

バラスト軌道における浮きまくらぎの検出と線路保守実務への応用に関する研究

楠田, 将之

<https://hdl.handle.net/2324/4110582>

出版情報 : Kyushu University, 2020, 博士 (工学), 論文博士
バージョン :
権利関係 :



バラスト軌道における浮きまくらぎの検出と
線路保守実務への応用に関する研究

令和2年7月

楠田 将之

Masanobu KUSUDA

目 次

第1章 序論	4
1.1 研究の背景	4
1.1.1 浮きまくらぎに関する課題認識	4
1.1.2 浮きまくらぎの検出に関する既往の研究	5
1.1.3 本研究の目的	6
1.2 本論文の構成	6
第2章 用語の定義	9
2.1 軌道の構造に関する専門用語	9
2.2 軌道の設計・管理に関する専門用語	11
第3章 バラスト軌道の支持状態の把握手法	15
3.1 手法の概要	15
3.2 FEMを用いた数値解析による浮きまくらぎ検出手法	17
3.2.1 レール	17
3.2.2 まくらぎおよびレール締結装置等	17
3.2.3 道床および路盤	17
3.2.4 拘束条件	17
3.2.5 計算コード	18
3.3 浮きまくらぎ検出手法の妥当性の確認	19
3.3.1 検討対象箇所の大略	19
3.3.2 浮き量の実測	20
3.3.3 静的変位の実測	21
3.3.4 復元波形の作成および道床面の設定	21
3.3.5 浮きまくらぎ検出手法の精度の確認	22
3.4 浮きまくらぎ検出手法の精度に与える各種影響の確認	28
3.4.1 継目形状の把握	28
3.4.2 復元波長帯域の違いによる影響	29
3.5 営業線のまくらぎ支持状態の実態把握	32
3.5.1 検討区間および使用データ	32
3.5.2 浮きまくらぎの発生状況	32
3.5.3 高低変位と浮きまくらぎの関係	34
3.6 まとめ	35
第4章 不均一支持箇所の軌道座屈発生への影響	38
4.1 検討の主旨	38
4.2 まくらぎ支持状態に着目した軌道座屈解析	38

4.2.1	軌道の座屈検討手法	38
4.2.2	評価手法	39
4.2.3	数値解析モデル	40
4.2.4	解析パラメータ	42
4.2.5	検討結果	45
4.3	座屈リスク箇所の簡便な抽出法の検討	47
4.3.1	検討の主旨	47
4.3.2	ひずみエネルギーとレール変形形状	47
4.3.3	浮きまくらぎを想定したパラメータスタディ	51
4.3.4	座屈発生時のレール変形形状が異なる場合の影響	54
4.4.5	座屈発生温度上昇量の推定と座屈リスク箇所の抽出	56
4.4	まとめ	59
第5章	不均一支持軌道走行時の軌道の応答と高低変位進み	61
5.1	検討の主旨	61
5.2	浮きまくらぎ箇所の軌道応答測定	61
5.2.1	地上測定箇所の選定と測定項目	61
5.2.2	測定結果	66
5.3	軌道支持状態と軌道応答の再現解析	70
5.3.1	数値計算モデル	70
5.3.2	計算結果	71
5.4	不均一支持箇所における軌道沈下の状況把握	72
5.4.1	地上測定箇所の高低変位および浮き量の推移	72
5.4.2	道床突き固め前後の高低変位および浮き量の推移	74
5.4.3	高低変位と車両通過時のレール圧力の関係	79
5.4.4	考察	82
5.5	まとめ	84
第6章	浮きまくらぎ検出手法の汎用性の向上	86
6.1	実務に適用する上での課題	86
6.1.1	位置に関する課題	86
6.1.2	質量に関する課題	86
6.1.3	まくらぎ下面の支持剛性に関する課題	87
6.2	浮きまくらぎ検出の感度分析	87
6.2.1	検討目的	87
6.2.2	検討方法	87
6.2.3	検討結果	88
6.3	実務用浮きまくらぎ検出プログラムの作成	94
6.3.1	計算手法構築の目的	94
6.3.2	プログラムの概要	94

6.3.3 プログラムの計算精度の確認	99
6.4 まとめ	102
第7章 研究のまとめと今後の展望.....	104
7.1 結 論	104
7.2 今後の展望	105
7.2.1 浮きまくらぎを考慮したバラスト軌道の設計・管理へのさらなる応用	105
7.2.2 浮きまくらぎ検出手法の精度向上	106
7.2.3 軌道座屈への反映について	106
7.2.4 軌道沈下への反映について	106
7.2.5 その他実務への適用について	106
7.3 公開論文	107
謝 辞.....	109

第1章 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 浮きまくらぎに関する課題認識

バラスト軌道は、鉄道線路に用いられる一般的な軌道構造で、路盤上にバラスト道床（以下、「道床」という。）と、その上に設置される、軌きょうと称するまくらぎ、レールおよび両者を固定するレール締結装置から構成される構造物である。建設コストが安価で施工速度も速く、補修が容易であることから今日まで広く採用されている。なお、車両荷重が繰返し作用することにより、道床部は徐々に変形し軌道変位が漸進するため、車両の走行安全性を確保するために、補修を繰返し必要としている。このように、バラスト軌道は強度面のみならず形状の面からも、その状態を評価して定期的な保守を行う必要があり、一般の土木構造物とは異なる特徴を持つ。

営業線のバラスト軌道において、自重のみが作用する無負荷時に、まくらぎ下面が道床上面（以下、「道床面」という。）に接触せずレールにぶら下がっている浮きまくらぎが散見される。図1-1にその概要図を示す。浮きまくらぎは、車両走行時にバラストとまくらぎが衝突することによりバラストを破砕させたり、路盤面からの噴泥を誘発させたりし、軌道状態を急速に悪化させる一因となる[1-1]。また、軌道の座屈に抵抗する道床横抵抗力のうち約1/3を占めるまくらぎ底面負担分[1-2]を喪失させ、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を低下させる。バラスト軌道の軌きょうをはりと捉えると、支点となる道床面が数多く存在する高次の不静定構造物となっていることから、車両通過に伴い道床面の沈下にばらつきが生じると、浮きまくらぎが形成されることになる。したがって、浮きまくらぎは多くの箇所が存在していると考えられるが、その実態は明らかではない。

バラスト軌道上を走行する車両の荷重は、車輪を案内するレールに直接作用し、まくらぎ、道床を經由して路盤に分散し伝達される。この分散荷重の算定には、連続弾性支持モデル[1-3]や有限間隔支持モデル[1-4]が用いられ、軌道の沈下量の算定や、軌道部材の設計等に反映されている。これらの計算モデルは、まくらぎが均一な道床面に支持されている条件を前提としているため、浮きまくらぎをはじめとする各種の不整の存在および影響を受ける、軌道を構成する各部材の負担力や、軌道の安定性の検討には、熟練した技術者の長年の経験に依存している部分が少なくない。

また、地方ローカル線のバラスト軌道に対して、安全性確保と保守費低減を目的に、寿命の短い木製のまくらぎをコンクリート製のPCまくらぎに交換し、あわせてまくらぎ間隔を拡大する取り組みが一部の鉄道事業者で行われている[1-5]。この種のニーズは今後多くの鉄道事業者に広がっていく可能性があると考えられる。まくらぎ間隔の拡大は、車両荷重を支えるまくらぎ本数を減少させることとなり、軌道の安定性を低下させる恐れがあることから、浮きまくらぎ介在による影響の見極めについて、今後さらに必要性が高まってくることが想定される。

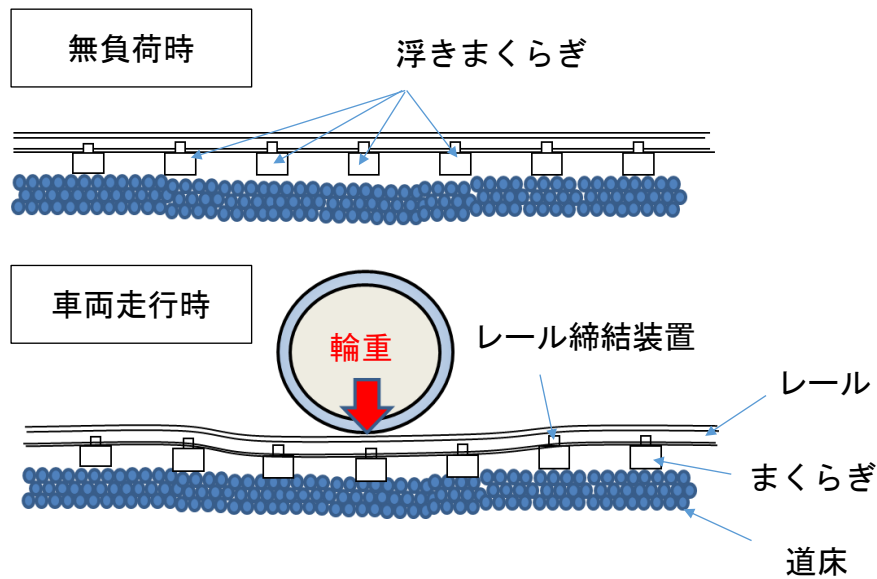


図 1-1 浮きまくらぎの概念図

1.1.2 浮きまくらぎの検出に関する既往の研究

浮きまくらぎが介在する軌道に関する力学的な研究は佐藤ら[1-6]によって行われている。この研究では、レール、まくらぎ間、あるいはまくらぎ、バラスト間に隙間がランダムに存在する条件で、車両走行時のレール上下変位を静的な数値計算により算出する方法を検討している。

家田ら[1-7]は軌きょうの形状について、車両走行時には道床面に合致しているが、車両荷重の作用していない無負荷時には自重によるたわみのみが生じるため、まくらぎ下面が道床面に接地している部分と浮きまくらぎとなっている部分に分かれるとして、両者の関係をはりのたわみ理論を用いて解明することを試みている。関連して山脇ら[1-8]は、同様に軌道検測車で測定された動的な高低変位から、車両走行時の車輪の走行軌跡である軌道の実形状（以下、「走行形状」という。）に該当する復元波形を算出し、これが道床面と一致するとして、自重による軌きょうのたわみを FEM 解析により算出することで、無負荷時の軌道の実形状（以下、「無負荷形状」という。）の推定が可能であるとしている。なお、この研究では、動的な高低変位と人力で測定された高低変位である静的な高低変位の相互関係の確認に主眼が置かれており、実際のまくらぎ配置間隔とは異なる 1m 間隔で取得された走行形状と無負荷形状の比較に留まり、個々の浮きまくらぎの大きさ（以下、「浮き量」という。）の確認までは行われていない。

須永ら[1-9][1-10]は、新幹線の速度向上に伴い課題となっていた著大な輪重を抑制するため、車両の車軸を保持し台車枠を支持する軸箱で測定された上下方向の加速度である軸箱加速度を活用した浮きまくらぎ検出手法を提案している。森本[1-11]は、近年主流となった 2 台車方式の偏心矢測定法による軌道検測車の測定特性に着目した高低変位の活用方法を提案し、木村ら[1-12]は、この手法により浮きまくらぎを検出できる可能性について言及している。田中ら[1-13]は、動的な高

低変位と静的な高低変位との差を求めることにより、輪重によって軌道が上下に変形する道床劣化箇所を抽出できるとしており、目視による道床表面の状況と照合させ検出精度の検証を行っている。

しかし、上記いずれの手法においても、浮きまくらぎの検出精度については未確認であり、現状では実務適用は困難である。

1.1.3 本研究の目的

以上を踏まえ、本研究は、これまで存在が確認されその悪影響が指摘されていたものの、技術的な知見の蓄積に乏しい浮きまくらぎに着目し、まくらぎの支持状態が軌道に及ぼす影響を解明することを目的とする。

まず、浮きまくらぎを検出する手法を提案し、営業線の浮きまくらぎの存在状況を明らかにする。次いで、浮きまくらぎが軌道に与える影響について検討する。具体的には、浮きまくらぎが軌道の座屈発生温度上昇量に与える影響をケーススタディにより把握すると共に、営業線の高低変位の状況より座屈リスク箇所を簡易に抽出する手法を提案する。また、軌道変位進みに与える浮きまくらぎの影響について営業線のデータを追跡調査し、軌道沈下推定式[1-14]との整合性について確認する。加えて、浮きまくらぎ検出手法を線路保守現場においても使用できるようなプログラムの開発を行う。

1.2 本論文の構成

本論文は、全7章で構成され、各章の概要は以下のとおりである。

第1章では、研究の背景として、バラスト軌道の構造と設計理論、および既往の浮きまくらぎ検出手法に関する研究の概略を示すと共に、研究の目的について述べる。

第2章では、本論文において用いた鉄道の軌道分野の専門用語について技術的背景を含めて概説する。

第3章では、軌道の諸元と軌道検測車で測定された高低変位の復元データを用いて、数値計算により自重による軌きょうのたわみを算出し、浮きまくらぎを検出する手法について説明する。その計算精度について、算出したまくらぎの浮き量および無負荷時の高低変位の計算値と、現地で測定した実測値とを比較して確認するとともに、精度に与える影響について論じる。また、本手法を用いてロングレール区間のまくらぎ支持状態の実態について調査し、高低変位との関係性について確認する。

第4章では、不均一支持状態が軌道の座屈発生温度上昇量に与える影響について検討する。具体的には、軌道の座屈に抵抗する道床横抵抗力は、道床面とまくらぎ下面間の摩擦力の影響を受けるため、**第3章**で提案した手法を用いて、まくらぎ別に道床面に作用する死荷重の大きさを算

出し、それに基づき道床横抵抗力を定義して、既往の研究で用いられている軌道座屈解析ツールを用いて軌道座屈の発生温度上昇量への影響を調査する。加えて、パラメータスタディにより、座屈直前時点における温度上昇量と、道床ばねに蓄えられるひずみエネルギーに着目し、個々のまくらぎの支持状態から、座屈発生温度上昇量が低下する座屈発生リスク箇所を抽出できる可能性について検討する。

第5章では、浮きまくらぎ箇所を車両が走行する際のレール圧力について実測により確認した結果を示し、数値計算による再現可能性について検討する。また、営業線において、浮きまくらぎの経時変化の状況を調査し、レール圧力の大きさと高低変位の進みへの影響を整理する。加えて、これらの結果を踏まえて、現在用いられている軌道沈下モデルとの整合性について論じる。

第6章では、営業線に存在するまくらぎの間隔、部材の質量および支持剛性のばらつきが、浮きまくらぎ検出の精度に与える影響について感度分析を行う。また、この結果を踏まえて、浮きまくらぎの検出を線路保守現場で容易に行うことができるプログラムを開発すると共に、その概要と適正な使用方法について示す。

第7章では、本研究で得られた結論を記し、今後の展望について述べ、本論文の結論とする。

参考文献

- [1-1] 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, 2013.
- [1-2] 保線工学編集委員会編: 保線工学<上>, pp.295-297, 鉄道現業社, 2016.
- [1-3] 佐藤裕: 軌道力学, 鉄道現業社, pp.10-19, 1972.
- [1-4] 宮本俊光, 渡辺偕年: 線路, pp.438-450, 山海堂, 1980.
- [1-5] 藪中嘉彦, 高尾賢一: 下級線に適したPCまくらぎ化の検討, 日本鉄道施設協会誌, Vol.56, pp.238-241, 2018.
- [1-6] 佐藤裕, 平田五十: レール支持点に遊隙がある軌道のレール沈下特性, 鉄道技術研究報告 No.393, 1964.
- [1-7] 家田仁, 平田和敏, 抱山洋之: 異種測定方式による軌道狂い測定値の相互関係, 鉄道線路, pp.16-21, 1986.6.
- [1-8] 山脇浩, 家田仁: 有限要素解析による動的及び静的狂いの相互関係, 土木学会第42回年次学術講演会概要集, IV-251, 1987.
- [1-9] 須永陽一, 井手寅三郎, 金尾稔: 軸箱加速度を活用した短波長軌道狂いの管理手法, 鉄道総研報告, Vol.9, No.2, pp.35-40, 1995.
- [1-10] 須永陽一, 佐野功, 井手寅三郎: 高速新幹線における短波長軌道狂いの検出法, 鉄道総研報告, Vol.13, No.4, pp.11-16, 1999.

- [1-11] 森本勝：偏心矢測定による軌道状態の把握手法，第 9 回鉄道技術連合シンポジウム（J-RAIL2002）講演概要集，S2-1-4，pp.417-420，2002.
- [1-12] 木村寛淳，田中博文，下野勇希：偏心矢を用いたバラスト軌道における高低変位急進箇所の効率的な検出手法，第 65 回土木学会年次学術講演会概要集，IV-212，pp.423-424，2010.
- [1-13] 田中博文，松本麻美：軌道検測車による道床劣化箇所の抽出法の開発，第 24 回鉄道技術・政策連合シンポジウム（J-RAIL2017），S2-2-3，2017.
- [1-14] 保線工学編集委員会／編：保線工学<上>，pp.216-232，鉄道現業社，2016.

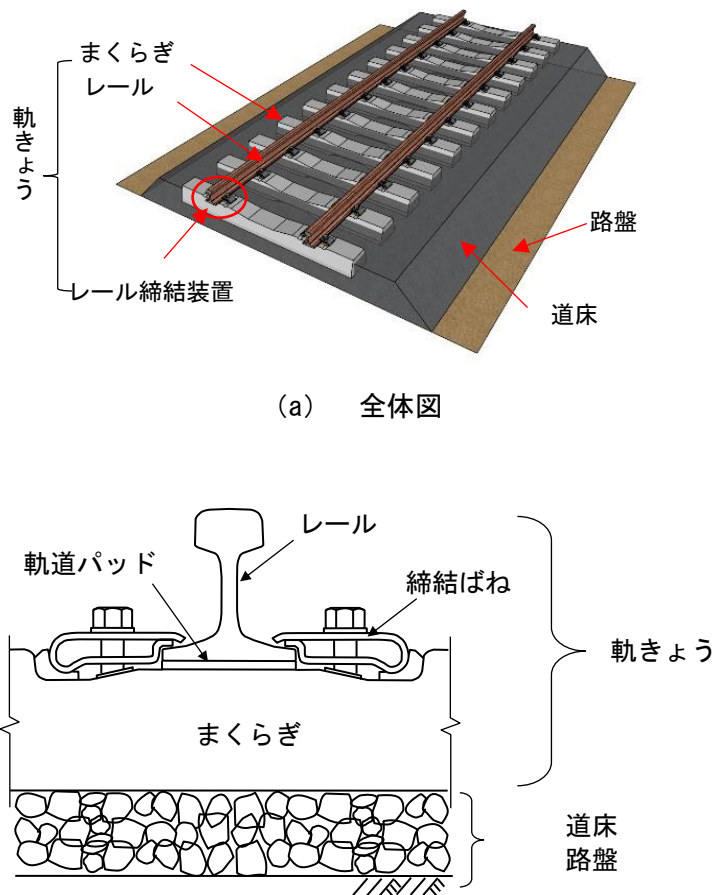
第2章 用語の定義

本論文では、以下に述べる鉄道分野の技術用語を用いる[2-1]～[2-5].

2.1 軌道の構造に関する専門用語

(1) バラスト軌道

鉄道線路に敷設される一般的な軌道構造で、主に道床（碎石）、まくらぎ、レールおよびレール締結装置から構成される（図2-1）。建設コストが安価で施工速度も速く、補修も容易であることから今日まで広く採用されてきている。しかし、列車荷重が繰返し作用することにより、道床に沈下が生じて軌道変位が漸進するため、定期的な補修を必要とする。



(a) 全体図

(b) 断面図

図2-1 一般的なバラスト軌道と軌道部材の概念図

(2) 軌道部材

軌道を構成する部材の総称。レール、レール締結装置、まくらぎ、軌道スラブ、道床、路盤等がある。

(3) 軌きょう

バラスト軌道を構成する軌道部材のうち、まくらぎにレール締結装置を用いてレールが締結されたもの。軌きょうを上下・左右に移動させることにより、比較的容易に保守が可能である点がバラスト軌道の特徴の一つとなっている。

(4) レール

鉄道軌道において、車両の車輪と軌道が接する部分で、車両の重量のまくらぎへの伝達、および車両走行の案内を行うと同時に、車輪との間に平滑な走行面を提供する部材。我が国では長さ25m のものが一般的である。端部は継目と称し、図 2-2 に示すようにレール継目板で連結されるのが一般的である。なお、レール端部同士を溶接等により接合して 200m 以上としたものをロングレールという。

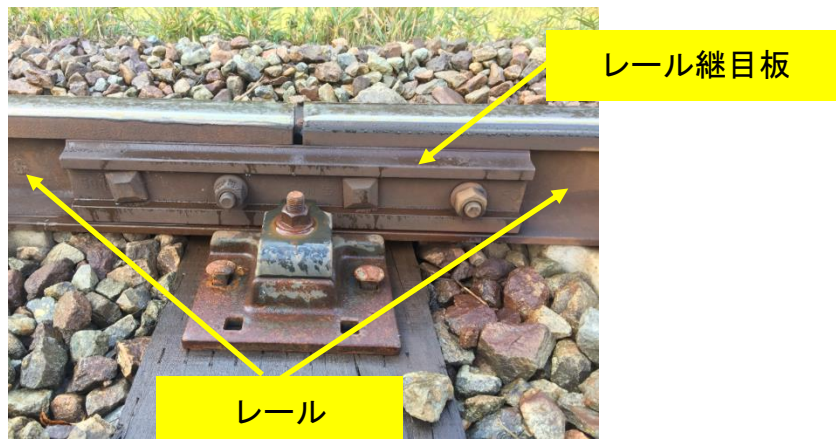


図 2-2 レール継目部

(5) レール締結装置

レールをまくらぎに固定する部材である。軌道に適度の弾性を与えて振動を低減し、車両からレールに作用する上下・左右方向の力を受け、まくらぎへと伝達する。バラスト軌道に用いられるものは、レールを押さえることにより、レールが長手方向に移動することを防止する機能も有する。

(6) まくらぎ

左右のレール間隔を一定に保ち、レールから伝達される列車荷重を広く道床に分散させる部材

である。従来は木材を素材としていたことから「枕木」と表記していたが、現在ではコンクリート、鉄鋼、合成樹脂などの材料が使用されているため「まくらぎ」と表記する。

(7) 道床

まくらぎから伝えられた力をさらに分散し、衝撃を緩和して路盤に伝える。また、排水やレールとまくらぎをしっかりと包み込み固定する機能も有する。材料は主に砕石が用いられ、車両の走行により破碎や流動が生じ、軌道に変形を生じさせる部位となっている。

2.2 軌道の設計・管理に関する専門用語

(1) 輪重

鉄道車両が線路上を走行する際にレール・車輪間に作用する力のうち、レールに対して垂直な面内にある上下方向成分の分力のこと。車両の重量を支える力としての静止輪重と、車両の運動に伴い発生する変動分の和で表される。

(2) 変動輪重

車両の静止状態における1車輪当りの荷重を静止輪重というのに対し、走行することにより発生する動的輪重から静止輪重を差し引いた変動分の荷重のこと。

(3) 横圧

車輪・レール間に作用する力のうち、レール長手方向に対して垂直な平面内にある左右方向成分の分力のこと。

(4) レール圧力

輪重がレールを介して伝達する際、まくらぎ1本に作用する鉛直方向の分散荷重のこと。圧力と称されているが、力の次元をもつ。レールの鉛直曲げ剛性および軌道の弾性により隣接するまくらぎへと荷重が分散するため、輪重そのものより小さくなる。

(5) 軌道変位

レール位置の設定位置からの変位のこと。一部の鉄道事業者や過去の文献では「軌道狂い」という用語が用いられている。本論文では、国土交通省鉄道技術省令、解釈基準等の標記に従い、軌道変位に統一する。なお、種別としては、以下に述べる高低変位、通り変位などがある。

(6) 高低変位

レールの上下方向の軌道変位のこと。通常は10m弦正矢法による値が用いられる。バラスト軌道では、主に道床部に生じる不同沈下により生じ、車両の上下並進運動に影響を与える。高低狂いともいう。一般に、軌道検測車により得られる高低変位を動的な高低変位、人力あるいは持ち運びが容易な簡易軌道検測装置により得られる高低変位を静的な高低変位と呼ばれている。つま

り、動的な高低変位は車両走行時の軌道形状を把握していることとなり、静的な高低変位は車両荷重の載っていないほぼ無負荷時の軌道形状を把握していることとなる。なお、本論文においては、特に断りが無い限り、高低変位とは動的な高低変位を指す。

(7) 通り変位

レールの左右方向の変位のこと。通常は 10m 弦正矢法による値が用いられる。車両の左右並進運動に影響を与える。通り狂いともいう。

(8) 10m弦正矢法

高低変位、通り変位の測定・管理方法として一般的に用いられている手法である。具体的には、10m の長さの弦をレールにあて、両端を結ぶ線分に対する、弦中央でのレールとの離れを測定するものである。数学的にはレール位置の絶対形状の 2 階差分であり、得られる波形は実形状とは異なる。

(9) 偏心矢法

近年、軌道検測車の走行性向上のために多く用いられている方法で、測定位置が弦の中央から偏った位置としたもの。弦長と偏心位置により検測特性は異なる。図 2-3 に 10m 弦正矢法との検測方法の違い、図 2-4 に検測特性の違いを示す。ここでは、本研究で使用する 2.1m-14.4m のものを示した。一般に、測定結果はデジタル信号処理により 10m 弦正矢法へ変換されたものを用いる。

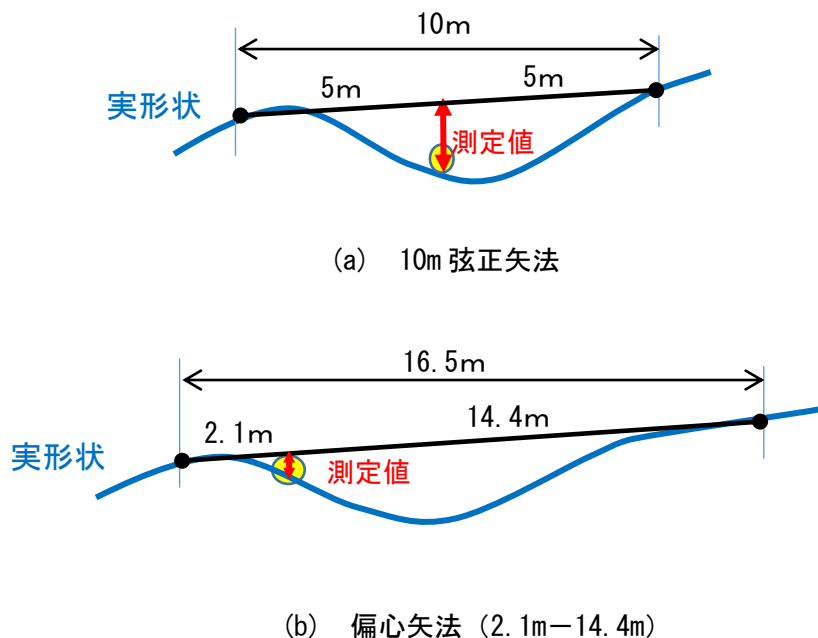


図 2-3 10m 弦正矢法と偏心矢法の検測方法

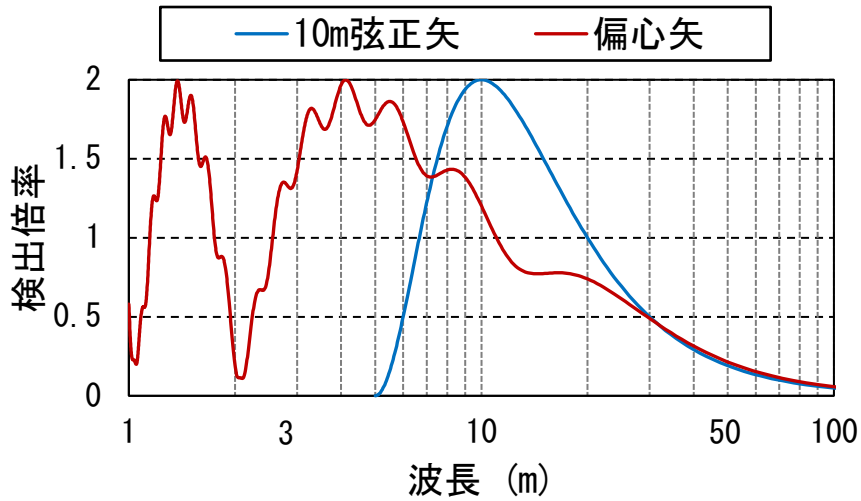


図 2-4 10m弦正矢法と偏心矢法の検測特性

(10) 復元波形

正矢法や偏心矢法で測定された軌道変位の測定波形から，デジタル信号処理によって得られた近似的な軌道の実形状のこと．この信号処理に用いるフィルタを復元フィルタという．元の検測手法で検出倍率が小さい波長帯域では精度が低下する．図 2-5 に 10m 弦正矢法による軌道変位と復元波形の概念図を示す．

実形状, 復元波形

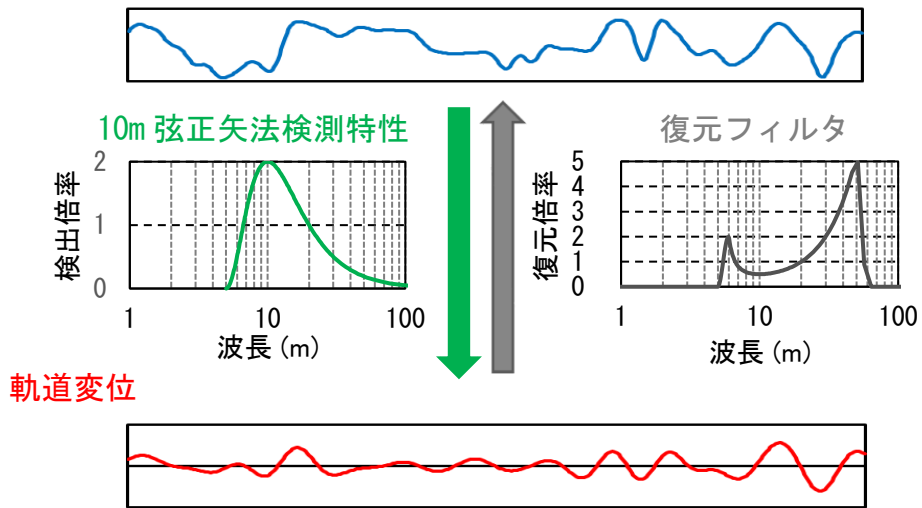


図 2-5 10m 弦正矢法による軌道変位と復元波形の関係

参考文献

- [2-1] 公益財団法人鉄道総合技術研究所，公益社団法人日本鉄道施設協会：わかりやすい鉄道技術 1.鉄道概論・土木編，2003.5.
- [2-2] 日本工業規格 JIS E1101:2001 鉄道—線路用語.
- [2-3] 公益財団法人 鉄道総合技術研究所編：第3版 鉄道技術用語辞典，2016.12.
- [2-4] 国土交通省鉄道局監修・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，2012.
- [2-5] 国土交通省鉄道局監修：解説 鉄道に関する技術基準（土木編），2002.

第3章 バラスト軌道の支持状態の把握手法

3.1 手法の概要

まず、軌道のゆがみの管理方法とその特徴を述べる。通常は、レールに長さ 10m の基準弦をあて、両端を結ぶ線分と弦の中央におけるレールとの離れを測定する 10m 弦正矢法で管理されている。これは、数学的にレール形状の 2 階差分と等価となる。この方法で把握されたレールの上下方向のゆがみを高低変位といい、軌道検測車を用いて測定される車両走行時の動的な高低変位と、人手または軽量の測定装置を用いてほぼ無負荷の状態でも測定される静的な高低変位がある。検測法は正矢法のほか、代表的なものとして偏心矢法[3-1]や慣性正矢法（動的な変位のみ）[3-2]があり、いずれも 10m 弦正矢法に変換のうえ管理されている。走行形状や無負荷形状はこれらの測定結果よりデジタル逆フィルタの手法を用いて推定が可能である。こうして得られた形状を一般に復元波形[3-3]といい、軌道の整正作業等に活用されている。なお、復元波形は特定の周波数範囲の部分的な復元であり、元の検測法の特性的影響を受ける。10m 弦正矢法で測定された変位と復元波形の関係は図 2-4 に示したとおりである。

浮きまくらぎの検出は、各まくらぎ配置位置において、無負荷時の道床面の位置とまくらぎ下面の位置を把握し、これらの差を取ることで可能である。道床面を直接把握することは困難であるが、車両荷重作用時にまくらぎ下面が道床面と合致するので、車輪の走行軌跡である走行形状を把握できればよい。これは軌道検測車による高低変位から復元波形を求めることにより推定できる。ただし、図 2-1 に示したように、バラスト軌道には軌道パッド、締結ばねや道床、路盤など弾性変形する部材があり、高低変位などに伴う輪重に変動が生じる場合、それぞれの弾性部材の変形量に相違が生じる。つまり、無負荷時と車両荷重作用時とで、道床面のレール長手方向の形状（以下、「道床面形状」という。）に相違が生じたり、軌きょうの高さ（レール面とまくらぎ下面間の距離）に相違が生じたりする。後者の場合、道床面形状と走行形状が一致しないことになる。そこで、高低変位に伴う輪重の変動による軌道の弾性変形への影響について検討した。

軌道全体の弾性変形量を、連続弾性支持はりモデル[3-4]で算出すると、荷重載荷点における弾性変形量は $\beta = \sqrt[4]{k/4EI_x}$ とおいて、式(3-1)で表される。

$$y = \frac{W}{8EI_x\beta^3} \quad (3-1)$$

ここで、 k は単位長さあたりの支持ばね定数、 EI_x はレールの強軸回りの曲げ剛性、 W は輪重である。

変動輪重は設計標準[3-5]に従い静止時における輪重の 10% を考慮した。式(3-1)に用いる各諸元は、現地の状況やレール締結装置の種別により異なるため、汎用のレール締結装置の評価を行った文献[3-6]の諸元にに基づき検討した。これらの値として、軌道パッドのばね定数に相当するレール

ル下ばね定数を 106.7 kN/mm, 道床と路盤のばね定数に相当する支承体下ばね定数を 48.8 kN/mm, まくらぎ間隔を 610 mm, レールを JIS 50kgN とした. 重量の大きい機関車 (輪重 80kN) の走行を想定して 10%の変動輪重分を 8 kN としても, 道床面形状に生じる高さの相違は 0.07 mm, 軌きょうの高さの相違は 0.03 mm と十分小さい. したがって, 本検討においては, これらの差を無視し, 車両走行時, 無負荷時とも道床面形状は一定であり, 走行形状と道床面形状は一致するものとした.

