

CO₂気液混合流体による 地盤凍結工法の開発

相馬 啓¹・有泉 毅²・塩屋 祐太³

¹正会員 ケミカルグラウト株式会社 技術本部技術開発部 (〒105-0001 東京都港区虎ノ門2-2-5)
E-mail:h-souma@chemicalgrout.co.jp

²正会員 ケミカルグラウト株式会社 技術本部技術管理部 (〒105-0001 東京都港区虎ノ門2-2-5)
E-mail:t-ariizumi@chemicalgrout.co.jp

³正会員 ケミカルグラウト株式会社 技術本部技術開発部 (〒105-0001 東京都港区虎ノ門2-2-5)
E-mail:y-sioya@chemicalgrout.co.jp

近年, 地球温暖化の影響が問題視されており, 冷凍空調システムの冷媒を自然冷媒に切り替える動きが本格化している. このような情勢の中, 2020年の東京オリンピック開催を控えて, 大型のトンネルプロジェクトが計画されているが, シールドトンネルの建設に伴う地盤凍結工法においても, こうした世界的な動向に追従する必要がある. 本報告のシステムでは, 冷凍機の一次側の冷媒にアンモニア, 凍結管を循環する二次側の冷媒に二酸化炭素を使用している. 自然冷媒を使用することにより, 地球環境への負荷を軽減するだけでなく, 配管類のサイズダウンによる作業性の向上や, 消費電力量の削減といった利点も得られる. 効果を検証するために, 模擬土槽や実際の地盤で凍土を造成する実証実験を実施した. その結果について, その詳細を報告する.

Key Words : Soil freezing, Natural refrigerant, CO₂, High efficient system, Field experiment

1. 緒言

地盤凍結工法(以下, 凍結工法)は, 主にシールドトンネル切広げの補助工法などに利用され, 地下水圧の高い大深度・大規模工事における確実な止水・耐圧壁として, 多くの採用実績がある. 凍結工法には, 冷凍機で-30℃程度に冷却したブラインと呼ばれる不凍液を凍結管で循環させるブライン方式と, 液体窒素の気化熱を直接利用する液体窒素方式の2方式があるが, コスト面からブライン方式が主に用いられている. 凍結工法の歴史としては, ドイツ人科学者Friedrich Poetschが発明し, 1862年に鉱山用立坑建設で用いられ, 1882年にその特許を取得¹⁾した. 我国では1962年に河底横断水道管布設工事で初めて適用²⁾された. Poetschが開発・適用した凍結工法もブライン方式であったといわれており, 現在に至る約150年以上もの間, 同一の原理でこの工法が使用されていることになる. 近年では, 不凍液の凝固点が-100℃より低い材料の化学的開発も進み, これをブライン方式凍結工法に適用する考え³⁾もあるが, 材料価格面などで実適用されていないようである. 海外においては, 欧州・北米で凍結工法は用いられているが, ブライン方式凍結工法が用いられている. 緯度の高い北米では, アラスカに

おけるガスパイプライン基礎に用いたThermosyphon pileを応用したHybrid Thermosyphon技術を用いた, 凍土壁による廃鉱山の有害物質封じ込め工事⁴⁾が開始されている.

一方, 我国における食品冷凍業界においては, フロン・代替フロン冷媒による地球環境の影響を考慮し, 自然冷媒を用いた高効率の冷凍機が開発⁵⁾され, 広く普及し始めている. この高効率の冷凍機を用いて, 新しい凍結工法を考える場合, 食品冷凍特有の条件である比較的高い温度帯であること, 必ずしも急速冷凍を必要としないこと等を考慮する必要がある. 平田ら⁶⁾は, 伝熱促進の以下の考え方を示しており, これらを考慮して新しい凍結工法の開発に当たった.

- 1) 熱伝導率の大きい材料を用いる. (熱伝導)
- 2) 材料を薄くし, 熱移動量を小さくする. (熱伝導)
- 3) 熱伝達率を大きくする. (熱伝達率)
 - ・熱伝達率やプラントル数の大きい流体を用いる.
 - ・流体速度を大きくする.
 - ・流れを乱流にする.
- 4) 伝熱面積を大きくする.

以下に, 二次冷媒に液化二酸化炭素(以下, CO₂)を用いた新しい凍結工法の開発について述べる.

