

液体窒素による地盤凍結実験 (III)

かま 鎌 田 まさ 孝*
 かし 櫻 村 ひろし*
 博

1. ま え が き

地盤凍結工法は、土という材料を対象とすることから、また熱との組み合わせであり、さらに実験的研究と実施工の資料不足からまだ多くの問題点を含んでいるというのが現状である。これら問題点の 2, 3 を液体窒素を利用した場合について列挙すればつぎのとおりである。

すなわち、凍結管相互の干渉による凍結速度の変化、最も経済的な凍結温度の設定と液体窒素の使用量、凍結速度による凍結土の圧縮強さと膨張量の程度、凍結温度の差による解凍速度と凍上量、地下水流の有無による凍結速度、保冷、および排出ガスの再利用などがある。

本文は、2種類の実験結果の一部についてまとめたものである。そのうちの実験[I]としては、主として粘性土を用いた場合の土中の温度分布と凍結管相互の干渉について実験を行ない、これらの結果を凍結実験[II]²⁾の計算値(以下計算値という)と比較検討し、本工法の実用への可能性、および今後の問題点について述べた。

なお、実験[I]は、後述のように試験地盤を造成して行なったものである。

一方実験[II]は、液体窒素の性質を利用することによって凍結速度の調整と凍結温度の調節をしながら凍結を行なった場合の結果の一部をまとめた。

なお、実験[II]においては、小型の冷却ソウ(槽)を用いて粘性土と砂質土について実験したが、ここでは粘性土を用いた場合の凍結土の凍結時間による圧縮強さと膨張量だけについて述べることにする。

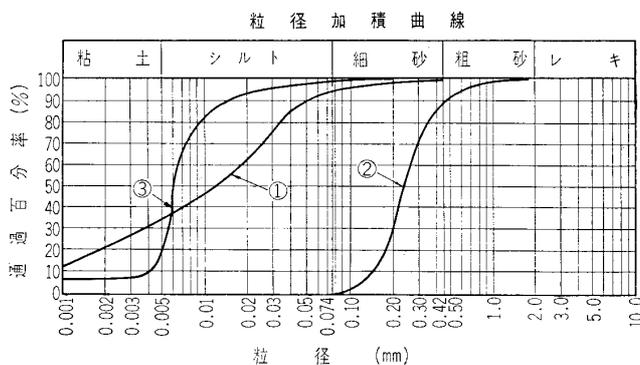
2. 実 験 [I]

2.1 実験の方法

実験に用いた試料は、シルト質粘土($G_s=2.63$, $w \approx 60\%$)と砂($G_s=2.75$, $w \approx 20\%$)の2種類を用いた。図-1 および表-1 は、試料の物理的性質を示したものである。同様に図-2 は、試験地盤の平面、および断面図を示す。図-2 の試験地盤の作成は、図に示すようにまず現地盤上に、高さ 1.8m×幅 3.0m、長さ 3.5m の木製型ワク(枠)を組み立て、型ワクのジョイント部分

からの漏水を防止するため、ビニールでシールしたのちに、下層に砂質土を、中間層(凍結の対象とした試料)にはシルト質粘土を、また上層部には下層と同じ砂質土をなるべく均一になるように締固めて作った。

これら各層のうち、とくにシルト質粘土試料については、一層の厚さが約 20 cm となるように注意しながら作った。もちろんシルト質粘土については、あらかじめ、全試料の含水比が一定になるように調整を行なったのち



試料番号 No.	レキ (%)	粗砂 (%)	細砂 (%)	シルト (%)	粘土 (%)	コロイド (%)	最大径 D_{max} (mm)	60%径 D_{60} (mm)	10%径 D_{10} (mm)
①	0	0	5.7	58.8	35.5		2.0	0.018	—
②	0	10	90	0	0	0	2.0	0.26	0.145
③	0	0	1	80	19		2.0	0.0064	0.0042

試料番号 No.	均等係数 (Uc)	2,000 μ フルイ通過率 (%)	420 μ フルイ通過率 (%)	74 μ フルイ通過率 (%)	土粒子の比重	分類
①	—	100	100	94.3	2.63	① シルト質粘土
②	1.7	100	90	0	2.75	② 砂
③	1.5	100	100	99	2.66	③ シルト質ローム

図-1 粒度分析

表-1 土の物理的性質

記号	数 値	
含水比 w	51%	それぞれ5コの平均値
比重 G_s	2.63	
湿潤密度 r_t	1,698 kg/m ³	
乾燥密度 r_d	1,126 kg/m ³	
間ゲキ比 e	1.34	
容積含水率 n'	0.57 m ³ /m ³	
飽和度 S_r	99.0%	

