

# 論文 道床つき固めおよび安定作業時の 道床横抵抗力の変化要因の検討

早川 容平<sup>1</sup>・中村 貴久<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 正会員 公益財団法人 鉄道総合技術研究所(〒185- 8540 東京都国分寺市光町二丁目 8-38)  
E-mail: hayakawa.yohei.11@rtri.or.jp

<sup>2</sup> 正会員 公益財団法人 鉄道総合技術研究所(〒185- 8540 東京都国分寺市光町二丁目 8-38)  
E-mail: takahisa.nakamura.19@rtri.or.jp (Corresponding Author)

バラスト軌道はつき固め作業を実施することで、道床バラストが弛緩され、道床横抵抗力が低下することが経験的に知られている。そのため、一部の事業者では道床弛緩作業の夏期制限を設けており、工事の平準化を妨げている。一方で、つき固め作業により低下した道床横抵抗力はスタビライザによる道床安定作業により回復することがわかっている。しかし、これらの作業による道床横抵抗力の変化要因については、十分な検討が行われておらず未解明な点が多い。本研究では、1/5 縮尺の小型模型試験により各作業後のまくらぎ各面の負担する道床横抵抗力特性を評価した。また、各作業時のまくらぎ各面に作用する垂直応力を測定するとともに、PIV 解析によりバラスト変形挙動の検討を行い、道床横抵抗力特性との関係性を明らかにすることで、その変化要因を検討した。

**Key Words:** ballasted track, lateral resistance force, dynamic track stabilizer, multiple tie tamper, image analysis

## 1. はじめに

バラスト軌道には、軌きょう状態のレールが温度上昇による伸長を拘束されることで生じる軸力により、軌きょうを横方向に変位させようとする荷重が作用する。これに対してまくらぎ周辺のバラストが抵抗力(以下、道床横抵抗力という)を発揮し、座屈に対する水平安定性を確保している。一般に道床横抵抗力は、1 本あるいは複数のまくらぎを水平に載荷して載荷荷重とまくらぎ変位を測定する道床横抵抗力試験により評価される。

バラスト軌道においては、タイタンパを用いたつき固め保守作業(以下、つき固め作業という)によりバラストが弛緩されて道床横抵抗力が低下し、座屈安定性が低下することから、レール温度が上昇する夏期において、一部の鉄道事業者では道床弛緩作業の制限を設けている。一方、つき固め作業により低下した道床横抵抗力は、道床安定作業車(以下、スタビライザという)を用いた道床安定作業により回復することがわかっている<sup>1)</sup>ことから、これによる保守作業制限の緩和が期待されている。

つき固め作業および道床安定作業後の道床横抵抗力特性については、基地線における実物大試験によりその検証が行われている<sup>2)</sup>。この検証では、各作業後に対する

道床横抵抗力試験を実施し、新品バラストの場合に、まくらぎ変位 2 mm 時の道床横抵抗力が、つき固め作業後に道床安定作業を実施することで3割程度増加し、最終道床横抵抗力では1割程度増加することが示されている。しかし、これらの作業により道床横抵抗力が変化する要因についてはこれまでに十分な検討がされておらず、未解明な点が多い。

そこで本研究では、つき固め作業および道床安定作業を行う保守用重機械として、マルチプルタイタンパ(以下、マルタイという)およびスタビライザを模擬した 1/5 縮尺の小型模型を製作し、小型模型試験により道床横抵抗力の変化要因を検討した。検討に際しては、まず道床横抵抗力試験により各作業後のまくらぎ各面の負担する道床横抵抗力特性を評価した。さらに、各作業時におけるまくらぎ各面に作用する垂直応力を測定するとともに、まくらぎ周辺のバラストを高速度カメラを用いて撮影し、その変形挙動を画像解析を行うことで把握することで、道床横抵抗力特性との関係性を明らかにし、その変化要因を検討した。

## 2. 保守用重機械の1/5 縮尺模型

### (1) マルタイ模型

マルタイ模型の製作にあたっては、ブラッサー&トイラー社製 09-16D マルタイのタンピングユニットを参考にし、タンピングツールの道床挿入深さ、タンピングツールの変位振幅、タンピングアームの寸法(長さ)、スクイズ量、タンピングユニットの質量について相似則<sup>3)</sup>を考慮した縮尺1/5の構造とした(図-1)。タンピングツールの振動機構は、実機と同様に電動モーターの回転軸に取り付けた偏心シャフトにより、その偏心量相当分の変位振幅をタンピングアームおよびタンピングツールに強制的に生じさせる方法とした。また、タンピングユニットの昇降はハンドルの上下動作、スクイズ作業はレバーの前後動作による手動制御とした。さらに、タンピングユニットの振動が軌きょうに伝達することによる道床沈下を防止するため、軌きょうとは独立した車輪を有しない吊り下げ構造とした(図-2)。

