土木学会論文集C（地圏工学）, Vol. 73, No. 2, 131-140, 2017.

凍結融解土の透水係数の実験的予測方法

廣瀬　剛[1]・伊藤　譲[2]・石川　達也[3]・赤川　敏[4]

[1]正会員　摂南大学　理工学研究科　創生工学専攻（〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町17番8号）
E-mail: 15d301hg@edu.setsunan.ac.jp

[2]正会員　摂南大学教授　理工学部　都市環境工学科（〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町17番8号）
E-mail: cito@civ.setsunan.ac.jp

[3]フェロー会員　北海道大学教授　工学研究院（〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8）
E-mail: t-ishika@eng.hokudai.ac.jp

[4]正会員　低温圏工学研究所（〒193-0826 東京都八王子市元八王子町3丁目2153番146号）
E-mail: bin.akagawa@gmail.com

本研究では凍結融解土の透水係数を実用的なレベルで予測する実験的方法を提案するため，飽和細粒土を用いて予圧密と実験荷重を変化させた凍結融解実験を行った．実験では人工地盤凍結工法の現場での施工条件を考慮し，一次元凍結融解実験に加え，水平変位を拘束した条件下で水平方向の凍結融解実験を実施した．その結果，凍結融解土の透水係数は凍上率，予圧密荷重や過圧密比よりも実験荷重の影響を強く受けていることが明らかになった．つまり，地盤の固結状況や過圧密比よりも有効土被り圧を知ることで，凍結融解後の透水係数を実験的に予測できる．さらに，水平方向変位が拘束された凍結融解実験より，凍結融解土では含水比が凍結管付近で高くなり，そのことが凍結融解土全体の透水係数のさらなる増加に関係することが示された．

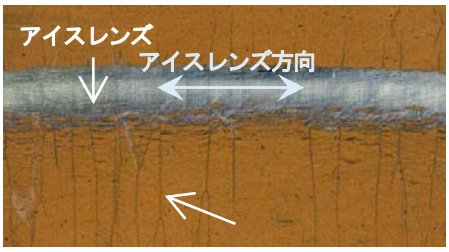
Key Words : *freeze-thaw, overconsolidated soil, permeability, ice lens, void ratio, overburden pressure*

1.　背景および目的

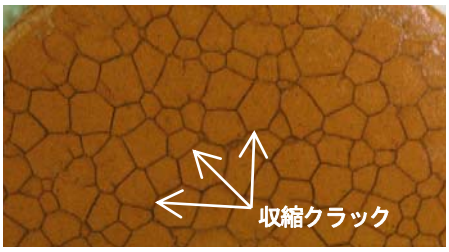
(1)　研究の背景

細粒土が凍結するとき，土中の間隙水の全てが同時に凍結するわけではなく一部は過冷却水として残る．過冷却水は温度低下に伴い周囲の土から水分を吸水しながら少しずつ凍結して**図-1** に示すようなアイスレンズ（IL）と呼ばれる氷晶を形成する．IL の発生・成長の過程で凍土に隣接する未凍土部分では激しく脱水されて亀甲状の収縮クラックが生じる．IL は凍結面が進むとともに幾層にもわたって形成され，凍土には IL と収縮クラックが多数発生することになる．

このようにして成長した凍土では融解後に透水係数が増加することは古くから知られていた．その要因を Camberlain & Gow[1)]や Benson & Othman[2)]は凍結時の IL や収縮クラックが融解後にも痕跡として残るためであると報告した．凍結融解前後の間隙比と透水係数の変化を検討した例として，Konrad & Samson[3)]は，凍結融解後の透水係数は間隙比が減少しても増加することを報告している．また，Dumais & Konrad[4)]は凍結融解による透水係数の変化には，細粒土に含まれる粘土及びシルトの粒径や細粒分の平均直径が影響していると報告している．なお，中村ら [5)]はこれらの実験結果とは逆に，小さい締固めエネ



