

奥村組土木興業（株）	正会員	○廣瀬 剛
摂南大学	正会員	伊藤 譲
北海道大学	フェロー	石川 達也
低温圏工学研究所	正会員	赤川 敏
苫小牧工業高等専門学校	正会員	所 哲也
関西大学	フェロー	大西 有三

1. 目的：凍結融解作用による細粒土の透水係数増加は、融解後にアイスレンズ(IL)の発生によるクラックの痕跡が残ることが原因とされていた。しかし、正規圧密粘土を用いた凍結融解実験では、IL の発生状況に関わらず透水係数が増加することが報告されている¹⁾。一方、地盤凍結工法では、土被り圧下で地盤は水平方向に凍結融解する。この条件下では、水平方向の凍上は抑制されるが、融解後には IL の痕跡がクラックとして残りやすく、融解後に鉛直方向の透水係数は増加する傾向があるものと予想される。本研究では、供試体を水平方向に凍結させ、鉛直方向に透水試験を実施可能な実験セルを製作し、凍結融解前後の透水係数の変化を調べた。特に、冷却速度の影響および凍結融解後の凍結方向（熱流方向）に直交する方向（鉛直方向）の透水係数について実験結果を報告する。

2. 試験方法

(1) 水平拘束凍結融解鉛直透水実験装置：図-1 に実験装置を示す。この装置は、水平方向の変位を拘束した状態で水平方向に凍結融解させ、鉛直方向に透水試験を行うことができる構造となっている。供試体寸法は Tw -Tc：8cm×奥行き：7cm×高さ：h(=約 8cm)である。

(2) 凍結融解試験 (K シリーズ)：試料土は藤森粘土($\rho_s=2.674\text{g/cm}^3$, $w_L=41.4\%$, $w_P=23.0\%$, 砂=9.4%, シルト=59.1%, 粘土=31.5%)を使用した。試料土に液性限界の 1.4 倍の蒸留水を加えて練り混ぜ、養生後、飽和させた。その後、 $P=5.25\sim500\text{kN/m}^2$ まで予圧密して供試体を作成した。

表-1 に実験条件を示す。K1 は閉式凍結, K2~K4 は開式凍結である。予圧密は、K1~K3 が $P=500\text{kN/m}^2$, K4 が $P=150\text{kN/m}^2$ である。実験荷重は、いずれも $P=50\text{kN/m}^2$ の過圧密状態である。図-2 に供試体の温度変化を示す。供試体セット後、所定の荷重を加え、供試体両端の温度を制御する。まず、Tw, Tc プレート温度=+5℃として、凍結前の透水試験を行う。透水試験終了後、Tw 側には給排水瓶を接続し、両端温度を降下させる。Tc プレート温度=-0.8℃まで降下すると同時に氷核形成を行う。その後、所定の温度条件で凍結させた後に融解させる。融解後、凍結前と同じ要領で、透水係数を測定する。実験後には、以下に示す圧密透水試験を行う。

(3) 圧密透水試験：図-3 に圧密透水試験に使用する試料の採取方法を示す。圧密透水試験では、標準圧密試験機を用いて変水位透水試験(JIS A 1218)を実施する。载荷段階は 50, 100, 200 kN/m^2 の順に各 24 時間载荷する。実験後には、供試体高さと含水比を測定する。

(4) 1 次元凍結融解実験 (C シリーズ)： K シリーズとの比較のため、1 次元凍結融解実験を行った。これは、凍結融解時に鉛直方向の変位を許し、熱流方向である鉛直方向に凍結融解と透水試験を行う構造である。実験条件は、開式凍結、予圧密

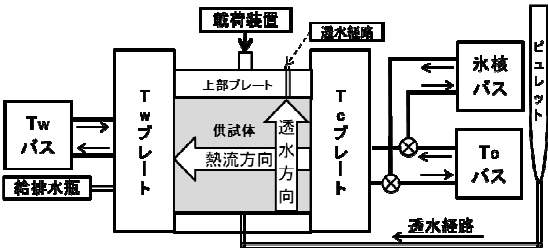


図-1 水平拘束凍結融解鉛直透水実験装置
表-1 Kシリーズの実験条件

実験ケース	試料土	冷却方法	最低温度 (℃)	冷却速度 (℃/h)	予圧密 (kPa)	実験荷重 (kPa)
K1	藤森14N	両面ランブ	-10	0.2	500	50
K2	藤森14N	両面ランブ	-10	0.2	500	50
K3	藤森14N	両面ランブ	-10	0.1	500	50
K4	藤森14N	両面ランブ	-10	0.2	150	50

※K1 は閉式, K2 は開式

$P=500\text{kN/m}^2$, 実験荷重 $P=50\text{kN/m}^2$ とし, 冷却速度を $C5:2.0.2^\circ\text{C/h}$, $C12:0.4^\circ\text{C/h}$, $C13:0.1^\circ\text{C/h}$ とした.

3. 結果と考察

(1) 冷却速度と透水係数: 図-4 に凍結融解前後の冷却速度 dT/dt と透水係数 k の関係を示す. K シリーズ (K) は, 冷却速度が小さい方が, 融解後の透水係数が大きくなる傾向が認められる. K は, C シリーズ (C) と比較して凍結融解前後共に透水係数が約 100 倍大きい. これは, 鉛直方向の IL の痕跡に加えて, 透水試験時に $T_w \cdot T_c$ 両プレート間のポーラスメタルを通過する水量の影響もあると考えられる.

