

軌道最終道床横抵抗力の補間方法が座屈強度の評価精度に及ぼす影響

新潟大学大学院自然科学研究科 学生会員 伊與部 匠
新潟大学工学部 正会員 阿部 和久

1 はじめに

鉄道におけるロングレール軌道の導入が進められているが、長区間でまくらぎを介して道床によって拘束されるため、その中央部には不動区間が存在する。この区間では、温度変化に伴うレール軸力が発生し、高温時には軌道座屈の危険性が増すため、その適切な管理と対策が重要である。現行の軌道座屈管理では、最低座屈温度に基づき評価がなされている¹⁾が、飛び移り座屈温度との温度差(座屈余裕度)を考慮した、飛び移り座屈温度に基づく軌道管理が合理的であると考えられる²⁾。

近年では、軌道の状態を適切に評価することで座屈温度を確定論的に予測する手法についても検討されている³⁾。しかし、座屈強度は中立温度と道床横抵抗りに強く依存するため、それを適切に評価するためには、最小限度の測定点から道床横抵抗りの空間分布を適切に推定する必要がある。また、測定間隔はランダム波形の波長成分に対するフィルタの役割を有すると見なすことができる。

そこで本研究では、道床横抵抗りの評価点間隔が座屈強度の解析精度に及ぼす影響と、座屈強度に影響する道床横抵抗りの変動波長範囲とについて基礎的検討を行う。

2 解析モデル

2.1 軌道モデル

座屈解析では、先行研究⁴⁾と同様の数値解析モデルを用いる。左右レールと等間隔 L で配置されたまくらぎから構成される軌きょうをモデル化する。レールは水平面内変位を考慮した Euler ばり有限要素で離散化し、有限変位理論に基づいてつり合い式を導出する。まくらぎは剛な棒で与え、レール締結部分には回転ばねと横方向ばねを設定し、左右レール間を結合する。また、まくらぎに作用する道床横抵抗りと縦抵抗りは次式による骨格曲線にて与え、弾塑性履歴を考慮する。

$$f = f_0 \frac{u_s}{a + |u_s|} \quad (1)$$

ここで、 f は道床横抵抗りまたは縦抵抗り、 f_0 はそれらの最終値、 u_s はまくらぎの横または縦方向変位、 a は $f = f_0/2$ における変位である。

2.2 ランダムな最終道床横抵抗りの生成

本研究では、定常ランダムな最終道床横抵抗りの変動成分を、以下の距離相関関数 $R(x)$ ⁴⁾に従うランダムデータとして生成する。

$$R(x) = \frac{\sigma^2}{1 + (x/d)^2} \quad (2)$$

ここで、 x は軌道長手方向距離、 σ は最終道床横抵抗りの標準偏差、 d は相関パラメータ(相関長)である。まくらぎ間距離を L とし、各まくらぎにおける最終道床横抵抗りの共分散行列 $[C]$ の i 行 j 列成分を c_{ij} とおくと、それは次式で与えられる。

$$c_{ij} = R(|i - j| \cdot L) \quad (3)$$

この時、最終道床横抵抗りの変動成分 $\{\mathbf{F}_0\}$ は次式により作成される。

$$\{\mathbf{F}_0\} = [\Phi][\Lambda^{1/2}]\{\xi\} \quad (4)$$

ここで、 $[\Phi]$ は行列 $[C]$ に関する固有ベクトルを縦ベクトル成分に持つ行列、 $[\Lambda^{1/2}]$ はその固有値の平方根を対角項に持つ対角行列、 $\{\xi\}$ は期待値0、分散1の標準正規乱数を成分に持つベクトルである。これを最終道床横抵抗りの平均値に足し合わせる。また、ランダムな初期通り変位についても式(4)と同様の手法で生成する。

3 解析手法

最終道床横抵抗りの評価点間隔を設定する際に、最終道床横抵抗りのランダムデータから等間隔に値を抽出し、所定の間隔で評価されたデータを模擬的に再現する。本研究では、評価点間に位置するまくらぎにおける最終道床横抵抗りの値を、離散正弦変換による補間、線形補間、および区間一定関数による補間を用いて評価し、その下で座屈解析を行い、得られた座屈強度と正解のデータから得られた強度とを比較することで評価点の間隔が座屈強度の推定に及ぼす影響を調べる。各補間に対する、座屈強度の評価精度の検討には次式を用いる。

$$e^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\tilde{t}_i - t_i)^2}{N} \quad (5)$$

式(5)より、 N ケースの座屈解析における、正解の飛び移り座屈温度 \tilde{t}_i と評価点間隔を空けたときの飛び移り座屈温度 t_i との誤差のバラツキ(分散) e^2 に基づき、評価点間隔や補間方法が精度に及ぼす影響について調べる。

4 解析結果

4.1 解析条件

座屈解析を実施するにあたって、軌道モデルに関する諸量は、先行研究⁴⁾と同様に設定した。最終道床横抵抗力は、平均値を 5500 N とし、ランダムな成分は、先行研究⁴⁾から相関長 d を 4 m とし、参考文献¹⁾に基づき、標準偏差の 3 倍が平均値から $\pm 50\%$ をカバーする様に $\sigma = 917$ N に設定した。各まくらぎの評価点間隔は 5 本、10 本、15 本、および 20 本の 4 ケースを対象とした。式(5)における試行回数については、 $N = 5000$ ケースとした。

