

## 異なる過圧密比のもとで凍結・融解履歴を受ける粘土の非排水せん断特性

Undrained shear properties of frozen and thawed clay with different overconsolidation ratio

北海学園大学工学部 正 員 小 野 丘 (Takashi Ono)  
 北海学園大学大学院 学生員 ○小 玉 大 樹 (Daiki Kodama)  
 北海学園大学工学部 学生員 近 藤 孝 裕 (Takahiro Kondo)

## 1. はじめに

土の凍上現象については、その凍上機構・凍結深などに関する研究が数多くなされているが、凍結融解土自体のせん断強さに関する研究は少ない。また、それら既往の研究で得られている結果は、分析に至るまでの実験過程に応力解放を伴っているなどの問題点を包含しているため、研究者により異なった見解がなされている現状にある<sup>1)</sup>。そこで、筆者らは圧密・凍結・融解・せん断の全過程において、軸対称三軸応力条件を保持できる装置により、粘性土の変形特性やせん断強さに与える凍結・融解履歴の影響について一連の実験を実施してきている<sup>2)3)4)</sup>。これまでの研究結果から、正規圧密粘土に凍結・融解を与え、その後排水と沈下を十分許すと間隙比の減少がみられ、非排水強さは未凍土の場合より増加することが分かっている。また、凍結中に受けた最大有効応力を凍結融解後の圧密特性から推定し、その圧力を先行圧密応力として過圧密履歴を与えた場合と、凍結・融解履歴を与えた場合のせん断特性はよく類似することも解かった。一方、過圧密試料(OCR=5)に凍結・融解履歴を与え、その後非排水せん断試験を行うと正規圧密粘土に類似したピークを持たない硬化型の応力-ひずみ挙動を示し、その非排水せん断強度(ピーク値)は未凍土とに顕著な差がないということなども明らかとなっている。そこで本報告では、凍結・融解履歴を与えた OCR=1, OCR=10 の飽和粘土の非排水せん断特性について若干の実験結果を得たのでその一部を報告する。また、既存の研究結果との比較を試みたのでその結果も述べる。

## 2. 実験試料および実験方法

## 2. 1 実験試料

本実験に用いた試料は市販の木節粘土とシルトを乾燥重量比 1:1 で混合したもので、それを液性限界の約 2 倍の含水比でスラリー状にし、予備圧密セルで一次的に鉛直有効応力 100kPa で圧密したものをφ50mm, H100mm にトリミングした飽和粘土である。表-1 にその試料の物理的性質を示す。なお、OCR=3.3 に関しては、予備圧密セル内で 100kPa(平均有効応力 66.7kPa)で作製し、三軸セル内で 20kPa に除荷したものをを用いている。

## 2. 2 実験方法

上記のように作製した供試体を、三軸セル内で所定の有効応力で等方圧密した後、適当な有効応力まで除荷し任意の異なる過圧密比をもった試料を作成する。それを凍結・融解させ、非排水せん断試験を行う。更に比較の

表-1 試料の物理的性質

|        |             |                   |
|--------|-------------|-------------------|
| 液性限界   | 38.8        | %                 |
| 塑性指数   | 17.3        |                   |
| 土粒子の密度 | 2.606       | g/cm <sup>3</sup> |
| 比表面積   | 17.67       | m <sup>2</sup> /g |
| 粘土分    | 47          | %                 |
| シルト分   | 53          | %                 |
| 工学的分類  | 低液性限界粘土(CL) |                   |

表-2 実験条件

| 実験番号 | 圧密圧力<br>(平均有効主応力) | OCR | 凍結<br>融解 | 凍結速度   | 凍結温度<br>上端面<br>下端面 |
|------|-------------------|-----|----------|--------|--------------------|
| 1    | 200kPa            | 1   | 無し       | —      | —                  |
| 2    | 200kPa            | 1   | 有り       | 6mm/hr | 0℃⇒-10℃<br>+10℃⇒0℃ |
| 3    | 66.7kPa⇒20kPa     | 3.3 | 無し       | —      | —                  |
| 4    | 66.7kPa⇒20kPa     | 3.3 | 有り       | 6mm/hr | 0℃⇒-10℃<br>+10℃⇒0℃ |
| 5    | 200kPa⇒20kPa      | 10  | 無し       | —      | —                  |
| 6    | 200kPa⇒20kPa      | 10  | 有り       | 6mm/hr | 0℃⇒-10℃<br>+10℃⇒0℃ |

