# 下負荷面モデルを用いたバラスト道床繰り返し変形解析における材料パラメータの感度評価

［土］紅露一寛 (新潟大)，［土］○間島朋也 (新潟大)，［土］阿部和久（新潟大)

# Sensitivity of material parameters in subloading surface model for cyclic deformation analysis of railway ballast

Kazuhiro KORO (Niigata Univ), Tomoya MASHIMA (Niigata Univ), Kazuhisa ABE (Niigata Univ)

The sensitivity of the material parameters on the simulation results of ballast settlement analysis is estimated with the first-order second-moment method(FOSM). The elastoplastic behaviour of railway ballast is modeled using the subloading surface model with rotational hardening. For the cyclic triaxial test of railway ballast, cyclic loading increases not only the accumulated axial strain, but also the uncertainty of the simulation results. For the cyclic loading test of a ballasted track, the parameter $\gamma$ is the most sensitive to the vertical displacement at points which are contact to the rail bottom on a sleeper.

**キーワード：** 道床沈下解析，下負荷面モデル，有限要素法，*1* 次近似 *2* 次モーメント法
***Key words :*** *ballast settlement analysis, subloading surface model, FEM, FOSM*

## 1. はじめに

バラスト道床は，列車走行時の荷重分散を図り，騒音・振動を低減させる機能を有しており，その優れた経済性・施工性ゆえに国内外の鉄道で広く敷設されている．しかし，その単粒度砕石の集合体である構造特性ゆえに，列車の繰り返し通過によって道床内部のバラスト粒子の移動・回転が徐々に累積し，結果としてバラスト上面に残留変位が生じることとなる．特に鉛直変位は道床沈下と呼ばれ，そのモニタリングおよび対策は，軌道を管理する上で極めて重要であり，道床沈下メカニズムの解明およびその数理モデル化，沈下量予測手法の予測は興味深い研究課題の一つである．

著者らはこれまで，バラスト道床沈下メカニズムの解明と，道床沈下量の定量予測手法の開発を目指し，バラスト道床を弾塑性連続体でモデル化した有限要素法を提案し，これを用いて道床沈下解析を試みてきた．特に，バラスト部の繰り返し変形挙動の弾塑性構成則として回転硬化を考慮した下負荷面モデル[1)]により与える有限要素解析法の実用化について取り組んでおり，有道床軌道の鉛直・水平載荷試験の有限要素シミュレーションを行ない，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，粒子配置のばらつきの影響を大きく受ける．同条件を仮定して実験を行っても，その結果は小さくない変動が含まれたものとなる．一方，弾塑性有限要素解析では，この力学挙動のばらつきを材料パラメータの変動として考慮する必要があるが，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[1)]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，材料パラメータの変動がバラスト材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. 回転硬化を考慮した下負荷面モデル

本研究では，バラスト材の繰り返し変形挙動を，弾塑性構成モデルの一つである下負荷面モデルで表現する．当該モデルでは，微小変形および全ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_{kl}$ の加算分解 ($\dot{\varepsilon}_{kl}=\dot{\varepsilon}^e_{kl}+\dot{\varepsilon}^p_{kl}$, $\dot{\varepsilon}^e_{kl}$: 弾性成分, $\dot{\varepsilon}^p_{kl}$: 塑性成分) を仮定した上で，次の亜弾性構成則を与える．

$$\dot{\sigma}_{ij}=E_{ijkl}(\dot{\varepsilon}_{kl}-\dot{\varepsilon}^p_{kl}), \tag{1}$$

ここで，$\sigma_{ij}$ は応力テンソル，$\varepsilon_{kl}$ は微小ひずみテンソルであり，$\dot{}$ は物質時間微分を表わす．また，弾性係数テンソル $E_{ijkl}$ は次式で与える．

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

なお，$\nu$ は Poisson 比，$\gamma$ は材料定数，$p_{num}$ は圧力ゼロのときの剛性を与えるためのパラメータ，$\delta_{ij}$ は Kronecker のデルタである．

