

# 地域鉄道に適した低コストなロングレール軌道構造の開発

西宮 裕騎\* 伊藤 壱記\*\* 桃谷 尚嗣\*\*

Low-cost Continuous Welded Rail Track Structure Suitable for Regional Railways

Yuki NISHINOMIYA Kazuki ITO Yoshitsugu MOMOYA

Rail joints are a weakness in tracks on regional railways. However, existing continuous welded rail track structures are designed for trunk lines, and would be difficult to introduce on regional railways given the high implementation cost. In the proposed track structure, some wooden sleepers are replaced with PC sleepers, while the soil/ballast mix is kept as it is, and joint depressions are sectioned off and welded. In order to maintain the lateral stability is guaranteed by adding cement to the ballast through stabilizing reinforcement. The developed continuous welded rail track structure was used to build a full size track model, and rail heating tests were conducted. The results confirmed that after the lateral ballast resistance force reinforcement work was done, no buckling occurred.

キーワード：ロングレール、道床横抵抗力、軌道座屈、地域鉄道、セメント安定処理

## 1. はじめに

地域鉄道のような閑散線区では、軌道の弱点であるレール継目が多数存在するため、保守の負担が大きく、少ない改良費で効果の高い軌道構造強化策が必要とされている。特に低コストなロングレール化を実現できればレール継目が除去され、保守費を大幅に削減できるため、効果が高いと考えられる。しかし、従来のロングレールは基幹線区向けに設計されており、導入コストが高いため地域鉄道への適用が困難である。そこで、地域鉄道のコスト削減及び安全・安定輸送の継続を支援することを目的として、低コストで導入可能なロングレール構造を開発した。

開発にあたっては、細粒土が混入したバラスト道床、40kgN レール、木まくらぎ・犬くぎ締結が大部分を占める地域鉄道の軌道構造を低コストで改良する工法が必要となる。そこで、可能な限り導入コストを削減する観点から、開発コンセプトを以下の通り設定した。

- (1) 低重量レールは継目付近の不良部を切断および除去した上で再利用し、縦移動させて除去した隙間を埋めて溶接する。
- (2) 木まくらぎから PC まくらぎへの交換本数を削減するため、3本に1本の割合で部分的に交換する。
- (3) 残った木まくらぎのレールふく進抵抗力は安価なアンチクリーパで確保する<sup>1)</sup>。
- (4) バラストの交換は必要最小限度とし、細粒土混入バ

ラストでも必要な道床横抵抗力を安価で長期的に確保できる工法を開発する。

これらのコンセプトに基づき開発したロングレール軌道構造を報告する。なお、断面積の大きいレールの方が発生する軸力が大きく、軌道座屈安定性の観点では不利になる。このため、以降の検討は 50kgN レールを対象とし、40kgN レールにも適用できるものとした。

## 2. ロングレールの基本設計

軌道座屈安定性を数値解析してロングレールの成立条件を求め、それを満たす工法を選定した。

### 2.1 軌道座屈解析

軌道座屈解析プログラムを用いて、必要な道床横抵抗力を算出した。解析モデルを図1に、基本解析条件を表1に示す。レールとまくらぎを梁要素でモデル化し、レール締結装置とバラスト道床の抵抗力は非線形ばね要素でモデル化した。解析種別は静的非線形（大変形）熱応力解析とし、レールに温度荷重を与え、その温度を弧長増分法で制御することで座屈後の経路を含めて求めた。将来的に木まくらぎの劣化による犬くぎの締結力の低下を想定し、木まくらぎの道床横抵抗力を期待しない条件とした。現行のロングレール設計では、設定温度からのレール温度上昇量を 35℃<sup>2)</sup> と想定しており、本解析では最低座屈強さに相当するレール温度上昇量が 35℃以上となる条件を求めた。なお、FEM 解析による手法は設計標準<sup>2)</sup> で示されるエネルギー法による計算結果を軌道構造係数 1.2 で除した設計応答値と同等であることを確認

