1505 累積損傷度理論に基づくバラスト軌道の塑性変形簡易解析法

学 [土]	〇亀井	威彦	(北海道大学)	正 [土]	石川	達也	(北海道大学)
正 [土]	関根	悦夫	(鉄道総合技術研究所)	正 [土]	三浦	清一	(北海道大学)

A simple cyclic plastic deformation analysis of ballasted track by cumulative damage model

Takehiko KAMEI, Hokkaido University. Kita 13, Nishi 8, Kita-ku, Sapporo City Tatsuya ISHIKAWA, Hokkaido University. Etsuo SEKINE, Railway Technical Research Institute Seiichi MIURA, Hokkaido University.

This paper presents a simple cyclic plastic deformation analysis of ballasted track subjected to cyclic loads in terms of the strength and deformation of railroad ballast. A new analytical procedure with linear elastic FEM considering the cumulative strain derived from cyclic triaxial compression test results of railroad ballast was proposed. By comparing real-scale model test of ballasted track with the analytical results, and it was revealed that the analytical procedure could roughly estimate the residual settlement of railroad ballast under cyclic loads.

Keywords :: cumulative damage model, cyclic plastic deformation, ballasted track, FEM

1. はじめに

バラスト軌道は、列車荷重が繰り返し作用することで バラスト道床(以下「道床」と称す)に不同沈下が生じ る.このため効率的な維持管理を行うには道床の沈下特 性を解明する必要がある.そのための解析的研究として、 石川・関根らが累積ひずみ特性を考慮した弾性 FEM 解 析を用いた簡易な塑性変形挙動解析方法を提案している ¹⁾.しかし、提案された解析方法は二次元平面ひずみ状 態を仮定し、新品バラストを用いているため、実軌道へ の適用が限られている.そこで本研究では、磨耗させた バラストを用いた実物大模型試験結果²⁾を累積ひずみ特 性を考慮した三次元弾性 FEM 解析で再現し、より実現 象に即した簡易な塑性変形挙動解析方法を提案する.

2. 累積損傷度理論に基く FEM による累積変形解析 2.1 累積ひずみ特性

既往の研究¹⁾では、繰返し三軸試験結果を用いて、バラストの累積ひずみ特性を式(1)のように表している.

$$\left(\varepsilon_{a}\right)_{\max} = \left(\frac{SR_{d}}{a1\left(a2 - a3 \cdot SR_{s}^{a4}\right) \cdot N_{c}^{a5}}\right)^{mont}$$
(1)

ここで, $(\epsilon_a)_{max}$:累積軸ひずみ, $al \sim a7$:係数, SR_s : 初期せん断応力比, $SR_s = \sigma_s/(2\sigma_m)$, SR_d :動的せん 断応力比, $SR_d = \sigma_d/(2\sigma_m)$, σ_s :初期軸差応力, σ_d : 繰返し応力振幅, σ_m :平均主応力

本研究では、磨耗度の異なるバラスト試料に対する大型繰返し三軸試験と実物大模型試験結果²⁾をもとに、式(1)の係数 al~a7 を同定し,累積軸ひずみ(ɛ_a)max</sub>を求めた. この際,係数 al は繰返し荷重作用下の粒子配列を表すと 考え,粒子摩耗度の指標である偏角関数値²⁾と al が線形 関係にあると仮定した.なお、本研究では、バラストの 累積ひずみ特性を考慮し、道床を表す FEM 要素の変形 係数を低下(損傷)させて繰返し載荷時の道床の弾塑性 変形量を推測する方法を「累積損傷度理論」と称する.

2.2 解析モデル

実物大模型試験²⁾を模擬したまくらぎ中央を中心とし た 1/4 対称三次元モデルの概略を Fig.1 に, FEM の静的 線形弾性解析で用いる解析パラメータを Table 1 に示す. このうち、まくらぎと路盤部の材料定数は模型試験²⁾で 使われた材料と同様の値を設定した.また,道床の密度 とポアソン比,および初期安定解析・初期応力解析時の 変形係数(初期変形係数)は,繰返し三軸試験結果 2)を 参考にして設定した. なお, 解析は新品バラスト(磨耗 度 O)と実軌道での使用を想定し磨耗させたもの二種類 (磨耗度 A, 磨耗度 B)の計三種類を用いた実物大模型 試験を対象として行ったが, 各解析をそれぞれ Analysis O, Analysis A, Analysis B と称す. Table 1 で Analysis A の初期変形係数が他の条件よりも大きいのは、粒子が適 度に磨耗され、粒子配列が良くなった為と考えられる. 解析モデルの境界条件は、底面完全固定・4 側面水平方 向固定とした.また、道床とまくらぎの間および道床と 路盤の間にジョイント要素を挿入し両者との不連続性を 考慮した.荷重条件は,模型試験との整合性をとるため, 最大鉛直荷重 Pmax= 34.3kN を初期荷重 Ps=19.6kN と繰返 し荷重 Pd=14.7kN に分け, 1/4 モデルであることを考慮し て Fig.1 のように載荷した.



