

人工凍土の造成に対する地下水流の影響

土壌圏システム学研究室 521362 藪内友佑

(指導教員：渡辺晋生)

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などに利用される。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。しかし、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といった課題が生じる。そのため数値解析により地下水流の凍土壁形成への影響の検討が行われている。解析の検証には、通水条件を変化させた凍結実験を行う必要がある。この際、小規模な実験系では、壁面や凍結管による通水流路への影響が大きいため、このような影響を無視できる規模の実験系が求められる。そこで、内径 20 cm の円筒カラムを用いた凍土壁形成実験を行い、地下水の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本研究の目的とした。

試料と方法 試料に鳥取砂丘砂を用いた。送液ポンプを接続した台座に内径 20 cm、高さ 60 cm のアクリル円筒を固定し、風乾試料を 56.5 cm 高まで乾燥密度 1.58 g/cm^3 で水中充填した。20 cm 高に銅製の凍結管（外径 0.6 cm）を 6 cm 間隔で 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 高に排水口を設け、下端から上端へ試料中を水が流れるようにした（図 1）。装置を室温が平均 5°C の部屋に設置し、試料に室温の水を通水しながら 36 時間以上静置した。その後、凍結管内に -3.5°C の冷媒を 72 時間循環させ、土中の温度変化を測定した。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次第に凍結した。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）が低温を、黒の破線が 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 の等温線が凍結管から下方（上流側）および側方に約 2.5 cm、上方（下流側）に約 5 cm に達するにとどまった。2 本の凍結管を設置した 20 cm 高の中央部の温度は -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 高以上の温度は 1°C を下回り、試料中央部の温度は 30 cm 高まで 0.5°C を下回った。45 cm 高の温度は約 1°C と 15 cm 高よりも約 2°C 低く、また流速 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が低下しにくくなり、下流（装置上部）

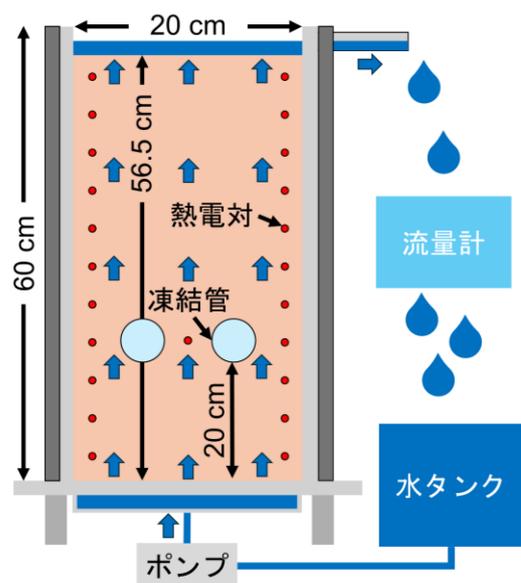


図 1 実験装置の概略図

は凍結管により冷却された水が流入するため温度が低下したと考えられる。ここで、試料の温度が 0°C 以下の断面積を求めた (図 3)。

0°C 以下の断面積は時間の経過とともに増加した。また、冷媒を 72 時間循環した際の 0°C 以下の断面積は流速 0 m/d で約 146 cm^2 、流速 2.0 m/d で約 61 cm^2 と流速が速くなるほど減少した。水の凍結を伴う一次元の熱伝導方程式の解析解 (Stefan 解) にもとづく、凍土量は時間の平方根に比例して増加する。流速 0 m/d の 0°C 以下の断面積は、Stefan 解と一致し、今回の実験系で凍結管周囲の凍土形成を表現できていると言える。一方、流速が大きくなると地下水流の影響により、 0°C 以下の断面積を Stefan 解で表せなくなった。

ところで試料の温度が 0°C 以下だとし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。凍土の結合前は 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 (凸形の頂点の高さ) 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。時間とともに 1°C 線の最高到達高は上昇した。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。

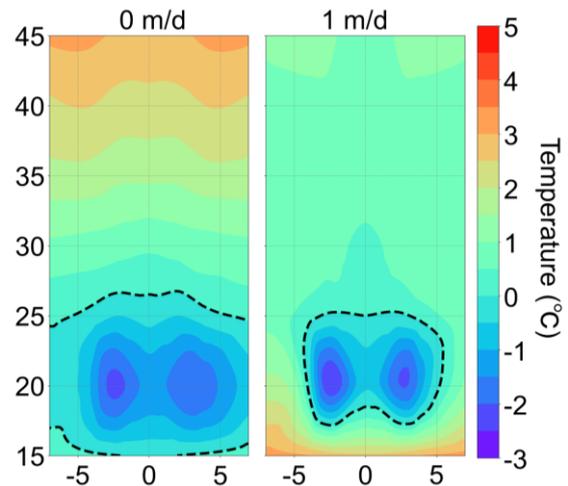


図 2 流速 0, 1 m/d の試料の温度分布

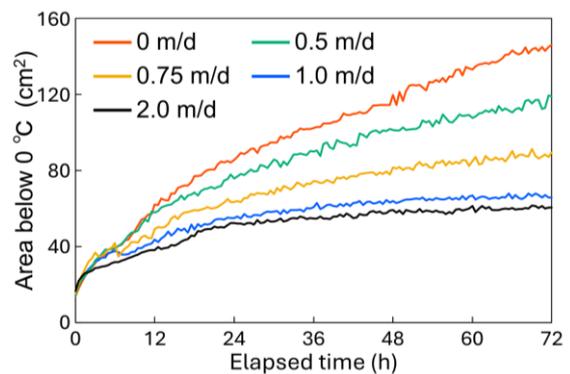


図 3 0°C 以下の断面積

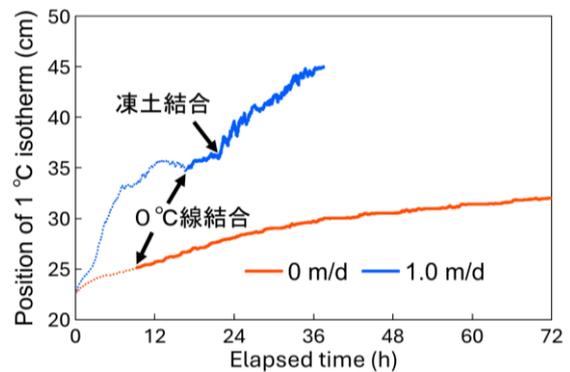


図 4 1°C の等温線の最高位置

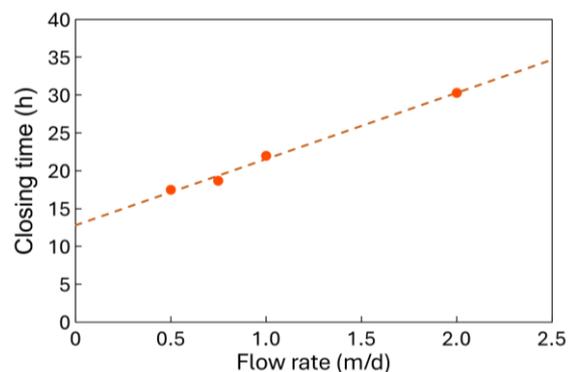


図 5 地下水流速と凍土の結合時間