

飽和細粒土における圧密特性の凍・不凍水量による解釈¹

Interpretation of consolidation characteristics in a saturated fine-grained soil by the amount of frozen / unfrozen water

鈴木 和也² 摂南大学大学院 理工学研究科
伊藤 譲 摂南大学理工学部 都市環境工学科
SUZUKI, Kazuya Graduate School of Science and Engineering,
Setsunan University
ITO, Yuzuru Department of Civil and Environmental Engineering,
Setsunan University

Abstract

The purpose of this study is to understand the relationship between the amount of frozen / unfrozen water in a saturated fine-grained soil and its consolidation characteristics. In this study, we compared and examined the relationship between the frozen / unfrozen void ratio and the geotechnical engineering properties (compression index, coefficient of permeability and coefficient of volume change) of a fine-grained soil (Shirotsuchi clay). It was revealed that the newly proposed frozen void ratio was related to the geotechnical engineering properties, and the unfrozen void ratio has no relation to them. Therefore, it was considered that the free water represented by frozen void ratio governs the consolidation characteristics.

キーワード: 圧密, 飽和細粒土, 未凍結水, 圧縮指数, 透水係数, 体積圧縮係数

Keywords : Consolidation, Saturated fine-grained soil, Unfrozen Water, Compression Index, Coefficient of Permeability, Coefficient of Volume Change

1. はじめに

土質試験より土質に応じた強度, 圧縮性や透水性などの工学的諸量を得ることができる。しかし, 建設工事の度に土質試験を行う必要があるのは, 地盤を構成する土粒子と間隙水の存在状況に関する理解が不足していることにも一因があると言えよう。そこで土粒子と間隙水(そして気体)の存在状態と工学的性質の関係を理解することは重要であり, それらの知見を基に, より合理的で簡単な方法で土の工学的性質を評価できれば, 土質試験が困難な場合にも実用的に一定の精度を有する諸量を推定することができるものと考えられた。

土の物理化学的アプローチから, その工学的性質を予測する試みが行われてきたが, まだ理論的にも実

¹【原稿受付】2021年9月11日, 【掲載決定】2022年1月22日

²【主著者連絡先】鈴木 和也 摂南大学大学院修士課程 e-mail: 21m211sk@edu.setsunan.ac.jp
〒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

験的にも実用的なレベルにまで到達していない。その原因として、特に細粒土においては土粒子と水の関係は複雑であり、土粒子表面の近傍では水の密度が大きく、粘性も強くなり、本来の水（自由水）とは異なる性質の吸着水（結合水）として存在するといわれている。しかし、それらを直接的に測定する方法が存在しなかった。

土は土粒子、水、空気の三相から構成されており、土の工学的性質はこの三相の状態によって支配されている。ところが飽和土では、土粒子と水の2相から構成されているので、単純なように見えるが、実質的には間隙水は土粒子の表面力を受けているので、土粒子と土粒子の表面力に影響されている間隙水（＝吸着水）、影響されていない間隙水（＝自由水）の3つの相に分かれる。このように、間隙水は土粒子表面からの影響の程度、つまり距離等に応じて段階的に変化するものと考えられた。

図1の拡散二重層のモデルに示すように、土粒子の近傍付近に存在する吸着水とは、土粒子の表面に帯電するマイナスの電荷が、含水状態において水の極性のため水素イオン H^+ を粘土表面に引き寄せ、その外側に酸素イオン O^{2-} の卓越した領域が続く拡散二重層が形成されるほど、土粒子の表面力の影響を強く受けた密度が大きく、粘性が強く、水の凝固点（ $0^{\circ}C$ ）以下でも凍りにくい性質を有する水分が存在すると考えられる。

このように、土が凍結するときの凍結水と未凍結水を測定して、凍結した水量に対応する間隙比を式(2)、(3)に定義した凍結間隙比 e_f 、 e_p とし、未凍結水量に対応する間隙比 e_u を式(4)に定義し、これら e_f 、 e_p 、 e_u と土の圧密特性との関係性を検討するものである。 e_f は間隙水が凍結する際の凍結膨張に関係する量である。 e_u は式(1)に定義した初期間隙比 e_0 から e_f を引いたもの、 e_p は e_u と土粒子が一体化していると仮定したときの凍結間隙比である。このような e_f 、 e_p 、 e_u の定義は、間隙比 e という透水性などを評価する簡易な指標が既に存在し、これまで e とさまざまな工学的諸性質との関係性が導かれているからである。そして、その関係性における e を e_f 、 e_p 、 e_u に置き換えて検討することで水分の存在状況がより具体的に把握できると考えられたからである。

2. 実験概要

試料土は表1に示す $425\mu m$ ふるいを通させた京都深草産の白土19Nである。細粒土の間隙水を測定するために、水から氷に変化する際に生じる9%の体積膨張を利用した「凍・不凍水量測定実験」を実施した。図2に凍・不凍水量測定実験装置を示す。試料土にイオン交換水を用いて液性限界の1.3倍の含水比に調整して練り混ぜて脱気した後、内径 $\phi=6\text{ cm}$ 、高さ $h=4\text{ cm}$ の円筒形の圧密容器に流し込み、予圧密荷重 P で圧密を行い飽和細粒土の供試体を作成した。予圧密後の供試体は $+1\sim 4^{\circ}C$ でコントロールされた低温室内で内径 $\phi=6\text{ cm}$ 、高さ $h=2\text{ cm}$ のテフロン製セルに移し替えて実験を行った。