一方, 無負荷時のまくらぎ下面の位置は, 無負荷形状より把握可能である. 無負荷形状の把握手法については, 現地でのレベル測量や, 静的な高低変位 (以下, 「静的変位」という.) の測定結果を復元する方法が考えられるが, いずれも多大な労力が必要となる. そこで, 道床面上での軌きょうの自重によるたわみを算出することにより把握することとした.

図 3-1 に浮きまくらぎ検出のフローを示す.

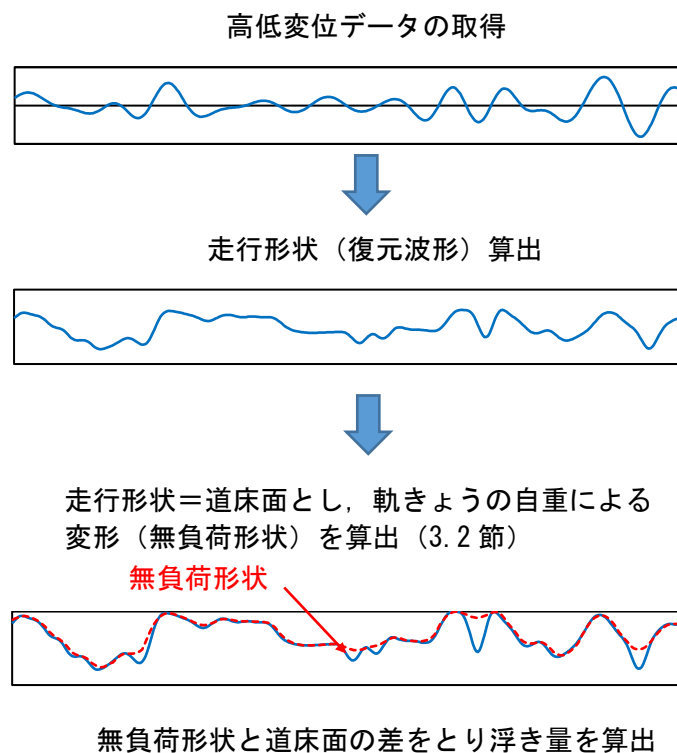


図 3-1 浮きまくらぎ検出のフロー

3.2 FEM を用いた数値解析による浮きまくらぎ検出手法

数値解析により自重による軌きょうの変形を推定するため、レール長手方向および鉛直方向の片側レール分の二次元はりばねモデルを FEM で構築した。片側レール分としたのは、高低変位が左右それぞれ独立して測定されており、レールの変形は左右の輪重が異なる場合でも互いに他のレールに与える影響が小さいためである[3-4]。モデル化の詳細を以下に示す。以降、本論文において、この数値解析手法をまとめて「浮きまくらぎ検出手法」と称することとする。

3.2.1 レール

はり要素でモデル化し、所定の曲げ剛性と質量を設定した。

3.2.2 まくらぎおよびレール締結装置等

まくらぎとレール締結装置の片側レール分を基本とする質量で定義した。まくらぎ上面に設置されている信号設備や、レール継目部の継目板など、自重により軌きょうの変形に影響する部材についても考慮に加えるものとした。

レール締結装置を構成する軌道パッドと締結ばねの影響により、自重作用時のレールとまくらぎの間隔は支持状態に依存し一定とはならないが、自重は大きくても 2 kN 程度であり、3.1 節に用いたレール下ばね定数を考慮するとこの影響は 0.02 mm 程度と小さい。そこで、レールとまくらぎは一体で挙動するものとして、質量要素の配置位置はレールをモデル化したはり要素上に、まくらぎの敷設位置を考慮して設けられた節点上とした。

3.2.3 道床および路盤

まくらぎ下面の道床と路盤の剛性については、ばね要素でモデル化し、質量要素が配置されたはり要素上の節点と不動点とを結合した。軌きょうと道床との接触を考慮し、両者に隙間が存在する場合は反力が生じない特性、両者が接触し隙間が存在しない場合にはバラスト軌道の構造解析モデル[3-7]で一般に用いられている線形特性の軌道の支持ばねとする、二段線形の材料非線形特性とした。この特性変化点は道床面に基づき以下のとおり設定した。イメージを図 3-2 に示す。

- (1) 道床面よりまくらぎ位置に対応する箇所を抽出する。道床面のデータ算出位置とまくらぎ位置とが一致しない場合は、隣接する道床面のデータ算出位置の値より線形補間した値とする。
- (2) 抽出した道床面のうち、最も高い地点を基準とし、その上に水平に軌きょうを設置する状況を想定する。各まくらぎ位置に対応する道床面までの距離を初期の隙間とみなし、各ばね要素の特性変化点とする。図 3-2 中の a, b, c がこれに該当する。ここでは、モデル作成の効率および計算精度を考慮してこの特性変化点を 0.5 mm 刻みで設定する。

3.2.4 拘束条件

二次元平面上で不動点は全自由度を拘束し、その他のレール上の節点についてはレール長手方

向の変位を拘束し，従来のバラスト軌道の構造解析モデル[3-7]と同様に幾何学的非線形性については考慮しないものとした。

3.2.5 計算コード

コードは汎用解析ソフト Femap with Nastran ver 11.3.0[3-8]を用い，2次元非線形静的解析（非線形弾性解析）を行った．荷重は鉛直下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，レールを鉛直下向きに一定量強制変位させた状態で釣り合いをとった後に，強制変位を解放しつつ鉛直下向きに重力加速度を作用させた．

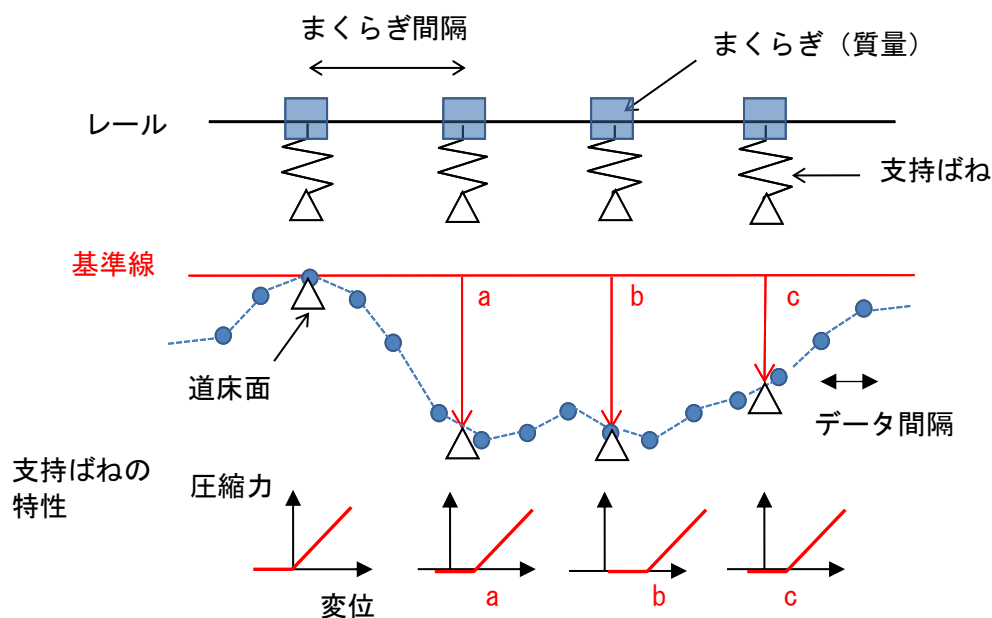


図 3-2 バラスト道床不整の設定イメージ

3.3 浮きまくらぎ検出手法の妥当性の確認

浮きまくらぎ検出手法の精度を検証するため、営業線のデータを用いてケーススタディを行った。営業線の高低変位データおよび軌道諸元に基づき図 3-1 のフローに従って無負荷形状を求め、そこから静的変位および浮き量を求めた。これと現地にて実測した静的変位と浮き量とを比較した。

なお、現地での実測データと、高低変位データの取得条件を極力同一のものとするため、現地での実測は、軌道検測車による高低変位測定日の前後 1～3 日に実施した。この間の通過トン数は 1～1.2 万トン程度とごくわずかであり、測定時期の相違による影響は小さい。

3.3.1 検討対象箇所の概略

営業線の対象箇所の概要を表 3-1 に示す。軌道構造の違いが精度に与える影響を検証するため、3 種類の異なる軌道構造の区間を選定した。いずれも狭軌で直線、JIS 50kgN レールが使用されている区間である。なお、表 3-1 の支持ばね定数とは、図 3-2 で示した支持ばね特性のうちの線形部分の支持剛性を示し、現地で実測した路盤ばね剛性と、軌道パッドおよびバラスト剛性に基づき算出した値とした。

区間 A は一般的に広く普及している軌道構造であり、まくらぎは全てコンクリート製の PC まくらぎで、レールの継目部を溶接したロングレールが用いられている区間である。

区間 B は、区間 A と同様全て PC まくらぎであるが、レールは溶接せず、図 2-2 に示したようにレール継目板で連結した普通継目となっている区間である。

区間 C は PC まくらぎと木まくらぎが混在する区間であり、連続して PC まくらぎが敷設されている箇所と、図 3-3 に示すように、木まくらぎ 3 本中 1 本を定期的に PC まくらぎとしている部分 PC まくらぎ区間から構成される区間である。レール継目は区間 B と同様普通継目である。

表 3-1 検討対象箇所の概要

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)	年間通過トン 数 (万トン)
A	57 本	PC まくらぎ	溶接	71.0	360
B	69 本	PC まくらぎ	普通	34.3	360
C	92 本	PC まくらぎ	普通	22.3	150
		部分 PC まくらぎ	普通		

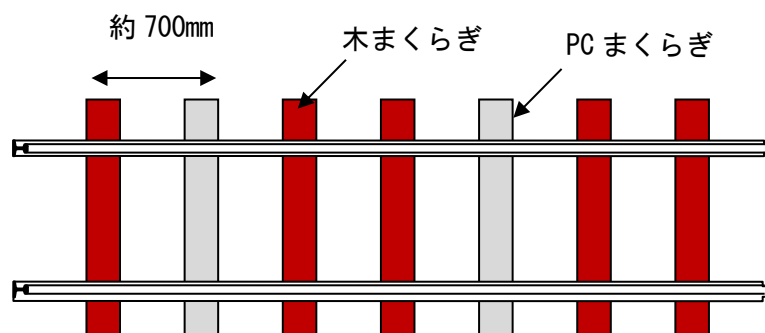


図 3-3 部分 PC まくらぎ区間のまくらぎ配置

3.3.2 浮き量の実測

浮き量の実測は、簡便に精度良く測定が可能な PC まくらぎを対象に行った。まくらぎごとに締結ばねを全て取り外し、まくらぎを完全にレールから分離させて、軌道パッド上面とレール下面間に生じた隙間に対し、テーパーゲージを用いて 0.1 mm 単位で読み取った。読み取り箇所は片側レールあたり軌道パッドの 4 隅とし、その値を算術平均したものを現地の浮き量とした。測定状況を図 3-4 に示す。



図 3-4 浮き量の測定状況

3.3.3 静的変位の実測

静的変位は、図 3-5 に示す簡易軌道検測装置を用いて測定した。本装置は、2m 弦正矢法により連続的に 0.25 m 間隔で測定値が記録されるものである。



図 3-5 簡易軌道検測装置

3.3.4 復元波形の作成および道床面の設定

高低変位は、いずれの区間も 2 台車方式の軌道検測車による 2.1m-14.4m 偏心矢法[3-3]を用いて連続的に測定されている。その測定間隔は 0.25m である。線路保守の実務では前述のとおり 10m 弦正矢法による高低変位に変換して管理されているが、本研究では、復元波形算出にあたり 10m 弦正矢法より波長の短い領域の検出特性に優る 10m 弦正矢法への変換前の測定値（以下、「偏心矢変位」という。）を用いた。図 3-6 に偏心矢変位の検出特性と本研究で用いた復元フィルタを示す。復元帯域は、復元精度を考慮し検出倍率が概ね 0.2 を上回る波長帯域である 3~50m とした。

道床面は前述のとおりまくらぎ位置ごとに設定するため、現地のまくらぎ位置と偏心矢変位を正確に対応させ、数値解析に反映することが重要である。その具体的な処理については、次の手順によった。

まず、偏心矢変位について、営業線軌道上に設置されているデータデポと称する地点管理用地上子により位置合わせを行った。次に、この偏心矢変位に対し、継目やまくらぎ箇所で行った簡易軌道検測装置のデータを基準として、相互相関法による高精度位置補正手法[3-9]による位置合わせ処理を行った。最後に、この偏心矢変位を、3~50m の帯域で復元し、まくらぎ位置に対応する道床面を設定した。

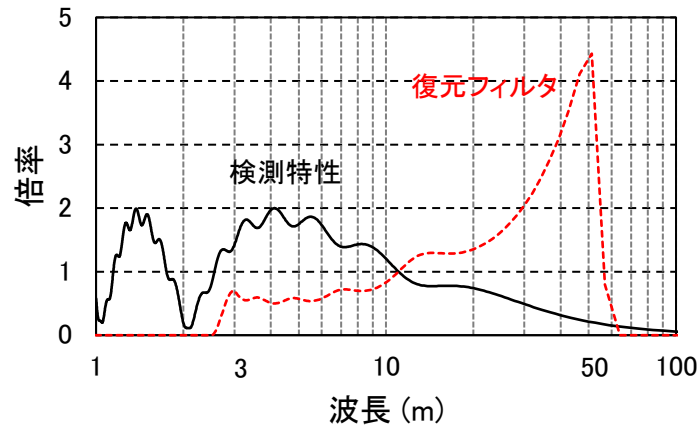


図 3-6 本検討に用いた検測特性と復元フィルタ

3.3.5 浮きまくらぎ検出手法の精度の確認

(1) 浮き量の実測値との比較

3.2 節に示した浮きまくらぎ検出手法により無負荷形状と浮き量を算出し、現地で測定した浮き量の実測値と比較した。図 3-7 に結果を示す。ここで、この図の縦軸の距離とは、図 3-2 に示した基準線（道床面の最高地点）からの距離を示している。ここで、区間 A、区間 B と区間 C とで浮き量の大きさに大きな相違が見られたことから、計算値と実測値の違いを見やすくするため、浮き量のスケールを変更している。この図によると、一般的な軌道構造である区間 A と普通継目箇所（以下、「継目部」という。）近傍を除く区間 B では、浮きの発生状況およびその大きさについて、計算値は実測値と概ね合致しており、区間 A における計算値と実測値を個々に比較すると相関係数が 0.87 と概ね妥当な推定結果が得られている。区間 C については、連続 PC 区間において、他の区間と同様と概ね妥当な推定結果が得られているが、部分 PC 区間では、推定精度が低下している。

以下、浮き量の推定精度が低い箇所について考察する。

継目部付近では、程度に差が見られるものの、浮き量について実測値を計算値が上回っており、区間 B の中央および区間 C の一部の継目部においてその傾向が顕著である。その原因として以下が考えられる。

- 継目部において散見される継目落ち[3-10]と称するレール端部の塑性変形が現地に存在しているが、本研究ではこのようなレールの初期変形を考慮していない。
- 継目部ではレールの曲げ剛性が継目部以外の区間（以下、溶接された継目を含めて「中間部」という。）と比較して小さいが、本研究では、継目部の剛性を考慮せず、レールの曲げ剛性を一

律中間部と同じとしてモデル化している。

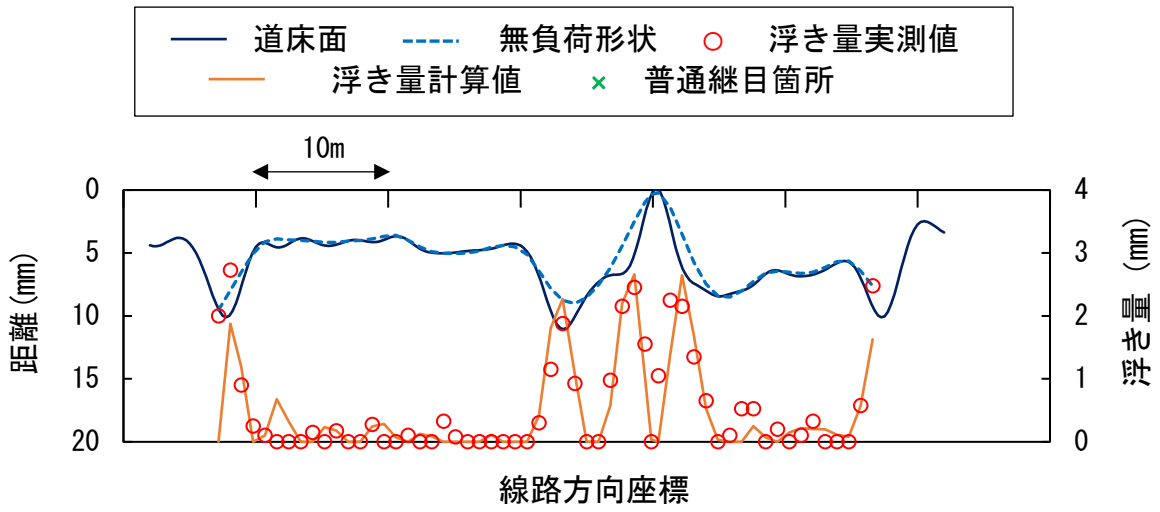
- ・本研究では輪重の変動による軌道部材の弾性変形の影響を無視して、道床面と走行形状が一致するものとしている。一方で、継目落ち箇所を走行する車両より見込んでいた変動輪重と比較して大きい衝撃的な輪重が載荷されるため、それに伴う軌道部材の弾性変形が中間部と比較して大きくなっている可能性がある。

区間 C の部分 PC 箇所では、継目部と異なり、浮き量の実測値に対し、計算値が概ね下回る結果となった。本研究ではまくらぎ沈下量の測定対象は PC まくらぎのみとしており、PC まくらぎと PC まくらぎの間に敷設されている木まくらぎのまくらぎ沈下量を確認していない。良好な精度が得られている連続 PC まくらぎ区間のうち、同様に 2 mm 程度の浮き量が見られる区間において、連続して浮きまくらぎが見られるのは最大でも 5 本程度のため、木まくらぎの多くは浮きまくらぎ状態となっていないものと考えられる。当該の部分 PC まくらぎは、全てが木まくらぎで安定的に支持されていた箇所の一部を PC まくらぎに交換しており、残存する木まくらぎと比較して支持状態が悪く、PC まくらぎ箇所の多くに浮きが生じている可能性が考えられる。当該区間のまくらぎ間隔は図 3-3 に示したとおり約 0.7 m であり、PC まくらぎのみに浮きが生じている場合、支持間隔は約 1.4 m で、その隣の木まくらぎも同時に浮きが生じている場合の支持間隔は約 2.1 m である。本研究で用いた復元波長帯域は 3~50 m としており、このような短い波長域の浮きまくらぎについては検出できない可能性があると考えられる。

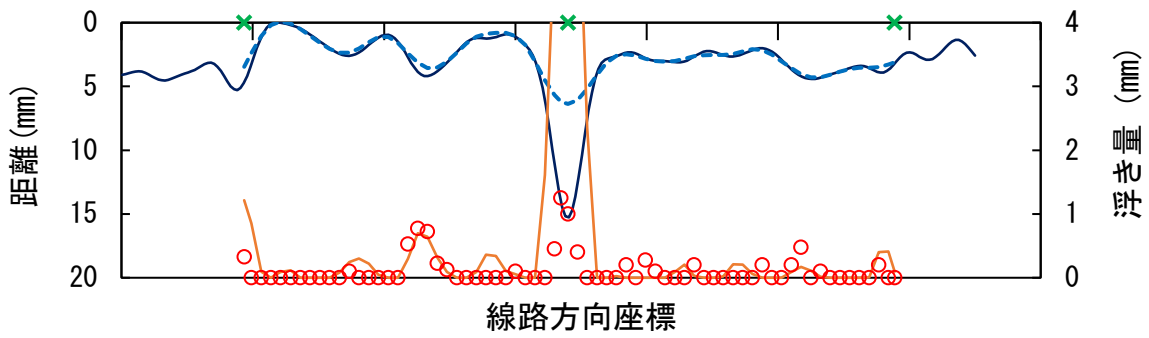
(2) 静的変位との比較

算出した無負荷形状の精度を確認するため、無負荷形状より図 2-4 の特性を用いて静的変位を求め、簡易軌道検測装置により実測した静的変位と比較した。結果を図 3-8 に示す。ここで、実測値については簡易軌道検測装置による 2m 弦正矢法の測定値を 10m 弦正矢の変位に変換したものであり、計算値については、解析で得られた無負荷形状より 10m 弦正矢の変位を算出したものである。この図によると、区間 A では両者がほぼ完全に一致しており、無負荷形状が精度よく計算されたことを示している。区間 B と区間 C の継目部の一部において乖離が見られ、これは前述のように継目部付近における計算精度の低下の影響と考えられる。

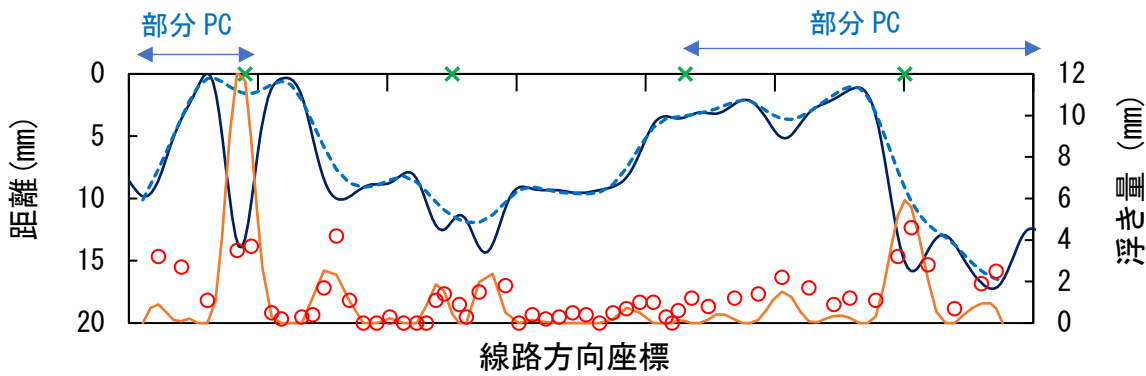
一方、区間 C の連続 PC 区間においても乖離が見られる区間がある。ここでは、計算値と実測値で凹凸波形の振幅は概ね一致しているものの、計算値が連続して静的変位の正方向もしくは負方向にシフトしている。これについては、基となる軌道変位の測定弦が、実測値では 2m 弦正矢であるのに対し、計算値では 2.1m-14.4m 偏心矢となっており、波長の長い変位に対する検出性能は後者が優れていることから、計算値で見られる波長の長い成分を、実測値では十分検出できなかったことが一因として考えられる。



(a) 区間 A (左レール)

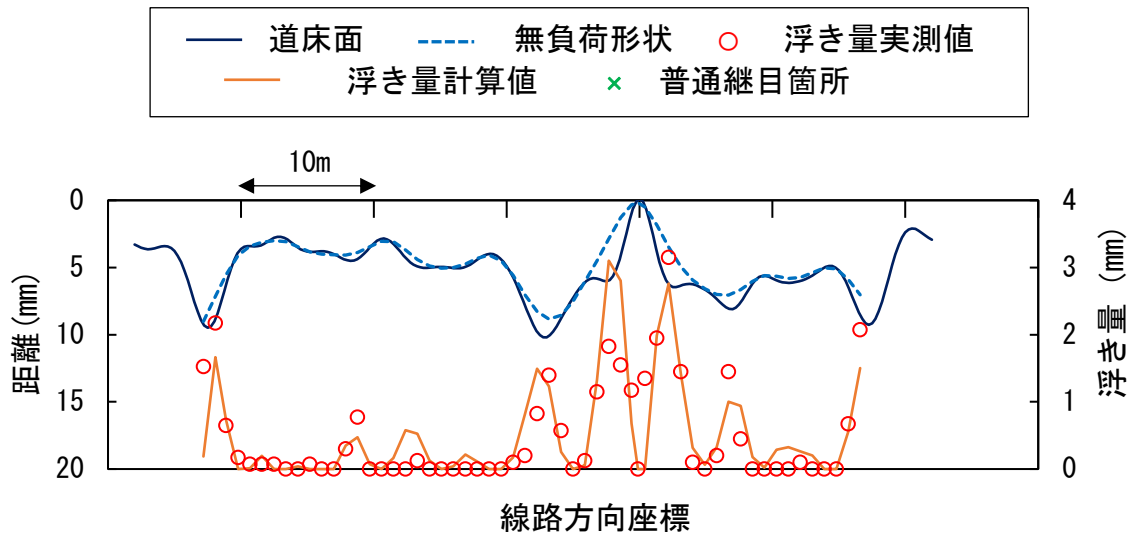


(b) 区間 B (左レール)

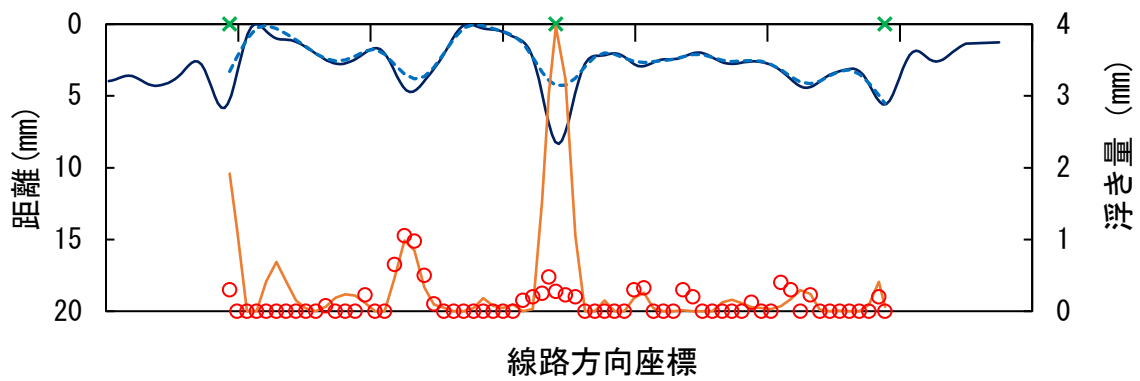


(c) 区間 C (左レール)

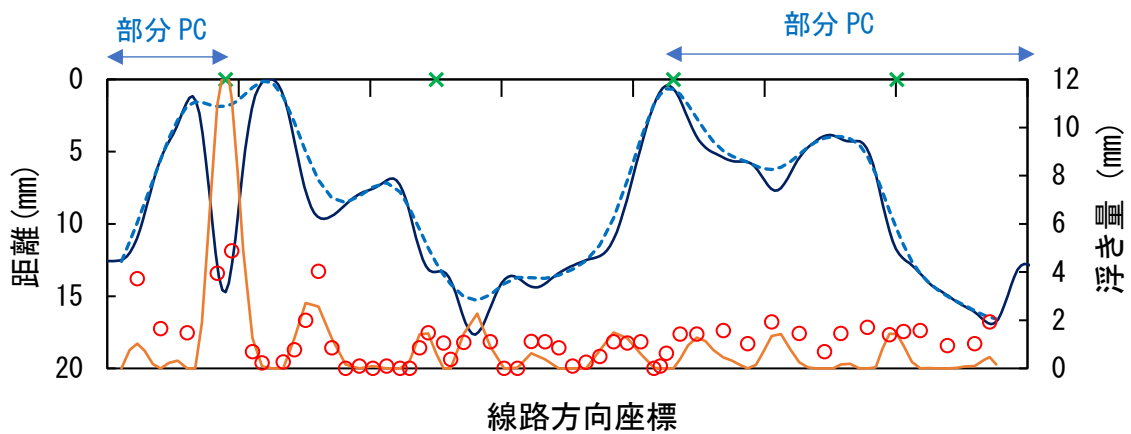
図 3-7 実測値と計算結果の比較



(d) 区間 A (右レール)

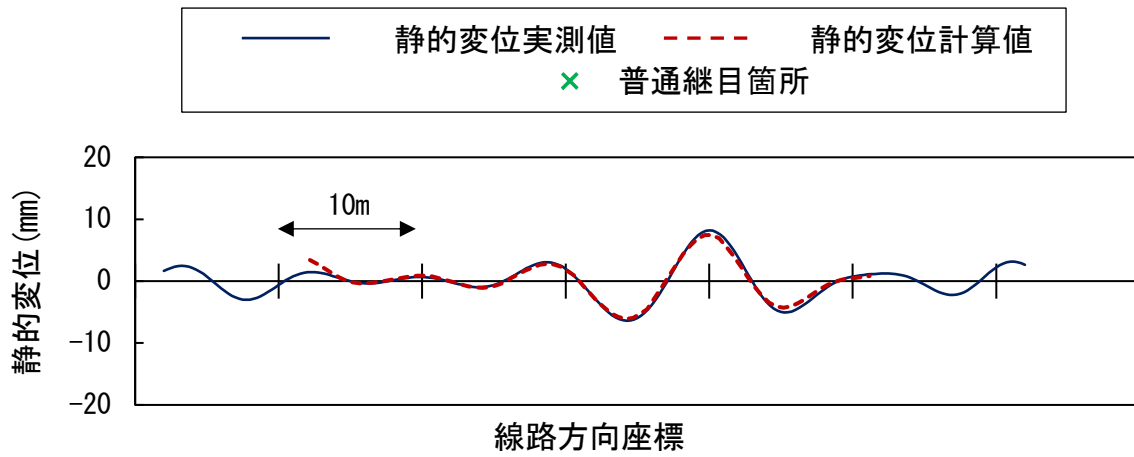


(e) 区間 B (右レール)

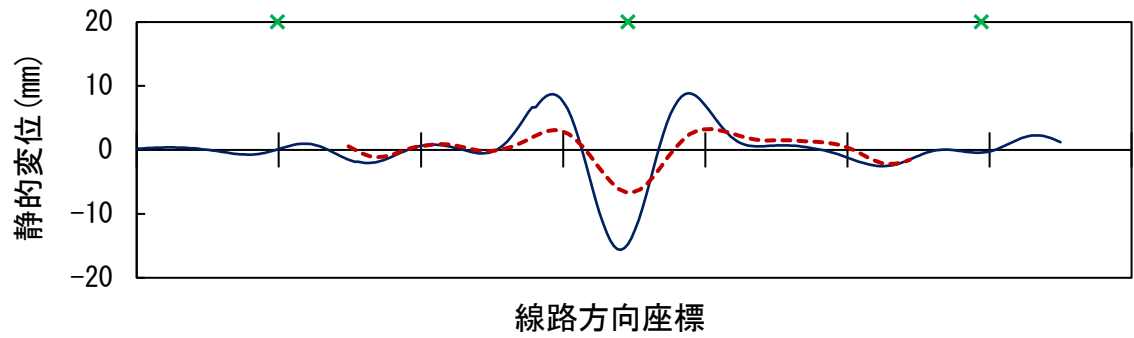


(f) 区間 C (右レール)

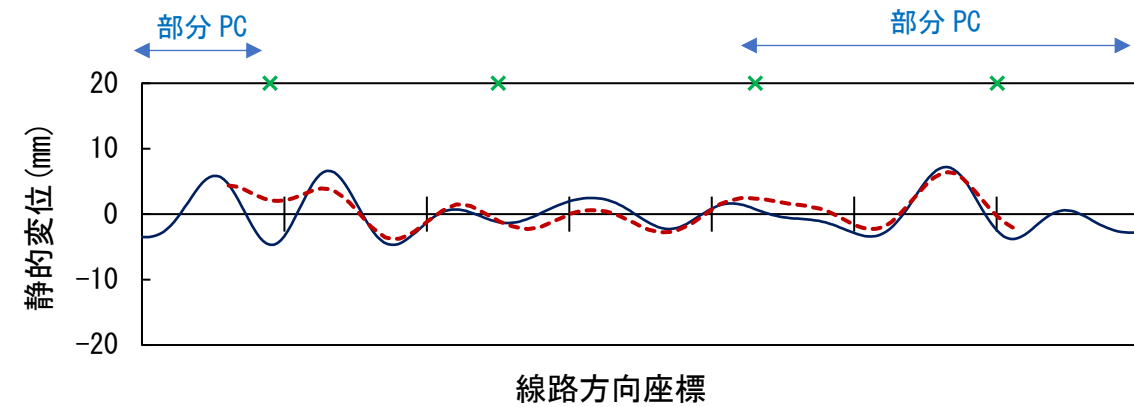
図 3-7 実測値と計算結果の比較 (つづき)



(a) 区間 A (左レール)

