荷重の 1/10 程度となった。

本解析では曲線部におけるレールの初期の弾性変形や初期不整を発生させるための初期抵抗力については考慮しておらず、試験によって得られた物性値にもばらつきがあるが、以上の結果より部材強度に対して十分に余裕があると考えられる。曲線半径が 700m 以上のスラブ軌道にロングレールを敷設した場合に、温度上昇に伴うレール軸力は当面 1250~1300kN 程度まで許容しても問題はないと推定される。実軌道への適用に際しては、横方向への作用力の増加に伴う軌道への影響、レールのふく進による軸力の付加やレール締結措置の水平抵抗力の経年変化等について注意が必要である。

なお、本解析は温度上昇時の検討を行ったが、温度下降時にはレール破断時開口量の制限があるため、別途検討が必要となる。

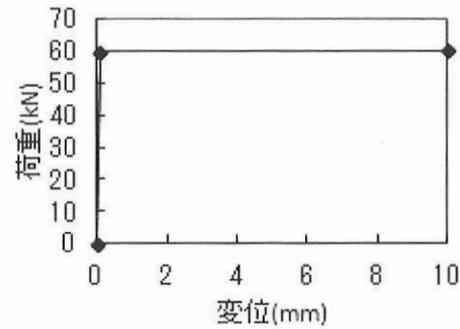


図 5 軌道スラブ・路盤間のばね要素特性

#### 5. まとめ

本研究において温度上昇時のスラブ軌道の横方向安定性を検討し、圧縮の最大レール軸力の限度値を緩和できる見通しを得た。高架橋上のロングレール化に際しては低温時のレール破断時開口量の制約があり、さらに検討を行っていく予定である。

#### 参 考 文 献

- 1) 三浦重他：急曲線へのロングレールの適用，鉄道総研報告，Vol.6，No.6，鉄道総合技術研究所，1992。
- 2) 島津健他：高架橋上における伸縮継目の撤去に関する研究，鉄道工学シンポジウム論文集，No.15，pp.108-111，2011
- 3) 長藤敬晴他：レール締結装置の機能向上，鉄道総研報告，Vol.6，No.11，鉄道総合技術研究所，1992。

表 3 解析結果のまとめ

#### (a) 解析ケース 1

レール温度上昇量/ レール軸力	70°C/1274kN		50°C/910kN		40°C/728kN	
	4000	2500	4000	2500	4000	2500
曲線半径 (m)	4000	2500	4000	2500	4000	2500
レール横変位 (mm)	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
レール締結装置への 横方向作用力 (kN)	7.4	7.5	5.3	5.3	4.2	4.3
突起への横方向 作用力 (kN)	20.1	21.0	14.4	15.0	11.5	12.0

#### (b) 解析ケース 2

レール温度上昇量/ レール軸力	72°C/1300kN			55°C/1000kN		
	2500	1000	700	2500	1000	700
曲線半径 (m)	2500	1000	700	2500	1000	700
レール横変位 (mm)	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2
レール締結装置への 横方向作用力 (kN)	6.7	7.3	7.7	5.1	5.5	5.9
突起への横方向 作用力 (kN)	1.5	1.7	2.2	1.1	1.3	1.4