

レール溶接部を通過する特急列車荷重に対する不連続変形法解析

(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 名村 明  
 (財) 鉄道総合技術研究所 正会員 浦川 文寛

1. 目的

軌道破壊現象は、バラスト砕石集合体の粒状性に起因して、列車走行荷重により道床内部に塑性ひずみが不均一に累積する劣化現象である。本論文はレール溶接部における道床振動加速度測定試験をもとに、レール・軌道パッド・まくらぎ・バラスト・路盤連成系を多角形粒状集合体と有限要素の混合モデルで表現し、構造減衰を考慮した不連続変形法解析により、列車走行実測荷重に対する道床内部砕石の挙動を求めた。また実軌道の動的応答特性に符合する構造減衰析パラメータの同定を試みた。

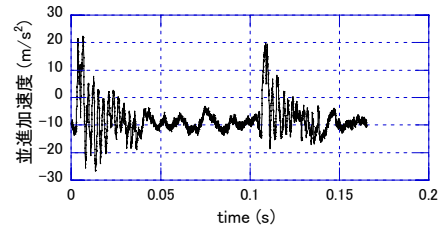
2. 営業線本線における動的挙動測定実験

鉄道営業線本線のレール溶接部のまくらぎ直下に、砕石の三次元的な挙動が測定可能なセンシングストーンを埋設し道床振動加速度を測定した。特急車両の先頭車ボギー第1軸および第2軸通過時の鉛直加速度波形を図-1に、パワースペクトル密度関数を図-2に示す。図では、砕石挙動の並進成分と回転成分に分離して示し、回転成分については回転半径を乗じて加速度単位で示した。図-1より、砕石の並進成分については、溶接部の衝撃荷重を受けた後、数百Hzの高周波の激しい振動を伴い急激に減衰した。この減衰は載荷後0.04秒後にはほぼ収束し、その後は80Hz前後の緩やかな振動となった。また、載荷直後の高周波の並進挙動に一致して、砕石の回転挙動も発生したが、高周波振動の収束後は回転運動は殆ど生じていない。また、図-2より、砕石の挙動に関しては、低周波の応答とともに高周波領域に応答のピークが見られ、その周波数は、並進加速度、回転加速度のいずれにも共通している。すなわち、密に締め固められた状況の砕石は、低い周波数で一体的に運動するとともに、局所的に隣接するブロック同士が互いに擦れ合うような、高周波の並進運動と回転運動(回転振動)を発生していることがわかった。

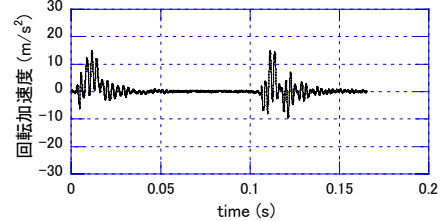
3. 不連続体解析モデルの作成と解析条件

在来線軌道の横断面に関して、二次元の多角形粒状集合体と有限要素の混合モデルにて表現した。図-3は、厚さ25cmの道床バラスト上に、PC3号まくらぎ、軌道パッド、60kgレールを敷設した不連続体モデルである。モデルの奥行きは30cm幅とした。物性値を表-1に示す。砕石は、実形状の測定結果をもとに多角形要素(定ひずみ要素)で表し、レールと軌道パッドについても断面形状を模擬した多角形要素とした。まくらぎは定ひずみ要素で

縦5分割、横20分割した有限要素モデルとした。路盤については、その上部に水平方向に26個、鉛直方向に4層の矩形要素を配置し、要素間の変形の連続性を維持することにより、局所的に大きな構造減衰特性を考慮した。図-4に示す特

