

浮きまくらぎ検出手法の提案と維持管理への活用

山岡 大樹* 楠田 将之** 田中 博文***
松本 麻美*** 片岡 宏夫#

Proposal of Unsupported Sleepers Detection Method and Utilization for Track Maintenance

Daiki YAMAOKA Masanobu KUSUDA Hirofumi TANAKA
Mami MATSUMOTO Hiroo KATAOKA

It has been pointed out that the unsupported sleepers existing in the ballast track can induce rapid track subsidence and decrease the safety margin against lateral stability of the track. Until now, there has been no method to accurately locate the unsupported sleepers, and the actual circumstance of the unsupported sleepers is unknown. This situation makes us to propose a new detection method for unsupported sleepers. Since the accuracy of the unsupported sleepers detection method is good, we investigate the actual circumstance of the unsupported sleepers.

キーワード：浮きまくらぎ，バラスト道床，軌きょう，軌道検測車，高低変位，復元波形

1. はじめに

列車荷重が軌きょうに加わると、軌きょうを支持するバラスト道床にその荷重が分散されることで碎石が乱され、バラスト道床が変形し、軌道沈下が生じる。軌道沈下が特に大きくなるような箇所では、図1に示すようにまくらぎがバラスト道床から離れてレールに吊り下がった「浮きまくらぎ¹⁾」と呼ばれる状態が生じる。

浮きまくらぎ発生箇所では、列車荷重により押し下げられたまくらぎにバラストがたたかれることで、バラストの破砕や路盤面からの噴泥が生じるなど、軌道状態が急速に悪化する¹⁾。さらに浮きまくらぎ発生箇所では、まくらぎ下面におけるバラスト道床とまくらぎの間における摩擦力が喪失することで道床抵抗力が低下し、軌道の横安定性の低下が懸念される。上記のような浮きまくらぎが軌道に及ぼす悪影響を踏まえると、浮きまくらぎ発生箇所を的確に捉え、適切に処理していくことは重要であるといえる。

しかしながら浮きまくらぎはまくらぎと道床の間に隙間を有している状態ゆえに、目視で確認することは困難であり、現場で直接調査を行う以外にその程度を把握する手段が乏しいのが実状である。そこで本研究では、軌道検測車で測定した高低変位データを活用して浮きまくらぎを定量的に検出する手法を開発した。本稿では、ま

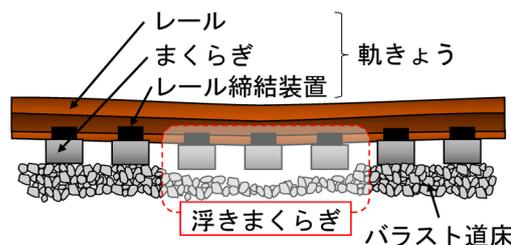


図1 浮きまくらぎの状態

ず浮きまくらぎ検出手法の原理について説明したうえで、本手法の検出精度の検証を行い、本手法を用いて営業線における浮きまくらぎの実態把握を行った結果について報告する。

2. 浮きまくらぎ検出手法の概要

2.1 概要

図2に本手法の原理を示す。まずバラスト道床上面のレール長手方向の上下凹凸形状（以下、道床面形状という）について、軌道検測車により一定間隔の離散データとして測定される列車在線時の高低変位（以下、動的な高低変位という）（図2①）を、検測倍率が十分確保される所定の復元波長帯域においてデジタル逆フィルターで処理した復元波形²⁾（図2②）で推定する。列車在線時は軌きょうが列車荷重により道床面まで押し下げられるため、まくらぎ下面と道床上面が接触している状態となる。レールやまくらぎ等の軌道部材の種別がレール長手方向で同一であれば、レール頭頂面からまくらぎ下面までの距離、つまり軌きょうの高さはレール長手方向でみ

