

分岐器介在ロングレールの 横方向安定性評価の高精度化

玉川 新悟* 片岡 宏夫*
西宮 裕騎* 小谷 隼**

Improvement in Evaluation Method of Lateral Stability of Turnout Connected with Continuous Welded Rail

Shingo TAMAGAWA Hiroo KATAOKA Yuki NISHINOMIYA Jun KOTANI

The installation of turnouts connected with continuous welded rail (CWR) is recommended for reduction in the amount of track maintenance and improvement in riding quality. However, requirements for the installation are not examined enough from the viewpoint of lateral stability and the installation is limited under specific conditions. This study improved the traditional method for evaluating the lateral stability of turnouts connected with CWRs and examined requirements for the installation by use of the method. As a result, firstly, lateral resistances of ballast required to ensure the lateral stability were estimated under several conditions of CWR tracks where two turnouts exist. Secondly, the requirements for the installation were made clear with regard to CWR tracks where symmetrical, asymmetrical and curved turnouts exist. Finally, a long-term site test of turnouts on a ballastless track of viaducts was carried out and characteristics of the rail axial force, the longitudinal rail displacement and the viaduct expansion caused by temperature fluctuations were made clear.

キーワード：ロングレール，分岐器，横方向安定性評価，座屈，レール軸力

1. はじめに

ロングレールは、騒音や振動の低減、軌道保守量の軽減や乗り心地の向上に有効である。近年では、一般区間だけでなく、分岐器や橋梁が介在する区間においても、その適用が進められている。

分岐器区間をロングレール化した場合、基準線側と分岐線側の軌道が合流することによる付加的なレール軸力が発生し、最大レール軸力が通常のロングレールに比べて大きくなることが知られている¹⁾。このため、軌道の横方向安定性の観点からその敷設条件を検討する必要がある。過去の研究²⁾では、複数台の分岐器を連続敷設した突き合せ分岐器や高架橋上のまくらぎ直結構造の分岐器（以下、「まくらぎ直結分岐器」という）について、ロングレール化するための敷設条件が提案されている。しかし、突き合せ分岐器については、分岐器の組合せや分岐器同士の距離の影響を含めた検討は十分でなく、より合理的な敷設条件の提示が望まれる。また、まくらぎ直結分岐器については、現地測定結果に基づく検討例は無く、高架橋への縦荷重の影響や横方向安定性の観点から、設計の合理化が望まれる。

* 軌道技術研究部 軌道構造研究室

** 軌道技術研究部 軌道構造研究室（現 北海道旅客鉄道株式会社）

そこで本研究では、分岐器介在ロングレールの高精度な横方向安定性評価法の確立を目的とし、既往の解析手法を拡張するとともに、在来線バラスト軌道用の突き合せ分岐器や、両開き、振分け、内方および外方分岐器について、横方向安定性の観点から敷設条件を整理した。また、まくらぎ直結分岐器について、長期間にわたる現地測定を実施し、レール軸力およびレール縦変位と高架橋の伸縮特性を明らかにした。

2. 分岐器介在ロングレールの横方向安定性評価法

鉄道構造物等設計標準・同解説（軌道構造）³⁾では、ロングレールの横方向安定性を評価する際に、次式で照査することとしている。

$$\gamma_a \cdot \gamma_b \cdot \gamma_i \frac{P}{P_t} \leq 1.0 \quad (1)$$

ここに、 γ_a ：構造解析係数、 γ_b ：軌道部材係数、 γ_i ：軌道構造係数であり、標準的な値は文献3)に掲載されている。また、 P ：レール軸力の応答値、 P_t ：座屈に対するレール軸力の限界値である。

本研究では、横方向安定性の評価に上記の照査を適用する。レール軸力 P の算定には、既往の研究で提案された解析手法¹⁾を用いる。一方、座屈に対する限界値 P_t

特集：軌道技術

の算定には、宮井⁴⁾により提案されたエネルギー法による座屈解析手法を用いる。ただし、宮井による手法は、一般区間を対象に構築されたものであるため、以下に示す拡張を加えることで、分岐器区間への適用を可能とした。

