

論文 バラスト保守作業による道床横抵抗力特性への影響に関する研究

吉川 秀平¹・薮中 嘉彦²・高尾 賢一³

¹正会員 西日本旅客鉄道株式会社 施設部 施設技術室（〒530-8341 大阪府大阪市北区芝田2-4-24）
E-mail:syuuhei-kikkawa@westjr.co.jp

²正会員 西日本旅客鉄道株式会社 金沢支社 施設課（〒920-0031 石川県金沢市広岡3-3-77）
E-mail: yoshihiko-yabunaka@westjr.co.jp

³正会員 西日本旅客鉄道株式会社 施設部 施設技術室（〒530-8341 大阪府大阪市北区芝田 2-4-24）
E-mail:kenichi-takao@westjr.co.jp

保線作業の労働生産性向上として、MTT作業の夏期保守作業制限緩和による工事の平準化は有効である。その実現の方策は、道床安定作業車の機能であるスタビライザーユニットを活用した道床横抵抗力の増加である。そこで、基準粒度内のバラストを対象に実軌道および軌道模型を用いた道床横抵抗力試験、画像解析によるバラスト粒子挙動を確認した。その結果、MTT作業後の軌道強制加振作業により道床横抵抗力が20%増加することを確認し、理論式で保守作業影響を推定できる見通しを得た。

Key Words :Lateral ballast resistance force, MTT, Dynamic track stabilization,Ballast maintenance work, Limit equilibrium method

1. はじめに

各鉄道事業者では、加速度的に進行し年々深刻化する労働力不足への対応として各種労働生産性向上に取り組んでいる。保線の労働生産性向上として、部材の長寿命化、構造の強靱化、保守工事の機械化、検査の装置化・自動化および工事の平準化等が挙げられる。特に工事の平準化の必要性は、保線業務の典型的な特徴といえる軌道座屈防止策として実施している夏期の道床を緩める作業の制限¹⁾に起因している。夏期は保守作業量が極端に少なく、労働生産性を著しく阻害している。そこで、夏期保守作業制限を受ける代表的な工事の一つである在来線のマルチプルタイタンパー（以下、MTTという）による道床つき固め作業を対象に夏期保守作業制限の緩和を検討する。ここで、MTT作業はそもそも省人化された機械作業であり跡作業を含めても従事者自体は極端に多くないため、一見労働生産性向上には大きく寄与しないように思える。しかし、MTTが非常に高価であり平準化が実現すると配備台数が大幅に減らせることおよび高度な専門技能を有するMTTのオペレーターの養成や確保においても効果は非常に大きい。

夏期保守制限緩和の具体的な方策として、MTTによ

るバラスト軌道の軌道狂い整備後におけるバラストの早期安定を図るための大型機械である道床安定作業車（以下、DGSという）やバラストレギュレータ（以下、KSPという）に搭載された主機能の一つであるスタビライザーユニットの活用がある。スタビライザーユニットはレール、まくらぎを介して軌間内外のバラストへ振動を伝えることで、初期沈下促進による軌道狂い進み抑制と道床横抵抗力を向上させる効果があり、DGSのスタビライザーユニットの機能を活用することで道床横抵抗力が20%程度改善することが確認されている²⁾。また、MTT作業後にKSPのスタビライザーユニットによる軌道強制加振作業（以下、スタビライザー作業という）を実施することでMTT作業前の状態にまで道床横抵抗力が回復する傾向が確認されている³⁾。しかし、道床横抵抗力のばらつきが大きいことに加え、MTT作業およびスタビライザーユニット作業といったバラスト保守作業が道床横抵抗力特性に与える影響について海外で見解が示されているが⁴⁾、未だ明確でないと考える。夏期保守作業制限の緩和にあたり、道床横抵抗力は軌道座屈安定性に最も重要な要素であり、軌道座屈は列車走行安全性に大きな影響を及ぼすことから精緻かつ慎重な検討が必要である。

そこで、本研究では基準粒度内のバラストを対象に実軌道および軌道模型を用いた道床横抵抗力試験、画像解析によるバラスト粒子挙動を確認し、バラスト保守作業による道床横抵抗力特性への影響について検討した。

2. 理論式を用いた保守作業影響による道床横抵抗力の推定

まくらぎ1本あたりの道床横抵抗力 R はまくらぎの底面、側面、端面の抵抗力 R_{bottom} 、 R_{side} 、 R_{end} によりそれぞれ分担され発揮されるとして、極限釣り合い法を用いて次の式(1)～(4)で求められる⁹⁾。