(a) 鉛直断面



(b) 水平断面

図-1　一次元凍結におけるアイスレンズの発生状況

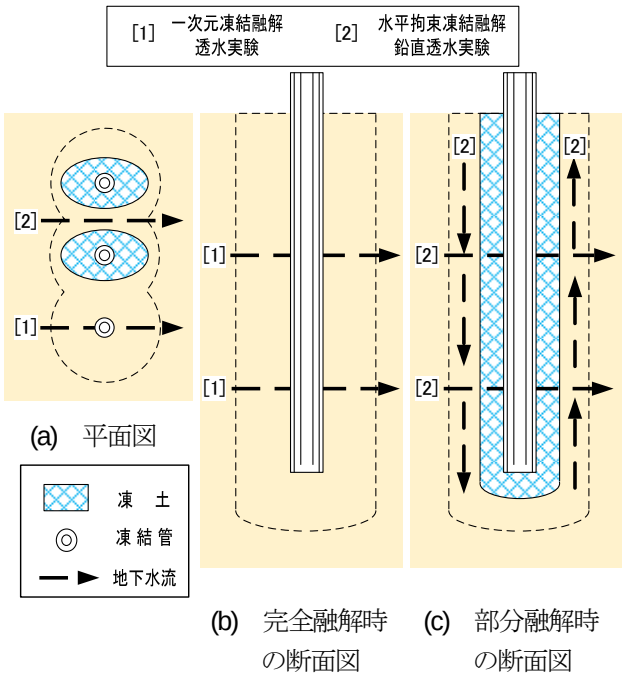


図-2 凍土壁周辺の融解時の水流

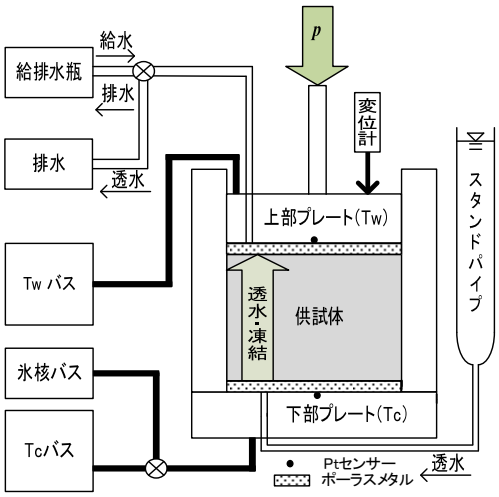


図-3 一次元凍結融解透水実験装置

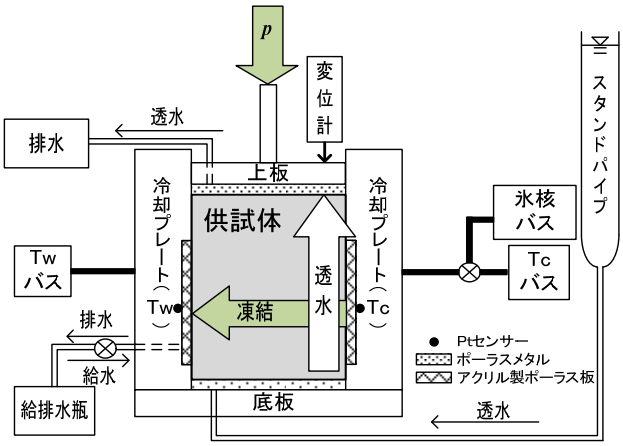


図-4 水平拘束凍結融解鉛直透水実験装置

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．

凍結融解による透水係数変化に影響を及ぼす要因を凍結の外的条件，つまり冷却方法や上載荷重との関係から検討した例として，Ito ら[6]は，一次元凍結融解実験装置を用いて実験的に検討して，藤森粘土と関東ロームでは凍結方法と融解後の透水係数には関係性がなく，正規圧密粘土では凍結融解時の上載荷重のみが凍結融解土の透水係数に影響を与えることを示した．

また，玉崎ら[7]は関東ロームを用いた実験で凍結融解前後の間隙比と透水係数の関係を調べ，凍結融解土の透水係数増加の要因は土構造の変化と要素自体の変化とに分けることができ，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を報告している．

このように凍結融解土の透水係数を支配する要因として，従来の IL や収縮クラックだけでなく，不凍水，細粒土の粒度分布，凍結融解時の上載荷重，土構造や土粒子の変化など数多くの定性的な知見が得られてきたが，予測可能なレベルまでメカニズムの解明に成功しているとは言えなかった．

一方，人工地盤凍結工法は中国や東南アジア諸国での施工事例も増加しており，北米では汚染土壌対策としての実績が増えてきており，自然冷熱と人工冷熱を組み合わせた新しい地盤凍結システムを用いて汚染土壌を地下水から隔離することに活用する事例が報告されている[8]．わが国でも福島第一原子力発電所廃炉事業では，原子炉建屋付近への地下水流入を抑えるべく凍土遮水壁[9]が設置されつつある．凍土遮水壁は原子炉建屋内から汚染水の漏水対策が完了するまで維持する予定とされ，長期間の安定管理技術が求められる．このように人工地盤凍結工法において凍結融解土の透水係数を把握することは極めて重要になっている．

人工地盤凍結工法により凍土壁を造成した場合，凍土壁の融解時の水流のパターンには図-2 に示す 2 とおりが存在する．まず，完全に融解する場合には IL の痕跡に直交する方向の流れ（図-2，[1]）が発生し，凍土の一部が融解する場合には凍結管の間の流れや凍土面に沿った，どちらも IL 方向の流れ（図-2，[2]）が発生する．

本研究では，「IL に直交する方向」については図-3 に示す一次元凍結融解透水実験装置を用いて，凍結の進行する方向に垂直である「IL 方向」については図-4 に示す水平拘束凍結融解鉛直透水実験装置により検討を行っている．

表-1　試料土の物性値

試料土	土粒子密度 ρs (g/cm^3)	液性限界 W_L (%)	塑性限界 W_P (%)	粒度分布		
				砂分 (%)	シルト分 (%)	粘土分 (%)
黄土14N	2.687	53.4	23.9	0.7	47.3	52.0

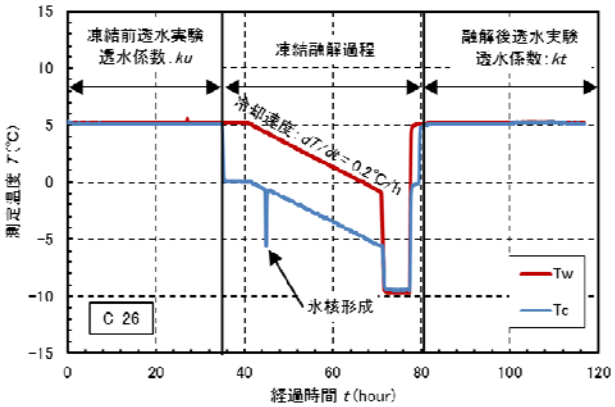


図-5　実験中の供試体両端温度の経時変化例

(2)　研究の目的

本研究の目的は人工地盤凍結工法の現場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，次のような検討を行った．

a)　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検討する．

b)　実際の人工地盤凍結工法を想定して，IL の成長方向，変位境界条件等が凍結融解土の透水係数に及ぼす影響を検討する．

c)　従来の知見と合わせて，凍結融解土の透水係数の実験的予測手法を提案する．

2.　実験方法

(1)　試料土

表-1 に試料土の物性値を示す．試料土はあらかじめ 425μm ふるいを通過させた京都伏見産の黄土（きづち）である．実験では，自然乾燥させた試料にイオン交換水を加えて液性限界の 1.3 倍の含水比に調整した後，撹拌・脱気したものを予圧密して作成した供試体を使用した．一次元凍結融解透水実験 [10]（一次元凍結融解実験）に用いる供試体は，内径 φ 100mm の凍結実験用アクリル円筒内で P ＝ 50，75，200，300，400，500 kN/m^2 で予圧密したものを高さ H_0 = 50 mm にトリミングした．水平拘束凍結融解鉛直透水実験 [11]（水平凍結融解実験）では，断面寸法が 80mm×70mm の矩形の圧密実験装置で高さが約 80mm となるように p = 150 kN/m^2 で予圧密したものを使用した．

表-2　実験条件

実験ケース	予圧密 P (kN/m^2)	実験荷重 p (kN/m^2)
C2-1	150	150
C5-1	150	50
C6-1	150	100
C7-1	150	75
C26-1	50	50
C26-2	75	75
C28-1	300	150
C28-2	400	200
C29-1	300	50
C29-2	500	200
C30-1	200	200
C30-2	500	50
C31-1	200	100
C31-2	500	100
K26	150	50
K27	150	50

