

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

小野 丘¹・三田地利之²

¹正会員 北海学園大学助教授 工学部土木工学科 (〒064-0926 札幌市南区南26条西11丁目)

²フェロー 工博 北海道大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

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新たに開発・製作し、その試験機を用いて締められた粘性土に対して得られた実験結果を示した。新たに製作した試験機は、通常の三軸試験装置内で供試体に鉛直軸方向から凍結・融解履歴を与えることができるもので、凍結・融解過程とせん断過程の間に応力開放を与えることなく常に一定の軸対称三軸応力条件の下で実施された実験データを得ることができる特徴を持つ。実験の結果、等方圧密後に凍結・融解履歴を与え、融解後の排水を十分に許した後の非排水強度は未凍結の場合の非排水強度より大きくなり、逆にせん断中の発生間隙水圧は凍結・融解履歴を受けた場合の方が小さくなること、また、有効応力による強度定数に差が生じないこと、などが明らかとなった。

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

1. はじめに

土またはその集合体としての地盤や土構造物が凍結しその後融解する場合としては、寒冷地域における気温の季節変動による周期的な凍結・融解、地盤の人工凍結工法による凍土の生成と解凍、また低温物質貯蔵タンクの周辺地盤の凍結などが代表的な例として考えられる。一方、このような地盤の凍結とその後の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。そこで、粘性土および火山灰土に関する既往の研究をまとめると以下ようになる。

強度が低下するとする報告は次のようである。青山・小川・川澄・田村・福田¹⁾ および青山・小川・福田²⁾ は、凍結・融解による一軸圧縮強度の低下は供試体の含水比が高いほど、また凍結・融解のサイクル数が多いほど顕著で、その主な原因は密度の低下と供試体内部での微小クラックの発生などであるとし、さらに三軸試験の結果から、粘着力と変形係数は凍結・融解によって低下するが、内部摩擦角は影響を受けないと述べている。Aoyama, Ogawa and Fukuda³⁾ は、火山灰土について三軸試験を実施し、凍結・融解により強度が低下するとともに応力-ひずみ曲線でピークを示さなくなる

こと、凍結時の温度が低いほど強度低下が大きいことを示した。長澤・梅田⁴⁾ は、一面せん断試験および一軸圧縮試験を実施し、凍結・融解過程を経るとせん断強さが大幅に低下し、その傾向は凍結温度が低いほど顕著であること、また、凍結・融解作用を繰り返し受けると徐々に低下の割合を増すが、最初のサイクルが最も顕著に影響を与えることを示した。Broms and Yao⁵⁾ は、飽和シルト質粘土に対して凍結・融解速度を変えて三軸試験を実施し、凍結速度が遅い場合の方が速い速度の場合に比べて強度の低下が大きいことを示した。その理由として、凍結速度が遅いと厚いアイスレンズが生成し、土粒子間隔をより広げる結果となり、さらにまたより多くの自由水が残留することが強度低下を大きくするとしている。Yong, Boonsinsuk and Yin⁶⁾ は、5種類の粘土試料に対して凍結・融解後、フォールコーンによってせん断強さを調べ、鋭敏な粘土は凍結・融解後の強度低下が大きいことを示した。その理由として、初期の土粒子間セメンテーションが破壊された後にできる新しい土粒子間の結合は不安定であることなどを挙げている。

一方、凍結・融解によってせん断強度が増加するという報告がある。緒方・片岡・岡本⁷⁾ および Ogata, Kataoka and Komiya⁸⁾ は、高塑性沖積粘土では、先行

