



新地盤凍結工法「ICECRETE (アイスクリート)」の高度化実証実験

相馬 啓・吉川 正・西 征一郎

地盤凍結工法は、地盤改良工法の一つであり、軟弱な地盤の強度増加や透水性の高い地盤の止水性向上のために地中に凍結管を埋設して冷却液を循環させることで、管の周囲の地盤を人工的に凍結させる工法である。凍土は、間隙水を一時的に凍結して固化するもので、その後、融解させることで地盤にセメントや薬液等を残さずに、止水性や強度が高い地盤改良体となる特長を有する。ICECRETEは、冷凍機の一次冷媒にアンモニア (NH₃)、凍結管の二次冷媒に液体の炭酸ガス (液化 CO₂) を使用する最新の地盤凍結システムである。これらの冷媒はどちらも自然冷媒であり、大気環境に配慮した工法である。近年、大深度や大断面の掘削工事が増加して施工時のトラブルの抑制、さらに環境負荷低減も要求されていることから、地盤凍結工法の需要が高まっている。

このため、ケミカルグラウト(株)、(一財)先端建設技術センター及び成和リニューアルワークス(株)は、ICECRETEの更なる高度化を目指した共同研究を実施している。本稿は、2022年度に実施した実証実験における成果の一部を報告する。

キーワード：凍結、凍土、環境、地球温暖化係数、自然冷媒、液化炭酸ガス

1. はじめに

ICECRETE (以下、本工法) の凍結システムでは、地球温暖化係数がフロン系冷媒と比較して非常に低い、NH₃と液化 CO₂を使用している。化学的に合成されたフロン系冷媒を自然冷媒に転換することで、環境負荷が低減可能となる。凍結システムを図-1に示す。

CO₂は大気圧下では、固体と気体の状態でのみ存在

するが、ある一定の高圧力下では液体の状態となる。本工法の凍結システムでは、液化器で液体化された液化 CO₂を循環ポンプで凍結管内を循環させる。液化 CO₂は送液中に地盤の熱で一部が気化し、その際の潜熱によって地盤から熱を奪って、凍土を造成する。気化した一部の CO₂は、NH₃を使用した冷凍機内で再液化される。液化する際に放出される熱は、凝縮器により冷却水に移動され、冷却塔から大気へ放熱される。

従来の凍結システムでは、約-30℃の塩化カルシウム水溶液等のブラインを凍結管に循環させることで、ブラインの送り温度と戻り温度の温度差分の熱量を地盤から奪い、凍土を造成する。冷凍機では、フロン系冷媒を使用した冷凍サイクルにより、地盤から奪った熱は冷却水に移動され、冷却塔から大気へ放熱される。

本工法では、凍結運転中の CO₂の圧力を 0.8 MPa 程度に保持しており、液化 CO₂の沸点が約-45℃となるように制御している。気化潜熱を使用することにより、単位重量当たりで奪う熱量が、-30℃程度で循環させるブラインにおける温度差分の熱量と比較して約 60 倍となる。そのため、従来のブラインと比較して 1/10 程度の流量の液化 CO₂で、同規模の凍土を造成できる。さらに、液化 CO₂の動粘度は、従来のブラインと比較して、約 1/90 と小さいため、冷媒を循環す

