

清水建設(株)土木技術部 正員 山田正男

1. まえがき わが国でこれまでに実施されてきた地盤凍結工事では、工事終了後は凍結管を埋設したままで引抜くことはほとんどなかったようである。凍結管を埋設したまましておくためには、凍結管内のブライン抜取後、モルタルを充填する場合が多い。しかし、ごくまれに、現場条件によっては凍結管を引抜いて完全に復旧する場合もある。このような場合には、凍結管を引抜くために、①凍土を強制解凍するか、②自然解凍に待つかのいずれかが選定される。強制解凍の工事例については、すでに発表したので、本文では自然解凍によって凍結管を引抜いた長方形立坑の工事例をとりあげ、自然解凍の計算値と実際の状態(凍結管の引抜可能な解凍状態)の経験を紹介する。

2. 未凍結領域(地山)からの流入熱による自然解凍

1) 凍土温度が -0°C にまで上昇するに要する時間の計算式 凍結進行中の未凍結領域内の温度 $\theta_2(^{\circ}\text{C})$ は次式で表わされる。²⁾

$$\theta_2 = \theta_{\infty} \left[\frac{1 - \{1 - \Phi(X/2\sqrt{k_2 t})\}}{1 - \Phi(\lambda_1 \sqrt{k_1/k_2})} \right] \text{-----} (1)$$

ここに、 θ_{∞} :地盤の自然温度($^{\circ}\text{C}$)、 k_1, k_2 :凍結領域、未凍結領域における温度伝播率(m^2/hr)、 t :経過時間(hr)、 X :凍結厚さ(m)、 λ_1 は次の λ_1 に関する超越方程式の根である。

$$\frac{k_1 \theta_c \exp(-\lambda_1^2)}{\sqrt{k_1} \Phi(\lambda_1)} - \frac{k_2 \theta_{\infty} \exp(-\lambda_1^2 k_1/k_2)}{\sqrt{k_2} \{1 - \Phi(\lambda_1 \sqrt{k_1/k_2})\}} = \lambda_1 L \sqrt{\pi k_1} \text{-----} (2)$$

ここに、 k_1, k_2 :凍結領域、未凍結領域の熱伝導率($\text{Kcal}/\text{m} \cdot \text{hr} \cdot ^{\circ}\text{C}$)、 L :土の凍結潜熱(Kcal/kg)、 ρ :土の単位体積重量(Kg/m^3)、 θ_c :冷却面温度($^{\circ}\text{C}$)、 $\Phi(y)$ という形の関数は確率積分である。

この場合、未凍結領域からの侵入熱量 Q_2 ($\text{Kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)は、次式で表わされる。

$$Q_2 = k_2 \left(\frac{\partial \theta_2}{\partial x} \right)_{x=2\lambda_1 \sqrt{k_2 t}} = \frac{k_2 \theta_{\infty} \exp\{-(\lambda_1 \sqrt{k_1/k_2})^2\}}{\sqrt{\pi k_2} \{1 - \Phi(\lambda_1 \sqrt{k_1/k_2})\}} \cdot \frac{1}{\sqrt{t}} \text{-----} (3)$$

いま、地盤冷却に要した時間を T_0 (hr)、凍土が -0°C に上昇するまでの時間を T_1 (hr)とすれば、未凍結領域からの侵入熱量 Q_1 (Kcal/m^2)は、次式で表わされる。

$$Q_1 = \int_{T_0}^{T_0+T_1} Q_2 dt = \frac{2k_2 \theta_{\infty} \exp\{-(\lambda_1 \sqrt{k_1/k_2})^2\}}{\sqrt{\pi k_2} \{1 - \Phi(\lambda_1 \sqrt{k_1/k_2})\}} (\sqrt{T_0+T_1} - \sqrt{T_0}) \text{-----} (4)$$

一方、凍土の温度上昇に要する熱量 Q_2 (Kcal/m^2)は、 $Q_2 = -C_1 \rho_1 \theta_s X$ ----- (5)

ここに、 C_1 :凍土の比熱($\text{Kcal}/\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$)、 ρ_1 :凍土の単位体積重量(Kg/m^3)、 θ_s :凍土の温度($^{\circ}\text{C}$)である。いま、 $Q_1 = Q_2$ として、この式を T_1 について解くと、

$$T_1 = \left[-XC_1 \rho_1 \theta_s \frac{\sqrt{\pi k_2} \{1 - \Phi(\lambda_1 \sqrt{k_1/k_2})\}}{2k_2 \theta_{\infty} \exp\{-(\lambda_1 \sqrt{k_1/k_2})^2\}} + \sqrt{T_0} \right]^2 - T_0 \text{-----} (6)$$

2) -0°C の凍土が $+0^{\circ}\text{C}$ になる自然解凍厚さの計算式¹⁾

解凍面が dt 時間に受ける熱量 dQ (Kcal/m^2)は、 $dQ = \theta_{\infty} K_2 dt' / \sqrt{\pi k_2 t'}$ で表わされる。 dt' 時間に dx_1 の解凍が進行すれば、 $dQ = L \rho dx_1$ なる関係式から解凍厚さ x_1 (m)は次式で表わされる。

$$x_1 = \frac{2K_2 \theta_{\infty}}{L \rho \sqrt{\pi k_2}} (\sqrt{T_0+t'} - \sqrt{T_0}) \text{-----} (7)$$

