

鉄道におけるバラスト道床材の繰り返し変形解析に用いる 構成モデルの検討

USEFULNESS OF CONSTITUTIVE MODELS FOR RAILWAY BALLAST SUBJECTING TO CYCLIC LOADING

紅露一寛¹⁾, 嘉数東陽²⁾, 梶原宗光²⁾, 阿部和久³⁾

Kazuhiro KORO, Toyo, KAKAZU, Munemitsu KAJIWARA and Kazuhisa ABE

1) 新潟大学大学院自然科学研究科 (〒 950-2181 新潟市西区五十嵐二の町 8050, E-mail: kouro@eng.niigata-u.ac.jp)

2) 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)

3) 新潟大学工学部建設学科 (〒 950-2181 新潟市西区五十嵐二の町 8050, E-mail: abe@eng.niigata-u.ac.jp)

The usefulness of two elastoplastic constitutive models, hypoplastic model and subloading surface model, is investigated through the numerical results on simulation of cyclic triaxial test for railway ballast. The stress-strain relation is more accurately simulated using the subloading surface model than the hypoplastic model. Although change from compaction to dilatation during cyclic loading can be simulated with the subloading surface model, the prediction of the volumetric strain appears to be somewhat inaccurate. The hypoplastic model is available for estimating the accumulation rate of permanent strain under cyclic loading. The subloading surface model with rotational hardening is in good agreement to the results of the cyclic triaxial test. The complicated constitutive equations and the determination of many material parameters are obstacles to use of the subloading surface model in ballast settlement simulation.

Key Words: railway track, ballast, hypoplastic model, subloading surface model

1. はじめに

わが国の鉄道軌道で採用・敷設されているバラスト道床は、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、輪重衝撃を吸収する役割も果たしている。碎石の集合体であるバラストは安価に敷設・施工できるものの、列車の繰り返し走行によって容易に変形・変化し、生じた残留変形は軌道の 3 次元のな狂いとなって現われる。中でも沈下（鉛直方向の残留変形）は軌道保守において主要な点検・改良項目であることから、沈下の進展の度合いを高精度に予測することが重要となる。

これまで、道床の構成材料であるバラストの巨視的な弾塑性挙動や実際のバラスト道床における沈下挙動に関して、その実験的・解析的な評価・検討が試みられている。特に実験的検討については、要素試験・実物大試験から得られた知見が数多く報告されている（例えば、文献^(1, 2, 3)）。一方、解析的なアプローチによる試みにおいては、バラスト粒子の粒径が数 cm オーダーと大きいこともあり、多くの場合バラスト道床を粒子集合体としてモデル化し、不連続変形法 (DDA)^(4, 5) や個別要素法 (DEM)⁽⁶⁾ を用いてその変形挙動

をシミュレートしている。これらの方法は実際のバラストを忠実に表現したものであるが、計算量の制約からいずれの試みも力学的に不合理な 2 次元解析にとどまっており、3 次元解析については今後も大きな困難を伴うものと思われる。

そのため、バラスト道床の 3 次元の巨視的な変形挙動を定量的に評価するためには、連続体モデルを採用することが現実的である。著者らは、バラスト材を弾塑性連続体としてモデル化し、橋口らが提案した回転硬化を考慮した下負荷面モデル^(7, 8) を構成モデルに用いて繰り返し三軸試験の数値解析を試みている⁽⁹⁾。一方、Augustin ら⁽¹⁰⁾ は、hypoplastic^(11, 12) 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。文献⁽¹⁰⁾ では通常の三軸試験の境界条件のほかに、圧密試験と同様に側方変位を拘束した境界条件の下でも繰り返し荷重を作用させ、得られた実験結果と解析結果との比較を通して、載荷方向の軸ひずみやその残留ひずみの累積挙動について構成モデルの有用性を検討している。しかし、体積変化に関する構成モデルの再現性能については検討結果が示されていない。また、構成モデル間の有用性の比較検討もなされておらず、