実験は表2に示す正規圧密状態（予圧密荷重 P =実験荷重 p ）の条件で行った。実験では上載荷重（実験荷重）を一定に保ち供試体上下端の温度を同時に図2に示す凍結バスから不凍液を循環させ、 $0^{\circ}C$ で12時間以上養生させた。その後、 $-0.7^{\circ}C$ (20 h)、 $-1.0^{\circ}C$ (18 h)、 $-1.5^{\circ}C$ (12 h)、 $-2.0^{\circ}C$ (6 h)、 $-3.0^{\circ}C$ (3 h)、 $-5.0^{\circ}C$ (3 h)、 $-10.0^{\circ}C$ (3 h)、 $-15.0^{\circ}C$ (3 h)と段階的に降下させ凍結を行い、その後温度を段階的に上昇させ融解を行った。なお、 $0^{\circ}C$ で12時間以上養生させたのち $-0.7^{\circ}C$ に降下させてからおよそ2時間後に図2に示す凍結バスから約 $-5.0^{\circ}C$ の不凍液を循環させるために氷核バスからの循環に切り替えた。瞬間的な変位量の増加を確認した直後から約15秒後に氷核バスから元の凍結バス循環に再び切り替えた。その後、温度が低下するにつれて水が氷へと相変化し、体積膨張によって変位が増加する。供試体高さの氷核形成直前の変位量を基準値とし、基準値からの変位量を用いて凍・不凍水量、凍結間隙比 e_f 、未凍結間隙比 e_u を計算した。本研究では e_0 、 e_f 、 e_p 、 e_u を以下の式で定義した。

$$e_0 = \frac{V_w}{V_s} = \frac{V_{w1} + A \times (-d_1)}{V_s} \quad (1)$$

$$e_f = \frac{V_{wf}}{V_s} = \frac{(A \times d_x) \div 0.09}{V_s} \quad (2)$$

$$e_{f2} = \frac{V_{wf}}{V_s + V_{wu}} = \frac{e_f}{1 + e_u} \quad (3)$$

$$e_u = \frac{V_{wu}}{V_s} = e_0 - e_f \quad (4)$$

ここで、 V_s ：融解後の土粒子体積、 V_{w1} ：融解後の供試体中の水の体積、 d_1 ：基準値から融解後の変位量、 d_x ：凍結期間における所定の温度で変位が一定になった時の凍結膨張量、 A ：供試体断面積、 0.09 ：水が氷へ相変化するときの体積膨張率、 V_{wf} は凍結水の体積、 V_{wu} 未凍結水の体積、 e_0 は氷核直前の間隙比、 e_f 、 e_{f2} は凍結間隙比、 e_u は未凍結間隙比である。

e_0 は実験開始時の間隙比（初期間隙比）であり、 $A \times (-d_1)$ は融解後の供試体から実験開始時（氷核形成直前）の変位量に断面積を乗じた値に融解後の間隙比を加えた値を初期の間隙水体積とし、それを融解後の土粒子体積で除して算出された指標である。このように定義したのは凍結前と融解後では土の構造が変化するためであり、 $A \times (-d_1)$ を加えた値が凍結前の間隙比に相当すると考えたからである。 e_f は e_0 から凍結によって膨張した体積 $A \times d_x$ を9%の体積膨張率0.09で除することで供試体内の凍結した間隙水体積が求められ、それを融解後の土粒子体積 V_s で除して算出された指標である。

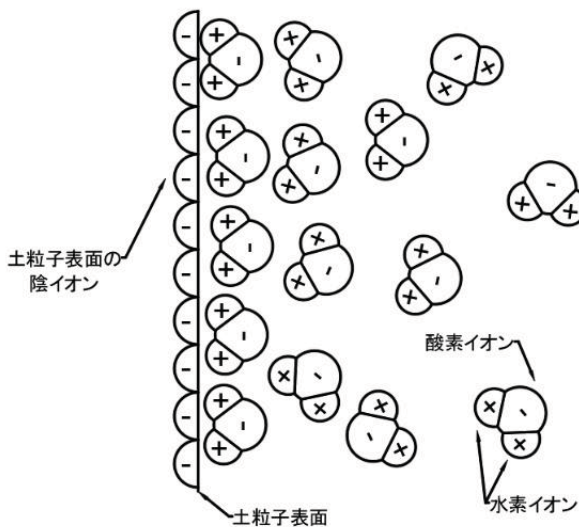


図1 拡散二重層のモデル

表1 試料土の物性値

試料土	土粒子密度	液性限界	塑性限界	粒度分布		
	ρ_s (g/cm ³)	LL (%)	PL (%)	砂 (%)	シルト (%)	粘土 (%)
白土19N	2.673	41.9	18.3	2.8	42.6	54.6

