

# 論文 杭工法による道床横抵抗力増加メカニズムと座屈発生点を考慮した座屈安定性の検証

藪中 嘉彦<sup>1</sup>・高尾 賢一<sup>1</sup>・吉川 秀平<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 西日本旅客鉄道株式会社 鉄道本部 施設部 施設技術室  
(〒530-8341 大阪府大阪市北区芝田2-4-24)

E-mail: yoshihiko-yabunaka@westjr.co.jp, kenichi-takao@westjr.co.jp

<sup>2</sup>正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 軌道・路盤研究室  
(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail: kikkawa.shuhei.68@rtri.or.jp

JR西日本では、保線部門における将来に亘る労働力不足への対応の一つとして下級線におけるPCまくらぎ化工事を進めているが、これを効率的に実施するには夏期保守作業制限を緩和する必要がある。このため、有効な方策と目される座屈防止杭について、理論的及び実験的検証により道床横抵抗力増強効果を解明し、夏期保守作業制限の緩和に対する軌道の座屈安定性を評価した。

**Key Words :** track buckling, lateral ballast resistance force, sleeper, pile, track maintenance, FEM

## 1. はじめに

JR西日本（以下、「当社」という）では、保線部門における将来に亘る労働力不足への対応の一つとして下級線のPCまくらぎ化を急ピッチで進めている<sup>1)</sup>。一方で、当社ではレール張り出し防止を目的に夏期における道床を緩める作業を制限しており、この間まくらぎ交換をはじめとした保線作業の生産性を著しく低下させている。保線作業における労働力不足が既に顕在化している現状を踏まえるとPCまくらぎ化工事を効率的に進めるべく夏期施工の実現が急務となっている。当社ではこれまで他社で実施している座屈防止杭<sup>2)</sup>の導入や道床締固め機の開発等様々な検討を重ねてきた。特に座屈防止杭については、当社の実軌道で道床横抵抗力の確認を相当数実

施してその効果を確認することができたため本格的な採用を検討している。しかしながら、実軌道ではまくらぎの構造的制約により最終道床横抵抗力まで測定することができないこと、当社下級線で実施したまくらぎ配置間隔の拡大<sup>3)</sup>による群杭効果が実測できていないこと及びこれらの理論的裏付けが未確認であることから、実物大軌道模型を用いた実証実験を実施しこの結果を基にした軌道の座屈安定性評価を行うこととした。

## 2. 座屈対策工の概要

まくらぎ交換作業直後における道床横抵抗力減少分の補完を図るべく、既往の研究<sup>2)</sup>を参考に「座屈防止杭」を対策工として用いることとした。今回の実証実験で用いた座屈防止杭及びPCまくらぎの形状・寸法等を図-1及び図-2に示す。

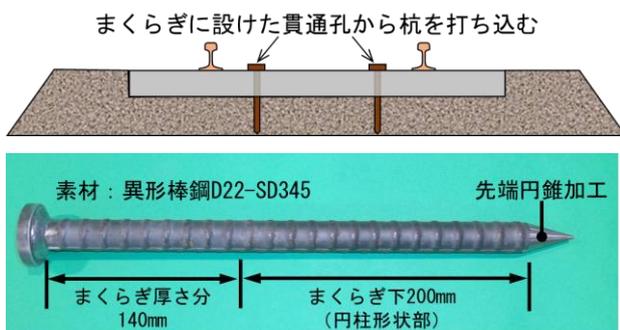


図-1 座屈防止杭の概要

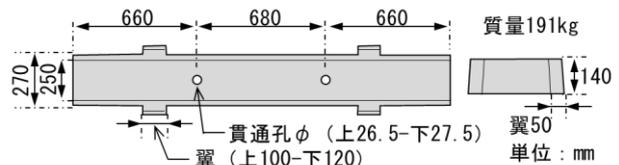


図-2 検証に用いたPCまくらぎの形状・寸法等

### 3. 理論計算による抵抗力増加メカニズムの推定

既往の研究では、実験により座屈防止杭の効果が確認されているが、そのメカニズムについては十分には解明されていない。そこで、本検証では杭基礎の設計方法を参考に杭の水平抵抗力を推定し、後述する実験結果との対比を行うこととした。座屈防止杭は埋込み長が浅いため概ね剛体挙動と見なしてよいと考えられ、杭長の全域にわたってバラストの塑性変形を伴いながら水平抵抗力が発生すると推測される(図-3参照)。そこで、杭の1本あたりの水平抵抗力を「短杭一杭頭の回転拘束一砂質土地盤」の条件でBromsの式(1a,1b)を用いて算出した<sup>3)</sup>。

