

# 構造物境界部における縦まくらぎ軌道による変位抑制効果

渡辺 勉\* 箕浦 慎太郎\*  
 後藤 恵一\*\* 松岡 弘大\*\*

Verification of Longitudinal Level Irregularity Suppression Effect at the Structural Boundary by Ballasted Ladder Track

Tsutomu WATANABE Shintaro MINOURA  
 Keiichi GOTO Kodai MATSUOKA

Numerical experiments were conducted using a three-dimensional numerical analysis model to quantify load dispersion performance of ladder sleepers at line structural boundary. As a result, it was revealed that compared with conventional prestressed concrete sleepers, the ladder sleeper can reduce the pressure on the sleeper bottom plane by approximately 70%. Furthermore, when laying the ladder sleeper at the structural boundary, it was shown that laying across the structural boundary may be more effective in reducing the pressure on the sleeper bottom plane than laying it in front of the structural boundary. Finally, the ladder sleepers were installed on commercial line to verify the effect in suppressing longitudinal level irregularity.

キーワード：縦まくらぎ，バラスト軌道，高低変位，保守省力化，数値解析

## 1. はじめに

縦まくらぎとはレールと並行に配置された2つの縦はりとそれらを繋ぐ部材で構成されるまくらぎである。縦まくらぎはバラストに対してレール方向に連続した面で接触するため、レール方向に離散的に接する横まくらぎに比べて列車通過時の荷重分散性に優れている。このため、縦まくらぎは横まくらぎよりも列車走行に伴うバラストへの動的な負荷を軽減することができる。

我が国の縦まくらぎは、バラストの突き固めを基本とする定期的な軌道整備を前提としたバラスト軌道の保守省力化を第一の目的として研究開発され、1999年に実用化された<sup>1)</sup>。具体的な構成部材は、一般にプレテンション方式のプレストレストコンクリート(PC)製の2本の縦はりと鋼製の継材およびポストテンション方式のPC製の端部閉合はりである。近年ではバラスト軌道の一般部だけではなく、レール継目部<sup>2)</sup>や伸縮継目<sup>3)</sup>のように衝撃荷重が発生しやすい箇所や踏切部のように軌道の支持剛性が変化する箇所など、一般部よりも多頻度で軌道整備作業が必要となる構造物境界部への適用が増えている。

このようなことから、盛土と橋台や橋桁、線路を横断する開渠などの構造物境界部においても、縦まくらぎを適用することによる保守省力化効果が期待されるが、このような箇所への縦まくらぎの敷設事例が少なく、保守

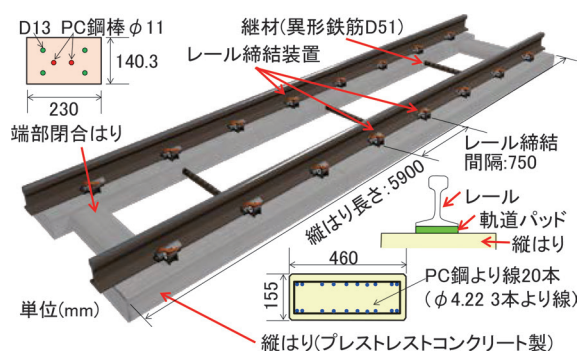


図1 本研究で対象とする縦まくらぎの概要

省力化効果の検証が不十分であるのが実態である。

以上のような背景から、本研究では以下の点に着目した検討を実施することとした。

- 1) 縦まくらぎ軌道を模擬した3次元FEM数値解析モデルを構築し、構造物境界部に縦まくらぎを敷設した場合を想定した数値実験を行い、縦まくらぎの荷重分散性能を評価する。
- 2) 縦まくらぎを営業線に敷設し、高低変位抑制効果を定量化する。

## 2. 数値実験による荷重分散性能の検討方法

### 2.1 縦まくらぎの概要

図1に縦まくらぎの概要を示す。縦まくらぎの線路方向の長さは5900mm、縦はりは幅460mm、高さ155mmの長方形断面でφ4.22mmの3本鋼より線が20本配置