次に，塑性を表現する諸式を示す．まず，許容応力空間を規定する正規降伏面を次式で与える．

$$f(\hat{\boldsymbol{\sigma}},\boldsymbol{\beta})=F(H),\quad F=F_0\exp\left(-\frac{H}{\rho-\gamma}\right) \tag{3}$$

ここで，$H$，$\boldsymbol{\beta}$ はそれぞれ等方硬化変数，回転硬化変数，$F$，$F_0$ は等方硬軟化関数その初期値，$\hat{\boldsymbol{\sigma}}$ は正規降伏面上の応力，$\rho$ は材料定数である．

次に，正規降伏面 (3) に対し，収縮率 $R$ で相似である曲面を下負荷面と定義し，次式で与える．

$$f(\bar{\boldsymbol{\sigma}}, \boldsymbol{\beta}) = RF(H) \tag{4}$$

ここで，下負荷面上の応力 $\bar{\boldsymbol{\sigma}}$ は次式で与える．

$$\bar{\boldsymbol{\sigma}} \equiv \boldsymbol{\sigma} - (1-R)\boldsymbol{s} \tag{5}$$

なお，$\boldsymbol{s}$ は相似中心である．

各変数の発展則は次のように表される．

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{\beta}} &= b_r \left\| \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{p*} \right\| \left\| \bar{\boldsymbol{\eta}} \right\| \bar{\boldsymbol{\eta}}_b \\ \dot{\boldsymbol{s}} &= c \left\| \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{p} \right\| \tilde{\boldsymbol{\sigma}} + \frac{1}{F}\left\{ \dot{F} - \mathrm{tr}\left( \frac{\partial f(\boldsymbol{s}, \boldsymbol{\beta})}{\partial \boldsymbol{\beta}} \dot{\boldsymbol{\beta}} \right) \right\} \boldsymbol{s} \\ \dot{R} &= U(R) \left\| \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{p} \right\| \quad (\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{p} \neq \boldsymbol{O}) \\ \dot{H} &= D_v^p + \mu \left\| \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{p*} \right\| (m_d - \frac{\|\boldsymbol{\sigma}^*\|}{p}), \end{aligned} \tag{6}$$

ここで，$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{p*}$ は $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{p}$ の偏差成分，$D_v^p = \mathrm{tr}\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p$ であり，

$$\begin{aligned} \bar{\boldsymbol{\eta}} &= \frac{\bar{\boldsymbol{\sigma}}^*}{\bar{p}} - \boldsymbol{\beta}, \ \bar{\boldsymbol{\sigma}}^* \equiv \bar{\boldsymbol{\sigma}} + \bar{p}\boldsymbol{I}, \ \bar{p} = -\frac{1}{3}\mathrm{tr}\bar{\boldsymbol{\sigma}}, \\ \bar{\boldsymbol{\eta}}_b &= \bar{m}_b \frac{\bar{\boldsymbol{\eta}}}{\|\bar{\boldsymbol{\eta}}\|} - \boldsymbol{\beta}, \ c = \frac{c_1}{R^{c_3}} \exp\left( c_2 \frac{1}{\sqrt{3}} \mathrm{tr}\bar{\boldsymbol{N}} \right), \\ \dot{F} &= -\frac{F}{\rho - \gamma}\dot{H}, \ U(R) = u_1(1/R^{m_1} - 1) \end{aligned} \tag{7}$$

となる．なお，$b_r$，$\mu$，$\phi_b$，$\phi_d$，$c_1$，$c_2$，$c_3$，$u_1$，$m_1$ は材料定数である．

材料関数 $\bar{m}$，$m_s$，$\bar{m}_b$，$m_d$ は次式で与える．

$$\begin{aligned} &\bar{m} = \zeta(\bar{\theta}_\sigma; \phi), \quad m_s = \zeta(\theta_s; \phi), \\ &\bar{m}_b = \zeta(\bar{\theta}_\sigma; \phi_b), \quad m_d = \zeta(\theta_\sigma; \phi_d), \\ &\sin 3\bar{\theta}_\sigma = -\sqrt{6}\frac{\mathrm{tr}\bar{\boldsymbol{\eta}}^3}{\|\bar{\boldsymbol{\eta}}\|^3}, \quad \sin 3\theta_s = -\sqrt{6}\frac{\mathrm{tr}\boldsymbol{\eta}_s^3}{\|\boldsymbol{\eta}_s\|^3}, \\ &\sin 3\theta_\sigma = -\sqrt{6}\frac{\mathrm{tr}\boldsymbol{\sigma}^{*3}}{\|\boldsymbol{\sigma}^*\|^3}, \end{aligned} \tag{8}$$

$$\zeta(\theta; \phi) = \frac{14\sqrt{6}\sin\phi}{(3 - \sin\phi)(8 - \sin 3\theta)}, \tag{9}$$

