

凍土遮水壁における凍土-未凍土境界部分の透水係数¹

Coefficient of permeability of unfrozen soil in front of the freezing earth wall

山本 はいか² 摂南大学工学部 理工学研究科
 伊藤 譲 摂南大学工学部 都市環境工学科
 YAMAMOTO, Haika Faculty of Science and Engineering,
 Setsunan University
 ITO, Yuzuru Department of Civil and Environmental Engineering,
 Setsunan University

Abstract

The purpose of this study is to assess the permeability of unfrozen part of the freezing earth wall. When the ground freezes, an ice lens is generated, and the ground is divided into frozen soil and unfrozen soil with this ice lens as the boundary. If the frozen earth wall is maintained for a long period of time, shrinkage cracks may occur due to dehydration consolidation of unfrozen soil, and groundwater can flow into the unfrozen soil generating water supply that bypasses the frozen earth wall. In this study, the coefficient of vertical permeabilities along the ice lens before, during, and after freeze-thaw were experimentally investigated. Using the hydraulic conductivity k_p obtained in the standard consolidation test, the relational expression between the void ratio and the coefficient of permeability was obtained. As a result, the coefficient of permeability of the frozen-thawed soil was greater than that in the unfrozen state. In particular, the permeability after thawing was the greatest among them. The measured coefficient of permeability was much greater than the estimated coefficient of permeability from a consolidation test. Comparing the estimated coefficient of permeability with the measured value, it was 2 times greater in the unfrozen soil part during freezing and 100 times in the frozen-thawed soil. The reason why the measured coefficient of permeability was greater than the estimated value is, we suppose that the invisible shrinkage cracks generated in the freeze-thaw tests works as the water paths.

キーワード: 透水係数, 未凍土, 凍結融解, 凍土, アイスレンズ

Keywords : permeability, unfrozen soil, freeze-thaw, frozen soil, ice lens,

1 【原稿受付】2021年9月11日, 【掲載決定】2022年1月26日

2 【主著者連絡先】山本 はいか 摂南大学大学院修士課程, mail:20m210yh@edu.setsunan.ac.jp
 〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町17-8, 摂南大学大学院理工学研究科

1. はじめに

1-1 背景

地盤の強度増加や遮水性を期待して、地中構造物の建設のための補助工法として人工地盤凍結工法⁷⁾が用いられる。本工法は、図1のように地盤中に設置された凍結管に不凍液を循環させ、地盤を凍結させる工法である。福島第一原子力発電所廃炉事業においても、本工法は高濃度の汚染水が滞留している原子炉建屋内への地下水流入量を減少させ、汚染水の増加を抑制するために使用されている。廃炉事業では運用期間が通常の地盤凍結工法よりも格段に長く、今後数十年の運用がなされることも考えられるため、その耐久性が懸念される。その理由は次のとおりである。凍土が長時間維持される場合、凍土の全面の未凍土部分では脱

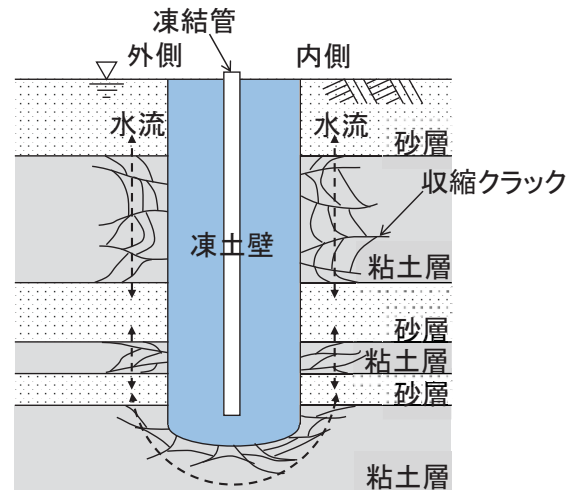


図1 SC(収縮クラック)を通過する
水流のイメージ

水圧密によるクラックが生じ、それらが連なって地下水が流れ込むことにより凍土を回り込む水道(みずみち)は発生することが考えられる。細粒土を凍結させると¹⁾、凍結面付近にアイスレンズ(II)が生じる²⁾。成長を続けるII前面の未凍土部分では、脱水压密されて間隙が小さくなり、透水性が低下する³⁾。ところが、粘土が脱水压密されると乾燥収縮によりクラックが発生する。それらのクラックは亀甲状を呈し、連結するとII方向と直角方向の水道となり得る⁴⁾。廃炉事業のように長期間凍土壁が維持される場合、凍土と未凍土の境界一定の位置にあり、II前面の未凍土が長期的に脱水压密される。そして、乾燥収縮クラックが成長し、本来は難透水層とされている粘土層が、砂層に匹敵する透水層へと変化する可能性が考えられた⁵⁾。なお、冷凍機のトラブルが発生して、凍土の一部もしくは全部が融解する⁷⁾と、凍結融解土の透水係数の増加減少により想定外の水流が発生する可能性もある⁸⁾。

