

凍土の融解による地形変形に関する基礎的研究

Fundamental study on ground deformation due to thawing of permafrost

北海道大学工学部環境社会工学科	○ 学生員	本間翔太 (Shota Homma)
北海道大学大学院工学院	学生員	土井泰樹 (Taiki Doi)
北海道大学大学院工学院	学生員	小川昌也 (Masaya Ogawa)
北海道大学大学院工学研究院	フェロー	蟹江俊仁 (Shunji Kanie)

1. 緒言

地球の陸地の約 15%は、地盤が 2 年以上凍結している永久凍土地帯である。凍土の表層部は夏季に融解し、冬季に凍結を繰り返すことから活動層と呼ばれる。これまで、活動層の挙動はモス層などの断熱効果を保有する植生によって最小限に抑えられてきた。しかし近年の地球温暖化に起因する温度侵食(図-1)により、温められた大気と凍土地盤の熱交換が活発になり、凍土の融解が進行し活動層の層厚が増大している。これにより凍土地帯では Frozen debris lobes (図-2) のような斜面変形が発生している。また支持力や耐食性の低下による地盤の沈下により、凍土地帯に多数存在する資源開発を目的とした大型の構造物にも被害が及ぶことが懸念されている¹⁾。

凍土は一度融解が生じると融解水が地盤表層部を通過して下方へ排水されるため、地盤の物性が変化する²⁾。すなわち凍土の凍結融解による地盤変形は不可逆的であり、温度侵食が発生する前に、抑止・緩和することが求められる。しかし凍土の地形変形は未だに全容が解明されておらず、有効な抑止・緩和策は提案されていない。

本研究では、凍土融解による斜面崩壊を実験と解析の両面から解明することを目的としている。その第一段階として、大気温度上昇が永久凍土地帯の地形変形に与える影響を室内実験で再現する。また断熱材等を用いて同様の実験を行うことにより、地盤の地形変形を最小限に抑える有効な対抗策を検討する。さらに数値シミュレーションで地形変形を予測するために、有限要素法による熱伝導解析を用いて凍土の融解過程の解析を行う。



図-1：温度侵食



図-2：Frozen debris lobes³⁾

2. 予備実験

ここでは、融解による凍結地盤変形実験の実験手順を確立させるために行った予備実験に関して記述する。

2.1. 試料に関する予備実験

試料の物性を把握するための実験を行った。実験試料として、将来的に凍土地帯に多く見られる細砂を用いる予定であるが、本実験では過程を可視化できる点や解析結果との比較をしやすい面を考慮し、粒径の整った 5mm のガラスビーズを用いた。

融解後の破壊面の安息角は、凍結時にガラスビーズがどれだけ密に敷き詰められているか、つまりガラスビーズの最密状態に依存するものであると推察される。そこで筆者らは、どの程度最密状態が再現されているのかを最密度合という指標で評価した。最密度合とは、試料を六方最密状態と仮定した時に理論的に算出される間隙量(V_a)に対する、実際に凍結時に使用した水の量(V_b)の割合であり、 V_b / V_a で表される。実験では試料は完全飽和と仮定しているため、最密度合が 1 に近づくほど理想的な最密状態であると言える。ここで剛性の高いコップを用いた簡易的な最密度合試験を行った結果、粒径 5mm のガラスビーズを用いた場合、最密度合はおよそ 1.56 で安定することが判明した。これは、コップに詰めた試料に理論値のおよそ 1.5 倍の空隙が含まれていることを意味する。試料が六方最密構造であり、粒径が完全に均一であると仮定した場合、その安息角は幾何学的に $58.5^\circ \sim 62.1^\circ$ を取ると算出される。以上から融解実験において観測される安息角は理論的な 60° 前後の値よりも小さな値を取ることが予想される。

2.2. 凍結・融解方法に関する予備実験

実験を行うに当たり試料の凍結・融解が試料表面で均一に生じるような工夫を施した。これは、試料を満たしたアクリル容器の上面にフィルムラップを貼り付けて、冷凍室内の空気や実験装置からの温風が直接試料の表面に流入することを遮断するものである。その結果、容器内の試料をその表面から概ね均一に凍結・融解させることが可能となった。

実験時間を管理するために、各過程の終了基準を設ける必要がある。予備実験より図-3 に示すように、試料の凍結は容器の壁面から進行することが判明した。そのため、試料の表面温度をサーモグラフィで測定し、表面が一般的な温度となったことを確認して凍結終了とした。また、凍結時に容器に入れた水の量に対する、融解時に装置外部に排出された水の量の割合から融解の終了を定量的に判定する。

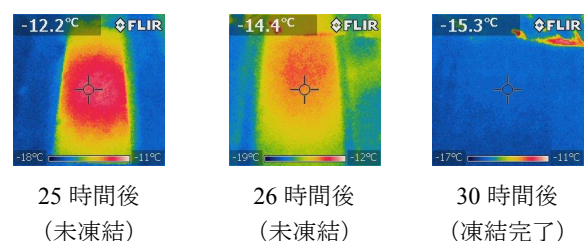


図-3：試料の表面温度の変化

3. 融解による凍結地盤変形実験

3.1. 実験目的

本実験の目的は、新たに設計・開発した融解促進装置（図-4）を使用して、凍土が融解することで起きる地形変形を室内実験により再現することである。融解過程の温度侵食の様子を観察するとともに、安息角を測定する。この結果と理論的に得られる安息角とを比較し、今後の実験で用いる安息角の基準を設定する。

