

18. 凍土急速解凍工法及びシステム

鹿島建設㈱：*白井 俊輔, 早川 康之
太田 勝矢, 平野 敏則

1. はじめに

今回開発した凍土解凍システムは、特にシールドトンネルの発進・到達や地中接合の防護工として採用されている凍結工法の凍土を強制解凍するものである。

凍結工法自体は信頼性が高く無公害であるが、凍土解凍時の解凍沈下という不都合な現象が発生することがあり、凍結工法施工後そのまま放置しておく、長期間にわたる自然解凍により解凍沈下が徐々に進行する。

そのため、従来から温水を循環させて解凍を短時間に行い解凍に伴う体積減少分だけセメントミルクを地盤に注入固結し解凍沈下を防止する方式(図-1左)が一般的に採用されている。

しかし、従来の強制解凍工法では今回実証施工した現場(詳細は後述)の例で強制解凍工に約60日間(因みに自然解凍では200~300日と推定)を要すると推定されるなど一般に解凍工に要する期間が長く、凍土が完全に解凍するまで常時沈下計測監視を続ける必要があるため、長期間の資機材及び人員を配置しなければならない。

ここで、シールドトンネル施工上の特殊性を考えると、一般に作業空間が狭隘であり、また、解凍注入作業を坑内で行うため作業そのものが資材の搬送の障害にもなり易くより一層、解凍工期の短縮が求められる。

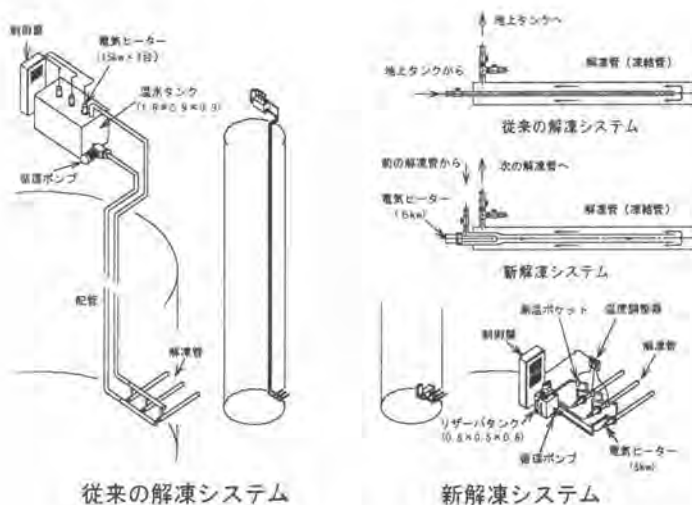


図-1 解凍システム比較イメージ図

解凍期間を短縮するためには、解凍管と凍土の温度差が大きいほど伝熱量が大きくなることから、解凍管表面の温度を高くすれば良いが、従来の温水循環方式では地上部に温水タンクを設置し長大な配管を敷設するため、坑内の作業員の安全性(高温配管との接触の可能性、配管からの温水の漏洩等)を考慮して地上タンク部で60℃程度に加熱し循環するのが普通で、解凍期間を短縮するために循環水温度を高く設定する事が難しい。

そこで、以下のコンセプトで開発を行う事とした。

- ・ 解凍管内部に直接電気ヒーターを設備し、安全に解凍管表面温度を高く設定する事で解凍期間の短縮(従来の強制解凍工期の半減)を図る。
- ・ 付帯設備を含む設備全体を小型化する事により、狭隘な作業空間においても設置可能で、さらに、設置・撤去の容易なシステムを構築する。

II. 予備検討及び実験

まず最初に、解凍システム全体の能力を設計するに先立ち、解凍管表面温度をどの程度の温度に設定したらいかにについて検討した。

これは、解凍管表面温度が高ければ高いほど解凍速度は速くなるが、解凍管近傍の凍土中の氷が融解した水は沸騰すると極端に伝熱特性が悪くなるばかりか予期せぬ箇所から蒸気が噴発する危険性もあるため、常に解凍管近傍の凍土中の氷が融解した水の沸点よりわずかに低くかつ安定して制御できる温度に設定する必要が有ると考えられるためである。

ここで、シールド工法における解凍部には一般に数MPaの地下水圧が作用しており、この場合の純水の沸点は圧力が0.2MPaで120.2℃、0.3MPaで133.5℃、0.4MPaで143.6℃、0.5MPaで151.8℃、0.6MPaで158.8℃などとなる。

