

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06177

研究課題名(和文) 軌道剛性急変箇所を対象とした道床沈下解析法の開発と沈下メカニズムの解明

研究課題名(英文) Development of FE-based simulation method for evaluating ballast settlement of railway track with transition zone or a rail joint

研究代表者

紅露 一寛 (KORO, Kazuhiro)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：70361912

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：軌道剛性急変箇所のためのバラスト道床沈下解析法を開発し、道床沈下の発生・進展メカニズムの解明に取り組んだ。軌道剛性急変箇所としてコンクリートとバラストの接続部およびレール継目部を対象とした。道床沈下解析法は、軌道振動問題と道床沈下問題との弱連成解析手法とした。当該手法を用いて、軌道剛性急変箇所の道床沈下の発生・進展の各種因子、特に車輪の走行速度や走行方向、継目部でのレール凹凸などの影響を検討した。また、沈下量の評価対象で粗粒材の集合体であるバラスト材は力学挙動に空間的ばらつきを有する。そのため、道床への作用力や沈下量に対するバラスト材の力学挙動の空間的ばらつきの影響を数値実験により検討した。

研究成果の概要(英文)：A coupling simulation method with track vibration and ballast settlement phenomena is developed for predicting the irreversible displacement (settlement) of railway ballast with transition zone or a rail joint. The present simulation method, is based on the finite element method (FEM), is used for investigating the influence of several factors in railway track, e.g. wheel running speed, joint structure and rail irregularity, on the progression of ballast settlement. The railway ballast is composed of crushed stones, and hence has spatial variation of its elastoplastic behavior. The influence of the simulated ballast settlement on the spatial variation of the mechanical behavior is estimated through the numerical tests using the stochastic FEM (SFEM).

研究分野：応用力学，鉄道工学，計算力学

キーワード：バラスト道床沈下 弾塑性有限要素法 確率有限要素法 材料物性値のばらつき 軌道剛性急変箇所  
レール継目

## 1. 研究開始当初の背景

近年、世界最高水準の社会基盤施設のパッケージ輸出に注目が集まる中、特に都市鉄道や都市間の高速度鉄道はその最有力として期待されている。また、わが国では国際貢献の一環として、内陸からの鉱業資源の輸送鉄道など、経済基盤の整備を目的とした鉄道整備も古くから取り組まれている。今日では専門家ならずとも知るように、国内外の鉄道軌道においては、粒径数センチ程度の碎石の集合体であるバラスト道床をまくらぎ下に敷設することが一般的である。バラスト道床は、列車走行時の輪重衝撃の緩和と騒音・振動の低減のための経済性・施工性に優れた軌道構造であるものの、列車の繰り返し走行により不可逆変位が発生・累積する。特に道床上面の沈下量(道床沈下量)は軌道保守上の重要監視項目の一つとなっており、その定量予測手法の確立は、今日に至るまで鉄道力学分野の重要な研究課題となっている。

これまで、国内外の多くの鉄道技術者・研究者が、バラスト道床の沈下現象の解明および道床沈下量予測手法の構築に取り組んできた。先行研究では、模型軌道や実物大軌道の載荷実験から沈下メカニズムの解明する試みだけでなく、道床沈下現象のメカニズムの解明や沈下量予測を目的とした数理モデル化およびその数値解析の実用化も試みられている。中でも、不連続変形法(DDA)や個別要素法(DEM)は、解析なモデルで粒子集合体の力学挙動を再現できる反面、粒子形状や寸法、配置などの変動が解析結果に及ぼす影響が極めて大きく、解析結果から力学挙動を定量的に評価することが難しい上、多大な計算負荷を要する問題点があった。そこで研究代表者は、バラスト道床の繰り返し変形挙動を弾塑性連続体としてモデル化し、残留変位・変形を有限要素法で求める解析手法を開発・改良してきた。特に、特に、cyclic densification モデルは現実的な計算負荷の下で実軌道の道床沈下解析を実現できる解析モデルである(引用文献①、②)。

