

レール継目部の PC まくらぎの動的応答性状

鉄道総研 正会員 ○渡辺 勉 鉄道総研 正会員 松岡 弘大  
 鉄道総研 正会員 箕浦 慎太郎 J R 西日本 正会員 山根 寛史

1. はじめに PC まくらぎの設計は、列車走行に伴う衝撃荷重の影響を考慮して行われる。衝撃荷重は、レール継目、レール溶接部凹凸、レール頭頂面波状摩耗、車輪フラット（ブレーキ時に車輪がレール上を滑走したときに生じる車輪表面が欠円状になる損傷）などに起因して発生する。この中でも特に車輪フラットは衝撃荷重を発生させる最も大きな要因として、PC まくらぎ開発当初より様々な研究が行われてきた<sup>1)</sup>。本研究では、これまであまり検討が行われてこなかったレール継目部の PC まくらぎを取り上げ、その動的応答性状に関する各種パラメータの影響やレール継目の影響範囲などについて検討を実施したので報告する。

2. 検討手法 2.1 測定手法 図1に今回調査対象とした軌道構造の概要を示す。当該区間は 60kg レールの定尺区間で、25m おきにレール継目が存在する。PC まくらぎについては、一般部は JIS E 1201 に規定された 6 号 PC まくらぎ（以下、6 号まくらぎ）、レール継目直下には継目用 PC まくらぎ（以下、継目用まくらぎ）が敷設されている。まくらぎ本数は 25m あたり 41 本である。

列車通過時における PC まくらぎの発生モーメントの測定は、継目用 PC まくらぎ 2 本(継目 1 および継目 2)とそれに隣接した 6 号まくらぎ 2 本(まくらぎ A,B)、さらにレール継目から 12.5m 離れた 2 本の 6 号まくらぎ(まくらぎ C,D)において実施した。なお、まくらぎ C,D を継目の影響を受けない一般部とみなした。走行列車は一般的な在来線の通勤車両(輪重 50kN 程度)である。発生曲げモーメントは、PC まくらぎの側面の上縁および下縁に添付したひずみゲージ(共和電業製)により得られたひずみを換算することにより求めた。測定サンプリングは 5kHz とした。

2.2 解析手法 図2に三次元数値解析モデルの概要を示す。数値解析には、鉄道総研開発の車両と線路構造物の動的相互作用解析プログラム DIASTARSIII を用いた。車両は車体、台車、輪軸を剛体と仮定し、それらをばねとダンパーでリンクしたモデルで 1 車両あたり 31 自由度を有する。軌道は有限要素法によりモデル化した。レールおよびまくらぎははり要素、軌道パッド、バラストおよび路盤はばね要素でモデル化した。解析モデルの総節点数は 8338、総要素数は 13012 である。数値解析はモーダル法により行い、5kHz までの振動を再現できるモード次数で解析を実施した。解析時間刻みは 0.1msec である。減衰定数は固有振動モード測定結果や後述する実測における時刻歴応答と解析結果の整合性から 0.3 とした。

図3に解析に用いた走行面凹凸を示す。解析ではレール継目1を対象にモデルを構築した。走行面凹凸は現地において長さ 1m の測定機により測定したレール頭頂面凹凸を用いた。

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・同解説<sup>2),3)</sup>や公称値から定まる値を用いることを基本とするが、列車通過時の発生曲げモーメントの実測結果との整合性から、軌道パッドのばね定数について公称値の2倍とし、PC まくらぎの支持ばね定数はまくらぎ中央付近がレール位置付近よりも大きい中央支持状態とした。具体的には、レール位置付近では設計値の1/2、まくらぎ中央付近長さ 500mm では設計値を用いた。500mm という範囲は、あくまで列車通過時の発生曲げモーメントに関する実測結果と解析結果との整合性から推定した値である。

表2に解析ケースを示す。本研究では、PC まくらぎの動的応答特性に及ぼす各種パラメータの影響を検討するために、列車速度およびバラストと路盤からなる PC まくらぎの支持ばね定数をパラメータとして解析を実施した。なお、列車速度 80km/h、中央支持①の支持条件が基本ケースとなる。支持条件は、中すかしおよび一様支持の条件が概ね軌道整備直後の状態、中央支

