

1502 時間域均質化法によるバラスト材の繰返し変形解析の効率化の試み

[土] 紅露一寛 (新潟大), O [土] 村松久志 (新潟大), [土] 阿部和久 (新潟大)

Reduction of computational cost on cyclic deformation analysis of railway ballast using time-domain homogenization method

Kazuhiro KORO (Niigata Univ.), Hisashi MURAMATSU (Niigata Univ.), Kazuhisa ABE (Niigata Univ.)

The numerical algorithm for reducing the computational work of the cyclic deformation analysis using the hypoplastic model with the time-domain homogenization is proposed. The multiple temporal scales of the stress, strain and void ratio are introduced, and the original constitutive equations are decomposed into coupled micro-chronological and macro-chronological equations using asymptotic analysis. The proposed algorithm enables us to change the step width of the macro-chronological analysis, and to reduce the number of the micro-chronological analysis. The accuracy of the simulation results depends on convergence speed of the accumulation of the permanent deformation.

キーワード : バラスト道床, 道床沈下, 時間域均質化法

Key words : time-domain homogenization, railway ballast, ballast settlement

1. はじめに

今日, わが国の鉄道軌道の多くでは, 単粒度砕石からなるバラスト道床が敷設され, 荷重分散や振動・騒音低減に効果を発揮している。バラスト道床は経済性や施工性に優れているものの, 列車が通過する度に残留変位が生じ, その累積が道床沈下現象として顕在化する。道床沈下は軌道保守上の重要項目であり, 長期間での道床沈下量の高精度・高効率予測は重要な課題となっている。

これまで, 道床沈下メカニズムの解明を目的として, 実験的または解析的なアプローチからの研究が試みられている。例えば, 石川らは, 実物大有道床軌道の繰返し载荷試験¹⁾, および大型繰返し三軸試験²⁾を行い, 道床沈下メカニズムの解明に取り組んでいる。実験によって残留変位の発現特性や繰返し载荷による変形係数の変化特性について明らかにされているが, 内部の応力分布やひずみ分布が一樣とならない実物大軌道では, 道床内部の3次元運動状態の観測が現在のところ困難であり, それを評価する試み³⁾もまだ端緒についたばかりである。そのため, バラスト道床内部の運動状態は, 離散化解析手法による解析結果に基づき, 定性的な議論に終始しているのが現状である。

離散化解析手法によるバラスト道床およびバラスト材の繰返し载荷解析は, バラスト道床を構成する単粒度砕石の粒径が道床厚などの代表寸法に比して必ずしも小さくないことを考慮して, 不連続変形法 (DDA)^{4),5)} や個別要素法 (DEM)^{6),7),8)} により行われてきた。しかし, これらの手法では, 粒子数の増加に伴って接触判定等の計算負荷が膨大となり, 計算を安定に進めるために微小の時間ステップを設定せざるを得ないことも相まって, 数万回以上の繰返し载荷・除荷によるバラスト道床部の残留変位解析は現実的とはいえない。

そこで著者らは, 単粒度砕石の集合体であるバラスト道床を弾塑性連続体としてモデル化し, 道床沈下をバラスト道床部に発生した塑性変形として評価することに取り組んできた。構成則として hypoplastic モデルと拡張下負荷面モデルの適用可能性について検討し⁹⁾, 特に拡張下負荷面モデルについては, 実物大有道床軌道の繰返し鉛直载荷試験の有限要素解析を行っている¹⁰⁾。ただし, 通常の弾塑性モデルを採用しても, DEM や DDA と比べ計算は容易となるものの, 負荷・除荷の履歴をもれなく追跡しなければならない点では変わりはない。そのため, 著者らは, 連続体モデルを用いた際の計算負荷を軽減することを目的として, hypoplastic モデル¹¹⁾による繰返し変形解析において時間域均質化法¹²⁾を適用し, その定式化を示した¹³⁾。ただし, 解析精度の検証や計算の効率化に対する実効性についての検討は十分とはいえない。なお, 連続体モデルに基づくバラスト道床の残留変形解析の計算効率を改善する試みとして, 関根らが残留ひずみを累積損傷度関数として扱い, 弾性有限要素法 (FEM) モデルを用いて簡易に評価する手法を提案している¹⁴⁾が, モデル化の妥当性の面で課題が残されている。

