

## 不飽和粘性土のサクションに与える凍結-融解の影響

### INFLUENCE OF FREEZING AND THAWING ON SUCTION OF UNSATURATED COHESIVE SOILS

西村友良\*・小川正二\*\*・和田正\*\*\*

By Tomoyoshi NISHIMURA, Shoji OGAWA and Tadashi WADA

This study aims to appear isotropic compression characteristic, shearing characteristics and changes of suction in unsaturated cohesive soils by freezing and thawing under undrained conditions. The pore water pressure increases by freezing and thawing and the suction in soils decreases. In isotropic compression, changes of suction in subjected to freezing and thawing soils is greatly. The decrease in the suction is related to the pore formation of soil structure and the decrease in shear strength.

*Keywords : freezing and thawing test, unsaturated soil, triaxial compression test, suction, shearing strength.*

#### 1. まえがき

1年を通して凍結状態にある永久凍土は現在、シベリアやアラスカ、カナダなどの寒い地域に分布し、その広さは世界の全陸地の14%を占め、一方冬期に凍結状態にあり、温暖な季節に融解する季節凍土は全陸地の70%程度にもみられるといわれている<sup>1)</sup>。

季節凍土を有する地盤では工学上種々の問題が発生している。たとえば、わが国の北海道や東北地方の寒冷地、長野・山梨・群馬県などの標高の高い山岳地域の道路では冬期に凍上現象によって舗装面が持ち上がりクラックが発生し、春の融解期になると融解作用によって路床が軟弱化し舗装面にクラックが発生している。舗装面にクラックが生じると路面から雨水が侵入し路床・路盤の支持力はさらに低下し、舗装面に亀甲状のひびわれが発生したり路面が破壊したりしている。

土の凍結は自然の気温の低下だけで起こるのでなく、近年の冷凍技術の開発で進歩した地盤凍結工法による地盤の凍結や液化天然ガス(LNG)の地下貯蔵タンク周

辺地盤の凍結など、人工的な作用によっても起きている。土の熱的問題の中で、土の凍結・凍上メカニズムに関しては Beskow (1935)<sup>2)</sup>, Everett and Haynes (1965)<sup>3)</sup>, Penner (1968)<sup>4)</sup>, Corte (1962)<sup>5)</sup>, 高木 (1981)<sup>6)</sup>, 高志ら<sup>7)~10)</sup>などが研究を進めており、凍上現象への土の内的要因(粒度分布・土の構造・比表面積・透水係数・含水比・応力履歴)や外的要因(凍結温度・凍結速度・上載拘束圧・排水条件・凍結-融解のサイクル数)の影響について検討している。

一方、盛土あるいは道路路床・締め固められた路盤などの不飽和土でも凍結-融解作用により、そのせん断抵抗力の低下を生じている。その原因是不飽和土の土粒子間力である土中のサクション力が凍結-融解作用の影響を受けたことにあるといわれている。

Williams (1964)<sup>11)</sup>, Penner (1967)<sup>12)</sup>, 長沢ら (1975)<sup>13)</sup>は、サクション力への凍結-融解の影響の研究を行い、凍結-融解作用により粘土粒子近傍の水分子や吸着水膜厚の減少とともにサクション力が低下すると述べている。しかし、凍結-融解後のせん断抵抗力の低下と土のサクション力との関係への凍結-融解の影響についてはまだ十分に明らかにされているとはいがたい。

本文はこのようなことを考慮して凍結-融解中に外部

\* 学生会員 工修 長岡技術科学大学大学院  
(〒940-21 長岡市上富岡町1603-1)

\*\* 正会員 工博 長岡技術科学大学教授 工学部建設系  
(同上)

\*\*\* 長岡技術科学大学 文部技官 (同上)

から水分の供給のないクローズドシステムの状態(closed-system)で凍結-融解作用を受けた不飽和粘性土の凍結-融解後の等方圧縮特性・せん断特性とサクション力との関係について検討した結果について述べている。

## 2. 試料・実験方法

実験に用いた試料は新潟県栃尾市大野より採取したシルト質粘性土であり、物理的性質を表-1に示す。この試料を気乾状態にした後に、所定の含水比に調整し、締固め用モールドを用いて一次元的圧縮力を加えて静的に締め固めて供試体を作成した<sup>14)</sup>。供試体の内的条件は表-2に示すとおりである。

実験に用いた熱サイクル三軸圧縮試験機<sup>14)</sup>の三軸室は内セル外セルの二重構造で、両セル内に冷媒(ナイブライン)を入れ、外セル内の冷媒を循環させて間接的に内セル内の冷媒の温度を制御し、供試体に凍結-融解を与えることができる。なお、温度制御は内セル中に取り付けた測温抵抗体によって測定された温度と光電式プログラム上の温度差が0°Cになるようにして行った。

今回の実験には図-1に示す温度変化を供試体に与え凍結-融解は1サイクルとした。

closed-systemの状態での凍結-融解過程、拘束圧力載荷時、せん断中の供試体の体積変化は内セルに取り付けた体積変化計(ギャップセンサー)で測定し、その経時変化を自動記録した。せん断は非排水排気状態でひずみ制御で行い、軸ひずみ速度は0.2(%/min)である。