(1) エネルギー変化量

分岐器の線形を考慮し、基準線側のレールと分岐線側のレールのエネルギー変化量を次式により算出する。

$$\Delta U = (\Delta U_1' + \Delta U_2' + \Delta W_3' + \Delta W_4' + \Delta W_5')/2 + (\Delta U_1'' + \Delta U_2'' + \Delta W_3'' + \Delta W_4'' + \Delta W_5'')/2 \quad (2)$$

ここに、

ΔU : エネルギー変化量の総和

ΔU_1 : レールの長さ方向ひずみエネルギー変化量

ΔU_2 : レールの曲げひずみエネルギー変化量

ΔW_3 : 道床縦抵抗力に対する仕事

ΔW_4 : 道床横抵抗力に対する仕事

ΔW_5 : レール締結装置の回転抵抗力に対する仕事

である。なお、右肩の「l」および「r」は、基準線側および分岐線側のレールを表す。道床横抵抗力およびレール締結装置の回転抵抗力に対する仕事は、曲線半径に依存しないため、 $\Delta W_4^l = \Delta W_4^r$ かつ、 $\Delta W_5^l = \Delta W_5^r$ が成立する。

(2) レール軸力

基準線側と分岐線側のレール軸力を一定の比を保ちつつ増加させる。その比は、レール軸力解析で得られた値を用いる。また、レール軸力はレールの長さ方向に一定と仮定する。

(3) 道床抵抗力

道床縦抵抗力と道床横抵抗力は、ともに基準線側と分岐線側のレールで等分する。

(4) レール締結装置の回転抵抗力

分岐器部のレール締結装置について、次章に示す回転抵抗力の測定試験を実施し、得られた結果を用いる。

3. レール締結装置の回転抵抗力試験

分岐器部のレール締結装置に関する回転抵抗力特性を実験的に把握した例は少なく、その特性は明らかでない。そこで、分岐器部のレール締結装置を用いて回転抵抗力の測定試験を実施し、その特性を明らかにした。

3.1 試験概要

本試験では、表1に示すレール締結装置を対象とした。分岐器部のレール締結装置は、在来線用について片開き分岐器 (T₅₀片12-301)の部材を、新幹線用について片開き分岐器 (T₆₀片18-501)の部材を用いた。また、分岐器部との比較として、新幹線の一般部に使用される高速形レール締結装置についても試験を実施した。

供試体は、図1に示すように、試験機の定盤上にPCまくらぎ、もしくは床板を固定した後、試験用レールおよびレール締結装置により組み立てた。組立後、試験用レールの底部側面に油圧ジャッキにより載荷し、載荷点位置の変位を測定することで、回転抵抗力と回転角を求めた。

3.2 試験結果

図2に回転抵抗力と回転角の関係を示す。図中には、既往の研究で得られた5形レール締結装置(在来線用一般部のレール締結装置)の結果も併記する。

試験結果より、以下のことを確認した。

- (a) 在来線用および新幹線用分岐器のレール締結装置は、一般部のレール締結装置(5形および高速形)と比較し、いずれも大きな回転抵抗力を有する。
- (b) 在来線用分岐器のレール締結装置では、ポイント部用座金形の回転抵抗力が最も大きく、新幹線用分岐器のレール締結装置では、ポイント部用プレス形の回転抵抗力が最も大きい。
- (c) 在来線用分岐器のレール締結装置のうち、ポイント部用プレス形および座金形の回転抵抗力について

表1 試験対象としたレール締結装置

在 / 幹	使用区別	形式
在来線	分岐器部	リード部用座金形
		ポイント部用プレス形
		ポイント部用座金形
新幹線	分岐器部	リード部用座金形
		ポイント部用プレス形
		ポイント部用座金形
	一般部	高速形レール締結装置

