

# 熱伝導解析を用いた鉄道路盤の凍結深さの評価

路床，凍上，地温

鉄道建設・運輸施設整備支援機構 国際会員 青木一三  
 鉄道総合技術研究所 国際会員 小島 謙一  
 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 正会員 丸山 修  
 複合技術研究所 国際会員 堀井 克己

## 1. はじめに

寒冷地に建設される新幹線の鉄道路盤は凍上に関する検討が必要であり，確率凍結指数を用いて修正 Berggren 法による設計を基本としている。しかし，この方法は 1 次元の熱伝導解析に基づくことから，周辺の環境や路盤の構造の違いにより適切な評価が可能かどうかの検証が必要と考えられる。本検討は，水平地盤および切土形状の地盤において，コンクリート軌道路盤を対象にして 2 次元熱伝導解析を行い，路床凍結の発生や周辺地盤からの熱の回り込みの影響などを 2 次元的に評価したものである。

## 2. 解析条件

解析は，低温の回り込みの影響の把握に主眼を置いて，周辺地盤の地形的な条件を変えて 2 次元熱伝導解析を行った。解析モデルは，水平地盤と切土地盤の 2 種類とし，解析領域は左右対称性より路盤中心より右半断面とし，水平地盤では水平に 20m，切土地盤では 30m とした(切土のり面勾配 1 : 1.5，高さ 10m) (図 1)。下方領域は地温が年間大きく変化しない約 10m の深度までとした。コンクリート路盤と粒調砕石層の厚さは，それぞれ 30cm，50cm とした(図 2)。粒調砕石層の厚さは，修正 Berggren 法<sup>1)</sup>で算定すると 48cm を得るが，FEM 解析では 50cm とした。ただし，算定条件は，コンクリート路盤厚 30cm，十和田の 100 年確率の凍結指数 495 ·day，凍結期間 125 日，コンクリート，粒調砕石，ロームの熱定数は表 1 のとおりである。

気温条件は，前述の十和田の平均気温データから算定された 100 年確率の凍結指数 495 ·day であり，平均凍結温度 -4 ，地中深部温度 9.4 である。図 3 に気温の時間変化を示す。

地山，路盤表面には，凍結指数に対応する温度を地表面に与えた。初期温度は，気温変化に対応する地中の温度変化に関する地温を用いて，年平均気温から定まる初期温度分布を仮定した。解析は非定常 FEM 解析とし，境界条件は，地表面で凍結指数を凍結期間で除した平均温度とし，地中深部で年平均気温とした。また，側方は断熱条件とした。解析に用いた物性値は既往の検討より表 1 のように設定した。

表 1 熱定数

| 材料     | 密度<br>g/cm <sup>3</sup> | 熱伝導係数<br>MJ/m·day· | 熱容量<br>MJ/m <sup>3</sup> · | 潜熱<br>MJ/m <sup>3</sup> | 熱拡散係数<br>m <sup>2</sup> /day |
|--------|-------------------------|--------------------|----------------------------|-------------------------|------------------------------|
| コンクリート | 2.45                    | 0.221              | 2.57                       | 0                       | 0.086                        |
| アスファルト | 2.40                    | 0.125              | 1.88                       | 0                       | 0.066                        |
| 粒調砕石   | 2.10                    | 0.0445             | 1.90                       | 43.5                    | 0.023                        |
| ローム    | 1.67                    | 0.0423             | 3.91                       | 290                     | 0.011                        |

2 次元熱伝導の支配方程式は式(1)で，境界条件は式(2)で与えられる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \lambda \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (1) \quad S_1 \text{ で } T = T_B, S_2 \text{ で } k \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k \frac{\partial T}{\partial y} n_y + q = 0 \quad (2)$$

ここに， $T$ ：地温， $x, y$ ：座標系， $\lambda$ ：熱容量， $k$ ：熱伝導係数， $n_x, n_y$ ：方向余弦， $q$ ：熱流出量。なお，解析については，時間に対する数値積分は陰解法を適用した。ただし，陰解法は時刻刻みに関して無条件安定である。