$$R = R_{bottom} + R_{side} + R_{end} \quad (1)$$

$$R_{bottom} = \tan \delta_{sleeper} \times W_{sleeper} \quad (2)$$

$$R_{side} = K_0 \rho_d l h^2 \times \tan \delta_{sleeper} \quad (3)$$

$$R_{end} = \sin \delta / \cos(\delta + \phi) \times W_{ballast} \quad (4)$$

ここで、

$\delta_{sleeper}$ ：まくらぎの壁面摩擦角

$W_{sleeper}$ ：まくらぎ重量

K_0 ：静止土圧係数

ρ_d ：バラスト密度

l ：まくらぎ長軸方向の長さ

h ：まくらぎ高さ

δ ：くさび側面のすべり面が線路直角方向となす角度

ϕ ：土くさび底面のすべり面の角度（0度⁹⁾）

$W_{ballast}$ ：土くさびの自重

である。本理論式を用いて、バラスト保守作業による道床横抵抗力の変化について仮説を立てた。本仮説では経年によるバラストの細粒化およびまくらぎ状態の変化、浮きまくらぎについては考慮しない。まず、底面抵抗力 R_{bottom} はクーロンの摩擦法則に基づくため、摩擦力は見かけの接触面積に依存しない。そのため、MTTおよびスタビライザー作業によるバラスト-まくらぎの接触状態の変化が生じたとしても摩擦係数は変化しないと考えられ、まくらぎの壁面摩擦角 $\delta_{sleeper}$ は過去の試験⁹⁾より42度で一定と考えられる。側面抵抗力 R_{side} は、施工前後でバラスト重量が殆ど増減しないためにバラスト密度は変化しないものの静止土圧係数 K_0 が変化すると考えられる。 K_0 は、Rankineの土圧理論に基づき計算される主動土圧係数と受動土圧係数の間をとり、 $K_0=1.5, 3.0, 13$ という値が報告されている⁹⁾ことから施工によってこの値が変化すると考えられる。端面抵抗力 R_{end} は各すべり面角度 δ 、 ϕ は材料特性として一定値であり、それに伴い土く

さびの自重は変化しないことから最終抵抗力では変化しないと考えられる。しかし、MTT作業で端面のバラストが緩むことでまくらぎ-バラスト間に若干の隙間が生じ、MTT作業では初期の抵抗力が低下し、スタビライザー作業で隙間が解消されると同時にバラストの再配列による噛み合わせがMTT作業前の状態に戻ると考えられる。

以上より、MTT作業およびスタビライザー作業で道床横抵抗力の変化はまくらぎ変位が小さい領域では側面、端面の抵抗力、最終道床横抵抗力では側面の抵抗力が影響していると考えられる。本仮説の検証内容を次章以降で述べる。

3. 実軌道による道床横抵抗力試験

模型試験の条件設定および模型試験結果と比較する目的で、実軌道においてMTTおよびKSPの実機作業を行い、輪重、横圧等の各種測定および道床横抵抗力試験を模型試験に先立ち実施した。模型試験では列車の繰り返し荷重を模擬した载荷が困難なことから、軌道が荷重履歴を受けていない保守基地において試験を実施した。

(1) 試験概要

試験条件を表-1、図-1に示す。試験手順は、MTTによるつき固め作業直後およびMTT作業後にKSPによる軌道強制加振後において、それぞれまくらぎ5本の道床横抵抗力試験を実施した。道床横抵抗力試験は、まくらぎ上にレール相当の重量として試験者1名（約65kg）が載った状態でまくらぎ変位4mmまで試験した。MTTのつき固め作業は計画こう上量20mm、タンピングツール先端の振動数35Hz、全振幅8mmである。KSPのスタビライザー作業は振動数35Hz、垂直圧力6MPa、作業速度

表-1 実機による道床横抵抗力試験の条件

項目	条件
まくらぎ、レール	3号PCまくらぎ、60kgレール
道床種別	碎石
道床肩（余盛）	400mm（100mm）
バラストの粒度分布	図-1参照
バラストの含水比	0.15%

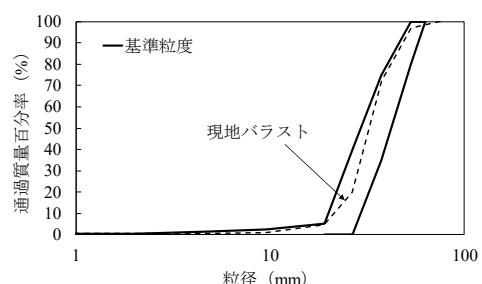


図-1 試験箇所におけるバラストの粒度分布

400m/hとした。スタビライザー作業時のレール作用力およびまくらぎ変位の測定結果は、表-2のとおりであった。MTT作業前後およびスタビライザー作業後にレベル測量を実施したところ、平均こう上量23mm、加振作業後の平均軌道沈下量13mmであった。

(2) 試験結果

道床横抵抗力試験結果を図-2に示す。まくらぎ変位2mm時点の値で比較すると、KSPのスタビライザー作業により約20%の道床横抵抗力の回復効果を確認した。実軌道では、まくらぎ変位4mm程度までしか道床横抵抗力試験ができないこと、まくらぎ底面、側面、端面の抵抗力の分担を正確に把握することや軌きょうでの道床横抵抗力試験が困難であることからバラスト軌道模型を用いて詳細に検討した。

4. 模型による道床横抵抗力試験

2章で示した仮説を検証するため、バラスト軌道模型（以下、軌道模型）、MIT（以下、MIT模型）およびスタビライザーユニット（以下、スタビライザー模型）を製作し、MIT模型およびスタビライザー模型を用いた作業後にまくらぎ1本およびまくらぎ5本からなる軌きょうの道床横抵抗力試験を実施した。模型の縮尺は、これまでの研究^{5)~7)}で実績のある1/5とした。また、ひずみゲージ式ロードセル（共和電業製、KFGS-1-120-C1-11 L1M2R）が内蔵されたまくらぎを用いたまくらぎ1本の道床横抵抗力試験より、まくらぎの底面、側面および端面の各面の荷重 - 変位関係を確認した。

(1) 縮尺1/5模型の概要

模型の相似則は、土構造の相似則⁸⁾を参考に実施されたバラスト軌道模型試験^{9)~10)}で実績のある模型の相似則にあわせて表-3とした。以下に、1/5縮尺の軌道模型、

表-2 スタビライザー作業時の各測定結果

項目	条件
輪重振幅（下限値－上限値）	50kN（5～55kN）
横圧振幅（下限値－上限値）	40kN（3～43kN）
まくらぎ上下変位（全振幅）	まくらぎ中央 2.4mm まくらぎ端部 2.2mm