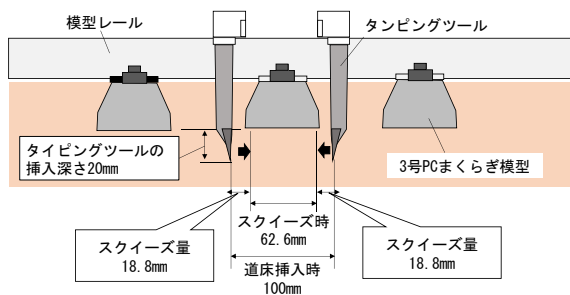


図-1 タンピングユニットの寸法

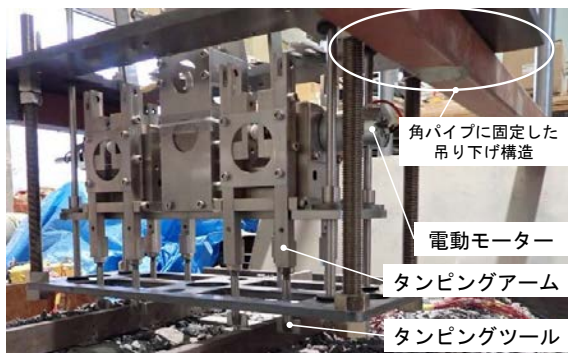


図-2 マルタイ模型の外観

### (2) スタビライザ模型

スタビライザ模型の製作にあたっては、ブラッサー&トイラー社製 DTS62N および 09-16D マルタイ搭載スタビライザの加振ユニットを参考に、車輪軸間距離、偏心重錘の質量、偏心重錘の偏心量、鉛直荷重(プレロード)について相似則を考慮した構造とした(図-3)。加振機構については、実機と同様に一對の偏心重錘を上下に配置し、電動モーターの回転軸に取り付けたギアを介してそれぞ

れの偏心重錘を逆方向に同期させて回転させることで、まくらぎ長手方向のみの水平振動を生じさせる機構とした(図-4)。振動は前後の車輪フランジ(左右車輪間距離可変式)により軌間内側から、前後車輪間中心位置に設けたベアリングローラにより軌間外側からレールを拘束し軌きょうに伝達させている(図-5)。また、作業時に左右の油圧シリンダにより軌道に作用させる鉛直荷重はおもりを積載することで再現し、最大で実機のシリンダ油圧6MPa(片レールあたりの作用荷重47.1kN)相当に対応可能とした。さらに、加振作業時におもりによる慣性力が起振力に影響を与えないよう、おもり積載部と起振部の間に振動方向のリニアガイドを設けた。

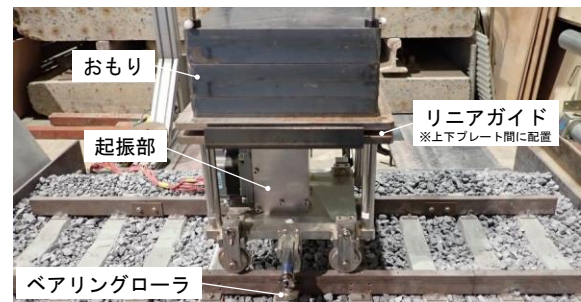


図-3 スタビライザ模型の外観

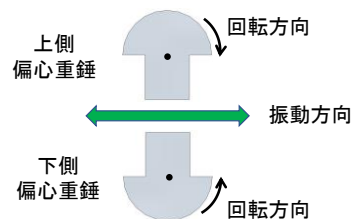


図-4 スタビライザ模型の加振機構

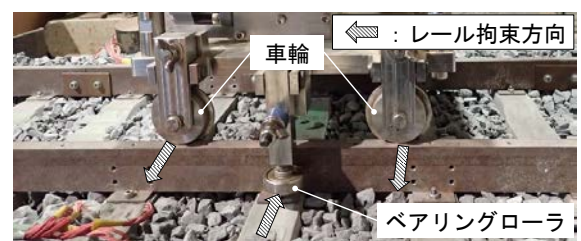


図-5 レールの拘束方法

## 3. 1/5 縮尺の道床横抵抗力試験

### (1) 模型試験の条件

つき固め作業後および道床安定作業後の道床横抵抗力特性を把握するため、1/5 縮尺の軌道模型を用いてまくらぎ1本の水平載荷試験(以下、1本引き試験という)およびまくらぎ5本の水平載荷試験(以下、軌きょう引き試験という)を行った。試験に用いた1本引き試験用の軌道模

型の配置を図-6に示す。軌道模型は1/5縮尺の3号PCまくらぎ模型9本をまくらぎ間隔114mmで配置した。道床バラストは新品バラストとし、実際の道床バラストの基準粒度<sup>9)</sup>に対して1/5相似粒度の範囲内にある単粒度碎石6号を用いて密度1.6g/cm<sup>3</sup>に締め固め構築した。

試験ケースは表-1に示す通り、1本引き試験および軌きょう引き試験を、つき固め作業および道床安定作業のいずれも行わない作業なしの場合(case1およびcase4)、つき固め作業を行った場合(case2およびcase5)、つき固め作業後に道床安定作業を行った場合(case3およびcase6)の合計6ケースとした。作業なしの試験ケースでは、軌道模型を道床厚40mmで構築し、それ以外の試験ケースでは、中央のまくらぎ5本分の道床厚を36mmで構築したのち、模型用ジャッキを用いて4mmこう上させ、つき固め作業により道床厚40mmとなるようにした。

つき固め作業は、マルタイ模型を用いて中央のまくらぎ5本分に対して行った。タンピングツールの振動周波数は、実機の標準的な周波数である35Hzに対して相似則を考慮し、√5倍した78Hzとした。つき固め作業時のスクイーズ時間は、実機のおおよその1.0sに対して相似則を考慮し、1/√5倍した0.45s程度を目安とした。