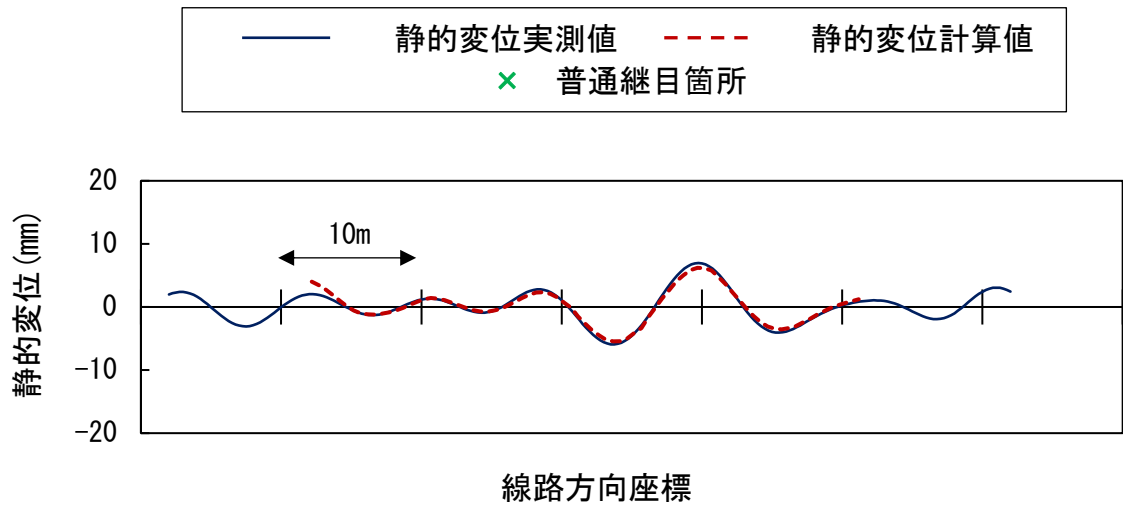


(b) 区間 B (左レール)

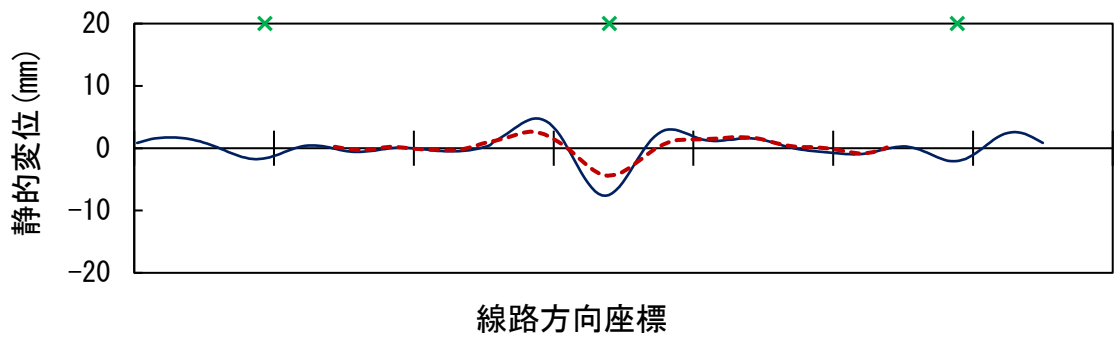


(c) 区間 C (左レール)

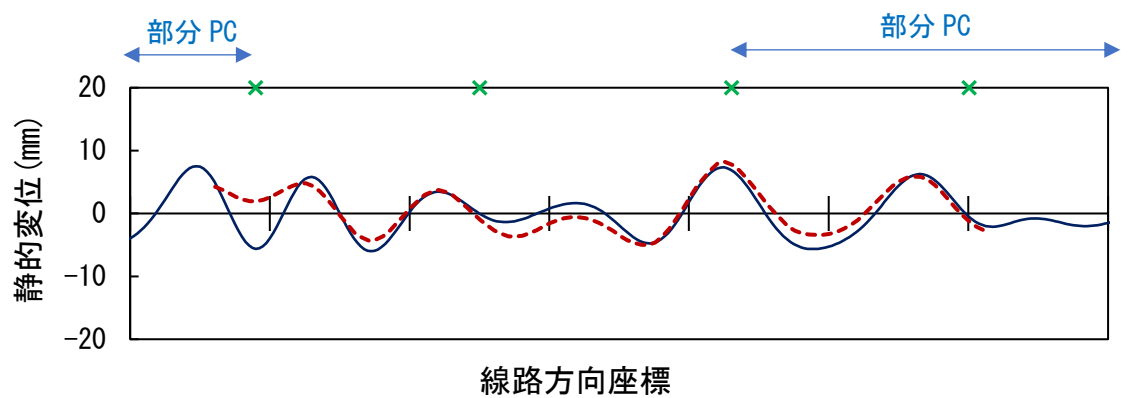
図 3-8 静的変位の実測値と計算値の比較



(d) 区間 A (右レール)



(e) 区間 B (右レール)



(f) 区間 C (右レール)

図 3-8 静的変位の実測値と計算値の比較 (つづき)

3.4 浮きまくらぎ検出手法の精度に与える各種影響の確認

3.4.1 継目形状の把握

区間 B の継目部を対象に，継目落ちの形状を実測した．レール頭頂面の凹凸測定に一般的に使用される 2m ストレッチの中央をレール継目中央部に合致するように設置して，レール頭頂面の高さを測定した．測定状況を図 3-9 に示す．図 3-10 に区間 B の左レール中央の継目部の凹凸測定結果を一例として示す．測定結果は記録紙上にペンで線を描画することにより記録されるが，記録が薄く視認しづらいため，ここでは線上をトレースしたものを示した．図中の数値は，測定の始末端を基準として，まくらぎ中央位置における凹凸（落ち込み）量を示している．この箇所は，図 3-9 のとおりまくらぎ上に継目が配置されるささえ継ぎ構造となっており，継目部において最大 3.8mm の落ち込みが存在している．図 3-7 (b) で示した当該箇所の浮き量は実測値 1.0 mm に対し計算値が 8.6 mm と 7.6 mm の乖離が生じており，予めこの継目落ち形状を考慮することにより，乖離が小さくなり推定精度の向上が期待できる．しかし，なお大きな乖離が残存することや，個々の継目により継目落ち形状が異なることから，継目部については実用に向けさらなる検討が必要である．



図 3-9 2m ストレッチによる継目部凹凸の測定状況

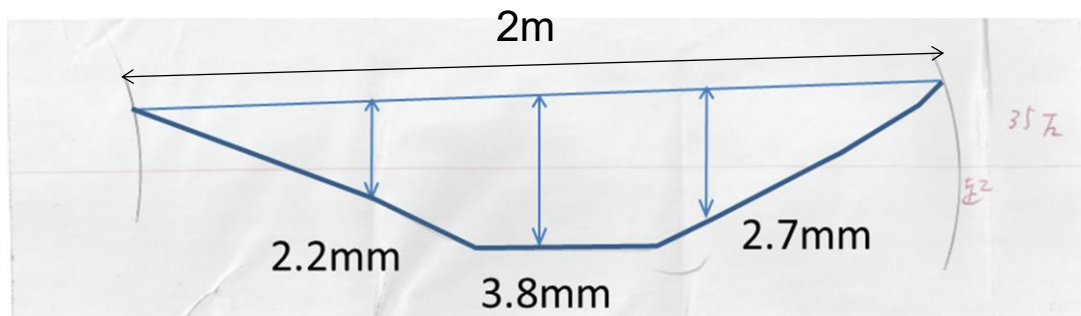
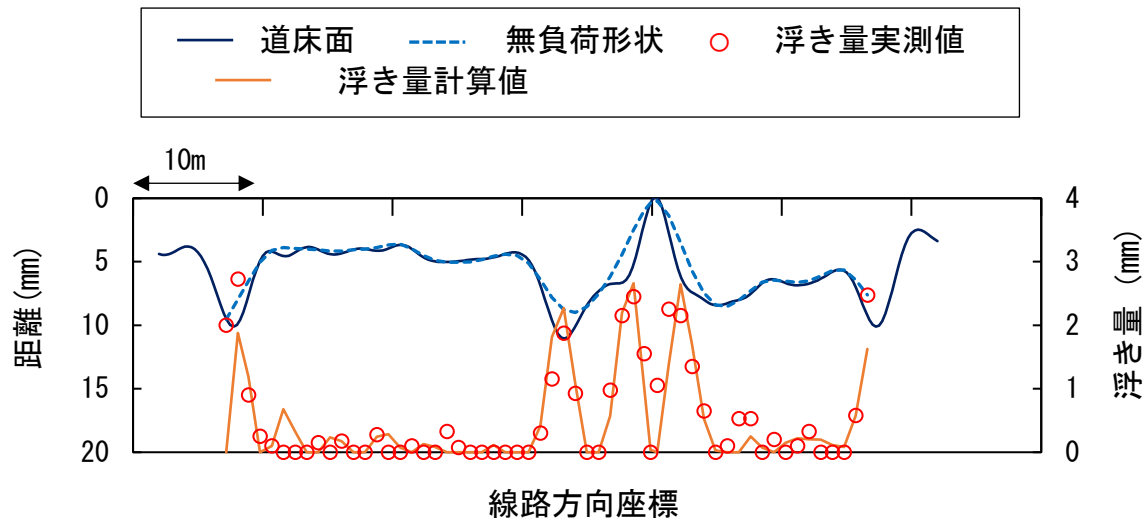


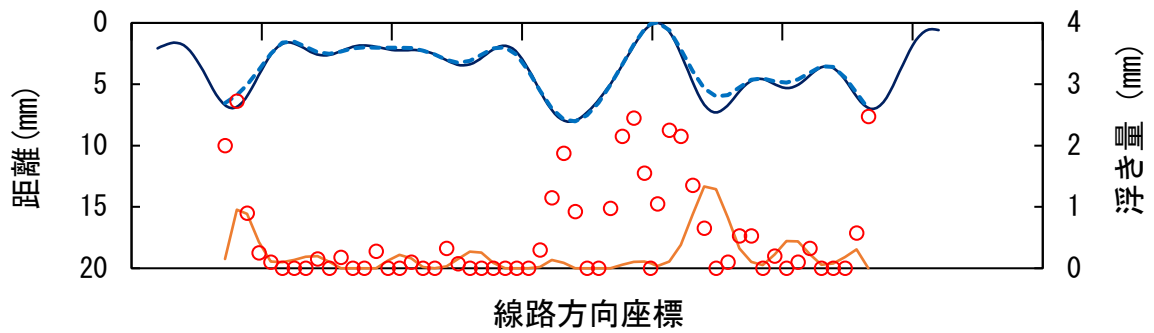
図 3-10 測定結果の一例（区間 B 左レール中央の継目部）

3.4.2 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 の左レールを対象に、偏心矢変位より復元波長帯域を 6~50m として設定した道床面をもとに、3.3 節と同様の数値計算を行った。結果を図 3-11 および図 3-12 に示す。比較のため、図 3-7 および図 3-8 に示した復元波長帯域 3~50m のものも再掲した。図 3-11 より、復元波長帯域を 6~50m とすることにより、道床面の短波長成分が除去されていることがわかる。それに伴い、レール変形と道床面との差が小さくなり、復元波長帯域 3~50m のものより浮きまくらぎ計算値の精度が低下している。この傾向は図 3-12 にも見られ、静的変位の計算値においても精度が若干低下していることが確認できる。つまり、本研究で提案した手法では、復元波長帯域が浮きまくらぎ検出の精度に大きく影響することを示している。このことより、部分 PC まくらぎ区間など、単独で短い波長での浮きまくらぎが発生し、浮きまくらぎの推定精度が低い区間においても、高低変位の取得方法の見直し等により[3-2]復元波長帯域をさらに短波長側に拡張することができれば、推定精度向上を図ることができる可能性があると考えられる。

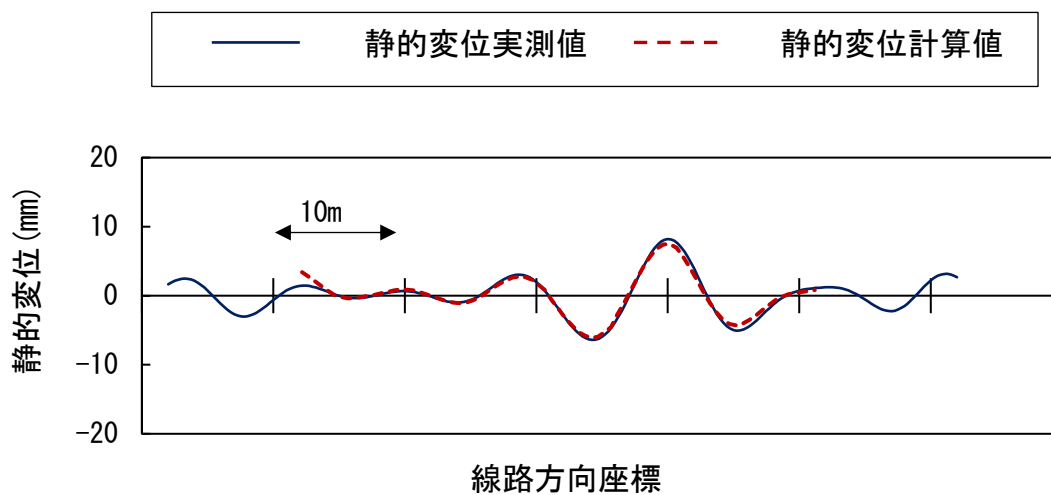


(a) 復元波長帯域 3~50m (再掲)

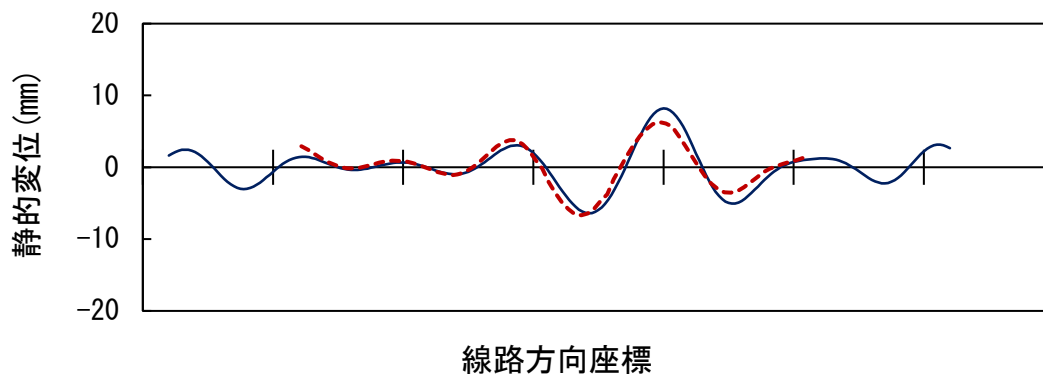


(b) 復元波長帯域 6~50m

図 3-11 復元波長帯域の違いによる実測値と解析結果との比較 (区間 A, 左レール)



(a) 復元波長帯域 3~50m (再掲)



(b) 復元波長帯域 6~50m

図 3-12 復元波長帯域の違いによる静的変位の計算値の影響 (区間 A, 左レール)

3.5 営業線のまくらぎ支持状態の実態把握

浮きまくらぎの介在等，まくらぎ支持状態の実態把握が行われた事例は少なく，山脇らの検討[3-11]がある程度に過ぎない．そこで，浮きまくらぎ検出手法を用いることにより，営業線のまくらぎ支持状態の実態把握を行った．

3.5.1 検討区間および使用データ

表 3-2 に営業線の検討対象箇所の概要を示す．対象箇所はいずれも直線区間で，主に PC まくらぎ，JIS 50kgN 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の軌道で，合計延長は 13 線区 12,883 m 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．

また，計算に使用した復元波形は，良好な浮きまくらぎ検出精度が確認されている，3.3.4 項で示したものと同一軌道検測車で測定された偏心矢変位を 3～50m の帯域で復元したものとした．

なお，本節では，個々のまくらぎの浮き量を求めるのではなく，傾向を把握することを目的としているため，3.3 節で行ったような高精度な位置合わせ[3-9]を行っていない．

表 3-2 検討対象箇所の概要

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

3.5.2 浮きまくらぎの発生状況

浮きまくらぎ検出手法により左右の浮き量および支持ばね反力を計算し，浮きまくらぎの発生状況を把握した．表 3-2 の検討対象箇所全区間について検討した結果，まくらぎ総本数 17,133 本のうち，31.9%の 5,465 本が浮きまくらぎと判定された．ここで，浮きまくらぎは，数値計算の結果，図 3-2 に示した支持ばねの反力が左右とも 0 であり，左右とも浮き状態となっているものとした．

図 3-13 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．これより，単独（連続 1 本）の浮きまくらぎよりも，連続浮きまくらぎの本数が多く存在していることがわかる．なお，今回認められた最大の連続浮きまくらぎは 10 本であり，無道床橋り

ようが介在している箇所であった。

図 3-14 に、まくらぎ間隔別に連続浮きまくらぎの範囲「まくらぎ間隔×(連続浮き本数+1)」とその発生率の関係を整理した。なお、ここでは、踏切や無道床橋りょう等、通常の PC まくらぎ軌道とは異なる特異箇所の近傍箇所を除く 11,578 本を対象としている。結果、連続浮きまくらぎとなっている範囲は、まくらぎ間隔によらず、最大で 5m 程度であることがわかった。

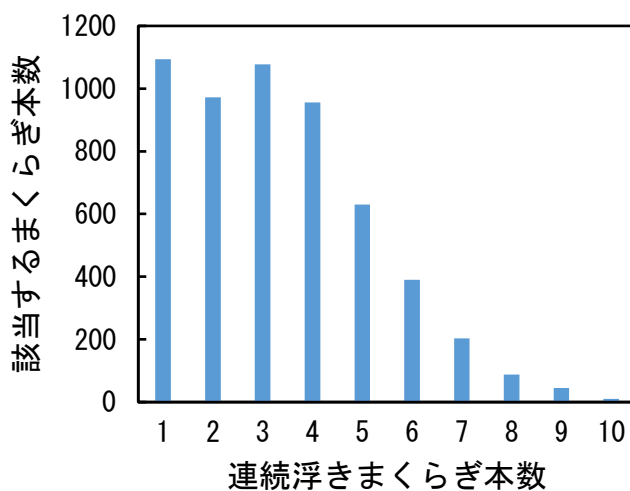


図 3-13 連続浮きまくらぎの本数内訳

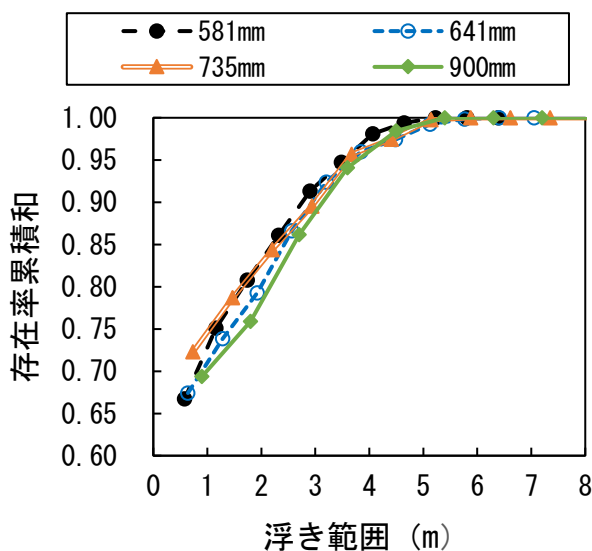


図 3-14 まくらぎ間隔と連続浮きまくらぎの関係

3.5.3 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、一般に線路保守に用いられる 100 m を 1 ロットとした高低変位の全測点の標準偏差（以下、同様に算出した 100m ロット単位の高低変位の標準偏差を「ロット高低 σ 」という。）と浮きまくらぎの関係をまくらぎ間隔別に整理した。ここで、踏切や無道床橋りょう等、通常の PC まくらぎ軌道とは異なる特異箇所が介在するロットについては整理対象から除外した。図 3-15 にロット別のロット高低 σ と浮きまくらぎ発生率（浮きまくらぎ本数÷まくらぎ全数）との関係を示す。また、図 3-16 にロット高低 σ 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 3-15 および図 3-16 の凡例の数値はまくらぎ間隔を示している。

これらの結果について考察すると以下のとおりとなる。

- ・浮きまくらぎの発生率は 0.12~0.49 であり、ロット高低 σ が大きいほど、すなわち、高低変位の整備状態が悪い区間ほど高くなる傾向が見られる。
- ・上記の傾向はまくらぎ間隔によらず同様であるが、特にまくらぎ間隔に依存する傾向は見られない。
- ・連続浮きまくらぎ本数についても、ロット高低 σ が大きいほど多くなる傾向が見られる。
- ・上記の傾向はまくらぎ間隔によらず同様であるが、加えて、まくらぎ間隔が小さいほど連続浮きまくらぎ本数が多くなる傾向が見られる。この理由として、回帰結果の決定係数 R^2 は 0.31~0.61 でありばらつきが大きいものの、図 3-14 に示したとおり、連続浮きまくらぎとなっている範囲はまくらぎ間隔にあまり依存しないことから、同一範囲の連続浮きまくらぎ区間に存在するまくらぎ本数は、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。

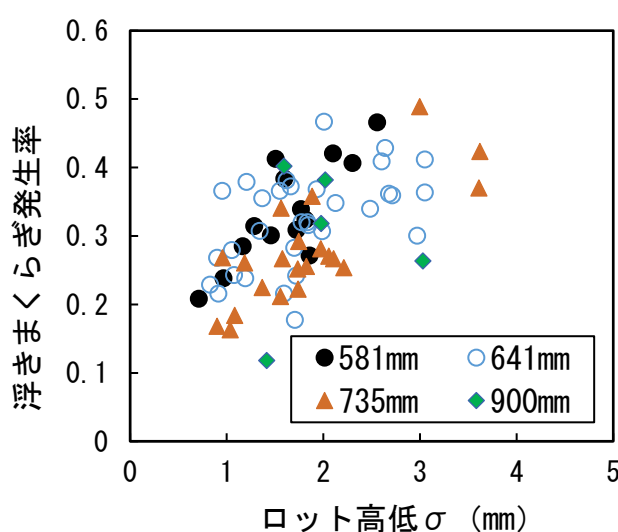


図 3-15 ロット高低 σ と浮きまくらぎ発生率

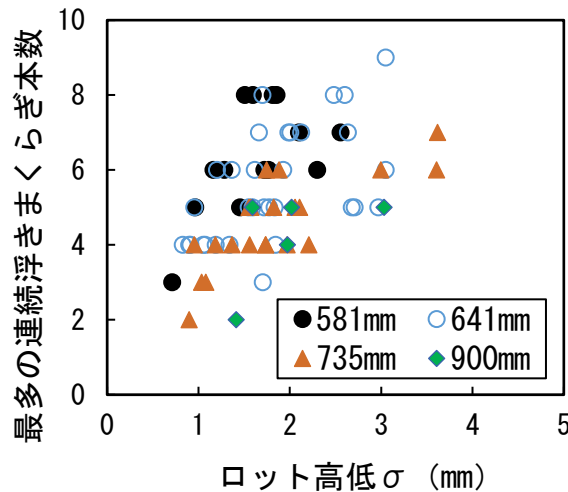


図 3-16 ロット高低σと連続浮きまくらぎ本数

3.6 まとめ

本章では、線路の保守管理上問題がある浮きまくらぎを簡易に精度良く把握することを目的として、容易に入手可能な各種の軌道データと、接触を考慮した FEM 解析モデルを用いて浮きまくらぎの発生状況を推定する手法について検討した。加えて、この手法を用いて営業線の浮きまくらぎの実態を調査した。以下に、得られた主な知見を示す。

- (1) 本研究では、道床面形状が軌道検測車による動的な高低変位の復元波形と一致すると仮定し、接触を考慮した非線形ばねと、軌道部材の質量を考慮したはりからなる二次元の FEM モデルを構築し、はりの自重によるたわみを計算することにより、無負荷形状および浮き量を算出する手法について検討した。ケーススタディとして営業線の実軌道を対象に 2.1 m-14.4 m の偏心矢法で測定された 10m 正矢法の変換前の高低測定データより、3~50 m の帯域で復元し設定した道床面を用いて、無負荷形状および浮き量を算出し、現地の実測値とを比較した。結果、一般的に広く普及している PC まくらぎのロングレール区間において、本研究で提案した手法は精度良く浮きまくらぎを検出できることを確認した。
- (2) 普通継目部付近においては、中間部と比較して精度が低下した。この区間に対し、本研究では、継目落ち形状を考慮していないこと、レールの曲げ剛性を継目部と中間部で同じとしていること、継目落ちに対する車両からの大きな輪重を考慮していないため、各種の弾性部材の変形量に大きな相違が生じ、同一と仮定していた走行形状と道床面が異なっている可能性があることがその原因として考えられる。なお、検討対象区間の一部の継目落ち形状を実測すると比較的大きい継目落ちが認められたことから、これを考慮することにより浮き量の推定精度を向上できる可能性がある。しかし、なお大きな乖離が残存することや、継目落ち形状は継目によ

り個々に異なることから、普通継目部付近に対しては実用に向け更なる検討が必要である。

- (3) 木まくらぎ区間のうち、規則的に 1/3 を PC まくらぎとした部分 PC まくらぎ区間で算出の精度が低下した。この区間では今回用いた復元波長帯域 3~50 m では検出できない短波長の変位が存在していたことが原因として考えられる。検証のため復元波長帯域 6~50 m のもので同様の検討を行ったところ、3~50 m のものと比較して精度低下が見られた。すなわち、浮きまくらぎ検出手法を適用する場合、復元波長帯域が浮きまくらぎ検出の精度に大きく影響することがわかった。部分 PC まくらぎ区間など、単独で短い波長での浮きまくらぎが発生し、浮きまくらぎの推定精度が低い区間においても、復元波長帯域をさらに短波長側に拡張することができれば、推定精度向上を図ることができる可能性があると考えられる。
- (4) 営業線のロングレール区間が敷設されている 13 線区 12,883 m を対象に、支持状態の実態を、浮きまくらぎ検出手法を用いることにより調査した。これらの線区では 3 割強のまくらぎが浮きまくらぎとなっており、無道床橋りょうが介在する箇所でも最大 10 本の連続浮きまくらぎが認められた。また、無道床橋りょう等、特異箇所を除いた区間において、まくらぎ間隔が連続浮きまくらぎとなっている範囲は、まくらぎの間隔によらず最大 5m 程度であった。
- (5) 浮きまくらぎの発生率を 100m ロット単位で集計すると、浮きまくらぎの発生率は 0.12~0.49 であり 100m ロット単位の高変位標準偏差が大きいほど浮きまくらぎ発生率が高く、連続で浮きまくらぎとなっている本数が多い傾向が明らかとなった。

参考文献

- [3-1] 竹下邦夫：偏心矢法による軌道狂い検出法，鉄道総研報告，vol.4，No.10，pp.18-24，1990.
- [3-2] 竹下邦夫，矢澤英治：慣性正矢法による軌道狂い検出装置の開発，鉄道総研報告，vol.14，No.4，pp.25-30，2000.
- [3-3] 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.
- [3-4] 佐藤裕：軌道力学，鉄道現業社，pp.10-16，1972.
- [3-5] 国土交通省鉄道局監修 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，p.271，丸善出版，2012.
- [3-6] 玉川新悟，片岡宏夫，弟子丸将：レールの小返り解析モデルの提案とレール締結装置の性能評価試験への応用，土木学会論文集 73 巻 2 号，pp.330-343，2017.
- [3-7] 国土交通省鉄道局監修 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.287-290，丸善出版，2012.
- [3-8] NX Nastran User's Guide, Siemens PLM Software, 2014.
- [3-9] 田中博文，山本修平，大島崇史，三和雅史：高頻度検出データに対応した軌道変位の局所的な急進箇所抽出・予測法，鉄道総研報告，Vol.31，No.12，pp.41-46，2017.
- [3-10] 古川敦，南木聡明，泉英治，米澤秀剛：軌道検出車の偏心矢を用いた継目落ち・角折れ等の評価，鉄道総研報告，Vol.23，No.10，pp.11-16，2009.

[3-11] 山脇浩, 家田仁 : 有限要素解析による動的及び静的狂いの相互関係, 土木学会第 42 回年次
学術講演会概要集, IV-251, 1987.

第4章 不均一支持箇所での軌道座屈発生への影響

4.1 検討の主旨

浮きまくらぎの存在箇所では、レール高温時における軌道の座屈抑止力の一つである道床横抵抗力が低下し、夏期のレール高温時に対する軌道の座屈安定性が損なわれる可能性がある。具体的には、浮きまくらぎ状態の場合、まくらぎ底面と道床面との摩擦力が喪失する。この摩擦力の大きさは道床面の死荷重（以下、「道床上死荷重」という。）に依存するため、道床に支持されているまくらぎ（以下、「支持まくらぎ」という。）では、前後の浮きまくらぎ分の死荷重が加わることにより、道床上死荷重および道床横抵抗力が増加する。道床上死荷重は第3章で示したとおり、浮きまくらぎ検出手法を用いて把握が可能であるため、これまで把握が困難であった道床横抵抗力のばらつきを考慮した軌道座屈の検討が可能となる。

一方、軌道の座屈解析手法については、近年FEMを用いた解析手法が提案され、様々な条件下で高精度な解析が可能となっており[4-1]、軌道の実状に応じた合理的なロングレール座屈安定性評価法の確立に向けた研究も行われてきている[4-2]。

このような背景を踏まえ、本章では、第3章で確認した営業線の浮きまくらぎ発生状況の実態に基づきケーススタディを行う。個々のまくらぎの道床横抵抗力を設定し、これが軌道座屈発生温度上昇量に与える影響について軌道座屈解析ツール（以下、「解析ツール」という。）を用いて定量的に捉え、軌道座屈への影響評価を行う。加えて、線路保守の実務への適用を目指し、道床横抵抗力の分布状態より、軌道座屈が発生する温度を推定する手法について検討する。

4.2 まくらぎ支持状態に着目した軌道座屈解析

4.2.1 軌道の座屈検討手法

温度上昇により圧縮のレール軸力を受ける軌道の横変形は一般に図4-1に示す形態となり、温度上昇量が T_A に達すると瞬時にB点に飛び移る。この現象が軌道座屈である[4-3]。 T_C は最低座屈強度といい、これ以下では座屈を生じない温度であり、わが国ではこれをもとにロングレールの設計や保守管理を行っている。 T_A や T_C の算出においては、飛び移り座屈を発生させるため、通り変位を想定して軌道直角方向の初期軌道変位を設定するものの、現地の軌道に存在するさまざまな不整等を考慮しない理想的な条件で行うのが一般的である。そのため様々な不整が存在する実際の軌道における座屈は温度上昇量 T_C と T_A の間で発生する。本研究でも同様の手法で座屈解析を行うものの、現地のばらつきの一つである支持状態の不整が座屈発生温度上昇量に与える影響を確認するため、得られた T_A に関して議論する。

検討に用いた解析ツール[4-1]は、ばね要素とはり要素で表現した有限要素モデルに対して、温度上昇を与えた際のつり合い経路を増分法により求めるものである。このツールは、道床横抵抗力をはじめ、軌道の諸元を個別に設定することが可能で、実物大軌道座屈試験の再現解析を行っ

た結果，良好な一致を得たものである．

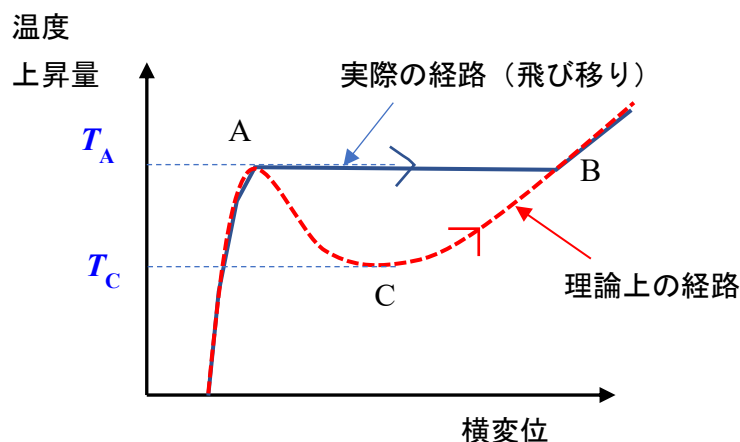


図 4-1 軌道の座屈特性[4-3]

4.2.2 評価手法

評価手法としては，まくらぎ支持状態の不整に伴って座屈発生温度上昇量が相対的に低下する箇所（以下，「座屈リスク箇所」という．）を抽出するため，まず営業線のデータを用いてケーススタディを行う．対象は表 3-2 に示した区間のうち，全長にわたり無道床橋りょうや踏切などの特異箇所が存在しない，まくらぎ間隔 641 mm で延長 494 m の区間とした．この対象区間に対して，後述する数値解析モデルによる計算区間を設定し，その区間における座屈発生温度上昇量 T_A を求める．ここで T_A は，図 4-1 に示したように解析ツールにより算出される温度上昇量の極大値とする．計算終了後には計算区間をまくらぎ 1 本分ずらした位置に設定し，同様の計算を行う．これを繰り返し行い，計算ケースごとに T_A を求める．図 4-2 に算出イメージを示す．計算ケース数は 571 である．

