

# 路盤剛性の異なるバラスト軌道の 不連続体解析による変形評価

関根 悦夫\* 石川 達也\*\*

## Evaluation of Effects of Roadbed Stiffness on Deformation Properties of Ballasted Track with DDA

Etsuo SEKINE Tatsuya ISHIKAWA

This paper proposes a new analytical procedure applying discontinuous analysis to estimate the deformation properties of railroad ballast. To examine the applicability of the procedure, a series of numerical simulations of static loading tests for 1/5 scale model of real ballasted track were performed with DDA that regards a particle of crushed stone as an irregular polygon. Based on the comparison of analytical results with experimental results, the effect of roadbed stiffness on the deformation properties of railroad ballast was examined. As the result, it has been revealed that the roadbed stiffness has a great influence on the deformation properties of railroad ballast, and that discontinuous analysis is an effective method to simulate the mechanical behavior of railroad ballast if the roadbed which behaves as a continuum can be modelled as a discontinuous body.

キーワード：道床バラスト，路盤，剛性，粒状材料，支持力，DDA

### 1. はじめに

1960年代以前に造られた路盤（以降，営業線路盤という）は，設計標準が整備されていなかったため，経験に基づく施工がほとんどで，図1に示すような設計標準による路盤（バラスト軌道用アスファルト路盤）と異なり，特に剛性の高い層を設けているわけではなく，路盤と路床の区分も明確でない。これらの中には，地盤を含めた路盤以下の強度・剛性が低く，いわゆる，軟弱路盤と呼ばれている箇所もある。路盤以下の強度・剛性が小さくなると列車走行時の路盤の変形が増大し（図2）<sup>1)</sup>，路盤の変形が大きくなると軌道変位進みが大きくなり（図3）<sup>1)</sup>，保守量が増大する。このような軟弱路盤箇所において，バラスト軌道の効率的な維持管理を行うには，粒状材料である道床バラストに関して，種々の剛性の路盤での列車荷重作用下における変形特性を解明する必要がある。

道床バラストのような粒状体としての特性を考慮した数値解析モデルとして，近年，不連続体解析手法の適用が種々検討されており，その有用性が確かめられている<sup>2)～5)</sup>。しかし，これらの研究は，路盤の剛性の変化が道床バラストの粒状体としての変形挙動にどのように影

響を与えるかを検討する際の解析手法としても適したものであるかどうかは不明である。

そこで，本研究では，バラスト道床を粒状材料の集合体と考え，バラスト軌道の不連続体解析を十分な解析精度をもって効率的に実施するために，バラスト道床と路盤系の構造の数理モデル化方法を検討する。具体的には，不連続解析手法の一種である不連続変形法（Discontinuous Deformation Analysis, DDA）<sup>6)</sup>を用いて，実粒子の粒子特性を評価して作成した碎石粒子要素により構成されるバラスト道床の支持力試験を，剛性の異なる路盤上で実施し，バラスト道床の支持力特性に及ぼす路盤剛性の影響を明らかにするとともに，バラスト道床・路盤系の数理モデル化がバラスト道床の支持力挙動に及ぼす影響について検討する。また，有限要素法（Finite Element Method, FEM）を用いて，同様な解析条