道床安定作業は、つき固め作業を行ったのち、スタビライザ模型を用いて軌道模型の両端間を走行させながら加振した。加振周波数は、実機の標準的な周波数である35Hzに対して相似則を考慮し、√5倍した78Hzとした。作業時に軌道に作用させる鉛直荷重は実機のシリンダー油圧4MPa(片レールあたりの作用荷重314kN)に対して1/5倍に相当する重量のおもりを50kgf積載した。また、走行速度は実機の0.4km/hに対して1/√5倍した50mm/sとし、巻き取り機を用いて一定速度で牽引した。

1本引き試験は、各試験ケースに対して3号PCまくらぎ模型による道床横抵抗力特性を評価した。さらに、3号PCまくらぎの形状を模擬した、まくらぎの各面にロードセルを内蔵した模型まくらぎにより、道床横抵抗力(R)に対して、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し、各面の荷重分担を評価した(図-7)。また、載荷速度は0.4mm/minとし、水平変

位10mmまで載荷した。ここで、鉄道構造物等設計標準(軌道構造)<sup>9)</sup>では、軌きょうの道床横抵抗力試験において、まくらぎ変位の増加に伴い一定となった荷重を最終道床横抵抗力としている。また、実軌道における道床横抵抗力試験では、1本引き試験のまくらぎ変位2mm時の荷重を軌きょう引きの最終道床横抵抗力として評価している。そこで本試験においては、まくらぎ水平変位0.4mm(実スケール2mm)時の荷重(以下、0.4mm時の道床横抵抗力)および水平変位4~6mm(実スケール20~30mm)時の平均荷重(以下、最終道床横抵抗力)により道床横抵抗力特性を評価した。道床横抵抗力とまくらぎ各面の負担力の関係を式(1)に示す。

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

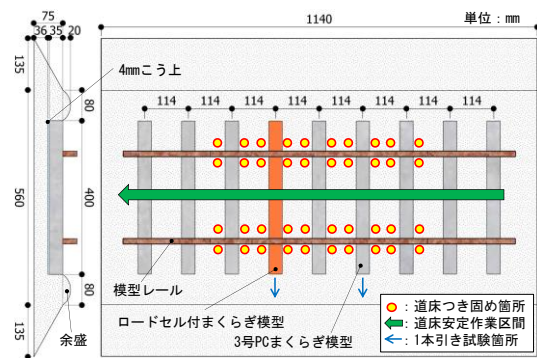


図-6 1本引き試験用軌道模型

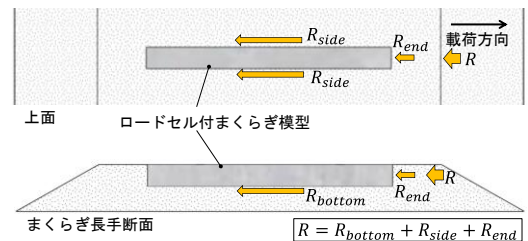


図-7 ロードセルまくらぎ模型の荷重測定方向

表-1 道床横抵抗力試験の試験ケース

試験ケース	道床条件	水平載荷の種類	作業種別
1	・新品 ・密度 1.6g/cm <sup>3</sup>	1本引き	作業なし
2			つき固め
3			つき固め +安定作業
4		軌きょう引き (5本引き)	作業なし
5			つき固め
6			つき固め +安定作業

(2) 道床横抵抗力特性の評価

図-8に3号PCまくらぎ模型の1本引き試験の荷重-変位関係を示す。0.4mm時の道床横抵抗力は、つき固め作業後(case2)に対して、道床安定作業(case3)を行うことで24%増加した。また、最終道床横抵抗力は、つき固め作業後(case2)に対して、道床安定作業(case3)を行うことで6%増加した。いずれも実物大試験結果<sup>2)</sup>と概ね同様の傾向となり、つき固め作業後に道床安定作業を行うことで道床横抵抗力が増加することがわかった。

ロードセル付きまくらぎの1本引き試験の結果を図-9~図-11に示す。図-9に作業なし(case1)の荷重-変位関係を示す。0.4mm時の道床横抵抗力は、底面の負担率が端面および側面よりもやや高く43%であったが、最終道床横抵抗力では各面の負担率が概ね1/3ずつとなり、既往の研究<sup>9)</sup>と同様の傾向となった。

図-10 につき固め作業後(case2)の荷重-変位関係を示す。0.4 mm 時の道床横抵抗力は、作業なし(case1)と比較して、側面の負担率が24%とやや低下し、端面の負担率に変化はなく、底面が48%とやや高かった。最終道床横抵抗力も、作業なし(case1)に比べて、側面の負担率が26%とやや低下し、端面の負担率にほとんど変化はなく、底面の負担率は40%とやや高かった。

図-11 につき固め作業後に道床安定作業を行った場合(case3)の荷重-変位関係を示す。0.4 mm 時の道床横抵抗力は、つき固め作業後(case2)と比較して、側面および端面の負担力が2倍以上に増加して端面の負担率が増加したのに対し、底面の負担力および負担率は低下したものの、道床横抵抗力は46%増加した。また、最終道床横抵抗力は、つき固め作業後(case2)と比較して18%増加しており、底面の負担力が低く、側面と端面の負担力が同程度に高かった。

