

低温液化ガスによる地盤凍結工法

正員 ○鎌 田 正 孝*

正員 檜 村 博*

1. ま え が き

本報告は、地下掘削の補助手段、軟弱地盤の一時的改良、その他湧水などの阻止を目的として、低温液化ガス(以後液体窒素)による地盤凍結工法の実験およびその施工例について簡単にのべるものである。軟弱地盤を改良し漏水を阻止する目的に凍結工法を利用することは、すでに1862年にイギリスのウェルズで小さなシャフトに応用されたのが最初であると報告されている。わが国では1959年より京大村山朔郎研究室で実験、理論の両方面からの研究が行なわれ、その結果地中平均温度の比較的高いわが国でも十分適用できることがわかった。しかし、いずれも冷媒循環によるブライン工法の実験および施工例である。

液体窒素による地盤凍結工法もブライン工法と同様、一時的に必要な範囲の地盤を凍結硬化せしめ、地盤の安定を保持しながらその間に必要とする工事を安全にかつ容易に施工可能であるが、冷媒として液体窒素のもつ潜熱と顕熱を有効に利用することができる。というところが他の凍結工法と異なる。したがって液体窒素で地盤の凍結を行なえば短時間に、しかも最小の現場設備(凍結管と液体窒素の容器)で地盤凍結を行なうことができる。ここではとくに凍結土とコンクリートの境界面の力学的関係および漏水実験の結果についてのべると同時に液体窒素の使用量、注入時間に対する簡単な計算をおこなった。

2. 凍結工法の種類

地盤を凍結する方法としては、寒冷源の種類によってブライン方式と液体窒素方式の2つに分けて考え、その内容を簡単に説明する。

2.1 ブライン方式

施工は、凍結しようとする地盤にボーリングおよびその他の方法で底部の閉じた凍結管を設置し、この凍結管の中に底部開放の内管をとりつけ内管に冷却液を循環させて凍結管の外壁を通して周囲地盤を冷却凍結させる。冷却液の温度は、 $-20 \sim -30^{\circ}\text{C}$ であり、 -30°C 以下にすると凍結速度は速くなるが冷却設備が二段圧縮となるため経済的には不利となる。冷却液は、エチレングリコール水溶液、塩

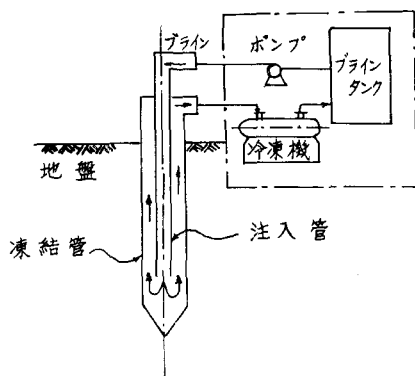


図-1 ブライン方式

化マグネシウム水溶液なども用いられるが、現在は一般に塩化カルシウム水溶液が用いられている。図-1はブライン方式の一般施工断面を簡単に表わした図である。凍結管は図のように適当な間隔に設置することができる。また冷却を開始すると、凍結管を中心に凍結が行なわれ時間とともに凍結範囲が拡がり凍結が徐々に成長して凍結硬化した土の壁が形成される。凍結管の直径は、現在のところ2"~6"のガス管を使用し、その間隔は50~150 cm ぐらいとされている。凍結速度は、地盤の最初の平均温度、冷却液の温度、土の凍結潜熱、凍結前後の土の熱伝導率、温度伝播率、凍結管の直径および間隔などに関係する。また同一温度であっても、土質、含水比、とくに地下水の流れなどによって凍結速度が大きく影響されるので注意しなければならない。

以上のごとくブライン方式は、その冷却源により凍結速度が緩慢でかつブラインタンク、ポンプ、冷凍機およびクーリングタワーなどとこれに伴う配管などの附帯設備も大規模となり、その消費電力も大となる。

2.2 液体窒素方式

液体窒素による凍結工法は、冷媒として液体窒素、液体酸素および液体空気を使用するもので、これらの潜熱、顕熱を直接あるいは間接的に有効に利用する。凍結工法に液体窒素を用いる第一の理由としては、液体窒素が現在用いられている冷媒のうち沸点が最も低く、かつ入手が比較的

* (株) 藤田組技術研究所

容易でありその取扱いも簡単なためである。表-1は各種冷媒の沸点を示した。

1.0 kg の液体窒素が -196°C で気化するとき約 47 Kcal の熱量をうばい、さらに気化した窒素ガスは、 $\pm 0^{\circ}\text{C}$ まで

表-1 各種冷媒の沸点

冷 媒	沸 点 ($^{\circ}\text{C}$)
液 体 窒 素	-195.8
フ ロ ン	-187.0
ド ラ イ ア イ ス	-75.5
液 体 炭 酸	-37.0
ア ン モ ニ ア	-33.4

