

## PC まくらぎ化工事の夏期保守作業制限緩和の検証と実施

### 1. はじめに

線路は一般的な土木構造物とは大きく異なり、定期的な補修や材料交換を繰り返すことを前提に設計されています。しかし、現在では少子高齢化に伴う労働力不足や若年層の労働嗜好の変化により担い手不足が年々深刻化しています。このため将来に亘って鉄道を安定的に維持していくには線路メンテナンスの労働生産性向上が不可欠となっています。本稿ではその一環として急ピッチで進めている下級線における木まくらぎのPCまくらぎ化工事<sup>1)</sup>について紹介します。本工事は大型機械を用いて一気に呵成的に施工することで労働生産性向上を図っていますが、レール張り出し防止を目的に設定した作業制限により夏期は施工することができず、生産性が大きく低下しています。そこで、安全性を損なうことなく夏期保守作業制限を緩和することを目的に理論と実験による検証を行い実用化を図りました。

### 2. 対策工の概要

まくらぎ交換作業の直後は列車荷重によって締め固められていたバラストが弛緩するため、レール張り出しに大きな影響を及ぼす道床横抵抗力が減少してしまいます。この減少分を補完するために既往の研究<sup>2)</sup>を参考にして「座屈防止杭」を対策工として用いることとしました(図1)。

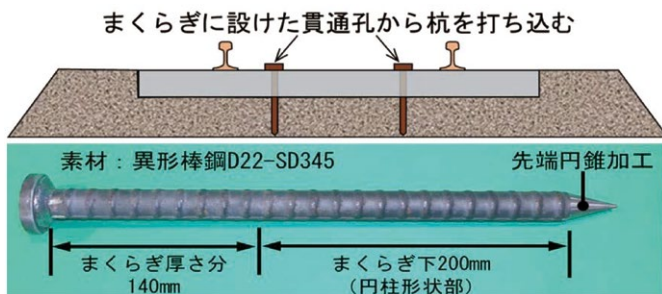


図1：座屈防止杭の概要

### 3. 理論計算による抵抗力増加メカニズムの推定

既往の研究では座屈防止杭の効果発現メカニズムが十分に解明されていませんでした。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することを試みました。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、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し、杭の1本あたりの水平抵抗力をBromsの式(1a, 1b)<sup>3)</sup>を用いて算出しました(図2、図3)。そして、後述の実験結果との対比により本推定方法の妥当性を確認することができました。

$$Q_u = 1/2 \alpha_h K_p y B (l_1^2 - l_2^2) \quad (1a)$$

$$K_p = \tan^2 (45 + \Phi/2) \quad (1b)$$

$Q_u$ ：杭の水平抵抗力、 $\alpha_h$ ：杭前面の形状係数

$K_p$ ：受動土圧係数、 $y$ ：バラストの単位体積重量

$B$ ：杭径、 $l_1 \cdot l_2$ ：杭の根入れ長さ

$\Phi$ ：バラストの内部摩擦角

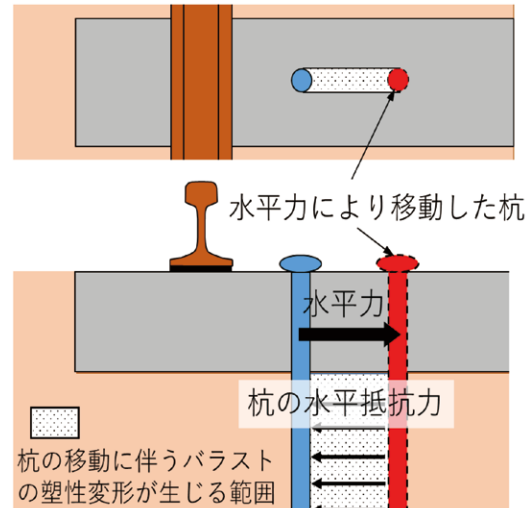


図2：杭の水平抵抗力の発生機構

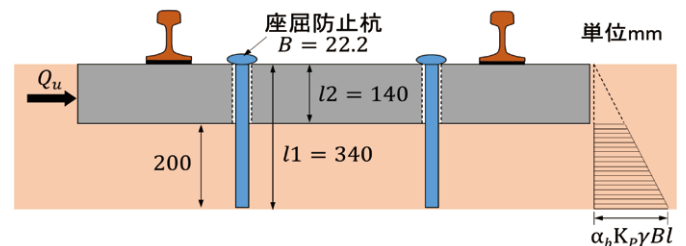


図3：杭の水平抵抗力の算出条件

### 4. 実物大軌道模型を用いた実験

座屈防止杭の道床横抵抗力増強効果を確認するために実物大軌道模型を用いた道床横抵抗力試験を実施しました。試験では当社の下級線に適用している軌道構造を再現した全長約5mの軌道模型を構築しました(図4)。模型の構築は、実際のまくらぎ交換を模擬した手順で行い、使用するバラストについては下級線の実軌道から採取したバラストを基にして粒度を調整しました。

