



Title	凍上力実験
Author(s)	木下, 誠一
Citation	低温科学. 物理篇, 30, 191-201
Issue Date	1973-03-05
Doc URL	<a href="http://hdl.handle.net/2115/18210">http://hdl.handle.net/2115/18210</a>
Type	bulletin (article)
File Information	30_p191-201.pdf



[Instructions for use](#)

## 凍 上 力 実 験\*

木 下 誠 一

(低温科学研究所)

(昭和 47 年 10 月受理)

### I. 緒 言

土が凍って凍上を起す場合に、大きな力が作用して建造物などが破壊されることがある。この凍上力の原因は、静的には、土粒間隙に氷と水とが曲面を界して共存するときに現われると考えられている<sup>1)</sup>。しかし、野外においては、周囲の拘束の状態や土の凍結の進行速度等によって、凍上力の現われ方がかなり違う。さきに、筆者は、北見における現場観測に関連して、凍上力が、土の凍結の進行や凍上の進み方に依存することを報告した<sup>2)-4)</sup>。又、高志等<sup>5)</sup>は、凍上実験において供試体に荷重をかけると、凍上量が減ることを見つけた。凍上量を 0 にするように抑えたときの荷重が、完全拘束のときの凍上力に相当するので、高志等のこの実験では、拘束をゆるめると、凍上力が減ることを見つけたものと言える。

これらの関係を詳細に把握するため、今回の実験では、種々の土質について、拘束のしかたや、凍結の進行速度更に水分条件等を変えて凍上力の測定を行なった。そして、凍上力発生の機構について考察を行なった。