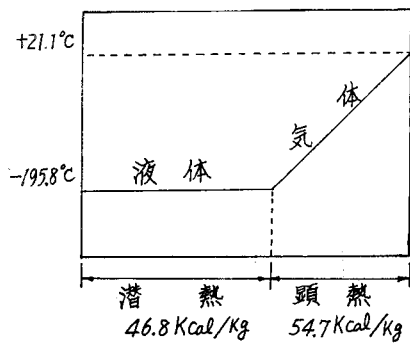


図-2 液体窒素の性質

表-2 液体窒素の性質

沸 点	-195.8°C (1 atm)
潜 熱	46.8 Kcal/kg
顕 熱	54.7 Kcal/kg
全 熱 容 量	101.6 Kcal/kg
重 量	0.808 kg/l
ガ ス の 密 度	1.24 kg/m^3
比 熱	1.4
比 熱	0.246 Kcal/kg (21.1°C)
分 子 量	28.016
色 香	な し

表-3 冷 却 熱 量

温 度 ($^{\circ}\text{C}$)	LN_2 1 kg に付き冷却熱量 (Kcal/kg)
0	96.0
-10	93.6
-15	92.5
-30	88.5
-50	83.7
-70	78.5

の間に約 46 Kcal の熱量をうばう。すなわち液体窒素の熱量を $-196^{\circ}\text{C} \sim \pm 0^{\circ}\text{C}$ まで利用するとすれば全体で約 96 Kcal/kg を得る。図-2 および表-2は液体窒素の物理的性質を表わしたものである。したがって廃棄される窒素ガスの温度によって寒冷量は異なる。表-3は各温度に対する液体窒素 1 kg 当りの寒冷量を示す。ここでは本方式を熱伝導の機構によって循環方式と注入方式の2つに分けて考える。

2.2.1 循環方式 この方式は、ブライン方式と同じであるが冷媒として液体窒素を利用する。また施工方法は、図-3(1),(2)に示すごとく簡単な配管と液体窒素の供給容器で充分である。まず凍結しようとする地盤に凍結管を設置する。これら凍結管の頭部に液体窒素の注入側と出口側に銅管を挿入して、図に示すように各凍結管をキャップする。この場合注入側の銅管は凍結管の長さと同じぐらいにする。

凍結管は一本ずつ独立することもあるが、一般的には寒

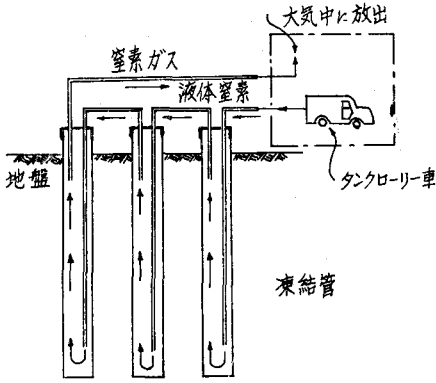


図-3 液体窒素による循環方式 (1)

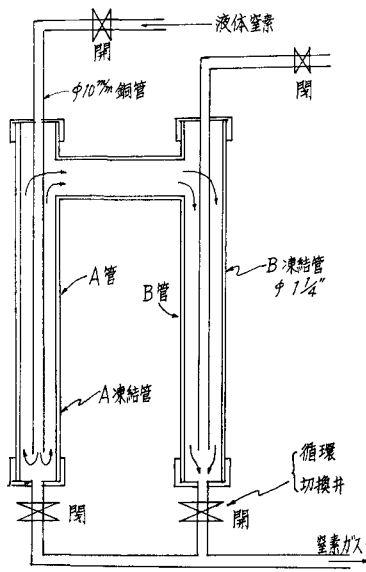


図-3 液体窒素による循環方式 (2)

冷の有効利用を考えて数本を一組とする。

循環方法はまず液体窒素容器の流出口と凍結管の注入側を接続し、流出された液体窒素は1本目の注入側の銅管の先端より噴射される。この液体窒素は瞬間的に気化し出口側の銅管を通して2本目の注入側の銅管に入る。この結果、最後に窒素ガスは常温近くなり地上に放出される。この間に凍結管の周囲は同心円状に凍結硬化する。窒素ガスの出口側に温度計をとりつけ放出される温度を測定することによって寒冷量が計算され、同時に地中に埋設した温度計で凍結の進行状態を確認する。

2.2.2 注入方式 2.2.1でのべた循環方式の熱伝導機構は、液体窒素と凍結管、凍結管と地盤、地盤から地盤え、という間接的な凍結作用である。しかしここでのべる注入方式は、ストレーナーを有する注入管を地盤に設置し、そのストレーナーから直接液体窒素を周囲地盤に注入して瞬間的に凍結作用を行なわせる。施工は注入管の設置完了後、注入管の頭部を図-4のごとくヘッダーパイプに接続する。この場合注入管とヘッダーパイプの間にストップバルブを取付け地盤の性質によって注入圧力、注入量を調節する。注入方式による地盤の凍結機構については未だ多くの問題点を残しているが、一考察として次のように考えら