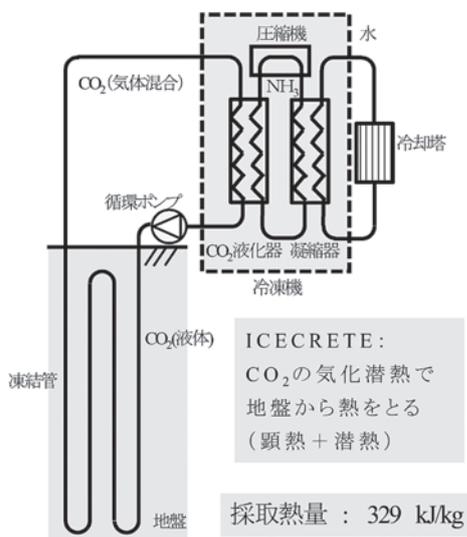


図-1 本工法の凍結システム

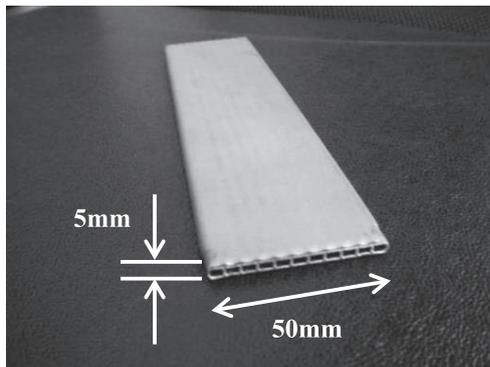
る配管やポンプを小さくでき、凍結システム全体の消費電力の削減が可能となった。

本工法では、幅 50 mm、厚さ 5 mm のアルミ製偏平多孔管の IC チャンネルを開発し使用している（写真—1）。IC チャンネルを使用した凍結管の構造概念図を図—2 に示す。IC チャンネルはアルミ製であり、熱伝導性能が鋼材の 4 倍程度、曲げ伸ばしも容易である。また、重量は 300 g/m と軽量で、設計通りの長さのものを工場製作の上、ロール状にして現場搬入できるため、従来の SGP 製の凍結管のような溶接による接続作業は不要である。さらに軽量でフレキシブルなためにクレーンが不要となり、人力で地中に挿入可能なものとなっている。

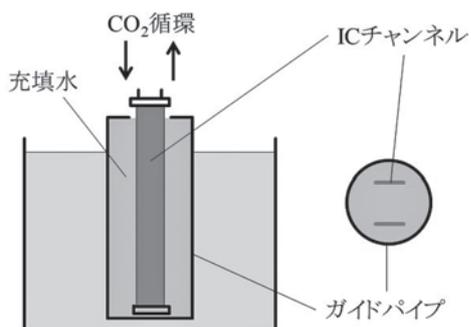
本工法は 2017 年にシールド到達防護工に初めて採用されて以来、2023 年 12 月時点にて施工実績は 10 件を超えている。

2. 実証実験

共同研究の活動において、これまでの本工法の施工実績を分析した結果、コストダウン、漏洩リスクの低減、出来形の可視化、強制解凍の施工仕様確立、効率的な運転に必要な環境条件の把握を目的とした実験を実施し、必要なデータを収集することとなった。そこで、施工技術総合研究所の模擬トンネルおよび作業



写真—1 IC チャンネル外観



図—2 凍結管の構造概念図

ヤードを使用し、実際の現場にて想定される施工条件を再現した環境下にて、凍土造成実験を実施した。写真—2、3 に実験状況の全景を示し、実験概要を以下に示す。

実験期間：2022 年 4 月～6 月

実験場所：静岡県富士市（施工技術総合研究所）

実験内容：

- ・ CO₂ 気液混合割合の検証
- ・ 液化 CO₂ 循環流量の検証
- ・ 自動遮断機能付き専用バルブの検証
- ・ 凍土造成範囲の予測精度向上
- ・ 専用凍結管による強制解凍の検証
- ・ トンネル坑内における凍結設備仕様の検証

主な実験設備：

- ・ 凍結プラント（定格電力 55 kW、冷凍能力 100 kW）
- ・ 実験土槽（24 m³×1 基、20 m³×1 基、16 m³×1 基、5 m³×1 基）
- ・ 模擬トンネル（全長 80 m、内空断面積 78 m²）

3. 実験方法

本報告では、前記の実験内容 6 項目のうち、CO₂ 気液混合割合の検証、液化 CO₂ 循環流量の検証、トンネル坑内における凍結設備仕様の検証について紹介する。前述の通り、本工法では、液体の CO₂ が地盤と熱



写真—2 実験全景（冷凍機（左手前）と模擬トンネル（奥））



写真—3 実験全景（凍結プラント（左）実験土槽（右））

交換することで、蒸発する際の気化潜熱を利用して凍土を造成する。つまり、気体だけの状態では地盤から熱を奪うことができず、計画通りに凍土が造成できない可能性がある。そこで、凍土造成期間中のCO₂の気液混合割合がどの程度であるか、実験土槽を用いて確認した。

