

令和 5 年 6 月 3 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H02234

研究課題名（和文）粗粒材の長期劣化を考慮した新たな交通施設の維持管理方法：経験知から科学知の保守へ

研究課題名（英文）New Maintenance Methods for Transportation Facilities Considering Long-Term Deterioration of Coarse Grain Materials: From Empirical Knowledge to Scientific Knowledge Maintenance

研究代表者

早野 公敏（HAYANO, KIMITOSHI）

横浜国立大学・大学院都市イノベーション研究院・教授

研究者番号：40302632

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,200,000円

研究成果の概要（和文）：鉄道・道路施設では道床材、路盤材として粗粒材を広く使用している。施工時には規定の粒度範囲におさまっているが、交通荷重により破碎・細粒化していく。細粒化が進行すると沈下が頻発し、脱線や陥没のリスクが高まる。災害を予防するためには道床・路盤材の交換や改良のタイミングの適切な判断が重要となっている。そこで本研究では破碎・細粒化が道床材・路盤材の保水性、透水性、繰返し変形特性、支持力特性に及ぼす影響を調査した。また、道床材・路盤材が経年劣化した軌道・舗装の変形・沈下量・安定性を予測可能な解析手法を提案した。さらに道床材・路盤材の健全度の評価法の提案を行うとともに、新しい改良方法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来、道床材・路盤材の細粒化後の供用性予測の不確実性は高く、道床材・路盤材の交換や改良のタイミングは、降雨後に沈下が頻発する現象や災害発生に基づいて事後に経験的に判断することが多い。しかし、従来の方法が踏襲されると脱線・陥没の頻発や維持管理コストの増加はまぬがれない。それに対して本研究成果は、破碎・細粒化した道床材・路盤材の沈下や支持力特性を解明し、交換や改良の適切なタイミング・効果を科学的に評価できる新たな維持管理体系の構築に貢献するものであり、学術的意義がある。また、維持管理の経験知の強い領域を科学知に基づく領域に発展させ、災害防止や維持管理コスト抑制に貢献できる点で社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：Coarse-grained materials are widely used as roadbed materials in railroad and road facilities. At the time of construction, the coarse-grained materials are within the specified grain size range, but they are crushed and finer-grained by traffic loads. As the finer grading progresses, settlement occurs more frequently, increasing the risk of derailment and sinking. In order to prevent disasters, it is important to make appropriate decisions on the timing of roadbed material replacement and improvement. In this study, we investigated the effects of crushing on the water retention, permeability, cyclic deformation, and bearing capacity of roadbed materials. An analytical method was also proposed to predict the deformation, settlement, and stability of track and pavement with aged roadbed materials. Furthermore, an evaluation method for the soundness of roadbed materials was proposed, and a new improvement method was developed.

研究分野：地盤工学

キーワード：交通地盤構造部 軌道 舗装 道床材 路盤材 耐久性 維持管理 破碎・細粒化

1. 研究開始当初の背景

鉄道・道路施設では道床材、路盤材として砕石を主体とする粗粒材を広く使用している。施工時には規定の粒度範囲におさまっているが、交通荷重(列車、自動車)の繰返しによりだいに破碎・細粒化していく。鉄道では敷設後 20 年以上経過したバラスト軌道で道床材の破碎・細粒化がよく認められている(図 1)。

細粒化が進行すると雨水浸透に伴う沈下が頻発し、さらには脱線や陥没のリスクが高まる。近年では降雨特徴の変化(短時間強雨の発生件数の増加など)により、突発的に変状が生じるケースが増加している。災害を予防するためには道床・路盤材の交換や改良のタイミングの適切な判断が重要となっている。維持管理コストの最小化を図るうえでも必要不可欠である。

維持管理の分野では事後から予防保全への転換が生じ、ライフサイクルコスト(LCC)の抑制効果が広く支持されている。通常、LCC の算定では軌道や舗装の供用性曲線が必要である。鉄道では軌道変位、舗装ではわだちぼれ・ひびわれ率・平坦性から求める舗装補修管理指数(PRI)の経時変化を示した供用性曲線が代表的である。しかし、現状の供用性曲線の推定は、道床・路盤材の破碎・細粒化の影響を考慮していない。