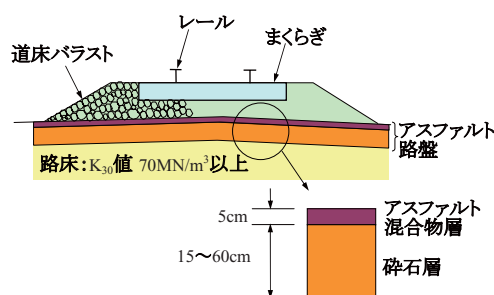


図1 設計標準によるバラスト軌道用アスファルト路盤

\* 軌道技術研究部（軌道・路盤）

\*\* 北海道大学大学院（工学研究科）

特集：軌道技術

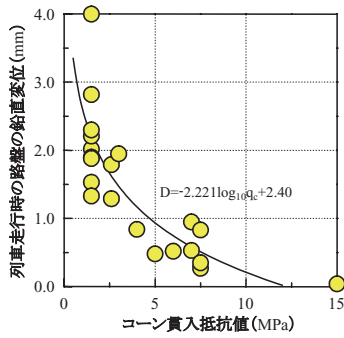


図2 地盤の強度と路盤の変位

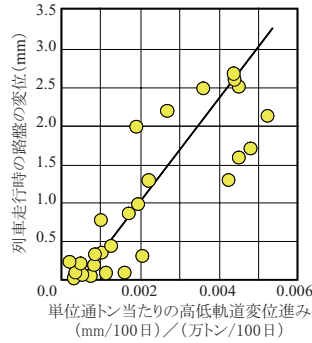


図3 軌道変位進みと路盤の変位

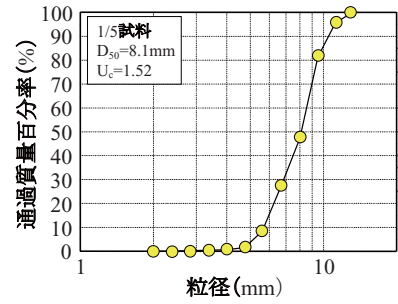


図5 試料の粒径加積曲線

件で支持力解析を行い、それらの数値解析結果と別途実施した模型試験結果との比較検討により、バラスト道床の支持力解析に適した解析手法を解析精度の観点から検討する。

## 2. 解析方法

本研究では、バラスト軌道の線路長手方向の1/5縮尺模型バラスト軌道について実施した支持力試験<sup>7)</sup>のシミュレーションをDDAとFEMを用いて行う。

### 2.1 解析モデル

#### (1) DDA 解析モデル

DDAは、任意形状の多角形粒子で構成された弾性ブロック群の動的および準静的な挙動を解析する数値解析手法である。DDA解析モデルの概略を図4に示す。DDA解析モデルは、模型試験と同様に線路長手方向を同一断面と仮定する2次元平面ひずみ状態にあり、模型試験の道床バラスト粒子を表現する「道床ブロック部」、まくらぎを表現する「载荷ブロック」、路盤を表現する「路盤ブロック部および鋼製路盤ブロック」、実験土層を表現する「側壁ブロック」から構成されており、個々のDDA要素(ブロック)は、ブロック境界で不連続となっている。道床ブロック部を構成する「碎石ブロック」としては、既往の研究<sup>5)</sup>にて高い解析精度を示した実道床バラスト粒子の稜角性と細長性を考慮した伸張六角形要素を採用した。なお、本研究で用いる碎石ブロックの粒度は、実軌道で使用されている道床バラストの粒度を1/5相似粒度に調整した模型試験の粒度(図5)と同じである。解析モデルのバラスト道床は、模型試験における道床部の締固め状態、特に粒子間空隙や粒子配列のランダム性を表現するため、载荷ブロックおよび碎石ブロックを重力場( $g=9.8 \text{ m/s}^2$ )で模型試験の所定断面形状に積み上げる解析(初期安定解析)を行うことにより作成し、道床厚は50mmとした。解析モデルの路盤については、連続体として挙動する鋼材やゴム材で作製された模型試験の路盤を不連続体解析モデルで表現する際の数理モデル化方法

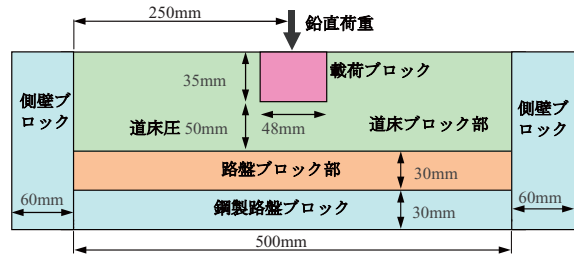


図4 DDA 解析モデルの概略

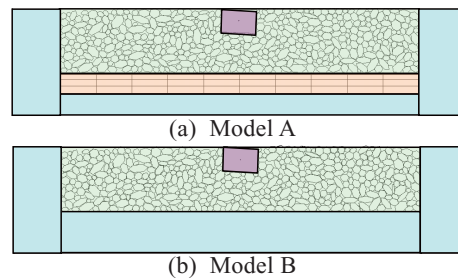


図6 DDA 解析モデルブロック図

を検討するために、その要素分割方法を変えた2種類の解析モデルを用意した。以下では、路盤ブロック部の上部30mmを縦3×横10に分割した解析モデルをModel Aと称し、分割しないものをModel Bと称することとする。以上のように作成した初期安定解析後の初期解析モデルの例を図6に示す。

