

CS-73

熱・浸透・応力連成解析の凍結問題への適用

岡山大学 工学部 正 西垣 誠
日本国土開発（株） 正 梅田 美彦
（株）CRC総合研究所 今井 紀和

1. はじめに

寒冷地での凍上による被害や地盤凍結工法、LNG貯蔵タンクの周辺など、地盤の凍結による問題は数多く考えられる。そこで本研究では、地盤凍結現象の予測および定量的な評価を行うために開発した熱・浸透・応力を連成させた地盤凍結解析の適用性について検討するために、いくつかの凍結問題の解析を行った。地盤凍結の基礎方程式は、熱・浸透・応力を連成させた基礎方程式に凍結による相変化の影響を次のように考慮する事で表した¹⁾。凍結による相変化と浸透との関係は、間隙氷と間隙空気を同一とみなすことによって凍結土と不飽和未凍結土を相似な土として扱い、凍結による不飽和浸透特性を考慮できるようにした。相変化と応力の関係は、相変化による中立応力（水圧＋氷圧）の変化が拡張されたクラウジウス・クラペイロンの式に従うことと、体積膨張が骨格へのひずみとして載荷することにより考慮した。

2. 1次元凍結問題における厳密解との比較

半無限領域の水の1次元凍結問題について解析し、ノイマンの厳密解との比較を行った。入力定数を表-1に示す。解析は、初期水温5.0℃の表面を瞬時に-10.0℃にした場合の水の進入深さについて実施し、厳密解と比較した。その結果を図-1に示す。

3. 飽和砂層内での2次元凍結問題

飽和砂層中のダルシー流れ場におかれたパイプまわりの凍結問題を、2次元場での解析の検証として実施した。図-2に本解析に用いた解析モデルを、表-2に使用した物性値を示す。初期条件は全体が4.5℃にあるものとし、凍結管を-7.5℃に冷却した時の砂層内の凍結の進行、浸透流の変化、砂の変形について解析した。図-3に凍結領域の進行を示した。温度0℃のコンターの時間経過から、凍結領域は最初浸透の方向に長い卵型に形成され、1時間後には左側の境界に達しており、浸透による熱の移流の影響が現れている。図-4の温度分布と浸透の流速ベクトルの図では、凍結パイプの周辺の凍結領域の内部ではほとんど浸透は生じていないが、凍結パイプの右側では凍結領域でせき止められた水が回り込み流速が大きくなっている。図-5には凍結パイプ周辺の変位を示す。地盤全体は凍結による膨張により凍結パイプの外側方向に変位している。

4. 地表面の凍結による土中水の上昇

地表面が凍結すると凍結面に水分が吸引され地表面に向かう浸透流が生じる。このため、廃棄物処理場などの地表面付近に有害物質が蓄積される恐れがある。ここでは、より現実的なモデルとしてキャピラリーバリアの効果に付いて解析を行った。

解析モデルは粘土、細砂および粗砂がこの順番で2段に成層した盛土地盤であり、低盤で水位0mで平衡状態にあるものとし、不飽和領域内での解析を行った。図-6にその解析モデルの概略を示す。解析に用いた各層の物性値を表-3に示す。67時間後の温度分布、全水頭と流速ベクトル、変位を、図-7、8、9に示す。この結果より凍結が地表部分の2/3程度進入しており、凍結による水分の吸引と地表面の隆起がみられる。

5. まとめ

1次元凍結問題におけるノイマンの厳密解と理論解とを比較し、本解析が妥当である事がわかった。また、飽和砂層内でのパイプまわりの凍結およびキャピラリーバリアモデルの解析の結果、本解析により凍結を伴う浸透場での浸透状況の変化と変位、応力分布が解析可能である事がわかった。

参考文献

1)河野・西垣・梅田・今井:飽和-不飽和領域における凍結問題の有限要素解析,第26回土質工学発表回,1991.7.

