

ストーンブロー工法における砕石粒度に関するDEMを用いた検討

○ [土] 河野 昭子 (鉄道総研)

[土] 松島 亘志 (筑波大学)

DEM Simulation for Investigating the Grain Size Distribution of fine crushed-stones
under Stone Blowing Method

○ Akiko KONO (Railway Technical Research Institute)

Takashi Matsushima (University of Tsukuba)

Tamping is the most common method for adjusting differential settlements of ballast layers. On the other hand, those settlements, especially gaps between ballast layer and sleepers, are adjusted by filling fine crushed stones, such as 'stone-blowing method' in UK. In this study, we investigate the effect of the grain size distribution of the fine crushed stones. At the same time, we observe the behaviors of the fine crushed stones inside ballast layer.

キーワード：道床バラスト，ストーンブロー，個別要素法，粒径分布

Key Words : Ballast Grain, Stone blowing, Discrete Element Method, Grain size distribution

1. はじめに

鉄道線路のバラスト軌道においては、従来、繰返し列車荷重によって軌道狂いが生じた場合、マルチプルタイタンパ（以下、マルタイ）による保守が行われている。この作業においては、図1に示すように道床バラスト層に挿入させたマルタイのツールを振動させることで、道床バラスト層の不同沈下を整齐している。しかしこの作業は、言い換えれば、繰返し列車荷重によって締まった道床バラストの粒子構造を、再び初期状態に戻すことにもなる。よって、マルタイの施工後も再び、繰返し列車荷重による沈下は生じてしまう。

これに対し英国では、ストーンブローイング^{*)1)2)}と言う新たな工法（図2）が提案され、局所的に沈下したバラスト層の表層に粒径20mm程度の細粒砕石を、空圧を利用して充填している。

我が国においても、'豆砕（細粒砕石）敷込工法'と呼ばれる同様な方法が古くから試みられているが、一方で、道床バラスト層の細粒成分を増加させることへの抵抗感も少なくない。

これに対し、複数の粒度の細粒砕石を用いた実験的検討が行なわれているが^{*)3)}、これによると、細粒砕石の粒度だけでなく、バラスト層自体の粒度も、沈下進みに影響を与えていることが示されている。

例えば図3は、実物大軌道模型において、基盤層として新品バラストと土砂混入バラスト（劣化したバラストを想

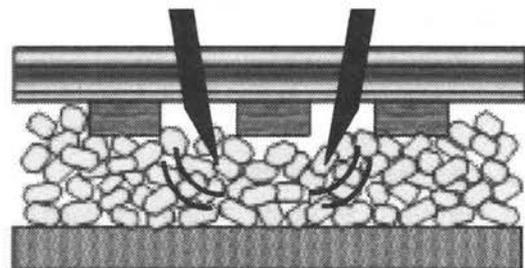


図1 マルタイによる整齐

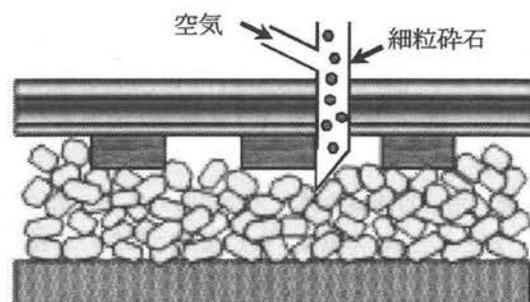


図2 ストーンブロー

定)の2種類を用い、更に各々2通りの細粒砕石を表層に敷き込んだ実験結果である^{*)3)}。これより、新品バラストおよび土砂混入バラストのいずれにおいても、細粒砕石の粒径が大きい方が沈下量は少ないことが示されている。

また、新品バラストに比較して、土砂混入バラストの方が、細粒砕石を敷き込んだ状態での沈下量は小さくなっている。

つまり新品バラストの場合、バラスト粒子間の空隙が土砂混入バラストより大きいと、細粒碎石の一部がバラスト層に貫通することが予想されるが、その状況を実験で観察することは困難である。