#### (2) FEM 解析モデル

FEM解析モデルの概略を図7に示す。DDA解析モデルと同様FEM解析モデルも線路縦断方向を同一断面とした2次元平面ひずみモデルである。FEM解析モデルも、载荷ブロック、バラスト道床、路盤から構成されているが、载荷ブロック～バラスト道床間、バラスト道床～路盤間、路盤～鋼製路盤間にジョイント要素を挿入して両者間の不連続性を考慮した。なお、解析モデルの境界条件は、底辺完全固定・2側辺スライド拘束とした。

## 2.2 解析条件

DDA・FEMの静的解析で用いる解析パラメータを表1に示す。なお、別途実施した1/5縮尺模型バラスト軌道

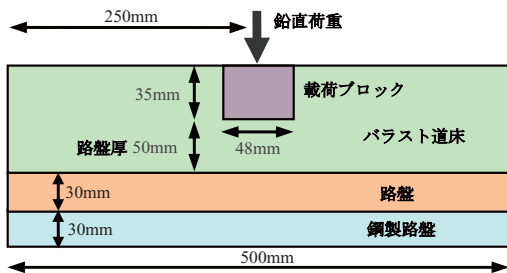


図7 FEM解析モデルの概略

の支持力試験の条件に一致させるため、载荷ブロックはアルミ製、バラスト道床は安山岩、路盤は鋼製・硬質ゴム製・軟質ゴム製の3種類を想定し、道床厚は50mmとした。なお、DDA・FEM解析とも用いる要素は、2次元平面ひずみ要素で、その要素特性は線形弾性である。

(1) DDA解析手順

DDA解析では、ブロックの力学特性として密度 $\rho$ 、変形係数 $E$ 、ポアソン比 $\nu$ を、ブロック境界の力学特性としてブロック間の粘着力 $C_\mu$ 、摩擦角 $\phi_\mu$ を用いる。ここで、粘着力 $C_\mu$ と摩擦角 $\phi_\mu$ は粒子間の解析パラメータであることから $\mu$ の添字を付した。このうち、 $\rho$ 、 $E$ 、 $\nu$ については、模型試験で用いた道床バラストの原石に対する三軸圧縮試験<sup>8)</sup>を参考にして設定した。また、 $\phi_\mu$ については、接触するブロック同士の材料特性に応じて設定することとし、路盤剛性一定の条件で高い解析精度を示した文献<sup>6)</sup>と同様、既往の研究<sup>9), 10)</sup>を参照して、碎石ブロック同士が接触する場合は $\phi_\mu=55^\circ$ を、碎石ブロックとそれ以外のブロックが接触する場合は $\phi_\mu=37^\circ$ をそれぞれ採用した。他方、 $C_\mu$ については、分割した路盤部以外の $C_\mu$ はゼロに設定したが、路盤ブロック部では変位が連続的に変化するように、ブロック側方の粘着力 $C_\mu$ のみ路盤の材料特性に応じて異なる値を与えた。各路盤の $C_\mu$ の設定方法については、「2.3」で詳述する。

载荷は、初期安定解析終了後のDDA解析モデルを用いて、模型試験の鉛直荷重5.0kNに相当する荷重強度まで鉛直線荷重を荷重制御で増加させる単調载荷を行った。この際の鉛直線荷重の载荷点は、载荷ブロック上面中央とした(図4)。また、解析中は鉛直線荷重以外に常時重力 $1G (=9.8 \text{ m/s}^2)$ が作用している。なお、模型試験では試験中、鉛直荷重が1, 2, 3, 4kNに達した時に、段階式载荷方式の平板载荷試験に準じて除荷、再载荷を行っているが、DDA解析では解析時間の関係からこれを割愛した。ただし、蔣らの研究<sup>11)</sup>では、過去に受けた応力履歴より大きな応力が载荷された場合、履歴を受けた礫の応力~ひずみ関係は、履歴のない礫の応力~ひずみ関係と一致する傾向にあることが示されている。このため、本

