

Cycle-jump 型構成モデルを用いた鉄道用バラスト材の繰返し変形解析

新潟大学大学院自然科学研究科 学生員 山田 啓太
 新潟大学大学院自然科学研究科 正会員 紅露 一寛
 新潟大学工学部建設学科 正会員 阿部 和久

1. はじめに

今日、わが国の鉄道では、荷重分散、排水性能、騒音振動低減を目的として、軌道にバラスト道床を敷設することが一般的である。バラスト道床は安価に施工できる長所を有するが、列車の繰返し走行によって残留変位が累積し、最終的に道床沈下などの軌道破壊に至ってしまう。軌道保守上の重要項目である道床沈下量を評価するにあたっては、簡易な経験式を用いることが一般的であるが、道床内部の運動状態を評価することは不可能である。そこで当研究室ではこれまで、解析的アプローチにより道床バラストの定量予測および変形機構の解明、特に、弾塑性連続体モデルである下負荷面モデル¹⁾や、hypo-plastic モデル²⁾の適用可能性について検討してきた。しかし、これらのモデルを採用しても載荷履歴をもれなく追跡せねばならず、実用上計算負荷は小さくない。そこで、疲労損傷度解析などで用いられ、繰返し各回での残留変形のみを評価する cycle-jump 型構成モデルの適用可能性について検討する。

2. Cycle-jump 型構成モデル

本研究では、バラスト材を対象に文献³⁾で示されている cycle-jump 型構成モデルを用い、繰返し各回における残留変形のみを評価する。応力は繰返し載荷回数 N の履歴依存性を有するものと仮定し、応力の変化速度は次の垂弾性構成式で与える。

$$\frac{d\sigma_{ij}}{dN} = D_{ijkl}(p) \frac{d\varepsilon_{kl}^e}{dN} \quad (1)$$

ここで、 ε_{kl}^e はひずみの弾性成分、弾性定数 D_{ijkl} は圧力依存性を考慮して、

$$D_{ijkl} = \frac{3K_t\{(1-2\nu)(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk}) + 2\nu\delta_{ij}\delta_{kl}\}}{2(1+\nu)} \quad (2)$$

$$K_t = K_{ref}(p/p_{ref})^{1-n^e}, \quad p < 0$$

で与える。 ν はポアソン比、 $p_{ref} (< 0)$ は参照応力、 K_{ref}, n^e は材料パラメータである。また静水圧応力 p 、相当応力 q 、 N_{ij}^f, N_{ij}^c は次式で与えられる。偏差応力 s_{ij} は $p = \frac{1}{3}\sigma_{kk}$, $q = \sqrt{\frac{3}{2}s_{ij}s_{ij}}$, $s_{ij} = \sigma_{ij} - p\delta_{ij}$ と定義する。一方、塑性ひずみ ε_{kl}^p の変化速度は、 $\kappa^p, \varepsilon_{vol,c}^p$ をそれぞれ摩擦滑り、体積変化に関する塑性乗数、 N_{ij} を

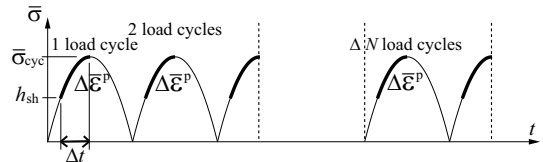


図1 繰返し載荷過程における塑性変形発生の仮定
 流動方向を規定するテンソルとして次の流動則で与える。

$$\frac{d\varepsilon_{ij}^p}{dN} = \frac{d\varepsilon_{ij}}{dN} - \frac{d\varepsilon_{ij}^e}{dN} = \frac{d\kappa^p}{dN} N_{ij}^f + \frac{d\varepsilon_{vol,c}^p}{dN} N_{ij}^c \quad (3)$$