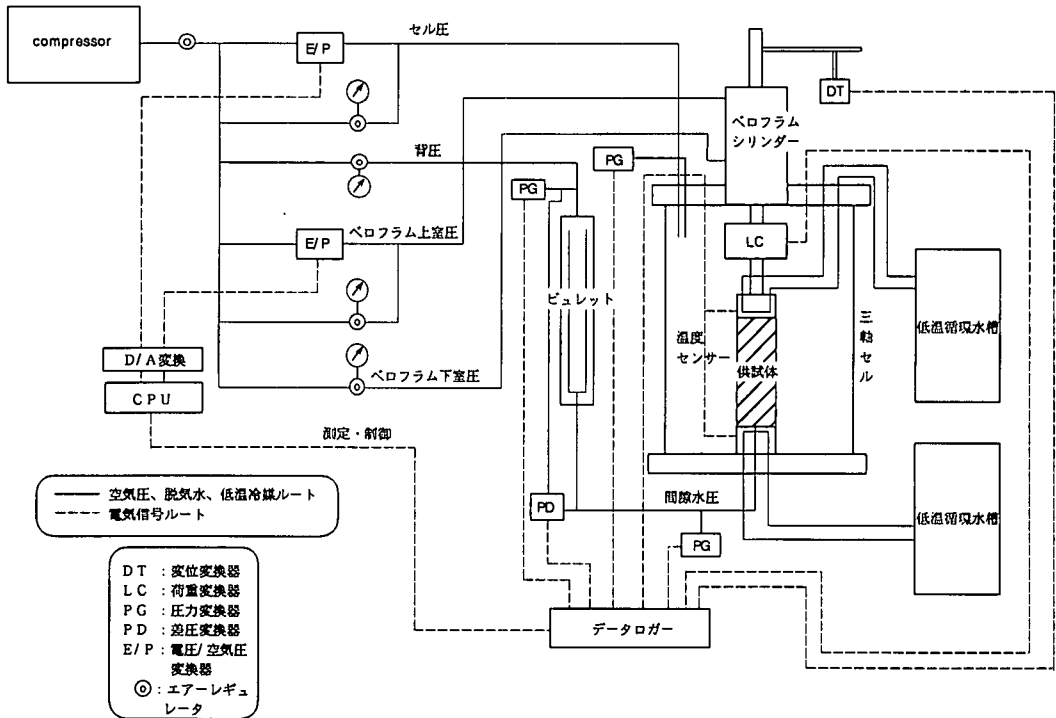


図-1 凍結・融解三軸試験装置（システム図）

圧密圧力以上の拘束圧力による三軸試験結果においては、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・融解の結果、供試体からの排水がおり密度が大きくなるため、OCR が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・融解作用はせん断抵抗角を増加させ、粘着力成分を減少させることも報告している。Chuvilin and Yazynin⁹⁾は、凍結・融解前後の土粒子構造の電子顕微鏡による観察の結果などから、凍結・融解作用によって骨格の収縮がおり粘土の強度は1～3オーダー増加すると述べている。また、Chamberlain¹⁰⁾は、「凍結・融解によって密度が増加する場合は強度の増加をもたらすと考えられるが、特別な場合として固結度が高い粘土や強く過圧密された粘土では強度が減少すると考えられる。」と述べている。

以上のように凍結・融解作用を受けた試料が示すせん断強さに異なる結果が出るのは、その実験方法に主な原因があると考えられる。ここに挙げた研究の中で実験方法が明記されているものについては、供試体に凍結・融解履歴を与える過程とせん断過程との間に応力開放があることと、凍結・融解-せん断の過程が一定応力条件の下にない、ということが分かった。凍結・融解作用を受けた地盤の工学的設計定数を得るためには、できるだけ原位置に近似した応力条件や排水条件で実験を実施す

べきであることは自明である。そこで本研究では、凍結-融解-せん断の全過程を同一セルの中で与えることのできる三軸試験装置を開発・製作し、その試験機を用いた明確な全応力境界条件の下でのデータから、凍結・融解履歴により粘性土のせん断強度がどのように変化するかを明らかにするものである。

2. 凍結・融解三軸試験装置

図-1は、凍結・融解三軸試験装置のシステム全体を表している。三軸セルは基本的には通常の軸対称型であるが、供試体の上下端の温度を任意に制御できることと、凍結・融解中の軸応力を一定に保つために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。供試体両端面温度の制御には低温恒温水槽を用いた。低温恒温水槽は循環させる冷媒の温度を任意にプログラム制御できるコントローラを備えており、その水槽を2台用いて供試体のキャップ側とベDESTAL側それぞれ冷媒を循環することで、温度を独立して制御できるようにした。また、三軸セル全体およびビュレットは+2℃の恒温室内に設置した