2. システム概要

(1) システム比較

冷凍システムの比較を図-1、図-2に示す。従来システムでは、塩化カルシウム溶液等のブラインを地盤に埋設した凍結管に循環することで、ブラインの送りと戻りの温度差分の熱量を地盤から奪って、凍土を造成する(顕熱凍結)。冷凍機では、代替フロンによる冷凍サイクルで地盤から奪った熱を冷却水に移し、冷却塔から大気へ放熱する。新しいシステムでは、CO₂を地盤に埋設した凍結管に循環する。液体のCO₂を送液し、地盤の熱で一部が気化して気液混合状態で冷凍機に戻る。CO₂が気化する際の潜熱でも地盤から熱を奪って、凍土を造成する(顕熱+潜熱凍結)。冷凍機では、NH₃による冷凍サイクルで地盤から奪った熱を冷却水に移し、冷却塔から大気へ放熱する。ブラインをCO₂に変えることで、温度差分の顕熱だけでなく、液体から気体への状態変化に伴う潜熱も使えるようになり、単位流量当たりで奪う熱量が増加するため、同程度の凍土量であれば、流量を小さくすることができる。図-3にCO₂の状態図⁷⁾を示す。CO₂は大気圧下では気体～固体(ドライアイス)であるが、圧力を掛けることで液体の状態となる。地盤凍結工法の冷却温度は、通常-30℃程度であるが、この場合の圧力は約14MPaとなる。液体のCO₂の粘性が小さいことから、循環ポンプの動力の削減、コンパクトとされるプレートフィン式の熱交換器の採用が可能となり、これらの理由により全体システムの消費電力量が削減できる。

(2) アルミマイクロチャンネル

アルミマイクロチャンネルを凍結管として使用する。アルミマイクロチャンネルとは、アルミ製の偏平多孔管で、熱交換器に使用されるものである。微小な流路が多数あることで、伝熱面積が大きくなり、熱交換効率が高くなる。以下に特長をまとめる。

- ・アルミ製で高い熱伝導性を有する(200W/mK)
- ・押し出し成形で均一シームレス(100μm程度)
- ・高い耐圧性を有する(16MPa)
- ・軽量で曲げ伸ばしも容易(300g/m)
- ・端末や接続部にはアルミソケットをろう付け加工

従来のように、凍結管を現場で溶接して製作する必要はなくなり、工場にて耐圧試験を実施したアルミマイクロチャンネルを挿入するだけの作業となる。アルミマイクロチャンネルはロール巻の状態で現場に搬入し、引き延ばしながら挿入・設置する。また、メイン・ヘッダー管は、従来と同様に鋼管を使用するが、サイズダウンにより、フランジ接続が可能となる。枝配管には銅パイプを使用し、フレア加工によるネジ接続が主体となる。従って、現場での溶接作業が減少し、工期短縮に繋がる。

