

(31) 高速回転走行する列車車輪とまくらぎとの衝撃挙動解析

Discrete Behavior Analysis to which the Rotating Wheel of a High Speed Train collides with a Sleeper

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, high-speed train, derailment, discrete analysis, discontinuous deformation analysis (DDA)

キーワード: バラスト軌道, 高速鉄道, 脱線挙動解析, 不連続変形法解析(DDA)

1. はじめに

新潟県中越地震において, 走行中の新幹線が脱線するという事故が発生した. 高速走行中の鉄道車両が何らかの原因で脱線した場合, 車両が減速して停止するまでの間にかなり長い距離を走行し続けることが予想される. そのため, たとえ脱線しても車両の逸脱を防止する逸脱防止装置をはじめ, 様々な施策が検討されている. しかし, これらの施策の有効性を確実なものとするには, 高速回転しながら高速走行する車輪と軌道構造との衝突挙動の詳細, 作用する荷重の大きさ, および, 発生する破壊モードを正確に把握することが重要である.

構造物の衝撃挙動に関しては多くの研究成果が報告されているが, 鉄道車輪のように高速回転する物体と構造物との衝突時の挙動を扱った研究は非常に少ない¹⁾²⁾. ことに, バラスト軌道を走行する高速鉄道に関しては, 実験的にも解析的にも殆ど解明されていない.

バラスト軌道は, まくらぎと砕石粒子からなる不連続体構造であり, 脱線後の車両と軌道の相互作用については, 不連続体としての非線形挙動が大きく影響する. しかも, 高速鉄道では走行速度が非常に大きく, 瞬時に衝撃荷重が加わるので, 短時間で発生する圧縮応力, せん断応力にくらべて, 曲げ応力や運動の発現には時間差があり, そのため発生する破壊モードが複雑になることが予想される. したがって, 本問題には, 粒子間の接触機構を考慮した不連続体解析により, 個々の砕石粒子のミクロな挙動を忠実に再現することが有効と考えられる.

そこで, 本論文では, バラスト軌道上を高速走行する車輪が軌道を逸脱した場合を想定し, 高速回転しながら, 高速並進挙動をする車輪が, レール頭頂面を乗り越えて落下し, さらに, 車輪がまくらぎおよび砕石層と衝撃する際の動的な挙動を二次元不連続変形法解析により再現するものである.

2. 解析対象の問題設定

2.1 問題設定

バラスト軌道上を走行する列車が何らかの原因で軌道を逸脱すると, 車輪はまくらぎを乗り越えながらバラスト砕石集合体上を走行する. この場合, まくらぎと砕石集合体には, 高速回転しながら高速走行する車輪とのダイナミクスに起因する, 著大な衝撃荷重が直接的に作用する. この衝撃荷重を受けて, 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とともに, 粒子破砕などによる破壊現象や塑性変形現象が発生する. また, まくらぎに関しては, 瞬時に作用する衝撃荷重で, コンクリート表面が削られたり, 条件によっては破断や破砕したりする可能性もある. これらの塑性変形現象や破壊現象のメカニズムは, 作用する荷重環境とともに, バラスト道床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大きく影響される.

本論文では最初のケーススタディとして, 次のようなシナリオを設定し解析を行う. すなわち, 軌道構造としては, 高速鉄道で用いられている 60kg ロングレール, 3H コンクリートまくらぎのバラスト軌道を想定し, 走行速度については, 営業線での最高速度 $V=300$ km/h を仮定する. この軌道上を走行する高速列車が何らかの原因で脱輪し, 走行速度一定のまま, 車輪がレール頭頂面を乗り越え, その後, まくらぎ上面まで車輪が達した時点について考える. この状態で, 車輪が最初のまくらぎの上面をかすめて, 隣のまくらぎの上面の稜角部に衝突する状況について解析を行うことにする.