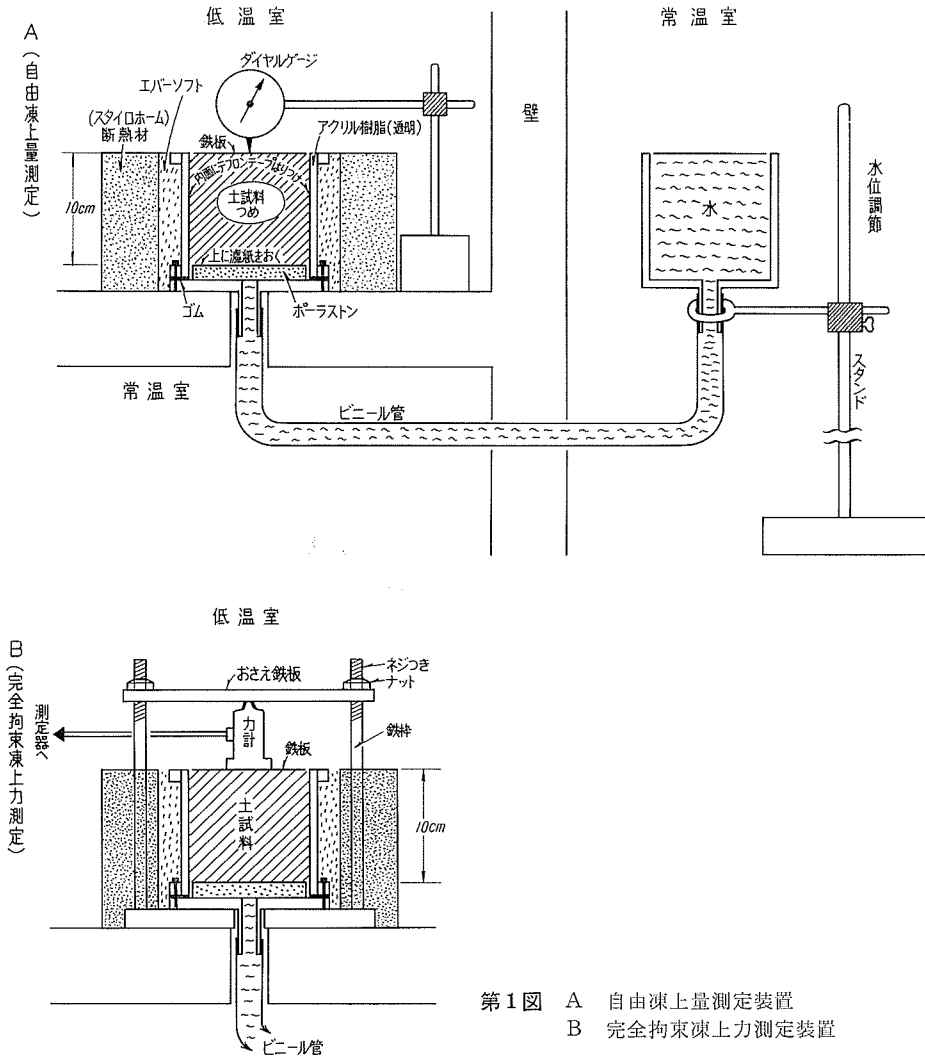
### II. 実験方法

凍上実験装置の略図を第 1 図 A に示す。低温室と常温室に別れ、低温室には土試料と附属する測定器類、常温室には水位を調節する装置と記録器がおかれる。土試料を入れるアクリル樹脂製の円筒は、内径 11 cm 高さ 11 cm で、底板が取外しの出来るようになっている。底板の中央には、外径 1.6 cm、内径 1.0 cm の管が下方に 4 cm 突き出ている。この突起は、低温室と下方の常温室とをしきる壁にあいている穴に、はめこまれるようになっている。それにビニール管をはめ、水位調節器に連絡される。

試料容器の底に厚さ 1 cm のポーラストンをはめ、更にその上に濾紙をのせる。容器の側面にはテフロンテープをはりつけ、その上から低温用グリースをぬりつけて、すべりよくし、土が側壁面に凍着しないように注意した。このような準備をした後で、容器のなかへ土をつき固めながらつめた。従って土の高さは 10 cm である。土の上面に薄い鉄板をのせ、ダイヤルゲージでこの鉄板の上昇高を測定した。容器の側部は厚い断熱材で蔽われ、土試料の冷却が上面からだけ起るようにした。

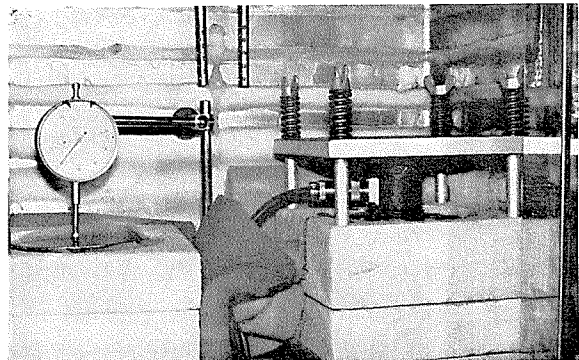
第 1 図 B の完全拘束凍上測定の方では、土試料を入れた容器を鉄棒の上ののせる。鉄棒は、

\* 北海道大学低温科学研究所業績 第 1222 号



第1図 A 自由凍上量測定装置  
B 完全拘束凍上力測定装置

15×15 cm の四角形で厚さ 1.5 cm の底板の四隅から鉄棒が垂直のび出したものである。底板の中央には穴があいていて、試料容器の底の突起がはまるようになっている。又、四本の鉄棒の上部にはネジがきってある。土試料の上面の鉄板の上に力計をのせ、更にその上に厚さ 1 cm の鉄板をのせる。この鉄板の四隅には穴があいていて、鉄棒の四本の棒が、はまるようになっている。力計に、上にのせた鉄板以外の力



第2図 低温室内の装置。左が自由凍上量測定装置、右が半拘束凍上力測定装置

がかからないように、ナットをはめる。

土試料が上面から凍結を開始すると、凍結線で氷が折出し凍上を起そうとする。しかし、試料全体が鉄棒で抑えられているため、全体としての体積膨脹はない。そこで力計に力が作用するわけで、その力を完全拘束時の凍上力と称したのである。

実験を始める前に、試料容器側部の断熱材をとり払い、低温室を $0^{\circ}\text{C}$ 以上の指定の温度に約1日間放置し、土試料が一様な温度になるようにした。その後で、断熱材をはめこみ低温室を指定の温度に冷やした。試料内の温度は、容器の上面から3 cmと7 cmの位置に、抵抗型温度計をはめ、自記記録した。

第2図の写真のなかの左側のダイヤルゲージのある方が自由凍上量測定装置で、右側の鉄棒のある方が凍上力測定装置である。しかし、この場合は、力計の上の鉄板とナットの間にはスプリングをはめてある。拘束のしかたをゆるめて凍上力を測定するわけである。

次に、実験方式をまとめて次に示す。

#### (1) 拘束のしかた

イ. 完全拘束

ロ. 半拘束 第2図の写真のように、スプリングを用いて、ある程度凍上を起させるようにする。用いたスプリングは次の3種類である。

	長さ	1 mm の縮みのときの力
I	4.55 cm	77 kg
II	4.50	10
III	4.52	1.05

ハ. 自由凍上

#### (2) 温度条件

低温室の温度を $-2\sim-10^{\circ}\text{C}$ の範囲内の一定の温度に保った。

#### (3) 水分条件

イ. 初期含水比

ロ. 凍上の型 開式

閉式 (水槽につながるビニール管を外し、試料容器外からの水の補給をなくする)

