

## クローズドシステム条件における粘性土の 凍上現象と水分移動の関係

### RELATIONSHIP BETWEEN FROST HEAVE PHENOMENA AND WATER MIGRATION IN COHESIVE SOILS UNDER CLOSED SYSTEM CONDITION

亀井健史\*・小川正二\*\*・木村嘉富\*\*\*

By Takeshi KAMEI, Shoji OGAWA and Yoshitomi KIMURA

In order to investigate the relationship between frost heave phenomena and water migration in cohesive soils, frost heave tests were performed on cohesive soils under closed system condition. In addition, it was also investigated the change in frost heave characteristics corresponding to the change in the prepared soil types.

The main concluding remarks derived from these studies are as follows; i) Frost heave rates in consolidated specimens are greater than the corresponding values in compacted specimens at the early stage during frost. ii) The frost heave was also closely related with the water migration and that relationship was affected by the degree of saturation in the specimen. In addition, the change in frost heave characteristics corresponding to the change in the prepared soil types were compared and cleared.

*Keywords: frost heave, cohesive soil, water migration*

#### 1. ま え が き

北欧や北米では、古くから凍上によるさまざまな被害が発生しており、凍上に関する研究が早くから進められてきた<sup>1),2)</sup>。その結果、「毛管凍上力理論」<sup>3),4)</sup>「frozen fringeの存在」<sup>5)</sup>「吸着水膜理論」<sup>6)</sup>などさまざまな凍上理論が提案された。また、これと並行して数値解析<sup>7),8)</sup>も進められ、室内における凍上現象はかなり解明されてきた。

これらの研究で扱っている凍上現象を模式的に描くとFig.1(a)となり、地下水が凍結面に移動してアイスレンズを生成することにより、凍上が発生していると考えられてきた。したがって、凍上量は凍結域に最初から存在していた水の凍結・膨張による凍上量と、凍結域に移動してきた水の凍結・膨張による凍上量との和であると考えられており、室内凍上試験はFig.1(b)に示すように、供試体外部から凍結面へ水を自由に供給させる、いわゆるオープンシステムで行っている。日本においても、

福尾ら<sup>9)</sup>は飽和土において、また田沼<sup>10)</sup>は不飽和土において凍上量と吸水量との関係を確認しており、さらに高志ら<sup>11)</sup>は、広範囲の拘束圧力下の実験でこの関係を確認した。

また、Hoekstra<sup>12)</sup>はγ線水分移動計を用いて土中の水分移動を測定した。福田も同様に水分移動を測定し<sup>13)</sup>、さらに数値解析を行っている<sup>14)</sup>。

ところで、長野県の蓼科高原や群馬県の軽井沢において、道路の凍上被害を調査すると、地下水位が高い場所ばかりでなく、Fig.1(c)のように、地下水位が相当低い場所においても凍上による被害が発生している。これらの地域の土は火山降下物が堆積して生成されており、含水比が非常に高い状態にある。したがって、地下水位が低く、凍結面に地下水が自由に移動できない場所においても、この土中水が凍結面に移動することにより、凍上が発生していると考えられる。

しかしながら、既往の研究の多くは上記のようにオープンシステムで凍上試験を行っており、これらの実験から得られた成果をFig.1(c)に示すような、クローズドシステム条件で土中に存在する水の移動による凍上現象に適用することができない。したがって、Fig.1(d)のような、供試体外部から水を供給させないクローズドシステムでの凍上現象についての研究が必要となる。しか

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

\*\* 正会員 工博 長岡技術科学大学教授 工学部建設系  
(同上)

\*\*\* 正会員 工修 建設省中部地方建設局天竜川上流工事事務所  
(〒399-41 駒ヶ根市上穂南7-10)

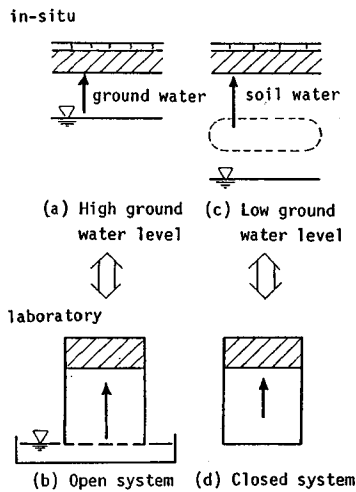


Fig.1 Relation between in-situ frost heave and frost heave test.