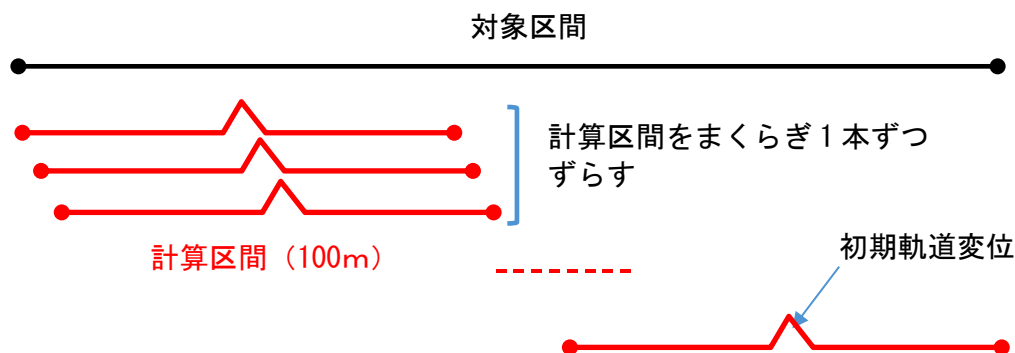


図 4-2 T_A 算出のイメージ図

4.2.3 数値解析モデル

前述の解析ツールに基づき、検討に用いる数値解析モデルを構築した。図 4-3 に解析モデルを示す。ここで、(a)はモデル全体を示し、(b)～(e)はモデルの一部を抜粋したものを拡大して示しており、すべて(a)と同様に、左右方向(x軸方向)を線路方向、上下方向(y軸方向)を線路直角方向としている。線形は直線、ロングレール不動区間[4-3]を想定し、軌道延長は100m、まくらぎ間隔を641mm(まくらぎ155本)とし、飛び移り座屈を発生させるため既往の研究[4-2]と同様に、計算モデル中央において最大値となるように初期軌道変位を与えた。

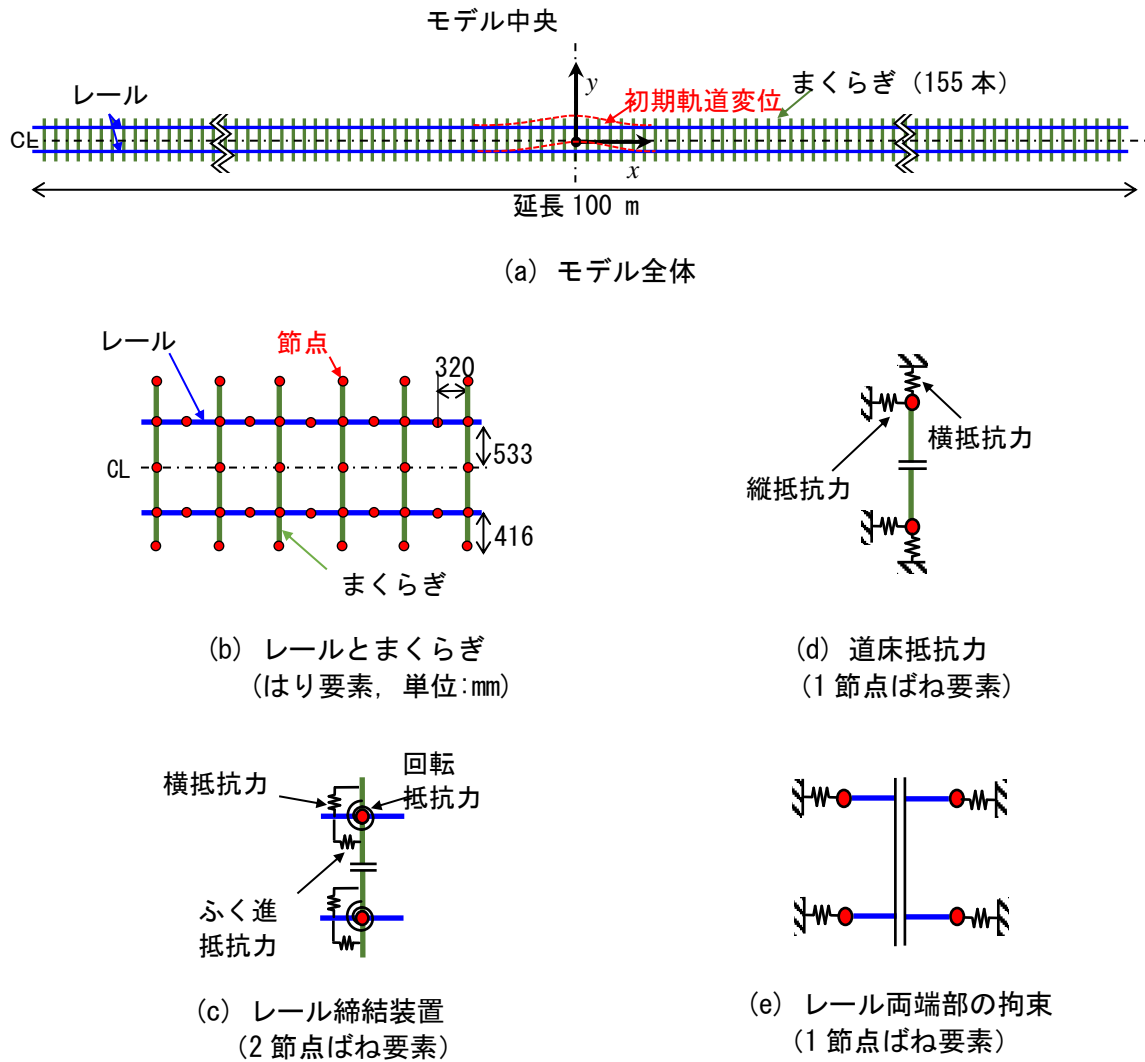


図 4-3 用いた軌道の解析モデル

その形状は次式で与え、中央の頂点を解析モデル中央に配置した。なお、初期軌道変位は幾何学的形状のみを与え、この形状の設定に伴う初期の部材力は考慮していない。

$$y = \frac{c}{2} \left(1 + \cos \frac{\pi}{l} x \right), \quad (-l \leq x \leq l) \quad (4-1)$$

ここで、 x は頂点を基準とするレール方向の座標であり、 y は軌道の横変位、 c は初期軌道変位の最大波高、 l は初期軌道変位の半波長である。本研究では、対象区間における軌道整備基準[4-4]に基づき、 c を 17 mm、 $2l$ を 10 m に設定した。

レールとまくらぎをばね要素でモデル化し、レール締結装置の横抵抗力、ふく進抵抗力および回転抵抗力を 2 節点ばね要素でモデル化した。また、PC まくらぎの道床縦抵抗力と道床横抵抗力を 1 節点ばね要素でモデル化した。これらのばね要素はいずれも非線形弾性を考慮できるものとした。ここで、1 節点ばね要素とは、1 つの節点に対して定義される要素であり、節点の初期位置からの変位とばね特性より算出された力が当該節点に働くように作用するものである。一方、2 節点ばね要素とは、2 つの節点間で定義される要素であり、2 つの節点の変位差とばね特性より算出された力が当該節点に作用するものである。さらに、レールの両端部には 1 節点ばね要素を設置した。また、幾何学的非線形性として、有限変位（微小ひずみ）を考慮している。非線形平衡方程式の解法には、Newton-Raphson 法による荷重増分法[4-5]と Ramm 法による弧長増分法[4-5]を併用し、解析初期の安定時には前者を、座屈前の不安定期には後者を用いた。表 4-1 に用いた解析条件を示す。

本研究では、温度荷重による静的な座屈のみを考慮し、 xy の 2 次元平面問題として取り扱う。拘束条件として、レール両端部の節点は、 y 軸方向の並進変位を拘束した。

表 4-1 解析条件

解析手法	荷重増分法と弧長増分法の併用
荷重増分	荷重増分幅 1.0 °C × 11 回 (弧長増分の前)
弧長増分	弧長増分幅 0.1 制御節点 レール中央節点の y 方向変位
収束判定値	1.0×10^{-5}

4.2.4 解析パラメータ

本解析に用いたパラメータは実際に用いられている部材の特性値を反映させたものを用いる。これらはいずれも対象区間で標準的に使用されているものを想定している。

(1) レール，まくらぎおよびレール締結装置

表 4-2 にレールとまくらぎの解析諸元を，表 4-3 にレール締結装置の解析諸元を示す。なお，本研究では温度上昇はレールのみを与えるためまくらぎの線膨張係数は設定していない。

(2) 道床横抵抗力と道床縦抵抗力

表 4-4 に道床横抵抗力と道床縦抵抗力の解析諸元を示す。道床横抵抗力の荷重－変位特性については，営業線における測定結果を基に提案されているモデル[4-6]を用いる。また，既往の知見[4-7]をもとに，以下の考えにより，道床上死荷重を最終道床横抵抗力に反映させている。

- ・最終道床横抵抗力のうちまくらぎ底面の負担分は，まくらぎ底面と道床上面間の摩擦力であり，道床上死荷重の影響を受ける。一方，まくらぎ底面以外の負担分はまくらぎの形状に依存し，道床上死荷重の影響を受けない。
- ・全てのまくらぎが標準の支持状態となっている場合，まくらぎ底面が負担する最終道床横抵抗力は，既往の知見に基づきまくらぎ 1 本分の最終道床横抵抗力の $1/3$ [4-7]となるように設定する。このとき，まくらぎ底面以外が負担する最終道床横抵抗力はまくらぎ 1 本分の最終道床横抵抗力の $2/3$ であり，まくらぎ底面が負担する道床横抵抗力の 2 倍となる。
- ・したがって，まくらぎ底面以外が負担する最終道床横抵抗力は，まくらぎ 1 本あたりの軌きょう重量 W に摩擦係数 μ を乗じ，さらに 2 倍したものとなる。
- ・任意の道床上死荷重 P に対するまくらぎ底面負担分の最終道床横抵抗力は，道床上死荷重 P に摩擦係数 μ を乗じて算出する。

図 4-4 に設定した道床横抵抗力の例を示す。

一方，道床縦抵抗力については，各まくらぎにおける道床横抵抗力を 1.5 倍したものとした。なお，道床縦抵抗力が座屈発生温度上昇量に与える影響は非常に小さいことを確認している[4-1]。

表 4-2 レールとまくらぎの解析諸元 [4-1]

項目		単位	値
レール	断面積	mm ²	6.42 × 10 ³
	断面 2 次モーメント (弱軸)	mm ⁴	3.22 × 10 ⁶
	ヤング率	N/mm ²	2.058 × 10 ⁵
	ポアソン比	-	0.3
	線膨張係数	/°C	1.14 × 10 ⁻⁵
まくらぎ	断面積	mm ²	2.84 × 10 ⁴
	断面 2 次モーメント (弱軸)	mm ⁴	1.14 × 10 ⁸
	ヤング率	N/mm ²	2.2 × 10 ⁴
	ポアソン比	-	0.2

表 4-3 レール締結装置の解析諸元

項目	記号	単位	値
横抵抗力 [4-8]	H	N/mm	3.4 × 10 ⁴
ふく進抵抗力 [4-8]	τ	N	$\tau = \tau_0 \times x^{1/2}$ $\tau_0 = 1.2 \times 10^4$
回転抵抗力 [4-2]	R	N/mm/rad	2.76 × 10 ⁷

表 4-4 道床横抵抗力・縦抵抗力の解析諸元 (ばね 1 本あたり)

項目	記号	単位	値
横抵抗力	g	N	$g = g_0 / 2 \times y / (y + a)$ [4-6] $g_0 = \mu \times (2W + P)$ g_0 : 最終道床横抵抗力 a : 初期特性係数 1.0 μ : まくらぎ底面と道床面間摩擦係数 0.8 [4-9] W : まくらぎ 1 本あたりの軌きょう重量 2.3 kN P : 道床上死荷重
縦抵抗力	γ	N	$\gamma = 1.5 \times g$ [4-1]

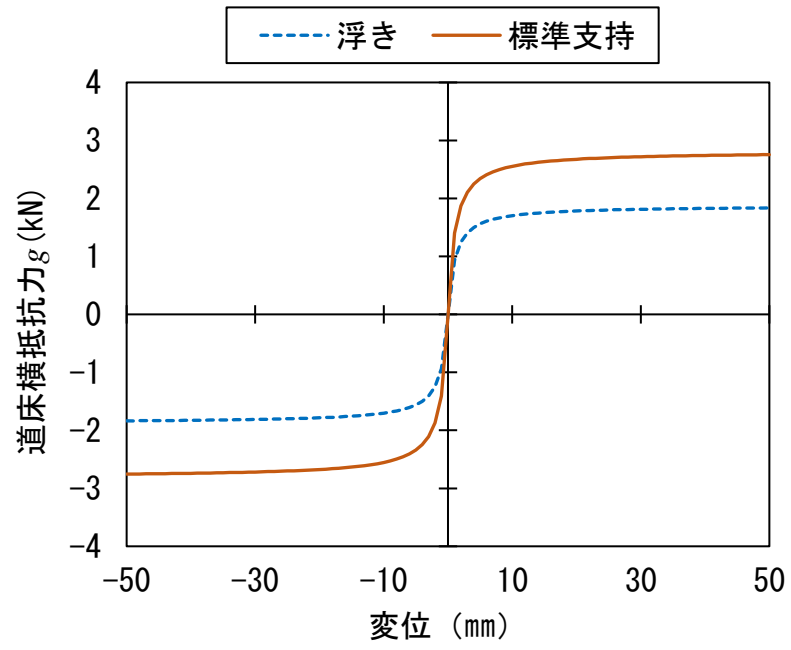


図 4-4 設定した道床横抵抗力の特性の例

4.2.5 検討結果

図 4-5 に浮きまくらぎ検出手法を用いて算出した対象区間におけるまくらぎ別の道床上死荷重と、それを基に算出した最終道床横抵抗力 g_0 の関係を示す。 g_0 の値は浮きまくらぎ箇所では最小の 3.8 kN であり、最大は 14.8 kN であった。

図 4-6 に各ケースの座屈発生温度上昇量 T_A の計算結果を示す。ここで、参考のため、まくらぎが全て標準支持であり、 g_0 を全て 5.6 kN とした場合（以下、「全支持」という。）、および全て浮きまくらぎの横抵抗力である、 g_0 を全て 3.8 kN とした場合（以下、「全浮き」という。）の T_A の計算結果もあわせて示す。全支持の T_A が 64.7 °C であるのに対し、対象区間の T_A の最低値は 52.4 °C と、12.3 °C 低下している。この箇所は連続浮きまくらぎ本数 6 本の区間であった。なお、この場合も全支持の最低座屈強度 T_C である 44.9 °C を上回り、4.2.1 項に述べたように、保守管理上の余裕を有している。一方、全浮きの T_A は 48.5 °C であり、対象区間の T_A が全区間で上回った。また、 T_A の平均は 62.7 °C、標準偏差は 4.2 °C であった。図 4-7 に示すように T_A の値に対してヒストグラムを作成すると、この T_A の計算値のばらつき状況はほぼ正規分布に従うことがわかった。

また、図 4-8 に連続浮きまくらぎ本数と T_A との関係を整理した。ここで、両隣の支持まくらぎが同じ、同一の連続浮きまくらぎ区間では、その代表値として最低値を示した。この図より、連続浮きまくらぎ本数が多いほど T_A が低下する傾向が認められる。ただし、ばらつきが大きいことから、 T_A は単に連続浮きまくらぎ本数では決定されず、前後の支持条件の影響を受けていると考えられる。

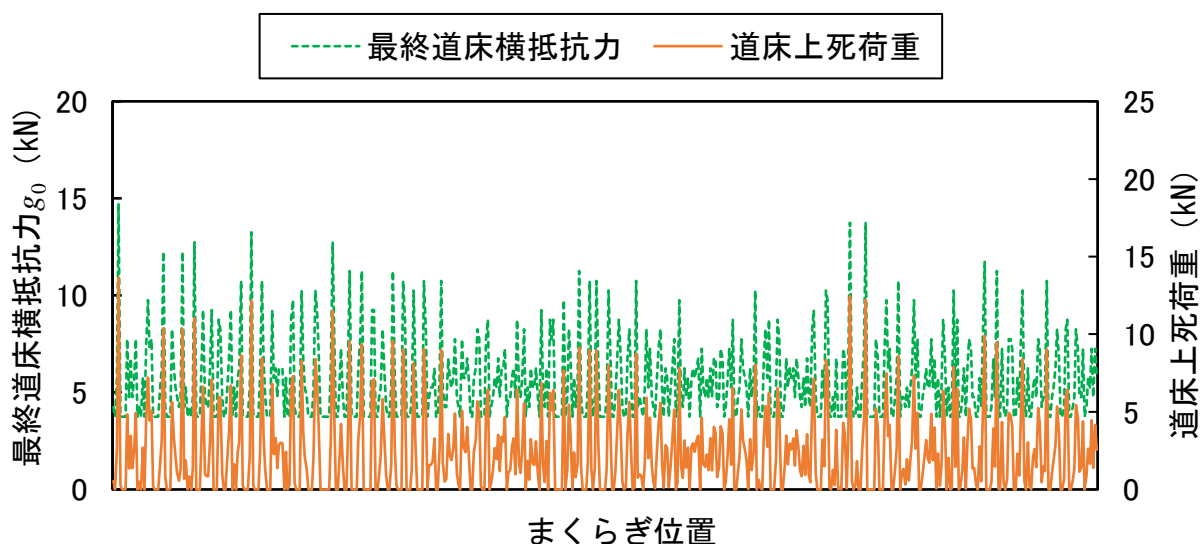


図 4-5 道床上死荷重と設定した最終道床横抵抗力 g_0

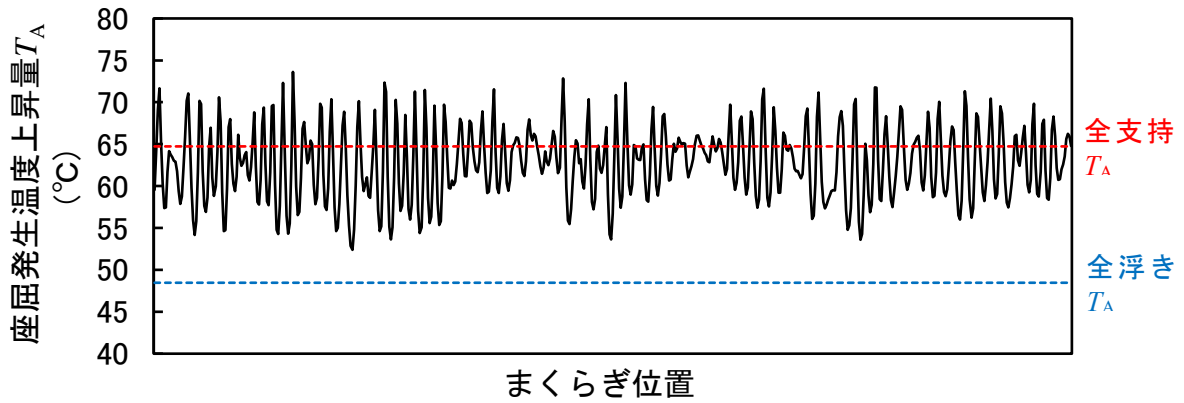


図 4-6 座屈発生温度上昇量 T_A の計算結果

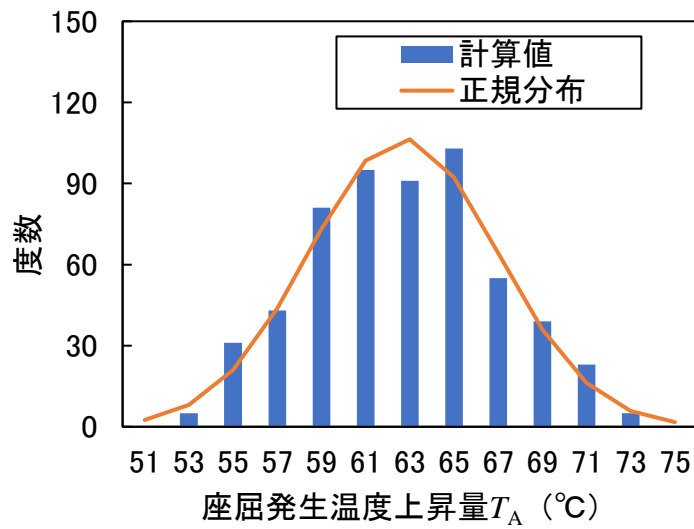


図 4-7 座屈発生温度上昇量 T_A の頻度分布

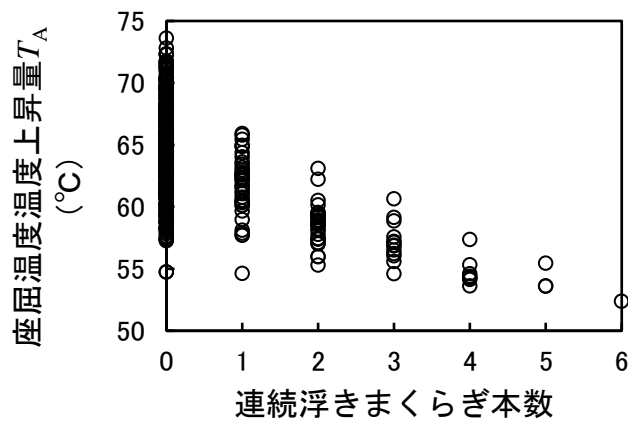


図 4-8 連続浮きまくらぎ本数と T_A の関係

4.3 座屈リスク箇所の簡便な抽出法の検討

4.3.1 検討の主旨

前 4.2 節の検討により、まくらぎ支持状態に起因して生じる道床横抵抗力の不整が軌道座屈発生温度上昇量 T_A に与える影響を明らかにした。この T_A より、従来把握できなかった座屈リスク箇所を抽出することができ、保守管理上有用なデータを得ることが可能となる。しかし、解析ツールの計算負荷が大きく、刻々と変化していく膨大な設備を対象とした軌道の保守管理に本法を用いるのは現実的ではない。そこで、道床横抵抗力の分布形態と座屈発生温度上昇量との関係に着目し、簡便な手法について検討する。

4.3.2 ひずみエネルギーとレール変形形状

軌道の座屈は、レール軸力に基づく変形によって、より安定な状態に進もうとする外力エネルギーと、変形を阻止しようとして働くレールまたは軌きょうの曲げエネルギー、および道床抵抗力のエネルギーを考えることにより説明することができる[4-10]。そこで、座屈発生温度上昇量 T_A に至るまでの温度上昇過程において、変形により費やされるレールの軸ひずみエネルギー（以下、「レールひずみエネルギー」という。）と、道床横抵抗力のばね要素に蓄えられるひずみエネルギー（以下、「道床ひずみエネルギー」という。）の関係を調べた。解析諸元および解析ツールは前 4.2 節と同じものを用いている。4.2.5 項に示した全支持、全浮きの条件と、その中間の道床横抵抗力 $g_0=4.7\text{ kN}$ を与えた条件（以下、「全中間」という。）のいずれも一様な道床横抵抗力を与えた 3 ケースを設定し、各ひずみエネルギーについては解析モデルの片側分を算出した。

ここで、レールひずみエネルギー E_r は式(4-2)で算出している。

$$E_r = \frac{1}{2}EA(\beta \cdot \Delta t)^2 L - \sum_i \frac{N_i^2 \cdot l_i}{2EA} \quad (4-2)$$

ここに、 E はレールのヤング率、 A はレールの断面積、 β はレールの線膨張係数、 Δt は温度上昇量、 L はレールの全長（100 m）、 N_i ははり要素 i のレール軸力、 l_i はその要素の長さである。

一方、道床ひずみエネルギー E_s は式(4-3)により算出している。

$$\begin{aligned} E_s &= \sum_j \frac{g_{0j}}{2} \int_0^{y_j} \frac{y}{y+a} dy \\ &= \frac{g_{0j}}{2} \left(y_j - a \cdot \ln \left| 1 + \frac{y_j}{a} \right| \right) \end{aligned} \quad (4-3)$$

ここに、 g_{0j} は道床横抵抗力をモデル化したばね要素 j の最終道床横抵抗力、 y_j は横変位である。

図 4-9 に T_A に達するまでの初期軌道変位の頂点における横変位（以下、「頂点変位」という。）と各ひずみエネルギーの関係を示す。両ひずみエネルギーは頂点変位にほぼ比例して増加する傾向が見られる。レールひずみエネルギー E_r に対する道床ひずみエネルギー E_s の比率はいずれも約 65~70%を占め、 E_s が座屈阻止に大きく寄与していることを示している。

図 4-10 に E_s とレール温度上昇量の関係を示す。図の凡例の数値は頂点変位を示し、各ケースで算出される頂点変位が概ねこの値と一致する計算ステップ時の値をプロットしている。概ねとしたのは、表 4-1 に示したとおり、荷重または弧長を制御して計算しており、各変位量が厳密には一致しないためである。5.8 mm とは全支持ケースの T_A のときの頂点変位である。この図によれば、レール温度が T_A に漸近するに従い、レール温度上昇に対する E_s の変化が大きくなることがわかる。具体的には、5.8 mm 変位時の温度上昇量は全中間ケースでは 56.5 °C で、 T_A 時 56.7 °C の 99.8%、全浮きケースでは 48.0 °C で、 T_A 時 48.5 °C の 99.0% である。一方、5.8 mm 時の E_s は全中間ケースでは 50.9 N・m で、 T_A 時 65.1 N・m の 78.1%、全浮きケースでは 41.2 N・m で、 T_A 時 62.0 N・m の 66.4% である。各条件における T_A の値とそのときの E_s の値との間にあまり相関は見られないが、各ケースの頂点変位が同一の条件では、 E_s とレール温度上昇量との間に正の相関が見られる。

図 4-11 に各ケースの頂点変位が、全支持ケース T_A 時の頂点変位 5.8 mm と概ね一致する場合のレール変形状を示す。この図より、レールの変形状はすべてのケースで概ね合致していることがわかる。また、図 4-12 にそのときの E_s と T_A との関係を示す。この図よりこのときの E_s と T_A には高い相関が見られる。つまり、このような均一支持の条件では、予め定めたレールの変形状を与えたときの E_s と T_A の関係を把握しておくことにより、任意の道床横抵抗力を与えた場合の E_s を算出し、それに基づき T_A を推定することができると思われる。

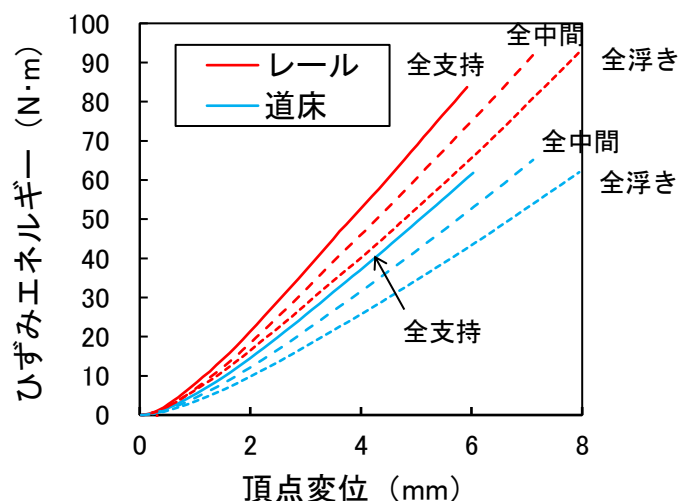


図 4-9 T_A に至るまでの頂点変位とひずみエネルギーの関係

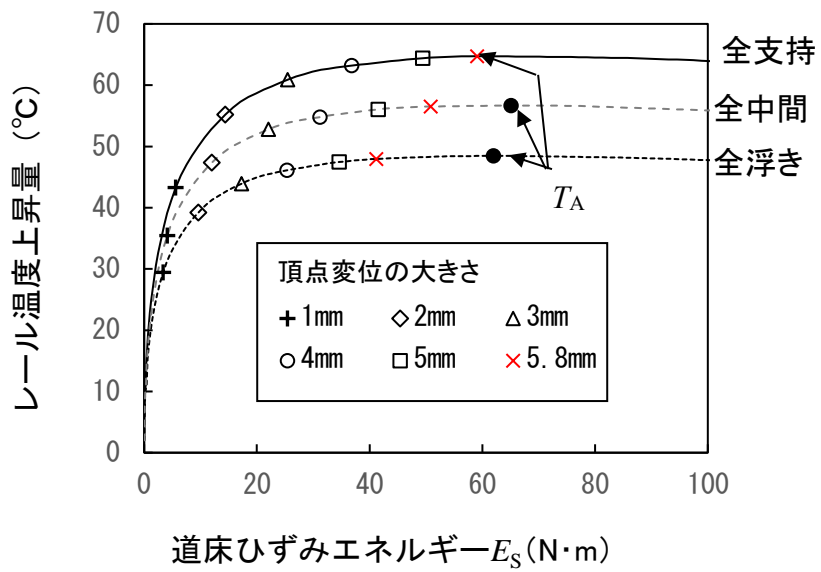


図 4-10 E_S とレール温度上昇量との関係

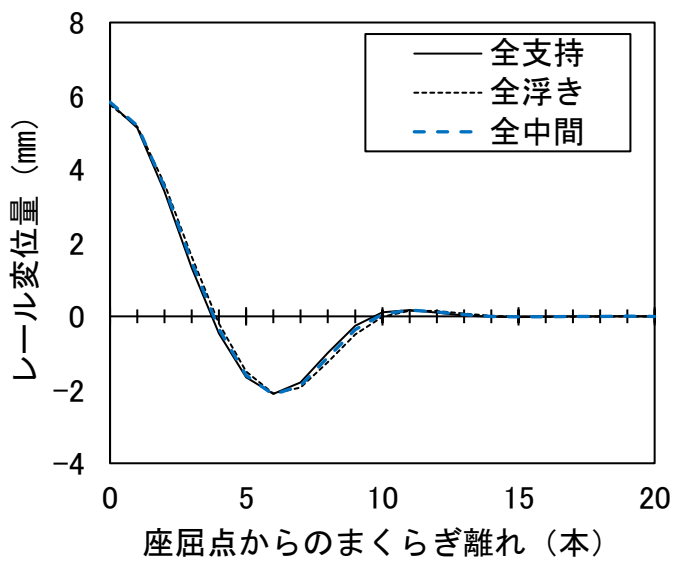


図 4-11 頂点変位 5.8 mm 時のレール変形形状

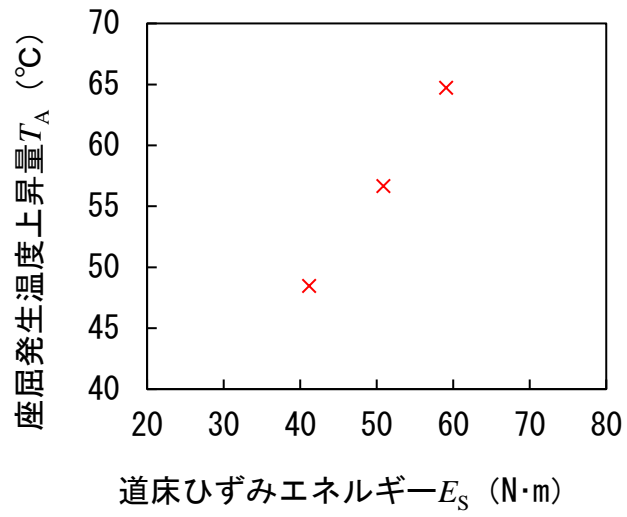


図 4-12 頂点変位 5.8mm 時の E_S と T_A

4.3.3 浮きまくらぎを想定したパラメータスタディ

(1) 条件の設定

前 4.3.2 項の検討より、異なる数種類の道床横抵抗力を一律に設定した軌道において、レール変形形状が同じとなる条件では、道床ひずみエネルギー E_s と座屈発生温度上昇量 T_A との間に高い相関が見られることを確認した。本節では、営業線のまくらぎ支持状態を想定し、道床横抵抗力にばらつきを与えた場合に対し同様の検討を行う。支持状態については、奇数本の連続浮きまくらぎと同数の支持まくらぎが交互に存在するよう規則的に設定し、浮きまくらぎ区間の中央のまくらぎを初期軌道変位の頂点に設定した。

連続浮きまくらぎ本数は第 3 章で明らかとなった実態を参考に、3, 5, 7, 9, 11, 13 本の 6 種類設定した。各道床抵抗力については、連続する正弦波形状の道床面上の軌きょうのたわみを浮きまくらぎ検出手法を用いて求め、このときの各まくらぎの支持ばね反力から表 4-4 に示した方法により算出している。図 4-13 に例として浮きまくらぎ連続 7 本の道床横抵抗力の設定状況の一部を示す。

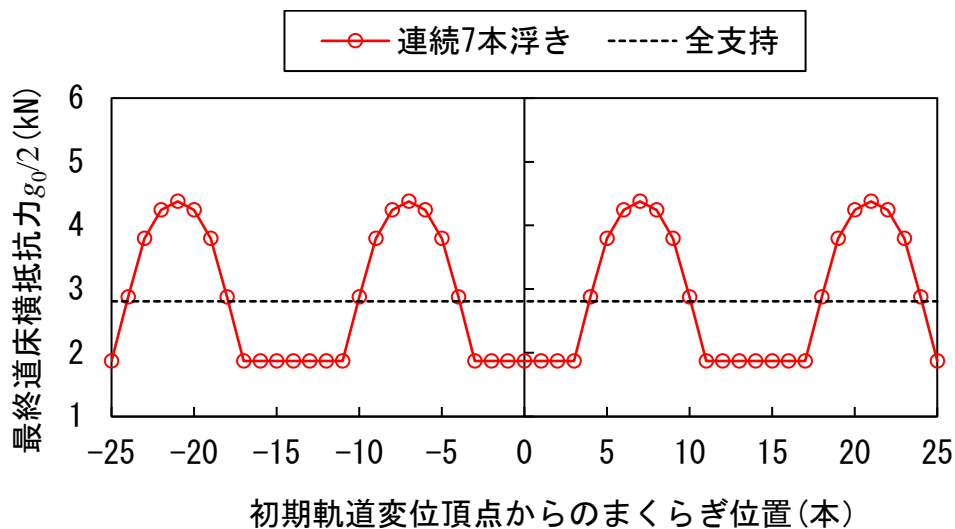


図 4-13 道床横抵抗力の設定例

(2) レールの変形形状

図 4-14 に図 4-11 と同様、各ケースの頂点変位が、全支持ケース T_A 時の頂点変位 5.8 mm と概ね一致するときのレール変形形状を示す。比較のため図 4-11 の全支持、全浮きの各ケースについても再掲した。変形形状の特徴として、4 本目と 10 本目付近に節を形成し、15 本目までに変位がほぼ収束することについて図 4-11 と同様の傾向を示しているが、5 本目～9 本目まではレール変位量にばらつきが見られる。これは、各ケースにおける道床横抵抗力の設定の違いにより、ばね反力の釣り合い条件が異なるためと考えられる。

