

(32) まくらぎ下面荷重測定と三次元個別要素法による動的応答解析

Measurement Techniques for Dynamic Pressure on a Sleeper Bottom and
Dynamic Behavior of Ballasted Track by 3-Dimensional Discrete Element Method

相川 明*

Akira Aikawa

*工博, 主任研究員, (財)鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

Key Words : (conventional ballasted track, track deterioration, polyhedron model, 3D motion of ballast particle, 3D discrete element method (DEM), pressure on a sleeper bottom)

キーワード: バラスト軌道, 軌道破壊, 多面体モデル, バラスト粒子の三次元挙動, 三次元個別要素法解析(DEM), まくらぎ下面応力

1. はじめに

バラスト軌道は任意形状を有するバラスト粒子の集合体(粒状体)である。バラスト軌道上を列車が走行すると、軸重通過による動的荷重とともに、車輪-レール間のダイナミクスに起因する衝撃荷重が、レール、軌道パッド、まくらぎを介してバラスト層まで伝わる。軸重通過による動的荷重および衝撃荷重を繰返し受けることにより、集合体をなす個々のバラスト粒子には、粒状体特有の回転挙動、粒子間の摩擦すべり、粒子破碎、粒子表面の摩耗などの微小な現象が発生する。これらの微小現象が長期間にわたり累積して、道床内部に局所的な塑性変形が不均一に発生する。道床内部における不均一な塑性変形現象は、軌道面において不同沈下による軌道不整をもたらすことになる。この軌道不整の進展現象のことを「軌道破壊現象」¹⁾とよんでおり、軌道破壊のメカニズム解明と、抑止策を含めたバラスト軌道の維持管理のあり方が重要な技術課題となっている。

バラスト軌道内部における塑性変形の進展現象は、その骨格構造をなす不連続なバラスト粒子の力学的特性に支配される。したがって、走行荷重による軌道破壊のメカニズム解明には、軌道において、バラスト粒子に作用する荷重環境を測定し、さらに、粒子レベルの実形状と詳細構造を模擬した不連続体モデルを用いて、動的荷重および衝撃荷重に対する個々の粒子の挙動を数値解析的に調べることが有効と考えられる²⁾。

しかし、まくらぎとバラストとの境界層における荷重伝達のメカニズムについては、例えば名村らによる実物大載荷試験において^{3,4)}、まくらぎと碎石層との接触面での応力分布に、まくらぎの変形挙動が関係することを指

摘しているが、その後、列車走行時の軌道での実態については殆ど解明されていない。

そこで、本論文では、列車走行に起因する動的荷重・衝撃荷重が、まくらぎ-バラスト碎石層の境界にて、どのようにして伝達されるかを詳細に把握するために、高周波特性に優れる piezoelectric film (PVDF) を用いた超薄型の衝撃荷重センサを、まくらぎ下面に隙間無く取り付けた構造を持つ「センシングまくらぎ」を開発した。これを試験軌道および実軌道に敷設し、列車走行時にまくらぎ下面よりバラスト碎石層に作用する動的荷重と衝撃荷重を測定した。

つぎに、粒子レベルの実形状と詳細構造を模擬した不連続体モデルを構築し、動的荷重および衝撃荷重に対する個々の粒子の挙動を数値解析的に調べた。すなわち、三次元デジタイザを用いて、実碎石の頂点に関する三次元座標を測定し、バラストの三次元形状を多面体モデルで表現した。これらの多面体近似したバラストモデルを三次元個別要素法により数値解析上で締固め、さらに、軌道パッド、まくらぎを多面体剛体要素で表現し、バラスト粒子の詳細構造を模擬した三次元不連続体力学モデルを構築した。本モデルに、実軌道での列車走行時のレール圧力波形を入力し、三次元個別要素法による軌道動的応答解析を行い、まくらぎ下面の応力とバラスト粒子の挙動について数値解析的に検討した。

なお、三次元個別要素法のソルバーとしては Itasca 社の 3DEC⁵⁾を用いた。本ソフトは、要素間の接触機構により生じる荷重を要素に加わる外力とし、各要素で三軸の並進および回転について、要素の重心の速度・角速度を未知数として、運動方程式を差分法で時間軸に関して離散化し、時間増分 Δt 単位ごとに解くものである。本ソ

