

地盤凍結工法によるシールド発進法

近藤 操可* 川原 正**
西沢 忠***

要 約

シールド工法の発進到達時の補助工法は、薬液注入工法が多く用いられてきたが、地下水汚染などの問題から、送水管流山関宿線φ700mm工事(シールド径φ2,300mm,土被8.1m,砂質土)では地盤凍結工法を用いた。本報告は、地盤凍結工法の一般的な説明を行った後、上記工事の凍結発進例について、工事の概要、冷凍設備、同運転管理、地盤凍結距離の予測と実測、熱伝導率の大きいシートパイル立坑における問題点などについて述べる。

目 次

- § 1. 地盤凍結工法の概要
- § 2. 凍結工法によるシールド機の発進
- § 3. シートパイル立坑における凍結発進の特徴
- § 4. むすび

§ 1. 凍結工法の概要

1-1 概要

地盤凍結工法とは軟弱な地盤や地下水位の高い地盤を一時的に人工凍結し地盤を安定させて構造物を安全確実に築造する工法である。土木工事に利用したのは1862年英国のウェールズで立坑築造のため、エーテルを用いて冷却したブライン(塩化カルシウムや食塩などの水溶液)をパイプに循環させて、地盤を凍結させたのが最初である。

日本においては、1962年大阪府守口市で水道管圧入工事の補助工法として利用された。その後、大都市を中心として各種土木工事や地下鉄工事等に採用され現在に至っている。

1-2 凍結工法の原理

地盤を冷却してその温度が間隙水の氷点下に降下するとその地盤は凍結し、強度と遮水性をもつ地盤に変化する。

凍結工法はこのきわめて単純な自然現象を利用した工

法である。すなわち、地盤中に凍結管を埋設し管内に凍結液またはガスを循環させ、凍結管をとおして周囲の地盤を冷却し凍結させるものである。地盤は凍結管を中心にして冷却、凍結され、その範囲は時間とともに拡大する。凍結管をあらかじめ凍結理論式により計算された間隔で埋設すれば、時間の経過に従ってたがいに連絡しあい、地盤中に連続凍土柱列からなる凍土壁を形成する。

1-3 凍結工法の特徴

凍結工法の特徴として長所、欠点をまとめると次のようになる。

長所

- (イ) 砂、シルト、粘土等ほとんどすべての土質に適用でき、凍結範囲や程度にむらがない。
- (ロ) 凍土の力学的強度が優れているので、仮設構造物として利用できる。
- (ハ) 遮水は完全であり、他の構造物との凍着力も大きい。
- (ニ) 理論計算式と実際の凍結の状況がよく一致するため、凍結範囲の予測、凍結管理が容易であり、工事計画、施工計画がたてやすい。
- (ホ) 土壌汚染、地下水汚染等公害の心配がない。
- (ヘ) 自然解凍時間が長いので、停電、冷凍機の故障等の不慮の事故に対しても、対応が容易である。

短所

- (イ) 熱伝導を利用するため、凍結に要する時間が一般的に長い。
- (ロ) 地下水流があるときは凍結が阻害されるため補助工法が必要である。

*機材部機械課

**東関東(支)宮野木(出)所長

***東関東(支)宮野木(出)工事係長

(イ) 凍結時に凍結膨張による凍上, 解凍時には沈下の生じるおそれがあるので, 周辺の状況により, 十分な配慮が必要である。

(ニ) 薬液注入工法等にくらべて, 工費が高い。

以上述べたように, 凍結工法は施工条件がある程度限定されるため, 設計, 施工時には

(イ) 地盤の土質調査, 土質試験

(ロ) 地下水の流速, 方向

(ハ) 地下埋設物の状況, 隣接構造物の位置

等について十分な事前調査, 検討を行うことが必要である。

1-4 凍土の特性

凍土の一般的な力学的性質を以下に示す。

(1) 一軸圧縮強度

一軸圧縮強度と温度との関係は, 温度が低くなるほど強度は増加する。また土粒子の粒径が粘土, シルト, 砂と大きくなるにつれ, 強度も増加する。(図-1)

