

碎石集合体の地震時破壊挙動 に関するDDA解析

相川 明*

*正会員 国立大分高専助教授 土木工学科 (〒 870-0151 大分市牧 1666 番地)

The Discontinuous Deformation Analysis was applied to analyze the dynamic failure behavior of railroad ballast in response to earthquakes. Several huge sine waves with different frequencies and accelerations were added to the discontinuous model, which consists of an assemblage of polygonal crushed stones. To find out the dependencies of railroad activities on frequency and acceleration, degree of failure was evaluated by the increase in void volume, displacement and angular movement not only at the whole model but also at some different points.

Key Words : *Discontinuous Deformation Analysis (DDA), Railroad Ballast, Failure Behavior of Polygonal Crushed Stones, Increase of Void Volume*

1. はじめに

鉄道は大量輸送機関として重要な役割を有することから、地震による鉄道被害の最小化対策が望まれる。現在、日本における鉄道営業線のほとんどが、碎石と枕木上に軌道を敷設した、いわゆる有道床軌道であり、地震時の脱線事故や変状を防止するには、動的荷重による有道床軌道の破壊過程の解明が必要である。

有道床軌道は、碎石集合体と枕木からなる不連続体構造物であり、地震時の破壊現象も、碎石の表面の摩擦や凹凸、碎石形状とかみ合わせ、碎石間の間隙の大小などの不連続性に依存して発生する。したがって、碎石の形状や表面の接触機構を表現しうする方法により動的破壊挙動を求め、対策の効果を評価する必要がある。ことに、周波数領域での動的な破壊挙動特性が明らかになると、地震対策ばかりでなく、脱線、騒音、軌道損傷などの広範な問題にも活用できる。

本研究は、不連続変形法解析 (Discontinuous Deformation Analysis, 以下「DDA」) を用いて¹⁾⁻³⁾、碎石形状や接触機構を考慮して、不連続体の動的破壊過程を解明するものである。DDAは、任意形状多角形からなる弾性体ブロック集合体の動的および準静的な挙動を求める数値解析手法である。

本研究は4段階よりなり、一つは、碎石の大きさや形状を測定し、形状特性に関する定量的評価法を構築するもの、二つは、有道床軌道に関する不連続体モデ

ルを構築するもの、三つは、DDAにより動的な挙動特性を解明するもの、四つは、有道床軌道の構造改善を提案し、その効果を調べるものである。本論文は、主に第三段階までの内容に関して述べる。すなわち、碎石形状の測定結果を用いて、道床の不連続体モデルを作成し、水平な正弦波地震動に対する時刻歴応答を求め、不連続体構造の全体的な破壊挙動と局所的な破壊挙動に関する周波数依存性について調べた。

2. 不連続体の動的破壊挙動の解析方法

有道床軌道に関する従来の研究では、列車からの動的荷重の伝達過程をマクロ的に表現することに主眼があり、ばねとダンパーからなる3重梁モデルなどの比較的簡略なモデルにて扱われてきた⁴⁾。碎石道床の動的挙動に関しては、維持管理の合理化の観点より、走行荷重による経年的な沈下挙動が重視されてきた⁵⁾⁻⁷⁾。石川、名村は、道床の実物大試験および大型三軸試験により、不連続体の変形挙動を要素実験的に調べた⁸⁾⁻⁹⁾。さらに、石川らは、DDAにより碎石の細部の挙動を再現し、道床の沈下現象が、碎石表面の摩擦と間隙量に影響されることを明らかにした¹⁰⁾⁻¹¹⁾。著者はDDAを用いて、初期の地震動で生じた小さな破壊が、その後の地震動により永久変形に至る過程を再現し、締固めによる間隙量の大小が道床の動的な安定性に大きく関与することを明らかにした¹²⁾⁻¹³⁾。

