

地盤凍結工法における凍土形成過程の予測解析手法の検討

清水建設 技術研究所 正会員 ○米山 一幸

1. はじめに

凍結工法は未固結地盤中の開削・トンネル工事などの補助工法として多くの実績を有し、特に近年では、都市域のシールド工事の立坑からの発進・到達時や地中接合時における土留め・止水を目的に広く適用されている。凍結工法の計画においては、地盤条件を考慮した熱伝導解析などにより凍土造成に必要な凍結管配置や設備仕様などを事前に検討するが、その際に地盤中の地下水流動が凍土の形成状況に与える影響を考慮する必要がある。そこで本研究では、地下水流動を考慮した凍土形成過程の予測手法の検討を目的に、地下水の凍結現象をモデル化した熱-浸透流連成解析プログラムを作成し、凍結管列による凍土形成の試解析を実施する。

2. 予測解析手法

解析プログラムとしては TOUGH2/EOS1¹⁾を用いる。このプログラムは地盤中の熱伝導と地下水・蒸気の流動を計算する連成解析プログラムで、水・蒸気の熱力学特性（圧力、温度、密度、比体積、比エンタルピー）は International Association for the Properties of Water and Steam (IAPWS) による熱力学方程式に基づき、プログラム内で自動計算される。ただし、IAPWS は温度 0℃以上の液体または気体の水を対象としており、0℃以下の固体の水(氷)は考慮されていないため、本研究では以下の修正を行うことにより凍結現象をモデル化する。

1) 密度・内部エネルギー（図1）

0℃以上の水については IAPWS の熱力学方程式より与える。0℃以下の氷については化学便覧に記載される値（図中にプロットで表示）を線形補間することにより設定する。また、0℃において凍結膨張率・凍結潜熱に相当する密度、内部エネルギーの変化を与えることにより凍結現象をモデル化する。これにより 0℃付近で不連続な物性変化が起こり計算の収束性が低下するため、プログラム中では凍結が完全に完了する温度 T_f を -1~-5℃程度に設定し、0℃から T_f の間では凍結前後の値を線形補間して与える方法を用いる。

2) 粘度（図2）

0℃以上の水については IAPWS の熱力学方程式を用いる。0℃以下の氷については仮想的に大きな粘度を与え、凍結による水の流動停止をモデル化する。

3) 熱伝導率

水と氷の熱伝導率の違いを考慮するため、飽和地盤の熱伝導率として凍土と未凍土で異なる値を用いる。0℃付近の変化については上記1)と同様に T_f を設定して凍結前後の値を線形補間し、計算の収束性を高める。