ここで，$\phi$ は材料定数である．

流動則は，関連流動則を採用する．$\bar{\boldsymbol{N}}$ は下負荷面の外向き単位法線ベクトル，$\lambda$ は正値の比例定数として次式で与える．

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p &= \lambda \bar{\boldsymbol{N}}, \ \bar{\boldsymbol{N}} = \frac{1}{\varphi}\frac{\partial f(\bar{p}, \bar{\chi})}{\partial \boldsymbol{\sigma}}, \\ \varphi &= \left\| \frac{\partial f(\bar{p}, \bar{\chi})}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \right\|, \ \lambda = \frac{\mathrm{tr}(\bar{\boldsymbol{N}}\boldsymbol{E}\boldsymbol{D})}{\mathrm{tr}(D_p + \bar{\boldsymbol{N}}\boldsymbol{E}\bar{\boldsymbol{N}})} \end{aligned} \tag{10}$$

ここで，

$$\begin{aligned} D_p &\equiv \mathrm{tr}(\bar{\boldsymbol{N}}\bar{\boldsymbol{a}}) \\ &+ \mathrm{tr}(\bar{\boldsymbol{N}}\bar{\boldsymbol{\sigma}}) \left\{ \frac{F'}{F}h - \frac{1}{RF}\mathrm{tr}\left( \frac{\partial f(\bar{\boldsymbol{\sigma}}, \boldsymbol{\beta})}{\partial \boldsymbol{\beta}} \boldsymbol{b} \right) + \frac{U}{R} \right\} \end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned} \bar{\boldsymbol{a}} &\equiv= (1-R)\boldsymbol{z} - U\boldsymbol{s}, \ \boldsymbol{b} = \frac{\dot{\boldsymbol{\beta}}}{\lambda} = b_r \left\| \bar{\boldsymbol{N}}^* \right\| \left\| \bar{\boldsymbol{\eta}} \right\| \bar{\boldsymbol{\eta}}_b \\ \boldsymbol{z} &\equiv \frac{\dot{\boldsymbol{s}}}{\lambda} = c\tilde{\boldsymbol{\sigma}} + \frac{1}{F}\left\{ F'h - \mathrm{tr}\left( \frac{\partial f(\boldsymbol{s}, \boldsymbol{\beta})}{\partial \boldsymbol{\beta}} \boldsymbol{b} \right) \right\} \boldsymbol{s} \\ \bar{\boldsymbol{N}}^* &\equiv \bar{\boldsymbol{N}} - \frac{1}{3}(\mathrm{tr}\bar{\boldsymbol{N}})\boldsymbol{I} \end{aligned} \tag{12}$$

また，負荷基準は次式で定める．

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p \neq \boldsymbol{0}: &\quad \bar{N}_{ij} E_{ijkl} D_{kl} > 0, \\ \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p = \boldsymbol{0}: &\quad \bar{N}_{ij} E_{ijkl} D_{kl} \leq 0, \end{aligned} \tag{13}$$

## 3. FOSM による材料パラメータの感度解析

次に，バラスト道床の繰り返し変形解析結果に及ぼす，下負荷面モデルの材料パラメータの感度の評価方法について考える．下負荷面モデルでは，材料パラメータおよびそれに準ずるものとして，$\phi$，$\rho$，$\mu$，$\phi_d$，$b_r$，$c_1$，$c_2$，$c_3$，$\gamma$，$\nu$，$u_1$，$m_1$，$\phi_b$，$F_0$ の 14 種類を用いる．以下では，これらを $\boldsymbol{p} = \{p_i | i = 1, 2, \cdots, m\} (m = 14)$ で表わし，確率変数として設定値の変動を考慮する．