\* 軌道技術研究部 軌道構造研究室

\*\* 軌道技術研究部 軌道・路盤研究室

している<sup>3)</sup>ため、最低座屈強さの安全係数は考慮しない。

解析結果を図2に示す。解析の結果、部分交換したPCまくらぎ1本につき14.7kNの道床横抵抗力を確保できれば、最低座屈強さに相当するレール温度上昇量が35℃以上となり、ロングレール化が可能である。

### 2.2 軌道座屈安定性の向上策

ロングレール化に必要な道床横抵抗力(14.7kN)は、基幹線区で用いられる通常のPCまくらぎの4倍であり、地域鉄道で用いられる小さいサイズのPCまくらぎでは、大幅に道床横抵抗力を増加させる必要がある。従来から知られている道床横抵抗力を増加させる手法としては、道床安定剤、座屈防止板の取り付けが挙げられる。道床安定剤はバラスト表面に樹脂剤を散布して表面のバラストを固めて道床横抵抗力を増加させる工法であるが、樹脂の耐久性が軌道部材に比べて短いことや、主表面のみを固める工法であるため効果が限定される。座屈防止板は、鋼製板そのものの耐久性は問題ないが、板のサイズを従来用いられているものより大きくする必要がある。さらに、地域鉄道ではバラストに細粒土が混入していることが多く、これらの対策のみで目標とする道床横抵抗力増加量を得ることが困難である。そこで、この細粒土混入バラストを利用し、安価で長期耐久性に優れた工法として、セメント安定処理による道床横抵抗力の増強工を新たに開発した。

### 3. 道床横抵抗力の増強工

ロングレール化に必要な道床横抵抗力を満足する増強工の開発を行った。はじめに細粒土混入バラスト道床の道床横抵抗力の特性を評価したうえで、道床横抵抗力の増強工を検討した。

#### 3.1 細粒土混入バラスト道床の道床横抵抗力の特性

細粒土混入バラスト道床に対して道床横抵抗力試験を実施し、0.075mm未満の細粒分含有率(以下、Fc)および道床の含水状態が道床横抵抗力に及ぼす影響を検討した。

本検討で用いた細粒土混入バラストは、図3に示した地域鉄道の現地における道床肩部および道床噴泥が生じている箇所のまくらぎ下面の道床の粒度分布を参考に、新品バラスト、クラッシュラン(以下、C-30)、カオリンの混合率を調整した。作製した道床のバラスト：C-30：カオリンの配合割合を、道床肩部の粒度分布を模擬した道床(以下、Fc2%道床)は8：2：0、道床噴泥箇所のまくらぎ下面の粒度分布を模擬した道床(以下、Fc10%道床)は6：2：1とした。各道床の締固め試験結果を表2に示す。

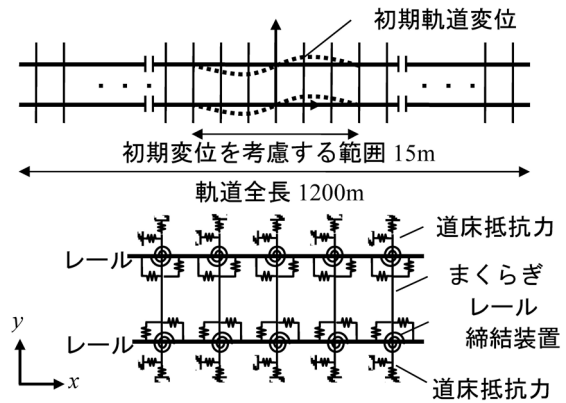


図1 軌道座屈解析モデル

表1 軌道座屈解析条件

項目	値
レール	種別 JIS 50kgN
初期軌道変位	波高 19mm(10m 弦)
	波長 15m
まくらぎ	間隔 735 mm
レール締結装置(PCまくらぎ)	ふく進抵抗力(ばね定数 x 方向) $\tau_0=12.4 \text{ kN/mm}^{1/2}$ $M=\tau_0 \times \sqrt{y}$
	横抵抗力(ばね定数 y 方向) 27.0 MN/m
	回転ばね定数 27600kN・mm/rad
レール締結装置(木まくらぎ)	ふく進抵抗力(ばね定数 x 方向) $\tau_0=1.24 \text{ kN/mm}^{1/2}$ $M=\tau_0 \times \sqrt{y}$
	横抵抗力*(ばね定数 y 方向) 2.7 MN/m