$$Q_u = \frac{1}{2} \alpha_n K_p \gamma B (l_1^2 - l_2^2) \quad (1a)$$

$$K_p = \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad (1b)$$

$Q_u$ : 杭の水平抵抗力,  $\alpha_n$ : 杭前面の形状係数

$K_p$ : 受動土圧係数,  $\gamma$ : バラストの単位体積重量

$B$ : 杭径,  $l_1, l_2$ : 杭の根入れ長さ

$\phi$ : バラストの内部摩擦角

ここで、後述の道床横抵抗力試験では杭径以上の水平変位まで試験を行うことから形状係数を6.0とした。バラストの単位体積重量及び内部摩擦角は細粒土混入バラストの力学特性に関する既往の知見<sup>4)</sup>を参考に、ここでは $\gamma=19.3\text{kN/m}^3$ ,  $\phi=59.3^\circ$ とした。その他の条件を図-4に示すとおりとした場合の2本分の杭の水平抵抗力 $Q_u$ は3.3kNとなる。

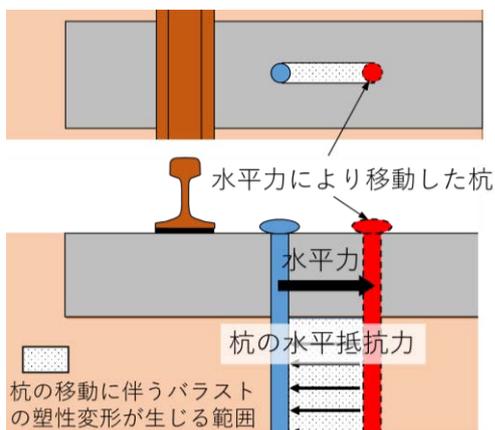


図-3 杭の水平抵抗力の発生機構

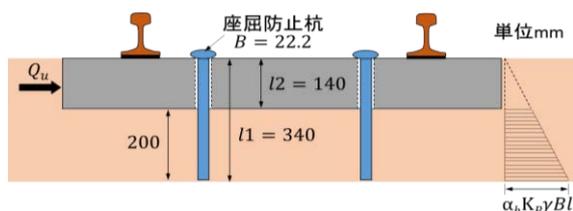


図-4 杭の水平抵抗力の算出条件

### 4. 実物大軌道模型を用いた道床横抵抗力試験

座屈防止杭の道床横抵抗力増強効果を確認するため実物大軌道模型による道床横抵抗力試験を実施した。試験では、「まくらぎ1本引き」及び「軌きょう引き」の両条件について増強効果を確認することとした。

#### (1) 試験供試体の作製

試験供試体は表-1に示す3種類である。試験に用いるバラストは当社の下級線から採取したサンプルを基に作製しており、その粒度分布を図-5に示す(以下、「細粒土混入バラスト」という)。なお、図-6に示すように载荷方向の肩部には標準粒度のバラストを使用した。これは、肩部に細粒土混入バラストを用いた予備試験を実施したところ、含水状態によっては締固め効果が卓越する特徴を有し、道床横抵抗力を過大評価する可能性を認めためである。供試体の作製手順は以下のとおりである。

- ① バラスト密度が一定となるように管理を行いながら、道床厚200mm、肩幅400mmの軌道を構築する。
- ② ①の後、まくらぎ交換を行い、この際に载荷方向肩部のバラストは標準粒度バラストに交換する。その後、TTによるつき固め及びプレートランマーによる締固めを実施し、余盛が100mmとなるように仕上げる。
- ③ 座屈防止杭有のケースでは、②の後にハンマーで座屈防止杭を打ち込む。

表-1 供試体の種類

試験ケース	まくらぎ種別	座屈防止杭	つき固め方法
Case1	PCまくらぎ	無	通常
Case2	PCまくらぎ	有	通常
Case3	PCまくらぎ	有	通常+軌間内

