

凍結融解作用を受ける火山灰土斜面の応力／浸透連成解析

北海道大学大学院工学研究科

正会員 ○石川 達也

北海道大学大学院工学研究科

フェロー 三浦 清一

室蘭工業大学工学部

正会員 川村 志麻

1. はじめに

積雪寒冷地である北海道では、融雪期に斜面崩壊が数多く発生するが、これは、斜面表層の凍土の融解や融雪などにより斜面表層が高含水状態となり、斜面崩壊が生じやすくなるためであると考えられている。特に、模型凍結融解斜面の降雨による斜面崩壊実験結果¹⁾によると、斜面内に形成される不透水性の凍結土層の位置と形状は斜面の安定性に極めて重要な影響を及ぼす。本報告では、応力／浸透連成 FEM 解析により凍結融解作用を受けた火山灰質粗粒土模型斜面の降雨による斜面崩壊実験の数値シミュレーションを行い、実験結果との比較により解析手法の適用性を検証するとともに、凍結融解作用により生じた不透水層の位置、

降雨強度、地盤の透水係数の違いが斜面崩壊現象に与える影響を明らかにする。

2. 解析方法

解析モデルの概略を図-1に示す。解析斜面は、模型実験と同様、火山灰質粗粒土で構成されているものとし、寸法も模型実験と同一とした。本解析モデルは二次元平面ひずみ解析モデルであり、要素には有効応力と間隙水圧の要素内分布が一致する8節点要素を用いた。境界条件としては、側辺水平固定・底辺鉛直固定とし、斜面部表面に降雨境界を、斜面部底面に排水境界をそれぞれ設けた。また、凍結土層を想定した斜面と平行な不透水境界を地表面から10cm以内の種々の深度に設けた。解析手順としては、初期に自重($g=9.80\text{m/s}^2$)による安定解析を行い、その後、模型実験で斜面崩壊が発生した時間と同じ105秒間降雨(降雨強度50, 100, 150mm/h)による応力／飽和・不飽和浸透連成解析を行った。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た。なお、斜面部要素の解析パラメーター(γ, E, ν)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²⁾に参考にして設定したが、凍結部要素については、凍結による剛性増加を考慮して弾性係数のみ斜面部要素の10倍の値に設定した。一方、飽和・不飽和浸透流解析実施のため、水分特性曲線($s \sim S_r$ 関係)を実験結果²⁾より定め、不飽和浸透特性(比透水係数 $k_r \sim S_r$ 関係)は式(1)³⁾を用いて水分特性曲線から推定した(図-2)。ただし、飽和透水係数 k_{sat} は変数とした。

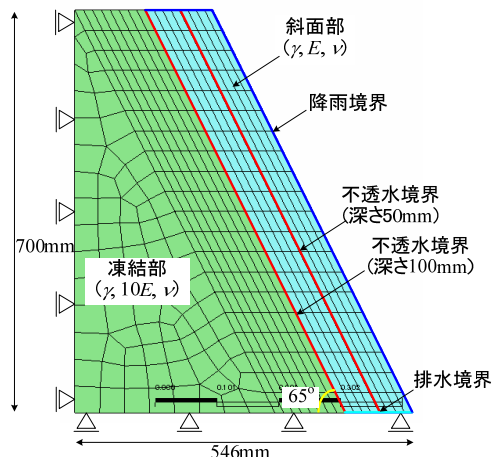


図-1 解析モデルの概略図

表-1 解析条件

解析 No.	γ (kN/m ³)	E (kPa)	ν	不透水境界位置 (mm)	降雨強度 (mm/h)	飽和透水係数(m/s)
Case1	6.84	76.0	0.3	10	100	1.3×10^{-4}
Case2	6.84	76.0	0.3	30	100	1.3×10^{-4}
Case3	6.84	76.0	0.3	50	100	1.3×10^{-4}
Case4	6.84	76.0	0.3	70	100	1.3×10^{-4}
Case5	6.84	76.0	0.3	100	100	1.3×10^{-4}
Case6	6.84	76.0	0.3	70	50	1.3×10^{-4}
Case7	6.84	76.0	0.3	70	150	1.3×10^{-4}
Case8	6.84	76.0	0.3	70	100	1.3×10^{-3}
Case9	6.84	76.0	0.3	70	100	1.3×10^{-5}

