下負荷面モデルを用いた鉄道用バラスト材の繰り返し変形解析

紅露一寛[1]・梶原宗光[2]・阿部和久[3]

[1] 正会員　博士（工学）　新潟大学准教授　大学院自然科学研究科 (〒 950-2181 新潟市西区五十嵐二の町 8050 番地)
E-mail: kouro@eng.niigata-u.ac.jp
[2]学生員　新潟大学大学院自然科学研究科　博士前期課程 (〒 950-2181 新潟市西区五十嵐二の町 8050 番地)
[3]正会員　工博　新潟大学准教授　工学部建設学科 (〒 950-2181 新潟市西区五十嵐二の町 8050 番地)

回転硬化を考慮した下負荷面モデルを用いて，道床部に使用されるバラスト材の繰り返し変形挙動の弾塑性解析を試みた．繰り返し初期における載荷・除荷時のつり合い経路は解析と実験とで概ね一致させることが可能である．それ以降の繰り返し時においては，変形係数は解析結果と実験結果とで概ね同程度であるが，残留軸ひずみの累積速さが一致をみておらず，繰り返し 100 回程度～1500 回程度においては，残留軸ひずみの値に明瞭な差が認められた．1500 回目程度以降の漸進的なひずみの累積過程においては，解析によって良好に再現できた．一方，繰り返し載荷時の体積変化については，解析によって収縮・膨張の定性的な傾向を再現するにとどまった．

Key Words : *railway ballast, cyclic loading, track deterioration, subloading surface model, rotational hardening*

1.　はじめに

今日，わが国の鉄道軌道の大多数はバラスト道床を有する軌道である．バラスト道床は，列車走行時に生じるまくらぎ下面圧力を分散させて路盤に伝達させるだけでなく，列車の走行振動や輪重衝撃の吸収材としての役割も果たしている．バラストは砕石の集合体であるため安価に敷設・施工できるものの，バラスト粒子集合体の骨格は列車の繰り返し走行によって容易に変形・変化するため，結果としてバラスト道床に残留変形が生じ，道床沈下を伴う軌道面の不整（軌道狂い）となって現われる．軌道の保守管理を効率よく進めるためには，列車の走行・通過状況に応じて軌道狂いの進展の度合いを高精度に定量的に評価・予測することが重要と考えられている．

これまで，軌道狂いの主因であるバラスト道床の沈下現象と，構成材料であるバラスト材の弾塑性挙動を実験的，または解析的に評価・検討する試みは，国内外の研究者が取り組んでおり，その知見が数多く報告されている．石川らは，バラスト道床部の実物大試験を行ない，実軌道における道床部の繰り返し変形特性を実験的に評価・検討している[1]．また，大型繰り返し三軸試験を実施し，要素試験結果を通して繰り返し弾塑性変形特性の把握も試みている[2]．一方，名村らは，荷重変動の中心荷重と変動振幅に着目し，実物大有道床模型軌道において上下方向の繰り返し荷重を加えた際の変形特性について検討し，変形特性値の推定方法を提案している[3]．また，文献[4]では，荷重の大きさとまくらぎ形状が繰り返し変形特性に及ぼす影響について実験的に検討している．これらの実験的検討においては，いずれも得られた知見を従前からある道床沈下量予測式（例えば文献[5),6]）へ如何に応用するかが重視されている．従前の道床沈下量予測式は非常に簡便に沈下量を与えるが，定数の設定など経験によるところも非常に大きい上，得られた結果からはバラスト内部の（空間的な）塑性変形の情報を得ることができない．

既往の研究では，バラスト道床の塑性変形の空間的な特性を把握するために，離散体，あるいは連続体としてモデル化し，汎用の離散化解析手法を用いた数値解析を試みている．石川らは，文献[7]では道床バラストの大型三軸試験の，文献[8]では実物大載荷試験の不連続変形法 (DDA) 解析をそれぞれ試みている．DDA による変形解析は相川らも試みており，地震荷重作用時のバラスト道床の破壊メカニズムに関する知見が報告されている[9]．また，阿部ら[10]は個別要素法 (DEM) を用いてまくらぎ・バラスト連成系の繰り返し荷重下での挙動解析を試みている．なお，DDA，DEM はいずれもバラストを離散体の集合としてモデル化し，解析するための手法であり，いずれの研究でも 2 次元解析にとどまっている．解析時の計算負荷を考えると，離散体モ

