

# 土の凍上性評価手法に関する研究

石 崎 武 志

## 1. はじめに

寒冷地にある石造文化財、土構造物、歴史的建造物の土壁などは、冬季に凍結、融解の影響を受けて劣化する場合がある。これは、多孔質材料が凍結する場合に、材料中にアイスレンズと呼ばれる氷の層ができて、粒子間の結合を壊すために起こる。このアイスレンズの出来安さを土の凍上性といい、粘土質のものや空隙の小さい材料は、凍上性が大きく、砂分を多く含むものや空隙の大きい材料は凍上性が小さいことが知られている。ここでは、土の凍上性を評価するための凍上試験法に関して、従来から用いられている凍結条件の異なる試験方法の比較試験を行った。試験結果から、凍結条件が異なる場合に於いても、凍結面への吸水速度と凍土中の温度勾配との間には比例関係があることが確認された。また、本研究結果から、凍上試験を精度良く、簡便に行う方法についての考察をした。

土が凍結する場合、凍上現象により地盤が膨張する。寒冷地に於ける道路の建設、地盤凍結工法などで、この凍上量を正確に予測することは重要である。この凍上量予測のために室内凍上試験が行われる。この凍上試験法として、日本では、一端の温度を試料の凍結温度（0℃）にし、他端を一定速度で冷却させ凍結させる方法が高志ら（1974）により提案された。試料の凍結膨張率（ $\xi$ ）と凍結速度（U）の間は下記の経験式によって、整理される。凍結膨張率は、単位体積当たりの膨張量である。

$$\xi = \xi_0 + \frac{\sigma_0}{\sigma} \left( 1 + \sqrt{\frac{U_0}{U}} \right) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\sigma$ は有効応力、 $\xi_0$ 、 $\sigma_0$ 、 $U_0$ は、それぞれ、試料の固有の定数である。

また、海外では、両端面を一定速度で低下させるか両端面一定温度の条件で試料を凍結させ、吸水速度(dw/dt)とフローズンプリンジと呼ばれる部分凍結領域中の温度勾配 (grad(Ti)) の関係 (2式) を求める方法が提案された。(Konrad, 1980)

$$\frac{dw}{dt} = SP_0 \exp(-aP) \text{grad}(T_i) \dots\dots\dots (2)$$

ここで、S P<sub>0</sub>はsegregational potential と呼ばれる試料固有の定数、Pは上載荷重、aは、試料固有の定数である。

ここで、前者の実験方法においては、一端の温度を一定にし、他端の温度を一定速度で低下させることにより、凍結を進めるため、凍結速度と温度勾配は独立な変数ではない。高志ら（1974）は、凍結速度（U）を一定にする条件として、試料の下部冷却面の温度（ $\theta_1$ ）と、上部冷却面の温度（ $\theta_2$ ）を熱解析から以下のように求めた。

$$\theta_1 = -\frac{L\gamma_1 \kappa_1}{k_1} \left( \exp(U^2 t / \kappa_1) - 1 \right) \dots\dots\dots (3)$$

$$\theta_2 = 0 \dots\dots\dots (4)$$

ここで $L$ は凍結潜熱、 $\gamma_1$ は凍土の密度、 $\kappa_1$ は凍土の熱拡散係数、 $t$ は経過時間、 $k_1$ は凍土の熱伝導率である。さらに、(3)式は、近似的に以下のように展開される。

$$\theta_1 = -\frac{L\gamma_1 U^2}{k_1} t \dots\dots\dots (5)$$

(5)式は変形すると(6)式になる。

$$\frac{\theta_1}{Ut} = -\frac{L\gamma_1 U}{k_1} (= \alpha_1) \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $\theta_1$ は冷却面温度、 $Ut$ は凍土長となるため、 $\theta_1/Ut$ は、近似的に凍土中の温度勾配( $\alpha_1$ )となる。すなわち、前者の試験では、近似的に凍土部分の温度勾配と凍結速度は比例することになる。このように、温度勾配と凍結速度が従属関係にあつては、前者の試験法と後者の試験法との比較をすることは難しいので、凍結速度、温度勾配を独立に制御できる実験方法(石崎ら、1988)により実験を行い比較したので以下に報告する。

## 2. 実験方法と試料

実験装置全体の写真を図1に、また試料容器部分の写真を図2に示す。試料は、直径6 cm、高さ5 cmの円柱状試料である。試料容器は、アクリル製で、厚さ2 cmである。試料容器には、1 cmごとに、サーミスター温度センサーを取り付け、実験中、試料中の温度分布を測定した。温度測定には、テクノセブン社製、サーミスタ高精度温度計(D642, 精度 $\pm 0.02^\circ\text{C}$ 、分解能 $0.01^\circ\text{C}$ )を用いた。試料上下面は、サーモモジュールで温度制御を行った。試料の凍上量は、変位計(小野測器社製)で $0.01\text{mm}$ の精度で測定した。また、吸水量は、差圧計(バリダイン社製)で測定した。試料容器部分には、厚さ3 cmのウレタンフォームを巻き断熱した。また、