フトは、バラスト碎石の不連続体構造を三次元多面体の集合体として表すことができ、要素間の接触については、要素同士で微小な貫入が生じた際にのみ作用するようなバネとスライダを多面体要素間に配して、荷重の伝達と変形挙動を表現するものである。

2. まくらぎ下面荷重の測定

2.1 衝撃荷重センサとセンシングまくらぎの構造

まくらぎ下面に作用する荷重を測定するために、図-1に示すような、コンクリートまくらぎの下面に、一辺が8cmの正方形の超薄型衝撃荷重センサ75個(25個×3列)を隙間無く貼り付けた構造の「センシングまくらぎ」を製作した⁶⁾。荷重センサについては、図-2に示す piezo 圧電フィルム(PVDF)を用いた衝撃荷重センサ(センサ自体の厚さ4.8mm)⁷⁾を採用することにより、スペーサやジグを含めた厚さを2cm以内とした。

本センサは、図-3に示すように、蒸着電極付きのPVDF両面に、シリコンゴム製弾性板を貼り、さらにその外側を金属板でサンドイッチ構造にしたものである。これに鉛直荷重が加わると、弾性体部分がポアソン効果で水平方向に延伸し、piezo電圧を効率よく発生する仕組みである。本センサは、電気回路ではコンデンサと同じなので、内部抵抗を有する歪みゲージ等とは異なり、高電圧を受ける軌道直下で用いても誘導電流によるノイズが発生しない。測定能力は、センサ面積1cm²あたり0.2kNまでの動的荷重・衝撃荷重を測定でき、しかも、低周波から数kHzの高周波域まで安定した測定性能を有する。

まくらぎ本体に関しては、その下面に厚さが2cmのセンサを取り付けることになるので、従来品のまくらぎより厚さが2cm薄く、それでいて従来品とほぼ同程度の強度を有するまくらぎを新たに設計、製作した。さらに、絶縁抵抗試験により電気絶縁抵抗の基準値(乾燥・降雨状態ともに軌道1kmあたり2.0Ω以上)を満たしていること、および、JIS-E1202「ポストテンション式PCまくらぎ」⁸⁾に準じた強度試験を実施して基準強度を満たしていることを確認し、本まくらぎを実軌道に敷設しても安性であることを確認した。

2.2 実験線でのモーターカー走行試験と測定結果

開発したまくらぎの測定性能を確認するために、実験線に本まくらぎを設置し、モーターカーによる走行試験(軸重60kN、軸距3.5m、速度40km/h)を実施し、列車走行によるまくらぎ下面の動的荷重と衝撃荷重を測定した。本まくらぎは寸法・強度ともに従来品とほぼ互換であり、設置作業にあたっては、既設まくらぎと入れ替えて、通常の締結装置でレールに締結するのみでよい。

測定では、左レールの頭頂面に、図-4に示すような人工の凹凸形状を与えて、列車通過による衝撃荷重を発生させた。測定結果の一例として、レール頭頂面の凹凸箇

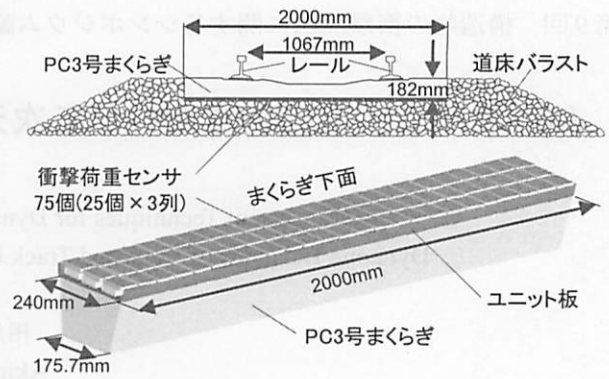


図-1 センシングまくらぎの概略図

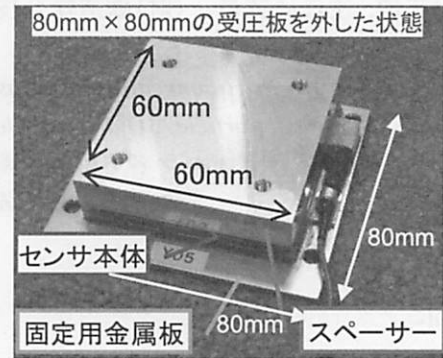
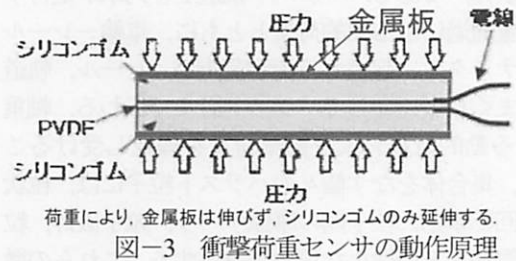