表-1 試料の物理的性質

液性限界	73 %
塑性限界	43
土粒子の密度	2.498 g/cm ³
< 5 μm	20 %

表-2 実験条件

有効拘束圧力 (kPa)	温度降下速度 (°C/ hour)	実験の種類
100	-0.6, -0.8, -1.2	圧密-凍結・融解-非排水せん断
150, 200, 250, 300	-0.6	圧密-凍結・融解-非排水せん断
100, 200, 300	-	圧密非排水せん断 (未凍結)

ので、セル外部の温度の変動による影響を受けることはない。

三軸型の凍結・融解装置はこれまでも提案されている。Goto¹⁾の装置は冷媒循環により供試体の下から凍結させる方式で、上下の温度制御は行っていないが、供試体の体積変化を内セルの水位変化を利用して計測できる工夫がなされている。また、小川・西村・和田²⁾は供試体を三次元的に凍結させる装置を利用して、上下の温度差から供試体に温度勾配を与える本研究の方式とは異なっている。

図-2に三軸セルの詳細を示す。供試体が凍結を始めると鉛直変位が生ずるが、その際に一定の鉛直応力を維持するために、セル内の荷重計とセルの直上にあるエアシリンダーによる制御を行った。つまり、凍結凍上・融解沈下により荷重が所定の制御荷重の範囲を超える値を感知するとその値が元に戻るまでエアシリンダーの空気圧を増減させるように電空変換器を介してプログラムで制御した。この方法により、力で±1 N、鉛直応力で±0.5 kPaの精度まで制御が可能である。供試体上下端の温度はキャップとペDESTALの側面に貼り付けたひずみゲージ式温度センサーにより測定した。供試体と接触していない状態でのキャップおよびペDESTALの表面の温度とセンサーの貼り付け位置での温度及び冷媒の温度の関係を正確に知るために、基準温度計を使って十分にキャリブレーションを行った。試験中の吸排水および間隙水圧測定は供試体底部中央から行った。また、セルの内部は断熱効果をも高めるために空気のみとし、液体は入れていない。これは空気の熱伝導率がガラスワールやスポンジなどの断熱材の約半分であり、それ自身に高い断熱性能があること、また、セル内の温度差に起因する密度の差によって発生する空気の対流の影響は、従来のモールド型装置でも断熱材の中やモールド

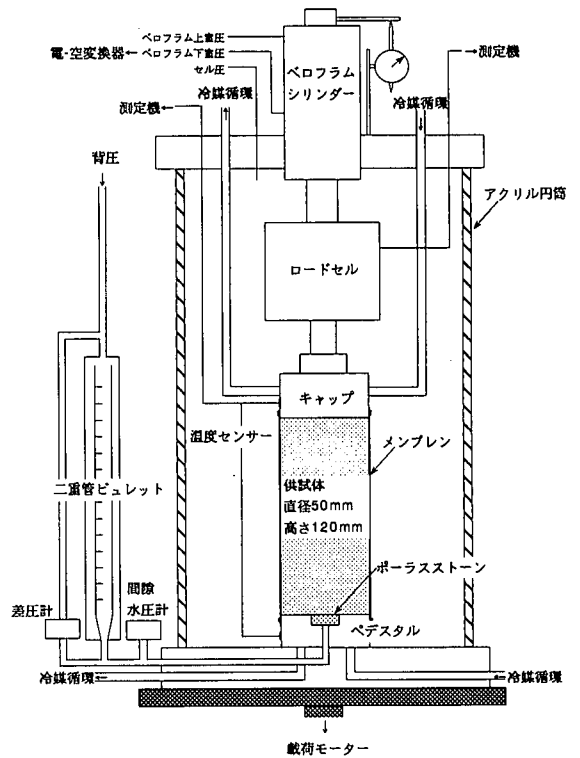


図-2 凍結・融解三軸試験装置 (三軸セル)

との隙間で発生しているはずであり本質的に避けられない問題であって、それにより従来の装置に比して本装置の断熱条件が著しく損なわれるとは考えられない、という理由による。

