

バラストの破碎・細粒化メカニズムの解明と 余寿命予測方法の提案

中村 貴久* 桃谷 尚嗣* 木次谷 一平*

Clarification of Mechanism of Ballast Crushing and Grain Refining Progress and Proposal of Remaining Life Prediction Method

Takahisa NAKAMURA Yoshitsugu MOMOYA Ippei KIIJIYA

In order to clarify the ballast crushing and grain refining progress, we conducted a field survey to investigate the grain size distribution of the ballast, and cyclic loading test and tie tamper tamping test to evaluate the factors affecting the ballast crushing and grain refining. Based on the test results, we proposed a method for estimating the present particle size distribution of ballast from the past tonnage and maintenance history. Furthermore, we suggested a method to predict the remaining ballast life from the current particle size distribution using the proposed estimation method.

キーワード：経年バラスト，破碎・細粒化，余寿命評価，粒度分布，つき固め補修，繰返し載荷

1. はじめに

バラスト軌道では、経年によりバラストの破碎および細粒化が進行すると、排水性が低下するとともに降雨時にはバラストの飽和度が高くなって強度が低下し¹⁾、特に細粒分が泥土となってまくらぎ下より噴出する噴泥現象が生じると沈下が急進する。また、破碎・細粒化が進行したバラストはタイタンパによるつき固め補修後の密度変化が大きくなることで²⁾、初期沈下が増加しやすくなることから、保守コストの高い道床交換が必要となる。これまでに経年によるバラストの劣化に関する実態調査が行われたが^{3) 4)}、新品のバラスト状態から噴泥に至るまでのバラストの破碎・細粒化メカニズムは十分に解明されていない。そこで本研究では、まず、現地調査により現地のバラストを採取して、経年したバラストの粒度分布を評価した。次に、円柱モールドを用いた繰返し載荷試験およびタイタンパを用いたつき固め試験により、バラストの破碎・細粒化が生じる要因を検討した。また、その試験結果をもとに粒度分布の変化率を求め、前回の道床交換から現時点までの累積通トン数および保守頻度から、劣化したバラストの粒度分布を推定する手法を提案し、現地バラストの現時点の粒度分布と比較することで妥当性を検証した。さらに、提案した推定手法を用いて現時点の粒度分布から将来のバラストの余寿命を予測する方法について検討したので報告する。

2. 経年したバラストの現地調査

保守頻度が少ない地点と多い地点における経年したバラストの粒度分布を評価するために、現地のバラストを

* 軌道技術研究部 軌道・路盤研究室

採取して粒度試験を実施した⁵⁾。現地のバラストの採取位置はレール継目部付近とし、まくらぎ直下のバラストを採取した。全10地点のうち、地点1から地点5は高低変位の進みが小さく保守頻度が少ない地点のバラストであり(図1)、地点6から地点10は噴泥しており保守頻度が多い地点のバラストである(図2)。粒度試験は、地盤工学会の「JISA1204 土の粒度試験方法」⁶⁾に準拠して実施した。地盤工学会では地盤材料を粒径で区分しており、粒径が0.075mm以下を細粒分(粘土およびシルト)とし、0.075mmから75mmの範囲の粒径を粗粒分(砂および礫)としている。基準粒度範囲内のバラストでは全体の95%以上が粒径20mm以上の礫である。

