鉄道バラストの三次元挙動測定装置の開発

―― 溶接継目衝撃荷重の現場測定と DDA パラメータ設定法の提案 –

Three-dimensional measurement of ballast stone behavior induced by running train: its application to parameter determination in DDA

相川 明*

Akira AIKAWA

*工博 (財)鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部(軌道力学)(〒185-8540 国分寺市光町2-8-38)

This paper describes newly developed measurement techniques of the three-dimensional (3D) behavior of an actual ballast stone. A field experiment was performed on a railway line using a special ballast sensing stone with piezoresistive triaxial accelerating sensors for measurement. Two accelerometer chips are embedded in a crushed stone separately. The average value of the two acceleration measurement values indicates the translational acceleration; the difference of the two acceleration measurement values yields off the rotational acceleration. The ballast grain receives an impact load imparted by a running train and generates a high-frequency translational motion together with the high-frequency rotational motion. We recorded a large amplitude signal immediately after loading; the high frequency of several hundred Hertz was rapidly attenuated. Regarding the reproducibility of high damping performance, this paper also proposed techniques for parameter determination in the dynamic discontinuous deformation analysis based on the results of a field measurement experiment on an actual railway track.

Key Words: conventional ballasted track, deterioration, piezoresistive triaxial accelerating sensor, 3D motion of ballast particle, discontinuous deformation analysis キーワード: バラスト軌道, 軌道破壊現象, ピェン抵抗型三軸加速度センサ, バラストの三次元挙動, 不連続変形法解析

1. はじめに

我が国の在来線の大部分は、道床バラスト^{1,2)}と呼ばれ る単粒度の砕石(以下「バラスト」と表示する)を用いた バラスト軌道である.バラストは稜角に富み構造的な安定 性があり、適度な剛性も有しており、列車の走行荷重を分 散し路盤に伝達するとともに、衝撃荷重を軽減する重要な 機能を有する³⁾.しかし、バラスト集合体の骨格構造をな す個々のバラスト粒子には、車軸通過による動的荷重を受 けて、微小な並進挙動や回転挙動、あるいは、破砕や摩耗 が発生する.軸重通過による動的荷重は多いところで年間 数百万回に達し、これらの微小な現象の累積結果として、 軌道不整の進行は、乗り心地や走行性に悪影響を与えかね ず、バラスト軌道には膨大な費用を要する保守作業が不可 避であることが維持管理上の技術課題となっている^{4,5}.

軌道破壊現象の一因として、列車の高速化に伴う高周波 の動的荷重と衝撃荷重の増大の影響が考えられる.軌道構 造部材の一つであるコンクリートまくらぎ(PC まくらぎ) の設計法に関しては、涌井・奥田らにより実物大試験およ び現場測定が実施され、その成果を受けて動的荷重と衝撃 荷重の評価が不可欠とし、静止輪重の5倍に相当する衝撃 荷重に耐えるような、PC まくらぎに関する限界状態設計 法が導入された^{6,8}. これと同様に、まくらぎ下部に位置 するバラスト集合体に関しても、高周波の衝撃荷重が、剛 なレール・まくらぎ構造を介して道床構造まで伝達されて いる可能性がある⁹. しかし、現状では、粒子挙動に関す る現場測定法およびその解析法ともに未確立のままであ る. 効率的な維持管理を行うためには、実軌道においてバ ラストの動的挙動特性を詳細に測定し現象を把握し、さら に、バラストの局所的な挙動に着目した力学モデルによる メカニズム解明が不可欠である.

バラスト粒子の動的挙動の測定に関しては、従来、一軸 加速度センサを取り付けたバラストを道床に埋設する方 法が行われてきた¹⁰⁰.しかし、一軸加速度センサでは、測 定軸がどの方向を向いているのか特定できず、設置後にセ ンサが移動・回転し、当初予定していた設置角度からずれ てしまうという問題点があった.また、粒状性に着目する と、個々の粒子の回転挙動が塑性変形の大きな要因となる ことから、回転運動を含めた、バラストの三次元的な運動 に関する測定技術が必要となる.

著者は、列車の動的荷重によるバラスト粒子の並進運動 と回転運動の把握を目的として、三軸方向の加速度値とと もに重力軸の方向も特定できる「ピエゾ抵抗型三軸加速度 センサ」を複数個用い、バラストの水平方向、鉛直方向、 奥行き方向の三軸の並進挙動と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.本論文では、その動作 原理と実軌道における測定例について述べ、さらに、レー ル・まくらぎ・バラスト・路盤連成系を、二次元の多角形 粒状集合体でモデル化し、構造減衰を考慮した不連続変形 法解析(DDA)により¹¹⁾¹⁴、軌道構造の動的応答特性の再現 とパラメータ決定法について検討した.

2. 軌道破壊現象に関する研究の背景

佐藤らは 1917 軌道破壊現象にバラストの動的挙動が関係することを初めて指摘し, 軌道構造を強化し保守費を低減するために, 動的な振動荷重とバラストの摩擦挙動に着目し, 動的載荷実験結果をもとに軌道沈下の概略の傾向を 把握する経験式を定式化した.その後,佐藤¹⁰,三浦¹⁹ らの研究成果を経て, 軌道長手方向の高低狂いの予測法が

「軌道破壊理論」として体系化された 20. さらに,内田 らの道床・路盤の沈下に関する実物大試験による実験式を 組み込み 20,現行の「軌道沈下則」が提案された 20.現 行の軌道沈下則は,ある閾値を超える荷重に対して,軸重 通過による微小な影響量を累積し,軌道沈下量が得られる という簡便なモデルである.しかし,不同沈下に直接的に 関与する道床内部における塑性変形量の分布特性を予測 できないことなどの課題が残る.