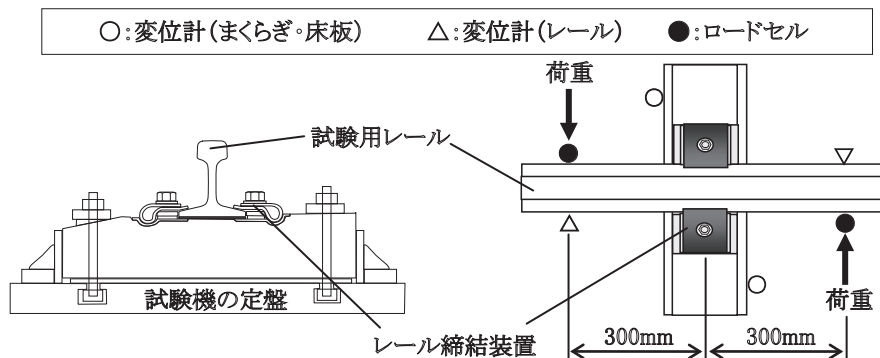


図1 レール締結装置の回転抵抗力試験

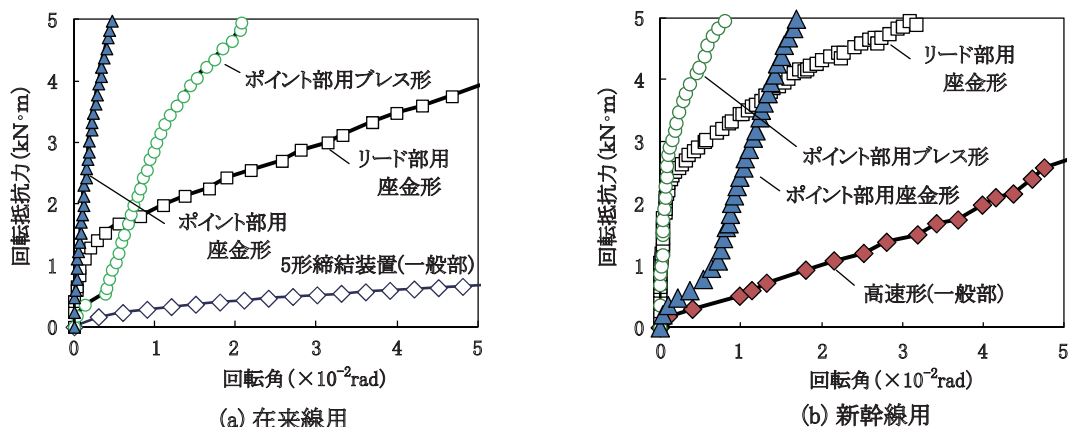


図2 回転抵抗力試験の結果

表2 レール軸力解析の計算諸元

項目	値	
50kgN レール	縦弾性係数	$2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$
	線膨張係数	$1.14 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$
最大温度変化量	35 °C	
まくらぎ間隔	一般区間	641 mm
	分岐器区間	図面に準じる
最終道床横抵抗力	一般区間	3.9 kN/m/ レール
	分岐器区間	図面に基づき算出
最終道床縦抵抗力	一般区間	7.8 kN/m/ レール
	分岐器区間	図面に基づき算出
拘束ばね定数	$6.0 \times 10^4 \text{ kN/m}$	

ては概ね直線的に増加する。リード部用座金形については回転角が $0.1 \times 10^2 \text{ rad}$ 程度の小さい範囲において直線的に増加し、これを越える回転角の範囲では、非線形特性を示す。

(d) 新幹線用分岐器のレール締結装置のうち、リード部用座金形の回転抵抗力については、回転角が $0.1 \times 10^2 \text{ rad}$ 程度の小さい範囲では直線的に増加し、それを越える回転角の範囲で非線形特性を示す。