ハ. 水位 実験開始前に水位を試料下面又は上面に設定した。又凍結が少し進んだ後で、試料上面よりも水位を上げて、試料に水圧がかかるようにもした。

#### (4) 土質

凍上性は土質特に粒度組成に依存することが知られている。この実験では粒度組成の異なる次の5種類の土を用いた。いずれも、横浜市本牧地区から採取したものである。

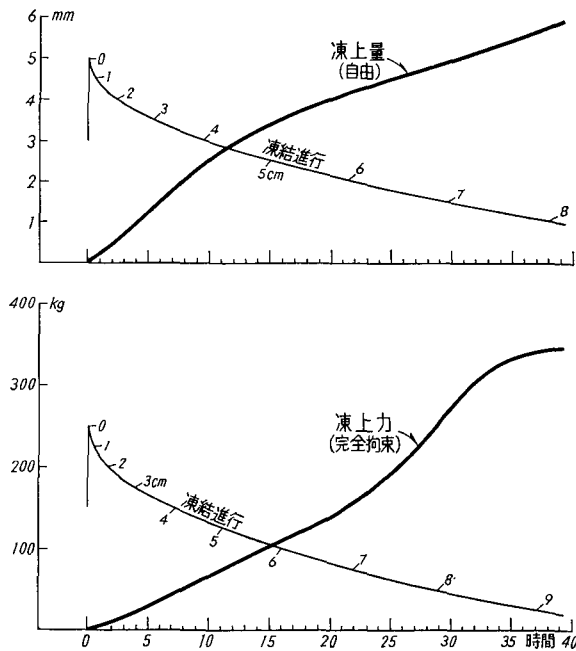
第 1 表

土 質	粒 度 分 布			土粒の比重	比表面積 (m <sup>2</sup> /g)
	粘 土 分 <0.005 mm (%)	シルト分 0.005~0.05 mm (%)	砂 分 0.05 mm< (%)		
a. 砂	0	6	94	2.64	9.1
b. 砂質ローム	18	15	67	2.66	14.5
c. 砂質粘土ローム	30	15	55	2.64	17.7
d. 粘 土 (1)	45	19	36	2.62	22.1
e. 粘 土 (2)	72	23	5	2.64	29.6

III. 実 験 結 果

1. 実験記録の一例

低温室内に、自由凍上量測定装置と、完全拘束をしたときの凍上力測定装置を2つ並べて同時に測定を行なった。第3図に、その記録の一例を示す。凍上量・凍上力とも凍結の進行とともに増大するが、凍結が試料の底に近づくにつれ、ほぼ一定の値に落ち着く傾向がある。細い実線は、温度の測定値から推定した凍結の進行を示す。両者の装置とも同じ状態で冷やしたのにも拘らず、凍結の進行状況は一致しない。自由凍上の方がおくれる。これは、凍上が起こるときに凍結線で氷が析出し、そのために潜熱が発生するからである。



第 3 図 実験記録の一例。砂質粘土ローム、初期含水比 39%、飽和度 87%、密度 1.68 g/cm<sup>3</sup>、実験前温度 1.2°C、実験開始後の低温室温度 -5°C、開式、水位は試料下面