デルは粒子集合体の定性的な挙動の評価には適しているが，特に空間に3次元的に広がるバラスト道床全体の塑性挙動を的確に評価し，道床沈下量予測に応用することは非常に困難であるといわざるを得ない．そのため，バラスト道床を連続体としてモデル化することを前提とした解析的研究も試みられている．Augustinら[11]は，hypoplasticモデルにより道床バラストの構成式を与え，その有用性について要素試験結果との比較を通して検討している．また，Suikerら[12]は，作用荷重の繰り返し回数を弾塑性モデルの時間パラメータとみなして残留変形解析のための構成式を提案し，2次元有限要素解析に導入することで繰り返し荷重作用時の塑性変形の空間特性を評価している．連続体モデルは塑性変形の定量評価においては非常に効率良い解析手法の構築を可能とするものの，これまでは離散体解析が多く試みられてきたこともあり，バラスト材の塑性挙動の表現に対して有用である構成式の選定に関しては十分な検討はされていないのが現状である．

そこで本研究では，橋口らが提案し砂質土の要素試験に対して良好な再現性を示している，回転硬化を考慮した下負荷面モデル[13),14)]を用いて，道床部に使用されるバラスト材の繰り返し変形挙動の弾塑性解析を試み，当該モデル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

これまでの数多くの報告（例えば，文献[1),2)]）でも示されているように，鉄道用バラスト道床では荷重振幅を一定として載荷・除荷を繰り返した場合でも塑性変形が発生し，繰り返しとともに変形が累積・進展する力学的ラチェット現象が発現する．そのため，繰り返し載荷時におけるバラスト材の変形解析を行なう際には，降伏面の内側の領域ではいかなる応力変化に対しても塑性変形が生じない古典的弾塑性論をそのまま適用することができない．金属材料では降伏面の移動（移動硬化モデル）によってラチェット現象を容易に表現できるが，地盤材料の降伏面は応力空間の原点を常に辛うじて含み，一般に降伏面の平行移動は許容できない．そのため，簡便な移動硬化モデルによって力学的ラチェット現象を表現することは困難である．そこで本研究では，橋口らが提案した回転硬化を考慮した下負荷面モデル[13),14)]を用いることで，繰り返し荷重を受ける鉄道用バラスト材の力学的ラチェット現象の再現を試みる．なお，以下においては微小変形を仮定し，応力とひずみ速度は引張を正と定義する．また，文献[13),14)]では構成式は有効応力について定義されているが，バラスト道床の変形（沈下）において空隙が外力に抵抗する状況にはなく，応力は全応力で与えるものとする．

(1) 応力速度とひずみ速度との関係

まず，応力 $\boldsymbol{\sigma}$ の速度 $\dot{\boldsymbol{\sigma}}$ とひずみ速度（ストレッチング）$\boldsymbol{D}$ との関係について考える．文献[13),14)]の下負荷面モデルでは，応力速度は弾性ひずみ速度 $\boldsymbol{D}^e$ によって決まるものとする．すなわち，

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}} = \boldsymbol{E} : \boldsymbol{D}^e, \quad \boldsymbol{D}^e = \boldsymbol{D} - \boldsymbol{D}^p. \tag{1}$$

ただし，$\boldsymbol{D}^p$ は塑性ひずみ速度であり，弾性係数テンソル $\boldsymbol{E}$ は G をせん断弾性係数として

$$\begin{aligned} E_{ijkl} &= \left(K - \frac{2}{3}G\right)\delta_{ij}\delta_{kl} + G\left(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk}\right), \\ K &= \frac{p}{\gamma}, \quad p = -\frac{1}{3}\mathrm{tr}\boldsymbol{\sigma} = -\frac{1}{3}\sigma_{mm}, \end{aligned} \tag{2}$$

なお，定数 γ は ν を三軸圧縮試験における体積として定義した $\ln\nu$–$\ln p$ 平面における膨潤（弾性）線の傾きである．塑性ひずみ速度 $\boldsymbol{D}^p$ は，2(4) 節で示す流動則に基づいて与える．