表1 解析パラメーター一覧

要素物性	载荷ブロック	バラスト道床	軟質ゴム路盤	硬質ゴム路盤	鋼製路盤
密度 (t/m <sup>3</sup> )	2.70	2.70	0.94	0.94	7.80
変形係数 (GPa)	70.0	0.02	0.001	0.004	210.0
ポアソン比	0.30	0.10	0.48	0.48	0.30
摩擦角 (deg.)	37.0	55.0	37.0	37.0	37.0
粘着力 (kPa)	0	0	10.0	150.0	400.0

研究では、DDA解析結果と模型試験結果を比較検討することにより、粒状路盤の支持力解析に対するDDA解析の適用性を検討することとした。

(2) FEM解析手順

FEM解析では、要素の $\rho$ 、 $E$ 、 $\nu$ については、DDA解析と同じ値に設定したが、新たに導入したジョイント要素については、路盤が鋼製路盤、道床厚50mmの時のFEM解析結果が模型試験結果と一致するように、ジョイント要素の解析パラメータを設定した。具体的には、内部摩擦角 $\phi$ については、DDA解析の粒子間摩擦角と同じ $37^\circ$ を採用し、その上でFEM解析結果が試験結果の沈下量と等しくなるよう、鉛直方向剛性率 $K_n (=320\text{N/m}^3)$ とせん断方向剛性率 $K_s (=128\text{N/m}^3)$ の値を調整した。载荷は、DDA解析と同様の方法で実施した。

2.3 各種路床の粘着力の検討

DDAは不連続体解析のため、本研究のように路盤をブロック分割した場合、ブロック間の摩擦力のみでは鉛直荷重に対して路盤ブロックが連続体的な挙動をせず、局所的に沈下する可能性がある。このため、分割した路盤ブロックの側面境界にせん断方向の変形に抵抗する粘着力 $C_\mu$ を付与し、路盤が連続体的に挙動するか検証した。この場合、路盤の材料特性により変形性も異なることから、2次元平面ひずみ状態の路盤の平板载荷試験を模擬したFEM解析とDDA解析を、路盤ブロックの $C_\mu$ は変数に、それ以外の解析パラメータは表1と同じ条件に設定し(以下、「予備解析」と称す)、両者の沈下傾向がほぼ一致するようにDDA解析における適切な路盤ブロックの粘着力 $C_\mu$ を選定することとした。予備解析における鉛直荷重は、支持力解析の最大値である5kNを平板中央に载荷した。なお、解析中は鉛直荷重以外に常時重力 $1G (=9.8 \text{ m/s}^2)$ が作用している。解析モデルの境界

