

佐藤工業 正 員 中村英孝
 佐藤工業 正 員 児玉敏雄
 岡山大学 正 員 西垣 誠

1. はじめに

凍結工法によって地盤の改良を行う際、凍結させようとする地盤中に、ある速度以上の地下水の流れがあれば、これが持ち込む熱のために凍土壁が形成できない場合や、一度形成された凍土壁が新たな地下水流の発生によって解凍される場合が生ずる¹⁾。したがって、地下水流の影響は地盤凍結工法にとって凍土壁の成長を阻害する要因となり非常に重要な問題である。本研究では、この問題に対処するため、相変化を伴う地盤における浸透流解析手法を開発し、地盤凍結工法における地下水流の影響について数値解析的検討を行った。ここでは、数値解析手法の概要および計算結果について述べる。

2. 数値解析法

有限要素法に基づく解析の手順を図-1に示し、図中の項目の具体的内容を以下に示す。

① 非定常の浸透流方程式を解く

$$\frac{\partial h}{\partial t} - \kappa \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) = q \quad (1)$$

ここに、 h , κ , q は水頭、透水量係数、流入流量を表す。

② ①で求めた地下水流速を移流流速とした非定常のエネルギー方程式を解く。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_w c_w \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) - D \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = Q \quad (2)$$

ここに、 T , u , v , Q は温度、流速成分、発生熱量を表し、 ρ , ρ_w , c , c_w は、土および地下水の密度、比熱をそれぞれ表し、 D は土の熱伝導率を意味する。

③ 要素の温度が 0°C より低くなった場合、'凍結中'とし、それ以後の温度を 0°C とするとともに低下した温度に相当する熱量を蓄積させる。蓄積が潜熱量を越えた場合は、その要素を'凍結完了'として扱い、その後の温度の低下を許すものとする²⁾。

④ ③で求められた凍結中あるいは凍結完了の要素について、透水係数を蓄積された潜熱に応じて変更する。

$$\log \kappa = A Q_L \quad (3)$$

ここに、 Q_L , A は蓄積熱量および比例定数を意味する。

以上のように浸透流方程式とエネルギー方程式を連立させ、潜熱を考慮した凍結の処理を行うことにより、流れ場と温度場の計算を行う。

3. 凍結工法のシミュレーション

凍結工事の目的は、遮水、耐力壁、半永久構造物などが考えられるが、多くの場合遮水と耐力壁の機能を同時に要求される。ある流速以上の地下水流が存在する地盤で凍結工法を行う場合、その地下水流の影響により所要の凍土壁を完成させることができない場合が生じる。この地下水流速を限界流速と呼ぶが、ブライン方式の場合、通常 $1 \sim 2\text{m}/\text{日}$ である¹⁾。ここでは、上記の現象を確認するため、図-2のような流れのある土槽を想定し、土槽中の3点(図中P1, P2, P2)において低温度を与えた場合、凍土壁の形成が浸透流速の大きさによってどのように変化するかを数値的に調べる。土槽に満たされている土は、飽和度50%の砂質土とし、熱物性および水理定数を表-1のように仮定した。温度の境界条件は図-2中下端部に位置する3点において $T=20^\circ\text{C}$ 、境界A-Bで $T=15^\circ\text{C}$ 、その他の境界では、断熱の条件を与えた。また、温度の初期条件は、解析領域すべて $T=15^\circ\text{C}$ とした。流れは、主流の流速が任意の値になるような水頭を左右の境界に与えることにより再現する。解析に用いた有限要素分割を図-3に示す。以上の条件によって計算を行い、凍土壁の形成状況を水頭分布、流速ベクトルおよび温度分布図により評価する。

ここでは、限界流速 $U_{crit}=1\text{m}/\text{日}$ としてケーススタディーを行った。図-4は主流の流速が $U=0.5U_{crit}$ の場合の50時間後の水頭、流速ベクトルおよび温度分布を示している。各低温境界点を中心に凍土が成長し、結合し管列を形成していることがわかる。また浸透流は、凍土壁をよけて流れている。それに対して、図-5は、主流の流速が $U=4U_{crit}$ の場合の同時刻の結果である。このケースでは、浸透流速が大きいので、移流される上流の高い温度が凍結に必要な熱量を奪うので凍土壁が形成されないことがわかる。

