

LNG 地下貯蔵槽に関する基礎的研究 (第8報)

——氷の強度変形特性——

西林 清 茂 上野 孝 之
佐藤 哲

Study on Underground Storage Tank for Liquefied Natural Gas (Part 8)

——Strength and Deformation of Ice——

Kiyoshige Nishibayashi Takayuki Ueno
Tetsu Sato

Abstract

When the freezing is progressing in the ground, water is drawn to the freezing front and ice lenses are created. This is prominent in cohesive soil consisting of small grains. Ice lenses are not formed in sand because pore water simply freezes. The existence of ice which strengthens the binding force between soil particles is one of the influential factors related to strength and deformation of frozen soil. In this paper are described studies on the influence of temperature and strain rate on strength and deformation of ice by means of unconfined compression tests. The following are disclosed as results of the tests. (1) Strength increases with decrease in temperature and increase in strain rate in the range of -5 to -50°C and 1 to 0.005%/min. (2) An ice lens has anisotropy and the ratio of strength in the direction of advance of freezing (q_{fv}) to strength in the horizontal angle to the direction of advance (q_{fh}) is 1.5 to 4.0. (3) Strength of ice in concrete-like form is almost the same as (q_{fh}) under the conditions of the same temperature and same strain rate.

概 要

土中で凍結が進行する時、凍結面に水が吸い寄せられアイスレンズ（析出水）が層状に生成される。これは土の粒子が小さい粘性土で顕著であり、砂質土では間げき水が単に凍るだけで析出水は生成されない。また、土粒子間の結合力を強めている氷の存在は凍土の強度変形特性の支配的要因の一つである。ここでは析出水とコンクリート状氷（市販氷）の強度変形特性に与える温度、ひずみ速度などの影響を一軸圧縮試験により調べ、以下の結果を得た。(1) 温度 ($^{\circ}\text{C}$) $-5 \sim -50^{\circ}\text{C}$ 、ひずみ速度 ($\dot{\epsilon}$) $1 \sim 0.002\%/min$ の範囲で強度は温度が低くひずみ速度が速いほど大きい。(2) 析出水には強度に方向性があり、凍結進行方向に圧縮した時の強度 (q_{fv}) とそれに垂直に圧縮した時の強度 (q_{fh}) の比 q_{fv}/q_{fh} は $1.5 \sim 4.1$ である。(3) コンクリート状氷の強度は温度、ひずみ速度の条件が同じとき、析出水の q_{fh} にほぼ等しい。

1. まえがき

地盤凍結工法による凍土壁の造成、LNG 地下式貯蔵槽周辺に発生する凍土の他、寒冷地での土木工事に関連して凍土の研究が盛んになってきている。

土中で凍結がゆっくり進行する時、土の粒子が小さいほど凍結面に水が吸い寄せられアイスレンズ（析出水）が層状に生成される。この凍土は霜降り状凍土と呼ばれ、

主に粘性土が凍結する場合に多く見られる。砂質土では間げき水が凍るだけで析出氷晶は生成されない。このような凍土はコンクリート状凍土と呼ばれている。

著者らは前報で凍土の強度は未凍土の数倍から数百倍にもなるという結果を報告している。単純に考えれば凍土は土粒子間に存在する吸着水を除く自由水が氷に変化するだけであるから凍土の強度変形特性のもっとも支配的な要因は氷の存在であるといえる。

そこで凍土中の氷に着目し、析出水とコンクリート状氷の強度変形特性を明らかにすることを試みた。この報文では一軸圧縮試験によって得られた氷の強度変形特性に及ぼす温度、ひずみ速度、異方性の影響について述べる。

2. 試験方法

2.1. 供試体作成方法

試験した氷は析出水とコンクリート状氷（市販氷）の2種類である。

(1) 析出水

図-1 に析出水作成に用いた装置の模式図を示す¹⁾。

析出水は湿潤砂、粘土、蒸留水の順に入れた内径100mmの亚克力製モールドを-15°Cのプライン槽中に一定速度で沈降させて作成した。粘土は粉末のカオリンを蒸留水で練り返し、3.0kgf/cm²の圧力で再圧密したものである。

凍結が進行すると粘土中に細かい析出水が層状に発生し、霜降り状凍土ができる。凍結がさらに進行すると発生する析出水の大きさは徐々に大きくなり、最終的には粘土をほとんど含まない析出水が未凍土と霜降り状凍土の間に生成される。なお、この方法で作成する氷は温度条件によって粘土を混入したものも作成できる。そこで亚克力モールドの吊り下げ速度を2.0~5.0mm/hrに変化させて粘土含有率（氷に含まれる粘土粒子重量/氷の全重量×100%）が1~8%の氷を作成し供試体とした。