不飽和供試体の間隙水圧の測定は、微細孔を有するセラミックディスクを用い供試体下端で行った。飽和させたセラミックディスクには表面張力が働き、空気はある大きさの圧力になるまで通過できないが、供試体中の間隙水はセラミックディスク中の細孔の中の水と連続しているので、セラミックディスクを介して間隙水圧を測定

表-1 試料の物理的性質

	大野粘性土
比重	2.70
液性限界	80.2%
塑性限界	48.7%
塑性指数	31.5
砂含有率	18.0%
シルト含有率	43.8%
粘土含有率	38.1%

表-2 供試体の初期条件

	間隙比	含水比	飽和度
1	1.67	28%	45%
2	1.67	34%	55%
3	1.67	37%	60%
4	1.67	44%	70%

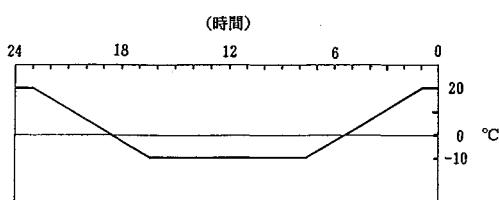


図-1 冷媒温度の経時変化

することができる。なお実験に用いたセラミックディスクの空気圧の限界値(エアエントリーバリュ: AEV)は2.0(kgf/cm<sup>2</sup>)である。

通常、大気圧下の不飽和土の土中の間隙空気圧( $u_a$ )はほぼ大気圧に等しく、間隙水圧は負の( $u_w < 0$ )状態にあるため、室内試験でサクションを直接測定する方法には加圧板法、吸引法、加圧膜法、遠心力法がある<sup>15)</sup>。加圧板法は供試体をセラミックディスク上に直接設置して、三軸セル内でバックプレッシャーとして正の間隙空気圧( $u_a > 0$ )を載荷し、発生する正の間隙水圧( $u_w > 0$ )を測定する方法である。この加圧板法は他の測定方法に比べて間隙水圧の測定が容易であり、またサクション力の測定範囲を $P_F$ の値で示すと0~4と比較的広い<sup>15)</sup>。

本研究では凍結-融解時、等方圧縮試験時およびせん断試験時において一定の大きさの間隙空気圧( $u_{a0} = 0.5$ (kgf/cm<sup>2</sup>))を供試体の上端より載荷し、供試体の下端で間隙水圧を測定している。したがって試験は非排水排気状態であるので原位置の状況に最も広く対応できる状態となっている<sup>16)</sup>。

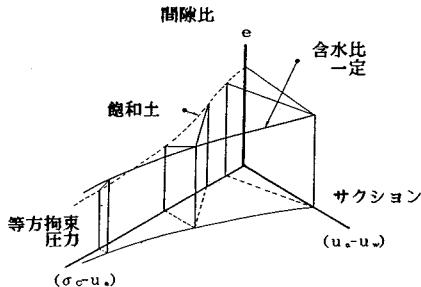
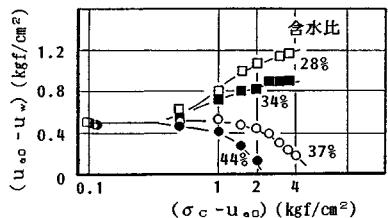
## 3. 等方圧縮を受ける融解土の( $u_{a0}-u_w$ )の変化

土粒子・水・空気の三相が存在する不飽和土のBishopの有効応力理論については多くの研究者らが実験を行い検討している。不飽和土の特徴は、土の骨格には表面張力により間隙水圧と間隙空気圧の2つの圧力差が平衡状態にあって、土粒子間の安定性を保っている。この圧力差であるサクション力( $u_a - u_w$ )は、土粒子同士が接触する面に垂直に働き不飽和土の有効応力の独立な応力成分の1つであり、Bishopは( $u_a - u_w$ )を導入した式(1)の有効応力式を提案し現在最も一般的と考えられている。

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \dots \dots \dots (1)$$

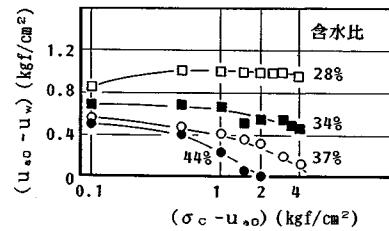
上式のように不飽和土の有効応力は拘束圧力( $\sigma - u_a$ )と $\chi(u_a - u_w)$ の2つの応力成分の和で表わされている。しかし、外力を受けた不飽和土のせん断強さやひずみの挙動を定量的に表現できる規準は得られていない。

Bishop and Blight(1963)<sup>17)</sup>は、数多くの締固め土の実験結果を整理して、等方拘束圧力( $\sigma_c - u_a$ )、サクション( $u_a - u_w$ )および間隙比( $e$ )の間には図-2のような三次元的な関係があると述べている。すなわち一定含水比状態で等方拘束圧力( $\sigma_c - u_a$ )が作用すると粒子接点にせん断力が発生し、土粒子間の相対的なすべりによって間隙比の減少が起きる。そのとき間隙の減少で間隙内の飽和度が高まり、サクション力の減少と外力に対する抵抗力が低下する。このようにサクション力の変化と土骨格の構造変化は対応していることになる。

