

博士学位論文

凍結融解作用を受けた飽和細粒土における
透水係数変化の実験的評価

2018 年

摂南大学大学院

理工学研究科 創生工学専攻

廣瀬 剛

目次

第1章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 凍上現象および凍結融解土の透水係数に関する既往の研究	5
1.2.1 凍上現象に関する既往の研究	5
1.2.2 凍結融解土の透水係数に関する既往の研究	8
1.3 凍上実験装置	12
1.4 研究の意義	15
1.5 研究の目的	16
1.6 研究業績	17
1.7 各章の構成	21
参考文献	23
第2章 アイスレンズの発生と凍結融解土の透水係数との関係	27
2.1 目的	27
2.2 実験方法	28
2.2.1 供試体作成	28
2.2.2 一次元凍結融解透水実験	29
2.2.3 三軸凍結融解透水実験	33
2.3 実験結果と考察	35
2.3.1 冷却速度の影響	35
2.3.2 最低冷却温度の影響	39
2.3.3 温度勾配の影響	40
2.3.4 凍上率と透水係数増加比の関係	41
2.3.5 間隙比と透水係数の関係	42
2.4 まとめ	43
参考文献	44

第3章	地盤の固結度及び土被り圧と凍結融解土の透水係数変化との関係	45
3.1	目的	45
3.2	実験方法	46
3.2.1	供試体作成	46
3.2.2	実験条件	47
3.3	実験結果と考察	50
3.3.1	凍上量と給水量の経時変化	50
3.3.2	凍上率と透水係数変化の関係	52
3.3.3	予圧密荷重および実験荷重と透水係数変化との関係	55
3.3.4	実験荷重と透水係数の関係	57
3.3.5	過圧密比と透水係数の関係	58
3.3.6	実験荷重と透水係数増加比の関係	59
3.3.7	間隙比と透水係数の関係	60
3.4	まとめ	63
	参考文献	64
第4章	凍結融解土におけるアイスレンズ方向とアイスレンズ直交方向の 透水係数の関係	65
4.1	目的	65
4.2	実験方法	67
4.2.1	供試体作成	67
4.2.2	水平方向変位拘束凍結融解鉛直透水実験	68
4.2.3	実験条件	70
4.2.4	圧密透水試験	72
4.3	実験結果と考察	74
4.3.1	鉛直変位量と給排水量の経時変化	74
4.3.2	実験荷重および予圧密荷重の影響	75
4.3.3	給排水の影響	77
4.3.4	凍結融解繰り返し回数の影響	78
4.3.5	アイスレンズ発生面と透水試験の方向との関係	81
4.4	まとめ	87

参考文献	89
第5章 アイスレンズ及び収縮ひび割れによる影響	90
5.1 目的	90
5.2 実験方法	91
5.2.1 供試体作成	91
5.2.2 実験条件	92
5.3 実験結果と考察	95
5.3.1 凍結方法の影響	95
5.3.2 アイスレンズと収縮クラックの影響	98
5.3.3 圧密透水試験の試料採取過程における乱れの影響	99
5.3.4 間隙比と透水係数の関係	101
5.4 まとめ	102
第6章 人工地盤凍結工法における凍結融解土の透水係数の予測方法	103
6.1 目的	103
6.2 透水係数の予測方法	105
6.3 予測結果の検証	109
6.3.1 アイスレンズ面直交方向の透水係数分布	109
6.3.2 アイスレンズ面方向の透水係数分布	113
6.3.3 透水係数の予測値の検証	118
6.4 まとめ	120
第7章 結論	122
研究業績	125
謝辞	128

第 1 章 序論

1.1 研究背景

寒冷地において冬季に土が凍ると、図 1-1 のように複数のアイスレンズ(IL)や収縮ひび割れ(SC)を発生させながら地盤が隆起することがある。これが凍上と呼ばれる現象である。凍上量は IL の厚みとほぼ等しく、土に含まれる間隙水が水から氷へと相変化するときの体積膨張量（約 9%）と比較して著しく大きくなる。そして、凍結融解後には解凍沈下や泥濘化を引き起こし、図 1-2

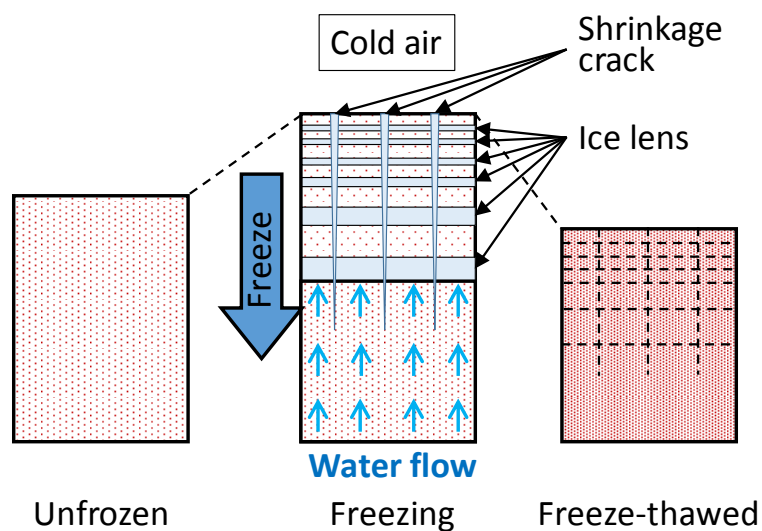


図 1-1 細粒土の凍結融解現象の模式図 ¹⁾



図 1-2 凍上による舗装面の損傷状況 ²⁾

に示すような道路舗装の被害等²⁾をもたらす厄介な問題として知られている。

一方、凍土は強度、遮水性、凍着による密閉性が得られるため、これを利用した人工地盤凍結工法（AGF）が古くから用いられている。AGFは1860年代に欧州で鉱山の立坑建設において始まり、その後シールドトンネル、仮締め切りや支持力壁などに利用されてきた³⁾。また、AGFは欧州だけでなく、中国でも50年以上の歴史があり、鉱山だけでなく仮締め切りや支持力壁として多くの施工事例⁴⁾がある。我が国でもAGFは50年以上の歴史があり、主にシールドトンネルの発進・到達防護や地中接合などで採用事例が多い⁵⁾。

AGFは汚染物質の封じ込めにも用いられており、ソイルセメント壁や鋼矢板とはことなり、汚染物質の洗浄が完了するなど封じ込めの必要がなくなると、凍結を止めれば簡単に凍土壁を取り除くことが可能である。例えば、アメリカでは、サーモプローブを汚染源の周りに配置して凍土遮水壁を構築する事例⁶⁾、自然冷熱と人工冷熱を組み合わせた凍結方法により汚染土壌と地下水を隔離する事例⁷⁾等が報告されている。

このように、汚染物質の封じ込め対策にAGFが採用される場合は凍土壁の運用期間が長期間になる。運用期間中に電力トラブル等により凍土の全部または一部が融解して生じる地下水流を事前に評価することは、汚染物質の封じ込めには必要不可欠であり、凍結融解土の透水係数を把握することが重要になる。

AGFは一般的に図1-3⁸⁾に示すように施工される。AGFでは地盤に凍結管を

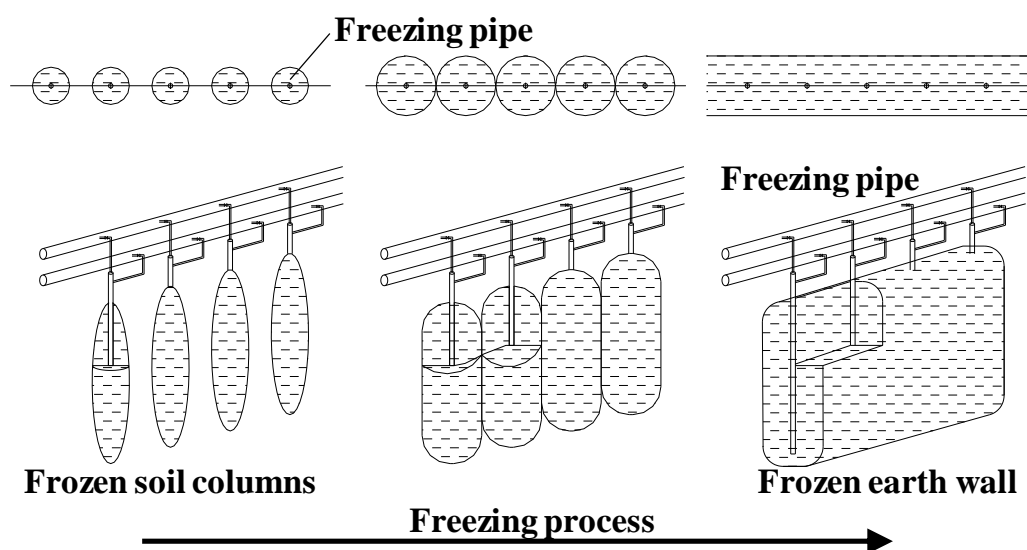


図 1-3 人工地盤凍結工法による凍土構築のイメージ³⁾

打設し，凍結管に不凍液を循環して水平方向に土が凍結され凍土柱になり，凍結の進行に伴い凍土柱が大きくなると，やがて閉合して凍土壁が構築される．AGFは大深度でも適用でき，セメント等による地盤改良とは異なり地盤を汚染する心配がなく，山留め鋼材を使用しないため仮設材を地中に残置しない等の利点があり，これまでに多くの施工事例がある．

凍土の遮水性に期待する AGF の適用事例として，最近では福島第一原子力発電所廃炉事業において採用されている凍土遮水壁が注目されている．凍土遮水壁は原子炉建屋内の汚染された水が周囲の地下水と混ざることによる汚染水の拡散の防止を目的としており，原子炉建屋の汚染水漏水対策が完了するまで長期間の安定管理技術が求められている⁹⁾．そのためには凍土遮水壁が電力トラブルなどで融解した時の透水係数変化により生じる地下水の流れを把握することが必要不可欠である．

凍土壁が融解する過程では，図 1-4 に示すように 2 通りの地下水の水流が発生すると考えられる．凍土壁が部分的に融解した場合には凍結管の間や壁面に沿った IL 方向の流れ（図 1-4(a)）が生じ，完全に融解した場合には IL の痕跡

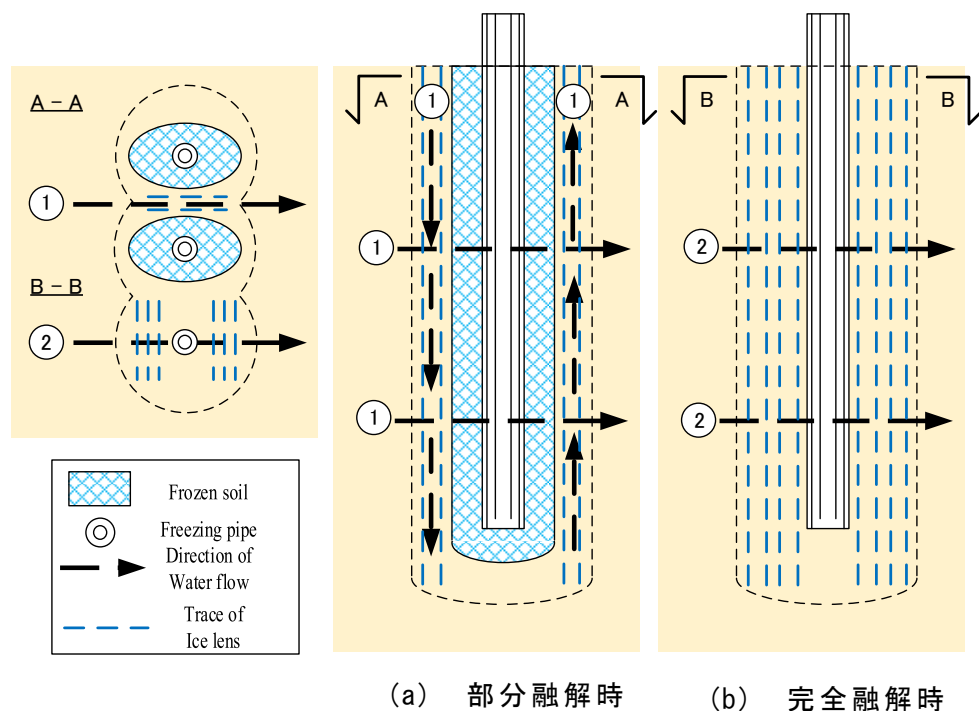


図 1-4 凍土壁周辺における融解時の水流

に直交する流れ（図 1-4(b)）が発生する．粘土地盤が凍結融解して透水係数が増加すると，あたかも砂地盤のように水を通すようになり，部分的に融解しただけでも凍土壁に沿って地下水が，凍土壁で締め切られた構内へ流入し，その結果汚染物質が地下水と共に広がり汚染が拡大する可能性がある．

1.2 凍上現象および凍結融解土の透水係数に関する既往の研究

1.2.1 凍上現象に関する既往の研究

凍上の被害を発生させる IL の発生と成長は地盤が隆起するだけでなく、IL への水分移動により土中水が再分布され、凍結融解後の土の泥濘化などを引き起こす。このような凍害を防止することを目的として凍上過程における IL 生成機構を明らかにすることが試みられてきた。先駆的な研究としては、**Taber**¹⁰⁾が 1929 年に土中の凍結時における IL が発生状況を示したことがあげられる。また、**Beskow**¹¹⁾は IL の成長には水の供給経路として不凍水が関係していることを示した。**Jackson** ら¹²⁾は凍上を支配する要素として地表面から熱を奪う速度、つまり冷却速度や凍結面への水分の供給を挙げており、さらに外的条件である上載荷重にも依存するとした。凍上する土質に関して、**Vinson** ら¹³⁾は凍上性を支配する粒度分布などの工学的要因を示した。

我が国の凍上に関する研究では寒冷地の鉄道における凍上対策が先行して始まり、続いて 1940 年代には北海道の道路整備に関する研究が開始され¹⁴⁾、1950 年代は AGF の国内での導入に向けて研究が始められた⁴⁾。

土の凍上に影響を及ぼす要因は①土の内因的にもっている要因（粒度分布、比表面積、透水係数、間隙水の化学的性質など）、②外的条件によって変化する要因（凍結中の拘束力、間隙水圧、凍結速度など）に大別される¹⁵⁾。①は主に寒冷地における自然凍上を対象としており、②では AGF に関係する要因としても研究が進められてきている。

①に関して IL の生成機構の解明を目的に多くの研究が行われている。現在、提唱されている主な IL の生成理論には、**Sill** らの毛管理論¹⁶⁾、**Miller** の二次凍上理論¹⁷⁾などがある。

特に、**Miller** の二次凍上理論はとびとびに発生する IL の生成を扱える理論であり、**Gilpin**¹⁸⁾や **Takagi**¹⁹⁾など多くの研究・改良例が報告されている。二次凍上理論では IL から凍結面までの領域（フローゼンフリンジ）へ連続した間隙氷が存在する領域があり、間隙氷の一部が IL の成長面になるとしている。フローゼンフリンジに関する研究では、例えば、**Akagawa** ら²⁰⁾は実験的に

IL と 0℃ の間の領域があることを確認したが、渡辺ら²¹⁾は凍結面近傍における微視的構造を観察しても Miller が提唱したような間隙氷が見られなかったことを報告している。IL から凍結面までの領域では水分の移動に関係する不凍水やサクション、間隙氷の存在の有無について多くの研究が行われているが、実験的に IL 発生 の 理論が証明されてはいない。そのため、IL の生成に関するメカニズムは現在のところ明らかではない。

②に関する国内の代表的な凍上理論は高志¹⁵⁾から提案された。高志は凍上率が有効応力と凍結速度の影響を受けると考え、これらの関係を定式化し、次の式(1.1)が成立することを示した。

$$\xi = \xi_0 + \frac{\sigma_0}{\sigma} \left(1 + \sqrt{\frac{U_0}{U}} \right) \quad (1.1)$$

ここに、 ξ は凍上率 (V_h/V_s)、 V_s は凍結したもとの容積、 V_h は凍上により増加した容積、 σ は外力である。 ξ_0 、 σ_0 、 U_0 は対象土固有の値で凍上定数と呼ばれる。 ξ_0 は外力と凍上率との関係から求められ、さらに凍結速度を考慮して U_0 および σ_0 が求められる。

高志の式は国内で広く凍上予測に使用されており、現在の国内基準である地盤工学会基準 (JGS-0171-2009) では高志の式で必要な定数を求められる凍上試験方法を設定している²²⁾。

一方、外国では凍上量を定量的に予測する代表的な構成式として Konrad の分離ポテンシャル理論²³⁾があげられる。分離ポテンシャル理論では凍上量を定量的に予測するために、分離ポテンシャル (SP) を定義し、温度勾配に基づく構成式を誘導した。SP はアイスレンズ付近での水の吸水速度と温度勾配の比であり、SP の決定には荷重、サクション、冷却速度の 3 条件を考慮する必要があった。Nixon²⁴⁾による DIL モデルは Gilpin のモデルを拡張、修正したもので、SP 理論とも整合しており、SP 理論よりも取り扱いが大幅に簡略化され、DIL モデルの構成式の導出過程で SP が冷却速度に無関係であることが示され、DIL パラメータ (k_0 、 α) と、外部条件として上載荷重とサクションをまとめられた荷重項のみの関数として式(1.2)のように表された。

$$\frac{K_f}{K_{ff}} \bullet \left(\frac{G_{ff}}{V_{ff}} - \frac{L}{K_f} \right) = \frac{\left\{ \frac{\alpha+1}{\alpha} (1.09P_0 - P_u) \right\}^\alpha}{k_0 \beta^{1+\alpha}} = \frac{1}{SP} \quad (1.2)$$

ここに、 K_f 、 K_{ff} は凍土、凍結フリンジの熱伝導率、 G_{ff} は凍結フリンジの温度勾配、 V_{ff} はアイスレンズ底部への凍結フリンジ中の水流、 L は水の潜熱、 k_0 は -1°C における凍土の透水係数、 α は凍土の透水係数と温度の関係を示す定数、 β は熱力学定数、 P_0 は上載荷重、 P_u は凍結フリンジと未凍土の境界における水圧である。

高志の凍上理論¹⁵⁾やKonradの分離ポテンシャル理論²³⁾は定量的な凍上解析方法として研究・改良が行われ、実用に供されている。

以上のように、凍上現象は内因的な要因と外的条件による要因によって決定されと考えられる。AGFでは凍上発生を支配する水分や温度、荷重を定量的に設定できるため、高志の式やSP理論など凍上予測のための構成式が実用に供されているが、自然寒冷地における凍上現象を予測する場合には内因的および外的条件が複雑になるため実務に堪えうる評価方法は見当たらないのが現状である。

1.2.2 凍結融解土の透水係数に関する既往の研究

凍上現象は間隙水の凍結による土の間隙の開き，IL への水分移動，凍結面近傍の未凍土における脱水圧密を引き起こし，土の構造を変化させる．融解後にはこのような構造変化が完全に元の状態に戻らずに土の圧密特性や強度特性などを変化させ，自然凍上では道路構造物などに被害を与える要因となってきた．凍結融解による被害を抑制するためには，凍結融解による土の透水係数の変化等の性質変化のメカニズムを明らかにすることが必要であり，これまで多くの研究が行われてきた．

Chamberlain ら²⁵⁾は凍結融解を繰り返すことにより図 1-5 に示すように透水係数が増加することを確認し，このような土の密度と透水係数が共に増加する不自然な現象は，凍結による土粒子の再配列と凍結面より高温側で発生する収縮ひび割れが影響しているとの見解を示した．また，Benson ら²⁶⁾は透水係数の増加は凍結融解後の IL が痕跡として残り，水道（みずみち）になるためであるとの見解を示した．Paudel ら²⁷⁾は凍結融解の繰返しにより，透水係数の増加量が少なくなる傾向を示し，透水係数の変化には凍結による土の構造変化が関係していることが示唆された．

一方，Konrad ら²⁸⁾は IL の痕跡が見られない場合においても凍結融解を受

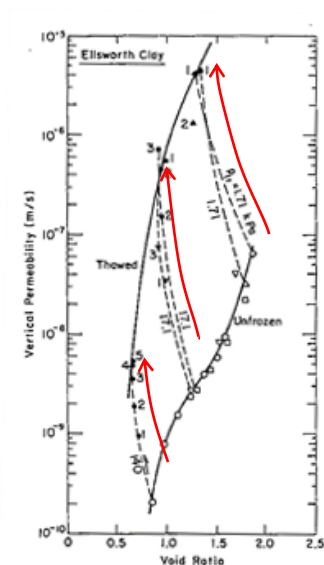
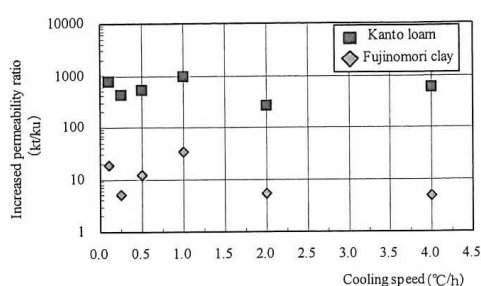


図 1-5 凍結融解繰返し後の鉛直方向の透水係数変化²⁵⁾

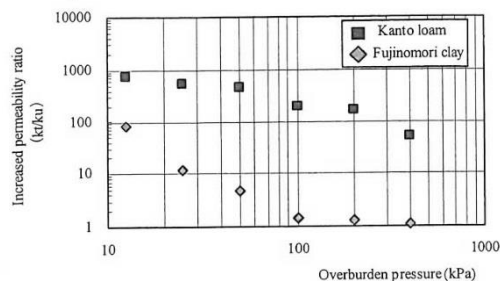
けた土の透水係数が増加したことを示し、Dumais ら²⁹⁾は粘土分やシルト分の含有率を細粒分の含有率や細粒分の平均粒径で評価し、細粒分が多く、粒径が小さい場合には凍結融解土の透水係数が大きくなることを報告した。

凍結融解土の透水係数と外的条件との関係についても多くの研究が行われている。Othman ら³⁰⁾は、凍結融解繰り返しによる透水係数の増加は上載荷重を大きくすることにより低く抑えられることを報告し、この原因は IL の発生が上載荷重で抑制されるためであると結論づけた。Sterpi ら³¹⁾は凍結前の締固め度が異なる 3 種類の土について凍結融解を繰り返した結果、いずれも透水係数は増加し、締固め度の高い土は締固め度の低い土における透水係数に近づく傾向があることを報告した。中村ら³²⁾は小さい締め固めエネルギーで作成された供試体では、凍結融解後には凍結前と比較して間隙比と透水係数が共に減少することを報告している。

Ito ら³³⁾は凍結融解による透水係数変化に影響を及ぼす外的条件による要因として冷却方法や上載荷重を変えた精緻な実験を行い、正規圧密の藤森粘土と関東ロームでは図 1-6 で認められるように凍結方法と凍結融解後の透水係数には関連性がなく、凍結融解時の上載荷重のみが影響することを示した。また、玉崎ら³⁴⁾は関東ロームを用いて凍結融解実験および圧密透水試験を行い、凍結融解前後の間隙比と透水係数の関係を調べ、図 1-7 に示すような結果を示した。この図より、凍結融解実験で得られた凍結前と凍結融解後の透水係数を結ぶと破線のようになり、凍結融解した土の圧密透水試験結果と交わる。圧密透水では凍結融解による土の構造変化の影響が取り除かれているため、未凍結土と圧



(a) 冷却速度との関係



(b) 上載荷重との関係

図 1-6 冷却条件と凍結融解土の透水係数との関係³³⁾

密透水試験による凍結融解土の透水係数変化は土粒子の変化に起因するものであると考えられる。一方，圧密透水試験と凍結融解実験における凍結融解土の透水係数の差は土の構造変化によるものであると考えられる。つまり，凍結融解による透水係数変化は土の構造変化と土粒子自体（要素）の変化とに分けることができることがわかる。そして，高圧力下では要素変化の割合が大きく，低圧力下では構造変化の割合が大きくなることが報告された。

凍結土の融解による土の構造変化に視点を置くと，広瀬ら³⁵⁾は飽和細粒土の凍結融解土の含水比分布を測定し，凍土では含水比が増加し，未凍土では IL の発生による脱水圧密により含水比が低下していることを確認した。また，片野田ら³⁶⁾は凍結融解実験と凍結融解土の圧密実験を行い，IL 付近において脱水圧密が生じ，透水係数は凍結融解土および未凍結土の両方が増加していることを確認した。佐藤ら³⁷⁾は高含水比の不良土の凍結融解による含水比分布の変化を調べ，未凍土では脱水圧密により含水比が低下し，地表面近くの凍結融解土では蒸発等により含水比が低下したことを報告した。

このように凍結融解土の透水係数変化を支配する要因について多くの知見が得られており，土の粒度分布や固結度，上載荷重が凍結時の土中の水分移動および脱水圧密，土構造・土粒子の変化等に影響を与え，凍結融解後の透水係数変化に強く影響することが予想されるが，そのメカニズムが明らかになったと

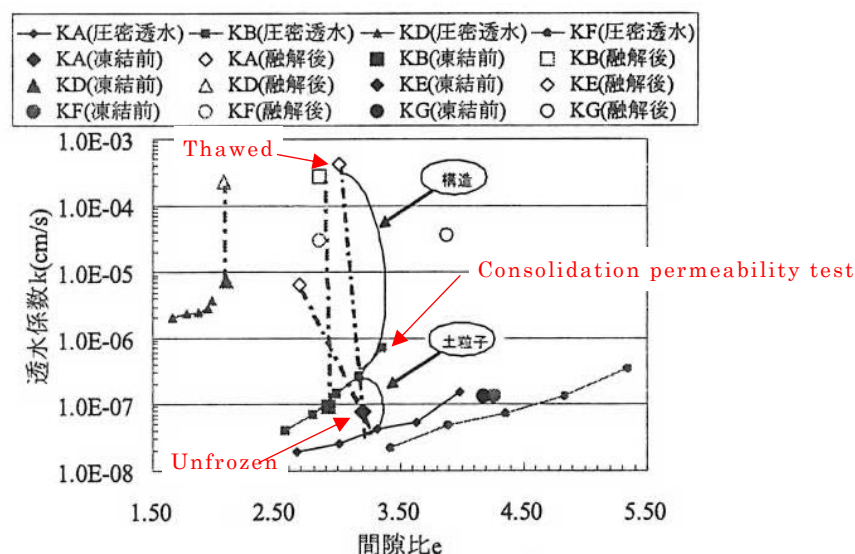


図 1-7 凍結融解による土の構造変化および要素変化に起因する透水係数変化³⁴⁾

は言えない。

これらの研究は自然凍上のように低荷重における凍結融解時の透水係数変化に着目したものであり，人工地盤凍結工法（AGF）のように固結度が高く，上載荷重が大きい地盤が凍結融解されることを想定してはいない。

また，これらの研究で行われた一般的な凍上実験は，上載荷重が作用する方向と凍結が進行する方向，透水試験で通水する方向が全て同じ方向である。つまり，AGFのように上載荷重が鉛直方向に作業し，凍結が水平方向に進行する場合における凍結融解土の鉛直方向の透水係数の変化については検討されていない。

1.3 凍上実験装置

土の凍結に関する研究は寒冷地を中心に世界中で行われており，凍上実験装置は研究の目的により異なる部分があるものの，**Taber**¹⁰⁾が室内実験を行った装置と基本的な機能は同じである．我が国の凍上量予測の基準の一つである地盤工学会基準（JGS0171-2009）の凍上実験装置（図 1-8）も基本的な構成は**Taber**の実験装置と同じである．凍上実験装置は図に示すように載荷方向，凍結方向は共に鉛直方向であり，実験要件として下部冷却盤を低温側，上部冷却盤を高温側とし，上部冷却プレートが供試体の変位を妨げることがない構造とすることが規定されている²²⁾．これは上部冷却盤が凍着によりモールドと接着されると鉛直変位が拘束されるためである．

一般的な凍上実験では AGF のように凍土壁を構築する際に凍結方向と直交する方向にも変位が発生することが考慮されていない．そこで，山本ら³⁸⁾は凍結方向の拘束応力及び凍結方向と直角する方向の拘束応力をそれぞれ任意に与える開放型の凍上試験装置（三軸凍上試験装置）を提案している．

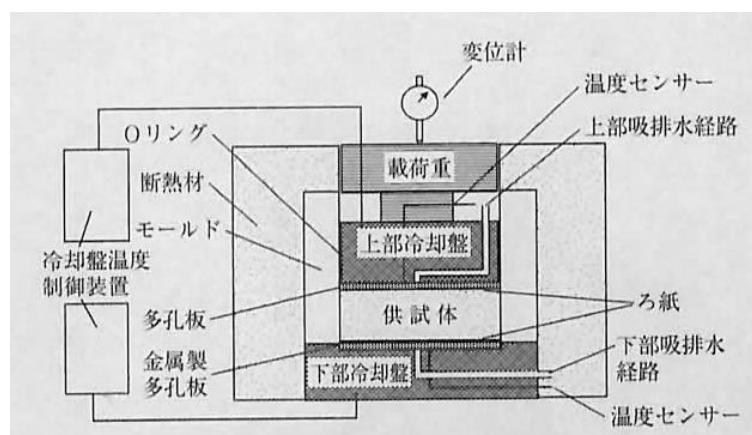


図 1-8 凍上試験機の概念図²²⁾

凍結融解に関する研究においては凍結前と凍結融解後それぞれの透水係数を測定することを目的として、一般的な凍上実験と透水試験を組み合わせた凍上実験装置も多く提案されている。例えば、Konrad ら²⁸⁾は図 1-9 に示す実験装置を用いて凍結融解による透水係数の変化を検討している。これは凍結方向、荷重の载荷方向、透水試験の方向がいずれも鉛直方向となる実験装置である。

AGF により構築された凍土壁が融解する場合を考慮できる凍結融解透水実験として、例えば、伊藤ら³⁹⁾により三軸凍上試験と透水試験を組み合わせた等方圧力条件における凍結融解による透水係数変化を測定できる実験装置が提案されている。このような三軸凍結実験と透水係数を組み合わせた実験においても凍結方向と透水試験を実施する方向は共に鉛直方向である。

以上のように凍上実験と透水試験を組み合わせた実験方法が提案されているが、凍結方向と直交する方向の透水係数を評価する凍結融解透水実験の方法は、現在のところ確立していない。

凍土壁を遮水目的で適用する場合には、凍結膨張によって生じる周辺環境や近接構造物への影響だけではなく、凍結融解土の透水係数の増加を把握し、部分的もしくは完全に融解した場合に凍土壁で隔離されている地盤へ進入する水量を事前に予測して、ディープウェルなどの排水設備を計画する必要がある。

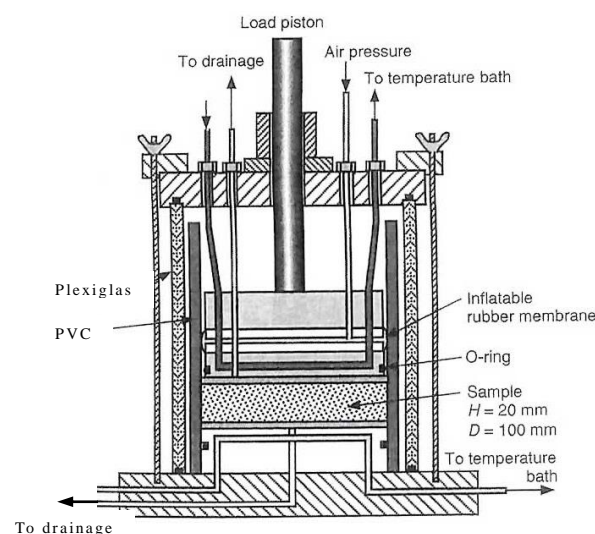


図 1-9 凍結融解透水試験装置の例²⁸⁾

現在のところ、実務では福島原子力発電所の廃炉事業において検討されているように、地盤工学会基準に準拠して土を凍結融解させ、凍結融解後の試料からサンプルを採取して透水係数を測定する方法が行われている⁴⁰⁾。この方法の利点は試験が簡単であるということにある。しかし、この方法では凍結融解土の凍結方向に直交する方向（IL 痕方向）の透水係数を直接測定できないため、IL 痕方向の凍結融解による透水係数の変化を正しく評価できているかは不明であった。

1.4 研究の意義

AGF は大深度でのシールド工事などで多く施工されてきた．近年では福島
凍土遮水壁のように汚染水や汚染土壌を周囲の地下水から隔離する遮水壁とし
ての用途でも適用されている．遮水を目的として AGF が施工される場合には
凍土を比較的長期間運用することが必要である．

遮水を目的として AGF により凍土壁が構築される場合、凍土壁が部分的に融
解すると透水係数の大幅な増加により周囲の地下水が回り込み、汚染の拡大を
招くなど深刻な被害に発展する可能性がある．しかし、凍土融解する時に発生
が予想される IL 痕方向の透水係数は、これまで実験的に明らかにされてい
なかった．また自然条件下における凍結融解による透水係数変化も定性的な解釈
にとどまっており、実務的なレベルでの凍結融解土の透水係数を予測は不可能
であった．

本研究では、IL 痕方向の透水係数の変化を測定することが可能な実験装置を
新たに開発し、これまで明らかではなかった IL 痕方向の凍結融解による透水
係数増加の要因を検討することが可能となった．この実験装置と一般的な凍土
実験装置を用いて、凍結融解土の IL 痕方向および IL 痕直交方向の透水係数を
明らかにする．そして、本研究では簡単な実験を行うだけで凍結履歴のない地
盤における凍結融解土の透水係数を予測できる方法が提案される．

凍土壁が部分的および完全に融解した際の透水係数を予測することで、凍土
壁が融解した際に凍土壁で囲まれた領域へ入り込む水の量を把握できるため、
設計段階から構内に必要なディープウェルの設置本数などを設定できるよう
になる．

1.5 研究の目的

本研究の目的は人工地盤凍結工法等で問題となる凍結融解土の透水係数を実験的に評価する方法を開発することであり、IL 痕方向および IL 痕に直交する方向の透水係数について、次のような検討を行った。

- (1) 凍結融解土の IL 痕直交方向の透水係数に影響を及ぼす要因を明確にするために、IL の発生量を左右する冷却方法と透水係数との関係を検討する。
- (2) 凍結融解土の IL 痕直交方向の透水係数に影響を及ぼす要因として、土の固結度や現地盤で受ける上載荷重の影響を解明するために、予圧密荷重および実験荷重と透水係数との関係を明らかにする。
- (3) 凍結融解土の IL 痕方向の透水係数に影響を及ぼす要因および、IL 方向と IL 痕直交方向の透水係数の違いを明らかにするために、人工地盤凍結工法を想定した水平方向変位拘束凍結融解鉛直透水実験装置を用いて凍結融解土の IL 痕方向の透水係数と冷却方法および荷重条件等との関係を検討する。また、IL 痕方向と IL 痕直交方向の透水係数を比較してそれらの違いの要因を明らかにする。さらに、凍結融解土に段階的に荷重を加えて透水係数の変化を調べることによって、凍結融解による土粒子の変化（要素変化）についても検討した。
- (4) IL や SC の発生が凍結融解土の透水係数に及ぼす影響を解明するために、凍結面を固定して大きな IL および SC を発生させて得られた凍結融解後の透水係数と、凍結面を一方向に進行させて小さいアイスレンズを複数発生させて得られた凍結融解土の透水係数の違いを明らかにする。
- (5) 凍結融解土の IL 痕方向と IL 痕直交方向の透水係数を実験的に求めるための簡易な予測方法を提案する。

1.6 研究業績

著者が摂南大学大学院で研究しているテーマは、凍結融解された細粒土の透水係数を予測する方法の提案、凍結融解作用とイオン交換反応を利用した汚染土壌の洗浄技術の開発である。これらの研究課題について 6 編の査読論文、6 編の論文・口頭発表を行い、共著として 8 編を報告した。本論文は、人工地盤凍結工法で凍結融解された細粒土の透水係数変化に関する研究①～⑨, ⑬, ⑯, ⑳の内容についてまとめたものである。

(1) 査読論文

- ① Go Hirose, Yuzuru Ito : Experimental study on the permeability change of fine-grained soil by freeze-thaw effect , The 11th International Symposium on Cold Regions Development (ISCORD2016), USB 6-2 IC-013 (2016).
- ② 廣瀬剛, 伊藤譲 : 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－, 摂南大学融合科学研究所論文集, 第 2 巻, 第 1 号, pp.40-50 (2016).
- ③ 廣瀬剛, 伊藤譲, 石川達也, 赤川敏, 所哲也, 大西有三, 上田保司 : 飽和細粒土の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実験的研究, 第 12 回地盤改良シンポジウム論文集, 3-3, pp.123-130 (2016).
- ④ 廣瀬剛, 伊藤譲, 石川達也, 赤川敏 : 凍結融解土の透水係数の実験的予測方法, 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.73, No.2, pp.131-140 (2017).
- ⑤ Go Hirose, Yuzuru Ito : Experimental estimation of permeability of freeze-thawed soils in artificial ground freezing, Proceedings of the International Scientific Conference Transportation Geotechnics and

Geoecology(TGG 2017), Procedia Engineering , Vol.189, pp.332-337 (2017).