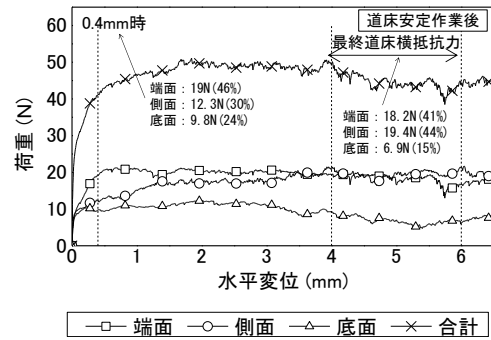


図-11 1本引き試験結果(ロードセル付きまくらぎ\_case3)

#### 4. まくらぎ各面に作用する垂直応力測定試験

##### (1) 模型試験の条件

つき固め作業前後および道床安定作業前後のまくらぎ各面に作用する垂直応力を検討するため、縮尺 1/5 の小型模型による測定試験を行った(図-12)。試験に用いた小型模型は、3(1)に示したつき固めおよび道床安定作業を行う場合の軌道模型と同様の方法で構築した。軌きょう中央には、3号 PC まくらぎの形状を模擬したまくらぎの各面(端面、側面、底面)に圧縮型のロードセルを内蔵した模型まくらぎ(以下、圧縮型ロードセル付きまくらぎ)を配置し、各作業後におけるまくらぎ各面に作用する圧縮力を測定した。つき固め作業および道床安定作業は、道床横抵抗力試験の際と同様の方法で実施した。なお、スタビライザ模型の走行速度は 50 mm/s とした。測定のタイミングは、軌道模型構築時の作業前(case1)、つき固め作業の前後(case2)および道床安定作業の前後(case3)とした。測定結果は模型構築前の無負荷の状態を初期値とし、圧縮力をまくらぎの各面の面積で除した垂直応力で整理した。

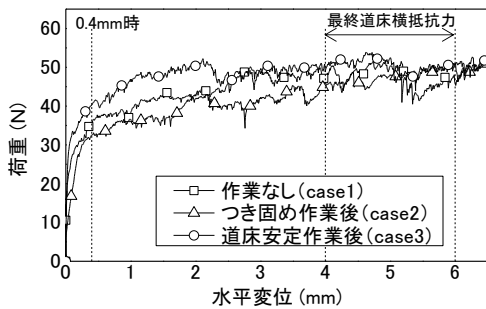


図-8 1本引き試験結果(PC 号まくらぎ模型)

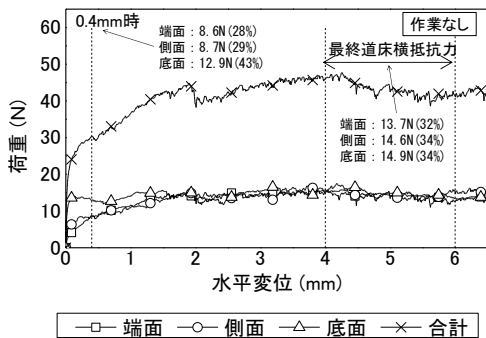


図-9 1本引き試験結果(ロードセル付きまくらぎ\_case1)

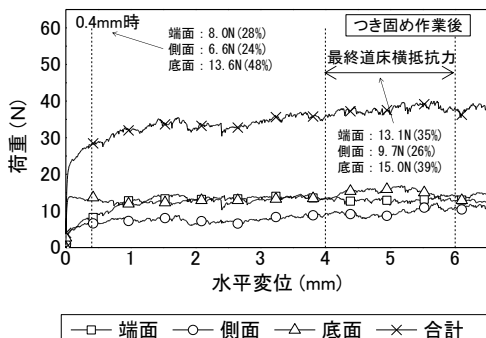


図-10 1本引き試験結果(ロードセル付きまくらぎ\_case2)

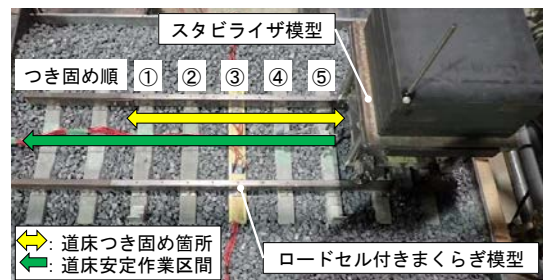


図-12 まくらぎ各面の応力測定試験の状況

##### (2) まくらぎ各面に作用する垂直応力の評価

既往の研究<sup>7)</sup>では、前述の式(1)より道床横抵抗力を算出する方法が提案されており、PCまくらぎの1/5縮尺模型の最終道床横抵抗力を推定できることが示されている。本算出方法における計算値と本試験の最終道床横抵抗力を比較すると、PCまくらぎの試験結果47.6Nおよびロードセル付きまくらぎの試験結果47.5Nに対して参考文

