

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

小川正二*・西村友良**・和田 正***

寒冷地や山岳地域では凍結-融解によって路床・路盤や切・盛土斜面などに被害が発生している。本研究では不飽和粘性土にクローズドシステムの状態で凍結-融解作用を与えたときの凍結-融解時の体積変化、融解後のせん断強さの変化について検討を行い、凍結-融解時の体積変化は飽和度、拘束圧力の影響を受け、融解後のせん断強さの低下は含水比の影響を受けるが、粘着力の低下が原因であることを解明している。

Keywords : freezing and thawing, unsaturated soil, confining stress, triaxial compression test, degree of saturation

1. ま え が き

寒冷地の路床・路盤では、冬期の凍結と春期の融解によって支持力が低下し、それが原因となって道路の舗装面の亀裂や路面の沈下などが生じる。また切・盛土斜面の表層が崩れ、土木構造物に被害をもたらしている¹⁾。

凍上現象や地盤中の凍結進行に伴う水分移動については多くの研究がなされている^{2)~4)}。一方、凍結-融解作用を受けた土の性質についての研究も多くなされている^{5), 6)}。しかし、凍結-融解土の諸特性あるいは凍結-融解土のせん断強さの低下の原因の解明は十分になされているとはいえない。その理由は凍結-融解土の諸特性が土の粒度分布や物理化学的性質・応力履歴・含水比・飽和度などの土の内的要因と凍結温度・凍結速度・間隙水の給排水条件など凍結-融解作用時の外的要因などの多くの要因の影響を受けることにある。

近年、地域開発に伴い寒冷地での道路施工が盛んに行われており、その施工の際には路床・路盤中への水の浸透を防止する対策が施されているにもかかわらず、春期には凍結-融解による路床・路盤の支持力低下が生じている³⁾。これは凍結時に、地下水の供給による路床・路盤の含水比の増加がなくとも、路床・路盤の土が凍結-融解作用によって状態を変化させているためと考えられる。

以上のような観点から、本研究では静的に締固めた不飽和粘性土に間隙水の給排水のないクローズドシステムの状態で、凍結-融解作用を与えたときの凍結-融解時の体積変化、融解後のせん断強さの変化について検討している。

2. 試料土および実験方法

実験に用いた試料は表-1に示すような物理的性質を有する粘性土であり、その試料を気乾燥状態にした後、所定の含水比に調整し、養生箱で約7日間養生した。

その後内面にふつ素樹脂加工を施した高さ300 mm、内径50 mmの静的締固め用モールド内で図-1に示すように、所定の密度になるように数個の円柱状のスペーサーを適宜挿入しながら一次的に圧縮して締固め、三軸試験法の規格に準じて高さ125 mm、直径50 mmの供試体を作成する。この方法によると、突固め法によって作った供試体とは異なり、最大でも図-2に示すような実験結果のばらつき程度で均一な供試体を作ることができた。

供試体の乾燥密度、含水比、飽和度の値は表-2に示すとおりである。

実験には図-3に示す二重セルを有する三軸セル内で供試体に直接凍結-融解の行える熱サイクル三軸試験機を用いた。したがって、供試体は軸方向および水平方向から温度変化を受けることになる。供試体上端の試料キャップの材質はアルミニウムで熱伝導率が $236 \text{ (W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ 、供試体下端のペディスタルの材質はステンレス鋼(SUS 304)で熱伝導率は $24.5 \text{ (W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ であり、材質の熱伝導率の差があるが供試体に対して水平方向からの熱の伝導が行われるので、供試体全体の体積変化に与える影響は無視できるものと考えられる。また、常に拘束圧力を受けた状態で凍結-融解作用を与えることもできる。この装置では内セル、外セルに冷媒(ナイブライン)を入れ、温度を制御した外セル内の冷媒を循環して内セル内の冷媒を冷却、加熱することによって、供試体の凍結-融解をセル内で直接行うことができる。温度制御は測温抵抗体により測定された温度と設定温度が一致するようにミキシングボックス内の加熱室と冷却

* 正会員 工博 長岡技術科学大学教授 工学部建設系
(〒940-21 長岡市上富岡町 1603-1)

** 正会員 工博 足利工業大学講師 工学部土木工学科

*** 長岡技術科学大学 文部技官

表-1 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
砂含有量	18.0%
シルト含有量	43.9%
粘土含有量	38.1%
透水係数	$0.18 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$