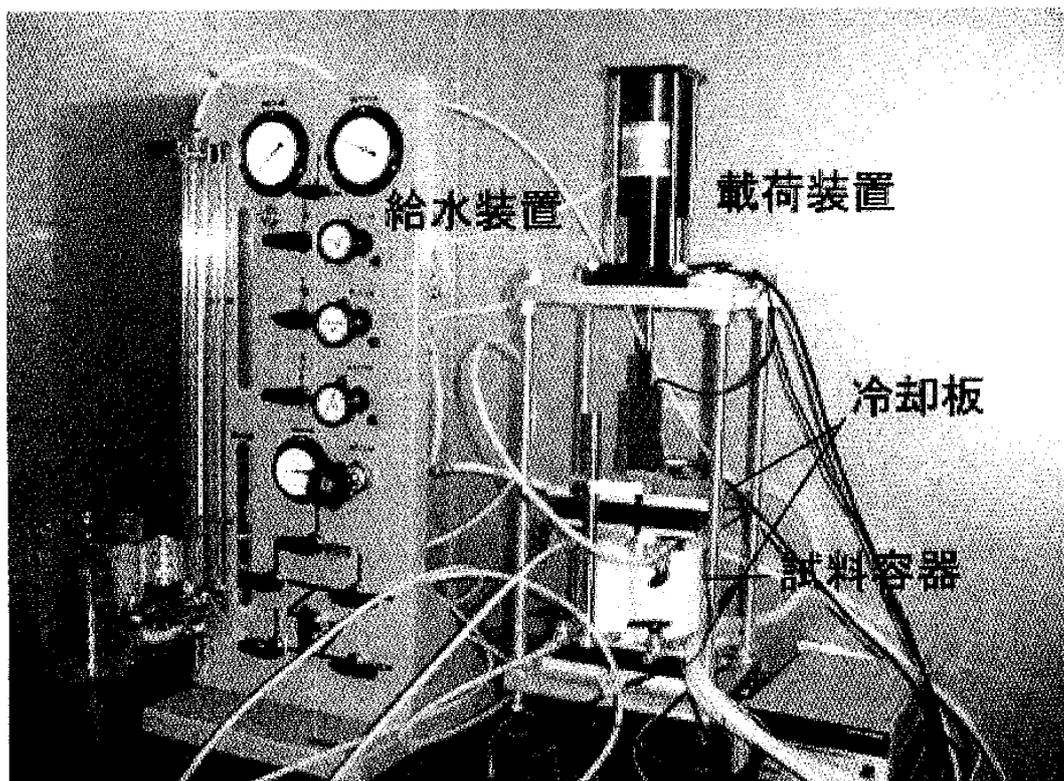


図1 土試料の凍結融解試験装置

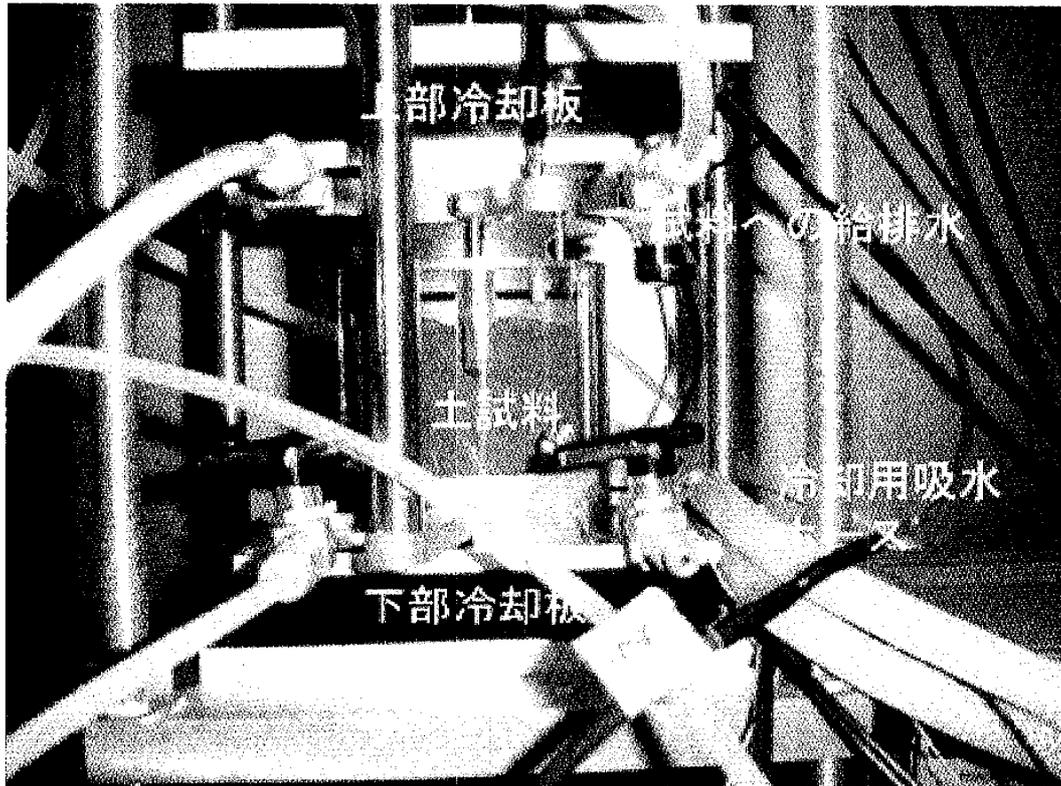


図2 試料容器部分の写真（土試料は下から上方へ凍結させる）

表1. ケース1の温度条件

Aシリーズ(上載荷重が 0.12MPa)								
実験番号	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7	A-8
上面温度	0℃	0℃	0℃	0℃	0℃	0℃	0℃	0℃
下面温度	-0.01t	-0.025t	-0.05t	-0.1t	-0.2t	-0.4t	-0.8t	-1.6t

また、上載荷重が 0.24MPa で温度条件の同じものをBシリーズとした。(B1~B8 まで)

表2. ケース2の温度条件（上載荷重は 0.12MPa）

Cシリーズ				
実験番号	C-1	C-2	C-3	C-4
上面温度	10-0.2t	10-0.4t	10-0.8t	10-1.6t
下面温度	-0.2t	-0.4t	-0.8t	-1.6t
Dシリーズ				
実験番号	D-1	D-2	D-3	D-4
上面温度	5-0.1t	5-0.2t	5-0.4t	5-0.8t
下面温度	-0.1	-0.2t	-0.4t	-0.8t
Eシリーズ				
実験番号	E-1	E-2	E-3	E-4
上面温度	2.5-0.05t	2.5-0.1t	2.5-0.2t	2.5-0.4t
下面温度	-0.05	-0.1t	-0.2t	-0.4t
Fシリーズ				
実験番号	F-1	F-2	F-3	F-4
上面温度	1.25-0.025t	1.25-0.05t	1.25-0.1t	1.25-0.2t
下面温度	-0.025	-0.05t	-0.1t	-0.2t

