

III-345 準熱平衡時のアイスレンズの成長挙動

清水建設株式会社 正会員 赤川 敏
東京電力株式会社 正会員 山本 康博
" " 橋本 哲
" " 高橋由多加

1. はじめに

筆者らは凍結面の進行速度が遅い場合の土の凍上量を把握するため、実験に基づいて粘性土の凍上特性を検討してきた。今回、準熱平衡時（最終アイスレンズの成長時期）の凍上量を予測する実験式を導くことができたので、その概要を報告する。

2. 試験概要

凍上実験は両端面温度を制御できる開式の凍上試験機を用い、10日から50日の長期間両端面温度を一定に保って行なった。使用した試料は凍上性の大きい不攪乱の沖積粘性土である。実験条件を表-1に示すが、実験方法、実験装置、試料の詳細は文献1を参照されたい。

表-1 実験条件

		温度勾配 °C/cm		
		0.3	1	1.7
供試体	15	—	△	—
	3	○	●	○
	6	○	●	○
	9	○	●	○
試料	25	—	▲	—

ただし、記号は以下の条件を示す。
○；拘束応力0.6, 1.1, 1.6 kgf/cm², 繰返し数1回
●；拘束応力0.6, 1.1, 1.6 kgf/cm², 1.1, 1.6 kgf/cm²は繰返し数1回, 0.6 kgf/cm²は繰返し数3回
△；拘束応力0.6 kgf/cm², 繰返し数1回
▲；拘束応力0.6 kgf/cm², 繰返し数2回

3. 実験結果

両端面温度を一定に保った開式凍上実験においては、図-1に示すようにその凍上挙動を3つの領域に分類することができる。すなわち、

「第一領域」：未凍土厚さが減少していく凍結挙動を示し、

高志等の凍上率²⁾ ξ および Konrad & Morgenstern の³⁾ Sp の概念で表される領域。 $(0 \leq t \leq t_1)$

「第二領域」：未凍土の減少なしに凍上が継続し、その特性は下式で表される領域。 $(t_1 \leq t \leq t_2)$

$$\frac{dh_2}{dt} = A \cdot \frac{1}{t} \quad \text{----- (1)}$$

ここに、 dh_2/dt は第二領域の凍上速度 (cm/hr) ,
 t は経過時間 (hr) , A は実験定数。

「第三領域」：後藤、了戒の実験式が成り立つ領域。

$$(t_2 \leq t)$$

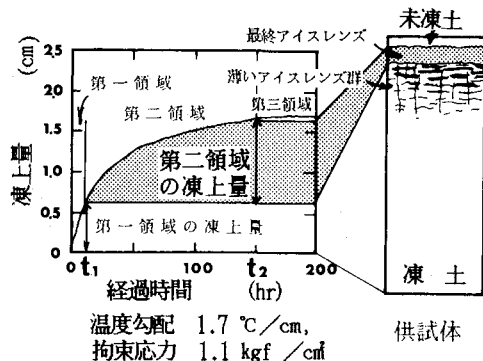


図-1 代表的な実験結果

4. 考察

第二領域の凍上挙動は、完全凍上あるいは最終アイスレンズの成長として研究されている部分⁵⁾に対応するが、この成長挙動を予測する実用的な成果は得られていない。ここでは、凍上量予測に適用事例のある³⁾ Sp の概念を採用して、(1)式の実験定数 A の意味を明確にし、実用的な第二領域の凍上予測式を導いた。

定数 Sp (cm/hr・°C)は土の凍上能力を示す固有値であり、第一領域における凍上速度は Sp を用いて下式のように示される。

$$\frac{dh}{dt} = \frac{dw}{dt} \cdot \Gamma = Sp \cdot \frac{d\theta}{dx} \cdot \Gamma \quad \text{----- (2)}$$

ここに、 dh/dt は凍上速度 (cm/hr) , dw/dt は吸水速度 (cm/hr) , Γ は水-氷の相変化に伴う体積変化率, $d\theta/dx$ は凍結面近傍の温度勾配 (°C/cm)を示す。また、不凍水の凍結による膨張分を無視すれば、

土の凍上率（ξ）は拘束応力（σ）に反比例するため、Spは拘束応力の関数として下式のように示せる。

$$Sp = \frac{Sp'}{\sigma} \quad \text{----- (3)} \quad \text{ただし, } Sp' = \frac{\sigma_0}{\Gamma} \left(1 + \sqrt{\frac{U_0}{U}} \right) \cdot U \frac{dx}{d\theta} \quad (\text{kgf/hr}^\circ\text{C})$$

