

論文 PC まくらぎの動的応答性状に対するレール継目部の影響

渡辺 勉^{*1}・松岡 弘大^{*1}・箕浦 慎太郎^{*2}・山根 寛史^{*3}

要旨：本研究は、レール継目部と一般部を対象として、現地計測と数値解析により PC まくらぎの動的応答性状を明らかにした。具体的には、レール継目用 PC まくらぎは一般部の 6 号 PC まくらぎに比べて最大で 4 倍程度、レール継目部に隣接した 6 号 PC まくらぎは一般部の 6 号 PC まくらぎに比べて最大で 2.7 倍程度の曲げモーメントが生じることを現地計測により明らかにするとともに、数値解析により発生曲げモーメントに対して最も影響の大きいパラメータはまくらぎの支持状態であること、発生曲げモーメントに関するレール継目の影響範囲は、今回の検討範囲においてはレール継目から概ね 4m 程度であることなどを明らかにした。

キーワード：PC まくらぎ、衝撃荷重、動的相互作用、数値解析、レール継目、軌道

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、レール継目部、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が、相対的にレール継目部および車輪フラットによる衝撃荷重の絶対値が大きい傾向にある。PC まくらぎの開発当初より車輪フラットが衝撃荷重の最も大きな要因であると認識され、車輪フラットに起因する衝撃荷重に関する現象解明は盛んに行われてきた¹⁾²⁾。実車走行試験や衝撃振動試験などから、想定しうる最大の車輪フラットに対してフルプレストレス状態を確保するためには、設計荷重として静的な輪重の 4 倍以上の荷重を考慮する必要があることなどが明らかにされている。これらの知見は、現在の PC まくらぎの設計法³⁾に取り入れられている。

一方で、レール継目部においては、大きな衝撃荷重が発生することは認識されていたが、木製の大盤まくらぎの敷設や PC まくらぎの敷設方法として掛け継ぎ法（PC まくらぎに直接衝撃荷重が作用するのを避けるため、まくらぎとまくらぎの中間に継目を設ける方法）などが普及していたこともあり、レール継目部の衝撃荷重が PC まくらぎに及ぼす影響については、これまであまり検討されてこなかったのが実状である。例えば、レール継目部に隣接した PC まくらぎではレール継目部の衝撃の影響を受けるが、線路方向への影響範囲やレール継目部のレールの凹凸形状の違いによる影響などについては未解明な部分が多い。しかしながら、近年の測定システムの高度化（多チャンネル同期測定、高周波サンプリング）や大規模計算機の普及による数値シミュレーション技術の向上などにより、現象解明のためのツールが整備されつつあるとともに、線区条件に応じた PC まくらぎの最

適設計法へのニーズも高まっている。

以上のような背景から、本研究では PC まくらぎの設計における決定要因となるレール継目部と車輪フラットのうち、現象解明が進んでいないレール継目部を対象とし、継目部に隣接する区間も含めて下記の各種検討を実施することとした。

- 1) 列車通過時におけるレール継目部ではない区間（以下、一般部という）およびレール継目部の PC まくらぎに発生する曲げモーメントの実測を行う。
- 2) 三次元数値解析モデルを構築し、車両および軌道の各種パラメータが一般部およびレール継目部の PC まくらぎの発生曲げモーメントに及ぼす影響を定量的に評価する。
- 3) 上記モデルにより、レール継目部の影響範囲を定量的に評価する。

2. 検討手法

2.1 測定手法

図-1 に対象とする軌道構造を示す。当該区間は、60kg レールの 25m 定尺区間で、25m おきにレール継目部が存在する。また、線路線形は緩和曲線である。PC まくらぎについては、一般部は JIS E1201 に規定された 6 号 PC まくらぎ（以下、6 号まくらぎ）、レール継目部は JIS E1201 に規定された継目用 PC まくらぎ（以下、継目用まくらぎ）で、まくらぎ敷設本数は 25m あたり 41 本である。列車通過時における PC まくらぎの発生曲げモーメントの測定は、継目用まくらぎとそれに隣接した 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 離れた位置の 2 本の 6 号まくらぎ（まくらぎ C,D）、さらにまくらぎ D から 12.5m 離れた継目用まくらぎについて実施した。なお、まくらぎ C,D をレール継目の影響を受けない一般部とみなした。列車は一般的な在来線の通勤車

