

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

石川達也¹・大西有三²

¹正会員 工修 東日本旅客鉄道(株) 総合技術開発推進部 (〒100 東京都千代田区有楽町二丁目10-1)

²正会員 工博 京都大学教授 工学部土木システム工学教室 (〒606 京都市左京区吉田本町)

有道床軌道における道床部の塑性変形挙動をより詳細に検討するには、粗粒材としての材料特性を考慮し、道床部を粒状集合体と考えたミクロ的考察が有効である。本論文は、このための基礎的な検討として道床バラストの大型三軸試験結果を不連続変形法 (DDA) により解析し、粗粒材の繰返し変形挙動に対する不連続体解析手法の適用方法について検討を行った。その結果、DDAの適用方法に関して新しい知見を得るとともに、解析結果に基づき道床バラストの変形挙動を粒子配列の構造変化の点から考察し、道床バラストの塑性変形挙動の本質が道床碎石粒子間の相対的な位置関係の変化にあることを明らかにした。

Key Words : *discontinuous analysis, railroad ballast, cyclic deformation, triaxial test, coarse granular materials, track deterioration*

1. はじめに

有道床軌道における軌道破壊現象の解明は、軌道構造の大部分が現在の形態を維持すると考えられるため、今後も鉄道工学における主要な研究課題の一つであり、保守の省力化が望まれる近年においては次世代の省力化施策を展望する重要な基礎研究となる。しかし、従来の軌道破壊理論¹⁾では、道床バラスト部 (以下、「道床部」と称す) 全体をマクロな構造体と仮定して解析を行っており、道床部の繰返し塑性変形挙動や路盤部への応力伝達機構を実現現象に即して解析することは難しい。このため、筆者らは、道床部を主体とした軌道破壊機構の解明を目的として、これまでに実物大載荷試験²⁾や大型三軸試験³⁾を行い、道床バラストの繰返し載荷時の変形特性が道床部の変形挙動を詳細検討する際に有益な基礎資料となることを明らかにした。この結果、粗粒材である道床部の変形挙動の本質を捉えるには、道床部を粒状集合体と考えた理論検討を行うことが現時点で最も適切であると考えられ、解析手法としては道床バラスト本来の材料特性である礫材の強度・変形特性を考慮したモデル化によるシミュレーションが有効となる。一般に道床バラストのような礫材の変形挙動を予測するには、粒子個々の移動傾向を把握する必要があり、そのためには粒子形状の評価

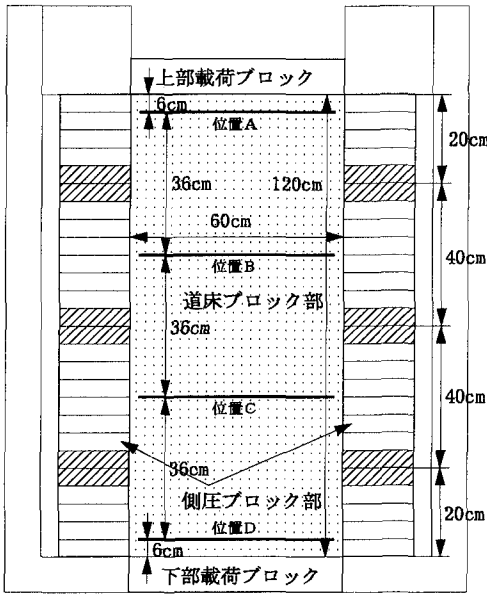
とともに粒子間空隙の評価が重要な研究課題の一つとなる。このような粒状体の粒状性を考慮した数値解析モデルとして、不連続体解析手法の適用が考えられるが、この手法は比較的最近開発されたものであり、その応用に対してははまだ未知の要素が多く、ケーススタディ等により解析上のノウハウを蓄積し、解析手法自体の深度化を図る必要がある。

本研究では、このような状況を踏まえ、道床部を粒状集合体と考えた解析を行うための基礎的検討として、粗粒材の繰返し変形挙動に対する不連続体解析手法の適用方法について検討する。このため、不連続体解析手法の1種である不連続変形法 (DDA) により道床バラストの大型三軸試験結果を解析し、解析メッシュや解析パラメータの設定方法に関して検討を行う。さらに、解析の妥当性を粒状体力学の観点から評価するとともに、解析結果に基づき道床バラストの変形挙動を粒子配列の構造変化の点から考察する。

2. 解析方法

(1) 解析手法

本研究ではShi (1984)⁴⁾により開発されたDDAを用いて解析を行うこととする。DDA (不連続変形法, Discontinuous Deformation Analysis) は、任



※1 ハッチした側圧ブロックは側方ひずみ計算点
 ※2 位置A~Dは局所軸ひずみ計算箇所

図-1 解析モデルの概略図

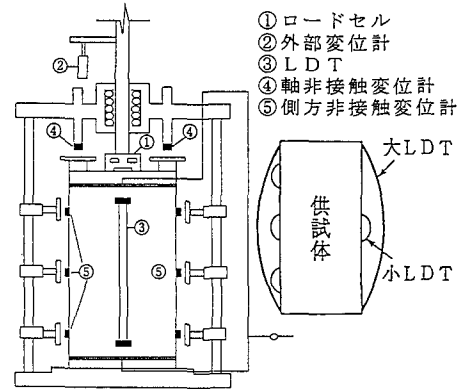


図-2 大型三軸試験装置の概要

表-1 解析パラメーター一覧

ブロック種別	道床ブロック	載荷ブロック	側圧ブロック
単位体積質量 ρ	2.77t/m ³	1.00t/m ³	1.00t/m ³
ヤング率 E	20.0GPa	1000.0GPa	0.1GPa
ポアソン比 ν	0.1	0.1	0.1
粘着力 C_u	0	0	0
摩擦角 ϕ_u	50 or 55°	0	0

※ただし、粒子間摩擦角は同一材料の接触の場合材料が異なる接触の場合にはすべてゼロとする

意形状の多角形で構成された弾性ブロック（弾性要素）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では、変分原理（ポテンシャルエネルギー最小化原理）に基づいて系の全ポテンシャルエネルギーを最小化することにより平衡方程式を組み立てるため、その定式化はFEMとほぼ同様である⁵⁾。しかし、DDAの要素境界は本質的に不連続であり、未知数は各要素の剛体変位、剛体回転、要素ひずみとなる。このため、DDAは不連続体の大変位・大変形問題を扱えるというFEMにない解析上の利点を有する。また、DDAは要素の接触部にばねを設定する点でDEM（個別要素法）と類似している。しかし、理論上は次のような特徴を有している。第一に、DDAの定式化では、ブロックシステムの運動に対して、要素同士の相互貫入がなく、要素間に引張力が働かないという2つの拘束条件を付帯条件として停留値問題に組み込んでいる。このため、FEMと同様に解の唯一性が保証される⁵⁾。第二に、DDAの要素の接触部では、静的・動的計算過程を問わずMohr-Coulombの摩擦条件が適用され、要素間の摩擦によるエネルギー損失が全ポテンシャルエネルギー算出時に考慮される。したがって、これがDDAにおける主要なエネルギー散逸機構となるため、解析のプロセスを概念的に捉えやすく、要素間の接触特性を表現するパラメータもその物理的な意味が比較的明解である。以上のように、DDA

は、FEMとDEMの特徴を併せ持った解析法である。

(2) 解析モデル

大型三軸試験を模擬した2次元平面ひずみ状態の解析モデルの概略を図-1に示す。なお、大型三軸試験³⁾には図-2のような実験装置（供試体サイズは直径30cm、高さ60cm）を用いている。また、大型三軸試験の供試体サイズと解析モデルの供試体サイズの違いについては、大型三軸試験が要素試験であることを考慮し供試体サイズの違いによる影響はないと判断して、計算の都合上倍半分に設定した。図に示すように解析モデルは、三軸供試体部の道床バラストを表現するブロック（以下、「道床ブロック」と称す）、キャップまたはペダスタル等を表現するブロック（以下、「載荷ブロック」と称す）、メンブレンを表現するブロック（以下、「側圧ブロック」と称す）から構成されており、個々のブロックはブロック境界で不連続となっている。なお、本論文では解析領域分割時の最小単位である部分領域（要素）を「ブロック」と表現し、材料特性が等しいブロックの集合体を「道床ブロック部」というように表現する。

解析パラメータを表-1に示す。DDAで用いる材料定数は、ブロック境界の力学特性としてブロック間の摩擦角 ϕ_u および粘着力 C_u 、ブロックの入力定数として単位体積質量 ρ 、ヤング率 E 、ポアソン比

