

土の凍結過程における凍上量と熱伝達に関する研究

土壌圏システム学研究室 520302 青木ひらり

(指導教員:渡辺晋生)

1. はじめに 土は凍結すると、非常に強固になりかつ水分を通さなくなる。こうした凍土の性質を利用した地盤改良工法の一つに地盤凍結工法がある。凍結工法では、地中に凍結管を挿入し冷媒を流すことで凍土を造成する。この際、土中にアイスレンズと呼ばれる氷晶が析出し、周囲の地盤が隆起する凍上が生じることがある。凍上や凍上時に発生する土圧は、周辺の構造物や施工に深刻な被害を及ぼしうる。凍上の抑制や対策を考えるためには、土の凍結履歴、凍土の吸水しやすさ、凍結管に循環する冷媒の温度などと凍上量の関係を明らかにする必要がある。また凍結工法では、いかに安全かつ安価に必要な量の凍土を造成するかの検討も重要である。この際、任意の時間で造成される凍土の量を予測するには、凍結管から周囲の土中への熱の伝わりやすさである伝達係数を知る必要がある。伝達係数は凍結管の形状や凍結管と周囲の土の接触、あるいは冷媒温度や循環速度に依存すると考えられる。そこで本研究では模型実験により凍結条件と凍上量の関係を明らかにすること、および凍結管を流れる冷媒の温度と凍結管から周囲の土中への熱の伝達係数を明らかにすることを目的とした。

2. 試料と方法 試料には凍上性が高いことが知られる笠岡粘土を用いた。変水位透水試験で求めた試料の飽和透水係数は 0.026 cm/d だった。また、未凍土の水分特性曲線から飽和凍土の不凍水曲線を推定したところ、試料は -30°C においても不凍水(0°C 以下でも液状を保つ土中の水分)を 10%以上保持した。厚さ 8 mm のアクリル板を用い、よくなじませた後、容器に飽和体積含水率 $0.38 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 、乾燥密度 $1.37 \text{ Mg}/\text{m}^3$ で 10 層に分けて均一に充填した。熱電対を図 1 の模型の背面から 50 mm 間隔で 24 か所に挿入し、凍結管を中央に貫通した。ここで、装置を 2°C の恒温室に 24 時間以上静置することで、試料に均一な初期条件を与えた。そして、容器の周囲を厚さ 5 cm のスタイロフォームで断熱し、任意の温度に冷却した冷媒を凍結管に 48 時間以上循環することで試料を中央から凍結した。この際、凍結履歴については有無の 2 条件、給水については湛水、無給水、下方を水だめに開放の 3 条件、冷媒については -8 、 -15 、 -20 、 -30°C の 4 条件とした。試料の凍結過程において、試料内の温度分布を 10 分の間隔で熱電対に接続したデータロガーで測定し、凍結の過程をタイムラプスカメラで撮影した。実験終了後に、撮影画像から試料の凍上量と凍結領域の広がりを経時変化をそれぞれ計測した。また、各時間の温度分布を土中の熱・水分移動の数値計算結果と比較し、凍結管近傍の地温 T_s と熱流 J_H を求めた。そしてニュートンの冷却法則 $J_H = h_c(T_c - T_s)$ に従い、熱伝導係数 h_c を求めた。ここで、 T_c は冷媒の温度とした。

3. 結果と考察 図 1 に凍結履歴の有る試料に湛水条件で、凍結管に -30°C の冷媒を 48 時間循環したときの試料の様子を示す。図中、凍土は破線内に形成されており、黒っぽく見える。凍結管に冷媒を流すといずれの冷媒温度においても、凍結領域は時間の経過と共に凍結管を中心に同心円状に広がった。この際、凍結面においてアイスレンズが析出と成長を繰り返した(図中右枠内)。図 2 に異なる条件で凍結した試料の凍結管直上の凍上量を示す。凍結履歴の有る試料に湛水条件で -8°C の冷媒で凍結すると、最初急激に、その後次第に凍上し、48 時間で 2 cm ほど地表が