ここに、σ₀、U₀は高志の実験式の実験定数、Uは凍結面進行速度（cm/hr）である。(2)式、(3)式より第一領域の凍上速度について拘束応力を考慮した形の下式が得られる。

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Sp'}{\sigma} \cdot \frac{d\theta}{dx} \cdot \Gamma \quad \text{----- (4)}$$

図-2に、今回得られた実験結果のt = t₁におけるdh/dt・σ/Γとdθ/dxの関係を示す。両者には直線関係が見られ、(3)、(4)式は今回の実験条件のもとで妥当であることが判る。

第二領域の開始時点（t = t₁）で(4)式は(1)式と連続するため、t = t₁において(1)、(4)式より下式が得られる。

$$\frac{A}{t_1} = \frac{Sp'}{\sigma} \cdot \frac{d\theta}{dx} \cdot \Gamma \quad \text{----- (5)}$$

したがって、(1)式の実験定数Aは下式のように表され、拘束応力に反比例し温度勾配に比例する形となる。

$$A = \frac{Sp'}{\sigma} \cdot t_1 \cdot \frac{d\theta}{dx} \cdot \Gamma \quad \text{----- (6)}$$

(1)、(6)式より第二領域の凍上速度を表す下式を得る。

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{Sp'}{\sigma} \cdot t_1 \cdot \frac{d\theta}{dx} \cdot \frac{\Gamma}{t} \quad \text{----- (7)}$$

さらに、上式をt = t₁においてh₂ = 0という初期条件を用いて積分し、第二領域の凍上量を表す実験式として下式が導かれる。

$$h_2 = \frac{Sp'}{\sigma} \cdot t_1 \cdot \frac{d\theta}{dx} \cdot \Gamma \cdot \ell n \left(t / t_1 \right) \quad \text{---- (8)}$$

上式中のSp'は、(4)式に対して実験結果を検討した図-2中の直線の傾きとして与えられ、Sp' = 0.021を得た。図-3は、温度勾配1℃/cm、拘束応力0.6kgf/cm²、供試体長1.5、3、6、9cmの条件における第二領域での凍上量の実測値と(8)式による推定値を対比して図示したものである。この図より(8)式は実験結果を良好に再現していることが判る。

5. おわりに

当報告で提案した(8)式は、両端面温度を一定に保った開式凍上実験の第二領域を表す実験式として、有効であると考えられる。

6. 謝 辞

当研究を行なうにあたり、御指導いただいた北海道大学低温科学研究所木下誠一所長ならびに福田正己助手に感謝いたします。

参考文献

(1) 橋本 哲, 高橋由多加, 赤川 敏;「開式・両端面温度一定条件下での土の凍上挙動」第19回土質工学研究発表会予稿集
 (2) 例えば、高志 勲, 益田 稔, 山本英夫;「土の凍結膨張率に及ぼす凍結速度、有効応力の影響に関する研究」, 雪氷 36巻, 2号, PP1-20.
 (3) 例えば、Konrad, J.-M., and Morgeistern, N.R.1982. Effects of applied pressure on freezing Soils, Can. Geotech. J. Vol. 19, PP494-505
 (4) 後藤 茂, 渡辺 修, 了戒公利;「土の長期凍上特性」, 第15回土質工学研究発表会予稿集, PP649-652
 (5) 例えば、福田正己「Segregation Potential概念を用いた野外での凍上量の予測-1982-83 苫小牧での事例-」, 日本雪氷学会秋季大会講演予稿集, 1983, P 206

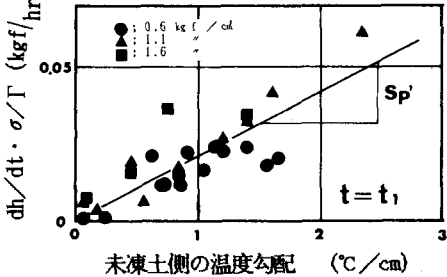


図-2 dh/dt・σ/Γと温度勾配との関係

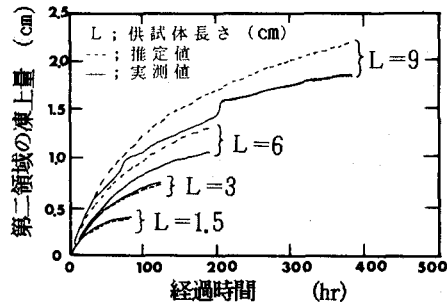


図-3 (8)式による推定凍上量と実測値の比較