ため、同じ過圧密比をもった試料を凍結・融解履歴を与えず非排水せん断試験を行う。表-2 に各実験条件をまとめたものを示す。なお、実験番号 3 と 4 は、既存の研究結果のもので、予備圧密セル内の平均有効主応力を 66.7kPa と解釈し、過圧密比を 3.3 として本報告の比較に用いた。凍結過程は、まずキャップ側の温度を一旦急激に低下させ氷核形成を行い、その後上下端面温度差を 10℃に保持しながら、凍結速度一定(6mm/hr)で凍結させる。凍結・融解過程終了後、排水が終了するのを待ち、直ちに非排水せん断試験を実施する。なお試験中は 100 kPa の背圧を載荷し、試験装置は+2℃の恒温室に置いた。ここで記した凍結速度とは、供試体中の 0℃線の進行速度と定義する。

## 3. 実験結果および考察

## 3. 1 非排水せん断特性

## (1)各過圧密比における応力-ひずみ特性

図-1 は異なる OCR をもつ試料に凍結・融解履歴を与

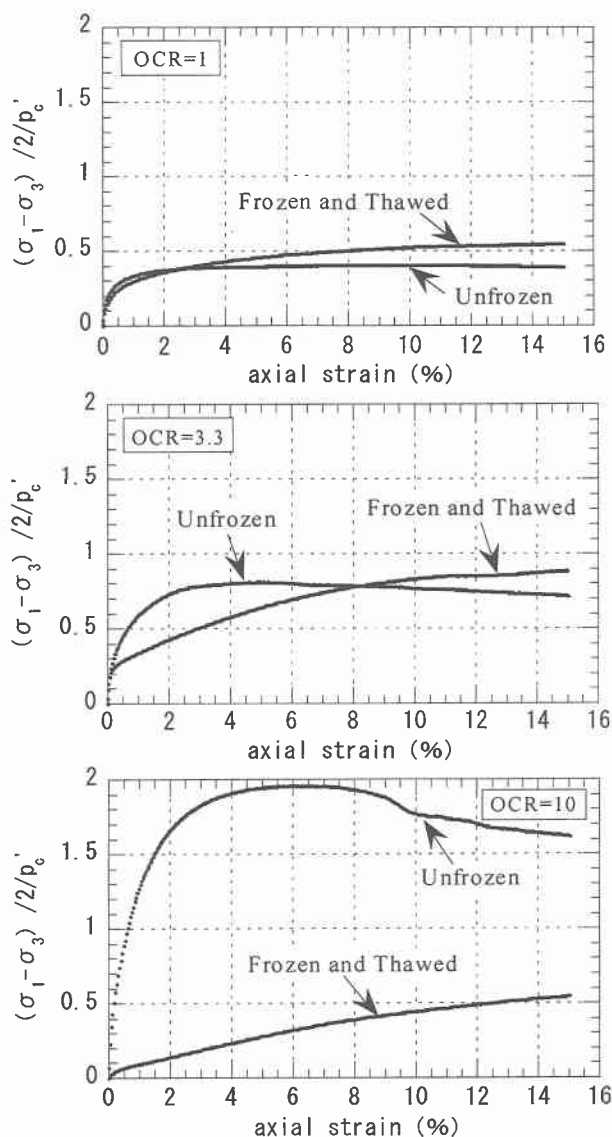


図-1 各 OCR における応力-ひずみ曲線

え、沈下と排水が十分終了したのを確認した後に非排水せん断を実施した結果と、これらと同様の OCR をもつ試料を未凍結の状態で行った結果とを圧密応力  $p'_c$  で正規化して比較した応力-ひずみ曲線である。図-1 より、OCR=1 (正規圧密粘土) では、ひずみの小さな範囲においては挙動が近似しているが、ひずみが 3% を超えると有意な差が生じ、凍結・融解履歴を受けた試料が未凍結試料よりもやや非排水強度が大きくなっていることが分かる。これは、既往の研究結果<sup>2)</sup>と同様の傾向を示すものであった。次に OCR=3.3 の結果では、未凍結試料はひずみの小さな段階でピークを迎える典型的な過圧密粘土の応力-ひずみ曲線を示すのに対し、凍結・融解履歴を受けた試料は、正規圧密粘土に類似したピークをもたない硬化型の挙動を示していることが分かる。