車輪が, 最初のまくらぎの上面を通過し, 隣のまくらぎに達する間は, 水平方向には等速運動, 鉛直方向については自由落下を仮定する. すなわち, 車輪の中心の軌跡について, 非常に緩やかな放物線を仮定した. また, 車輪がまくらぎとの衝突した後の車輪の軌跡について

は、車輪は高速回転しながらそのまま水平方向のみに移動するものとした。車輪はこの軌跡上を、時速 300km/h で回転運動しながら並進移動する。

なお、車輪の回転挙動の再現方法に関しては、車輪中心 1 点と、円周近傍に 120 度ごとに変位入力点 3 点を設けた。あらかじめ計算した軌跡を、これらの変位入力点に強制変位として入力し、車輪の高速移動と高速回転挙動を正確に再現した。また、軌道構造のモデル化に関しては、碎石実形状の測定結果に基づいて、碎石層を二次元の弾性体の多角形不連続体モデルで表現した。まくらぎおよび車輪については、弾性体の多角形不連続体ブロックを一体化したモデルとした。

2.2 解析条件

高速回転する車輪(車輪半径 $R=430$ mm)が水平方向に時速 $V=300$ km/h の等速運動しながら、レール頭頂面を乗り越えて、60 kg レールの高さ $h=174$ mm 分を鉛直方向に自由落下する場合の軌跡について考える。レール直下での 3H まくらぎ上面の幅は $l_0=190$ mm であり、まくらぎ上面位置で測ったまくらぎ間隔を $l_s=392$ mm とする。まず、走行速度 V を秒速 v_0 に換算し、まくらぎ間隔を通過するために必要な時間 Δt を求める。

$$v_0 = 300 \times 10^3 / 3600 = 83.333 \text{ (m/s)}$$

$$\Delta t = l_s / v_0 = 0.392 / 83.333 = 4.7040 \times 10^{-3} \text{ (s)}$$

レール頭頂面から車輪が落下し、まくらぎ表面に車輪が達したときの落下速度(鉛直方向成分) v_1 を求める。

$$v_1 = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \times 9.8 \times 0.174} = 1.8467 \text{ (m/s)}$$

この時点をと $t=0$ s とする。この状態では、最初のまくらぎの右端部表面に車輪の最下点がある。さらに、車輪の中心軸が次のまくらぎ左端部に達する時間は Δt であり、この間での車輪の落下距離 s_1 を求める。

$$s_1 = v_1 \times \Delta t = 1.8467 \times 4.7040 \times 10^{-3} = 8.687 \times 10^{-3} \text{ (m)}$$

図-1 に、車輪とまくらぎの端部が接触しはじめた時の位置関係を示すが、車輪半径 $R=430$ mm より、まくらぎ上面を横切る車輪の弦長を求めると 172 mm となる。なお、本解析では、車輪はこの後自由落下することなく、水平方向のみに移動するものと仮定する。

3. 二次元不連続解析モデルの構築

3.1 バラスト碎石の形状測定とモデル化³⁾

図-2 に示すような接触式三次元デジタイザを用いて、約 300 個のバラスト碎石に関して、その頂点の三次元座標を測定した。1 碎石あたりの頂点数は 8~14 点である。つぎに、三次元 CAD を用いて、頂点座標を直線で結び、碎石形状を三次元の多面体モデルで表現した。同図に碎石現物の写真とそのモデルを示す。図より、作成した多面体モデルは、実際の碎石形状を概ね再現できていることが分かる。本解析は二次元解析なので、図-3 に示すように、三次元 CAD 上で碎石多面体モデルを直交する三

