

凍結融解による土の透水係数及び間隙比の変化

中村 大¹・鈴木 輝之²・後藤 隆司³・金 学三⁴・伊藤 陽司⁵・山下 聡⁶

¹正会員 北見工業大学助教 工学部社会環境工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)

E-mail: dnaka@mail.kitami-it.ac.jp

²正会員 北見工業大学教授 工学部社会環境工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)

E-mail: suzuki@kitami-it.ac.jp

³非会員 北見工業大学准教授 工学部社会環境工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)

E-mail: gotok@mail.kitami-it.ac.jp

⁴非会員 嶺南理工大学教授 土木科 (〒705-703 大邱広域市南区顯忠路274)

E-mail: kimhs@ync.ac.kr

⁵非会員 北見工業大学准教授 工学部社会環境工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)

E-mail: itoyj@mail.kitami-it.ac.jp

⁶正会員 北見工業大学教授 工学部社会環境工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)

E-mail: yamast@mail.kitami-it.ac.jp

本研究では、繰返し凍結融解実験を行い、凍結融解前の土の各種物性値、特に透水係数と間隙比が、凍結融解後にどのように変化するかを明らかにすることに取り組んだ。実験には凍上性の高い風化火山灰を用い、締まった状態と緩んだ状態の土を想定して、3種類の突固め条件で締固めた。本研究の実験結果から、高い締固めエネルギーで突固めた土の透水係数、間隙比は1サイクル目の凍結融解によって増加すること、低い締固めエネルギーで突固めた土の透水係数、間隙比は凍結融解によって減少することが確認された。凍結融解を繰返し受けることによって透水係数、間隙比は変化していくが、サイクルを重ねるごとにその変化は小さくなっていき、ある一定の値に収束していくことが明らかとなった。

Key Words : frost heave, freeze, thaw, permeability coefficient, void ratio

1. はじめに

北海道のような積雪寒冷地において、春先の融解期に発生する法面の表層崩壊や支持力不足によるアスファルト舗装の亀甲状クラックの発生には、凍上した地盤の融解が深く関わっている¹⁾。

本研究では、法面の表層部の凍結融解挙動に着目し、次のような法面崩壊メカニズムを考えた。冬期、気温の低下に伴って法面の表面温度も低下し、地盤中には凍結面(0℃線)が形成される。凍結面付近にはアイスレンズが形成されるが、このアイスレンズは地盤中の未凍結側からの水分供給によって時間の経過とともに厚く成長する。アイスレンズの成長によって、法面表層部は熱流方向へ押し上げられる。春期には、形成されたアイスレンズは気温の上昇に伴って融解するため、法面表層部は鉛直下方に作用する重力の影響を受けつつ沈下する。このような凍結融解作用を繰返し受けると、法面表層部は緩んだ状態となり、せん断抵抗が低下する。緩んだ表層部に湧水や雨水が浸透すると、崩壊が発生しやすくなる

と考えられる。

以上のような法面崩壊メカニズムを考えた場合、冬期に凍土中で形成されたアイスレンズが、春期に融解することによって、法面の表層部分には多量の水分が含まれることとなる。融解によって発生した水分は気温の上昇によって蒸発するか、表層部分を移動して法面下方へと排水されるか、または地中深くへと浸透していくことになるが、このような水分挙動は法面崩壊メカニズムに強く関係していると考えられる。融解過程における土中の水分挙動や透水性の変化を明らかにすることは、法面崩壊の対策を考える上で工学的に重要である。

後に示すが、既往の研究では、間隙比の小さい締まった状態の土の透水係数が、凍結融解を繰り返すことによって、増加することが報告されている。しかしながら、間隙比の大きい緩んだ状態の土の透水係数がどのように変化するかについては報告されていない。

そこで、本研究では、凍上性の高い風化火山灰を実験試料として用い、締まった状態と緩んだ状態の土を想定して3種類の突固め条件で締固めた。このようにして作

製した供試体と、室内凍上試験装置を用いて、繰返し凍結融解実験を行い、凍結融解前の土の各種物性値、特に透水係数と間隙比が、繰返しの凍結融解を受けた後に、どのような変化を示すのかを明らかにすることに取り組んだ。

2. 既往の研究

近年、アメリカでは圧密された粘土や細粒土の遮水性が注目され、有害廃棄物処理場からの汚染物質の流出による地下水の汚染や、毒性の強い化学物質の溶解等を防ぐバリアとして、圧密した粘土や細粒土が利用されている。しかし、積雪寒冷地に設置されたバリアでは、凍結融解によって遮水層の透水性が増加してしまうことが懸念されている。このような問題を背景に、凍結融解による土の透水性の変化については、これまでも多くの研究が行われている。その代表的な例としては、Chamberlain²⁾や Benson & Othman³⁾、Konrad⁴⁾を挙げることができる。

Chamberlain²⁾は、突固めによって作製した5種類の粘土供試体を用いて15サイクルの凍結融解実験を行い、そのうち4種類の試料において、最終的に凍結融解後の透水係数が1から2桁増加することを確認した。ただし、1種類のシルト質粘土では、凍結融解後の透水係数の変化はランダムで、凍結融解サイクル数と透水性の間には相関性はみられなかったことが報告されている。

Benson & Othman³⁾は、突固めによって作製した大きな粘土供試体(直径298mm、厚さ914mm)を、60日間屋外に設置して凍上させた後、実験室内で融解し、その前後において透水係数の測定を行った。その結果、供試体全体の透水係数は本質的には変化しないが、凍結面より上方においては1から2桁、透水係数が増加することを確認した。また、透水係数の増加は、供試体の上端で最も大きく、下方へと深くなるに従って減少することを報告している。

以上のChamberlain²⁾や、Benson & Othman³⁾は、凍結融解後の透水係数の増加が、凍上によって形成される水平方向と垂直方向のクラックによって引き起こされると結論付けている。

Konrad⁴⁾は、スラリー状態から過圧密した粘土質シルト供試体を用いて凍結融解実験を行い、凍結融解後の透水係数が2から10倍に増加することを確認した。Konradは、凍結融解による透水係数の増加が、有効間隙率の増加によって引き起こされることを指摘している。また、Konradの実験では、Chamberlain²⁾や、Benson & Othman³⁾の実験で確認された垂直方向のクラックは確認されなかった。

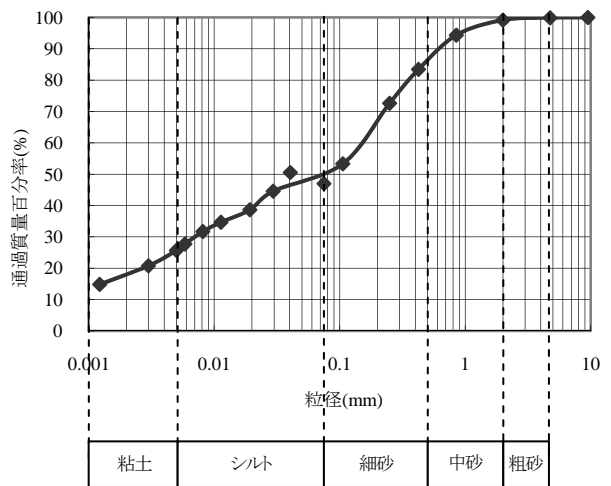


図-1 粒径加積曲線

表-1 粒度分布

	粘土	シルト	細砂	中砂	粗砂
通過百分率(%)	26	24	33	16	1

以上のような研究の他にも、例外的に、凍結融解後の透水係数が、凍上前のそれより、減少することも報告されている。Starke⁵⁾は、Wisconsinで冬期間野外にさらされた粘土の遮水ライナーから供試体を採取して、透水試験を行った。凍結前に 2.5×10^{-10} m/sだった透水係数は、凍結融解後に 1.5×10^{-10} m/sへとわずかに減少したことが報告されている。