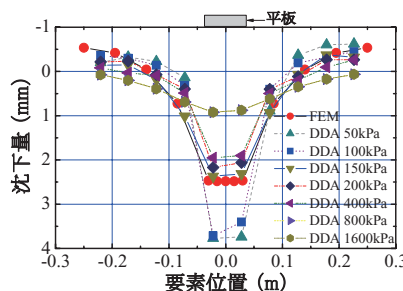


図8 平板载荷試験の数値解析結果

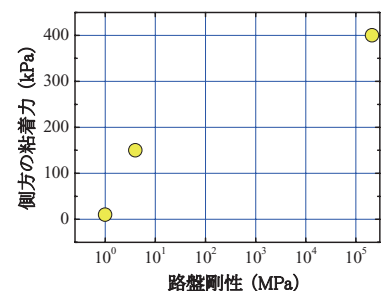


図9 粘着力と路盤剛性との関係

特集：軌道技術

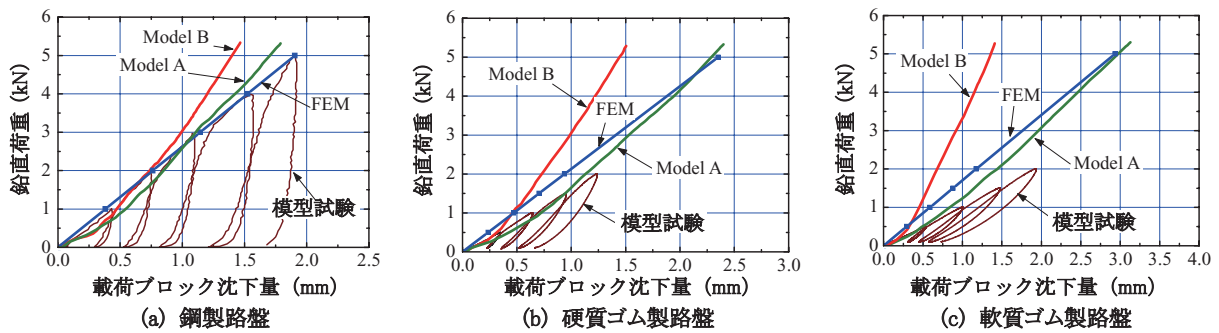


図10 鉛直荷重と载荷ブロック沈下量との関係

条件は、底辺完全固定・2側辺スライド拘束とした。

図8は、硬質ゴム製路盤の予備解析から得られた鉛直荷重5kN载荷時の路盤表面要素の沈下量と载荷点から要素中心までの距離の関係を示す。FEM解析結果とDDA解析結果で比較したものである。ただし、DDA解析結果については、路盤ブロック側方境界に付与した $C_{\mu}$ の値毎に示した。同図から、 $C_{\mu}$ が低くなると载荷点近傍の沈下量が増加するとともに、解析モデル端部周辺の路盤表面が盛り上がり、FEM解析結果の沈下傾向に近づくことがわかる。同図を見る限り、硬質ゴム路床の場合、 $C_{\mu}=150\text{kPa}$ のDDA解析の路床表面の沈下傾向がFEM解析結果にもっとも近い。同様に、他の路盤種別についても適切な路盤ブロックの粘着力 $C_{\mu}$ を選定した結果を図9に示す。同図から、路盤剛性が高くなると、適切な $C_{\mu}$ の値も大きくなる。以上のことから、本研究では、表2に示すように材質に応じて路床ブロックの粘着力 $C_{\mu}$ を変更することとした。ただし、本研究で求めた $C_{\mu}$ は、FEM解析との比較検討を目的としたものであり、FEM解析結果が実際の平板载荷試験結果と異なることも想定されるため、路盤ブロック側方境界の $C_{\mu}$ の設定方法については、今後、DDA解析結果と実現象との整合性を検証するなどして、さらに検討する必要がある。

### 3. 解析結果

#### 3.1 荷重～変位関係

図10は、路盤の要素分割方法が異なる路盤厚50mmのDDA解析から得られた鉛直荷重～载荷ブロック沈下量関係を、路盤剛性ごとに模型試験結果、FEM解析結果と比較したものである。ここで、载荷ブロック沈下量とは载荷ブロック重心の鉛直変位のことである。

まず、DDA解析結果に及ぼす路盤の数理モデル化方法の影響について検討する。同じ路盤剛性のModel AとModel Bの解析結果を同一鉛直荷重で比較すると、路盤剛性によらずModel Aの沈下量はModel Bよりも大きい。また、路盤剛性によらずModel Aの解析結果は模型試験の荷重～変位関係の傾向を捉えているが、Model B

と試験結果の乖離は路盤剛性が低下するにつれて増加する。以上のことから、路盤を要素分割しないModel Bに比べると、路盤の要素分割が多く変形しやすいModel Aの方が全体的に模型試験の再現性は高く、解析精度の観点から見た場合、特に路盤剛性の低い場合のバラスト道床・路盤系の支持力解析に適した解析方法であることがわかる。

次に、DDA解析の有用性をFEM解析と比較して検討する。図10を見ると、FEM解析結果は、模型試験結果の荷重～変位関係を精度良く模擬しているが、路盤剛性が鋼製路盤から軟質ゴム製路盤へと減少するにつれて模型試験の結果との差が大きくなり、解析精度は低下していることがわかる。これは、本研究では、FEM解析におけるすべてのジョイント要素の解析パラメータを鋼製路盤の模型試験結果と一致するように一律に設定しているため、鋼製路盤からゴム製路盤へ路盤剛性が低下したこ

