

不均一支持のバラスト軌道の車両応答特性および高低変位に与える影響

楠田, 将之
(公財)鉄道総合技術研究所軌道構造

伊藤, 壱記
(公財)鉄道総合技術研究所軌道・路盤

張, 順智
九州大学大学院工学府建設システム工学専攻 : 修士課程

園田, 佳巨
九州大学大学院工学研究院社会基盤部門 : 教授

<https://hdl.handle.net/2324/4793213>

出版情報 : Journal of structural engineering. A. 66, pp.1-9, 2020-03. 土木学会
バージョン :
権利関係 :



不均一支持のバラスト軌道の車両応答特性および 高低変位に与える影響

Vehicle response properties of non-uniformly supported ballast track and its effect on longitudinal level irregularity

楠田将之[†], 伊藤孝記*, 張順智**, 園田佳巨***

Masanobu Kusuda, Kazuki Ito, Junji Cho, Yoshimi Sonoda

[†]工修, (公財) 鉄道総合技術研究所軌道構造 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

*工修, (公財) 鉄道総合技術研究所軌道・路盤 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

**九州大学大学院, 工学府建設システム工学専攻修士課程 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

***工博, 九州大学教授, 大学院工学研究院社会基盤部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

Unsupported sleepers, which are found sporadically along railway ballasted track, cause various problems from track geometry management, such as a rapid deterioration of the track condition. In this study, we conducted on-site measurement of the response in commercial line and a follow-up survey of the amount of the gap between the bottom of the sleeper and upper surface of ballast (gap value). As a result, it is confirmed that the rail seat load is smaller and the vertical displacement of the sleeper is larger at the sites of unsupported sleepers than at the normal ones; the phenomenon can be reproduced by numerical calculation; the unsupported sleeper location is almost predictable, and the gap value gradually increases and affects the progress of longitudinal level irregularity.

Key Words: ballasted track, unsupported sleeper, response with passing vehicle, longitudinal level irregularity

キーワード: バラスト軌道, 浮きまくらぎ, 車両走行の応答, 高低変位

1. はじめに

バラスト軌道は図-1 に示すように, 多数のまくらぎとレールおよびそれらを固定するレール締結装置から構成される軌きようが, バラスト道床 (以下, 「道床」という.) 上に設置された構造物である. 鉄道車両からレールを介してまくらぎに伝達された荷重は, 道床により路盤, 路床へと分散し伝達される. この繰返し荷重の作用により不同沈下が発生することから, 車両走行安全や乗り心地の確保のため道床の突き固め (以下, 「道床突き固め」という.) 等による軌道変位保守作業が随時要求される点が他の構造物と大きく異なる. 不同沈下の発生箇所においては, 図-2 に示すように, 無負荷時にレールの剛性によりまくらぎ下面が道床に接触せずレールにぶら下がっている「浮きまくらぎ」が生じることがある. このよ

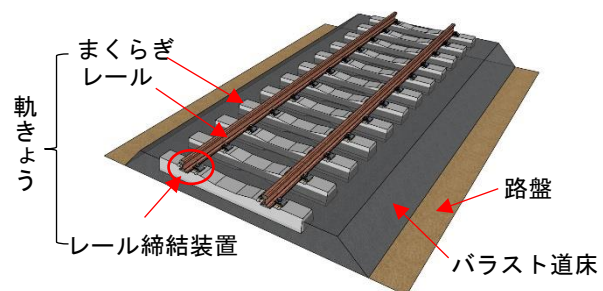


図-1 一般的なバラスト軌道の構造

うな浮きまくらぎ箇所では, 車両走行時に道床とまくらぎが衝突し, バラストが破碎したり, 路盤面からの噴泥が発生したりするなど軌道状態が急速に悪化する¹⁾. 加えて, 主に夏季期間のレール高温時における軌道の座屈安定性に重要な役割を果たす道床横抵抗力が減少する²⁾.

筆者らは, 軌道の日常管理に用いられる高低変位の検

[†] 連絡著者 / Corresponding author

E-mail: kusuda.masanobu.75@rtri.or.jp

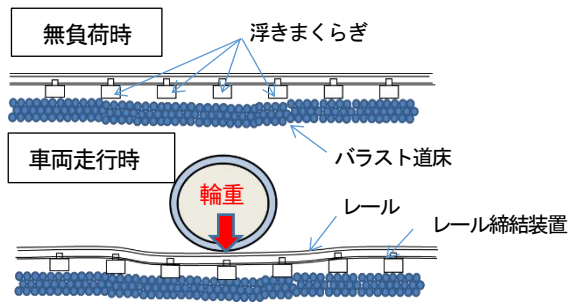


図-2 浮きまくらぎの概念図

測データを用いて、簡便かつ高精度に浮きまくらぎの状態を推定可能な数値計算手法を開発しており³⁾、軌道保守の実務に適用可能な浮きまくらぎの検出手法についても提案している⁴⁾。これらの手法を活用して、走行安全性確保や乗り心地確保など、軌道の保守管理レベル向上を図っていくことが期待される。

道床の沈下・変形について、わが国では1950年代より軌道破壊理論として体系的な研究が行われており、これまで様々なモデルが提案されている⁵⁾。軌道沈下の全般的な傾向を把握するために適切とされているモデル（以下、「軌道構造標準モデル」という。）では、レールの継目部と中間部において、車両走行時の車輪からレールへの作用（以下、「輪重」という。）が異なることにより、道床の沈下量に差が生じ、高低変位が進行するとしている。沈下量は、まくらぎの支持条件を均一と仮定し、弾性床土のはりモデル等により定まる一定の荷重分散を考慮して算出されるまくらぎ1本に対する作用（以下、「レール圧力」という。）の大きさにより定まるとしており、浮きまくらぎの介在など不均一な支持状態については考慮していない。また、不均一な支持状態でのレール圧力も不明である。