これらの研究の多くは、粘土を試料として用いており、実験にはよく締固められた供試体が使用されている。また、多くの実験では凍結融解によって概ね1から2桁、透水係数が増加することが確認されているが、透水係数がランダムに変化することや、透水係数が減少することでも報告されている。

3. 凍結融解実験

(1) 使用した土とその基本物性

本研究では、北見市内で採取され、既に凍上性の強いことが確認されている風化火山灰を使用した。基本物性として、粒度分布、土粒子の密度、最適含水比を測定した。試験方法としては、粒度分布はJIS A 1204「土の粒度試験」、土粒子の密度はJIS A 1202「土粒子の密度試験」、最適含水比はJIS A 1210「突固めによる土の締固め試験」のA-a法を、それぞれ採用した。

粒径加積曲線を図-1に、粒度分布を表-1に、締固め

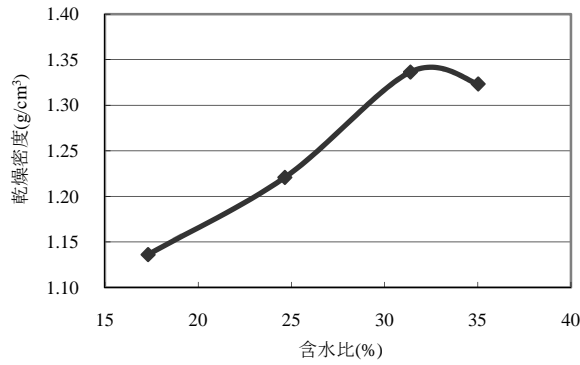


図-2 締固め曲線

表-2 突固め条件

突固め条件	1層の突固め回数	層	合計の突固め回数	締固めエネルギー(kJ/m³)
1	29	3	87	550
2	15	3	45	284
3	10	2	20	126

曲線を図-2 に示す。粒子密度は 2.557g/cm^3 ，最適含水比は 32.5%であった。

(2) 供試体の作製方法と突固め条件

本研究では，水分調整を行った土を突固めて，供試体を作製した。

まず，土を最適含水比に調整し，24時間養生した。

その後，特注ランマー（ランマー質量：1.268kg，落下高さ：198.5mm）と専用のモールドを用いて突固めを行い，直径 99.5mm，高さ 50mm の供試体を作製した。

本研究では，3 種類の突固め条件を設定して実験を行った。表-2 にそれぞれの突固め条件について示す。表-2 の突固め条件 1 は，1 層 29 回で 3 層，合計 87 回の突固めを行った場合で，締固めエネルギーは締固め試験の A 法と同様の 550kJ/m^3 となる。突固め条件 2 は条件 1 の約 1/2，突固め条件 3 は条件 2 の約 1/2 の締固めエネルギーである。

(3) 凍上試験装置

本研究で使用した土の凍上試験装置を図-3 に示す。この凍上試験装置は地盤工学会基準「凍上性判定のための土の凍上試験方法」⁶⁾に準拠して製作されたものである。試験装置の詳細については，中村ら⁷⁾を参照されたい。凍結融解実験中は，常に装置の上方から 10kPa の圧力を加え続けた。実験期間中の変位量は，図に示した凍

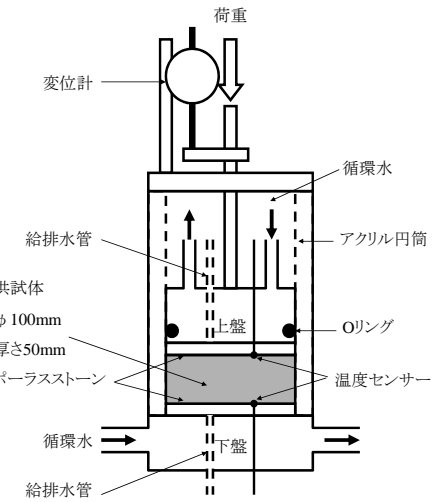


図-3 凍上試験装置図

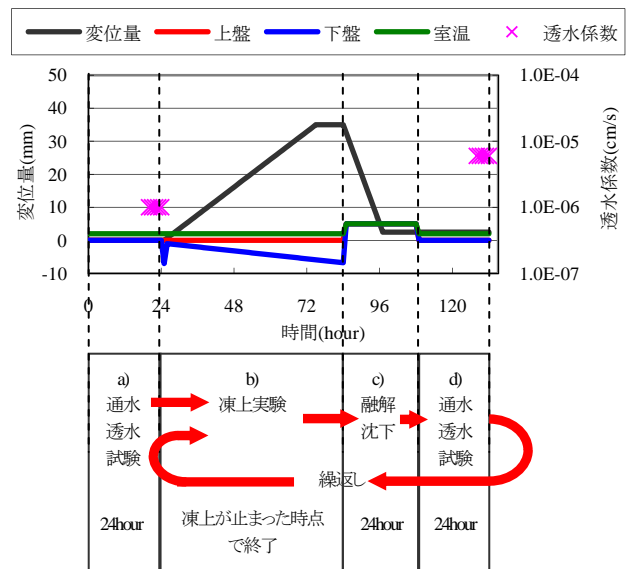


図-4 凍結融解実験概要図

上試験装置の上方に取り付けた変位計によって，1 分毎に測定した。

(4) 実験方法

図-4 に凍結融解実験の概要を示す。

a) 凍上実験前の通水と透水試験

図-3 に示すように，凍上試験装置に供試体を設置した。供試体側面はアクリルセルで覆い，アクリルセルの内壁及び上盤の側面には凍上時に発生する摩擦を軽減する目的で，シリコングリスを塗布した。また，試験装置全体は恒温室に設置し，通水期間中は $+2^{\circ}\text{C}$ で制御した。

供試体を設置した後，上下盤をコントロールする冷媒の温度はどちらも 24 時間以上， 0°C で保たれる。その間，供試体を飽和させるため，供試体下面から給水して，

上部から排水する通水を行った。通水開始直後は、供試体の直径 99.5mm が、アクリルセルの内径 100mm より 0.5mm 小さいため、供試体側面を水分が流れる様子が観察された。しかしながら、通水開始から約 20 時間後には、上方からの圧力や下方からの通水によって、供試体がアクリルセルの内壁に接するようになり、供試体側面を水分が流れる様子は観察されなかった。

また、凍上実験前の通水時には、変水位透水試験を用いて透水係数を測定した。通水開始から約 20 時間以上経過した後、給水量と排水量が等しくなっていることを確認した。その後、給水管の水頭差を 5 回以上計測した。計測した水頭差から透水係数を算出し、平均値を求め、それぞれの供試体の透水係数とした。前述のように、供試体の直径は、アクリルセルの内径より 0.5mm 小さいが、透水係数は通水開始から約 20 時間後から測定されるため、この影響は非常に小さいと考えられる。

透水係数は、JIS A 1218 の以下の式(1)によって算出した。

温度 15°C における透水係数 k (cm/s)

$$k = 2.303 \frac{aL}{A(t_2 - t_1)} \log \frac{h_1}{h_2} \frac{\eta_t}{\eta_{15}} \quad (1)$$