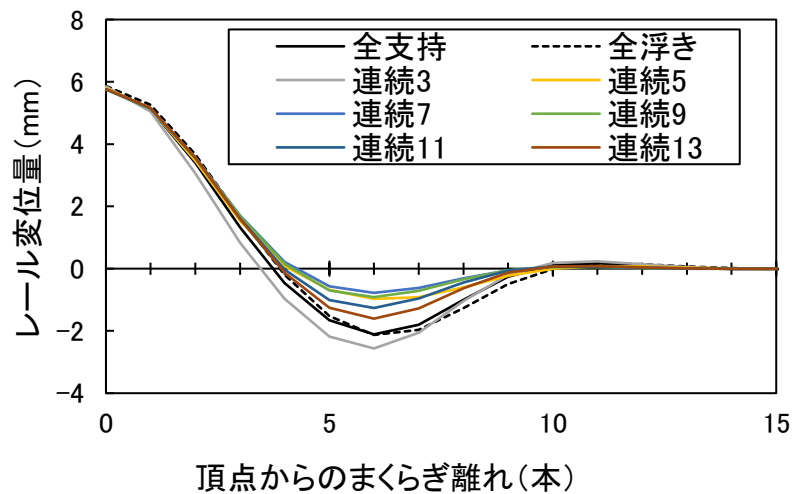


図 4-14 頂点変位 5.8 mm 時のレール変形形状

(3) 道床ひずみエネルギーと座屈発生温度上昇量

前 4.3.2 項で言及した、道床ひずみエネルギー E_S より座屈発生温度上昇量 T_A を推定できる可能性について検討するため、全支持ケース T_A 時におけるレール変形形状を各ケースに与え、算出した道床ひずみエネルギー E_S と各ケースの T_A との関係を整理した。なお、図 4-14 に示した通り、頂点から 4 本目を境に各ケースのレール変位量の相違が大きくなるため、その影響を見るため全数の道床横抵抗力ばねに蓄えられる E_S に加え、頂点を中心としてまくらぎ 7 本分（座屈点から 3 本目まで、以下同様）、および 9, 11, 13 本分の E_S を算出した。図 4-15 に結果を示す。ここで、凡例は E_S の計算に用いた道床横抵抗力のばね要素の本数を示している。なお、 E_S の計算結果が一定値となる、連続浮きまくらぎ本数が道床ひずみエネルギー計算本数を上回る条件での結果は図示していない。結果、 E_S の計算に用いたばねの本数により E_S と T_A の相関に相違が見られる。最も相関が高いのは 11 本の場合であり、決定係数 R^2 は 0.98 であった。このときの回帰式を式(4-4)に示す。

$$T_A = 0.8624 E_S + 23.26 \quad (4-4)$$

以上より、道床横抵抗力にばらつきがある場合においても、全支持ケース T_A 時におけるレール変形状を与え、概ね変形状が合致する範囲で E_S を計算することにより、 T_A を推定できる可能性があると考えられる。

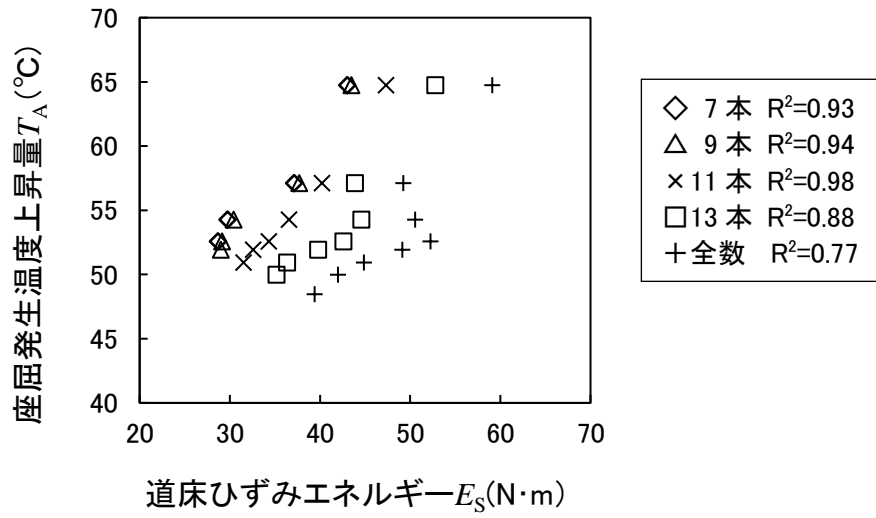


図 4-15 全支持ケース T_A 時の変位量を与えた場合の E_S と T_A の関係

4.3.4 座屈発生時のレール変形状が異なる場合の影響

前 4.3.3 項の検討は、浮きまくらぎを規則的、かつ初期軌道変位の頂点を浮きまくらぎとして対称に配置した条件（以下、「浮き対称」という。）で行っており、座屈発生温度上昇量 T_A 時のレール変位最大値は、いずれも初期軌道変位の頂点に生じている。営業線ではこのような理想的な浮きまくらぎの配置となっている条件は少なく、加えて T_A 時のレール変位最大値が初期軌道変位の頂点と異なる箇所が生じる場合があると考えられる。その影響を確認するため、軌道変位の頂点に対し連続浮きまくらぎを非対称に配置した条件（以下、「浮き非対称」という。）での検討を行った。具体的には、連続 7 本の浮きまくらぎの中心位置を頂点に対し 1 本ずつ最大 7 本ずらした 7 ケースを設定し、前 4.3.3 項と同様の検討を行った。

図 4-16 に設定した道床横抵抗力の例を示す。ここで 0 本ずれとは、図 4-13 に示した連続 7 本の浮きまくらぎの浮き対称のケースである。また、図 4-17 にこれらの条件での T_A 時における変形状を示す。この図より浮き非対称のケースでは浮き対称のケースと異なる変形状となることがわかる。3 本ずれのケースでは最大変位は頂点よりまくらぎ 1 本ずれた位置（横軸が -1 の位置）に生じており、7 本ずれのケースは前後 6 本ずれた位置に生じている。

図 4-18 に T_A について、解析ツールを用いて算出した値と、4.3.3 項の検討結果に基づき推定した値の比較を示す。具体的には、推定した T_A は、全支持ケース T_A 時の変形状を各々の道床横抵抗力分布に与えたときのまくらぎ 11 本分の E_s より、式(4-4)を用いて算出したものである。図中の数値は設定した位置ずれの本数である。1 本ずれと 2 本ずれのケースは、浮き対称と同様 T_A 時の最大変位が頂点と合致し、 T_A の推定精度も浮き対称のケースと同様に良好である。一方、ずれが 3 本以上では前述のとおり最大変位と頂点が合致せず、設定した位置ずれが大きくなるほど T_A の推定結果が過大となり精度が低下している。

営業線を対象に T_A を推定する場合、図 4-2 と同様に、計算区間を 1 本ずつ移動させ連続的に行うこととなる。計算区間は E_s の計算に用いるばねの本数分となる。計算区間ごとに位置ずれ本数や T_A の推定精度も異なることとなるが、同一の連続浮きまくらぎ区間における推定精度は T_A が低いほど高く、多少の位置ずれでも良好な結果が得られているため、 T_A が低い座屈リスク箇所を抽出する目的であれば、今回提案した手法の適用が可能であると考えられる。

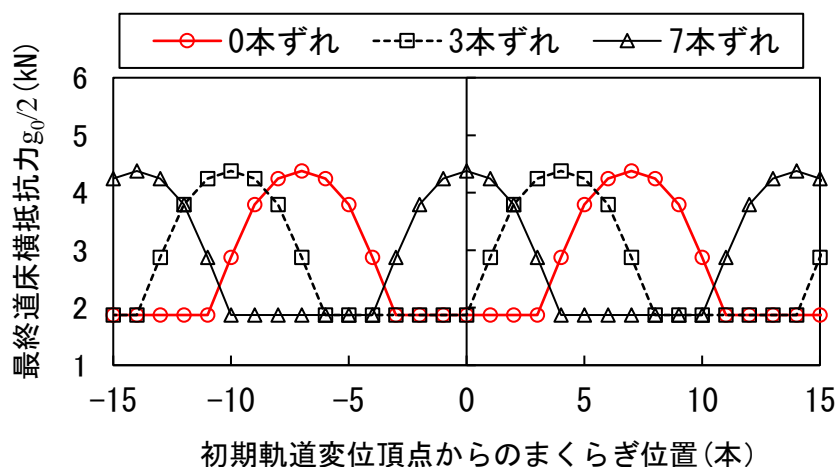


図 4-16 設定した浮き非対称の道床横抵抗力の一例

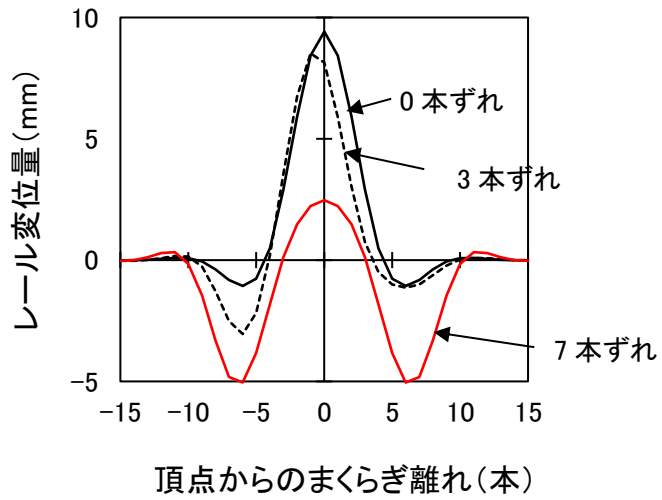


図 4-17 位置ずれ本数と T_A 時の変形形状

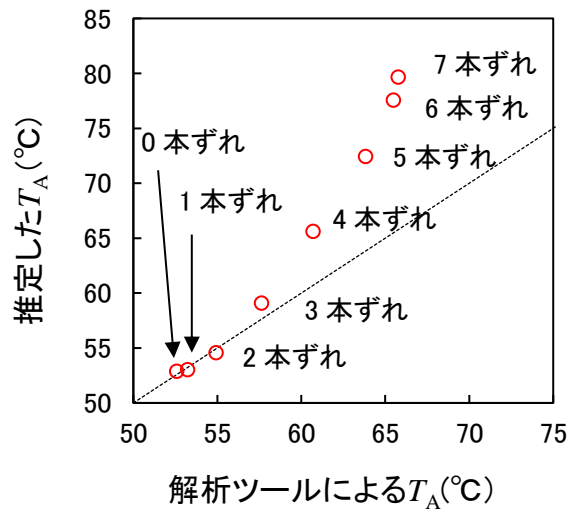


図 4-18 T_A の推定精度

4.4.5 座屈発生温度上昇量の推定と座屈リスク箇所の抽出

(1) 検討方法

以上の検討結果を踏まえ、4.3節で検討した営業線の対象区間における座屈発生温度上昇量 T_A の推定を試みる。推定は図4-19のフローに従い、以下の通り行った。

- ・浮きまくらぎ検出手法により、自重作用時の道床面死荷重 P を求め、道床横抵抗力を設定する。
- ・道床横抵抗力分布と、全支持ケース T_A 時のレール変形状より、まくらぎ 11 本分の E_S を求め、式(4-4)を用いて T_A を推定する。
- ・この処理をまくらぎ 1 本ずつずらして繰り返し行い、 T_A の分布を作成する。

ここで、道床横抵抗力分布については図4-5のものを、全支持ケース T_A 時の変形状については図4-11および図4-14のものをを用いた。

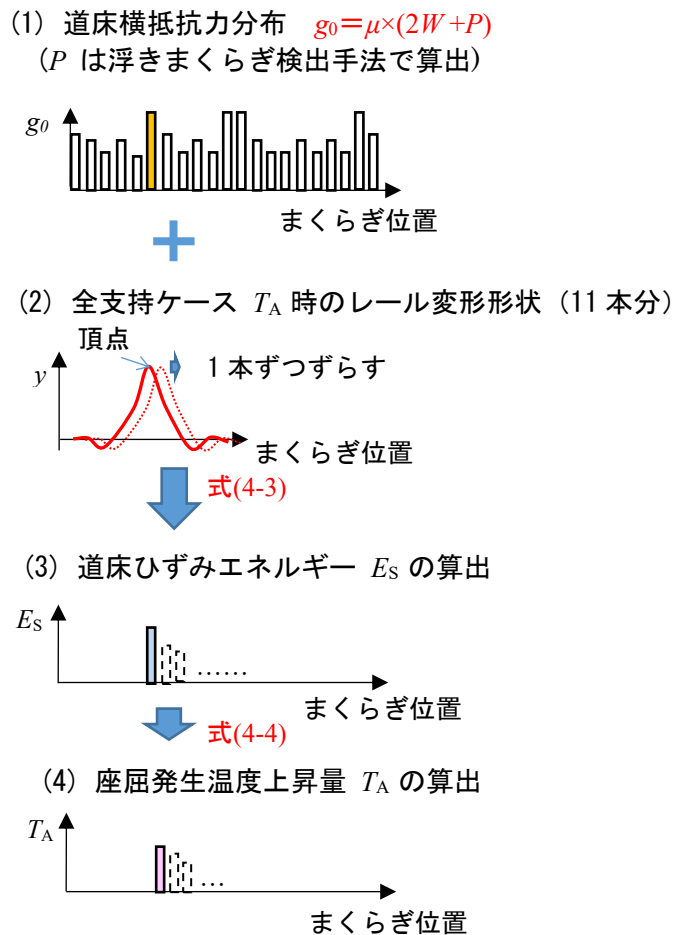


図4-19 営業線軌道を対象とした T_A の推定フロー

(2) 検討結果

図 4-20 に T_A の推定結果の一部を示す。最終道床横抵抗力 g_0 の値、浮きまくらぎ箇所、および前 4.3.4 項で T_A の推定精度が良好であった、初期軌道変位の頂点と T_A 時の最大変位箇所が合致した箇所も併せて示した。これによると、推定した T_A は解析ツールで算出した T_A の形状を概ね正しく推定できていることがわかる。 T_A が周囲より低く、その極小値となっている箇所は、初期軌道変位の頂点と T_A 時の最大変位箇所とが一致しており、良好な推定精度が得られている。

図 4-21 に浮きまくらぎ区間における T_A の推定結果と解析ツールで求めた結果との比較を示す。ここで、凡例は連続浮きまくらぎの本数を示し、同一連続まくらぎ区間ではその T_A の最小値をそれぞれプロットしている。この図より、両者は相関係数 0.92 と良好な推定結果が得られており、今回提案した手法を用いて、 T_A が相対的に低くなる座屈リスク箇所については概ね良好に推定することができると思われる。

なお、本節で用いたレール変形状、 E_s 算出に用いるまくらぎ本数、および式(4-4)については、表 4.2～表 4.4 で示した軌道の諸元および式(4-1)で示した初期軌道変位によって決定される。したがって、これらと異なる諸元で検討を行う場合は、別途同様の検討により適正なものを設定する必要がある。

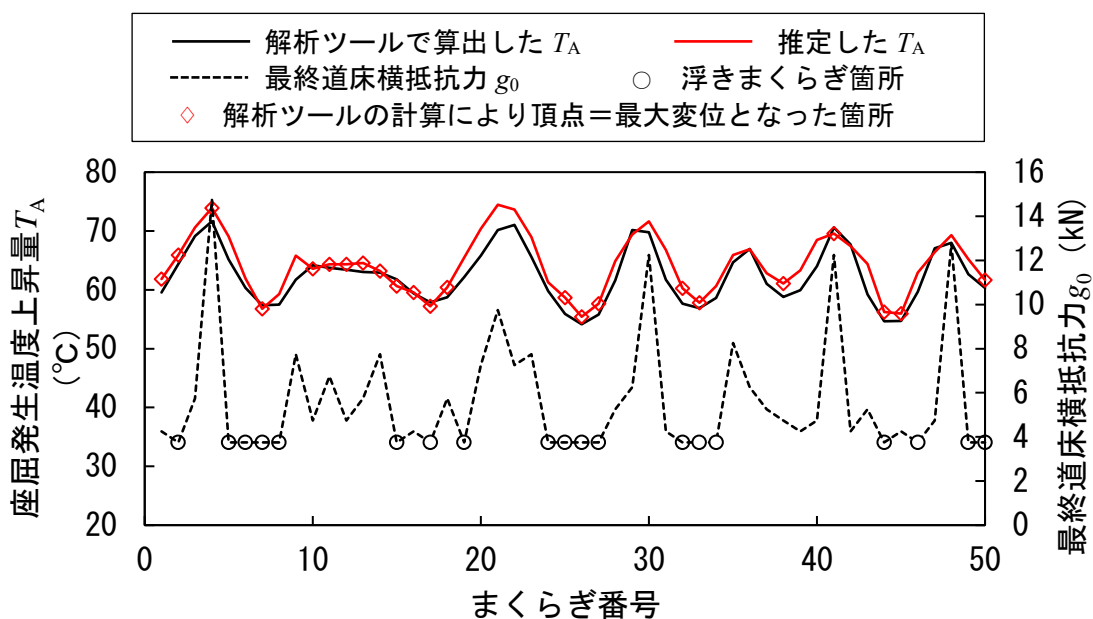


図 4-20 営業線軌道を対象とした T_A の推定結果の抜粋

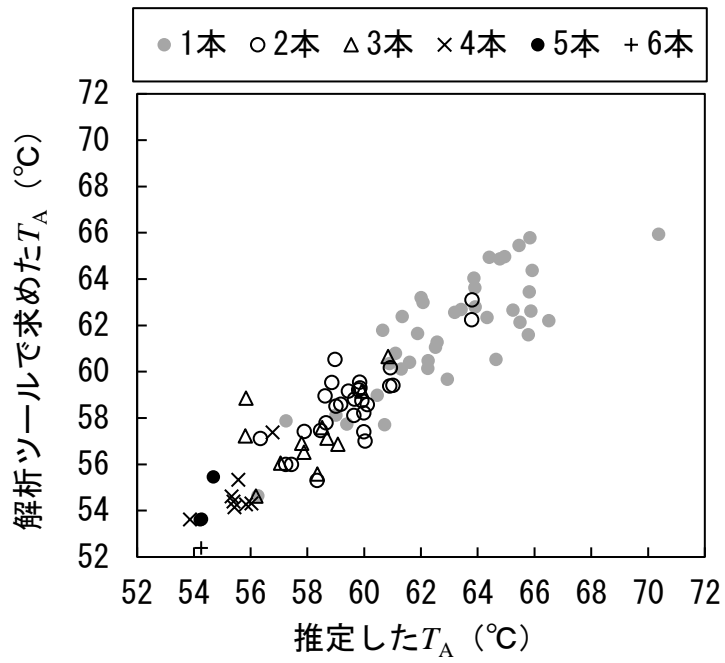


図 4-21 T_A の推定値と計算値の比較

4.4 まとめ

本章では、営業線のまくらぎ支持状態の実態に基づき設定した道床横抵抗力のばらつきにより、軌道座屈が発生する温度に与える影響について軌道座屈解析ツール（解析ツール）を用いて定量的に捉えた。また、解析ツールを用いなくても、道床横抵抗力の分布状態より、軌道座屈が発生する温度を推定する手法について検討した。

以下に結果を示す。

- (1) まくらぎ支持状態を基にまくらぎ個別の道床横抵抗力を設定し、軌道座屈解析ツールを用いて座屈解析を行った。営業線を対象に実施した結果、連続浮きまくらぎ本数が増えるほど座屈発生温度上昇量 T_A が低下する傾向が見られたが、その温度にはばらつきが認められた。つまり、 T_A は単純に浮きまくらぎの本数で決定されず、前後のまくらぎの支持状態の影響を受けていることが考えられる。
- (2) 道床横抵抗力を一律の値で設定した軌道に対し、解析ツールを用いて、レール温度上昇量、支持された道床横抵抗力のばね要素に蓄えられるひずみエネルギー E_S 、および解析ツールに与えた初期軌道変位の頂点における変位との関係を調べた。道床横抵抗力を3ケース設定して検討した結果、頂点の変位が同じとなる条件では、レールの変形形状はほぼ一致すること、およびそのときの E_S と T_A との間に高い相関があることを確認した。
- (3) 規則的に連続浮きまくらぎが発生している軌道状態を設定し、浮きまくらぎ区間の中央を初期軌道変位の頂点とした場合に対し、解析ツールを用いて(2)と同様のパラメータスタディを行った。結果は(2)と異なり、頂点変位が同じとなる条件においてもそれぞれ異なるレール変形形状となった。ただし、頂点近傍の比較的レール変形形状が一致している区間を抽出することにより、その区間で算出した E_S と T_A との間には高い相関が得られる条件が存在することを確認した。
- (4) 初期軌道変位の頂点を連続浮きまくらぎ中央からずらした条件を設定し、(3)で得られた E_S より T_A を推定する回帰式の精度に与える影響についてパラメータスタディを行った。結果、設定した位置ずれが小さく T_A 時の最大変位箇所が頂点と一致する場合は、回帰式により T_A を精度良く推定できること、設定した位置ずれが大きく T_A 時の最大変位箇所が頂点と一致しない場合は、 T_A の推定結果が過大となり推定精度が低下することを確認した。営業線を対象に回帰式を用いて T_A を推定する場合、計算区間を1本ずつ移動させ連続的に行うため、計算区間ごとに位置ずれ本数や T_A の推定精度も異なることとなる。ただし、同一の連続浮きまくらぎ区間における推定精度は T_A が低いほど高く、多少の位置ずれでも良好な結果が得られているため、 T_A が低い座屈リスク箇所を抽出する目的であれば、今回提案した手法の適用が可能であると考えられる。
- (5) (1)で用いた営業線の検討対象区間に対し、(3)に従って算出した E_S および回帰式を用いて T_A を推定し、解析ツールで求めた T_A と比較した。結果、 T_A が相対的に低くなる座屈リスク箇所については概ね良好に推定できていることを確認した。
- (6) 本研究では、限定された初期軌道変位や軌道構造条件を用いた検討となっている。異なる条

件で検討を行う場合には、別途同様の検討により、 E_s の計算本数や回帰式など適正な条件を設定する必要がある。

本章の一部は、国土交通省の鉄道技術開発補助金を受けて実施した。

参考文献

- [4-1] 玉川新悟，西宮裕騎：FEM 解析ツールを用いた実物大軌道座屈試験の再現解析，第 23 回鉄道工学シンポジウム論文集，pp.267-274，2019.
- [4-2] 西宮裕騎，片岡宏夫：座屈発生点を考慮したロングレールの座屈安定性の評価法に関する一考察，第 20 回鉄道工学シンポジウム論文集，pp.9-15，2016.
- [4-3] 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.173-186，丸善出版，2011.
- [4-4] 保線工学委員会/編：保線工学<下>，p.12，鉄道現業社，2018.
- [4-5] 久田俊明，野口裕久：非線形有限要素法の基礎と応用，pp.247-260，丸善株式会社，1995.
- [4-6] 宮井徹，飯田啓善，細川岳洋，浜崎郷広：営業線における道床横抵抗力試験，鉄道技術研究所速報，No.82-142，1982.
- [4-7] 保線工学編集委員会編：保線工学<上>，pp. 295-297，鉄道現業社，2016.
- [4-8] 梅田静也，熊崎弘：3号 PC まくらぎ用 5 形改良形レール締結装置の開発，鉄道技術研究報告，No.1332，pp.48-51，1986.
- [4-9] 片岡宏夫，柳川秀明：軌道のアップリフトを考慮した座屈安定性解析，鉄道総研報告，Vol.14，No.4，pp.7-12，2000.
- [4-10] 沼田実：ロング・レールの座屈強さ，鉄道技術研究報告，No.721（施設編第 313 号），1970.

第5章 不均一支持軌道走行時の軌道の応答と高低変位進み

5.1 検討の主旨

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[5-1]。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、軌道の沈下量はまくらぎ1本に対する作用（以下、「レール圧力」という。）が大きく影響し、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。）の大きさが異なることにより道床の沈下量に差が生じ、その結果、高低変位が進行するとしている。レール圧力は、まくらぎの支持条件を均一と仮定し、弾性床上のはりモデル等により定まる輪重の分散荷重として算出されるのが一般的であり、浮きまくらぎの介在など不均一な支持状態については想定していない。また、不均一な支持状態でのレール圧力も不明である。

本章では、このような不均一な支持状態における軌道変位進みを明らかにし、軌道破壊理論を補完することを目的に、まず、浮きまくらぎ箇所におけるレール圧力の実態を確認し、数値計算による再現を試みる。また、高低変位や浮きまくらぎ発生状況の経時変化を確認し、レール圧力と高低変位進みの関係について調査する。加えて、まくらぎ間隔がレール圧力に与える影響についても確認する。

5.2 浮きまくらぎ箇所の軌道応答測定

本節では、浮きまくらぎ箇所におけるレール圧力の実態を確認するため、営業線において、車両走行時の軌道の応答測定を行い、結果を考察する。以下、この測定を行った箇所を地上測定箇所という。

5.2.1 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の支持まくらぎ箇所とし、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 の区間であり、年間通過トン数は 1960 万トンである。

(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、予め浮きまくらぎ検出手法により、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 5-1 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、RFWD[5-2]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 5-2 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[5-3]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、浮き量の計算精度が低下している可能性があることから、応答変位遅延時間の大きい箇所の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。



図 5-1 RFWD による測定状況

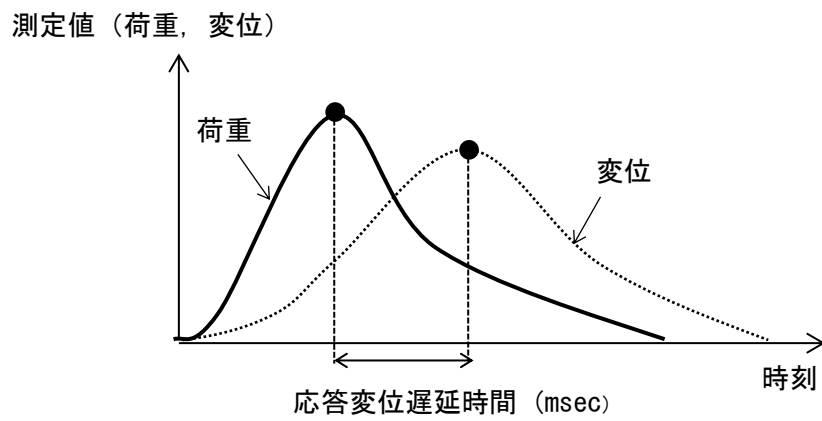
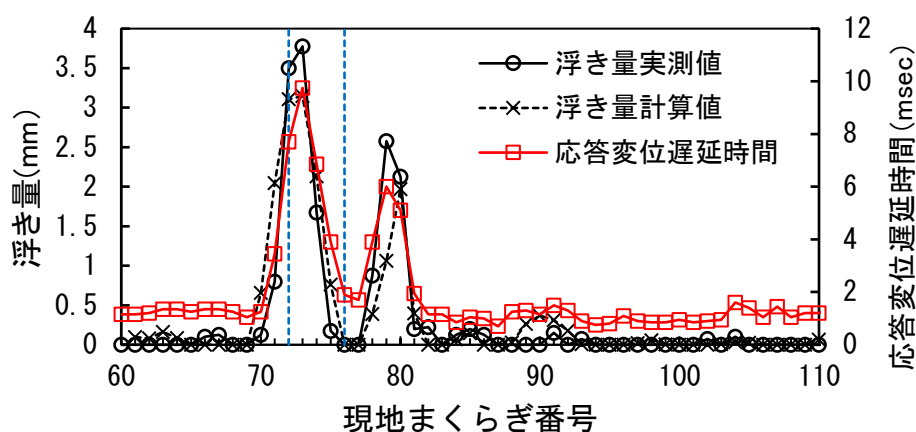


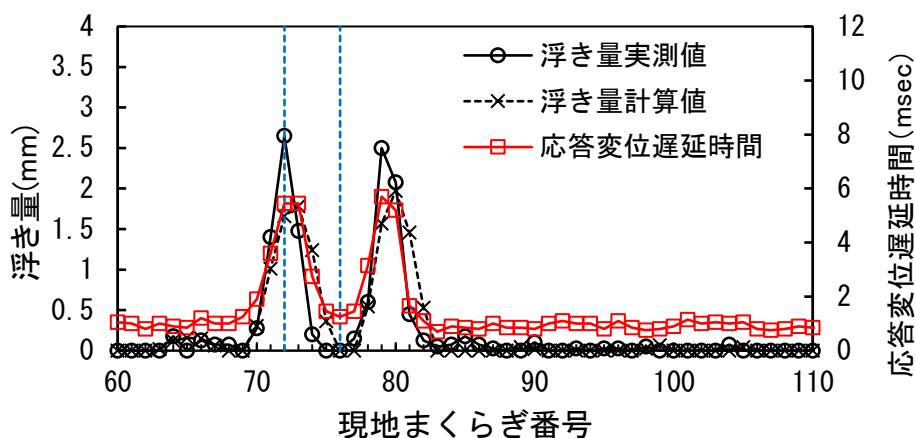
図 5-2 応答変位遅延時間の算出方法

(3) 地上測定箇所の調査結果

図 5-3 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，計算に用いた高低変位の復元波形[5-4]には，第 3 章において良好な精度が確認された 3～50 m の帯域で復元したものをを用いた．浮き量の実測値は，3.3.2 項に示したように，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．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，第 6 章に後述するように，現地のまくらぎ位置等の諸元を数値計算に反映させていないため生じたものと考えられる．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．



(a) 左レール



(b) 右レール

図 5-3 浮き量と応答変位遅延時間

(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5-4に測点配置を示す。それぞれの測定方法は以下のとおりとし、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[5-5]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。

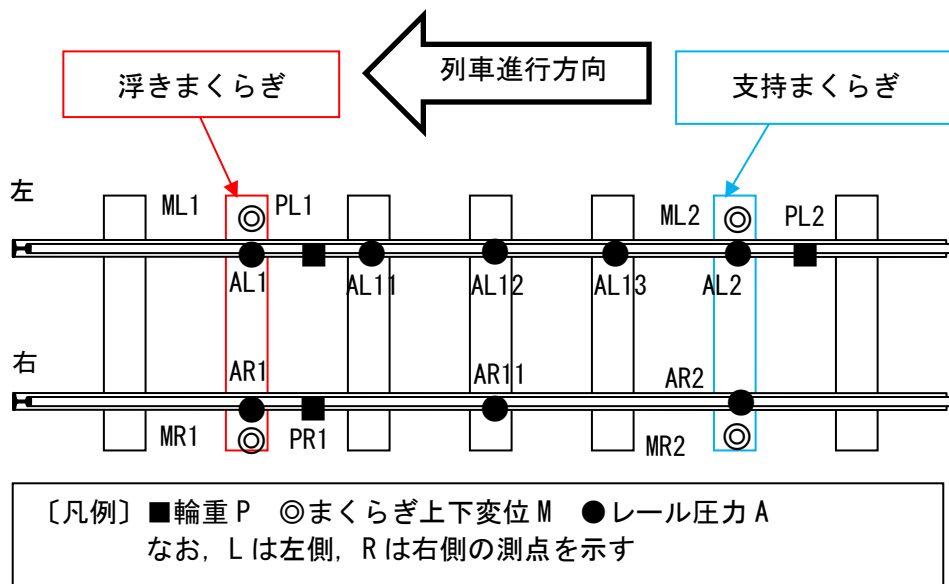


図5-4 地上測定の測点配置

5.2.2 測定結果

図 5-5 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、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 とともに車軸ごとのばらつきが大きいのは、車両質量のアン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 3.5 mm に対し平均で 3.9 mm であり、支持まくらぎ ML2 では平均で 0.8 mm である。

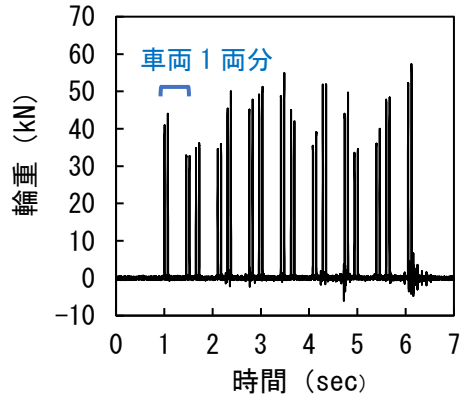
レール圧力については、浮きまくらぎ AL1 が支持まくらぎ AL2 の 1/2~1/4 程度と明らかに小さい。波形を見ると、支持まくらぎ AL2 では、付近の車軸の影響を受け、概ね 4 軸通過ごとに値が 0 になるのを繰り返しているのに対し、浮きまくらぎ AL1 ではそのような傾向が見られず、1 軸通過するごとに値が 0 となっている。つまり、浮きまくらぎ箇所では、まくらぎが道床面に接地してからレール圧力が発生していることを示している。

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。

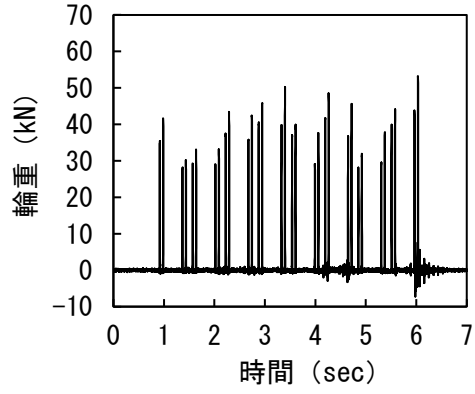
図 5-6 にレール圧力の測定値を測点別に比較したものを示す。測定した車両編成は図 5-5 と同一で、先頭の 2 軸通過前後の時間帯のみ抜粋している。支持まくらぎ箇所から浮きまくらぎ箇所にかけて徐々にレール圧力のピークが低下しており、この原因は、前後のまくらぎの支持状態を含めた荷重分散の影響によるものと考えられる。