上添字 f, c はそれぞれ摩擦滑り、圧縮に関する量を示す。

次に塑性乗数について考える。バラストに生じる残留変形は、図1に示すように、所定の応力レベル h_{sh} を超過することにより生じるものとし、釣合状態は繰返し各回の荷重または変位振幅に関して考える。よって2種類の塑性乗数の発展則は、 h_{sh} を shakedown 応力の特性値として

$$\frac{d\kappa^p}{dN} = \alpha^f \left\langle \left(-\frac{q}{p} \right) - h_{sh}^f(\kappa^p) \right\rangle^{\gamma^f}$$

$$\frac{d\varepsilon_{vol,c}^p}{dN} = \alpha^c \left\langle \left(\frac{p}{p_0} \right) - h_{sh}^c(\varepsilon_{vol,c}^p) \right\rangle^{\gamma^c} \quad (4)$$

で与える。ここで、 $\langle \cdot \rangle$ は Macauley bracket, $\alpha^f, \gamma^f, \alpha^c, \gamma^c$ は材料パラメータであり、応力超過量評価の基準値となる材料関数 h_{sh}^f, h_{sh}^c は次式で与えられる。

$$h_{sh}^f(\kappa^p) = h_0 + (h_m - h_0)[1 - e^{-\eta^f(\kappa^p - \kappa_0^p)}]$$

$$h_{sh}^c(\varepsilon_{vol,c}^p) = 1 + \eta^c(\varepsilon_{vol,c}^p - \varepsilon_{vol,c,0}^p) \quad (5)$$

ここで、 h_0, h_m, η^f, η^c は材料パラメータである。

また N_{ij}^f, N_{ij}^c は次式に示す塑性ポテンシャル g^f, g^c の勾配によって与える。 g^f, g^c を次式で与えると、

$$g^f(q, p, \kappa^p) = q + d^f(\kappa^p)p$$

$$g^c(p, \varepsilon_{vol,c}^p) = -p + h_{sh}^c(\varepsilon_{vol,c}^p)p_0$$

$$d^f(\kappa^p) = d_0 + (d_m - d_0)[1 - e^{-\zeta^f(\kappa^p - \kappa_0^p)}]$$

$$\quad (6)$$

$$N_{ij}^f = \frac{\partial g^f}{\partial q} \frac{\partial q}{\partial \sigma_{ij}} + \frac{\partial g^f}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{3s_{ij}}{2q} + d^f \frac{1}{3} \delta_{ij}$$

$$N_{ij}^c = \frac{\partial g^c}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial \sigma_{ij}} = -\frac{1}{3} \delta_{ij} \quad (7)$$

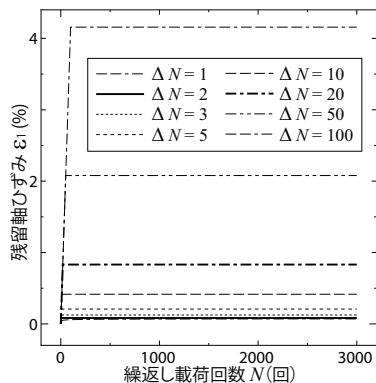
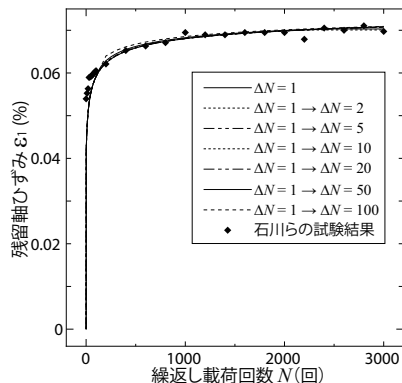
図2 残留軸ひずみ図 (ΔN 別の比較)

図3 残留軸ひずみ図 (第100サイクルでステップ幅を変更)

