



東京農工大学大学院 農学府

令和7年度 修士論文

地下水水流存在下の地盤凍結過程の 水分・熱の同時解析手法の確立に向けて

Toward the Establishment of a Method for Simultaneous Analysis
of Water and Heat in Ground Freezing Processes in the Presence
of Groundwater Flow

指導教員 : 斎藤 広隆 教授

研究室 : 地水環境工学研究室

学籍番号 : 24517003

氏名 : 菊地 駿

要旨

近年、建設技術の高度化および都市空間の深部利用の進展に伴い、大深度高水圧下の帶水層や軟弱地盤における掘削工事、さらには汚染物質の封じ込めといった難条件への対応が必要となっている。そのため、地盤の強度増加と遮水性を同時に、かつ可逆的に確保可能な地盤改良技術が強く求められている。これらの要求に応え得る有効な工法の一つとして、人工地盤凍結工法が挙げられる。本工法は、地盤中に一定間隔で設置した凍結管内に、冷媒を循環させることで地盤から熱を奪い、隙水を凍結させる地盤改良技術である。土粒子を化学的に固結させる従来工法とは異なり、隙水の相変化という物理現象を利用する点が特徴である。これにより、均質で高強度な凍結地盤を形成できること、実質的な完全遮水性、ならびに地盤を原状回復できる可逆性といった利点を有する。一方で、地下水流れが速い地盤では流れによって凍土の造成が阻害され、その適用可能性には限りがある。既往の解析的な検討において、閉塞可能な上限流速である限界流速は、凍土壁の規模を示す代表長さによって支配される。しかし、凍土壁閉塞に影響するのは凍土周辺の局所的な範囲に限られるため、慣例的に凍土壁全長を代表長さとして用いた場合、実際の限界流速は過小評価される。そのため、実際には造成可能な地下水流速でも凍土が閉塞しないと判定され、凍土壁全長を代表長さとみなして限界流速式を適用し、工法の可否を判定する従来手法には課題が残る。そこで本研究では開発した凍結・融解を含む飽和二次元熱・水移動数値解析ソルバーを用いた数値解析によって、凍結管配置に基づく代表長さの算出式を構築した。

本研究で開発した数値解析ソルバーは、エネルギー保存則に基づく熱移動支配方程式と隙水質量保存則に基づく水分支配方程式を連成して構築した。液状水と氷の相平衡については一般化クラジウス・クラペイロン式を用い、算出された液状水の圧力を水分保持関数に代入することで、ある温度条件下での不凍水分量を計算した。なお、本解析では解析領域を凍結範囲に対して十分に大きく設定し、境界条件の影響を排除するとともに、相変化に伴う体積変化は無視した。

ここで、解析対象として、凍結管が配置されている空間内のある一定の深さにおける $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ の断面領域をとり、初期地下水流速を $0.0\text{ m d}^{-1} \sim 1.2\text{ m d}^{-1}$ の範囲で 19 通り設定した。表面温度が -30°C である凍結管を解析領域の左端から 10 m の地点に上下対称に 2, 4, 8, 12 本の管をそれぞれ $0.6, 0.8, 1.0\text{ m}$ の一定間隔で設置し、得られた温度分

布の経時変化に基づき、凍土壁が閉塞するまでの所要時間を算出した。まず、それぞれの凍結管間隔・本数に対し、初期流速と凍土が閉塞するまでの時間について双曲線フィッティングを行った。凍結管本数が多い条件では、初期流速が閉塞成立の限界に近づくにつれて閉塞時間が急増する傾向があったが、双曲線フィッティングは全体的な挙動を概ね良好にとらえた。特に凍結管が2本の場合、フィッティングされた双曲線の漸近値は理論的な限界流速とよく一致した。これより、数値解析結果のフィッティングより得られる漸近値は、理論上の閉塞限界と等価であるとみなせる。したがって、限界流速式で算出される限界流速をこの数値的な漸近値に置き換えることで、経験的パラメータである代表長さを数値計算によって逆算することが可能となる。このようにして数値的に求めた代表長さと、慣例的に代表長さとして用いられてきた凍土壁全長との比較を行った。その結果を踏まえ、凍結管間隔、凍結管密度およびそれらの相互作用項を説明変数とする重回帰分析を行い、新たな代表長さの算定式を構築した。これにより、凍結管配置を考慮した代表長さを良好に整理でき、本手法の有効性を示した。本研究で構築した代表長さの算定式は、凍結管間隔や凍結管密度など、あらかじめ決定可能な幾何学的条件のみを説明変数としている。このため、従来設計者の判断に委ねられていた代表長さを、客観的かつ定量的に決定することが可能となる。本研究の成果は、解析的設計手法の信頼性および実用性を向上させ、地下水流动を伴う人工地盤凍結工事の設計において、過度に保守的な設計や不要な地盤改良の解消に寄与することが期待される。