献 7)を参考に式(1)より求めた計算値は 44.0 Nであり、概ね同程度であった。本推定式では、まくらぎに作用するバラストの垂直応力に摩擦等を考慮して道床横抵抗力を算出している。以下では、式(2)~式(4)を用いて求めたまくらぎ各面に作用するバラストによる垂直応力の計算値と、軌きょうの中央に設置した圧縮型ロードセル付きまくらぎで各作業前後に測定した垂直応力を比較した。

$$\sigma_{side} = \frac{1}{2} K_0 \times \rho_d \times l \times h^2 \times \frac{1}{S_{side}} \quad (2)$$

ここで、 $\sigma_{side}$ :まくらぎ側面の垂直応力、 $K_0$ :静止土圧係数、 $\rho_d$ :バラストの密度、 $l$ :まくらぎ長さ、 $h$ :まくらぎ高さ、 $S_{side}$ :まくらぎ側面積

$$\sigma_{end} = (1 - \sin\phi) \times \rho_d \times h \quad (3)$$

ここで、 $\sigma_{end}$ :まくらぎ端面の垂直応力、 $\phi$ :内部摩擦角

$$\sigma_{bottom} = W_{bottom} \times \frac{1}{S_{bottom}} \quad (4)$$

ここで、 $\sigma_{bottom}$ :まくらぎ側面の垂直応力、 $W_{bottom}$ :まくらぎおよびレール重量、 $S_{bottom}$ :まくらぎ底面積

図-13 にまくらぎ各面に作用する垂直応力を測定した結果を示す。側面に作用する垂直応力については、軌道模型構築後の作業前(case1)における垂直応力は 424 Pa であった。ここで、参考文献 7)の内部摩擦角( $\phi=55$ 度)を用いて Jaky の式から静止土圧係数( $K'_0=1 - \sin\phi$ )を設定して、式(2)より求めた計算値は 420 Pa であり、試験結果と同程度であった。また、つき固め作業後(case2)の垂直応力は 296 Pa となり、作業前(case1)と比較して垂直応力が 0.7倍程度に低下したものの、道床安定作業後(case3)は 536 Pa となり、作業前(case1)の 1.3倍程度に増加した。したがって、つき固め作業によりまくらぎ側面に作用する垂直応力が低下したことで道床横抵抗力が低下し、道床安定作業によりまくらぎ周辺のバラストが締め固まり、まくらぎ側面に作用する垂直応力が増加することで道床横抵抗力が増加したと考えられる。

まくらぎ端面に作用する垂直応力について、軌道模型

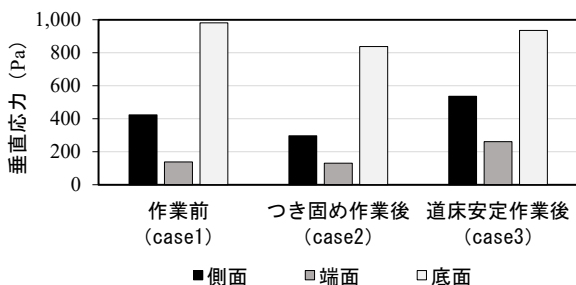


図-13 まくらぎ各面の垂直応力測定結果

構築後の作業前(case1)における端面の垂直応力は 138 Pa であった。一方、参考文献 7)の内部摩擦角を用いて式(3)より求めた計算値は 100 Pa 程度であり、測定値の方がやや大きくなった。つき固め作業後(case2)は 131 Pa であり、作業前(case1)と比較してほぼ変化がなかった。それに対し道床安定作業後(case3)は 262 Pa となり、作業前(case1)と比較して1.9倍に増加したことから、まくらぎ端面に作用する垂直応力の増加によっても載荷初期における道床横抵抗力が増加したと考えられる。

まくらぎ底面に作用する垂直応力について、軌道模型構築後の作業前(case1)における底面の垂直応力が 981 Pa、レールの自重(まくらぎ 1本あたりの質量 547 g)およびまくらぎの自重(質量 1288 g)から式(4)より求めた計算値が 880 Pa 程度であった。まくらぎ底面に作用する垂直応力は、まくらぎの支持状態が均一であれば作業の有無によらず変化は生じないと言えるが、計算値よりやや高くなった要因として、レールに締結された軌きょう状態で測定したため、隣接まくらぎの支持状態の影響を受けた可能性が考えられる。つき固め作業後(case2)は 838 Pa となり、隣接まくらぎの支持状態が均一化し、作業前(case1)と比較して、レールおよびまくらぎ自重のみの垂直応力に相当する値になったと考えられる。また、道床安定作業後(case3)には 935 Pa となったが、これは隣接まくらぎ間の沈下量に差が生じることで、まくらぎの支持状態が不均一となったことが影響した可能性が考えられる。まくらぎ底面の道床横抵抗力は、まくらぎおよびレールの自重に支配されるため、隣接まくらぎの支持状態の影響を受けない1本引き試験では、つき固め作業および道床安定作業が、まくらぎ底面が負担する道床横抵抗力に与える影響は小さいと考えられる。

## 5. バラスト変形挙動の画像解析

### (1) 高速度カメラによる撮影試験の方法

つき固め作業時および道床安定作業時におけるバラスト粒子の挙動を PIV(Particle Imaging Velocimetry:粒子画像流速測定法)による画像解析で可視化することを目的とし、縮尺 1/5の小型模型による撮影試験を実施した。