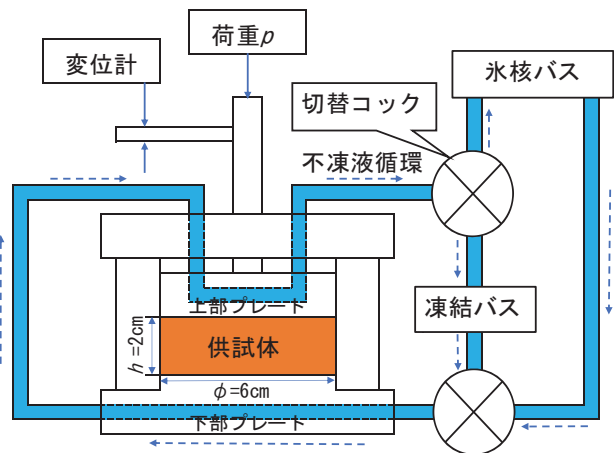


図2 凍・不凍水量測定実験装置

表2 実験条件

試料名	実験ケース	予圧密荷重 P (kN/m ²)	実験荷重 p (kN/m ²)
白土19N	CASE1	39.2	39.2
	CASE2	78.5	78.5
	CASE3	157	157
	CASE4	314	314
	CASE5	628	628

本研究では e_f 、 e_{f2} および e_u を求め、これらに基づいて透水係数 k_{15} 、圧密特性など土の地盤工学的性質と

の関係を明らかにした。なお、本研究で利用される地盤工学的性質は圧密透水試験(JIS A 1217, 1218)から得られた結果を用いた。実験結果に用いた透水係数 $k_{15(c)}$ 、体積圧縮係数 m_v は圧密試験(JIS A 1217)、透水係数 k_{15} は透水試験(JIS A 1218)から得られた値である。

3. 実験結果と考察

3.1 凍・不凍水量測定実験の実験と結果

CASE1 の凍・不凍水量測定実験の実験と結果を以下に示す。

図3の実験荷重の経時変化より、実験中、実験荷重はほぼ一定であることがわかる。

図4は供試体両端面温度の経時変化を示す。温度は0°C、-0.7°C、-1.0°C、-1.5°C、-2.0°C、-3.0°C、-5.0°C、-10.0°C、-15.0°Cと段階的に降下させ、その後段階的に上昇させた。

図5は変位の経時変化を示す。変位量は実験開始直後から減少し、氷核形成時 ($t=20$ h 当たり) で急激に増加した。その後、温度が段階的に降下すると共に変位は段階的に増加した。そして、温度が段階的に上昇していく期間では温度が0°C付近まで上昇した時に急激に変位量が減少した。このことから、凍結期間では間隙水は温度降下に従って段階的に凍結していくが、一度凍結した間隙水の多くは水の融点である0°C近くになるまでは融解しない傾向にあることがわかる。

図6に式(1)、(2)で算出された T と e_f 、 e_u の関係を示す。 e_f は温度が0°Cから-0.7°C、-1.0°Cに降下した時にかけて急激に大きくなり、その後、温度降下の伴って少しずつ増加するが、-5.0°C以下ではほぼ一定であった。 e_u は e_f とは逆の関係を示した。このことから、-5.0°Cで供試体内の凍結すべき間隙水のほぼ全てが凍結したと言える。

