

研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間：2007–2008  
 課題番号：19760352  
 研究課題名（和文）  
 繰り返し载荷時のバラスト道床沈下を対象とした高精度・高効率な沈下量予測手法の開発  
 研究課題名（英文）  
 Development of high performance simulation method for settlement of railway ballast layer  
 研究代表者  
 紅露 一寛 (KAZUHIRO KORO)  
 新潟大学・自然科学系・准教授  
 研究者番号：70361912

研究成果の概要：本研究では、わが国の鉄道軌道で広く採用されているバラスト道床の沈下現象を対象に、現実的な計算負荷の下で定量評価に耐えうる沈下量予測手法の構築に取り組んだ。対象とする道床沈下現象は、砕石の集合体に繰り返し荷重が作用することによって残留変位が生じる力学現象である。本研究では、計算負荷の面から砕石集合体を連続体に置き換えることで数値モデル化し、残留変位は弾塑性モデルを用いて表現することとした上で、hypoplastic モデルと下負荷面モデルの適用可能性について検討した。特に下負荷面モデルについては、有道床軌道の実物大繰り返し载荷試験の有限要素解析も試み、バラスト道床部の応力や残留変形、残留変位の発現挙動などについて検討した。また、荷重の繰り返し作用による残留変形を効率的に評価することを目的に、hypoplastic モデルと時間域マルチスケール法を組み合わせた道床沈下解析手法を構築し、繰り返し三軸試験のシミュレーションを試み、解析アルゴリズムの計算効率や解析精度について検討した。また、提案手法の境界値問題への適用可能性について検討した。

#### 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	700,000	0	700,000
2008 年度	300,000	90,000	390,000
総計	1,000,000	90,000	1,090,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学，土木計画学・交通工学

キーワード：鉄道工学，軌道力学，応用力学，計算力学，バラスト道床

#### 1 研究開始当初の背景

わが国の鉄道においては、列車走行時の輪重衝撃の緩和を主たる目的として、まくらぎ下にバラスト砕石を道床として敷設するのが一般的である。バラスト道床は施工が安価で緩衝材としての機能に優れているものの、列車の繰り返し通過により不同沈下が発生・進展し、定期的な軌道保守作業が必要となる。そのため、合理

的かつ効率的な軌道設計・維持管理計画を策定するためには、バラスト道床の沈下メカニズムの解明や、合理的な沈下量予測モデルの構築は工学的に重要な課題である。

これまで、国内外の鉄道技術者・研究者がバラスト道床の沈下挙動の検討と定量評価手法の構築を試みてきた。名村らは、繰り返し三軸試験<sup>1)</sup>や実物大軌道の载荷試験<sup>2)</sup>などの実験を

通し、道床内部の密粒化と軌道剛性の関係や、繰り返し荷重作用時の沈下挙動の考察などに取り組んできた。

一方、数値解析により沈下現象を解明する取り組みや、定量的な沈下量予測モデルを構築する試みもなされている。その多くは、バラスト道床が碎石粒子の集合体であることに注目し、不連続変形法 (DDA)<sup>3)</sup> や個別要素法 (DEM)<sup>4)</sup> を用いて、道床バラストの運動特性を定性的に評価・検討している。DDA や DEM では、バラスト材の定性的な力学挙動を比較的簡便な形でモデル化できる反面、安定に解析を進めるためには計算負荷が非常に大きくなる傾向がある。そのため、これらの方法は短時間での道床内部の運動状態の把握・評価には適していても、沈下量予測に適しているとは言い難く、バラスト道床の沈下現象を弾塑性連続体としてモデル化することが現実的であると思われる。しかし、このモデル化を採用しても載荷・除荷の繰り返しによる計算量の増加は避けられず、現実的な計算負荷の下で道床沈下量を予測するためには、計算負荷を軽減するための何らかの工夫が必要である。以上の背景から、本研究課題に取り組むに至った。

## 2 研究の目的

本研究では、弾塑性連続体モデルでバラスト道床の沈下現象をモデル化し、効率的かつ定量評価に耐えうる沈下量予測手法を構築することを目的とする。そのために、以下の課題に取り組むこととした、

