

道床の振動低減に効果的なまくらぎ構造の提案

鉄道力学研究部 軌道力学
 研究員 浦川 文寛

1. はじめに

有道床軌道では、道床部の塑性沈下に対する保守コストがしばしば問題となっている。まくらぎ交換の際に、同種のまくらぎではなく、道床の沈下抑制に効果的なまくらぎを敷設すれば、以降の沈下に対する保守コストを削減することができる。

列車がレール継目等の凹凸部を高速で通過する際には、軸距や台車間隔に起因する数Hzから数十

Hzオーダーの低い周波数の荷重と、数百Hzオーダーの高周波の衝撃荷重による振動加速度がまくらぎ下面を介して道床部に伝わる。道床の塑性沈下は従来から図1のように、この低周波荷重による側方への分力と、バラストの高周波振動によるバラスト粒子同士の摩擦の低下により、バラストがまくらぎ側面外側へ流動することで進むと考えられており、両者を低減させることにより、塑性沈下抑制が期待できる。本発表は、後者のバラストの高周波振動低減に効果的なまくらぎ構造を、有限要素解析により検討するものである。なお後述するモデルでは、道床を、質量を持たないばね要素のみで表現しているため、道床振動加速度を直接算出することはできないが、文献(1)で行った列車走行時の測定結果より、道床振動加速度とまくらぎ振動に相関性が見られることから、道床振動加速度を本解析のまくらぎ振動加速度より評価する。

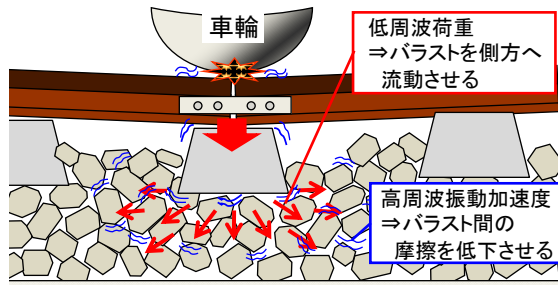


図1 道床の沈下進み

2. 解析モデル

図2に示すモデル (BASEモデル) は、実験とのコリレーションにより、1 kHz以下の3PRまくらぎの固有値、応答のピーク値が実現象と一致するよう、解析要素の選択、メッシュサイズ、要素パラメータを調整したものである。本モデルで

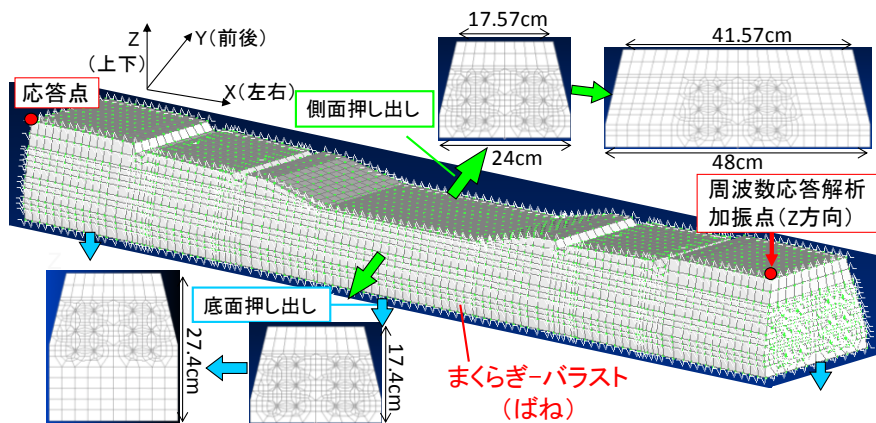


図2 まくらぎの解析モデル概要と構造変更の方法

は、まくらぎのコンクリートとPC鋼線にはソリッド要素を用い、バラストとの接触部は、底面、側面、端面にそれぞれ3方向のばね要素を並列に配置している。表1にソリッド要素のパラメータを、表2にまくらぎとバラストとの接触ばねの全体剛性を示す。ばね要素の減衰については、周波数特性を含む値 (図3に、下面法線方向の減衰を示す) を用い