構成式の選定に関して十分な情報が得られているとは言い難い。

そこで本研究では、バラスト材の構成モデルとして hypoplastic モデルと回転硬化を考慮した下負荷面モデルの 2 種類を考え、繰り返し三軸試験結果の再現性能の面から双方の構成モデルの有用性について検討する。

2. 繰り返し変形解析のための構成モデル

本研究では、バラスト道床材の繰り返し変形解析において用いる構成モデルとして、hypoplastic モデル^(11, 12)と、橋口らが繰り返し荷重を受ける地盤材料の構成モデルとして提案している下負荷面モデル^(7, 8)の 2 種類を考える。以下に、各々の構成モデルを示す。

2.1. Hypoplastic モデル

Hypoplastic モデル^(11, 12)は、古典的弾塑性論のような弾性域と塑性域の区別がなく、構成式が古典的弾塑性モデルと比べて簡易な形で表現できる利点を有している。この構成モデルでは、真応力 \mathbf{T} の客観速度 $\dot{\mathbf{T}}$ とストレッチング (ひずみ速度) \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。

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

ここで、 $\dot{\mathbf{T}} = \mathbf{T}/\text{tr}\mathbf{T}$ とし、 $\dot{\mathbf{T}}^*$ は $\dot{\mathbf{T}}$ 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。

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

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

$$h_i = \frac{1}{c_1^2} + \frac{1}{3} - \left(\frac{e_{i0} - e_{d0}}{e_{c0} - e_{d0}}\right)^\alpha \frac{1}{c_1 \sqrt{3}}, \quad (4)$$

$$e_i = e_{i0} \exp \left[- \left(\frac{3p}{h_s}\right)^n \right], \quad (5)$$

$$\frac{e_c}{e_i} = \frac{e_{c0}}{e_{i0}}, \quad \frac{e_d}{e_i} = \frac{e_{d0}}{e_{i0}}. \quad (6)$$

ただし、 h_s は粒子硬度、 c_1 , 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、 $p = -\text{tr}\mathbf{T}/3 = 0$ 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に相当し、

次式で与えられる。

$$a_1^{-1} = c_1 + c_2 \|\dot{\mathbf{T}}^*\| [1 + \cos(3\theta)], \quad (7)$$

$$\cos(3\theta) = -\sqrt{6} \frac{\text{tr}(\dot{\mathbf{T}}^{*3})}{[\text{tr}(\dot{\mathbf{T}}^{*2})]^{3/2}}, \quad (8)$$

ここで、 c_2 は材料定数であり、間隙比の変化速度は $\dot{e} = (1+e)\text{tr}\mathbf{D}$ で与える。なお、2.1 節では当該構成式を用いて変形解析を実行するために必要となる最低限の情報を示した。Hypoplastic モデルの概念や材料パラメータの設定方法等に関する詳細については、文献^(11, 12)を参照されたい。

2.2. 回転硬化を考慮した下負荷面モデル

下負荷面モデルは、繰り返し負荷に対する塑性変形挙動を表現するために用いられる構成モデルである。構成式は、古典的弾塑性論における降伏面の内部に、その内部に常に現応力点を通り降伏面に相似となるように定義される下負荷面を用いて構成される。なお、回転硬化は、橋口らが地盤材料に対しては移動硬化によってバウシinger 効果を表現できない点に着目し、主応力空間内での降伏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したものである^(7, 8)。

まず、応力速度 $\dot{\mathbf{T}}$ とストレッチング (ひずみ速度) \mathbf{D} との関係について考える。下負荷面モデルでは、古典的弾塑性論と同様に応力速度は弾性ストレッチング \mathbf{D}^e によって決まるものとする。

$$\dot{\mathbf{T}} = \mathbf{E} : \mathbf{D}^e, \quad \mathbf{D}^e = \mathbf{D} - \mathbf{D}^p, \quad (9)$$