第2表 実験結果一覧表

土質	実験式	始めに 設定した 水	初期 含水比	密度	間隙率	飽和度	実験前 試料 温度	冷却 温度	試料上面の 凍結開始 から実験 終了まで の時間	自由凍上量測定			凍上力測定				半拘束の 凍上量 の時間	
										実験終了 時の値	試料10cm の凍結 完了時間 (mm)	凍結完了 時の値 (mm)	実験終了 時の値 (kg/cm <sup>3</sup> )	試料10cm の凍結 完了時間 (時間)	凍結完了 時の値 (安全拘束) (kg/cm <sup>2</sup> )	凍結完了 時の値 (半拘束) (kg/cm <sup>2</sup> )		
砂	開式	試料上面	39	1.82	50	100	3.6	-5	49	0.97	49	0.97						
	"	"	39	1.82	50	100	1.5	-2	72	1.11	96*	1.2*	1.5	80*	1.5*			
	"	"	39	1.82	50	100	1.3	-5	46	1.00	50*	1.0*	0.3	40	40	0.3	0.71	
	"	"	39	1.82	50	100	0.6	-4.5	63	0.80	50	0.80	1.18	40	40	1.18		
	閉式	"	33	1.76	50	88	1.0	-5	33	0.51	40*	0.6*	1.2	37*	37*	1.2*		
	"	"	33	1.76	50	88	1.9	-2	58	0.74	80*	0.8*	0.87	73*	73*	0.9*		
	"	"	33	1.76	50	88	2.5	-2.4	46	0.93	70*	1.0*	0.35	60*	60*	0.35	0.82	
砂質 ローム	開式	試料上面	59	1.64	61	100	1.6	-5	28	3.85	50*	4.4*	3.4	35*	3.95*			
	"	"	59	1.64	61	100	1.3	-2.6	60	3.20	80*	3.4*	2.37	51	2.6			
	閉式	"	46	1.58	59	83	1.0	-4.5	33	3.15	40*	3.3*	2.1	38*	2.25*			
	"	"	46	1.58	59	83	1.5	-3	74	4.19	80*	4.3*	3.77	55	3.95			
	開式	試料上面	54	1.68	59	100	4.0	-5.5	34	3.51	35*	3.51	3.1	31	3.1		3.1	0.9
	"	"	54	1.68	59	100	1.8	-5	40	2.42	40	2.42	0.48	30	30	0.52	1.22	
	"	"	54	1.68	59	100	1.4	-3	50	2.56	55*	2.6*	0.40	40	40	0.44	1.06	
砂質 粘土 ローム	"	"	57	1.66	60	100	2.3	-5	71	3.85	75*		3.75	59	3.8			
	"	"	57	1.66	60	100	1.5	-2	80				1.0	100*	1.1*			
	"	試料下面	39	1.68	54	87	1.6	-5	38	5.91	60*	6.5*	3.63	45*	3.7*			
	"	"	39	1.68	54	87	2.0	-4.7	70				0.9	70		0.9	2.1	
粘土(1)	"	試料上面	68	1.60	64	100	1.8	-5	49	4.51	75*	5.1*	1.88	60*	2.05*			
	"	"	68	1.60	64	100	2.0	-2.2	99	3.52	130*	3.8*	1.42	110*	1.5*			
	"	試料下面	47	1.59	59	87	0.8	-5	75	7.5	72	7.5	3.02	46	3.3			
	"	"	47	1.59	59	87	0.2	-4.5	79	7.83	80	7.83	0.85	50		0.85	2.0	
	"	試料上面 から9cm上	54	1.68	59	100	2.2	-5	97	15.9	95	15.9	3.4	70	3.4			
	"	"	54	1.68	59	100	0.7	-4	74	9.46	90*	10.5*		70	3.05			
粘土(2)	閉式	"	74	1.55	66	100	2.5	-10	29	4.29	40*	5.0*	4.6	40*	5.3*			
	"	"	55	1.67	59	100	0.7	-5	57	3.98	75*	4.5*						
	開式	試料上面	55	1.67	59	100	1.2	-5	69	7.94	72*	8.4*	3.58	60	3.63			
	"	"	55	1.67	59	100	2.0	-5	57				0.65	100*	0.84*			

