

温度侵食による凍結地盤の地形変形に関する基礎的研究

北海道大学大学院工学院

○ 学生員

本間翔太 (Shota Homma)

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院

学生員

土井泰樹 (Taiki Doi)

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

近年の地球温暖化の進行に伴い、地球の陸地の約 15% を占める永久凍土地帯では凍土の融解が懸念されている。永久凍土がひとたび融解すると、地盤は支持力を失い斜面崩壊を引き起こす。¹⁾ このような温度侵食で引き起こされる斜面崩壊により、パイプラインの破損や構造物の沈下等の被害が発生している。しかし凍土地帯の地形変形には、frozen debris lobes (図 1) や solifluction (図 2) の様に、特異的なものが多くその変形メカニズムは未だに解明されていない。凍土の融解は不可逆的であるため、被害が生じる前に抑止・緩和することが重要である。

本研究の目標は凍結地盤の温度侵食による地形変形を、再現実験と数値解析の双方から解明することである。数値解析は広く熱伝導の解析に用いられている有限要素法(以下 FEM)と、対象を不連続体の集合体とすることで大規模変形を再現可能な個別要素法(以下 DEM)を適用した。本研究では、融解による地形変形の新たな室内実験の手法を提案し、またその実験結果と数値解析とで検討を行うことで凍土の温度侵食の研究手法の確立を目指した。



図 1 : frozen debris lobes



図 2 : solifluction

2. 室内実験

2.1. 実験装置

室内実験では、融解に伴う水分と土粒子の移動がどのようなメカニズムで進行するのかを検証するとともに、モス層に代表される地表面での断熱効果が、温度侵食の抑制にどのように寄与するのかを観測することが目的である。このような意図の下で開発された実験装置を図 3

に示す。本装置は繰り返し凍結融解に耐えうる耐久性、実験結果から外気温の影響を排除する断熱性、装置内環境の保持性、および装置内外での大気・物質の交換が生じない密閉性が必須性能である。そのため断熱性能と耐久性性能の両立のためアクリルで構成した。装置内は上部構造である熱循環器により 60℃ 前後に保たれ地表面側からの融解が促進される。試料が均一に凍結・融解するため、循環器から生じる温風が直接試験体に作用しないよう上部構造と下部構造を分断した。これにより下部構内に、上部構との熱交換に起因する対流が発生し、その対流により試験体が一様に凍結・融解することを期待した。

2.2. 融解促進実験概要

本研究では基本的な性質を検証するために、凍土地域に広く分布する細砂に替えて、剛体で物性が把握しやすく結果が安定することから粒径 5mm のガラスビーズを試料として選定した。

実験方法は、まず十分に飽和した試料を -10℃ の冷凍室で凍結させる。凍結後の試料を装置の熱で融解させ、その変形の様子を観察するという実験である。本実験では上部構と下部構の遮蔽はフィルムラップを用いて行った。

実験結果を図 4 に示す。試料は融解に伴って徐々に斜面崩壊を起こし、温度侵食による地形変形を再現することができた。実験を繰り返した結果、凍結試料は融解時に破壊面の角度が 30°前後で収束することが判明した。この実験結果と以降の章で示す解析結果とを比較検討し、この実験手法及び結果を評価する。



図 3 : 融解促進装置

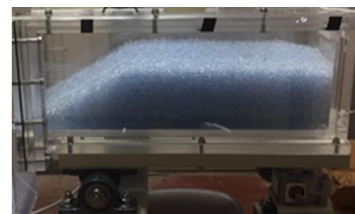


図 4 : 実験結果

Keywords : global warming, frozen soil, Finite Element Method, Distinct Element Method, ground deformation

連絡先 : 〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目 北海道大学大学院工学院, TEL 011-706-6177

3. 数値解析による再現

3.1. FEM による熱伝導解析

FEM では、式(1)に示す二次元非定常熱伝導方程式を離散化する。式(1)を離散化すると熱伝導等定式は式(2)で表される。ここで[C]は熱容量マトリクス、[D]は熱伝達マトリクスである。解析領域は実験に使用した試験体を模し、縦 10cm、横 50cm とした。1cm 四方の正方形要素 500 個で構築し、初期条件としてモデル上辺、左辺の節点の初期温度を 60°C、それ以外のすべての節点の温度を-15°C とした。境界条件として、モデルの外周全ての節点の温度を初期温度で固定した。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad \text{式 (1)}$$

$$[C] \left[\frac{\partial \{T\}}{\partial t} \right] + [D] \{T\} = \{f\} \quad \text{式 (2)}$$