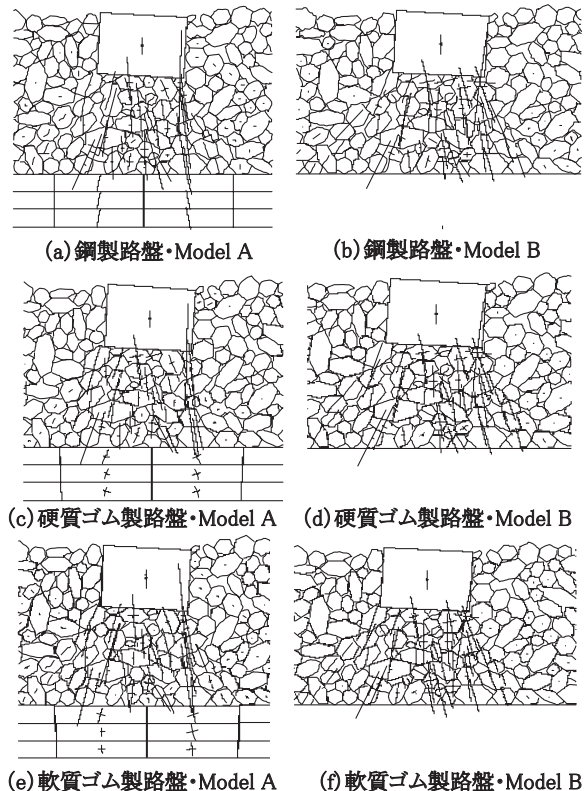


図11 载荷ブロック近傍の主応力図

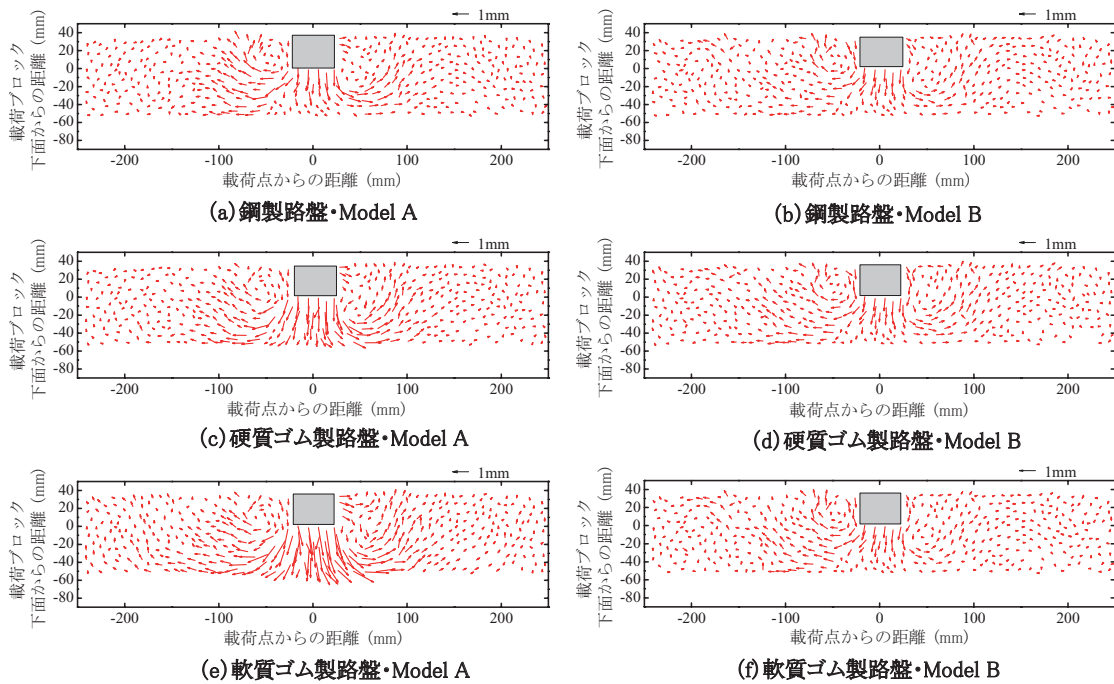


図12 バラスト道床ブロック部の変位ベクトル

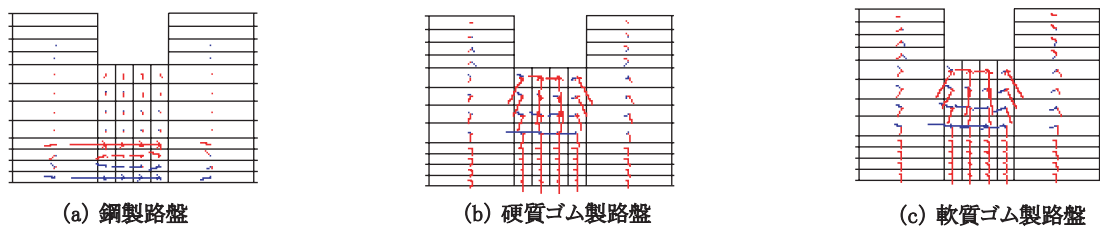


図13 FEM解析による主応力ベクトル（青：引張，赤：圧縮）

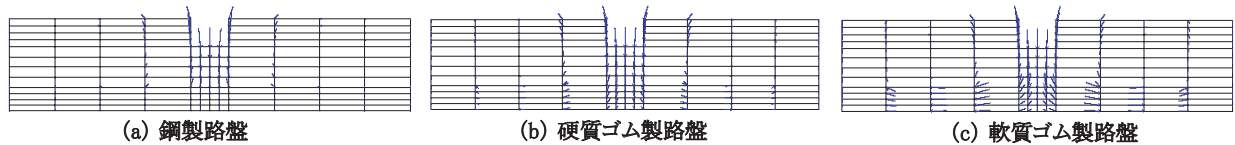


図14 FEM解析による変位ベクトル

とにより変形モードも変化し、バラスト道床・路盤系に対するFEM解析モデルの変形挙動の追随性が低下したことによると考えられる。

### 3.2 砕石粒子の移動傾向

図11に、DDA解析モデルの支持力解析から得られた鉛直荷重5kN載荷時の載荷ブロック近傍の主応力ベクトルを示す。また、図12に、DDA解析モデルの初期安定解析後から鉛直荷重5kN載荷までの各砕石ブロックの変位ベクトルを示す。同様の主応力ベクトルと変位ベクトルをFEM解析結果について示したものが、図13、14である。ここで、主応力ベクトルは、圧縮応力を赤で、引張り応力を青で表記した。

まず、DDA解析結果に及ぼす路盤の不連続体モデル化方法の影響について検討する。図11から、Model Aでは主応力ベクトルが載荷ブロック直下に集中して主に鉛

直方向に作用するのに対し、Model Bでは主応力ベクトルが載荷ブロック直下から左右に拡がるように広く分散していることがわかる。また、図12のように路盤剛性の低下によりModel Aでは路盤ブロックの変形が大きくなるが、Model Bではほとんど変形が生じなかった。