

飽和地盤凍結の潜熱処理方法による数値解析の評価

Evaluation of saturated ground freezing simulation with different latent heat treatments

○ 菊地駿¹ 斎藤広隆² 大石雅人³○ Shun Kikuchi¹ Hirotaka Saito² Masato Oishi³

1. はじめに

地盤凍結工法は凍土によって地盤が高い強度と止水性が確保されることを利用して、トンネル掘削発進時の防護などに用いられる地盤改良工事の一種である。日本は諸外国に比べて地中温度が高く、地下水流による上流部からの熱の供与が凍土形成により大きな影響を与える。数値解析によってその影響を検査するためには水の相変化による非線形性やそのときの物性値の与え方が重要となる。そこで潜熱処理のひとつである温度回復法を用いた数値計算ソルバーを開発し、凍結過程の数値解析における潜熱の取り扱い手法について検討した。

2. 理論

飽和水分移動下の凍結過程における熱移動の支配方程式は、凍結に伴う潜熱の放出を考慮して次式で与えられる。

$$C_p \frac{\partial T}{\partial t} - L_f \rho_{ice} \frac{\partial \theta_{ice}}{\partial t} = \nabla \cdot \left[\lambda_{ij}(T) \nabla T \right] - C_w \mathbf{q}_i \nabla T \quad (1)$$

また、水分移動の支配方程式には次式を用いる。

$$\frac{\partial \theta_l}{\partial t} + \frac{\rho_{ice}}{\rho_w} \frac{\partial \theta_{ice}}{\partial t} = \nabla \cdot \left[K_{lh} (K_{ij}^A \nabla h + K_{iz}^A) \right] \quad (2)$$

ただし、 C_p 、 C_w は土壌全体、水の体積熱容量 [$J m^{-3} K^{-1}$]、 \mathbf{q}_i は液状水のフラックス [$m s^{-1}$]、 λ_{ij} は熱伝導率 [$W m^{-1} K^{-1}$]、 L_f は水の凍結潜熱 [$J kg^{-1}$]、 ρ_w 、 ρ_{ice} は水の密度 [$kg m^{-3}$]、 K_{lh} は液状水の透水係数 [$m s^{-1}$]、 K^A は透水係数テンソル [-]、 T は温度 [$^{\circ}C$]、 θ_l 、 θ_{ice} は体積含水率、体積含水率 [$m^3 m^{-3}$] である。数値解析の中で凍結・融解に伴う潜熱を扱う一つの方法である温度回復法 (TRM) では、ただし温度回復法では (1) 式左辺第二項を考慮せず温度解析を行い、その後凝固点からの温度低下量が潜熱として放出された量と同一とみなし凝固点まで温度を回復させる (西垣ら、1993)。また潜熱項を支配方程式に組み込んだ (1) 式を解くためには温度 T と含水量 θ_{ice} の関係式が必要となる。渡辺ら (2007) は、凍結過程に General Clausius-Clapeyron (GCC) 式を適用し、水分保持関数より不凍水量を絶対温度の関数として推定し含水量を与えている。また、Li et al. (2019) は凍結率 Fr を温度の指数関数モデル (Power モデル) として与えている。本研究では Galerkin 有限要素法で離散化し、陰解法を用い作成したソルバーで温度回復法に加えて、GCC モデルと Power モデルを用いた解析を行った。

3. 結果・考察

本研究では Fig. 1 に示す $15 \times 4.8m$ の領域に凍結管を (5, 2.0), (5, 2.8) の 2 点に配置し $-30^{\circ}C$ で冷却

1 東京農工大学大学院農学府 Graduated School of Agriculture, TUAT 2 東京農工大学大学院農学研究院 Institute of Agriculture, TUAT 3 株式会社精研 SEIKEN CO., LTD.
キーワード：凍結、数値解析

