

凍結・融解履歴を受ける過圧密粘土の非排水せん断特性

Undrained shear properties of frozen and thawed over-consolidated clay

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)

1. まえがき

土が凍結する時、地表面変位が発生するいわゆる凍上が起こる。凍上現象が起こると、地上や地中構造物に被害を与え、一度被害を受けると程度によっては補修に莫大な費用がかかる。また、土が凍結した後、融解作用を受けることによって、地盤の支持力が低下し、構造物に被害を生ずることがある。土が凍結・融解作用を受けると、土そのものの物性が大きく変わると考えられているが¹⁾、凍結・融解履歴が土の力学的性質にどのような影響を及ぼすかについては不明な点が多いのが現状である。

一方このような地盤の凍結・融解過程が土のせん断強さをどのように変化させるかに関するこれまでの研究においては、研究者によって異なった結論が得られている。このような凍結・融解作用を受けた試料が示すせん断強さに異なった結果が出るのは、その実験方法に主な原因があることが指摘されている²⁾。

そこで筆者らは、これまでに筆者らが開発した凍結・融解三軸試験装置を用いて、飽和粘土試料に対して一連の実験を実施してきている³⁾。この実験装置の特徴は、凍結・融解・せん断の全過程を同一セルの中で与えることができ、明確な全応力境界条件の下でのデータを得ることができることにある⁴⁾。筆者らのこれまでの実験結果では、正規圧密粘土に凍結・融解履歴を与えると間隙比が減少し、せん断強度が増加する⁵⁾という結果を得ており、また凍結中に受けた最大有効応力 p_{cr} を推定し、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との非排水せん断挙動はよく類似することがわかっている⁶⁾⁷⁾。また過圧密粘性土の凍上特性として、凍結速度が小さくなるにつれて凍上率は大きくなり、凍結速度が小さくなるにつれて凍上速度も小さくなるという結果を得ている。これは高志らの実験結果⁸⁾と定性的に同じ結果であるが、それを有効拘束圧力 20kPa でも成り立つことを示した³⁾。

本報告では、凍結・融解中の過圧密粘土の特性、および凍結・融解履歴を受けた過圧密粘土と未凍結過圧密粘土との非排水せん断特性の違い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。

2. 実験試料および実験方法

2.1 実験試料

実験に用いた試料は粉末木節粘土とシルト(粉碎した石英砂)を乾燥重量比 1:1 で混合した粘土(低液性粘土)で、それを液性限界の約 2 倍の含水比を持つスラリー状にした後、予備圧密装置内で過圧密(100kPa→20kPa, OCR=5)したものを $\phi 50\text{mm}$, H100mm にトリミングして使用

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^3
粘土分	47	%
シルト分	53	%
工学的分類	低液性限界粘土(CL)	

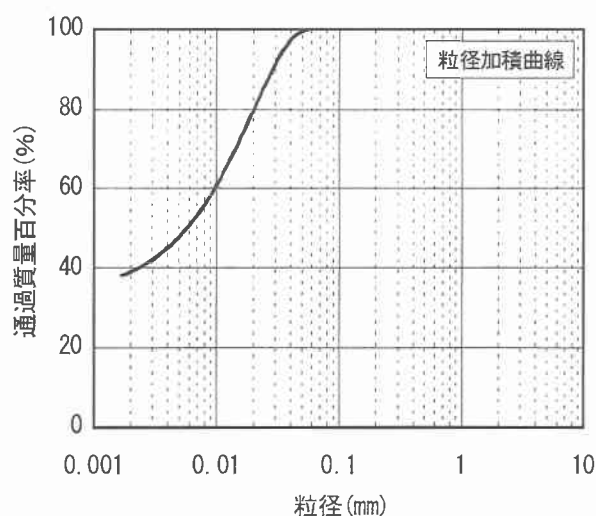


図 1 試料の粒径加積曲線

した。表 1 にその物理的性質を図 1 に粒度分布を示す。

2.2 実験方法

本報告で示す実験は、供試体を三軸セルの中で有効応力 20kPa で等方過圧密後、同じ有効応力の下で凍結速度 $U=6\text{mm/hr}$ と 8mm/hr で凍結・融解させ、非排水せん断を行った場合と、比較のための通常の等方圧密非排水せん断試験を行った場合の 3 通りである。なお、ここで凍結速度 U とは、供試体中の零度線の進行速度と定義する。

