

ライフサイクルコスト低減に向けた バラストのメンテナンス技術



中村 貴久
Takahisa Nakamura
軌道技術研究部
軌道・路盤研究室
主任研究員(上級)



廣尾 智彰
Tomoaki Hiroo
軌道技術研究部
軌道・路盤研究室
研究員



河野 昭子
Akiko Kono
鉄道力学研究部
軌道力学研究室
主任研究員

はじめに

鉄道のバラスト軌道(図1)では、レール上を鉄道車両が繰り返し走行することで、レールおよびまくらぎを支持するバラストが徐々に沈下し、それにつられてまくらぎも沈下することで、線路にゆがみが生じます。この「線路のゆがみ(以下、軌道変位)」が大きくなると、乗り心地や走行安全性の悪化につながります。特に鉄道車両の走行や軌道保守作業の繰り返しにより、バラストが砕けたり細かくすりつぶされたりする破碎・細粒化(以下、劣化)が生じると排水性が悪くなり、降雨などで水分が多くなることで強度が低下し、大きな軌道変位が生じる可能性が高くなります。

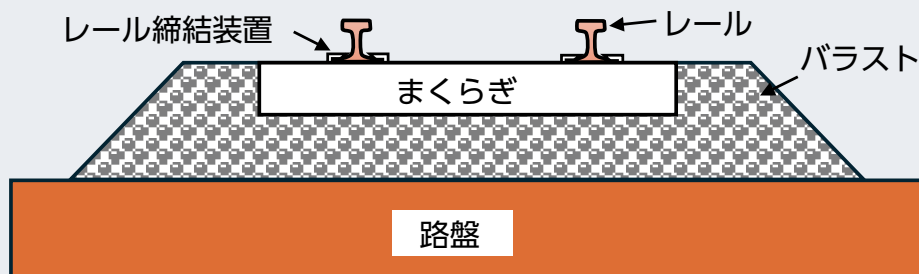
軌道変位が生じた場合には、ジャッキでレールおよびまくらぎを持ち上げて、レールレベルを整正し、タイタンパーと呼ばれる保守専用の

振動機を用いて、まくらぎ下にバラストをつき込む作業(以下、つき固め作業)が行われます。つき固め作業に用いるタイタンパーには、レール上を走行しながら作業する保守用重機と、人力で使用するものがあります。

これまでの検討でつき固め作業を繰り返すとバラストの劣化が早まることが判明しています。そのため、つき固めによるバラストの劣化を抑制する方法を開発してバラストを長寿命化することができれば、ライフサイクルコストが低減するとともに、バラストに使用する自然岩石の消費量の低減や、つき固め作業時のCO₂発生量の低減といった面で鉄道の持続可能性に寄与できます。

ここでは、ハンドタイタンパー(以下、HTT)に着目し(図2)、近年の開発動向の調査とともに、つき固め作業によるバラストの劣化の試験的評

図1 バラスト軌道の構造



価および解析的評価を行い、劣化を抑制する方法について基礎検討を行ったので報告します。

近年のHTTの開発動向

HTTの先端（以下、ツール）の形状には、従来から用いられているへら型と近年に導入された円筒型の2種類があります（図3）。HTTの性能はメーカーごとに異なることから、装置の仕様（ツール形状、HTTの質量および振動周波数など）を公表している国内外のメーカー5社を対象に調査を行いました。HTTの質量と振動周波数の関係を図4に示します。ここで、バラスト内にツールを挿入するためのHTTの加振力 F に関して、図中に、HTTの加振機構の偏心重錘の質量 m と偏心量 r および振動加速度 ω の関係を合わせて示します。従来のHTTは質量が30kg程度で、振動周波数は電源周波数と同じ、東日本50Hz、西日本60Hzです。近年では、バッテリー駆動の電動モーターや燃料エンジンを用いて20kg程度に軽量化され、振動周波数は100Hz程度かそれ以上に高周波化されています。これは、HTTの質量もバラスト内にツールを挿入する作用力に影響することから、作業性向上のための軽量化にともない低下したツール挿入時の作用力を、高周波化して増加した加振力で補うためであると考えられます。