その他、軌道沈下に関連する研究として、村本ら^{5a)}は模型実験により支持条件の異なる軌道の境界部付近において浮きまくらぎが発生することを明らかにし、浮きまくらぎの抑制により、軌道沈下の抑制につながることを実験的に確認している。また、名村ら⁷⁾は、軌道模型に対し種々の荷重条件で載荷試験を行い、軌道沈下は単純にレール圧力の最大値で決定されるのではなく、荷重振幅の大きさや、最小荷重の大きさに依存することを明らかにしている。

本研究では、不均一支持状態の軌道の沈下特性を定量化することを目的に、まず、営業線の浮きまくらぎが発生している軌道上を車両が走行するときのレール圧力、まくらぎ変位等の応答について確認する。続いて、この結果について数値計算により再現を試みる。加えて、高低変位や浮きまくらぎ発生状況の経時変化を確認し、軌道の支持条件と応答の関係より、従来の軌道構造標準モデルを補完する知見を得ることを目指す。

2. 浮きまくらぎ箇所の軌道応答測定

2.1 実施目的

バラスト軌道の沈下および高低変位の進行には、車両走行時の軌道の応答が大きく影響する。従来、この応答は前述の通り均一な支持状態を想定して算出されている。不均一支持状態のバラスト軌道の応答についてこれまで確認された実例がないことから、この区間を対象に車両が走行する時のレール圧力、まくらぎ変位の応答の測定（以下、「地上測定」という。）を実施し現状把握を行う。

2.2 地上測定箇所の選定と測定項目

(1) 選定条件

地上測定箇所は直線のロングレール敷設区間で、浮きまくらぎ箇所とその近傍で浮きの見られない道床に支持されたまくらぎ（以下、「支持まくらぎ」という。）箇所とし、以下の考えに基づき選定した。

- ・路盤構造や車両走行時の輪重等、極力浮きまくらぎ箇所と支持まくらぎ箇所との環境条件を合致させるため、付近に構造物境界や溶接継目が介在しない箇所
- ・車両走行速度の影響を確認するため、異なる速度の列車が走行する、優等列車走行線区の停車場近傍の箇所

これらの条件をもとに選定した地上測定箇所の軌道構造は、JIS 50kgN レール、JIS3 号 PC まくらぎが敷設された標準のまくらぎ間隔が 641 mm の区間である。

(2) 地上測定箇所の選定方法

地上測定箇所の支持状態を確実に把握するため、予め高低変位の検測データを用いた数値計算³⁾により、浮き量を算出し、測定を行うまくらぎの絞り込みを行った。なお、この時点で現地の詳細なまくらぎ位置が把握されていないことから、数値計算により得られる浮き量は、標準のまくらぎ間隔に基づく架空のまくらぎ位置における値である。現地と高低変位の検測データの位置情報にずれが生じている可能性があり、加えて、調査時間が制約されていたことから、まず、図-3 に示すように、迅速かつ定量的にバラスト軌道の支持剛性を評価できる軌道支持剛性測定装置（以下、RFWD⁸⁾という。）を用いて、まくらぎ位置ごとに軌道の支持剛性を把握した。RFWDとはFWD（重錘落下試験装置）を活用し、重錘をレール上に自由落下させることにより衝撃荷重を加え、荷重と変位の時刻歴データを取得することが可能な測定装置である。これらのデータから、図-4 に示す方法により最大荷重と最大変位の発生時刻の差である応答変位遅延時間⁹⁾を算出した。この応答変位遅延時間は軌道の支持剛性を表す指標として提案されているもので、値が大きい箇所は支持剛性が小さく、浮きまくらぎの可能性のある箇所とされている。なお、応答変位遅延時間と浮き量の大きさの関係が不明であること、浮き量の計算値は前述のとおり架空のまくらぎ位置によるものであり、精度が低下している可能性があることから⁴⁾、応答変位遅延時



図-3 RFWDによる測定状況

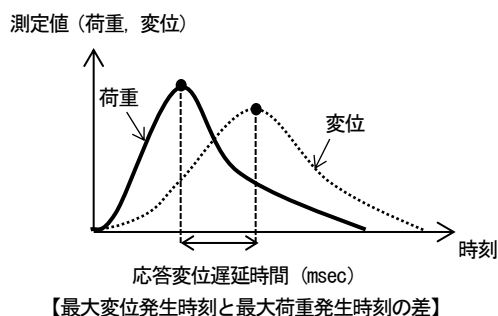


図-4 応答変位遅延時間の算出方法

間の大きい箇所周辺で浮き量の実測もあわせて実施した。それらの結果より、確実に浮きまくらぎが存在し、支持剛性が小さく浮きまくらぎの影響が大きいと考えられる箇所を浮きまくらぎ測定箇所、その近傍でまくらぎに浮きが見られず、かつ支持剛性が高い箇所を支持まくらぎ箇所として選定した。

(3) 地上測定箇所の調査結果

図-5 に浮き量の実測値、計算値および応答変位遅延時間の関係を示す。ここで、浮き量の数値計算に用いた高低変位の復元波形¹⁰⁾には、良好な精度が確認された3～50mの帯域で復元したものを用いた³⁾。浮き量の実測値は、まくらぎごとにレール締結装置を全て取り外し、まくらぎを完全にレールから分離させた際に生じる上下方向の隙間を測定したものである³⁾。応答変位遅延時間と浮き量の大きさには相関が見られ、両者を線形回帰したときの決定係数 R^2 は 0.92 となった。浮き量の計算値と実測値で見られる若干の乖離は、現地のまくらぎ位置等の諸元を数値計算に反映していないため生じたものと考えられる⁴⁾。これらの結果より、現地の各々のまくらぎの支持条件を正確に把握できたと判断し、浮きまくらぎ箇所をまくらぎ番号 72、支持まくらぎ箇所をまくらぎ番号 76 に設定した。