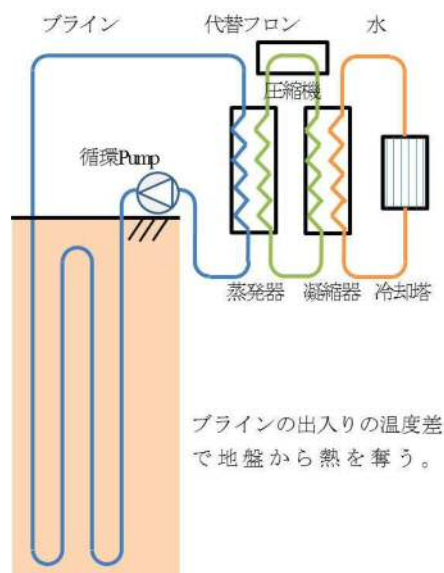


図-1 従来システムの冷凍システム

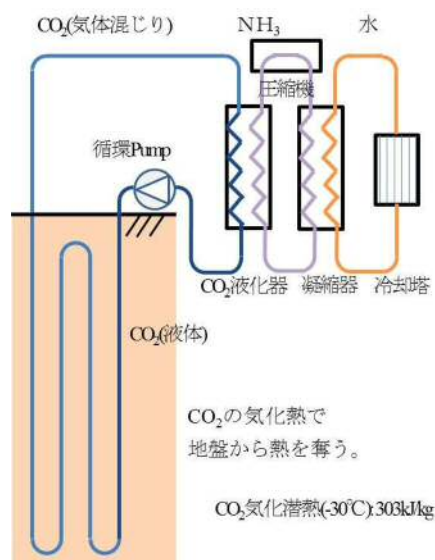


図-2 新システムの冷凍システム

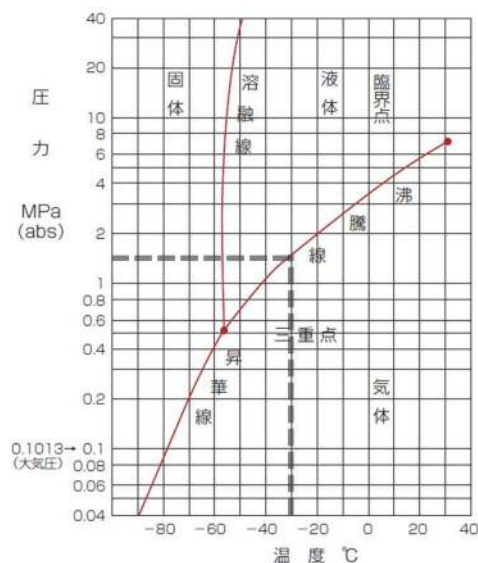


図-3 CO₂の状態図⁷⁾

3. 基礎実験

従来システムと性能を比較するために、2m³の小規模な土槽で凍土造成実験を実施した。

(1) 実験方法

図-4に使用したアルミマイクロチャンネル(以下、MC)の断面イメージを示す。図-5に実験イメージを示す。水で飽和状態の砂を模擬土とし、土槽の中央に凍結管を1本配置した。CO₂方式の凍結管は、φ114.3mmのガイドパイプに1枚または2枚のMCを挿入する構造とした。実験ケースは、表-1に示す5ケースとし、凍結管構造(二重管、MC1枚または2枚挿入)、冷媒(塩化カルシウムブライン、CO₂)、冷却温度(-30℃、-45℃)、冷媒流量(1～50L/min)をパラメータとして、凍土造成量と消費電力量を比較した。ブライン方式とCO₂方式では別々の冷凍機を使用した。冷凍機的能力は同一とし、冷媒の流量はポンプ能力の最大とした。運転期間は7日間とし、水で飽和状態の砂による模擬土槽に凍土を造成し、掘り起こして寸法を計測した。

(2) 実験結果

表-1に各実験ケースの最終的な凍土直径を示す。ケース1の従来方式と比較して、ケース2の二重管とケース4のMC2枚挿入の凍土直径が同等となった。図-7に各ケースの凍土成長曲線を示す。図-7に示すように、ケース3のMC1枚挿入では、ガイドパイプ内の充填水を凍結するために時間が掛かり、約1日分凍土の造成が遅れている。ケース5では、冷却温度を-45℃とすることで、最大の凍土直径となった。図-8に各ケースの消費電力量を示す。従来方式のケース1が最大で、ケース2の二重管でケース1の約60%、ケース4のMC2枚挿入でケース1の約50%となった。ケース5で冷却温度を-45℃まで下げた場合でも、従来方式より消費電力量が少ない結果となった。これより、CO₂方式では、ケース5を標準の施工仕様とした。

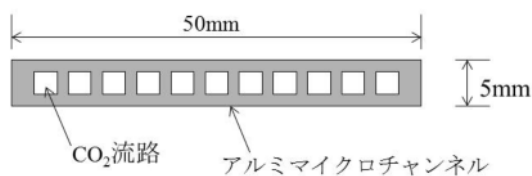


図-4 アルミマイクロチャンネルの断面イメージ

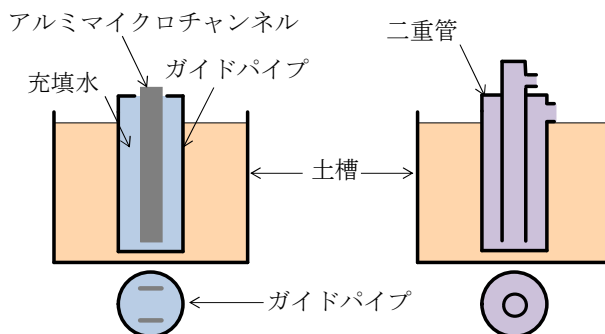


図-5 実験イメージ図

表-1 実験ケースと凍土直径

ケース	凍結管構造	冷媒・温度・流量	凍土直径 (mm)
1	二重管	CaCl ₂ ・-30℃・50L/min	810
2	二重管	CO ₂ ・-30℃・10L/min	850
3	MCシングル	CO ₂ ・-30℃・1L/min	640
4	MCダブル	CO ₂ ・-30℃・2L/min	700
5	MCダブル	CO ₂ ・-45℃・2L/min	1050