なお、バラスト道床沈下は、レール継目部やコンクリート直結軌道からバラスト道床軌道への移行箇所など、軌道剛性が不連続または局所的に急変する箇所において、他の箇所と比べて顕著となることが知られている。当該箇所での道床沈下は、軌道剛性の急変に伴ってバラストへの鉛直作用力が著大となることが原因と考えられている。著大となる作用力の大きさは、車両の走行速度や車両重量、レール凹凸の大きさや道床沈下の進展によって生じる浮きまくらぎの発生の有無と発生箇所などの影響を受ける。動的作用が無視できない当該箇所での道床沈下量の定量評価手法がなく、沈下促進メカニズムが十分に解明されたとは言えない。また、バラスト道床は碎石粒子の集合体であることもあり、その材料挙動には小さくない変動が存在する。その結果、車両・軌道系の動的相互作用

によりその大きさが定まるバラストへの鉛直作用力や、道床沈下量にも小さくない変動が混入する。特に、道床沈下が他の箇所よりも著大となる軌道剛性急変箇所では、バラスト材の力学挙動の変動が道床沈下量に及ぼす影響が一層大きくなり、最終的に数値解析により予測・評価する道床沈下量は、解析結果の信頼性を考慮した上で軌道設計・管理に反映・活用する必要がある。しかしながら現状では、軌道剛性急変箇所を対象とした、バラスト材の力学挙動の変動の影響を考慮した道床沈下解析法は存在しない。以上の学術的背景から、本研究課題に対する補助金を申請するに至った。

## 2. 研究の目的

上記1.の研究背景を踏まえ、本研究課題では、軌道剛性急変箇所でのバラスト道床沈下現象を対象に、その力学的なメカニズムを解明するために、当該箇所での車両・軌道系の連成振動応答を考慮したバラスト道床沈下解析手法を開発する。また、軌道剛性急変箇所を対象とした、バラスト材の力学挙動の変動を考慮した道床沈下解析を実現するための具体的な数値計算法を開発する。本研究では、以下3点について明らかにする。

(1) 軌道剛性急変箇所におけるバラスト道床沈下量の定量評価を目的として、車両・軌道系の連成振動解析と、繰り返し荷重作用によるバラスト道床沈下解析との連成解析法の定式化、およびその具体的な解析アルゴリズムを示し、その妥当性を検討する。

(2) 軌道剛性急変箇所におけるバラスト道床沈下現象に対する各種因子の影響について検討することで、当該現象の発生・進展メカニズムを明らかにする。

(3) バラスト材の力学挙動のばらつきの影響を考慮した上で、バラスト道床沈下量とそのばらつきとをあわせて定量評価する手法の定式化、およびその具体的な解析アルゴリズムを示し、その妥当性を検討する。

## 3. 研究の方法

## (1) 軌道剛性急変部の道床沈下現象の解明

軌道剛性急変部として、次の2種類の軌道構造を対象に、バラスト道床沈下量の定量評価を試み、道床沈下の発生・進展メカニズムを検討した。

## ① コンクリート道床とバラストとの接続部

## ② レール継目箇所

これらの箇所では、軌道剛性の急変に伴い、列車通過時の軌道の応答には、動的作用が無視できないものとなる。そのため、本研究では、車輪・軌道系の連成振動問題と、バラスト道床の沈下問題とを連成して解く解析法を構成した。軌道振動問題は、図1に示すようなはり・質点・ダッシュポットからなる解析モデルに有限要素法及び直接時間積分法を適用して解き、まくらぎ・道床間作用力の最大値を評価することとした。

