

バラスト軌道の動的挙動に関する現場測定と2次元不連続体解析

(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

1. はじめに

バラスト軌道には「軌道破壊」と呼ばれる経年的な沈下現象が避けられず維持管理上の課題となっている¹⁾。軌道破壊は、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。本報告では、まず、砕石形状の実測値をもとに、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にて表現し、構造減衰を考慮した不連続変形法解析により、列車走行時の実測波形に対する軌道構造の動的応答特性について検討した。つぎに、ピエゾ抵抗型三軸加速度センサを用いて、砕石の三軸方向の並進および回転挙動を同時に測定可能なセンシングストーンを試作し、営業線本線にて列車通過時の道床内部の砕石の動的挙動を測定した。実軌道での測定結果より得られた知見をもとに、軌道に関する動的応答解析に要求される不連続体解析の諸元について考察した。

2. 軌道破壊現象に関する数値解析についての基本的な問題設定

バラスト軌道は、路盤上に大きさ4~10cmの砕石の集合体を厚さ20~50cmにつき固めたものである。一車両あたり30~40tonの重量を4軸(8個の車輪)で支持し、その走行荷重をレール・軌道パッド・まくらぎ・道床により路盤に伝達する。以下はあくまで大雑把な仮定であるが、1軸あたり80kNの重量を路盤1m²で支持する場合を想定すると、動的な荷重を考慮しても、路盤面の応力は高々数0.01~数0.1MN/m²程度である。一方、砕石の一軸圧縮強度は60~80MN/m²以上が見込まれるので、砕石に破壊や劣化を引き起こすには、局所的に数百~数千倍の応力集中が必要となる。すなわち、軌道劣化を解析的に扱うには、不均一性と局所的な非線形挙動の再現性が要求され、この観点からは、粒状性に着目した不連続体解析の応用が有効と考えられる。

また、砕石は地盤材料の範疇に属しており、その動的応答解析では低周波成分のみを扱うのが一般的である。一方、車輪とレール間の接触機構には数kHzの高周波が作用しており、砕石の挙動に関しても高周波成分が影響する可能性がある。しかしながら、従来は砕石の動的挙動に関する有効な測定方法がなく、軌道の応答解析で扱うべき周波数の範囲と、その減衰特性については殆ど検討されていない。本課題を解き明かすには、個々の砕石の三次元的な運動に関する、高周波までの測定技術の構築が不可欠であり、新しい計測方法により道床内砕石の動的な挙動の実態を把握して、必要とされる数値解析の諸元の大枠を決める必要がある。

3. 不連続体解析理論に基づくバラスト軌道の動的応答解析例

在来線軌道の横断面に関して、2次元DDAとFEMを併用した解析例を紹介する。図1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。解析に用いた物性値を表1に示す。モデルの奥行きは30cm幅とした。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で表現した。まくらぎは多様な変形モードがありうるので、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。また、路盤面での反射を低減するために、粘性マトリックスに比例する構造減衰を考慮した矩形定ひずみ要素(幅20cm、厚さ5cm)を、路盤上部に水平方向に26個、鉛直方向に4層配置し、局所的に大きな構造減衰(以下の解析例では粘性係数 $\eta=0.45$)を導入した。解析にあたり事前にDDAを用いて30Hzの動的荷重にて十分締め固めた。その後、図2に示す荷重波形を左右のレール頭頂部に加えて、荷重載荷開始から2秒後までの、全要素の並進変位、回転変位、応力、ひずみ、接触力の時刻歴応答を1/10000秒刻みで求めた。荷重は、営業線本線における特急列車通過時の荷重測定波形を平滑化し、最大値を50kNに調整したものである。