* 軌道技術研究部 軌道構造研究室
** 軌道技術研究部 軌道構造研究室（現 西日本旅客鉄道株式会社）
*** 軌道技術研究部 軌道管理研究室
軌道技術研究部

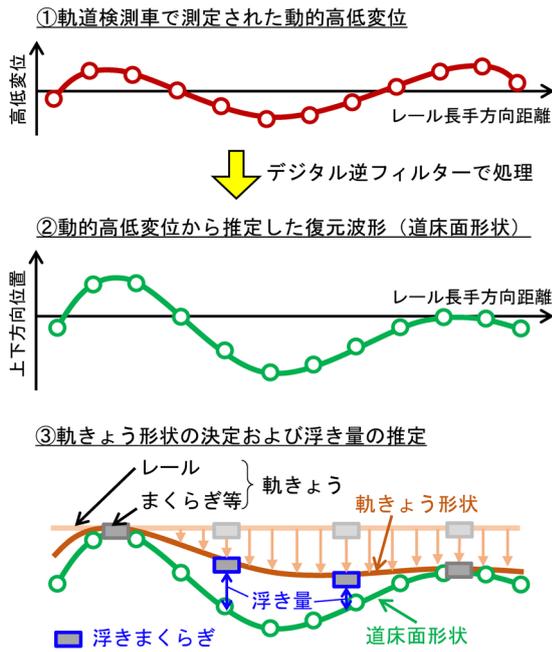


図2 浮きまくらぎ検出手法の原理

るとほぼ変化しない。すなわち動的高低変位は本来レール頭頂面の上下方向のゆがみ量を表すものであるが、軌きょうの高さを差し引けば道床面の凹凸を表すものとして捉えることができる。なお列車在線時は、軌道パッドやバラスト道床に弾性変形が生じるため、列車在線時と不在時で軌きょうの高さや道床面の位置は若干異なるが、それらの差は十分に小さいため、本手法においてはこれらの差を無視する。以上の仮定により、動的高低変位から推定された復元波形を道床面形状とする。

次に軌きょうの上下方向のたわみ形状（以下、軌きょう形状という）を推定する。列車不在時の軌きょうはバラスト道床の上に設置されている状態である。一方、バラスト道床は列車荷重の作用により、上下方向に不規則な凹凸を有している。よって、不規則な凹凸を有する道床面形状の上に軌きょうが設置されると、軌きょうが道床面形状の凹凸に沿ってたわむことになる。しかし、軌きょう形状はその自重と曲げ剛性により決定されるため、必ずしも道床面形状とは一致しない（図2③）。以上より、両形状の差分を算出すれば各まくらぎ位置において軌きょうと道床面の離隔距離を表す「浮き量」が求まるため、浮きまくらぎ発生箇所を把握することができる。

2.2 計算方法

本手法ではFEMによる検討を行うため、レールを梁要素、まくらぎ・締結装置等（レール片側分）を節点集中質量、バラスト道床・路盤の剛性をばね要素で定義し、レール長手方向および鉛直方向の2次元平面に表現した軌きょう片側半分の2次元FEMモデルを構築した。図3に本モデルの概略を示す。軌きょう片側としたのは、