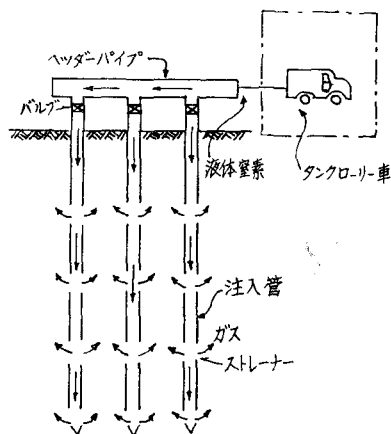


図-4 液体窒素による注入方式

れる。

液体窒素はある圧力でヘッダーパイプを通して注入管に流出されると管内の水を排除してストレーナーより周囲地盤に注入される。この液体窒素は瞬間的に気化すると同時に周囲地盤と直接熱交換する。この結果窒素ガスとなったものは地盤の間ゲキを通して地表面に常温に近いガスとして放出される。したがって液体窒素を連続的に注入すれば、周囲地盤は急激に冷却し、凍結範囲も注入管を中心として円柱状に成長する。この方式は液体窒素のもつ寒冷量を完全に利用することができるので、他の方式に比較して最も凍結速度が速く、また地下水の流れがあっても充分その漏水効果を期待することができる。

3. 各種実験

ここに述べる各種実験は、凍結土とコンクリートの境界面の温度による力学的特性を調べた。その実験内容はコンクリートと凍結土の水平荷重に対する附着強さ、コンクリートと凍結土の引張りに対する強さ、圧縮強さおよび一定水圧に対する漏水効果の4項目について行なった。またこれらの補足実験として凍結時間による土の凍上量の測定も合せて実験した。実験時の液体窒素の注入は循環方式とし、試料の各点の温度変化は熱電対自動記録計を用いて測定し実験時の温度とした。実験に供した試料は砂質土であり、比重2.7、含水比を30%に調整した。

3.1 附着試験

供試体は20×20×25 cmの大きさの木製型枠を図-5に示すようなコンクリート本体に載せ、凍結管(10×12 mm CuT)を試料の中心に位置するように設置し、ただちに含水比30%に調整した試料を投入して作成した。供試体の作成後コンクリートと凍結土の境界面の温度を測定するための温度計を各点に埋設し(コンクリート内の温度計は、打設時に埋設したものである)、実験前の温度を自記記録計で測定した。

液体窒素の注入を開始後、凍結土とコンクリート面の温度が所定の温度に達したら注入を中止したただちに水平荷

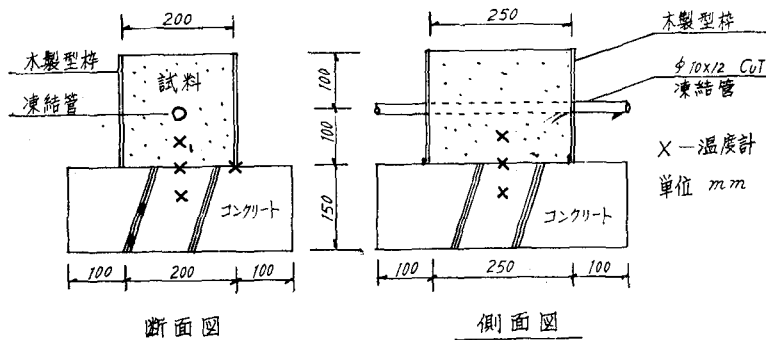


図-5 附着試験

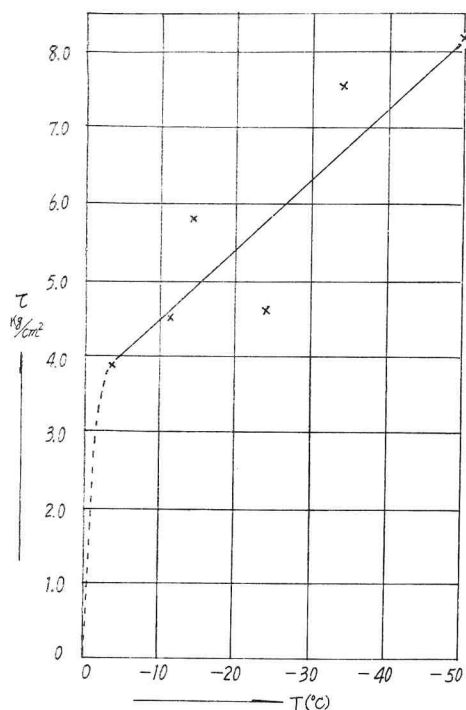


図-6 附着強さと温度との関係

重による附着強さの実験を行なった。このときの荷重速度は0.02 ㏑/secとした。これらの実験結果を図-6に示す。実験回数も少なく、実験時の温度を完全に一定とすることが困難なため幾分バラツキではいるが、凍結土とコンクリートの附着強さは、その温度が低くれば低いほど大きいということがいえる。写真-1は実験時の全景、写真-2は油圧ジャッキで水平荷重を加えそのときの附着強さを測定している。