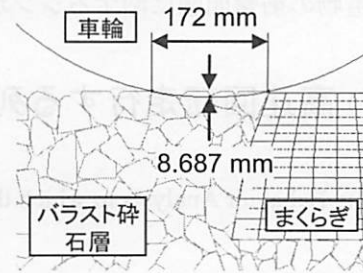


図-1 車輪とまくらぎの接触時の位置関係

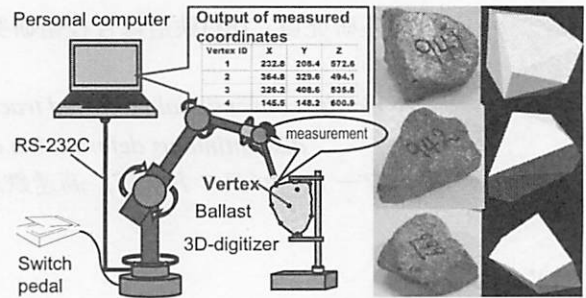


図-2 バラスト碎石の形状測定とモデル化

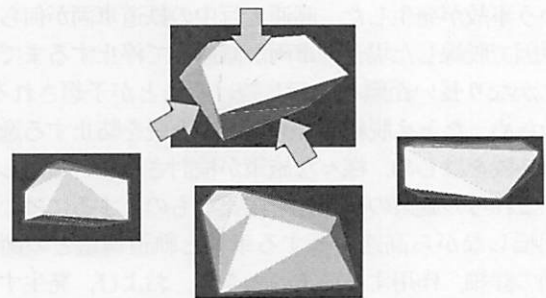


図-3 三次元多面体の二次元多角形への投影

つの平面に投影し、その外形を結んで、1 碎石あたり 3 個の二次元多角形モデルを作成した。

3.2 不連続変形法解析 (DDA)

解析には、大変形を伴う動的挙動の再現性に優れる不連続変形法解析(DDA)を用いた⁴⁾。DDA は多角形で構成される弾性体ブロック集合体の動的な数値解析手法である。ブロックの剛体変位、剛体回転、要素ひずみを未知数として、式(1)の Hamilton の原理に基づく運動方程式について、ポテンシャルエネルギーを変分原理により最小化して平衡方程式を導出する。

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

DDA は、変位型の有限要素法(FEM)の一種であり、一般の FEM に加えて、不連続体構造物の弾性変形、剛体変位モード、動的挙動、減衰振動の再現が可能である。また、FEM と同様に、ポテンシャルエネルギーを最小化する基準を導入したことにより、運動方程式を直接解く方法にくらべて解が安定し、エネルギー保存則も成立す

る。その定式化も FEM とほぼ同様なので、各種構造物との境界条件の処理も容易であり、本解析のように、複雑形状を有する弾性体と不連続体との連成挙動解析も容易に実施できる。要素間の接触機構に関しては、要素間に接触バネを用いる点では、DDA も個別要素法(DEM)と同じである。しかし、DDA では、隣接ブロック間に貫入がなく、かつ、引張力も作用しないという付帯条件を、停留値問題に付加し、要素間の接触判定を厳密に行うところが DEM と大きく異なる。また、個々のブロック間の接触部では Mohr-Coulomb 則が考慮される。また、DDA における構造減衰では、運動方程式第 2 項の粘性項に関して、式(2)に示すような質量マトリックス M に粘性係数 η を乗じた粘性マトリックス C を導入する。

$$C = \eta M \quad (2)$$

減衰の効果は η の値により異なるが、不連続体構造物の減衰に関しては、まだ十分には解明されていない。そこで、本解析では、別途実施した衝撃载荷試験の再現性に着目して、碎石層の粘性減衰値を決定した。

3.3 バラスト軌道に関する縦断面モデルの作成

図4は、車輪脱輪後の衝突挙動解析に用いた高速鉄道用バラスト軌道の縦断面に関する不連続体モデルである。厚さ 25cm の道床バラスト上に、3H コンクリートまくらぎを施工したものである。実際の軌道では、まくらぎが数多く並び、その上にレールが敷設された構造であるが、本解析では、車輪とまくらぎ1本との衝突挙動を扱うので、モデル中央にまくらぎ1本のみを配置したモデルとした。

個々の碎石は、前述の碎石形状の測定結果をもとに多角形要素で表現した。個々の要素は弾性体として挙動すると同時に、並進および回転に関する剛体変位モードも表現できる。各要素同士は、その境界において、応力と変位が不連続となる。また、まくらぎに関しては、車輪通過時における、細部の応力と変形を求めるために、まくらぎ内部を、不連続体弾性体ブロックで縦 8 列、横 8 列に分割し、計 64 個のブロックを接着して一体化した構造とした。境界面における引張強度と粘着力を超える応力が作用すると、ブロック間に破断や剥離が発生するが、それ以外の場合は弾性体として挙動する⁹⁾。

