論文　通り変位と浮きまくらぎの影響を考慮したロングレールの座屈温度の簡易な推定手法

山岡　大樹[1]・玉川　新悟[2]・西宮　裕騎[3]

[1]正会員　（公財）鉄道総合技術研究所　軌道技術研究部（〒185-0034 東京都国分寺市光町二丁目 8-38）
E-mail: yamaoka.daiki.29@rtri.or.jp (Corresponding Author)

[2]正会員　（公財）鉄道総合技術研究所　軌道技術研究部（〒185-0034 東京都国分寺市光町二丁目 8-38）
E-mail: tamagawa.shingo.15@rtri.or.jp

[3]正会員　（公財）鉄道総合技術研究所　軌道技術研究部（〒185-0034 東京都国分寺市光町二丁目 8-38）
E-mail: nishinomiya.yuki.78@rtri.or.jp

著者らは，軌道検測車で測定した通り変位データを反映した軌道の FEM 座屈解析を実施し，レール長手方向の形状から抽出したパラメータから座屈発生温度を簡易に推定する手法を過去に構築した．一方で，本手法では道床横抵抗力は評価区間で一定と仮定しており，浮きまくらぎなどによる道床横抵抗力のばらつきを考慮した検討は行っていない．そこで本論文では，通り変位と浮きまくらぎを考慮した軌道を対象とし，その関連パラメータ群と座屈温度との関係を明らかにし，座屈温度を推定した結果を報告する．

Key Words: *lateral track irregularity, unsupported sleeper, buckling temperature, PLS*

1.　はじめに

バラスト軌道のロングレールでは，温度変化に伴う伸縮がレール締結装置とまくらぎを介して道床に拘束されるため，温度変化に起因したレール軸力が生じる．特に，夏季の高温時には，レール軸力が圧縮方向に作用するため，この圧縮力が許容限度を超えた場合，レールがまくらぎごと横方向に張り出す軌道座屈の発生が懸念される．このため，ロングレールの敷設区間では，軌道座屈の防止に関する適切な管理が必要となる．

軌道座屈における，温度荷重と内力の理論上の釣り合い経路として，**図-1** にレール温度上昇量とレール横移動量の関係を示す．なお，レール温度上昇量は，レール軸力が 0 となる中立温度からの温度上昇量を表している．レール温度が上昇し，極大点（A 点）に到達すると，極小点（C 点）を含む不安定な釣り合い経路を介して，安定な釣り合い状態である B 点に飛び移り，レール横移動量が急激に増加する軌道座屈が生じる．ここで，A 点におけるレール温度上昇量（以下，T_a）は与えられた条件における理論上の上限値であるが，軌道の持つ各種の初期不整，特に通り変位が大きくなると低下する可能性が指摘されている [1]．そこで現行の座屈管理では，座屈状態が生じ得る理論上の下限値であり，初期不整の影響が小さいとされる C 点におけるレール温度上昇量（以下，T_c）を座屈強度の指標とし，レール温度上昇量がこれを上回らないように管理している [2]．

図-1 のT_cを座屈強度の指標とした座屈管理は，安全側の管理である一方で，T_aとの間には少なからず温度差がある．そのため，T_cを管理指標とすると必要以上に座屈に対する安全度の余裕が生じている可能性があり，保守コストの観点から必ずしも合理的なものではない．そこで近年，ロングレールの保守コストの削減を目的として，座屈強度の指標に上記の温度差を反映させるための

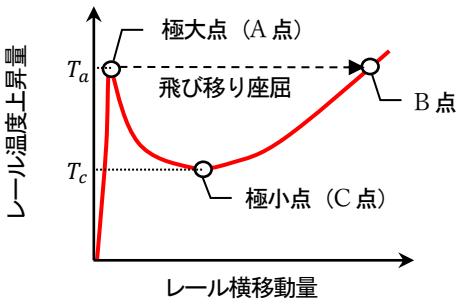


図-1　レール温度上昇量とレール横移動量の関係

検討が行われている[3]．この検討では，UICの基準[4]を参考として，T_aおよびT_cの温度差が 20℃以上となる条件を整理したうえで，座屈管理の指標を緩和する可能性について言及している．ただし，T_aに影響を及ぼす通り変位を正弦波等の仮想波形で設定して FEM 解析を行っており，その設定方法については課題が残るとしている．

これに対して著者ら[5]は，軌道検測車で測定した通り変位データをレール長手方向の形状に反映した軌道のFEM解析を行っている．文献5)では，通り変位の復元波形をレール長手方向の形状としたときの軌道の横方向の曲率（以下，レール曲率）がT_aに及ぼす影響について分析することで，FEM での大規模計算を介することなくT_aを簡易に推定する方法を提案している．本方法は，ロングレールのふく進量管理の基準点となるふく進杭間で設定された 50m～200m の評価区間に対して，道床横抵抗力を一定としたうえで，レール曲率の最大値からT_aを推定するものである．ただし，同一の評価区間内においても，浮きまくらぎなどによる道床横抵抗力のばらつきがあるため，この影響を考慮することで，T_aの推定精度をより向上できると考えられる．

そこで本研究では，文献 5）の検討をさらに発展させて，軌道検測車で測定した通り変位データに加えて，高低変位データから検出でき，道床横抵抗力の特性に影響を及ぼす浮きまくらぎについても複合的に考慮し，T_aおよびT_cを簡易に推定する方法の構築を試みた．なお，本研究では，T_aおよびT_cの両温度を総称して，「座屈温度」という．

