

日射に関する諸条件と中立温度低下域との関係性について

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

1 はじめに

ロングレール軌道では、レール温度上昇時の線膨張がまくらぎの抵抗力によって妨げられ温度応力が生じる不動区間が存在するため、座屈の発生を未然に防止するためには適切な軸力管理が不可欠である。そこで、レール中立温度の挙動を把握するため、日陰の移動によってレールの日射条件が空間的・時間的に変化し、ふく進が生じる場合に着目した研究を行ってきた¹⁾。

本研究では、日陰に起因して座屈リスクが高まる事象について調べるため、中立温度低下域でレール温度が上昇する（相対温度が増大する）状況について2ケース検討した。

2 解析手法^{1,2)}

2.1 解析モデルの概要

レール温度解析とふく進解析から成る数値解法²⁾を用いて、中立温度分布の空間・時間変動を求める。

レール温度 T の熱伝導方程式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{C_R \rho A} \{ \gamma Q_S - h S_R (T - T_a) - \epsilon S_R (T^4 - T_a^4) \} \quad (1)$$

ここで、 κ は熱伝導係数、 C_R は比熱、 ρ は質量密度、 A はレール断面積、 h は空気の熱伝導率、 T_a は気温、 S_R はレール断面の周長、 ϵ はレールと周辺環境との間での輻射に関する係数、 Q_S は太陽輻射エネルギーに関する値であり、 γ はその吸収率である。式(1)を有限要素で離散化し、時間積分により逐次解くことで、実際の気温から同時刻のレール温度を算出する。

ふく進解析は、前述したレール温度解析によって得られたレール温度 T と、レール拘束力から得られたひずみに基づき、温度伸縮と弾性変形を考慮したレールのつり合い式を離散化して得た軌道長手方向変位から中立温度を得るのである。レールに作用する軸力 N は次式で与えられる。

$$N = EA(-\varepsilon + \alpha \Delta T) \quad (2)$$

ここで、 ε は伸びひずみ、 EA はレールの伸び剛性、 α は線膨張係数である。ふく進解析において ΔT は、設定温度を基準とした相対温度とし、軸力 N は圧縮を正とする。なお、レールは締結部において道床縦抵抗力によって拘束されるものとする。道床縦抵抗力は非弾性履歴モデルで与え、

次式で相対変位と拘束力の関係を与える。

$$f_s = f_{S0} \frac{u}{u_a + |u|} \quad (3)$$

ここで、 u はレールの軸方向変位、 f_s は道床縦抵抗力、 f_{S0} は最終道床縦抵抗力である。また、 u_a は f_s が $f_{S0}/2$ となるときのレール軸方向変位に相当する値である。本解析においては、まくらぎ1/2本（レール1本）当たり $f_{S0} = 4000\text{N}$ 、 $u_a = 1\text{mm}$ で与え、Newton-Raphson 法に基づいた反復計算により解を求めた。

2.2 解析条件

レール両端の可動区間の干渉を避け、十分な不動区間長を確保するため、まくらぎ4000区間（2400m）をモデル化し、これを解析対象とした。なお、レール両端変位は拘束せずに、道床縦抵抗力が作用する下での伸縮を許容した。レール敷設箇所は新潟市を想定し、北緯38°、東経139°、標高25mとして日射量を求めた。直線軌道（レール）に沿って一次元座標 x を設定し、東西方向とのなす角 Θ （反時計回りが正）が0°のときの西端を原点とした。また、まくらぎ間隔は0.6m、50kgNレールを対象に表2.2のとおり各種パラメータを設定した。日陰区間の設定に際して解析区間中央、レールからの距離 $d = 20\text{m}$ の位置に建物を設置し、これによってレール上に生じる日陰の幅 B を30m、建物の高さは無限とした。解析においては断りがない限り、日中は常に快晴とし、日射を遮るものは建物以外に無いものとする。2010年8月1日～2011年7月31日の一年間を解析対象期間とし、気象庁による新潟市の気温の観測値を用いた。レールの設定温度は解析開始時点の気温とし、8月1日午前1時の気温である28.4°Cに設定した。

表-1 解析パラメータ

$C_R \rho$	(J/km ³)	3.93×10^6
κ	(m ² /h)	0.0458
A	(m ²)	64.05×10^{-4}
γ		0.8
h	(W/km ²)	10.0
ϵ	(J/hm ² K ⁴)	1×10^{-4}
E	(GPa)	206
α	(K ⁻¹)	12×10^{-6}

3 解析結果

3.1 一時的な長時間の曇天が中立温度分布に及ぼす影響

中立温度低下域で相対温度が増大する恐れがある事象として、一時的に曇天が発生する場合は挙げられる。雲によって日射が遮られ、レール全体が一様に直達日射を受けていない間、曇天直前の日陰区間に生じていた中立温度低下域は残留する。曇天が数時間継続している間に太陽が移動することに伴って日陰区間も移動するため、曇天終了直後には中立温度の残留部が日射を受けてレール温度が急上昇し、局所的に軸力が増加する状況が想定される。

計算開始から8月15日12時までは常に快晴で、その後15時までの3時間にわたり曇天が続いた場合の中立温度と軸力の分布を求めた。建物位置付近の結果を図-1および図-2に示す。図-2に示した日向区間の軸力は、曇りが生じた場合と快晴の場合それぞれの15時時点の値である。