24 m³の土槽に2 mの凍結管7本を0.8 mピッチで設置し、土砂の投入、加水及び締固めを行いながら、含水率30%の実験土槽を作成した。同時に測温管を設置して、凍土造成時に土槽内の温度を計測し、凍土造成状況を把握した。土槽の外周は、断熱材と輻射熱防止シートを設置して断熱した。7本の凍結管は、凍結延長が2 m×7本=14 mとなるように連続して、直列に接続し、戻り側に気液混合割合を計測できる「乾き度センサー」を設置した。

ここで、気液二相流の乾き度 x は、全質量流量 G (kg/s) に対する気相の質量流量 G_g (kg/s) の比で定義される。

$$x \equiv \frac{G_g}{G}$$

凍結運転期間は14日間とし、期間中の乾き度のデータの経時変化を計測した。運転期間終了時には凍土を掘り起こして、その出来形の寸法も計測した。

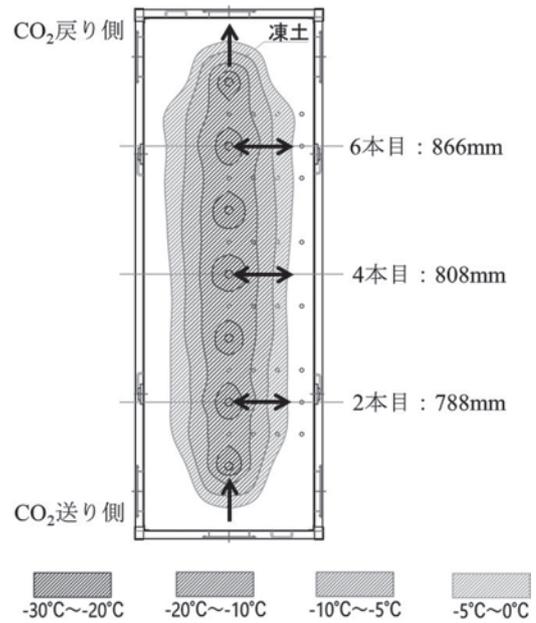
上記の実験と同時に、液化CO₂の循環流量をパラメータとした凍土厚さの検証実験を実施した。流量は0.5, 1.0, 1.5 L/minの3ケースとした。断熱材の仕切り板で、16 m³の土槽を3分割し、2 mの凍結管を0.8 mピッチで2本設置して、凍土を造成した。

実験で使用する凍結プラントの冷却塔は、水冷式（クーリングタワー）と空冷式（ドライクーラー）の2種類とし、模擬トンネル内に設置した。運転期間中に、模擬トンネル内の換気風速を0~1.5 m/secと変化させて、坑内の湿度と温度、冷却塔の電流値と冷却水出入温度差を計測した。

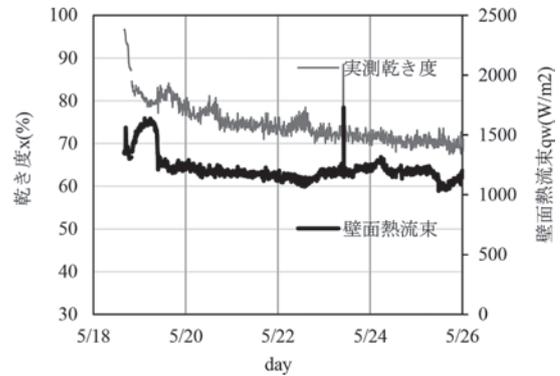
4. 実験結果

CO₂ 気液混合割合の検証で造成した凍土の寸法を図一三に示す。実験土槽の手前（送り側）から奥（戻り側）に向かって、凍土厚さが小さくなることはなく、凍結管を直列で接続した影響は見られない。

実測した乾き度は、図一四の細かい線に示すように、凍土造成開始直後、気相は乾き度100%を計測したが、凍土の成長に伴い、凍結負荷が減少するにつれて低下した。凍結運転期間の後半では、乾き度が70%程度で安定する傾向が見られ、乾き度70%程度の気相で、



