

Hypoplastic モデルのバラスト材繰り返し変形解析への適用

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. 研究の背景と目的

現在、多くの鉄道軌道の道床部では鉄道用バラスト碎石が用いられている。鉄道軌道は、列車通過が繰り返されるとともに軌道狂いが蓄積し、バラスト道床の残留変形(沈下)の蓄積が軌道狂いの主要因となっている。経済的な軌道管理のためには、バラスト道床沈下の高精度な予測が必須である。

本研究では、繰り返し载荷によるバラスト道床の沈下量予測手法の構築を最終目的としているが、今回は hypoplastic モデル¹⁾を用いた繰り返し変形解析を行い、既に報告されている三軸圧縮試験結果²⁾との比較を通して当該モデルの有用性を検討する。

2. Hypoplastic モデル

バラスト材の力学挙動特性をモデル化するため、粒状体材料の変形を記述した hypoplastic モデル¹⁾を用いる。Hypoplastic モデルでは古典的弾塑性論のように弾性域と塑性域の区別がなく、構成式が弾塑性モデルに比べて簡易な形で表現できる利点を有している。この構成則では、真応力 \mathbf{T} の(客観)速度 $\dot{\mathbf{T}}$ とストレッチング \mathbf{D} との関係、変形・負荷履歴を考慮するために導入された真応力 \mathbf{T} 、間隙比 e の他に、変形速度の大きさ $\|\mathbf{D}\| = \sqrt{D_{\alpha\beta}D_{\alpha\beta}}$ にも依存する形で、次式で定義される。

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{T}} &= f_s [\mathbf{L} + f_d \mathbf{N} \|\mathbf{D}\|], \\ \mathbf{L} &= a_1^2 \mathbf{D} + \hat{\mathbf{T}} \text{tr}(\hat{\mathbf{T}} \cdot \mathbf{D}), \quad \mathbf{N} = a_1(\hat{\mathbf{T}} + \hat{\mathbf{T}}^*), \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $\hat{\mathbf{T}} = \mathbf{T}/\text{tr}\mathbf{T}$ とし、 $\hat{\mathbf{T}}^*$ は $\hat{\mathbf{T}}$ の偏差成分である。式(1)第2, 3式のテンソル \mathbf{L} , \mathbf{N} は、単位大きさのストレッチングをひずみ空間内の任意方向に与えたときに得られる応力速度の軌跡(曲面)である応答曲面の基本形状、応答曲面の中心点の移動方向をそれぞれ規定している。一方、応答曲面の大きさを定める定数 f_s 、中心点の移動量を与える定数 f_d は、それぞれ次式で与える。

$$f_s = \frac{h_s}{nh_i} \left(\frac{e_i}{e}\right)^\beta \frac{1+e_i}{e_i} \left(\frac{3p_s}{h_s}\right)^{1-n} \quad (2)$$

$$f_d = \left(\frac{e - e_d}{e_c - e_d}\right)^\alpha \quad (3)$$

$$h_i = \frac{1}{c_1} + \frac{1}{3} - \left(\frac{e_{i0} - e_d}{e_c - e_d}\right)^\alpha \quad (4)$$

$$e_i = e_{i0} \exp[-(3p_s/h_s)^n]$$

$$e_c/e_i = e_{c0}/e_{i0}, \quad e_d/e_i = e_{d0}/e_{i0}.$$

ただし、 h_s は粒子硬度、 c_1 , c_2 , α , β , n は材料定数である。 e_i , e_c , e_d は最大間隙比、限界状態間隙比、最小間隙比であり、 $p_s = -\text{tr}\mathbf{T}/3 = 0$ における各々の値 e_{i0} , e_{c0} , e_{d0} は材料定数として与える。なお、中心点の移動量については、 f_d だけでなく $\|\mathbf{D}\|$ にも依存しており、式(1)はストレッチングに対して非線形性を有していることがわかる。

定数 a_1 は材料の限界状態における偏差応力を π 平面上でプロットした場合の、原点から偏差応力までの距離であり、次式で与えられる。

$$a_1^{-1} = c_1 + c_2 \|\hat{\mathbf{T}}^*\| [1 + \cos(3\theta)] \quad (5)$$

$$\cos(3\theta) = -\sqrt{6} \frac{\text{tr}(\hat{\mathbf{T}}^{*3})}{[\text{tr}(\hat{\mathbf{T}}^{*2})]^{3/2}} \quad (6)$$

なお、間隙比の変化速度は $\dot{e} = (1+e)\text{tr}\mathbf{D}$ で与える。

3. 実験結果との比較

バラスト材の繰り返し変形挙動の再現に対する hypoplastic モデルの有用性について検証するため、文献²⁾で示されたバラスト材の大型三軸圧縮試験結果と解析結果との比較を行なった。

試験で用いられた円柱供試体は直径 30cm、高さ 60cm である。試験においては供試体を 19.6kPa まで等方圧密した後、荷重制御で軸荷重を単調増加させている。最大軸荷重が $T_{11} = -98\text{kPa}$ に達した後は、等方応力状態まで軸圧を除荷している。拘束圧は $T_{22} = T_{33} = -19.6\text{kPa}$ で一定としている。

解析においては、応力速度を $\dot{\mathbf{T}} \approx \dot{\mathbf{T}}$ と仮定して行なった。材料定数については、本来圧縮・伸張の三軸試験と圧密試験の結果から定めることができる。今回は、各载荷・除荷サイクルにおける応力・ひずみ挙動と、繰り返し载荷時の残留変形の発現具合の双方の再現性を考え、 $c_1 = 1.65$, $c_2 = 1.874$, $h_s = 1.874\text{MPa}$, $n = 1.7$, $\alpha = 0.15$, $\beta = 1.25$,

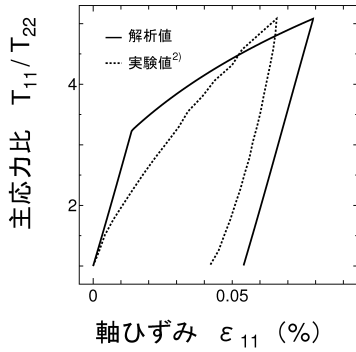


図 1 軸ひずみ-主応力比関係 (繰り返し試験 1 回目) .