試料中への熱の移動が少なくなるように、実験装置全体を0.5℃に保った低温室に入れた。また、この装置において試料への水の供給は、試料上部から行い、間隙水圧を加えられる様になっている。また、上載荷重はベローフラムシリンダーで加えられる様になっている。本実験では、上載荷重による試料上面に加わる垂直応力を0.12MPaと0.24MPaに設定して実験を行った。以降、表記を簡単にするため、この値を上載荷重という。試料端面の温度変化は、一端の温度を試料の凍結温度に設定して、他端面の温度を一定速度で降下させる場合（ケース1）と試料の両端面の温度を一定速度で降下させる場合（ケース2）の2ケースで行った。試料は、両方のケースで下方より上方へ凍結させた。試料の初期温度は、ケース1では、試料全体の温度が試料の凍結温度（ここでは0℃に設定）になるようにした。またケース2では、試料の初期温度が試料上面の温度に等しくなるように設定した。実験は、まず、試料下面の温度を急激に下げ、潜熱の発生による温度上昇が見られ試料の凍結を確認してから、試料上下面の温度をプログラム制御した。ケース1では、試料上面の温度は、0℃に一定にし、試料下面の温度は、一定速度で低下させた。ケース2では、試料上下面の温度を一定速度で低下させ、一定速度、一定の温度勾配のもとで実験を行った。実験の温度条件を、表1と表2に示す。ここで、-0.1tと示したのは、1時間に0.1℃の速度で温度を低下させていくことを示している。

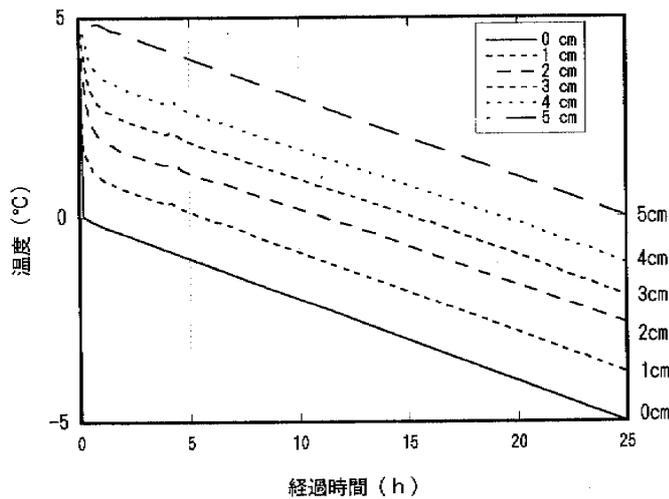


図3 土試料中の温度変化  
(実験D-2、図右の数字は、下部冷却面からの距離)

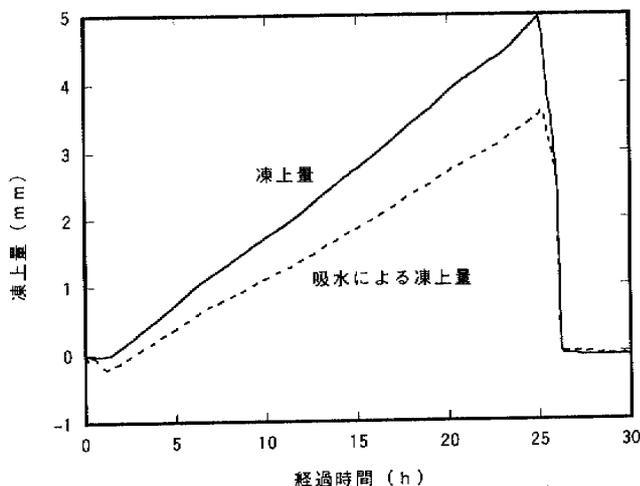


図4 土の凍土量および吸水による凍土量の時間変化  
(実験D-2)

実験試料として、過圧密粘土試料を用いた。土試料の飽和状態での密度は、1.97g/cm<sup>3</sup>、乾燥密度は1.47 g/cm<sup>3</sup>、体積含水率は49.9%、重量含水比は33.9%、比表面積は28.2m<sup>2</sup>/gである。

実験結果の一例を図3、図4に示す。図3は、実験D-2の両端面と試料中の温度変化を示したものである。試料両端面の温度と試料中の温度が一定速度で低下しているのが見られる。図4には、実験D-2の凍上量の時間変化、および吸水による凍上量の時間変化を示している。吸水による凍上量は、吸水量を試料断面積で割り、相変化による体積膨張部分を換算したものである。凍上量と吸水による凍上量の差は、土中に含まれていた水がその場で凍結することによる体積膨張分である。凍上量および、吸水による凍上量が時間と共にほぼ直線的に増加しているのが分かる。また、実験終了後の試料の観察により試料中にはほぼ等間隔にアイスレンズの成長が見られた。ここでは、凍上速度、吸水速度、試料内温度分布の値は、5分おきに測定し、コンピューターに集録した。

### 3. 実験結果

#### 3-1 ケース1の実験結果

##### 3-1-1 凍結速度と凍土中温度勾配の関係

実験結果から、凍上を開始する温度が、上載荷重が0.12MPaの時は、約 $-0.2^{\circ}\text{C}$ 、上載荷重が0.24MPaの時は、約 $-0.3^{\circ}\text{C}$ であったので、凍結面の位置は、試料中の温度が、これらの温度より下がった時とした。このようにして求めた凍結面位置の時間変化を図5に示す。凍結面位置が3 cm程度までは、ほぼ直線的に凍結深さが増加していくが、それ以降は、凍結速度は遅くなる。これは、実際の試料の凍結温度が、 $0^{\circ}\text{C}$ より低いことと、周囲からの若干の熱流があるためと考えられる。この様にして求めたケース1での凍結速度、凍土中の温度勾配を表3に示す。そこで、ここでは凍結線がほぼ試料中心部を通過した時の結果を用いることにした。また、凍結速度と凍土中の温度勾配の関係を図6に示す。上載荷重が0.12MPa, 0.24MPaの両方の条件で、凍結速度の大きい部分では、試料の凍結速度が凍土中の温度勾配とほぼ比例関係にあることが分かる。これは、(6)式の近似式に一致する。すなわち、凍結面の位置が試料中央部に達するまでは、十分に、高志らの近似式が成り立っていることを示している。ただし、下部冷却面の温度低下速度が $0.01^{\circ}\text{C}/\text{h}$  (A-1,B-1) や、 $0.025^{\circ}\text{C}/\text{h}$  (A-2,B-2) の条件（それぞれ、凍結速度が $0.5\text{ mm/h}$ 、 $1\text{ mm/h}$ に対応する）では、(6)式の比例関係から、ずれてくることが分かる。この部分の結果の評価については、考察の部分で述べる。