- (1) バラスト道床部の繰り返し変形挙動を表現するための構成モデルの選定について検討する。
- (2) 弾塑性連続体モデルを採用した場合に想定される計算負荷を軽減するような沈下量予測手法を構築する。本研究では、数学的に矛盾のない形で計算負荷を軽減するために、時間域マルチスケール法を適用し、一度の載荷・除荷に対応する短時間の応答と残留変形が蓄積していく長時間の応答とに分離して評価する解析手法を考える。

## 3 研究の方法

### (1) 弾塑性構成モデルの有効性の検討

本研究では、第一の課題として、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<sup>5)</sup> 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<sup>6)</sup> の2種類を考え、これらのモデルの繰り返し変形解析への有効性について検討する。具体的には、石川らが行なったバラスト材の繰り返し三軸試験のシミュレーションを行い、その力学挙動の再現性能について検討する。

### (2) 有道床軌道の繰り返し載荷試験の有限要素解析

本研究では、前節で示した構成則のうち、回転硬化を考慮した下負荷面モデル<sup>6)</sup> を用いてバラスト道床の弾塑性挙動を表現し、有道床軌道の繰り返し載荷試験の有限要素解析を試みる。準静的条件下でのつりあい問題を考え、前進 Euler 法による応力積分を実行した上で、バラスト道床部を有限要素を用いて離散化した。

### (3) 時間域マルチスケール法を援用した繰り返し変形解析手法の構成

本研究では、連続体モデルによりバラスト道床の繰り返し変形解析における計算負荷の軽減を図るために、hypoplastic モデルによるバラスト材繰り返し変形解析を対象に、時間域マルチスケール法<sup>7)</sup> を導入する。

まず、ミクロ時間変数  $\tau$  とマクロ時間変数  $t$  を定義し、 $\tau = t/\zeta$  ( $\zeta \ll 1$ ) なる関係を有するものとする。今、対象とする変数 (応答)  $\phi$  が時間に関する多重スケール性を有するものとするとして、

$$\phi^\zeta(\mathbf{X}, t) := \phi(\mathbf{X}, t, \tau(t)), \quad (1)$$

のように表わすものとする。なお、 $\mathbf{X}$  は物質点の位置ベクトルである。 $\phi^\zeta$  の物質時間導関数  $\dot{\phi}^\zeta$  は、

$$\dot{\phi}^\zeta(\mathbf{X}, t) = \phi_{,t}(\mathbf{X}, t, \tau) + \frac{1}{\zeta} \phi_{,\tau}(\mathbf{X}, t, \tau), \quad (2)$$

のようになる。

ここで、 $\phi^\zeta$  を  $\zeta = 0$  のまわりで漸近展開し、次式で表わす。

$$\phi^\zeta = \sum_{m=0,1,\dots} \zeta^m \phi^{(m)}(\mathbf{X}, t, \tau). \quad (3)$$

このとき、物質時間導関数は次式で表わすこと

ができる．

$$\begin{aligned}\dot{\phi}^\zeta &:= \sum_{m=0,1,\dots} \zeta^{m-1} \dot{\phi}^{(m-1)}(\mathbf{X}, t, \tau), \\ \dot{\phi}^{(-1)} &:= \phi_{,\tau}^{(0)}, \\ \dot{\phi}^{(n-1)} &:= \phi_{,t}^{(n-1)} + \phi_{,\tau}^{(n)}, \quad (n = 1, 2, \dots).\end{aligned}\quad (4)$$

本研究では，hypoplastic モデルにおける変数である応力  $T_{ij}$ ，ひずみ  $\varepsilon_{ij}$ ，間隙比  $e$  とその時間導関数に上述の漸近展開を適用し，スケールパラメータ  $\zeta$  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．

$$\begin{aligned}T_{ij,\tau}^{(0)} &= f_s^{(0)} \left[ L_{ij}^{(0)} + f_d^{(0)} N_{ij}^{(0)} \sqrt{\varepsilon_{\gamma\delta,\tau}^{(0)} \varepsilon_{\gamma\delta,\tau}^{(0)}} \right], \\ e_{,\tau}^{(0)} &= \left[ 1 + e^{(0)} \right] \varepsilon_{kk,\tau}^{(0)},\end{aligned}\quad (5)$$