*1 (公財)鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 博(工) (正会員)

*2 (公財)鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 工修 (正会員)

*3 西日本旅客鉄道株式会社 鉄道本部 施設部 保線課 経営学修士

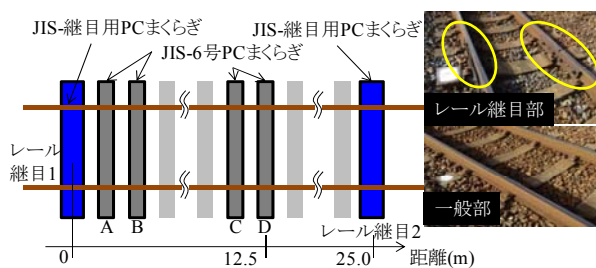


図-1 軌道構造の概要

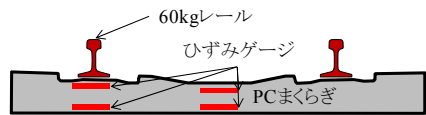


図-2 ひずみゲージ貼付位置

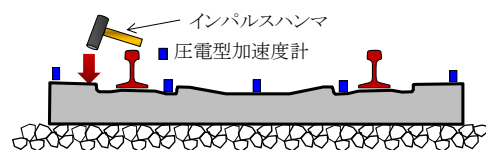


図-3 PC まくらぎの振動モードの測定方法

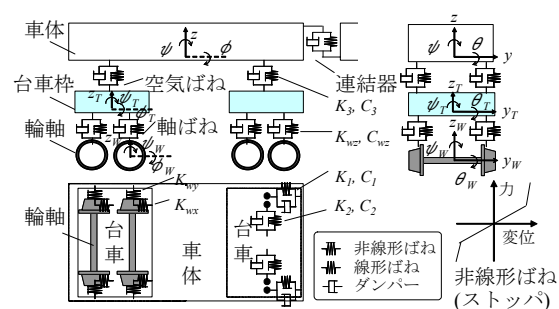
両（輪重 50kN 程度）である。

図-2 にひずみゲージ添付位置を示す。ひずみゲージは設計断面であるレール位置断面とまくらぎ中央断面の2断面にそれぞれ上縁および下縁に2枚貼付した。ここで得られるひずみから曲げモーメントに換算した。ひずみゲージは共和電業のKC線ひずみゲージを使用し、それらを日本ナショナルインスツルメンツ製のモジュールで集約し、LANケーブルを介してPCに収録した。データ収録プログラムはLabVIEWを用いてまくらぎの振動加速度をトリガーとして自動収録されるように構築した。サンプリング周波数は5kHz、列車速度はスピードガンにより測定した。

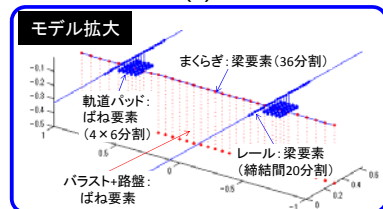
図-3にPCまくらぎの振動モードの測定方法を示す。圧電型加速度計（リオンPV-85）を5点配置し、インパルスハンマーによる加振後の自由振動応答を測定した。圧電型加速度計にて得られた応答はプリアンプ、A/D変換器を介してサンプリング周波数5kHzでノートPCに収録した。振動モードの同定手法は、ERA（Eigensystem Realization Algorithm）法⁴⁾を採用した。ERA法については、文献5等で理論的展開が示されているため、本研究では以下に簡単な説明を述べるに留める。本手法は、線形時不変系に基づいたシステムの特性行列を最小実現の考え方により固有振動数を同定する方法である。振動特性の精度を評価するための指標も、いくつか提案されており、本研究では可制御性に関するMAC（Modal Amplitude Coherence）⁵⁾を用いる。本研究では自由度40とし、MAC検定値0.99以上の条件を満たす場合にPCまくらぎのモード特性として同定した。

