

# 凍結—融解作用が不飽和粘性土の有効応力とせん断強さに与える影響

西村友良\*・小川正二\*\*・和田 正\*\*\*

寒冷地や山岳地域では凍結—融解作用が地盤に凍上現象やせん断強さの低下を発生させ凍害をもたらしている。本研究は不飽和粘性土にクローズドシステムの状態凍結—融解作用を与え、サクシオン力や温度勾配が凍結—融解時の体積変化に影響を与え、また凍結—融解時の体積変化によって融解後の土のせん断強さが異なることを明白にしている。さらにせん断強さの低下は有効応力の減少が原因であることを拘束圧力とサクシオン力によって定量的に表している。

**Key Words:** freezing and thawing, unsaturated soil, triaxial compression test, suction pressure, effective stress

## 1. まえがき

わが国の北海道や東北地方の寒冷地および長野・山梨・群馬県などの標高の高い山岳地域は毎年、気温が零℃以下に下がる冬期に凍上現象が生じ、春先になると凍っていた土中のアイスレンズが融解し地盤の支持力やせん断強さが低下する。そのために道路路面に局部的なひび割れが発生し、切土・盛土法面や自然斜面が融雪期に崩落を起こし、またトンネル内の覆工コンクリートや排水溝は凍上力によって変形やクラックが生じている。このような工学的問題にたいして、凍害対策がそれぞれの被害状況に応じて施されている<sup>1)~4)</sup>。また液化天然ガスの地下貯蔵による地盤の凍結、あるいは施工深度が深い建設工事や軟弱地盤中のシールドトンネルの掘削において、人工的に凍土壁や凍土ブロックを造る地盤凍結工法による地盤の凍結膨張が周辺地盤へ影響を与える問題が起きている<sup>5)</sup>。

一方、地盤の熱的問題に関しては寒冷地における被害状況の調査とあわせて土の凍結に関する基礎的研究が数多く行われ、これまでに凍上機構や凍上のメカニズム、熱伝導解析、土の熱的性質、凍土の力学的性質、凍結—融解土の物理的・化学的性質や力学特性について検討されている<sup>6)~10)</sup>。

さらに過去の研究・調査から凍結—融解作用を受けた道路の路床・路盤では路体の支持力が低下し軟弱化が生じることが報告されている<sup>2)</sup>。このような現象のメカニズムを解明するために凍結—融解作用を受ける地盤と同じ条件で室内の凍結—融解試験を再現することも試みられているが<sup>11)</sup>、この種の試験は必ずしも容易ではない。

表—1 試料の物理的性質

	大野粘性土
土粒子の密度	2.70 g/cm <sup>3</sup>
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	43.9 %
粘土含有率	38.1 %

また土の凍上特性と融解後のせん断強さの関連性および凍結—融解土のせん断特性の定量的な評価はいまだに十分になされていない。

このようなことを考慮して本研究では熱サイクル三軸圧縮試験機を用いて凍結—融解中に供試体中の含水量の増減が生じないクローズドシステム (closed-system) の状態で三次元的な凍結—融解作用を行った。本文ではその結果に基づいて不飽和粘性土の凍結—融解中の体積変化に与える不飽和粘性土のサクシオン力や外的要因である凍結—融解時の温度勾配の影響および凍結—融解時の体積変化が融解後のせん断強さに与える影響を検討している。さらに凍結—融解土のせん断強さをサクシオン力と拘束圧力による破壊条件式によって定量的に表し、凍結—融解作用によるせん断強さの低下の原因が有効応力の減少であることを明白にしている。

## 2. 試料の性質と試験方法

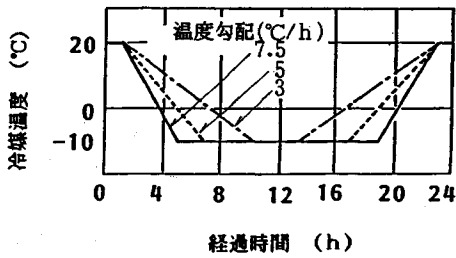
実験に用いた試料は新潟県栃尾市大野より採取したシルト質粘性土であり、物理的性質は表—1に示すとおりである。供試体は気乾状態にした試料を所定の含水比に調整し、一次的に圧縮力を加えて静的に締固めて作製した<sup>11)</sup>。

凍結—融解試験および三軸圧縮試験は熱サイクル三軸

\* 正会員 工博 足利工業大学講師 工学部土木工学科 (〒326 足利市大前町 268)

\*\* 正会員 工博 長岡技術科学大学教授 工学部建設系

\*\*\* 正会員 工修 長岡技術科学大学 文部技官



図一 冷媒温度の経時変化

圧縮試験機<sup>11)</sup>を用いて行った。凍結—融解試験時の温度制御は供試体側面近傍に取り付けた測温抵抗体で測定した冷媒の温度と光電式プログラムに設定された温度差が零°Cになるようにして自動制御されている。

冷媒温度は図一のように凍結時、融解時の温度勾配を直線的に変化させ、供試体にはこの凍結—融解作用を1サイクル(24時間)与えた。また供試体の温度変化にともなう体積変化は非接触型体積変化計で測定した。