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

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

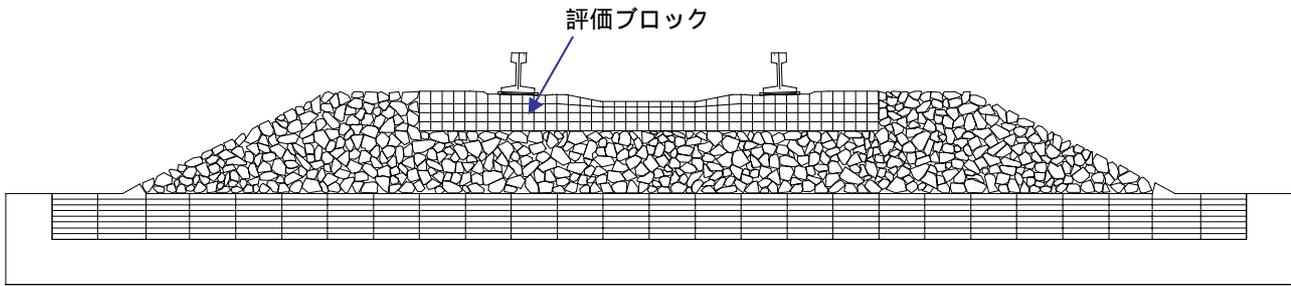


図1 在来線軌道の横断面に関する不連続体モデル

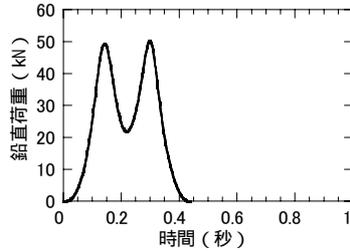


図2 载荷荷重

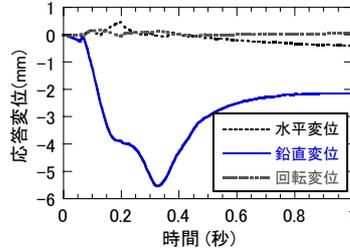


図3 碎石の変位応答

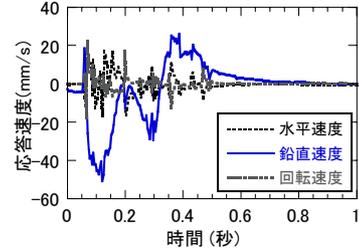


図4 碎石の速度応答

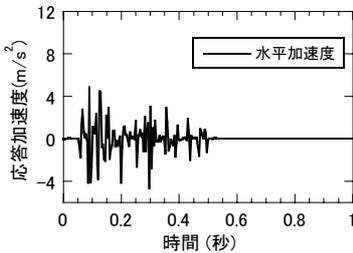


図5 碎石の水平加速度

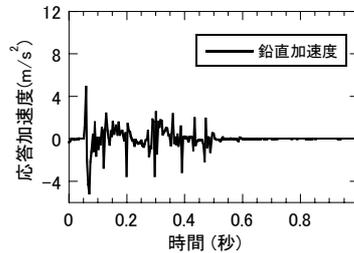


図6 碎石の鉛直加速度

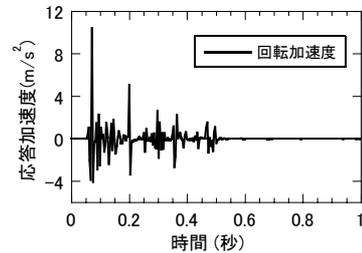


図7 碎石の回転加速度

図1の左レール直下の評価ブロックの挙動について、図3から図7に示す。図中の回転成分については、回転角に碎石の断面2次半径を掛けて長さの単位で表示した。図3より、走行荷重の载荷により、碎石は鉛直方向に沈下し、除荷により緩やかに戻ったことがわかる。また、図4より、概ね鉛直方向の速度応答は荷重波形に近いものとなっているが、水平・鉛直・回転のいずれについても高周波成分が見られる。図5～図7の加速度応答でも高周波の応答が顕著である。また、最大の加速度応答成分は载荷直後の回転挙動のものである。载荷波形は2つのピークを持つ滑らかな5Hz前後の低周波波形であるが、碎石の速度応答や加速度応答を見ると、碎石は高周波の並進運動および回転運動を伴った運動をしており、道床内のエネルギー損失機構に、碎石の局所的な高周波の並進運動と回転挙動が大きく関与しているものと考えられる。すなわち、道床のように粒子が密に詰まった構造では、载荷時には粒子間の接触力が大きく作用しており、この状態で、粒子間に回転運動を伴う高周波振動が発生すると、碎石間にて大量の摩擦エネルギーが消費されることになる。さらに、碎石粒子に高周波の回転運動が生じると、必然的に碎石粒子近傍に微小な体積膨張を繰り返すことになり、このことが塑性変位が累積するプロセスに関与する可能性がある。