また、凍結・融解履歴を受けた試料と未凍結試料との強度(ピーク強度)に大きな差異は認められなかった。さらに OCR=10 の場合は、その強度特性は OCR=3.3 の場合と同様に凍結・融解後はピークをもたない硬化型の応力-ひずみ曲線を示した。しかしながら、その傾向は OCR=3.3 の場合よりもより顕著に表れ、未凍結試料に比

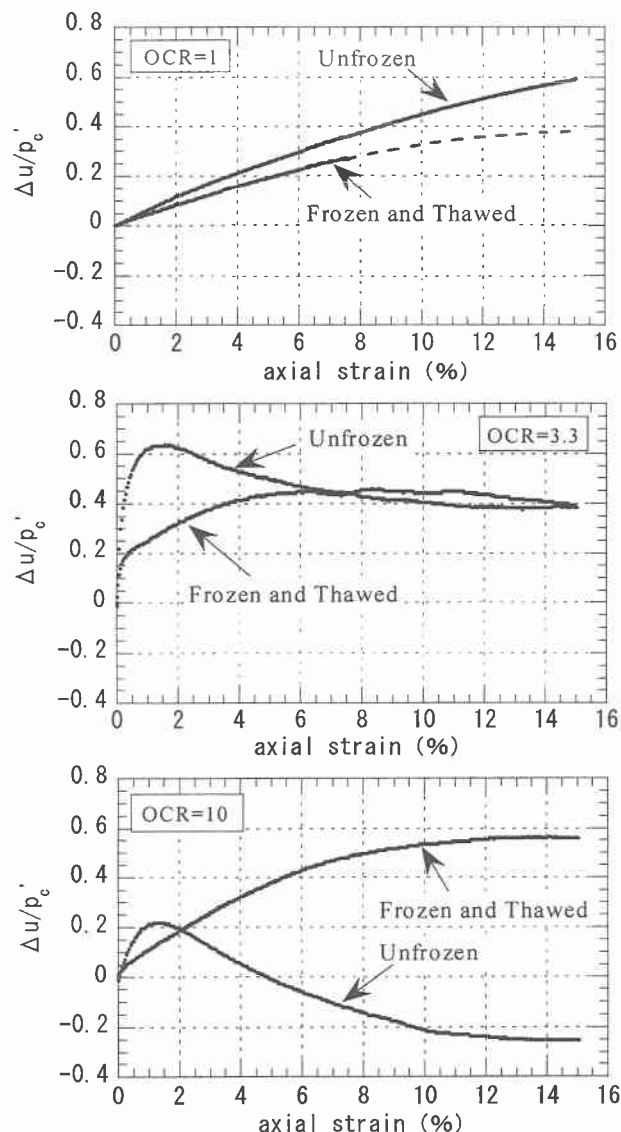


図-2 各 OCR における発生間隙水圧特性

べその応力-ひずみの形状が大幅に変化して、凍結・融解後は強度が低下する結果となった。これは、緒方ら<sup>5)</sup>や Chamberlain<sup>6)</sup>が示したように、過圧密比の大きい試料に凍結・融解履歴を与えると強度が低下する結果と定性的に同じである。以上のことから、凍結・融解履歴を受けた飽和粘土の強度発現特性や強度変化に与える影響は、OCR によって各々異なるものと考えられる。

## (2) 各過圧密比における発生間隙水圧特性

図-2 は非排水せん断中の発生間隙水圧を比較したものである。OCR=1 の結果では、未凍結と凍結・融解履歴を受けた試料は、ほぼ同じ傾向を示しているが、その発生量は未凍結試料よりも凍結・融解を受けた試料の方が多少減少する結果となっている。OCR=3.3 の未凍結と凍結・融解履歴を受けた試料では、軸ひずみが 7% を越えると、両者はほぼ同じ程度の間隙水圧の値を示しているが、ひずみの小さな範囲においては、両者に大きな違いが見られ、凍結・融解履歴を受けた試料の方が間隙水圧発生量は減少する結果となった。一方、OCR=10 の場合では、OCR=1 や 3.3 とは逆に未凍結試料よりも凍結・融解履歴