繰り返し変形解析によって評価される物理量を $g_i (i = 1, 2, \cdots, n)$ ($n$：評価自由度) で表わしておき，これらの平均値 $\mathrm{E}(g_i)$ と分散 $\mathrm{Var}(g_i)$，標準偏差 $\sigma_{g_i}$ について考える．1 次近似 2 次モーメント法 (FOSM)[3]では，$g_i$ をパラメータの期待値 $\mathrm{E}(p_j)$ 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．

$$\begin{aligned} g_i &\approx g_i(\mathrm{E}(p_1), \mathrm{E}(p_2), \cdots, \mathrm{E}(p_m)) \\ &\quad + \sum_{j=1}^{m} (p_j - \mathrm{E}(p_j)) \left. \frac{\partial g_i}{\partial p_j} \right|_{\bar{\mathbf{p}}} \end{aligned} \tag{14}$$

式 (14) について期待値と分散とをそれぞれ計算すると，

$$\mathrm{E}(g_i) \approx g_i(\mathrm{E}(\bar{p}_1), \mathrm{E}(\bar{p}_2), \cdots, \mathrm{E}(\bar{p}_m)) \tag{15}$$

$$\mathrm{Var}(g_i) \approx \sum_{j=1}^{m}\sum_{l=1}^{m} \left. \frac{\partial g_i}{\partial p_j} \right|_{\bar{\mathbf{p}}} \cdot \left. \frac{\partial g_i}{\partial p_l} \right|_{\bar{\mathbf{p}}} \cdot \mathrm{Cov}(p_j, p_l) \tag{16}$$

ただし，$\bar{\boldsymbol{p}} = \{\bar{p}_k = \mathrm{E}(p_k) | k = 1, 2, \cdots, m\}$ とし，$\mathrm{Cov}(\cdot, \cdot)$ は共分散を表わす．標準偏差は $\sigma_{g_i} = \sqrt{\mathrm{Var}(g_i)}$ で評価できる．

材料パラメータの共分散 $\mathrm{Cov}(p_i, p_j)$ は，確率変数 $p_i (i = 1, \cdots, m)$ 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[4]を用いて評価する．

## 4. 下負荷面モデルで用いる材料パラメータの感度解析

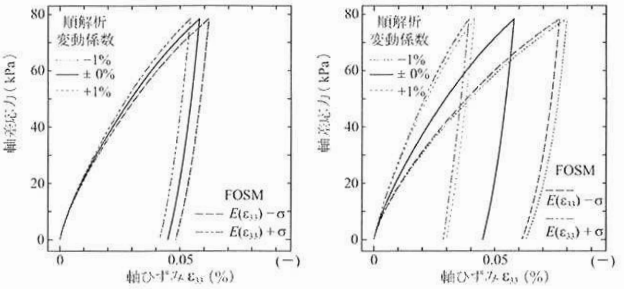
### 4.1 大型繰り返し三軸試験の数値シミュレーション

まず，石川らにより実施されたバラスト材の大型繰り返し三軸試験[5]の数値シミュレーションを対象に，下負荷面モデルの材料パラメータの感度解析を行なう．以下では，石川らの試験条件に準じ，拘束圧 $\sigma_{11} = \sigma_{22} = -19.6$(kPa) で一定とした上で，軸方向応力 $\sigma_{33}$ を $-19.6$(kPa) から $-98.0$(kPa)（応力は引張を正と定義）の範囲で載荷・除荷を繰り返す繰り返し変形解析を感度解析の対象とする．なお，変形解析は応力制御で行ない，解析結果に及ぼす材料パラメータの感度は，前述の 14 個のパラメータ全てについて検討する．各パラメータの期待値は，実験結果の再現性を考え **Table 1** の通りとした．

感度解析に先立ち，材料パラメータの影響感度の評価方法である FOSM の評価精度について検討しておく．後述するが，上記 14 種類の材料パラメータの影響感度は，$c_3$，$F_0$，$\phi$，$c_1$，$m_1$ の順で大きい．そのため，参照解として，