凍結前の供試体と三軸圧縮試験を行う前の非凍結土の供試体に、供試体上端から空気圧( $u_a$ )を加え、供試体下端では脱気水で飽和した微細孔を有するセラミックディスクを通じて土中水を排水させて $u_w=0 \text{ kgf/cm}^2$ とし、( $u_a-u_w$ )で表されるサクシオン力を与える<sup>12)</sup>。凍結—融解試験は排水バルブを閉じ、一定の大きさの空気圧を加えた非排水・排気状態で行った。また、融解後には発生した間隙水圧を測定し、凍結—融解作用によるサクシオン力の変化を求めた。

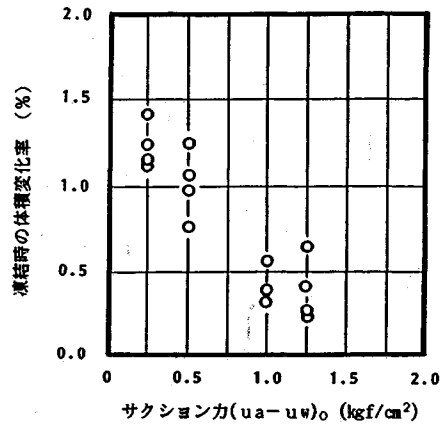
融解後の三軸圧縮試験は不飽和土のせん断強さが含水比によって大きく異なることや凍結—融解作用をクローズドシステムの状態ですべて供試体に与えていること、またサクシオン力が変化した凍結—融解土のせん断特性を明白にするために非排水・排気条件のひずみ制御で、軸ひずみ速度を0.2%/minとした。また凍結—融解後の土のせん断強さと比較検討を行うために、非凍結土に対しても同一の拘束圧条件で三軸圧縮試験を行った。

### 3. 不飽和土の凍結—融解による体積変化

#### (1) サクシオン力と凍結時の体積変化の関係

凍上量および凍結時の膨張量の予測のために行われる室内凍上試験では供試体に均一性の高い飽和供試体が多い。しかしながら、切土・盛土法面や路床・路盤では土が不飽和な状態で凍結—融解作用を受けて凍上現象を生じている。

不飽和供試体がクローズドシステム状態で凍結作用を受けて供試体周囲より温度が低下すると土中の間隙水が凍結面へ移動し、未凍結部分の間隙水量が減少する。このとき間隙水量の減少で土粒子間のメニスカスの曲率半径が小さくなり、土粒子同士は引き付け合い未凍結部分



図二 サクシオン力と凍結時の体積変化率の関係

の間隙の体積の収縮が起きる。一方、凍結面では移動してきた間隙水の氷結で土粒子間隔が大きくなり凍上による体積膨張が起き、凍結面近傍では間隙の収縮と膨張の2つの現象が起きる<sup>13)</sup>。このようにして凍結時には間隙水の移動とともに土の体積変化が生じる。

凍結前の不飽和土の間隙水は土粒子間に保水され、表面張力のため粒子間にサクシオン力による結合力が作用し、土粒子同志の骨格構造を保持する要因の1つとなっている。

このサクシオン力は不飽和土の有効応力の応力成分であり、凍結時の間隙水の移動や凍結面近傍で生じる間隙部分の収縮・膨張に影響を与える。このとき凍結前にサクシオン力( $u_a-u_w$ )<sub>0</sub>の大きな供試体では凍結時の間隙水の移動あるいは凍上力による間隙の構造の変化に対する抵抗力が大きいので、図二に示すように凍結前のサクシオン力が小さな供試体に比べると体積膨張率が小さい。

なお、図二の中の凍結—融解時の供試体の体積変化率は式(1)のように定義した値である。

$$ev = \Delta V / V_0 \times 100 (\%) \dots\dots\dots (1)$$

ev: 体積変化率(%)。正は膨張, 負は収縮  
 $\Delta V$ : 凍結—融解中の供試体の体積変化量  
 $V_0$ : 凍結—融解前の供試体の体積

#### (2) サクシオン力と融解後の体積変化の関係

融解後には供試体中のアイスレンズが解けて間隙水は凍結前の状態に戻る。しかし、土粒子の周りの吸着水は凍結時の氷晶分離作用で土粒子から遊離し、融解後には元の吸着水に戻らず自由水として存在するため、凍結前に比べて供試体中の吸着水量は減少する<sup>9)</sup>。さらに凍上現象による土粒子間の構造の乱れや微小クラックの発生などのために凍結前の構造配列は供試体全体が収縮するような構造配列に変化し、凍結—融解による熱的作用は供試体に圧縮作用を与えたと同じ結果になり図三のように体積収縮が生じる。このとき凍結前のサクシオン力