図2 HTTを用いたつき固め作業

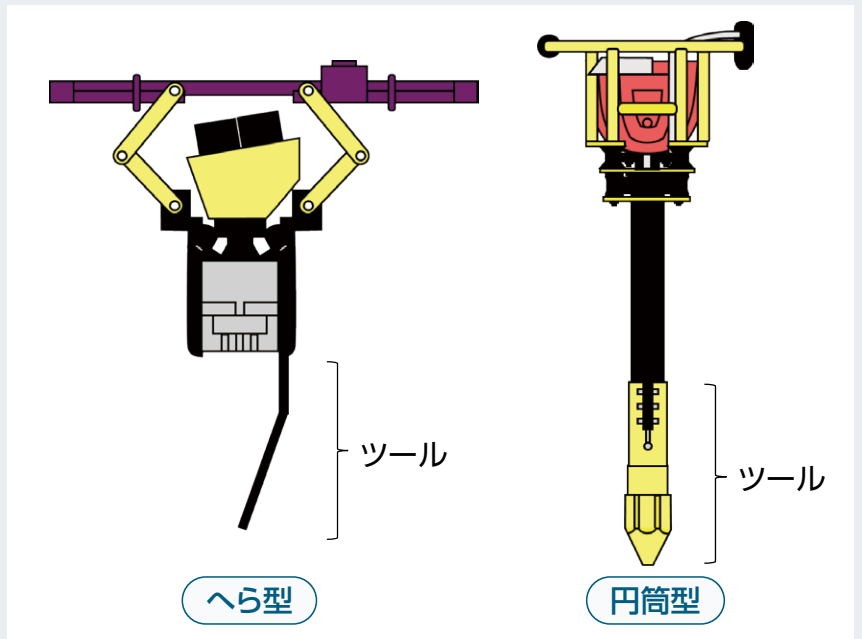


図3 HTTの種類例

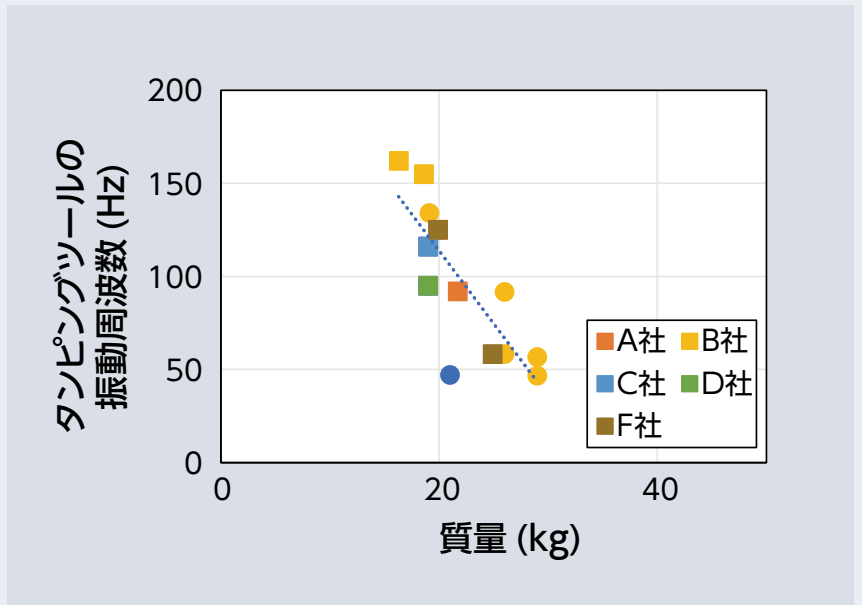


図4 HTTの重量とつき固めツールの周波数の関係



【供試体】

- ・ 寸法：直径300mm×高さ300mm
- ・ バラスト密度：1.60g/cm³

【つき固め条件】

- ・ つき固め時間：15秒/回

供試体 (バラスト)