2.2 解析手法

図-4に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との動的相互作用解析プログラムDIASTARSIIIを用いた。車両については車体、

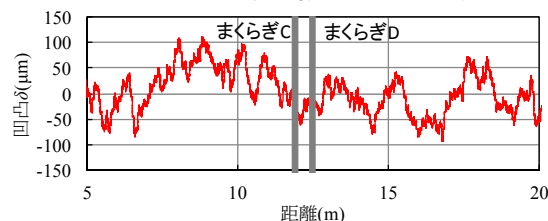


(a) 車両の力学モデル

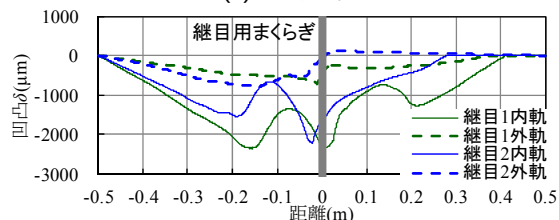


(b) 軌道の力学モデル

図-4 三次元数値解析モデルの概要



(a) 一般部



(b) レール継目部凹凸

図-5 走行面凹凸

台車、輪軸を剛体と仮定し、それらばねとダンパーでリンクした三次元力学モデルで、1車両あたり31自由度を有する。列車は、車両モデルの端部に設けたばねとダンパーで連結して構成する。軌道については有限要素法によりモデル化した。レールは梁要素でモデル化し、解析メッシュ刻みは1レール締結装置間当たり20分割である。PCまくらぎは梁要素でモデル化し、解析メッシュ刻みは36分割である。軌道パッドはばね要素とするが、軌道パッドの大きさに応じた荷重分散を考慮するため、ばね要素35要素でモデル化した。バラストおよび路盤は、両者を1つのばね要素に集約してモデル化した。解析モデル全体で節点数は8338節点、要素数は13012要素である。

数値解析はモーダル法により行った。解析におけるモード次数は5kHz程度までの振動を再現できる次数とし、解析時間刻みは0.1msecである。減衰定数は後述する固

有振動モードの同定におけるモード減衰比と時刻歴応答解析との整合性から 0.3 とした。

図-5 に解析に用いた走行面凹凸を示す。PC まくらぎが負担する荷重には静的な荷重だけではなく、車輪およびレールの凹凸などに起因して発生する動的な変動作用力の寄与も大きい。本研究ではそれらの影響を考慮するために、現地において長さ 1m の測定機を用いて測定したレール頭頂面凹凸と、既往の車輪凹凸分布に基づき復元した車輪踏面凹凸⁶⁾を車輪の走行面に与えた。なお、継目用まくらぎ前後の特に内軌側の走行面凹凸に見られる凸部は端部熱処理レールの熱処理部の影響であると考えられる。

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^{7), 8)}や公称値から定まる定数を用いることを基本とするが、後述する PC まくらぎの振動モードや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は公称値の 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、あくまで振動モード形および固有振動数、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、車体重量（乗車率で評価）、輪軸重量、走行面凹凸、軌道パッドのばね定数、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、同表の下線を引いた諸元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 PC まくらぎの振動モード

表-3 に PC まくらぎの各振動モード形における固有振動数の実測と解析の比較を示す。PC まくらぎは継目用まくらぎと 6 号まくらぎ D である。インパルスハンマー加振試験で得られた加速度自由振動応答より実測同定した固有振動数は、継目用まくらぎについては、上下方向の並進モードは 101Hz、回転モードは 74Hz、1 次モード（中央が振動モード形の腹）は 202Hz、2 次モード（中央が振動モード形の節、 $1/4L_P$ 位置が振動モード形の腹）は 534Hz、3 次モード（中央、 $1/4L_P$ 位置が振動モード形の腹）は 907Hz となった。一方、6 号まくらぎについては、並進モードは 92Hz、回転モードは 102Hz、1 次モードは