3.2 圧密透水試験と凍・不凍水量測定実験の結果

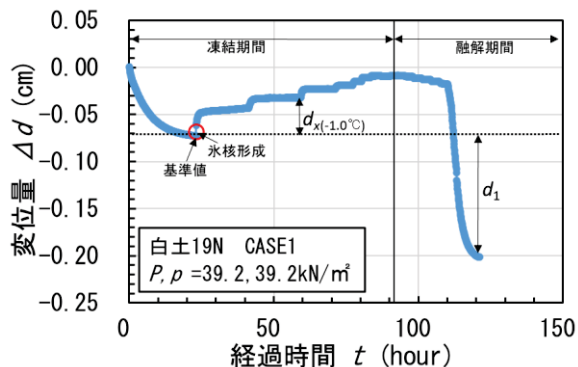


図3 CASE1における実験荷重 p の経時変化

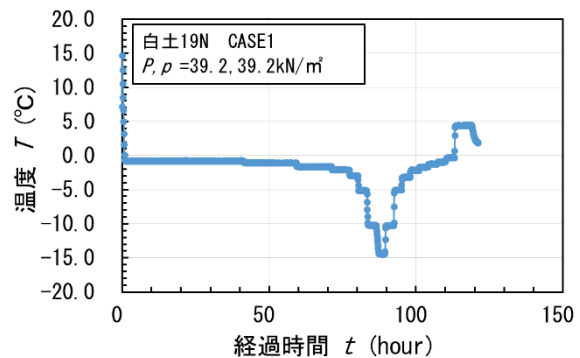


図4 CASE1における実験温度 T の経時変化

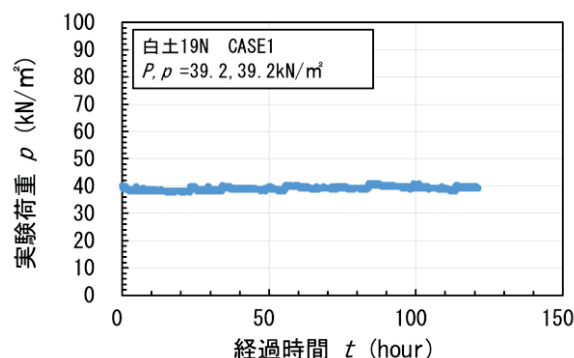


図5 CASE1における Δd の経時変化

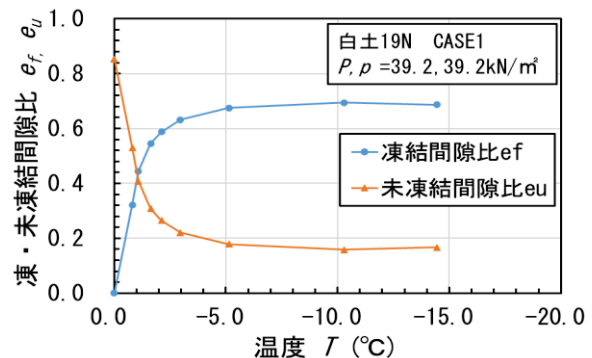


図6 CASE1における T と e_f 、 e_u の関係

図7に間隙比 e と透水試験から得られた透水係数 k_{15} 、圧密試験によって得られた透水係数 $k_{15(c)}$ の関係を示す。圧密透水試験は予圧密 $p = 78.5 \text{ kN/m}^2$ を行った供試体を実験荷重 19.6 kN/m^2 、 39.2 kN/m^2 、 78.5 kN/m^2 、 157 kN/m^2 、 314 kN/m^2 、 628 kN/m^2 の6段階で実施した。ここで、圧密試験によって求められる $k_{15(c)}$ は圧密荷重が $\bar{p} = \sqrt{p \cdot p'}$ (p' :直前の载荷段階の圧密圧力) であるため、凍・不凍水量測定実験の実験荷重とは若干異なる。そこで、 $k_{15(c)}$ は関係性を検討する荷重の前後の p によって求められた $k_{15(c)}$ の平均とした。例えば、圧密荷重が 39.2 kN/m^2 における圧密試験によって求められる $k_{15(c)}$ は $\bar{p} = \sqrt{19.6 \times 39.2} = 27.7 \text{ kN/m}^2$ における k_1 と $\bar{p} = \sqrt{39.2 \times 78.5} = 55.5 \text{ kN/m}^2$ における k_2 の平均であり $k_{15(c)} = (k_1 + k_2) / 2$ となる。図7は e が大きくなると透水係数が大きくなることを示しているが、圧密透水試験において透水係数が大きい図の右から2つのプロットは過圧密条件となっているため、圧密試験で得られた透水係数は本来の e に対する値より大きくなったものと考えられる。本研究では透水試験によって得られた透水係数 k_{15} を e_f 、 e_p 、 e_u との関係を検討する際に用いた。

図8に白土における圧密時に排水される水の凝固点と圧密荷重 p の関係を示す。 p が大きくなると凝固点は低くなる結果が得られ、凝固点は $-0.3 \text{ }^\circ\text{C} \sim -0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ となった。しかし、圧密荷重が小さい場合は圧密初期段階の過飽和状態における排水も含んでいるため、イオン交換水で薄められていると考えられる。このことから、大気圧下の間隙水の凝固点は約 $-0.45 \text{ }^\circ\text{C}$ で一定といえる。

図9にCASE1における凍結過程と融解過程における凍結間隙比 e_f と温度の関係を示す。凍結過程は温度低下に伴って e_f が大きくなる。融解過程で温度が上昇しても融解されにくく、 $-0.7 \text{ }^\circ\text{C}$ でもほとんど凍結状態を維持する。これは、凍結過程において間隙水のすべては凝固せず、凍結した水では結晶構造が大きく成