例えばバラスト軌道では規定粒度内の道床材に対する道床沈下進みの推定式を用いて軌道変位を推定している。細粒化した道床材に対して推定式は適用範囲外となる。道路のアスファルト舗装も同様であり、路盤材の細粒化が生じた場合に PRI の供用性曲線の推定式は適用外となる。そのため、細粒化後の供用性予測の不確実性は高く、道床・路盤材の交換や改良のタイミングは、降雨後に沈下が頻発する現象や災害発生に基づいて事後に経験的に判断することが多い。

細粒化した道床・路盤材の供用性曲線には細粒化程度、含水状態や密度、荷重レベルや降雨量など多くの要因が影響し、単一的に評価することは難しい。しかし細粒化した道床・路盤材の交換や改良のタイミングを科学的に評価する方法が確立されていない現状は深刻である。経験的なやり方が踏襲され続けると細粒化した道床・路盤材の増加に伴って、短時間強雨の発生などによる脱線・陥没の頻発や維持管理コストの増加はまぬがれない。



図 1 破碎・細粒化した道床材

2. 研究の目的

破碎・細粒化した道床・路盤材の雨水浸透にともなう沈下特性を解明し、交換や改良の適切なタイミング・効果を科学的に評価できる新たな維持管理体系の構築を目指し、以下の内容を具体的な目的とした。

- 1) 細粒分増加や粒子形状変化が保水性や変形特性に及ぼす影響の解明
- 2) 飽和度変化時の繰返し変形特性・支持力特性に破碎・細粒化の程度が及ぼす影響の解明
- 3) 道床・路盤材が経年劣化した軌道・舗装の変形・沈下量・安定性を予測可能な解析ツールの開発
- 4) 破碎・細粒化した道床・路盤材の新しい改良方法の開発

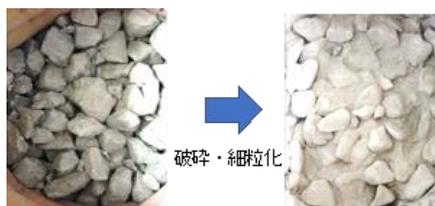


図 2 道床材の破碎・細粒化

3. 研究の方法

各項目の研究目的を達成するために、下記の方法で検討した。

- 1) 細粒分増加や粒子形状変化が保水性や変形特性に及ぼす影響の解明

破碎・細粒化(図 2)にともなう粒度変化はふるい分析により、粒子形状変化は画像解析により評価した。また保水性の変化は保水性試験により、変形特性の変化は繰返し三軸試験(図 3)などにより調べた。さらに透水試験を合わせて実施し、破碎・細粒化の程度が透水性の変化に及ぼす影響も調べた。

- 2) 飽和度変化時の繰返し変形特性・支持力特性に破碎・細粒化の程度が及ぼす影響の解明

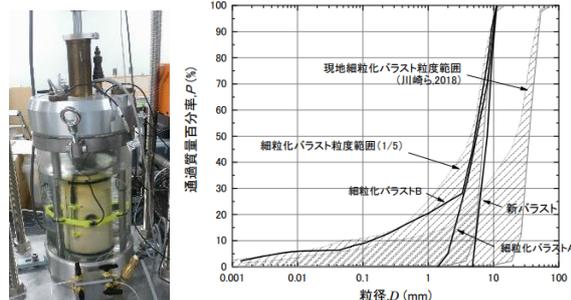


図 3 繰返し三軸試験と細粒化バラストの粒径加積曲線

破碎・細粒化した道床・路盤材を用いて乾燥・飽和・不飽和三軸供試体を作製し、交通荷重に対応する繰返し三軸試験を行った。また、破碎・細粒化の程度および締めめ条件を変えた模型試験(図4)を実施して、破碎・細粒化程度が飽和度変化時の繰返し載荷回数～残留変形に及ぼす影響を調べた。

