論文 道床初期沈下量の分散に与える締固め度の 影響に関する解析的検討

河野 昭子1

¹正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目8-38) E-mail: kono.akiko.43@rtri.or.jp

道床沈下抑制工法等の効果の評価においては、従来、道床の初期沈下が収束した後の漸進沈下過程にお ける沈下進み係数が用いられてきた.これは初期沈下過程においては、道床バラスト層の初期の粒子配置 の僅かな違いが、粒子層の体積圧縮に伴う沈下量に影響を及ぼすためであるが、これにより実物大載荷試 験等においては、相当数の載荷回数を確保することが求められる.これに対して初期沈下収束と、その後 の漸進沈下過程の沈下進み係数βの値が早期に判定できれば、載荷回数を低減することが可能となる。そ こで本研究では、初期の締固め度が同程度の複数の離散体モデルをモデルを用いて繰返し載荷シミュレー ションを行い、初期の締固め度が初期沈下収束および沈下進み係数βの推定値の精度に与える影響ついて 検討を行った.

Key Words : Ballasted Track, Discrete Element Methods, Cyclic Loading Test, Curve Fitting

1. はじめに

道床沈下過程は、道床交換直後の「初期沈下過程」と、 初期沈下が収束した後の「漸進沈下過程」の2つのステ ージに分けられるが、軌道条件や沈下抑制工法の評価を 行う際には、後者の「漸進沈下過程」における直線の傾 きβ(「沈下進み」と呼ばれる)が用いられている(図 -1 参照).これは、道床交換直後の道床バラスト層に 比較して、載荷履歴により粒子構造が安定した道床バラ スト層においては、沈下量のバラツキが減少することが 経験的に知られているためである.これにより実物大道 床バラスト層の繰返し載荷実験等においては、漸進沈下 過程に至った後に相当数の繰返し回数を確保しなければ ならず、例えば数百万回レベルの載荷が行われている¹).

これに対して、図-1に示すように、初期沈下の収束を 判定し、漸進沈下過程のβを早期に予測できれば、実験 や追跡調査のコストを削減することが可能となるが、道 床バラスト層の初期沈下量はバラツキが大きいため、精 度の高い予測は困難ともいえる.

そこで本研究では、初期の締固め度の異なる複数の離 散体モデルを用いた繰返し載荷シミュレーションを行い、 初期の締固め度が、初期の締固め度が初期沈下収束およ び沈下進み係数βの推定値の精度に与える影響について 検討したので報告する.



2. 解析モデル

既往の研究により、重量法によって算出した道床バラ スト層の見かけの密度は、密詰めの場合1.60~1.67g/cm³, 緩詰めでは1.40~1.45g/cm³、中程度で1.50~1.55g/cm³程度 であることが示されている². そこで本研究では、乱数 によって初期配置を決めたバラスト要素を落下させ、見 かけの密度が概ね1.67g/cm³または1.60g/cm³となるように 締固め、それぞれの締固め度で解析モデルを3通り作成 した.前者をモデルAグループ、後者をモデルBグルー プと呼ぶ.また、各解析モデルの諸元を表-1にまとめる.

道床バラスト層の寸法は、図-2に示すように、いず れも幅1000mm、奥行300mm、厚さ約250mmとし、中央 に300mm×300mmの載荷板を設置した(図-2参照).

幅方向と奥行方向の境界は摩擦のない固定面とした.

シミュレーションには鉄道総研と筑波大学の共同研究 で作成した 'DEMCS-track' を用いた³.