さらに、図12を見ると、載荷ブロック下の砕石ブロックの変位ベクトルが、Model Aに比べてModel Bでは全体的に小さいこと、および路盤剛性の低下によりModel Aでは砕石ブロックの移動量が大きくなるが、Model Bではほとんど変化しないことがわかる。以上のことから、DDA解析では、路盤の要素分割方法により主応力の分布傾向が異なっており、応力分布傾向の違いによりブロックの移動傾向に差が生じるため、バラスト道床の支持力も異なると考えられる。

次に、FEM解析結果とDDA解析結果の支持力挙動の違いについて検討する。図11と図13を比較すると、DDA

## 特集：軌道技術

解析では、理論上、砕石ブロック間の接触点ではブロック境界法線方向に引張り応力は作用しないが、FEM解析結果では、載荷ブロック近傍の最小主応力が引張側となっていることがわかる。また、DDA解析結果では、載荷ブロック側面近傍の砕石ブロックに応力の発生はほとんど認められないが、FEM解析結果では、当該箇所では水平方向には主に圧縮応力が、鉛直方向に主に引張り応力が生じており、これらは特に変形の大きい軟質ゴム製路盤で明瞭に認められる。これらのことから、DDA解析結果とFEM解析結果が前述のように特に路盤剛性の低い解析条件で異なる支持力挙動を呈した理由は、引張応力の発生を含めたバラスト道床内の応力分布傾向の違いにあると推察される。粒状集合体の挙動解析に対する不連続体解析手法の有用性については、前述のように既往の研究でも確かめられていることから、以上のような結果が得られたことは、DDA解析がFEM解析と比較してバラスト道床・路盤系の支持力解析に高い適用性を有していることを示唆するものであると考えられる。