なお，上式の  $L_{ij}^{(0)}$ ， $N_{ij}^{(0)}$ ， $f_s^{(0)}$ ， $f_d^{(0)}$  は，文献 [3] の定義に従うので，参照されたい．

ここで， $T_{ij}^{(0)}$  と  $\varepsilon_{ij}^{(0)}$ ， $e^{(0)}$  が次のように分解可能であるものとし，

$$\begin{aligned}T_{ij}^{(0)}(\mathbf{X}, t, \tau) &= \bar{T}_{ij}(\mathbf{X}, t) + \tilde{T}_{ij}(\mathbf{X}, t, \tau), \\ \varepsilon_{ij}^{(0)}(\mathbf{X}, t, \tau) &= \bar{\varepsilon}_{ij}(\mathbf{X}, t) + \tilde{\varepsilon}_{ij}(\mathbf{X}, t, \tau), \\ e^{(0)}(\mathbf{X}, t, \tau) &= \bar{e}(\mathbf{X}, t) + \tilde{e}(\mathbf{X}, t, \tau),\end{aligned}\quad (6)$$

漸近展開の高次項（添字“(1)”の付された項）を無視すると，ミクロ時間スケールにおける構成式として次式を得る．

$$\begin{aligned}\tilde{T}_{ij,\tau} &= f_s^{(0)} \left[ a_1^{(0)2} \tilde{\varepsilon}_{ij,\tau} + \hat{T}_{ij}^{(0)} \hat{T}_{kl}^{(0)} \tilde{\varepsilon}_{kl,\tau} \right. \\ &\quad \left. + f_d^{(0)} a_1^{(0)} \left( \hat{T}_{ij}^{(0)} + \hat{T}_{ij}^{(0)*} \right) \sqrt{\varepsilon_{\gamma\delta,\tau} \varepsilon_{\gamma\delta,\tau}} \right], \\ \tilde{e}_{,\tau} &= \left[ 1 + \bar{e} + \tilde{e} \right] \tilde{\varepsilon}_{kk,\tau}.\end{aligned}\quad (7)$$

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．

$$\begin{aligned}T_{ij,t}^{(0)} &= f_s^{(0)} \left[ a_1^{(0)2} \varepsilon_{ij,t}^{(0)} + \hat{T}_{ij}^{(0)} \hat{T}_{kl}^{(0)} \varepsilon_{kl,t}^{(0)} \right. \\ &\quad \left. + f_s^{(0)} f_d^{(0)} N_{ij}^{(0)} \frac{\varepsilon_{kl,t}^{(0)} \varepsilon_{kl,\tau}^{(0)}}{\sqrt{\varepsilon_{\gamma\delta,\tau}^{(0)} \varepsilon_{\gamma\delta,\tau}^{(0)}}} \right], \\ e_{,t}^{(0)} + e_{,\tau}^{(1)} &= e^{(1)} \varepsilon_{kk,t}^{(0)} \\ &\quad + \left[ 1 + e^{(0)} \right] \left[ \varepsilon_{kk,t}^{(0)} + \varepsilon_{kk,\tau}^{(1)} \right].\end{aligned}\quad (8)$$

ここで，式 (6) を (8) に代入し， $\tau_0$  をミクロ時間スケールの代表長さとして  $\tau$  について次式の時間平均をとると，

$$\langle \phi \rangle := \frac{1}{\tau_0} \int_0^{\tau_0} \phi(\mathbf{X}, t, \tau) d\tau, \quad (9)$$

その結果，次のマクロ時間スケールにおける構成式を得る．

$$\begin{aligned}\bar{T}_{ij,t} + \langle \tilde{T}_{ij} \rangle_{,t} &= \langle C_{ijkl} \rangle \bar{\varepsilon}_{kl,t} \\ &\quad + C_{ijkl}(\tau_1) \langle \tilde{\varepsilon}_{kl} \rangle_{,t}, \\ \bar{e}_{,t} + \langle \tilde{e} \rangle_{,t} &= \left[ 1 + \bar{e} + \langle \tilde{e} \rangle \right] \bar{\varepsilon}_{kk,t} \\ &\quad + \left[ 1 + \bar{e} + \tilde{e}(\tau_2) \right] \langle \tilde{\varepsilon}_{kk} \rangle_{,t}, \\ C_{ijkl} &:= \frac{1}{2} f_s^{(0)} a_1^{(0)2} (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \\ &\quad + f_s^{(0)} \hat{T}_{ij}^{(0)} \hat{T}_{kl}^{(0)} + f_s^{(0)} f_d^{(0)} N_{ij}^{(0)} \frac{\tilde{\varepsilon}_{kl,\tau}}{\sqrt{\varepsilon_{\gamma\delta,\tau} \varepsilon_{\gamma\delta,\tau}}}.\end{aligned}\quad (10)$$