目次

1 序論	1
2 手法	2
3 結果	3
3.1 実験に基づく数値モデルの妥当性検証	4
3.1.1 実験概要	4
3.1.2 数値解析条件	4
3.1.3 結果と考察	8
3.1.4 本解析手法の妥当性と適用範囲に関する総括	11
3.2 地下水流れ存在下での人工地盤凍結工法におけるパラメータスタディ	11
3.2.1 概要	11
3.2.2 解析条件および計算ケース	12
3.2.3 結果	12
3.2.4 考察	13
付録	14
引用文献	14

図目次

Fig. 1	実験装置の模式図および対応する計算領域. (a) 実験装置の模式図, (b) 数値解析に用いた計算領域. (b) 中のアスタリスクでの熱移動境界条件として, 逆解析により推定したパラメータ (底面 (*1) および左右 (*2, *3) の凍結管表面における境界温度) を用いる.	5
Fig. 2	圧力水頭の空間分布. (a) 数値解, (b) 解析解, (c) 数値解と解析解の残差.	6
Fig. 3	同定されたパラメータに基づく鳥取砂丘砂の水分保持関数	7
Fig. 4	実験時の外部環境温度変化	8
Fig. 5	逆解析による境界条件推定を用いた温度の経時変化の比較	10

表目次

Table 1	予備実験により同定された熱物性値および水理定数	7
Table 2	実験期間中の外部環境温度に関する統計量	9

第1部

序論

第2部

手法

第3部

結果

3.1 実験に基づく数値モデルの妥当性検証

本節ではこれまでに検討した数値モデルに対して、実験装置を用いた実験を行い、その結果を比較・検証する。

3.1.1 実験概要

実験には、Fig. 1a に示す円筒形の凍結実験装置を用いた。装置は内径 0.2 m、外径 0.23 m、高さ 0.6 m のアクリル円筒と、円筒下端から 0.2 m の位置を貫通する外径 0.006 m の U 字型凍結管で構成される。供試体は鳥取砂丘砂を乾燥密度 1600 kg m^{-3} で水中充填法により作製し、底部給水・上部排水により飽和状態を維持した。凍結開始前に Darcy 流速 1.0 m d^{-1} で 36 時間以上給水した後、凍結管内にブライン（エチレングリコール水溶液、比重 1100 kg m^{-3} ）を循環させて内部から冷却した。

3.1.2 数値解析条件

3.1.2.1 計算領域および計算条件

実験結果との比較のため、Fig. 1a を基に作成した計算領域を Fig. 1b に示した。解析は、凍結管軸に垂直な水平断面を対象とした二次元モデルで実施した。

装置底面および凍結管表面の境界条件は、実験ごとの接触熱抵抗や流体挙動に依存するため、一意な決定が困難である。そこで本解析では、逆解析により境界温度を同定し、その結果を用いて検証を行った。なお、他の境界は断熱境界条件とした。また、流体の流入出境界には、実験と同様に Darcy 流速 1.0 m d^{-1} を与え、それ以外の境界は流体の出入りがないよう不透水境界条件とした。逆解析における境界条件の詳細は 3.1.2.3 小節で後述する。

初期条件として、温度は一様に 5°C 、圧力は Darcy 流速 1.0 m d^{-1} に対応する分布を与えた。飽和多孔質媒体中の初期圧力場は、凍結管群を過ぎる一様流とみなせる。速度ポテンシャルは、ラプラス方程式の線形性に基づき、一様流と各凍結管中心 z_j に配置された二重湧き出しの重ね合わせで表現できる（異、1982）。無限遠流速を U 、凍結管半径を a とすると、複素速度ポテンシャル $W(z)$ は次式となる。

