

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04572

研究課題名(和文) 軌道曲線部におけるバラスト道床の変状発生・進展メカニズムの解明

研究課題名(英文) Research on ballast settlement behavior of curved railway track

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) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：数値シミュレーションの成果を活用することで、軌道曲線部におけるバラスト道床の変状発生・進展メカニズムの解明に取り組んだ。数値シミュレーションの実施に際しては、軌道曲線部における軌道振動応答を考慮した道床沈下解析法を新たに開発・利用した。カント超過時およびカント不足時を対象に、バラスト道床断面内の変位およびひずみ分布の検討を通して、曲線部バラスト道床の繰り返し変形特性を明らかにした。あわせて、バラスト軌道における道床沈下解析結果の信頼性評価を目的として、バラスト軌道の構成部材における複数の材料物性値・形状特性値の空間的ばらつきが軌道振動・道床沈下解析結果に及ぼす影響について定量的に評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題の成果は、軌道曲線部のバラスト道床の繰り返し変形メカニズムの解明、の点から、バラスト軌道保守やバラスト軌道破壊対策の技術的進歩に資する。特に、わが国の急速な人口減少局面においては、速達性・安全性に優れる鉄道の維持のために軌道の維持補修費用の節減が求められており、本研究の成果は軌道保守の合理化の点から、全国の鉄道事業者の経営の持続性と安定性の向上に貢献するものである。

研究成果の概要(英文)：We developed a FE-based simulation method for ballast settlement of curved railway track in consideration of track vibration. We investigated the mechanism on cyclic deformation of ballast layer in a curved track with cant deficiency or cant excess, through the numerical tests using the simulation method. The sensitivity of the spatial variation of material- or shape parameters of ingredients of railway track was evaluated through the ballast settlement- or vibration analysis of ballasted railway track using the stochastic FEM.

研究分野：土木工学，応用力学，鉄道工学

キーワード：バラスト道床沈下 曲線軌道 車輪・軌道系連成振動 弾塑性有限要素法 cyclic densification モデル

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

国内外の鉄道においては、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したバラスト軌道を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道床沈下のような不可逆変位が発生・累積する。各鉄道事業者は、列車走行時の乗り心地や安全性を担保するために、少なくない費用を投じてバラスト材の交換やつき固めなどの定期的な保守作業を実施している。近年わが国では、大都市圏以外の地方での加速度的な少子化と人口減少が予想されており、少子高齢化・人口減少社会を迎える上で「高い速達性・安全性を持つ交通手段」である鉄道を維持していくためには、鉄道事業の合理化が必須となっている。特に軌道の維持補修費用の節減は、全国の鉄道事業者にとって、経営の持続性と安定性を向上させるためにどうしても実現させたい「技術課題」の一つといえよう。

上述の「技術課題」を解決するためには、繰り返し走行荷重を受けるバラスト道床の変形メカニズムの解明が必要である。実際の軌道では数多くの曲線区間が存在しているが、バラスト道床の変状はまくらぎの鉛直・水平方向の支持状態を変化させ、軌道の通り変位(レール側面方向の変位)を増加させる。そのため、軌道曲線部バラスト道床の変状の定量予測を実現し、予測結果に基づく軌道設計や管理が望ましいが、現状では曲線部バラスト道床の変状に関する定量予測手法が確立されていないうえ、曲線軌道におけるバラスト道床の不可逆的変形の発生・進展メカニズムが十分に解明されているとは言い難い。

### 2. 研究の目的

前述の学術的背景のもとで、本研究課題では、次の2点を具体的な研究目的に設定した。

- ・曲線部バラスト道床の変状に関する定量予測手法を確立すること。
- ・曲線部バラスト道床の不可逆的変形の発生・進展メカニズムを解明すること。

あわせて、曲線部バラスト道床の繰り返し変形解析結果の信頼性評価を検討するために、軌道各部の材料物性値・形状特性値に空間的ばらつきが存在する場合を想定し、これらのばらつきが軌道振動解析結果や道床沈下解析結果の変動特性に及ぼす影響を、確率有限要素法を用いた数値実験により定量評価することを第三の研究目的とした。