そこで本研究では、新品バラストを想定した粒度のバラスト層に、粒度の異なる細粒碎石を敷き込んだ場合の、細粒碎石の充填および貫通状態を DEM を用いて観察する。

2. シミュレーション概要

2.1 バラスト要素の作成

近年、粒子集合体の構造物の変形挙動に関して、個別要素法を用いて検討される事例が増加しており、また粒子のモデルにおいても、碎石や砂などの不規則形状を再現したものが多く見られる。これらは主に、多面体や多角形でモデル化したものと、球や円の集合体でモデル化したものに大別されるが、いずれのモデルも一長一短がある。

本研究では、(1) 粒子間の異常貫入^{*4)}を避けるため、(2) 計算時間を短縮するため、の二つの理由で球の集合体を用いることとする。

(1) 粒子形状

道床バラストのような複雑な形状については、3次元レーザースキャナを用いた測定によって、図4に示すレベルにまで精密な形状の把握が可能となっている。しかし、これらの形状を精密にモデル化する場合、多面体では多くの頂点が、球集合体では多くの球を用いる必要があり、実用面で効率的であるとは言えない。

本研究では先述の通り、粒度に着目した検討を行なうことから、バラストの形状は極力単純にし、図5に示す12個の球による六角形の板状形状とした。

ただしモデル化においては、安山岩バラストの形状を Zingg の方法で整理した既往研究^{*5)}を参考にした(図6参照)。ここでは、バラストを直方体に近似した場合の長軸(図中 ℓ)、中軸(図中 S)、短軸(図中 i)より、その比 i/S を横軸、 i/ℓ を縦軸にしてプロットしている。図より、安山岩バラスト(図中の黒四角印)では、 i/S の値は $2/3$ 程度に集中し、 i/ℓ の値は $0.4 \sim 0.7$ の範囲内であることが明らかである。

本研究で用いる球集合体モデルにおいても、 i/S の値は $2/3$ と一定とし、 i/ℓ の値は、 0.4 、 0.55 、 0.7 の3通りのパターンとしてモデル化した(図7参照)。