1-2 目的

本研究の目的は人工地盤凍結工法の長期的な遮水性を示す、凍結中の凍土前面の未凍土部分における透水性⁹⁾を評価することである。供試体を低温側から凍結させるとIIが発生し、地盤はこのIIから低温側の凍土部分とIIから高温側の未凍土部分に分かれている状態になる。そのため、凍土遮水壁を想定した凍結融解実験により凍結中の凍土前面の未凍土および凍結融解後の透水係数について、以下に示す検討を行った。凍結中は、IIより高温側の未凍土部分を対象とした透水試験を実施した。

- 1) 土のII平行方向における透水係数の変化を把握するために、凍結前、凍結中(IIより高温側)、凍結融解後(融解土と未凍結部分)、全凍結融解後の計4回の鉛直方向の透水試験を実施する。
- 2) 凍結融解後供試体の間隙比分布と圧密透水試験の結果から計算した透水係数を上記の実測値と比較する。

2. 実験方法

2-1 供試体

試料土は表1に示す425 μm ふるいを通させた稲荷山黄土粘土である。供試体は、含水比が液性限界の1.3倍になるようにイオン交換水を加えて含水比調整を行い、攪拌してペースト状にしたものを脱気した後、24時間以上養生し、脱気したペーストを流し込み、9.8、19.6、38.2、78.4、156.8、313.6、500.0

kN/m²まで段階ごとに予圧密して作成した。予圧密後の供試体高さが7cmとなるように計算した量のペースト状にされた試料土を流し込んだ。

図2に本試料で実施した土の段階载荷による圧密試験(JIS A 1217)から得た間隙比と透水係数の関係を示す。圧密透水試験から得られた透水係数を k_p 、標準圧密試験から計算された透水係数を k_c とした。間隙比 $e=0.51$ のとき、 $k_c=7.60 \times 10^{-11}$ m/sであり、透水係数が著しく低下した。これは、透水試験を開始する際に、初期水位を基準水面の近くに設定したことが原因だと考えられる。

2-2 水平拘束凍結融解鉛直透水実験

図3に水平拘束凍結融解鉛直透水実験装置を示す。前面、背面の亚克力プレート、Tc側(低温側)とTw側(高温側)のアルミプレートからなる供試体部分の寸法は、縦=100mm、横=200mm、奥行き=50mm、である。Tc側とTw側アルミ製冷却プレート、前面・背面の厚さ=50mmの透明亚克力板、上・下部の塩化ビニル製のプレートで構成される。冷却プレートには、それぞれ低温恒温水層(低温側=Tcバス、高温側=Twバス)で温度管理された不凍液(ブライン)が循環される。供試体両端の温度は、それぞれ冷却プレートに設置されたPtセンサーにより、給排水量の変化は、電子天秤により測定した。

図4に凍結中の供試体断面を示す。上部プレートは、シャフトガイドを3箇所を使用し、傾きを防止した。上部プレートに変位板を取り付け、鉛直方向に変位を測定した。また、上部プレートの下には、凍上現象が起こっても上載荷重 p が供試体に対し、均一に作用するように、ゴム製のパルーンを使用した。本実験の透水試験は、鉛直方向の透水試験を下部から上部へ方向に実施した。透水試験中は、TcとTwプレートに設置させた供試体への給排水コックを閉じ、ビュレット以外の水の出入りがないようにした。なお、実験中の供試体断面の様子はインターバルレコーダーを用いて30分間隔で撮影した。

表2に実験条件を示す。実験は+3℃に保持された低温室で実施された。予圧密荷重 $P=500$ kN/m²、実験中の圧力 $p=200$ kN/m²とし過圧密状態で実験した。供試体設置と同時に载荷し、 $t=77.7$ 時間から384時間をかけ凍結させた時間を半凍結期間とした。凍結融解後、実験装置から供試体を取り出し、鉛直方向