C:一次元凍結融解透水実験，K：水平拘束凍結融解鉛直透水実験
冷却方法：両面ランプ，給排水：有，温度勾配 G：1℃/cm(C2～C31)，0.625℃/cm(K26，K27)，冷却速度：dT/dt=0.2℃/h（K27 を除く），0.4℃/h(K27)

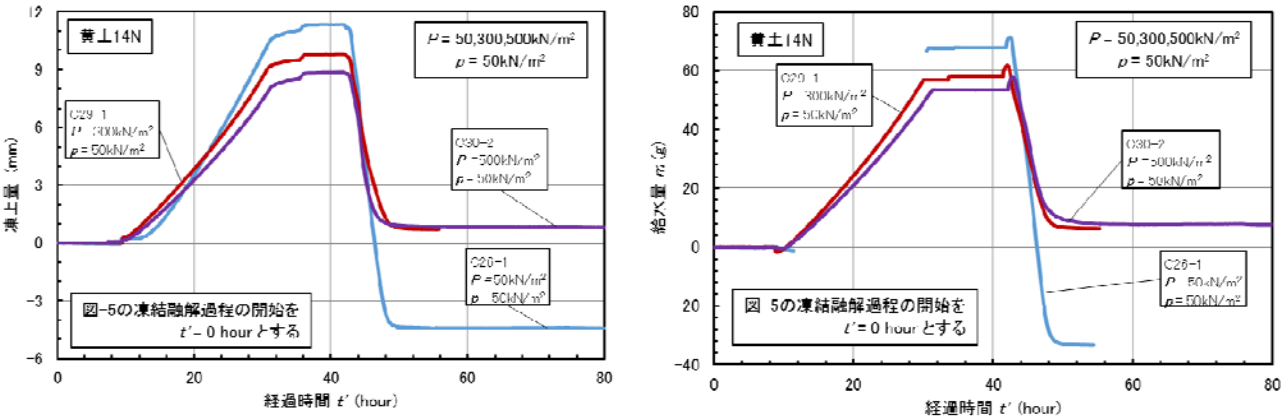
(2)　一次元凍結融解透水実験

図-3 に示す一次元凍結融解実験装置のセルは，上・下部のアルミ製冷却プレートとアクリル円筒（内径 φ 100 mm，厚さ t = 30 mm）により構成される．上・下部プレートには低温恒温水層（Tc・Tw・氷核バス）でそれぞれ温度調節された不凍液（エチレングリコール）が循環される．

図-5 に実験中の温度変化の一例を示す．供試体の境界温度は上・下部プレートに設置された Pt センサーにより測定された．実験では，室温を常時 20℃に保ち，下部プレートを低温側（Tc）とし，上部プレートを高温側（Tw）として下部から上部方向に凍結させた．初期の Tw と Tc の温度差を 5℃として，Tw と Tc 共に冷却速度 dT/dt = 0.2 ℃/h で Tw = 5.0 ～ -1.0 ℃，Tc = 0 ～ -6 ℃まで温度降下させ，その後 Tw および Tc を-10 ℃まで急速に温度降下させた．

凍結融解時は上部プレートから給排水が可能な開式凍結とし，給排水量の測定には電子天秤を使用した．透水試験および凍結融解過程において供試体に与える上載荷重を実験荷重と呼ぶこととし，実験荷重はシャフトから上部プレートを通して供試体に鉛直方向に載荷され，凍上量はシャフトに取り付けられた変位計により測定された．凍結融解前後には下部から上部方向に変水位透水試験を行った．

表-2 に示す実験条件の C シリーズが一次元凍結融解実験である．予圧密荷重および実験荷重の影響を検討す



(a) 凍上量の経時変化　　(b) 給水量の経時変化

図-6 凍結融解過程の凍上量と給水量（一次元凍結融解実験）

表-3 一次元凍結融解実験結果一覧表

実験ケース	予圧密 P (kN/m²)	実験荷重 p (kN/m²)	透水係数 凍結前 k_u (m/s)	透水係数 融解後 k_t (m/s)	凍上率 (%)	透水係数増加比 k_t/k_u	過圧密比 P/p
C5	150	50	3.2×10^{-10}	4.6×10^{-9}	22	14.5	3.0
C26-1	50		8.4×10^{-10}	6.3×10^{-9}	21	7.5	1.0
C29-1	300		3.1×10^{-10}	4.7×10^{-9}	20	15.4	6.0
C30-2	500		2.5×10^{-10}	3.8×10^{-9}	18	15.1	10.0
C7	150	75	4.5×10^{-10}	2.9×10^{-9}	20	6.4	2.0
C26-2	75		7.1×10^{-10}	4.0×10^{-9}	18	5.7	1.0
C6	150	100	4.1×10^{-10}	2.2×10^{-9}	18	5.4	1.5
C31-1	200		4.2×10^{-10}	1.3×10^{-9}	17	3.2	2.0
C31-2	500		2.5×10^{-10}	9.3×10^{-10}	15	3.8	5.0
C2	150	150	4.7×10^{-10}	7.0×10^{-10}	15	1.5	1.0
C28-1	300		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
C29-2	500		1.9×10^{-10}	3.5×10^{-10}	13	1.9	2.5
C30-1	200		3.0×10^{-10}	5.3×10^{-10}	12	1.8	1.0

るため，予圧密荷重 P = 50 ～ 500 kN/m²，実験荷重 p = 50 ～ 200 kN/m² で実験を行った．冷却速度および温度勾配は，Ito ら[6]によると，それぞれ dT/dt = 0.1 ～ 4.0 ℃/h，G = 0.3 ～ 1.5 ℃/cm の範囲において透水係数増加比に影響を与えないことが確認されているため，dT/dt = 0.2 ℃/h，両端面温度差を 5℃（G = 1.0 ℃/cm）とした．

(3) 水平拘束凍結融解鉛直透水実験

図-4 に示す水平凍結融解実験装置は，矩形の供試体の左右側面のアルミ製冷却プレートに温度制御された不凍水を循環させ水平方向に凍結融解させるものである．前後の側面は厚み 50mm のアクリル板で断熱され IL の観察も可能である．左右の冷却プレートと前後のアクリル板はステンレス製の固定治具により固定されて供試体水平方向の変位は完全に拘束されている．一方の冷却プレートを低温側（Tc）とし，他方を高温側（Tw）とし，冷却温度は左右の冷却プレートに設置した Pt センサーにより測定された．凍結融解過程では Tw 側から給排水を可能とし，給排水量の測定には電子天秤を使用した．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凍結融解時の鉛直変位量が測定された．凍結融解前後には底板から上板方向に変水位透水試験を行った．

