

細粒土の凍上性が凍結中の未凍土部分における透水係数に与える影響

奥村組土木興業 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

1.目的：寒冷地で地盤が凍結すると、凍結面付近にアイスレンズ（IL）が形成され、凍結面前面の未凍土では乾燥収縮ひび割れ（SC）が発生することがある。自然環境における IL の発生は地表面の隆起を引き起こす。これを凍上と呼び、細粒土は IL が発生しやすい（凍上性が高い）ことが知られている。

人工地盤凍結工法（AGF）は凍土の強度、遮水性を利用し、シールドの発進・到達立坑や汚染物質の封じ込めなどに適用されている。福島県凍土遮水壁は人工凍土で原子炉建屋を囲み、建屋内に流れ込む地下水量を減らすことにより、汚染水の発生を抑制する。人工凍土は、建屋内の汚染水の漏水防止対策が完了するまでの期間、維持管理することが必要である。維持管理期間中は凍結面が固定され、凍結面付近の未凍土では激しい脱水压密を受け、SC が発生し、SC が水道（みずみち）となることが懸念された。

これまでの研究では SC の発生による凍結面前面の未凍土の透水係数変化を実験的に検討し、凍結前の未凍土よりも凍結している最中の凍結面前面の未凍土における透水係数が大きいことが確認された¹⁾。今回は AGF を再現した水平方向変位拘束凍結融解鉛直透水実験を新たに開発し、凍上性の違いが凍結面前面の未凍土の透水係数に及ぼす影響を明らかにするため、物性値が異なる 2 種類の細粒土を用いて、凍結前の未凍土と凍結面前面の未凍土、融解後の凍結融解土の透水係数を比較した。

2.実験方法：試料土は表 1 に物性値を示す黄土 16N と藤森 16N である。実験には、試料土を液性限界の 1.3 倍の含水比に調整してペースト状になるまで練り混ぜて脱気し、24 時間養生した後、予圧密荷重 $P = 500 \text{ kN/m}^2$ まで段階的に圧密した供試体（幅 20cm、奥行き 5cm、高さ約 7cm）を使用した。

図 1 に水平方向変位拘束凍結融解鉛直透水実験の概要を示す。実験セルは頂板、底板、冷却プレート、アクリルプレートから構成される。頂板にはシャフトを通し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で鉛直方向変位が測定された。頂板の補助シャフトとシャフトガイドで上載荷重と変位の鉛直性が保持された。透水試験を行う際には底板とビュレットを接続し、頂板から排水した。

冷却プレートは一方を低温側（Tc）、他方を高温側（Tw）とし、水平方向に凍結し、冷却プレートに設置された温度センサーで冷却温度が測定された。凍結融解時には Tw から給排水を行った。

実験では凍上性の異なる黄土 16N と藤森 16N を用い、凍結条件はステップ式凍結、実験荷重 $p = 100 \text{ kN/m}^2$ 、温度勾配 $dT/dx = 2.5 \text{ }^{\circ}\text{C/cm}$ で統一した。図 2 に冷却温度を示す。凍結前と融解後は Tc, Tw = 5 $^{\circ}\text{C}$ で未凍結・凍結融解透水試験が行われた。半凍結は Tc = 0 $^{\circ}\text{C}$ 、Tw = 10 $^{\circ}\text{C}$ で 20 時間冷却後、Tc = -10 $^{\circ}\text{C}$ に温度降下させて一定温度に保ち、凍結面が固定された後、給排水を止

表 1 試料土の物性値

試料土	工学的分類	土粒子密度		液性限界		塑性限界		粒度分布		
		ρ_s	g/cm^3	W_L	%	W_P	%	砂分	シルト分	粘土分
黄土16N	CH	2.702		54.5		22.1		0.9	31.5	67.6
藤森16N	CL	2.705		45.5		23.4		3.7	46.3	50.0