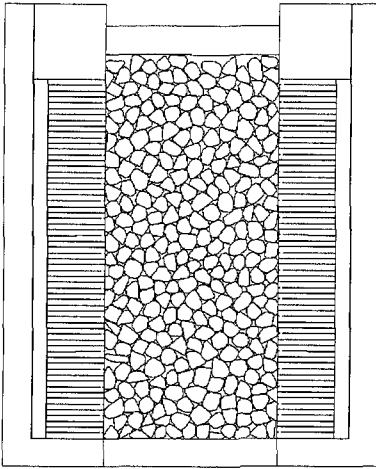


図-3 解析モデルの初期状態 (case1)

ν である。このうちブロック境界の力学特性は、道床ブロック間の摩擦角だけを与え、それ以外のブロック間の摩擦角および粘着力はすべてゼロに設定した。なお、道床ブロック間の粒子間摩擦角 ϕ_u は大型三軸試験³⁾から得られた内部摩擦角 $\phi = 54.4^\circ$ を参考にして設定したが、一般に内部摩擦角と粒子間摩擦角は異なるため、 ϕ_u の設定方法については次章で検討することとした。一方、ブロックの入力定数は、道床ブロックについては、道床バラスト原石(安山岩)の試験結果⁶⁾に基づき ρ 、 E 、 ν をそれぞれ設定したが⁷⁾、側圧ブロックおよび載荷ブロックについては、道床ブロックの変形挙動に影響を及ぼさないように側圧ブロックのヤング率は小さく、載荷ブロックが剛体挙動をするように載荷ブロックのヤング率は大きく、それぞれ道床ブロックのヤング率と1オーダー以上の差がつくように設定した。

解析モデルの初期状態(図-3の状態)は、大型三軸試験における供試体の積層状態、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に、大型三軸試験とほぼ同様な以下のような手順で作成した。

- ①側圧ブロックおよび下部載荷ブロック(図-1参照)を固定した状態で道床ブロック群を高さ30cmの位置から積層体の高さが120cm程度になるまで徐々に自由落下(重力1G)させた。
- ②上面が比較的平滑になるようにブロックの追加・削除を行った後、上部載荷ブロック(図-1参照)を自由落下させた。

なお、この際、道床ブロック間の ϕ_u は一律 55° とした。また、道床ブロックは、120cm×60cmの長方形をポロノイ分割⁸⁾して作成したが、その際に分割数を変えて分割を行い、粒度分布の異なる3種類(図-4および表-2のcase1~case3)の解析モデルを

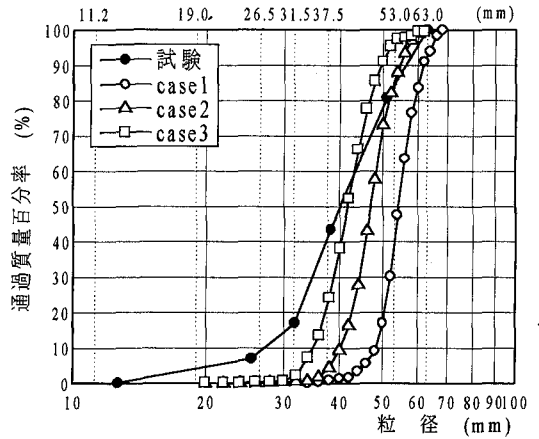


図-4 道床ブロックの粒度分布

表-2 道床ブロックの組成

モデル	道床ブロック数	均等係数 U_c	平均粒径 D_{50}	間隙率 n	平均配位数 \bar{N}
case1	296	1.15	5.4 mm	15.8 %	4.82
case2	389	1.20	4.6 mm	16.5 %	4.35
case3	489	1.23	4.2 mm	15.9 %	4.56
試験	—	1.70	4.1 mm	38.2 %	—

作成した。ただし、側圧ブロックおよび載荷ブロックについては各解析モデルとも共通である。なお、道床ブロックの平均粒径 D_{50} は、表-2に示すように各解析モデルとも大型三軸試験³⁾で用いた道床バラスト(粒度分布は図-4参照)の D_{50} よりやや大きめになっている。

(3) 解析条件

初期状態の解析モデルを用いて、単調載荷試験と繰返し載荷試験の平面ひずみ圧縮状態(2軸圧縮)のシミュレーションを行った。解析条件を表-3に示す。載荷方法としては、単調載荷解析(AML)、繰返し載荷解析(ACL)とも、まず側圧ブロックの固定を解除した後、側圧ブロックおよび上部載荷ブロックに拘束圧 σ_3 に相当する等分布荷重を載荷し初期状態の解析モデルを等方圧縮する(以下、この状態を「初期等方状態」と称す)。なお、面内にはこの他に重力が作用している。その後、単調載荷解析では、側圧一定の下で軸ひずみ ϵ_1 が約2%程度になるまで応力制御(主応力比 $\sigma_1/\sigma_3 = 1$ 増加に対し1秒の速度で、ひずみ速度に単純に換算すると約0.25~0.35%/秒)で上部載荷ブロックの等分布荷重を増加させた。一方、繰返し載荷解析では、初期等方状態から側圧一定の下で所定の最大主応力 σ_{1max} に相当する荷重強度まで軸方向の等分布荷重を増加し、そ

表-3 解析条件.

(a) 単調載荷解析

解析 No.	解析モデル	拘束圧 σ_3	摩擦角 ϕ_u	q_{max} (kPa)
AML-11a	case1	19.6kPa	50°	126.8
AML-11b	case1	19.6kPa	55°	135.1
AML-12a	case1	39.2kPa	50°	225.5
AML-12b	case1	39.2kPa	55°	282.2
AML-13a	case1	58.9kPa	50°	319.5
AML-13b	case1	58.9kPa	55°	397.3
AML-21b	case2	19.6kPa	55°	121.5
AML-22a	case2	39.2kPa	50°	260.0
AML-22b	case2	39.2kPa	55°	261.6
AML-23b	case2	58.9kPa	55°	335.6
AML-31b	case3	19.6kPa	55°	44.0
AML-32a	case3	39.2kPa	50°	203.1
AML-32b	case3	39.2kPa	55°	210.7
AML-33b	case3	58.9kPa	55°	346.8

(b) 繰返し載荷解析

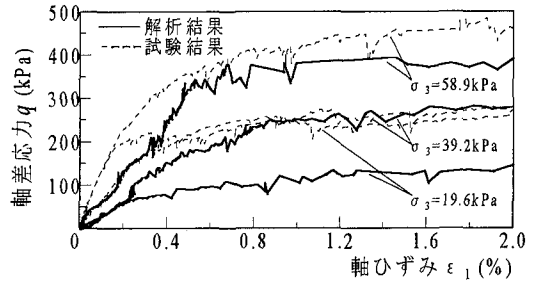
解析 No.	解析モデル	拘束圧 σ_3	摩擦角 ϕ_u	主応力比 $(\sigma_1/\sigma_3)_{max}$
ACL-11b	case1	19.6kPa	55°	5.0
ACL-12b	case1	39.2kPa	55°	5.0
ACL-13b	case1	58.9kPa	55°	4.0
ACL-14b	case1	58.9kPa	55°	5.0
ACL-15b	case1	58.9kPa	55°	6.0

の後等方状態まで除荷するプロセスを5回繰返した。この三角波形の軸圧縮荷重の載荷は0.25Hzで行った。検討に用いる軸圧 σ_1 は上部載荷ブロックの反力から求めており、軸ひずみ ϵ_1 は上部載荷ブロックの中央部および両端点の上下変位量を、側方ひずみ ϵ_3 は左右の上中下部の側圧ブロック計6点の側方変位をそれぞれ平均して求めている(図-1参照)。