表-2 に示す実験条件の K シリーズが水平凍結融解実験である．冷却条件は dT/dt = 0.2 ℃/h および 0.4℃/h とし，Tw と Tc の温度差を 5 ℃（G = 0.625 ℃/cm），最低温度を-10℃とした．

3. 結果と考察

(1) 一次元凍結融解実験での凍上特性

図-6(a)に一次元凍結融解実験の凍結過程における凍上量の経時変化の例を示す．経過時間 t' = 0 hour は**図-5** における凍結融解過程の開始時間 t = 35 hour に相当する．実験荷重 p = 50 kN/m² とした場合，予圧密荷重 P = 50 kN/m² の正規圧密状態では凍結前と比較して凍結融解後

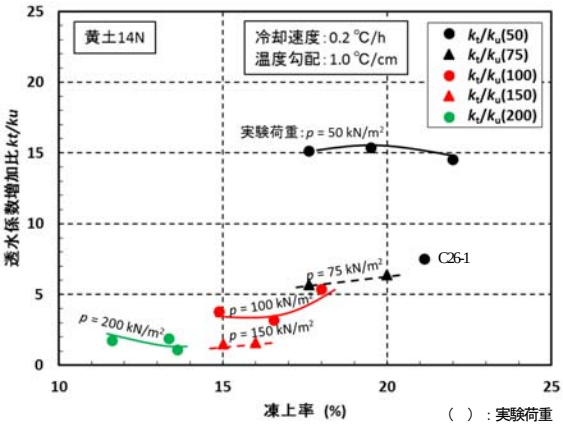


図-7　凍上率と透水係数増加比の関係

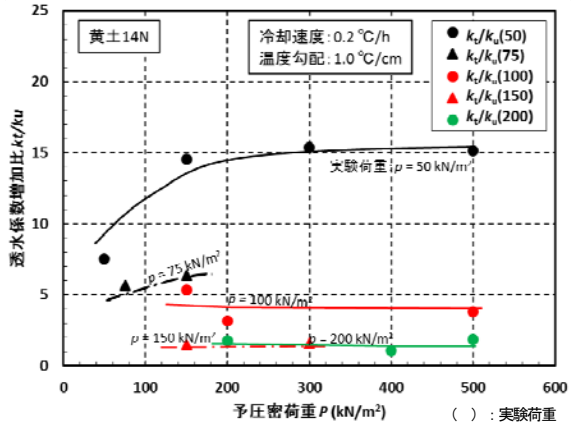


図-9　予圧密荷重と透水係数増加比の関係

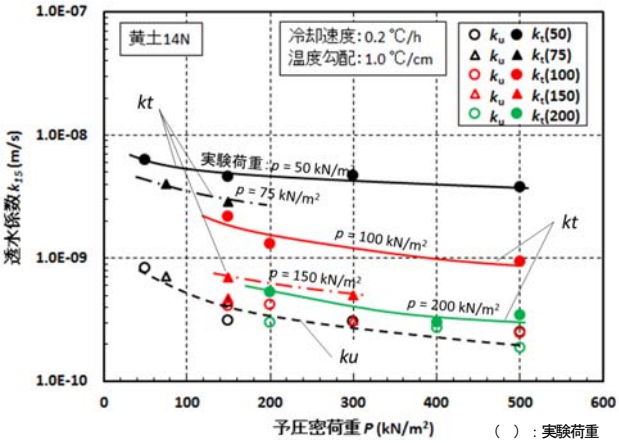


図-8　予圧密荷重と透水係数の関係

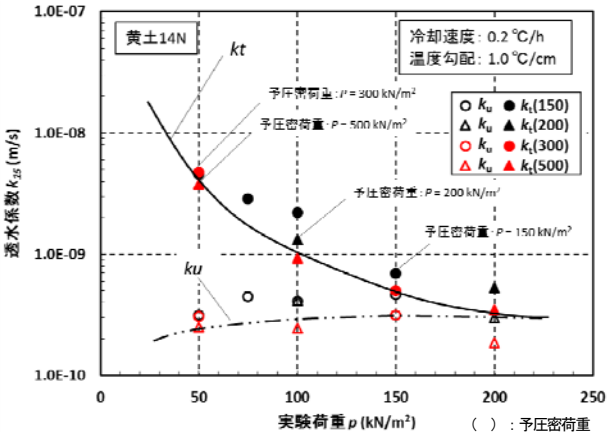


図-10　実験荷重と透水係数の関係

に供試体は圧縮されている．一方，過圧密状態の P = 300, 500 kN/m^{2}の供試体では凍結膨張量が融解後に元の状態にまで戻らなかった．

図-6(b)に給水量の経時変化を示す．図-6(a)とよく対応し正規圧密状態では凍結時の給水量よりも融解時の排水量が多いが，過圧密状態では凍結時の給水量の方が多かった．

(2)　凍上率と透水係数変化の関係

表-3 に実験結果一覧表，図-7 に凍上率と透水係数増加比の関係を示す．凍上率とは供試体初期高さに対する最大の凍結膨張量（凍上量）の百分率である．透水係数増加比とは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 k_t/k_u である．

実験荷重 p = 50 kN/m^{2}において凍上率と透水係数増加比が最大であり，p = 200 kN/m^{2}では両者共に最小である．全体的に実験荷重が小さくなると凍上率が大きくなり，透水係数増加比は大きくなる．また，実験荷重が同じであれば，p = 50kN/m^{2}の C26-1 を除いて，凍上率が変化しても透水係数増加比はほぼ一定であるため，透水係数増加比に影響を与えるのは実験荷重と言えよう．

C26-1 は p = 50kN/m^{2}で行った予圧密荷重の異なる他の実験ケースと比較すると，融解後の透水係数に大きな違いはないが，凍結前の透水係数が大きい．これは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)　予圧密荷重と透水係数変化の関係

図-8 に予圧密荷重と透水係数の関係を示す．未凍結土と凍結融解土ともに予圧密荷重が大きくなるほど透水係数は低下する傾向がみられる．しかし，予圧密荷重の増加による透水係数の低下がわずかであるのに対して，実験荷重による変化は大きく，P = 500 kN/m^{2}において p = 50 kN/m^{2}で k_t = 4.0×10^{-9} m/s となり，p = 200 kN/m^{2}では k_t = 4.0×10^{-10} m/s 付近となり約 10 倍の違いがあり，実験荷重の影響の方が支配的である．