$$W(z) = U \left(z + \sum_{j=1}^2 \frac{a^2}{z - z_j} \right) \quad (3.1.2.1)$$

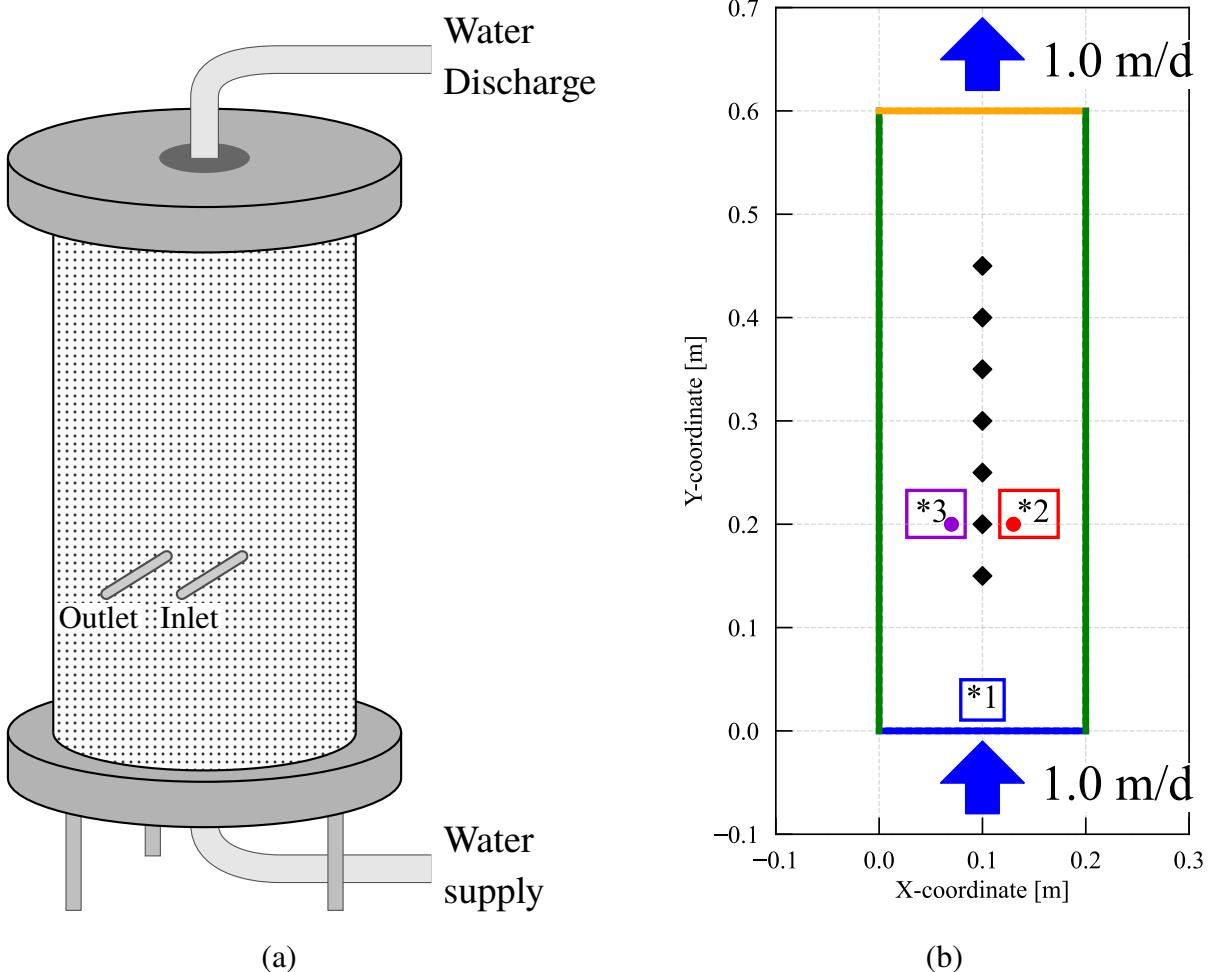


Fig. 1 実験装置の模式図および対応する計算領域. (a) 実験装置の模式図, (b) 数値解析に用いた計算領域. (b) 中のアスタリスクでの熱移動境界条件として, 逆解析により推定したパラメータ (底面 (*1) および左右 (*2, *3) の凍結管表面における境界温度) を用いる.

ここで, z は複素座標, z_j は j 番目の凍結管の中心座標である. このとき, 圧力水頭 h は飽和透水係数を用いて, 複素ポテンシャルの実部と以下の関係になる.

$$h = -\frac{1}{K_s} \Re[W(z)] \quad (3.1.2.2)$$

この解析解と数値的に得られた初期圧力分布を Fig. 2 に示した.

数値解と解析解を比較することにより, 初期圧力分布に対する数値モデルの妥当性を検証した. その結果, 凍結管周りの残差が少し大きいが, 残差の最大ノルム および二乗平均平方根誤差はそれぞれ 2.012×10^{-4} , 2.917×10^{-5} となり, 両者は良好に一致していることが確認され, 初期圧力分布の設定が妥当であることが示された.

