

軌道構造に着目した波状摩耗振動特性に関する構造解析

東京地下鉄株式会社 正会員 ○劔持 尚樹

渡邊 真一

河野 陽介

日鉄住金レールウェイテクノス株式会社 久保 奈帆美

1. はじめに

東京地下鉄(以下、弊社とする。)では、195.1キロの営業線を維持管理しており、路線延長の約16%がR300以下の急曲線である。急曲線区間では、内軌レールに波状摩耗が発生し、列車走行時の騒音や振動の原因となる。

これまでの検討では、内軌レールの波状摩耗発生メカニズムを調査するため、発生状況が異なる2種類の軌道構造について、実体を調査した。その結果、列車通過時のレール左右振動特性とレール小返り特性について、軌道構造により差があることがわかった。¹⁾

今回の検討では、軌道構造によるレール左右振動特性の違いをシミュレーションで検証するため、有限要素モデルを作成した。作成したモデルで構造解析をし、左右振動特性を検証したのでその結果を報告する。

2. 対象の軌道構造と有限要素モデル

(1) 軌道構造

実体調査の対象とした軌道構造は、二重弾性締結装置(以下、PL5という。)構造と、レール下及びバタイプレート下に低弾性材を挿入し構成した多重弾性締結装置(以下、KD2という。)構造である。いずれもRC構造短まくらぎで支持、コンクリート道床であり、各軌道構造の写真を図-1に示す。



図-1 各軌道構造の写真

(2) 有限要素モデル

PL5とKD2の構造やバネ特性を考慮し、有限要素モデルを作成した。モデルの各部材の弾性係数を表-1に示す。バネクリップ及びゴムパッドの弾性係数は、実部材の材料物性と形状より算出した。モデルの長手方向の長さは、横圧荷重時の影響の範囲を考慮して、まくらぎ10本分(5650mm)とした。また、道床と締結装置とを固定する締結ボルトは、その機能を考慮して、締結力の設計値である5kNの荷重に置き換えた。

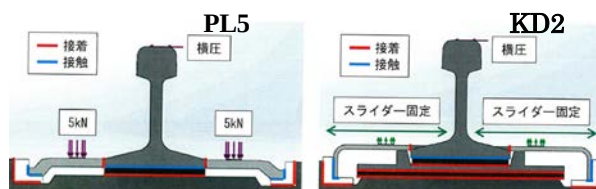


図-2 接触条件

3. 解析条件と結果

(1) 静解析

モデルの検証を目的として、静解析を実施した。荷重条件は締結装置間中央のレール頭頂部中心に、10kNの左右方向荷重とした。接触条件は実部材の接触状況に合うように設定した。(図-2)

レール頭部及び底部の変位量の静解析結果と、列車が通過した際の変位量¹⁾(以下、実験値という。)を表-2に示す。

表-1 構造諸元表

締結装置	バネ	バネ値[MN/m]	変位量計算値
KD2	上下	総合	36.8
		バネクリップ	9.09
		パッド上部	70
		パッド下部	50
	左右	総合	34.4
		バネクリップ	27.40
PL5	上下	パッド上部	7
		パッド下部	5
	左右	総合	51.22
		バネクリップ	0.61
		パッド	50
	左右	総合	62.7
		バネクリップ	57.7
		パッド	5

キーワード 左右振動加速度, 弾性係数, 固有値

連絡先 〒110-8614 東京都台東区東上野 3-19-6 東京地下鉄(株) TEL 03-3837-8084 FAX 03-3837-7176

す。実験値とシミュレーションを比較すると、値の大きさは概ね一致しており、頭部と底部の変位量の大小関係の傾向も一致している。

(2) 固有値解析結果

モデルの振動特性を検証するため、固有値解析を実施した。接触条件は、部材間のすべりを考慮しないものとし、全て接着状態とした。

解析で得た固有モードのうち、レールの左右振動に相当するモードを抽出した。一例を図-3に示す。各モード形状の節の数と固有値の関係を調べたものを図-4に示す。波長が長く、すなわち節の数が減少するにつれて、固有値は小さくなり、その値は一定の下限值に漸近する。下限値は軌道構造により異なり、KD2は約130Hz、PL5は約150Hzである。節の数が0の場合は剛体モードであり、固有値が下限値より低い固有値のモードは存在しない。一方、締結装置位置が節となる節の数が10のモードの場合には、固有値は軌道構造に関わらず約500Hzに収束する。次に、解析結果と比較するため、KD2とPL5について予備調査として実施した打撃試験の結果を用いた。図-5は各軌道構造のアクセラランスと周波数の関係性を示す。KD2は約130Hz付近から伝達度がピークとなり、以降の周波数では概ね安定している。PL5は約150Hz付近からピークとなり、KD2同様に安定している。