ここで、 a は給水管の断面積(cm^2)、 L は供試体の長さ(cm)、 A は供試体の断面積(cm^2)、 $(t_2 - t_1)$ は測定時間(s)、 h_1 は時刻 t_1 における水位差(cm)、 h_2 は時刻 t_2 における水位差(cm)、 η_t/η_{15} は温度 15°C に対する温度 t °C の粘性係数である。

b) 凍上実験

凍上実験方法には、地盤工学会基準「凍上性判定のための土の凍上試験方法」⁹⁾を採用した。

温度制御装置を用いて、上盤の冷媒を 0°C 付近の温度、下盤の冷媒をマイナスの温度で制御し、供試体の下面から凍結を進行させた。また、凍結中の水分の供給は供試体上面から行った。

約 24 時間の通水後、実験をスタートさせる。まず、上盤の冷媒温度を 0°C で保ったまま、下盤の冷媒温度を -7°C まで急激に降下させ、供試体にサーマルショックを与える。サーマルショックを与えた後、下盤の冷媒温度を -1°C まで上昇させる。その後、下盤の冷媒温度を 0.1°C/hour の速度で降下させていく。実験は、凍結が上盤まで入り、凍上量が増えなくなるまで続けた。凍上実験期間中は、通水期間中と同様に、恒温室の温度は +2°C で制御した。

c) 融解沈下

融解は、上下盤の冷媒温度を、ともに +5°C で制御した。融解中の水分の排水は供試体の上下面から行った。排水量はどちらもメスシリンダーによって計測される。融解は 24 時間続けられたが、全ての供試体において、

24 時間後までに必ず沈下が止まっていた。融解期間中は、恒温室の温度は +5°C で制御した。

d) 凍上実験後の通水と透水試験

融解後、再度、前述の方法で 24 時間の通水を行い、凍結融解後の透水係数の計測を行った。凍結融解を繰り返す場合には、b) 凍上実験から再度行う。

本研究では、凍結融解実験を最多で 3 サイクル行った。後に詳述するが、全ての突固め条件において、透水係数の変化は、凍結融解を繰り返すことで、徐々に小さくなっていく。最終的に、透水係数変化率は 3 サイクル終了時に 20% 以下となった。このことから、これ以上の凍結融解を繰り返しても、透水係数に大きな変化は生じないと判断し、凍結融解サイクル数を 3 サイクルに決定した。

4. 供試体の各種物性値の算出及び実験結果の整理に用いた式

供試体の各種物性値の算出及び実験結果の整理に用いた式を以下にまとめる。

供試体の乾燥質量 m_s (g)

$$m_s = \frac{m_0}{1 + w_0/100} \quad (2)$$

ここで、 m_0 は供試体の初期質量(g)、 w_0 は供試体の初期含水比(%)である。

実験中の供試体の高さ H_1 (cm)

$$H_1 = H_0 + \frac{\Delta H_d}{10} \quad (3)$$

ここで、 H_0 は供試体の初期高さ(cm)、 ΔH_d は実験中の供試体の変位量(mm)である。

供試体の実質高さ H_s (cm)

$$H_s = \frac{m_s / \rho_s}{A} \quad (4)$$

ここで、 m_s は供試体の乾燥質量(g)、 ρ_s は JIS A 1202 によって求めた土粒子の密度(g/cm^3)、 A は供試体の断面積(cm^2)である。

実験中の供試体の間隙比 e_1

$$e_1 = \frac{H_1}{H_s} - 1 \quad (5)$$

ここで、 H_1 は実験中の供試体の高さ(cm)、 H_s は供試体の実質高さ(cm)である。

各サイクルにおける凍結膨張率 ξ (%)