つき固め作業についてはマルチモデル、道床安定作業についてはスタビライザモデルを用いた。撮影は高速度カメラを用いて、表-2 に示す試験ケースに対して、つき固め作業時と道床安定作業時におけるレール長手方向およびレール直角方向の各断面を撮影した。レール長手方向断面についてはレール直下の位置に、レール直角方向断面についてはまくらぎ直下の位置に透明のアクリルボードを設置した。また、上記の試験ケースに加えて、道床安定作業時の道床上面のバラスト変形挙動についても

表-2 撮影試験の試験ケース

試験 case	作業 種別	撮影断面	作業条件
case1	つき固め	レール長手方向	3本つき固め
case2		レール直角方向	3本つき固め
case3	安定作業	レール長手方向	走行速度 50mm/s
case4		レール直角方向	走行速度 50mm/s

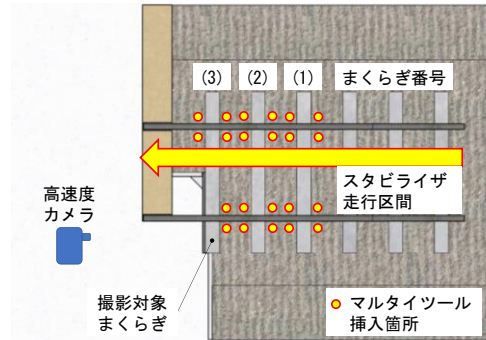


図-16 レール直角方向断面撮影時の平面図

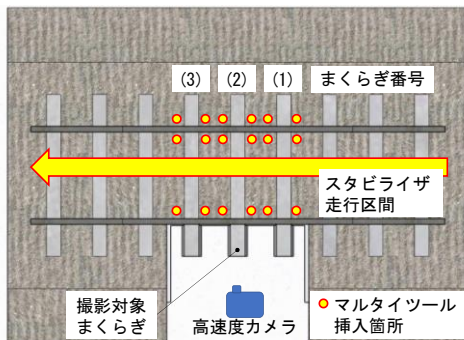


図-14 レール長手方向断面撮影時の平面図

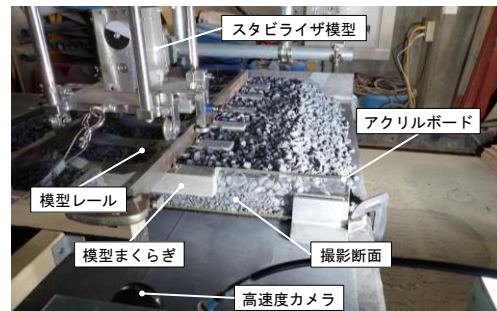


図-17 レール直角方向断面撮影時の状況

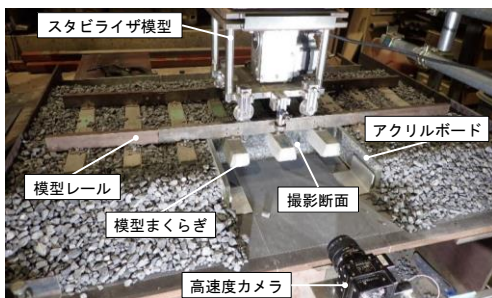


図-15 レール長手方向断面撮影時の状況

つき固め作業および道床安定作業時のレール直角方向断面の撮影(case2 および case4)時の配置を図-16 に示す。つき固め作業は、まくらぎ6本の軌道模型を用いて、軌きょう左端にあたるまくらぎ(3)に対して撮影を行った。つき固め作業は、まくらぎ(1)→(2)→(3)の順に実施し、その時のまくらぎ(3)と周辺のバラスト粒子の挙動を撮影した。道床安定作業は、case2 のつき固め作業後の軌道模型に対して、スタビライザ模型を速度 50 mm/s で走行させながら加振し、その時のまくらぎ(3)と周辺のバラスト粒子の挙動を撮影した。撮影状況を図-17 に示す。

撮影した。撮影条件は、撮影速度 100fps、解像度 1920×1080 pixel とし、各作業前後の2枚の画像を用いて、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。

つき固め作業および道床安定作業時のレール長手方向断面の撮影(case1 および case3)時の配置を図-14 に示す。つき固め作業は、まくらぎ9本の軌道模型を用いて、中央のまくらぎ3本に対して軌きょうの中央にあたるまくらぎ(2)の撮影を行った。つき固め作業は、まくらぎ(1)→(2)→(3)の順に実施し、その時のまくらぎ(2)と周辺のバラスト粒子の挙動を撮影した。道床安定作業は、つき固め作業後のまくらぎ9本の軌道模型を用いて、スタビライザ模型を速度 50 mm/s でレール上を走行させながら道床を加振し、その時の中央まくらぎと周辺のバラスト粒子の挙動を撮影した。撮影状況を図-15 に示す。

## (2) 画像解析結果

図-18 につき固め作業時のレール長手方向断面の画像解析結果(case1)を示す。軌道こう上によってまくらぎ下に生じた 4mm の空隙に対し、つき固め作業によりまくらぎ側面からのバラストが 3mm 以上移動してまくらぎ下に押し込まれ、まくらぎ底面とバラストが接触している状況を確認した。隣接まくらぎのつき固め時に、まくらぎ側面のバラストが中央まくらぎ側に移動し、まくらぎ下の隙間にバラストが押し込まれていた。まくらぎ側面では、タンピングツールがまくらぎ下に挿入されてスクイズする際に、バラストが乱されながらまくらぎ下に移動することで、まくらぎ側面に作用する垂直応力が低下し、道床横抵抗力も低下したと考えられる。