しながら、クローズドシステムでの凍上特性に関する既往の研究例はほとんどみられない。

著者らはこの点に着目し、締め固めた不飽和供試体を用いてクローズドシステムでの凍上試験を行ってきた。その結果から、含水比や飽和度が粘性土の凍上現象に及ぼす影響を調べ、不飽和粘性土の凍上発生メカニズムについて明らかにした<sup>15)</sup>。しかしながら、圧密した供試体および不攪乱供試体への、これらの結果の適用性についてはまだ明らかにされていない。そこで、圧密した飽和供試体および原位置から採取した不攪乱供試体についてもクローズドシステムで実験を行い、その結果と締め固めた不飽和供試体で得られた結果との比較検討を行った。さらにこれらの結果から、クローズドシステムにおいてもオープンシステムの場合と同様な、凍上量と水分移動量との関係を確認したので報告する。

## 2. 試料および実験方法

本実験で用いた供試体は、新潟県柏崎市米山付近で採取した練返し粘性土(米山土)および長野県の蓼科高原で採取した不攪乱土(蓼科土)である。各試料土の物理的性質を Table 1 に示す。

供試体は、前報<sup>15)</sup>で用いた締め固めた供試体のほかに、圧密した供試体と不攪乱土を用いた。圧密圧は、圧密後の含水比や成形の容易さを考慮して 100 kPa と 450 kPa とし、それぞれ記号 P100, P450 で表わした。また、蓼科高原の不攪乱土を成形した 2 つの供試体は、記号 T1, T2 で示した。

供試体はいずれも直径 6 cm, 高さ 12 cm の円柱供試体で、試験前の各供試体の状態は Table 2(a), (b) に示すとおりである。なお、米山土と蓼科土では明らかに含

Table 1 Index properties of the soil samples.

Soil Samples	Yoneyama soil	Tateshina soil
Gs	2.82	2.73
$w_L$ (%)	64.2	118.3
$w_p$ (%)	36.6	71.5
Ip	27.6	46.8
Sand (%)	42.5	59.0
Silt (%)	29.5	24.8
Clay (%)	28.0	16.2

Table 2 Soil properties of specimens.

(a)<sup>15)</sup>

Specimen	$w$ (%)	$\rho_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	e	Sr (%)
Y1	30	12.9	1.19	71
Y2	32	13.7	1.06	85
Y3	35	13.5	1.09	90
Y4	40	12.7	1.23	91
Y5	45	11.9	1.36	92
Y6	55	10.6	1.67	95

(b)

Specimen	$w$ (%)	$\rho_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	e	Sr (%)
P100	44	12.4	1.28	98
P450	37	13.6	1.07	98
T1	107	6.5	3.22	90
T2	126	5.7	3.78	91

水比、間隙比の値が異なっているが、実験した範囲では、いずれも飽和度は 90 % 以上となっている。

凍上試験装置は Fig. 2 に示すような一軸圧縮試験機を改良した本体と、供試体をセットする試料室③④、冷却装置⑥⑫および温度制御装置⑦⑬(精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ )、凍上圧測定装置⑨(精度 0.35 kPa)、載荷制御装置⑩⑮、凍上量測定装置⑪(精度 $\pm 0.01$  mm)、供試体内温度測定装置②および記録計⑭からなっている。なお、本装置は  $20^\circ\text{C}$  の恒温室内に設置されている。

実験はクローズドシステムとし、凍結終了後、供試体を切断して各部分の含水比を測定し、水分の移動状況について検討した。供試体の側面は、周囲を発泡スチロール④で断熱した透明アクリル製の二つ割りセル③でおおわれている。また冷却は、実際の自然条件を考慮して、供試体の上面より一次的に行った。さらに、供試体の一部のみを凍結させるために、供試体の上下端面の温度を試験の間それぞれ正、負の一定温度に保っている。実験方法は、前報<sup>15)</sup>に述べたように以下のとおりである。