3.2. DEM による連続体変形解析²⁾

DEM は解析領域を不連続な粒状態の集合と考え、各個体の運動方程式を解き、各時刻での位置を求める手法である。一方で、前ステップでの位置関係により現時刻での座標を算出する陽解法のため、各時間ステップでの力学的評価には適していないところもある。しかし、本研究では凍土融解による挙動を把握することを目的としているため、DEM を適用するものとした。解析条件として粒子間に鉛直方向、せん断方向の接点ばねを設定した。ダッシュポットとして粘性係数をそれぞれ鉛直方向、せん断方向に定義した。

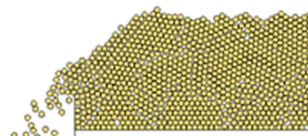
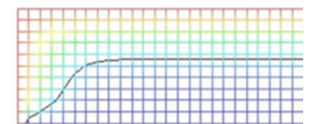
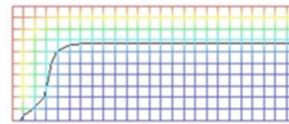
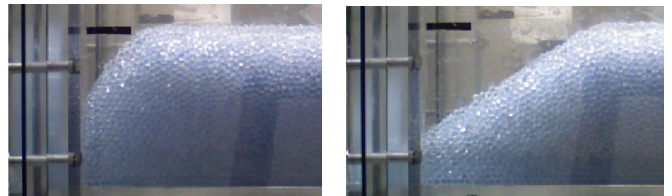
4. 実験結果と数値解析の比較

図 5 に実験結果、及び解析結果を示す。最上段は実験の初期状態、次に上から実験結果、FEM の結果、DEM の結果である。FEM は可視化し、図中の赤い範囲は温度が高く(60°C)、青い部分は温度が低い(-15°C)。また黒い線は温度が 0°C の位置を示しており、これを凍結深とした。また DEM において、融解による固結力の低下を表現するべく領域左辺の拘束を段階的に上方から解放した。実験結果とこれら数値解析の結果を合わせて検討する。図 5 より、実験初期から中期にかけて破壊面の傾斜角は 50°以上あるのに対し、中期から実験終了にかけて傾斜角は約 30°となる。また、両解析結果も実験と同様の変化を示す。このことから実験初期は凍結深の低下が遅く、融解によって固結力を失った粒子のみが物理法則に従って落下したと推察される。しかし侵食の進展により融解範囲が広がり、粒子の落下がその粒子単体の力学的挙動に留

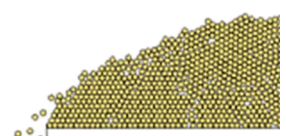
まらなくなるにつれ、粒子の侵食範囲も拡大し、侵食量が増大した。その結果、終了時の傾斜角は中期より小さい角度で安定したと考察される。



初期状態



実験中期



実験終了時

図 5 : 実験結果と解析結果の比較

5. まとめと今後の展望

本研究では新たに提案した凍土の融解による地形変形を室内実験で再現する手法の検討を、FEM・DEM の両手法で行った。その結果、実験と解析結果は非常に良い相関性を示した。このことから、本手法における再現実験は妥当であると判断できた。

今後はより実現象に近い再現実験を行うため、試料のガラスビーズの粒径を小さくすることや、モス層のような地表面の断熱条件が異なる環境の再現に取り組む予定である。このような実験を解析的な手法との比較を通じて検証することで、永久凍土地帯における地形変形の予測と抑制につなげていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 中村大, 鈴木輝之, 後藤隆司, 金学三, 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 C, Vol.67, No.2, pp.264-275 (2011)
- 2) Matsushima, T. and Saomoto, H.: Discrete Element Modeling for Irregularly-shaped Sand Grains, Proc. NUMGE2002: Numerical Methods in Geotechnical Engineering, Meast (ed.), pp.239-246, 2002