を受けた試料の方が間隙水圧の発生量が著しく大きくなる結果となった。また、その発生特性を見ても未凍結試料では、強く過圧密された粘土が示す一般的な挙動を示しているが、凍結・融解履歴を受けた試料は、軸ひずみの増加とともに間隙水圧が単調に増大し、あたかも正規圧密粘土のような挙動を示していることが分かる。以上の OCR=1, 3.3, 10 の結果から、凍結・融解履歴は飽和粘土のダイレイタンスー特性を変化させるものと推論できる。また、その変化の仕方は OCR に依存していることが伺われる。つまり、凍結・融解履歴が構造に与える影響は OCR によって異なることを示唆している。

### (3) 各過圧密比における有効応力経路

異なる OCR をもつ未凍結試料と凍結融解履歴を受けた試料との非排水せん断過程における応力状態の変化を検討するために、有効応力経路の比較を図-3 に示す。ここに  $q = \sigma_1 - \sigma_3$ ,  $p' = (\sigma_1' + 2\sigma_3')/3$  である。まず、OCR=1 の場合の凍結・融解履歴を受けた試料を見ると、初期の  $q$  の立ち上がり部分で未凍結試料と似た挙動を示すが、その後、上方に離脱して強度が増加していることが分かる。次に OCR=3.3 の凍結・融解試料では、未凍結よりも初期から直線的に上昇する結果となっており、軽く過圧密された粘土のような挙動を示している。OCR=10 の凍結・融解試料では、OCR=3.3 と同じように  $q$  が直線的に上昇するものの、未凍結試料と比較すると初期段階から大幅に異なった挙動を示していることが分かる。以上をまとめると、OCR=3.3 や 10 のような過圧密試料が、凍結・融解履歴を受けると、過圧密の度合いが小さくなる傾向を示し、OCR=1、つまり正規圧密試料では、凍結・融解後に過圧密粘土のような挙動を示す傾向にあると言える。これは既往の研究結果<sup>3)</sup>と一致している。

## 3. 2 凍結・融解履歴の過圧密比依存性

### (1) 間隙比変化と OCR の関係

凍結・融解前後の間隙比変化  $\Delta e$  の OCR 依存性を検証するために、図-4 に、間隙比変化  $\Delta e$  と OCR の関係を示す。なお、間隙比変化  $\Delta e$  とは、凍結融解後の間隙比の値から凍結直前の間隙比の値を差し引いた値であり、負の値は間隙比の減少を表す。この図より、今回の試料においては OCR が約 9 以下であれば、凍結・融解履歴によって間隙比が減少すると推測される。また、図-4 を利用することで凍結・融解前後の間隙比変化を OCR からある程度推測することができると考えられる。