試験モールド

図5 試験条件

表1 試験条件

ケース	ツール形状	重錘質量	加振周波数(Hz)	供試体数	つき固めセット数(セット)
1	へら型	従来値	40	1	100, 200, 400
2		従来値	50 (従来値)	3	100, 200, 400
3		従来値	70	1	100, 200, 400
4		従来値 1/2 倍 (ケース3の加振力の1/2倍)	70	1	100, 200, 400
5	円筒型	従来値	120	1	100, 200, 400
6		従来値	140	1	100, 200, 400
7		従来値	155 (従来値)	3	100, 200, 400
8		1/2 倍 (ケース7の加振力の1/2倍)	155 (従来値)	1	100, 200, 400

つき固め作業によるバラストの劣化状態の試験的評価

試験方法

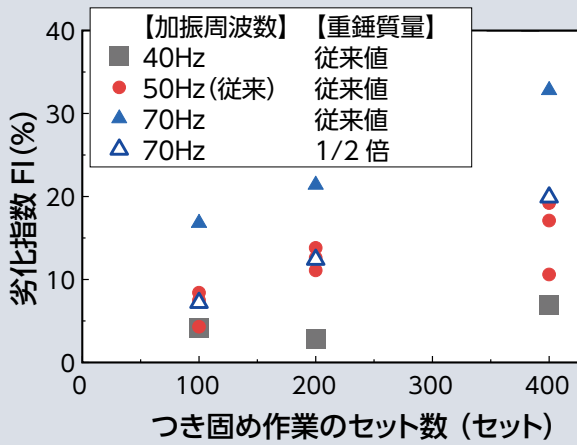
つき固め作業後のバラストの**粒度分布**[※]に対する、HTTの仕様の影響を評価するためにつき固め試験を実施しました。供試体は、図5に示すとおり、直径300mmの円柱モールド内

※ 粒度分布

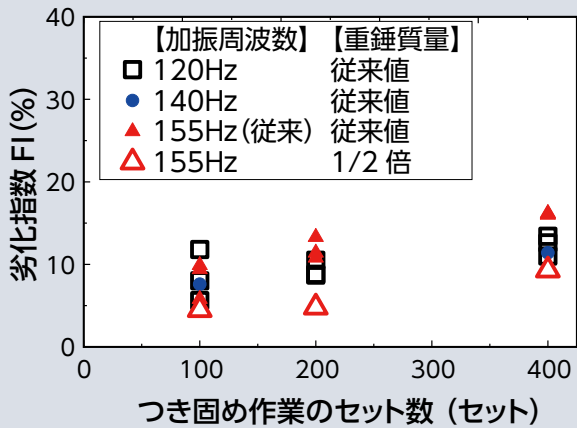
バラスト粒子の粒子径の広がり(分布)を示す指標です。バラストの粒度分布を求めるには、規格化された大きさが異なるふるい目を用いたふるい試験「JISA 1204:2020 土の粒度試験方法」を実施し、各ふるいに残留する質量から全体質量に対する割合を算出することで、求めることができます。

に投入した厚さ300mmの新品バラストであり、乾燥密度1.60g/cm³を目標に締め固めて作製しました。試験条件は表1に示すように、ツール形状2種類、周波数3種類、重錘質量2種類を組み合わせたものとししました。つき固め作業は、ツール挿入→15秒間つき固め→ツール引抜きを1セットとしました。

つき固め作業後にバラストの粒度試験を実施し、バラストの劣化指標として、粒径0.075mm未満と粒径4.75mm未満の質量パーセントの和で算出される劣化指数FI=Fouling Index¹⁾(以下、FI)を求めました。既往の研究では²⁾、FIが20%以上で劣化と判定しています。