図一三 掘り起こした凍土の寸法 (CO₂ 気液混合割合の検証)



図一四 乾き度と壁面熱流束の関係

凍土厚さが800 mm程度を確保することができた。

実測した乾き度の精度について、乾き度から凍結管の壁面を通過する熱流束に換算し、熱流束の値に基づいて解析した凍土厚さを、実測値と比較した。

凍結管の外径 D (m)、流れ方向の長さを z (m)、管の外から凍結管の壁面を通過する熱流束を q_w (W/m²) とすると、1秒あたりの入熱量は、 $\pi Dz q_w$ (W) となる。よって、内部を流れる流体の比エンタルピーの増加量は、 $\frac{\pi Dz q_w}{G}$ (J/kg) となる。ここで、 G (kg/s) は供給流体の質量流量である。凍結管の流入口で飽和液が循環したとすると、管入口からの距離 z (m) の位置における乾き度 x は、次の式で表される。

$$x(z) = \frac{\pi Dz q_w}{Gr}$$

ここで、 r (J/kg) は気化潜熱である。上式より、管壁における熱流束 q_w (W/m²) は、次式で表される。

$$q_w = \frac{Grx}{\pi Dz}$$

実測した乾き度と上記の計算式により換算した壁面熱流束の関係を図-4の太い線に示す。壁面熱流束は、乾き度と同様に凍結運転初期に大きく、次第に低下していき、約1,100 (W/m²)で壁面熱流束が安定する結果となった。

次に、実験土槽をモデルとして、凍結管半径方向の平面を対象とし、非定常空間2次元解析を行った。実験結果から得られた壁面熱流束を凍結管表面に与えて、片側凍土造成厚さの経時変化を解析した。図-5に解析結果のグラフと実測値のプロットを示す。参考として、凍結管表面温度に基づく解析値も併せて示す。実測した凍土厚さは、約80時間後に580mm程度であったことから、解析値と概ね一致する結果となった。

液化CO₂循環流量の検証で造成した凍土の寸法を図-6に示す。流量を0.5, 1.0, 1.5 L/minと変化させ

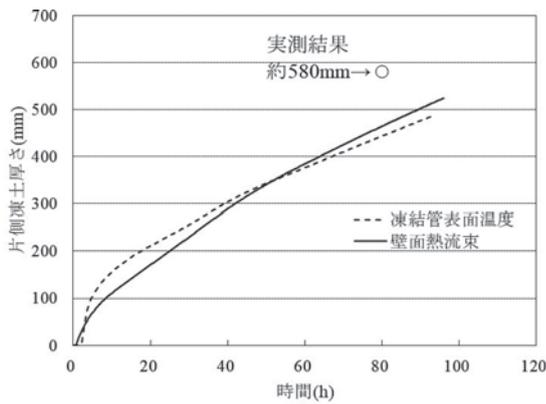


図-5 壁面熱流束、及び凍結管表面温度に基づく凍土成長の解析値と実測値の比較

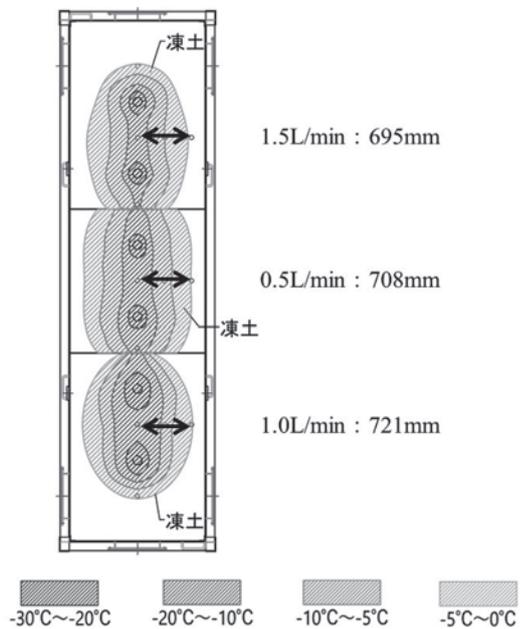


図-6 掘り起こした凍土の寸法 (液化CO₂循環流量の検証)