表-2 供試体の初期内的条件

乾燥密度	含水比	飽和度
1.25 g/cm ³	30%	70%
	34%	80%
	39%	90%
1.16 g/cm ³	34%	70%
	39%	80%
	44%	90%
1.08 g/cm ³	34%	62%
	39%	70%
	44%	80%
	50%	90%
1.00 g/cm ³	44%	70%
	50%	80%
	57%	90%

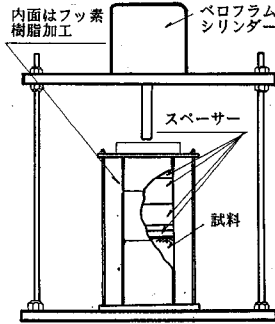


図-1 静的締固め方法

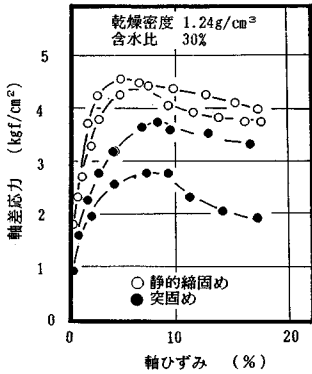


図-2 供試体のばらつきが三軸圧縮試験結果に与える影響

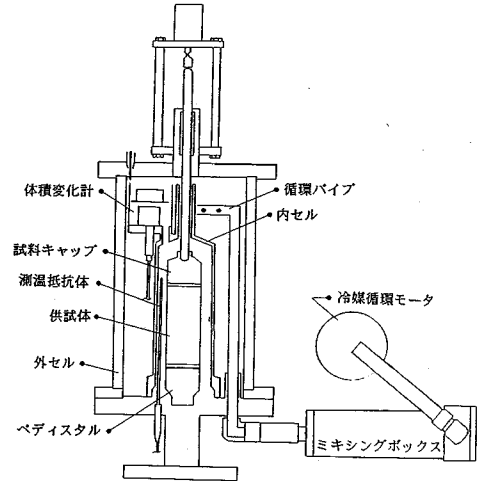


図-3 熱サイクル三軸圧縮試験機

室で制御し、冷媒循環モータを通り、冷媒を外セル内を循環させて行った。また、本装置では凍結-融解中に体積変化を測定することもできる。

実験では、冷媒温度を図-4 (a) のように +20°C から -20°C まで変化させる温度変化を三次元的に供試体周面から与えた。なお予備実験の段階で -20°C に至ってから 2 時間以内に供試体の体積変化が一定の状態になることを確認できたので、-20°C に維持する時間は 2 時間とし、凍結-融解時間の 1 サイクルを 12 時間として、土には 1 サイクルのみの凍結-融解作用を与えた。また、凍結-融解中の拘束圧力の大きさは $\sigma_c = 0, 0.5, 1.0 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$ の 3 種類とした。

凍結-融解中は水の給排水のないクローズドシステム状態で、融解後は供試体の含水比不変状態でひずみ制御の非圧密非排水圧縮試験 (UU 試験) を行い、非凍結土

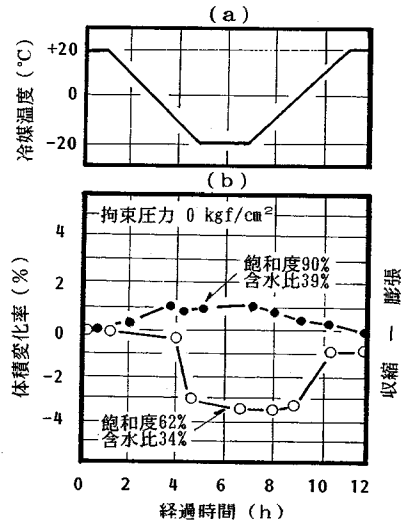


図-4 冷媒温度と体積変化率の経時的変化

の UU 試験の結果と比較し、凍結-融解作用のせん断特性に及ぼす影響を把握している。

なお、三次元的凍結-融解の熱供給は一次元的凍結-融解と異なるが、地盤内の土の一要素を想定すると凍結-

融解作用の影響には大きな違いはないと考えられる。

3. 凍結-融解時の体積変化

不飽和土が凍結-融解作用を受けると、凍結前の土粒子・水・空気の状態が、凍結時に土粒子・氷・空気・不凍水に変化し、融解後再び土粒子・水・空気の状態に戻る。一軸的に凍結-融解作用を与えたときのこのような土内部の状態変化、凍結時の間隙水の移動や供試体中の含水比分布の変化については青山ら⁵⁾によって明らかにされている。その結果によると、間隙水は凍結の進行に伴う土中の温度勾配によって、温度の低い方へ移動する。