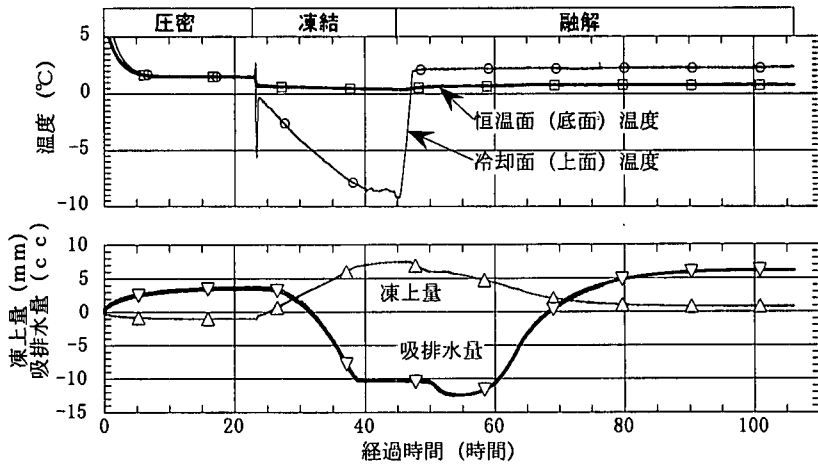


図-3 圧密-凍結-融解過程 ($-0.6^{\circ}\text{C}/\text{hour}$)

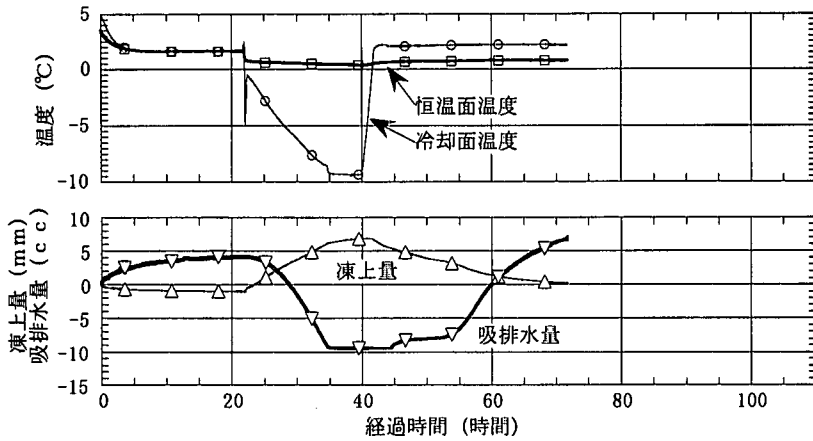


図-4 圧密-凍結-融解過程 ($-0.8^{\circ}\text{C}/\text{hour}$)

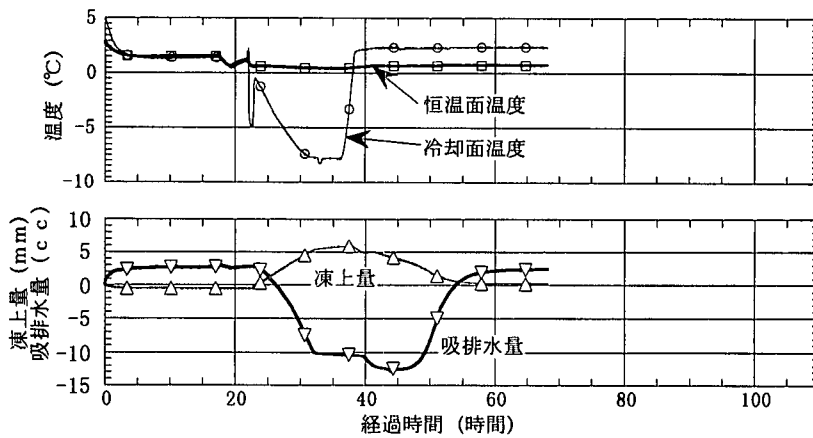


図-5 圧密-凍結-融解過程 ($-1.2^{\circ}\text{C}/\text{hour}$)

3. 実験試料

実験に用いた粘土試料の物理的性質を表-1に示す。供試体は所定の含水比に調整した試料をモールドの中で静的に締め固めたものをトリミングして作製した。静的締め固め時に載荷した鉛直応力は約700kPaである。また、初期含水比は36~37%、計算上の初期飽和度は平均97%であった。

