

バラスト材を対象とした大型三軸試験の弾塑性解析

新潟大学大学院自然科学研究科 学生員 嘉数 東陽
 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

わが国の鉄道の大部分は、バラスト材を用いた有道床軌道が採用され、列車走行時の振動・騒音の低減を図っている。しかし、軌道部分は列車の繰り返し走行によって軌道狂いが蓄積する。有道床軌道の場合、道床バラストの沈下残留変形の蓄積が軌道狂いの主要因であることもあって、道床バラスト部の沈下量予測は、経済的かつ合理的な保守管理の為に必須となる。そこで本研究では、連行荷重の繰り返し作用による道床バラストの沈下量予測手法を構築するための第一段階として、Liu の弾塑性モデル¹⁾に基づく弾塑性解析を行い、三軸圧縮試験結果²⁾の再現を試みた。

2. バラスト材の構成則

バラスト材が、構造物の代表長さが 10cm～数 m 程度である道床部の構成材として用いられることを考えると、粒子集合体としてモデル化する選択肢も考えられる。しかし、本研究では弾塑性連続体としてモデル化し、塑性流動方向を規定する際の取り扱いの煩雑さを避ける目的で Liu の弾塑性構成モデル¹⁾を採用する。なお、弾性域での構成則は歪弾性モデル³⁾で定義し、粒子集合体において圧縮変形の進展に伴って変形係数が漸増することを考慮する。

(1) 歪弾性モデル

歪弾性モデルでは、応力速度 $\dot{\sigma}$ と弾性ひずみ速度 $\dot{\epsilon}^e$ との間の構成関係を規定する。本研究では、変形係数が平均応力 $p = \sigma_{mm}/3$ に依存するものとして次式で与える。

$$\begin{aligned}\dot{\sigma}_{ij} &= D_{ijkl}(\dot{\epsilon}_{kl} - \dot{\epsilon}_{kl}^p), \\ D_{ijkl} &= \frac{3K_t}{2(1+\nu)}[(1-2\nu)(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk}) + 2\nu\delta_{ij}\delta_{kl}], \\ K_t &= K_{ref} \left(\frac{p - p_{num}}{p_{ref}} \right)^{1-n_e}, \quad K_{ref} = \frac{E_{ref}}{3(1-2\nu)}\end{aligned}\quad (1)$$

ここで、 $\dot{\epsilon}^p$ は塑性ひずみ速度、 E_{ref} 、 ν はバラスト材のヤング率、Poisson 比の公称値であり、 p_{ref} 、 p_{num} 、 n_e は制御パラメータである。

(2) 降伏関数と流動則

本研究で採用する Liu の弾塑性モデルでは、弾性/塑性状態の判定の際に次の降伏関数 f を用いる。

$$\begin{aligned}f &= \frac{J_2}{p_a^2} - \left[-\alpha \cdot \left(\frac{I_1 + R}{p_a} \right)^n + \gamma \cdot \left(\frac{I_1 + R}{p_a} \right)^g \right] F_s, \\ F_s &= \left(1 - \frac{3\sqrt{3}}{2} \beta \cdot J_3 \cdot J_2^{-\frac{3}{2}} \right)^m,\end{aligned}\quad (2)$$

ここで、応力テンソルの不変量である I_1 、 J_2 、 J_3 は、偏差応力を $\mathbf{S}$ として、 $I_1 = \sigma_{mm}$ 、 $J_2 = S_{kl}S_{lk}/2$ 、 $J_3 = S_{kl}S_{lm}S_{mk}/3$ で与えられる。また、 p_a は大気圧（絶対圧）である。 $\beta, \gamma, g, n, m, R$ は f の形状を制御するパラメータで、それらの値は所定の拘束圧の下で正負の軸差応力を生じさせる三軸試験結果から設定可能である。なお、ひずみ硬化挙動を規定する α は次式で与える。

$$\begin{aligned}\alpha &= \frac{a_1 \xi_v}{\xi_v + \xi_d} \exp(b_1 \xi_v) \\ &+ \frac{a_1 \xi_d}{\xi_v + \xi_d} \left[1 - \frac{(M')^2}{27\gamma} \left(\frac{\xi_d}{d_1 + \xi_d} \right)^2 \left(\frac{3p_c}{p_a} \right)^{2-g} \right],\end{aligned}\quad (3)$$