以上で示したように、分岐器部のレール締結装置の回転抵抗力は、リード部とポイント部で違いが確認された。本研究では、試験結果を次章の在来線用分岐器の横方向安定性評価に反映させるにあたり、回転抵抗力の値が最も小さいものを用いるのが安全側の評価になると考え、リード部用座金形の回転抵抗力を用いた。

4. 在来線用分岐器の安定性評価

分岐器介在ロングレールの適用拡大を目的とし、在来線バラスト軌道用の突き合せ、両開き、振分け、内方および外方分岐器について、レール軸力解析および座屈解析を実施した。得られた結果を基に、横方向安定性の観点からこれらの敷設条件を整理した。

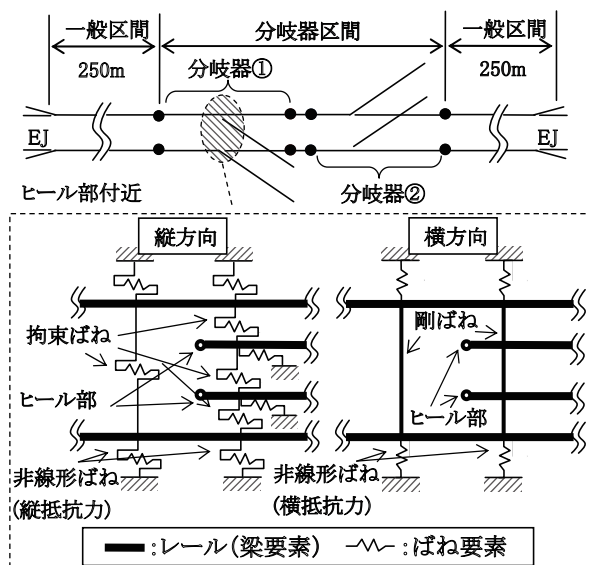


図3 レール軸力解析モデル

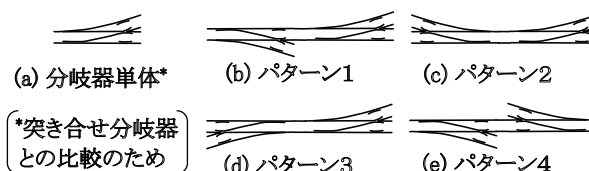


図4 分岐器の突き合せパターン

4.1 突き合せ分岐器に関する検討

4.1.1 レール軸力解析

FEMによる解析手法¹⁾を用いて、突き合せ分岐器(2台の片開き分岐器)のレール軸力解析を実施した。表2に計算諸元を、図3に解析モデルを示す。解析ケースは、以下の敷設条件の組合せにより合計68ケースとした。

- ①分岐器の番数：8, 10, 12, 16番の4通りとする。
 - ②突き合せパターン：図4に示す5通りとする。
 - ③分岐器間距離：5, 10, 15, 20mの4通りとする。
- なお、いずれも同番数の分岐器の突き合せとする。