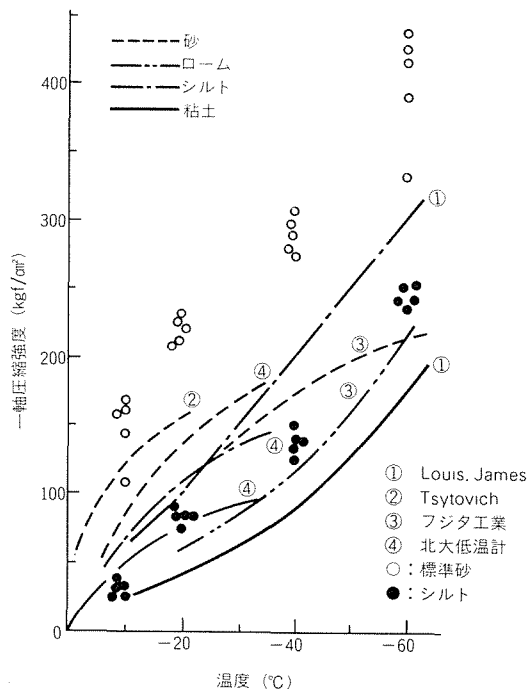


図-1 一軸圧縮強度と温度

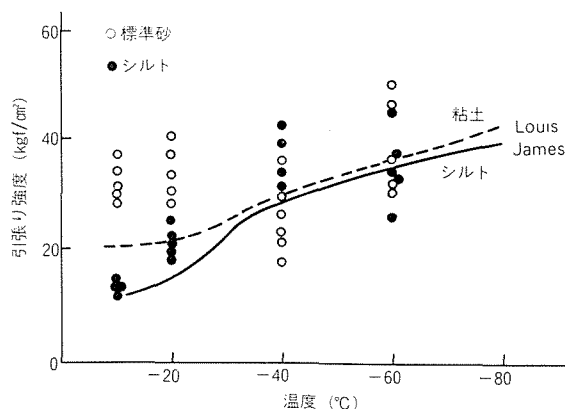


図-2 引張強度と温度

(2) 引張強度

引張強度と温度の関係は, 温度が -40°C までは強度の増加はみられるものの, それより低い温度では土質にかかわらず一定になる傾向がある。(図-2)

(3) 曲げ強度

表-1に各種土質の曲げ強度の試験結果を示す。

以上のことから, 一般的に凍土の強度は, 普通コンクリートに比べて圧縮強度が少し低いほかはほぼ同等なみの強度が期待できるといえる。

表-1 曲げ強度試験結果

土 質	含水比 (%)	曲げ強度 (kgf/cm²)	供 試 体 温 度 (°C)	備 考
砂	12.7	40.5	$-13.5 \sim -12.8$	供試体寸法 $500 \times 500 \times 3,600$ 3等分点荷重 $l = 3,000$
"	13.5	43.3	$-18.1 \sim -17.2$	
"	16.3	51.3	$-16.8 \sim -16.4$	
シルト質 ローム	51.3	27.9	-20.0	供試体寸法 $150 \times 150 \times 550$
砂	23.4	56.0	-10.0	
"	21.3	66.0	-10.0	
"	14.9	46.6	-12.0	
"	13.7	53.3	-11.0	現場凍土 $500 \times 500 \times 1,900$
砂	—	34.5	表面 -5 坑内 -35	

1-5 凍結方式

凍結管を冷却する方法としては, ブライン方式と低温液化ガス方式とがある。この2方式の選定は経済性の比較から, 凍結土量 150 m^3 以下の小規模で短期の工事には低温液化ガス方式, 大規模工事にはブライン方式を採用している。

いずれを採用するにしても, 事前に

- (イ) 凍結範囲, 形状の仮定, 凍土壁の力学的強度計算
- (ロ) 凍結管の形状, 管径, 材質
- (ハ) 凍結管の設置間隔, 埋設深度
- (ニ) 凍結管群の配管と冷却液の分配方式
- (ホ) 凍結管群の凍結順序, 解凍順序, 方法
- (ヘ) 凍結温度の測定位置, 測定箇所, 測定の方法
- (ト) 冷凍装置の能力, 機種
- (チ) 冷凍装置の騒音, 振動等の対策
- (リ) 電力設備, 給排水設備

等について検討の必要がある。

1-5-1 ブライン方式

冷凍機を用いてブライン (塩化カルシウム水溶液, 凝固点 -55°C 比重 $1.26 \sim 1.28$) を $-20^{\circ}\text{C} \sim -40^{\circ}\text{C}$ に冷却し, 循環ポンプにより地中に埋設した凍結管内に送りこみ, 凍結管をとおして地盤を冷却する。