※締結力を考慮する場合。

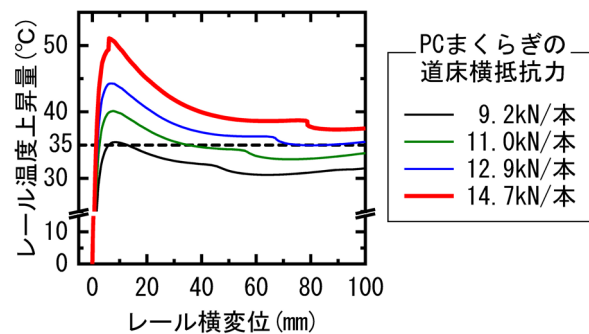


図2 軌道座屈解析結果

締固め試験結果を参考に、図4に示す実物大軌道模型を構築した。乾燥した道床状態を模擬するため、構築時の道床の含水比を低く設定した。Fc2%道床では含水比1.4%で締固め度が98%、Fc10%道床では含水比1.6%で締固め度が90%となり、最適含水比が低いFc10%道床の方が構築時の締固め度は低くなった。道床の締固めには、タンピングランマおよびプレートランマを用いた。

試験で用いたまくらぎは、PC3号まくらぎ、TPCま

くらぎおよび木まくらぎの3種類とした。実物大軌道模型は、図4に示すように各まくらぎの長さが異なるため、載荷方向の道床肩幅を350mm確保することとした。

道床横抵抗力試験では、降雨を想定して試験直前にまくらぎ周囲に散水した。なお、同じ道床を締め固め直してFc2%道床とFc10%道床において試験をそれぞれ各3ケース（計6ケース）行った。道床の締め固め方法は、プレートランマを用いた場合、タンピングランマおよびプレートランマを用いた場合とし、まくらぎ周辺の締め固め方法の違いが道床横抵抗力に与える影響を検討した。載荷にはスクリージャッキを用い、まくらぎ長手方向の載荷速度は2mm/minとした。道床横抵抗力は、一般に軌きょう全体が移動した場合の最終道床横抵抗力に概ね等しい<sup>2)</sup>とされる、まくらぎ水平変位2mm時の値で比較した。

図5に各まくらぎにおける水平変位2mm時の道床横抵抗力、締め固め時の含水比および試験時の含水比を示す。Fc2%道床では、各試験ケースの含水比に大きな変化がないものの、締め固め方法を変えることで道床横抵抗力がやや増加する傾向を示した。一方、Fc10%道床では、散水により各試験ケースの含水比が変化した。ケース2では、ケース1の散水よって道床の含水比が4.2%になった状態で、プレートランマで締め固めた後に試験を行ったところ、PC3号まくらぎおよびTPCまくらぎには大きな変化が見られなかったが、木まくらぎではケース1の結果よりも増加した。ケース3では、試験時の含水比(5.8%)がケース2よりもやや低かったものの、締め固め時の含水比が7.2%であり、最適含水比(7.8%)に近づいた。また、タンピングランマおよびプレートランマを用いて念入りに締め固めたことから高い密度が得られていたと考えられ、道床横抵抗力が全てのまくらぎ種類において増加した。

### 3.2 道床横抵抗力の増強工の開発

前節より、細粒土混入バラスト道床は、最適含水比の状態ではタンピングランマおよびプレートランマにより道床を締め固めることで道床横抵抗力が増加する傾向を示したが、ロングレール化に必要な道床横抵抗力(14.7kN)を確保することはできなかった。そこで、既設のバラストを活用し、環境負荷の低減、処理費用の削減を目的とした低コストな道床横抵抗力の増強工を検討した。増強工は、前項で得られた知見を踏まえ、含水比調整した既設バラストにセメントを10%添加したセメント安定処理土を用いて道床肩部を強化する方法とすることとした。