4. 結果に対する考察

打撃試験では低い周波数帯に応答しない領域があり、固有値解析ではモード固有値に下限があり、それより低い周波数をもたない。また、その値はKD2とPL5で差があり、打撃試験・固有値解析ともにほぼ同じ値を示した。0~150Hzの低い周波数領域では、軌道構造により振動のしやすさに差があることがわかった。また、固有値解析では約500Hz、打撃試験では約450Hzの振動モードは、その固有値が軌道構造によらず、レール剛性が支配的なモードであると考えられる。

5. まとめと今後の展望

今回の検討で、左右振動特性の異なる二つの軌道構造を再現したモデルを作成し、固有値について検証を実施した。固有値と伝達度を比較することで、低周波数帯の左右振動特性の再現性を確認している。列車通過時の左右振動加速度の特性差については、軌道構造内の部材の変位とバネの減衰特性の影響を含めて検討したい。¹⁾

今回の検討で対象としている波状摩耗は、コンクリート道床直結軌道での発生事例を検証対象としている。しかし、同様の波状摩耗は軌道構造が異なる場合にも発生しているため、締結装置だけでなく、弾性直結軌道の特性も含めた調査・検討を実施し、波状摩耗抑制に努めたい。²⁾

表-2 レール小返り実測値と静解析結果

締結装置	過重負荷位置	シミュレーション結果		実験値	
		頭部	底部	頭部	底部
		【mm/kN】			
KD2	締結装置間中央	0.0523	0.0167	0.0596	0.0143
PL5		0.0567	0.0069	0.0511	0.0031

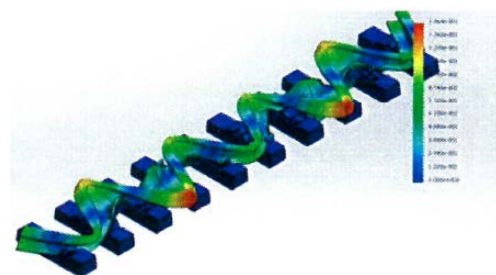


図-3 モード設定 (KD2 節点数=10)

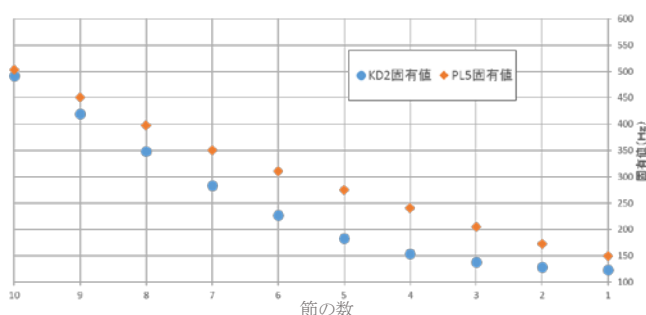


図-4 固有値解析結果

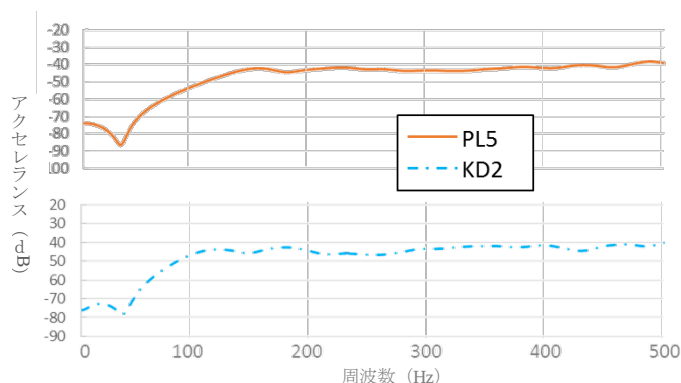


図-5 打撃試験結果

参考文献

- 1) 大澤, 河野: 軌道構造に着目した内軌側波状摩耗特性に関する一考察 土木学会第71回年次学術講演会(2017. 9)
- 2) 泊, 鈴木: 地下鉄の曲線部における波状摩耗の対策に関する一考察 土木学会第60回年次学術講演会(2005. 9)