

地下水流を考慮した凍土方式遮水壁の閉合に係る解析的評価 凍土方式による遮水技術に関するフィージビリティスタディ事業 (その9)

鹿島建設(株) 正会員 ○並川 正 森川誠司 吉田 輝 佐藤一成
ケミカルグラウト(株) 正会員 相馬 啓

1. はじめに

福島第一原子力発電所の汚染水対策の一つとして、凍土方式遮水壁の施工を進めている。凍土方式遮水壁施工では、地下水流が凍結冷熱を奪うといった課題が考えられる。そのため、試験や解析で凍土への地下水流の影響を事前に把握し、必要な対策が迅速に講じられるようにしておくことは重要である。このような背景のもと、凍土方式遮水壁の一部を切り出したモックアップ凍結試験(以下、実証試験③)¹⁾を模擬した解析により、地下水流が凍土造成に与える影響を検討した。以下、解析手法と解析結果の概要を報告する。

2. 解析手法

本検討に用いた解析手法は、水と氷の間の相変化に伴う透水係数の変化と潜熱を考慮した三次元浸透流・熱移動連成有限要素法解析である。

熱を考慮した浸透流の支配方程式を(1)式で示す。

$$\{\alpha S_s + C(\varphi)\} \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} - K_{ij} \beta (T - T_0) \delta_j \right\} \quad \text{ここで } i, j = 1, 2, 3, \delta_i = (0, 0, 1) \quad (1)$$

$\alpha = 0$: 不飽和領域、 $\alpha = 1$: 飽和領域、 h : 全水頭、 $S_s (= \frac{\partial h}{\partial \varphi})$: 比貯留係数、 $C(\varphi) (= \frac{\partial \theta}{\partial \varphi})$: 比水分容量、

θ : 体積含水率、 φ : 圧力水頭、 K_{ij} : 透水係数テンソル、 β : 体積膨張係数、 T : 温度、 T_0 : 基準温度

熱移動の支配方程式は(2)式で示される。

$$(\rho C_v)^m \frac{\partial T}{\partial t} + \rho^l C_v^l u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda_{ij}^m \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad \text{ここで } i, j = 1, 2, 3, l: \text{液相}, s: \text{固相}, m: \text{固液混合}, u_i: \text{ダルシー流速} \quad (2)$$

$(\rho C_v)^m = \{n S_w \rho^l C_v^l + (1-n) \rho^s C_v^s\}$ 、 ρ^l, ρ^s : 液相、固相の密度、 C_v^l, C_v^s : 液相、固相の比熱、

S_w : 飽和度、 n : 間隙率、 $\lambda_{ij}^m = n S_w \lambda_{ij}^l + (1-n) \lambda_{ij}^s$ 、 $\lambda_{ij}^l, \lambda_{ij}^s$: 液相、固相の熱伝導率テンソル

凍結遷移区間での透水係数は、文献2)を参考に -3°C 以下で $1 \times 10^{-12} \text{cm/s}$ (一定)になるようにし、 0°C から -3°C の間はその対数値を線形補間した。また、凍結潜熱は等価比熱法(潜熱量を液相の比熱の変化に含める解析方法)により考慮した³⁾。

解析手順は、浸透流方程式(1)式と熱移動方程式(2)式を時間刻みごとに交互に繰り返し解くことで、時々刻々の全水頭 h 、ダルシー流速 u 、温度 T を求める。

3. 解析モデル

実証試験③は、ケイ砂製の模擬地盤に対し下向き浸透流を与えながら、3本の水平凍結管で模擬地盤を凍結させるというものであり、その詳細は文献1)に譲る。なお、その解析モデルはモックアップ奥行方向の同一性を考慮して、二次元モデルとした。

キーワード 凍結工法、地下水流、浸透流・熱移動連成有限要素法解析、福島第一原子力発電所
連絡先 〒107-8502 東京都港区赤坂6-5-30 KIビル TEL 03-6229-6791

図-1 に解析モデルと境界条件を示す。熱物性値は文献 4)を参考に実際の含水率に応じて設定した。

4. 試験結果との比較

図-2 は初期流速 0.1m/day、図-3 は初期流速 0.7m/day の場合の図-1 に示す中央の凍結管直下の計測点 D-4、E-4、F-4 (紙面奥行き方向に 3 点計測) における温度の経時変化について解析結果と試験結果を比較したものである (ブライン温度は-30℃)。

