

地盤研究室 M2 森山 哲成
 担当教授 杉本 光隆
 陳 劍

1.はじめに

地盤凍結工法（以下:AGF）は、凍土の持つ優れた遮水性と強度を利用し、一時的・人工的に凍土を造成させて構造物を安全かつ確実に築造する工法である。地下空間の利用が進む都市部を中心に、地下鉄工事やシールド工法の発進到達時の補助工法等に利用されているように、高度な施工技術が確立されている。しかし、凍土壁を造成する際には、熱伝導、水浸透、相変化といった様々な物理現象が互いに影響をおよぼし合い複雑であることから、これらの連成解析を考慮したモデルは確立されていない。本研究では、相鉄・東急直通線羽沢トンネルのシールドマシンテール部換装防護凍結工を対象現場とし、多孔質媒体における熱伝導と水浸透理論に基づいて凍土造成予測を正確に行う数値モデルを確立することを目的とする。

2.羽沢トンネル凍結工

2.1.施工目的

相鉄・東急直通線羽沢トンネル工事において、土圧式シールド機（シールド外径 φ10,460mm）テール部の換装工事を行う際の防護を目的として凍土の利点を活かして AGF により行うものである。

2.2.設計条件

凍結対象地盤の容積含水率を $P=0.5\text{m}^3/\text{m}^3$ 、地盤温度を $\theta_{\infty}=18^{\circ}\text{C}$ とする。その際の飽水土の熱的性質を表-1 に示す。地下水中に塩分はなく、自然地下水流速はきわめて遅いことから凍結に影響のないものとし、凍土造成期間は放射凍結管による凍土造成 35 日間であった。

2.2.1.必要凍土圧

凍土壁にはシールド下端で水圧 p_l が作用した時、設計基準強度を σ_u 、設計安全率を $F_s=1.2$ とすると必要凍土厚 $t(\text{m})$ は(1)式より求まる。

$$t = \sqrt{\frac{1.2}{\sigma_u} \times \frac{p \times l^2}{2}} \quad (1)$$

ここで、梁長 $l=2.83\text{m}$ 、設計曲げ強度を $\sigma_u=1650(\text{kN}/\text{m}^2)$ (砂凍土;凍土温度 -5°C)として上式に代入すると $t=1.16(\text{m})$ となる。

表-1 飽水土の熱的性質 ($P=0.5\text{m}^3/\text{m}^3$ の場合)

飽水土の熱的性質	凍結前	凍結後
密度 ρ (kg/m^3)	1900	1840.80
比熱 C ($\text{kJ}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$)	1.7802	1.2016
熱伝導率 λ ($\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$)	1.6397	2.8077
温度伝播率 k (m^2/s)	0.4848×10^{-6}	1.2693×10^{-8}
凍結潜熱 L (kJ/kg)	90.393	-

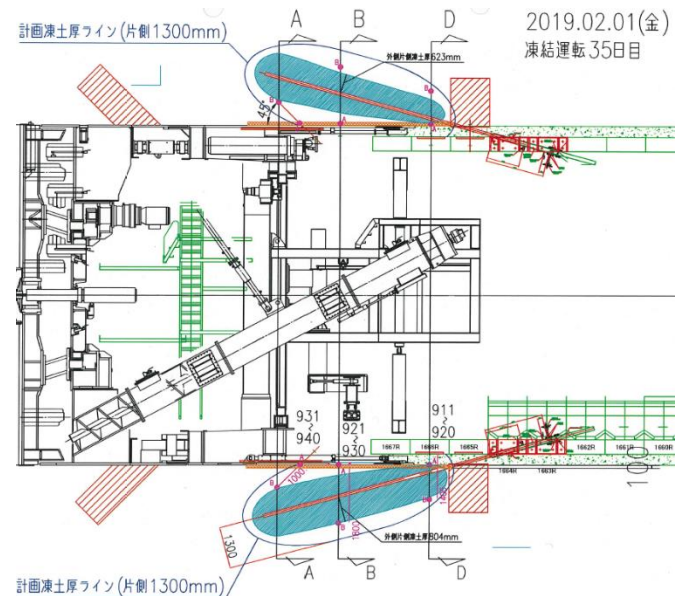


図-1 凍土防護範囲縦断面図

AGF では止水凍土が確実に止水機能を果たす温度を -5°C 以下と規定している。本設計では施工誤差等を考慮し凍土壁が連続したことを確認でき、かつ温度が -5°C 以下を確保できる厚みとして凍結管埋設間隔の 75% 以上の片側造成厚みを標準的な必要厚みとしている。凍結管埋設間隔が 0.8m であることから片側凍土必要厚 $t=0.6(0.8 \times 0.75)\text{m}$ となる。

2.2.1.测温断面

図-1 に凍土防護範囲と测温断面を示す。测温が行われた断面は図-1 に示される A-A, B-B, D-D 断面であり、测温箇所は A-A 断面ではシールドマシン側の 10 箇所、B-B, D-D 断面ではシールドマシン側及び地山側のそれぞれ 20 箇所にて测温された。