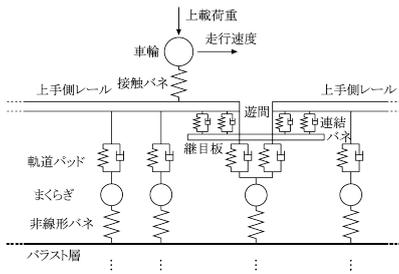


図1 車輪・軌道系の連成解析モデル

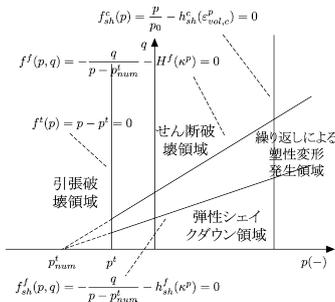


図2 Cyclic densification モデルの降伏面形状（繰り返し载荷モデル）

軌道振動解析により評価したまくらぎ・道床間最大作用力をバラスト道床への作用外力として、バラスト道床沈下解析を行った。沈下解析では、バラスト材の繰り返し変形挙動を弾塑性連続体としてモデル化し、構成則には cyclic densification モデル（引用文献①）を採用した。当該の構成モデルは、無荷重状態から最大荷重作用時点まで、および最大荷重作用時点から完全除荷時までの解析に用いる「単調载荷モデル」と、最大荷重が繰り返し作用する条件下において、载荷・除荷単位回あたりの物理量を負荷サイクル数について直接積分して評価する「繰り返し载荷モデル」の2つのモデルからなる。図2は繰り返し载荷モデルの降伏面形状を図示したものである。実際の解析では、道床沈下の進展に伴って軌道系の動的応答も変化することが予想されるため、上述の振動解析と道床沈下解析とを所定サイクル数の間隔で交互に実行する弱連成解析を行う。当該の沈下解析で得られた各まくらぎ位置での沈下変位は、軌道振動解析の解析条件として与えることで、発生・進展した沈下変位を反映した振動解析を実現することができる。

## (2)軌道剛性急変部の道床沈下に対する各種因子の影響の評価

本研究では、軌道剛性急変部の道床沈下発生・進展メカニズムの解明のために、まず、道床沈下解析に用いる材料物性値を、室内試験結果から同定した上で、同定した物性値に所定のばらつきが混入する場合を仮定して、その応力解析結果に及ぼす影響を評価した。材料物性値の同定には粒子群最適化手法を用い、材料物性値のばらつきの影響は、2次近似2次モーメント法を用いて評価した。

次に、軌道剛性急変部のバラスト道床沈下現象を対象に、まくらぎの浮きの有無、車両の走行速度、列車進行方向などの各種因子の影響について検討した。当該影響の検討は、3(1)節で開発した解析手法を用いて行った。

なお、3(1)節で説明した軌道振動・バラスト道床沈下連成解析法では、バラスト道床沈下解析における作用外力は、軌道振動解析で評価されるまくらぎ・道床間最大作用力としている。一方、バラスト道床はその層厚に対して粒径がさほど小さくない砕石粒子の集合体であり、その弾性挙動を平均化してモデル化する場合、空間的ばらつきは無視できないものとなる。そこで本研究では、バラスト道床のヤング率の空間的ばらつきを考慮した車両・軌道系の連成振動解析を行なうことで、バラスト道床のヤング率の空間的ばらつきがまくらぎ・道床間作用力のばらつきに及ぼす影響について検討した。解析においては、バラスト道床ヤング率の空間的ばらつきは Karhunen-Loeve 展開でモデル化した上で、バラスト道床の動的応答を数値的に予め求めた Green 関数の形で取り込んで振動解析を行うこととした。数値 Green 関数は、polynomial chaos を用いたスペクトル確率有限要素法 (SSFEM, 引用文献③) を用いて求めることとした。

## (3)バラスト材の力学挙動のばらつきを考慮した道床沈下解析法の開発

バラスト材は、前述のように粗粒材の集合体であるため、その力学挙動にはばらつきが含まれる。本研究課題で取り組んでいるバラスト道床沈下量の定量評価においては、この力学挙動のばらつきは、バラスト材の材料物性値の空間的ばらつきとして考慮される必要がある。そこで、確率有限要素法を用いて、バラスト材の材料物性値の空間的ばらつきを考慮したバラスト道床沈下解析法を開発した。空間的ばらつきは Karhunen-Loeve 展開でモデル化した上で、bounding body 近似に基づく SSFEM（引用文献④）、または有限要素法を用いたモンテカルロシミュレーション (MCS) により、道床沈下量の期待値と標準偏差を同時に評価する手法を構成した。なお、前者のアプローチは単調载荷過程の解析においてバラスト材ヤング率の影響を考慮する場合に採用した。後者は、バラスト材のヤング率に限定されず各種材料物性値の空間的ばらつきを考慮する場合に適用した。