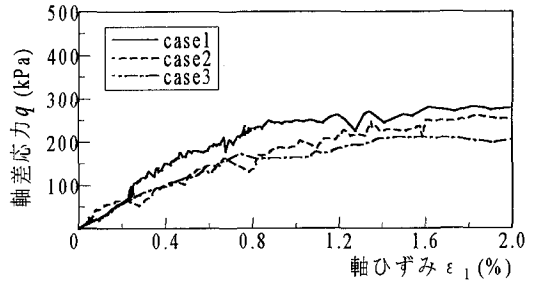
3. DDAの単調載荷試験結果への適用

(1) 試験結果と解析結果の比較

まず、単調載荷解析から得られたマクロな応力～ひずみ関係の一例として、 σ_3 を変化させた場合の解析モデルcase1の軸差応力 q ($q = \sigma_1 - \sigma_3$)～軸ひずみ ϵ_1 関係を図-5(a)に、 $\sigma_3 = 39.2\text{kPa}$ 一定の場合の解析モデルcase1～case3の関係を図-5(b)に示す。なお、同図には大型三軸試験から得られた応力～ひずみ関係(軸非接触変位計(GS)の測定結果、図-2参照)も合わせて示した。まず、同図(a)から、解析結果と試験結果の応力～ひずみ関係は、圧縮につれて軸差応力は増加するが $\epsilon_1 = 0.8\%$ 程度でグラフが平坦に向かい明瞭なピーク強度をもたない傾向や、スティックスリップ状の挙動を有する鋸型の形状となる点で各 σ_3 とも類似がみられる。これらの傾向



(a) 拘束圧 σ_3 別(case1, $\phi_u = 55^\circ$)



(b) 解析モデル別($\sigma_3 = 39.2\text{kPa}$, $\phi_u = 55^\circ$)

図-5 単調載荷解析結果

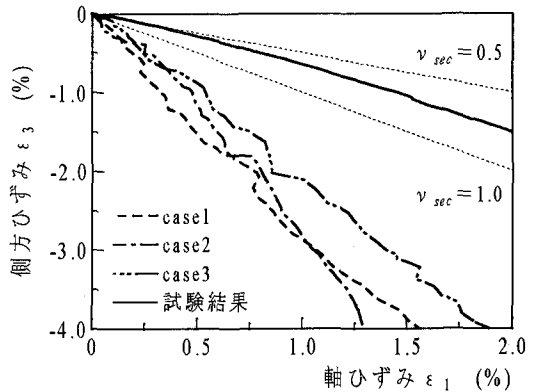


図-6 マクロな軸ひずみ～側方ひずみ関係

($\sigma_3 = 39.2\text{kPa}$, $\phi_u = 55^\circ$)

は同図(b)からもわかるように解析モデルcase2およびcase3の解析においてもみられた。しかし、解析結果と試験結果の定量的な比較では、解析結果の軸差応力は各 σ_3 とも同一ひずみレベルの試験結果の5～8割程度しか得られておらず、解析結果の応力レベルは全体的に低い。この理由に関しては(2)項で検討する。

次に、単調載荷解析から得られたマクロな軸ひずみ～側方ひずみ関係の一例として、 $\sigma_3 = 39.2\text{kPa}$ 一定の場合の解析モデルcase1～case3の $\epsilon_1 \sim \epsilon_3$ 関係を図-6に示す。なお、同図には大型三軸試験から得

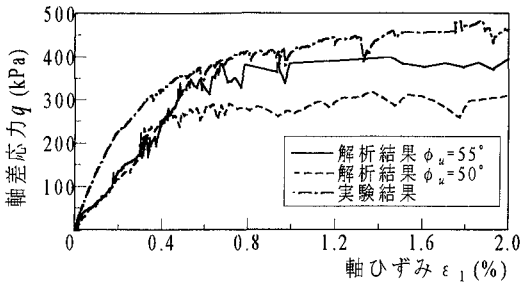


図-7 応力～ひずみ関係に対する ϕ_u の影響
(case1, $\sigma_3=39.2\text{kPa}$)

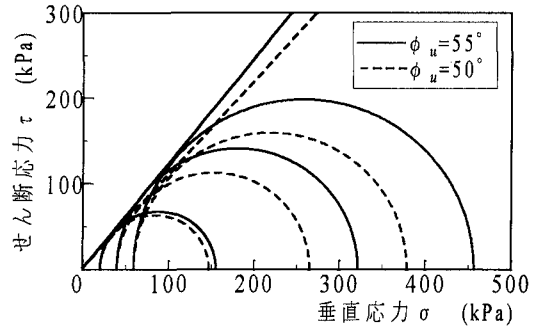


図-8 モール円と強度線

られた $\varepsilon_1 \sim \varepsilon_3$ 関係(軸・側方非接触変位計の測定結果, 図-2参照)も合わせて示した. 図を見る限り試験結果の $\varepsilon_1 \sim \varepsilon_3$ 関係は, $\varepsilon_1=2\%$ 以下のひずみ領域において割線ポアソン比 $\nu_{sec} (= -\varepsilon_3/\varepsilon_1) = 0.5 \sim 1.0$ の範囲にある. 一方, 解析結果の $\varepsilon_1 \sim \varepsilon_3$ 関係は, 同じひずみ領域において各解析モデルとも $\nu_{sec}=1.0$ を越えており, 解析結果と試験結果のマクロな側方ひずみの発生傾向に差異が生じている.

(2) 粒子間摩擦角に関する検討

DDAでは前述のように要素間の摩擦接触特性として, 内部摩擦角 ϕ ではなく, 要素間の摩擦係数を表現する粒子間摩擦角 ϕ_u をDEM同様直接解析で用いている. 両者の関係について諸戸³⁾は, 限界状態の内部摩擦角 ϕ_{cv} と粒子間摩擦角 ϕ_u の関係として式(1)を提案している.

$$\sin \phi_{cv} = \frac{1.22 \tan \phi_u}{\tan \phi_u + 0.62} \quad (1)$$

この式に試験結果から得られた内部摩擦角 54.4° を代入すると, ϕ_u は 51° となる. このためここでは, 試験結果から得られた内部摩擦角に近い 55° と式(1)から得られた粒子間摩擦角に近い 50° を用い, 粒子間摩擦角の設定方法について検討する. まず, 応力～ひずみ関係に対する粒子間摩擦角の影響について検討する. 図-7は, 解析モデルcase1の単調載荷解析から得られた $\sigma_3=58.9\text{kPa}$ 一定で ϕ_u を変化させた場合の $q \sim \varepsilon_1$ 関係である. なお, 同図には大型三軸試験から得られた $q \sim \varepsilon_1$ 関係も合わせて示した. 図から, ϕ_u が小さくなればピーク強度も減少することがわかる. この傾向は, 解析モデルcase2およびcase3の解析においても, また σ_3 が異なる解析においてもみられた. 次に, 表-3に示した σ_3 別の最大軸差応力 q_{max} を用いて図-8に示すモールの応力円を描き強度定数(c, ϕ)を求めると, $\phi_u=55^\circ$ の場合粘着力 c^* はほぼゼロ, 内部摩擦角 ϕ^* は約 51° となった(以下, 試験結果と解析結果の強度定数の

混同を避けるため, 解析の結果得られる強度定数には*の添字を付す). 一方, $\phi_u=50^\circ$ の場合の ϕ^* は約 47° であった. このため今回の解析では, 解析上の粒子間摩擦角 ϕ_u が小さくなれば解析結果から得られる内部摩擦角 ϕ^* も ϕ_u の差とほぼ同程度減少する結果となった. 円要素を用いたDEM解析では, 粒子間摩擦角を大きくしても内部摩擦角が 20° 程度までしか上がらないことや, 粒子間摩擦角の影響は非常に小さいことが報告されており¹⁰⁾, この原因として要素形状の影響が大きいとしている. 本解析で用いた多角形要素はポロノイ分割により作成したものであるが, 実際の道床バラストの粒子形状に糞状のものが多く¹¹⁾を考慮し, ポロノイ核⁹⁾の配置をある程度制御して比較的粒子形状のそろったブロック群を意図的に作成した. このため, 楕円のように扁平な要素が少なく要素形状としては円要素に近い. また, 要素表面に角張った端部をもつためある程度Angularity(粒子の角張り具合を示す指標)も評価している. 今回の解析では, 後者の特性が影響して円要素を用いたDEM解析と異なり, 解析結果から試験結果に近い内部摩擦角が得られたと考えられる. このことは, 道床バラストのように内部摩擦角の大きい粗粒材の解析手法として, ポロノイ分割を用いたDDA解析が有効であることを示すものである.