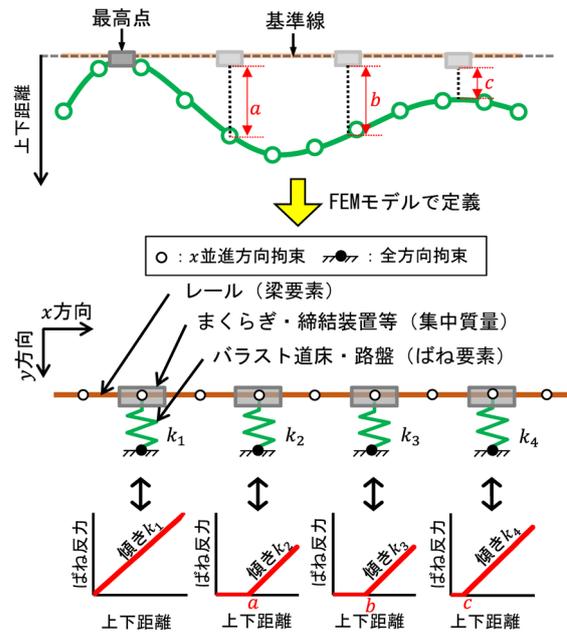


図3 2次元FEMモデルの概略

高低変位が左右レールで独立して測定され、また列車走行時のレール変形が、左右の輪重が異なる場合でも互いに他のレールに及ぼす影響が小さい³⁾ためである。

まず道床面形状の最高点にあたる位置に基準線を設け、この基準線に沿って軌きょうを水平に設置する。前述のとおり、道床面形状は一般的に不規則な凹凸を有するため、初期状態では最高点以外において軌きょうと道床面の間には隙間が存在している。軌きょうが初期状態からその自重により道床面上でたわみ、各支持ばね位置において軌きょうが道床面と接触するとばね反力が生じるが、ばね反力の大きさは初期状態における軌きょうと道床面の間隙と、初期状態からの軌きょうの自重によるたわみ量の大小関係に依存する。すなわち本モデルでは支持ばねが2段線形特性を有するものとして考え、各支持ばね位置における軌きょうのたわみ量が隙間の大きさ以下の場合にはばね反力が0、軌きょうの変位量が隙間の大きさを上回り始めるとばね反力が生じて線形的に上昇していくものと仮定した。

以上のモデルにおいてFEMに基づく数値計算を行い、軌きょうの自重と各支持ばねで発生するばね反力の総和が釣り合う時の軌きょう形状を決定し、道床面形状との差分を算出して浮き量を求める。なお、道床面形状を表す復元波形データは一定間隔の離散データのため、必ずしもまくらぎ位置とは合致しない。よってまくらぎ位置に対応する道床面形状における支持ばねの位置は、まくらぎ間隔を考慮して、隣接する2点のデータで線形補間することにより求める。

本計算において、モデルに配置された各節点の拘束条件は、梁要素上の節点についてはx並進方向を、それら



図4 簡易軌道検測装置⁵⁾

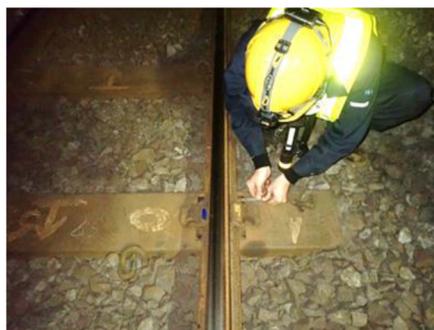


図5 浮き量の測定状況

表1 検討区間

区間	まくらぎ本数	まくらぎ種別	継目種別	支持ばね定数 (MN/m)
A	57	PCまくらぎ	溶接	71.0
B	69	PCまくらぎ	普通	22.3

の節点とばね要素を介して接続されている節点については全方向拘束とした。なお幾何学的非線形性については考慮しないものとした。

コードは汎用解析ソフト Femap with Nastran ver11.3.0⁴⁾を用い、2次元非線形静的解析を実施した。モデルのy方向正の向きに重力加速度を設定し、これを10ステップの漸増载荷で与え、ステップごとの収束計算には準Newton法を用いた。なお、収束計算を安定させるため、y方向正の向きに一定量の強制変位を梁要素(レール)に与えた状態で釣り合いをとった後、与えた変位を開放しつつ重力加速度を作用させた。

3. 浮きまくらぎ検出手法の妥当性の確認

3.1 検証方法

浮きまくらぎ検出手法の精度を検証するため、営業線の軌道検測データおよび現地測定結果を用いたケーススタディを行い、浮き量に関して本手法により算出される推定値と現場で取得した実測値を比較することとした。また、本手法の信頼性をより高めるため、軌きょう形状に関して本手法による推定結果と実際の形状についても比較するべきであるが、実際の軌きょう形状の把握には労力を要する。そこで図4のような簡易軌道検測装置を使用して検測される静的高低変位をも一つの比較対象として、その実測値と計算値を比較することとした。

検討区間の詳細を表1に示す。軌道構造の違いが浮きまくらぎの検出精度に与える影響についても確認するため、レール継目部を溶接したロングレール区間(区間A)と、普通継目を有する区間(区間B)を選定した。それぞれ狭軌であり、JIS50kgNレールが使用されている直線区間である。なお同表の支持ばね定数とは図3で示した線形特性を有する軌道の支持ばね定数を示し、現地で