現在施工される最も深いシールドトンネルは約70m(解凍施工部)であり、地下水位を考慮して解凍部に作用する水圧が最大0.6MPa程度作用するものとし、解凍管表面温度を最高で150℃に制御する条件で試算した結果より各解凍管に装備するヒーターの能力を4kWと仮定した。

次に、表-1に示す各種電気ヒーターを選定し、実施工に適用するために各々の伝熱特性と制御性について予備実験を行った。


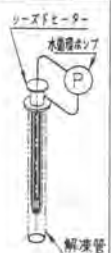



図-2に示す実験装置を用い、水を満たした水槽中に挿入したヒーターを加熱し、加熱に伴うヒーター温度、解凍管外面の温度と水槽内の水温(解凍管近傍)を計測する方法で予備実験を行った。

なお、この実験は実大規模で計画し、実験条件に合う圧力容器を用意するのは実際的でないことから、大気圧下で行ったため解凍管表面温度を95℃に保つようにヒーター温度を制御して各部の温度を計測し、その結果を表-2に示す。

ヒーターの伝熱特性及び制御性はヒーター温度(t_1)と解凍管外面温度(t_2)との温度差(Δt)が小さいほうが良いと考えられる。(ヒーターによる発熱量が有効に凍土解凍管外に伝達する事、また実施工においてはヒーター温度により解凍管表面の温度を制御する事から応答性が良い)

表-2より、強制水循環方式が Δt がもっとも小さく、伝熱特性、制御性共に優れていると考えられるため、これを採用し実用システムを構築する事とした。

表-1 加熱方式比較表

名称	シーズヒーター方式 (高熱伝導性パテ充填)	シーズヒーター方式 (水循環)	カートリッジ・ シーズヒーター方式	面状発熱体方式	SECT方式
概念図					
仕様	AC200Vx3px4kW	AC200Vx3px4kW	AC200Vx3px4kW	AC200Vx4x2kW	AC5.4Vx4x2kW
装置概要	シーズヒーターと 解凍管の間に熱伝 導性の高いコーポ ングラファイトの パテを充填した 方式	解凍管に熱媒とし て水を通し、 水循環のソアイ等 制御法を採る方式	シーズヒーターを 酸化マグネシウム 充填した樹脂樹脂管 にセットし、コー シタリし、解凍 管への電気を容易 にした方式	面状発熱体 と解凍管に密着 した面状発熱体 を密着させた方式	交流電圧の発生部 をより内管内部 及び内管外部自 体を加熱させる方式 内管が銅の場合は 電流損失が少なく ない場合(2kW)

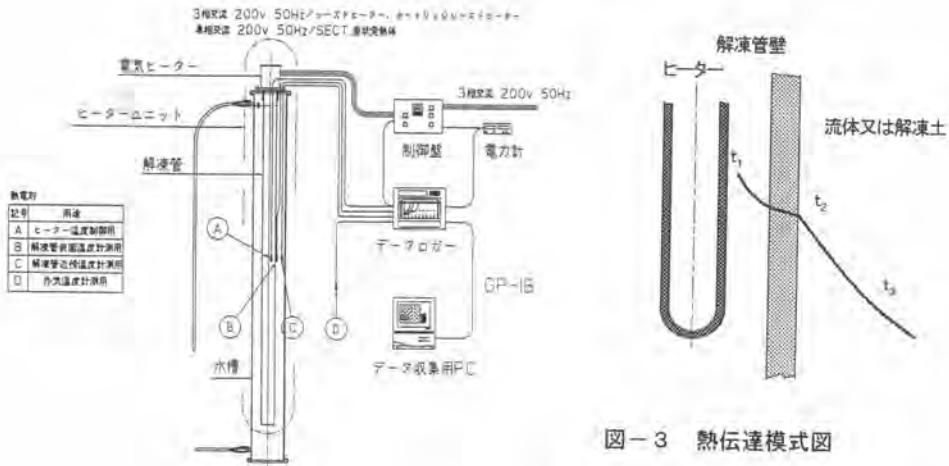


図-2 実験装置構成図

図-3 熱伝達模式図

表-2 予備実験結果

ヒーター名称	熱伝達方式	各部温度(°C)		制御温度 $\Delta t = t_1 - t_2$
		t_1	t_2	
シーズヒーター	強制水循環	100	95	5
	高熱伝導性パテ充填	105	95	10
カートリッジ・シーズヒーター	高熱伝導性パテ充填	186	95	91
面状発熱体	接触熱伝達	153	95	58
SECT	直接加熱(銅内管)	139	95	44
	直接加熱(鉄内管)	225	95	130