亚克力モールドから取り出した析出水は成長方向を軸として直径5cm、高さ10cmに成形して供試体とした。また成長方向に対して垂直方向を軸として径3.5cm、高さ7cmの円柱体を切り出して供試体とした。析出水は写真-1に示すように凍結進行方向に細いすじ状の模様が認められる。さらにカオリンを混入しない位置で氷の成長方向とこれに垂直方向の薄片を作成し、偏光顕微鏡で

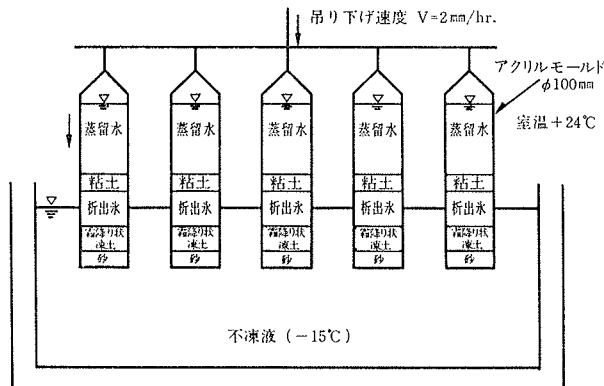


図-1 析出水作成装置

撮影したものをそれぞれ写真-2, 3に示す。写真-2の成長方向断面の縦方向の薄い連続した縞模様は、内眼で見た場合、虹のように見え、氷晶が成長方向に並んでいることがわかる。また写真-1で見られる縞状の模様は写真-2では細長い気泡であることがわかる。これらの観察から析出水は成長方向に細長く伸びた多角柱状の結晶の集合体であることがわかる。写真-3によれば1

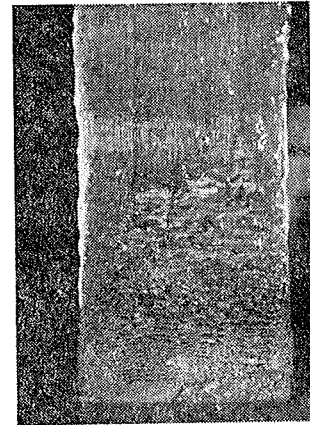


写真-1 析出水断面図

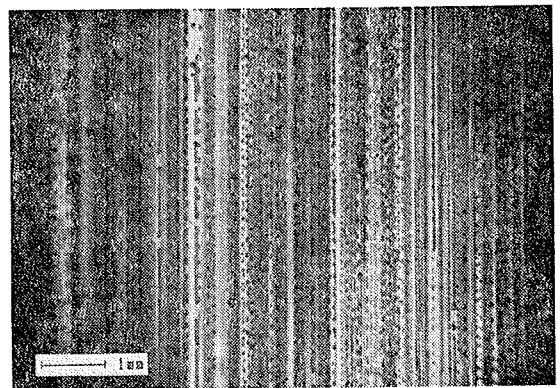


写真-2 氷の成長方向断面の結晶

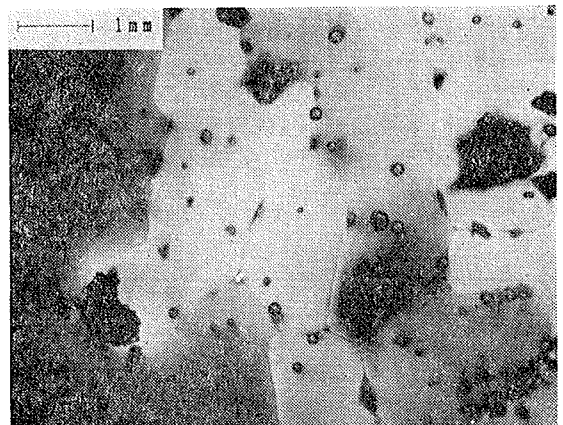
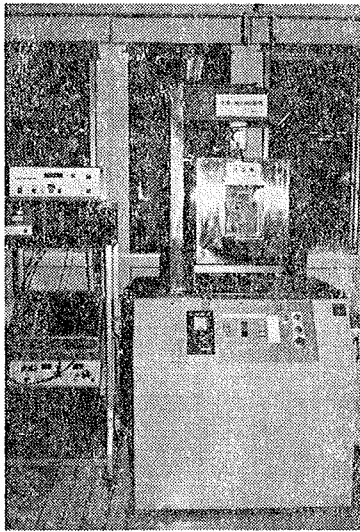


