

振動低減のための PC まくらぎの形状と構造に関する有限要素解析

(財)鉄道総合技術研究所 正会員 ○相川 明  
 (財)鉄道総合技術研究所 正会員 浦川 文寛  
 新潟大学工学部建設学科 正会員 阿部 和久  
 (財)鉄道総合技術研究所 正会員 名村 明

**1. 目的** PC まくらぎは 1kHz 以下の周波数帯で複数の固有モードを持ち<sup>1),2)</sup>, 実軌道でもまくらぎの固有モードに依存する動的荷重の存在が確認されている<sup>3)</sup>. しかしながら, PC まくらぎとバラスト間の動荷重伝播特性, および, PC まくらぎの形状や構造の影響による動的挙動の差異については十分に検討されていない. 本研究では, 在来線 PC まくらぎに関するインパルス加振試験をもとに, 1kHz までの固有モードを求め, 詳細な有限要素モデルを用いてアクセラランスを再現するとともに, バラスト層の動ばね特性と減衰特性を同定した. さらに, PC まくらぎの形状因子および構造因子が軌道の動特性に与える影響を解析的に求め, 軌道劣化を抑制する方向性に関して数例を比較した.

**2. バラスト-まくらぎインパルス加振試験** まず, 自由支持状態の PC まくらぎ(3PR)のインパルス加振試験より固有モードを求めた. また, 詳細構造を模擬した有限要素モデルにより, 周波数の誤差 5%以内で固有モード伝達関数と固有モードを再現した. つぎに, 道床バラスト層上の PC まくらぎ(図 1)に関し, インパルス加振試験により, 1kHz までの PC まくらぎの固有モードを含むバラストの動特性を求めた. さらに, 図 2 に示すように, PC まくらぎ単体モデルをベースに, バラスト層を 3 軸方向のばね要素と減衰要素で表現し, 固有モードとアクセラランスの再現性に着目して, PC まくらぎとバラスト間に作用する動的なばね特性と減衰特性を定量的に求めた. なお, 実験結果より, バラスト層は高周波領域ほど極端に減衰が大きくなる周波数依存性が確認されたため, 200Hz を境界にして, 低周波域, 高周波域にわけて減衰特性を同定した. これらのパラメータを用いて, バラスト層上の PC まくらぎの固有モードを再現したところ, いずれの固有モードに関しても周波数の再現誤差±5%以内となる解析結果が得られた. 本パラメータによる, FEM 解析結果の例として, 鉛直加振時の鉛直方向アクセラランス(加速度/加振力)を図 3 に示す. 図より, 全周波数域で振動特性を良好に再現できていることがわかる.

**3. まくらぎの構造変更による振動加速度への影響評価** PC まくらぎの固有モードに着目して, まくらぎ形状と構造の変更による振動加速度の低減効果を FEM 解析により検討した. 振動を減少させる一般的な方法として, 構造の変更により, 問題となる周波数帯から固有振動数をずらす方法がある. 軌道劣化に関して, 問題となる周波数帯がどの辺りにあるかは十分には解明されていないが, いずれも数百 Hz から千数百 Hz の周波