表1 ソリッド要素パラメータ

材質	コンクリート	鋼材
縦弾性率 E [GPa]	45	210
ポアソン比 ν	0.167	0.29
密度 ρ [kg/m^3]	2350	7820
構造減衰係数 ζ	0.01	0.01

た。また、今回は簡単な構造変更例として、BASEモデルに対し、図2のように、まくらぎの底面幅、端面高さをそれぞれ、24 cmから48 cm、17.4 cmから27.4 cmに増加させたモデルと、慣性による加速度低減を期待し、まくらぎの質量を増加させたモデル（コンクリートの密度を2350 kg/m³から4850 kg/m³に変更）で解析を行う。

表2 接触ばね剛性

面	軸	剛性 [MN/m]
下面	X	35.0
	Y	35.0
	Z	28.0
側面	X	5.0
	Y	18.0
	Z	5.0
端面	X	2.1
	Y	0.6
	Z	0.6

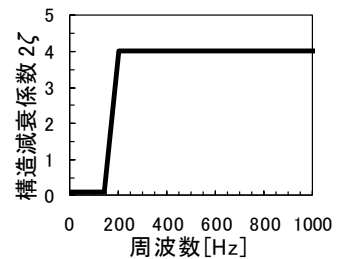


図3 まくらぎ下面の法線方向の構造減衰

3. まくらぎの周波数特性に関する解析

周波数別の振動低減効果を詳細に分析するため、固有値解析，周波数応答解析を実施した。

3.1 固有値解析（固有モードの変化）

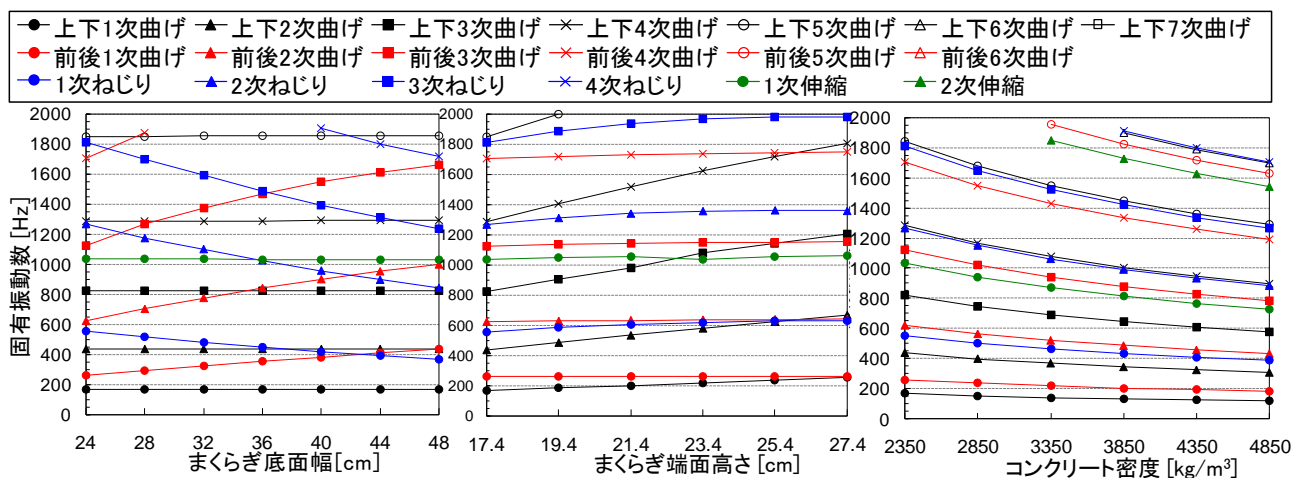
固有値解析より、50～100 Hzに6自由度の剛体振動モードが、100 Hzから1 kHzの間に、まくらぎに曲げ等が発生する6個の高次のモードが存在することがわかった。

