

正弦波入力による碎石道床の 破壊挙動に関する解析

相川 明*

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

The dynamic failure processes of a railroad ballast track, which consists of an assemblage of polygonal crushed stones, are simulated by using the Discontinuous Deformation Analysis (DDA) as to the effect of the seismic wave frequency and the condition of the preliminary tamping. The seismic energy onto the railroad track is assumed to be consumed with two types of failure modes: failure mode with the rigid body displacements of the crushed stones and a failure mode with the frictional shear actions along with the surface of the polygonal blocks. This paper clarifies the process where the initial small failures spread gradually and become the wide permanent deformation.

Key Words : *discontinuous seismic response analysis, railroad ballast, failure expansion process, discontinuous deformation analysis, polygonal crushed stone*

1. はじめに

鉄道は、環境保全性、省エネルギー性、経済性などの優れた特性を有していることから、新しい都市交通システムとしての再構築が期待されており、軌道の維持管理方法の合理化や省力化、ことに、碎石と枕木からなる碎石道床の根本的な構造改善が望まれている¹⁾⁻⁴⁾。また、阪神・淡路大震災においても、道床の変状、軌道の損傷等の鉄道被害が報告されているが⁵⁾⁻⁶⁾、将来的に鉄道に対する重要性が増大すると、地震時の鉄道交通機能の確保、および、被災時の復旧手順の確立が重要な課題となってくるであろう。しかしながら、碎石道床に関する従来の研究では、概ね土質材料と同じく連続体として扱っており、地震による道床の損傷や変状などの破壊現象のメカニズムに関してはまだ未解明な点が多い。

本研究は、不連続体構造としての破壊特性を考慮した上での、軌道構造の提案に資するため、現状の碎石道床に関して不連続体モデルを作成し、それに正弦波地震動を入力し、時刻歴の動的応答挙動を比較することにより、エネルギー散逸特性と変形性能を調べるものである。本報告は、その最初として、碎石現物の形状データをもとに小型の道床モデルを作成し、事前の締固めの有無による動的な挙動特性の差異を不連続変形法解析(DDA)⁷⁾により比較した。

2. 碎石道床のエネルギー散逸現象の原理

碎石道床の挙動に関しては、従来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要視されてきた⁸⁾⁻¹⁰⁾。石川、名村は、走行荷重と締固めの履歴から、力学的モデルに統計解析を応用して沈下予測の経験式を作成するとともに、道床の実物大試験および大型三軸試験により、不連続体としての変形挙動を要素実験的に調べた¹¹⁾⁻¹²⁾。さらに、石川らは、不連続変形法解析(DDA)により碎石の細部の挙動を再現し、道床の沈下現象が、主として碎石ブロック間のすべりによること、および、道床バラストでのエネルギー損失が、碎石表面の摩擦角、および、碎石の配位による間隙量に大きく関与することを明らかにした¹³⁾。また、DDAを用いることにより、流動則や損失係数を導入しなくても塑性変形や摩擦による損失の影響を評価しうることを示した点で有意義である。

本研究では、碎石ブロックの地震時のエネルギー散逸現象の原因を、(1) 碎石の形状や碎石間の間隙量が影響する剛体変位モードによるものと、(2) 碎石の組み合わせや凹凸が影響するブロック間の摩擦によるものの2者からなるものと考え、前者は、ブロックが移動して、道床の形や機能に損傷を受ける、いわゆる破壊による永久変形であり、破壊挙動の進展によりエネルギーが消費される。この場合、碎石の移動あるいは碎

石の乖離による体積増加を伴うものと考えられる。一方、後者は、碎石表面に平行な動きにより、碎石表面の凹凸が擦れて、摩擦エネルギーが消費される挙動である。不連続体による非線形挙動ではあるものの、碎石間のかみ合わせが良好で、しかも、変形挙動がわずかであれば、除荷後は変形がもとに戻る微小変形現象の一種と考えることができる。碎石間の乖離を伴わないので、体積増加もわずかと考えられる。