* (株) 藤田組技術研究所

No. 504

に、型ワク内に入れたものである。

一方、温度測定方法は、試験地盤の各点に埋設した銅-コンスタンタン熱電対を用いて自動温度記録計および自動温度指示計で記録した。

液体窒素（以後 LN_2 とかく）の注入量の測定は、 LN_2 タンク（容量 3,000 l）に取り付けてある液面計を用いて行なった。

また凍上量の測定は、図-3 に示したように土中に埋設した鉄板の上に鉄筋棒を溶接し、その先端部を、地表面のダイヤルゲージ（1目盛 1 mm /100）で読んだ。

図-4 は、温度測定用の熱電対、凍上量測定用の鉄筋棒、および凍結管などの埋設位置を示したものである。一方凍結管は、図-5 に示したように 2 重管（外管 $\phi = 1\ 1/4'$ 鉄管、内管 $\phi = 10\text{ mm}$ 銅管）とし、間隔 1.0 m の 2 本の凍結管を内管で 1 本に連結し、それぞれ図に示すように (A) 凍結管と (B) 凍結管とした。さらにこの先端部を直接 LN_2 タンクの液出口にジョイントした。また凍結管の埋設位置は、図からわかるようにシルト質粘土層の中心部とした。

LN_2 の注入要領は、 LN_2 タンクのバルブを開き、まず $\phi = 10\text{ mm}$ の銅管に、つづいて 2 重管の内管部に流入することによって行なった。さらに内管の先端部よりブローした LN_2 は、内管と外管との間を通して注入側の放出口から大気中に放出した。このときの注入量の調整は、冷却された外管（凍結管）の表面温度 T_c をつね

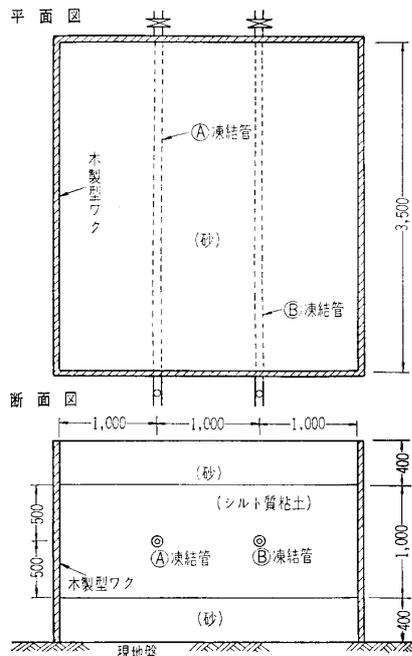
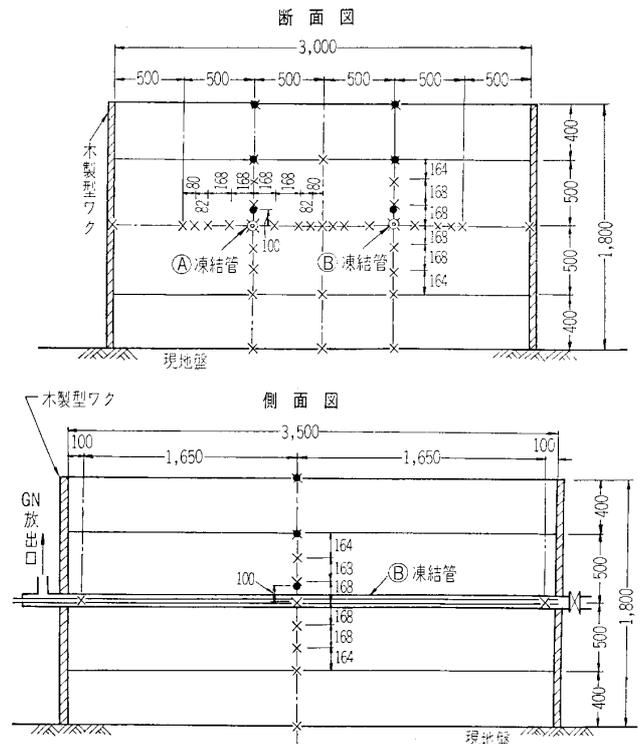


