

縦まくらぎの荷重分散性能に関する数値解析的検討

○ [土] 渡辺 勉 [土] 後藤 恵一 [土] 箕浦 慎太郎 (鉄道総合技術研究所)

Numerical analysis of load dispersion characteristics of longitudinal sleeper

○ Tsutomu Watanabe, Keiichi Goto, Shintaro Minoura

(Railway Technical Research Institute)

Longitudinal sleepers can increase the rigidity in the longitudinal direction of tracks and are expected to contribute to labor saving in maintenance work of frequent maintenance sections such as structural boundaries. In this study, we develop a three-dimensional FEM model simulating longitudinal sleeper ballast tracks and conduct numerical experiments forcing structural boundaries. The results clarify that the longitudinal sleepers are able to reduce the pressure on the lower surface of the sleepers to 66% ~ 80% compared to the conventional cross sleeper tracks, and installing the longitudinal sleepers across the structural boundary is effective for maintenance labor saving.

キーワード: 縦まくらぎ, コンクリートまくらぎ, ラダーマクラギ, 保守省力化, 数値解析

Key Words: Longitudinal sleeper, concrete sleeper, ladder sleeper, labor saving, numerical analysis

1. はじめに

鉄道総研では、図1に示すプレストレストコンクリート製の縦梁と鋼製の継材から構成されるはしご状の縦まくらぎであるラダーマクラギを1999年に実用化した¹⁾。ラダーマクラギは一般区間だけではなく、レール継目部²⁾、伸縮継目部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ばね定数が増える箇所など、バラスト軌道の保守上の弱点となりやすい箇所にも適用されており、バラストの突き固めを基本とする定期的な保守を前提としたバラスト軌道の保守省力化に貢献している。

バラスト軌道における縦まくらぎの荷重分散メカニズムについては、大屋戸³⁾のDYLOC 載荷試験、筆者らの鉄道総研試験線や営業線への試験施工および長期モニタリング⁴⁾よりすでに実証されているが、今後敷設の増加が想定されるバラスト軌道の様々な多頻度保守箇所(例えば、地

盤が軟弱な箇所、盛土・橋台・桁や土構造・横断水渠・土構造のような構造が不連続となる箇所等)については、実施工前に数値解析により縦まくらぎの保守省力化効果が定量化できれば合理的である。

そこで本研究では、縦まくらぎバラスト軌道を模擬した3次元 FEM モデルを構築するとともに、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について検討を行うこととした。

2. 検討手法

2.1 3次元 FEM 解析モデルの概要

図2に縦まくらぎバラスト軌道の3次元 FEM 解析モデルの概要を示す。比較用に従来の横まくらぎバラスト軌道の解析モデルも構築した。数値解析に使用したプログラムは、鉄道総研が開発した車両と構造物の動的相互作用解析プログラム DIASTARSIII である。

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。レールは締結間隔を5分割、まくらぎは高さ方向に4分割、バラストはバラスト層全体を5層に分割した。図1に示す鋼製継材および端部閉合梁はモデル化していない。なお、まくらぎとバラストの境界部分は本来であれば非線形要素を設け、まくらぎとバラストの接触状態および非接触状態を再現すべきであるが、本解析モデルでは