(2) 正規降伏面と下負荷面

まず，正規降伏面を定義し，あわせて降伏面の拡大（縮小）で表現される等方硬化と，降伏面の回転によって表現される回転硬化を導入する．正規降伏面は，古典的弾塑性論における降伏曲面と考えてよい．正規降伏面は，形状の相似性を保持するものと仮定すると次式で記述できる．

$$f(\hat{p}, \hat{\chi}) = \hat{p}g(\hat{\chi}) = F(H), \tag{3}$$

ここで，H は等方硬化変数，$\boldsymbol{\beta}$ は回転硬化変数であり，$F(H)$ は等方硬軟化関数である．また，$\hat{p}$, $\hat{\chi}$ はともに正規降伏面上の応力 $\hat{\boldsymbol{\sigma}}$ により，次式で与えられる．

$$\begin{aligned} &\hat{p} = -\frac{1}{3}\mathrm{tr}\hat{\boldsymbol{\sigma}}, \quad \hat{\chi} = \frac{\|\hat{\boldsymbol{\eta}}\|}{\hat{m}}, \quad \hat{\boldsymbol{\eta}} = \hat{\boldsymbol{Q}} - \boldsymbol{\beta}, \\ &\hat{\boldsymbol{Q}} = \frac{\hat{\boldsymbol{\sigma}}^*}{\hat{p}}, \quad \hat{\boldsymbol{\sigma}}^* = \hat{\boldsymbol{\sigma}} + \hat{p}\boldsymbol{I}. \end{aligned} \tag{4}$$

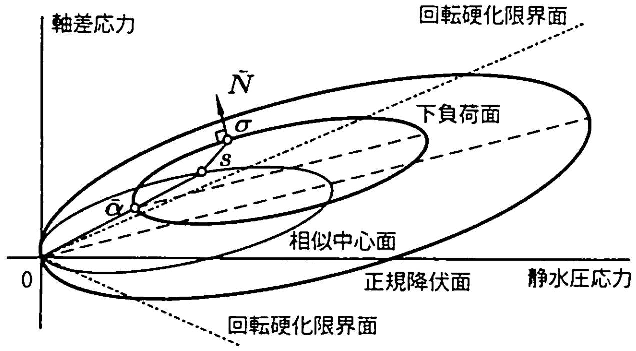
ただし，$\hat{m}$ は材料定数 ϕ と $\sin 3\hat{\theta}_\sigma$ の関数として定義される．

$$\hat{m} = f_m(\sin 3\hat{\theta}_\sigma; \phi), \quad \sin 3\hat{\theta}_\sigma = -\sqrt{6}\frac{\mathrm{tr}\hat{\boldsymbol{\eta}}^3}{\|\hat{\boldsymbol{\eta}}\|^3}. \tag{5}$$

なお，$\hat{m}$ の具体的な定義は，2(5) 節で示す．

一方，下負荷面は，応力空間内において現応力点を通り正規降伏面に相似な曲面と定義され[13)]，次式で表現できるものと仮定する．

$$\begin{aligned} &f(\bar{p}, \bar{\chi}) = \bar{p}g(\bar{\chi}) = RF(H), \\ &\bar{\boldsymbol{\sigma}} = \boldsymbol{\sigma} - \bar{\boldsymbol{\alpha}}, \quad \bar{p} = -\frac{1}{3}\mathrm{tr}\bar{\boldsymbol{\sigma}}, \quad \bar{\chi} = \frac{\|\bar{\boldsymbol{\eta}}\|}{\bar{m}}, \\ &\bar{\boldsymbol{\eta}} = \bar{\boldsymbol{Q}} - \boldsymbol{\beta}, \quad \bar{\boldsymbol{Q}} = \frac{\bar{\boldsymbol{\sigma}}^*}{\bar{p}}, \quad \bar{\boldsymbol{\sigma}}^* = \bar{\boldsymbol{\sigma}} + \bar{p}\boldsymbol{I}, \end{aligned} \tag{6}$$



図–1 軸対称応力状態における下負荷面と各種応力の定義.（文献[13]を参考に作成）

ここで,

$$\bar{m} = f_m(\sin 3\bar{\theta}_\sigma;\ \phi), \qquad \sin 3\bar{\theta}_\sigma = -\sqrt{6}\frac{\mathrm{tr}\bar{\eta}^3}{\|\bar{\eta}\|^3}, \tag{7}$$

で定義する．また，R $(0 \geq R \geq 1)$ は正規降伏面と下負荷面との相似比である．$\bar{\alpha}$ は，正規降伏面上でゼロ応力となる点に対応する下負荷面上の点であり，相似比 R と正規降伏面と下負荷面との相似中心応力 s とを用いて，$\bar{\alpha} = (1 - R)s$ で与えられる．

なお，現応力，相似中心応力と下負荷面，正規降伏面の関係を図–1 に図示しておく．

(3) 各種硬化変数の発展則・相似中心の移動則

回転硬化を考慮した下負荷面モデル[13),14)]においては，回転硬化，等方硬化の 2 種類の硬化変数 β，H と，正規降伏面と下負荷面との相似中心（応力）とを用いて繰り返し載荷時の弾塑性挙動を制御している．そのため，これらの制御変数の発展則・移動則を定めておく必要がある．