図-2 試験地盤



注：×印-温度測定位置を示す 設置個数47個
 •印-凍上量測定位置を示す 設置個数6個

図-4 試験地盤内の温度と凍上量測定位置図

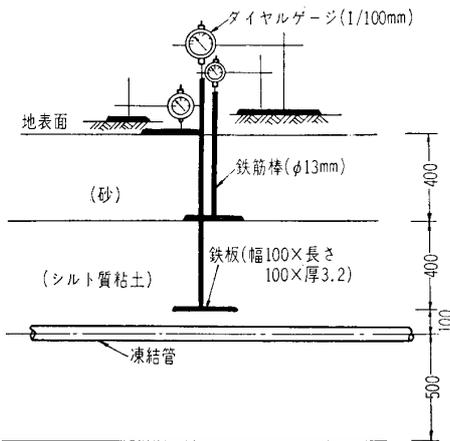


図-3 凍上量測定装置

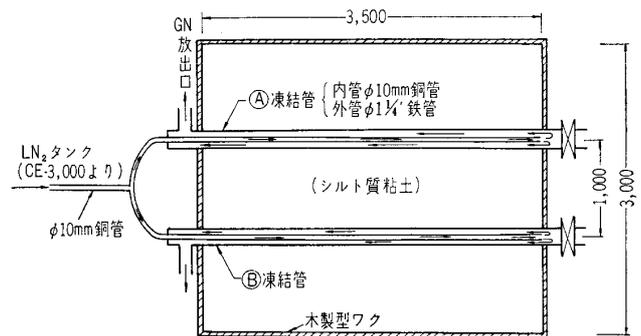


図-5 配管（平面図）

に一定温度に保持する必要があったので、温度計でチェックしながら LN_2 タンクの注入バルブの開閉によって行なった。

試験地盤の凍結範囲は、凍結管の中心から半径 50 cm までとし、その確認は土中に埋設した 47 個の温度計で行なった。なお、凍結完了（凍結管の中心から 50 cm のところの温度が 0°C になったとき）後は、ただちに LN_2 の注入を停止し、それから解凍にともなう各測定を一定時間ごとに行なった（測定時間は 600 時間）。

2.2 実験結果と考察

(1) 土の熱的性質

表-2 は、試験地盤のうちのシルト質粘土の凍結前後の土の熱的性質、およびその他の諸数値を示したものである。この表の熱的諸数値は、表-1 の飽和度から一応シルト質粘土の飽和度を $S_r = 100\%$ として計算したも

表-2 土の熱的性質

	凍結前	凍結後
熱伝導率	$K_2=1.28 \text{ kcal/m}\cdot\text{h}\cdot\text{°C}$	$K_1=2.34 \text{ kcal/m}\cdot\text{h}\cdot\text{°C}$
密度	$\gamma_{t2}=1,698 \text{ kg/m}^3$	$\gamma_{t1}=1,631 \text{ kg/m}^3$
比熱	$C_2=0.48 \text{ kcal/kg}\cdot\text{°C}$	$C_1=0.33 \text{ kcal/kg}\cdot\text{°C}$
温度伝率	$K_2=1.56 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$	$K_1=4.39 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$
凍結潜熱	$L=27.78 \text{ kcal/kg}$	
凍結管表面温度	$T_c=-118\text{°C}$ (冷却中各時間の温度平均値-92コ)	
地中の平均温度	$T_\infty=+14\text{°C}$ (36コの平均値)	
凍結管半径	$r=0.021 \text{ m}$	

のであって、容積含水率 n' をパラメーターとして算出した。

また地中温度 T_∞ および凍結管の表面温度 T_c は、埋設した温度計 47 個のうち 6 個の平均値である。

(2) 凍結中の地中温度分布

図-6 は、④凍結管を中心とした場合の上下方向における 4 時間 32 分目と 72 時間 38 分目の温度分布の実測値と計算値を示したものである。ここでいう計算値とは、凍結実験[II]²⁾ の 2 次元の解に表-2 の諸数値を入れて計算して得た値(単管の場合)である。図に示すように横軸は、凍結管の中心からの距離(凍結管半径 $r=0.021 \text{ m}$)であり、縦軸は、温度の状態を表わすものとして $(T-T_c)/(T_\infty-T_c)$ を用いたものである。すなわち T_∞ は土中の温度、 T_c は凍結管の表面温度、 T は任意の温度を表わすものである。

この図によれば、単管の場合の計算値と実測値がかなりよく一致していることがわかる。凍結中の全体的な温度分布の傾向としては、凍結管から同一距離の場合を比較すると実測値の方が計算値よりもいくぶん温度が低く