条件名	密度 [g/cm ³]	粒子数	粒子質量 合計 [g]	道床厚さ [mm]
A1	1.67E+00	2200	1.26E+05	251.7
A2	1.66E+00	2200	1.27E+05	256.2
A3	1.68E+00	2186	1.27E+05	250.9
B1	1.59E+00	2051	1.22E+05	254.3
B2	1.61E+00	2066	1.21E+05	252.2
B3	1.60E+00	2061	1.21E+05	252.2

表-1 道床バラスト層モデルの諸元



図-2 解析モデル例 (A1モデル)

1.75

1.62

1.66

1.73

1.65

1.62

1.50

1.70

道床厚 さ方向

道床厚 さ方向

道床厚 さ方向

厚向

通ちて回

1.75

1.59

1.62

1.69

1.60

1.58

1.57

1.63

	載荷板						
厚向	1.63	1.63	1.56	1.63	1.62		
道さ	1.72	1.74	1.75	1.75	1.70		
-	·····································						

載荷板

1.73

1.61

密度

載荷板

1.59

1.72

載荷板

1.61

1.58

(i)密度

載荷板

1.46

1.62

(i)密度

3. 締固め度の評価

締固め度については、冒頭で述べたように、従来「見 かけの密度」で判断されてきたが、ここでは密度に加え て、離散体モデルを用いた解析結果から得られる情報の 一つである配位数(一つの粒子の他の粒子との接触点の 数) にも着目することとする.

表-1に示した6通りのモデルの繰返し載荷開始前の道 床バラスト層の密度および配位数の分布を図-3に示す. なお分布の表示は、道床バラスト層の幅方向(1000mm) を5分割,厚さ方向(250mm)を2分割した. 各図「載荷 板」と記した部分の太線部が載荷板の幅(300mm)を示 している.

図より、見かけの密度を概ね1.67g/cm3前後に調整した モデルAグループ3通りにおいて、密度は1.56~1.75g/cm³, 配位数は2.37~2.71の値を示す. ここでモデルA1とA3は 下層の密度が大きく、モデルA2では上層の密度が大き

			載荷板			
ほう	2.47	2.61	2.53	2.64	2.65	
道された	2.48	2.50	2.52	2.60	2.45	
	(ii) 配位数					

(密度 1.67g/cm3)

(a) モデル A1

1.74

1.59

1.62

1.67

1.60

1.59

1.60

1.63

(c) モデル A3

1.72

1.60

1.62

1.70

1.56

1.65

			載荷板				
は回回	2.37	2.54	2.48	2.45	2.43		
通され	2.64	2.62	2.55	2.64	2.53		
	(ii) 配位数						

(b) モデル A2 (密度 1.66g/cm3)

			載荷板			
呼回	2.61	2.54	2.62	2.71	2.66	
通われた	2.44	2.67	2.48	2.55	2.47	
(ii) 配位数						

(密度 1.68g/cm3)

			載荷板				
きし	2.49	2.56	2.55	2.54	2.54		
通われた	2.48	2.58	2.46	2.45	2.47		
	(ii) 配位数						

(d) = 7

デル B1	(密度 1.59g/cm3)
-------	----------------

			載荷板		
医间间 医	2.40	2.67	2.56	2.46	2.48
通われた	2.51	2.56	2.57	2.54	2.48

(ii) 配位数

(i)密度	
	(e) モデル B2

1.59

1.66

⁻ ル B2	(密度 1.61g/cm3)

			載荷板						載荷板		
を向	1.56	1.58	1.53	1.56	1.56	味ら	2.40	2.58	2.55	2.62	2.56
型で	1.64	1.70	1.62	1.61	1.65	道された	2.58	2.43	2.44	2.63	2.41
-			(i)密度					(ii)配位数		
				(f) T	デル B3	(密度 1.60g	/cm3)				

図-3 離散体バラスト層モデルの載荷前の密度および配位数の分布

いが、これは解析モデル作成時に、モデルA2について はモデルA1の要素配列を鉛直方向で反転させて締固め たためである.

他方,見かけの密度を概ね1.60g/cm³前後に調整したモ デルBグループの3通りにおいて,密度は1.46~1.70g/cm³, 配位数は2.40~2.67の値を示す.

以上より,密詰めにしたモデルAグループは,密度だけでなく配位数もモデルBグループより大きい傾向を示している.