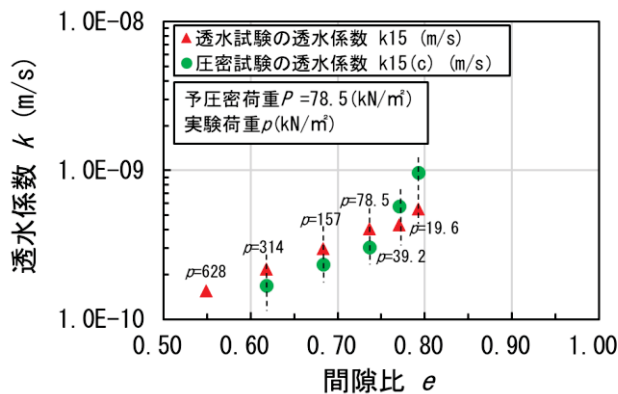


図7 e と k_{15} 、 $k_{15(c)}$ の関係

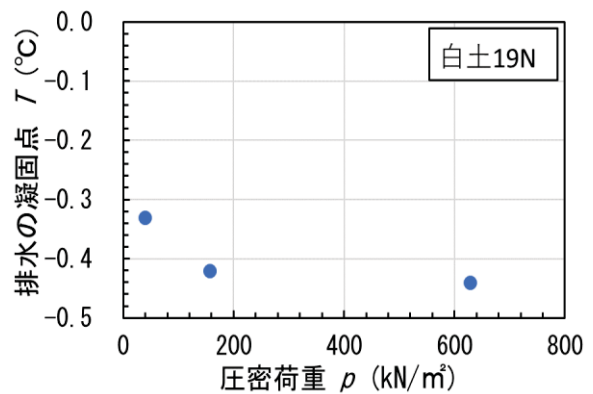


図8 p と凝固点 T の関係

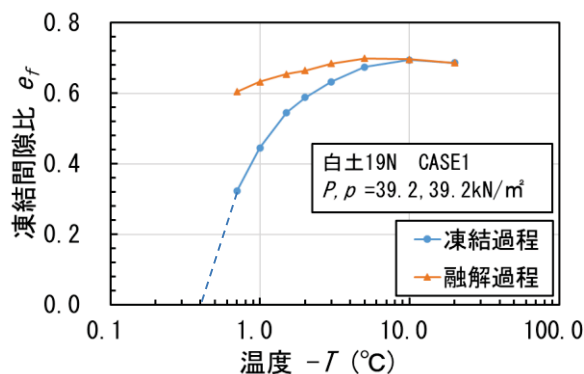


図9 T と e_f の関係

長して氷塊を形成し、一度形成された氷塊は土粒子の表面力を受けないため融点（0℃）以上にならないと融解しないと考えられる。このことから、融解過程では土構造が変化しているため、温度変化による土粒子と間隙水の相互作用のみを表現しているとは言えないため、凍結過程の間隙比を地盤工学的性質との関係性を検討する際に採用するものとした。また、凍結過程において-0.7℃から e_f が0方向に外挿すると-0.4℃付近で e_f が0となる。これは、図8の排水における凝固点とほぼ一致し、このことから凍結過程の間隙比を用いることが適切であると考えられた。

図10に温度 T と e_f 、図11に温度 T と e_u の関係を示す。図10では、温度の低下に伴い e_f が大きくなるが、温度が-5℃を下回ると e_f はほとんど変化せず、最終的に荷重（ $P=p$ ）に対応して0.3~0.7の範囲に収束した。これに対して、 e_u は図11より温度の低下に伴い小さくなり、最終的に荷重（ $P=p$ ）に関係なく0.15~0.3の間に収束した。 e_f 、 e_u 共に-5.0℃以下では温度変化に対する間隙比の変化割合は一定であるため、土粒子付近の吸着水と考えられる未凍結水の割合は、凍結水と同程度に P 、 p の影響を受けていないものと推察される。

3.3 圧密圧力 p と凍結間隙比 e_f 、 e_p の関係

図12、13、14は $e-\log p$ 関係で圧密圧力 p と e_f 、 e_p 、 e_u を整理している。aは-15℃までに凍結しなかった間隙水の割合、bは-0.7℃~-15℃で凍結した間隙水の割合、cは-0.7℃までに凍結した間隙水の割合である。なお、CASE3（ P 、 $p=157$ 、157 kN/m²）は他より少し異なるが、原因は明確にはわからない。

図12に p と e_f の関係、図13に p と e_p の関係を示す。bより温度変化に伴い $e_p-\log p$ 曲線は平行に移動していることから e_f の変化は荷重によらずほぼ一定である。つまり、 $p=39.2\sim 628$ kN/m²で、-1.0℃以下では温度降下により新たに凍結する間隙水は一定である。また、-5.0℃~-15.0℃では図がほぼ重なり、-5.0℃以下で新たに凍結する水分はほとんどないことが読み取れる。

次に、圧縮指数 C_c は $e-\log p$ 曲線の傾きを示す圧縮性の大きさを表す指標である。図13の e_p では、土粒子と近傍の未凍結水が一体となって挙動すると考えている。図12の e_f は土粒子と凍結水の比であり、未凍結水は考慮されていないため、 e_0 と比較すると全体的に右肩下がりの傾向が強い。ゆえに、 C_c を表現するのは $e_0-\log p$ 曲線の傾きと平行関係にある $e_p-\log p$ 曲線の傾きであるといえる。

3.4 圧密圧力 p と未凍結間隙比 e_u の関係

図14に p と e_u の関係を示す。図に示す通り、-0.7℃以下では各温度段階で存在する未凍結水の割合は p に関係なくほぼ一定である。さらにbの領域も荷重によらずほぼ一定であり、温度変化による e_u の変化はほぼ一定である。これは土中に存在する吸着水量は p に関係なく、吸着水量は荷重のような外的な影響よ