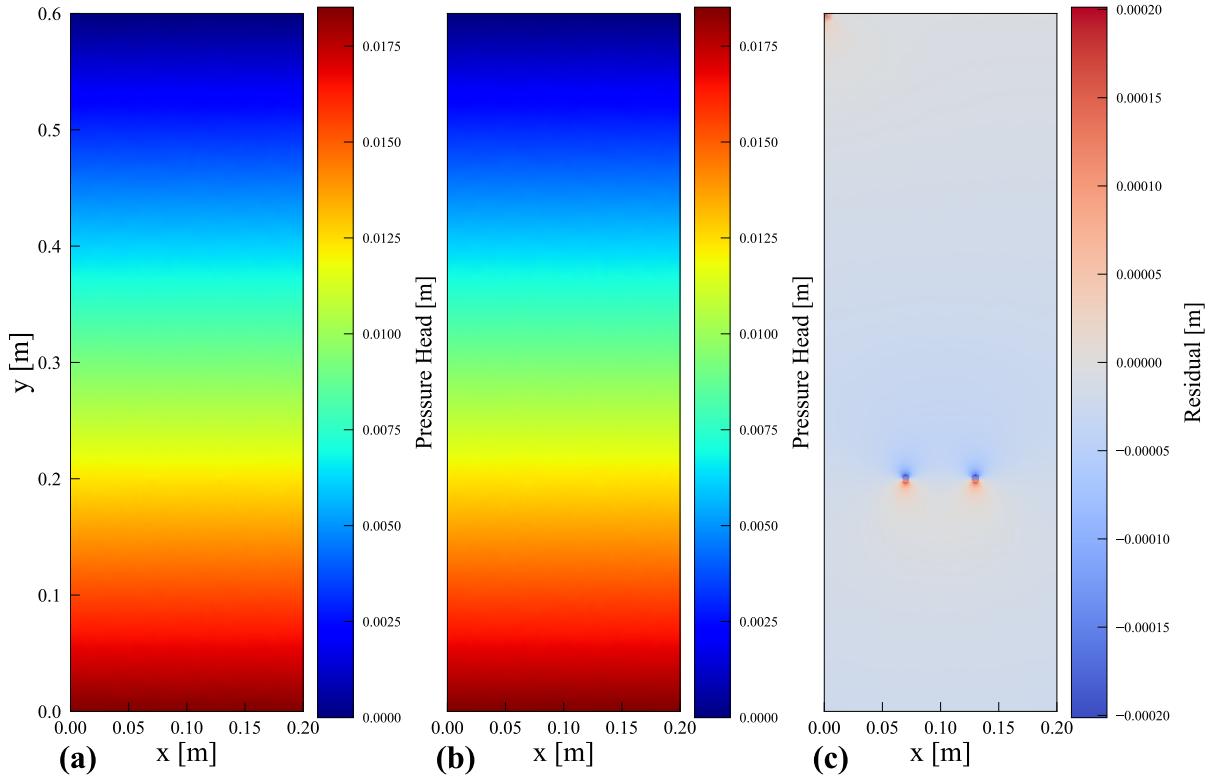


Fig. 2 壓力水頭の空間分布. (a) 数値解, (b) 解析解, (c) 数値解と解析解の残差.

3.1.2.2 使用した物性値

本検証解析においては、実験に用いた鳥取砂丘砂の物理的性質を忠実に再現するため、予備実験によって決定した物性値を Table 1 に示した。

3.1.2.3 逆解析による境界条件の同定

実験では管表面温度等が計測されているが、接触熱抵抗や流入条件の不確実性を考慮し、逆解析により有効な境界温度を同定した。逆解析には PEST (John, 2004) を用い、下端からの流入水温度および凍結管表面温度を推定パラメータとした。比較対象となる温度観測点は、流速の不均一性の影響を低減するため領域中央の鉛直線上（高さ 0.15 m から 0.45 m の 7 点）に選定した。ここで、相変化領域の再現性を最優先とするため、凍結管近傍（高さ 0.20 m および 0.25 m）の重み係数を他の点より大きく設定した。この重み付けにより、未凍結部全体のフィッティングに引きずられることなく、凍結フロント近傍の挙動を重点的に再現した。

Table 1 予備実験により同定された熱物性値および水理定数

Parameter	Thermal Properties			Hydraulic Properties			
	Component	Symbol	Value	Symbol	Unit	Value	
Porosity	–	ϕ	0.4	θ_s	[–]	0.399 71	
Density	Soil	ρ_s	2684	θ_r	[–]	0.006 71	
	[kg m ⁻³]	Water	ρ_w	1000	α_1	[m ⁻¹]	4.034
		Ice	ρ_{ice}	917	α_2	[m ⁻¹]	0.040 34
Specific heat	Soil	c_s	636.8	n_1	[–]	8.461 52	
	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]	Water	c_w	4186	n_2	[–]	1.309 84
		Ice	c_{ice}	2100	w_1	[–]	0.723 52
Thermal conductivity	Soil	λ_s	2.44	K_s	[m s ⁻¹]	3.75×10^{-4}	
	[W m ⁻¹ K ⁻¹]	Water	λ_w	0.6			
		Ice	λ_{ice}	2.2			