しかし, 一般に内部摩擦角 ϕ は, 粒子表面の固体摩擦角 ϕ_u , インターロッキングによる成分 ϕ_{ra} , ダイレクタンシーによる成分 ϕ_d からなるとされており¹²⁾, ϕ は ϕ_u に比べ大きくなる. 一方, 今回の解析結果から得られた内部摩擦角 ϕ^* は, 各解析モデルとも粒子間摩擦角 ϕ_u に比べ若干小さくなった. この理由に関しては, $\varepsilon_1=2\%$ 以下のひずみ領域における最大軸差応力を用いて内部摩擦角を算出したことにも一因があるが, 図-5のように同一ひずみレベルでの軸差応力に試験結果と解析結果で差が生じていることから, 要素形状や要素間の接触特性にも

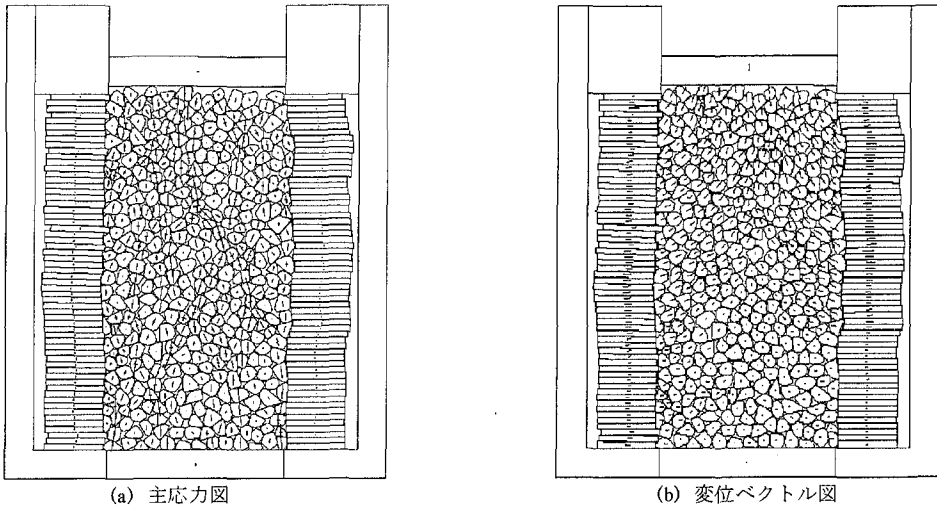


図-9 道床ブロックの応力状態と移動傾向

原因があると考えられる。このような傾向は円要素を用いたDEM解析でも報告されており、DEM解析では、解析の結果得られる内部摩擦角が砂の内部摩擦角と比べかなり小さい原因を、要素形状と要素の表面形状の点から検討している。前者について澤田ら¹⁰⁾は、要素のSphericity（球形度）を考慮して楕円要素を用いたDEM解析により、要素の扁平率が内部摩擦角に大きな影響を与えることを示している。また、後者について岩下ら¹³⁾は、要素表面のAngularityを考慮して要素接点での回転剛性を取り入れたDEM解析により、モーメントの伝達を要素接点で考慮した場合ピーク強度が大きくなることを示している。今回の解析の場合、まず要素形状については、楕円要素のように扁平な要素を用いることも考えられるが、実際に用いられている道床パラストで扁平な粒子の占める割合は30%以下¹¹⁾であるため、今回用いた要素形状はほぼ妥当であると考えられる。一方、要素の表面形状の影響に関しては、多角形要素を用いたことにより要素形状に起因するモーメントの伝達をある程度評価していると考えられるが¹⁴⁾、角と辺や角と角といった接触の際に面接触を考慮したモーメントの伝達を評価することは本解析においても行っていない。今回の解析結果から要素接点でのモーメントの伝達の影響を十分推定することはできないが、道床碎石粒子表面の凹凸形状を考えた場合、粒子接触におけるAngularityの影響を過小評価している可能性のあることは否定できない。Angularityの影響に関しては今後さらに検討を要する。なお、以下では、試験結果から得られた内部摩擦角に近い解析結果を示した $\phi_u=55^\circ$ を解析上の粒子間摩擦角と仮定し検討を進める。

(3) 変形の局所化に関する検討

まず、三軸供試体部の道床ブロックの応力状態と移動傾向に関して検討する。図-9は、解析モデルcase2の $\sigma_3=39.2\text{kPa}$ の単調載荷解析（表-3(a)のAML-22b）から得られた $\epsilon_1=2\%$ 時の主応力図（図(a)）と変位ベクトル図（図(b)）である。なお、変位ベクトル図は初期等方状態のブロック重心の位置と $\epsilon_1=2\%$ 時に重心が移動した点を直線で結んだものである。図(a)から、一般にいわれているように最大主応力が軸方向に伸びて主応力の柱を形成し、軸圧に抗していることがわかる。また、図(b)から、道床ブロック個々の移動方向や移動量は三軸供試体の上半分と下半分で大きく異なり、三軸供試体全域で一様でないことがわかる。これらのことから、三軸供試体内部の変形は一様でないことが予想される。そこで、ここでは(1)項で検討したような三軸供試体全域の平均的挙動を表現するマクロな応力～ひずみ関係ではなく、三軸供試体部を高さ方向に3分割してより局所的な応力～ひずみ関係について検討する。図-10は、図-2のように三軸供試体の上部、中部、下部に取り付けたLDT（局所変形測定装置）¹⁵⁾で測定した軸ひずみを用いた局所的な応力～ひずみ関係（図(a)）と、解析モデルcase1およびcase3の単調載荷解析から得られた三軸供試体部のほぼ同様な位置における応力～ひずみ関係（図(b)、図(c))を比較したものである。ただし、解析結果の局所的な軸ひずみは、図-1のA～Dの位置にある数個のブロックの平均変位量から各位置間の相対変位量を算出して求めた。また、応力としては図-5同様供試体全体に対する軸差応力を用いた。まず、同図(a)に示すように、試験結果の3つの小LDTの軸ひずみは、