実験の手順は以下である。トリミングした供試体をゴムメンブレンと O-リングで恒温室内(2°C)の三軸セルにセットする。所定の圧力で等方圧密を始め、圧密終了後直ちに凍結を開始する。温度降下に先立ち、 0°C 以下で確実に氷晶が形成されるように低温側のキャップの温度を一時的に急激に降下させ過冷却を破る操作(サーマルショック)を行う。凍結・融解過程終了後、吸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。凍結・融解・せん断の全過程で全応力を一定に保持し、100kPa の背圧を載荷した。実験条件を表 2、表 3 にまとめて示す。

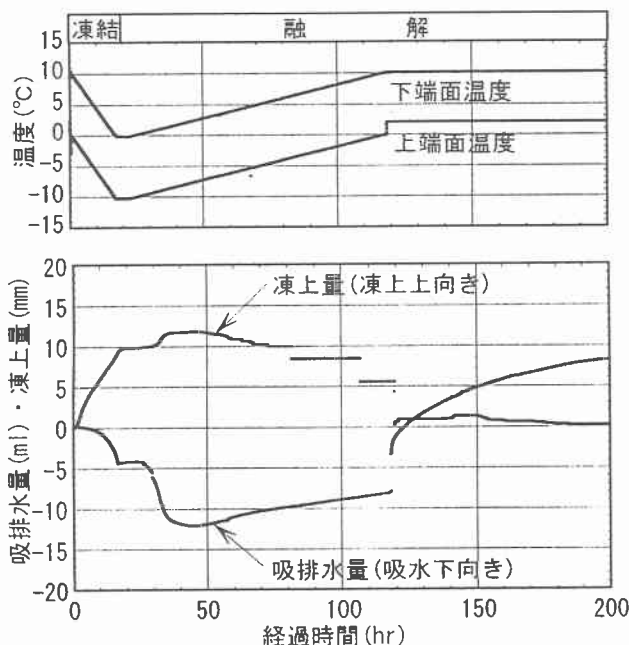


図2 凍結-融解過程(凍結速度 $U=6\text{mm/hr}$)

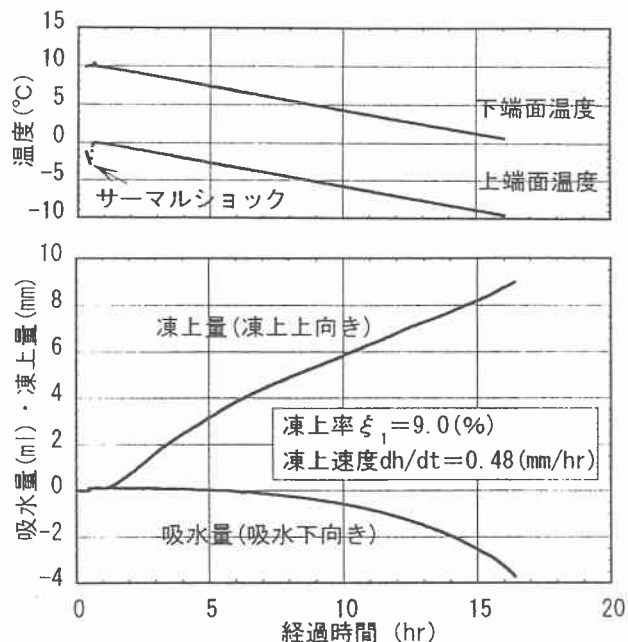


図4 凍結過程(凍結速度 $U=6\text{mm/hr}$)

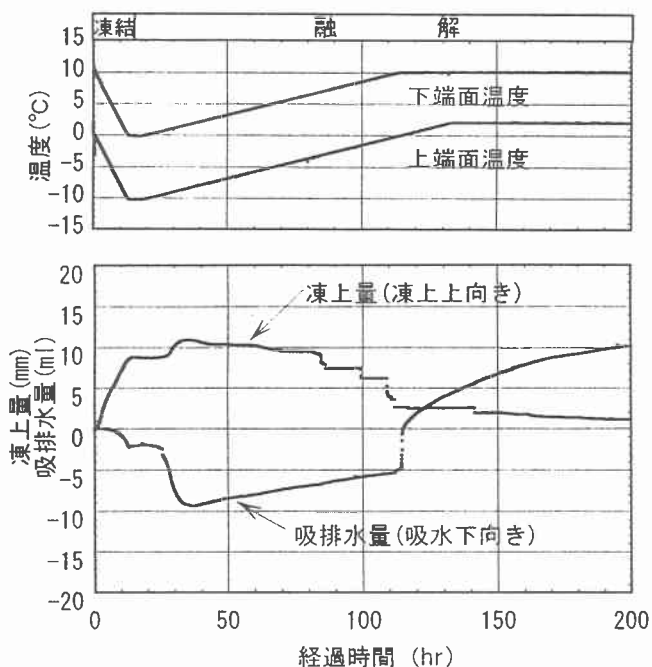


図3 凍結-融解過程(凍結速度 $U=8\text{mm/hr}$)