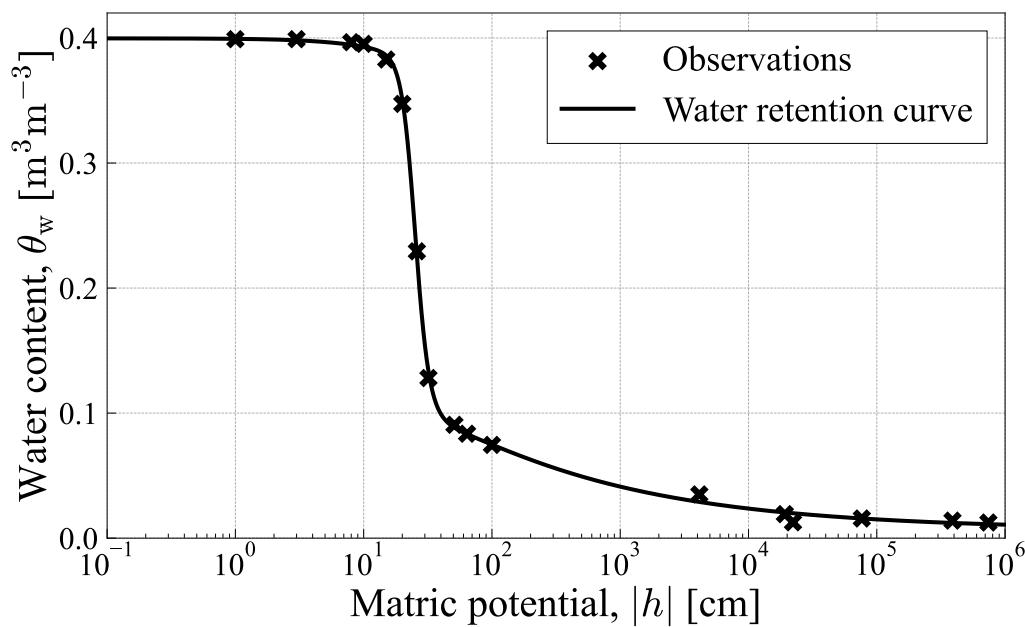


Fig. 3 同定されたパラメータに基づく鳥取砂丘砂の水分保持関数

3.1.3 結果と考察

3.1.3.1 逆解析を用いた境界条件推定

3.1.2.3 小節で述べた逆解析手法を用いて、境界条件の温度について推定を行った。実験期間中の外部環境温度の変化を Fig. 4 に示す。また、実験期間中の外部環境温度に関する統計量を Table 2 に示す。

まず、Fig. 4, Table 2 より、凍結管表面の熱電対の温度は、往き側・還り側はそれぞれ平均約 -1.44°C , -1.18°C であり、実験期間中においては比較的安定していたことが分かる。また、室温は平均約 5.05°C であり、初期温度場として 5.0°C を設定したことも妥当であり、実験装置周囲の放射熱交換も大きく変動しないと考えられるため、断熱境界条件の妥当性も支持される。つまり、実験期間中においては、外部環境温度は比較的一定であったため、逆解析における温度境界条件推定において、境界での温度を時間発展させなくても安定した結果が得られることが期待される。

逆解析により推定された境界温度は、下端が 4.219°C 、往き側が約 -2.500°C 、還り側が約 -1.970°C となり、いずれも実験期間中の実測平均値とは異なる値を示した。まず、