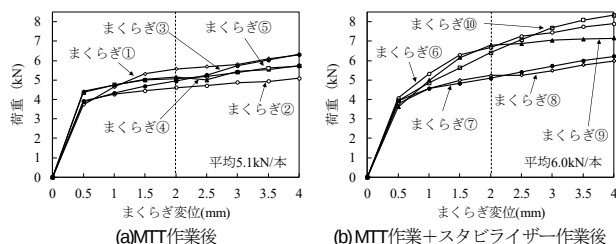


図-2 実機による道床横抵抗力試験結果

MIT 模型、スタビライザー模型の概要を示す。

a) 縮尺1/5の軌道模型

軌道模型に用いたバラスト模型（以下、1/5 粒径のバラスト）は密度 1.6g/cm³、所定道床厚 40mm、道床肩幅 80mm（余盛 20mm）となるように構築した。1/5 粒径のバラストは、実物のバラストの 1/5 粒径に近い単粒度砕石 6号を用いた（図-3）。レール模型は、60kg レールの断面 2 次モーメント I_x 、 I_y の 1/5 縮尺とし、材質 SS400、断面形状を直方体とした。まくらぎ模型は、3 号 PC まくらぎの 1/5 縮尺でセメントモルタルにより作製した。実物の 3 号 PC まくらぎの質量は 161kg であり、相似則を考慮すると 1288g となる。ロードセルを内蔵したまくらぎ模型（以下、ロードセル付まくらぎ模型）は 3 号 PC まくらぎ模型と同じ寸法となるように製作した。まくらぎに内蔵したロードセルは端面に各 1 個（計 2 個）、側面に各 2 個（計 4 個）および底面に 2 個の合計 8 個である（図-4）。ロードセル付まくらぎ模型により、道床横抵抗力試験時における端面に作用する圧縮力、側面および底面に作用するせん断力を測定する。ロードセル付まくらぎ模型の材質はアルミ製のため、まくらぎの表面摩擦をコンクリートと同等とする必要がある。そこで、バラストと接触する面に同種模型試験⁹⁾を参考にサンドペーパーを貼付けた。ロードセル付まくらぎ模型の質量は 1628g であり、3 号 PC まくらぎ模型の質量と比べると重い。道床横抵抗力試験時にはロードセル付まくらぎの重量をレール模型に相当する重量とまくらぎ模型の合

表-3 模型試験の相似則

項目	相似則（ $\lambda=5$ ）
周波数	$\sqrt{5}$
質量密度	1
速度	$1/\sqrt{5}$
変位	1/5

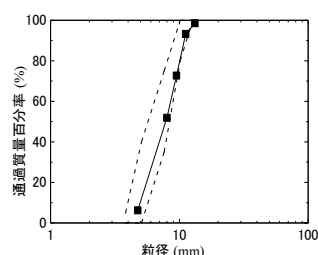


図-3 1/5粒径のバラスト（単粒度砕石6号）の粒度分布

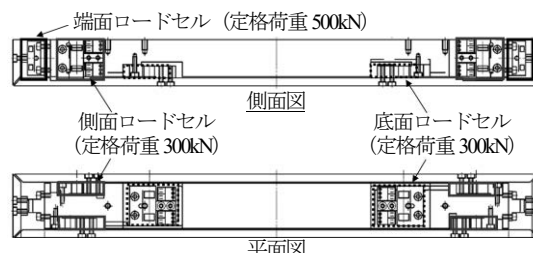


図-4 ロードセル付まくらぎの概要

計重量となるように調整した。まくらぎ間隔は 114mm（44 本/25m 相当）とした。

b) 縮尺1/5のMTT模型

MTT 模型の仕様および性能は、図-5 に MTT 模型の概要図、図-6 に道床挿入時のタンピングツールの各寸法、表-4 に MTT 模型の主な仕様を示す。実際の MTT 作業では、リフティング・ライニングユニットで軌道をこう上して軌道整正を行うが、本試験では軌道模型に取り付けたスクリージャッキで軌道こう上を実施した。また、タンピングツールのバラストへの挿入およびスクイーズ動作は手動とした。MTT 模型の加振は、電動モーターをタンピングツール上部に設置し、ボールベアリングを用いた軸受を介して不平衡重錘を回転させる方式とした。不平衡重錘の回転数は電圧コントローラーで調整し、タンピングツールの加振周波数を制御した。