図3に粒度試験の結果を示す。保守頻度が少ない地点のバラストの粒度分布は、経年劣化により20mm以下



図1 保守頻度が少ない地点のバラストの状態(地点5)⁵⁾



図2 保守頻度が多い地点のバラストの状態(地点6)⁵⁾

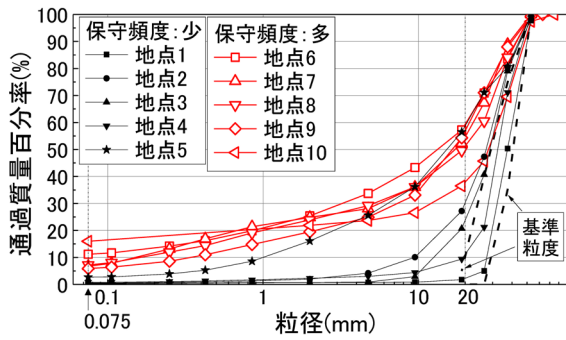
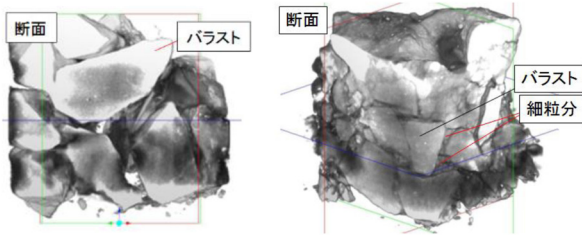


図3 現地より採取したバラストの粒度分布



(a) 保守頻度：少 (地点3) (b) 保守頻度：多 (地点8)

図4 不攪乱バラストのCT スキャン結果

の粒径の割合が増加して基準粒度から外れているものがあるが、地点1～地点4では粒径2mm以下の割合は3%以下であった。地点5のみ、粒径20mm以下の割合がバラスト全体の50%を超えているものの、粒径0.075mm以下の割合（以下、細粒分含有率）は3%以下とわずかであった。

一方、保守頻度が多い地点のバラストは、保守頻度が少ない地点よりも粒径20mm以下の割合が多く、基準粒度から大きく外れていた。地点6～地点10では粒径20mm以下の割合がバラスト全体の50%を占めており、比較的大きな粒径のバラストの破碎が進行するとともに摩耗して細粒分が増加したと考えられる。また、細粒分含有率は最大16%（地点6）、最小でも6%（地点9）と保守頻度が少ない軌道のバラストの2倍以上であったことから、細粒分含有率が増加することで透水性が低下し、バラストに水が滞水しやすくなり、噴泥に至ったと考えられる。

また、現地においてまくらぎ下のバラストを不攪乱のままパラフィンで拘束して採取した不攪乱バラストをX線CTスキャンし、バラストの内部構造を可視化したところ（図4）、保守頻度の少ない地点3では、大きなバラスト粒子同士が骨格構造を形成しているのに対して、保守頻度の多い地点8では、バラスト粒子間に細粒分が密に堆積した構造であることを確認した。

以上より、保守頻度が多い地点のバラストは、経年によりバラストの破碎・細粒化が進むことで20mm以下の粒径が増加して、0.075mm以下の細粒分含有率は概ね6%以上であることがわかった。

3. 要素試験による破碎・細粒化要因の検討

3.1 タイタンパによるつき固め作業の影響

円柱モールド内のバラストに対してつき固め作業を繰り返し行い、つき固め作業前後の粒度分布の変化を調べた。使用したタイタンパは、人力のハンドタイタンパ（以下、HTT）およびマルチプルタイタンパ（以下、MTT）の2種類である（図5および図6）。タイタンパのつき固め条件は、つき固め回数およびつき固めツールの挿入時間を実作業に合わせることにした。表1に実作業と本試験のつき固め条件を示す。

直径300mmおよび高さ300mmの円柱モールド内に、各試験で同じ粒度分布となるように粒度調整した新品バラストを乾燥密度1.6g/cm³となるように投入して、締め固めて供試体を作製した。

図7にHTTおよびMTTの1回あたりの軌道整正作業におけるまくらぎ1本に対するつき固めツールの挿入位置とバラストへの影響範囲を示す。HTTの試験条件



図5 HTTによるつき固め試験⁵⁾



図6 MTTによるつき固め試験⁷⁾

表1 実作業とモールド試験のつき固め条件

ツール挿入 1箇所あたり	MTT		HTT	
	実作業	本試験	実作業	本試験
加振周波数 (Hz)	35	35	45	45
ツール本数 (本)	2	1	1	1
つき固め時間 (秒)	1~2	2	10	15
つき固め回数 (回)	1~2	2	6	4 or 6