\* 推定値

凍上力実験

2. 実験結果の一覧

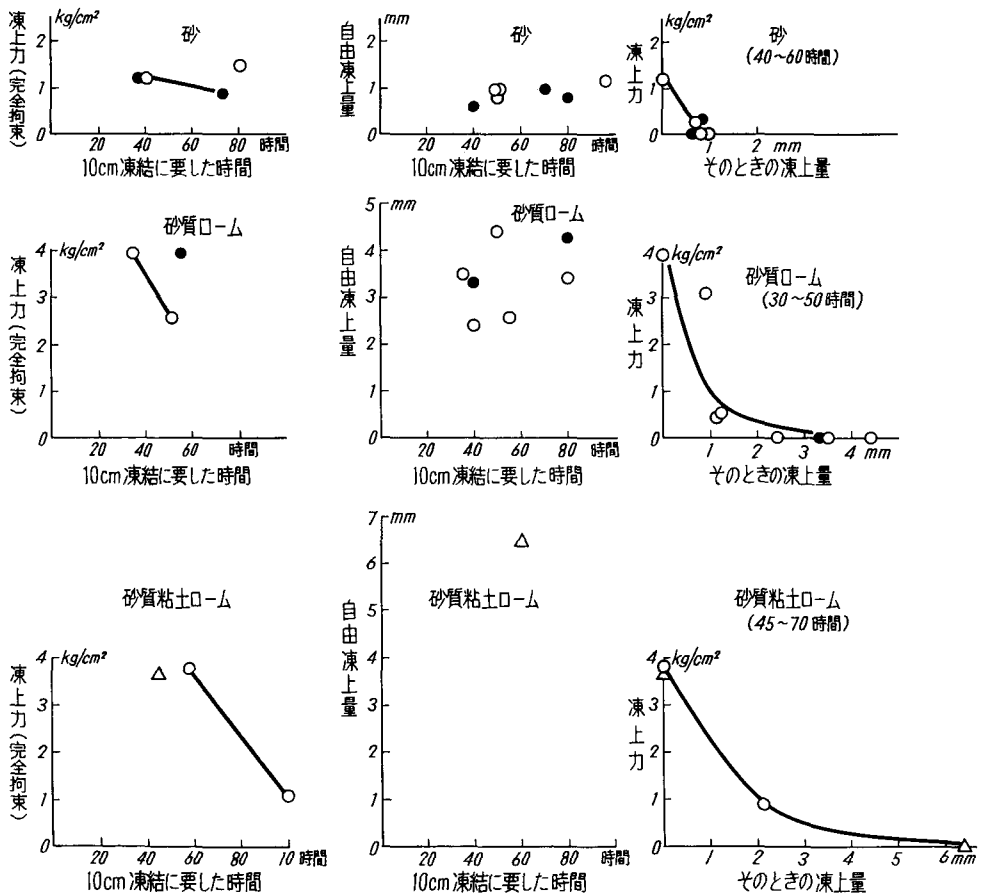
実験結果を各土質ごとに、まとめて第2表に示す。

IV. 実験結果の整理

得られた実験結果のうちから、それぞれの土質について、10 cm の試料が凍結完了する時の値をとり出して、次のような整理を試みた。

1. 完全拘束のときの凍上力と凍結進行速度との関係

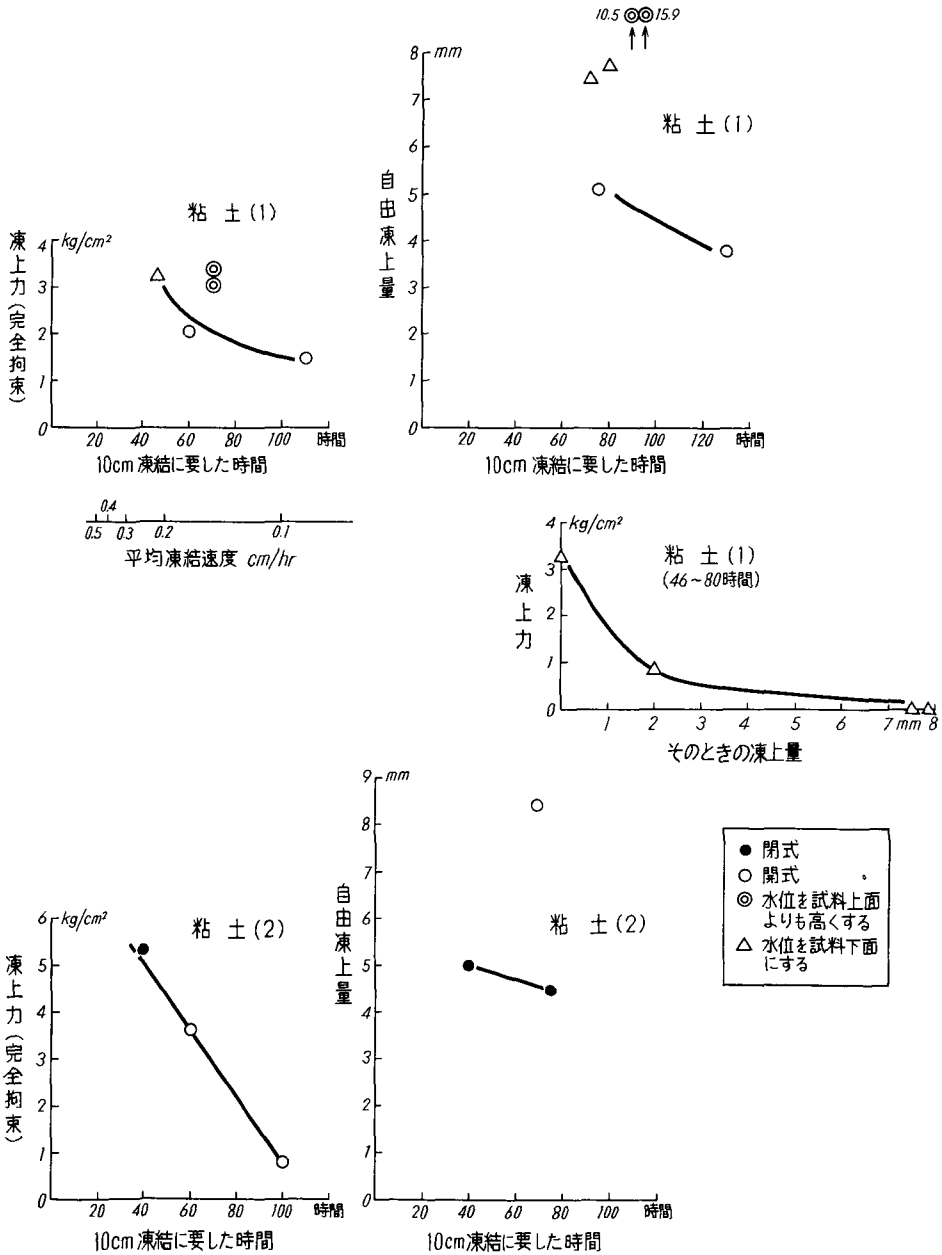
第4図の左の列に並べて示したのがそれである。横軸を10 cm 凍結に要した時間、つまり平均凍結速度で示してあるが、凍結進行がおそくなるほど、凍上力は小さくなる。第4図の各土質についてのグラフをひとまとめにして示したのが第5図の(A)である。同じ平均凍結速度では、土質については、砂、砂質ローム、砂質粘土ローム、粘土(1)、粘土(2)の順に凍上力は大きくなる。つまり、粒径の細かい土質ほど凍上力が大きい。凍上の型については、特に顕著な特徴は見られなかった。