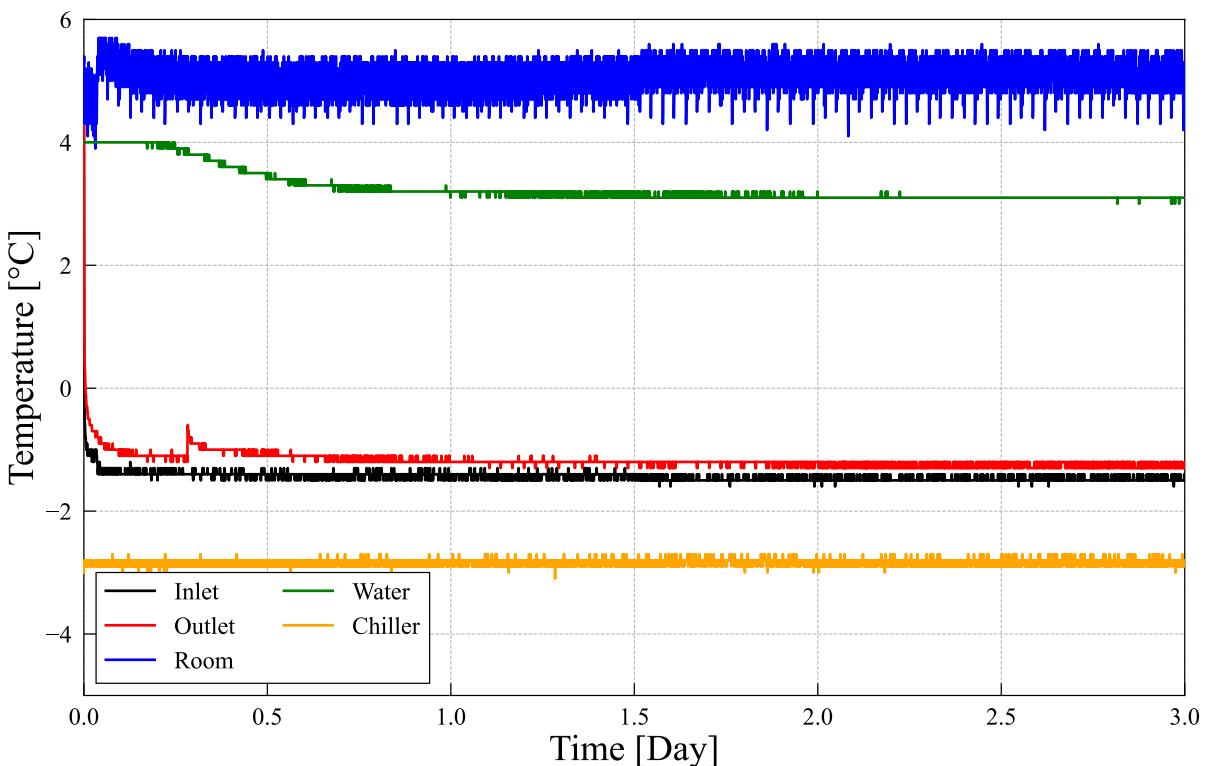


Fig. 4 実験時の外部環境温度変化

Table 2 実験期間中の外部環境温度に関する統計量

Variable	Min	Median	Max	Mean	Std. Dev.
Inlet	-1.6	-1.4	1.2	-1.44	0.09
Outlet	-1.3	-1.2	2.0	-1.18	0.13
Room Temp.	3.9	5.0	5.7	5.05	0.28
Water Temp.	3.0	3.1	4.0	3.26	0.27
Chiller Temp.	-3.1	-2.8	-2.7	-2.83	0.06

往き側および還り側の推定温度が実測値の平均（それぞれ約 -1.44°C , -1.18°C ）よりも低くなった点について考察する。この乖離は、実験装置の断熱が完全ではないことに起因すると考えられる。すなわち、周囲環境からの放射および自然対流による受熱が、配管表面や熱電対そのものに影響を与え、実測値が内部を流れる実際のブライン温度よりも高く観測されていた可能性が示唆される。推定された境界温度はチラーの設定温度（約 -2.8°C ）に近い値であり、逆解析によって外乱の影響を除外した実効的な境界温度が得られたと解釈できる。また、往き側の推定温度が還り側より低くなった結果は、凍結管が往き側から還り側へと直列に接続された流路構造と整合する。これは、往き側で土壤冷却に寄与したブラインが昇温して還り側へ流入する過程を正しく反映しているといえる。一方、下端境界温度がタンク内の循環水温度（約 3.26°C ）よりも高く推定された点については、以下の二つの要因が挙げられる。第一に、実験装置が室内に設置されているため、循環水がタンクから試験体下端に到達するまでの経路において周囲環境からの吸熱が生じたこと、第二に、循環ポンプの機械的損失に伴う発熱が水温を上昇させたことである。これらを鑑みれば、推定された下端境界温度がタンク内水温よりも高くなることは物理的に妥当である。

3.1.3.2 逆解析を用いた境界条件推定による温度の経時変化

Fig. 5 に、逆解析によって推定された境界条件を用いて解析した結果と実験で得られた温度の経時変化を比較した。ここで、実測値については特に 15, 20, 25, 30, 40 cm の深さに設置された 1 時間ごとの熱電対のデータを示している。

