

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

奥村組土木興業 正会員 ○廣瀬 剛, 摂南大学 正会員 伊藤 謙
 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
 苫小牧高専 正会員 所 哲也, 関西大学 フェロー 大西有三
 精研 正会員 上田保司

1.目的：細粒土は凍結時に未凍土側から凍結面に向かって水分移動が発生し、アイスレンズ(IL)が成長する。凍結土の融解後の透水係数の変化は、この IL の痕跡の影響を受けていることが容易に予想できる。これまでに、一次元凍結融解実験において、IL に直交する方向（熱流・水流の方向）については、IL の量に影響を与える冷却速度や IL の厚さを示す凍上率が透水係数の増加と関係性なく、載荷重の影響のみを受けることが報告された¹⁾。一方、IL 面方向（熱流・水流と直交方向）の透水係数は、変位拘束条件下においては、冷却速度が小さくなる（IL の量が多い）と透水係数が大きくなる傾向が見られ、IL 痕跡により透水係数が大きくなると考えられた²⁾。本研究では、1次元凍結融解実験において荷重一定下での、IL 面方向の透水係数を調べるため、新たに実験セルを製作し、凍結融解前後の透水係数の変化を調べた。

2.実験方法：IL 面方向の透水係数を検討するため、一次元凍結融解実験に IL 面方向の変水位透水試験の機能を付加した装置を用いて実験を行った。試料には藤森粘土 14N ($\rho_s=2.674\text{g/cm}^3$, $w_L=41.4\%$, $w_P=23.0\%$, 砂=9.4%, シルト=59.1%, 粘土=31.5%) を使用し、液性限界の 1.4 倍を目標としてイオン交換水を加えて練り混ぜ、養生後、脱気・飽和させた。その後、予圧密して ($P=150\text{kN/m}^2$, 500kN/m^2) 供試体を作成した。

(1)一次元凍結融解実験(C シリーズ)¹⁾：1次元凍結融解実験は、荷重一定下で凍結融解させ、鉛直方向に透水試験を行う構造である。実験条件は、全て予圧密 $P=500\text{kN/m}^2$ 、開式凍結とし、実験荷重 ($50\sim190\text{kN/m}^2$)、最低温度 ($-5\sim-20^\circ\text{C}$)、温度勾配 ($0.5\sim2^\circ\text{C/cm}$)、冷却速度 ($0.05\sim0.4^\circ\text{C/h}$) を変化させた。

(2)鉛直凍結水平透水実験(H シリーズ)²⁾：図 - 1 に実験装置を示す。この装置は矩形断面の一次元凍結融解実験装置で、鉛直方向に凍結融解、水平方向に透水試験を行うことが可能な構造となっている。表 - 1 に実験条件を示す。予圧密は H1, H2 : $P=500\text{kN/m}^2$, H3, H4 : $P=150\text{kN/m}^2$ とし、実験荷重はすべて $P=50\text{kN/m}^2$ とした。冷却速度は、H1~H3 : 0.2°C/h , H4 : 0.1°C/h とした。図 - 2 に供試体温度の経時変化を示す。実験では凍結前に上部 (Tw), 下部プレート (Tc) に不凍液を循環させ $+5^\circ\text{C}$ に保ち、

凍結前の透水試験を行う。凍結過程は Tc を 0°C まで降下させ 6 時間養生後、所定の冷却速度で Tw, Tc を冷却していく。Tc が -0.8°C まで降下した時に氷核形成を行う。その後、Tw が -1°C , Tc が -6°C に達した後に Tw と Tc を共に -10°C で冷却する。融解後は Tw, Tc の温度を $+5^\circ\text{C}$ 一定で透水係数を測定する。さらに実験後供試体を用いて、標準圧密試験装置により変水位透水試験を実施する。なお、圧密圧力は、25, 50, 100, 200kN/m^2 である。

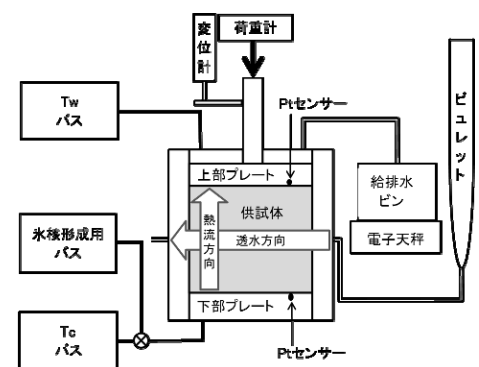


図-1 鉛直凍結水平透水実験装置

3.結果と考察

(1)冷却速度と透水係数の関係：図 - 3 に冷却速度 dT/dt と透水係数 k_{15} の関係を示す。H2 は C5-2 と比較して融解後の透水係数が約 10 倍となった。H3, H4 を比較すると冷却速度が小さくなくても透水係数の変化が小さく、冷却速度と透水係数の関係は明らかでない。

C シリーズ (C), H シリーズ (H) 共に冷却速度と透水係数の変化

表-1 H シリーズの実験条件

実験ケース	給水条件	冷却方法	最低温度 ($^\circ\text{C}$)	冷却速度 ($^\circ\text{C/h}$)	予圧密 (kN/m^2)	実験荷重 (kN/m^2)
H1	開式	両面ランプ	-10	0.2	500	50
H2	開式	両面ランプ	-10	0.2	500	50
H3	開式	両面ランプ	-10	0.2	150	50
H4	開式	両面ランプ	-10	0.1	150	50