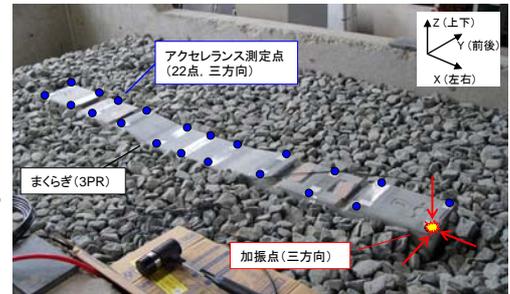


図1 インパルス加振試験

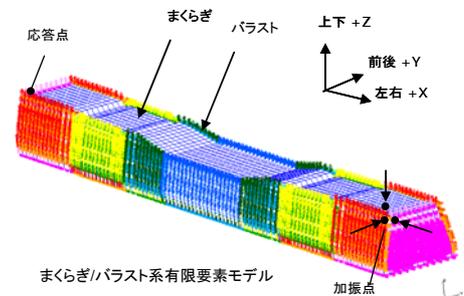
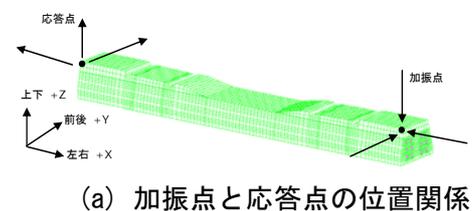
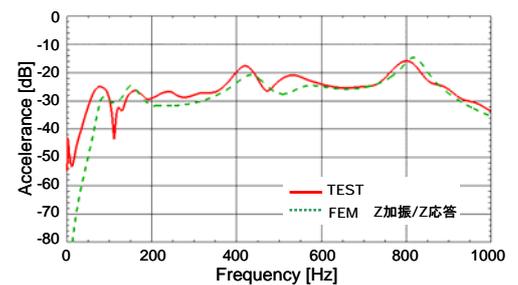


図2 まくらぎ-バラスト有限要素モデル



(a) 加振点と応答点の位置関係



(b) 鉛直方向アクセラランス

図3 鉛直方向アクセラランスの比較

キーワード バラスト, PC まくらぎ, インパルス加振試験, 実験モーダル解析, モデルコリレーション

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 (財)鉄道総合技術研究所 TEL 042-573-7291 E-mail: aikawa@rtri.or.jp

数に存在すると想定される。すなわち、PCまくらぎの固有振動数を高周波側にずらし、この周波数帯に含まれる固有モードの数を減らし、この周波数帯での応答加速度を低減させ、道床振動加速度の抑制効果を期待するものである。また、固有モード以外の周波数では、慣性力と復元力の差分で振動に抵抗するため、PCまくらぎの剛性を増やすことも有効な方法と思われる。

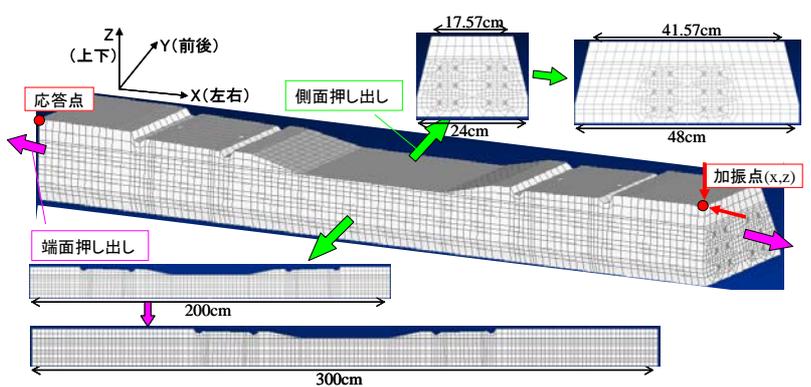


図4 PCまくらぎモデルの形状特性の変更

そこで、PCまくらぎの固有振動数上昇、振動加速度低減を目標に、PCまくらぎの形状と構造の変更によるパラメータスタディを行った。基本モデルを図4に示す。本モデルの長さ、幅、厚さ、密度、ヤング率をパラメトリックに変えて1kHzまでの固有モードとアクセラランスを比較した。解析結果より、まくらぎ長延伸と密度増加については、全体としてアクセラランスのピーク値が減少するものの、高次の固有モードが低い周波数領域に移行し、振動のピーク数は増える結果となり、構造変更の有効性は認められなかった。