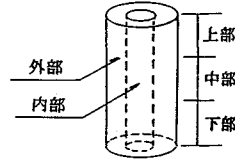
クローズドシステムの状態で供試体の周囲から三次元的に凍結作用を与えた場合、表-3に示すように供試体外周部分の含水比は凍結前に比べて増加し、逆に供試体中心部分の含水比は減少する。融解後には、供試体全体の含水比はほぼ凍結前の含水比分布に戻っている。不飽和土の移動水分量が飽和土の移動水分量に比べ小さいのは土中の間隙水の連続性が不飽和土の場合には低いためであるといえる。

凍結時には初めに供試体表面部が凍結し、まだ凍結していない部分の間隙水は、凍結した温度の低い部分に吸い寄せられる。そのために供試体内部の土粒子の周りの間隙水は減少し、土粒子間隙水のメニスカスの半径は減少し、土粒子間隔が小さくなる。同時に周りの凍結部の体積膨張による圧縮作用によって、未凍結部分である供試体中心部では体積が収縮する。これに対し、供試体表面の凍結部分では間隙水を吸収したことで、さらに氷晶の成長が活発になり土粒子間隔が拡大して体積が膨張する。

凍結-融解時の体積変化率 $\Delta V/V_0$ (ΔV は供試体の体積変化量(cc)、 V_0 は凍結前の供試体の体積(cc))の経時変化は図-4(b)に示すとおりである。ただし体積変化測定に関して温度補正は行っていない。凍結-融解過程での供試体の体積変化の大きさは、飽和度によって異なるが、その変化の傾向は乾燥密度が変わっても飽和度が同じであればほぼ同じである。また、拘束圧力が0.5, 1.0 (kgf/cm²)の場合でも図-4と同じ傾向である。

飽和度の高い ($S_r=90\%$) 供試体では土中における間隙水の連続性が十分にあるので⁷⁾、供試体周面の凍結部分の土粒子間隙の間隙は氷晶の発達で大きくなり、供試体の体積は次第に増大するが、ほぼ -10°C で一定となる。飽和度の低い供試体では間隙中の空隙部の割合が大きいことや、間隙水の連続性が不十分なために間隙水は凍結前の位置で氷結し、ほぼ均一に土の骨格構造が変化する。このとき供試体は間隙水の氷結による体積の膨張よりも土の構造の変化による体積収縮が生じ、温度の低下とともに収縮している。しかし、最低温度の -20°C に至ると体積収縮量はほぼ一定となっている。

表-3 供試体中の含水比分布



飽和度		100%		60%	
凍結前		67.2	67.3	36.6	37.3
		凍結時	凍結融解時	凍結時	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	67.0	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

飽和度が低い場合、凍結時に体積収縮が生じることは従来の凍上現象の研究結果と反対の現象であるが、その原因は過去の研究の多くが拘束圧力を作用しない一軸状態で供試体に冷却を行っているためと考えられる。

一方、融解過程では供試体の周面部分の氷晶が融解し始め、自由水に変化する。融解した自由水は凍結時とは逆に温度の低い供試体中心部分に移動する。凍結時に体積膨張を生じた飽和度の高い ($S_r=90\%$) 供試体が融解を始めると、供試体の中では土粒子間隔を拡大し、土の構造を乱していた氷晶が自由水となり体積が減少し、土粒子間隔が減少する。そのため膨張していた供試体の体積は収縮する。融解後の体積は凍結時の構造の変化の影響によって凍結前の大きさに比べて収縮する。一方、凍結時に土粒子間隔の減少によって体積が収縮していた飽和度の低い供試体が融解を始めると、土中の間隙水圧が増大し、有効応力が低下するので⁸⁾、土粒子間隔が増大して全体としては体積が次第に増大する。しかし増大する体積よりも凍結時に生じた体積収縮量の方が大きく、融解後は凍結前に比べて収縮する。

