

弾塑性材料定数の変動を考慮した拡張下負荷面モデルを用いた 3次元バラスト道床沈下解析

新潟大学大学院自然科学研究科 学生員 間島 朋也
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

わが国の鉄道においては、まくらぎ下に単粒度碎石からなるバラスト道床を敷設することが一般的である。バラスト道床は経済性・施工性に優れ、騒音・振動の低減効果に有効である。しかし、列車の繰り返しの通過により残留変位が発生・蓄積するため、この定量予測は軌道保守上重要な課題の一つである。

これまで当研究室では、バラスト部の力学挙動を拡張下負荷面モデル¹⁾で表現した弾塑性有限要素法を用いて有道床軌道の鉛直・水平載荷解析を行い、バラスト道床内部の荷重分散や変形の集中箇所等について検討した²⁾。しかし、道床用バラスト材は構造の代表寸法に比べて粒径が大きいこともあり、要素試験や実物大試験の試験結果は、供試体ごとの粒径や形状、粒子配置の変動の影響を大きく受ける。一方、弾塑性有限要素解析では、この力学挙動のばらつきは材料定数の変動として反映されることとなるが、解法が決定論的手法であるため、材料の平均的な力学挙動を評価しているに過ぎない。

そこで本研究では、回転硬化を考慮した下負荷面モデルに基づく弾塑性連続体でバラスト材をモデル化する場合を対象に、材料定数の変動が有道床バラスト軌道の繰り返し変形解析結果に及ぼす影響について、1次近似2次モーメント法(FOSM)³⁾を用いて評価・検討する。

2. FOSM による材料定数の変動の影響評価

バラスト道床内部の応力やひずみなどを弾塑性有限要素法などの数値解析によって評価する場合を考える。材料モデルが m 個の材料定数 $\{p_i | i = 1, 2, \dots, m\}$ 個を用いるものとし、これらを確率変数としてその値の変動を考慮する。

ここで、有限要素解析によって評価される応答 $g_i (i = 1, 2, \dots, n)$ (n : 評価自由度) に関し、その平均値 $E(g_i)$ と分散 $\text{Var}(g_i)$ 、標準偏差 σ_{g_i} について考える。FOSM では、 g_i を材料定数の期待値 $E(p_j)$ まわりで Taylor 展開し、一次の項で打ち切って近似評価する。その結果、次式を得る。

$$g_i \approx g_i(E(p_1), E(p_2), \dots, E(p_m)) + \sum_{j=1}^m (p_j - E(p_j)) \left. \frac{\partial g_i}{\partial p_j} \right|_{\bar{p}} \quad (1)$$

式(1)について期待値と分散とを計算すると、

$$E(g_i) \approx g_i(E(\bar{p}_1), E(\bar{p}_2), \dots, E(\bar{p}_m)) \quad (2)$$

$$\text{Var}(g_i) \approx \sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^m \left. \frac{\partial g_i}{\partial p_j} \right|_{\bar{p}} \cdot \left. \frac{\partial g_i}{\partial p_l} \right|_{\bar{p}} \cdot \text{Cov}(p_j, p_l) \quad (3)$$

ただし、 $\bar{p} = \{\bar{p}_k = E(p_k) | k = 1, 2, \dots, m\}$ とし、 $\text{Cov}(\cdot, \cdot)$ は共分散を表す。標準偏差は $\sigma_{g_i} = \sqrt{\text{Var}(g_i)}$ で評価できる。

材料定数の共分散 $\text{Cov}(p_i, p_j)$ は、確率変数 $p_i (i = 1 \sim m)$ の独立を仮定して与える。感度 $\partial g_i / \partial p_j$ については、有理多項式近似を用いて評価する。

