

下負荷面モデルによる鉄道用バラスト材の 繰り返し変形挙動の定量評価

新潟大学大学院自然科学研究科 学生員 梶原 宗光
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

日本における線路のほとんどがレール・まくらぎ・バラスト道床・路盤で構成された有道床軌道である。列車の繰り返し通過により、バラスト道床部および路盤部に漸進的な塑性変形が生じ、軌道狂いを誘発する。しかし、これまでの沈下量予測では、経験式に頼らざるを得ない状況にある。

本研究では、繰り返し荷重作用時における道床部の変形挙動を、回転硬化を導入した下負荷面モデルを用いて評価し、その有用性について検討する。

2. 回転硬化を考慮した下負荷面モデル

本研究では、回転硬化を導入した下負荷面モデル¹⁾を用いて変形挙動をモデル化する。回転硬化は、移動硬化によってパウシンガー効果を表現できない地盤材料の塑性モデルにおいて、主応力空間内での降伏曲面の回転により塑性ラチェット現象を表現するために導入する。

まず、ストレッチング(ひずみ速度) $\mathbf{D}$ が $\mathbf{D} = \mathbf{D}^e + \mathbf{D}^p$ ($\mathbf{D}^e$:弾性成分, $\mathbf{D}^p$:塑性成分)に加算分解できるものとする。 $\mathbf{D}^e$ は応力速度 $\dot{\boldsymbol{\sigma}}$ に対して次の関係を有している。

$$\mathbf{D}^e = \mathbf{E}^{-1} : \dot{\boldsymbol{\sigma}} \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{E}$ は弾性係数テンソルである。

下負荷面モデルでは、古典的弾塑性論における降伏曲面を正規降伏面と呼び、 $\hat{\boldsymbol{\sigma}}$ を正規降伏面上の応力、 $\boldsymbol{\beta}$ を回転硬化変数、 H を等方硬化変数として次式で定義する。

$$f(\hat{\boldsymbol{\sigma}}; \boldsymbol{\beta}) = F(H), \quad F(H) = F_0 \exp\left(-\frac{H}{\rho - \gamma}\right) \quad (2)$$

ここで、 ρ, γ は材料パラメータ、 F_0 は F の初期値である。

さらに、正規降伏面と相似形で、かつ現時点での応力点 $\boldsymbol{\sigma}$ がこの曲面上に存在するように新たな降伏面を導入し、下負荷面と呼ぶ。下負荷面上の応力を $\bar{\boldsymbol{\sigma}}$ として

$$f(\bar{\boldsymbol{\sigma}}; \boldsymbol{\beta}) = RF(H) \quad (3)$$

のように定義する。なお、 $\bar{\boldsymbol{\sigma}} = \boldsymbol{\sigma} - (1 - R)\mathbf{s}$ ($\mathbf{s}$; 2つの曲面の相似中心)となり、 R ($0 \leq R \leq 1$)は2曲面の相似

比である。相似中心面は、2曲面と同じように次式で表される。

$$f(\mathbf{s}; \boldsymbol{\beta}) = R_s F(H) \quad (4)$$

R_s は正規降伏面に対する相似中心面の比である。

$\boldsymbol{\beta}, \mathbf{s}, H$ の発展則は次式で記述できる。

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{\beta}} = b_r \|\mathbf{D}^p\| \|\bar{\boldsymbol{\eta}}\| \bar{\boldsymbol{\eta}}, \\ \dot{\mathbf{s}} = c \|\mathbf{D}^p\| \bar{\boldsymbol{\sigma}} + \frac{1}{F} \{ \dot{F} - \text{tr}(\frac{\partial f(\mathbf{s}; \boldsymbol{\beta})}{\partial \boldsymbol{\beta}} \dot{\boldsymbol{\beta}}) \} \mathbf{s}, \\ \dot{R} = U(R) \|\mathbf{D}^p\|, \\ \dot{H} = D_v^p + \mu \|\mathbf{D}^p\| (m_d - \frac{\|\boldsymbol{\sigma}^*\|}{p}) \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 b_r, c, μ は材料パラメータで、 $\bar{\boldsymbol{\sigma}}, \bar{\boldsymbol{\eta}}, \bar{\boldsymbol{\eta}}_b, m_d$ の定義は文献¹⁾と同一とした。ただし、 $\mathbf{D}^p$ は塑性偏差ストレッチング、 D_v^p は塑性体積ストレッチングであり、 U は単調減少関数である。 $R > 1$ では、 $U < 0, \dot{R} < 0$ となり、応力は自動的に正規降伏面内に引き戻される。