表1 試料の物性

試料土	土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	液性限界 W_L (%)	塑性限界 W_P (%)	粒度分布		
				砂分 (%)	シルト分 (%)	粘土分 (%)
黄土21N	2.694	37.1	21.9	4.0	66.5	29.5

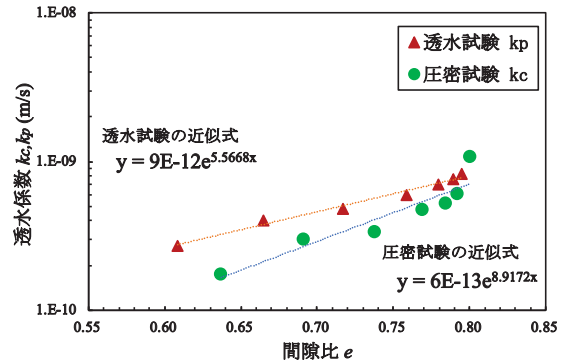


図2 標準圧密透水試験の結果

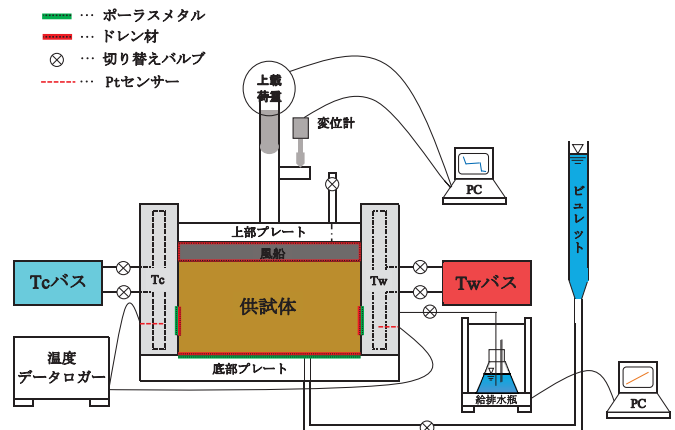


図3 水平方向変位拘束凍結融解鉛直透水実験装置

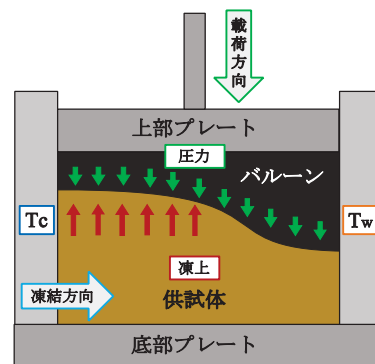


図4 供試体断面図

を上・中・下に3分割し、各々を Tc 側から 1cm ごと 20 個、計 60 個に切り分け、含水比を測定した。

実験結果と考察

3-1 供試体の温度

図5に供試体の高温側 (Tw) と低温側 (Tc) それぞれの冷却プレートの温度変化を示す。凍結はステップ式で、Tc 側と Tw 側の温度をステップ状に変化させた。実験は、Tc・Tw 側=+5.0℃より開始し、その後 Tc 側=-10.0℃、Tw 側=+10.0℃、さらに Tc・Tw 側=-10.0℃とし、Tc・Tw 側共に+5.0℃で融解させた。

その間、図6に示すように合計4回(凍結前、凍結中、凍結融解後、全凍結融解後)の透水試験を各々48時間実施した。凍結前は、Tc・Tw 側=5.0℃、凍結中は Tc=-10.0℃、Tw=10.0℃、凍結融解後は、Tc・Tw 側共に 5.0℃、全凍結の Tc・Tw 側=-10.0℃の後、全凍結融解後は Tc・Tw 側共に 5.0℃で透水試験を行った。なお、透水試験時は透水試験用のコックを開けて、給排水用のコックは閉じた。

3-2 変位

表3に供試体の初期条件、表4に実験前後の変位と排水量の変化量を示す。供試体の初期条件は、供試体質量 $m_0=1655.1$ g、含水比 $w=27.90\%$ 、間隙比 $e=0.745$ であった。排水量 $\Delta Q_d=26.46$ cm³、実験開始時から終了時までの鉛直変位 $\Delta d=-1.84$ mm であった。

図7に供試体の鉛直変位の経時変化を示す。凍結開始から $t=201$ h まで変位は増加を続けた。その後、一時的に低下し、ほぼ一定を保っていたが、再び $t=340$ h で 0.06 mm とわずかに低下した。土の表面は、凍土と未凍土共に等しく増減すると仮定した。