写真-3 氷の成長方向に垂直な断面の結晶

個の断面の大きさは不揃いで0.7~2.6mm程度であった。

(2) コンクリート状氷

コンクリート状氷は105×50×26cmの立方体の市販氷をブロック状に切り出し、径5cm、高さ10cmの円柱形に成形し供試体とした。コンクリート状氷は、偏光顕微鏡で観察した場合、明確な結晶が認められず析出氷のような異方性も見られなかった。



2.2. 一軸圧縮試験装置 写真-4 一軸圧縮試験装置

一軸圧縮試験装置は液体窒素を噴霧することにより常温から-120℃の範囲を±0.5℃の精度で制御できる低温槽と載荷能力が5ton、載荷速度が0.0015~1.0%/minまで任意に設定できる載荷装置から構成されている。応力とひずみはX-Yレコーダーに自記録できるシステムである。試験装置を写真-4に示す。

2.3. 試験条件

試験のパラメーターを温度、ひずみ速度とした。また粘土含有率の影響を調べるため、析出氷の粘土含有率が1~8%の供試体を成長方向に圧縮する試験を行なった。その時の条件は温度-5℃、ひずみ速度1.0%/min.とした。各氷に対する試験条件と試験本数を表-1に示す。

試験条件	ひずみ速度(%/min.)			
	1.0	0.1	0.01	0.002
試験温度(℃)	-5 -10 -30	-5 -10 -30	-5 -10 -30	-5 -10 -30
コンクリート状氷	3 3 3	3 3 3	3 3 3	3 3 3
析出氷	成長方向に圧縮 W=1~2%	5 4 5	5 4 4	5 5 5
	成長方向に垂直に圧縮 W=1~2%	3 3 3	3 3 3	2 2
	成長方向に圧縮 W=1~8%	24		

※W: 粘土含有率

表-1 各氷に対する試験条件と試験本数

3. 試験結果と考察

3.1. 応力~ひずみ曲線

試験中の圧縮応力σを次式で定義した。

$$\sigma = \frac{P}{A_0 \left(1 - \frac{\epsilon}{100}\right)} \quad \dots\dots\dots(1)$$