図-3に凍結装置とブライン循環装置, 図-4に凍結管の構造を示す。

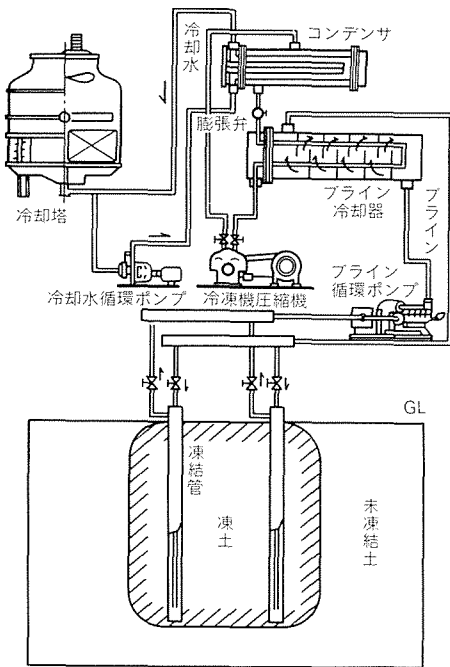


図-3 ブライン方式の凍結工法

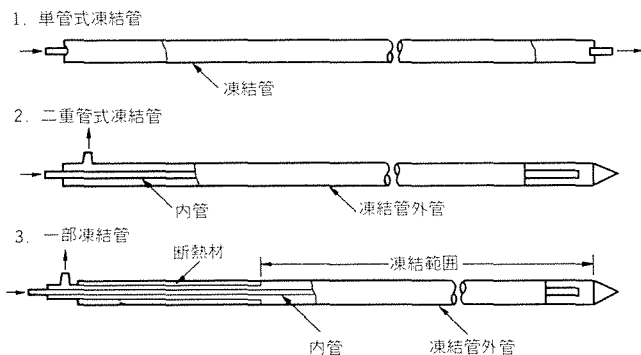


図-4 凍結管の種類と構造

1-5-2 低温液化ガス方式

液体窒素（気化温度 -196°C ）を使用して、工場から直接にタンクローリで現場に運搬して使用する。これには、直接冷却方式と間接冷却方式とがある。

直接冷却方式は、地盤中にストレーナのついた注入管を埋設して液体窒素を直接に地盤に注入する方式である。図-5にその概略を示す。間接冷却方式は、凍結管内で気化したガスを大気中に放出させる方法で、図-6にその概略を示す。直接方式は地盤中に放出するため問題点が多く、事故等の特殊な場合にのみ使用され、ほとんどは間接方式である。

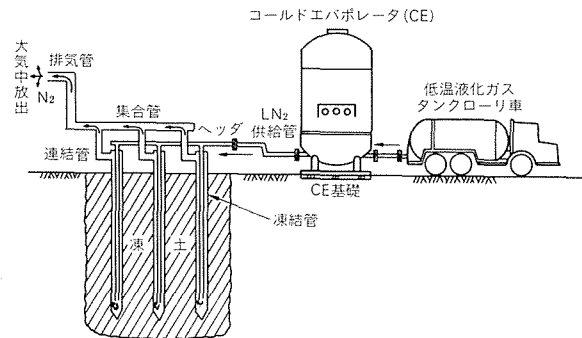
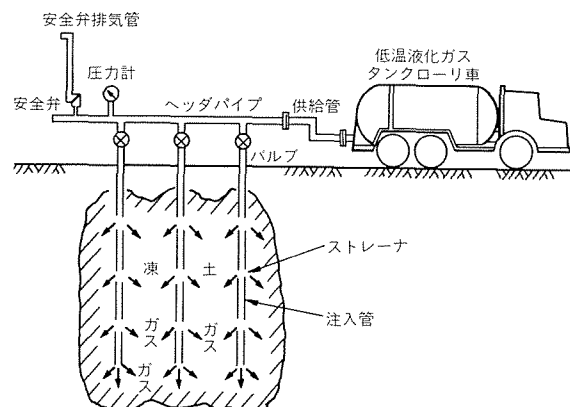


図-5 液体窒素による注入方式

図-6 低温液化ガス方式の液体窒素(LN₂)供給系統

§ 2. 凍結工法によるシールド機の発進

2-1 概要

凍結工法によるシールド機の発進方法は、シールド機の前面地盤（立坑の外側）を地盤凍結工法により凍結させて切刃を自立させ、エントランスパッキング内にシールド機を仮推進させて掘削、本推進を開始する方法で、図-7にその概要を示す。シールド機の前面切刃は凍結土であるため、漏れ、噴発、切刃の崩落等の危険が全くなく非常に安全性、信頼性の高い工法である。

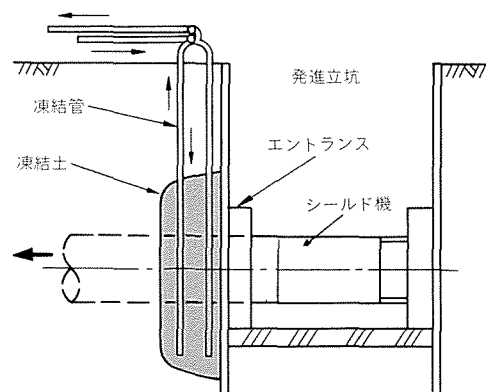


図-7 シールド凍結発進法

2-2 施工例

2-2-1 工事概要

地盤凍結工法を利用してシールド機の発進を行った例を述べる。

- (イ) 企業先、北千葉広域水道事業団
- (ロ) 工事名 送水管流山関宿線φ700mm布設工事
- (ハ) 施工場所 流山市大字北赤坂～同北小屋
- (ニ) 工期 昭和52年4月1日～53年8月12日
- (ホ) 工事延長 399.2m
- (ヘ) 送水管内径、φ700mm、ダクタイル鋳鉄管
- (ト) 発進立坑、到達立坑、各1基
- (チ) 泥水シールド掘進機 2,300mmφ×3,690mm
セグメント、スチール 2,150mmφ
一次覆工延長 $\ell=389.5\text{m}$
二次覆工延長 $\ell=389.5\text{m}$