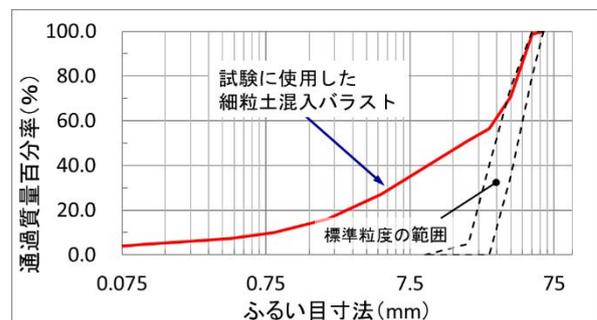


図-5 細粒土混入バラストの粒度分布

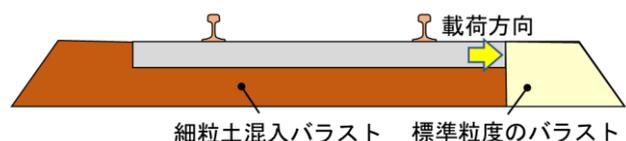
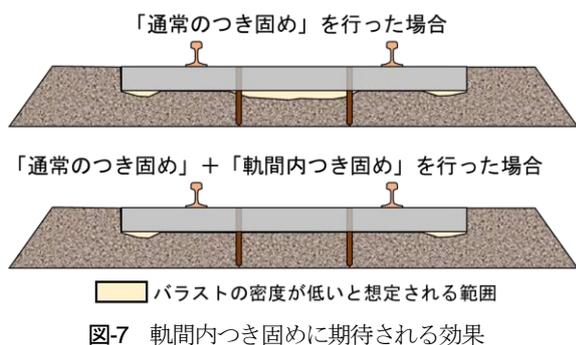


図-6 供試体の概要図

ここで、つき固め方法について、通常のつき固め範囲に加えて軌間内つき固めを行うことで図-7に示すように杭周辺のバラスト密度が上昇し、抵抗力の増加が見込めると考えた。「通常+軌間内」はこれを期待して設けた試験条件である。



## (2) まくらぎ1本引きによる道床横抵抗力試験

まくらぎ1本引きによる道床横抵抗力試験はCase1～3について各3回実施した。試験では隣接まくらぎの影響が及ばないように十分なまくらぎ間隔(1,041mm)を設け、試験荷重の荷重は電動油圧ジャッキを用いて荷重速度2mm/minを目標に制御した。なお、ここで設定したまくらぎ間隔は当社の下級線に適用しているものである。測定結果を図-8及び表-2に示す。試験は各ケースで3回実施しているが、全てのケースにおいて横抵抗力のばらつきは1kN程度であり、再現性の高い結果であった。ここで、図-8に示すグラフは3回の試験のうち各ケースで中間的な値となった2回目の試験結果である。試験により得られた結果は以下である。

- ① 座屈防止杭の効果により最終道床横抵抗力が増大した(通常つき固め時1.62倍、通常+軌間内つき固め時1.76倍)。
- ② 営業線では主にまくらぎ移動量2mm時の抵抗力を測定する手法が用いられるが、移動量2mm時では座屈防止杭の効果が殆ど見られなかった。
- ③ 座屈防止杭有の場合に「軌間内つき固め」を行うことで、最終道床横抵抗力が10%程度増加した。

①について、座屈防止杭による水平抵抗力の増分は4.7～5.8kNであり、計算値3.3kNより大きいものの、図-9に示す杭周辺のバラストの塑性変形の状態(杭の水平移動に伴う変形)から、杭基礎の設計を参考にした本計算方法の適用は妥当であると考えられる。計算値に対して実験値が大きくなった要因としては、計算に含まれないバラストの粘着力(バラスト中に含まれる細粒土による粘り)、まくらぎ・レール等の上載荷重などが影響したと考えられるが、本計算方法によって安全側に評価することが可能と考える。②について、座屈防止杭を使用しない一般的な軌道構造においては、2mm移動時の抵抗力が最終道床横抵抗力の70～80%となること及び軌きょう

