# 凍結融解作用を受ける火山灰土斜面の熱伝導/応力変形連成解析

北海道大学大学院工学研究科	正会員	〇石川	達也
地層科学研究所	正会員	里	優
北海道大学大学院工学研究科	正会員	赤川	敏
北海道大学大学院工学研究科	フェロー	- 三浦	清一

# 1. はじめに

積雪寒冷地である北海道では,融雪期に凍結融解斜面の表層崩壊が数 多く発生するが,この誘因の一つとして,冬期の降温過程で斜面と垂直 方向に隆起(凍上)した凍結深以浅の地盤が,春期の昇温過程では重力 により鉛直に近い方向へ融解沈下するため,1回の凍結融解履歴により せん断ひずみが斜面内に発生・残留すること<sup>1)</sup>が挙げられる.本報告で は,前述した凍結融解地盤の変形挙動を再現するために,凍結融解中の 地盤材料の剛性変化と体積変化を数理モデル化した,熱伝導/応力変形 連成 FEM 解析手法を用いて火山灰土模型斜面の凍結融解実験を行い, 実験結果との比較により計算アルゴリズムに導入した数理モデルの妥 当性を検証するとともに,地盤の凍結融解に関係する解析パラメータ が寒冷地斜面の表層崩壊に及ぼす影響について検討する.

## 2. 解析方法

模型実験<sup>1)</sup>を模擬した解析モデルの概略を図1に示す. 当該モデルは 二次元平面ひずみ FEM 解析モデルであり、要素には全応力と温度分布 が要素内で一定とする定ひずみ 4 節点要素を用いた. 境界条件として は、解析モデルの側辺水平固定・底辺鉛直固定とし、斜面表面に温度 境界を,側辺および底辺に断熱境界を,それぞれ設けた.解析手順と しては、初めに自重 (g=9.80m/s<sup>2</sup>) による初期安定解析を実施した.次 に、 凍結融解に伴う斜面の変形挙動を把握するために、 模型斜面全域の 初期温度を室温 22℃ に設定の上,地表面(温度境界)の温度を-30℃ に8時間保持し、その後、地表面の温度を10℃に昇温しさらに8時間 当該温度を保持する熱伝導/応力変形連成解析を実施した.解析条件を まとめて表1に示す.要素の材料特性は計算の簡略化のため線形弾性と し、その解析パラメータ(y, E, v)は、模型実験と同様の火山灰質粗粒 土を用いた三軸試験結果<sup>2)</sup>を参考に設定した.ただし、本解析では数理 モデルを単純化するため、降温過程では、実現象で生じる凍結に伴う地 盤剛性の増加を省略して, 地盤要素が凍結融解作用を受ける前の変形係 数 E<sub>0</sub>と凍結後の変形係数 E<sub>f</sub>が等しいと仮定するとともに、昇温過程で は、地盤要素の温度 T が凍結終了温度 T<sub>f</sub>℃ から 0℃ まで変化した場合、





解析種別	パラメータ名	入力値
	単位体積重量 γ	4.41 kN/m <sup>3</sup>
応力変形	凍結時変形係数 E <sub>f</sub>	300.0 kPa
解析	ポアソン比 <i>v</i>	0.30
	融解時の剛性低下率 b	0.90
	熱伝導率 $\lambda$	0.34 W/mK
	体積熱容量 C	9.58×10 <sup>5</sup> J/m <sup>3</sup> K
熱伝導	潜熱 Q1	25.0 J/m <sup>3</sup>
解析	体積熱膨張率 $\alpha$	5.0×10 <sup>-6</sup>
	凍結膨張ひずみ <i>ɛ</i> fmax	1.0 %
	凍結終了温度T <sub>f</sub>	-1.0 °C



地盤の変形係数 E が,凍結時(融解開始時)の変形係数  $E_f$ から $(1-b)E_f$  図2 凍結融解時の体積・剛性変化 まで割合 b (=融解時の剛性低下率)だけ低下すると仮定した(図2).また,地盤の凍結に伴う体積膨張(凍上) を模擬するため,地盤要素の体積ひずみが,降温過程( $T=0^{\circ}C \rightarrow T_f^{\circ}C$ )で凍結膨張ひずみ  $\varepsilon_{fmax}$ だけ膨張し,昇温過

