飽和細粒土の透水係数と凍結試験から評価される間隙比の関係[†]

伊藤 譲* 堀家 直也**

Relationship between the Permeability and Frozen Void Ratio of Saturated Fine-Grained Soils

by

Yuzuru Ito * and Naoya HORIKE **

It would be very convenient if the permeability of a fine-grained soil could be predicted by simple index properties such as a void ratio. The difficulty is considered to be the uniqueness of water's property in such a soil. In order to effectively evaluate the permeability of a fine-grained soil, a new definition of soil's void ratio was proposed as a result of a freezing test. In this study, the following conclusions are obtained : 1) A new index called "frozen void ratio" is defined as a ratio of the volume of frozen water at a certain temperature below a zero degree Celsius to the volume of soil particles and unfrozen water ; 2) It was shown that under the reported test condition the frozen void ratio at -1°C most closely related to the permeability of a soil ; and 3) It was demonstrated that the Kozeny-Carman equation may be applied to a fine grained soil if the frozen void ratio is used instead of the conventional void ratio.

Key words : Permeability, Fine-grained soil, Freezing test, Void ratio, Frozen void ratio

1 緒 言

廃棄物管理施設の建設や土壌汚染問題の解決にあたって、細粒土の透水性を把握することが重要である。粗粒土のような粒径の大きな土では、透水係数は定水位透水試験または粒度試験や間隙比から容易に求めることができるが、細粒土においては透水係数を求めるために長時間の透水試験が必要となることもある。

簡単な試験や僅かな指標から透水係数を評価できることは理想的であるが、細粒土の透水現象においては土と水との相互作用の影響が複雑である。また、透水係数は巨視的なパラメーターであるため、Kozeny-Carman 式のように間隙比等と単純に関係付けて評価すること自体に限界があるとも言われてきた^{1), 2)}

ところで、間隙水は土粒子表面では拡散二重層³⁾による強い吸着力を受け、土粒子の接点近傍では毛管作用も受けている。そのため間隙水の性質は均一ではなく、例えば吸着強さの順に土粒子表面から、結晶水、密な吸着水、ゆるい吸着水、毛管水、自由水（バルクな水）などと分類することができる⁴⁾しかし、これは工学的に区別できる指標ではない。

著者らは、間隙水の性質を評価するための指標を得るために凍結現象に着目した。つまり、細粒土が凍結する際に 0°C において間隙水は一度に凍結するのではなく、温度低下とともに土粒子表面から遠い間隙水から順番に凍結する現象から間隙水の吸着強さが類推できると考えられた。

本研究では透水係数を支配する間隙特性を探るために以下の検討を行った。

(1) 細粒土の間隙の特性を評価するための凍結試験を提案する。この方法は少量の試料でも試験が可能であり、水分が凍結するまでの比較的短時間で実施できるなどの利点を有する。

(2) (1)の試験結果を整理するために新たに凍結間隙比と呼ばれる指標を定義して、さまざまな土の透水係数との関係を検討する。

(3) 凍結間隙比について、Kozeny-Carman 式への適用性を論じる。

2 実験方法

2・1 試料土

Table 1 に実験に用いた試料土の物性値を示す。試料土は藤森粘土 3 種、関東ローム、カオリン粘土 3 種、京

Table 1 Properties of Samples.

Samples	Symbol	ρ_s g/cm ³	LL %	PL %	Grain Size		
					Sand %	Silt %	Clay %
Fujinomori06N	N-C	2.684	48.0	27.9	24.4	54.5	21.1
Fujinomori08P	P-C	2.681	44.6	25.5	26.4	47.1	26.5
Fujinomori08F	F-A		49.8	21.2			
Fujinomori08F-B	F-B	2.688	51.1	21.2	10.3	47.3	42.4
Fujinomori08F-D	F-D		38.1	22.2			
Kanto loam	K-A		169.8	99.5			
Kanto loam-B	K-B	2.638	137.9	93.3	6.0	64.5	29.5
Kanto loam-D	K-D		NP	NP			
Kaolin No.5 clay	G-C	2.805	39.6	26.1	0.0	57.7	42.3
ST Kaolin clay	S-C	2.720	53.2	40.7	0.0	51.3	48.8
Katarupo	T-C	2.704	31.7	19.7	0.0	73.1	26.9
Kyobashi clay	B-C	2.676	43.4	22.6	0.5	3.3	96.2
Ueshiro	U-C	2.615	44.6	30.4	0.1	6.8	93.1
Akananago	A-C	2.659	49.1	31.4	6.5	2.0	91.5

[†] 原稿受理 平成 23 年 5 月 9 日 Received May 9, 2011 ©2012 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 摂南大学都市環境工学科 〒572-8508 寝屋川市池田中町, Dept. Civil and Environ. Eng., Setsunan Univ., Ikeda-Nakamachi, Neyagawa, 572-8508