ただし、 \mathbf{D}^p は塑性ストレッチングであり、弾性係数テンソル \mathbf{E} は G をせん断弾性係数として

$$E_{ijkl} = \left(K - \frac{2}{3}G\right) \delta_{ij}\delta_{kl} + G(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk}), \quad (10)$$

$$K = \frac{p}{\gamma}, \quad p = -\frac{1}{3}\text{tr}\mathbf{T}.$$

なお、 γ は定数である。

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、 $\hat{\mathbf{T}}$ を正規降伏面上の応力、 β を回転硬化変数、 H を等方硬化変数として

$$\begin{aligned} f(\hat{\mathbf{T}}; \beta) &= \hat{p}g(\hat{\chi}) = F(H), \\ \hat{p} &= -\frac{\text{tr}\hat{\mathbf{T}}}{3}, \quad \hat{\chi} = \frac{\|\hat{\eta}\|}{\hat{m}}, \quad \hat{\eta} = \hat{\mathbf{Q}} - \beta, \\ \hat{\mathbf{Q}} &= \frac{\hat{\mathbf{T}}^*}{\hat{p}}, \quad \hat{\mathbf{T}}^* = \hat{\mathbf{T}} + \hat{p}\mathbf{I}, \end{aligned} \quad (11)$$

により定義する。ここで、関数 g は $g(\hat{\chi}) = 1 + \hat{\chi}^2$ なる 2 次式で与えることとする。 \hat{m} は ϕ を材料パラメータとして

$$\hat{m} = f_m(\sin 3\hat{\theta}_T; \phi), \quad \sin 3\hat{\theta}_T = -\sqrt{6} \frac{\text{tr}\hat{\eta}^3}{\|\hat{\eta}\|^3}, \quad (12)$$

$$f_m(x; \theta) = \frac{2\sqrt{6} \sin \theta}{3[1 + a(1 - x^2)] - x \sin \theta},$$

で与えられる。以下においては、材料関数 f_m は上式で与えるものとし、 a は定数である。

また、正規降伏面と相似形の曲面で、かつ現時点の応力 \mathbf{T} がこの曲面上に存在するように定義し、この曲面を下負荷面と呼ぶ。下負荷面上の応力を $\bar{\mathbf{T}}$ として

$$\begin{aligned} f(\bar{\mathbf{T}}; \beta) &= \bar{p}g(\bar{\chi}) = RF(H), \\ \bar{\mathbf{T}} &= \mathbf{T} - (1 - R)\mathbf{s}, \quad \bar{p} = -\frac{1}{3}\text{tr}\bar{\mathbf{T}}, \quad \bar{\chi} = \frac{\|\bar{\eta}\|}{\bar{m}}, \\ \bar{\eta} &= \bar{\mathbf{Q}} - \beta, \quad \bar{\mathbf{Q}} = \frac{\bar{\mathbf{T}}^*}{\bar{p}}, \quad \bar{\mathbf{T}}^* = \bar{\mathbf{T}} + \bar{p}\mathbf{I}, \end{aligned} \quad (13)$$

で与える。なお、 \mathbf{s} は 2 つの曲面の相似中心応力、 R ($0 \leq R \leq 1$) は 2 曲面の相似比であり、

$$\bar{m} = f_m(\sin 3\bar{\theta}_T; \phi), \quad \sin 3\bar{\theta}_T = -\sqrt{6} \frac{\text{tr}\bar{\eta}^3}{\|\bar{\eta}\|^3}, \quad (14)$$

である。

各種応力、硬化変数の発展則は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \dot{\beta} &= b_r \|D^{P^*}\| \|\bar{\eta}\| \bar{\eta}_b, \\ \bar{\eta}_b &= \bar{m}_b \frac{\bar{\eta}}{\|\bar{\eta}\|} - \beta, \quad \bar{m}_b = f_m(\sin 3\bar{\theta}_T; \phi_b), \end{aligned} \quad (15)$$

$$\dot{\mathbf{s}} = c \|D^{P^*}\| \bar{\mathbf{T}} + \frac{1}{F} \left[\dot{F} - \text{tr} \left(\frac{\partial f(\mathbf{s}; \beta)}{\partial \beta} \right) \dot{\beta} \right] \mathbf{s}, \quad (16)$$