石川ら²³,木幡ら^{24,25}は、バラストを構成する粒状体 の弾塑性挙動に着目して、三軸圧縮試験の拘束圧として、 試験体内部の負圧を用いるという斬新なアイディアで、側 方から拘束荷重を加えながらも、バラスト集合体の大変形 に追従できるという画期的な大型三軸圧縮載荷試験装置 を開発し、バラスト集合体の繰り返し荷重に対する変形特 性に関する要素試験を行った.また、石川らは、軌道構造 の実物大の載荷試験により、繰り返し載荷に対する変形特 性を検討し²⁶、さらに、名村らは実物大試験の結果をも とに、変形特性の推定法を提案している²⁷.

石川,木幡,名村らの実験結果を参考にすると,いずれ の実験結果でも,荷重振幅一定で載荷・除荷を繰り返した 場合でも塑性変形が発生し,塑性変形が累積・進展する現 象が確認できる.また,Choletらは,容器内のバラスト集 合体模型への,側方から往復荷重による載荷実験を行い, 載荷の周波数を変えてバラストの動的挙動に,周波数が関 連することを定性的に示した^{28),29}.これらの実験結果に 見られるバラスト集合体独特の挙動は,バラスト間の動的 な摩擦現象と,バラスト形状の組み合わせによるバラスト 相互の引っ掛かり現象が大きく影響している. これらの現 象は、スティックスリップ現象³⁰、あるいは、力学的ラ チェット現象と呼ばれており³¹⁾、これらのミクロな現象 と、動的荷重依存性および周波数依存性に関する解明が、 軌道破壊現象解明の大きな鍵となるものと考えられる. こ の現象を粒子挙動に着目して解明する手法としては、粒子 間に貫入が発生しないDDA が有望であると考える.

ここに、上述の石川、木幡、名村らの実験成果は、従来 解明できなかったバラスト集合体の準静的挙動に関する 新たな知見を多く与えている.したがって、これらの実験 による粒子の挙動を、三次元の粒状体解析にて精密かつ詳 細に再現すれば、集合体内部におけるバラスト挙動、力学 パラメータの影響性の解明をはじめ、新たな力学モデルの 構築に大きく寄与するものと考える³²⁰.

ところで、バラスト集合体の高周波荷重の影響について は、従来、実験的な再現は困難と考えられてきた.最近、 Shaer らの仏国鉄の研究チームが 1/3 スケール模型にて、 列車の高速化を模擬した高周波載荷によるバラスト挙動 の実験に成功している 33. 同チームは、路盤、バラスト 層上に3本のまくらぎからなる軌きょう模型を製作し,高 速制御した油圧ジャッキにより、3本のまくらぎにわずか の時間差を持って連続的に載荷し、時速400 km/h までの 走行荷重を模擬した. 従来の載荷試験では, バラスト層の 沈下挙動は概ね載荷回数に比例して漸増するものとされ てきたが、本実験結果によると、 バラスト層の変形は、載 荷回数に伴って増加傾向が見られるものの、その変形は 徐々に累積せず, あるとき突然大きく発生し, 変位履歴は 階段状を呈する結果となった. 本実験結果は、高速走行に よる高周波の影響があることを示したことでも貴重な成 果であるが、あくまで実験室レベルであり、次の段階とし て、実軌道にて同様の現象があるのか無いのかを確認する 必要がある. そのためには, バラストの三次元挙動を正確 に測定する方法の開発が不可欠であり、本研究で開発する 装置は、「あるとき突然大きく発生」するというバラスト固 有現象を把握するためにも有効に活用しうるものである.

従来, 道床バラストは地盤材料の範疇に属し, したがっ て数十~数百 Hz を超える高周波の影響性に関しては殆 ど検討されてこなかった. 最近, 北川 34, 上妻ら 35によ り、列車の騒音対策を目的として、車両と軌道構造との高 周波までの動的応答特性が模型試験や数値解析により解 明されてきており、その中でバラスト軌道に関しても高周 波の応答の存在が示されている. また, 道床バラストの粒 子構造に着目した動力学的なアプローチとしては、たとえ ば, Saussine ら³⁰, 石川ら³⁷⁾, 阿部ら³⁸⁾, 浦川ら³⁹⁾をは じめ、各種の粒状体解析手法の応用が試みられている. ま た、 粒状体の新しい構成式のモデルとして、 橋口らの下負 荷面モデル 40を、鉄道バラストに応用した紅露らの研究 が、軌道の長期沈下を含む三次元的な挙動の表現モデルと して注目される 30. 下負荷面モデルはさまざまな破壊状 況の再現性に優れるモデルであり, 軌道破壊現象の再現に も有力視されるが、実現象との整合性の確保、および、パ ラメータ同定法の開発などが今後必要とされる.

3. 道床加速度の三軸測定装置の試作

3.1 三次元センシングストーンの動作原理

三次元センシングストーンの構造とその動作原理につ いて述べる. 図-1 に、直方体の対角線上の頂点に、三 軸加速度センサ2 個を配置した状況を示す. それぞれ A センサ、B センサとする. 直方体の辺長をそれぞれ L_x, L_y, L_z とすると、センサ間距離 L は三平方の定理より $L = \sqrt{L_x^2 + L_y^2 + L_z^2}$ となる. また、L と、x, y, z 軸が なす方向余弦をそれぞれ θ_x , θ_y , θ_z と表示すると、 $\cos \theta_x = L_x/L$, $\cos \theta_y = L_y/L$, $\cos \theta_z = L_z/L$ の関係 が成り立つ.

ここで, *x*, *y*, *z* の各軸について直交する面を考え, A センサおよび B センサの *x*, *y*, *z* 軸に関する軸間距離 T_x, T_y, T_z を求める. *x*軸間距離 T_x , *y*軸間距離 T_y , *z*軸 間距離 T_z は, それぞれ次式により求められる.

$$T_{x} = L \sin \theta_{x} = \sqrt{L^{2} - L_{x}^{2}} = \sqrt{L_{y}^{2} + L_{z}^{2}}$$
$$T_{y} = L \sin \theta_{y} = \sqrt{L^{2} - L_{y}^{2}} = \sqrt{L_{z}^{2} + L_{x}^{2}}$$
$$T_{z} = L \sin \theta_{z} = \sqrt{L^{2} - L_{z}^{2}} = \sqrt{L_{x}^{2} + L_{y}^{2}}$$

ここで、あらためてAセンサのx, y, z軸に関する加速 度測定値をそれぞれ x_1, y_1, z_1 , Bセンサの加速度測定値 をそれぞれ x_2, y_2, z_2 と記号表示する.以下の説明では、 説明の簡略化のため、センサは互いに平行であり、また、 加速度評価点は両センサの中点と仮定し、さらに、この 加速度評価点と直方体全体の重心は一致するものとする.