** 奈良県庁 〒630-8501 奈良市登大路町, Nara Pref., Noboriohji-cho, Nara, 630-8501

橋粘土, 上白, 赤7号である。なお, 藤森 08F と関東ロームは自然含水比状態 (記号「A」) で保管され, その他の試料土は採取後に乾燥および粉碎を行った (記号「C」)。すべての試料は $425\mu\text{m}$ ふり通過分である。

また, 藤森 08F と関東ロームについては土の性質を変化させるために前処理を行っている。前処理は -20°C で 24 時間凍結後に 20°C で融解した凍結融解処理 (記号「B」), $+110^\circ\text{C}$ の乾燥炉で 24 時間乾燥した炉乾燥処理 (記号「D」) である。

2・2 圧密透水試験

圧密透水試験は標準圧密試験 (JIS A 1217) と変水位透水試験 (JIS A 1218) を準用したものである。まず, 試料土にイオン交換水を加え, 含水比を液性限界の約 1.5 倍に調整して練り混ぜ, 真空脱気して 12 時間以上養生したスラリー状試料土を圧密リングに流し込んだ。次に, 12 時間以上静置した後, 圧密圧力 $p = 9.8\text{kN/m}^2 \sim 1256\text{kN/m}^2$ まで, 荷重増分比 $\Delta p/p = 1$ で 7 段階の载荷を行った。

その間, 各々 24 時間圧密の直後に, 圧密容器底部の排水口をスタンドパイプに接続して 24 時間の変水位透水試験を実施した。なお, 動水勾配は $20 \sim 40$ の範囲であった。また, 通水中の沈下量は, 沈下量の小さい G-C, S-C と T-C では沈下量全体の半分程度であったが, 大多数の試料土では全体の 1 割以下であった。

透水係数 k と間隙比 e の関係を整理して, 凍結水量測定試験時の間隙比に対応する透水係数 k' を読み取った。

2・3 凍結水量の測定

(1) 凍結水量測定試験

凍結水と未凍結水の測定にはさまざまな方法が用いられている。⁵⁾ 本研究で提案する方法は, 試料土の凍結時における間隙水が液相から固相への相変化に伴う体積膨張 (約 9%) を利用している。⁶⁾

この方法は従来の方法よりも測定装置が簡単である。しかし, 測定温度が不凍液の温度であり, 供試体自体の温度ではないこと等の問題点もある。

供試体は 2・2 節と同様に準備したスラリー状試料土を圧密リングにて各々圧力 $p = 19.6\text{kN/m}^2 \sim 1256\text{kN/m}^2$ まで圧密して作成した。供試体はポリエチレン袋に入れられアスピレーターで吸引パックされた後, アルミニウム製円筒容器に移され不凍液 (エチレングリコール) で満たされた。そして, 円筒容器ごと低温恒温水槽内で $-1, -3, -5, -7, -10, -15, -20^\circ\text{C}$ の順に温度降下させ, 不凍液温度とビュレットで測定される体積変化を測定した。

(2) 凍結間隙比の定義式

上記の測定結果から式 (1) を用いて凍結水体積 $V_{wf}(T^\circ\text{C})$ を求め, 式 (2), 式 (3) から凍結間隙比 $e_{f1}(T^\circ\text{C})$, $e_{f2}(T^\circ\text{C})$ を計算した。^{7)~9)}

$$V_{wf}(T^\circ\text{C}) = \frac{(\Delta V_f(T^\circ\text{C}) - \alpha \cdot \Delta T \cdot V)}{0.09} \quad (1)$$

$$e_{f1}(T^\circ\text{C}) = \frac{V_{wf}(T^\circ\text{C})}{V_s} \quad (2)$$

$$e_{f2}(T^\circ\text{C}) = \frac{V_{wf}(T^\circ\text{C})}{V_s + V_{wu}(T^\circ\text{C})} \quad (3)$$

ここに, $V_{wf}(T^\circ\text{C})$: 凍結水体積, $\Delta V_f(T^\circ\text{C})$: 体積変化量, α : 不凍液の体積膨張係数, ΔT : 不凍液温度, V : 容器中の不凍液体積, $V_{wu}(T^\circ\text{C})$: 未凍結水体積とする。

ここで, 凍結間隙比は未凍結水の扱いの違いから, 2 種類の定義が可能である。式 (2) で定義される $e_{f1}(T^\circ\text{C})$ とは土粒子体積に対する凍結水体積の比で示される。式 (3) で定義される $e_{f2}(T^\circ\text{C})$ は土粒子体積および未凍結水体積に対する凍結水体積の比で示される。本報告では, 透水係数を評価するにあたり, 未凍結水は通水に関しては土粒子と同等であると考えて $e_{f2}(T^\circ\text{C})$ を用いる。