Ⅲ. ヒーターシステムの概要

個々の解凍管内に汎用のプラグヒータ(5kW 200V 3φ)を装備した内管を挿入したユニットをシリーズに接続した1つの解凍管列について、汎用の循環ポンプを装備した小型のリザーバタンクを持ち、リザーバタンクから送り出した熱媒流体を順次各解凍管に循環させ、ヒータから発生した熱を効率よく解凍管表面に伝達するための流速を得る構造を有するシステム(図-4下、5)で、1系統に10本程度の解凍管を接続可能。

各解凍管にヒータを設置することにより解凍部での温度をきめ細かに設定でき、熱媒としての水の温度を沸騰しない範囲で、できるだけ高く保つ事ができる。

温度制御はサーモスタット式の温度調整器(設定温度でON-OFF)を使い、測温ポケットにて計測した熱媒流体の温度でヒータの運転を制御する。

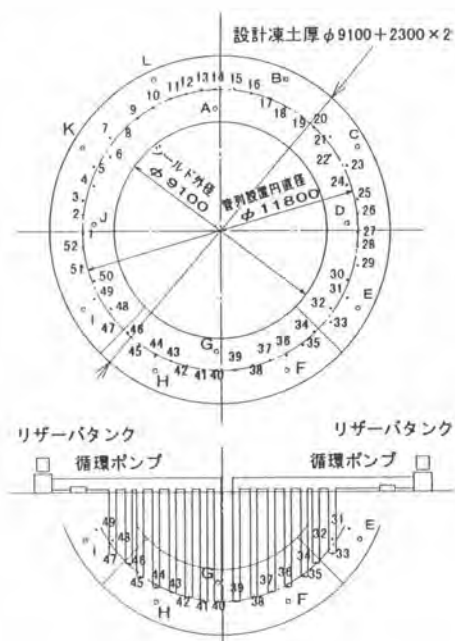


図-4 解凍管配置図



写真-1 ヒーター及び温度調節器

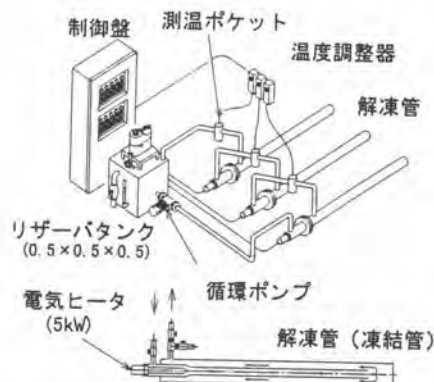


図-5 ヒーターシステム構成図



写真-2 循環ポンプ部



写真-3 リザーバタンク及び制御盤

IV. 実証施工

今回の強制解凍システムを、東京ガス(株)扇島工場受入配管シールドトンネル工事(海上工区)に適用して良好な成果が得られたので紹介する。

1. 工事概要

- 解凍工期 : 1996. 2. 12~1996. 4. 22(1996. 3. 8より加熱開始)
施工深さ : DL-38. 600m(到達部トンネルCL)=(海底下23. 2m+水深15. 4m)
トンネル外径 : ϕ 8900mm(一次覆工)
最大解凍距離 : 1. 5m
解凍管 : 13本(各5kWプラグヒータを装備)を坑口よりトンネル下部のみ設置
解凍管設置方向:海上立坑よりトンネル軸線に対し平行に設置
電気ヒーター : 5kW 200V 3 ϕ /1カ所
解凍開始時平均凍土部温度: -13. 5°C
解凍開始時凍土部含水率 : 約70%

なお、解凍管表面温度を高くするため、熱媒流体に油などを使用する事が考えられるが、今回の施工場所が海底であることから海洋汚染の可能性を考慮し、熱媒流体に水を採用した。

また、凍結管はトンネルの軸方向全周にわたって設置したが、今回の施工位置が海底下かつ大深度であるためトンネル自体の沈下防止のみを考えればよく、トンネル下部90°を強制解凍の範囲とした。

図-4の1~52の凍結管のうち33~47にヒーターシステムを設置し、さらに、33~39、40~47の2系統に分けて施工した。

なお、施工中における各部凍土の温度変化を図-4 A~Lの測温管で計測した。

2. 施工結果及び考察

測温管 A~L の内、解凍範囲にある測温管はF, G, Hで、その温度変化を図-6に示す。また、解凍範囲以外での地中の温度変化の例としてKでの温度変化を同様に図-6に示す。