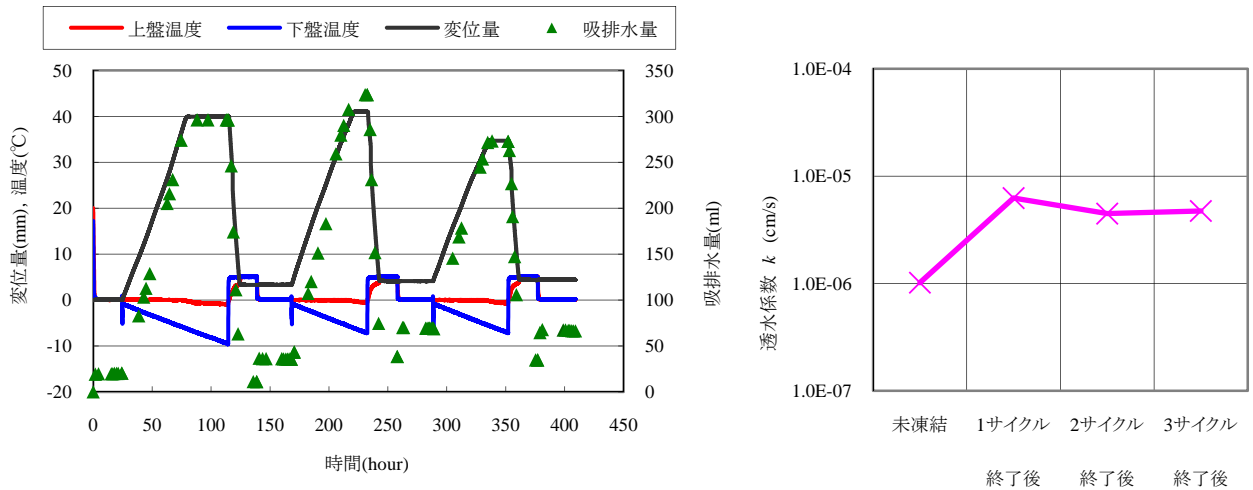


図-5 突固め条件1 (総突固め回数 87回) で作製した供試体で、凍結融解実験を3サイクル行った際の
変位量, 吸排水量の経時変化と、それに伴う透水係数の変化

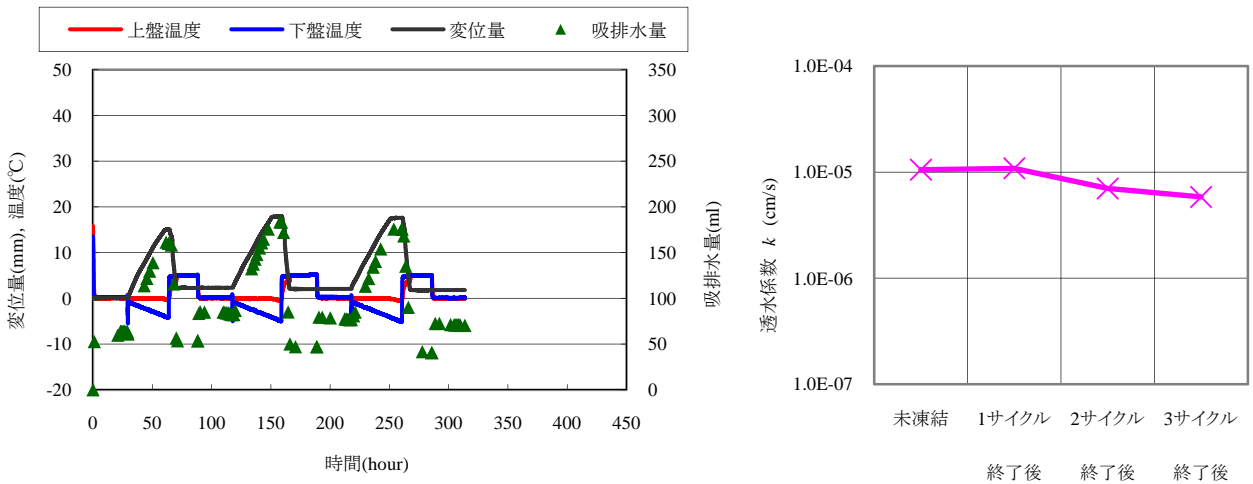


図-6 突固め条件2 (総突固め回数 45回) で作製した供試体で、凍結融解実験を3サイクル行った際の
変位量, 吸排水量の経時変化と、それに伴う透水係数の変化

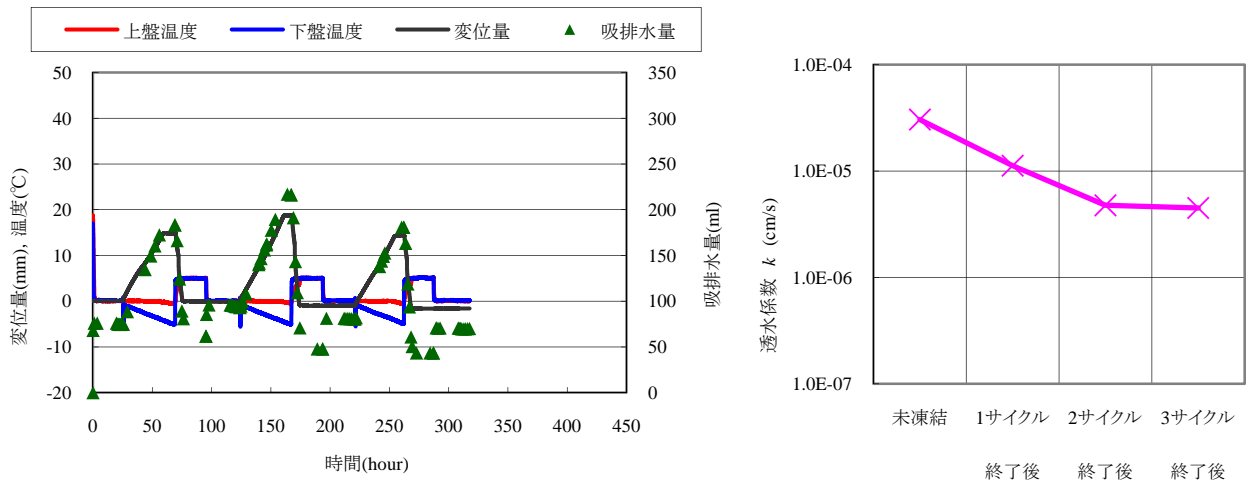
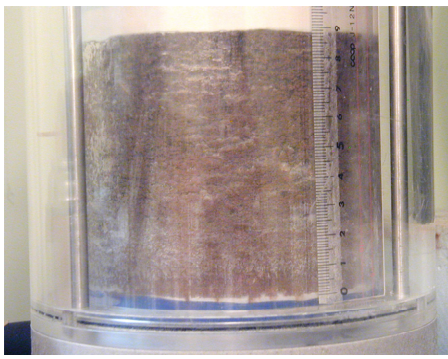
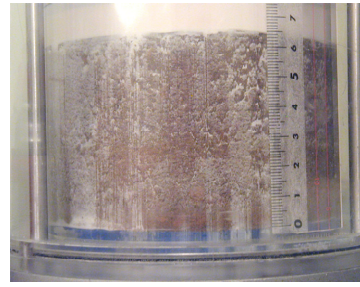


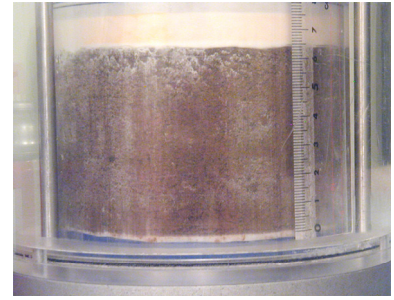
図-7 突固め条件3 (総突固め回数 20回) で作製した供試体で、凍結融解実験を3サイクル行った際の
変位量, 吸排水量の経時変化と、それに伴う透水係数の変化



突固め条件1



突固め条件2



突固め条件3

写真-1 各突固め条件における1回目の凍上実験後の供試体の様子

$$\xi = \frac{\Delta H_f}{H_2} \times 10 \quad (6)$$

ここで、 ΔH_f は各サイクルの凍上実験終了時の変位量(mm)、 H_2 は各サイクルの凍上実験直前の供試体高さ(cm)である。

各サイクルにおける間隙比変化率 C_e (%)

$$C_e = \frac{e_f}{e} \times 100 \quad (7)$$

ここで、 e は各サイクルの凍結前の間隙比、 e_f は各サイクルの凍結融解後の間隙比である。

各サイクルにおける透水係数変化率 C_k (%)

$$C_k = \frac{k_f}{k} \times 100 \quad (8)$$

ここで、 k は各サイクルの凍結前の透水係数(cm/s)、 k_f は各サイクルの凍結融解後の透水係数(cm/s)である。

5. 実験結果と考察

(1) 各突固め条件における実験結果の一例

本研究では、表-2の突固め条件1、条件2の供試体を用いた1サイクルの凍結融解実験を3回、条件3の供試体を用いた1サイクルの凍結融解実験を4回行った。また、突固め条件1、条件2、条件3の供試体を用いた3サイクルの凍結融解実験は、それぞれ2回ずつ行った。さらに、これらとは別に、凍上後の供試体断面を確認する目的で、1回目の凍結のみで終了させる実験を、各突固め条件で、2回ずつ行った。

以下に、実験結果の一例を示す。図-5、図-6、図-7は、それぞれ、突固め条件1、条件2、条件3の供試体で、凍結融解実験を3サイクル行った際の変位量、吸排水量の経時変化と、それに伴う透水係数の変化を表している。

写真-1は各突固め条件における1回目の凍上実験後の供試体の様子である。

図-5から図-7の実験における具体的な凍上量、凍上速度、凍結膨張率を表-3にまとめる。凍上速度は、図の凍上量が直線的な変化を示す部分で線形近似し、その直線の傾きが最も急な部分とした。

写真-1及び表-3から、突固め条件1の凍上性は、他の2つの突固め条件に較べて、著しく高いことが明らかである。

図-5から図-7の実験における具体的な未凍結時の供試体高さ、各サイクルの融解沈下後の供試体高さ、融解沈下後の変位量を表-4にまとめる。融解沈下後の変位量は、各サイクルにおける融解沈下後の供試体高さ、一度も凍結していない未凍結時の供試体高さとの差から求めた。変位量が未凍結時から増加した場合には正、減少した場合は負とした。また、表-4の各サイクルにおける融解沈下後の供試体高さは、表-3の凍結膨張率を式(6)で算出する際に、各サイクルの凍上実験直前の供試体高さ H_2 として用いられる。例えば、2サイクル目の凍結膨張率を算出する場合には、凍上実験直前の供試体高さ H_2 として、1サイクル目の融解沈下後の供試体の高さをを用いることとなる。

表-4から、突固め条件1の融解後の変位量は、1サイクル終了時には約3mmで、凍上量が融解後にも残留していることが確認できる。この変位量は凍結融解サイクルを重ねるごとに、徐々にではあるが、鉛直上方に増加していることがわかる。突固め条件2の融解後の変位量は、1サイクル終了時に約2mmで、突固め条件1と同様、凍上量が融解後にも残留していることが確認できる。しかしながら、この変位量は2サイクル目以降は減少に転じ、徐々にではあるが、沈下していることがわかる。突固め条件3の融解後の変位量は、突固め条件1とは正反対に、凍結融解サイクルを重ねるごとに、徐々に減少している。ただし、上記の変化は、全ての突固め条件において、サイクルを重ねるごとに小さくなっており、ある一定の値