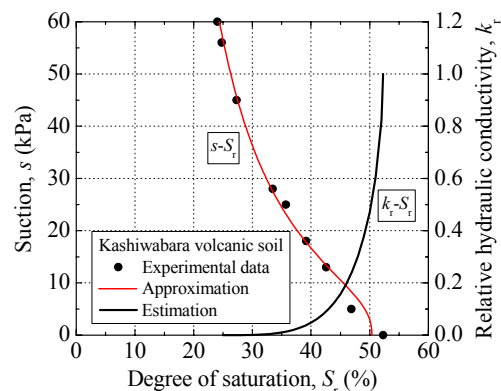


図-2 不飽和浸透特性

$$\text{Van Genuchten 式: } k_r = k_{\text{unsat}} / k_{\text{sat}} = S_e^{0.5} \left\{ 1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right\}^2, \quad S_e = \frac{S_r - S_{r0}}{S_{r\text{max}} - S_{r0}} = \left\{ 1 + (-as)^n \right\}^{-m} \quad (1)$$

ここに、 k_{unsat} : 不飽和透水係数、 S_e : 有効飽和度、 S_{r0} : 残留飽和度、 $S_{r\text{max}}$: 最大飽和度

キーワード 凍結融解作用, 斜面安定, 応力／浸透連成解析, 不透水性凍結層

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 TEL 011-706-6202

3. 解析結果と考察

図-3に、模型実験結果の斜面崩壊発生直前の斜面内せん断ひずみ分布を示す。

図-4は、不透水境界位置以外の条件が模型実験と同じ解析について、不透水境界位置が斜面内せん断ひずみ分布に及ぼす影響を比較したものである。両図を比

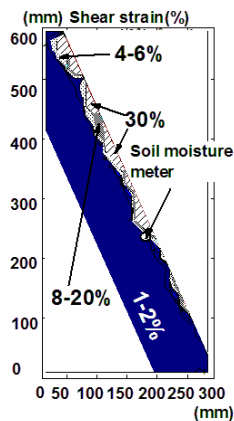


図-3 実験結果

較すると、不透水境界が深さ 100mm の解析結果は、斜面表層のせん断ひずみが高い領域が実験結果ほど発達していないが、70mm の解析結果は実験結果に近い分布を示している。また、図-4では、不透水境界位置が浅くなる程、せん断ひずみの高い領域が斜面表層上部から徐々に広がっているが、これは不透水層の位置が浅くなると崩壊し易くなる実験結果の傾向と一致するものである。しかし、せん断ひずみの値には大きな差があり、実験結果を定量的に充分に捉えているとは言い難い。図-5, 6, 7は、降雨開始から 105 秒間の斜面内最大せん断ひずみの時間的変化を、不透水境界位置・降雨強度・地盤の透水係数が異なる解析結果についてそれぞれ比較したものである。解析条件によらず、時間の経過とともに最大せん断ひずみは増加する傾向にあるが、解析結果を同時刻で比較すると、不透水境界位置については浅いほど、降雨強度と透水係数については大きいほど、発生する最大せん断ひずみは大きくなった。また、不透水境界位置が異なる場合には解析結果に有意な差が見られるが、降雨強度と透水係数が異なる場合には不透水層位置の影響度に比べると明確な差は認められなかった。このことから、本解析の範囲内では、降雨強度と透水係数の違いが解析モデルの斜面崩壊挙動に及ぼす影響は小さいと考えられる。