図-2 衝撃荷重センサの外観



荷重により、金属板は伸びず、シリコンゴムのみ延伸する。

図-3 衝撃荷重センサの動作原理

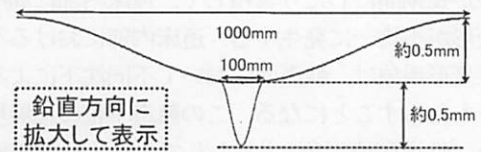


図-4 レール頭頂面の凹凸形状

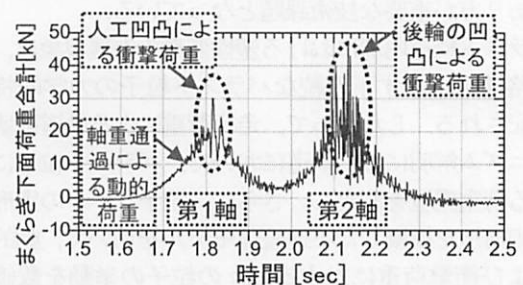


図-5 まくらぎ下面荷重測定結果(合計値)

所を通過する際の、まくらぎ下面に作用する荷重合計値の波形を図-5に示す。図より、前軸、後軸通過によるM字型の動的荷重が測定されていることがわかる。なお、後軸通過時に高周波の衝撃荷重がみられる。これは車輪

の凹凸に起因する衝撃荷重であるが、このことより、高周波の衝撃荷重は、レール、まくらぎを介して、バラスト層まで伝達されていることがわかる。

また、図-6は、前軸が凹凸箇所を通過する際（図-5の第1軸通過時の丸い波線をつけた範囲）の拡大図である。図より、1.80~1.85sの間で、レール頭頂面に与えた人工の凹凸に起因する約20kNの荷重変動が明瞭に読みとれ、本センシングまくらぎが衝撃荷重に関する十分な測定能力を有することが確認できた。

また、衝撃荷重がピークとなる時刻前後でのまくらぎ下面荷重の分布を図-7に示す。図より、まくらぎ下面荷重は、人工の凹凸を設けた左レールに偏って発生しており、また、面的なばらつきも大きく、局所的に集中して荷重が作用している。本測定の結果より、まくらぎ下面荷重に作用する荷重に関しては、まくらぎ下面の全面で均等に受け持つのではなく、時間的にも空間的にも一様ではなく、ばらつきが大きいことがわかった。

3. バラスト軌道に関する三次元モデル構築

実軌道の溶接継目箇所において、列車通過時における動的挙動の測定を行った。現場でのバラスト軌道の挙動を数値解析的に再現し、バラスト粒子の挙動特性を明らかにするために、碎石形状を三次元多面体で数値化し、バラスト軌道の詳細構造を模擬した不連続体モデルを構築した。本モデルに、実軌道でのレール圧力測定波形を入力し、三次元個別要素法による軌道動的応答解析を行い、実軌道での測定値と比較し、三次元個別要素法解析による動的挙動の再現性と課題について検討した。

3.1 バラスト碎石の三次元形状測定

接触式三次元デジタイザを用いて約4000個の実バラストの三次元形状を測定した。まず、個々のバラストの頂点座標を接触式三次元デジタイザ（Immersion社製MicroScribe-G2）を用いて測定し、新たに開発した多面体自動生成アルゴリズムにより、碎石形状を多面体数値モデルとして自動作成した。図-8に多面体モデルの作成例を示すが、モデルは実物の形状を概ね再現できていることが分かる。