両挙動のいずれが卓越するかは、(a) 締固めによる間隙量の大小、(b) 碎石の形状とかみ合わせ状態、(c) 外力としての走行荷重や地震荷重の大きさと周波数特性により差異が生じるものと考えられる。また、ある変位が生じたとき、いずれの挙動が卓越したかは、碎石間の局所的な体積増加量と、碎石表面に平行なせん断方向の相対変位量により概略を判断しうるが、破壊進行に伴う体積増加により、碎石重心の相対的位置関係も変化するので、重心間距離の増加量でダイレクションの測定に代えることが可能と考える。

また、本問題のような不連続体の地震応答に関しては、連続体ほど顕著ではなくとも、緩やかな固有振動モードが存在し、しかも、不連続性の影響度により周波数領域での分散性を有するものと想定される。そこで、本研究では、外力として正弦波の周波数を逐次変化させ、時刻歴応答を求めることにより、周波数依存性を把握することとした。

3. 解析モデルの作成と解析条件

碎石現物を 300 個ほど入手し、CAD 上で形状をトレースして数値化した。入手したバラストは、硬く良質の安山岩であり、一方向から見ると四角形、五角形、六角形などに近いものが多かった。ここでは、最長の長さを「縦」、それに直交する最長の幅を「横」、さらにそれらに直交する厚さを「高さ」として大きさと質量を測定した。詳細は割愛するが平均値は、縦 64.7mm(標準偏差 14.1mm)、横 46.3mm(標準偏差 9.9mm) 高さ 27.6mm(標準偏差 7.6mm) で平均質量は 106.3g(標準偏差 57.0g) であった。

つぎに、形状データをもとに図-1 のような道床の不連続体モデルを作成した。固定の仮想地盤上に、水平可動の振動台を設置し、その上方の空中にランダムに碎石を配置し、自由落下させながら、載荷板を用いて所定の荷重で締固めて作成したものである。載荷板を除去後、振動台中央を水平加振して、碎石の時刻歴応答を調べる。ただし、計算量が膨大なので、今回は、上底 20cm、下底 100cm、高さ 25cm の小型モデルで、枕木とレール、および、走行荷重のない状態での不連続体の挙動を解析することとした。奥行きは単位長さ 1m である。碎石の物性は、密度 2.770 g/cm^3 、ヤング率 20 GPa、ポアソン比 0.25 とし、載荷板や振動台は

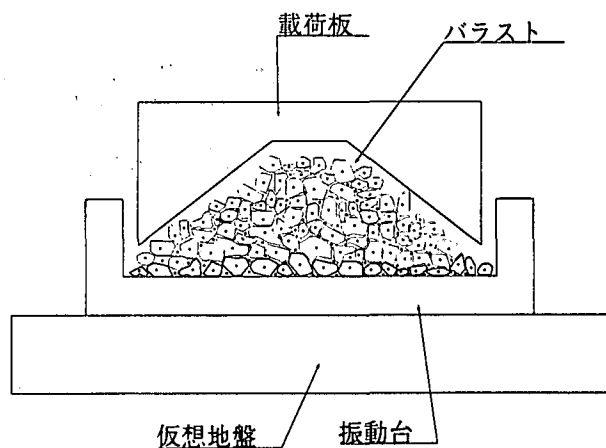


図-1 試験解析用バラストのモデル

剛体を仮定し、ヤング率 1000 GPa、ポアソン比 0 とした。また、碎石の摩擦角は 55° とし¹³⁾、碎石下面と振動台の接触面はすべりが生じないように摩擦角 89° 、一方、仮想地盤と振動台間の摩擦角は 0° とした。

地震波を加える前に、周波数 30 Hz の正弦波形の上載荷重 (50 kN/m^2) で 0.8 秒間にわたり、道床表面を叩いて締固めた。つぎに、締固め用の載荷板を除去し、振動台の中央に、周波数 1 Hz ~ 128 Hz の正弦波の水平地震動 (10000 N) を 2.5 秒間加えて、その応答を調べた。なお、振動台の浮き上がり防止のため、振動台の左右両端 2 箇所、それぞれ鉛直荷重 10000 N を加えた。