砕石道床は十分に締固められていて、しかも、微小な荷重であれば、連続体のように全体的な挙動が卓越することが考えられるが、荷重が大きい場合、外力の周波数が高い場合、あるいは、道床内の空隙量が大きい場合は、個々のブロックの局所的な挙動、すなわち、不連続性の影響が卓越することが予想される。本研究では、連続体のような極端なピークではなくても、不連続体構造物に関しても、周波数応答特性に差異が存在するのではないかと考えた。しかも、対象とする不連続体構造物がどの程度連続体的性質を有するか、あるいは、不連続性を有するかにより、例えば、モデルの形状、ブロックの大きさ、形状、かみ合わせ状態、摩擦角の大小、締固め具合などにより、周波数依存性の大きさに違いが生じるものと思われる。

本研究では、入力波の周波数を漸次変えながら、正弦波地震動に対する不連続体モデルの時刻歴応答を DDA により計算し、次に、FFT により入力波形と時刻歴応答に関する周波数領域でのスペクトル特性を求め、さらに、入出力のスペクトル特性の比より「周波数応答倍率に類似した関数」を求めた。本関数は、入力波形および出力波形を別々に周波数領域に変換したものであり、周波数軸に関して、入出力間に一対一の線形性を想定したものではないが、ある帯域幅における入出力間の関連性を調べるには有用と考える。なお、地震時の列車走行特性に関する問題まで適応可能なように、低周波から 100Hz 以上の高周波までを扱った。

3. 不連続体モデルの作成と解析条件

3.1 砕石形状の測定とその数値化

実際に使用されていた砕石の現物を入手し、その形状を CAD 上で数値化した。硬く良質の安山岩であり、極端に小さいものや大きいものはなく、一方向から見ると多角形に近いものが多かった。質量から求めた平均粒径による粒度分布を図-1 に示す。

3.2 解析モデルの作成手順

形状データをもとに図-2 の枕木とレールのない状態の小型モデルを作成した。モデル作成でも DDA を用いる。まず、固定の仮想地盤上に、水平可動な振動台を設置し、振動台上方の空中に砕石をランダムに配置し、自由落下させた。つぎに、載荷板により、周波数 30 Hz の正弦波形の上載荷重 (50 kN/m²) で 0.8 秒間締固めた後、ブロックが安定するまで 0.7 秒間放置した。

3.3 解析条件

載荷板を除去し、振動台の中央に、正弦波水平地震動 (10000 N) を 1.5 秒間加えて応答を調べた。入力波は 1 Hz から 256 Hz まで、2 Hz から 4 Hz 刻みとした。なお、振動台の浮き上がり防止のため、振動台の左右両