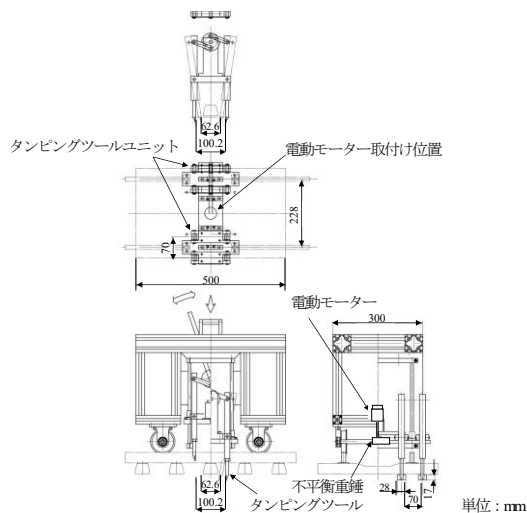


図-5 MTT模型の概要図

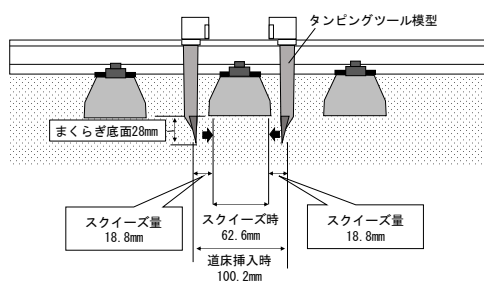


図-6 道床挿入時のタンピングツールの各寸法

表-4 MTT模型（タンピングツール）の主な仕様

項目	実機	1/5 模型
ツールの数	16 本	8 本
ツールの道床挿入深さ	まくらぎ底面から 140mm	まくらぎ底面から 140mm
加振周波数	35Hz	78Hz
スクイーズ幅	94mm/片側	18.8mm/片側
スクイーズ時間	0.6～1.0 秒	0.45 秒（目安）
プレート部の寸法	幅 140mm 高さ 85mm	幅 28mm 高さ 17mm

c) 縮尺1/5のスタビライザー模型

図-7 にスタビライザー模型の概要図、表-5 に主な仕様を示す。模型の走行速度はウインチを用いて軌道模型上を 50～100mm/sec で走行させた。実際のスタビライザー作業中は水平方向の加振に加え、鉛直方向のプレロードを軌道に作用させている。スタビライザー模型では構造簡略化のため、鉛直方向のプレロードには水平成分の加振を含んでいないため、図-8 に示すように水平方向の加振と鉛直方向のプレロードを分けて軌道模型に作用させた。実際の作用状態と異なるが、その影響は不明である。スタビライザー模型の一軸あたりの鉛直方向のプレロードを模擬するため、スタビライザー模型の台車の総質量を 160kg（80kg/軸）に設定した。スタビライザー模型による軌道強制加振作業の手順は、総質量 160kg に調整したスタビライザー模型を無加振の状態では軌道模型上を走行させ、スタビライザー模型による水平方向に加振させながら軌道模型上を走行させ、最後に最初と同様にスタビライザー模型を無加振の状態では走行させた。スタビライザー模型の加振は、台車底部に電動モーターを設置し、ボールベアリングを用いた軸受を介して不平衡重錘を回転させ、軌間外側のレール模型側面にコイルばねを用いてボールベアリングを押し付け、スタビライザー模型の台車底部からの振動を軌道模型に作用させた。

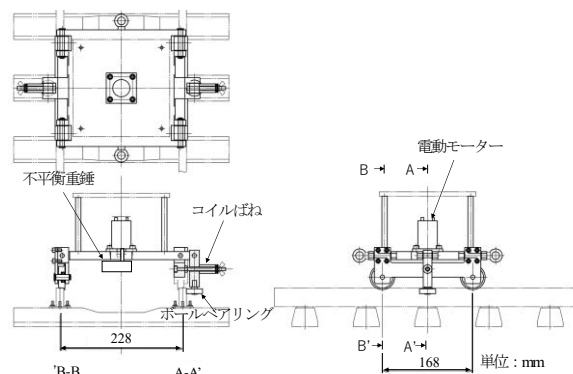


図-7 スタビライザー模型の概念図

表-5 スタビライザー模型の主な仕様

項目	実機	1/5 模型
加振周波数	35Hz	78Hz
鉛直荷重（動的）	50kN/輪重	0.8kN/軸
加振中のまくらぎ端部の変位（全振幅）	2.2mm	0.44mm（目安）
走行速度	400m/h	49.7mm/s

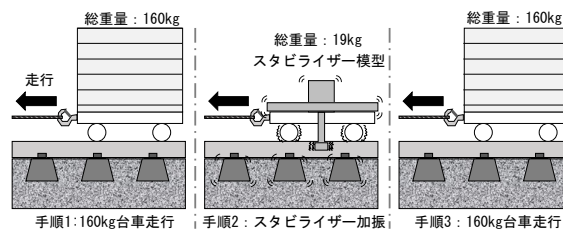


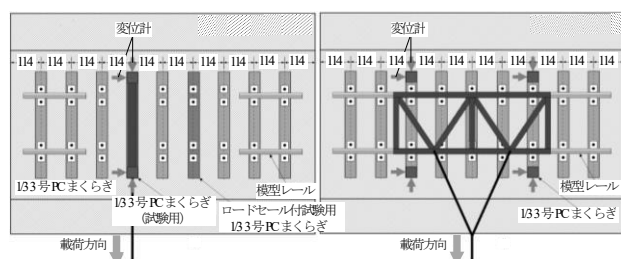
図-8 スタビライザー模型による加振作業の概念図

(2) 試験条件

試験ケースを表-6、模型試験の概要を図-9に示す。まくらぎ1本および軌きょうともに道床横抵抗力試験は載荷速度0.4mm/min、まくらぎ水平変位が10mmとなるまで実施した。試番①および試番⑤では、1/5模型を用いた道床横抵抗力試験の結果⁷⁾と比較するために実施した。試番②および試番⑥では、密度1.6g/cm³で道床厚36mmの軌道模型を構築後、MTT作業で軌道を4mm（実軌道：20mm）こう上して所定道床厚に仕上げて試験した。スタビライザー作業の走行速度が道床横抵抗力に及ぼす影響を確認するため、実際のスタビライザーの走行速度49.7mm/sec（実機：400m/h）および0.5倍の走行速度24.9mm/sec（実機：200m/h）で検討した。試番③および試番⑦では、MTT作業で軌道を4mmこう上し、走行速度1倍スタビライザー作業後に試験した。試番④および試番⑧では、上記と同様の手順でスタビライザー作業を走行速度0.5倍で実施後に試験した。各ケースの試験回数は1回であり、試験のばらつきの検討は別途必要である。測定項目はロードセル荷重、まくらぎ鉛直変位および水平変位である。小型模型試験の評価には、水平変位0.4mm時の荷重および水平変位5～10mmの荷重平均値を用いた。これは、まくらぎ1本の道床横抵抗力試験の場合、営業線における道床横抵抗力の管理指標であるまくらぎ変位2mm時の荷重に合わせ、まくらぎ模型の変位0.4mm時の荷重を用いた。また、既往の研究⁷⁾では、1/5模型のまくらぎ1本と軌きょうの道床横抵抗力試験を実施し、まくらぎ1本と軌きょうの道床横抵抗力には一定の相関関係があることが示されている。その評価には軌きょうのまくらぎ変位5～10mm（実軌道：25～50mm）