3. バラスト道床沈下解析結果に対するバラスト材の材料定数の変動の影響

(1) 変動を考慮する材料定数および解析条件

本研究では、拡張下負荷面モデル¹⁾を用いてバラスト材の繰り返し変形挙動を表現するものとし、陽解法に基づく弾塑性有限要素法を用いてその応答を評価する。当該モデルでは、材料定数およびそれに準ずるものとして、 ϕ , ρ , μ , ϕ_d , b_r , c_1 , c_2 , c_3 , γ , ν , u_1 , m_1 , ϕ_b , F_0 の14種類²⁾についてその変動を考える。

道床沈下解析は、石川らにより実施された実物大有道床軌道の繰返し載荷試験⁴⁾を対象として、**図1**の3次元有限要素モデルを用いて行なった。解析領域はまくらぎ、バラストの2相からなり、**図1**のように境界条件を設定した。なお、まくらぎは等方均質弾性体としてモデル化する。解析の初期条件は無変形・無応力・無重力状態に定め、自重沈降解析を行ったうえで、まくらぎ1本・片レールあたりの最大荷重を5kN刻みで20kNまで漸増させる条件下で、鉛直荷重を繰り返し作用させた。バラスト部の材料パラメータの期待値は、石川らが実施した実験結果の再現性を考慮して**表1**に示すとおりに設定し、変動係数 $\delta = 10\%$ 相当分の変動を混入させる。まくらぎの材料定数はヤング率78(GPa)、ポアソン比0.17、質量密度 $2.677 \times 10^3 (\text{kg/m}^3)$ に定めた。

材料定数の変動感度は、まくらぎ位置での鉛直変位について評価する。

(2) まくらぎ位置での鉛直変位に対する材料定数の変動の影響

まず、バラスト材の大型繰返し三軸試験の応力解析⁵⁾にお

Key Words: バラスト, 下負荷面モデル, 1次近似2次モーメント法

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) 7274

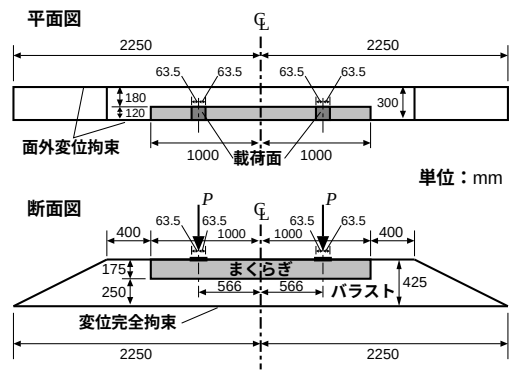


図 1 解析モデルおよび境界条件

表 1 実物大試験における各パラメータの期待値

バラスト	
質量密度	$1.74 \times 10^3 (\text{kg/m}^3)$
降伏面形状	$\phi = 24^\circ$
等方硬軟化	$\rho = 0.1, \mu = 3.8, \phi_d = 20^\circ$
回転硬化	$b_r = 80, \phi_b = 32^\circ$
R の発展	$u_1 = 1.0, m_1 = 4.3$
相似中心の移動	$c_1 = 3.5, c_2 = 1.2, c_3 = 3.2$
弾性定数	$\gamma = 3.5 \times 10^{-4}, \nu = 0.15$
	$p_{num} = 0.01 (\text{kPa})$
初期値	$F_0 = 270 (\text{kPa})$

いて材料定数の変動感度が最も高かった c_3 のみ、および実物大試験において、鉛直変位に対する感度の最も高かった γ のみ変動を考慮した場合を対象に、FOSM による解析結果の変動量の評価結果を図 2 (a)、図 2 (b) に示す。

図 2 (a) において、 γ は圧力依存性を有するバラスト材の接線剛性を決定するパラメータであり、特に拘束圧の小さい領域において材料定数値の変動の影響がより顕著になっている。比較的大きな変動を与えているにも関わらず、FOSM による変動量（標準偏差）の評価精度は十分なものとなっていることが、解析結果における順解析結果との比較から確認できる。

