

# 遮水材を含む土の凍結・凍上について

517331 榎原 愛弓 (土壌圏システム学教育研究分野)

## 1. はじめに

凍結した土（凍土）は優れた強度と遮水性を持ち、地下トンネル工事の軟弱地盤の補強や遮水に応用されている（地盤凍結工法）。近年では、遮水材や固化材を地盤に浸透させる薬液注入工法が地盤凍結工法と併用されることもある。ところで、土が凍るとき、凍結面近傍にアイスレンズと呼ばれる氷の層が析出し、地面が隆起することがある（凍上）。地盤凍結工法においても凍上の予測と対策は重要である。これまで、地盤の凍上予測のためのモデルや経験式が多く提案されてきた。しかし、遮水材を含む土の凍上については不明なことも多い。そこで本研究では、遮水材によってどの程度凍上が抑制されるのか、既往のモデルを遮水材の混合率に対してどのように適用すべきなのかについて明らかにすることを目的とした。

## 2. 試料と方法

試料には、藤森シルトの 2 mm 篩通過分を用いた。また遮水材として、ケイ酸ナトリウム溶液と希塩酸を混合してゲル状ケイ酸を作成した。試料とゲル状ケイ酸、純水を混合して脱気し、640 kPa の加重で 3 日間脱水圧密することで、直径 100 mm、厚さ 20 mm、乾燥密度 1.46 Mg/m<sup>3</sup> の飽和円盤試料を作成した。混合するゲル状ケイ酸の量は、土粒子間隙の 0, 10, 25, 40%とした（ゲル状ケイ酸混合率とする）。試料の飽和透水係数は、混合率 0%試料に比べ、25%試料で約 1 オーダー、40%試料で約 2 オーダー低下した。この円盤試料を厚さ 10 mm のアクリル板で挟み、試料中央に外径 8 mm の銅管（凍結管）を通した。凍結管から左右上下方向にそれぞれ 5 mm 間隔で熱電対を挿入した。この装置全体を水槽に入れ、試料上端まで水を加えた（図 1）。2℃の低温室で、凍結管に 2℃の冷媒を約半日流すことで、試料の温度を一定

に馴化した。その後、凍結管に−5℃の冷媒を循環し、試料を中央より 48 時間凍結した。試料の凍結過程において、凍結面近傍および試料の凍上の様子をタイムラプスカメラで 5 分毎に撮影し、撮影画像から凍結面の位置と凍上に伴う試料の膨張量（凍上量）を測定した。

## 3. 結果と考察

凍結管に−5℃の冷媒を流し始めると（凍結開始 0 時間とする）、凍結管近くの試料の温度が急激に低下した。その後、凍土内は大きな温度勾配、未凍土内は緩やかな温度勾配を維持しながら、試料全体の温度が低下した。凍結を開始すると、凍結管から概ね同心円状に凍結面が進行した。凍結面の進行は凍結初期ほど速く、その後次第に遅くなった。アイスレンズは、凍結面近傍で析出・成長を繰り返した。凍結初期よりも凍結後期に発生したアイスレンズの方が厚くなった。また、混合率 0%試料に比べ、25, 40%試料の方が凍結面の進行が遅く、アイスレンズも全体的に薄くなった。アイスレンズの析出・成長に伴って試料が凍上した。各試料の凍上量の時間変化を図 2 に示す。どの試料もはじめ数時間で急激に凍上し、それ以降は緩やかに凍上した。混合率が高い試料ほど、

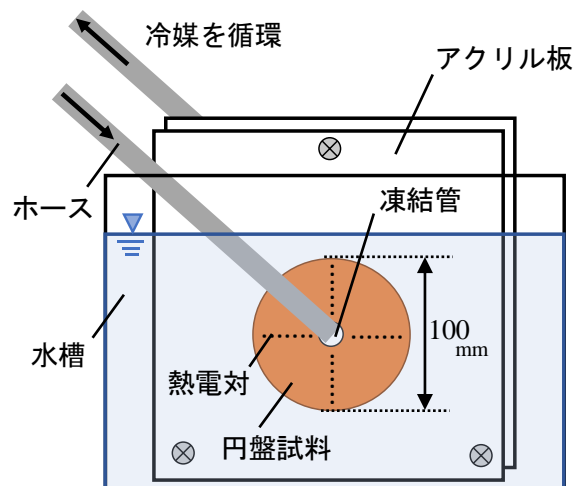


図 1 実験装置

凍上量は抑制された。凍結開始 12 時間後において、混合率 0 % 試料の凍上量は約 4 mm であるのに対し、25, 40 % 試料の凍上量は約 2 mm と半減した。凍結初期では、ゲル状ケイ酸によって凍上量が約 50 % 抑制されるといえる。

