

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

— 融解後の間隙比分布の影響 —¹

Difference of Permeability of Freeze-Thawed Soils by the Directions of Ice Lens

- Influence of Void Ratio Distribution after Thawing -

廣瀬 剛² 摂南大学工学部 工学研究科

伊藤 譲 摂南大学工学部 都市環境工学科

HIROSE, Go Graduate School of Science and Engineering,
Setsunan University

ITO, Yuzuru Department of Civil and Environmental Engineering,
Setsunan University

Abstract

The purpose of this study is to evaluate the influence of freezing direction on the permeability of freeze-thawed soils. In this study, the permeability of both ice lens (IL) and IL orthogonal directions in the freeze-thawed soil were experimentally investigated. As a result, the permeability of IL direction was greater than IL orthogonal direction. Especially, the permeability of open-system freeze-thawed soils increased remarkably and it received not only the overburden pressure but also the influenced of both condition of pre-consolidation pressure and the number of freeze-thaw cycles. The permeability of closed-system freeze-thawed soils was lower than that of open-system. It was concluded that the permeability of freeze-thawed soil of IL direction is greater because of the remarkably greater void ratio in the colder temperature side of freezing.

キーワード： 凍結融解、透水係数、アイスレンズ、飽和細粒土

Keywords : freeze-thaw, coefficient of permeability, ice lens, saturated fine-grained soil

1. 背景と目的

1-1 背景

細粒土が凍結すると土中にアイスレンズ (IL) と呼ばれる氷晶が形成される。これは土中の間隙水の一部

¹ 【原稿受付】 2016年8月8日、【掲載決定】 2016年9月28日

² 【主著者連絡先】 廣瀬 剛 摂南大学、博士課程後期 e-mail: 15d301hg@edu.setsunan.ac.jp
〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町 17-8、摂南大学工学部 工学研究科

が凍結しないで過冷却水となり、周囲の水分を吸水しながら少しずつ成長するために生じる現象である。ILの発生・成長は同時に未凍土部分の脱水圧密を促し、収縮クラックが発生する。ILは凍結面の進行に伴い図1に示すように幾層にもわたって形成される。これは凍上現象と呼ばれ、粘性土などの細粒土を有する寒冷地の地盤でしばしば発生し、土の性質を変化させ、凍結時の地盤隆起や融解時の泥濘化や解凍沈下を起すことが知られている。

Camberlain⁽¹⁾やBenson&Othmanら⁽²⁾は凍結融解後の透水係数の変化を調べ、ILや収縮クラックの痕跡が原因となって融解後の透水係数が増加すると主張した。凍結融解後の間隙比と透水係数の変化に着目した研究として、Konradら⁽³⁾は凍結融解によって細粒土の間隙比が減少しても透水係数が増加することを報告している。Dumaisら⁽⁴⁾は凍結融解による透水係数の変化には細粒土に含まれる粘土分およびシルト分の粒径や細粒分の平均粒径が関係していることを報告している。Paudelら⁽⁵⁾は繰り返し回数を重ねるごとに透水係数が増加するが、増加幅は次第に小さくなることを報告した。凍結時の冷却条件や荷重条件との関連を調べる研究もされており、例えば、伊藤ら⁽⁶⁾は正規圧密の藤森粘土を用いた凍結融解実験により、透水係数変化が影響を受ける実験条件は冷却方法ではなく、凍結融解中の上載荷重であることを示した。そして、玉崎⁽⁷⁾らは関東ロームを用いて凍結融解前後の間隙比と透水係数の関係を示し、凍結融解による透水係数変化を支配する要素は土構造の変化と要素自体の変化であることを主張した。以上のように、凍結融解による透水係数増加については多くの研究成果が報告されている。

人工地盤凍結工法は、凍土による強度増加や遮水性の付与を期待する工法で、トンネルの掘削防護などを目的に適用されてきた。この工法は地盤に凍結管を打設して不凍液（ブライン）を循環させ地盤に対して水平方向に凍結させる。つまり、人工地盤凍結工法では凍結が地盤に対して水平方向に進行し、上載荷重は鉛直方向に作用している。

最近では福島第一原子力発電所廃炉事業において、原子炉建屋と周囲の水を隔離するために凍土遮水壁の施工が進められており、凍土遮水壁の主たる目的は遮水性にあることが特徴である⁽⁸⁾。凍土遮水壁の維持管理期間は、原子炉建屋からの汚染水の漏水対策が終了するまでとされており、長期間になることが予想される。このような場合には、長期間安全に運用する技術が必要であり、凍結融解土の透水係数変化を把握することが必要不可欠である。

凍土を維持するためには、凍結管に断続的にブラインを循環させる必要があるが、電力トラブルなどが発生すると、凍土の一部もしくは全てが融解する。図2に凍土の一部または全てが融解した時の水の流れを示す。凍土が完全に融解した場合にはIL直交方向の水流(図2、①)が生じ、部分的に融解した場合にはIL方