図-6 掘り起こした凍土

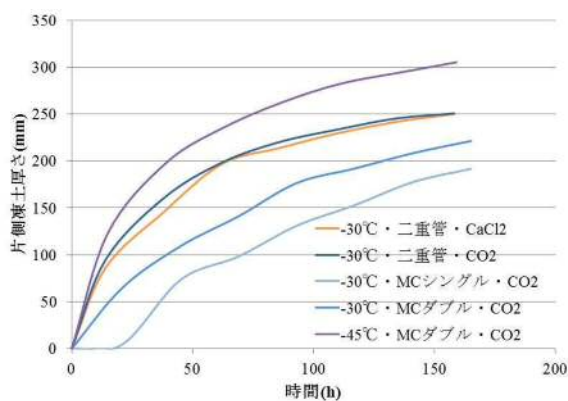


図-7 凍土成長曲線

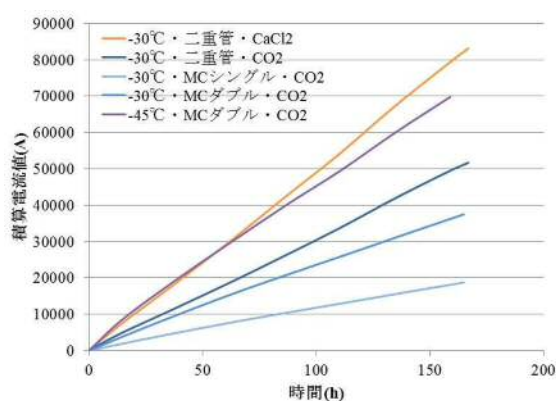


図-8 消費電力量

4. 実証実験

3. 基礎実験の結果に基づく標準施工仕様を用いて、より実際の現場に近い規模で凍土を造成した。

(1) 実験方法

実験立坑(縦5m×横5m×深さ5m)に砂と水を投入して模擬地盤を作成し、図-9、10に示すように、ガイドパイプφ114.3mmにMC2枚を挿入した全長5.5mの鉛直凍結管を3本と、MCを鋼矢板に貼り付け、隙間にモルタルを充填した全長0.5mの貼付凍結管を2列×2段で設置した。鉛直凍結管で使用したMCは、ロール巻の状態で搬入し、引き延ばしながら人力で挿入した。MCを挿入後、水道ホースでガイドパイプ内に注水した。冷凍機から凍結管への配管には、φ19.05mmとφ12.7mmの銅パイプを使用し、現場でフレア加工してナットで接続した。配管後、窒素ガスを封入し、圧力3.0MPaで24時間圧力が低下しないことを確認した。引き続き、配管内の真空引きを行い、詰まりの原因となる水分を蒸発させた。CO₂はポンベから充填し、ポンベ1本分約30Lを使用した。CO₂の温度を-45℃、凍結管1本当たりの流量を2L/minとして、凍土の造成を開始し、28日後に掘り起こして寸法を確認した。

(2) 実験結果

図-11に鉛直凍結の凍土成長曲線を示す。図中の計算値は、地盤凍結工法で一般的な計算方法とされている管列凍結の理論⁸⁾に基づくものである。実測値は、地中に埋設した測温管による温度データから算出した。浅い深度であったため、やや外気の影響があったと思われるが、実測値は計測値と概ね一致した。従来のブライン方式は凍結管1本当たりの冷媒流量が20L/min程度であるが、冷媒流量を2L/minとしても、従来と同等の速度で凍土が造成できることを確認した。図-12に掘り起こした凍土の写真、図-13に凍土の温度コンター図を示す。鉛直凍結の片側凍土厚さは最大で1.31m、貼付凍結は最大で0.8mとなった。約1ヶ月の運転期間中、CO₂の循環は、圧力・流量ともに安定していた。



図-9 鉛直凍結管



図-10 貼付凍結管

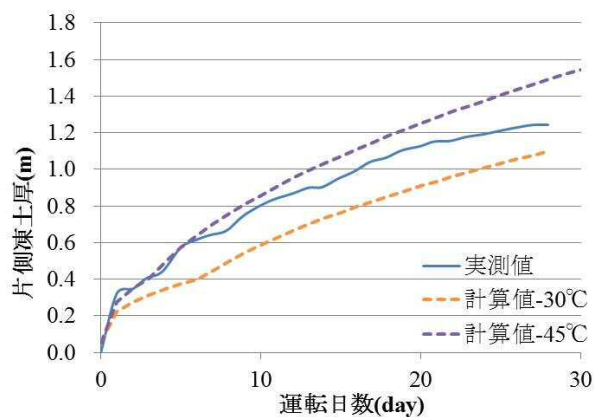


図-11 凍土成長曲線(鉛直凍結管)



図-12 掘り起こした凍土(左：鉛直 右：貼付)