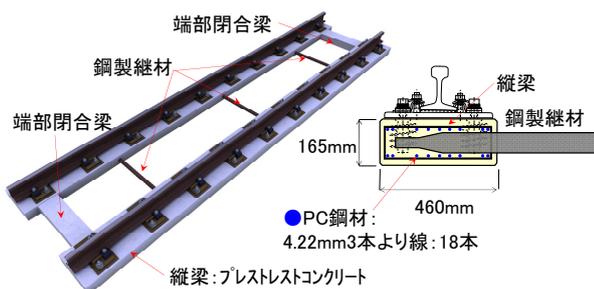


図1 標準的なラダーマクラギの概要

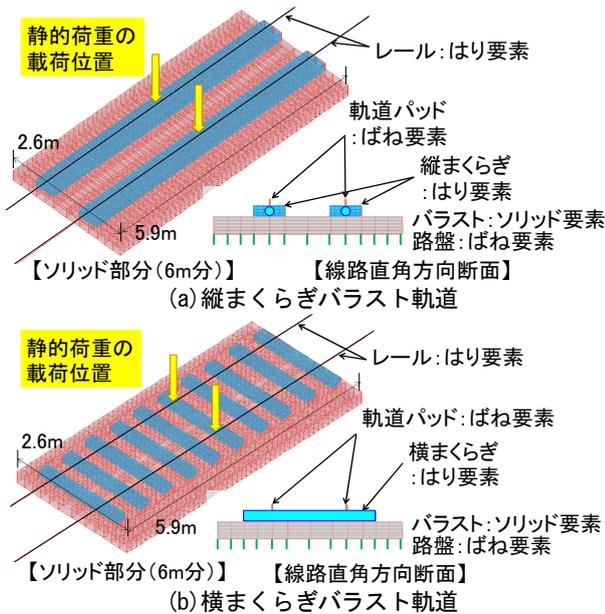


図2 3次元FEM解析モデルの概要

非線形要素等は設けず、単純にまくらぎとバラストの節点を共有した。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8mについては、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た。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。以上のモデル化により、解析モデルの総延長はおよそ22m(8+5.9+8)となり、縦まくらぎバラスト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。

2.2 解析条件

表1に材料諸元を示す。材料定数は鉄道構造物等設計標準・同解説⁶⁷⁾を参考に設定した。なお、比較用に設定した横まくらぎ軌道のPCまくらぎの品形は直線用の3号まくらぎとした。また、走行車両は近年の一般的な在来線車両(輪重40kN程度、軸距2.1m、車両長20m)とし、列車速度は90km/hとした。

2.3 解析ケース

表2に解析ケースを示す。荷重条件は、静的荷重と走行列車の2通りを設定した。また、支持状態として一様支持と図3に示す2つの支持条件を設定した。具体的には、支持Aは構造境界の手前に縦まくらぎを敷設した場合、支持Bは構造境界を跨いで縦まくらぎを敷設した場合である。なお、既往の測定結果⁴⁾からあおりが発生しやすい位置はバラスト区間と橋台等の比較的剛な支持状態の構造境界において、バラスト区間から剛支持区間に移る場合であるため、列車の走行方向はバラスト区間から剛支持区間に移る方向とした。

2.4 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。

表1 材料諸元

種別	材料定数等
レール	50kgNレール 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	- 公称ばね定数 $K_p=60\text{MN/m}$
縦まくらぎ	NNT056 ヤング係数 $E=200\text{kN/mm}^2$ 断面高さ $h=165\text{mm}$, 断面幅 $b=460\text{mm}$ 1ユニット長 $L_t=6.15\text{m}$ 締結数 $N=10$ 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	3号(3PR) ヤング係数 $E=200\text{kN/mm}^2$ 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 $K_{30}=50\text{MN/m}^3$ (ばね定数 $K_S=22.0\text{MN/m}$)

表2 解析ケース

荷重	支持状態	レール凹凸	備考
静的荷重	一様支持	—	0→80kNまで5secで載荷
走行列車	一様支持	なし	※基本ケースとする
	支持A	なし	バラスト→剛支持へ段上がり走行 構造境界の手前に縦まくらぎ敷設
	支持B	なし	バラスト→剛支持へ段上がり走行 構造境界を跨いで縦まくらぎ敷設

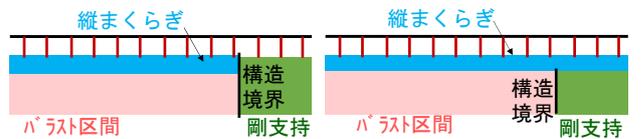


図3 解析ケースにおける支持A、支持Bの概要

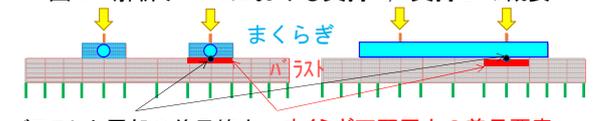


図4 評価位置の概要

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 Δt 単位に解いていく。解析に用いた Δt は、0.0001秒とした。また、解析におけるモード次数は1000Hz程度までの振動を再現できる次数とした。

2.5 評価方法

既往の研究⁸⁹⁾より、バラスト軌道における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バラスト上層加速度およびまくらぎ下面圧力に着目して評価することとした。具体的な位置は、図4に示す同じ位置の同一節点・要素で、バラスト上層加速度については該当する位置の節点の加速度を、まくらぎ下面圧力については該当する位置の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