4. 実験方法

トリミングした供試体はゴムメンブレンとOリングで恒温室内の三軸セルにセットする。所定のセル圧力を載荷して等方圧密を始めると同時に、圧密時から恒温室内と同じ温度(+2°C)の冷媒をキャップ側とペDESTAL側へ循環した。この操作によって凍結開始時点での供試体全体の初期温度を一様にする事ができる。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)を行った。

凍結はペDESTAL側(高温側)の温度を+0.5°Cの一定値に保ちながらキャップ側(低温側)の温度を一定速度で降下させる方式による。凍結・融解中に凍上量、吸排水量、上下端の温度変化を記録した。温度降下速度は-0.6°C/hour、-0.8°C/hour、-1.2°C/hourを設定し、-10°Cまで降下させた。その後一定温度を5時間保った後に2時間で上下端の温度を+2°Cに上昇させ、吸排水が終了するまで融解時間をとった。融解終了後直ちに非排水せん断試験を実施した。凍結・融解・せん断の全過程で全応力を一定値に保持し、100kPaの背圧を載荷した。表-2に実験条件をまとめて示した。

5. 実験結果

(1) 凍結・融解過程

図-3、図-4、図-5に温度降下速度別に圧密-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。実験開始から24時間までが圧密過程を示しており、その後サーマルショックを与えた後に温度降下が始まる。吸水とともに直線的な凍上が発生する様子がわかる。また、凍結終了後、冷却面温度が上昇するとともに、融解による沈下とやや遅れて排水が観察され、一定値に落ち着くまで

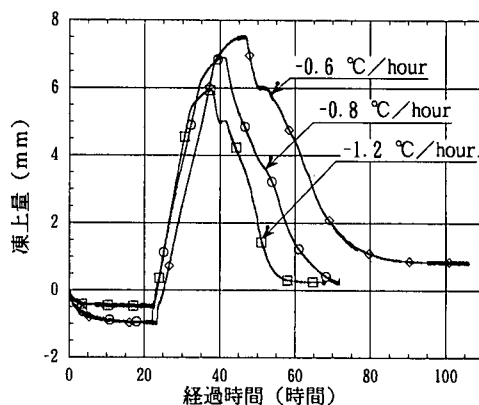


図-6 凍上量と温度降下速度

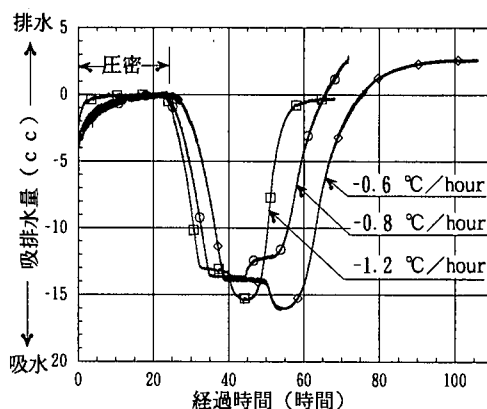


図-7 凍結融解過程中の吸排水量

に30~60時間を要している。図中の符号は凍上を+に、吸水を-にとってある。図-3および図-5で冷却面温度が0°C以上になってからも吸水する現象がみられた。この原因は、急速に端面温度が上昇したために生じた融解部分の再凍結によるものと推定されるが詳細な理由は不明である。凍結中は供試体にほぼ一様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が観察されたが、本研究では側方変位は測定していない。

凍結・融解による凍上/沈下量の温度降下速度による違いを知るために、凍上/沈下量の経時変化だけを抜き出したのが図-6である。冷却面の温度降下速度が遅いほど凍上量が多い結果となっている。冷却面の温度降下速度は供試体を通る0°C線の速度と言い換えることができる。つまり、本実験で用いた温度低下速度の範