(2) 粒径分布

シミュレーションにおけるバラスト要素の粒径分布は、図8に示す実バラストの粒径分布を参考にし、図中黒線で示す通りとした。

また充填する細粒碎石要素の粒径分布は、市販の5号碎石の粒径分布を参考にし、図中の点線に示す通りとした。

2.2 DEMパラメータ

DEM においては、図9に示すように、粒子間の接触を法線方向と接線方向のバネとダンパでモデル化し、接線方

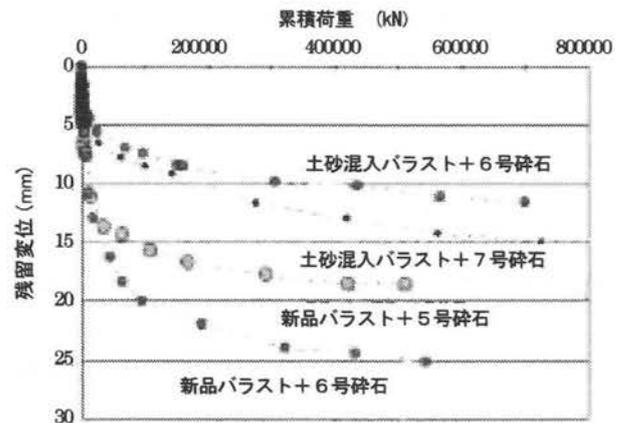


図3 豆砕敷込工法の実験的検討^{*3)}



図4 実バラスト3次元形状測定結果

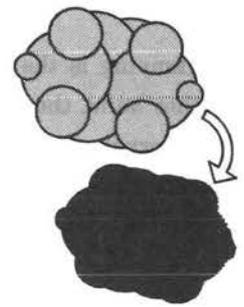


図5 バラスト粒子モデル

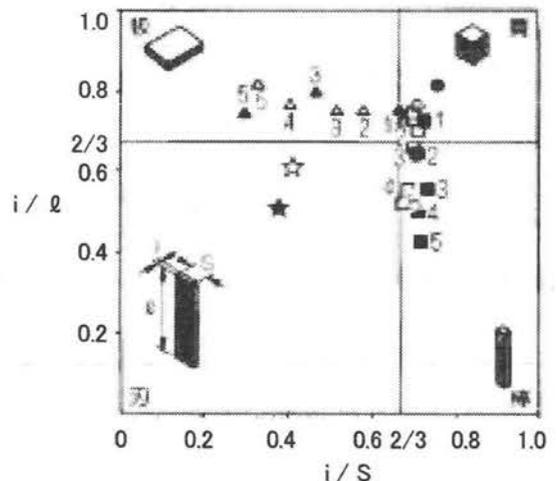


図6 Zingg の方法による実バラスト形状の整理^{*5)}

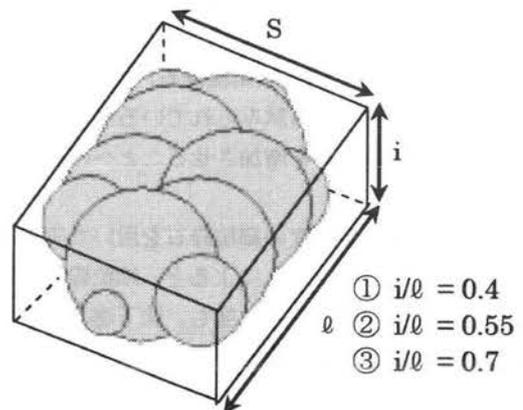


図7 バラスト要素の形状パターン

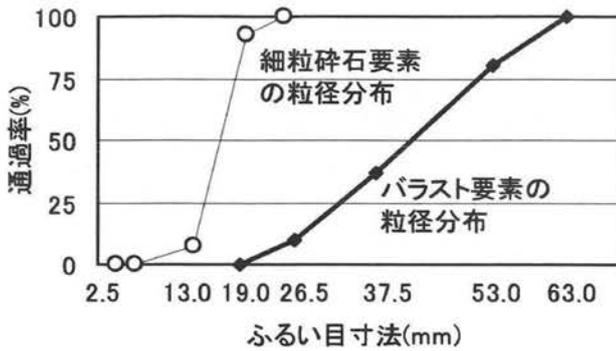


図8 各要素の粒径分布

向のスライダによって粒子間の滑りをモデル化している。ここで粒子間のバネ係数 k_n および k_s については、波動方程式と振動方程式から導かれる式(1)に実バラスト層のP波速度 V_p とS波速度 V_s 、バラスト粒子の密度 ρ を代入して算出した。

$$k_n = \frac{1}{4} \pi \rho V_p^2, \quad k_s = \frac{1}{4} \pi \rho V_s^2 \quad \dots (1)$$

粒子間の減衰係数については、バネ・ダンパの付いた質点の運動方程式より得られる式(2)を用い、ここでは碎石の反発係数 e_b を 0.5 として算出した。

$$e_b = \exp\left(-\frac{h}{\sqrt{1-h^2}} \pi\right) \quad h = \frac{c}{2\sqrt{k \cdot m}} \quad \dots (2)$$

これらの値を表1にまとめる。表中の摩擦係数については、砂の形状を再現したDEMモデルで用いられている $0.5^{*6)}$ とを採用した。

2.3 供試体のサイズと作成方法

図 10 にシミュレーションにおける供試体のサイズを示す。ここで、バラスト層の厚さは実際のバラスト軌道を参考にして 20cm とし、幅は大盤まくらぎ 1 本分の両側を 30cm 程度とし、全体で 90cm とした。奥行は、レール底部の幅を参考にして 15cm とした。

まずバラスト要素のみを落下させた後、締め固めて、上述のサイズの供試体 (図 11) を構築する。その後、細粒碎石要素をバラスト要素のみの基盤層の表層 (まくらぎ下部分) に落下させた (図 12)。

