

新しい地盤凍結技術ICECRETE工法の合理化に関する研究 その2

一乾き度と壁面熱流束の比較及び凍土シミュレーション

ケミカルグラウト株式会社
一般財団法人先端建設技術センター
成和リニューアルワークス株式会社

正会員 ○塩屋 祐太 正会員 相馬 啓 正会員 小池遼太郎
正会員 吉川 正 正会員 橋立 健司 河原 一弘
正会員 西 征一郎

1. はじめに

本報文は、「新しい地盤凍結技術 ICECRETE 工法の合理化に関する研究」の一環として実施した「配管の最適化」の理論的考察についてまとめたものである。

従来の地盤凍結工法では、凍結管を循環する不凍液の温度差分の「顕熱」を利用して、地盤に凍土を造成していた。一方、ICECRETE 工法は、凍結管に液化炭酸ガスを循環させ、地盤と熱交換を行うことで、液化炭酸ガスが蒸発する「気化潜熱」を利用して凍土を造成する。この気化潜熱は従来の顕熱よりも単位体積当たりの熱交換量が非常に大きく、従来工法より効率的に凍土を造成することが可能となる。また、循環する液化炭酸ガスは気液二相流となる。図-1 に気液二相流の流動様式を示す。気泡流、スラグ流、チャーン流、環状噴霧流の順に液相状態が少なくなることが知られている。しかし、気相だけの状態では、地盤に熱を伝えることができず、計画通りに凍土が造成出来ない可能性がある。本報告では、凍結管循環後の液化炭酸ガスの気液混合割合を解明するために行った実験について報告する。

2. 実験

本実験²⁾では、24m³の水槽に2mの凍結管7本を0.8mピッチで設置し、加水と締固めを行いながら、含水率40%に調整し、水槽内に土を投入した。測温管を設置し、土槽内の温度を測定し、凍土造成状況をモニタリングした。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、外気等が凍土に影響しないようにした。7本の凍結管は直列に接続し、最後の凍結管の出口に乾き度センサーを設置した。その後、凍結管に液化炭酸ガスを循環させて14日間運転し、循環後の液化炭酸ガスの状態を把握するために、乾き度を実測した。図-2 に乾き度センサーの外形図、図-3 に実験配置図を示す。乾き度は、蒸気クオリティ x (式1)とも呼ばれ、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。

$$x \equiv \frac{G_g}{G} \quad \dots \dots \text{式1}$$

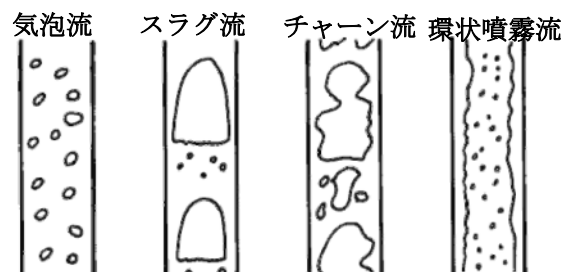
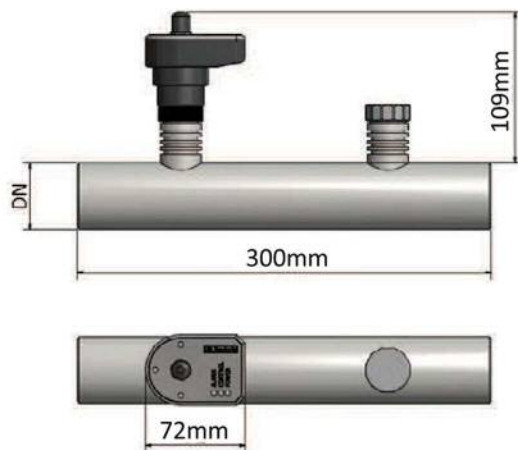
図-1 気液二相流の流動様式¹⁾

図-2 乾き度センサー外形図

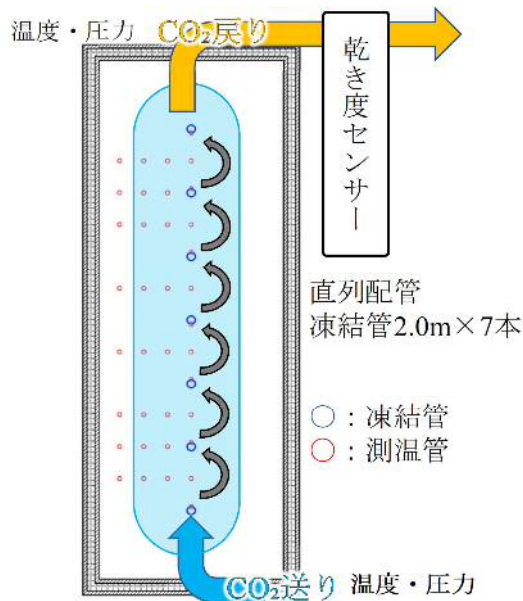


図-3 実験配置平面図

キーワード ICECRETE 工法, 凍土, 気液二相流, 乾き度

連絡先 〒105-0001 東京都港区虎ノ門2丁目2-5 ケミカルグラウト株式会社 TEL 03-5575-0472

3. 乾き度と壁面熱流束の関係

凍結管の外径 (m)、流れ方向の長さを (m)、管外からの熱流束を w (W/m^2) とすると、1秒あたりの入熱量は、 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、

