不連続体解析による路床剛性の 異なる粒状路盤の支持力挙動評価

石川達也¹· 亀井威彦²· 関根悦夫³· 大西有三⁴

¹正会員 博(工) 北海道大学准教授 大学院工学研究科 (〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8) E-mail:t-ishika@eng.hokudai.ac.jp

²学生会員 北海道大学 大学院工学研究科 (〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8)
³正会員 博(工) (財) 鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)
⁴正会員 工博 京都大学教授 大学院工学研究科 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)

本研究では、多層走行路構造の適切な数理モデル化方法を確立するために、粒状路盤・路床系の支持力試 験のシミュレーションを不連続変形法と有限要素法で行い、路床・路盤系の数理モデル化や路床剛性や路盤 厚の違いが粒状路盤の支持力挙動に及ぼす影響について検討するとともに、模型試験結果と解析結果を比較 してその適用性を検証した.その結果、本研究で用いた DDA 解析が、多層走行路構造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、粒状路盤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床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.

Key Words : roadbed, coarse granular materials, bearing capacity, DDA

1. はじめに

交通荷重を受ける道路や線路の路盤(図-1)は、路面 にかかる交通荷重を本来保持すべき走行路としての機能 を損なうことなく支持することができ、長期の供用にも 十分な耐久性を有することが望まれている。しかし、例 えば、道路舗装は表層・基層・路盤・路床で構成されて おり、路盤も基層からの交通荷重を分散し、下部の路床 へ安全に伝達する役割を担う一構造に過ぎない。このた め、本来、舗装全体を強固に支持する役目を担う路床の 支持力が、降水や寒暑などの気候条件、あるいは地下水 位上昇などの影響によって低下した場合には、設計上十 分な強度・剛性を有する路盤であっても、交通荷重載荷 時の路盤の変形が支持層である路床の変形に伴い増加し、 路面の沈下やひび割れの誘因となりえる。このため、車 両の走行安全性・走行安定性を所定の基準値以上常時確



図-1 道路や線路の構造図

保するには、走行路を構成する構造部位・部材単体では なく構造システムとしての路盤の支持力特性を解明する 必要がある.

従来,道路や線路の構造設計として,TA法などの経験 的方法や,多層弾性理論などの数値解析を利用した理論 設計が行われてきた¹⁾²⁾.しかし,道路の下層路盤や線路 の道床は,多くの場合,現場の近くで経済的に入手でき る砕石や砂利,スラグなどを締め固めて施工されるため, 粒状地盤材料で構成されている.このような粒状地盤材 料で構成される路盤(以下,「粒状路盤」と称す)の変形 挙動を解析するには,一般に構成粒子個々の移動傾向を 把握する必要があり,そのためには,粒状体の粒子特性

(粒度,粒子形状,物理的性質)の適切な評価が重要な 研究課題となる.こ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,不連続体解析手法が 着目されている.例えば,日本の在来線の約90%を占め るバラスト軌道の変形挙動解析では,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^{3)~6}.これらの研究事例に共通することは,粒子 形状が不連続体解析手法の解析結果に強い影響を及ぼす ことから,砕石粒子単体あるいは粒子集合体としての数 理モデル化方法に力点をおいて,現象のモデル化に起因 する計算誤差の抑制方法や設計計算上必要とされる解析 精度を維持した効率的な現象再現方法を検討している点 である.しかしながら,これらの研究は,主に鉄道軌道 という構造システムの一構成要素としての粒状路盤の数 理モデル化方法に焦点を当てたものであり、例えば、路 床剛性の変化が交通荷重作用時の粒状路盤の変形挙動に どのように影響するかなど他の構成要素との相互作用を 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.

本研究では、このような状況を踏まえ、道路の下層路 盤や線路の道床を粒状集合体と考えた舗装構造やバラス 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、粒状路盤と路床からなる多層走行 路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) ⁷⁾を用いて, 実粒子の粒子特 性を評価して作成した砕石粒子要素により構成される粒 状路盤の支持力試験を, 剛性の異なる路床上で実施し、 粒状路盤の支持力特性に及ぼす路床剛性の影響を明らか にするとともに、粒状路盤・路床系の数理モデル化が粒 状路盤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, 粒状路盤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、粒状路盤・路床系の構造システムとして バラスト軌道を取り上げ、線路縦断方向の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^{8,9}のシミュレー ションを、DDA と FEM を用いて行う.