実験開始後、供試体上端が凍結することにより凍上圧が発生し始める。この圧力を供試体下方に設置したロー

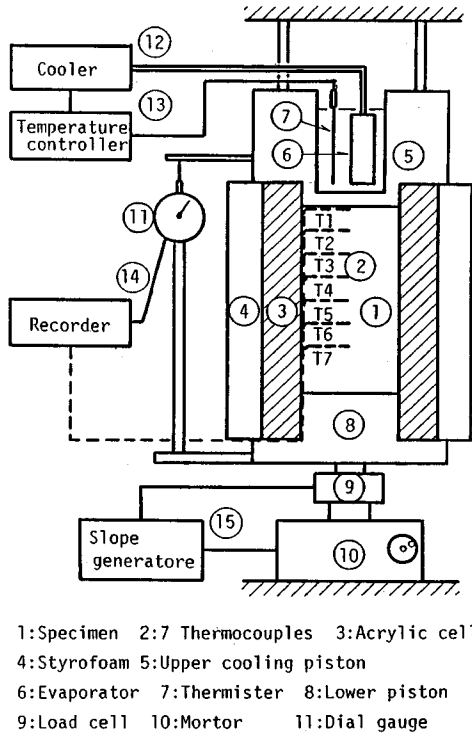


Fig.2 Frost heave test apparatus used in the present study.

ドセル⑨が感知すると、載荷制御装置⑮により供試体下端の金属性ピストンを降下させて、凍上圧がゼロとなるようにした。したがって、未凍結側での脱水圧密現象は起こらず、供試体の未凍結部分は下方に変位し、この変位を凍上量としてダイヤルゲージにより測定した。また、供試体中の温度は銅-コンスタンタン熱電対を Fig.2 に示す位置に設置して測定し、この結果をもとに凍結面の位置や温度勾配を算出した。

凍上試験においては、供試体とセルの間の摩擦や凍結土のセルへの凍着が問題となる。そのために、シリコングリースをセルの内壁に十分に塗布し、摩擦の低減を行った。さらに本実験では凍結部は変位せず、凍結面付近にできるアイスレンズによって未凍結部分が下方に変位している。したがって、凍結土の側面がセルに凍着することによる凍上量への摩擦の影響は小さいと考えられる。

### 3. 実験結果および考察

#### (1) 圧密した供試体の凍上現象

a) 供試体の作成方法の違いが凍上現象に及ぼす影響  
100 kPa, 450 kPa で圧密した供試体 P100, P450 について、クローズドシステムで両端面温度一定凍上試験を行った。供試体上端面での冷却温度が  $-24^{\circ}\text{C}$  の場合

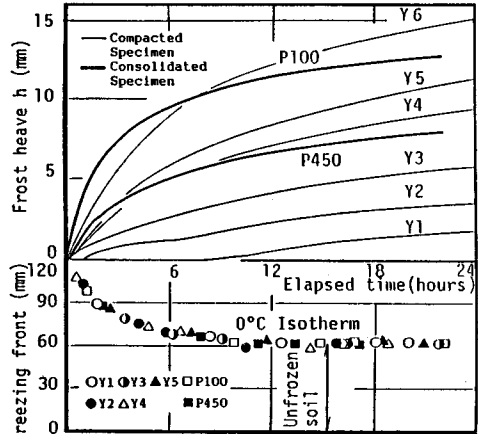


Fig.3 Variations of frost heave and freezing front with elapsed time at  $\theta_c = -24^{\circ}\text{C}$ .

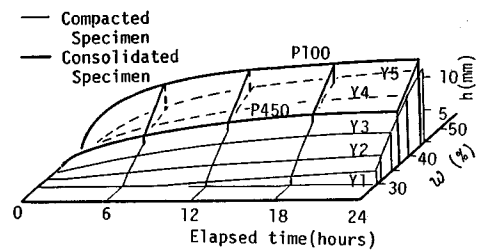


Fig.4 Comparison of frost heave curves in the compacted specimens and consolidated specimens ( $\theta_c = -24^{\circ}\text{C}$ ).

の凍結面の位置と凍上量の経時変化を Fig.3 に示す。なお、図中には比較のために締め固めた供試体 Y1~Y5 についての実験結果も併記した<sup>15)</sup>。

図示のように、供試体の作成方法が異なっても、凍結面はほぼ同様に進入していることが認められる。これは今回の実験の場合、供試体の両端面温度差が比較的大きいため凍結面の浸入速度が大きく土の間隙状態の不揃いの影響がみられずこのような結果になっているものと考えられる。しかしながら、凍上量の経時変化はほぼ同じ含水比 (Y3, Y5 と P450, P100) でも供試体の作成方法によってやや異なっており、圧密した供試体は、圧密圧が大きくなると凍上量は減少するが、いずれの圧密圧力でも締め固めた供試体と比較して、凍結初期に凍上量が急増している。しかし、飽和度が比較的近い Y6 と P100 を比較すると凍上量の経時変化はほぼ等しいが、飽和度が近くても、含水比の大きく異なる P450 の傾向は Y6 と明らかに異なっている。

