

任意形状多角形集合体の強度・変形特性に関する 不連続体解析

国立大分高専 正 員○ 相川 明
国立大分高専 学生員 河野正寿

1. はじめに

鉄道軌道構造の多くは、レール、まくらぎ、数10cm厚の碎石層と土路盤からなる有道床軌道である。有道床軌道は適度な剛性を持ち、経済的で補修の容易さ等の利点を有するが、列車走行による繰返し荷重で「軌道破壊」と呼ばれる経年的な劣化現象が避けられないことが課題となっている。碎石層は単粒度碎石の粒状集合体であり、劣化や破壊挙動のメカニズムの解明には、不連続体構造に着目したミクロな観点からのアプローチが不可欠である。また、列車が高速走行することから、車両/軌道連成構造系の挙動解析には、地震波のような低周波の応答のみでなく、数百Hzまでの挙動の解明が必要とされる¹⁾。

本研究は、有道床軌道に関する周波数依存性と破壊のメカニズム解明のために、碎石層を2次元の任意形状の多角形粒状集合体と仮定し、静的荷重、低周波から高周波までの動的荷重に対する碎石層の挙動を再現するものである。これにより、従来、実験による再現や測定が困難であった碎石層内部の個々の碎石の挙動を求めて、運動エネルギー、ひずみエネルギー等を算出し、碎石層に関するエネルギー散逸特性を明らかにすることを目的とする。

2. 任意形状多角形集合体に関する研究

石川らは、大型の三軸圧縮試験と数値解析により、多角形粒状集合体の破壊挙動に碎石形状や配位が関係することを明らかにした²⁾⁻³⁾。木幡らは、粒度調整を行った単粒度碎石を用いて大型の三軸の載荷試験を行い、粒度分布の影響について調べている⁴⁾。

Cholet らの大型模型実験では、碎石集合体の動的な挙動に関して、低周波載荷では引っかかりながらガタガタと動き、載荷点近傍のみしか影響がないのに対し、高周波では液体のようななめらかに動いて広い範囲まで影響が及び、また、中間的な周波数では両者の中間の粘性的な挙動となり、顕著な周波数依存性が示されている⁵⁾⁻⁷⁾。

著者は、道床構造を不連続体モデルで表現し、周波数と加速度レベルを変えて、道床横断面に動的な鉛直載荷および水平載荷を行い、その応答特性に周波数依存性があることを解析的に再現した⁸⁾⁻⁹⁾。そのなかで、著者ら

は碎石の挙動を全体的な挙動と碎石の局所的な挙動に分けて、局所的な運動エネルギーへの変換性能の差異が挙動に大きく関与していることを指摘している¹⁰⁾。

本論文は、実験成果がすでに得られている三軸圧縮試験²⁾⁻⁴⁾に着目し、密に締固まった供試体モデルの数値解析による作成方法、および、側方の変形を許すような実験装置の表現方法を工夫し、さらに、完成したモデルに上載荷重と側圧を作用して実験の再現を行ったものである。なお、解析には不連続体解析法(DDA)を用いた¹¹⁾。

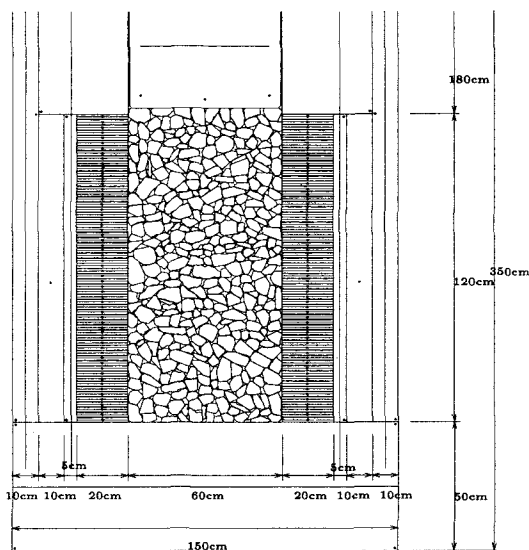


図-1 数値解析用の実験装置(解析モデル)

3. 三軸試験不連続体モデル作成と解析条件

碎石現物の形状をCAD上で数値化し、図-1の大型三軸圧縮装置を模擬した2次元のモデルを作成した。供試体寸法は文献との整合性より幅60cm、高さ120cmとした。

側圧板は、供試体作成時には剛な側板として作用し、載荷試験時には、水平方向のみに側圧を加えて、供試体の側方への変形に柔に追従することが要求される。本解析では、2cm間隔のスリットを60個有する櫛状の剛な側圧反力板を変位制御で供試体外側の左右に配置し、その内側の櫛の隙間に、荷重制御の長方形小ブロックを密に配置した二重構造の側圧板とし、これらの問題を解決した。

モデル作成時も DDA を用いる。まず、空中にランダムに碎石を配置し、自由落下させながら、載荷板と側圧板を用いて所定の動的な振動荷重で締固めた。供試体作成後、載荷板および側圧板を一旦除荷し、三軸圧縮試験を開始する。すなわち、所定の拘束圧に達するまで、上載荷板と側圧板により等圧載荷を行い、次に、拘束圧は一定に保ったまま、上載荷重のみを増加させる。なお、載荷試験時には、櫛状の側圧反力板は、それぞれ左右側方に位置を広げており、供試体変位に影響を与えないようにした。

解析条件と解析に用いた物性値を表-1～表-2に示す。バラストは安山岩であり、載荷板や側圧反力板は剛体を仮定し、碎石よりも数桁硬い値とした。また、側圧載荷用のブロック状の側圧板は碎石の変形を阻害しないように、碎石よりも数桁柔らかく設定した。