解析に用いた物性値を表-1に示す。図4に示した縦断面モデルでは、レール、軌道パッドは無いが、次章に

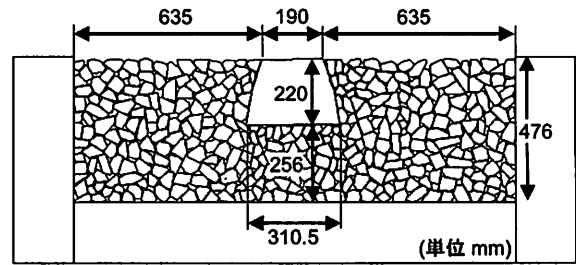


図-4 高速鉄道用バラスト軌道縦断面モデル

表-1 解析に用いた物性値

	密度 ρ (kg/m^3)	弾性係数 E (GN/m^2)	ポアソン 比 ν	摩擦角 ϕ ($^\circ$)
バラスト	2770	20	0.30	50
まくらぎ	2400	10	0.30	35
パッド	1400	100	0	-
レール・車輪	7860	210	0.30	$\mu=0.3$
上載荷板	1000	0.01	0	0
路盤	1000	1000	0	80
側板	1000	1000	0	0

て扱う横断モデルにて用いることから、これらの値も同表に示す。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。本解析では、パッドおよび路盤については剛体として扱い、変形の発生を想定していないため、非常に大きな弾性係数値を仮定し、ポアソン比も 0 とした。また、路盤とバラストとの接触面の摩擦角のみ大きな摩擦角として 80° とした。車輪・レールの摩擦係数については $\mu=0.3$ とした。

4. 衝撃载荷による減衰パラメータ推定

4.1 衝撃载荷試験の概要

実物大試験軌道での衝撃载荷試験結果を用いて、実現象に符合する粘性減衰値を求める。本载荷試験では、重錘(振り子)による衝撃荷重を、レール頭頂面に対して水平に载荷した。したがって、解析でも横断面のモデルを用いる。バラスト軌道横断面に関する解析モデルを図-5

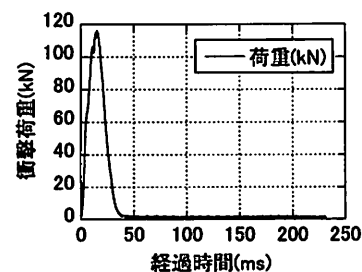


図-6 レール頭頂面の入力荷重波形(実測値)

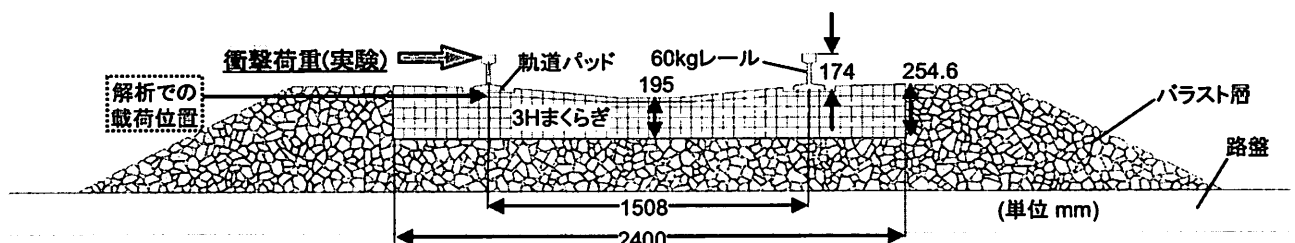


図-5 高速鉄道用バラスト軌道横断面モデル

に示す。また、レール頭頂面での衝撃荷重測定波形(最大荷重 115 kN)を図-6 に示す。

本モデルは、厚さ 25cm の道床バラスト上に、3H コンクリートまくらぎ、軌道パッド、60kg レールを敷設したものである。モデルの構造は前述の縦断面モデルとほぼ同様である。また、まくらぎに関しては、多様な変形モードが発生しうるので、鉛直縦方向に 5 列、水平方向に 20 個の多角形の弾性体要素を貼り合わせた構造とした⁹⁾。