含水比の凍上量-経過時間関係曲線 (以下凍上量曲線とよぶ) への影響を三次元的に描くと Fig.4 となる。また、凍上量が急増する点を明確にするために、単位時間当たりの凍上量である凍上速度を求めて、同様に三次元

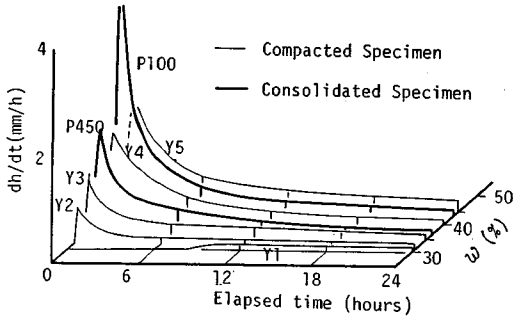


Fig. 5 Comparison of frost heave rate curves in the compacted specimens and consolidated specimens ( $\theta_c = -24^\circ\text{C}$ ).

的に描くと Fig. 5 が得られる。Fig. 4, Fig. 5 をみると、圧密した供試体は、締め固めた供試体と比較して、凍結初期の凍上速度が大きいが、両者の凍上量の差は時間経過とともに小さくなる。しかしながら、含水比が同じ程度の供試体の最終的な凍上量は、締め固めた供試体より圧密した供試体のほうが大きくなることわかる。

締め固めた供試体と圧密した供試体の間には、その作成方法の違いのために、次のような性質の差が存在している。

- ① 締め固めは間隙中の空気を追い出すことにより、また圧密は水を追い出すことにより、土を密にしている。
- ② 締め固められた供試体は、ランマーにより突き固めるため、供試体中の土の状態が不均一となるが、圧密された供試体ではその影響はない。
- ③ 締め固めた土では粒子の配列に方向性がなく不規則である。一方、一次元的な圧密をした土では、粒子は水平方向を向いて堆積し、層を成している。また、圧密した供試体の飽和度は締め固めた供試体の飽和度より高い。

以上のような構造上の違いから、圧密した供試体は締め固めた供試体と比較して、透水性がよいと考えられる<sup>16)</sup>。

このような点を考慮すると、供試体の作成方法の違いが凍上現象に及ぼす影響は以下のようである。

圧密された供試体では、間隙がほぼ水で飽和されているため、間隙水の凍結・膨張によりすぐに凍上が発生する。さらに下方からの水の移動が容易であるため、凍結初期に大きな凍上速度となる。

b) 凍上量と圧密圧、凍結深さの関係

Fig. 3 において、供試体の圧密圧が凍上現象に及ぼす影響についてみると、圧密圧が大きい供試体の凍上量が小さくなっている。この傾向は、供試体上端面での冷却温度が  $-11^\circ\text{C}$  の場合でも同様に確認された。

これは、供試体の圧密圧の増加により、間隙比が低下

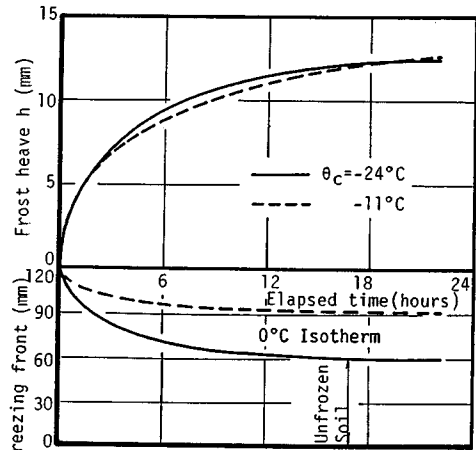


Fig. 6 Variations of frost heave and freezing front with elapsed time in the specimen P100.

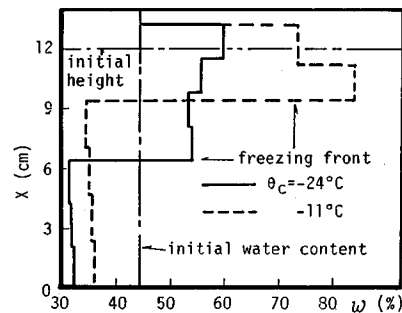


Fig. 7 The water content distributions after freezing in the specimen P100.

