

不連続変形法解析を用いた砕石道床の 地震時における内部破壊特性

Discontinuous Deformation Analysis of Seismic Failure Behavior
in a Narrow Area of Railroad Ballast

○相川 明*
Akira AIKAWA

*正会員 工博 国立大分高専助教授 (〒870-0152 大分市牧 1666 番地)

The seismic failure behavior of railroad ballasts in response to earthquakes was analyzed using Discontinuous Deformation Analysis. Several sinusoidal waves with different frequencies and accelerations were inputted into the discontinuous numerical model of a railroad ballast, which consists of an assemblage of polygonal crushed stones, rails, sleepers and a roadbed. The dependencies of railroad failure activities on frequency and acceleration were evaluated with such parameters as; increase in void volume, horizontal, vertical and angular displacements at different points with respect to the areas under the sleeper and the shoulder of ballast. The results indicated that initial dilation by the rotational behavior of the crushed stones triggers the succeeding failure process.

Key Words : seismic time history analysis, failure process, railroad ballast, discontinuous deformation analysis, assemblage of polygonal blocks, dilation

1. はじめに

近年、環境問題が注目され、慢性的な交通渋滞や環境問題を誘発している自動車交通に代わり、環境性を考慮した総合的な交通システムを見直す気運が高まってきている^{1),2)}。鉄道は環境保全性、省エネルギー性、経済性などの面において優れた大量交通機関であり^{3),4)}、将来的な総合交通システムの中核を担うものと考えられる。将来的に鉄道の重要性が増すと、地震災害時の鉄道交通機能の確保、および、復旧手順の確立も重要な課題となってくるであろう^{5),6)}。

現在、鉄道の営業路線の大部分がいわゆる「有道床軌道」である^{7),8)}。有道床軌道は、レール、まくらぎ、砕石バラスト、土路盤からなる簡略な不連続体構造で、大きな列車荷重を支えるものであり、経済性、施工性、環境性、補修の容易さなど多くの長所を有する。構造が簡略な反面、耐震性では基本的に弱い構造であり、これまでも地震時には変状や側方流動などの発生事例が報告されている^{9),10)}。

道床に関する従来の研究は、主として高速化に伴う走行安定性や、走行荷重による道床沈下現象の解明に主眼があり、車輪とレールの接触機構を考慮して、道床部分については多質点系の多層粘弾性モデルで表現し、連続体力学の延長として扱われてきた¹¹⁾⁻¹⁴⁾。一方、石川らの研究のように、道床の維持管理を目的として、不連続体構造を考慮した研究もあるが¹⁵⁾⁻¹⁷⁾、ことに地震災害時の道床部分の挙動についてはほとんど未解明のままである。

地震時の道床の挙動に関しては、道床を構成する砕石の配位の変化によるダイレタンシー特性が、砕石層の変位や振動に大きく影響する。従来連続体力学で

は、せん断応力による砕石間の滑りを主に考えてきたが、粒状体にせん断応力が作用すると、すべりだけではなく、せん断応力に起因する偶力により、砕石粒子には回転力も発生する。不規則な砕石形状に回転が生じると、局所的な体積膨張が生じ、砕石間に微小な不連続面や応力集中が発生するものと考えられる。

したがって、軌道の沈下挙動や軌道破壊現象の原因の解明には、個々の砕石粒子の動的な挙動を再現して、道床内の局所的なダイレタンシー特性を明らかにする必要がある。局所的なダイレタンシー特性は、道床全体の破壊の進行に関与する要因であるが、従来の連続体モデルや、円形や球形近似による不連続体モデルでは、砕石粒子の配位の変化や回転による体積膨張を再現できず、基本的なメカニズムの解明につながっていない面があった。

多角形粒状集合体の破壊挙動に関するモデル化に関して、Meguroらは、円形や球形の要素を間隙バネで組み合わせることにより、接触判定を簡便なままで、2次元および3次元の複雑な多角形の表現を可能とする個別要素法の拡張方法を提案した¹⁸⁾。また、砕石のような長短軸を持つ形状を表現するために、楕円体要素を用いる方法も工夫されており¹⁹⁾⁻²¹⁾、楕円を用いた場合接触判定が複雑なため、円形や球体要素をジョイントする方法も提案されている²²⁾。

本研究は、砕石粒子の配位の変化や回転による体積膨張現象を忠実に再現するために、まず、有道床軌道断面を、砕石形状の実測に基づく任意形状の多角形の砕石集合体、まくらぎ、路盤からなる2次元の不連続体構造でモデル化した。作成したモデルの基礎部分に、地震荷重として、水平方向の正弦波変位波形を加えて、有道床軌道の動的な破壊挙動を数値解析的に再現し、さ

らに、応答変位の時刻歴にFFTを適用して周波数領域に変換し、周波数依存性を調べるものである。

解析には、大変形を伴う動的再現性および回転挙動の再現性に優れた不連続変形法解析(DDA)を用いた。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^{23),24)}。各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、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。変位型のFEMによる弾性体の大変形解析の一種であり、その定式化もFEMと同様の手順である。接触バネを用いる点は個別要素法に類似するが、ブロックには互いに貫入がなく、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、具体的には貫入によるポテンシャルエネルギーを最小2乗法で評価するPenalty法を用いる。また、ブロックの接触部ではMohr-Coulomb則により、摩擦によるエネルギー損失が考慮される。別の見方をすると、1ブロック=1Finite CoverとなるManifold法の特殊な場合とみなせる。

2. 解析モデルの作成と解析条件

2.1 モデルの作成方法

道床は砕石からなる不連続体構造物であり、構造物の外形や予定の大きさは分かっているものの、内部の砕石が具体的にどの位置にどのような形で配置されているかは施工前には不確定である。そのため、施工過程を考慮したモデル化が要求される。不連続体のモデル作成については、円形要素や球形要素を組み合わせた要素を用いる場合について、各種の方法が提案されており²⁵⁾、たとえば、構造物全体の大きさに比べて、個々の砕石が相対的に小さい場合には、円形や球形で近似したモデル化も有効と考えられる。

多角形粒状集合体の粒子の大きさと形状の影響性に関し、Choquetら²⁶⁾は、多角形粒状集合体の法面角度と不連続面の角度を変数として、転倒破壊の発生条件を解析的に調べているが、その結果より、斜面の高さ H とブロックの大きさ D の比 H/D について、 H/D が大きくなると集合体としての挙動が卓越し、 H/D が小さくなると、個々の不連続面の特性が卓越する傾向が得られている。Jiangらも²⁷⁾、 H/D が小さい範囲ではブロックの凹凸によるインターロッキングが発生するが、他方、 H/D が大きくなると粒としての挙動が卓越する結果が得られている。この挙動の閾値は、条件にもよるが、 H/D が10~20のところにある。

道床の砕石に関しては、道床全体の大きさに比べて、個々の砕石が比較的大きく、 H/D が概ね10以下であり、粒としての挙動よりは、角の尖り具合や面の凹凸などの形状の影響が無視できず、砕石の形状を考慮したモデル化が必要となる。