3) 道床・路盤材が経年劣化した軌道・舗装の変形・沈下量・安定性を予測可能な解析ツールの開発

既存の解析ツールに対して破碎・細粒化の影響を考慮できるように高度化した。また三軸供試体の繰返し変形特性などを用いて高度化したモデルのパラメータの同定を行った。そして飽和度を変化させた三軸供試体の繰返し変形特性と比較し、モデルの精度の検証を実施した。

4) 破碎・細粒化した道床・路盤材の新しい改良方法の開発

解析および模型試験結果をもとに維持管理指標を用いて、破碎・細粒化した道床・路盤材の健全度の評価を行うとともに、従来の改良が困難なケースに対して適用可能な新しい改良方法として低強度安定処理工法を開発し、その適用性を模型試験および現地試験により実証した。

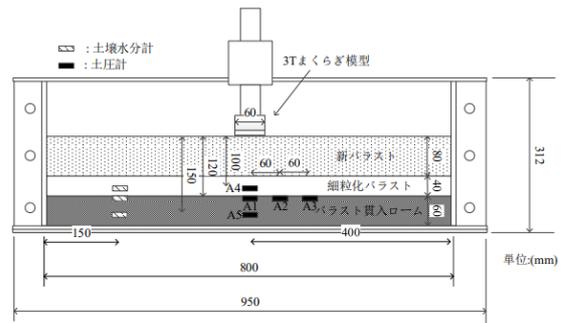


図4 細粒化バラストを用いた繰返し載荷模型試験

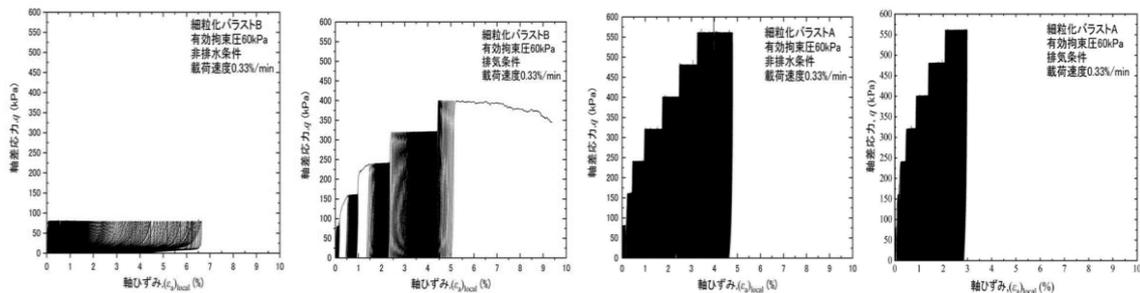


図5 繰返し三軸試験による軸ひずみ～軸差応力関係

4. 研究成果

各項目の研究目的に対して、下記の成果を得られた。

1) 細粒分増加や粒子形状変化が保水性や変形特性に及ぼす影響の解明

細粒分含有率の異なる細粒化した道床・路盤材を用いて、乾燥・飽和状態における交通荷重に対する沈下量を繰返し三軸試験により検証したところ、細粒分含有率が多いほうが、繰返しにともなう累積ひずみが大きくなった(図5)。また乾燥状態よりも飽和状態のほうがこの傾向は著しかった。

また、保水性試験で水分特性曲線を調べた結果、細粒化の程度が同じであれば、粒子形状の違いが保水性特性に及ぼす影響は小さかった(図6)。いっぽうで細粒分含有率の違いが保水性に与える影響は著しく、そして細粒化にともなう透水係数の低下も顕著であった。