3 結果と考察

3・1 凍結水量測定

Fig. 1 に間隙比 e , 凍結間隙比 $e_{f2}(T^\circ\text{C})$ と圧密圧力の関係を示す。図より, $e_{f2}(T^\circ\text{C})$ と圧密圧力の関係は温度低下に従い上方に移動して e - $\log p$ 曲線近くに移動しており, 間隙水が温度低下により徐々に凍結する様子が見えがえる。また, e - $\log p$ と $e_{f2}(-20^\circ\text{C})$ - $\log p$ の両曲線が一致せず, 後者が低くなっている。このことは, -20°C における未凍結水の存在を示している。さらに, e - $\log p$ 曲線の傾きは $e_{f2}(-1^\circ\text{C})$ - $\log p$ 曲線にほぼ平行であり, これは圧密により排水される間隙水は -1°C までに凍結する間隙水であることを意味する。

このように凍結水量測定から間隙水の存在状態を知ることが可能である。

3・2 透水係数と間隙比

(1) 透水係数と間隙比

透水係数 k と透水試験時の間隙比 e から, 凍結水量測定試験時の間隙比 e に対応した透水係数を求め, 透水係数 k' とする。これ以降は透水係数 k' との関係性を述べる。

Fig. 2 に通常の間隙比 e と透水係数 k' の関係を示す。図より, 本研究で用いた試料土においては e が増加すると k' は増加するという関係がみられる。しかし, 試料土全体を眺めると e が与えられると k' が決まるとは一概にはいえない。例えば, $e = 1.0$ のラインにおいて左のグループでは k' は $1.00 \times 10^{-6} \sim 10^{-8}\text{cm/s}$ の範囲に分布する。

Fig. 1 Void and Frozen Void Ratios and $\log p$ (N-C).

Fig. 2 Void Ratio e and Permeability k' .

さらに、このグループから離れ、 e が 2.00 を越えている K-A と K-B が存在する。このことは、既往の研究^{1), 2)}で示されたとおり、通常の間隙比からさまざまな土の透水係数を一括評価することが困難であることを示している。

(2) 透水係数と凍結間隙比 $e_{f2(TC)}$

Fig. 3 に -20°C の凍結間隙比 $e_{f2(-20^{\circ}\text{C})}$ と透水係数 k' の関係を示す。Fig. 2 ではグループから離れていた K-A と K-B が $e_{f2(-20^{\circ}\text{C})}$ を用いて整理すると一つのグループに集まっていることがわかる。しかし、バラつきが大きく、 $e_{f2(-20^{\circ}\text{C})}$ と透水係数の関係は明確ではない。

Fig. 4 に -1°C の凍結間隙比 $e_{f2(-1^{\circ}\text{C})}$ と透水係数 k' の関係を示す。Fig. 3 と比較するとすべてのデータがさらに移動して右上がりの領域に集中することがわかる。 e - k' 関係では大きくグループから外れていた K-A と K-B は完全にこのグループにまとまった。つまり、 $e_{f2(-1^{\circ}\text{C})}$ を用いることによって試料土全体としての間隙と透水係数の関係を見つけることができ、今回の実験の温度条件では -1°C で凍結する水分量が透水係数に最も関係していると言える。

これらの結果から凍結間隙比 $e_{f2(TC)}$ を用いることによって、さまざまな試料における透水係数を評価できる可能性が示された。さらに、その関係は間隙水の凍結温

Fig. 3 Frozen Void Ratio $e_{f2(-20^{\circ}\text{C})}$ and k' . Fig. 4 Frozen Void Ratio $e_{f2(-1^{\circ}\text{C})}$ and k' .

度によって異なり、今回示した温度条件では -1°C で凍結した水分量を用いた凍結間隙比 $e_{f2(-1^{\circ}\text{C})}$ と透水係数 k' の関係の相関関係が最も強かった。³⁾

(3) 透水係数と間隙比関数 $e^3/(1+e)$

Kozeny-Carman 式中の $e^3/(1+e)$ を間隙比関数と定義して、Fig. 5 に透水係数 k' と間隙比関数 $e^3/(1+e)$ の関係を示す。Fig. 6 では Fig. 5 の横軸の範囲を 2.00 までとし、Fig. 5 における左のグループの違いを拡大した。Fig. 5 同様に、試料土ごとにみると、 $e^3/(1+e)$ と k' の関係は比例関係に近いものであるが、試料土全体を眺めるとプロットがばらばらであり、 $e^3/(1+e)$ と k' との関係は明瞭ではない。

次に、Fig. 6 では、試料土ごとに $e^3/(1+e)$ が大きくなると k' が大きくなるが、試料土全体では $e^3/(1+e)$ と k' の関係は強くない。つまり、間隙比関数ではさまざまな土の透水係数を一括して評価することは難しい。