### (2) $A_f$ と OCR の関係

図-5 は、非排水せん断試験より得られる破壊時の間隙水圧係数  $A_f$  と OCR との関係を示したものである。 $A_f$  は(1)式で定義する。

$$A_f = \frac{\Delta u_f}{\Delta \sigma_{1f}} \quad (1)$$

ここに、  
 $\Delta u_f$ : 破壊時の発生間隙水圧  
 $\Delta \sigma_1$ : 破壊時の最大主応力の増分

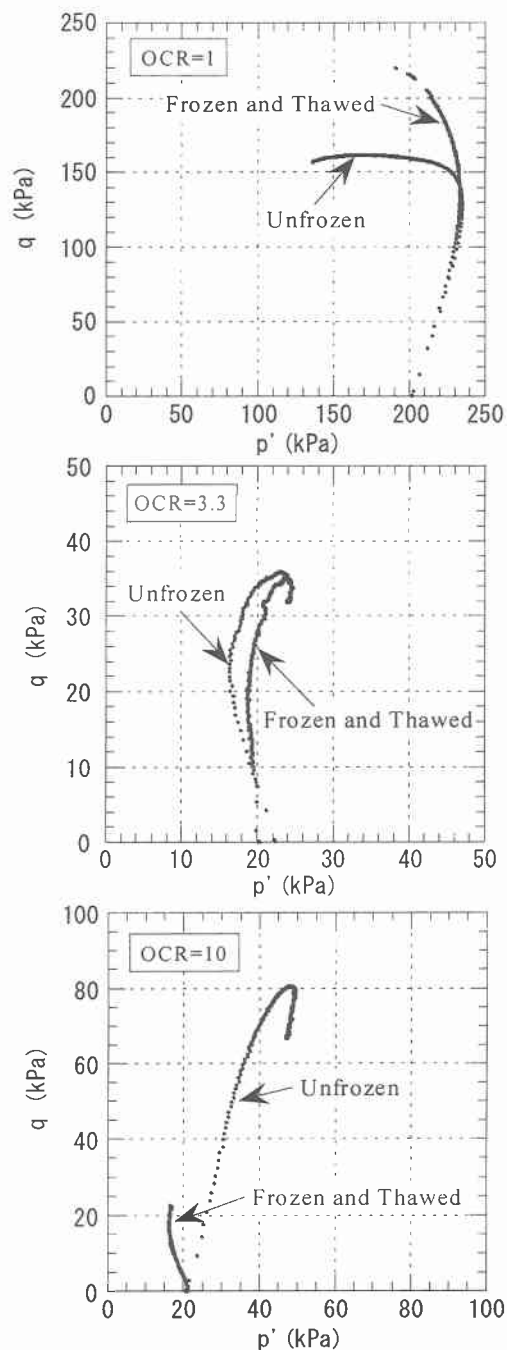


図-3 各 OCR における有効応力経路

図-5 より、OCR=1 の場合は凍結・融解後に  $A_f$  の値が減少し、OCR=3.3 では若干の減少、OCR=10 では逆に増加する結果となった。 $A_f$  の値は土の構造、つまりダイレイタンスー特性を表しているので、 $A_f$  の値が未凍土より小さくなるという事実は、間隙水圧が発生しにくい構造に変化したことを示しており、それと逆の場合には、間隙水圧が発生しやすくなったことを示している。また、OCR と  $A_f$  の間には、一般的に一義的な関係があることから、凍結・融解履歴による破壊時の間隙水圧係数  $A_f$  の変化は、試料における OCR が凍結・融解によって変化したと解釈することもできる。これより、図-5 から  $A_f$  の変化に対応した OCR を推定すると、OCR=1 の場合は約 2.5、OCR=3.3 では約 4.5、OCR=10 では約 2 に対応する変化が見られる。また、凍結・融解後の全ての OCR

が2～5程度に収束する傾向にある。

### (3) 非排水せん断強度比とOCRの関係

図-6は非排水せん断強度比とOCRとの関係を示したものである。ここに非排水せん断強度比  $S_{uF}/S_{uF}$  は(2)式で定義する。

$$S_{uF}/S_{uF} = \frac{\text{凍結・融解後の試料の非排水せん断強度}}{\text{未凍結試料の非排水せん断強度}} \quad (2)$$

また、既往の結果である試料A(LL=73%,PI=43)、試料B(LL=50%,PI=24)による結果も併せて載せてある。図-6より、凍結・融解を受けた粘土の非排水強度比は、OCR