$$\bar{\mathbf{T}} = \mathbf{T} - \mathbf{s}, \quad F(H) = F_0 \exp \left(-\frac{H}{\rho - \gamma} \right),$$

$$\dot{H} = D_0^p + \mu \|D^{P^*}\| \left(m_d - \frac{\|\mathbf{T}^*\|}{p} \right),$$

$$m_d = f_m(\sin 3\theta_T; \phi_d), \quad \sin 3\theta_T = -\sqrt{6} \frac{\text{tr}\mathbf{T}^{*3}}{\|\mathbf{T}^*\|^3}, \quad (17)$$

$$\mathbf{T}^* = \mathbf{T} + p\mathbf{I},$$

ここで、 D^{P^*} は塑性ストレッチングの偏差成分であり、 ρ 、 ϕ_b 、 ϕ_d 、 μ は材料パラメータである。また、 F は等方硬化関数、 \dot{F} は F の物質時間導関数である。材料関数 U 、 c は次式で与える。

$$U = u_1 \left(\frac{1}{R^{u_2}} - 1 \right), \quad c = \frac{\zeta_1}{R^{\zeta_3}} \exp \left(\frac{\zeta_2}{\sqrt{3}} \text{tr}\bar{\mathbf{N}} \right), \quad (18)$$

なお、 u_1 、 u_2 、 ζ_1 、 ζ_2 、 ζ_3 は材料パラメータである。

流動則は関連流動則で与え、塑性ストレッチング D^P は次式で与える。

$$D^P = \lambda \bar{\mathbf{N}}, \quad \bar{\mathbf{N}} = \frac{1}{\psi} \frac{\partial f(\bar{\mathbf{T}}; \beta)}{\partial \mathbf{T}}, \quad \psi = \left\| \frac{\partial f(\bar{\mathbf{T}}; \beta)}{\partial \mathbf{T}} \right\|, \quad (19)$$

ここで、正值の比例定数 λ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{\text{tr}(\bar{\mathbf{N}}\mathbf{E}\mathbf{D})}{M_p + \text{tr}(\bar{\mathbf{N}}\mathbf{E}\mathbf{N})}, \\ M_p &= \text{tr}(\bar{\mathbf{N}}\bar{\mathbf{a}}) - \frac{RF}{\psi} \left[\frac{h}{\rho - \gamma} + \frac{1}{RF} \text{tr} \left(\frac{\partial f(\bar{\mathbf{T}}; \beta)}{\partial \beta} \mathbf{b} \right) - \frac{U}{R} \right], \\ \bar{\mathbf{a}} &= (1 - R)\mathbf{z} - U\mathbf{s}, \quad \mathbf{z} = \frac{\dot{\mathbf{s}}}{\lambda}, \quad h = \frac{\dot{H}}{\lambda}, \quad \mathbf{b} = \frac{\dot{\beta}}{\lambda}. \end{aligned} \quad (20)$$

なお、負荷条件は次式で与える。

$$\begin{aligned} D^P &\neq 0, \quad \text{tr}(\bar{\mathbf{N}}\mathbf{E}\mathbf{D}) > 0, \\ D^P &= 0, \quad \text{tr}(\bar{\mathbf{N}}\mathbf{E}\mathbf{D}) \leq 0. \end{aligned} \quad (21)$$

Table 1 Material parameters.