\* 鉄道力学研究部 軌道力学研究室

\*\* 鉄道力学研究部 構造力学研究室

されている。コンクリートの設計基準強度は一般的な日本のPCまくらぎと同等の50N/mm<sup>2</sup>である。レール締結間隔は750mmである。縦まくらぎの設計は、従来のPCまくらぎ<sup>4)</sup>と同様に、使用性の照査では静止輪重80kNに割増係数(変動輪重係数)として2<sup>5)</sup>を考慮した設計応答値(曲げモーメント)に対して、デコンプレッションモーメントを設計限界値として縦はりの断面を決定した。また、安全性の照査では静止輪重80kNに変動輪重係数として4を考慮した設計曲げモーメントに対して、鋼材降伏あるいはコンクリートが圧壊する終局モーメントを設計限界値として縦はりの断面を決定した。なお、どちらの照査もバラストや路盤の沈下等により縦まくらぎがバラストに支持されなくなるリスクを想定し、不支持区間を設定した。実際の営業線における縦まくらぎの支持状態は一様支持に近いという報告<sup>6)</sup>もあるが、安全側に、不支持区間の長さをレール締結間隔の750mmとして設定し、設計曲げモーメントを算定した。

## 2.2 3次元 FEM 数値解析モデルの概要

図2に3次元 FEM 数値解析モデルの概要を示す。数値解析には鉄道総研が開発した車両と線路構造物の動的相互作用解析プログラム DIASTARSIII を使用した。

レールははり要素、軌道パッドはばね要素、まくらぎははり要素、バラストはソリッド要素、路盤はばね要素でモデル化した。レール、まくらぎはレール締結間を5分割、バラストはバラスト層全体を5層に分割した。解析モデルは縦まくらぎだけではなく、比較のために横まくらぎの解析モデルも構築した。2つの解析モデルはまくらぎの形状が異なるだけで、その他の条件はすべて同

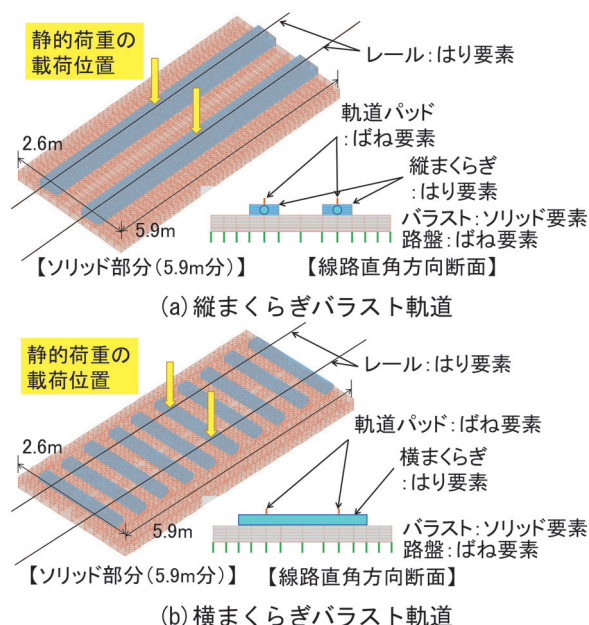


図2 3次元 FEM 数値解析モデルの概要

じである。なお、まくらぎとバラストは列車通過時に非接触状態となることも想定され、両者を非線形ばね要素等で接続するのが実現をより精度よく再現するためには必要と考えられるが、本研究においてはまくらぎとバラスト間のばね要素の非線形特性を一義的に定めることが難しいため、本解析モデルでは剛なばねでまくらぎとバラストを接続した。また、まくらぎおよびバラストをソリッド要素でモデル化した部分の前後については、解析上の助走区間を8m設けた。この区間では、レールをはり要素、軌道パッド、バラスト、路盤を1つの合成ばねでモデル化し、まくらぎおよびバラストの質量はレール節点に集約した。以上より、解析モデルの総延長はおよそ22m(8+5.9+8m)となり、バラスト・ラダー軌道の解析モデルの総節点数は、5430節点、総要素数は5728要素、横まくらぎバラスト軌道の解析モデルの総節点数は5310節点、総要素数は5584要素となった。

## 2.3 解析に用いた材料諸元

表1に解析に用いた材料諸元を示す。材料諸元は鉄道構造物等設計標準・同解説<sup>7)8)</sup>を参考に設定した。ただし、軌道パッドのばね定数は後述する振動モードごとの固有振動数の実測値に整合させるため公称値の2倍とした。また、ヤング係数はコンクリートコアの圧縮強度試験結果から対応するヤング係数を定めた<sup>8)</sup>。さらに、地盤反力係数は現地にて実施した小型FWD(東京測器研究所)試験および後述する静的載荷試験の結果に基づき定めた。縦まくらぎの比較用の横まくらぎはJIS