図 2 (b) において、繰り返し三軸試験の応力解析において感度が高かった c_3 は γ ほどではないが、他の下負荷面モデルの材料定数の中では、高い変動感度を示した。バラスト領域内部の応力・ひずみ分布が一樣でないこともあり、パラメータの変動量を期待値の 10% と小さくない値に設定しても、変位量の変動幅は変動なしの場合の 10% 程度を示しており、FOSM による鉛直変位の変動幅の評価結果は順解析結果と概ね一致している。しかし、塑性挙動に影響を与える材料定数の場合、載荷・除荷の繰り返しとともに残留変位が累積すると、FOSM による鉛直変位の標準偏差の評

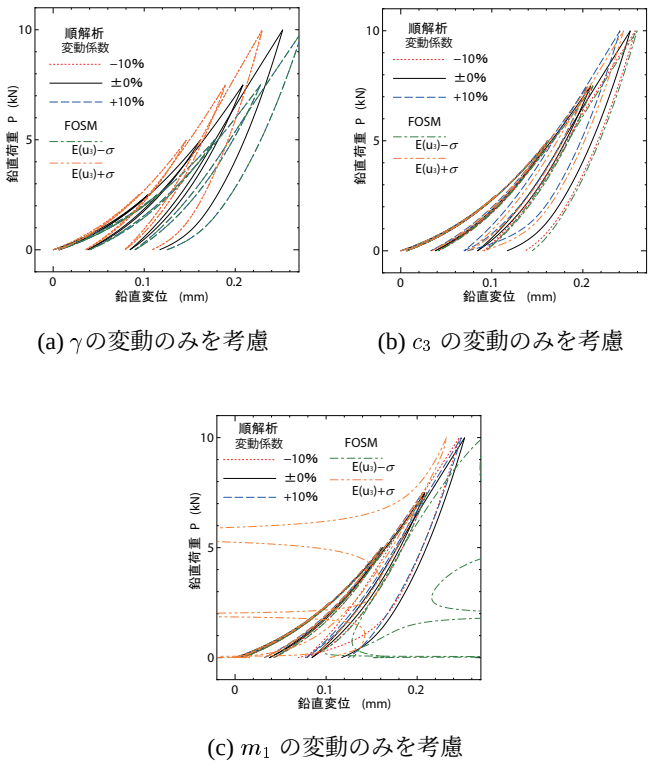


図 2 作用荷重とまくらぎ鉛直変位の関係（変動係数 $\delta = 10\%$ ）

価精度が低下する傾向を示す。この傾向は、繰り返し三軸試験を対象とした材料定数の変動感度解析の場合と同様である。

また、 m_1 を変動させた場合を図 2 (c) に示す、この場合 FOSM による標準偏差の評価精度が著しく低下する傾向となった。これは正負の変動を与えた順解析での解が同ステップにおいてほぼ同等となる箇所において、材料定数の感度が有利多項式法でうまく計算できていないことが原因であるので、今後はこの問題を解決するとともに、バラスト領域内の応力や残留ひずみに対する材料定数の変動の影響について取り組む。

謝辞 本研究を実施するにあたり、平成 21–23 年度文部科学省科学研究費補助金（若手研究（B）、課題番号 21760398）の助成を得た。よって、ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 橋口公一，上野正美，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。
- 紅露一寛，福津佑太，東海林裕之，阿部和久：下負荷面モデルを用いた弾塑性有限要素法による有道床バラスト軌道の繰り返し変形解析，計算工学講演会論文集，Vol.15，pp.961-964，2010。
- Mellán,R.,Auvinet,G.,Masrouri,F.: Stochastic finite element method applied to non-linear analysis of embankments, Prob. Engrg. Mech., Vol.15, pp.251-259, 2000。
- 石川達也，名村 明：実物大試験による道床バラスト部繰返し変形特性の検討，土木学会論文集，No.512, I -27, pp.47-59, 1995。
- 紅露一寛，間島朋也，阿部和久：下負荷面モデルを用いたバラスト道床繰返し変形解析における材料パラメータの感度評価，J-RAIL2011 講演論文集，pp.77-80，2011。