この直方体に並進運動と回転運動が同時に作用すると、 両センサには、並進運動と回転運動の大きさに応じた、 異なる大きさの加速度が生じる.したがって、両センサ 各軸にも加速度値に比例した電圧が測定される.

2個のセンサについて, *x*, *y*, *z*軸別に,加速度の平均 値 α_x , α_y , α_z および, 軸毎に平均値からの偏差量 β_x , β_y , β_z を求めると以下の通りである.

$$\alpha_{x} = \frac{x_{1} + x_{2}}{2}, \ \alpha_{y} = \frac{y_{1} + y_{2}}{2}, \ \alpha_{z} = \frac{z_{1} + z_{2}}{2}$$

$$\beta_{x} = x_{1} - \alpha_{x} = x_{1} - \frac{x_{1} + x_{2}}{2} = \frac{x_{1} - x_{2}}{2},$$

$$\beta_{y} = y_{1} - \alpha_{y} = y_{1} - \frac{y_{1} + y_{2}}{2} = \frac{y_{1} - y_{2}}{2},$$

$$\beta_{z} = z_{1} - \alpha_{z} = z_{1} - \frac{z_{1} + z_{2}}{2} = \frac{z_{1} - z_{2}}{2}$$

$$x_{2} - \alpha_{x} = -\beta_{x}, \ y_{2} - \alpha_{y} = -\beta_{y}, \ z_{2} - \alpha_{z} = -\beta_{y}$$

上述の仮定より、加速度評価点はABの中点にあり、 しかも、加速度評価点は重心と一致する.したがって、 両センサの加速度測定値の平均値と偏差量を求めること は、測定された加速度を、重心における並進加速度成分 と回転加速度成分にわけることと同じ意味を持つ.すな



図-1 三次元センシングストーンの動作原理

わち、この場合、平均値 $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ は速度評価点での並 進運動に関する加速度成分を表し、一方、偏差量 $\beta_x, \beta_y, \beta_z$ は加速度評価点での回転運動に関する加速度 成分を表す.

ここに、回転運動に関する加速度は、加速度評価点と 測定点間の軸の長さが関係するので、回転成分 $\beta_x, \beta_y, \beta_z$ については、加速度評価点とセンサ間の距離 の半分($T_x/2, T_y/2, T_z/2$)で割って基準化し、回転方 向の加速度成分 $\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$ と表示することもできる.

$$\begin{split} \gamma_x &= \frac{\beta_x}{T_x/2} = \frac{x_1 - x_2}{2} \Big/ \frac{T_x}{2} = \frac{x_1 - x_2}{T_x} = \frac{x_1 - x_2}{\sqrt{L_y^2 + L_z^2}},\\ \gamma_y &= \frac{\beta_y}{T_y/2} = \frac{y_1 - y_2}{2} \Big/ \frac{T_y}{2} = \frac{y_1 - y_2}{T_y} = \frac{y_1 - y_2}{\sqrt{L_x^2 + L_x^2}},\\ \gamma_z &= \frac{\beta_z}{T_z/2} = \frac{z_1 - z_2}{2} \Big/ \frac{T_z}{2} = \frac{z_1 - z_2}{T_z} = \frac{z_1 - z_2}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}}. \end{split}$$

このように、2つのセンサの各軸の測定値の平均値と 偏差量をとることにより、バラストの三次元の並進挙動 と、回転挙動とを同時に測定可能である.なお、加速度 測定の単位を m/s^2 とすると、並進加速度成分 $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ 、 および、回転方向の加速度成分 $\beta_x, \beta_y, \beta_z$ の単位は測定 値と同じ次元の m/s^2 である.一方、軸と直交する半径で 除して、角度で表示した回転方向の加速度成分 $\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$ については、軸方向加速度(m/s^2)÷軸間半径 (m)となり、その単位は角加速度 rad/s²となる.

また,静止状態での各軸の加速度測定値は,各軸の重 力加速度値に比例した電圧となる.すなわち,静止状態 での各軸の出力電圧より,各軸が重力軸となす角度を求 めることができる.したがって,三軸の測定値に,軸の 向きに応じた三次元の一次変換行列を乗じて,任意の軸 方向の測定値に換算できる.

3.2 三次元センシングストーンの製作過程

試作品の製作過程について述べる.上述の説明では、直 方体の頂点に加速度センサを2個配置した構造を考えた. しかし、製作にあたっては、直方体の構造の中で2個のセンサを結ぶ部分のみを、バラスト内に再現すれば十分であ る.そこで、正確に位置決めされた2個の加速度センサを あらかじめモールドで固定・封入し、これをあとから砕石 内部もしくは人工砕石に埋め込むことにした.使用したセ ンサは、最大加速度±10G、基準感度 90mV/G であり、正 弦波載荷試験により 1kHz までの線形性を確認した.また、 設置の向きを把握するために、2 個の加速度センサの中央 位置に、デジタル式方位センサを固定し、0.1s 毎に設置方 位を1°単位で出力できるようにした.さらに、モールド の周囲をコンクリート接着用樹脂で固めて砕石と同じ形 状に仕上げた.なお、全体の質量は 396 g である.

4. 実軌道における動的挙動測定試験

4.1 試験概要

実軌道にて測定試験を実施した. 60 kg ロングレール区 間において, 事前に 25 m 区間(まくらぎ 44 本分)の道床 交換作業を実施し, 道床安定化のためにその後4ヶ月間放 置した. その後, センシングストーンを溶接継目位置で, PC3 号まくらぎ(まくらぎ長 2000 mm, レール位置でのま くらぎ高さ 159.7 mm, 上面幅 182.5 mm, 底面幅 240 mm) の直下で深さ 15 cm の道床内部(まくらぎ下の道床厚さは 約 25 cm)に設置した. 図-2 は, 静止状態での三軸加速 度値と, 方位センサより求めたバラストの設置状況である. 図は, まくらぎ側方からみた軌道の縦断面である. 2 個の センサ A,B を結ぶ直線はほぼレール方向に一致し, 軸を 結ぶ直線が水平面となす角はおよそ 34°である. なお列 車はこの図の右側から左方向に走行する.