図-9 に予圧密荷重と透水係数増加比 k_t/k_u を整理する．透水係数増加比は，予圧密荷重 P = 50 kN/m^{2}で実験荷重 p = 50 kN/m^2 の 1 点を除くと，実験荷重 p = 50, 75, 100 kN/m^{2}に応じた透水係数増加比はそれぞれ k_t / k_u = 15, 6, 3 となり，p = 150，200 kN/m^{2}では透水係数増加比が約 1 となった．予圧密荷重と透水係数増加比には明確な関係が

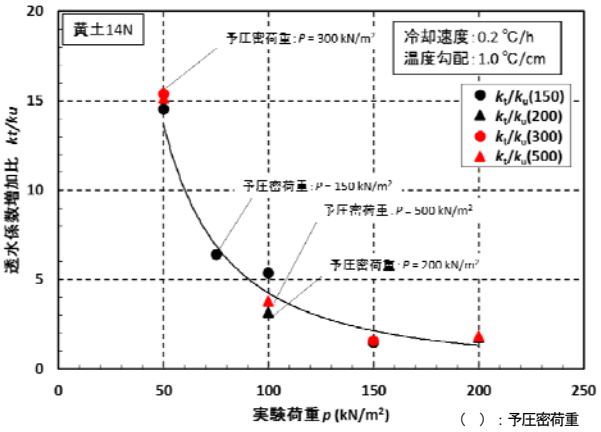


図-11　実験荷重と透水係数増加比の関係

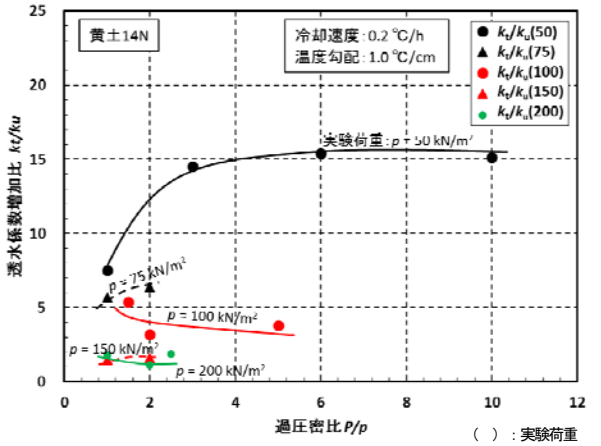


図-12　過圧密比と透水係数増加比の関係

認められず，透水係数増加比はそれぞれの実験荷重に応じたほぼ一定の値を示すものと言えよう．

(4)　実験荷重と透水係数の関係

図-10 に実験荷重と透水係数の関係を示す．実験荷重が大きくなるほど融解後の透水係数が小さくなる傾向があり，p = 200 kN/m^{2}では融解後の透水係数は凍結前と同等である k_t = 4.0×10^{-9} m/s 付近に収束している．

図-11 に実験荷重に対する透水係数増加比の関係を示す．実験荷重が大きくなるほど k_t / k_u は低下し，p = 200 kN/m^{2}では凍結融解後の透水係数はほとんど変化せず k_t / k_u = 1 に収束した．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見られなくなることを意味する．

また，実地盤において凍結融解土の透水係数を知りたい場合には，室内実験において現場の有効土被り圧に相当する実験荷重を作用させて凍結融解実験を行うことで評価できることを示すものである．

(5)　過圧密比と透水係数の関係

図-12 に過圧密比と透水係数増加比の関係を示す．過圧密比と透水係数増加比の関係は，**図-9** の予圧密荷重と透水係数増加比の関係と同じ傾向が見られた．

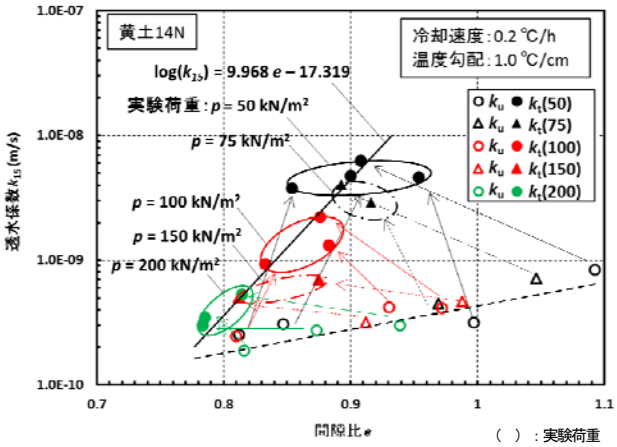


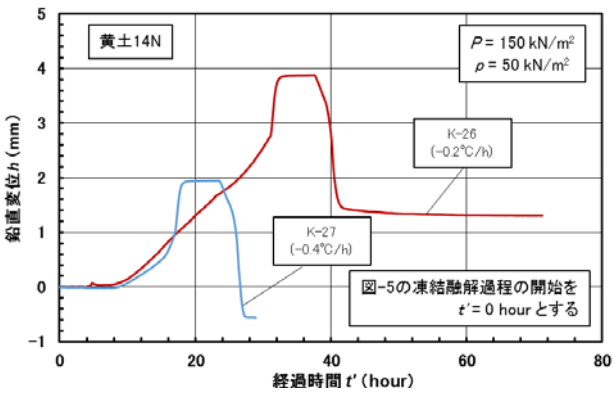
図-13　一次元凍結融解における間隙比と透水係数の関係（IL 直交方向）

これらの結果をまとめると，凍結融解による透水係数の変化は試料土の固結の度合いが関係する予圧密荷重や過圧密比ではなく，単純に実験荷重（有効土被り圧）の影響が支配的であると結論付けられる．