(4) 測定項目

地上測定の測定項目は、浮きまくらぎ、支持まくらぎともにレール圧力、まくらぎ上下変位および輪重とした。図-6 に測点配置を示す。それぞれの測定方法は以下の

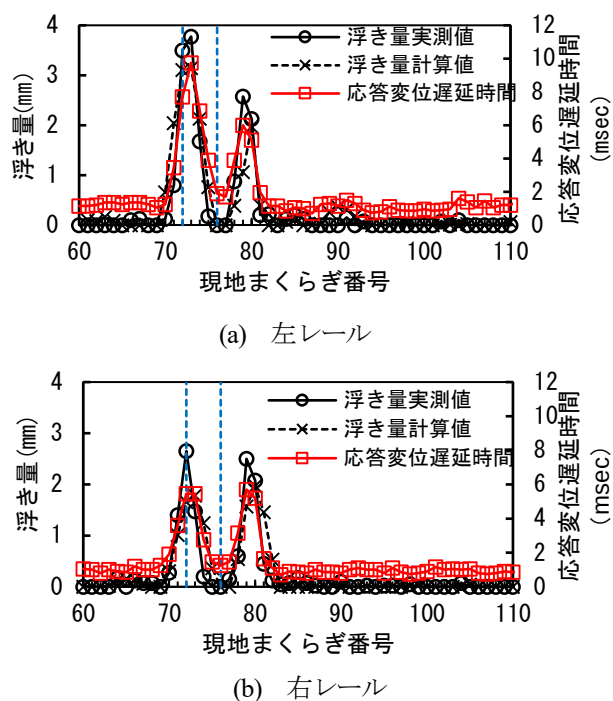


図-5 浮き量と応答変位遅延時間

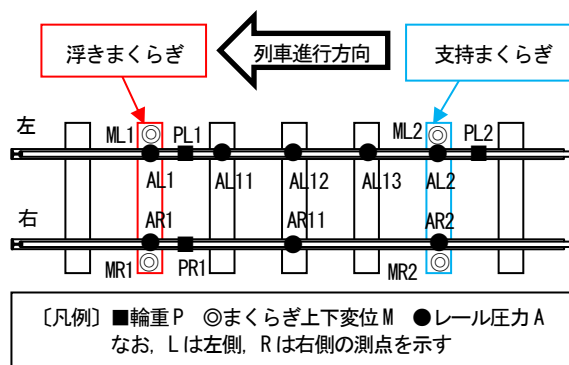


図-6 地上測定の測点配置

とおりとし、いずれも車両通過時の時刻歴データを取得した。測定した車両編成数は22である。

- ・レール圧力は、レールとまくらぎの間に挿入されている軌道パッドを、レール圧力の測定に一般的に用いられるレール圧力板¹¹⁾に交換して測定した。

- ・まくらぎ上下変位は、不動点として路盤に埋設した測定杭を基準にして、まくらぎ上面の変位をカンチレバ式変位計で測定した。

- ・輪重は、レール腹部に貼り付けた2軸ひずみゲージを用いて、せん断ひずみ方式により測定した。

- ・車両走行速度は、輪重のピーク値の出現時刻と測定車両の車軸間隔より換算した。

2.3 測定結果

図-7 に測定結果の一例を示す。これらはいずれも同一の車両編成が通過したときの測定記録である。なお、

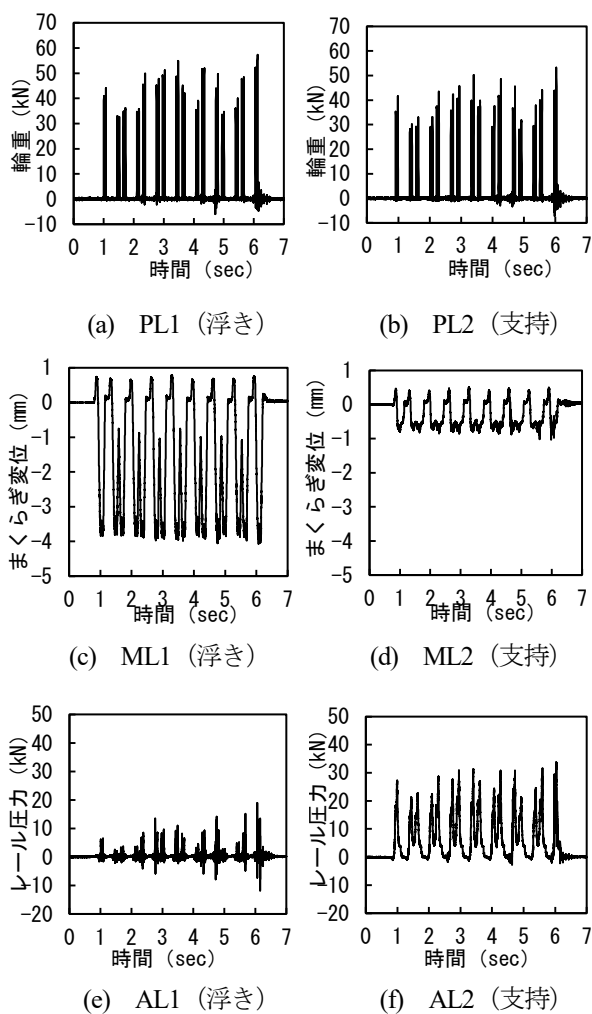


図-7 測定結果の一例（左レール）

左右とも同様の結果であったため左レールの結果のみ示している。ここで、まくらぎ変位は鉛直上向きを正、レール圧力は圧縮側を正としている。

車両からもたらされる上下方向の作用である輪重については、浮きまくらぎ PL1 が支持まくらぎ PL2 を平均で 15%程度上回っている。なお、PL1、PL2 ともに車軸ごとのばらつきが大きいのは、車両質量のバランスによる影響と考えられる。まくらぎの下方への変位量については、浮きまくらぎ ML1 が浮き量の実測値 3.5mm に対し平均で 3.9mm であり、支持まくらぎ ML2 では平均で 0.8mm である。レール圧力については、浮きまくらぎ AL1 が支持まくらぎ AL2 の 32%程度と明らかに小さい。まくらぎ変位量と浮き量の差は、まくらぎを支持する下部構造（路盤+道床）の変形量を示すが、これはレール圧力の大きい支持まくらぎが浮きまくらぎを上回っている。

