

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

小野 丘¹・小玉 大樹²・加藤 幸輝³

¹正会員 北海学園大学教授 工学部土木工学科(〒064-0926 札幌市中央区南 26 条西 11 丁目)

²正会員 ㈱日建ソイルリサーチ(〒541-0045 大阪市中央区修道町 4 丁目 5-22)

³正会員 北海道開発局 小樽開発建設部(〒047-8555 小樽市潮見台 1 丁目 15-5)

軸対称三軸応力条件の下で凍結・融解・せん断試験ができる装置を用いて正規圧密および過圧密飽和粘土に対して一連の実験を行った。その結果、正規圧密粘土に与えられた凍結・融解履歴は、過圧密履歴として扱うことができる可能性があり、さらに、凍結・融解履歴後に密度増加がある場合は、非排水せん断強度は増加することが実験的に確かめられた。一方、凍結・融解履歴を与えた過圧密粘土に対して、非排水せん断試験を実施した結果、凍結・融解履歴を受けた過圧密粘土はその前後で土構造が変化し、ダイレイタンスー特性が変わることを示す実験結果を得た。そして、その変化の様子は過圧密比によって異なることが明らかになり、凍結・融解履歴の過圧密比依存性を示すことができた。

Key Words: triaxial test, freeze and thaw, clay soil, undrained shear strength, pore pressure, shear parameters

1. はじめに

外気温の低下により凍結線が地中に侵入すると、その結果地盤中に氷の層が発生し地表面の隆起をもたらす凍上現象が起こる。凍上現象は舗装などの地表構造物や埋設管などの地中構造物においては隆起・ひびわれ・段差の原因となり、また、背面地盤の凍結による土留め構造物の変位などの被害を与える。さらに、融解後の強度変化や地表面の沈下が深刻な問題となることがある。一方、土が凍結・融解履歴を受けると、土そのものの物性が大きく変わると考えられている¹⁾が、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関しては、今だ未解明な点が多いのが現状である²⁾。これまで凍結・融解履歴を受けた粘土の強度について調べた室内実験のほとんどはモールドタイプの試験装置を用いているか、もしくは、三軸試験装置を用いた場合でも、凍結・融解・せん断の過程中に応力解放がある。つまり、それぞれの研究者が実験条件を示しつつも、明確な応力・温度等の条件下で実験が行われてきてはいない^{3)~6)}。そのため、それらの結果、特にせん断特性に関しては少なくとも応力解放の影響

や地盤内で受けていると想定される応力条件が考慮されているとは言えず、原位置で土要素が凍結・融解後にせん断応力を受ける現象とは異なっていると言わざるを得ない。

凍結・融解履歴を受けた飽和粘土が示す基本的性質に関する研究としては、緒方ら⁵⁾の研究がある。緒方らは三軸圧縮試験装置を用いて正規圧密および過圧密粘土を用いた凍結・融解実験を行っている。その結果、沖積粘土では、圧密降伏応力以上の拘束圧下では凍結・融解作用は強度に影響を及ぼさないが、カオリンでは、凍結・融解履歴を受けると供試体からの排水がおこり密度が増加するため、OCRが1~8程度までは強度が増加する結果を示している。さらに、凍結・融解履歴を受けると、せん断抵抗角を増加させ、粘着成分を減少させることも報告している。しかし、凍結・融解過程とせん断過程との間に一旦応力解放があることや凍結・融解時の拘束圧力がゼロであること、凍結・融解中に吸排水を許さないこと、零度線の進行が三次元的であることなどの実験条件が実験結果に影響しているとも考えられる。

そこで筆者らは、これまでに凍結・融解三軸試験

装置を用いて、飽和粘土試料に対して圧密-凍結-融解-せん断すべての過程を一貫した応力境界条件の下で一連の実験²⁾を実施してきた。これまでの研究から、締固め試料を用いた場合は、凍結・融解後、十分に排水させると試料の密度が増加し、約20%の非排水強度増加があるという結果を得ている²⁾。また、凍結・融解履歴の有無に関わらず強度定数に変化が生じないことなども明らかとなった²⁾。しかし、凍結・融解履歴を受けた正規圧密または過圧密飽和粘土が示す凍上特性やせん断特性および両者の関連などの基本的性質については今だ未解明な部分が多く存在している。

本報告では、まず、実験室内で作成した飽和粘土試料による正規圧密および過圧密粘土に凍結・融解履歴を与え、その履歴が飽和粘土の凍上特性や、非排水せん断特性にどのような変化をもたらすかを明らかにする。また、これらの実験事実に基づき、正規圧密および過圧密飽和粘土における凍結・融解履歴の影響を整理した。

2. 凍結・融解三軸試験装置

本実験で用いた凍結・融解三軸試験装置は、凍結・融解作用を与える装置部分を除くと、通常の三軸圧縮試験装置と基本的に同一であるが、供試体の上下端面温度を独立して制御できることと、圧密や凍上による供試体の軸方向変位に伴い変化する応力を一定に保つために三軸セル内に設置した荷重計の値をフィードバックして制御できるようにしてある点に特徴がある²⁾。これにより、圧密、凍結、融解、せん断のすべての過程を制御された全応力境界条件の下で任意の温度勾配や凍結速度で実施することができる。また、実験中の供試体の端面温度は、キャップとペDESTALに埋め込まれた白金測温抵抗体を用いて測定している。なお、三軸セル内には液体を入れていない。

3. 実験試料

実験にはカオリン粘土(試料A)、藤の森青粘土(試料B)、本山木節+シルト(試料C)の3種類の試料を用いた。試料Aは市販の粉末粘土で、これを液性限界の2倍の含水比でスラリー状にした後、十分攪拌・脱気してから予備圧密装置内で一次的に100kPaで圧密したものをφ50mm, H100mmにトリミングして使用した。試料Bは攪拌・脱気を容易にする