石川らは砕石道床の挙動解析にDDAの応用を試みており、モデルは1Gの重力で自由落下により作成した^{17),28)}。しかしながら、実際の道床は、所定の形状内に砕石を配置するだけでなく、強度を増すために、空隙が最小になるように締固め過程を考慮しなければ、実際の破壊現象を再現できないものと考えられる。本

論文では、砕石を自由落下させながら、載荷板の振動荷重により、道床バラストの表面に面荷重を加えて締固める方法を採用し、細密充填構造に近いモデルにするために、締固めの方法に関して工夫を行った。

DDAではモデルに外力を加える場合、ある点に荷重として加える方法と、ある点における強制変位として加える方法の2つの方法が利用できる。このことは、締固め時の載荷板の動きに関しても、「荷重制御」によるものと、「変位制御」によるものの2方法が採用できることを意味する。以下に「荷重制御によるモデル作成方法」と「変位制御によるモデル作成方法」の2つの方法を提案するとともに、両者のモデル作成結果について比較する。

表-1に解析に用いた物性値を示す。文献による実験値および測定値を参考にした^{15)-17),29),30)}。なお、物性値に関しては、今後パラメトリックな検討が必要と考える。また、解析で用いた諸定数を表-2に示す。諸定数の詳細については参考文献に譲るが^{23),24)}、接触バネ剛性についてはプログラムによる自動設定値であり、ヤング率×ブロックの平均直径の大きさが用いられる。また、砕石の形状に関しては、実際に鉄道で使われている砕石現物を入手し、砕石の形状をCADを用いてパソコンに取り込み、さらに、テキストデータに変換して数値化した。

表-1 解析に用いた物性値

部材	砕石	まくらぎ	路盤	載荷版
密度 ρ (g/cm ³)	2.77	2.38	2.20	3.33
ヤング率 E (GPa)	20	30	3×10^4	3×10^4
ポアソン比 ν	0.1	0.1	0	0
摩擦角 ϕ (°)	55	37	80	0
粘着力 C (GN/m ²)	0	0	3×10^4	0

表-2 DDA解析で用いる諸定数の設定

	定数名	記号	定数値
1	最小接触判定値	e_0	1×10^{-6}
2	最大変位の割合	g_2	2×10^{-4}
3	最大時間間隔 (sec)	g_1	5×10^{-4}
4	接触バネ剛性	g_0	自動設定値
5	オーバーリラクゼーション係数	q_q	1.4
6	解析領域の1/2係数	W	0.5 m

2.2 荷重制御によるモデル作成方法

図-1は、あらかじめ中空にランダムに配置した砕石ブロックを自由落下させながら、載荷板で締固めて、目標の道床形状を作成する過程を模式的に示したものである。ただし、本モデルの作成にあたり以下の制約条件を課した。

- (1) 自由落下後、道床の上部にまくらぎを配置すること。
- (2) まくらぎは道床中央部に、水平に配置すること。
- (3) まくらぎの両側に砕石のみの部分があり、まくらぎの上面と両側の砕石の上面とを平面となるように仕上げること。

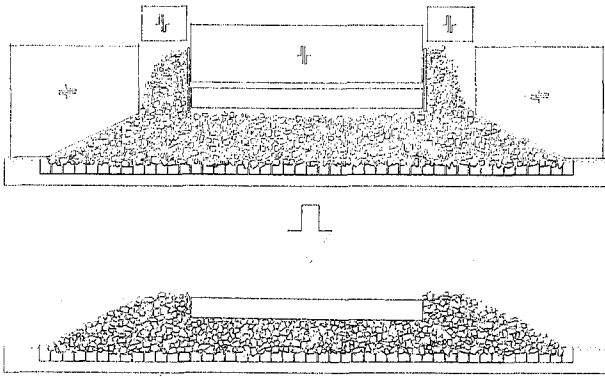


図-1 荷重制御によるモデル作成方法

- (4) まくらぎ下面に碎石のない空隙個所ができないように、まくらぎ下部にも碎石を密に充填すること。
- (5) 道床最下面が底盤に十分に密着すること。
- (6) 道床はまくらぎを含めてきれいな台形とすること。

道床断面の形状に関しては文献を参照し³¹⁾、上記の条件を満たすために以下の工夫を行った。

- (1) 載荷板を5つに分割し、まくらぎブロック上面を鉛直に載荷する載荷板、まくらぎブロックの両側の碎石ブロック部分を鉛直方向に載荷する載荷板、および、左右の両法面を水平方向に載荷する載荷板にわけた。
- (2) まくらぎブロックと碎石ブロックを同時に落下させると、まくらぎブロックが水平にならなかったり、まくらぎブロックの下面に空隙ができたり、あるいは、まくらぎブロック上面に碎石ブロックが残ったりなどの支障がある。そこで、まくらぎブロックの両側にガイド用の薄板(隔壁)を配置し、まくらぎブロックと碎石ブロックの落下位置を明確に区分した。
- (3) 碎石ブロックがある程度落下した後、やや時間を置いてからまくらぎブロックをガイド板に沿って落下させ、まくらぎブロックが落下後にガイド板を引き上げ、道床の上面および側面から振動荷重を加えた。

本法により完成したモデルを同図に示す。図は、道床表面に最大荷重 50 kN/m^2 の 20Hz の正弦波を2秒間加えて締固めた後、載荷板を取り除いて1秒間放置したものである。なお、本モデルでは、モデル下面の碎石ブロックと路盤ブロックとが接触する部分は、碎石ブロックが地面にめり込むような構造としている。

この方法では、載荷板で締固めているときには目標の断面形状を維持しているが、載荷板除去時にかたち崩れが生じ、法面と法肩がわずかに変形した断面形になった。これは、計算時間の関係で締固めの時間が長くとれないことから、締固めの程度が若干不足しており、そのために碎石ブロックが必ずしも相互に密着した構造となっていないことが原因しているものと推察される。

表-3 変位制御によるモデル作成時の物性値

部 材	砕 石	まくらぎ	路 盤	載荷板
密度 ρ (g/cm ³)	2.77	2.38	2.20	3.33
ヤング率 E (GPa)	3×10^4	3×10^4	3×10^4	3×10^4
ポアソン比 ν	0.1	0.1	0	0
摩擦角 ϕ (°)	0	0	0	0
粘着力 C (kN/m ²)	0	0	0	0

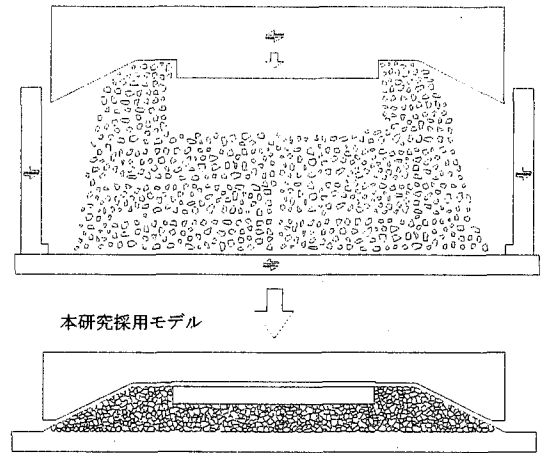


図-2 変位制御によるモデル作成方法

2.3 変位制御によるモデル作成方法

変位制御によるモデルの作成過程を図-2に模式的に示す。まず、中空に碎石ブロックを配置し、次に碎石ブロックを自由落下させ、引き続いて上部の載荷板に時間経過に応じた強制変位を与えて碎石ブロックを締固める。上部の載荷板の形状は、道床の全断面の外形の形状を一体で表現したものとなっている。また、両側方にも載荷板が配置されており、これにも時間に依存した強制変位を与えているが、この側方の載荷板は、法尻部分で載荷板と底盤ブロックの間に碎石ブロックが挟まらないようにするためのものであり、締固めには直接関与するものでない。

