

軌道の通り変位と道床横抵抗力のランダム性が座屈余裕度に与える影響

新潟大学大学院自然科学研究科
新潟大学工学部
新潟大学工学部

学生員 岩井翔
正会員 阿部 和久
正会員 紅露 一寛

1. はじめに

現在, 軌道の管理基準は安全性を十分に考慮した 図 1 の つり合い経路の最低座屈強さ (B 点) に従って設定されている。しかし, 実際の座屈発生源は飛び移り座屈温度 (A 点) であり, その間には少なからず余裕が存在する。本研究ではその温度差 (座屈余裕度) を考慮したより合理的な管理基準のための検討を行う。

当研究室では, 軌道の初期通り変位をランダムな波形で与え, モンテカルロシミュレーション (MCS) により飛び移り座屈温度の確率特性について調べた¹⁾。本研究ではさらに最低座屈温度の確率特性を調べ, それを考慮して座屈余裕度を評価する。また, 座屈温度に影響を与える要因の一つである道床横抵抗力について, その空間変動が座屈の確率特性に及ぼす影響と道床横抵抗力のバラツキを考慮した座屈余裕度について評価する。

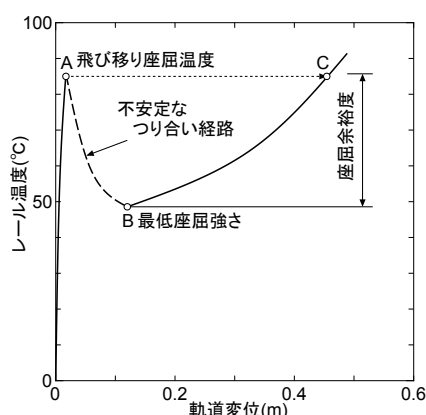


図 1 軌道横変位のつり合い経路の例

2. 軌道座屈 MCS の概要

(1) 軌道のモデル化

軌道は左右ロングレールとまくらぎから構成される軌きょうによりモデル化し, レールは Euler ばり要素で与え有限たわみ理論のもとに有限要素で離散化する。レールとまくらぎの締結部に回転バネ k_R と横方向バネ k_T を設定し, まくらぎに作用する道床縦・横抵抗力 f を次式で与える。

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

ここで, u はまくらぎの横変位または軌道長手方向の変位, f_0 は最終道床抵抗力, a 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。

(2) ランダムな通り変位の設定

初期通り変位は次式の距離相関関数 $R(x)$ ¹⁾ に従うランダムな波形で与える。

$$R(x) = \sigma^2 e^{-\left(\frac{x}{d}\right)^2} \quad (2)$$

ここで, σ は通り変位波形の標準偏差, d は相関長であり, これらが座屈温度に与える影響を調べる。

(3) MCS による座屈温度の確率特性評価

生成した軌道モデルに温度応力を与え, 弧長増分法²⁾による解析を多数回行い, 飛び移り座屈温度と最低座屈温度の確率密度関数を作成する MCS を実施する。文献 1) では確率密度関数の推定にベータ分布を適用したが, 本研究では, よりデータ分布に適合する事が確認されたカーネル密度推定を適用する。 n 個のランダムデータ $x_i (i=1, \dots, N)$ から確率密度関数 $p(t)$ は次式で表される。

$$p(t) = \frac{1}{Nh\sqrt{2\pi}} \sum_{i=1}^N e^{-\frac{(t-t_i)^2}{2h^2}}, \quad (3)$$

$$h = \sigma_t \left(\frac{4}{3N}\right)^{1/5}$$

ここで, σ_t は x_i より求めた標準偏差である。

3. 解析結果

(1) 初期通り変位波形の標準偏差と相関長が座屈余裕度に及ぼす影響

前述の手順で MCS を行い, 式 (2) で設定する標準偏差と相関長が座屈余裕度に及ぼす影響を求めた。図 2 には標準偏差が座屈余裕度に与える影響を示し, 図 3 には相関長が座屈余裕度に与える影響を示す。