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。

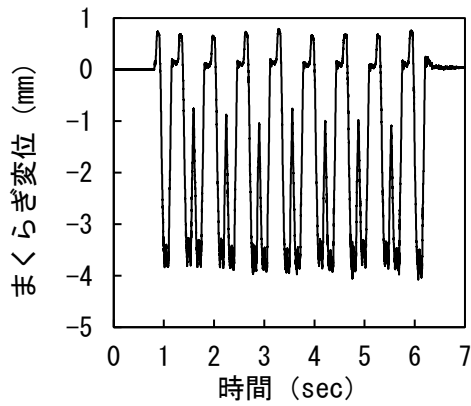
図 5-7 に輪重の平均値に対する応答値を速度別に整理した結果を、表 5-1 にこれらの関係を線形回帰した結果を示す。これによると、まくらぎ上下変位、レール圧力とも速度が大きいほど大きくなる傾向が見られ、その影響は 100 km/h あたり 10~30 %程度である。ただし測定編成によるばらつきが見られ、決定係数 R^2 は 0.02~0.57 であった。



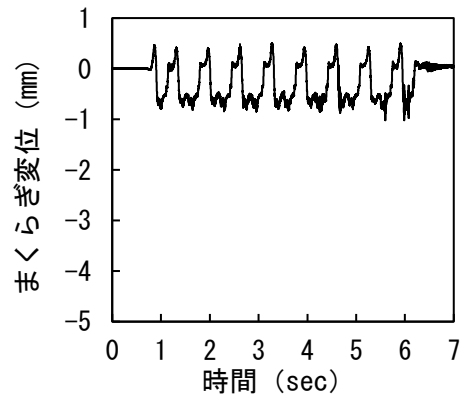
(a) PL1 (浮き)



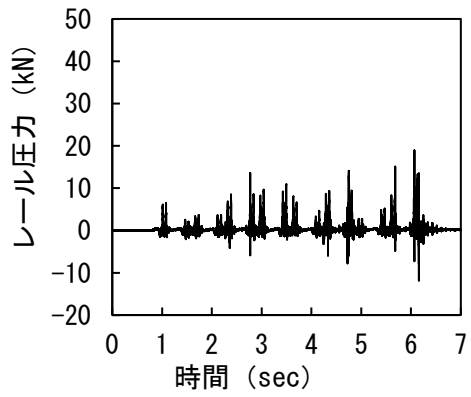
(b) PL2 (支持)



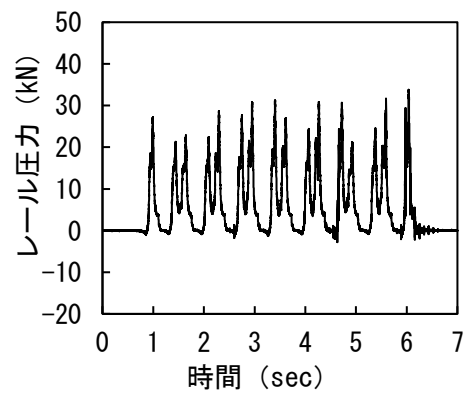
(c) ML1 (浮き)



(d) ML2 (支持)



(e) AL1 (浮き)



(f) AL2 (支持)

図 5-5 測定結果の一例 (左レール)

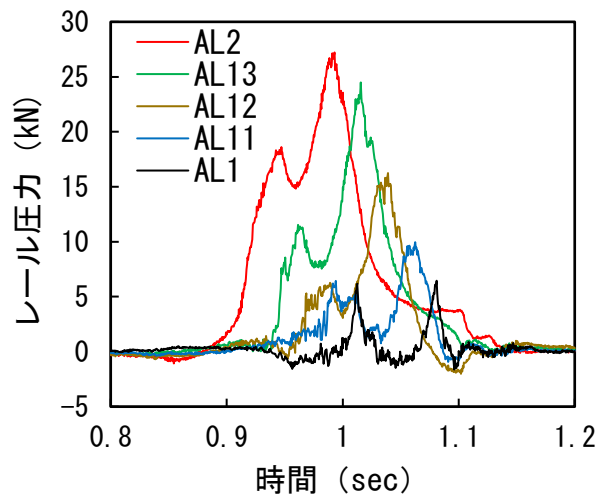
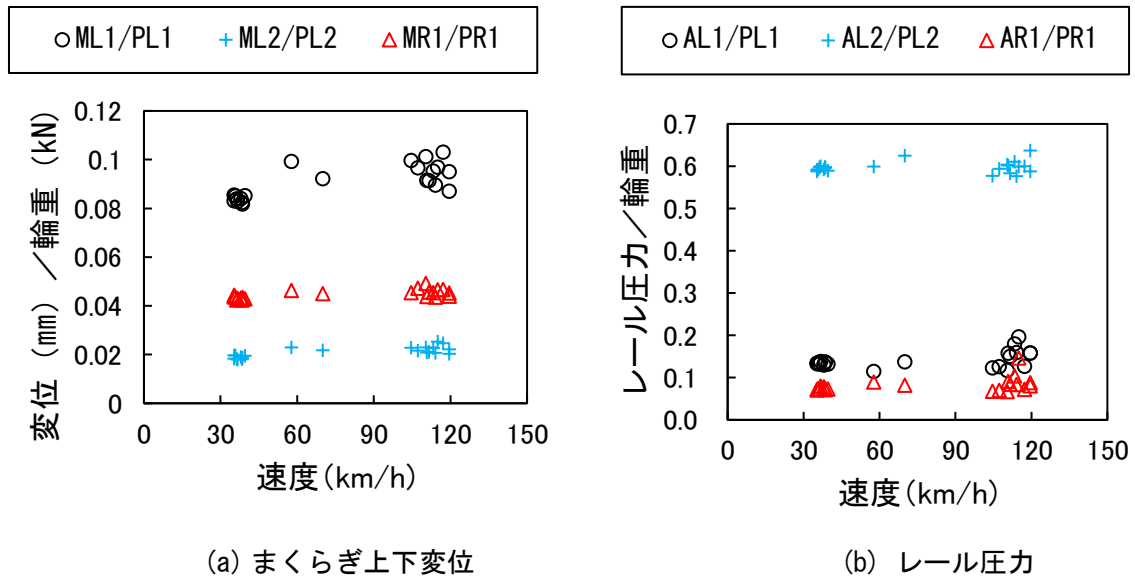


図 5-6 レール圧力の比較



(a) まくらぎ上下変位

(b) レール圧力

図 5-7 速度と各応答値と輪重の比

表 5-1 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

5.3 軌道支持状態と軌道応答の再現解析

本節では、浮きまくらぎ箇所を含む不均一支持状態の軌道において、軌道応答の再現解析を行う。ここでは主に軌道沈下への影響について確認するため、レール圧力の大きさに着目した検討を行う。

5.3.1 数値計算モデル

浮きまくらぎ検出手法に用いた FEM 計算モデルを、輪重を模擬した静的な集中荷重の荷重が可能となるよう拡張した数値計算モデルを用いる。具体的には、浮き量を算出する過程である自重による軌きょうのたわみを算出した後に、実際の車両走行を想定し、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の 1 台車の車軸間距離で、隣接軸の影響を受けると考えられる 2.1 m 間隔の 2 点の集中荷重を移動させたときの影響線を算出した。

図 5-8 に計算イメージを示す。

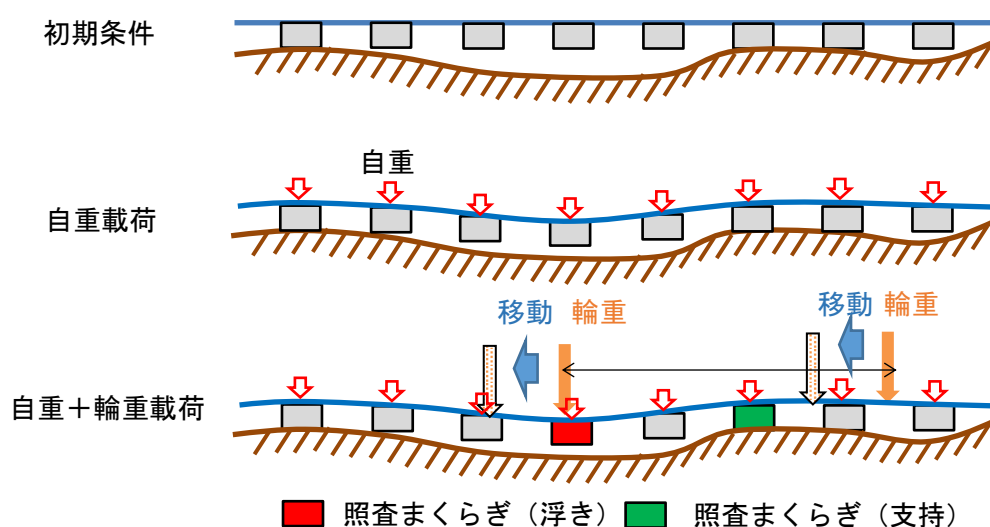


図 5-8 数値計算のイメージ

5.3.2 計算結果

図 5-9 に実測値と計算値との比較結果を示す。実測値は図 5-5 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考えられる。

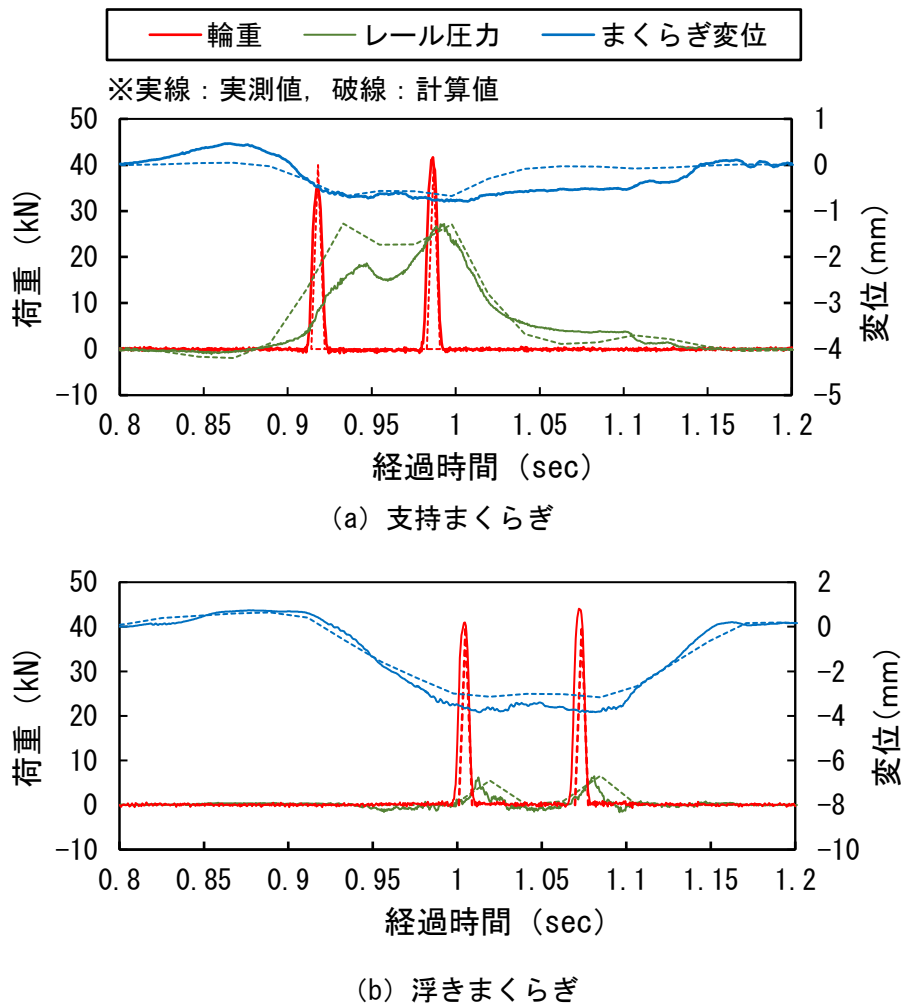


図 5-9 実測値と計算値の比較

5.4 不均一支持箇所における軌道沈下の状況把握

本節では、高低変位や浮きまくらぎ発生状況の経時変化を確認し、前節までで明らかにした不均一な支持状態の軌道を車両が走行するときのレール圧力の大きさととの関係を踏まえて、従来の軌道構造標準モデルとの関連性を論じる。

5.4.1 地上測定箇所の高低変位および浮き量の推移

本項では、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。ここでは、軌道の沈下に影響があるとされているレール圧力との比較を行う。なお、本節において「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。

図 5-10 に地上測定箇所の 10m 弦高低変位の経時変化を示す。道床突き固めを含め軌道変位保守作業の実績がない 2 年間の推移を示している。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 5-11 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 5-12 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 17 kN 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を受けているのが原因と考えられる。

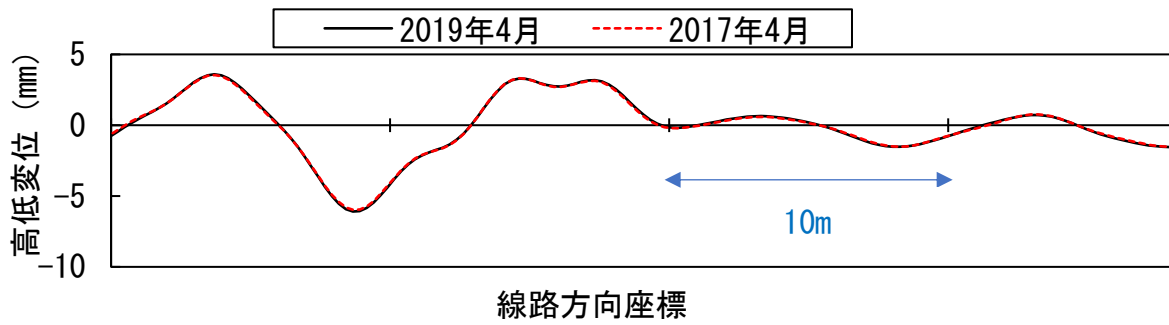


図 5-10 地上測定箇所の高低変位の変化

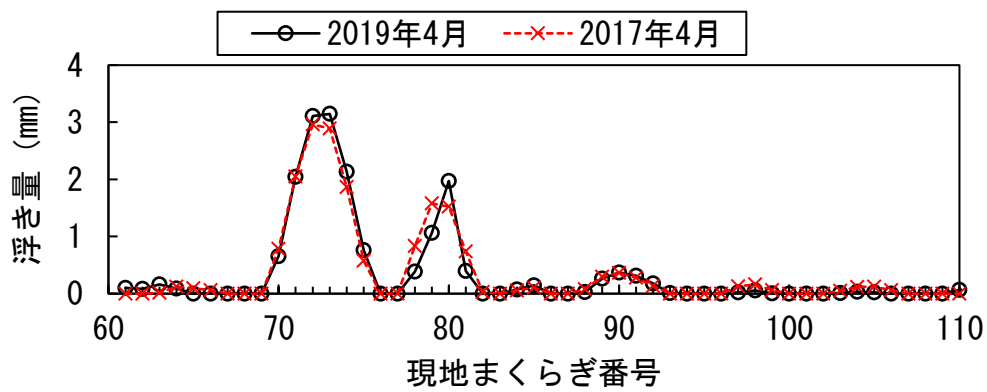


図 5-11 地上測定箇所のまくらぎ浮き量の変化

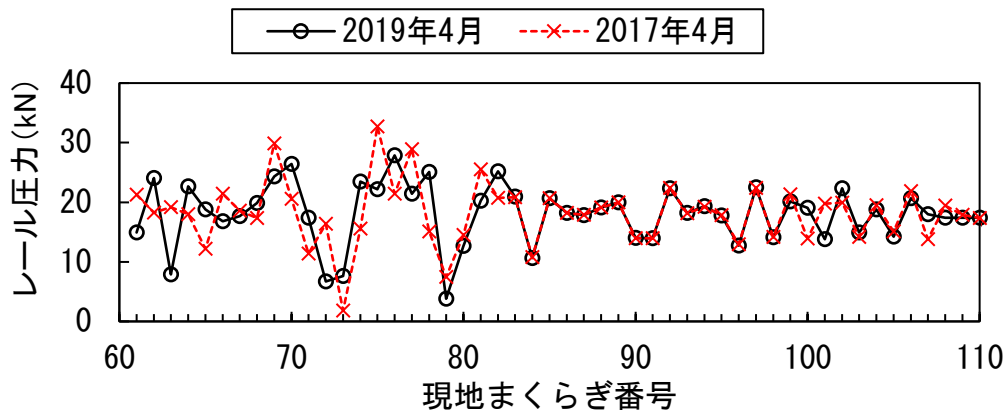


図 5-12 まくらぎごとのレール圧力の変化

5.4.2 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、**図 5-13** に示すように道床突き固めの直後に急激な変形（初期変形）が生じ、その後漸進的な変形過程へと推移する[5-6]。前 **5.4.1 項** で確認に至らなかった沈下進みの大きい箇所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、**5.4.1 項** 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、定期的にレール削正作業を行い輪重の変動が小さい直線区間で、年間の通過トン数が多く、大型保線用機械（マルチプルタイタンパー）による軌道変位保守作業の作業履歴がある区間から選定した。検証区間の軌道構造は、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 であり、年間の通過トン数は 3370 万トンである。

図 5-14 に軌道変位保守作業の施工前、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貨物列車など多様な車両が走行するため、機関車荷重を想定して輪重を 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、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、地上測定箇所での検討結果と同様に浮き量が大きい箇所レール圧力が小さい傾向が確認できる。

図 5-15 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 5-16** 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。

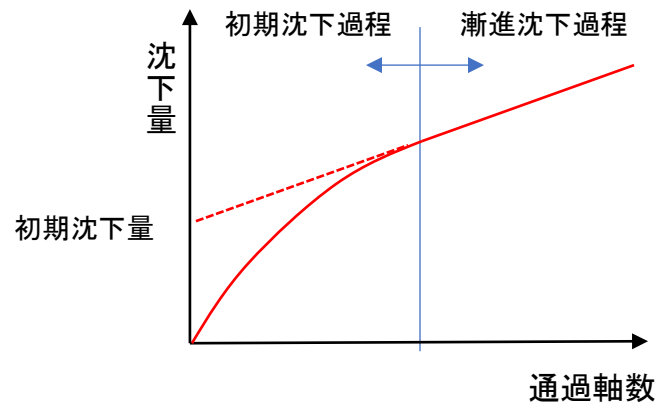


図 5-13 道床の塑性変形の概念図 [5-6]

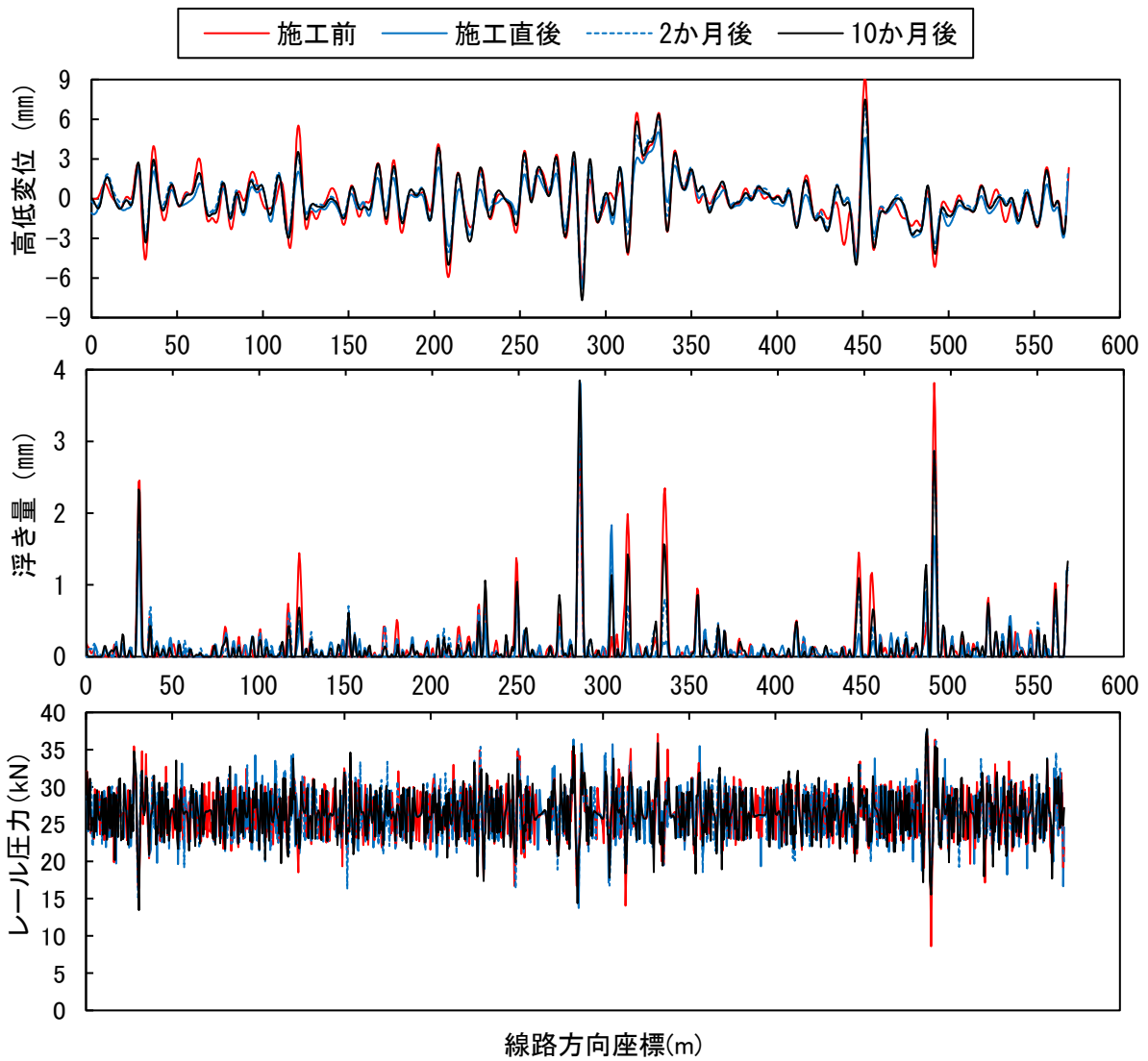


図 5-14 道床突き固め前後の軌道状態の推移

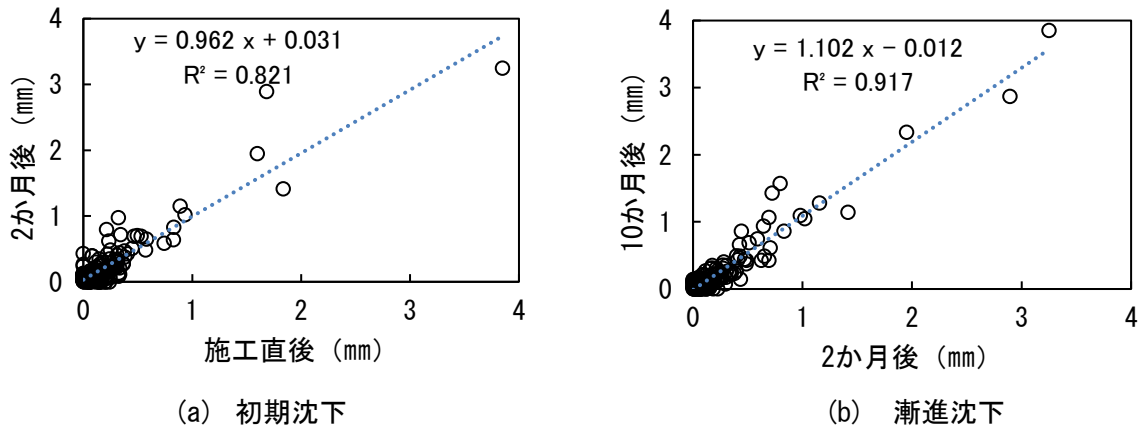


図 5-15 浮き量（代表値）の経時変化

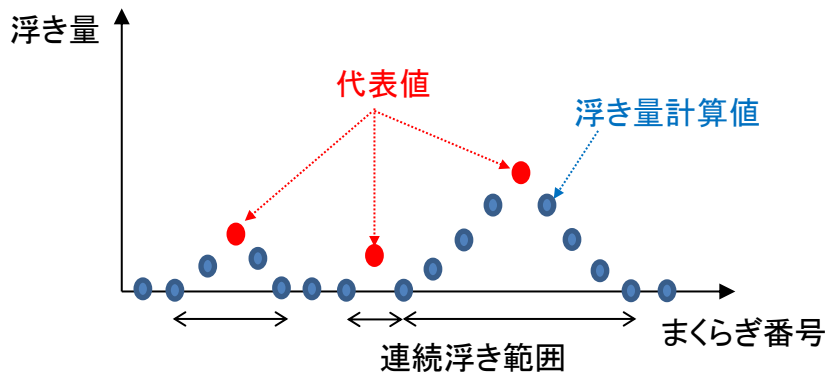


図 5-16 浮き量の代表値の定義

図 5-17 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 5-12 と同様に、近傍のまくらぎの支持条件の影響を受けているためと考えられる。

図 5-18 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 5-2 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ことがわかる。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 5-19 にロット高低 σ （100m ロットの高低変位の標準偏差）と浮き量の変化の関係を示す。

ここで、浮き量については、対応する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、ロット高低 σ の変化量と浮き量の合計値の変化量には正の相関が見られる。つまり、浮き量が大きくなるロットでは、ロット高低 σ が進行する傾向が見られるといえる。

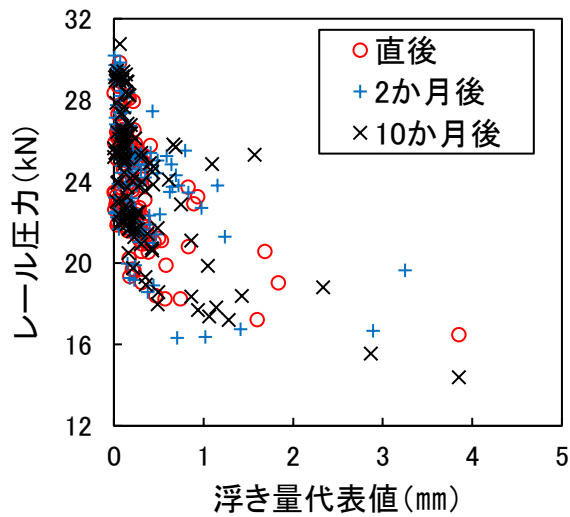


図 5-17 浮き量代表値とレール圧力

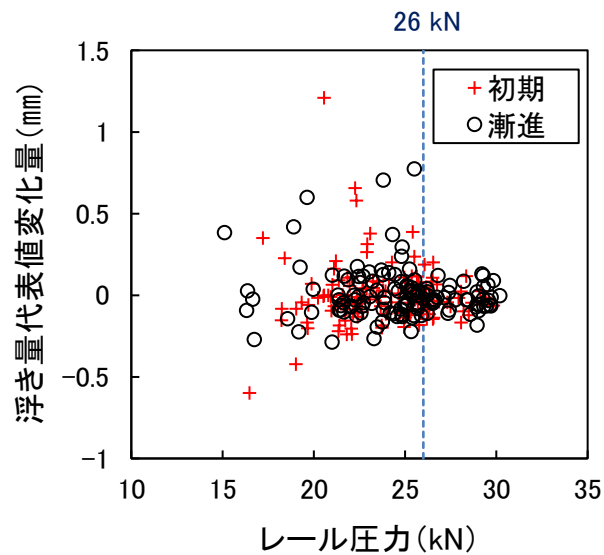


図 5-18 レール圧力と浮き量の変化

表 5-2 レール圧力と浮き量の変化

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

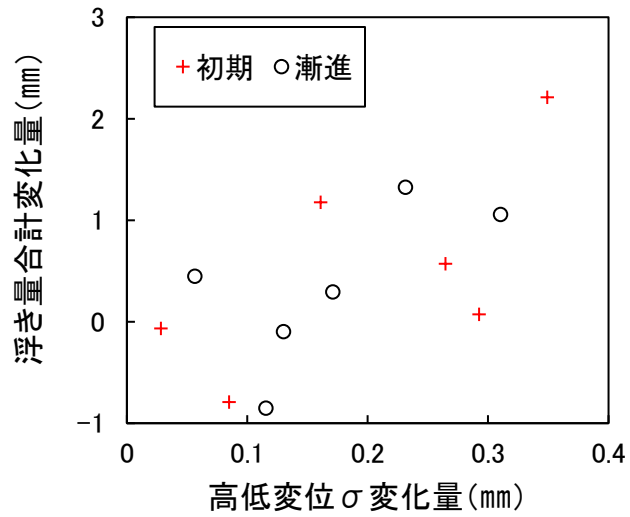


図 5-19 高低変位 σ 変化と浮き量合計値の変化

5.4.3 高低変位と車両通過時のレール圧力の関係

本項では、100m ロット単位で高低変位とレール圧力との関係について営業線のデータを分析する。分析に用いた営業線の区間は表 3-2 に示したものをを用いる。この区間における標準のまくらぎ間隔は4種類あるので、まくらぎ間隔の影響についても考察する。レール圧力については、5.4.2 項と同様に機関車荷重を想定して輪重を 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軸の条件で行い、載荷点直下の計算値を求めた。

各まくらぎ直上に集中荷重を載荷したときの載荷点直下のレール圧力を算出した。図 5-20 に一例として、まくらぎ間隔 900 mm の区間の一部に対し、0 kN (自重のみ)、20 kN、40 kN、60 kN、80 kN の集中荷重を載荷した結果を示す。なお、線区を走行する車両の輪重は概ね 40~80 kN である。この図によると、40 kN 載荷時にはレール圧力が 0 の箇所が存在しなくなっており、全てのまくらぎが荷重を支持する状態となっていることが分かる。これは、5.2 節で示した実測値と同様の結果となっている。また、載荷荷重によらずいずれも不均一な支持条件に起因して値にばらつきが生じている。ここで、このばらつきの状況を評価するため、均一な支持状態時におけるレール圧力に対する、不均一な支持状態におけるレール圧力の比で整理した。これをレール圧力比と称し、図 5-21 に荷重の大きさ別に、不均一支持状態におけるレール圧力とレール圧力比の標準偏差を算出し整理した。載荷荷重が大きいほどレール圧力比が小さくなっており、荷重が大きいほど不均一支持の影響が相対的に小さくなっていることを示している。図 5-22 に、レール圧力比の状況について頻度分布を作成したものを示す。これによると、いずれの荷重においても、ほぼ正規分布に従うことが分かる。

図 5-23 にロット高低 σ と、同じ 100m ロットで整理したレール圧力比の標準偏差との関係を示す。この図によれば、図 3-15 に示した浮きまくらぎ発生状況と同様、ロット高低 σ とレール圧力比には正の相関が見られる。また図 5-24 に図 5-23 をまくらぎ間隔別に線形回帰した結果を示す。ばらつきは見られるものの、まくらぎ間隔が大きいほどレール圧力比標準偏差が全体的に小さくなる傾向が見られる。この原因として、浮きまくらぎの介在はまくらぎ間隔を広げると同様の効果があり、まくらぎ間隔が広くなるほど荷重分散は悪くなり載荷箇所のレール圧力が大きくなるが、連続弾性支持モデル[5-6]等で検討すると、レール圧力の増加割合はまくらぎ間隔の増加割合を下回るためであると考えられる。