表-1 試料の物理的性質

	カオリン (試料A)	藤の森青 (試料B)	木節+シルト (試料C)
液性限界(%)	67	58	39
塑性指数	31	32	17
土粒子の密度(g/cm ³)	2.742	2.701	2.606
粘土分(%)	82	10	47
シルト分(%)	18	73	53
工学的分類	CH	CH	CL

ために液性限界の約2.4倍の含水比でスラリー状にした後、試料Aと同一方法で供試体を作成した。試料Cは市販の粉末木節粘土とシルトを乾燥重量比1:1で混合したもので、これを液性限界の約2倍の含水比でスラリー状にした後、試料A, Bと同一方法により供試体を作成した。それぞれの試料の初期飽和度は、平均98%であった。また、全応力を増加させる方法で別途求めたB値は0.95以上の値を示した。表-1に各試料の物理的性質を示す。

4. 凍結・融解・せん断過程

実験手順は以下の通りである。

- ①トリミングした供試体をゴムメンブレンとOリングで三軸セルにセットし、所要の圧力まで段階的に圧力を上げて等方圧密を行う。過圧密履歴を与える場合は、等方圧密終了後、所定の圧力まで減圧した。ただし、OCR=3.3の試料の場合は、一次元予備圧密時の鉛直応力が100kPaであることより、その時のKo値を0.5と仮定して平均有効主応力を66.7kPaと解釈し、三軸試験装置内で20kPaの等方圧密を行った。
 - ②圧密終了後、0℃以下で確実に氷晶を存在させるために、低温側(キャップ側)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。
 - ③供試体上下端面の温度差を10℃に保ち、キャップ側を0℃から-10℃、ペDESTAL側を+10℃から0℃まで上下同時に温度降下させる。上下面での温度降下速度は0.2~0.8℃/hrである。
 - ④凍結終了後、同一温度を5時間保った後に1~4日かけて上下端面の温度を徐々に上昇させて融解する。
 - ⑤融解による排水と沈下が終了したのを確認した後、直ちに非排水せん断試験を行う。
- なお、凍結・融解の全過程において全応力は等方

表-2 実験条件 1

	有効拘束圧力 p' (kPa) (凍結・融解過程)	凍結速度 U (mm/hr)
正規圧密試料 (OCR=1)	150, 200, 250, 300	2, 6
過圧密試料 (OCR=3.3)	20	2, 3, 4, 6, 8
過圧密試料 (OCR=10)	20	6

表-3 実験条件 2

背圧	100kPa
凍結中の上端面温度	0°C→-10°C
凍結中の下端面温度	+10°C→0°C
上下端面での温度降下速度	0.2~0.8°C/hr
温度勾配*	≒1.0°C/cm
融解時間	24~115時間
せん断ひずみ速度	0.04%/min

※凍土と未凍土の熱伝導率を同一と仮定した場合

で一定に保たれている。また、実験中は100kPaの背圧を載荷した。非排水せん断時のひずみ速度は0.04%/minである。

本研究では、供試体両端面の温度をそれぞれ独立に制御し、同時に温度降下させることによって実験を行った。凍結過程に供試体内の温度を測定していないが、別途実施した凍結中の側方変位を連続的に測定した結果から⁷⁾凍結線がほぼ一定速度で供試体内を移動していることが確認されており、実験中は凍結速度がほぼ一定に制御されていると考えられる。

本研究における凍結速度 U は、式(1)により定義する。

$$\text{凍結速度 } U = \frac{H_0}{t} \quad (\text{mm/hr}) \quad (1)$$

ここに、 H_0 : 供試体初期高さ (mm)
 t : 凍結時間 (hr)

凍結速度は凍結中の0°C線(凍結線)が未凍土中を進む速度として定義されるべきである。本実験の場合、供試体は下端まで全て凍結し、0°C線は最終的に供試体下端を貫通していること、また供試体上下の温度は同時に等速で降下しており0°C線がほぼ一定速度で移動するとしてよいことから、式(1)による定義は未凍土中を0°C線が進む速度を表していると考えてよい。表-2、表-3に実験条件をまとめて示す。