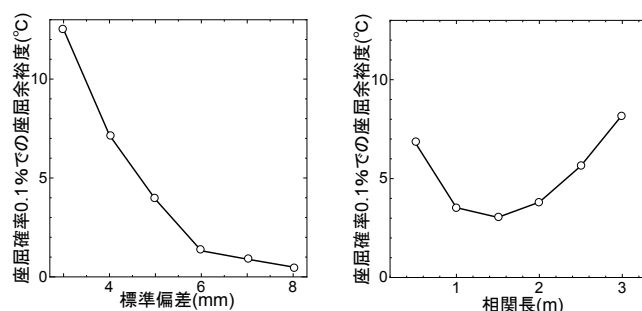


図 2 通り変位の標準偏差が座屈余裕度に及ぼす影響 (座屈余裕度: 0.1% の座屈余裕度)
図 3 通り変位の相関長が座屈余裕度に及ぼす影響 (座屈余裕度: 0.1% の座屈余裕度, $d=1.7\text{m}$)

図 2 より, 標準偏差の増加と共に座屈余裕度は減少しており, 初期通り変位に対する飛び移り座屈温度の鋭敏性を確認

キーワード: 通り変位, 軸力, 道床横抵抗力

連絡先: 〒 950-2181 新潟市西区五十嵐二の町 8050 番地 TEL: 025(262)7274

出来た。なお、実軌道における初期通り変位波形の標準偏差はこの範囲の値をとると考えられ、管理法を検討する際には標準偏差に対する鋭敏性を考慮する必要がある。図3より、座屈余裕度は相関長が1.5m付近で最小値をとり、その値から遠ざかるほど増加する事が分かる。ここで、図2で設定された相関長は実軌道から推定された値($d=1.7\text{m}$)であり、最小値を取った $d=1.5\text{m}$ に近い。よって、図2は各標準偏差における最小値を概ね示しており、相関長がいかなる値であっても、各標準偏差の下で最低限確保できる座屈余裕度は図2より把握出来る事が分かる。

(2) 最終道床横抵抗力の空間変動が座屈確率特性に及ぼす影響

軌道の道床横抵抗力の空間変動特性が座屈安定性に与える影響について調べるため、式(1)の最終道床横抵抗力に次式でバラツキを与えた。

$$f_{0T_i} = \bar{f}_{0T} \left\{ 1 + 0.5 \sin\left(\frac{2\pi L_i}{\lambda}\right) \right\} \quad (4)$$

ここで f_{0T_i} は軌道モデルの左端から i 番目のまくらぎにおける最終道床横抵抗力、 $\bar{f}_{0T}$ はそれらの平均値で5.5kN/本と設定、 λ は空間変動波長である。

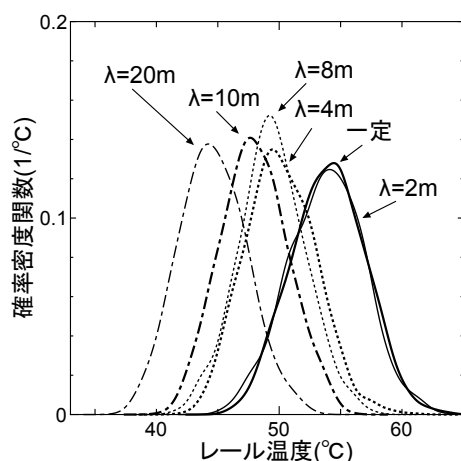


図4 最終道床横抵抗力の変動波長が飛び移り座屈の確率密度関数に及ぼす影響 ($\sigma=5\text{mm}$, $d=1.7\text{m}$)