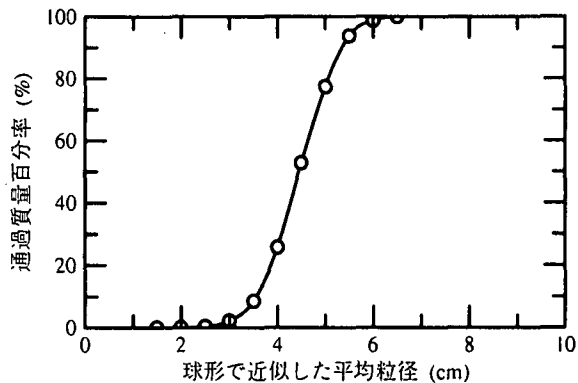


図-1 平均粒径による粒度の分布図

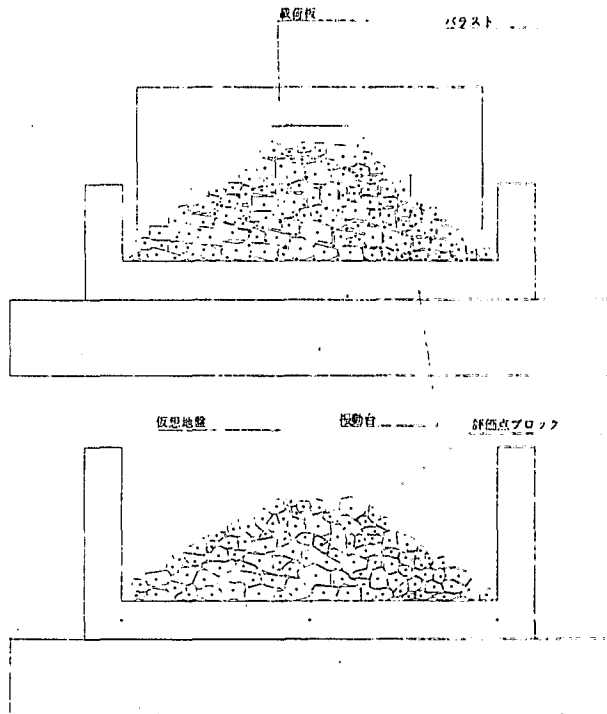


図-2 モデルの作成手順 (上図: モデル作成にあたり、砕石を目的の形状に近くなるように配置したもの。下図: 同量の砕石を空中に配置し、DDA により自由落下させ、その後、上載荷重で締固めた小型の解析モデル。图中、斜線のブロックは評価点ブロックである。) 寸法: 上底 20 cm, 下底 100 cm, 高さ 25 cm, 奥行き 1 m 物性値: 砕石ブロック (密度 2.770 g/cm³, ヤング率 20 GPa, ポアソン比 0.25, 摩擦角 55°)¹⁰⁾, 載荷板および振動台 (ヤング率 1000 GPa, ポアソン比 0, 砕石下面と振動台の接触面の摩擦角: 89°, 仮想地盤と振動台の接触面の摩擦角: 0°)

端に、それぞれ鉛直荷重 10000 N を加えた。振動台と仮想地盤との摩擦角を 0 としたので、振動台を押さえたことによる影響はわずかである。

振動台枠の質量により、地震動載荷時のロスが生じるので、振動台および道床底部にて変位を測定し、実際に加わった地震動の大きさを求めた。変位応答より逆算すると、入力加速度は約 200 gal に相当する。

解析結果は、全ブロックの重心に計測点を設け、水平変位、鉛直変位、回転角、速度および内部の応力状

態を各計算ステップごとに出力した。解析の時間刻みは最大で $\Delta t = 0.0005$ 秒とし、1条件あたり1~2万回の時間ステップについて、繰返し収束計算を実施した。

3.4 解析結果の評価方法

全体的な破壊挙動特性をみるために、地震動載荷前後におけるブロックの移動量と、体積変化に着目して、周波数の影響を比較する。また、モデル中央の評価点ブロックの変位量と回転角に関して挙動特性を求めて、局所的な破壊挙動の周波数依存性を調べた。また、入力波に関しては、振動台と道床ブロック間に損失があり、振動台の挙動をそのまま入力波形としては扱えない。そこで、道床最下段の中央付近のブロック11個の時刻歴挙動の平均値を入力波形とした。

なお、DDAの計算における時間刻みは、ブロックの移動量により逐次変化するので、時刻歴の計算結果は等時間間隔ではない。そこで、DDAの計算結果をスプライン関数で $\Delta t = 0.0005$ 秒の等間隔に補間し、FFTにより周波数領域に変換した。また、体積変化に関しては、モデル内の隣接ブロックの重心間を直線で結んで三角形のメッシュを構成し、三角形の面積を逐次求めて、時刻歴における体積変化を把握した。

4. 全体的な破壊挙動に関する解析結果

4.1 道床の絶対変位

図-3は、正弦波地震動載荷前後における、ブロック重心の水平変位、鉛直変位、回転角の絶対変位量について、全ブロックの平均値を求めたものである。図は、入力周波数の1/2オクターブ幅で平滑化した。図より、回転角については、入力周波数に関して変動がみられるが、水平変位や鉛直変位については、入力周波数に関する依存性あまりみられない。