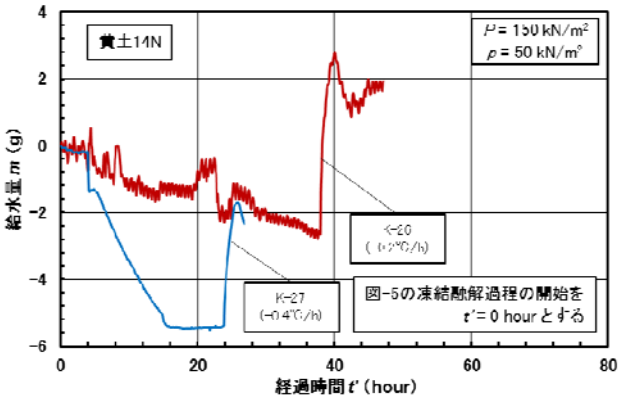
(6)　一次元凍結融解実験における間隙比と透水係数の関係

図-13 に一次元凍結融解実験における間隙比と透水係数の関係をまとめる．この図から次に示す 4 つの傾向を読み取ることができる．[1]間隙比と透水係数の関係は凍結前と融解後とでそれぞれ独立している．同じ間隙比で凍結前と融解後の透水係数を比較すると，融解後の透水係数の方が大きい．また，間隙比が大きくなるほど，凍結前透水係数に対する融解後の増加幅が大きくなっている．[2]各実験荷重における凍結融解前後の間隙比の変化に着目すると，過圧密度が高い場合には凍結融解により間隙比が増加し，正規圧密土または過圧密度が低い場合には凍結融解により間隙比が減少している．[3]透水係数は融解後には一貫して増加する傾向が認められる．[4]凍結融解後の間隙比と透水係数は，凍結前の間隙比と透水係数に関係なく，実験荷重に応じた間隙比と透水係数へと収束すると読み取ることができる．例えば，実験荷重 p = 50 kN/m^{2}では間隙比 e = 0.90，融解後透水係数 k_t = 5.0×10^{-9} m/s に，p = 100 kN/m^{2}では e = 0.87，k_t = 1.5×10^{-9} m/s，p = 200 kN/m^{2}では e = 0.80，k_t = 4.0×10^{-10} m/s にそれぞれ収束している．

図-7 で述べたように，凍結融解土の透水係数変化に対して IL の発生量と関係の深い凍上率との相関が小さいことは，冷却速度や温度勾配との相関が小さい[6),7)]こととも一致する．つまり，凍結融解の過程で IL や収縮クラックのようなマクロな構造は崩壊して消えてしまうが，凍結の過程で土粒子周囲の間隙が開き，土構造が再



(a)　鉛直変位の経時変化



(b)　給水量の経時変化

図-14　凍結融解過程の鉛直変位と給水量
（水平拘束凍結融解実験）

構成された影響は残り，凍結融解により再構成された土構造の状態で融解後に圧密され，実験荷重に応じて凍結前とは異なった間隙比と透水係数の関係に従った透水係数を示すものと考えられる．

これは，実地盤においては，凍結融解土の透水係数は土被り圧に応じた凍結融解土の間隙比と透水係数の関係に収束することを意味する．また，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，この試料土においては上載荷重が p = 200 kN/m² を超える場合には，透水係数の増加は認められない．

(7)　水平拘束凍結融解透水実験での凍上特性

水平凍結融解実験では，図-2 に示す人工地盤凍結工法のように，凍結方向が水平方向であるが，水平方向の変位が拘束されているので凍結膨張変位は鉛直方向へのみ許される．また，実験荷重と透水試験の方向は鉛直方向である．

図-14(a)に水平凍結融解実験における凍結融解過程の鉛直変位の経時変化を示す．鉛直変位は凍結に伴い増加して融解時には減少した．冷却速度 dT/dt が遅い場合

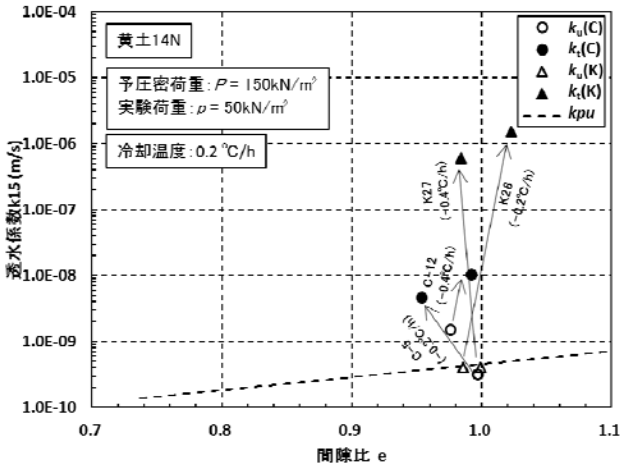


図-15　水平方向凍結融解実験における間隙比と透水係数の関係

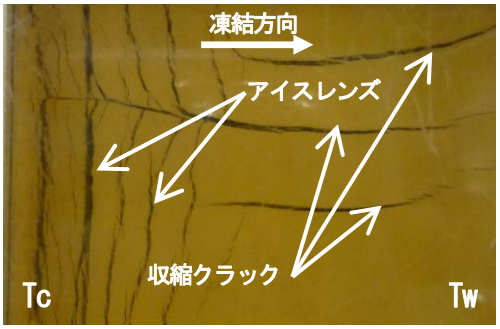


図-16　IL の発生状況

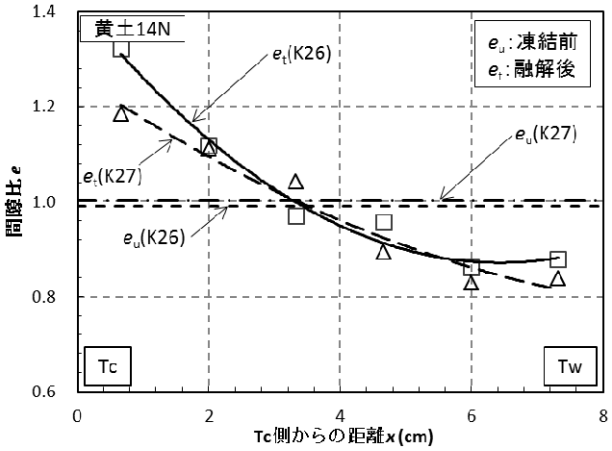


図-17　凍結融解後の間隙比分布

（0.2 ℃/h）には，凍結時の最大膨張量が大きく，融解時には元には戻らなかった．一方，冷却速度が速い場合（0.4 ℃/h）には，融解後は凍結前よりも沈下していた．

図-14(b)に給水量の経時変化を示す．凍結中は供試体から排水され，融解時には給水されている．変位量に対応して，冷却速度の遅い場合には凍結融解前後で給水が上回り，速い場合には排水が上回った．

