

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 15 日現在

機関番号：13101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21760398

研究課題名（和文） 連続体モデルによるバラスト道床の繰り返し変形挙動の定量評価に関する総合的検討

研究課題名（英文） Several improvements of accuracy and computational cost of 3-D elastoplastic FEM for simulating railway ballast settlement

研究代表者

紅露 一寛 (KORO KAZUHIRO)

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（和文）：本研究では、弾塑性連続体モデルに基づく 3 次元有限要素モデルを用いて、バラスト道床の沈下メカニズムの解明に取り組んだ。また、時間域均質化法や multi-time scaling 法、cyclic densification モデルの適用により、有限要素法に基づく道床沈下解析における計算効率の改善を図った。さらに、particle swarm optimization(PSO)により拡張下負荷面モデルの材料パラメータを同定した上で、1 次近似 2 次モーメント法を用いて、材料の力学挙動の変動の影響を考慮した 3 次元道床沈下解析手法を開発した。

研究成果の概要（英文）：In the present study, settlement phenomena of a railway ballasted track are simulated with 3-D FEM. Computational cost of 3-D ballast settlement analysis is reduced using a time-domain homogenization method, a multi-time scaling method or a cyclic densification model. The material parameters for the extended subloading surface elastoplasticity model are identified using the particle swarm optimization (PSO). The numerical method for simulating the variation of ballast settlement caused by the randomness of material parameters is developed with the first-order second-moment method (FOSM).

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	900,000	270,000	1,170,000
2010 年度	200,000	60,000	260,000
2011 年度	300,000	90,000	390,000
年度			
年度			
総計	1,400,000	420,000	1,820,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学（分科），土木計画学・交通工学（細目）

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広く敷設されているバラスト道床は、粒径数センチ程度の砕石の集合体であり、列車の繰り返し走行によって道床上面の沈下量に代表される軌道狂い

が発生・累積する。そのため、道床沈下対策や効率的な軌道保守作業を実現するためには、バラスト道床の沈下メカニズムを解明する必要がある。

これまで、バラスト道床沈下に関する研究

では、石川らによる大型三軸試験¹⁾・実物大有道床軌道の載荷試験²⁾だけでなく、不連続変形法 (DDA)³⁾や個別要素法 (DEM)⁴⁾による数値解析も試みられている。しかし、実験でも道床内部の力学状態を把握することは極めて困難であり、数値解析によって実験を補うにしても、粒状体解析手法では計算負荷の大きさがネックとなる。

そのため研究代表者は、hypoplastic model⁵⁾や回転硬化を考慮した下負荷面モデル⁶⁾を用いて、道床バラスト材を弾塑性連続体としてモデル化する手法の妥当性について検討してきた⁷⁾。ただし、連続体モデルを採用することで解析の安定性・ロバスト性は向上するが、載荷・除荷の繰り返しによる計算量の増加は解決されない。このような経緯から、研究代表者は平成 19-20 年度に科学研究費補助金 (若手研究(B), 課題番号 19760352) の助成を受け、hypoplastic モデルでバラスト材の力学挙動を表現する場合を対象に、時間域均質化法を援用した効率化解析法を構築した⁸⁾。しかし、有限要素法への実装については未着手であった。

上記以外にも、現段階ではバラスト道床の 3 次元変形メカニズムの解明も十分とは言えない。また、バラスト道床の沈下量予測におけるさらなる計算効率の向上について、他の効率化解析法の導入可能性など、多面的に検討する必要がある。さらに、本来バラスト道床の力学挙動は粒径や粒子配置などの不確定性 (ばらつき) の影響を受け小さくない変動を示すものであるが、現状ではこの影響を評価する方法が確立されていない。このような背景・経緯から、本研究課題に対して補助金を申請するに至った。