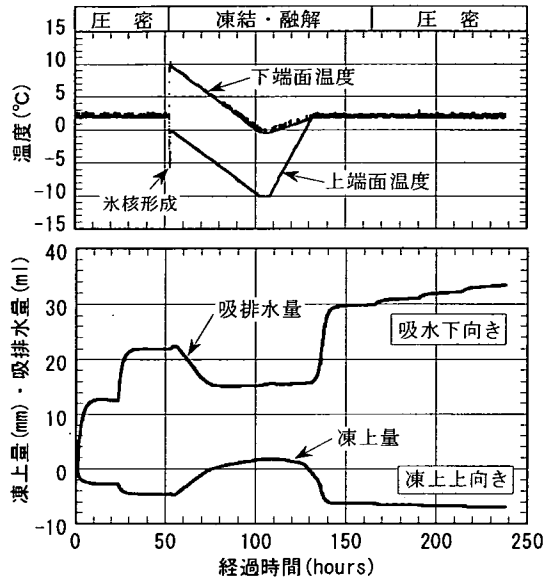


図-1 正規圧密粘土の圧密-凍結・融解-再圧密過程

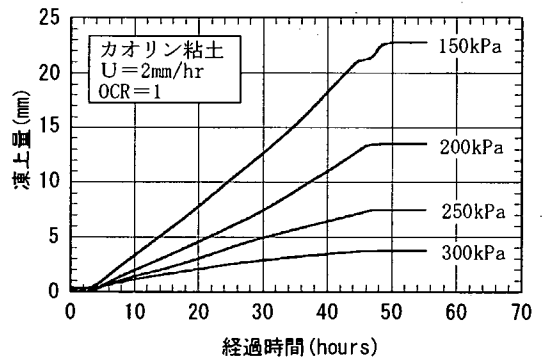


図-2 凍上量の経時変化

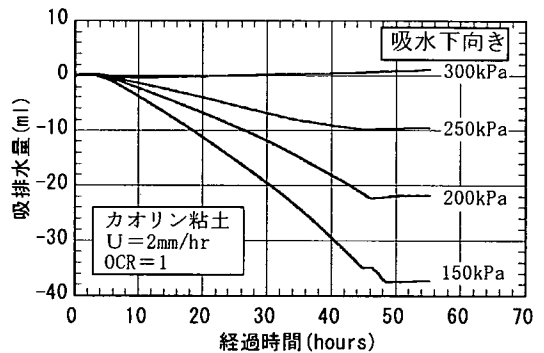


図-3 吸排水量の経時変化

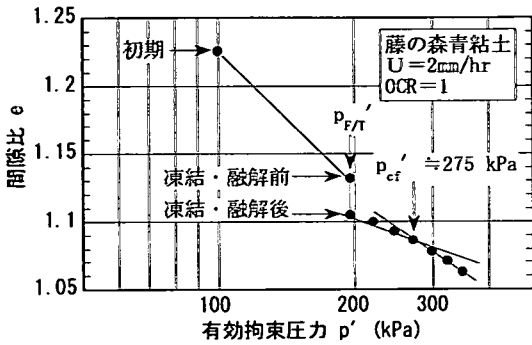


図-4 凍結・融解後の圧密特性

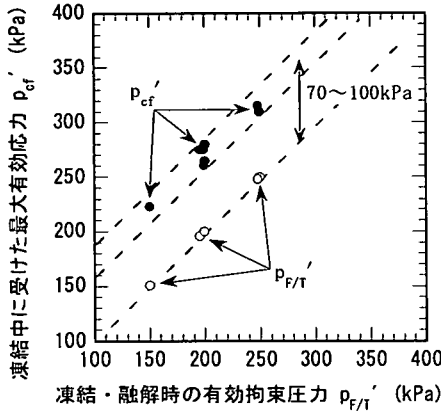


図-5 凍結・融解時の有効拘束圧力と凍結中の最大有効応力の関係

5. 正規圧密飽和粘土における凍結・融解履歴

(1) 鉛直凍上特性

図-1 に正規圧密試料における圧密・凍結・融解・再圧密過程の温度、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た結果の一例を示す。試料はCで、凍結・融解過程における有効拘束圧力は200kPa、凍結速度は2mm/hourの場合である。実験開始から所要の圧力まで+2℃で段階的に等方圧密させ、その後氷核形成を行った後に両端面温度を同時に降下させると吸水とともに鉛直変位の発生とアイスレンズ生成が確認され凍上が観察される。また、再圧密過程では初期よりも沈下があることがわかる。なお、図-1 において、圧密過程での排水および鉛直変位にある段差は圧密圧力の段階的に対応している。また、吸排水量は二重管ビュレットと差圧計を用いて測定し、供試体からの排水を正、吸水を負とした。

図-2、図-3 に有効拘束圧力が 150, 200, 250, 300kPa における凍結過程での凍上量および吸

排水量の経時変化を示す。試料はカオリン粘土である。図-2 より有効拘束圧力が大きくなるにつれて勾配が小さくなり最終凍上量も小さくなっていることがわかる。一般的に拘束圧が大きいほど、凍上量は小さいと考えられている⁹⁾が、本研究での軸対称三軸条件下でも同様の結果を得た。また、凍上量の経時変化は凍結進行中はほぼ直線であることから、凍結が一定速度で進行していたことが推定される。

図-3 において、凍結中の吸水量は、有効拘束圧力が大きくなるにつれて少ないという結果となった。凍上量、つまりアイスレンズの生成量が多いほど吸水量も多いと考えられるので、図-2 と図-3 の結果はよく対応している。また、図-3 の有効拘束圧力 300kPa の場合は、凍結過程中ほとんど吸排水が生じていないことがわかる。これは、凍結中の間隙水圧低下に起因する脱水圧密⁹⁾による排水量とアイスレンズを生成するための吸水量とが平衡した結果であると考えられる。

(2) 凍結・融解履歴と過圧密履歴

筆者らのこれまでの研究では正規圧密飽和粘土に凍結・融解履歴を与え、その後圧密を続けると $e-\log p'$ 曲線上に降伏点が現れることがわかっている¹⁰⁾。図-4 は試料 B を圧密・凍結・融解・再圧密したときの $e-\log p'$ 曲線を示している。図-4 より凍結・融解履歴により間隙比の減少が確認できるとともに、さらに圧密を続けると、ある降伏点 p'_{cf} で $e-\log p'$ 曲線が折れ曲がる様子が観察される。本実験では全応力条件を等方かつ一定の下で凍結・融解履歴を与えているため、この降伏点は凍結過程に供試体が受けた有効応力増分の結果であると考えられることができる。このように凍結・融解後の $e-\log p'$ 曲線上に降伏点が出現することは Chamberlain⁶⁾ によっても示されている。

図-5 は、異なる拘束応力について図-4 のようにして求めた再圧密後の降伏応力 p'_{cf} と凍結・融解過程の有効応力 $p_{F/T}$ との関係を得られている他のデータを含めてまとめた図である。図-5 より降伏応力 p'_{cf} は凍結・融解履歴時の有効拘束圧力 $p_{F/T}$ よりも 70~100kPa 程度大きいこと、およびその値は有効拘束圧力の値に依存していないことがわかる。そこで、これらの実験結果に基づき、それぞれ 275 kPa, 375kPa を先行圧密圧力として 200kPa, 300kPa まで徐荷した過圧密試料に対して非排水せん断試験を実施した場合と、有効拘束圧力 200kPa および 300kPa の下で凍結・融解履歴を与えた後、非排水せん断試験を実施した場合とを比較する実験を行った。