試験結果を(図5)に示します。まくらぎ1本当たりの最終道床横抵抗力は座屈防止杭無の場合が8.8kN、座屈防止杭有の場合が13.8kNであり、杭の効果により5.0kNの増加(1.6倍)が見られました。また、試験実施後のまくらぎ下のバラスト状態を観察したところ、メカニズムの推定時に想定していた杭周辺バラストの塑性変形が生じていることが確認できました(図6)。

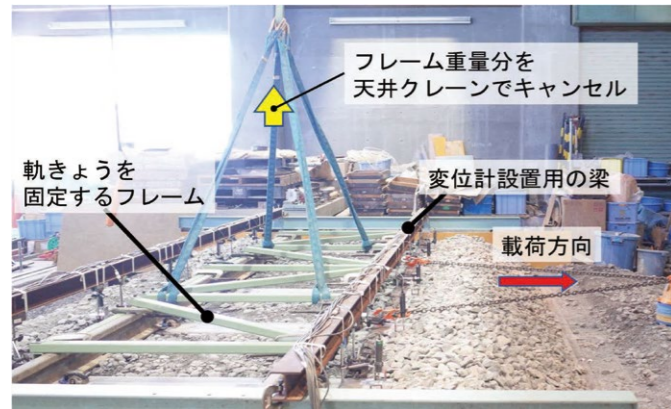
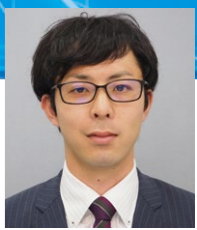


図4：実物大軌道模型実験の状況

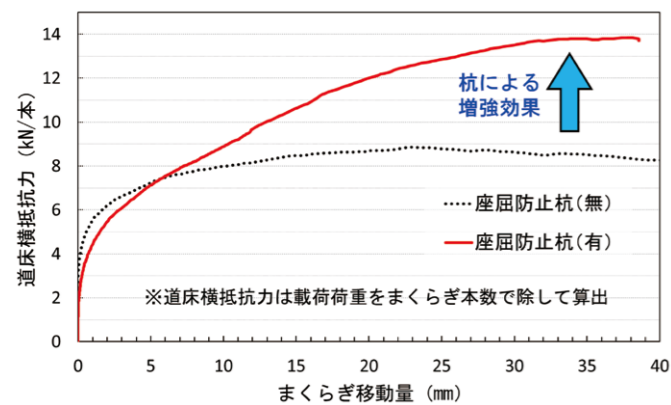


図5：道床横抵抗力試験の結果

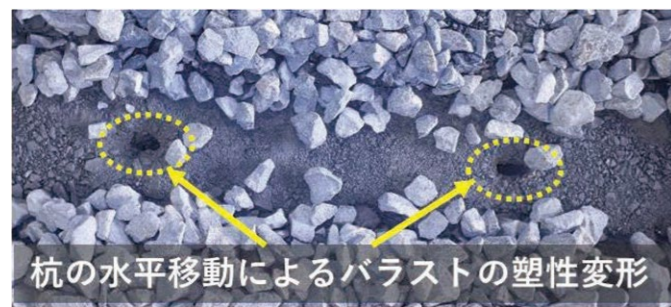


図6：試験後のまくらぎ下バラストの状況

### 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法を基にした理論式により算出した「最低座屈強さ」を用いて安全性の評価を行っています。しかし、実際に座屈現象が生じるとされる「座屈発生点」はさらに上位に存在するため、実質的にはこの差による安全余裕が存在します。この安全余裕を定量的に把握するために、鉄道総研が開発したFEM解析手法<sup>4)</sup>を用いて最低座屈強さと座屈発生点との差を確認することとしました。解析条件は当社の下級線に適用している軌道構造に対応させたものとし、線形は直線としています。そして、座屈