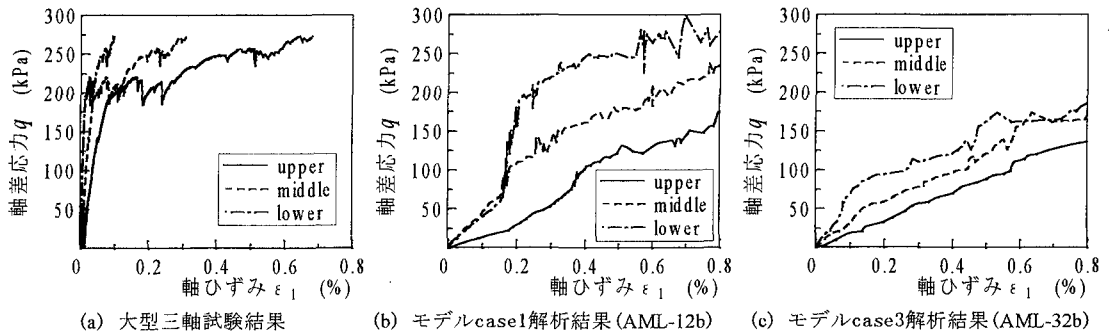


図-10 局所的な応力～ひずみ関係

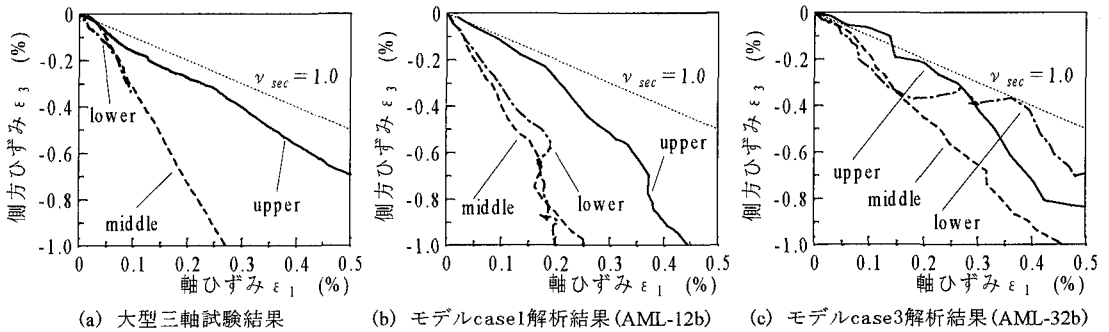


図-11 局所的な軸ひずみ～側方ひずみ関係

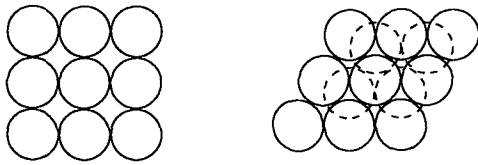
上端から荷重を載荷した場合上部、中部、下部の順で小さくなっており、三軸供試体内部の変形は局所化する傾向にある。他方、解析結果の局所的な軸ひずみも、上部の軸ひずみと中部、下部の軸ひずみの間には差が見られ、試験結果の小LDTの軸ひずみの発生傾向と類似している。図-11は、同様に試験結果と解析結果の局所的な軸ひずみ～側方ひずみ関係を比較したものである。図から、解析結果の側方ひずみの箇所別の発生傾向は三軸供試体の高さ方向に一樣でない点で試験結果の局所的な軸ひずみ～側方ひずみ関係と類似性が見られること、および試験結果と解析結果の局所的な軸ひずみ～側方ひずみ関係は各箇所とも $\nu_{sec} = 1.0$ をほぼ越えていることがわかる。このうち、後者の傾向は、図-6のマクロな軸ひずみ～側方ひずみ関係に対する傾向と矛盾するものであるが、この理由に関しては以下のように考えられる。図-6の軸ひずみは、LDTの測定範囲 ($\pm 1\%$ 以下) を越えているためGSで測定した軸ひずみを用いたが、GSで測定した軸ひずみは、ベッディングエラーの影響によりLDTで測定した軸ひずみに比べ大きくなるとされている¹⁶⁾。このため、LDTとGSで測定した軸ひずみ～側方ひずみ関係を比較した場合、 ν_{sec} はLDTの測定結果よりもGSの測定結果の方が小さくなる。したがって、図-6ように試験結果の ν_{sec} が解析結果の ν_{sec} に比べ小さくなっ

たと考えられる。ただし、解析結果の3つの局所的な軸ひずみの合計は軸ひずみ ϵ_1 にほぼ等しい。

以上のように、DDA解析では各箇所の局所的なひずみに差が生じており、試験結果と同様変形が局所化する傾向にある。三軸供試体を等方線形弾性体と仮定した場合、連続体の理論では、発生するひずみが三軸供試体各所で一定になることを考えれば、今回の解析結果は粗粒材の変形解析に対して道床碎石粒子の動きを捉えることのできる不連続体解析手法が有効であることを示すものである。なお、本論文では、変形の局所化として局所的な応力～ひずみ関係について検討したが、せん断帯の形成といった議論に比べると若干マクロ的な議論となっている。

(4) 間隙率および配位数に関する検討

粗粒材の変形解析を行うには、粒子形状の評価と並んで間隙率の評価が重要になる。しかし、今回の解析では初期状態の三軸供試体部の間隙率 n は表-2のように各解析モデルとも16%程度であり、大型三軸試験から得られた道床バラストの間隙率 $n = 38\%$ と比較するとかなり小さい。また、間隙率は平均配位数 (ただし、配位数は1粒子当たりの接点数) とユニークな関係にあるとされており、Field⁷⁾ は礫を用いた実験結果から粒度分布や粒子形状に左右されない間隙比 e と平均配位数 \bar{N} の関係として式(2)を



(a) Simple cubic配列 (b) Tetrahedral配列
図-12 等径球の規則配列

提案している。

$$\bar{N} = 12/(1+e) \quad (2)$$

この式に道床バラストの間隙比として $e=0.61$ ($n=38\%$)を代入した場合、平均配位数は7.5となる。しかし、表-2に示すように初期状態の各解析モデルの(総接点数 $\times 2$ /ブロック数)から得られる平均配位数は4.4~4.8であり、式(2)から得られた値と比較すると小さくなる。これらの理由に関してまず要素形状の点から検討する。円要素を用いたDDA解析¹⁸⁾により道床バラストの粒度分布にできる限り合わせてパッキングを行った結果では、今回用いた多角形要素よりも円要素の方が間隙率は若干大きくなるものの、 $n=19\%$ とほぼ同様な値が得られた。この結果、円形に近い要素で粒度分布を合わせて2次元的にパッキングした場合、この程度の間隙率しか得られないものと推定される。したがって、2次元状態で間隙率を実現に合わせるには、要素形状を変更することが必要になり、これは今回の要素形状が妥当であるとした(2)項の考察と矛盾する。このため、次に2次元パッキングと3次元パッキングの相違点から検討する。前述のように解析モデルの均等係数が $U_c=1.2$ 程度とほぼ均一粒径に近いことおよび実際の道床バラストでもやはり均等係数が $U_c=1.7$ 程度と低いことを考慮して、ここでは、直径の等しい球を用いたパッキングで2次元状態と3次元状態の間隙率の関係を考えてみる。Smith¹⁹⁾らは、等しい球のランダムな充填は図-12のようなSimple cubic配列(以下、「Cubic配列」と略す)とTetrahedral配列(以下、「Tetra配列」と略す)の2つのクラスターの集まりであるとしている。実際、Cubic配列とTetra配列の間隙率はそれぞれ47.6%と26.0%であり、道床バラストの間隙率はその間にある。また、Cubic配列とTetra配列を2次元に投影した場合、間隙率はそれぞれ21.5%と9.3%、同じく配位数はそれぞれ4と6であり、各解析モデルの初期状態の間隙率および平均配位数はその間にある。これらのことから、道床バラストの粒子配列も解析モデルの要素配列も、Cubic配列とTetra配列の混在した配列であると考えられることができる。この2つの配列について2次元状態と3次元状態での間隙率を比較

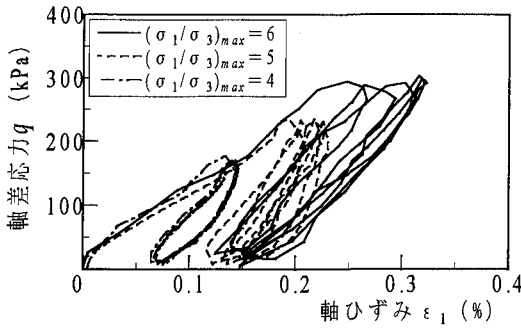
すると、Cubic配列で約2.2倍、Tetra配列で約2.8倍、2次元状態の間隙率に比べ3次元状態の間隙率は大きくなる。この結果を今回の解析結果に適用すると、2次元状態で16%の間隙率を有する場合3次的には約35~45%の間隙率を有することになり、道床バラストの間隙率 $n=38\%$ はこの範囲にある。したがって、2次元パッキングと3次元パッキングの対応を考えた場合、間隙率的にはあまり問題がないことになる。均一でない粒度分布で3次的な間隙率を2次的に評価した場合、適正な値がどの程度なのかについては今回の検討結果だけでは明らかにできないが、(3)項で述べたように局所的な v_{sec} にさほど差異がないことを考えれば、今回の間隙率の設定はほぼ妥当であると考えられる。

4. DDAの繰返し載荷試験結果への適用

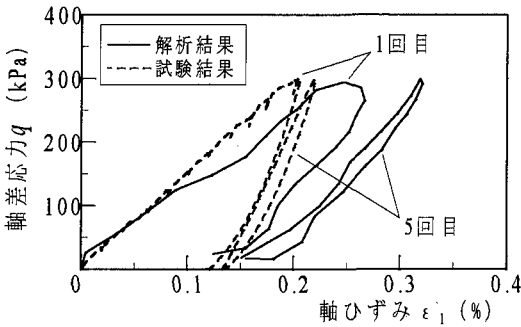
(1) 繰返し載荷時の応力~ひずみ関係

前章で検討したように、本解析で得られた $q \sim \varepsilon_1$ 関係の応力レベルは試験結果の応力レベルと比較すると全体的に低い。この理由については今回の解析結果だけではよくわからないが、図-11の局所的な軸ひずみ~側方ひずみ関係にはあまり差異が見られないことから、同一ひずみレベルにおける試験結果と解析結果の変形挙動はほぼ一致するものと考えられる。このため以下では、発生するひずみが解析結果と試験結果で一致するように、解析上の軸差応力を補正することとした。繰返し載荷試験時に得られたひずみをもとに解析対象とするひずみ領域を0~0.4%に設定した場合、そのひずみ領域における解析結果と試験結果の割線変形係数の比を図-5(a)から各拘束圧別に求め、それを平均すると0.63となる。このことから、軸差応力の低減率を6割に設定することとした。なお、計算時間と計算機の記憶容量の関係から繰返し載荷解析は解析モデルcase1を用いて行った。