3-3 排水量

図8に排水量の経時変化を示す。凍結期間を通じて Tw 側からの排水が続いた。透水試験中は、給排水瓶のコックを閉じているため、給排水瓶重量の増減は認められない。IL の発生に伴い、未凍土部分から IL 方向への給水を予想していたが、その逆に IL 前面から未凍土方向へと水分の移動が生じていた。凍結中にフラスコの重量が増加していることは、供試体から排水さ

表2 実験条件

試料土	予圧密 P (kN/m ²)	実験荷重 p (kN/m ²)	半凍結期間 t (hour)
黄土21N	500	200	384

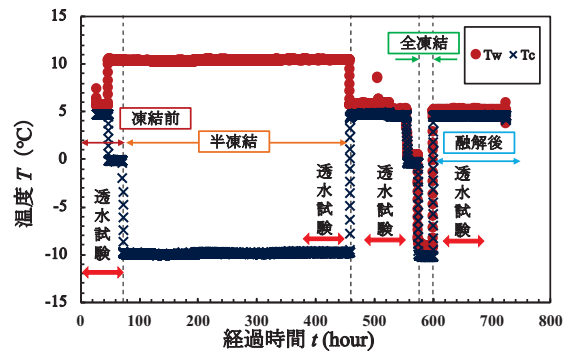


図5 温度の経時変化

表3 供試体の初期条件

初期条件	供試体質量 m_0 (g)	含水比 w (%)	間隙比 e
	1655.1	27.9	0.745

表4 実験による変位と排水量の変化

	初期高さ h_0 (cm)	変位量 Δd (mm)	排水量 ΔQ_d (cm ³)
総変化量	7.70	-1.84	26.46

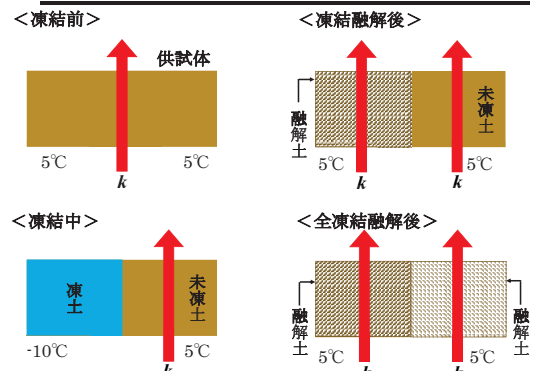


図6 透水試験の違い

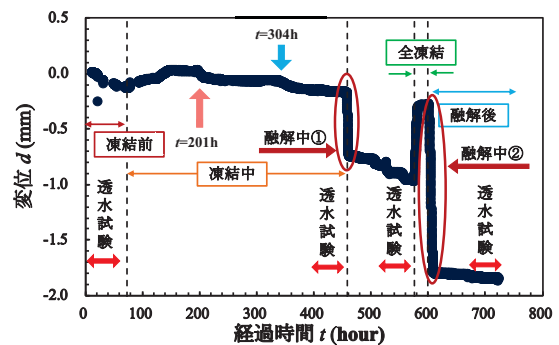


図7 鉛直変位の経時変化

れていることを意味する。これは凍土の成長による水から氷への相変化による体積膨張に相当する体積のほとんどが排水されたと考えられる。また、融解後における排水の増加は、凍結により土粒子から分離した水分が排水されたものと考えられる。目視可能なILが発生した $t=87.3$ hから、凍結中の透水試験を開始するまでは排水を続けていた。

3-4 凍結融解後の含水比分布

図9に凍結融解後の供試体におけるTc側からTw側にかけての含水比分布を示す。ILはTc側からの距離 $x=6.37$ cm, 幅 $t=1.73$ mmで発生した。初期含水比 $w_0=27.90\%$, 実験後の平均含水比 $w=25.14\%$ であり、凍結融解作用により w は2.76%低下した。全凍結融解後、ILよりTw側に位置する $x=7.0\sim 14.0$ cmでは、供試体全体の平均含水比全体的に低かった。また、未凍土部分の両端である $x=7.0$ cmと 20.0 cmの含水比は同等であった。 $x=7.0$ cm, $w=25.05\%$ から $x=10.0$ cmまでの3.0 cm間は、緩やかに低下し、最低含水比 $w=22.48\%$ を示した。さらに、 $x=10.0$ cmから $x=17.0$ cmにかけて $w=25.12\%$ まで徐々に上昇した。