図-2 等方圧力下の体積変化空間<sup>17)</sup>図-3 非凍結土の( $\sigma_c - u_{ao}$ )とサクション力の関係

上記のことを考慮して間隙空気圧( $u_{ao}$ )を0.5(kgf/cm<sup>2</sup>)と一定の大きさにし、等方拘束圧力( $\sigma_c - u_{ao}$ )を0.1(kgf/cm<sup>2</sup>)から徐々に増大させたときの非凍結土のサクション力( $u_{ao} - u_w$ )は図-3に示すとおりであり、土中のサクション力は( $\sigma_c - u_{ao}$ )の増加に従って変化するが、その変化の様子は供試体の初期飽和度・含水比の大きさで異なる。すなわち含水比が37%、44%と大きな供試体(飽和度60%、70%)では( $\sigma_c - u_{ao}$ )が増加するとBishop and Blight(1963)<sup>17)</sup>の実験結果と同様に土粒子間の間隙が収縮し、( $u_{ao} - u_w$ )が減少する。しかし含水比28%、34%の飽和度が $S_r=45\%$ 、55%と小さい場合には、( $\sigma_c - u_{ao}$ )の増加により間隙が減少しているにもかかわらず( $u_{ao} - u_w$ )は大きくなっている。これは供試体が拘束圧力( $\sigma_c - u_{ao}$ )の増加で圧縮され毛管径が小さくなり表面張力による土中の毛管上昇力が大きくなつたことと、供試体の含水比が小さいことから供試体と飽和したセラミックディスクの含水量の相違によってサクション勾配が発生し、負の間隙水圧が測定されたことのいずれかにより、( $u_{ao} - u_w$ )が増大したためと考えられる。しかし、この点については不明である。

一方、0.1(kgf/cm<sup>2</sup>)の等方拘束圧力( $\sigma_c - u_{ao}$ )を載荷した状態で凍結・融解作用を受け、その後等方拘束圧力を増大させたときの凍結・融解土の( $\sigma_c - u_{ao}$ )とサクション力の変化の関係は図-4のように非凍結土と異なる傾向を示している。すなわち、凍結・融解を受けた土では飽和度の小さい含水比28%を除くと間隙水圧の発生が大きく、供試体のサクション力は飽和度・含水比の大きさに関係なく、( $\sigma_c - u_{ao}$ )の増大とともにかなり小さくなっている。このように凍結・融解後に過剰間隙水

図-4 凍結・融解土の( $\sigma_c - u_{ao}$ )とサクション力の関係

圧の大きさが増大することはNixon and Morgensternら(1973)<sup>18)</sup>が、飽和粘性土に非排水状態で凍結・融解を行った場合に生じた現象と同じである。飽和度の高い含水比37%、44%の供試体では、( $\sigma_c - u_{ao}$ )が増すにつれて( $u_{ao} - u_w$ )は徐々に低下しているが、その曲線の勾配は小さく、非凍結土と比べると( $\sigma_c - u_{ao}$ )に対するその低下割合は小さい。すなわち非凍結土で含水比37%の場合は( $\sigma_c - u_{ao}$ )=1.5(kgf/cm<sup>2</sup>)、含水比44%の場合は1.0(kgf/cm<sup>2</sup>)付近で曲線勾配が大きくなる点がみられるが、凍結・融解後はその点を明確にとらえられない。また含水比28%、34%の供試体の( $\sigma_c - u_{ao}$ )=0.1(kgf/cm<sup>2</sup>)のときの凍結・融解直後の( $u_{ao} - u_w$ )の大きさはそれぞれ0.86(kgf/cm<sup>2</sup>)、0.69(kgf/cm<sup>2</sup>)で、同じ供試体の非凍結土の( $\sigma_c - u_{ao}$ )=0.1(kgf/cm<sup>2</sup>)載荷のサクション力0.5(kgf/cm<sup>2</sup>)よりも大きい。これは含水比の小さい非凍結土の供試体と同様にサクション勾配による負の水圧が凍結・融解によって発生した間隙水圧を上回ったためと考えられる。

含水比34%の供試体の場合も( $u_{ao} - u_w$ )はゆるやかに減少するが、含水比28%の供試体の( $u_{ao} - u_w$ )は凍結・融解直後の大きさよりわずかに大きくなるが、( $\sigma_c - u_{ao}$ )=0.5(kgf/cm<sup>2</sup>)以上ではほとんど変化しない。

拘束圧力を増大させると供試体の体積が減少し、飽和度が大きくなる。そのときの飽和度とサクション力との関係は図-5に示すようになり、凍結・融解土の( $u_{ao} - u_w$ )は同じ大きさの飽和度を有する非凍結土の( $u_{ao} - u_w$ )よりも明らかに小さい。これは凍結・融解作用によつて土中に大きな間隙水圧が発生したためである。また凍