中立温度低下域の残留分布の影響によって、日陰区間(15時)左側では日向区間にも関わらず相対温度は約 -2.5°C となっており、局所的な温度増加が発生したと言える。以上を踏まえ曇りが生じた場合の15時の軸力分布を図-2で確認すると、相対温度増加区間の値は日向区間のそれを約30kN上回っており、日陰が軸力増加を惹き起こすことが示された。ただし、このときの軸力は全不動区間に亘って200~270kN前後の小さな値にとどまっており、危険性は増加するとは考え難い。

3.2 軌道の敷設方向が中立温度分布に及ぼす影響

軌道の敷設方向の観点から、中立温度低下域が日射を受けて相対温度が増加する事象について引き続き検討を行う。 $\theta > 0^{\circ}$ の場合、太陽がレールを跨いだ時点から日陰区間がレール上に存在しなくなり、以降はレール全域が直達日射を受け続ける。建物付近における中立温度の低下域は一定の残留が予想され、日最高気温に達する頃に相対温度が局所的に大きくなる可能性がある。

終日快晴の条件下において、相対温度の増加が最も顕著であった $\theta = 115^{\circ}$ の場合と、その比較対象として $\theta = 0^{\circ}$ の場合の8月15日のレール温度と中立温度、軸力の分布を図-3、図-4にそれぞれ示した。前者は16時、後者は14時36分の値で、これはそれぞれの条件下で日最大軸力となる時刻である。 $\theta = 115^{\circ}$ の場合にはレール全域が高温になったことにより、建物付近の中立温度低下域において相対温度が増加し、建物の日陰が軸力増加につながる事象が確認された。建物の日陰の影響を受けていない箇所と比べて約30kN大きな圧縮軸力が建物の北側で発生しており、軌道の敷設方向次第では日陰の存在に起因する局所的

な軸力増加が発生することが分かった。

4 おわりに

中立温度が、日陰区間において低下し、日陰の非定常性によって残留する性質を踏まえ、中立温度低下域において相対温度が局所的に増大する2つの事象について調べた。一時的な曇天が一定時間生じる場合には、建物位置付近において日陰起因の軸力増加が認められた。しかし曇天中にレール温度が低下し、蓄積していた圧縮力が解放されることで、曇天非発生時に比べてレール全域で軸力低下が発生するため、座屈誘発につながる恐れはないと考えられる。これに対して、軌道の敷設方向による日射条件の変化が惹き起こした約30kN(レール温度換算で約 2°C)の局所的な軸力増加に関しては、全軸力が400kN前後の値をとっているため、座屈に対して一定の影響を及ぼす可能性がある。現行の管理基準下では、敷設方向による影響に対し取り立てて注意を払う必要は無いと推察されるが、このような日射条件が座屈発生リスクに及ぼす影響については、さらなる検討が必要と考えられる。

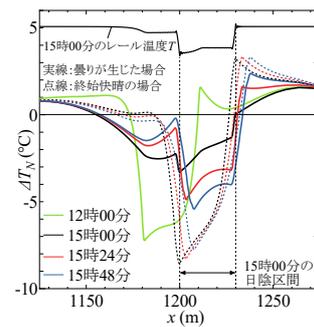


図-1 曇天後の建物付近における中立温度分布

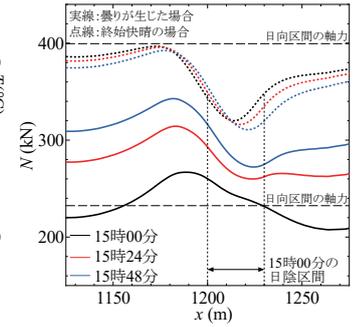


図-2 曇天後の建物付近における軸力分布

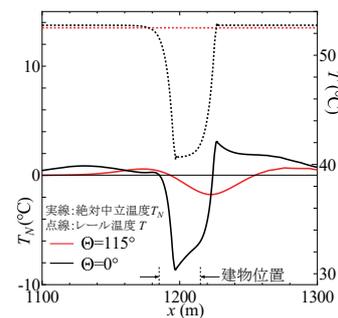


図-3 軌道の方角が中立温度およびレール温度分布に及ぼす影響

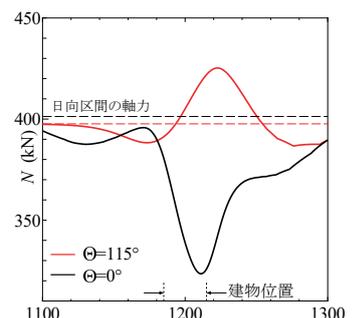


図-4 軌道の方角がレール軸力分布に及ぼす影響

参考文献

- 1) 高木 祐子, 阿部和久, 紅露一寛: 建物の日陰の移動がレール中立温度に及ぼす影響, 土木学会論文集, Vol.80, No.15, 23-15007, 2024.
- 2) 阿部和久, 桑山卓也, 元好茂: 空間的・時間的な温度変化を受けるロングレールの軸力分布解析, 鉄道力学シンポジウム論文集, No.16, pp.101-108, 2012.