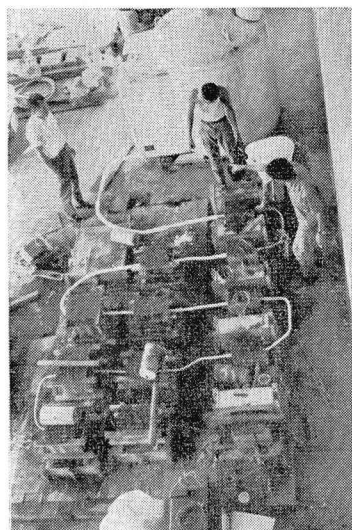


写真-1 全 景

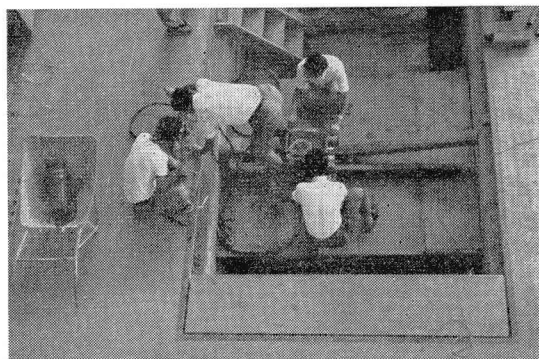


写真-2

3.2 引張り試験

供試体は 図-7 に示すごとくコンクリート本体に 20×20×20 cm の木製型枠を設置し附着試験と同一凍結管 (10×12 mm CuT) を試料の中心に位置するようにし、調整試料 (含水比 30%) を投入した後にさらに型枠の上部にコンクリ

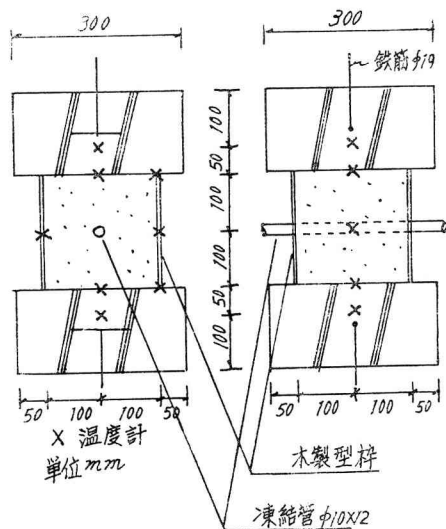


図-7 引張り試験

表-4 引張り試験結果

供試体	断面積	荷 重	引張り強さ	荷重速度	試験時温度	凍結土含水比
No.	A (cm ²)	P (kg)	T (kg/cm ²)	S (t/sec)	t (°C)	w (%)
No. 1*	400	1,650	4.13	0.02	-40	21.4
No. 2	400	1,900	4.75	0.02	-37	28.7
	400	1,700	4.25	0.02	-45	測定せず
No. 3**	400	3,600	9.15	0.02	-35	32.9
平 均	400	2,230	5.57			

* 片面 ** 片面

ート本体を載せて作成した。凍結方法や各点の温度測定などは附着試験と同様である。試験は、両側のコンクリートに埋設した鉄筋棒 ($\phi=19\text{mm}$) を 10 用アムスラーのチャックにかけて引張り試験を行なった。これらの実験結果を表-4に示す。

3.3 圧縮試験

供試体の作成、温度計の埋設場所および凍結方法は、3.2

表-5 圧縮試験結果

供試体	断面積	荷重	圧縮強さ	$\phi 15 \times 30\text{cm}$ の円柱供試 体に直した	荷重 速度	試験温 度	凍結 土含 水比
No.	A (cm^2)	P (kg)	σ (kg/cm^2)	σ' (kg/cm^2)	S (t/sec)	t ($^{\circ}\text{C}$)	w (%)
No. 1	400	62,000	155.00	111.3	0.25	-37	30.9
No. 2	400	43,500	108.75	73.0	0.25	-35	28.7
No. 3	400	58,900	146.13	103.8	0.25	-28	28.8
平均	400	54,800	136.63	96.0			