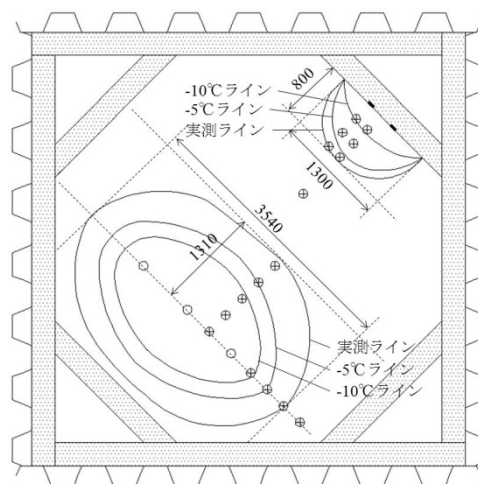


図-13 凍土寸法

実証実験において、熱境界条件を適正に設定すれば、従来のブライン方式と同様の非定常熱伝導FEM解析で評価できることを確認した。すなわち、MC外周部を熱境界として一定冷媒温度に設定することで、これまで用いている地盤凍結熱伝導解析で解析可能である。ここで、解析に当たって地盤中水分の凝固潜熱の影響は、等価比熱法⁹⁾を用いた。図-14に、解析結果である冷凍機の運転開始から28日目の温度コンターを示した。実測したる凍土の厚みと合致し、解析の妥当性を検証できた。

5. 原地盤凍結実験

実際に凍結管を地盤に埋設して、凍土を造成する実験を実施した。現場への適用を想定して、部分的に凍土を造成する限定凍結管、ヒーターによる強制解凍の検証、CO₂の配管圧力損失計測を実施した。

(1) 限定凍結管

図-15に限定凍結管の構造を示す。全長15.5mのうち、凍結部の5m分のMCを2枚挿入し、凍結しない限定部は断熱材を巻いた銅パイプを接続した。強制解凍は従来のブライン方式のように温水をMCに通水することができないため、ヒーターを2本沿わせている。この凍結管5本を0.8m間隔で埋設し、凍土を造成した。

(2) 凍土造成・強制解凍状況

図-16に、運転21日目の凍土成長曲線を示す。実線は凍結部、点線は限定部を示す。凍結部の曲線は、冷凍機調整で2日間断続的に停止したことを考慮すると、管列凍結理論⁸⁾の計算値と概ね一致する結果となった。限定部は運転初期に冷却されているが、以降の凍土成長は抑制できていることが分かる。図-17に、2本の凍結管の中間位置にある測温管の温度変化グラフを示す。図中の赤い点線で示す時間から、ヒーターによる解凍を開始し、約1週間で凍結された領域の温度が0℃付近まで上昇したことを確認した。

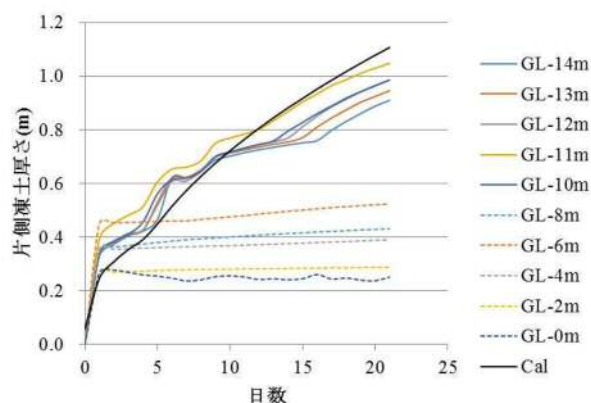


図-16 凍土成長曲線

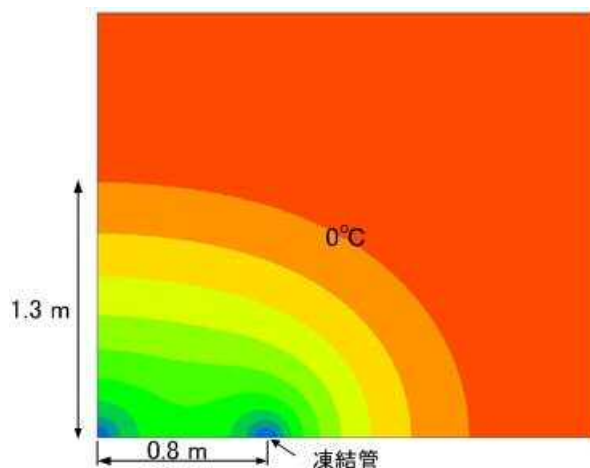


図-14 熱伝導FEM解析結果(28日後)