そこで, 本研究では, hypoplastic モデルによる繰返し変形解析において時間域均質化法を適用した解析手法を対象に, 本手法の適用による繰返し変形解析の効率化の可能性について検討する。

2. Hypoplastic モデル

本研究では, バラスト道床の繰返し変形挙動の評価に hypoplastic モデルを用いる。Hypoplastic モデルは, 古典的弾塑性論のように, 弾性域と塑性域の区別がないために, 古典的弾塑性モデルと比べて簡易な構成式で表

現できる。構成式は、次式で与えられる¹¹⁾。

$$\begin{aligned} \dot{T}_{ij} &= f_s \left[L_{ij} + f_d N_{ij} \sqrt{\dot{\epsilon}_{\gamma\delta} \dot{\epsilon}_{\gamma\delta}} \right], \\ L_{ij} &= a_1^2 D_{ij} + \hat{T}_{ij} \hat{T}_{kl} \dot{\epsilon}_{kl}, \quad N_{ij} = a_1 (\hat{T}_{ij} + \hat{T}_{ij}^*) \end{aligned} \quad (1)$$

なお、文献¹¹⁾では、客観応力速度とストレッチングとの間の関係を規定しているが、本研究では微小変形を仮定し、客観応力速度は応力テンソルの物質時間微分 $\dot{T}$ で、ストレッチングは微小ひずみテンソル ϵ の物質時間微分 $\dot{\epsilon}$ でそれぞれ与える。また、 $\hat{T}_{ij} = T_{ij}/T_{kk}$ とし、 $\hat{T}_{ij}^*$ は $\hat{T}_{ij}$ の偏差成分である。

定数 f_s , f_d は、それぞれ次式で与える。

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

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

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

$$e_i = e_{i0} \exp[-(3p/h_s)^n], \quad p = -T_{kk}/3 \quad (5)$$

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

ただし、 h_s は粒子硬度、 c_1 , α , β , n 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、 $p=0$ 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。

材料定数 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。

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

$$\cos(3\theta) = -\sqrt{6} \text{tr}(\hat{T}^*{}^3) [\text{tr}(\hat{T}^*{}^2)] \quad (8)$$

ここで、 c_2 は材料定数である。

なお、間隙比の変化速度は次式で与える。

$$\dot{e} = (1+e)D_{kk} = (1+e)\dot{\epsilon}_{kk} \quad (9)$$

3. 構成式の時間域マルチスケール分解

本研究では、前節で示した構成式に対し、文献¹³⁾で示した時間域均質化法¹²⁾の定式化を適用し、ミクロ時間スケールとマクロ時間スケールの2つの時間スケールの下での構成式を弱連成の下で解く。本節では、文献¹³⁾の定式化の要点と、解析に用いる2つの構成式を示しておく。

まず、ミクロ時間変数 τ とマクロ時間変数 t を定義し、2つのスケール間で ζ をスケール変換パラメータとして $\tau = t/\zeta$ ($\zeta \ll 1$) なる関係を有するものとする。さらに、時間に関する多重スケール性を応力 T_{ij} 、ひずみ ϵ_{ij} 、間隙比 e に仮定すると、 $\mathbf{X}$ は物質点の位置ベクトルとして、

次式で与えることができる。

$$\begin{aligned} T_{ij}^\zeta(\mathbf{X}, t) &:= T_{ij}(\mathbf{X}, t, \tau) = \sum_{m=0,1,\dots} \zeta^m T_{ij}^{(m)}(\mathbf{X}, t, \tau), \\ \epsilon_{ij}^\zeta(\mathbf{X}, t) &:= \epsilon_{ij}(\mathbf{X}, t, \tau) = \sum_{m=0,1,\dots} \zeta^m \epsilon_{ij}^{(m)}(\mathbf{X}, t, \tau), \\ e^\zeta(\mathbf{X}, t) &:= e(\mathbf{X}, t, \tau) = \sum_{m=0,1,\dots} \zeta^m e^{(m)}(\mathbf{X}, t, \tau), \end{aligned} \quad (10)$$