ただし、 a_1, b_1, d_1, M' は硬化挙動の制御パラメータ、 p_c は等方圧密の履歴によって決まる平均応力値である。 ξ_d 、 ξ_v は全塑性ひずみ増分 $d\epsilon_{ij}^p$ 、偏差塑性ひずみ増分 $d\epsilon_{ij}^p = d\epsilon_{ij}^p - d\epsilon_{kk}^p/3$ から、次式で定義される。

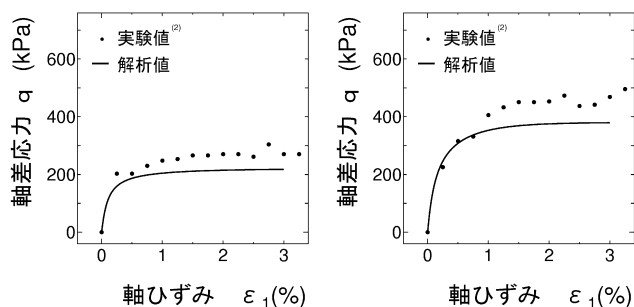
$$\xi_d = \int (d\epsilon_{ij}^p \cdot d\epsilon_{ij}^p)^{\frac{1}{2}}, \quad \xi_v = \int \frac{1}{\sqrt{3}} (d\epsilon_{kk}^p \cdot d\epsilon_{kk}^p)^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

流動則は、体積ひずみの過大評価を避ける目的で、非関連流動則で与える。流動パラメータを λ 、塑性ポテンシャルを Q として、次式を得る。

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \lambda \frac{\partial Q}{\partial \sigma_{ij}}, \quad (5)$$

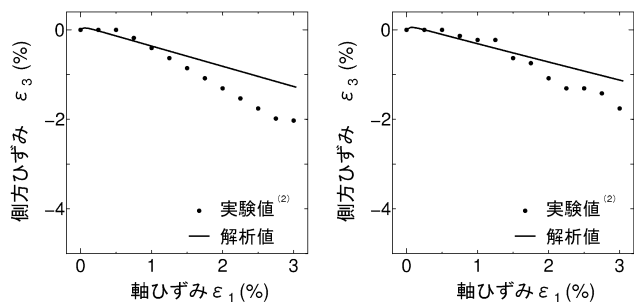
$$\begin{aligned}Q &= \frac{J_2}{p_a^2} - \left[-\alpha_Q \cdot \left(\frac{I_1 + R}{p_a} \right)^n + \gamma \cdot \left(\frac{I_1 + R}{p_a} \right)^g \right] F_s, \\ \alpha_Q &= \alpha + \kappa_c(\alpha_0 - \alpha)(1 - \chi_v), \quad \chi_v = \xi_v/\xi.\end{aligned}\quad (6)$$

ここで、 α_0 は流動開始時の α で与えられるものとし、 κ_c は実験結果から定めるパラメータである。また $\xi = \sqrt{\xi_d^2 + \xi_v^2}$ である。上式で定義した f, Q は主応力空間において閉じた曲面になり、平均有効応力が圧縮を示す場合には、 f は少なくとも C^1 連続となり微分可能である。なお、解析においては、後退型 Euler 法に基づく return-mapping 法を適用して応力積分を実行する。



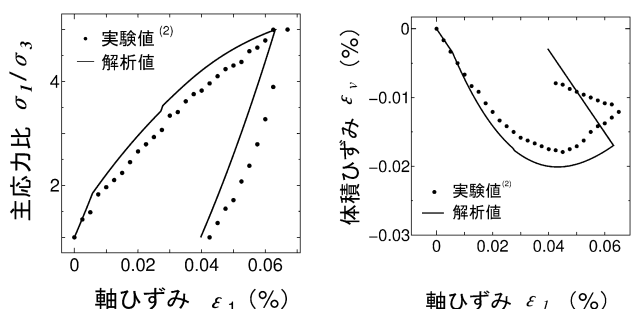
(a) 拘束圧 $\sigma_3 = 39.2$ kPa. (b) 拘束圧 $\sigma_3 = 58.8$ kPa.