第4図 A 実験結果の整理 (1)

2. 自由凍上量と凍結進行速度との関係

第4図の中央の列に並べて示したのがそれである。横軸を同じく10cm凍結に要した時間で示してある。凍結進行速度よりはむしろ凍上の型や水位条件に依存する。凍上の型では、開式の方が閉式よりも、又水位条件では、水位が試料上面よりも高いもの、つまり試料に水圧がかかる場合が、凍上量が非常に大きく、ついで水位が試料下面の場合である。水位が試料上面



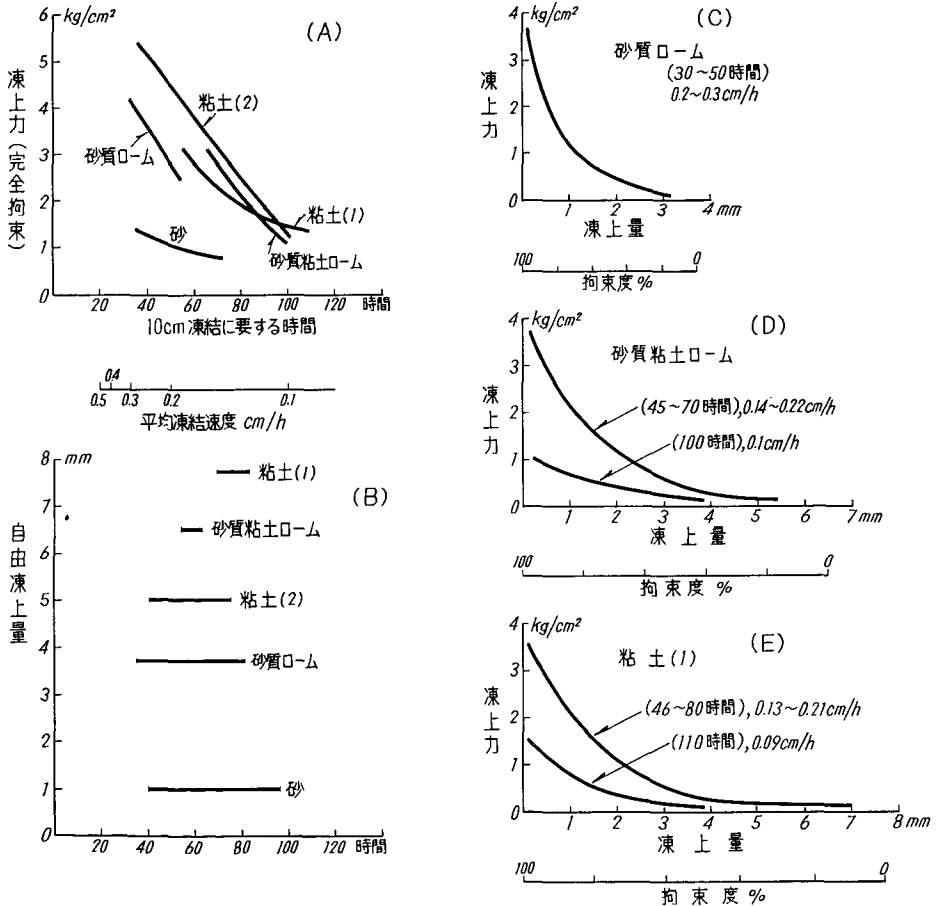
第4図B 実験結果の整理 (1) つづき



の場合が一番小さかった。そして凍結進行速度との関係については、特に顕著な傾向はみられなかった。開式で、水位が試料上面又は試料下面の場合だけについて、各土質ひとまとめにして模式的に書くと、第5図(B)のようになる。(但し粘土(1)については水位が試料下面のときだけ、又粘土(2)については、閉式のときだけを取り出して書いた)。砂、砂質ローム、砂質粘土ローム、粘土のように粒径が小さくなるほど、凍上量が大きい。そして、凍結進行速度に依存しない。このことは高志等の実験<sup>6)</sup>においても確かめられている。