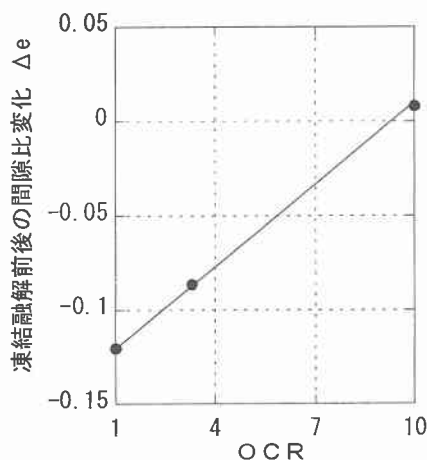


図-4 Δe と OCR の関係

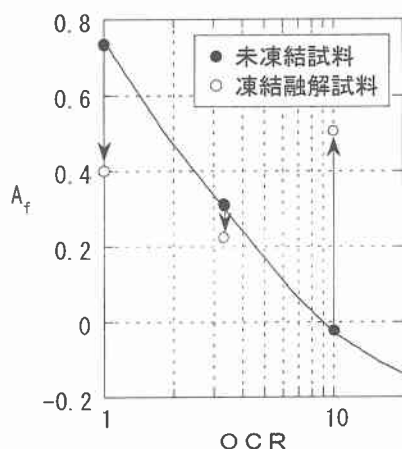


図-5 Af と OCR の関係

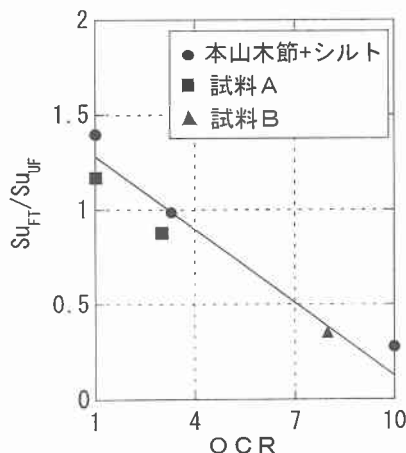


図-6 非排水せん断強度比と OCR の関係

が大きくなるに従って小さくなることが分かる。また、OCRが約3を境にして強度の変化が逆転することが分かる。なお、この結果は異なる試料A、試料Bにおいても同様の傾向を示していることが確かめられる。

### 4. まとめ

本研究で得られた結果をまとめると次のようになる。

1. 凍結・融解履歴が飽和粘土の強度発現特性や強度変化に与える影響は、OCRによって各々異なり、過圧密粘土では、応力-ひずみ曲線の形状が正規圧密粘土に類似したピークをもたない硬化型の挙動を示した。
2. 未凍結試料と凍結・融解履歴を受けた試料では非排水せん断中の間隙水圧の発生量が異なり、ダイレイタンシー特性に関わる構造変化が凍結・融解履歴によってもたらされたものと推論できる。また、その発生特性の変化は、OCRに依存する。
3. OCR=1(正規圧密試料)が凍結・融解履歴を受けると過圧密粘土のような挙動を示す傾向にあり、OCR=3.3や10のような過圧密試料では凍結・融解後に過圧密の度合いが小さくなる傾向を示した。
4. 凍結・融解前後の間隙比変化とOCRの関係から、今回の試料においては、OCRが約9以下であれば、凍結・融解履歴によって間隙比が減少することが分かった。
5. OCRが約3以下になると未凍結試料に比べ、凍結・融解履歴を受けた試料の方が強度が増加し、逆に約3以上になると強度は減少することが分かった。
6. 未凍土の  $A_f$ -OCR の関係を用いて、凍結・融解後の  $A_f$  の変化に対応したOCRを推定すると、OCR=1の場合は約2.5、OCR=3.3では約4.5、OCR=10では約2に対応し、凍結・融解後はOCRが2～5程度に収束する傾向にあることが分かった。

### 参考文献

- 1) 小野丘, 三田地利之: 粘性土の軸対称三軸応力下における凍結・融解履歴について, 土木学会論文集 No. 617/III-46, pp275-282, 1999.
- 2) 小野丘, 三田地利之: 正規圧密飽和粘性土の三軸凍結・融解・せん断特性, 第32回地盤工学研究発表会発表講演集, pp1179-1180, 1997.
- 3) 加藤幸輝, 武市靖, 小野丘: 飽和粘性土における凍結・融解履歴と過圧密履歴について, 第33回地盤工学研究発表会発表講演集, pp1171-1172, 1998.
- 4) 小野丘, 小玉大樹: 凍結・融解履歴を受ける過圧密粘土の非排水せん断特性, 平成12年度土木学会北海道支部論文報告集, 第57号, pp538-541, 2001.
- 5) 緒方信英, 片岡哲之, 岡本敏郎: 地盤の凍結・凍上特性-粘性土の強度特性におよぼす凍結・融解の影響-, 電力中央研究所土木研究報告, No. 385054, 1986.
- 6) Chamberlain, E.J.: Physical changes in clays due to frost action and their effect on engineering structure, Proceedings of the International Symposium on Frost in geotechnical engineering Vol.1, pp863-893, 1989.