4.2 軌道横断面モデルによる解析結果

まくらぎの水平変位に関する解析値と実験値を図-7 に示す。解析値は、バラスト碎石層の粘性係数を $\eta = 0.05$ に設定し、図-6 の荷重波形をレール直下のまくらぎ要素に入力した時の、まくらぎ中央の水平変位である。一方、実験値は、レール頭頂面での測定値であり、まくらぎの水平変位に、レールの小返り量が加わったものとなっている。そのため载荷直後 20ms 付近にレール小返りによるピーク波形が見られるが、これは時間経過により徐々に低減し、まくらぎの最終的な変位量は実験値が 12mm、解析値が 10 mm 程度と、両者は概ね近い値となった。図-8 にまくらぎ左端部の状況を示すが、まくらぎが衝撃荷重で動いたことにより、まくらぎ左側に隙間が発生したことがわかる。この結果をもとに、縦断方向の脱輪後の解析においても、バラストの粘性係数 $\eta = 0.05$ を採用する。

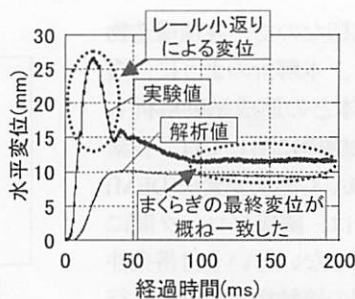


図-7 水平変位時刻歴

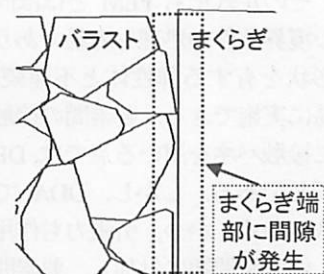


図-8 まくらぎ端部の塑性変形

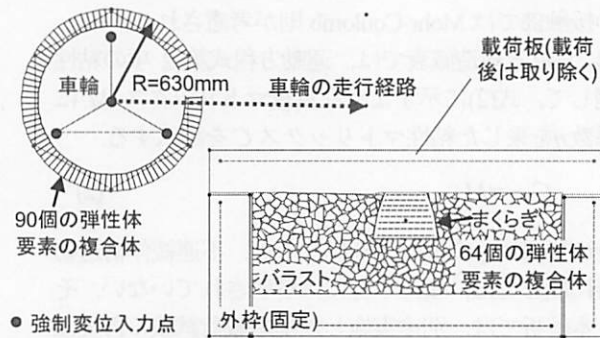


図-9 車輪とバラスト軌道モデルの初期の位置関係

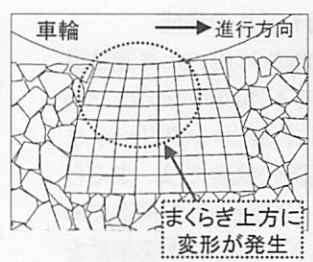


図-10 車輪通過状況

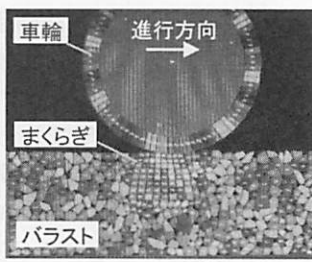


図-11 車輪通過状況

5. 車輪とバラスト軌道の衝突挙動に関する解析

5.1 解析の概要

車輪モデルとバラスト軌道縦断面モデルの相対的な位置関係を図-9 に示す。ここにバラスト層の不連続体モデルは、複雑形状を有する粒子の内部と外部の判定を正確に行うため、事前に締固めを行った粒子配列から、粒子間に微小な隙間を持つように再配置されており、バラスト層全体の厚さで約 6mm 膨張した状態となっている。解析では、バラスト軌道モデルの上面に取り付けた載荷板を上下方向に 30Hz で減衰振動させながら約 6mm 降下させ、締固め操作を 1 秒間行い、最終的な締固めの状態を再現する。その後、載荷板をゆっくり上昇させてモデル内より取り除く。つぎに、車輪に設けた変位入力点 4 点に、車輪の軌跡に相当する強制変位波形を入力し、車輪を高速回転させながら高速並進させ、まくらぎに衝突させる。なお、本解析では、高速走行による詳細な挙動を再現するために、時間刻み値を 0.1 ms とした。