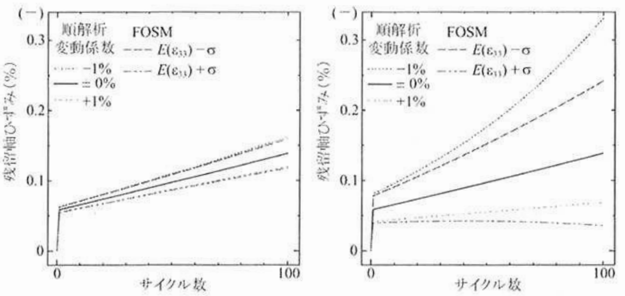
**Table 1　三軸試験における各パラメータの期待値**

| | |
|---|---|
| 降伏面形状 | $\phi = 31°$ |
| 等方硬軟化 | $\rho = 0.1$ , $\mu = 3.0$ , $\phi_d = 25°$ |
| 回転硬化 | $b_r = 20$ , $\phi_b = 54.4$ |
| $R$ の発展 | $u_1 = 0.7$ , $m_1 = 2.41$ |
| 相似中心の移動 | $c_1 = 40$ , $c_2 = 0.25$ , $c_3 = 3.0$ |
| 弾性定数 | $\gamma = 1.5 \times 10^{-4}$ , $\nu = 0.15$ |
| $F$ の初期値 | $F_0 = 200(\mathrm{kPa})$ |




(a) 変動係数 $\delta = 1\%$　　(b) 変動係数 $\delta = 5\%$

**Fig.1　繰り返し第1サイクルでの軸ひずみ・軸差応力 ($c_3$ のみ変動)**




(a) 変動係数 $\delta = 1\%$　　(b) 変動係数 $\delta = 5\%$

**Fig.2　残留軸ひずみの累積挙動に及ぼす材料パラメータ変動の影響 ($c_3$ のみ変動)**

ここでは最も影響が大きかった $c_3$ のみ変動を考慮し，材料パラメータに変動係数 $\delta = 1\%, 5\%$ 相当分の変動が混入したときの順解析結果を用い，FOSM による評価精度を検証する．載荷・除荷第1サイクルにおける軸ひずみ・軸差応力についての解析結果を **Fig.1** に示す．$\pm 1\%$ の変動では，FOSM による軸ひずみの標準偏差 $\sigma_{\varepsilon_{33}}$ の評価精度は良好であるが，$\pm 5\%$ の変動では，順解析結果の変動が大きくなり，FOSM の評価精度が低下することが分かる．一方，解析サイクル数増加に伴う残留軸ひずみの解析結果は **Fig.2** に示す通りである．解析サイクル数の増加とともに，残留軸ひずみの変動幅は拡大する傾向を示す．変動係数 $\delta = 1\%$ の変動では，順解析結果と FOSM による解析結果が概ね一致するのに対し，$\delta = 5\%$ の場合には変動幅を与える標準偏差の評価精度がサイクル数の進展とともに低下することが分かる．なお，**Fig.1**，**Fig.2** ともに，順解析結果の変動幅が大きい場合ほど FOSM による評価精度が低下する傾向を示し，他のパラメータでも同様である．

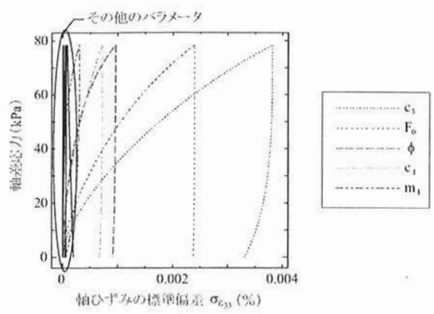
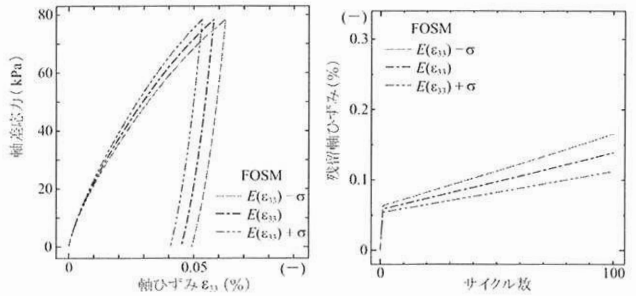