3. 単管凍結の理論解との比較

作成した数値解析プログラムの検証を目的に、単体の凍結管周囲に円筒形の凍土を形成する場合(単管凍

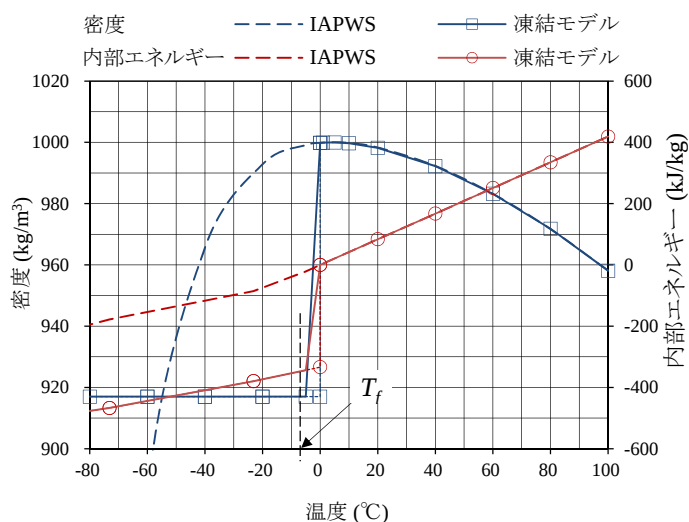


図1 水の密度と内部エネルギーのモデル化

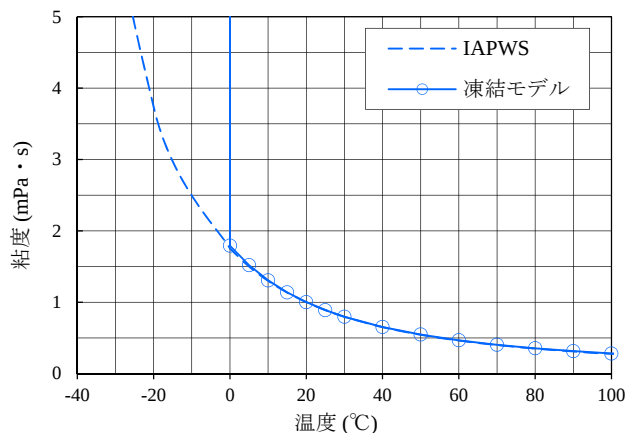


図2 水の粘度のモデル化

キーワード 凍結工法, 凍結領域, 潜熱, 地下水流動, 数値解析, 管列凍結

連絡先 〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17 清水建設(株) 技術研究所 TEL. 03-3820-5557

結)の理論解²⁾との比較を行う。解析領域は軸対称の1次元モデルとし、地盤の物性値は一般的な飽和土の熱的性質に関する文献値²⁾(表1)を用いる。図3は凍結管温度 $T_0 = -20, -50, -100^\circ\text{C}$ の各ケースについて、凍結管周囲に形成される凍土の半径の経時変化に関する理論解と解析結果の比較を示す。両者は概ね良好に一致しており、作成した解析プログラムは凍結現象を適切にモデル化していると判断できる。

4. 管列凍結の試解析

作成した解析プログラムを用いて、管列凍結における地下水流動の影響に関する試解析を行う。半径0.05mの凍結管を0.8m間隔で1列に配置したケースを想定し、隣接する1組の凍結管を抽出した2次元領域を解析対象とする(図4)。地盤物性は表1と同じ値を用いる。地盤・地下水の初期温度は 18°C とし、初期の地下水流速と凍結管温度 T_0 ($-30, -40^\circ\text{C}$)を解析パラメータとして変化させて解析を行う。

図5は凍結領域と流速分布の解析結果例を示しており、地下水流動の影響により凍結領域が下流側(右側)に偏心して形成されている。(a)は、凍結管の間に連続した凍結領域が形成されるケースにおいて、凍結領域が連結した直後の状況を示しており、この後、凍結領域は管列に平行に左右に拡大していく。一方(b)は連続した凍結領域が形成されないケースであり、領域の形状はこの後ほとんど変化していない。

表2は各解析ケースにおける連続した凍結領域の形成の有無を整理して示す。本検討で設定した地盤条件では、凍結管温度 T_0 が -30°C の場合は地下水流速が0.6 m/日以下、 -40°C では0.8 m/日以下のケースで連続した凍結領域が形成されている。なお、高志³⁾は地下水流動がある場合の凍土壁の形成条件に関し、いくつかの前提条件を仮定した上で、連続した凍土壁を形成しうる圧力差の限界値の判別式を提案しているが、本解析結果は高志らの結果と乖離がみられる。その原因などについて、今後より詳細な検討を行う予定である。

5. まとめ

地下水の凍結現象を考慮した熱-浸透流連成解析プログラムを作成して管列凍結のモデル解析を実施し、地下水流動が凍結領域形成に及ぼす影響を検討した。

参考文献

- 1) K. Pruess et. al: TOUGH2 user's guide, ver.2, 1999
- 2) 日本建設機械化協会: 地盤凍結工法, 1982
- 3) 高志: 凍結管列の凍結結合に対する地下水流動の影響について, 1969