3. 解析結果

いま、石川らの大型繰返し三軸試験⁴⁾を対象とした解析を行う。この試験で用いる試料の粒度はわが国で使用されているバラスト材の粒度分布を考慮しており(均等係数 $U_c = 1.7$)、試験供試体は直径 30cm、高さ 60cm で、圧密排気条件の CD 試験を行っている。また解析条件は、拘束圧 $\sigma_3 = 19.6\text{kPa}$ 、最大主応力比 $(\frac{\sigma_1}{\sigma_3})_{\max} = 5$ 、ポアソン比 $\nu = 0.1$ 、繰返し負荷回数は 3000 回としている。また、材料パラメータは石川らの試験結果⁴⁾の残留軸ひずみ図に適合するように、文献³⁾から h_0 , h_m , η^f を変更した $n^e = 0.35$, $p_{ref} = -100\text{kPa}$, $p_{num}^t = 10\text{kPa}$, $\alpha^f = 5.0 \times 10^{-3}$, $\gamma^f = 4.0$, $\alpha^c = 1.0 \times 10^{-3}$, $\gamma^c = 3.0$, $p_0 = -50\text{kPa}$, $h_0 = 0.89$, $h_m = 2.04$, $\eta^f = 900$, $d_0 (= d_m) = -0.50$, $\eta^c = 2000$, $\zeta^f = 80$ を用いる。まず、残留軸ひずみ ε_1^p の発現に対し、ステップ幅 ΔN が結果に及ぼす影響を検討する。図2に示すように、 ΔN を2以上に定めると、解析第1ステップで全ての残留ひずみが生じ、それ以降のステップでは残留ひずみの累積が全く認められなかった。これは、本モデルの cycle-jump の概念と、繰返し載荷初期段階における塑性ひずみの進展との整合がとれていないことが原因と思われる。第1ステップで過大な塑性ひずみが生じ、それにより材料モデルのひずみ硬化も実現象より早く進展したことで、第2ステップ以降で塑性ひずみが累積しなかったと考えられる。以上の結果から、塑性変形の進展傾向に応じてステッ

表1 塑性体積ひずみ増分 $\Delta\varepsilon_v^p(\%)$

Cycle	解析結果	試験結果
1	1.78×10^{-2}	7.0×10^{-3}
2	4.09×10^{-4}	
2452	3.87×10^{-7}	
3000	0	5.0×10^{-4}

プ幅 ΔN の大きさを可変に設定して解析を行うこととした。試験結果⁴⁾から第100サイクル以降の残留ひずみ増分が微小であると判断し、増分が著しい初期段階では ΔN を小さく ($\Delta N = 1$)、それ以降は計算効率を考慮して大きく設定した。結果を図3に示す。

全サイクルで $\Delta N = 1$ を用いた解析と、第100サイクルで変更した各解析の曲線がほぼ同じになることから、ステップ幅の切り替えは解析時間の短縮を図る上で非常に有効な手段であると言える。

次に、残留体積ひずみの発現傾向について検討する。離散化誤差を最小にするため、ステップ幅は $\Delta N = 1$ を用いる。残留体積ひずみ増分 $\Delta\varepsilon_v^p$ の解析結果と試験結果を表1に示す。解析結果では、1サイクル後の残留ひずみ増分が非常に大きく、石川らの試験結果⁴⁾の約2.5倍である。増分は急激に減少していき、3000サイクル後では試験結果では比較的大きい増分が生じているが、解析では0となっている。以上のことから、実現象よりも解析の方が早く shakedown 状態に到達してしまっていると考えられる。しかし、これは材料パラメータの値にも依存するため、慎重な議論が必要である。

4. おわりに

本研究では、バラスト道床沈下量予測における cycle-jump 型弾塑性構成モデルの適用可能性について検討した。バラスト材の大型繰返し三軸試験の数値実験を行い、残留軸ひずみ、体積ひずみの評価精度を調べた。その結果、残留ひずみの発現が大きい段階では、ステップ幅 ΔN を小さくとり、繰返しサイクルの進展に応じて ΔN を大きく選択することが、効率良く解析を進めるためには必須であることが分かった。

参考文献

- 1) 福津佑太, 紅露一寛, 阿部和久: 回転硬化を考慮した下荷荷面モデルによる有道床軌道の繰返し変形解析の試み, 土木学会第63回年次学術講演会講演概要集, 4-068, 2008.
- 2) 紅露一寛, 嘉数東陽, 阿部和久: 鉄道用バラスト材の繰返し変形解析のための時間域均質化法定式化, 応用力学論文集, Vol.11, pp.149-158, 2008.
- 3) Suiker, A.S.J., de Borst, R.: A numerical model for the cyclic deterioration of railway tracks, *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, Vol.57, pp.441-470, 2003.
- 4) 石川達也, 須長誠, 董軍, 名村明: 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/-40, pp.169-178, 1997.9.