ここで， $\tau_1$ ， $\tau_2$  はそれぞれ  $\langle (\tau - \tau_1) \tilde{\varepsilon}_{ij,t} \rangle = 0$ ， $\langle (\tau - \tau_2) \tilde{\varepsilon}_{kk,t} \rangle = 0$  のように定義する．

## 4 研究成果

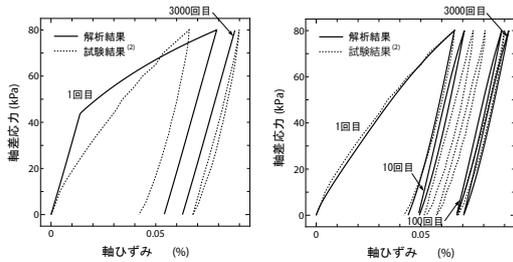
### (1) 弾塑性構成モデルの有効性の検討

解析結果の比較・検討は，石川らが行なったパラスト材の繰り返し三軸試験結果<sup>1)</sup>に基づき行なう．拘束圧 19.6kPa の場合を考え，解析の諸条件については文献<sup>1)</sup>に従った．また，2種類の構成モデルの材料パラメータの設定値および初期値は，文献 [1] に示す通りである．

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 は hypoplastic モデル，回転硬化を考慮した下負荷面モデルの各々を用いて得られた解析結果である．Hypoplastic モデルを用いた場合，せん断に関するヒステリシスなど，載荷 1 回目における力学挙動を定性的に再現されているが，軸差応力が 45kPa 以下の範囲でつりあい経路にずれが生じている．一方，下負荷面モデルを用いた場合では，繰り返しせん断挙動の再現性は hypoplastic モデルと比べて高い．しかし，載荷 10 回目での残留ひずみが実験よりもわずかに小さく，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思われる．

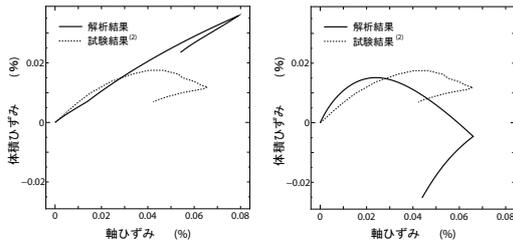
次に，軸ひずみと体積ひずみとの関係に着目し，2種類の構成モデルの再現性能について検討する．Fig.2 に示した解析結果から，双方のモデルとも体積ひずみの定量評価は難しいと言わざるを得ない．ただし，下負荷面モデルでは，載荷 1 回目でのダイレイタンシー挙動が定性的に再現できていることがわかる．

最後に，多数回の繰り返し時におけるパラスト材の剛性と残留ひずみの発現について検討する．Fig.3 より，hypoplastic モデルを用いた場合，軸ひずみの振幅だけでなく，繰り返し回数



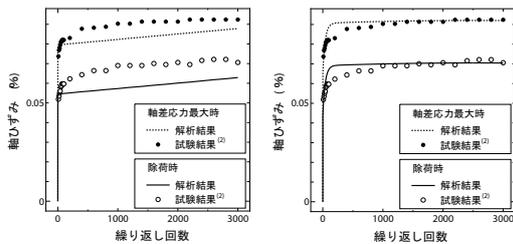
(a) Hypoplastic モデル. (b) 下負荷面モデル.

Fig. 1: 軸ひずみと軸差応力.



(a) Hypoplastic モデル. (b) 下負荷面モデル.

Fig. 2: 軸ひずみと体積ひずみ (1st cycle).