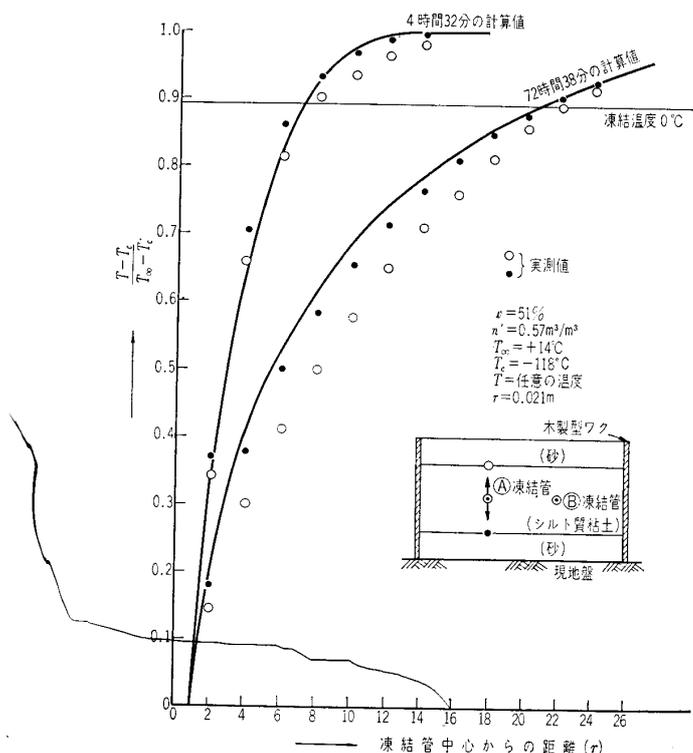


図-6 ④凍結管を中心とした垂直方向の温度分布

なっている。これは、凍結速度が速いことを意味することにはかならない。また実験結果だけの温度分布を比較すると、凍結管の上と下側で差がみとめられる。すなわち凍結管の上側の温度は、下側の温度より低く、かつ下側の実測値より計算値においてその差が大きい(とくに 72 時間 38 分)。これらの結果については現在のところはっきりしたことはいえないが、その一つとしてつぎのようなことが実験状況から考えられる。

土中の温度測定個所の関係上、凍結管の上下側で 2 種類の温度計を使用したこと、実験中の降雨によって上部砂層の含水比が多くなったこと、日中の砂表面の温度が 30°C 内外に上昇したことの気象条件から考えても、凍結管の下側より上側の温度が高い温度を示すはずである。それにもかかわらず凍結管の上側の温度計で測定した値が計算値と同じくらいか、あるいはもう一方の温度計で測定した値より低い温度を示している。これらのことから、温度計の指示値にいくぶん差が生じたと推定される。

同様に図-7 は、④凍結管を中心とした水平方向の温度分布について 72 時間 38 分目の実測値と計算値とを比較したものである。この図の横軸と縦軸は、図-6 と同様凍結管からの距離と $(T-T_c)/(T_\infty-T_c)$ をとったものである。

この図をみると、凍結管の右方向(黒マル)、つまり④凍結管と⑥凍結管の間の温度分布は、管相互の影響のためこのときすでに所定の半径 $24r$ (50 cm) まで凍結したことになる。しかしそれでも干渉の影響を考慮しない計算値とあまり大きな差はないようである。一方、凍

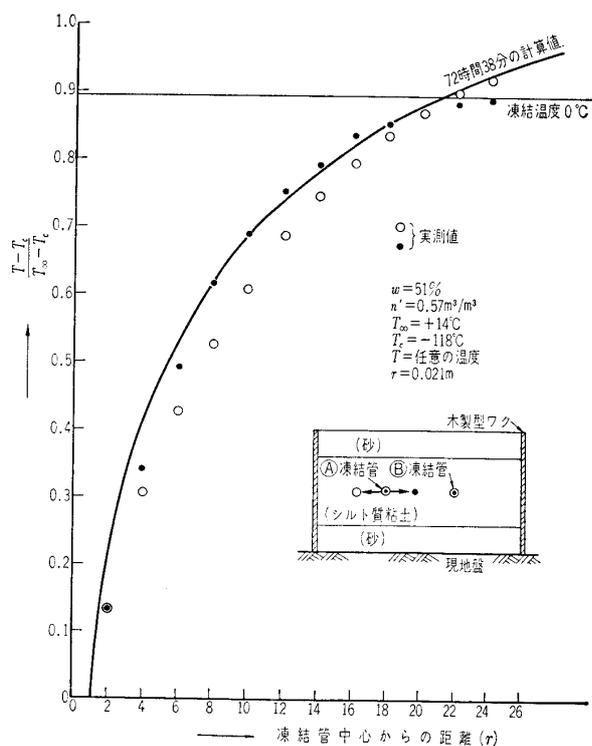


図-7 ④凍結管を中心とした水平方向の温度分布

結管の左側（白マル）の温度分布は、計算値とあまりよく一致していないことがわかる。

(3) 凍結速度

凍結面の位置 $R^2)$ を実測するのは実際のところなかなかむずかしいので、ここでは温度分布曲線から 0°C となる点を読みとり、これを凍結面の位置 R として凍結線を求めた。

図-8 は、④凍結管を中心とした垂直方向と水平方向における凍結線について、実測値と単管の場合の計算値とを比較したものである。この図の横軸は冷却時間(hr)を表わし、縦軸に凍結半径(m)をとった。

この図から、図-6, 7 の温度分布と同様に計算値と実測値とがかなりよく一致していることがわかる。ただ④凍結管と⑤凍結管の間における温度分布から推定すれば、 LN_2 の注入を開始してから約 60 時間後にはじめて管相互の干渉による影響があらわれた傾向を示している。しかしある冷却時間（ここでは約 40 時間）までは、単管だけの計算値とそれほど大きな差は認められない。

(4) 解凍中の温度分布

地盤凍結工法を実施するにあたって、所定の凍結を完了したのち、目的とする工事の途中においては凍結も解凍も進行しないというような条件を保持するために、保冷用の LN_2 を供給しなければいけない。したがって保