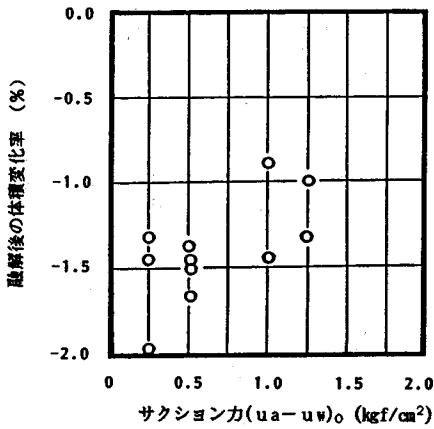


図-3 サクション力と融解後の体積変化率の関係

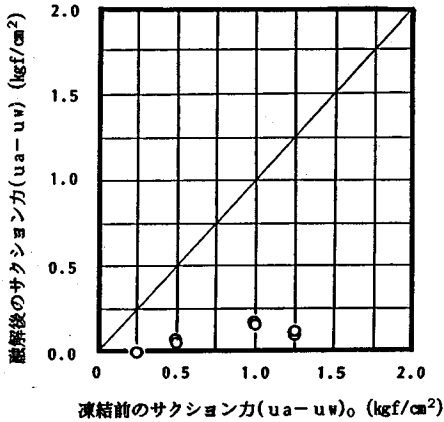


図-4 凍結-融解作用によるサクシヨンの変化

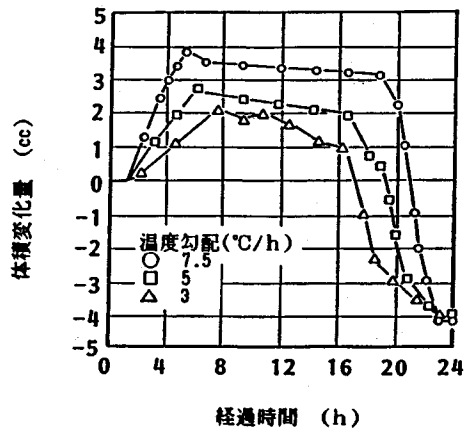


図-5 体積変化量の経時変化

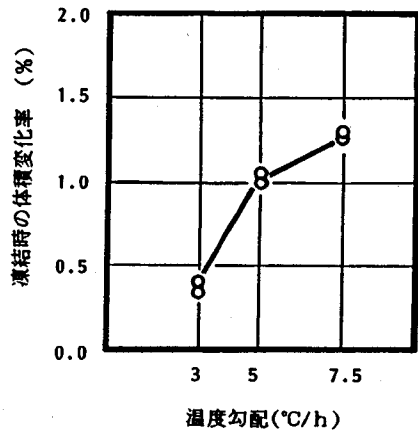


図-6 温度勾配と凍結時の体積変化率の関係

が大きな土では凍結-融解中の間隙構造の変化にたいして安定性を保つように作用している土粒子間力が高いので、融解後の体積収縮率は小さい。

一方、凍結-融解後のサクシヨンの力 ( $u_a - u_w$ ) は融解過程で間隙水圧が増大しているために図-4のように凍結前のサクシヨンの力の大きさに比べて著しく減少している。

Nixonら<sup>13),14)</sup>も飽和粘性土の凍結-融解試験を行い、凍土中のアイスレンズの融解過程において土中に過剰間隙水圧が発生することを指摘している。

このような間隙水圧の発生が土粒子間の接触部分に伝達する有効応力の減少をもたらす、融解後の供試体の体積収縮の原因となるものと考えられる。

### (3) 体積変化への温度勾配の影響

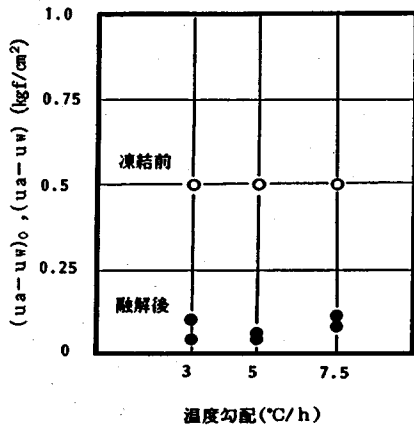
前述のようにサクシヨンの力の変化が凍結時・融解後の体積変化に影響を与えることが明白となった。さらに凍結-融解中の供試体表面の温度変化の大きさ(温度勾配)も、凍結-融解中の体積変化やサクシヨンの力に影響するものと考えられるので外的要因の温度勾配が体積変化に

与える影響について検討する。

Penner<sup>15)</sup>, Freden<sup>16)</sup>, 高志<sup>17)</sup>, Taber<sup>18)</sup>らは、凍結膨張率の凍結速度依存性について検討し、土の凍上速度は凍結速度が大きくなるほど増大すると報告している。これにたいしてHigashi<sup>19)</sup>は、凍結速度が大きくなると凍結面の進行が早くなり、凍上速度は小さくなると逆の結果を報告している。また、Beskow<sup>6)</sup>は土の凍上速度は凍結速度にあまり影響されないと述べており、土の凍上速度と凍結速度の関係を統一的に表現する見解や実験式が定まっていない。

このように研究者によって異なる結果となるのは試験装置、試験方法や条件の差異、実験データ数の不足が原因であると考えられている<sup>1)</sup>。

そのために凍結-融解時の温度勾配と体積変化の関係を確認する目的で含水比  $w=44\%$  の試料を間隙比  $e=1.40$ 、飽和度  $S_r=85\%$  に締固めた供試体に凍結前に ( $u_a - u_w$ )<sub>0</sub> = 0.5 kgf/cm<sup>2</sup> のサクシヨンの力を与え、非排水・排気状態で温度勾配を図-1のように 3, 5, 7.5 °C/h の大きさとし、体積変化の経時変化を図-5に示す。



図—7 温度勾配とサクシオン力の変化

このときの凍結過程における体積膨張の増加の割合(体積変化量)は3°C/hから7.5°C/hと大きくなるにつれて大きくなり、また図—6のように凍結時の体積膨張率は温度勾配の増大によって増加している。