本稿では，まず 2 章において，浮きまくらぎに関するパラメータが座屈温度に及ぼす影響について，軌道を模擬した解析モデルを用いて定量的に分析した．そして 3 章において，軌道検測データに基づく解析モデルを多数構築し，それぞれのケースで座屈温度を算出した．その後，解析モデルから抽出した，通り変位と浮きまくらぎに関するパラメータ群と座屈温度の関係を回帰分析したうえで，軌道検測データから座屈温度を簡易に推定する方法を構築し，その推定精度を検証した．

2. 浮きまくらぎに関するパラメータが座屈温度に及ぼす影響の把握

本章では，浮きまくらぎに関するパラメータと座屈温度の関係を把握するため，FEM を用いたパラメータスタディを実施した．

(1) FEM 解析ツール

本研究で用いた FEM 解析ツールは，過去に著者らが開発した静的座屈解析プログラムである[6]．本解析ツールは，梁要素とばね要素で構成した軌道の有限要素モデルに対して，一様なレール温度上昇を与えた際のつり合い経路を増分法と弧長法により求めるものである．本解析ツールは，レールやまくらぎの種別，レール締結装置や道床の抵抗力を個別に設定することが可能であり，過去に実物大の軌道座屈試験の再現解析を行った結果[6]，試験結果と良好な一致を得たものである．

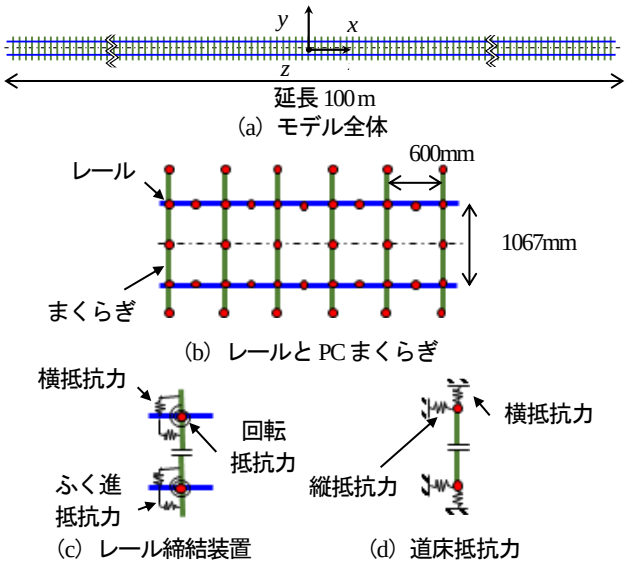


図-2 解析モデルの概要

(2) 解析モデル

図-2 に解析モデルの概要を示す．解析モデルの全長は 100m とし，ロングレールの不動区間を想定して左右レールの両端をレール長手方向に拘束している．

本章における通り変位は，解析モデルの中央に次式による仮想的な波形を与えた．

$$y_0 = \frac{h}{2}\left(1+\cos\frac{2\pi}{A}x\right), \quad -\frac{A}{2} \le x \le \frac{A}{2} \quad (1)$$

ここに，y_0：通り変位，h：通り変位の波高，A：通り変位の波長である．

レールと PC まくらぎは Euler 梁要素でモデル化し，レール締結装置の縦抵抗力，横抵抗力および回転抵抗力は 2 節点ばね要素でモデル化した．また，道床縦抵抗力と道床横抵抗力は，1 節点ばね要素でモデル化した．これらのばね要素は非線形弾性を考慮できるものとした．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と Ramm 法による弧長増分法[7]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．

(3) 解析諸元と設定したパラメータ諸量

表-1 に解析モデルの基本諸元を示す．レール種別は 50kgN レールとし，PC まくらぎとレール締結装置の諸元は，バラスト軌道で標準的に使用される値としている[8]．

9). また，道床横抵抗力と道床縦抵抗力は，過去の試験結果[10]に基づく**表-1**の算定式に示すように，まくらぎの変位に対して値が増加し，表中の最終値に漸近する非線形弾性として設定した．道床横抵抗力の最終値（以下，最終道床横抵抗力）は，急曲線を除く区間で一般的に確保される値[11]とし，道床縦抵抗力の最終値（以下，最終道床縦抵抗力）は，最終道床横抵抗力の 1.5 倍としている．なお，浮きまくらぎ箇所では，約 1/3 の横抵抗力を負担する[12]とされるまくらぎ底面において，バラストとの接触が喪失するため，通常時と比べて最終道床横抵抗力が 2/3 倍となるように設定した．一方，最終道床縦抵抗力については，既往研究[3),5),6)]で座屈温度に及ぼす影響が小さいことを確認しているため，浮きまくらぎ箇所において値を低減していない。通り変位については，文献3),5)と同様に設定した．

既往研究 5)では，通り変位の波長および波高を変化させた解析を実施している．本章では，通り変位のパラメータは**表-1**に示す 1 ケースで固定し，浮きまくらぎに関する以下のパラメータを変化させた解析を実施した．

A) レール曲率最大箇所と，その直近で連続して発生した浮きまくらぎ箇所（以下，浮きまくらぎ群）の中心までの離隔 D

B) 解析モデル中の最終道床横抵抗力の平均値 g_{ave}

C) レール曲率最大箇所の直近の浮きまくらぎ群の範囲（以下，浮きまくらぎ範囲）L

図-3 に各パラメータの定義を示す．A)については，浮きまくらぎ群の本数を，文献 13)の検討を参考に 6 本で固定し，レール曲率最大位置から，浮きまくらぎ群の中心との離隔を変化させた． B)については，6 本の浮きまくらぎ群を一定の間隔で配置し，その間隔を変化させることで，解析モデル中の最終道床横抵抗力の平均値を変化させた． C)については，初期不整範囲内で浮きまくらぎが発生しているパターン①と，範囲外で浮きまくらぎが発生しているパターン②の 2 パターンについて，浮きまくらぎ範囲を変化させた．