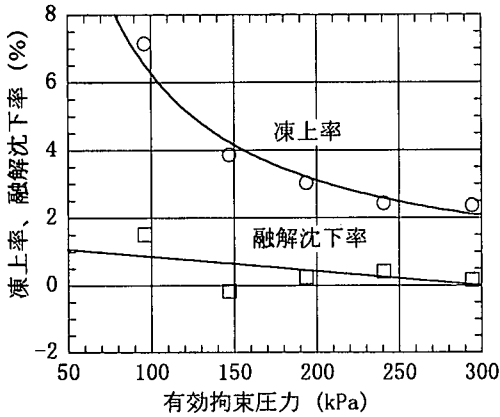


図-8 凍上率、融解沈下率の拘束圧力依存性

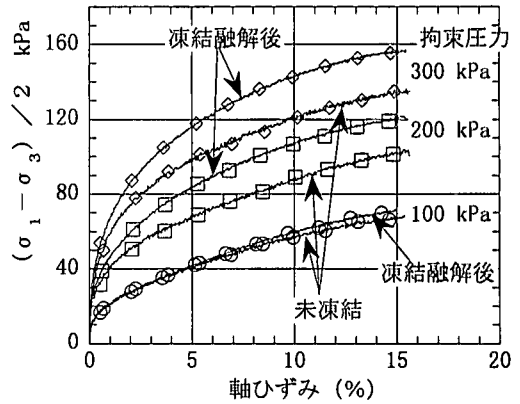


図-9 凍結融解土と未凍結土の応力-ひずみ

囲では0℃線が供試体内を通過する速度が遅いほど、アイスレンズが多く生成し、そのために凍上量が大きくなったと考えられる。この結果は、高志ら¹³⁾の提案した凍上率-凍結速度関係と定性的に一致する。一方、図-7は凍結・融解中の吸排水量の経時変化を圧密終了時点での値を基準として示している。凍結中の吸水速度（初期の曲線の傾き）は冷却面の温度低下速度が遅いほど緩やかとなり、温度低下速度が遅い順に融解による総排水量も多いという結果となっている。これは今回の実験では温度低下速度が遅いほど凍上量、即ち氷の生成量が多いと推定されるため（図-6）、総排水量も多くなったと解釈できる。また、温度低下速度が0.6℃/hour および0.8℃/hour の場合、融解後は排水量が正となっており、圧密終了時点より体積が減少していることが分かる。つまり凍結・融解によって圧密後より密度が増加している。今回実施した実験では凍結・融解後も全応力を一定に保ち排水を十分に許している。このような条件の下では凍結・融解過程は供試体の密度増加をもたらす場合があることが明らかとなった。

図-8は0.6℃/hour の場合の凍結・融解試験の結果を有効拘束圧力によって整理した図である。図中の凍上率および融解沈下率の定義は次式による。

$$\begin{aligned} \text{凍上率 (\%)} &= \text{凍結凍上量} / \text{圧密終了時の供試体高さ} \\ \text{融解沈下率 (\%)} &= \text{融解沈下量} / \text{圧密終了時の供試体高さ} \end{aligned}$$

ここに、凍結凍上量と融解沈下量はともに圧密終了時（凍結直前）からの鉛直変位量である。

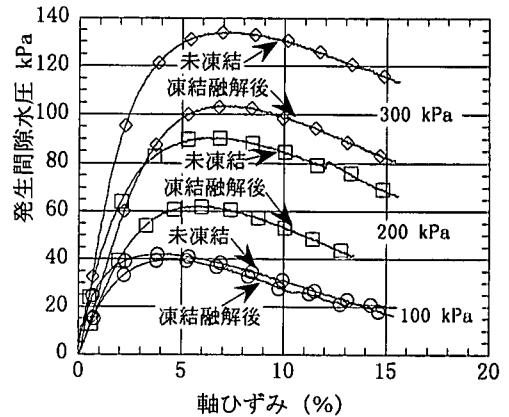


図-10 非排水せん断中の発生間隙水圧

図-8より凍上率は有効拘束圧力の増加とともに小さくなっており、山本らの結果¹⁴⁾と同様であった。しかし、融解沈下率は有効拘束圧力の影響をあまり受けず、融解終了後はほぼ圧密終了時の高さまで戻ることが分かる。

(2) 非排水せん断特性

図-9は異なる有効拘束圧力の下で圧密-凍結・融解過程を経て直ちに非排水せん断を実施した結果を、同様な拘束圧力の下での未凍結供試体の結果と比較したものである。有効拘束圧力が200kPaと300kPaの場合は凍結・融解履歴を受けた供試体の方が約20%ほど非排水強度が大きくなっていることが分かる。圧密終了時と融解終了時の間隙比の差に相当する有効応力増分を圧縮指数Ccから求め、未凍土の非排水強度増加率