本検討では、道床横抵抗力と増強工の寸法(道床肩部を強化する範囲)の関係について検討し、一般的にレール座屈防止対策に用いられている道床安定剤と座屈防止

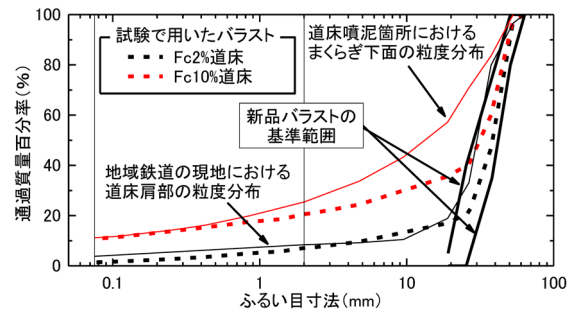


図3 細粒土混入バラストの粒度分布

表2 締め固め試験結果

道床	最大乾燥密度 $\rho_{dmax}$	最適含水比 $W_{opt}$
Fc2%道床	1.877g/cm <sup>3</sup>	3.7%
Fc10%道床	2.185g/cm <sup>3</sup>	7.8%

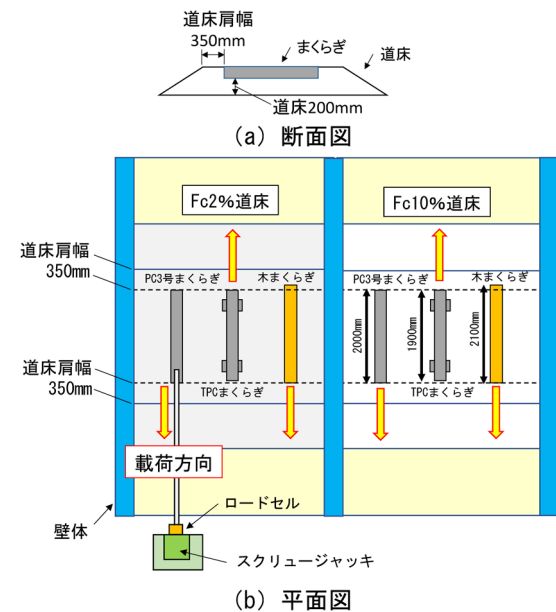


図4 実物大軌道模型の概要

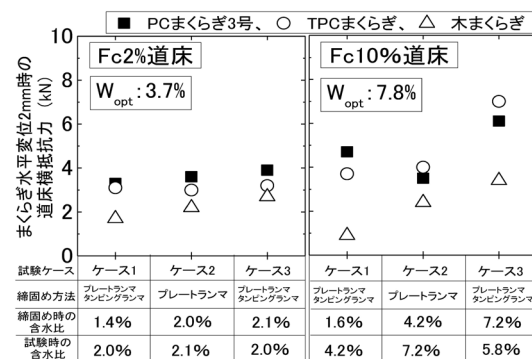


図5 道床横抵抗力試験の結果

板も併せて検討した。実物大模型軌道を用いた道床横抵抗力試験は、表3に示す試験条件で実施した。

実物大軌道模型の条件は、道床肩幅350mm、道床厚200mmの木まくらぎの区間において、1/3部分PCまく

らぎ化を施工した軌道を想定した。増強工の施工位置は、TPC まくらぎに交換した箇所其道床肩部で、かつ隣接する木まくらぎとの間の範囲とした。図6に実物大軌道模型の形状と寸法を示す。実際のバラスト道床は、まくらぎ下面の方が道床肩部よりも細粒土が多く含まれていることから、本軌道模型ではまくらぎ下面にFc10%道床を構築し、その上にFc2%道床を構築した。なお、case1およびcase3の試験は、case2およびcase4～case5を敷設する前の軌道模型に対して実施した。

増強工に用いたセメント安定処理土の締め固め試験の結果、最適含水比は5.1%、最大乾燥密度は2.261g/cm<sup>3</sup>であった。なお、セメント安定処理土を含水比5.0%に調整し、締め固め度92%で作製した供試体の一軸圧縮強さは材齢7日で8.3MN/m<sup>2</sup>、28日で8.8MN/m<sup>2</sup>であった。

case4からcase6の増強工は、道床肩部をレール延長方向に幅600mm、900mmおよび1200mmの範囲でセメント安定処理土により強化した。前項で得られた知見を基に、増強工の構築では、セメント安定処理土を最適含水比5.0%に調整して、タンピングランマおよびプレートランマにより、十分に締め固めた(図7)。