(4) 解析結果

図-4 に各パラメータと座屈温度の関係を示す．各パラメータスタディの結果を整理すると以下のとおりである．

- レール曲率最大箇所を基準としたときの浮きまくらぎ群の離隔 D が増加すると，T_a は概ね線形に 2.1℃/m 程度増加したが，T_c は概ね一定であった．
- ただし，離隔 D が大きくなると，最大変位箇所（以下，座屈発生箇所）も遷移し，浮きまくらぎ箇所で座屈が生じた．よって，浮きまくらぎ箇所におけるレール曲率の絶対値や，解析モデル中のレール曲率の最大値に対する同箇所におけるレール曲率の相対値，あるいは最終道床横抵抗力の大きさなどが影響している可能性が考えられる．
- 解析モデル中の最終道床横抵抗力の平均値 g_{ave} が増加すると， T_a は 6.1℃/(kN/m/レール)， T_c は 2.7℃/(kN/m/レール)程度で概ね線形に増加した．
- パターン①の場合，浮きまくらぎ範囲 L が増加すると，T_a はおよびT_cは対数的に低下した．
- パターン②の場合，浮きまくらぎ範囲 L が増加するにつれてT_cは対数的に低下するが，T_aは概ね一定であった．

表-1 解析モデルの基本諸元（標準値）

項　目		値
50kgN レール	ヤング率	2.058×10^5 N/mm^2
	ポアソン比	0.3
	線膨張係数	1.14×10^{-5}/℃
	断面積	6.42×10^3 mm^2
	断面 2 次モーメント（z 軸回り）	3.22×10^6 mm^4
PC まくらぎ	ヤング率	2.2×10^4 N/mm^2
	ポアソン比	0.2
	断面積	2.84×10^4 mm^2
	断面 2 次モーメント（z 軸回り）	1.14×10^8 mm^4
	長さ	2000 mm
レール締結装置	回転抵抗力のばね定数	27.6 kNm/rad
	縦抵抗力のばね定数	12 kN/mm
	横抵抗力のばね定数	43 kN/mm
道床横抵抗力	最終値 g_0※1	4 kN/m/レール
	算定式 g	$g=g_0\times v/(v+1.0)$，v：y 方向変位(mm)
道床縦抵抗力	最終値 h_0	6 kN/m/レール
	算定式 h	$k=k_0\times u/(u+1.0)$，u：x 方向変位(mm)
通り変位	波長 L	10 m
	波高 h	13 mm

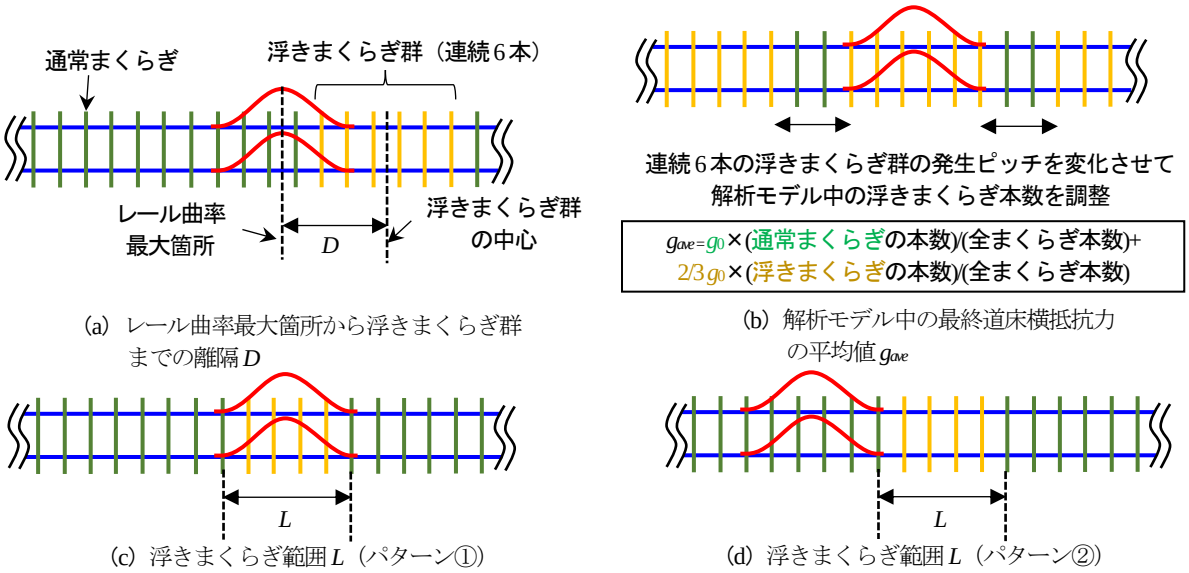
※1　浮きまくらぎ箇所では通常時の 2/3 倍に低減

3. 軌道検測データに基づく座屈温度の推定法に関する検討

本章では，軌道検測車で測定した通り変位データと，高低変位データから検出できる浮きまくらぎを考慮した座屈解析により求めた座屈温度と， 2 章での検討に基づいた各種パラメータとの関係を分析することで，各種パラメータから座屈温度を推定する方法について検討した．