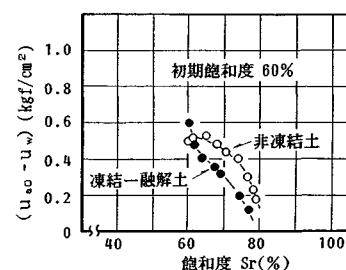


図-5 飽和度とサクション力の関係

結-融解土の飽和度の増大に対する  $(u_{ao} - u_w)$  の変化は非凍結土に比べ直線的であり、非凍結土と凍結-融解土の土粒子接点や間隙構造の違いを推測することができ、凍結-融解作用による土粒子骨格構造の変化が大きな間隙水圧の発生の要因であると考えられる。サクション力を測定することによってのみ非凍結土と凍結-融解土の土内部の差異を明らかにすことができる、単に供試体のマクロ的な体積変化量から求めた飽和度の変化から土内部の凍結-融解作用の影響を明確にするのは難しい。なお、図-5には初期飽和度 60 % の供試体の場合のみ示しているが、飽和度・含水比が異なる他の供試体でも同様な関係がみられた。

非凍結土・凍結-融解土のそれぞれの拘束圧力に対する飽和度とサクション力の関係は図-6, 7 に示すようにどの大きさの飽和度であっても凍結-融解土のサクション力は非凍結土のサクション力よりも小さい。不飽和土のサクション力と飽和度の関係について軽部ら(1978)<sup>19)</sup>、足立ら(1975)<sup>20)</sup>が接点 2 粒子モデルを用いてサクション力や飽和度、土粒子の周囲の拘束水膜の厚さをパラメーターとして理論曲線(図-8)を求め、飽和度が同じ大きさの不飽和土でもサクション力が小さい不飽和土は土粒子の周りの拘束水膜の厚さが減少していることを示している。この関係をみると、凍結-融解作用によってサクション力が低下した凍結-融解土では、拘束水膜の厚さが減少しているといえる。

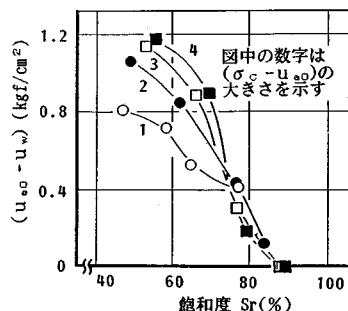


図-6 非凍結土の飽和度とサクション力の関係

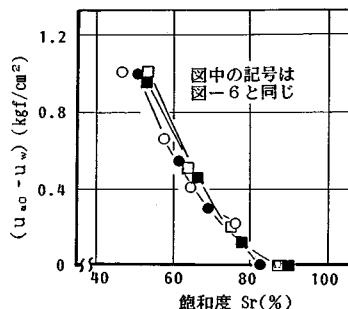


図-7 凍結-融解土の飽和度とサクション力の関係

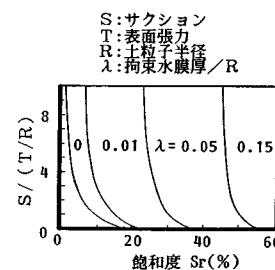


図-8 飽和度とサクションの関係

また非凍結土の場合、飽和度 70 % 以下では  $(\sigma_c - u_{ao})$  が大きいほど  $(u_{ao} - u_w)$  が大きい(図-6)。一方凍結-融解土の場合、飽和度 80 % 以下は  $(\sigma_c - u_{ao})$  の大きさに関係なく  $(u_{ao} - u_w)$  はほぼ一定で飽和度とともにほぼ直線的に低下しており(図-7)、 $(\sigma_c - u_{ao})$  の大きさの違いによる  $(u_{ao} - u_w)$  の差が非凍結土とは著しく異なる傾向を示している。

#### 4. せん断強さに与える凍結-融解作用の影響

##### (1) 応力-ひずみ関係

凍結-融解作用は  $0.1 \text{ (kgf/cm}^2)$  の等方拘束圧力の作用下で与え、その後等方拘束圧力  $(\sigma_c - u_{ao}) = 1, 2, 4 \text{ (kgf/cm}^2)$  の大きさで非排水排気三軸圧縮試験を行った。

初期飽和度 60 % の供試体の非凍結土・凍結-融解土の応力-ひずみ曲線は図-9 に示すとおりであり、等方拘束圧力が  $(\sigma_c - u_{ao}) = 1, 2 \text{ (kgf/cm}^2)$  の場合には凍結-融解作用の応力-ひずみ曲線への影響がほとんどみられない。しかし、 $(\sigma_c - u_{ao}) = 4.0 \text{ (kgf/cm}^2)$  の場合凍結-融解土の軸ひずみに対応する  $(\sigma_1 - \sigma_c)$  は非凍結土に比べて小さくなっているが、軸ひずみが 20 % に至ると非凍結土の  $(\sigma_1 - \sigma_c)$  とほぼ一致している。

一方、 $(\sigma_c - u_{ao})$  を  $2.0 \text{ (kgf/cm}^2)$  と同じにし、飽和度・含水比を変化させたときの非凍結土・凍結-融解土の応力-ひずみ関係は図-10(a) に示すとおりであり、含水比が 34 %, 37 % の供試体では凍結-融解作用の影響によるせん断強さの低下は生じていないが、高含水比(44