表-6 試験ケース

試番	条件	作業種別
①		作業なし（密度1.6g/cm ³ ）
②	まくらぎ1本引き	MTT作業
③	・3号PC模型 ・ロードセル付 まくらぎ模型	MTT作業+スタビライザー作業 （走行速度49.7mm/sec）
④		MTT作業+スタビライザー作業 （走行速度24.9mm/sec）
⑤	軌きょう引き	①と同様
⑥	・3号PC模型	②と同様
⑦	5本引き	③と同様
⑧		④と同様



(a) まくらぎ1本引き

(b) 軌きょう引き

図-9 軌道模型による道床横抵抗力試験

の荷重平均値を用いており、これを参考にした。

(3) 試験結果

a) まくらぎ1本の道床横抵抗力試験

まくらぎ1本の道床横抵抗力試験結果を図-10に示す。まくらぎ水平変位0.4mm時の道床横抵抗力は、MTT作業前32.3Nと比較してMTT作業後が31.5Nと低下した。MTT作業とスタビライザー作業後では、MTT作業後と比較して試番③が38.7Nと23%増加、試番④が37.5Nと19%増加した。まくらぎ水平変位5～10mm時の道床横抵抗力の平均値では、MTT作業前46.7Nと比較してMTT作業後が41.6N、MTT作業とスタビライザー作業後では、試番③が42.2N、試番④が55.2Nと0.4mm変位時と同様の傾向であった。

b) 軌きょうの道床横抵抗力試験

軌きょうの道床横抵抗力試験結果を図-11に示す。まくらぎ水平変位0.4mm時の道床横抵抗力は、MTT作業前158.7Nと比較してMTT作業後が132.3Nと低下した。MTT作業とスタビライザー作業後では、MTT作業後と比較して試番⑦が157.0Nと19%増加、試番⑧が181.7Nと37%増加した。3章の試験結果と同条件である試番⑦の結果から、どちらもスタビライザー作業によりMTT作業後の道床横抵抗力が約20%増加しており、模型試験でも同様の傾向を評価できている。まくらぎ水平変位5～10mm時の道床横抵抗力の平均値では、MTT作業前182.0Nと比較してMTT作業後が174.6Nと低下した。MTT作業とスタビライザー作業後では、MTT作業後と比較して試番⑦が176.6Nとわずかに増加し、試番⑧が199.9Nと15%増加した。ここで、実軌道のまくらぎ1本のまくらぎ変位2mm時の道床横抵抗力が最終道床横抵抗力の70～80%となる¹¹⁾。