## 4. 研究成果

### (1)コンクリート道床・バラスト道床接続部の道床沈下量評価

まず、図3のコンクリート道床・バラスト道床接続部周辺のバラスト道床沈下解析結果を図4に示す。なお、ここではコンクリート区間からバラスト区間へ乗り移る場合を対象としている。解析結果より、コンクリート・バラスト接続部より4本目のまくらぎ位置

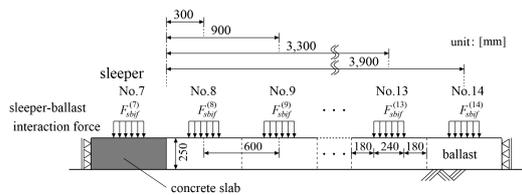
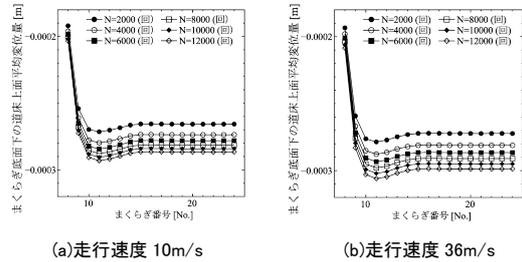


図3 コンクリート道床・バラスト道床接続部の道床沈下解析の条件



(a) 走行速度 10m/s (b) 走行速度 36m/s

図4 まくらぎ位置での沈下量の分布(コンクリート区間からバラスト

区間への進入の場合)

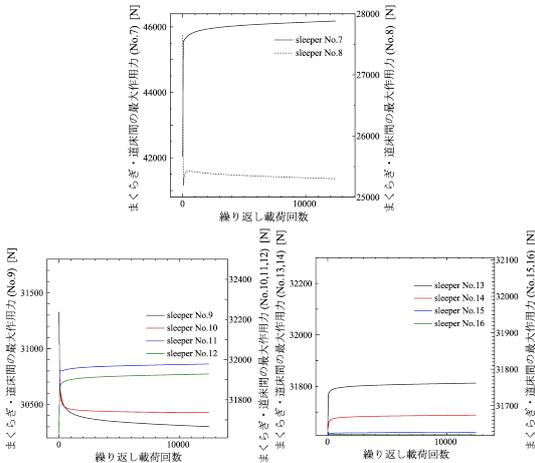
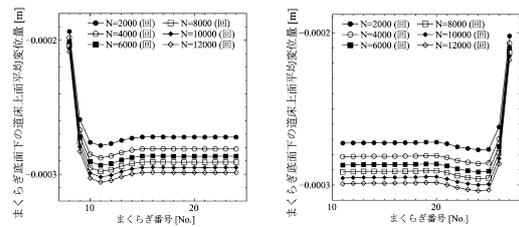


図5 コンクリート道床・バラスト道床接続部におけるまくらぎ・道床間

作用力の推移

(2.1m付近)で沈下変位がピークを示すことや、接続部から8本程度離れたら沈下変位はほぼ一様となること、これらの沈下変位の発現量の違いは、振動解析により評価されるまくらぎ・バラスト間最大作用力の発現に依存しており、接続部から4~7本目での最大作用力は繰返し数に対して漸増、1~3本目では漸減、8本目以降はサイクル数の進展に対してほぼ横ばいで推移することがわかった。一方、バラスト道床への作用外力であるまくらぎ・道床間最大作用力は、図5に示すように、沈下量が大きくなるNo.11,12のまくらぎ位置とコンクリート部No.7での最大作用力が漸増し、No.10,9,8と接続部に接近するにつれて最大作用力が小さくなり、かつサイクル数の進行とともにその値が低減することがわかる。No.13以遠のまくらぎ位置では最大作用力は漸増するが、その増加速度は遠方のまくらぎほど小さくなる。解析手法の特性上、この挙動は沈下挙動と符合するものである。車輪の走行速度を10m/sから36m/sに上昇させた場合においては、軌道剛性急変箇所を通過する際にまくらぎ・道床間作用力において動的な増幅効果によって道床沈下量は増加するものの、沈下変位の空間



(a) コンクリートからバラスト (b) バラストからコンクリート

図6 まくらぎ位置での道床沈下量に及ぼす車輪の進入方向の影響

(走行速度 36m/s)

