3次元個別要素法のための砕石集合体の3次元形状計測とその形状特性

鉄道総合技術研究所	正会員	浦川	文寛
鉄道総合技術研究所	正会員	相川	明
鉄道総合技術研究所	正会員	緒方	政照
鉄道総合技術研究所	正会員	名村	明

1.はじめに

我が国の鉄道の営業線の多くは,路盤とレール・まくらぎの間に道床バラストと呼ばれる砕石を敷き詰めた「バ ラスト軌道」である.バラスト軌道は排水性,施工性,修繕のしやすさ等多くの長所を持つ反面,列車走行による 繰返し荷重が長期的に作用することにより軌道沈下等の劣化が生じるため,保守コストが膨大となる.効率的な保 守を行うためには,沈下のメカニズムを解明し,軌道劣化を精度良く予測するモデルを確立することが求められる.

本研究では,近年急速に発展しつつある不連続体の解析理論を用いたバラスト軌道劣化モデルの開発を目的とする.解析例としては C. Cholet らの研究¹⁾等が挙げられ,バラスト1つ1つを不連続な粒状体として捉えることが可能である.本論文では,シミュレーションの準備段階として,実際のバラストを3次元データとして取り込むための頂点座標の計測と,頂点座標から自動的に立体を作成する方法を述べるとともに,計測したデータからバラストの形状特性の評価を行う.

2.パラスト軌道劣化モデル

図1に不連続体解析理論を用いたバラスト軌道劣化モデル の概要を示す.列車通過に伴う繰返し荷重は,レール,まく らぎを介して道床部に伝播する.道床は,剛な不連続体粒子 の3次元的な集合としてモデル化する.1つ1つの粒子形状 は,実際のバラストを模擬した多面体で表し,粒子同士の接 触状況に応じて,接触部に垂直応力と摩擦力が働くものとす る.各要素で独立な運動方程式をたて,要素間の接触機構を 考慮して全体のポテンシャルが最小化するように時間領域で 前進的に解き,個々の要素の運動を追跡していくものである.

3.砕石の3次元形状計測

敷設されている線路から 1000 個のバラストをサンプルとして採取し,形状を計測する.

3.1 計測装置

計測装置の構成図を,図4に示す.本装置は接触式3次元 デジタイザー(Immersion 社製 MicroScribe-G2,アーム半径127 cm,精度0.38 mm)²⁾,スイッチペダル,データ収録用 PC か ら構成される.3次元デジタイザーは,アルミ製のロボット アームの先端に入力用ペン(プローブ)が付いた装置で,パ ソコンやワークステーションに接続し,机の上で簡単に操作 できるように設計されている.ロボットアームは計5つの可



動関節を持ち,それぞれが独立して回転することで,その移 動距離および方向を基にプローブの座標を読み取ることがで きる.本計測ではプローブを対象物に当て,スイッチペダル を踏むと,RS-232Cを介して収録用ソフトウェア((株) C₂D₂ 社製 232 エクセルロガー)³により,PC の Excel 上に座標デ ータがテキストデータとして出力されるようにした.

3.2 頂点座標の計測方法

まずサンプルに通し番号をつけ,個々のサンプルについて 頂点を決める.次に,座標取得のため,全ての頂点が3次元 デジタイザーのプロープで読み取れる位置に固定し,3次元 デジタイザーのプロープを頂点にあて,スイッチペダルを踏 み,座標を取得する.これを全ての頂点に対して行う.

3.3 多面体モデルの作成

以上,砕石の頂点座標の計測について述べたが,3次元の シミュレーションを行うためには,頂点座標データから面を 持った多面体としてのデータを作成する必要がある.また, 大量のサンプルを用いてシミュレーションを行うためには, 多面体作成作業をできる限り省力化することが望ましい.そ こで,計測した頂点座標から独自に作成したツール40を用いて 自動的に多面体を作成する.また,多面体の作成にあたり,以 下の条件を満たすこととした.

多面体の1つの面は3つの頂点を結んだ三角形とする.これは,対象とする石が角張った砕石であること,また,後のシミュレーションにおける計算の簡略化のためである.

作成する多面体は,不自然な凹凸を含まず,できるだけ丸 みを帯びた凸集合の形状にする.