2-2-2 地質

本工事の施工地点は、江戸川左岸の中川低地（沖積低地）と野田台地（洪積台地）との境界付近に位置し、北側には利根川と江戸川を結ぶ利根運河が東西に流れている。

この付近の地層は地表からGL-6.5mぐらいまでは沖積層（第四紀沖積世）、それ以下は上部東京層（第四紀洪積世）となっている。

沖積層は、表土、粘性土、腐食土層からなり、上部東京層は砂質土とシルト質細砂の互層状を呈している。

発進立坑のシールド切羽は、土被り約8.1m、上部は細粒混り細砂、下部はシルト質細砂からなり、N値20～35、含水比31～33%、透水係数 10^{-3}cm/s を示している。

図-8に凍結工法を採用した発進立坑付近の地質、凍結範囲及び立坑の断面図を示す。

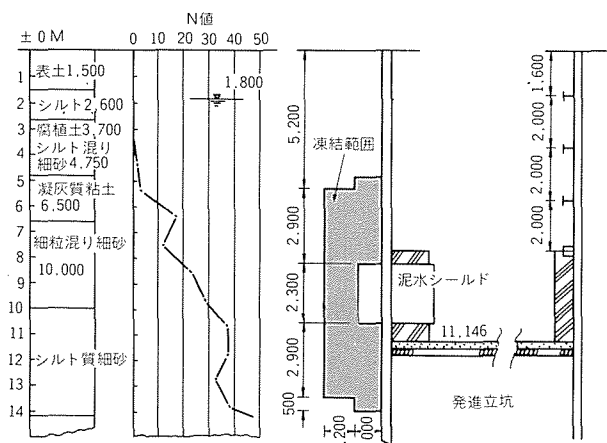


図-8 発進立坑土質柱状図

2-2-3 凍結発進工事内容

本工事の発進立坑は用水路に近接して土被りが少なく、

しかもシールド機が立坑に対し53°の角度をもって発進するため、補助工法として凍結工法を採用した。

凍結工法は、シールド発進部に凍土壁を築造して優れた遮水性と強度を併せもつ凍土でシールド発進作業時の止水及び山留を行い、安全、確実に初期発進作業を完了せしめるのが目的である。

工事順序としては、立坑の鋼矢板打設後、地上から鉛直ボーリングを行い、鉛直限定凍結管、測温管を埋設し、冷却液配管、断熱、計測配線を行い、凍結機からブライン方式で凍結液を循環させ地盤の凍結を行う。

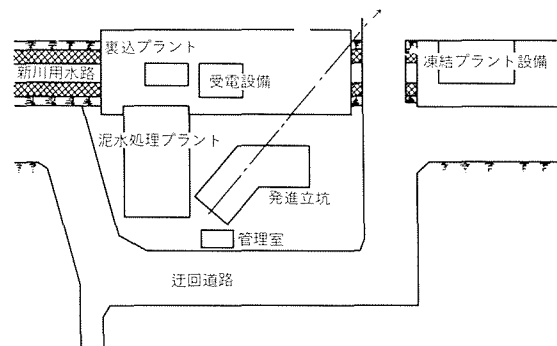
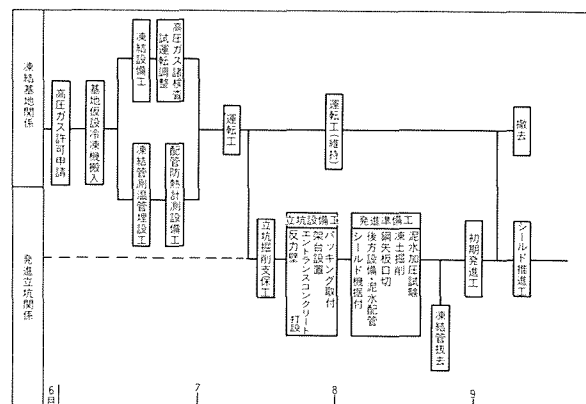


図-9 発進基地設備配置図

図-9は発進立坑の設備配置図である。これら一連の作業順序を表-2に示す。

表-2 凍結工法、基地、立坑施工順序



2-2-4 施工

- (イ) 冷凍機 45kW冷凍ユニット2台 (表-3)
- (ロ) 工期 凍結日数35日+維持日数35日合計70日
- (ハ) 凍結土量 約200m³
- (ニ) 測温点数 地中温度測定用15ヶ所
冷凍機運用用5ヶ所
合計20ヶ所