2. 研究の目的

本研究では、上述の研究背景を踏まえ、次の 3 点の研究課題に取り組む。

- ① 拡張下負荷面モデルに基づく有限要素法を用いて、バラスト道床内部の 3 次元変形メカニズムの解明に取り組む。既往の研究は鉛直載荷試験の有限要素解析に限定されており、今回は水平載荷試験の有限要素解析に取り組む。当該の検討により、道床沈下量の定量予測手法の構築や道床沈下対策工の開発・改善にとって有益な知見が得られる。
- ② バラスト道床の繰り返し変形解析における計算負荷のさらなる軽減を目指して、cyclic densification モデルに基づく評価手法⁹⁾の適用可能性について検討する。また、低サイクル数における当該モデルの評価精度の低さの改善に取り組む。当該課題は、弾塑性連続体モデルに基づく道床沈下解析手法のさらなる効率化に資する。
- ③ 現状の連続体解析モデルをベースに、確率論的手法を援用して、バラスト道床の構成

に関する不確定性 (ばらつき) が変形挙動に及ぼす影響を評価する手法の開発に取り組む。その結果、沈下量予測の信頼性を確率論的に担保することができるようになる。

3. 研究の方法

(1) バラスト道床内部の 3 次元変形メカニズムの解明

有道床バラスト軌道に鉛直荷重・水平荷重が繰り返し作用した際の、バラスト道床内部の 3 次元変形メカニズムの解明のために、まくらぎ・バラスト材からなる 3 次元有道床軌道モデルについて、有限要素解析を行なった。構成モデルは、まくらぎは等方弾性体、バラスト材は回転硬化を考慮した拡張下負荷面モデル⁶⁾で与えた。

(2) バラスト道床の繰り返し変形解析における計算負荷のさらなる軽減の試み

まず、構成モデルを hypoplastic モデル⁵⁾で与え、計算効率の改善のために時間域均質化法を援用する手法⁸⁾を 3 次元有限要素法に実装し、有限要素解析における当該の効率化法の妥当性について検討した。また、第 2 の道床沈下解析効率化法として、構成モデルを hypoplastic モデルで与え、multi-time scaling 法¹⁰⁾を援用する方法を構成した。定式化に際しては、Daubechies の正規直交 wavelet を用いた。さらに、第 3 の効率化法として、cyclic densification モデル⁹⁾の適用を試み、その有効性について検討した。Cyclic densification モデルは、載荷・除荷の繰り返しサイクル数の増加に対する残留ひずみの増加量を直接与える構成モデルで、応力履歴をもれなく追跡する必要がある一般的な弾塑性モデルとは違い、応力積分はサイクル数についての積分により実行する。そのため、多数回の載荷・除荷の繰り返しを対象とした変形解析では、通常の弾塑性解析よりも非常に少ない計算量で済む利点を有している。なお、解析は応力点解析、有道床軌道の 3 次元有限要素解析の双方を実行した。

(3) バラスト道床の構成関係の変動が変形挙動に及ぼす影響の評価

バラスト材は粒径が道床の層厚に対して相対的に大きいこともあり、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、小さくない変動を含むものとなる。しかし、通常の弾塑性解析は決定論的手法によるため、材料の平均的な力学挙動を評価することとなり、変動の影響は考慮できない。そこで、拡張下負荷面モデル⁶⁾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

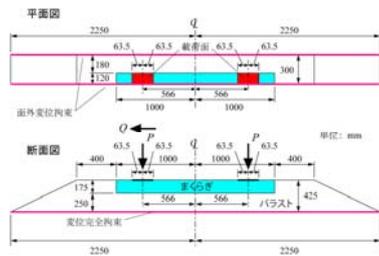
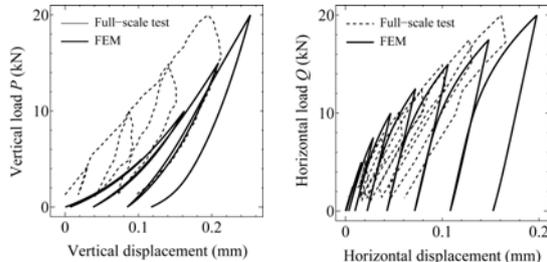


図1 解析モデルおよび境界条件.