表1 解析に用いた物性値

	密度 ρ (kg/m^3)	弾性係数 $E(\text{MN/m}^2)$	ポアソン比 ν	摩擦係数 ϕ ($^\circ$)
碎石	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	--

4. 道床加速度の三軸測定装置の原理

軌道構造の動的挙動に関する不連続体解析を定量的な評価に役立てるには、列車走行時の実態荷重環境下での碎石挙動に符合するパラメータ同定が不可欠である。そのためには、道床内部のバラスト碎石に関する、回転挙動を含めた三次元的な運動の測定技術が必要なる。そこで、3軸方向の加速度を測定可能な「 piezo抵抗型三軸加速度センサ」を用いて²⁾、碎石の三次元的な並進および回転挙動を同時に測定するセンシングストーンを開発した³⁾。図8に碎石内部に三軸加速度センサ2個を配置した場合の動

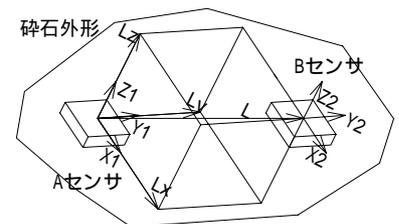


図8 道床碎石の挙動に関するセンシングストーンの動作原理

作原理を示す．説明の簡略化のため AB の中点と碎石の重心が一致すると仮定する．この碎石に並進運動と回転運動が同時に作用すると，両センサからは並進運動と回転運動の大きさに応じた加速度が出力される．両センサの出力の平均値は碎石の並進運動の加速度成分，他方，両センサ出力値の偏差量は，碎石の回転運動の加速度成分を表すものである．

5．営業線本線における道床碎石の動的挙動測定実験

営業線本線軌道にて，まくらぎ下部に試作品を設置し，測定実験を実施した．センシングストーンを設置状況を図9に示す．測定結果の一例を図10に示す．図は，特急の先頭車のボギー第1軸および第2軸通過時の，2つの加速度センサ x, y, z 各軸方向に関する時刻暦応答である．図より，ボギー第1軸および第2軸が通過するタイミングに一致して，碎石が激しく運動していることがわかる．また，同じセンシングストーン内部でありながら，2個のセンサで応答が異なり，さらに，軸別で見ても応答に大小がみられる．



図9 測定試験時の設置状況

センサ設置時には，前掲の図9のように，センサ本体を概ね水平に設置した．しかし，その後のつき固め作業で，碎石が傾いた可能性がある．無載荷時の x,y,z 軸の出力電圧は，重力軸の方向余弦に比例するので，これより，センシングストーンの設定角度を求めた．その結果，各軸が重力軸となす角度は x, y, z 軸がそれぞれ 120 度, 62 度, 43 度であった．このことから，つき固め作業により碎石が大きく回転したことがわかり，したがって，信頼できる道床加速度の測定結果を得るには，三軸の加速度測定が不可欠ということが確認できた．

図11は，これらの角度をもとに，鉛直方向の加速度成分を計算し，さらに，並進挙動成分（平均成分）と回転挙動成分（偏差成分）に分離したものである．上述の解析例でも高周波の挙動が見られたが，図より，実際の碎石においても，並進運動とともに，回転を伴った高周波の運動を引き起こしていることがわかる．

また，重力加速度は 9.8m/s^2 であり，図11(a)の並進加速度成分の図をみると，およそ -10m/s^2 が波形の中心となることから，本図ではマイナス方向が下向き(重力方向)となる．図より，碎石は，載荷直後に一旦上向きに跳ね上がるような運動の後，数百 Hz の高い周波数の激しい振動を伴って急激に減衰することがわかる．碎石の減衰は非常に大きく，荷重載荷後 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が生じている．また，図11(b)の回転成分の図より，載荷直後の高周波の運動は回転成分でも見られるが，高周波振動の収束後は回転運動は殆ど生じない．