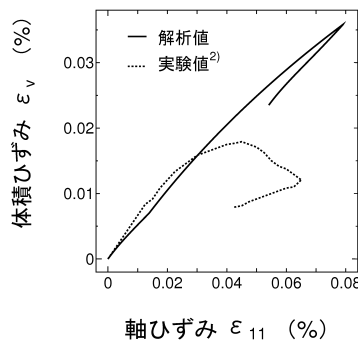


図 2 軸ひずみ-体積ひずみ関係 (繰り返し試験 1 回目) .

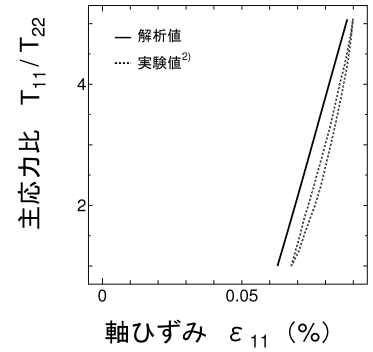


図 3 軸ひずみ-主応力比関係 (繰り返し試験 3000 回目) .

$e = 0.6$, $e_{i0} = 0.600588$, $e_{c0} = 0.600580$, $e_{d0} = 0.600575$ とした. 設定に際しては, 鉄道軌道で問題となる軌道狂いが多数回の載荷・除荷の繰り返しの後に蓄積される残留変形であることを考慮し, 多数回の繰り返し時の載荷・除荷の剛性, 残留ひずみの増加割合と最終的に得られる軸ひずみの値が概ね適切に再現できることを重視した.

まず, 繰り返し載荷 1 回目における軸ひずみと主応力比との関係を図 1 に示す. なお, 以降の図中では, ひずみ ϵ はすべて圧縮を正として示している. 実験結果と同様, 解析においても大きなヒステリシスループを描き, 最大主応力比時の軸ひずみ ϵ_{11}^{max} と除荷時の残留軸ひずみ ϵ_{11}^p との割合も実験結果と同程度であり, これらの定性的な部分は再現している. しかし, 解析結果は主応力比が 4 以下の範囲で剛性が大きく, 負荷・除荷時のつりあい経路全体にずれが生じており, 除荷時の残留ひずみは実験と解析とで約 2 割程度の差が生じていることが分かる.

一方, 繰り返し載荷 1 回目における体積ひずみは, 図 2 に示すように, 載荷過程で体積が収縮から膨張に転じる傾向が解析において適切に再現できておらず, 実験と比較して除荷終了時の塑性体積ひずみが過大に評価されていることがわかる. そのため, 1 サイクル目の解析結果に限定すれば, 当該モデルを採用することを肯定する材料に乏しい結果となっている. しかし, 実際のバラストにおける繰り返し初期の変形応答はバラスト粒子の初期配置に強く依存する上, 粒子骨格の比較的大きな変化が生じやすいことから, 当該モデルの有用性は慎重に判断する必要がある.

次に, 多数回の繰り返し時におけるバラスト材の剛性と残留ひずみの発現について検討する. 図 3 に 3000 回目の載荷・除荷時における軸ひずみと主応力比との関係を, 図 4 に載荷繰り返し回数と軸ひずみの関係をそれぞれ示す. 図 3 より, 解析結果では載荷時と除荷時とで釣り合い経路がほぼ同一となっているが, 変形剛性は実験・解析とで概ね同程度となっている. この点については, 図 4 において

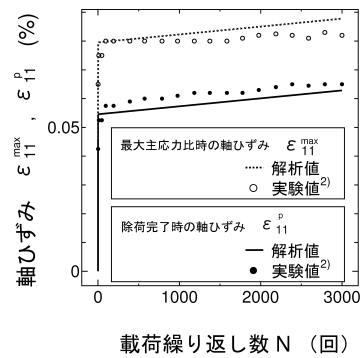


図 4 繰り返し載荷回数 N - 軸ひずみ関係.

ϵ_{11}^{max} と ϵ_{11}^p の差が実験と解析とでほぼ等しいことからわかる. また, 繰り返し載荷初期 ($1 < N < 10$) における繰り返し回数の増加とともに変形剛性が漸増する挙動も再現できた. $N < 100$ なる繰り返しでは剛性が一定の値に収束するが, この点についても当該モデルによって表現できている. さらに, 解析によって, 実測と同程度の割合で増加する残留ひずみ ϵ_{11}^p を評価可能であることが確認できた.

4. まとめ

以上の結果から, hypoplastic モデルを用いて繰り返し載荷時におけるバラスト材の変形挙動を評価することが可能であることが確認できた. ただし, 当該の解析ではすべての応力履歴を考慮して残留変形量を評価していることから, 実用においては計算量の増加と陽解法による応力積分による数値誤差の影響が懸念される. そのため, 今後は解析効率の向上を目的として, 時間域マルチスケール法に基づく変形量の評価手法を構成する予定である.

参考文献

1) Bauer, E.: Calibration of a comprehensive hypoplastic model for granular materials. *Soils & Foundations*, Vol.36, No.1, pp.13-26, 1996.
 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, pp.169-178,1997.