

回転硬化を考慮した下負荷面モデルによる有道床軌道の繰り返し変形解析の試み

新潟大学大学院自然科学研究科 学生員 福津 佑太
 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

バラスト道床は、列車の繰り返し走行によって残留変位が累積し、道床上面の沈下に代表される軌道狂いは重要な保守項目となっている。今日、道床内部の繰り返し変形機構の解明を目的として、DEMやDDAなどの不連続体モデル、FEMによる連続体モデルを用いた変形解析が試みられている。本研究では、解析効率を考慮して、下負荷面モデルを構成則に採用した連続体モデルを用いて、バラスト道床の繰り返し変形解析を試みる。

2. 回転硬化を考慮した下負荷面モデル

本研究では、軌道バラスト道床部を連続体とみなし、その弾塑性挙動を回転硬化を考慮した下負荷面モデル¹⁾を用いて表現する。当該モデルでは、弾塑性変形における許容応力空間を規定する降伏曲面(正規降伏面)を定めた上で、現応力点を通りそれと相似な下負荷面を用いて流動則を定義し、塑性負荷の判定を行なう。

まず、微小変形と材料の弾性的性質を仮定し、応力速度・ひずみ速度関係を次式で与える。

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}_{ij} &= E_{ijkl}(D_{kl} - D_{kl}^p), \\ E_{ijkl} &= \left(K - \frac{2}{3}G \right) \delta_{ij}\delta_{kl} + G(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk}), \\ K &= \frac{p + p_{num}}{\gamma}, \quad G = \frac{3(1-2\nu)}{2(1+\nu)}K, \quad p = -\frac{\sigma_{kk}}{3}, \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 σ_{ij} は応力、 ε_{ij} は微小ひずみ、 $D_{kl} = \dot{\varepsilon}_{kl}$ はひずみ速度、 D_{kl}^p は塑性ひずみ速度であり、 ν はPoisson比、 γ 、 p_{num} は材料定数である。

塑性状態の判定は次式で行ない、

$$\begin{aligned} D^p \neq \mathbf{0}: \quad \bar{N}_{ij} E_{ijkl} D_{kl} &> 0, \\ D^p = \mathbf{0}: \quad \bar{N}_{ij} E_{ijkl} D_{kl} &\leq 0, \end{aligned} \quad (2)$$

流動則は下負荷面を塑性ポテンシャルとした関連流れ則で与える。ここで、 \bar{N}_{ij} は現応力点において流動方向の単位量を規定するテンソルとする。

塑性負荷状態においては、式(1)より次の構成関係を与

える。

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}_{ij} &= E_{ijkl}^{(ep)} D_{kl}, \\ E_{ijkl}^{(ep)} &= E_{ijkl} - \frac{(E_{ijrs} \bar{N}_{rs})(\bar{N}_{pq} E_{pqkl})}{D_p + \bar{N}_{\alpha\beta} E_{\alpha\beta\gamma\delta} \bar{N}_{\gamma\delta}}, \end{aligned} \quad (3)$$

なお、本モデルでは、内部状態変数として等方硬化変数 H 、回転硬化変数 β 、相似中心応力 s 、相似比 R を考えることとし、 s 、 β 、 H の発展則と D_p は文献¹⁾に示すように与える。

3. つりあい問題の定式化

本研究では、準静的条件下でのつりあい問題を考える。仮想仕事式が時刻 $t = t_{n+1}$ で成り立つものとして、次式を得る。

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \sigma_{ij}^{(n+1)} \delta \varepsilon_{ij} d\Omega \\ = \int_{\Gamma_t} \bar{t}_i^{(n+1)} \delta u_i d\Gamma + \int_{\Omega} \bar{b}_i^{(n+1)} \delta u_i d\Omega, \end{aligned} \quad (4)$$

ただし、 δu_i は仮想変位、 $\delta \varepsilon_{ij}$ は仮想ひずみであり、 \bar{t}_i 、 \bar{b}_i はそれぞれ作用表面力・物体力であり、 Ω は領域、 Γ_t は表面力規定部分境界である。

ここで、前進 Euler 法により応力積分を処理するものとする、時刻 t_{n+1} で解くべき方程式は

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \delta \varepsilon_{ij} E_{ijkl}^{(ep)}(t_n) \Delta \varepsilon_{kl} d\Omega = \int_{\Gamma_t} \bar{t}_i^{(n+1)} \delta u_i d\Gamma \\ + \int_{\Omega} \bar{b}_i^{(n+1)} \delta u_i d\Omega - \int_{\Omega} \sigma_{ij}^{(n)} \delta \varepsilon_{ij} d\Omega, \end{aligned} \quad (5)$$

となる。なお、 $\Delta \varepsilon_{kl} = \varepsilon_{kl}^{(n+1)} - \varepsilon_{kl}^{(n)}$ であり、解析においては式(5)を有限要素法を用いて逐次解く。応力増分は $\Delta \sigma_{ij} = E_{ijkl}^{(ep)} \Delta \varepsilon_{kl}$ で与える。

4. 解析条件と解析結果

本研究では、実物大バラスト有道床軌道を対象とした繰り返し载荷試験²⁾を解析の対象とした。図1に示す試験軌道において、2本のレール各々に最大20kNの同じ大きさの鉛直荷重を作用させ、その载荷・除荷を繰り返している。なお、载荷は、5kN刻みで最大荷重を漸増させ、20kNに達するまで载荷・除荷を繰り返した。解析においては、載

keywords: バラスト, 下負荷面モデル, 回転硬化, 道床沈下, 繰り返し荷重
 連絡先: 950-2181 新潟市西区五十嵐二の町 8050 番地
 TEL 025 (262) 7274 FAX 025 (262) 7021

表 1 解析における物性値.