4.2 重力方向加速度の合成

特急列車(走行速度 V=78 km/h)の先頭車両の前台車第 1 軸および第 2 軸通過時の測定結果を図-3 に示す. 図は, センサの三軸の加速度測定値をもとに, A センサと B センサの鉛直方向の加速度を合成し, 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. なお, 回転成分については, センサ間距離の半分で除して, 角加速度単位(rad/s²)でも表示可能であるが, 並進運動との比較のため, 加速度単位(m/s²)で表示する.

図(a) の並進成分の図では、マイナス向きが重力向きで ある. 図より、走行荷重を受けたバラストは、載荷直後に 一旦沈下してから跳ね上がるような運動の後、数百 Hz の 高周波の激しい振動を伴って急激に減衰したことがわか る. この減衰は、載荷後 0.04 秒後にはほぼ終了し、その 後は 50~100Hz 前後の緩やかな振動が生じた.

また、図(b)の回転成分の図では、図-2の右回転が正 である.図より、載荷直後の高周波応答は、回転成分にお いても見られるが、高周波振動の終了後では、回転運動は 殆ど生じていない、すなわち、載荷直後の高周波減衰振動 は、回転運動を伴ったバラストの局所的な運動であり、そ れに続く50~100Hz前後の波形は並進運動が主体であり、 しかも、この波形には回転運動を伴っていないことから、 隣接するバラストもほぼ一体的に運動をしていることが



図-3 鉛直方向加速度に関する並進成分と回転成分

推定される.

なお、本センシングストーンでは、Bセンサ側に出力用 のケーブルが接続されており、このケーブルがバラストの 回転挙動をわずかに阻害する可能性がある.しかし、載荷 直後のみ回転挙動が発生し、その後は、回転挙動は発生し ないという挙動の違いは、ケーブルの存在の有無のみによ って説明できるものではない.また、本センシングストー ンは、そのサイズが若干大きめであり、並進成分と回転成 分の比率に関しては影響を与える可能性がある.しかし、 このことについてもケーブルの影響性と同様に、上述のバ ラストの挙動に関する説明を否定するものではない.

4.3 道床バラストの挙動の周波数特性

図-4は、鉛直方向の加速度のパワースペクトル密度関数(PSD)である.図(a)は、載荷直後の減衰振動をしている0.0512秒間(20kHzサンプリング、窓関数 Welch 関数、データ数1024個)、および、図(b)は、減衰振動終了後の経過時間0.04~0.10秒の波形(同、データ数1200個)につ

いての図である.並進成分と回転成分の大きさが異なるこ とから,図には,並進成分を左軸に,回転成分を右軸に示 す。図より,減衰振動時には,低周波の応答とともに, 340Hz および460Hz 近傍の高周波領域にピークが見られ, 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バラスト は,低い周波数で一体的に運動するとともに,局所的に隣 接するバラスト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想定 される.また,減衰振動終了後は,200Hz 以下の低周波の 並進成分の振動のみであり,回転成分の PSD は2桁以上 小さい.このことから,減衰振動終了後は,道床全体がほ ぼ同位相の運動をしていることが推定される.

また、紙面の都合で詳細は述べないが、同時に測定した、 レールおよびまくらぎの鉛直方向加速度に関する PSD と 比べると、340Hz 近傍の周波数はレールの振動に関する PSD のピークと一致し、また、460Hz 近傍の周波数はまく らぎの振動に関する PSD のピークと一致していた. この ことより、車輪・レール間の高周波振動成分がまくらぎ下 部まで伝わっているものと考えられる.

5. 不連続体解析のための道床モデルの作成と解析概要

5.1 解析概要

バラストを多角形粒状集合体で表現し、バラスト軌道に 動的走行荷重が加わった場合の、軌道構造部材の動的応答 を不連続体解析により再現する.その際、現場測定にて観 測された事項として、(1)バラストに関する高周波挙動の 再現性、(2)走行荷重載荷直後の高い減衰性能の再現性、 (3)バラストに生じる最大加速度の3点に着目して、減衰 パラメータの影響性を比較・検討する.まず、実軌道にお ける測定現場を想定し、在来線軌道の横断面に関して、バ ラストを二次元不連続変形法による多角形弾性体モデル で表現した.外力には、列車走行時の軌道パッドにおける 荷重実測波形を用い、高い減衰特性を表現するために、路 盤部における構造減衰を導入した二次元DDAにより、軌 道構造の動的応答特性を求めた.

5.2 バラストの形状測定装置とモデル化

バラストの形状に関しては、実軌道で用いられているバ ラストを入手し、バラストの頂点の三次元座標を測定し、 その座標値をもとに三次元 CAD 上でバラスト形状を模擬 した多面体を生成した.形状の測定装置の構成を図-5 に 示す.本装置は接触式三次元デジタイザ、スイッチペダル、 データ収録用 PC から構成される.形状の測定では、まず、 バラストの頂点に印をつけ、三次元デジタイザのプローブ を頂点にあて座標を取得する.次に(1)面を三角形とする こと、(2)形状ができるだけ凸集合とすることの2つの観 点に従い、バラストの形状を多面体として数値的に表現し た⁴¹⁾.バラストの実形状とモデルの例を図-6 に示す.本







図-5 三次元形状測定システム構成





解析は2次元解析なので、図-7のようにバラスト形状を模擬した多面体を平面に投影し、その外形で二次元多角形モデルを作成した. なお、形状を測定したバラストは4000個ほどであるが、本解析ではそのうち300個を用いた.