5.2 まくらぎの変位挙動

図-10 は解析の途中経過の例であり、車輪がまくらぎ左端に衝突後、徐々に右向きに回転しながら移動する状

況を示したものである。図より、まくらぎは、非常に硬いコンクリート製であるにもかかわらず、とくに車輪直下付近に集中して、目視で分かるほどの大きな変形が発生していることが分かる。また、図-11 は、車輪がまくらぎ上を通過し終える時点での計算画面の出力例である。本図でも、車輪が載ったまくらぎ右端部近傍の要素が歪んでおり、大きな変形が発生していることが分かる。図-12 は、まくらぎ天端左端部の要素(01)についての変位応答時刻歴である。図では、水平変位については右向き正、鉛直変位については上向き正とする。車輪の衝突時に 8mm 近くの大きな鉛直変位が発生した。

また、図-13、図-14 に、まくらぎ天端の 8 要素(01~08)、および、まくらぎ下面の 8 要素(57~64)の鉛直変位を示す。測点の位置関係は、図-12 の隣に示す。図より、車輪の進行に伴い、僅かな時間差をもって、個々の要素に変位のピークが発生していることがわかる。また、まくらぎ天端における鉛直変位と、底面における鉛直変位を比べると、底面の変位が 1/4~1/2.5 程度小さく、このことより、衝撃荷重によりコンクリート内部に大きな変形が生じていることがわかる。また、右側の要素になるにしたがって、天端、底面ともに鉛直方向の変位量が大きくなっており、このことより車輪の通過

により、まくらぎ自体がわずかに右回転したことがわかる。また、車輪通過後はその反動で、まくらぎが1mm近く浮き上がった。

ここで、車輪がまくらぎ上を通過するために必要な時間はわずか3~4 ms と非常に小さい時間である。しかし、図を見ると、変形挙動や回転運動が発生し、それが回復するまでには、その数倍の時間がかかっている。すなわち、変形挙動やブロック全体の運動の発生には、高速鉄道の列車速度に比べると、大きな時間的な遅れがあることがわかる。

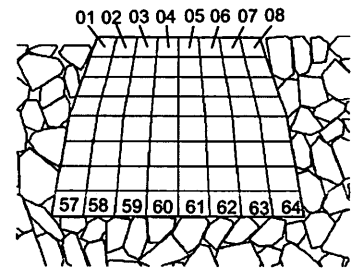
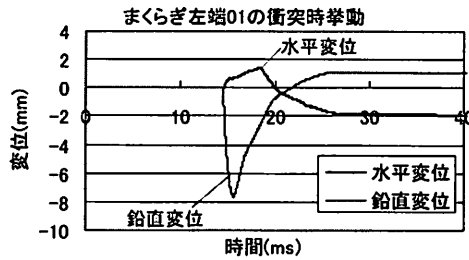


図-12 まくらぎ左端部の要素の変位 (解析値)

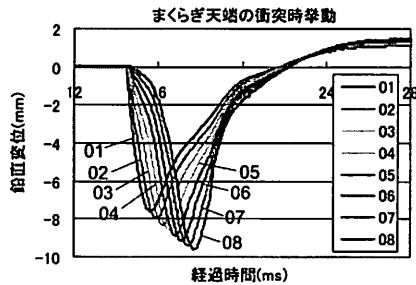


図-13 まくらぎ天端での鉛直変位

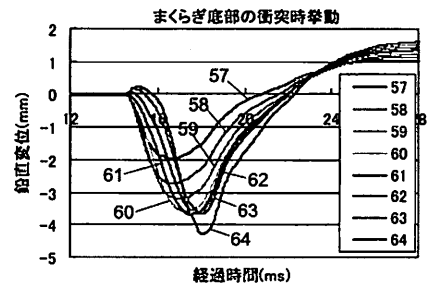


図-14 まくらぎ底面での鉛直変位

5.3 まくらぎ内部応力

図-15~図-18に、まくらぎ上面および下面の、左右の端部における内部応力について、水平方向応力 s_x 、鉛直方向応力 s_y 、せん断応力 s_{xy} に分けて示す。図より、まくらぎ上面(01)では、車輪が要素上を通過する非常に短い時間に著大な衝撃荷重が作用したことがわかる。この内部応力の発生時間は、車輪の通過に必要な時間にほぼ一致しており、これらの内部応力の発生原因は、車輪の通過による直接的な圧縮変形であると考えられる。