解析結果として、図5に各ケースの分岐器間距離と最大レール軸力の関係を示す。図の縦軸は、分岐器単体の最大レール軸力に対する、各突き合わせパターンの最大

特集：軌道技術

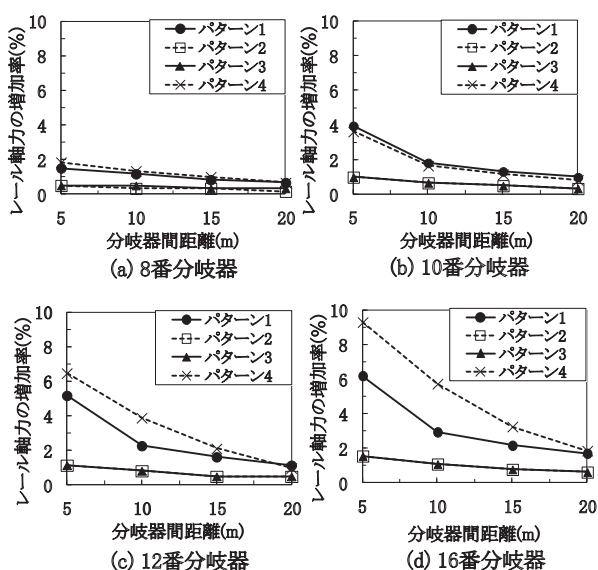


図5 分岐器間距離と最大レール軸力の増加率

表3 座屈解析の計算諸元

項目	値
初期通り変位	波高： $c_0=0.02$ m, 波長： $l_0=5$ m
座屈波形	$y=c/2(1+\cos\pi x/l)-x^2/2R$ ($c \geq c_0, l \geq l_0, l \geq x \geq 0, R$: 曲線半径)
レール締結装置の回転抵抗力	在来線リード部用座金形の回転抵抗力試験結果 (3章参照)

レール軸力の増加率 (%) を表す。最大レール軸力は、すべての番数・突き合わせパターンについて、分岐器単体として算出したものに比べて大きく、その値は、分岐器間距離の減少に伴い増加している。最大レール軸力の増加率は、分岐器間距離を5m確保した場合で最大9%程度、20m確保した場合で最大2%程度であった。

4.1.2 横方向安定性評価

表3に示す条件により座屈解析を実施し、座屈解析で得られた限界値（最低座屈強さ）および前項で得られた最大レール軸力を基に、横方向安定性の照査を実施した。図6に横方向安定性の照査を満足するのに必要な道床横抵抗力を示す。

突き合わせ分岐器をロングレール化するには、最大レール軸力が生じるヒール部を中心として、図6に示す道床横抵抗力を確保する必要がある。なお、分岐器間距離を20m確保した場合、各突き合わせパターンにおける必要道床横抵抗力の値は、分岐器単体の場合と比較して有意な差は見られず、座屈防止の観点からは、連続敷設した2台の分岐器を単体の分岐器として評価できる。

4.2 両開き、振分け分岐器に関する検討

両開き、振分け、内方および外方分岐器を対象に座屈解析および横方向安定性評価を実施し、これらの敷設条件を整理した。

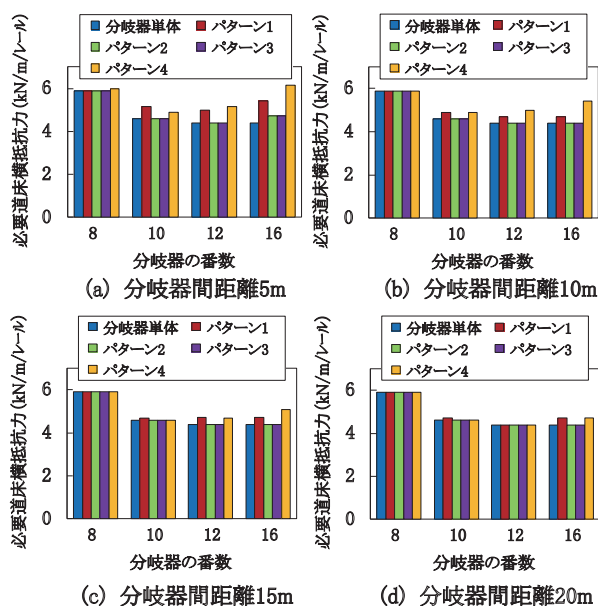


図6 突き合わせ分岐器の必要道床横抵抗力

表4 解析対象とした分岐器

番数	形状		曲線半径 (m)	
			基準線	分岐線
8	振分け	9:1	1196	-133
		両開き	237	-237
10	振分け	9:1	1862	-207
		4:1	931	-233
		7:3	621	-266
	両開き		371	-371
	内方		600	142
外方		600	-269	
12	振分け	3:2	669	-446