4. 凍結時の体積変化への飽和度、拘束圧力の影響

凍結時の間隙水の移動による不飽和粘性土の体積変化は飽和度に大きく影響される。ここでは凍結時の体積変化率の大きさと土の内的要因である飽和度、乾燥密度との関係および外的要因としての拘束圧力との関係について述べる。

(1) 体積変化と飽和度の関係

図-5は凍結作用を受けた土の体積膨張率・収縮率と飽和度の関係を示している。供試体の体積膨張率は、凍結前の飽和度が大きく間隙中の空隙部分が少ないほど大きくなる。しかし、含水量が少なく間隙中の空隙部分の大きい飽和度の低い供試体では、前述のように間隙水の

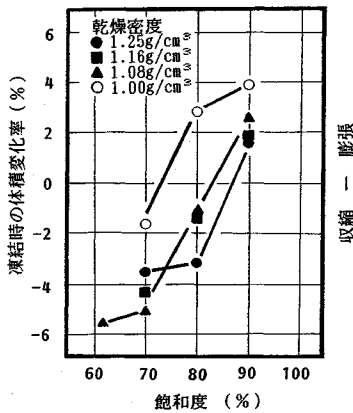


図-5 飽和度と体積変化率の関係

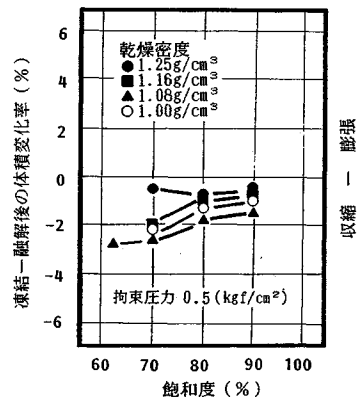


図-7 飽和度と凍結-融解後の体積変化率の関係

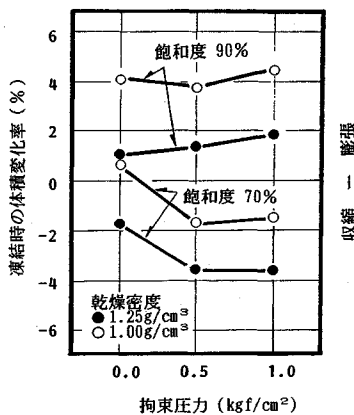


図-6 拘束圧力と凍結時の体積変化率の関係

移動による氷晶の発達が少ない、間隙水の氷結による体積変化よりも土の構造の変化による体積収縮が卓越し、供試体全体として収縮している。

(2) 体積変化と拘束圧力の関係

高志ら³⁾は土の凍上量に与える拘束圧力の影響に関する研究の中で、飽和土の土粒子間力の増加とともに凍結膨張率は指数関数的に減少し、有効応力の増大が凍上を抑制する働きを示すことを述べている。しかし、今回の実験のように単に等方拘束圧力(全応力)の増大が、体積膨張率・収縮率に与える影響をみると図-6に示すように、飽和度70%、乾燥密度1.25 g/cm³の供試体では拘束圧力がゼロ(無拘束)の場合に体積が収縮し、拘束圧力の作用を受けると収縮率は増大している。このような傾向は、飽和度70%、乾燥密度1.00 g/cm³の供試体でも同じである。また、体積膨張率への拘束圧力の影響をみると、拘束圧力が0.5 (kgf/cm²) から1.0 (kgf/cm²) に変化しているにもかかわらず体積収縮率はほとんど同じである。一方、飽和度90%の場合には拘束圧力が大きくなると体積膨張率はむしろ大きくなる傾向を示している。

5. 融解後の体積変化への飽和度、拘束圧力の影響

寒冷地の現場調査によると、冬期の凍上現象によって道路の舗装面が隆起し、気温が暖かくなると凍土が融解し、凍土を起こした舗装面が徐々に沈下し、最終的には凍結前よりも沈下していることが指摘されている⁹⁾。

土が凍結-融解を受けている際には、熱量の出入りが行われ土中の内部エネルギーやエントロピーに変化が生じ土の構造は変化する¹⁰⁾。そのような走査型電子顕微鏡によって観察すると、土の構成単位のベッドが破壊され、土中には多数のヘアクラックが生じ土全体が粗粒化しているといわれる¹¹⁾。