- ⑥ 廣瀬剛，伊藤譲：凍結融解作用による透水係数の変化とアイスレンズの痕跡との関係，材料，Vol.67，No.1，pp.28-33 (2018).

(2) 論文・口頭発表

- ⑦ 廣瀬剛，伊藤譲，石川達也，赤川敏，所哲也，大西有三：飽和細粒土の凍結融解前後における熱流直角方向の透水係数変化に関する実験，平成 27 年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-13 (2015).
- ⑧ 廣瀬剛，伊藤譲，石川達也，赤川敏，所哲也，大西有三，上田保司：飽和細粒土の凍結融解前後におけるアイスレンズ面方向の透水係数変化に関する実験，土木学会 第 70 回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-281，pp.561-562 (2015).
- ⑨ 廣瀬剛，伊藤譲，石川達也，赤川敏，所哲也，大西有三：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について(1)，土木学会 第 71 回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-314，pp.627-628 (2016).
- ⑩ 廣瀬剛，伊藤譲，井上拓人，阪部秀雄：凍結融解現象と陽イオン交換を利用した汚染土の洗浄に関する実験，第 51 回地盤工学研究発表会，B-00，pp.2159-2160 (2016).
- ⑪ 廣瀬剛，伊藤譲，井上拓人，阪部秀雄，芮大虎：凍結融解回数およびイオン交換物質の供給方法が汚染土壌の洗浄効果に及ぼす影響，第 52 回地盤工学会研究発表会，D-02，0163，pp.323-324 (2017).
- ⑫ 廣瀬剛，伊藤譲：載荷条件下における不凍水量と透水係数の関係，土木学会

第 72 回年次学術講演会講演概要集, III-446, pp.891-892 (2017).

(3) その他

- ⑬ 伊藤譲, 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, D-08, pp.895-896 (2015).
- ⑭ 井上拓人, 伊藤譲, 廣瀬剛, 阪部秀雄: 凍結融解とイオン交換反応を利用した汚染土壌の洗浄技術, 平成 28 年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集, III-25 (2016).
- ⑮ 井上拓人, 伊藤譲, 廣瀬剛, 阪部秀雄, 芮大虎: 凍結融解とイオン交換を利用した洗浄技術の特性について, 土木学会 第 71 回年次学術講演会講演概要集, III-078, pp.155-156 (2016).
- ⑯ 伊藤譲, 廣瀬剛, 石川達也, 赤川敏, 所哲也, 大西有三: 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について(2), 土木学会 第 71 回年次学術講演会講演概要集, III-315, pp.629-630 (2016).
- ⑰ 井上拓人, 伊藤譲, 廣瀬剛, 阪部秀雄, 芮大虎: 凍結融解とイオン交換反応を利用した土壌洗浄実験における洗浄効率に及ぼす影響, 第 12 回地盤改良シンポジウム論文集, 6-6, pp.277-282 (2016).
- ⑱ 井上拓人, 伊藤譲, 廣瀬剛, 阪部秀雄, 芮大虎: 凍結融解現象とイオン交換反応を利用した細粒土の洗浄技術に関する実験的研究, 摂南大学融合科学研究論文集, 第 2 巻, 第 1 号, pp.32-39 (2016).
- ⑲ 井上拓人, 伊藤譲, 廣瀬剛, 阪部秀雄, 芮大虎: 凍結融解とイオン交換反応を利用した洗浄技術における洗浄効率改善のための実験的検討, 土木学会

第 72 回年次学術講演会講演概要集, III-214, pp.427-428 (2017).

- ⑳ Yuzuru Ito, Go Hirose: Mechanism of permeability of freeze-thawed soil,
The 2nd Asian Conference on Permafrost, Poster (2017).

1.7 各章の構成

本論文は凍結融解土の透水係数を予測するための実験的な評価方法の提案に関して 7 章構成で取りまとめたものである．以下に各章の内容について簡単に記述する．

第 2 章は凍結融解土の IL の痕跡に直交する方向（IL 痕直交方向）に地下水流が発生する場合を想定して，凍上量すなわち IL の発生量が凍結融解土の透水係数変化に与える影響を明らかにした．そのため，一次元凍結融解透水実験で両端面の温度を徐々に降下させる際の冷却速度，温度勾配と最低冷却温度を変えた実験を行った．

第 3 章は地盤の固結度や土被り圧が凍結融解土の透水係数変化に与える影響を解明するために，凍上性の異なる 2 種類の粘性土を用いて予圧密荷重および実験荷重を変化させた一次元凍結融解透水実験を行った．

第 4 章は凍結融解土の IL の痕跡に沿う方向（IL 痕方向）に地下水流が発生する場合を想定して，IL 痕方向の透水係数に影響を与える要素を明らかにした．そのために，実験荷重，予圧密荷重，給排水の有無，凍結融解繰返し回数を変えた実験を行った．そして，凍結融解による土中の水分移動が IL 方向の透水係数変化を関係しているかを明らかにするために，凍結融解土の間隙比分布を算出した．また，凍結融解土の透水係数の異方性を明らかにするために IL 方向と IL 直交方向の凍結融解土の透水係数を比較した．さらに，圧密透水試験により段階的に荷重が加えられた時の土の間隙構造の変化に伴う透水係数の変化を明らかにし，凍結融解による土の構造変化と土粒子の変化を検討した．

第 5 章は IL と SC が凍結融解土の透水係数に与える影響を解明するために，両端面の温度を一定にして IL を厚く成長させた場合と両端面の温度を一定の速度で降下させて複数の IL を発生させた場合について，凍結融解土の IL 痕と IL 痕直交方向の透水係数を比較した．さらに，圧密透水試験の準備段階において凍結融解土をセルから押す際に試料が乱される影響を明らかにするため，セルからの押出し作業がない三軸凍結融解透水実験と一次元凍結融解実験とから採取した圧密透水試験の実験結果を比較した．

第 6 章は人工地盤凍結工法で凍結された地盤が融解した場合の IL 痕方向と

IL 痕直交方向の透水係数を予測する方法を提案した．具体的には IL 痕直交方向の透水係数は一次元凍結融解透水実験により予測し，IL 痕方向は一次元凍結融解透水実験で得られた間隙比と透水係数の関係式と透水試験を省略した水平方向変位拘束凍結融解実験で得られた凍結融解土の間隙比分布から予測する．そして，透水試験の実測値と比較して，予測値と対応しているかを検討する．

第 7 章は結論としてこれまでの内容を総括した．

参考文献

- 1) Yuzuru Ito, Go Hirose: Mechanism of permeability of freeze-thawed soil, The 2nd Asian Conference on Permafrost, Poster (2017).
- 2) http://www.mlit.go.jp/river/press_blog/past_press/press/200101_06/010511/010511-2.html, (2017)
- 3) 伊藤譲, 吉田聡志: 我が国における地盤改良技術の変遷 5.人工地盤凍結工法とその展開, 材料, Vol.65, No.12, pp.883~889 (2016).
- 4) L. Tsang, A. Cheung, C. Leung, L. Chan: Artificial ground freezing for TBM Break-through – Construction, Proceedings of the 32nd Annual Seminar Geotechnical Division, The Hong Kong Institution of Engineers, pp.125-130 (2012).
- 5) 凍土分科会: 凍土の知識－人工凍土壁の技術－, 雪氷, 76 巻 2 号, pp.179-192 (2014).
- 6) U.S. Department of Energy: Frozen Soil Barrier, Innovative Technology Summary Report, DOE/EM-0483 (1999).
- 7) Wagner, A. M.: Creation of an artificial frozen barrier using hybrid thermosiphons, Cold Regions Science and Technology, Vol.96, pp.108-116 (2013).
- 8) 地盤工学会: 地盤改良の調査・設計と施工, 6.6 凍結工法, 255p (2013).
- 9) http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning/committee/osensuiasakuteam/2016/pdf/0331_2a.pdf, (2016).
- 10) S. Taber: Frost heaving, Journal of Geology, Vol.37, pp.428-461 (1929).
- 11) G. Beskow: Soil freezing and frost heaving with special application to roads and railroads, The Swedish Geological Society, Series C, 375(26th year book), pp.14-21 (1935).
- 12) K. A. Jackson, D. R. Uhlmann, B. Chalmers: Frost heave in soils, Journal of Applied Physics, Vol. 37, No. 2, pp.848-852 (1965).
- 13) T. S. Vinson, F. Ahmad and R. Rieke: Factors important to the development of frost heave susceptibility criteria for coarse-grained soils,

Transportation Research Record 1089. Transportation Reserch Board, ISSN: 0361-1981 (1986).

14) 池田憲二：積雪寒冷地における地盤工学の歩みと展望，地盤工学会誌，Vol.63－11/12，HP5-HP6 (2015).

15) 高志勤，益田聡司，山本英夫：土の凍結膨張率に及ぼす凍結速度，有効応力の影響に関する研究，雪氷，36 卷 2 号，pp.1-20 (1974).

16) R. C. Sill and A. S. Skapski: Method for the determination of the surface tension of solids from their melting points in thin wedges. Journal of Chemical Physics, Vol. 24, pp.644-651 (1956).

17) R. D. Miller: Freezing and heaving of saturated and unsaturated soils, Highway Research Record, 393, pp.1-13 (1972).

18) R. R. Gilpin: A model for the prediction of ice lensing and frost heave in soils, Water Resources Research, 16, 5, pp.918-930 (1980).

19) S. Takagi: The adsorption force theory of frost heaving, Cold Regions Science and Technology, 3, pp.57-81 (1980).

20) S. Akagawa: Experimental study of frozen fringe Characteristics, Journal of Cold Regions Science and Technology, Vol.15, pp.209-223 (1988).

21) 渡辺晋生，溝口勝，石崎武志：凍結過程における土の凍結面近傍の微視的構造についての実験研究，農業土木学会論文集，No.191，pp.53-58 (1997).

22) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説，第 11 章凍上試験，pp.226-249 (2016).

23) J. M. Konrad and N. R. Morgenstern: The segregation potential of a freezing soil, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 18, pp.482-491 (1981).

24) J. F. Nixon: Discrete ice lens theory for frost heave in soils, Canadian Geotechnical Journal, Vol.28, pp.843-859 (1991).

25) E. J. Chamberlain and A. J. Gow: Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils, Engineering Geology, Vol.13, pp.73-92 (1979).

26) C. Benson and M. A. Othman: Hydraulic conductivity of compacted clay frozen and thawed in situ, Journal of Geotechnical Engineering, Vol.119,

No.2, pp.276-297 (1993).

27) B. Paudel and B. Wang: Freeze-thaw effect on consolidation properties of fine grained soils from the Mackenzie valley, 63rd Canadian Geotechnical Conference & 6th Canadian Permafrost Conference, pp.992-996 (2010).

28) J. M. Konrad and M. Samson: Hydraulic conductivity of kaolinite-silt mixtures subjected to closed-system freezing and thaw consolidation, Canadian Geotechnical Journal, Vol.37, pp.857-869 (2000).

29) S. Dumais and J. M. Konrad: Compressibility and hydraulic conductivity of thawed fine-grained permafrost, 11th International Symposium on Cold Regions Development, USB, 6-2 IC-010 (2016).

30) M. A. Othman, C. Benson: Effect of freeze-thaw on the hydraulic conductivity and morphology of compacted clay, Canadian Geotechnical Journal, Vol.30, pp.236-246 (1993).

31) D. Sterpi: Effect of freeze-thaw cycles on the hydraulic conductivity of a compacted clayey silt and influence of the compaction energy, Soils and Foundations, No.55(5), pp.1326-1332 (2015).

32) 中村大, 鈴木輝之, 後藤隆司, 金学三, 伊藤陽司, 山下聡: 凍結融解による土の透水係数および間隙比の変化, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.67, No.2, pp.264-275 (2011).

33) Y. Ito, M. Kamon and K. Aramoto: Influence of freezing method on the permeability of frozen-thawed soils, Proc. 5th Japan-Korea Joint Seminar on Geoenvironmental Engineering, pp.199-194 (2005).

34) 玉崎千秋, 伊藤譲, 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, pp.75-78 (2008).

35) 広瀬剛, 伊藤譲, 片野田栄一: 凍結融解土の圧密特性の変化について, 土木学会第 55 回年次学術講演会, III-B356 (2000).

36) 片野田栄一, 伊藤譲, 嘉門雅史, 野村忠明: 凍結融解現象を利用した新圧密促進工法, 第 4 回地盤改良シンポジウム発表論文集, pp.175-182 (2000).

37) 佐藤厚子, 中村大, 鈴木輝之, 西本聡: 自然寒冷下での凍結融解過程にお

ける高含水比土の水分挙動，地盤工学ジャーナル，Vol.4，No.2，pp.205-214 (2009).

38) 山本英夫，上田保司，伊豆田久雄：飽和度の三軸凍結膨張に関する実験的研究，雪氷，56 巻 4 号，pp.325-333 (1994).

39) 伊藤譲，新居和人，新本健司：等方圧力下における凍結融解後の透水係数の変化，土木学会第 60 回年次学術講演会，3-310 (2005).

40) http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/140715/140715_01i.pdf, (2018).

第2章 アイスレンズの発生と凍結融解土の透水係数との関係

2.1 目的

細粒土が凍結作用を受けると凍上現象が発生して、アイスレンズ（IL）と呼ばれる氷晶が幾層も形成される。凍上した細粒土が凍結融解することによる透水係数増加のメカニズムについて、Cambrlain ら¹⁾や Benson ら²⁾は、凍結融解後にも凍結時の IL が痕跡として残っており、痕跡が水道（みずみち）となることで透水係数が増加すると考えた。しかし、Konrad ら³⁾や Dumais ら⁴⁾が主張しているように透水係数の増加には IL の痕跡ではなく、細粒分の含有率や平均粒径が影響を及ぼすとの報告もある。

凍結融解後の透水係数変化に影響を及ぼす外的な条件についての研究も行われている。Ito ら⁵⁾は凍結融解に及ぼす要素を明確にするために冷却条件や荷重条件を変えた実験を行い、凍結融解土の透水係数は上載荷重の影響を受けることを結論付けた。

これらの研究は自然界のように地盤が地表面から鉛直方向に凍結融解作用を受けることを想定したものである。このとき、凍結融解土に流れる水流は IL 痕跡に直交した方向（IL 痕直交方向）になる。一方、人工地盤凍結工法（AGF）では凍結管の表面から水平方向に地盤が凍結されて凍土壁が構築される。そして、凍土壁が完全に融解した場合においても、凍結融解土には IL 痕直交方向の水流が発生する。

本章で IL 痕直交方向の凍結融解土の透水係数について、冷却方法が凍結融解土の透水係数に与える影響を明らかにするために、冷却速度、最低冷却温度、温度勾配を変えた実験を行った。さらに、IL の発生する量が透水係数に及ぼす影響を明らかにするために凍上率と透水係数の関係を検討した。実験は一般的な凍上実験に準拠した一次元凍結融解透水実験と AGF により凍結融解されたときの透水係数の変化を検討することが可能な三軸凍結融解透水実験により行われた。

2.2 実験方法

2.2.1 供試体作成

IL の発生量が凍結融解土の透水係数に及ぼす影響を検討するために、一次元凍結融解透水実験（鉛直凍結実験）と三軸凍結融解透水実験（三軸凍結実験）を行い、熱流方向（鉛直方向，IL 面に対して直角方向）の凍結融解前後の透水係数を検討する．

試料土は表 2-1 に物性値を示した $425\mu\text{m}$ ふるいを通過した藤森 14N であり，地盤工学会基準（JGS0051-2009）に基づく工学的分類では粘土（CL）となる．鉛直凍結実験の供試体は，試料土を液性限界の 1.3 倍の含水比（ $41.4 \times 1.3 = 53.8\%$ ）に調整し，ハンドミキサーを用い 5 分間練り混ぜ，15 分間真空脱気した後，24 時間養生したものを直径 $\phi 10\text{ cm}$ の円筒形の予圧密容器に流し込み，予圧密荷重 $P = 500\text{ kN/m}^2$ まで段階的に載荷して，高さ $h = 5\text{ cm}$ ，直径 $\phi 10\text{ cm}$ に成形したものである．三軸凍結実験の供試体は同様に $\phi 6\text{ cm}$ ， $h = 5\text{ cm}$ に成形したものである．

表 2-1 試料土の物性値

Sample	ρ_s g/cm ³	w_L %	w_P %	Sand %	Silt %	Clay %
Fujinomor 14N	2.674	41.4	23.0	9.4	59.1	31.5

2.2.2 一次元凍結融解透水実験

図 2-1 に一次元凍結融解透水実験装置（鉛直凍結実験装置）を示す．鉛直凍結実験装置は凍上試験装置（JGS0171）に変水位透水試験機能を加えたものであり，内空 $\phi 10\text{cm}$ ，厚さ 3cm ，高さ $h=15\text{cm}$ のアクリル製円筒，アルミ製の上・下部プレートから構成される．上・下部プレートには恒温水層で温度制御された不凍液を循環させ，下部を低温側（ T_c ），上部を高温側（ T_w ）とし，凍着による鉛直変位の阻害を防ぐために下部から上部方向へ供試体を凍結させた．上・下部プレートには Pt センサーが設置され，供試体上・下端面付近の温度を測定することができる．凍結融解中の給排水は上部プレートから給排水瓶方向へ行われ，給排水量は給排水瓶の重量変化として電子天秤により測定される．また，上部プレートのシャフトにはベロフラムシリンダーを介して上載荷重が加えられ，シャフトに取り付けられた変位計で鉛直変位が測定された．

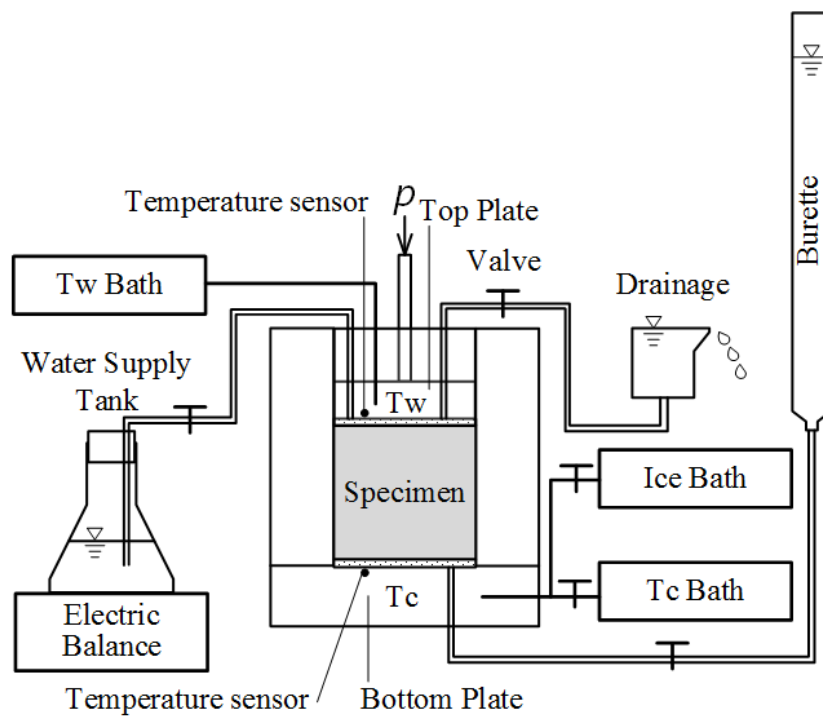


図 2-1 一次元凍結融解透水実験装置（鉛直凍結実験装置）

図 2-2 に供試体上・下端面温度の経時変化を示す．実験過程は凍結融解とその前後の透水試験からなる．凍結融解過程では，まず T_w と T_c が 5°C の温度差を保ちながら徐々に温度降下される． $T_c = -0.8^{\circ}\text{C}$ まで温度降下した時に -20°C の不凍液を下部プレートに 10 分程度循環させ，氷核形成が行われる．その後 $T_c = -6^{\circ}\text{C}$ ， $T_w = -1^{\circ}\text{C}$ まで温度降下した後， T_w と T_c 共に -10°C まで急冷却し，6 時間一定に保った．

図 2-3 に凍上量の経時変化を示す．凍上量 h' とは初期の供試体高さからの変位量である．氷核形成直後から凍上量が増加し， T_w ， $T_c = -10^{\circ}\text{C}$ の時に凍上量変化が止まり，融解時には凍上量が減少した．図 2-4 に給水量の経時変化を示す．給排水量の変化は供試体からの排水を負とし，供試体への給水を正としている．給排水重量の変化は凍上量と対応する．図 2-2 に示すように，変水位透水試験は凍結融解過程の前後に行われ，試験中の供試体の両端面温度を T_w ， $T_c = 5^{\circ}\text{C}$ とし，下部プレートをビュレット側に接続し，上部プレート側から排水した．

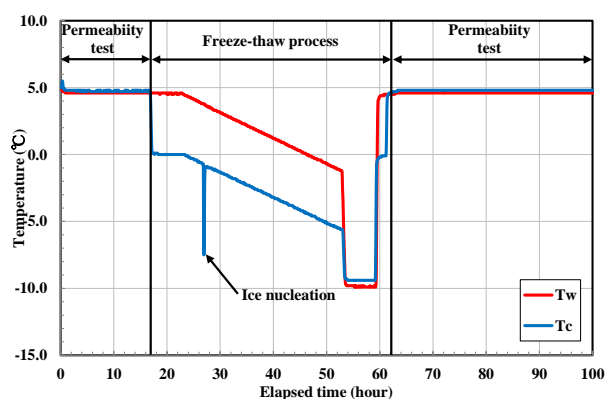


図 2-2 供試体両端面温度の経時変化 (C5)

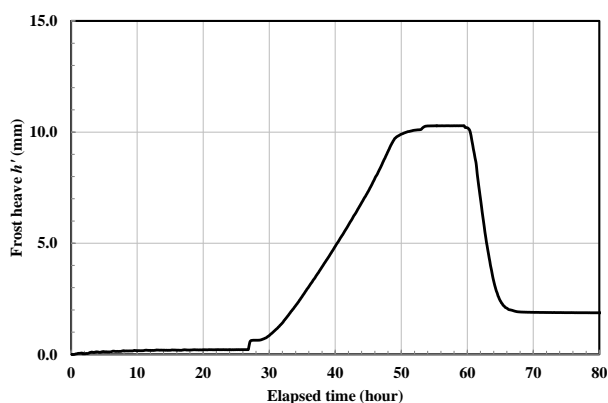


図 2-3 凍上量の経時変化 (C5)

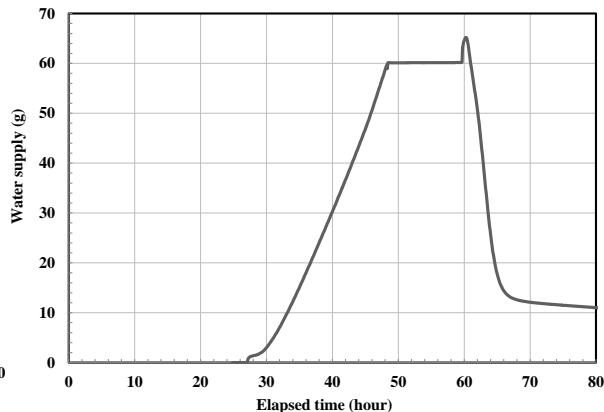


図 2-4 給水量の経時変化 (C5)

表 2-2 に鉛直凍結実験の実験条件を示す．鉛直凍結実験では冷却速度，冷却温度，温度勾配の影響を検討した．C1～4 では高荷重における冷却速度の影響（冷却速度 $dT/dt = 0.05 \sim 0.4$ °C/hour，実験荷重 $p = 150$ kN/m²），C5，12，13 では低荷重における冷却速度の影響（ $dT/dt = 0.1 \sim 0.4$ °C/hour， $p = 50$ kN/m²），C7，8，9-2 では高荷重における最低冷却温度の影響（最低温度 $T_L = -5 \sim -20$ °C， $p = 190$ kN/m²），C5，8-2，9-2 では低荷重時の最低冷却温度の影響（ $T_L = -5 \sim -20$ °C， $p = 50$ kN/m²）を検討した．

Influence of	Purpose	Test No.	Cooling rate	Lowest cooling temperature	Temperature gradient	Pre-consolidation pressure	Overburden pressure
			dT/dt °C/hour	T_L °C	dT/dh °C/cm	P kN/m ²	p kN/m ²
Cooling rate under greater overburden pressure		C1-1	0.1	-10	1	500	150
		C2-1	0.2	-10	1	500	150
		C3-1	0.4	-10	1	500	150
		C4-1	0.05	-10	1	500	150
Cooling rate under lower overburden pressure		C5-1	0.2	-10	1	500	50
		C12-1	0.4	-10	1	500	50
		C13-1	0.1	-10	1	500	50
Lowest cooling temperature		C7-1	0.2	-10	1	500	190
		C8-1	0.2	-5	1	500	190
		C8-2	0.2	-5	1	500	50
		C9-1	0.2	-20	1	500	50
		C9-2	0.2	-20	1	500	190
Temperature gradient		C10-1	0.2	-10	2	500	50
		C10-2	0.2	-10	2	500	190
		C11-1	0.2	-10	0.5	500	50
		C11-2	0.2	-10	0.5	500	190

※Freezing method : Ramp

※Water supply : Open

温度勾配の影響（温度勾配 $dT/dh = 0.5 \sim 2.0$ °C/cm, $p = 190$ kN/m²), C5, 10, 11 では低荷重下の温度勾配の影響（ $dT/dh = 0.5 \sim 2.0$ °C/cm, $p = 50$ kN/m²)を検討した．上記の実験は徐々に冷却温度を低下させるランプ式凍結，凍結融解中に給排水が可能である開式凍結で予圧密荷重 $P = 500$ kN/m² とした．

2.2.3 三軸凍結融解透水実験

図 2-5 に三軸凍結融解透水実験装置を示す．実験装置は三軸圧縮試験装置に温度制御と変水位透水試験の機能を加えたものであり，等方・異方応力条件，鉛直変位拘束条件下での凍上実験が可能である．装置はアルミ製のペDESTALとキャップ，圧力室を密閉するアクリル円筒，ステンレス製の上部・下部プレートから構成される．キャップにはシャフトが取り付けられ鉛直荷重の制御と変位拘束が可能である．実験ではφ 6cm の供試体にゴムスリーブを取付け，側圧を空気圧，鉛直荷重をロードセルにより制御した．キャップを高温（ T_w ）側 T_w ，ペDESTALを低温（ T_c ）側とし，供試体の下部から上へ鉛直方向に凍結させた．凍結融解中の給排水はキャップから給排水瓶へ行われ，給排水量は電子天秤の重量変化により測定される．実験中の温度変化は図 2-2 と同様である．

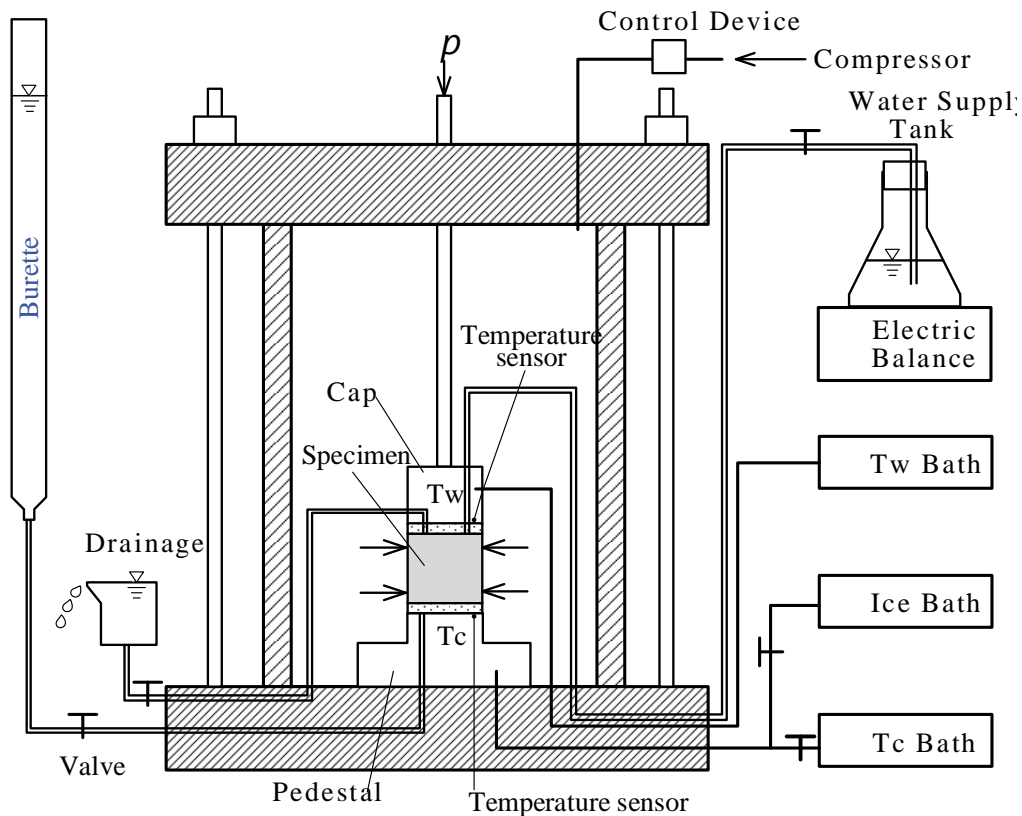


図 2-5 三軸凍結融解透水実験（三軸凍結実験）

凍結融解前後には変水位透水試験が行なわれ、キャップ方向に通水させ鉛直方向の透水係数を測定した。

表 2-3 に三軸凍結実験の実験条件を示す。冷却速度の影響（ $dT/dt = 0.1 \sim 0.4$ °C/hour）を検討した。T1～3 は等方圧力，T4～6 は鉛直方向の変位を拘束し， $p = 50 \text{ kN/m}^2$ とした。予圧密荷重は全て $P = 500 \text{ kN/m}^2$ とし，凍結は徐々に両端面の冷却温度を降下させるランプ式，凍結中に給排水が可能である開式条件とした。

表 2-3 三軸凍結実験における冷却条件の影響に関する実験条件

Purpose	Test No.	Cooling rate dT/dt °C/hour	Lowest cooling temperature T_L °C	Temperature gradient dT/dh °C/cm	Pre-consolidation pressure P kN/m ²	Overburden pressure p kN/m ²	Pressure condition
Influence of Cooling rate	T1	0.2	-10	1	500	50	Isotropic pressure
	T2	0.1	-10	1	500	50	
	T3	0.4	-10	1	500	50	
	T4	0.2	-10	1	500	50	Vertical displacement constraint
	T5	0.1	-10	1	500	50	
	T6	0.4	-10	1	500	50	

※Freezing method : Ramp

2.3 実験結果と考察

表 2-4 に鉛直凍結実験の、表 2-5 に三軸凍結実験の実験結果一覧を示す。鉛直凍結実験、三軸凍結実験ともに透水係数は未凍結土よりも凍結融解土の方が大きい。未凍結土の透水係数 k_u に対する凍結融解土の透水係数 k_t の比を透水係数増加比 k_t/k_u とすると、鉛直実験では、透水係数増加比は $k_t/k_u = 2 \sim 8$ で 14 点あり、その他は $k_t/k_u = 15, 86$ がそれぞれ 1 点ずつあった。一方、三軸凍結実験では $k_t/k_u = 2.9 \sim 3.6$ であり、 $k_t/k_u = 3.3$ 付近であった。

2.3.1 冷却速度の影響

図 2-6 に低荷重 ($p = 50 \text{ kN/m}^2$) 時における冷却速度と透水係数の関係を示す。C5, C13 ($dT/dt = 0.1, 0.2 \text{ } ^\circ\text{C/hour}$) では凍結融解土の透水係数は $k_t = 1.0 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ 付近で同程度であり、透水係数増加比は C5, C13 で $k_t/k_u = 6, k_t/k_u = 7$ であった。冷却速度と凍結融解土の透水係数に関係性は認められない。C12 の凍結融解後の透水係数は他のケースよりも大きい、その理由は不明である。

図 2-7 に高荷重 ($p = 150 \text{ kN/m}^2$) 時における冷却速度と透水係数の関係を示す。凍結融解土の透水係数はいずれも $k_t = 3.0 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ 程度で冷却速度に関係なく、透水係数増加比は $k_t/k_u = 2 \sim 3$ の間であった。高荷重時においても冷却速度と凍結融解土の透水係数に関係性は認められない。

図 2-8 に三軸凍結実験における冷却速度と透水係数の関係を示す。凍結融解土の透水係数の増加は冷却速度や変位拘束条件に関係なく、凍結融解土の透水係数は $k_t = 1.0 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ であり、透水係数増加比は $k_t/k_u = 3 \sim 4$ の範囲であった。三軸凍結実験においても冷却速度を透水係数との関係性は認められなかった。

つまり、冷却速度と凍結融解土の透水係数との間には関係性がないことが明らかになった。そして、高荷重では低荷重よりも凍結融解土の透水係数が小さくなり、実験荷重と凍結融解土の透水係数の関係が示唆された。さらに、低荷重 ($p = 50 \text{ kN/m}^2$) における鉛直凍結実験と三軸凍結実験での凍結融解度の透水係数は同程度であり、供試体側面の拘束条件を変えても凍結融解土の透水係

数は同程度になると考えられる。

表 2-4 鉛直凍結実験の実験結果一覧

Test No.	Pre-consolidation pressure	Overburden pressure	Void ratio		Permeability		Frost heave ratio	Permeability ratio
	P	p	UF	F/T	UF	F/T		
	kN/m^2	kN/m^2	e_0	e_t	k_u m/s	k_t m/s	%	k_t/k_u
C1-1	500	150	0.822	0.836	1.6×10^{-9}	3.9×10^{-9}	18	2.4
C2-1	500	150	0.848	0.840	1.7×10^{-9}	4.1×10^{-9}	11	2.4
C3-1	500	150	0.814	0.828	1.3×10^{-9}	2.8×10^{-9}	8	2.1
C4-1	500	150	0.841	0.860	2.1×10^{-9}	4.5×10^{-9}	24	2.1
C5-1	500	50	0.845	0.891	1.1×10^{-9}	6.4×10^{-9}	20	5.9
C7-1	500	190	0.814	0.827	5.4×10^{-10}	3.7×10^{-9}	6	6.9
C8-1	500	190	0.875	0.870	3.0×10^{-9}	7.0×10^{-9}	5	2.3
C8-2	500	50	0.854	0.889	2.2×10^{-9}	6.0×10^{-9}	20	2.8
C9-1	500	50	0.853	0.998	1.1×10^{-9}	9.7×10^{-9}	16	9.1
C9-2	500	190	0.861	0.835	1.6×10^{-9}	4.0×10^{-9}	10	2.6
C10-1	500	50	0.822	1.018	7.9×10^{-10}	1.2×10^{-8}	36	15
C10-2	500	190	1.062	1.413	5.9×10^{-9}	4.7×10^{-8}	24	8
C11-1	500	50	0.832	0.837	7.9×10^{-10}	6.1×10^{-9}	6	7.7
C11-2	500	190	0.839	0.896	1.7×10^{-9}	3.3×10^{-9}	4	2
C12-1	500	50	0.830	0.914	9.5×10^{-10}	8.1×10^{-8}	12	86.1
C13-1	500	50	0.825	0.995	1.7×10^{-9}	1.2×10^{-8}	15	7.3

表 2-5 三軸凍結実験の実験結果一覧

Test No.	Pressure condition	Cooling rate	Void ratio		Permeability		Frost heave ratio %	Permeability ratio k_t/k_u
		dT/dt	UF	F/T	UF	F/T		
		°C/hour	e_0	e_t	k_u m/s	k_t m/s		
T1	Isotropic pressure	0.2	0.804	0.873	1.4×10^{-9}	4.9×10^{-9}	20	3.5
T2		0.1	0.809	0.873	1.6×10^{-9}	5.8×10^{-9}	26	3.6
T3		0.4	0.823	0.862	1.8×10^{-9}	5.1×10^{-9}	15	2.9
T4	Vertical displacement constraint	0.2	0.824	0.877	1.5×10^{-9}	5.2×10^{-9}	0	3.5
T5		0.1	0.834	0.919	2.4×10^{-9}	7.8×10^{-9}	0	3.3
T6		0.4	0.813	0.858	2.2×10^{-9}	7.1×10^{-9}	0	3.3

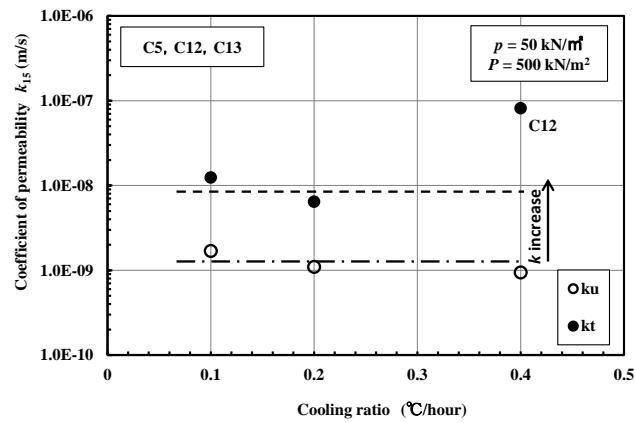


図 2-6 鉛直凍結実験の低荷重条件下における冷却速度と透水係数の関係

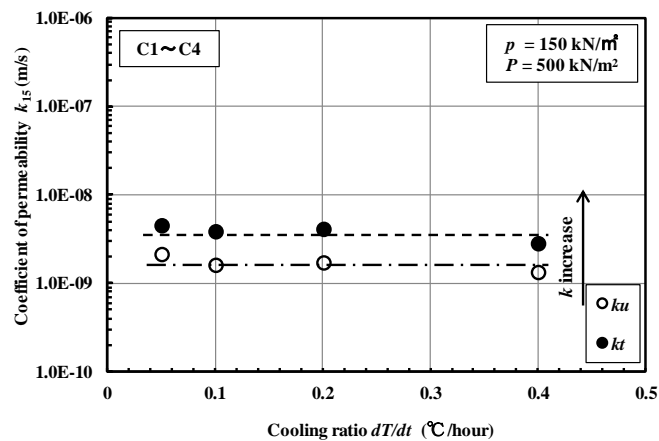


図 2-7 鉛直凍結実験における冷却速度と透水係数の関係

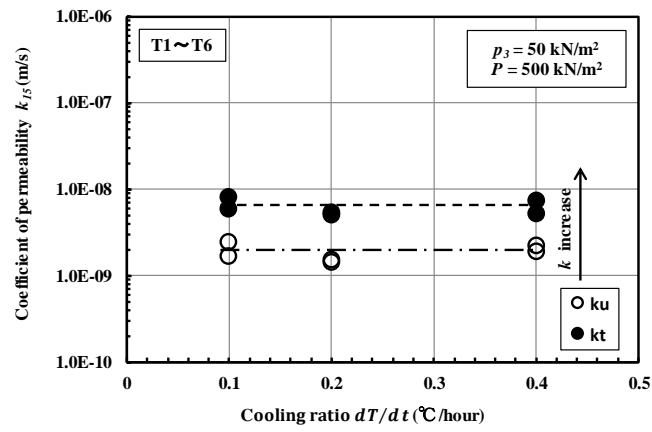


図 2-8 三軸凍結実験における冷却速度と透水係数の関係

2.3.2 最低冷却温度の影響

図 2-9 に最低冷却温度と透水係数の関係を示す. 最低冷却温度 $T_L = -5 \sim -20$ °C の範囲では, T_L が変わっても凍結融解土の透水係数 k_t に有意な差はなかった. 実験荷重 p の大きい方が k_t は小さくなる傾向があり, $p = 190$ kN/m² のとき, $k_t = 4.0 \times 10^{-9}$ m/s 程度であり, $p = 50$ kN/m² のとき $k_t = 6.0 \times 10^{-9}$ m/s 程度となった.

