

異なる流速下における飽和土中の凍土形成過程

Freezing of saturated soil under different soil water flow rates

藪内友佑¹・渡辺晋生¹・釘崎佑樹²・大石雅人²

¹三重大学生物資源学部・²株式会社精研

要旨(Abstract) :

地盤に凍結管を埋設し凍土を造成する際、地下水流にともなう熱の移流を無視できない場合がある。そこで、土の凍結に与える地下水流の影響の評価を目的とした。砂カラムに異なる流速で4℃の水を通水しつつ、カラムを貫通した凍結管に-5℃の冷媒を流し、その際のカラム内の温度分布の変化を測定した。その結果、通水流速の違いにより、同一断面の流路の閉塞にかかる時間が異なること、凍結管の高さを境界として温度変化の様子が異なることが示された。

キーワード：地盤凍結，カラム実験，飽和流れ

Key words: Ground freezing, Column experiments, Saturated flow

1. はじめに

地盤凍結工法は、地盤中に凍結管を埋設し、その中に冷却液を循環することで、凍土を造成し、地盤の遮水性や強度を増強する地盤改良工法である。凍土の造成に影響を与える要素として、地下水流があげられる。地下水にともなう熱の流入は、地盤の凍結を遅延させたり、凍土の融解リスクを増大したりする。そのため地盤凍結工法では、対象地盤の地下水流速が速い場合、事前に薬液注入などにより流速を低下したり、凍結管同士の間隔を狭くしたりするなどの対策が取られる。より安全かつ低コストで凍土を造成するには、様々な地下水流下における地盤の凍結過程を理解することが重要である。そこでここでは、異なる流速の通水条件下での凍土形成過程を調べることを目的とした。

2. 方法

試料には鳥取砂丘砂を用いた。ポンプを接続した基部に固定したアクリル円筒（内径 11.5 cm，高さ 50 cm）に試料を 40 cm の高さまで乾燥密度 1.6 g/cm³ で水中充填した。アクリル円筒には高さ 45 cm に排水口を設け、下端から上端側へ水が流れるようにした。また、高さ 15 cm には凍結管を設置した。試料には熱電対を中央とその四方各 1 点で 6 層(Fig. 1a)，およ

び凍結管と同じ高さに 4 点(Fig. 1b)設置した。アクリル円筒の側面は断熱材で覆った。

装置を室温約 4℃の部屋に設置し、試料に室温の水を通水しながら、1 日以上静置した。試料内の温度が一定となった後、ダルシー流速 1.69 cm/h あるいは 3.93 cm/h で試料に通水しつつ凍結管に-5℃の冷却液を循環し、そのときの土中の温度変化を測定した。