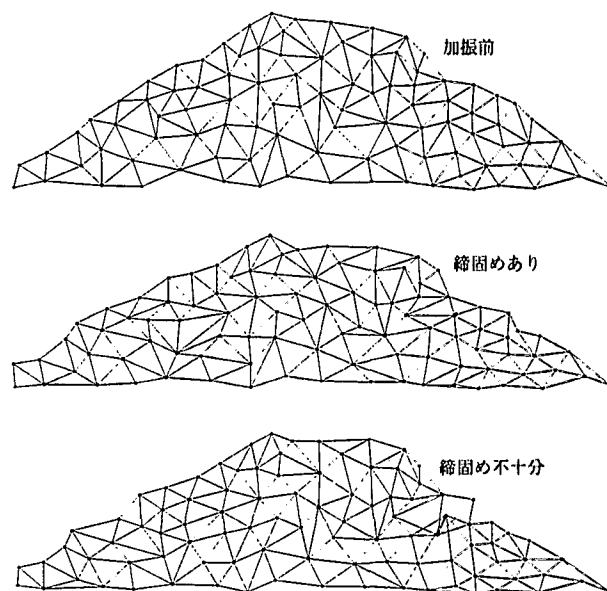


図-2 加振前後での碎石重心の位置関係 (1Hz)

4. 解析結果

上述の締固めを実施した場合と、締固めが不十分な場合の2つについて挙動を比較した。締固めが不十分なときは、碎石が移動して法面が大きく変形した。一方、締固めた場合は全体的な破壊は生じず、碎石は最後まで十分にかみ合った状態であった。

図-2は、事前に締固めた場合の碎石重心の位置を、三角形の頂点で表現したものである。図より破壊の概略を視覚的に捉えることができる。締固めた場合は、破壊の進行は少なく、碎石頂部で残留変位として水平方向17mm、沈下量が38mmが生じた程度である。一方、締固めが不十分な場合は、法面右肩部および左側において破壊が集中的に生じ、また、三角形が全体的に横に広がり、沈下が生じるとともに側方流動が発生したことがわかる。事前の締め固めの有無が破壊の発生に大きく関与することが確認できた。