以上の結果より, 最低冷却温度が凍結融解土の透水係数に与える影響は認められない. むしろ, 実験荷重が凍結融解土の透水係数に影響を与えている可能性がある.

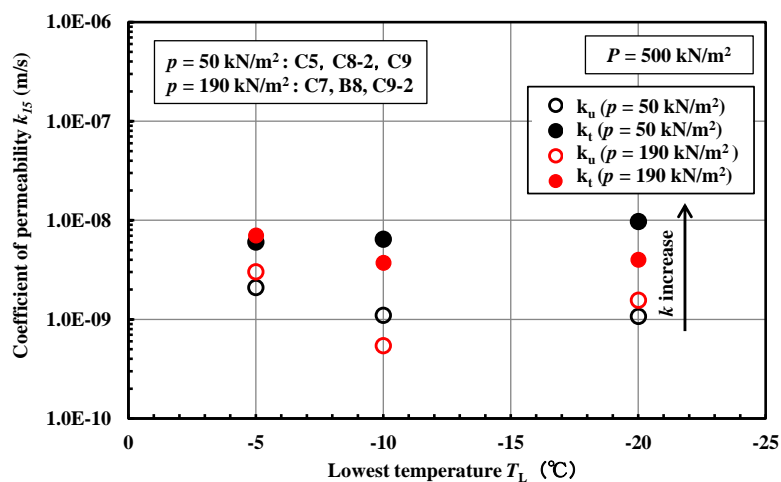


図 2-9 最終冷却温度と透水係数の関係

2.3.3 温度勾配の影響

図 2-10 に温度勾配と透水係数の関係を示す．温度勾配に関係なく，凍結融解土の透水係数は $k_t = 1.0 \times 10^{-8}$ m/s で同程度であり，温度勾配と k_t に関係は見られなかった．実験荷重 $p = 50, 190$ kN/m² における k_t を比較しても， p の違いによる影響は認められなかった．

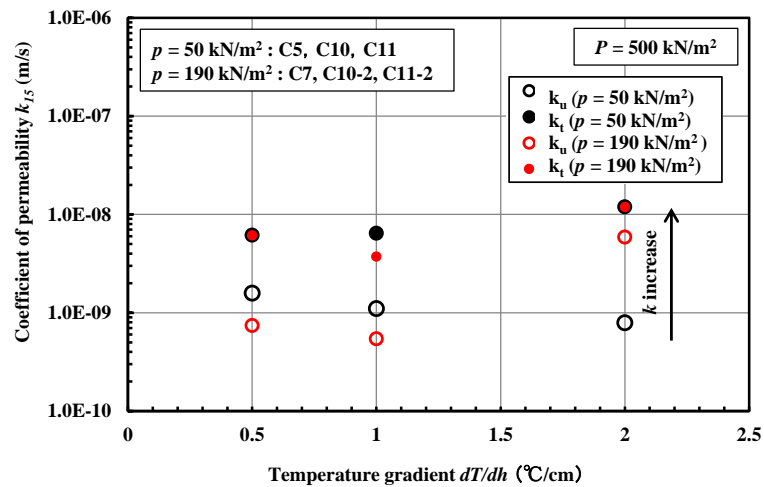


図 2-10 温度勾配と透水係数の関係

2.3.4 凍上率と透水係数増加比の関係

図 2-11 に凍上率と透水係数の関係を示す．凍上率とは凍結前の供試体高さ h に対する凍上量 h' の比 h'/h である．鉛直凍結実験と三軸凍結実験における透水係数増加比をそれぞれ $k_t/k_u(C)$ と $k_t/k_u(T)$ とする．IL の発生が凍結融解土の透水係数に影響すると仮定すると，凍上率が大きくなるほど融解後の透水係数が増加するはずである．しかし，実際には凍上率が大きくなっても $k_t/k_u(C)$ および $k_t/k_u(T)$ との間に関係性は認められなかった．

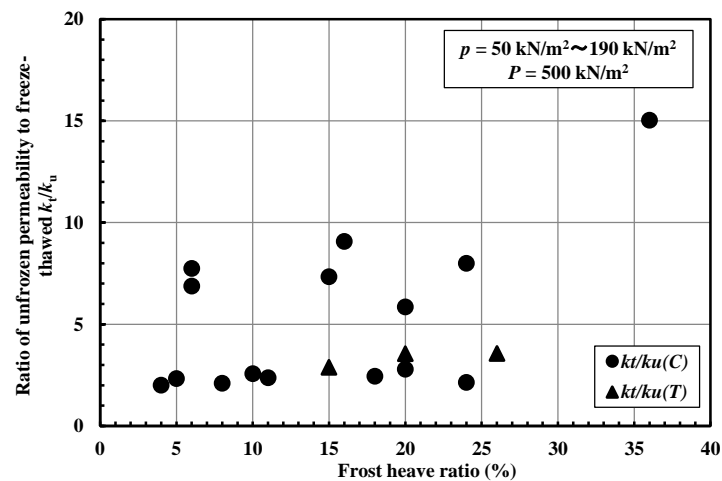


図 2-11 凍上率と透水係数の関係

2.3.5 間隙比と透水係数の関係

図 2-12 に間隙比と透水係数の関係を示す．鉛直凍結実験，三軸凍結実験ともに凍結融解土にはほぼ同じレベルにまで透水係数 k が増加した．同じ間隙比であっても，透水係数は未凍結土で小さく，凍結融解土で大きくなっている．予圧密荷重が一定であるため，未凍結土の間隙比 e は $e = 0.85$ 付近にであるが，凍結融解土は $e = 0.8 \sim 1$ 付近に分布している．実験荷重が小さい $p=50\text{kN/m}^2$ のうち C9-1，C10-1，C13 において間隙比の増加が認められた．

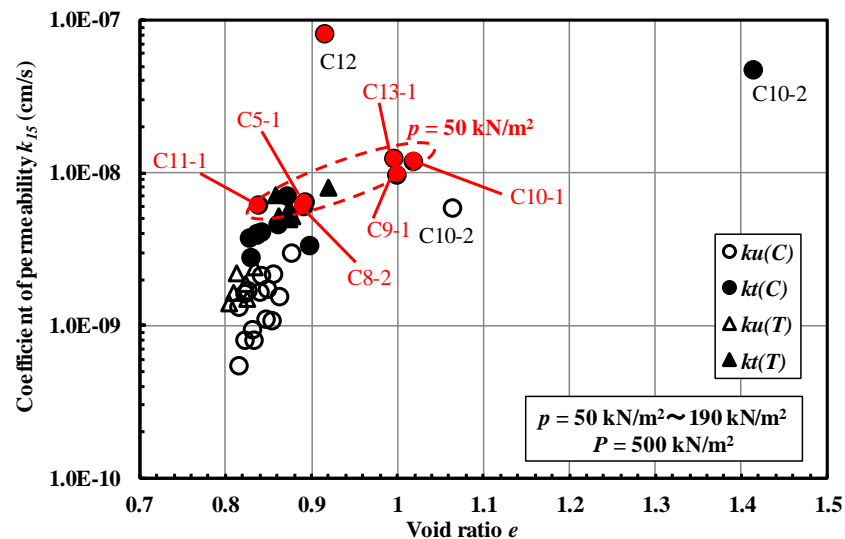


図 2-12 間隙比と透水係数の関係

2.4 まとめ

一次元凍結融解透水実験および三軸凍結融解透水実験により IL の発生と凍結融解土の鉛直方向（IL 直交方向）の透水係数との関係を検討した．実験の結果を以下にまとめる．

- (1) 冷却速度，最低冷却温度，温度勾配が及ぼす凍結融解土の透水係数への影響は認められなかった．
- (2) 凍上率の透水係数増加比への影響も認められなかった．
- (3) 凍結融解土の透水係数と間隙比の関係で整理すると，同じ間隙比において未凍結土よりも凍結融解土の方が透水係数は大きくなった．
- (4) 未凍結土の間隙比と透水係数は一定の値であるが，凍結融解を行うことにより間隙比の分布範囲が広がった．間隙比の増加は実験荷重が小さい場合に認められた．

以上を総合すると，IL の発生量を左右する冷却速度，最終冷却温度，温度勾配は凍結融解土の透水係数に強く影響を及ぼさないと結論付けられる．

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*, Vol.13, pp.73-92, 1979.
- 2) Benson, C. and Othman, M. A.: Hydraulic conductivity of compacted clay frozen and thawed in situ, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.119, No.2, pp.276-297, 1993.
- 3) J. M. Konrad and M. Samson: Hydraulic conductivity of kaolinite-silt mixtures subjected to closed-system freezing and thaw consolidation, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.37, pp.857-869 (2000).
- 4) S. Dumais and J. M. Konrad: Compressibility and hydraulic conductivity of thawed fine-grained permafrost, 11th International Symposium on Cold Regions Development, USB, 6-2 IC-010 (2016).
- 5) Ito, Y., Kamon, M. and Aramoto, K.: Influence of freezing method on the permeability of frozen-thawed soils, *Proc. 5th Japan-Korea Joint Seminar on Geoenvironmental Engineering*, pp.199-194 (2005).
- 6) 高志勤, 益田稔, 山本英夫: 土の凍結膨張率に及ぼす凍結速度・有効応力の影響に関する研究, *雪氷*, 36 巻, 2 号, pp.49-68 (1974).

第3章 地盤の固結度及び土被り圧と凍結融解土の透水係数変化との関係

3.1 目的

ILの発生量を左右する冷却条件として冷却速度，最低冷却温度，温度勾配の影響について検討した結果，これらの要因は凍結融解土の透水係数変化に強く影響を及ぼさないことが明らかになった．凍結融解土の透水係数に影響を及ぼすもう一つの要因として，上載荷重の影響が挙げられる．Othman ら¹⁾は上載荷重が大きい場合には凍結融解による透水係数の増加が抑えられることを示した．また，Ito ら²⁾は凍結融解による透水係数の変化には上載荷重のみが影響することを実験的に示した．未凍結土の締固め度の違いによる凍結融解土の透水係数への影響についても研究が行われている．中村ら³⁾は締め固めエネルギーが小さいと凍結融解によって間隙比と透水係数が共に減少することを報告している．また，Sterpi ら⁴⁾は締め固めエネルギーが大きく間隙比が小さい土を凍結融解させると締め固めエネルギーが小さい土よりも間隙比と透水係数の増加が著しく，凍結融解を繰り返すと，両者の間隙比と透水係数が近づくことを確認した．以上のように上載荷重の凍結融解土が及ぼす透水係数への影響，締め固めの程度が凍結融解による間隙比や透水係数の変化に及ぼす影響について多くの知見が得られているが，これらの関係が明らかであるとは言えなかった．

そこで，本章では地盤の固結の程度や土被り圧が凍結融解土の透水係数に及ぼす影響を明らかにするために，藤森粘土および黄土を用いて，固結度（予圧密荷重），土被り圧などの上載荷重（実験荷重）を変化させて，荷重条件が凍結融解土の透水係数に及ぼす影響について検討した．

3.2 実験方法

3.2.1 供試体作成

凍結融解土の透水係数に及ぼす荷重条件の影響を検討するために、鉛直凍結実験を行い、IL 痕直交方向の凍結融解前後の透水係数を検討する。試料土は物性値を表 2-1 に示す藤森 14N と表 3-1 に示す黄土 14N であり、共に $425\mu\text{m}$ ふるいを通過させている。黄土 14N は地盤工学会基準（JGS0051-2009）に基づき工学的分類を行うと粘土（CH）である。供試体は 2.2 と同様に試料土を液性限界の 1.3 倍（ $53.4 \times 1.3 = 69.4\%$ ）の含水比に調整し、練り混ぜ、脱気した後 24 時間養生し、予圧密荷重を $P = 50 \sim 1000 \text{ kN/m}^2$ まで変化させて作成した。供試体は直径 $\phi 10\text{cm}$ 、高さは C22-1, C23-1, C24-1, C25-1, C25-2 においては IL 痕方向と IL 痕直交方向の圧密透水試験を実施するために $h = 7\text{cm}$ にした。圧密透水試験の詳細については第 4 章で説明する。その他の実験では $h = 5\text{cm}$ に成形した。なお、冷却温度を同じにして供試体の高さを変えると温度勾配が変わるが、第 2 章に示したように、温度勾配は凍結融解土の透水係数に影響しないとの知見を得ているので、厳密に温度勾配を揃えることはしていない。

表 3-1 試料土の物性値

Sample	ρ_s g/cm ³	w_L %	w_P %	Sand %	Silt %	Clay %
Kizuchi 14N	2.687	53.4	23.9	0.7	47.3	52.0

3.2.2 実験条件

表 3-2 に藤森 14N を用いた鉛直凍結実験の実験条件を示す．実験荷重の影響を検討するために，C2-1, C5-1, C5-2, C6-1, C7-1 では予圧密荷重 $P = 500 \text{ kN/m}^2$ （実験荷重 $p = 50, 75, 100, 150, 190 \text{ kN/m}^2$ ）とした．冷却条件は，温度勾配 $dT/dh = 1.0 \text{ }^\circ\text{C/cm}$, 冷却速度 $dT/dt = 0.2 \text{ }^\circ\text{C/hour}$, 最低冷却温度 $T_L = -10 \text{ }^\circ\text{C}$ とした．予圧密荷重の影響を検討するために，C22-1, C24-1, C25-1, C25-2 では $p = 100 \text{ kN/m}^2$ （ $P = 150, 300, 500, 1000 \text{ kN/m}^2$ ）とした．冷却条件は $dT/dh = 0.714 \text{ }^\circ\text{C/cm}$, $dT/dt = 0.2 \text{ }^\circ\text{C/hour}$, $T_L = -10 \text{ }^\circ\text{C}$ とした．C23-1 では予圧密荷重および冷却条件を C22-1 と同じとし，実験荷重（ $p = 190 \text{ kN/m}^2$ ）のみを変化させた．

表 3-2 藤森 14N による実験条件

Purpose	Test No.	Pre-consolidation pressure P kN/m^2	Overburden pressure p kN/m^2	Over-consolidation ratio P/p	Cooling rate dT/dt $^\circ\text{C/hour}$	Lowest temperature T_L $^\circ\text{C}$	Temperature gradient dT/dh $^\circ\text{C/cm}$
Influence of Overburden pressure	C2-1	500	150	3.3	0.2	-10	1
	C5-1	500	50	10.0	0.2	-10	1
	C5-2	500	75	6.7	0.2	-10	1
	C6-1	500	100	5.0	0.2	-10	1
	C7-1	500	190	2.6	0.2	-10	1
	C22-1	500	100	5.0	0.2	-10	0.714
	C23-1	500	190	2.6	0.2	-10	0.714
Pre-consolidation pressure	C24-1	300	100	3.0	0.2	-10	0.714
	C25-1	1000	100	10.0	0.2	-10	0.714
	C25-2	150	100	1.5	0.2	-10	0.714

※Sample soil : Fujinomoril4N

※Freezing method : Ramp

※Water supply : Open

表 3-3 に黄土 14N を用いた実験条件を示す. 予圧密の影響を検討するために, C5-3, C26-1, C29-1, C30-2 では $p = 50 \text{ kN/m}^2$ ($P = 50, 150, 300, 500 \text{ kN/m}^2$), C7, C26-2 では $p = 75 \text{ kN/m}^2$ ($P = 75, 150 \text{ kN/m}^2$), C6-2, C31-1, C31-2 では $p = 100 \text{ kN/m}^2$ ($P = 150, 200, 500 \text{ kN/m}^2$), C2, C28-1 では $p = 150 \text{ kN/m}^2$ ($P = 150, 300 \text{ kN/m}^2$), C28-2, C29-2, C30-1 では $p = 200 \text{ kN/m}^2$ ($P = 200, 400, 500 \text{ kN/m}^2$) とした. また, 実験荷重の影響を検討するために, C5-3, C6-2, C7-2 では $P = 150 \text{ kN/m}^2$ ($p = 50, 75, 100 \text{ kN/m}^2$), C30-1, C31-1

表 3-3 黄土 14N による実験条件

Purpose	Test No.	Pre-consolidation pressure P kN/m ²	Overburden pressure p kN/m ²	Over-consolidation ratio P/p	Cooling rate dT/dt °C/hour	Lowest temperature T_L °C	Temperature gradient dT/dh °C/cm
Influence of							
	C2-2	150	150	1.0	0.2	-10	1
	C5-3	150	50	3.0	0.2	-10	1
	C6-2	150	100	1.5	0.2	-10	1
	C7-2	150	75	2.0	0.2	-10	1
	C26-1	50	50	1.0	0.2	-10	1
	C26-2	75	75	1.0	0.2	-10	1
Overburden and Pre-consolidation pressure	C28-1	300	150	2.0	0.2	-10	1
	C28-2	400	200	2.0	0.2	-10	1
	C29-1	300	50	6.0	0.2	-10	1
	C29-2	500	200	2.5	0.2	-10	1
	C30-1	200	200	1.0	0.2	-10	1
	C30-2	500	50	10.0	0.2	-10	1
	C31-1	200	100	2.0	0.2	-10	1
	C31-2	500	100	5.0	0.2	-10	1

※Sample soil : Kizuchi14N

※Freezing method : Ramp

※Water supply : Open

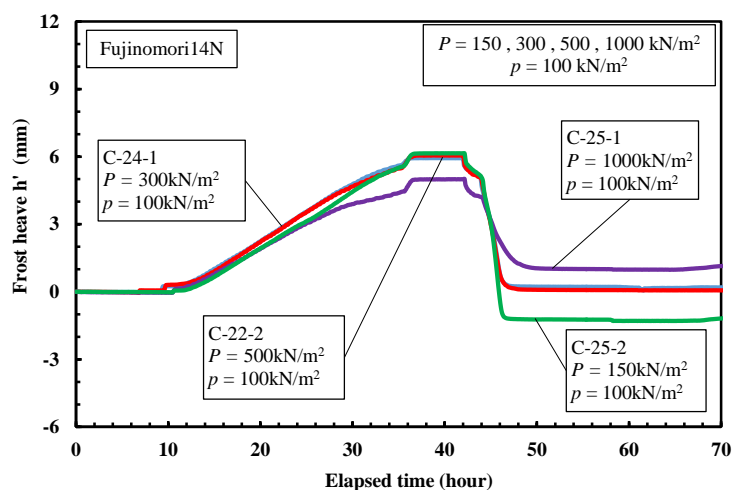
では $P = 200 \text{ kN/m}^2$ ($p = 100, 200 \text{ kN/m}^2$), C28-1, C29-1 では $P = 300 \text{ kN/m}^2$ ($p = 50, 150 \text{ kN/m}^2$), C29-2, C30-2, C31-2 では $P = 500 \text{ kN/m}^2$ ($p = 50, 100, 200 \text{ kN/m}^2$) とした.

3.3 実験結果と考察

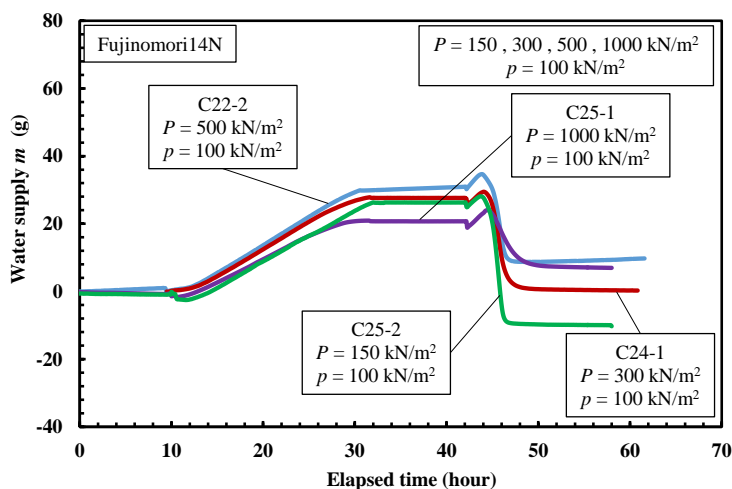
3.3.1 凍上量と給水量の経時変化

図 3-1(a)に藤森 14N の凍上量の経時変化を示す． $P = 150 \text{ kN/m}^2$ で予圧密された供試体では実験荷重 $p = 100 \text{ kN/m}^2$ で凍結融解を行うと，融解後の供試体は凍結前と比較して圧縮された．一方， $P = 300, 500, 1000 \text{ kN/m}^2$ で予圧密された供試体は凍結前と比較して膨張していた．

図 3-1(b)に給水量の経時変化を示す．給排水量の変化は図 3-1(a)と対応した関係が認められた．



(a) 凍上量の経時変化

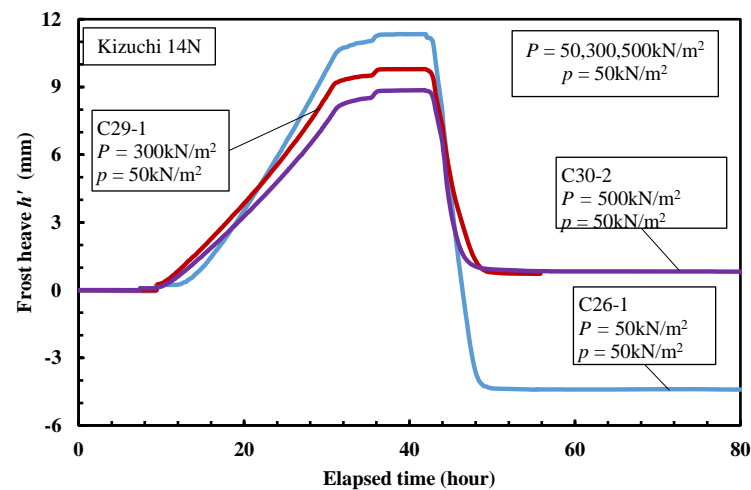


(b) 給水量の経時変化

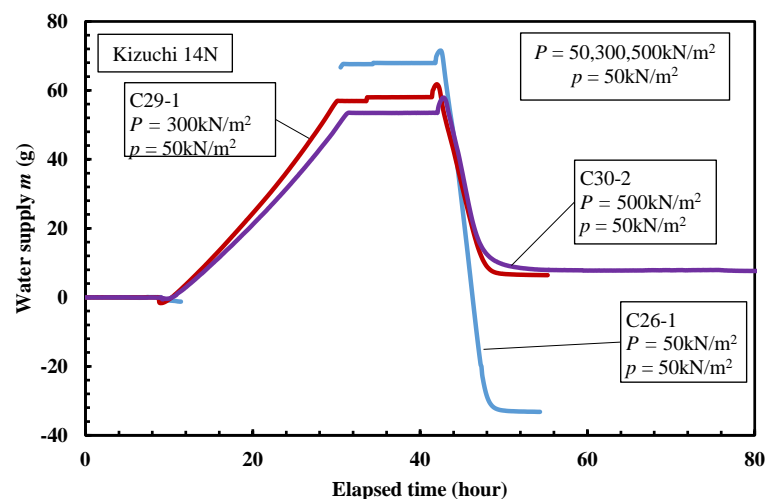
図 3-1 藤森 14N による凍上量と給水量の経時変化

図 3-2(a)に黄土 14N の凍上量の経時変化を示す．正規圧密状態の予圧密荷重 $P = 50 \text{ kN/m}^2$ ，実験荷重 $p = 50 \text{ kN/m}^2$ では凍結融解後の供試体は凍結前よりも圧縮されていた． $P = 300, 500 \text{ kN/m}^2$ ， $p = 50 \text{ kN/m}^2$ では凍結融解後の供試体は膨張していた．

図 3-2(b)に黄土 14N の給水量の経時変化を示す．給水量の変化は凍上量の変化と対応した関係が認められた．



(a) 凍上量の経時変化



(b) 給水量の経時変化

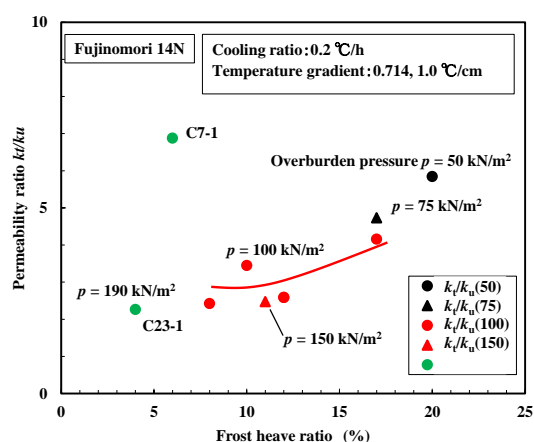
図 3-2 黄土 14N による凍上量と給水量の経時変化

3.3.2 凍上率と透水係数変化の関係

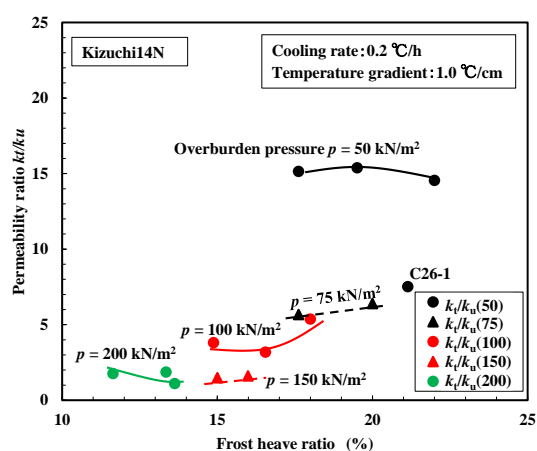
表 3-4 に藤森 14N を用いた実験結果の一覧表を示す．透水係数増加比 $k_t/k_u=2.3\sim6.9$ となった．図 3-3(a)に藤森 14N の凍上率 h'/h と透水係数増加比 k_t/k_u を示す．実験荷重 $p = 50 \text{ kN/m}^2$ から $p = 190 \text{ kN/m}^2$ にかけて実験荷重 p が大きくなるにつれ透水係数増加比 k_t/k_u が減少する傾向が認められた． $p =$

表 3-4 藤森 14N を用いた実験結果一覧

Test No.	Pre-consolidation pressure	Overburden pressure	Permeability		Frost heave ratio	Permeability ratio	Over-consolidation ratio
	P	p	UF	F/T		k_t/k_u	P/p
	kN/m^2	kN/m^2	k_u m/s	k_t m/s	%		
C2-1	500	150	1.7×10^{-9}	4.2×10^{-9}	11	2.5	3.3
C5-1	500	50	1.1×10^{-9}	6.4×10^{-9}	20	5.8	10.0
C5-2	500	75	1.2×10^{-9}	5.8×10^{-9}	17	4.7	6.7
C6-1	500	100	9.6×10^{-10}	4.0×10^{-9}	17	4.2	5.0
C7-1	500	190	5.4×10^{-10}	3.7×10^{-9}	6	6.9	2.6
C22-1	500	100	3.1×10^{-9}	7.5×10^{-9}	8	2.4	5.0
C23-1	500	190	2.1×10^{-9}	4.7×10^{-9}	4	2.3	2.6
C24-1	300	100	2.4×10^{-9}	6.2×10^{-9}	12	2.6	3.0
C25-1	1000	100	9.7×10^{-10}	3.4×10^{-9}	10	3.4	10.0
C25-2	150	100	4.8×10^{-9}	1.2×10^{-8}	12	2.6	1.5



(a) 藤森 14N



(b) 黄土 14N

図 3-3 凍上率と透水係数増加比の関係

100 kN/m²において凍上率 h'/h と k_t/k_u では、 h'/h の増加に伴い k_t/k_u も増加する傾向が認められる。 h'/h の変化による k_t/k_u の変化が $k_t/k_u=2.4\sim 4.2$ の範囲であるのに対して、実験荷重 p の変化による透水係数増加比 k_t/k_u の変化は $k_t/k_u=2.3\sim 5.8$ である。透水係数増加比 k_t/k_u は凍上率 h'/h よりも実験荷重 p の影響の方がわずかに大きい。なお、C7-1 ($p = 190$ kN/m²) は $k_t/k_u=6.9$ であり同じ p の C23-1 と大きく異なる。表 3-4 より C7-1 は予圧密が十分に行われず未凍結土の透水係数が大きくなったことが影響したと考えられる。

表 3-5 に黄土 14N を用いた実験結果の一覧表を示す。 k_t/k_u は 1.1~15.4 となり藤森 14N よりも範囲が広く、上限値が大きくなった。図 3-3(b)に黄土 14N の凍上率 h'/h と透水係数増加比 k_t/k_u を示す。実験荷重 p が大きくなるほど透水係数増加比は小さくなる傾向が認められた。各実験荷重 p において凍上率

表 3-5 黄土 14N を用いた実験結果一覧表

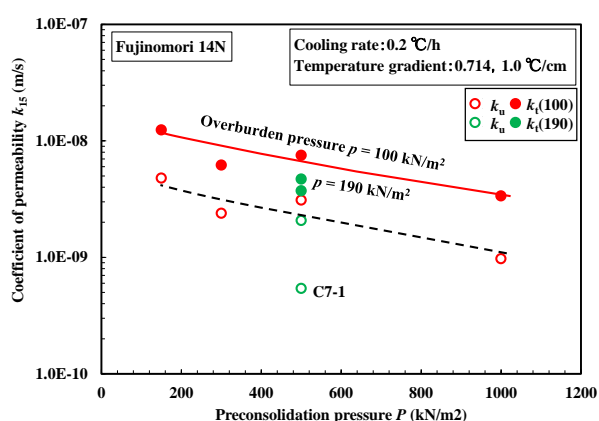
Test No.	Pre-consolidation pressure	Overburden pressure	Permeability		Frost heave ratio	Permeability ratio	Over-consolidation ratio
	P	p	UF	F/T		ratio	
	kN/m ²	kN/m ²	k_u m/s	k_t m/s	%	k_t/k_u	P/p
C2-2	150	150	4.7×10^{-10}	7.0×10^{-10}	15	1.5	1.0
C5-3	150	50	3.2×10^{-10}	4.6×10^{-9}	22	14.5	3.0
C6-2	150	100	4.1×10^{-10}	2.2×10^{-9}	18	5.4	1.5
C7-2	150	75	4.5×10^{-10}	2.9×10^{-9}	20	6.4	2.0
C26-1	50	50	8.4×10^{-10}	6.3×10^{-9}	21	7.5	1.0
C26-2	75	75	7.1×10^{-10}	4.0×10^{-9}	18	5.7	1.0
C28-1	300	150	3.1×10^{-10}	5.0×10^{-10}	16	1.6	2.0
C28-2	400	200	2.7×10^{-10}	3.0×10^{-10}	14	1.1	2.0
C29-1	300	50	3.1×10^{-10}	4.7×10^{-9}	20	15.4	6.0
C29-2	500	200	1.9×10^{-10}	3.5×10^{-10}	13	1.9	2.5
C30-1	200	200	3.0×10^{-10}	5.3×10^{-10}	12	1.8	1.0
C30-2	500	50	2.5×10^{-10}	3.8×10^{-9}	18	15.1	10.0
C31-1	200	100	4.2×10^{-10}	1.3×10^{-9}	17	3.2	2.0
C31-2	500	100	2.5×10^{-10}	9.3×10^{-10}	15	3.8	5.0

h'/h と透水係数増加比 k_t/k_u の関係をみると、 h'/h が変化しても k_t/k_u は変化しないことが分かる． $p = 50 \text{ kN/m}^2$ で凍結融解させた場合に約 $k_t/k_u=15$ となり k_t/k_u は最大になった． p が大きくなるほど k_t/k_u は小さくなる傾向が見られ、 $p = 200 \text{ kN/m}^2$ では約 $k_t/k_u=2$ となり最小値となった．C26-1 は凍結前の透水係数が大きく供試体作成の段階で予圧密荷重が周面摩擦などの影響を受けて予定通りに載荷されていなかった可能性が考えられる．