表2 連続凍結領域の形成条件

地下水流速	$T_0 = -30^\circ\text{C}$	$T_0 = -40^\circ\text{C}$
0.6 m/日	連続した凍結領域を形成	
0.7 m/日		
0.8 m/日	連続した	
0.9 m/日	凍結領域を形成しない	

T_0 : 凍結管温度

表1 地盤条件²⁾

地盤熱伝導率 (飽和)	未凍土	1.424 W/m·K
	凍土	2.689 W/m·K
土粒子の比熱		854.2 J/kg·K
土粒子の密度		2650 kg/m ³
間隙率 (体積含水率)		0.6
透水係数		1.0×10^{-5} m/sec

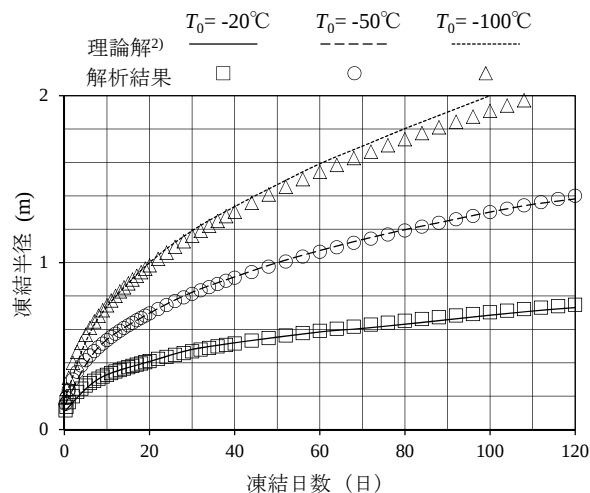


図3 単管凍結における凍結半径の経時変化

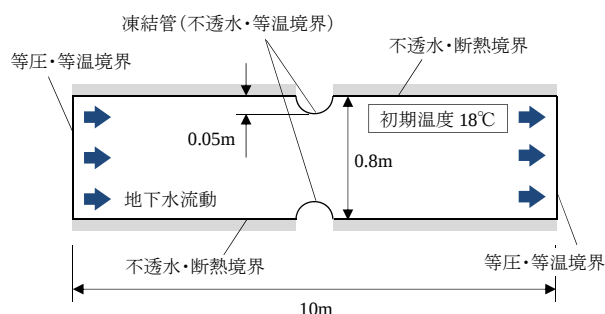
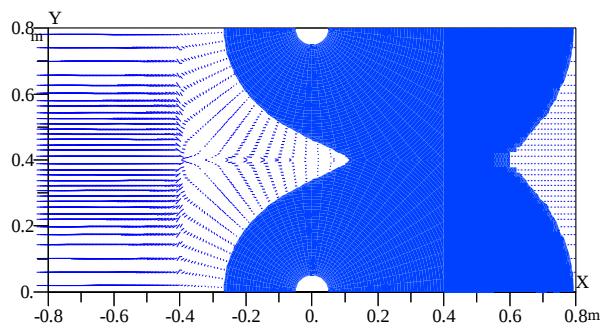
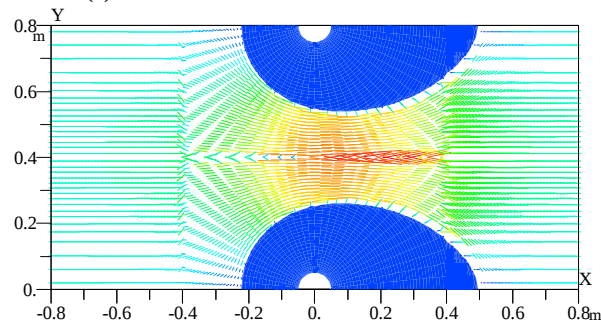


図4 解析モデルの概念図



(a) 地下水流速 0.6m/日, 凍結開始 30 日後



(b) 地下水流速 0.7m/日, 凍結開始 30 日後

図5 凍結領域・地下水流速の分布 ($T_0 = -30^\circ\text{C}$)