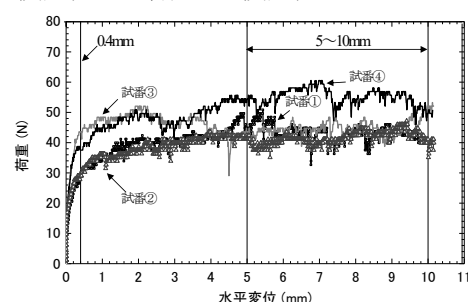


図-10 まくらぎ1本の道床横抵抗力試験結果

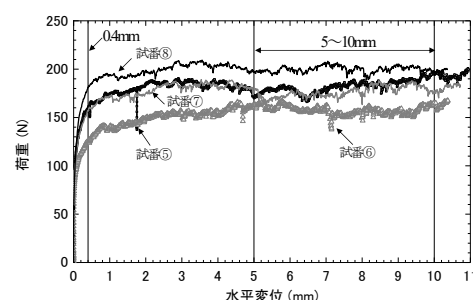


図-11 軌きょうの道床横抵抗力試験結果

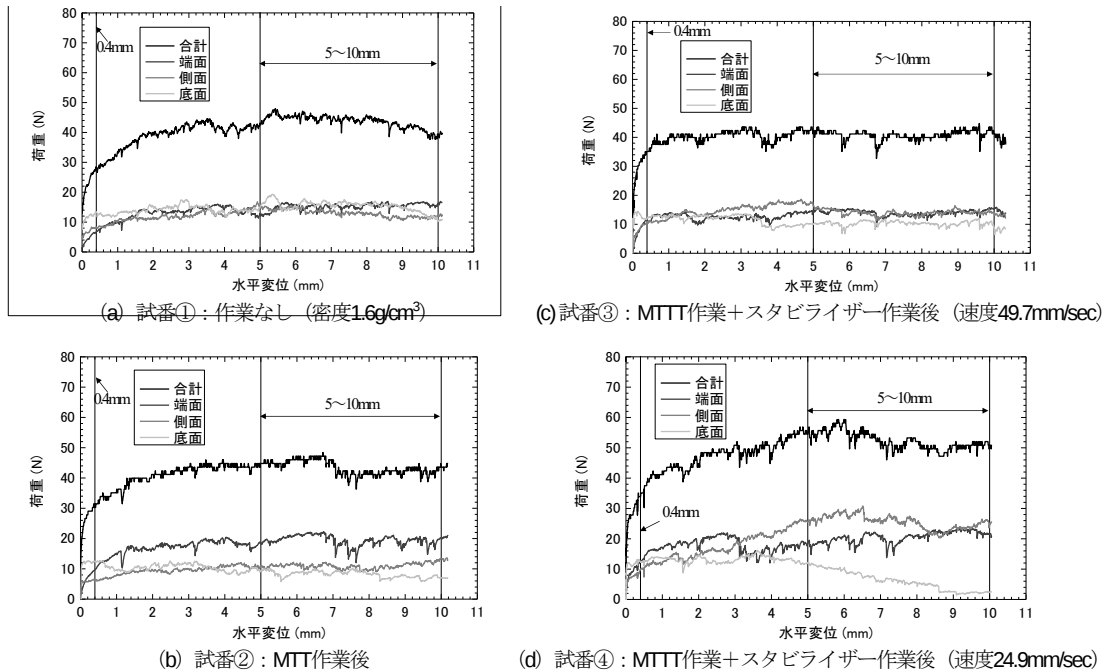


図-12 ロードセル付まくらぎ各面の道床横抵抗力試験結果

上記結果より、試験①69.1%，試験②75.7%，試験③91.9%，試験④68.0%であり、試験③以外は従来の知見と概ね同様であった。試験⑦はスタビライザーの効果で抵抗力が初期の段階から発揮されたものと推測される。

さらに、式 (5) ⁷⁾ から軌きょうの道床横抵抗力試験における隣接まくらぎの群杭効率 η を検討した。

$$\eta = 31.741(SW/SS)^2 - 72.216(SW/SS) + 100 \quad (5)$$

まくらぎ幅 $SW48\text{mm}$ ，まくらぎ間隔 $SS114\text{mm}$ における群杭効率は 0.752 となる。a)の試験（試験①～④）におけるまくらぎ水平変位 5～10mm の荷重平均値に対して群杭効果率を乗じて、軌きょうの群杭効果を考慮したまくらぎ 1 本あたりの最終道床横抵抗力を推定した。上記推定値と試験⑤～⑧の最終道床横抵抗力の比率は 0.89～1.0 の間にあり、概ね一致することを確認した。

以上より、MTT作業後にスタビライザー作業を実施することで、道床横抵抗力が増加することを確認した。

c) ロードセル付まくらぎの道床横抵抗力試験

ロードセル付まくらぎ各面の道床横抵抗力試験結果を図-12、まくらぎ各面の荷重と負担率を表-7、表-8 に示す。まくらぎ各面の荷重は、各面のロードセル荷重の合計値である。ここで、a)まくらぎ 1 本の道床横抵抗力試験と各面の抵抗力の合計は概ね同程度であり、本結果は信頼性が高いと考えられる。MTT 作業前（試験①）では、まくらぎ水平変位 0.4mm 時の道床横抵抗力は底面の負担率が 47%と高く、まくらぎ水平変位 5～10mm 時では各面の荷重は 13～15N であり、概ね 1/3 ずつ負担しており従来の知見通りであった¹⁾。MTT 作業後（試験②）では、まくらぎ水平変位 0.4mm 時の道床横抵抗力は試験

表-7 まくらぎ水平変位0.4mm時の各面の荷重と負担率

試験番	荷重 (N) (分担率)			
	合計	端面	側面	底面
①	28.34	6.80 (24%)	8.29 (29%)	13.25 (47%)
②	28.44	9.69 (34%)	6.32 (22%)	12.43 (44%)
③	34.57	11.57 (33%)	10.98 (32%)	12.02 (35%)
④	34.90	12.44 (36%)	9.93 (28%)	12.53 (36%)

表-8 まくらぎ水平変位5～10mm時の各面の荷重と負担率

試験番	荷重 (N) (分担率)			
	合計	端面	側面	底面
①	43.75	15.29 (35%)	12.99 (30%)	15.47 (35%)
②	38.61	19.44 (50%)	10.97 (28%)	8.20 (22%)
③	38.41	14.02 (37%)	14.06 (37%)	10.33 (26%)
④	52.27	20.55 (39%)	25.56 (49%)	6.16 (12%)

①と比較すると、まくらぎ端面の荷重が増加し、側面の荷重が低下した。まくらぎ水平変位 5～10mm 時では、底面の荷重がなだらかに低下し、端面および側面がそれぞれ増加してまくらぎ端面の負担率が 50%と高くなった。表-7 より、MTT 作業+スタビライザー作業後（試験③）は、まくらぎ底面、側面および端面の荷重は 11～12N となり、概ね 1/3 ずつの負担率となり、MTT 作業後に比べて側面、端面の負担力が増加した。表-8 より、まくらぎ変位 5～10mm では、まくらぎ底面の荷重がなだらかに低下し、まくらぎ端面およびまくらぎ側面の荷重は概ね一定で 14N 程度であり、MTT 作業後と比べてまくらぎ端面の荷重が 7 割程度に小さくなった。試験④では試験③と同様に、まくらぎ水平変位 0.4mm 時にまくらぎ底面、側面および端面の荷重が 10～12N 程度で概ね同一となった。まくらぎ変位 5～10mm では、まくらぎ底面が