**Fig.3　各材料パラメータを個々に変動させた場合の軸ひずみの標準偏差（変動係数 $\delta = 1\%$）**




(a) 第1サイクルにおける軸ひずみと軸差応力　　(b) サイクル数と残留軸ひずみ

**Fig.4　全てのパラメータの変動（変動係数 $\delta = 1\%$）を仮定した場合における繰り返し三軸試験の数値解析結果とその変動**

次に，材料パラメータのいずれか一つの 1% 変動を仮定した場合における，FOSM で評価した第1サイクルでの軸ひずみ $\varepsilon_{33}$ の標準偏差 $\sigma_{\varepsilon_{33}}$ と軸差応力の履歴を **Fig.3** に示し，解析結果に対する影響感度の高いパラメータを特定する．解析結果より，$c_3$，$F_0$，$\phi$，$c_1$，$m_1$ の順で，その変動が解析結果に及ぼす影響が大きく，その他のパラメータについてはほとんど解析結果に影響を与えないことが分かる．特に，影響の大きい $c_3$，$F_0$ については，1%相当の変動が混入するだけで第1サイクル終了時の残留軸ひずみ評価値の約 7%（$c_3$），約 5%($F_0$) 相当の変動量が観測されることが分かる．そのため，実験における力学挙動の比較的大きな変動は，解析においてはこれら高感度を示すパラメータの変動として反映される可能性が高いと考えられ，影響感度が高い材料パラメータの選定に際しては注意が必要である．

**Fig.4** は，すべてのパラメータに対し変動係数 $\delta = 1\%$ の変動を与えた場合における，第1サイクルでの軸ひずみと軸差応力の関係，およびサイクル数と残留軸ひずみの関係を示したものである．**Fig.4**(a) より，第1サイクルでの軸ひずみにおける標準偏差 $\pm\sigma$ 相当分の変動幅は，パラメータ値の変動感度が最も高い $c_3$ のみ変動の場合と概ね同程度となっている．また，**Fig.4**(b) より，サイクル数の増加とともに残留変形が累積するのに伴い，残留軸ひずみの標準偏差 $\sigma_{\varepsilon_{33}}$ の値は漸増している．第1サイクル終了時の残留軸ひずみでは，変動係数が $\delta_{\varepsilon_{33}} = \sigma_{\varepsilon_{33}}/\mathrm{E}(\varepsilon_{33}) \approx 0.07$ であるが，サイクルの進展に伴いその値は増大し，100サ