表1 解析に用いた材料諸元

部材	材料定数等
レール (50kgレール JIS E1101)	ヤング係数 $E=200\text{kN/mm}^2$ 面積 $A=6.405 \times 10^{-3}\text{m}^2$ 断面2次モーメント $I_y=1.960 \times 10^{-5}\text{m}^4$ 単位体積重量 $\gamma=78.5\text{kN/m}^3$
軌道パッド	ばね定数 $K_P=120\text{MN/m}^{*1}$ (公称ばね定数 $60\text{MN/m}$ )
縦まくらぎ	ヤング係数 $E=38\text{kN/mm}^2$ <sup>**2</sup> 断面高さ $h=155\text{mm}$ , 断面幅 $b=460\text{mm}$ 1ユニット長 $L_1=5.9\text{m}$ 締結数 $N=8$ 締結(1レール, 5.9mあたり) 単位体積重量 $\gamma=25.0\text{kN/m}^3$
横まくらぎ (JIS-3号)	ヤング係数 $E=38\text{kN/mm}^2$ <sup>**2</sup> まくらぎ長さ $L_S=2.0\text{m}$ 断面: レール位置 $h=159.7\text{mm}$ , $b=240\text{mm}$ : 中央位置 $h=130\text{mm}$ , $b=240\text{mm}$ 単位体積重量 $\gamma=25.0\text{kN/m}^3$ まくらぎ間隔 $S=0.61\text{m}$ (41本/25m)
バラスト	ヤング係数 $E=88\text{MN/m}^2(=0.088\text{kN/mm}^2)$ 厚さ $d=250\text{mm}$ , 単位体積重量 $\gamma=19.0\text{kN/m}^3$ ばね定数 $K_B=200\text{MN/m}$
路盤	地盤反力係数 $K_{30}=50\text{MN/m}^3$ <sup>**3</sup> (ばね定数 $K_S=22.0\text{MN/m}$ )

※1 固有振動数の実測値に整合させるため公称値の2倍とした。  
 ※2: コア圧縮強度試験結果から対応するヤング係数を定めた<sup>8)</sup>。  
 ※3: 現地での小型FWD試験と静的載荷試験に基づき定めた。

E1201に規定される直線用PCまくらぎ（品型：3号）とした。

## 2.4 解析ケース

表2に解析ケースを示す。支持状態は縦まくらぎがバラストに一樣に支持されるケース（ケース1および2）に加えて、縦まくらぎが構造物境界部に敷設される場合を想定した支持Aおよび支持B（ケース3）を設定した。具体的には図3に示すように、支持Aは構造物境界の手前に縦まくらぎを敷設した場合、支持Bは構造物境界を跨いで縦まくらぎを敷設した場合である。加振方法は、静的載荷および車両走行とした。車両走行における走行方向は、バラスト区間から橋台などを想定した剛支持区間に乗り移る「段上がり走行」とした。なお、剛支持区間は表1に示すバラストのヤング係数および路盤の地盤反力係数を1000倍してモデル化した。走行車両は近年の一般的な在来線車両（軸重80kN程度、軸距2.1m、車両長20m）の3両編成とし、列車速度は90km/hとした。

## 2.5 数値解析法

DIASTARS IIIでは、車両および構造物に関する運動方程式を連立して解くことにより、複数の車両からなる長大な列車と構造物との動的な連成解析を行うことができる。効率的な数値解析を行うために、車両および構造物の運動方程式をモーダル変換する。得られる車両および構造物のモーダル座標系上での運動方程式を、Newmarkの平均加速度法により時間増分 $\Delta t$ 単位に解いていく。解析に用いた $\Delta t$ は、0.0001秒とした。また、解析モード次数は1000Hzまでの振動を再現できる次数とした。

## 2.6 解析モデルの妥当性の検証と解析結果の評価方法

解析モデルの妥当性の検証のために、静的載荷試験と縦まくらぎの固有振動数と振動モードの同定のため、インパルスハンマ試験を実施した。

図4に静的載荷試験の概要を示す。この試験により縦まくらぎバラスト軌道の支持剛性を評価する。試験は縦まくらぎに対して実施した。軌道への荷重の載荷方法は、レール頭頂面に固定したH鋼の上にデッドウェイト（鉄板）を順次載せることにより行い、160kNまで載荷した。また、載荷時の変位は220万画素で最大170fpsでの撮影が可能な産業用カメラであるCMOSモノクロカメラ（分解能0.01mm）を使用して測定した画像をデジタル画像相関法<sup>9)</sup>により処理することで取得した。

図5にインパルスハンマ試験の概要を示す。この試験では、縦まくらぎの振動特性を評価する。具体的には、縦まくらぎ加振時のインパクトハンマ（東陽テクニカ、

表2 解析ケース

ケース	支持状態	加振方法	備考
1	一樣支持	静的載荷	0→160kN (1レール80kN) まで載荷
2	一樣支持	車両走行	—
3	支持A	車両走行	バラスト→剛支持へ段上がり走行 構造物境界の手前に縦まくらぎ敷設
	支持B	車両走行	バラスト→剛支持へ段上がり走行 構造物境界を跨いで縦まくらぎ敷設