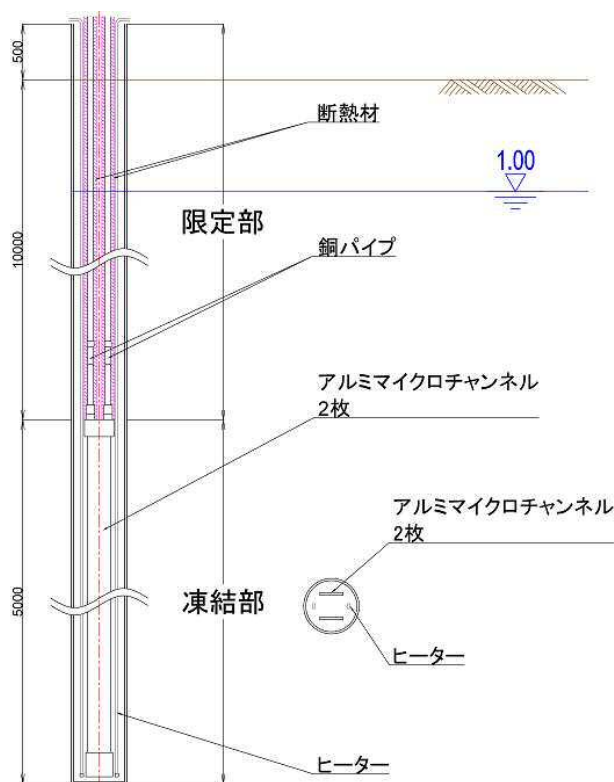


図-15 限定凍結管構造図

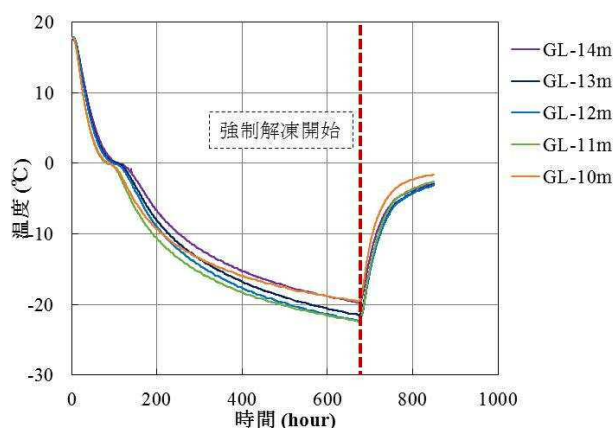


図-17 温度変化グラフ

(3) CO₂の配管圧力損失

冷凍プラントから施工場所までの距離が長くなるケースを想定し、地上で100m分の横引き配管を行い、液体のCO₂をポンプで送る実験を行った。配管材には、圧力配管用炭素鋼鋼管(STPG)を使用し、フランジ接続とした。配管径は20A(φ27.2mm)、25A(φ34mm)、50A(φ60.5mm)、80A(φ89.1mm)の4種類とした。配管には厚さ5mmの断熱材を巻いた。図-19に圧力損失の計測結果を示す。50Aと80Aではほとんど抵抗が掛からなかった。20Aと25Aでは、流量が50L/min程度であれば、1kWの送液ポンプにほとんど負荷が掛からなかった。凍結管1本当たりのCO₂流量が2L/minであることから、メイン配管の流量が50L/minで凍結管25本分となり、凍土量100m³程度の現場に対応可能であることを確認した。図-20に20Aと25Aの摩擦圧力損失の計算値との比較を示す。計算はファニング式(1)と、カルマン式の近似式(2)を用いた。

$$\Delta P_f = 2 f \rho u^2 \frac{L}{De} \quad (1)$$

$$f = 0.0626 / \left[\log \left(\frac{e}{3.7 De} + \left(5.74 / \text{Re}^{0.9} \right) \right) \right]^2 \quad (2)$$

ここで、式(1)、(2)中の記号の意味を以下に示す。

ΔP_f : 圧力損失

f : 摩擦損失係数

ρ : 密度

u : 流速

L : 配管距離

De : 相等直径

e : 表面粗度

Re : レイノルズ数

図-20の計算値はCO₂を液体としたものであるが、実測値と概ね一致している。また、図-21は全長20mのMCを地上に置いて圧力損失を計測し、(1)式、(2)式による計算値と比較したものである。図-21では、CO₂を液体として計算した値と、気体として計算した値を併記してあるが、実測値により近いのは液体の計算値である。これらの結果より、CO₂の循環は液体が卓越していることが分かる。気液混合流であることから、送液途中で蒸発してしまうことがないような流量を維持する必要がある。