測定した路盤剛性と、軌道パッド剛性およびバラスト剛性に基いて算出した値である。

3.2 浮き量の比較

浮き量の実測値はまくらぎごとにレール締結装置を取り外してまくらぎをバラスト道床上に落とし、まくらぎ下面とバラスト道床上面が接触したときにレール底面と軌道パッド上面に生じる隙間を、テーパーゲージを用いて0.1mm単位で読み取ることで測定した。読み取り箇所は片側レールの軌道パッドの4隅とし、その値を算術平均した値を実測値とした。図5に測定状況を示す。

各区間における動的高低変位のデータは、区間A,Bそれぞれの現地において浮き量および静的高低変位を測定した時期の直前に測定されたデータを採用した。測定はいずれも2台車方式の軌道検測車を用いた2.1m-14.4m偏心矢法によって連続的に実施されており、その測定間隔は0.25mである。図6に2.1m-14.4m偏心矢法の検測特性、図7に本検討で用いた復元逆フィルターを示す。なお復元波長帯域は、復元の精度が十分に確保される検測倍率0.2を上回る3-50mの波長帯域(図6の水色で塗りつぶした範囲)に設定した。よって軌道検測車により得られた動的高低変位データを3-50mの波長帯域の復元逆フィルターで処理し、道床面形状を設定した。

本手法により前述のとおり設定した道床面形状をもとに軌きょう形状を求め、浮き量を算出した。なお、以降では両区間ともに左レールにおける結果のみを示す。図8に道床面形状と軌きょう形状を併せた図を、図9に浮き量の実測値と計算値を比較した結果を示す。図8において軌きょう形状と道床面形状が互いに異なる形状となっていることが分かる。図9からは、区間Aおよび区間Bの普通継目近傍箇所を除いた区間において、浮き量の実測値および計算値が概ね一致していることがうかがえる。一方で、区間Bの継目部付近において浮き量の推定精度が低下しているが、この理由としては以下の3点が考えられる。

- ① 実際のレール継目部において散見される継目落ちと呼ばれるレール端部塑性変形を、本手法では考慮で

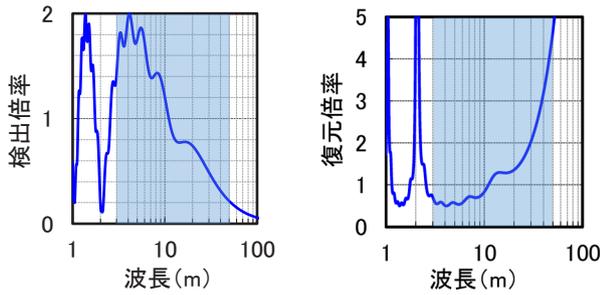


図6 2.1m-14.4m 偏心
矢法の検出特性

図7 使用した復元
逆フィルター

きていないこと

- ② 継目部ではレールの曲げ剛性が、継目部以外の区間（溶接継目部も含む）に比べて小さいが、本手法ではレールの曲げ剛性の違いを考慮せず一定としていること
- ③ 本手法では輪重変動による軌道部材の弾性変形量が無視しているが、継目部付近では継目落ちに起因して、静止輪重より著大な衝撃輪重が載荷されるため、無視できないほどの軌道部材の弾性変形量が発生している可能性があること

3.3 静的高低変位の比較

前述のとおり、静的高低変位の測定については簡易軌道検測装置を用いて行うが、本装置による高低変位は2m 弦正矢法による値となる。この2m 弦正矢法による値を10m 弦正矢法による値に変換したものを静的高低変位の実測値とした。

これを踏まえて、浮きまくらぎ検出手法により推定された軌きょう形状についても10m 弦正矢法の高低変位に変換し、これを静的高低変位の計算値とした。

図10に静的高低変位の実測値および計算値を示す。同図によると、区間Aでは両者がほぼ完全に一致しており、本手法により推定した軌きょう形状の精度が良好であったことがうかがえる。一方で、区間Bの継目部付近において両者が乖離しているが、これは前節で述べた浮き量の推定精度低下と同様の理由によるものである。