本研究では、締固めの程度を高めるために、載荷過程を「予備締固め」と「本締固め」の2段階に分けて実施し、「予備締固め」では表-3の物性値を、「本締固め」では前掲の表-2の物性値を用いて、細密充填構造に近いモデル作成に成功している。

- (1) 予備締固めでは、上部載荷板は、まくらぎの部分と一体化した形状とし、また、表-3のように碎石ブロックの物性値を硬くして、載荷時に碎石ブロックに変形が生じないようにし、しかも、碎石ブロックが滑りやすい条件にして、間隙量が減少できるようにした。
- (2) 予備締固めの後、計算結果の碎石ブロックの座標をCADデータに戻し、CAD上で個々の碎石ブロックが微小な間隔(0.1~1mm)を持つように、碎石ブロックを少しずつ離し、さらに、中央部にまくらぎブロックを配置した。
- (3) その後、修正したCADデータをDDAの形状デー

タに再変換し、本締固めでは、表-1の材料定数を用いて、上載荷板の強制変位量を微調整して、再度締固めの操作を行った。

同図に、本操作で得られた最終的な断面を示すが、道床の上表面、法面ともにシャープな形状で、密に詰まったモデルが得られた。

表-4 モデル断面作成法の比較

作成方法	荷重制御	変位制御
締固めの程度	締固め不十分	密に詰まった構造
施工過程	実際の現象に近い	幾つかの仮定が必要
作成の容易さ	簡単	困難
計算時間	長時間必要	短時間
総合判定	不採用	採用

2.4 モデル断面作成法の選定

表-4に両作成法の比較結果をまとめる。得られた断面の形状を比較すると、「変位制御によるモデル作成方法」の方が、計算時間は短いにも関わらず、より密に詰まった構造である。

施工過程を再現する意味では「荷重制御によるモデル作成方法」が現実的であり、手順も簡単であり、汎用の構造物を容易に作成可能である。また、計算時間を十分に長くすれば、締固めの程度も改善できるものと考えられる。

他方、「変位制御によるモデル作成方法」は、最終的には密に詰まった構造が得られたが、モデル作成過程では、強制変位量を試行錯誤で決めねばならず、また、予備締固め後の碎石ブロックの再配置作業に労力を要する。したがって、多様な解析モデルの作成には適さないと考えられる。

しかしながら、本研究では、何度も繰り返して計算する必要があり、短時間で十分な締固めが得られる後者の方法を採用した。同じモデルを共通して使うことを考えると、作業時間と計算時間の合計では有利と判断したことによる。図-3と表-5に最終的な解析モデルとその諸元をまとめる。

表-5 完成したモデルの諸元

構造形式	バラスト道床(PC枕木)
断面形状	台形断面
路盤幅員	5.200 m
道床幅員	2.800 m
道床肩幅	0.400 m
道床厚	0.449 m
断面に用いたブロック数	592 個
ブロックの平均面積	17.6 cm ²
間隙比 e	17.8%
間隙率 n	15.1%

2.5 解析条件

碎石集合体の動的な破壊挙動をできるだけ忠実に再現するとともに、計算過程を簡略化し、計算時間をで

きるだけ短くするために、本解析では、結果に影響を与えない範囲で、以下のような条件や仮定を設定した。

- (1) 路盤ブロック上面と碎石ブロックとが接触するところでは、実際には、碎石は路盤の土の中に埋もれているはずである。したがって、本モデルでも、路盤ブロック上面は平面とはせず、道床モデル最下面の碎石ブロックが半分埋もれるように、凹凸のあるような形状とした。
- (2) また、道床モデル最下面の碎石ブロックは路盤ブロック中に半分埋もれていることから、道床モデル最下面の碎石ブロックと路盤ブロックとは一体的に挙動するはずである。そこで、本解析では、道床モデル最下面の碎石ブロックと路盤ブロック間に、表-1に示すように大きな粘着力と引張力を設定し、動的な荷重が加わっても道床モデル最下面の碎石ブロックと路盤ブロックとが一体的に挙動するようにした。
- (3) 正弦波荷重が加わったときに路盤自体が変形するとエネルギーの損失が生じて、バラストのみの破壊過程を再現することが困難となるので、路盤のヤング率を表-1に示すのように、碎石より十分大きな値とし、路盤のポアソン比を0とした。

なお、最大時間刻みを0.0005秒とし、1つの解析条件あたり約20000回の収束計算を実施した。計算には前述の締固め過程も毎回含まれるため、締固め後の正弦波載荷時の2.0~4.0秒の挙動を比較した。

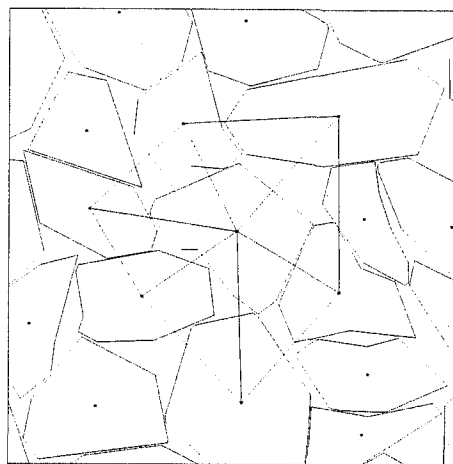


図-4 ブロックネットによる評価点

2.6 ブロックネットによる評価点設定

破壊現象の進行の状況を定量的に把握するために、道床の破壊進行に伴う体積増加に着目する必要がある。そのために、碎石ブロックの重心間距離および重心間の面積の増加量を時刻歴上で数値化できるように、図-4に示すような、計測点のブロックとその周りのブロックの重心を結ぶブロックネットをモデル内の12箇所に配置した。破壊進行により、ブロックネットの体積や、碎石重心間の相対距離も増加するので、ブロックネットの面積の増加量でダイレーションの測定に代えるものである。これにより、従来は定量的に把握できなかった局所的な破壊状況の定量化が可能となる。