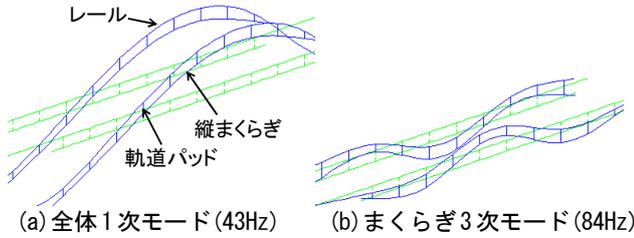


図5 縦まくらぎ軌道の主な振動モード形

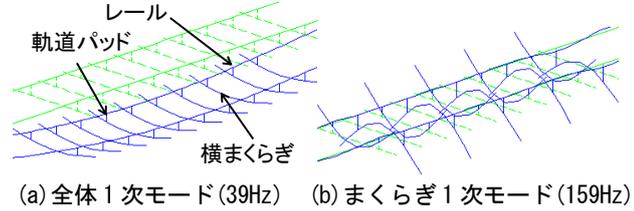


図6 横まくらぎ軌道の主な振動モード形

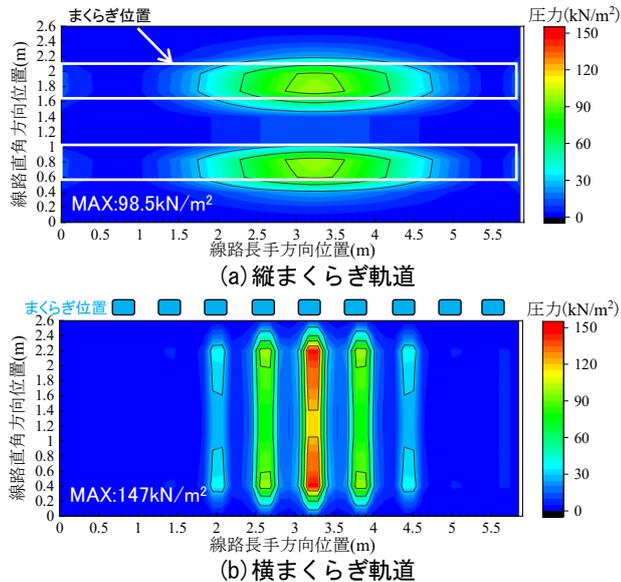


図7 静的荷重 80kN 載荷時のまくらぎ下面圧力の分布

り、バラスト粒子自体の振動を再現したものではないことに留意が必要である。

3. 検討結果

3.1 振動モード形

図5および図6に縦まくらぎ軌道および横まくらぎ軌道の主な振動モード形をそれぞれ示す。図中にはレール、軌道パッド、まくらぎを模擬した要素のみを表示した。全体の1次モードは縦まくらぎ軌道と横まくらぎ軌道にほとんど差は見られず、40Hz程度となった。また、後述するまくらぎ下面圧力の周波数特性でピークとなる周波数帯の振動モードを見ると、縦まくらぎ軌道では84Hzで縦まくらぎの3次モード、横まくらぎ軌道では159Hzで横まくらぎの1次モードが確認された。

3.2 静的載荷解析

図7に静的荷重 80kN 載荷時のまくらぎ下面圧力を示す。図より、縦まくらぎ軌道では最大圧力 98.5kN/m²に対し、横まくらぎ軌道では最大圧力 147kN/m²となり、縦まくらぎ軌道は横まくらぎ軌道の67%程度に低減されていることが分かる。また、線路長手方向の荷重分散は縦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

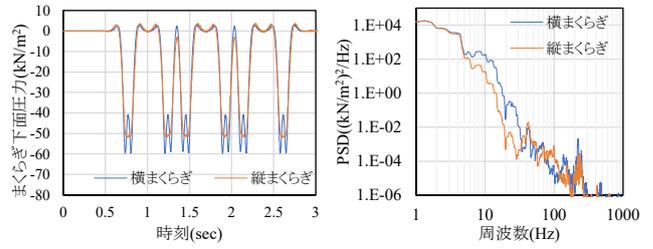


図8 基本ケースのまくらぎ下面圧力の比較(モデル中央)