(4) CO₂の流量について

表-2に、-30℃と-45℃の時のCO₂の密度と潜熱を示す。今回の実験における、冷却温度-45℃、凍結管1本当たりのCO₂流量2L/minの場合の最大供給熱量は、CO₂が全て気化すると仮定した場合で、流量に密度と潜熱を乗じた3,895Wとなる。図-22に管列凍結理論⁸⁾に基づく凍結長



図-18 冷凍プラント

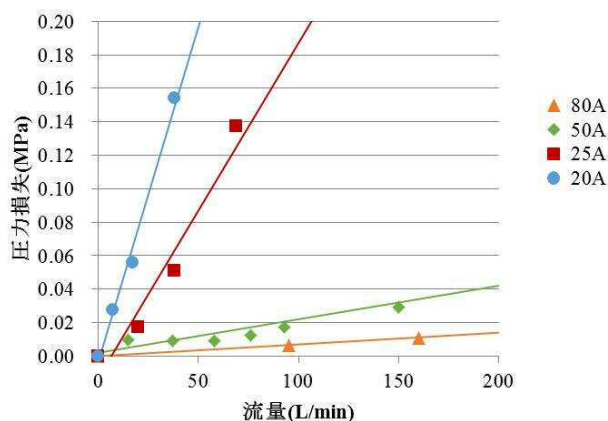


図-19 配管100mにおける摩擦圧力損失

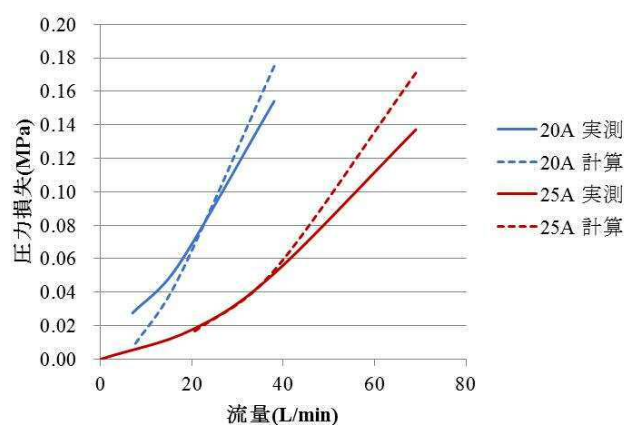


図-20 摩擦圧力損失の計算値との比較

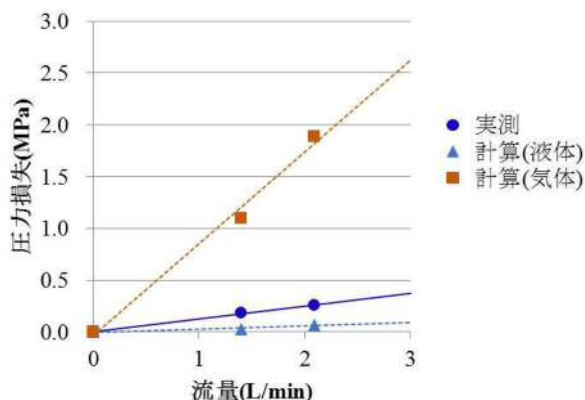


図-21 MC20mにおける摩擦圧力損失

5m分の凍結負荷曲線と併せて示す。CO₂の供給熱量は、凍結運転の初期段階を除き、凍結負荷に対して十分に余裕がある。実際には、CO₂が全て気化するのは運転開始から数十分程度であることを実験で確認している。この計算結果によれば、CO₂の流量をさらに低下させることが可能とも言えるが、食品業界の凍結と異なり、凍結工法ではある程度短期間で凍土を造成し、凍土掘削中の安全性も考慮する必要があることから、現時点ではCO₂の流量2L/minは妥当であると考える。