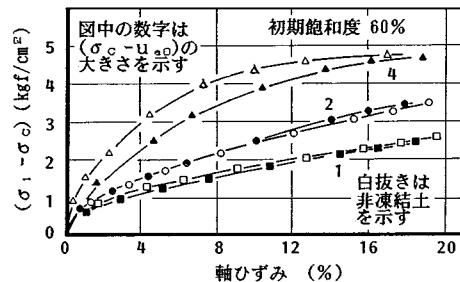


図-9 応力-ひずみ曲線

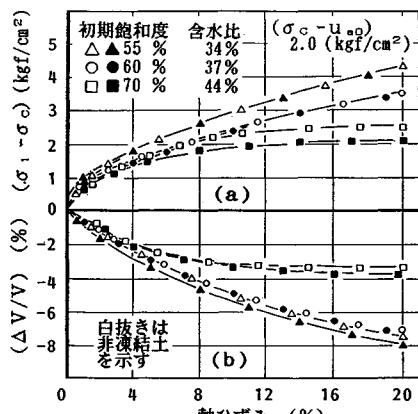


図-10 応力・体積ひずみ-軸ひずみ曲線

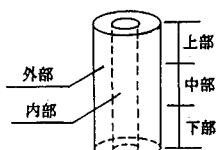
%) の供試体では明らかにせん断強さが低下している。このように、せん断強さの低下が含水比の大きさによって異なるのは、凍結-融解作用時に土中を移動する土中水分量の大きさが影響しているためと考えられる。

表-3は含水比の大きさの異なる2つの供試体の凍結前、凍結時、融解後のそれぞれの含水比分布を示している。含水比67%の供試体は凍結時に供試体外部の含水比が内部の含水比より大きい、すなわち本実験では供試体に三次元的な凍結-融解作用を与えていたので、凍結初期に供試体内部の温度が供試体外部より大きくなっているので土中水が低温部に移動している。しかし含水比37%の供試体では供試体内部と外部の含水比の差がわずかであり、間隙水の移動が小さいことがわかる。

このように初期含水比(飽和度)の相違により凍結-融解過程での間隙水の移動の違いがみられる。したがって間隙水の移動の差が間隙構造の変化や微少クラックの発生、吸着水膜の減少によるサクション力および土粒子間の粘着力の低下に影響を与え、青山ら(1977)<sup>21)</sup>が述べていると同様に、高含水比の土ほどせん断強さの低下

表-3 供試体中の含水比分布

飽和度	100%		60%	
	凍結前	凍結時	凍結融解時	凍結融解時
上部	内部 61.0	62.6	36.3	37.1
	外部 69.8	66.4	36.7	37.0
中部	内部 62.8	63.6	36.5	37.3
	外部 72.7	87.0	37.2	37.4
下部	内部 62.5	63.3	36.2	37.5
	外部 69.5	66.2	37.2	37.3



が大きいものといえる。

## (2) 凍結-融解土のダイレイタンシー

非凍結土・凍結-融解土の体積ひずみと軸ひずみの関係を図-10(b)に示すが、体積ひずみ( $\Delta V/V$ )はせん断前の体積 $V$ (cc)とせん断過程における体積変化量 $\Delta V$ (cc)であり、両者の比を百分率で表わしている。

軸ひずみの進行に伴う体積ひずみは収縮方向にだけ進んでいる。含水比44%の供試体は凍結-融解作用を受けた場合あるいは受けていない場合、いずれの場合でも軸ひずみ10%程度で軸差応力と同様に体積ひずみはほぼ一定に至り、含水比が低い供試体では大きな軸ひずみまで体積ひずみが進行している。このとき凍結-融解土の体積ひずみは供試体の含水比の大きさに関係なく非凍結土の体積ひずみよりわずかではあるが大きい。このような非凍結土・凍結-融解土のせん断作用によるダイレイタンシーの違いは、凍結-融解作用による土粒子の微視的構造の変化<sup>22)</sup>や粘土粒子近傍の界面に働く静電気力・分子間力・イオン力の凍結-融解作用による減少で非凍結土よりも土骨格はゆるい状態に変化したことによると考えられる。

非凍結土と凍結-融解土の応力-ひずみ関係を式(2)のTaylorのエネルギー補正関係によりダイレイタンシー補正をし、純粋な粘土粒子間にせん断作用に対する抵抗力の凍結-融解作用による影響について検討する。

$$(\sigma_1 - \sigma_c) = (\sigma_1 - \sigma_c)_r + (\sigma_c - u_{a0}) \cdot d(\Delta V/V)/d\varepsilon \dots (2)$$

$(\sigma_1 - \sigma_c)$ : 外部より加えた主応力差

$(\sigma_1 - \sigma_c)_r$ : 土のせん断のみに消費された主応力差

$(\sigma_c - u_{a0}) \cdot d(\Delta V/V)/d\varepsilon$ : 体積ひずみの増分を生ずるための仕事

不飽和土のせん断強さはサクション力に支配されており、不飽和土の一軸圧縮強さは足立ら(1977)<sup>23)</sup>、川上ら(1981)<sup>24)</sup>によればサクション力の対数に対し比例して増大し、また阿部ら(1987)<sup>25)</sup>によると破壊時のサクション力にも密接な関係があるといわれている。