(1) 軌道検測データ

本解析では，2 台車方式の軌道検測車を用いて，2.1m-14.4m 偏心矢法[14)]により営業線で測定した検測データを使用した．なお，解析モデルに適用するため，測定された検測データをデジタル逆フィルタの手法[15)]を用いて，復元波形に変換した．



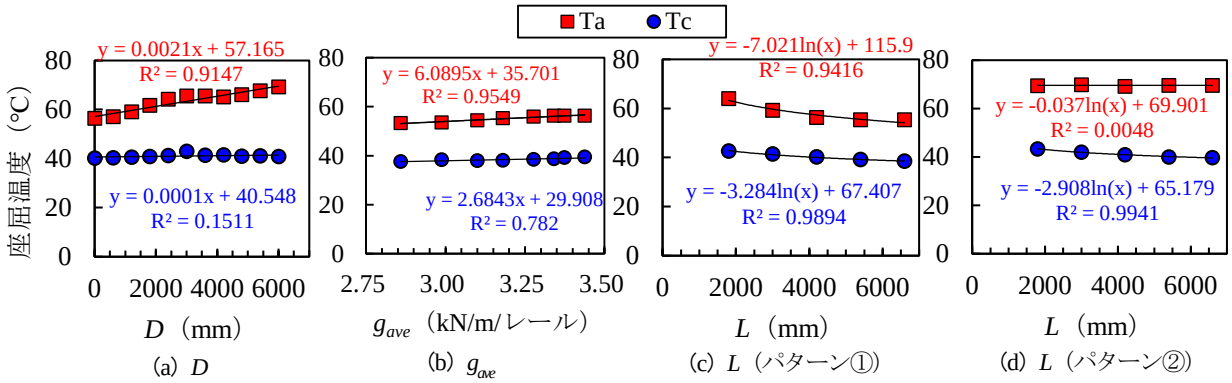
(a) レール曲率最大箇所から浮きまくらぎ群までの離隔 D

(b) 解析モデル中の最終道床横抵抗力の平均値 g_{ave}

(c) 浮きまくらぎ範囲 L（パターン①）

(d) 浮きまくらぎ範囲 L（パターン②）

図-3 浮きまくらぎに関するパラメータの定義



(a) D　(b) g_{ave}　(c) L（パターン①）　(d) L（パターン②）

図-4 浮きまくらぎに関するパラメータと座屈温度の関係

ここで本解析では，通り変位については，文献 5)と同様に，復元する際の波長帯域を 6～45m とした．一方，高低変位については，文献 16)における浮きまくらぎの検出精度の検証結果を踏まえて，復元する際の波長帯域を 3～50m とした．なお，本研究では左右レールともに左レールの検測データを反映している．

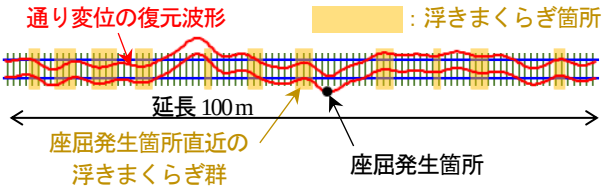


図-5 軌道検測データを反映した解析モデルの概要

(2) 解析モデルと解析ケース

本稿では，既往の文献 5)と同様に，通り変位を持たない理想形状（直線あるいは曲線半径 400m，600m，800m の円曲線）のレール節点座標に，前述の通り変位の復元波形を付加し，軌道形状を作成した．また，高低変位の復元波形をもとに浮き量[17]を算出し，本稿においてはこの浮き量が 0mm より大きい箇所を浮きまくらぎとして定義した．これにより，**図-5** に示すように，異なる軌道形状および浮きまくらぎの分布を有する全長 100m の解析モデルを複数作成し，1 モデルを 1 ケースとして，全部で 237 ケースを設定した．全 237 ケースのうち，直線が 96 ケース，曲線半径 400m が 46 ケース，600m が 64 ケース，800m が 31 ケースである．直線のケースは，直線区間で測定した軌道検測データを用い，曲線半径 400m，600m，800m のケースは，それぞれ曲線半径 R が R≦400m，400m＜R≦800m，800m＜R の曲線区間で測定した検測データを用いている．なお，以上のケースは，文献 5)と同様に，座屈発生箇所が解析モデルの両端から 15m の範囲内に入るケースは含んでいない．また，解析モデルの構成要素と諸元は，**図-2** および**表-1** と同じである．

(3) 各パラメータが座屈温度に及ぼす影響分析

本節では後述するとおり，構築する回帰式の精度検証を実施するため，全 237 ケースのうち，158 ケースを回帰式構築用の教師ケース，79 ケースを回帰式の精度確認用の校正ケースとして分割した．なお，各基本線形の解析モデルがそれぞれ約 2：1 の比率となるように分割数を調整した．そして，158 の教師ケースについて座屈解析を行い，座屈温度と座屈発生箇所をまず求めた．そ

の後，教師ケースごとに，抽出したパラメータと座屈温度の関係を回帰分析することとした．

文献5)では，レール曲率の最大値とT_aの関係について整理し，両者に対数関数を介した強い関連性があることを確認している．本稿ではこれに加え，前述のパラメータスタディの結果を踏まえて，各解析ケースについて以下のパラメータを抽出した．