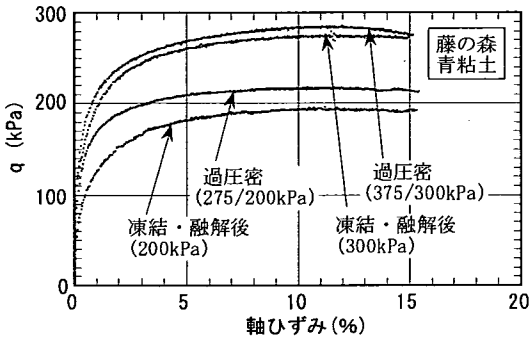


図-6 過圧密試料と凍結・融解試料の応力-ひずみ曲線

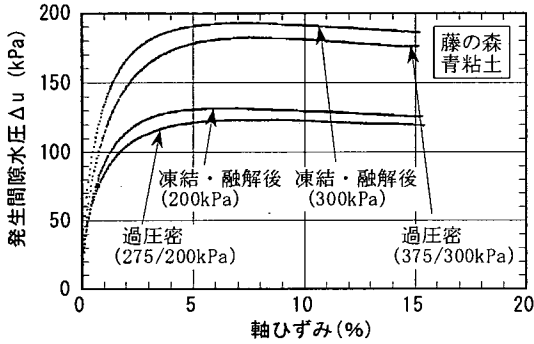


図-7 過圧密試料と凍結・融解試料の間隙水圧-軸ひずみ

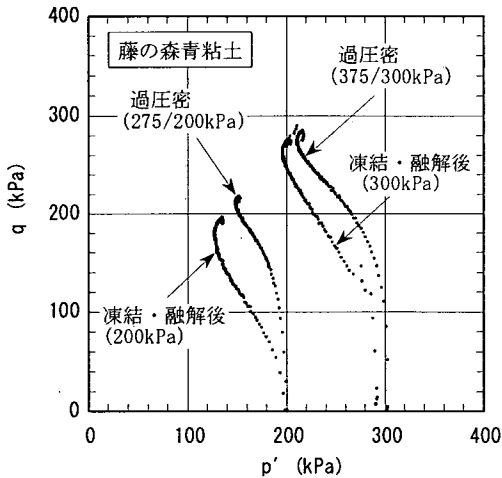


図-8 過圧密試料と凍結・融解試料の有効応力径路

図-6 は試料 B の未凍結試料を三軸セル内で有効拘束圧力 375kPa, 275kPa の先行圧密圧力で等方圧密し、その後 300kPa, 200kPa の有効拘束圧力まで徐荷して非排水せん断した場合と、有効拘束圧力 300kPa, 200kPa の下で凍結・融解履歴を与えた後、非排水せん断試験を行った場合を比較した応力-ひずみ関係である。図-6 より未凍結過圧密試料と凍結・融解

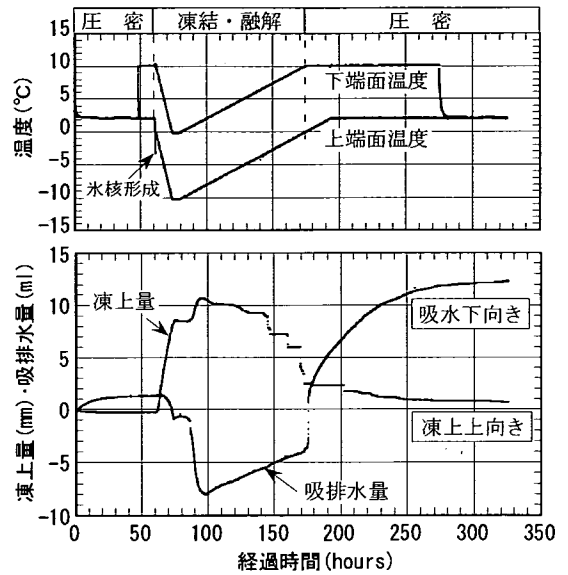


図-9 過圧密粘土の圧密-凍結・融解-再圧密過程 (U=8mm/hr)

履歴を受けた正規圧密試料の強度発現特性やせん断強度は大変近似していることがわかる。

同様に図-7 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。未凍結過圧密試料と凍結・融解履歴を受けた試料では、発生間隙水圧においても挙動がよく近似しており、凍結・融解履歴は過圧密履歴と同等なダイレイタンスー特性の変化をもたらすものと推論される。

図-8 は同じ結果を平均有効主応力と偏差応力で示した非排水せん断時の有効応力径路である ($q = \sigma_1 - \sigma_3$, $p' = (\sigma_1' + 2\sigma_3')/3$)。凍結・融解履歴を受けた試料と過圧密試料の示す非排水応力径路はやはり相似形を成しており両者の同一性が見てとれる。

以上より、凍結中に受けたと考えられる有効応力増分を考慮した過圧密履歴と凍結・融解履歴は類似することがわかった。このことは、正規圧密飽和粘土における凍結・融解履歴が土質工学的には過圧密履歴として扱えることを示している。

6. 過圧密飽和粘土 (OCR=3.3) の凍上特性

図-9 に試料 C を用いて過圧密比=3.3 の供試体について凍結速度 U=8mm/hr で実施した圧密-凍結・融解-再圧密の過程における上端面温度、凍上/沈下量、吸排水量の変化を経過時間を横軸にとった実験結果の一例を示す。正規圧密試料の場合と同様に実験開始後、圧密過程では、わずかな沈下と 1ml 程度