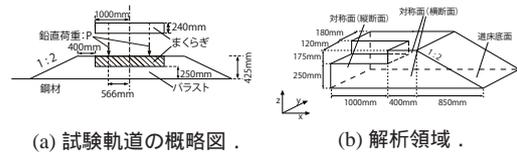
(a) Hypoplastic モデル. (b) 下負荷面モデル.

Fig. 3: 残留軸ひずみと繰返し回数.

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。一方、下負荷面モデルを用いた場合、繰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、残留ひずみは解析の方が速く累積している。

(2) 有道床軌道の繰返し負荷試験の有限要素解析

本研究では、実物大パラスト有道床軌道を対象とした繰返し負荷試験<sup>2)</sup>を解析対象とした。この試験では、Fig. 4(a) に示す試験軌道において、2 本のレール各々に同じ大きさの鉛直荷重を作用させた。試験軌道に対応する解析領域は Fig.4(b) を考えた。境界条件は、軌道対称面・道床底面、まくらぎ側面はいずれも面外変位拘束とし、まくらぎ下面は一様に強制変位を与える変位規定境界とした。繰返し過程はまくらぎ下面で強制変位を与える変位制御解析とし、材



(a) 試験軌道の概略図. (b) 解析領域.

Fig. 4: 試験軌道と解析領域.

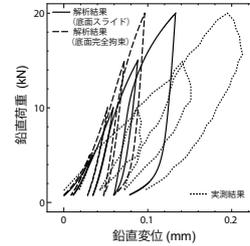
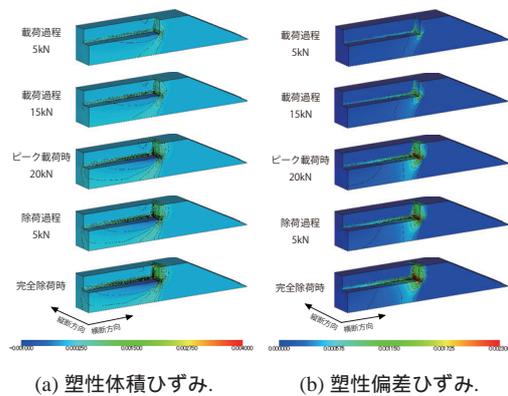


Fig. 5: 鉛直変位と鉛直荷重との関係.



(a) 塑性体積ひずみ. (b) 塑性偏差ひずみ.

Fig. 6: 繰返し負荷時における塑性ひずみの進展傾向.

料定数は文献 [4] に示す値を用いた。

まず、まくらぎ位置での鉛直変位と鉛直荷重との関係を Fig.5 に示す。解析結果では、載荷・除荷を通して試験結果の傾向は概ね良好に表現できており、各繰返し段階での残留変位も概ね同程度となっている。

次に、軌道内部における残留変形の発現傾向について検討する。4 回目の繰返し載荷・除荷時における塑性体積ひずみを Fig.6(a) に、偏差塑性ひずみの 2 次不変量を Fig.6(b) に示す。解析結果より、塑性体積ひずみはまくらぎ端部において集中して発生している。載荷・除荷 1 サイクルにおいては、先行荷重を超過した  $P = 15\text{kN} \rightarrow 20\text{kN}$  の段階で塑性体積ひずみの累積が進行している。一方、除荷過程では、載荷重がわずかとなった  $P = 5\text{kN} \rightarrow 0\text{kN}$  では再び塑性変形が生じている。塑性偏差ひずみはまくらぎ端部に集中し、発生傾向は塑性体積ひずみと同様となった。ひずみの集中域は、応力集中箇所であるまくらぎ端部から道床底面に向け