(1) 解析モデル

a) 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-2 に示す. DDA 解析モデルは、模型試験と同様に線路縦断方向を同一断 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「粒状路盤ブロック部」、ま くらぎを表現する「載荷ブロック」,路床を表現する「(鋼 製) 路床ブロック部」,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. 粒状路盤ブロ ック部を構成する「砕石ブロック」としては、既往の研 究 %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6角形要素を採用した.な お、本研究で用いる砕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-3)と同じである.解析モデル



の粒状路盤は、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、 載荷ブロックおよび砕石ブロックを重力場 (g=9.8 m/s²) 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た.この際,解析モデル の路盤厚は、路盤厚が変化した場合の解析モデルの適用 性を検討するために、20mm、50mm、80mmの3種類と した. 他方, 解析モデルの路床については, 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床を 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、路床ブロック部の上部 30 mm 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-4に、各解析モデルの粒状路盤ブロック部の要素 数,間隙比,密度を模型試験結果と比較して表-1に示す. ただし、模型試験の粒状路盤の間隙比と密度は3次元的 な値のため、DDA 解析モデルに比べて間隙比は大きく、 密度は小さい.

b) FEM解析モデル

FEM 解析モデルの概略,メッシュ図の一例を図-5 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,載荷ブロック,粒状路盤(厚さ20, 50,80 mm),(鋼製)路床から構成されているが,載荷 ブロック~粒状路盤間,粒状路盤~路床間,路床~鋼製 路床間にジョイント要素を挿入して両者間の不連続性を



(c) Model A (路盤厚 20 mm)

表-1 粒状路盤ブロック粒子の要素特性と 模型試験の実粒子との比較

DDA						
路盤厚(mm)	要素数	間隙比e	密度p _s (t/m ³)			
20	318	0.28	2.11			
50	451	0.27	2.12			
80	548	0.27	2.13			
模型試験						
路盤厚(mm)	路床種別	間隙比e	密度p _s (t/m ³)			
路盤厚(mm) 20	路床種別 鋼製	間隙比e 0.93	密度p _s (t/m ³) 1.4			
路盤厚(mm) 20	路床種別 鋼製 鋼製	間隙比e 0.93 0.86	密度p _s (t/m ³) 1.4 1.45			
路盤厚(mm) 20 50	路床種別 鋼製 鋼製 硬質ゴム	間隙比e 0.93 0.86 0.81	密度p _s (t/m ³) 1.4 1.45 1.49			
路盤厚(mm) 20 50	路床種別 鋼製 鋼製 硬質ゴム 軟質ゴム	間隙比e 0.93 0.86 0.81 0.89	密度p _s (t/m ³) 1.4 1.45 1.49 1.45			

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) 解析条件

DDA・FEM の静的解析で用いる解析パラメータを表-2 に示す. なお、別途実施した 1/5 縮尺模型バラスト軌道の 支持力試験の条件に一致させるため、載荷ブロックはア ルミ製、粒状路盤は安山岩製、路床は鋼製・硬質ゴム製・ 軟質ゴム製の3 種類を想定して解析を行った. 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.

a)DDA解析手順

DDA 解析では、ブロックの力学特性として密度p、変 形係数 E、ポアソン比v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_{μ} 、摩擦角 ϕ_{μ} を用いる.ここで、 粘着力 C_{μ} と摩擦角 ϕ_{μ} は粒子間の解析パラメータであるこ とから μ の添字を付した.このうち、p、E、v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¹⁰⁾を参考にして設定した.また、 ϕ_{μ} 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、路床剛性一定の条件で高い解析精度を示した文献 6 と同様、既往の研究^{11),12)}を参照して、砕石ブロック同士 が接触する場合は ϕ_{μ} =37°をそれぞれ採用した. 他方、 C_{μ} については、分割した路床部以外の C_{μ} はゼロに 設定したが、路床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_{μ} のみ路床の材料特性