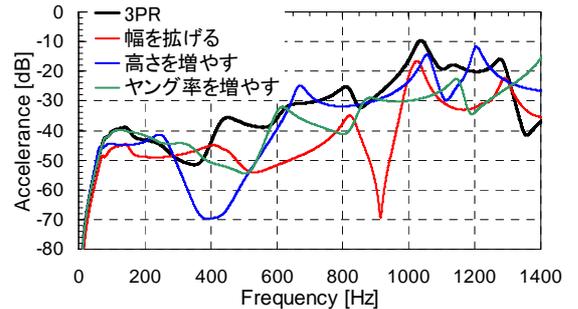


図5 アクセラランス低減効果(X 応答/X 加振)

一方、振動低減の効果が期待できる解析例を図5、図6に示す。図は、X方向(まくらぎ長手方向)とZ方向(鉛直方向)のアクセラランスである。図には、基本モデル、①まくらぎ幅を48cmに拡幅、②まくらぎ厚を10cm増加、③ヤング率を2倍に増加のそれぞれの構造変更による結果を示す。図より、①まくらぎ幅の拡幅では400Hzと900Hz近傍に固有振動数が集中するが、広い周波数域でアクセラランスが低減した。また、②まくらぎ厚の増加は、質量と剛性の増加により応答低減を図るものであるが、およそまくらぎ厚さの2乗に比例して上下曲げモード剛性も増大するので、固有振動数の上昇も期待できる。③ヤング率増加に関しては、まくらぎの(剛体モードを除く)全てのモードに対して剛性が増大し、固有振動数も高周波側に移行する。この変更は、まくらぎに高剛性材料を用いた場合や、金属等でまくらぎを補強した場合に相当する。図より、いずれの解析結果も、3PRまくらぎと比較して、全ての固有モードで固有振動数が1.3~1.4倍に上昇し、アクセラランスについても全体的に減少する傾向が得られた。

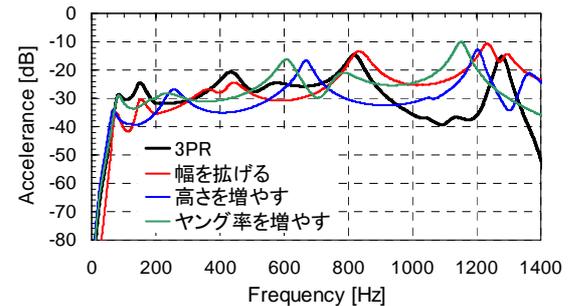


図6 アクセラランス低減効果(Z 応答/Z 加振)

**4. まとめ** 本研究では、PCまくらぎに関するインパルス加振試験に基づいて固有モードを特定し、固有モードとアクセラランスを再現しうる詳細な有限要素モデルを構築し、バラスト層のバネ特性と減衰特性を同定した。さらに、PCまくらぎの形状因子と構造因子が軌道動特性に与える影響を解析的に求め、PCまくらぎの構造変更による振動低減効果を、PCまくらぎの固有振動数とアクセラランスを評価軸として比較した。本解析は、加振点がまくらぎ端部であり、必ずしも列車の走行を模擬したものではないが、数例のPCまくらぎの構造変更の効果を比べたところ、①まくらぎ幅の拡幅、②まくらぎ厚さ増加、③まくらぎ剛性増加について、振動加速度の低減が期待できるとの方向性が得られた。今後は、軌きょう構造、まくらぎ下面の荷重分布、バラスト粒状性なども考慮してモデルの精緻化をはかり、各種の施策の評価に資することを目指すものである。

**参考文献** 1) S. Kaewunruen & A. M. Remennikov: Dynamic Effect on Vibration Signatures of Cracks in Railway Prestressed Concrete Sleepers, *Advanced Materials Research*, Vol.41-42, pp.233-239, 2008. 2) S. Kaewunruen & A. M. Remennikov: Investigation of free vibrations of voided concrete sleepers in railway track system, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, Vol.221, No.4, pp.495-507, 2007. 3) 浦川文寛, 相川明, 名村明: まくらぎの変形モードに着目した道床への荷重伝播特性, 鉄道総研報告, Vol.24, No.4, pp.17-22, 2010.