6.2N と低下したが、まくらぎ端面が 20.6N となり、まくらぎ側面が 25.6N となり、試番③と比べてまくらぎ端面と側面は 2 倍程度大きくなった。まくらぎ底面の荷重の低下は、まくらぎ端部の抵抗力が増大していることから、水平変位とともに載荷方向と反対側のまくらぎ端部が鉛直方向に上昇したことによるものと考えられる。

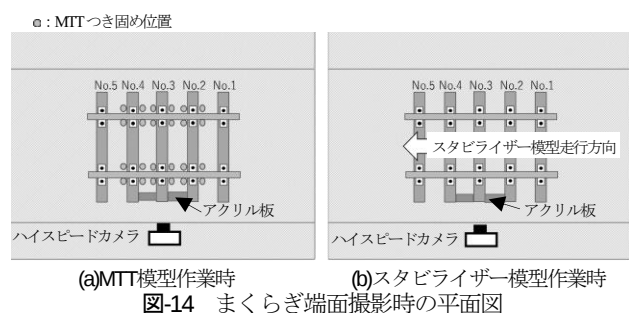
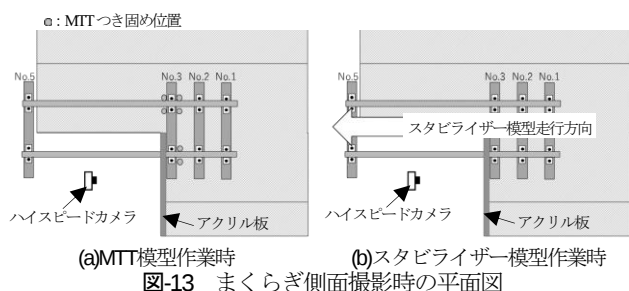
以上より、まくらぎ変位 0.4mm 時では、MIT 後にまくらぎ側面の抵抗力が低下し、スタビライザー作業によりまくらぎ側面の抵抗力が増加することがわかった。

5. 画像解析

本章では、画像解析により各作業時のバラスト粒子挙動を直接観察することで道床横抵抗力が向上するメカニズムを検証した。

(1) 画像解析の概要

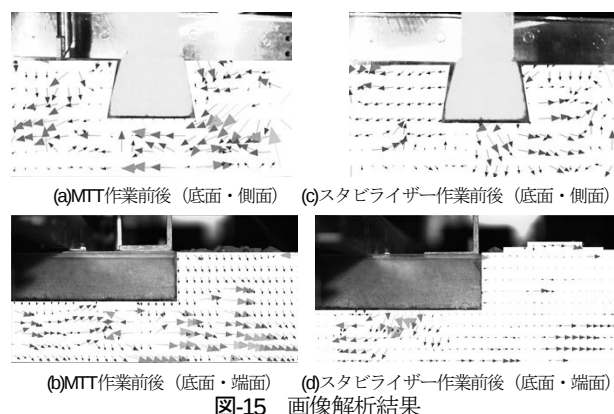
解析画像はハイスピードカメラを用いて、MIT 模型作業時とスタビライザー模型作業時にまくらぎ側面とまくらぎ端面の各断面にアクリル板を設置し、撮影した。ハイスピードカメラは nac Image Technology Inc. 製のマルチヘッドハイスピードカメラ(M-CamMFT)を使用した。撮影条件は撮影速度 250fps、最大撮影時間 30s、解像度 1280 (水平) × 1024 (垂直) pixel である。各模型作業時のまくらぎ側面撮影時の平面図を図-13、各模型作業時のまくらぎ端面撮影時の平面図を図-14 に示す。軌きょう右手からまくらぎ番号を付け、軌きょうの中間にあたるまくらぎ No.3 に対して撮影した。まくらぎ端面からの撮影方法は、まくらぎ No.2~4 の順番でつき固め作業を実施し、その時のまくらぎ No.3 と周辺のバラスト粒子の挙動を撮影した。スタビライザー模型加振時は、MIT



作業後の軌きょうを用いてまくらぎ No.1~5 まで順に、スタビライザー模型を 100mm/sec でレール上を走行させ、まくらぎ No.3 と周辺のバラスト粒子の挙動を撮影した。まくらぎ側面からの撮影方法は、MIT 作業時はまくらぎ No.3 のつき固め時にまくらぎと周辺のバラスト粒子の挙動を撮影し、スタビライザー模型加振時はまくらぎ端面と同じ条件でまくらぎと周辺のバラスト粒子の挙動を撮影した。画像解析は文献⁹⁾を参考に、MIT 模型作業では作業前後の画像を、スタビライザー模型加振時は測定対象まくらぎ上の通過前後の画像を用いて、画像解析ソフトにより直接相互相関法による PIV 解析で変位増分ベクトルを求めた。

(2) 画像解析の結果

画像解析結果を図-15 に示す。ベクトルの大きさ、濃淡でバラスト粒子挙動を相対的に確認する。ベクトルが大きい箇所はバラストがよく動き、濃淡が薄いほど変位量大きい。まくらぎ No.3 における MIT 作業前後の変位ベクトル(図-15(a), (b))から、MIT 作業でまくらぎ底面より深い位置のバラストおよび側面に近いバラストが大きく移動していた。また、つき固め前後でまくらぎ端部と接触するバラストの移動はわずかであった。ここで、ロードセル付まくらぎの結果より、MIT 作業前の抵抗力と比較し、まくらぎ底面の抵抗力はほとんど変化がなく、まくらぎ端面の抵抗力が増加し、まくらぎ側面の抵抗力は低下した。これは、まくらぎ底面の抵抗力は軌道こう上により低下するが、MIT 作業でまくらぎ下のバラストがつき固められてまくらぎ底面とバラストが接触して抵抗力が回復し、まくらぎ側面の抵抗力は MIT 作業によりバラストが乱されることで低下したと考えられる。まくらぎ端面の抵抗力は、MIT 作業によるバラストの移動がわずかであったが、まくらぎ底面と側面で移動したバラストを拘束することで、まくらぎ端面のバラストが締め固められて抵抗力がやや増加したと考えられる。以上より、まくらぎ底面および端面の抵抗力は MIT 作業前後で変化が小さく、まくらぎ側面の抵抗力が低下することで道床横抵抗力が低下したと考えら



