

不連続変形法による地震時のバラスト挙動解析

鉄道力学研究部 軌道力学
主任研究員 相川 明

1. はじめに

地震時におけるバラスト軌道の塑性変形や変状発生現象には、バラスト砕石の粒状性に起因する非線形挙動が大きく影響するものと考えられる。したがって、そのメカニズムを解明するには、砕石粒子間の接触機構を考慮した不連続体解析により、バラストを構成する砕石粒子1個1個のミクロな挙動を忠実に再現することが有効である。鉄道総研では、バラスト軌道の粒状性に着目した数値粒状体モデル作成技術の開発と、数値粒状体モデルを用いたバラスト軌道の地震時の動的挙動解析を進めている。本報告は、鉄道総研において開発した、バラスト砕石の三次元実測形状の測定技術、バラスト軌道に関する数値粒状体モデルの作成技術、および、不連続体解析を用いたバラスト軌道の地震時の挙動解析例について紹介するものである。

2. 不連続体解析によるバラスト軌道の地震応答解析の必要性

地震時におけるバラスト軌道の塑性変形や変状発生現象には、砕石集合体の粒状性に起因する非線形挙動が大きく影響するため、そのメカニズムの詳細については十分には解明されていなかった。従来、地震時におけるバラスト軌道の挙動解析に関しては、バラスト内部に滑り面を仮定した解析や、構成式に構造非線形性を導入した有限要素解析等が用いられてきた。これらの手法は、入力加速度が比較的小さく、バラストの挙動に概ね連続性や線形性を仮定できる場合には、有用な知見を与えるものであった。しかし、近年の地震被害の経験を経て、設計地震波として数百～千 gal 規模の外力を考慮することとなり、バラスト軌道に関しても、砕石集合体の粒状性に起因する非線形性を再現しうる解析手法・評価手法の開発が希求されるようになってきた。

ミクロな観点から見ると、道床バラストの構造は、任意形状を有する砕石粒子の集合体であり、その地震時の動的挙動特性は、不連続な砕石粒子で構成される骨格構造の力学的特性に支配される。したがって、バラスト軌道の地震時挙動の本質を把握するには、砕石粒状集合体というミクロ構造に関する接触機構を制約条件として、砕石形状、材料物性、表面摩擦、粒子間粘性、減衰特性等を考慮して、個々の砕石粒子に関する運動方程式を連立して、入力地震波形に対する応答を求める必要がある。

近年、コンピュータを用いた計算力学が急激に発展したことにより、バラスト構造に関しても、不連続体解析や粒状体解析を用いて、粒子1個1個の挙動を詳細に再現できるようになってきた。本問題に関して不連続体解析を用いると、粒子回転や摩擦すべりなどの粒状体特有の複雑な挙動の本質を捉えることができ、また、実験や観測では測定不可能な、個々の粒子間の接触力、粒子内部の応力、粒子運動の履歴も定量的に把握できる。このことは、軌道上を車両が高速走行する条件下で、バラスト軌道に加えられた地震波のエネルギーが、道床内にてどのようなメカニズムで消費され、そのうちのどれだけのエネルギー量が軌道構造の破壊現象に寄与するかを定量的に把握できることを意味する。地震外力に対する、道床バラストの運動性能と変形性能、動的破壊挙動特性のメカニズム解明、および、変状の予測や対策工の評価に関しても有用な知見を与えるものである。

3. バラストの三次元形状計測装置と数値モデル自動生成アルゴリズムの開発

バラストの三次元形状を測定する計測装置を作製した。本装置は図1に示すように、接触式三次元デジタル計測機、スイッチペダル、データ収録用PCからなる。敷設されている線路から1000個のバラスト碎石のサンプルを採取し、本装置を用いてバラスト碎石の頂点座標を計測し、これをバラスト碎石の形状特性に関するデータベースとした。

不連続体解析による数値シミュレーションを行うためには、これらの頂点座標データベースから、二次元の場合は辺を持った多角形として、三次元の場合は面を持った多面体として、碎石単体の数値モデルを作成する必要がある。不連続体数値モデルの作成作業は、多大な時間と労力を必要とするものであり、この作業性の低さが鉄道分野における不連続体解析の実用化の障壁となっていた。

