

地中構造物が凍上に及ぼす影響

土壌圏システム学研究室 518342 鈴木健大

(指導教員:渡辺晋生)

1. はじめに 地盤が軟弱な工事現場では地下水噴出や地盤崩壊対策の地盤改良に地盤凍結工法を用いることがある。地盤凍結工法は、地盤に設置した凍結管に $-20\sim-30^{\circ}\text{C}$ の冷媒を循環することで高い強度と遮水性を持つ凍土壁を造成し、安全な工事を可能とする。しかし、凍土の形成時に周囲の土中水が凍結面(凍土と未凍土の境界)に移動し、アイスレンズと呼ばれるとびとびの氷の層が析出することがある。アイスレンズの析出を伴う地表の隆起(凍上現象)は周囲の構造物に影響を及ぼす。そこで凍結工法施工時は、凍上量の予測に基づき対策を講じるが、近年、地中構造物が複雑に配置された現場等で凍上量を予測できない事例が生じている。これは地中構造物による水分や熱の移動の抑制や凍結膨張時の土の移動の妨げによると考えられる。そこで本研究では構造物近傍の凍上予測の精度向上を目指し、構造物の材質や凍土との距離と凍上の関係を明らかにすることを目的とした。

2. 試料と方法 8 mm 厚のアクリル板を用い、内寸 $300\times 300\times 200\text{ mm}^3$ の容器を作成した(図1)。内径10 mmのアルミニウム製の凍結管を容器中央の20 mm 高に設置し、低温循環水槽と接続した。容器背面45、70、95 mm 高に30 mm 間隔で7本ずつ計21本の熱電対を設置した。熱電対はアクリル面から内側50 mm に先端が来るようにした。2 mm 篩別した青粘土を容器に乾燥密度 1.29 Mg/m^3 、含水率0.53(飽和)の均質な土層になるように、120 mm 高まで充填した。 2°C の低温室で試料を48時間馴化した後、容器前面以外を50 mm 厚のスタイロフォームで断熱した。そして、凍結管に -5°C の冷媒を循環し、試料を凍結した。試料の凍結過程の温度分布をモニターすると共に凍結面の様子と凍上変位をタイムラプスカメラで撮影した。実験は地中構造物の影響を考えるため、次の4つの土層で行った。(1)土層のみ。(2)と(3)凍結管から40 mm あるいは80 mm に容器底から上端まで

8 mm 厚のアクリル壁を含む土層。(4)凍結管から40 mm に容器底から100 mm 高までのポリエチレンテレフタレート(PET)シートを含む土層である。なお、(2)と(3)のアクリル板は試料を左右に分断しており、全ての高さで左右の水分移動を抑制するのに対し、(4)のPETシートは試料上端に達しておらず、上部20 mm は試料の水分移動を妨げない。

3. 実験結果 冷媒を循環すると初期に急激にそして次第にゆっくりと凍結管から同心円状に凍土が発達した。図2に24時間経過時の凍結管近傍の様子を示す。図中の濃色部分が凍土領域、凍土領域内の亀裂状のものがアイスレンズを示す。アクリル板やPETシートがある場合、アイスレンズの厚さが薄くなった。いずれの土層についても凍結面は -0.2°C 線と概ね一致し、24時間後には凍結管から約60 mm に達した。土層(1)では地温は同心円状に低下したが、土層(2)ではアクリル板より左方の温度低下が凍結管側より遅くなった。また、アクリル板左方では凍結面が確認されなかった。同様に土層(3)のアクリル板左方の温度は24時間で 0°C まで下がらなかった。これはアクリル板の熱伝導率が飽和粘土の1/5程度であることが、熱の移動を妨げた原因であると考えられる。土層(4)の温度分布は土層(1)と類似した。PETシートは薄く、熱移動にほとんど影響しなかったと言える。

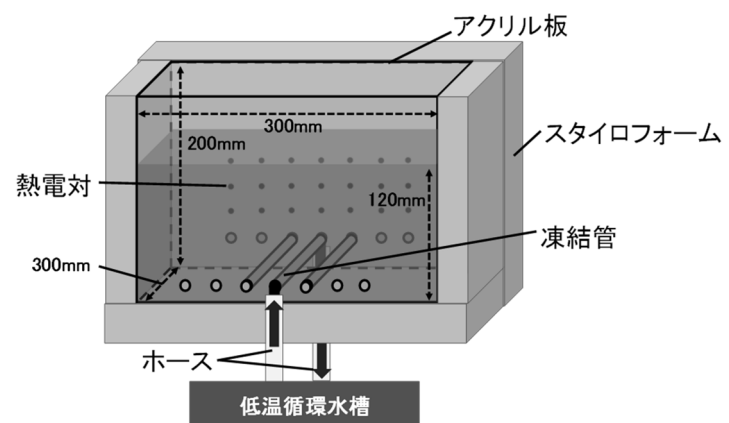


図1 実験装置の概要

図 3 に 24 時間凍結時の凍上量(凍結管周囲の土の膨張により隆起した地表各地点の垂直変位)を示す。図横軸には凍結管からの距離を右方を正、左方を負で表した。土層(1)は凍結管直上をピークとして概ね正規分布状に凍上した。一方、土層(2)は凍上のピークがアクリル板近傍(-40 mm)に現れ、それより左方ではほとんど凍上しなかった。凍結管近傍から斜方への土の移動がアクリル板により制限され上方へ押し上げられたためと考えられる。また、土層(4)のピークが(2)と異なり凍結管直上で生じたのは、PET シートがアクリル板の様に熱移動を阻害しないこと、柔らかく土の移動を妨げないことによると考えられる。土層(3)の凍上は凍結管より右で大きく、左右非対称になった。ここで、位置-150 mm から 150 mm における凍上量の凍結開始からの積算値(図 3 の凍上面積)の経時変化を図 4 に示す。土層(1)と(4)では積算凍上量が初期に急激に、その後ゆっくり増加したが、アクリル板がある土層(2)と(3)では凍上速度が小さく、積算凍上量が土層(1)の半分以下となった。