式(10)の物質時間微分は、 ζ の項別に整理して、次式で表すことができる。

$$\begin{aligned} \dot{T}_{ij}^\zeta(\mathbf{X}, t) &:= \sum_{m=0,1,\dots} \zeta^{m-1} \dot{T}_{ij}^{(m-1)}(\mathbf{X}, t, \tau) \\ \dot{\epsilon}_{ij}^\zeta(\mathbf{X}, t) &:= \sum_{m=0,1,\dots} \zeta^{m-1} \dot{\epsilon}_{ij}^{(m-1)}(\mathbf{X}, t, \tau) \\ \dot{e}^\zeta(\mathbf{X}, t) &:= \sum_{m=0,1,\dots} \zeta^{m-1} \dot{e}^{(m-1)}(\mathbf{X}, t, \tau) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \dot{T}_{ij}^{(-1)} &= T_{ij,\tau}^{(0)}, \quad \dot{T}_{ij}^{n-1} = T_{ij,t}^{(n)} + T_{ij,\tau}^{(n)} \\ \dot{\epsilon}_{ij}^{(-1)} &= \epsilon_{ij,\tau}^{(0)}, \quad \dot{\epsilon}_{ij}^{n-1} = \epsilon_{ij,t}^{(n)} + \epsilon_{ij,\tau}^{(n)} \\ \dot{e}^{(-1)} &= e_{,\tau}^{(0)}, \quad \dot{e}^{n-1} = e_{,t}^{(n)} + e_{,\tau}^{(n)} \end{aligned} \quad (12)$$

ここで、 $n = 1, 2, \dots$ とする。

3.1 応力速度・ひずみ速度関係式

まず、応力速度・ひずみ速度関係について考える。マルチスケール分解の対象となるのは、式(1)-(8)である。これらの式に対し、式(10)-(12)を適用し、 ζ に関する主要項を評価する。その結果、 $O(\zeta^{-1})$ の構成式として次式を得る。

$$T_{ij,\tau}^{(0)} = f_s^{(0)} \left[L_{ij}^{(0)} + f_d^{(0)} N_{ij}^{(0)} \sqrt{\epsilon_{\gamma\delta}^{(0)} \epsilon_{\gamma\delta}^{(0)}} \right] \quad (13)$$

ここで、 $\hat{T}_{ij}^{(0)} = T_{ij}^{(0)}/T_{kk}^{(0)}$, $p^{(0)} = -T_{kk}^{(0)}/3$ であり、 $L_{ij}^{(0)}$, $N_{ij}^{(0)}$, $f_s^{(0)}$, $f_d^{(0)}$ は次式で定義される。

$$\begin{aligned} L_{ij}^{(0)} &:= a_1^{(0)2} \epsilon_{ij,\tau}^{(0)} + \hat{T}_{ij}^{(0)} \hat{T}_{kl}^{(0)} \epsilon_{kl,\tau}^{(0)}, \\ N_{ij}^{(0)} &:= a_1^{(0)} [\hat{T}_{ij}^{(0)} + \hat{T}_{ij}^{(0)*}], \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} f_s^{(0)} &:= \frac{h_s}{nh_i} \left(\frac{e_i^{(0)}}{e^{(0)}} \right)^\beta \frac{1+e^{(0)}}{e^{(0)}} \left(\frac{3p^{(0)}}{h_s} \right)^{1-n} \\ f_d^{(0)} &:= \left(\frac{e^{(0)} - e_d^{(0)}}{e_c^{(0)} - e_d^{(0)}} \right)^\alpha \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} a_1^{(0)} &:= \{c_1 + c_2 \|\hat{T}^{(0)*}\| [1 + \cos(3\theta^{(0)})]\}^{-1} \\ \cos(3\theta^{(0)}) &:= -\sqrt{6} \text{tr}(\hat{T}^{(0)*3}) (\text{tr}(\hat{T}^{(0)*2}))^{-3/2} \\ e_i &:= e_{i0} := e_{i0} \exp \left[- \left(3p^{(0)}/h_s \right)^n \right] \\ e_d^{(0)}/e_{d0} &= e_c^{(0)}/e_{c0} = e_i^{(0)}/e_{i0} \end{aligned} \quad (16)$$