冷用の LN_2 の供給がなんらかの理由で突然中断した場合に、また他の理由で注入が不可能となった場合を考えて解凍がどの程度進行するのを知る必要がある。ここでは、解凍中の凍結面の位置 $X^2)$ について実験結果と 1 次元の熱伝導の微分方程式より導かれる温度分布の解から得た解凍量を比較検討した。

解凍中の凍結面の位置 X は、実測が困難であるため解凍時の温度分布を、埋設した数個の温度計で測定し、これらの点をむすんだ曲線から 0°C となるところを読みとった。図-9 は、④凍結管の中心から左側と下側における解凍曲線の実測値と計算値とを比較したものである。この図の横軸には、解凍時間(hr)を示し、縦軸は、凍結半径(m)を表わしたものである。

この図から、実測値は、計算値よりも全体として約 2 倍ほど速く解凍が行なわれたことを示しており、かなりの差が生じたことになる。このような差が生じた理由としては、いろいろ他にも考えられるであろうが、まず試験地盤が小規模であったうえに、実験の時期が温度の高い 5 月と 6 月であったため、外部からの熱の侵入が非常に多かったこと、さらに解凍中、2 度ほど大降雨があって試験地盤全体をおおっているカバーシートの不備のため、外部から水がかなりはいったことによって解凍の進行が一時的に促進され、実測値が早くなったものと考えられる。しかし以上のような条件のもとに行なった実験結果から、 LN_2 注入停止後約 2 日間ほとんど融解しなかったということからも、たとえ保冷用の LN_2 が中断しなければならぬ事態が生じたとしても実施工面から考えればそれほど心配する必要はないであろう。

(5) 液体窒素の使用量

本工法の実施計画にあたって、まず LN_2 の使用量を算出しなければならないのは当然であって、同時に LN_2 の使用量のいかに、本工法を経済的な点から考えた場合、最も大きくそのコストを左右するという理由から、ここでは実験に使用した LN_2 の量と計算値の比較を行なった。

その結果、全使用量は、実験においては約 8.8 t (保冷は含まない) であった。これに対して表-1 と表-2 の土の物理的性質、および土の熱的性質を用いて行なった計算結果によれば、その使用量は約 7 t であった。なおこの場合の凍結前の地中の平均温度は、 $+14^\circ\text{C}$ 、凍結後の土の温度は、 -35°C と仮定して行なったものである。したがって計算値より約 1.8 t だけ多く使用したことになる。

図-10 は、これらの結果を④凍結管についてまとめたものである。実験時の凍結土量の推定（凍結半径）は、図-8 に示す実験結果の凍結線から算出したものである。この図から、土 1.0 m^3 を凍結するのに全体として

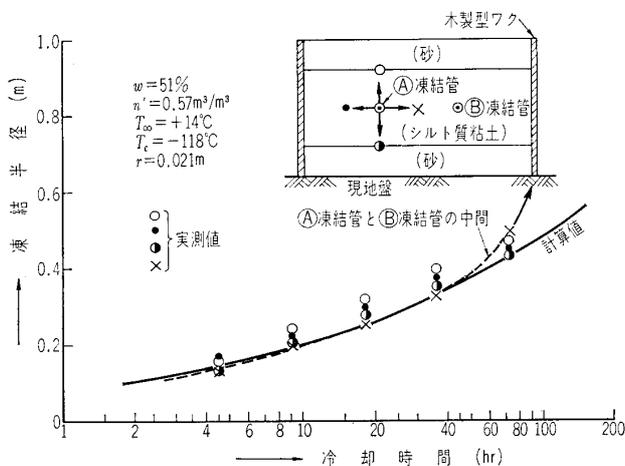


図-8 凍結線

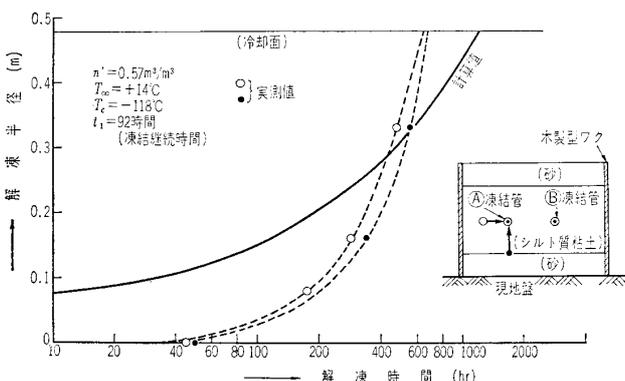


図-9 解凍線 (④凍結管側)