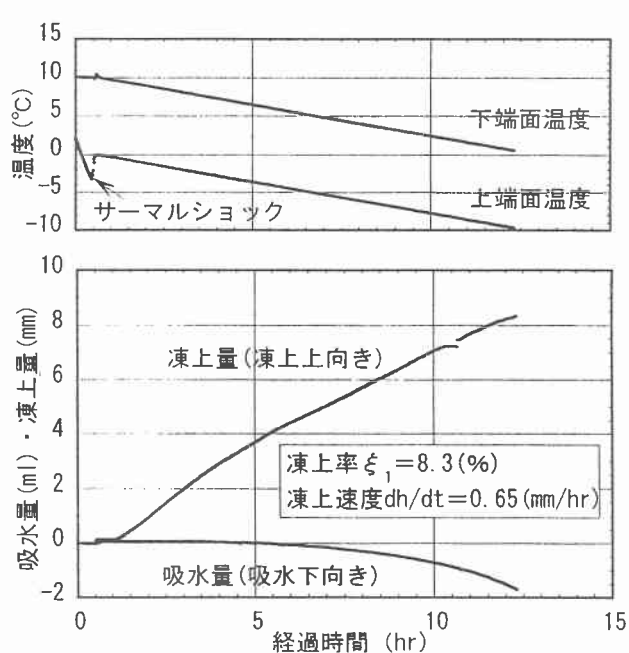


図5 凍結過程(凍結速度 $U=8\text{mm/hr}$)

表2 各過程の温度条件

	圧密	凍結	融解
上端面温度	$+2^{\circ}\text{C}$	$0^{\circ}\text{C} \rightarrow -10^{\circ}\text{C}$	$-10^{\circ}\text{C} \rightarrow +2^{\circ}\text{C}$
下端面温度	$+10^{\circ}\text{C}$	$+10^{\circ}\text{C} \rightarrow 0^{\circ}\text{C}$	$0^{\circ}\text{C} \rightarrow +10^{\circ}\text{C}$

表3 実験条件

有効拘束圧力 σ_1' / σ_3'	凍結速度	凍結時間	融解時間
20/20	6mm/hr	16時間40分	96時間
20/20	8mm/hr	12時間30分	115時間12分

3. 実験結果および考察

3.1 凍結・融解過程

図2、図3に凍結速度 $U=6\text{mm/hr}$ と $U=8\text{mm/hr}$ での凍結・融解過程の上下端面の温度、凍上/沈下量および吸排水量の変化を経過時間を横軸にとって示す。また、図4、図5には凍結過程における凍上量と吸水量、および両端面温度を拡大して示す。凍結開始から両端面温度を 10°C の差で一定に降下させていくと、それに伴って直線的な鉛直変位と連続的な吸水が確認できる。また、凍結速度の違いによる凍上率 ξ_1 は、凍結速度 $U=6\text{mm/hr}$ の場合 9.0% 、凍結速度 $U=8\text{mm/hr}$ の場合 8.3% となり、凍結速度が小さい方が凍上率はやや大きくなった。なお、凍上率 ξ_1 は次式で定義した。

表 4 各実験の間隙比の値

	初期 間隙比	凍結直前の 間隙比	せん断直前の 間隙比
未凍結	0.879	—	0.859
凍結速度 6mm/hr	0.875	0.863	0.801
凍結速度 8mm/hr	0.92	0.908	0.802

$$\varepsilon_i = \frac{\text{凍結終了時の凍上量}}{\text{凍結直前の供試体高さ}} \times 100(\%)$$

次に凍結速度の違いによる凍上速度 dh/dt を較べると、凍結速度 $U=6\text{mm/hr}$ の場合 $dh/dt=0.48\text{mm/hr}$ 、 $U=8\text{mm/hr}$ の場合 $dh/dt=0.65\text{mm/hr}$ となり、凍結速度が小さい場合に凍上速度も小さくなる結果となった。この実験結果は、筆者らの過去の研究³⁾と定性的に一致する結果となった。なお、凍上速度は、経過時間に対する鉛直凍上変位の直線的变化部分の勾配と定義した。

