

## 人工凍土の造成に対する地下水流の影響

## Influence of groundwater flow on the formation of frozen soil around freeze pipes

○藪内友佑\* 渡辺晋生\* 大石雅人\*\* 釘崎佑樹\*\*

Yusuke Yabuchi, Kunio Watanabe, Masato Oishi, Yuki Kugisaki

はじめに 土中水が凍結すると、高い強度と遮水性をもつ凍土が形成される。凍土は自然凍土と人工凍土に大別され、人工凍土は軟弱地盤の改良や有害物質の拡散防止などを目的として地盤凍結工法に利用される。地盤凍結工法では、地中に埋設された多数の凍結管に冷媒を循環し凍土柱を造成、結合することで凍土壁を形成する。地下水流速が大きい場合、凍土量の減少や凍土柱の結合阻害などの課題が生じる。そこで様々な通水条件による実験的検討が必要である。しかし、壁面や凍結管の通水流路に対する影響を無視できる規模の実験系が求められる。本研究では、内径 20 cm の円筒カラムを用いた凍土壁形成実験を行い、地下水流速と凍土の造成量、および凍土壁形成時間の関係を調べることを目的とした。

**試料と方法** 試料には鳥取砂丘砂を用いた。送液ポンプが接続された台座に内径 20 cm、高さ 60 cm のアクリル円筒を固定した。風乾試料を 56.5 cm 高まで乾燥密度 1.58 g/cm<sup>3</sup> で水中充填した。20 cm 高に 6 cm 間隔で銅製の凍結管（外径 0.6 cm）を 2 本貫通し、熱電対を 5 cm 間隔で 5 cm 高から 55 cm 高まで、各高さ 4 本ずつ設置した（20 cm 高のみ 5 本）。また、57 cm 高には排水口を設けた（図 1）。この装置を室温が平均 5 °C の部屋に設置し、試料に室温水を所定の流量で送液しながら 36 時間以上静置した。その後、-3.5 °C の冷媒を 2 本の凍結管に循環させ、試料の温度変化を 72 時間測定した。試料に対する通水流速（地下水流速、以下「流速」）は、0, 0.5, 0.75, 1.0, 2.0 m/d とした。

**結果と考察** 凍結管に冷媒を循環すると周囲の熱が奪われ、凍結管周辺の試料が凍結した。図 2 に流速 0 m/d と 1.0 m/d の試料に冷媒を 72 時間循環した際の 15 cm 高から 45 cm 高の試料の温度分布を示す。図中、赤色が高温、紫色（濃色）が低温、黒破線が 0 °C の等温線を示す。流速 0 m/d は 15 cm から 25 cm 高の試料の温度が 0 °C を下回った。25 cm 高以上の等温線は概ね等間隔になった。また、45 cm 高の温度は 3 °C 程度までしか低下しなかった。それに対して、流速 1.0 m/d は 0 °C の等温線が凍結管下方（上流側）および側方に約 2.5 cm、上方（下流側）に約 5 cm に達した。20 cm 高（凍結管の設置高）の中央部は、-0.5 °C 程度までしか低下せず、流速 0 m/d の場合と比較して 0.5 °C 高くなった。25 cm 高以上は 1 °C

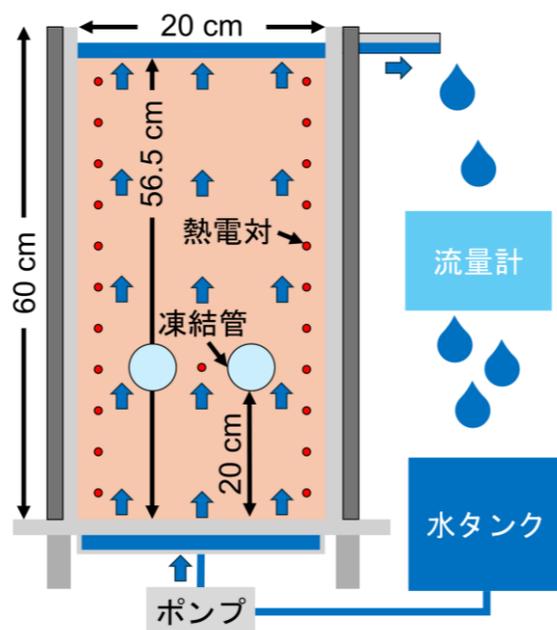


図 1 実験装置の概略図

Fig 1. Schematic of experimental apparatus

\*三重大学大学院生物資源学研究科 Graduate school of Bioresources, Mie Univ., \*\*株式会社精研 Seiken Co., Ltd.  
キーワード：凍上・凍結，水分移動，土壌の熱的性質

を下回り、特に中央部は 30 cm 高まで 0.5 °C を下回った。45 cm 高は、約 1 °C と 15 cm 高よりも約 2 °C 低く、0 m/d の場合と比べ 2 °C 程度低かった。上流（装置下部）は室温水が下端から供給されるため、温度低下が小さくなり、下流（装置上部）は凍結管により冷却された水が流入するため、温度低下が大きくなったと考えられる。ここで、試料の温度が 0 °C 以下の断面積を求めた（図 3）。断面積は時間の経過とともに増加した。また、冷媒を 72 時間循環した際、0 °C 以下の断面積は流速 0 m/d で約 146 cm<sup>2</sup>、流速 2.0 m/d で約 61 cm<sup>2</sup> と流速が速くなるほど減少した。