図1 実験模型と凍結の様子

隆起した。凍結履歴の無い試料では他条件が等しくても凍上量は半分以下となった。凍結履歴により土の構造が変化し、アイスレンズが成長しやすくなったためと考えられる。なお、凍結履歴の回数は凍上量に大きく影響しなかった。無給水条件では、湛水条件の半分程度しか凍上しなかった。これは凍結面に移動できる水分が不足し、アイスレンズの成長が抑制されたためと考えられる。また、凍上量は冷媒の温度が低くなると小さくなる傾向がみられた。これは、凍結速度がアイスレンズの成長速度や土中水分の移動速度より速くなるためと考えられる。すなわち、凍結履歴の有る地盤でも低い冷媒温度で凍結させれば凍上量を減少させられる可能性が示唆された。図3に、凍結履歴が有る試料に、湛水条件にて -30°C の冷媒を48時間循環させたときの土層全体の温度の分布を示す。凍結は概ね同心円状に進行した。凍結管左右の試料の温度勾配は対称とみなせた。しかし、凍結管近傍では冷媒の温度によらず、上方の試料は下方より冷えやすい傾向にあった。一方、凍結管から10 cm以遠の上方の試料は下方より冷えにくくなった。これは、湛水面を 2°C の室温に開放しているため、外気の熱流を無視できないためと考えられる。次に、凍結管の水平方向の試料の温度分布の時間変化を再現するように、土中の熱・水移動を計算し、凍結管に接する試料の温度(図3での中心の温度)を推定した。図4に凍結履歴の有る試料に湛水条件で異なる温度の冷媒を循環させたときの凍結管に接している試料の温度を示す。凍結管周辺の試料の温度は冷媒温度が低いほど低くなった。しかし、冷媒温度を100%とするといずれの温度であっても試料の温度は約30%程しか下がっていなかった。そこで、冷媒と土の温度差から、この間の熱伝達係数を求めた(図5)。冷媒の温度にかかわらず、熱伝達係数は $6\text{ W/m}^2\text{K}$ となった。冷媒の流速や凍結管の形状、凍結管と試料との接触が等しいとき、凍結の際の熱伝達効率は冷媒温度に依存しないといえる。

今後は、異なる冷媒の流速や凍結管の径での検証が必要だと思われる。

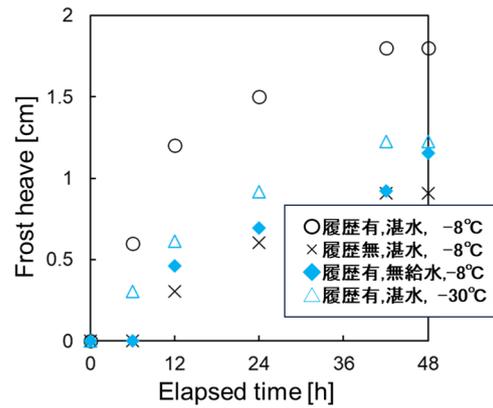


図2 異なる条件で凍結した試料の凍上量

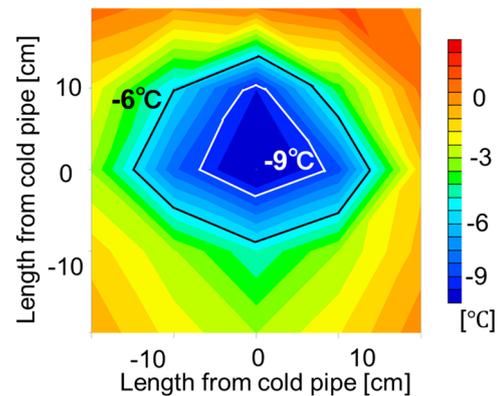


図3 冷媒温度 -30°C で凍結時の温度分布

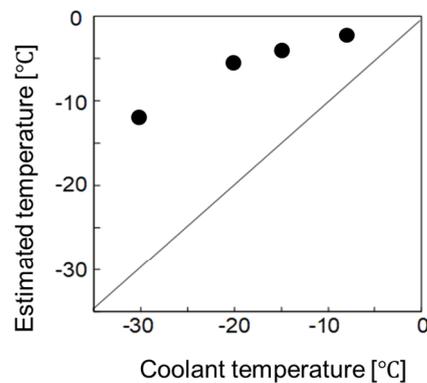


図4 冷媒温度と凍結管周囲の地温

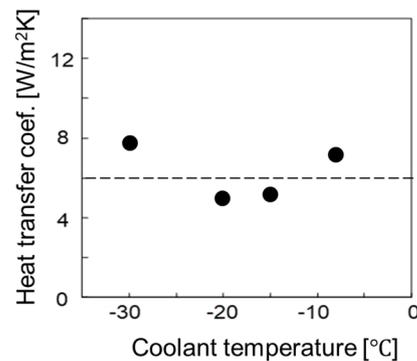


図5 熱伝達係数と冷媒の設定温度