し、一様温度 18°C と圧力を平均流速が 0.1 m d^{-1} となるような定常流れ場となる境界条件を与えて計算を行った。Fig. 2 に示すように水分移動を考慮しない場合、TRM は他の手法に比べて 0°C 以下になる時刻が 1 日程度遅れることが確認された。同様の傾向が初期流速が 0.1 m d^{-1} の場合の Fig. 3 からも確認される。TRM ではその性質上、潜熱の処理が節点の温度が 0°C であるときのみ行われるため、時間に対する凍結率の増加の線形性が他の 2 つのモデルを用いた場合に比べて高く、潜熱の影響を受ける時間領域が狭くなる。一方 GCC モデルと Power モデルを用いた場合、潜熱の影響が長い時間続き、それに伴い熱拡散率の低下が長い時間続くため、Fig. 2 に示す熱伝導が支配する条件では熱拡散率の低下によって 0°C 以下になる時刻が遅れることが確認された。地下水流による移流の影響がある Fig. 3 では凍結管より下流側の 2 つの観測点において温度低下が早まっていることが確認された。これは凍結管周辺の低温状態が水流によって下流に移動する現象を再現できている。一方観測点 (5, 1.6) では、熱拡散のみの解析と比べて温度低下が 5 日程度遅れている。

4. 結論

TRM, GCC モデル, Power モデルを用いた数値解析を行い、凍結過程における潜熱の取り扱い手法について検討した。いずれの条件であっても TRM は短い時間で凍結が終了するが GCC モデルと Power モデルを用いた場合、潜熱がより長い時間影響を及ぼし、それに伴い凍結にかかる時間が長くなった。また比較的小さな流速条件与えた場合、凍結管の間の温度低下は大きく変動はしないが、凍土壁の成長には水分移動が大きく影響することが明らかになった。

引用文献

- Li Z. et al. (2019), *Tunnelling and Underground Space Technology*, **92**, p. 103035.
 西垣ら (1993), 土木学会論文集, **1993**(475), 39–48.
 渡辺ら (2007), 土壌の物理性, **106**, 21–32.

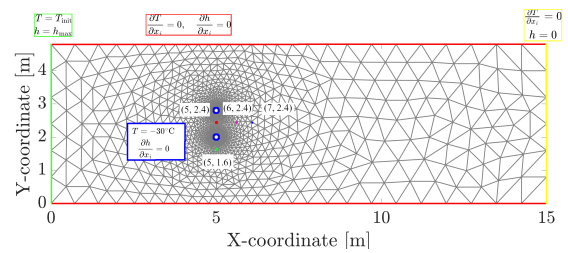


図 1: 計算領域の格子及び境界条件

Fig. 1: Numerical simulation domain geometry, mesh and boundary conditions

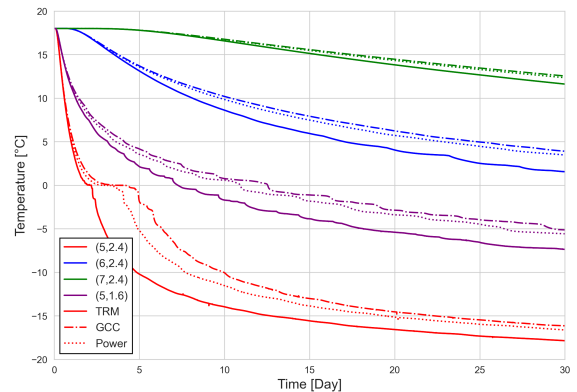


図 2: 水分移動を考慮しない各観測地点における温度の経時変化

Fig. 2: Temperature changes through time at each observation point without consideration of water transport

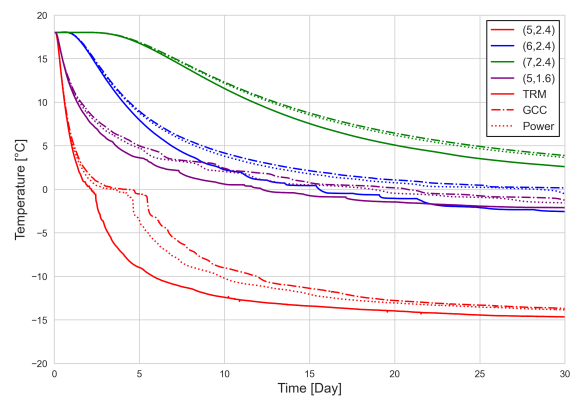


図 3: 初期平均流速 0.1 m d^{-1} の各観測地点における温度の経時変化

Fig. 3: Temperature changes through time at each observation point for an initial flux of 0.1 m d^{-1}