2) 飽和度変化時の繰返し変形特性・支持力特性に破碎・細粒化の程度が及ぼす影響の解明

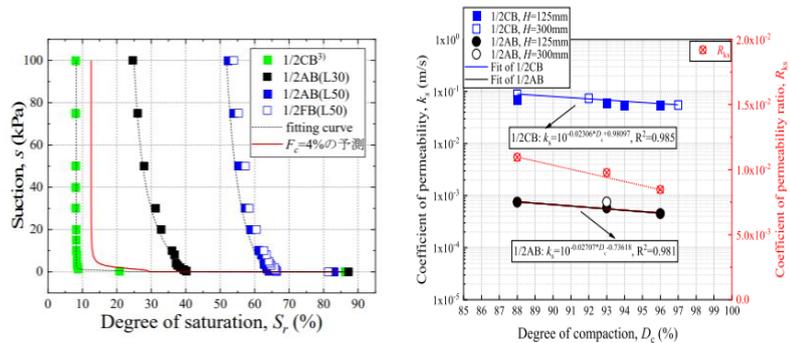


図6 細粒化バラストの水分特性曲線と透水係数

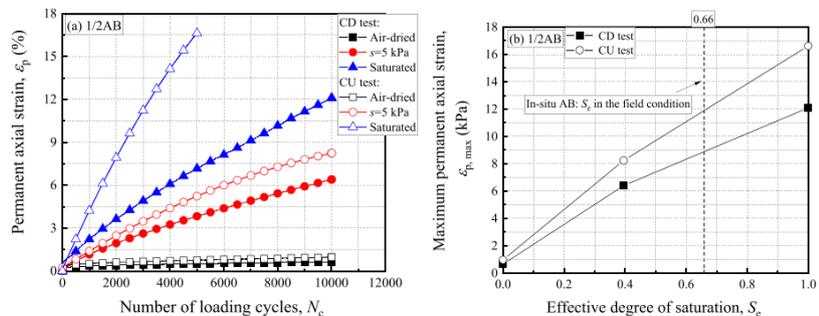


図7 乾燥・不飽和・飽和状態の繰返し三軸試験結果

2) 飽和度変化時の繰返し変形特性・支持力特性に破碎・細粒化の程度が及ぼす影響の解明

不飽和土のサクシオンを測定できる三軸試験装置を用いて、乾燥・飽和状態に加えて不飽和上状態の細粒化した道床材繰返し変形特性を調べた結果、飽和度が及ぼす影響が大きいことが明らかになった(図7). また、細粒化した道床材を用いて模型を作製し、交通荷重による繰返し荷重を与えた結果、降雨(散水)にともなう飽和度増加にともなう、まくらぎの沈下が増加することが明らかになった(図8).

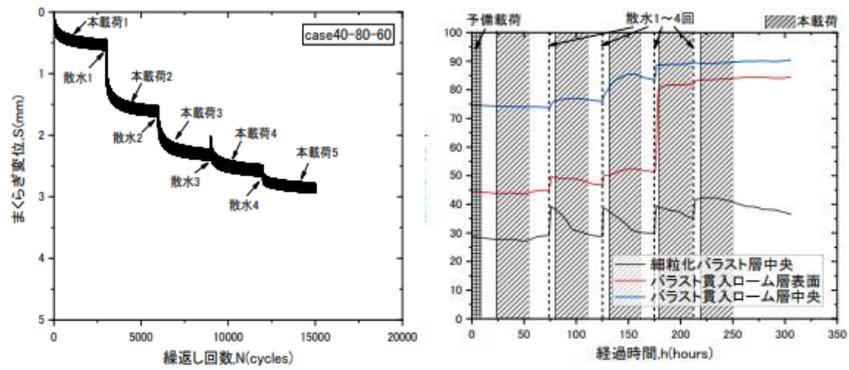


図8 繰返し荷重模型試験にけるまくらぎ沈下量と道床の飽和度

3) 道床・路盤材が経年劣化した軌道・舗装の変形・沈下量・安定性を予測可能な解析ツールの開発

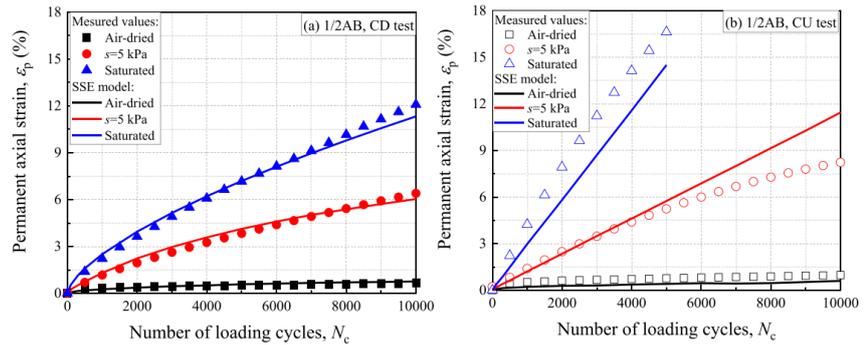


図9 乾燥・不飽和・飽和状態の繰返し三軸試験結果

既存の解析ツールに対して破碎・細粒化の影響および飽和・不飽和の状態を考慮できるように高度化した。その結果、繰返し三軸により得られた乾燥・飽和・不飽和の状態の細粒化した道床材の累積ひずみを精度良く予測できるようになった(図9).

