

地下水流れが土壌凍結に与える影響の数値解析による評価

Evaluation of the impact of groundwater flow on soil freezing by numerical analysis

菊地駿¹・斎藤広隆¹・大石雅人²

¹東京農工大学大学院・²株式会社精研

要旨 (Abstract) :

本研究は、数値解析を通じて地下水流れが土壌の凍結過程に与える影響を評価し、高志の判定式の有用性を検証した。水分・熱移動解析より凍土壁の造成時間を比較し、地下水流れが凍土壁の造成時間に与える影響を示し、高志の判定式の有用性を示した。

キーワード：土壌凍結, 地下水流れ, 数値解析

Key words: Soil freezing, Groundwater flow, Numerical analysis

1. はじめに

地盤凍結工法は、凍結によって地盤の強度向上や遮水を目的として行われる工法である。地下水流れがある飽和土壌を凍結させる場合には、上流部より常に地下水により熱の供給が行われるため、地下水流れがない場合と比べ凍土の造成が抑制される。現在、地盤凍結の現場では高志 (1969) の判定式より地下水流れに対して地盤凍結工法が適用できるか判定するが、この判定式による評価のみでは凍土壁の造成にどれだけの時間がかかるかや運転条件について評価することはできない。そのため、本研究では地下水流れが土壌凍結に与える影響を数値解析により解析するとともに、高志の判定式の有用性を検証する。

2. 方法

地下水流れを考慮した 2 次元飽和土中の凍結・融解過程における熱移動は、水の凍結潜熱を考慮した 2 次元熱伝導移流方程式で表される。

$$C_p(\theta_{ice})\partial_t T - L_f \rho_{ice} \partial_t \theta_{ice} \quad (1)$$

$$= \nabla \cdot [\lambda(\theta_{ice}) \nabla T] - C_w \mathbf{q}_w \nabla T$$

また、凍結に伴う間隙率の変化を無視した飽和土壌の水分移動は、凍結による氷の生成・消失を考慮した次式で表される。

$$\partial_t \theta_w + \frac{\rho_{ice}}{\rho_w} \partial_t \theta_{ice} = \nabla \cdot [K_f(\theta_{ice}) \nabla H] \quad (2)$$

ここで C_p , C_w はそれぞれ土壌, 水の体積

熱容量 [$\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$], λ は土壌の熱伝導率 [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$], L_f は水の凍結潜熱 [J kg^{-1}], ρ_{ice} , ρ_w はそれぞれ氷, 水の密度 [kg m^{-3}], θ_{ice} , θ_w はそれぞれ体積含水率, 体積含水率 [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$], K_f は土壌の透水係数 [m s^{-1}], T は温度 [$^{\circ}\text{C}$], H は全水頭 [m], \mathbf{q}_w は水分フラックス [m s^{-1}], t は時間 [s], λ , K_f の異方性および分散長は考慮しない。ここで、 \mathbf{q}_w はダルシー則に従い、(3) 式で表される。このとき、 K_f は未凍土の透水係数 K_s [m s^{-1}] が θ_{ice} に依存して変化するとし、(4) 式で表される (Hansson et al., 2004)。

$$\mathbf{q}_w = -K_f(\theta_{ice}) \nabla H \quad (3)$$

$$K_f(\theta_{ice}) := 10^{-10\theta_{ice}} K_s \quad (4)$$

(1) 式の T と θ_{ice} はいずれも未知数であるため、数値的に解くために T から θ_{ice} を求める必要がある。本研究では飽和土壌の液状水凍結過程と液状水の脱水過程が同一と仮定し、相平衡を表す一般化 Clausius-Clapeyron (GCC) 式 (Edlefsen et al., 1943) を用い、水分特性曲線のひとつである van Genuchten (VG) モデルに GCC 式を適用することで θ_{ice} を求める。

$$h = \frac{L_f}{g} \ln \frac{T^*}{T_f^*} \quad (5)$$

$$\frac{\theta_w(T^*) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(1 + \left| \alpha \frac{L_f}{g} \ln \frac{T^*}{T_f^*} \right|^n \right)^{-m} \quad (6)$$

$$\theta_{ice} = \theta_s - \theta_w - \theta_r \quad (7)$$

ここで、 h は不凍水圧力 [m]、 g は重力加速度 [ms^{-2}]、 T^* は絶対温度 [K]、 T_f^* は凍結開始温度 [K]、 θ_r 、 θ_s はそれぞれ残留含水率、飽和含水率 [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]、 α 、 n 、 m はそれぞれ VG モデルのパラメータである。ただし、本研究では (5) 式の h に起因する水分移動は考慮しない。(1)、(2) 式を数値的に解くために有限要素法を用いて解析を行った。また、高志の判定式より限界流速 \tilde{V} [ms^{-1}] は次のように表される。

$$\tilde{V} = \frac{2\pi\lambda_f}{lC_w} \frac{T_f - T_s}{T_\infty - T_f} F\left(\frac{2a}{L}, \tilde{b}_T\right) \quad (8)$$

$$F\left(\frac{2a}{L}, b_T\right) = \left[\frac{1}{\sqrt{1-b_T^2}} \left\{ \frac{\pi}{2} + \arctan \frac{b_T}{\sqrt{1-b_T^2}} \right\} + 1 - b_T - \frac{\pi}{2} \right] \left(\ln \frac{L}{2a} + \ln b_T \right)^{-1} \quad (9)$$