図-8 にレール圧力の測定値を測点別に比較したものを示す。測定した車両編成は図-7 と同一で、先頭の 2 軸通過前後の時間帯のみ抜粋している。支持まくらぎ箇所から浮きまくらぎ箇所にかけて徐々にレール圧力のピークが低下しており、この原因は、前後のまくらぎの支持状態を含めた荷重分散の影響によるものと考えられる。

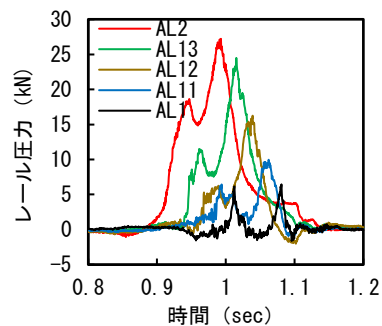


図-8 レール圧力の比較

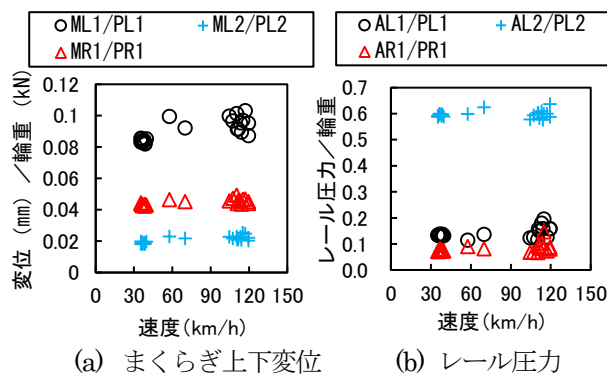


図-9 速度と各応答値と輪重の比

表-1 輪重と各応答値の回帰結果

※回帰式 $y=ax+b$, x : 速度(km/h)

y	a	b	決定係数 R^2
ML1/PL1	1.38×10^{-4}	0.0799	0.56
ML2/PL2	4.32×10^{-5}	0.0175	0.57
MR1/PR1	2.99×10^{-5}	0.0424	0.40
AL1/PL1	2.45×10^{-4}	0.122	0.21
AL2/PL2	4.87×10^{-5}	0.0174	0.02
AR1/PR1	1.70×10^{-4}	0.0683	0.14

また、輪重に対する軌道のマクロな応答および速度依存性を確認するため、車軸ごとに各測点のピーク値を全軸読み取り、測定編成ごとにその平均値を算出した。

図-9 に輪重の平均値に対する応答値を速度別に整理した結果を、表-1 にこれらの関係を線形回帰した結果を示す。これによると、まくらぎ上下変位、レール圧力とも速度が大きいほど大きくなる傾向が見られ、その影響は 100km/h あたり 10~30 %程度である。ただし測定編成によるばらつきが見られ、決定係数 R^2 は 0.02~0.57 であった。

3. 軌道支持状態と軌道応答の再現解析

3.1 目的

地上測定結果の結果を基に、軌道支持状態と車両走行

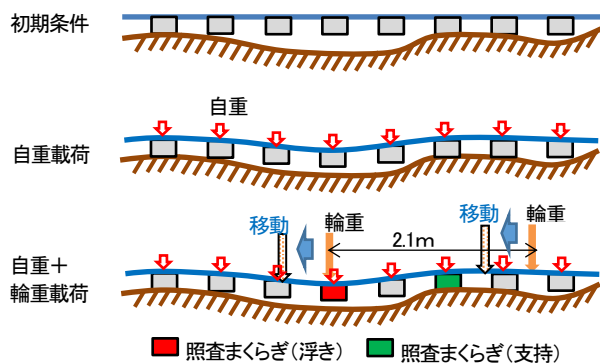


図-10 静的計算のイメージ

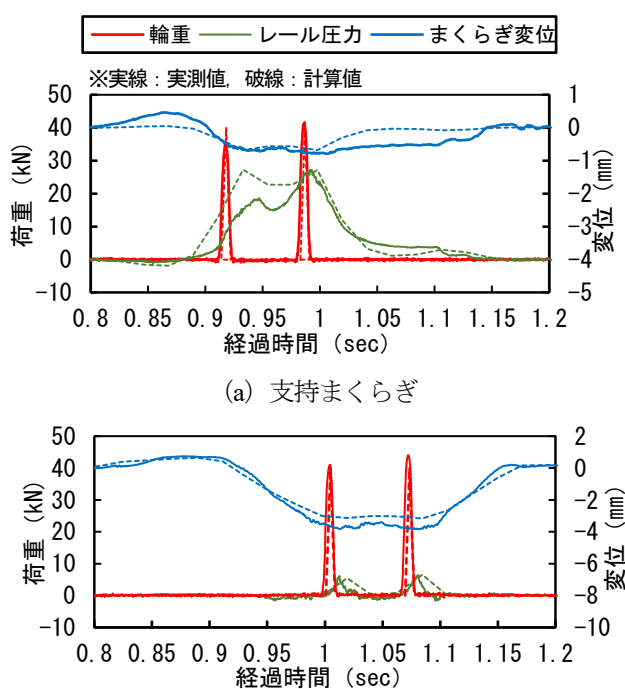


図-11 実測値と計算値の比較

時における軌道の応答の関係について解明するため、数値計算による再現解析を行う。この解析については軌道構造標準モデルと対比するため静的計算により行い、主に軌道の沈下に影響があるとされているレール圧力の最大値について論じる。

3.2 車両走行時の応答の推定

(1) 数値計算モデル

数値計算モデルは筆者らが提案した高低変位の検測データを用いた数値計算手法³⁾をもとに、輪重を模擬した静的な集中荷重の載荷が可能なものとする。具体的には、実際の車両走行を想定し、浮き量を算出する過程である軌きょうの自重によるたわみを算出した後に、輪重を模擬した静的な荷重をレール上加えることにより、車両走行時の応答を静的に求める。本研究では、地上測定箇所を走行する車両を想定し、2.1m間隔の2点の集中荷重