3. 解析条件

3.1. 熱の流れの基本式

温度場の方程式は以下の対流をとる多孔質媒体の水/氷の相変化を考慮したエネルギー保存の原理で表現することができる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_f \frac{\partial T}{\partial x} \right) - C_w \rho_w u_w \frac{\partial T}{\partial x} = C_f \frac{\partial T}{\partial t} - L_f \rho_i \frac{\partial \theta_i}{\partial t} \quad (2)$$

ここで λ_f , T , x , t , u_w , L_f , θ_i はそれぞれ土の熱伝導率 (W/cm°C), 温度 (°C), 位置座標 (cm), 時間 (sec), 水の浸透ベクトル, 凍結潜熱 (J/g), 容積含水率 (cm³/cm³) を示している. C_f , C_w は土, 水の比熱 (J/g°C), ρ_w , ρ_i は水, 氷の密度 (g/cm³) である. 本研究では, 温度と氷の比率は次式で表される経験式²⁾を使用した.

$$\theta_i = n \cdot S_i \quad (3)$$

$$S_i = \begin{cases} [1 - (T - T_0)]^\alpha, & T \leq T_0 \\ 0, & T > T_0 \end{cases} \quad (4)$$

ここで n は間隙率, S_i は細孔の体積に対する細孔の氷の体積の比率を表しており, T_0 は初期凍結温度, α は凍結係数である.

3.2. 水の流れの基本式

水の流れの基本式は, 温度の勾配による水分移動を説明した Harlan モデルを使用した. このモデルは, 凍土中の水分移動を説明するためには, 凍土中にも動水勾配が存在しなければならないとしている.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial \theta_w}{\partial x} \right) - \frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{\partial \theta_i}{\partial t} = \frac{\partial \theta_w}{\partial t} \quad (5)$$

ここで, D は水分拡散係数 (cm²/sec), θ_w は容積含水率 (cm³/cm³) である. 式(5)において, 左辺第1項は含水比勾配による, 第2項は含水比率の変化による水の流れを表している.

4. 凍土造成シミュレーション

4.1. 二次元検討

A-A, B-B, D-D のそれぞれの断面で測定された実測値とモデルの測温平均値を図-2 に示す. 解析値と実測値との最大差は A-A 断面における 4.4°C, 最小差は B-B 断面地山側の 0.2°C となっている. また, それぞれの凍土造成過程において, 凍結開始後 35 日まで, 実測値と解析値の間で同様の経路で温度下降が確認された.

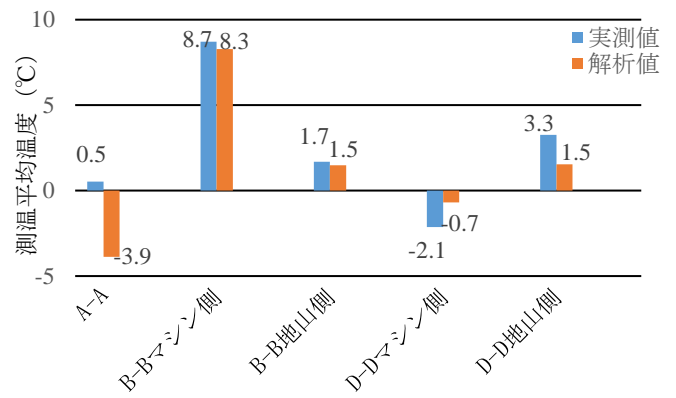


図-2 解析値-実測値の比較

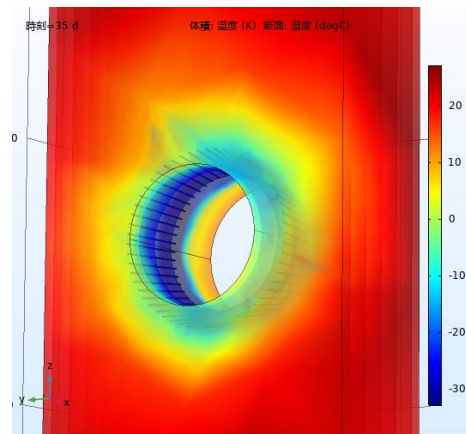


図-3 三次元凍土造成予測 (35 時間経過後)

4.2. 三次元検討

凍土造成後 35 日経過後の三次元予測を図-3 に示す. 約 1 週間で凍土柱が形成され, 20 日経過後にはそれらの凍土柱が連続した状態となる. 35 日経過後には凍土壁が設計厚以上を保ち, 地下水流を遮断する状態となる. 三次元モデル化により, 凍土壁造成過程を段階的に可視化できる.

5. 結論

本研究から得られた結論は以下のとおりである.

- ① 連成解析モデルによる凍土造成予測は二次元的に妥当であり, 三次元的に表現することが可能である.
- ② 凍土造成工程後期では, 潜熱効果が顕熱効果より大きな影響をおよぼすため, 凍結潜熱を調整することで, 実測値と解析値を, 整合させることが可能である.

[参考文献]

- 1) 凍土分科会, 凍土の知識-人工凍土壁の技術- 日本雪氷学会誌雪氷, 76 巻 2 号, 179-192, 2014.3.
- 2) Zhou, J.Z., Li, D.Q., Numerical analysis of coupled water, heat and stress in saturated freezing soil. Cold Reg. Sci. Technol. 72, 43-49. 2012.