

初期通り変位波形の波数特性と軌道座屈温度の関係

新潟大学大学院自然科学研究科 学生会員 中田 健太
 新潟大学工学部 正会員 阿部 和久
 新潟大学工学部 正会員 紅露 一寛

1 はじめに

著者ら¹⁾は、通り変位の弦正矢データから復元された原波形に基づいた座屈予測の可能性について検討した。具体的には、得られた通り変位原波形を用いて軌道座屈解析を行い、飛び移り座屈温度と座屈箇所を求め、正解値と比較することでその推定精度を調べた。その結果、飛び移り座屈温度は高温から低温までの様々な値をとることが分かった。また、既往研究²⁾では、数値軌道モデルにより、軌道の初期通り変位波形におけるばらつきが軌道座屈に大きく影響するということが確率的に示された。そこで、飛び移り座屈温度が高温や低温となるときに軌道の初期通り変位波形に何らかの傾向があるのではないかと考え、飛び移り座屈温度の高温時や低温時である低確率域を部分集合シミュレーション³⁾によって抽出し、低確率域における初期通り変位波形の特性について検討した。また、単波長通り変位と座屈温度との関係についても調べた。

2 軌道のモデル化

ルールとまくらぎから構成される軌きょうを図-1のようにモデル化する。なお、2本のルールは横方向たわみとルール軸方向の伸縮を考慮した Euler ばりで表現する。ルール締結部分は回転ばね k_R と横方向ばね k_T で表す。まくらぎは横方向変位とルール軸方向変位を考慮し、等間隔 L で設定する、ただし、まくらぎに作用する道床横抵抗力 f_T は次式で与える。

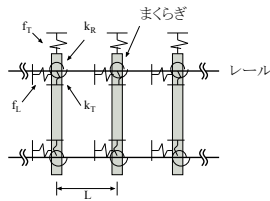


図-1 軌道のモデル化

$$f_T = f_{0T} \frac{u_{ST}}{a_T + |u_{ST}|} \quad (1)$$

ここで、 u_{ST} はまくらぎの横方向変位、 f_{0T} は最終横抵抗力、 a_T は作用力が最終道床抵抗力の $1/2$ を与えるときの変位である。以上のモデル化の下ルールたわみを有限変位の定式化に従い離散化する。また、低確率域の情報を効率的に抽出する目的で部分集合シミュレーション³⁾を用いる。確率変数を x とした確率 $P_x(x)$ について考える。ある確率レベル P_i に対して、 $P_x(x) \leq P_i$ を満たす集合を S_i とおく。すると、式 (2) が成り立つ。

$$P_x(x) \leq P_i \quad \text{for} \quad x \in S_i \quad (2)$$

また、 x は軌道の通り変位やそれを生成する $[0, 1]$ の一様乱数ベクトル $\{\eta\}$ で与えられ、通り変位波形は式 (3) で与えられる。

$$\{w\} = [\Phi][\Lambda^{1/2}]\{\xi(\eta)\} \quad (3)$$

ここで、 $[\Lambda^{1/2}]$ は初期通り変位に関する距離相関関数より与えられる共分散行列から得られる固有値の平方根を対角項に持つ行列、 $[\Phi]$ は固有ベクトルである。 $\{\xi\}$ は期待値 0、標準偏差 1.0 のランダムベクトルであり、 $[0, 1]$ の一様乱数ベクトル $\{\eta\}$ から ξ の確率密度関数 $P_\xi(\xi)$ を介して、次の関係に基づき決定される。

$$\eta_i = P_\xi(\xi_i) \quad \xi_i = P_\xi^{-1}(\eta_i) \quad (4)$$

以上より、 η_i が具体的に定まると、式 (3) より $\{w\}$ が定まる。すると座屈解析により、飛び移り座屈温度 T_s が定まり、 $\{\eta\}$ と T_s との一対一の関係が得られる。そして、確率レベル P_i で得られる部分集合 S_i を構成するサンプル $\{\eta^i\}$ から、その近傍サンプルを元の総数 N になるまで生成する。

3 数値モデルによる検証

3.1 初期通り変位のスペクトル特性

部分集合シミュレーションで絞り込んだ低座屈温度側のケースと高温側における低確率域の通り変位データを対象に、初期通り変位のスペクトル特性を調べる。また、スペクトル分布には軌道の不動区間 300m を対象とした。不動区間の左端から幅 12m の窓関数をルール長手軸方向に移動させて求めたスペクトル分布を図-2、図-3 に、またウェーブレットで表したものを図-4、図-5 に示す。ただし、図-2、図-3 の x 軸、 y 軸はそれぞれルール軸方向 (m) と波数 (1/m)、図-4、図-5 の x 軸、 y 軸はそれぞれルール軸方向 (m) と解像度である。

図-2、図-3 の座屈箇所は図中に赤の破線で示した。両者のスペクトルを比較する限り、座屈箇所の周辺で卓越する波数成分が存在するというような特徴は認められない。

図-4、図-5 の座屈箇所は図中に赤の破線で示した。こちらも両者のスペクトルを比較する限り、座屈箇所の周辺で卓越する波数成分が存在するというような特徴は認められない。