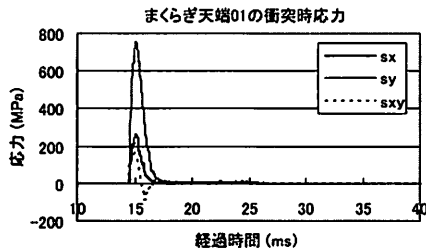


図-15 まくらぎ天端左端部の応力

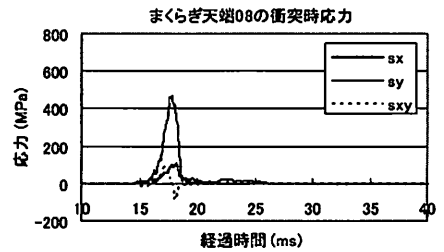


図-16 まくらぎ天端右端部での応力

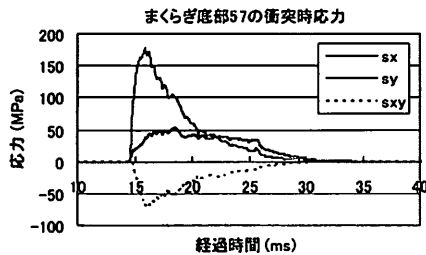


図-17 まくらぎ底部左端部の応力

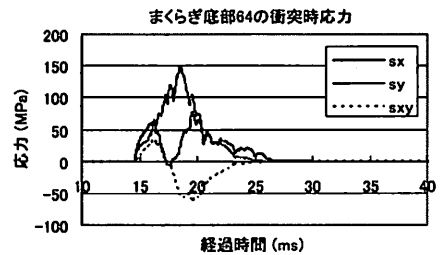


図-18 まくらぎ底部右端部での応力

る。また、車輪進行に伴い、右側の要素(08)ほど応力のピーク値は低減する傾向が見られる。

他方、同図より、まくらぎ下面(57, 64)については、衝撃荷重のピーク値は天端(01, 08)に比べると小さくなるが、応力の作用時間は長くなっている。これは、車輪と直接接するまくらぎ上面では、衝撃荷重が接触点近傍に集中的に作用するのに対し、載荷点から離れるに従い、応力が拡散し低減するとともに、内部の変形や運動の発生によって、荷重が伝達されるまでに時間を要することが原因するものと思われる。

まくらぎの応力について、その成分を比較すると、天端の要素では、水平方向成分やせん断に関する成分に比べると、はるかに鉛直方向成分が卓越する傾向が見られる。これは、車輪が要素直上を高速で移動するものの、

移動速度に同期して車輪自体が回転するため、接触面では鉛直方向に転圧されるのみで、水平方向への滑り挙動が殆ど生じていないためと考えられる。それに比べ、まくらぎ下面の要素では、鉛直方向の応力が大きくなる傾向については天端部と同じであるが、しかし、水平方向成分やせん断成分も大きく、このことから、内部の変形挙動やまくらぎの全体的な運動が影響しているものと推察される。

また、まくらぎ内部の応力の大きさについてみると、本解析では、たとえば、まくらぎ天端左端部の要素(01)では800 MPaに達する著大応力が発生している。これは、コンクリートの破壊応力を遙かに超える値である。本解析は二次元解析のため、応力や変位の値に関しては、実現象との整合性を必ずしも保証できるものではない。

しかしながら、通常、たわみなどのコンクリートの曲げ変形挙動は、载荷に対して時間的に遅れて、ある程度広範囲に発現するものであり、高速車輪が通過する現象のように、ごく短時間の载荷挙動の場合は、時間遅れを伴う曲げ変形挙動よりは、せん断や圧縮による局所的で直接的な挙動の方が卓越することが想定される。そのため、本解析の計算結果に関しては、車輪位置からまくらぎの長手方向に離れた位置での再現性では劣るものの、車輪直下におけるまくらぎおよび碎石の変位・応力に関しては、かなり実現象に近い計算結果が得られて

いるものと考えられる。すなわち、車輪が通過したまくらぎ天端部分は、瞬時にして車輪で削り取られるか、あるいは、破断するような、何らかの破壊現象が発生することが予想される。