表-3 凍結ユニット仕様(2台)

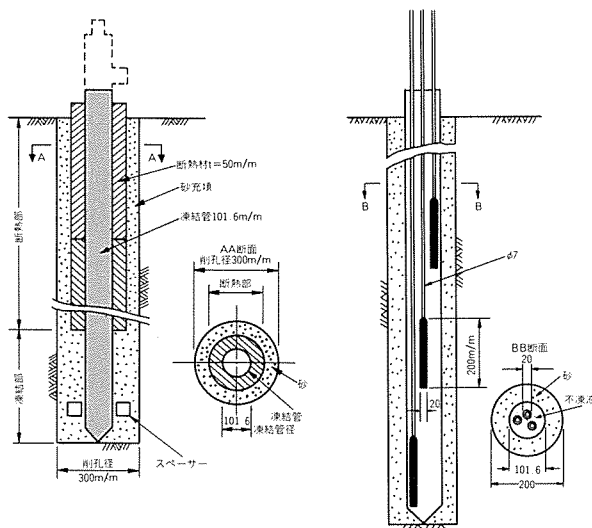
使用機器の種類	能力
冷凍機圧縮機 (105M4R, 冷媒-R22)	蒸発温度-30℃ 凝縮温度40℃ 冷凍能力40,000kcal/h
冷凍機電動機	200V-45kW
凝縮機	横型シェルアンドチューブ式
ライン冷却器	横型シェルアンドチューブ式
冷却塔(MT-5011L)	冷却能力50RT
ライン循環ポンプ	80φ3 P×200V×5.5kW
冷却水循環ポンプ	80φ3 P×200V×2.2kW
制御装置	電動機オーバーロードリレー 圧力スイッチ, 断水リレー, 冷却水温度サーモスタット 冷凍機油圧スイッチ

表-4 凍結管施工数量

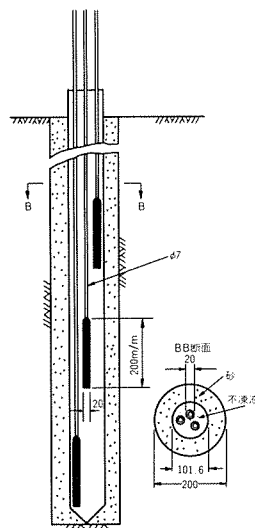
	本数	管長	凍結部	断熱部	延 長
鉛直凍結管	10本	12.8m	8.3m	4.5m	128.0m
〃	6本	12.3m	7.3m	5.0m	73.8m
立坑貼り付け凍結管	20本	10.8m	5.8m	5.0m	216.0m
合 計	36本		242.8m	175.0m	417.8m

表-5 測溫管施工數量

	本数	管長	測点数	延長
鉛直測温管	3 本	12.8m	3点/本	38.4m
〃	2 本	12.3m	〃	24.6m
合 計	5 本		(15点)	



図一10 凍結管詳細図



図一11 測温管詳細図

今回使用した凍結管，測温管の詳細を図-10，11に示す。凍結管には，凍結対象以外への熱損失を防止し，冷凍機的能力を有効に利用するために，50mmの厚さの発泡スチロールの保温筒をビニールテープで固定して，断熱を行った。

凍結管，測温管は地上からロータリ式ボーリングマシン（300mmφ）でGL-12.8~13.8mまで穿孔し埋設した。なお凍結管，測温管とも製作時及び埋設後にそれぞれ4.0kgf/cm²の水圧テストを2時間行い，ブライン等の洩れのないように厳重な検査を行った。凍結管，測温管の施工数量を表-4，5に示す。

凍結温度計測は、地中温度計測と冷凍装置管理計測の両方を行った。測定方法は両方とも白金抵抗素子を自記記録計に連動させて計測した。冷凍装置での計測は、ブライン冷却温度の設定に必要な冷却ユニットの、ブライン入口温度と出口温度を計測した。図-12, 13は、凍結管、測温管の配置平面図及び断面図である。