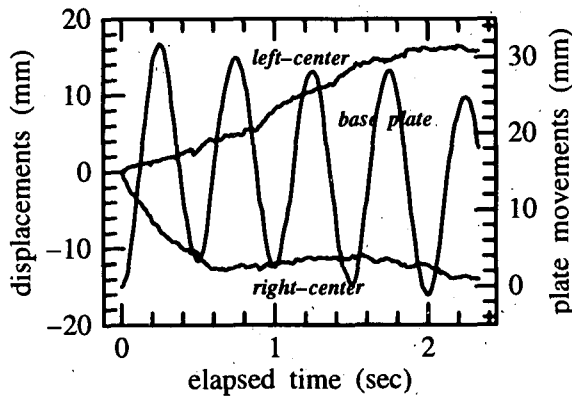


図-3 道床内2測点間の相対変位と振動台の変位

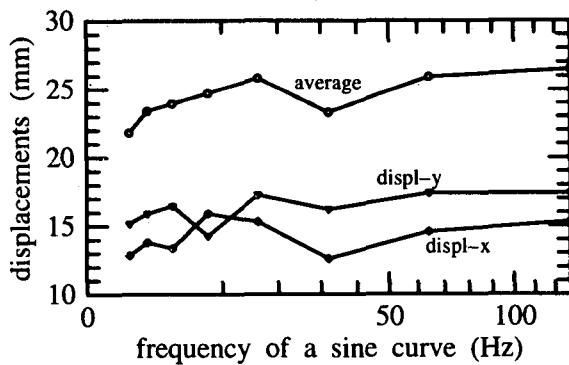


図-4 加振周波数と平均変位量

図-3は、事前の締固めを実施した場合、道床の頂部から5cmほど下方で、中心軸から左右両側に7cmの地点と、ほぼ中心軸上の碎石間の相対変位をプロット

したものである。第2軸に道床底部の振動台での変位も示す。地震動は道床下部での最大振幅16mm程度であった。一方、碎石の相対変位に関しては、正の相対変位は碎石間の距離が縮まったことを、負の相対変位は間隙が広がったことを意味する。地震動は、最初右向きに加えたことから、道床の右側では間隙が増大し、一方、左側では碎石が密に詰まる傾向が見られる。地震荷重は正弦波であり、左右両方向に均等に载荷されているにも拘わらず、相対変位に関する上述の傾向は、時間経過に伴い、戻ることなく増大している。すなわち、最初の変位がどちら向きに生じたかにより、初期の破壊が発生し、その後の地震動により変位が戻ることなく、塑性破壊が一方向に進行したといえる。

図-4は、正弦波の周波数を変えた場合の、モデル全体に関する水平、鉛直、および、その両者の平均残留変位量を比較したものである。周波数が8Hz前後において変動があるものの、おおむね周波数が大きくなるにつれて残留変位がわずかながら増加する傾向がみられるが、今回の解析の範囲では、周波数依存性はそれほど顕著ではないことがわかる。

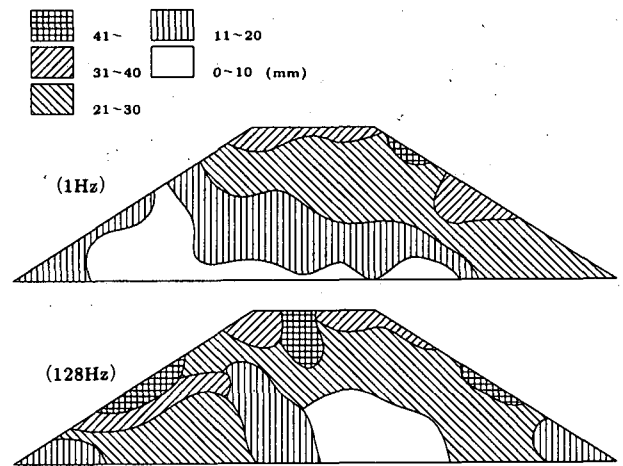


図-5 締固めた場合の残留変位の分布(1Hz,128Hz)

図-5および図-6は道床破壊による残留変位の場所的な分布を図示したものである。図-5は事前に締固めた場合であり、図-6は締固めが不十分な場合である。図-5をみると、128Hzの場合の方が1Hzに比べると側面および上底部で変位が大きいが、周波数が高くなるにつれて、上側の碎石が、下の方の碎石の間隙に入り込む傾向があり、鉛直方向への沈下量が増え、結果的にモデル全体が横方向に広がる挙動がみられた。一方、締固めが不十分な場合には、変位量が全体的に大きくなり、モデルの上方、特に法肩付近および上底部において大きな変位が生じている。実際の碎石道床でも地震などの振動による力が加わった場合これらの部分に破壊が集中するものと考えられる。

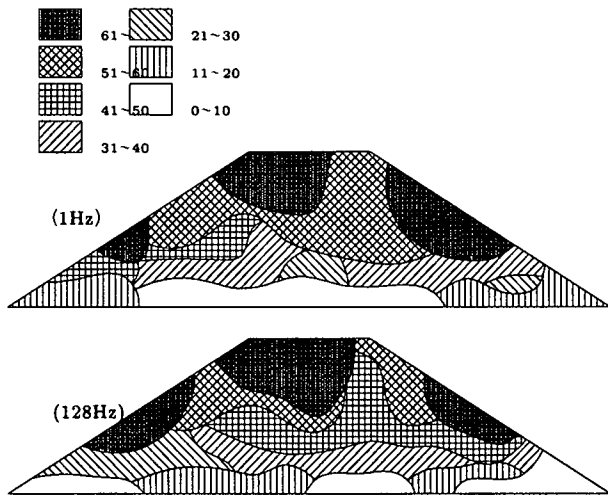


図-6 締固めない場合の残留変位の分布 (1Hz,128Hz)

