

載荷条件下における不凍水量と透水係数の関係

摂南大学 正会員 ○廣瀬 剛
摂南大学 正会員 伊藤 謙

1. 目的: 砂質土の透水係数は一般的に土の粒度や間隙比等から比較的精度よく推定することができる。しかし、粘性土ではこれらの指標からのみ透水係数を推定することは困難である。その理由の一つは、粘性土において間隙水が土粒子に吸着された水分と自由水とから構成されることと関係しているとされてきた。このような自由水と吸着水とを定量化する方法として、凍結実験を行う方法が提案され、両者の境界を -1°C 付近とすると、透水係数や一軸圧縮強度を比較的よく評価できることが報告されている¹⁾。この実験は無載荷条件下で行われていた。本研究では凍結融解過程において載荷条件下とした実験を行い、凍結間隙比、未凍結間隙比を算出し、透水係数との関係を検討した。

2. 実験方法: 実験では表 1 に示す $425\mu\text{m}$ ふりを通過した黄土 16N を使用した。試料土を液性限界の 1.3 倍の含水比に調整して練り混ぜ、脱気後 24 時間養生してペースト状試料を作成した。透水係数は標準圧密試験(JIS A 1217)と変水位透水試験(JISA1218)を準用し、 $p = 19.6 \sim 1256\text{ kN/m}^2$ の荷重段階ごとにそれぞれ 24 時間の圧密試験と透水試験を行い、 $p = 78.5, 157\text{ kN/m}^2$ における透水係数を求めた。予圧密荷重は $P = 78.5, 157\text{ kN/m}^2$ とし、予圧密後に $\phi 10\text{cm}$ $h = 3\text{ cm}$ の円筒形供試体に成形した。

実験装置は円筒形セル、上・下部プレートから構成される。供試体上端面の温度(T_{top})、下端面の温度(T_{btm})はそれぞれのプレートに設置された Pt センサーにより測定された。図 1 に T_{top} と T_{btm} の経時変化を示す。供試体は $T_{\text{top}} \cdot T_{\text{btm}}$ を -1°C から -20°C まで段階的に温度降下後上昇させた。上載荷重は $p = 78.5, 157\text{ kN/m}^2$ を鉛直方向に載荷した。図 2 に変位量の経時変化を示す。凍結開始時刻を基準とした変位量の増減を計算し、各温度における変位 Δd を計算した。以下の式から、凍結した水の高さ h_{wf} 、凍結水体积 $V_{\text{wf}}(\text{T}^{\circ}\text{C})$ 、凍結間隙比 $e_{\text{f}}(\text{T}^{\circ}\text{C})$ 、未凍結間隙比 $e_{\text{u}}(\text{T}^{\circ}\text{C})$ 、凍結水量 W_{f} 、不凍水量 W_{u} をそれぞれ求める。

$$h_{\text{wf}} = \Delta d / 0.09 \quad (1) \quad , \quad V_{\text{wf}}(\text{T}^{\circ}\text{C}) = h_{\text{wf}} \times A / 10 \quad (2)$$

$$e_{\text{f}}(\text{T}^{\circ}\text{C}) = V_{\text{wf}}(\text{T}^{\circ}\text{C}) / V_{\text{s}} \quad (3) \quad , \quad e_{\text{u}}(\text{T}^{\circ}\text{C}) = e - e_{\text{f}}(\text{T}^{\circ}\text{C}) \quad (4)$$

$$W_{\text{f}} = e_{\text{f}}(\text{T}^{\circ}\text{C}) / e \quad (5) \quad , \quad W_{\text{u}} = e_{\text{u}}(\text{T}^{\circ}\text{C}) / e \quad (6)$$

ここに、 Δd : 各温度での変位(mm)、 A : 断面積(cm^2)、 V_{s} : 土粒子の体積(cm^3)、 e : 間隙比とする。

3. 実験結果

(1) 上・下端面の温度分布: 図 3 に T_{top} と熱電対による供試体上端面の温度測定を示す。上端面の温度分布は $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 程度のばらつきを示した。図 4 に T_{btm} と熱電対による供試体下端面の温度測定を示す。 T_{btm} と下端面との温度差は