3.4 復元波長帯域の違いによる影響

良好な推定結果が得られた区間Aを対象に、動的高低変位の復元波長帯域を6-50mに変更した場合の軌きょう形状、浮き量を求めた。図11、図12にそれぞれの結果を示す。図11より、道床面形状が復元波長帯域3-50mの場合（図8の区間A）に比べて相対的になだらかな形状に変化していることが分かる。これは道床面形状の短波長成分が除去されていることが原因である。また図12からは、復元波長帯域3-50mの場合に比べて浮き量の計算値が小さくなっており、精度が低下している

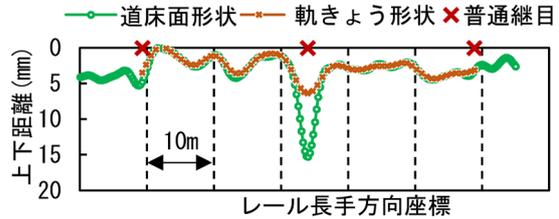
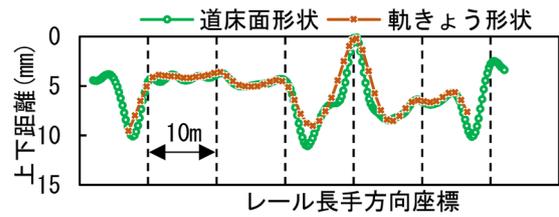


図8 道床面形状と軌きょう形状
(上：区間A，下：区間B)

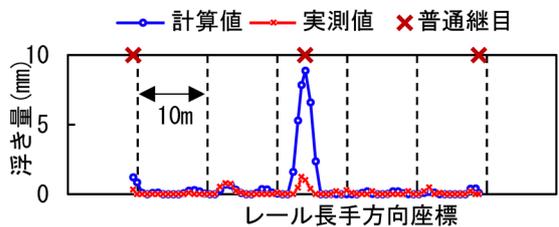
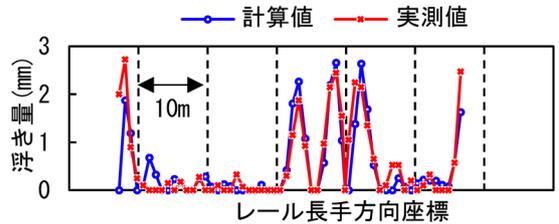


図9 浮き量（上：区間A，下：区間B）

ことが分かる。よって本手法においては復元波長帯域が浮きまくらぎの検出精度に大きく影響することが分かった。すなわち復元波長帯域を選択する場合には適切な波長帯域を選定することが必要であるといえる。また、さらに短波長側に拡張することができれば検出精度向上の可能性があると考えられる。

4. 営業線の浮きまくらぎの実態把握

4.1 概要

本章では、これまで明らかにされてこなかった営業線における浮きまくらぎの発生状況について、3章で良好な検出精度を確認した浮きまくらぎ検出手法を用いてその実態を把握することとした。なお、検討対象区間を表2（ロングレール区間）のとおりとし、それぞれの道床面形状は波長帯域3-50mで復元することにした。対象区間はいずれも直線区間であり、主にPCまくらぎ、

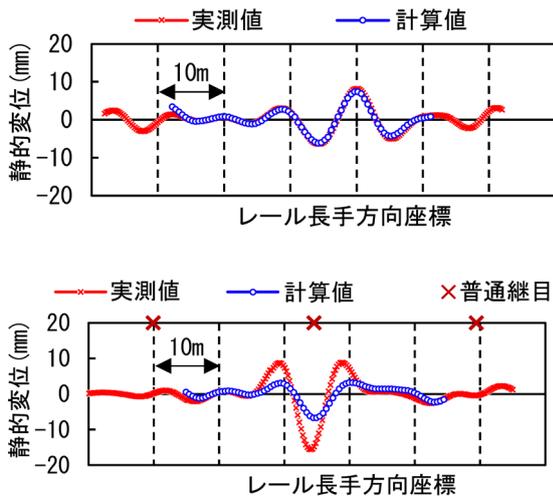


図 10 静的高低変位（上：区間 A，下：区間 B）

JIS50kgN レールが用いられたロングレールが敷設されている狭軌で、合計延長は 13 線区 12,883m である。軌道構造の違いによる影響を確認するため、4 種類のまくらぎ敷設間隔の区間を選定した。