5.3 解析モデルの作成と解析パラメータ

図-8は、厚さ25 cm の道床バラスト上に、PC3 号まく らぎ、軌道パッド、60 kg レールを敷設した不連続体モデ ルである.モデルの幅 5600mm、高さ 800 mm、まくらぎ 下の道床厚さは 250 mm である.バラストは、実形状の測 定結果をもとに多角形要素(定歪み要素)で表し、レールと 軌道パッド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,縦4分割, 横20分割したコンクリートの矩形の定歪み要素とし,要 素間にコンクリートと同強度のモルタルを充填して接着 した構造とした⁴²⁾. モルタル充填面については,圧縮強度 の1/10程度の引張力で破断するように,摩擦角80°,引張 強度5MPa,粘着力5MPaとし,要素間に破断が生じる までは弾性変形挙動を再現できるようにした.また,路盤 に配した矩形要素についても,要素間に剥離やずれが生じ ないように,摩擦角80°,引張強度1GPa,粘着力1GPa とし,要素間を強力に接着した状態を再現した.また,路 盤の矩形要素の周囲についても多角形の定歪み要素とし, その底部を固定境界とした.

解析に用いた物性値を表-1に示す.バラストは安山岩 を想定し、まくらぎは高強度のコンクリートの一般的な物 性値とした.レールおよびパッドの物性値は、製造メーカ ーの実験値を用いた.路盤のモデル化に関しては、次項で 述べるが、計算時における減衰の効果を高めるために弾性 係数を小さめに設定した.また、路盤の密度は、間隙比を 考慮しない場合の値であり、実際より大きめである.

ここに、路盤の重量の影響は締固め時の初期沈下量に影響するが、その後の応答解析では、締固め終了時点の変位量を0に設定するため、上部にある道床挙動の解析結果には殆ど影響を与えない、むしろ、次項で述べるが、路盤の密度は粘性係数との積の形で減衰に影響し、路盤の密度の不足もしくは超過分は、粘性係数の大小に含まれるので、路盤に関する物性値に実際の値を用いる必要はない、なお、バラスト層と路盤の境界は、実際にはバラストが路盤に埋まって動かない状態になっていた。そのため路盤との接触面の摩擦角のみ、非常に大きな摩擦角として 80° とした。

5.4 不連続体解析における構造減衰特性の導入

構造減衰に関しては、質量マトリックス M、剛性マト リックス K、粘性マトリックス C に関する運動方程式(1) の粘性項に関して、ηを粘性係数とし、式(2)のような質量 マトリックスに比例する減衰を導入する.

$$M \frac{d^{2}x}{dt^{2}} + C \frac{dx}{dt} + Kx = F(t)$$
(1)
$$C = \eta M$$
(2)

ここに、x:二次元座標ベクトル,t:時間,F: 外力. 上述のように、本解析では、路盤上部に水平方向に26個、 鉛直方向に4層の矩形要素を配置し、要素間を接着した構 造とし、変形の連続性を確保することにより、路盤部に大 きな減衰特性を導入した⁴²⁾. なお、個々の構造部材により 物性が異なるので、減衰特性に関しても物性ごとの違いが あるものと考えられる. しかしながら、以下の解析例では、 まずは、路盤、まくらぎ、バラストに同じ値の粘性係数を 導入し、その上で、粘性係数をパラメトリックに変化させ て、道床部のバラストの運動エネルギー特性に与える影響 について明らかにすることにした. 粘性係数については、 $\eta = 0.00$ から 1.00 まで 0.05 刻みで変化させた.

5.5 解析モデルのつき固めと解析手順

モデル作成にあたり事前にDDAを用いてモデル上面より、30 Hz, 50 kNの正弦波動的荷重にて十分締め固めた. その後、図-9に示す実軌道における特急列車通過時の軌



図-7 3次元多面体の2次元多角形への投影

表一1 解析に用いた物性値				
	密度ρ	弾性係数	ポアソン	摩擦角
	(kg/m ³)	E(MN/m²)	ttν	\$(°)
バラスト	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	••



図-8 在来線軌道の横断面に関する不連続体モデル

道パッドにおける荷重測定波形を左右のレール頭頂部に 加えた.本波形は、先頭車両前台車の第1軸および第2 軸通過による動的な荷重の山が、それぞれ 0.1s, 0.2s 付近 にあり、それから約 0.01 s 後に溶接継目による衝撃荷重が 重なった波形である.本波形を用いて、載荷開始から 1 秒間の、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最大時間間隔 0.2 ms で求めた.

結果については、バラストの最大加速度、加速度の周 波数特性、減衰特性に着目し、道床加速度の実測値と比較 した.評価点ブロックは左レール直下で、現場の設置位置 と一致するブロック(block No.082)とした.評価点付近の拡 大図を図-10 に示す.解析にあたっては、毎回、図-10 の上部にある載荷板で1 秒間動的荷重による締固め操作 を行い、載荷板を除去後、図-9の波形を入力する.また、 個々のブロックにより挙動にばらつきがあることから、粘 性係数の影響性の分析に関しても、評価点ブロックを含め た周囲の23 個のブロック挙動の平均を用いた.

5.6 個々のブロック挙動に関する運動エネルギー量

ブロックの水平変位x(t)(m),鉛直変位y(t)(m),回転角 $\theta(t)$ (rad)の時刻歴応答を微分し、速度 $v_x(t), v_y(t)$ (m/s)と角 速度a(t)(rad/s)の時刻歴応答を求めた.

$$v_x(t) = \frac{dx(t)}{dt}, \ v_y(t) = \frac{dy(t)}{dt}, \ \omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt}$$
(3)

ブロック質量をm (kg),慣性モーメントを I_{xy} (kg-m²)として,水平・鉛直・回転の各運動エネルギーの時刻歴応答 $e_x(t), e_y(t), e_r(t)$ (kg-m²/s²=Nm)を計算した.

$$e_{x}(t) = \frac{1}{2}mv_{x}(t)^{2}, \ e_{y}(t) = \frac{1}{2}mv_{y}(t)^{2}, \ e_{r}(t) = \frac{1}{2}I_{xy}\omega(t)^{2}$$
(4)