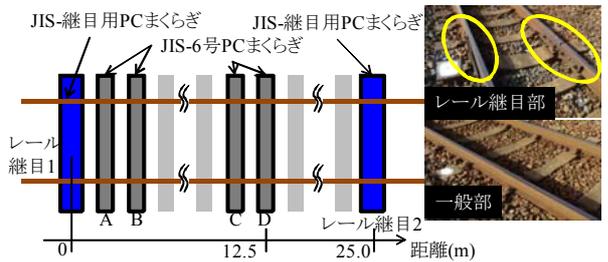


図1 軌道構造の概要

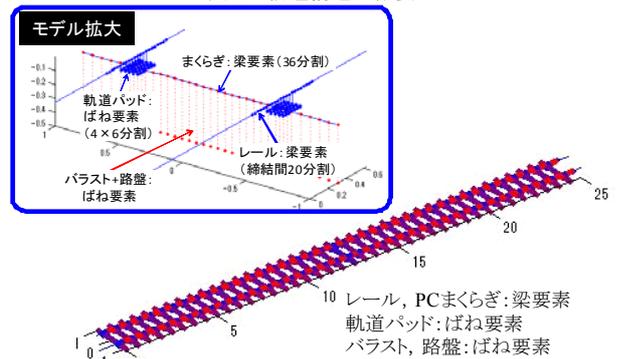


図2 三次元数値解析モデルの概要

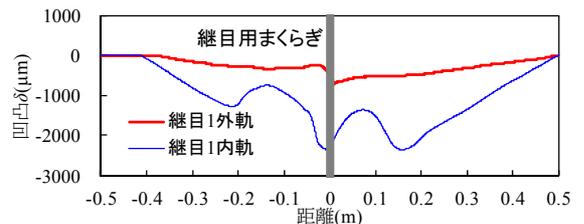


図3 走行面凹凸 (継目 1)

表1 材料定数

レール	種別: 60kg レール(定尺) ヤング係数 $E_S$ : 200MPa
軌道パッド	ばね定数 $D_P$ : 220MN/m(公称値 110MN/m)
PC まくらぎ	■継目用まくらぎ PC 鋼線: $\phi 2.9\text{mm}$ 3本より線 16本 長さ $L_P$ : 2000mm, 底面幅 $B_P$ : 300mm 高さ $H_P$ : 170mm(レール下), 145mm(中央) コンクリートヤング係数 $E_C$ : 33MPa
バラスト	バラスト厚さ $h$ : 250mm 支持ばね定数 $D_B$ : 180MN/m(1レール分)
路盤	地盤反力係数 $K_{30}$ : 110MN/m <sup>3</sup> 支持ばね定数 $D_S$ : 111MN/m(1レール分)

※バラスト  $D_B$  と路盤  $D_S$  の集約ばね  $D_T$  は、レール位置付近では  $1/2 D_T$ 、まくらぎ中央付近長さ 500mm の範囲では  $D_T$  を用いた。

キーワード PC まくらぎ, 衝撃荷重, 動的相互作用, レール継目, 数値解析  
 連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 TEL 042-573-7290

持の条件が軌道整備からある程度の日数が経過した状態を想定した。

**3. 検討結果 3.1 曲げモーメントの時刻歴波形** 図4に列車通過時における継目用まくらぎ(継目1)の発生曲げモーメントの実測と解析の比較を示す。正曲げモーメントにおいては、数値解析の支持条件の違いはほとんど見られないが、負曲げモーメントにおいては、一様支持の解析結果は実測結果の1/2程度であった。一方、中央支持の解析結果は実測結果をよく再現していることがわかる。当該線区は軌道整備から1年近くが経過しており、列車との相互作用によってレール位置においてバラストの締め固め状態が緩み、PCまくらぎの支持状態は一様支持状態から中央支持状態に移行しつつあると推察される。

**3.2 最大曲げモーメント** 図5に列車速度とPCまくらぎの発生曲げモーメントの関係を示す。図中には曲げモーメントの設計限界値も併せて示した。なお、以下の数値はすべて発生最大曲げモーメントの平均値の比較である。継目用まくらぎの曲げモーメントは、一般部の6号まくらぎC、Dと比べると、正曲げでは最大で3.2倍程度、負曲げでは最大で3.0倍程度であることがわかる。また、2本の継目用まくらぎ(継目1と継目2)を比較すると、負曲げモーメントについては継目2の方が継目1に比べて概ね1.4倍程度大きいことがわかる。この原因は後述するパラメータ解析より、支持条件の違いが影響しているものと考えられる。一般部の6号まくらぎDとレール継目に隣接した6号まくらぎAを比較すると、6号まくらぎAの方が正曲げで最大2.2倍程度、負曲げで最大1.4倍程度曲げモーメントが大きくなった。このように同じ種類のPCまくらぎであっても敷設箇所によって発生する曲げモーメントが異なることがわかる。

**3.3 パラメータ解析結果** 図6にパラメータ解析結果を示す。パラメータの影響が顕著であった負曲げについて示す。

図6(a)の支持条件の違いによる発生負曲げモーメントの影響を見ると、中すかし、一様支持、中央支持の順に発生負曲げモーメントが大きくなることがわかる。中すかしの条件に比べて、中央支持では最大で4倍程度の曲げモーメントとなることがわかった。