このような現象のほかに、凍結時に氷晶分離によって土粒子の周りの吸着水膜の厚さが減少して、土粒子と間隙水の相互作用の変化による結合力の低下や、凍結-融解中の間隙水の移動や氷晶の発達による土の構造の変化で土の構造が乱され、融解後に体積が収縮することが考えられるので以下では体積変化率への飽和度、拘束圧力の影響を検討する。

(1) 体積収縮率と飽和度の関係

融解後は氷晶が消滅するために凍結時の体積変化率と飽和度の関係とは異なって、図-7に示すように凍結前に比べ収縮するものの、飽和度の大きさの差の影響は非常に少ない。しかし、融解後の収縮率は乾燥密度の高い供試体ほど小さい傾向にある。これは乾燥密度が高いほど凍結-融解時での間隙水の移動や氷晶の成長による土の構造の乱れが小さいためと考えられる。

(2) 体積収縮率と拘束圧力の関係

凍結-融解後の供試体の体積収縮率は、図-8に示すように飽和度70%の土では拘束圧力が大きいほど大きい、飽和度90%の土では拘束圧力0.5 (kgf/cm²) と1.0 (kgf/cm²) ではほとんど変わらない。

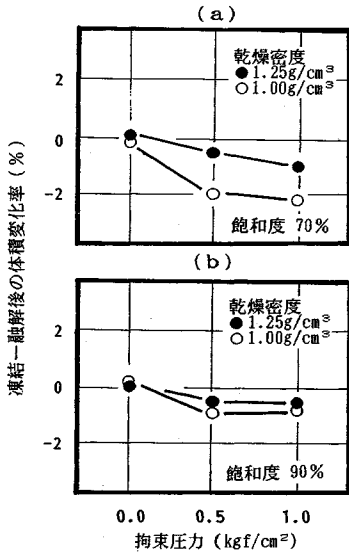


図-8 拘束圧力と凍結-融解後の体積変化率の関係

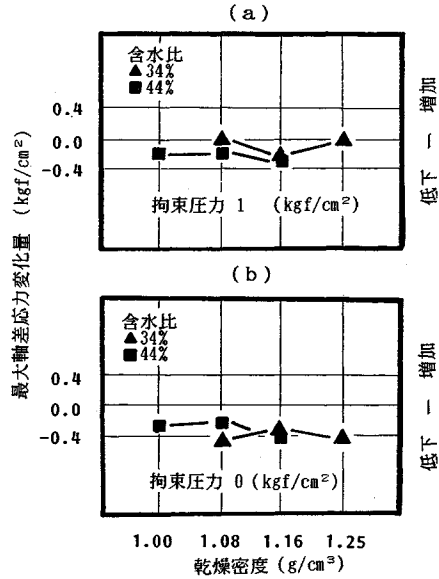


図-10 乾燥密度と最大軸差応力変化量の関係

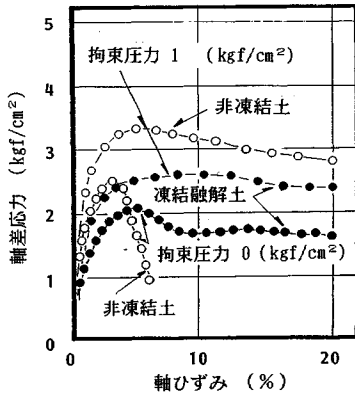


図-9 凍結-融解による応力-ひずみ曲線の変化

6. 凍結-融解土のせん断特性

(1) 応力-ひずみ関係

一般的傾向として凍結-融解を受けた土の応力-ひずみ曲線は図-9に示すように非凍結土に比べ曲線が平坦になっている。特に拘束圧力 $\sigma_c = 0$ (kgf/cm²) の一軸状態の場合、非凍結土では小さなひずみ量で大きな圧縮強さを発揮し、その後急激に破壊につながる脆性破壊挙動を示している。これに対し、凍結-融解土では緩やかな曲線となっている。このような応力-ひずみ曲線の変化は、凍結時に土粒子の周りの吸着水膜の一部が氷結し、融解後自由水として間隙中に存在して⁵⁾、土粒子接点に働く吸引力や斥力が低下しているために生じるものと考えられる。