上記の結果をみると不飽和土の凍結作用による体積変化は凍結面近傍の間隙水の氷結による膨張と間隙水の移動による間隙構造の収縮によって生じると考えられ、温度勾配が大きい場合は供試体中の凍結面の進行が速く、未凍結部分の間隙の収縮が十分に行われない間に、凍結面の到達による間隙水の氷結が生じるので、温度勾配が大きいほど膨張量が大きいものと考えられる。

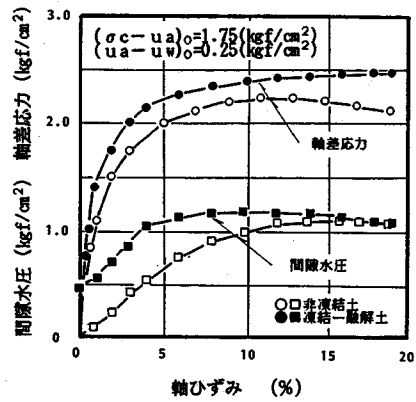
このように凍結時に温度勾配の大きさが異なると供試体の体積膨張率に差異を生じているが、体積は融解とともに減少し始め、最終的には凍結前に比べて収縮し、その値は温度勾配の大きさに拘らずほぼ同一となっている。

一方、凍結—融解前に $(u_a - u_w)_0 = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ であったサクシオン力は凍結—融解作用後の間隙水圧の発生によって図—7のように減少し、融解後のサクシオン力は、温度勾配の大きさの変化にかかわらず、ほぼ等しい値を示している。

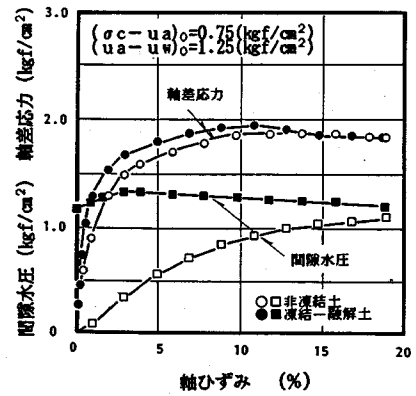
#### 4. 凍結—融解土のサクシオン力とせん断特性の関係

土が凍結—融解作用を受けるとせん断強さが低下することは多くの研究者によって指摘され、またせん断強さの低下が見かけの粘着力の低下によるものといわれている<sup>10)</sup>。しかし、凍結—融解作用を受けた土のせん断強さは密度、含水比、粒度、応力履歴などの内的な要因、凍結—融解試験時の外的要因で変化するために、凍結—融解土の応力—ひずみ関係や破壊規準式などのせん断特性を把握・予測し、シュミレートするようなモデルあるいは構成式の確立には至っていない。

そのために、本節では数多くの影響因子の中から、凍



図—8 軸差応力・間隙水圧—軸ひずみ関係



図—9 軸差応力・間隙水圧—軸ひずみ関係

結時の体積膨張、融解後の体積収縮と融解後のせん断特性との関係について述べる。

##### (1) 凍結—融解時の体積変化とせん断強さの関係

含水比 $w = 44\%$ 、間隙比 $e = 1.40$ 、飽和度 $S_r = 85\%$ の供試体にセル圧 $\sigma_c = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ 、サクシオン力 $(u_a - u_w)_0 = 0.25 \sim 1.25 \text{ kgf/cm}^2$ を与え、拘束圧力 $(\sigma_c - u_a)_0 = 0.75 \sim 1.75 \text{ kgf/cm}^2$ の範囲で非排水・排気状態で凍結—融解試験を行い、融解後ただちに凍結—融解時と同じ大きさの拘束圧力 $(\sigma_c - u_a)_0$ 条件で非排水・排気条件の三軸圧縮試験を行った。このときの軸差応力・間隙水圧—軸ひずみ関係を見ると図—8, 9に示すようになり、凍結—融解土のせん断強さは非凍結土のせん断強さよりも大きく、特に $(\sigma_c - u_a)_0 = 1.75 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $(u_a - u_w)_0 = 0.25 \text{ kgf/cm}^2$ の場合にその傾向が大きく現れている。この結果は一般にいわれている凍結—融解作用によって土のせん断強さは低下するという傾向と逆の結果となっている。

また、圧縮時の非凍結土の間隙水圧は軸ひずみの増大とともに正の値として増加し、大きな軸ひずみ量に至るとその値はほぼ一定値となっている。これにたいして、 $(\sigma_c - u_a)_0 = 1.75 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $(u_a - u_w)_0 = 0.25 \text{ kgf/cm}^2$ の