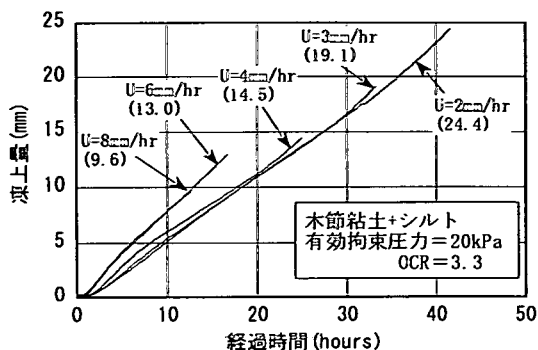


図-10 過圧密粘土における凍結中の凍上量の経時変化 (カッコ内の数値は最大値, mm)

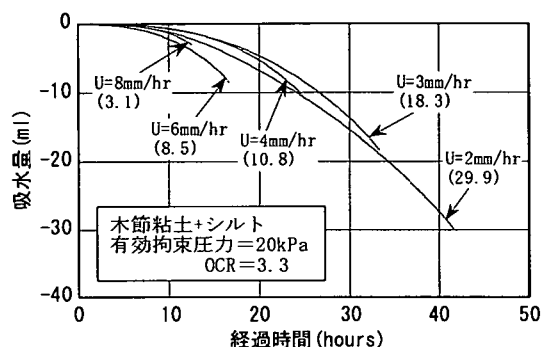


図-11 過圧密粘土における凍結中の吸水量の経時変化 (カッコ内の数値は最大値, ml)

の排水が確認できる。氷核形成を行った後、両端面温度差を 10℃に保持して、一定速度で温度を降下させていくと、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、凍結終了後、融解による両端面温度の上昇に伴って沈下と排水が見られる。凍結中はとびとびにアイスレンズが生成され、融解直前には供試体下端まで凍結が到達していることが観察された。また、凍結中に供試体の側方への変位も観察された¹¹⁾。なお、融解中の鉛直変位および吸排水曲線に段差が見られるが、前半は供試体下部の局所的な融解による融解水の再凍結によるものと考えられ、この変位量は凍上量に含めていない。また、後半の段差は供試体上部の層状アイスレンズ融解時の排水遅れによるものであると考えられる。

凍結過程中的凍上量および吸水量の凍結速度依存性を知るために、これまでに実施した凍結速度の異なる実験結果から、凍上量/吸水量の経時変化を示したのが図-10、図-11である。図-10より、凍結速度Uが遅いほど時間-凍上量の傾き、つまり凍上速度が緩くなっており、凍結終了時の最終凍上量が多い結果となっている。また、図-11には図-10のそれ

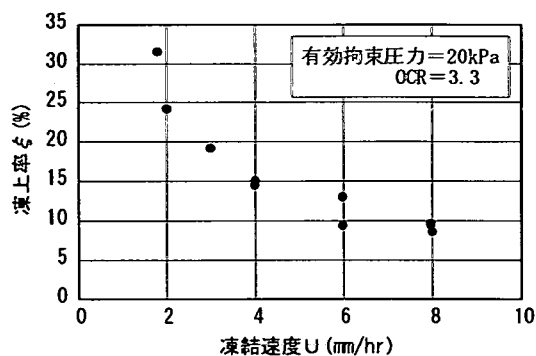


図-12 過圧密粘土における凍結速度と凍上率の関係

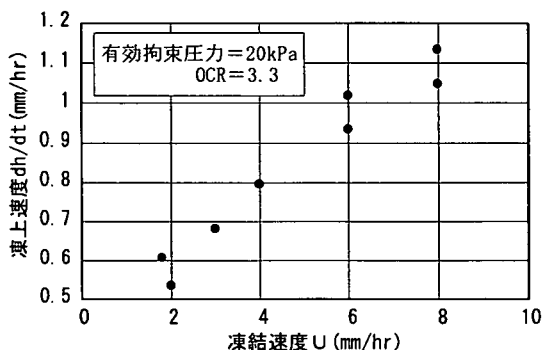


図-13 過圧密粘土における凍結速度と凍上速度の関係

ぞれの凍上率に対応した吸水が確認できる。ここで、鉛直凍上率 ξ を式(2)で定義して、凍結速度Uとの関係を調べたのが図-12である。

$$\text{鉛直凍上率 } \xi = \frac{\Delta h}{H_0} \times 100(\%) \quad (2)$$

ここに、 H_0 : 凍結前の供試体高さ(mm)

Δh : 凍結終了時の全鉛直変位量(mm)

図-12より凍結速度Uが小さくなるにつれて鉛直凍上率 ξ が顕著に増加することが分かる。これは、高志らの研究⁸⁾と定性的に同じ結果であるが、過圧密飽和粘土について軸対称応力条件下でも成り立っていることが確かめられたことになる。

次に、式(3)で凍上速度 dh/dt を定義する。

$$\text{凍上速度 } \frac{dh}{dt} = \frac{\Delta h}{\Delta t} \text{ (mm/hr)} \quad (3)$$

ここに、 Δh : 凍上量-時間関係における単位時間内の凍上量(mm)

Δt : 単位時間(hr)

図-13 は式(3)で定義した凍上速度 dh/dt と凍結速度 U の関係を示した図である。なお、図-13の凍上速度は凍上量-時間関係を直線として求めた。図-13では、凍結速度 U が小さくなるにつれて凍上速度 dh/dt も小さくなる結果が得られた。これまでに、凍結速度と凍上速度の関係は石崎ら¹²⁾、Penner¹³⁾、高志ら⁸⁾が示している。これらの結果と過圧密状態で有効応力が小さい今回の実験結果とは傾向が一致する結果となった。