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	■6 号まくらぎ PC 鋼線： $\phi 2.9\text{mm}$ 3 本より線 12 本 長さ L_P ：2000mm, 底面幅 B_P ：240mm 高さ H_P ：170mm(レール下), 150mm(中央) コンクリートヤング係数 E_C ：33MPa ■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 ³ 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。

表-2 解析ケース

PC まくらぎ	6 号まくらぎ、継目用まくらぎ
列車速度 V	50～130km/h (80km/h が基本速度)
車体質量 M_C	乗車率 50%, 0%, 100% (60kg/人)
輪軸質量 M_W	M_{p1} 1.5 M_W , 2.0 M_W
走行面凹凸 δ	一般部凹凸, 継目凹凸 1, 継目凹凸 2, 凹凸無し
軌道パッドのばね定数 D_p	110, 220MN/m
PC まくらぎ支持ばね定数 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。

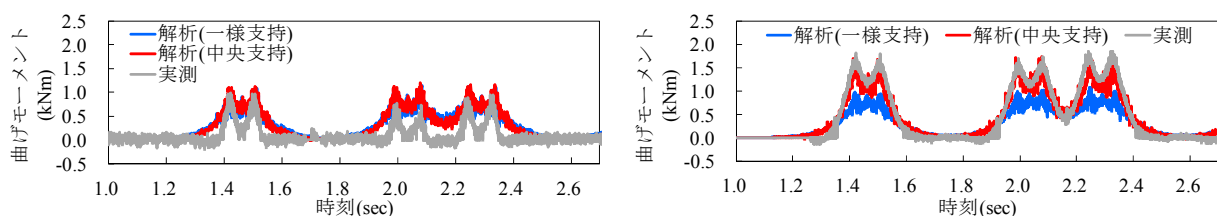
表-3 固有振動数の実測と解析の比較

まくらぎ種別	継目用まくらぎ		6 号まくらぎ	
モード	実測 (Hz)	解析 (Hz)	実測 (Hz)	解析 (Hz)
上下並進	101	105	92	86
回転	74	95	102	86
1 次モード	202	203	173	174
2 次モード	534	520	497	478
3 次モード	907	939	813	817

173Hz、2 次モードは 497Hz、3 次モードは 813Hz となり、6 号まくらぎよりも断面の大きな継目用まくらぎの方が、曲げ振動モードの固有振動数は大きくなる結果となった。実測と解析の固有振動数を比較すると、回転モードを除く振動モードについては実測と解析の固有振動数は概ね 5%程度の差異となった。回転モードについては改善の余地を残すが、概ね基本的な振動性状は再現できるものと判断し、以降の検討を進めることとした。

3.2 列車通過時の発生曲げモーメント

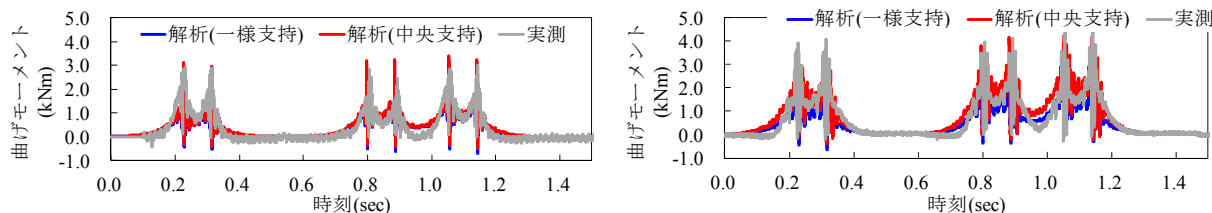
図-6 および図-7 に列車通過時における 6 号まくらぎ D および継目用まくらぎ（継目 1）の発生曲げモーメントの時刻歴波形に関する実測結果と解析結果の比較をそれぞれ示す。列車速度は 80km/h で、乗客の乗車率は 50%として解析した。同図に示すように、レール位置の正曲げモーメントよりもまくらぎ中央の負曲げモーメントの方が最大値が大きいことがわかる。