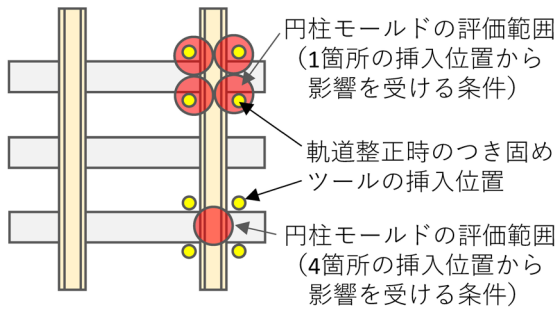


図7 つき固めツール挿入位置とバラストへの影響範囲

に関して、実作業では1箇所あたりに6回挿入し、1回あたり10秒間で計1分間加振しながらつき固め作業を実施する方法が標準⁸⁾とされているが、経年劣化によりつき固め時間が長くなる場合を想定して1回あたり15秒とした。また、後述の検討によりHTTのつき固め回数が細粒化に影響することがわかっている。ここで、同じ位置のバラストがつき固めツールの影響を受ける回数を「挿入のべ回数」と定義することとした。また、つき固めツール1回の挿入によって、バラストが影響を受ける範囲を二通りの考え方で仮定することとし、1箇所あたりのつき固め時間が標準的な方法と同様に合計1分間となるように挿入のべ回数を4回とする条件と、標準的な方法でレールとまくらぎが交差する位置に4箇所から各6回挿入して挿入のべ回数を24回とする条件で結果を整理することとした。

MTTの実作業では、1箇所あたりつき固めツール2本が1～2回挿入されているが、円柱モールドのサイズを考慮して、つき固めツール1本で試験を行うこととした。軌道整正作業1回あたりのつき固めツールの挿入回数を本試験条件に換算すると、図7に示したように挿入位置1箇所分を円柱モールドでの評価範囲に相当する条件として、つき固めツール2本かつつき固め回数2回では挿入のべ回数は計4回となる。

試験条件は、HTTの挿入のべ回数を100回、200回、800回とし、MTTの挿入のべ回数を20回、40回、100回とした。

図8および図9につき固め後の粒度分布を示す。つき固め回数の増加に伴い粒度分布が変化しており、つき固め回数100回（HTTおよびMTTの挿入のべ回数4回の場合：軌道整正25回分、HTTの挿入のべ回数24回の場合：軌道整正4.2回分）で比較すると、HTTでは細粒分含有率が4.4%増加したのに対して、MTTでは2.7%の増加であった。しかし、粒径2mm以上から26.5mm以下の割合は、試験前の8.0%に対し、HTTでは10.4%と比較的変化が小さかったが、MTTでは33.9%とHTTの3倍以上に増加した。

図10につき固め後のバラスト状態を示す。(a)はHTTによるつき固め回数800回（挿入のべ回数4回

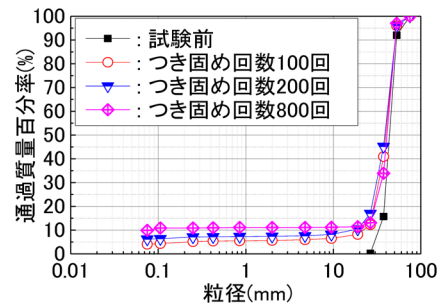


図8 HTTつき固め後の粒度分布（HTT）

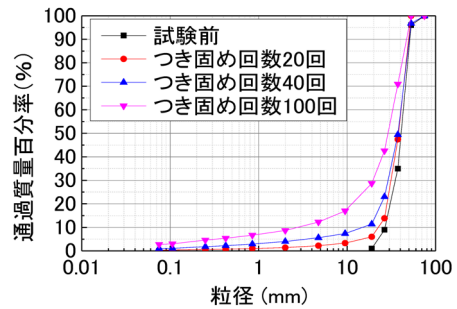


図9 MTTつき固め後の粒度分布



(a) HTT800回後 (b) MTT100回後⁷⁾

図10 つき固め後のバラストの状態

場合：軌道整正200回分、挿入のべ回数24回の場合：軌道整正33回分）後であり、バラストが摩耗して丸みを帯びていることがわかる。(b)はMTTによるつき固め回数100回（軌道整正25回分）後であり、大きな粒径の粒子が少なく破砕が大きく進行していた。