7. 凍結・融解履歴の過圧密比依存性

(1) 応力-ひずみ特性

図-14は異なるOCRをもつ試料Cに凍結・融解履歴を与え、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を比較した応力-ひずみ曲線である。凍結速度 U はすべて 6mm/hr で行った。なお、図中のマーカーは曲線を区別するために示してある。図-14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その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¹⁴⁾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現れ、未凍結試料に比べその応力-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⁵⁾やChamberlain⁶⁾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として実験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。

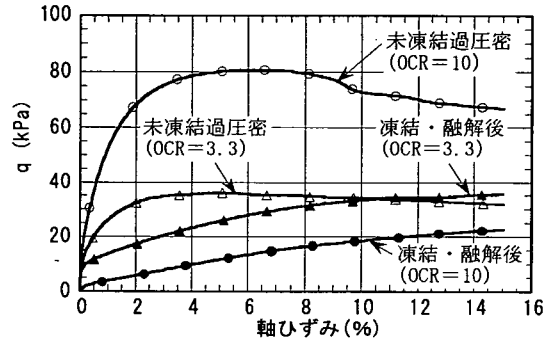
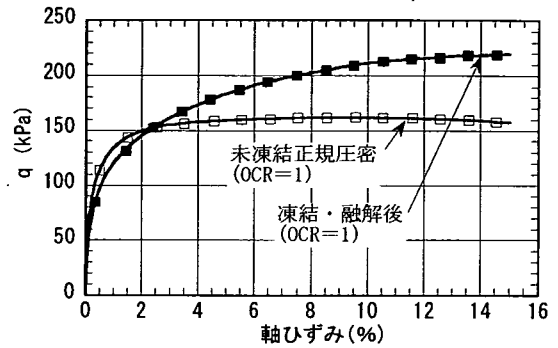


図-14 異なるOCRにおける応力-ひずみ曲線

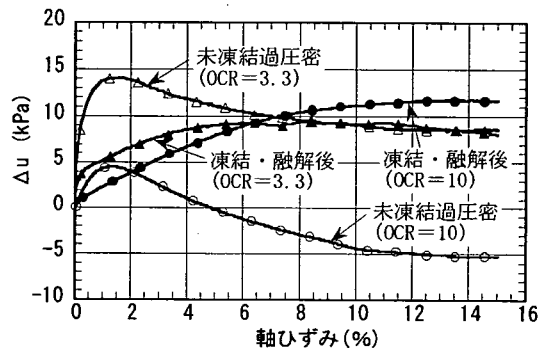
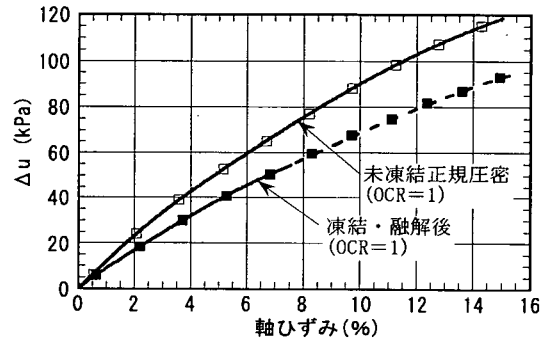


図-15 異なるOCRにおける発生間隙水圧特性

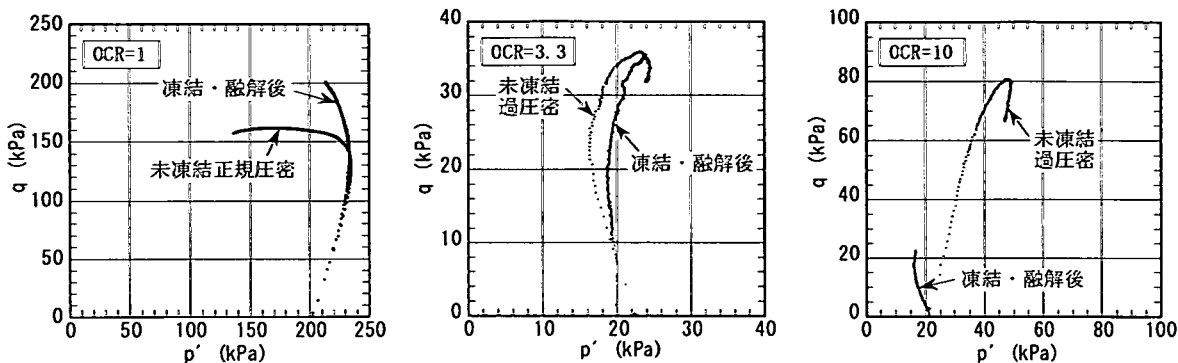


図-16 異なる OCR における有効応力径路

(2) 異なる過圧密比における発生間隙水圧特性

図-15 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。なお、図-15 で OCR=1 の凍結・融解後の曲線後半の破線は、一部データに欠損があるための推定線であることを意味している。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) 有効応力径路

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、有効応力径路の比較を図-16 に示す。ここに $q = \sigma_1 - \sigma_3$, $p' = (\sigma_1' + 2\sigma_3')/3$ である。

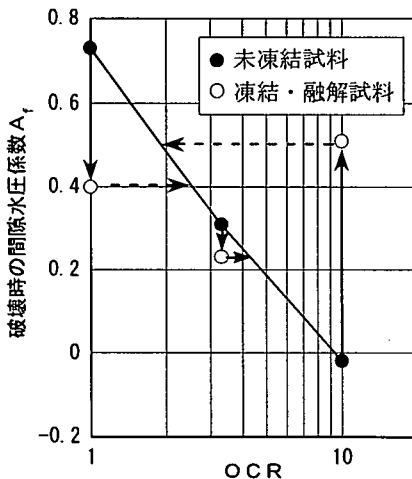


図-17 破壊時の間隙水圧係数 A_r と OCR の関係

まず、OCR=1 の場合、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、上方に離脱して直線的に q が増加していることがわかる。OCR=3.3 の凍結・融解試料では、未凍結試料よりも初期から直線的に上昇する結果となっているが、両者は近似した応力径路を示している。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異なった勾配を持った径路を示していることが分かる。以上をまとめると、OCR=10 の過圧密試料が、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すが、OCR=3.3 では両者に差異は現れず、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。