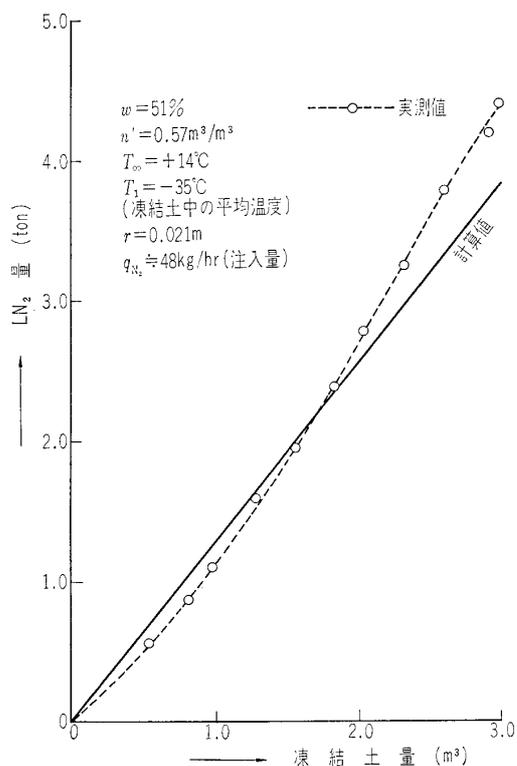


図-10 LN₂量と凍結土量 (④凍結管側)

約 1.5 t の LN₂ を使用したことになる。

(6) 凍上量

図-11 は、③凍結管の上側の凍上量と土中の温度との関係を示したものである。

この図から、冷却中の凍上量の変化は、No. 2 と No. 4 の測点位置ではほとんど同じ傾向を示しており、同時に LN₂ の注入停止後わずかに No. 2 の凍上量が大きくなっている。ここで注目すべきことは、LN₂ 注入停止後も凍上が進行していることである。これに対し、同様に、LN₂ 注入中の土中の温度変化を測定すると同図の①、②のようになっている。しかし LN₂ 停止後 24 時間で土中の温度は、約 -5°C 付近まで急速に上昇している。これは、凍結土が過冷却の状態から均一な温度状態になろうとする性質を示すものであると考えられる。これらのことから LN₂ 注入停止後も凍上の進行が生じる一つの理由としては、凍結土の温度が比較的 low、同時に不均一な温度状態にあるためにさらに凍結面が成長しようとするためではなかろうかと考えられる。

凍上量は、凍結管の付近の No. 6 が約 3 cm で最も少なく、これと反対に地表面、すなわち No. 2 が約 6 cm でいちばん大きい。

3. 実験 [II]

3.1 実験の方法

図-12 は、一種のマホービン (P-30 型容量 30 l) と供試体を冷却する装置を示したものである。LN₂ の冷

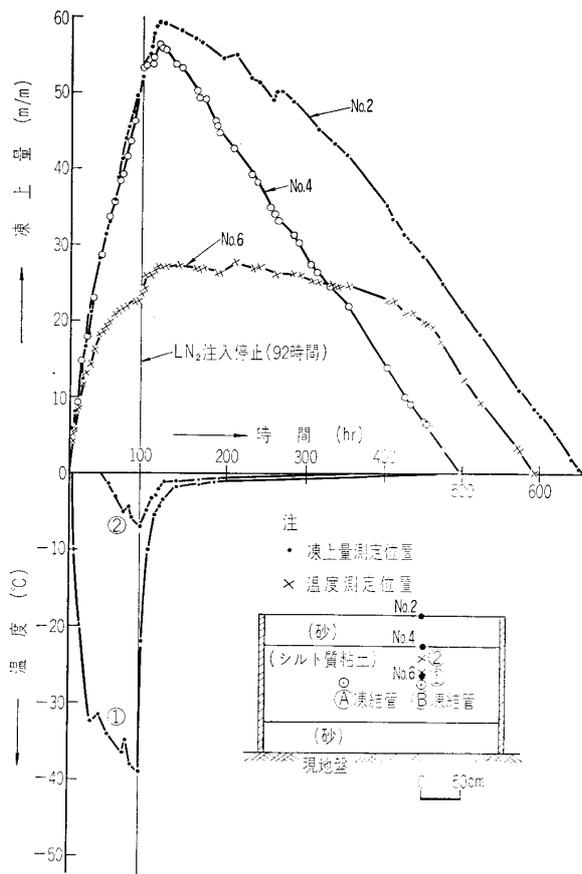


図-11 凍上量と温度 (③凍結管より上側)

却ソウ内への注入は、マホービンのプッシュボタンとブロー弁の簡単な操作によって調整しながら行なった。

試料および冷却ソウ内の温度測定は、銅-コンスタント熱電対を用いて自動温度指示計で読んだ。

実験に供した試料は、図-1 の③に示すように粒度分析の結果シルト質ロームに属する性質 (Gs=2.66) のものであり、その試験時の含水比 w は、40%、45% および 50% の 3 種類を目標にそれぞれ調整した。