## 4. まとめ

本研究では、バラスト道床・路盤系の支持力解析に対する不連続体解析手法の適用性について検討を行い、以下の知見を得た。

- (a) DDA解析によるバラスト道床・路盤系の支持力試験のシミュレーションでは、路盤剛性がバラスト道床の支持力に強く影響するため、路盤の数理モデル化方法（要素分割方法、ブロック境界の粘着力の設定方法）が、DDAの解析精度を大きく左右する。
- (b) DDA解析では、路盤の要素分割方法によりバラスト道床内の主応力分布が異なり砕石ブロックの移動傾向に差が生じ、バラスト道床の支持力に影響を与える。同様に、DDAとFEM解析結果が異なる支持力挙動を呈する理由は、引張応力の発生を含めたバラスト道床内の両者の応力分布の違いにある。
- (c) ジョイント要素の解析パラメータを不変とするFEM解析では、路盤剛性が低下するにつれ模型試験結果との差が大きくなった。一方、DDA解析では、路盤の要素分割・粘着力付与により路盤剛性の変化を適切に考慮すれば、バラスト道床の挙動を評価可能である。このため、DDA解析は、粒状体／連続体間の相互作用の事前評価が不要という点においてバラスト道床・路盤系の支持力解析手法として高い適用性がある。

以上のように、本研究ではバラスト道床・路盤系の支持力解析を不連続変形法と有限要素法により行い、バラスト道床・路盤系の数理モデル化や路盤剛性がバラスト

道床の支持力挙動に及ぼす影響について検討した。その結果、本研究で用いたDDA解析がバラスト軌道の有用な解析手法の一つであることを示し、その解析精度を維持するには、バラスト道床の構成粒子の粒子特性を考慮するだけでなく、連続体的に変形する路盤の挙動再現に適した不連続体モデル化方法を、その材料特性に応じて採用することが重要となることを明らかにした。しかし、路盤の要素分割方法や路盤ブロック側方境界に付与する粘着力あるいは路盤ブロックの変形性など数理モデル化方法の妥当性については、今後、解析結果と実現象との整合性を検証するなどして、さらに検討していく必要がある。

## 文献

- 1) 関根悦夫, 村本勝己: 営業線路盤の支持力特性に関する研究, 鉄道総研報告, Vol.9, No7, pp.19-24, 1995
- 2) 相川明: 正弦波鉛直荷重に対する有軌道横断面の動的挙動特性に関する不連続体解析, 鉄道力学論文集—シンポジウム発表論文—, 第7号, pp.19-44, 2003
- 3) Saussine, G., Chplet, C., Gautier, P.E., Duboris, F., Bohatier, C., and Moreau, J.J.: Modeling ballast under cycle loading using discret element method, Triantafylidis (ed), Proc. Of cycle behavior of soils and liquefaction phenomena, Bochum, pp.649-658, 2004.
- 4) 鬼頭昭人, 長戸博: レール継目部保守低減方法の一考察, 平成11年鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL'99), pp.35-38, 1999
- 5) 石川達也, 関根悦夫, 三和雅史, 大西有三: バラスト軌道の不連続体解析に対する粒子特性の力学的影響評価, 応用力学論文集, Vol.10, pp.513-522, 2007
- 6) Shi, G. H.: Block System Modeling by Discontinuous Deformation Analysis. Univ. of California, Berkeley, Dept. of Civil Eng., 1989.
- 7) 関根悦夫, 河野昭子, 村本勝己, 石川達也: 列車荷重を受けるバラスト軌道の塑性変形に及ぼす路盤剛性の影響, 第40回地盤工学研究発表会講演集, pp.1169-1170, 2005
- 8) 桜井孝, 高橋明教: 三軸圧縮試験における硬岩の変形特性, 鉄道技術研究所速報, No.82-155, 1982
- 9) 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
- 10) 佐藤吉彦, 宮井徹: 各種道床まくらぎ軌道の道床横抵抗力とその特性, 鉄道技術研究所速報, No.76-150, 1976
- 11) 蔣関魯, 木幡行宏, 龍岡文夫: 繰返し荷重を受ける礫の変形特性, 第33回地盤工学研究発表会講演集, pp.745-746, 1998