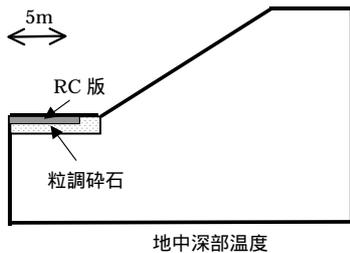


図 1 切土断面

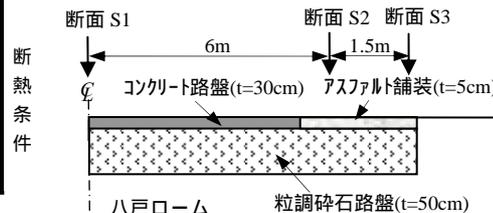


図 2 路盤断面と温度変化をみた断面

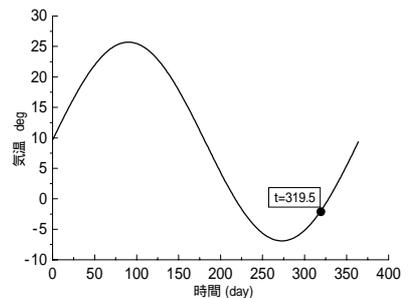


図 3 気温条件(十和田，100 年確率)

Evaluation of frost thrust of railroad sub-grade by thermal conductivity analysis

H. Aoki<sup>1)</sup>, K. Kojima<sup>2)</sup>, O. Maruyama<sup>1)</sup> and K. Horii<sup>3)</sup> <sup>1)</sup> Japan Railway Construction, Transportation and Technology Agency,

<sup>2)</sup> Railway Technical Research Institute, <sup>3)</sup> Integrated Geotechnogy Institute

### 3. 解析結果と考察

路盤に凍結深度が深く侵入する時間(319.5日)における水平地盤と切土地盤の路盤近傍の地温分布を図4,5に示す。これより、地温コンターは概ね地表面に平行に分布し、コンクリート路盤の端部(中心から6m離れ)から地山部(中心から7.5m離れ)にかけて地温分布は漸変する。路盤部で凍結線が侵入する深さは、路盤中心からコンクリート路盤の端部にかけて一様であるが、コンクリート路盤端部から地山との境にかけて浅くなる。コンクリート路盤で侵入深さが大きいのは、コンクリートの熱伝導係数が地盤の熱伝導係数よりも大きいことによる。このように、路盤部の地温分布は、水平地盤と切土地盤ではほぼ同じ分布となり、路盤部に及ぼす地形の影響は殆ど無いことが分かる。

水平地盤に対する地中温度の時間変化を図6に示す。左から路盤中心(断面S1)、コンクリート路盤端部(断面S2)、路盤と地山の境界(断面S3)の3断面である。この結果より、温度変化は深さが増すにつれて、温度振幅が減少し位相も遅れてくる挙動が分かる。粒調砕石と路床土の層境の深さ80cmでの地温変化を見ると、路盤中心(断面S1)では $t=300$ 日の前後で零度を下回っている。コンクリート路盤端部を通る断面S2の深さ80cmでは、最低温度はほぼ0である。地山との境の断面S3の深さ80cmでは最低温度は+1.5であり、0を下回らない。断面間の温度差は表面の構造の違い(コンクリート版、アスファルト舗装、地山)によるものである。

解析に与えた粒調砕石層の厚さは修正 Berggren 法によるものである。2次元解析の結果では、路盤中心部で凍結線が路床部に少し侵入する結果になった。これは、修正 Berggren 法では気温波形を一様な波形(矩形波)で与えられるのに対して、2次元 FEM 解析は実際の気温波形に近い正弦波で与えていることによるものと考えられる。