(a)へら型



(b)円筒型

図6 つき固め試験後の劣化指数FI

試験結果

つき固め回数とFIの関係を図6に示します。つき固め回数400セット（つき固め保守作業50回分相当）後で比較すると、へら型では、振動周波数を50Hz（従来値）から70Hzに上げるとFIが2倍程度に増加しました。しかし、40Hzに下げた場合、または重錘質量を1/2倍にした場合は、FIが減少しました。次に円筒型では、振動周波数を155Hz（従来値）から下げても、へら型のようなFIの顕著な減少は見られませんでした。しかし、重錘質量を1/2倍にした場合は、従来値と比較してFIが1/2倍程度に減少することがわかりました。

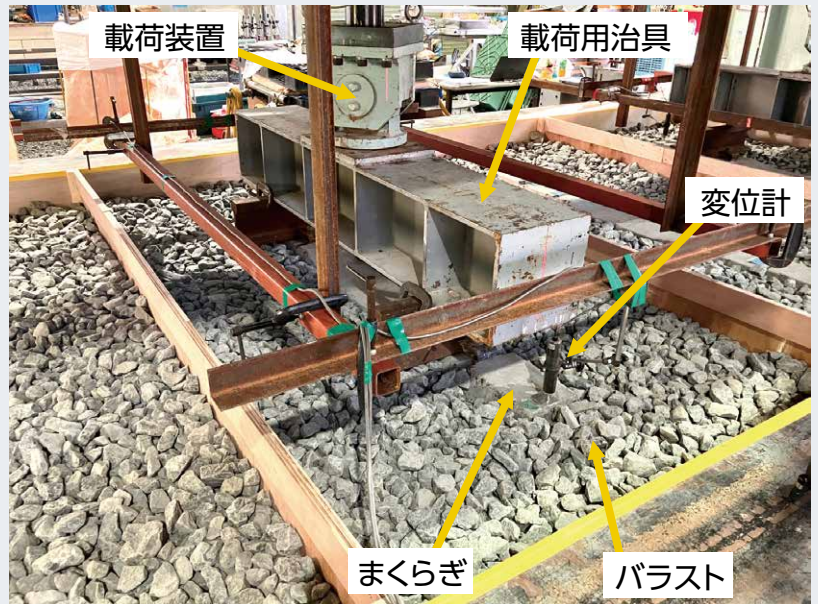


図7 実物大試験の条件

表2 試験条件

载荷荷重	最小	5kN
	最大	137kN
	振幅※	132kN
载荷回数	30万回	
载荷周波数	5Hz	

※荷重振幅：軸重 170kN × 衝撃荷重 1.55 × 荷重分担 0.5

劣化を抑制する加振条件のつき固め作業における沈下特性の試験的評価

試験方法

HTTの重錘質量（加振力）を低下させると、つき固めるエネルギーが小さくなるので、まくらぎ下にバラストを十分につき込めず、列車荷重により沈下量が増大する懸念がありました。そこで、劣化を抑制するために、重錘質量を1/2倍に減少させた加振条件でつき固めたバラストの沈下特性を、実物大のバラスト軌道模型を用いた繰返し载荷試験により検討しました（図7）。つき固め作業には円筒型HTTを用いました。試験ケースは、従来通りの重錘質量とす