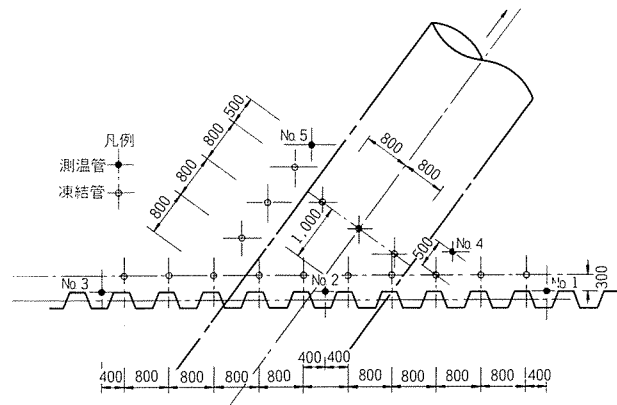


図-12 凍結管，測温管平面配置図

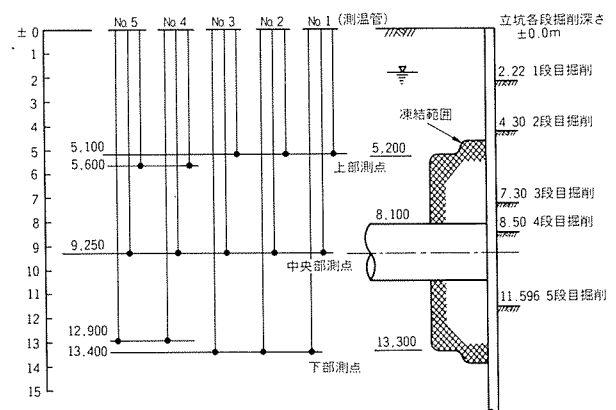


図-13 温度測定位置と立坑掘削深さ

ブライン配管及びヘッタ管はSGPを用い、接続は溶接とKK接手を併用した。ヘッタ管と凍結管の接続はエアホースを使用し、凍結膨張、解凍時の沈下に柔軟に対応できるようにした。なお、配管終了時に全体の気密試験を行い、装置、設備の洩れのない事を確認した。

(ホ) 冷凍機の運転管理

冷凍機の運転開始後は、工事終了まで冷凍機保守のための停止（オイル交換、乾燥剤交換、冷媒の補充、その他）、または不測事態による停止（停電、断水、配管の折損等）以外は24時間連続運転とし、このため冷凍機の保守管理が非常に重要となるため、当現場では3交代でこれにあたった。保守管理の内容は、先に述べたオイル交換、乾燥剤交換、冷媒の補充のほか、膨張弁、油圧弁等の調整、ガス洩れのチェック、定時点検等である。定時点検の内容は、1時間ごとに、冷凍機については、吐出圧力、吸入圧力、油圧、吐出温度、吸入温度、電流、負荷率を、凝縮機については、冷却水入口温度、同出口温度、冷媒液温度等である。

2-3 凍土強度の検討

施工計画の段階で、立坑壁から1m凍土掘削をしたときの前面凍土壁の厚さを推定し、凍結土強度の検討を行った。

立坑掘削終了時の掘削断面は図-14のようになり、以下の計算には余掘を考慮して図-15に示すような等分布荷重を受けるとし、周辺固定の円板として検討した。

(イ) 凍土面にかかる側圧 p は

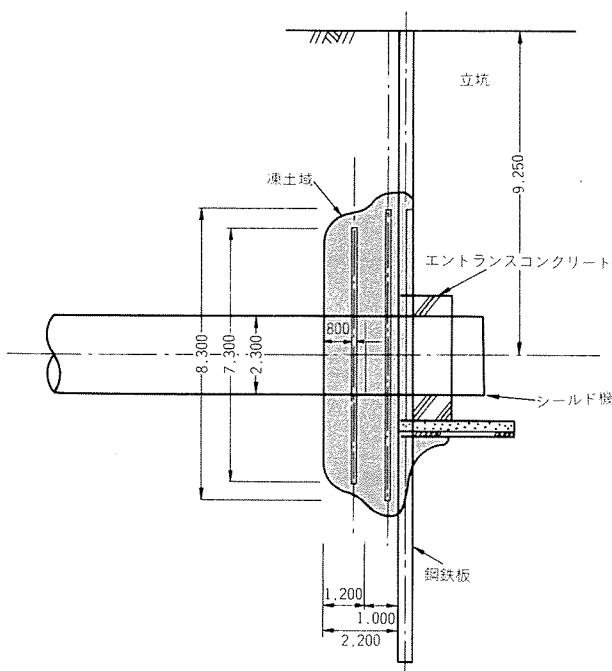


図-14 掘削後凍結土断面

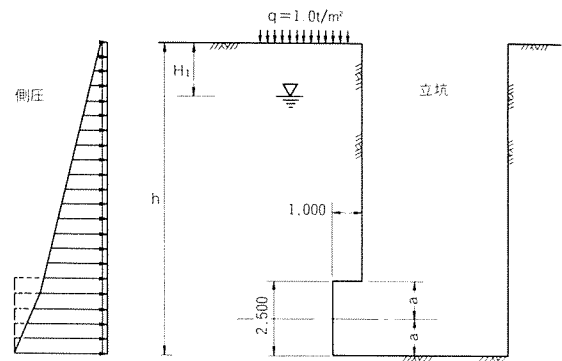


図-15 凍結土内の強度の計算

$$p = 0.5 \{ q + \gamma H_1 + \gamma' (h - H_1) \} + \gamma_w (h - H_1)$$

ここで、 p = 単位面積あたりの側圧 (tf/m²)

q = 上載荷重 (tf/m²) = 1.0 tf/m²

γ = 土の単位体積重量 (tf/m³)