(a) 鉛直載荷. (b) 水平載荷

図2 作用荷重とまくらぎ変位の関係.

法(FOSM)¹¹⁾を用いて評価・検討した. あわせて, particle swarm optimization(PSO)¹²⁾を用いて, 実験結果から拡張下負荷面モデルの材料パラメータを同定する手法を開発した.

4. 研究成果

(1) バラスト道床内部の3次元的な変形メカニズムの解明

本研究では, 石川らの実物大有道床軌道の繰り返し载荷試験²⁾を対象に, 3次元弾塑性有限要素解析を行なった. 鉛直载荷試験では2本のレール各々に繰り返し鉛直荷重を繰り返し作用させ, 水平载荷試験では鉛直荷重を2本のレールに作用させた後, さらに水平荷重 Q を繰り返し作用させている. 具体的な作用荷重値は文献[1]を参照されたい. 解析においては, 図1に示すようなまくらぎ1区間分を解析領域として設定し, 軌道横断面には対称条件, バラスト道床底面には変位完全拘束条件, バラストとまくらぎとの境界面には完全付着条件を課した. なお, 解析は荷重制御条件下で行なった.

まず, 有限要素解析によって得られたまくらぎ位置での荷重・変位関係を図2に示す. 鉛直载荷の場合, まくらぎ下面位置で一般的な強制変位を繰り返し作用させていた従前の解析結果と比べ, 先行鉛直荷重超過時の残留変形の発現が小さい上, 超過後の剛性低下もあまり見られず, 解析結果は実測結果により近い挙動を示している. 除荷時については, しばらくは概ね線形関係で推移し, 除荷完了直前の拘束応力が小さい段階で残留変位の発現量が大きくなっている. 水平载荷の場合, 先行荷重超過以降で残留変位の発現量が増加し始めており, 試験結果と解析結果とで定性的に矛盾のない結果が得られている. しか

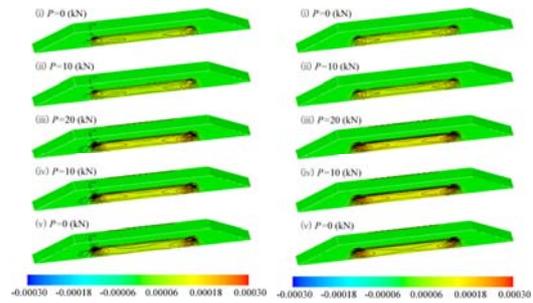


図3 繰り返し最終サイクルにおける塑性ひずみの発現傾向(鉛直载荷).

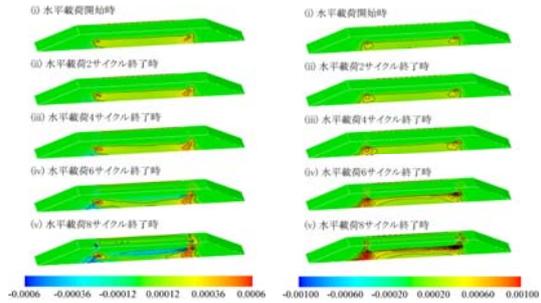


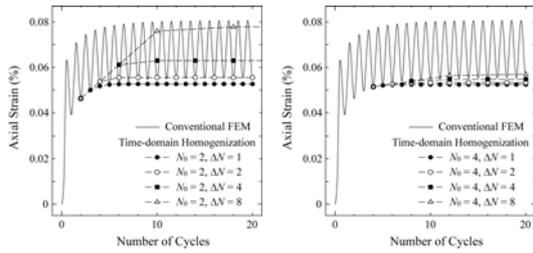
図4 繰り返し最終サイクルにおける塑性ひずみの発現傾向(水平载荷).

し, 実験と解析とで剛性および残留変位量が大きく異なっており, この点は今後改善が必要である.