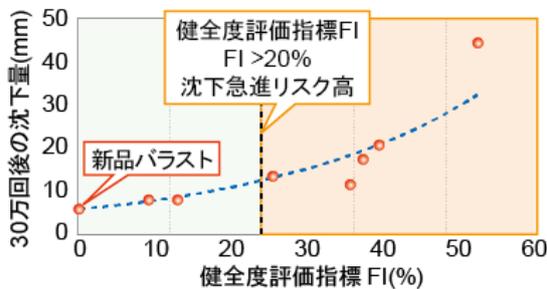


図10 健全度評価指標 FI と沈下量の関係

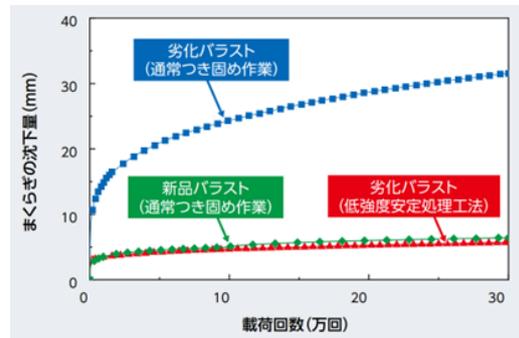


図11 実物大のバラスト軌道試験体の沈下量

4) 破碎・細粒化した道床・路盤材の新しい改良方法の開発

解析および模型試験結果をもとに、破碎・細粒化による粒度変化率を定式化し、将来の粒度を予測して道床材の交換が必要になるまでの予寿命を算定する手法を提案した(図10). そして、道床のつき固め作業時にセメントと高分子材料からなる補修材を劣化した道床材と今後、低強度に安定処理する工法を開発し、その適用性を模型試験および現地試験により実証した(図11). また、まくらぎ間隔の拡大をとともなう改修(図12)において軌道の水平安定性を照査するなかで、まくらぎと道床材の相互作用を考量する予測手法を提案した.

以上のように、経年劣化による破碎・細粒化が道床材・路盤材の保水特性、透水特性、繰返し変形特性、支持力特性に及ぼす影響を調査した。また、得られた試験データを活用して、道床材・路盤材が経年劣化した軌道・舗装の変