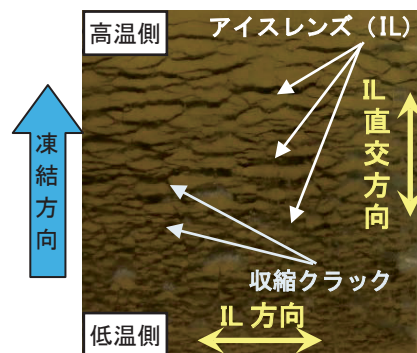


図1 アイスレンズの発生状況

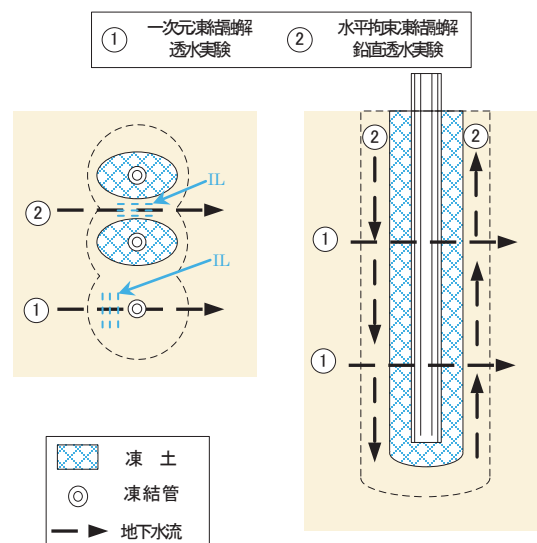


図2 人工凍結地盤融解時の水の流れ

向の水流(図2、②)となる。凍結地盤におけるIL方向の水流は凍結管の間を流れる水平方向の水流であるか、または凍土壁に沿った鉛直方向の水流が考えられる。

ここで、凍結融解現象により生じるILが透水係数変化の要因の一つである場合には、凍結の進行方向と凍結の進行方向に直交する方向では凍結融解後の透水係数が異なる可能性がある。また、融解後の間隙比と透水係数の関係も凍結の進行方向と進行方向に直交する方向で異なる可能性がある。しかし、これまでの研究は主に凍結融解後の透水試験の実施方向、つまりILとIL直交方向の違いについての評価は十分とは言い切れない。

本研究ではIL直交方向の透水係数変化は図3に示す一次元凍結融解透水実験、IL方向は図4に示す水平拘束凍結融解鉛直透水実験により検討しているところである。既往の研究⁹⁾では一次元および三軸凍結融解透水実験を行い、両者の実験結果が良く対応しており、融解後の透水係数変化は主に凍結方向に作用する実験荷重のみに影響されることを確認した。

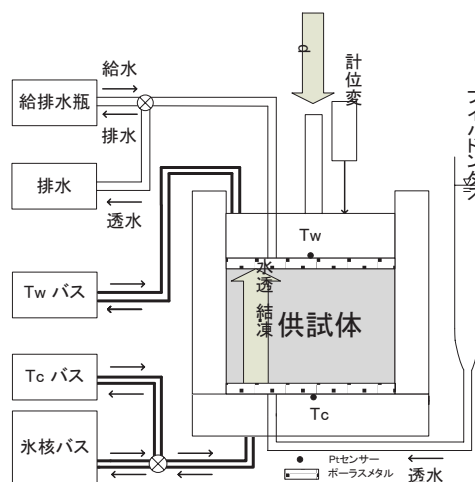


図3 一次元凍結融解透水実験

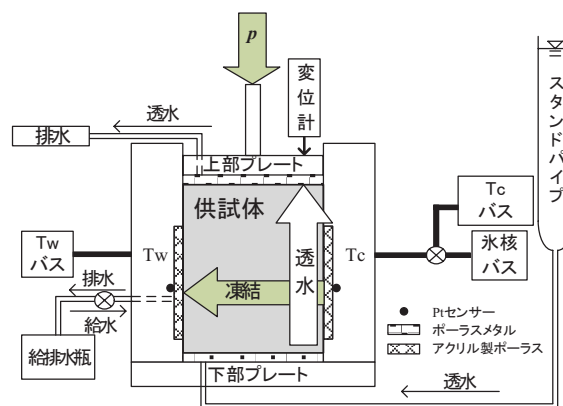


図4 水平拘束凍結融解鉛直透水実験

1-2 目的

本研究の目的は人工地盤凍結工法を想定した凍結融解実験により凍結融解後の透水係数変化を検討することであり、以下に示す実験を行った。

- 固い地盤および軟らかい地盤を想定した土が凍結融解を受けたときのIL方向の透水係数変化を水の供給がある場合とない場合に分けて検討する。
- 水の供給がある場合とない場合のIL方向の凍結融解後供試体の間隙比分布と融解後透水係数の関係を検討する。
- IL直交方向とIL方向の凍結融解後の透水係数を比較し、一般的な凍結融解実験からIL方向の融解後透水係数の推定方法を検討する。

2. 実験方法

2-1 試料土

表1に試料土の物性値を示す。試料土は425 μ mふるいを通過させた藤森粘土である。実験に使用した供試体は、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

表1 試料土の物性値

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 (%)
藤森14N	2.674	41.4	23.0	9.4	59.1	31.5

ト状にしたものを脱気し、24時間以上養生し、予圧密したものである。一次元凍結融解透水実験では、内径φ100mm、厚み3cmのアクリルセルにペーストを流し込み、50、75、150 kN/m²まで予圧密したもの、もしくは50、75、200、500 kN/m²まで予圧密した供試体を高さH₀=5.0 cmにトリミングして使用した。水平拘束凍結融解鉛直透水実験では80mm×70mmの矩形の圧密実験装置で予圧密後の供試体高さが8.0cmになるようにペーストの量を調整して、50、75、150 kN/m²まで予圧密したもの、もしくは50、75、200、500 kN/m²まで予圧密した供試体を使用した。