A) レール曲率の最大値（対数）$\ln \kappa_{max}$
B) 浮きまくらぎ箇所のみを対象としたときのレール曲率の最大値（対数）$\ln \kappa_{max,u}$
C) 座屈発生箇所の曲率κを，レール曲率の最大値κ_{max}で割ったときの比率κ/κ_{max}
D) 解析モデル中の最終道床横抵抗力の平均g_{ave}
E) 解析モデル中の最終道床横抵抗力の標準偏差g_{std}
F) 座屈発生箇所直近の浮きまくらぎ群（**図-6** 参照）までの離隔D
G) 座屈発生箇所直近の浮きまくらぎ範囲（対数）$\ln L$
H) 座屈発生箇所の最終道床横抵抗力g

以上に示した A)～H)のパラメータについて，これらを説明変数として座屈温度との関係を回帰分析する．ここで，複数の説明変数をもとに目的変数を推定する回帰分析手法として，重回帰分析を採用することが考えられる．ただし，上記に示したパラメータについて，各パラメータ間に相関が認められる場合，そのまま重回帰分析を実施すると多重共線性の問題が生じ，座屈温度の推定精度の悪化につながる恐れがある．

そこで，本研究ではこのような多重共線性の問題をあらかじめ回避するために，部分的最小二乗法（Partial Least Squares；以下，PLS）[17]を適用することとした．以下，まずPLSの概要について説明したうえで，解析結果にPLSを適用し，抽出したパラメータ群から座屈温度の回帰推定を行う．その後，構築した回帰式の妥当性をFEM解析の結果と対応させて検証した．

a) PLSの概要

PLSとは，説明変数間に多重共線性が認められる場合等に有用な回帰分析手法である．PLSでは説明変数をそのまま用いず，説明変数から潜在変数とよばれる互いに無相関な変数を新たに作り，この潜在変数への回帰を行う点が重回帰分析と異なる．

i番目のサンプルデータにおける，後述する第j潜在変数の値z_{ij}は，重み係数をかけた各説明変数の線形結合として以下のように表される．

$$z_{ij} = \sum_{k=1}^{d_e} w_{kj} x_{ki} \qquad (2)$$

ここで，d_e：説明変数の個数，x_{ki}：i番目のサンプルデータにおけるk番目の説明変数の値，w_{kj}：第j潜在変数の成分であるk番目の説明変数の重み係数（ただし，$\sum_{k=1}^{d_e} {w_{kj}}^2 = 1$）である．なお，本稿では，158ある教師ケースのうち，任意の1ケースにおける解析モデルのパラメータ群（説明変数）および座屈温度の結果（目的変数）をまとめたデータを，1つのサンプルデータと定義する．

w_{kj}は，以下の式(3)に示す潜在変数と目的変数の共分散σ_{zy}が最も高くなるように計算される．

$$\sigma_{zy} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} z_{ij} y_i \qquad (3)$$

ここで，n：サンプルデータ数，y_i：i番目のサンプルデータにおける目的変数の値である．なお，上記のx_{ki}およびy_iは，平均が0，標準偏差が1となるように，あらかじめ補正された値（以下，オートスケーリング値）である．式(3)に式(2)を代入することで，共分散σ_{zy}はw_{kj}の関数となるので，これをw_{kj}に関する制約付き最大化問題として解くことでw_{kj}を計算できる．

まず，$j = 1$として上記のとおり計算したw_{k1}を式(2)に代入すれば，説明変数を成分とした潜在変数の構成式が求められる．この潜在変数により目的変数の回帰推定を行うことになるが，この潜在変数のみでは目的変数を十分に説明しきれず，目的変数の情報（残差）が残る場合がある．

そこで，上記に示した潜在変数を抽出する操作を，$j = 2$として目的変数の残差に対しても同様に行うと，共分散が次点で高くなる別の潜在変数を算出することができる．以降，jを更新し上記の操作を繰り返すことで，互いに無相関な潜在変数が作り出され，目的変数の回帰式を構築することができる．各計算過程で抽出した潜在変数をそれぞれ区別するため，最初の操作で抽出した潜在変数を第1潜在変数，以降で抽出した潜在変数を第2潜在変数，第3潜在変数というように，j回目の操作で抽出した潜在変数を第j潜在変数とよぶこととする．なお，上記の操作は説明変数と同じ数まで繰り返すことが可能である．ただし，潜在変数の数を増やせば回帰式の精度が向上するとは限らないため，潜在変数を回帰式にいくつ採用するかについては別途確認する必要がある．

潜在変数が求まれば，目的変数の回帰式は以下のとおり構築できる．

$$\hat{y}_i = \sum_{j=1}^{d_p} q_j z_{ij} \qquad (4)$$

$$q_j = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i z_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} {z_{ij}}^2} \qquad (5)$$

ここで，$\hat{y}_i$：i番目のサンプルデータにおける目的変数の推定値，d_p：潜在変数の個数，q_j：第j潜在変数の係数である．q_jの導出についてはここでは省略する．

なお，上記の$\hat{y}_i$はオートスケーリング値になるため，

以下の補正式(6)により実スケールの目的変数の推定値を計算できる．

$$\hat{Y}_i = \bar{Y} + \sigma_Y \hat{y}_i \qquad (6)$$

ここで，$\hat{Y}_i$：i番目のサンプルデータにおける目的変数の推定値，$\bar{Y}$：n個の目的変数の平均，σ_Y：n個の目的変数の標準偏差であり，いずれの変数も目的変数と同等のスケール値である．

b)　PLSによる回帰分析の結果

前述の 158 の教師ケースで求めたT_aまたはT_cを目的変数とし，前述の A)～H)のパラメータをそれぞれのケースから抽出してこれらを説明変数として，PLS により潜在変数を作り出した．なお，PLS の計算は商用のデータ解析ソフトウェア OriginPro （2018J，64-bit）の計算プログラムを使用した．ここで，目的変数の回帰推定に用いる潜在変数d_pをいくつまで用いるかについては，以下の予測平方和（$PRESS_{d_p}$）を最小にする数を指標として決定した[17]．$PRESS_{d_p}$は以下の式(7)で表される．

$$PRESS_{d_p} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_{i,d_p})^2 \qquad (7)$$