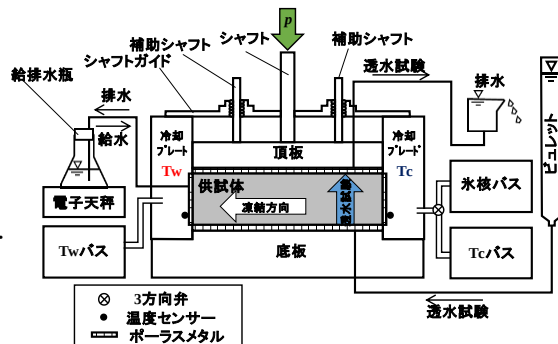


図 1 水平方向変位拘束凍結融解鉛直透水実験装置

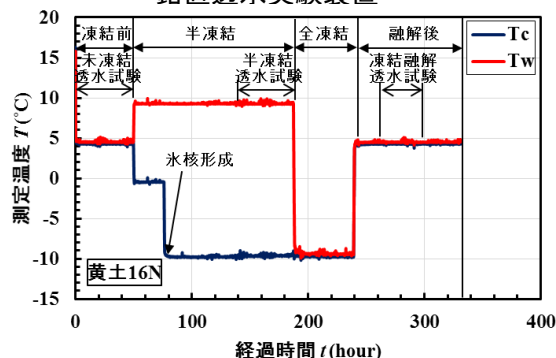


図 2 供試体冷却温度の経時変化

キーワード 凍結、収縮クラック、透水係数、飽和細粒土、人工地盤凍結工法

連絡先 〒552-0016 大阪府大阪市港区三先1丁目11番18号 奥村組土木興業技術部 TEL 06-6572-5262

めて半凍結透水試験が行われた。透水試験終了後に給排水を再開し、 $T_w = -10^\circ\text{C}$ に温度降下させ全凍結した。

凍結実験後は供試体を T_c から T_w まで 1cm 間隔で 20 等分して含水比測定を行い、間隙比を算出した。

3.結果と考察：図 3 に鉛直変位量 h_v の経時変化を示す。 h_v は水核形成後および全凍結開始時に急増した。黄土 16N は藤森 16N より最大 h_v が大きくなった。

図 4 に給水量 V の経時変化を示す。 V は水核形成時に約 1 cm^3 減少した後一定になり、試料土による違いはなかった。融解時には藤森 16N における V の減少が顕著であった。

図 5 に凍結実験後の間隙比分布を示す。いずれの土も T_c からの距離 $d = 9 \sim 20\text{ cm}$ では未凍結土と比較して凍結融解土の間隙比 e が小さくなった。 $d = 0 \sim 9\text{ cm}$ では、黄土 16N では $d = 9\text{ cm}$ に近いほど凍結融解土の e が未凍結土よりも著しく大きくなり、藤森 16N では未凍結土と凍結融解土の e は概ね一致した。

図 6(a)に黄土 16N における未凍結・半凍結・凍結融解時の透水係数を示す。半凍結時の未凍土の透水係数 k_{hf} は、未凍土長さが温度データより 11 cm、奥行き 5 cm、高さ 7 cm として計算している。 k_{hf} は凍結前の未凍結土の透水係数 k_u と比較して 10 倍以上大きくなり、凍結融解土の透水係数 k_t とは同程度になった。図 6(b)に藤森 16N の透水係数を示す。 k_{hf} は k_u と明確な違いはなかった。 k_t は k_u よりも大きくなった。

図 7 に凍結時の供試体の凍結状況を示す。IL は藤森 16N と比較すると黄土 16N の方が厚く形成された。黄土 16N の方が凍結面付近の e が激しく増加し、厚い IL が形成されていることから、黄土 16N の方が藤森 16N よりも凍上性が高い土であると考えられる。図 6(a)より黄土 16N の k_{hf} が k_u よりも著しく透水係数が増加しており、供試体内部には IL の発生に伴う激しい脱水作用が発生し微細な SC が多数発生し、水道となった可能性がある。

4.まとめ：本研究の成果をまとめる。①凍結面前面の未凍土は脱水圧密を受けて、凍結前の未凍土よりも間隙比が減少した。特に黄土 16N では間隙比の減少が顕著であった。②凍上性の高い黄土 16N では、凍結面前面の未凍結土における透水係数が凍結前の未凍結土と比較して約 10 倍増加した。一方、藤森 16N では、凍結面前面の未凍結土の透水係数が増加しなかった。③今後は実験荷重や冷却条件を変化させ、SC の発生や凍結面前面の未凍土の透水係数の変化を検討する。