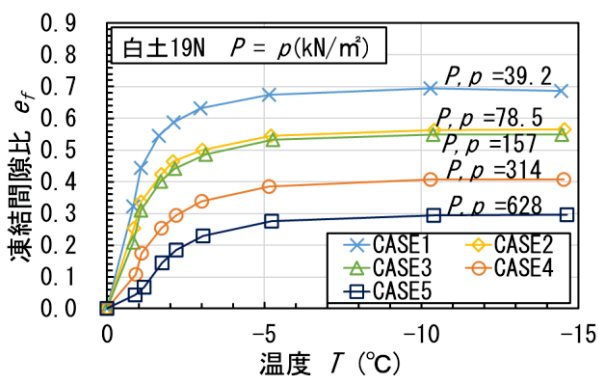


図10 T と e_f の関係

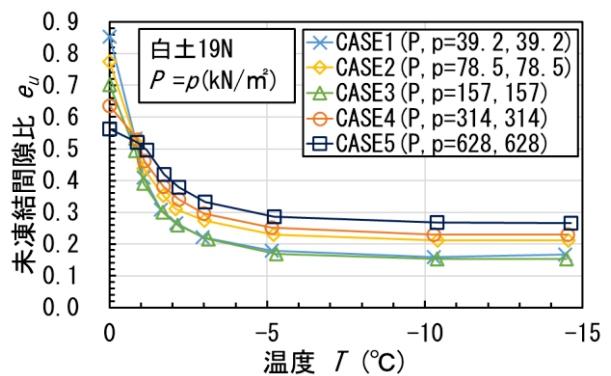


図11 T と e_u の関係

りも、土粒子からの表面力に影響されていることを意味する。次に、cに示される通り $p=628 \text{ kN/m}^2$ の圧密段階までに、吸着力の弱い間隙水はほとんどなくなり、新たに圧密により排水される水分が少ないことがわかる。これは圧密により排水される水分は土粒子表面から離れて位置するためであろう。

しかし、 -1.0°C における e_u は $p=39.2 \text{ kN/m}^2$ で $e_u=0.409$ 、 $p=628 \text{ kN/m}^2$ で $e_u=0.497$ であるが、 p が大きくなると若干大きくなるようにみえる。これは、 P が大きくなるほど間隙比が小さくなることから、同一体積で供試体を作成するときに P 、 p が大きい実験ケースほど土粒子の比表面積が大きくなり、土粒子表面に吸着する吸着水量が相対的に増加し、 e_u が大きくなったと考えられる。

3.5 凍結間隙比 e_f 、 e_{f2} と透水係数 k_{15} の関係

図15に e_f と k_{15} 、図16に e_{f2} と k_{15} の関係を示す。図15、16より e_f 、 e_{f2} が大きくなると k_{15} も大きくなる関係が得られた。そして、 e_f と k_{15} の関係は e_0 と k_{15} の関係とほぼ平行に対応している。図15より、 $e_{f(-3.0^\circ\text{C})}$ と k_{15} の関係が最も原点付近を通過するため、 $e_{f(-3.0^\circ\text{C})}$ が k_{15} に影響を及ぼすと考えられ、 $e_{f(-3.0^\circ\text{C})}$ が k_{15} を支配する間隙水と言えよう。 $e_{f(-1.5^\circ\text{C})}$ と k_{15} の関係が e_0 と k_{15} の関係と平行な関係にあったため、 $e_{f(-1.5^\circ\text{C})}$ 時の凍結水量が k_{15} とより強く関係すると考えられる。

3.6 未凍結間隙比 e_u と透水係数 k_{15} の関係

図17に e_u と k_{15} の関係を示す。図17で -0.7°C のとき e_u は k_{15} に関係なく一定であり、 k_{15} の変化は -0.7°C で未凍結の水分は影響されないと思われる。温度が低下すると、 e_u が大きくなると k_{15} は小さくなり、 k_{15}

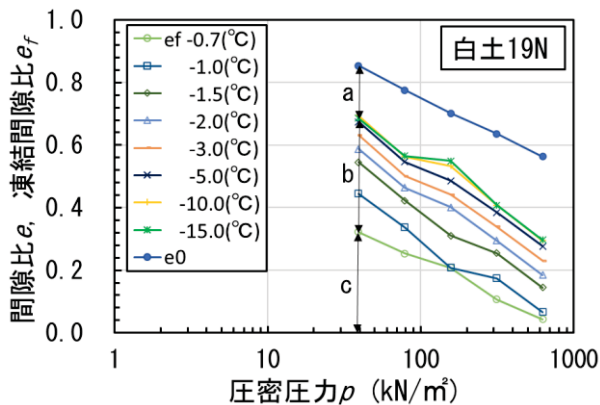


図12 p と e_f の関係

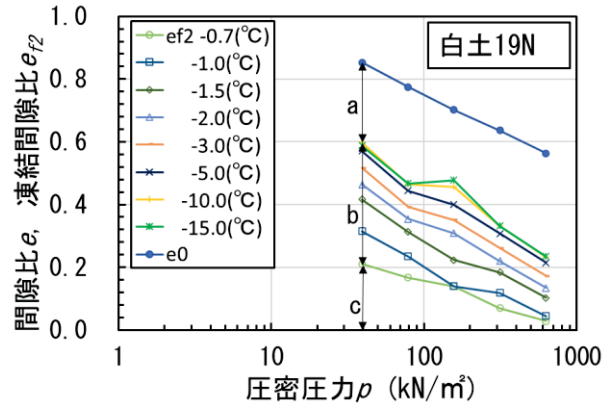


図13 p と e_{f2} の関係

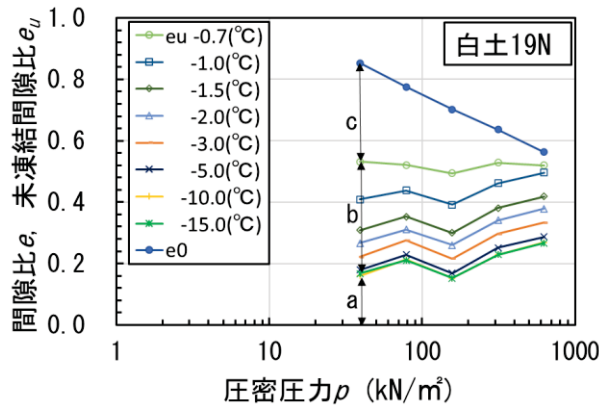


図14 p と e_u の関係

は e_u の少しの変化に敏感で、少しの増加で k_{15} が減少しているように見える。全体的には、 e_u は一定であるが k_{15} は変化しているとも読みとれる。つまり、 e_u が k_{15} に及ぼす影響は、 e_f 、 e_p が k_{15} に及ぼす影響と比較するとはわずかであるといえる。