3.2 非排水せん断過程

(1) 未凍結試料と凍結・融解試料の非排水せん断強度

図 6 は OCR=5 の過圧密粘土を 20kPa で等方過圧密後直ちに非排水せん断した場合と、凍結・融解履歴を与えた後、沈下と排水が終了したのを確認して非排水せん断試験を行った場合を圧密圧力で正規化して比較した応力-ひずみ曲線である ($q = (\sigma_1' - \sigma_3')/2$, $p_e' =$ 有効圧密圧力)。この図から両者の強度発現特性を見ると、未凍結過圧密試料は一般的な軟化型の応力-ひずみ曲線を表しているが、凍結・融解履歴を受けた過圧密粘土はピークを持たない正規圧密粘土に類似した硬化型の応力-ひずみ曲線の挙動を示していることが分かる。表 4 に示したように、せん断直前の間隙比が未凍結試料の方が大きいことを考慮すると、図 6 の応力-ひずみ曲線における非排水せん断強度(ピーク値)には両者に大きな差はないと言える。また、凍結速度 6mm/hr と 8mm/hr で凍結履歴を与えた試料の間隙比を比較すると、非排水せん断直前の場合の間隙比はほぼ同じであり、図 6 の応力-ひずみ曲線を見ると、両者の強度発現特性もほぼ同じであることがわかる。凍結速度が異なれば、生成する水量が異なるとするのが一般的であり、それに応じた融解時の間隙比変化があると考えられる。しかし、今回の結果では表 4 に示したように、凍結直前の間隙比(含水比)が、凍結速度 $U=6\text{mm/hr}$ の試料より 8mm/hr の試料の方が大きいので、8mm/hr の試料の含水比が少し高く、結果的に両者の凍上量(氷の生成量)に差がなくなって、凍結速度による差異が間隙比に表れず、図 6 のような結果になったと考えられる。

(2) 発生間隙水圧特性

図 7 は非排水せん断中の間隙水圧特性を比較した図である。過圧密粘土に凍結・融解履歴を与えると、ひずみレベルが小さいところで過剰間隙水圧の発生量に大きな差が現れることが分かる。つまりダイレイタンシー特性