回転硬化変数 β の発展則は，正規降伏面の回転速度が塑性偏差ストレッチングの大きさ $\|D^{p*}\|$ に比例し塑性体積ストレッチング $D_v^p = \mathrm{tr}D^p$ には依存しないこと，回転範囲には限界が存在することを仮定した上で，次式で与えることができる．

$$\begin{aligned} &\dot{\beta} = b_r\|D^{p*}\|\|\bar{\eta}\|\bar{\eta}_b, \qquad \bar{\eta}_b = \bar{m}_b\bar{t} - \beta, \\ &\bar{t} = \frac{\bar{\eta}}{\|\bar{\eta}\|}, \qquad \bar{m}_b = f_m(\sin 3\bar{\theta}_\sigma;\ \phi_b), \end{aligned} \tag{8}$$

上式において，b_r は材料定数である．

一方，等方硬化変数 H の発展則は，文献[13)]と同様に，塑性ストレッチングの偏差成分，体積成分双方に依存する形で，次式で与える．

$$\begin{aligned} &\dot{H} = D_v^p + \mu\|D^{p*}\|\left(m_d - \frac{\|\sigma^*\|}{p}\right), \\ &m_d = f_m(\sin 3\theta_\sigma;\ \phi_d), \\ &\sin 3\theta_\sigma = -\sqrt{6}\frac{\mathrm{tr}\sigma^{*3}}{\|\sigma^{*3}\|}, \qquad \sigma^* = \sigma + pI, \end{aligned} \tag{9}$$

ただし，μ，ϕ_d は材料定数である．

次に，正規降伏面と下負荷面との相似中心（応力）s の移動則について考える．移動則を定義するために，相似中心 s を通り正規降伏面と相似な曲面である相似中心面を次式で定義する．

$$\begin{aligned} &f(p_s, \chi_s) = p_s g(\chi_s), \\ &p_s = -\frac{1}{3}\mathrm{tr}s, \qquad \chi_s = \frac{\|\eta_s\|}{m_s}, \qquad \eta_s = Q_s - \beta, \\ &Q_s = \frac{s^*}{p_s}, \qquad s^* = s + p_s I, \end{aligned} \tag{10}$$

s の移動則は，式 (10) 第 1 式で定義された相似中心面が正規降伏面の内側に存在する条件を常に満足するように定義する．その結果，次式で与えることができる．

$$\begin{aligned} &\dot{s} = c\|D^p\|\tilde{\sigma} + \frac{1}{F}\left[\dot{F} - \mathrm{tr}\left(\frac{\partial f(p_s, \chi_s)}{\partial \beta}\cdot\dot{\beta}\right)\right]s, \\ &\tilde{\sigma} = \sigma - s, \end{aligned} \tag{11}$$

ここで，$c(\geq 0)$ は材料関数である．

(4) 流動則と負荷条件

本研究では，流動則には文献[13),14)]と同様に関連流動則を用いる．その結果，塑性ストレッチング D^p は次式で規定することができる．

$$D^p = \lambda\bar{N}, \qquad (\lambda > 0), \tag{12}$$

ここで，$\bar{N}$ は，下負荷面の単位外向き法線方向を与えるテンソルである．

$$\bar{N} = \frac{1}{\psi}\frac{\partial f(\bar{p}, \bar{\chi})}{\partial \sigma}, \qquad \psi = \left\|\frac{\partial f(\bar{p}, \bar{\chi})}{\partial \sigma}\right\|. \tag{13}$$

また，正値の比例定数 λ は，次式で与えられる．

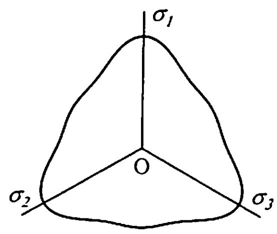
$$\lambda = \frac{\mathrm{tr}(\bar{N}\cdot\dot{\sigma})}{M_p} = \frac{\mathrm{tr}(\bar{N}ED)}{M_p + \mathrm{tr}(\bar{N}E\bar{N})}, \tag{14}$$

なお，M_p，$\bar{a}$，h は次式で定義する．

$$\begin{aligned} M_p = &\ \mathrm{tr}(\bar{N}\cdot\bar{a}) \\ &+ \mathrm{tr}(\bar{N}\cdot\bar{\sigma})\left[\frac{hF'}{F} - \frac{1}{RF}\mathrm{tr}\left(\frac{\partial f(\bar{p}, \bar{\chi})}{\partial \beta}\cdot b\right) + \frac{U}{R}\right], \end{aligned} \tag{15}$$