また、多面体モデルで表現したことにより、従来の粒度などの経験的な指標に代わり、碎石集合体の形状特性を質量、主軸まわり慣性モーメント、表面積などの定量的な物理指標で表現できるようになった。図-9は、モデルに用いた頂点数と、主軸まわり慣性モーメントおよび体積との関係を示したものである。体積については、実体積との比で示す。図より、測点数が増加するにつれて、主軸まわり慣性モーメントも体積比も増加し、その後は一定値に漸近する傾向が見られる。この例では、測点数がおおよそ30点をこえるとほぼ一定値に漸近しており、十分な再現精度があると判断できる。

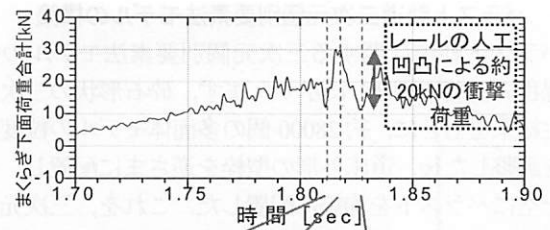


図-6 凹凸通過前後のまくらぎ下面荷重(拡大図)

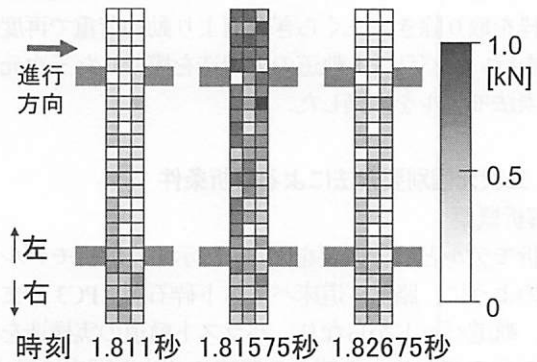


図-7 凹凸通過前後のまくらぎ下面荷重分布

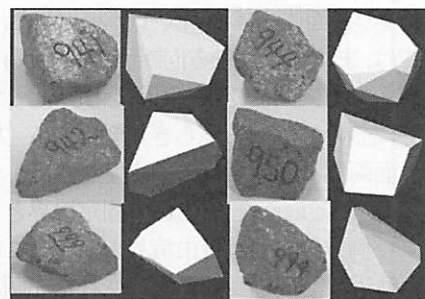


図-8 バラスト碎石現物と多面体モデル

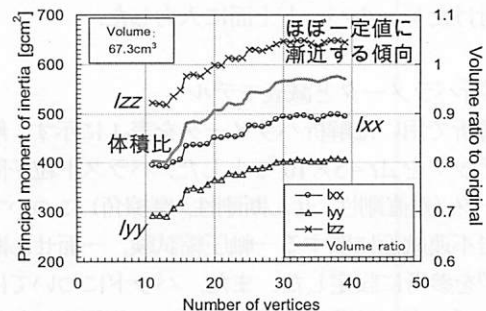


図-9 主軸周りのモーメントと体積の再現性

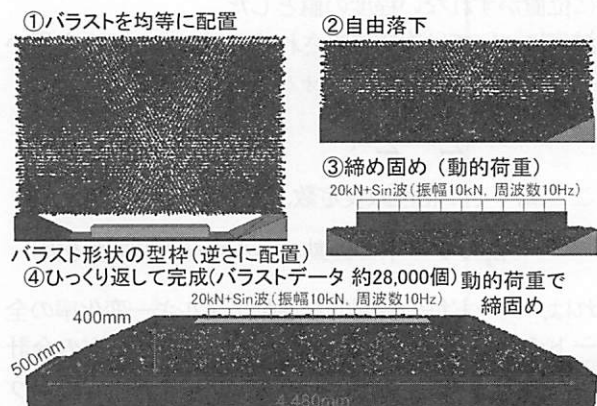


図-10 三次元個別要素法モデルの作製過程

3.2 バラスト軌道三次元個別要素法モデルの構築

バラスト軌道に関する三次元個別要素法モデルの作製過程の概略を図-10 に示す。まず、砕石形状の三次元測定結果をもとに、約28000個の多面体モデルの粒度分布を調整した後、道床外形の型枠を逆さまに配置し、その上空にバラストを均等に配置した。これを、三次元個別要素法を用いて自由落下させ、さらに動的荷重で締固めた。つぎに、モデル全体をひっくり返して、道床形状の型枠を取り除き、まくらぎ表面より動的荷重で再度締固めを行い、バラスト軌道の実構造を模擬した三次元個別要素法モデルを構築した。