### 3. 研究の方法

軌道曲線部のバラスト道床沈下解析法は、曲線軌道を対象とした振動解析を行い、各まくらぎ位置でのレール・まくらぎ間作用力(軌道パッド作用力)の最大値を抽出する。抽出した軌道パッド最大作用力を外力として、繰り返し弾塑性モデルの一種である cyclic densification モデルを用いた弾塑性有限要素解析により、バラスト道床内部の不可逆変形、およびまくらぎ位置での残留変位を評価するものである。なお、軌道振動解析においては、曲線部の曲率の影響は無視したはりでレールをモデル化し、まくらぎは弾性床上的のはりでモデル化している。車両からレールへの作用力は、本来であれば転がり摩擦を考慮した接触解析により評価するのが望ましいが、今回は設計標準で採用されている輪重・横圧の推定式を用いて評価した。

一方、軌道各部の材料物性値・形状特性値に空間的ばらつきが軌道振動解析結果や道床沈下解析結果への影響の評価に際しては、入力情報の空間的ばらつきは Karhunen-Loeve 展開で表現したうえで、スペクトル確率有限要素解析や stochastic collocation method を援用した確率有限要素解析により評価した。

### 4. 研究成果

#### (1) 軌道曲線部におけるバラスト道床の繰り返し変形挙動

図-1 に示すような曲率半径一定 ( $R=700(m)$ ) の単曲線区間を考え、振動解析でははりでモデル化したまくらぎが弾性床支持される振動解析モデルを解析の対象とした。振動解析では、レール・まくらぎ間作用力(軌道パッド作用力)の最大値を各まくらぎ位置で抽出する。バラスト道床沈下解析では、図-2 に示すまくらぎ・バラスト道床からなる軌道断面での平面ひずみ問題を考え、当該モデルにおけるまくらぎのレール締結位置において、軌道面直角・水平方向に振動解析により得られた最大作用力を作用させ、繰り返し変形解析を行った。

図-3 は、曲線半径  $700(m)$  とカント  $0.105(m)$  を固定したうえで、カント不足時(走行速度  $27.8(m/s)$ )における 1000 サイクル経過時点での最大変位、全ひずみ分布を示したものである。また、図-4 はカント超過時(走行速度  $16.7(m/s)$ )における 1000 サイクル経過時点での最大変位、全ひずみ分布を示したものである。カント不足・超過

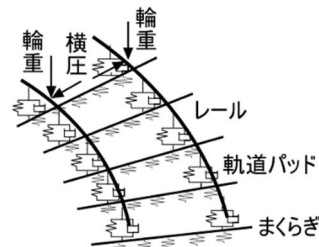


図-1 曲線軌道の振動解析モデル

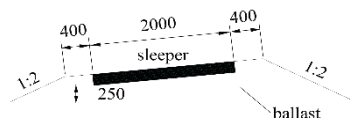


図-2 解析領域形状(単位:mm)

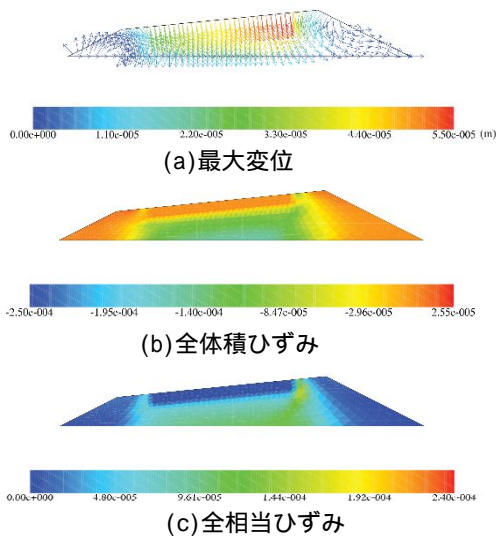


図-3 カント不足時の変位・ひずみ分布

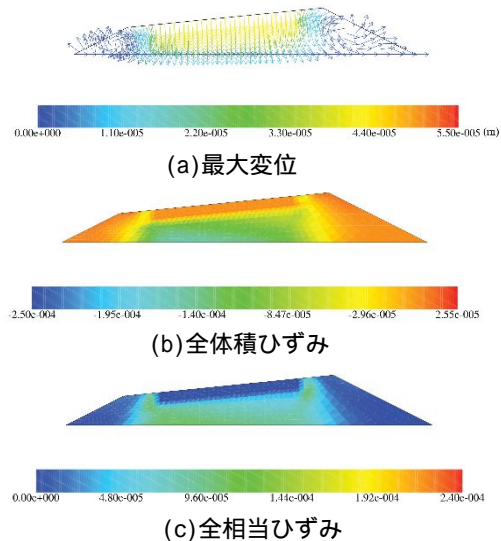


図-4 カント超過時の変位・ひずみ分布

のいずれの場合でもまくらぎ端部付近のバラスト道床部でせん断変形が大きくなること、それ以外でのせん断変形著大箇所がカント不足の場合では外軌側レール下部、カント超過の場合では内規側レール下部となることが分かった。また、体積圧縮は内外軌で比較して輪重が大きくなる側のレール締結箇所の下方領域で大きくなることが分かった。