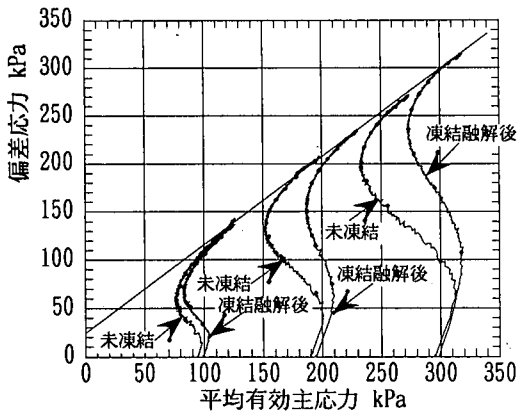


図-11 有効応力径路

C_u/p' を用いて非排水強度の増分を算出したところ、図-9の実験事実とはほぼ一致した。つまり、前述した緒方ら⁷⁾が指摘しているように凍結・融解後の強度増加は密度増加(間隙比減少)がその主たる原因であるとしてよい。

非排水せん断中の発生間隙水圧を比較したのが図-10である。非排水せん断による過剰間隙水圧の発生量は凍結・融解履歴を受けた供試体の方が少ないことが分かる。この結果から、少なくともダイレイタンシー特性に関わる構造変化が凍結・融解によってもたらされたと推論することができる。Yong et.al.⁶⁾や 風間・青山・福田¹⁵⁾および Chuvilin and Yazynin⁹⁾が報告しているように、凍結作用による粒子結合の破壊や細粒化および骨格の収縮がダイレイタンシー特性を変え、図-10の様な結果となったと解釈しても矛盾はないものと考えられる。

図-11はせん断中の有効応力径路を示している。図-9および図-10の結果が有効応力径路の差となって現れていることがよく分かる。さらに、今回実施した応力範囲では破壊包絡線は凍結・融解履歴の有無にかかわらず一本となるとして良いようである。つまり、強度定数に変化は生じないと結論できる。

図-12は鉛直応力と側方応力が異なる、異方応力条件下で凍結・融解履歴を与えた場合を図-11と同様に比較した結果である¹⁶⁾。ただし、融解過程で供試体の様な変形を妨げずに異方応力を維持することが困難であったため、融解履歴だけは等方応力のもとで行った。つまり凍結過程終了までは未凍結供試体と同じ異方応力を与えて、その後等方応力下で融解させ非排水せん断を実施したものである。その結果は図-11と類似した有効応力径路を示した。

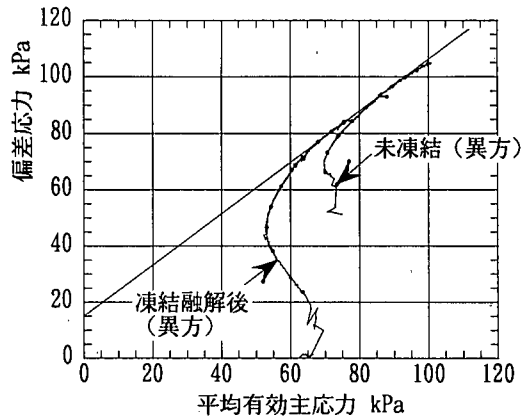


図-12 有効応力径路(異方)

6. 結論

今回の実験結果をまとめると以下のような結論が得られる。

1. 凍結・融解過程とせん断過程の間に応力開放を与えることなく、すべての過程を通して常に一定の軸対称三軸応力条件下で実験を実施できる凍結・融解三軸試験装置を開発し、締固めた粘性土に対してデータを得た。
2. 本研究に用いた凍結・融解三軸試験装置では、供試体の上下両端面を任意の温度に制御ができ、かつ凍上・沈下に伴う供試体の変形によっても鉛直応力は正確に保持できるので、拘束圧力一定の下で凍結・融解・せん断過程を実現できる。
3. 今回実施した実験条件の範囲では、冷却面の温度降下速度が遅いほど鉛直凍上量が多いという結果を得た。これは降下速度が遅いほどアイスレンズの生成量が多いためであると考えられる。
4. 圧密終了後と融解終了後の体積変化を比較したところ、凍結・融解過程が供試体の密度増加をもたらす場合があることが明らかとなった。
5. 凍上率は有効拘束圧力の増加とともに小さくなるが、融解沈下率は100kPa~300kPaの圧力範囲では有効拘束圧力の影響をあまり受けない。
6. 凍結・融解履歴を与えた供試体は未凍結供試体に比べ約20%の非排水強度増加があるという結果を得た。この強度増加は凍結・融解履歴による密度増加に主に起因するものと考えられる。
7. 非排水せん断中の過剰間隙水圧の発生量は凍結・融解履歴を受けた供試体の方が少ないことが分かった。