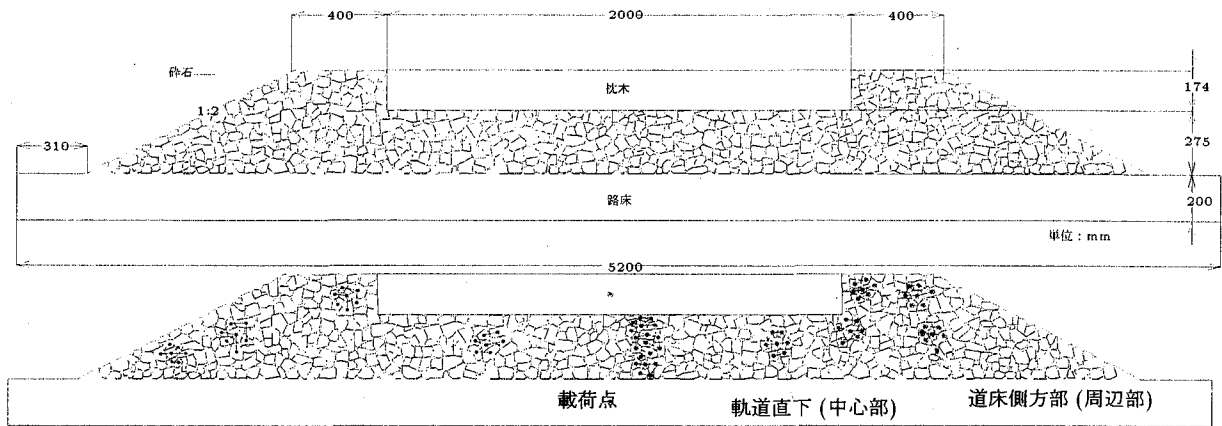


図-3 解析モデル (上図) とブロックネットの配置 (下図)

2.7 荷重荷重の設定

地震波の入力方法は、荷重で指定することも、変位で指定することも可能である。しかし、荷重で入力した場合は、路盤と道床間の相互作用のため所定の荷重が載荷できないことから、本解析では、モデル底盤中央部に正弦波変位波形を水平に強制変位として加えて、その応答を調べた。すなわち、最大入力加速度を a 、正弦波の周波数を f と表示すると、正弦波加速度波形を2回積分した、最大入力変位 $a/(2\pi f)^2$ の大きさの正弦波変位波形をモデル底盤中央部に載荷した。

また、周波数に関しては、一般の地盤応答解析では数 Hz の低周波のみ扱えば十分であるが、鉄道の場合、高速走行時の列車の挙動も考える必要があり、そのためには数百 Hz の高周波までの応答が必要となる。そこで本研究では、周波数として2のべき乗で1～256 Hz、入力加速度については100 gal 刻みで200 gal～500 gal の正弦波とした。なお、正弦波地震動は、モデル作成時の締固め作業終了後に載荷を開始し、載荷を始めてから2秒間の挙動を調べた。

2.8 結果の評価方法

解析モデルは、完全に不連続な構造として扱われるので、路盤だけが入力波形の時刻歴と全く同じ挙動を示し、個々の砕石ブロックの挙動は路盤ブロックの挙動とは一般に異なったものとなるはずである。本解析では、局所的な破壊挙動の周波数依存性を調べるために、軌道下部の中心部と道床側方部の周辺部の2点における水平変位、鉛直変位、回転量、面積変化率の時刻歴応答と、FFT解析によりこれら4変数のパワースペクトル、および、2回微分に関するパワースペクトル(以後「加速度スペクトル」と呼ぶ)を求めた。なお、パワースペクトルの表示では、1/3オクターブ幅の平滑化を行った。

3. 時間領域での解析結果

解析結果の一例として、本論文では12箇所のブロックネットのうち、軌道直下(中心部)と、道床側方部(周辺部)の2点の、入力加速度の大きさ200 galと400 galの2つについて比較する。一方は、レール直下で、まくらぎや砕石が密集し、砕石の動きに関して拘束が多

い点であり、他方は軌道外側の法面内に位置し、側方および上方への動きに関して拘束が少ない点である。

以下の図中、正の値は、水平方向では右方向変位、鉛直変位では上方向変位、回転角では右回転、面積変化率では面積増加を意味する。なお、2秒間締固めを行ったので、図は2秒からの表示である。

3.1 200 gal の場合の時刻歴応答

200 gal 載荷時の水平変位、鉛直変位、回転角、面積変化率に関する時刻歴応答を図-5 から図-8 に示す。

図-5 より水平変位については、中心部・周辺部ともに、入力した正弦波に近い形の比較的なめらかな応答であり、道床は中心部・周辺部共にほぼ一体的な挙動をしていることがわかる。しかしながら、時間経過に伴い、中心部と周辺部に少しずつ乖離が生じており、この乖離現象は時間経過に伴って、戻ることなく徐々に増加する傾向にある。このことから、この乖離は弾性変形によるものではなく、中心部と周辺部の間に間隙が増加し、塑性ひずみが増加したことを意味する。

図-6 より、道床には水平載荷したにもかかわらず、鉛直方向にも変位が生じていることがわかる。また、鉛直方向の挙動は、入力周波数に一致した周期の緩やかな波とともに、小刻みな短周期の波形があわさったものとなっている。

図-7 より、回転角については、入力した正弦波に近い形状とはならず、鉛直変位と同様に短周期の変動を多く伴うような波形となった。これらの短周期の挙動は、水平変位の挙動とは異なることから、鉛直変位の挙動はブロックが回転する局所的な動きと大きく関係するものと推察される。また、中心部では僅かな変動が徐々に累積して最終的に左回転を少し生じただけであったが、周辺部では変動幅が若干大きく、また3.5秒近辺で突如大きく左回転の挙動が生じている。砕石の拘束条件の差異が影響しているものと思われる。

図-8 に面積変化の時刻歴を示すが、図より、面積変化についても短周期の変動が大きく含まれており、この傾向は回転挙動や鉛直挙動に近い周期であり、おそらく、砕石の回転と鉛直の挙動が面積変化に関係しているものと思われる。また、周辺部の面積変化では3.7秒近辺で大きな変動があるが、この変動には3.5秒近辺で回転の影響がでている。