[No.09-65] 日本機械学会第16回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集 [2009-12.2~4. 東京]

× 06. Ver1

Table 1	解析パラ	メータ
---------	------	-----

要素名 まくらぎ		密度 (t/m [*])	変形係数 (MPa)	ホアソン比	
		2.52	35000	0.17	
道床	Analysis O, B	1.59	180*	0.49	
	Analysis A	1.59	200*	0.49	
路盤	アスファルト	2.30	3000	0.30	
	粒調砕石	2.23	180	0.30	
	砂質土	1.87	67	0.30	

*初期変形係数

2.3 累積変形解析

FEM 解析における道床の変形係数の設定方法および 弾塑性変形量の推定方法の概略を Fig.2 に示す.ここで, 損傷後の変形係数(軟化変形係数 E_N(n)) はバラストの 累積ひずみ特性が式(1)のように表されることから,式(2) により算定する.

E_N(n)) =(σ_s +σ_d)/(ε_a)_{max} (2) ただし,道床以外の部材は繰返し載荷により損傷しない と考え,道床の変形係数以外は材料定数を変更しないで FEM 解析を行った.



3. 解析結果

Fig.3 はまくらぎ上面での残留変位量 u と N_cの関係を 解析結果と実験結果²⁾で比較したものである.ここで, 解析結果から得られる値は弾塑性変位量 u_P であること から,(各載荷回数 N_cでの弾塑性変位量 u_P)-(N_c=1 で の弾塑性変位量 u_P)を残留変位量 u と仮定している.図 から,解析結果の残留変位量 u は N_cの増加とともに増加 していることがわかる.また,各 N_cで解析結果の u_P と 実験結果の値を比べると,多少の増減は見られるものの, 摩耗度に依らず解析結果は実験結果の残留変位量傾向を 充分に捉えている.Fig.4 は,Analysis O の載荷点を基準 にした線路横断方向の道床の繰返し載荷 4,000 回目と 40.000 回目の軟化変形係数の分布をそれぞれ示したもの である.同図では,色の濃い部分ほど載荷によって損傷 し、変形係数が初期変形係数より低下した要素を表して いる.図から、鉛直荷重の載荷による道床の損傷はまく らぎ直下およびまくらぎ端部で激しく、まくらぎ直下で はまくらぎ下面から離れるに従い、損傷の具合は減少す ることがわかる.また、Fig.4(a)とFig.4(b)を比較すると、 載荷40.000回の方が明らかに損傷している.以上のよう な結果が得られたことは、実物大模型試験における道床 の繰返し塑性変形挙動をバラストの室内要素試験を通し て推定する手法の妥当性を示すものである.ただし、現 象のモデル化方法や解析手法の妥当性については今後さ らに検討を要する.



Fig.4 Analysis O の軟化変形係数の分布(単位: MPa)

4. まとめ

実物大模型試験を模擬した FEM の三次元累積変形解 析を行い,実軌道での使用を想定し磨耗させたバラスト を用いた試験結果も再現できたことから,より実現象に 即したバラスト軌道の繰返し荷重作用下の塑性変形量も 簡易な線形弾性解析で比較的精度良く推定できることが わかった.今後解析精度の向上とバラスト材料の変更等 解析条件を変化させた場合の適用性について検討する予 定である.

参考文献

- 関根悦夫,石川達也,三浦清一:繰返し移動荷重を 受ける粒状材料の累積損傷度理論による塑性変形解 析,土木学会舗装工学論文集,第12巻,pp1-8,2007.
- 関根悦夫,河野昭子,長戸博,鬼頭昭人:道床バラ ストの磨耗過程における強度・変形特性,鉄道総研 報告 Vol.16, No.4, pp.23-28, 2002.