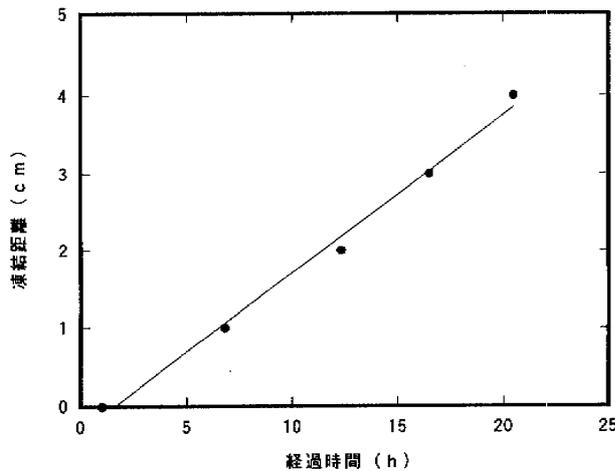


図5 凍結面位置の時間変化 (実験D-2)

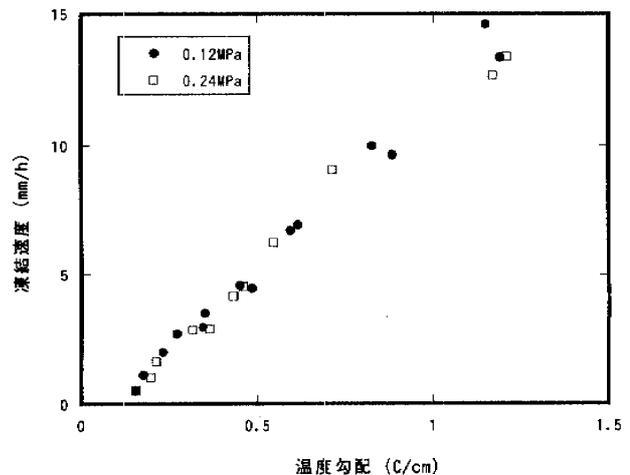


図6 凍結速度と凍土中の温度勾配の関係 (ケース1、A、Bシリーズ)

表3 ケース1の温度勾配、凍結速度

Aシリーズ(上載荷重が0.12MPa)								
実験番号	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7	A-8
温度勾配( $^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ )	0.22	0.26	0.27	0.35	0.45	0.59	0.89	1.15
凍結速度( $\text{mm}/\text{h}$ )	0.51	1.11	2.07	2.93	4.57	6.73	9.66	14.6
Bシリーズ(上載荷重が0.24MPa)								
実験番号	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	B-6	B-7	B-8
温度勾配( $^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ )	0.16	0.20	0.21	0.37	0.46	0.55	0.71	1.21
凍結速度( $\text{mm}/\text{h}$ )	0.52	0.99	1.62	2.90	4.54	6.25	9.08	13.4

### 3-1-2 吸水による凍上速度と凍土中温度勾配の関係

吸水による凍上速度は、吸水量を試料断面積で割り、その値に、相変化による体積膨張分(1.092倍)を考慮し求めたものである。吸水速度は、時間と共に若干変化するが、ここでは、凍結面が試料中央部を通過する時間の平均値を求めた。具体的には、凍結面が2 cmから3 cmを通過する際の、吸水速度の平均値を最小二乗法により求めたものである。凍土中の温度勾配は、凍結面が試料中央部を通過する際の値を求めた。また、この様なデータを用いることによって、未凍土部分の長が一定の場合の測定結果を比較することができ、実験による未凍土部分の動水抵抗の違いによる影響を排除することができる。AシリーズとBシリーズの結果を図7に示す。吸水による凍上速度は、凍土中の温度勾配が大きくなるにつれて、ほぼ直線的に大きくなっている。また、Bシリーズの吸水による凍上速度が、Aシリーズのものより小さくなっているのは、Bシリーズの方の荷重が大きいためである。

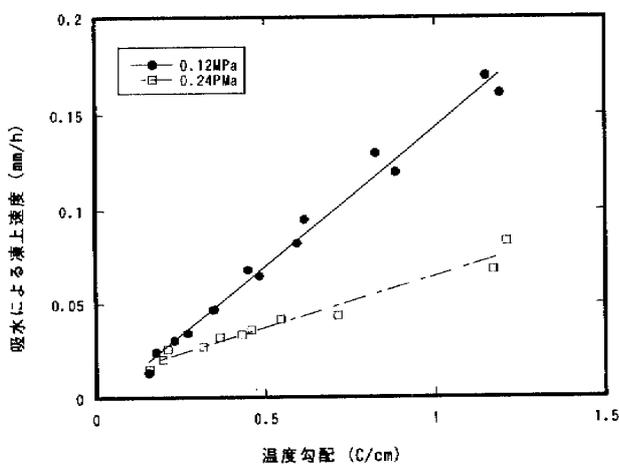


図7 吸水による凍上速度と凍土内温度勾配の関係  
(ケース1, A, Bシリーズ)

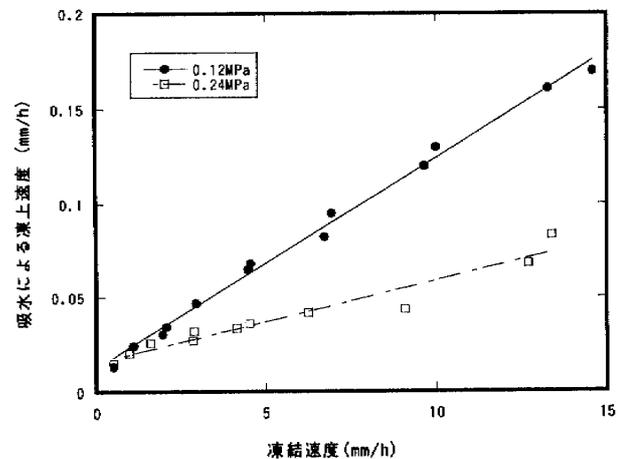


図8 吸水による凍上速度と凍結速度の関係  
(ケース1, A, Bシリーズ)