隣接する面の傾きを出来る限り緩やかにする.

3.4 計測結果

図3に計測したバラスト形状を CAD 上で描写した図と実物のバラストの写真を示す.本計測法により,概ね実際の形状を再現できていることがわかる.

バラストの形状は,質量,慣性モーメント,バラスト同士の接触状況等に大きく影響し,シミュレーションを行う上での重要なファクターとなるため,形状計測の結果をより詳細に検証する必要がある.そこで,実物のバラストと作成した多面体との体積を比較し,その結果を表1に示す.ここで,実物の砕石の体積は,質量を計測し,密度 2.72 g/cm³で除して求めた.計測により得られた体積は,実物の約7割から8割と実物より小さな値を取った.これは,実際のバラストは角が欠け,わずかに丸みを帯びているのに対し,多面体モデルでは,1つの面を平面と考え,頂点を直線で結んでいるため,バラストの内接線を取る形となり,

実物より体積が小さくなると考えられる.

3.5 最適な頂点座標の計測点数

実物と計測結果の誤差は,計測する頂点の数を増やすことで減少すると 思われるが,それに伴い,計測の手間,シミュレーションに必要な時間と メモリーも増大する.計測およびシミュレーションの効率化を図るには, 計測する頂点の数と誤差の関係を明らかにし,要求する計測精度に応じて



図3 形状計測の結果 表1 宝物と計測結果の休積の比較

スー 天物と計測加木の件積の比較						
パラストID -		体積(cm ³)			モデル / 実物	
	実物	モデル1	モデル2	モデル1	モデル2	
941	71.91	52.35	53.80	0.728	0.748	
942	67.94	50.01	53.72	0.736	0.791	
943	66.24	50.15	53.68	0.757	0.810	
944	66.22	51.12	53.76	0.772	0.812	
947	51.49	30.44	37.10	0.591	0.720	
950	65.88	49.65	54.69	0.754	0.830	
993	65.52	41.90	43.82	0.639	0.669	
994	55.36	39.47	41.33	0.713	0.747	
998	58.32	42.75	46.26	0.733	0.793	
999	59.11	43.32	46.89	0.733	0.793	
平均值	62.80	45.12	48.50	0.716	0.771	

表2 合試料の体積と計測点数					
No.	質量[g]	体積[cm3]	測定点		
No.1	70	25.70	42		
No.2	98	36.07	41		
No.3	183	67.28	39		
No.4	283	104.04	53		
No.5	351	129.04	53		
No.6	364	133.82	36		



最適な計測点数を設定する必要がある.

ここでは,体積の異なるバラスト試料に対して計測を行い(表2),それぞれの試料で参照する頂点数を変え,体積,慣性モーメントの計算を行った.その結果を図4に示す.

各バラストにおける体積と慣性モーメントの挙動はほぼ一致しており,頂点数の増加とともに上昇するがその増 加速度は減少していく.体積比を見ると,頂点数が10から20の間では変動が大きく,その値も小さいが,頂点数 が30以上では0.9を超え,かつ増加も比較的横ばいになっているので,30点がバラストの形状を正確に表す頂点 数の基準になると思われる.

4.現行の規格に則した形状の評価

道床バラストを管理する上で,形状に関しては, 粒度分布, 粒子形状についての規格化がなされている⁵⁾. そのため,実軌道を再現するためには,使用するデータもこれらの規格を満足させなければならない. について は,用いたサンプルが敷設された線路より取得した物であることから,既に規格を満たしているものとし,本節で は の粒度分布についての評価を行う.

4.1 バラストデータの粒度分布

形状計測を行った 1000 個のバラストに対してふるい分け試験を行ったところ 粒度分布は図 5 となった しかし, 今回行った計測では,計測データは実物と比較して,体積比で約 0.77,長さの次元で約 0.92 と小さく評価している ことから,計測データの粒度分布も,実測値のふるい目寸法に 0.92 を乗じた値を用いることが妥当である.JR 各 社では道床バラストに関する標準示方書において粒度分布を図 5 の破線内と定めており⁵⁾,計測したデータは,基 準値と比較して粗粒分を多く含んでいるため,シミュレーショ

ンを行う前に粒度分布を調整する必要がある.