図10にIL前面のアイスフリンジの模式図を示す。IL前面では、IL成長に伴う未凍土側から水の移動が発生していると考えられる。そのため、未凍土側であっても $x=7.0$ cmは含水比が高くなったと思われる。

3-5 各段階の透水係数の推定

図11に間隙比分布と給排水量から推定したTc側からTw側まで1.0 cmごとの透水係数分布を示す。

各所の透水係数の推定は、図2に示した圧密透水試験の結果から計算している。図10の間隙比 e は、実験終了時のものである。それぞれの推定透水係数 k の分布は、凍結融解後(実験後)の含水比分布=間隙比分布を基準とし、実験終了時からそれぞれの透水試験開始時までの給排水量 Δd が供試体の x に関わらず均等に排水されていると仮定した。排水量から算出した各透水試験時の e を求め、圧密透水試験から得られた関係式に代入して算出後、合成式(1)より求めた。

$$k_H = \frac{(\Delta h_1 k_1 + \Delta h_2 k_2 + \dots)}{H} \quad (1)$$

また、凍結中の排水量は未凍結部分のみの変化量とした。凍結前、凍結融解後、全凍結融解後においては供試体全体にあたる 756.7 cm³, 半凍結中は未凍土部分のみが透水試験の対象であるためILよりTw側部

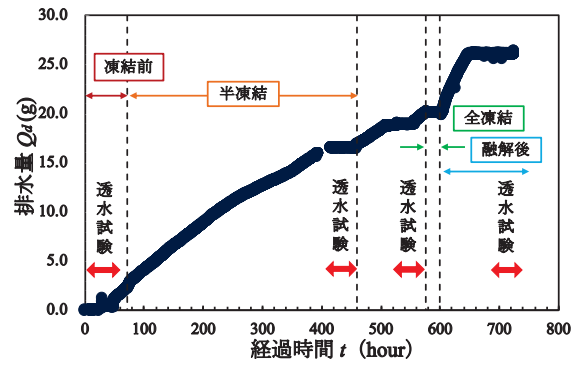


図8 給排水量の経時変化

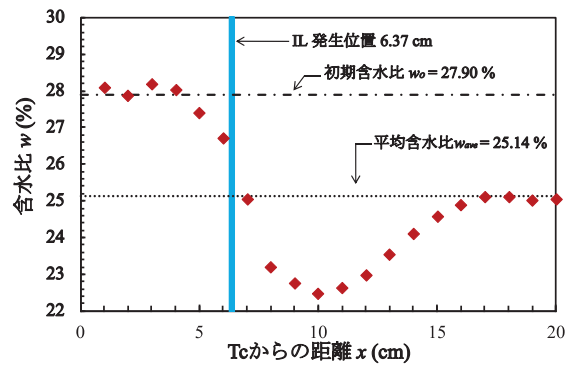


図9 融解後の含水比分布

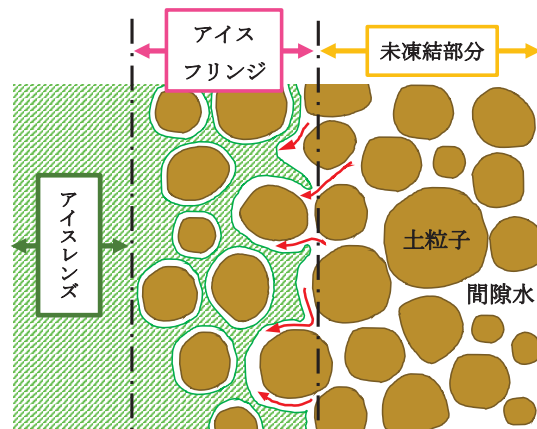


図10 アイスフリンジの模式図

分 = 206.0 cm³ とした。実験後の推定透水係数平均値は、順に凍結前 $k = 6.31 \times 10^{-10}$ m/s, 凍結融解後 $k = 5.01 \times 10^{-10}$ m/s, 全凍結融解後 $k = 4.60 \times 10^{-10}$ m/s, 凍結中 $k = 2.85 \times 10^{-10}$ m/s であった。