(2) 軌道各部の種々の空間的ばらつきが軌道振動応答解析結果に及ぼす影響

バラスト材の複数の材料物性値の空間的ばらつきの影響

軌道構造の中でも、材料物性値のばらつきが小さいバラスト材の Young 率と質量密度の空間的ばらつきを同時に考慮した場合の軌道振動解析を行った。解析は 7 本のまくらぎが間隔 0.6(m) で配置された 4.2(m) の軌道を走行速度 30(m/s) で定速走行する場合を対象とした。材料物性値の空間的ばらつきは Karhunen-Loeve 展開でモデル化し、ばらつきは変動係数 10% 相当、相関長 0.25(m) とし、2 種類の材料物性値のばらつきの完全相関を仮定した場合でばらつきの影響を検討した。なお、バラスト道床の動的応答を評価する上で、数値計算の負荷を軽減する目的で、時間域 Green 関数をスペクトル確率有限要素法により生成し畳み込み積分を数値的に実行することとした。

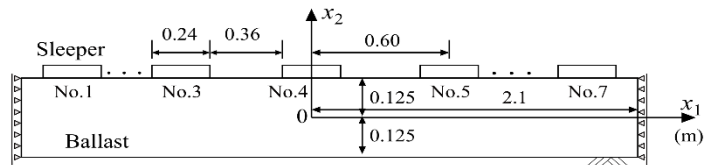


図-5 バラスト道床部の解析モデル

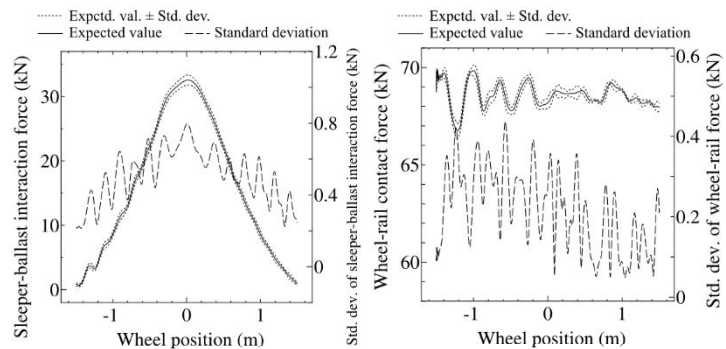


図-6 各種作用力の期待値・標準偏差と車輪走行位置の関係

こととした。図-6 は解析区間中央に配置されたまくらぎ位置でのまくらぎ・道床間作用力およびレール・車輪接触力の期待値と標準偏差を示したものである。バラスト道床の物性値のばらつきに関し、変動係数 10% 相当のばらつきが内在する場合、まくらぎ・道床間作用力のばらつきは 3% 程度にとどまっている。レール・車輪接触力では、解析結果に伝播するばらつきはさらに小さく、変動係数 1% 相当以下にとどまることがわかった。

レールの材料物性値・形状特性値の空間的ばらつきの影響

次に、レールに関する複数の材料物性値・形状特性値の空間的ばらつきが、軌道振動解析結果に及ぼす影響について検討した。レールの材料物性値・形状特性値のうち、Young 率、質量密度、断面積、断面二次モーメント、レール凹凸の 5 種類について、空間的ばらつきを考慮し、Young 率と質量密度、断面積と断面二次モーメントとレール凹凸をそれぞれ完全相関と仮定した。ばらつきの度合いは、変動係数 20% 相当を考えることとした。車輪・振動解析では、図-7 のはり・質点・Voigt ユニットの組み合わせた連成振動解析モデルを用いた。車輪の走行速度は 30, 50, 70,

90m/s の 4 種類を検討対象とした。

図-8 は車輪・レール接触力の期待値と標準偏差, 図-9 はまくらぎ・道床間作用力の期待値と標準偏差をそれぞれ示したものである。レールの物性値のばらつきを考慮しているが, レールに直接作用する車輪との接触力に伝播するばらつきの影響は, 高速走行で動的応答が増幅するほど顕著であるが, その大きさは期待値の 5%程度にとどまっている。まくらぎ・道床間作用力については, 走行速度によらずに変動係数 5%程度のばらつきが伝播するにとどまることが分かった。