3.2. 実験方法

図-5 の様に凍上容器にガラスビーズを敷き詰め、試料高さまで水を入れる。室温約-10℃の冷凍室で凍結させた試料を融解させ、その融解過程と破壊面を観察する。層厚による融解結果の差異を観るため、2 ケース（8cm、12cm）で実験を行う。実験条件として、試料は完全飽和とする。また凍結・融解の両過程で試料に一定の熱量を与え、装置内外での大気との交換は無いものとする。

実験の融解過程において観測するものは、装置内部の温度・試料の様子・装置外に出た水の量・融解後の安息角である。温度計は装置上部の融解機構の上流・下流の2ヶ所に設置する。融解中の様子はタイムラプスカメラを用いて30秒に1コマ間隔で撮影する。融解後の安息角はこのカメラの画像から求めることとする。



図-4：融解促進装置

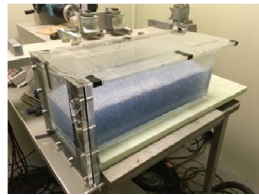


図-5：凍結時の様子

3.3. 実験結果

本実験で得られた結果を表-1 にまとめる。試料高さにより凍結・融解時間に差はあるものの、安息角については大きな差異は観測されなかった。また実験時に装置上部に設置した温度計の時間変化の結果を図-6 に示す。上流に設置したものを温度計 1、下流のものを温度計 2 とする。装置内の温度は時間と共に上昇し、どちらもおよそ 70℃付近で定常となった。温度計 1 と 2 の差は、平均して 8cm で 2.54℃、12cm で 3.25℃であった。試料高が大きい実験ケースの方がより活発な熱交換が行われるため、この温度差の違いが生じたと考えられる。最後に融解の前後の様子を図-7 に示す。

表-1：実験結果

試料高	凍結時間	融解時間	安息角	最密度合
8cm	30 時間	12 時間	35.6°	1.48
12cm	37 時間	14.5 時間	32.4°	1.41

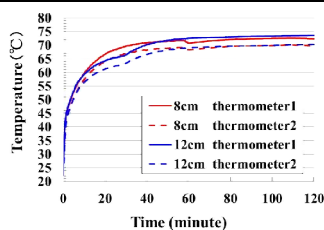


図-6：各実験ケースの温度の時間変化

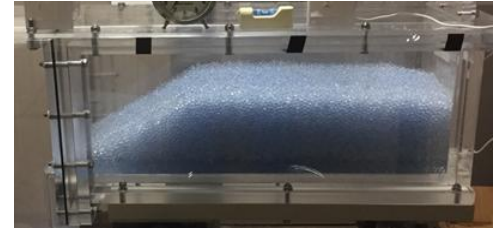
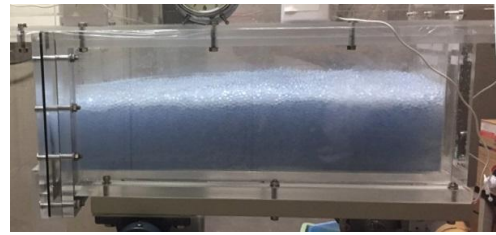


図-7：融解の様子（上：融解開始 下：融解終了）

3.4. 考察

実験で得られた安息角について評価する。安息角は最密度合試験結果から予想される通り、理論値の 60°を大きく下回り 35°前後の値で安定することが分かった。表-1 より最密度合が 1.5 程度である事や、実験を繰り返して安息角が安定したことからも、本実験では十分に今後の実験の基準となり得る破壊面が観測できたと言える。この先試料表面の条件を変えた場合や、試料に傾斜を与える実験を行う場合には、この安息角 35°前後の基準をもって地盤の侵食を評価することとする。

4. まとめと今後の展望

予備実験より得られた知見を元に一連の凍結融解実験の方法を樹立し、凍土の融解に伴う温度侵食を観察できた。また、融解後の安息角について考察を行い、本手法での試料における安息角は概ね 30° を取ることが確認された。今後行う予定の研究は以下の2点である。

(1) 実験条件の変更による結果の比較

断熱材を試料表面に配置して実験を行う。第3節での結果と比較して、表層部の条件が破壊面に及ぼす影響を考察し、融解による地形変形の抑止策を考える。

また斜面上の凍土の融解を再現するため、試料に傾斜を与える。融解水による熱伝搬が試料に与える影響を把握し、温度侵食による斜面崩壊の対抗策を考察する。

(2) 有限要素法を用いた熱伝導解析

凍土の融解過程を数値解析の面から再現することも本研究の目的である。凍土の融解は融解水による熱移動、凍土の潜熱等を考慮する必要がある。本研究ではその足掛かりとして、熱量収支の評価に優れた有限要素法による熱伝導解析によって、凍土の融解過程の解析を行うことを予定している。

参考文献

- 1) 赤川敏：永久凍土地帯の特徴的地形と構造物基礎の特殊性，土と基礎 Vol.38，No.1，pp.13～19，1990
- 2) 中村大，鈴木輝之，後藤隆司，金学山，伊藤陽司，山下聡：凍結融解による土の透水係数及び間隙比の変化，土木学会論文集，C67（2），pp.264-275，2011
- 3) Todd Paris, University of Alaska Fairbanks : Debris lobe creeps closer to Alaska's Dalton Highway, 2014.7.14