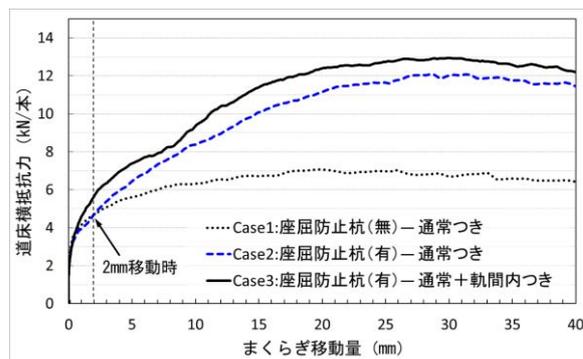


図-8 道床横抵抗力測定結果(1本引き)

表-2 道床横抵抗力測定結果(1本引き)

試験ケース	2mm時	最終
Case1(杭無,通常つき)	5.0kN (1.00)	7.5kN (1.00)
Case2(杭有,通常つき)	5.2kN (1.04)	12.2kN (1.62)
Case3(杭有,通常+軌間つき)	6.3kN (1.26)	13.3kN (1.76)

※値は各3回の平均値。( )内はCase1に対する増加率



図-9 試験後のまくらぎ下の状況

の状態が発揮される最終道床横抵抗力は1本引きによる測定値の80～85%になることから「2mm移動時の抵抗力(1本引き)≒最終道床横抵抗力(軌きょう)」と評価することとしているが、座屈防止杭を使用した場合にはこの関係が成立しない。このため、営業線の道床横抵抗力を評価する際には2mm移動時の値そのものを用いるのではなく座屈防止杭の効果により得られる増分を加算する等して評価を行う必要がある。③については想定した軌間内バラスト密度増加の影響によるものとする。

## (3) 軌きょう引きによる道床横抵抗力試験

軌きょう引きによる道床横抵抗力試験はCase1及びCase3について各1回実施した。試験では、まくらぎ配置間隔1,041mmとした全長5,205mm(まくらぎ5本分)の軌道模型を用いた。レールは50kgNを使用し、各まくらぎに対して試験荷重が均一に伝達するように剛性の高いフレームで左右レールを固定した。そして、フレームには天井クレーンによる吊り上げ荷重を与え、その自重分をキャンセルする機構とした。試験荷重は「1本引き」と同様に荷重速度2mm/minを目標に制御した。試験状況を図-10に、測定結果を図-11に示す。軌きょう引き試験により得られたまくらぎ1本当たりの最終道床横抵抗力は

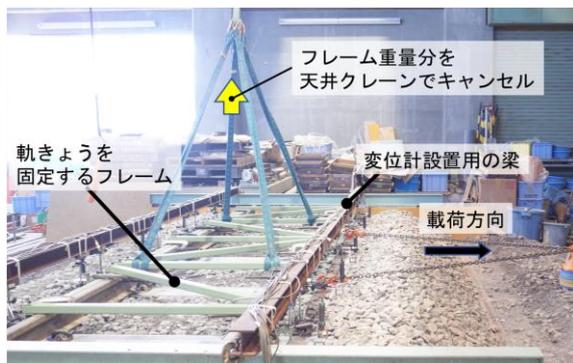


図-10 軌きょう引き道床横抵抗力試験の状況

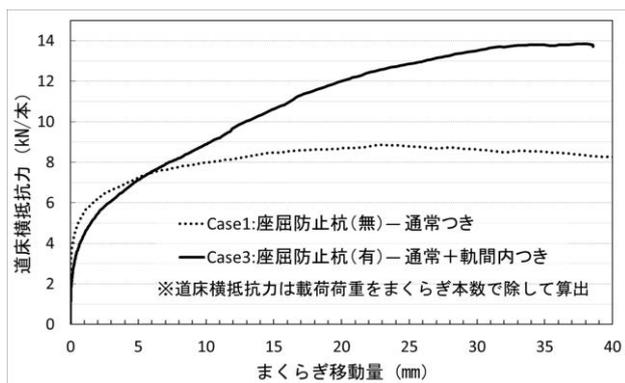
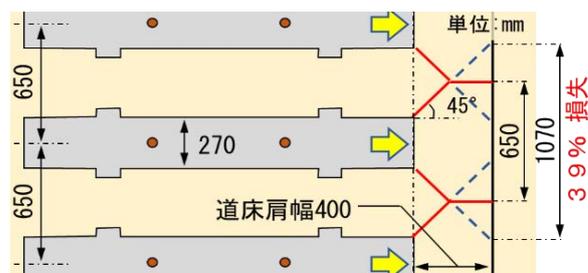