図-11は $(\sigma_c - u_{a0}) = 2.0$ (kgf/cm<sup>2</sup>)の大きさの等方拘束圧力を載荷したときの含水比34%, 37%, 44%の供試体に対する非凍結土・凍結-融解土のダイレイタンシー補正後のせん断強さ $(\sigma_1 - \sigma_c)_r$ とせん断前の供試体のサクション力 $(u_{a0} - u_w)$ の関係を示しており、せん断強さ $(\sigma_1 - \sigma_c)_r$ はせん断前の $(u_{a0} - u_w)$ の増加とともに増大しているが、 $(u_{a0} - u_w)$ の大きさが0.4(kgf/cm<sup>2</sup>)以上になると $(u_{a0} - u_w)$ の増大に対するせん断強さの増加量は小さくなる。この関係は、非凍結土・凍結-融解土に関係なく1つの線上にプロットされる。図-9および10と図-11を比較すると凍結-融解により土のせん断強さが低下するのは凍結-融解によるサクション力の減少によるものであることがわかる。

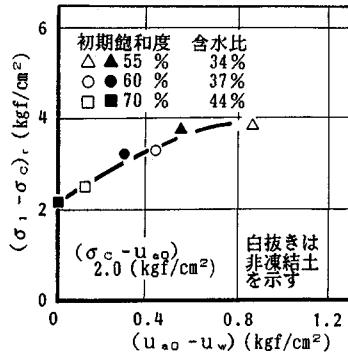


図-11 せん断強さとサクション力の関係

いま、等方拘束圧力の大きさのせん断強さとサクション力の関係に与える影響を明白にするためにサクション力( $u_{ao} - u_w$ )、ダイレイタンシー補正後のせん断強さ( $\sigma_1 - \sigma_c$ )<sub>r</sub>を等方拘束圧力( $\sigma_c - u_{ao}$ )で正規化したそれぞれの応力比である( $u_{ao} - u_w$ )/( $\sigma_c - u_{ao}$ )と( $\sigma_1 - \sigma_c$ )<sub>r</sub>/( $\sigma_c - u_{ao}$ )の関係をみると図-12に示すように、非凍結土・凍結-融解土に関係なく同一の直線で示すことができ、この関係は式(3)となる。

$$\frac{(\sigma_1 - \sigma_c)_r}{(\sigma_c - u_{ao})} = 2.55 \frac{(u_{ao} - u_w)}{(\sigma_c - u_{ao})} + 1.04 \quad \dots \dots \dots (3)$$

したがって式(3)により、土塊に作用する等方拘束圧力の増大によるサクション力の変化に対し、非凍結土・凍結-融解土に関係なく不飽和土のせん断強さの変化は1つの直線的に表現できる。式(3)中の( $u_{ao} - u_w$ )/( $\sigma_c - u_{ao}$ )は図-3、4で示した等方拘束圧力の増加に対するサクション力の変化に対応しており、凍結-融解土の( $\sigma_c - u_{ao}$ )に対する( $u_{ao} - u_w$ )の曲線はゆるやかであるので、式(3)中の( $u_{ao} - u_w$ )/( $\sigma_c - u_{ao}$ )の値は小さくなり、( $\sigma_1 - \sigma_c$ )<sub>r</sub>/( $\sigma_c - u_{ao}$ )は非凍結土よりも低下し、非凍結土・凍結-融解土による等方圧縮過程におけるサクション力の変化の違いが、せん断強さの変化に影響を与えてることがわかる。

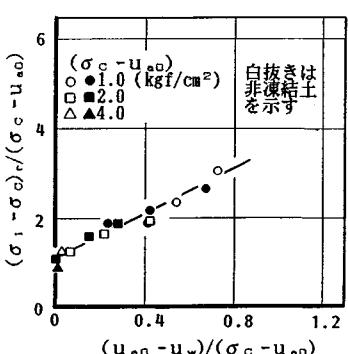


図-12 せん断強さとサクション力の関係

## 5. 凍結-融解土の破壊状態

凍結-融解作用を受けた土のせん断作用による破壊状態を考察する。実験に用いた供試体は不飽和土であり、飽和土とは異なる破壊応力を示すことになる。飽和粘性土では、せん断応力 $q$ が増大するとせん断破壊を起こし、限界状態(Critical State)に至り、その限界状態は正規圧密粘土・過圧密粘土にかかわらずせん断応力 $q$ (= $\sigma'_1 - \sigma'_3$ )、平均有効応力 $p'$ (=( $\sigma'_1 + 2\sigma'_3$ )/3)を用いて式(4)の限界状態線(Critical State Line: CSL)で表現できることが知られている。

$$q = Mp' \quad \dots \dots \dots (4)$$

$M$ :せん断抵抗係数、破壊線の勾配

一方、不飽和土は土粒子・水・空気の三相から構成され、サクション力( $u_a - u_w$ )が含まれるので、限界状態は飽和土の破壊状態を示す式(4)よりも複雑である。軽部(1987)<sup>26)</sup>はカオリン試料を用いて不飽和土の破壊応力について主応力差 $q_r$ (ダイレイタンシー補正後の破壊時主応力差)、平均有効応力 $p$ (=( $\sigma_1 + 2\sigma_3$ )/3 -  $u_a$ )を定義して研究を進めている。いま、軽部(1987)<sup>26)</sup>と同様に主応力差 $q_r$ 、平均有効応力 $p$ を式(5)のように定義する。