キーワード 斜面安定,凍結融解作用,熱伝導/応力変形連成解析,凍上現象,せん断変形 連絡先 〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8 北海道大学大学院工学研究科 TEL011-706-6202

-255-





図3 凍結融解時の斜面内温度変化

図4 凍結融解時の斜面の変形図とせん断ひずみ分布図

程で凍結前の状態に復帰すると仮定した.一方,熱伝導解析の実施に 必要な解析パラメータ ( $\lambda$ , *C*, *Q*<sub>l</sub>) は、模型実験<sup>1)</sup>における火山灰質粗 粒土の乾燥密度 $\rho_d$ と含水比 *w* を Kersten や伊福部らの実験式<sup>3)</sup>等に代 入して算出した.

### 3. 解析結果と考察

図3に、深度が異なる斜面表層部の3地点(図1)における凍結融 解中の地温の時間変化を示す. 解析結果は, 深度に拘わらず試験結果 を概ね良好に再現している.図4は、凍結終了時(8h 経過後)と融 解終了時(16h 経過後)の模型斜面の変形図とせん断ひずみ分布図で ある.また,図5は、底面からの高さが異なる法面上の3節点の凍結 融解中の軌跡である.底面からの高さにより若干傾向が異なるものの、 降温過程では凍結融解作用を受けた斜面表面部が斜面とほぼ垂直方 向に隆起し,昇温過程では鉛直に近い方向へ沈下した.これに伴い, 凍結時に斜面表層部に発生したせん断ひずみが,融解終了時に地表面 付近に残留したままとなっている.以上のような解析結果の傾向は, 定性的には模型実験結果<sup>1)</sup>と符号するものである.表2は、凍結融解 終了時に斜面内で生じた最大せん断ひずみを、 $\gamma \cdot b \cdot \epsilon_{fmax} \cdot T_f$ が異な る解析結果についてそれぞれ比較し, 地盤の凍結融解に関係する解析 パラメータが斜面内のせん断ひずみの発生に及ぼす影響を検討した ものである.ただし、着目する解析パラメータ以外の定数は、表1に 示す値に固定した.各解析条件とも凍結融解終了時に凍結膨張した部 位ではせん断ひずみの残留が認められるが、単位体積重量・融解時の 剛性低下率・凍結膨張ひずみについては大きいほど、凍結終了温度に



ついては低いほど,発生する最大せん断ひずみは大きくなった.また, $\gamma \cdot b \cdot \epsilon_{\text{fmaxf}}$ が異なる場合には解析結果に有意な差が見られるが, $T_{\text{f}}$ が異なる場合には $\gamma \cdot b \cdot \epsilon_{\text{fmax}}$ の影響度に比べると明確な差は認められなかった.

#### 4. まとめ

本報告では、熱伝導/応力変形連成 FEM 解析を用いて凍結融解作用を受ける斜面の数値シミュレーションを行い、計算アルゴリズムに導入した地盤の凍結・凍上融解現象を模擬する数理モデルの妥当性と、寒冷地斜面の安定 性評価の観点から凍結融解に伴う地盤のせん断変形に対する解析条件の影響度について検討した.その結果、解析 の有用性を例証すると共に、単位体積重量・融解時の剛性低下・凍上率が斜面崩壊現象に強く影響を及ぼすことを 示した.今後、実現象と同様な解析条件で解析を実施し、解析の適用性を検証すると共に、入力パラメータの感度 分析や適切な要素構成則の導入を行うなど、解析手法の確立に向けた検討を継続する予定である.

【参考文献】1)石川・里・三浦・赤川・川村: 寒冷地斜面の凍結融解現象を対象とした連成解析方法の検討,第12回岩の力学国内 シンポジウム講演論文集, pp.35-36,2008.2)吉田・三浦・石川: 破砕性粒状体の強度特性に及ぼす含水状態の影響評価,第43回地 盤工学研究発表会講演集, pp.767-768,2008.3)例えば 林・鈴木・安達: 補強土壁工法の断熱材による凍上対策, pp.219-228,2009.