図-11 道床横抵抗力測定結果 (軌きょう引き)

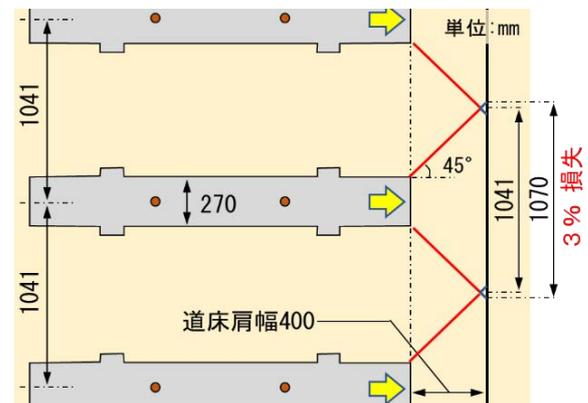
座屈防止杭無が8.8kN、座屈防止杭有が13.8kNであり、杭の効果により5.0kN増加（1.6倍）した。一般的な軌道構造では、軌きょう状態で発揮される最終道床横抵抗力は1本引き試験の値より15～20%程度減少するが<sup>9)</sup>、今回の検証ではこの現象は生じなかった。これについて、既往の知見<sup>9)</sup>によれば、まくらぎ端部から伝達される抵抗力は隣り合うまくらぎによって発生する土くさびとの重なりにより、一種の群杭効果によって抵抗力を損失する（取り合う）とされている。しかし、今回の検証に適用したまくらぎ配置間隔は一般的なものより拡大していることから、図-12に示すように群杭効果の影響が殆どなかったものと考えられる。以上のことから、まくらぎ配置間隔が広い（1,041mm以上）場合には、軌きょうの耐座屈性能評価に際して1本引き試験で得られる最終道床横抵抗力を用いて差支えないと考える。

## 5. FEM解析による軌道座屈安定性の評価

軌道の座屈安定性に対する照査は、従来からエネルギー一法を基にした理論式により算出される「最低座屈強さ」を対象として安全性の評価が行われることが主であり<sup>7)</sup>、当社もこの手法による管理を行っている。しかしながら、この最低座屈強さは座屈状態を発生しうる軸力の下限を与えるものであり、安全側の目安として採用されているものの、実際に座屈現象に至るとされる「座屈発生点」



(a) 一般的なまくらぎ配置間隔の場合



(b) まくらぎ配置間隔が広い場合

図-12 群杭効果による影響の比較

はさらに上位に存在することから、実質的にはこの差による安全余裕を有していることとなる。一方、近年FEMを用いた座屈解析手法が提案されており、様々な条件下で高精度の解析が可能となっている<sup>7)</sup>。本検証ではこの解析手法を用い、最低座屈強さと座屈発生点の差を明らかにすることで実質的な安全余裕を把握することとした。解析モデルを図-13に示す。解析ではレール2本を梁要素とし、道床抵抗力及びレール締結装置のふく進抵抗力と回転抵抗モーメントを非線形ばね要素でモデル化しており、レール温度荷重は全レール節点に対して均一に載荷した。本評価では温度荷重による静的な座屈のみを考慮しており、軌道の横方向変位のみを2次元平面問題として取り扱う。この条件で非線形静解析を実施し、座屈後の挙動を求めるために弧長増分法を用いた。解析に用いた入力パラメータを表-3に示す。道床横抵抗力については前項の実験のうち、図-11に示すCase3（「座屈防止杭有」、「通常+軌間内つき固め」）により得られた道床横抵抗力の荷重-変位関係に基づき、荷重の70%を実効値（各変位に対応する抵抗力を0.7倍）として特性を設定した。また、座屈のきっかけとなる初期不整として通り狂いを想定し、座屈波形は第Ⅱ波形<sup>7)</sup>と仮定して式(2a,2b)を近似してモデル化した。

$$y = c \cdot \sin \frac{3\pi}{2l} x, \left(-\frac{l}{3} \leq x \leq \frac{l}{3}\right) \quad (2a)$$

$$y = \frac{c}{2} \left(1 + \cos \frac{3\pi}{2l} \left(x - \frac{l}{3}\right)\right), \left(-l \leq x \leq -\frac{l}{3}, \frac{l}{3} \leq x \leq l\right) \quad (2b)$$