図4(a)~(c)にまくらぎの幅、高さ、密度の変化に対する100 Hz以上のモード毎の固有振動数の変化を示す。図4(a)より、まくらぎ幅を広げた場合、ねじりのモードの固有振動数が低下し、上下曲げ、伸縮では固有振動数は変化せず、前後曲げでは固有振動数は上昇する。1 kHz以下でのモードの数が7個に増え、まくらぎ幅36 cm以上では400 Hzと900 Hz付近に集中する。図4(b)より、まくらぎ高さを増加させた場合、上下曲げモードの固有振動数が増加し、1 kHz以下の固有モードの数が5個に減る。図4(c)より、まくらぎ密度を増加させた場合、質量が一樣に増加するため、全体的に固有振動数が低下し、1 kHz以下でのモードの数は10個に増える。

3.2 周波数応答解析

図2のように、まくらぎ上面端部を加振点、反対の角を応答点とし、Z方向に加振した場合での周波数応答解析を行った。加振点をまくらぎ端部の角としたのは、この位置は全モードの振動の腹であり、単一方向加振でも複数のモードの振動を励起できるためである。

図5(a)~(c)に、まくらぎの幅、高さ、密度を変更した際のZ方向のアクセラランス（加速度／加振力）を示す。Z方向加振時では80～100Hzの剛体モードと上下曲げモードが卓越する。3種の構造変更ではいずれも剛体モードのピークが低下している。これは、1質点系の振動加速度は一般



(a) まくらぎ幅変更 (b) まくらぎ高さ変更 (c) まくらぎ密度(質量)変更

図4 まくらぎ構造変更による固有振動数の変化

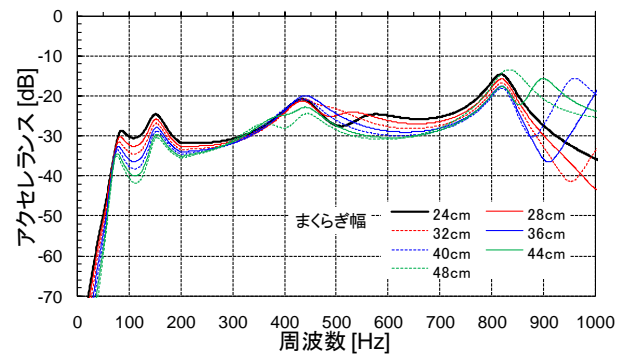
に質量の増加により減少する。ここでは3種の構造変更に伴う質量の増加により、まくらぎが変形しない剛体モードの振動が減少したためと思われる。まくらぎ幅を広げた場合は、図4(a)のとおり、上下曲げの固有振動数が変化しないため、スペクトルはあまり変わらないが、広い周波数帯でアクセラランスの低下が見られ、800 Hz以下では500 Hz近傍を除きBASEモデル（まくらぎ幅24 cm）以下となった（図5(a)）。まくらぎを高くした場合（図5(b)）、上下曲げの固有振動数の上昇により、1 kHz以下のピークが減少し、アクセラランスが低下した。図5(c)より、質量の増加とともに、共振のピークが下がるため、アクセラランスが下がる帯域は多いが、固有振動数の低下により、1 kHz以下の固有モードの数が増える。また、上下1次曲げの固有振動数が140 Hzを下回るため、バラストの減衰が弱まり、上下1次曲げのピークが約5 dB上昇した。

4. 列車通過時まくらぎ応答解析

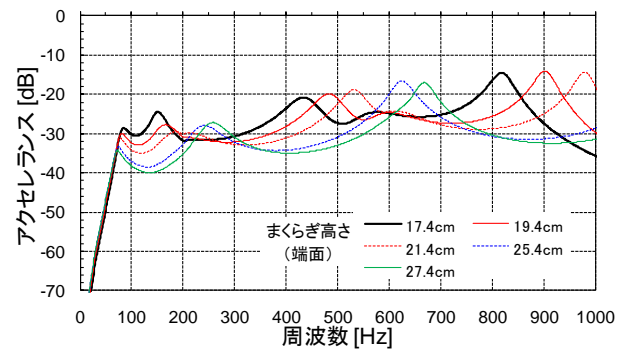
列車の先頭台車通過時の、レール圧力実測値（図6）を、まくらぎ上面の左右レール位置に作用させた場合の応答解析を行った。まくらぎの構造を変えればレール圧力も変化するはずであるが、ここでは測定値をそのまま用いた。