3. 凍上力と拘束の度合との関係

第4図の右の列に並べて書いたのがそれである。横軸が10 cmの試料が凍結を完了したときに現われた凍上量で、横軸上の点は、凍上力がゼロ、つまり自由凍上量を示す。又一方、その値が拘束度ゼロの点に相当する。縦軸は、10 cmの試料が凍結を完了したときに現われた凍上力で、縦軸上の点は、凍上量がゼロ、つまり完全拘束時の凍上力を示し、拘束度100%ということになる。それ以外の所にある点は、拘束をゆるめ、ある程度凍上を起すようにした場合を示す。1.で説明したように、凍上力は凍結進行速度に依存するので、第4図の右の列のグラフには、ほぼ同じ凍結進行速度の場合だけを取り出して示した。いずれも拘束がゆるむと、凍



第5図 実験結果の整理 (2)

上力は急に減少する。第5図の(D)と(E)に、砂質粘土ロームと粘土(1)の場合について、凍結進行速度の大きい場合と小さい場合に大別してグラフに示した。拘束がゆるむと凍上力が急に減少する傾向は両者とも変りないが、凍結進行速度の小さい方が凍上力の値そのものが小さい。

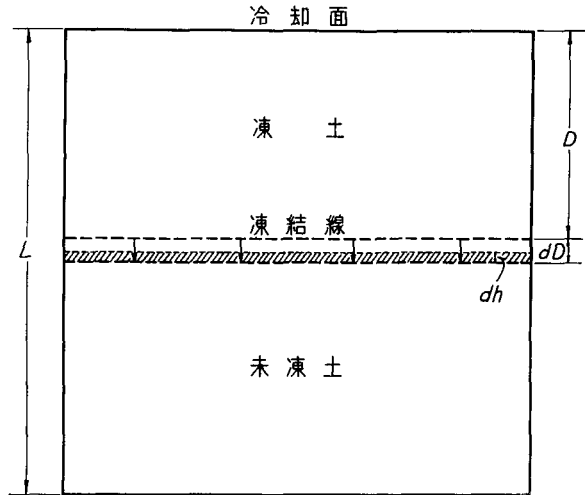
## V. 考 察

前節の1.2.3のまとめで、凍上力に関係のない2.の場合だけが凍結進行速度に依存しないが、凍上力が発生する場合には、凍結進行速度に大きく依存し、しかも、速度が小さいゆっくりな場合ほど、凍上力が小さくなるのが解った。これは、粘弾性物質の一般的な特徴の一つとも言えるので、凍上力の発生機構について、粘弾性の考え方をとり入れ、次のような考察を試みた。

高さ $L$ の供試体のなかで、第6図のように、凍結線が $D$ の位置から $dD$ だけ下方に進んだとする。そしてこの $dD$ のなかの $dh$ だけが、凍上による、つまり凍結線での氷析出による体積新造分と考える。完全拘束のときには、供試体の全長 $L$ が一定のままであるから、この新造分 $dh$ だけ供試体が圧密されなければならない。凍土・未凍土とも弾性体とすると、それにもとづく力 $dF$ は

$$dF = \frac{E_1 E_2}{E_1(L-D) + E_2 D} dh \quad (1)$$

で表される。ここで、 $E_1$ と $E_2$ はそれぞれ凍土・未凍土の弾性率である。この $dF$ がそれまでに現われていた力 $F$ に上ずみされる。



第6図 供試体内の凍結進行の模式図、 $dD$ は凍結線の進行分、 $dh$ は新造の体積分

一方、凍上の発生がとまると、つまり $dh=0$ になると、もとの力 $F$ 自体も減少することが知られている<sup>4)</sup>、これらの関係を粘弾性のマツクルウェル模型を用いて表わすと、

$$\frac{dF}{dt} + \beta F = \frac{E_1 E_2}{E_1(L-D) + E_2 D} \frac{dh}{dt} \quad (2)$$