表4に対象とした分岐器とその曲線半径を示す。なお、分岐器の曲線半径は、その円の中心が基準線側の曲線と反対側にある場合を負で表している。

座屈解析に用いた計算諸元は、前節の表3に示したものと同一とする。座屈解析の結果を基に、横方向安定性の照査を満足するのに必要な道床横抵抗力を算出した。なお、照査に用いたレール軸力は、4.1.1項で算出した片開き分岐器単体の最大レール軸力とした。本レール軸力を用いた理由は、ロングレールの軸力特性がレールの長さ方向の相対変位量に依存するものであり、同番数の分岐器では、最大レール軸力の値に有意な差がないものと考えたためである。

図7に必要道床横抵抗力の計算結果を示す。図中には、比較として片開き分岐器の計算結果を併記する。図7について、10番分岐器に着目すると、振分け分岐器の必要道床横抵抗力は、片開き分岐器と比較して小さい。また、その値は振分率の均衡に伴い減少し、振分率1:1である両開き分岐器については、座屈を生じない結果を得た。振分け

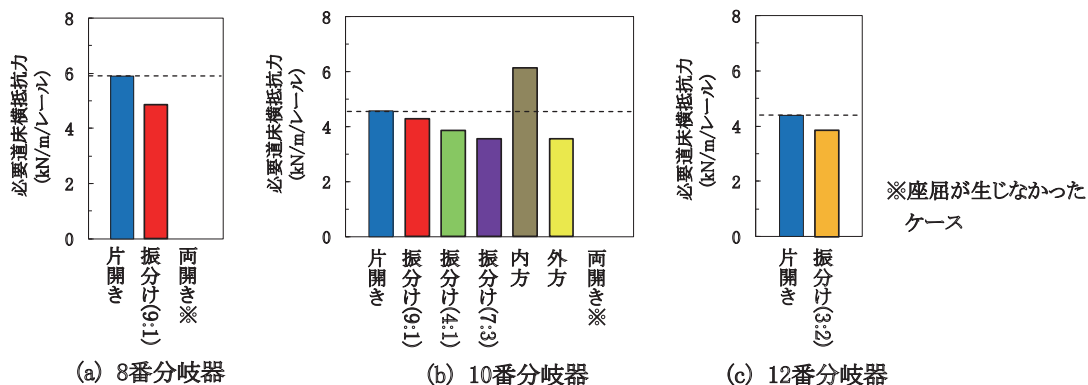


図7 両開き・振分け・内方および外方分岐器の必要道床横抵抗力

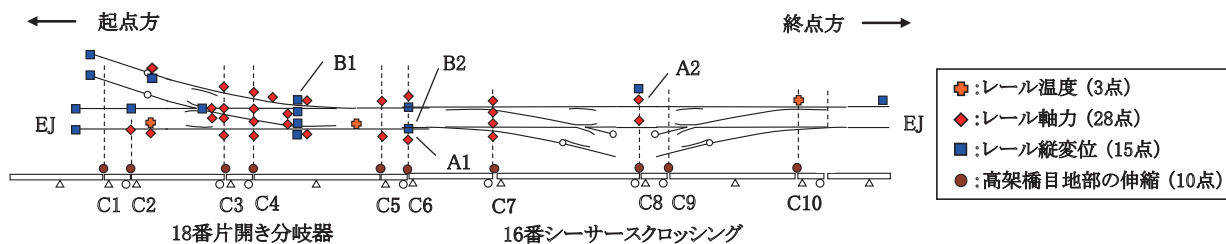


図8 現地測定の測点配置

分岐器と同様に、外方分岐器の必要道床横抵抗力についても、片開き分岐器と比較して小さい。一方、内方分岐器の必要道床横抵抗力は、片開き分岐器と比較して大きく、片開き分岐器に対して3割程度の割増を考慮の必要がある。

以上の傾向は、8番および12番分岐器に対しても同様である。このため、両開き、振分け、外方分岐器をロングレール化する場合には、片開き分岐器と同等の必要道床横抵抗力を確保すれば常に安全側の配慮となる。また、内方分岐器については、片開き分岐器に対して必要道床横抵抗力の割増が必要となる。