ただし，$U = U(R)$ を $U = u_1(1/R^{u_2} - 1)$ $(u_1, u_2$: 材料定数$)$ なる関数として与えた上で，

$$\begin{aligned} &\bar{a} = (1 - R)z - Us, \qquad F' = \frac{dF(H)}{dH}, \\ &h = \mathrm{tr}\bar{N} + \mu\|\bar{N}^*\|\left(m_d - \frac{\|\sigma^*\|}{p}\right), \\ &b = b_r\|\bar{N}^*\|\|\bar{\eta}\|\bar{\eta}_b, \\ &z = c\tilde{\sigma} + \frac{1}{F}\left[F'h - \mathrm{tr}\left(\frac{\partial f(p_s, \chi_s)}{\partial \beta}b\right)\right]s, \\ &\bar{N}^* = \bar{N} - \frac{1}{3}(\mathrm{tr}\bar{N})I. \end{aligned} \tag{16}$$



図–2 π 平面に関する $\bar{m}$, m_s, $\bar{m}_b$ の断面形状.

と定義する.

塑性流動は, 式 (14) の比例係数が常に正であるように規定する. その結果, 負荷条件は次式で与えられることとなる.

$$\begin{aligned} \boldsymbol{D}^p &\neq \boldsymbol{0}, & \mathrm{tr}(\bar{\boldsymbol{N}}\boldsymbol{E}\boldsymbol{D}) &> 0, \\ \boldsymbol{D}^p &= \boldsymbol{0}, & \mathrm{tr}(\bar{\boldsymbol{N}}\boldsymbol{E}\boldsymbol{D}) &\leq 0. \end{aligned} \tag{17}$$

(5) 材料関数

前節で示した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弾塑性変形解析を行なう場合, いくつかの材料関数を定義しておく必要がある. 本研究では, 砂質土を対象に文献[13),14)]で導入された材料関数を用いることとする. 以下では, 各材料関数の定義を示す.

まず, 材料関数 g は, 次の 2 次式で与える.

$$g(\bar{\chi}) = 1 + \bar{\chi}^2, \quad g(\chi_s) = 1 + \chi_s^2. \tag{18}$$

また, $\bar{m}$, m_s, $\bar{m}_b$ はそれぞれ次式で定義する.

$$\begin{aligned} \bar{m} &= \frac{2\sqrt{6}\sin\phi}{3[1 + a(1 - \sin^2 3\bar{\theta}_\sigma)] - \sin\phi \sin 3\bar{\theta}_\sigma}, \\ m_s &= \frac{2\sqrt{6}\sin\phi}{3[1 + a(1 - \sin^2 3\theta_s)] - \sin\phi \sin 3\theta_s}, \\ \bar{m}_b &= \frac{2\sqrt{6}\sin\phi_b}{3[1 + a(1 - \sin^2 3\bar{\theta}_\sigma)] - \sin\phi_b \sin 3\bar{\theta}_\sigma}, \end{aligned} \tag{19}$$

ただし, a は定数である. 式 (19) の $\bar{m}$, m_s, $\bar{m}_b$ とも同形式となっており, これを π 平面上で図示すると, 図–2 のようになる.

一方, 等方硬軟化関数 $F(H)$ は, 硬化・軟化現象が塑性体積の増減によって専ら生じることを考慮して, 次式で与える.

$$F = F_0 \exp\left(-\frac{H}{\rho - \gamma}\right). \tag{20}$$

なお, ρ, γ は材料定数である.

また, 式 (11) の移動則に含まれる材料関数 c は次式で与える.

$$c = \frac{c_1}{R^{c_3}} \exp\left(\frac{c_2}{\sqrt{3}}\mathrm{tr}\bar{\boldsymbol{N}}\right), \tag{21}$$

ここで, c_1, c_2, c_3 は材料定数である.

表–1 解析に用いた材料パラメータ.

降伏曲面形状	$\phi = 31°$, $a = 0.1$
等方硬軟化	$\rho = 100$, $\mu = 3.8$, $\phi_d = 20°$
	$F_0 = 270$(kPa)
回転硬化	$b_r = 39$, $\phi_b = 46.4°$
U の制御	$u_1 = 0.71$, $u_2 = 2$
相似中心の移動	$c_1 = 7.5$, $c_2 = 1$, $c_3 = 3$
弾性定数	$\gamma = 0.00018$, $G = 190000$(kPa)

3. 繰り返し三軸試験の弾塑性解析

前節で示した回転硬化を考慮した下負荷面モデルを用いて, 鉄道用バラスト材を対象とした繰り返し三軸試験の弾塑性解析を試みる. なお, 解析は実験条件を勘案し, 応力制御の下で応力や各種硬化変数を前進 Euler 法によって積分計算した. 解析結果の比較・検討は, 石川らが行なったバラスト材の繰り返し三軸試験結果[2)]に基づき行なう. 実験に使用した材料や実験条件等に関する詳細については, 文献[2)]を参照されたい.