5.7 運動エネルギーの消費特性の定量化

個々のブロックの運動に応じて、その運動エネルギー量 も時刻歴上で変動するので、ブロックの運動特性の評価は 運動エネルギー量の積分値によった.積分時間は、交通荷 重を載荷した △t=0.4 秒間とした.

$$E_{x} = \int_{0}^{t} e_{x}(t) dt,$$

$$E_{y} = \int_{0}^{t} e_{y}(t) dt,$$

$$E_{r} = \int_{0}^{t} e_{r}(t) dt$$
(5)

つぎに、運動エネルギーの鉛直運動・水平運動・回転運動の合計値を1として基準化し、運動エネルギーの構成比 *h_x, h_y*, *h* を求め、これらを摩擦角と粘性係数をパラメータとして比較した。

$$E_{sum} = E_x + E_y + E_r$$

$$h_x = E_x / E_{sum}, h_y = E_y / E_{sum}, h_r = E_r / E_{sum}$$
(6)







図-10 評価点(082)とその周辺ブロック



6. 不連続体解析による解析結果

6.1 バラストの摩擦角と運動エネルギー特性の関係

図-11 は、粘性係数 $\eta = 0.1$ と固定した場合の、荷重を 載荷した $\Delta t = 0.4$ 秒間における、評価点周囲 23 個のブロッ クの運動エネルギーの累積値である. バラストの摩擦角 $\phi = 10^\circ$ の場合の運動エネルギー累積値の水平・鉛直・回 転の合計を 1 に基準化して示す. 図より、摩擦角 ϕ が大 きくなるにつれて、鉛直方向の運動エネルギーの割合が没 しずつ増加し、回転の運動エネルギーの割合が徐々に減少 する傾向が見られる.

図-12 は、評価点周囲の23 個のブロックにおける最大 加速度(並進成分)である.図より、最大加速度に関して も、摩擦角の影響は小さいことがわかる.摩擦によるエネ ルギー損失は、バラスト集合体の挙動に関して重要な要因 となる.しかし、道床バラストは、路盤上に大きさ数 cm のバラスト粒子を厚さ25 cm 程度に締固めたものであり、 構造物の大きさに比べて粒子の形状の影響が無視できな い.したがって、バラスト表面の摩擦係数よりは、むしろ、 バラストの凹凸による影響が挙動に大きく関連している ものと推測される.既往の岩石に関する実験値等 23,43 を 参考にして以下の解析では $\phi = 50^{\circ}$ を採用した.

6.2 粘性係数と道床バラストの運動エネルギー量

図-13に、荷重を入力した Δt =0.4 秒間における、レー ル直下の評価点周囲の23 個のブロックについて、運動エ ネルギー量(鉛直運動・水平運動・回転運動)の合計の累 積値を粘性係数 η をパラメータとして示す. 図では、構 造減衰を考慮しない場合(η = 0)の運動エネルギー累積値 について、鉛直・水平・回転成分の3 つの合計値を1とし て基準化した. 図より、粘性係数が大きくなるにつれて、 バラストの運動エネルギー量が急激に減少することがわ かる.また、いずれの粘性係数でも、鉛直成分が大きく、 次いで、回転成分、水平成分の順となっている.

6.3 バラストの最大加速度

図-14に、レール直下の評価点周囲の23 個のブロック 平均の最大加速度値を示す.載荷波形を鉛直方向に加えた ことから、いずれの条件下でも、最大加速度値は鉛直方向 に関するものであった.開発したセンシングストーンによ る現場測定値では最大加速度が 80 m/s²程度,ほぼ同位置 にて従来型一軸センサで測定した結果では 80~150 m/s² であった.これらの測定加速度の差は、開発したセンシン グストーンの設置位置が、一軸センサより下方であったた めと、バラストの大きさの違いが影響しているものと考え られる.ここでは、衝撃波形載荷後の減衰時間と最大加速 度値とを参考にして、本解析では粘性係数として $\eta = 0.45$ を採用することにする.

6.4 最大加速度に関する再現性

式(2)の減衰のパラメータとして $\eta = 0.45$ と仮定した場 合の,評価ブロック(block082)の挙動の鉛直加速度の時刻 歴応答を図-15 に示す.図より,解析結果に関しても, 載荷荷重(図-9)における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ており,その後,高周波成分 を含む急激な減衰振動が生じていることがわかる.

バラストのミクロな挙動に着目すると、個々のバラスト の形状や大きさ、局所的な拘束条件の違い、あるいは、応 力が伝達される主要な柱構造の内部にあるか否かにより、 個々のブロックの局所的な挙動に差異がある.そのため、 実測結果と数値解析結果を1対1で対応させて、値を直接 的に比較できるものではない.このことを前提としながら、 鉛直方向の最大加速度に着目して、解析結果と実測値を比 較すると、現場での測定では、上述のように、開発したセ ンシングストーンによる現場測定値では、最大加速度が 80 m/s²程度、従来型の一軸センサでは 80~150 m/s²であ り、解析結果は 80 m/s² と概ね実測値に近い値になった.



6.5 減衰性能に関する再現性

減衰性能に関しては、実測値では前述のように、車輪通 過の衝撃荷重載荷後、概ね 0.04 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測定された.

数値解析における減衰の再現性に関しては、式(2)に示した粘性係数の値の設定によって大きく異なる. 一般の連続体構造物では、地震による応答解析に関連して、粘性係数 $\eta = 0.03 \sim 0.05$ 程度の小さな値が用いられている. 一方、不連続体構造物では減衰の詳細に関しては、現状ではまだ十分には検討されていないが、たとえば、岩盤斜面の落石挙動に関して、現場実験とその再現が試みられており、衝突によるエネルギー損失を考慮したうえで、さらに、実験結果に一致するように $\eta = 0 \sim 0.20$ の値を採用している⁴⁴.