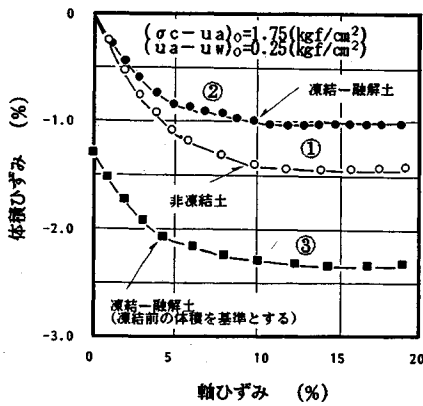


図-10 体積ひずみ-軸ひずみ関係

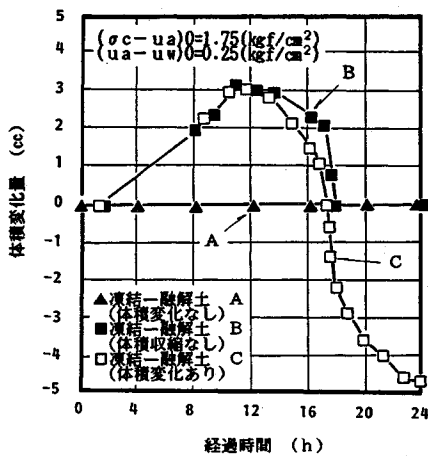


図-11 体積変化量の経時変化

場合の凍結-融解土の間隙水圧は軸ひずみの増加とともに凍結-融解直後の間隙水圧よりも増大しているが、 $(\sigma_c - u_a)_0 = 0.75 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $(u_a - u_w)_0 = 1.25 \text{ kgf/cm}^2$  の場合には軸圧縮過程での間隙水圧の変化は小さい。しかし、最大軸差応力を発揮した後は非凍結土と凍結-融解土の間隙水圧の大きさがほぼ等しくなっている。

さらに、土中にせん断応力が発生すると図-10の曲線①、②のように非凍結土、凍結-融解土ともせん断応力によって負のダイレイタンス（体積圧縮ひずみ）が生じ、凍結-融解土のその値は非凍結土よりも小さい。しかし、凍結-融解土は凍結-融解作用によって融解後に体積が凍結前よりも収縮し、負の体積ひずみを生じているので、凍結前の供試体の体積を基準ととり、凍結-融解後の体積収縮を考慮した軸ひずみと体積ひずみの関係を見ると図中の曲線③のように凍結-融解土の全体積ひずみは非凍結土よりも大きいことがわかる。したがって凍結-融解土のせん断強さが非凍結土よりも増大する結果となったのは融解過程で供試体の体積が収縮し、同時に土の配列構造が密な状態になり、土粒子間力が増加

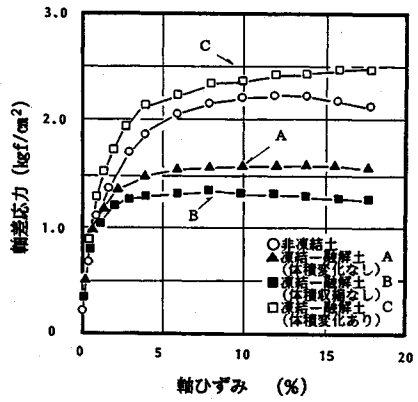


図-12 軸差応力-軸ひずみ関係

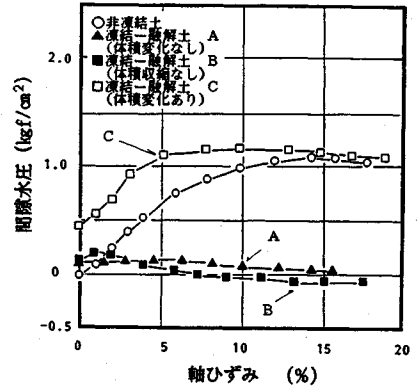


図-13 間隙水圧-軸ひずみ関係

して非凍結土よりもせん断抵抗力が大きくなったためと考えられる。

寒冷地の融解期に見られる道路路面の沈下、亀裂の発生は、凍結-融解作用による体積収縮が原因となっていると考えられる。そこで、このような凍結-融解中の体積変化が融解後の土のせん断強さに与える影響を明白にするために図-11のように凍結-融解過程でセル圧 $(\sigma_c)$ を操作して凍結-融解中に体積の大きさが変化しないように体積変化を制御した凍結-融解土(A)、融解過程で凍結前の体積と同じ体積となるように体積変化を制御した凍結-融解土(B)、および一般に行っているセル圧を制御しないで凍結-融解を与えた凍結-融解土(C)について三軸圧縮試験を行った。このようにして行ったそれぞれの条件の凍結-融解土(A, B, C)と非凍結土の応力-ひずみ曲線を見ると図-12, 13のようになり、凍結-融解土(A, B)のせん断強さは融解後に体積収縮を生じた凍結-融解土(C)や非凍結土のせん断強さよりも明らかに低下している。特に、凍結時に凍上現象による大きな体積膨張を生じた凍結-融解土(B)のせん断強さの低下が最も大きいことがわかる。