- x: 初期通り狂い中心を基準とするレール方向の座標
- y: 位置xにおける軌道の横変位
- c: 初期通り狂いの最大波高
- l: 初期通り狂いの波長

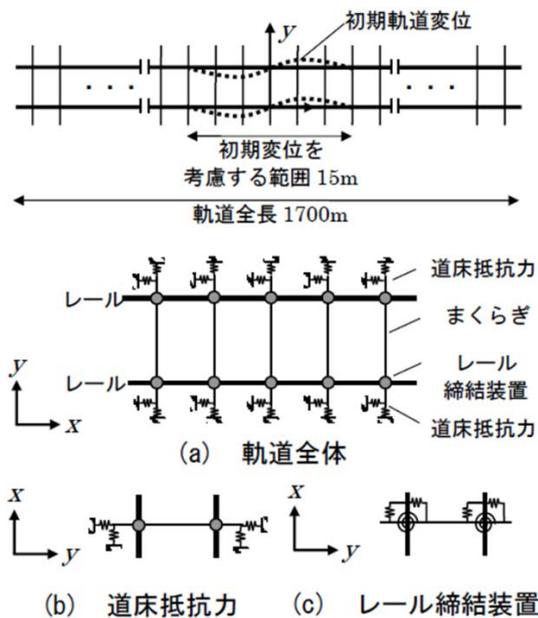


図-13 解析モデル

表-3 解析条件

項目		値
軌道	線形	直線
レール (50kgN)	縦弾性係数	$2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$
	ポアソン比	0.3
	線膨張係数	$1.14 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$
	断面積	$6.42 \times 10^3 \text{ mm}^2$
	断面二次モーメント	$3.22 \times 10^6 \text{ mm}^4$
初期通り狂い	波形	第II波形
	波高	4,7,10,15mm (10m弦)
	波長	15m
まくらぎ	縦弾性係数	$2.2 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$
	ポアソン比	0.2
	断面積	$3.64 \times 10^4 \text{ mm}^2$
	まくらぎ間隔	1041mm
レール締結装置	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)	37.5MN/m
	回転ばね定数	27600kN・mm/rad
道床抵抗力	横抵抗力	実験値
	縦抵抗力	横抵抗力×1.5

ここで、表-3に示す波高は10m弦正矢での値であり、第II波形での実波高は4, 7, 10, 15mmの場合それぞれ2, 7, 4.7, 6.7, 10.0mmとなる。解析結果を図-14及び表-4に示す。初期通り狂いが小さい場合には座屈発生温度は急激に高くなる傾向を示しており、初期通り狂い4mmのケー

スでは座屈発生温度は92°Cとなり、最低座屈強さ（温度換算値）との差は45°C以上であった。

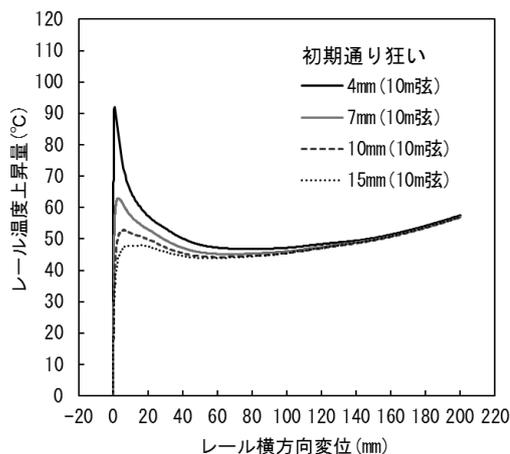


図-14 レール温度上昇量とレール横方向変位の関係

表-4 座屈発生温度と最低座屈強さの温度換算値

初期通り狂い 波高 (mm)	座屈発生温度 (°C)	最低座屈強さの 温度換算値 (°C)
4	92.1	46.8
7	62.9	45.2
10	52.8	44.3
15	48.0	43.9

## 6. 夏期保守作業制限緩和に対する安全性評価

実物大軌道模型試験及びFEM解析の結果を基に夏期保守作業制限緩和に対する安全性の評価を行った。当社では試験条件と同様の軌道構造を適用した場合に道床横抵抗力を4kN/mとしてエネルギー法を基にした理論式<sup>9)</sup>により最低座屈強さを算出し、座屈安定性に対する安全度判定を行っている。この最低座屈強さの温度換算値（以下、「管理値」という）と前項のFEM解析結果（初期通り狂い4mm）を併記して図-15に示す。