一般に、不連続体構造物の地震被害については、最終的な変位の有無やその大きさについて議論されることが多いようである。しかしながら、本結果からも明らかのように、従来の考え方の延長として、永久変位の大小のみでは、周波数の依存性を十分に考慮できないことがわかる。なお、この点に関しては次節以降で扱う。

4.2 道床の体積変化

不連続体構造の破壊挙動の程度は、斜面崩壊のような顕著な破壊挙動に関しては明確に把握できる。しかしながら、外見上は健全であり、少し緩んだ程度の現象は把握しがたい。しかしながら、軽度の破壊現象であってもダイラタンシー特性を伴うので、体積変化を調べることで、破壊の進展状況を把握できる。

図-4は、正弦波地震載荷後の道床体積の総量を比較したものである。図は、体積が最小となった1Hzの結果を基準として、体積増加量を、周波数に関し1/2オ

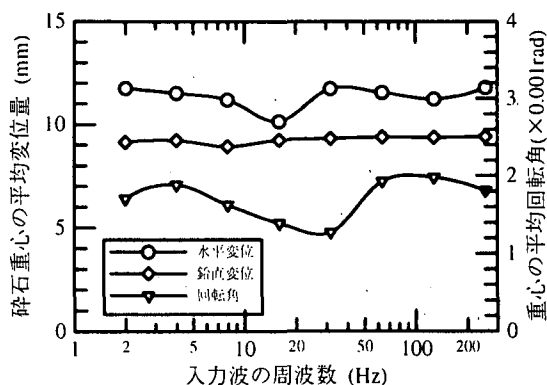


図-3 入力周波数と平均変位量

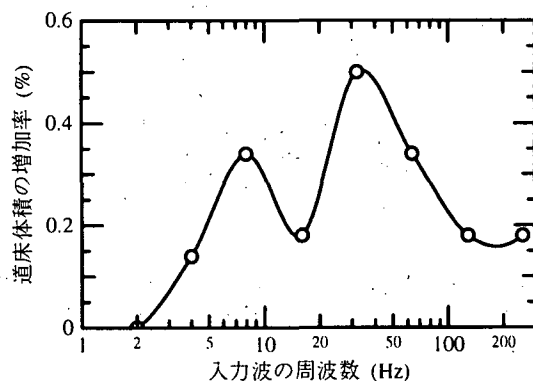


図-4 道床体積変化の周波数依存性

クターブ幅で平滑化したものである。この体積増加は、振動による締固めが原因した体積減少と、破壊進展による体積膨張の差によるものであり、体積増加率の大小は破壊挙動の概略を表したものと見える。

図より、載荷後の道床の体積は、低い入力周波数で最小となり、入力周波数が高くなるにつれて体積が増加する傾向がある。また、8Hzおよび30Hz~40Hz近傍に緩やかな山があり、高い周波数では再度小さくなっている。体積変化の最大値と最小値の差は僅か0.5%程度であるが、全体の空隙量は18%程度であり、空隙量に対する変動量としては無視できない大きさである。

4.3 ブロックの移動ベクトル

図-5は、正弦波地震載荷前後における、碎石の重心移動量をベクトルで示したものである。図は、低い周波数(1Hz)、体積のピークが生じた周波数(8Hz)、ピークの谷間となった周波数(16Hz)、高い周波数(128Hz)の4例を示す。矢印は実際の移動量の10倍とした。

まず、低い周波数(1Hz)と高い周波数(128Hz)を比較する。1Hzでは、上方の碎石が下方の隙間に入り込み、法面上の碎石は法面に沿って間隔が詰まった。道床底面での変位も小さく、道床の形はそのまま、より密に詰まった状態となった。128Hzでは、上方の碎石が下方の隙間に入り込む傾向が顕著であり、道床底部が外側に広がり、道床頂部に沈下が大きく発生した。