次に, 鉛直载荷の場合における繰り返し最終サイクル(4回目)における塑性体積ひずみ, 塑性偏差ひずみの2次不変量の推移を図3に示す. 塑性ひずみの体積成分, せん断成分ともまくらぎ直下の直方体状の領域に専ら発現しており, せん断ひずみが大きい箇所では正の塑性体積ひずみが発現している. また, 水平载荷の場合における繰り返し各サイクル終了時の塑性体積ひずみ, 塑性偏差ひずみの2次不変量の推移を図4に示す. 水平方向の繰り返し载荷によって, 図中右側のまくらぎ端面でまくらぎがバラストから剥離し, 剥離面がバラストの下方に進展していくことがわかる. また, 水平载荷試験では鉛直荷重も同時に作用させるため, まくらぎが正の曲げを受ける箇所ではバラスト材の摩擦抵抗により水平反力の一部を負担すると考えられる.

(2) バラスト道床の繰り返し変形解析における計算負荷のさらなる軽減の試み

まず, バラスト材の繰り返し変形挙動を hypoplastic モデルで表現する準静的釣り合い問題の有限要素法に時間域均質化法を実装した場合における, 解析精度と計算量の削減効果について検討した. 数値実験は拘束圧を -19.6 (kPa) で一定とし, 等方応力状態と軸差応力 -78.4 (kPa) の状態との間で荷重・除荷を一定周期の下で繰り返した, 石川らによる



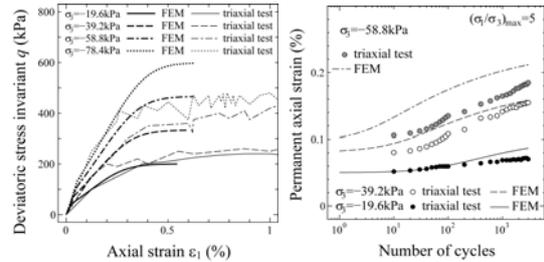
(a) $N_0 = 2$. (b) $N_0 = 4$.

図5 残留軸ひずみ評価値に及ぼす時間スケール分離開始サイクル N_0 および計算サイクル幅 ΔN の影響.

大型繰り返し三軸試験¹⁾を対象として行なった. なお, 解析においては, ミクロ時間スケール問題を解く際には, 直方体上面に軸差応力(0~78.4kPa)に相当する直応力を繰り返し作用させ, 残りの側面では表面力0に設定している. 一方, マクロ時間スケール問題を解く際には, 全ての表面力規定境界上で-19.6kPaを各面に直応力として作用させる. ここで, 時間スケール分離移行サイクルを $N_0 = 2, 4$ のいずれかに固定し, それぞれ解析サイクル幅を $\Delta N = 1, 2, 4, 8$ に変化させた場合における, 残留軸ひずみの評価結果を図5に示す. 当該の問題では, 繰り返し初期に比較的大きな残留軸ひずみが生じ, 各サイクルでの残留ひずみの増加量は繰り返しサイクルの進行とともに急速に減少している. そのため, 従来法で解析するサイクル数が少ない場合には, 1サイクル当りの残留軸ひずみ増分の変化が大きく, 1サイクルでの時間平均量のマクロ時間変化率の評価精度が低くなる. その結果, ΔN の設定値により残留軸ひずみの予測値が大きく変化する. 一方, スケール分離開始サイクル N_0 を次第に大きくすると, 各サイクルでの残留ひずみの増分が概ね一定で小さいため, 解析サイクル幅の影響は徐々に小さくなることがわかった.