式(4)の変動波長を2~20mまでの範囲で設定し得られた飛び移り座屈温度の確率密度関数を図4に示す。図4より、 λ の増加と共に分布は低温度側へ移動している。ただし、 $\lambda=2\text{m}$ の結果は最終道床横抵抗力一定のものと比べ影響は見られず、 $\lambda=4\text{m}$ において急激に変化している。また、 $\lambda=4\sim 10\text{m}$ の範囲における変化は、 $\lambda=2\text{m}$ と4mのケース間に比べてやや小さく、それ以上の波長においても緩慢である。ここで、本軌道モデルの分岐座屈時の理論座屈波長は3.9mであり、 $\lambda=4\text{m}$ に近い。軌道座屈過程では、この点を起点にたわみの増大と共に長波長の変位波形成分が成長するため、 $\lambda=4\text{m}$ 以下では影響を与えなかったものと解釈できる。

(3) 最終道床横抵抗力のバラツキが座屈確率特性に及ぼす影響

最終道床横抵抗力が軌道長手方向に一定値をとり、軌道毎にランダムな値を取る場合を想定し、最終道床横抵抗力の確率密度関数 p_f を次の4次のベータ分により与えた。

$$p_f(f_{0T}) = \frac{15}{16f_{max}} \left\{ 1 - \left(\frac{f_{0T} - \bar{f}_{0T}}{f_{max}} \right)^2 \right\}^2 \quad (5)$$

$$|f_{0T} - \bar{f}_{0T}| \leq f_{max}$$

ここで、 f_{max} はMCSにおける最終道床横抵抗力の変動幅である。

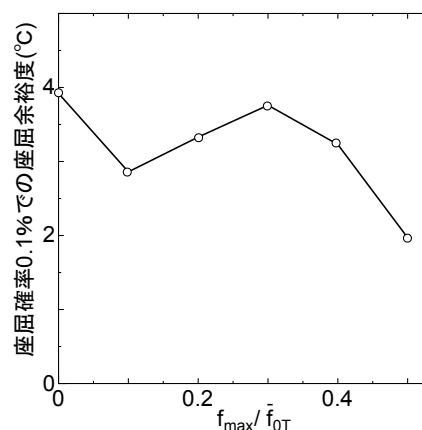


図5 最終道床横抵抗力の変動幅が座屈余裕度に及ぼす影響 ($\sigma=5\text{mm}$, $d=1.7\text{m}$)

$\bar{f}_{0T}=5.5\text{kN/本}$ の下、 $f_{max}/\bar{f}_{0T}=0.5$ までの座屈確率0.1%における座屈余裕度の関係を図5に示す。図より、変動幅 $f_{max}/\bar{f}_{0T}=0.4$ 以下の範囲では、座屈余裕度は3~4℃で推移している。しかし、座屈確率0.1%におけるMCSの計算精度は1℃程度であるため¹⁾、 $f_{max}/\bar{f}_{0T}=0.4$ 以下の変動は概ね誤差範囲内であると考えられる。よって、座屈余裕度における有意な低下は $f_{max}/\bar{f}_{0T}=0.4$ 以上で発生しており、最終道床横抵抗力の変動幅が極端に大きなケース以外では、それが座屈余裕度に及ぼす影響は比較的小さいと思われる。

4. おわりに

軌道の初期通り変位の標準偏差と相関長が座屈余裕度を与える影響について調べた結果、標準偏差の影響が大きく、管理法を検討する際にはその鋭敏性を考慮する必要がある事が分かった。また、道床横抵抗力のバラツキが座屈余裕度を与える影響について調べた結果、空間変動の特性に関しては波長が4m以上のものから影響が大きく出る事が分かり、変動幅に関しては $f_{max}/\bar{f}_{0T} \leq 0.4$ の範囲においてはその影響は比較的小さいという事が分かった。

謝辞 本研究は科研費(20K04661)の助成を受けたものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 岩崎英治, 松野純一, 長井正嗣: 弧長法のための一反復解法と弧長自動設定法, 応用力学論文集, Vol.5, pp.207-216, 2002.