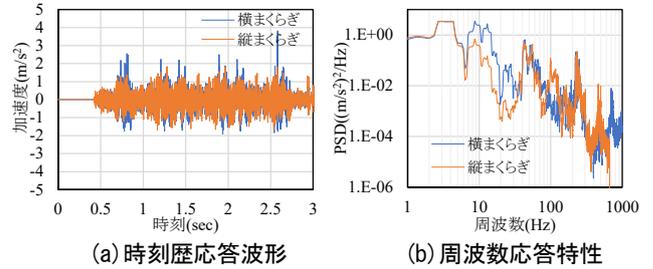


図9 基本ケースのバラスト上層加速度の比較(モデル中央)

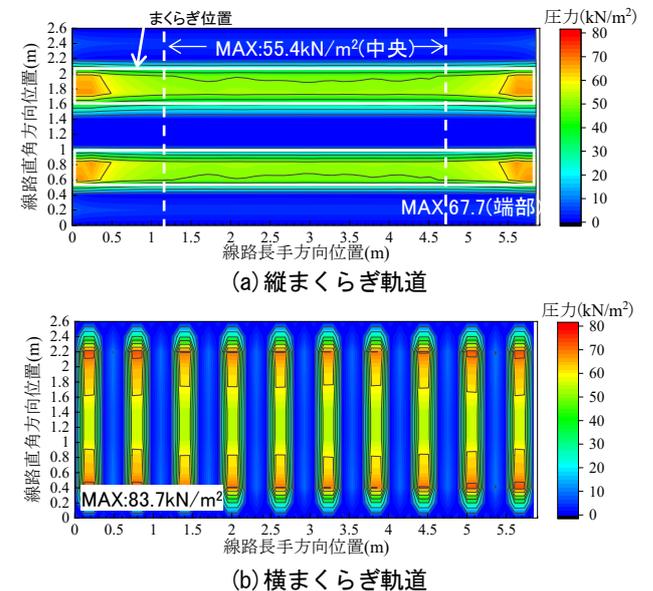


図10 基本ケースの列車走行時の最大まくらぎ下面圧力分布では横まくらぎの位置で見ると7本程度の範囲で荷重を負担していることが分かる。

3.3 列車走行解析

図8に基本ケースにおけるまくらぎ下面圧力の時刻歴応答波形および周波数応答特性を示す。同図(a)より、縦まくらぎ軌道の時刻歴応答は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1台車ごととなっている。これは縦まくらぎの荷重分散効果の影響であり、この影響で1軸ごとの加振周波数 $11.2\text{Hz} (= 1/(2.1\text{m}/(90\text{km/h}/3.6)))$ の影響が小さくなったため、縦まくらぎ軌道は横まくらぎ軌道に比べて、同図(b)に示す10Hz付近で大きくパワースペクトル密度(以下、PSD)が低減したものと考えられる。

図9に基本ケースにおけるバラスト上層加速度の時刻歴応答波形および周波数応答特性を示す。同図(b)に見られる10Hz付近の縦まくらぎ軌道と横まくらぎ軌道の違いの要因は前述の通りである。90Hz付近においては縦まくらぎ軌道のPSDが横まくらぎ軌道よりも大きくなっているが、これは図5に示した通り、縦まくらぎの3次振動モードの

影響と考えられる。

図 10 に基本ケースにおける列車走行時の最大まくらぎ下面圧力分布を示す。着目区間約 6m において、縦まくらぎは中央部(解析モデル 1.1~4.7m の範囲)における最大圧力が 55.4kN/m^2 、端部では最大圧力が 67.7kN/m^2 となり、端部でまくらぎ下面圧力が 20%程度増加することが分かる。一方、横まくらぎ軌道では最大圧力が 83.7kN/m^2 であり、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中央部で 66%程度、端部で 80%程度に低減できることが分かる。このように、縦まくらぎの端部は構造的に不連続となる部分であり、線路長手方向に荷重が分散されなくなるため、縦まくらぎによるまくらぎ下面圧力の低減効果が薄れることになるが、図 1 に示すラダーマクラギではこの弱点を補うため、バラストに対する受圧面積を増加させる目的で「端部閉合梁」が配置されている。