表-2 CO₂の物性値

温度	密度	潜熱
-30℃	1075.7 kg/m ³	133.34 kJ/kg
-45℃	1135.8 kg/m ³	102.87 kJ/kg

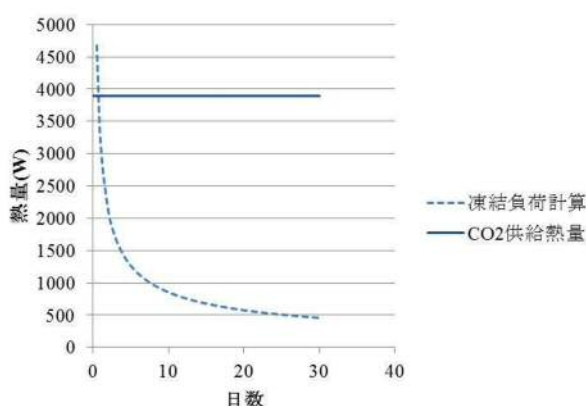


図-22 凍結負荷に対する供給熱量

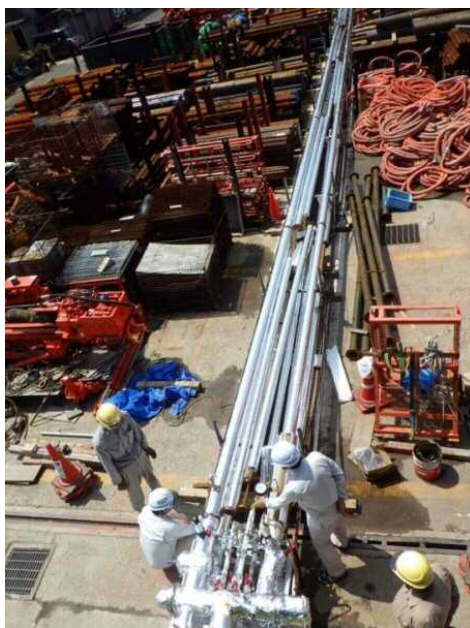


図-23 配管圧力損失計測状況

6. 結言

これまで3回の実証実験を実施して、CO₂気液混合流体を用いた新しい凍結工法の開発を推進してきた。熱伝導Fourier法則では、伝熱量は温度勾配に依存するため、いかに地盤温度に対し凍結管温度を低くできるかが重要である。CO₂を用いた凍結工法においては、図-3の状態図から圧力を低下させることで容易に-30℃から-45℃の低温を用いることができる。その性能は、ブライン方式以上であることを前記の実験で実証している。シールド坑内で使用する際の漏洩対策については、現場ごとに十分に検討する必要があるが、技術的には実用化へ移行できる段階である。地球温暖化緩和への世界的な取り組みが行われている中で、自然冷媒を使用すること、消費電力量を削減できることから、地盤凍結工法においても、温暖化防止に寄与することができる。2020年の東京オリンピック開催を控えて、首都圏では大型のトンネルプロジェクトが急ピッチで推し進められており、これらのプロジェクトでは、補助工法の一つとして、地盤凍結工法の適用が検討されている。本工法は、環境負荷の低減だけでなく、施工の簡略化におけるメリットも大きいと考える。この機会に、地盤凍結工法が広く普及することを期待している。

参考文献

- 1) Haß, H. and Schäfers, P. : Application of ground freezing for underground construction in soft ground, pp.405-412, Proc. of 5th IS TC28 Amsterdam, 2005.
- 2) 生頼孝博：地盤凍結工法とその開発, pp.159-167, 雪氷 59 巻 3 号, 1997.
- 3) 吉田輝, 他：超低温ブラインを用いた凍結運転方法の提案, pp.1121-1122, 第39回地盤工学研究発表会, 2004.
- 4) Paradis, A., Nahir, M., Hockley, D., Newman, G., and Kennard, D. : Giant Mine Remediation Project -Freeze and Underground, pp.10-14, Environmental Assessment Public Hearing September, 2012.
- 5) 浅野英世：自然冷媒装置による冷蔵倉庫の電力削減効果, pp.1-5, 冷凍 Vol.86, No.1008, 2011.
- 6) 平田哲夫, 田中誠, 羽田喜昭：例題で判る伝熱工学 第2版, 森北出版, 2014.
- 7) (社)日本産業・医療ガス協会 炭酸ガス分科会：液化炭酸ガス取扱テキスト, pp.4, 2009.
- 8) (社)日本建設機械化協会：地盤凍結工法-計画・設計から施工まで-, pp.45-50, 1982.
- 9) 中川知和, 武林慶樹：軽合金鋳物の凝固シミュレーション, pp.445-452, 軽金属 Vol.36, No.7, 1986.

(2016.8.5 受付)

GROUND FREEZING TECHNIQUE USING CO₂

Hiroshi SOMA, Takeru ARIIZUMI and Yuta SHIOYA

As global warming problem become serious, industrial refrigerant must be changed to natural refrigerant in near future. Ground freezing method which is planned in several big tunnel projects for upcoming Tokyo Olympic games in 2020 also should be adopted for this situation. New freezing system uses ammonia and CO₂ natural refrigerant. This system enables not only to reduce global warming gas but also to ease piping work and to reduce electric consumption. The field experiment was conducted to confirm capability of new system. This paper shows the feature of new system and the result of field experiment in detail.