(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）

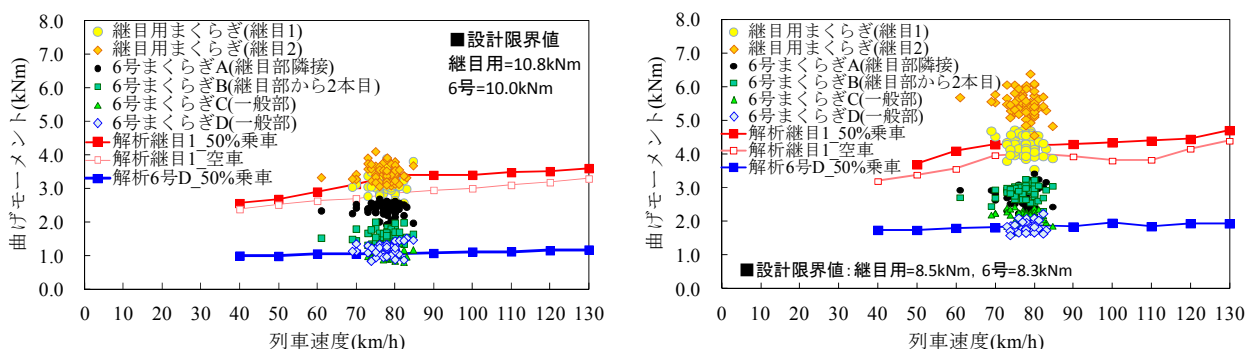
図-6 列車通過時における6号まくらぎDの発生曲げモーメントの実測と解析の比較



(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-7 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



(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-8 列車速度と継目用まくらぎおよび6号まくらぎの発生曲げモーメントの最大値の関係

実測と解析を比較すると、正曲げモーメントにおいては、数値解析における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(支持ばね定数 $0.5D_T$)の解析結果は実測結果の 1/2 程度のモーメントであった。一方、中央支持(支持ばね定数 $0.5D_T + D_T + 0.5D_T$)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ものと考えられる。また、荷重の分散性について、6号まくらぎDの正曲げモーメントについては実測に比べて解析の方が大きい傾向となったが、その他の応答については概ね実測と同様の分散性となった。

図-8 に列車速度と継目用まくらぎおよび6号まくらぎの発生曲げモーメントの最大値の関係を示す。

実測より、継目用まくらぎの発生曲げモーメントが最も大きく、一般部の6号まくらぎC,Dの最大で4倍程度の発生曲げモーメントが生じることがわかる。レール継目部1と継目部2を比較すると、両者は正曲げモーメントでは概ね同等であるが、負曲げモーメントについては継目部2の方が継目部1に比べて概ね1.5倍程度大きいことがわかる。この原因について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おり、継目部2の方がレール下のバラストの締固め状態が緩み、レール下の支持力が低下したため、負曲げモーメントが増大したものと推察される。一般部の6号まくらぎDと継目部に隣接した6号まくらぎAを比較すると、発生曲げモーメントが正曲げで最大2.7倍程度、負曲げで最大2.5倍程度、6号まくらぎAに隣接する6号まくらぎBでは発生曲げモーメントが正曲げで最大2.0倍程度、負曲げでは6号まくらぎAと同程度の最大2.5倍程度生じていた。このように同じ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ることがわかる。

数値解析より、曲げモーメントに関する40km/hに対する130km/hの動的応答倍率は、継目用まくらぎについては正曲げ1.4倍程度、負曲げ1.4倍程度、6号まくらぎDについては正曲げ1.2倍程度、負曲げでは1.1倍程度となり、継目用まくらぎの方が一般部における6号まくらぎDよりも動的応答倍率が大きいことがわかる。