これより、ダイレイタンス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。

8. 今回実施した応力範囲では非排水せん断による破壊包絡線は凍結・融解履歴の有無にかかわらず一定で、強度定数に変化が無いことが分かった。
9. 異方応力の下での凍結・融解履歴実験においても等方応力条件と同様の結果を得た。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 青山清道, 小川正二, 福田誠: 凍結-融解を受けた土の力学特性, 第34回土木学会年次学術講演会, pp.77-78, 1979.
- 3) Aoyama, K., Ogawa, S. and Fukuda, M.: Temperature dependencies of mechanical properties of soils subjected to freezing and thawing, *Proceedings of the 4th International Symposium on Ground Freezing*, pp.217-222, 1985.
- 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) Broms, B.B. and Yao, L. Y. C.: Shear strength of a soil after freezing and thawing, *ASCE*, Vol.90, No.SM4, pp.1-25, 1964.
- 6) Yong, R. N., Boonsinsuk, P. and Yin, C. W. P.: Alternation of soil behaviour after cyclic freezing and thawing, *Proceedings of the 4th International Symposium on Ground Freezing*, pp.187-195, 1985.
- 7) 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.

- 8) Ogata, N., Kataoka, T. and Komiyama, A.: Effect of freezing-thawing on the mechanical properties of soil, *Proceedings of the 4th International Symposium on Ground Freezing*, pp.201-207, 1985.
- 9) Chuvilin, Ye.M. and Yazynin, O.M.: Frozen soil macro- and microtexture formation, *Proceedings of the 5th International Conference on Permafrost*, vol.1, pp.320-328, 1988.
- 10) Chamberlain, E.J.: Physical changes in clays due to frost action and their effect on engineering structures, *Proceedings of the International Symposium on Frost in geotechnical engineering*, Vol.1, pp.863-893, 1989.
- 11) Goto, S.: Influence of a freeze and thaw cycle on liquefaction resistance of sandy soils, *Soils and Foundations*, Vol. 33, No. 4, pp.148-158, 1993.
- 12) 小川正二, 西村友良, 和田正: 三次元的凍結-融解を受けた不飽和粘性土の体積変化および強度定数, 土木学会論文集, No. 430, III-15, pp.21-28, 1991.
- 13) 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 巻, 2 号, pp.1-20, 1974.
- 14) 山本英夫, 上田保司, 伊豆田久雄: 飽和土の三軸凍結膨張に関する実験的研究, 雪氷, 56 巻, 4 号, pp.325-333, 1994.
- 15) 風間秀彦, 青山清道, 福田誠: 凍結融解に伴う粘性土の微視的構造変化, 第22回土質工学研究発表会講演集, pp.201-202, 1989.
- 16) Ono, T. and Mitachi, T.: Computer controlled triaxial freeze-thaw-shear apparatus, *Proceedings of the International Symposium on Ground Freezing and Frost Action in Soils*, pp.335-339, 1997.

(1998. 10. 8 受付)

THE BEHAVIOUR OF FROZEN AND THAWED CLAY SOIL UNDER AXI-SYMMETRIC TRIAXIAL CONDITION

Takashi ONO and Toshiyuki MITACHI

A new system of axi-symmetric triaxial freeze-thaw-shear testing apparatus is introduced. This system is developed to evaluate the shear parameters and their dependence upon freezing-thawing history of soil samples. Shear testing can be carried out immediately after thawing without any stress release between freeze-thaw and shear operation. It is found on the compacted clay that the frozen and thawed soil shows larger strength and smaller pore pressure development than those of unfrozen sample, however the effective shear strength parameters of isotropically or anisotropically consolidated unfrozen and frozen samples do not vary after the thaw settlement of the frozen soil is completed.