(a) Hypoplastic model.	
$c_1 = 1.65$, $c_2 = 1.874$, $h_s = 5.5$ (MPa), $n = 1.7$,	
$\alpha = 0.15$, $\beta = 1.25$, $e(t = 0) = 0.6$,	
$e_{i0} = 0.600588$, $e_{c0} = 0.600580$, $e_{d0} = 0.600575$	
(b) Subloading surface model.	
yield surface shape	$\phi = 31^\circ$, $a = 0.1$
isotropic hardening	$\rho = 100$, $\mu = 3.8$, $\phi_d = 20^\circ$ $F_0 = 270$ (kPa)
rotational hardening	$b_r = 39$, $\phi_b = 46.4^\circ$
evolution of R	$u_1 = 0.71$, $u_2 = 2$
similarity-center	$\zeta_1 = 7.5$, $\zeta_2 = 1$, $\zeta_3 = 3$
elastic constants	$\gamma = 0.00018$, $G = 190000$ (kPa)

なお、本論文では、回転硬化を考慮した下負荷面モデルの概要と、解析に用いた構成式を示すにとどまっている。当該モデルの概念や材料パラメータの設定等に関する詳細については、文献(7, 8, 14)を参照されたい。

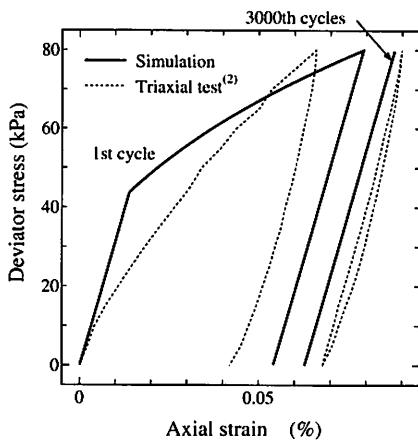
3. 各構成モデルの有用性に関する検討

前節で示した hypoplastic モデル、回転硬化を考慮した下負荷面モデルを各々用いて、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行ない、得られた結果と実験結果との比較を通して構成モデルの有用性について検討する。

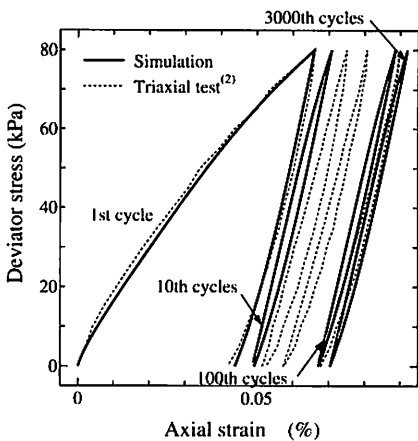
3.1. 比較対象とした実験の概要と解析条件

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。三軸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 $T_{11} = -98$ 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 $T_{22} = T_{33} = -19.6$ kPa で一定としている。なお、実験に使用した材料や試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。

一方、解析においては、 $\dot{\mathbf{T}} \approx \mathbf{T}$ で与え、時間積分は陽的に処理した。2 種類の構成モデルの材料パラメータは、Table 1 に示す値に定めた。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载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(14)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。一方、hypoplastic モデルについては、圧密試験と三軸試験とにより得られた結果からすべての材料パラメータを設定可能である。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つたため、いずれの構成モデルを用いた解析においても、やむを得ず文献(2)に示されている繰り返し三軸圧縮試験



(a) Hypoplastic model.



(b) Subloading surface model.

Fig. 1 Axial strain and deviator stress in a cyclic triaxial test and its simulation. (Confining stress: 19.6(kPa), Total number of cycles: 3000)

結果を良好に再現できるように、試行錯誤的に材料パラメータの値を定めることとした。初期応力は $T = -19.6I$ (kPa) として試験条件との整合を図った。下負荷面モデルに基づく解析では、相似中心応力の初期値は $s = -0.5I$ (kPa) とし、回転硬化変数は $\beta = 0$ を初期値として与えることとした。

3.2. 軸ひずみ-軸差応力関係

まず、軸ひずみと軸差応力との関係について検討する。Fig.1(a) は hypoplastic モデルの下で得られた解析結果である。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。試験結果と同様、解析においても大きなヒステリシスループを描き、軸差応力最大時の軸ひずみと除荷時の残留軸ひずみとの割合も試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、解析結果は軸差応力が 45kPa 以下の範囲で変形係数が大きく、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試験と解析とで約 2 割程度の差が生じていることが分かる。3000 回目においては、解析では負荷・除荷時の経路がほぼ同一となり、試験に比べて残留ひずみが 10% 程度小さく