なお、図-8には輪重80kN、割増係数2.0、分散係数0.5、許容引張応力0(継目用)、2(6号)N/mm²として許容応力度法で算出された設計限界値を示したが、設計荷重は実車両の軸重より大きく、さらに割増係数を2.0考慮しているため、当然のことながら発生曲げモーメントは設計限界値以内に収まった。

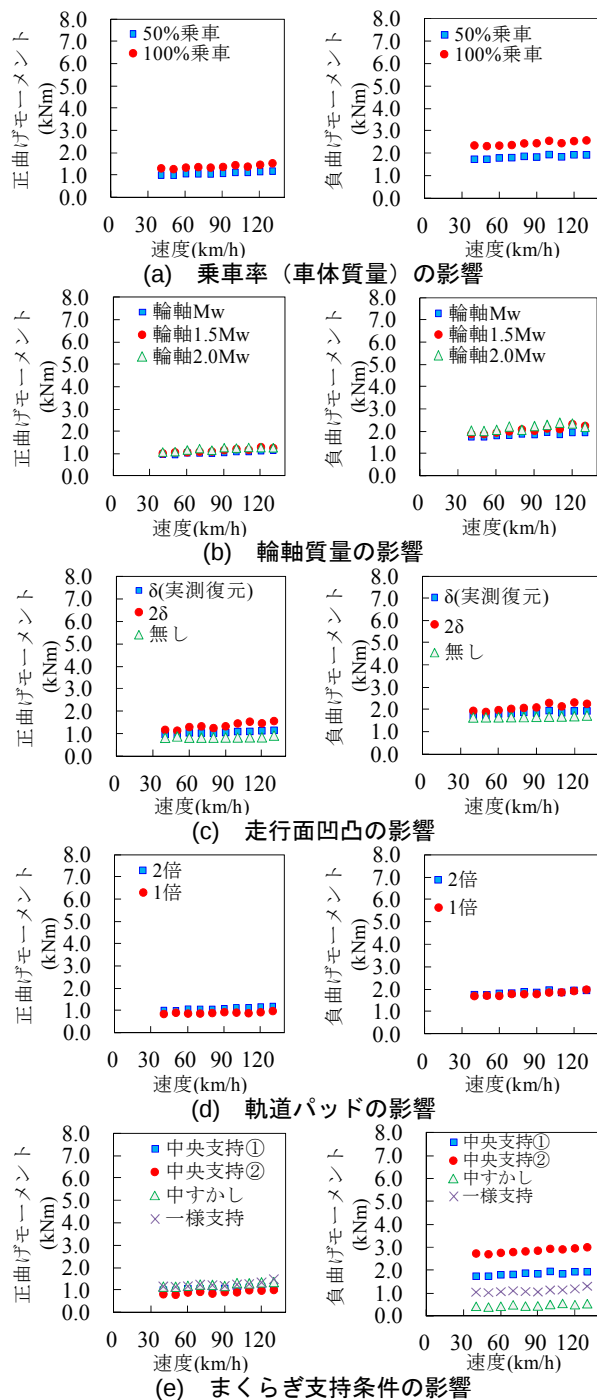


図-9 各種パラメータが6号まくらぎの発生曲げモーメントに及ぼす影響（解析結果）

3.3 各種パラメータの影響

図-9および図-10に各種パラメータが6号および継目用まくらぎの発生曲げモーメントに及ぼす影響をそれぞれ示す。両者のまくらぎに共通する傾向としては、乗車率や輪軸質量が増加すると発生曲げモーメントが増加すること、レール凹凸が増加すると発生曲げモーメントが増加すること、軌道パッドを低ばね定数化すると発生曲げモーメントが低下するが他のパラメータと比較して感度が鈍いことなどである。また、支持状態は特に負曲げモーメントに与える影響が大きく、6号まくらぎでは中すかしの条件に比べて中央支持では最大で6倍程度の曲げモーメントが生じること、同様に継目用まくらぎで