表-3 各突固め条件における凍上量, 凍上速度, 融解沈下後の変位量

突固め条件	凍結融解 1 サイクル			凍結融解 2 サイクル			凍結融解 3 サイクル		
	凍上実験終了時の変位量(凍上量) $\Delta H_f(\text{mm})$	凍上速度(mm/h)	凍結膨張率 $\xi(\%)$	凍上実験終了時の変位量(凍上量) $\Delta H_f(\text{mm})$	凍上速度(mm/h)	凍結膨張率 $\xi(\%)$	凍上実験終了時の変位量(凍上量) $\Delta H_f(\text{mm})$	凍上速度(mm/h)	凍結膨張率 $\xi(\%)$
1	38.905	0.726	76.9	37.625	0.725	69.8	30.596	0.648	55.9
2	15.122	0.527	29.7	15.720	0.480	29.6	15.661	0.479	29.6
3	14.829	0.425	29.2	19.009	0.479	37.6	15.358	0.435	30.9

表-4 各突固め条件における未凍結時の供試体の高さ, 融解沈下後の供試体の高さ, 融解沈下後の変位量

突固め条件	未凍結時	凍結融解 1 サイクル		凍結融解 2 サイクル		凍結融解 3 サイクル	
	供試体の高さ $H_2(\text{cm})$	融解沈下後の供試体の高さ(cm)	融解沈下後の変位量(残留変位)(mm)	融解沈下後の供試体の高さ(cm)	融解沈下後の変位量(残留変位)(mm)	融解沈下後の供試体の高さ(cm)	融解沈下後の変位量(残留変位)(mm)
1	5.0562	5.3893	+3.331	5.4715	+4.153	5.4988	+4.426
2	5.0883	5.3162	+2.279	5.2916	+2.033	5.2675	+1.792
3	5.0755	5.0538	-0.217	4.9661	-1.094	4.9044	-1.711

表-5 各突固め条件における未凍結時の間隙比, 融解沈下後の間隙比, 間隙比変化率

突固め条件	未凍結時	凍結融解 1 サイクル		凍結融解 2 サイクル		凍結融解 3 サイクル	
	間隙比 e	融解沈下後の間隙比 e_f	間隙比変化率 $C_e(\%)$	融解沈下後の間隙比 e_f	間隙比変化率 $C_e(\%)$	融解沈下後の間隙比 e_f	間隙比変化率 $C_e(\%)$
1	0.959	1.088	113	1.120	103	1.131	101
2	1.174	1.271	108	1.261	99	1.251	99
3	1.393	1.383	99	1.341	97	1.312	98

表-6 各突固め条件における未凍結時の透水係数, 融解沈下後の透水係数, 透水係数変化率

突固め条件	未凍結時	凍結融解 1 サイクル		凍結融解 2 サイクル		凍結融解 3 サイクル	
	透水係数 $k(\text{cm/s})$	融解沈下後の透水係数 $k_f(\text{cm/s})$	透水係数変化率 $C_k(\%)$	融解沈下後の透水係数 $k_f(\text{cm/s})$	透水係数変化率 $C_k(\%)$	融解沈下後の透水係数 $k_f(\text{cm/s})$	透水係数変化率 $C_k(\%)$
1	1.02×10^{-6}	6.25×10^{-6}	614	4.48×10^{-6}	72	4.74×10^{-6}	106
2	1.06×10^{-5}	1.09×10^{-5}	103	7.01×10^{-6}	65	5.84×10^{-6}	83
3	3.05×10^{-5}	1.12×10^{-5}	37	4.76×10^{-6}	42	4.49×10^{-6}	94

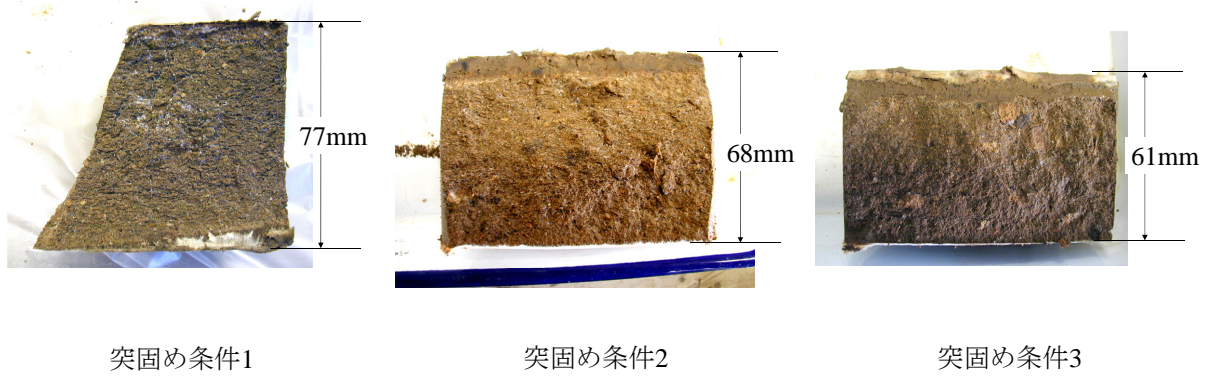


写真-2 各突固め条件における1回目の凍上実験後の供試体断面

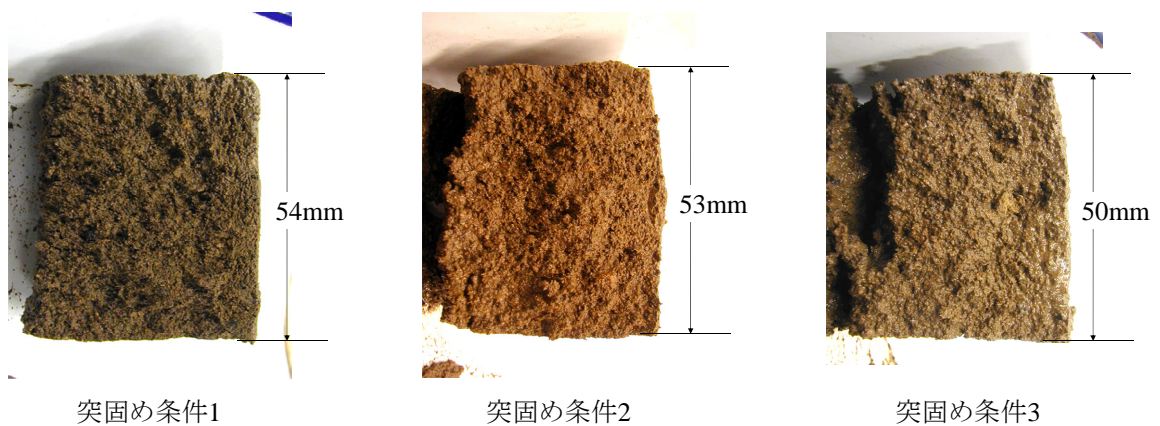


写真-3 各突固め条件における1回目の融解後の供試体断面

に収束していく傾向がみてとれる。

以上の変位量の挙動から、高い締固めエネルギーで突固められた土は、凍結融解によって徐々に緩い状態となり、低い締固めエネルギーで突固められた土は、凍結融解後の沈下によって徐々に締まった状態になっていると考えられる。

図-5から図-7の実験における具体的な未凍結時の間隙比、各サイクルの融解沈下後の間隙比及び間隙比変化率を表-5にまとめる。表-5の各サイクルにおける間隙比変化率は、式(7)に、各サイクルの凍結前の間隙比 e と凍結融解後の透水係数 e_f を代入して算出する。例えば、2サイクル目の間隙比変化率を算出する場合には、凍結前の間隙比 e として、1サイクル目の融解沈下後の透水係数 e_f を用いることとなる。