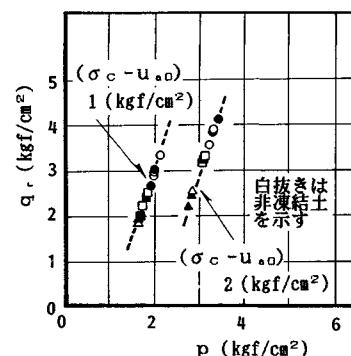
$$\left. \begin{aligned} q_r &= (\sigma_1 - \sigma_c)_r \\ p &= (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3 - u_a \end{aligned} \right\} \quad \dots \dots \dots (5)$$

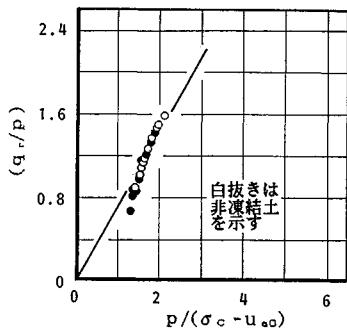
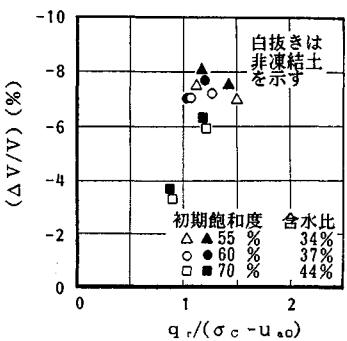
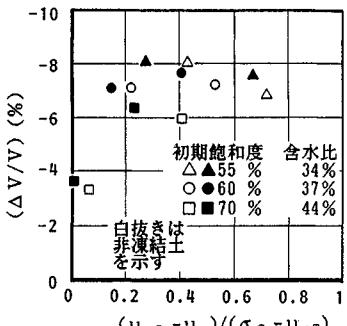
$q_r$ :ダイレイタンシー補正後の最大軸差応力

$p$ と $q_r$ の間には図-13に示すように、飽和粘性土の破壊状態とは異なり、原点を通る直線ではない。また、( $\sigma_c - u_{ao}$ )=1.2 (kgf/cm<sup>2</sup>)で2本の直線が描かれ、等方拘束圧力の大きさにより $p$ - $q_r$ 関係が異なっている。しかし非凍結土・凍結-融解土の違いによる差異はみられない。

これに対し、破壊応力比( $q_r/p$ )と平均有効応力 $p$ と等方拘束圧力( $\sigma_c - u_{ao}$ )の比 $p/(\sigma_c - u_{ao})$ の関係は図-14に示すように

$$(q_r/p) = 0.713 p/(\sigma_c - u_{ao}) \quad \dots \dots \dots (6)$$

図-13  $p$ - $q_r$ の関係

図-14  $p/(\sigma_c - u_{ao}) - (q_r/p)$ 図-15  $q_r/(\sigma_c - u_{ao}) - (\Delta V/V)$ 図-16  $(u_{ao} - u_w)/(\sigma_c - u_{ao}) - (\Delta V/V)$ 

と原点を通る直線で表わされ、破壊状態に至った不飽和状態の非凍結土・凍結-融解土のせん断特性は1つの直線として表現できる。この関係の理論的な根拠・原因について、現在のところ明白でないが不飽和土の破壊状態について重要な関係であると考えられる。

飽和土の破壊時の体積ひずみについては柴田(1963)<sup>27)</sup>はダイレイタンシー(体積変化)と $(\sigma_i - \sigma_3)/\sigma'_m$ ( $\sigma'_m$ :平均有効応力)には原点を通る直線関係があると述べてあり、 $(\sigma_i - \sigma_3)/\sigma'_m$ の増大に従ってダイレイタンシーも増加すると述べている。しかし、不飽和土では図-15に示すように柴田(1963)<sup>27)</sup>が述べたような明確な直線関係は見出せなかった。この原因は $q_r$ ,  $p$ の

中にサクション力の影響が含まれていないためと考えられる。すなわち図-12で不飽和土の等方拘束圧力の増大によるサクション力の変化に対するせん断強さの変化を1つの直線で示したが、サクション力に対する破壊時の体積ひずみの関係を示す図-16をみると、全体の傾向としては凍結-融解土の方が $(u_{ao} - u_w)/(\sigma_c - u_{ao})$ の変化による体積ひずみの変化が大きく、 $(u_{ao} - u_w)/(\sigma_c - u_{ao})$ に関する明確な関係はみられない。したがってサクション力と体積ひずみの関係について今後十分な検討を行う必要がある。

## 6. む す び

closed-systemの状態で凍結-融解作用を受けた不飽和粘性土の等方圧縮特性、せん断特性とサクション力の関係についてまとめる。

(1) 凍結-融解作用によって土中のサクション力は低下し、飽和度の増大に対して直線的に減少する。

(2) 凍結-融解後の等方拘束圧力の増加によるサクション力の変化を表わす曲線の勾配は、非凍結土よりも小さく凍結-融解作用によって土の間隙構造が乱されると考えられる。また凍結-融解作用を受けた含水比の小さい不飽和土は、含水比の高い不飽和土に比べてその曲線はゆるやかである。

(3) 凍結-融解作用を受けた土のせん断強さの低下はサクション力の低下によって生じ、特に含水比の大きな不飽和土で凍結-融解過程の間隙水の移動が大きいので、せん断強さの低下が大きい。また、凍結-融解作用によって土骨格はゆるい状態に変化せん断時の体積ひずみは非凍結土に比べて大きくなる。