と同様であり、試験はアムスラーを用いて行なった。表-5はそのときの実験結果を示す。写真-3は試験時状況を示す。

3.4 漏水試験

実験の目的は、地下水面以下のコンクリート構造物が破
カイしはげしい漏水を生じた場合を想定し、その一時的な

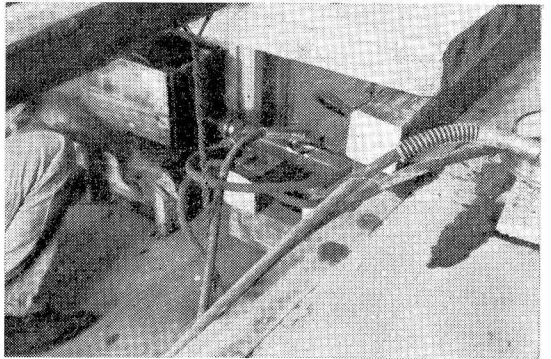


写真-3

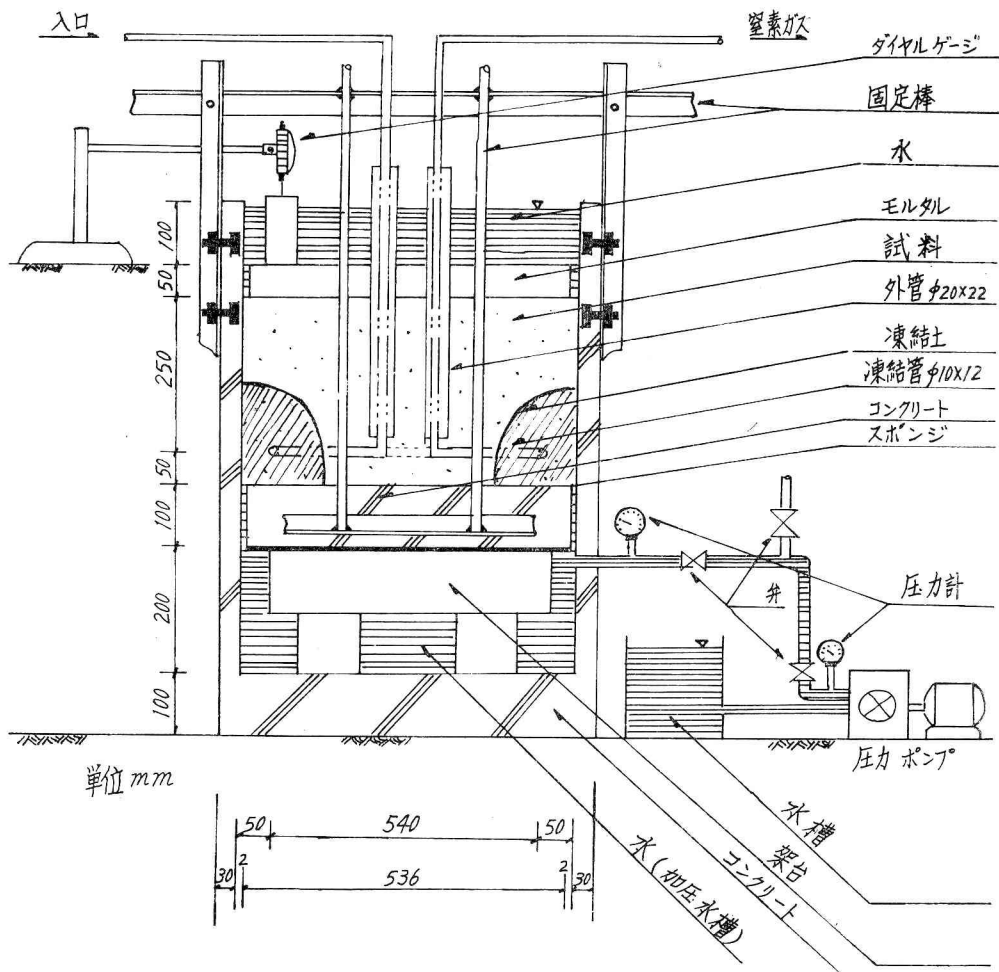


図-8 漏水試験装置

止水方法として液体窒素を用い急速に凍結させた場合凍結土とコンクリートの境界面がどれほどの水圧に耐え得るかどうかを試験することになった。しかし実験時の凍結土とコンクリート面の温度は -15°C までとした。

実験方法およびその規模は図-8に示す通りである。まずドラムかん(200ℓ)の内側に3cm、さらに底部に10cm厚さのコンクリートを打設した。次に加圧装置としては、深さ20cmの加圧水槽を底部コンクリート上に設け、圧力ポンプの加圧側に接続した。また水槽内に架台を作りその上に厚さ10cmの円型コンクリート板を設け、その上側に凍結管を円周上に設置した後に試料(砂質土)を約30cmの厚さで投入する。各点の温度計埋設が終わったら、試料の表面に約5cmの厚さでモルタルを打設し、容器が一ばいになるまで注水した。実験は、凍結土とコンクリートの境の温度が平均 -15°C に低下したら、ただちに水圧ポンプで $1\text{kg}/\text{cm}^2$ 、 $2\text{kg}/\text{cm}^2$ 、 $3\text{kg}/\text{cm}^2$ 、 $4\text{kg}/\text{cm}^2$ と加圧して漏水状態を測定した。測定は圧力計の減少、ダイヤルゲージの変化および容器表面より溢流する水などで行なった。この結果、 $-10\sim-15^{\circ}\text{C}$ の間では水圧 $4\text{kg}/\text{cm}^2$ まで充分耐えることがわかった。しかし $-1\sim-2^{\circ}\text{C}$ に対しては水圧 $1.5\text{kg}/\text{cm}^2$ で漏水が起ったことがみとめられた。実験は合計2回行ない、 -15°C まで温度を低下せしめるに使った液体窒素は、225kg(6.5時間)、175kg(1.5時間)であった。このときの凍上量は、図-9に示す通りであり短時間に、急速に凍結させれば凍上量が少ない。すなわち1回目の実験では6.5時間を要して凍結させた。そのときの凍上量は約3.5mmであった。2回目においては1.5時間で凍結させ、そのときの凍上量は約1.00mmであった。