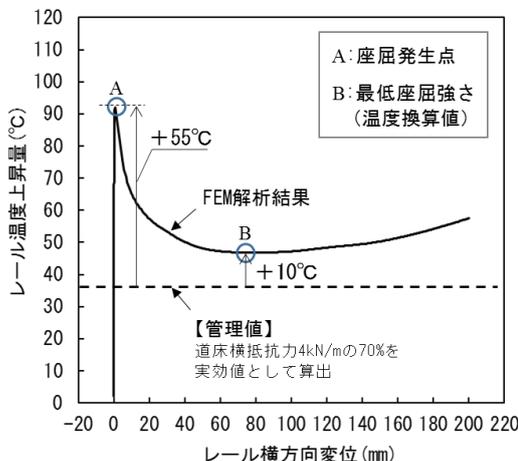


図-15 FEM解析結果と管理値の比較

FEM解析による最低座屈強さの温度換算値は管理値を10°C上回っており、さらに実質的な安全余裕と考えられる座屈発生点との差は55°Cであり十分大きい。以上のことから、施工箇所の線形選定や保守作業後の仕上がり管理を適切に実施し、作業直後に座屈防止杭を設置することで相当な安全余裕を有して夏期保守作業制限を緩和できる見通しを得た。

## 7. おわりに

今回の理論計算及び実物大軌道模型実験による検証で座屈防止杭による道床横抵抗力増加メカニズムが概ね解明でき、座屈安定性解析の結果から夏期保守作業制限緩和の見通しを得ることができた。これにより作業制限の見直しを検討していくこととするが、レール張り出しは列車の走行安全性に大きな影響を及ぼすこととなるため精緻かつ慎重な検討を重ねていくこととする。特に軌道の主要構成部材であるバラストについては現地での性能のばらつきが大きいこと、理論計算での再現が難しいこと及び僅かな条件の違いで生じる現象の変化が大きいことから、夏期保守作業制限の見直しに際しては先人が構築した軌道に関する理論に最近の知見を加え、それを最新の高性能計算機及び実物実験で再現・検証し評価したいと考える。

## 参考文献

- 1) 藪中嘉彦, 高尾賢一: 下級線に適した PC まくらぎ化の検討, 日本鉄道施設協会誌, Vol.56, No.4, 2018.4
- 2) 福中力也: 下級線用 PC まくらぎを活用した座屈防止杭の効果の検証, 新線路, Vol.69, No.1, 2015.1
- 3) 杭基礎の設計法とその解説編集委員会: 杭基礎の設計法とその解説, 土質工学会, 1985
- 4) 石川達也, 松谷真悟, 所哲也, 中村貴久, 桃谷尚嗣: 不飽和鉄道バラストの力学特性に及ぼす細粒分の影響評価, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.72, No.3 (舗装工學論文集第 21 卷), 2016
- 5) 保線工学編集委員会編: 保線工学<上>, 鉄道現業社, 2016
- 6) 市川拓真, 早野公敏, 中村貴久, 桃谷尚嗣, 小池陽平: 極限釣り合い法を用いた鉄道バラスト軌道の道床横抵抗力の推定, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.70, No.3 (舗装工學論文集第 19 卷), 2014
- 7) 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, 鉄道工學シンポジウム論文集, 第 20 号, 2016

(2019.4.5 受付)

# VERIFICATION OF THE TRACK STABILITY FOR BUCKLING IN CONSIDERATION OF INCREASE MECHANISM OF LATERAL BALLAST RESISTANCE USING BUCKLING PREVENTION PILES AND A CRITICAL BUCKLING TEMPERATURE

Yoshihiko YABUNAKA, Kenichi TAKAO, Shuhei KIKKAWA

JR-West has been promoting replacement constructions of wooden sleepers to PC sleepers as an effective measure of labor shortage in the track maintenance field over the future. However, it is necessary to deregulate summer maintenance work restrictions relaxation to carry out this construction effectively. At present, buckling prevention piles are considered as an effective measure for this relaxation. There, the enhancement effect of lateral ballast resistance by the buckling prevention piles was verified from theory and experiment. We also evaluated the track buckling stability for the summer maintenance work restriction relaxation.