表-5から、突固め条件1の凍結融解1サイクル終了時の間隙比は、未凍結時から約10%程度の増加を示しており、2サイクル目以降も微少ではあるが間隙比が増加し続けていることが確認できる。突固め条件3の間隙比は、突固め条件1とは正反対に、凍結融解サイクルを重ねるごとに、微少ではあるが減少し続けていることが確認でき

る。

表-5の間隙比の変化からも、表-4と同様に、高い締固めエネルギーで突固められた土が、凍結融解によって徐々に緩み、低い締固めエネルギーで突固められた土が、凍結融解後の沈下によって徐々に締まっていく傾向を見取ることができる。

小野ら⁸⁾は、軸対称三軸試験装置を用いて実験を行い、凍結融解履歴が正規圧密及び過圧密飽和粘土に与える影響について、考察を行った。正規圧密飽和粘土は、凍結融解後の再圧密時に、初期よりも変位が沈下し、密度が増加した。これに対し、過圧密飽和粘土は、凍結融解後の再圧密時に、初期よりも変位が残留し、密度が低下した。上記の小野らの研究における正規圧密飽和粘土の挙動と本研究における低い締固めエネルギーで突固められた土の挙動、過圧密飽和粘土の挙動と高い締固めエネルギーで突固められた土の挙動は、それぞれ、きわめて類似している。以上の事実から、土の締固めエネルギーの高低は、過圧密比の大小とリンクするものと予想できる。

図-5から図-7の実験における具体的な未凍結時の透水係数、各サイクルの融解沈下後の透水係数及び透水係数

変化率を表-6にまとめる。表-6の各サイクルにおける透水係数変化率は、式(8)に、各サイクルの凍結前の透水係数 k と凍結融解後の透水係数 k_f を代入して算出する。例えば、2サイクル目の透水係数変化率を算出する場合には、凍結前の透水係数 k として、1サイクル目の融解沈下後の透水係数 k_f を用いることとなる。

表-6から、突固め条件1の凍結融解1サイクル終了時の透水係数は、未凍結時の約6倍となっており、非常に大きく増加していることが明らかである。2サイクル目の透水係数は1サイクル目から約30%程度の減少、3サイクル目の透水係数は2サイクル目から約10%程度の増加となっており、透水係数の変化は徐々に小さくなっていることがわかる。突固め条件2の凍結融解1サイクル終了時の透水係数には、ほぼ変化がみられない。2サイクル目の透水係数は1サイクル目から35%の減少、3サイクル目では2サイクル目から約20%程度の減少となっており、サイクルを重ねるごとにその変化が小さくなっていることが確認できる。突固め条件3の透水係数は、凍結融解2サイクル終了時まで、約40%ずつ、継続的に減少していることがわかる。しかしながら、3サイクル終了時では、透水係数の変化は10%未満と、非常に小さくなっている。いずれの突固め条件でも、3サイクル終了時の透水係数の変化は20%未満となっていることから、3サイクル以上凍結融解を繰返した場合、透水係数の変化は徐々に小さくなっていき、最終的には変化がなくなると予測することができる。

表-5、表-6から、突固め条件2の供試体では、凍結融解3サイクル後、間隙比が未凍結時よりも増加しているにも関わらず、透水係数は未凍結時の約50%程度に減少していることが確認できる。これは、凍結融解2サイクル目以降、供試体が融解沈下時にゆっくりと圧密されるため、土粒子が水平方向に配向されるためではないかと考えられる。この水平方向に配向された土粒子が、通水を阻害しているのではないかと推測できる。このような凍結融解による土粒子の動きは、今後明らかにしなければいけない課題である。

(2) 凍結融解後の供試体断面

本研究では、実験が終了し、供試体が融解した状態で供試体を切断し、その断面の観察を行った。また、これらとの比較を行うために、前述の実験とは別に、1回の凍上実験のみを行い、供試体が凍上した状態で供試体を切断し、その断面についても観察を行った。

写真-2は各突固め条件における1回目の凍上実験後の供試体断面、写真-3は各突固め条件における1回目の凍結融解後の供試体断面である。

写真-2から、高い凍上性を示した突固め条件1の凍結後の供試体断面には、霜降り状のアイスレンズを確認す

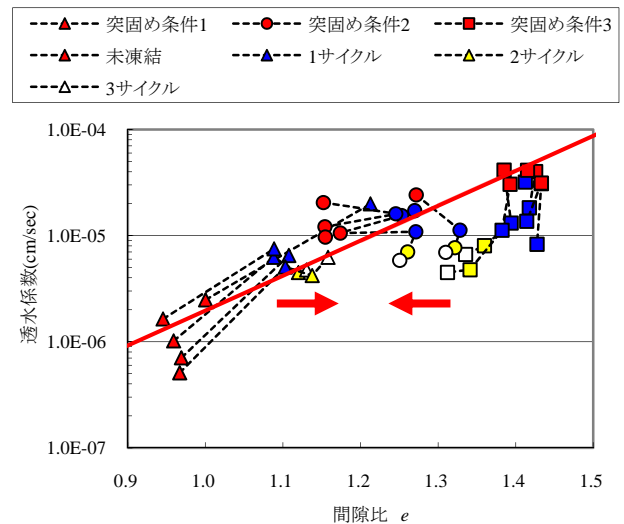


図-8 間隙比と透水係数

ることができる。これに対し、突固め条件2、突固め条件3の供試体断面にはヘアクラック状の薄いアイスレンズしか確認することができなかった。

写真-3から、全ての突固め条件において、融解後の供試体断面には、クラックを確認することはできなかった。これは、融解時の沈下で、アイスレンズによって形成されたクラックが閉塞してしまったためだと考えられる。Benson & Othman³⁾は粘土供試体で実験を行い、融解後の供試体断面に目視で観察されたクラックを、透水係数が増加する原因であると結論付けたが、風化火山灰を用いた本研究では、上記のように、融解後の供試体断面には目視で確認できるようなクラックは確認できなかった。

(3) 間隙比と透水係数

図-8は、全ての実験における間隙比と透水係数の関係を表している。1つの実験における間隙比と透水係数の変化は、サイクル順に点線で結んで表されている。

未凍結時の透水係数に注目すると、間隙比の増加に伴って、透水係数も増加していることが明らかである。細粒分を含む土の透水係数は間隙比の影響を受けることが知られており、細粒土では透水係数の対数と間隙比の間に線形関係が成立することが報告されている⁹⁾。本研究においても、未凍結時の透水係数の対数と間隙比の間には線形関係が確認でき、図-8のように直線で示すことができる。

突固め条件1の供試体では、凍結融解1サイクルにおいて、間隙比は最大で約20%、透水係数は最大で約10倍、どちらも大きく増加している。このことから、凍結融解1サイクルにおける突固め条件1の供試体の透水係数の増加は、凍結融解後の間隙比の増加によってもたらされていると考えられる。凍結融解2サイクル目以降、間隙比は、若干ではあるが、増加し続けている。透水係数も、