3. シミュレーション結果

3.1 細粒碎石の移動状況

図 13 に 5 号碎石を敷き込んだ直後と、100MPa で 5 回 載荷した後の、細粒碎石の中心座標を示す。図中の灰色丸印が 載荷前、黒色菱形印が 載荷後の位置を示す。これより、たかだか 載荷 5 回程度でも、細粒碎石が下方へと移動しているのが明らかである。

3.2 細粒碎石の貫通状況

図 14 に 上述の 5 回 載荷後の細粒碎石とバラスト要素の

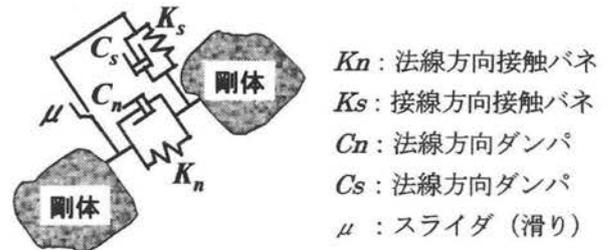


図9 DEMの接触モデル

表1 DEMパラメータ

粒子間バネ係数	法線方向	4.24×10^8 N/m
	接線方向	1.06×10^7 N/m
粒子間減衰係数	法線方向	6.90×10^4 N·s/m
	接線方向	3.45×10^4 N·s/m
表面摩擦係数		0.5

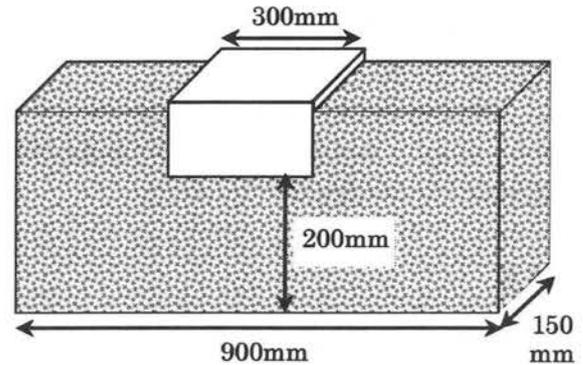


図10 供試体のサイズ

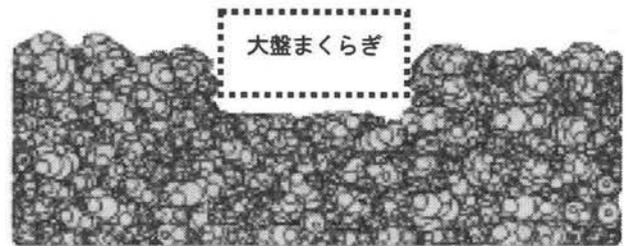


図11 3次元DEMモデル (バラスト層部分)

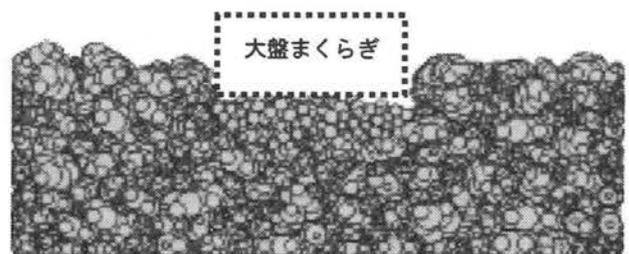


図12 3次元DEMモデル (バラスト層と細粒碎石層)

中心座標を示す。図中、白抜き丸印はバラスト要素を、黒星印は細粒砕石要素の中心座標を示す。図中の数字は、特にバラスト層の深部まで貫通した細粒砕石の粒径を示す。これより、バラスト層の表層から 50mm 以下 (鉛直方向位置で 150mm) に達している細粒砕石の粒径は、7mm 未満のものが大半であるが、中には図に示すように 10.29mm の粒径のものも見られている。

また全ての細粒砕石要素の粒径と貫通量の関係について図 15 に示す。これより、粒径が小さい方が貫通量も大きい傾向とはなっているが、必ずしも線形の関係ではなく、細粒砕石の粒径が 7mm 程度でも貫通が 0 である場合もあれば、粒径が 20mm 程度でも 20mm 近く貫通している場合もある。