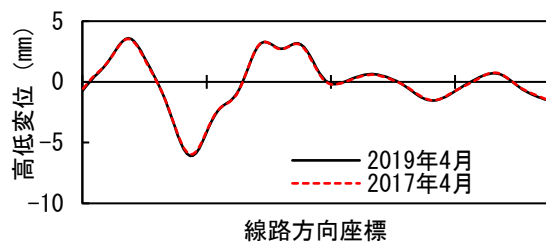


図-12 地上測定箇所の高低変位の変化

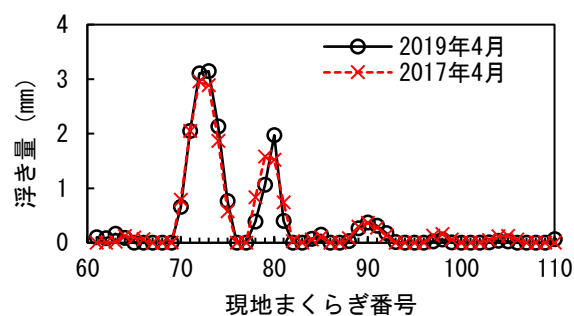


図-13 地上測定箇所のまくらぎ浮き量の変化

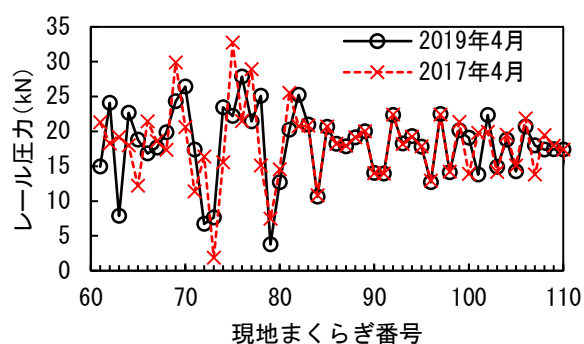


図-14 まくらぎごとのレール圧力の変化

を移動させたときの影響線を算出した。図-10に計算イメージを示す。

(2) 計算結果

図-11に実測値と計算値との比較結果を示す。実測値は図-7で示したものと同一の編成が通過したときの先頭の2軸通過時の部分を抜粋し、参考にまくらぎ変位もあわせて示している。計算値については線路方向座標別に算出したものを実測値の車両速度(110.8 km/h)を用いて時間換算している。のべ4軸の輪重測定値は35.4~44.1 kNであったが、計算に用いた輪重は全て40 kNに統一している。

支持まくらぎ箇所、浮きまくらぎ箇所ともにレール圧力の最大値はほぼ再現できており、その差も1%程度と小さい。最大値の前後において再現性が低下している理由として、輪重やまくらぎ位置等の計算諸元に起因する誤差や車両走行に伴う振動の影響が考えられる。まくらぎ変位の最大値について、支持まくらぎでは同程度の値となっているものの、浮きまくらぎでは浮き量の計算誤

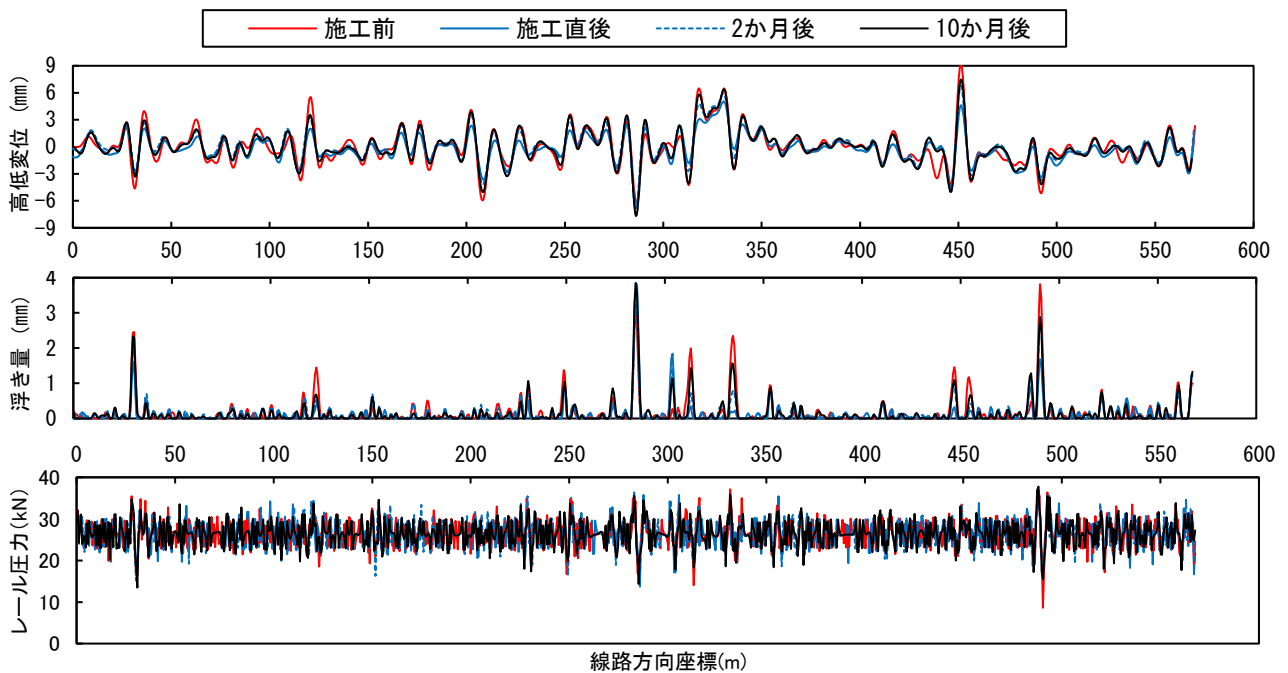


図-15 道床突き固め前後の軌道状態の推移

差の影響に起因すると考えられる乖離が見られる。ただし、これは適正な計算諸元を与えることにより改善が可能であると考えられる。

以上より、不均一な支持状態の軌道上を車両が走行する際のレール圧力の最大値については、この数値計算モデルを用いることで推定可能であると判断した。

4. 営業線における軌道支持状態の推移

本章では、軌道の応答と軌道の支持状態の推移の関係について営業線の実データを用いて検証を行う。ここでも、前3章と同様、軌道の沈下に影響があるとされているレール圧力について検討する。なお、本章以降での「レール圧力」とは、まくらぎ位置で算出された各々のレール圧力の最大値を示す。