= 1.8 tf/m³ (GL-1.8m)

γ' = 土の水中での単位体積重量 (tf/m³)

= 0.8 tf/m³ (GL-1.8m ~ 8.15m)

= 1.0 tf/m³ (GL-8.15m ~ 10.5m)

γ_w = 水の単位体積重量 (tf/m³) = 1.0 tf/m³

H_1 = 地表面より地下水位までの高さ (m) =

1.8m

h = 地表面より側圧を求めようとする位置の

深さ (m) = 10.5m

以上により計算すると

$$p \approx 14.5 \text{ tf/m}^2$$

(ロ) 応力度

側圧14.5 tf/m²の等分布荷重を受ける周辺固定の円板の最大曲げ応力は周辺でおこり、その円板の厚さを t とすると

$$\sigma_{\max} = 3/4 \times \frac{p \cdot a^2}{t^2}$$

となる。いま、凍土厚 $t = 1.0$ m、円板の半径を1.25 mとすると、

$$\sigma_{\max} = 17.0 \text{ tf/m}^2 = 1.7 \text{ kgf/cm}^2$$

となる。

(ハ) 安全率

凍土 (砂) の曲げに対する設計基準強度は、凍土平均温度が -10°C の時、図-1から $\sigma_v = 25.0 \text{ kgf/cm}^2$ とすると、曲げに対する安全率は

$$SF = \frac{\sigma_v}{\sigma_{\max}} = \frac{25.0}{1.7} \approx 14 > 3$$

となる。

2-4 凍結距離の予測と実測

凍結管の間隔は、凍結完了期間と地下水流の多さなどによって決定する。凍結管の外径101.6mmの場合の実験報告として、水流を考えない場合、初期地中温度14℃、ブライン温度-30℃、75kW冷凍機を使用して、凍結期間21日で凍結距離60cm、35日間で75cmという例がある。本工事に先だち、凍結管の間隔（距離）を決定するため、当現場の土質試験結果（表-6）をもとに検討を行った。

表-6 土質試験結果

試験名		試料名	粘土 Gs=2.688	細粒分まじり砂 Gs=2.872	シルト質砂 Gs=2.750
自然含水比 (%)			35.9	28.4	35.8
単位体積重量	湿潤密度 γt (g/cm³)		1.853	1.949	1.854
	乾燥密度 γd (g/cm³)		1.364	1.518	1.365
間隙比 e			0.97	0.89	1.01
飽和度 Sz (%)			99.5	91.6	97.5
含水率 (%)			49.0	43.1	48.9

一般に凍結土の進行距離と時間の関係は、次の式で表される。

$$\xi = m\sqrt{t} \text{ (m)}$$

ただし、 ξ = 凍結距離(m)

m = 係数

t = 時間(h)

係数 m は、ノイマン凍結部および未凍結部の熱伝達に対する二つのフーリエの偏微分方程式の解によって決定され $m=0.026$ を得た。これらの計算の結果、凍結管を中心とした凍結距離は、凍結期間14日で48cm、35日で75cmとなった。この値をもとに、地下水流、凍結管の施工垂直精度、安全率等を考慮し、凍結管の間隔を80cmとした。

実測値による検討

凍結管にブラインを循環しはじめると、直ちに凍結管を中心にして同心円的に凍結面は成長していく。凍結面の位置を実際に観測する事は困難であるので、測温管の温度分布より0℃になる点を凍結面の位置としている。

概略検討として、図-16に示す実測した温度変化のグラフによると、凍結開始から14日目にNo5（凍結管からの距離が50cm）で0℃になっている。したがってこの時点で、凍結管を中心として半径50cmの範囲は凍結が完了したものともみなすことができ、初期の計画案とはほぼ一致している。

