

気液混合 CO₂ を冷媒に用いた土の凍結過程における熱移動と凍上現象

— 従来法との比較 —

土壌圏システム学研究室 522339 鷲見怜香

(指導教員: 渡辺晋生)

1. はじめに 地盤改良や崩落対策等の工法の一つに地盤凍結工法がある。地盤凍結工法では埋設した凍結管に冷媒を循環して土を凍結し、高い強度や遮水性を有する凍土壁を形成する。凍土壁の形成時には、周囲の土中水が凍結面に引き寄せられ、氷の層（アイスレンズ）が析出することがある。アイスレンズの成長は地盤を押し上げ（凍上現象）建物倒壊等の被害を招く。地盤凍結工法施工時における凍上対策として、現場では凍結速度 U から凍上速度 V を予測する高志ら（1974）のモデルが用いられている。

従来の地盤凍結工法では、冷媒にブラインが用いられる。しかし、ブライン冷媒には配管中の温度維持が難しいこと、循環や冷却に大型のポンプや冷凍機が必要なこと等の課題がある。近年、冷媒に気液混合状態の CO₂ を用いる凍結工法が考案された。この CO₂ 冷媒には圧力制御により気液の混合状態を維持するため配管中の温度維持が容易であること、気液混合流であり相変化の潜熱も利用するためポンプや冷凍機的小型化も可能であること等の利点がある。

しかし、この新凍結工法は未だ実績が少なく、従来法との比較も十分にされていない。そこで本研究では、冷媒にブラインと気液混合 CO₂ を用いた時の、凍結管周囲の地温の低下やアイスレンズの成長の違いを明らかにすることを目的とする。そして気液混合 CO₂ 冷媒を用いた時の凍上予測への既存のモデルの適用を検討する。

2. 試料と方法 試料には蛙目粘土を用いた。試料を水道水で含水比 0.45 g/g に調整し、乾燥密度 1.25 g/cm³ になるように 40 × 40 × 10 cm³ のアクリル容器に 40 cm 充填した。容器中央には凍結管を、周囲に 5 cm 間隔で格子状に熱電対を設置した（図 1）。熱電対は凍結管の容器出入口にも設置した。試料上部には変位計を設置した。試料温度を 20℃ に馴化した後、容器を断熱し、

凍結管に冷媒を 48 時間循環することで凍結管周囲の試料を凍結した。冷凍機から凍結管までの配管は 1 m とし、冷媒の設定温度はブラインで -45、-35、-25、-15℃、気液混合 CO₂ で -45、-35、-30℃ とした。実験中は、熱電対の温度と試料上端の変位量（凍上量）を 4 分間隔で測定した。実験終了時には断熱材を取り除き、凍土やアイスレンズの様子を観察した。

3. 結果と考察 凍結管に冷媒を循環すると、凍結管周囲から同心円状に試料温度が低下し、アイスレンズの析出を伴って試料が凍結した。

図 2 に冷媒を 48 時間循環した時の、冷凍機の設定温度に対する、凍結管の容器出入口、及び凍結管近傍の試料の温度を示す。ブライン冷媒では、冷凍機の設定温度が低いほど凍結管入口の温度が設定より高く、冷媒を冷凍機で -45℃ に冷やしても容器到達までに冷媒温度が約 20℃ 上昇した。凍結管の容器出入口でも冷媒温度に約 2℃ の差が生じた。また、凍結管近傍の試料の温度は凍結管の温度より約 10℃ 高かった。気液混合 CO₂ 冷媒では凍結管出入口の温度は冷凍機の設定温度と等しかった。気液混合 CO₂ 冷媒では圧力を一定に制御するため、配管や凍結管に熱が流入しても、管内の CO₂ が相変化することにより冷媒の温度上昇が抑えられると言える。

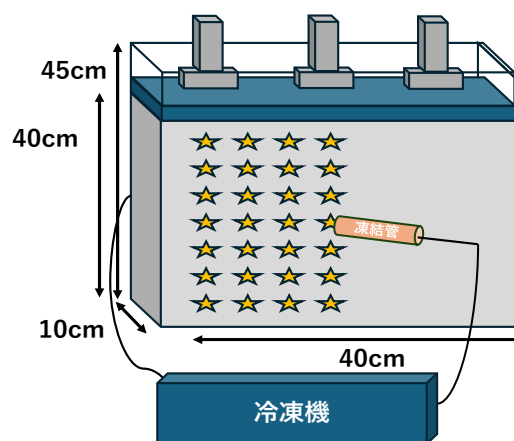


図1 装置概要

また、凍結管近傍の試料温度はブライン冷媒と同様に凍結管より約 10℃高かった。

凍結管近傍の試料の温度は、設定温度-35℃のブライン冷媒と、-30℃の気液混合 CO₂ 冷媒を用いた場合に約-10℃となった。図 3 にこれらの冷媒を 48 時間流した時の凍結管近傍の様子を、図 4 に 0℃線進行量（凍結量）と凍上量を示す。図 3 中、点線は 0℃の等温線を、0℃線の内側の凍土中黒色部はアイスレンズを示す。気液混合 CO₂ を冷媒に用いるとブライン冷媒を用いた時よりアイスレンズが大きく成長し、収縮亀裂も顕著になった。凍結量の増加は初期に急激に、時間の経過と共に緩やかになった（図 4 (a)）。凍結量の差は、冷媒の違いで 48 時間後に約 10 mm となったが、凍結速度に冷媒の違いはあまり見られなかった。凍上量はブライン冷媒では凍結開始 24 時間後から増加したが、気液混合 CO₂ 冷媒では開始直後から増加した（図 4 (b)）。凍上量の差は 48 時間後に約 15 mm となった。凍上速度は気液混合 CO₂ 冷媒で 3 倍速かった。