以上より、つき固め作業を繰り返し実施することで、HTTでは細粒分が増加しやすく、MTTでは2mm以上の粒径の碎石が破砕しやすいことがわかった。

3.2 繰返し载荷の影響

繰返し载荷が破砕・細粒化に与える影響を検討するため、列車荷重を想定した繰返し载荷試験を実施し、試験前後に粒度試験を実施した（図11）。供試体は前節と同じφ300mm×H300mmの円柱モールドに入れたバラストであり、载荷板はφ300mmの鉄板とした。円柱モールドの底面には、 $K_{30}=50 \sim 60\text{MN/m}^3$ 相当の軟弱路盤を想定してゴムシートを設置することとし、FEM解析による検討によりゴムシートの厚さを5mmに設定した。

荷重条件は、静止軸重 160kN に対してレール継目部における変動輪重係数を 2.0⁹⁾、レールの荷重分散効果による車軸直下のまくらぎに対する荷重分担率 0.4¹⁰⁾ を考慮すると、まくらぎ 1 本に作用する鉛直荷重は 128kN となる。この荷重がまくらぎの直下のバラストに作用した場合と同じ値の鉛直応力が供試体に作用するように、寸法を考慮して作用荷重を 18.4kN に設定した。載荷周波数は 25Hz、載荷回数は 1000 万回とした。

1000 万回の繰返し載荷試験の前後の粒度試験結果を図 12 に示す。試験前後で粒度分布の形状に大きな変化は見られなかった。図 13 に 1000 万回の繰返し荷重載荷後のバラストの状態を示す。試験前の粒子形状と同様に角張りがあり、破碎・細粒化の進展はほとんど見られなかった。

さらに、バラストの破碎・細粒化の進行を促進するように静止軸重よりも大きい荷重レベルに設定し、さらに軟弱路盤を想定してバラストのひずみが増加しやすい載



図 11 繰返し載荷試験の載荷状況⁵⁾

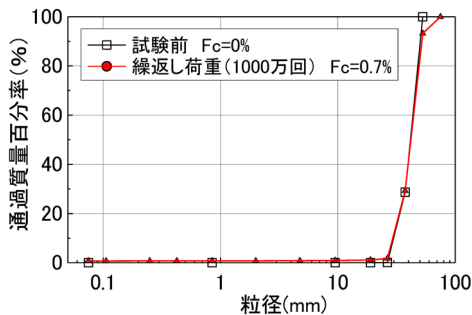


図 12 粒度分布（繰返し荷重）



図 13 試験後のバラスト状態

荷条件で 1000 万回の繰返し載荷を実施したにもかかわらず、連続した繰返し載荷ではバラストの破碎・細粒化に与える影響が小さいことがわかった。

4. 劣化バラストの余寿命評価方法

4.1 バラストの粒度推定手法

3 章の結果をもとに、前回の道床交換から現時点までの保守頻度および累積通トン数を用いて、現時点のバラストの粒度分布を推定する方法を検討した。なお、本推定手法では、つき固めによる要因 (HTT・MTT) と繰返し荷重による要因に着目した。継目部のような高周波数の衝撃荷重も影響を及ぼすと想定されるが、今後の検討課題とした。