評価されているものの、変形係数は試験結果と概ね同程度となっている。

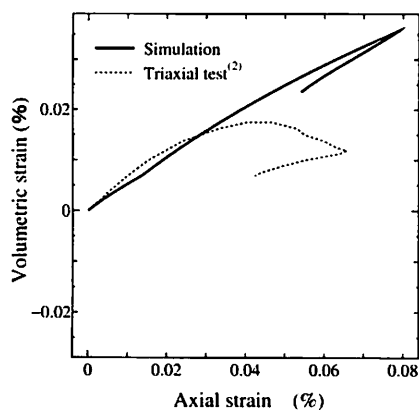
一方、下負荷面モデルを用いた場合の結果を Fig.1(b) に示す。1 回目のつり合い経路は、負荷時・除荷時ともに試験結果と解析結果とでほぼ同一となっている。また、負荷 10 回目での試験結果と解析結果とを比較すると、材料の変形係数 (図中の線の傾き) はほぼ同程度であるが、残留軸ひずみは解析結果がわずかに過小評価となっている。しかし、負荷 100 回目では、解析結果と試験結果とで残留軸ひずみの大小関係は逆転し、解析は試験を 15% 程度上回る結果となっている。粒径に比して発生ひずみが非常に小さい実験条件であることから、試験結果のばらつきは小さくないと思われるが、中程度の繰り返し回数においては残留ひずみの累積の速さが解析と試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られる。繰り返し数を 3000 回では、試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。

双方の構成モデルの再現性能を比較すると、繰り返し初期段階においては構成モデルがより複雑な下負荷面モデルが再現性能に優れており、hypoplastic モデルではヒステリシスループを描いているものの、下負荷面モデルと同程度の一致をみることはできないことがわかる。繰り返し回数が 100 程度を超えると、どちらの構成モデルを用いても試験結果と概ね同等な変形係数を示している。しかし、hypoplastic モデルは実験結果や下負荷面モデルのようにヒステリシスループを描かず、つり合い経路の形状もほとんど直線となっているが、繰り返し初期のような試験と解析結果との間の大きな差になっていない。以上のことから、構成モデル間の変形係数に関する再現性能の差は繰り返し初期に顕著に現われるが、非常に多数の荷重の繰り返しの際には、両者の構成モデルの再現性能にはそれほど大きな差がないことがわかった。なお、hypoplastic モデルでは残留ひずみにおいて試験結果との間に 10% 程度の差が認められている。しかし、差の大小と構成モデルの再現性能については、残留ひずみの試験結果に及ぼす砕石粒子の形状や初期配置のばらつきの影響が小さくないことを考慮し、慎重に判断する必要があると考える。

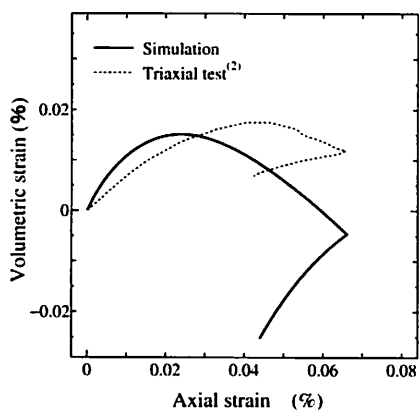
3.3. 体積変化特性

次に、軸ひずみと体積ひずみとの関係に着目し、2 種類の構成モデルの再現性能について検討する。まず、hypoplastic モデルの下で得られた解析結果を Fig.2(a) に示す。試験結果から、負荷 1 回目では粒子骨格の変形が顕著であることもあって、体積変化の特性も明瞭に観察できる。負荷時に軸ひずみ 0.04% 程度で体積が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 0.007% 程度収縮している。

Hypoplastic モデルを用いて得た解析結果では、負荷過程で体積が軸ひずみ 0.04% 付近で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いない。除荷時には体積の膨張傾向を示しているが、試験と比較して除荷終了時の塑性体積ひずみが 3 倍程度過大に評価されていることがわかる。そ



(a) Hypoplastic model.