また、凍結-融解土(A, B)の軸圧縮過程での間隙

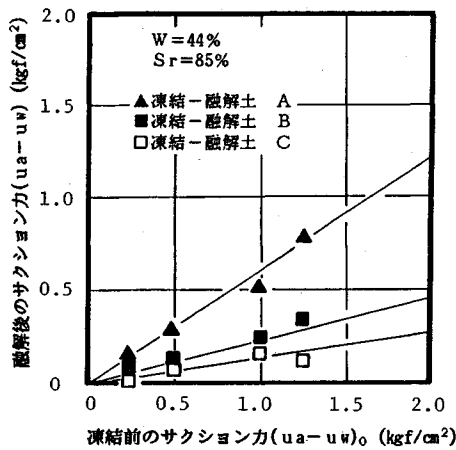


図-14 凍結-融解によるサクシジョン力の変化

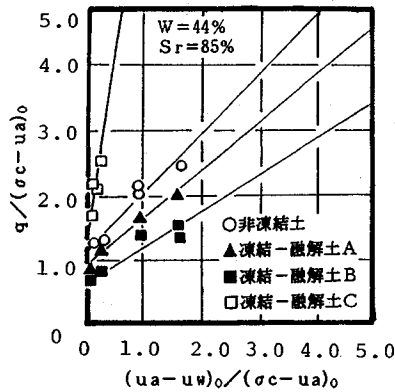


図-15 せん断強さとサクシジョン力・拘束圧力の関係

表-2 直線の係数

	$\alpha$	$\beta$
非凍結土	0.948	1.114
凍結-融解土 A	0.780	0.848
凍結-融解土 B	0.579	0.631
凍結-融解土 C	6.509	1.281

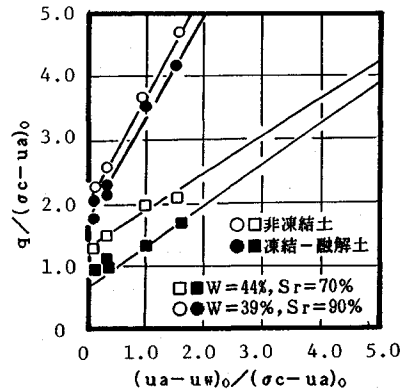


図-16 せん断強さとサクシジョン力・拘束圧力の関係

表-3 直線の係数

		$\alpha$	$\beta$
非凍結土	w=44% Sr=70%	0.591	1.284
	w=39% Sr=90%	1.700	1.978
凍結-融解土	w=44% Sr=70%	0.659	0.655
	w=39% Sr=90%	1.653	1.673

水圧は凍結-融解土 (C) や非凍結土の間隙水圧に比べて小さく、凍結-融解土 (B) では軸ひずみが増大するにともないむしろ負の間隙水圧となっている。

(2) 凍結-融解土のせん断強さとサクシジョン力の関係

前述のように不飽和土のサクシジョン力は凍結-融解作用によって低下し、凍結-融解中に体積変化の制御を受けた凍結-融解土 (A, B) のサクシジョン力も図-14のように凍結前より低下している。また凍結前のサクシジョン力が大きいほど凍結-融解によるサクシジョン力の低下量が多い。さらに凍結時に体積膨張を生じた凍結-融解土 (B) のサクシジョン力は凍結-融解時に体積変化のない凍結-融解土 (A) のサクシジョン力よりも小さく、融解後のサクシジョン力の大きさの影響が図-12に示したせん断強さの大きさの違いに現れていると考えられる。

一方、凍結-融解土 (C) では凍結-融解作用による間隙水圧の発生と融解後の体積収縮による間隙水圧の増大で、凍結-融解土 (A, B) に比べてサクシジョン力の

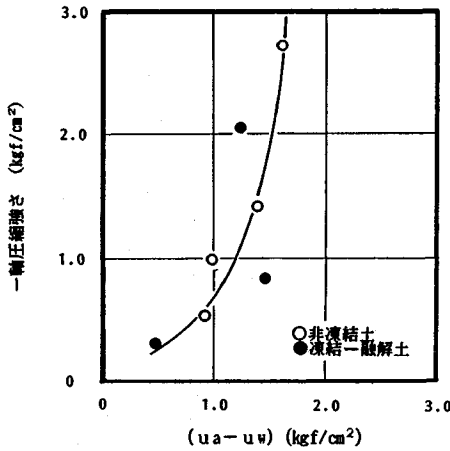
低下が大きい。

ここで、サクシジョン力とせん断強さの関係に与える凍結-融解作用の影響を明らかにするために、非凍結土あるいは凍結-融解作用によってせん断強さが低下した凍結-融解土 (A, B) のそれぞれのせん断強さとビショップの有効応力式の応力成分であるサクシジョン力を拘束圧力で正規化した値の関係をみると図-15のようになり、A, B で示す凍結-融解土および非凍結土では  $q/(\sigma_c - u_a)_0$  と  $(u_a - u_w)_0/(\sigma_c - u_a)_0$  の関係が式 (2) で示される直線関係となり、せん断強さはサクシジョン力および拘束圧力を用いて定量的に表すことができる。

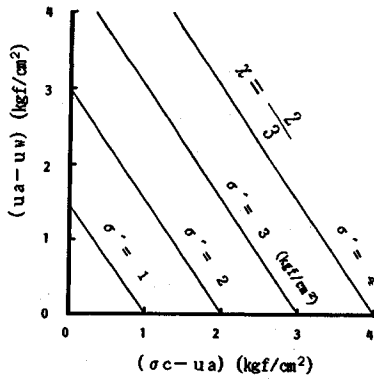
$$\frac{q}{(\sigma_c - u_a)_0} = \alpha \frac{(u_a - u_w)_0}{(\sigma_c - u_a)_0} + \beta \dots \dots \dots (2)$$

- ここに  $q$ : せん断強さ  $q = (\sigma_1 - \sigma_3)$
- $(\sigma_c - u_a)_0$ : 凍結前に載荷した拘束圧力
- $(u_a - u_w)_0$ : 凍結前に載荷したサクシジョン力
- $\alpha, \beta$ : 直線の係数