4. まとめ

本報告では、応力/浸透連成 FEM 解析を用いて凍結土層を有する斜面の崩壊シミュレーションを行い、凍結融解と降雨による複合型斜面崩壊に対する数値解析方法の適用性と、斜面崩壊現象への解析条件の影響度について検討した。その結果、降雨強度・透水係数が斜面崩壊現象に及ぼす影響は小さいが、凍結融解作用により生じる不透水境界の位置は斜面崩壊現象に強く影響を及ぼすことを示した。しかし、斜面崩壊挙動の定性的な把握に対する FEM 解析の有用を示すことはできたものの、崩壊時のせん断ひずみ分布を定量的に充分捉えることはできなかった。今後、適切な要素構成則の導入や凍結/非凍結層間の摩擦の考慮等、この課題に関する検討を継続する予定である。

【参考文献】 1)川村・井野・三浦・石川：凍結・融解履歴を受けた火山灰質土斜面の降雨時力学挙動，第43回地盤工学研究発表会講演集，2008（投稿中） 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，2008（投稿中） 3)地盤工学会：不飽和地盤の挙動と評価，pp.35-45, 2004.

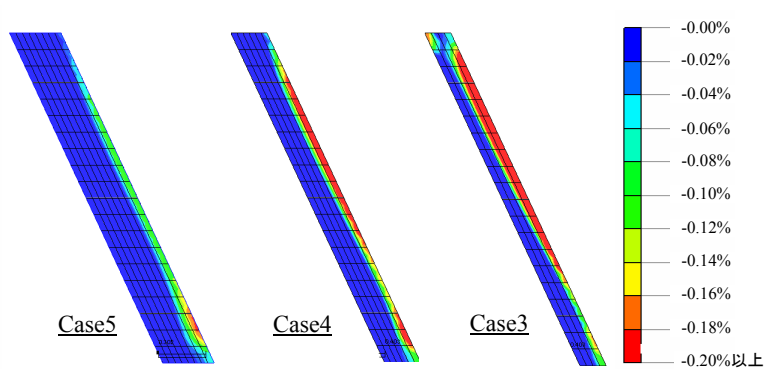


図-4 せん断ひずみ分布図（解析結果）

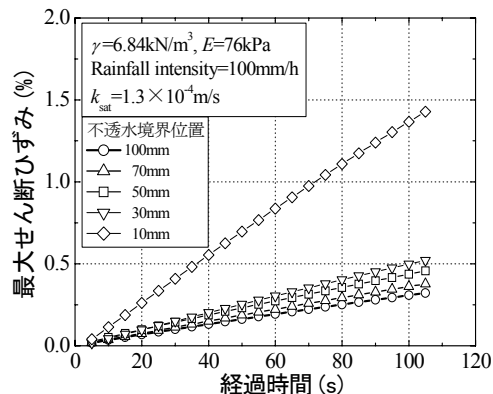


図-5 不透水境界位置が及ぼす影響

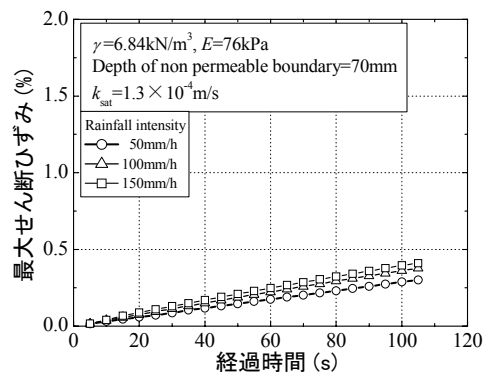


図-6 降雨強度が及ぼす影響

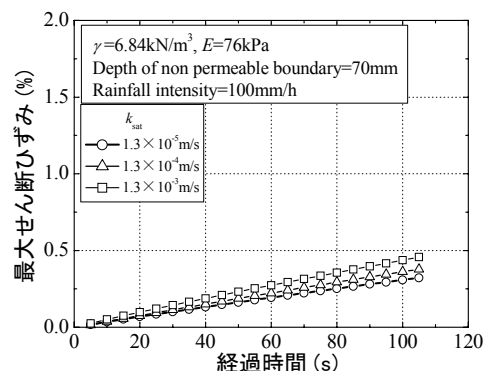


図-7 透水係数が及ぼす影響