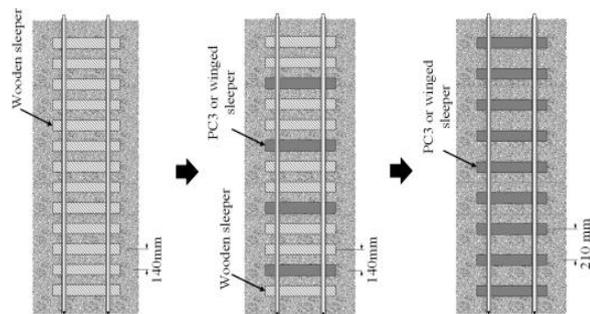


図12 改修にともなうまくらぎ間隔の拡大

形・沈下量・安定性を予測可能な解析手法を提案した。さらに破碎・細粒化した道床・路盤材の健全度の評価を行うとともに、従来の改良が困難なケースに対して適用可能な新しい改良方法を開発し、その適用性を検証した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9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 Yang Jiaqiang, Ishikawa Tatsuya, Tokoro Tetsuya, Nakamura Takahisa, Kijiya Ippei, Okayasu Takashi	4. 巻 30
2. 論文標題 Effect evaluation of drainage condition and water content on cyclic plastic deformation of aged ballast and its estimation models	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Transportation Geotechnics	6. 最初と最後の頁 100606 ~ 100606
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.trgeo.2021.100606	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 Lin Tianshu, Ishikawa Tatsuya, Yang Jiaqiang, Tokoro Tetsuya	4. 巻 194
2. 論文標題 Evaluation of climate effect on resilient modulus of granular subgrade material	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Cold Regions Science and Technology	6. 最初と最後の頁 103452 ~ 103452
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.coldregions.2021.103452	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 Lin Tianshu, Ishikawa Tatsuya, Tokoro Tetsuya, Maruyama Kimio, Ueno Chigusa	4. 巻 1
2. 論文標題 Modification of Japanese Pavement Fatigue Life Criteria by Considering Climatic Effects in Cold Regions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 4th International Conference on Transportation Geotechnics 1	6. 最初と最後の頁 29 ~ 39
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-77230-7_3	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 Abadin Md. Joynul, Hayano Kimitoshi	4. 巻 318
2. 論文標題 Investigation of premature failure mechanism in pavement overlay of national highway of Bangladesh	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Construction and Building Materials	6. 最初と最後の頁 126194 ~ 126194
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.conbuildmat.2021.126194	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 Djandjieme Maliki Otieboame, Hayano Kimitoshi, Mochizuki Yoshitoshi, Yamauchi Hiromoto	4. 巻 1
2. 論文標題 Fundamental Study on the Mechanical Characteristics of Sand Treated by a PS Ash-Based Improving Material	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advances in Sustainable Construction and Resource Management, Lecture Notes in Civil Engineering 144	6. 最初と最後の頁 107 ~ 116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-981-16-0077-7_11	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 Yang Jiaqiang, Ishikawa Tatsuya, Lin Tianshu, Tokoro Tetsuya, Nakamura Takahisa, Momoya Yoshitsugu	4. 巻 27
2. 論文標題 Influence of aging on hydro-mechanical behavior of unsaturated ballast	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Transportation Geotechnics	6. 最初と最後の頁 100480 ~ 100480
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.trgeo.2020.100480	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 Lin Tianshu, Ishikawa Tatsuya, Maruyama Kimio, Tokoro Tetsuya	4. 巻 28
2. 論文標題 Pavement design method in Japan with consideration of climate effect and principal stress axis rotation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Transportation Geotechnics	6. 最初と最後の頁 100552 ~ 100552
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.trgeo.2021.100552	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 Koyama Emiri, Ito Kazuki, Hayano Kimitoshi, Momoya Yoshitsugu	4. 巻 61
2. 論文標題 A new approach for evaluating lateral resistance of railway ballast associated with extended sleeper spacing	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Soils and Foundations	6. 最初と最後の頁 1565 ~ 1580
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sandf.2021.09.004	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 木次谷 一平, 伊藤 啓記, 中村 貴久, 石川 達也, 岡安 崇史	4. 巻 75(2)
2. 論文標題 下負荷面モデルを用いた繰返し載荷を受けた道床バラストの弾塑性変形挙動の検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集E1 (舗装工学)	6. 最初と最後の頁 I_105-I_113
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejpe.75.2_I_105	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 -