し、その結果、

- ① 水分量の低下
- ② 透水性の低下

などにより、凍上量が減少したためと考えられる。

一方、凍結深さが異なる圧密した供試体の凍上現象に及ぼす影響を調べるために、供試体上端面での冷却温度を  $-24^\circ\text{C}$ 、および  $-11^\circ\text{C}$  として凍上試験を行い比較した。このうち、供試体 P100 について凍結面の位置と凍上量の経時変化を描くと、Fig. 6 のようになり供試体の冷却温度の違いにより、凍結深さは供試体の上部 1/2、および 1/4 と変化しているにもかかわらず、凍上量はほぼ同じ傾向で増加している。この傾向は、供試体 P450 の場合においても同様に認められた。

この現象について検討するために、試験後、供試体を切断して含水比を測定した結果、Fig. 7 に示す供試体中の含水比の分布が得られた。供試体の未凍結部の含水比の低下量を見ると、低下した含水比の値としては凍結温度が  $-24^\circ\text{C}$  の場合に大きくなっているが、凍結深さが異なるため未凍結土全体の水分低下量としては、一

11°C の場合が大きくなっている。一方、凍結土中の含水比の増加量は、-11°C の場合が大きくなっている。

一般に、凍上量は、間隙中の水がその位置で凍結・膨張することにより発生する凍上量と、未凍結土からの水分移動により凍上量とからなっている<sup>17)</sup>。したがって、圧密した供試体はほぼ飽和しているため、凍結深さが大きくなると、現位置の水の凍結・膨張による凍上量が大きくなる。しかしながら、前述した含水比分布によれば、凍結深さが大きくなると水分移動量は小さくなっており、この両者の相互作用により、凍結深さが異なっても、同様な凍上量曲線を示したものと考えられる。

(2) クローズドシステムにおける凍上量と水分移動量との関係

上述の凍上量と水分移動量との関係をより明白にするために以下の関係について検討を行った。

- ① 同一供試体、同一温度条件で、時間経過による凍上量と水分移動量との関係
- ② 同一供試体、同一温度条件で、水分移動範囲を変化させた場合の凍上量と水分移動量との関係
- ③ 異なる供試体や温度条件の場合の凍上量と水分移動量との関係
- ④ 原位置から採取した不攪乱土への凍上量と水分移動量との関係の適用性

a) 時間経過による凍上量と水分移動量との関係

供試体 P100 に対し、冷却温度を -11°C として、クローズドシステムで3日間凍上試験を行った結果、凍上量は Fig. 8 の実線のように変化した。一方同じ供試体を用いたオープンシステム条件下では、凍上量は図中の破線で示したようになる。両者を比較すると、凍上初期の増加傾向は同じであるが、3時間を過ぎるとクローズドシステムでの凍上量の増加割合は小さくなり、最終凍上量はオープンシステムの場合と比較してかなり小さくなっている。この原因はクローズドシステムで凍上が発生すると、未凍結土中の水分量が低下するので、未凍結

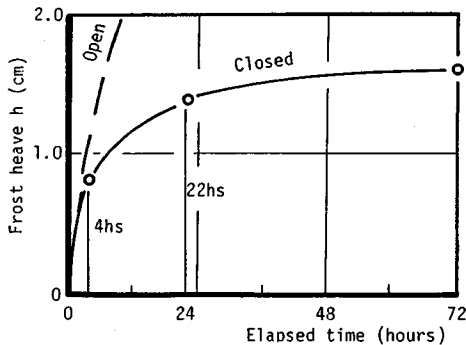


Fig. 8 Variations of frost heave with elapsed time in the specimen P100 ( $\theta_c = -11^\circ\text{C}$ ).