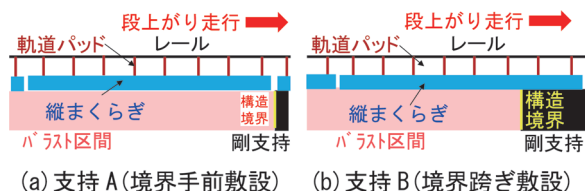


図3 解析ケースにおける支持A、支持Bの概要



図4 静的載荷試験の概要



図5 インパルスハンマ試験の概要

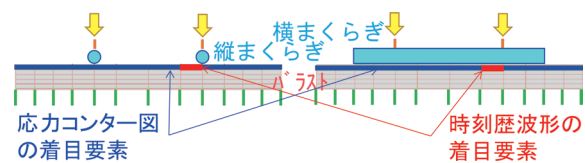


図6 検証位置の概要

086C05) および圧電型加速度計（リオン、PV85）の測定波形から算出したアクセランスに基づき周波数領域で固有振動数と振動モード形を同定した<sup>10)</sup>。

解析結果は、既往の研究<sup>11)</sup>を参考に、バラストの沈下の進行に及ぼす影響が大きいことが知られているまくらぎ下面圧力に着目して検証することとした。具体的な位置は、図6に示す縦まくらぎおよび横まくらぎとも同じ位置におけるソリッド要素の鉛直方向の応力とした。なお、本解析モデルはバラストをソリッド要素でモデル化しており、バラスト粒子自体の応力や振動を正確に再現できるものではない。

### 3. 数値実験による荷重分散性能の検討結果

#### 3.1 解析モデルの妥当性の検証

##### 3.1.1 縦まくらぎ軌道の支持剛性

図7に静的載荷試験結果と解析結果の比較を示す。着目位置は図2(a)で示した縦まくらぎ軌道の解析モデルの中央である。試験においては160kNまでの載荷に対し、レールで1.5mm程度、縦まくらぎで0.8mm程度の沈下が生じたが、解析結果はそれらを精度よく再現できていることがわかる。また、縦まくらぎ軌道と横まくらぎ軌道の解析結果をレール変位で比較すると、横まくらぎ軌道の方が0.07mm大きくなっており、相対的に縦まくらぎ軌道の方が軌道の支持剛性が高いことがわかる。

##### 3.1.2 縦まくらぎの振動特性

図8に縦まくらぎの固有振動モードと固有振動数に関する実測と解析の比較を示す。実測において、縦まくらぎの曲げ1次モードの固有振動数は75Hz、2次モードは151Hz、3次モードは293Hz、4次モードは480Hz、5次モードは748Hzとなった。それぞれ解析により得られ