4. 繰返し載荷初期の沈下量の観察

(1) マクロな観察

図-3 に示した解析モデルにおいて繰返し載荷を行った.載荷条件は、まず繰返し載荷前に10kN,1Hz および20kN,1Hz の予備載荷を行い、その後、最小荷重1kN,最大荷重20kNで、周波数10Hzの正弦波載荷を行った.

載荷1~200回における道床バラスト層の沈下量を図-4 に示す.ここで'沈下量'とは、各載荷回で載荷板の変 位が最小となった瞬間の変位の増加分を示す.

図より,見かけの密度を概ね1.67g/cm³前後に調整した モデルAグループ3通りにおいて,載荷200回目の沈下量 はそれぞれ6.83mm, 14.8mm, 13.4mmで,3つの結果の平 均値は11.68mm,標準偏差は3.48で,平均値に対する変 動は30%程度となる.他方見かけの密度を概ね1.60g/cm³ 前後に調整したモデルBグループ3通りにおいて,載荷 200回目の沈下量はそれぞれ27.50mm,35.3mm,17.4mm で,3つの結果の平均値は26.76mm,標準偏差は7.34で、 平均値に対する変動は30%程度となる.

つまり、A・B両グループとも3通りの供試体の沈下量の変動係数は同程度となるが、締固め度の緩い道床バラスト層の場合、沈下量自体が大きくなることから、供試体による沈下量の差が大きくなることが確認できる.

またモデルAグループで最も沈下が大きかったモデル A2は、道床バラスト層全体の初期の密度が3グループの うち最も小さかったことと、図-3に示したように、道 床バラスト層の初期の粒子配置において、下層部の密度 が上層部よりも小さい事が影響していると考えられる.

同様にモデルBグループで最も沈下が大きかったモデ ルB2は、道床バラスト層全体の初期の密度は3グループ のうち最も大きいが、図-2に示すように道床バラスト層 上層部の載荷板直下の密度が1.46g/cm³と著しく小さい事 が影響していると考えられる.

次に載荷2回目以降の各載荷回の変位振幅(最大変位 と最小変位の差)を図-5,沈下進みを図-6に示す.

図-5より変位振幅は、モデルAグループのうちA1、



- 39 -

A3では載荷100回における変動は小さいのに対して,A2 では大きな変動が見られ,載荷80回目以降にようやく収 束する.この要因は先述の沈下量と同様に,モデルA2 のバラスト要素の初期配置が,下層の方が密度および配 位数ともに小さいことが影響していると考えられる.

他方モデルBグループでは大きな変動は見られないが、 モデルB2では載荷35回目、50回目付近で変動が見られる.

ここで各モデルの変位振幅および沈下進み(各載荷回の沈下量の増加量)について,載荷2回目~50回目,51回目~100回目,および101回目~200回目の各載荷ステ ージの平均値の値を図-7に示す.

まず図(a) より変位振幅の平均値は、載荷2~50回およ び51回~100回においてバラツキが大きく、特にモデル AグループのモデルA2において、他のA1、A3よりも大 きい値を示す.その後の載荷101回目~200回における変 位振幅の平均値は、モデルA、Bの両グループにおいて バラツキが収束し、各グループの分散はAで0.0002、Bで 0.001程度となる.

図(b)の沈下進みにおいては、モデルA, Bの両グルー プにおいて載荷2回目~50回目の平均値のバラツキが大 きく、その後の載荷51回から100回目では、モデルAグ ループではバラツキが小さくなるものの、モデルBグル ープでは収束せず、モデルAグループの載荷2~50回目 と同程度の値となっている.更に、その後の101回目~ 200回目における沈下進みの平均値は、モデルAグルー プおよびBグループの両者でバラツキが収束し、分散の 値はそれぞれ0.0002、0.001程度となる.

以上より,初期沈下過程においては,道床バラスト層 の初期密度および載荷回数の影響は変位振幅より沈下進 みに顕著に現れることが確認された.