### 3-1-3 吸水による凍上速度と凍結速度の関係

ここで、凍結速度は、凍上速度の測定方法と同様に、凍結面が試料中央部を通る時の平均値により求めた。図8に、AシリーズとBシリーズの吸水による凍上速度と、凍結速度の関係を示す。吸水による凍上速度は、凍結速度が速くなるにつれて、ほぼ直線的に増加している。これは、凍結速度と凍土中の温度勾配が、図6の様にほぼ比例関係にあることと対応している。

### 3-1-4 凍上速度と凍土中の温度勾配の関係

凍上速度と凍土中の温度勾配の関係を図9に示す。凍上速度は、凍土中の温度勾配が大きくなるにつれてほぼ直線的に増加した。凍上速度は、吸水による凍上速度より大きくなっているが、これは、凍上速度は、試料中に含まれる水の凍結膨張分だけ、吸水による凍上速度より大きくなるためである。

### 3-1-5 凍上速度と凍結速度の関係

凍上速度と凍土中の温度勾配の関係を図10に示す。凍上速度は、凍結速度が大きくなるにつれて、ほぼ直線的に増加した。

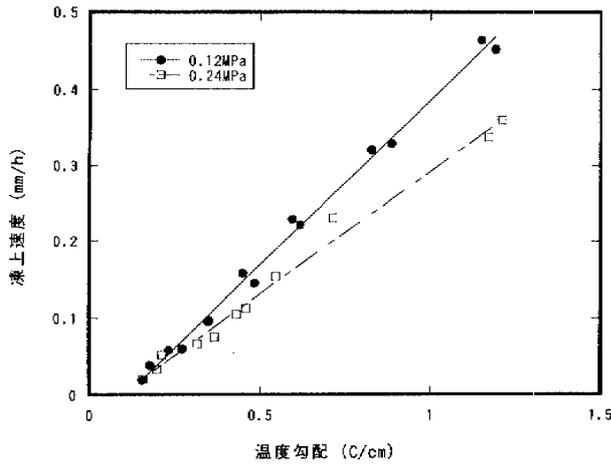


図9 凍上速度と凍土中の温度勾配の関係  
(ケース1、A、Bシリーズ)

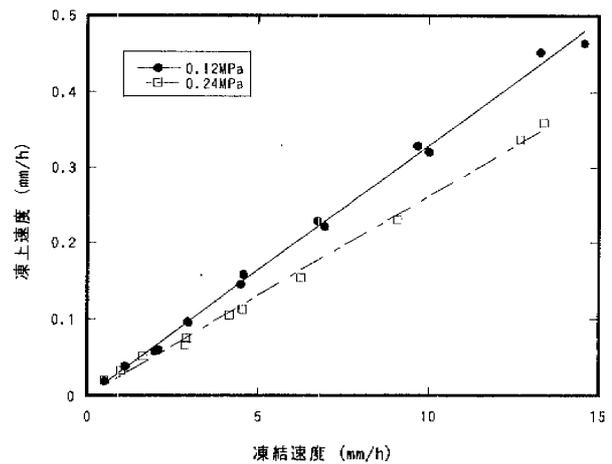


図10 凍上速度と凍結速度の関係  
(ケース1、A、Bシリーズ)

3-1-6 凍結膨張率と凍結速度の関係

凍結膨張率は、単位長さが凍結する際の凍上量である。高志ら(1974)は、凍結膨張量は、実験終了後、凍土部分の温度を-10℃まで下げ、凍土部分の温度条件を同じにして凍上量を求め、それを初期試料長で割ることにより求めている。ここでは、凍結膨張量は、試料中央部を凍結面が横切った時の、凍上速度 (dh/dt) と凍結速度 (U) の比により下式で求めた。

$$\xi = \frac{dh}{dx} = \frac{dh}{dt} / \frac{dx}{dt} = \frac{dh}{dt} / U \dots\dots\dots (7)$$

このようにして求めた凍結膨張率 (ξ) と凍結速度 (U) の関係を図11に示す。凍結速度が、3 mm/h以上では、凍結膨張率は、凍結速度によらずほぼ一定の値を示した。しかし、これ以下の凍結速度では、凍結膨張率が、凍結速度が小さくなるにつれて大きくなる傾向が見られた。この結果は、凍結速度が小さくなるにつれて、(6)式で見られるように、比例関係を示す直線より、凍結速度が小さくなっていることに対応している。また、凍結膨張率は、凍結速度が、0.5mm/h ~ 14.6mm/hと広い範囲で、ケースA (0.12MPa) では、2.5 ~ 3.5%の範囲、ケースB

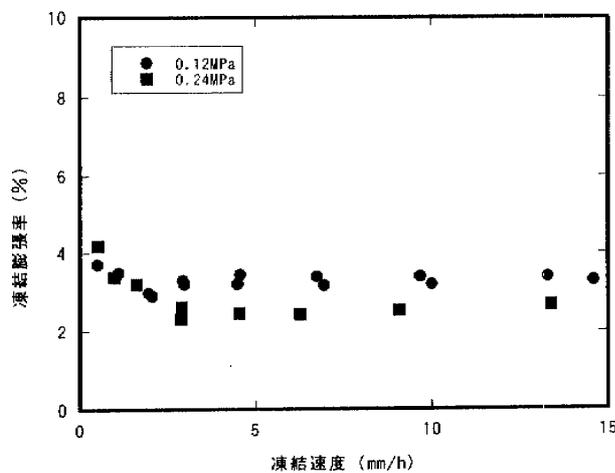


図11 凍結膨張率と凍結速度の関係  
(ケース1、A、Bシリーズ、凍結膨張率は、7式より計算により求めた)

