# 凍結試験から細粒土の透水性のメカニズムを考える

摂南大学　正会員　○伊藤　譲

## 1. 目的

飽和細粒土の強度や圧縮性などの工学的性質は間隙水に支配されているといわれている．間隙水は土粒子近傍では土粒子からの強い吸着作用を受け吸着水と呼ばれ，土粒子表面から離れるに従い吸着力は急激に低下し，重力の影響のみを受ける自由水へと連続的に変化している．土の工学的性質をこのような間隙水の性質から評価できないかと考え，簡易な土の凍結試験から得られる「凍結間隙比 $e_f$」と「未凍結間隙比 $e_u$」と呼ばれる指標を提案して検討してきた．

これまで，主として液性限界の低い土についての実験結果から，一軸圧縮強さ，透水性，圧縮性（圧縮指数，体積圧縮係数）などは，凍結間隙比 $e_f$によって定義される凍結しやすい性質を有するいわゆる自由水と呼ばれる水分の割合によって支配され，未凍結間隙比 $e_u$によって定義される凍結しにくい性質を有する吸着水と呼ばれる水分には影響されないことが示されている．つまり，細粒土において吸着水は土粒子と一体となっているため，工学的挙動には影響を及ぼさないと言い変えることもできる．しかし，未凍結間隙比 $e_u$＝0.6 付近を境界としてその様子は異なり，本研究の目的はこの原因を探ることにある．

本報告では，最初に従来の無載荷の凍結試験に対して，載荷した状態で実施する凍結試験（以下，「載荷凍結試験」）の説明を行い，両試験の比較検討を行う．次に，液性限界の大きく異なる試料土を用いて，両試験から得られる指標と透水係数との関係について考察する．

## 2. 試験方法

**表-1** に本研究に用いた試料土の物性値を示す．各試験前の供試体作成のため，試料土を液性限界の約 1.3 倍の含水比状態で練り混ぜ，養生，脱気後に予圧密を行う．本報告では，圧密試験（JIS A 1217）の各段階の圧密終了後に行った 24 時間の変水位透水試験の結果を用いた．

**表-1** 試料土の物性値

| 試料土 | 密度 $\rho_s$ g/cm$^3$ | 液性限界 $w_L$ % | 塑性限界 $w_P$ % | 粒度分布 砂 % | シルト % | 粘土 % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 藤森13N | 2.630 | 40.6 | 23.2 | 12.9 | 60.3 | 26.8 |
| 白土11 | 2.649 | 61.3 | 25.4 | 3.0 | 35.0 | 62.0 |
| 黄土11 | 2.624 | 50.8 | 24.6 | 2.1 | 49.7 | 48.2 |
| 水ひ | 2.627 | 46.9 | 20.9 | 8.2 | 37.4 | 54.4 |
| 1T(No.4) | 2.642 | 70.7 | 25.6 | 3.7 | 44.9 | 51.4 |
| DS-1(No.1) | 2.733 | 105.6 | 37.4 | 0.3 | 42.7 | 57.0 |
| 1D-2(No.3) | 2.623 | 125.6 | 34.3 | 1.8 | 36.6 | 61.6 |

**(1) 従来の凍結試験**：$p$ = 19.6～1254kN/m$^2$ で予圧密した供試体をアクリルリングに移し，真空吸引パックする．次に，アルミ製容器に入れ密閉した後，-5℃まで急激に温度を降下させ氷核形成を行う．氷核形成後，段階的に温度を降下させ，各温度での体積変化をビュレットで測定する．ここで，凍結試験より得られる供試体中の凍結した水分の体積 $V_{wf(T℃)}$ (cm$^3$)から，凍結間隙比 $e_{f1(T℃)}$と未凍結間隙比 $e_{u1(T℃)}$が以下の通り求まる．

$$e_{f1(T℃)} = \frac{V_{wf(T℃)}}{V_s} \quad (1) \qquad e_{u1(T℃)} = e - e_{f1(T℃)} = \frac{V_{wu(T℃)}}{V_S} \quad (2)$$