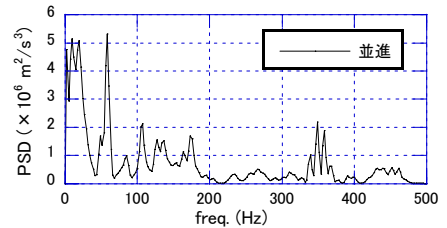


(a) 鉛直方向の並進加速度成分

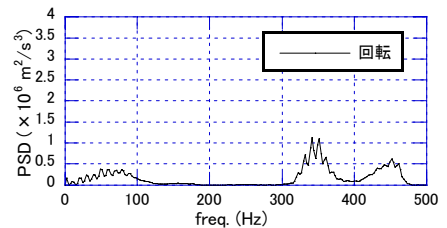


(b) 鉛直方向の回転加速度成分

図-1 道床振動加速度測定結果



(a) 鉛直方向の並進加速度成分



(b) 鉛直方向の回転加速度成分

図-2 砕石挙動のパワースペクトル

表-1 解析に用いた物性値

	密度ρ (kg/m³)	弾性係数 E(MN/m²)	ポアソン比ν	摩擦係数φ(°)
砕石	2770	20000	0.25	50
まくらぎ	2400	10000	0.25	35
路盤	2200	1	0.45	80
レール	2358	210000	0.30	--
パッド	2000	100	0.40	--

キーワード 軌道破壊 バラスト軌道 砕石集合体 粒状体解析 DDA(不連続変形法解析)

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

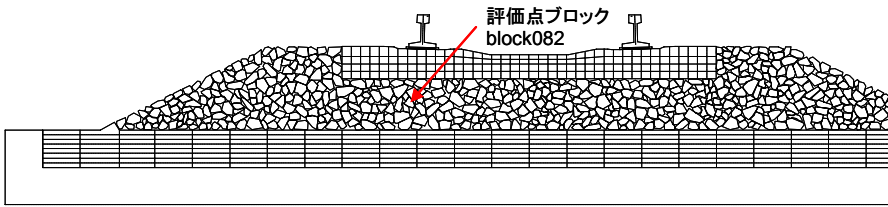


図-3 在来線軌道の横断面に関する不連続体モデル

急列車通過時のレール圧力波形を、左右のレール頭頂部に加えて、2次元 DDA 解析により、载荷開始から2秒間の応答を求めた。構造減衰については、運動方程式の粘性項に関して、質量マトリックス  $M$  と剛性マトリックス  $K$  からなる粘性マトリックス  $C = \eta M + \zeta K$  ( $\zeta = 0$ ) を導入し、粘性係数  $\eta$  をパラメトリックに変化させた。図-3 の左側レール直下の碎石ブロック (block No.082) を評価点とし、一方、粘性係数の影響性に関しては、評価点周囲の23個のブロック挙動の平均を用いた。

4. 解析結果および考察

図-5 は、荷重を载荷した  $t=0.4$  秒間における、評価点周囲の23個のブロックの運動エネルギー量 (鉛直運動・水平運動・回転運動) 累積値である。図では、構造減衰を考慮しない場合 ( $\eta=0$ ) の運動エネルギー累積値の水平・鉛直・回転の合計を1に基準化した。図より、粘性係数  $\eta$  が大きくなるにつれて、碎石の運動エネルギーが急激に減少することがわかる。図-6 は、評価点周囲の23個のブロックの最大加速度値である。現場測定値では、最大加速度が  $80\text{m/s}^2 \sim 150\text{m/s}^2$  であった。また、衝撃波形载荷後の収束時間と最大加速度値を参考にして、本解析における粘性係数として  $\eta=0.45$  を採用するものである。

この場合の、評価点ブロック (block082) の鉛直加速度を図-7 に示す。図-8 は、図-4 の载荷荷重を測定した地点直下の道床内部の測点 (Dv5) における加速度測定波形である。図-7 では、車輪通過時の衝撃荷重のタイミングに一致して、大きな加速度応答が生じ、その後は実測値と同じく、概ね0.05秒程度の短い時間で高周波の振動を伴って急速に減衰する傾向が再現できた。鉛直方向の最大加速度についても、解析結果と実測値は概ね近い値になった。