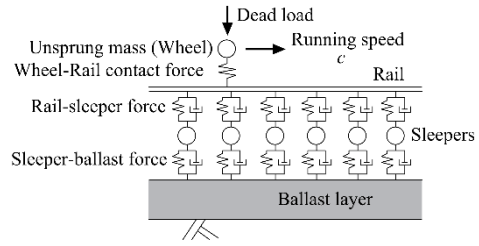


図-7 軌道振動解析モデル

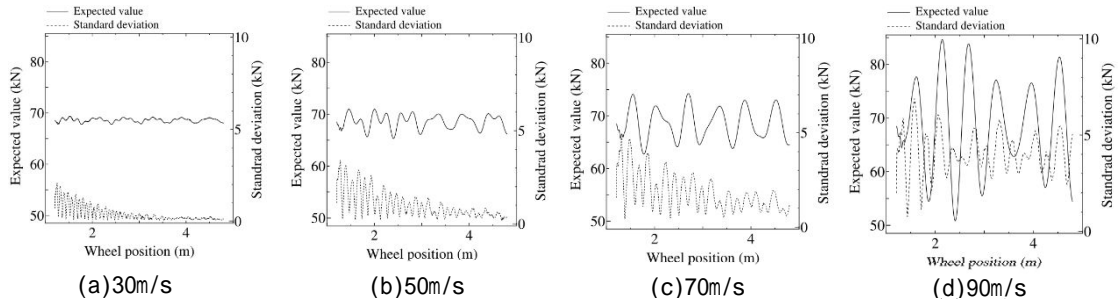


図-8 レールに関する複数の物性値の空間的ばらつきが車輪・レール接触力に及ぼす影響

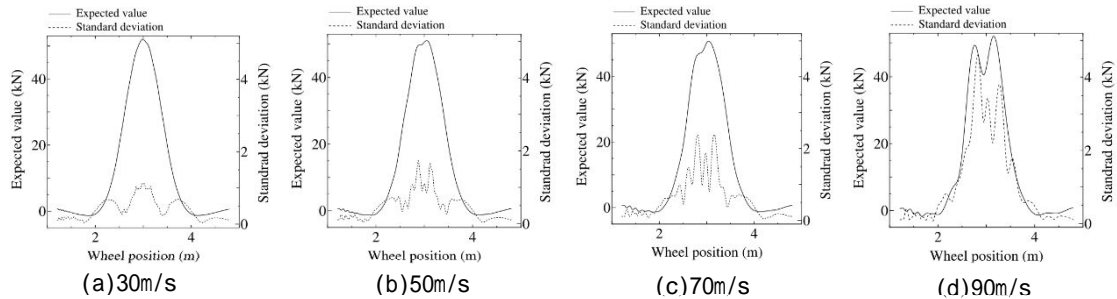


図-9 レールに関する複数の物性値の空間的ばらつきがまくらぎ・道床間作用力に及ぼす影響

(3) バラスト材の材料物性値・形状特性値の空間的ばらつきが道床沈下解析結果に及ぼす影響

図-10 に示すバラスト道床において, 構成モデルである cyclic densification model で用いられる 3 種類の材料物性値  $K_{ref}$ ,  $H_0$ ,  $h_0$  の空間的ばらつきが完全相関であると仮定した場合を検討の対象とした。これらの材料物性値は, 期待値の 10%相当のばらつきを考慮した。Stochastic collocation method で用いる決定論的解析のパターン数  $N_{MCS}$  は解析結果から 200 に設定した。本研究により, 図-11 のように, 図-10 のバラスト軌道の A 点におけるバラスト上面鉛直変位の期待値およびそのばらつきの伝播度合いを定量的に評価することができた。入力する材料物性値のばらつきを変動係数 10%相当と設定して道床沈下解析を行う場合, 解析条件から発生鉛直変位が最大となる箇所では, 解析により得られた変位には期待値の 10%強のばらつきが伝播することがわかった。