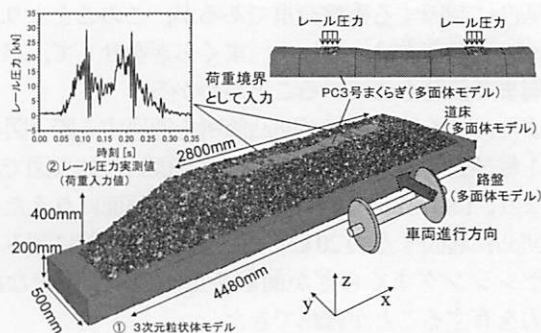


図-11 三次元個別要素法による軌道動的挙動解析

3.3 三次元個別要素法による解析条件

(1) 解析概要

解析モデルと解析概要を図-11 に示す。解析モデルは前述のように、路盤、道床バラスト砕石層、PC3号まくらぎ、軌道パッドからなり、バラスト軌道の実構造を模擬したものである。モデルの概略の寸法を図中に示す。本モデルでは、道床部を多面体粒子の集合体で、まくらぎ、路盤を1つの多面体剛体要素でモデル化した。なお、以下の説明では、まくらぎ長軸方向断面(Y-Z平面)を縦断面、まくらぎ短軸方向断面(X-Z平面)を横断面とする。モデルの境界については、まくらぎ短軸方向(Y方向)について、境界面両側に摩擦ゼロの固定壁を設け、モデル下面(Z方向)は、路盤底面を変位0の固定境界とし、モデル上面および側方の法面は自由境界とした。このモデルに対し、実軌道の溶接継目部で測定された先頭車前台区のレール圧力波形を解析モデル上面のレール位置に取り付けたレールパッド上面に入力した。

表-1 解析パラメータ

要素内パラメータ	バラスト	まくらぎ	パッド	路盤	側壁
密度 ρ [kg/m ³]	2720	2400	1000	2400	3000
要素間パラメータ	バラスト ↔	まくらぎ ↔	パッド ↔	路盤 ↔	側壁 ↔
垂直ばねkn [Pa/m]	2.0×10^{10}	2.0×10^{10}	1.0×10^{10}	2.0×10^{10}	2.0×10^{10}
せん断ばねks [Pa/m]	4.9×10^9	4.9×10^9	1.0×10^{10}	4.9×10^9	4.9×10^9
粘性係数c [Pa]	0	0	1.0×10^{10}	0	0
摩擦角 ϕ [°]	34.1	30	80	40	0

(2) 解析パラメータと減衰モデル

本解析で用いた解析パラメータを表-1 に示す。解析時間ステップを $\Delta t = 5 \times 10^{-6}$ s とした。バラスト粒子間のパラメータ(垂直剛性、せん断剛性、摩擦角)については、花崗岩不連続面に関する一軸圧縮試験、一面せん断試験結果⁹⁾を参考に設定した。また、パッドについては、本解析モデル上では荷重境界としてのみ作用するため、パラメータはある程度任意に設定できる。ここでは、載荷時に位置がずれない程度の値とした。

減衰については次式で表される Global damping を用いた⁵⁾。これは3DECのデフォルトの設定である。

$$R = \sum c\dot{x} / \sum \dot{E}_k$$

ここに、 c : 粘性減衰定数、 \dot{x} : ノードの速度

\dot{E}_k : ノードの運動エネルギーの時間変化率

これは、ノード毎の時間的な運動エネルギー変化率の全ノードの合計とノード毎の減衰力 $c\dot{x}$ の全ノードの合計が一定値 R (デフォルトの値 0.5 を用いた) となるように減衰定数を調整するものである。