ここで，$\hat{y}_{i,d_p}$は，i番目のサンプルデータを除いて回帰式を構築し，その回帰式を用いてi番目のサンプルデータの観測値を予測したものである．

図-6に潜在変数の個数と$PRESS_{d_p}$の関係を，T_aとT_cそれぞれについて示す．同図から，T_aについては潜在変数の数を 8 とした場合に，T_cについては潜在変数の数を 4 とした場合に$PRESS_{d_p}$が最も小さくなる結果となった．よってT_aについては 8 つ，T_cについては 4 つの潜在変数を用いてそれぞれ回帰式を構築した．

図-7 に各潜在変数を構成する説明変数の重み係数w_{kj}（T_aについては第 4 潜在変数までを表示）を示す．

T_aおよびT_cの第 1 潜在変数に着目すると，T_aについてはレール曲率の寄与度が高く，T_cについてはレール曲率の寄与度も高いが，道床横抵抗力や浮きまくらぎに関するパラメータもT_aに比べて寄与度が相対的に高い．この傾向は，T_aがレール曲率との間に強い関連性があり[5]，T_cが道床横抵抗力の影響を受ける[3]という過去の知見とも整合性がとれていると考えられる．

図-8 に目的変数に対する潜在変数の係数q_jを示す．両温度とも，第 1 潜在変数の係数の絶対値が，他の潜在変数に比べて大きくなっていることが分かる．

c)　校正ケースを用いた回帰式の推定精度の検証

前項 b)にて，解析モデルのパラメータ群から座屈温度を推定する回帰式を PLS により求めた．ただし，本回帰式の推定精度については，未知のデータを用いて検証する必要がある．そこで，前述の 79 の校正ケースを用いて，本回帰式の推定精度を検証することとした．ただし，校正ケースでは座屈発生箇所をあらかじめ特定できないため，(3)冒頭に示した A)～H)のパラメータのうち，C), F), G), H)の 4 つのパラメータは抽出できない．そこで，この 4 つのパラメータについては，各校正ケースの解析モデル中のレール節点すべてについて各パラメータの値をまず求めた．そして，レール節点ごとに求めたパラメータ値を式(2)に代入して潜在変数を算出し，求めた潜在変数を式(4)～(6)に代入して座屈温度の分布を推定し，この分布の最小値を校正ケースにおける座屈温度の推定値として定義した．また，T_aの最小値が得られたレール節点の位置を校正ケースにおける「座屈推定箇所」として定義した．

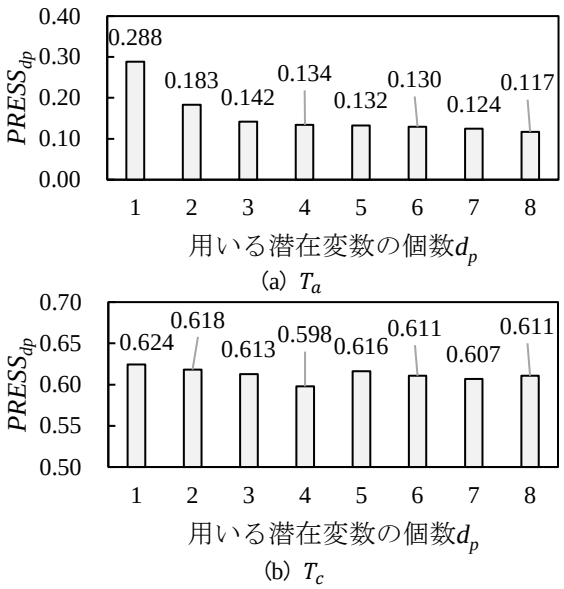


図-6　潜在変数の個数と PRESS の関係

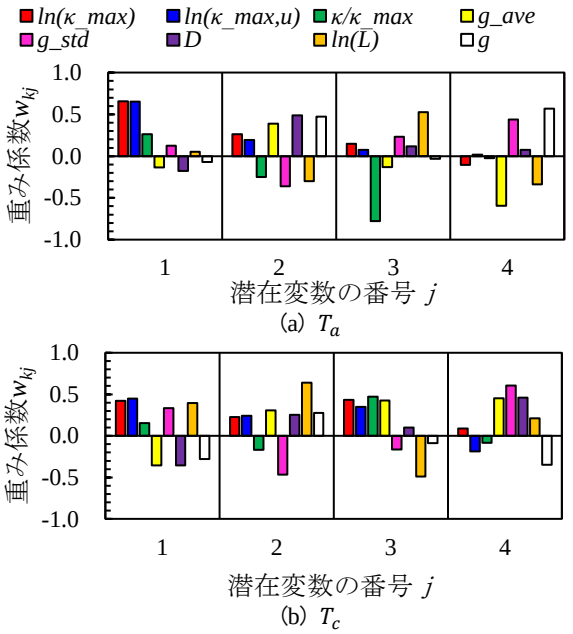


図-7　潜在変数を構成する説明変数の重み

図-9 に FEM で算出した座屈温度の解析値と回帰式による推定値の関係を示す．同図によると，T_aおよびT_cのそれぞれについて，両値は概ね一致していることから，