図-19 につき固め作業時のレール直角方向断面の画像解析結果(case2)を示す。タンピングツール挿入箇所で、

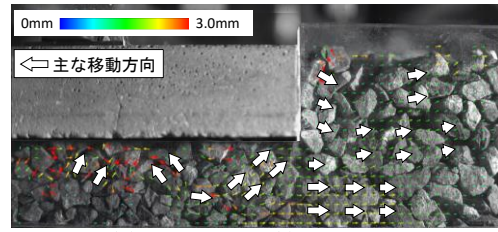
スクイズ作業により側面側から底面にバラストが押し込まれ、まくらぎ底面のバラストが 3 mm 以上上方に移動した。また、軌道こう上時に生じたまくらぎ下の空隙に、タンピングツール挿入位置以外でもバラストが突き込まれ、まくらぎ底面とバラストが全体的に接触している状況が確認された。まくらぎ端面のバラストは、つき固め作業時にまくらぎ下のバラストとともに軌道外側に移動する挙動が確認されたが、移動量は 1 mm 以下であり、まくらぎ端面に作用する垂直応力が変化していないため、道床横抵抗力に与える影響は小さいと考えられる。

図-20 に道床安定作業時のレール長手方向断面の画像解析結果(case3)を示す。道床安定作業時に、まくらぎ側面および底面の周辺のバラストが沈下しており、特にまくらぎ周辺のバラストが 3 mm 以上沈下した。これは、水平加振によってまくらぎ周辺のバラストが締め固められたことで圧縮し、まくらぎに作用する垂直応力の増加とともに道床横抵抗力が増加したと考えられる。

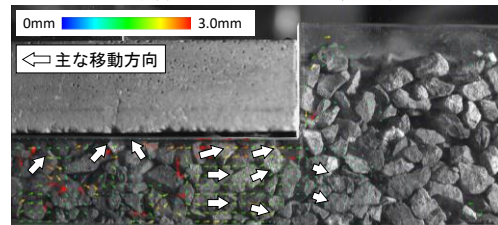
図-21 に道床安定作業時のレール直角方向断面の画像解析結果(case4)を示す。道床安定作業によりまくらぎ底面のバラストが全体的に 1.5 mm 程度沈下するとともに、軌道外側に 1 mm 程度移動した。まくらぎ端面においては、道床肩部の表面バラストがまくらぎ端面側に 1 mm 程度移動し、端面に接触する範囲では底面側に向かい沈みこむ挙動が確認された。その結果、まくらぎ端面の垂直応力が増加し、道床横抵抗力も増加したと考えられる。

図-22 に道床安定作業時の軌道模型上面の画像解析結果を示す。加振点が隣接まくらぎを通過する時点からバラストが徐々に移動し始め、当該まくらぎ直上の通過前から通過中および通過中から通過後も道床肩部からまくらぎに向かってバラストが 4 mm 以上移動しており、端面に接触する範囲では目視により底面側に沈み込んでいく挙動が確認された。また、まくらぎ側面のバラストはまくらぎに沿って軌間内側へ向かって水平方向に移動

しており、まくらぎ間のバラストが水平方向に締め固められ、まくらぎ側面の垂直応力が増加したと考えられる。



(a)隣接まくらぎ(2)つき固め後



(b)中央まくらぎ(3)つき固め後

図-19 つき固め作業時の画像解析結果(case2)

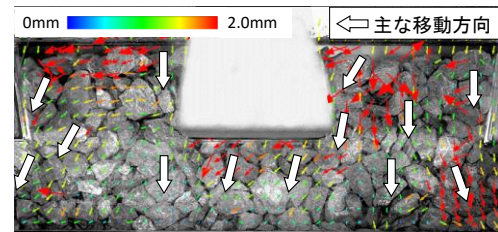


図-20 道床安定作業時の画像解析結果(case3)

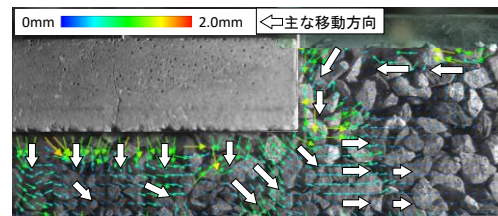


図-21 道床安定作業時の画像解析結果(case4)

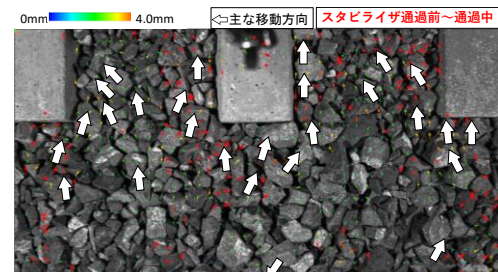
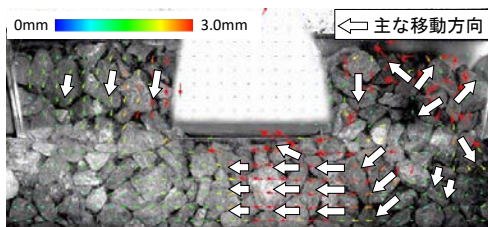
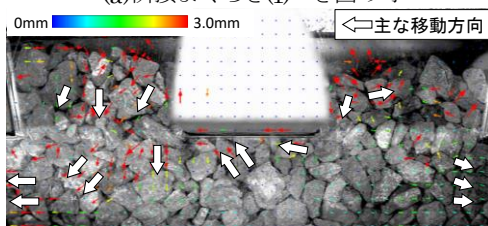