3.4 支持状態の影響

図 11 に支持状態の影響を示す。図 11(c)に示した構造境界に隣接した横まくらぎ軌道では端部のまくらぎ下面圧力の最大値が 58.6kN/m^2 であるのに対し、図 11(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 31.9kN/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 11(b)の支持 B は構造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 11.9kN/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。このように縦まくらぎを構造境界付近に敷設する場合には、支持剛性の変化箇所の手前に縦まくらぎを敷設するよりも、支持剛性変化箇所を跨いで敷設した方が構造境界に隣接したバラスト区間のまくらぎ下面圧力の低減に効果的であることが分かった。

4. まとめ

本研究では、縦まくらぎバラスト軌道を模擬した 3 次元 FEM モデルにより、縦まくらぎの荷重分散性能に関する数値実験を実施した。得られた知見は以下の通りである。

- (1) 静的載荷解析により、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が 67%程度に低減されることが分かった。また、今回の条件下では、荷重分散の範囲が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 7 本程度の範囲で荷重を負担することが分かった。
- (2) 列車走行解析により、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中央部で 66%程度、端部で 80%程度に低減できることが分かった。なお、実際のラダーマクラギでは端部閉合梁が配置されており、端部の低減効果は本解析結果よりも大きい。
- (3) 縦まくらぎを構造境界付近に敷設する場合には、構造境界の手前に敷設するよりも、構造境界を跨いで敷設した方が構造境界に隣接したバラスト区間のまくらぎ下面圧力の低減に効果的であることが分かった。

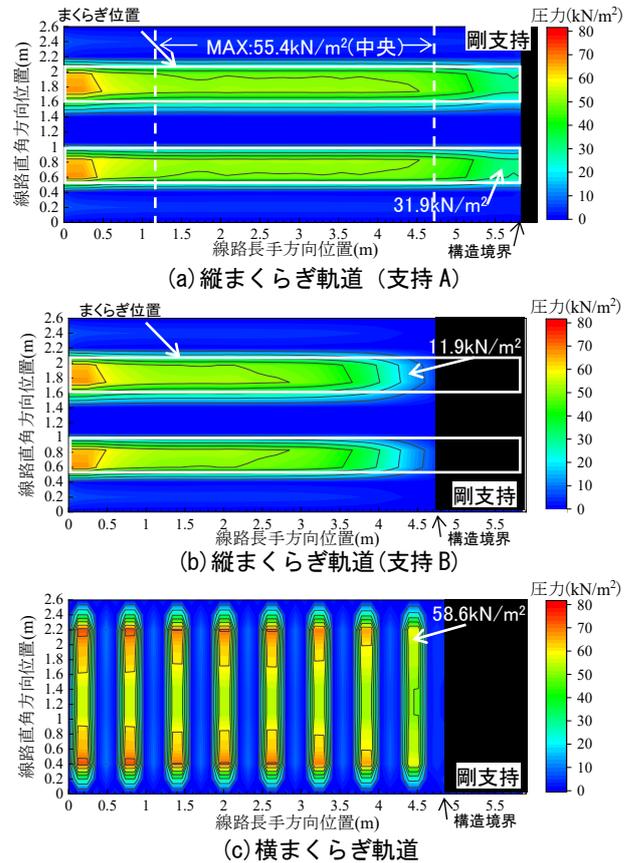


図 11 構造物境界における
列車走行時の最大まくらぎ下面圧力分布

参考文献

- 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: バラスト・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) 大屋戸理明, 井上寛美, 曾我部正道, 松本信之, 小山弘男, 高木言芳: バラスト道床型ラダー軌道の沈下特性試験と道床圧力解析, 鉄道総研報告, Vol.10, No.9, 1996
- 4) 渡辺勉, 箕浦慎太郎, 後藤恵一, 池田学: 構造物境界部における縦まくらぎの変位抑制効果, 日本鉄道施設協会誌, Vol.58, No.8, pp.592-595, 2020
- 5) 渡辺勉, 箕浦慎太郎, 面高陽紀, 神津大輔: 荷重環境の実態調査に基づく低廉な縦まくらぎの開発, 鉄道総研報告, Vol.32, No.6, 2018
- 6) 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, 2012.1
- 7) 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, 丸善, 2004.4
- 8) 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, 1995
- 9) 運輸省鉄道局監修: 鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造[有道床軌道] (案), 1997