

土中の構造物近くに凍土形成時の凍上量と凍上圧

土壌圏システム学研究室 519313 遠藤洗希

(指導教員:渡辺晋生)

1. はじめに 地盤凍結工法は、地盤に埋設した凍結管に $-20\sim-30^{\circ}\text{C}$ の冷媒を循環させることによって高い強度と遮水性を持つ凍土を形成する工法であり、軟弱地盤の改良に適用されている。しかし、凍土形成時、未凍土領域から凍結面に集積する水の凍結や、凍土領域に存在した土中水の凍結膨張により、凍上と呼ばれる地表の隆起が生じることがある。そのため、予め凍上量を予測して対策を施す必要がある。土中に構造物がない場合、凍上は凍土の直上をピークとした正規分布状に発生する。一方、構造物がある場合、水や熱の移動が阻害されるため、全体の凍上量が低下することや凍上のピーク位置が凍土の直上から移動することが知られている。しかし、この凍上のピーク位置の変位量と構造物の距離の関係は未だ明らかになっていない。また、凍上圧から土中構造物を保護するために、凍土形成時に構造物が受ける圧力を予測することも重要である。そこで本研究では、土中の構造物近くに凍土を形成時の凍上ピーク位置の変位量を明らかにするとともに、凍上圧と凍土の位置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て、内寸 $300\times 300\times 200\text{ mm}^3$ の箱型容器を作成した(図1)。内径10 mmのアルミニウム製の凍結管を容器中央の15 mm高に1本設置し、低温循環水槽と接続した。容器前面15 mm高の容器中央から120 mmの位置にゴム栓付きチューブを2本設置し、給水管と接続した。容器背面15 mm高に6本、55、95、135、175 mm高に7本、40 mm間隔で計34本の熱電対を背面から50 mmに先端が来るよう設置した。2 mm篩分した試料を容器に乾燥密度 1.28 Mg/m^3 、含水率0.47の均質な土層になるように、200 mm高まで40 mmずつ充填した。 2°C の低温室で試料を24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。その後、凍結管に -8°C の冷媒を循環し、試料を凍結した。試料が凍結していく際の温度分布をモニターするとともに、凍結面の様子や凍上変位をタイムラプスカメラで撮影した。容器には凍結管から150、110あるいは70 mmに土中構造物として容器底から275 mm高まで8 mm厚のアクリル壁を設置した。また、アクリル壁中央の30、70、110、150、190 mm高にロードセルを設置し、土中構造物各高さが受ける凍上にもなう圧力変化を測定した。

3. 実験結果 図2に凍結管に冷媒を循環開始後48時間の試料の様子を示す。土中構造物の位置によらず、凍結管から同心円状に半径80 mm程度まで凍土が形成した。凍結面の温度は約 -0.2°C だった。また、土中構造物よりも図中左方には凍土は形成されなかった。アクリル板の熱伝導は、飽和粘土の $1/5$ 程度であり熱移動が抑制されたためと考えられる。ここで、装置右端と土中構造物間の距離を R 、凍結管から土中構造物までの水平距離を X 、凍結管から実験開始時の地表までの鉛直距離を Y 、任意の時間の凍結面から土中構造物までの距離を L とする。図3に48時間冷媒循環時の凍上量を示す。図横軸は、凍結管からの距離を示し、図中凍結管から右方を正、左方を負で表した。 $X = 150\text{ mm}$ の試料では、凍上が約2時間後から開始し、凍上速度は時間経過にともない次第に緩やかになった。地表は凍結管直上をピークに正規分布状に隆起した。48時間後、凍上面積は 863 mm^2 、ピークの凍上量は 6.0 mm であり、左右両給水管から 19 mL 吸水した。一方、 $X = 110、70\text{ mm}$ の試料では、凍上の開始時間に大きな変化は見られなかった。凍上速度は24時間経過するまでは変化しなかったが、その後急激に低下した。地表は $X = 150\text{ mm}$ の試料より正方向で隆起し、ピークが正方向に移動した。凍上量も減少し、48時間後の凍上面積はそれぞれ 580 と 500 mm^2 、ピークの凍上量は 4.0 と 3.8 mm となった。土中構造物左の給水管からの吸水は見られず、右の給水管からの吸水量も 17 mL に低下した。ここで、ピークの正方向への

変位を S 、凍上面積を R で除した平均凍上量を Δ とする。48 時間後の Δ は $X = 150 \text{ mm}$ の試料で 3 mm 、 $X = 110, 70 \text{ mm}$ の試料で 2.5 mm だった。図 4a に平均凍上量 Δ を示す。 Δ は時間にともない増加したが、増加速度は次第に遅くなった。また、 Δ には X の減少に伴う減少傾向が見られた。図 4b に凍上のピーク変位 S と 24 時間冷媒循環時の Δ および X と Y の関係を示す。実験初期の Δ が小さい間は、凍結管直上付近の地表が凍上した。その後、 Δ の増加にともない、凍上の範囲が正方向に拡大し、ピーク変位 S が増加した。また、 X や Y が減少すると、凍土の膨張が地表や構造物に伝わりやすくなり、 S も増加した。そこで、凍上のピーク変位 S を次式で表した。