部分からの水分移動量が少なくなったためである。

以下に、凍上過程における凍上量と水分移動量の関係について検討する。クローズドシステムにおいては、未凍結土からの水分移動量は直接には測定できない。そのために、未凍結土中の含水比の低下量を水分移動量と考えて、4 hs., 22 hs. において実験を中断して含水比分布を測定した。その結果を示す Fig. 9 より未凍結土中の含水比の低下量から単位面積 (cm<sup>2</sup>) 当たりの水分移動量  $m_{wm}$  を求めると、各時間における  $m_{wm}$  と凍上量  $h$  の関係は、Fig. 10 中の○印で示したようになる。

いま、飽和土の凍上量  $h$  (cm) が、凍結部分に存在していた凍結前の全水分量を供試体断面積で除した単位面積当たりの水分量  $m_{wi}$  (gf/cm<sup>2</sup>) の凍結による体積増加  $0.09 m_{wi}$  と、未凍結領域から凍結領域へ移動した水  $m_{wm}$  (gf/cm<sup>2</sup>) の凍結による体積増加  $1.09 m_{wm}$  の和と仮定すると、次式が成り立つ。

$$h = 0.09 m_{wi} + 1.09 m_{wm} \dots\dots\dots (1)$$

上式を図中を実線で示すと、実験値と比較的よく一致しており、クローズドシステムにおいて各時間の凍上量は凍結部の供積膨張と移動水の体積膨張の和であることがわかる。

b) 水分移動範囲を制限させた場合の凍上量と水分移動量との関係

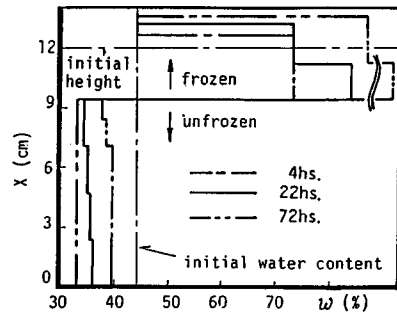


Fig. 9 Variations of water content distribution with elapsed time (P100,  $\theta_c = -11^\circ\text{C}$ ).

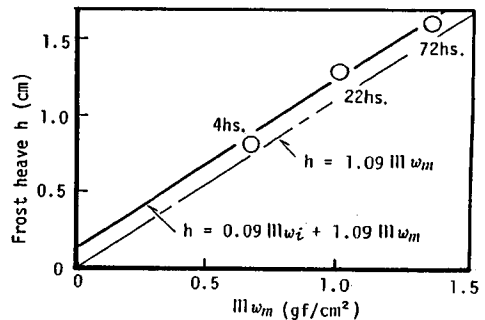


Fig. 10 Relationship between frost heave and water immigration (P100,  $\theta_c = -11^\circ\text{C}$ ).

供試体の形状効果を調べるために、同一供試体、同一温度条件で、供試体中の特定の1か所に遮水シートを設置して水分移動範囲を制限させた実験を行った。なお、供試体はP100を用い、冷却温度は $-11^{\circ}\text{C}$ とした。その設置位置は供試体の上面から、それぞれ $(1/4)H$ 、 $(2/4)H$ 、 $(3/4)H$ 、 $H$ である。それぞれの場合の凍上量の経時変化をFig. 11に、含水比の分布をFig. 12に示す。

両図より、供試体の水分移動範囲が小さくなると、未凍結土からの水の移動量が低下するために、凍上量も小さくなっていることが確認される。前述の方法と同様に

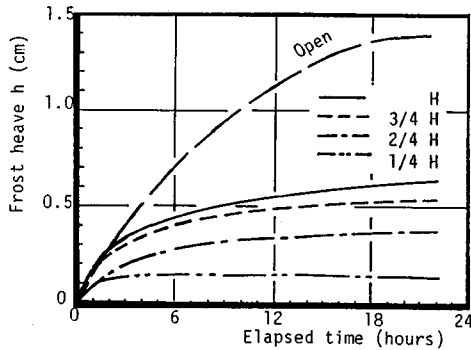


Fig. 11 Effect of the extent of water immigration on frost heave curves (P100,  $\theta_c = -11^{\circ}\text{C}$ ).

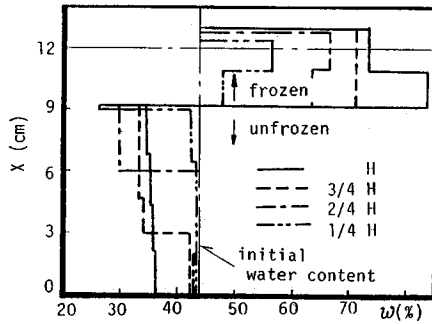


Fig. 12 The water content distributions after freezing (P100,  $\theta_c = -11^{\circ}\text{C}$ ).