3.2 通り変位の曲率に着目した検討

一定振幅・一定波長の初期通り変位を設定した。初期通り変位の振幅が 4mm~8mm の場合の初期通り変位波長と座屈温度との関係を図-6 に、曲率と座屈温度の関係を図-7 に示す。図-6 において、波数 0.9(1/m) 付近までは初期通り変位の振幅が小さいほど飛び移り座屈温度が高いという結果が得られた。また、初期通り変位の振幅が小さいほど飛び移り座屈温度が高いという結果は、本研究の既往研究²⁾

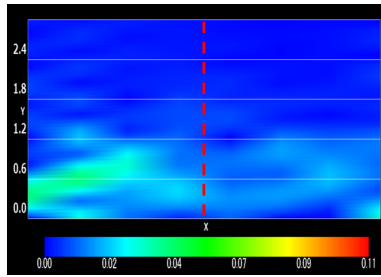


図-2 低温時のスペクトル分布

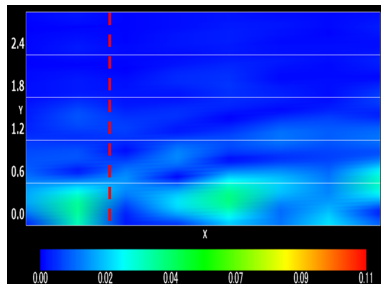


図-3 高温時のスペクトル分布

で示された傾向と一致した. 一方で, 波数 $0.9(1/m)$ を超えた付近からはその傾向が逆転し, 最終的には, 初期通り変位の振幅が小さいほど飛び移り座屈温度が低いという, 既往研究²⁾で示された結果とは逆の傾向が得られた. さらに, 図-7において, 飛び移り座屈温度は曲率 $0.003(1/m)$ 付近までは振幅の大小によらず曲率のみに支配されていることを確認した. また, 曲率 $0.003\sim 0.006(1/m)$ 付近までは初期通り変位の振幅が小さいほど飛び移り座屈温度が高いが, 曲率 $0.006(1/m)$ を超えると, 明確な差異は認められない.

4 おわりに

本研究では, 部分集合シミュレーションを用いて低確率域における初期通り変位波形の特性について検討した. しかし, 初期通り変位のスペクトル分布からは低座屈温度側と高温側における初期通り変位波形の特性をつかむことができなかった. そこで, 新たに初期通り変位波長と飛び移り座屈温度の関係を調べた. その結果, 比較的小さな曲率域では, 飛び移り座屈温度が曲率のみに依存する傾向にあることがわかった. また, 振幅毎に見た場合, ある波数(曲率)において座屈温度が最小値を示す傾向を確認することができた.

謝辞 本研究は科研費(20K04661)の助成を受けたものである.

参考文献

- 1) 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", 鉄道工学シンポジウム論文集, .
- 2) 阿部和久, 水野雄太, 紅露一寛: "通り変位波形におけるバラツキが軌道座屈強度の確率特性に及ぼす影響", 鉄道工学シンポジウム論文集, No.24,167-174,2020.
- 3) Siu-Kui Au, James L. Beck: "Estimation of small failure probabilities in high dimensions by subset simulation", Probabilistic Engineering Mechanics 16(2001)263-277.

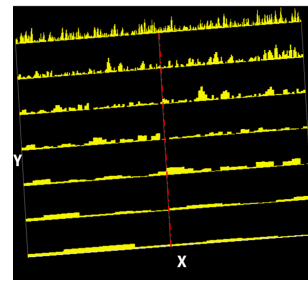


図-4 低温時のスペクトル分布

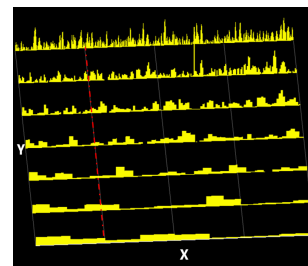


図-5 高温時のスペクトル分布

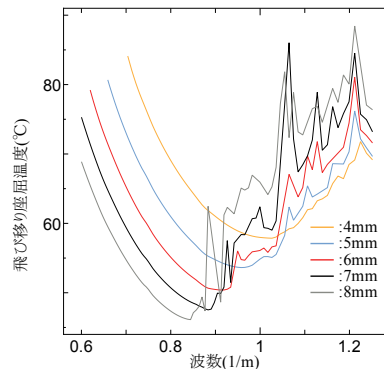


図-6 飛び移り座屈温度と波数の関係

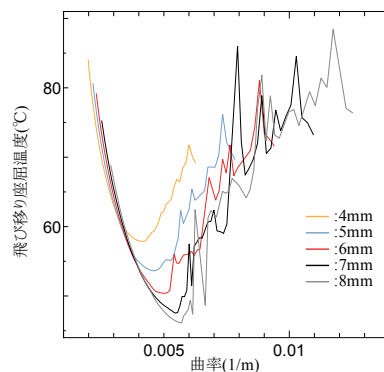


図-7 飛び移り座屈温度と曲率の関係