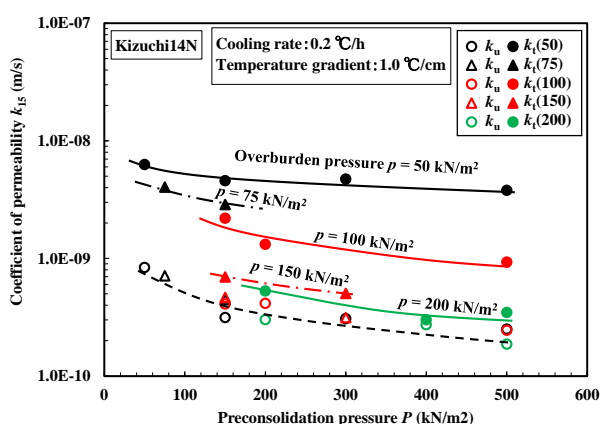
3.3.3 予圧密荷重および実験荷重と透水係数変化との関係

図 3-4(a)に藤森 14N の予圧密荷重と透水係数の関係を示す．未凍結土および凍結融解土はともに予圧密荷重 P が大きくなるほど透水係数が低下する傾向が見られた．実験荷重 p が大きい $p = 190 \text{ kN/m}^2$ の凍結融解土の透水係数 k_t は $p = 100 \text{ kN/m}^2$ の k_t よりも低くなった．未凍結土の透水係数 k_u のうち C7-1 の k_u は他の実験ケースと比較して著しく低い値であるが，この原因は不明である．

図 3-4(b)に黄土 14N の予圧密荷重 P と透水係数 k の関係を示す． P が大きくなるほど未凍結土と凍結融解土の透水係数はともに低下する傾向が見られる． P の増加による k_t の低下に対して，実験荷重 p による透水係数 k の低下の方が著しい．例えば， $p = 50 \text{ kN/m}^2$ で予圧密荷重 $P = 50, 200 \text{ kN/m}^2$ における凍結融解土の透水係数はそれぞれ $k_t = 6.3 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ ， $k_t = 3.8 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ であり，約 1.7 倍の差である．これに対して， $P = 200 \text{ kN/m}^2$ での実験荷重 p による違いを比較すると， $p = 200 \text{ kN/m}^2$ では $k_t = 3.5 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ であり， $p = 50 \text{ kN/m}^2$ の k_t と約 10 倍の違いがあり，凍結融解土の透水係数は予圧密荷重 P よりも実験荷重 p の影響を強く受けると考えられる．



(a) 藤森 14N

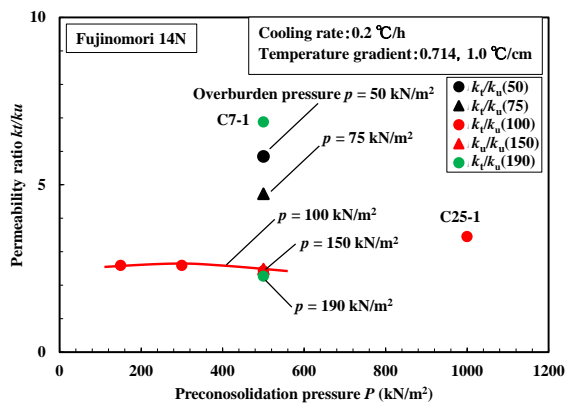


(b) 黄土 14N

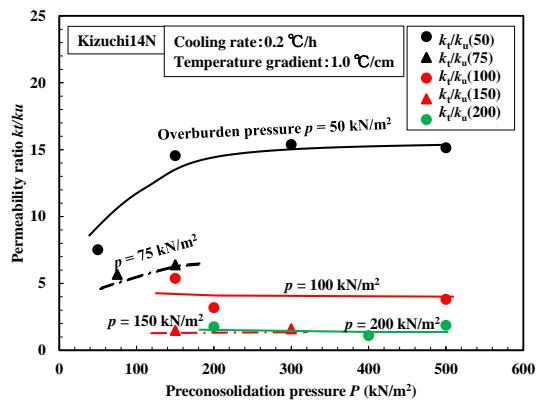
図 3-4 予圧密荷重と透水係数の関係

図 3-5(a)に藤森 14N における予圧密荷重 P と透水係数増加比 k_t/k_u の関係を示す。実験荷重 $p = 100 \text{ kN/m}^2$ で予圧密荷重 P の影響を比較すると、 $P = 150, 300, 500 \text{ kN/m}^2$ と変化しても透水係数増加比は $k_t/k_u = 2.5$ 程度であり、 P と k_t/k_u の関係性は認められない。一方、 p が小さくなるほど k_t/k_u が大きくなる傾向が認められる。つまり、透水係数増加比 k_t/k_u は予圧密荷重 P よりも実験荷重 p の影響を強く受けていることが分かる。

図 3-5(b)に黄土 14N の予圧密荷重 P と透水係数増加比 k_t/k_u の関係を示す。それぞれの実験荷重 ($p = 50, 75, 100, 150, 200 \text{ kN/m}^2$) のにおいて P と k_t/k_u の関係をみると、 k_t/k_u は P の大小に関わらず一定である。 k_t/k_u は p が小さい順に $k_t/k_u = 15, 6, 3, 2, 1$ となった。このことから、透水係数増加比 k_t/k_u は実験荷重 p に応じた値を示すものと言えよう。



(a) 藤森 14N



(b) 黄土 14N

図 3-5 予圧密荷重と透水係数増加比の関係

3.3.4 実験荷重と透水係数の関係

図 3-6(a)に藤森 14N の実験荷重 p と透水係数 k の関係を示す．予圧密荷重 $P = 500 \text{ kN/m}^2$ において p が大きくなるほど，凍結融解土の透水係数の増加が抑えられ，未凍結土の透水係数に近づく． $p = 150, 190 \text{ kN/m}^2$ における透水係数増加比 k_t/k_u はそれぞれ $k_t/k_u = 2.5, 2.3$ であり， $k_t/k_u = 2.0$ 程度に収束する傾向が認められた．

図 3-6(b)に黄土 14N の実験荷重 p と透水係数 k の関係を示す．藤森 14N と同様に p が大きくなるほど，凍結融解土の透水係数の増加が抑えられた． $p = 200 \text{ kN/m}^2$ では凍結融解後の透水係数は $k_t = 4.0 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ 付近に収束し， $p = 150, 200 \text{ kN/m}^2$ における k_t/k_u は $1.1 \sim 1.9$ となり， $k_t/k_u = 1$ に収束する傾向が認められた．このことは実験荷重がある程度大きくなると凍結融解による透水係数変化が無視できることを意味する．

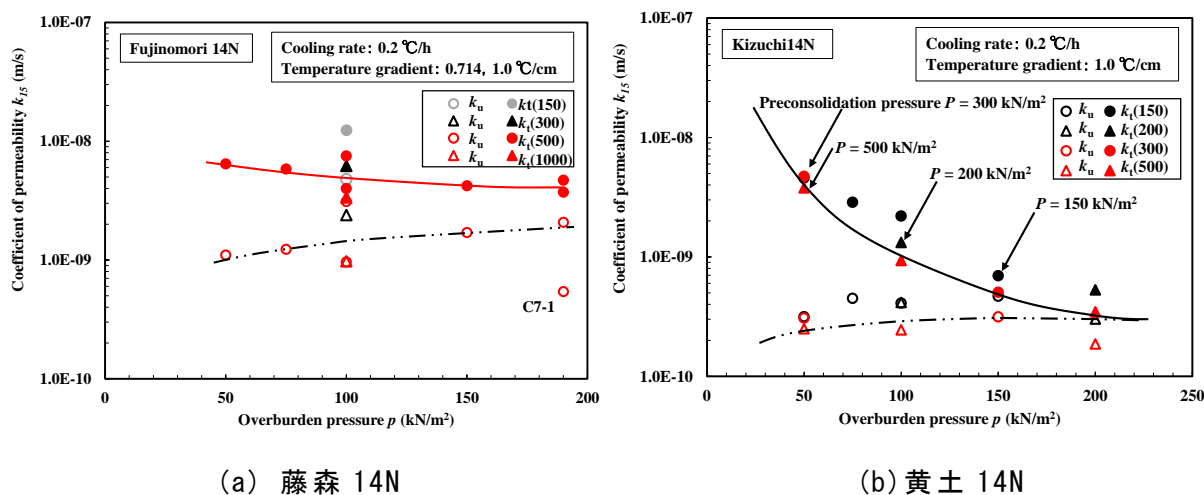
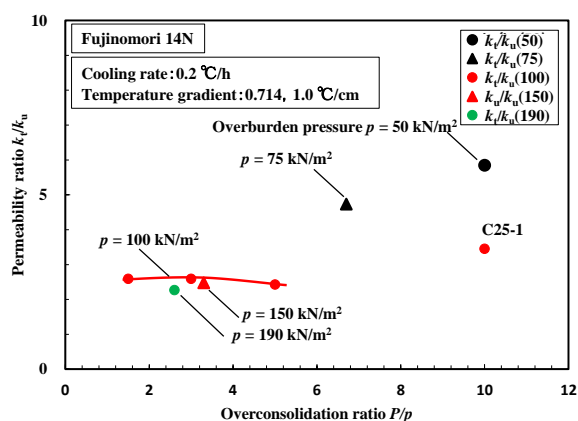


図 3-6 実験荷重と透水係数の関係

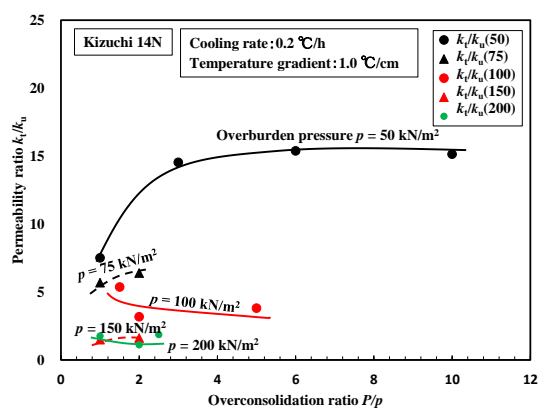
3.3.5 過圧密比と透水係数の関係

図 3-7(a)に藤森 14N の過圧密比 P/p と透水係数増加比 k_t/k_u の関係を示す．実験荷重 $p = 100 \text{ kN/m}^2$ のとき，過圧密比 P/p が異なっても透水係数増加比 k_t/k_u は同程度である．そして， p が増加すると k_t/k_u は減少する．これは透水係数増加比 k_t/k_u が過圧密比 P/p よりも実験荷重 p に強く影響されることを示す．

図 3-7(b)に黄土 14N の過圧密比 P/p と透水係数増加比 k_t/k_u の関係を示す． $p = 50 \text{ kN/m}^2$ ， $P/p = 1$ の場合を除いて， P/p の大小に関係なく，透水係数 k は p ごとに同程度となった．



(a) 藤森 14N



(b) 黄土 14N

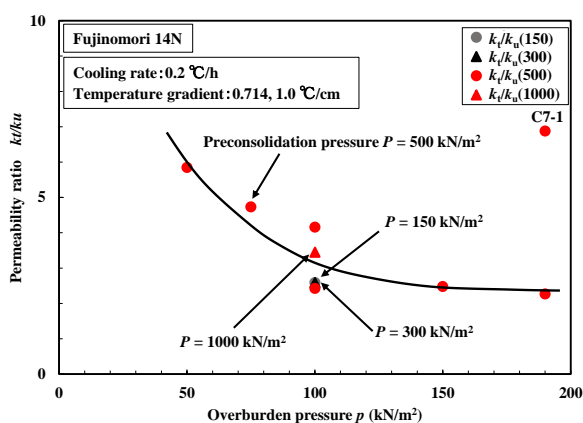
図 3-7 実験荷重と透水係数増加比の関係

3.3.6 実験荷重と透水係数増加比の関係

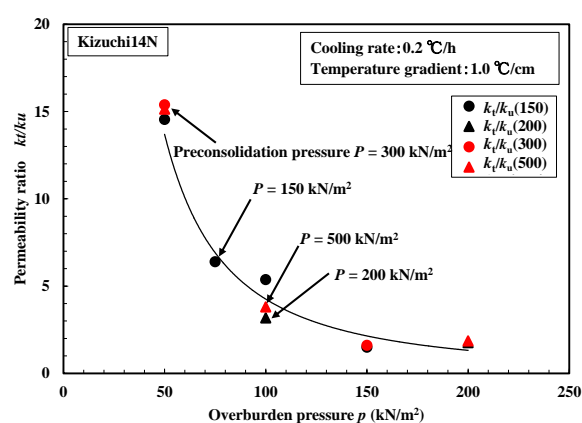
図 3-8(a)に藤森 14N の実験荷重 p と透水係数増加比 k_t/k_u の関係を示す。予圧密荷重 $P = 500 \text{ kN/m}^2$ における p と k_t/k_u の関係は、 p が大きくなるにつれ k_t/k_u が減少し k_t/k_u が 2 に収束する傾向が認められた。

図 3-8(b)に黄土 14N の実験荷重 p と透水係数増加比 k_t/k_u の関係を示す。藤森 14N と同様に p が大きくなるにつれ k_t/k_u が減少する傾向を示し、 $p = 150, 200 \text{ kN/m}^2$ では $k_t/k_u = 1$ 程度となり、凍結融解による透水係数 k の増加がなくなった。

藤森 14N, 黄土 14N のいずれの場合においても実験荷重 p が大きくなると透水係数増加比 k_t/k_u は小さくなり、最終的には凍結融解しても透水係数 k の増加がなくなることが明らかとなった。



(a) 藤森 14N



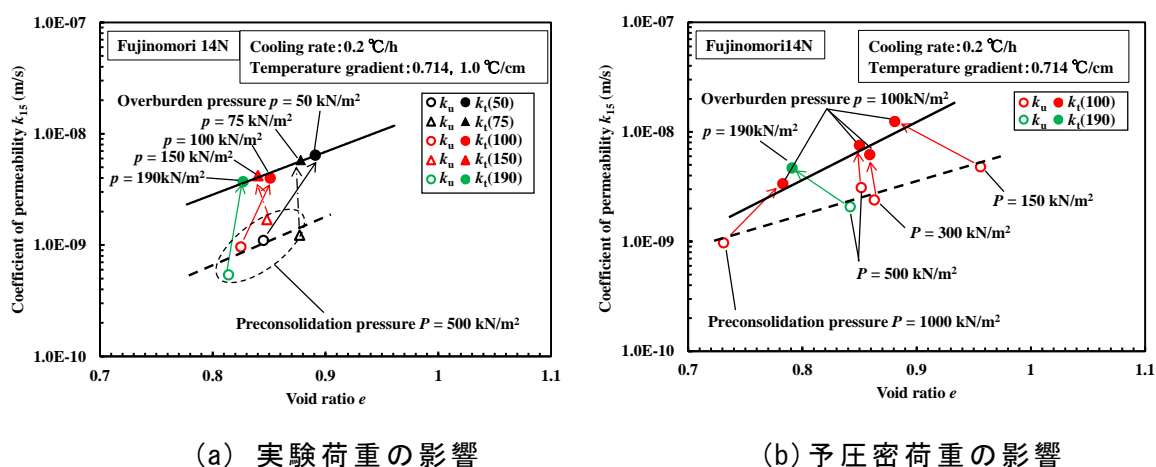
(b) 黄土 14N

図 3-8 実験荷重と透水係数増加比の関係

3.3.7 間隙比と透水係数の関係

図 3-9 に藤森 14N を用いた鉛直凍結実験の間隙比 e と透水係数 k の関係を示す。図 3-9(a) は予圧密荷重 $P = 500 \text{ kN/m}^2$ において実験荷重 p を変化させた C2, C5-1, C5-2, C6-1, C7-1 における未凍結土と凍結融解土の e と k を示したものである。 e が大きくなるにつれ凍結融解土の透水係数 k_t は増加した。そして、 p が小さくなるにつれ k_t は増加する傾向が認められた。同じ e で未凍結土と凍結融解度の透水係数 k を比較すると、凍結融解土の透水係数 k_t が大きくなった。

図 3-9(b) は $p = 100 \text{ kN/m}^2$ において予圧密荷重 P を変化させた C22-1, C23-1, C24-1, C25-1, C25-2 と $p = 190 \text{ kN/m}^2$ の C23-1 における未凍結土と凍結融解土の間隙比 e と透水係数 k の関係を示したものである。 P が大きい $P = 1000 \text{ kN/m}^2$ では凍結融解により e は増加し、 P が小さい $P = 150 \text{ kN/m}^2$ の場合には凍結融解により e が減少した。 $p = 100 \text{ kN/m}^2$ でみると、未凍結土の e の大小は凍結融解によって互いに近づく傾向が見られた。 $P = 500 \text{ kN/m}^2$ では $p = 190 \text{ kN/m}^2$ では e が減少し、 $p = 100 \text{ kN/m}^2$ では e が変化しなかった。同じ間隙比で比較すると、未凍結の透水係数 k_u よりも凍結融解度の透水係数 k_t が大きくなった。



(a) 実験荷重の影響

(b) 予圧密荷重の影響

図 3-9 藤森 14N における間隙比と透水係数の関係

図 3-10 に黄土 14N における凍結融解前後の間隙比 e と透水係数 k の関係を示す。 e と k の関係は未凍結土と凍結融解土とでそれぞれ独立している。 同じ e で凍結前と凍結融解後の k を比較すると、凍結融解後の透水係数 k_t の方が大きい。 また、 e が大きくなるほど k_t の増加幅が大きい。 各実験荷重 p における凍結融解前後の e の変化に着目すると、 e が小さい（固結度が高い）場合には凍結融解により e が増加し、 e が大きい（固結度が低い）場合には凍結融解により e が減少している。 凍結融解土の間隙比 e と透水係数 k_t は、凍結前の間隙比 e と透水係数 k_u に関係なく、 p に応じた e と k へと収束すると読み取ることができる。

これまでの結果をまとめると、図 3-3 で示したように凍上率と凍結融解土の透水係数に関係がなく、図 3-9、3-10 で示したように凍結融解土の透水係数が実験荷重のみに影響されることは、これまでの研究²⁾とも一致している。 このような現象が生じる要因は、凍結の過程で IL や収縮クラック、間隙水の凍結により土粒子の間隔が開き、融解後も凍結時の土粒子の構造変化の影響を残したまま上載荷重に応じた間隙比と透水係数へと収束したと考えられる。 これ

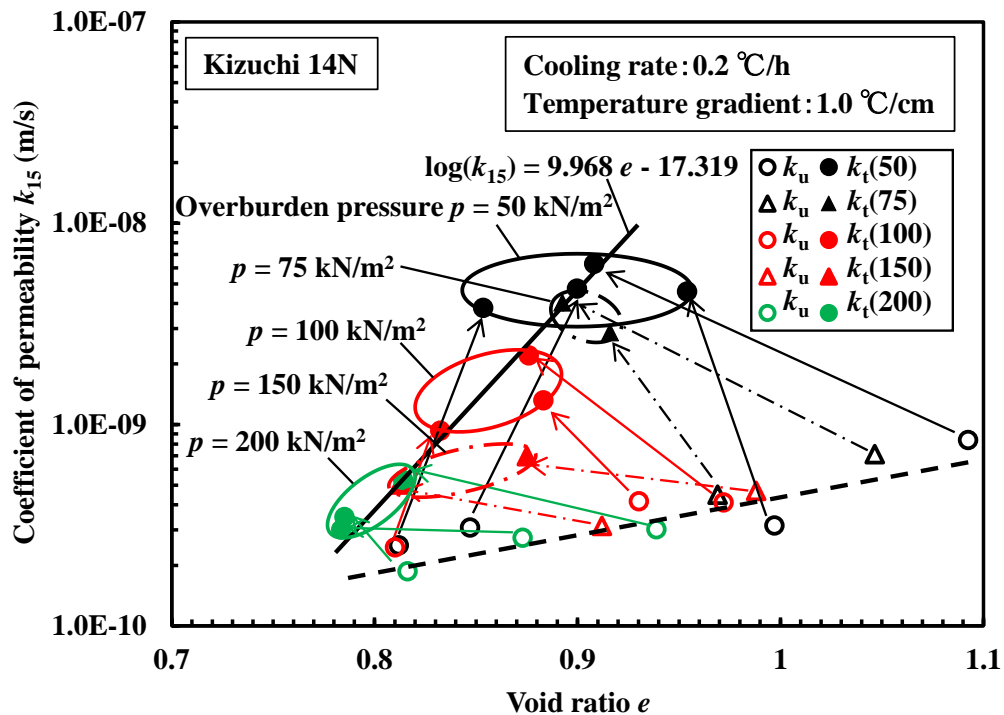


図 3-10 黄土 14N における間隙比と透水係数の関係

は実地盤においては，凍結融解土の透水係数が凍結時の土被り圧に応じた間隙比と透水係数に収束することを意味する．また，黄土 14N においては上載荷重が大きくなり，間隙比が小さくなるほど，凍結融解前後の透水係数の増加は小さくなり， $p = 200 \text{ kN/m}^2$ を超える場合には，透水係数の増加はほとんど認められない．

3.4 まとめ

凍結融解による IL 直交方向の透水係数変化に影響を与える要素として、予圧密荷重および実験荷重の影響を検討した。実験の結果を以下にまとめる。

- (1) 凍結融解による透水係数の変化には上載荷重（実験荷重）が強く影響している。そして、凍結前の土の固結度（予圧密荷重）に関係なく凍結融解時に作用する上載荷重に応じた間隙比と透水係数に収束することが明らかになった。
- (2) 実験荷重が大きくなるにつれて透水係数増加比は減少し、最終的には透水係数増加比が 1~2 に収束する傾向が認められた。つまり、上載荷重が大きくなると凍結融解による透水係数の変化がなくなることが明らかになった。
- (3) 間隙比と透水係数の関係は未凍結土と凍結融解土があたかも違う土質であるような挙動を示し、それぞれことなった間隙比と透水係数の関係を有していることが確認された。

参考文献

- 1) M. A. Othman, C. Benson: Effect of freeze-thaw on the hydraulic conductivity and morphology of compacted clay, Canadian Geotechnical Journal, Vol.30, pp.236-246 (1993).
- 2) Ito, Y., Kamon, M. and Aramoto, K.: Influence of freezing method on the permeability of frozen-thawed soils, Proc. 5th Japan-Korea Joint Seminar on Geoenvironmental Engineering, pp.199-194 (2005).
- 3) 中村大, 鈴木輝之, 後藤隆司, 金学三, 伊藤陽司, 山下聡: 凍結融解による土の透水係数および間隙比の変化, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.67, No.2, pp.264-275, 2011.
- 4) D. Sterpi: Effect of freeze-thaw cycles on the hydraulic conductivity of a compacted clayey silt and influence of the compaction energy, Soils and Foundations, No.55(5), pp.1326-1332 (2015).

第4章 凍結融解土におけるアイスレンズ方向とアイスレンズ直交方向の透水係数の関係

4.1 目的

これまでの検討により，IL 痕直交方向の凍結融解土の透水係数は冷却方法や地盤の固結度よりも土被り圧等の上載荷重に強く影響されることが明らかになった．IL 痕直交方向の透水係数は自然界や AGF で人工的に構築された凍土壁が完全に融解した場合において地下水が流れる方向の透水係数に相当する．

一方，AGF で構築された凍土壁が部分的に融解すると，図 1-4 に示すように，凍土壁が完全に融解した場合とは異なり，IL 痕方向に地下水が流れる．

図 4-1 に凍土壁が部分的に融解した時の地下水の流れのイメージを示す．図 4-1(a)は凍結過程を示しており，凍結管から水平方向に地盤が凍結された時の IL の発生状況を示した模式図である．凍結管近傍では凍結面の進行が速いため IL が十分に発達する前に凍結面が移動する．しかし，凍結面がある程度まで進むと凍結面の進行が遅くなり IL が厚く成長する．その際，未凍土部分は土中水が IL へ吸水され脱水圧密する．図 4-1(b)は電力トラブルなどにより凍土の一部が融解した時の地下水の流れを示したものである．凍土は外側から融解し，このような領域では透水係数が未凍結土と比較して大幅に増加しており，想定したよりも縦方向の地下水の流れが激しくなる可能性がある．

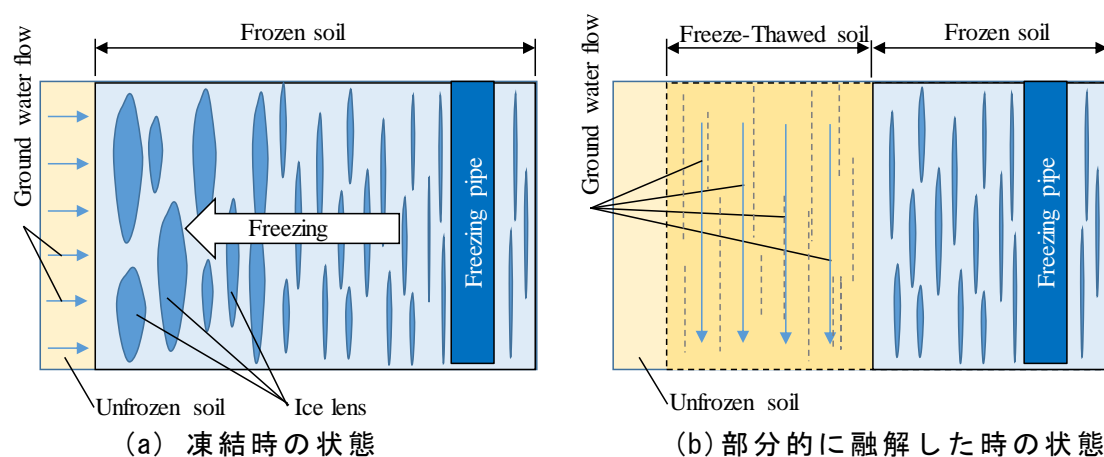


図 4-1 AGF により構築された凍土壁が部分的に融解した時の地下水の流れ

これまで Chamberlain ら¹⁾, Konrad ら²⁾や Ito ら³⁾など多くの研究者が行ってきた凍結融解土の透水係数の変化に関する研究では、主に Taber⁴⁾の室内実験装置や地盤工学会の凍上実験⁵⁾と同じ機能を持つ凍上実験装置に透水試験の機能を組み合わせたものが用いられてきた。これは自然界における凍結融解を模擬したものであり、つまり凍結方向と上載荷重、透水試験の方向が全て鉛直方向であり、IL 痕直交方向の透水試験を検討するものである。

しかし、AGF では地盤は水平方向に凍結されるため、凍結は水平方向に進行し、上載荷重は鉛直方向に作用し、地下水の流れは鉛直方向（IL 痕方向）となる。既往の研究ではこのような IL 痕方向の凍結融解土の透水係数については明らかではなかった。

広瀬ら⁶⁾や片野田ら⁷⁾は AGF を模擬した土層実験により正規圧密粘土を凍結融解させ、凍結管近傍での含水比増加と未凍土部分の脱水圧密を確認し、いずれにおいても凍結融解土の透水係数の増加を確認した。しかし、凍結融解後の透水係数は供試体から標準圧密試験の試料を採取して測定されたものであった。凍結融解による含水比分布の変化と透水係数増加の関係は明らかでなかった。

本研究では IL 痕方向の凍結融解土の AGF を模擬した水平方向変位拘束凍結融解鉛直透水実験（水平凍結実験）装置を開発した。この装置では凍結は水平方向に進行し、鉛直方向に上載荷重が載荷され、鉛直方向の透水係数が測定可能である。

本章では、この実験装置を用いて凍結融解させ、未凍結土と凍結融解土の IL 痕方向の透水係数を検討し、凍結融解後の供試体を用いて含水比分布から間隙比分布を算出した。実験では IL 方向の凍結融解後の透水係数に影響を及ぼす要因を特定するために、①上載荷重（土被り圧を想定）、②予圧密荷重（地盤の固結度を想定）、③給排水の有無、④凍結融解繰り返しと凍結融解土の透水係数との関係を明らかにする。そして、鉛直凍結実験および水平凍結実験の供試体から試料を採取し、IL の痕跡や間隙の開きが閉じていく過程における透水係数の変化を知り、土粒子自体の変化の有無を確認するために、標準圧密試験（JIS A 1217）を準用した圧密透水試験により IL 方向と IL 直交方向の透水係数の変化を比較した。

4.2 実験方法

4.2.1 供試体作成

凍結融解土の IL 方向の透水係数変化を検討するため水平方向変位拘束凍結融解鉛直透水実験（水平凍結実験）を製作した．試料土は表 2-1 および表 3-1 に示す藤森 14N および黄土 14N である．水平凍結実験の供試体は試料土を液性限界の 1.3 倍の含水比に調整し，練り混ぜ，脱気した後，24 時間養生した試料を幅 8cm，奥行き 7cm，高さ 15cm の角型の圧密装置に流し込み，予圧密終了時の供試体高さが約 7cm になるように，予圧密荷重 $P = 150, 300, 500, 1000$ kN/m² まで段階的に載荷したものである．

4.2.2 水平方向変位拘束凍結融解鉛直透水実験

図 4-2 に水平方向変位拘束凍結融解鉛直透水実験装置（水平凍結実験装置）を示す。水平凍結実験は鉛直方向に上載荷重を作用させた状態で水平方向に凍結融解させることが可能で、凍結融解前後に鉛直方向（IL 痕方向）に変水位透水試験を行うことができる。この実験装置は矩形の供試体（7cm×8cm、高さ約 15cm）の左右側面のアルミ製冷却プレートと前後側面のアクリル板、塩化ビニル製の上板と底板から構成される。

左右側面のアルミ製冷却プレートには温度制御された不凍液を循環され、一方を低温側（ T_c ）、他方を高温側（ T_w ）とし、水平方向に凍結融解させる。各冷却プレートには P_t センサーが設置され、温度が測定された。実験中の温度変化は図 2-2 と同様であり、凍結融解時には T_w 側の冷却プレートから給排水が行われ、給排水瓶の重量変化から給排水量を測定した。供試体の前後の側面は厚み 5cm のアクリル板で断熱され、凍結時に IL の発生状況を観察することができる。供試体の上板と底板は断熱のため塩化ビニル製とした。上板にはシ

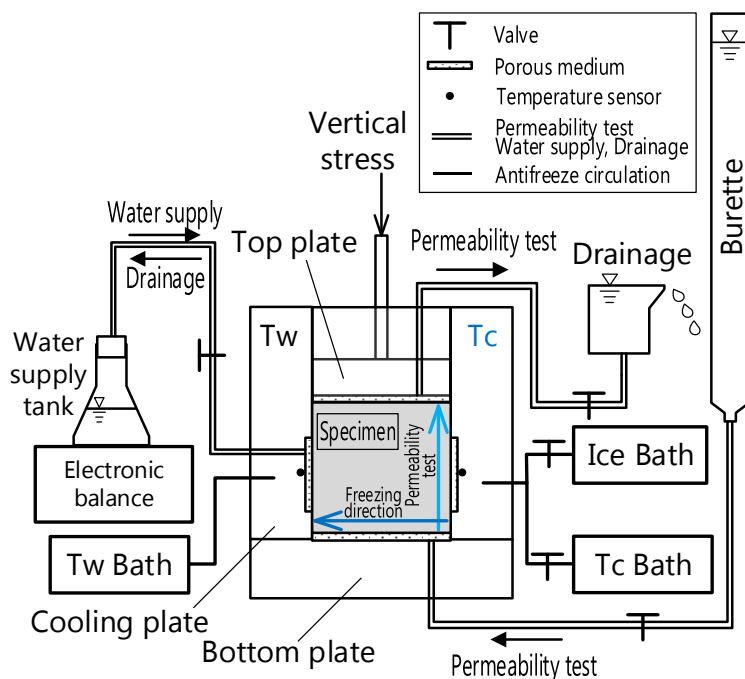


図 4-2 水平方向変位拘束凍結融解鉛直透水実験（水平凍結実験）

ャフトを通じて実験荷重が載荷され、シャフトに取り付けられた変位計により鉛直変位が測定される。凍結融解過程の前後には底板から上板方向に排水させて 24 時間の変水位透水試験が行われる。

図 4-3(a)に鉛直凍結実験，図 4-3(b)に水平凍結実験による IL の発生状況を示す。鉛直凍結実験では凍結方向と実験荷重の載荷方向が共に鉛直方向であり，凍結融解前後の透水試験の方向も鉛直であるため，透水の方向は融解後の IL 痕に直交する（図 4-3(a)）。これに対して，水平凍結実験では凍結が水平方向，実験荷重が鉛直方向であり，透水試験の方向も鉛直であるため，透水の方向は IL 痕に平行である（図 4-3(b)）。

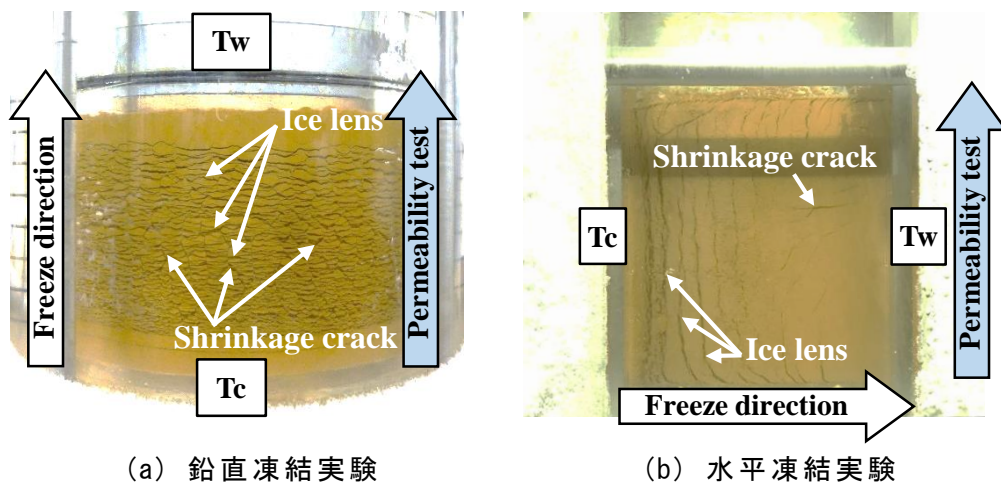


図 4-3 凍結実験における IL と SC の発生状況

4.2.3 実験条件

表 4-1 に水平凍結実験の条件を示す．水平凍結実験では AGF と同様に水平方向に供試体を凍結融解させ，IL 痕方向の透水係数の変化に及ぼす固結度（予圧密荷重），上載荷重（実験荷重），給排水の有無，凍結融解繰り返し回数の影響について検討した．実験荷重の影響を検討するために K21，K22，K30 では予圧密荷重 $P = 500 \text{ kN/m}^2$ ，実験荷重 $p = 50, 100, 200 \text{ kN/m}^2$ とした．次に予圧密荷重の影響を検討するために K22，K24 では $p = 200 \text{ kN/m}^2$ とし， $P = 500, 1000 \text{ kN/m}^2$ に変化させた．K25，K30 では $p = 50 \text{ kN/m}^2$ とし， $P = 300, 500$