4.2 浮きまくらぎの発生状況

表 2 に示した各区間について、浮きまくらぎ検出手法により浮きまくらぎ発生状況を把握した。その結果、まくらぎ総本数 17,133 本のうち、31.9%にあたる 5,465 本が浮きまくらぎと判定された。なお、ここで浮きまくらぎは、本手法により左右レールともに支持ばね反力が 0 となる箇所と定義した。

図 13 にレール長手方向に連続で発生している浮きまくらぎ（以下、連続浮きまくらぎという）の内訳を示す。同図からは単独（連続 1 本）で発生している浮きまくらぎよりも、2 本以上連続して発生している連続浮きまくらぎが多く存在していることが分かる。なお、本検討における最大の連続浮きまくらぎ本数は 10 本であり、構造上浮きまくらぎが発生しやすい無道床橋梁が介在している箇所であった。

また無道床橋梁を除いた箇所に対して、連続浮きまくらぎが存在する範囲（以下、浮き範囲という）をまくらぎ間隔別に整理し、浮き範囲の存在率を把握した。図 14 に、浮き範囲の存在率の累積和を示す。凡例の数値はまくらぎ間隔を表している。同図によると、本調査の範囲内ではまくらぎ間隔によらず浮き範囲は最大でも 5m 程度であった。

4.3 高低変位と浮きまくらぎの関係

浮きまくらぎの発生状況と軌道の保守状態との関係を明らかにするため、軌道保守の実務において一般的に用いられる、延長 100m を 1 ロットとしたときの高低変位

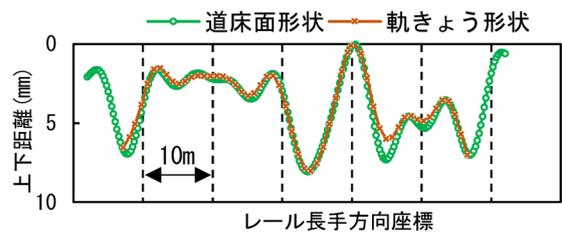


図 11 道床面形状と軌きょう形状
（復元波長帯域 6-50m）

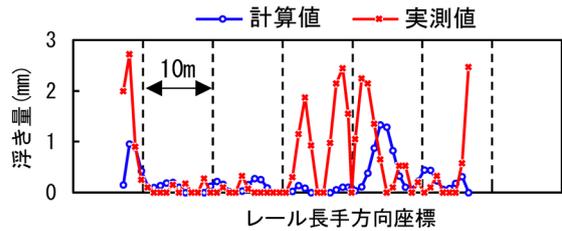


図 12 浮き量（復元波長帯域 6-50m）

表 2 検討区間

まくらぎ間隔 (mm)	区間数	合計延長 (m)
581	4	2075
641	6	4729
735	2	5095
900	1	934

の標準偏差と、浮きまくらぎの関係をまくらぎ間隔ごとに整理した。なお、踏切や無道床橋梁等、PC まくらぎ区間以外の特異箇所を含むロットについては除外した。図 15 にロット別の高低変位の標準偏差と、ロット内の浮きまくらぎ発生率（= 浮きまくらぎ本数 / 全まくらぎ本数）の関係を示す。また、図 16 にはロット別の高低変位の標準偏差と、ロット内に存在する最多の連続浮きまくらぎ本数の関係を示す。なお、図 15、16 の凡例の数値はまくらぎ間隔を表している。それぞれの結果を考察すると以下ようになる。

- ① 本検討における浮きまくらぎの発生率は最大で 0.49、最小で 0.12 であり、高低変位の標準偏差が大きいほど、すなわち高低変位の整備状態が悪いほど高くなる傾向がみられる。
- ② ①の傾向はまくらぎ間隔によらず同様であり、まくらぎ間隔に依存する傾向はみられない。
- ③ 連続浮きまくらぎ本数についても、高低変位の標準偏差が大きいほど多くなる傾向がみられる。
- ④ ③の傾向はまくらぎ間隔によらず同様であるが、さらに、まくらぎ間隔が小さいほど連続浮きまくらぎ本数が増える傾向がみられる。この原因としては、同じ浮き範囲に存在するまくらぎの本数は、まくらぎ間隔が小さいほど多くなるためであると考えられる。