ここで、 $T_{ij}^{(0)}$, $\epsilon_{ij}^{(0)}$, $e^{(0)}$ が次のように分解できるものとする。

$$\begin{aligned}
T_{ij}^{(0)}(X, t, \tau) &= \bar{T}_{ij}(X, t) + \tilde{T}_{ij}(X, t, \tau) \\
\varepsilon_{ij}^{(0)}(X, t, \tau) &= \bar{\varepsilon}_{ij}(X, t) + \tilde{\varepsilon}_{ij}(X, t, \tau) \\
e^{(0)}(X, t, \tau) &= \bar{e}(X, t) + \tilde{e}(X, t, \tau)
\end{aligned} \quad (17)$$

式 (13) より、マイクロ時間スケールにおける構成式として次式を得る。

$$\begin{aligned}
\tilde{T}_{ij,\tau} &= f_s^{(0)} \left[a_1^{(0)2} \tilde{\varepsilon}_{ij,\tau} + \hat{T}_{ij}^{(0)} \hat{T}_{kl}^{(0)} \tilde{\varepsilon}_{kl,\tau} \right. \\
&\quad \left. + f_d^{(0)} a_1^{(0)} (\hat{T}_{ij}^{(0)} + \hat{T}_{ij}^{(0)*}) \sqrt{\tilde{\varepsilon}_{\gamma\delta,\tau} \tilde{\varepsilon}_{\gamma\delta,\tau}} \right]
\end{aligned} \quad (18)$$

一方、 $O(\zeta^0)$ の構成式は、諸量の漸近展開において展開第 1 項のみを考えて高次項を無視すると、次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
T_{ij,t}^{(0)} &= f_s^{(0)} \left[a_1^{(0)2} \varepsilon_{ij,t} + \hat{T}_{ij}^{(0)} \hat{T}_{kl}^{(0)} \varepsilon_{kl,t} \right] \\
&\quad + f_s^{(0)} f_d^{(0)} N_{ij}^{(0)} \frac{\varepsilon_{kl,t} \varepsilon_{kl,\tau}^{(0)}}{\sqrt{\varepsilon_{\gamma\delta,\tau}^{(0)} \varepsilon_{\gamma\delta,\tau}^{(0)}}}
\end{aligned} \quad (19)$$

ここで、式 (17) を (19) に代入し、 τ_0 をマイクロ時間スケールの代表長さとして τ について次式の時間平均をとる。

$$\langle \phi \rangle := \frac{1}{\tau_0} \int_0^{\tau_0} \phi(X, t, \tau) d\tau \quad (20)$$

その結果、次式を得る。

$$\begin{aligned}
\bar{T}_{ij,t} + \langle \tilde{T}_{ij} \rangle_t &= \langle C_{ijkl} \rangle \bar{\varepsilon}_{kl,t} + \langle C_{ijkl} \tilde{\varepsilon}_{ij,t} \rangle, \\
C_{ijkl} &:= \frac{1}{2} f_s^{(0)} a_1^{(0)2} (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} + \delta_{jk}) \\
&\quad + f_s^{(0)} \hat{T}_{ij}^{(0)} \hat{T}_{kl}^{(0)} + f_s^{(0)} f_d^{(0)} N_{ij}^{(0)} \frac{\tilde{\varepsilon}_{kl,\tau}}{\sqrt{\tilde{\varepsilon}_{\gamma\delta,\tau} \tilde{\varepsilon}_{\gamma\delta,\tau}}}
\end{aligned} \quad (21)$$