流動則は関連流動則で与え、塑性ストレッチング $\mathbf{D}^p$ は次式で表される。

$$\begin{aligned} \mathbf{D}^p &= \lambda \bar{\mathbf{N}}, \quad \bar{\mathbf{N}} = \frac{1}{\psi} \frac{\partial f(\bar{\boldsymbol{\sigma}}; \boldsymbol{\beta})}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \\ \psi &= \left\| \frac{\partial f(\bar{\boldsymbol{\sigma}}; \boldsymbol{\beta})}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \right\| \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、正值の比例定数 λ は次式で与える。

$$\lambda = \frac{\text{tr}(\bar{\mathbf{N}} \cdot \mathbf{E} : \mathbf{D})}{D_p + \text{tr}(\bar{\mathbf{N}} \cdot \mathbf{E} : \bar{\mathbf{N}})} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} D_p &= \text{tr}(\bar{\mathbf{N}} \bar{\mathbf{a}}) \\ &- \frac{RF}{\psi} \left\{ \frac{h}{\rho - \gamma} + \frac{1}{RF} \text{tr}(\frac{\partial f(\bar{\boldsymbol{\sigma}}; \boldsymbol{\beta})}{\partial \boldsymbol{\beta}} \mathbf{b}) - \frac{U}{R} \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{a}} &= (1 - R)\mathbf{z} - U\mathbf{s}, \quad \mathbf{z} = \dot{\mathbf{s}}/\lambda, \\ h &= \dot{H}/\lambda, \quad \mathbf{b} = \dot{\boldsymbol{\beta}}/\lambda \end{aligned} \quad (9)$$

なお、負荷条件は次式で与える。

$$\mathbf{D}^p \neq \mathbf{0} : \text{tr}(\bar{\mathbf{N}} \cdot \mathbf{E} : \mathbf{D}) > 0 \quad (10)$$

$$\mathbf{D}^p = \mathbf{0} : \text{tr}(\bar{\mathbf{N}} \cdot \mathbf{E} : \mathbf{D}) \leq 0 \quad (11)$$

表 1 材料パラメータ

降伏曲面形状			$\phi = 31^\circ$
硬/軟化	等方	体積	$\rho = 100.0$
		偏差	$\mu = 3.8, \phi_d = 20^\circ$
	回転		$b_r = 39, \phi_b = 46.4^\circ$
R の発展			$u_1 = 0.71, u_2 = 2.0$
相似中心の移動			$c_1 = 7.5, c_2 = 1, c_3 = 3$
弾性定数			$\gamma = 0.00018, G = 190000$
初期値			$F_0 = 270[\text{kPa}], \beta_0 = 0,$ $s_0 = -0.5I[\text{kPa}], \sigma_0 = -19.6I[\text{kPa}]$

3. 解析結果の検討

解析結果の妥当性を検討するために、石川らの大型三軸試験結果²⁾と解析結果とを比較する。大型三軸試験では、供試体を直径 30cm、高さ 60cm の円柱供試体を用いている。材料パラメータは、大型三軸試験の結果の再現性を考慮し、設定した設定値を表 1 に示す通りである。また、解析においては応力制御で解析を行い、応力、各種内部変数の積分は陽的に処理している。

繰返し载荷試験²⁾では、拘束圧 19.6kPa まで等方圧密し、拘束圧一定の下で正弦波形の繰返し軸圧縮荷重を加えている。側圧一定の下で軸差応力が 80kPa となるまで軸圧縮荷重を加え、軸差応力が 0kPa となるまで除荷した。これを 3000 回繰返した。