図-4 DDA 解析モデルブロック図 ジョイント要素 250mm 鉛直荷重 挿入箇所 34.8mm 荷ブロ 路盤厚 48.0mm 粒状路盤 20mm. 50mm. 80m 側辺 水平方向:固定 鉛直方向:自由 30mm 路床 30mm 鋼製路床 500.0mm 底辺:完全固定 解析モデルの概略 (a)

(d) Model A (路盤厚 80 mm)

b) メッシュ図(路盤厚 50 mm)
図-5 FEM 解析モデル

表-2 解析パラメータ一覧

要素物性	載荷ブ	粒状	軟質ゴ	硬質ゴ	鋼製
	ロック	路盤	ム路床	ム路床	路床
密度 (t/m³)	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

に応じて異なる値を与えた. 各路床の C_µの設定方法については,本章(3)で詳述する.

載荷は、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 5.0 kN 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載荷を行った. この際の鉛直線荷重の載荷点は、載荷ブロック上面中央 とした(図-2).また、解析中は鉛直線荷重以外に常時重 力1G(=9.8 m/s²)が作用している.なお、模型試験では 試験中、鉛直荷重が 1,2,3,4 kN に達した時に、段階 式載荷方式の平板載荷試験に準じて除荷、再載荷を行っ 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、蒋らの研究¹³では、過去に受けた応力履 歴より大きな応力が載荷された場合、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.

b)FEM解析手順

FEM 解析では、要素の ρ , E, v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、路床が鋼製路床、路盤厚 50 mm 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、まず内 部摩擦角 ϕ については、DDA 解析の粒子間摩擦角と同じ 37°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に、鉛直方向剛性率 K_n (=320 N/m³) とせん断方向剛性率 K_s (=320 N/m³) の値を調整した.載 荷は、DDA 解析と同様の方法で実施した.

(3) 各種路床の粘着力の検討

DDA は不連続体解析のため、本研究のように路床をブ ロック分割した場合、ブロック間の摩擦力のみでは鉛直 荷重に対して路床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、分割した路床 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Cuを付与し、路床が連続体的に挙動するか検証した. この場合、路床の材料特性により変形性も異なることか ら、図-6に示すような2次元平面ひずみ状態の路床の平 板載荷試験を模擬した FEM 解析と DDA 解析を,路床ブ ロックのCuは変数に、それ以外の解析パラメータは表-2 と同じ条件に設定して行い(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 る適切な路床ブロックの粘着力Cu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,平板中央に載荷した.なお,解析中は鉛直荷 重以外に常時重力 1G (=9.8 m/s²) が作用している. 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.

図-7 は、硬質ゴム製路床の予備解析から得られた、鉛 直荷重5kN載荷時の路床表面要素の沈下量と載荷点から 要素中心までの距離の関係を、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、路床ブロック側方境界に付与した Cuの値毎に 示した. 図から、Cuが低くなると載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床表面が盛 り上がり、FEM 解析結果の沈下傾向に近づくことがわか る. 図を見る限り、硬質ゴム路床の場合、Cu=150 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, 他の路床種別についても適切な路 床ブロックの粘着力 Cuを選定した結果を,図-8 に示す. 図から、路床剛性が高くなると、適切な Cuの値も大きく なることがわかる.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 Cuを変 更することとした. ただし、本研究で求めた Cu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 果が実際の平板載荷試験結果と異なることも想定される. このため、路床ブロック側方境界のCu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、さらに検討していく必要がある.