式 (21) において、 $\langle (\tau - \tau_1) \tilde{\varepsilon}_{ij,t} \rangle = 0$ のように τ_1 を選び、 $\tilde{\varepsilon}_{ij,t}$ を含む各項を平均値の定理を用いて近似すると、最終的に次式を得る。

$$\bar{T}_{ij,t} + \langle \tilde{T}_{ij} \rangle_t = \langle C_{ijkl} \rangle \bar{\varepsilon}_{kl,t} + C_{ijkl}(\tau_1) \langle \tilde{\varepsilon}_{kl} \rangle_t \quad (22)$$

式 (22) は、マクロ時間スケールにおける構成式となる。

3.2 間隙比の発展則

応力速度-ひずみ速度関係の場合と同様に、間隙比の発展則についても時間域均質化法を適用する。式 (9) の諸量にマルチスケール性を仮定し、式 (10)、(11) を適用すると次式を得る。

$$\begin{aligned}
O(\zeta^{-1}): \quad e_{\tau}^{(0)} &= [1 + e^{(0)}] \varepsilon_{kk,\tau}, \\
O(\zeta^0): \quad e_t^{(0)} + e_{\tau}^{(1)} &= e^{(1)} \varepsilon_{kk,\tau} \\
&\quad + [1 + e^{(0)}] [\varepsilon_{kk,t}^{(0)} + \varepsilon_{kk,\tau}^{(1)}]
\end{aligned} \quad (23)$$

ここで、漸近展開の高次項（添字“(1)”の付された項）を無視すると、式 (17) を式 (23) 第 1 式に代入すると、マイクロ時間スケールにおける発展則を規定する式が得られる。

$$\bar{e}_{,t} = [1 + \bar{e} + \bar{e}] \bar{\varepsilon}_{kk,\tau} \quad (24)$$

一方、式 (17) を式 (23) 第 2 式に代入し、 τ に関する時間平均をとる。さらに $\langle (\tau - \tau_2) \bar{\varepsilon}_{kk,t} \rangle = 0$ となるように τ_2 を定め、平均値の定理を適用すると、マクロ時間スケールにおける発展則を規定する式は次式で得られる。

$$\begin{aligned}
\bar{e}_{,t} + \langle \bar{e} \rangle_t &= [1 + \bar{e} + \langle \bar{e} \rangle] \bar{\varepsilon}_{kk,\tau} \\
&\quad + [1 + \bar{e} + \bar{e}(\tau_2)] \langle \bar{\varepsilon}_{kk} \rangle_t
\end{aligned} \quad (25)$$

4. 要素試験の解析アルゴリズム

供試体内の応力場が一様となる要素試験の繰返し載荷試験を対象に、本手法を用いて応力解析を実行する場合、マイクロ時間スケール・マクロ時間スケールの連成効果を弱い意味で考慮した、以下のアルゴリズムを適用する。

解析アルゴリズム

- (1) 載荷・除荷 $N_0 - 1$ サイクルまでは、hypoplastic モデルを用いた通常の弾塑性解析を実行する。ただし、接線係数および各サイクル内でのひずみ・間隙比の変動成分に関する時間平均計算は解析に並行して行う。応力解析を実行するに当たり、最初の $N_0 - 1$ サイクル分を時間域均質化法の適用対象から除外するのは、残留ひずみの各サイクル終了時の増分量が大きい段階で時間域均質化法を適用すると、均質化法適用により生じる誤差の影響が大きくなるためである。
- (2) 載荷・除荷 N_0 サイクルから、ツースケール分離解法を適用する。まず、マイクロ時間応答 $\tilde{\varepsilon}$ 、 $\tilde{e}$ をマイクロスケール構成式より計算する。また、 τ_1 、 τ_2 、およびマイクロ時間応答および接線係数の時間平均もあわせて計算しておく。
- (3) 上記 (2) の結果を用いて、載荷・除荷 $N_0 + \Delta N$ サイクル終了時の残留ひずみ・間隙比を計算する。その際、マイクロ時間平均のマクロ時間変化率 $\langle \tilde{\phi} \rangle_t$ を計算する必要があるが、次式で評価する。

$$\langle \tilde{\phi} \rangle_t \approx \begin{cases} \frac{\langle \tilde{\phi} \rangle_{N_0} - \langle \tilde{\phi} \rangle_{N_0-1}}{1}, & \text{(載荷・除荷 } N_0 \text{ サイクル)} \\ \frac{\langle \tilde{\phi} \rangle_{N_0+k\Delta N} - \langle \tilde{\phi} \rangle_{N_0+(k-1)\Delta N}}{\Delta N}, & \text{(載荷・除荷 } N_0 + k\Delta N \text{ サイクル)} \end{cases} \quad (26)$$