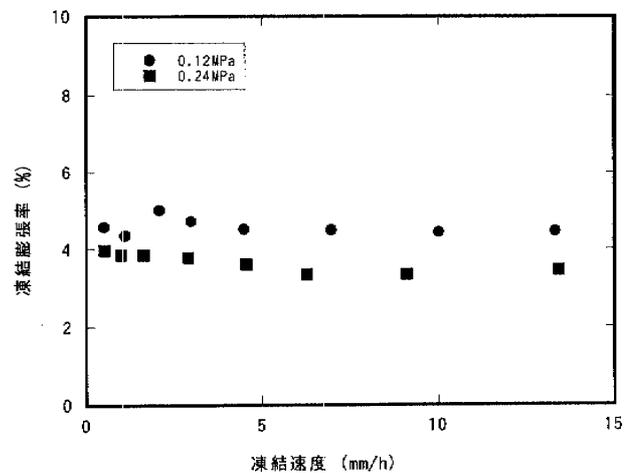


図12 凍結膨張率と凍結速度の関係  
(ケース1、A、Bシリーズ、凍結膨張率は、試料面端面を-0.5℃、-10℃に設定し、完全に凍結させて求めた)

(0.24MPa) では、2.3 ~ 4.2% の範囲内であり、凍結速度の変化による凍結膨張率の変化は小さかった。

次に、凍結膨張率を従来の方法で求めた結果を以下に示す。ここでは、試料上面温度を 0℃ に一定に保ったため、凍結は完了しない。そこで、凍結完了時間を、式 (5) に平均の凍結速度 (U) を代入して求め、試料上面を -0.5℃、試料下面を -10℃ に一定にし 3 時間保ったときの最大凍上量から、式 (7) より凍結膨張率を求めた。この様にして求めた凍結膨張率は、図 11 の値より、凍土中の不凍水が、温度低下により凍結する際の体積膨張分だけ大きくなる。これを、図 12 に示す。この結果からは、凍結速度が遅いときの、凍結膨張率の顕著な増加が見られない。これらの結果から、図 11 において、凍結速度が小さいときに、凍結膨張率が増加するのは、(6) 式の関係より、凍結速度が小さい側にシフトする事が主な原因と考えられるが、詳細は今後の課題である。

### 3-2 ケース 2 の実験結果

#### 3-2-1 凍結速度と凍土中の温度勾配

この実験は、両端面の温度を一定速度で降下させる方法であるので、凍土中の温度勾配と凍結速度をそれぞれの実験で独立に設定することができる。C シリーズ、D シリーズ、E シリーズ、F シリーズの実験での凍土中の温度勾配、凍結速度を表 4 に示す。

表 4 ケース 2 の温度勾配、凍結速度 (上載荷重は 0.12MPa)

C シリーズ				
実験番号	C-1	C-2	C-3	C-4
温度勾配(°C/cm)	1.86	1.99	2.56	2.98
凍結速度(mm/h)	2.50	4.50	7.60	12.2
D シリーズ				
実験番号	D-1	D-2	D-3	D-4
温度勾配(°C/cm)	0.95	1.13	1.21	1.36
凍結速度(mm/h)	1.28	2.28	3.64	6.88
E シリーズ				
実験番号	E-1	E-2	E-3	E-4
温度勾配(°C/cm)	0.63	0.67	0.65	0.77
凍結速度(mm/h)	1.06	2.06	3.52	8.60
F シリーズ				
実験番号	F-1	F-2	F-3	F-4
温度勾配(°C/cm)	0.37	0.33	0.34	0.38
凍結速度(mm/h)	0.41	0.61	2.76	4.8

#### 3-2-2 吸水による凍上速度と凍土中温度勾配の関係

吸水による凍上速度と凍土中の温度勾配の関係を図 13 に示す。吸水による凍上速度は、凍土中の温度勾配が大きくなるにつれてほぼ直線的に増加した。また、それぞれの凍土中の温度勾配で、ばらつきがある。ここでは、同じ凍土中の温度勾配でも、凍結速度が速くなるにつれて、吸水による凍上速度も大きくなることに対応している。

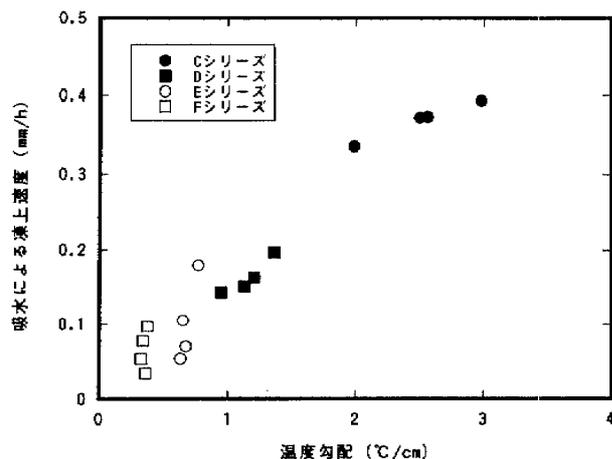


図13 吸水による凍上速度と凍土内温度勾配の関係  
(ケース2、C、D、E、Fシリーズ)

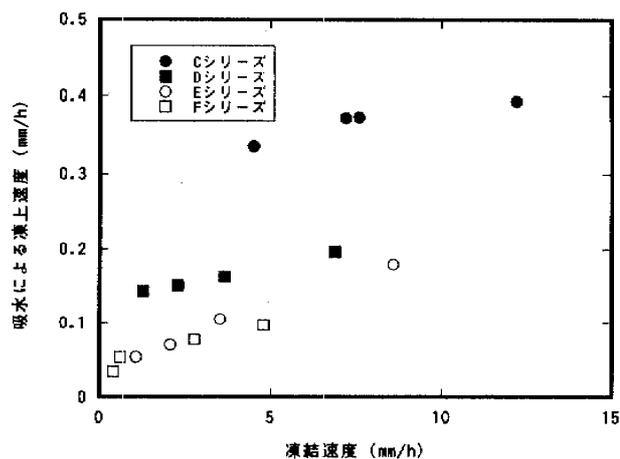


図14 吸水による凍上速度と凍結速度の関係  
(ケース2、C、D、E、Fシリーズ)