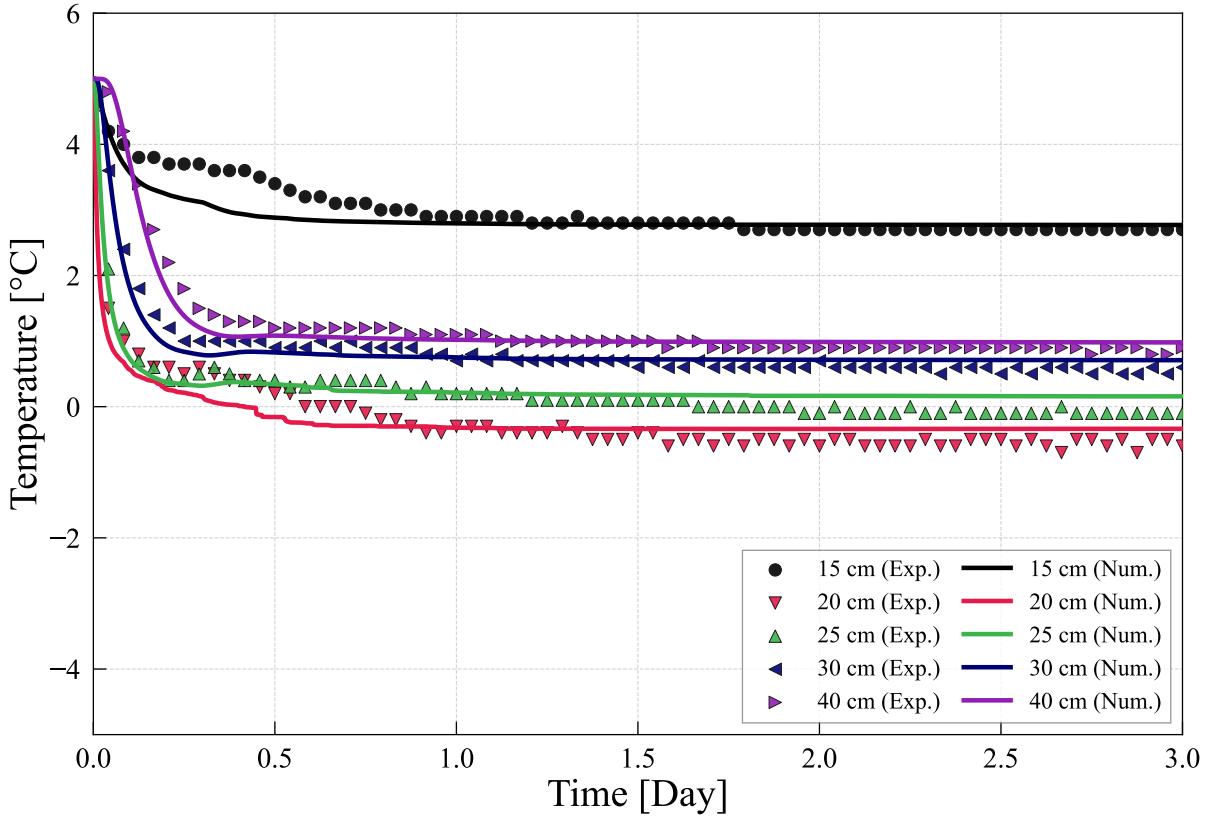


Fig. 5 逆解析による境界条件推定を用いた温度の経時変化の比較

Fig. 5 より、全体として数値解析結果 (Num.) は実験値 (Exp.) の傾向を良好に再現していることが分かる。3 日間にわたる実験期間中において、温度が 0°C 付近で推移するゼロカーテン現象 (zero-curtain effect) が適切に表現されている。これは、凍結管を介したブラインをによる冷却と、地下水流による連続的な熱供給、そして潜熱放出の間のエネルギーバランスが、数値モデルにおいて正しく計算されていることを示唆している。しかしながら、実験開始から約 0.5 日付近において、モデルと実験値の間に顕著な乖離が見られる。実験データでは過冷却の解消に伴う急激な温度上昇が確認できるのに対し、数値モデルではこの挙動を捉えきれていない。この主な要因は、熱的境界条件の簡略化と、数値モデルが核形成のような確率的なプロセスを考慮していない点にあると考えられる。実際の実験系では、ブライン循環と水循環は独立しており、ブライン温度は一定であったものの、流入水温は実験の進行とともに徐々に低下し、最終的に約 3.2°C で安定した。これに対し、本数値モデルでは流入境界温度を時間的に一定の値として扱っている。この仮定は、長期的な凍結プロセスの全体像をシミュレートするには十分であるが、過冷却の解消のような急激な過渡現象を完全に再現するには限界がある。こうした局所的な不一致はあるものの、逆解析により推定された境

界条件は物理的に妥当なものであった。これらの結果は、本数値ソルバーが観測された凍結挙動を信頼性高く再現でき、凍結プロセスの解析手法として適切であることを示している。

3.1.4 本解析手法の妥当性と適用範囲に関する総括

以上の結果に基づき、本解析手法の適用範囲と工学的有用性について総括する。実験初期に見られた過冷却現象に伴う温度の不一致は、核形成確率などの相変化の微視的メカニズムを捨象したマクロな連続体モデルの限界を示すものである。しかしながら、人工凍結工法の設計や施工管理において主たる関心事となるのは、過冷却解消後の定常的な凍結進展挙動や、最終的に形成される凍結土の造成範囲である。本数値モデルは、凍結進行に伴う潜熱放出と地下水水流による熱供給のバランスを正確に再現できており、長期的な温度場形成を予測する上で十分な精度を有していると判断できる。

また、逆解析によって同定された境界条件が実測値と乖離した事実は、実験計測値には不可避的に環境からの外乱が含まれることを示唆している。逆に言えば、本研究で用いた逆解析手法は、こうした外乱の影響をフィルタリングし、数値計算上で物理的整合性を保つための実効的な境界条件を抽出する有効な手段であるといえる。不確実性の高い実験境界条件を直接入力するのではなく、逆解析を通じてシステム全体の熱収支と整合する値を同定するアプローチは、複雑な熱的境界を有する地盤凍結問題を扱う上で極めて合理的である。

したがって、構築した数値解析モデルおよび逆解析によるパラメータ同定手法は、凍結現象の主要なプロセスを捉える妥当なアプローチであり、次章以降の検討における信頼性は担保されたものと結論付ける。本検証により、数値モデルは実験室規模の現象を再現可能であることが確認されたため、次章では本ソルバーを用いて、より広範な条件下でのパラメータスタディや、実規模を想定した解析への適用を進める。