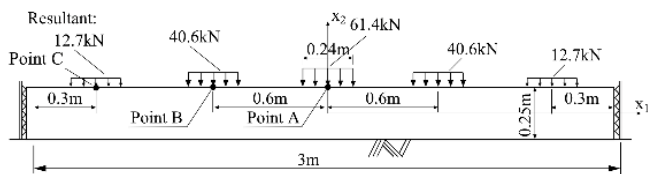


図-10 解析領域

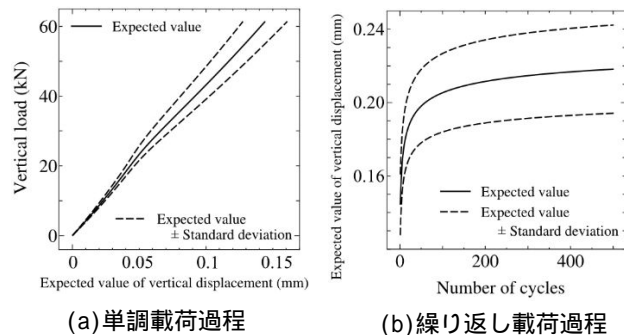


図-11 バラスト上面鉛直変位の期待値および標準偏差

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 紅露一寛, 上平健太, 阿部和久	4. 巻 19
2. 論文標題 Polynomial chaos 展開を用いた確率有限要素法によるバラスト材の力学挙動の空間的ばらつきを考慮した道床沈下解析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 計算数理工学論文集	6. 最初と最後の頁 55-60
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 上平健太, 紅露一寛, 阿部和久	4. 巻 CD-ROM
2. 論文標題 バラスト材の弾塑性挙動の空間的ばらつきを考慮したスペクトル確率有限要素・繰り返し変形解析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 第32回計算力学講演会 (CMD2019) 講演論文集	6. 最初と最後の頁 172
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 上平健太, 紅露一寛, 阿部和久	4. 巻 CD-ROM
2. 論文標題 バラスト材の弾塑性挙動の空間的ばらつきを考慮したバラスト道床沈下・確率有限要素解析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 第26回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2019) 講演論文集	6. 最初と最後の頁 550-553
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 紅露一寛, 阿部和久	4. 巻 CD-ROM
2. 論文標題 バラスト材の力学挙動の空間的ばらつきを非Gauss 型確率過程によりモデル化したバラスト道床沈下解析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 第26回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2019) 講演論文集	6. 最初と最後の頁 252-255
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 紅露一寛, 阿部和久	4. 巻 25
2. 論文標題 バラスト道床における複数の材料物性値の空間的ばらつきを同時に考慮した軌道振動解析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会鉄道工学シンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 225-232
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 紅露一寛, 阿部和久	4. 巻 -
2. 論文標題 複数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	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 第34 回計算力学講演会 (CMD2021) 講演論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 紅露一寛, 阿部和久	4. 巻 -
2. 論文標題 バラスト材の複数の材料物性値の空間的ばらつきが道床沈下解析結果に及ぼす影響	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 第28 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集 (J-RAIL2021)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 紅露一寛, 阿部和久	4. 巻 26
2. 論文標題 バラスト材の複数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	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木学会鉄道工学シンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 井上翔陽, 紅露一寛	4. 巻 26
2. 論文標題 軌道振動を考慮した軌道曲線部バラスト道床沈下解析法	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木学会鉄道工学シンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 紅露一寛, 阿部和久	4. 巻 27
2. 論文標題 レールに関する複数の材料物性値・形状特性値の空間的ばらつきを考慮した車両・軌道連成振動解析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 計算工学講演会論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 上平健太, 紅露一寛, 阿部和久
2. 発表標題 バラスト材の弾塑性挙動の空間的ばらつきを考慮したスペクトル確率有限要素・繰り返し変形解析
3. 学会等名 第32回計算力学講演会 (CMD2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上平健太, 紅露一寛, 阿部和久
2. 発表標題 バラスト材の弾塑性挙動の空間的ばらつきを考慮したバラスト道床沈下・確率有限要素解析
3. 学会等名 第26回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 紅露一寛, 阿部和久
2. 発表標題 バラスト材の力学挙動の空間的ばらつきを非Gauss型確率過程によりモデル化したバラスト道床沈下解析
3. 学会等名 第26回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 紅露一寛, 阿部和久
2. 発表標題 複数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
3. 学会等名 第34回計算力学講演会 (CMD2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 紅露一寛, 阿部和久
2. 発表標題 バラスト材の複数の材料物性値の空間的ばらつきが道床沈下解析結果に及ぼす影響
3. 学会等名 第28回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 紅露一寛, 阿部和久
2. 発表標題 レールに関する複数の材料物性値・形状特性値の空間的ばらつきを考慮した車両・軌道連成振動解析
3. 学会等名 第27回計算工学講演会
4. 発表年 2022年



〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------