3-6 透水係数の変化

図 12 に透水試験中の透水係数の経時変化を示す。凍結前の透水係数は不安定であり、 $t=20.0$ h 程度までは、供試体設置の影響があると思われる。凍結中、凍結融解後、全凍結融解後は比較的安定しているが、 $t=8.0$ h 程度までは不安定に思える。そこで、透水係数の平均値 k は各透水試験中 $t=8.0$ h から、透水試験終了時までの値を平均した。また、凍結中に行った透水試験の対象とした供試体断面積は IL より Tw 側の未凍土部分のみとした。実測した透水係数は順に、全凍結融解後 $k = 1.47 \times 10^{-7}$ m/s, 半凍結融解後 $k = 1.88 \times 10^{-8}$ m/s, 凍結前 $k = 7.09 \times 10^{-10}$ m/s, 凍結中 $k = 6.37 \times 10^{-10}$ m/s と、凍結中の透水係数が最も小さかった。これは図 9 により、 $x=8.0 \sim 14.0$ cm 部分の水分が IL の成長に伴い、一部は吸引され IL が成長し、同時に体積膨張分の大半が Tw 側より排水された。このことは間隙比分布の形状と一致している。

3-7 各段階の透水係数の比較

表 5 と図 13 に、透水係数 k の実測値と推定した透水係数 k_e の間隙比関係を示す。実測値と推定値の透水係数に最大の差があったのは、全凍結融解後であり、 $k = 4.60 \times 10^{-10}$ m/s は $k = 1.47 \times 10^{-7}$ m/s の約 320 倍であった。凍結前は、 $k = 7.09 \times 10^{-10}$ m/s と $k = 6.31 \times 10^{-10}$ m/s は、ほとんど同じ値であった。凍結融解後と全凍結融解後において、間隙比 e は小さくなるが、透水係数 k は高くなり、凍結前と凍結中は、間隙比 e が低下すると k も低下した。未凍土では、圧密透水試験の結果から推定した供試体の透水係数に対して、実測値が大幅に上回っている。これは未凍土中に発生した目視できないクラックによるものと思われる。これは、IL 発生付近の透水係数が推定値よりも透水係数が高い可能性がある。つまり、目視では半凍結融解後に IL が閉じたように見えたが、IL 発生位置近傍である Tc 側からの距離 $x=6.0 \sim 7.0$ cm 付近では融解した IL が残水しており、著しく高い含水比となった部分は大きな水道となり、推定値よりも高い透水係数を示したと考えることができる。

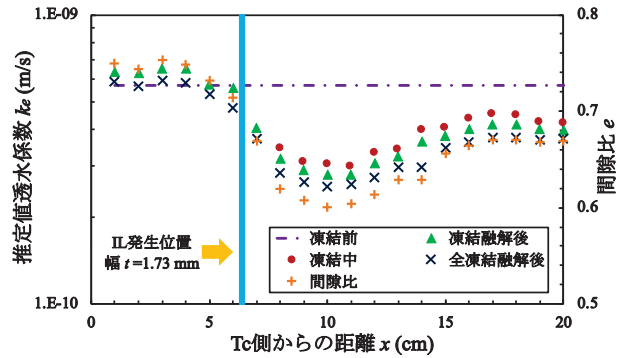


図 11 間隙比分布と推定値 k の関係

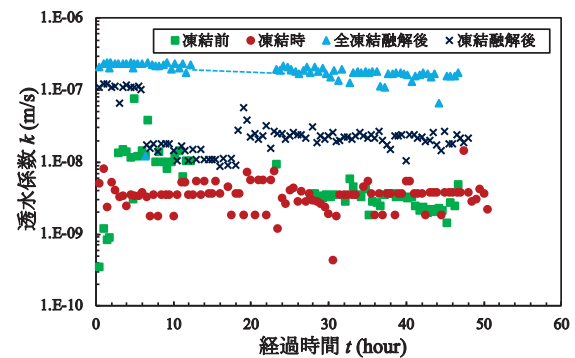


図 12 実測値 k の経時変化

表 5 透水係数の比較

k (m/s)	凍結前	凍結中	凍結融解後	全凍結融解後
推定値	5.70×10^{-10}	3.80×10^{-10}	4.35×10^{-10}	3.93×10^{-10}
実測値	7.09×10^{-10}	6.37×10^{-10}	1.88×10^{-8}	1.47×10^{-7}