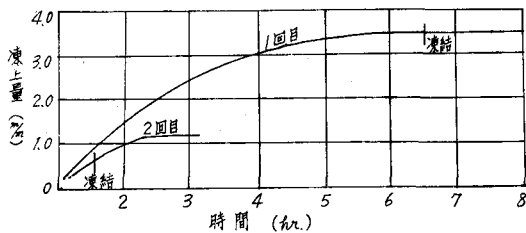


図-9 凍結時間と凍上量

表-6 総 寒 冷 量

n' (m^3/m^3)	γ_{t2} (t/m^3)	γ_{t1} (t/m^3)	C_2 ($\text{Kcal}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$)	C_1 ($\text{Kcal}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$)	Q (Kcal)	W (kg)	V (ℓ)
0.22	2.36	2.34	0.29	0.24	33,121	324	405
0.34	2.15	2.10	0.34	0.26	43,845	429	536
0.40	2.06	2.00	0.37	0.27	47,928	469	587
0.44	1.97	1.92	0.40	0.27	52,336	512	639
0.46	1.94	1.88	0.41	0.27	53,715	525	656
0.73	1.45	1.37	0.61	0.36	76,339	746	933

4.1 土の熱的性質

地盤を構成している土粒子の間ゲキが水で飽和しているとすれば、土粒子自体の熱的性質を知ることによって水と土粒子の混合物である地盤の凍結前後の熱的性質を比較的正確に計算することができる。

4.1.1 凍結前後の土の密度(γ_{t2} , γ_{t1}) 凍結前の土の密度 γ_{t2} は土粒子の比重 G_s と容積含水率 n' がわかれば、

$$\gamma_{t2} = (1-n') G_s + n' \gamma_w \tag{1}$$

ここに γ_w =水の単位重量(t/m^3), $n' = \frac{e}{1+e}$ (m^3/m^3)

また凍結後の土の密度 γ_{t1} は(1)式の γ_w の代りに氷の密度 $\gamma_i = 0.88\text{t}/\text{m}^3$ を用いて計算する。

4.1.2 凍結前後の土の比熱(C_2 , C_1) 凍結前の土の比熱 C_2 は土粒子の平均比熱 C_s と n' から

$$C_2 \gamma_{t2} = C_s G_s (1-n') + C_w \gamma_w n' \tag{2}$$

として求めることができる。また凍結後の土の比熱 C_1 は水の比熱 C_w の代りに氷の比熱 C_i を用いて(2)式より解くことができる。

ここに、 $C_s = 0.22\text{Kcal}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$, $C_w = 1.0\text{Kcal}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$, $C_i = 0.5\text{Kcal}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$ 。

4.1.3 土の凍結潜熱(L) 土の凍結潜熱 L は、土中の水分の凍結潜熱と考えられ、次の式で計算する。

$$L = n' \times L_i \times 1000 / \gamma_{t1} \tag{3}$$

ここに $L_i = 79.5\text{Kcal}/\text{kg}$ で氷の潜熱を示す。

4.2 必要寒冷量

4.2.1 液体窒素の熱量 単位容積の土を凍結させるに必要な液体窒素の総熱量を計算するには、種々のむずかしい数値も必要であるが、簡単な場合としては次のように計算することができる。

いま、地中平均温度を $T_2^{\circ}\text{C}$ 、凍結土の温度を $T_1^{\circ}\text{C}$ 、氷の潜熱を L_i とすれば、単位容積当りの総寒冷量 Q は、

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \tag{4}$$

$$Q_1 = \gamma_{t2} C_2 T_2^{\circ}\text{C} \tag{5}$$

$$Q_2 = \gamma_{t1} C_1 T_1^{\circ}\text{C} \tag{6}$$

$$Q_3 = L_i n' \gamma_w \tag{7}$$

したがって Q_1 は $T_2^{\circ}\text{C}$ から 0°C までの寒冷量、 Q_2 は

0°C から T_1 °C までの寒冷量である。表-6は液体窒素の寒冷量を全て凍結作用に使用したと考えたときの n' に対する計算を 1 m^3 の土を基として行なった。