2-2 一次元凍結融解透水実験

図3に一次元凍結融解透水実験装置を示す。実験装置は上・下部のアルミ製冷却プレートとアクリルセルで構成される。アクリルセルは供試体を予圧密した時に使用したアクリルセルをそのまま用いることによって、供試体とセルの間に隙間ができることを防止した。凍結は凍着による変位拘束を防ぐため下部から凍結することとし、上・下部の冷却プレートには、それぞれの低温恒温水層（上部：Twバス、下部：Tc・氷核バス）で温度調節されたブライン（エチレングリコール）が循環される。

図5に凍結融解実験中の測定温度の経時変化の例を示す。供試体の上・下端の温度は、それぞれ上部プレート・下部プレートに設置されたPtセンサーにより測定された。実験室内の温度を20℃に保った状態で実験は行われ、凍結は下部プレートを低温側（Tc）とし、上部プレートを高温側（Tw）として、下から上の方向に凍結させた。凍結過程では、TwとTcの温度差を5.0℃に保ち、Tw=5.0℃、Tc=0℃から冷却速度を0.2℃/hで温度降下させ、Tc=0.8℃に達した時に下部プレートには氷核バスで冷却させた-20℃のブラインを氷核形成が確認されるまで約10分循環させサーマルショックを与えた。冷却温度がTc=-6.0℃、Tw=-0.1℃に達した後、Tw、Tcを共に-10℃まで急速に温度降下させた。その後6時間Tw、Tcを-10℃に保ち、その後融解させた。

一次元凍結融解透水実験は凍結融解時に上部プレートから給排水を行う開式凍結とし、給排水量の変化は電子天秤により測定された。上載荷重はシャフトから上部プレートを介して供試体に鉛直方向に作用される。凍結融解時の供試体の変位量は、シャフトに取り付けた変位計により測定された。凍結融解前後は変水位透水試験を行った。このとき、下部プレートにはビュレットを接続し、上部プレートから排水させて、下から上の方向に透水試験を行った。

表2のC5、C22、C23、C25が一次元凍結融解透水実験である。水平拘束凍結融解鉛直透水実験と比較するために、固い地盤および軟らかい地盤を想定して予圧密荷重P=150、500 kN/m²、土被り圧を想定して実験荷重p=50、100、190 kN/m²とした。

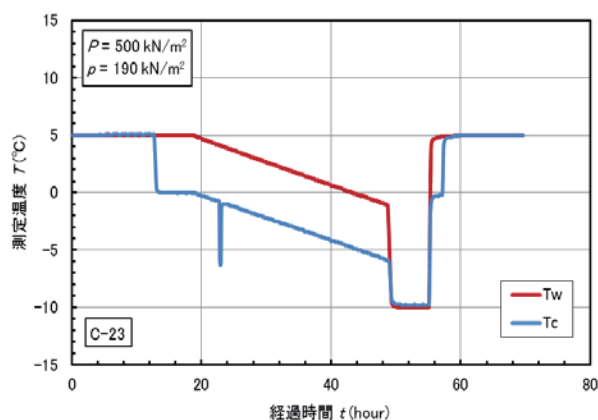


図5 測定温度の経時変化例

表2 実験条件

実験方法	実験ケース	凍結融解繰返し回数 n (回)	予圧密 P (kN/m ²)	実験荷重 p (kN/m ²)	給排水
一次元凍結融解透水実験	C5	1	500	50	有
	C22	1	500	100	有
	C23	1	500	190	有
	C25	1	150	100	有
水平拘束凍結融解鉛直透水実験	K4	1	150	50	有
	K22	1	500	200	有
	K23	1	150	50	無
	K28	1	500	50	無
	K29	1	500	200	無
	K30	1	500	50	有
	K31	3	500	50	有
	K32	5	500	50	有

※凍結方法：ランプ式凍結、両端面温度：|Tw-Tc|=5.0℃、冷却速度：dT/dt=0.2℃/hour、

2-3 水平拘束凍結融解鉛直透水実験

図4に水平拘束凍結融解鉛直透水実験装置を示す。この実験装置は矩形の供試体側面の冷却プレートから水平方向に凍結融解させることができる。冷却プレートはアルミ製で左右側面のそれぞれに温度の異なるブラインを循環させることにより凍結温度を制御し、一方を低温側(Tc)とし、他方を高温側(Tw)とした。冷却プレートにはそれぞれPtセンサーを設置しており、実験中の温度変化を記録した。実験中の温度変化は図5と同じである。凍結中の給排水はTw側から行い、電子天秤により重量変化を測定した。供試体の断熱は上・下プレートの材質には塩化ビニルを使用し、供試体の前後面には凍結融解状況を観察できるように厚み3cmの亚克力板を用いた。実験荷重はシャフトから上部プレートを通じて鉛直方向に作用させた。凍結融解中、凍結方向の変位は拘束されており、鉛直方向の変位を上部プレートのシャフトに取り付けた変位計により測定された。凍結融解前後には、下部プレートにビュレットを接続し、上部プレートから排水して、下方から上方向に変水位透水試験を実施した。

表2のK4、K22、K30、K31、K32は地下水位が高く、難透水層の層厚が比較的薄い地盤を想定し、凍結中に給排水される開式凍結である。K23、K28、K29は地下水位が低い、あるいは難透水層の層厚が厚い場合を想定し、凍結中に給排水を許さない閉式凍結である。荷重条件は地盤の固結の度合いとして予圧密荷重を $P=150、500\text{ kN/m}^2$ とした。そして、土被り圧、つまり実験荷重の影響を調べるために $p=50、200\text{ kN/m}^2$ とした。冷却速度は $dT/dt=0.2\text{ }^\circ\text{C/h}$ 、TwとTcの温度差を 5°C 、最低温度を -10°C とした。