バラスト質量密度	$1.74 \times 10^3 (\text{kg/m}^3)$
降伏面形状	$\phi = 31^\circ$
等方硬化	$\rho = 100, \mu = 3.8, \phi_d = 20^\circ$
回転硬化	$b_r = 50, \phi_d = 46.4^\circ$
R の発展	$u_1 = 0.7, u_2 = 4.2$
相似中心の移動	$c_1 = 7.5, c_2 = 1, c_3 = 3$
弾性定数	$\gamma = 9.0 \times 10^{-5}, \nu = 0.15,$ $p_{\text{num}} = 0.01 (\text{kPa})$

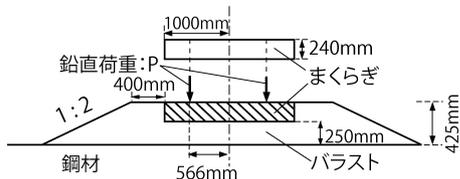


図 1 試験軌道の概略図.

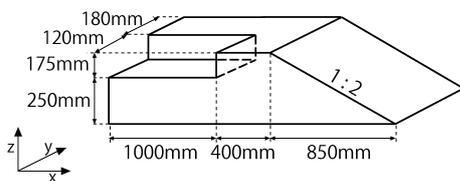


図 2 解析領域.

荷試験に対応する解析領域として図 2 を考えた. 領域境界のうち, $x = 0, y = 0, z = 0$ の面は面外変位拘束とし, まくらぎ形状に対応した凹形状の境界については, まくらぎ下面を変位制御面とした. それ以外の境界面は, 荷重時にまくらぎは剛であると仮定して面外変位拘束面とした. また, 材料定数は表 1 に示す値を用いた. バラストの自重は解析の最初に所定値まで漸増させて作用させた. その後, まくらぎ下面位置に鉛直下向きの強制変位を与え, 下面での反力がまくらぎ重量 (160kgf/本相当) となった時点を繰り返し解析の初期応力・形状に設定した. 繰り返し解析はまくらぎ下面で強制変位を与える変位制御解析とし, 変位増分は $\Delta u = 2.0 \times 10^{-4} (\text{mm})$ とした.

まず, まくらぎ位置での鉛直変位と鉛直荷重との関係を図 3 に示す. 試験結果では, 荷重時には鉛直変位に対して概ね線形に荷重が増加していき, 残留変形が生じても剛性の低下は比較的小さいことがわかる. 一方, 除荷時には, 当初は荷重時の剛性を維持して推移するが, 鉛直荷重が 0 の近くで剛性が急激に低下する. これは, 除荷によってバラスト道床内部の拘束圧が低下することで巨視的弾性係数が小さくなること, それに伴い除荷時にも比較的大きな残留変形が発生することが原因であると考えられる. 解析結果では, 除荷時におけるこの応答が比較的良好に再現されており, 各繰り返し段階での残留変位も概ね同程度となっている. しかし, 弾性応答が実測よりも剛に評価されている上, 荷重時の塑性変形が実際よりも大きく評価されている可能性がある. この点は今後の検討課題としたい.

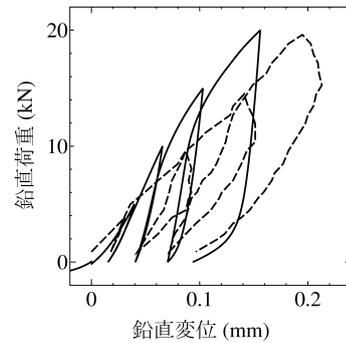


図 3 鉛直変位と鉛直荷重との関係.

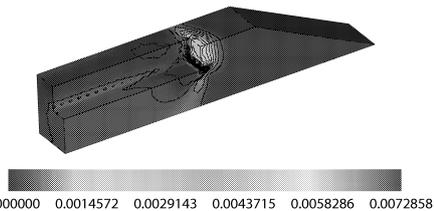


図 4 繰り返し荷重終了時における塑性体積ひずみの分布.

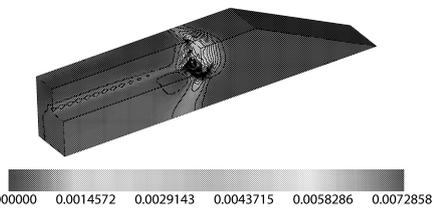


図 5 繰り返し荷重終了時における塑性偏差ひずみの 2 次不変量の分布.

次に, 荷重・除荷の繰り返し過程終了時における塑性体積ひずみを図 4 に, 偏差塑性ひずみの 2 次不変量を図 5 に示す. 道床に繰り返し荷重を作用させることで, ひずみの集中域がまくらぎを設置した応力集中箇所から軌道中心線方向に面的に進展していることがわかる.

5. おわりに

今回の解析では, 先行荷重超過時・除荷過程における荷重ゼロ時点近傍における剛性の大きな低下, 残留変位の蓄積傾向について良好な再現を見た. 下負荷面モデルは実軌道での繰り返し荷重発生時に対しても, 荷重・変位レベルでの定性的な再現性を有することが確認できた. しかし, 繰り返し荷重の過程では道床内部に破壊面が生じているとも解釈できる解析結果となっている. この挙動は実験において必ずしも観測されていないようであり, 今後, 境界条件の設定に関する検討やひずみの局所化を回避する取り扱いの導入などに取り組むなどして, 改善を図る必要があると思われる.

参考文献

- 1) 橋口公一, 上野正実, 陳 忠平: 下負荷面および回転硬化の概念に基づく土の弾塑性構成式, 土木学会論文集, No.547, III-36, pp.127-144, 1996.
- 2) 石川達也, 名村 明: 実物大試験による道床バラスト部繰り返し変形特性の検討, 土木学会論文集, No.512, IV-27, pp.47-59, 1995.