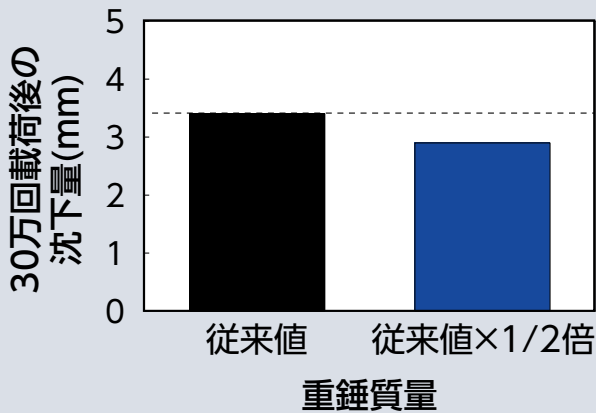


図8 繰返し載荷30万回載荷後のまくらぎ沈下量



図9 つき固め試験の個別要素法の解析モデル

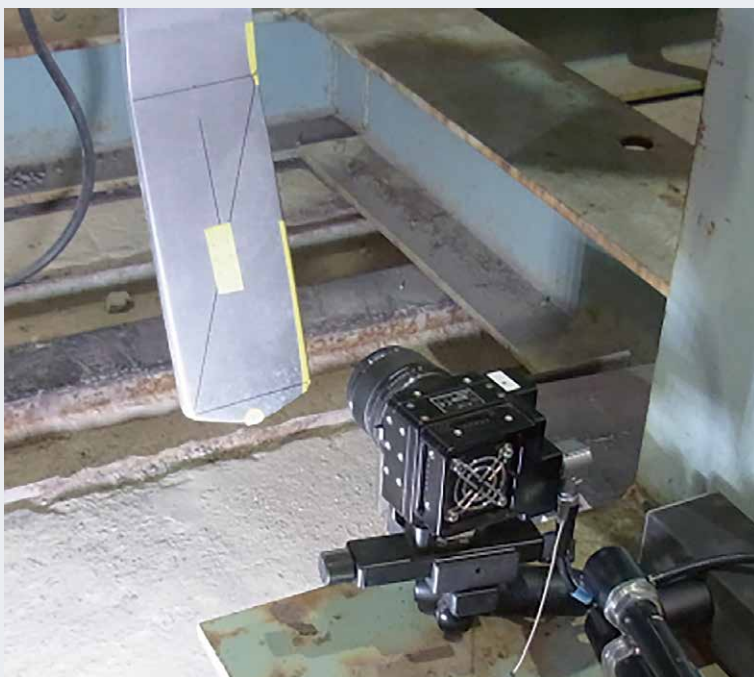


図10 高速度カメラを用いたツールの挙動の観察

る場合と、重錘質量を1/2倍にする場合の2ケースとしました。試験条件を表2に示します。ここで、繰返し載荷1回とは、車軸1軸分の通過1回分に相当します。

試験結果

繰返し載荷回数と30万回載荷後のまくらぎ沈下量の関係を図8に示します。繰返し載荷30万回後のまくらぎ沈下量は、従来通りの加振力の方が大きく、重錘質量(加振力)を1/2倍にしても沈下量は増加せず、逆にわずかに小さくなりました。これは、従来の円筒型HTTの加振力が沈下抑制の観点では大き過ぎ、つき固められて密実化したバラストを逆に緩めてしまったためと考えられます。

つき固め作業によるバラストの劣化状態の解析的評価

解析方法

つき固め試験の再現シミュレーションを実施し、HTTの仕様がバラストの劣化に与える影響を解析的に評価しました。つき固め作業時の各バラスト粒子に作用する接触力を求めることができる個別要素法を用いて、つき固め試験の供試体とHTTのツールをモデル化しました(図9)。

再現シミュレーションでも、試験と同様にバラストの密度が 1.60g/cm^3 となるように締め固めて供試体をモデル化しました。また、つき固め試験時のツールの動きを高速度カメラで撮影して(図10)ツールの挙動を再現し、HTT質量と作