また、凍結-融解を受けた土では表-3に示すように凍結-融解後に全体としての含水比は変化していないが

最大圧縮強さに達するまでのひずみ量は大きく、最大圧縮強さに達した後に急激な破壊を生じず、延性破壊挙動を起こしている。また、凍結-融解を受けた土の初期割線係数は小さくなり凍結-融解作用を受けた土の応力-ひずみ関係は凍結-融解がクローズドシステムの状態で行われたにもかかわらず、供試体の含水比があたかも増大したような挙動を示している。このような凍結-融解を受けた土のせん断特性は拘束圧力が作用した場合でも同じである。

(2) せん断強さの低下量と乾燥密度、含水比の関係

土が凍結-融解作用を受けると、体積変化を生じると同時にせん断特性が変化する。凍結-融解後の土のせん断強さの低下は一般にいわれているように土の含水比や密度の大きさの影響が現れるものと考えられる⁹⁾。このような不飽和土のせん断強さの低下の評価には、土粒子間に存在するサクシオン力の影響^{12), 13)}を考慮しなければならないが、本文中では凍結-融解作用によるサクシオン力の影響については述べていない。

いま、凍結-融解後のせん断強さの低下と供試体の乾燥密度の関係をみると図-10に示すように、非凍結土に対する凍結-融解土の強度低下量は供試体の含水比が一定であれば、乾燥密度の大きさが変化してもほぼ一定であり、長澤ら¹⁴⁾の報告と同じ傾向にある。またこのような傾向は拘束圧力の大きさが変化しても変わらない。

せん断強さの低下に与える含水比の影響をより明白にするために含水比とせん断強さの低下の関係をみると、図-11に示すように最適含水比 (JIS A 1210, 締固め仕事量 5.6 cm³・kg/cm³) に相当する含水比 39% で締固めた土は凍結-融解作用による強度低下が多少大きく現

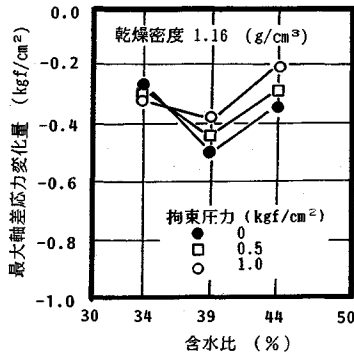


図-11 含水比と最大軸差応力変化量の関係

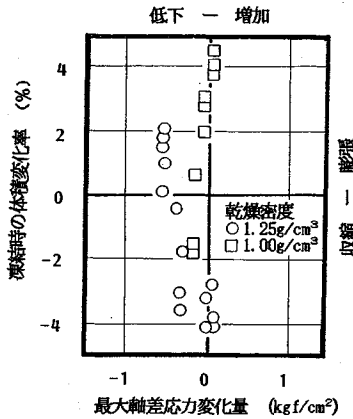


図-12 強度変化と体積変化の関係

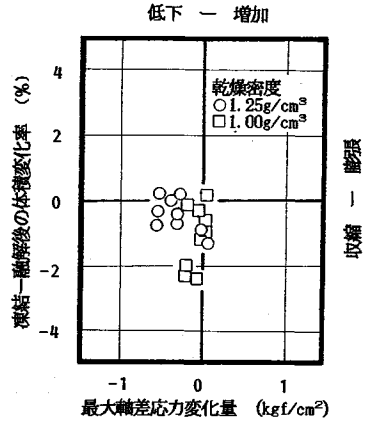


図-13 強度変化と体積変化の関係

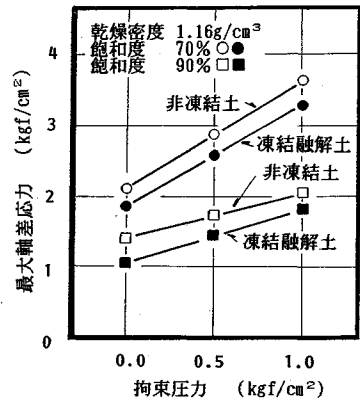


図-14 拘束圧力と最大軸差応力の関係

れている。小川ら¹⁵⁾も乾燥密度が一定になるように種々の含水比で突固めた供試体の、凍結-融解後の一軸圧縮強さの低下について検討を行い、最適含水比付近で圧縮強さの低下量が最大となり、それ以上含水比が増加しても逆に、低下量は小さくなると報告している。