表 4-1 水平凍結実験における実験

Purpose	Test No.	Pre-consolidation pressure P kN/m^2	Overburden pressure p kN/m^2	Freeze-thaw cycles n	Water supply	Cooling rate dT/dt $^{\circ}\text{C}/\text{hour}$
Influence of						
Overburden pressure	K21	500	100	1	Open	0.2
	K22	500	200	1	Open	0.2
	K30	500	50	1	Open	0.2
Pre-consolidation pressure	K24	1000	200	1	Open	0.2
	K25	300	50	1	Open	0.2
Water supply	K23	150	50	1	Close	0.2
	K28	500	50	1	Close	0.2
	K29	500	200	1	Close	0.2
Freeze-thaw cycles	K31	500	50	3	Open	0.2
	K32	500	50	5	Open	0.2
	K33	500	200	3	Open	0.2
	K41	500	200	5	Open	0.2
Frost susceptibility	K26	150	50	1	Open	0.2
	K27	150	50	1	Open	0.4

※Temperature gradient: $dT/dh = 0.625 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$, Lowest temperature: $T_L = -10^{\circ}\text{C}$

※Sample soil Fujinomor 14N : K21-K25, K28-K41

Kizuchi 14N : K26, K27

kN/m²とした。これらは凍結融解中に給排水を行う開式凍結によるものである。給排水の有無による影響を明らかにするために、凍結融解中に給排水を行わない閉式凍結実験を行い、 $P = 150, 500 \text{ kN/m}^2$, $p = 50, 200 \text{ kN/m}^2$ とした。凍結融解繰り返しの影響を K30, K31, K32 では低荷重条件 ($P = 500 \text{ kN/m}^2$, $p = 50 \text{ kN/m}^2$) とし、凍結融解繰り返し回数 $n = 1, 3, 5$ 回とした。K22, K33, K41 では高荷重条件 ($P = 500 \text{ kN/m}^2$, $p = 200 \text{ kN/m}^2$) で $n = 1, 3, 5$ 回とした。いずれの実験においても、冷却条件は冷却速度 $dT/dt = 0.2^\circ\text{C}/\text{hour}$ 、温度勾配 $dT/dh = 0.625^\circ\text{C}/\text{cm}$ 、最低冷却温度 $T_L = -10^\circ\text{C}$ とした。

K26, K27 では試料土として黄土 14N を使用した。冷却速度の影響を検討するために $dT/dt = 0.2, 0.4^\circ\text{C}/\text{hour}$ とし、開式凍結で $P = 150 \text{ kN/m}^2$, $p = 50 \text{ kN/m}^2$, $dT/dh = 0.626^\circ\text{C}/\text{cm}$, $T_L = -10^\circ\text{C}$ とした。

凍結融解実験後の供試体では図 4-4 に示すように T_c から T_w にかけて間隙比分布を求めた。 $T_w \sim T_c$ までの長さは 8cm で、K22 では 5 等分、K23 では 6 等分し、K28 から K41 は 8 等分して含水比を測定し、間隙比を算出した。

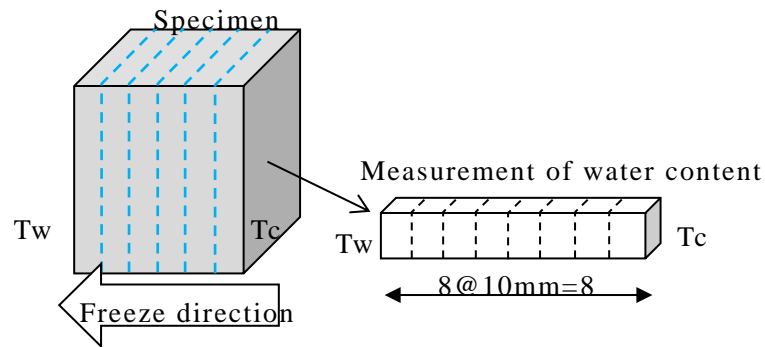
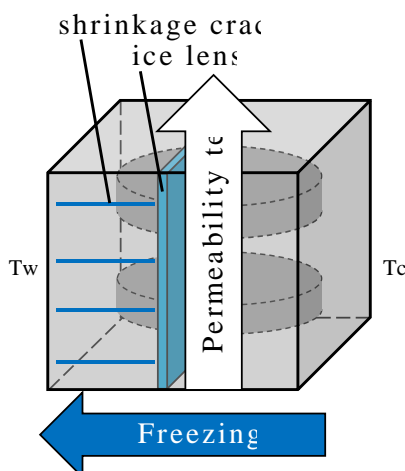
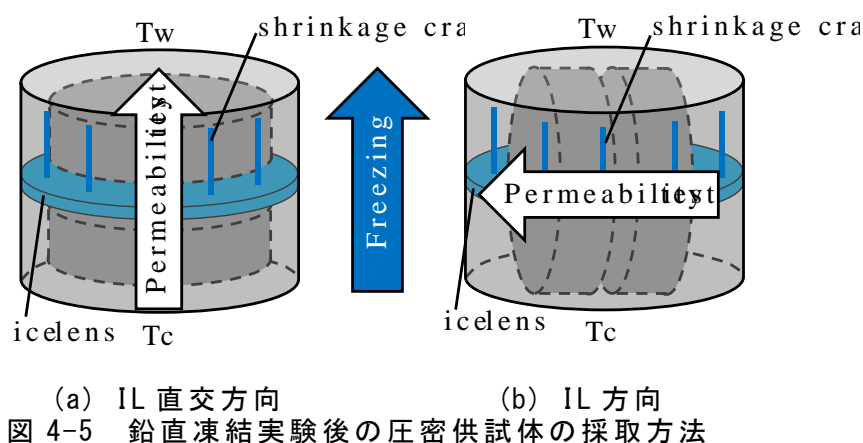


図 4-4 間隙比の測定イメージ

4.2.4 圧密透水試験

圧密透水試験は JIS A 1217(土の段階載荷による圧密試験方法)と JIS A 1218(土の透水試験方法)とを準用したものであり，標準圧密試験の各載荷段階の直後に 24 時間の変水位透水試験を行う．図 4-5 に鉛直凍結実験後の凍結融解土の圧密透水試験の試料採取イメージを示す．圧密透水試験の試料は C22-1, C23-1, C24-1 の凍結融解土から IL 痕直交方向（図 4-5(a)）および IL 痕方向（図 4-5(b)）を採取した．図 4-6 に水平凍結実験後の凍結融解土からの圧密透水試験の試料採取イメージを示す．圧密透水試験の試料は K21, K22, K30, K31, K32, K33 の凍結融解土から IL 痕方向を採取した．なお，比較のために



未凍結試料の圧密透水試験も実施している．本論文では未凍結土の圧密透水による透水係数は k_{pu} としている．

圧密透水試験では，最初に凍結融解実験の実験荷重 p の直前の荷重段階まで急速載荷し，その後の各載荷段階においてそれぞれ 24 時間の圧密試験と 24 時間の変水位透水試験を行った．

4.3 実験結果と考察

4.3.1 鉛直変位量と給水量の経時変化

図 4-7 に水平凍結実験の鉛直変位量の経時変化を示す．水平凍結実験では水平方向の変位を拘束した状態で水平方向に凍結させ，鉛直方向のみ変位を許している．実験荷重が小さいほど鉛直変位量 h_v が大きくなった．融解時には鉛直変位 h_v は減少に転じ，凍結融解後には実験荷重 p が小さいほど供試体高さが高くなった．実験荷重 p が最大の K22 ($p = 200 \text{ kN/m}^2$) では h_v が凍結前よりも小さくなったが， $p = 50, 100 \text{ kN/m}^2$ では凍結融解後の h_v が凍結前よりも大きくなり，凍結前の状態まで戻りきらなかった．

図 4-8 に給水量の経時変化を示す．凍結開始後約 26 時間は凍結の進行に伴い実験荷重 p が小さい $p = 50 \text{ kN/m}^2$ のみ供試体へ水が給水されているが，それ以外 ($p = 100, 200 \text{ kN/m}^2$) は供試体から水が吐き出されながら凍結された．凍結融解完了時においては p が小さいほど給水量は大きくなった． $p = 50, 100 \text{ kN/m}^2$ では凍結前よりも供試体が給水した状態となり， $p = 200 \text{ kN/m}^2$ では凍結前よりも供試体から排水された状態となった．

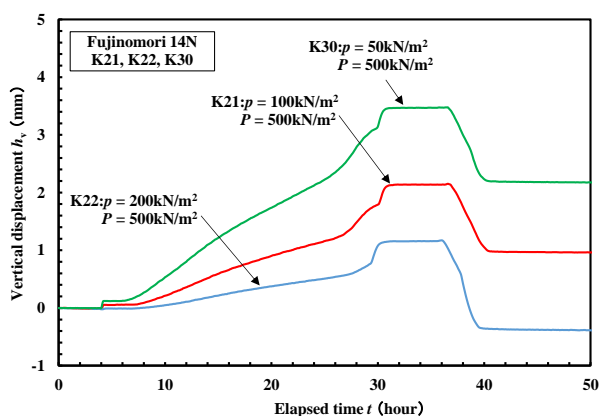


図 4-7 鉛直変位量の経時変化

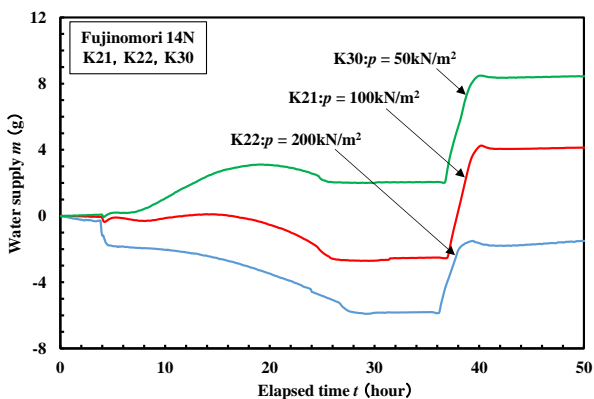


図 4-8 給水量の経時変化

4.3.2 実験荷重および予圧密荷重の影響

表 4-2 に実験結果の一覧表，図 4-9 に $P = 500 \text{ kN/m}^2$ とした時の実験荷重を変化させたときの間隙比と透水係数の関係を示す．未凍結土の透水係数を k_u ，凍結融解土の透水係数を k_t とする．実験荷重 p が小さいほど k_t が大きくなり，

表 4-2 水平凍結実験の実験結果一覧

Sample soil	Test No.	Pre-consolidation pressure	Overburden pressure	Freeze-thaw cycles	Water supply	Void ratio		Permeability		Permeability ratio
		P kN/m ²	p kN/m ²	n		UF e_u	F/T e_t	UF k_u m/s	F/T k_t m/s	
Fujinomori 14N	K21	500	100	1	Open	0.817	0.838	1.4×10^{-9}	8.8×10^{-9}	6.2
	K22	500	200	1	Open	0.791	0.783	1.0×10^{-9}	5.9×10^{-9}	5.9
	K23	150	50	1	Close	0.967	0.987	2.7×10^{-9}	6.0×10^{-8}	22.3
	K24	1000	200	1	Open	0.767	0.762	9.0×10^{-10}	8.9×10^{-9}	9.9
	K25	300	50	1	Open	0.905	0.926	1.9×10^{-9}	2.2×10^{-8}	11.3
Kizuchi 14N	K26	150	50	1	Open	0.986	1.023	4.0×10^{-10}	1.5×10^{-6}	3750
	K27	150	50	1	Open	0.999	0.984	4.0×10^{-10}	6.0×10^{-7}	1490
Fujinomori 14N	K28	500	50	1	Close	0.805	0.847	1.1×10^{-9}	5.3×10^{-9}	4.8
	K29	500	200	1	Close	0.873	0.855	1.7×10^{-9}	1.1×10^{-8}	6.6
	K30	500	50	1	Open	0.803	0.851	1.1×10^{-9}	1.4×10^{-8}	12.5
	K31	500	50	3	Open	0.854	0.924	1.5×10^{-9}	1.9×10^{-7}	126.7
	K32	500	50	5	Open	0.801	0.951	1.1×10^{-9}	5.8×10^{-7}	523.6
	K33	500	200	3	Open	0.877	0.816	1.7×10^{-9}	1.1×10^{-8}	6.2
	K41	500	200	5	Open	0.826	0.824	1.3×10^{-9}	1.1×10^{-8}	8.4

※UF: Unfrozen soil, F/T: Freeze-thawed soil, e_u : Void ratio of unfrozen soil, e_t : Void ratio of freeze-thawed soil, k_u : Permeability of unfrozen soil, k_t : Permeability of freeze-thawed soil

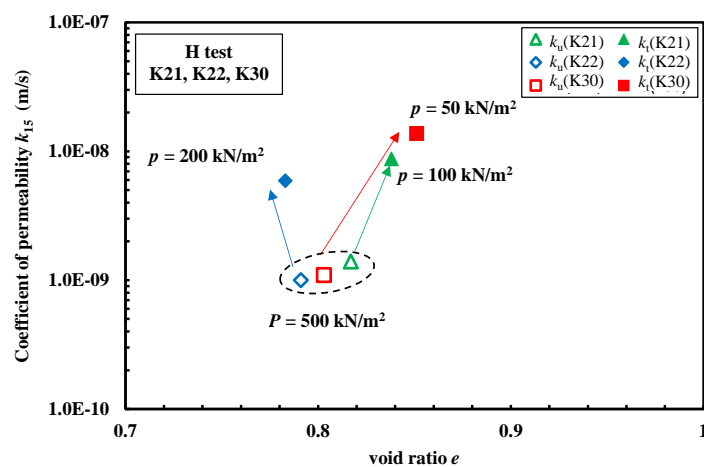


図 4-9 実験荷重の違いによる間隙比と透水係数の関係

透水係数増加比 k_t/k_u も増加した. k_t/k_u は K30 ($p = 50 \text{ kN/m}^2$) で $k_t/k_u = 12.5$, K21 ($p = 100 \text{ kN/m}^2$) で $k_t/k_u = 6.2$, K22 ($p = 200 \text{ kN/m}^2$) で $k_t/k_u = 5.9$ となった. 実験荷重 p が小さいと間隙比 e は増加し, p が大きいと e は減少する傾向が認められた. $p = 200 \text{ kN/m}^2$ では凍結融解により $e = 0.791$ から 0.783 に減少し, $p = 50, 100 \text{ kN/m}^2$ ではそれぞれ $e = 0.803$ から 0.851 , $e = 0.817$ から 0.838 に増加した.

図 4-10 に予圧密荷重を変化させたときの間隙比と透水係数の関係を示す. 凍結融解により全体的に透水係数 k は増加し, p が小さい $p = 50 \text{ kN/m}^2$ では間隙比 e が増加し, 実験荷重 p が大きい $p = 200 \text{ kN/m}^2$ では間隙比 e が減少する傾向が認められた.

図 4-11 に予圧密荷重 P , 実験荷重 p を変化させたときの凍結融解土の間隙比分布を比較する. e は K22 を除いて K21, 25, 30 において低温 Tc 側が増加した. K21, 30 を比較すると p が小さい K30 ($p = 50 \text{ kN/m}^2$) において e の増加が最大であった. p が等しく P が異なる K25 ($P = 500 \text{ kN/m}^2$), K30 ($P = 300 \text{ kN/m}^2$) を比較すると, P が小さい K30 は Tc 側の e の増加が著しかった. Tw 側の e はいずれの実験においても変化は認められなかった.

以上のことから, 水平方向に凍結融解させた供試体は低温側である Tc 側で e が増加する傾向が見られ, 透水係数の増加には Tc 側でみられるこのような e の増加が関係している可能性がある.

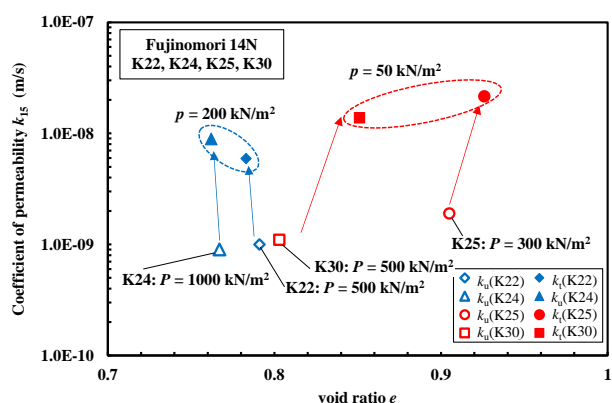


図 4-10 予圧密荷重の違いによる間隙比と透水係数の関係

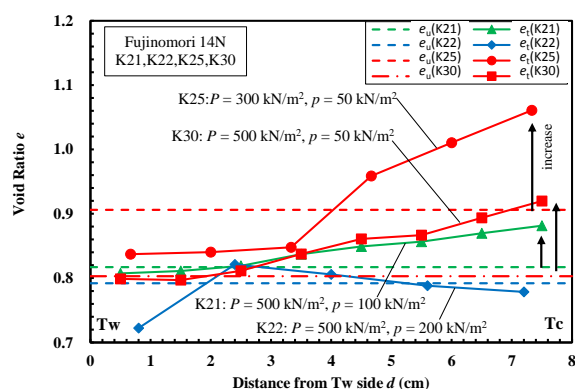


図 4-11 実験・予圧密荷重が異なる試料の凍結融解後の間隙比分布

4.3.3 給排水の影響

図 4-12 に閉式凍結における間隙比 e と透水係数 k の関係を示す．凍結融解により実験荷重 $p = 50 \text{ kN/m}^2$ では e が増加し， $p = 200 \text{ kN/m}^2$ では減少した．しかし，透水係数 k はいずれも増加し，予圧密荷重 P が小さい $P = 300 \text{ kN/m}^2$ において k の増加幅が大きい．

図 4-13 に閉式凍結における間隙比分布の変化を示す．凍結融解により最も透水係数 k が増加した K23 においては Tc 付近において大きく間隙比 e が増加し，Tw 付近では e が減少していることがわかる． k の変化が小さい K28，29 では凍結融解後の間隙比分布は Tc 側で若干増加するに留まった．K23 において Tc 側の e が大きく増加した原因は凍結融解時に土の固結度が低く（間隙比が大きく），実験荷重 p も小さいために低温 Tc 側において激しく凍上し，土に含まれる間隙水が Tc 側へ移動し Tw 側が脱水されて間隙比が偏った状態になり，融解時に元に戻りきらなかったためと考えられる．

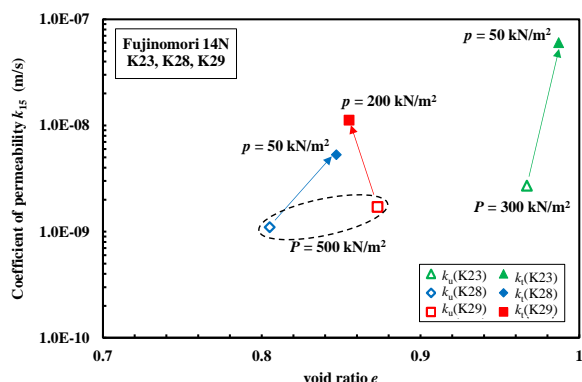


図 4-12 閉式凍結における間隙比と透水係数の変化

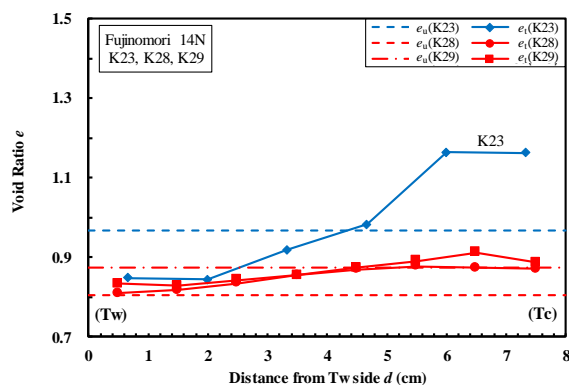


図 4-13 閉式凍結における間隙比分布の変化

4.3.4 凍結融解繰り返し回数の影響

図 4-14 に凍結融解繰り返しによる鉛直変位の経時変化を示す． $p = 50 \text{ kN/m}^2$ では凍結融解回数 n が増えるほど鉛直変位量 h_v も増加する傾向が見られた．しかし $p = 200 \text{ kN/m}^2$ では n が増えても h_v はほとんど変化せず，むしろ凍結前よりも圧縮される傾向が認められた．

図 4-15 に凍結融解繰り返しによる給排水量の経時変化を示す． $p = 50, 200 \text{ kN/m}^2$ のいずれにおいても凍結時に排水され，融解時に給水される傾向が見られた． $p = 50 \text{ kN/m}^2$ では給水量の方が排水量よりも多く， $p = 200 \text{ kN/m}^2$ では給水量よりも排水量の方が多い傾向が見られた．

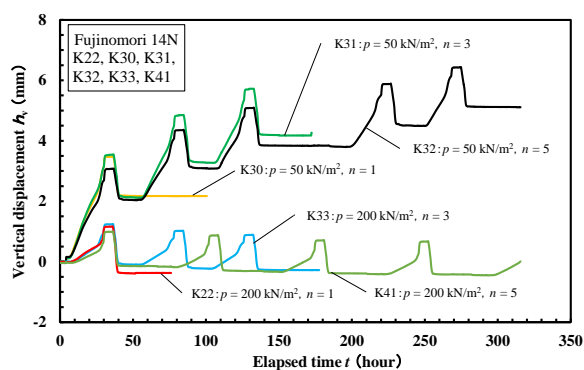


図 4-14 凍結融解繰り返しにおける鉛直変位量の経時変化

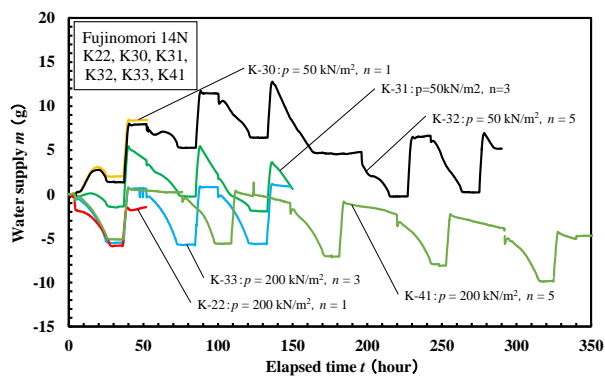


図 4-15 凍結融解繰り返しにおける給水量の経時変化

図 4-16 に凍結融解繰り返し回数と透水係数の関係を示す。凍結融解を繰り返すほど凍結融解土の透水係数 k_t は大きくなる傾向が見られるものの、一定の値に収束する傾向が見られる。実験荷重 p が小さい $p = 50 \text{ kN/m}^2$ では k_t の増加が著しく、 $n = 1, 3, 5$ の透水係数増加比 k_t/k_u はそれぞれ $k_t/k_u = 12.5, 126.7, 523.6$ 倍となった。一方、 p が大きい $p = 200 \text{ kN/m}^2$ では n が大きくなっても k_t の増加は低く抑えられ、 $n = 1, 3, 5$ に対して $k_t/k_u = 5.9, 6.2, 8.4$ 倍程度の増加にとどまった。つまり、凍結融解の繰り返しにより k_t は増加を続けるものの、その値は一定値に収束し、 p が大きいほど増加は抑えられる。

図 4-17 に凍結融解繰り返しによる間隙比 e と透水係数 k の変化を示す。 $p = 50 \text{ kN/m}^2$ では凍結融解を繰り返すと e と k が共に大きく増加した。 $p = 200 \text{ kN/m}^2$ では凍結融解繰り返しても e は変わらず k の増加幅は小さい。凍結融解を繰り返しても e と k の関係では一定の線上に示される。

以上のような k と e の変化から、凍結融解を繰り返すと p に応じた e と k の関係に収束する傾向があると考えられる。

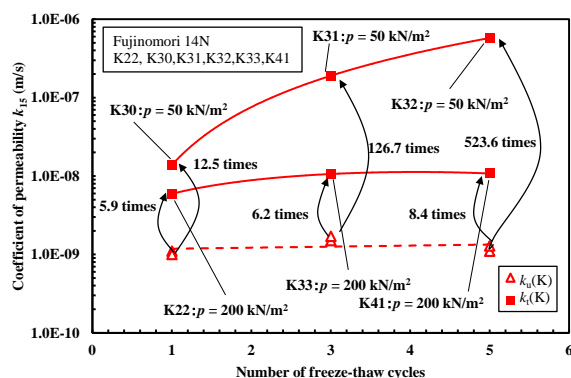


図 4-16 凍結融解繰り返し回数と透水係数の関係

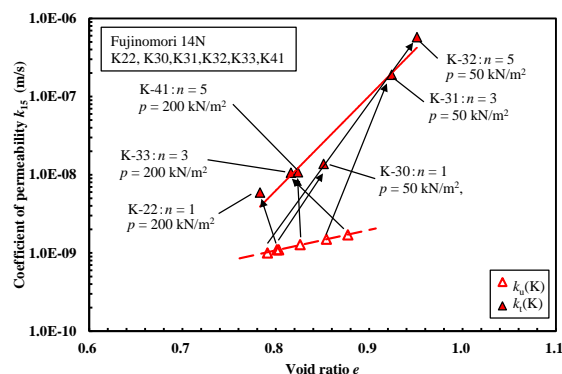


図 4-17 凍結融解繰り返しによる間隙比と透水係数の変化

図 4-18 に低荷重時の凍結融解繰り返しによる間隙比分布の変化を示す。Tc側では凍結融解の繰り返しにより間隙比 e が増加する傾向が見られ、一方、Tw側では e の変化がほとんど見られなかった。凍結融解繰り返し回数が増えると (K31, 32) Tc 側の e が著しく増加した。図 4-19 に高荷重時における凍結融解繰り返しによる間隙比分布の変化を示す。Tc 側において凍結融解による e の増加が認められるものの、凍結融解繰り返し回数を多くしても K33, 41 のように Tc 側の e の増加は見られず、図 4-18 に見られるような著しい e の増加は見られなかった。

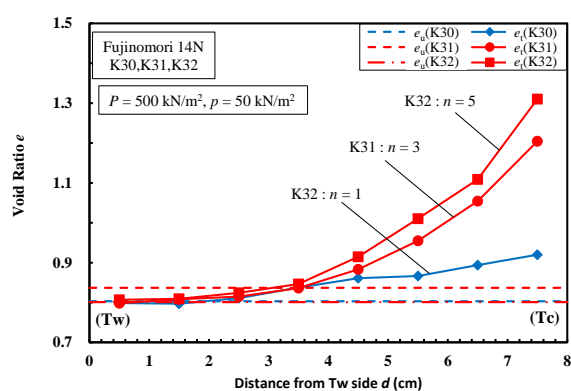


図 4-18 低荷重時の凍結融解繰り返しによる間隙比分布の変化

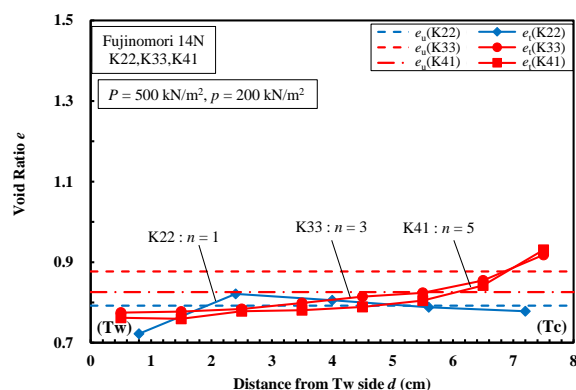


図 4-19 高荷重時の凍結融解繰り返しによる間隙比分布の変化

4.3.5 アイスレンズ発生面と透水試験の方向との関係

(1) 鉛直凍結実験および水平凍結実験による検討

図 4-20 に鉛直凍結実験と水平凍結実験における間隙比と透水係数の関係を示す．水平凍結実験における未凍土の透水係数を $k_u(K)$ ，凍結融解土の透水係数を $k_t(K)$ とし，鉛直凍結実験における未凍土の透水係数を $k_u(C)$ ，凍結融解土の透水係数を $k_t(C)$ とする．間隙比と透水係数は未凍結土と凍結融解土で大きく 2 つのグループに分けることができる．凍結融解土では $k_t(K)$ が $k_t(C)$ よりも若干大きい傾向が認められた．特に低荷重 $p = 50 \text{ kN/m}^2$ ， $n = 3, 5$ の K31, 32 は透水係数の増加が顕著であった．この図で示す凍結融解後の間隙比とは凍結融解土全体の平均であり，間隙比の偏りが k_t に影響しているならば，IL 痕方向の透水係数を評価するためには全体の間隙比ではなく，供試体の間隙比分布を考慮する必要があると考えられる．

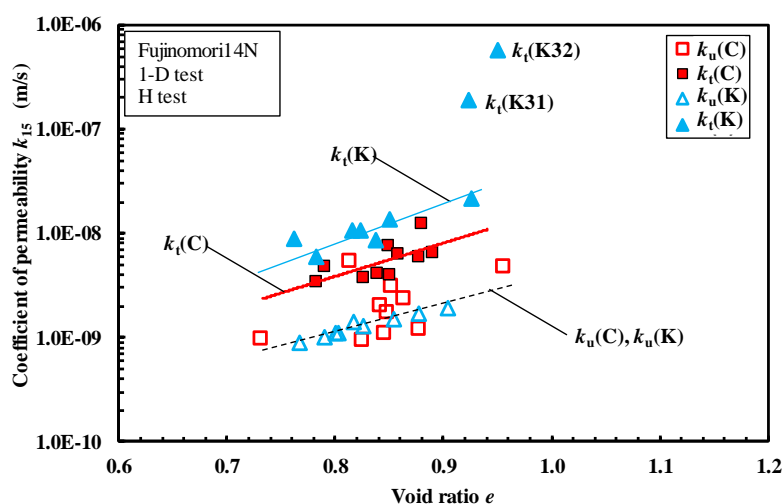


図 4-20 藤森 14N を用いた鉛直凍結実験および水平凍結実験における
間隙比と透水係数の関係

図 4-21 に黄土 14N における鉛直凍結実験と水平凍結実験における間隙比と透水係数の関係を示す。鉛直凍結実験と比較して水平凍結実験では凍結融解土の透水係数 k_t は著しく増加している。冷却速度は K26, K27 がそれぞれ $dT/dt = 0.2, 0.4$ °C/hour である。透水係数増加比 k_t/k_u は K26 で $k_t/k_u = 3750$, K27 で $k_t/k_u = 1490$ であり、透水係数はそれぞれ $k_t = 1.5 \times 10^{-6}, 6.0 \times 10^{-7}$ m/s まで増加した。鉛直実験では最も k_t/k_u が大きい C29 においても $k_t/k_u = 15$ であることから、水平実験における k_t/k_u が著しく大きいことがわかる。

図 4-22 に凍結融解後の間隙比分布を示す。凍結融解後の間隙比は K26, K27 のいずれも Tc 側で顕著な増加を示した。K26 と比較すると K27 の間隙比は低温側において低くなっており、凍結融解土の透水係数の大小関係と対応してい

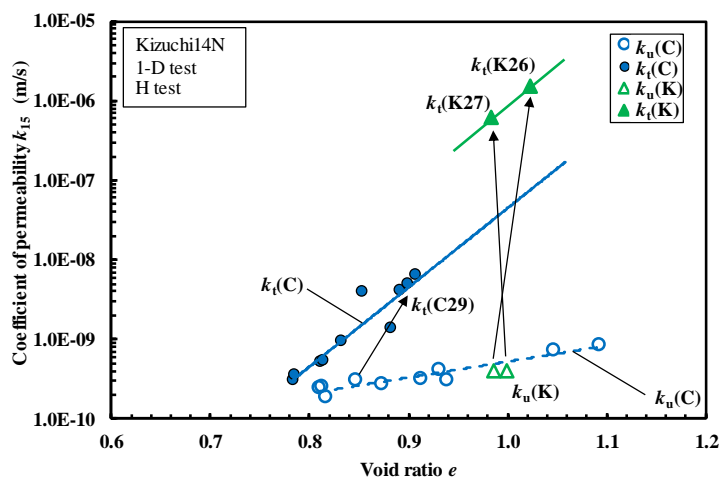


図 4-21 黄土 14N を用いた鉛直凍結実験と水平凍結実験における間隙比と透水係数の関係

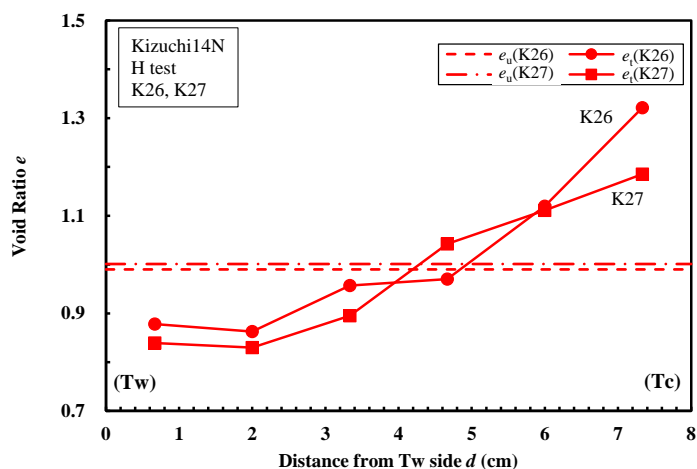


図 4-22 黄土 14N を用いた凍結融解実験後の間隙比分布（水平凍結実験）

る．凍上性の高い黄土 14N においても藤森 14N と同様に水平凍結実験における $k_t(K)$ の増加には T_c 側の間隙比の増加が強く影響している可能性がある．

(2) 圧密透水試験による検討

圧密透水試験は鉛直凍結実験からサンプルを採取し，IL 痕方向と IL 痕直交方向の透水係数を比較した．圧密透水試験では凍結融解による IL や SC の痕跡の発生や土の間隙構造の変化が上載荷重の増加と共に徐々に閉塞されていく過程でどのように透水係数が変化しているかを検討した．

図 4-23 に鉛直凍結実験と圧密透水試験の比較を示す．圧密透水試験の未凍結土の透水係数を k_{pu} ，凍結融解土を k_{pt} とする．圧密透水試験における透水係数 k_{pt} では IL 痕方向と IL 痕直交方向の透水係数に違いは認められなかった．未凍結の透水係数 k_{pu} と凍結融解土の値 k_{pt} を比較すると両者は同程度であり，圧密透水試験による凍結融解土の透水係数 k_{pt} は鉛直凍結実験の透水係数 $k_t(C)$ よりも低くなった．

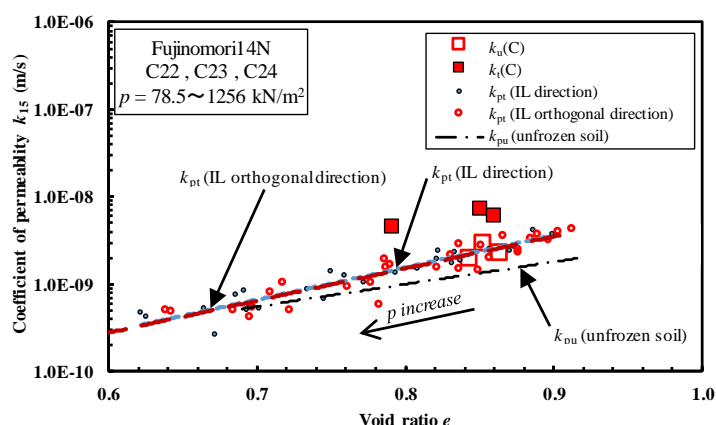


図 4-23 鉛直凍結実験と圧密透水試験（IL 方向と IL 直交方向）の透水係数の比較

図 4-24 に水平凍結実験と圧密透水試験の比較を示す. K21, K22, K30 は予圧密荷重 $P = 500 \text{ kN/m}^2$, 実験荷重 $p = 100, 200, 50 \text{ kN/m}^2$ であり, いずれも凍結融解繰返し回数 $n = 1$ である. 圧密透水試験の凍結融解土の透水係数 k_{pt} は未凍結土の値 k_{pu} と同程度であり, 水平凍結実験の凍結融解土の透水係数 $k_t(K)$ よりも低くなった.