4.2.2 液体窒素量 液体窒素のもつ潜熱は約 46.8 Kcal/kg であり、いま -100°C までの寒冷量を利用すれば、熱量 Q_N は

$$\begin{aligned} Q_N &= \text{潜熱} + \text{顕熱} (\text{比熱} \times \text{温度差}) \\ &= 46.8 + 0.25(-100 - 196) \\ &= 70.8 \text{ Kcal/kg} \end{aligned} \quad (8)$$

となる。したがって (4) 式で得た総寒冷量から必要な液体窒素量 W は、次式で求めることができる。

$$W = Q/Q_N \quad (9)$$

しかし実際の施工時においては、配管などの熱損失を考慮しなければならない。

4.2.3 保冷用液体窒素 いま図-10に示すごとく凍結土の外周より入ってくる熱量に対し、凍結に影響しない距

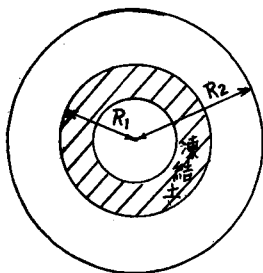


図-10 凍結断面

離を凍結円筒の中心より R_2 とし、凍結土の外周を R_1 とすれば伝熱量 q は

$$q = \frac{2\pi l K \Delta T}{2.3 \log \frac{R_2}{R_1}} \quad (10)$$

ここに、 q =Kcal/hr, l =凍結管の長さ (m), K =熱伝導率 (Kcal/mhr°C), ΔT =温度差 (°C) である。

いま凍結管の内側からの侵入熱量が外側からの侵入熱量と同じとすれば、全侵入熱量 q_1 (Kcal/hr) は、

$$q_1 = 2q \quad (11)$$

したがって単位時間に保冷用として必要な液体窒素 W_1 (-100°C まで利用する) は、

$$W_1 = \frac{q_1}{Q_N} \quad (12)$$

4.2.4 注入時間 いま図-11のように、液体窒素は -196°C で直径 ϕ 中の凍結管に注入され周囲地盤と熱交換しながら -100°C の窒素ガスとして放出されたと考える。ここに凍結土の半径を管の中心より R とし、凍結土の長さを l とすれば、単位時間における最も効果的な注入量は、次の式による。まず伝熱量の計算式は、

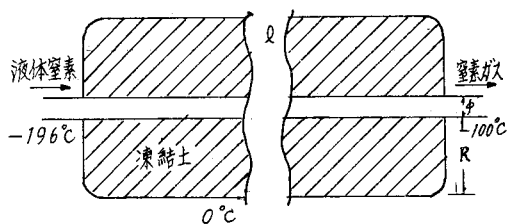


図-11 注入時間

$$q = \bar{A} \frac{K}{L} \Delta T \quad (13)$$

ここに q =伝熱量 (Kcal/hr), L =伝熱距離 (m), K =凍結土の熱伝導率 (Kcal/mhr°C), ΔT =温度差 (°C), また $\bar{A}$ は、

$$\bar{A} = \frac{A_1 - A_2}{2.3 \log \frac{A_1}{A_2}} \quad (14)$$

ここに $\bar{A}$ =平均伝熱面積 (m^2), A_1 =凍結土の表面積 (m^2), A_2 =管の表面積 (m^2), また伝熱距離 L は、

$$L = R - \frac{1}{2} \phi \quad (15)$$

ΔT は図-11に示すように平均温度差とすれば -148°C である。またそのときの平均温度は $-148^\circ\text{C} + 0/2 = -74^\circ\text{C}$ とする。 $K=2.7 \text{ Kcal/mhr}^\circ\text{C}$ とすれば (13) 式を解くことによって単位時間当りの伝熱量がわかり、液体窒素量を計算することができる。

5. 施工例

5.1 施工概要

凍結土量: 13 m^3

液体窒素量: $11,000 \text{ kg}$

凍結管: $\phi 34 \text{ mm} \times 5.5 \text{ m} - 6 \text{ 本}$

ヘッダーパイプ: $\phi 34 \text{ mm} \times 2.5 \text{ m} - 1 \text{ 本}$

土の性質: $w=52\%$, $\gamma_s=1.66 \text{ t/m}^3$, $e=1.4$,
 $n' (e/(1+e))=0.57$, $G_s=2.64$

温度: 地中平均温度 $+15^\circ\text{C}$, 凍結後の温度 -10°C

土の熱的性質: $C_s=0.22 \text{ Kcal/kg}^\circ\text{C}$,
 $C_w=1.0 \text{ Kcal/kg}^\circ\text{C}$,
 $C_i=0.5 \text{ Kcal/kg}^\circ\text{C}$

5.2 施工と結果

施工は地盤掘削の途中における既設埋設管 ($\phi 1500 \text{ mm}$ のヒューム管) 横断部の地盤安定を目的とした。この埋設管横断部以外の施工場所は、シートパイルで山留を行なっているが、横断場所の掘削にはシートパイルの使用はできなかった。しかし地盤が悪いので所定の深さ (埋設管より 4.5 m 掘削する) まで完全に掘削することはできなかった。掘削の途中で漏水が生じたときは、水とともに土砂が流出し、埋設管の不等沈下、これにともなって埋設管継手個所