高志ら（1974）の凍上予測モデルは、(1)式のように整理できる。

$$V = B_1 U + B_2 \sqrt{U} + B_3 \quad (1)$$

ここで、 B_1 、 B_2 、 B_3 は土質や有効応力に関する定数である。凍結速度 U と凍上速度 V の関係を図 5 に示す。図中の実線と点線は (1)式の適合曲線を示す。凍結速度が大きくなるにつれ凍上速度は小さくなった。また冷媒が異なると(1)式の B_1 、 B_2 、 B_3 も異なった。これは、同一の凍結速度でもブライン冷媒より気液混合 CO₂ 冷媒を用いた時の凍上量やアイスレンズの生成速度が大きかったことによる。

ブライン冷媒は対流熱伝達で凍結管から熱を奪うのに対し、気液混合 CO₂ 冷媒は潜熱を伴う二相流熱伝達で熱を奪うため、アイスレンズの成長時に発生する潜熱を効率よく除去できる。このため、凍結速度が見かけ上等しい場合でも、気液混合 CO₂ 冷媒を用いると土中により大きなアイスレンズが生成すると考えられる。

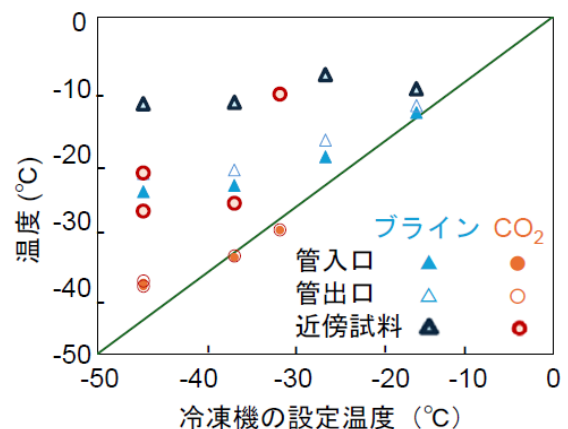


図2 凍結管出入口と凍結管近傍の試料温度

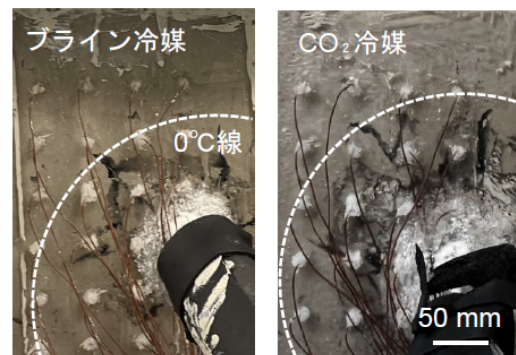


図3 凍結管近傍の様子の比較

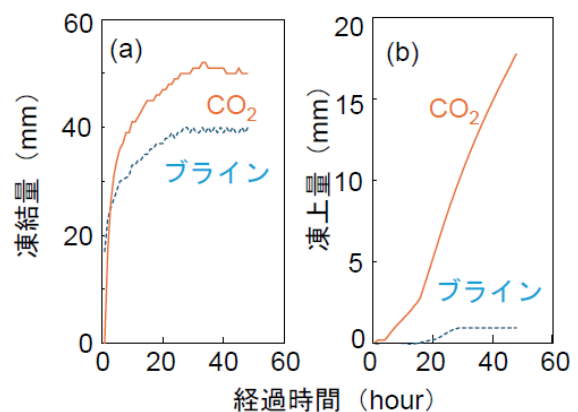


図4 (a) 0℃線の進行量と(b)凍上量

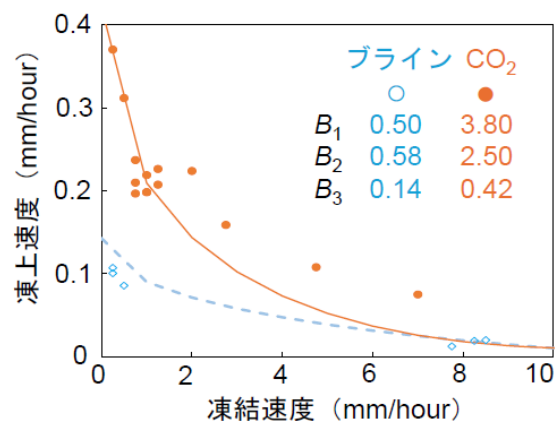


図5 凍結速度と凍上速度の関係