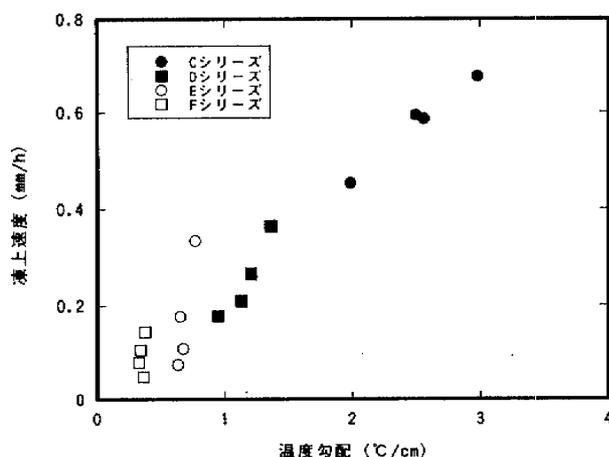


図15 凍上速度と凍土内温度勾配の関係  
(ケース2、C、D、E、Fシリーズ)

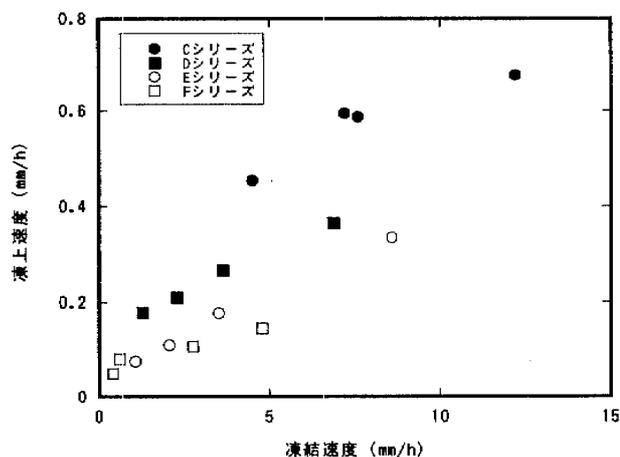


図16 凍結速度と凍上速度の関係  
(ケース2、C、D、E、Fシリーズ)

### 3-2-3 吸水による凍上速度と凍結速度の関係

吸水による凍上速度と凍結速度の関係を図14に示す。吸水による凍上速度は、同じ温度勾配の場合、凍結速度が大きくなるにつれて直線的に増加しているのが分かる。しかし、凍土中の温度勾配が異なる場合は、吸水による凍上速度も大きく異なり、凍結速度だけでは、吸水による凍上速度を表すことができないことは明らかである。

### 3-2-4 凍上速度と凍土中温度勾配の関係

凍上速度と凍土内温度勾配の関係を図15に示す。凍上速度は、凍土中の温度勾配が大きくなるにつれてほぼ直線的に増加した。また、それぞれの凍土中の温度勾配で、ばらつきがある。ここでは、同じ凍土中の温度勾配でも、凍結速度が速くなるにつれて、図13と同様に凍上速度も大きくなっている。この変化は、図13より大きくなっているが、これは、凍結速度の違いにより、試料中の水の凍結による膨張速度が大きく異なるためである。

### 3-2-5 凍上速度と凍結速度の関係

凍上速度と凍結速度の関係を図16に示す。凍上速度は、同じ温度勾配の場合、凍結速度が大きくなるにつれてほぼ直線的に増加した。しかし、凍土中の温度勾配が異なる場合は、凍上速

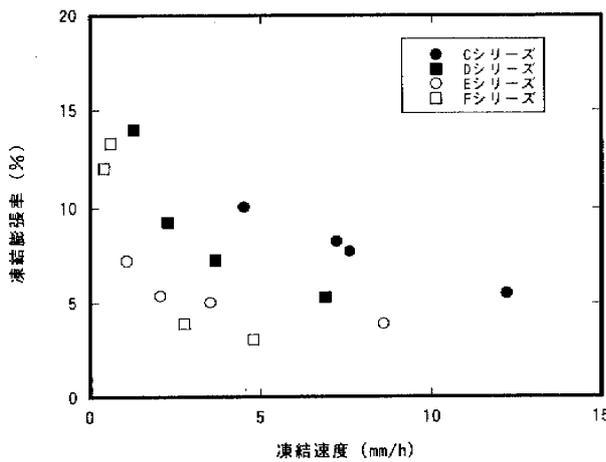


図17 凍結膨張率と凍上速度の関係  
(ケース2、C、D、E、Fシリーズ)

度も大きく異なることが分かる。

### 3-2-6 凍結膨張率と凍結速度の関係

(7) 式で定義された凍結膨張率と凍結速度の関係を図17に示す。凍結速度が小さくなるにつれて、凍結膨張率が増加するのが分かる。これは、ケース2の実験では、各シリーズで凍土中の温度勾配がほぼ一定に保たれているので、凍結速度が遅いと、吸水時間が増えるためである。この結果は、(1) 式の経験式に対応した結果となっている。ケース1に関しては、凍結速度が遅くなると凍土中の温度勾配も小さくなるので、この効果も相殺されて凍結膨張率はほぼ一定になったものと考えられる。

## 4. 考 察

今回の実験では、試料周囲を $0.5^{\circ}\text{C}$ に保ち、試料容器周辺にも断熱材を巻き、試料周囲からの熱流の影響を極力避けるようにした。そのため、ケース1の実験では、凍土中の温度勾配と凍結速度の関係も、図6に示した様に、ほぼ比例関係が得られた。しかし、凍結速度が $0.5\text{ mm/h}$ や $1\text{ mm/h}$ など小さい条件では、温度勾配と凍結速度の関係は、式(6)で示される関係から、ずれた。これは、まず、凍土中の温度勾配、凍結速度が小さくなるにつれて、凍土の平均温度も高くなり、凍土中の熱伝導率が小さくなることによると考えられる<sup>3)</sup>。すなわち、式(5)において、熱伝導率 $k_1$ が小さくなると、冷却面の温度降下速度が同じ場合、凍結速度が小さくなるためである。また(6)式が、試料の凍結温度が $0^{\circ}\text{C}$ であること、未凍土部分の熱流を零と考えた場合の解析解であり、実際は、試料中の水の凍結温度は、 $-0.2\sim-0.3^{\circ}\text{C}$ と、氷点降下すること、また周囲からの熱流も完全には無視できないことなどにもよると考えられる。図11に見られる様に、ケース1の条件で、凍結速度が $2\text{ mm/h}$ 以下で、凍結膨張量が大きくなっているのは、分母である凍結速度(U)が、小さくなっているためと考えられる。また、凍結速度は、試料周囲の温度分布の時間変化から求めたが、これは、試料中の温度勾配が小さくなると、凍結速度の測定精度が落ちることも寄与していると考えられる。この点に関しては、さらに詳細な実験を続ける予定である。