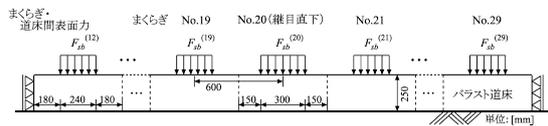
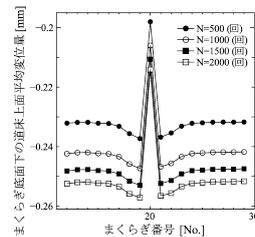
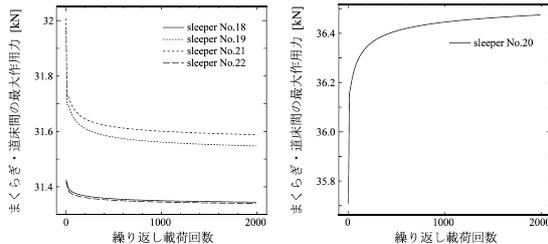


図7 レール継目部道床沈下解析の解析条件



(a) 道床沈下量分布



(b) まくらぎ・道床間最大作用力とサイクル数

図8 レール継目部の道床沈下量分布とまくらぎ・道床間最大作用

力(レール凹凸なし)

分布は低速時と概ね同様となることがわかった。なお、車輪の進入方向をバラスト道床からコンクリート道床に進入するように設定した場合には、道床沈下分布はコンクリート区間からバラスト区間に進入する場合と同様であったものの、沈下量はバラスト区間からコンクリート区間に進入する場合よりも若干大きくなることが分かった(図6)。

(2) レール継目部の道床沈下量評価

次に、かけ継ぎによるレール継目を対象に、図7に示したまくらぎ配置・バラスト道床での沈下量解析を行った結果を図8に示す。なお、図8はレール継目付近のレール凹凸が存在しない場合を対象とした結果となっている。レール継目を通過する際に生じる衝撃輪重によって、継目直下まくらぎでは最大作用力が他と比べて1割程度増加し、負荷サイクルの進展とともに増加している。しかし、継目直下では幅の広い大判まくらぎが敷設されていることもあり、バラストに作用する表面力が継目周辺部よりも相対的に小さくなり、結果として評価される沈下変位は継目直

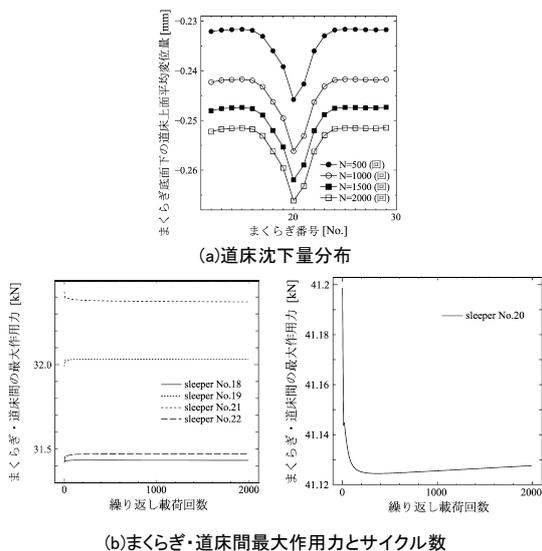


図9 レール継目部の道床沈下量分布とまくらぎ・道床間最大作用力 (レール凹凸あり)

下ではその周辺部と比して小さくなる。一方、レール継目周辺で観測される典型的なレール凹凸を与えた場合の道床沈下量分布を図9に示す。レール継目でレール頭頂面が摩耗で落ち込むレール凹凸を与えることで、実軌道で観測される典型的な道床沈下分布が得られている。まくらぎ・道床間最大作用力は、凹凸なしの場合とは異なり、サイクル数が増加しても最大作用力はさほど変化しないが、レール継目直下では最大作用力が低下、継目周辺ではわずかに増加する挙動を示している。以上の結果は、レール継目付近のまくらぎ支持剛性を調整することで道床沈下量が局所的に著大となることを回避できる可能性を示唆するものである。