5. まくらぎ直結分岐器の現地測定

新幹線軌道のまくらぎ直結分岐器のレール軸力、レール縦変位および高架橋の伸縮特性を明らかにすることを目的とし、長期間にわたる現地測定を実施した。

5.1 現地測定概要

測定対象は、18番片開き分岐器と16番シーサースクロッシングが連続して敷設された区間とした。いずれも高架橋上に敷設されたまくらぎ直結分岐器であり、分岐器の前後に伸縮継目が配置されている。

測定は、レール温度、レール軸力、レール縦変位、高架橋の目地部における伸縮量について、図8に示す位置にて実施した。測定期間は2年間とした。また、測定開始時のレール温度は7℃であり、以下に述べるレール軸力、レール変位および高架橋目地部の伸縮量は、この時点からの変動値としている。

5.2 現地測定結果

5.2.1 レール温度

測定期間中における最高レール温度は50℃、最低レール温度は-6℃であり、年間の最大温度変化量は56℃であった。この値は、想定される最高レール温度60℃と最低レール温度-10℃の範囲内であった。

5.2.2 レール軸力

レール軸力について、2台の分岐器間の一般部（測点A1）および16番シーサースクロッシングの基準線側（測点A2）で測定された結果を図9に示す。図中の値は、圧縮を正（+）とする。図中の測点は、他の測点と比較して大きな軸力が確認された箇所である。

図9より、温度変化量40℃に対するレール軸力の最大変化量は、既往の研究²⁾で推定されたように、一部の測点において構造物の設計時に想定される980kNを上回る結果を得た。レール軸力が構造物に与える影響については、今後とも詳細な検討が必要であると考えられる。また、レール軸力の年間変化は、測点による若干のばらつきはあるものの、ヒステリシスを繰返しながらかね線形に変化することを確認した。

5.2.3 レール縦変位

レール縦変位について、18番片開き分岐器のヒール部（測点B1）における年間変化量を確認したところ、その値は最大で1.5mm程度であった。これは、トンゲレールの食い違いを防止するための移動防止金具の許容変位量が5mm程度であることを踏まえると、十分に小さい値である。一方、レール軸力が大きい一般部（測点B2）のレール縦変位の変化量は、最大6mm程度であり、

特集：軌道技術

ヒール部と比較して大きいことを確認した。

5.2.4 高架橋目地部の伸縮量

高架橋目地部の伸縮量を測定した結果を図10に示す。図中には、単純桁の両端部（測点C6, C7）で測定された結果を示す。結果より、高架橋の伸縮量は、温度変化に伴いヒステリシスを描きながら次第にその値が変化することを確認した。

各測点について、最大レール温度変化量56℃に対する高架橋の伸縮量の実測値と計算値を図11に比較する。なお計算値は、桁の線膨張係数を $1.0 \times 10^{-5}/\text{℃}$ とし、各桁の固定端を基準に伸縮すると仮定した場合の試算値である。結果より、各測点における伸縮量は、実測値と計算値に差がある。これは、計算で桁の温度変化量を最大レール温度変化量56℃としているのに対して、実際の桁の温度変化量が56℃と異なることが原因として考えられる。すべての測点について、伸縮量の実測値の総和と計算値の総和を比較した結果、実測値は計算値の6割程度であった。本結果を踏まえ、高架橋の伸縮量をレール軸力の解析パラメータに反映させるには、桁の温度変化量をレールの温度変化量の6割程度とすることが望ましいと考える。

今後は、以上で得られた結果を基に、まくらぎ直結分岐器のレール軸力解析を実施し、実測値と解析値の比較を行うことで、解析手法の妥当性を確認するとともに、更なる深度化を図る必要があると考える。

