

(株) 精 研 正 松岡 啓次 正 伊豆田 久雄 正 生頼 孝博

I. 緒言 粘性土や塩分を含む砂質土が凍結すると凍土中には不凍水が存在しその量は温度に強く依存する為、凍土の熱伝導率は土中の自由水の凍結温度 θ_f からの温度低下により急増し、固相水のうち自由水は θ_f で凍結するが他の水は θ_f 以下の温度で徐々に凍結するので θ_f での潜熱量は不凍水分だけ小さくなり反面凍土の比熱は不凍水の凍結潜熱分だけ大きくなる。一方、地盤凍結工法や寒冷地での自然凍結における土の凍結問題を解析する際に、殆んどの場合凍土の熱伝導率は温度に依存せず、固相水はすべて θ_f で凍結し又凍土の比熱は顕熱分のみと近似し種々の計算がされている。この近似による誤差を評価する為、熱物性値に温度依存性を持たせた実測値を用いた非線形非定常の凍結問題を階差法により解析した。

II. 対象土及び冷却条件 計算の対象とした試料土は、スラリー状の藤の森青粘土¹⁾を0.4MPaで圧密し作製したもの(FB)と、炉乾の豊浦標準砂を塩分濃度1.55% gNaCl/g溶液の塩水で飽和させたもの(TSNA)の2種類でありその物理定数を表1に示す。種々の温度 θ での凍土の熱伝導率 k_i の実測値は、図1に示すように θ が凍結温度 θ_f より低くなった直後に急増しその後緩かに増加する¹⁾。又、凍土の見かけ比熱(顕熱比熱と潜熱比熱の和) C_i の実測値は図2に示すように、不凍水の凍結が著しい θ_f から-10℃前後までは大きな値であるがそれ以下の θ では僅かであるから小さな値である²⁾。これらの実験式として k_i , C_i に対し(1),(2)~(4)式の関数形を仮定し各定数を求めた結果を表1に示す。又、実験式を図1,2中の実線で示す。尚 θ_f は、 C_i を θ_f から-60℃まで積分した全熱量が、1gの湿土中の水の凍結潜熱量と θ_f から-60℃まで顕熱比熱を積分した熱量の和と等しくなるように決定した。一次元x座標と一次元円筒座標の2種類のモデルについて数値解析を行い、各々を以下 平面凍結、円筒凍結と呼ぶこととする。冷却条件は、通常地盤凍結工法の設計で用

$$k_i(\theta) = k_2 + k_0 \cdot |\theta - \theta_f|^{n_0} \tag{1}$$
$$C_i(\theta) = C_{01} \cdot |\theta|^{n_1} \tag{2}$$
$$= C_{02} \cdot |\theta|^{n_2} \tag{3}$$
$$= C_{03} \cdot |\theta|^{n_3} \tag{4}$$

$\theta_1 < \theta \leq \theta_f$
$$\theta_2 < \theta \leq \theta_1$$
$$-60 \leq \theta \leq \theta_2$$

表1. 対象土の物理定数

物 理 量	記号	単 位	藤・森青粘土		塩分含有 豊浦標準砂	
			FB	TSNA	FB	TSNA
湿潤密度凍結	ρ_i	t/m ³	1941	2004		
含水比	w	%	31.38	22.86		
土粒子比重	G_s	-	2656	2640		
凍結温度	θ_f	°C	-0147	-0999		
熱伝導率	未凍結	k_2		1504	2689	
	-10℃	k_i		2243	4271	
	定 数	k_0		0549	0817	
		n_0		0.129	0.301	
見かけ比熱	未凍結	C_2		1569	1385	
	-10℃	C_i		1034	0971	
	区切温度	θ_1		-40	-70	
		θ_2		-125	-220	
	定 数	C_{01}		17.16	5346	
		C_{02}		4.273	6.892	
		C_{03}		2280	1.867	
		n_1		-1.462	-1.665	
	定 数	n_2		-0.459	-0.612	
		n_3		-0.132	-0.190	

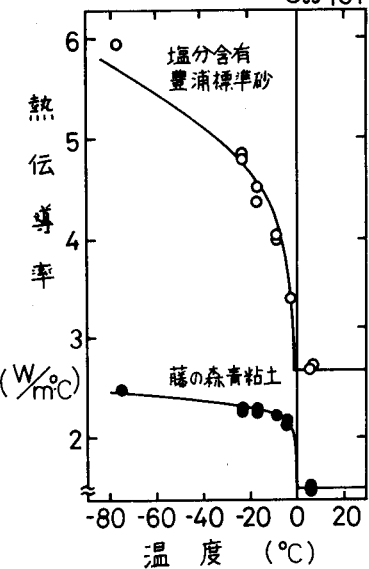


図1. 熱伝導率の温度依存性

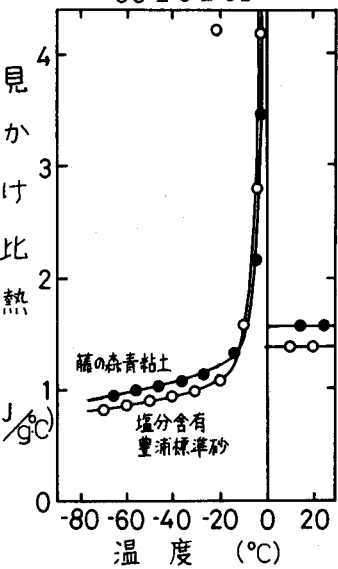


図2. 見かけ比熱の温度依存性 (NaClの氷晶点: -21.2℃)