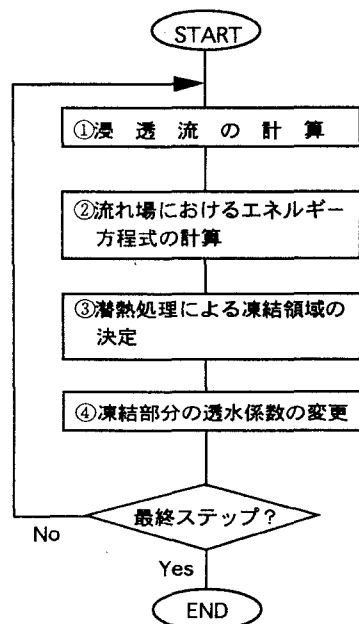


図-1 解析の流れ

4. まとめ

相変化を伴う地盤における地下水の浸透解析手法を示した。本手法を凍結工法の凍土壁形成シミュレーションに適用した結果、地下水流速が限界流速を越えると凍土壁が形成されにくくなるという経験的事実を確認した。今後、本手法を凍結工法やLNG地下タンク等相変化を伴う地盤に関する様々な事例に適用していく考えである。

参考文献

1) 日本建設機械化協会：地盤凍結工法，p.166，1982.
2) 内田博，高瀬啓元，平野隆久：曲面要素法による潜熱を含めた非定常熱伝導解析法，土と基礎，Vol. 25, No.7, pp.47～52，1977.

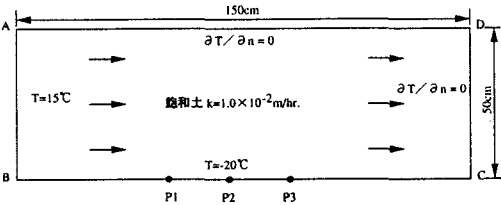


図-2 凍結実験モデル

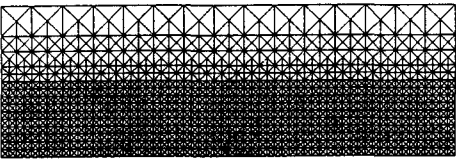
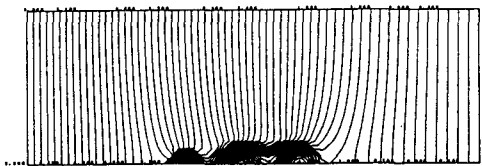


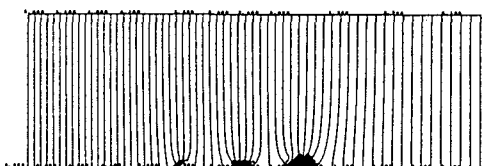
図-3 有限要素分割

表-1 土の物性値

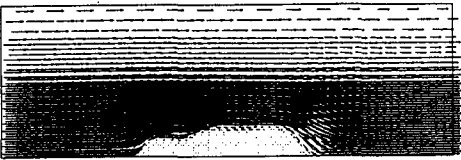
容積含水率		0.5
飽和土の湿潤密度 (kg/m3)	凍結前 γ ₂	1900
	凍結後 γ ₁	1840
飽和土の比熱 (kcal/kg℃)	凍結前 C ₂	0.425
	凍結後 C ₁	0.287
飽和土の熱伝導率 (kcal/mh℃)	凍結前 λ ₂	1.410
	凍結後 λ ₁	2.415
飽和土の凍結潜熱 (kcal/kg)		21.59
飽和土の透水係数 (m/h)		1.0×10 ⁻²



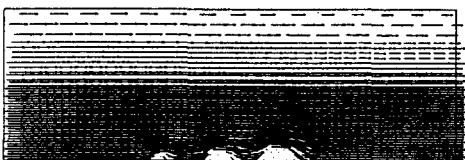
Hydraulic head (m)



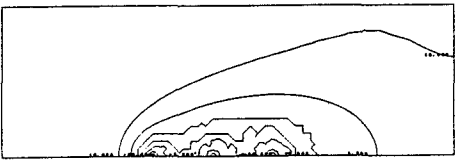
Hydraulic head (m)



Velocity distribution
→ 14.0 (cm/hr.)

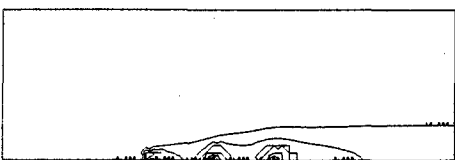


Velocity distribution
→ 32.0 (cm/hr.)



Temperature (deg.)

TIME=50.0hrs.



Temperature (deg.)

TIME=50.0hrs.

図-4 凍土壁の形成 (U=0.5Ucrit)

図-5 凍土壁の形成 (U=4Ucrit)