(b) Subloading surface model.

Fig. 2 Axial strain and volumetric strain in the 1st loading/unloading cycle. (Confining stress: 19.6(kPa))

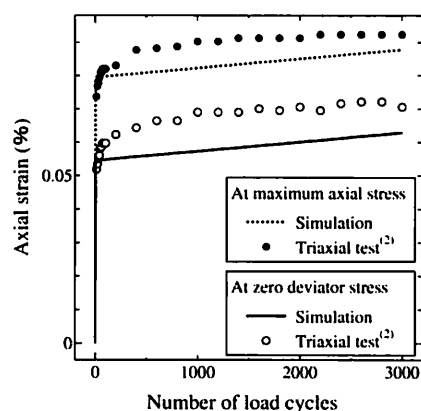
のため、1 サイクル目の解析結果に限定すれば、当該モデルを採用することを肯定する材料に乏しい結果となっている。

一方、下負荷面モデルの下で得られた結果を Fig.2(b) に示す。解析結果においては、hypoplastic モデルでは認められなかった、載荷時における体積収縮から膨張への変動傾向が再現できている。しかし、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、試験結果との間に差が生じている。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な体積は 0.02%程度膨張する結果が得られた。

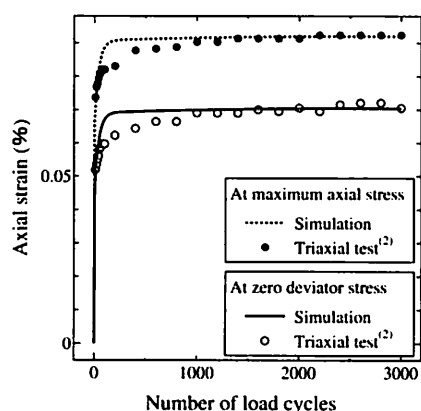
以上の結果から、体積の収縮・膨張傾向の定性的な挙動に関する再現性能は、hypoplastic モデルよりも下負荷面モデルが優れていると結論付けることができる。しかし、体積ひずみの残留量は試験結果と解析結果とで比較的大きな差があり、軸差応力・軸ひずみ関係ほどの再現性能は認められなかった。なお、実際のバラストにおける繰り返し初期の変形応答はバラスト粒子の初期配置に強く依存する上、粒子骨格の比較的大きな変化が生じやすい点に留意する必要がある。

3.4. 残留軸ひずみの蓄積特性

最後に、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。Hypoplastic モデルの



(a) Hypoplastic model.



(b) Subloading surface model.

Fig.3 Cyclic strain evolution. (Confining stress: 19.6(kPa))

下で得られた解析結果を Fig.3(a) に、下負荷面モデルで得られた結果を Fig.3(b) にそれぞれ示す。試験では、繰り返し初期段階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。

Hypoplastic モデルを用いた場合、軸差応力最大時の軸ひずみと除荷時の軸ひずみとの差が試験結果と解析結果とでほぼ同等となっており、Fig.1(a) に示した軸ひずみ・軸差応力関係とあわせて、繰り返し回数がある程度以上の段階では変形剛性が解析モデルによって適切に評価されている。繰り返し時における残留軸ひずみの大きさは解析結果と試験結果との間に 10%程度の差が認められるものの、繰り返し回数に対する残留ひずみの増加率は良好な精度で再現できている。道床沈下解析では変形の緩やかな蓄積の評価が重要であり、hypoplastic モデルの有用性については今後より慎重な議論が必要である。

一方、下負荷面モデルを用いた場合、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、試験結果と同程度の速さで軸ひずみが累積している。

なお、前節までにおいては hypoplastic モデルの再現性能の低さを示す解析結果となっていた。しかし、載荷・除荷の繰り返しによる残留軸ひずみの累積特性に関する再現性能に限定すれば、hypoplastic モデル・下負荷面モデルのいずれを用いても変形係数や残留ひずみの累積率は適切に評価できることがわかった。残留ひずみについては試験結果がバラスト粒子の形状や配置のばらつきの影響を受けるため、双方のモデルの有用性については試験結果の再現性を考慮して慎重に判断する必要がある。