4.2 e と座屈温度の平均値

それぞれの補間方法によって求めた飛び移り座屈温度と正解の飛び移り座屈温度との誤差 e を図 1 に示す。座屈温度の誤差のバラツキは、補間方法が離散正弦変換、線形近似、区間一定関数の順に大きくなった。ただし、分散の値自体は、離散正弦変換と線形近似とで有意な違いは認められない。

次に、評価点間隔ごとに解析を 5000 ケース行ったときの座屈温度の平均値を図 2 に示す。評価点間隔の増加と共に正解との差が増大する様子が確認できる。平均値に関しては離散正弦変換によるものが精度低下が最小となった。

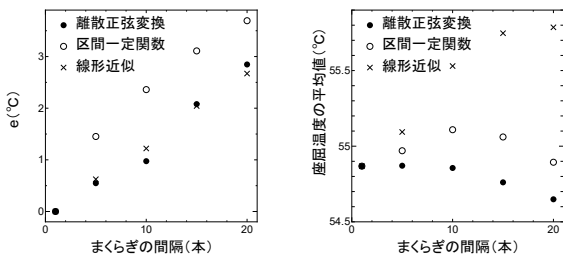


図 1: 誤差 e

図 2: 座屈温度の平均値

4.3 最終道床横抵抗力のバラツキが確率密度関数および確率分布関数に及ぼす影響

最終道床横抵抗力の各補間方法によって求めた座屈温度確率密度関数および確率分布関数をそれぞれ図 3 と図 4 に示す。図より、評価点間隔が増加するにつれて、正解からのずれが大きくなるのがわかる。線形近似および区間一定関数による補間における正解からのずれは、離散正弦変換による補間よりも高い確率域から大きくなっている。区間一定関数による補間では、離散正弦変換に比べて最大で

10 倍ほど大きく、強度確率の評価精度に大きく影響している。また、確率分布関数において、測定間隔が 20 本の場合に誤差が急拡大している。

評価点間隔が 15~20 本の場合において座屈確率に大きな影響を及ぼしていることから、約 10~12 m 以上の波長成分が座屈強度に大きく影響することがわかる。

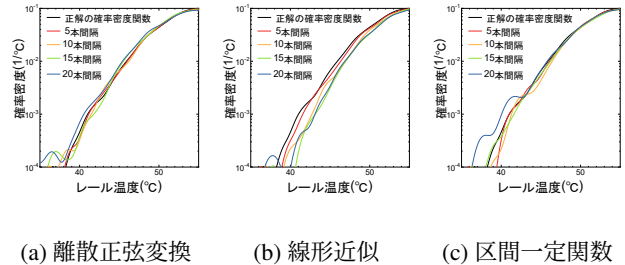


図 3: 確率密度関数

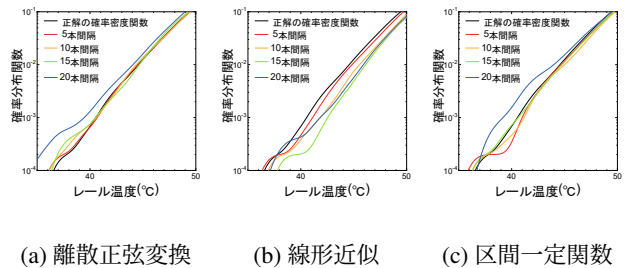


図 4: 確率分布関数

5 おわりに

最終道床横抵抗力が空間変動する場合を想定し、その評価点間隔がそれにより補間推定された値に基づいて評価した座屈強度に及ぼす影響について調べた。また、当該補間の際に離散正弦変換、線形補間および区間一定関数の 3 ケースを用いた。その結果、離散正弦変換による補間が最も高精度な結果を与えることを確認した。

また、評価点間隔がまくらぎ 15~20 本程度以上の場合において、座屈強度確率の評価精度の低下が顕著となるのがわかった。このことより、本解析における設定条件下では、道床横抵抗力の空間変動成分の内 10~12 m 以上のものが軌道座屈強度に大きく影響しているものと考えられる。

参考文献

- 1) 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，11 章 ロングレール，丸善出版，2021。
- 2) 阿部和久，小坂拓斗，紅露一寛：種々の不確実性を考慮した軌道座屈発生件数の期待値解析，第 27 回鉄道工学シンポジウム論文集，pp.183-190，2023。
- 3) 中田健太，阿部和久，紅露一寛：復元通り変位原波形に基づく軌道座屈予測に関する基礎的検討，第 26 回鉄道工学シンポジウム論文集，pp.89-96，2022。
- 4) 阿部和久，岩井翔，紅露一寛：通り変位と道床横抵抗力のバラツキを考慮した軌道座屈余裕度の確率的評価，鉄道工学シンポジウム論文集，No.24，pp.69-76，2021。