P: ひずみがεになった時に供試体に加えられる荷重

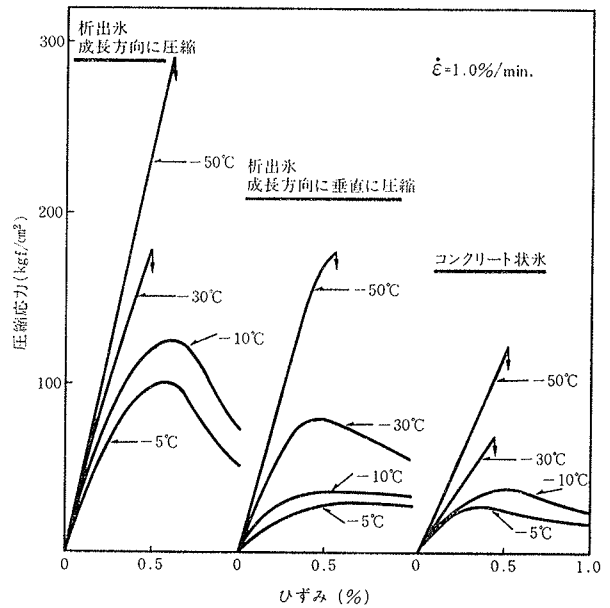


図-2 温度と圧縮応力~ひずみ曲線

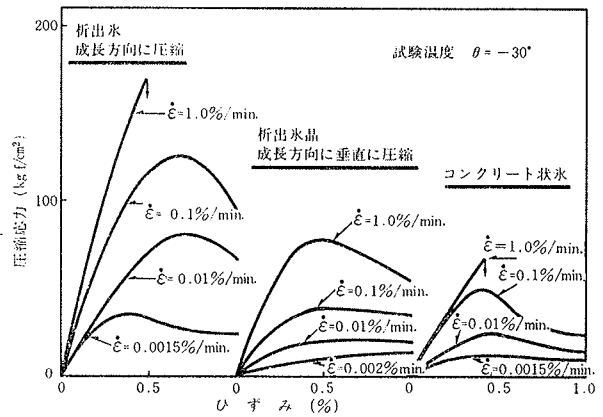


図-3 ひずみ速度と圧縮応力~ひずみ曲線

A₀: 圧縮する前の供試体の平均断面積

圧縮応力σとひずみεの関係を図-2, 3, 4に示した。図-2は、ひずみ速度を1%/minとし、温度を変化させた条件のもの

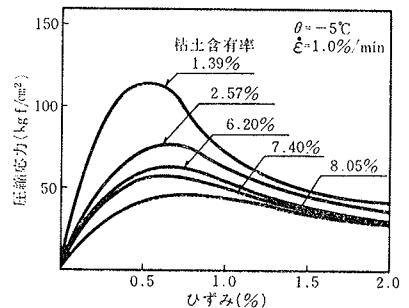


図-4 粘土含有率と圧縮応力~ひずみ曲線

であるが、温度が高くなるにつれて脆性的破壊から延性的破壊になってゆくのわかる。析出氷には異方性があり、成長方向の方がこれに垂直な方向のものに比べ、より脆性的な破壊を示している。また成長方向に垂直な析出氷とコンクリート状氷を比較した場合、-30℃以下で前者の方がより延性的な破壊を示している。図-3に温度が-30℃でひずみ速度を変化させた時の圧縮応力~ひずみ曲線の一例を示す。温度を変化させた場合と同様、

ひずみ速度が 1.0 から 0.002%/min. へ遅くなるにつれて脆性的破壊から延性的破壊になるのがわかる。図-4 には粘土含有率を変化させた時の圧縮応力～ひずみ曲線を示す。粘土含有率が小さくなるにつれて明瞭なピークが現れ破壊ひずみは小さくなる。

温度、ひずみ速度、粘土含有率が破壊の形態に影響を与える原因は以下のように考えられている²⁾。ひずみ速度が遅くなると結晶粒内にすべりが起り塑性流動を起す。温度が高くなると流動が速くなり塑性流動を促す。また粘土粒子は不純物として結晶粒界に存在し、結晶粒の境界で生じる粒界すべりを起しやすくする。

3.2. 強度について

圧縮応力～ひずみ曲線上での最大圧縮応力を q_f と定義した。

図-5 にひずみ速度が 1%/min. の時の強度と温度の関係を示す。析出氷の場合、成長方向に圧縮した時の強度(q_{fv})は成長方向に垂直に圧縮した時の強度(q_{fh})に比べ 1.5~3.6 倍であった。(ひずみ速度 1.0 から 0.002%/min. の間で比較した場合は 1.5~4.1 倍) また、各氷の強度は温度の低下に伴い増加し、特に -30°C 以下で急激に増加する。

凍土にも同じ傾向があり^{3),4)}、その原因が土粒子間に存在する氷の強度によるものであることがわかる。また凍土と同様に 0°C から -50°C の間では $q_f = a + b|\theta| + c|\theta|^2 + d|\theta|^3$ が適用できる。図中に全周方向より凍結した含水比 35% のカオリン粘土の強度を載せたが、この値はコンクリート状氷の強度とよく一致している。この結果と、カオリン粘土凍土の強度が含水比 35~118% の範囲で変化しないこと^{3),4)} から以下のことが推測される。(1) 全周より急速凍結したカオリン粘土の土粒子間に存在する氷はコンクリート状氷と同じであるか、またはそれと同じ強度変形特性を持つものである。(2) 全周より急速凍結したカオリン粘土は含水比が無限に大きくなっても強度は変化しない。

図-6 に試験温度 -30°C のときの強度とひずみ速度の関係を両対数紙上に示した。それぞれ図上で直線関係にあり凍結土の場合^{3),4)} と同様 $q_f = a\dot{\epsilon}^b$ の近似式が適用できる。析出氷を成長方向に垂直に圧縮した時の結果はコンクリート状氷の結果と同じであった。

図-7 に温度 -5°C、ひずみ速度 1%/min. で種々の粘土含有率を持つ析出氷を成長方向に圧縮した時の強度を示す。粘土含有率は強度に大きな影響を与え、粘土含有率が小さくなるにつれて強度は大きくなる。この図より純粋な析出氷の強度 ($q + r_v$) は約 140 kgf/cm² と推定できるが、この値は高志らの報告¹⁾ と一致する。