れる。

つぎに、スタビライザー模型前後のレール長手方向の変位ベクトル（図-15 (c)）より、まくらぎ下のタンピングツールの挿入箇所のバラストが沈下しており、まくらぎ端部および中央部のバラストはまくらぎ長手方向に水平移動している。一方、まくらぎ端部のバラストはほとんど移動していない。スタビライザー作業前後のまくらぎ長手方向の変位ベクトル（図-15 (d)）より、まくらぎ下のバラストが沈下し、まくらぎ側面のバラストは水平方向に移動している。ここで、ロードセル付まくらぎの結果より、MTT 作業後と比べてスタビライザー作業によりまくらぎ底面の抵抗力はほとんど変化がないものの、端面の抵抗力は 19%増加し、まくらぎ側面の抵抗力が 74%増加した。画像解析の結果より、スタビライザー作業でまくらぎ底面のバラストが沈下することから、バラストが締め固められるものの、まくらぎとバラストの摩擦は変化しないと考えられる。まくらぎ側面のバラストは水平方向に移動することで締め固められることで側面の抵抗力が増加した。まくらぎ端面のバラストはスタビライザー作業でわずかに移動することで、まくらぎ変位が小さい領域で端面の抵抗力が増加したと考えられる。

6. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 実軌道および小型模型を用いた道床横抵抗力試験結果より、MTT 作業後に比べてスタビライザー作業後の道床横抵抗力はまくらぎ変位 2mm 時で約 20%増加し、スタビライザー作業速度を 0.5 倍にした場合、道床横抵抗力がさらに増加した。
- 2) ロードセル付まくらぎの道床横抵抗力試験および画像解析より、スタビライザー作業による道床横抵抗力はまくらぎ側面の抵抗力がバラスト再配列によりバラストが締め固められることで増加し、端面の抵抗力も同様の影響で微増した。これは、極

限釣り合い法を用いた理論式による仮説と概ね整合しており、理論式でバラスト保守作業の影響を考慮した道床横抵抗力を推定できる見通しを得た。

謝辞：本研究の模型試験および画像解析は、（公財）鉄道総合技術研究所軌道技術研究部軌道・路盤研究室に多大なるご協力を得た。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 保線工学編集委員会編：保線工学（下），pp.312-328, 2018.
- 2) Gerhard Kaess : Erfahrungen und Ergebnisse aus dem Einsatz des dynamischen Gleisstabilisators, ETR, p.663, 1987.
- 3) 太田普一，清末敦博：夏期保守作業制限の見直しに伴う検討，新線路，Vol.72, No.2, 2018.
- 4) Florian Auer : Der Dynamische Gleisstabilisator auf Schiene, ETR, pp.48-51, 2019.
- 5) 市川拓真，早野公敏，中村貴久，桃谷尚嗣，小池陽平：極限釣り合い法を用いた鉄道バラスト軌道の道床横抵抗力の推定，土木学会論文集 E1（舗装工学），Vol.72, No.3(舗装工学論文集第 19 巻)，2014.
- 6) 関根悦夫，中村貴久，平尾博樹：バラスト軌道の道床横抵抗力に関する模型試験，第 65 回土木学会年次学術講演会，IV-237, pp.473-474, 2010.
- 7) 小山詠美梨，高橋龍太郎，早野公敏，伊藤孝記，桃谷尚嗣：「群杭効果」がバラスト軌道の道床横抵抗力に及ぼす影響，第 54 回地盤工学会研究発表会，2019.
- 8) 香川崇章：土構造物の模型振動実験における相似則，土木学会論文集，第 275 号，pp.69-77, 1978.
- 9) 中村貴久，桃谷尚嗣，石川達也，早野公敏：バラスト軌道における座屈対策工の地震時道床横抵抗力に関する研究，土木学会論文集 E1（舗装工学），75 巻第 1 号，p.41-52, 2019.
- 10) 吉川秀平，中村貴久，桃谷尚嗣，牛田貴士，佐名川太亮，西岡英俊：構造物・軌道一体型模型を用いた大型振動台実験による連成挙動の検討，日本地震工学論文集，19 巻第 5 号，pp.334-344, 2019.
- 11) 公益財団法人鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造，丸善，2012.

(2020.4.3 受付)

STUDY ON THE EFFECT OF BALLAST MAINTENANCE WORK ON THE LATERAL BALLAST RESISTANCE FORCE

Shuhei KIKKAWA, Yoshihiko YABUNAKA and Kenichi TAKAO

In order to improve the labor productivity of the track maintenance work, relaxation of the summer maintenance work restriction of MTT work is effective for leveling the work. The measure is to increase the lateral ballast resistance force by dynamic track stabilization after ballast tamping by MTT. There , the ballast particles within the standard grain size were subjected to test a lateral ballast resistance force using a full scale track and a 1/5 scale track model, and the behavior of the ballast particles was confirmed by image analysis. As a result, the influence of the ballast maintenance work on the lateral ballast resistance force was confirmed.