$$S = 3364(\Delta / XY)^{0.6} \quad (1)$$

式(1)は実測値をよく再現した。

土中構造物が受ける圧力は地表から深いほど増加した。ただし、 100 mm 深付近で局所的に大きな圧力を受けることがあった。図 5a に凍結管と同じ高さの土中構造物が、凍上によって受ける圧力 P と Δ 、 L の関係を示す。時間経過にともない、凍土が大きくなることで L は短く、 Δ は増加し、 P は $\text{LN}(\Delta/L)$ に比例して増加した。また、 L は $X = 150 \text{ mm}$ の試料では 48 時間後も 60 mm だったが、 $X = 110, 70 \text{ mm}$ の試料ではそれぞれ 36, 8 時間後に 0 mm となった。この際、 X によらず P と $\text{LN}(\Delta/L)$ の傾きは概ね一致した。そこで、凍結管から半径方向の P と $\text{LN}(\Delta/L)$ の傾きを凍上圧係数 A とした。また、土中構造物各高さの凍上圧係数は凍結管とのなす角度 γ により変化した(図 5b)。 $\gamma < 30^\circ$ では凍上圧係数は A の水平成分 $A \cos \gamma$ と一致した。すなわち、土中構造物が近傍の凍土から受ける圧力 P は次式で表せた。

$$P = A \cos \gamma \text{LN}(\Delta / L) \quad (2)$$

$\gamma = 45^\circ$ では、凍上圧係数は A よりも大きくなった。これは、 $\gamma = 45^\circ$ は上述の局所的に P が大きくなる高さに相当するためである。また、 $\gamma > 60^\circ$ では、 P は 0 に近く、ほとんど変化しなかった。このため、凍上圧係数は近似的に 0 とみなせた。

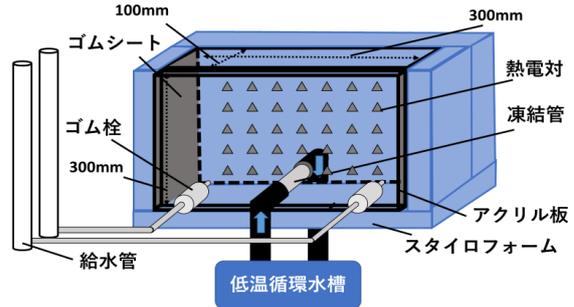


図 1 実験装置の概要

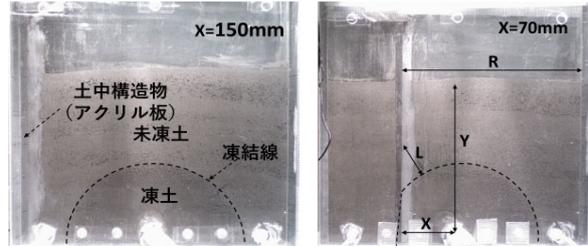


図 2 48h 経過後の装置の様子

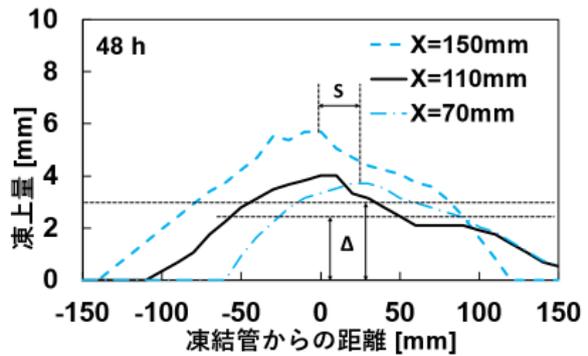


図3 凍上量

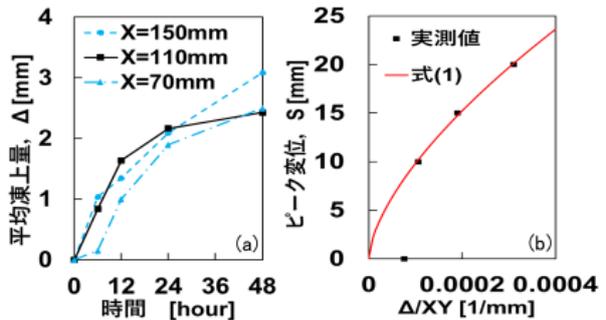


図4 (a)平均凍上量、(b)凍上のピーク変位

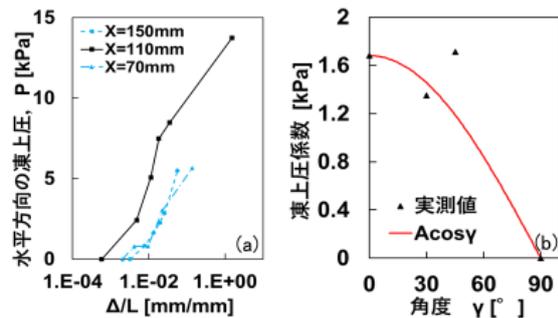


図5 (a)水平方向の凍上圧、(b)凍上圧係数