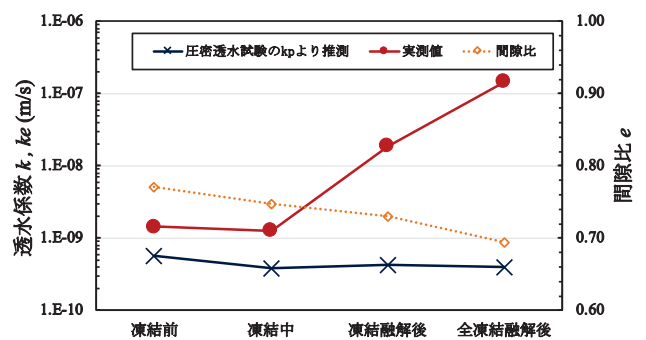


図 13 実測値 k ・推定値 k_e ・間隙比 e の関係

4. 結論

本研究の結論を以下にまとめる。

- (1)凍土遮水壁の凍土前面における未凍土部分の透水性を評価するため、水平変位拘束鉛直透水実験装置を用いて、水平方向に凍結融解する時の、鉛直方向の透水試験を実施した。透水試験は、未凍結状態、凍結状態（未凍結部分）、凍結融解状態、全体的に凍結融した後の融解状態の4通り行った。
- (2)凍結過程では、凍結面が停止した状態で、アイスレンズは成長を続けた。この間、供試体の鉛直変位はほとんど認められなかったが、高温側（Tw）からの排水量は一定に増加した。このことより、凍土は成長に伴い未凍土側を圧縮（圧密）して、排水が行われたものと考えられる。
- (3)凍結融解後の含水比分布より、凍土側の含水比が高くなり、アイスレンズ前面では含水比が著しく低下し、そこからTw側にかけての未凍土側では凍土側よりも含水比が低くなっている。
- (4)含水比分布から間隙比分布を計算し、圧密透水試験における間隙比と透水係数の関係から供試体の透水係数を算出して、実測値と比較した。凍結融解後の間隙比分布と圧密透水試験から計算された透水係数と実測値の関係では、実測値の方が凍結中の未凍土部分で3倍、凍結融解では43倍、全凍結融解では376倍大きくなった。
- (5)凍結融解によるIL方向の透水係数の増加は、主に低温側の凍結融解による間隙比の増加によるものと考えられる。凍結融解作用により凍土部分の間隙比が増加し、凍結融解後の透水係数が大きくなる。

謝辞

本実験の主要部分は摂南大学都市環境工学科の原氏、原田氏の卒業研究として実施しています。

参考文献

- (1) Chamberlain, E. J. and Gow, A. J., “Effect of Freezing and Thawing on the Permeability and Structure of Soils”, *Engineering Geology*, 13(1979), pp.73-92.
- (2) Benson, C. and Othman, M. A., “Hydraulic conductivity of compacted clay frozen and thawed in situ”, *Journal of Geotechnical Engineering*, 119-2(1993), pp.276-297.
- (3) Konrad, J. M. and Samson, M. “Hydraulic conductivity of kaolinite-silt mixtures subjected to closed-system freezing and thaw consolidation”, *Canadian Geotechnical Journal*, 37(2000), pp.857-869.
- (4) Dumais, S and Konrad, J. M., “Compressibility and Hydraulic Conductivity of Thawed Fine-Grained Permafrost”, *11th International Symposium on Cold Regions Development*, (2016).
- (5) Ito, Y., Kamon, M., K. Aramoto, “Influence of freezing method on the permeability of frozen-thawed soils”, *Proc. 5th Japan-Korea Joint Seminar on Geoenvironmental Engineering*, (2005), pp.194-199.
- (6) 玉崎千秋, 伊藤讓, 嘉門雅史, 「細粒土における凍結融解作用による透水係数変化のメカニズムに関する研究」, 第8回地盤改良シンポジウム, (2008), pp.75-78.
- (7) 伊藤讓, 石川達也, 赤川敏, 所哲也, 大西有三, 上田保司, 廣瀬剛, 「過圧密粘性土の凍結融解による透水係数変化に関する実験」, 第50回地盤工学研究発表会, (2015), pp.895-896.
- (8) 廣瀬剛, 伊藤讓他: 凍結融解繰り返しによる飽和細粒土のアイスレンズ面方向の透水係数変化について(1)(2), 平成28年度土木学会年次学術講演会, (2016), pp.627-630.
- (9) 廣瀬剛, 伊藤讓他: 飽和細粒土の凍結融解によるアイスレンズ方向の透水係数変化, 2016年度摂南大学融合科学研究所文集, (2016), pp.627-630.