のきっかけとなる初期不整として4段階の通り狂いを設定しました。なお、道床横抵抗力については実験値(図5)の70%を実効値として入力しています。解析の結果、初期通り狂いが小さい場合には座屈発生点が急激に上昇し、最低座屈強さとの差が増大することが確認できました(図7)。

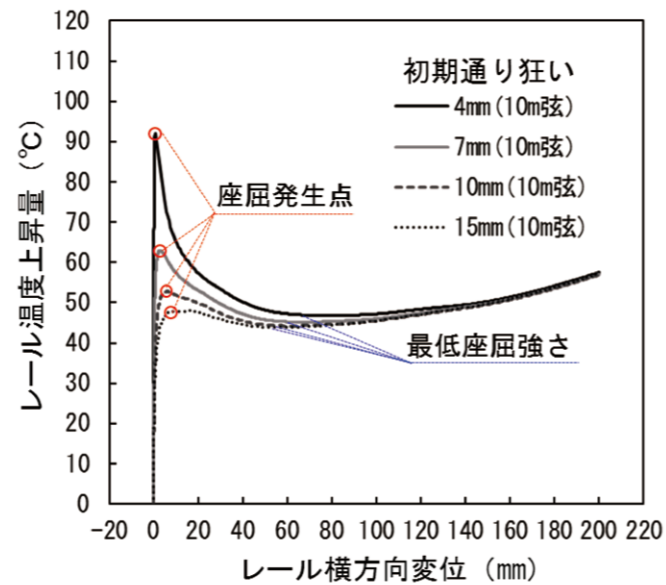


図7：FEM解析結果

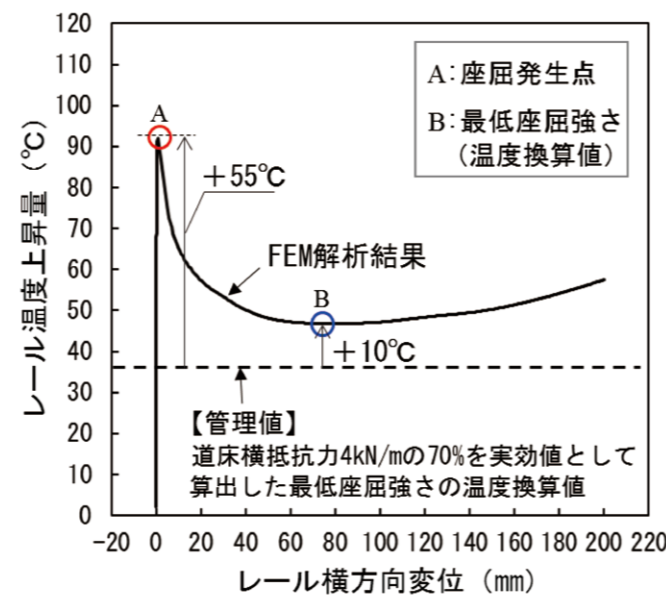


図8：FEM解析結果と管理値の比較

当社では従来からエネルギー法に基づき算出される最低座屈強さを用いて座屈安定性に対する安全度判定を行っています。この最低座屈強さの温度換算値(以下、「管理値」といいます)とFEM解析結果(初期通り狂い4mm)を併記して(図8)に示します。FEM解析による最低座屈強さは管理値を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であり十分に大きいことを確認しました。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ことが確認できました。

### 6. おわりに

今回の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たと考えています。一方で、本研究の対象としたバラストは現地での性能のばらつきがあること、理論計算での正確な再現が困難であること、そして僅かな条件の違いで性能が変化すること等を考慮する必要があります。そのため夏期保守作業制限の緩和にはバラストの性能のばらつきやその特徴を考慮しても十分過ぎるくらいの安全余裕を確保して実施すべきと考え、まずは直線に限定し構造物前後を避ける

等の制約条件を設けたうえで、一部線区のPCまくらぎ化工事を実施しました<sup>5)</sup>。本工事において杭打ち等の施工性を確認できたことから、今後は本施策を展開し工事の平準化を図っていく予定です。

### 参考文献

- 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
- 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
- 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
- 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、2016
- 古本幸彦ほか：  
酷暑期間における芸備線PCまくらぎ化施工、日本鉄道施設協会誌、Vol. 58、No. 1、2020. 1