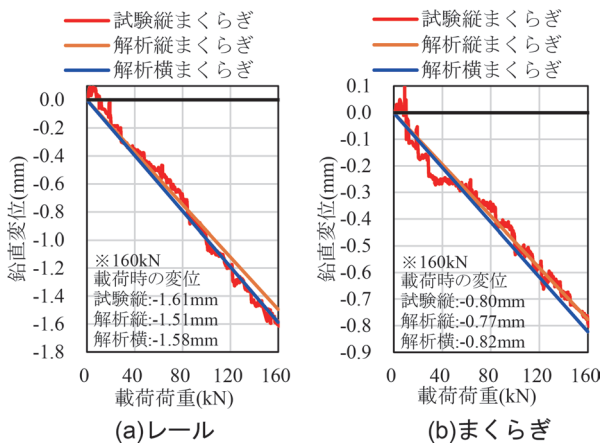


図7 静的載荷試験結果と解析結果の比較

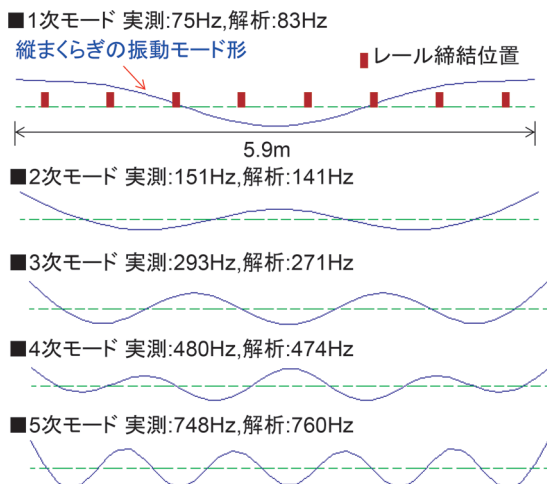


図8 固有振動モードと固有振動数の比較

た固有振動数は、ばらつきはあるものの概ね10%程度以内の誤差で固有振動数を再現できていることがわかる。なお、既往の研究<sup>12)</sup>によれば、今回比較対象とした長さ2mの横まくらぎの曲げ1次モードの固有振動数は155Hz、2次モードは460Hz、3次モードは860Hzという結果が得られており、本研究で対象とした長さ5.9m縦まくらぎとは振動特性が大きく異なる。

以上より、本研究で構築した縦まくらぎ軌道の解析モデルは軌道の支持剛性および縦まくらぎの振動特性に関する実現象を再現可能であると判断し、以降では、本解析モデルを用いて縦まくらぎの荷重分散性能に関する数値実験の結果を示すこととする。

#### 3.2 縦まくらぎの荷重分散性能に関する数値実験

##### 3.2.1 静的載荷（解析ケース1）

図9に静的荷重160kN載荷時のまくらぎ下面圧力を示す。載荷位置は、図2で示した解析モデルの中央における左右のレールである。図より、まくらぎ下面の最大値を比較すると、縦まくらぎ軌道では98.5kN/m<sup>2</sup>に対し、横まくらぎ軌道では147kN/m<sup>2</sup>となり、縦まくらぎ軌道のまくらぎ下面圧力は横まくらぎ軌道の67%程度に低減されることがわかる。また、レール長手方向の荷重分散は横まくらぎ軌道ではまくらぎ5本分であるのに対し、縦まくらぎ軌道では横まくらぎ位置で見ると、7本程度の範囲で荷重を負担していることがわかる。

##### 3.2.2 一様支持における列車走行（解析ケース2）

図10に軌道が一様に支持された条件（解析ケース2）におけるまくらぎ下面圧力の時刻歴応答波形およびその波形の周波数応答特性を示す。着目位置は図6に示した

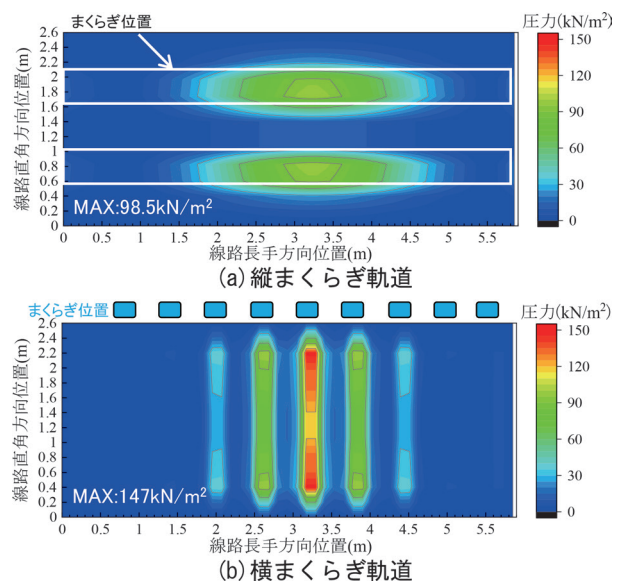


図9 静的荷重160kN載荷時のまくらぎ下面圧力（解析ケース1）

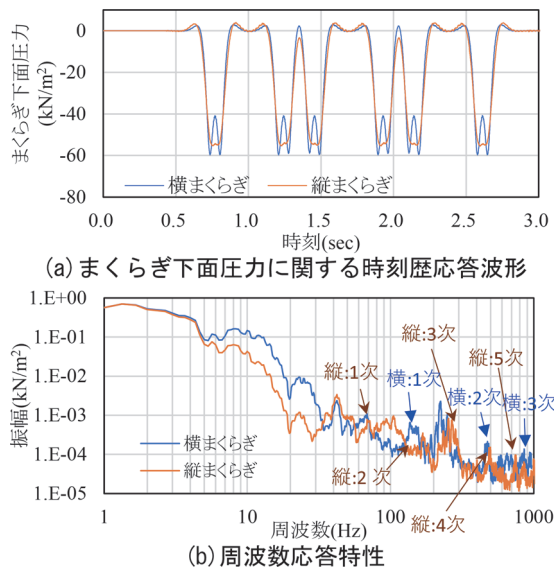


図 10 車両走行時のまくらぎ下面圧力の解析結果 (解析ケース 2)