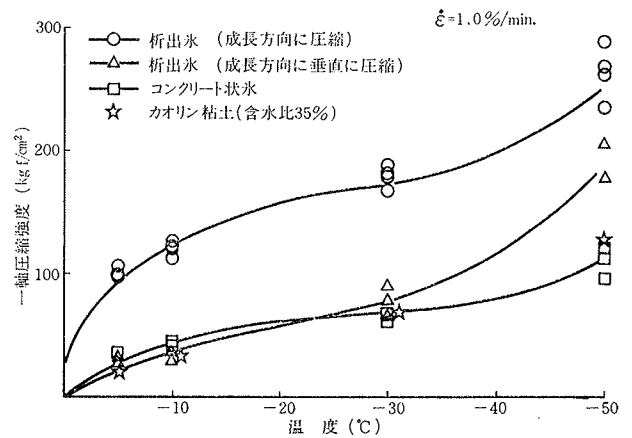


図-5 強度～温度

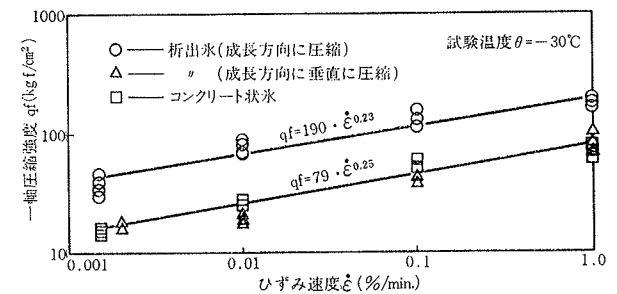


図-6 強度～ひずみ速度

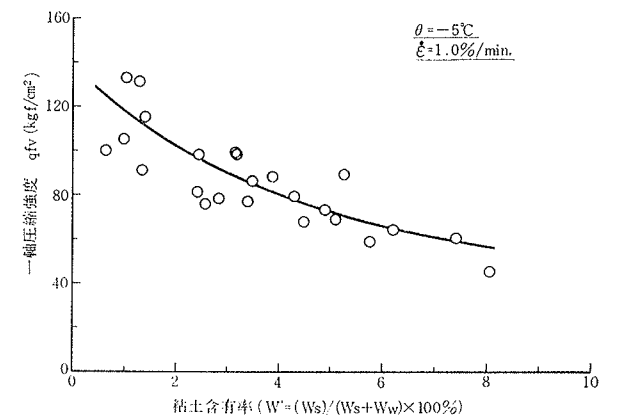


図-7 強度～粘土含有率

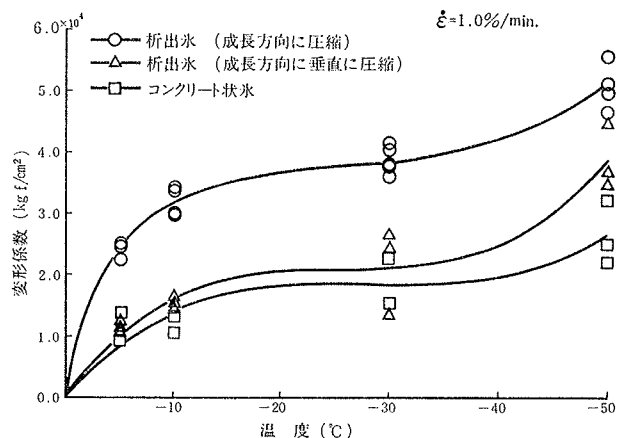


図-8 変形係数～温度

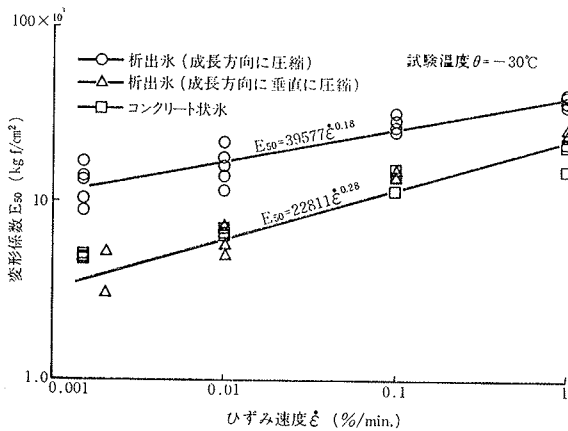


図-9 変形係数～ひずみ速度

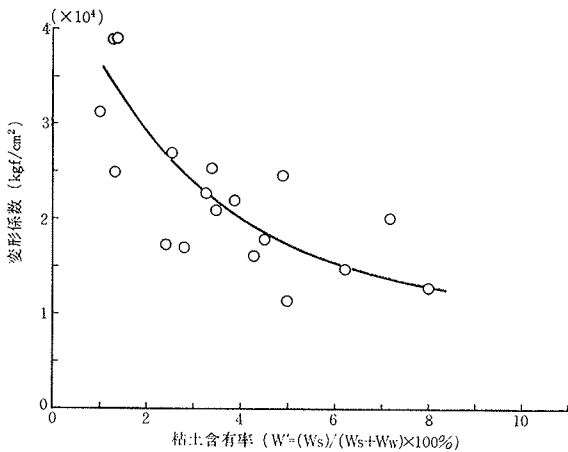


図-10 変形係数～粘土含有率

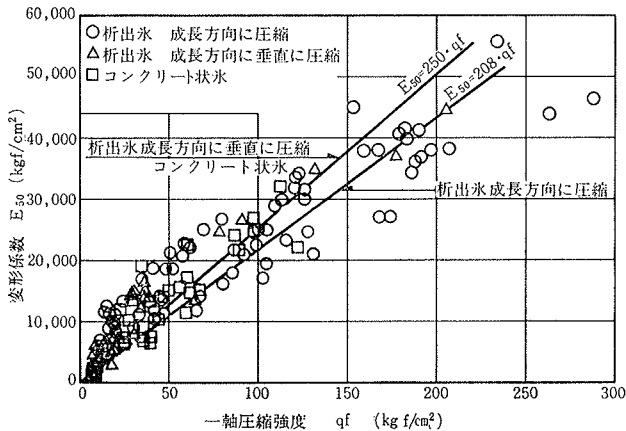


図-11 強度～変形係数

3.3. 変形係数について

変形係数 E_{50} を次式により定義した。

$$E_{50} = 1/2q_f / (\text{応力が } 1/2q_f \text{ の時のひずみ}) \dots\dots(2)$$

図-8 に変形係数と温度の関係の一例(ひずみ速度 1.0%/min.) を示す。ばらつきは大きいが強度と温度の関係と同様な傾向があり変形係数は温度の低下とともに

増加し、またその増加割合は -30°C と -50°C の間で大きくなる。

図-9 は試験温度 -30°C における各氷の変形係数とひずみ速度の関係を両対数紙上に示したもので $E_{50} = c\dot{\epsilon}^d$ の関係がある。析出氷を成長方向に垂直に圧縮した時の変形係数はコンクリート状氷の変形係数とほぼ同じであった。

図-10 は析出氷を成長方向に圧縮した時の粘土含有率と変形係数の関係である。粘土含有率と強度の関係と同様、粘土含有率が増加すると変形係数は減少する。