いられる初期温度が18℃、冷却面温度が-20℃、冷却面位置が平面凍結で $x=0$ m、円筒凍結で $r=0.05$ mとする。

Ⅲ. 数値計算法 数値計算は、平面凍結は(5)式、円筒凍結では(6)式に示す陽解法の階差式を用いた。³⁾ ($n=x/\Delta x=r/\Delta r$, $P=t/\Delta t$)

$$\int_{\theta_n^p}^{\theta_{n+1}^p} C(\theta) P d\theta = \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \left[\int_{\theta_n^p}^{\theta_{n+1}^p} k(\theta) d\theta + \int_{\theta_n^p}^{\theta_{n-1}^p} k(\theta) d\theta \right] \quad (5)$$

$$\int_{\theta_n^p}^{\theta_{n+1}^p} C(\theta) P d\theta = \frac{\Delta t}{(\Delta r)^2} \left[\left(1 + \frac{1}{2n}\right) \int_{\theta_n^p}^{\theta_{n+1}^p} k(\theta) d\theta + \left(1 - \frac{1}{2n}\right) \int_{\theta_n^p}^{\theta_{n-1}^p} k(\theta) d\theta \right] \quad (6)$$

差分荒さは $\Delta x=\Delta r=0.05$ m, $\Delta t=0.075$ hとした。熱物性値が温度に依存しない場合の凍結問題において階差解が解析解の計算結果と一致することを確認した後に以下の計算を行った。

Ⅳ. 計算結果及び考察 凍土成長の計算結果を図3.4に示す。 k_i , C_i が共に温度に依存する実測値の場合(①)を実線で示し、 k_i が一定($=k_i(-10^\circ\text{C})$)の近似と、間隙水はすべて θ_f で凍結し C_i は顕熱分のみの値 C_f であるとする近似を行った場合(②)を破線で示す。FB, TSNA共に②の凍土厚は①に比べ平面凍結で6%、円筒凍結で5%小さくなる。この原因を調べる為に、①の近似のみを許した場合の凍土厚を計算すると①との差は1%以内であり k_i の温度依存性の影響は小さかった。一方、②の近似のみを許した場合の凍土厚は①に比べ5%程度小さく、凍土厚の計算に誤差を生じさせるのは主に見かけ比熱 C_i に關する近似であることが分った。この機構としては、同距離まで凍結するのに奪うべき潜熱量が近似では実際には存在する不凍水も凍結するとしている為に大き目になることが考えられる。この潜熱の①からの増加率を概算すると、平面凍結でFB14% TSNA17%、円筒凍結では θ_f 付近の体積が全凍結体積に占める割合が平面凍結より大きくなる為に26%、40%にもなる。この潜熱の増加による凍土厚の①からの減少は、熱物性値が温度に依存しない場合に解析的に計算した潜熱と凍土厚の関係(図5)を用いると4~5%であり数値計算結果を定量的に説明し正しさを裏付けている。

Ⅴ. 結言 平面凍結や円筒凍結において凍土厚を計算する場合に凍土の熱伝導率の温度依存性は実用上無視し得るが、粘土や塩分を含む砂質土においては間隙水がすべて θ_f で凍結し凍土の比熱が顕熱分のみであると近似すると凍土厚は実際より5%程度小さ目に計算され誤差を生じることが分った。

参考文献

- 1) 伊豆田他; 土木学会中37回年次学術講演会概要集, Ⅲ-144
- 2) 生頼他; 昭和58年雪氷学会秋季大会, p212
- 3) 片山他; 伝熱工学の進展 Vol. 3, p111-209, 養賢堂(1974)
- 4) Carslaw他; Conduction of Heat in Solids, 2nd ed., Oxford(1959)

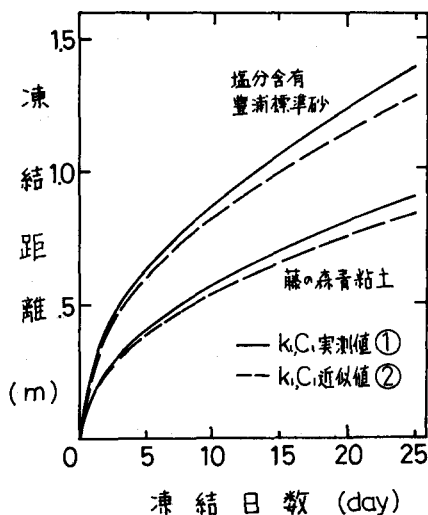


図3. 平面凍結での凍土成長

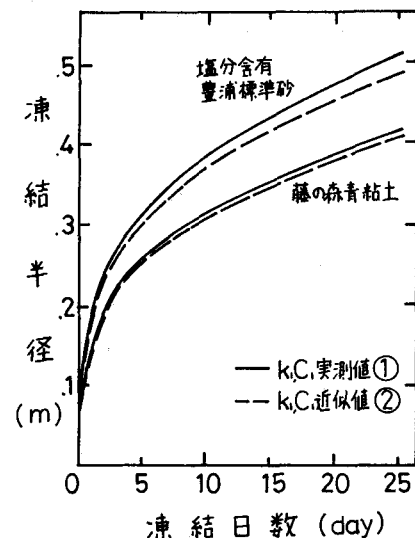


図4. 円筒凍結での凍土成長

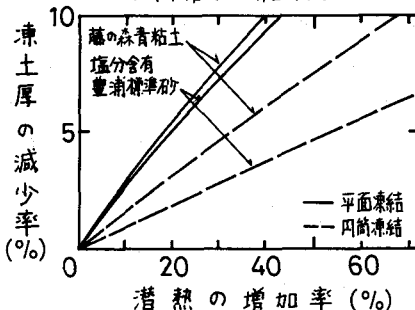


図5. 熱物性値が温度に依存しない場合に解析的に計算した潜熱と凍土厚の関係