(4) 非凍結土・凍結-融解土ともに等方拘束圧力( $\sigma_c - u_{ao}$ )とサクション力( $u_{ao} - u_w$ )をパラメーターとしてせん断強さの変化を直線的に表現できる。

(5) 凍結-融解土の破壊状態は破壊応力比( $q_r/p$ )と $p/(\sigma_c - u_{ao})$ が原点を通る直線で表現でき、その関係は非凍結土の関係と一致する。

## 参 考 文 献

- 1) 土質工学会編：土の凍結—その制御と応用—、土質基礎工学ライブラー 23, 1982.
- 2) Beskow, G. : Soil freezing and frost heaving with special application to roads and railroads, Swedish Geotechnical Society Series C, No. 375, pp. 145, 1935.
- 3) Everett, D. H. and Haynes, J. M. : Capillary properties of some model pore systems with reference to frost damage, RILEM Bulletin, New Series, No. 27, pp. 31~38, 1965.
- 4) Penner, E. : Particle size as a basis for predicting frost action in soils, Soils and Foundations, Vol. 8, pp. 21~29, 1968.

- 5) Corte, A. E. : Vertical migration of particles in frost of a moving freezing plane, *Journal of Geophysical*, Vol. 67, No. 3, pp. 1085~1090, 1962.
- 6) 高木俊介：論理的凍上理論の現状と将来, *Present and future of the logical theory of frost heaving*, 土と基礎, Vol. 29, No. 2, pp. 1~8, 1981.
- 7) 高志 勤・益田 稔・山本英夫：土の凍結膨張に及ぼす凍結速度、有効応力に関する研究, *雪氷*, 第 36 卷, 第 2 号, pp. 1~20, 1974.
- 8) 高志 勤・益田 稔・山本英夫：凍上に及ぼす未凍結土内の動水抵抗の影響(特に応力の小さい場合), *雪氷*, 第 38 卷, 第 1 号, pp. 1~10, 1976.
- 9) 高志 勤・生瀬孝博・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*, 第 39 卷, 第 2 号, pp. 1~12, 1977.
- 10) 高志 勤・生瀬孝博・山本英夫：土の間隙水の粘性増加による凍上抑制に関する実験的研究, *土木学会論文報告集*, 第 298 号, pp. 77~85, 1980 年 6 月.
- 11) Williams, P. J. : Unfrozen water content of frozen soils and soil moisture suction, *Geotechnique*, Vol. 14, No. 3, pp. 231~246, 1964.
- 12) Penner, E. : Heaving pressure in soils during undirectional freezing, *Can. Geotech., J.*, Vol. 4, No. 4, pp. 398~408, 1967.
- 13) 長沢徹明・梅田安治：土の強さに及ぼす凍結-融解過程の影響—凍結・融解土の特性に関する研究(Ⅱ)—, *農業土木学会論文集*, 第 60 号, pp. 19~23, 1975.
- 14) 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*(投稿中).
- 15) 阿部廣史：不飽和土の試験法, *土質工学会中部支部昭和 62 年度第 2 回地質研究会, 地盤工学に伴う不飽和土の取扱い*, pp. 37~54, 1987.
- 16) 阿部廣史・龍岡文夫・佐藤剛司：土質せん断試験機の設計と製作—不飽和土サクションの制御と測定—, *地質と調査*, 第 1 号, pp. 69~74, 1985.
- 17) Bishop, A. W. and Blight, G. E. : Some aspect of effective stress in saturated and partly saturated soils, *Geotechnique*, Vol. 13, pp. 177~197, 1963.
- 18) Nixon, J. F. and Morgenstern, N. R. : The residual stress in thawing soils, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 10, No. 4, pp. 571~580, 1973.
- 19) 軽部大蔵・苗村康造・森田 登・岩崎哲雄：不飽和土の力学的性質に関する基礎的研究, *土木学会論文報告集*, 第 269 号, pp. 105~119, 1978 年 1 月.
- 20) 足立・日比谷：不飽和土の変形機構に関する一考察, 第 10 回土質工学研究発表会講演集, pp. 209~212, 1975.
- 21) 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.
- 22) 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, pp. 201~202, 1987.
- 23) 足立忠司・堤 聰・竹中 肇：火山灰に由来する有機質土の強度特性, *農業土木学会論文集*, 第 71 号, pp. 39~43, 1977.
- 24) 川上 浩：不飽和土の取扱いの現状と問題点 The present situation and some problems on unsaturated soils, *土と基礎*, Vol. 29, No. 6, pp. 7~11, 1981.
- 25) 阿部廣史・川上 浩：不飽和土の負の間隙水圧とコラブス現象、不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム発表論文集, 不飽和土の工学的性質に関する研究委員会, pp. 45~54, 1987 年 12 月.
- 26) 軽部大蔵：不飽和土の構成式、不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム発表論文集, 不飽和土の工学的性質に関する研究委員会, pp. 59~68, 1987 年 12 月.
- 27) 柴田 徹：粘土のダイレイタンシーについて, *京都大学防災研年報*, No. 6, 1963.

(1990.5.25・受付)