解析結果と実測値のパワースペクトルを図-9 および図-10 に示す。図より、現場の実測値では概ね150~200Hz 近傍にピークがあるが、一方、数値解析結果でも140Hz および180Hz 付近に応答のピークがあり、さらに高周波でもいくつかのピークが生じた。実測値でも高周波成分の応答が見られるが、本解析結果は実測値よりは高周波の成分を多く含む結果となった。

5. まとめ

本論文は、実軌道における碎石挙動の測定結果をもとに、碎石挙動の最大応答加速度、衝撃荷重直後の減衰特性、高周波挙動の再現性に着目して、実測値と解析結果を比較した。今後、解析に用いる物性値を改善することにより、実現象を定量的に再現できる不連続体解析が可能となる可能性が見出された。

<謝 辞> 最後に現地測定にご協力いただいた九州旅客鉄道株式会社に感謝の意を表する次第である。

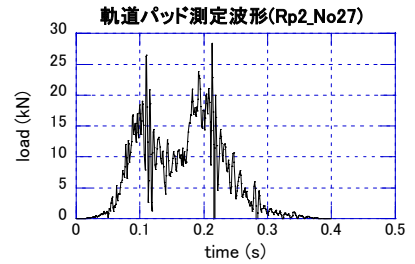


図-4 レール頭頂面の荷重波形

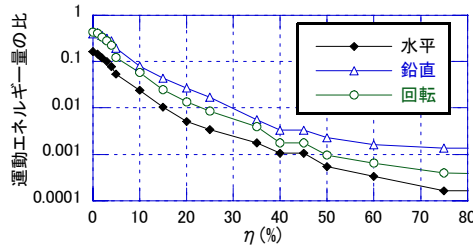


図-5 粘性係数と運動エネルギー量の関係

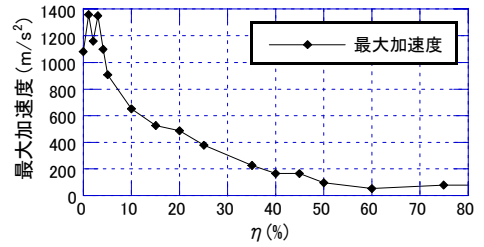


図-6 評価点近傍での最大加速度値

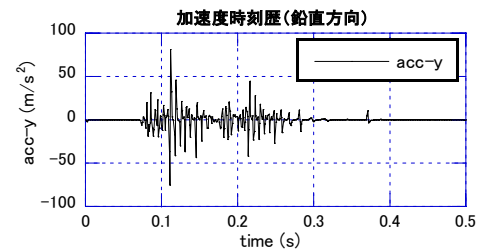


図-7 block082 の鉛直加速度

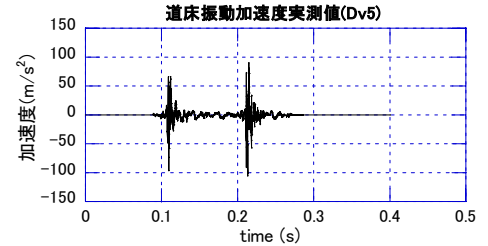


図-8 道床振動加速度測定波形 (Dv5)

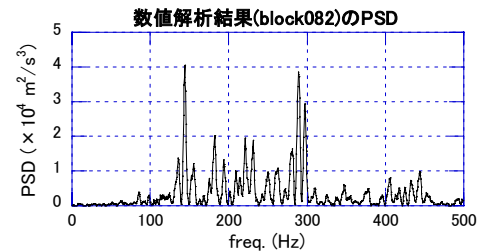


図-9 解析結果 (block082) の PSD 関数

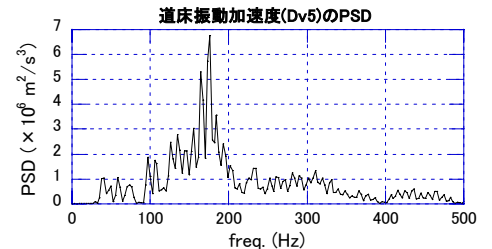


図-10 実測値 (Dv5) の PSD 関数