〔学会発表〕 計21件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 古木達也, 石川達也, 馬場弘毅, 越智友紀
2. 発表標題 キャピラリーバリアの適用性評価のための路盤材の浸透特性の検討
3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表会講演集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平松海斗, 楊家強, 石川達也, 中村貴久, 木次谷一平
2. 発表標題 道床バラストの浸透・強度変形特性に及ぼす経年劣化の影響
3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表会講演集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平松海斗, 石川達也, 浴達也, 中村貴久, 木次谷一平
2. 発表標題 道床バラストの浸透・力学特性に及ぼす経年劣化の影響評価
3. 学会等名 地盤工学会北海道支部技術報告集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 古木達也, 石川達也, 馬場弘毅, 越智友紀
2. 発表標題 スファルト舗装の粒度適正化によるキャピラリーバリアシステムの提案
3. 学会等名 地盤工学会北海道支部技術報告集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Junling Si, 石川達也, 丸山記美雄, 上野千草
2. 発表標題 Evaluation of Resilient Modulus of Asphalt Pavement in Cold Region Based on Thermo-Hydro- Mechanical Coupling Simulation
3. 学会等名 地盤工学会北海道支部技術報告集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金子治暉, 平松海斗, 石川達也, 中村貴久, 木次谷一平
2. 発表標題 経年劣化したプラスチックの保水性に対する細粒化と粒子形状変化の影響
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会講演集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金子治暉, 石川達也, 中村貴久, 木次谷一平, 平松海斗
2. 発表標題 不飽和粒状路盤の降雨浸透特性に及ぼす経年劣化の影響, 地盤工学会北海道支部技術報告集
3. 学会等名 地盤工学会北海道支部技術報告集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 廖然, 徐予楠, 早野公敏, 川崎祐征, 本道諒太
2. 発表標題 細粒化バラストの層厚の変化が有道床軌道の沈下特性に及ぼす影響
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会講演集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮崎莉緒, 早野公敏
2. 発表標題 スケールバラストの相似比が締め・強度特性に及ぼす影響
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会講演集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田島史花, 早野公敏, 川崎祐征, 本道諒太
2. 発表標題 初期応力状態が鉄道バラストの繰返し変形特性に及ぼす影響
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会講演集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋龍太朗, 早野公敏, 伊藤孝記, 桃谷尚嗣
2. 発表標題 浮きまくらぎ状態における道床横抵抗力特性に関する実験的検討
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会講演集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田島史花, 早野公敏, 川崎祐征, 本道諒太
2. 発表標題 初期応力および応力履歴が鉄道バラストの繰返し変形特性に及ぼす影響
3. 学会等名 土木学会全国大会第75回年次学術講演会講演集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Goldsmith, V., Ishikawa, T.
2. 発表標題 Impact of increase in speed and axle load of trains on track settlement in the context of Indian track structure
3. 学会等名 Railway Engineering-2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yang, J.Q., Ishikawa, T., Matsutani, S., Tokoro, T., Nakamura, T., Momoya, Y.
2. 発表標題 Influences of water content and fine fraction content on permanent deformation of ballasts
3. 学会等名 16th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 金子治暉, 石川達也, 中村貴久, 木次谷一平
2. 発表標題 経年劣化したバラストの透水性に与える細粒化の影響評価
3. 学会等名 第1回交通地盤工学に関する国内シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 金子治暉, 石川達也, 中村貴久, 木次谷一平
2. 発表標題 バラスト軌道の降雨浸透特性に及ぼす経年劣化の影響
3. 学会等名 地盤工学会北海道支部技術報告会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Momoya, Y., Nakamura, T., Itou, K., Tanigawa, H.
2. 発表標題 Measurement of Ballasted Track Stiffness by FWD for Railway
3. 学会等名 XVI Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村貴久, 桃谷尚嗣, 木次谷一平
2. 発表標題 細粒分含有率が高い劣化バラストの造粒化による沈下抑制工法
3. 学会等名 第1回交通地盤工学に関する国内シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安竹洸治, 川崎祐征, 早野公敏
2. 発表標題 細粒化に伴う道床バラストの繰返し変形特性の変化に関する基礎的検討
3. 学会等名 第 54 回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hayano, K, Koyama, Ito, K., Momoya, Y.
2. 発表標題 Scaled model tests for evaluating effects of sleeper spacing on the lateral resistance of railway ballasted tracks
3. 学会等名 the 16th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. J. Abadin, K. Hayano
2. 発表標題 Investigation of Structural Distresses within Flexible Pavements at Network Level through FWD Deflection Basin Parameters
3. 学会等名 第 54 回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019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
研究分担者	石川 達也 (ISHIKAWA TATSUYA) (60359479)	北海道大学・工学研究院・教授 (10101)	
研究分担者	桃谷 尚嗣 (MOMOYA YOSHITSUGU) (60425973)	公益財団法人鉄道総合技術研究所・軌道技術研究部・上席研究員GL (82658)	
研究分担者	中村 貴久 (NAKAMURA TAKAHISA) (80425975)	公益財団法人鉄道総合技術研究所・軌道技術研究部・主任研究員 (82658)	

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
---------	---------