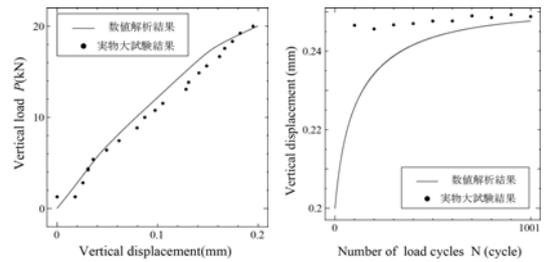
また, パラスト材の繰り返し変形挙動を hypoplastic モデルで表現する場合を対象に, multi-time scaling 法¹²⁾による計算効率の改善については, 当該構成モデルにおいて multi-time scaling 法を適用するための定式化を行なった. 定式化の妥当性, 計算効率および精度に及ぼす離散化の影響については, 文献1)の大型繰り返し三軸試験の実験条件に準拠した解析例を対象とした数値実験を通して検証した. 数値実験においては, Daubechies の正規直交 wavelet を用い, 時間積分は台形公式を用いたところ, Daubechies wavelet の表現解像度が低すぎると, 計算に用いる影響係数の評価精度が低下するため, 1サイクルでの評価物理量の評価精度に悪影響を及ぼすことがわかった.

最後に, Suiker らが提案した cyclic densification モデル¹¹⁾によるパラスト材の



(a) 軸差応力と軸ひずみ (単調載荷). (b) 残留軸ひずみの累積傾向 (繰り返し載荷).

図6 Cyclic densification モデルによる応力点解析結果 (単調載荷・繰り返し載荷).



(a) 鉛直変位と鉛直荷重の関係 (単調載荷). (b) 残留変位の進展傾向 (繰り返し載荷).

図7 Cyclic densification モデルによる実物大軌道・鉛直荷重試験の3次元解析結果.

繰り返し変形挙動のモデル化の妥当性について検討した. 解析は, 石川らの大型繰り返し三軸試験¹⁾の応力点解析, 実物大試験の3次元有限要素解析の双方について実施した.

まず, 大型三軸試験の応力点解析結果を示す. 図6(a)は単調載荷試験における軸差応力・軸ひずみ関係を示したものである. 軸ひずみ0.3%以下の範囲では, いずれの拘束圧の下でも解析結果と試験結果は同様の値を示している. しかし, 軸ひずみ0.3%以上の範囲での解析結果は, 拘束圧が小さい場合では試験結果と概ね一致しているが, 拘束圧を大きく設定するにつれて最大軸差応力の値に差が生じている. また, 終局強度到達までの速度は試験と解析とで相違が認められ, 解析の方がひずみのより小さい段階で最大軸差応力に到達する傾向を示した. さらに, 最大主応力比を5で一定とした繰り返し三軸試験の解析結果を, 試験結果と併せて図6(b)に示す. 3種類の拘束圧の設定値のうち, -19.6(kPa), -39.2(kPa)の条件下では実験と解析とで概ね同程度の残留ひずみの値およびその変化挙動を示しているのに対し, -58.8(kPa)とした場合には, 解析結果は残留軸ひずみを過大に評価する傾向を示した.

次に, 実物大軌道の単調載荷試験²⁾ (最大鉛直荷重20kN)を対象とした3次元有限要素解析により得られた鉛直荷重と鉛直変位の解析結果を図7(a)に示す. 解析結果は実験結

表1 PSOにより同定した拡張下負荷面モデルの材料パラメータ値.

$\phi = 31.217^\circ$
$\rho = 0.081, \mu = 4.308, \phi_d = 33.948^\circ$
$b_r = 20.437, \phi_b = 76.515$
$w_1 = 0.825, m_1 = 1.563$
$c_1 = 22.930, c_2 = 0.170, c_3 = 3.347$
$\gamma = 0.657 \times 10^{-4}$
$F_0 = 201.59(\text{kPa})$

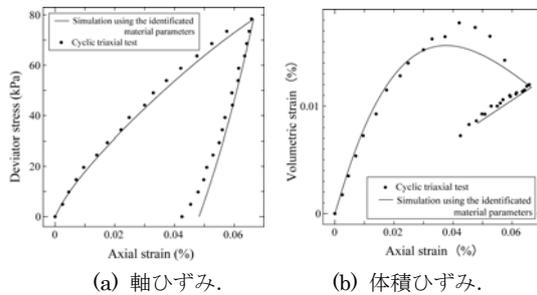


図8 同定パラメータ値による応力解析結果.

