

地下水位が凍結管周囲の土の凍結・凍上に及ぼす影響

516329 榊原 聖二 (土壌圏システム学教育研究分野)

1. はじめに

土は凍結すると硬くなり、遮水性を持つ。この性質を地盤改良に応用した工法を地盤凍結工法という。一方、土が凍結するとき未凍土中の水が凍結面近傍に引き寄せられ、アイスレンズと呼ばれる氷の層として析出することがある。アイスレンズの析出による地盤の膨張を凍上という。地盤凍結工法では凍結管を土に埋め込み凍土を造成する際、アイスレンズが発生し、凍結管周囲の土が凍上する。そのため施行時には凍上の予測と対策が必須である。近年、地盤凍結工法が地下水面近くの浅層の不飽和帯との境界面部分や複雑な形状の構造物を対象とした工事に用いられる機会が増えている。この際、地下水面からの距離の違いは凍結面への導水抵抗を変えることから、凍結管周囲の凍結の進行や凍上量に影響を及ぼすと考えられる。そこで本研究では、凍結管に対する地下水面の位置の違いが土の凍結や凍上に与える影響を明らかにすることを目的に実験を行った。

2. 試料と方法

藤の森シルトと水を混合し脱気した後、脱水圧密により半径 5.0 cm、厚さ 2.0 cm、乾燥密度 1.46 g/cm^3 、体積含水率 $0.46 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ の飽和試料円盤を作成した。試料円盤を、伸縮性のあるポリブチレンテレフタートネットで覆い、縦横 30 cm、厚さ 1.5 cm の 2 枚の亚克力板で挟み込み、中心に外径 1 cm の銅管（凍結管）を通した（図 1）。凍結管から上下左右に 1 cm 間隔で熱電対を 3 本ずつ計 12 本設置した。これを水槽内に置き水位（10、7.5、5、0 cm、水なし）を設定した。ここで水位 10 cm は試料全体が水につかる水位、水位 0 cm は試料の下端が水面に接する水位である。凍結管に -2°C の冷媒を循環し 24 時間静置することで試料に初期状態を与え

た。そして、冷媒の温度を -5°C に設定し試料を 24 時間冷却した。実験は室温 2°C の低温室で行った。熱電対で試料各点の温度を計測し、温度勾配と 0°C 線の位置を算出した。タイムラプスカメラで 5 分毎に撮影を行い、同心円状に進行する凍結線と試料外周の膨張量（凍上量）を観測した。この際、凍結線は試料の色の変化で判別し、凍結管から凍結線までの長さを凍結長とした。

3. 結果と考察

水位 10 cm で行った実験の試料上方の温度変化を図 2 に示す。試料の温度は冷却開始後に急激に低下し、その後ゆるやかに一定値に近づいた。この際、凍結管周囲の土中にアイスレンズが発生し、試料が同心円状に凍上した。凍結管から各距離の温度変化は水位の違いや凍結管からの方向に依らず一致した。このときの温度勾配は、1 時間で $2.96^\circ\text{C}/\text{cm}$ 、3 時間で $1.21^\circ\text{C}/\text{cm}$ 、24 時間で $0.61^\circ\text{C}/\text{cm}$ と次第に小さくなった。図 3 に水位 10 cm で行った実験の試料上方の凍結長及び凍結管から 0°C 線までの距離を示す。凍結長と 0°C 線までの距離は、冷却開始直後は急激に、その後ゆるやかに伸長した。 0°C 線までの距離が凍結長より長かったことから、凍結は 0°C 以下の温度で生じたと見なせる。水位が異なっても 0°C 線は同心円状に進行したが、

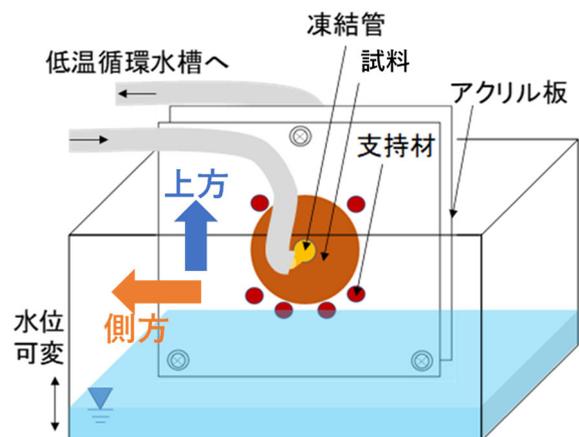


図 1. 装置概要

凍結長の上方への伸長は水位が低くなると遅くなり、冷却 24 時間後には上方への凍結長は側方より 5 mm 短くなった。図 4 に凍上量の経時変化を示す。時間の経過とともに凍上速度は遅くなり、24 時間後には概ね 0 mm/h となった。24 時間の凍結管から上方への凍上量は水位 10 cm では 4.3 mm、水位 7.5 cm では 3.5 mm、水位 5 cm では 2.5 mm と水位低下にともない小さくなった。