(3) セン断強さの低下量と体積変化の関係

凍結-融解過程の土の体積変化と融解後のせん断強さの関係は、これまでほとんど明らかにされていない。凍結時の体積変化率と最大軸差応力の変化量との関係は図-12に示すとおりであり、同じ乾燥密度の供試体でも飽和度の大きさによって体積が膨張したり収縮したりしている。しかし体積膨張・収縮量と最大軸差応力の低下量との間には明確な関係がみられない。融解後も、図-13に示すように体積収縮率と最大軸差応力の低下の間には一定の関係がみられず、この強度低下にはサクシヨンの変化など他の要因が影響していることが考えられる。この点については現在検討している。

(4) c, ϕ に与える拘束圧力の影響

凍結-融解土のせん断強さの低下量は拘束圧力の大きさが変化しても図-14に示すようにほぼ一定である。このような結果は、供試体の含水比や乾燥密度が異なっ

ても同様な傾向である。

凍結-融解作用の粘着力、内部摩擦角への影響について福田ら¹⁶⁾は、突固めた供試体がクローズドシステムの条件で凍結-融解を受けると、内部摩擦角は変わらず粘着力が減少することを報告している。また青山ら¹⁷⁾も凍結-融解作用は内部摩擦角よりも粘着力を低下させ、粘着力の低下が土の圧縮強さを減少させると報告している。

いま三次元的に凍結-融解作用を与えたときの土の内部摩擦角、粘着力の変化をみると図-15、16に示すようになる。なお、図-15は、横軸に非凍結土の全応力表示の内部摩擦角、縦軸に凍結-融解土の全応力表示の内部摩擦角を示している。両者は図中の対角線上に分布し、三次元的に凍結-融解作用を与えた場合も内部摩擦角の変化はほとんどないことがいえる。一方、凍結-融解前後の粘着力の変化は図-16に示すようになり、融解後には明らかに粘着力が低下し、その低下の程度は、乾燥密度が大きいほど大きい。したがって、凍結-融解作用によるせん断強さの変化は、土の粘着力の低下にあるといえる。

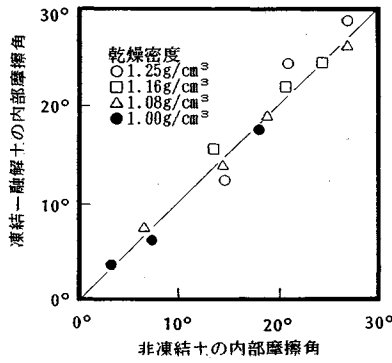


図-15 凍結-融解による内部摩擦角の変化

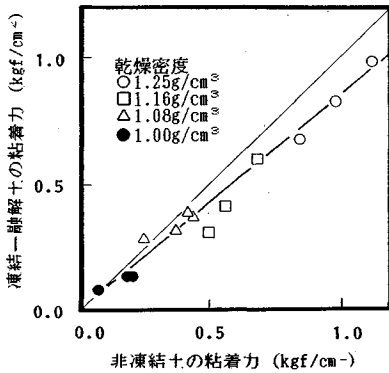


図-16 凍結-融解による粘着力の変化

また、凍結-融解作用により土の構造が変化したこと
に起因する応力-ひずみ曲線より求めた変形係数 E_{50} の
低下の程度をみると、図-17 に示すように最大軸差応
力と同様に拘束圧力の大きさによってほとんど変化して
いない。

7. む す び

本研究では静的に締固めた不飽和粘性土をクローズド
システムの状態で三次元的に凍結-融解を行った。そし
て凍結-融解前の供試体の含水比、乾燥密度、飽和度の
内的因子が凍結-融解過程における供試体の体積変化お
よびせん断特性の変化に影響することを明らかにした。

その結果を要約すると次のとおりである。

(1) 不飽和粘性土の凍結時の体積変化の大きさは、
飽和度によって異なる。飽和度が大きい土は、凍結時
の間隙水の連続的な移動で氷晶が発達し体積が膨張する。
このとき飽和度が大きいほど膨張率は大きい。

これに対し飽和度の低い土では、間隙水の移動による
氷晶の発達が少ない、土の構造の変化に起因する体積の
収縮が大きい。また拘束圧力が大きくなるほど収縮率は
増大する。