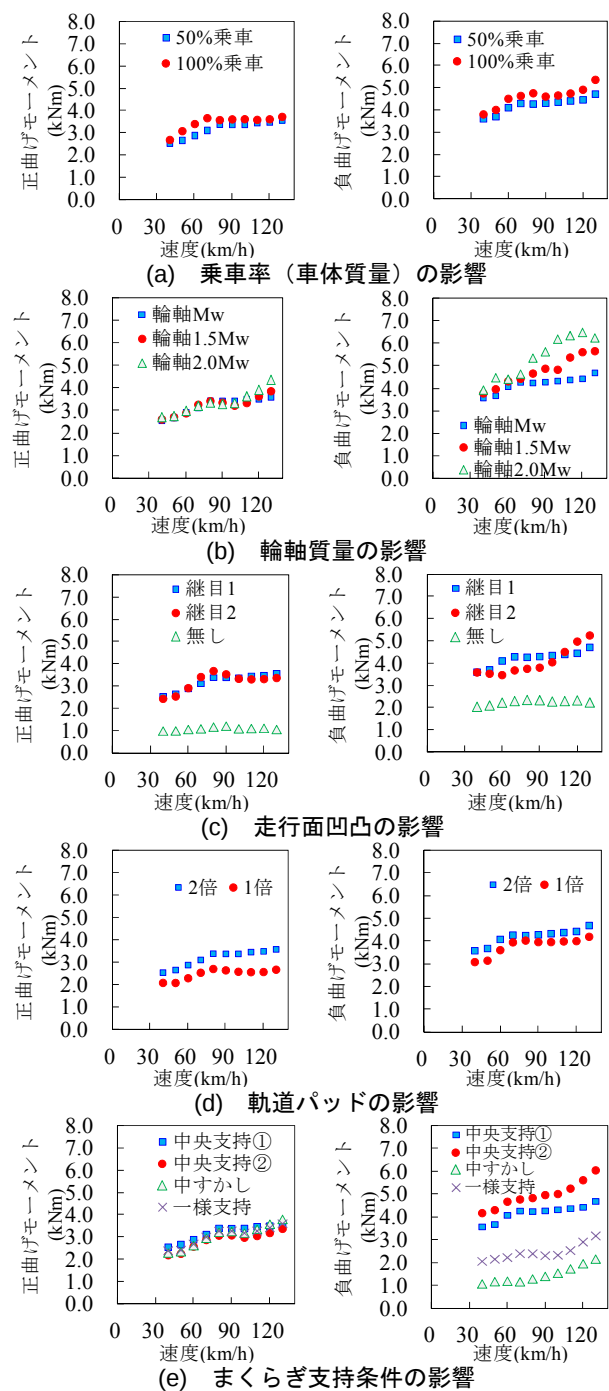


図-10 各種パラメータが継目用まくらぎの発生曲げモーメントに及ぼす影響（解析結果）

は、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が生じることがわかる。

6号まくらぎと継目用まくらぎに異なる傾向としては、まず継目用まくらぎで例えば正曲げモーメントで70~80km/h付近に見られる応答のピークが挙げられる。走行車両は両者で同じであることや表-3に示した各振動モード形における固有振動数は両者で大きく異ならないため、両者のまくらぎに動的応答性状に違いを生じさせる要因は、走行面の凹凸であると考えられる。具体的には、継目用まくらぎの上下並進モードの固有振動数 f を表-3の結果より105Hz、レールの熱処理部の凸部の長さ L を190mmとすると、共振速度 V は f と L を乗じ

て 20m/s (=72km/h) となるため、70~80km/h で応答のピークが生じたものと考えられる。

40km/h に対する 130km/h における動的応答倍率については、6号まくらぎでは 1.1~1.3 倍程度の応答倍率、継目用まくらぎでは、曲げモーメントの絶対値は小さいが、中すかしの条件における継目用まくらぎの負曲げモーメントについては 2.0 倍程度となった。

3.4 レール継目部の影響範囲

図-11 にレール継目部の影響範囲を示す。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、レール継目部の影響範囲について、列車速度、輪軸質量および継目の凹凸による違いは見られず、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