道床横抵抗力試験では、TPC まくらぎの水平変位10mm時の抵抗力を最終道床横抵抗力と定義して評価した(図8)。同図より、未対策4.8kNに対して、道床安定剤が7.3kN、座屈防止板12.8kNであり、道床横抵抗力の増加が確認されたものの、本増強工に求められる道床横抵抗力14.7kNよりも小さかった。

セメント安定処理土による増強工では、道床肩部の強化幅W600mmで9.1kN、W900mmで12.0kN、W1200mmで20.0kNであり、W1200mmのケースにおいて道床横抵抗力14.7kNを満足することを確認した。

したがって、本軌道条件における道床肩部の強化幅は、レール延長方向に1200mmとした。

#### 4. 実物大軌道模型を用いた座屈安定性評価

開発したロングレール構造の妥当性を確認するため、実物大軌道模型を製作し、高周波通電加熱試験装置によりレールを加熱する座屈試験を実施した。

##### 4.1 試験装置

試験装置の主要諸元を表4に、構成を図9に示す。

過去の試験結果から座屈後のレール変形範囲は約25mであり、両端に20mの余裕をみると必要な軌道延長は65mとなる。前述の通り、想定する設定温度からのレール温度上昇量は35℃であり、試験におけるレール温度上昇量は余裕をみて70℃とした。この時、ロングレールの不動区間では、レール軸力1075kN/レールが発生する。ロングレールの不動区間で生じる座屈を模擬するた

表3 試験条件の一覧

試験	内容	備考
case1	未対策	—
case2	道床安定剤	散布量：2kg/m <sup>2</sup>
case3	座屈防止板	寸法：W600×H300×t9 (mm)
case4	増強工 (W600mm)	セメント安定処理土 (Fc2%道床+セメント10%添加)
case5	増強工 (W900mm)	
case6	増強工 (W1200mm)	

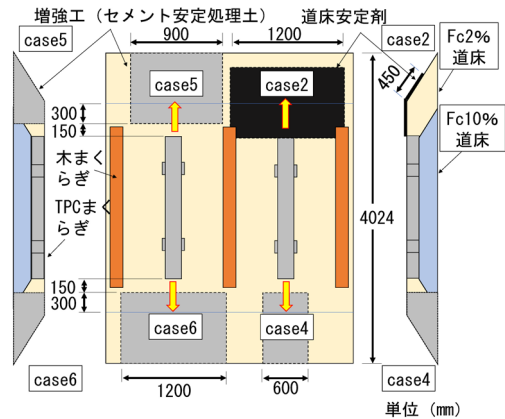


図6 実物大軌道模型の形状と寸法 (case2, 4, 5, 6)



図7 増強工の構築状況 (幅1200mm)

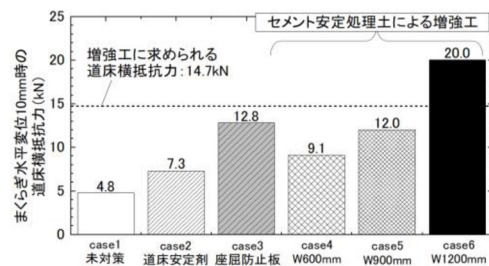


図8 各種増強工の道床横抵抗力の比較

め、レール端部には想定するレール軸力に耐えられるよう、宮井ら<sup>4)</sup>によって設置されたレール反力壁を用いた。

レールを加熱する方式として、蒸気加熱、ヒーター加熱、直流通電加熱などが過去に用いられてきた。しかし、蒸気加熱は発生した水分によりバラスト道床の強度が低下する。ヒーター加熱方式はヒーター接触部が高温となり、本質的に加熱むら避けられない。また、直流通電加熱方式は、レールに大電流が流れるため危険性が高い。代替の方式として、レールに高周波交流電流を通電し、