4. おわりに

局部的に沈下したバラスト層に細粒砕石を充填する‘ストーンブロー’あるいは‘豆砕敷込工法’について、DEM を用いた再現シミュレーションを行った。

これより、実験では観察が困難な、細粒砕石のバラスト層への貫通の状況を観察した。

今後は、細粒砕石の粒度に着目した DEM シミュレーションを行うとともに、実現場の保守における最適な細粒砕石の粒径分布についても検討を行いたい。

参考文献

- 1) W.F.Anderson & A.J.Key : Two Layer ballast beds as railway track foundations, 20th European conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol3, pp1725-1731, 1999
- 2) W.F.Anderson et.al : The deformation behavior of two layer ballast beds, 15th Intl. conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, pp27-31, 2001
- 3) 河野昭子、堀池高広：単粒度砕石を用いた二層バラスト道床の繰り返し衝撃载荷試験，第 40 回地盤工学研究発表会，pp1171-1172，2005 年
- 4) 河野昭子 ほか：多面体要素を用いた DEM 三軸圧縮試験の試み，第 43 回地盤工学研究発表会，pp823-824，2008 年
- 5) 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, vol51, No8, pp12-15, 1994 年

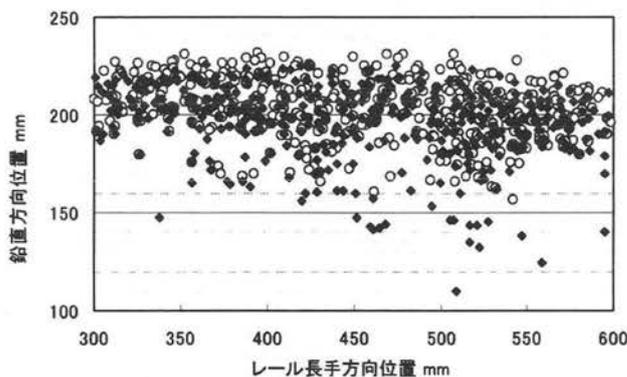


図13 細粒砕石要素の中心座標の比較 (载荷前と载荷後)

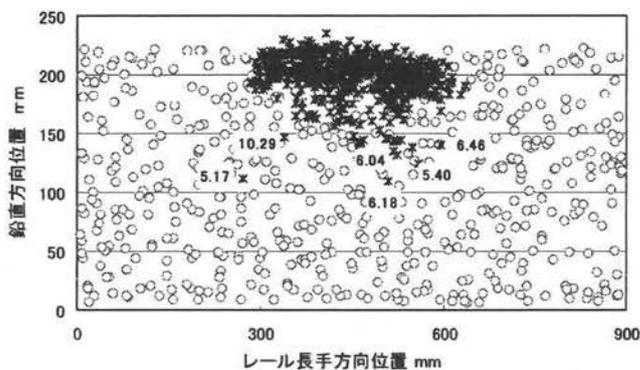


図14 細粒砕石要素とバラスト要素の中心座標の比較 (载荷後)

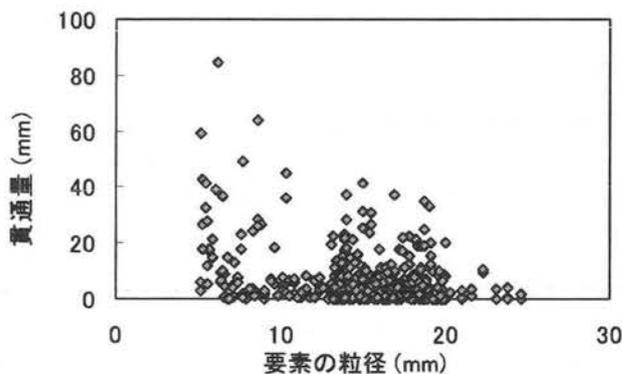


図15 要素の粒径と貫通量の関係