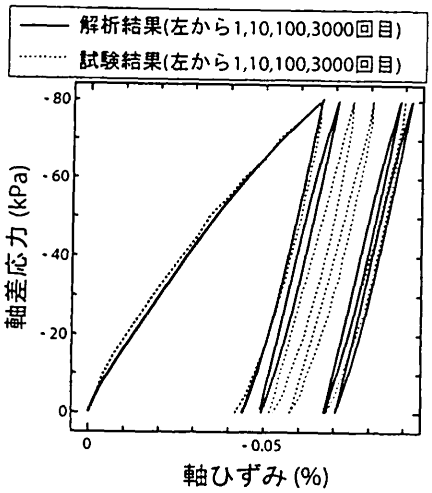
(1) 解析条件

解析に用いた材料パラメータを表–1 に示す. なお, 下負荷面モデルでは, 要素試験結果から体系的に材料パラメータを決定する方法が提案されていない. そのため, 解析においては種々の載荷パターンの三軸試験結果とのカーブフィッティングからパラメータの値を設定するか, あるいは文献[15)]に示されているように, 過去の解析事例を材料の種類で整理した結果から解析者の判断に基づき設定する必要がある. しかし, 今回の解析では十分な量の実験データを既往の報告例から集めることができなかったため, やむを得ず比較対象としている繰返し三軸圧縮試験結果を良好に再現できるように材料パラメータの値を定めることとした. また, 初期応力は $\boldsymbol{\sigma} = -19.6\boldsymbol{I}$(kPa) として実験条件との整合を図った. 相似中心応力の初期値は $\boldsymbol{s} = -0.5\boldsymbol{I}$(kPa) とし, 回転硬化変数は $\boldsymbol{\beta} = \boldsymbol{0}$ を初期値として与えることとした.

(2) 軸ひずみと軸差応力との関係

まず, 軸ひずみと軸差応力との関係について考える. 繰り返し載荷時における軸ひずみと軸差応力について, 三軸試験結果と解析結果とを合わせて図–3 に示す. なお, 図中の実線は左から 1, 10, 100, 3000 回目の解析結果を示している.

1 回目のつり合い経路は, 載荷時・除荷時ともに実験結果と解析結果とではほぼ同一となっており, 大きな塑性変形が生じる繰り返し初期において, 回転硬化を考慮した下負荷面モデルを用いることでつり合い経路の



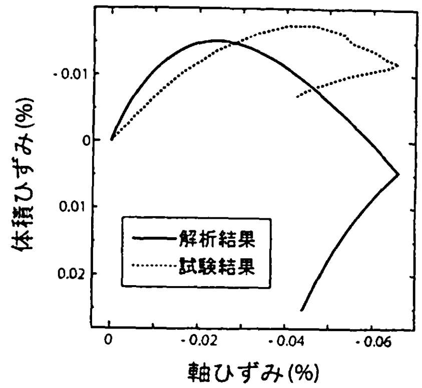
図–3 繰り返し載荷時における軸ひずみと軸差応力との関係.(拘束圧 19.6(kPa),繰り返し回数:3000 回.試験結果は文献[2])から抽出して図示.)

形状や発現した軸ひずみの大きさは精度良く再現可能であることが確認できる.また,載荷 10 回目での試験結果と解析結果とを比較すると,材料の変形係数(図中の線の傾き)はほぼ同程度であるが,残留軸ひずみは解析結果がわずかに過小評価となっている.しかし,載荷 100 回目では,解析結果と試験結果とで残留軸ひずみの大小関係は逆転し,解析は実験を 15%程度上回る結果となっている.粒径に比して非常に小さい実験条件であることから,実験結果のばらつきは小さくないと思われるが,中程度の繰り返し回数においては残留ひずみの累積の速さが解析と実験との間で必ずしも整合していないと判断するのが妥当であると考える.残留軸ひずみの累積の速さに対する解析モデルの再現性については,3(4) 節で論じることとする.なお,繰り返し数を 3000 回では,実験と解析とで発生ひずみの大きさ・変形係数ともにほぼ同一となった.