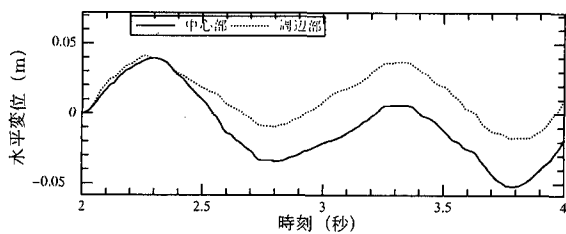


図-5 中心部、周辺部の 200 gal における水平変位

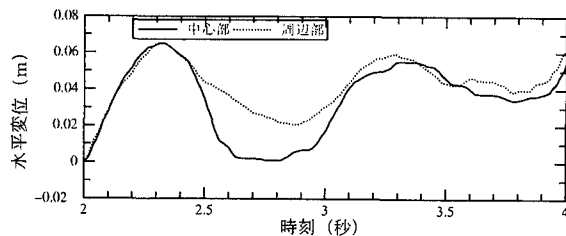


図-9 中心部、周辺部の 400 gal における水平変位

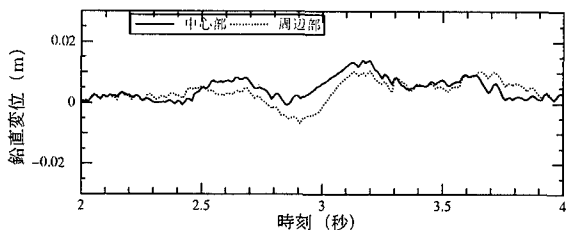


図-6 中心部、周辺部の 200 gal における鉛直変位

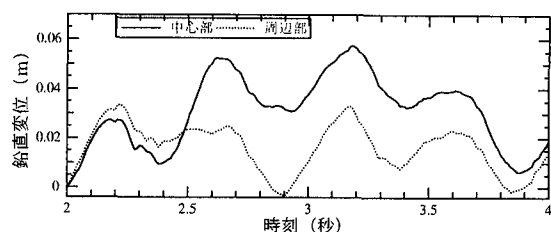


図-10 中心部、周辺部の 400 gal における鉛直変位

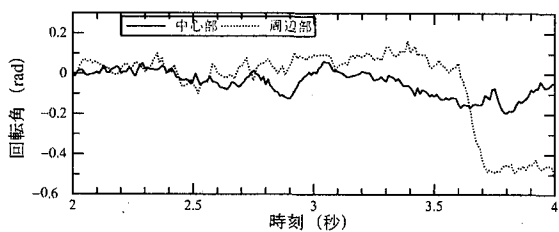


図-7 中心部、周辺部の 200 gal における回転角

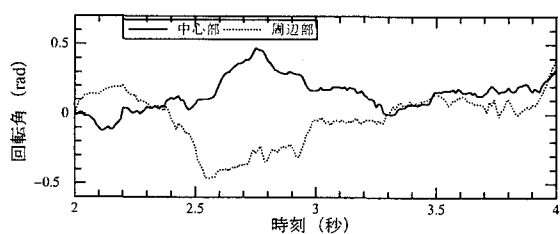


図-11 中心部、周辺部の 400 gal における回転角

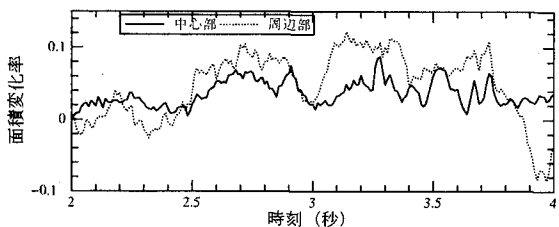


図-8 中心部、周辺部の 200 gal における面積変化率

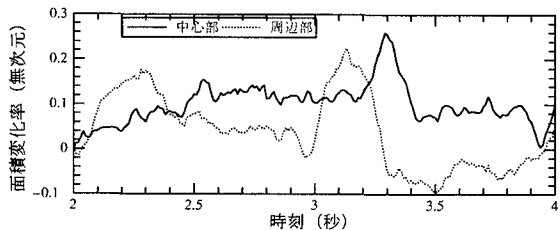


図-12 中心部、周辺部の 400 gal における面積変化率

3.2 400 gal の場合の時刻歴応答

400 gal 載荷時の水平変位、鉛直変位、回転角、面積変化率に関する時刻歴応答を図-9 から図-12 に示す。

図-9 より、400 gal における水平変位は、入力波形 1Hz を主体とする挙動になっているものの、形状はかなり歪んだ形である。ことに 3 秒以降は入力波形に追従できず、道床内に塑性変形が発生したことがわかる。

図-10 の鉛直方向の挙動に関しては、2Hz 位の周期的な大きな変動とともに、短周期の微小な変動がみられる。約 2Hz 挙動は道床の中心部でも周辺部でもほぼ同位相で動いており、道床の全体的な挙動であり、おそらく入力波の周波数が関係しているものと考えられる。

図-11 の回転挙動に関しても、200 gal に比べて変動幅が大きくなっているが、200 gal の時と同様に短周期の細かな変動がみられる。

図-12 の面積変化では、小刻みな挙動と急激な挙動が交互に発生し、変動幅も 200 gal よりもかなり大きくなっている。また、回転が起きた後に面積変化が発生していることから、面積変化には回転が関連性をもつことがわかる。

3.3 時間領域の碎石の挙動特性

1Hz を載荷した場合について、時間領域での結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 水平変位は入力加速度が大きくなるにつれ、正弦波波形の形から離れていき、入力波に追従できなくなる傾向が見られた。入力加速度が大きくなるにつれてその挙動ははっきりと表れることから、戻れない原因は塑性変形によるものと考えられる。
- (2) 鉛直変位は入力加速度に比例して大きくなる傾向があり、中心部では、周りの拘束と回転角との関連性から、体積膨張により上方向の変位が発生し、一方、周辺部でも当初鉛直上方向に変位するが、時間経過に伴い上昇量は減少した。
- (3) 回転角は、碎石の位置や拘束条件により、回転の向きが異なり、碎石の回転が面積変化率に大きく影響を及ぼすことがわかった。
- (4) 面積変化率は水平変位、鉛直変位、回転角の 3 つの要素からなり、その中でも回転角の影響を大きく受ける。入力加速度に比例して、面積変化量も増加する傾向がある。