Fig. 7 に -1°C の凍結間隙比 $e_{f2(-1^{\circ}\text{C})}$ を用いた間隙比関数 $e_{f2(-1^{\circ}\text{C})}^3/(1+e_{f2(-1^{\circ}\text{C})})$ と k' の関係を示す。Fig. 5 では間隙比関数の範囲が試料 K-A において 15.00 までと幅広く分布していたが、Fig. 7 ではすべての試料土が 1.00 までの範囲にある。また、Fig. 6 に比べて Fig. 7 では

Fig. 5 Void Ratio Function and k' ($e = 0.00 \sim 15.00$).

Fig. 6 Void Ratio Function and k' ($e = 0.00 \sim 2.00$). Fig. 7 Frozen Void Ratio Func. and k' .

ロットが原点側に集まり、S-CとG-Cの一部を除くと全体が右上がりのグループを形成している。

しかし、Fig. 7において間隙比関数が同じでも透水係数に一けた以上の差があり、この図だけから透水係数を予測することは困難である。今回の実験結果では同じ凍結間隙比において、粘土分が多いほど透水係数が小さくなる傾向にあり、これは、Kozeny-Carman式に示される屈曲率と表面積の影響であると考えられ、今後の検討課題である。

3・3 凍結挙動と透水係数の関係

Fig. 4, Fig. 7に示したように、凍結間隙比や凍結間隙比から求めた間隙比関数を用いることによって、間隙量と透水係数との関係がある程度明らかになった。

今回の実験条件では -1°C までに凍結する水分量が透水係数に最も関係している結果となった。このことは、 -1°C までに凍結する間隙水は吸着作用を比較的受けていない自由水に近い水分であり、この水分は実際の通水に関係している水分に近いといえよう。

つまり、凍結間隙比 $e_{f2(-1^{\circ}\text{C})}$ は有効間隙と関係のある指標であり、これに対して、従来の間隙比 e には土粒子の吸着作用を受け、透水現象に関与しない水分も含まれているものと考えられる。

4 結 言

本研究の成果を以下にまとめる。

(1) 飽和細粒土の透水係数 k を評価するために凍結試験から求めた凍結間隙比 $e_{f2(TC)}$ という指標が提案された。

(2) 凍結間隙比 $e_{f2(TC)}$ を用いると、通常の間隙比 e からは把握できない、実際の透水現象に関係している間隙と透水係数 k の関係が把握できる。

(3) 凍結間隙比 $e_{f2(TC)}$ で表される間隙比関数 $e_{f2(TC)}^3/(1+e_{f2(TC)})$ を用いると、Kozeny-Carman式の適用範囲が拡大される可能性が認められた。今後は、屈曲率と表面積の影響を合わせて評価する方法を検討する。

(4) 今回の実験条件下では、 -1°C で凍結した水分量と透水係数 k の相関が最も良く、透水係数に影響する間隙水は氷点温度近くで凍結するものと考えられる。また、凍結間隙比 $e_{f2(-1^{\circ}\text{C})}$ は有効間隙と関係するものと考えられた。

本研究には日本学術振興会科学研究補助金（基盤(C)）No.22560501の一部が使用されています。ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) J. K. Mitchell and K. Soga, "Fundamentals of soil behavior", pp.251-262 (2005) John Wiley & Sons, Inc.
- 2) Soil Physics Research Committee, "Soil physics", pp.80-81 (1979) Morikita Press.
- 3) G. H. Bolt and M. G. M. Bruggenwert (Japanese Translation), "Soil chemistry", pp.46-55 (1980) Japan UNI Agency Inc.
- 4) S. Matsuo, "Structures of soil", pp.147-154 (1973) Sankaido Press.
- 5) JGS, "Soil freezing and its control", pp.21-78 (1994) JGS.
- 6) N. Horike and Y. Ito, "Relationship between the permeability and the void ratio obtained by a freezing test", Proceedings of the 9th Symposium on Ground Improvement, pp.321-326 (2010) JSMS.
- 7) N. Horike, Y. Ito and M. Kamon, "A relationship between the freezing test result and consolidation characteristics", Proceedings of the 64th JSCE Annual Conference, CD-ROM, pp.III 17-18 (2009) JSCE.
- 8) N. Horike and Y. Ito, "A method to evaluate the void ratio controlling the permeability of a saturated fine-grained soil", Proceedings of the 65th JSCE Annual conference, CD-ROM, pp.III 253-254 (2010) JSCE.
- 9) M. Higashi, A. Furukawa and N. Horike, "Study on the engineering properties and freezing characteristics of fine-grained soils", Graduation Thesis (2008) Setsunan Univ.