図6に凍結融解後の間隙比分布測定イメージ図を示す。水平拘束凍結融解鉛直透水実験後の供試体についてはTcからTwにかけて間隙比の分布を求めた。TcからTwまでの長さは8cmであり、K22では5等分、K23では6等分し、K28からK32は8等分した間隙比を測定した。

3. 実験結果と考察

3-1 凍上量と給水量の変化

図7に $P=500\text{ kN/m}^2$ における凍上量と実験荷重 p の関係を示す。凍結する過程においていずれの実験においても凍上による鉛直方向の膨張がみられ、実験荷重が小さいほど凍上量が大きくなった。融解過程にお

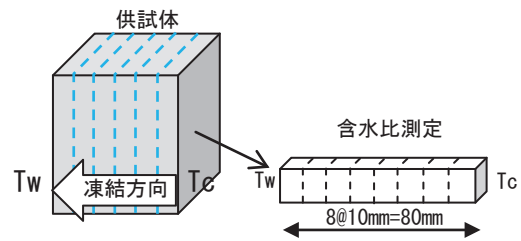


図6 水平拘束凍結融解鉛直透水実験後間隙比測定

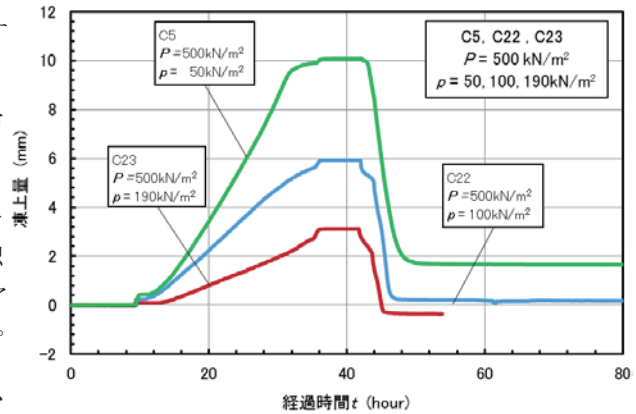


図7 実験荷重と凍上量の関係

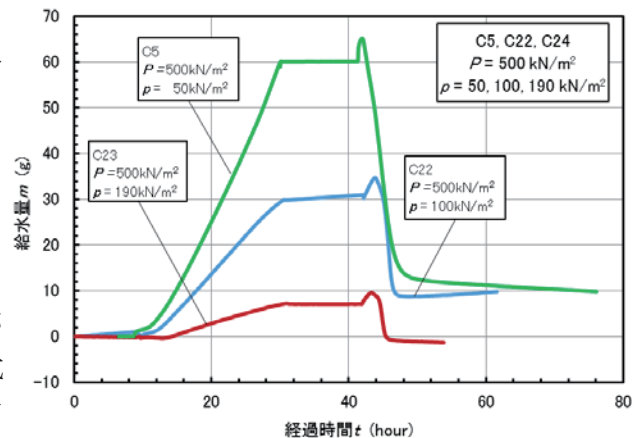


図8 実験荷重と給水量の関係

いて変位は沈下に転じ、 $p = 100, 190 \text{ kN/m}^2$ では凍結前の変位に戻ったが、 $p = 50 \text{ kN/m}^2$ では凍上量よりも沈下量が小さく、凍結前の状態には完全に戻りきらなかった。

図8に給水量の経時変化を示す。凍結過程での変化は実験荷重が小さいほど給水量が多くなった。これは図7に示す凍上量の変化とよく対応している。一方、融解過程では凍上時に給水された水分が土中から排水され、 $p = 190 \text{ kN/m}^2$ では元の状態まで排水された。だが、 $p = 100, 190 \text{ kN/m}^2$ では完全に元の状態まで排水されなかった。経過時間が44時間付近において凍結過程から融解過程に切り替わる際に、一旦給水されてから排水されている。これは下部プレートの中で凍結していた水分が融解したことにより体積が減少し、見かけ上給水されたような挙動を示しているためと考えられる。

3-2 一次元凍結融解実験での凍結融解前後の間隙比・透水係数変化

図9に間隙比と透水係数の変化に及ぼす実験荷重の影響を示す。凍結融解により実験荷重が大きい場合には間隙比が減少し、実験荷重が小さい場合には間隙比が増加した。中間の $p = 100 \text{ kN/m}^2$ では凍結融解前後で間隙比は変化しなかった。透水係数は、凍結融解によりいずれの実験荷重においても増加した。実験荷重による凍結融解後の透水係数の大小関係を比較すると、実験荷重が大きい $p = 190 \text{ kN/m}^2$ で若干透水係数が小さい傾向がみられた。融解後の透水係数 k_t は、実験荷重の小さい順に、 $k_t = 4.69 \times 10^{-9}$ 、 7.52×10^{-9} 、 $1.10 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ であった。

図10に実験荷重一定条件における予圧密荷重の影響を示す。実験荷重 $p = 100 \text{ kN/m}^2$ のとき、凍結前の間隙比が大きい $P = 150 \text{ kN/m}^2$ では凍結融解により間隙比 $e = 0.956$ から $e = 0.881$ に減少したのに対し、間隙比が小さい $P = 500 \text{ kN/m}^2$ では間隙比の変化が $e = 0.852$ から $e = 0.850$ で、変化が小さかった。透水係数を比較すると、融解後の透水係数は、両実験において大きな違いはなく、 $P = 150 \text{ kN/m}^2$ のとき $k_t = 1.24 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ 、 $P = 500 \text{ kN/m}^2$ のとき $k_t = 7.52 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ であった。