て帯状に生じ、軌道長手方向に面的に広がった滑り面の様相を呈している。

### (3) 時間域マルチスケール法を援用した繰り返し変形解析手法の構成

2(3)節で示した解析手法の定式化の妥当性を検討する目的で、バラスト材の大型繰り返し三軸試験<sup>1)</sup>のシミュレーションに本手法を適用した。解析結果の比較は、2(1)節で示した通常のhypoplasticモデルによる繰り返し解析(以下、従来法)の結果を用いて行なうこととする。解析条件および材料パラメータの値は、3(1)節と同様に定めた。なお、 $\tau_1, \tau_2$ は $\tau_1 = \langle \tau \cdot \tilde{\epsilon}_{ij} \rangle / \langle \tilde{\epsilon}_{ij} \rangle$ 、 $\tau_2 = \langle \tau \cdot \tilde{\epsilon}_{kk} \rangle / \langle \tilde{\epsilon}_{kk} \rangle$ で与え、 $\tilde{\epsilon}_{ij}$ と $\tilde{\epsilon}$ の時間平均値の $t$ に関する変化率 $\langle \tilde{\epsilon}_{ij} \rangle_{,t}$ 、 $\langle \tilde{\epsilon} \rangle_{,t}$ は、 $t$ に関する差分近似により、次に示す2通りの手法のいずれかで与える。

**スキーム1** 時間平均をとる物理量を $\tilde{\phi}$ として、現時刻 $t = t_n$ と、1ステップ前の時刻 $t = t_{n-1}$ における時間平均値の差分近似で時間変化率を評価する。ただし、前ステップの値が存在しない $t = t_1$ におけるマクロ解析では、ミクロ・マクロ弱連成解析に先立って通常の繰り返し変形解析を2サイクル実行し、各サイクルで算出した時間平均値の差分で $\langle \tilde{\phi} \rangle_{,t}$ の値を近似する。

**スキーム2** マクロ時間 $t$ によらず、ミクロ時間 $\tau$ における解析は常に連続する2サイクル分実行し、1サイクル目、2サイクル目の各々のうちの $\tilde{\phi}$ に相当する部分の時間平均に関して差分近似をとり、 $\langle \tilde{\phi} \rangle_{,t}$ を与える。

**解析結果** まず、繰り返し回数10回目までの残留軸ひずみと間隙比の評価精度について検討する。本手法によれば、載荷・除荷1サイクル終了時の残留ひずみと間隙比は、マクロ時間応答 $\bar{\epsilon}_{11}$ 、 $\bar{\epsilon}$ で与えられる。Fig.7より、時間平均の時間変化率をスキーム1で評価した場合、繰り返し1回目こそ従来法による解析結果とほぼ一致しているが、繰り返し2回目において間隙比のマクロ時間における変化量 $\Delta\bar{\epsilon}$ と軸ひずみ増分 $\Delta\bar{\epsilon}_{11}$ が過大評価されている。マクロ時間応答の構成式を解く際には、時間平均の時間変化率 $\langle \tilde{\epsilon}_{ij} \rangle_{,t}$ 、 $\langle \tilde{\epsilon} \rangle_{,t}$ の値が既知量となることから、この精度低下はこの時間変化率の評価精度に原因があると考えられる。そのため、本研究では精度検証の観点から時間変化率をより高精度に近似するスキーム2の適用を試みた。Fig.8より、スキーム2によって時間変化率の評価精度

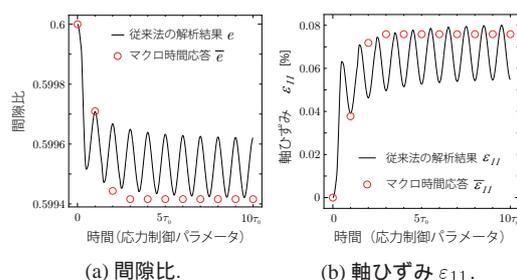


Fig. 7: 繰り返し10回目までのマクロ時間応答 $\bar{\epsilon}$ 、 $\bar{\epsilon}_{11}$ の評価精度(スキーム1)。

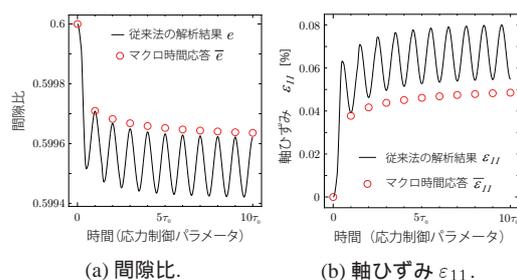


Fig. 8: 繰り返し10回目までのマクロ時間応答 $\bar{\epsilon}$ 、 $\bar{\epsilon}_{11}$ の評価精度(スキーム2)。