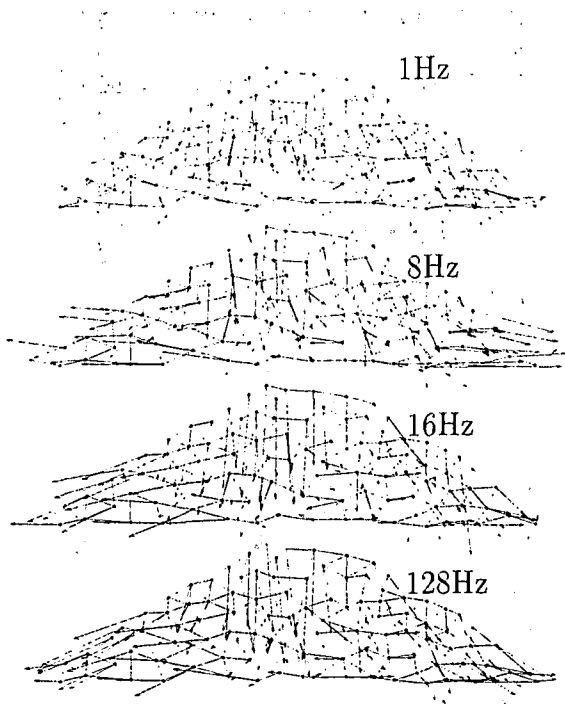


図-5 破壊状況と周波数依存性(1Hz,8Hz,16Hz,128Hz) (碎石の移動ベクトルは実際の移動量の10倍のスケールで表示した)

また、法面の中腹が斜面に沿って斜め下方にずれた。法面と頂部での破壊の発生が体積変化に差を生じる原因となったものと考えられる。

つぎに、体積がピークの8Hzとピークの谷間の16Hzを比較する。8Hzでは、左右の法面中腹から法尻の碎石全体が外側に水平に張り出し(側方流動)、道床底面の碎石も外側に動いて、道床内部の碎石の間隔が広がる傾向(分離)が発生した。さらに、生じた間隙に上方の碎石が入り込んだ。16Hzでは、頂部の沈下は大きい、法面の碎石は法面に沿って間隔が詰まるような変位を生じた。図-3でも16Hzでは水平変位量は小さく、側方流動の有無が体積変化に影響している。

5. 局所的な動的応答特性に関する解析結果

全体的な挙動では、入力周波数に関して、体積変化に差異があり、破壊挙動についても周波数依存性が存在するものと考えられる。ここでは、評価点ブロックの局所的な挙動に着目して周波数応答特性を調べる。

前掲の図-4では、1Hz前後の低い周波数で最小値となり、5Hz前後の周波数で増加傾向を示し、8Hz~50Hzで大きな変動とともにピークを示した後、100Hz以上で再度低下する。そこで、1Hz~256Hzの結果を、低周波から高周波まで対数軸上で4区分し、各区分における平均挙動と比較することにした。4区分の周波数の対数平均値を実軸に戻すと、それぞれ、1.6Hz、5.9Hz、24.1Hz、117Hzである。