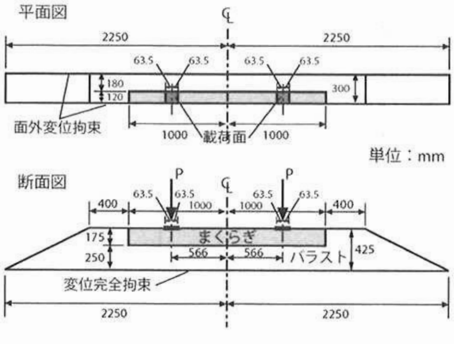



**Fig.5 解析モデルおよび境界条件**

**Table 2 実物大試験における各パラメータの期待値**

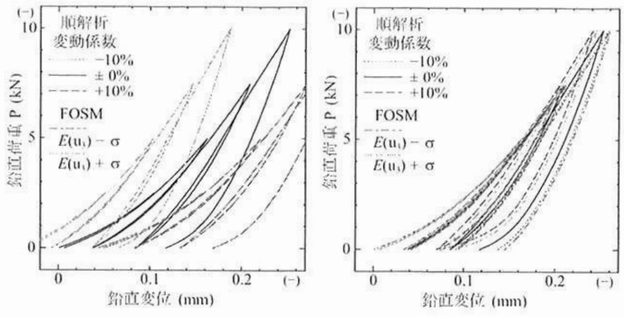
| | |
|---|---|
| バラスト | |
| 質量密度 | $1.74 \times 10^3 (\mathrm{kg/m^3})$ |
| 降伏面形状 | $\phi = 24°$ |
| 等方硬軟化 | $\rho = 0.1$ , $\mu = 3.8$ , $\phi_d = 20°$ |
| 回転硬化 | $b_r = 80$ , $\phi_b = 32°$ |
| $R$ の発展 | $u_1 = 1.0$ , $m_1 = 4.3$ |
| 相似中心の移動 | $c_1 = 3.5$ , $c_2 = 1.2$ , $c_3 = 3.2$ |
| 弾性定数 | $\gamma = 3.5 \times 10^{-4}$ , $\nu = 0.15$ |
| | $p_{num} = 0.01(\mathrm{kPa})$ |
| 初期値 | $F_0 = 270(\mathrm{kPa})$ |
| まくらぎ | |
| 弾性定数 | $E = 78(\mathrm{GPa})$ , $\nu = 0.17$ |
| 質量密度 | $2.677 \times 10^3 (\mathrm{kg/m^3})$ |

イクル終了時では $\delta_{\sigma_{\varepsilon_{33}}} \approx 0.18$ となっている．このことから，参照実験結果の力学挙動の変動の影響を考慮して選定した，(変動を有する）材料パラメータを解析に使用した場合，サイクル数の増大とともに残留ひずみの解析結果の変動幅が大きくなる．入力値のわずかな変動でも，特に高サイクル下では決定論的に得られた解析結果からの変動が大きくなるため，解析結果の分析・考察の際には注意が必要である．また，残留ひずみの進展挙動の再現性をもとに下負荷面モデルの材料パラメータを決定するのは，解析結果の不確定性の増大ゆえに困難が予想される．

### 4.2 実物大軌道の繰り返し載荷試験の有限要素解析

次に，実物大有道床軌道の繰り返し載荷試験の有限要素解析結果に対する下負荷面モデルの材料パラメータの感度を評価する．解析は，石川らが実施した実物大有道床軌道の繰り返し鉛直載荷試験[6]を対象として，**Fig.5** 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（線形弾性体），バラスト（下負荷面モデル）の2相からなり，各部の材料パラメータの期待値は **Table 2** に示す通りに設定した．材料パラメータの変動は，バラスト部の 14 種類のみ考慮し，今回はまくらぎ位置での鉛直変位に対する感度を評価した．なお，鉛直荷重は，2本のレールの各々の最大荷重が 2.5kN 刻みで 10kN まで漸増させる条件下で，繰り返し作用させた．

三軸試験において材料パラメータの感度が最も高かった $c_3$ のみ（変動係数 $\delta = 10\%$），および鉛直変位に対する感度の最も高かった $\gamma$ のみの変動を考慮した場合を対象に，FOSM による解析結果の変動感度の評価結果を **Fig.6** に示す．鉛直変位に対する $\gamma$ の影響感度が最も高




(a) $\gamma$ の変動のみを考慮　(b) $c_3$ の変動のみを考慮

**Fig.6 作用荷重とまくらぎ鉛直変位の関係 (変動係数 $\delta = 10\%$)**

いのは，$\gamma$ が圧力依存性を有するバラスト材の初期接線剛性を決定するパラメータであることが理由である．繰り返し三軸試験のシミュレーションにおいて感度が高かった $c_3$ については，$\gamma$ ほどではないが，他の下負荷面モデルのパラメータの中では，高い影響感度を示した．バラスト領域内部の応力・ひずみ分布が一様でないこともあり，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パラメータの場合，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，繰り返し三軸試験の解析の場合と同様である．なお，パラメータ $m_1$ を変動させた場合，FOSM による標準偏差の評価精度が著しく低下する場合があった．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パラメータの感度評価に取り組む．

**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

1) 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.

2) 紅露一寛，阿部和久：有道床バラスト軌道を対象とした繰り返し鉛直・水平載荷試験の弾塑性有限要素解析，第 17 回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL) 講演論文集，pp.565-568，2010.

3) Mellan,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.

4) Chowdhury, R.N., Xu, D.W.: Rational polynomial technique in slope-reliability analysis. *J. Geotech. Engrg. ASCE*, Vol.119, No.12, 1993.

5) 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.

6) 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, IV-27, pp.47–59, 1995.