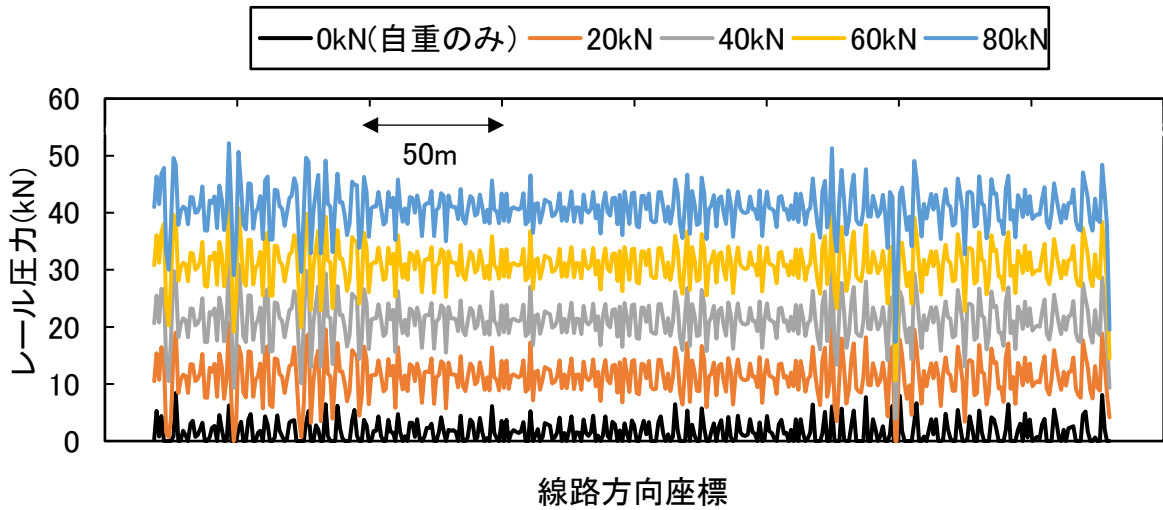


図 5-20 集中荷重の大きさとレール圧力の関係

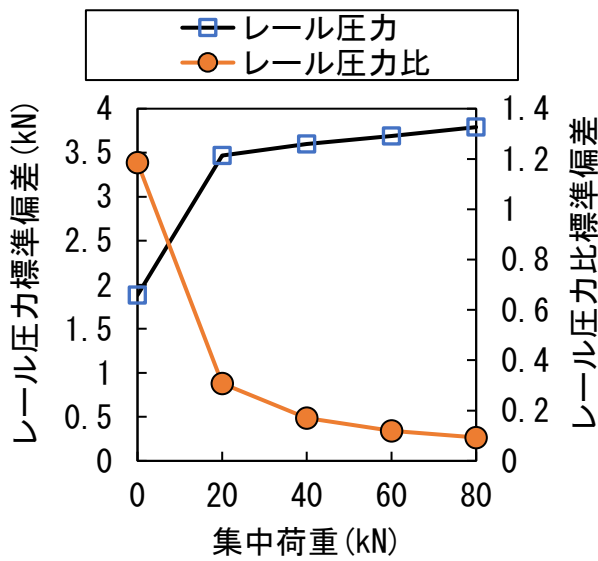


図 5-21 集中荷重の大きさとレール圧力およびレール圧力比の標準偏差

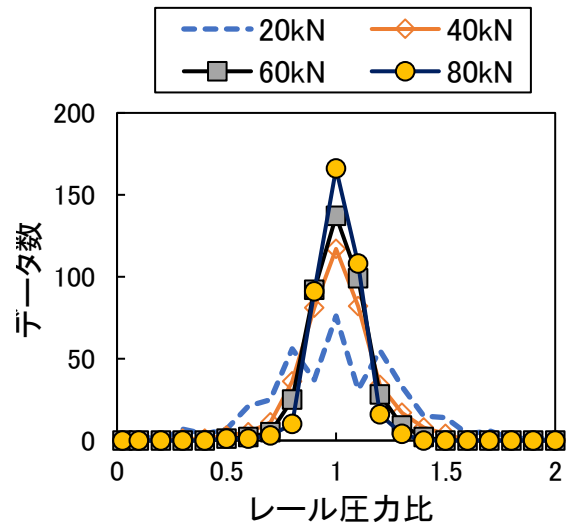


図 5-22 レール圧力比の度数分布

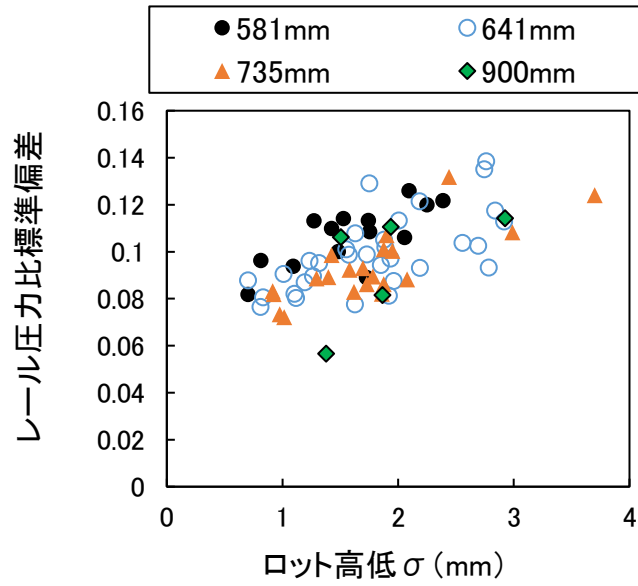


図 5-23 ロット高低σとレール圧力比の標準偏差

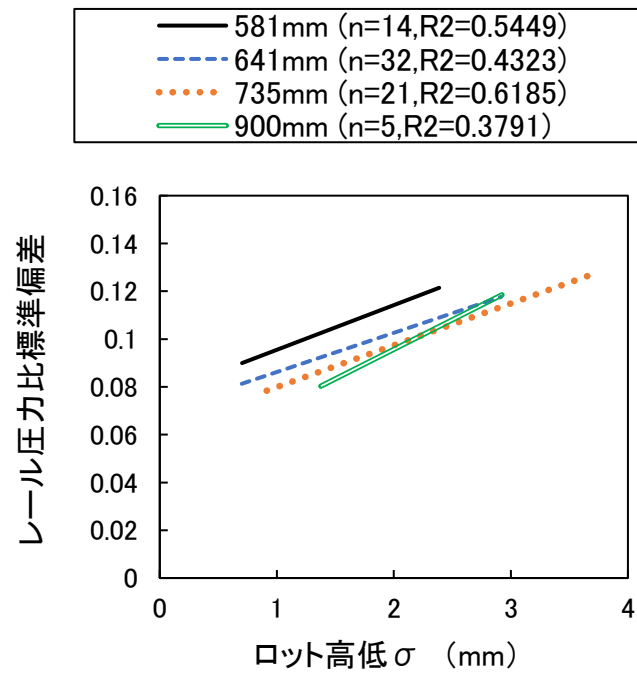


図 5-24 図 5-23 の線形回帰結果

5.4.4 考 察

(1) レール圧力、浮き量と高低変位進みの関係

本節では、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、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[5-7]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[5-7]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と考えられる。

一方、軌道構造標準モデル[5-1]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るとされており、実際確認された沈下進みの傾向とは合致していない。今後の課題として、名村らの知見[5-7]をさらに深度化させ、不均一支持区間を対象としたバラスト軌道の沈下特性を解明することが望まれる。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 σ の進みのメカニズム

ここでは、高低変位を一般的な管理単位であるロット高低 σ 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[5-8]は、ロット高低 σ が大きいほどロット高低 σ 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。また、5.4.3項において、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、レール圧力のロット標準偏差は、ロット高低 σ 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が大きいほどロット高低 σ 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5-25に結果を示す。ここで、レール圧力標準偏差は図5-18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ロット高低 σ の進みが大きくなる傾向が確認でき、既往の知見と整合する。加えて、前述した軌道構造標準モデル[5-1]では、レール圧力の差が大きいと高低変位の進み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いえる。

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 σ 進みのメカニズムは以下の通りであると考えられる。

- ・ロット高低 σ 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。

- ロット高低 σ 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、ロット高低 σ の大きいロットでは、ロット高低 σ の進みが大きくなる。

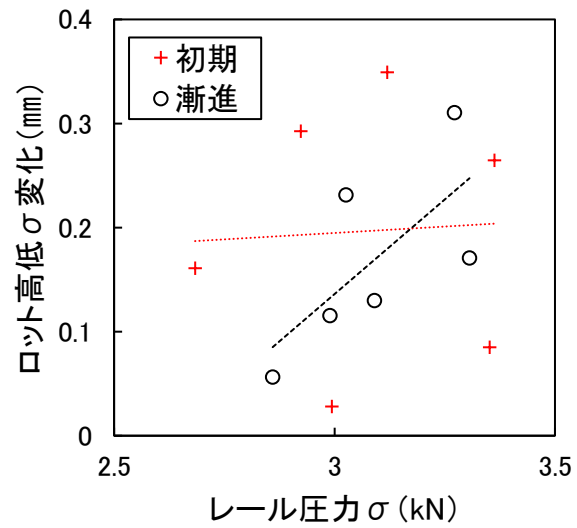


図 5-25 レール圧力標準偏差とロット高低 σ の進みの関係

5.5 まとめ

本章で得られた知見は次の通りである。

- (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。また、これらの値については、簡易な静的モデルを用いた数値計算により算定できることを確認した。
- (3) 浮きまくらぎが介在する軌道に集中荷重を作用させた場合、荷重分散に与える影響として、集中荷重が大きくなるほど浮きまくらぎの影響が小さくなる傾向が見られた。また、荷重分散のばらつきは 100m ロット単位の高低変位の標準偏差（ロット高低 σ ）が大きくなるほど大きくなる傾向が見られ、まくらぎ間隔が広がるほど小さくなる傾向が見られた。つまり、まくらぎ間隔が広がるほど、浮きまくらぎの影響が小さくなる可能性があることが明らかとなった。
- (4) 営業線の軌道状態を追跡調査した結果、レール圧力の小さい箇所では浮き量の変化が大きくなる傾向を確認した。この傾向は、均一な支持を前提としている軌道構造標準モデルと整合しない。一方、100m ロット単位で整理すると、レール圧力の標準偏差が大きい箇所ほどロット高低 σ の進みが大きくなる傾向が確認できたことから、軌道構造標準モデルの考え方と整合する。なお、沈下進みについてはレール圧力の大きさだけでなく、その荷重領域の影響も受けるとの既往の研究もあることから、バラスト軌道の沈下のメカニズムについて、不均一支持区間を対象とした沈下特性の解明が望まれる。

参考文献

- [5-1] 保線工学編集委員会／編：保線工学<上>， pp.216-232， 鉄道現業社， 2016.
- [5-2] 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.
- [5-3] 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.
- [5-4] 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.
- [5-5] 佐藤吉彦：新軌道力学， pp.379-381， 鉄道現業社， 1997.
- [5-6] 国土交通省鉄道局監修・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.283-298.， 2012.
- [5-7] 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.
- [5-8] 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.

第6章 浮きまくらぎ検出手法の汎用性の向上

第3章において、浮きまくらぎ検出手法を提案し、以降その手法を用いて営業線での浮きまくらぎの実態や影響について検討し、浮きまくらぎの把握は線路保守現場で有用な知見をもたらすことを明らかにした。

浮きまくらぎ検出手法は、現地の条件を細部まで設定可能であるが、線路保守の実務に適用するためには、手法の簡便さの確保と、現地に存在する設定条件のばらつきの影響を確認する必要がある。そこで、本研究では、線路保守の実務に浮きまくらぎ検出手法を適用していくための課題を明らかにし、より簡便に軌道の支持状態を把握するための検討を行った。

6.1 実務に適用する上での課題

浮きまくらぎ検出手法に用いる各種諸元は現地での軌道の実態を反映させているが、実務に適用していくためには以下の理由によりこれら詳細な条件を取り入れることは困難である。

6.1.1 位置に関する課題

まくらぎは、軌道の使用条件に応じて軌道延長 25m あたりの本数および基本の配置間隔が規定されており、レールに継目を有する軌道では、継目部近傍とその他では異なる間隔とされている。また、曲線区間や勾配区間、橋りょうの橋台付近では別の間隔[6-1][6-2]が規定されており、保守管理上一定のまくらぎ間隔の拡大が許容[6-3]されているなど同一線区でもまくらぎ間隔は一律ではない。また、実務上問題ないことからまくらぎ位置の厳密な管理が行われておらず、実際の間隔にはばらつきがある。加えて、一律の間隔でまくらぎが敷設された場合においても、道床面の設定に用いる軌道検測車の検測データと厳密に位置合わせを行うには、第3章で述べたように高度な技術と膨大な労力を要する。

6.1.2 質量に関する課題

軌きょうを構成する部材は、レールとまくらぎおよび両者を固定するレール締結装置が基本である。浮きまくらぎ検出手法では、軌きょうの質量をレールとまくらぎ等レール以外の部材により与えている。後者には、基本のまくらぎとレール締結装置の他にレールの継目板、ガードレールなどの軌道部材や、まくらぎ上に設置されている各種の地上子のような信号設備も存在する。また、まくらぎの質量は種別により様々である。さらに、レールの継目箇所が介在する箇所、信号用ケーブルが軌道を横断する箇所、路盤種別が変更する箇所では異なった種別のものが使用されるケースがある。また、第3章で示した部分 PC まくらぎも中下級線区で適用区間が広まりつつある。

線路保守現場では、ある一定の延長を1ロットとして、各ロット内で付与された番号により敷設されているまくらぎの種別の管理が行われているが、まくらぎ以外の部材の設置状況も含めこ

これらの質量を解析モデルに正確に与えるには労力を要する。

6.1.3 まくらぎ下面の支持剛性に関する課題

まくらぎ下面の支持剛性は実務では管理されていない。把握手法として第5章で用いた小型FWDを用いた簡易な軌道支持剛性評価法[6-4]が有効であるが、営業線全線にわたる測定には膨大な労力を要する。

6.2 浮きまくらぎ検出の感度分析

6.2.1 検討目的

浮きまくらぎを踏まえた線路保守を実施するためには、詳細な諸元データを用いなくても、保線区等の線路保守現場において容易に入手可能なデータを用いても精度よく浮きまくらぎを検出できることが望ましい。これらも一律の値で設定できれば条件設定の労力も軽減でき実務上さらに好ましい。

そこで、実際にはばらつきのある諸元データの代わりに一律の諸元データを用いることによる計算結果への影響について検討した。

6.2.2 検討方法

浮きまくらぎ検出手法を用い、良好な精度が確認できた第3章での区間A(以下、「既検討区間」という。)を対象に検討した。具体的には、その他の条件を一定としたうえで、まくらぎ位置、まくらぎの質量、およびまくらぎ下の支持剛性を各々変化させ、浮き量を比較することにより行った。

(1) まくらぎ位置のずれ・ばらつきに関する検討

既検討区間のまくらぎ間隔が一定でなかったため、まくらぎ間隔を均等間隔に再配置したものを基本とし、それに対し、前後に位置ずれを加えたものと、配置間隔にばらつきを加えたものを比較した。まくらぎ本数が既知で、まくらぎが均等に配置されている場合、位置ずれの最大値はまくらぎ間隔の1/2となる。そこで、前後にまくらぎ間隔の1/6, 1/3, 1/2を位置ずれとして与えた計6ケースで検討した。一方、配置間隔のばらつきは規定上のまくらぎ間隔の違い等を考慮して最大で1/3となるように一様乱数で設定した。これは実軌道よりもばらつきが大きい設定である。検討ケース数は10とした。まくらぎ位置に対応する道床面は第3章で述べたように補間して求めているが、ここでは線路保守現場で幅広く用いられている軌道保守管理データベースシステムLABOCS Ver.4.1[6-5]に搭載され、サンプリング定理を活用しているCNGDXコマンド[6-6]を用いて算出した。

(2) 質量のばらつきに関する検討

レール以外の部材の質量は、部材の種別やその組み合わせにより様々である。そこで本検討においては質量の異なるまくらぎを組み合わせその違いによる影響を検討した。検討に用いたま

くらはぎは、汎用品の中から質量 60kg, 160kg, 230kg (モデルではレール片側あたりの質量なのでその半分) の 3 種類を選定し、その種別をそれぞれ軽・中・重と称する。既検討区間に敷設されているまくらぎは重に相当する。この 3 種類のまくらぎから 2 種類を組み合わせた 3 条件を設定し、それぞれまくらぎ種別をランダムに混在させた。これは部分 PC まくらぎなど実軌道でもあり得る条件である。それぞれのケース数は 10 とした。

(3) まくらぎ下面の支持剛性に関する検討

まくらぎ下面の支持剛性は管理対象となっておらず、測定にも労力を要するため、まくらぎ個々に正確な値を設定するのは現実的ではない。そこで、計算を行う区間において営業線に存在する範囲で一定の剛性を設定し、その値を変化させたときの影響について検討した。

まくらぎ下面の剛性は、道床と路盤の剛性を合成して算出される。道床を 200 MN/m, 路盤のばね係数 D_s (MN/m) を式(6-1)で算出する[6-7]。

$$D_s = a \cdot h_B^b \cdot K_{30}^c \cdot S_T^d + e \quad (6-1)$$

ここに、 h_B : 道床厚 (mm), K_{30} : K_{30} 値 (MN/m³), S_T : まくらぎ底面積 (m²) であり、既設線想定の場合、各係数は以下の値をとる。

$$a = 2 \times 10^{-3}, b = 0.80, c = 1.60, d = 1.00, e = 0$$

設定した軌道条件については、まくらぎを中相当、道床厚を 200 mm, K_{30} 値については、軟弱路盤相当の路盤剛性、土構造設計標準[6-8]で定められている有道床軌道用の路盤剛性、省力化軌道用の路盤剛性としてそれぞれ 30, 70, 110 (MN/m³) とした。そのとき、式(6-1)より D_s はそれぞれ 15.4, 59.6, 122.8 (MN/m) と求まり、まくらぎ下面の剛性はそれぞれ 14.3, 45.9, 76.1 (MN/m) となる。

そこで本検討では、まくらぎ下面の剛性を、10, 20, 30, 50, 100, 200 (MN/m) とした場合についての検討を行った。

6.2.3 検討結果

検討結果について以下に示す。各種データのばらつきの影響については、既検討の条件をもとに設定した条件との比較を行った。なお、計算区間端部の境界条件の影響を排除するため、両端のまくらぎ位置における計算結果についてはいずれも除外した。

(1) まくらぎ位置のずれ・ばらつきに関する検討

浮きまくらぎの計算は、ずれやばらつきを考慮したまくらぎ位置で行い、結果の整理は均等間隔に配置した基本のまくらぎ位置で行った。図 6-1～図 6-3 に結果を示す。

図 6-1 は位置ずれ時におけるレールの変形形状の計算結果であり、浮き量算出の元になるものである。ここで「+1/6 ずれ」とは、まくらぎ間隔の 1/6 相当分を終点方 (図の右側) にずらした

位置での計算結果を示している。計算区間両端では境界条件の影響による相違が見られるが、その他区間では位置ずれに伴う変形状の相違は小さくほぼ同一線上に位置していることが確認できる。

図 6-2 は位置ずれ時における基本との浮き量の比較である。図 6-1 とは異なり基本のまくらぎ位置で整理しているため、位置のずれによる影響が表れている。ここでは、実際にはばらつきのある諸元データの代わりに一律の諸元データを用いることによる影響を検討しているため、縦軸が実際の浮き量、横軸が一律諸元としたときの浮き量に該当する。つまり、実際の浮き量が概ね 1 mm を上回る箇所においては、浮きまくらぎがほぼ確実に検出できていることがわかる。基本に対する浮き量の誤差を示す RMS (Root Mean Square) 値は 1/6 の位置ずれで 0.18~0.19 mm, 1/3 で 0.30~0.35 mm, 1/2 で 0.42~0.43 mm で、位置ずれが大きいほど精度が低下している。

図 6-3 はまくらぎ位置のばらつきに対する浮き量の比較である。ここでは最大まくらぎ間隔の 1/3 となる一様のばらつきを与えているが、浮き量の RMS 値は 0.16~0.25 mm と、概ね 1/6 の位置ずれと同程度の値である。最大 1/3 となる一様のばらつきの期待値は 1/6 となることから、基本からのまくらぎ位置ずれの大きさが精度に影響するものと考えられる。

以上より、まくらぎ位置のずれ・ばらつきの影響について、レール変形状に与える影響は小さいこと、浮きまくらぎの計算結果を整理する過程でずれ・ばらつきの影響が表れるが概ね 1 mm を上回る浮き量の箇所ではほぼ確実に浮きまくらぎを検出できることが確認された。

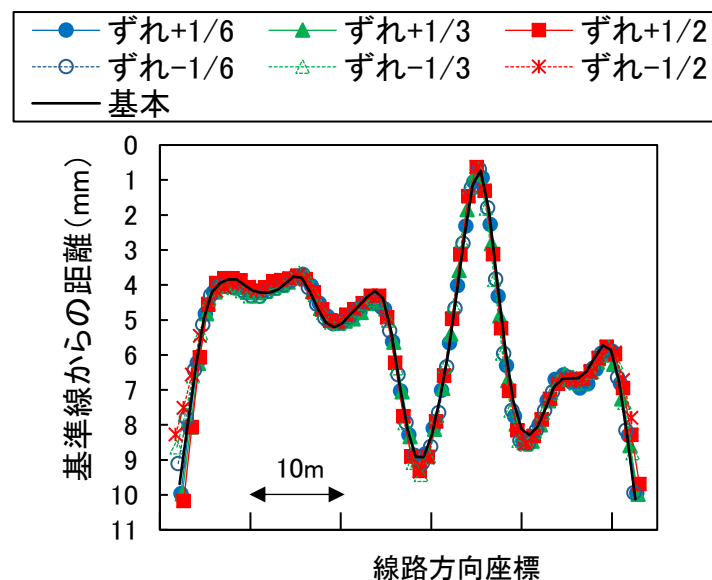


図 6-1 まくらぎ位置ずれ時のレール変形状

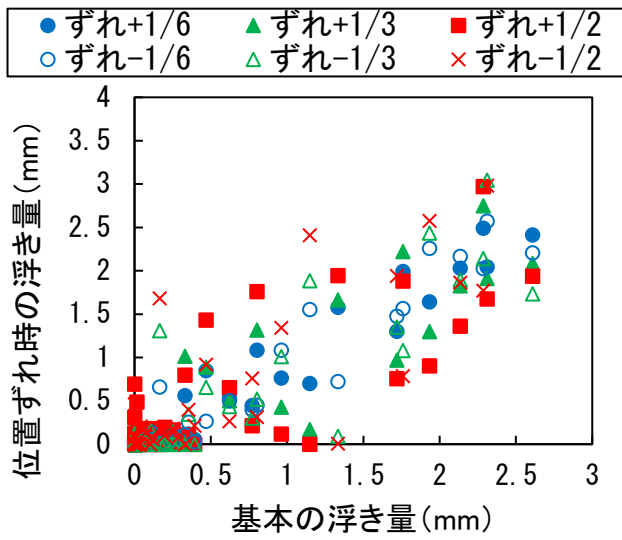


図 6-2 まくらぎ位置ずれ時の浮き量

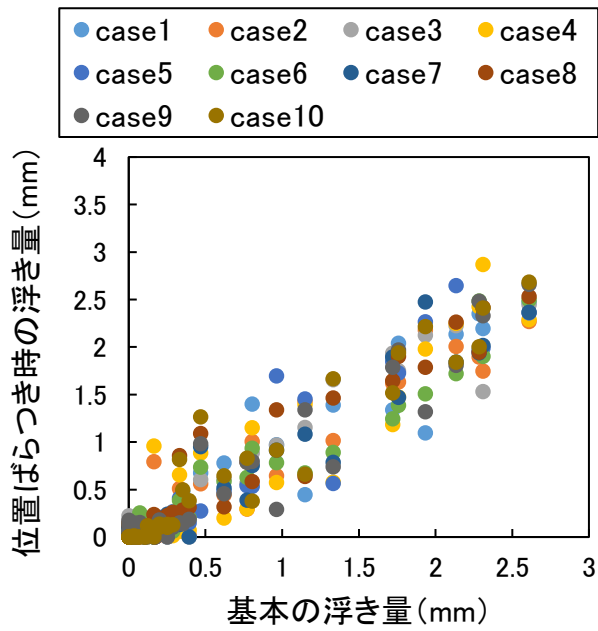
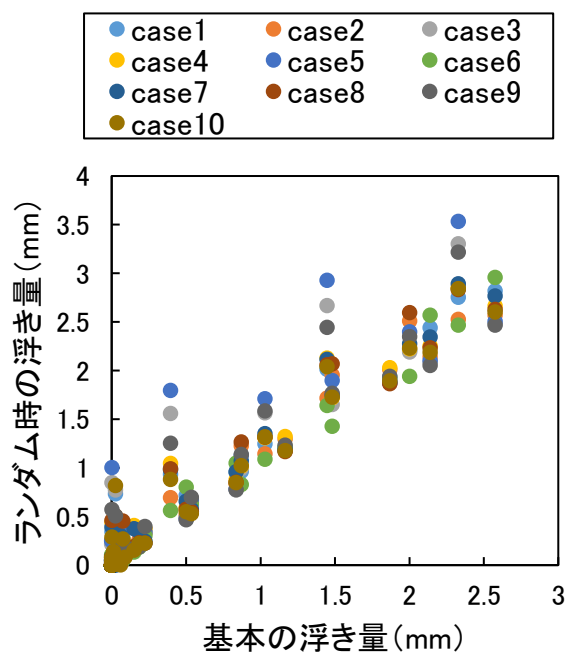


図 6-3 まくらぎ位置ばらつき時の浮き量

(2) 質量のばらつきに関する検討

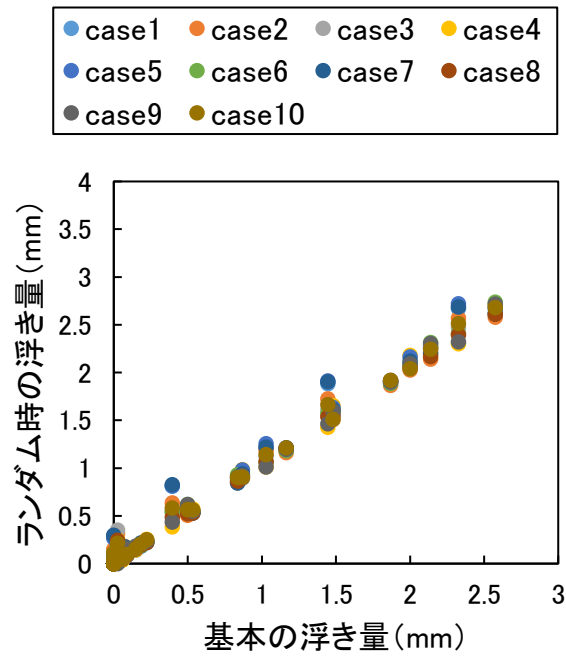
まくらぎ質量の3種類の組み合わせ（軽+重，中+重，軽+中）別にまくらぎがランダムに混在している検討を各10回行った。まくらぎが全て重で構成されたものを基本の条件とした。図6-4に基本に対する浮き量のばらつきを示す。いずれの条件においても、浮き量は基本とほぼ同程度もしくは大きい側にばらつきが見られる。これは、基本と比較していずれもまくらぎ質量が同じか小さいもので構成されており軌きょうの変形が小さくなっているためである。また、これらの図において、基本の浮き量が0.4 mm付近、1.5 mm付近、2.5 mm付近で特にばらつきが大きくなっている。検証のため図6-5に線路方向座標別の計算結果（各組み合わせごとの平均値）の比較を示す。既検討結果とは、第3章に示した実軌道の諸元で計算した結果である。この図の矢印で示す位置で乖離が見られる。これは、道床面の形状と軌きょうの質量の影響により軌きょうの変形量に相違が生じ、まくらぎが浮いている範囲に影響を及ぼしたことが原因である。また、基本の浮き量に対する各ケースの浮き量のRMS値は、図6-4において(a)の場合0.18~0.38 mm, (b)の場合0.04~0.12 mm, (c)の場合0.20~0.41 mmであり、構成しているまくらぎ質量の差に依存する結果となった。

以上より、まくらぎ質量にばらつきがある場合において、浮きまくらぎの存在箇所の検出は概ね正確で影響は小さいものの、浮き量の算出精度については質量の差が大きくなることにより低下することが確認された。

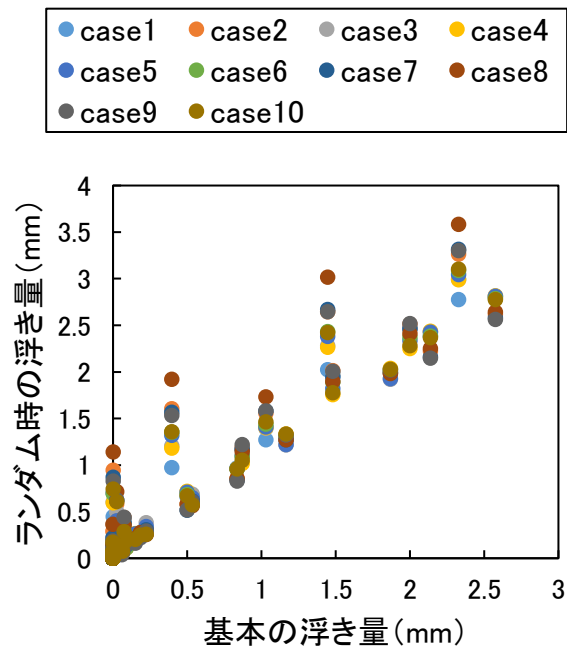


(a) 軽+重の組み合わせ

図6-4 まくらぎ質量のばらつきに関する検討結果



(b) 中+重の組み合わせ



(c) 軽+中の組み合わせ

図 6-4 まくらぎ質量のばらつきに関する検討結果 (つづき)

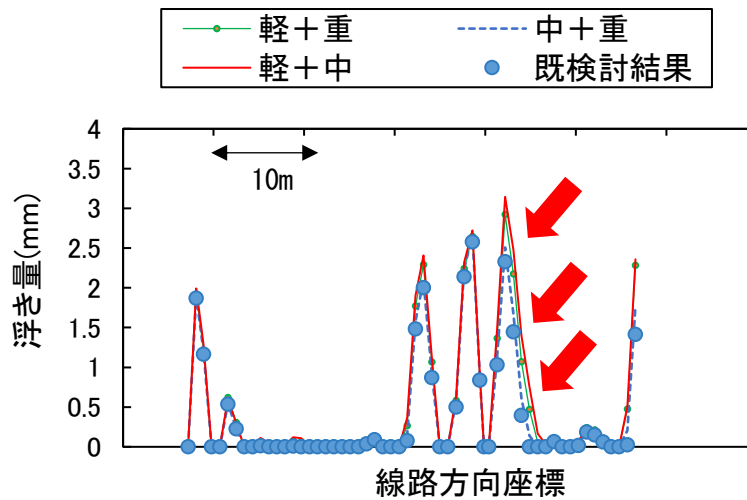


図 6-5 まくらぎ質量ばらつきと線路方向座標別浮き量の比較

(3) まくらぎ下面の支持剛性に関する検討

まくらぎ下面の支持剛性を一律変更したときの基本に対する浮き量のばらつきを図 6-6 に示す。影響を見るため検討条件のうち最も支持剛性が小さい 10 MN/m を基本として整理した。この図によれば、剛性が大きくなるほど浮き量が大きくなる傾向を示している。これは剛性が大きくなるに伴い、浮きまくらぎ箇所前後の支持まくらぎ箇所のたわみが小さくなることが理由である。各条件の基本に対する相関係数は剛性の違いが大きくなるほど低下しているがいずれも 0.97 以上と高い。以上より、まくらぎ下面の支持剛性が浮きまくらぎの検出に与える影響は小さいと考えられる。

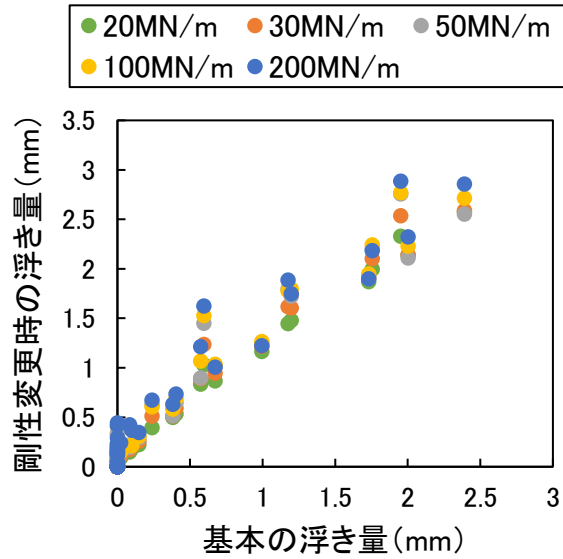


図 6-6 まくらぎ下面の支持剛性変更時の検討結果

6.3 実務用浮きまくらぎ検出プログラムの作成

6.3.1 計算手法構築の目的

前 6.2 節の検討により、まくらぎ位置のずれ・ばらつきや、まくらぎの質量のばらつきを適切に考慮すれば、浮きまくらぎ箇所の検出は概ね可能であることが確認された。つまり、浮きまくらぎの検出において、浮きまくらぎ検出手法のように、解析用ソフトウェアを用いて各種部材の諸元を詳細に設定する必要性は小さいということになる。そこで、線路保守の実務に広く適用されることを目指し、計算に必要な各種軌道諸元をそれぞれ一定値として任意に設定でき、任意の計算延長に対応できるような専用の計算プログラム（以下、「プログラム」という。）を作成することとした。

6.3.2 プログラムの概要

線路保守の実務への適用を目的としているため、計算には安定性が求められる。延長が数 100km に達する線区もあり、手法によっては計算の不安定さが懸念される。そこで、佐藤ら[6-9]による、支持点の隙間を考慮したはりのたわみ算出手法を参考にプログラムを作成した。これは、はりのたわみと設定された隙間との位置関係より、外力と反力との釣り合いを考慮してたわみを補正し、解を算出するものである。ここで、隙間が本研究で論じている浮きまくらぎに該当する。図 6-7 に基本モデルを示す。この手法は、等間隔の $(2n+1)$ 本の接触を考慮した非線形ばねに支持された有限長の等間隔弾性支持モデルを基本としており計算の安定性が高く、実務への適用上問題ないことを確認している。処理内容の詳細は以下の通りである。

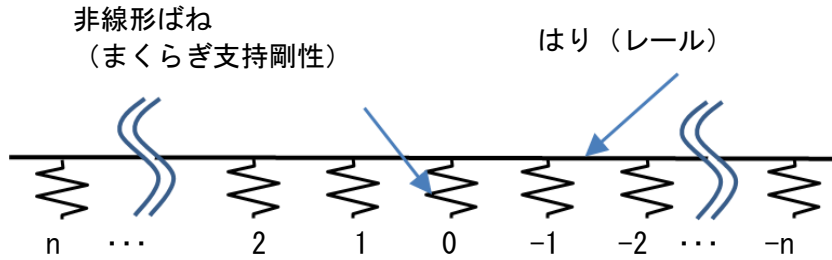


図 6-7 有限長の等間隔支持モデル

(1) 各支持点における荷重分散率の算定

図 6-7 のモデルより，三連モーメントの公式を用いて，モデル中央の支持点 0 の箇所に単位荷重が載荷されたときの変位 y と，荷重に対する各支持点でのばね反力の割合である荷重分散率 F を算出する．ここでは，各支持点とばねの間に隙間が存在しない条件を考える．