これらの実験結果から凍結融解による間隙比の増減は実験荷重に応じた間隙比に近づくように変化するものと考えられる。これは凍結前の土の間隙比が小さい固い地盤においても凍結融解時の上載荷重や土被りに応じた値に近づく可能性を示すものである。この原因は凍結融解により土中の間隙が開き、土の構造が一旦崩された後、融解時に実験荷重に応じた土の構造に再構成されたと考えられる。そのため、間隙比が大きなゆるい土の場合には凍結融解後に間隙比が減少し、間隙比が小さい密な土の場合には間隙比が増加していた。

3-3 鉛直変位量と給水量の変化

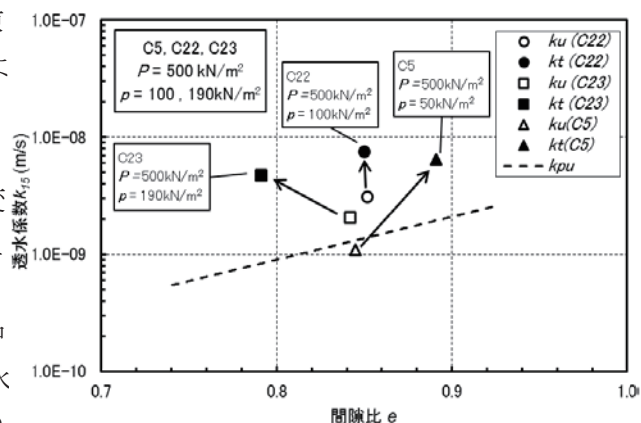


図9 間隙比と透水係数の変化に及ぼす実験荷重の影響

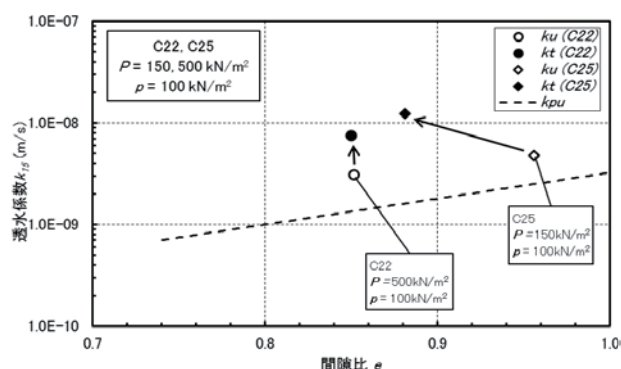


図10 間隙比と透水係数の変化に及ぼす予圧密荷重の影響

図 11 に水平拘束凍結融解鉛直透水実験における鉛直変位量の経時変化を示す。水平拘束凍結融解鉛直透水実験では凍結方向の変位が拘束されており、変位する方向は凍結方向と直交する方向（鉛直方向）である。鉛直方向の変位量を膨張量 h とする。膨張量は、実験荷重が小さい方が大きくなった。閉式凍結と開式凍結の膨張量を比較すると $p = 50, 200 \text{ kN/m}^2$ のいずれも開式凍結の方が大きくなった。K28 は凍結開始後 20 時間付近まで膨張量に変化がない。この原因は明らかではないが、最終的な膨張量は開式凍結に近いところまで達した。融解時にはいずれも沈下したが、実験荷重が小さい $p = 50 \text{ kN/m}^2$ の場合は膨張量に対して沈下量が小さく、実験荷重が大きい $p = 200 \text{ kN/m}^2$ の場合は膨張量よりも沈下量が大きくなった。

図 12 に給水量の経時変化を示す。開式凍結では凍結融解に伴い土中への給排水が行われる。実験荷重が小さい $p = 50 \text{ kN/m}^2$ の場合は凍結過程において土中へ給水されるが、実験荷重が大きい $p = 200 \text{ kN/m}^2$ は排水された。融解時にはいずれも供試体中へ給水され、最終的には $p = 50 \text{ kN/m}^2$ では凍結前よりも水を吸った状態となり、 $p = 200 \text{ kN/m}^2$ では凍結前よりも排水された状態となった。

3-4 水平拘束凍結融解鉛直透水実験での凍結融解前後の間隙比・透水係数変化

図 13 に間隙比と透水係数の関係に及ぼす閉式凍結における荷重条件の影響を示す。いずれの実験においても凍結融解前後で間隙比はほとんど変化しなかった。凍結融解前後の透水係数の変化は、凍結前の間隙比が大きい予圧密荷重 $P = 150 \text{ kN/m}^2$ のとき (K23) に最も大きく $k_t = 6.01 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ 、凍結融解前後で透水係数は 22 倍に増加した。一方、 $P = 500 \text{ kN/m}^2$ では実験荷重が異なっても同程度の透水係数になり、 $p = 50 \text{ kN/m}^2$ では $k_t = 5.29 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ で 5 倍、 $p = 200 \text{ kN/m}^2$ では $k_t = 1.12 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ で 7 倍に増加した。