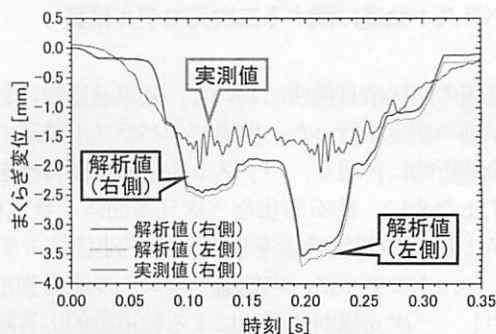


図-12 まくらぎ変位

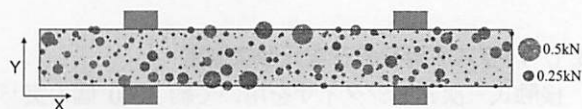


図-13 まくらぎ下面荷重分布 (解析)

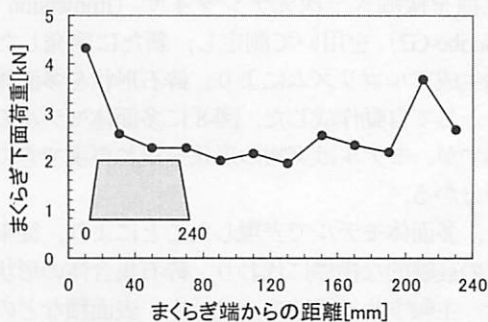


図-14 まくらぎ下面荷重分布 (縦断面, 解析)

3.4 三次元個別要素法による解析結果

(1) まくらぎ変位

図-12 は、解析で得られたまくらぎ左右端の変位と、まくらぎ右端の変位の実測値である。図より、解析結果は実測値と比較して、前後軸通過時でそれぞれ約 0.5 mm、

1.5 mm ほど大きいのが、前後軸通過で2つのピークが発生する傾向を概ね再現できていることがわかる。しかし、軸通過時の継目部で発生した高周波の衝撃荷重については、本解析の結果では十分に再現できていない。高周波の応答の再現性に関しては今後改善が必要と考える。

(2) まくらぎ下面荷重

まくらぎ下面の荷重の分布を図-13 示す。図より、軌間中心付近のまくらぎ側面付近で荷重が集中する部分が見られる。まくらぎ縦断面に関して 20 mm 毎の荷重を合計すると、図-14 となる。図より、まくらぎ側面付近で、中央部より荷重が大きくなる傾向がみられる。

図-15 に、解析結果によるまくらぎ下面荷重の合計値と、左右の패드上面に入力した荷重合計値を示す。図より、入力波形の振動成分を除いた中央値とまくらぎ下面荷重はほぼ一致している。しかし、まくらぎ変位と同様に、入力波形の高周波成分、特に溶接継目部通過時の衝撃荷重が十分に再現できていないことがわかる。

(3) バラスト粒子の並進・回転速度ベクトル分布

解析結果をもとに、個々のバラストの重心に関する並進速度と回転に関する角速度の分布特性を求めた。図-16 に、前軸通過による載荷過程($t=0.097$ s)、および、後軸通過時の除荷過程($t=0.239$ s)における、レール直下の縦断面上での、バラスト粒子の並進速度と回転速度の分布を示す。なお、前軸通過による載荷過程では前軸がまくらぎ中央より 271 mm 手前を通過した $t=0.097$ s にて、バラストの速度および角速度の絶対値合計が最大となり、一方、台車通過後の除荷過程では、後軸がまくらぎ中心より 552 mm 後方を通過した際 ($t=0.239$ s) に速度と角速度が最大となった。図中、並進速度を矢印で、回転挙動に関する角速度を円の大ききで示す。図より、載荷過程、除荷過程ともに、まくらぎ直下のバラストの運動が顕著であり、また、まくらぎ端部付近に回転挙動が発生していることがわかる。

図-17 は、バラスト粒子の速度ベクトルと角速度の分布を軌道横断面について示したものである。図では、載荷過程 ($t=0.097$ s) および、前軸がまくらぎ中心直上を通過した時刻 ($t=0.110$ s) での分布を示す。載荷過程で

の速度分布より、まくらぎ直下の領域では、鉛直方向に大きく沈み込む動きがあり、まくらぎ端部から斜め下部の領域では、バラストは側方に移動する傾向が見られる。一方、前軸通過直後では、バラストに大きな動きは見られない。図より、まくらぎ中央付近のバラストの移動はほぼ鉛直方向に限定されているのに対し、まくらぎ側面付近では、斜め下向きの移動とともに、局所的な回転移動が発生していることがわかる。