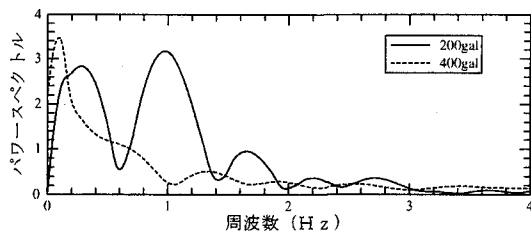


図-13 中心部の水平変位のパワースペクトル

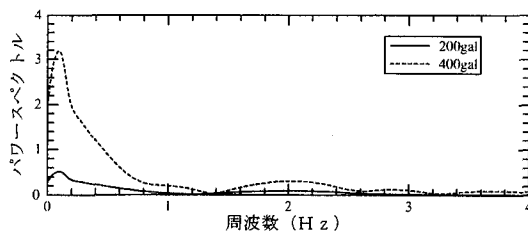


図-17 中心部の鉛直変位のパワースペクトル

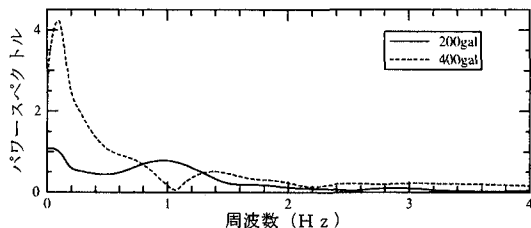


図-14 周辺部の水平変位のパワースペクトル

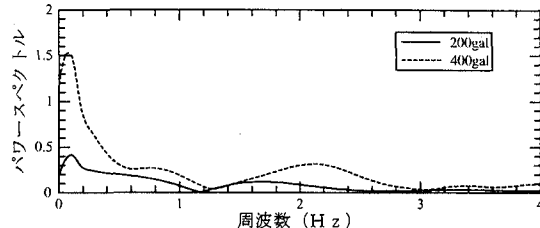


図-18 周辺部の鉛直変位のパワースペクトル

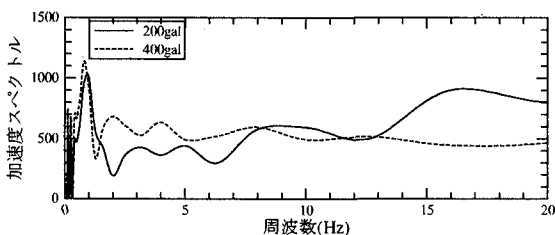


図-15 中心部の水平変位の加速度スペクトル

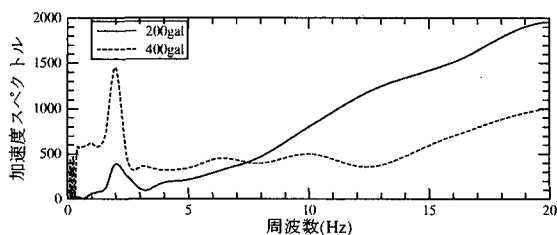


図-19 中心部の鉛直変位の加速度スペクトル

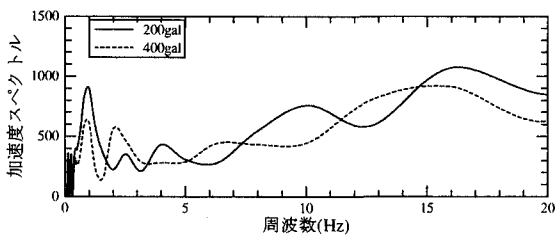


図-16 周辺部の水平変位の加速度スペクトル

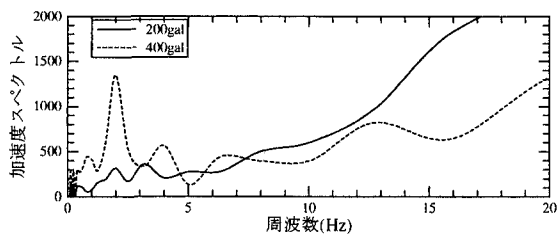


図-20 周辺部の鉛直変位の加速度スペクトル

4. 周波数領域での解析結果

4.1 水平変位について

時刻歴応答をFFTにより周波数領域に変換して、パワースペクトルによる周波数応答分析を行った。

水平変位のパワースペクトルを図-13、図-14に示す。図より、入力加速度200galでは、中央部、周辺部ともに入力周波数に一致する1Hzにピークが見られ、道床全体が1Hzの周波数で挙動していることがわかる。しかしながら、中心部では1Hz付近で極端なピークとなっているのに対し、周辺部でのピークは緩やかであり、両者に若干の挙動の違いが見られる。

一方、400galでは、中央部、周辺部ともに1Hzにピークがみられず、1Hzからずれた周波数で応答が大きくなっている。このことは、時刻歴の応答の波形と比べると、最初の右方向大きい加速度の影響で、道床内部に塑性変形を生じ、ブロックが入力波形に追従できないものと考えられる。また、周波数0Hz付近の応答値が大きく、このことから永久変形が大きく発生していることがわかる。

水平変位に関する加速度パワースペクトルを図-15、

図-16に示す。加速度では、いずれのグラフでも1Hz近傍に応答のピークが見られるが、200galと400galを比べると、400galの方がピークの発生地点が周波数の低い方に移動している傾向がある。これは、小さい加速度では、全体が一体的に連続体に近い挙動となり、入力周波数に一致した動きとなるが、他方、大きな加速度では変形に追従できず、道床全体が必ずしも一体的な挙動になっていないことを意味している。

また、周辺部の400galにおいては、加速度スペクトルでも、1Hzの応答値は小さくなっており、これも塑性変形を生じブロックが戻ることができないためである。周辺部はまくらぎや、他のブロックからの拘束が小さいため不規則な挙動成分が多くなったものと考えられる。

4.2 鉛直変位について

結果を図-17、図-18に示す。入力加速度は水平に載荷したが、鉛直方向にも変位が生じている。また、1Hzの入力加速度を加えたものの、鉛直変位では入力加速度の周波数に一致する挙動とはならなかった。400galでは、2Hz付近に応答のピークが見られる。

図より、中心部、周辺部ともに加速度が大きくなるにつれて変位のパワースペクトルの振幅も大きくなっているのがわかる。また、周波数の0 Hzに近いところにピークがあり、塑性変形が多く発生していることもわかる。ことに、加速度が大きくなった場合、中心部において応答値が大きくなっており、中心部では、周辺の碎石の存在により、側方への変位挙動ができないことから、上下方向の動きがより大きくなったものと考えられる。

つぎに、鉛直変位の加速度スペクトルによる結果を図-19、図-20に示す。加速度のパワースペクトルでも、とくに、加速度が大きい場合について2 Hz前後に応答のピークが顕著である。これは、鉛直変位の変位のパワースペクトルに確認できたものと同様である。入力周波数のおよそ2倍の周波数で応答にピークが発生した原因については、上下の碎石間の跳ね返りや、回転挙動による接触点の入れ替わりなどいろんな原因が考えられるが、入力周波数を変化させて、詳細に挙動を分析する必要があり、これは今後の課題である。

中心部と周辺部を比較すると、変位については中心部が周辺部の2倍近い振幅となった。これは中心部では碎石が密集しており、上載荷重による荷重増加に対して、碎石の側方への広がりができないため、碎石が弾性変形して圧縮することでひずみエネルギーとして荷重を蓄え、つぎに上載荷重が除荷される際に、碎石に蓄えられたひずみエネルギーが解放され、碎石が伸びたり、あるいは、跳ね上がる現象が起きているものと推察される。

また、加速度のパワースペクトルでは、200 galの入力加速度の時、中央部では2 Hz近傍のみにピークをもつような形状であるが、周辺部では2, 3, 5 Hz付近で応答が大きく、周辺部ほど挙動のばらつきが大きいことが解る。また、入力加速度が大きくなると、2 Hz近傍の応答が大きくなるとともに、0~5 Hzの広い範囲の応答が大きくなっており、不規則な挙動が増加していることがわかる。

本論文は、変位に着目した解析であったが、碎石の応力やひずみについても同時に扱うことで、これらの挙動の差異の原因を解明できるものと考えられる。

4.3 回転角について

回転角に関するパワースペクトルを図-21および図-22に示す。水平載荷したにもかかわらず、鉛直変位同様、道床内部では、回転運動も発生することがわかる。

200 galでは、中心部、周辺部ともにはっきりとしたピークはなく、0~2 Hzに応答が大きい範囲が存在しており、いろんな周波数の成分を含んでおり、緩やかな曲線となり、よりランダムに近い挙動をしていることがわかる。また、中央部よりは周辺部が大きい応答であり、周りの拘束の大きい中心部と拘束の少ない周辺部による差異の影響が大きいようである。

一方、400 gal 載荷時の中心部では、0 Hz 近傍と1, 1.8, 2.6 Hz に付近において回転の応答が大きくなっているが、周辺部では逆に応答が減少している。中央部では側方に広がりにくいことから、入力加速度が大きくなると、碎石はその場での回転運動を増加させて、