3. 結果

通水流速 1.69 cm/h および 3.93 cm/h 下で、凍結管に冷却液の循環を開始した際の試料の各層の温度変化を Fig. 2 と 3 にそれぞれ示す。

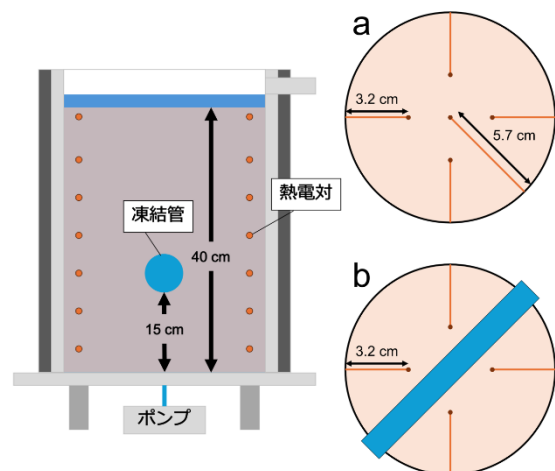


Fig. 1 実験装置の概略図

Schematic of experimental apparatus

なお、図中実線は中央、破線は四方に配置した熱電対の測定結果である。

通水流速 1.69 cm/h については (Fig. 2), 冷却液の循環開始直後から 15 cm 高 (凍結管設置高) の試料の温度が急速に低下した (図中灰色線)。4 時間後には、温度低下は落ち着き、以降は、 $-1 \sim -2$ °C で凍土が維持された。15 cm 高では、四方の 1 点温度低下が遅れたが、同一高さで凍結管から等距離の温度低下は一致した。15 cm 高に続いて、20 cm 高の試料の温度が低下した (図中緑線)。20 cm 高の試料の温度も開始から 4 時間まで温度が急激に、その後緩やかに低下した。凍結管から 5 cm 下流に位置する 20 cm 高では、他の高さと比べても試料中央の温度低下が四方より速い傾向にあり、同一高さにおいて最大で約 1 °C の温度差が生じた。これは、試料中央部が上流にある凍結管による熱交換の影響を強く受けたためと考える。一方、凍結管から 5 cm 上流に位置する 10 cm 高では (図中橙線)、凍結管からの距離が等しい 20 cm 高と比べ温度低下が緩やかだった。また冷却液を 16 時間循環しても、試料は凍結しなかった。通水による熱の流入が凍土の形成を阻害したと考えられる。同様に 5 cm 高 (図中青線) の温度低下が 25 cm や 30 cm 高 (図中紫および黄色線) より小さいのも通水の影響が凍結管による冷却に対して大きいと推測できる。また、冷却液の循環開始後 15 時間以降で、5 cm および 10 cm 高の温度が急激に低下し、一方で 30 cm 高の温度が上昇した。凍土により流路が閉塞し、通水が滞ったためと考えられる。

通水流速 3.93 cm/h についても (Fig. 3), 1.69 cm/h 同様、15 cm 高の試料が冷却液循環開始後すぐに凍結した。また、20 cm 高の試料は 10 時間頃から順次凍結したが、同一高さでの温度差が大きかった。凍結管の上流 5 cm に位置する 10 cm 高では、32 時間経過しても凍土が形成されなかった。5 cm 高では、冷却液

循環開始 30 時間まで、温度低下が小さかった。さらに、冷却液循環開始 30 時間後に 5 cm および 10 cm 高では急激に温度が低下し、30 cm および 38 cm 高では温度が上昇した。

2 つの通水流速の結果を比較すると、15 cm 高の凍結管を境に温度変化の様子が異なった。凍結管より下層 (上流) では、通水流速が大きい方 (Fig. 3) が、通水流速の小さい場合 (Fig. 2) に比べ、温度の低下速度が緩やかで、低下温度も小さかった。一方、凍結管より上層 (下流) では、通水流速が大きい方が、温度低下が急で、低下温度も大きくなった。また、通水流速が倍になると、本実験系では同一断面の流路を閉塞するのに要する時間も倍近くとなった。

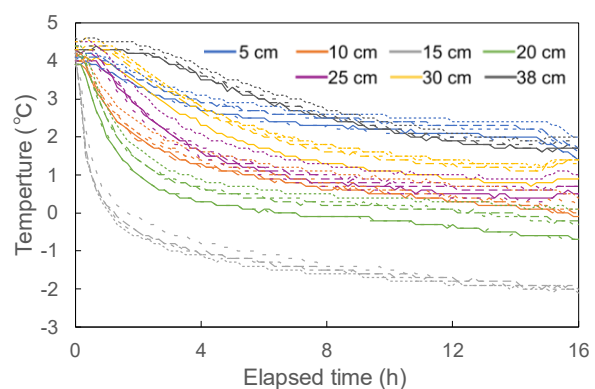


Fig. 2 流速 1.69 cm/h における試料の温度変化
Temperature change at each depth under a flow rate of 1.69 cm/h

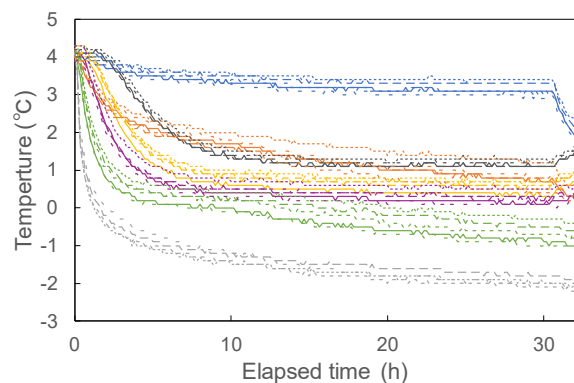


Fig. 3 流速 3.93 cm/h における試料の温度変化
Temperature change at each depth under a flow rate of 3.93 cm/h