マイクロ時間平均のマクロ時間変化率を式 (26) で与えることは、載荷・除荷 $N_0 + (k-1)\Delta N$ サイクルから $N_0 + k\Delta N$ までの間、マクロ時間平均の値はサイクル数に対して線形に変化することを仮定すること意味している。

- (4) 上記 (2)、(3) の計算を、繰返し計算する。その結果、残留ひずみ・間隙比は、載荷・除荷 $N_0 + k\Delta N$ サイクルでの値が得られることとなる。その結果、 ΔN の値を大きく設定するほど、解析時の計算量は削減されることとなる。

5. 解析手法の妥当性の検討

上述の解析手法の妥当性を検討するために、石川らが実施した、バラスト材の大型繰返し三軸試験²⁾の応力解析を行った。試験は直径 30cm、高さ 60cm の円筒供試体を対象に、圧密排気条件の CD 条件のもとで実施している。拘束圧は $\sigma_3 = 19.6 \text{ kPa}$ 、最大主応力比 $(\frac{\sigma_1}{\sigma_3})_{\max} = 5$ に定めている。本手法では、載荷・除荷 N_0 サイクルから時間スケール分離解法を適用するが、適用開始時の残留ひずみ・間隙比をマクロ時間応答 $\bar{\varepsilon}$ 、 $\bar{e}$ の初期値とし、マイクロ時間

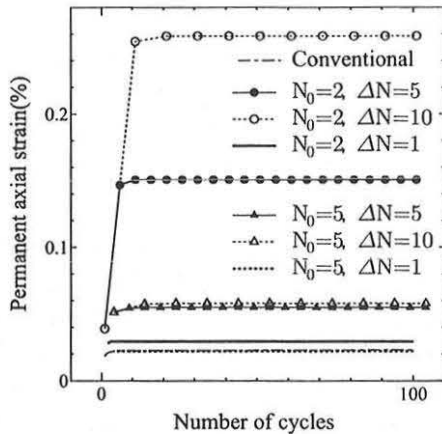


Fig. 1 Permanent axial strain under the various values of N_0 and ΔN .

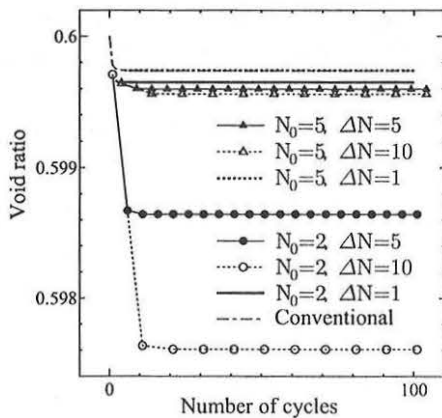


Fig. 2 Influence of the values of N_0 and ΔN on the void ratio at the perfect unloading state in every loading/unloading cycle.

応答 $\bar{\epsilon}$, $\bar{\epsilon}$ の初期値はいずれの成分も 0 と設定する。また、応力については、 $\bar{T}_{ij} = -19.6\delta_{ij}$ (kPa), $\bar{T}_{ij} = T_{ij} - \bar{T}_{ij}$ となり、応力振幅一定の条件から、 $\langle \bar{T}_{ij} \rangle_t = 0$ となる。なお、時間スケール分離解法適用前の通常の弾塑性解析については、試験条件を考慮し、初期ひずみはいずれの成分も 0、初期間隙比は 0.6 としている。