6. まとめ

本研究では、分岐器介在ロングレールの高精度な横方向安定性評価法の確立を目的とし、既往の解析手法を拡張するとともに、これを用いて在来線バラスト軌道用分岐器の横方向安定性評価を実施した。また、高架橋上のまくらぎ直結分岐器について、長期間にわたる現地測定を実施した。得られた主な知見を以下に示す。

- (1) 既往の座屈解析手法を拡張し、分岐器部の横方向安定性評価を可能とした。
- (2) 分岐器部におけるレール締結装置の回転抵抗力を実験的に把握し、試験結果を横方向安定性評価に反映させた。
- (3) 突き合せ分岐器の各敷設条件についてロングレール化に必要な道床横抵抗力を整理した。また、分岐器間距離を20m以上確保すれば、連続敷設した2台の分岐器を単体の分岐器として評価できることを示した。
- (4) 両開き、振分け、内方分岐器をロングレール化する場合、片開き分岐器と同等の道床横抵抗力を確保すれば常に安全側の配慮となることを示した。また、外方分岐器については、片開き分岐器に必要な道床横抵抗力に対する割増が必要であることを示した。
- (5) 高架橋上のまくらぎ直結分岐器について、レール軸

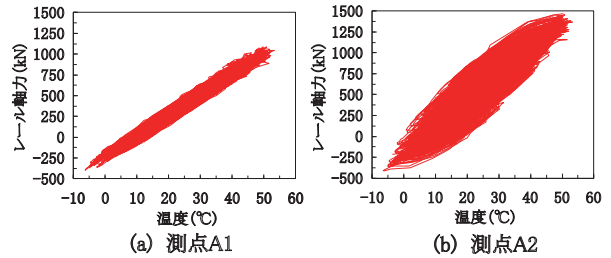


図9 レール軸力の測定結果

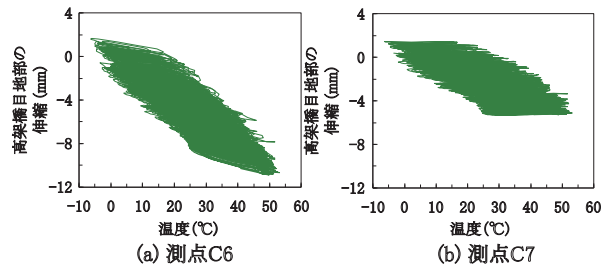


図10 高架橋目地部の伸縮量の測定結果

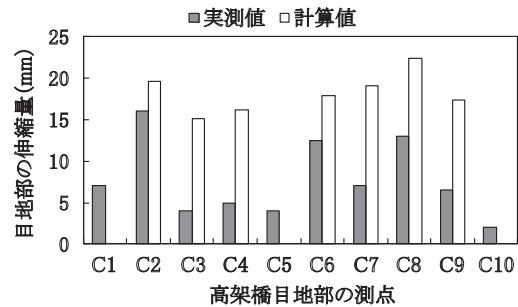


図11 高架橋目地部の伸縮量

力、レール縦変位、高架橋目地部の伸縮量の特徴を把握し、レール軸力解析の際に重要となる解析パラメータを取得した。

謝辞

現地測定を実施するにあたり、九州旅客鉄道株式会社殿および独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構殿からの多大なる御支援、御協力を賜りました。ここに深く感謝します。

文献

- 1) 三浦重, 柳川秀明: ロングレールと一体化した分岐器のレール軸力特性, 鉄道総研報告, Vol.3, No.1, pp.36-42, 1989
- 2) 岩佐裕一, 片岡宏夫, 柳川秀明: 分岐器介在ロングレールの適用範囲の拡大, 鉄道総研報告, Vol.20, No.4, pp.11-16, 2006
- 3) 国土交通省監修: 鉄道構造物等設計標準・同解説-軌道構造, 丸善, 2012
- 4) 宮井徹: エネルギー法による軌道座屈の数値解析, 鉄道技術研究報告, No.1271, pp.1-19, 1984