(2) ミクロな観察

前節の図-7(b)で示した各載荷ステージの沈下進みの 平均値は,モデルA1(初期密度1.67g/cm³)の載荷2回目 ~51回目で0.064mm,モデルB3(初期密度1.60g/cm³)の 載荷51回目~100回目で0.071mmと同程度の値を示す.こ れより,モデルA1の載荷30回終了後とモデルB3の載荷 90回終了後の道床バラスト層内の密度と配位数の分布を 観察する.図-8に,これらの分布図を,モデルA1の載 荷90回後の分布図とともに示す.

図より、モデルB3の載荷90回終了時の密度の分布は、 モデルA1の載荷30回終了時に比較して、道床バラスト



層全体で小さい値であり、載荷板直下に着目しても、モ デルB3の載荷90回終了時で小さい値を示す.

同様にモデルB3の載荷90回終了時の配位数の分布は, モデルA1の載荷30回終了時に比較して,道床バラスト 全体で小さい値であるが,載荷板直下については同程度 で,若干モデルA1の方が小さい値となっている.

以上より、マクロな観察による沈下進みが同程度と見 られる場合でもミクロな粒子構造には差があり、特に締 固めが十分でない場合は、その後の載荷途中で急激な沈 下進みが発生する可能性も含んでいる.

なお、図-8(c)に示すモデルA1の載荷90回終了時の密 度および配位数の分布は、同モデルの載荷30回終了時よ りも増加していることから、モデルA1も載荷30回の時 点では、初期沈下が継続しているといえる.

5. 初期沈下過程のフィッティングの誤差

(1) 沈下量の予測値との誤差

道床バラスト層の沈下予測については、従来、様々な 予測式が提案されているが⁴、ここでは式(1)および(2)に 示す予測式を用いて、初期沈下過程における沈下予測の 誤差について検討する.

$$y = \alpha \left(1 - e^{-\gamma x} \right) + \beta x \quad --(1)$$
$$y = a x^{b} \qquad --(2)$$

ここでxは載荷回数,yは沈下量, α , β , γ ,a,bはいずれも係数である.

図-4 に示した各モデルの沈下曲線の載荷50回前まで を式(1)および式(2)でフィッティングした曲線(以下そ れぞれ, Fit-1およびFit-2)を,載荷100回目までのシミュ



図-9 沈下曲線とフィッティング曲線の比較

レーション結果と合 わせた図の例(モデ ルA3およびB3)を 図-9に示す.この図 における載荷100回 目のフィッティング 曲線の沈下量とシミ ュレーション結果の 沈下量の差を '誤 差'とし,表-3に, 全てのモデルにおけ る誤差の値を示す.

表-3 2通りのフィッティング による誤差の比較

Fit1	Fit2
誤差	誤差
mm	mm
0.39	0.71
1.46	2.99
0.27	1.14
2.36	3.03
1.28	0.61
1.43	0.22
	Fit1 誤差 mm 0.39 1.46 0.27 2.36 1.28 1.43

表より,モデルAグループ3条件のうちA1とA3は Fit-1 による誤差が,モデルBグループ3条件のうちB2とB3は Fit-2による誤差がより小さくなる傾向が示されている.

これは、フィッティングの対象とした沈下曲線において、式(1)の第2項で示される漸進沈下過程に移行している場合は Fit-1 が適しており、逆に初期沈下が継続している場合はFit-2 が適していることを示している.

これにより, Fit-1 とFit-2 の両者による誤差を比較する ことで,初期沈下の収束をある程度は判定できる可能性 が示唆された.

(2) 沈下進み係数のモデルごとの誤差

冒頭でも述べた通り,道床沈下抑制工法等の検証にお いては,式(1)に示すβが用いられている.

これよりすべてのモデルのシミュレーション結果より、 載荷100回までの沈下曲線の β 値と載荷200回まで沈下曲 線の β 値を**表-4**に示す.