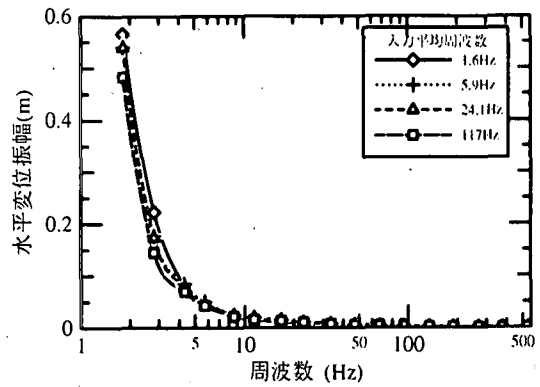


図-6 水平変位に関するスペクトル特性

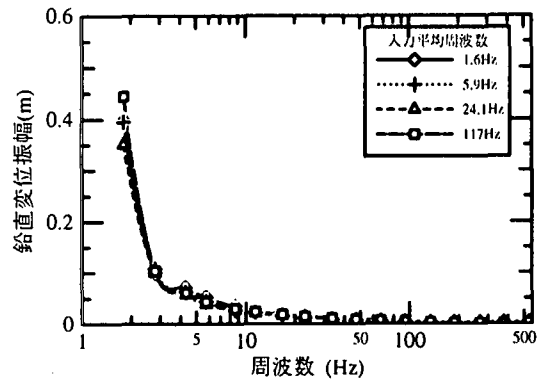


図-7 鉛直変位に関するスペクトル特性

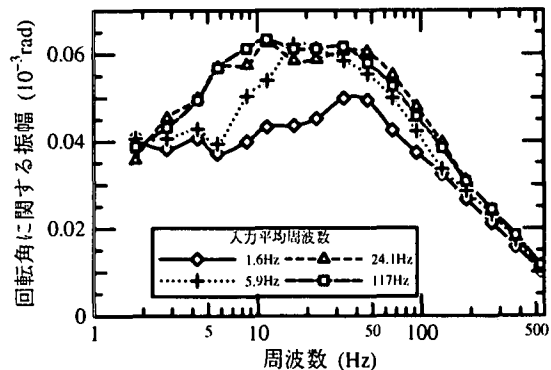


図-8 回転角に関するスペクトル特性

5.1 変位に関する局所的な動的挙動特性

図-6、図-7は、評価点ブロックの移動量に関する時刻歴をフーリエ変換したものである。水平変位と鉛直変位に関する周波数成分を比べると、入力平均周波数の高低による差異はあまりなく、どの入力平均周波数についても、3Hz以下の低周波成分のみが卓越し、それより大きい周波数成分についてはほぼ0に近い値となっている。低周波数成分はおそらく永久変位などの全体的な挙動を反映したものと考えられる。全体的な挙動に関しては前章で述べたように、入力周波数の高低による依存性は小さく、本結果は現象に符合するものとなっている。

5.2 回転に関する局所的な動的挙動特性

図-8は、評価点ブロックの回転角に関する時刻歴をフーリエ変換したものである。回転挙動は、変位の場合とは全く異なる傾向を示す。ブロックが小さいことから、低周波域での振幅は小さく、中域で大きくなり、再度高域で小さくなる傾向が見られる。この傾向は入力平均周波数により異なり、入力平均周波数1.6Hzでは、低域から高域にかけて大きな変動は少なく50Hz付近にわずかな山が見られるが、入力平均周波数5.9Hz、24.1Hz、117Hzの3つでは、入力平均周波数の増加により、5Hzから100Hz付近の回転成分が増加する傾向がある。すなわち、入力平均周波数が低いときは、砕石全体が一体的にゆっくりと変位の挙動が卓越し、入力平均周波数が高くなるにつれて、個々のブロックの回転挙動が大きくなるものと考えられる。

また、入力平均周波数が高い場合は、10Hzと40Hz近傍に緩やかなピークが見られる。このピークは、前掲の図-4の体積変化のピークとなる周波数に近いものとなっている。本結果だけでは断言できないが、ブロックの回転挙動の増加が、体積増加に大きく関与し、他方、ブロックの変位挙動は体積増加にはあまり関与しないものと考えられる。この点については、他のブロックの挙動解析とともに、空隙量に関する時刻歴応答解析が必要である。