ケース2の実験に関しては、図13に見られる様に、吸水による凍上量は、凍土中の温度勾配が増加するにつれてほぼ直線的に増加した。また、C、D、E、Fシリーズの条件では、ほぼ同じ温度勾配下でも、凍結速度が大きくなるにつれて、吸水による凍上量は、凍結速度が大きくなるにつれて大きくなる結果が見られた(図14)。この吸水による凍上量の凍結速度依存性のメカニズムに関しては、今後の検討課題である。

ケース1、ケース2の実験のうち、載荷荷重が $0.12\text{MPa}$ のもの(A、C、D、E、F)の吸水による凍上速度と凍土内温度勾配の関係を図18に示す。これらの実験条件では、凍土内の温度勾配は、 $0.2\sim 3.0^{\circ}\text{C/cm}$ 、凍結速度は、 $0.5\sim 14.6\text{ mm/h}$ と広い範囲になっている。これら異なる凍結条件での試験に於いて、吸水による凍上速度は、凍土中の温度勾配にはほぼ比例する結果がえられた。これは、凍土中の温度勾配の分かる条件で、数回の凍上試験を行うことによって、

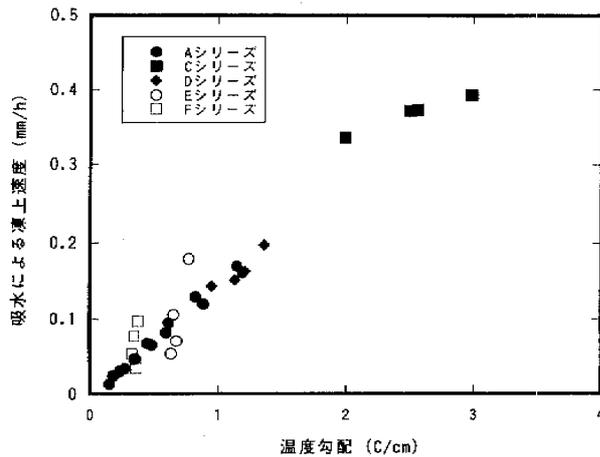


図18 吸水による凍上量と凍土内温度勾配の関係  
(ケース1、ケース2、0.12MPa)

その土試料の凍上性を評価できることを示している。また、凍結速度が0.5 mm/hから、14.6 mm/hまでの広い範囲で、凍結膨張率がほぼ一定になる結果が得られたことから、凍結速度の速い短時間の実験結果から土の凍上性を判断することが可能であることが示唆される。この点に関しては、土質の異なる土試料で同様の試験を行い、検証していく予定である。

## 5. ま と め

土の凍結膨張率や凍上速度を求めるために、室内凍上実験が行われている。日本では、高志ら(1974)の提案した、一端を試料の凍結温度に設定し、他端を一定速度で降下させる実験を行い、凍結膨張率と凍結速度、有効応力との関係式を求めることが行われている。一方、海外では、試料の両端面の温度を一定速度で低下させるか、両端面一定温度の実験を行い、フローゼンフリッジと呼ばれる部分凍結領域の温度勾配と、吸水速度の関係性を求めることがなされている。今回は、同じ土試料を用いて、両者の方法で実験を行い、実験結果の比較を行った。実験結果から、前者の実験方法(ケース1)においても、吸水速度と凍土内の温度勾配の間には、ほぼ比例関係が得られ、後者の実験(ケース2)と同様の方法で実験結果を整理できることが分かった。本研究では、凍結膨張率として(7)式で定義される凍結膨張率と凍結速度の関係性を求めた。実験結果から、凍結膨張率は、凍結速度の非常に小さい領域では、凍結速度が小さくなるにつれて増加するが、凍結速度が3 mm/h以上の条件では、ほぼ一定値が得られた。これは、凍結速度が大きい部分で、凍上速度が、凍結速度にほぼ比例するためである。また凍結膨張量を、試料の凍結完了時に試料上面の温度を $-0.5^{\circ}\text{C}$ 、試料下面を $-10^{\circ}\text{C}$ にして求め、この値と凍結速度の関係性を求めた。この場合は、凍結速度が小さくなることによる顕著な凍結膨張率の増加が見られなかった。

ケース1、ケース2の異なる凍結条件の試験に於いて、吸水による凍上速度は、凍土中の温度勾配にほぼ比例する結果がえられた。これは、凍土中の温度勾配の分かる条件で、数回の凍上試験を行うことによって、その土試料の凍上性を評価できることを示している。また、凍結速度が0.5 mm/hから、14.6 mm/hまでの広い範囲で、凍結膨張率がほぼ一定になる結果が得られたことから、凍結速度の速い短時間の実験結果から土の凍上性を判断することが可能であることが示唆された。また、これらの結果から、より簡便な凍上性判定法を構築することが可能であると考えられる。

## 謝辞

北海道大学工学部赤川敏教授には、試料の提供を受けた。また、研究を進めるに当たって、赤川敏教授、(株)精研の伊豆田久雄氏には貴重な助言を頂いた。ここに記して謝意を表します。

**参考文献**

- 1) 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, 2, 1-20.
- 2) Ishizaki, T. and Nishio N. : Experimental study of frost heaving of a saturated soil. Proc. Ground Freezing 88, 65-72.
- 3) Penner, E.: Thermal Conductivity of Frozen Soils, Canadian J. Earth Science, 7, 982~987, 1970.

## Experimental Study of the Evaluation Method for Frost Susceptibility of Soils

ISHIZAKI Takeshi

In cold regions, stone monuments, brick buildings and earthen walls of historic Japanese buildings suffer from frost damage in winter season. Deterioration is caused by the segregation of ice lens in the porous material during freezing. This is called a frost heave phenomenon. Frost susceptibility is high for clay and silt, and it is low for sand. Here we report on a comparison of evaluation methods for frost susceptibility of soils under different temperature conditions. From experimental results, a linear relationship was obtained between water intake rate to the freezing front and temperature gradient in the frozen zone. We also discuss the possibility of a simple and reliable evaluation method for frost susceptibility of soils based on the experimental results.