

## 軌道部材間の連成が PC まくらぎのモード特性に及ぼす影響に関する解析的研究

鉄道総研 正会員 ○松岡 弘大

鉄道総研 正会員 渡辺 勉

## 1. はじめに

PC まくらぎはレールの軌間保持と道床への輪重伝達を担う軌道部材であり、現在までに膨大な社会資本ストックを形成している。導入からすでに 50 年を超えた PC まくらぎも増加しつつあるため、状態に応じた効率的な維持管理の実現が喫緊の課題であるが、鉄道路線に多用されるバラスト軌道では図 1 のようにまくらぎ上面までバラストが敷設されており、PC まくらぎの状態の確認は容易ではない<sup>1)</sup>。このような PC まくらぎの損傷検知手法として、PC まくらぎの 3 次モード固有振動数に基づく方法(図 2)が提案され、実路線での検証も実施されている<sup>1)</sup>。ただし、既往検討は JIS3 号まくらぎを対象としており、他 PC まくらぎはほとんど検討されていない。また、道床・路盤や軌道パッドは材料定数のばらつきが大きい<sup>2)</sup>が、これらが PC まくらぎの固有振動数に及ぼす影響については不明な点も多い。以上を踏まえ、本研究は JIS6 号まくらぎ、および継目用まくらぎを対象に、PC まくらぎ、バラスト、軌道パッドおよびレールで構成される解析モデルに基づき、各軌道部材が PC まくらぎの固有振動数に及ぼす影響について基礎的な検討を実施した。

## 2. 検討方法

図 2 に解析モデルを示す。60kg レール定尺区間を対象とし、JIS E 1201 に規定された 6 号 PC まくらぎ、および継目用 PC まくらぎの二種類について、一締結分をモデル化した。まくらぎおよびレールは梁要素で、軌道パッドとバラストおよび路盤はばね要素でそれぞれモデル化した。なお、軌道パッドはその寸法を考慮するため、ばね 35 要素でモデル化した。またバラストおよび路盤は集約ばねとした。レール端部はすべての回転自由度および軸方向自由度を拘束した。表 1 に解析に用いた材料定数を示す。各部材とも鉄道構造物等設計標準・同解析や公称値から定まる定数を基本とした<sup>2)</sup>。表 2 に解析ケースを示す。本研究では PC まくらぎの固有振動数に及ぼす軌道部材の影響を検討するため、PC まくらぎのコンクリートのヤング係数に加え、軌道パッドばね定数、および集約ばね定数をパラメータとして固有値解析を実施した。



図 1 一般的な PC まくらぎの敷設状況

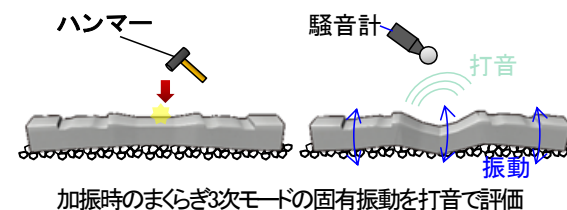


図 2 3 次モード固有振動数に基づく損傷検知

まくらぎ: 梁要素(締結間36分割)

レール: 梁要素(締結間20分割)

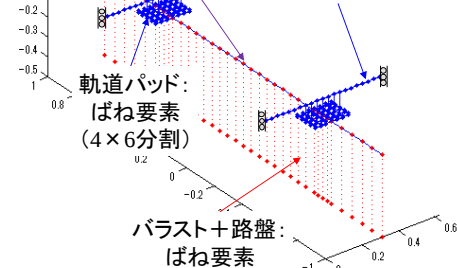


図 3 三次元数値解析モデルの概要

表 1 材料定数の基本値

|             |                                                                         |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------|
| レール         | 種別: 60kg レール(定尺)<br>ヤング係数 $E_s$ : 200MPa                                |
| 軌道パッド       | ばね定数 $D_p$ : 60MN/m                                                     |
| PC まくらぎ     | 6 号まくらぎ<br>継目用まくらぎ(JIS E 1201 に規定)<br>コンクリートヤング係数 $E_c$ : 33MPa         |
| バラスト        | 支持ばね定数 $D_B$ : 180MN/m(1 レール)                                           |
| 路盤          | 地盤反力係数 $K_{30}$ : 110MN/m <sup>3</sup><br>支持ばね定数 $D_s$ : 111MN/m(1 レール) |
| バラスト・路盤集約ばね | 集約ばね $D_T$ : 68.8MN/m(1 レール)                                            |

表 2 解析ケース

|                        |                                                   |
|------------------------|---------------------------------------------------|
| 軌道パッド                  | 60, 80, 100, 120MN/m                              |
| PC まくらぎ<br>コンクリートヤング係数 | $E_c$ : 33MPa $\times$ 0.9~1.4 (0.05 刻み)          |
| 集約ばね定数                 | $D_T$ : 68.8MN/m(1 レール) $\times$ 0.1~1.0 (0.1 刻み) |

キーワード PC まくらぎ, バラスト軌道, 固有振動数, 数値解析

連絡先 〒185-8540 東京都分寺市光町 2-8-38 南館 213 (公財) 鉄道総合技術研究所 TEL 042-573-7290

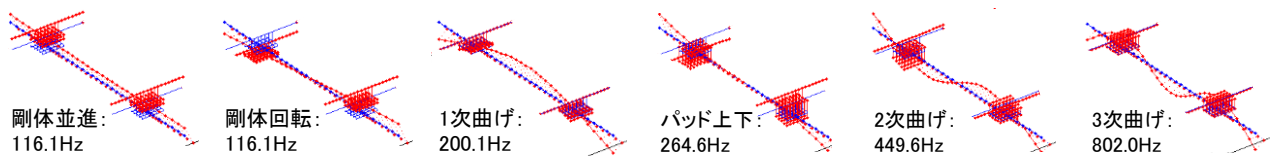


図4 固有値解析結果 (6号, 基本ケース)

3. 検討結果

図4にモード形の例として, 6号まくらぎモデル ( $E_c=33, D_p=60, D_T=68.8$ ) の結果を示す. バラストおよび路盤による支持ばねの変形モードが100Hz程度, 1次曲げが200Hz程度, 軌道パッドの変形モードが260Hz程度, 2次曲げおよび3次曲げが450Hzと800Hz程度であった.