3. 解析結果

(1) 荷重~変位関係

図-9は、路床の要素分割方法が異なる路盤厚 50 mmの DDA 解析から得られた鉛直荷重~載荷ブロック沈下量 関係を、路床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、載荷ブロック沈下量とは 載荷ブロック重心の鉛直変位である.まず、DDA 解析結 果に及ぼす路床の数理モデル化方法の影響について検討 する.同じ路床剛性の Model A と Model B の解析結果を 同一鉛直荷重で比較すると、路床剛性によらず Model A の沈下量は Model B よりも大きい.また、路床剛性によ 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床剛 性が低下するにつれて増加する.以上のことから、路床 を要素分割しない Model B に比べると、路床の要素分割 が多く変形し易い 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、特に路床 剛性の低い粒状路盤・路床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-9(a)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, 路床剛性が鋼製路床から軟質ゴム路床へ 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, 鋼製路床・路盤厚 50 mm の模型試験結果と一致するよう に一律に設定しているが, 鋼製路床からゴム路床へ路床 剛性が低下したことにより変形モードも変化し、粒状路 盤・路床系に対する 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. 図-10は、路盤厚が 異なるModelAのDDA解析から得られた鉛直荷重~載荷 ブロック沈下量関係を,路床剛性ごとにFEM 解析結果と 比較したものである、図から、DDA 解析結果では、路床 剛性に関わらず路盤厚が増加すると沈下量も増加するこ とがわかる.一方, FEM 解析結果では, 鋼製路床の場合, 路盤厚が増加しても荷重~変位関係はあまり変化しない が、ゴム路床の場合には、路盤厚が増加すると沈下量は 減少する傾向にあることがわかる.模型試験結果^{8,9}では, 路盤厚の増加または路床剛性の低下に伴い沈下量が増加 することが示されており、DDA 解析結果は試験結果の傾 向を十分に再現しているといえる.ただし、模型試験は、 路盤厚 50 mm 一定で路床剛性を変化させる試験条件と、

鋼製路床で路盤厚を変化させる試験条件で実施したもの であり,FEM 解析結果のように,路盤厚が減少した結果, 路床表面に載荷される荷重が増加して路床の沈下量が増 加することも試験条件によっては想定される.このため, 各種路床上の粒状路盤の沈下量に及ぼす路盤厚の影響に 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.

(2) 粒状路盤の支持力評価

本研究では、別途実施した模型試験の最大鉛直荷重が 2.0 kN または 5.0 kN であることを考慮して、粒状路盤の 支持力を鉛直荷重2 kN または5 kN 載荷時の載荷ブロッ ク沈下量で定義する. このため, 鉛直荷重5kN 載荷時の 沈下量が小さいほど,解析モデルの粒状路盤の支持力は 大きいと考える. 図-11 は, 路盤厚 50 mm の DDA 解析 から得られた支持力~路床種別関係を、鉛直荷重強度別 に模型試験結果,FEM 解析結果と比較したものである. ただし、鋼製路床は鉛直荷重 5.0 kN まで、硬質・軟質ゴ ム路床は 2.0 kN 載荷までしか試験データがないため、図 -11(b)では鋼製路床の模型試験結果のみ示した.また、図 -12 は、路盤厚が異なる DDA 解析 (Model A) から得ら れた支持力~路床種別関係を,鉛直荷重強度別にFEM 解 析結果と比較したものである.以下では、試験結果との 比較検討により DDA 解析の適用性について検証する.図 -11 を見ると, 鉛直荷重2kN 載荷時(図-11(a))は, 前述 のように DDA 解析 (Model A) が最も模型試験結果の傾



向を捉えている.しかし, 鉛直荷重 5 kN 載荷時(図-11(b)) では, 路床種別によらず DDA 解析 (Model A) 結果と FEM 解析結果の沈下量に差はほとんど見られない.これは, 路床上部 30 mm を縦 3×横 10 しか分割してない,本研究 の路床の不連続体モデル化方法に原因があると考えられ る.例えば,図-11(a)を見ると,剛性が高い鋼製路床の DDA 解析 (Model A) 結果は,模型試験結果とほぼ等し いだけでなく DDA 解析 (Model B) にも近いが, 剛性の 低い軟質ゴム路床の場合には, 模型試験結果に最も近い DDA 解析 (Model A) でも他の路床種別に比べると両者 間に若干差が生じている.これらは,路床の変形が卓越 するような条件, すなわち路床剛性が低く鉛直荷重が大 きい場合には,路床の要素分割方法や路床ブロック側方 境界に付与する粘着力あるいは路床ブロック自体の変形



性など路床の不連続体モデル化方法の影響が顕在化し易 く、それらが粒状路盤・路床系としての DDA の解析精度 に強く影響することを示すものである. なお、図-12 でも、 前述のように、路床剛性が異なる場合、路盤厚が支持力 に及ぼす影響は、荷重強度の大小に関わらず、DDA 解析 と FEM 解析で傾向が異なっている. このため、両解析の どちらがより実現象に即しているかについては、種々の 試験条件で粒状路盤・路床系の支持力試験を行い、数値 解析手法の妥当性を確認する必要がある.