表4 実物座屈試験装置の主要諸元

項目	諸元
レール反力壁の最大軸力	1300kN×2本
加熱方式	高周波通電加熱
出力	150kW
周波数	6kHz
対象レール	JIS 50kgN 65m×2本
温度上昇量	70℃/時間(目安値)

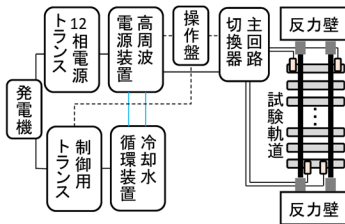


図9 レール加熱装置の構成

レールの電気抵抗で直接加熱する方法を検討した。

軌道を均一に加熱するため、3mと1.4mの短レールと軌道延長25mのレールを用いた加熱試験を行い、出力や回路構成を設計した。軌道延長25mを対象とした加熱試験を実施したところ、左右レールに12%の温度差を生じることがわかった。そこで、左右レールを独立の加熱回路とし、回路切替器により交互に加熱することで温度差を調整する機構を設けた。

#### 4.2 実物大軌道模型の製作

開発したロングレール構造の妥当性を確認するため、実物大軌道模型を製作し、高周波通電加熱試験装置により座屈試験を実施した。軌道条件を表5、図10に、製作した実物大軌道模型を図11に示す。

50kgNレールをガス圧接により溶接した全長65mの軌道において、木まくらぎ区間を3本に1本の割合でPCまくらぎ化し、締結間隔を675mmとした条件を基本とした。座屈のきっかけとなる不整については、通り変位と浮きまくらぎを設定し、中央30m区間については犬くぎの締結不良を想定して木まくらぎを締結せず、アンチクリーパのみを設置した。

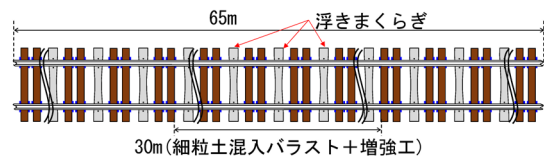
#### 4.3 試験方法及び測定方法

製作した実物大軌道模型を用いてレール加熱試験を実施した。軌道模型のレール端には隙間があり、端部の反力壁もわずかだが弾性変形するため、ロングレール不動区間の軸力を載荷するためには、所定の温度以上に加熱する必要がある。

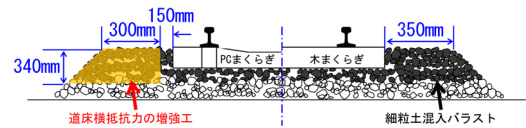
このため、軌道模型中央の腹部に貼り付けたひずみゲージによりレール軸力をモニタリングし、換算係数

表5 実物大軌道模型の条件

項目	諸元
レール種別	JIS 50kgN
軌道延長	65m
道床肩幅	PCまくらぎ：450mm, 木まくらぎ：350mm
道床状態	土砂混入バラスト
道床横抵抗力の増強工※	PCまくらぎを中心に軌道延長1.2mの範囲で施工
通り変位	波高30mm, 波長10m
浮きまくらぎ	中央のPCまくらぎ5本
レール締結装置	PCまくらぎ：線ばね形, 木まくらぎ：アンチクリーパのみ