図より、解凍範囲内の測温管設置位置では、ほぼ9~12日間で解凍しているのに対し解凍範囲外のKでは解凍終了時まで凍結したままであった。

また、今回の解凍施工条件で施工期間の予測を数値計算により事前に行った結果を図-7に示す。

図より、今回の解凍条件で(最大解凍距離:1. 5m/平均凍土部温度:-13. 5°C/解凍開始時凍土部含水率:約70%)従来の強制解凍工法(タンク部循環水温60°Cの時管路における温度低下により解凍管位置表面55°Cと仮定)では約60日、に対し本システム(解凍管温度を90°C)では約30日で解凍すると予測できる。(因みに、自然解凍なら過去の経験から200~300日と予測)

測温管F, G, Hにおける解凍管列からの距離と解凍時間(解凍開始後温度が0°Cになった時間)を予測曲線(図-7)上にプロットした。

その結果、現地凍土とほぼ等しい含水率70%の曲線付近にあり、解凍時間と距離の関係がほぼ予測曲線(含水率70%)に沿って進むと推定した。

この含水率70%のグラフで、設定した解凍範囲1. 5mの凍土(設計では最大1. 35m)を解凍するのに、約

1ヵ月間かかることから、余裕を見て、加熱開始から40日間加熱を継続することにした。

沈下計測とミルク注入管理から約30日で解凍が終了したものと判断したが、その後の経過を確認する意味で40日間加熱後システムを停止し、施工を終了した。

このことより、『従来の強制解凍工期の半減』及び『付帯設備を含む設備全体を小型化』という目標が達成できた。

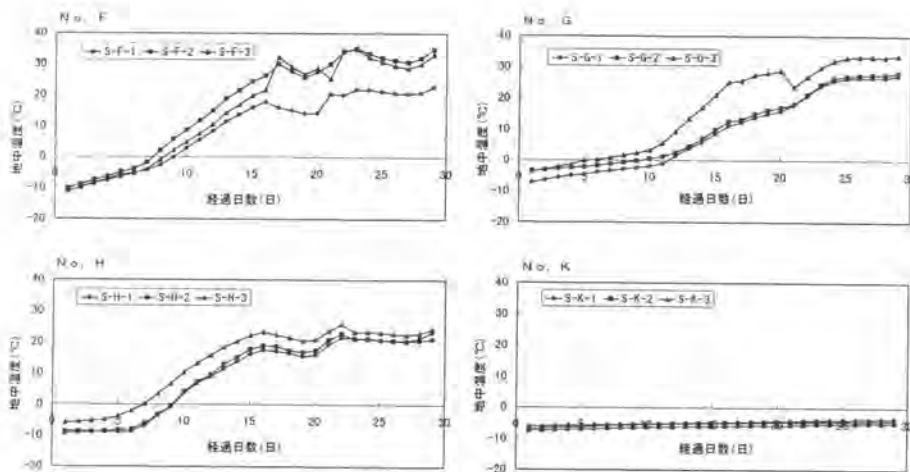


図-6 測温管部温度変化

V.あとなぎ

本施工において、最大解凍距離1.5mを約1ヵ月の加熱で解凍を完了したことにより、ヒーターシステムの有効性が実証できた。

本システムは小型簡便であるため、立坑やトンネル内空の狭い他の現場にも容易に設置可能であるとともに、解凍期間が大幅に短縮出来るなどのメリットが有るため、開発者として一般に広く普及する事を願ってやまない。

今後は、予備検討の項でも述べたように、本システムでは解凍管表面温度をより高く保つ事で解凍期間がさらに短く出来るため、熱媒流体に大気圧下での沸点が十分高いものを用いてその伝熱特性及び制御性を検証して行きたい。

また、今回施工したものと地盤の状態その他条件の異なるケースでさらに施工を行いデータを収集し、普遍のかつ合理的な工法にする予定である。

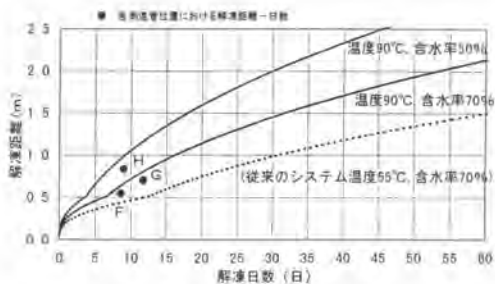


図-7 解凍距離と日数の関係（予測曲線）