3.7 凍結間隙比 e_f 、 e_p と体積圧縮係数 m_v の関係

e_f 、 e_p 、 e_u と m_v の関係性を検討するにあたり、圧密試験によって求められる m_v は圧密荷重 $\bar{p} = \sqrt{p \cdot p'}$ が (p' :直前の荷役段階の圧密圧力) であるため、凍・不凍水量測定実験の実験荷重とは若干異なる。そこで、 m_v は関係性を検討する荷重に該当する前後の \bar{p} によって求められた m_v の平均とした。

図 18 に e_f と m_v の関係、図 19 に e_p と m_v の関係を示す。図 18、19 より e_f 、 e_p が大きくなると m_v も大きくなる関係が得られた。次に、図 19 より、 $e_{p(-1.5^\circ\text{C})}$ と m_v の関係が e_0 と m_v の関係と平行な関係であったため、 $e_{p(-1.5^\circ\text{C})}$ 時の凍結水量が m_v とより強く関係すると考えられる。また、 $e_{p(-1.5^\circ\text{C})}$ 時の凍・不凍水量が自由水と吸着水の境界であると考えられる。

3.8 未凍結間隙比 e_u と体積圧縮係数 m_v の関係

図 20 に e_u と m_v の関係を示す。図 20 では -0.7°C では、 p に間隙比 e_u は一定であり、 m_v の変化は -0.7°C で凍結する水分に影響されると思われる。温度が降下すると e_u が大きくなると m_v は小さくなり、 m_v は e_u の少しの変化に敏感であり、少しの増加で m_v が減少しているように見える。一方で、全体的には、 e_u は一定であるが m_v は変化しているとも読みとれる。つまり、 e_u が m_v に及ぼす影響は e_f 、 e_p が m_v に及ぼす影響と比較するとはわずかであるといえる。