図 4-25 に水平凍結実験による凍結融解繰返しによる透水係数と圧密透水試験による IL 痕方向の透水係数との比較を示す. $k_t(K)$ は低荷重で $n=3, 5$ の K31,

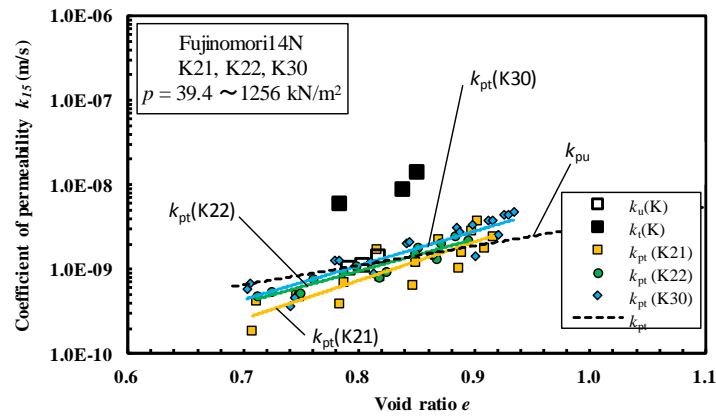


図 4-24 水平凍結実験と圧密透水試験による IL 方向の透水係数の比較

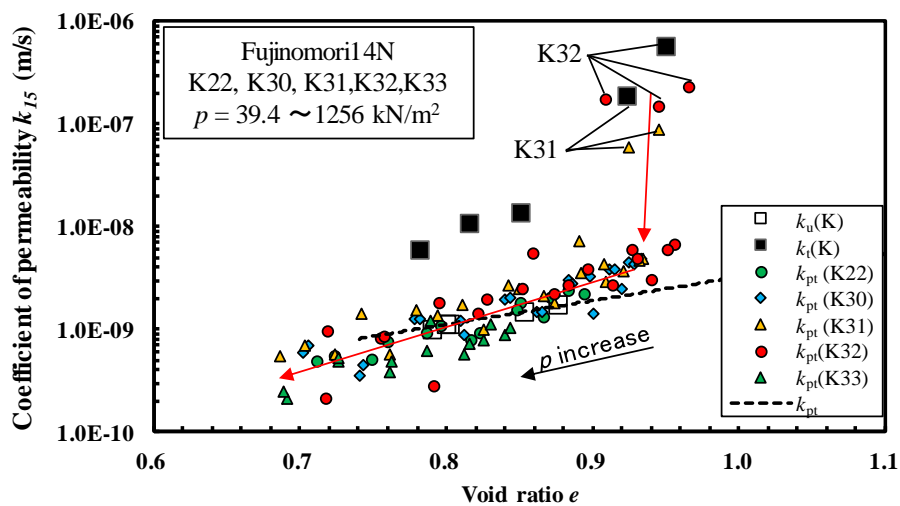


図 4-25 水平凍結実験による凍結融解繰返しによる透水係数増加と圧密透水試験による IL 方向の凍結透水係数との比較

32を除いた K22, 30, 33 において k_{pu} よりも 5 倍程度大きくなっているが、圧密透水試験により得られた凍結融解後の透水係数 k_{pt} は $k_t(K)$ ほどの透水係数の増加が見られず、 k_{pt} は $e = 0.8$ 以上で k_{pu} よりも若干大きくなる程度である。一方、K31 および K32 では k_{pt} は荷重段階初期で k_{pu} の約 200 倍まで増加しており $k_t(K)$ と同程度であったが、 k_{pt} は上載荷重を増加させると他の融解後の圧密透水試験の透水係数 k_{pt} と同程度まで透水係数 k が低下した。

図 4-17, 4-18, 4-25 を総括すると、図 4-17 に示すように $p = 50 \text{ kN/m}^2$ で凍結融解の繰り返し回数 n が多いと透水係数が著しく増加する原因として図 4-18 に示すような低温側における間隙比の著しい増加が関係していると考えられる。しかし、図 4-25 に見られるように、圧密透水試験でみられる透水係数の増加は、荷重段階が進むと急激に低下する。つまり、圧密透水試験において上載荷重を加えることにより凍結融解による間隙構造の変化は容易に取り除かれると考えられる。

図 4-26 に鉛直凍結実験、水平凍結実験と圧密透水試験における間隙比と透水係数の関係を示す。鉛直凍結実験と水平凍結実験の結果を比較すると、凍結融解土の IL 痕方向の透水係数 $k_t(K)$ は IL 痕直交方向の透水係数 $k_t(C)$ よりも大きい傾向が見られた。一方、圧密透水試験で比較すると IL 痕方向の透水係数

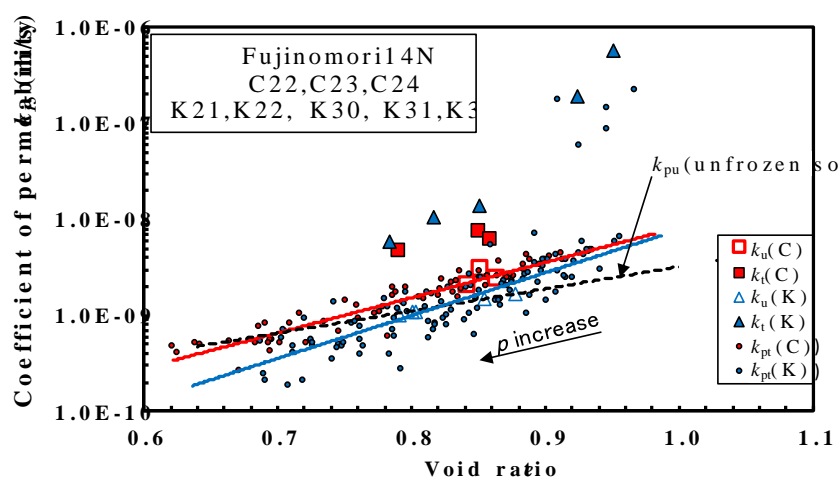


図 4-26 凍結融解透水試験と圧密透水試験による凍結融解土の IL 方向と IL 直交方向の透水係数の関係
(鉛直凍結実験、水平凍結実験、圧密透水試験)

$k_{pt}(K)$ とIL痕直交方向の透水係数 $k_{pt}(C)$ では透水試験の方向による明確な違いが認められなかった。

鉛直凍結実験において凍結融解土の透水係数が増加する原因は IL やそれに直交する収縮ひび割れ (SC) のようなマクロなクラックの痕跡ではなく、間隙水がその場で凍結する際に体積膨張して土粒子間の接触を緩め、間隙を押し広げる極めて微細な無数のクラックであると推定できる。鉛直凍結実験後の供試体には、そのような無数の微細なクラックが存在して凍結融解土の透水係数 k_t を大きくしている可能性がある。しかし、圧密透水試験では微細なクラックのほとんどが供試体作成の過程において、セルから押し出す際に乱されることや軽い振動などの外力により容易に閉じてしまう。

一方、水平凍結実験後の供試体は凍結融解後に T_c 付近で間隙比が増加しており、凍結融解後に T_c 側の間隙が広げられた影響が凍結融解後の透水係数に強く影響すると考えられる。特に、低荷重下で凍結融解繰り返しを受けた土に見られたような T_c 側における間隙比の著しい増加は圧密透水試験の初期の荷重段階においても透水係数の増加をもたらしたと考えられるが、荷重が大きくなると間隙が閉じるために、未凍結土と同じような間隙比と透水係数の関係を示すものと思われる。

4.4 まとめ

水平凍結実験により，凍結融解土の IL 痕方向の透水係数に影響する要因として実験荷重と予圧密荷重，給排水の有無，凍結融解繰り返し回数が検討された．また，IL 痕と IL 痕に直交する方向の透水係数を比較するために圧密透水試験が行なわれた．本章の実験の結果を以下にまとめる．

- (1) 水平凍結実験において，凍結融解土の透水係数は未凍結土よりも大きく，その程度は実験荷重が小さいほど著しい．また，凍結融解土では実験荷重が小さいと間隙比は増加し，実験荷重が大きい場合には間隙比が減少する傾向が見られた．しかし，実験荷重による間隙比の変化に関わらず凍結融解土の透水係数は増加した．
- (2) 凍結融解後の間隙比分布は T_c 側で凍結前よりも増加する傾向が見られ，その傾向は実験荷重が小さいほど，また予圧密荷重が小さいほど顕著であった．
- (3) 凍結融解過程において給水を行わない閉式凍結では，予圧密荷重および実験荷重が小さいときに凍結融解土の間隙比分布が T_c 側で増加し T_w 側で減少した． T_c 側における間隙比増加が大きい場合には透水係数の増加も顕著であった．
- (4) 凍結融解繰り返しにより，間隙比と透水係数は一定値に収束する傾向が見られ，実験荷重が小さい場合には間隙比と透水係数の増加が著しくなった．凍結融解土の間隙比分布は，特に T_c 側で凍結融解繰り返しにより増加した．
- (5) 未凍結土と凍結融解土では間隙比と透水係数の関係がそれぞれ独立しており，異なった関係を示した．そして，凍結融解土の透水係数は IL 痕直交方向よりも IL 痕方向の方が若干大きくなる傾向が認められた．
- (6) 凍結融解実験後に採取したサンプルを用いて圧密透水試験を行うと，凍結融解土の透水係数は未凍結土と同程度を示した．また，IL 痕方向と IL 痕直交方向の凍結融解土の透水係数の違いは認められなかった．
- (7) 図 4-27 に示すように IL 痕直交方向の透水係数の増加は凍結により間隙部分に発生する微細なクラックの影響を受けていると考えられる．一方，IL 痕方向の透水係数の増加には凍結融解土の間隙比分布が T_c 側において増加することが関係していると考えられる．

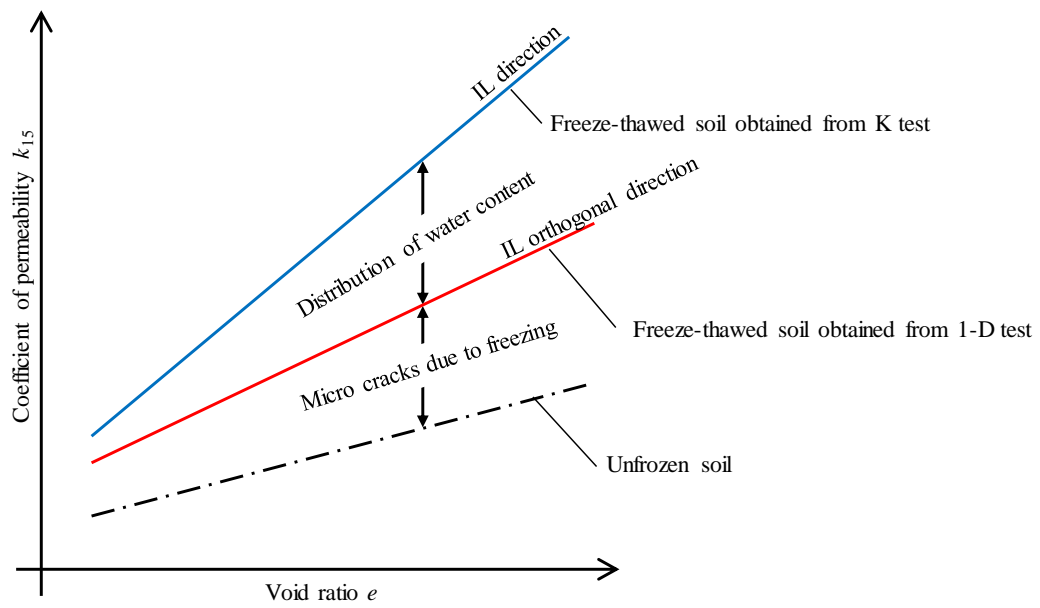


図 4-27 凍結融解による透水係数の変化

参考文献

- 1) E. J. Chamberlain and A. J. Gow: Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils, *Engineering Geology*, Vol.13, pp.73-92 (1979).
- 2) J. M. Konrad and M. Samson: Hydraulic conductivity of kaolinite-silt mixtures subjected to closed-system freezing and thaw consolidation, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.37, pp.857-869 (2000).
- 3) Y. Ito, M. Kamon and K. Aramoto: Influence of freezing method on the permeability of frozen-thawed soils, *Proc. 5th Japan-Korea Joint Seminar on Geoenvironmental Engineering*, pp.199-194 (2005).
- 4) S. Taber: Frost heaving, *Journal of Geology*, Vol.37, pp.428-461 (1929).
- 5) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説，第 11 章凍上試験，pp.226-249 (2016).
- 6) 広瀬剛，伊藤譲，片野田栄一：凍結融解土の圧密特性の変化について，土木学会第 55 回年次学術講演会，Ⅲ-B356 (2000).
- 7) 片野田栄一，伊藤譲，嘉門雅史，野村忠明：凍結融解現象を利用した新圧密促進工法，第 4 回地盤改良シンポジウム発表論文集，pp.175-182 (2000).

第 5 章 アイスレンズ及び収縮ひび割れによる影響

5.1 目的

これまでの実験では冷却速度を一定とするランプ式凍結による実験が中心であった。ランプ式凍結では凍結面が常に移動して次々に新たな IL が発生するため、供試体中に一様に IL が形成されるが十分に吸水が十分に行われる前に次の IL が発生するため、凍結面よりも高温側の未凍土における脱水圧密の影響は顕著とは言えない。しかし、実際の AGF では凍土壁の完成後に一定期間維持運転を行うので IL が成長を続ける。そこで、両端面温度一定のステップ式凍結による実験が必要と考えられた。

細粒土をステップ式凍結で凍結させた場合、IL が一旦形成されると、未凍土側から吸水して IL が発達していく。このとき、凍上速度が吸水速度よりも小さい場合には継続して土中水を取り込み IL は肉厚に成長する。そして、凍上速度が吸水速度よりも大きい場合には IL の成長が早く、未凍土からの給水が間に合わないため、IL に近い未凍土では脱水圧密され亀裂が生じることがある。これは収縮ひび割れ (SC) と呼ばれ、IL と同様に融解後に痕跡が残ると透水係数を著しく増加させる可能性がある。IL や SC が発達するのはランプ式凍結よりもステップ式凍結の方が著しいため、凍結融解土の透水係数に及ぼす IL と SC の影響を明らかにするためにはステップ式凍結で凍結させた土の融解後の透水係数を調べる必要があると考えられる。

本章では IL や SC を顕著に発生させて、IL や SC の痕跡が及ぼす凍結融解土の透水係数への影響を明らかにするために、ステップ式とランプ式凍結による凍結融解土の透水係数を比較した。また、凍結融解実験後の供試体からサンプルを取り出して IL 痕方向と IL 痕直交方向の透水係数の違いを検討した。圧密透水試験のサンプルを採取する際、凍結実験の円筒セルから供試体を押し出す際に試料が乱される可能性が懸念された。三軸凍結実験では供試体をゴムスリーブで覆い凍結融解させるため、圧密試料のサンプルを採取する際にセルから押し出す作業がない。そこで、三軸凍結実験と鉛直凍結実験から取り出した圧密透水試験の結果を比較した。

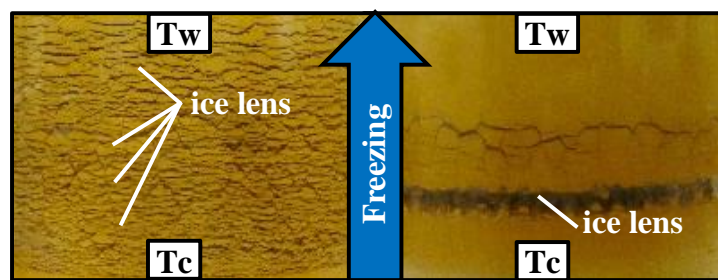
5.2 実験方法

凍結融解土の透水係数に及ぼす IL や SC の痕跡の影響を明らかにするために、ステップ式凍結により鉛直凍結実験が行われた。そしてステップ式凍結による実験の凍結融解土からサンプルを採取して圧密透水試験が行なわれた。三軸凍結実験は凍結方向と側面方向に体積変化が可能で AGF で凍結融解された地盤の凍結膨張を再現できる。そのため、変位方向を鉛直方向に限定している鉛直凍結実験と実地盤との透水係数の差異がないか比較検討することが可能である。さらに、三軸凍結実験後に実験装置から土を取り出す際にはゴムスリーブを外すだけであるため、セルから土を押しぬく作業が無く、試料土が乱されることを防ぐことができる。

5.2.1 供試体作成

試料土は表 2-1 に示す藤森 14N である。鉛直凍結実験および三軸凍結実験の供試体は 2.2 と同様の手順で作成し、予圧密荷重は $P = 500 \text{ kN/m}^2$ とした。

予圧密が終了した供試体は、三軸凍結実験 (T-21, T-22) では直径 $\phi = 6$ 、高さ $h = 5 \text{ cm}$ に成形された。IL 痕直交方向と IL 痕方向の両方の圧密透水試験のサンプルを採取するために、鉛直凍結実験 (CS1, CS1-2, CS2, CS3) および三軸凍結実験 (T-23, T-24) では供試体直径 $\phi = 10 \text{ cm}$ 、高さ $h = 7 \text{ cm}$ で成形され、三軸凍結実験 (T-28, T-24) では IL 痕直交方向のみサンプルを採取するために $\phi = 10 \text{ cm}$ 、 $h = 5 \text{ cm}$ で成形された。



(a) ランプ式凍結 (b) ステップ式凍結
図 5-1 凍結方式によるアイスレンズ発生状況の違い

5.2.2 実験条件

図 5-1 にランプ式凍結(a)とステップ式凍結(b)による IL の発生状況を示す。ランプ式では多数の微細な IL が発生し，ステップ式では少数の厚い IL が発生する。

表 5-1 に実験条件を示す。ステップ式凍結（CS シリーズ）は IL と SC の影響を検討した。

表 5-1 実験条件

Test No.	Test method	Freezing method	Pre-consolidation pressure P kN/m ²	Overburden pressure p kN/m ²	Cooling rate dT/dt °C/hour	Water supply	Initial temperature gradient dT/dh °C/cm	Lowest cooling temperature T_L °C
CS1	1-D test	Step	500	100	—	Open	0.714	-10
CS1-2			500	100	—	Open	1.429	-10
CS2			500	100	—	Close	1.429	-10
CS3			500	100	—	Open	1.429	-7.5
T-21	T test	Ramp	500	100	0.2	Open	1.0	-10
T-22			500	200	0.2	Open	1.0	-10
T-23			500	100	0.2	Open	0.714	-10
T-24			500	200	0.2	Open	0.714	-10
T-28			500	100	0.2	Open	1.0	-10
T-29			500	200	0.2	Open	1.0	-10

※Dimensions of the specimen: ϕ 10cm, h =7cm(CS1~3, T-23, 24), ϕ 10cm, h =5cm(T-28, 29), ϕ 6cm, h =5cm(T-21, 22)

図 5-2 に供試体両端面温度の経時変化を示す．CS1, 1-2 では温度勾配をそれぞれ $dT/dh = 0.714, 1.429 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ とし，CS1（図 5-2(a)）では凍結中の冷却温度は $T_w = +2.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ， $T_c = -2.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ とし，CS1-2（図 5-2(b)）では IL が厚く成長するために冷却温度を $T_w = +2.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ， $T_c = -7.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ として 30 時間温度を一定温度に保ち，その後 $T_w, T_c = -10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ に温度を急降下させた．CS2 では $dT/dh = 1.429 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ ，凍結中に給水させない閉式凍結とした．CS2 において T_c が 76 時間経過で 0°C まで上昇しているが，これは冷凍機のトラブルのためである．CS2（図 5-2(c)）は冷却条件が CS1-2 と同じで給排水を許さない閉式凍結とした．CS3（図 5-2(d)）は $dT/dh = 1.429 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ とし，開式凍結で IL 前面の SC の影響を検討するために凍結融解過程において $T_w = +2.5^{\circ}\text{C}$ に保ち，高温側を凍結させなかった．凍結融解後の供試体からは図 4-5 に示す要領で圧密透水試験

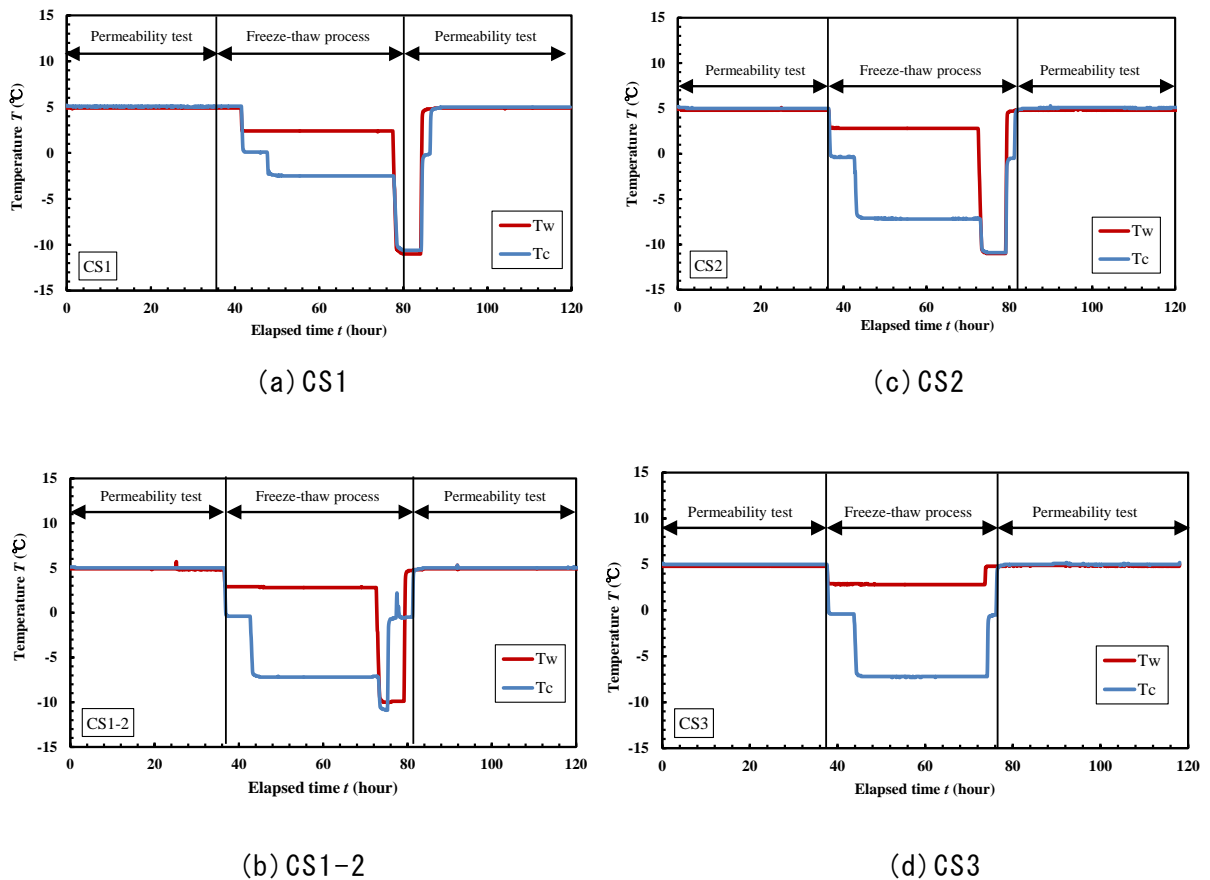


図 5-2 供試体両端面温度の経時変化

の試料を採取し、IL 痕方向と IL 痕直交方向の透水係数の違いを検討した。また、比較のために未凍結の試料を用いた圧密透水試験も行なった。

地盤凍結工法では凍結による体積膨張がアイスレンズ面に直交する方向だけでなくアイスレンズ面の方向にも膨張することが考えられるため、実際の地盤条件に近い荷重や変異の条件を再現できる三軸凍結実験を表 5-1 に示す実験条件で行なった。また、三軸凍結実験後に圧密透水試験の供試体を取り出す際に余分な外力がかかりにくく、圧密透水試験において供試体が乱される影響を取り除くことができる。T-21, T-22 は $dT/dh = 1.0 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$, 等方圧力 $p = 100, 200 \text{ kN/m}^2$ とした。T-23, T-24 と T-28, T-29 は $dT/dh = 0.714, 1.0 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ とし、図 4-5 と同様な手順で T-23 と T-24 が IL 痕方向 (図 4-5(b)), T-28 と T-29 が IL 痕直交方向 (図 4-5(a)) の圧密透水試験用の試料を採取した。なお、2.3.3 に示したように温度勾配は凍結融解後の透水係数に影響しないという知見が得られていることから、温度勾配を厳密に揃えることはしていない。

5.3 実験結果と考察

5.3.1 凍結方法の影響

表 5-2 にステップ式による鉛直凍結実験およびランプ式による三軸凍結実験の実験結果の一覧表を示す．CS シリーズでは CS3 を除いて透水係数増加比 k_t/k_u が約 $k_t/k_u = 3$ であった．T シリーズでは約 $k_t/k_u = 2$ である．なお，T-29 は実験中のトラブルにより凍結融解土の透水係数 k_t が測定できなかったが，凍

表 5-2 実験結果一覧表

Test method	Freezing method	Test No.	Pre-consolidation pressure	Overburden pressure	Water supply	Void ratio		Permeability		Permeability ratio k_t/k_u
			P kN/m ²	p kN/m ²		UF e_u	F/T e_t	UF k_u m/s	F/T k_t m/s	
1-D test	Step	CS1	500	100	Open	0.849	0.831	1.8×10^{-9}	5.3×10^{-9}	2.9
		CS1-2	500	100	Open	0.838	0.844	2.1×10^{-9}	7.0×10^{-9}	3.3
		CS2	500	100	Close	0.824	0.833	2.5×10^{-9}	6.7×10^{-9}	2.7
		CS3	500	100	Open	0.817	0.824	2.0×10^{-10}	3.1×10^{-9}	1.6
T test	Ramp	T-21	500	100	Open	0.855	0.868	2.5×10^{-9}	6.3×10^{-9}	2.5
		T-22	500	200	Open	0.822	0.770	9.7×10^{-10}	2.3×10^{-9}	2.4
		T-23	500	100	Open	0.858	0.780	1.9×10^{-9}	4.0×10^{-9}	2.1
		T-24	500	200	Open	0.812	0.751	1.6×10^{-9}	2.6×10^{-9}	1.6
		T-28	500	100	Open	0.841	0.830	2.0×10^{-9}	6.0×10^{-9}	3
		T-29	500	200	Open	0.819	0.720	1.1×10^{-9}	—	—

※UF: Unfrozen soil, F/T: Freeze-thawed soil, e_u : Void ratio of unfrozen soil, e_t : Void ratio of freeze-thawed soil, k_u : Permeability of unfrozen soil, k_t : Permeability of freeze-thawed soil

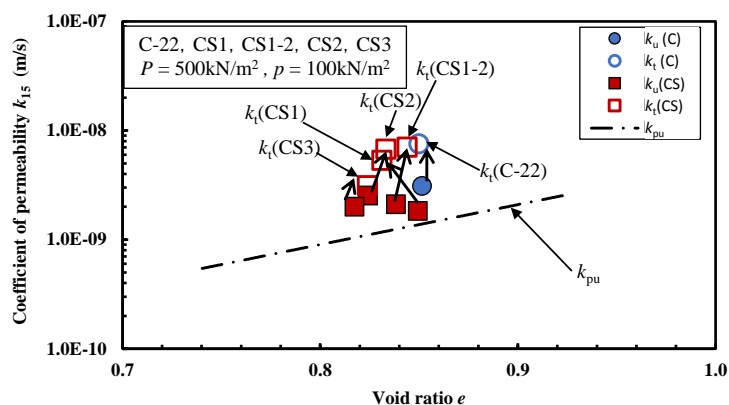


図 5-3 凍結方法による凍結融解後の透水係数への影響

結融解は問題なく行われている。

図 5-3 に凍結方法による凍結融解後の透水係数への影響を検討するために、間隙比と透水係数の関係を示す。ランプ式凍結の C22 は実験条件を表 3-2 に示したもので荷重条件は CS シリーズと同じである。ステップ試験の CS1, 1-2 と C22 とを比較すると C22 は $k_t = 7.5 \times 10^{-9}$ m/s, CS1 は $k_t = 5.3 \times 10^{-9}$ m/s, CS1-2 は $k_t = 7.0 \times 10^{-9}$ m/s であり, C22, CS1-2, CS1 に明確な透水係数の違いはなかった。融解後の間隙比は C22 で $e = 0.850$, CS1 で $e = 0.831$, CS1-2 で $e = 0.844$ であり, 大きな違いはなかった。閉式凍結を行った CS2 は $k_t = 6.7 \times 10^{-9}$ m/s であり, CS1-2 とほぼ同じ透水係数であるため, 給排水の有無による影響は認められなかった。Tw 側を最後まで凍結させなかった CS3 は $k_t = 3.1 \times 10^{-9}$ m/s, $e = 0.824$ となり, CS1-2 と比較すると透水係数と間隙比がともに小さくなった。

以上の結果より, ステップ式凍結とランプ式凍結では明らかな差は認められない。また, 閉式凍結と開式凍結の凍結融解前後の間隙比と透水係数の変化は同程度であった。IL より未凍土側を凍結させなかった場合には透水係数の増加が低く抑えられた。これは Tw 側を未凍土のまま保持させたことが関係していると考えられる。

図 5-4 に CS シリーズの凍結融解後の間隙比分布を示す。Tc 側で凍結融解土の間隙比 e_t が未凍結土の間隙比 e_u よりも増加する傾向が見られた。一方, Tw 側では e_t が e_u よりも減少する傾向が認められた。温度勾配の異なる CS1 と

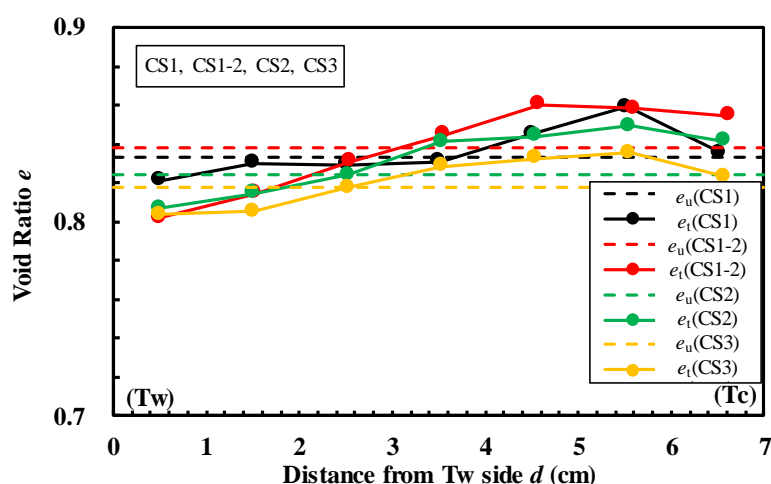


図 5-4 CS シリーズにおける凍結融解後の間隙比分布

CS1-2 を比較すると、最大の間隙比は両者とも同程度であるが、C1-2の方がTwからの距離 $d = 3.5 \sim 7.0$ の範囲で間隙比が大きい傾向が見られた。閉式凍結を行ったCS2はCS1-2と比較して最大の e_t が小さい傾向が見られた。Tw側を凍結させずに未凍結土のまま保ったCS3はTw側の間隙比が最も低くなった。

CS1-2がCS1よりもTc側で間隙比の増加した範囲が広い原因は、Tc温度が低いと凍結面がTwに近づき、さらに温度勾配を大きくすることでTw側からTc側への水分移動が促されたためと考えられる。そして、給水無しの場合ではTw側の間隙比が給水する場合よりも小さくなると予想されたが、Tw側の間隙比は給水の有無に関係なく同等であり、Tw側において想定したような脱水圧密や収縮クラックが入りにくかった可能性がある。Tw側を未凍結のまま保持すると全体的に間隙比が小さくなる傾向が認められた。

5.3.2 アイスレンズと収縮クラックの影響

図 5-5 に IL と SC の痕跡の影響を検討するために、圧密透水試験における間隙比と透水係数の関係を示す。CS1 および CS2 における Tw 側の IL 痕直交方向の透水係数 k_{pt} は初期の荷重段階で k_{pu} と比較して CS1 が 10 倍, CS2 が 100 倍以上の透水係数の増加が認められた。しかし、荷重段階が進み上載荷重が大きくなると k_{pt} は急激に低下した。CS3 で IL より未凍土側の IL 直交方向の k_{pt} は未凍結の試料であり、SC の発生による透水係数の増加が予想されたが、未凍結土と同程度の透水係数であった。CS1, CS1-2, CS3 の Tw 側の IL 直交方向の k_{pt} は、図 4-22 と同様に $e = 0.8$ 以上では k_{pu} よりも大きくなる傾向が見られた。

CS1 と CS2 で見られた Tw 側の IL 直交方向における k_{pt} の著しい増加は、凍結過程で発生した SC が融解後にも痕跡として残り、水道（みずみち）になったことが原因であると考えられる。また、IL よりも Tw 側で凍結されなかった CS3 の IL 直交方向の透水係数は未凍結土と全く同じ傾向を示した。このことは凍結融解により土自体に前述のような透水係数を増加させる作用が働いていることを示しているものと考えられる。

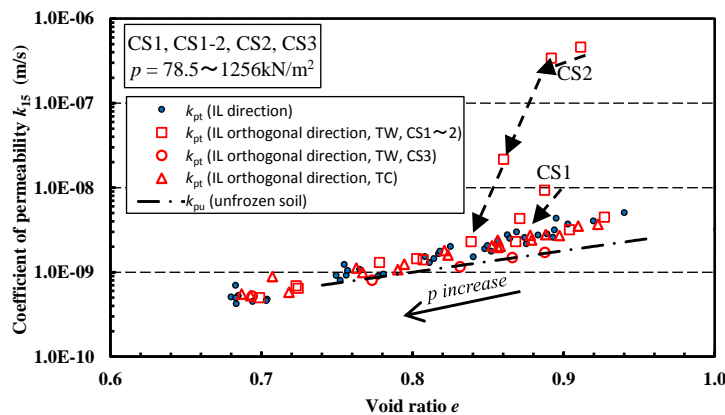


図 5-5 IL と SC の痕跡の影響

5.3.3 圧密透水試験の試料採取過程における乱れの影響

図 5-6 に三軸凍結実験と鉛直凍結実験の間隙比と透水係数の関係を比較する．実験では予圧密荷重 $P = 500 \text{ kN/m}^2$ とし，実験荷重を $p = 100 \sim 200 \text{ kN/m}^2$ に変化させた．T-21, T-22 と比較する鉛直凍結実験の C22, C23 は，表 3-2 に実験条件を示しており，T-21 と C22, T-22 と C23 はほぼ同等の実験条件である．実験荷重が大きい $p = 200 \text{ kN/m}^2$ では T および C シリーズの間隙比は共に (T-22, C23) 減少するが透水係数は増加している．実験荷重が小さい $p = 100 \text{ kN/m}^2$ の間隙比は共に (T-21, C22) 大幅には変化しないが，透水係数は増加している．全体的に透水係数は T シリーズの方が C シリーズよりも若干小さい．その原因は三軸凍結実験では鉛直凍結実験とは異なり側方への変位が可能であるため，凍結時に発生していた SC の痕跡が融解時の側方からの圧力により閉じてしまうために供試体の側面付近において水道が閉塞した可能性がある．

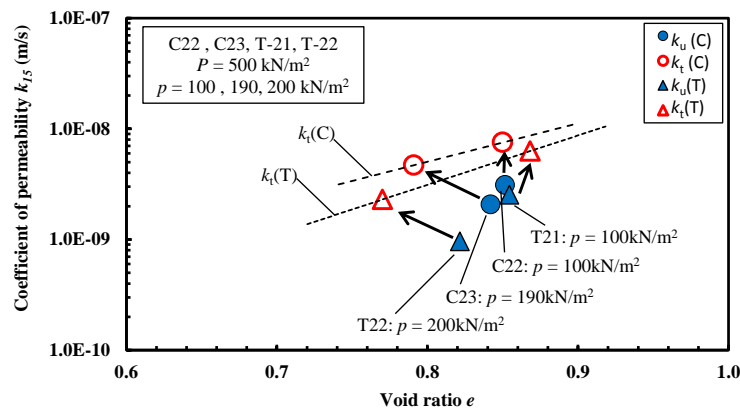


図 5-6 C・Tシリーズの間隙比と透水係数の比較

図 5-7 に T シリーズの圧密透水結果より IL 痕と IL 痕直交方向の透水係数を比較する. 透水係数は IL 痕と IL 痕直交方向で有意な違いは認められなかった. k_{pu} と比較すると $e = 0.8$ 以上では k_{pt} が k_{pu} よりも若干大きくなった. しかし, 図 5-5 で見られたような透水係数の増加は見られず, IL や SC の痕跡による透水係数の増加は見られなかった. このことは C シリーズ圧密透水試験の結果と同様である.