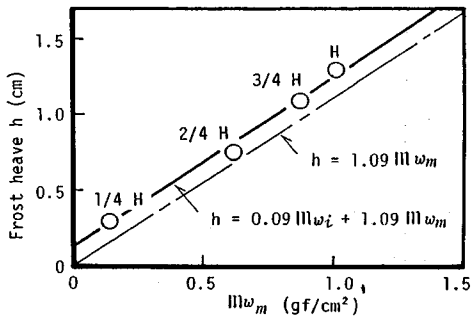


Fig. 13 Relationship between frost heave and water immigration (P100,  $\theta_c = -11^{\circ}\text{C}$ ).

含水比分布から  $m_{wm}$  を求め、 $m_{wm}$ 、 $m_{wi}$  と  $h$  との関係 を Fig. 13 中に○印で示した。この実験値も式 (1) とよく一致していることがわかる。

c) 異なる供試体や温度条件での凍上量と水分移動量との関係

前記の検討により、同一供試体と同一温度条件下においては、式 (1) が成立することが確認された。このような結果の一般性を検討するために、異なる供試体や温度条件で供試体 P100, P450 について冷却温度を  $-24^{\circ}\text{C}$ 、 $-11^{\circ}\text{C}$  と変化させてその凍上量と水分移動量との関係を調べた。

供試体の含水比や凍結深さが異なるために、凍結領域に存在していた凍結前の水分量  $m_{wi}$  も変化する。そこで、この値も考慮して、Fig. 14 に示したように  $m_{wi}$ 、

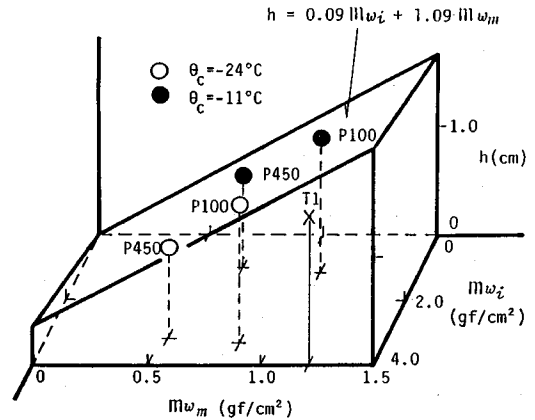


Fig. 14 Relationship between frost heave and water immigration in the consolidated specimens.

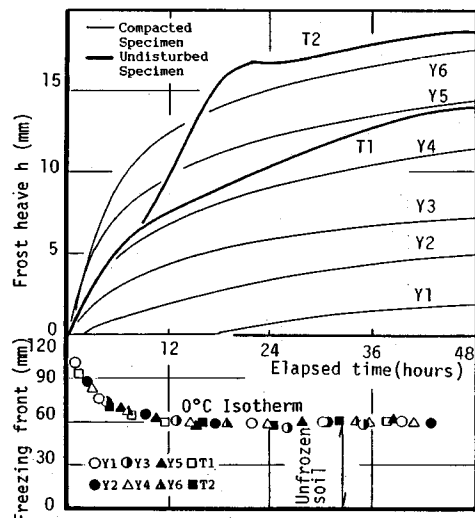


Fig. 15 Variations of frost heave and freezing front with elapsed time in the undisturbed specimens ( $\theta_c = -24^{\circ}\text{C}$ ).

$m_{wm}$  と  $h$  との関係を三次元的に描くと、多少の誤差はあるものの実験値は平面上に示された式(1)とよい対応を示しており、クローズドシステムにおいても式(1)の仮定が妥当であることがわかる。

d) 原位置から採取した不攪乱土への凍上量と水分移動量との関係の適用性

圧密した供試体を用いた凍上試験での凍上量と水分移動量との関係の不攪乱供試体への適用性について検討を行うために、長野県の蓼科高原で採取した不攪乱供試体 T1, T2 を用いて上記と同様の実験を行った結果、Fig. 15 に示す凍上量曲線を得た。ここで、供試体 T2 は、実験開始後約 9 時間を経過したところから急速に凍上量が増加している。これは供試体 T2 では、凍結前に下面から約 6.5 cm のところに亀裂があったために、凍結面がこの深さに達すると、移動した水分が亀裂面に集中してアイスレンズが発生したためと考えられる。そのために T1 のみについて比較すると、米山土と蓼科土では含水比が大きく異なるにもかかわらず、飽和度のほぼ同じである Y4・Y5 と同じ程度の凍上量を示している。しかし、Y3 よりはかなり大きい凍上量となっている。