5.3 入力波の周波数特性と局所的な動的挙動特性との関連性

図-9～図-11は、評価点ブロックの加速度と角加速度に関するフーリエスペクトルを求め、道床下面での水平加速度に対する応答比を求めたものである。

水平加速度、鉛直加速度に関しては、入力平均周波数の高低により応答倍率に差異がある。入力平均周波数が1.6Hzの場合、周波数成分3Hz付近が最小であり、周波数成分が高くなるに従い増加する傾向がある。入力平均周波数が5.9Hzでは、周波数成分4Hz～10Hz付近が最小で、入力平均周波数が24.1Hzでは、周波数成分10Hz～20Hz付近が最小となっている。ことに、入力平均周波数が低い場合は、入力平均周波数近傍での応答倍率が低く、道床下部に載荷された周波数成分が、評価点近傍では大きい値として観測されないことを意味する。また、入力平均周波数が大きくなるにつれて、加速度の応答倍率は全体的に大きくなる傾向がある。

回転成分に関しては、いずれの入力平均周波数でも、周波数成分3Hz付近に最小値があり、周波数成分が高くなるに従い応答倍率が大きくなる。また、入力平均周波数が高くなるに従い、全体的な応答倍率も大きくなる傾向がある。

以上のことより、推測の域を出ないが、道床全体は外見上一体的に挙動しているように見えるものの、実際は一体的な挙動とはいえず、道床最下面に加わった水

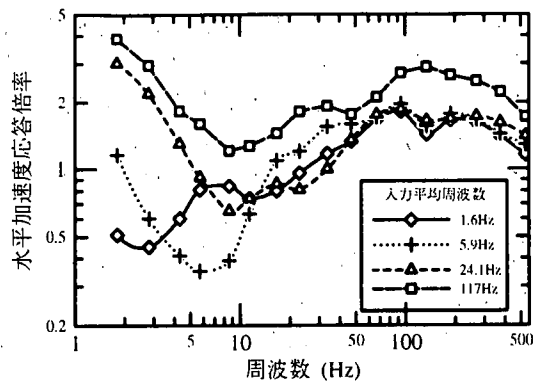


図-9 水平入力加速度に対する水平加速度応答倍率

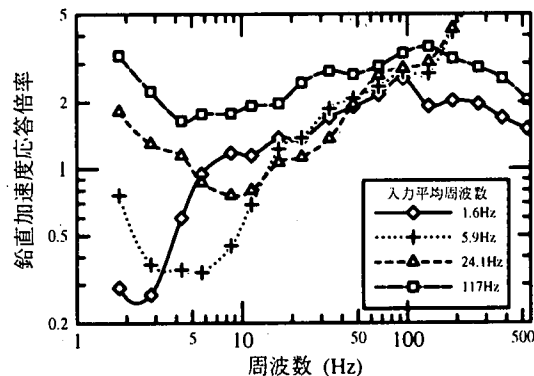


図-10 水平入力加速度に対する鉛直加速度応答倍率

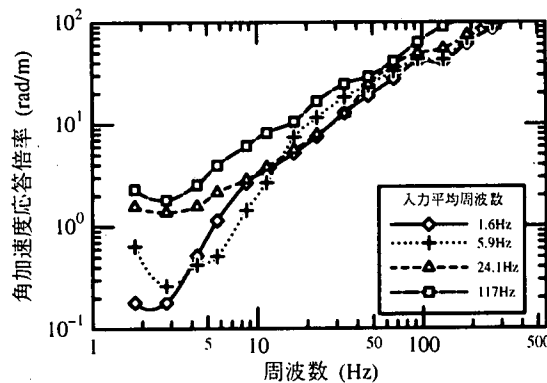


図-11 水平入力加速度に対する角加速度応答倍率

平地震波のエネルギーは、直接的に上部ブロックへは水平動としては伝わらず、ブロックの回転によるせん断挙動を介して、上部に伝達される可能性がある。また、入力周波数が高くなるに従い、回転挙動が増加し、個々のブロックがバラバラに動く傾向が大きくなるものと考えられる。この点に関して、評価点以外のブロック相互のせん断挙動を詳細に検討する必要がある。