また, T シリーズと C シリーズの k_{pt} がほぼ同程度であることから, 凍結融解土の IL 痕方向と IL 痕直交方向の透水係数の関係が未凍結と一致していることは実験手法, つまりセルから押し出す時の外力による影響ではないことが確認された.

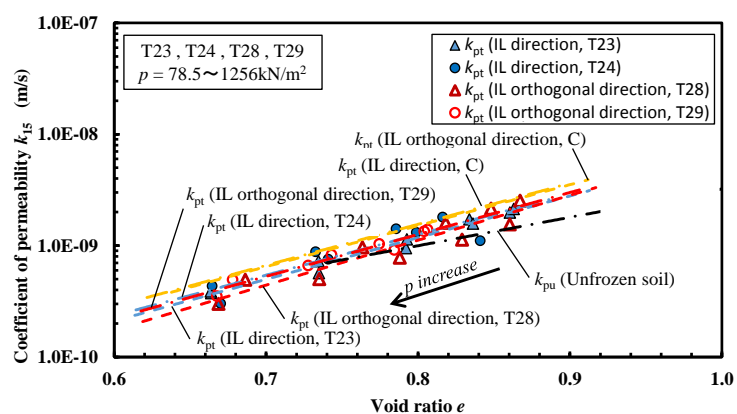


図 5-7 T シリーズにおける IL と SC の影響

5.3.4 間隙比と透水係数の関係

図 5-8 に藤森 14N における C, CS, T シリーズおよび圧密透水試験結果を間隙比と透水係数の関係で整理した。間隙比 e に対する凍結融解土の透水係数 k_t と未凍結土の透水係数 k_u の関係は C, CS, T シリーズにおいて同じ傾向であり、間隙比と透水係数の関係は 2 つのグループに分けることができる。ところが、圧密透水試験により得られた凍結融解後の透水係数 k_{pt} は k_t よりも k_u および k_{pu} に近い値を示した。

凍結融解による透水係数 k の増加は IL や SC の痕跡よりも凍結過程における水分移動、間隙水の凍結により土の間隙が開き、凍結融解後に間隙比が増加することが関係していると考えられる。しかし、土の間隙が開くことによる土の微細な間隙構造の変化は、圧密透水試験において圧密荷重を載荷することにより容易に凍結前の状態に戻ると考えられる。その結果、凍結融解実験により測定された凍結融解土の透水係数 k_t と圧密透水試験により得られた凍結融解土の透水係数 k_{pt} が一致しなかったものと考えられる。

さらに、C および T シリーズの k_{pt} が同程度であることから、 k_{pt} は C シリーズの圧密透水試験の供試体からサンプルを採取する際のセルからの押し出し作業による試料の乱れに影響されていないことが明らかになった。

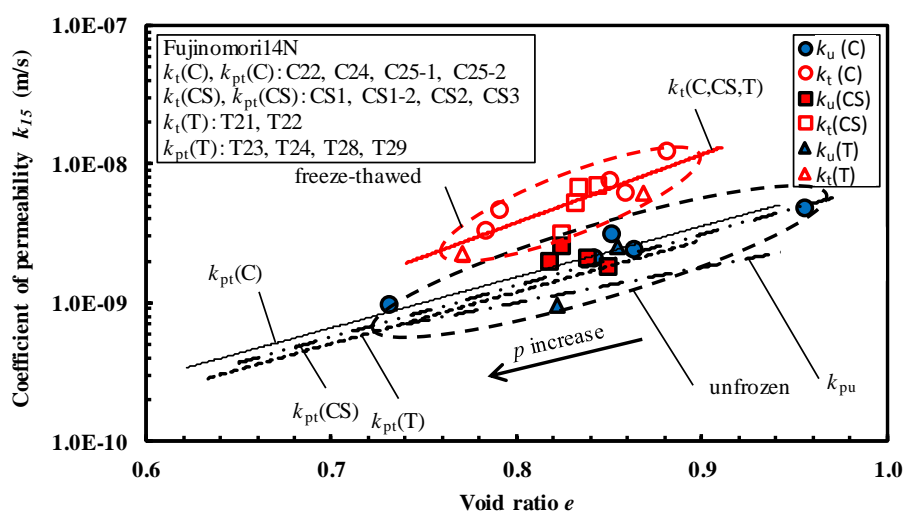


図 5-8 C, CS, T シリーズおよび圧密透水試験における間隙比と透水係数の関係

5.4 まとめ

凍結融解土の透水係数に及ぼす IL, SC の影響を検討するために, ステップ式とランプ式による鉛直凍結実験を行い, 凍結融解土の透水係数を比較した. また, 凍結融解試験が終了した供試体から圧密透水試験のサンプルを採取する際に供試体をセルから押し出すことにより土が乱される影響を検討するために比較実験として三軸凍結実験により得られた凍結融解土からサンプルを採取して圧密透水試験を行った. 実験の結果を以下にまとめる.

- (1) ステップ式とランプ式凍結では凍結融解土の透水係数に有意な差は認められなかった. つまり, 凍結融解による透水係数の変化は形成される IL の数量や厚さとも関係していないことが明らかとなった.
- (2) 鉛直凍結実験と三軸凍結実験のランプ式凍結の供試体から採取したサンプルで圧密透水試験を行ったところ, 両者に明確な違いはなかった. これにより鉛直凍結実験から圧密透水試験の試料を採取する時にアクリルセルから押し出されることによる影響は無視できるものと言えよう.
- (3) ステップ式凍結の供試体から採取したサンプルで圧密透水試験を行ったところ, Tw 側の IL 痕直交方向における透水係数は初期荷重段階において著しく大きくなり, 上載荷重の増加により急激に減少して Tc 側の IL 痕直交方向, IL 痕方向の凍結融解土や未凍結土と同等になった. 初期荷重においては IL 近傍の未凍結土で発生した SC が融解後にも痕跡として残り, 水道になった可能性がある. しかし, 上載荷重の増加により SC の痕跡は容易に閉じたものと考えられる.
- (4) 鉛直凍結実験および三軸凍結実験により得られた間隙比と透水係数の関係は未凍結土と凍結融解土で 2 つのグループに分けることができる. しかし, 凍結融解土からサンプルを採取した圧密透水試験では未凍結土の透水係数と同程度である.
- (5) 上記をまとめると凍結融解作用により土の間隙比と透水係数は変化するが, IL や SC が支配的な要因ではないことが明らかとなった.

第 6 章 人工地盤凍結工法における凍結融解土の透水係数の予測方法

6.1 目的

これまでの実験では凍結融解土の透水係数に影響を及ぼす要因について、図 6-1 に示すような流れで検討が行われた。一次元凍結融解鉛直透水実験では凍結融解土における IL 痕直交方向（鉛直方向）の凍結融解土の透水係数に影響

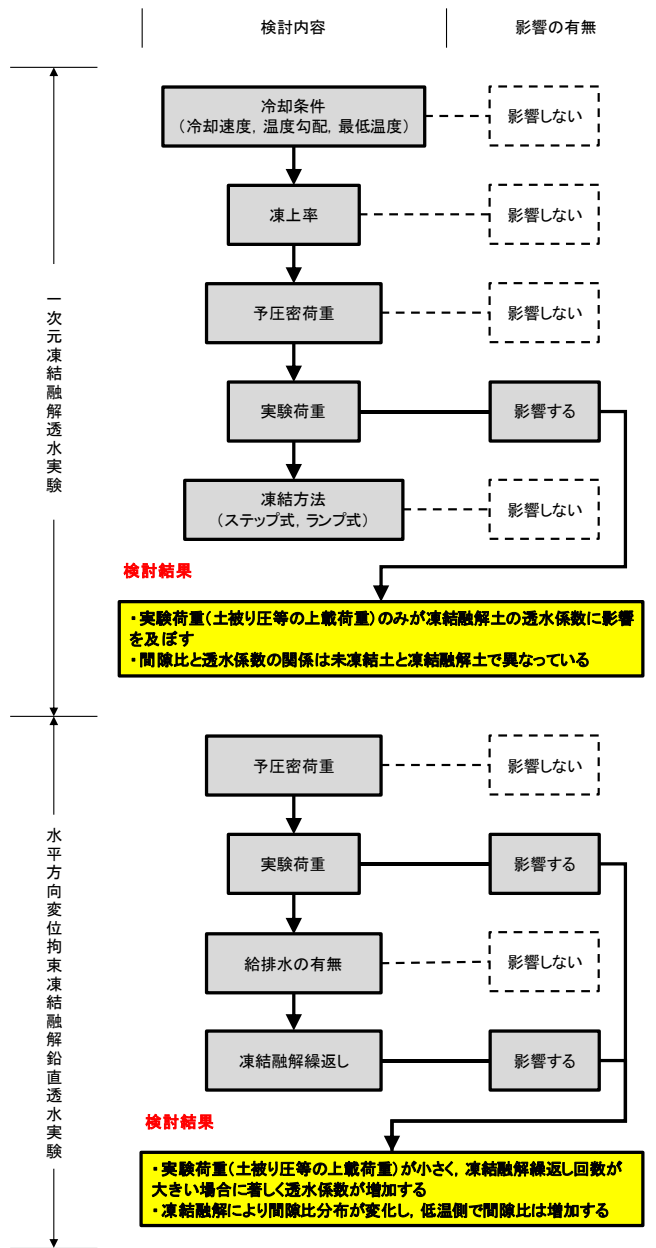


図 6-1 これまでの検討内容のフロー図

を及ぼす要因について検討し、凍結融解土の透水係数は土被り圧などの上載荷重のみが影響することが明らかになり、間隙比と透水係数の関係は未凍結土と凍結融解土ではあたかも異なった土のように振る舞うことが示された。

一方、水平方向変位拘束凍結融解鉛直透水実験では IL 痕方向の凍結融解土の透水係数に影響を及ぼす要因を検討した。その結果、IL 痕方向の透水係数も実験荷重に影響を受けることが明らかになり、凍結融解を繰り返すと実験荷重が小さい場合には著しく透水係数が増加することが示された。凍結融解後の間隙比分布は低温側で増加する傾向が認められ、凍結融解土の透水係数には低温側の間隙比の増加が関係していると考えられた。

そして、これまでの実験により、IL 痕方向と IL 痕直交方向の凍結融解土の透水係数を比較すると、IL 痕方向の透水係数が大きくなる傾向が認められていることから、AGF により凍結融解された土の透水係数を予測するためには、IL 痕直交方向の透水係数だけでなく、IL 痕方向の透水係数を求めることが必要であることが明らかになった。しかし、IL 痕方向の透水係数を求めるための一般的な実験方法が確立されていないため、直接的に実験で IL 痕方向の透水係数を求めることは困難である。そこで、簡易な方法で IL 痕方向の透水係数を予測することが必要となった。

本研究では一般的な凍結実験方法と簡単に求められる水平方向の間隙比分布によって IL 方向の透水係数を簡単な方法で算出する手法を提案する。

6.2 透水係数の予測方法

図 6-2 に凍結融解土の透水係数の予測手順を示す．透水係数の予測は準備，鉛直凍結実験，水平凍結実験の順番に行う．初めに，AGF を適用する地盤から試料土を採取する．その際，凍結融解土の透水係数に地盤の固結度は関係しないため，試料土は乱れていても，適当に予圧密することが可能であれば問題はない．そして，予圧密荷重を加えて供試体を作成し，一般的な装置で鉛直凍結実験を行う．その際，実際に現地で受ける上載荷重に対応した実験荷重下で凍

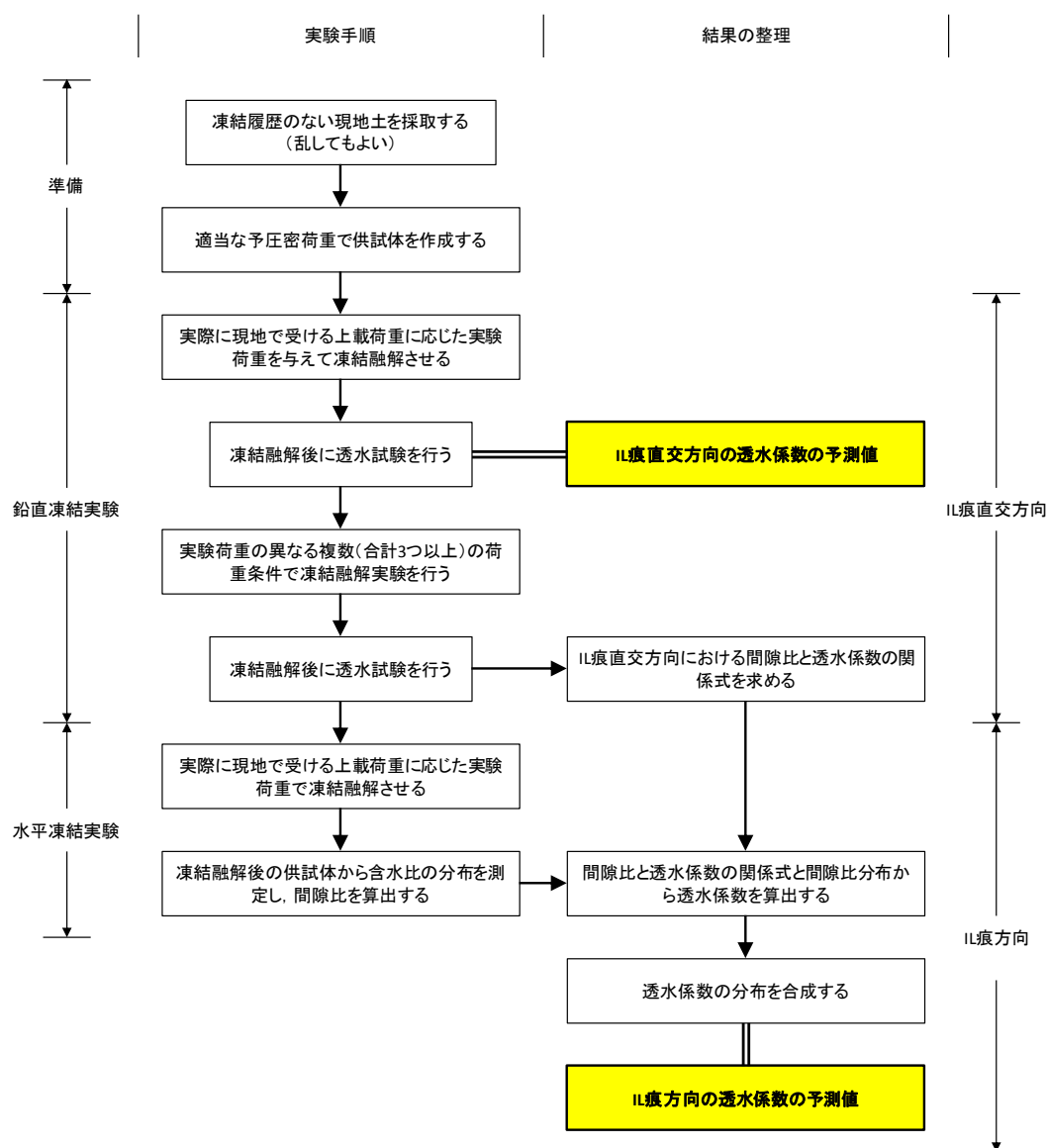


図 6-2 凍結融解土の透水係数の予測手順

結融解させ、透水係数を測定すれば IL 痕直交方向の透水係数を予測することができる。次に IL 直交方向の間隙比と透水係数を求める。そのために、実験荷重を数通り変化させた鉛直凍結実験を行う。IL 痕直交方向の間隙比と透水係数の関係式が得られれば、次に水平凍結実験を行う。水平凍結実験は鉛直方向に荷重を載荷し、水平方向に凍結を行う機能を有していればよい。水平凍結実験において実際に現地で受けると予想される上載荷重に対応した実験荷重を加えて凍結融解させ、供試体の低温側から高温側にかけての含水比分布を測定する。そして、含水比から間隙比を算出し、鉛直透水実験結果から求めた間隙比と透水係数の関係式を用いて、間隙比分布を透水係数分布に換算する。そして、透水係数を合成すれば、求めたい IL 痕方向の透水係数が予測される。以下ではこれまでに得られた実験結果より IL 痕方向の透水係数の予測値を算出する。

図 6-3 に鉛直実験で得られた間隙比と透水係数の一例を示す。鉛直実験は一般的な凍結実験方法に準拠しており、凍結融解後の間隙比と透水係数の関係を導くのは比較的容易である。図より、凍上性の異なる藤森 14N および黄土 14N についてそれぞれ独立した凍結融解土の間隙比と透水係数が得ることができる。藤森 14N については式(6.1)，黄土は式(6.2)に間隙比と透水係数の関係式の例を示す。

$$\text{藤森 14N} : k_{15} = 1.013 \times 10^{-12} \times \text{EXP} (10.470 \times e) \quad (6.1)$$

$$\text{黄土 14N} : k_{15} = 4.800 \times 10^{-18} \times \text{EXP} (22.950 \times e) \quad (6.2)$$

ここで、 e : 間隙比とする。

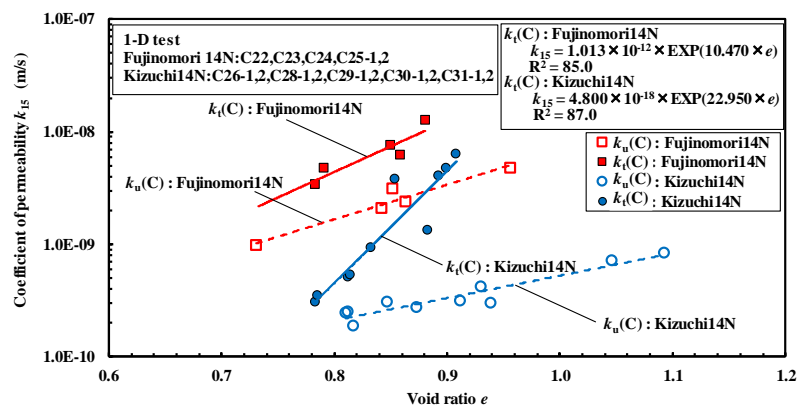


図 6-3 鉛直実験により得られた間隙比と透水係数の一例

黄土 14N の場合、まず、式(6.2)の間隙比 e に図 6-4 に示すような水平実験で得られる間隙比分布の e を代入することにより凍結融解後の透水係数 k_t' が算出される。

計算例として、K27 の間隙比分布から透水係数分布を算出する。表 6-1 に K27 における間隙比分布と透水係数分布を示す。Tw からの距離 $d = 7.3$ cm における間隙比 $e = 1.185$ は以下のように透水係数 k_t' へと換算される。

$e = 1.185$ を式(6.2)に代入する。

$$k_t' = 4.8 \times 10^{-18} \times \text{EXP} (22.950 \times 1.185) = 3.1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$$

上記の要領で間隙比分布を透水係数分布に換算すると表 6-1 のようになる。 k_t' と d の関係をプロットすると図 6-4 に示すようになる。

表 6-1 K27 における間隙比分布と透水係数分布

Distance from Tw side d (cm)	0.7	2	3.3	4.7	6	7.3
Void ratio e	0.839	0.83	0.895	1.042	1.111	1.185
Computed permeability k_t' (m/s)	1.1×10^{-9}	8.9×10^{-10}	4.0×10^{-9}	1.2×10^{-7}	5.7×10^{-7}	3.1×10^{-6}

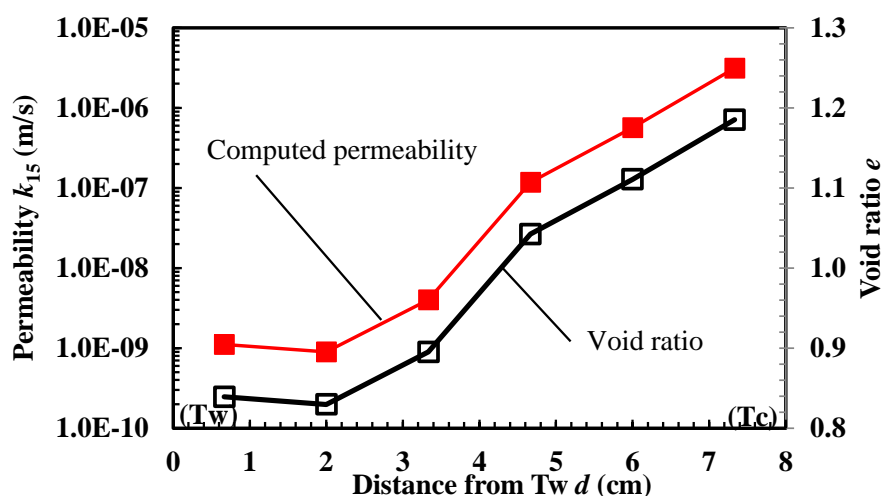


図 6-4 K27 における間隙比および透水係数分布

次に、 k_t' の分布から全体の透水係数を求めるために、図 6-5 に示すように透水係数の異なる土の等価透水係数を鉛直実験および水平実験の凍結融解後の供試体に適用して算出する．鉛直実験で得られた間隙比分布を合成する場合には図 6-5(a)，水平実験では図 6-5(b)を適用する．IL 痕直交方向の透水係数は、鉛直実験で得られた透水係数分布を式(6.3)に代入して等価透水係数 k_t' (CM)として求められる．また、IL 痕方向の透水係数は、水平実験で得られた透水係数分布を式(6.4)に代入して等価透水係数 k_t' (KM)として求められる．

$$k_t'(\text{CM}) = \frac{H}{\sum_{i=1}^n \frac{H_i}{k_t' i}} \quad (6.3)$$

$$k_t'(\text{KM}) = \frac{\sum_{i=1}^n D_i k_t' i}{\sum_{i=1}^n D_i} \quad (6.4)$$

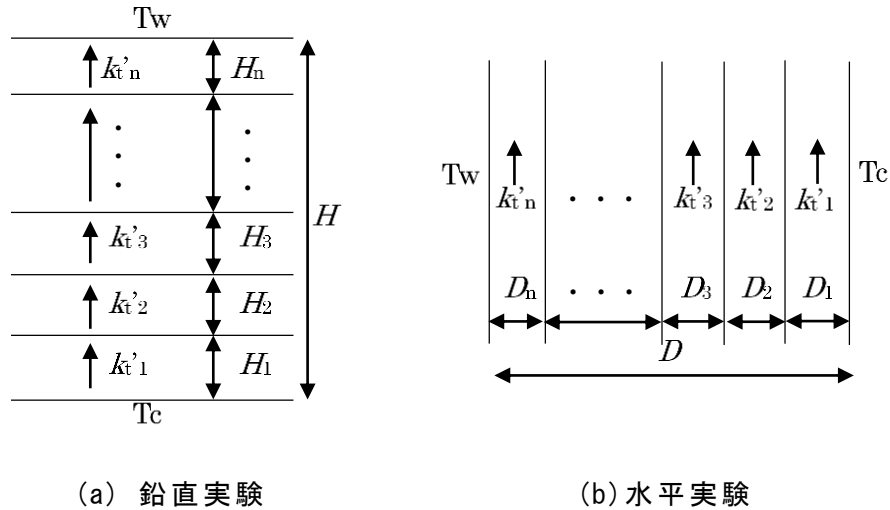


図 6-5 鉛直実験および水平実験における等価透水係数

6.3 予測結果の検証

6.3.1 アイスレンズ面直交方向の透水係数分布

(1) C シリーズにおける透水係数分布

図 6-6 に藤森 14N を用いた C シリーズ 3 ケース (C24, C25-1, C25-2) の凍結融解土の間隙比 e_t と透水係数 k の分布を示す. C24, C25-1, C25-2 の予圧密荷重 P はそれぞれ $P = 150, 300, 1000 \text{ kN/m}^2$ と異なるが, 実験荷重 p は共に $p = 100 \text{ kN/m}^2$ である. 図 6-6(a) より凍結融解後の間隙比 e_t は Tc 側で若干大きいのが全体的に間隙比分布に大きな偏りは認められなかった. 凍結前の間隙比 e_u が大きい C25-1 は凍結融解により e_t が e_u よりも小さくなり, e_u が小さい C25-2 では e_t が e_u よりも大きくなる傾向が見られた. 図 6-6(b) では凍結融解土の IL 痕直交方向の e と k の関係を利用して, 各点の間隙比から透水係数を計算している. これにより各点の凍結融解土の透水係数を比較すると, いず

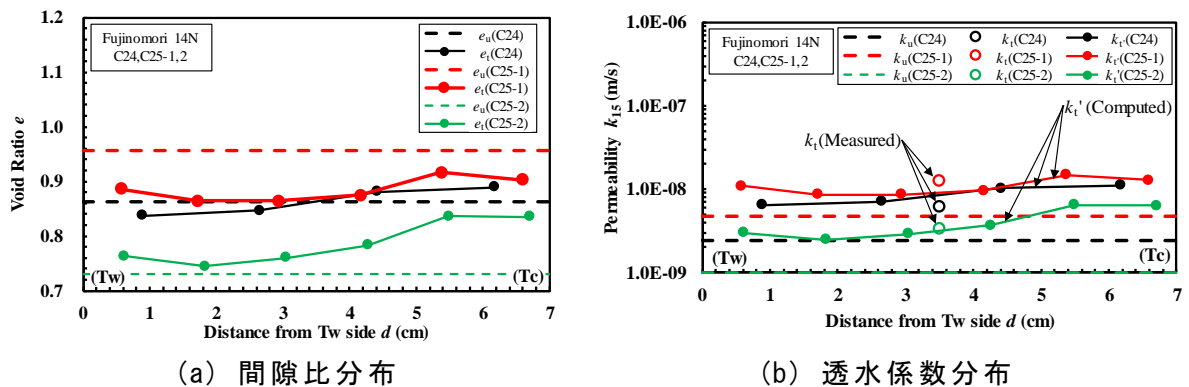


図 6-6 藤森 14N の凍結融解後の間隙比分布と透水係数分布の変化

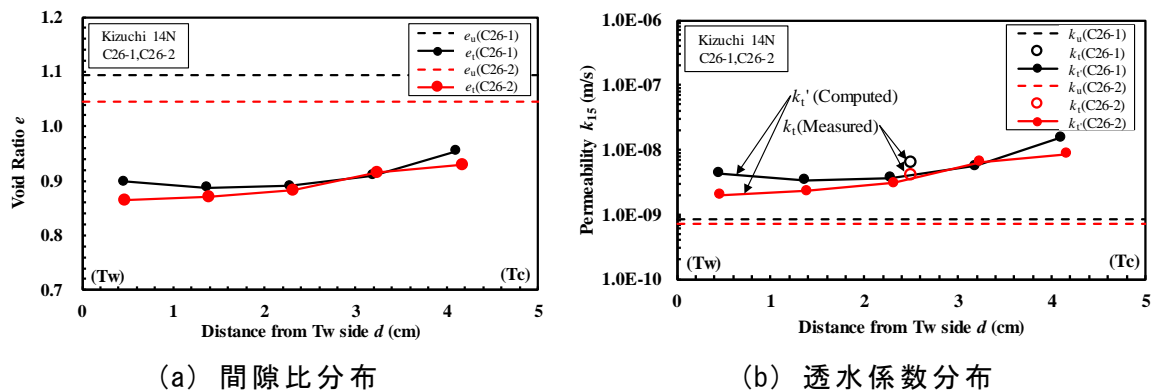


図 6-7 黄土 14N の正規圧密での間隙比分布と透水係数分布の変化

れも未凍結の k_u よりも凍結融解後の k_t が増加する傾向が見られた。また、変水位透水試験で実測された k_t は間隙比から算出した k_t' の平均とよく整合した。

図 6-7 に黄土 14N を用いた C26-1, C26-2 の凍結融解土の間隙比と透水係数の分布を示す。C26-1, C26-2 は表 3-3 に示すとおり、正規圧密状態であり予圧密荷重 P と実験荷重 p は等しく $P, p = 50, 75 \text{ kN/m}^2$ である。間隙比は全体的に凍結融解後に未凍結土よりも大幅に低下するが (図 6-7(a)), 透水係数は増加する傾向 (図 6-7(b)) が見られた。間隙比 e と透水係数 k_t' は共に Tc 側で若干大きくなる傾向が認められた。

図 6-8 に C28-1, C28-2 における間隙比分布と透水係数分布の変化を示す。C28-1, C28-2 はそれぞれ $p = 150, 200 \text{ kN/m}^2$, $P = 300, 400 \text{ kN/m}^2$ であり、共に OCR=2 である。間隙比 e は未凍結土と比較して凍結融解土が小さくなったが (図 6-8(a)), 透水係数は全体的に変化が小さい (図 6-8(b))。

図 6-9 に C31-1, C31-2 における間隙比分布と透水係数分布を示す。C31-1, C31-2 は実験荷重を共に $p = 100 \text{ kN/m}^2$ とし、予圧密荷重を $P = 200, 500 \text{ kN/m}^2$

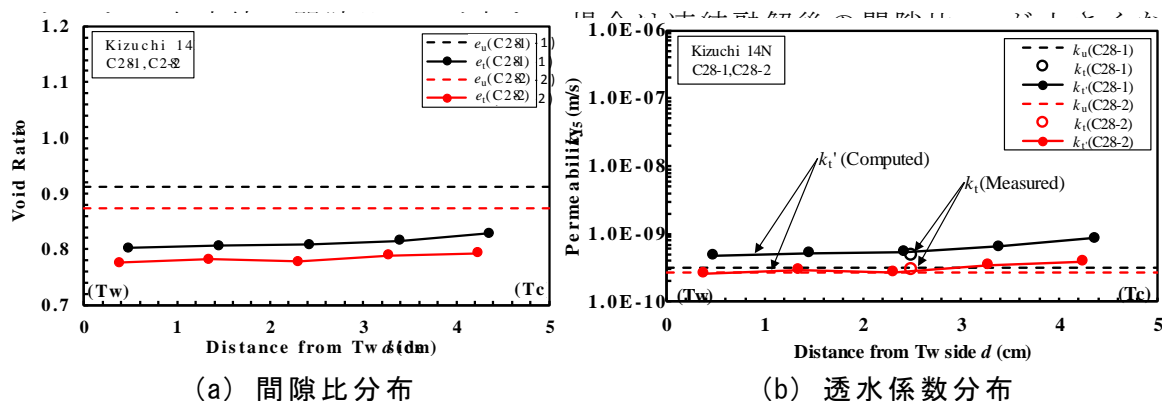


図 6-8 黄土 14N の OCR 一定の予圧密・実験荷重による間隙比分布と透水係数分布の変化

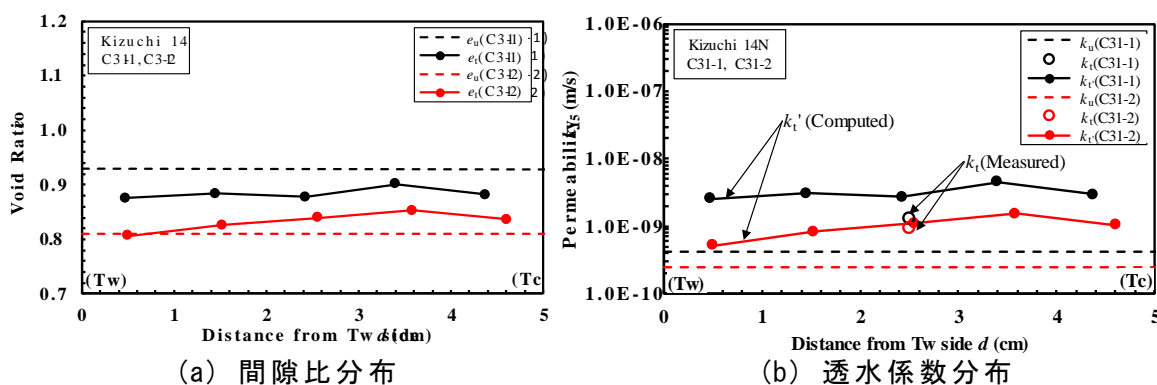


図 6-9 黄土 14N の予圧密荷重による間隙比分布と透水係数分布の変化

り、 e_u が小さい場合には e_t が大きくなる傾向が認められた (図 6-9(a)). 一方、透水係数は共に未凍結の透水係数 k_u よりも凍結融解後の k_t が大きくなる傾向がみられた. 間隙比分布から計算した透水係数 k_t' と変水位透水試験により得られた k_t を比較すると、図 6-7(b), 図 6-8(b), 図 6-9(b)のいずれにおいても k_t' と k_t はよく整合していた.

C シリーズの間隙比 e と透水係数 k についてまとめると、未凍土の間隙比と比較して凍結融解後の間隙比分布は Tc 側において若干増加する傾向が認められた. 凍結融解後の間隙比分布と IL 痕直交方向の間隙比と透水係数の関係式を用いて算出された透水係数は、変水位透水試験で得られた透水係数と同程度の値であった.