3. 立坑内からの流入熱による解凍厚さ(-0°C の凍土が $+0^{\circ}\text{C}$ になる)の計算式¹⁾

いまの場合、熱伝導系内の温度変化は緩慢であるから、温度分布は定常状態とみなしても差支えないであろう

したがって、立坑内の温度が θ_0 のとき、立坑内から解凍面への流入熱 q (kcal/m²・hr) は次式で表わされる

$$q = \frac{\alpha K_w K_2 \theta_0}{K_w K_2 + \alpha dw K_2 + \alpha l_2 K_w} \quad (8)$$

ここ K , α : 立坑内表面の熱伝達率 (kcal/m²・hr・°C), K_w : 断熱材の熱伝導率 (kcal/m・hr・°C), dw : 断熱材の厚さ (m), l_2 : 解凍厚さ (m) である。

d 時間 t に $d x_2$ の解凍が進行する関係式から解凍厚さ x_2 (m) は、次式で表わされる。

$$x_2 = -AK_2 + \sqrt{(AK_2)^2 + \frac{2K_2\theta_0}{L\delta} \cdot t} \quad (9)$$

ここ K , A は立坑の壁に関する熱貫流抵抗で、 $(K_w + \alpha dw)/\alpha K_w = A$ (m²・hr・°C/kcal) である

4. 数値計算

式(2)における λ_1 と θ_c の関係を図-1に示す。

ここ K , θ_∞ : 18°C, K_1, K_2 : $4.53/10^{-3}$, 1.4478×10^{-3} m²/hr, L : 28.9273 Kcal/kg, δ : 1650 kg/m³, K_1, K_2 : 2.3148, 1.2254 Kcal/m・hr・°Cである。

図-2は、凍結管(外径72.3mm)の配置と最終凍結厚さを示すものである。

式(6)の T_1 の計算にさいし、 C_1 : 0.3098 Kcal/kg°C, X_1 : 0.8m, T_0 : 19日, θ_5 : $(\theta_c + 0)/2 = -15^\circ\text{C}$ などと式(6)に代入すると、 T_1 は6.2日となる。

式(7), (9)の x_1, x_2 の計算結果を図-3に示す。

ここ K , θ_0 : 10°C, α : 15 Kcal/m²・hr・°C, K_w : 0.2 Kcal/m・hr・°C, dw : 0.05mである。

5. 経時解凍厚さの計算値と凍結管の引抜完了時点の比較

図-3は、経時解凍厚さの計算結果で、凍結管の引抜時点、冷却停止から73日めである。

凍結管の引抜き方法は、凍結管にフックをつけて8トンリッカーで引揚げられるものである。引かれた凍結管を観察すると、凍結管内の水が氷着く状態にまで至らないものや、氷の

みつかものもあつた。したがって、凍結管引抜時点では、凍土は、まだ所々に島状になつて残っていたが、凍結管が引抜けたことは、凍土の強度が著しく減少していたことによるものと思われる。

6. あとがき 本文は文献3)に紹介されている $L N_2$ による地盤凍結の現場における凍結管の引抜きが可能となるための解凍を図-3に示すもので、今後の凍結管引抜予測時期の参考になるものと思われる。

1) 山田正男: 地盤凍結と強制解凍による凍上・沈下の考察, 土木学会論文報告集, 234号, pp.97~109, 1975

2) 高志勤: 土壌凍結工法(IV), 一次元の解凍, 冷凍39巻, 才439号 pp.1~12, 1964.

3) 山田正男: 液化低温ガスによる地盤凍結, 土と基礎, vol.25, NO.7, pp.45~52, 1977

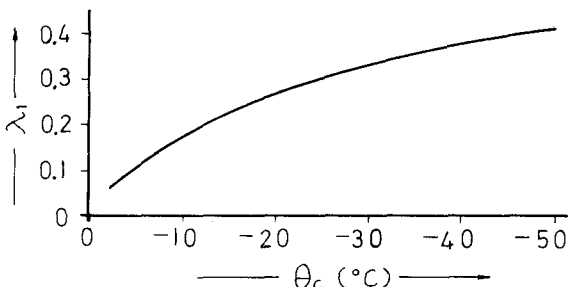


fig.1

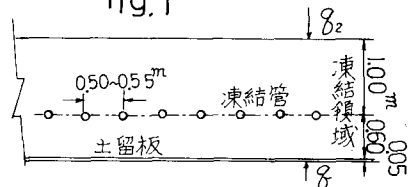


fig.2

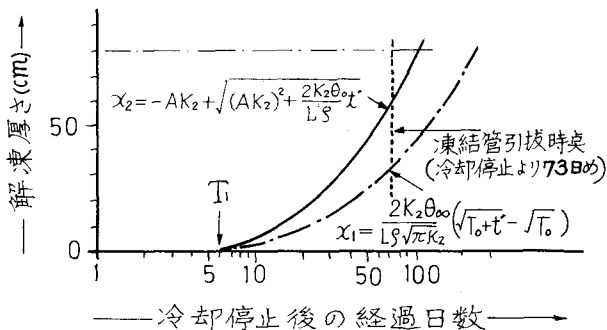


fig.3