図7(a)~(d)はそれぞれ、BASEモデル、まくらぎ底面幅を48 cm、端面高さを27.4 cm、質量を319 kg（密度4850 kg/m³）としたモデルでの解析結果で、まくらぎ下面左右レール下、左右端部の加速度の時刻歴応答、およびその振幅スペクトルである。BASEモデルでの時刻歴応答の最大値は430 m/s²で、スペクトルより、100 Hz近傍に鋭いピークがあり、振動の大部分がこの周波数の応答であることがわかる。なお、これは剛体振動モードによる共振である。100 Hz以上の高い周波数では、400 Hz、800 Hz

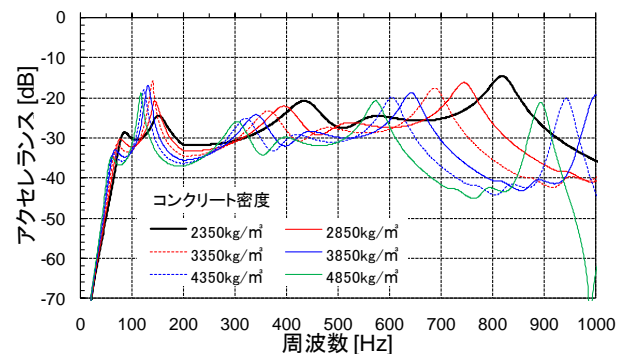
に上下1次、2次曲げモードの2つの共振ピークが現れた。表3に、各ケースでの、加速度最大値、100 Hzの振動のピーク値、100 Hzから1000Hzの高周波でのピークの数をもとめる。構造変更により加速度最大値は下がり、まくらぎ幅を48 cmとした場合で最も小さくなった。質量を319 kgとした場合、100 Hzのピークが最も小さくなるものの、加速度最大値の低減が最も少なかった。これは、100 Hz以上でのピークの数が増え、高周波の応答が増加したためと思われる。端面高さを27.4 cmとした場合では、100 Hzのピークが他と比べて大きいものの、100 Hz以上でのピークの



(a) まくらぎ幅変更



(b) まくらぎ高さ変更



(c) まくらぎ密度（質量）変更

図5 Z方向アクセラランスの変化

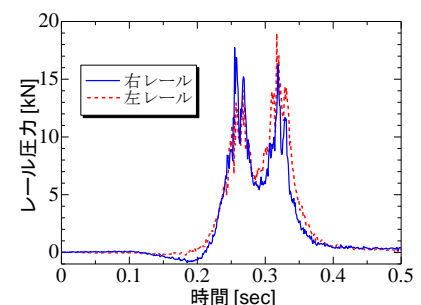


図6 先頭台車通過時レール圧力

数が1つに減ることで、高周波の応答が下がり、加速度最大値がまくらぎの質量を319 kgとした場合よりも小さくなった。

5. まとめ

列車走行時のまくらぎの振動加速度の応答は、100 Hz付近の、剛体振動モードの共振の影響が最も大きく、これに100 Hz以上の変形を伴う高次モードの共振ピークが重なって現れることがわかった。また、3種の構造変更により、まくらぎの質量を増やすことで、100 Hz付近の剛体振動を低減させることができた。ところが、単純に質量（密度）を増やした場合、図5(c)のように100 Hz以上の高次モードの共振のピーク値が下がるものの、ピークの数が増えるため、100 Hz以上の周波数帯での応答が上昇し、他の2種の構造変更より振動低減効果は少ない結果となった。100 Hz以上の周波数帯で振動を低減させるには、まくらぎ幅や高さを増やすなど、曲げに対する剛性を高め、固有振動数を高周波側にずらす構造が望ましい。

以上より、まくらぎの振動特性は100 Hz付近とそれ以上の周波数帯で異なるため、振動対策もこの2つの周波数帯で変えるべきである。100 Hz付近ではまくらぎ質量を増やし、100 Hz以上では、曲げに対する剛性を高める等、固有振動数を高周波側にずらすと良い。振動低減に効果的なまくらぎとはこれら2つを両立させるもので、今回ではまくらぎ幅を拡張した場合で最も良い効果が得られた。