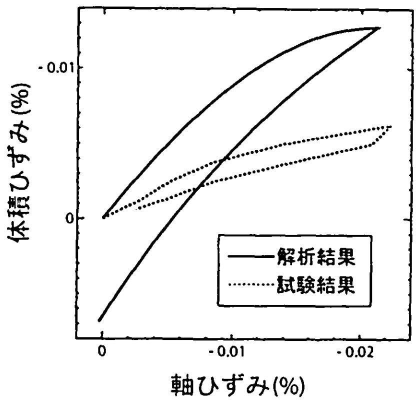
(3) 軸ひずみと体積ひずみとの関係

次に,体積変化(ダイレイタンシー)に関する当該モデルの再現性能について検討する.繰り返し載荷 1 回目,3000 回目における軸ひずみと体積ひずみとの関係を図–4 に示す.なお,軸ひずみ,体積ひずみとも,載荷開始時の大きさをゼロとして図示している.

載荷 1 回目では,実験結果が軸ひずみ 0.45%程度で収縮から膨張に転じ,除荷過程でもそのまま体積膨張を続け,最終的には体積が 0.07%程度収縮している.しかし,解析結果においては,収縮から膨張に転じる軸ひずみが 0.025%程度となっており,実験結果との間に小さくない差が生じている.その後の体積膨張の進行は解析の方がより顕著であり,その傾向は除荷時においても認められる.その結果,解析においては最終的



(a) 繰り返し 1 回目.



(b) 繰り返し 3000 回目.

図–4 繰り返し載荷時における軸ひずみと体積ひずみとの関係.(拘束圧 19.6(kPa),(a) 繰り返し 1 回目,(b) 繰り返し 3000 回目.試験結果は文献[2])から抽出して図示.)

な体積は 0.02%程度膨張する結果が得られている.繰り返し初期では,実験と解析とで体積の収縮・膨張傾向の定性的な挙動は当該モデルで表現できているものの,体積ひずみの残留量には比較的大きな差が生じていることが分かる.

一方,載荷 3000 回目においては,実験・解析ともに載荷時には体積収縮,除荷時には体積膨張の傾向を示しており,体積の収縮・膨張に関する定性的な傾向は当該モデルで表現できている.しかし,繰り返し 1 回目と同様,解析において評価される最終的な体積ひずみは実験結果と比較して大きな体積膨張を示している.実験における測定データのばらつきを考慮した上で判断する必要があるものの,今回は体積ひずみに関して当該モデルの再現性に乏しい結果となった.現時点ではその原因は不明であるが,モデル内で導入している体積の圧力依存性が実現象と整合していないことも考えられ,今後の検討課題としたい.

(4) 塑性変形の累積挙動

最後に,載荷・除荷の繰り返し回数と残留軸ひずみとの関係を,図–5 に示す.繰り返し三軸試験結果にお

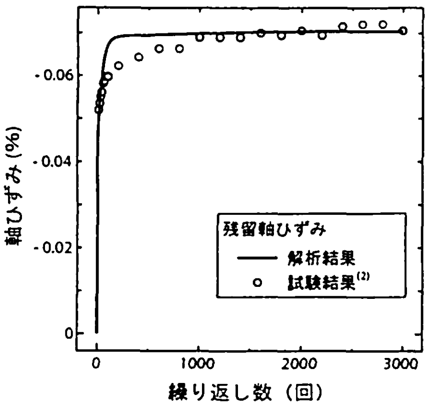


図-5 繰り返し回数と残留軸ひずみとの関係．（拘束圧19.6(kPa)，試験結果は文献2)から抽出して図示.）

いては，繰り返し初期において急激に残留ひずみが累積し，繰り返し100回目程度以降でも1500回目程度まで緩やかに残留変形が蓄積している．1500回目程度以降では，残留軸ひずみは概ね一定割合で漸増傾向を示していることが見て取れる．一方，解析結果においては，繰り返し初期の残留変形の蓄積量は試験結果と概ね同程度であるが，100回目程度から1500回目程度の範囲では，試験結果との間で比較的大きな差が認められる．解析では100回目以降も残留ひずみの累積の速さが緩和することなく，繰り返し200回程度で終局値と同オーダーの残留軸ひずみが累積している．それ以降の繰り返しにおいては，実験結果と同程度の速さで軸ひずみが累積しており，多数回の繰り返し時における漸進的な変形の累積挙動は当該モデルによって良好に再現できると考えられる．