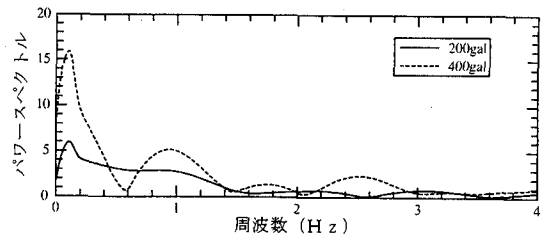


図-21 中心部の回転角のパワースペクトル

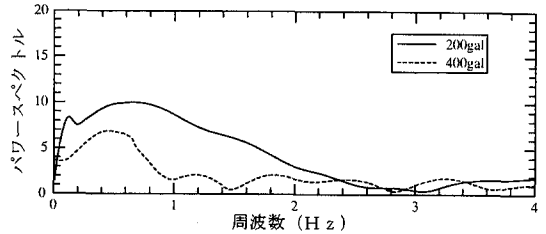


図-22 周辺部の回転角のパワースペクトル

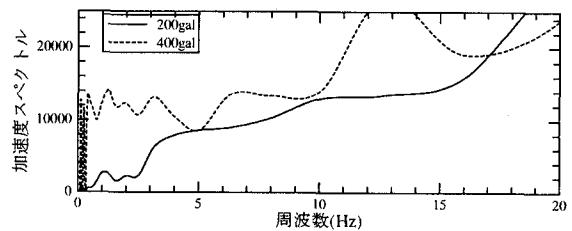


図-23 中心部の回転角の加速度スペクトル

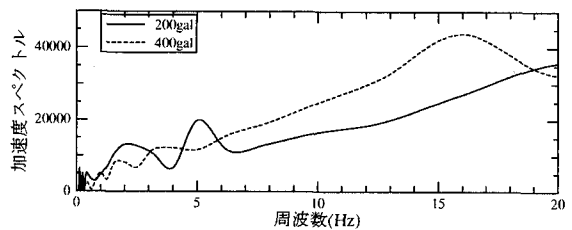


図-24 周辺部の回転角の加速度スペクトル

鉛直方向の動きとともに、隣接する碎石間に体積膨張を引き起こすものと考えられる。周辺部では、側方にも、鉛直方向にも容易に体積を増加できるので、入力加速度が大きくなると、水平方向および鉛直方向の並進運動が増加して、体積膨張をもたらす、その一方で、碎石が自由に並進運動できることから、回転運動は減少したものと考えられる。

回転角に関する加速度スペクトルによる結果を図-23、図-24に示す。回転角および面積増加率についての2回微分については物理的な意味がとらえにくい、変位と同等の観点で評価を行うものである。図より、中心部では、加速度の増加に伴って、周波数の広い範囲で応答値の増加がみられ、とくに低周波域でいくつかのピークをともなって、応答値の増加が顕著である。一方、周辺部では、高い周波数の応答値が増加しており、低周波域では応答が減少している。これらのことは、体積変化とともに、隣接する碎石との接触点や配位の状況が関与しているものと考えられる。中央部、周辺部ともに、広い周波数域での応答値の増加があり、入力加速度の増大により、よりランダムで振幅の大きい挙動をしていることがわかる。

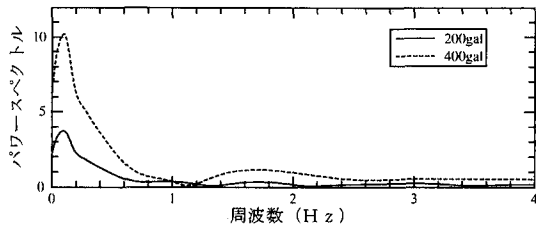


図-25 中心部の面積変化率のパワースペクトル

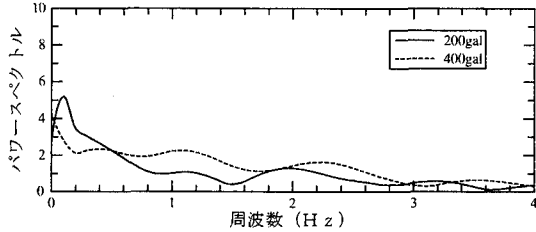


図-26 周辺部の面積変化率のパワースペクトル

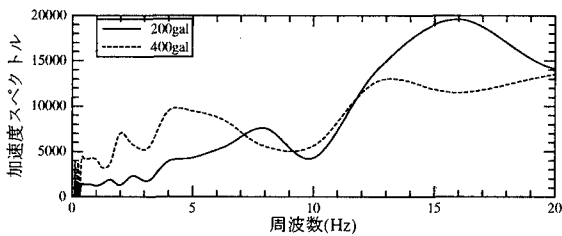


図-27 中心部の面積変化率の加速度スペクトル

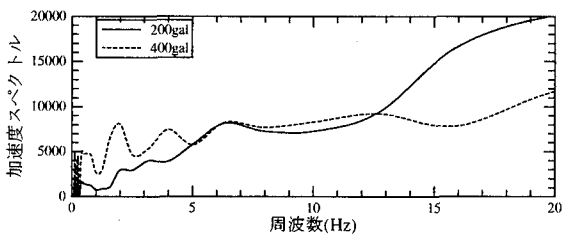


図-28 周辺部の面積変化率の加速度スペクトル

4.4 面積変化率について

面積変化率に関するパワースペクトルを図-25 および図-26 に示す。図より、中心部では、0 Hz 近傍と、1.8 Hz 付近に応答値が大きいところがあり、入力加速度の増加に伴って応答が大きくなっている。中心部では、砕石粒子が互いに強く密着した状態を保っており、入力加速度の増加に伴って、回転挙動と鉛直方向の挙動が増加して、間隙が増加したものと考えられる。

周辺部では、200 gal では 0 Hz 近傍と 2 Hz 付近に応答値が大きいところがあるが、入力加速度が大きくなると、応答値の山がなくなり平坦な形状となっている。周辺部では、入力加速度増加により、側方に広がるとともに、沈下しており、砕石粒子が互いに緩んだ状態となっており、砕石のランダムな挙動が増加しており、面積変化についてもランダムな傾向が増加していることがわかる。

面積変化率に関する加速度スペクトルを図-27、図-28 に示す。入力加速度の増加により、低周波域での応答値が増加しており、2 Hz 付近と 4 ~ 5 Hz 付近に山が生じている。ピークの発生周波数から、鉛直方向の挙動と回転挙動が大きく関与しているものと考えられる。

5. 結論

従来の連続体モデルでは、モデル全体が入力地震波の周波数に一致した応答となり、応力状態については十分な再現性を有するものの、地震による破壊現象の進展挙動、とくに局所的な変位挙動については十分には再現できなかった。

本研究では、DDA による不連続体モデルを用いることにより、局所的な破壊の進展挙動を考えることとし、そのための解析手順を構築するとともに、モデル作成法とブロックネットを用いた評価法を提案し、さらに、数例の解析事例をもとに道床の挙動を比較した。本研究で得られた知見を以下に列挙してまとめとする。