謝辞：本研究には科学研究費補助金(基盤研究(B))課題番号 17H03307 番が使用されています。**参考文献：**1) 廣瀬剛他：細粒土の凍結時に未凍土部分で生じる収縮クラックの透水係数に与える影響について、土木学会第 72 回年次学術講演会、III-446, pp.891-892,2017。

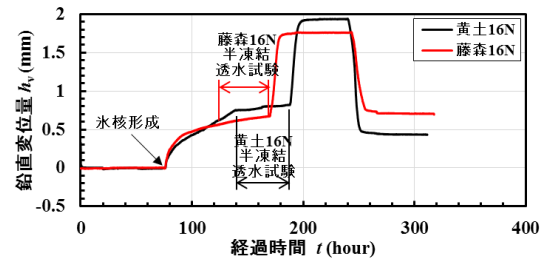


図 3 鉛直変位量の経時変化

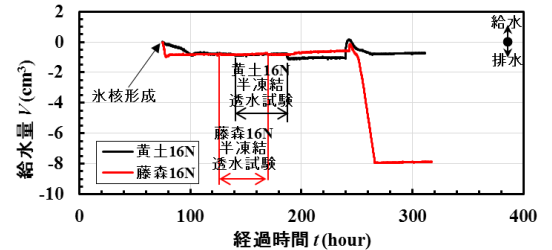


図 4 給水量の経時変化

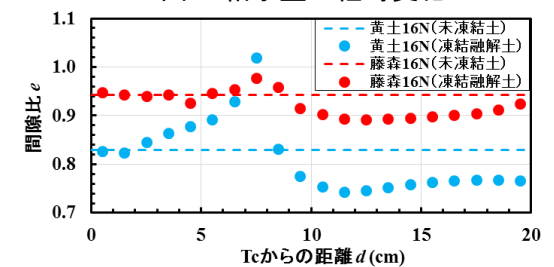
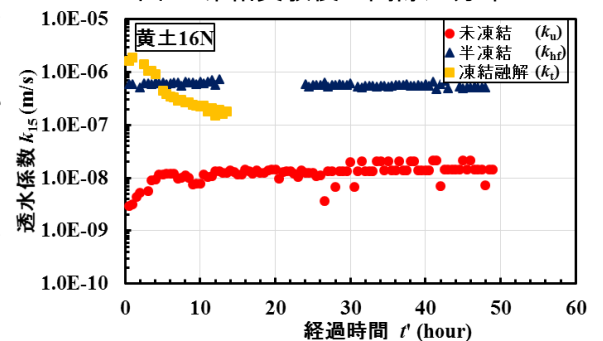
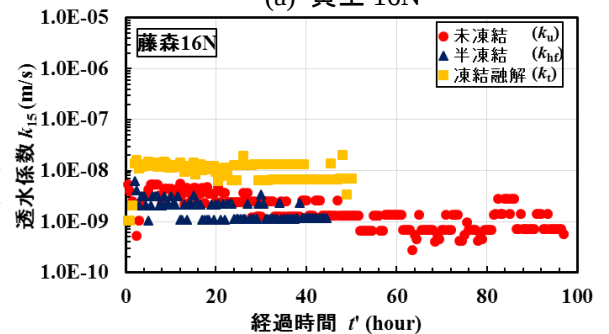


図 5 凍結実験後の間隙比分布



(a) 黄土 16N



(b) 藤森 16N

図 6 未凍結・半凍結・凍結融解における透水係数

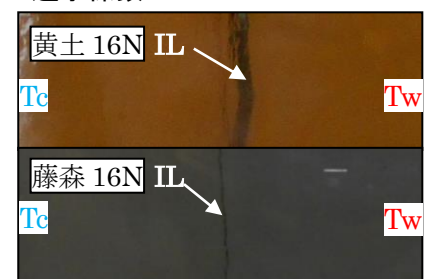


図 7 凍結状況