を改善すると、マクロ時間応答の評価精度も著しく改善される。よって、本手法により道床沈下量を高精度に定量評価するためには、これらの時間変化率の評価精度を担保することが重要であることがわかった。なお、スキーム2は精度は改善されるものの、従来法を上回る計算負荷となり、その適用は現実的でない。そのため、残留変位が急速に進展する繰り返し初期段階は従来法を適用し、繰り返し数に対して概ね線形に残留変位が進展する段階で本手法に切り替えることが実用的であると考えられる。本手法によれば、従来法の解析とはシームレスな接続が可能である。

最後に、本研究では2(3)節の手法の境界値問題への適用について検討した。その結果、境界値問題についてもマクロ時間応答、ミクロ時間応答の双方の問題に分離して記述する定式化が可能であることを確認した。ただし、平成20年度までの研究では、境界値問題の定式化を示すにとどまっており、有限要素法の実装は次年度以降に引き続き取り組む予定である。

#### [参考文献]

- 1) 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, No.575, -40, pp.169-178, 1997.
- 2) 石川達也, 名村明: 実物大試験による道床バラスト部の繰り返し変形特性の検討, 土木学会論

文集, No.512, -27, pp.47-59, 1995.

- 5) 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り返し変形機構の検討, 土木学会論文集, No.645, -50, pp.15-28, 2000.
- 7) Sussine, G., et al.: Modeling ballast behaviour under dynamic loading, Part 1: A 2D polygonal discrete element method approach, *Comput. Mech. Appl. Mech. Engrg.*, 2005.
- 8) Bauer, E.: Calibration of a comprehensive hypoplastic model for granular materials, *Soils and Foundation*, Vol.36, No.1, pp.13-26, 1996.
- 9) 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, -36, pp.127-144, 1996.
- 11) Oskey, C., Fish, J.: Fatigue life prediction using 2-scale temporal asymptotic homogenization. *Int. J. Numer. Meth. Engrg.*, Vol.61, pp.329-359, 2004.

## 5 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 15 件, 下記他 11 件)

- [1] 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り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.7-1, pp.31-36, 平成 19 年 (2007), 査読あり.
- [2] 紅露一寛, 梶原宗光, 阿部和久: 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, 土木学会鉄道力学論文集, Vol.11, pp.7-13, 平成 19 年 (2007), 査読あり.
- [3] 紅露一寛, 嘉数東陽, 阿部和久: 鉄道用バラスト材の繰り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, 平成 20(2008) 年, 査読あり.
- [4] 紅露一寛, 福津佑太, 阿部和久: バラスト道床の弾塑性連続体モデル化に基づいた 3 次元繰り返し変形解析, 第 15 回鉄道技術・政策連合シンポジウム講演論文集, pp.411-414, 平成 20(2008) 年, 査読なし.

〔学会発表〕(計 15 件, 下記他 11 件)

- [1] 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り返し変形解析に用いる構成モデルの検討, 計算数理工学コンファレンス 2007, 平成 19(2007) 年 6 月 29 日, 名古屋大学 (名古屋市).

- [2] 紅露一寛, 梶原宗光, 阿部和久: 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, 第 11 回土木学会鉄道力学シンポジウム, 平成 19(2007) 年 7 月 19 日, 土木学会 (東京都新宿区).

- [3] 紅露一寛, 嘉数東陽, 阿部和久: 鉄道用バラスト材の繰り返し変形解析のための時間域均質化法定式化, 土木学会第 11 回応用力学シンポジウム, 平成 20(2008) 年 9 月 9 日, 東北大学 (仙台市).

- [4] 紅露一寛, 福津佑太, 阿部和久: バラスト道床の弾塑性連続体モデル化に基づいた 3 次元繰り返し変形解析, 第 15 回鉄道技術・政策連合シンポジウム (J-RAIL2008), 平成 20(2008) 年 12 月 17 日, 国立オリンピック記念青少年センター (東京都渋谷区).

〔図書〕(計 0 件)

なし.

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

なし.

取得状況 (計 0 件)

なし.

〔その他〕

なし.

## 6 研究組織

### (1) 研究代表者

紅露一寛 (KAZUHIRO KORO)

所属 新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号 70361912

### (2) 研究分担者

なし.

### (3) 連携研究者

なし.