図 14 に閉式凍結における融解後供試体の間隙比分布を示す。最も透水係数が増加した K23 では T_c 付

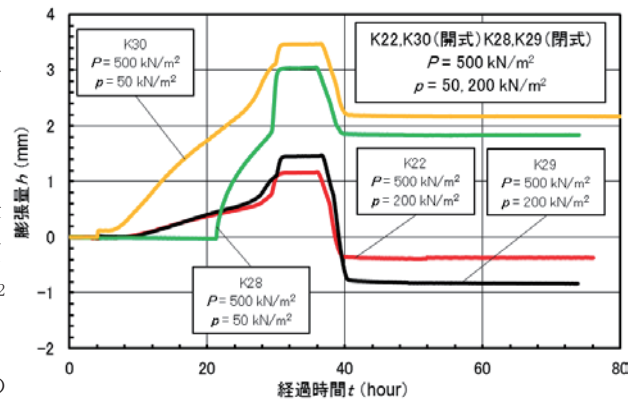


図 11 鉛直変位量の経時変化

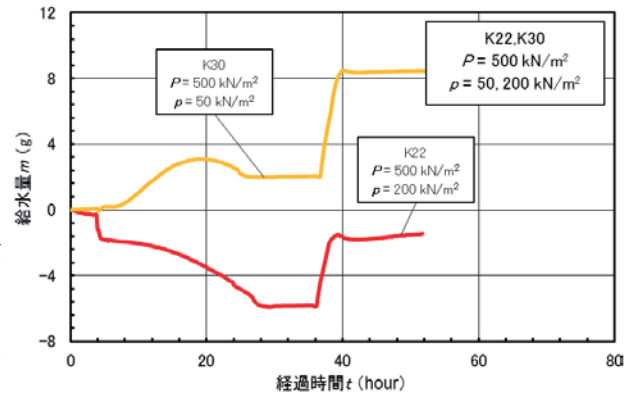


図 12 給水量の経時変化

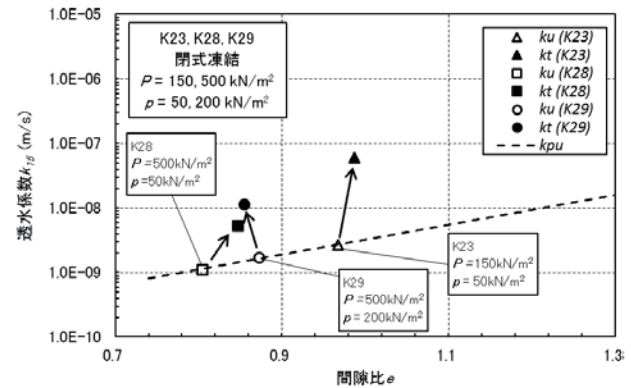


図 13 間隙比と透水係数の関係に及ぼす閉式凍結における荷重条件の影響

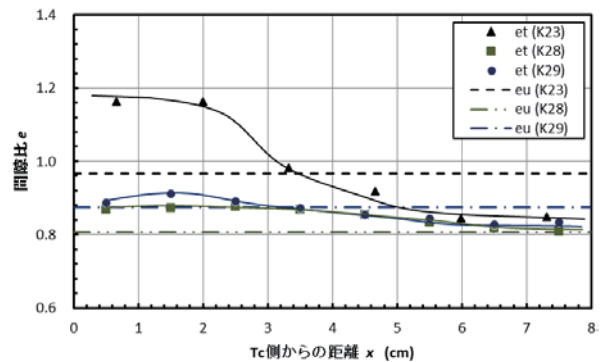


図 14 閉式凍結における融解後供試体の間隙比分布

近において間隙比が著しく増加していることがわかる。一方、 $P = 500 \text{ kN/m}^2$ のK28、K29では、初期間隙比が小さく、凍結融解後によりTc付近で間隙比がわずかに増加する傾向が見られるものの、実験荷重に関係なくK28とK29の間隙比分布はほぼ同じ値となった。

水平方向に凍結・変位拘束した状態で、給排水を行なわない場合には、融解後の間隙比と透水係数の関係は必ずしも実験荷重に影響しない。むしろ、凍結融解中の給排水がないため、凍結前の間隙比が融解後の透水係数に支配的に影響する可能性がある。その原因として凍結融解によりTc付近の間隙比が増加することが影響していると考えられる。それは、初期間隙比が大きい場合には凍結融解によりTc側に移動する土中の水分が多いため、Tc付近の融解後透水係数の増加に大きく影響するためである。

図15に開式凍結における凍結融解前後の間隙比と透水係数の変化を示す。予圧密荷重・実験荷重が共に小さく $P = 150 \text{ kN/m}^2$ 、 $p = 50 \text{ kN/m}^2$ であるK4では凍結融解により間隙比が低下し、透水係数が著しく増加した。一方、予圧密荷重が $P = 500 \text{ kN/m}^2$ であるK22、K23はいずれも透水係数の増加はK4よりも小さくなった。間隙比は実験荷重が $p = 50 \text{ kN/m}^2$ のK30では間隙比が増加し、 $p = 200 \text{ kN/m}^2$ のK22は間隙比が減少した。凍結前に対して融解後の透水係数は、K4で588倍、K30で12.5倍、K22で5.9倍であった。K4とK30は同じ実験荷重であるが、融解後透水係数は大きく異なった。K4は $k_t = 5.59 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 、K30は $kt = 1.38 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ であった。

図16に $p = 50 \text{ kN/m}^2$ における凍結融解繰り返しの影響⁽¹⁰⁾とK4の結果を重ねてプロットした。予圧密荷重 $P = 500 \text{ kN/m}^2$ の場合においても、凍結融解を繰り返すことにより、間隙比と透水係数はK4の値に近づく傾向が見られた。