解析結果に関しては、個々のブロックの重心に計測点を設け、時刻歴における碎石の変位、回転角、応力、ひずみを記録するとともに、軸ひずみは上部載荷板の変位から、側方ひずみは左右側圧板の変位の平均値から求めた。破壊が進行に伴う体積変化は、上部載荷板の変位と左右の側圧板の相対変位量から求めた。

表-1 解析条件（主軸応力と拘束圧）

モデル No.	主軸応力 σ_1 (kPa)	拘束圧 σ_3 (kPa)	軸差応力 $\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	摩擦角 ϕ (°)
028	346.8	58.9	338.4	55
029	210.7	39.2	338.4	55
030	210.7	58.9	338.4	30
032	397.3	58.9	338.4	55
033	282.2	39.2	243.0	55
034	135.1	19.6	115.5	55
035	397.3	58.9	338.4	50
036	397.3	58.9	338.4	45
037	397.3	58.9	338.4	40
038	397.3	58.9	338.4	35

表-2 解析に用いた物性値

物性値	単位	碎石	装置	側圧ブロック
単位体積重量	ρ (g/cm ³)	2.77	1.00	0.10
ヤング率	E (GPa)	20	3×10^4	0.01
ポアソン比	ν (無次元)	0.1	0	0
粘着力	C_u (kPa)	0	0.1	0.1
摩擦角	ϕ_u (°)	30~55	0	0

4. 予備解析の結果と考察

結果の一例を図-2に示す。図中一番左側は、事前に締固めた状態であり、隣はNo.028～No.030である。定性的な表現になるが、No.028とNo.029を比べると、主軸力差が大きいNo.028の方が軸方向の変形量も側方への膨張量も大きいことがわかる。また、碎石の内部摩擦角を低減すると（No.030）碎石粒子間のすべりが大きくなり、主軸方向のひずみも側方のひずみも増大している。

主働土圧の考え方によると、破壊面は $\alpha_f = \phi/2 + \pi/4$

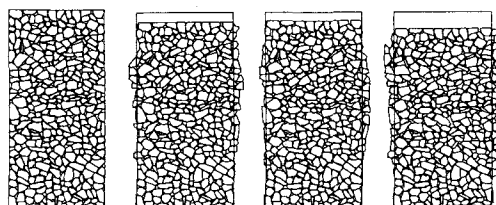


図-2 数値結果の一例（破壊試験後のコアの形状）

左から：載荷前、No.028, No.029, No.030
 No.028($\phi = 55^\circ, \sigma_1 = 346.8 \text{ kPa}, \sigma_3 = 58.9 \text{ kPa}$)
 No.029($\phi = 55^\circ, \sigma_1 = 210.7 \text{ kPa}, \sigma_3 = 39.2 \text{ kPa}$)
 No.030($\phi = 30^\circ, \sigma_1 = 210.7 \text{ kPa}, \sigma_3 = 39.2 \text{ kPa}$)

の角度、すなわち、 $\phi = 55^\circ$ のとき $\alpha_f = 72.5^\circ$ 、 $\phi = 30^\circ$ のとき $\alpha_f = 60.0^\circ$ の傾きで破壊面が形成されるはずである。解析結果では破壊面の角度は理論解と一致したものとはなっていないようである。本結果を踏まえると、不連続体の破壊挙動に関しては、内部摩擦角の大小の影響に加えて、むしろ、多角形粒状集合体の個々のブロックの形状より決まる不連続面の局所的な凹凸の影響の方が卓越するのではないかと予想される。

5. まとめ

本論文では、碎石による密に締固まった解析モデルの作成法、および、実験装置の表現方法について検討を行った。本解析は、碎石の摩擦角と形状のみをパラメータとしており、従来の連続体モデルのような仮想的な構成式を用いていない。本論文では定性的な表現のみであるが、多角形の粒状集合体で実験状況の再現が可能となった。

今後は、実際の実験状況を定量的に再現できる物性値を求める必要がある。また、静的な載荷から高周波までの動的載荷に対する個々の碎石の挙動を求め、消費されるエネルギーの傾向について明らかにする予定である。

参考文献

- 1) 涌井 一 (2003)：衝撃輪重に起因する車両／軌道構造系の課題。鉄道総研報告, Vol.17, No.9, pp.1-8.
- 2) 石川達也・名村 明 (1997)：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.
- 3) 石川達也・大西有三 (1998)：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.
- 4) 木幡行宏, 他 (2003)：相似粒度による単粒度碎石の強度・変形特性。鉄道力学論文集, 第7号, pp.25-30.
- 5) Cholet, C., et.al. (2001)：Study of the Mechanical Behaviour of the Ballast using Discrete Element Approach, WCCR2001.
- 6) Cholet, C., et.al. (2002)：Study of the Mechanical Behaviour of the Ballasted Track using Discrete Element Methods, Railway Engineering-2002.
- 7) Cholet, C., et.al. (2003)：Mechanical Behaviour of the Ballast using Discrete Element Methods, WCCR2003, pp.877-884.
- 8) 相川 明 (2003)：正弦波鉛直荷重に対する有道床軌道横断面の動的挙動特性に関する不連続変形法解析。鉄道力学論文集, 第7号, pp.19-24.
- 9) 相川 明 (2003)：不連続変形法解析を用いた碎石道床の地震時における内部破壊特性。応用力学論文集, 第6号, pp.593-602.
- 10) 相川 明・河野正寿 (2004)：鉄道道床の碎石粒子の動的挙動と運動エネルギー特性に関する研究。大分高専紀要.
- 11) Shi, G.H. and Yeung, M.R. (1996)：Discontinuous Deformation Analysis Program Version 96 User's Manual.