になる。 $t$ は時間、 $\beta$ は粘弾性に関する常数である。 $h$ については、直接観測は出来ないが、自由凍上量と同じ経過を示すものと仮定し、自由凍上量が凍結速度に依存しないで、凍結完了時には常に同じ値 $H$ になることを考慮して

$$h = \frac{HD}{L^2}(2L-D) \quad (3)$$

とおく。一方、凍結深 $D$ は試料表面温度の積算寒度の平方根に比例することが経験的に確かめられているので、

$$D = \alpha \sqrt{t} \quad (4)$$

とおく。この  $\alpha$  は、表面温度の絶対値の平方根に比例する量である。それで

$$\frac{dh}{dt} = \frac{H}{L^2} \frac{\alpha^2}{D} (L-D) \quad (5)$$

になるから、結局 (2) 式は次のようになる。

$$\frac{dF}{dt} + \beta F = \frac{E_1 E_2}{E_1(L-D) + E_2 D} \frac{H \alpha^2}{LD} (L-D) \quad (6)$$

(6) 式の解は

$$F = \frac{E_1 E_2 H \alpha}{L^2} e^{-\beta t} \int_0^t \frac{e^{\beta t}}{E_1(L - \alpha \sqrt{t}) + E_2 \alpha \sqrt{t}} \cdot \frac{L - \alpha \sqrt{t}}{\sqrt{t}} dt \quad (7)$$

である。

第 3 図の砂質粘土ロームの場合について、この関係を当ってみよう。  $L=10$  cm, 又  $\alpha^2=2.2$  cm/hr を適用し、  $E_1=5000$  kg/cm<sup>2</sup>,  $E=50$  kg/cm<sup>2</sup> を仮定して、(6) の関係を実際の曲線に当ってみると、  $\beta=0.0004$  1/hr,  $H=0.39$  cm という結果が出る。完全拘束とは言いながら、供試体のなかで 4 mm 近くの体積新造分があることは注目すべきであろう。この値は、自由凍上量 6.5 mm の 60% 近くに相当する値でかなり大きいものである。

しかし、採用した粘弾性の考え、特にマッフスワエル模型は、凍土には余りよく合わないことが知られているので、もう少し検討すべきと考えられる。

実験に当り、故田沼邦雄助教授と理学研究科大学院生川田邦夫氏の協力を得た。又、鈴木義男助教授からは有益な助言を得た。厚く感謝の意を表する次第である。

## 文 献

- 1) Everett, D. H. 1961 The thermodynamics of frost damage to porous solids. *Trans. Faraday Soc.*, **57**, 1541-1551.
- 2) 木下誠一・大野武敏 1963 凍上力 I. 低温科学, 物理篇, **21**, 117-139.
- 3) 木下誠一・大野武敏・小黒 貢 1966 凍上力 II. 低温科学, 物理篇, **24**, 285-297.
- 4) Kinoshita, S. 1967 Heaving Force of Frozen Soils. In *Physics of Snow and Ice, Part 2* (H. Ôura, ed.), Inst. Low Temp. Sci., Sapporo. 1345-1360.
- 5) 高志 勤・益田 稔 1971 拘束圧下における土の凍上量と間隙水移動について. 雪氷, **33**, 101-119.
- 6) 高志 勤・益田 稔 1971 凍結速度が土の凍上現象に及ぼす効果について. 日本雪氷学会秋季大会講演予稿集, 30.

## Summary

Frost heaving of soil accompanies a force which often causes severe damage to constructions. The force, so called "heaving force", is attributed to the coexistence of ice and water in micro-pores among soil particles and, in principle, can be computed thermodynamically. Since the shapes of pores may change during soil freezing in a complicated manner depending on various factors including freezing velocity, constraining conditions for the soil as a whole, and size of soil particles, the heaving

considered to depend on these factors. Measurements of heaving force were carried out of various soil samples (sand, sandy loam, sandy clay loam and two kinds of clays) under various freezing conditions (Freezing velocity, mode of water supply and constraints for soil were changed). In every experiment, soil was packed in a cylindrical container with a diameter of 11 cm and a height of 10 cm (Soil was constrained completely in the radial direction and at the bottom: Constraining conditions at the bottom for water depended on the mode of water supply from below). A disk was placed on top of the soil contained in the cylinder to constrain the sample either rigidly (a complete axial constraint) or through a spring (a loose axial constraint). Main results of the measurements were as follows:

(1) Under the condition of the complete axial constraint, the heaving force decreased with the decrease in freezing velocity and with the increase in the size of soil particles.

(2) Without the constraint, the heaving amount was almost independent of the freezing velocity (The heaving amount was called the free heaving amount).

(3) The heaving force decreased very rapidly with the loosening of the axial constraint (with the softening of the spring).

The results indicate that it is practical to treat the heaving force phenomenologically as a kind of resistive force exerted by freezing soil on a body constraining from without. Because of a volume increase due to the transformation of water into ice at the freezing front, both unfrozen and frozen parts of soil suffer some strains, if the soil is somehow constrained. The strains cause stresses, which appear as the heaving force. A formula for the heaving force was given where both the frozen and the unfrozen soil were treated as visco-elastic bodies.