既往の凍上モデルには、例えば Konrad and Morgenstern (1981) のように凍結面の温度勾配  $dT/dz$  を指標とするモデルや、高志ら (1974) のように凍結速度  $U$  を指標とするモデルがある。そこで、図 2 の凍上量の時間変化の傾きから凍上速度  $V$  を、また撮影画像と温度データから凍結面の温度勾配  $dT/dz$  を求め、両者を比較した (図 3)。いずれの試料も凍上速度  $V$  は凍結面の温度勾配  $dT/dz$  に比例した (式 (1))。

$$V = A \frac{dT}{dz} \quad (1)$$

ここで、 $A$  は図 3 の直線の傾きである。各試料の傾き  $A$  を図 4 にマーカーで示す。 $A$  は混合率 0~10 % で急激に、10 % 以上では緩やかに低下した。そこで  $A$  を混合率  $x$  の指数関数として表すと、図 4 の破線のようにになった。次に凍結面の位置の時間変化の傾きから凍結速度  $U$  を求め、凍上速度  $V$  と比較した (図 5)。凍上速度  $V$  は小さな凍結速度  $U$  では急激に、大きな凍結速度  $U$  では緩やかに増加した。凍上速度  $V$  と凍結速度  $U$  には式 (2) の関係が見られた。

$$V = B_1 U + B_2 \sqrt{U} \quad (2)$$

ここで、 $B_1$ 、 $B_2$  は定数である。各試料の  $B_1$ 、 $B_2$  を図 6 にマーカーで示す。混合率が高いほど  $B_1$  は大きく、 $B_2$  は小さくなった。そこで  $B_1$ 、 $B_2$  を例えば混合率  $x$  の一次関数として表すと、図 6 の破線のようにになった。

遮水材を含む土の凍上速度  $V$  は、遮水材の混合率  $x$  と凍結面の温度勾配  $dT/dz$ 、あるいは混合率  $x$  と凍結速度  $U$  で推定できる可能性がある。汎用的な凍上モデルの構築に向け、様々な土質や水分、圧力条件での検討が必要である。

#### 参考文献

Konrad and Morgenstern (1981), *Can. Geotech. J.*  
高志ら (1974), 雪氷

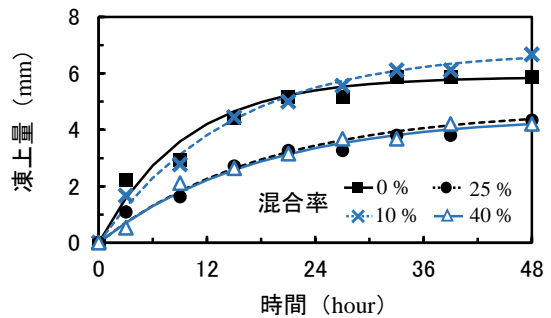


図2 凍上量

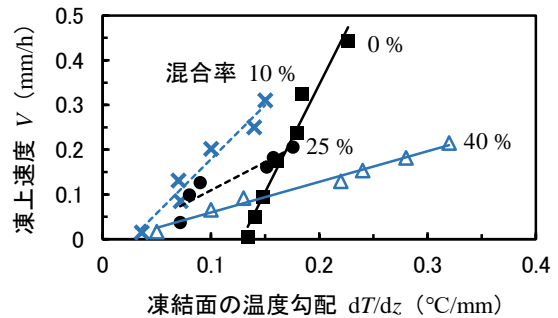


図3 凍結面の温度勾配と凍上速度

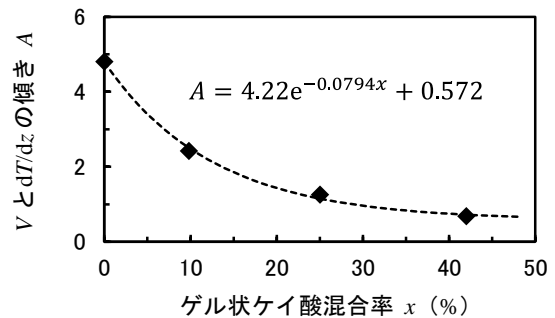


図4 ゲル状ケイ酸混合率とA の関係

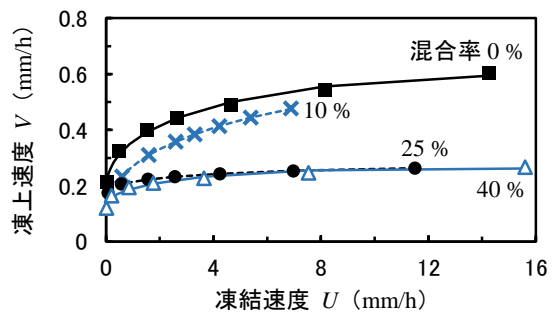


図5 凍結速度と凍上速度

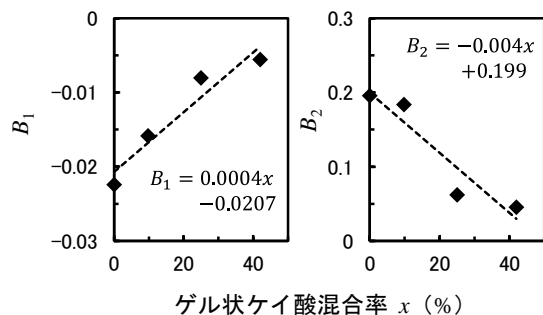


図6 ゲル状ケイ酸混合率と  $B_1$ 、 $B_2$  の関係