参考文献

1) 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. 20, No. 4, pp. 17-22, 2010

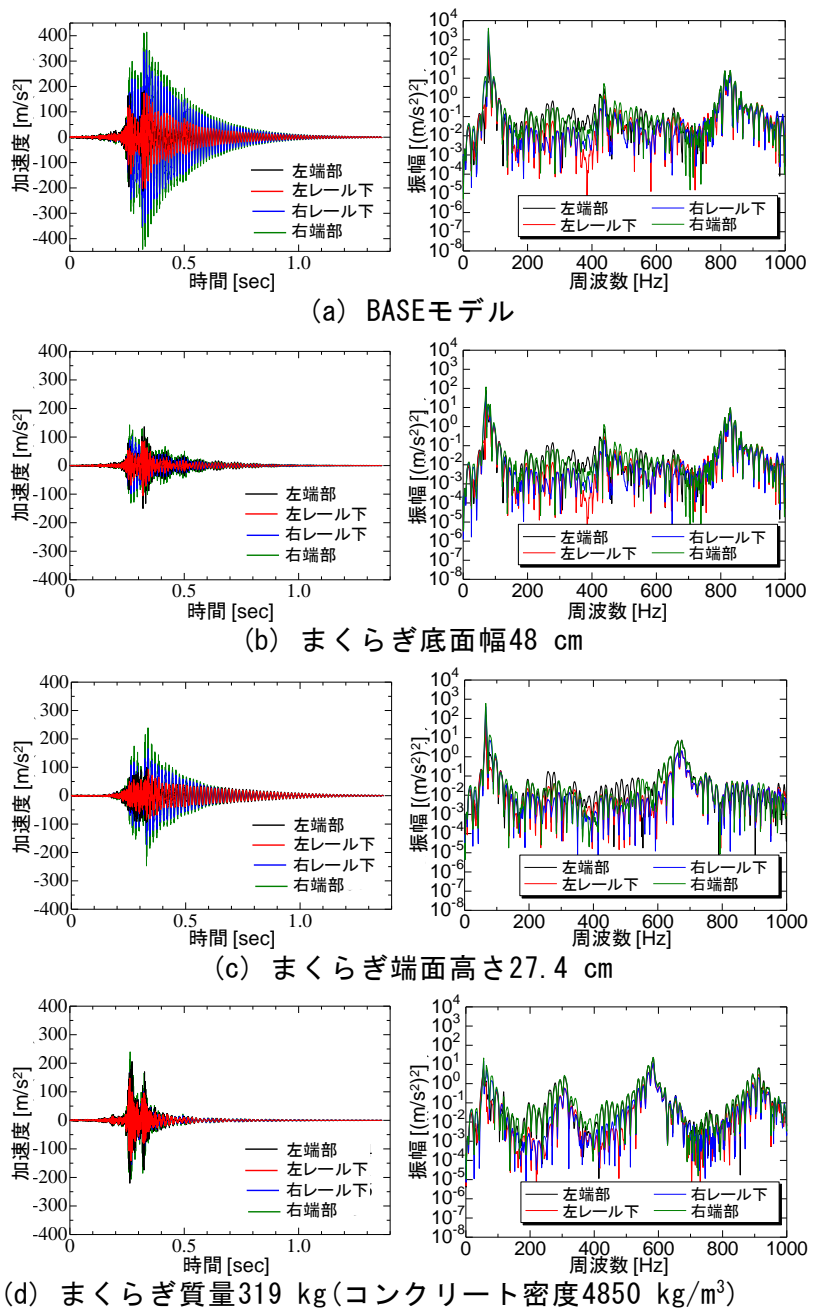


図7 過渡応答解析結果(左:時刻歴, 右:振幅スペクトル)

表3 列車通過時のまくらぎ応答特性

モデル	加速度 最大値 [m/s ²]	100 Hz ピーク値 [(m/s ²) ²]	100~ 1000Hzの ピークの数
BASEモデル	430	4050	2
まくらぎ底面幅48 cm	145	119	2
まくらぎ端面高さ27.4 cm	235	604	1
まくらぎ質量319 kg	250	22	3