(2) CS シリーズにおける透水係数分布

図 6-10 にステップ試験（CS シリーズ）における透水係数分布を示す．凍結融解後の透水係数 k_t' を間隙比から算出すると， k_t' は凍結条件に関係なく同程度であり，未凍結土の透水係数 k_u よりも増加した．また， k_t' は全体的に偏りがなかった．CS3 を除くと k_t' と変水位透水試験で実測された凍結融解土の透水係数 k_t はほぼ同じ値となった．CS3 は間隙比から算出した透水係数よりも変水位透水試験により実測した透水係数が小さくなった．

図 6-11 に CS3 における IL 発生状況を示す．CS3 では実験中の T_w を $+3^{\circ}\text{C}$ で維持しており， T_w 付近は未凍結土のままである．そのため，変水位透水試験では T_w 付近の未凍結土に影響を受けて透水係数は小さくなり，凍結融解土と未凍結土の透水係数は同程度となった．

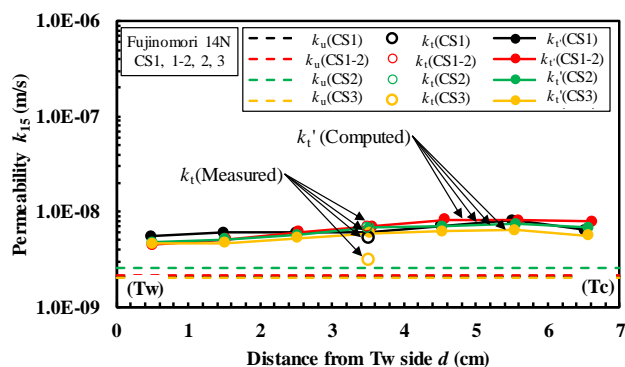


図 6-10 ステップ式凍結による透水係数分布

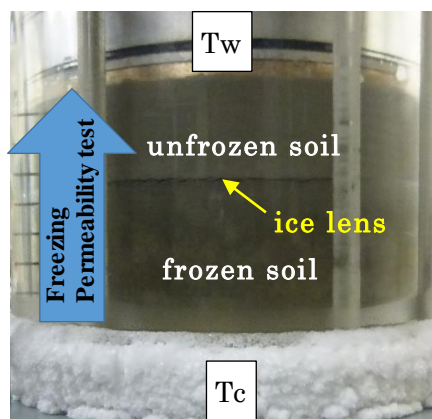


図 6-11 CS3 における IL 発生状況

6.3.2 アイスレンズ面方向の透水係数分布

(1) 藤森 14N を用いた実験における透水係数分布

図 6-12 に実験荷重及び予圧密荷重による透水係数分布の違いを示す．実験荷重の影響を検討するために，K21, K22, K30 では予圧密荷重 $P = 500 \text{ kN/m}^2$ 一定とし，実験荷重 p はそれぞれ $p = 100, 200, 50 \text{ kN/m}^2$ とした．全体的に凍結融解土の間隙比 e_t から算出された凍結融解土の透水係数 k_t' は未凍結の透水係数 k_u よりも大きくなり， p が小さいほど Tc 側の透水係数 k_t' は大きくなる．一方，Tw 側では k_t' に実験条件による違いが認められない．

予圧密荷重の影響を検討するために，K25, K30 では $p = 50 \text{ kN/m}^2$ 一定で $P = 300, 500 \text{ kN/m}^2$ とした．予圧密荷重の小さい方が Tc 側の k_t' が大きくなる．透水実験で実測された透水係数 k_t および間隙比から算出された k_t' は，実験荷重および予圧密荷重が共に小さい K25 ($P = 300 \text{ kN/m}^2$, $p = 50 \text{ kN/m}^2$) において共に大きかった． k_t は k_t' とよく対応しており，間隙比の増加が凍結融解による透水係数の増加に影響していると考えられる．

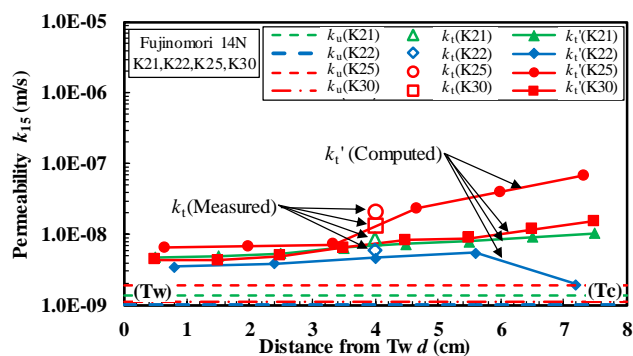


図 6-12 予圧密・実験荷重による透水係数分布の変化

図 6-13 に閉式凍結における透水係数分布を示す．表 4-1 に示すように K23 は予圧密荷重 P および実験荷重 p が共に小さく $P = 300 \text{ kN/m}^2$, $p = 50 \text{ kN/m}^2$ である．K28, K2 は共に $P = 500 \text{ kN/m}^2$ であり，K28 は $p = 50 \text{ kN/m}^2$ であり，K29 は $p = 200 \text{ kN/m}^2$ である．図 4-13 で見られるように凍結融解土の間隙比 e_t は Tw 側で減少し，Tc 側で増加する傾向が見られる．一方，間隙比分布から算出した透水係数 k_t' は未凍結土の透水係数 k_u よりも大きくなり，Tc 側で増加する． P および p が最少の K23 において， k_t' は最大となる．実験荷重 p の違いを K28, K29 で比較すると，両者の透水係数 k_t' に有意な差は認められない．透水実験の実測値 k_t は k_t' 分布とよく対応しており，このことから凍結融解による間隙比の増加が透水係数の増加に対応していると考えられる．

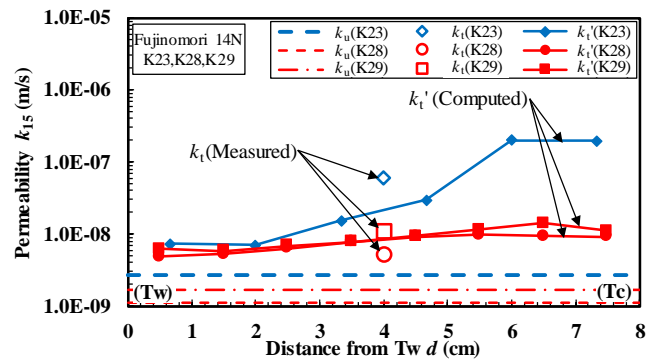


図 6-13 閉式凍結における透水係数分布の変化

図 6-14 に実験荷重を低荷重とした場合の凍結融解繰り返しによる透水係数分布の変化を示す。K30, K31, K32 では実験荷重 $p = 50 \text{ kN/m}^2$ で凍結融解繰り返し回数 $n = 1, 3, 5$ 回とした。間隙比から算出した凍結融解土の透水係数 k_t' はいずれも未凍土の透水係数 k_u と比較して増加し、特に $n = 3, 5$ では k_t' が著しく増加した。透水試験で実測した凍結融解土の透水係数 k_t は Tc 側の k_t' と同程度の値となった。

図 6-15 に実験荷重を高荷重とした場合の凍結融解繰り返しによる透水係数分布の変化を示す。K22, K33, K41 では $p = 200 \text{ kN/m}^2$ で $n = 1, 3, 5$ 回の凍結融解を繰り返した。凍結融解により k_t' は k_u と比較して全体的に増加しており、特に $n = 3, 5$ では Tc において増加量が大きく k_t' の分布に偏りが見られた。 k_t は図 6-9 や 6-10 と同様に Tc 側の k_t' に近い値となった。

以上をまとめると、間隙比分布から算出した凍結融解土の IL 直交方向の透水係数分布は間隙比の増加に対応して増加し、Tc 側で増加量が大きくなる傾向がみられる。そして、変水位透水試験により得られる凍結融解土の透水係数は Tc 側で増加した透水係数に強く影響されることが明らかになった。

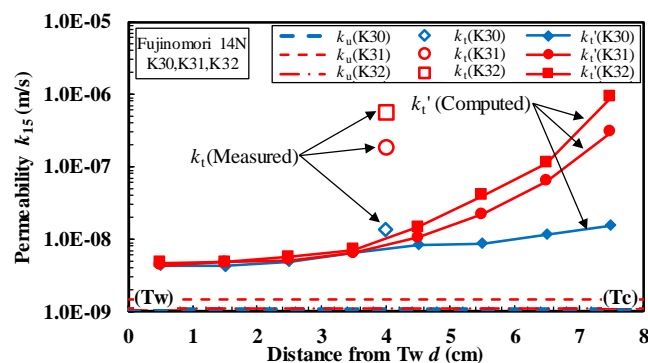


図 6-14 低荷重時の凍結融解繰り返しによる透水係数分布の変化

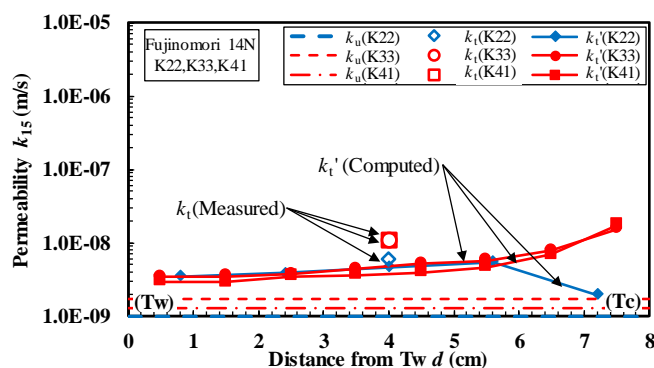


図 6-15 高荷重時の凍結融解繰り返しによる透水係数分布の変化

(2) 黄土 14N を用いた実験における透水係数分布

図 6-16 に黄土 14N を用いた水平実験 (K26, K27) における凍結融解後の透水係数分布を示す. K26 および K27 はそれぞれ冷却速度 $dT/dt = 0.2, 0.4 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{hour}$ で凍結させたものである. 凍結融解後の間隙比から算出した透水係数 k_t' の分布は K26 と K27 で同じ傾向を示した. k_t' は T_c に近づくほど著しく増加し, T_c 直近で k_t' が k_u の 3~4 オーダー増加した. 変水位透水試験で実測した透水係数 k_t は T_c 側の k_t' と大きな違いはない.

図 6-17 に K26 で見られた凍結融解時の IL の痕跡の状況を示す. K26 では凍

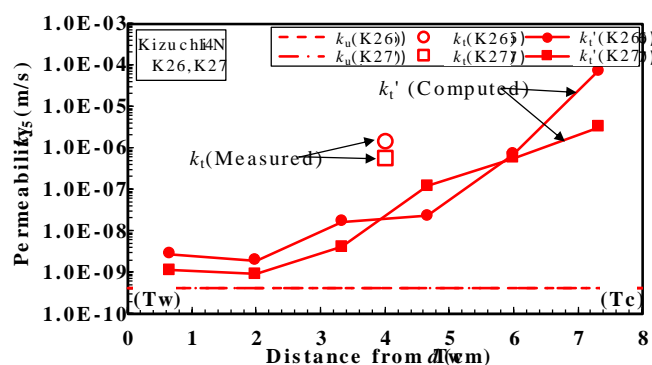
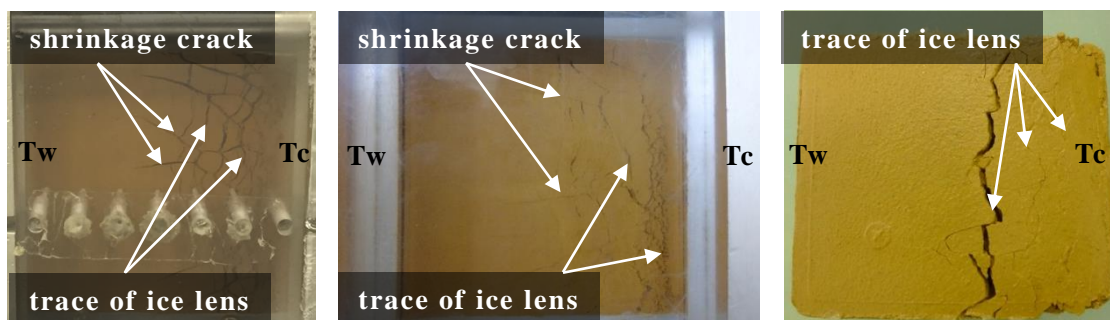


図 6-16 黄土 14N を用いた水平実験における透水係数分布の変化

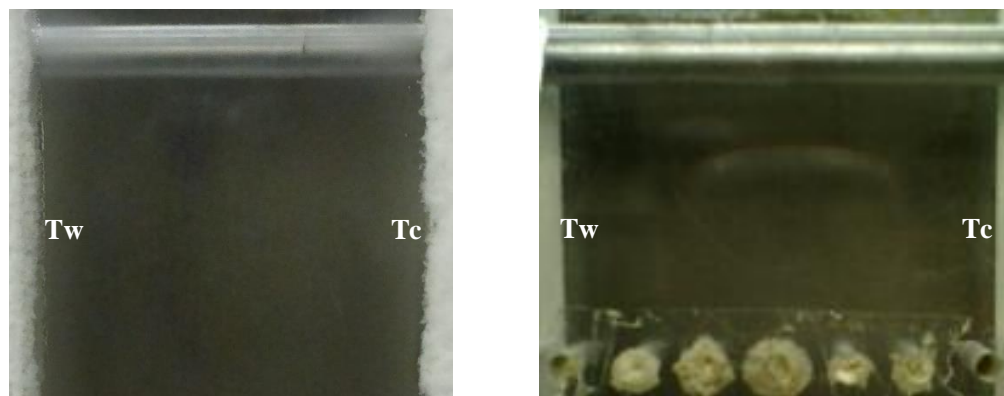


(a) 凍結時の側面の状態 (b) 融解後の側面の状況 (c) 供試体上面の状況

図 6-17 K26 (黄土 14N) における IL の痕跡の状況

結時の供試体において IL や SC が発生し（図 6-17(a)），凍結融解後には IL の痕跡が亀裂として残り（図 6-17(b)），実験終了後に供試体を取り出すと上面においても複数の IL の痕跡が認められた（図 6-17(c)）。図 6-18 に示した藤森 14N (K31) における凍結時と凍結融解後の供試体の側面の状況と比較すると，藤森 14N では凍結中および凍結融解後に視覚的には IL や SC が認められなかった。

以上の結果より，藤森 14N と比較して凍上性の高い黄土 14N では凍結時に IL や SC の発生が視覚的に確認された。IL の痕跡が凍結融解後の透水係数増加の原因となるのであれば，間隙比分布から算出した凍結融解土の透水係数分布は透水実験により実測した透水係数と対応しないはずである。しかし，図 6-16 に示すように両者は対応しているため，凍結融解による IL 痕方向の透水係数の増加は間隙比の増加が要因となっていると言えよう。



(a) 凍結時の状況

(b) 凍結融解後の側面の状況

図 6-18 K31（藤森 14N）における実験状況

6.3.3 透水係数の予測値の検証

図 6-6 から図 6-16 に示した透水係数分布をそれぞれ合成することで凍結融解後の透水係数を予測することが出来る．鉛直実験では式 (3)，水平実験では式 (4) により透水係数分布を合成し，透水係数の予測値である等価透水係数 $k_t'(CM)$ ， $k_t'(KM)$ が算出される．図 6-19 に等価透水係数 $k_t'(CM)$ ， $k_t'(KM)$ と透水試験で実測した透水係数 k_t との比較を示す．全体的には藤森 14N および黄土 14N の予測値である等価透水係数 $k_t'(CM)$ ， $k_t'(KM)$ は実測値である k_t はよく対応している．図 6-19(a) の K31，K32 では若干 k_t が $k_t'(KM)$ より大きいのが、これは低荷重において凍結融解を繰り返したものである．

図 6-20 に間隙比と透水係数および等価透水係数 $k_t'(CM)$ ， $k_t'(KM)$ の関係を

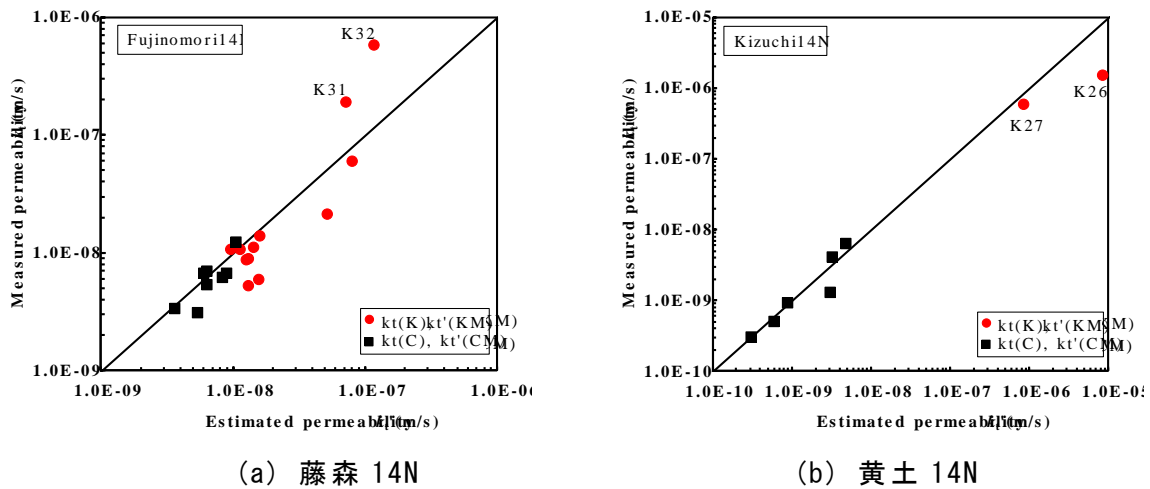
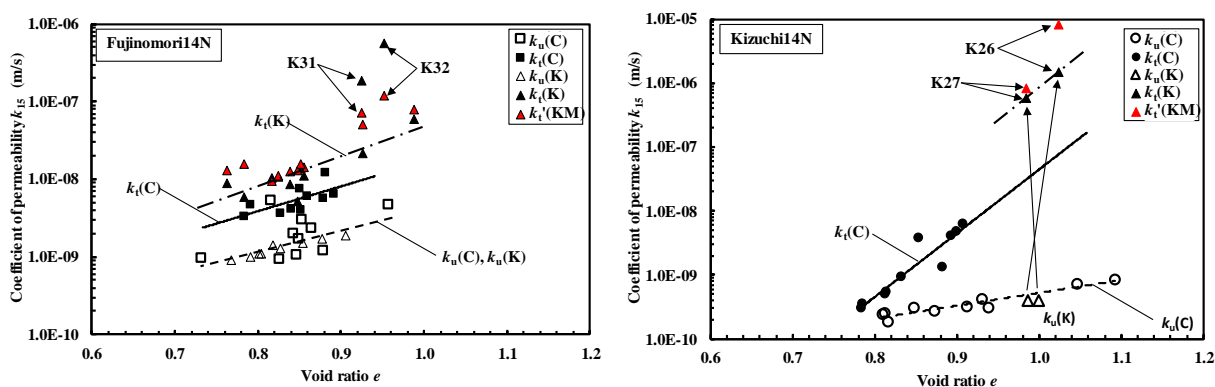


図 6-19 等価透水係数と変水位透水試験の実験値との比較

示す．図 6-20(a)より，藤森 14N では凍結融解土における IL 方向の透水係数の予測値（等価透水係数） $k_t'(KM)$ は，透水試験で得られた凍結融解土の間隙比 e と透水係数 k との関係によく対応した．図 6-20(b)より，黄土 14N も透水試験により得られた e と k の関係によく対応した．

図 6-21 は図 6-20(a)に図 6-20(b)を上書きしたものである．藤森 14N と黄土 14N はともに間隙比 e と透水係数 k との関係は，未凍結土と凍結融解土で全く異なった関係を示す． e と k の関係を示す直線の勾配は，凍上性が高い黄土 14N の方が藤森 14N よりも急であり，凍結融解土においては黄土 14N の方が間隙比の増加に対する透水係数の増加が顕著であるといえる．



(a) 藤森 14N (b) 黄土 14N
図 6-20 間隙比と透水係数および等価透水係数の関係

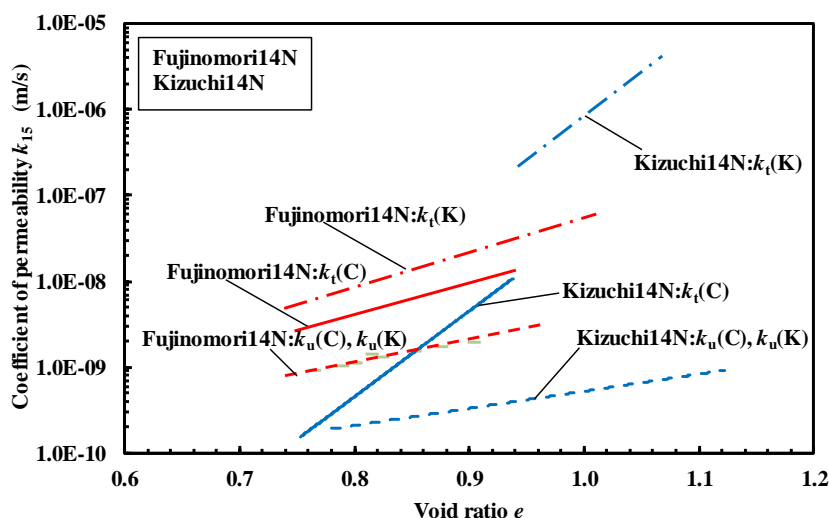


図 6-21 等価透水係数と変水位透水試験の実験値との比較

6.4 まとめ

人工地盤凍結工法において凍結融解後の透水係数が問題となる場合には、IL 痕直交方向の透水係数だけでなく、IL 痕方向の透水係数を予測する必要がある。そこで、鉛直実験で求めた間隙比と IL 痕直交方向の透水係数の関係式と水平実験の供試体の間隙比分布とから算出した透水係数を合成して得られた等価透水係数を予測値として評価を試みた。以下に検討の結果を示す。

- (1) 鉛直実験により求めた間隙比と透水係数の関係式および水平実験で得られた凍結融解土の間隙比分布から透水係数の分布を算出することが可能であった。
- (2) 水平実験により得られた IL 痕方向の透水係数分布では Tc 側の透水係数が増加する。特に、凍上性が高い黄土 14N においては Tc 側の透水係数が著しく増加する傾向が認められた。一方、鉛直実験で得られた IL 痕直交方向の透水係数分布は Tc 側で若干透水係数が大きくなるものの、水平実験のような透水係数分布の偏りは見られない。
- (3) 変水位透水試験で実測された IL 痕方向の透水係数は、間隙比から算出した透水係数の Tc 側の値に近くなったことから、IL 痕方向の透水係数は Tc 側の透水係数増加の影響を強く受けることが明らかになった。
- (4) 凍上性の高い黄土 14N は凍結時に発生した IL や SC が凍結融解後にも痕跡として残っていることが視認されたが、凍結融解後の IL 痕方向の透水係数は間隙比から算出した透水係数と対応している。このことは、凍結融解による IL 痕方向の透水係数の増加を決定する要因としては IL の痕跡ではなく、間隙比の増加が支配的であることを示す。
- (5) 透水係数分布から凍結融解後の透水係数を評価するために、透水係数分布を合成して等価透水係数を求めた。
- (6) 等価透水係数と透水実験から得られた透水係数を比較すると両者はよく対応した。
- (7) 水平方向に凍結融解させ鉛直方向の透水係数を実測する実験方法は確立されていないが、一般的な鉛直凍結実験により凍結融解土の間隙比と IL 痕直交方向の透水係数の関係式を求め、変水位透水試験を省略した水平凍結実験により凍結融解後の間隙比分布を求めることで、凍結融解土の IL 痕方向の透水係

数が簡単に予測できることが明らかになった.

第 7 章 結論

本研究では凍結融解した飽和細粒土の透水係数を，従来の IL 痕直交方向に加えて，新たに開発した実験装置を用いて IL 痕方向についても検討し，透水係数に影響を及ぼす要因を明らかにした．そして，本研究の目的である，自然環境の季節凍土と人工地盤凍結工法（AGF）で構築された凍土壁について凍結融解後の透水係数を予測する実験的方法を提案した．

本研究で得られた結果を以下に示す．

第 2 章では凍結融解土の IL 痕直交方向の透水係数に影響を及ぼす要因を明らかにするために，冷却方法として冷却速度，最低冷却温度，温度勾配を変えた実験を行った．結果を以下にまとめる．

- (1)冷却速度，最低冷却温度，温度勾配と凍結融解土の透水係数との間には有意な関係は認められなかった．
- (2)凍上率は凍結融解土の透水係数に関係しない．つまり，IL が発生する量は凍結融解土の透水係数に影響しないことが明らかになった．

第 3 章では凍結融解土の IL 痕直交方向の透水係数に影響を及ぼす要因を明らかにするために，地盤の固結度（予圧密荷重）や上載荷重（実験荷重）の影響を検討した．結果を以下にまとめる．

- (1)凍結融解土の透水係数は予圧密荷重ではなく，実験荷重にのみ影響される．
- (2)間隙比と透水係数の関係は未凍結土と凍結融解土でそれぞれ異なった土のように振る舞う．
- (3)凍結融解土は凍結融解中に受けた実験荷重に応じた間隙比と透水係数に収束する．
- (4)実験荷重が大きくなるほど凍結融解による透水係数の増加量が小さくなり，未凍結土とほぼ変わらない値まで凍結融解土の透水係数が低下する．

第 4 章では新たに開発した実験装置で凍結融解土の IL 痕方向の透水係数に影響を及ぼす要因を明らかにした．実験では地盤の固結度（予圧密荷重），上載荷重（実験荷重），給排水の有無，凍結融解繰り返し回数の影響について検討した．また，凍結融解土の間隙比分布を求め，透水係数変化との関係を検討した．さらに，凍結融解した供試体から採取した試料で圧密透水試験を行い，段階的に

荷重を加える過程での透水係数を検討した．結果を次に示す．

- (1)凍結融解土の透水係数に影響を及ぼす要因は，実験荷重が支配的である．
- (2)実験荷重が小さく凍結融解繰り返し回数が多い場合には凍結融解土の透水係数が激しく増加する．
- (3)IL 痕直交方向と IL 痕方向を比較すると IL 痕方向の透水係数が大きい．
- (4)凍結融解土の間隙比分布には偏りが認められ，低温側で間隙比が増加する傾向が認められた．
- (5)圧密透水試験では凍結融解土の透水係数が未凍結土と同程度まで低下する傾向が認められた．また，IL 痕方向と IL 痕直交方向で凍結融解土の透水係数に違いはなかった．

第 5 章では，これまで主に行われたランプ式凍結とは異なり，IL と SC を顕著に発生させるステップ式凍結で IL と SC の影響を検討した．結果を以下に示す．

- (1)ステップ式とランプ式では凍結融解土の透水係数に有意な差は認められなかった．つまり，IL が形成される厚さは凍結融解土の透水係数に関係しない．
- (2)圧密透水試験では荷重段階初期において SC の痕跡が要因と考えられる透水係数の増加が見られたが，上載荷重の増加により急激に低下した．これは SC の痕跡が上載荷重の増加により容易に閉じた可能性がある．

第 6 章では凍結融解土の透水係数を予測する方法を提案した．結果を以下に示す．

- (1)IL 痕直交方向の透水係数は現地土を採取して適当な予圧密で供試体を作成し，実際に現地で受ける上載荷重に応じた実験荷重で凍結融解させ，透水試験を行うことで予測できる．
- (2)IL 痕方向の透水係数を予測する方法が提案された．水平方向に凍結融解させて，鉛直方向に上載荷重を載荷する機能を有する実験装置で凍結融解して低温側から高温側の間隙比分布を求め，凍結融解土の IL 直交方向の透水係数と間隙比の関係式と間隙比から透水係数を算出する．そして，その透水係数を合成すれば，IL 痕方向の透水係数の予測値が可能である．
- (3)IL 痕方向の透水係数の予測値と透水試験の実測値はよく対応した．

以上のように本研究では凍結融解土の透水係数に影響を及ぼす要因を IL 痕方向と IL 痕直交方向それぞれにおいて明らかにした。そして、実験方法が確立されていない凍結融解土の IL 痕方向の透水係数が IL 痕直交方向の透水係数よりも大きくなる傾向を示した。さらに、凍結融解土の IL 痕方向および IL 痕直交方向の透水係数を実験的に予測する簡易な方法を提案した。これらは凍土壁が部分的および完全に融解した場合において、凍土壁から構内に流入する水量を予測し、構内に設置するディープウェル本数等を設計する際に役立つ。これは、凍土壁を汚染物質の封じ込め等に適用する際に汚染物質の拡散を防ぐ有用な手段となる。

研究業績

(1)査読論文

著者	論文タイトル	掲載書籍，雑誌，HP，ページ数	発行年	博士論文引用先
Go Hirose Yuzuru Ito	Experimental study on the permeability change of fine-grained soil by freeze-thaw effect	The 11th International Symposium on Cold Regions Development (ISCORD2016), USB 6-2 IC-013	2016	第 4 章
廣瀬剛，伊藤譲	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－	摂南大学融合科学研究所論文集，第 2 巻，第 1 号，pp.40-50	2016	第 4 章
廣瀬剛，伊藤譲， 石川達也，赤川敏， 所哲也，大西有三， 上田保司	飽和細粒土の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実験的研究	第 12 回地盤改良シンポジウム論文集，3-3，pp.123-130	2016	第 5 章
廣瀬剛，伊藤譲， 石川達也，赤川敏	凍結融解土の透水係数の実験的予測方法	土木学会論文集 C(地圏工学)，Vol.73，No.2，pp.131-140	2017	第 3 章
Go Hirose Yuzuru Ito	Experimental estimation of permeability of freeze-thawed soils in artificial ground freezing	Proceedings of the International Scientific Conference Transportation Geotechnics and Geocology(TGG 2017) , Procedia Engineering , Vol.189, pp.332-337	2017	第 6 章
廣瀬剛，伊藤譲	凍結融解作用による透水係数の変化とアイスレンズの痕跡との関係	材料，Vol.67，No.1，pp.28-33	2018	第 5 章

著者	論文タイトル	掲載書籍，雑誌，HP，ページ数	発行年	博士論文 引用先
廣瀬剛，伊藤譲， 石川達也，赤川敏， 所哲也，大西有三	飽和細粒土の凍結融解前後における熱流直角方 向の透水係数変化に関する実験	平成 27 年度土木学会関西支部年次学術講演会 講演概要集，Ⅲ-13	2015	第 4 章
廣瀬剛，伊藤譲， 石川達也，赤川敏， 所哲也，大西有三， 上田保司	飽和細粒土の凍結融解前後におけるアイスレン ズ面方向の透水係数変化に関する実験	土木学会 第 70 回年次学術講演会講演概要集， Ⅲ-281，pp.561-562	2015	第 4 章
廣瀬剛，伊藤譲， 石川達也，赤川敏， 所哲也，大西有三	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について(1)	土木学会 第 71 回年次学術講演会講演概要集， Ⅲ-314，pp.627-628	2016	第 4 章
廣瀬剛，伊藤譲， 井上拓人，阪部秀 雄	凍結融解現象と陽イオン交換を利用した汚染土 の洗浄に関する実験	第 51 回地盤工学研究発表会，B-00，1080， pp.2159-2160	2016	
廣瀬剛，伊藤譲， 井上拓人，阪部秀 雄，芮大虎	凍結融解回数およびイオン交換物質の供給方法 が汚染土壌の洗浄効果に及ぼす影響	第 52 回地盤工学学会研究発表会，D-02，0163， pp.323-324	2017	
廣瀬剛，伊藤譲	載荷条件下における不凍水量と透水係数の関係	土木学会 第 72 回年次学術講演会講演概要集， Ⅲ-446，pp.891-892	2017	

(3)共著

著者	論文タイトル	掲載書籍, 雑誌, HP, ページ数	発行年	博士論文 引用先
伊藤謙, 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, D-08, 448, pp.895-896	2015	第 2 章
井上拓人, 伊藤謙, 廣瀬剛, 阪部秀雄	凍結融解とイオン交換反応を利用した汚染土壌の洗浄技術	平成 28 年度土木学会関西支部年次学術講演会 講演概要集, III-25	2016	
井上拓人, 伊藤謙, 廣瀬剛, 阪部秀雄, 芮大虎	凍結融解とイオン交換を利用した洗浄技術の特性について	土木学会 第 71 回年次学術講演会講演概要集, III-078, pp.155-156	2016	
伊藤謙, 廣瀬剛, 石川達也, 赤川敏, 所哲也, 大西有三	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について(2)	土木学会 第 71 回年次学術講演会講演概要集, III-315, pp.629-630	2016	第 4 章
井上拓人, 伊藤謙, 廣瀬剛, 阪部秀雄, 芮大虎	凍結融解とイオン交換反応を利用した土壌洗浄 実験における洗浄効率に及ぼす影響	第 12 回地盤改良シンポジウム論文集, 6-6, pp.277-282	2016	
井上拓人, 伊藤謙, 廣瀬剛, 阪部秀雄, 芮大虎	凍結融解現象とイオン交換反応を利用した細粒 土の洗浄技術に関する実験的研究	摂南大学融合科学研究所論文集, 第 2 巻, 第 1 号, pp.32-39	2016	
井上拓人, 伊藤謙, 廣瀬剛, 阪部秀雄, 芮大虎	凍結融解とイオン交換反応を利用した洗浄技術 における洗浄効率改善のための実験的検討	土木学会 第 72 回年次学術講演会講演概要集, III-214, pp.427-428	2017	
Yuzuru Ito, Go Hirose	Mechanism of permeability of freeze-thawed soil	The 2 nd Asian Conference on Permafrost, Poster	2017	

謝辞

本論文は筆者が摂南大学大学院理工学研究科創生工学専攻博士後期課程に在籍中の研究成果をまとめたものです。本論文を提出するにあたって、多くの方々のご指導とご助力をいただきました。

摂南大学理工学部教授 伊藤譲先生には私が摂南大学土木工学科に在籍の折、大学院に導いてくださったことにはじまり、研究の初歩から修士論文作成までご指導いただきました。現在勤めております奥村組土木興業株式会社を紹介していただいたのも伊藤先生でした。そして、今度は社会人ドクターとして本研究に従事する機会をいただき、指導教官および主査として力不足の私を辛抱強く、研究の遂行にあたって終始、ご指導いただきました。また、研究を行う過程で凍土遮水壁研究会、国際会議などに参加させていただいたことで、多くの人々と知り合うことができました。これらは私にとって何にも換えがたい貴重な財産となりました。深く御礼申し上げます。

摂南大学理工学部教授 熊野知司先生、川野常夫先生には副査として論文作成に当たり貴重なご教示を賜りました。先生方のご助言により、本論文の完成度が高まりました。この場を借りて深く感謝いたします。

凍土遮水壁研究会の京都大学名誉教授 大西有三先生、低温圏研究所 赤川敏様、北海道大学大学院工学研究院教授 石川達也先生、苫小牧工業高等専門学校環境工学科助教 所哲也先生、株式会社精研 上田保司様、久門義史様には、本研究について多くのご助言をいただき、研究の方向性を定め、実験の精度を向上させる上で大変参考になりました。また、投稿論文を執筆するにあたり多くの助言をいただき、論文の完成度が向上いたしました。心より感謝いたします。

河南理工大学教授 ルイダフー先生には人工地盤凍結工法に関して多くの資料をいただきました。また、凍結融解現象を利用した地盤洗浄技術に関して共同で研究させていただき、本研究に有益な多くの知見をご教授いただきました。感謝いたします。

摂南大学大学院理工学研究科の教職員の皆様には講義やその他の行事を通して、専門および専門外の立場から数々のアドバイスをいただきました。感謝い

たします。

本研究はこれまで伊藤研究室において行われてきた研究の成果が土台になっています。1998年から2017年の伊藤研究室の学部卒業生，大学院修了生（岬誠一氏，植田剛士氏，鳩裕幸氏，片野田栄一氏，玉崎千秋氏，新居和人氏，乾誠氏，田和照大氏，西村卓也氏，川端将貴氏，鈴木啓汰氏，福井貴大氏 ほか）らの研究成果がなければ本研究は完成しませんでした。ここに記して心より感謝いたします。

私が勤めます奥村組土木興業には，博士後期課程への入学を承認していただき，経済的な面においても支援していただきました。中でも，奥村組土木興業株式会社社長 奥村安正様，副社長 奥村安史様，専務取締役 竹垣喜勝様，技術部技師長 山本剛様，技術部長 桑本浩様，技術次長 吉田彰男様は私の良き理解者であり，各立場から相談に乗っていただき，助言をいただきました。深く感謝いたします。また，技術部の社員の皆様にも現在の多忙な業務の中，業務時間の一部を裂いて論文執筆することを認めていただくとともに，会社の業務を分担していただくなど多大なご協力をいただきました。ここに記して御礼申し上げます。

博士論文を書き上げられたことに対して，これまでお世話になった全ての方に改めて謝意を表します。

最後になりましたが，研究と仕事との両立は妻・香織，長男・礼央，二男・鼓太郎，そして両親の支えが無ければ実現できませんでした。本当にありがとうございました。

本研究は科学研究費補助金（基礎研究(B)）課題番号 26289156 および 17H03307 により実施されたものです。ここに記して感謝の意を表します。

2018 年 1 月

廣瀬 剛