図 5 に凍結管近傍で観察されたアイスレンズの総面積を示す。何れの土層のアイスレンズも 18 時間まで同様に増加した。しかし、24 時間後には土層(1)と(4)で約 850 mm² まで増加したのに対し、土層(2)と(3)の面積は約 600 mm² に留まった。凍結面近傍の構造物は凍結面への水分供給を抑制し、アイスレンズの成長を抑制することで、土層全体の凍上量を小さくすると考えられる。

ここで、図 3 に式(1)の三次元凍上予測計算法で予測した凍上量 G を点線で示した。

$$G = \frac{\eta}{4} \int_{h_1}^{h_2} \{erfA + erfB\} \{erfC + erfD\} dh \quad (1)$$

ここで、 η は凍上率、 h_1 と h_2 は凍土の上端と下端の深さ、 A 、 B 、 C 、 D はそれぞれ $(l+x)/ah$ 、 $(l-x)/ah$ 、 $(w+y)/ah$ 、 $(w-y)/ah$ である。また、 l 、 w は凍土の横及び奥行き方向の長さの半分の値、 a は凍土範囲への影響を表す値である。式(1)は土層(1)とよく一致した。土層(2)や(3)も同様に表すために、式(1)を、構造物の影響を考慮して修正することが今後の課題である。

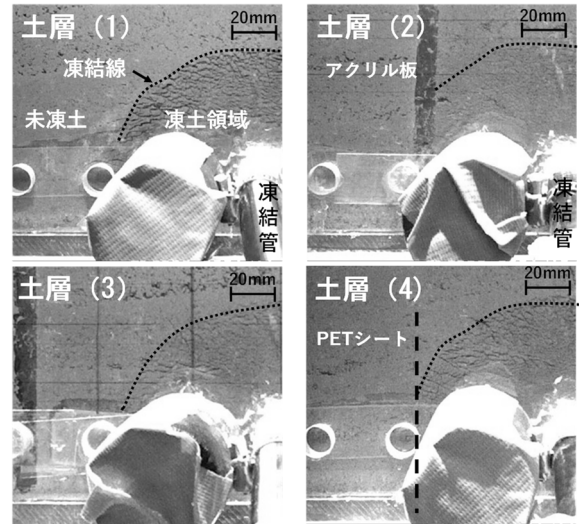


図 2 凍結面近傍の様子。点線は凍結線を示す。

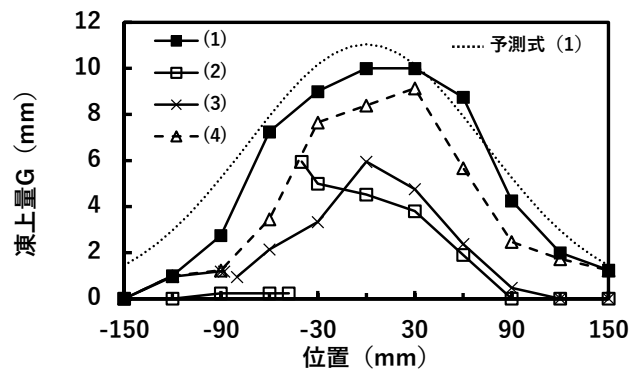


図3 凍上量

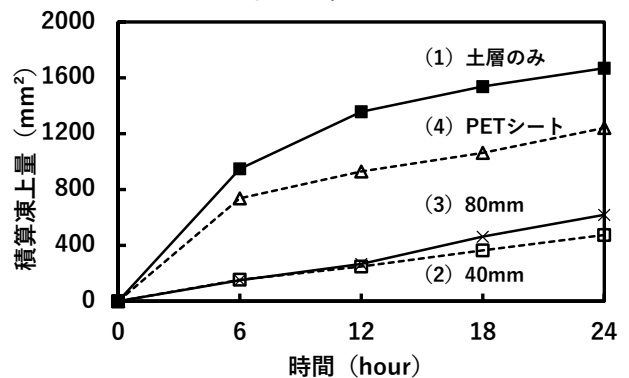


図4 積算凍上量

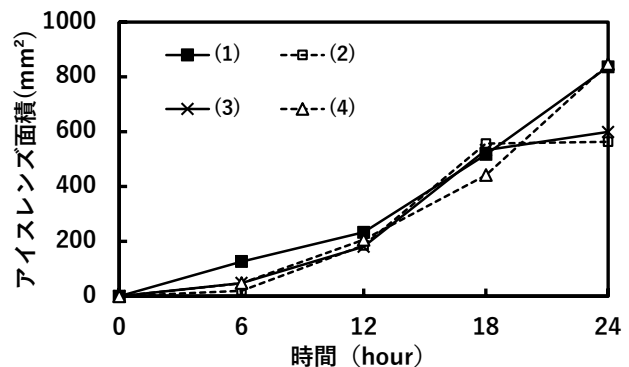


図5 アイスレンズ面積