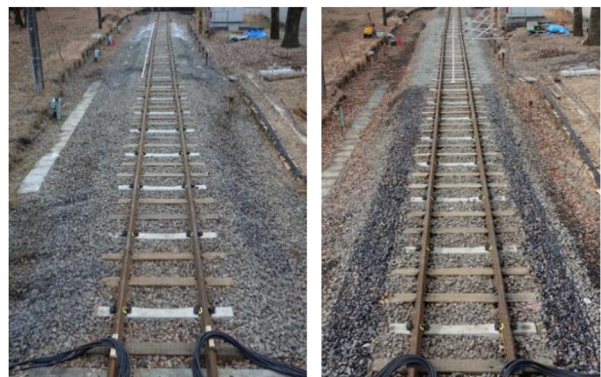


(a) 俯瞰図



(b) 断面

図10 実物大軌道模型の構造



(a) 増強工あり

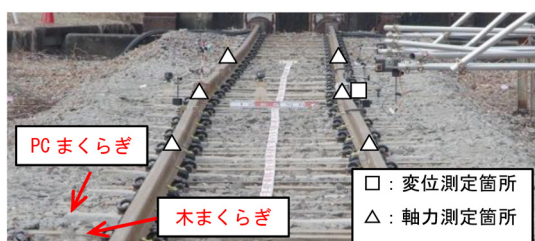
(b) 増強工なし

図11 製作した実物大軌道模型

15.1kN/℃で不動区間のレール温度に換算して評価に用いた。なお、高周波通電加熱ではレールに高電圧が加わるため、測定点毎に蓄電池とひずみ変換装置及び無線伝送装置から成る測定機器を用い、機器内に電位差が生じない構成とした。載荷速度は25～40℃/hとし、設定温度からの温度上昇量が70℃に達しても座屈しない場合は、その状態を1時間以上保持する条件とした。

#### 4.4 試験結果及び考察

増強工を施さない軌道模型を用いた座屈試験の状況を図12に、増強工を施した軌道模型を用いた状況を図13に、レール軸力とレール横変位との関係を図14に示す。図12,14から増強工を施さない軌道模型ではレール軸力638kN（温度換算  $\Delta t$  42°C相当）で座屈が生じたが、増強工を施工した軌道模型では、図13, 14に示すようにレール軸力1055kN（温度換算  $\Delta t$  70°C相当）でも座屈が発生せず、十分な効果を有することを確認した。



(a) 試験前の状況



(b) 試験後の状況

図12 道床横抵抗力の増強工を施工しない実物大軌道模型を用いた座屈試験の状況



(a) 試験前の状況



(b) 試験後の状況

図13 道床横抵抗力の増強工を施工した実物大軌道模型を用いた座屈試験の状況

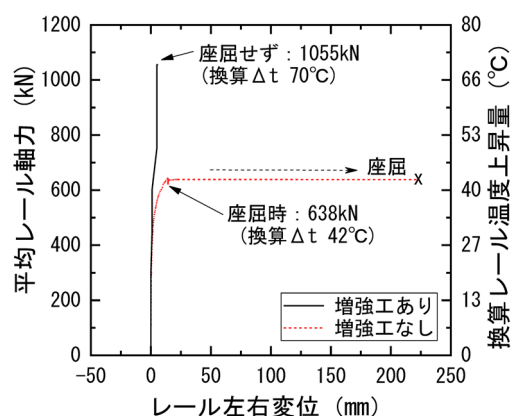


図14 実物大軌道模型を用いた座屈試験におけるレール軸力とレール横変位の関係

#### 5. まとめ

本研究では、地域鉄道のコスト削減及び安全・安定輸送の継続を支援することを目的として、低コストなロングレール軌道構造を開発した。その結果は以下の通りである。

- (1) 木まくらぎ区間を部分的にPCまくらぎ化した場合を想定し、有限要素法による解析からロングレールの成立に必要な道床横抵抗力を明らかにした。
- (2) 低コストな道床横抵抗力の増強工として、タンピングランマを用いて最適含水比付近に調整したセメント安定処理土を締め固めて道床肩部を強化する工法を開発した。
- (3) 開発構造の座屈安定性を確認するため、実物大軌道模型を用いた座屈試験を行った結果、レール軸力の温度換算値が約70°C相当でも座屈が発生せず、十分な座屈安定性を有することを確認した。

また、このロングレール構造では、安価な伸縮継目を開発しており、現在敷設試験を進めている。

本研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

#### 文献

- 1) 西宮裕騎, 西本晋平, 片岡宏夫: 低廉軌きょうのレールふく進抵抗力特性, 第72回土木学会年次学術講演会講演概要集, VI-451, 2017
- 2) (公財) 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物設計標準・同解説 軌道構造, 2012
- 3) 西宮裕騎, 片岡宏夫: 座屈発生点を考慮したロングレールの座屈安定性の評価法に関する一考察, 鉄道工学シンポジウム論文集, 第20号, pp.9-16, 2016
- 4) 宮井徹, 飯田啓善, 篠田七次: 実物軌道座屈実験装置の製作と第1次実験, 鉄道技術研究所速報, A-83, No.170, 1983