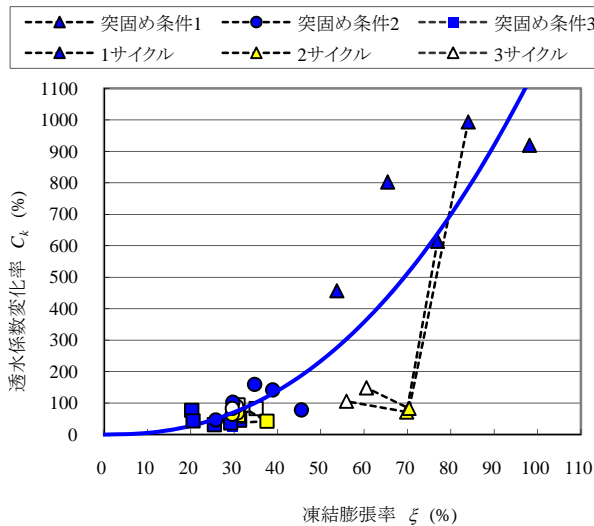


図-9 凍結膨張率と透水係数増加倍率

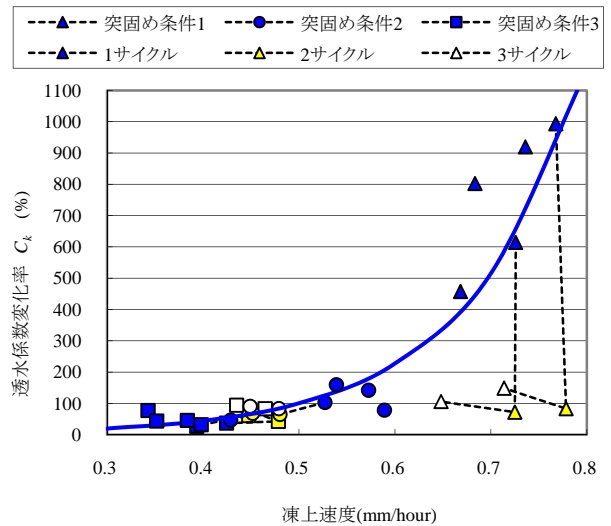


図-10 凍上速度と透水係数増加倍率

若干の増減を示しているが、その変化は間隙比の増加とはリンクしていない。これは、間隙比の増加がわずかで、透水係数の変化には影響が及ばないためだと考えられる。

突固め条件3の供試体の間隙比は、凍結融解1サイクルにおいて、わずかではあるが減少している。また、透水係数は未凍結時の最大で約70%程度まで減少している。間隙比は、凍結融解2サイクル目以降も、わずかではあるが、実験を通して、継続的に減少していることがわかる。透水係数も、同様に、凍結融解2サイクル目以降も、継続的に減少している。以上のことから、突固め条件3の供試体の凍結融解後の透水係数の減少は、融解後の間隙比の減少によってもたらされていると考えられる。しかしながら、透水係数の変化は、凍結融解3サイクル終了時には20%未満と小さくなっており、徐々に、小さくなっている。

突固め条件2の供試体の間隙比は、凍結融解1サイクルにおいて、凍上による変位量が融解後も残留したため、いずれの供試体においても約10%程度の大きな増加を示している。しかしながら、その変化は突固め条件1の供試体より小さい。透水係数は、凍結融解1サイクルにおいて、2つの実験で減少を示しているものの、図-8の直線に沿って、増加する傾向を示している。以上のことから、凍結融解1サイクルの透水係数の増加は、間隙比の増加によって引き起こされていると考えられる。凍結融解2サイクル目以降は、間隙比は一転して若干の減少傾向を示している。透水係数も間隙比と同様に、凍結融解2サイクル目以降は、減少する傾向を示している。この透水係数の減少も、間隙比の減少によって引き起こされていると考えられる。ただし、透水係数の変化は、突固め条件1、条件3と同様に、凍結融解3サイクル終了時には20%未満と小さくなっており、徐々に、小さくなっている。

以上の実験結果から、高い締固めエネルギーで突固められた土（突固め条件1）は、凍結融解後の残留変位の増加によって緩み、間隙比が増加し、それに伴って透水係数も増加するものと考えられる。これに対し、低い締固めエネルギーで突固められた土（突固め条件3）は、残留変位の減少によって締めり、間隙比が減少し、それに伴って透水係数も減少するものと考えられる。ただし、いずれの土も、凍結融解を繰り返すことによって、最終的にある一定の状態（突固め条件2の間隙比、透水係数付近）へと収束していく傾向が認められる。また、凍結融解を3サイクル以上繰り返していくと、間隙比は1.2付近へ、透水係数は $5 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 付近へと収束していくことが推測できる。上記の間隙比の土の状態は、締固め度 D_c で表すと約90%である。

(4) 凍結膨張率、凍上速度と透水係数増加倍率

図-9は凍結膨張率と透水係数増加倍率の関係、図-10は凍上速度と透水係数増加倍率の関係を表している。1つの実験における凍結膨張率、凍上速度と透水係数増加倍率の変化は、サイクル順に点線で結んで表されている。ただし、凍結融解を1サイクルしか行っていない場合は、点線で結ばれない。

図-9から、突固め条件1の供試体では、凍結融解1サイクルで、透水係数が最大で約10倍から、最小で約5倍程度、増加したことが確認できる。突固め条件2の供試体では、透水係数の変化は2倍未満と小さく、突固め条件3では、全ての供試体で透水係数が減少している。また、全ての供試体の1度目の凍結時における凍結膨張率と透水係数増加倍率の関係は、下に凸の曲線関係であることがわかる。

図-10から、全ての供試体の1度目の凍結時における凍上速度と透水係数増加倍率に着目すると、凍結膨張率と同

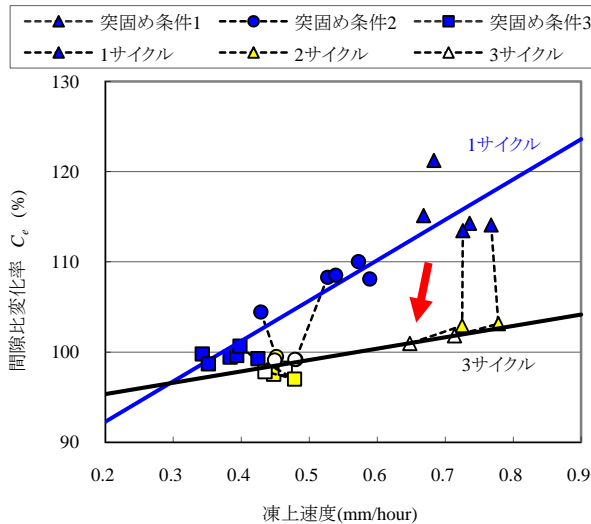


図-11 凍上速度と間隙比変化率の関係

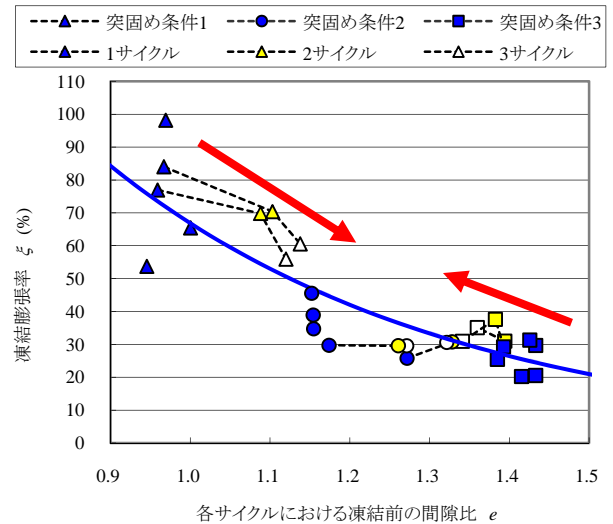


図-12 各サイクルにおける凍結前の間隙比と凍結膨張率

様に、下に凸の曲線関係であることがわかる。以上から、1度目の凍結時において、高い凍上性を示せば示すほど、融解後の透水係数が大きく増加することが明らかとなった。

しかしながら、図-9、図-10から、2サイクル目以降は、凍結膨張率、凍上速度と透水係数変化率との間には、上記のような関係性は確認できない。

図-11は、凍上速度と間隙比変化率の関係を表している。図中の点線は、前述の図-9、図-10と同様に、凍上速度と間隙比変化率のサイクルごとの変化を表している。

凍結融解1サイクルに着目すると、凍上速度の増加に伴って、間隙比変化率も増加していることが明らかであり、凍上速度と間隙比変化率の間に直線の比例関係が成り立つことが確認できる。このことから、高い凍上性を示す土では、発達したアイスレンズが形成され、融解後の間隙比が増大し、透水係数も増加することが明らかとなった。凍結融解3サイクルでも、凍上速度と間隙比変化率の間に直線の比例関係が認められるが、その傾きは非常に小さい。これは、3サイクル目以降は凍上速度に関わらず、サイクルを重ねるごとに間隙比の変化が小さくなり、透水係数の変化も小さくなって行くことを表している。以上のことから、凍結融解サイクルを重ねることによって、透水係数及び間隙比の変化は小さくなり、ある一定の値に収束していくことが推測できる。