供試体の作製方法は、調整した試料をマイターボックスを利用して直径 5 cm、高さ 10 cm に成形し冷却ソウ

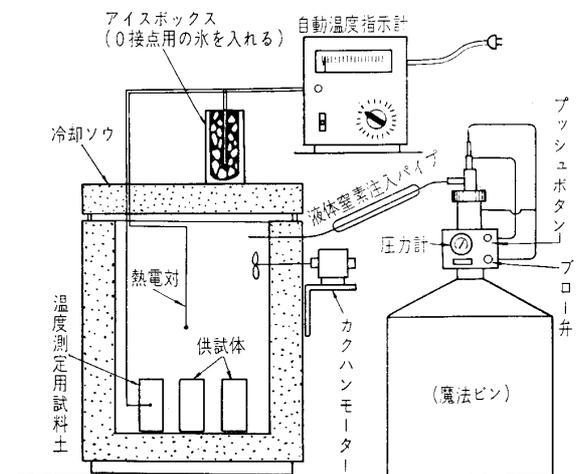


図-12 冷却装置

内に入れて所定温度になるまで冷却した。

また試験時の供試体の温度を正確に測定する方法として、供試体と同一の試料を作り、その試料の中心位置に熱電対をソウ入した。

一方冷却ソウ内の供試体の冷却方法は、 -20°C 、 -40°C および -60°C の3種類とし、供試体のはいつている冷却ソウ内に LN_2 を所定の量だけ注入しながら常温 ($+10^{\circ}\text{C}$ 前後) より徐々に行なった。このときの常温から目標温度までの冷却時間は、0分、10分、30分、100分、240分および480分の6種類とした。なお、ここでいう冷却時間0分とは、供試体を冷却ソウ内に入れる前に冷却ソウ内の温度を目標温度まで冷却したことを意味する。

LN_2 の注入によって冷却ソウ内の温度を所定の目標に到達させ、ただちに自動制御弁を用いて冷却ソウ内の温度を目標温度に合わせ、供試体の中心部の温度が冷却ソウ内の温度すなわち供試体の表面温度と同じになるまで冷却を続けた。その後、ただちに冷却ソウ内から供試体を取りだし、膨張測定と圧縮試験を行なった。

膨張の測定方法は、供試体の直径(6個所)と高さ(4個所)をそれぞれノギスを用いて行なった。また圧縮試験は、膨張測定後 CBR 試験機を用いて 1 mm/min の変形速度で行なった。なお圧縮試験中に供試体が解凍しないように供試体の上下面に供試体と同一温度に冷却したコンクリート版を用いた。

3.2 実験結果と考察

(1) 冷却時間と圧縮強さ、および膨張率

図-13 は、冷却時間と圧縮強さの関係を示したもの

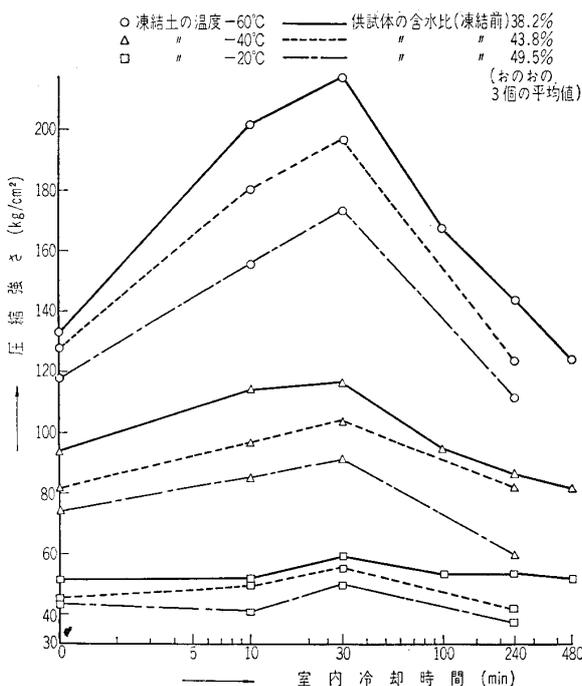


図-13 冷却時間と凍結土の圧縮強さ

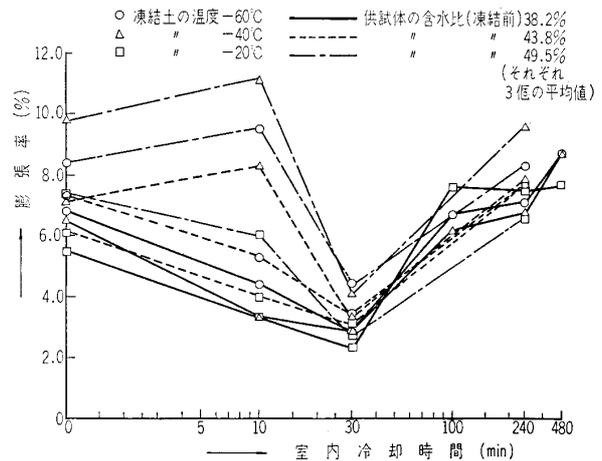


図-14 冷却時間と凍結土の膨張率

である。この図から、同一温度であるにもかかわらず冷却時間によって圧縮強さに相当の差がみとめられた。この実験結果によれば、傾向としては冷却時間、つまり常温の冷却ソウ内を目標温度まで冷却させるための冷却時間を30分間で行なったときの凍結土の圧縮強さが最も大きく、それ以外、とくに冷却時間が長くなるにしたがって圧縮強さの低下を示している。