粒度分布の推定手順を以下に示す。

- ① 前回の道床交換から現時点までの累積通トン数と、HTT および MTT の軌道整正の回数から軌道整正 1 回あたりの挿入のべ回数を求める。
- ② つき固め試験結果 (図 8 および図 9) より挿入のべ回数 1 回あたり、繰返し載荷試験結果 (図 12) より累積通過トン数 1 万トンあたりの各粒度の変化率を求め、①の値を乗じて現時点の粒度分布を推定する。

ここで、HTT および MTT の挿入のべ回数と通過重量百分率の関係を図 14 および図 15 に示す。図に示すように、HTT の場合は 100 回、200 回、800 回の 3 段階で、MTT の場合は、20 回、40 回、100 回の 3 段階で変化率の傾きを変化させる区分線形条件とした。

本推定手法の妥当性を検討するために、まず、3 章と

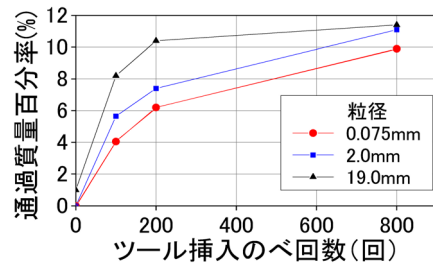


図 14 挿入のべ回数と通過重量百分率の関係 (HTT)⁷⁾

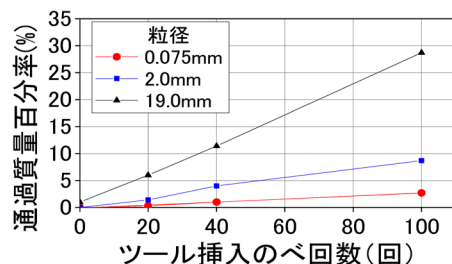


図 15 挿入のべ回数と通過重量百分率の関係 (MTT)⁷⁾

同じ円柱モールドを用いた供試体に対し、HTTのつき固め作業と繰返し載荷試験を交互に実施し、バラストの粒度分布の推定結果と比較した。試験では、繰返し載荷125万回ごとに載荷を中断して、つき固め作業を20回実施する手順を7セット繰り返し、最終的に繰返し載荷回数を計1000万回、つき固め回数を計140回とした。つき固め方法および荷重条件は、3.1節および3.2節と同条件とした。

試験後の粒度分布および推定した粒度分布を図16に示す。つき固め作業と繰返し載荷試験を交互に実施することで細粒分(0.075mm以下)が5.5%に増加した。本手法により粒度分布を推定したところ、概ね同様の粒度分布が得られ、細粒分含有率も4.9%と概ね同程度となった。

次に、現地バラストの粒度分布と比較することにより、本推定手法の妥当性を検証した。検証対象とした3地点(地点A, 地点B, 地点C)の軌道構造は、ロングレール、PCまくらぎ、土路盤であり、レール継目部のような著大な衝撃荷重が作用しない区間である。前回の道床交換から現在までの保守頻度および累積通トン数を表2に示す。ここで、本推定方法では、MTTおよびHTTの軌道整正1回分の挿入のべ回数を、3.1節と同様に2種類設定し、推定①はMTTを4回、HTTを24回、推定②ではMTTを4回、HTTを4回に設定した。

推定した粒度分布と現地バラストの粒度分布を図17に示す。現地バラストの細粒分含有率は地点Aが10.5%、地点Bが1.7%、地点Cが9.2%であるのに対して、推定①では地点Aが12.5%、地点Bが3.8%、地点Cが17.6%であり、細粒分含有率が多い地点Aおよび地点Cにおいて実際の粒度分布よりやや離れる傾向を示した。推定②では、地点Aが9.2%、地点Bが3.3%、地点Cが12.4%であり、全地点において実際に近い粒度分布を推定した。これより、推定②のつき固め回数を用いることで、細粒分含有率が多い地点でも適切に粒度分布を推定できることがわかった。