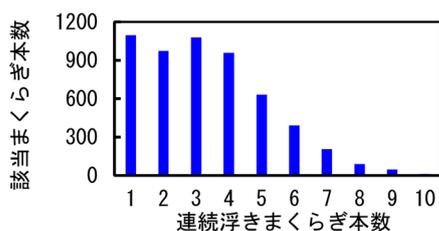


図 13 連続浮きまくらぎの内訳

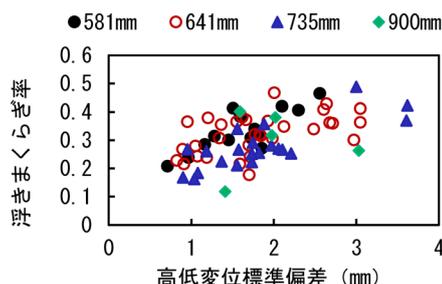


図 15 高低変位標準偏差と浮きまくらぎ率の関係

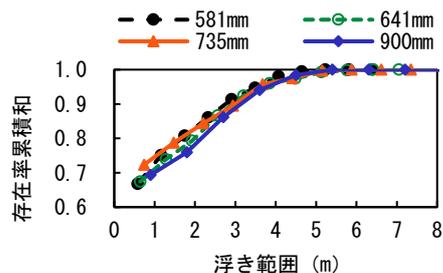


図 14 浮き範囲の存在率の累積和

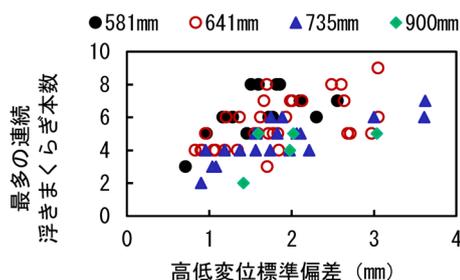


図 16 高低変位標準偏差と最大の連続浮きまくらぎ本数の関係

5. LABOCS への実装

本研究で提案した浮きまくらぎ検出手法を現場の保守管理に活用できるように、鉄道事業者向けの浮きまくらぎ検出用のプログラムを開発し、軌道保守管理データベースシステム LABOCS Ver.4.2 に実装した⁶⁾。このプログラムは、本手法による浮きまくらぎ検出の精度に対して、まくらぎ間隔やまくらぎ質量などのばらつきの影響が小さいことを確認したうえで、3連モーメント法を応用したもの⁷⁾である。新たに実装されたこの機能により、軌道上に存在する浮きまくらぎを的確に把握し、効率的に対処できるようになることが期待される。

6. まとめ

本研究では、浮きまくらぎ検出手法を提案し、その検出精度の検証を行った。また本手法を用いて、営業線における浮きまくらぎの実態を把握した。以下、本稿における実施内容をまとめる。

- (1) 軌道検測車の高低変位データをもとに道床面形状および軌きょう形状を推定し、浮き量を算出する手法を開発した。
- (2) 本手法を営業線に適用したところ、ロングレール区間にて良好な浮きまくらぎの検出精度が確認できた。
- (3) 本手法を用いて、営業線における浮きまくらぎの発

生状況や、浮きまくらぎと高低変位の標準偏差との関係性を明らかにした。

今後は浮きまくらぎ検出手法を用いて、浮きまくらぎに関する有用な知見を蓄積していく予定である。

文献

- 1) 村本勝己, 中村貴久, 野村清順: 浮きまくらぎを自動で補正する, RRR, Vol.71, No.12, pp.8-11, 2014
- 2) 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
- 3) 佐藤裕: 軌道力学, 鉄道現業社, pp.10-16
- 4) NX Nastran User's Guide, Siemens PLM Software, 2014.
- 5) 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
- 6) 吉田尚史, 田中博文, 西本正人: 軌道保守管理データベースシステム (LABOCS) Ver.4.2 のリリースと新機能, 新線路, pp.23-25, 2020
- 7) 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, 2019