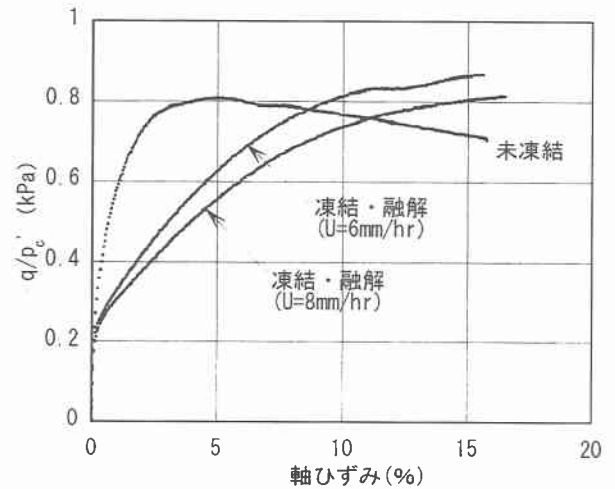


図 6 未凍結試料と凍結・融解試料の応力-軸ひずみの比較

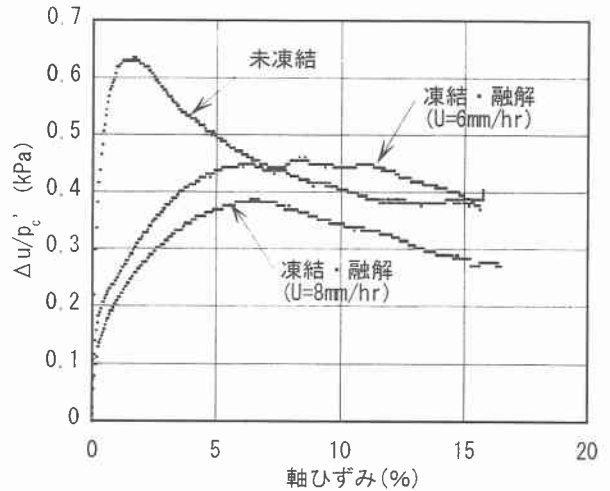


図 7 未凍結試料と凍結・融解試料の発生間隙水圧の比較

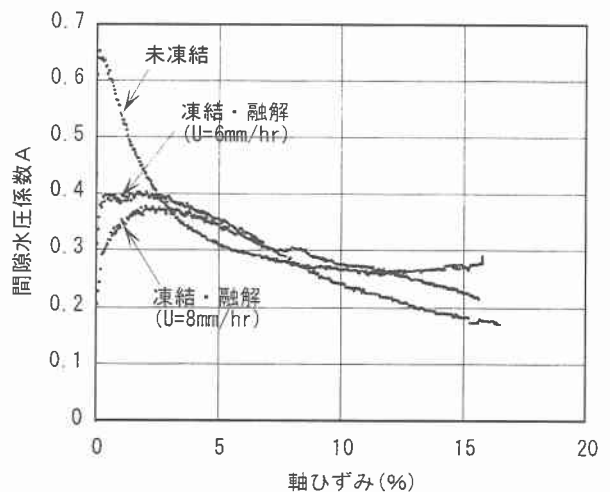


図 8 未凍結試料と凍結・融解試料の間隙水圧係数 A の比較

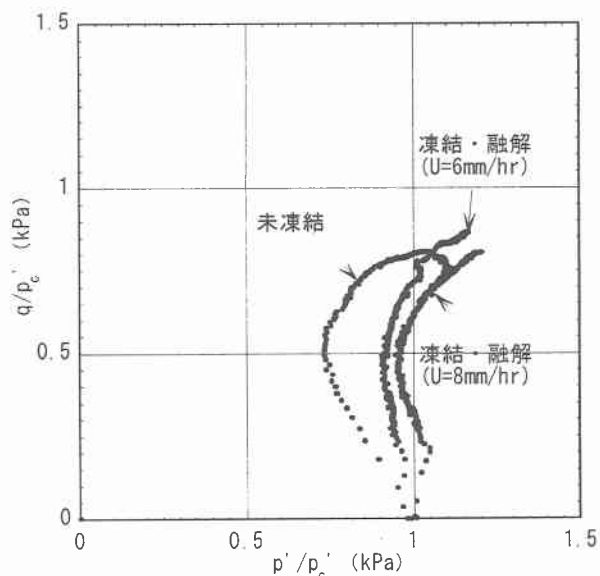


図9 未凍結試料と凍結・融解試料の有効応力経路

が凍結・融解履歴により大幅に変化するものと推論できる。このことをはっきり示すために、図8に未凍結と凍結・融解履歴の非排水せん断中の間隙水圧係数 A を比較した。図8から、軸ひずみが3%程度までの A 係数に明らかな差があることが分かる。このことは、凍結・融解履歴は粘土の土構造を大きく変化させることを示唆しているものと解釈できる。

(3) 有効応力経路

図9は平均有効主応力と偏差応力を正規化した非排水せん断時の有効応力経路である。図9から凍結・融解履歴後の応力経路はほぼ直線的に上昇し、軽く過圧密された粘土のような挙動を示していることが分かる。つまり、比較するデータ数が少ないものの、過圧密粘土に凍結・融解履歴を与えると、過圧密の度合いが小さくなる傾向を示すものと考えられる。

4. まとめ

今回の実験結果をまとめると以下ようになる。

1. 凍結・融解履歴を受けた過圧密粘土はピークを持たないひずみ硬化型の応力-ひずみ曲線の挙動を示す。

2. 今回の実験条件の下では、凍結・融解履歴を受けた過圧密粘土と未凍結過圧密粘土の非排水強度(ピーク強度)には大きな差は認められなかった。
3. 凍結・融解履歴により過圧密粘土のダイレイタンシー特性が大幅に変化する。
4. ダイレイタンシー特性の変化は小さなひずみレベルに顕著に表れる。
5. 凍結・融解履歴は過圧密粘土の過圧密の度合いを小さくする傾向がある。

5. あとがき

今回、有効拘束圧力20kPaと低い圧力で、かつ凍結速度が6mm/hr、8mm/hrと自然地盤における値より比較的速い条件で実験を行った。今後は凍結速度の幅を広げた条件での実験を行っていく予定である。また、既往の研究の成果で得られている凍結・融解履歴の正規圧密粘性土への影響と、今回の結果との統一的な解釈も試みる予定である。

参考文献

- 1) 例えば木下誠一編：凍土の物理学，森北出版，1982
- 2) 小野丘・三田地利之：粘性土の軸対象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, 275-282, 1999. 3
- 3) 小野丘・小玉大樹：低拘束圧過圧密粘性土の凍上特性，2000年度日本雪氷学会全国大会講演予稿集，p149
- 4) 小野丘・三田地利之：凍結・融解作用を受けた粘性土の示す非排水せん断特性について，地盤工学会北海道支部技術報告集，第36号，1996. 2
- 5) 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，p1179-1180, 1997
- 6) 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，p1171-1172, 1998. 7
- 7) 加藤幸輝・武市靖・小野丘：凍結・融解履歴を受けた飽和粘土の非排水せん断挙動について，土木学会第53回年次学術講演会，p766-767, 1998
- 8) 高志勤・益田稔・山本英夫：土の凍結膨張率に及ぼす凍結速度、有効応力の影響に関する研究，雪氷，36、2、1-20、1974