本解析では、 η の値を η = 0.00 から 1.00 まで 0.05 刻みで 変化させて繰返し解析を行い、その結果より衝撃載荷後の 減衰の傾向が概ね一致する値として η = 0.45 採用した.数 値解析の結果については、たとえば図-15 に示すように、 衝撃荷重の載荷タイミングに一致して、大きな加速度値が 得られ、その後 0.05 秒程度の時間で急速に減衰する傾向 が再現できている.

6.6 周波数特性に関する再現性

不連続体解析による評価点ブロック(block082)の鉛直方 向加速度のパワースペクトル密度関数を図-16 に示す. また,センシングストーンによる道床振動加速度のパワー スペクトル密度関数は、上述の図-4のとおりである.

図-4(a)より,現場の実測値では、50~180Hzの低周波 領域および340Hz,460Hz 近傍の高周波領域に応答のピー クがあるが、一方、解析結果では140Hz および180Hz 付 近に応答のピークが生じたが、さらに低い50Hz 付近の応 答は殆どみられなかった.さらに高周波の応答に関しては、 数値解析結果では250Hz 近傍、300Hz 付近、450Hz 付近 にも応答のピークが生じた.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.

これらの結果に関しても、センサの感度や観測条件、設置条件、記録時間の刻みが異なり、必ずしも数値解析結果と一概に比較できるものではない.しかし、不連続体解析の結果を見ると、バラストの挙動に関連すると考えられる約 500Hz までの周波数領域を概ね網羅できている.

本解析は2次元解析であり、現象の再現性の面では、今後、実験・測定により詳細な検討が必要であることはいうまでもない.しかし、計算量が3次元解析に比べて遙かに少なくてすむ2次元解析でも、物性値を改善することにより、概ね実現象を再現することができ、軌道構造の改善の効果の評価等の工学的な内容に活用できるものと考える.

7. まとめ

本論文では、三軸加速度センサを用いたセンシングスト ーンを製作し、軌道でのバラスト挙動の測定試験を行った. また、測定結果より得られた知見をもとに、バラスト形状 を多角形で近似し、構造減衰を考慮した不連続変形法解析 により、バラストの挙動の再現を試みた.本研究の成果を 以下に列挙して結論とする.

(1) 列車走行時の道床内部バラストの三次元的な動的挙動 (並進運動・回転運動)を測定するために,三軸加速度センサを複数用いたセンシングストーンを開発した。

(2) 試作品を実軌道に埋設し、特急列車通過時のバラストの動的挙動を測定した.従来、土質材料を粒状体として捉える場合、粒子の並進運動と回転運動の両者を考えてきているが、バラストに関しては実測により確認されていなかった.本測定により、バラストについて、動的荷重を受けて並進運動するのみでなく、高周波の回転振動を伴った急



減な減衰運動をしていることが確認できた.

(3) バラスト形状実測値を用いて、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、列車走行時のレール圧力波形実測値に対する、軌道 構造の動的応答特性について検討した。

(4) バラスト道床の動的挙動に関する2次元不連続変形法 に関し、バラスト挙動の最大応答加速度、衝撃荷重載荷直 後の減衰特性、高周波挙動の再現性に着目して解析結果を 比較した.本解析の場合、摩擦角が動的な挙動特性に与え る影響は小さく、粘性係数の影響は大きいことがわかった. (5) 摩擦係数を固定し、粘性減衰のみをパラメトリックに 変化させて、2次元不連続変形法を繰り返し、現場測定結 果に近い最大加速度値となる粘性減衰を採用するという パラメータを決定を提案した.本解析に限ってではあるが、 粘性係数η=0.45を採用すると、バラスト挙動の最大応答 加速度、衝撃荷重載荷直後の減衰特性、高周波挙動の再現 性ともに、概ね実測値に近い解析結果が得られた.

参考文献

- 1) 高原清介: 新軌道材料, 第7編道床バラスト, pp.387-418, 鉄道現業社, 1985.
- 2) 大島洋志: 道床バラストの石質と技術的課題, 鉄道総研 報告, Vol.4, No.4, pp.18-26, 1990.
- 3) 名村 明:「軌道を構成する材料と構造」道床バラスト, 鉄道技術講座「軌道構造の設計・施工と保守」,日本鉄 道施設協会誌, Vol.45, No.2, pp.66-68, 2007.
- 4) 垂木尚志: 道床・路盤・路床に関する研究開発の経緯, 鉄 道総研報告, Vol.7, No.2, pp.1-10, 1993.
- 5) 石田誠: 軌道動的応答モデルのこれまでの発展と今後の展望,鉄道総研報告, Vol.14, No.4, pp.1-6, 2000.
- 6) 涌井 一, 奥田広之: PC マクラギの限界状態設計法に関する研究, 土木学会論文集, No.557/V-34, pp.35-54, 1997.
- 7) 奥田広之,曽我部正道,松本信之,涌井一:フローティング・ラダー軌道の波動伝播速度および衝撃輪重特性, 鉄道総研報告, Vol.15, No.12, pp.27-32, 2001.
- 8) 浅沼 潔, 松本 信之, 奥田 広之, 涌井 一: プエブロ実 験線の重軸重列車走行におけるバラスト・ラダー軌道の 耐久性・保守省力効果, 鉄道総研報告, Vol.16, No.2, pp.45-50, 2002.
- 涌井一:衝撃輪重に起因する車両/軌道構造系の課題, 鉄道総研報告, Vol.17, No.9, pp.1-8, 2003.9.