キーワード 凍結融解, 透水係数, アイスレンズ, 間隙比, 飽和粘性土, 過圧密

連絡先 〒552-0016 大阪府大阪市港区三先1丁目11番18号 TEL.06-6572-5262 FAX.06-6572-0545

に關係は認められなかった。

(2)凍上率と透水係数の關係：図-4に凍上率 hs と透水係数 k_{15} の關係を示す。HのH3, H4を比較すると、凍上率が小さいほど透水係数が大きくなる傾向が認められるが顕著ではない。Cは凍上率が小さいほど透水係数が大きくなる傾向がみられる。全体的に、今回の実験条件では凍上率が小さいほど融解後の透水係数が大きい。

(3)間隙比と透水係数の關係：図-5に間隙比 e と透水係数 k_{15} の關係を示す。H3, H4は凍結融解後に間隙比は変化しないが、透水係数は増加している。一方、Cは凍結融解により間隙比が増加し、透水係数も増加する。これは、HはCよりも予圧密荷重が小さく、凍結前の間隙比、透水係数共に大きいためと考えられる。C, H共に全体的に融解後には同じレベルにまで透水係数が増加すると言えよう。なお、H3, H4の凍結前透水係数が未凍結圧密透水よりも大きい。これは、実験装置には凍結時の給排水や透水試験のためにポーラスメタルが取り付けられており、凍結前透水試験において水流の一部が上下部のポーラスメタルを通過した可能性を示している。

(4)IL面方向(H)の圧密透水試験とIL面直角方向(C)と未凍結圧密透水との關係：図-6に未凍結圧密透水とCの融解後の透水係数に対して、Hの圧密透水試験結果を示す。Hの圧密透水試験では荷重段階初期において凍結融解後のIL痕跡が通水経路となり透水係数が大きく、荷重段階が進むにつれてIL痕跡が閉塞し透水係数が一定の範囲で落ち着くことが予想された。Hは荷重段階にかかわらず間隙比に対応して透水係数が増加し、Cの融解後の透水係数に沿うように分布している。これは、IL面方向、IL面直交方向共に融解後の透水係数増加にはIL痕跡の影響とは関係のない要素が含まれていることを示唆している。なお、HはCと比較して透水係数が若干低く分布している。

4.まとめ：本研究の結果をまとめる。①凍結融解後のIL面方向の透水係数は、IL面直交方向と同じレベルで、未凍結圧密透水よりも10倍以上大きくなる可能性がある。②圧密透水試験の結果より、ILの痕跡が閉塞されても、透水係数は増加しているような傾向が見られ、融解後の透水係数増加にはIL痕跡の影響とは関係のない要素が含まれていると思われる。③今回報告したHシリーズの透水係数は、上下部プレートにポーラスメタルの影響を含んでいると考えられ、今後は実験方法の改良を行い、追実験を行う。

謝辞：本研究の主要な実験を担当した摂南大学都市環境工学科の中島弘敬氏（現：精研）、渡辺俊貴（現：NEXCO メンテ関西）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)伊藤譲他：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，2015，2)廣瀬剛他：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，2015

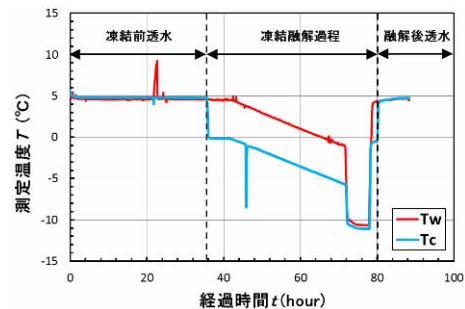


図-2 供試体温度の経時変化

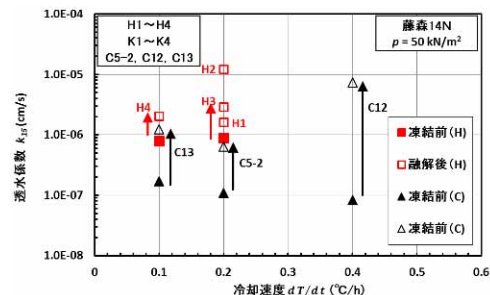


図-3 冷却速度と透水係数の関係

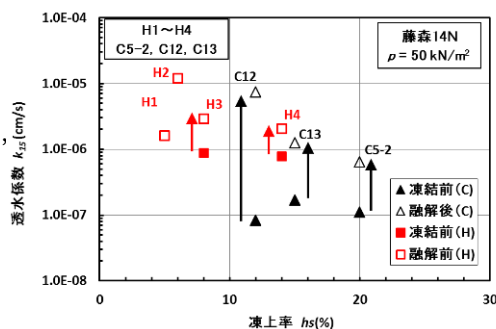


図-4 凍上率と透水係数の関係

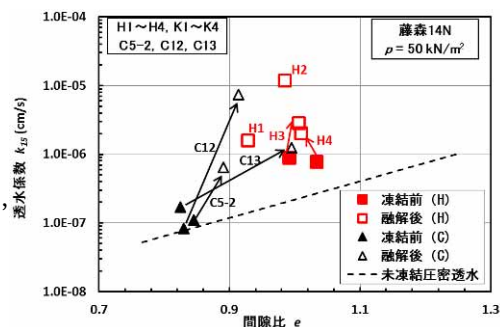


図-5 間隙比と透水係数の関係

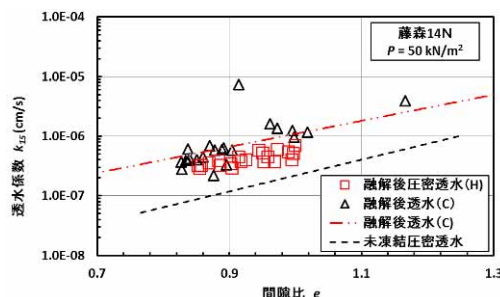


図-6 間隙比と融解後圧密透水の関係