3.2 地下水流れ存在下での人工地盤凍結工法におけるパラメータスタディ

3.2.1 概要

前章までは、室内模型実験およびその再現解析を通じて、構築した数値解析モデルの妥当性を検証した。本章では、検証済みの数値モデルを実規模を想定した広域な解析領域に適用

し、地下水流が存在する地盤における凍結挙動についてのパラメータスタディを行う。

地下水流は、凍結管による冷却エネルギーを移流によって拡散させ、凍結土の形成を阻害する主要な要因となる。特に、複数の凍結管によって形成される凍結領域が連結（閉合）し、遮水壁として機能するまでの所要時間は、地下水流速や凍結管の本数、配置間隔といった設計因子に強く依存する。そこで本章では、解析領域内の初期地下水流速および凍結管の配置条件（本数・間隔）をパラメータとして変化させ、これらが凍結壁の閉塞時間や形成される凍結領域の形状に及ぼす影響を定量的かつ網羅的に検討する。また、得られた数値解析結果に基づき、既存の設計理論式に含まれる幾何学的パラメータ（代表長さ）の再評価を試みる。

3.2.2 解析条件および計算ケース

解析対象として、凍結管が配置されている空間内のある一定の深さにおける $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ の水平断面領域を設定した。凍結管は表面温度一定 (-30°C) とし、解析領域の左端（流入境界）から 10 m の地点に、領域中心軸に対して上下対称となるように配置した。

計算ケースとして、凍結管の本数を 2, 4, 8, 12 本の 4 水準とし、それぞれの配置において凍結管間隔を $0.6, 0.8, 1.0\text{ m}$ の一定間隔とした組み合わせについて検討を行った。また、地下水流の影響を詳細に評価するため、初期地下水流速については、 0.0 m d^{-1} から 1.2 m d^{-1} の範囲で計 19 通りの流速条件を設定した。これにより、流速の増大に伴う凍結閉塞時間の変化および閉塞限界近傍の非線形な挙動を捉えることを可能とした。その他の解析条件（境界条件の設定等）および物性値については、前章の実験検証と同様とした。

3.2.3 結果

3.2.3.1 凍土壁閉塞時間の算出

各計算ケースにおいて、得られた温度分布の経時変化に基づき、凍土壁が閉塞するまでの所要時間を算出した。ここで「閉塞」とは、隣接する凍結管から成長した凍結領域が連結し、凍結管列の間隙が全て 0°C 以下の領域で満たされた状態と定義した。

3.2.3.2 双曲線フィッティングによる限界流速の同定

それぞれの凍結管間隔・本数に対し、初期流速と凍土が閉塞するまでの時間について双曲線フィッティングを行った。凍結管本数が多い条件では、初期流速が閉塞成立の限界（限界

流速)に近づくにつれて閉塞時間が急増する傾向が見られたが、双曲線フィッティングはこうした全体的な挙動を概ね良好に捉えることができた。

特に凍結管が2本の場合、フィッティングされた双曲線の漸近値(閉塞時間が無限大となる流速)は、既存の理論式から算出される理論的な限界流速とよく一致した。これより、本数値解析結果のフィッティングより得られる漸近値は、理論上の閉塞限界と等価であるとみなせる。したがって、以下の考察においては、この数値的な漸近値をその計算ケースにおける「実効的な限界流速」として取り扱う。

3.2.4 考察

3.2.4.1 代表長さの逆算と評価

前節の結果に基づき、限界流速式で算出される限界流速を数値的な漸近値に置き換えることで、式中の経験的パラメータである「代表長さ」を数値計算によって逆算することを試みた。従来、この代表長さとしては凍土壁全長(凍結管列の全幅)が慣例的に用いられてきたが、管間隔や密度効果は考慮されていなかった。このようにして数値的に求めた代表長さと、慣例的に代表長さとして用いられてきた凍土壁全長との比較を行ったところ、凍結管配置によっては両者に有意な乖離が生じることが確認された。

3.2.4.2 新たな代表長さ算定式の構築

上記の知見を踏まえ、より合理的な設計パラメータを導出するため、凍結管間隔、凍結管密度およびそれらの相互作用項を説明変数とする重回帰分析を行い、新たな代表長さの算定式を構築した。分析の結果、提案式を用いることで、凍結管配置を考慮した代表長さを良好に整理できることが確認され、本手法の有効性が示された。

本研究で構築した代表長さの算定式は、凍結管間隔や凍結管密度など、あらかじめ決定可能な幾何学的条件のみを説明変数としている。このため、従来設計者の経験的判断に委ねられていた代表長さを、客観的かつ定量的に決定することが可能となる。本研究の成果は、解析的設計手法の信頼性および実用性を向上させ、地下水流动を伴う人工地盤凍結工事の設計において、過度に保守的な設計や不要な地盤改良の解消に寄与することが期待される。

引用文献

John, Doherty (2004). *Model-Independent Parameter Estimation User Manual* (5th). Watermark Numerical Computing.

巽 友正 (1982). 流体力学 培風館