

精研冷機(株) 正眞・高 志 勤  
 精研冷機(株) 住 吉 正 光

§ 1. 緒言

地盤を人工的に凍結して土木工事を行う地盤凍結工法では凍結時の土の膨脹に起因する地盤内の土圧増加及び周囲構造物の変位が問題になる。地盤の凍結に伴って起る凍上現象はこの工法の最大の問題点と云うことができる。凍上現象そのものの研究は古くから活凍に行はれ(脚註1) 多数の理論的実験の結果が発表されているが、これらはいづれも寒冷地の自然凍結による凍上現象を対象としたもので、凍上量を対象にしたものでは上載荷重はゼロであるか、または非常に小さいものと取扱っている(文献2) 一方 凍上圧を対象にしたものでは、変位をゼロまたは非常に小さく抑制して実験が行われてきた(文献3) 従って、これらの結果を地盤凍結の現場にあてはめて、予め周囲構造物の変位を予測することは不可能である。

そこで著者等は一定の上載荷重がある場合の開放型凍上(脚註) 試験装置を組立て、凍上量が拘束圧によってどのように変化するかを実験した。本講演はこの装置によって得られた最初の結果を報告するものである。

§ 2. 実験装置の概要

実験装置は図-1に示す通りで、詳細は講演の際スライドで説明するが、この装置の特徴として次の7点があげられる。

- 1) 冷却には電子冷却装置を採用したので短時間に0°C ~ -25°C迄迄範囲に冷却温度を調節できる。
- 2) 試料下面にも冷却装置を取付けたため実験中周囲温度の影響を小さくでき、凍結完了の確認が容易になった。
- 3) 載荷はスプリングで行っているので実験中凍上による変位のため1~2%の載荷の増加はあるが、簡単に確実に載荷量の変更ができる。
- 4) 試料はアクリライトケースに入れて実験するので凍上中アイスレンズの形成と

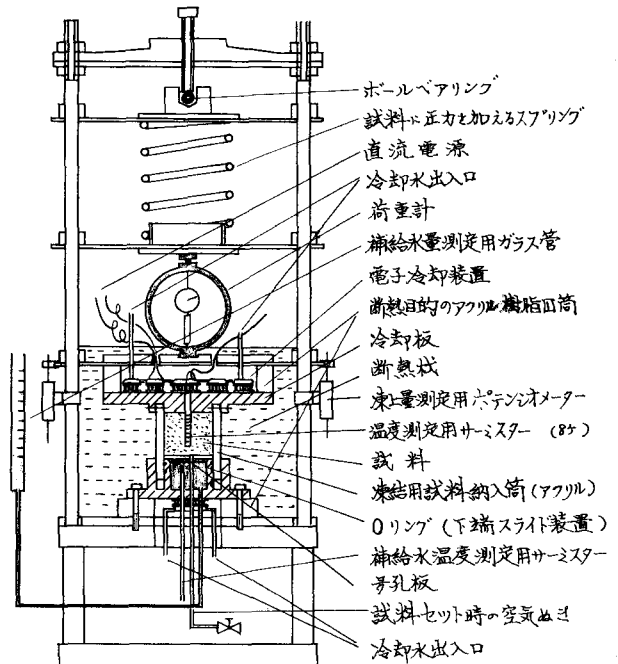


図-1

[脚註] 試料の凍結過程で、間隙水が熱流の方向と平行に自由に出入りできるようにしながら凍上させるものである。

観察することができる。

- 5) 補給水を加圧できるので現場に合せて間隙水圧の調節が可能となった上、凍結中の結排水量が子エツプできる。
- 6) 凍上量 温度の自記化により凍上過程の細部解析が可能である。
- 7) 試料下端でケースシリンダーをスライドさせる構造を採用したため試料とシリンダーとの凍着の影響を除去することに成功した。

### §3 実験方法と凍結の一様性のテスト

実験は、鋼製アダプター(図-2)と装着したアクリライトシリンダーを圧入して現場の土を不攪乱のまま採取し、そのまま持帰って装置に取付け、上載荷重、間隙水圧、温度を現場のそれに合せて変位指度が一定になる迄設置した後、試料の上面から一定温度で凍結を行う。このとき、試料の凍結が終了したことを確認しやすくするために、下面冷却板は補給水が凍結しない程度に0°C付近で恒温に保っておく。また、資料をセツトする時、気泡が残らないように充分注意が必要である。結果の一例を図-3に示す。また実験に用いた2種類の上の諸性質は図-4に示す通りである。なお、この装置では試料側面のアクリライトシリンダーより熱が浸入する