ここに，$T$：測定温度(℃)，$V_{wu}$：不凍水の体積(cm$^3$)，$V_s$：土粒子体積(cm$^3$)，$e$：間隙比である．

**(2) 載荷凍結試験**：$p$ = 78.4～313.6kN/m$^2$ で予圧密して供試体を作成する．次に，凍結リングに加圧板を載せ，不凍液で満たしたアルミ製バスに入れ，予圧密荷重と等しい荷重を載荷する．その後は，前述と同様に段階的な温度降下を行い，供試体の膨張量 $\Delta h$ を変位計で測定する．$T$℃で凍結した水分量の高さ $h'_{(T℃)}$(cm)，凍結間隙比 $e_{fp1(T℃)}$，未凍結間隙比 $e_{up1(T℃)}$は次のように求められる．

$$h'_{(T℃)} = \frac{\Delta h}{0.09} \quad (3) \qquad e_{fp1(T℃)} = \frac{h'_{(T℃)}}{h_s} \quad (4) \qquad e_{up1} = e - e_{fp1(T℃)} \quad (5)$$

キーワード　透水係数，凍結試験，液性限界，圧密

連絡先　〒572-8508　大阪府寝屋川市池田中町 17-8 摂南大学理工学部都市環境工学科　TEL072-839-9701

### 3. 結果と考察

**図-1** に凍結間隙比 $e_{fl(-1℃)}$と $e_{fpl(-1℃)}$の比較を示す．当初の予想では，全体的に $e_{fl(-1℃)}$よりも $e_{fpl(-1℃)}$が小さくなると予想された．しかし，液性限界 $w_L$ = 60%より小さい土では $e_{fl(-1℃)}$と $e_{fpl(-1℃)}$が同等であるか $e_{fpl(-1℃)}$の方がやや小さく予想のとおりであったが，60%より大きい土では明らかに $e_{fpl(-1℃)}$の方が大きくなる傾向が見られる．このことは，$w_L$ が大きい土では凍上性が強いために，供試体厚が大きい載荷凍結試験において，凍上による水分移動の影響が強く，土粒子周辺の水分が奪われて凍結する水分量が増えたためではないかと考えられる．また，今回の実験の荷重レベルにおいては凍結を抑制する効果はそれほど大きくないと考えられる．

**図-2** に凍結間隙比 $e_{fl(-1℃)}$，$e_{fpl(-1℃)}$と透水係数 $k_{15}$の関係を示す．試料によってばらつきは見られるが，全体的に $p$ の増加に伴い自由水を示す $e_{fl(-1℃)}$，$e_{fpl(-1℃)}$が減少し $k_{15}$ が減少している．その程度は液性限界の小さいグループにおいて急激であり，大きいグループにおいてなだらかである．前者は土粒子がお互いに接触して圧縮により間隙の形状と大きさが変化するために間隙比関数に示されるとおり透水係数は指数関数的に変化するが，後者は土粒子の接触が少なく，間隙水に浮いた状態であり，間隙水の減少とほぼ比例して透水係数が低下するものと推察される．