ところで試料の温度が 0 °C 以下となっても地下水流の影響を受ける場合土中水が凍結しない場合がある。よって、それぞれの凍結管周囲の 0 °C の等温線の結合からは凍土の結合（凍土壁の形成）を判別できない。そこで、1 °C の等温線に着目した。凍土結合前は 2 本の凍結管の間を通過する水がよく冷やされるため凍結管下流の 1 °C 線は凸形になる。この水流が継続すると 1 °C 線は凸形を維持しつつ下流に進行する。しかし、凍土の結合により、この水流が停止すると、1 °C 線は凸形を維持できなくなり、凸部の進行速度が遅くなる。その後、凍土壁側方から試料中央に流れ込む水の温度が低下するため 1 °C 線の進行が再開する。そこで本研究では 1 °C 線の進行の再開時間を凍土の結合時間とした。図 4 に、流速 0 m/d と 1.0 m/d の 1 °C 線の最高到達高（凸形の高さ）を示す。図の破線は 0 °C 線結合前、実線は 0 °C 線結合後の推移である。1 °C 線の最高到達高は、時間とともに上昇した。流速 1.0 m/d の凍土の結合時間は、約 22 時間後となった。ここで、他の流速でも同様に凍土の結合時間を求めた。図 5 に流速と凍土の結合時間の関係を示す。流速が速くなると凍土の結合時間は比例して遅くなった。このことから、正の温度の等温線形状の経時変化から凍土の結合を推察できた。

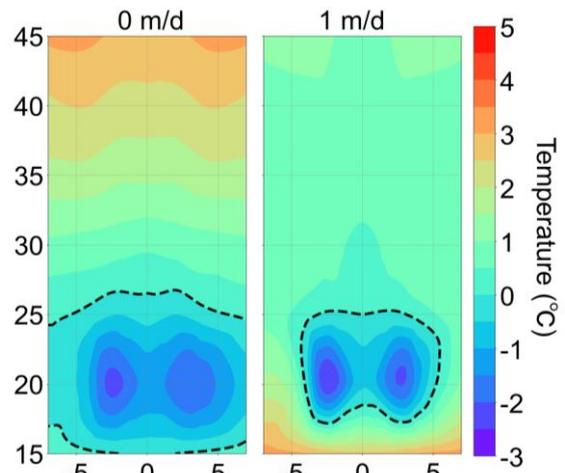


図 2 試料の温度分布 (72 時間後)  
Fig 2. Temperature distribution (72 h)

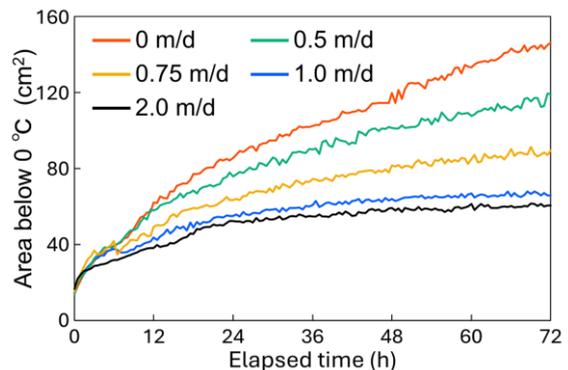


図 3 0 °C 以下の断面積  
Fig 3. Cross sectional area below 0 °C

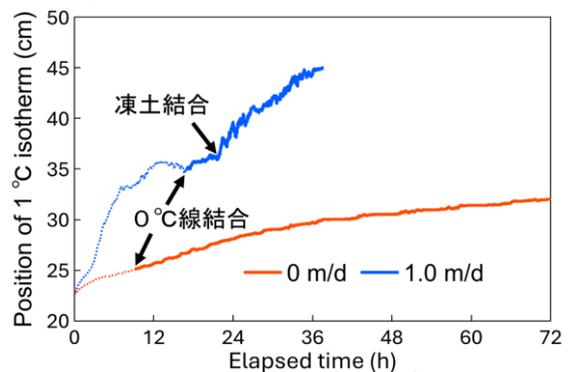


図 4 1 °C の等温線の最高位置  
Fig 4. Highest position of 1 °C isotherm

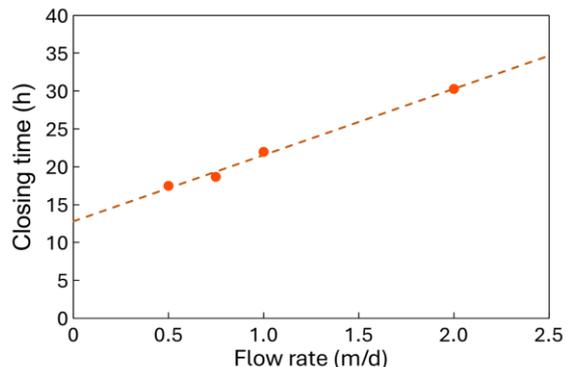


図 5 地下水流速と凍土の結合時間  
Fig 5. Flow rate and frozen soil closing time