なお、上記の影響因子以外にも、車両の走行速度や継目遊間長、まくらぎ支持方法や支持剛性の影響についても評価を試みた。

(3) バラスト材の力学挙動のばらつきを考慮した道床沈下解析法の開発

まず、バラスト材の大型繰り返し三軸試験を対象とした応力解析を通して、粒子群最適化手法(PSO)を用いて材料物性値を同定した。また、各物性値のばらつきが応力解析結果の変動に及ぼす影響について検討した。その結果、三軸試験の応力比を大きく設定する場合、弾性挙動および摩擦すべりの終局強度を制御する材料物性値の変動の影響が、他の物性値の影響に比べて大きくなることがわかった。

次に、バラスト道床解析の外力として与えるまくらぎ・道床間作用力に及ぼすバラスト道床ヤング率の空間的ばらつきの影響を図10に示す。SSFEMを用いた振動解析により得られた解析結果は、走行速度によらずヤング率の相関係数10%に対してバラスト・道床間作用力の標準偏差は期待値の1%に満たないことがわかった。また、レールの断面二次モーメントの空間的ばらつきの影響を検討し

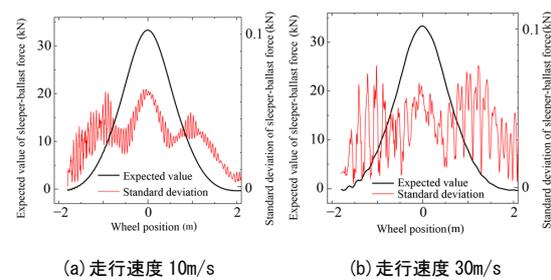


図10 ヤング率の空間的ばらつきを有するバラスト道床上を車輪が走行した際に観測されるまくらぎ・道床間作用力の期待値と標準偏差 (変動係数10%, 相関長さ0.1m)

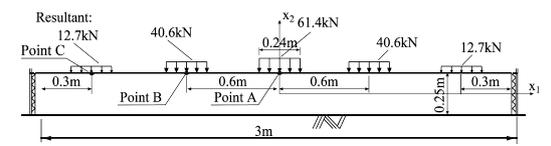


図11 実軌道を模擬した道床沈下解析の領域と境界条件

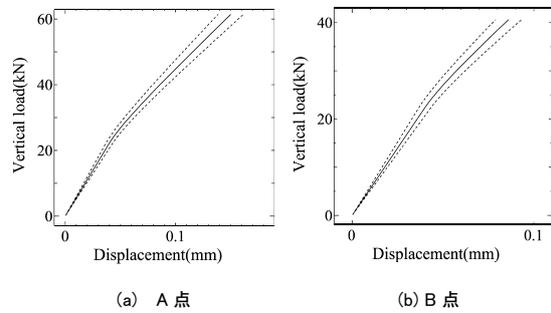


図12 ヤング率の空間的ばらつきを考慮した場合のバラスト上面位置での荷重・変位関係(弾性挙動を線形化, 変動係数10%, bounding body近似に基づくSSFEM解析)

たところ、バラスト道床ヤング率と同様の傾向を示した。

最後に、バラスト材の材料物性値の空間的ばらつきが道床沈下予測量のばらつき度合い(標準偏差)に及ぼす影響について検討した。まず、実際の軌道を模擬した図11のバラスト道床領域において各まくらぎ位置で単調載荷する場合を対象に、バラスト材の弾性挙動を線形と仮定した上で、ヤング率の空間的ばらつき(相関係数10%)を考慮した場合におけるA点およびB点での変位の期待値と標準偏差を図12に示す。なお、当該の解析結果は bounding body 近似に基づくSSFEM解析により得られたものである。当該の解析では弾性挙動を線形化していることもあり、入力であるヤング率のばらつき度合い(変動係数10%)と同程度の変動が解析により得られた道床上面鉛直変位に発現することがわかった。さらに、図11の領域を対象に、cyclic densificationモデルの塑性挙動を制御する材料物性値の空間的ばらつきを考慮した道床沈下解析結果を図13に示す。なお、当該の解析はMCSで得られたものである。解析対象の問題では塑性変形が局在化することもあり、弾性に関する物性値以外では、摩擦す