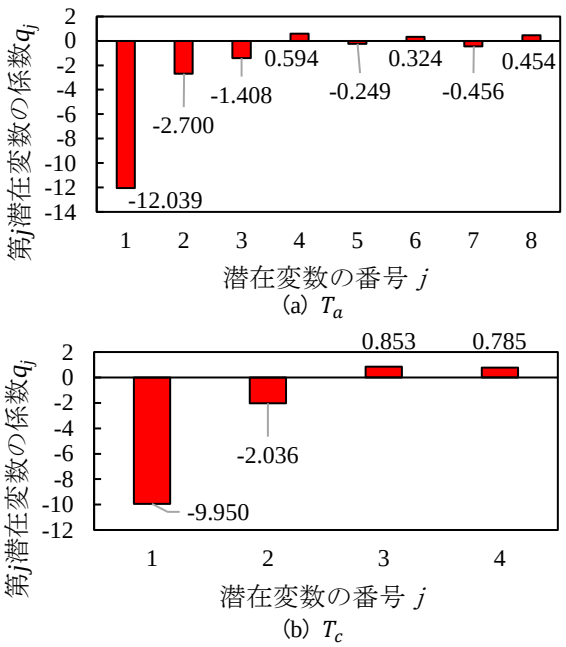


図-8　目的変数に対する潜在変数の係数

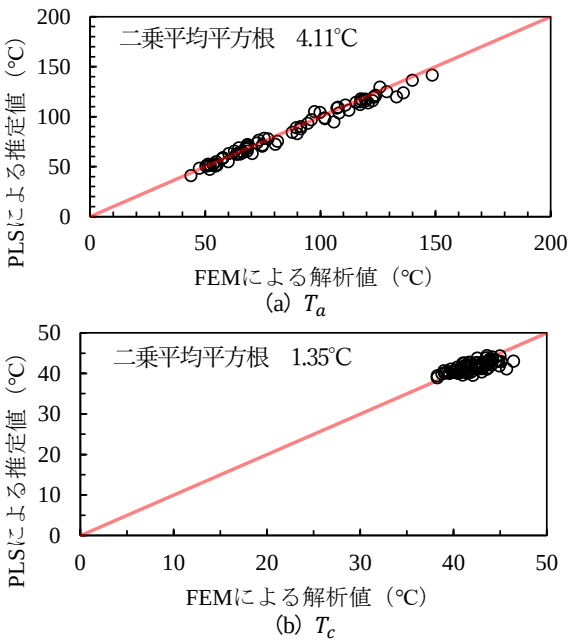


図-9　FEM の解析値と PLS の推定値の比較

本回帰式の推定精度が良好であるといえる．また，図-10 に FEM による座屈発生箇所と PLS による座屈推定箇所の関係について示す．なお，原点が解析モデル中心である．同図によると，座屈発生箇所の推定精度が低いことが分かる． ここでT_aは，滑らかなで連続的な分布となるレール曲率の影響を強く受け，同様の分布となるため，座屈推定箇所の抽出方法には問題がないと考えられる．T_aの推定精度が高い一方で，座屈発生箇所の推定精度が低いのは，T_aの解析値に近い推定値が解析モデル中の複数箇所で検出されるようなケースにおいて，座屈発生箇所を誤検出したためと考えられる．よって，本研究で構築したT_aの回帰式は，座屈発生箇所の推定には課題があるが，T_aは良好に推定可能といえる．

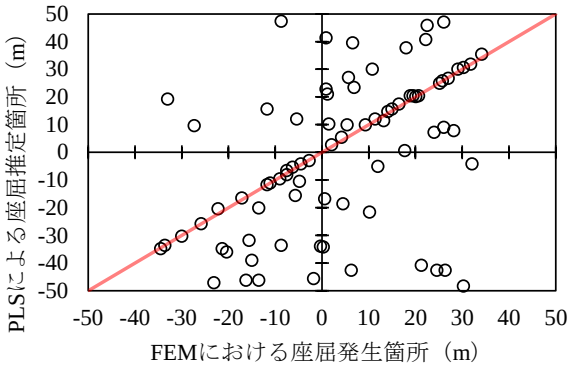


図-10　FEM における座屈発生箇所と PLS による座屈推定箇所の比較

4. まとめ

本研究では，ロングレール軌道を対象とした一連の FEM 解析を行い，軌道検測車で測定した通り変位データおよび高低変位データに基づき，座屈温度を簡易に推定する方法を検討した．得られた主な知見を以下に示す．

(1) 浮きまくらぎに関するパラメータを変化させた座屈解析を行った結果，各パラメータが座屈温度に及ぼす影響が分かった．

(2) パラメータスタディの結果を踏まえて，軌道検測車で測定した通り変位の復元波形をレール長手方向の形状に，高低変位の復元波形をもとに把握した浮きまくらぎを考慮した道床横抵抗力のばらつきを反映した座屈解析を行った．PLSによる分析を行った結果，T_aにはレール曲率が強い影響を及ぼし，T_cにはレール曲率の他に浮きまくらぎに関するパラメータも影響する可能性が示唆された．

(3) 本研究で構築した座屈温度の回帰式により，座屈温度を良好に推定できることを確認した．一方，T_aの回帰式を用いて座屈発生箇所の推定を試みたところ，推定精度が低かった．よって，本研究で構築したT_aの回帰式は，座屈発生箇所の推定には課題があるが，T_aは良好に推定可能といえる．

REFERENCES

1) 沼田実：ロング・レールの座屈強さ，鉄道技術研究報告，第 721 号，1970. [Numata, M.: Buckling strength of long welded rail, *Railway Technical Research Report*, Issue 721, 1970.]