4.1 地上測定箇所の高低変位および浮き量の推移

図-12 に地上測定箇所の 10m 弦高低変位の経時変化を示す。この2年間は道床突き固めを含め軌道変位保守作業の実績がない期間である。10m 弦高低変位とは、上下方向の軌道のゆがみを 10m 正矢法で測定したもので、軌道保守の実務で一般的に使用されている指標である⁴⁾。この図の横軸（線路方向）の範囲は図-5 のまくらぎ番号で示した範囲と同一としている。この区間における高低変位の標準偏差は 2.11 mm から 2.15 mm へ推移しており、進行が小さく安定している。

図-13 にまくらぎ浮き量を算出しその分布を比較したものを示す。浮き量のピークを形成しているまくらぎ番号 72～73、81 付近で浮き量が 0.3～0.5 mm 大きくなっ

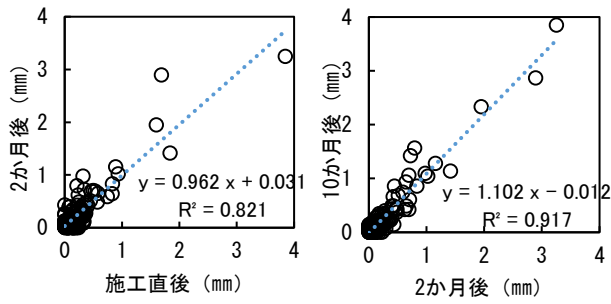
ているが、浮き量の小さい区間では変化が小さい。

図-14 に算出されたレール圧力の変化を示す。浮き量のピークを形成しているまくらぎ番号 72～73、81 付近のレール圧力がいずれも平均である 17kN より小さく、レール圧力の小さい箇所で浮き量が大きくなっていることが確認できる。また、浮き量の小さいまくらぎ番号 60～70 および 95～110 付近でレール圧力のばらつきが比較的大きいのは、近傍のまくらぎの支持条件の影響が現れやすいのが原因と考えられる。

4.2 道床突き固め前後の高低変位および浮き量の推移

一般に、バラスト軌道は、道床突き固めの直後に急激な沈下（初期沈下）が生じ、その後漸進的な沈下過程へと推移する⁵⁾。4.1 節で確認に至らなかった沈下進みの大きい箇所の軌道の支持状態の推移を確認するため、営業線の道床突き固め実施前後の高低変位データを用いて、4.1 節と同様の分析を行う。検証に用いた区間（以下、「検証区間」という。）は、JIS 60kg のロングレール、JIS 3 号 PC まくらぎが敷設されている標準のまくらぎ間隔が 581 mm の直線軌道で、最近連続 566 m にわたり大型保線用機械（マルチプルタイタンパー）を用いた軌道変位保守作業（道床突き固め）が施工された区間である。

図-15 に施工前、施工直後、施工 2 か月後、施工 10 か月後の 10m 弦高低変位と、浮き量およびレール圧力の計算結果の推移を示す。レール圧力の算出にあたっては、地上測定箇所と異なり検証区間では多様な車両が走行するため、重い車両を想定して輪重を 80kN とし、車軸配置については応答に与える影響が最も大きい 1 軸の条件としている。この区間の高低変位の標準偏差を求めると、



(a) 初期沈下 (b) 漸進沈下

図-16 浮き量（代表値）の経時変化

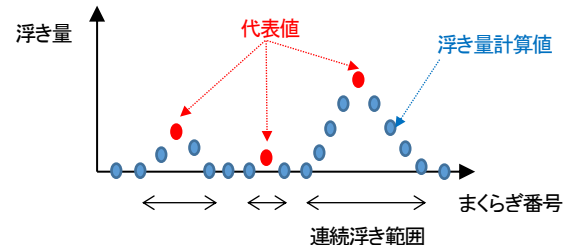


図-17 浮き量の代表値の定義

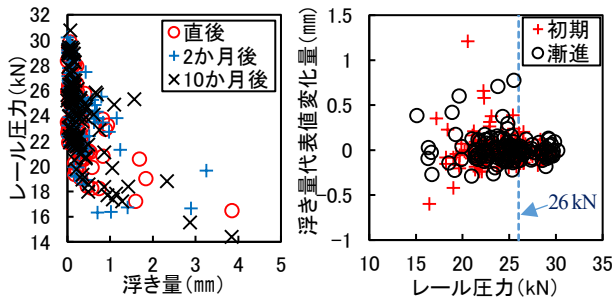


図-18 浮き量とレール
圧力

図-19 レール圧力と浮
き量の変化

施工前が1.89 mmであるのに対し、施工直後で1.32 mm、2 か月後で1.54 mm、10 か月後で1.73 mmと地上測定箇所を上回る進行が見られる。高低変位の波形には、その性質上0 mmを中心に周期的に正負交互の値が出現する。測定時期により高低変位の値に変化は見られるものの、正負交互の値の出現パターンは高低変位測定時期によらずほぼ同じである。つまり、軌道の相対的に高い箇所と低い箇所が概ね固定化されており、バラスト軌道の部分的な沈下の進行により、高低変位の波形振幅が大きくなり、高低変位の標準偏差が進行していると考えられる。浮き量も同様の傾向が見られ、周囲より軌道が低い箇所に出現する浮きまくらぎが、測定時期によらずほぼ同じ箇所に出現しており、その大きさが変化していることがわかる。レール圧力は均一な支持状態のときの値である26 kN付近を中心に分布しており、第3章での検討結果と同様に浮き量が多い箇所でレール圧力が小さい傾向が確認できる。

図-16 に施工後の浮き量の変化を比較したものを示す。ここでは、図-17 で定義する浮き量の代表値（連続的に浮きまくらぎとなっている区間の最大値）で整理した。施工直後と2 か月後を比較した初期沈下過程と考えられる(a)と、2 か月後と10 か月後を比較した漸進的な沈下過程と考えられる(b)とを比較すると、(b)が(a)と比べて変化のばらつきが小さく、全体的に浮き量が大きくなっている傾向が確認できる。ここで、浮き量が減少している箇所が散見されるが、バラスト軌道は車両の通過に伴