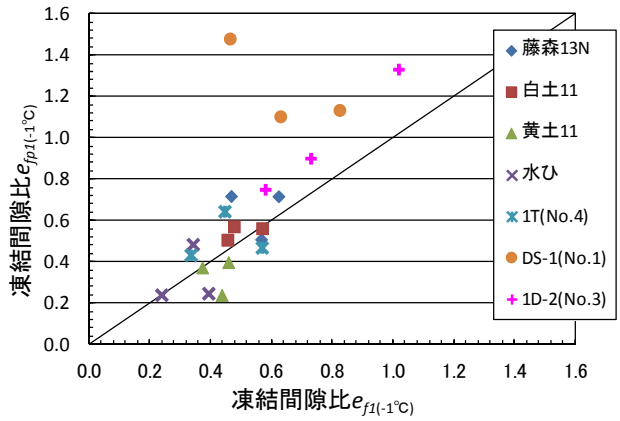


**図-1** 凍結間隙比 $e_{fl(-1℃)}$と $e_{fpl(-1℃)}$

**図-3** に未凍結間隙比 $e_{ul(-1℃)}$と透水係数 $k_{15}$の関係を示す．全ての試料において $p$ の増加に伴い $e_{ul(-1℃)}$は一定であるが，$k_{15}$ は減少する傾向が認められる．しかし，その様子は $e_{ul(-1℃)}$ = 0.6，液性限界 $w_L$ = 60%付近を境界として異なり，$e_{ul(-1℃)}$ が 0.6 より小さくなっても，0.6 よりも大きくなっても $k_{15}$ の下限は大きくなる傾向を示す．つまり，$e_{ul(-1℃)}$ = 0.6 を示す $w_L$ = 60%の材料において $k_{15}$ は最小を示し，粘土分の割合が最適である時に透水係数が最も低くなることを意味するのであろうか．また，$e_{ul(-1℃)}$ を詳細に検討すると $w_L$ = 60%未満の土では載荷重の増加に伴い吸着水が若干増加している．これは，間隙が狭くなることによる毛管水の増加と関係するかも知れない．

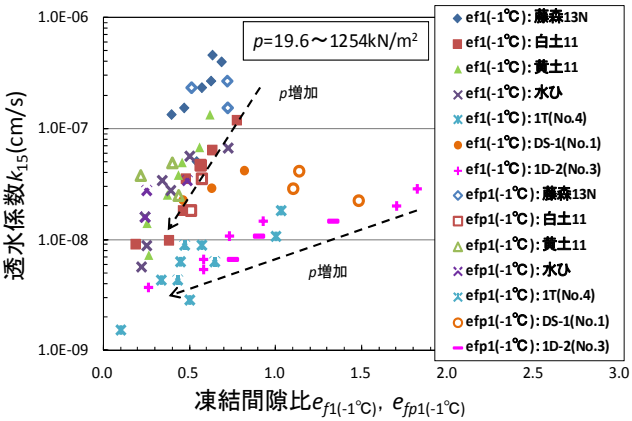


**図-2** 凍結間隙比 $e_{fl(-1℃)}$，$e_{fpl(-1℃)}$と $k_{15}$

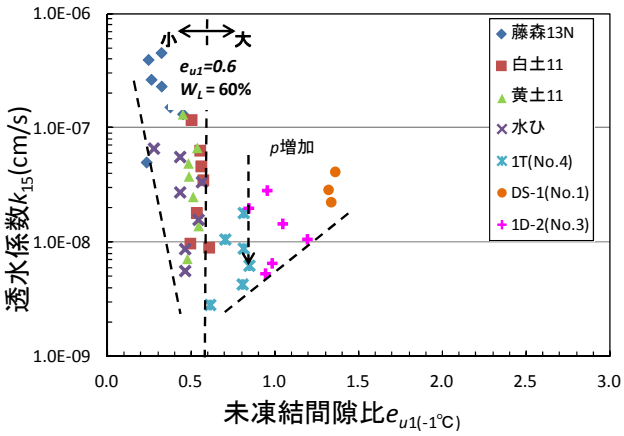


**図-3** 未凍結間隙比 $e_{ul(-1℃)}$と $k_{15}$

**4. まとめ**：(1)載荷凍結試験では，載荷重の影響は大きいとは言えないが，供試体厚が大きいために $w_L$≧60%の凍上性の強い土では凍結間隙比を若干大きめに評価している可能性がある．(2)個々の土の透水係数は自由水に支配され，吸着水には影響されないが，液性限界の違いにより自由水の $k_{15}$ に及ぼす働きは異なることが示唆された．(3) $e_{ul(-1℃)}$と $k_{15}$ の関係より，載荷重のレベルでは吸着水は排水されないこと，$w_L$ = 60%付近の材料を境に $e_{ul(-1℃)}$と $k_{15}$ の関係が変わることが示された．

**謝辞**：本報告には科学研究費補助金(基盤研究(C)，課題番号 22560501 番)で実施された内容が含まれています．また，本研究の実験は石田裕一，後島佑輔，脇本尊志の卒業研究によるものであります．ここに記して感謝の意を表します．

**参考文献**：1)佛圓典史・伊藤譲：飽和細粒土の凍結試験から得られる指標と圧密特性との関係，土木学会第 68 回年次学術講演会概要集，pp.349-350，2013.