鉄道総研では、不連続体モデル構築時の作業を簡略化し、しかも、客観的でより高精度のモデルを得るために、計測した頂点座標をもとに、解析で用いる多面体や多角形を自動生成するアルゴリズムを開発した。本アルゴリズムは、(1)多面体の面は3頂点を結んだ三角形とし、(2)多面体は不自然な凹凸を含まず、できるだけ凸集合形状にするという2つの観点により開発したものである。本アルゴリズムによる三次元多面体モデルの作成例を図2に示す。多面体と実物の写真を比べると、概ね実際の形状を再現できていることがわかる。さらに、碎石単体の数値モデルに関して、任意の粒度分布を得るための粒度調整法についても新たに開発を行った。

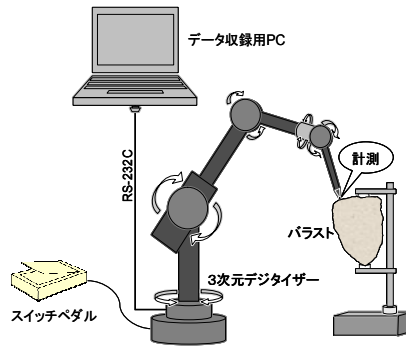


図1 計測装置の構成

図2 多面体モデルの作成例

4. 不連続変形法解析 (DDA)

バラスト碎石集合体を、弾性体の多角形粒状集合体で近似表現し、バラスト軌道に地震外力が加わった場合の、軌道構造部材の動的応答を不連続体解析により再現する。解析には、大変形を伴う動的挙動の再現性および回転挙動の再現性に優れる不連続変形法解析 (DDA) を用いた。不連続変形法解析の概要について以下に紹介する。

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ものである。

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

DDA は、変位型の有限要素法 (FEM) による弾性体の大変形解析の一種であり、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 とほぼ同様の手順に従うことから、各種構造物との境界条件の処理も容易であり、したがって、不連続体と連続体構造物の連成系解析も容易である。

要素間の接触のメカニズムに関しては、要素間に接触バネを用いる点では、DDA も個別要素法 (DEM) と同じであるが、DDA では、隣接するブロック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、停留値問題に付加することにより、ブロック間の接触判定を厳密に行うところが DEM と大きく異なる。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 乗法で評価するペナルティ法を用いており、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。

また、DDA における構造減衰では、運動方程式の第 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。

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

これは、Rayleigh 減衰 $C = \eta M + \zeta K$ について、剛性マトリックスの係数 ζ を 0 とした場合に相当する。この減衰の再現性に関しては、粘性係数 η の値によって大きく異なるものの、不連続体構造物の減衰の詳細に関しては、現時点ではまだ十分には解明されていない。これは、粒状体では、外力に対して個々の要素に運動が容易に発生してしまい、要素内の変形はわずかとなり、したがって、構造減衰を有効に機能させることが困難なことに起因している。以下の解析例では、モデル全体に同じ値の粘性係数を導入し、その値をパラメトリックに変化させて、最も実測値に近い減衰性能を再現できるようなパラメータ値を採用することにした。

5. バラスト軌道に関する二次元不連続体モデルの作成

図 3 は、高架橋上のバラスト軌道部分の不連続体モデルである。モデルは、厚さ 25cm の道床バラスト上に、PC まくらぎ、軌道パッド、60kg レールを敷設したものである。モデルの奥行きは 1m 幅とした。図 4 に示すように、個々の碎石は、上述のバラスト碎石形状に関する測定結果を