推定した細粒分含有率に対して、各要因による増加量を図18に示す。地点Aの細粒分含有率のうち、MTTによる増加量は2.5%、HTTによる増加量は5.2%、累積通トンの増加量は1.5%であった。地点BはMTTによる増加量が2.1%、HTTによる増加量は0.2%、累積通トンの増加量が3.4%、地点CはMTTによる増加量が3.4%、HTTによる増加量は6.8%、累積通トンの増加量は2.2%であった。細粒分含有率の増加量に対するHTTおよびMTTによるつき固め補修作業の寄与度は、地点Aで84%、地点Bで69%、地点Cで83%であった。地点Aおよび地点Cの細粒分含有率は噴泥する可能性が高いほど高いのに対して、地点Bの細粒分含有率は、地点Aおよび地点Cの1/3程度と少ない。これは、累積通トン数およびMTTの回数は3地点で大きく変わらないが、

地点BではHTTの回数が1回と非常に少ないためであると考えられる。

以上より、推定した細粒分含有率は実測と比較してやや大きい傾向があるものの、推定②の方法により現地のバラストの粒度分布を概ね推定できる見通しが得られた。

4.2 余寿命予測方法

前節の推定手法を応用することで、想定される保守量および累積通トン数より今後の粒度分布の変化率を予測し、道床交換が必要になるまでの余寿命を予測した。算出手順を以下に示す。

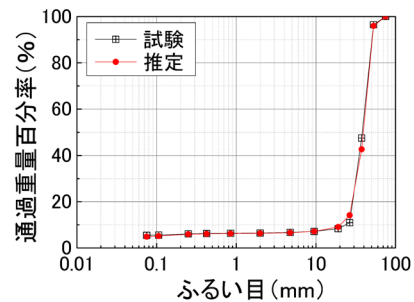


図16 推定した粒度分布(要素試験)

表2 前回の道床交換から現在までの保守頻度および累積通トン数⁷⁾

	HTT (回)	MTT (回)	累積通トン数 (億トン)
地点A	38	23	11.1
地点B	1	20	7.7
地点C	75	31	14.8

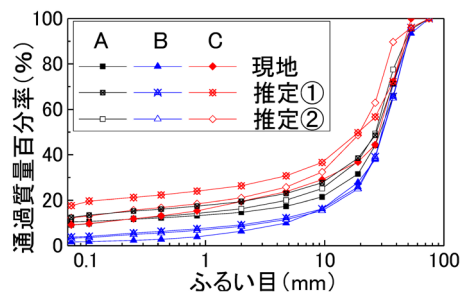


図17 推定した粒度分布⁷⁾

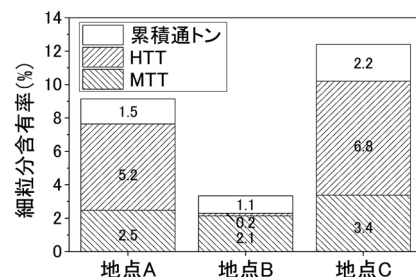


図18 細粒分含有率の増加量の各要因⁷⁾

- 1) 現地バラストの現時点の粒度分布および推定年数までの MTT および HTT の軌道整正の回数および累積通トン数を設定し、粒度分布の変化率を求める。
- 2) 現時点の粒度分布に、推定年数経過後の粒度分布の変化率を加えて、推定年数経過後の粒度分布を算出する。
- 3) 2章の結果より、保守頻度の多い区間の細粒分含有率の最小値であった 6% を道床交換の判定値として、推定年数後の細粒分含有率と比較し、余寿命を推定する。

図 19 に推定②の粒度分布の推定方法を用いた 5 年後、10 年後および 15 年後の細粒分含有率の推定結果を示す。累積通トン数および MTT の回数は過去 2 年間分を参考に今後も同様であると仮定して MTT の回数は 1 回/年とした。HTT の回数は劣化の進行とともに保守量が増加することを考慮して、0 回/年、1 回/年、2 回/年の条件で算出した。その結果、0 回/年の場合は、15 年後の細粒分含有率が 4.4% と少ないが、1 回/年では 15 年後に 7.8%、2 回/年では 10 年後に 8.1% となり、道床交換の判定値 6% を超えることから道床交換が必要になるとの判定結果となった。