6. まとめ

地震による軌道破壊のメカニズムを解明するには、不連続性による接触機構を忠実に再現した上で、不連続

体部分のエネルギー散逸特性と変形性能を把握する必要がある。本研究では、動的な外力のエネルギーは、碎石間の摩擦による変形と、剛体変位による破壊の2者で消費されると考え、不連続変形法を用いて、道床の不連続体モデルに正弦波を入力して時刻歴応答を求め、さらに、フーリエ変換により周波数領域に変換して、全体的な破壊挙動と局所的な破壊挙動に関する周波数依存性を比較検討した。

小型のモデルであり、しかも、2次元的な水平載荷のみではあるが、破壊状況、碎石の変位量・回転量、道床の体積変化のいずれに関しても、入力周波数が影響し、本解析に限ってではあるが、不連続体の破壊現象にも周波数の依存性が確認された。

変位ベクトルに関しては、体積変化にピークが生じた周波数では、法面の分離・崩壊とともに、道床頂部の沈下が顕著であり、道床下部が側方へ広がる現象がみられた。法面ブロック、および、道床底部から法尻にかけてのブロックの水平移動をいかに拘束するかが道床の安定性に影響するものと予測される。

周波数の依存性に関しては、入力平均周波数が高くなるにつれて、全体的な破壊が僅かに増加する傾向がみられた。また、応答倍率の分析より、いずれの入力周波数についても、道床下部に載荷された周波数成分が、道床内部では大きい応答値とはならず、道床は必ずしも一体的な挙動をしている訳ではなく、入力周波数が高くなるに従い、個々のブロックがバラバラに動く傾向が大きくなるものと考えられる。

本結果のみからは断言できないが、低い入力平均周波数では、全体がゆっくりと一体的に挙動し、入力平均周波数が高くなるにつれて、ブロックの回転挙動が増加し、このことが破壊に伴う体積増加に関与しているものと考えられる。一方、ブロックの変位挙動は体積増加にはあまり関与せず、ブロックの個別の回転挙動の大小が、地震波のエネルギーの伝達機能と破壊進展挙動に大きく関与するものと考えられる。

今後は、1個のブロックに関して、その周囲の間隙量とその固有振動数の関係を調べるとともに、ブロッ

ク間の相対的な回転挙動とせん断挙動の周波数依存性、および、碎石間の間隙量の影響を求めることにより、局所的な破壊進展挙動とエネルギー散逸特性との関連性についても解析を進めたいと考える。

参考文献

- 1) Shi, G.H. and Goodman, R.E.: Discontinuous Deformation Analysis - A New Method for Computing Stress, Strain and Sliding of Block System, *Key Questions in Rock Mechanics: Proc. 29th U.S. Symposium*, pp.381-393, 1988.
- 2) 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.
- 3) Shi, G.H.: Discontinuous Deformation Analysis Program Version 96 User's Manual, p.25, 1996.
- 4) 佐藤吉彦: 新軌道力学, 鉄道現業社, p.571, 1991.
- 5) 石川達也・名村 明・堀池高広: 道床バラスト部の繰返し変形特性の定量化に関する検討, 鉄道総研報告, Vol.8, No.11, pp.31-36, 1994.
- 6) 須長 誠・池内久満: 道床バラストの締固めと沈下特性, 鉄道総研報告, Vol.9, No.7, pp.13-17, 1995.
- 7) 池内久満・須長 誠: 三軸圧縮試験による道床バラストの変形特性の検討, 鉄道総研報告, Vol.9, No.7, pp.7-12, 1995.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 相川 明: 正弦波入力による碎石道床の破壊挙動に関する解析, 第1回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, pp.263-266, 土木学会技術推進機構, 2000.
- 13) 相川 明: 碎石道床の動的挙動に関する不連続変形法解析, 鉄道力学論文集, 第4号, pp.37-42, 土木学会構造工学委員会, 2000.