5.4 バラスト碎石に関する内部応力

図-19～図-21に、まくらぎ下面の左右の端部直下のバラスト層と、まくらぎ右壁面近傍のバラスト層の碎石内部の応力を示す。バラストの位置は、図-22に示した通りである。上述のように、車輪が最初に衝突するまくらぎ左端部では、応力がまくらぎ上方の要素に集中的に作用するため、その直下のバラスト(68)では分担すべき応力は小さくなっている。

一方、まくらぎ右端部では、車輪の衝撃荷重を、車輪がまくらぎ上面を通過するある程度長い時間にわたり分担し続けることにより、まくらぎ自体にも右回転と変形が生じ、その影響で左側のバラスト(74)については、大きな内部応力が発生していることが分かる。またその応力については鉛直成分が卓越することがわかる。

また、図-21のまくらぎ右壁面近傍のバラスト(94)では、直上を通過する車輪の荷重が直接的に作用するので、著大な鉛直応力が発生していることがわかる。

6. まとめ

本論文では、バラスト軌道上を高速走行する車輪が軌道を逸脱した場合を想定し、高速回転しながら高速並進する車輪が、レール頭頂面を乗り越えて、まくらぎおよび碎石層と衝撃する挙動を二次元不連続変形法解析により再現を試みた。解析結果より、まくらぎに関しては、車輪が衝突する瞬間に、破壊レベルを遥かに超える内部

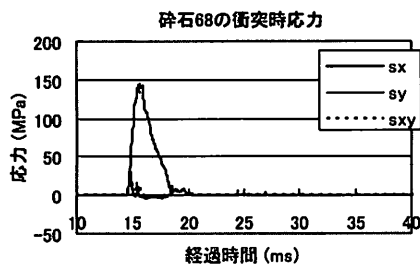


図-19 まくらぎ左下部の碎石応力

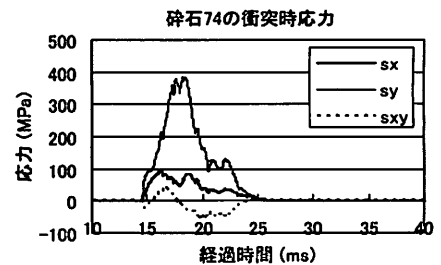


図-20 まくらぎ右下部での碎石応力

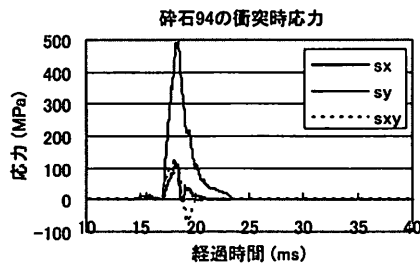


図-21 まくらぎ右壁面部の碎石応力

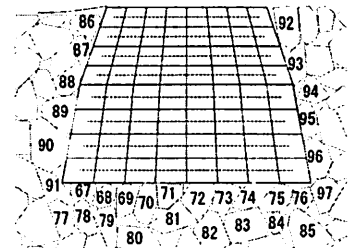


図-22 碎石番号と概略位置

応力が生じる可能性があり、車輪通過に伴って応力が徐々に低減する傾向がみられた。また、バラスト碎石に関しては、車輪通過に伴って短時間に鉛直荷重が増加する傾向が得られた。本解析は二次元解析のため定量評価までは言及できるものではないが、本解析により、車輪の高速回転・高速走行による軌道構造の応答解析ができるようになった点では有意義と考える。また、車輪通過による応力の発現や、軌道構造部材の変形や運動発生メカニズムについては、圧縮やせん断による短時間で局所的な挙動と、曲げ変形やまくらぎ自体の回転運動などの、わずかな時間遅れを伴う挙動とに分けて、今後詳細に検討する必要があるものと考え。今後は、三次元の粒状体解析により、定量的な解析を目指すものである。

参考文献

- 1) 園田佳巨, 深澤仁, 曾我部正道: 鉄道車両逸脱防止壁に作用する衝撃力の評価に関する研究, 応用力学論文集, Vol.10, 2007.
- 2) 深澤仁, 園田佳巨: 鉄道車両逸脱防止壁の性能評価に関する研究, 応用力学論文集, Vol.11, pp.459-466, 2008.
- 3) 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, 2008.
- 4) G-H. Shi: Block system modeling by discontinuous deformation analysis, Computational Mechanics Publications, England, 209 p, 1993.
- 5) 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.