図6(b)にはレール継目の影響範囲を示す。レール継目からの距離0mが継目用まくらぎで、その他は6号まくらぎである。同図より、概ね4m程度以遠は発生曲げモーメントに対するレール継目部の影響は小さいことがわかる。そこで、今回の解析条件の下では、レール継目から4m程度以上離れた範囲をレール継目の影響を受けない一般部と定義することができる。これらの結果は今回設定したある特定の走行面凹凸の結果であるが、影響範囲を考える上での参考値となりうると考える。今後は凹凸のサンプル数や解析パラメータを増やし、レール継目の影響範囲を一般化する必要があると考える。

**4. まとめ** ①列車通過時における発生曲げモーメントの実測結果より、同じ種類のPCまくらぎであっても、敷設箇所によって発生曲げモーメントが大きく異なり、特にレール継目に近接した場合、一般部に比べて最大で3.2倍程度の発生曲げモーメントとなることがわかった。②レール継目の影響をうける範囲は、レール継目から概ね4mの範囲であることがわかった。

今後はこれらの知見をPCまくらぎの設計に反映させていきたいと考えている。

**参考文献** 1)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, 1997.2, 2)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, 3)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

表2 解析ケース

列車速度 $V$	50~130km/h (80km/hが基本速度)
PCまくらぎ支持条件 (支持ばね定数 $D_T$ )	一様支持 : $D_T$ 中すかし : $D_T + 0.5D_T + D_T$ 中央支持① : $0.5D_T + D_T + 0.5D_T$ 中央支持② : $0.25D_T + D_T + 0.25D_T$

※PCまくらぎの支持ばね定数の分布は、まくらぎ両端部から長さ750mmと中央付近長さ500mmで3分割した。

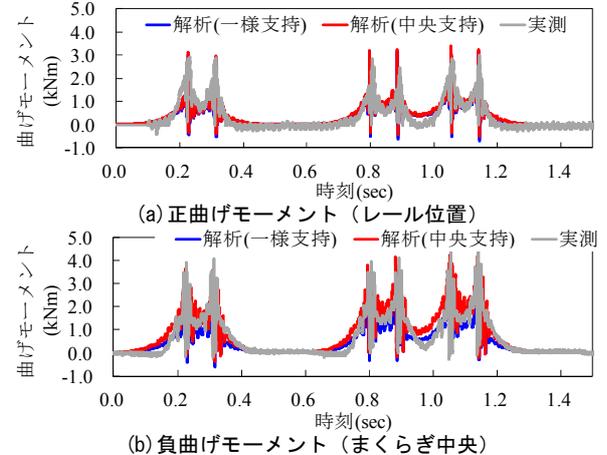
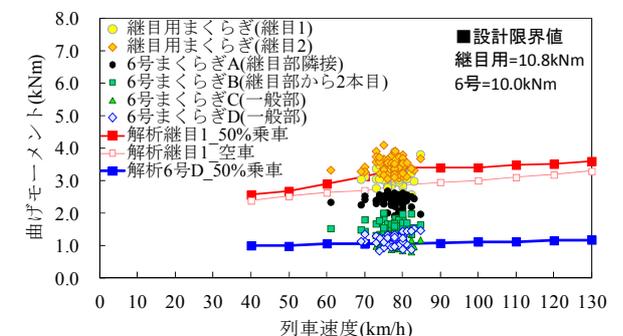
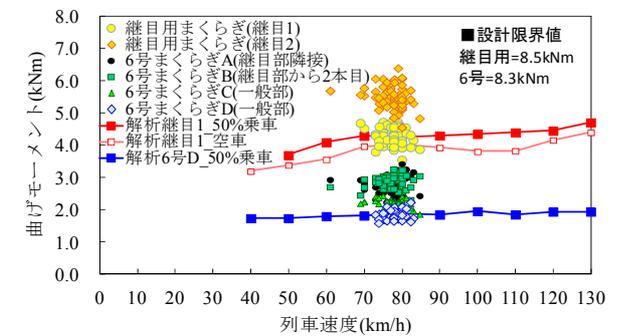


図4 発生曲げモーメントの実測と解析の比較(継目1)

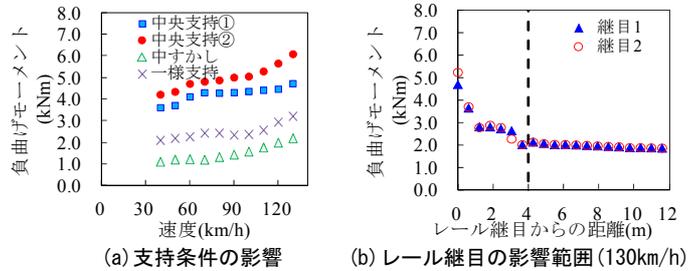


(a) 正曲げモーメント(レール位置)



(b) 負曲げモーメント(まくらぎ中央)

図5 列車速度と発生曲げモーメントの関係



(a) 支持条件の影響

(b) レール継目の影響範囲(130km/h)

図6 パラメータ解析結果