表-2 レール圧力と浮き量の変化（単位 mm）

レール圧力	26 kN 未満		26 kN 以上	
	初期	漸進	初期	漸進
平均	0.01	0.02	-0.02	-0.02
標準偏差	0.21	0.18	0.09	0.07

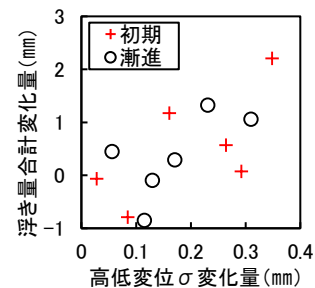


図-20 高低変位σ変化と浮き量合計値の変化

い沈下するため、このような箇所では付近の支持まくらぎの沈下量が浮きまくらぎ箇所の沈下量を上回り、浮きまくらぎ箇所の沈下量が相対的に小さくなっていることを示している。

図-18 に浮き量の代表値とそれに対応するレール圧力の大きさの関係を示す。浮き量が多いほどレール圧力が小さくなる傾向が見られる。浮き量が比較的小さい範囲でレール圧力が大きくばらついているのは、図-14 で見られたのと同様に、近傍のまくらぎの支持条件の影響を受けやすいためと考えられる。

図-19 にレール圧力と浮き量の代表値の経時変化の関係を示す。ここで、レール圧力は基準時点での値としており、初期沈下過程では施工直後の値、漸進沈下過程では施工2 か月後の値を用いている。これによると、レール圧力が平均値である26 kNを境にして浮き量の代表値の変化量の傾向に相違が見られる。そこで、表-2 に各沈下過程における浮き量の変化の平均と標準偏差をレール圧力の大きさ別に整理した。レール圧力26 kN未満の箇所では、26 kN以上の箇所と比較して標準偏差が大きく、浮き量の変化が大きいがわかる。また、平均が正の値であり、浮き量が全体的に大きくなる傾向を示している。また、レール圧力の大きさによらず、標準偏

差は初期沈下過程が漸進沈下過程を上回り、初期沈下過程の浮き量の変化が大きい傾向が見られる。

図-20 に高低変位と浮き量の変化の関係を示す。ここでは、高低変位を一般的な管理単位である 100m ロットの標準偏差 σ と、そのロットにおける浮き量の代表値の合計を求め、各沈下過程別に整理している。この図より、高低変位 σ の変化量が大きいほど浮き量の合計値が大きくなる傾向が見られる。つまり、高低変位 σ は浮き量が大きくなることにより進行する傾向があるといえる。

4.3 考察

(1) レール圧力、浮き量と高低変位進みの関係

第3章では、地上測定の結果および再現解析により、浮きまくらぎ箇所においてレール圧力が小さくなる傾向を明らかにした。また、前 4.2 節の検討により、レール圧力の小さい箇所で浮き量の変化が大きくなる傾向を明らかにした。

名村ら⁷⁾は浮きまくらぎを想定した検討までは行っていないものの、軌道の沈下進みはレール圧力の大きさのみで決定されるのではなく、レール圧力の振幅が等しい場合、レール圧力の最小値が小さいほど軌道の沈下進みが速い傾向にあることを実験的に明らかにしている。本研究において、沈下量と浮き量との相違はあるものの、レール圧力の小さい箇所で浮き量の進みが大きくなる箇所が散見されたことから、名村らの知見⁷⁾と同様、沈下進みの大きさはレール圧力の大きさだけによらないことがわかる。

一方、軌道構造標準モデル⁵⁾によれば、レール圧力は軌道の沈下に大きく影響し、レール圧力が大きいほど軌道沈下の進み量が大きくなり、結果高低変位の進み量が大きくなるとされている。軌道構造標準モデルは均一な支持を前提としているため、本研究のような不均一支持には必ずしも適用できるものではないと考えられる。名村らの知見⁷⁾をさらに深度化させ、支持条件別の沈下特性を解明することは今後の課題である。これが解明されることにより、軌道状態の推移をより精度よく行うことができるものと考ええる。

(2) ロット高低変位進みのメカニズム

ここでは、高低変位を一般的な管理単位である 100m ロット高低変位の標準偏差の進みに着目し、既往の知見との対比を行う。

高低変位の進みに関して、三和ら¹²⁾は、100m ロット高低変位の標準偏差を用いて、高低変位の標準偏差が大きいほど標準偏差の進み量は大きくなる傾向があることを明らかにしている。筆者ら¹³⁾は不均一支持軌道へ静的荷重を載荷したときのレール圧力を算出し、その値の平均値は均一支持の場合のレール圧力に合致すること、求めたレール圧力のロット標準偏差は、高低変位標準偏差が大きいほど大きくなる傾向があることを明らかにしている。これらの知見より、レール圧力のロット標準偏差

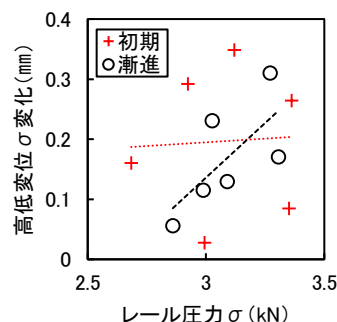


図-21 レール圧力標準偏差と高低変位標準偏差の進みの関係

が大きいほど高低変位標準偏差の進みが大きくなると考えられる。そこで、検証区間を対象にこれらの関係を整理した。図-21 に結果を示す。ここで、レール圧力標準偏差は図-19 と同様に基準時点の値としている。初期沈下過程ではばらつきが大きく両者の関係は明確ではないが、漸進沈下過程においては、レール圧力標準偏差が大きいほど高低変位標準偏差の進みが大きくなる傾向が確認でき、既往の知見¹²⁾ ¹³⁾と整合している。加えて、前述した軌道構造標準モデル⁵⁾では、レール圧力が大きいほど軌道沈下の進み量が大きくなるとしていることから、漸進沈下過程においてロット単位のような全体的な高低変位の進みを論じる場合、検証区間での検討結果は軌道構造標準モデルとも整合すると考えられる。