たが、3ケースとも凍土厚さは700mm程度となった。設置する凍結管の全長によるが、流量を0.5 L/minまで低下させても凍土造成に必要な気化潜熱が得られることが分かった。

模擬トンネル内の環境変化と冷却塔の運転データの経時変化を図-7, 8に示す。水冷式のクーリングタワー稼働時は風速0.5 m/secで坑内平均湿度が一定となり、空冷式のドライクーラー稼働時は風速1.0 m/secで坑内平均温度が一定となった。運転データでは、空冷式のドライクーラーの電流値への影響が顕著であり、風速1.0 m/sec以上で安定する傾向が見られた。今後、トンネル坑内に凍結プラントを設置する際に必要となる風速の基準とする。

5. おわりに

本実証実験では、ICECRETEの凍結システムの高度化に向けた各実験内容について実験と理論の両面から検証することができた。CO₂の気液混合割合について、今回の実験ケースでは、気相が乾き度70%程度まで増加した場合でも、循環流量が0.5 L/minまで低下しても、凍結運転は安定しており、必要な凍土を造成することができた。したがって、配管数量やポンプ

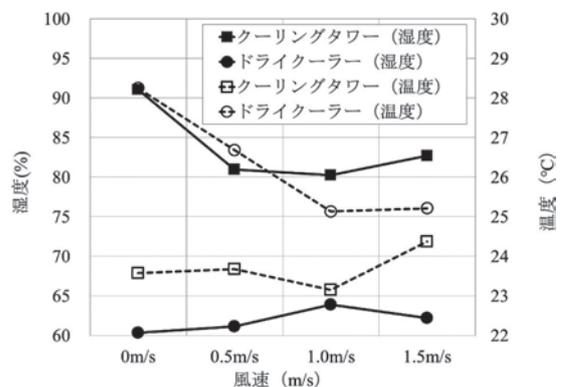


図-7 模擬トンネル内の環境変化

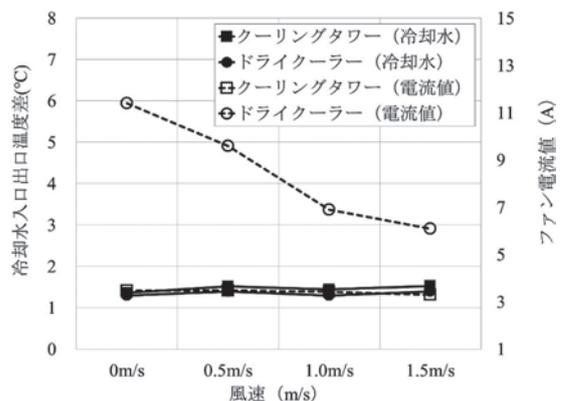


図-8 冷却塔の運転データの経時変化

動力が削減でき、コストダウンが可能であることが判明した。また、トンネル坑内に凍結プラントを設置する条件として、風速 1.0 m/sec 以上必要との知見を得た。今回導入した新しい装置や設備についても、実際の工事で使用する際の標準的な仕様を確立することができた。今後も実験と理論、さらに数値解析を組合せた検証を継続し、凍土造成に影響しない気相の割合の限界を見極め、最適な施工仕様を追求する所存である。

その他に、トータルステーションや地上型レーザースキャナーを併用した凍結管の削孔位置計測と削孔の自動化、限られた本数の測温管の温度データから AI による凍土造成範囲の予測等の研究開発を進めている。今回紹介しなかった研究成果についても、機会を見つけて適宜紹介していく予定である。

JCM A



[筆者紹介]

相馬 啓 (そうま ひろし)
ケミカルグラウト(株)
地盤改良部
部長



吉川 正 (よしかわ ただし)
(一財) 先端建設技術センター
審議役



西 征一郎 (にし せいいちろう)
成和リニューアルワークス(株)
技術部プロジェクト室
課長