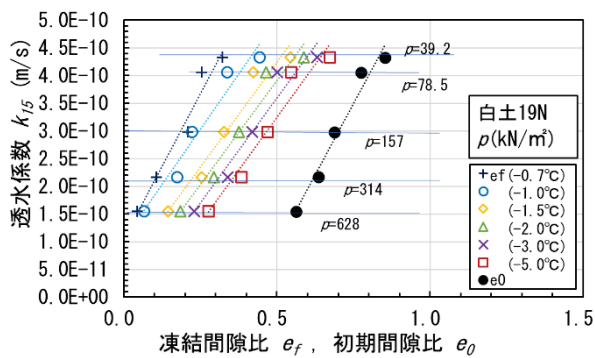


図 15 e_f と k_{15} の関係

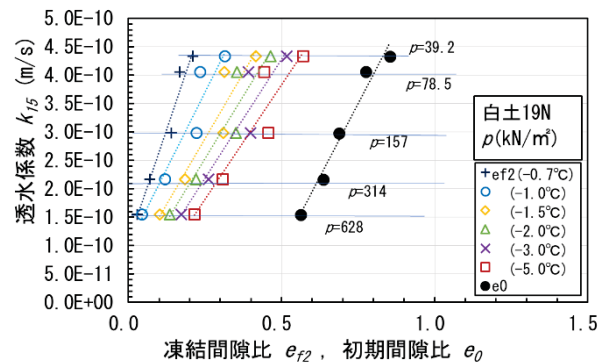


図 16 e_p と k_{15} の関係

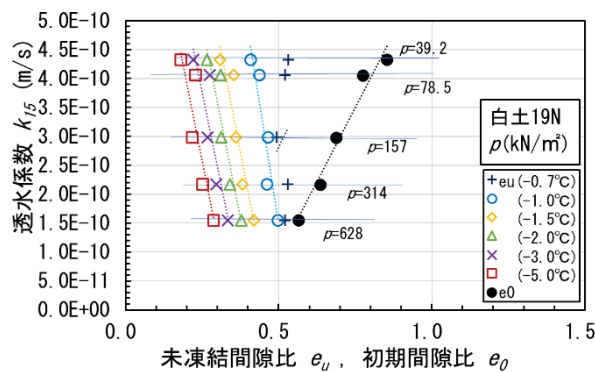


図 17 e_u と k_{15} の関係

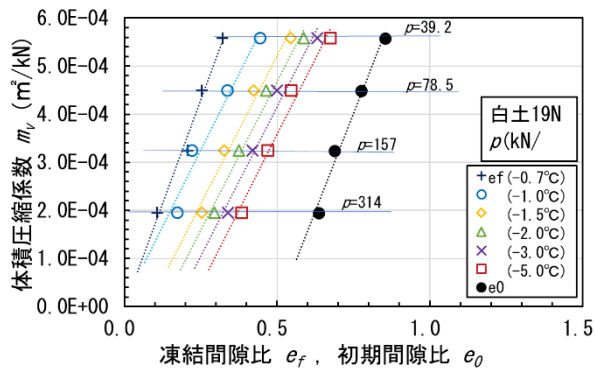


図 18 e_f と m_v の関係

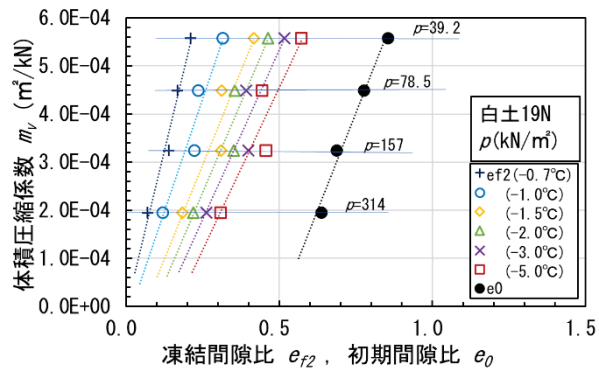


図 19 e_{f2} と m_v の関係

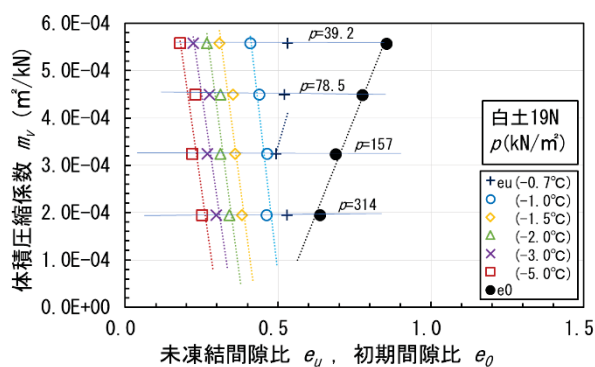


図 20 e_u と m_v の関係

4. 結論

本研究の結論を以下にまとめる。

- (1) 土粒子の吸着水と考えられる凍結試験から得られる未凍結水は、凍結水ほどには圧密荷重 p の影響を受けてはいない。
- (2) 土の圧縮指数 C_c は凍結しやすい水分 e_f , e_{f2} で定義される水分に支配されている。凍結前の e_0 - $\log p$ 曲線と e_{f2} - $\log p$ 曲線によって求められた C_c がほぼ平行な関係にあり、特に e_{f2} は e_f よりも C_c を求める指標になる可能性が示された。
- (3) なお、 e_0 - $\log p$ 曲線から読み取れる圧密による排水は $-0.7^\circ\text{C} \sim -1.0^\circ\text{C}$ の凍結間隙比 e_f と対応する。また、 $p = 628 \text{ kN/m}^2$ 程度までの圧密による排水はほぼ自由水に限定される可能性が強い。
- (4) 透水係数 k_{15} と体積圧縮係数 m_v も、凍結間隙比 e_f , e_{f2} と良好な相関関係が認められた。このことから、凍結間隙比すなわち凍結が容易である土粒子表面から離れて存在する自由水の量が圧縮指数 C_c , 透水係数 k_{15} , 体積圧縮係数 m_v に影響を及ぼし、その挙動を支配していると考えられる。

謝辞

本研究の実験の一部は森實太一朗氏 NEXCO 西日本エンジニアリング関西（元摂南大学都市環境工学科）の卒業研究として実施されたものである。また、本研究の実験には錦城護謨株式会社の寄付金を使用されています。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- (1) James K. Mitchell & Kenichi Soga: Fundamentals of soil behavior, Third Edition chapter 6 Soil-Water-Chemical Interactions, pp. 146-147, 153-154, 256-258, 2005.
- (2) 佛圓典史, 伊藤讓: 飽和細粒土の透水係数と凍結試験から得られる間隙特性の関係について, 第9回地盤改良シンポジウム, pp. 321-326, 2010.
- (3) 伊藤讓, 佛圓典史, 堀塚直也: 凍結試験から粘性土の一軸圧縮強さのメカニズムを知る方法, 第46回地盤工学研究発表会, pp. 285-286, 2011.
- (4) 佛圓典史, 伊藤讓: 飽和細粒土における凍結試験と圧密特性との関係について, 日本材料学会, 第10回地盤改良シンポジウム, pp. 169-172, 2012.
- (5) 森秀哉, 山中悠暉: 載荷条件下における不凍水量の測定実験と土の工学的性質との関係, 摂南大学学士請求論文, 2016.
- (6) 塚本光祐, 山中雄太: 飽和細粒土の工学的性質を評価するための凍・不凍水量測定方法の開発, 摂南大学学士請求論文, 2017.
- (7) 津留健太, 山中翔太: 飽和細粒土の凍・不凍水量と工学的性質に関する基礎的研究, 摂南大学学士請求論文, 2018.
- (8) 塚本 光祐: 飽和細粒土の工学的特性と凍・不凍水量測定結果との関係, 摂南大学修士請求論文 2019.
- (9) 三木椋介, 神戸隆志: 凍結試験から得られる凍・不凍水量と一軸圧縮強さの関係, 摂南大学学士請求論文, 2019.
- (10) 鈴木和也, 森實太一郎: 飽和細粒土の地盤工学的性質に及ぼす凍・不凍水量の影響, 摂南大学学士請求論文, 2020.