2) 国土交通省監修：鉄道構造物等設計標準・同解説－軌道構造，丸善，pp.173-186，2012. [supervised by Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism: *Design Standards for Railway Structures and Commentary (Track Structures)*, Maruzen, pp.173-186，2012.]

3) 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，鉄道工学シンポジウム論文集，第 20 号，pp.9-15，2016.

[Nishinomiya, Y. and Kataoka, H.: Study of the stability of continuous welded rail in consideration of a critical buckling temperature increase, *Journal of Railway Engineering, JSCE*, Issue 20, pp.9-15, 2016.]

4) Coenraad Esveld: *Modern Railway Track 2nd ed*, MRT-Production, 2001.
5) 玉川新悟，山岡大樹，西宮裕騎：軌道検測車で測定した通り変位波形に基づくロングレールの実用的な座屈発生温度の推定法，構造工学論文集，Vol.69A，2023. [Tamagawa, S., Yamaoka, D. and Nishinomiya, Y.: Practical method for estimating buckling temperature of continuous welded rails based on lateral track irregularities measured by track inspection car, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 69A, 2023.]
6) 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，鉄道工学シンポジウム論文集，第 23 号，pp.267-274，2019. [Tamagawa, S. and Nishinomiya, Y.: FEM simulation of buckling test of full size track, *Journal of Railway Engineering, JSCE*, Issue 23, pp.267-274, 2019.]
7) Ramm, E.: Strategies for tracing the nonlinear response near limit points, *nonlinear finite element analysis in structural mechanics*, pp.63-89, 1981.
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，第 1332 号，1986. [Umeda, S. and Kumazaki, H.: Development of improved type-5 rail fastening device for type 3 prestressed concrete tie, *Railway Technical Research Report*, Issue 1332, 1986.]
9) 玉川新悟，片岡宏夫，西宮裕騎，小谷隼：分岐器介在ロングレールの横方向安定性評価の高精度化，鉄道総研報告，Vol.27，No.4，pp.11-16，2013. [Tamagawa, S., Kataoka, H., Nishinomiya, Y. and Kotani, J.: Improvement in evaluation method of lateral stability of turnout connected with continuous welded rail, *RTRI Report*, Vol.27, No.4, pp.11-16, 2013.]
10) 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，鉄道技術研究資料，Vol.40，No.4，pp.23-24，1983. [Miyai, T., Iida, H., Hosokawa, T. and Hamasaki, S.: lateral ballast resistance on commercial lines, *Journal of Railway Engineering Research*, Vol.27, No.4, pp.11-16, 2013.]
11) 伊藤稔：ロングレールの設定温度と道床横抵抗力，新線路，Vol.50，No.4，pp.28-31，1996. [Ito, M.: Rail neutral temperature of continuous welded rail and lateral ballast resistance, *Shinsenro*, Vol.50, No.4, pp.28-31, 1996.]
12) 保線工学編集委員会編：保線工学＜上＞，鉄道現業社，pp.295-297，2016 [Track Maintenance Engineering Editorial Committee Edition: *Track Maintenance Engineering (1)*, Tetsudo Gengyosha, pp.295-297, 2016.]
13) 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_635-646，2019. [Kusuda, M. and Nishinomiya, Y.: A study on the track buckling temperature considering the supporting status of the sleeper, *Proceedings of JSCE A2 (applied mechanics)*, Vol.75, No.2, I_635-646，2019.]
14) 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. [Takeshita, K.: A method for track irregularity inspection by asymmetrical chord offset method, *RTRI Report*, Vol.4, No.10, pp.18-24, 1990.]
15) 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. [Yoshimura, A.: Study on theoretical foundations to restoring an original waveform of track irregularity and its application, *Proceedings of JSCE*, Vol.377, pp.117-126, 1987.]
16) 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_543-551，2018. [Kusuda, M., Matsumoto, M., and Kataoka, H.: Detection method for unsupported sleepers based on track irregularity data, *Proceedings of JSCE A2 (applied mechanics)*, Vol.74, No.2, I_543-551，2018.]
17) 橋本淳樹，田中豊：PLS 回帰におけるモデル選択，南山大学紀要『アカデミア』情報理工学編，Vol.10，pp.39-49，2010. [Hashimoto, A. and Tanaka, Y.: Model selection in PLS regression, *Academia. Information Sciences and Engineering: Journal of the Nanzan Academic Society*, Vol.10, pp.39-49，2010.]

(Received March 31, 2023)
(Accepted June 9, 2023)

SIMPLE METHOD FOR ESTIMATING THE BUCKLING TEMPERATURE OF CONTINUOUS WELDED RAILS CONSIDERING EFFECT OF LATERAL TRACK IRREGULARITIES AND UNSUPPORTED SLEEPERS

Daiki YAMAOKA, Shingo TAMAGAWA and Yuki NISHINOMIYA

The authors carried out a FEM buckling analysis of a track having rails reflecting the lateral track irregularities measured by a track inspection car. And we have developed a method to estimate the buckling temperature from parameters extracted from rail shape. However, the method assumed that the lateral ballast resistance of track was constant in the evaluation section, and did not consider that variations in the lateral ballast resistance of track due to unsupported sleepers and other factors. In this paper, clarifying the relationship between the parameters of track and the buckling temperature for track considering unsupported sleeper and lateral track irregularities, we report the results of the estimation of buckling temperature.