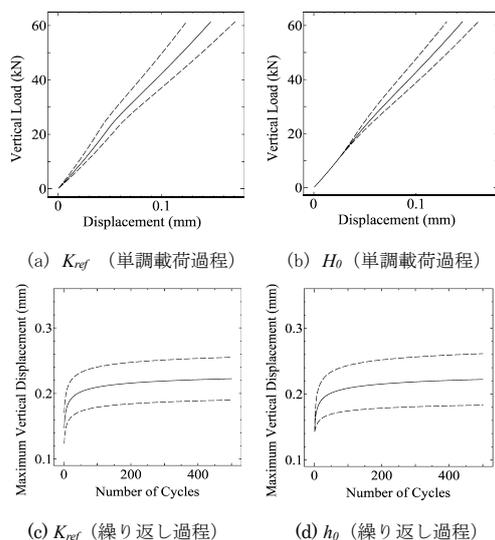


図 1 バラスト上面鉛直変位に対する cyclic densification モデルの

材料物性値の空間的ばらつきの影響(A 点, 変動係数 20%)

べりの初期強度を制御する  $H_0$ ,  $h_0$  のばらつきの影響が最も顕著となる。

#### <引用文献>

- ① Suiker, A. S., J., de Borst, Rene. : A numerical model for the cyclic deterioration of railway tracks. Int. J. Numer. Meth. Engng., Vol.57, pp.441-470, 2003.
- ② 佐藤江美, 紅露一寛, 阿部和久 : Cyclic densification モデルを用いた有限要素法に基づくバラスト道床沈下解析法の適用可能性に関する検討, 土木学会鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.17, pp.143-150, 2013.
- ③ Ghanem, R.G. & Spanos, P.G. : Stochastic finite elements. Dover, 1991.
- ④ Anders, M. & Hori, M. : Stochastic finite element method for elasto-plastic body. Int. J. Numer. Meth. Engng., Vol.46, pp.1897-1916, 1999.

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 10 件)

- ① 紅露一寛, 井口建斗, 阿部和久 : 道床沈下解析におけるバラスト材の弾塑性挙動の空間的ばらつきの影響評価, 土木学会鉄道工学シンポジウム論文集, 査読有, Vol.22, 2018. (掲載決定)
- ② 紅露一寛, 渡邊あゆみ, 阿部和久 : 軌道の構成部材の形状特性値および物性値の空間的ばらつきに起因する軌道振動応答の変動量の評価, 計算数理工学論文集, 査読有, Vol.17, pp.37-42, 2017.
- ③ 渡邊あゆみ, 紅露一寛 : バラスト軌道の振動応答に及ぼすバラスト材の弾性係数の空間的ばらつきの影響, 土木学会論文集 A2 (応用力学), 査読有, Vol.72, No.2,

pp. I\_265-I\_276, 2017.

④ 紅露一寛, 井口建斗, 阿部和久 : Cyclic densification モデルに基づくバラスト道床沈下解析におけるバラスト材の Young 率の空間変動の影響, 計算数理工学論文集, 査読有, Vol.16, pp.7-12, 2016.

⑤ 紅露一寛, 林 栞菜, 阿部和久 : Cyclic densification モデルを用いた道床沈下解析における材料パラメータの変動の影響評価, 土木学会鉄道工学シンポジウム論文集, 査読有, Vol.20, pp.177-184, 2016.

⑥ 相田真人, 紅露一寛, 阿部和久 : まくらぎの浮きを考慮した軌道振動・道床沈下連成解析, 土木学会鉄道工学シンポジウム論文集, 査読有, Vol.19, pp.127-134, 2015.

[学会発表] (計 25 件)

① Koro, K., Abe, K. : A FE-based 2-D ballast settlement analysis of railway track with a rail joint, 4th International Conference on railway Technology, 2018 年 9 月開催予定, 口頭発表採択決定.

② Koro, K., Watanabe, A., Abe, K. : SSFEM-based vibration analysis for railway track with spatial variation of elastic modulus of ballast layer, WCCM XII & APCOM VI, 2016 年.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://applmech.eng.niigata-u.ac.jp/research/ballast/ballast.html>

#### 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・教授  
研究者番号 : 70361912

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし.

(4) 研究協力者

なし.