図 6-7 で示したモデルは左右対称となるので，三連モーメント式は式(6-2)で表される．

$$M_i + 4M_{i-1} + M_{i-2} = -B \cdot a(y_i - 2y_{i-1} + y_{i-2}) \quad (6-2)$$

$(i = 2, 3, \dots, n)$

$i = 1$ の場合， $M_1 = M_{-1}$ より式(6-3)を得る．

$$M_1 + 2M_0 = -B \cdot a(y_1 - y_0) \quad (6-3)$$

また，力の釣り合いの関係は，式(6-4)で表される．

$$y_0 + 2 \sum_{i=1}^n y_i = 1/k \quad (6-4)$$

ここに， M_i ：支持点番号 i におけるはりの曲げモーメント，
 $B = 6EI/a^3$ ， EI ：はり（レール）の曲げ剛性， a ：ばねの配置間隔， k ：ばね係数 である．

ここで，端部（ n 番目の支持点）の位置が載荷点より十分遠いものとする， $M_n = 0$ とみなすことができることより，各支持点における曲げモーメントと変位の関係は式(6-5)で表される．

$$\frac{M_{n-i}}{a \cdot k} = \sum_{j=0}^{i-1} (i-j) y_{n-j} \quad (6-5)$$

$(i = 1, 2, \dots, n)$

式(6-2)～(6-5)より変位 y について解くと、式(6-6)を得る。

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{C} \quad (6-6)$$

ここに、

$$\mathbf{Y} = \begin{pmatrix} y_n \\ y_{n-1} \\ \vdots \\ y_1 \\ y_0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1/k \end{pmatrix}$$

であり、各支持点における荷重分散率 \mathbf{F} は \mathbf{Y} より式(6-7)で表される。

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} f_n \\ f_{n-1} \\ \vdots \\ f_1 \\ f_0 \end{pmatrix} = k \cdot \mathbf{Y} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6-7)$$

また、 \mathbf{A} は式(6-8)で表される。

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 6+B/k & 1-2B/k & B/k & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 12 & 6+B/k & 1-2B/k & B/k & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 18 & 12 & 6+B/k & 1-2B/k & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 6(n-2) & 6(n-3) & 6(n-4) & 6(n-5) & \cdots & 1-2B/k & B/k & 0 \\ 6(n-1) & 6(n-2) & 6(n-3) & 6(n-4) & \cdots & 6+B/k & 1-2B/k & B/k \\ 3(n-1)+2 & 3(n-2)+2 & 3(n-3)+2 & 3(n-4)+2 & \cdots & 5 & 2+B/k & -B/k \\ 2 & 2 & 2 & 2 & \cdots & 2 & 2 & 1 \end{pmatrix} \quad (6-8)$$

(2) 初期条件による変位と反力の設定

まず、初期条件として、各支持点に隙間がない状態を考える。このとき、支持点間隔および支持ばね係数が一定であることから、はりの自重による各支持点のばねの反力 P_i および変位 y_i^0 ($i=0, \pm 1, \pm 2, \dots, n$) は、式(6-9)のとおり一定となる。なお、各記号の上付き添え字は、後述する演算回数を示し、 y_i^0 のように 0 は初期値であることを示す。

$$P_i^0 = k y_i^0 = W \cdot a \quad (6-9)$$

ここに、 W ：はりの単位長さあたりの重量である。

(3) 支持点ごとの隙間 ε_i の設定

浮きまくらぎ検出手法と同様に、支持点ごとの隙間 ε_i は計算区間の復元波形データの最高地点と、これを基準とした各支持点 i における復元波形の高さの差とする。つまり、第3章の図3-2に示した符号 a , b , c が相当する。

(4) 隙間 ε_i を考慮した補正変位の算出

ばねとはりの間に隙間 ε_i を考慮した支持点の変位を考える。仮にこのときの変位が初期条件で算出したものと等しいとすると、隙間が存在する支持点では初期条件より反力が小さくなるため、外力であるはりの自重との力の釣り合いが確保されない。そこで、その支持点に対し、力の釣り合いを取るために鉛直下向きの荷重を加え補正を行う。この荷重を相当荷重と称し、隙間 ε_i と変位 y_i^0 の大きさの関係より以下により求める[6-9]。

・ $y_i^0 > \varepsilon_i$ の場合

初期条件における支持点の変位 y_i^0 に対し、ばねの変位は $(y_i^0 - \varepsilon_i)$ となり、ばねの反力は $k\varepsilon_i$ 小さくなる。したがって、相当荷重 $Q_i^0 = k\varepsilon_i$ とする。

・ $y_i^0 \leq \varepsilon_i$ の場合

ばねには反力が全く発生しないため、相当荷重 $Q_i^0 = ky_i^0$ とする。

以上より、初期条件の支持点 i ($=0, \pm 1, \pm 2, \dots, n$)に相当荷重 Q_i^0 を載荷した場合に、支持点 j ($=0, \pm 1, \pm 2, \dots, n$)に生じる補正変位 Δ_j^0 は荷重分散率を考慮して式(6-10)で表される。

$$\Delta_j^0 = f_{|j-i|} \cdot \frac{Q_i^0}{k} \quad (6-10)$$

ただし、 $|j-i| > n$ のとき $f_{|j-i|} = 0$

隙間を考慮した支持点 j の変位は、全ての支持点 i に対して相当荷重 Q_i が載荷された場合の補正変位 Δ_j^0 の総和となり、式(6-11)で表される。

$$y_j^1 = y_j^0 + \sum_{i=-n}^n \Delta_i^0 \quad (6-11)$$

同様に、 m ($=1, 2, 3, \dots$) 回繰り返し計算したときの変位を y^m とおくと、変位 y_i^m , y_i^{m-1} と隙間 ε との大きさの関係より、上記と同様に相当荷重の大きさ Q_i^m は以下により決定される。

つまり，変位は y_0^{m+1} となり，浮き量は $\varepsilon_0 - y_0^{m+1}$ となる．

(5) 計算区間全体の変位および浮き量算出

浮き量を算出する区間全体を対象に上記 (2)～(4) の処理を繰り返す．計算結果の出力は (4) で述べたとおり中央の支持点 1 箇所のみとなるため，浮き量を算出する区間全体を計算するためには支持点を 1 箇所分ずつずらしてモデル計算区間を設定することになる．図 6-8 にイメージを示す．計算区間全体の支持点数を S とおくと，上記処理を行う回数は $S-2n$ となる．各処理で 1 箇所の浮きまくらぎが計算されるので，浮きまくらぎが得られる支持点数は $S-2n$ となる．

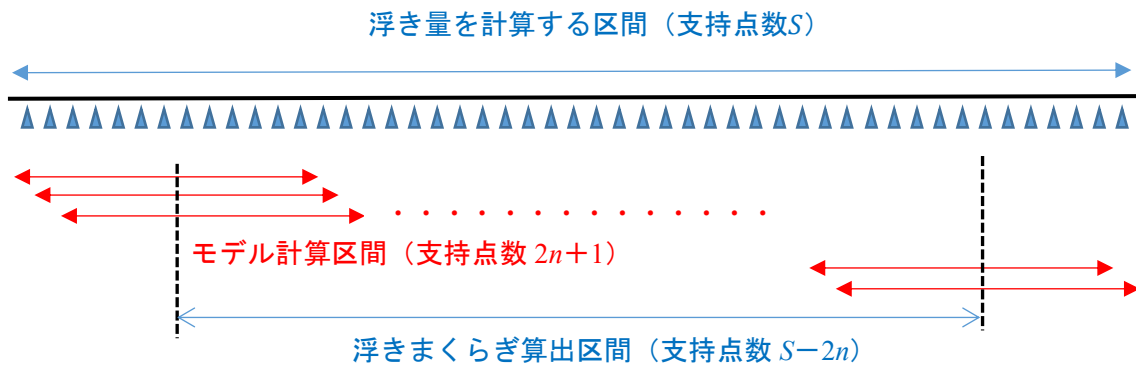


図 6-8 浮きまくらぎの算出区間とモデル計算区間の関係

6.3.3 プログラムの計算精度の確認

実用化を踏まえたプログラムでの計算において，精度と処理時間のバランスが重要である．精度に影響するのは荷重分散率 F と収束判定値 e である．荷重分散率 F は，モデル計算区間の範囲に依存し，図 6-8 で示したモデルの n の値（以下，「次数」という．）が大きいくほど精度が向上する．

ここで，連続弾性床上のはり理論を用いて荷重載荷点からの離れと荷重分散の関係について考える．荷重によるはり（レール）の変形は， x 方向をレール長手方向， y 方向を荷重載荷方向とし， EI をレールの曲げ剛性， k を単位長さあたりのばね係数とすれば，式(6-14)で表される[6-10]．

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + ky = 0 \quad (6-14)$$

これより，はりのモーメントを求めると，式(6-15)を得る．

$$M = \frac{P}{4\beta} e^{-\beta x} (\cos\beta x - \sin\beta x) \quad (6-15)$$

ここに、 P は載荷荷重の大きさ、 $\beta = \sqrt[4]{k/4EI}$ である。

式(6-15)のうち、載荷点からの距離に依存する関数である $\varphi(\beta x) = e^{-\beta x} (\cos\beta x - \sin\beta x)$ は、図 6-9 に示すように、周期 2π で正負に振幅しながら急速に減衰する特性を持つ。プログラムの前提では、式(6-5)で示したとおり計算モデル端部の曲げモーメント M を 0 としているが、式(6-15)より $M = 0$ となる βx は $\pi/4, 5\pi/4, \dots$ のときである。既検討区間に対し連続弾性床の上のり理論を用いて βx を算出し、これと既検討区間の軌道諸元より $M=0$ に相当する次数を求めると、 $\beta x = 5\pi/4$ のとき 4 次、 $9\pi/4$ のとき 7 次、 $13\pi/4$ のとき 10 次となる。

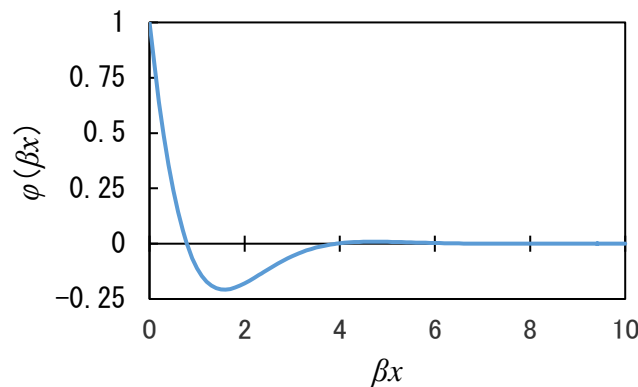


図 6-9 $\varphi(\beta x)$ の特性

そこで、既検討区間を対象に、次数を 4, 7, 10, それに十分大きな値として 23 とし、それぞれに対し e を $10^{-1}, 10^{-3}, 10^{-5}, 10^{-7}$ (mm) とした場合の計算結果について確認した。図 6-10 に結果を示す。ここで、反復回数とは、既検討区間全体を計算するのに要した繰り返し計算回数の合計を示し、RMS 値とは、 e を 10^{-7} mm としたときの計算結果に対し、各支持点の RMS 値を算出したものである。凡例の数値は次数を示している。計算値が mm オーダーであることを考慮すれば、 e を 10^{-3} mm 程度とし RMS 値が $10^{-3} \sim 10^{-2}$ mm となれば十分である。そのときの反復回数は 10^{-7} mm とした場合の半分程度となり、計算負荷の面からも望ましい。

また、図 6-11 および表 6-1 に既検討区間に対する浮きまくらぎ検出手法による浮き量の計算結果とプログラムによる計算結果の関係を示す。ここで、浮きまくらぎ検出手法において、支持点の位置はプログラムと同じ支持点となるよう調整したものとしている。またプログラムにおいて e を 10^{-3} mm とした。結果、両者はよく一致していることがわかる。計算値のオーダーを考慮すると、今回の場合では誤差が 0.1 mm 以下となる 10 次以上とするのが望ましく、これを一般化して βx を $13\pi/4$ 以上となるような次数を設定するのが望ましいと考えられる。

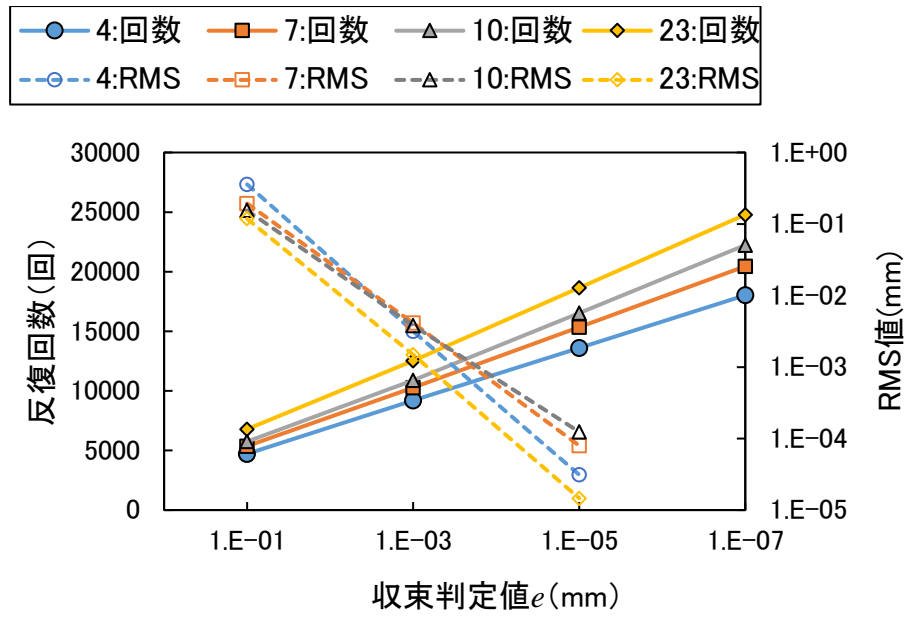


図 6-10 次数別プログラムの計算結果

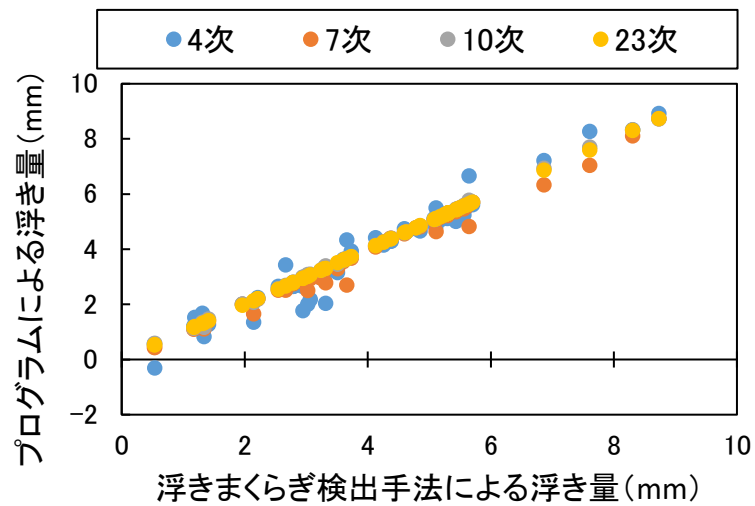


図 6-11 浮きまくらぎ検出手法とプログラムによる浮き量計算結果の比較

表 6-1 浮きまくらぎ検出手法とプログラムによる相関係数と RMS 値の比較

次数	4 次	7 次	10 次	23 次
相関係数	0.9778	0.9930	0.9998	1.0000
RMS 値 (mm)	0.4341	0.2528	0.0422	0.0043

6.4 まとめ

本章では、軌道の保守管理上問題がある浮きまくらぎを実務において簡易に精度良く把握することを目的として、浮きまくらぎ検出手法により軌道の諸元のばらつきが浮き量に与える影響を把握した。その結果を踏まえ、線路保守の実務にてより容易に浮きまくらぎを把握することができるプログラムを開発し、その精度の確認を行い、プログラムの適正な使用方法について提案を行った。以下に、得られた主な知見を示す。

- (1) 浮きまくらぎ検出手法に与えるまくらぎ位置にずれがある場合に対し、浮き量に与える影響について検討した。条件は、一定間隔に配置されているまくらぎに対し、位置に一定のずれが生じている場合と、最大でまくらぎ間隔の1/3のばらつきがランダムで生じている場合とした。結果、まくらぎ位置のずれ・ばらつきの影響について、レール変形形状に与える影響は小さいこと、浮きまくらぎの計算結果を整理する過程でずれ・ばらつきの影響が表れるが概ね1mmを上回る浮き量の箇所ではほぼ確実に浮きまくらぎを検出できることが確認された。
- (2) 浮きまくらぎ検出手法に与える質量にばらつきが存在する場合に対し、浮き量に与える影響について確認した。2種類の質量の異なるまくらぎをランダムに配置する検討を行った。結果、まくらぎ質量にばらつきがある場合において、浮きまくらぎの存在箇所の検出は概ね正確で影響は小さいが、浮き量の算出精度については質量の差が大きくなることにより低下することが確認された。
- (3) 浮きまくらぎ検出手法に与えるまくらぎ下面の支持剛性の違いが浮き量に与える影響について検討した。一律の支持剛性を6種類設定して検討した結果、支持剛性が大きくなるほど浮き量の計算結果が大きくなる傾向が見られたものの、浮きまくらぎの存在箇所の検出精度に対する影響は小さいことが確認された。
- (4) 浮きまくらぎ検出手法により、軌道の諸元のばらつきによる浮きまくらぎ検出への影響が小さいことが確認されたことから、線路保守の実務に広く適用されることを目指し、計算に必要な各種諸元をそれぞれ一定値として任意に設定でき、任意の計算延長に対応できるような専用のプログラムを作成した。本プログラムは、三連モーメントの公式を基本とし、隙間を考慮した力のつりあい計算により収束演算を行うことではりの変形を算出するものである。
- (5) 開発したプログラムを用いた浮きまくらぎの計算を精度よく、かつ計算負荷を小さくするため、モデルに用いる次数は、連続弾性床のはり理論により βx を求め、それが $13\pi/4$ 以上となるような値とすることが望ましい。また収束判定値 e は 10^{-3}mm 程度とするのが望ましい。

参考文献

- [6-1] 須田征男, 長門彰, 徳岡研三, 三浦重: 新しい線路, pp.118-121, 日本鉄道施設協会, 1997.
- [6-2] 国土交通省鉄道局監修 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.93-95, 丸善出版, 2012.
- [6-3] 国鉄・施設局保線課編集: 保線ハンドブック(1) (軌道構造・整備編), p.68, 1968.
- [6-4] 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の基礎的研究, 鉄道工学シンポジウム論文集, No.19, pp.135-142, 2015.
- [6-5] 田中博文: 軌道保守管理データベースシステム LABOCS (ラボックス) の機能紹介と新バージョンのリリース, 新線路, 鉄道現業社, Vol.69, No.7, pp.24-26, 2015.
- [6-6] (公財) 鉄道総合技術研究所, (株)ジェーアール総研情報システム: 軌道保守管理データベースシステム LABOCS Ver.4.1 使用説明書, pp.137-146, 2016.
- [6-7] 国土交通省鉄道局監修 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.287-290, 丸善出版, 2012.
- [6-8] 国土交通省鉄道局監修 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物, p.234, 丸善出版, 2007.
- [6-9] 佐藤裕, 平田五十: レール支持点に遊隙がある軌道のレール沈下特性, 鉄道技術研究報告 No.393, 1964.
- [6-10] 佐藤裕: 軌道力学, 鉄道現業社, pp.10-13, 1964.

第7章 研究のまとめと今後の展望

7.1 結論

本研究では、これまで把握が困難であった浮きまくらぎを、軌道の諸元と定期的に測定されている軌道検測車による軌道変位データを用いることにより、数値計算により簡易かつ高精度に把握する手法を開発した。この手法を用いることにより、営業線における存在する浮きまくらぎの存在状況を把握し、軌道変位との関係性を明らかにした。

また、浮きまくらぎの存在する軌きょうの不均一な支持状態より、レール高温時の軌道座屈発生リスクの高い箇所を抽出できることを示した。なお、営業線を対象とした軌道座屈の計算には労力を要することから、軌道座屈発生直前のレール温度上昇量と道床ばねに蓄えられるひずみエネルギーとの間に相関があることに着目し、軌きょうの支持状態から、軌道座屈発生リスクの高い箇所を簡易に抽出できる可能性を示した。

加えて、浮きまくらぎ箇所の車両走行に伴うレール圧力の大きさを実測し、数値計算により再現可能であることを示した。この手法を用いて営業線の高低変位の経時変化とレール圧力との関係を調査し、現在用いられている軌道破壊理論との整合性について論じた。

さらに、浮きまくらぎの検出を線路保守現場で容易に行うことができるプログラムを開発した。

第1章では、研究の背景として、バラスト軌道の構造と設計理論、および既往の浮きまくらぎ検出手法に関する研究の概略を示すと共に、研究の目的について述べた。

第2章では、本論文において用いた鉄道の軌道分野の専門用語について技術的背景を含めて概説した。

第3章では、軌道の諸元と軌道検測車で測定された高低変位の復元データを用いて、数値計算により自重による軌きょうのたわみを算出し、浮きまくらぎを把握する手法を提案した。計算精度について、3~50 m の波長帯域で復元された高低変位データを用いて算出したまくらぎの浮き量および無負荷時の高低変位の計算値と、現地で測定した実測値とを比較し、PC まくらぎが敷設されたロングレール区間において良好に一致することを確認した。なお、本手法では、レール継目部において精度が低下すること、高低変位の復元波長帯域が精度に影響することを示した。また、本手法を用いてロングレール区間のまくらぎ支持状態の実態について調査し、100m ロット単位の高低変位の標準偏差（ロット高低 σ ）が大きいほど浮きまくらぎの存在率が高くなり、連続浮きまくらぎの本数も多くなる傾向が見られることを明らかにした。

第4章では、不均一支持状態がレール温度上昇時における軌道の座屈発生温度上昇量に与える影響について検討した。軌道の座屈に抵抗する道床横抵抗力は、道床面とまくらぎ下面間の摩擦力の影響を受ける。そこで、第3章で提案した手法を用いて、まくらぎ別に道床面の死荷重の大きさを算出し、それに基づき道床横抵抗力を定義して、既往の研究で用いられている軌道座屈解析ツールを用いて軌道座屈の発生温度への影響を調査した。結果、連続浮きまくらぎ箇所では座

屈発生温度上昇量の低下傾向が見られるものの、前後のまくらぎ支持状態の影響を受け大きくばらつくことがわかった。そこで、パラメータスタディにより、座屈直前時点における温度上昇量と、道床ばねに蓄えられるひずみエネルギーに一定の相関が見られる条件を明らかにし、個々のまくらぎの支持状態から、座屈発生温度上昇量が低下する座屈発生リスク箇所を抽出できる可能性を示した。

第5章では、浮きまくらぎ箇所を車両が走行する際のレール圧力が小さくなることを実測により確認し、これを数値計算により概ね再現可能であることを示した。さらに、営業線において、高低変位の経時変化とレール圧力との関係を調査し、浮きまくらぎ箇所において周囲を上回る沈下が生じ、浮き量が進行する箇所が多いこと、100mロットで整理すると、レール圧力の標準偏差が大きいほどロット高低 σ の進みが大きくなる傾向が見られることを確認した。また、100mロットのレール圧力のばらつきは、まくらぎ間隔が大きくなるほど小さくなる傾向が見られることを確認した。

第6章では、営業線に存在するまくらぎの間隔や質量および支持剛性のばらつきが、浮きまくらぎ検出の精度に与える影響について感度分析を行い、これらを適正に設定すれば影響は小さいことを明らかにした。それを踏まえて、浮きまくらぎの検出を線路保守現場で容易に行うことができるプログラムを開発し、その概要と適正な使用方法について示した。

7.2 今後の展望

少子高齢化の進展や労働嗜好の変化に伴う労働力不足や、対抗交通機関の整備による競争激化により経費圧縮が求められる中、継続的に実施が求められるバラスト軌道の保守をより効果的に行っていくことは、今後ますます重要になってくるものと考えられる。そのような中で本研究では、これまで知見が乏しかったバラスト軌道の浮きまくらぎに着目し、これの検出手法を提案し、得られた結果を考慮して、バラスト軌道の安全性向上に資する設計や保守管理上の着眼点を得ており、バラスト軌道の将来の効果的な保守に向けた一定の役割を果たすものとする。

以下に、本研究を踏まえた今後の展望について述べる。

7.2.1 浮きまくらぎを考慮したバラスト軌道の設計・管理へのさらなる応用

バラスト軌道の設計に関しては、輪軸横圧による軌きょうの横変形[7-1]や、連続締結不良による軌間拡大[7-2]の照査への活用により、さらなるバラスト軌道の安全性向上が期待される。

軌道部材の設計・照査に関しては、レール締結装置について既に弟子丸ら[7-3]が浮きまくらぎの実態を考慮した設計・照査荷重の照査を提案している。PCまくらぎについては、渡辺ら[7-4]が浮きまくらぎを考慮した設計荷重について、既往のものと比較検討を行った事例がある。また、浮きまくらぎ箇所では車両走行時のレール上下変位が大きくなることから、この箇所のレールの曲げ応力の推定が可能となり、きめ細やかなレールの寿命評価を行うことができる可能性があると考えられる。

7.2.2 浮きまくらぎ検出手法の精度向上

今回提案した浮きまくらぎ検出手法では、普通継目部付近において、中間部と比較して推定精度が低下することを確認している。現在でも継目部では概ね浮きまくらぎとなっていることが認識されているが、浮き量が把握できることにより、動的なレール変位量を推定することができ、軌道の弱点の一つとなっている継目部に関連した軌道部材の損傷等のリスクをより精度よく把握できる可能性がある。継目部の精度向上のためには、継目落ち形状、変動輪重および継目部のレール曲げ剛性の把握が必要であると考えられるが、これらの形状や特性はそれぞれの継目部の状態に依存するため、実用化のためには軸箱加速度[7-5]など車上の検出データを活用した手法の開発が望まれる。

また、本研究では、検出データの特徴を踏まえて3~50 mの帯域で復元した高低変位データを用いているが、この帯域では部分PCまくらぎ区間など、単独で存在する浮きまくらぎの検出精度が低下する可能性を示した。これについては、慣性正矢法など、より短い波長帯域においても検出性能が優れる検出手法を用いることにより検出精度の向上が期待される。

7.2.3 軌道座屈への反映について

軌道座屈の発生リスク箇所について、本研究では不均一な支持状態を想定し、まくらぎごとに道床横抵抗力を設定して座屈温度を求めている。実務において座屈防止のために、道床横抵抗力確保を目的とした浮きまくらぎの抑制や、道床の形状確保[7-6]を行っているので、今回提案した座屈リスク箇所抽出手法の適用がその一助になると期待される。ただし、本研究で得られた回帰式は今回ケーススタディで用いた条件に対するものであり、異なる条件の場合は別途同様の検討を行い、適切な式を定める必要がある。

なお、軌道座屈のリスク算定は道床横抵抗力のばらつきの考慮だけでは不十分であり、レール軸力のばらつきや、通り変位の状況、あるいは車両走行時の動的な挙動の影響も受ける。まくらぎの支持状態はこれらの要素に影響を与える可能性があり、軌道座屈の解析ツール[7-7]も発展の余地が残されていることから、これらを考慮することにより、軌道座屈リスク箇所をより精度よく抽出できるようになることが期待される。

7.2.4 軌道沈下への反映について

軌道沈下のメカニズム解明についてこれまでも様々な試験が行われているが、まだ未解明な部分も多い。本研究では、営業線における浮きまくらぎの継続調査により、浮き量が徐々に大きくなる箇所が多いことを確認した。このような、レール圧力の小さい浮きまくらぎ箇所でも支持まくらぎ箇所よりも沈下が大きくなることについて、車両走行シミュレーションによる不均一区間の軌道の応答の解明と、土質力学的なアプローチによる不均一区間の軌道沈下に関する研究の進展が期待される。

7.2.5 その他実務への適用について

浮きまくらぎを活用したバラスト軌道の保守管理には、現場起点の課題解決も重要である。第6章で提案した浮きまくらぎ検出プログラムは、軌道保守管理データベースシステム（LABOCS）

の新バージョンへの搭載が決定され、実用化される[7-8]. 現場第一線での活用により、各所において線路状態の改善を図っていただくことを期待している.

7.3 公開論文

本論文は、以下に示す公表済の論文の内容をもとに編纂した.

- ・ 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.
- ・ 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, 2019.
- ・ M. Kusuda, T. Deshimaru, and H. Kataoka: A study on the design method for the ballasted track in consideration of unsupported sleepers, Proceedings of the International Heavy Haul Association STS conference 2019 (IHHA2019), pp.183-190, 2019.
- ・ 楠田将之, 西宮裕騎: まくらぎの支持状態を考慮した軌道の座屈発生温度に関する研究, 土木学会論文集A2 (応用力学) Vol. 75, No. 2, I_635-I_646, 2019.
- ・ 楠田将之, 伊藤孝記, 張順智, 園田佳巨: 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, 構造工学論文集Vol.66A, pp.1-9, 2020.

参考文献

- [7-1] 国土交通省鉄道局監修 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，p.318，丸善出版，2012.
- [7-2] 国土交通省鉄道局監修 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.319-320，丸善出版，2012.
- [7-3] 弟子丸将，片岡宏夫，園田佳巨：軌道の支持状態がレール締結装置に作用する分散荷重に及ぼす影響の研究，鉄道工学シンポジウム論文集，第23号，土木学会 構造工学委員会 鉄道工学連絡小委員会，pp.317-324，2019.
- [7-4] 渡辺勉，箕浦慎太郎，後藤恵一，松岡弘大：各種不整を考慮したPCまくらぎの動的応答特性に関する研究，鉄道工学シンポジウム論文集，第21号，土木学会 構造工学委員会 鉄道工学連絡小委員会，pp.205-212，2017.
- [7-5] 須永陽一，井手寅三郎，金尾稔：軸箱加速度を活用した短波長軌道狂いの管理手法，鉄道総研報告，Vol.9，No.2，pp.35-40，1995.
- [7-6] 桶谷栄一：ロングレールの管理，新線路，鉄道現業社，Vol.65，No.771，pp.31-33，2011.
- [7-7] 玉川新悟，西宮裕騎：FEM解析ツールを用いた実物大軌道座屈試験の再現解析，第23回鉄道工学シンポジウム論文集，pp.267-274，2019.
- [7-8] 楠田将之：浮きまくらぎの検出手法と軌道座屈に与える影響，新線路，鉄道現業社，Vol.74，No.878，pp.31-33，2020.

謝 辞

平成28年6月1日大安、筆者にとって2度目の公益財団法人 鉄道総合技術研究所（鉄道総研）における研究者生活が始まりました。「そろそろ学位取得を…」との関係者からのプレッシャーを受け流しながら、淡々と与えられた課題に取り組む日々が続きました。バラスト軌道に関する新規研究テーマの立ち上げ業務に携わる中で、あれこれ逡巡していたところ、図らずも本論文の骨子である浮きまくらぎに考えが及びました。その後上司の薦めもあり、学位論文の執筆に挑戦することとなり、何とかとりまとめを終え提出するに至った次第です。その間、本当に多くの方々に支えられ、ご指導、ご支援をいただきました。心より感謝申し上げます。

論文審査の主査を引き受けていただきました九州大学大学院 園田佳巨教授には、鉄道軌道固有の研究テーマについて深くご理解いただき、論文の構成や内容について、多大なご指導、ご鞭撻をいただきました。九州大学大学院 松田泰治教授、大枝良直准教授には、副査を務めていただき、論文審査において論文をご精読いただき工学的見地から貴重なご意見をいただきました。

鉄道総研 村本勝己博士には、筆者が研究成果を上げやすくなるよう研究の枠組みの構築に多大なご支援をいただくと共に、論文執筆のご指導・ご鞭撻をいただきました。片岡宏夫氏には、本研究のあらゆる局面において、軌道に関する豊富な知識と経験に基づくご指導、ご鞭撻をいただきました。及川祐也氏には、技術的な見地からのご指導ならびに業務遂行上のご配慮をいただきました。弟子丸将博士からは、浮きまくらぎ検出手法の活用方法、および学位論文執筆に関するご助言をいただきました。西宮裕騎博士、玉川新悟博士からは、軌道座屈に関する知見や計算手法についてのご指導、ご助言をいただきました。中村貴久博士、伊藤壱記氏、太田晋一氏、早川容平氏、田中俊史氏（現 JR西日本）、本村裕基氏（現 JR東海）、水谷淳氏（現 JR東日本）、三原輝久氏（現 鉄道機器株式会社）、吉川秀平氏（現 JR西日本）、伊地知卓也氏（現 JR東海）、福中力也氏（現 JR東海）には、営業線の浮きまくらぎ調査に多大なご協力をいただきました。田中博文博士には、軌道変位データの取り扱いについてご指導、ご助言をいただきました。松本麻美氏、西島悠太氏には、営業線のデータ分析、加工に関し多大なご協力をいただきました。浦川文寛氏には、計算データの分析処理に関し、多大なご支援をいただきました。

JR西日本 高尾賢一氏には、現地試験や現場データの提供など、本研究を遂行するにあたり全面的にご支援いただきました。藪中嘉彦氏、吉川秀平氏には、営業線での調査の段取りや、作業日程・行程の調整など、多大なご支援をいただきました。

九州大学大学院 張順智氏には、現地測定の実施についてご提案いただき、データの取りまとめにご支援いただきました。株式会社テス 津山康吉氏には、現地測定方法についてご助言をいただきました。赤尾麻弥氏には、各種の研究補助作業ならびに論文の校正にご協力いただきました。

さらに、ご芳名を挙げるができなかった実に多くの方々からも、ご助言や温かい励ましをいただきました。関係の皆様改めて感謝の意を表します。

令和 2年 7月
楠田 将之