本手法を適用するに当たり、時間スケール分離解法適用開始サイクル N_0 、およびマクロ時間応答の計算ステップ ΔN の設定が解析結果に及ぼす影響を検討する必要がある。そこで、 $N_0 = 2, 5$, $\Delta N = 1, 5, 10$ とした場合における、各载荷・除荷サイクルでの残留軸ひずみを Fig. 1、間隙比を Fig. 2 にそれぞれ示す。解析結果より、残留ひずみの進展がさほど進んでいない $N_0 = 2$ (载荷・除荷 2 サイクル) から時間スケール分離解法を適用した場合、マクロ応答評価のサイクル幅 ΔN の影響が非常に大きく、 ΔN が小さいほど従来の弾塑性解析結果に近い値をとるが、 ΔN が大きくなると残留変形が過大評価されることが分かる。これは、時間スケール分離解法適用開始時において、ミクロ応答の時間平均に関するマクロ時間

変化率が大きく、本手法ではその変化率の値は N_0 サイクルから $N_0 + \Delta N$ サイクルまで一定と仮定しているため、本来であれば漸減していくマクロ時間変化率を精度よく近似できていないことが原因と思われる。一方、 $N_0 = 5$ (载荷・除荷 5 サイクル) から時間スケール分離解法を適用した場合には、解析結果にそれほど大きな差は認められない。そのため、残留変形の発現がある程度収束した状況下では、本手法を適用することで計算負荷を軽減できる可能性があることが分かる。

今後は、実物大有道床軌道の繰返し変形解析に本手法を適用し、その精度や計算効率について検討することとしたい。

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) 相川 明: 鉄道バラストの三次元挙動測定装置の開発 - 溶接継目衝撃荷重の現場測定と DDA パラメータ設定法の提案 -。土木学会応用力学論文集, Vol.11, pp.487-496, 2008.
- 4) 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.
- 5) 石川達也, 関根悦夫, 三和雅史, 大西有三: バラスト軌道の不連続体解析に対する粒子特性の力学的影響評価。土木学会応用力学論文集, Vol.10, pp.513-522, 2007.
- 6) Saussine, G., Cholet, C., Gautier, P.E., Dubois, F., Bohatier, C., Moreau, J.J.: Modelling ballast behaviour under dynamic loading. Part 1: A 2D polygonal discrete element method approach. *Comput. Meth. Appl. Mech. Engrg.*, Vol.195, pp.2841-2859, 2006.
- 7) 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, pp. 49-54, 2006.
- 8) Karrech, A., Duhamel, D., Bonnet, G., Chevoir, F., Roux, J.-N., Canou, J., Dupla, J.-C.: A discrete element study of settlement in vibrated granular layers: role of contact loss and acceleration. *Granular Matter*, Vol.10, pp.369-375, 2008.
- 9) 紅露一寛, 嘉数東陽, 梶原宗光, 阿部和久: 鉄道におけるバラスト道床材の繰返し変形解析に用いる構成モデルの検討。計算数理工学論文集, Vol.7, No.1, pp. 31-36, 2007.
- 10) Koro, K., Fukutsu, Y., Abe, K.: 3-D FE simulation of cyclic loading tests of railway ballasted track using subloading surface elastoplastic model. *Proc. of STECH'09*, CD-ROM, 2009.
- 11) Bauer, E.: Calibration of a comprehensive hypoplastic model for granular materials. *Soils & Foundations*, Vol.36, No.1, pp.13-26, 1996.
- 12) Oshay, C., Fish, J.: Fatigue life prediction using 2-scale temporal asymptotic homogenization. *Int. J. Numer. Meth. Engrg.*, Vol.61, pp.329-359, 2004.
- 13) 紅露一寛, 嘉数東陽, 阿部和久: 鉄道用バラスト材の繰返し変形解析のための時間域均質化法定式化。土木学会応用力学論文集, Vol.11, pp.149-158, 2008.
- 14) 関根悦夫, 石川達也: 繰返し荷重を受ける粒状材料の累積損傷度理論による塑性変形解析。土木学会舗装工学論文集, Vol.10, pp.53-60, 2005.