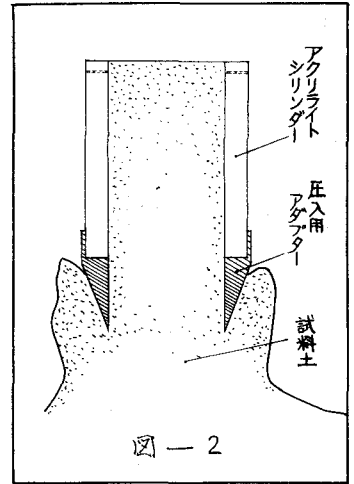


図-2

ため、凍結面が予測通り平面のまま下降するかどうか疑問があるため、本実験に入る前にメチレンブルー水溶液を凍結させて凍結フロントの形を観察した。結果は非常に良好であった(スライド)。

### §4 凍上量と熱流の関係

凍結面の進行速度と凍上量の間係を知るため上載荷重を2kg/cm<sup>2</sup>に揃えて冷却面温度を変化させて最終凍上量を測定した。結果は冷却面温度が-10°C~-12.5°C付近で凍上量が最大となる(図-5)。ここに注意することは

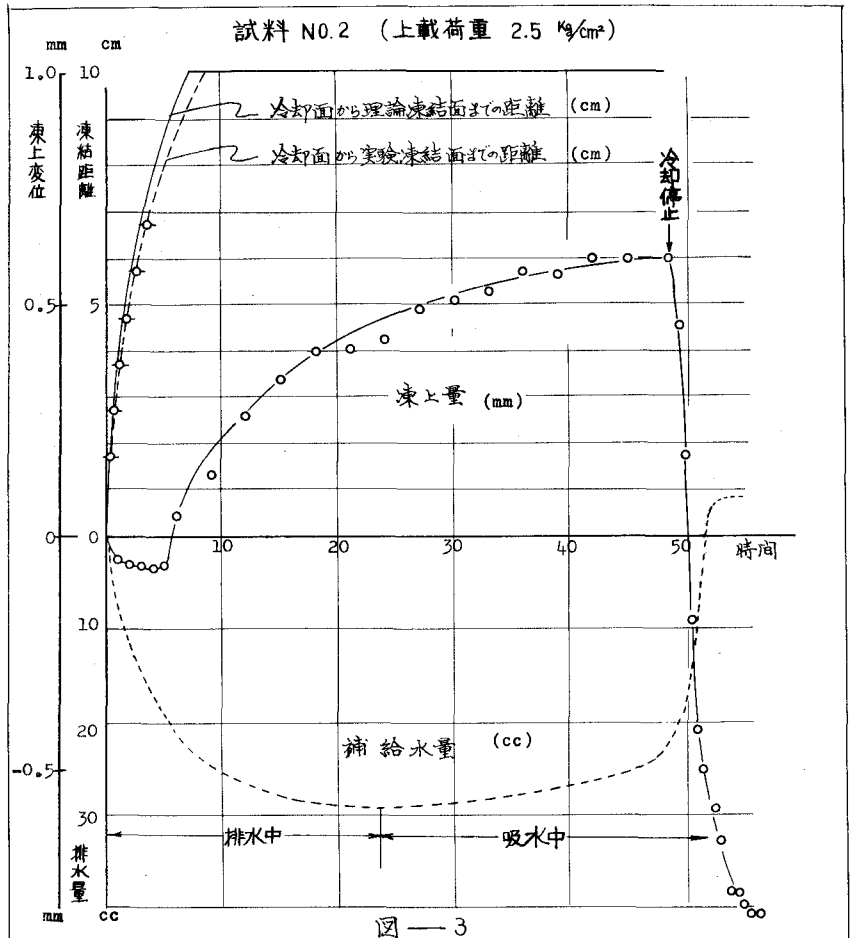


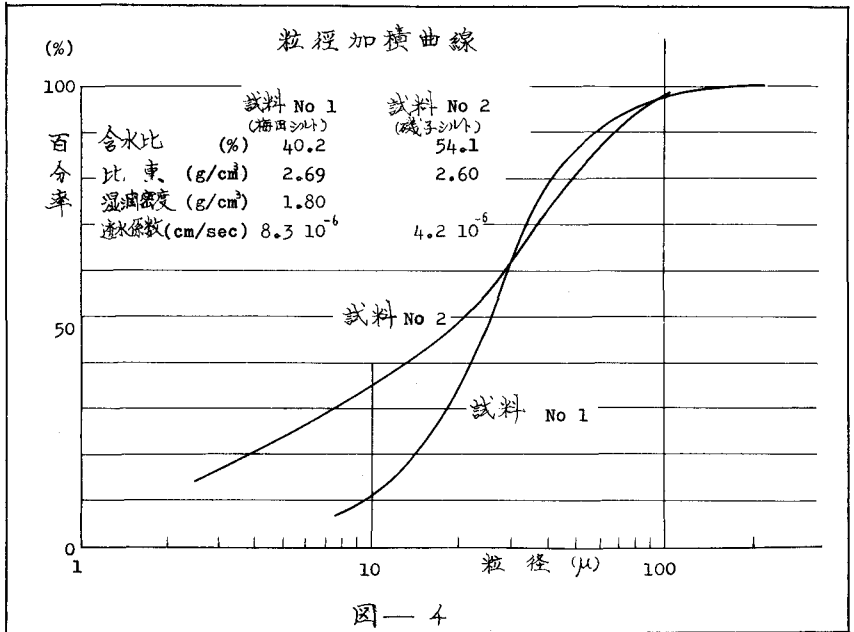
図-3

これらの実験は同一の試料を用いて行ったため、凍結解凍の繰返しによって乱されている可能性のあることである。実験は先ず試料 No. 1 を冷却温度  $-10^{\circ}\text{C}$  より始めて順次  $-25^{\circ}\text{C}$  迄下げて、次に  $-5^{\circ}\text{C}$  迄順次上昇させ更に  $-10^{\circ}\text{C}$  迄下げて上の攪乱の影響を調べたが、それ程大きい影響がないことが確認できた。試料 No. 2 の凍上量が No. 1 に比して約3倍程度大きいのは、両試料の粒径分布の相違を反映しているものと思われる。なお、No. 2 のデータのバラツキについては、現在のところ明確な原因がつかめていない。

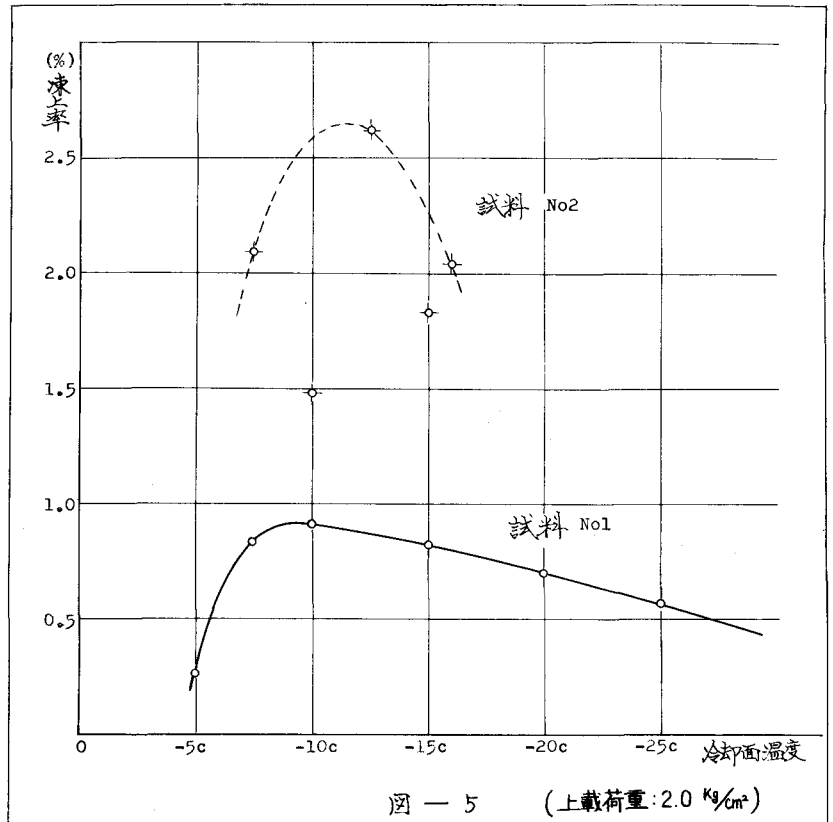
### §5 凍上量と上載荷重の関係

上載荷重または拘束圧力によって凍上量が変化することは以前から指摘されていた(文献3)が、これを定量的に示した報告は殆どみあたらない。

一方、凍上圧に関しては P. Hoekstra(文献4)、E. Penner(文献5)等によって詳細な実験が行われている。これらの結果からみると、本実験に用いたような土では上載荷重が3%程度で大きく抑制され得ることを示している。そこで実験としては、試料 No. 2 を用いて、冷却温度と前節の実験で最大凍上量を得た  $-12.5^{\circ}\text{C}$