表より各β値の標準偏差の変動率は、載荷100回目ま での沈下曲線ではモデルAグループで35.7%、モデルBグ ループで47.6%であるのに対して、載荷200回目の沈下曲 線では、各グループそれぞれ22.2%と21.8%となる.こ れより、いずれのグループにおいても載荷回数が増加す ることで変動率が収束すると考えられる.

表-4	・ モデル A,	Bグループの	β値の変動率

		載荷100回		載荷200回	
		₿値	変動率 %	₿値	変動率 %
エデル.	A1	0.022	35.7	0.020	22.2
	A2	0.045		0.028	
	AЗ	0.058		0.035	
エデル	B1	0.085	47.6	0.065	21.8
	B2	0.190		0.088	
200-2	В3	0.067		0.052	

6. まとめ

初期の締固め度の異なる複数の離散体モデルを用いて 繰返し載荷シミュレーションを行い,初期沈下過程にお ける道床バラスト層の沈下量や密度・配位数の分布のバ ラツキについて観察し,更に2通りの沈下予測式を用い て沈下曲線のフィッティングを行った結果,下記の傾向 が得られた.

- 道床バラスト層の初期沈下量のバラツキは、初期の締 固め度つまり見かけの密度が大きい方が小さくなるが、 粒子配置によっては、見かけの密度が大きくても、初 期沈下が大きくなることがある。
- 2) 道床沈下曲線において初期沈下量が収束しつつあるス テージにおいては、道床バラスト層全体において、密 度は1.67 g/cm³、配位数は2.0を超えた値となる.
- 3) 2種類の道床沈下予測式において載荷50回までの沈下 曲線から載荷100回目の沈下量を予測し,実際の沈下 量との誤差を比較した結果,初期沈下が収束する前の 過程ではべき乗近似式による予測値の誤差が,初期沈 下が収束しつつある過程では載荷回数に対する一次の 項を含む式による予測値の誤差が,より小さくなる傾 向が示された.

4)各モデルグループ3ケースずつのβ値の変動率は、載荷200回目で20%程度となった。この変動率と載荷回数およびモデル数を比較することで、より精度の高い推定のために必要な載荷回数やモデル数を検討することも可能といえる。

なお、初期沈下収束判定の精度を向上させる上では、 更に繰返し載荷シミュレーションの載荷回数を確保する と同時に、既往の実験結果との比較も必要であり、今後 の課題である.

参考文献

- 1) 名村明ほか:有道床軌道の道床沈下の定量化に関する 基礎的検討,,鉄道総研報告 Vol.7 No.10 pp.47-54,1993
- 2) 須長誠, 榎本秀明: ラジオアイソトープを用いた道床 バラストの密度測定, 鉄道総研報告, vol6, No10, pp47-54, 1992
- 3) 河野昭子,松島亘志:離散体モデルを用いた道床バラス ト層の変形挙動解析,鉄道総研報告 Vol.28 No.12 pp.41-46,2014
- 4) 名村明,木幡行宏,三浦清一:道床バラストの沈下量 予測式に関する検討,第 38 回地盤工学研究発表会講演 論文集,2003

(2019.4.5 受付)

NUMERICAL EVALUATION OF INFLUENCE OF BALLAST COMPACTNESS ON VARIANCE OF BALLAST INITIAL SETTLEMENT

Akiko KONO

The cofficcient of ballast settlement during gradual settlement process after initial settlement has been used to evaluate the effects of countermeasure for reducing ballast deterioration. This is because a slight difference of the initial grains disposition influence on the ballast settlement remarkably. Therefore full-scale cyclic loading tests are demanded to have enough cycles for the purpose. Then the author made plural discrete element models that have equivalent degrees of compactness and observed the change and variance of ballast settlement from macro view and ballast deformation from micro view. In addition, the author evaluated the precision of ballast settlement prediction methods during initial settlement stage.