表 1 試料土の物性値

試料名	ρ_s g/cm ³	LL %	PL %	砂 %	シルト %	粘土 %
黄土16N	2.702	54.5	22.1	0.9	31.5	67.6

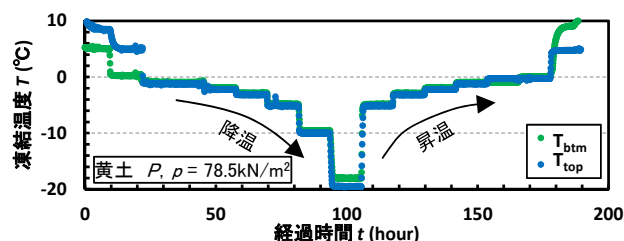


図 1 供試体上下端面温度の経時変化

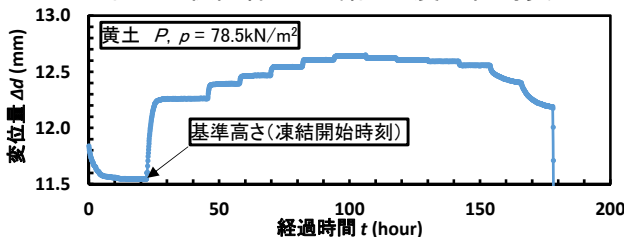


図 2 変位量の経時変化

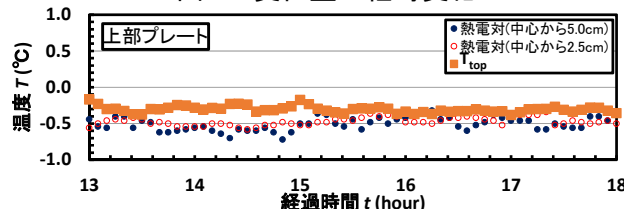


図 3 供試体上端面の冷却精度

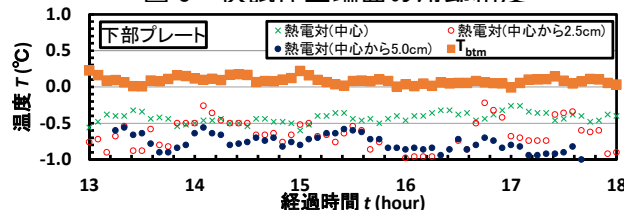


図 4 供試体下端面の温度分布

キーワード 不凍水量, 凍結水量, 透水係数, 凍土, 間隙比

連絡先 〒572-0074 大阪府寝屋川市池田中町 17-8 摂南大学 TEL 072-839-9106

0.5~1℃程度確認された。下端面の測定温度には±0.5℃程度のばらつきが認められた。

(2)凍結水量 W_f 、不凍水量 W_u と凍結温度 T の関係：図5に降温時と昇温時の W_f の変化を示す。降温時と昇温時の W_f は一致していない。これは降温時には土粒子からの吸着作用を受けて凍結し難い水分が、一旦凍結すると土中で分離して氷晶を形成して、昇温時には0℃付近まで多量の氷晶が残るためであると考えられる。今回は温度降下過程における W_f を使用した。図6に W_f 、 W_u と T の関係を示す。 W_f は $T = -1℃$ で急激に増加するが、その後は W_f の増加は低く抑えられた。 W_u は W_f とは逆の関係が見られた。

(2)凍結間隙比 $e_f(T℃)$ 、未凍結間隙比 $e_u(T℃)$ と凍結温度 T の関係：図7に T と $e_f(T℃)$ 、 $e_u(T℃)$ の関係を示す。 $e_f(T℃)$ は荷重が小さい $p = 78.5 \text{ kN/m}^2$ の方が大きく、 $e_u(T℃)$ は荷重による違いがない。つまり、土の圧密により排除される水分は自由水であり、吸着水は今回の荷重レベルでは排除されずに一定であることが分かる。

(3)凍結間隙比 $e_f(T℃)$ 、未凍結間隙比 $e_u(T℃)$ と透水係数 k の関係：図8に $e_f(T℃)$ と k の関係を示す。 $e_f(T℃)$ は同じ温度で比較すると $p = 157 \text{ kN/m}^2$ の方が小さくなった。 $e_f(T℃)$ の温度の低下による増分は-1℃以下で p に関係なく一定となった。図9に $e_u(T℃)$ と k の関係を示す。 $e_u(T℃)$ は-1℃以下では p に関係なく一致した。

図7に示したように、-1℃までに間隙水が多量に凍結し、それより低温では凍結水量の増加が少ないことから、-1℃で凍結する水分が自由水に近いと考えられる。そして、透水係数は上載荷重が大きくなると間隙比の減少により小さくなり、図8に示すように、-1℃より低温側で上載荷重に関わらず凍結間隙比との関係が一定となるため、-1℃で凍結する水分が透水係数に影響していると読み取ることができる。また、図9に示すように、-1℃より低温側では未凍結間隙比が荷重に関係なく一定であることから理解することができる。つまり、細粒土の透水性は、吸着水ではなく自由水により決定されることが確認された。