繰返し載荷解析から得られたマクロな応力~ひずみ関係の一例として、 $\sigma_3=39.2\text{kPa}$ 一定で最大主応力比(σ_1/σ_3) $_{max}$ を変化させた場合(表-3(b)のACL-11~13)の負荷・除荷時の各 $q \sim \varepsilon_1$ 関係を図-13(a)に示し、繰返し載荷解析(ACL-11)における1, 5回目の関係を同一荷重条件の大型三軸試験結果と比較して図-13(b)に示す。なお以下では、解析結果に関しては解析上の軸差応力を1.67倍(低減率6割の逆数)して図中の軸差応力および主応力比の値としている。まず、同図(a)から各解析条件とも、解析結果の負荷曲線と除荷曲線は繰返し載荷初期には大きなヒステリシス・ループを描き、残留軸



(a) 最大主応力比 $(\sigma_1/\sigma_3)_{max}$ 別



(b) 繰返し載荷に伴う応力～ひずみ関係の変化

図-13 繰返し載荷解析結果

ひずみの増加は大きく塑性傾向の強い弾塑性状態を示すが、繰返し載荷回数増加に伴いヒステリシス・ループの面積が減少するとともに、各回での残留軸ひずみの増加量は減少し、弾性化が進行することがわかる。なお、 $(\sigma_1/\sigma_3)_{max}=5$ 一定で σ_3 が異なる他の解析条件(ACL-14~15)においても同様の傾向が見られた。また、同図(b)から、解析結果のこのような傾向は、試験結果と定性的にほぼ一致することがわかる。これらの結果からDDA解析では、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エネルギー損失を評価でき、実現象のモデル化を比較的簡易に行えることがわかる。なお、繰返し載荷に伴い変形係数が増加し減衰比が減少するのは、三軸供試体が締め固まり道床ブロック個々のすべりが生じにくくなって塑性流動や摩擦損失が小さくなることによると考えられる。一方、図-14は同一荷重条件の解析結果と試験結果の定量的な比較を、1回目の載荷時の最大軸ひずみ ϵ_{1max} (軸差応力振幅負荷時の軸ひずみ、図-15参照)と残留軸ひずみ ϵ_{1res} (軸差応力除荷時の累積塑性ひずみ、図-15参照)に関して行ったものである。図から、 ϵ_{1max} については解析結果の方が試験結果より若干大きい、 ϵ_{1res} についてはかなり良い一致をみせることがわかる。なお、解析結果の ϵ_{1max} が試験結

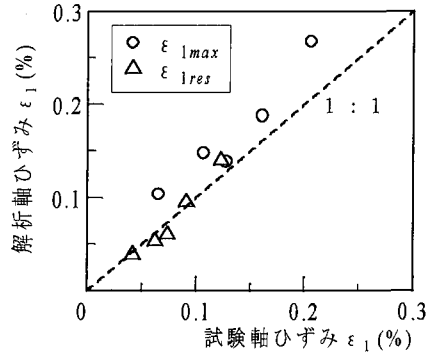


図-14 試験結果と解析結果の比較

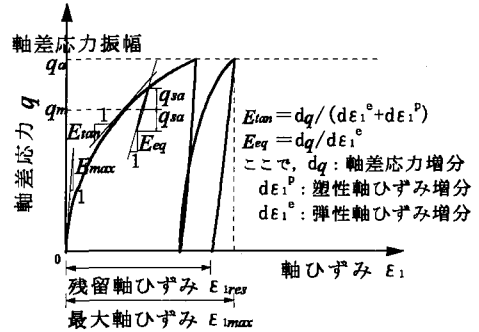
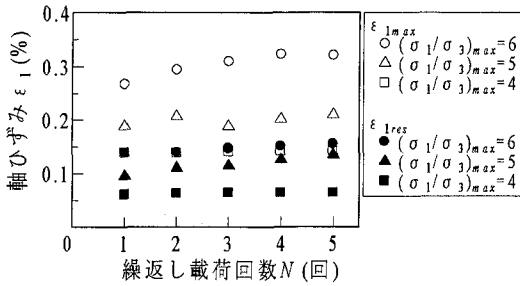


図-15 応力～ひずみ関係の定義

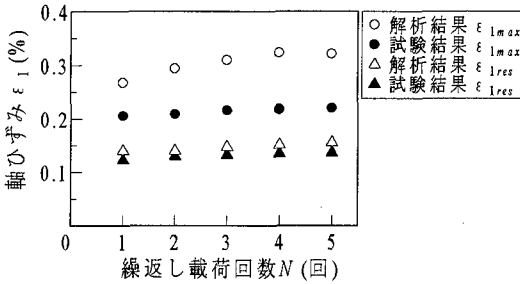
果に比べ大きくなる理由は、図-13(b)で解析結果の $q \sim \epsilon_1$ 関係が試験結果に比べねていることからわかるように、軸差応力に対して行った補正だけでは解析結果を実現象の応力～ひずみ関係に近づけるのに充分でないことによると考えられる。このため、解析手法自体にはまだ改善の余地があると推定される。

(2) 繰返し塑性変形特性に関する検討

まず、繰返し載荷解析から得られた繰返し載荷に伴うマクロな軸ひずみの増加傾向の一例として、 $\sigma_3=39.2\text{kPa}$ 一定で $(\sigma_1/\sigma_3)_{max}$ を変化させた場合(ACL-11~13)の繰返し載荷回数 N と ϵ_1 の関係を図-16(a)に、大型三軸試験から得られた $N \sim \epsilon_1$ 関係(大LDT 2個の測定結果の平均値、図-2参照)と解析結果(ACL-11)の比較を図-16(b)に示す。同図(a)から、軸差応力振幅 q_a ($q_a=(\sigma_1-\sigma_3)_{max}$)が一定でも $\epsilon_{1max} \cdot \epsilon_{1res}$ はともに繰返し載荷回数増加に伴い増加すること、および1回目の載荷時には大きな塑性ひずみを生じるが、2回目以降の繰返し載荷で発生する各回の塑性ひずみは、1回目の載荷時に発生する塑性ひずみと比較して急激に減少するとともにほぼ一定になることがわかる。また、同図(b)から、 ϵ_{1max} については解析結果と試験結果で



(a) 最大主応力比 $(\sigma_1/\sigma_3)_{max}$ 別



(b) 試験結果との比較

図-16 軸ひずみと繰返し载荷回数との関係

その大きさや繰返し载荷に伴う増加傾向が若干異なるものの、 ϵ_{1res} については大きさもまたその増加傾向もほぼ等しいことがわかる。なお、他の解析条件についてもほぼ同様な傾向が見られた。本解析では特に試験供試体の粒子構造をトレースして解析モデルを構築したわけではないため、上記のような解析結果が得られたことは、試験供試体と解析モデルで粒子配列や粒子形状等が異なることを考慮すれば、かなり良い一致を見せていると考えられる。したがって、DDA解析を用いることにより繰返し载荷に伴う道床バラストの塑性ひずみの増加傾向はおおまかに把握できると考えられる。

一方、大型三軸試験における道床バラストの塑性変形挙動では、最大軸ひずみ ϵ_{1max} と残留軸ひずみ ϵ_{1res} は拘束圧とは無関係な定数 a, b を用いて式(3)のように表せる³⁾。

$$\epsilon_{1res} = a(\epsilon_{1max} - b) \quad (3)$$

同様にここでは、DDA解析における道床ブロックの塑性変形特性を検討するため、繰返し载荷解析(ACL-11~15)の1回目と5回目の载荷時の ϵ_{1max} と ϵ_{1res} の関係を図-17に示す。なお、同図には、大型三軸試験の1回目と10回目の载荷時の $\epsilon_{1max} \sim \epsilon_{1res}$ 関係から得られた式(3)の近似結果も合わせて示した。図から、各回の解析結果とも ϵ_{1res} は ϵ_{1max} の増加に伴い増加することがわかる。この傾向は試験結果と定性的に一致するものであり、特に1回目の載

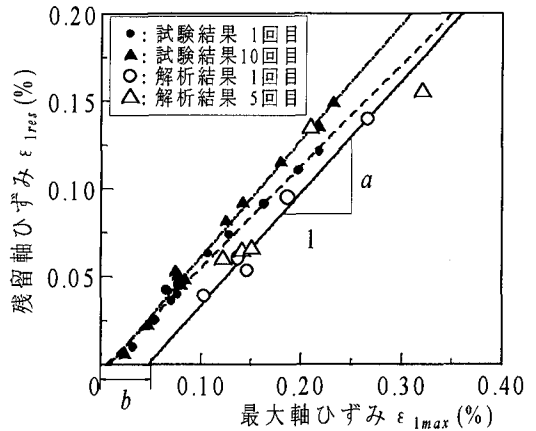
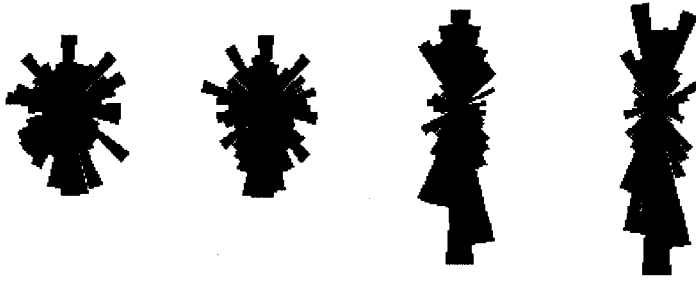