(4) 破壊時の間隙水圧係数 A_r と過圧密比の関係

図-17 は、非排水せん断試験より得られる破壊時

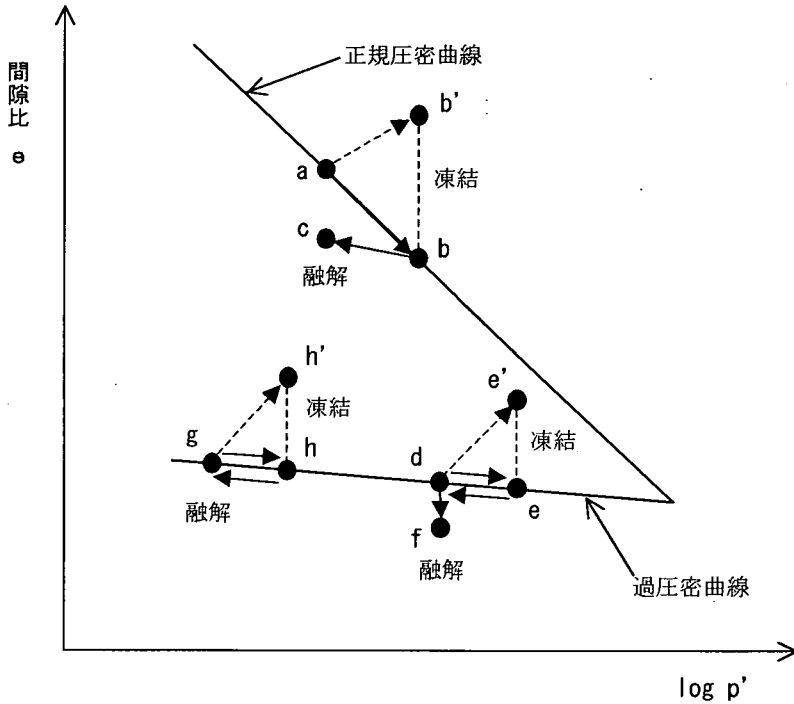


図-18 凍結・融解履歴における $e-\log p'$ の関係

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 は式(4)で定義する。

$$A_f = \frac{\Delta u_f}{\Delta \sigma_{1f}} \quad (4)$$

ここに、 Δu_f : 破壊時の発生間隙水圧 (kPa)
 $\Delta \sigma_{1f}$: 破壊時の最大主応力の増分 (kPa)

図-17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シー特性を表しているので、 A_f の値が凍結・融解後に未凍土より小さくなるという事実は、間隙水圧の発現を妨げる構造に変化したことを示しており、それと逆の場合には、間隙水圧の発現を促すことを示しているとしてよい。また、未凍結試料の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、試料における過圧密の度合いが凍結・融解によって変化したと解釈することもできる。そこで、図-17から A_f の変化に対応した凍結・融解後の試料のOCRの値を推定すると、OCR=1の場合は約2.5に、OCR=3.3では約4.6に、OCR=10では約2となる変化が見られる。このことより、凍結・融解履歴を与えられた飽和粘土試料はその過圧密の度合いが変化して、過圧密比にすると

2~5程度の中に収束する傾向にあるものと推論される。

8. 飽和粘土における凍結・融解履歴

これまでの実験結果から、正規圧密および過圧密粘土に与えられた凍結・融解履歴が、その後の変形・強度特性に与える影響をある程度知ることができた。

まず、これまでの実験で得られた凍結・融解履歴の影響に関する実験事実とそこから推論される事項を正規圧密粘土と過圧密粘土に分けて以下に整理する。

《正規圧密粘土》

- ① 比較的緩く詰まった構造を成していると考えられる正規圧密粘土に凍結・融解履歴を与え、その後十分に排水させると間隙比が減少する。
- ② 凍結に伴い供試体内に間隙水圧低下が発生し、その結果、70~100kPa程度の有効応力増加の履歴を受ける。
- ③ 凍結・融解履歴を受けた後は過圧密に類似した非排水せん断挙動を示す。
- ④ 凍結・融解履歴を受けた後は非排水強度が増加する。

《過圧密粘土》

- ① 凍結・融解前後でダイレイタンシー特性が大き

く変化する。

- ② 凍結・融解履歴は過圧密の度合いを小さくする。
- ③ 凍結・融解履歴がダイレイタンシー特性や強度発現特性および強度変化に与える影響は、過圧密比によって異なる。

図-18 は正規圧密および過圧密飽和粘土における凍結・融解履歴を $e-\log p'$ 上で表した図である。

図-18 の $e-\log p'$ 上で正規圧密曲線上の a は物理化学的な作用によって粘土粒子の周りに吸着している水(吸着水)と比較的自由な水で満たされた間隙を持つ緩く堆積した正規圧密飽和粘土を表している。この粘土が凍結すると、アイスレンズが生成される。試料内ではアイスレンズの生成とそれに伴って発生する間隙水圧低下によって吸着水の一部と自由水が氷に相変化する。また、凍結・融解後に圧密を続けると降伏点が表れるという実験事実から、その間、試料は凍結・融解によって 70~100kPa 程度の有効応力増加の履歴を受けていると考えられる。従って、有効応力の増加と生成した氷を含めた間隙比を考慮すると、図-18 の $e-\log p'$ 上では凍結中は a の右上の b' に位置し、土粒子と間隙水(不凍水)だけを考慮した場合は正規圧密線上の b に至るものと考えられる。