(2) 凍結-融解過程に土中に生じる間隙水の移動

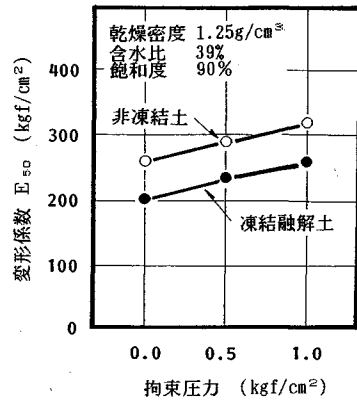


図-17 凍結-融解による変形係数の変化

で、土の構造が乱されるために融解後の体積は収縮する
が、体積収縮率への飽和度の大きさの影響は乾燥密度が
同じであれば非常に少ない。

(3) 凍結-融解後の土のせん断強さの低下量は含水
比が一定であれば、乾燥密度の大きさが変化してもほぼ
一定である。また最適含水比に相当する含水比で締固め
た土はせん断強さの低下が多少大きく現れる。

(4) 凍結-融解作用によるせん断強さの低下は、乾
燥密度が大きいほど大きい。このとき内部摩擦角の変化
はほとんどなく、粘着力の低下のみがみられる。

参 考 文 献

- 1) 山内豊聡・下荒磯滋：やまなみハイウェイの舗装凍害と
その調査研究，土と基礎，Vol. 29, No. 2, pp. 23-30,
1981.
- 2) 木下誠一：土の低温特性，土と基礎，Vol. 25, No. 7,
pp. 5-9, 1977.
- 3) 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 卷，
2号，pp. 1-20, 1974.
- 4) Penner, E. : Pressures Developed During The
Unidirectional Freezing of Water-Saturated Porous Mate-
rials, Proceedings International Conference on Low
Temperature Science, pp. 1401-1412, 1966.
- 5) 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.
- 6) Culley, R. W. : Effect of Freeze-Thaw Cycling on Stress-
Strain Characteristics and Volume Change of a Till Subject
to Repetitive Loading, Canadian Geotechnical Journal,
Vol. 8, No. 3, pp. 359-371, 1971.
- 7) 土の物理学～土質工学の基礎～土壌物理研究会，pp.
147-149, 森北出版.
- 8) Nixon, J. F. and Morgenstern, N. R. : The Residual Stress
in Thawing Soils, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 10,
No. 4, pp. 571-580, 1973.
- 9) 土質工学会編：土の凍結—その制御と応用—，土質基礎
工学ライブラリー 23, pp. 91-95, 1982.

- 10) 越後雅夫：解説熱力学の計算法，東京電機大学出版局.
- 11) 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.
- 12) 島昭治郎・建山和由・藤本直明：締固めた不飽和土の水浸時挙動の予測に関する研究，不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム，pp. 131-140, 1987.
- 13) Bishop, A. W. and Blight, G. E. : Some Aspects of Effective Stress in Saturated and Partly Saturated Soils, *Geotechnique*, Vol. 13, No. 3, pp. 177-197, 1986.
- 14) 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.
- 15) 小川正二・青山清道：凍結-融解を受けた土の強度回復，第8回土質工学研究発表会，pp. 88-92, 1973.
- 16) 福田 誠・小川正二・武内 恵・笹 洋一：凍上の発生機構と凍結-融解後の土の性質，第17回土質工学研究発表会，pp. 533-536, 1982.
- 17) 青山清道・小川正二・福田 誠：凍結-融解を受けた土の力学的特性，第34回土木学会年次学術講演会概要集，pp. 464-465, 1978.

(1990.1.18 受付)

VOLUME CHANGE AND STRENGTH PARAMETERS OF UNSATURATED COHESIVE SOILS SUBJECTED TO THREE DIMENSIONAL FREEZING AND THAWING

Shoji OGAWA, Tomoyoshi NISHIMURA and Tadashi WADA

The paper explains volume change and strength characteristics of unsaturated cohesive soil subjected to freezing and thawing. A series of freezing and thawing tests were carried out under a given confining stress in triaxial cell. In consequence, the following phenomena are shown ; 1) volume change of soil on freezing and/or thawing are affected by a degree of saturation and the magnitude of confining stress 2) decrease of shearing strength of soil subjected to freezing and thawing are also affected by water content 3) the cohesion of soil are decreased due to freezing and thawing, but angle of internal friction are not changed.