3.5 バラストの挙動特性と解析法に関する課題

まくらぎ下面の荷重については、まくらぎ側面付近に集中し、かつ、まくらぎ側面付近のバラストには、回転および側方への移動する傾向が得られた。これは、まくらぎが下向きに運動する際、まくらぎ側面付近のバラストは、まくらぎに対して「くさび」のように傾斜して接触面が接するため、鉛直方向の移動に対する抵抗力に加え、側方および回転移動に対する抵抗力が影響し、中央

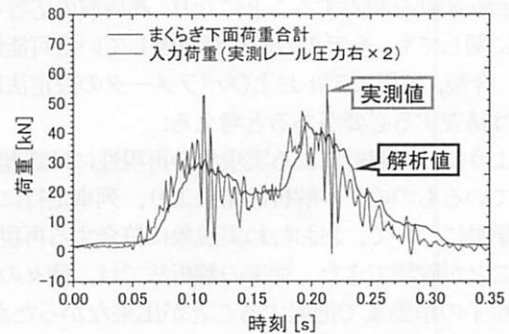


図-15 まくらぎ下面荷重合計

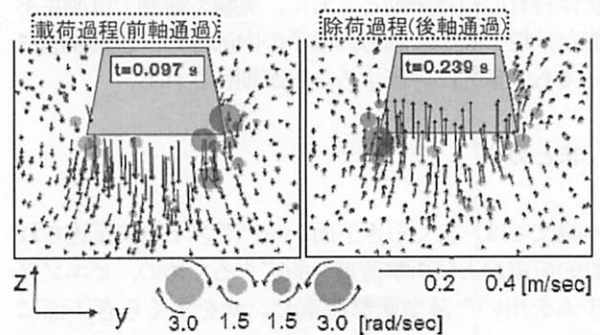


図-16 バラスト粒子の並進・回転速度ベクトル

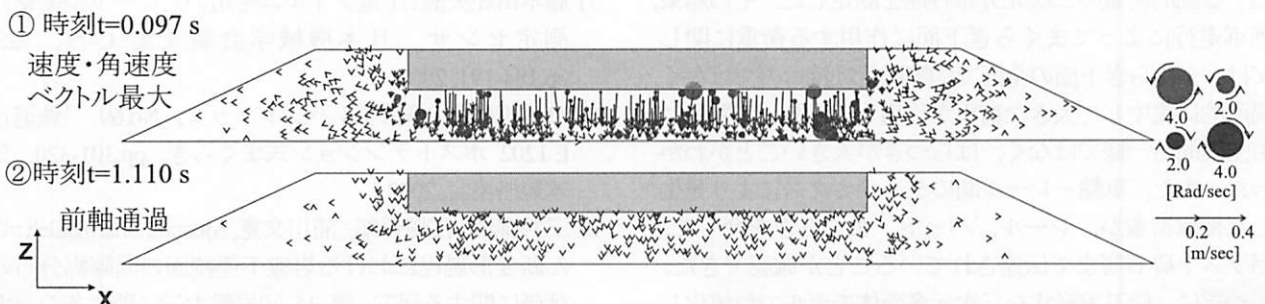


図-17 バラストの速度ベクトルおよび角速度ベクトル (横断面, 解析)

部と比較して剛性が高くなり、その結果として荷重分担が大きくなるのが影響しているものと考えられる。また、本解析では、まくらぎ要素を1個の剛体要素としてモデル化した。まくらぎに関して変形挙動を考慮するモデルにすることにより、実現象に近い解析結果を得られるものと思われる。

また、実軌道での測定結果では、溶接継目の通過時に生じた衝撃荷重が、パッド、まくらぎを通じて道床にまで伝わっていたが、一方、解析結果をみると、パッド上面に入力した荷重の高周波成分の応答については、まくらぎ、道床では十分に再現できていなかった。これは、解析に用いた減衰モデルは系全体の運動エネルギーの時間変動に比例した減衰を与えるため、溶接継目通過時に生じるような短期的な運動の変化が過剰に拘束されたためと思われる。また、本モデルでは、個々のバラストの三次元モデル化にあたり、計算効率を考慮して、できるだけ頂点数を減らしたモデルを採用した。しかし、頂点数を減らすと碎石形状が尖った形状となり、個々の粒子の回転挙動を制限することになり、高周波の応答の再現性に関しても、モデルの形状が原因している可能性がある。今後、解析モデルおよびパラメータの設定法については精査する必要があると考える。