この直線の傾き  $\alpha$  および切片  $\beta = q/(\sigma_c - u_a)_0$  の値は表-2のようになり、 $\alpha, \beta$  のそれぞれの値は非凍結土の



図一七 一軸圧縮強さとサクシヨン力の関係



図一八 不飽和土の等有効応力線<sup>20)</sup>

せん断強さよりも大きなせん断強さを示す凍結-融解土 (C) で大きく、凍結-融解土 (B) の  $\alpha$ ,  $\beta$  が最も小さな値を示している。

さらに凍結-融解土 (B) と同様に凍結-融解中の体積変化の制御を行った含水比、飽和度の異なる凍結-融解土のせん断強さとサクシヨン力、拘束圧力の関係も図一16のように直線関係となるが、 $\alpha$ ,  $\beta$  の値は表一3に示すように含水比、飽和度の大きさによって差異が見られる。

(3) 一軸圧縮強さからのサクシヨン力の推定

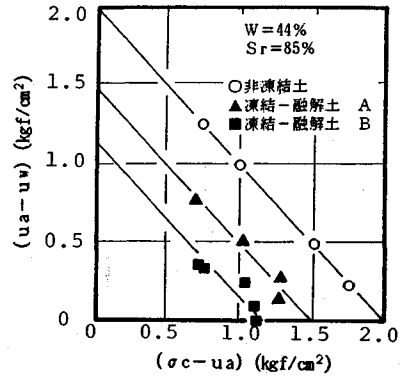
式(2)により非凍結土、凍結-融解土のせん断強さを定量的に表したが、さらに式(2)を変形し、式(3)のような形で不飽和土の  $q$  を表す。

$$q = \beta(\sigma_c - u_a)_0 + \alpha(u_a - u_w)_0 \dots \dots \dots (3)$$

拘束圧力とサクシヨン力の2つの応力項で構成される式(3)は、式(4)に示すビショップの有効応力式の形に似ており、ビショップの有効応力係数  $\chi$  を含まない不飽和土の有効応力式と同じ関係になる。

$$\sigma' = (\sigma_c - u_a) + \chi(u_a - u_w) \dots \dots \dots (4)$$

$\sigma'$ : 有効応力



図一十九 拘束圧力とサクシヨン力の関係

$\chi$ : ビショップの有効応力係数

$(\sigma_c - u_a)$ : 拘束圧力

$(u_a - u_w)$ : サクシヨン力

拘束圧力  $(\sigma_c - u_a)_0$  が零の状態でのせん断強さ(一軸圧縮強さ)からサクシヨン力  $(u_a - u_w)_0$  を式(3)より推定すると式(5)となる。

$$(u_a - u_w)_0 = q_u / \alpha \dots \dots \dots (5)$$

ここで、非凍結土と凍結-融解土に一軸圧縮試験を行い得られた一軸圧縮強さ ( $q_u$ ) と三軸圧縮試験結果から求めた  $\alpha$  を式(5)に代入して求めたサクシヨン力との関係は図一17のようになり、非凍結土、凍結-融解土の一軸圧縮強さはサクシヨン力が大きくなるにつれて増大し、一軸圧縮強さとサクシヨン力の関係は非凍結土、凍結-融解土に関わらずほぼ1つの曲線で表されることがわかる。

5. 有効応力に与える凍結-融解作用の影響

凍結-融解作用はサクシヨン力の減少とそれによる土のせん断特性の変化を生じさせること、また凍結-融解中の体積変化が融解後のせん断強さに影響を与えることを明らかにした。さらに、凍結-融解作用による不飽和土の有効応力の変化を拘束圧力  $(\sigma_c - u_a)$  とサクシヨン力  $(u_a - u_w)$  を用いて説明する。

式(4)のビショップの有効応力係数  $\chi$  の値を  $2/3$  と仮定して求めた有効応力の大きさが  $\sigma' = 1 \sim 4 \text{ kgf/cm}^2$  を示す拘束圧力  $(\sigma_c - u_a)$  とサクシヨン力  $(u_a - u_w)$  の関係は図一18の等有効応力線として描かれる<sup>20)</sup>。

等有効応力線は等しい破壊強度を与える拘束圧力とサクシヨン力の組み合わせを示す線であり、拘束圧力とサクシヨン力の値が小さくなると有効応力  $\sigma'$  が減少し、等有効応力線が図一18のように原点側に平行移動し、またせん断強さも減少する<sup>20)</sup>。

非凍結土の  $(\sigma_c - u_a)$  と  $(u_a - u_w)$  の応力条件は本実験での条件では図一19の図中記号 (O) で示されるように  $(\sigma_c - u_a) = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$  と  $(u_a - u_w) = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$  の

2点を結ぶ直線上にある。またそれぞれの応力条件における非凍結土の排気・非排水条件の三軸圧縮試験でのせん断強さはほぼ同じ大きさであり、等有効応力線にほぼ等しい。

一方、凍結—融解土 (A, B) の融解後のサクシオン力とせん断強さを式 (2) に代入して求めた拘束圧力と融解後のサクシオン力の組み合わせは図—19の図中記号 (▲, ■) で示すように非凍結土の拘束圧力とサクシオン力の関係にほぼ平行であるが非凍結土の等有効応力線よりも原点側に移行し、凍結—融解作用によって有効応力の大きさが減少していることがわかる。