その後、温度を上昇させて融解し、沈下と排水を充分に行うと、凍結・融解後に間隙比が減少するという実験事実から、一度凍結によって薄くなった吸着水は元の吸着状態へは完全には戻らずに一部が排水したと考えることができる。また、凍結・融解履歴を受けた正規圧密粘土の非排水せん断試験の結果、過圧密粘土に類似したせん断挙動を示すという実験事実から、融解後は c の過圧密領域に移動したと考えられる。

一方、図-18 の過圧密曲線上の d, g は、異なる OCR を持つ2つ過圧密粘土に対応している。過圧密粘土が凍結すると、正規圧密の場合と同様に吸着水の一部が凍結面に流入し、そこにアイスレンズが生成されると考えられる。過圧密粘土が凍結履歴を受けた場合も、凍結中に有効応力増加の履歴を受けていると考えられることから、正規圧密の場合と同様に凍結中は過圧密線の右上の e', h' に位置し、過圧密線上では e, h に位置すると考えられる。また、融解後、沈下と排水が終了した状態を図-18 の f, g に示す。過圧密粘土が凍結・融解履歴を受けた後の間隙比は、OCR=3.3 の場合は多少の減少、OCR=10 の場合はほぼ変化しないという実験事実から考えると、今回の実験結果の OCR=3.3 の場合は融解後 f の位置に相当し、OCR=10 の場合は元の g

の位置に相当することになる。

以上のように、正規圧密および過圧密飽和粘土における凍結・融解過程を解釈して $e-\log p'$ 関係上で表現すると図-18 に示したようになると推論される。ただし、図-18 の $e-\log p'$ 関係だけでは、凍結・融解履歴によって過圧密の度合いが減少して正規圧密に類似した挙動を示すことなどの凍結・融解後の非排水せん断強度特性までを表現することはできない。

9. まとめ

凍結・融解・せん断のすべての過程を同一拘束応力条件下で行うことのできる軸対称三軸試験装置を用いて、凍結・融解履歴が正規圧密および過圧密飽和粘土に与える影響について実験的考察を行った。その結果、得られた新しい知見を以下にまとめて示す。

・正規圧密飽和粘土について

1. 正規圧密粘土における軸対称三軸条件下での凍上量は有効拘束圧力に依存する。
2. 凍結・融解履歴を与えた後、さらに圧密を続けることで、新たな先行圧密圧力に相当する p_{cf}' が得られた。
3. 凍結・融解履歴を受けた正規圧密粘土の非排水せん断特性は過圧密粘土の非排水せん断特性に類似している。

・過圧密飽和粘土について

4. 凍結速度が小さくなるにつれて凍上率が大きくなり凍上速度は小さくなるのが低拘束圧力下の飽和過圧密粘土において確かめられた。
5. 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ことが推論される。
6. 凍結・融解履歴が飽和粘土のダイレイタンシー特性や強度発現特性および強度変化に与える影響は、過圧密比によって異なる。

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, pp. 275-282, 1999。
- 3) 青山清道，小川正二，川澄修，田村富雄，福田誠：凍結・融解を受けた土の性質，土と基礎，Vol. 25, No. 7,

- pp. 41-46, 1977.
- 4) 長澤徹明, 梅田安治: 凍結融解土の諸性質について, 土と基礎, Vol. 29, No. 2, pp. 39-46, 1981.
 - 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.: Overconsolidation effect of ground freezing, *Engineering Geology*, 18, pp.97-110, 1981.
 - 7) Ono, T.: Lateral deformation of freezing clay under triaxial stress condition using laser-measuring device, *Cold Regions Science and Technology*, 35, pp.45-54, 2002.
 - 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, pp. 1-20, 1974.
 - 9) 高志勤, 生頼孝博, 山本英夫: 一次元定速度凍結における凍結面前方の間隙水圧と脱水圧密, 雪氷, 39, pp. 53-64, 1977.
 - 10) 小野丘, 三田地利之: 凍結・融解履歴を受けた飽和粘性土の圧密過程, 土木学会第 52 回年次学術講演概要集, pp. 646-647, 1997.
 - 11) Ono, T.: Lateral deformation of clay soil during freezing under axi-symmetric stress. *Proc. Int. Symp. on Ground Freezing and Frost Action in Soils*, Belgium, pp.95-99, 2000.
 - 12) 石崎武志, 赤川敏, 伊豆田久雄: 凍結方向が異なる試験法での凍上速度、凍結膨張率と温度条件の関係, 土の凍結と室内凍上試験方法に関するシンポジウム発表論文集, 地盤工学会土の凍上試験方法検討委員会 pp. 39-44, 2001.
 - 13) Penner, E.: The importance of freezing rate in frost action in soil, *Proc. Am. Soc. Test. Mater.*, 60, pp.1151-1165, 1960.
 - 14) 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, pp. 1179-1180, 1997.

(2002. 7. 4 受付)

THE PROPERTIES OF NORMALLY AND OVERCONSOLIDATED CLAY AFTER FREEZING AND THAWING HISTORY

Takashi ONO, Daiki KODAMA and Takaki KATO

Freeze-thaw-shear tests are carried out in order to investigate fundamental properties of normally and overconsolidated clay after freezing and thawing history in the laboratory under triaxial condition. It is found that the frozen and thawed sample shows larger strength and smaller pore pressure development than those of unfrozen sample for the normally consolidated clay, and the change of shear strength and the dilatancy of overconsolidated clay depends on the overconsolidation ratio of sample.