- (1) 変位制御によるモデル構築法と応力制御によるモデル構築法を提案し、両者の特徴を比較した。汎用的に各種の問題に本法を適用するには、応力制御による方法が有効であり、一方、細密充填構造に近いモデルとするには変位制御が有効である。作業性からは応力制御による方法のほうが容易である。
- (2) ブロックネットを用いた評価法は、局所的な破壊の進展挙動を定量的に把握することに有効である。モデル全体にわたり、広範囲にブロックネットを設けて、配位の関係も同時に扱うことにより、破壊挙動の解明に役立つものと考えられる。
- (3) 道床は全体的には入力周波数と同様の動きであるが、局所的には必ずしも入力周波数に呼応した挙動を示しているわけではないことを明らかにした。すなわち、水平載荷したにもかかわらず、個々の砕石には鉛直方向の変位や、回転挙動が発生し、これらのことが動的な破壊挙動の進展に大きく関与することをつきとめた。
- (4) 道床の挙動は、周辺部は広い周波数にわたりランダムな挙動が増加し、中心部は一体的な挙動を保とうとした。さらに、小さい加速度では、連続体に近い挙動となるが、入力加速度が大きくなるにつれて一体的な挙動に加えて、個々の砕石の回転による影響が左右し、不規則な挙動と非線形性が増大することがわかった。これらには砕石の変位挙動に関する初期の拘束条件が大きく影響する。
- (5) 大きな加速度になるにつれて、初期挙動による塑性変形の発生が、後の破壊挙動に大きく影響することもわかった。
- (6) 道床を構成する砕石の回転挙動に関しては、小刻みな短周期の変動を繰り返して、ともに一方向への回転角が少しずつ増加する傾向が見られた。この際に、局所的な面積増加の要因としてに大きく影響を及ぼすことがわかった。回転角は、時間領域・周波数領域に共通して面積変化率に大きく影響を及ぼす原因であると言える。
- (7) 道床中央部では、砕石が密集して、側方への広がりができないため、砕石にはその場での回転挙動とともに、鉛直方向の挙動が発生し、これらの挙動が体積増加に大きく影響している。砕石に蓄えられたひずみエネルギー解放による跳ね上がる現象が起きているものと推察される。また、周波数領域では 2 Hz 近傍に応答のピークがあることが共

通しており、詳細な挙動分析を実施する必要があり、今後の課題である。

- (8) 道床周辺部では、中央部からの水平変位の累積により、水平方向に変位するとともに、鉛直方向の変位が発生する。また、周辺部では碎石の水平方向と鉛直方向の運動が容易に生じることから、碎石自体の回転挙動よりは、むしろ並進挙動により体積膨張が生じ、碎石間が緩んだ状態となり、碎石にはランダムな挙動が増加する。

参考文献

- 1) 内田雅夫: 鉄道技術の研究開発の現状と今後の課題, 鉄道総研報告, Vol.13, No.5, pp.1-4, 1999.
- 2) 三浦 重: 軌道技術における今後の課題, 鉄道総研報告, Vol.12, No.3, pp.1-4, 1998.
- 3) 福田典子, 渡邊朝紀: 新幹線電車と走行エネルギー, CO₂ 排出量抑制方法, 鉄道総研報告, Vol.16, No.10, pp.10-26, 2002.
- 4) 高田 潤, 相原直樹, 辻村太郎: 鉄道と他の交通機関の環境負荷分析, 鉄道総研報告, Vol.16, No.10, pp.27-32, 2002.
- 5) 亀田弘行: 地震工学から見た鉄道の防災課題, 第3回鉄道力学シンポジウム講演論文集, pp.83-89, 1999.
- 6) 松浦章夫: 地震時に起こること, 第2回鉄道力学シンポジウム講演論文集, p.45, 1997.
- 7) 上浦正樹, 須長 誠, 小野田滋: 鉄道工学, 森北出版, 2000.
- 8) 佐藤吉彦: 新軌道力学, 鉄道現業社, 1991.
- 9) 河田恵昭, 古市秀徳: 地震時の列車事故に起因する人的被害予測に関する研究, 第2回鉄道力学シンポジウム講演論文集, pp.47-52, 1997.
- 10) 那須誠, 菊池保孝: 阪神・淡路大震災における列車脱線への地盤と路盤の影響, 第3回鉄道力学シンポジウム講演論文集, pp.71-76, 1999.
- 11) 須長 誠: 鉄道における土構造物の研究の現状と今後の課題, 鉄道総研報告, Vol.12, No.4, pp.1-6, 1998.
- 12) 村田 修: バラストと土構造物の研究開発の現状と課題, 鉄道総研報告, Vol.9, No.7, pp.1-36, 1995.
- 13) 宮本昌幸: 鉄道車両の走行安全性, 第2回鉄道力学シンポジウム講演論文集, pp.53-60, 1997.
- 14) 及川祐也, 松浦章夫: 大きな変位の生じた軌道上の走行シミュレーション, 第3回鉄道力学シンポジウム講演論文集, pp.77-82.
- 15) 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.
- 16) 石川達也, 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.
- 17) 石川達也, 大西有三: 道床バラストの繰返し変形挙動に対する不連続変形法 (DDA) の適用, 土木学会論文集, No.589/III-42, pp.205-217, 1998.
- 18) Meguro, K., Iwashita, K. and Hakuno, M.: Fracture Analysis of Media Composed of Irregularly Shaped Regions by the Extended Distinct Element Method, *Structural Eng./Earthquake Eng.*, Vol.8, No.3, pp.131s-142s, (Proc. of JSCE No.437/I-17), pp.37-48, 1991.
- 19) 小長井一男, 他: 斜面崩壊の程度と崩壊速度の評価手法の開発, 平成8年度科学研究費補助金 (重点領域研究 (2)) 研究成果報告書, 1997.
- 20) Ng, T.-T and Xiaoshan, L.: A Three-Dimensional Discrete Element Model using Arrays of Ellipsoids, *Geotechnique*, 47, pp.319-329 1997.
- 21) Quadfel, H. and Rothenburg, L.: An Algorithm for Detecting Inter-Ellipsoid Contacts, *Computers and Geotechnics*, pp.245-263, 1999.
- 22) Vu-Quoc, L., Zhang, X. and Walton, O.R.: A 3-D Discrete-Element Method for Dry Granular Flows of Ellipsoidal Particles, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, pp.483-528, 2000.
- 23) Shi, G.H. and Goodman, R.E.: Generalization of Two-dimensional Discontinuous Deformation Analysis for Forward Modeling, *Int J. Numer. Anal. Methods Geomech*, 13, pp. 359-380, 1989.
- 24) Shi, G.H.: Discontinuous Deformation Analysis Program Version 96 User's Manual, p. 25, 1996.
- 25) 伯野元彦: 破壊のシミュレーション, 森北出版, 1997.
- 26) Choquet, P. and Tanon, D.D.B.: Nomograms for the Assessment of Toppling Failure in Rock Slopes, *26th US Symp. on Rock Mech.*, pp.19-30, 1985.
- 27) Jiang, Y., Esaki, T., Nagatomi, M. and Okada, T.: Studies on Toppling Failure Mechanism of Slope in Discontinuous Rockmass, *Mechanics of Jointed and Faulted Rock*, pp.605-610, Balkema, 1995.
- 28) 石川達也, 大西有三, 堀池高広: 不連続変形法 (DDA) による道床バラスト部繰返し塑性変形機構の検討, 土木学会論文集, No.645/III-50, pp.15-28, 2000.
- 29) 國井仁彦・谷本親伯, 中村 真, 岸田 深: 岩盤の変形特性の評価における不連続面の影響, 土木学会論文集, No.575/III-40, pp.121-130, 1997.
- 30) 日本材料学会編: 岩の力学—基礎から応用まで, 丸善, 1993.
- 31) 宮原良夫, 天宮廣二: 鉄道工学, コロナ社, 1972.

(2003年4月18日受付)