図-17は理論凍結距離と実測値の比較である。この図からもわかるように、地盤凍結工法は理論と実測がほぼ一致するので、非常に精度の高い信頼できる工法といえる。

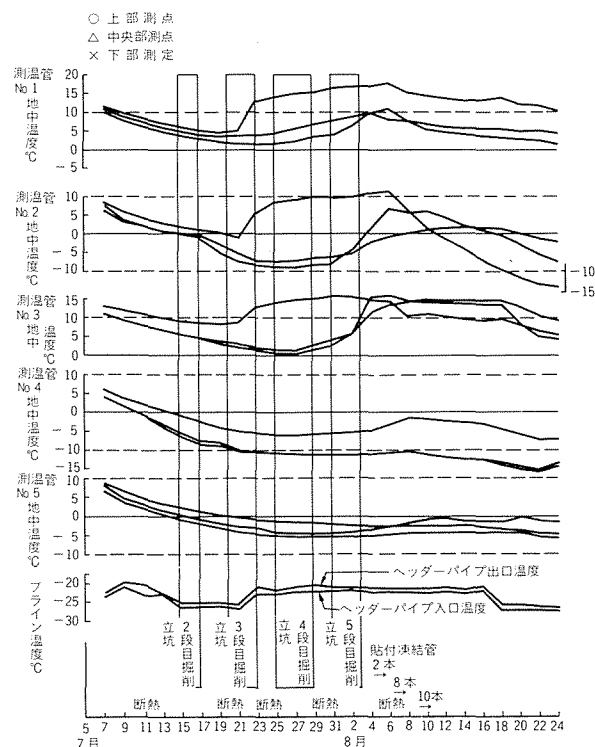


図-16 地中温度変化

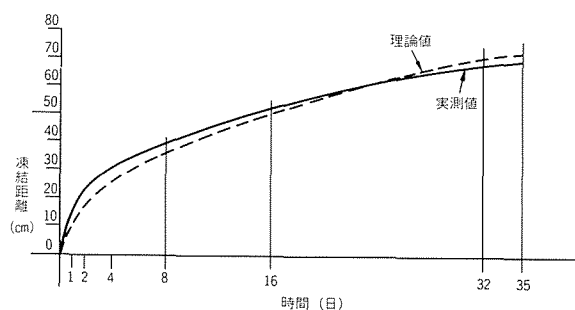


図-17 理論凍結距離と実測値の比較

2-5 冷凍機の騒音対策

冷凍機（105H-4R×2台）の発する騒音は、1m離れて約80ホンであり、その周波数特性は500～2000ヘルツが主成分である。

今回、冷凍機の設置場所から約50m北側に民家があるため、冷凍機建屋の外で騒音レベルが65ホン以下になるように考慮した。

このため、冷凍機建屋は極力窓を少なくし、室内壁に吸音材（グラスウール、厚50mm）を貼って確実を期した。これにより冷凍機建屋の外側で騒音レベルを実測したところ、約57ホンとなり、耳ざわりな高い音が著るしく減少し、近隣住民からの苦情は全くなかった。

§ 3. シールパイル立坑における凍結発進の特徴

今回の凍結発進の特徴は、立坑がシートパイルであったことである。シートパイルは、熱伝導率が非常に高いため、シートパイル面から凍土域への熱伝導がさかんで、凍土域の温度に影響が顕著にあらわれた。立坑掘削は凍土形成への温度の影響をおそれ、地盤温度を十分検討したうえで開始し、各段切梁まで掘削終了後、直ちに立坑内壁面の凍土領域側を厚さ50mmの断熱材で断熱したが、図-16からわかるとおり、影響が立坑シートパイルから1 m離れた測温点No.4 にまであらわれている。しかし、シートパイルに貼付した凍結管にブラインの循環を開始すると同時に、ふたたび温度は低下しはじめ、15日後にはほぼもとと同じ温度になった。

今回の工事で一部凍結土の温度が上昇した大きな原因は、

- (イ) 立坑掘削時、連日気温が30°Cをこえ、立坑内の温度上昇も著しかった。
- (ロ) 立坑内凍結側のシートパイルにそって、GL-6 m付近から、厚さ40~60cmの凍土が形成されていたため、立坑掘削に手間どり、シートパイルに貼付した凍結管へのブラインの循環が遅れた。
- (ハ) 隅部シートパイルの継手から漏水があり、このため地下水の移動があった。

の3点である。

立坑内凍土は、ツルハシ、ピックハンマでは掘削が不可能で、3台のブレイカを使用して掘削したが、予想よりはるかに硬く、掘削工程に遅れを生じた。

§ 4. むすび

施工中、不慣れな点から数々の障害に遭遇したが、無事克服し工期内に終了することができたのは、ひとえに企業先はじめ関係各位の御協力によるものと、深く感謝しております。

御存知のよう、公害に対する意識の高まり、安全な工法の志向等から地盤凍結工法へよせられる関心は大きく、今後ますます多くの施工が期待されております。

当社においても、機材部、技術研究部、電算室の協力により、地盤凍結の新しいプログラムを開発し、現在、東関東支店宮野木出張所において、泥水シールド機の発進、到達の補助工法として施工中である。また断熱の方法として、真空による断熱も実験中であり、次回にはこの報告も併せてできるものと思っております。

参考文献

- 1) 吉田弘「凍結」施工技術第3巻6号
- 2) 高志勤、和田正八郎「土壌凍結工法について〔I〕」冷凍第36巻第410号
- 3) 高志勤、松浦一三、谷口晴美「土壌凍結工法〔II〕」冷凍第36巻第410号
- 4) 高志勤、松浦一三、谷口晴美「土壌凍結工法〔III〕」冷凍第36巻第411号
- 5) 和田弘、加藤哲治「地盤凍結工法入門(1)」トンネルと地下第12巻第1号