図17に開式凍結における凍結融解後の供試体の間隙比分布を示す。凍結融解回数が増やすと、K30、K31、K32の間隙比分布に見られるようにTc付近で著しい間隙比の増加が見られる。Tc付近の間隙比増加が融解後の透水係数増加に大きく寄与していると考えられる。

開式凍結における凍結融解前後の間隙比と透水係数の変化は、実験荷重が小さく予圧密荷重が大きい場合には間隙比を増加させる方向に働き、予圧密荷重が小さいときには間隙比を減少させる方向に作用する。そして、透水係数はいずれも増大する。予圧密荷重が大きい場合には透水係数の増加率は小さいが、予圧密荷

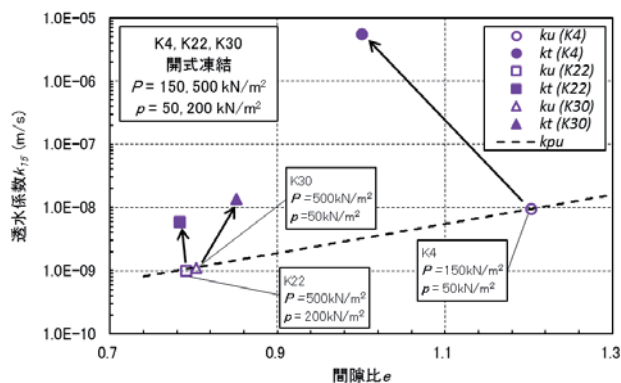


図15 間隙比と透水係数の関係に及ぼす開式凍結における荷重条件の影響

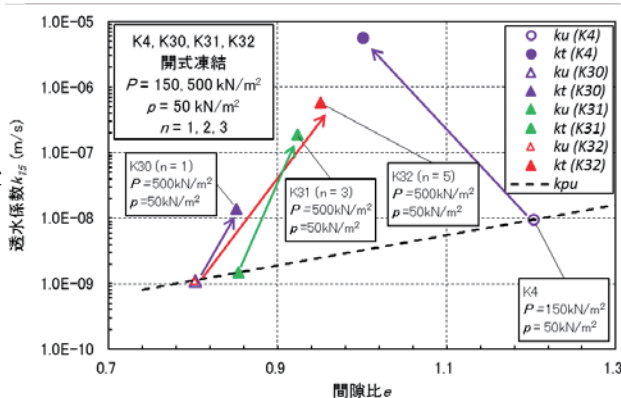


図16 間隙比と透水係数の関係に及ぼす凍結融解繰り返しの影響

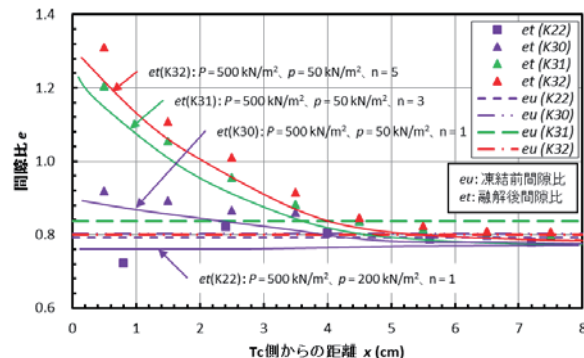


図17 開式凍結における融解供試体の間隙比分布 ($P = 500 \text{ kN/m}^2$)

重が小さい場合には透水係数が著しく増加する。ただし予圧密荷重が大きい場合においても実験荷重が小さければ凍結融解を繰り返すことにより著しく透水係数は増加する。これは T_c 付近の間隙比増加による影響が支配的であると考えられる。実地盤においては、地下水の供給がない場合には凍結融解後の透水係数増加は初期の間隙比に影響されるが、地下水の供給がある場合にはたとえ凍結前の間隙比が小さく固い地盤であっても凍結融解が繰り返されることにより間隙比と透水係数は上載荷重に応じた値になるように振る舞うであろう。特に、上載荷重が小さい場合には、著しい間隙比と透水係数の増加を引き起こす可能性がある。

3-5 開式・閉式凍結における IL 方向および IL 直交方向の間隙比と透水係数変化に及ぼす影響

図 18 に間隙比と透水係数の関係に及ぼす給水条件の影響を示す。未凍結の透水係数 $k_i(K)$ と比較して水平拘束凍結融解鉛直透水実験での融解後透水係数 $k_f(K)$ は開式・閉式凍結いずれの場合も大きくなった。開式凍結と閉式凍結の $k_f(K)$ を比較すると $e = 0.8$ 付近では両者の透水係数に大きな違いはないが、間隙比が大きくなるほど開式の方が閉式よりも透水係数が増加する傾向が見られた。

図 19 に間隙比と透水係数の関係に及ぼす IL 方向の影響を示す。一次元凍結融解透水実験で得られた IL 直交方向の凍結融解後の透水係数 $k_f(C)$ は凍結前の透水係数と比較して増加する傾向が見られた。IL 方向の融解後透水係数 $k_f(K)$ と $k_f(C)$ を比較すると $k_f(C)$ の方が小さい傾向が見られた。ただし、閉式凍結で得られた $k_f(K)$ と $k_f(C)$ を比較すると、今回の実験で得られた $k_f(C)$ の値を見る限りは両者に顕著な差は見られない。