4. おわりに

本研究では、繰り返し塑性変形挙動を再現するために提案されている hypoplastic モデルと下負荷面モデルの2種類を対象に、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行ない、各々の構成モデルの再現性能を比較・検討した。その結果、繰り返し初期段階における応力・ひずみ関係については下負荷面モデルの再現性能が高く、構成式が簡易な hypoplastic モデルは下負荷面モデルに劣ることがわかった。しかし、変形係数はいずれのモデル・繰り返し回数でも試験結果と比較的良好一致を見ており、繰り返し載荷・除荷に伴う変形係数の変化は的確に表現できていると思われる。一方、体積変化特性については、一連の載荷・除荷過程における体積ひずみの変動に関する定性的傾向は下負荷面モデルの方がより正確に再現しているものの、いずれのモデルでも定量的には試験と解析とで小さくない差が認められた。そのため、体積変動を的確に表現できるように構成モデルを修正することも今後必要となるとと思われる。なお、残留ひずみについては、増加割合はいずれも双方のモデルで比較的良好に再現できているが、ひずみ量については hypoplastic モデルにおいて 10%程度の差が試験結果との間に認められた。ただし、道床沈下解析では残留ひずみの累積率が適切に評価されていることが重要であり、今後より慎重な議論が必要である。

今回検討の対象とした要素試験では生じた変形が非常に小さく、変位は粒子の代表寸法に比して非常に小さいものとなる。そのため、粒子の初期配置の影響や試験結果のばらつきの影響が比較的大きいものとなることが考えられる。構成モデルの選択に当たっては、試験結果のばらつきを考慮した上で各構成モデルの力学挙動の再現性能を比較検討し、無用に複雑な構成モデルの採用は避ける必要がある。特に下負荷面モデルは構成モデルが複雑な上、hypoplastic モデルとは異なり要素試験結果から解析的に材料パラメータを決定することができないことに注意が必要である。

今後は、解析的なアプローチによる実軌道におけるバラスト道床の繰り返し塑性変形機構の解明や、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り返し変形特性の検討, 土木学会論文集, **512**, IV-27(1995), pp.47-59.
- (2) 石川達也, 須長 誠, 董 軍, 名村 明: 大型繰り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, **575**, III-40(1997), pp.169-178.
- (3) 名村 明, 木幡行宏, 三浦清一: 道床バラストの繰り返し変形特性と推定法, 土木学会応用力学論文集, **5**(2002), pp.793-800.
- (4) 石川達也, 大西有三: 道床バラストの繰り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, **589**, III-42(1998), pp.205-217.
- (5) 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, **8**(2004), pp.25-30.
- (6) 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, **10**(2006), pp.49-54.
- (7) 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, **547**, III-36(1996), pp. 127-144.
- (8) Hashiguchi, K. and Chen, Z-P.: Elastoplastic constitutive equation of soils with the subloading surface and the rotational hardening. *Int. J. Numer. Meth. Geomech.*, **22**(1998), pp. 197-227.
- (9) 梶原宗光, 紅露一寛, 阿部和久: 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, 土木学会第 62 回年次学術講演会講演概要集, (2007), CD-ROM.
- (10) 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.), (2003), Springer, pp.317-336.
- (11) Gudehus, G.: A comprehensive constitutive equation for granular materials. *Soils & Foundations*, **36**, 1(1996), pp.1-12.
- (12) Bauer, E.: Calibration of a comprehensive hypoplastic model for granular materials. *Soils & Foundations*, **36**, 1(1996), pp.13-26.
- (13) Suiker, A.S.J. and de Borst, R.: A numerical model for the cyclic deterioration of railway tracks. *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, **57**(2003), pp.441-470.
- (14) 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, **9**(2006), pp. 491-502.