4.2 バラスト(多面体)データの粒径の求め方.

粒度分布を調整するためにはバラストの粒径を求める必要 があるが,バラストのような不規則な形状の粒径を直接計算す ることは困難であるため,以下の手順でデータを直方体に近似 し,それを基に求める.

- (1) 主軸回りの慣性モーメント I(I_{xx},I_{yy},I_{zz})を計算
- (2) 注軸回りの慣性モーメントが一致する直方体で近似する.
 直方体の辺が, x,y,z 軸に平行となるように置いた場合の,



M = abc ·
$$\rho$$

 $\begin{pmatrix} Ir_{xx} \\ Ir_{yy} \\ Ir_{zz} \end{pmatrix} = \frac{M}{12} \begin{pmatrix} b^2 + c^2 \\ c^2 + a^2 \\ a^2 + b^2 \end{pmatrix}$ ここで,
M: 質量, ρ : 密度

I=Ir と置くと,直方体の辺 a,b,c は次式で定まる.

$$\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{\frac{6}{M}(-I_{xx} + I_{yy} + I_{zz})} \\ \sqrt{\frac{6}{M}(I_{xx} - I_{yy} + I_{zz})} \\ \sqrt{\frac{6}{M}(I_{xx} + I_{yy} - I_{zz})} \end{pmatrix}$$
 (\vec{x} 2)

(3) 直方体から粒径を求める

粒径はふるい目の寸法で定められ,直方体の粒径は,図6 に示すように,2番目に長い辺(以下第2辺)の長さが粒径 となる.そこで,近似した直方体の第2辺をバラストの粒径 と考え,粒度分布を求めたところ,図7となった.直方体第2 辺とバラストデータを比較すると,ふるい目寸法で約7.4mm の差が見られたが,これは直方体に近似したことにより生じた 誤差と思われる.この直方体第2辺に7.4mmを足した値が, 実験より得られたバラストデータの粒度分布と良く合うこと から,バラストの粒径は,「慣性モーメントが一致する直方体 の2番目に長い辺+7.4mm」とする.

4.3 粒度の調整

調整するサイズ(区間を指定)とバラストを乱数で選び,指 図8 調整後のハラストテーダの粒度分布 定した数だけ拡大縮小する事で,粒度分布を調整する.図8に計測データにサイズを調整した1483個のデータを加 えたものの粒度分布を示す.一連の操作により,粒度分布を基準値内に収めることが出来た.

5.おわりに

本論文では,バラストの形状を3次元の多面体数値データとして取り込むための形状計測システムを提案し,実際のバラストに適用した.提案した手法により,バラストの形状を比較的正確に再現できることが確認できたが,今回の場合測定した頂点数が少ないこともあり,体積を約2割程度過小に評価してしまうという結果となった.そこで,頂点数に対する体積と慣性モーメントの関係から,本計測法によるバラストの形状を正確に測るための頂点数を30と定めた.さらに,計測したデータに対して形状の評価を行い,現行のバラストに関する規格を満たすよう粒度の調整を行った.今後は,多面体の粒状体数値計算上での動的振動締固めによる最密充填配置および3次元粒状体シミュレーションの手法を確立させ,バラスト軌道劣化モデルの完成を目指す.

参考文献

- 1) C. Cholet, G. Combe, G. Saussine, K. Sab, C. Bohatier, P.E. Gautier: Study of the mechanical behavior of the ballsted track using discrete element methods, Railway Engineering 2002.
- 2) Immersion 社 ホームページ: http://www.nihonbinary.co.jp/Virtual/Microscribe/
- 3) (株) C_2D_2 社 ホームページ: http://www.c2d2.co.jp/products/exlogger/
- 4) 浦川文寛,相川明,河野昭子,緒方政照,名村明:バラスト軌道劣化モデルの開発を目的とした単粒度砕石の 3次元形状計測システム,pp.415-419,第3回地盤工学会関東支部研究発表会講演集.
- 5) 須田征,長門彰,徳岡研三,三浦重 編:新しい線路 軌道の構造と管理, pp. 214-215, (社) 日本鉄道施設協会.