業者の体重の一部を考慮して鉛直方向に50kgfをツールに作用させました。つき固め試験におけるツールの回転振動の条件を表3に示します。

つき固め時のバラストの摩耗の評価方法

本解析方法ではバラスト粒子を剛体としてモデル化しました。そのため、摩耗を直接的に再現できないことから、[アーチャードの摩耗則](#)^④を参考に、式(2)に示す接触点における法線方向接触力 P と接触点の滑り距離 L の積から求まる摩擦エネルギーを $EneFr$ と定義して、つき固め時のバラストの摩耗を評価することとしました。

$$EneFr = P \times L \dots\dots\dots (2)$$

つき固め試験と再現シミュレーション結果の比較

前節のつき固め試験で得られた FI と、本シミュレーションで得られた $EneFr$ の関係を図11に示します。線形近似をしたところ、相関係数は0.75と高い相関性があることがわかりました。本解析方法を用いることで、今後、バラストの劣化を抑制するために最適なHTTの開発などに活用できます。

おわりに

バラストの劣化を抑制するつき固め方法およびバラストの劣化の解析的な評価方法について紹介しました。今後は、本解析方法を用いてバラストの劣化を抑制するHTTを開発して、バラストを長寿命化させることで、バラスト軌道のライフサイクルコスト低減を図ります。RRR

表3 解析条件

解析ケース	へら型		
	重錘質量	周波数	変位振幅
1	従来値	40Hz	5mm
2	従来値	47Hz	10mm
3	従来値	70Hz	15mm
4	従来値×1/2倍	70Hz	7.5mm

解析ケース	円筒型		
	重錘質量	周波数	変位振幅
5	従来値	120Hz	1.0mm
6	従来値	140Hz	1.5mm
7	従来値	155Hz	2.0mm
8	従来値×1/2倍	155Hz	1.0mm

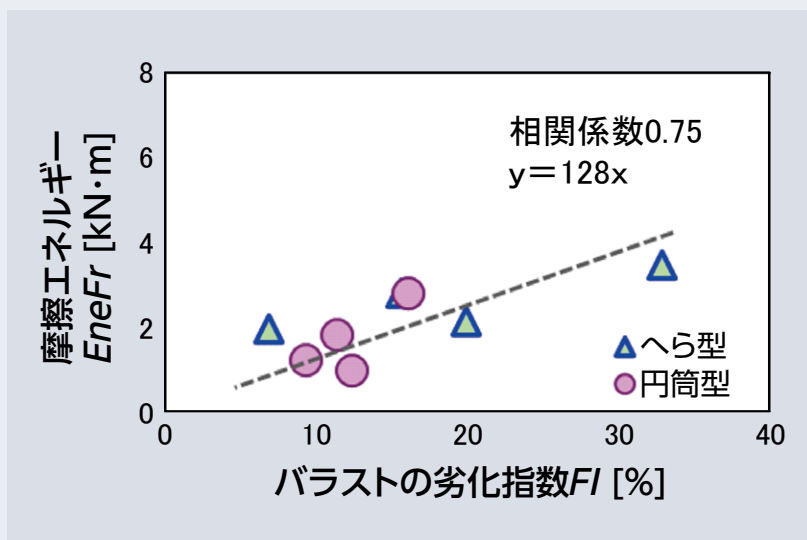


図11 FI と $EneFr$ の関係

④ アーチャードの摩耗則

同一の材料同士の接触によって発生する摩耗量 V を式(1)にて算出することができます³⁾。

$$V = kPL / H \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 P は接触点における法線方向接触力、 L は接触点の滑り距離、 H は材料のビッカース硬さ、 k は「摩耗定数」と呼ばれる定数です。

文献

- 1) Selig, E.T.: Ballast for heavy duty track. In: Track Technology, Proceedings of a Conference organized by the Institute of Engineers (ICE), Nottingham, pp.245-252, 1985
- 2) 高浦真行, 中村貴久, 景山隆弘: 土砂が混入したバラストの健全度評価方法, 第2回交通地盤工学に関する国内シンポジウム, 1-1, 031, 2022
- 3) J.F.Archard and W.Hirst: The wear of metals under unlubricated conditions, Proceedings of the Royal Society A, Vol.236, pp.397-410, 1956