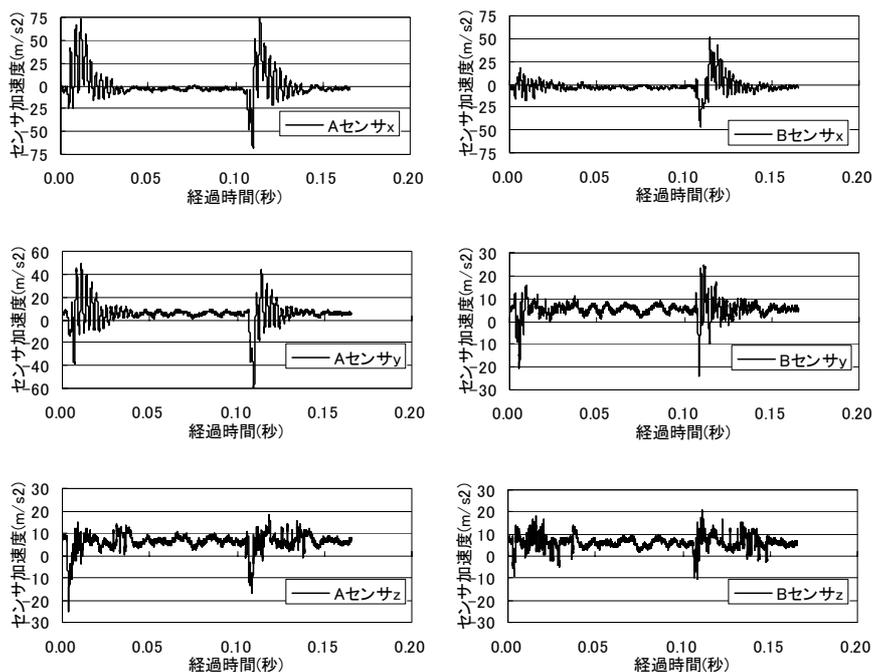
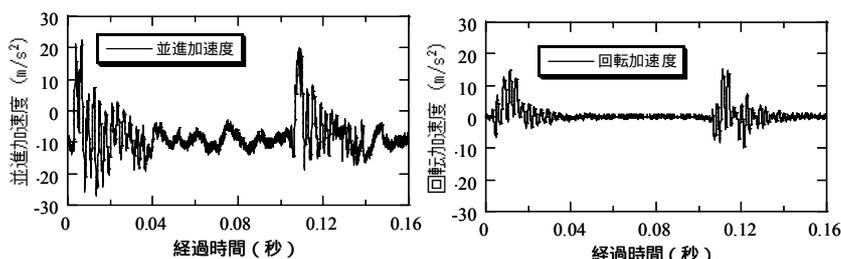


図10 センシングストーンによる測定例（特急車両(V=78km/h)の先頭車両通過時のまくらぎ直下 15cm 位置における鉛直加速度測定値，左 A センサ，右 B センサ，上から各センサの x 軸, y 軸, z 軸の測定値）



(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11 鉛直方向の加速度に関する並進成分と回転成分の分離

すなわち、载荷直後の高周波の減衰振動は、回転運動を伴った碎石の局所的な運動であり、一方、それに引き続く80Hz前後の波形は並進運動が主であり、回転運動を伴わないことから、隣接する碎石もほぼ一体的な運動をしていることがわかる。

6. 道床碎石の挙動の周波数特性

図12は、図11の鉛直方向加速度に関するパワースペクトルである。なお、500Hz以上の応答はほぼ0であり、図には500Hzまで示した。図より、低い周波数の応答とともに、300~500Hzの高周波領域に応答のピークが見られる。これらの高周波のピークを与える周波数は、並進加速度、回転加速度のいずれにも共通している。これらのことから、密に締め固められた状況の碎石は、低い周波数で一体的に振動するとともに、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)を引き起こしていることがわかった。