- 10) (財)鉄道総合技術研究所編:在来鉄道運転速度向上試験 マニュアル・解説,軌道各部の振動特性,pp.216-220, (財)鉄道総合技術研究所,研友社,1993.
- G-H. Shi and R.E Goodman: Discontinuous Deformation Analysis, *Proceedings of the 25th U.S. Symposium on Rock Mechanics*, pp. 269-277, 1984.
- 12) G-H. Shi.: Discontinuous Deformation Analysis: A new numerical model for the statics and dynamics of block systems, *Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of California*, Berkeley, 378 p, 1988.
- G-H. Shi.: Forward and backward discontinuous deformation analyses of rock systems, *Proceedings of the International Conference on Rock Joints*, Balkema, pp. 731-743, 1990.
- 14) G-H. Shi: Block system modeling by Discontinuous Deformation Analysis, *Computational Mechanics Publications*, London, England, 209 p, 1993.
- 15) 佐藤 裕, 武藤寅一, 豊田昌義, 梅窪 茂: 道床強さ(第1 報), 鉄道業務研究資料, 11-9, pp.215-226, 1954.
- 16) 佐藤 裕, 豊田昌義, 市川 茂: 道床強さ(第2報)振動測 定結果, 鉄道業務研究資料, 11-17, pp.419-433, 1954.
- 17) 佐藤 裕: 軌道構造と振動との関係について, 鉄道業務 研究資料, 13-8, pp.200-224, 1956.
- 佐藤吉彦:有道床における軌道振動の理論解析,鉄道業務研究資料,34-4, pp.133-139,1977.
- 19) 三浦 重: 軌道構造の動特性モデルの構築, 鉄道総研報 告, 9-12, pp.7-12, 1995.
- 20) 佐藤吉彦:新軌道力学,鉄道現業社,571p,1997.
- 21) 内田雅夫,石川達也,名村 明,高井秀之,三和雅史: 軌道狂い進みに着目した有道床軌道の新しい設計法, 鉄道総研報告,9-4, pp.37-42, 1995.
- 22) 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),1997.
- 23) 石川達也,須長 誠,董 軍,名村 明:大型繰返し三 軸試験による道床バラストの変形特性の検討,土木学会 論文集, No.575, III-40, pp.169-178, 1997.
- 24) 木幡行宏, 只野尚徳, 関根悦夫: 繰返し載荷履歴を受け る単粒度砕石の変形特性, 鉄道力学論文集, 5, pp.61-65, 2001.
- 25) 木幡行宏, 三浦宏介, 井口 充, 関根悦夫: 相似粒度に よる単粒度砕石の強度・変形特性,鉄道力学論文集, 7, pp.25-30,2003.
- 26) 石川達也,名村 明: 実物大試験による道床バラスト部 繰返し変形特性の検討,土木学会論文集,No.512, IV-27, pp.47-59, 1995.
- 27) 名村 明, 木幡行宏, 三浦清一: 道床バラストの繰返し 変形特性と推定法, 応用力学論文集, 5, pp.793-800, 2002.
- 28) C. Cholet, X. Oviedo, G. Combe, P.E. Gautier, K. Sab, J.J. Moreau, G. Foret, F. Josse, L. M. Cleon: Study of the mechanical behaviour of the ballast using discrete approach, WCRR 2001 (CD-ROM), 2001.
- 29) C. Cholet, G. Saussine, G. Combe, C. Bohatier, F. Dubois, K. Sab, P.E.Gautier: Mechanical behaviour of ballast using

discrete element methods, WCRR 2003, pp.877-884, 2003.

- 30) 日本材料学会編: 岩の力学 基礎から応用まで, 丸善(株), 688 p, 1993.12.
- 31) 紅露一寛,梶原宗光,阿部和久:下負荷面モデルを用いた鉄道用バラスト材の繰り返し変形特性,鉄道力学論文集,11,pp.7-13,2007.
- 32) 河野昭子,名村明,相川明,浦川文寛:多面体要素を用 いた DEM 三軸王縮試験の試み,第43 回地盤工学研究 発表会, DS-16 粒子特性の評価と工学的応用, No.412, 2007.
- 33) A-A. Shaer: Analysis des deformations permanentes des voies ferrees ballastees - approche dynamique, Docteur de L'ecole Nationale des Ponts et Chaussees, 129 p, 2005.
- 34) 北川敏樹: 転動音の特性と軌道・車両に係わるパラメータの影響, 鉄道総研報告, Vol.22, No.5, pp.23-28, 2008.
- 35) 上妻雄一, 北川敏樹, 長倉清: 在来線用鉄道車輪の振動 特性に影響を及ぼす形状因子, 鉄道総研報告, Vol.21, No.3, pp.17-22, 2007.
- 36) G.Saussine, C.Cholet, P.E.Gautier, et.al: Modelling ballast under cyclic loading using Discrete Element Method, Cyclic behaviour of soils and liquefaction phenomena, Triantafyllidis (ed), Tayler & Fracis Group, London, pp.649-658, 2004.
- 37) 石川達也, 関根悦夫, 三和雅史, 大西有三: バラスト軌 道の不連続体解析に対する粒子特性の力学的影響評価, 応用力学論文集, Vol.10, pp.513-522, 2007.
- 38) 阿部和久, M.Syakir, 紅露一寛: 二次元粒状体モデルによるバラスト道床の沈下解析,鉄道力学論文集,10, pp.49-54,2006.
- 39) 浦川文寛, 相川明, 名村明: 砕石形状実測データを用い たバラスト軌道のモデル化と三次元個別要素による軌 道動的応答解析, 鉄道力学論文集, 12, pp.67-72, 2008.
- 40)橋口公一,上野正実,陳忠平:下負荷面および回転硬化の概念に基づく土の弾塑性構成式,土木学会論文集, No.547,Ⅲ-36, pp.127-144, 1996.
- 41) 相川明, 浦川文寛: 鉄道軌道の砕石バラスト集合体の三 次元形状測定とそのモデル化, 第 57 回理論応用力学講 演会講演論文集, pp.217-218, 日本学術会議, 2008.
- 42) 相川明, 池永貴史: 橋脚沈下を受ける石造アーチ橋の構造安定性と局所的な振動特性に関する不連続体解析, 応用力学論文集, Vol.8, pp.617-626, 2005.
- 43) 三谷泰浩, 江崎哲郎, 浦川文寛, Mostafa Sharifzadeh: せん断変形過程における岩盤不連続面の間隙幅分布の評価に関する研究, 第 34 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.57-64, 2005
- 44) I.Hagiwara, T.Sasaki, et.al.: Estimation and simulation of vegetation effect on rockfall using discontinuous deformation analysis, ISRM International Symposium / Third Asian Rock Mechanics Symposium, No.258, 2004.11.

(2008年4月14日 受付)