図 1 単調載荷試験における軸ひずみ－軸差応力関係



(a) 拘束圧 $\sigma_3 = 39.2$ kPa. (b) 拘束圧 $\sigma_3 = 58.8$ kPa.

図 2 単調載荷試験における軸ひずみ－側方ひずみ関係。



(a) 軸ひずみと主応力比との関係. (b) 軸ひずみと体積ひずみとの関係。

図 3 繰返し試験 1 回目の変形挙動. ($\sigma_3 = 19.6$ kPa, $\sigma_1 = 98$ kPa まで載荷)

3. 実験結果との比較

解析モデルの妥当性を検証するため、名村らが行ったバラスト材の大型三軸試験結果²⁾と解析結果との比較を行った。

大型三軸試験では直径 30cm、高さ 60cm の円柱供試体を用いている。試験は単調載荷試験と繰返し載荷試験が行われた。単調載荷試験方法は所定の拘束圧まで等方圧密を行い、側圧 σ_3 を一定にした状態でひずみ速度 0.1%/分で軸圧 σ_1 を増加させている。一方、繰返し載荷試験の載荷 1 回目は供試体を 19.6kPa まで等方的に圧縮し、 σ_3 を一定にした状態で σ_1 を 98kPa まで手動で加圧した後、等

方応力状態まで除荷を行っている。

まず、単調載荷試験および解析結果の一例として、拘束圧 $\sigma_3 = 39.2$ kPa, 58.8kPa における軸差応力を図 1 に、軸ひずみと側方ひずみとの関係を図 2 にそれぞれ示す。なお、ひずみは圧縮を正として図示している。

これらの図より、軸差応力、側方ひずみとも定性的に矛盾のない解析結果が得られていることがわかる。軸差応力については、実験と解析とを比較すると最大応力値において 50kPa の程度差が生じているが、応力の発現・変化とも本モデルを用いることで比較的精度良く表現できていることがわかる。一方、軸ひずみと側方ひずみとの関係は、軸ひずみ 1%以下の範囲においては解析・実験とで大きな差はない。しかし、変形の進展に伴う塑性変形の蓄積量が大きくなるにつれて、解析モデルにおける側方ひずみの過小評価が顕著となる結果を得た。なお、拘束圧を変えた場合についても検討を行ったが、同様な結果を得た。

次に、繰返し載荷試験 1 回目の変形・応力発現挙動について検討する。軸ひずみ ε_1 と主応力比 σ_1/σ_3 の関係を図 3-(a) に、軸ひずみ ε_1 と体積ひずみ ε_v の関係を図 3-(b) にそれぞれ示す。主応力比については、解析によって評価した最大軸ひずみが実験結果をわずかに下回っているが、変形が非常に小さい段階から塑性変形が発生する傾向を適切に表現できている。載荷・除荷経路も定量的な評価に耐えうる精度で再現できている。一方、体積ひずみについては、実験値に比べ載荷過程の体積ひずみが若干大きく発生しているものの、その変動傾向は表現できている。しかし、除荷時の体積ひずみの変化については解析結果と実測結果との間に小さくない差が生じている。これは弾性域のモデルの選択の影響であることは明らかである。この点の改善についてはバラストにおけるラチェティングの解析手法の構成とあわせて、今後の検討課題としたい。

解析によって、実験で報告された載荷過程において体積ひずみが収縮から膨張へ転じる挙動や、載荷・除荷による軸塑性ひずみ・塑性体積ひずみは適切に評価できている。今後は、バラストのラチェティング現象とそれに伴う塑性変形の蓄積量を効率よく評価する解析手法を、時間域マールスケール法に基づき構成する予定である。

参考文献

- 1) Lui, X., Cheng, X. H., Scarpas, A., Blaauwendraad, J.: Numerical modelling of nonlinear response of soil. Part1: Constitutive model *Int. J. Solid and Struct.*, 42, pp. 1849-1881, 2005
- 2) 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/III-40, 169-178, 1997
- 3) Suiker, A. S. J., de Borst, R.: A numerical model for the cyclic deterioration of railway tracks. *Int. J. Numer. Meth. Engrg.*, 57, pp. 441-470, 2003