表-1 ノイマン問題の入力定数

項目	熱伝導率 (W/m・℃)	密度 (kg/m ³)	比熱 (kJ/kg・℃)	潜熱 (kJ/kg)
水	0.57	1000.0	4.19	334
氷	2.20	917.0	2.00	

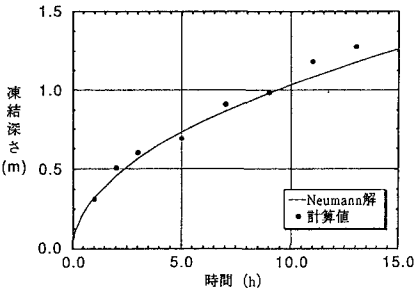


図-1 ノイマン解との比較

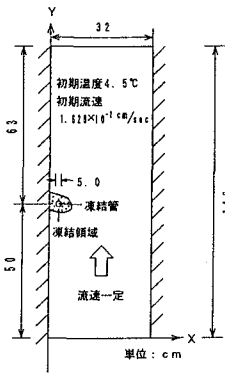


図-2 解析モデル概略図

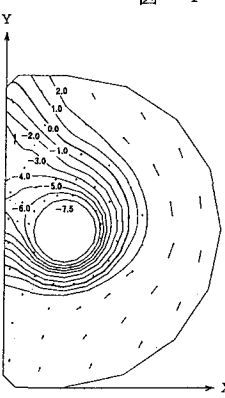
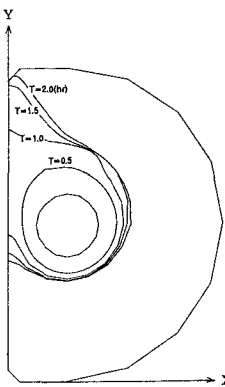


図-4 温度分布と流速ベクトル図

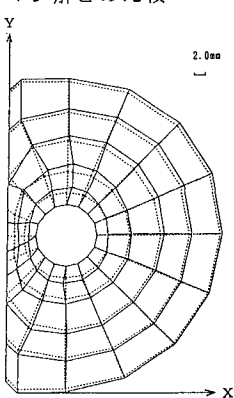


図-5 変形図

表-2 入力物性値

未凍土の熱伝導率 (W/cm・℃)	8.72×10 ⁻⁴	飽和透水係数 (cm/sec)	0.1
凍土の熱伝導率 (W/cm・℃)	12.9	間隙率	0.36
潜熱 (J/g)	334	ヤング率 (kg/cm ²)	300.0
水の比熱 (J/g・℃)	4.19	ポアソン比	0.333
氷の比熱 (J/g・℃)	2.00	土の比熱×単位重量 (J/cm ³ ・℃)	2.38

表-3 入力物性値

項目	材料	粘土	細砂	粗砂
土の熱伝導率 (W/cm・℃)		1.640	1.675	1.793
凍土の熱伝導率 (W/cm・℃)		2.582	2.596	2.644
透水係数 (cm/sec)		4×10 ⁻⁸	4×10 ⁻³	3.6×10 ⁻¹
限界毛管高 (cm)		500	100	3.0
弾性係数 (kg/cm ²)		300	300	300
ポアソン比		0.4	0.4	0.4
間隙比		0.448	0.432	0.365

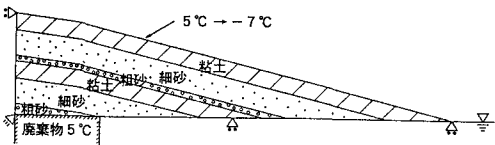


図-6 解析モデル概略図

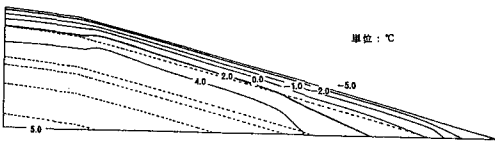


図-7 温度分布図



図-8 全水頭と流速ベクトル図

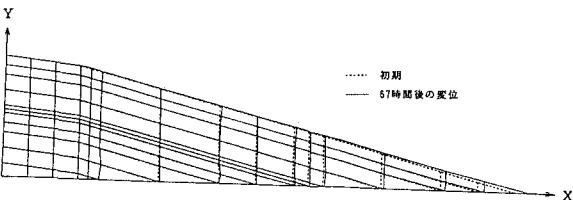


図-9 変形図