$S_r=90\%$  の不飽和状態にある供試体 T1 について、実験終了後測定した含水比分布から求めた水分移動量と凍上量との関係を検討すると、Fig. 14 において×印で示したようになり、室内で成形した供試体の試験結果とかなり異なっている。

#### 4. 結 論

クローズドシステム条件における粘性土の凍上現象について検討するために、締め固めた供試体を用いて実験を行った前報に加え、圧密した飽和供試体および不攪乱供試体に対しても同様に、凍上試験を行った。本研究によって得られた主要な成果は以下のとおりである。

(1) ほぼ等しい含水比を有する圧密した供試体 (P100, P400) と締め固めた供試体 (Y3, Y5) の凍上量と経過時間の関係を比較すると、凍結初期の凍上速度は圧密した供試体の方が大きい。また、飽和度が近い (Y6, P100) ならば凍上量と経過時間の関係はほぼ等しくなるが、凍上量は含水比、間隙比、飽和度などの相互関係によるといえる。

(2) 圧密した供試体の凍上量はその圧密圧が大きくなると、含水比、間隙比が減少するために小さくなる。

(3) 飽和供試体の凍上量は、凍結域に最初から存在していた水分の凍結・膨張による凍上量と、未凍結域から移動してきた水分の凍結・膨張による凍上量との和で表わされる。

(4) 原位置で採取した不攪乱土においても室内で作

成した圧密および締め固めた供試体とはほぼ同様な傾向の凍上量-時間関係が確認された。

土の凍上現象は供試体の状態、拘束圧力の大きさ、冷却温度など多くの要因の影響を受けるので、今後はこれらの点について研究を進めてゆくつもりである。また、最後になりましたが本研究を行うにあたり、不攪乱試料を採取していただいた、三井建設(株)に謝意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) Taber, S. : Frost heaving, Journal of Geology, Vol. 37, pp. 428~461, 1929.
- 2) Beskow, G. : Soil Freezing and Frost Heaving with Special Application to Roads and Railroads, Swedish Geotechnical Society Series C., No. 375, 145 pp., 1935.
- 3) Everett, D. H. and Haynes, J. M. : Capillary properties of some model pore systems with reference to frost damage, RILEM Bulletin, New Series, No. 27, pp. 31~38, 1965.
- 4) Williams, P. J. : Properties and behaviour of freezing soils, Norwegian Geotechnical Institute Publication NR, 72, 119 pp., 1968.
- 5) Miller, R. D. : Freezing and heaving of saturated and unsaturated soils, Highway Research Record, No. 393, pp. 1~11, 1972.
- 6) Kaplar, C. W. : Phenomenon and mechanism of frost heaving, Highway Research Record, No. 304, pp. 1~13, 1970.
- 7) Harlan, R. L. : Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soils, Water Resources Research, 9, pp. 1314~1323, 1973.
- 8) Taylor, G. S. and Luthin, J. N. : A model for coupled heat and moisture transfer during soil freezing, Canadian Geotechnical J. 15, pp. 548~555, 1978.
- 9) 福尾義昭・北岡豪一・有賀祥夫 : 凍上量と温度分布・吸水量との関係について, 京大防災研究所年報, 12-B, pp. 169~176, 1969.
- 10) 田沼邦雄 : 凍上の際の土中水分移動と間隙率との関係, 低温科学, 物理篇, 27, pp. 359~366, 1970.
- 11) 高志 勤・益田 稔 : 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, 第 33 巻, 第 3 号, pp. 1~11, 1971.
- 12) Hoekstra, P. : Water movement and freezing pressures, Soil Sciences Society of America, Proceedings, 33, pp. 512~518, 1969.
- 13) 福田正己 : ガンマー線水分計による凍土中の水分移動の測定, 雪氷, 第 44 巻, 第 1 号, pp. 1~11, 1982.
- 14) 福田正己・中川 茂 : 土の凍結過程での熱と水の流れの数値解析, 雪氷, 第 44 巻, 第 1 号, pp. 13~21, 1982.
- 15) 亀井健史・小川正二・木村嘉富・福田 誠 : 不飽和粘性土の凍上メカニズム, 土木学会論文集, No. 382, III-7, pp. 201~208, 1987.
- 16) 土質工学ハンドブック, 1982.
- 17) 木下誠一 : 凍上の物理学, 1967.