(2) 間隙比と透水係数: 図-5 では凍結融解前後の間隙比 e と透水係数 k で整理する. 閉式凍結の K1 では凍結融解後に間隙比と透水係数が若干減少している. 開式凍結の K2~K4 では, 間隙比が減少するが透水係数が増加する傾向にある. しかし, C では, 凍結融解後に間隙比と透水係数がともに増加する傾向にある. これは, 開式凍結では IL の発生により凍結膨張圧を受けて間隙比は小さくなるが, IL の痕跡が水道となったとも考えられる.

(3) 熱流直角方向 (K) の圧密透水試験と熱流方向 (C) との関係: 図-6 に未凍結圧密透水および C の透水係数に対して, K の融解後の圧密透水試験結果を比較する. C と K は, 共に未凍結圧密透水よりも透水係数が大きく, 両者はほぼ同じ範囲に分布している. K の载荷段階に対する間隙比と透水係数の変化を矢印で示す. 载荷重の増加に従い間隙比と透水係数が両方とも小さくなる. 開式は, C の分布に沿って変化する. 閉式では, 透水係数は载荷重初期段階で開式の約 100 倍大きい, 载荷重の増加に従い開式の値に近づく. これは, IL の痕跡が载荷重の増加により閉塞したためと考えられる. これらのことは, 融解後の透水係数は変位拘束に関係なく, 間隙比に対応して増加することを意味する.

4. まとめ: 本研究の結果をまとめる. ① K シリーズは, 冷却速度が小さい方が融解後の透水係数が大きくなる傾向が見られた. ② K シリーズでは, 開式凍結において凍結融解前後に間隙比が減少し, 透水係数が増加した. これは凍結方向の変位拘束条件下で IL の発生による凍結膨張圧による圧密と融解後の IL 痕跡による両者の影響が考えられる. ③ 基本的に融解後の透水係数は IL の方向や拘束条件に関係がなく, 間隙比に応じたレベルに達すると考えられる. ④ なお, 透水試験時に $T_w \cdot T_c$ 面のポーラスメタルを通過する水流の影響を排除することが今後の課題である.

謝辞: 本研究の主要部分を担当した摂南大学都市環境工学科の飼馬弘至氏, 山原貴大氏に厚く御礼申し上げます. なお, 本研究には, 科学研究費補助金 (基盤研究 (B)) 課題番号 26289156 番が使用されています.

参考文献: (1) 伊藤譲・新居和人: 冷却方法の違いによる凍結融解土の透水係数について, 平成 17 年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要, pp. III-33-34, 2005.

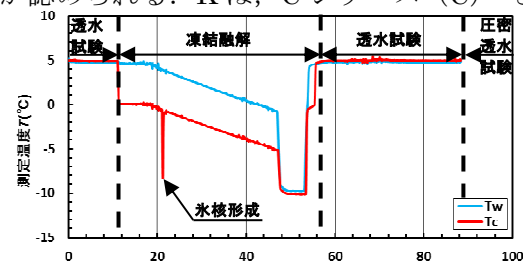


図-2 供試体温度の経時変化 (K2)

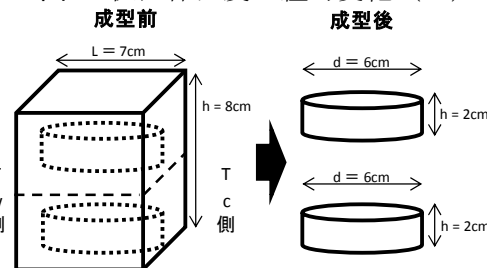


図-3 圧密透水試験の供試体

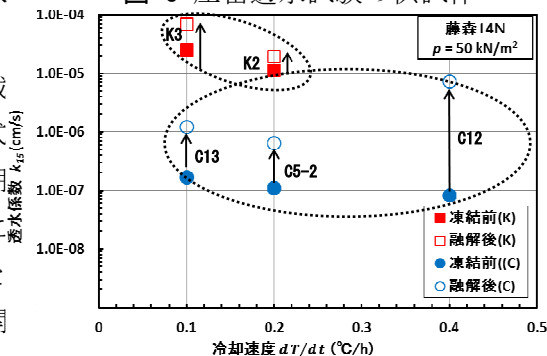


図-4 冷却速度と透水係数

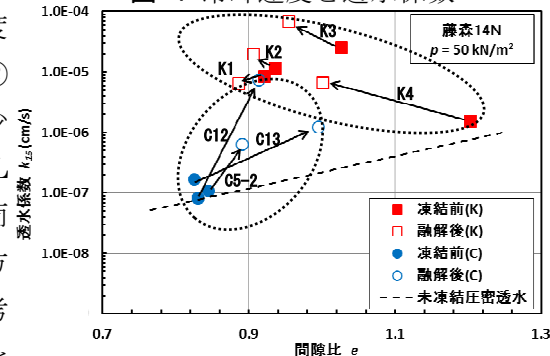


図-5 間隙比と透水係数

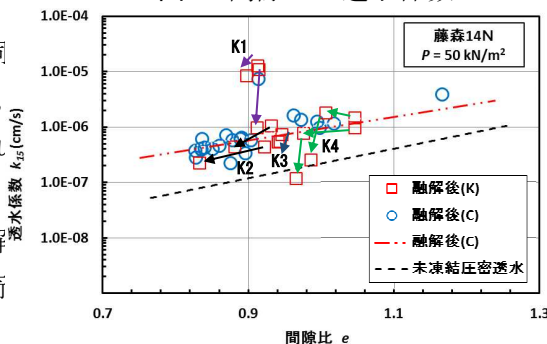


図-6 熱流方向 (C) と熱流直角方向 (K)