4. まとめ：(1) 間隙水は-1℃までに急激に凍結し、-1℃より低温では凍結水の増加量は小さい。(2) 凍結間隙比および未凍結間隙比は、-1℃以下では上載荷重の影響をほとんど受けない。(3) 透水係数には-1℃までに凍結する水分が関係している。つまり吸着水ではなく自由水が透水係数に影響すると考えられる。

参考文献：1)伊藤譲他：飽和細粒土における透水性と吸着水との関係について、第47回地盤工学研究発表会、153, pp.303-304, 2012.

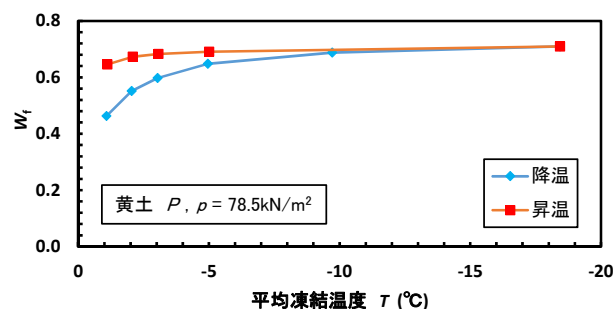


図5 凍結水量と凍結温度の関係

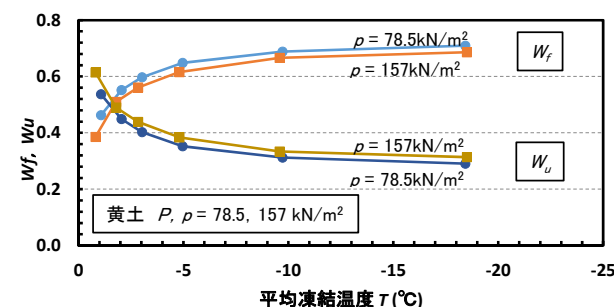


図6 凍結水量・不凍水量と凍結温度の関係

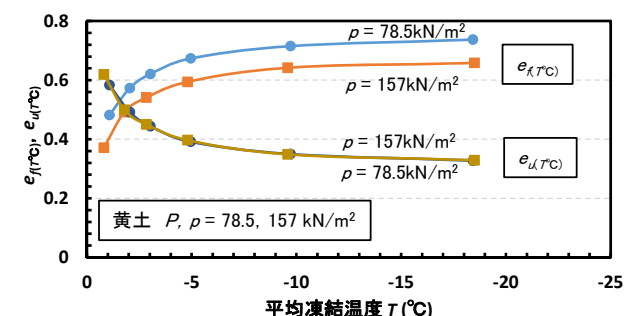


図7 凍結・未凍結間隙比と凍結温度の関係

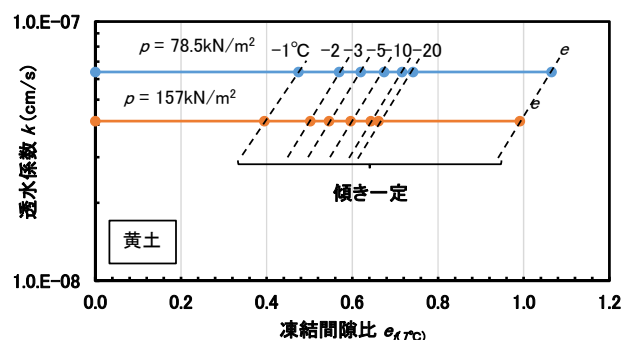


図8 凍結間隙比と透水係数の関係

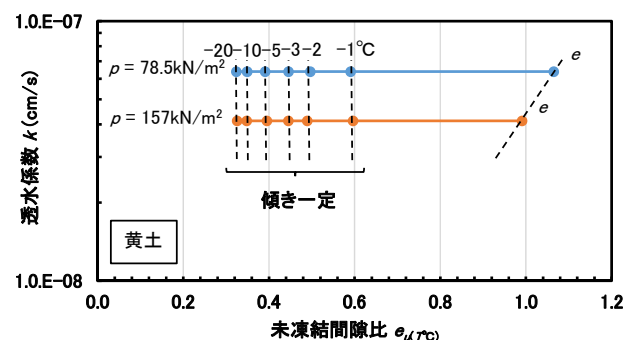


図9 未凍結間隙比と透水係数の関係