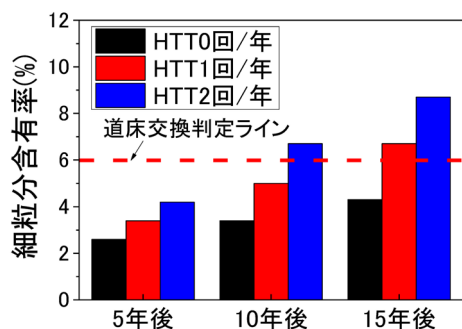


図 19 推定した細粒分含有率⁷⁾

5. まとめ

バラストの破碎・細粒化メカニズムを解明するために現地調査、繰返し載荷試験およびタイタンパを用いたつき固め試験を実施し、それらの結果をもとに粒度分布の推定手法を提案した。得られた結果を以下に示す。

- ・ 高低変位進みが大きい保守多投入箇所の多くは噴泥を伴っており、道床交換の対象となることから、現地試験によりバラストの粒度分布を評価した。バラストの排水性に影響する細粒分含有率（粒径 0.075mm 以下）に着目したところ、保守頻度が少ない地点では細粒分含有率が 3% 以下であったが、保守頻度が多い地点では 6% を超えていた。
- ・ タイタンパによるつき固め作業および列車の繰返

し荷重の影響によるバラストの粒度の変化率を室内試験により検討したところ、つき固め作業の影響が大きく、HTT(人力のハンドタイタンパ)では細粒分が増加し、MTT(マルチプルタイタンパ)では 2mm 以上の粒径の碎石が破碎されることを明らかにした。

- ・ 室内試験結果より、各要因による粒度分布の変化率を定式化し、現時点の粒度分布から累積通トン数および保守頻度を考慮して、将来の粒度分布を予測して道床交換が必要になるまでの余寿命を算定する手法を提案した。

本研究の一部は、MEXT 科研費 JP19H02234 の助成を受けて実施した。

謝辞

本研究におけるバラストの X 線 CT スキャンの実施に多大なご協力をいただいた北海道大学の石川達也教授に厚くお礼申し上げます。

文献

- 1) Yang, J.Q., Ishikawa, T., Matsutani, S., Tokoro, T., Nakamura, T., Momoya, Y., “#Influences of water content and fine fraction content on permanent deformation of ballasts”, Proceedings of the 16th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Taipei, Taiwan, 2019.
- 2) 伊藤孝記, 木次谷一平, 桃谷尚嗣: タイタンパー補修に伴う道床バラストの密度変化, 第 46 回地盤工学研究発表会, pp.943-944, 2011
- 3) 大島洋志, 樋口岩雄, 中林好範: 道床バラストの劣化・細粒化と品質管理, 鉄道技術研究資料, 36 巻, 5 号, pp.21, 1979
- 4) 片山守彦, 高木喜内: 東海道新幹線高架橋上における道床固結の特性とその処理方法, 鉄道技術研究報告, No.1358, 1987
- 5) 中村貴久, 福中力也, 木次谷一平, 桃谷尚嗣: 道床の破碎・細粒化過程に関する研究, 日本施設協会誌, 58 巻, 1 号, pp.17-20, 2020
- 6) 地盤工学会: 地盤材料試験の方法と解説, pp.115-136, 2009
- 7) 中村貴久, 木次谷一平, 桃谷尚嗣: 劣化バラストの余寿命予測手法に関する研究, 日本施設協会誌, 59 巻, 2 号, pp.41-44, 2021
- 8) 渡辺幹夫編: 近代絵とき保線工学, 交友社, pp.116, 1977
- 9) (公財) 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造, pp.264-298, 丸善, 2012
- 10) (公財) 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造, pp.363-371, 丸善, 2012