水分供給を伴う IL 方向の融解後の透水係数は間隙比が大きい場合に著しく増加するが、IL 直交方向の融解後の透水係数は IL 方向と比べて小さくなる。この原因として、凍結融解による土の構造の再構成過程の違いが考えられる。IL 直交方向では土の構造が凍結により一旦ほぐれても融解後に上載荷重が作用することにより土の構造が上載荷重に応じて再構成される。一方、IL 方向では T_c 側では凍結により水分を吸水し、間隙が開かれた T_c 付近で土はゆるい状態となり、 T_w 付近では凍土の成長に伴うサクシオンと体積膨張による圧力を受けて土が過圧密状態になる。そのため、融解過程においても凍土に集中した水分は T_w 側に戻りきらない。その結果、 T_c 付近においては凍結時に土の含水量が多くなった状態、つまり間隙比が広がった状態となり、この部分において透水性が著しく増加するものと考えられる。

4. 結論

本研究の結論を以下にまとめる。

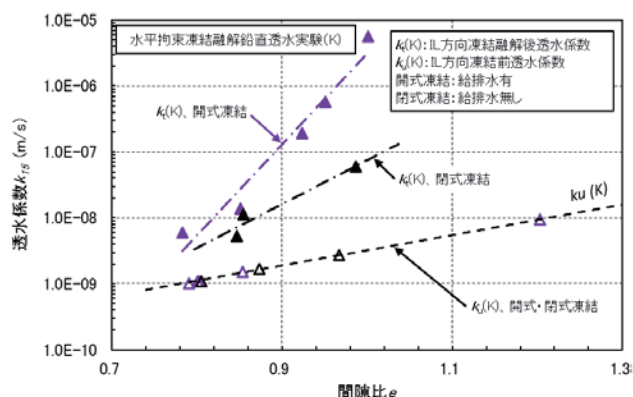


図 18 間隙比と透水係数の関係に及ぼす給水条件の影響

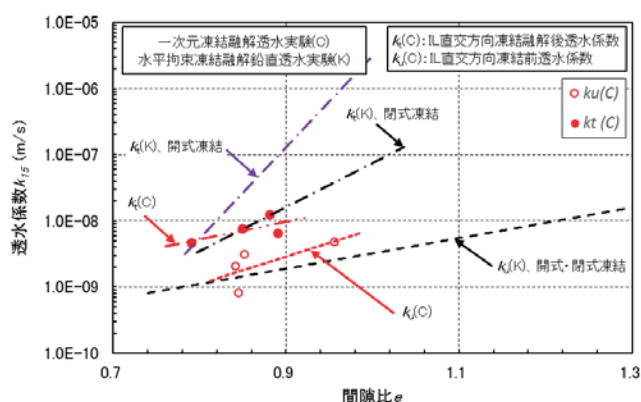


図 19 間隙比と透水係数の関係に及ぼす IL 方向の影響

- (1) IL 方向の凍結融解後の透水係数変化は、開式の凍結融解の場合には上載荷重に応じた透水係数に収束する傾向が見られた。しかし、給排水を許さない場合には、予圧密荷重が大きい場合には上載荷重が異なっても凍結融解後の透水係数に大きな違いはなく、上載荷重に応じた透水係数に収束するとは言えない。
- (2) IL 方向の凍結融解後の間隙比と透水係数の関係を給排水の有無で比較すると、給水有（開式凍結）の方が給水無し（閉式凍結）よりも間隙比の増加に対する透水係数の増加が大きい。つまり、間隙比が大きくなるほど開式凍結の融解後透水係数が閉式凍結の透水係数よりも著しく大きくなった。
- (3) IL 直交方向と IL 方向の間隙比と透水係数の関係を比較すると、IL 方向における開式凍結の間隙比の増加に対する透水係数の増加量が IL 直交方向のものよりも大きくなった。IL 方向の閉式凍結と IL 直交方向の間隙比と透水係数の関係に大きな違いはなかった。
- (4) 上載荷重が大きい場合、つまり融解後の間隙比が小さい場合については IL 方向や給排水の有無、IL 直交方向での間隙比と透水係数の関係に大きな違いはない。
- (5) 予圧密荷重の大きい土は凍結融解を繰り返すと間隙比と透水係数が増加する傾向にある。そして、予圧密荷重の小さい土では間隙比が減少し、透水係数が増加する。これら予圧密荷重の異なる土も、一定の上載荷重で凍結融解を繰り返すと最終的に上載荷重に応じた間隙比と透水係数に収束するように振舞う。
- (6) 凍結融解による IL 方向の透水係数の増加は、主に凍結融解による低温側の間隙比の増加によるものと考えられる。予圧密荷重が小さい場合には、閉式試験の場合においても凍結前の含水量が多いため、凍土部分の間隙比が増加しやすく、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田和昭大氏、乾誠氏、飼馬弘至氏、山原貴大氏、川端将貴氏、西村卓也氏、鈴木啓汰氏、福井貴大氏の卒業研究として実施されたものです。また、本研究には科学研究費補助金(基礎研究(B))課題番号 26289156 が使用されています。

参考文献

- (1) Chambarlain, 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) Paudel, B. and Wang, B. “Freeze-thaw effect on consolidation properties of fine grained soils from the Mackenzie valley”, *Canada, 63th Canadian Geotechnical Conference & 6th Canadian Permafrost Conference*, (2010), pp.992-996.
- (6) 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.
- (7) 玉崎千秋, 伊藤謙, 嘉門雅史, 「細粒土における凍結融解歪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.

- (8) 「汚染水問題の抜本対策の進め方」, http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/130913/130913_01g.pdf, (2016年8月3日閲覧).
- (9) 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.
- (10) 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.