図-22 道床安定作業時の画像解析結果(道床上面)



(a)隣接まくらぎ(1)つき固め時



(b)中央まくらぎ(2)つき固め時

図-18 つき固め作業時の画像解析結果(case1)

## 6. まとめ

本研究では、つき固め作業および道床安定作業後の道床横抵抗力の変化要因を検討するため、1/5 縮尺の小型模型試験を行った。以下に本研究で得られた知見を示す。

- (1) 道床横抵抗力試験により、道床安定作業を行うことで、つき固め作業後に対してまくらぎ変位 0.4 mm(実スケール 2 mm)時の道床横抵抗力は 24%増加、最終道床横抵抗力は 6%増加することを確認した。
- (2) まくらぎの各面に作用する垂直応力の測定試験により、つき固め作業によりまくらぎ側面の垂直応力が低下するのに対し、道床安定作業により側面および端面の垂直応力が増加することを確認した。
- (3) 画像解析によるつき固め作業時のバラスト変形挙動から、まくらぎ側面は、タンピングツールがまくらぎ下に挿入されてスクイズする際に、バラストが乱されながらまくらぎ下に移動しており、これにより、まくらぎ側面に作用するバラストの垂直応力が低下し、道床横抵抗力が低下したと考えられる。
- (4) 画像解析による道床安定作業時のバラスト変形挙動から、道床肩部のバラストがまくらぎに向かい移動し、端面から底面に沈み込み、まくらぎ側面のバラストはまくらぎに沿って軌間内側へ向かい水平方向に移動していた。これにより、まくらぎ端面およびまくらぎ側面の垂直応力が増加し、道床横抵抗力が増加したと考えられる。

## REFERENCES

- 1) 高井秀之：ダイナミック・トラック・スタビライザ (DTS)に関する文献調査，日本鉄道施設協会誌，Vol.30, No.11, pp. 44-47, 1992. [Takai, H.: Literature search on DTS, *The Journal of Japan Railway Civil Engineering Association*, Vol.30, No.11, pp. 44-47, 1992.]
- 2) 吉川秀平，高尾賢一，桃谷尚嗣，中村貴久，伊藤孝記：大型保線機械によるつき固め作業後の道床横抵抗力特性の検証試験，鉄道工学シンポジウム，pp.77-84, 2021. [Kikkawa, S. Takao, K. Momoya, Y. Nakamura, T. and Ito, K.: Verification test of lateral ballast resistance force characteristics of after tamping with a large machine for track maintenance, *Journal of railway engineering, JSCE*, pp. 77-84, 2021.]
- 3) 新版軌道材料編集委員会：新版軌道材料，第 7 編道床バラスト，pp. 382-383, 2011. [Editorial Committee on New Edition Track Material: *New Edition Track Material*, Chapter7 ballast, pp. 382-383, 2011.]
- 4) 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. [Kagawa, T.: On the similitude in model vibration tests of earth-structures, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Issue 275, pp. 69-77, 1978.]
- 5) (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. 182-183, 2012. [Railway Technical Research Institute: *Design Standard for Railway Structures(Track Structures)*, pp. 182-183, 2012.]
- 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，土木学会年次学術講演会，IV-237，pp. 473-474, 2009. [Sekine, E. Nakamura, T. and Hirao, H.: Model test on the lateral resistance of the ballast track, *Annual Meeting of Japan Society of Civil Engineers*, IV-237, pp. 473-474, 2009.]
- 7) 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，Vol.70，No.3，pp. 71-77, 2014. [Ichikawa, T. Hayano, K. Nakamura, T. Momoya, Y. and Koike, Y.: Prediction of lateral resistance of ballasted tracks based on limiting equilibrium methods, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. E1*, Vol.70, No.3, pp. 71-77, 2014.]

(Received April 1, 2022)

(Accepted June 3, 2022)

## STUDIES ON FACTORS THAT CHANGE THE LATERAL RESISTANCE CHARACTERISTICS OF THE TRACK BED BY TAMPING AND STABILIZING WORK FOR THE BALLASTED TRACK

Yohei HAYAKAWA and Takahisa NAKAMURA

In the ballast track, it is known that the track bed ballast is relaxed and the lateral resistance of the track bed is reduced by performing compaction work. On the other hand, it is known that the lateral resistance of the track bed is restored by the track bed stabilization work by the stabilizer. However, the factors that change the lateral resistance force due to these operations have not been sufficiently investigated and many points have not been clarified. In this study, we evaluated the lateral resistance force characteristics on each side of the sleepers after each work by a 1/5 scale small model test. In addition, we measure the normal stress acting on each surface of the sleepers during each work, confirm the ballast deformation behavior by PIV analysis, and clarify the relationship between these and the lateral resistance characteristics of the track bed. We have clarified the factors that cause the fluctuation.