4. おわりに

本研究では，橋口らが提案した回転硬化を考慮した下負荷面モデルを用いて，道床部に使用されるバラスト材の繰り返し変形挙動の弾塑性解析を試みた．その結果，繰り返し初期における載荷・除荷時のつり合い経路は解析によって良好に再現できた．それ以降の繰り返し時においては，変形係数は解析結果と実験結果とで概ね同程度であるが，残留軸ひずみの累積速さが一致をみておらず，繰り返し100回程度～1500回程度においては，残留軸ひずみの値に明瞭な差が認められた．しかし，1500回目程度以降の漸進的なひずみの累積過程においては，解析によって良好に再現できたと考えている．一方，繰り返し載荷時の体積変化については，収縮・膨張の定性的な傾向は解析結果から確認できたものの，定量的には比較的大きな差が生じている．ただし，粒径の大きなバラスト砕石に微小な変形を生じさせる実験条件であることから，当該モデルの有用性は，実験結果のばらつきを考慮した再現性能の検討からだけでなく，複雑な構成式や体系的に設定できない材料パラメータの存在，陰解法による応力積分の煩雑さなどの実用上の利点・欠点も総合的に考慮した上で，慎重に判断する必要があると考える．

今後は，実験結果だけでなく離散体モデルによる解析結果も用いて，構成モデル間の弾塑性変形挙動の再現性能の比較検討や，実軌道における繰り返し塑性変形機構の解明，繰り返し載荷時の高効率な変形量評価手法の構築などに取り組んでいく予定である．

参考文献

1) 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.
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.
3) 名村　明，木幡行宏，三浦清一：道床バラストの繰返し変形特性と推定法，土木学会応用力学論文集，Vol.5, pp.793–800, 2002.
4) 名村　明，木幡行宏，三浦清一：有道床軌道の繰返し変形特性に及ぼす荷重とまくらぎ形状の影響に関する実験的研究，土木学会論文集，No.779, IV-66, pp.53–68, 2005.
5) Dahlberg, T.: Some railroad settlement models — a critical review. *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, Vol.215, Part F, pp.289–300, 2001.
6) 石田　誠，名村　明，鈴木貴洋：軌道沈下の実態と予測モデル，土木学会鉄道力学論文集，Vol.6, pp.61–66, 2002.
7) 石川達也，大西有三：道床バラストの繰返し変形挙動に対する不連続変形法 (DDA) の適用，土木学会論文集，No.589, III-42, pp.205–217, 1998.
8) 石川達也，大西有三，堀池高広：不連続変形法 (DDA) による道床バラスト部繰返し塑性変形機構の検討，土木学会論文集，No.645, III-50, pp.15–28, 2000.
9) 相川　明，河野正寿：正弦波地震載荷時の道床砕石粒子の局所的な運動エネルギー特性，土木学会鉄道力学論文集，Vol.8, pp.25–30, 2004.
10) 阿部和久，Syakir, M.，紅露一寛：二次元粒状体モデルによるバラスト道床の沈下解析，土木学会鉄道力学論文集，Vol.10, 2006.
11) Augustin, S., Gudehus, G., Huber, G., Schünemann, A.: Numerical Model and Laboratory tests on settlement of ballast track. *System dynamics and long-term behaviour of railway vehicles, track and subgrade*, Popp, K., Schiehlen, W. (eds.), pp. 317–336, Springer, 2003.
12) Suiker, A.S.J. and de Borst, R.: A numerical model for the cyclic deterioration of railway tracks. *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, Vol.57, pp.441–470, 2003.
13) 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.
14) Hashiguchi, K. and Chen, Z-P.: Elastoplastic constitutive equation of soils with the subloading surface and the rotational hardening. *Int. J. Numer. Meth. Geomech.*, Vol.22, pp.197–227, 1998.
15) 瀬戸内秀規，橋口公一：下負荷面モデルの材料パラメータの決定法に関する研究，土木学会応用力学論文集，Vol.9, pp.491–502, 2006.

CYCLIC DEFORMATION ANALYSIS OF RAILWAY BALLAST USING SUBLOADING SURFACE ELASTOPLASTIC MODEL

Kazuhiro KORO, Munemitsu KAJIWARA and Kazuhisa ABE

Cyclic elastoplastic behaviour of railway ballast is simulated using the subloading surface model with rotational hardening, in order to employ in the continuum-type settelement simulation model. In low (under 100 load cycles) and high cycle range (over 1500 load cycles), the simuation results on the deviatoric stress – strain relation and the magnitude of permanent strain is good agreement with the triaxial test results. The prediction of the volumeric strain appears to be somewhat inaccurate, though change from compaction to dilatation during cyclic loading can be simulated.