切土地盤の温度変化は図示を省略しているが、路盤温度の時間変化や位相の遅れなどは、水平地盤とほとんど変わらない結果になっている。

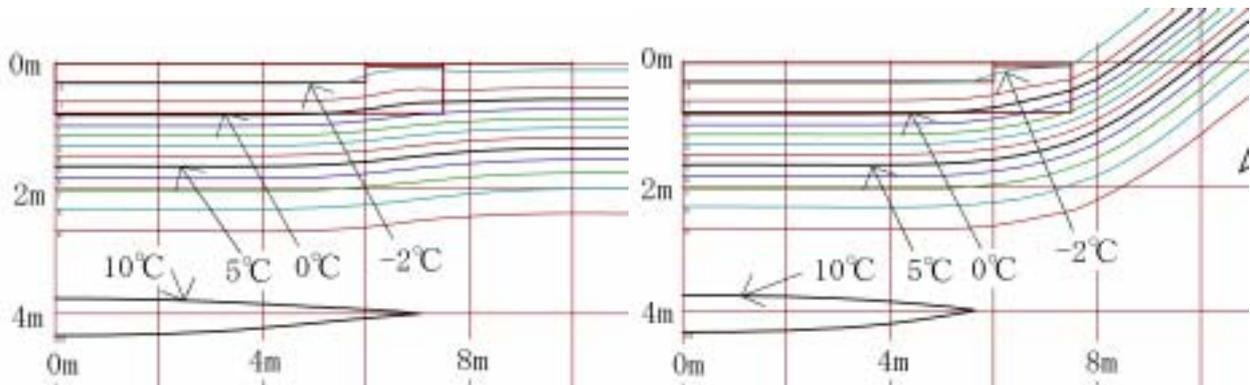


図4 水平地盤の路盤付近の地温分布

図5 切土地盤の路盤付近の地温分布

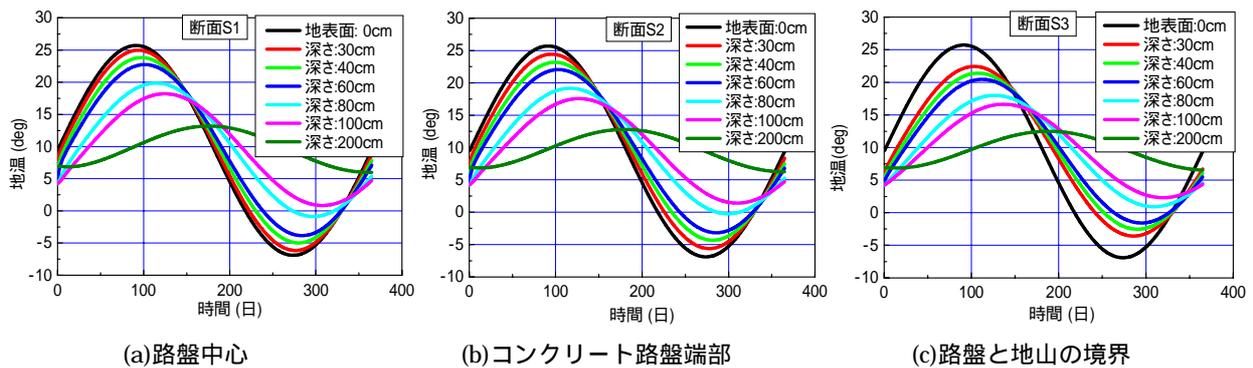


図6 水平地盤における地温の時間変化

### 4. まとめ

鉄道の切土構造の路盤を対象として、凍上の設計における周辺環境の影響について2次元熱伝導解析を行い、検討した。その結果、路盤部以外からの冷気の侵入による凍結の進行の影響は小さいことがわかった。したがって、1次元モデルでの検討である修正 Berggren 法による設計の妥当性が検証された。また、本検討モデルにおいても修正 Berggren 法による凍結深度と FEM 結果は概ね整合していることも確認された。今後は、実際の計測データとの検証を行い、より精度の高い設計手法および定数の評価を行っていく予定である。

#### 【参考文献】

- 1) 道路土工 排水工指針, 日本道路協会, 1987.