(1) 軸ひずみと軸差応力との関係

軸ひずみと軸差応力の関係を図 1 に示す。図を見てみると、1 回目はほぼ同じつり合い経路をたどっており、除荷時の残留軸ひずみの誤差も 5%以内となった。残留軸ひずみの値を見ると、10 回程度の繰返し载荷で終局値に到達していることから、解析では実験よりも弾性化の進展が速いことがわかる。しかし、残留ひずみの終局値自体は実験・解析ともほぼ同一となっており、塑性変形の蓄積挙動が適切に再現できることがわかった。ここで、試験と解析の剛性について見てみると、10 回程度ですでに試験の 100 回目と同じくらいの剛性であることがわかる。この点からも弾性化が速いことがわかる。

(2) 繰返し数と残留軸ひずみとの関係

繰返し数と残留軸ひずみの関係を図 2 に示す。図を見てみると、軸ひずみの値が試験結果よりも解析結果の方が終局値へ達するのが速く、100 回程度の繰返し载荷数で終局値に達している。しかし、その後の軸ひずみは実験値と同程度の速さで漸増していることがわかる。このことから、解析における繰返し载荷初期での弾性化の進展は速いが、その後の挙動は試験結果と同じような経路をたどることから、良好な再現性が確認できたと言える。

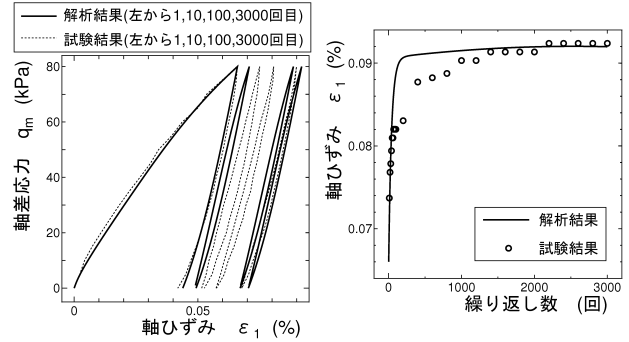
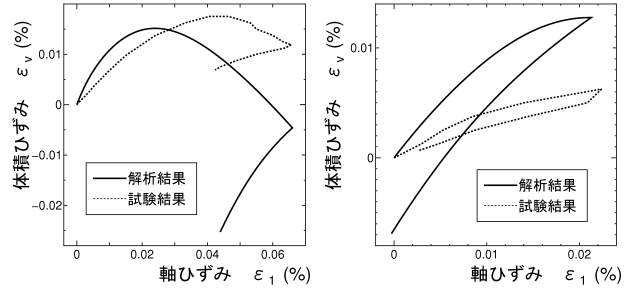


図 1 軸ひずみ—軸差応力。

図 2 繰返し数—軸ひずみ。



(a) 繰返し数 1 回。

(b) 繰返し数 3000 回。

図 3 軸ひずみ—体積ひずみ。

(3) 軸ひずみと体積ひずみとの関係

軸ひずみと体積ひずみの関係をそれぞれ図 3 に示す。図を見てみると、1 回目における収縮から膨張への定性的な傾向は解析と実験とで同様となっているが、特に除荷時の体積膨張が過大に評価されてしまい、除荷後の体積が負荷前の体積より前の体積よりも膨張してしまうという非現実的な挙動が見られた。また、3000 回目でも負荷・除荷の収縮・膨張挙動は再現されているものの、それぞれ相当な値のずれが見られた。このことから、バラスト材の体積の再現性に関しては乏しい結果が確認された。

4. まとめ

本研究では、回転硬化を考慮した下負荷面モデルを用いて、バラスト材の繰返し载荷・変形挙動の定量評価を試みた。その結果、载荷・除荷におけるつり合い経路や残留軸ひずみの蓄積量、剛性の向上など塑性変形機構の再現性では、良好な精度で定量的に評価できることが確認できた。しかし、体積変化については、負荷時の収縮から膨張への定性的な傾向の一致は見られたものの、除荷後の体積の膨張で不合理な結果が生じる場合もあった。

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-36,127-144,1996.9
- 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-40,169-178,1997.9