図-17 軸ひずみの塑性変形傾向

荷時(初期降伏時)の $\epsilon_{1max} \sim \epsilon_{1res}$ 関係は試験結果とほぼ同様な1次関係にあるため、式(3)を用いて近似することとした。その結果、弾性限界ひずみを近似的に表すと考えられる x 切片(定数 b) は試験結果より多少大きい、近似直線の傾き a に関しては試験結果の1回目の载荷時の傾きとほぼ同じであった(図-17参照)。塑性に関する構成則を導入していない本解析で、試験結果とほぼ同様な傾きを有する $\epsilon_{1max} \sim \epsilon_{1res}$ 関係が得られたことは、道床バラストの塑性変形の主因が道床碎石粒子の相対的な位置関係の変化(すべり)に起因することを示すものである。また、試験結果より解析結果の弾性限界ひずみが大きいのは、試験供試体と解析モデルで幾何形状が異なることも一因であるが、道床碎石粒子の破砕性にも原因があると考えられる。大島ら²⁰⁾は道床バラストの初期沈下量と粒子破砕率の相関関係が高いことを指摘しているが、本解析ではブロックの破砕性を考慮していないことから道床ブロックの稜角部等の破壊に起因する塑性変形は生じないため、弾性限界ひずみが大きくなったと考えられる。

(3) 繰返し载荷に伴う粒子構造の変化

礫材の応力~ひずみ関係を検討する手法として、龍岡ら^{21), 22)}は損傷関数・塑性化関数で定義される非線形化関数を提案しているが、式(3)は塑性化関数の一つの表現形であると考えられる。一方、損傷関数は、等方応力状態の変形係数 E_{max} (図-15参照)と各応力状態における変形挙動の弾性的性質を表現する等価変形係数 E_{eq} (図-15参照)の比として定義される。この場合、主応力比 σ_1/σ_3 の増加に伴う E_{eq}/E_{max} の値の変化は道床バラストの変形挙動において応力誘導異方性を表現すること^{21), 22)}、および粒状体力学では一般に応力誘導異方性は粒子間接



(a) 初期等方状態 (b) 5回目の除荷時 (c) 1回目の負荷時 (d) 5回目の負荷時

図-18 要素間接触力の分布状況

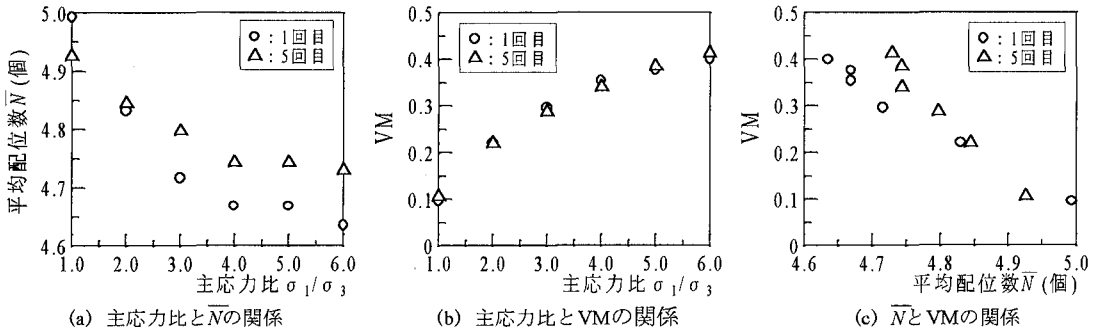


図-19 繰返し載荷に伴う粒子構造の変化

触法線方向分布の偏りで特徴づけられることから、結果的に E_{eq} は粒子間接触法線方向の分布となんらかの関係の有することになる。このためここでは、一つの試みとして道床パラストの変形挙動における応力依存性および繰返し載荷履歴の影響を、粒子構造の変化の点から検討する。

図-18は、繰返し載荷解析 (ACL-11) における初期等方状態、1回目・5回目の最大軸差応力負荷時、5回目の除荷時の道床ブロック間のすべての接点における要素間接触力ベクトルの方向 θ の度数分布を示したものである。なお、接触力ベクトルの方向 θ は、最大主応力面から反時計回りに測っており、 270° で重力方向に一致する。また、棒状放射グラフは 10° 分の幅を有しており、棒の長さでその範囲にある θ の度数を表している。まず、初期等方状態(図(a))では重力の作用方向である 270° 近辺に若干 θ の集中が見られる以外は平均的にばらついており、特に目立った傾向が見られない。しかし、軸差応力が負荷されると(図(c)) $\theta = 270^\circ$ 付近が突出し、接触力が軸圧に抗するように分布する様子が見られる。また、図(a)と図(b)の比較から等方応力状態では繰返し載荷の影響による差異は顕著に見られないものの、図(c)と図(d)を比較すると最大軸差応力負荷時には、繰返し載荷により最小主応力の作用方向である 0° と 180° 近辺の方向力を有する接点数

が減少し、 270° 近辺の方向力を有する接点数が全体的に多くなるように接触力分布が再構成されることがわかる。これらの結果から粒子構造は、負荷された軸差応力を効率よく支持できるように繰返し載荷に伴い再配列されると考えられる。そこで、この変化をより定量的に捉えるため、次に平均配位数 \bar{N} とVM (vector magnitude)¹²⁾の点から検討する。ただし、VMは式(4)で定義される配向度の指標であり、 θ の頻度分布が一様であればゼロに、特定方向に集中すれば1になる。なお、 θ の卓越方向は図-18からもわかるように繰返し載荷解析中常に軸圧の載荷方向(最大主応力方向)であった。

$$VM = \frac{1}{M} \left\{ \left[\sum_{k=1}^M \cos 2\theta_k \right]^2 + \left[\sum_{k=1}^M \sin 2\theta_k \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (4)$$

ここで、M: 道床ブロック間の接点数

まず、図-19(a)は繰返し載荷解析 (ACL-11) における1回目・5回目の載荷時の道床ブロックの平均配位数 \bar{N} と主応力比の関係を示したものである。図から、1回目・5回目の載荷時とも \bar{N} は主応力比の増加に伴い減少すること、および \bar{N} は繰返し載荷により等方応力状態付近で減少し、主応力比3~6の範囲で増加することがわかる。同図(b)は同じくVMと主応力比の関係を示したものである。図から、1回目・5回目の載荷時ともVMは主応力比の増加に伴い

増加すること、およびVMの増加傾向は繰返し載荷の前後であまり変化しないことがわかる。さらに同図(c)は同じく \bar{N} とVMの関係を示したものである。図から、1回目・5回目の載荷時とも主応力比の増加に伴い \bar{N} が減少すると、VMは逆に増加することがわかる。これらの結果から、主応力比の増加に伴って軸圧の載荷方向の接触力を有する接点が増加し、外力に対する支持力が増加する一方で、主応力比の増加に伴う総接点数の減少により支持力は低下する傾向にあることがわかる。これらは一見矛盾する現象であるが、主応力比の増加に対する変化率は図-19にみられるように \bar{N} よりもVMの方が大きいため、変形特性に対する影響度はVMの方が大きく、全体として外力に対する支持力は増加すると考えられる。このような現象は粒状体の変形挙動で一般的に見られる最大主応力方向に伸びる柱の形成による硬化現象と、間隙量の増加に伴う軟化現象¹²⁾に対応すると考えられる。実際、柱の形成は図-9に示すように要素の最大主応力が軸圧の載荷方向へ集中する現象であるため、VMと関係がある。また、配位数の減少は間隙の増加と関係が深いと考えられるから、結果的にVMの増加は硬化を、配位数の減少は軟化を表すと考えられる。このような観点に立てば、今回の解析結果を見る限りでは、道床バラストの大型三軸試験³⁾で見られた E_{eq} の増加現象は、VMあるいは N の増減傾向と以下のように関係づけて説明することができる。