$\frac{w}{G}$ (J/kg) となる。ここで、 G (kg/s) は供給流体の質量流量である。凍結管入口で飽和液が循環したとすると、管入口からの距離 (m) の位置における乾き度 x は、式2で表される。

$$x(\text{m}) = \frac{w}{Gr} \quad \dots \text{式2}$$

ここで、 (J/kg) は蒸発潜熱である。上式より、管壁における熱流束 w (W/m^2) は、式3で表される。

$$w = \frac{Grx}{\pi Dz} \quad \dots \text{式3}$$

4. 実験結果

図-4 に計算した乾き度と壁面熱流束の関係図を示す。実測した乾き度は、凍土造成開始直後は、100%気相となり、凍結負荷が減少するにつれて低下した。運転後半では、乾き度は、約 70%を推移していた。壁面熱流束は、凍結運転初期に大きく、次第に低下し、本実験では、約 $1,100\text{W/m}^2$ の壁面熱流束を得た。

5. 凍土造成シミュレーション解析結果

実験の凍結管配置レイアウトで凍結管半径方向の平面を対象とした非定常空間 2 次元熱伝導解析を行った。図-5 に解析モデルを示す。実測した乾き度から得られた壁面熱流束を凍結管表面に与えて、片側凍土厚さの経時変化を解析した。比較するために、凍結管表面に運転温度を与えた場合も解析した。図-6 に解析結果を示す。解析の結果、凍結管表面温度を与えた場合と凍結管表面熱流束を与えた場合で、片側凍土厚さが大きく異なった。実測した凍土厚さは、運転 80 時間後で 660mm であったことから、壁面熱流束を与えた結果が、実測した片側凍土厚さと近い値となった。これは、液化炭酸ガスの気化潜熱を利用する ICECRETE 工法の特徴を示す結果となっている。

6. まとめ

実測した乾き度から算出した壁面熱流束を用いてシミュレーションを行った結果、実測した凍土厚さとよく一致し、ICECRETE 工法の特徴である気液二相流による凍土造成のメカニズムが明らかとなった。引き続き乾き度のデータを収集分析し、施工性、解析精度の向上に努める所存である。

参考文献

- 流れ 2003 年 8 月号 3. 気液二相流に関する話題: https://www.jsme.or.jp/fed/old/newsletters/2003_8/03/238-3.html
- 小池ら: 新しい地盤凍結技術 ICECRETE 工法の合理化に関する研究 その 1, 土木学会 78 回年次学術講演会 2023. 9

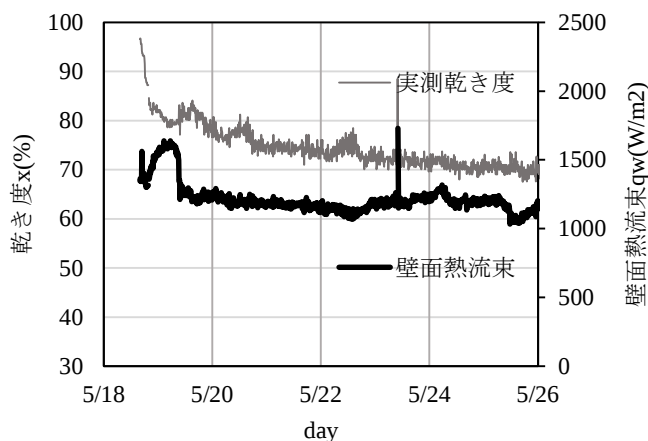


図-4 乾き度と壁面熱流束の関係

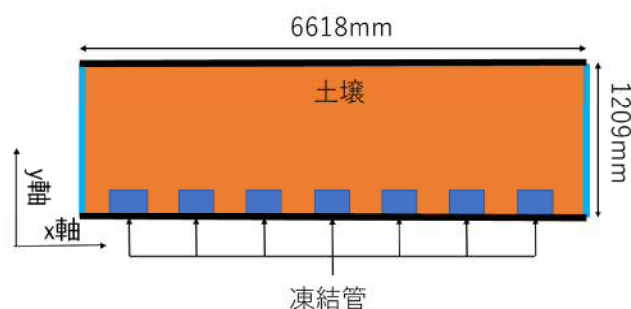


図-5 解析モデル

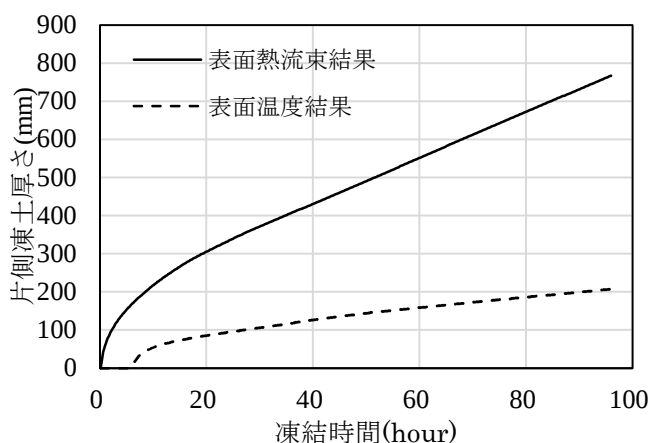


図-6 解析結果