以上をまとめると、不均一支持のバラスト軌道における、漸進沈下過程のロット高低変位進みのメカニズムは以下の通りであると考えられる。

- ・高低変位標準偏差の大きいロットでは、レール圧力の標準偏差が大きく、レール圧力の大きい箇所と小さい箇所が混在する。
- ・レール圧力の小さい浮きまくらぎ箇所において、軌道の沈下が進み、高低変位が大きくなる箇所が一定数存在する。一方、レール圧力の大きい箇所では、軌道の沈下の進みは小さい。
- ・高低変位標準偏差の大きいロットでは、レール圧力の小さい箇所が多く存在していることから、高低変位が大きくなる箇所も多く存在する。
- ・結果として、高低変位標準偏差の大きいロットでは、高低変位の進みが大きくなる。

5. 結論

本研究の結論をまとめると以下の通りとなる。

- 1) 営業線においてまくらぎ位置ごとに RFWD による軌道支持剛性の測定を行い、その結果とまくらぎ浮き量の実測値との比較を行った。その結果、RFWD による測定で得られる応答変位遅延時間は、まくらぎ浮き量の実測値と良好な相関が見られることを確

認した。

- 2) 営業線の浮きまくらぎ箇所および近傍の支持まくらぎ箇所の列車通過時におけるまくらぎ上下変位、レール圧力を測定した。結果、浮きまくらぎ箇所では支持まくらぎ箇所と比較して、浮き量に応じてまくらぎの上下変位の振幅が大きくなること、レール圧力の最大値が小さくなることを確認した。
- 3) 車両走行に伴う、不均一支持のバラスト軌道区間のまくらぎ上下変位、レール圧力の大きさについては、簡易な静的モデルを用いた数値計算により推定できる可能性があることを確認した。
- 4) 営業線の浮きまくらぎ状況について数値計算で求め、経時変化を確認した結果、浮きまくらぎ箇所は同一区間でほぼ固定されていること、浮き量の大きさは車両の走行に伴い徐々に変化することを確認した。また、浮き量が進行する箇所はレール圧力の小さい箇所が多く見られることを確認した。
- 5) 不均一支持のバラスト軌道における、漸進沈下過程のロット高低変位進みのメカニズムは以下の通りであると考えられる。
 - ・高低変位標準偏差の大きいロットでは、レール圧力の標準偏差が大きく、レール圧力の大きい箇所と小さい箇所が混在する。
 - ・レール圧力の小さい浮きまくらぎ箇所において、軌道の沈下が進み、高低変位が大きくなる箇所が一定数存在する。一方、レール圧力の大きい箇所では、軌道の沈下の進みは小さい。
 - ・高低変位標準偏差の大きいロットでは、レール圧力の小さい箇所が多く存在していることから、高低変位が大きくなる箇所も多く存在する。
 - ・結果として、高低変位標準偏差の大きいロットでは、高低変位標準偏差の進みが大きくなる。
- 6) 今後の課題として、自重による荷重が道床面に作用しておらず、車両走行時のレール圧力の小さい浮きまくらぎ箇所において、沈下量が大きくなる箇所が散見されたことから、これを定量把握し、支持条件別の沈下特性を解明することが挙げられる。この挙動解明により、軌道状態の推移をより精度よく行うことができるものとする。

参考文献

- 1) 村本勝己, 中村貴久, 櫻井祐: 自動沈下補正まくらぎを用いたレール継目部の浮きまくらぎ対策, 鉄道総研報告, Vol.27, No.4, pp.17-22, 2013.
- 2) 保線工学編集委員会編: 保線工学<上>, pp.295~297, 鉄道現業社, 2016.
- 3) 楠田将之, 松本麻美, 片岡宏夫: 軌道変位データに基づく浮きまくらぎ検出手法, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.74, No.2, I_543-I_551, 2018.
- 4) 楠田将之, 田中博文, 片岡宏夫: 浮きまくらぎ検出に対する各種軌道諸元の影響確認と実務適用に向けた計算手法の構築, 構造工学論文集, Vol.65A, pp.52-62, 2018.
- 5) 保線工学編集委員会/編: 保線工学<上>, pp.216-232, 鉄道現業社, 2016.
- 6) 村本勝己, 中村貴久: 自動沈下補正まくらぎによる構造境界部の軌道変位抑制効果, 鉄道総研報告, Vol.23, No.10, pp.29-34, 2009.
- 7) 名村明, 木幡行宏, 三浦清一: 有道床軌道の繰返し変形特性に及ぼす荷重とまくらぎ形状の影響に関する実験的研究, 土木学会論文集 No.779/IV-66, pp.53-68, 2004.
- 8) 中村貴久, 桃谷尚嗣, 谷川光, 吉川秀平, 木次谷一平: バラスト軌道における軌道支持剛性評価方法の開発, 鉄道総研報告, Vol.31, No.12, pp.29-34, 2017.
- 9) 谷川光, 中村貴久, 桃谷尚嗣: 小型 FWD を用いた軌道支持剛性評価法における浮きまくらぎ影響の検討, 第 20 回鉄道工学シンポジウム論文集, pp.161-168, 2016.
- 10) 吉村彰芳: 軌道狂い原波形の復元に関する理論的基礎の検討とその適用, 土木学会論文集 Vol.377, pp.117-126, 1987.
- 11) 佐藤吉彦: 新軌道力学, pp.379-381, 鉄道現業社, 1997.
- 12) 三和雅史, 大山達雄: 軌道狂い保守の改善と適正化のための手法の提案と考察, 日本オペレーションズ・リサーチ学会春季研究発表会概要集, 2011.
- 13) M.Kusuda, T.Deshimaru, H.katoka: A study on the design method for the ballasted track in consideration of unsupported sleepers, Proceedings of the International Heavy Haul Association STS Conference (IHHA2019), pp.183-190, 2019.

(2019 年 9 月 20 日受付)

(2020 年 2 月 1 日受理)