(8)　水平拘束凍結融解実験における間隙比と透水係数

図-15 に凍結融解前後における間隙比と透水係数の関

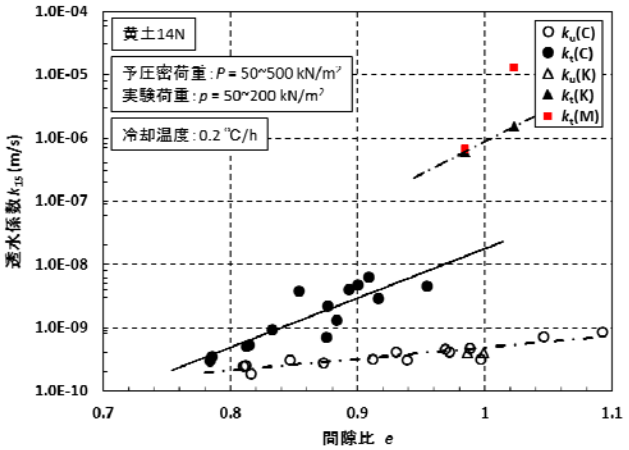


図-18　IL と IL 直交方向における間隙比と透水係数の関係

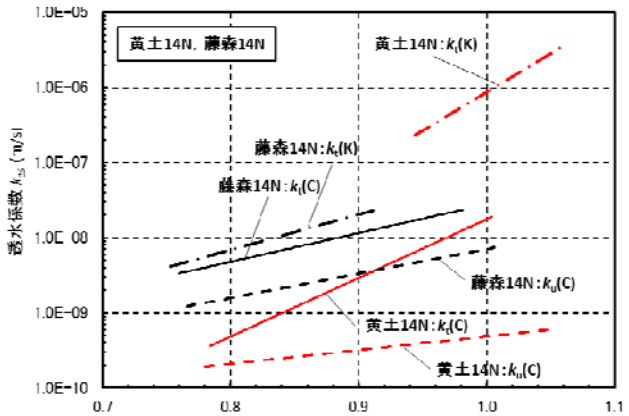


図-19　藤森 14N と黄土 14N における間隙比と透水係数の関係

係を示す．凍結融解による融解後の透水係数増加比は，K26 で $k_t/k_u = 3700$，K27 で $k_t/k_u = 1500$ であり，融解後の透水係数は $k_{15} = 1.0\times10^{-6}$ m/s 付近まで増加した．図-9 に示すように IL 直交方向の透水係数増加比が最大で 15 倍程度であったことと比較すると IL 方向の透水係数の増加が著しい．

これは図-16 に示すように凍結中に IL が縦方向に発生したことと関係があると思われた．実験では水平方向に凍結し，IL が鉛直方向に，収縮クラックが水平方向に発生している．このとき，水平方向の変位が拘束され，荷重が鉛直方向に作用しているため，融解後において収縮クラックは閉じやすいが，IL は痕跡として比較的残りやすかったとも言える．

図-17 に凍結融解実験後の供試体の含水比分布から計算した間隙比分布を示す．凍結融解後の間隙比は Tc 側では増加し，Tc 側と Tw 側の中間の位置を境として Tw 側では低下していた．その原因は，凍結中に Tw 側の未凍土から Tc 側の IL に向かって水分移動が発生するものの，融解時に逆方向の水分移動が十分には行われないために，融解後の含水比は Tc 側では高く，Tw 側では低くなったものと思われる．

すなわち，図-15 に示すように供試体全体では凍結融解後の間隙比変化は僅かであるが，部分的に間隙比の増加した箇所と減少した箇所が生じ，結果として全体の透水係数が増加するものと考えられる．さらに，先述したように，この実験では IL の痕跡が閉じやすい方向には載荷されていないため，凍結融解後の透水係数は，間隙比分布の変化と IL 痕跡の両方の影響を受けている可能性がある．

(9) 凍結融解による透水係数変化における凍結方向の影響

図-18 に IL と IL 直交方向の間隙比と透水係数の関係を示す．一次元凍結融解実験 k_t (C)と水平凍結融解実験 k_t (K)を比較すると，$e = 1.0$ では未凍結土よりも凍結融解土の k_t (C)は約 37 倍大きく，さらに k_t (C)よりも水平方向の k (K)は約 50 倍程度大きくなり，IL 方向の凍結融解土の透水係数は未凍結土よりも約 1850 倍大きい．

また，図-13 に示す凍結融解後の間隙比と透水係数の関係式を用いると，図-17 に示す凍結融解後の間隙比分布に対応する透水係数の分布を算出することができる．算出された透水係数の分布は Tc 側で透水係数が大きくなる．このように水平方向の透水係数が変化する供試体の鉛直方向の透水係数を評価するために，平均の透水係数として等価透水係数 k_t (M)を用いることにした．k_t (M)は測定値である k_t (K)と比較的近い値を示す．このことより IL 方向の透水係数の変化は，IL の痕跡が要因であるとするよりも間隙比分布の偏りが強く影響しているものと結論付けられた．

(10) 凍結融解後の透水係数の評価

図-19 は図-18 に黄土よりも凍上性の小さい藤森粘土の実験結果[12]を上書きしたものである．両者とも，その程度は異なるが，凍結融解土の間隙比と透水係数の関係は，未凍結土とは独立した関係を示し，凍結融解土の透水係数は未凍結土の値よりも大きい．透水係数の増加を間隙比 $e = 1.0$ で比較すると，黄土は未凍結土で $k_u = 4.8 \times 10^{-10}$ m/s，一次元凍結融解実験で $k_t = 1.8 \times 10^{-8}$ m/s，水平凍結融解実験では $k_t = 9.0 \times 10^{-7}$ m/s となった．それに対して藤森粘土では間隙比 $e = 0.9$ で比較すると，未凍結土で $k_u = 3.3 \times 10^{-10}$ m/s，一次元凍結融解実験で $k_t = 1.1 \times 10^{-8}$ m/s，水平凍結融解実験では $k_t = 1.9 \times 10^{-8}$ m/s であった．

凍結融解土の透水係数の増加割合は，黄土では間隙比が大きい場合に顕著であり，藤森粘土では間隙比が大きくなっても透水係数の増加割合はそれほど大きくならない．また，一次元凍結融解実験と比較して水平凍結融解実験の場合には，黄土では著しく透水係数が増加したが，藤森粘土では変化が小さい．