また図-14 は、冷却時間と膨張率 (容積変化率 $\Delta V/V \times 100$ で示す) との関係を示すものであって、この図から図-13 の圧縮強さの場合とは反対の傾向、すなわち冷却時間が30分のときの膨張率が最も小さい傾向を示している。この図で膨張率が9%以上を示しているところがあるが、これは現在のところはっきりしたことはわからないが、理由の一つとしては、試料土が凍結するとき、まずその表面が凍結し、つづいて徐々に中心部に進行することから内部応力が発生し、供試体の表面に非常に小さいキレツの発生がみとめられたこと、また土中水が凍るとき、その中に含まれている空気が中心部に集められ、みかけ上、容積が大きくなったということが考えられる。

4. あとがき

以上、液体窒素による地盤凍結実験についての概要を述べたが、実験[I]の結果からつぎのようなことが考えられる。

(i) 実験結果土中の温度分布、および凍結速度は、計算値とかなりよく一致する。これらのことから、実施の計画にあたって土の凍結前後の熱的性質がわかれば計算からかなり近い値を推定することができ、実用への可能性がみとめられた。

(ii) 凍結管が隣接しているときの温度分布、および凍結速度については、凍結管と凍結管の間隔が 1.0 m ぐらいのとき冷却開始後約40時間ぐらいまでは単管の計算値とかなりよく一致し、凍結完了までそれほど大きな

差が生じないようである。このことから隣接管の影響をそれほど厳密に考えなくても単管の計算値から実用的な数値を推定することができる。

(iii) 冷却停止後の凍結土の解凍については、実験の不備から、計算値と比較検討するまでにはいたらなかった。しかし、前述したような実験条件にもかかわらず冷却停止後約2日間、ほとんど融解しなかったということから、施工中、突然の事態によって保冷用の LN_2 の供給が中断するような場合でもそれほど心配する必要がなく、目的を果すことができる。

(iv) LN_2 の使用量については、計算によって比較的正確に推定することができる。しかし、いままでの著者らの施工経験から計算値に対して、配管などによる熱損失、およびその他のロスとして約20から30%の量を多く見込んでいる。

(v) 凍上量は、凍結管の付近が最も少なく、凍結管からの距離に比例して多くなるようであり、地表面が最

も多い。また冷却停止後も、わずかではあるが凍上の進行がつづく。解凍にともなう地盤沈下を生じせしむる凍結土の温度は、そのときのいろいろな条件によって異なると考えられるが、実験結果によれば -3°C 前後であった。

以上は、実験[I]の結果からわかったものであり、実験[II]については、現在他の実験結果についても検討中であるので後日あらためて報告したい。最後に、これらの実験にあたって、種々ご協力して下さった日本酸素(株)のかたがたに深く謝意を表する次第です。

参 考 文 献

- 1) 鎌田正孝：液体窒素による地盤凍結実験 [I]，土と基礎 Vol. 12 No. 10 (1964)
- 2) 鎌田正孝：液体窒素による地盤凍結実験 [II]，土と基礎 Vol. 12 No. 11 (1964)
- 3) Alfreds R. Jumikis : Thermal Soil Mechanics(1966)
(原稿受付 1967. 4. 8)

第2回地質調査技士資格検定試験のお知らせ

1. 受験資格 試錐業務につき実務経験高等学校卒業またはこれと同等以上の学力を有する者は5年以上、その他の者は8年以上。
2. 試験科目および方法
 - 筆記試験 試錐業務に関する一般知識および関連業務に対する常識について行なう。
 - 口答試験 経歴に応じて実務に関する口答試問を行なう。
3. 試験時期 9月15日(祭)、16日(土)、17日(日)の3日間に実施する。
4. 試験地
 - (イ) 札幌(北海道一円)
 - (ロ) 仙台(東北六県)
 - (ハ) 富山(新潟, 富山, 石川, 福井)
 - (ニ) 東京(東京, 千葉, 茨城, 栃木, 群馬, 埼玉, 長野, 山梨, 神奈川, 静岡)
 - (ホ) 名古屋(岐阜, 愛知, 三重)
 - (ヘ) 大阪(大阪, 和歌山, 奈良, 滋賀, 京都, 兵庫)
 - (ト) 広島(岡山, 広島, 山口, 島根, 鳥取, 香川, 徳島, 愛媛, 高知)
 - (チ) 福岡(九州一円)
5. 受験手続 返信用封筒に住所・氏名を記入し、郵便切手を貼付のうえ、各地区地質調査業協会へご照会ください。

東京都千代田区岩本町2丁目16番10号(中屋ビル)
社団法人 全国地質調査業協会連合会事務局
Tel. 東京(866) 1404, 1405