3.4. 強度と変形係数の相関性について

図-11 に各氷の強度と変形係数の関係を示す。これには温度、ひずみ速度を変化させて試験した結果をすべて図中に示した。凍土では変形係数と強度の間に直線の関係がある^{3),4)} が、ここでは各氷とも強度の増加に伴い変形係数の増加割合はわずかに減少する傾向が得られた。これらをあえて直線で近似した場合コンクリート状氷の変形係数と強度の比は析出氷の成長方向に垂直に圧縮したときの変形係数と強度の比に一致した。

あとがき

ここでは凍結土の強度変形特性を把握する何らかの手がかりが得られることを期待して、コンクリート状氷、析出氷の強度変形特性に対する温度、ひずみ速度、異方性の影響を調べた。結果として氷の強度変形特性は温度、ひずみ速度、異方性の影響を強く受け、またこういった氷そのものが持つ特性はコンクリート状凍土の強度変形特性を支配する大きな要因であることが判明した。今後は凍上した凍土との関連性を把握することが課題となるう。

なお析出氷の偏光顕微鏡写真の撮影にあたっては当技術研究所 化学研究室の守屋正裕職員の尽力に依るところが多い。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 生頼, 高志, 他: 土の凍結に伴う析出氷晶の一軸圧縮強度, 雪氷 Vol. 43, No. 2, (1981), pp. 83~96
- 2) 小川, 黒岩: 純水及び KCl を含む多結晶氷の破壊強度, 低温科学, 物理編, Vol. 36, (1978), pp. 1~9
- 3) 西林, 上野, 佐藤: LNG 地下貯蔵槽に関する研究, (第7報), 大林組技術研究所報, No. 31, (1985), pp. 109~113
- 4) 西林, 上野, 佐藤: 粘土凍土の強度変形特性について, 土木学会第40回年次学術講演会講演概要集, 第3部, (昭和60. 9), pp. 813~814