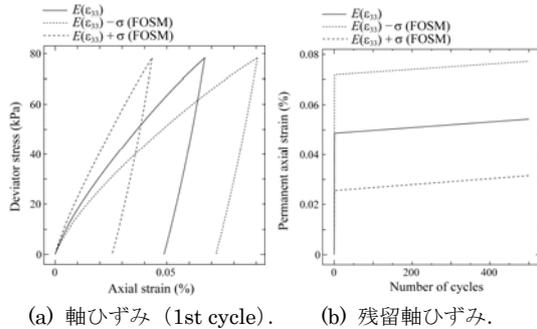


図9 軸ひずみの解析結果における材料パラメータの変動の影響.

果と概ね同等の鉛直荷重-変位関係が得られている. また, 繰返し載荷条件下 (最大鉛直荷重 20kN) における繰返し載荷回数と鉛直変位の関係を図7(b)に示す. 解析結果では, 繰返し載荷回数の増加とともに 1cycle あたりの残留変位増分は徐々に小さくなり, バラストの変形が塑性的なものから弾性的な変形に変化していく. 載荷初期では実験結果と解析結果では2割ほどの差が生じているが, 繰返し載荷回数の増加とともにその差が縮小していく結果が得られた.

(3) バラスト道床の構成関係の変動が変形挙動に及ぼす影響の評価

バラスト道床の構成関係の変動が変形挙動に及ぼす影響は, バラスト材を拡張下負荷面モデル⁷⁾でモデル化した場合を対象に評価した. 評価に当たっては, まず拡張下負荷面モデルの材料パラメータを, 大型繰返し三軸試験結果¹⁾を参照解とした Particle Swarm Optimization(PSO)アルゴリズムを用いて同定した. 同定結果を表1, 同定パラメータを用いた順解析結果を図8にそれぞれ示

す. なお, 同定計算においては, Poisson 比を体積ひずみの除荷曲線から $\nu = 0.4084$ に固定した. また, 同定パラメータの探索範囲を初期値の $\pm 50\%$ に設定し, PSO 解析ステップ数 100, 個体数 10 で第1段階の同定計算を実行したのち, 第1段階終了時におけるグローバルベストとなる材料パラメータ値の $\pm 30\%$ に最適パラメータの探索空間を狭めた上で, 第2段階の同定計算を行なった. 解析結果より, 軸ひずみ・軸差応力関係, 軸ひずみ・体積ひずみ関係ともに良好な精度で実験結果を再現できた.

次に, 回転硬化を考慮した拡張下負荷面モデルにおける材料パラメータの変動が, 繰返し変形解析により得られるひずみ成分に及ぼす影響について, 大型繰返し三軸試験の応力点解析を対象に検討する. 全てのパラメータについて変動係数 $\delta = 5\%$ 相当分の変動を与えた場合における, 残留軸ひずみの進展解析結果に対する材料パラメータ変動の影響を図9に示す. 第2サイクル以降における残留変形の進行がわずかであることもあり, 載荷・除荷サイクルが進展し残留軸ひずみの蓄積が進行しても, FOSMにより評価される残留ひずみの標準偏差はほとんど変化がないことがわかった.

なお, 材料パラメータ変動の影響評価は, 実物大軌道の鉛直繰返し載荷試験²⁾の有限要素解析についても行なった. 変動の影響はまくらぎ位置での鉛直変位について検討し, γ の影響感度が最も高いこと, パラメータ m_1 を変動させた場合には FOSM による標準偏差の評価精度が著しく低下する場面があることがわかった.

〔参考文献〕

- 1) 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.
- 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返し変形特性の検討, 土木学会論文集, No. 512, IV-27, pp.47-59, 1995.
- 3) 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変形機構の検討, 土木学会論文集, No. 645, III-50, pp.15-28, 2000.
- 4) 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.
- 5) Bauer, E.: Calibration of a comprehensive hypoplastic model for granular materials. Soils and Foundations, Vol. 36, No. 1, pp.13-26, 1996.