このように、本解析による実現象の再現性には課題が残されているものの、本解析の結果より、列車走行による動的挙動について、おおむね実現象に符合する再現性があることが確認できた。従来の解析法では、個々のバラスト粒子の挙動まで把握することが出来なかったが、粒子構造を詳細に再現した不連続体力学モデルを用いることにより、バラスト粒子の回転や摩擦すべりなどの粒状体特有の複雑挙動とともに、実験や観測では測定不可能な、粒子間の接触力、粒子の内部応力、運動履歴についても定量的に評価することが期待される。

4. まとめ

本論文では、まくらぎ下面からバラスト層に伝達される動的荷重および衝撃荷重を測定するための、ピエゾフィルムを用いた薄型衝撃荷重センサをまくらぎ下面に多数敷き詰めた構造を持つセンシングまくらぎを開発し、実験線および実軌道に敷設して、まくらぎ下面に作用する動的荷重の二次元分布特性を測定した。その結果、列車走行によってまくらぎ下面に作用する荷重に関しては、まくらぎ下面の全面で均等に受け持つのではなく、局所的に集中して大きな荷重が作用しており、時間的にも空間的にも一様ではなく、ばらつきが大きいことがわかった。また、車輪-レール間のダイナミクスにより発生した衝撃荷重が、レール、パッド、まくらぎを介して、バラスト碎石層まで伝達されていることが確認できた。

つぎに、碎石実形状を三次元多面体モデルで数値化し、バラスト軌道を軌道パッド、まくらぎ、道床、路盤から

なる不連続体モデルで表現した。本モデルに、三次元個別要素法により、本モデルにレール溶接継目部におけるレール圧力の実測波形を入力し、1台車通過時における軌道構成部材の動的応答解析を行った。解析結果より、まくらぎ変位については実測値と比較して、若干大きめであるが、前後軸通過で2つのピークが発生する傾向を概ね再現することができた。また、まくらぎ下面荷重と個々のバラストの動特性として、速度および角速度ベクトルを求めた。まくらぎ下面の荷重は、まくらぎ側面付近に集中し、かつ、まくらぎ側面付近のバラストには、回転および側方への移動する傾向が得られた。しかしながら、本解析では、高周波の応答については十分な再現性が得られておらず、モデルの構造、および、減衰および粒子間のばね等のパラメータを精査する必要がある。

今後は、センシングまくらぎを含めた実軌道での動的測定結果に関して、その分布特性および周波数特性の分析を進めて、バラスト層に作用する荷重の実態を明らかにするとともに、三次元個別要素法による数値解析の高精度化をめざすものである。さらに、これらの結果をもとに、バラスト粒子の運動性能、変形性能、エネルギー散逸特性、周波数依存性を定量評価し、保守費低減対策の評価方法についても検討する予定である。

参考文献

- 1) 佐藤吉彦：新軌道力学，鉄道現業社，571p，1997.
- 2) 相川 明：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—，応用力学論文集，Vol.11，pp.487-496，土木学会，2008.
- 3) 名村明：道床沈下抑制から見た最適まくらぎ形状，第167回鉄道総研月例発表会講演要旨，(財)鉄道総合技術研究所，2004.
- 4) 名村明：まくらぎの長さ道床沈下，新線路，2005年1月号，pp.56-59，2005.
- 5) Itasca Consulting Group, Inc. : 3DEC - 3 Dimensional Distinct Element Code, Theory and Background, 2007.
- 6) 相川明，名村明，河野昭子，浦川文寛：まくらぎ下面圧力とバラスト挙動に関する現場測定法の開発，鉄道総研報告，Vol.22，No.8，pp.23-28，(財)鉄道総合技術研究所，2008.
- 7) 藤本由紀夫他：圧電フィルムを用いたシート型衝撃力測定センサ，日本機械学会論文集 C-73，725，pp.184-191，2007.
- 8) 日本規格協会編：JIS ハンドブック，No.69，「鉄道」，E 1202 ポストテンション式まくらぎ，pp.301-320，日本規格協会，2002.
- 9) 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.