本図より、解析結果と試験結果はよく整合しており、本解析手法は地下水流が凍土施工時の地中温度変化に与える影響を評価できることが分かる。

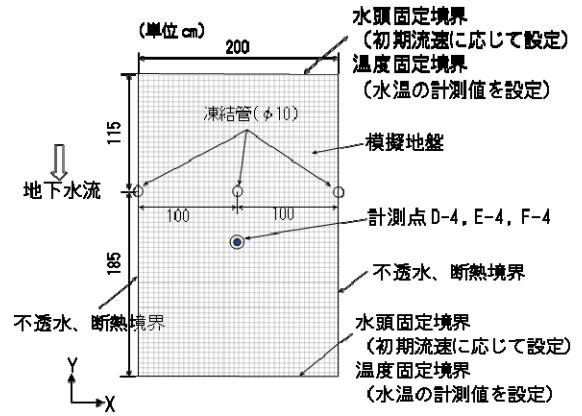


図-1 解析モデル概要図と計測点位置

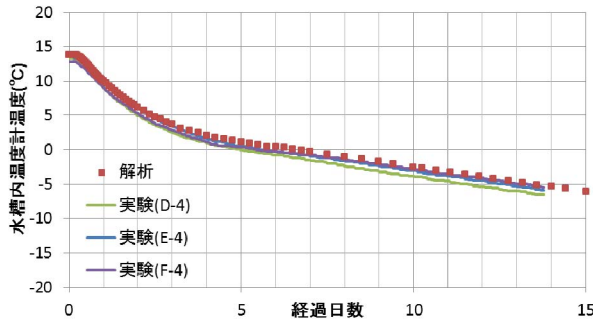


図-2 温度経時変化の比較 (初期流速 0.1m/day)

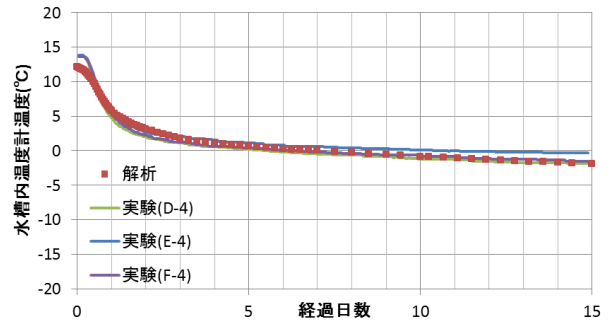


図-3 温度経時変化の比較 (初期流速 0.7m/day)

5. 凍結閉合するための限界流速の検討

凍結管周りの凍土が成長して閉合する限界の流速を把握するため、初期流速をパラメータとした解析を行った。図-4 と図-5 はそれぞれブライン温度-30℃と-40℃の場合での、凍結開始 1、5、10、20 日後の温度分布コンタである。これらより、ブライン温度-30℃では 0.6~0.7m/day、-40℃では 0.9~1m/day が凍土が閉合する限界の流速であることや、ブライン温度の低下は地下水流対策にある程度有効なことなどが分かる。

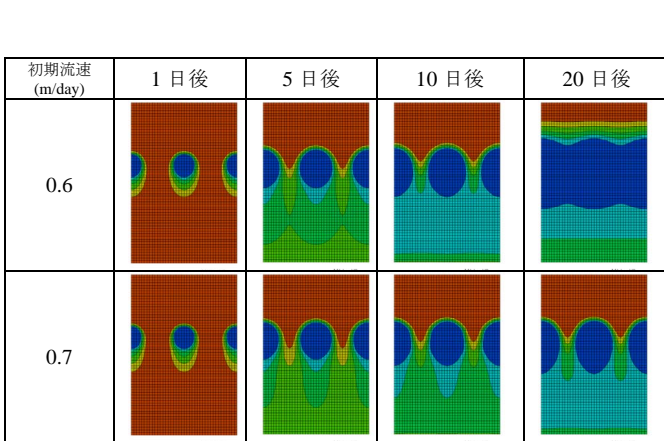


図-4 温度分布の比較 (ブライン温度-30℃)

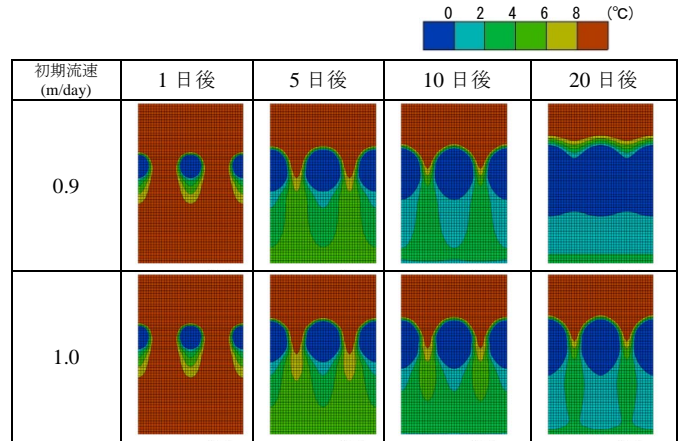


図-5 温度分布の比較 (ブライン温度-40℃)

6. おわりに

本解析はモックアップ凍結試験をよく再現しており、本解析手法の妥当性が検証できたと言える。また、ブライン温度に対する限界初期流速も概ね把握できたことから、本解析手法は凍土壁施工における各種計画に有用であると言える。なお、本検討は、資源エネルギー庁からの委託業務である「凍土方式による遮水技術に関するフェージビリティ・スタディ事業」の一環で行いました。本事業の関係各位に深謝致します。

参考文献

- 1) 長大凍土方式遮水壁による地下水堰上りを考慮したモックアップ試験-凍土方式による遮水技術に関するフェージビリティ・スタディ事業 (その8) 土木学会年講(2015)、2) 日本雪氷学会凍土分科会 凍土の知識-人工凍土壁の技術-(2014)、3) 大中逸雄: コンピュータ伝熱・凝固解析入門 (1985)、4) 日本建設機械化協会: 地盤凍結工法 -計画・設計から施工まで- (1982)