- 6) 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.
- 7) 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, No. 1, pp. 31-36, 2007.
- 8) 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, 2008.
- 9) Suiker, A. S., de Vorst, R.: A numerical model for the cyclic deterioration of railway tracks. Int. J. Numer. Meth. Engrg., Vol. 57, pp. 441-470, 2003.
- 10) Joseph, D. S., Chakraborty, P., Ghosh, S.: Wavelet transformation based multi-time scaling method for crystal plasticity FE simulations under cyclic loading. Comput. Meth. Appl. Mech. Engrg., Vol. 199, pp. 2177-2194, 2010.
- 11) 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.
- 12) 江本久雄: メタヒューリスティクスによる最適設計と逆解析の構造工学への適用に関する研究, 山口大学大学院理工学研究科博士學位論文, 2006.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 8 件, 下記他 3 件)

- ① 紅露一寛, 米澤拓馬, 阿部和久: Particle Swarm Optimization(PSO)によるバラスト道床繰り返し変形解析の材料パラメータ同定, 第 18 回鉄道技術・政策連合シンポジウム(J-RAIL2011)講演論文集, pp.81-84, 平成 23 年(2011), 査読なし.
- ② 紅露一寛, 間島朋也, 阿部和久: 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, 第 18 回鉄道技術・政策連合シンポジウム(J-RAIL2011)講演論文集, pp.77-80, 平成 23 年(2011), 査読なし.
- ③ 紅露一寛, 山田啓太: Cyclic densification モデルに基づく 3 次元弾塑性有限要素法を用いたバラスト材の繰り返し変形解析, 土木学会鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.15, pp.85-92, 平成 23 年(2011), 査読あり.
- ④ 紅露一寛, 福津佑太, 東海林裕之, 阿部

和久: 下負荷面モデルを用いた弾塑性有限要素法による有道床バラスト軌道の繰り返し変形解析, 計算工学講演会論文集, Vol.15, pp.961-964, 平成 22 年(2010), 査読なし.

- ⑤ 紅露一寛, 村松久志, 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を援用した有限要素解析法, 計算工学講演会論文集, Vol.15, pp.1001-1004, 平成 22 年(2010), 査読なし.

〔学会発表〕(計 8 件, 下記他 3 件)

- ① 紅露一寛, 米澤拓馬, 阿部和久: Particle Swarm Optimization(PSO)によるバラスト道床繰り返し変形解析の材料パラメータ同定, 第 18 回鉄道技術・政策連合シンポジウム(J-RAIL2011), 平成 23(2011)年 12 月 13 日, 国立オリンピック記念青少年総合センター(東京都渋谷区).
- ② 紅露一寛, 間島朋也, 阿部和久: 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, 第 18 回鉄道技術・政策連合シンポジウム(J-RAIL2011), 平成 23(2011)年 12 月 13 日, 国立オリンピック記念青少年総合センター(東京都渋谷区).
- ③ 紅露一寛, 山田啓太: Cyclic densification モデルに基づく 3 次元弾塑性有限要素法を用いたバラスト材の繰り返し変形解析, 第 15 回鉄道工学シンポジウム, 平成 23(2011)年 7 月 13 日, 土木学会(東京都新宿区).
- ④ 紅露一寛, 村松久志, 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を援用した有限要素解析法, 第 15 回計算工学講演会, 平成 22(2010)年 5 月 27 日, 九州大学(福岡県福岡市).
- ⑤ 紅露一寛, 福津佑太, 東海林裕之, 阿部和久: 下負荷面モデルを用いた弾塑性有限要素法による有道床バラスト軌道の繰り返し変形解析, 第 15 回計算工学講演会, 平成 22(2010)年 5 月 26 日, 九州大学(福岡県福岡市).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

紅露一寛 (KORO KAZUHIRO)
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.