位置である。時刻歴波形より、横まくらぎ軌道の時刻歴応答は車輪 1 軸ごとに応答のピークが見られるのに対し、縦まくらぎ軌道ではレール長手方向に横まくらぎ軌道よりも大きな剛性を有しているため、応答のピークが 1 台車ごととなっている。これにより、車輪 1 軸ごとの加振周波数  $11.9\text{Hz}$  ( $\equiv 1/(2.1\text{m}/(90\text{km/h}/3.6))$ ) に起因する成分が小さくなったため、同図 (b) に示すように、縦まくらぎ軌道は横まくらぎ軌道に比べて、 $10\text{Hz}$  付近の成分が低減した。さらに高周波数側を見ると、すべてのピークを説明できるわけではないが、縦まくらぎおよび横まくらぎの固有振動数付近でそれぞれの軌道の応答ピークが見られることがわかる。

図 11 に軌道が一様に支持された条件 (解析ケース 2) における車両走行時のまくらぎ下面圧力分布を示す。縦まくらぎ軌道はまくらぎ下面圧力の最大値が  $55.4\text{kN/m}^2$ 、横まくらぎ軌道では最大値が  $83.7\text{kN/m}^2$  となり、縦まくらぎ軌道は横まくらぎ軌道に比べて、まくらぎ下面圧力を 66% 程度に低減できることがわかる。

### 3.2.3 構造物境界部における列車走行 (解析ケース 3)

図 12 に構造物境界部を模擬した列車走行解析時におけるまくらぎ下面圧力の分布を示す。図 12 (c) に示した構造物境界部に隣接した横まくらぎバラスト軌道では端部のまくらぎ下面圧力の最大値が  $58.6\text{kN/m}^2$  であるのに対し、図 12 (a) の支持 A に示す縦まくらぎの端部の下面圧力の最大値は  $31.9\text{kN/m}^2$  となり、同じ位置の横まくらぎのまくらぎ下面圧力の 54% 程度に低減された。また、図 12 (b) の支持 B は構造物境界を跨いで縦まくらぎを敷設したケースであるが、縦まくらぎの端部の下面圧力の最大値は  $11.9\text{kN/m}^2$  となり、同じ位置の横まくらぎの下面圧力の 20% 程度に低減された。

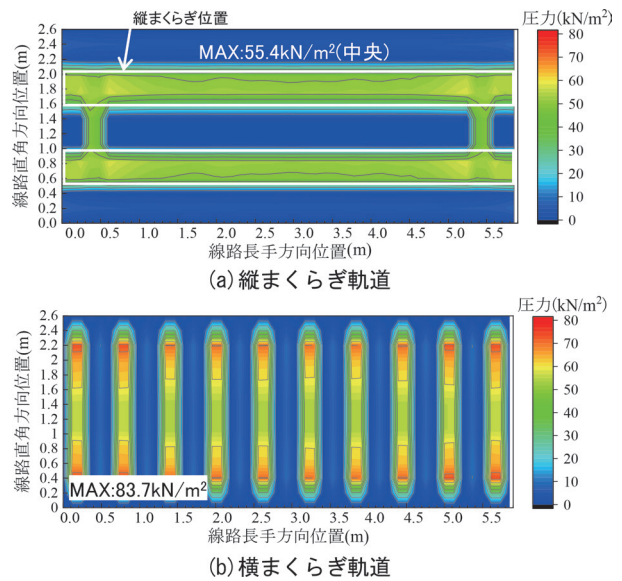


図 11 車両走行時のまくらぎ下面圧力 (解析ケース 2)