(3) 砕石粒子の移動傾向

図-13 に、路盤厚 50 mm の 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 傍の主応カベクトル図を示す.また、図-14 に、路盤厚 50 mm の 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図を示 す. 同様の主応力ベクトル図と変位ベクトル図を FEM 解 析結果について示したものが, 図-15 と図-16 である. こ こで、主応カベクトルは、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床の不 連続体モデル化方法の影響について検討する.図-13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 カ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-13のように路 床剛性の低下により Model A では路床ブロックの変形が 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-14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、および路床剛性の低下により 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、路床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、粒状路盤の支持力も異なっ たと考えられる.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-13 と図-15 を 比較すると、DDA 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 応力が引張り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 ゴム路床(図-16)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 路床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、引張り応力の発生を含めた粒状路盤内の応力分布 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 と比較して粒状路盤・路床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、多層走行路構造の適切な数理モデル化方 法を確立するために、粒状路盤・路床系の支持力解析に 対する不連続体解析手法の適用性について検討を行い、 以下のような知見を得た.

- (a) DDA 解析による粒状路盤・路床系の支持力試験のシ ミュレーションでは、路床剛性が粒状路盤の支持力 に強く影響するため、路床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,路床の要素分割方法により粒状路盤 内の主応力分布が異なり砕石ブロックの移動傾向に 差が生じる結果,粒状路盤の支持力に影響する.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,引張り応力の発生を含めた粒状路盤

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、路床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、路床 の要素分割・粘着力付与により路床剛性の変化を適 切に考慮すれば、粒状路盤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粒状路盤・路 床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、本研究では粒状路盤・路床系の支持力 解析を不連続変形法と有限要素法により行い、路床・路 盤系の数理モデル化や路床剛性や路盤厚の違いが粒状路 盤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 解析が多層走行路構造の有用な 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、粒状路盤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床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、路床 の要素分割方法や路床ブロック側方境界に付与する粘着 力あるいは路床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.

謝辞:本研究の遂行にあたっては、北海道大学 三浦清 一教授に、貴重な御助言を頂きました.ここに記して深 甚なる謝意を表します.

参考文献

- 西澤辰男: TA 法によるアスファルト舗装の信頼性評価,土 木学会論文集, No.781/V56, pp.125-132, 2005.
- 小澤良明,松井邦人:剛体平板載荷を受ける多層弾性構造 解析問題へ GAMES の適用法,土木学会舗装工学論文集,

第12巻, pp.39-44, 2007.

- 3) 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.
- 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.
- 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.
- 6) 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.
- Shi, G. H. : Block System Modeling by Discontinuous Deformation Analysis. Univ. of California, Berkeley, Dept. of Civil Eng., 1989.
- 8) 関根悦夫,村本勝巳,河野昭子,桃谷尚嗣,名村明,石川 達也,大塚勝:道床・路盤の変形挙動に関する研究,鉄道 総合技術研究所研究開発テーマ報告,2004.
- 関根悦夫,河野昭子,石川達也:列車荷重を受けるバラス ト軌道の繰返し塑性変形に及ぼすバラスト厚さの影響,第 39回地盤工学研究発表会講演集,pp.1069-1070,2004.
- 桜井孝,高橋明教:三軸王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.
- 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.
- 12) 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.
- 13) 蒋関魯,木幡行宏,龍岡文夫:繰返し載荷を受ける礫の変 形特性,第33回地盤工学研究発表会講演集,pp.745-746, 1998.

EFFECTS EVALUATION OF SUBGRADE STIFFNESS ON BEARING CAPACITY OF GRANULAR ROADBED WITH DDA

Tatsuya ISHIKAWA, Takehiko KAMEI, Etsuo SEKINE and Yuzo OHNISHI

The paper proposes a new analytical procedure with discontinuous analysis to estimate the bearing capacity of granular roadbed used in ballasted track or road pavement. To examine the applicability, a series of numerical simulations bearing capacity 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 subgrade stiffness on the bearing capacity of granular roadbed was examined. As the result, it is revealed that the subgrade stiffness has a great influence on the bearing capacity of granular roadbed, and that discontinuous analysis is an effective method to simulate the mechanical behavior of granular roadbed if the subgrade which behaves as a continuum can be approximated with discontinuous modeling well.