- ①主応力比の増加に伴う軸圧の載荷方向の E_{eq} の増加現象はVMの増加傾向と関係がある。
- ②主応力比の大きいところで見られる繰返し載荷に伴う軸圧の載荷方向の E_{eq} の増加現象は、VMの主応力比に対する増加傾向には繰返し載荷前後であまり変化が見られないことから、図-19(a)に示す繰返し載荷に伴う配位数の減少傾向と関係がある。

5. まとめ

本研究では、道床バラストの大型三軸試験結果をDDAにより解析し、粗粒材の変形挙動に対するDDAの適用方法や粒子配列の構造変化に伴う道床バラストの繰返し塑性変形機構を、粒状体力学の観点から検討した。得られた知見を要約すると以下ようになる。

(1) ボロノイ分割を用いたDDA解析を行った結果、内部摩擦角について円要素を用いたDEM解析よりも実現象に近い値がえられるとともに、粒子間摩擦角の影響を検討することができた。このため、内部摩擦角の大きい粗粒材の変形挙動解析に対してボロ

ノイ分割を用いたDDA解析は有効である。

(2) 同一ひずみレベルで試験結果と解析結果を比較した場合、局所的なポアソン比や塑性変形傾向はかなりよい一致を見せる。このため、解析モデルの要素形状や間隙率の設定はほぼ適正であり、軸差応力の応力レベルが低いのは要素間の接触特性に問題があると考えられる。

(3) ボロノイ分割を用いたDDA解析では、特殊な構成則を用いることなく実現象に近い繰返し塑性変形挙動を表現できる。このため、道床バラストの塑性変形挙動の本質は、道床碎石粒子間の相対的な位置関係の変化(すべり)にある。

(4) 粒子構造の変化と応力誘導異方性や繰返し載荷履歴の影響との関係を検討した結果、主応力比の増加や繰返し載荷に伴う配位数の増減傾向や要素間接触力の分布傾向から、硬化特性を表現するVMの増加傾向は応力誘導異方性と、軟化特性を表現する配位数の減少傾向は繰返し効果とそれぞれなんらかの関係性を有することがわかった。

ボロノイ分割を用いたDDA解析により道床碎石粒子個々を解析上の構成要素とし、粒子間空隙や粒子形状を直接的に表現する解析が可能になったことは、従来経験則で表現されてきた道床部の塑性変形機構を、道床碎石粒子の移動という粒状体力学の観点から検討する場合に非常に有効な手段になる。しかし、間隙率の差異からもわかるように、3次元的な挙動をとる実際の道床碎石粒子の動きを平面ひずみ状態の2次元解析で完全に表現することは、事実上不可能に近く、その意味で本論文の解析結果は実現象に対する第一次近似解と考えるべきであろう。このため、DDA解析の道床部への適用、さらには軌道構造設計手法への応用にあたっては、3次元問題に対する2次元近似の有効性の検証等現象のモデル化方法や解析結果の解釈方法に関する研究を、実データを用いたケーススタディにより深度化する必要がある。今後、このような研究課題に対する検討を継続し、DDA解析を用いた軌道構造解析手法の構築を行い、道床部の繰返し塑性変形挙動の解明に寄与する考えである。

謝辞：本研究を行うにあたり、京都大学防災研究所 嘉門雅史教授、(財)鉄道総合技術研究所 須長誠氏、木幡行宏氏には貴重な御助言を頂きました。ここに、感謝の意を表します。また、本研究で用いたプログラムは、DDA実用化研究委員会で配布されたものをもとに京都大学工学部 陳光齋氏と共同で開発したものです。陳氏に感謝の意を表します。なお、本研究は著者の一人である石川の(財)鉄道総合技術研

究所在籍中に行ったものです。研究の場を提供して下さった関係諸氏に感謝します。

参考文献

- 1) 佐藤吉彦, 梅原利之編: 線路工学, 日本鉄道施設協会, 1982.
- 2) 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.
- 3) 石川達也, 須長 誠, 董 軍, 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, 土木学会論文集, No.575/III-40, pp.169-178, 1997.
- 4) Shi, G.H.: Block system modeling by Discontinuous Deformation Analysis, Univ. of California, Berkeley, Dept. of Civil Eng., 1989.
- 5) 佐々木猛, 大西有三, 吉中龍之進: 不連続変形法(DDA)とその岩盤工学への適用に関する研究, 土木学会論文集, No.493/III-27, pp.11-20, 1994.6.
- 6) 桜井 孝, 高橋昭教: 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.
- 7) 石川達也, 大西有三: 粗粒材の三軸試験結果へのDDA適用に関する一考察, 第30回土質工学会研究発表会講演集, pp.2081-2082, 1995.
- 8) 大西有三, 河野正雄: ボロノイ分割法を適用した岩盤の個別要素解析について, 土木学会論文集, No.376/III-6, pp.231-239, 1986.
- 9) 諸戸靖史: 砂や礫の内部摩擦角, 土と基礎, Vol.31 No.8, pp.5-9, 1983.
- 10) 澤田純男, ブラダランテージ B.S., 土岐憲三, 山下典彦: 個別要素解析における要素形状と初期密度の影響, 地盤の破壊とひずみの局所化に関するシンポジウム発表論文集, pp.163-170, 1994.
- 11) 榎本秀明, 木谷日出男, 太田岳洋: 道床バラストの形を測る, RRR, Vol.51 No.8, pp.12-15, 1994.
- 12) 粒状体力学に関する国内委員会: 粒状体の力学, (社)土質工学会, 1993.
- 13) 岩下和義, 松浦浩一, 小田匡寛: 粒子接点でのモーメント伝達を考慮した個別要素法の研究, 土木学会論文集, No.529/III-33, pp.145-154, 1995.
- 14) 松島直志, 小長井一男: 正多角形要素を用いた個別要素法による粒状体の単純せん断シミュレーション, 生産研究, Vol.48 No.7, pp.343-346, 1996.
- 15) 後藤 聡, 龍岡文夫: 粒状体の三軸圧縮時の強度変形特性に与える試験条件の影響, 第21回土質工学研究発表会講演集, pp.237-240, 1986.
- 16) 董 軍, 中村和之, 龍岡文夫, 木幡行宏: 単調および繰返し載荷による粗粒材料の三軸せん断特性, 「地盤および土構造物の動的問題における地盤材料の変形特性-試験法・調査法および結果の適用-」に関する国内シンポジウム発表論文集, pp.211-216, 1994.
- 17) Field, W.G.: Towards the statistical definition of a granular mass, *Proc. 4th A. and N.Z. cont. on Soil Mech.*, pp.143-148, 1963.
- 18) Ohnishi, Y. and Miki, S.: Development of circular and elliptic disc element for DDA, *Proc. of The First International Forum on Discontinuous Deformation Analysis(DDA) and Simulations of Discontinuous Media*, pp.44-51, 1996.
- 19) Smith, W.O., Foote, P.D. and Busang, P.E.: Packing of homogeneous spheres, *Phy. Rev.*, Vol.34. pp.1271-1274, 1977.
- 20) 大島洋志, 榎本秀明, 高木盛男: バラストの形状が道床沈下に及ぼす影響, 鉄道技術研究所速報, No.A-86-195, 1986.
- 21) 龍岡文夫, 木幡行宏, Teachavorasinskun.S., 董 軍, 水本圭輔: 地盤材料の側圧一定三軸圧縮試験での応力~ひずみ関係の考察, 第28回土質工学研究発表会講演集, pp.837-840, 1993.
- 22) 木幡行宏, 龍岡文夫: 三軸圧縮状態での地盤材料の変形係数に関する考察, 第29回土質工学研究発表会講演集, pp.695-698, 1994.

(1997. 4. 17 受付)

APPLICATION OF DDA TO CYCLIC DEFORMATION OF RAILROAD BALLAST IN TRIAXIAL TESTS

Tatsuya ISHIKAWA and Yuzo OHNISHI

In this paper, as the basic study to analyze the deformation of "ballast", a track component of ballasted track which is composed of crushed stone, regarding its part as an assemblage of coarse granular materials, the application method of discrete analysis treating the problem including discontinuous boundaries to cyclic deformation of coarse granular materials was discussed by simulating triaxial tests of railroad ballast with DDA (Discontinuous Deformation Analysis). As a result, it was revealed that some new guidelines for the application method of DDA were indicated, and also quasi-static performance of railroad ballast is discussed in terms of fabric transformation of particle alignment.