このことは，試料土の凍上性に関係するものであり，凍上性の強い黄土 14N では凍上による水分移動が激しく，供試体中に図-17 に示すような含水比分布が発生して，融解時においても元に戻らなかったためと思われる．これに対して藤森粘土では凍結融解の繰り返し回数が 1 回の場合には凍上による水分移動が緩慢であり，Tc 付近における含水比の増加が軽微なため，融解後に元の状態に近くなる[13]．

凍結融解土の透水係数を評価するためには所定の上載荷重（土被り圧）における一次元凍結融解実験を行い，上載荷重に対応する間隙比および透水係数を求め，さらに，凍上性の強い土に対しては IL 方向（鉛直方向）の透水係数が著しく増加する可能性があるため，水平凍結融解実験を行うことによって，IL 方向の凍結融解後の間隙比と透水係数変化の関係を予測することができる．また，水平凍結融解実験では，透水試験を省略して，水平凍結融解実験後の供試体の間隙比分布と一次元凍結融解実験から求まる透水係数から，地盤凍結工法の現場における融解後の透水係数を計算することは容易である．

4. 結論

本研究の結論をまとめる．

(1) 地盤凍結工法の現場で起こり得る凍結融解土の透水係数を一次元凍結融解透水実験および水平変位を拘束した水平方向の凍結融解実験により検討を行った．

(2) 凍結融解土の透水係数は地盤の固結の程度ではなく，土被り圧等の上載圧力と凍結融解の方向のみに影響されることが明らかとなった．

(3) つまり，凍結融解後の透水係数を実験的に予測するには，地盤から採取した試料土を予圧密により再構成して，一次元凍結融解実験において対象地盤の土被り圧に相当する実験荷重下で凍結融解作用を与えた後に実施する透水試験から求めることができる．その際，供試体の固結の程度である予圧密荷重の影響は小さい．また，この時の凍結速度や温度勾配等の凍上率に影響を与える要因は凍結融解土の透水係数に影響を与えないことは，既往の研究で明らかにされている．

(4) 一次元凍結融解実験において得られる凍結融解土の透水係数は予測される下限の値であるものと考えられる．これに対して，上限つまり危険側の値は，水平方向変位を拘束した状態で水平方向に凍結融解を行い，鉛直に透水試験を実施することで，凍結時に発生する間隙比分布の偏りを考慮した凍結融解土の透水係数を求めることができる．

(5) 凍結融解土の透水係数変化は深度または土被り圧が一定の値よりも大きい場合には無視できる．

(6) 土の間隙比と透水係数の関係は凍結融解前後においてそれぞれ独立していることが確認された．このことは，凍結融解により土構造に変化が生じるためであると考えられる．

(7) 水平方向の凍結融解による透水係数の増加には土の凍上性が強く影響しているものと考えられる．

謝辞：本実験の主要部分は摂南大学都市環境工学科の川端将貴氏，西村卓也氏，鈴木啓汰氏，福井貴大氏の卒業研究として実施されたものです．また，本研究には科学研究費補助金(基礎研究(B))課題番号 26289156 が使用されています．

参考文献

1) Chambarlain, E. J. and Gow, A. J.: Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils, *Engineering Geology*, 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) Konrad, J. M. and Samson, M.: Hydraulic conductivity of kaolinite-silt mixtures subjected to closed-system freezing and thaw consolidation, *Canadian Geotechnical Journal*, Nol.37, pp.857-869, 2000.
4) Dumais, S. and Konrad, J. M.: Compressibility and hydraulic conductivity of thawed fine-grained permafrost, *11th International Symposium on Cold Regions Development*, USB, 6-2 IC-010, 2016.
5) 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.
6) 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.
7) 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.
8) Wagner, A. M.: Creation of an artificial frozen barrier using hybrid thermosyphons, *Cold Regions Science and Technology*, Vol.96, pp.108-116, 2013.
9) http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning/committee/osensuitaisakuteam/2016/pdf/0331_2a.pdf, 2016.
10) 伊藤譲，石川達也，赤川敏，所哲也，大西有三，上田保司，廣瀬剛：過圧密粘性土の凍結融解による透水係数変化に関する実験，第 50 回地盤工学研究発表会，2015.
11) 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(第 III 部門)，III-13, 2015.
12) Hirose, G. and Ito, Y.: Experimental study on the permea-

bility change of fine-grained soil by freeze-thaw effect, *11th International Symposium on Cold Regions Development*, USB, 6-2 IC-013, 2016.
13) 伊藤譲，廣瀬剛，石川達也，所哲也，赤川敏，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変化について(2)，平成 28 年度土木学会年次学術講演会(第 III 部門)，pp.629-630, 2016.

(2016. 8. 4 受付)

EXPERIMENTAL PREDICTION OF PERMEABILITY OF FREEZE-THAWED FINE-GRAINED SOIL

Go HIROSE, Yuzuru ITO, Tatsuya ISHIKAWA and Satoshi AKAGAWA

Prediction of the permeability of freeze-thawed soils is significantly important in the case that a final disposal site is being constructed in a cold region or a large-scale frozen earth wall is operating for a long period. Although a large number of knowledge has been obtained, it still is difficult to predict the permeability of freeze-thawed soils in a practical level. This study proposes a permeability prediction method of freeze-thawed soils based on the experimental findings.

In this study, freeze-thaw experiments were conducted with saturated fine-grained soils with different pre-consolidation pressures and overburden loads in order to predict the permeability of freeze-thawed soil. Two types of freeze-thawed experiments were carried out with the artificial ground freezing on-site construction condition considered, one is one-dimensional freeze-thaw test, and the other is horizontal displacement restrained freeze-thaw and vertical permeability test, which enables horizontal freezing under restricted horizontal displacement.

The result has revealed that the permeability of freeze-thawed soil is obviously influenced by overburden test pressure rather than pre-consolidation pressure, over-consolidation ratio and frost heave ratio. The result suggests that the permeability of freeze-thawed soil can be predicted by the freeze-thaw test for which the effective overburden pressure is considered, rather than strength or hardness of the ground materials and other freezing conditions are. Moreover, void ratio and permeability after freeze-thaw tended to approach the value of unfrozen soils with an increases of pressure. Furthermore, it has been suggested that the permeability of freeze-thawed soils in an actual artificial ground freezing method might be increased by non uniformity in distribution of void ratio due to frost heave.