本研究で得られた知見を以下に整理する。

- 1) 列車通過時における曲げモーメントの実測より、継目用まくらぎに隣接した 6号まくらぎは、一般部の 6号まくらぎに比べて正曲げモーメントで 2.7 倍程度、負曲げモーメントで 2.5 倍程度となった。さらに 1本離れた 6号まくらぎでは、同様に正曲げモーメントで最大 2.0 倍程度、負曲げモーメントで最大 2.5 倍程度となった。このように同じ 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ることがわかった。
- 2) 数値解析により、40km/h に対する 130km/h における動的応答倍率は、6号まくらぎについては最大で 1.3 倍程度、継目用まくらぎについては最大で 2 倍程度となることがわかった。
- 3) 発生曲げモーメントに対して最も影響の大きいパラメータはまくらぎの支持状態であった。6号まくらぎについては中すかしの支持条件に対して中央支持では最大 6 倍程度、継目用まくらぎについては中すかしの支持条件に対して中央支持では 4 倍程度の負曲げモーメントとなった。
- 4) 今回の検討の範囲では、レール継目の影響を受ける範囲は、レール継目から概ね 4m 程度となった。レール継目から 4m 以上離れれば、発生曲げモーメントについてはレール継目の影響を受けない一般部

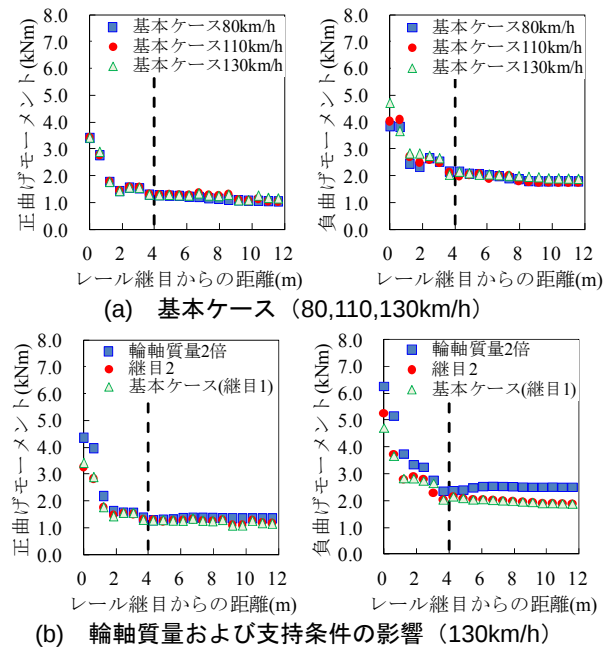


図-11 レール継目部の影響範囲（解析結果）

と定義することができる。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してきたい。

今後はこれらの知見をPCまくらぎの設計に反映させ、レール継目部と車輪フラットによる衝撃荷重に対応した最適設計法を構築していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 宮本俊充, 渡辺偕年: 線路 - 軌道の設計・管理-, 山海堂, pp.90-131, 1980
- 2) 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
- 3) 曾我部正道, 渡辺勉, 徳永宗正, 井上寛美: JIS 規格 PC まくらぎの入線可能輪重の算定, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.343-348, 2014.7
- 4) 松岡弘大, 貝戸清之, 石井秀和: 供用後 86 年が経過した 24 連鋼鉄道橋の振動特性とその変動要因に関する統計的考察, 土木学会論文集 F4, Vol.68, No.3, pp.157-174, 2012.10
- 5) 長山智則, 阿部雅人, 藤野陽三, 池田憲二: 常時微動計測に基づく非比例減衰系の非反復構造逆解析と長大吊橋の動特性の理解, 土木学会論文集 No.745 /I-65, 155-169, 2003.10
- 6) 北川敏樹, 村田香, 長倉清: 在来鉄道における車輪・レールの凹凸, J-rail2007, pp.515-518, 2007.12
- 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), 丸善, 2004