7. バラスト軌道の動的応答解析に要求される解析の性能諸元

列車走行による荷重が道床に加わると、碎石間に大きな接触応力が作用する。この状態で、碎石に並進運動と回転振動が発生し、300~500Hzの高周波で激しく運動することにより、隣接する碎石が互いに強く擦れ合い、その結果、外力の動的エネルギーが、道床内部にて摩擦エネルギーに変換されるという、エネルギー消費のメカニズムが機能していることが想定される。本論文で紹介した測定結果および解析結果については、まだ試験的な段階であり、今後、追試験、数値解析、模型実験を併用して詳細に検討する必要がある。ここで、本論文で得られた知見をもとに、軌道構造に関する動的な不連続体解析に要求される周波数特性や減衰特性などの、数値解析の性能諸元について以下に簡単にまとめる。

従来、バラストに関する研究では、概ね100Hz以下の低周波成分を対象にしてきた。しかし、実際の道床内のバラスト碎石は列車の走行荷重を受けて、高周波の並進運動とともに回転運動を引き起こしている。したがって、バラスト軌道の動的応答解析にあたり、不連続体解析で扱うべき周波数特性として、低周波から少なくとも500Hzまでの高周波成分についての再現性が必要とされる。

また、回転方向の高周波の振動が、道床内部におけるエネルギー逸散に大きく関与する可能性がある。他方、碎石自体は非常に硬いことから、実際の現象では碎石間に貫入現象は発生しない。このことを踏まえると、現在の個別要素法等の不連続体解析では、粒子間に微小な貫入が発生することを前提にして計算を行っているが、貫入とは直角方向となる円周方向の運動の再現性、および、円周方向の運動による損失の評価が重要となる。

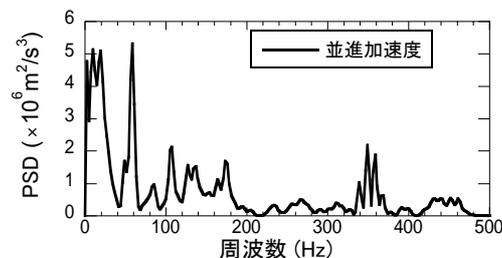
さらに、碎石集合体の構造減衰としては、走行荷重载荷後の0.04秒後には概ね0に収束するような、非常に大きな減衰性能を再現できることが不可欠である。従来、不連続体解析においては、式の展開上はエネルギー減衰を定式化しているものの、実際の解析ではそれほど大きな減衰を扱っていない。今回の測定結果を参考にすると、非常に大きな構造減衰を再現することが重要といえる。

8. まとめ

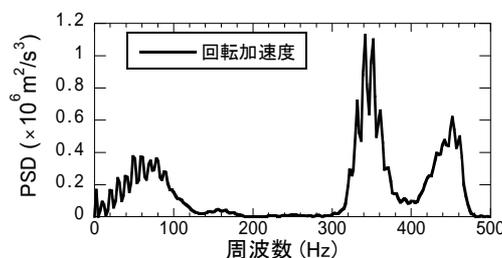
本論文では軌道破壊現象について、軌道劣化に関与すると考えられる道床の不連続体構造の動的挙動の再現性に着目し、実軌道における碎石の運動の測定結果をもとに、不連続体解析に要求される周波数特性と減衰性能について検討した。今後は、詳細な測定により現象を正確に把握するとともに、測定結果に符合するようなパラメータ同定と解析手法の改良を行い、軌道劣化のメカニズム解明に役立てる必要がある。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説、軌道構造「有道床軌道」(案)、110p、平成9年4月。
- 2) 日立金属(株)：ピエゾ抵抗型3軸加速度センサ、http://www.hitachi-metals.co.jp/prod/prod14/p14_03.html。
- 3) 相川・緒方・他：道床加速度の三軸測定装置の開発、日本機械学会第13回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集、pp.193-194、2006。



(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12 鉛直方向の加速度に関するパワースペクトル密度関数