水位 10 cm で行った実験については凍結管から上方と側方への凍上量は一致した。凍結線への導水抵抗に違いがなかったためと考えられる。一方、水位 7.5 cm と 5 cm で行った実験は上方より側方への凍上量が大きくなった。水位 5 cm の実験については、冷却開始から 10 時間後までは上方へと側方への凍上速度に差は見られなかったが、10 時間以降に上方への凍上速度が大きく減少した。それまでに形成された凍土によって水分の移動が遮られて、導水長が増したためと考えられる。図 5 に試料上方についての凍結速度と凍上速度の関係を示す。凍上速度は凍結速度に比例して速くなった。水位 10 cm で行った実験では凍上速度は凍結速度の約 1/5、水位 5 cm では約 1/8、水位 0 cm では約 1/20 となった。そこで、図 5 の凍上速度と凍結速度の傾き（凍上凍結比）と水位の関係を調べた（図 6）。凍上凍結比は概ね水位に比例した。これにより、凍結速度を測定すれば凍上速度を導くことができる。また水位が異なっても同様に導くことができる。

4. おわりに

本実験により、凍結管周囲の凍土は 0°C 以下で形成すること、凍上量は地下水位からの距離に応じて低下することが確認できた。また、本実験で扱った凍結条件においては、多くのモデルで指標とされる 0°C 線や温度勾配ではなく、凍上速度は凍結速度に比例し、この比例係数は水位の関数として表せた。こうした関係を利用すれば、不飽和帯の地盤凍結時の凍上量予測の精度を向上できる可能性がある

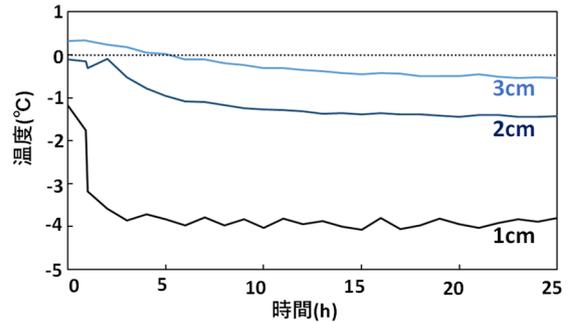


図 2. 試料上方の温度の経時変化（水位 10 cm）

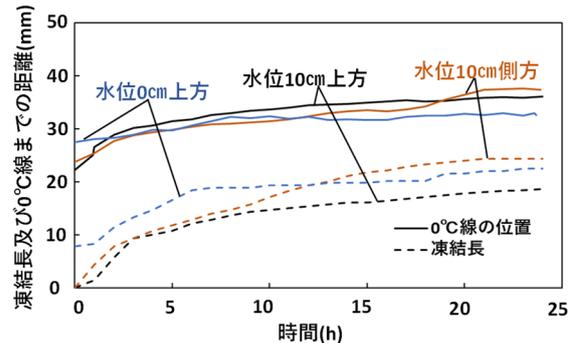


図 3. 凍結長及び 0°C 線までの距離

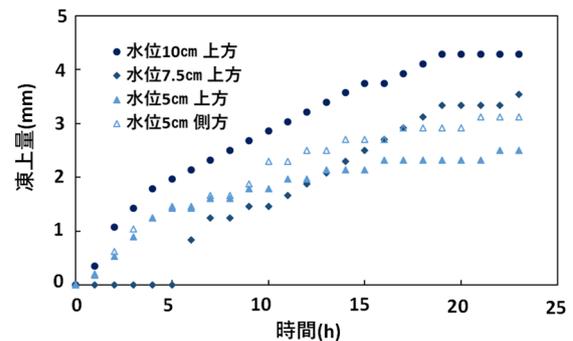


図 4. 凍上量の経時変化

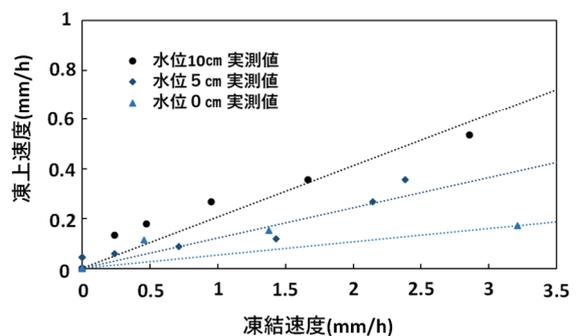


図 5. 試料上方の凍結速度と凍上速度の関係

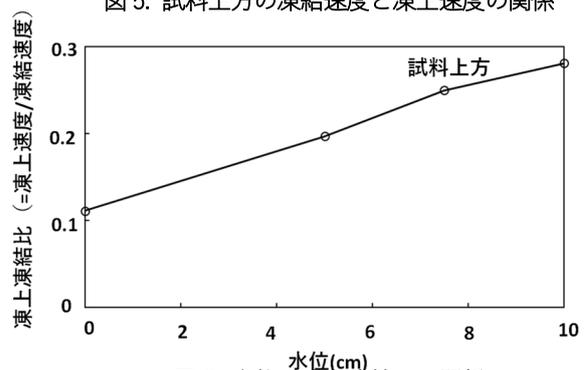


図 6. 水位と凍上凍結比の関係