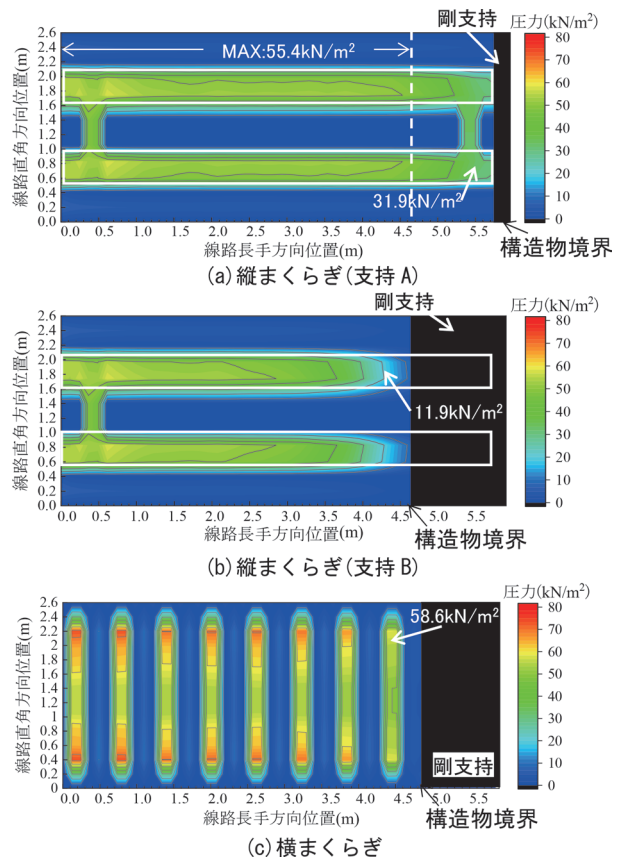


図 12 車両走行時のまくらぎ下面圧力 (解析ケース 3)

## 4. 縦まくらぎによる高低変位抑制効果

### 4.1 検証方法

図 13 に営業線における縦まくらぎの敷設状況を示す。敷設箇所は、 $50\text{kgN}$  レールが使用された直線区間で、

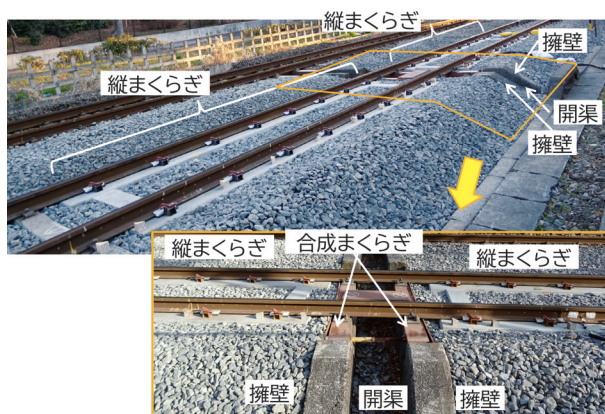


図 13 営業線における縦まくらぎの敷設状況

線路を直角に横断する開渠に隣接した箇所的前後に縦まくらぎを2体敷設した。開渠はコンクリート擁壁に挟まれており、それぞれの擁壁上には合成まくらぎが設置されている。縦まくらぎはこの擁壁から100mm程度離れた位置を目安に敷設した。この敷設方法は、表2や図3で示した支持Aに相当する。なお、走行列車は通勤列車と貨物列車で速度は60km/h程度である。

高低変位のデータは、鉄道事業者が所有する線路設備モニタリングシステム<sup>13)</sup>により取得した。縦まくらぎの比較用の横まくらぎの高低変位は、縦まくらぎ敷設前に同じ位置に敷設されていた横まくらぎの検測データを用いた。バラスト交換後の軌道整備回数は縦まくらぎで4回、横まくらぎで6回である。また、横まくらぎの初期沈下時のデータを取得できなかったため、初期沈下が収束した後の漸進的な沈下過程で比較を行うこととした。なお、軌道の沈下進みは既往研究<sup>14)</sup>による式(1)で表現されるものとした。

$$Y = a(1 - e^{-\gamma X}) + \beta X \quad (1)$$

ここに、 $a$ は初期沈下係数、 $\beta$ は沈下進み係数、 $\gamma$ は軌道状態による係数、 $Y$ は変位、 $X$ は通過トン数である。

#### 4.2 検証結果

図14に縦まくらぎと横まくらぎの高低変位進みの比較を示す。横まくらぎの軌道整備回数はバラスト交換後6回に対し、縦まくらぎでは軌道整備回数が4回であるにもかかわらず、軌道変位進みが改善されていることが分かる。具体的には、横まくらぎでは軌道整備後180日で12mm程度であるのに対し、縦まくらぎは軌道整備後680日においても6mm程度であった。なお、試験敷設箇所は、横まくらぎでは年間3~4回程度の軌道整備を行う多頻度保守箇所であったが、縦まくらぎを敷設したことにより、軌道整備から約680日経過しても高

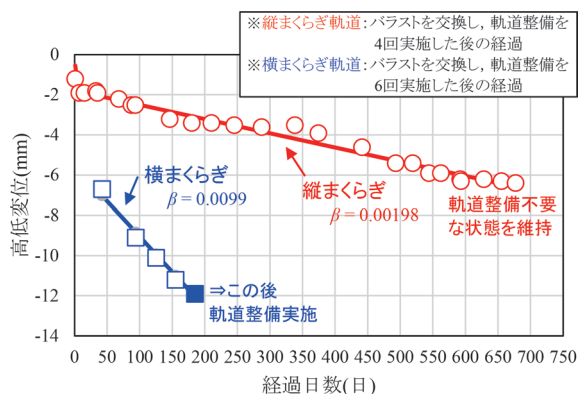


図 14 縦まくらぎと横まくらぎの高低変位の比較

低変位が抑制されており、整備不要な状態を保った。また、沈下進み係数 $\beta$ で比較すると、横まくらぎで0.0099に対し、縦まくらぎでは0.00198となり、1/5程度となった。