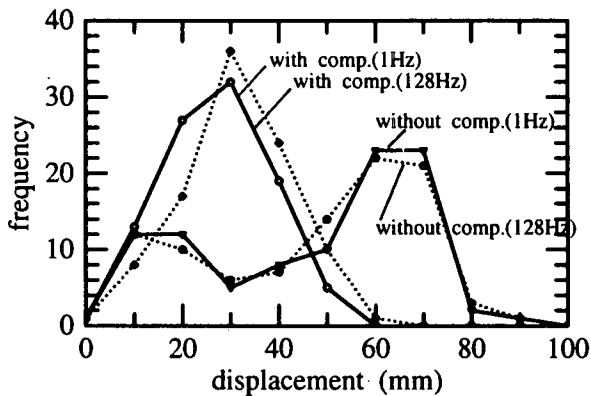


図-7 締固めの有無による変位量の頻度分布 (1Hz,128Hz)

図-7に残留変位の大きさ別に頻度分布を示すが、締固めた場合は、変位は全体に小さめで、しかも、変位の分布は平均値付近に均質に分布するが、締固めが不十分な場合は、変位の分布が2山構造となり、剛体変位による破壊が大きく進行した部分とそうでない部分と崩壊の挙動に差異が生じたことが理解できる。

5. まとめ

鉄道軌道が地震により破壊や変状を受けると市民生活に与える影響は甚大である。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り、本研究では、地震エネルギーは、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、不連続変形法により時刻歴応答を解析的に求めて比較検討した。

まず、不連続変形法解析を利用する際の事前処理として、CADを用いて碎石の形状を数値化し、道床の不連続体モデルを作成した。つぎに、モデルに正弦波地

震動を入力し、締固めの有無による道床の挙動を比較した。解析の結果、締固めが不十分な場合は、剛体変形による破壊が広い範囲で生じたが、一方、締固めをした場合の破壊挙動は比較的小さく、締固めによる碎石間のかみ合わせの程度が道床の動的な安定性に大きく関与することが確認できた。また、不連続変形法解析を用いることにより、最初の地震動で生じた小さな破壊が、その後の地震動により、一方向のみに広がり、最終的な永久変形に至る過程が再現できた。なお、周波数の依存性に関しては、周波数の増加により全体的な破壊が僅かに増加する傾向がみられたが、その傾向は顕著でなく、今後、周波数依存性および分散性に関して詳細な解析を実施する必要があると考える。その際、不連続体解析のみでなく、連続体モデルによる固有値解析を併用することにより、連続体としての共振周波数を求め、さらに、その共振周波数近傍を不連続体変形法解析より詳細に検討することが有効であろう。また、同時に入力周波数、地震強度、碎石の摩擦角、締固めの状態、道床形状をパラメータとして、碎石間のせん断方向の挙動とダイレーションの増加量を数値化し、局所的な破壊の進行とエネルギー散逸特性との関連性についても検討を進めたい。

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) 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。
- 4) 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。
- 5) 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。
- 6) 金澤芳信・一志義晴・岩橋寛臣：阪神・淡路大震災における盛土・抗土圧構造物の被災と復旧について，第3回鉄道力学シンポジウム講演論文集，pp.59-63，1999。第3回鉄道力学シンポジウム講演論文集，pp.65-70，1999。
- 7) Shi,G.H. and Goodman,R.E.: Generalization of Two-dimensional Discontinuous Deformation Analysis for Forward Modeling, *Int.j.numer.ani.methods geomech*, 13, pp.359-380, 1989。
- 8) 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。
- 9) 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。
- 10) 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。
- 11) 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。
- 12) 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。
- 13) 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。