図—4



図—5 (上載荷重:  $2.0 \text{ kg/cm}^2$ )

に換え、下面の冷却温度を $+0^{\circ}\text{C}$ 付近として上  
 載荷重を $0.9\sim 4\text{ kg/cm}^2$ まで $0.5\text{ kg/cm}^2$ 間隔で変化さ  
 せて凍上量の測定を行った。ただし、間隙水  
 圧は大気圧に等しく、試料は前節とは別のもの  
 をセツトして繰返し実験を行った。この結果  
 上載荷重によって凍上量が大きく抑制されること  
 が判った(図-6)。この結果を閉鎖型の凍上  
 実験(文献6)と比較すると、その相違が非常に明  
 確に理解できる。

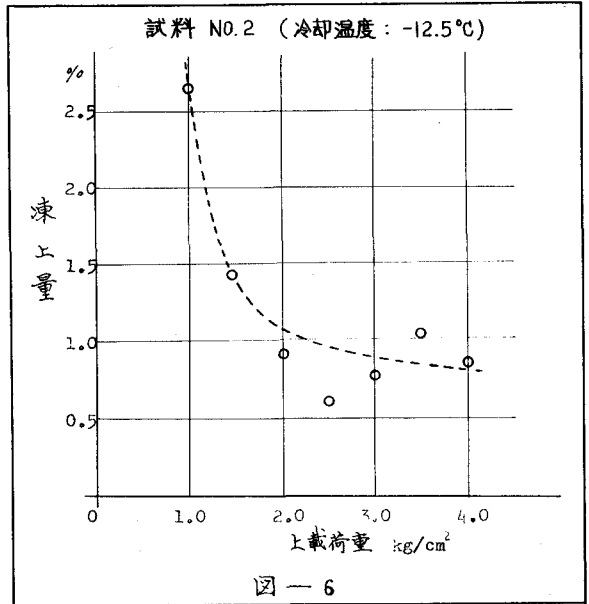


図-6

### §6 凍上過程における水の移動

凍上現象については、「凍結進行中に周囲の水  
 を凍結面に取りこんでアイスレンズを形成しな  
 がら凍上し、凍上量はこもり取りこまれた水の  
 総量に等しい」という中谷教授の有名な提言が  
 ある(文献1)。これは上載荷重がない場合に正しく、本実験のように上載荷重がある場合には、試  
 料が完全に凍結するまでは水は排出され、解凍する時にそれと殆んど同量の水が吸込まれるのが一般  
 的傾向である(図-3)。例にあげた実験では、冷却開始後25時間位で排出が止まり吸込みになるが  
 その量は僅少である。このように載荷がある場合には、凍結中に自由水が排出されるのは一般的傾  
 向ということができる。またこの実験で明らかになったもうひとつの興味ある点は、試料が完全に  
 氷点以下になってから尚長時間凍上が継続することである。これは一見凍結を完了したかに見える  
 土の中の不凍水が流動して凍上を続けると考えるより外に説明しようがない。この点に関しては  
 さらに数多くの試料について実験を行った後に発表したい。

### §7 結言

本装置による実験は尚継続中であるが、これまでに明らかになった点と要約すれば次の3点となる。

- 1) 凍上量は温度勾配によって変動し、凍上量を最大にする温度勾配が存在する。
  - 2) 載荷がある程度大きい場合には、凍結過程で間隙水は排出され解凍過程で吸込まれる。
  - 3) 凍上量は、閉鎖型凍結では上載荷重の変化を受けにくい、開放型では大きく変化する。
- なほ、助言指導を賜った京大防災研究所村山朔郎教授、奥田節夫教授、福尾義昭助教授に謝辞を申  
 し上げたい。

#### (引用文献)

1. 中谷・森野; 凍上の機構について, 北海道大. 低温科学研究報告第1号, 寒気集誌, 第2輯, 第18巻, P. 313.
2. 中谷; 凍上の機構について, 同上報告第4号, 寒気集誌, 第2輯, 第19巻, P. 125
3. 木下・大野; 凍上力 I, 低温科学, 物理誌, 第21輯, P. 117.
4. P. Hoekstra et al.; U.S. Army Material Command C.R.R.E.L. Research Report, 176
5. E. Penner; Proc. of the Int. Conf. on Low Temp. Sci., 1966, P. 1401
6. 福尾・加藤・有賀; 凍結による土壌の体積変化について, 京大防災研究所年報, 第10号, P. 529