以上の結果より、構造物境界部に縦まくらぎを敷設することにより、保守省力化に大きく貢献できることが実証された。これらの結果は、構造物境界部の手前に縦まくらぎを敷設した場合(支持A)であるが、3章の数値実験の結果を踏まえると、構造物境界部を跨いで敷設する場合(支持B)においても、同等以上の高低変位抑制効果が期待できる。

#### 5. まとめ

本研究で得られた知見は以下の通りである。

- 1) 構造物境界部における数値実験により、縦まくらぎがバラストに一樣支持された場合では縦まくらぎのまくらぎ下面圧力は横まくらぎの70%程度、構造物境界部の手前に縦まくらぎを敷設した場合には横まくらぎの50%程度、構造物境界部を跨いで敷設した場合には横まくらぎの20%程度に低減できる可能性を示した。
- 2) 縦まくらぎを営業線に敷設し、高低変位の抑制効果を実証した。具体的には、縦まくらぎの沈下進み係数が横まくらぎの1/5程度となり、横まくらぎでは年間3~4回程度の軌道整備を行う多頻度保守箇所であったが、縦まくらぎは軌道整備から約680日経過しても整備不要な状態を保った。

以上より、縦まくらぎは構造物境界部の保守省力化に有効であることが明らかとなった。なお、本研究における高低変位の評価は、東日本旅客鉄道株式会社殿に甚大なるご協力をいただいた。ここに感謝の意を表する。

文 献

- 1) 渡辺勉, 後藤恵一, 涌井一: 軌道の性能向上を目指して-ラダーマクラギの開発-, RRR, Vol.73, No.6, pp.12-15, 2016
- 2) 森山正彦: パラスト・ラダーマクラギを用いた継目落ち対策, 日本鉄道施設協会誌, Vol.47, No.9, pp.738-740, 2009
- 3) 古澤亘弘, 山崎雅士: 伸縮継目用パラスト・ラダーまくらぎ敷設後の効果とふく進防止対策, 日本鉄道施設協会誌, Vol.56, No.1, pp.17-20, 2018
- 4) 涌井一, 奥田広之: PCまくらぎの限界状態設計法に関する研究, 土木学会論文集, No.557/V-34, pp.34-54, 1997
- 5) 渡辺勉, 箕浦慎太郎, 後藤恵一, 松岡弘大: 各種不整を考慮したPCまくらぎの動的応答特性に関する研究, 第21回鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.21, pp.205-212, 2017
- 6) 井上寛美, 大屋戸理明: ラダー軌道の保守省力化効果, 鉄道総研報告, Vol.12, No.9, 1998
- 7) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造, 丸善, 2012
- 8) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 コ  
ンクリート構造物, 丸善, 2004
- 9) 松岡弘大, 上半文昭, 日下博也, 今川太郎, 野田晃浩: ノンターゲット光学式測定による桁たわみ形状測定の精度検証と適用性検討, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.74, No.2, pp.I\_715-I\_726, 2018
- 10) 松岡弘大, 貝戸清之, 渡辺勉, 曾我部正道: 走行列車荷重を利用した RC 鉄道高架橋の部材振動の同定と動的挙動の把握, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.67, No.3, pp.545-564, 2011
- 11) 内田雅夫, 石川達也, 名村明, 高井秀之, 三和雅史: 軌道狂い進みに着目した有道床軌道の新しい設計法, 鉄道総研報告, Vol.9, No.4, pp.37-42, 1995
- 12) 松岡弘大, 渡辺勉, 箕浦慎太郎, 曾我部正道, 面高陽紀: 損傷 PC まくらぎの振動モード特性と打音による簡易検知手法の開発, 土木学会論文集 E2 (材料, コンクリート構造), Vol.74, No.3, pp.158-175, 2018
- 13) 松田博之, 瀧川光伸, 片岡慶太, 小関昌信他: 営業列車による線路設備モニタリング, JR East Technical Review, No.32, pp.7-10, 2010
- 14) 佐藤裕: 繰返荷重による道床沈下の実験, 鉄道技術研究報告, No.65, 1959