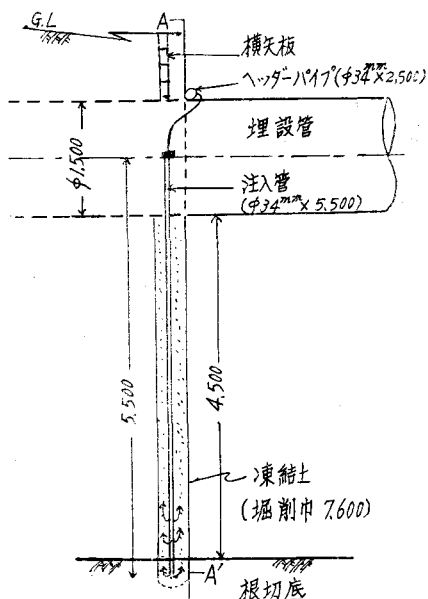


図-12

の破カイが起る。これらの事故を防止するために図-12, 13に示す注入方式による凍結を行なった。

注入は、片側ずつ2度行ない、最初の注入においては注入圧 (4.0 kg/cm^2) を大きくしたので、凍結速度は速かったが同一窒素量に対して凍結土量が少なかった。しかし反対側の注入は約24時間で注入を行なったので予定の凍結土量ができた。注入完了後ただちに凍結土の前面部分を掘削し、同時に外部に露出した凍結土の表面をうすい鉄板でカバーし融解しても漏水が生じないようにした(鉄板の両端を両側のシートパイルと溶接した)。

6. あとがき

以上液体窒素による地盤凍結工法の実験および施工例についての概要を述べたが、凍結機構の問題、土中水の凍結温度の問題、温度による凍結土の力学的な問題およびクリープなど多くの未解決部分を残している。しかし1~2の現場施工の結果、実用化が可能となったので軟弱地盤の一時的な改良や地下掘削時の漏水対策、その他の土工事に対して今後大きな役割を果すものと信ずる。

最後に本実験をつづけるにあたって種々あたらしいアイデアをだされ、終始御指導をして下さった東大最上教授に謹んで御礼を申し上げます。また液体窒素の供給などの点から積極的に御協力して下さいました日本酸素(株)の方々

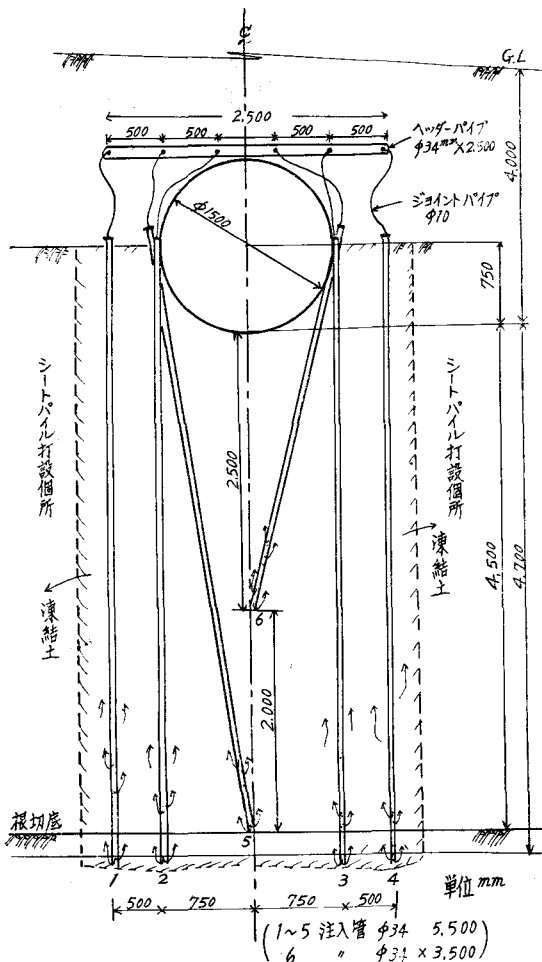


図-13 A~A' 断面図

に感謝いたします。本報告が先輩諸兄の参考になれば幸いです。

参考文献

- 1) 村山朗郎：基礎工学ハンドブック，800，1964，朝倉書店。
- 2) 鎌田正孝：土と基礎，Vol. 12，No. 10，3~9，1964。
- 3) "："，Vol. 12，No. 11，3~11，1964。
- 4) 鎌田正孝・吉野耕一：第20回年次学術講演会概要，III-83，土木学会，1965，5月。
- 5) P. J. Williams：Unfrozen Water of Frozen Soils and Soil Moisture Suction. Géotechnique Vol. XIV No. 3, Sep. '64.