図5に6号まくらぎ, 図6に継目用まくらぎの1次から3次曲げの固有振動数をそれぞれ示す. 横軸に $E_c$ を取っているが, 1~3次までを比較すると, 1次に比べ2次と3次モードはコンクリートヤング率の変化に敏感である. また, 図中に軌道パッド剛性 $D_p$ を2倍としたケース, 支持ばね $D_T$ を0.1倍としたケースを示す. 1次曲げの固有振動数は支持ばね $D_T$ の変化により大きく低下する. 2次曲げの固有振動数は支持ばね $D_T$ および軌道パッド剛性 $D_p$ のどちらの影響も受ける. 一方, 3次曲げの固有振動数は支持ばね $D_T$ が10分の1になってもほとんど変化しない. また, 軌道パッド剛性 $D_p$ も影響は小さく,  $D_p$ が2倍となる場合にも4%程度しか変化しない. これらの傾向は既存研究におけるJIS3号まくらぎの実測結果とも整合的であり, 6号および継目まくらぎについても3次曲げモードを用いることで, 他軌道部材の影響が抑制した損傷検知が可能であると期待される.

$E_c$ は2次および3次,  $D_p$ は2次,  $D_T$ は1次および2次にそれぞれ影響するため, 1~3次の固有振動数の同定値があれば,  $E_c, D_p, D_T$ を一意に逆算可能である. 表3に例として, 各種パラメータを変化させた固有値解析で得られた1~3次曲げモードの固有振動数が文献<sup>2)</sup>の実測値に最も近くなるケースを選出した. 現実的な範囲で $E_c, D_p, D_T$ が得られており, 固有振動数も概ね一致することがわかる. 得られた結果は, 損傷検知の初期条件や, 実測に合わせた数値解析諸元としても利用可能であると考えられる.

4. まとめ

6号および継目PCまくらぎの固有振動数に他軌道部材が及ぼす影響を解析的に検討した結果, コンクリートのヤング率は2次および3次曲げモードに, 軌道パッドは2次曲げモードに, 支持ばねは1次および2次モードにそれぞれ影響することを明らかにした.

参考文献

1) 松岡弘大他: 高次の振動モードに基づくPCまくらぎの損傷検知, 土木学会論文集A2, Vol. 70, pp. I\_947-I\_957, 2014.  
2) 渡辺勉他: レール継目部のPCまくらぎの動的応答特性, 日本鉄道施設協会誌, 10月号, pp. 64-67, 2016.

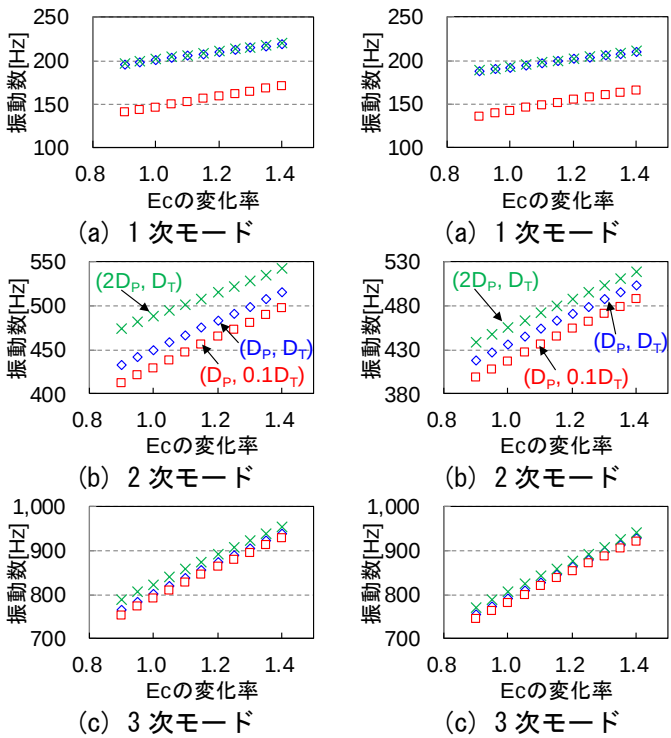


図5 固有値解析結果 (6号まくらぎ)      図6 固有値解析結果 (継目まくらぎ)

表3 既往文献との比較による  $E_c, D_p, D_T$  の推定

| まくらぎ<br>種別 | 継目用まくらぎ                  |                               |            | 6号まくらぎ                   |                               |            |
|------------|--------------------------|-------------------------------|------------|--------------------------|-------------------------------|------------|
| モード        | 文献 <sup>2)</sup><br>(Hz) | ( $E_c,$<br>$D_p,$<br>$D_T$ ) | 解析<br>(Hz) | 文献 <sup>2)</sup><br>(Hz) | ( $E_c,$<br>$D_p,$<br>$D_T$ ) | 解析<br>(Hz) |
| 1次曲げ       | 202                      | (34.7,                        | 203        | 173                      | (42.9,                        | 175        |
| 2次曲げ       | 534                      | 100.0,                        | 522        | 497                      | 100.0,                        | 479        |
| 3次曲げ       | 907                      | 34.4)                         | 908        | 813                      | 68.8)                         | 814        |