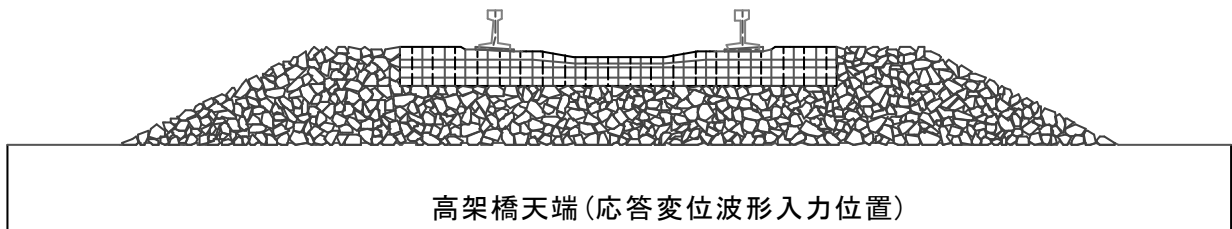


図 3 バラスト軌道の横断面に関する不連続体モデル

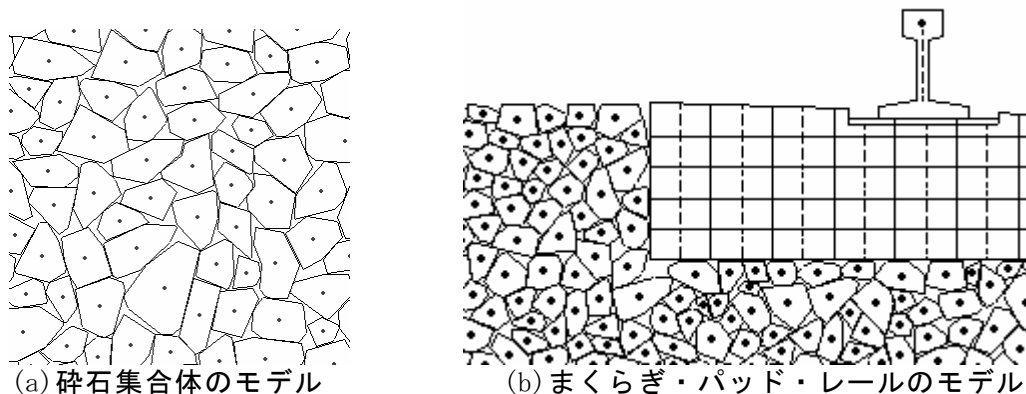


図 4 バラスト軌道の横断面に関する不連続体モデルの拡大図

二次元平面に写像した多角形要素で表現し、レールと軌道パッドについても断面形状を模擬した多角形要素で表現した。それぞれの要素は弾性体として挙動するとともに、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、互いの境界において、応力と変位が不連続となる。また、まくらぎに関しては、多様な変形モードが発生しうるので、鉛直縦方向に矩形要素で5分割、水平方向に20分割した有限要素モデルとした。

6. バラスト砕石の粒状性に着目したバラスト軌道の地震応答解析例

標準的なラーメン高架橋上に敷設されたバラスト軌道に関する、二次元の不連続変形法解析を用いた地震時の挙動解析について紹介する。

まず、標準的なラーメン高架橋モデルを用いて、図5に示すような高架橋天端部（バラスト下面）での応答変位波形（相対変位波形）を求める。

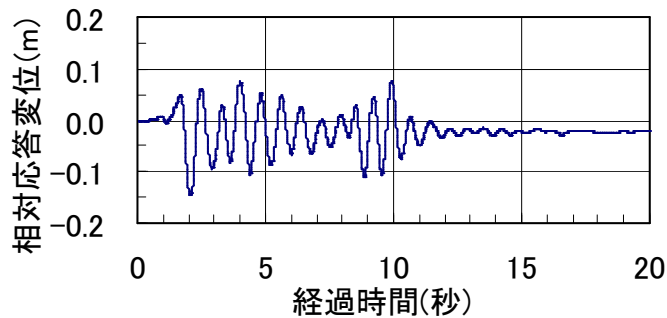


図5 高架橋天端（バラスト下面）での応答変位波形

つぎに、この応答変位波形を、図3のバラスト軌道の不連続体モデル下部に、水平方向の強制変位として入力し、不連続変形法解析により、全要素に関する時刻歴応答を求めた。解析結果の例を図6に示す。図より、高架橋天端とバラスト層との境界部において、変位に対する追従性に差異があるため、まず境界部の砕石に引っかかりや回転挙動が発生し、つぎにバラスト層内部に向かって変状が徐々に進展することがわかる。

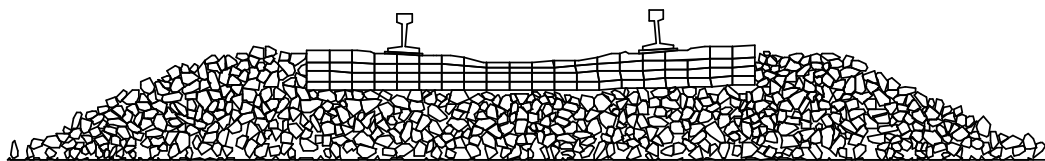


図6 不連続変形法解析による解析例（時刻 $t=3.517s$ ）

7. まとめ

本報告では、粒状性に着目した地震時のバラストの挙動解析に関して、モデルの作成に必要なバラスト砕石の形状測定法、数値粒状体モデル自動生成アルゴリズムについて紹介するとともに、ラーメン高架橋上のバラスト軌道の解析例について紹介した。今後は、室内実験結果、現場測定結果をもとに不連続体解析を実施し、バラスト軌道に関する地震時挙動特性や変状発生の本質を探るとともに、それらの成果を、地震時の列車の走行安全性の確保、および、バラスト軌道に関する各種対策工に反映させる方法について検討する予定である。