ここで、 λ_f は凍土の熱伝導率 [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]、 T_f 、 T_s 、 T_∞ はそれぞれ凍結開始、凍結管表面、上流から流れてくる地下水の温度 [$^\circ\text{C}$]、 l は凍土壁の代表長さ [m]、 a は凍結管の半径 [m]、 L は凍結管間の距離 [m]、 \tilde{b}_T はある $2a/L$ において (9) 式を最小化させる b_T の値である。図 1 に示す初期温度 18°C の $15 \times 4.8\text{m}$ の領域に対して、 $L = 0.8, 1.0, 1.2\text{m}$ の 3 条件で領域左端の境界圧力を、初期平均流速 q_{init} が $0 \sim 1\text{m d}^{-1}$ となるように変化させながら数値解析を実施し、凍土壁の造成時間を求めた。このとき、凍土壁の造成時間は、凍土壁の中心部における温度が 0°C 以下になる時間として計算した。

3. 結果

各条件での温度予測の結果をもとに、凍土壁の造成時間を計算した結果を図 2 のプロットに示した。いずれの条件であっても、 q_{init} が大きいほど凍土壁の造成時間が長くなることがわかった。 q_{init} と凍土壁の造成時間には反比例の関係があり、これを (10) 式を用いてフィッティングすると図 2 の実線となった。

$$IP(V) = a - b/(V - c) \quad (10)$$

ここで、 a 、 b 、 c はそれぞれフィッティングパラメータであり、各条件でのフィッティングパラメータを表 1、 \tilde{V} を図 2 の点線に示した。い

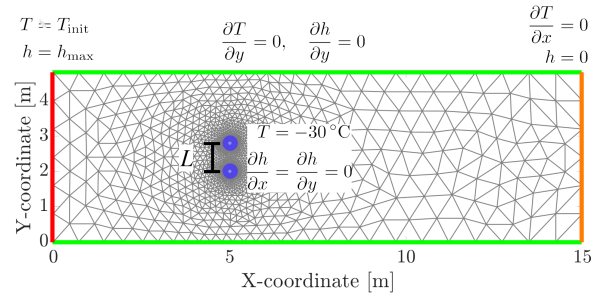


図 1 計算領域および境界条件

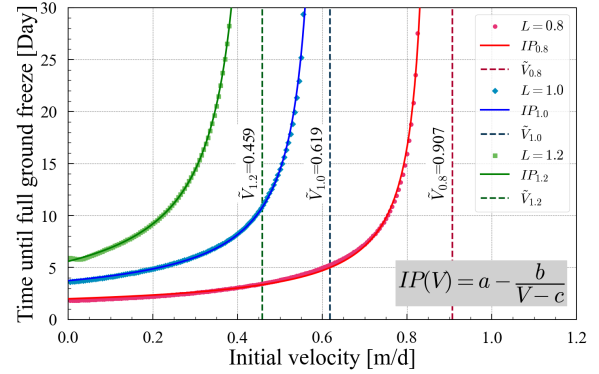


図 2 各 L における q_{init} と凍土壁の造成時間の関係性

表 1 各 L におけるフィッティングパラメータおよび \tilde{V}

L	a	b	c	\tilde{V}
0.8	0.784	1.040	0.866	0.907
1.0	1.421	1.404	0.608	0.619
1.2	0.909	2.147	0.459	0.459

れの条件であっても、 \tilde{V} よりも小さい流速で凍土壁の造成が限界となることがわかった。ここで、(10) 式が $V \rightarrow c$ となるとき、凍土壁の造成時間が無限大に発散するため、 c は数値解析より求められる限界流速といえる。表 1 より c は \tilde{V} より小さくなっているものの、ほぼ同等であり判定式は凍土壁の造成を評価する上で有用である。また様々な条件で (10) 式を適用することで、数値計算を必要としない均一土壌における凍土壁の造成時間を評価するための一般的な式を導出することが可能であると考えられる。

引用文献

- Edlefsen, N. et al. (1943), *Hilgardia*, 15(2), 31–298.
Hansson, K. et al. (2004), *Vadose Zone Journal*, 3(2), 693–704.
高志勤 (1969), 土木学会論文報告集, 1969(161), 51–58.