## 6. むすび

本研究はクローズドシステムの状態で三次元的な凍結—融解作用を受けた不飽和粘性土の凍結—融解時の体積変化に与えるサクシオン力や温度勾配の影響および凍結—融解時の体積変化と融解後のせん断強さの関係を検討し、次のような結果を得ている。

(1) 不飽和土では凍結時に土中の間隙水の移動とともに体積変化を生じる。その体積変化はサクシオン力の大きさによって異なり、サクシオン力が大きな土は凍結時の間隙水の移動あるいは凍上力による間隙の構造の変化にたいする抵抗力が大きいので、サクシオン力が小さな土よりも凍結時の体積膨張率が小さい。

(2) 凍結—融解作用による氷晶分離、間隙水の移動、土粒子間の構造の乱れ、結合力の低下で融解後に土の体積は収縮するが、凍結前のサクシオン力が大きな土では土粒子間の結合力が高いので、サクシオン力が小さな土に比べて融解後の体積収縮率が小さい。

(3) 凍結—融解時の温度勾配が小さいほど土中の凍結面の進行がゆるやかであるので凍結時の体積膨張率は減少するが、融解した後の体積収縮率には温度勾配の影響は見られない。

(4) 凍結—融解作用による凍結時の体積膨張や融解後の体積収縮は凍結—融解後の土のせん断強さに影響を与え、凍結時に体積膨張を生じ融解後に体積収縮を生じていない凍結—融解土のせん断強さの低下が最も大きい。

(5) 非凍結土、凍結—融解土のせん断強さはサクシオン力、拘束圧力との間に直線関係を有する。その直線の係数 ( $\alpha$ ) は凍結—融解中の体積変化や不飽和土の内的因子によって異なる。さらに融解後のサクシオン力と拘束圧力の関係の変化より、凍結—融解作用によって有効応力が減少して土のせん断強さが低下する。

## 参 考 文 献

- 1) 土質工学会編：土質基礎工学ライブラリー 23, 土の凍結—その制御と応用—, pp. 70~90, 1989.
- 2) 河野弘文：寒冷地における路床・路盤, 土と基礎, Vol. 20, No. 6, pp. 19~23, 1972.
- 3) 北海道土木技術会道路トンネル研究委員会変状トンネル分科会：北海道における道路トンネルの変状実態と2, 3の考察, '89 トンネル技術の特別講演と技術研究発表会論文集, pp. 13~21, 1989.
- 4) 佐々木勝美：寒冷地ののり面保護工, 土木技術資料, Vol. 22, No. 8, pp. 18~23, 1980.
- 5) 建設省土木研究所施工研究室編：地盤凍結工法指針(案), 土木研究所資料, 第 1540 号, 1980.
- 6) Beskow, G. : Soil freezing and frost heaving with special application to roads and railroads, Swedish Geotechnical Society Series C, No. 375, pp. 145, 1935.
- 7) Core, A. E. : Vertical migration of particles in frost of a moving freezing plane, Journal of Geophysical, Vol. 67, No. 3, pp. 1085~1090, 1962.
- 8) 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, No. 298, pp. 77~85, 1980. 6.
- 9) 長沢徹明・梅田安治：土の強さの及ぼす凍結—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.
- 10) 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.
- 11) 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. 6.
- 12) 西村友良・小川正二・和田正：不飽和粘性土のサクシオンに与える凍結—融解の作用, 土木学会論文集, No. 424, III~14, pp. 243~250, 1990. 12.
- 13) Nixon, J. F. and Morgenstern, N. R. : The residual stress in thawing soils, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 10, No. 4, pp. 571~580, 1973.
- 14) Nixon, J. F. and Morgenstern, N. R. : One-dimensional consolidation of thawing soils, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 8, No. 4, pp. 558~565, 1971.
- 15) Penner, F. : The importance of freezing rate in frost in soils, Proceeding of American Society for Testing Materials, 60, 1960.
- 16) Frenden, S. : Mechanism of frost heave and its relation to heat flow, Proceeding of the 6th International Conference Soil Mechanism Foundation Engineering, 1, 1966.
- 17) 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, 36, No. 2, pp. 1~20, 1974.
- 18) Taber, S. : Frost heaving, J. Geol., 37, pp. 428~461, 1929.
- 19) Higashi, A. : Experimental study of frost heaving, SIPRE Rep., 45, 1958.
- 20) 軽部大蔵：不飽和土の構成式, 不飽和土の工学的性質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.

(1992. 9. 9 受付)



---

## INFLUENCE OF FREEZING AND THAWING ON SUCTION AND SHEARING STRENGTH OF UNSATURATED SOILS

Tomoyoshi NISHIMURÁ, Shoji OGAWA and Tadashi WADA

This paper discusses on the relation between volume change, suction pressure and decrease of shear strength of unsaturated soils due to freezing and thawing under undraind conditions. The magnitude of volume expansion in soil under freezing decrease with increase of suction pressure and decrease of temperature gradient, and the shrinkage of volume after thawing decreases with increase of suction forces, however be independent of temperature gradient. The shear strength of soil subjected to freezing and thawing is influenced by the amount of volume change during freezing and thawing. Moreover, the decreases of the shear strength are caused by decrease of effective stress due to reduction of confining pressure and suction pressure.

---