(5) 間隙比と凍結前の凍結膨張率

図-12は、各サイクルにおける凍結前の間隙比と凍結膨張率の関係を表している。図中の点線は、図-9から図-11と同様に、各サイクルにおける凍結前の間隙比と凍結膨張率のサイクルごとの変化を表している。

図から、突固め条件1の供試体では、凍結融解サイク

ルを重ねるごとに間隙比が増大していき、それに伴って、凍結膨張率は減少している。これは、凍結融解作用を繰返し受けた粘土の凍上量が次第に減少するという既往の実験結果と良い一致を示している¹⁰⁾。突固め条件2の供試体では、凍結融解によって間隙比が若干増加しているが、凍結膨張率にはほぼ変化がみられない。突固め条件3の供試体では、凍結融解サイクルを重ねるごとに間隙比は若干ではあるが減少していき、それに伴って、凍結膨張率は微少ではあるが増加する傾向を示している。

また、図-12から、各サイクルにおける凍結前の間隙比が大きくなるにしたがって、凍結膨張率が低下する傾向を見て取ることができる。一般的に、土が凍上するためには凍結面への不凍水の供給が必要条件であると考えられている（例えば、赤川¹¹⁾など）。また、土粒子表面に存在する不凍水の厚さが温度によって決まることは、鞠谷ら¹²⁾によって報告されている。以上から、土粒子表面の不凍水の厚さが一定であるとする、間隙比が大きくなり土粒子間の距離が広がることによって、不凍水の連結性が阻害されるのではないかと推測することができる。このため、凍結面への不凍水の供給量は減少し、凍上性が低くなるのではないかと考えられる。

6. まとめ

本研究で得られた知見について以下にまとめる。

- (1) 高い締固めエネルギーで突固められた土（突固め条件1）は、凍結融解後の残留変位の増加によって緩み、間隙比が増加し、それに伴って透水係数も増加する。これに対し、低い締固めエネルギーで突固められた土（突固め条件3）は、残留変位の減少によ

って締まり、間隙比が減少し、それに伴って透水係数も減少する。ただし、どちらの土も、凍結融解を繰り返すことによって、最終的にある一定の状態（突固め条件2の間隙比、透水係数）へと収束していく。

- (2) 1度目の凍結時において、高い凍上性を示す土では、発達したアイスレンズが形成されるため、融解後の間隙比が増大し、透水係数も増加することが明らかとなった。この凍結融解1サイクル目における透水係数の増加割合は、凍上時の凍結膨張率、凍上速度と良い相関関係を示す。
- (3) 同一土を用い、締固め方法などで間隙比の異なる供試体を作製した場合、土の間隙比が大きくなるにしたがって、凍結膨張率が低下することが明らかとなった。

上記の知見は、凍上性の強い風化火山灰で得られたものである。今後、他の土についても同様の凍結融解実験を行い、間隙比、透水係数、凍結膨張率で、上記のような傾向が得られるか、確認する必要があると考えられる。また、本研究では、凍結融解によって土粒子の配向が変化したと考えられる実験結果が得られた。このような土粒子の動きについては、今後明らかにしていく予定である。

参考文献

- 1) 河野文弘：舗装の凍上被害と対策—道路排水溝指針に寄せて—，土木試験所月報，No.254，pp. 2-13，1975。
- 2) Chamberlain, E., Iskandar, I. and Hunsicker, S. E.: Effect of freeze-thaw cycles on the permeability and microstructure of soils, *Cold Region Research and Engineering Laboratory*, Vol.90, No.1, pp. 145-155, 1990.
- 3) Benson, C. H. and Othman, M. A.: Hydraulic conductivity of compacted clay frozen and thawed in situ, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.119, No.2, pp. 276-294, 1993.
- 4) Konrad, J. -M.: Physical processes during freeze-thaw cycles in clayey silts, *Cold Regions Science and Technology*, Vol.16, pp. 291-303, 1989.
- 5) Starke, J. O.: Effect of freeze-thaw weather conditions on compacted clay liners, *12th Annual Waste Conference*, pp. 412-420, 1989.
- 6) 新規格定地盤工学会基準・同解説 VII（2003年度版），凍上性予測のための土の凍上試験方法，凍上性判定のための土の凍上試験方法，地盤工学会，2003。
- 7) 中村 大，後藤隆司，森 訓保，鈴木輝之，平松雅宏：岩石の凍上性に関する基礎的研究—岩石の物性値と破砕の影響—，地盤工学ジャーナル，Vol. 1, No. 4, pp.131-142, 2006。
- 8) 小野 丘，小玉大樹，加藤幸輝：凍結・融解履歴を受ける正規圧密および過圧密飽和粘土の性質について，土木学会論文集，No.743/III-64，pp.47-57, 2003。
- 9) Tavenas, F., Jean, P., Leblond, P. and Leroueil, S.: The permeability of natural soft clays, Part II, Permeability Characteristics, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.20, pp. 645-660, 1983.
- 10) Hui, B. and Ping, H.: Frost heave and dry density changes during cyclic freeze-thaw of silty clay, *Permafrost and Periglacial Processes*, Vol.20, pp. 65-70, 2009.
- 11) 赤川 敏：土・岩・モルタルの凍上現象とそのアイスレンズ発生の巨視的メカニズム，雪氷，66巻，2号，pp.149-161, 2002。
- 12) 鞠谷佳郎，高橋賢士，原口征人，赤川 敏：各種粘性土の不凍水厚さの温度依存性，第37回地盤工学研究発表会，pp.1160-1170, 2002。

(2010.7.9受付)

CHANGES IN THE PERMEABILITY COEFFICIENT AND THE VOID RATIO OF COMPACTED SOIL BY THE EFFECT OF FREEZE-THAW CYCLES

Dai NAKAMURA, Teruyuki SUZUKI, Takashi GOTO, Hakusam KIM, Yoji ITO
and Satoshi YAMASHITA

In this research, we used frost heave test equipment to conduct a freeze-thaw cycle test and checked how the various physical properties of soil, particularly the permeability coefficient and the void ratio, changes before and after the soil froze and thawed. We employed weathered volcanic ash that has high frost susceptibility and tested the soil under tightened and loosened compacting conditions. From the test results, we confirmed that the permeability coefficient and the void ratio of compacted soil with high compaction energy is increased by the first cycle of freeze-thaw and the coefficient of permeability and the void ratio of compacted soil with low compaction energy is decreased by repeating freeze-thaw cycles. In addition, we clarified that the physical properties of the soil are changed by repeating the freeze-thaw, and finally the physical properties establish a steady state after several cycles.