

長野県稲子岳斜面崩壊危険度評価手法の確立に向けた検討

新潟大学災害・復興科学研究所 ○王 純祥 (現 株式会社キタック)
 新潟大学災害・復興科学研究所 水野 正樹
 新潟大学農学部 権田 豊
 新潟大学災害・復興科学研究所 丸井 英明

1. はじめに

本研究では、海溝型地震時に大規模崩壊（約 3.5 億 m³）した災害履歴がある長野県南佐久郡小海町稲子岳において、差分干渉 SAR（以下、DInSAR）画像で地すべり移動エリアが抽出（図-1、水野ら 2016）され、GPS 測量で移動を計測したことから、崩壊発生前に斜面崩壊危険度を評価する手法の確立に向けて、稲子岳を対象にして、常時自重解析、震度法解析、「地震波を用いた動的解析」を実施するとともに、数値汎濫シミュレーションにより深層崩壊が発生した場合の到達範囲や到達時間を把握したので、報告する。

2. せん断強度低減法を用いた安定性評価

2.1 せん断強度低減法

斜面安定解析手法においては、極限平衡解析、有限要素法又は有限差分法などの連続体力学に基づく方法がよく用いられる。そのうち極限平衡解析は、予め設定されたすべり面上のせん断応力 τ_F とせん断強度 τ により、式(1)から算出される安全率 F_s によって斜面の安定性が評価される。

$$F_s = \frac{\tau}{\tau_F} \quad \text{式(1)}$$

一方、せん断強度低減法（Shear strength reduction method, SSRM）では、式(1)の F_s を分母に移動した式(2)に示すように、係数 F_s を徐々に増加させ、粘着力 c と内部摩擦角 ϕ がそれに応じて低減される。 F_s を逐次増加させるうちに、図-2に示すように斜面内のどこかで、塑性が進みすべり面となり得る最も危険な「最大せん断ひずみ速度の高い層」が自然と現れてくる。

$$\tau_F = \frac{\tau}{F_s} = \frac{c}{F_s} + \sigma \frac{\tan\phi}{F_s} \quad \text{式(2)}$$

c 、 ϕ は、粘着力、内部摩擦角、 σ はすべり面上の鉛直応力である。この SSRM は、計算アルゴリズムを FEM や FDM などの連続体解析コードに組み込むことにより、自動的に安全率 F_s を算出することができるため、極限平衡法のように予めすべり面を設定することなく、斜面の安定性を評価することが可能となる。そこで本研究では、せん断強度低減法を採用して、米国 ITASCA 社開発の FLAC 3D プログラムを使用した。

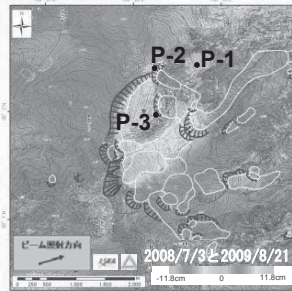


図-1 稲子岳の ALOS DInSAR

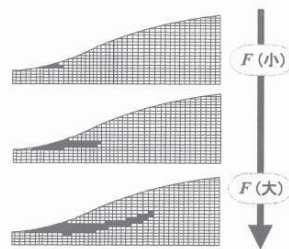


図-2 塑性域（黒色部）の進展（若井・蔡, 2003）

2.2 安定性評価

国土地理院の HP より長野県小海町稲子岳付近の 10m メッシュ標高データをダウンロードし、3 次元の地形モデルを作成した。ALOS/PALSAR データの DInSAR 画像（図-1）から稲子岳付近で山体が微小移動している可能性のあるエリアを抽出した（図-3）。GPS 移動杭の測点 P-3 から移動方向に向かって断面 AA' を作成した。この断面 AA' を用いて、FLAC3D に用いる 3 次元地盤モ

デルを作成した。この地盤モデルは、水平方向に 2300m、幅 10m で、格子数が約 1 万である（図-4）。

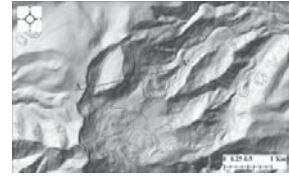


図-3 ALOS DInSAR から抽出した地すべり範囲と設定した断面 AA' の位置

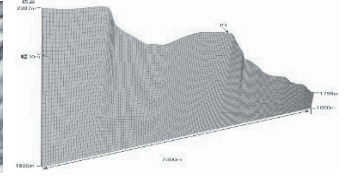


図-4 3次元解析モデル

稲子岳山頂で採取した岩石及び土砂試料より得られた岩石の密度 $\rho_r=2300 \text{ Kg/m}^3$ 、土砂の密度 $\rho_s=1580 \text{ Kg/m}^3$ 、弾性係数 3588 MN/m^2 。岩盤の粘着力及び内部摩擦角は、参考文献 3 の岩盤強度を参考して、粘着力 $c=1.5 \text{ MPa}$ と内部摩擦角 $\phi=30^\circ$ を用いた。本研究では、詳細な地質構造が不明のため、斜面全体を連続体の均質地盤としてモデル化した。現在、稲子岳周辺の地下水水位は未把握であるため、安定性評価の手順として、次の(1)~(3)の三段階の手法を順次実施した。まず、(1)地下水水位を考慮せずに、常時自重解析を行う。次に、(2)地形と池の標高から地下水水位を仮定し、安定解析を行う。最後に、(3)構造物耐震設計の静的解析の震度法を用いて安定評価を行う。

(1) 常時自重解析

地下水水位を考慮しない場合の解析結果として、最大せん断ひずみ速度コンターを図-5に示す。この解析から出力した安全率は 1.37 となった。

(2) 地下水水位を考慮した常時の安定解析

地下水水位が未把握なため、稲子岳付近の地形と池の標高から地下水水位を仮定した。解析結果として、斜面崩壊する場合にすべり面となる可能性が高い層である最大せん断ひずみ速度コンターを図-6に示す。安全率は 1.22 となった。

(3) 静的解析の震度法を用いた解析

震度法は、地震力を静的な力（慣性力）に置き換え、それを構造物に作用させて地震力を計算する方法である。水平震度は、以下の式により算出する。

$$k_h = c_z \cdot c_s \cdot k_{h0} \quad \text{式(3)}$$

ここに、 k_h : 設計水平震度（小数点以下 2 桁に丸める）、 c_z : 地域別補正係数、 c_s : 構造物重要度別補正係数、 k_{h0} : 構造物の耐震設計に用いる設計水平震度の標準値。それぞれの入力値として、地域別補正係数 c_z の値は道路橋示方書 V. 耐震設計編 4.4 項の規定により 1.0 となる。稲子岳付近は国立公園内にあり道路橋示方書 V. 耐震設計編 4.4 項の規定により、構造物重

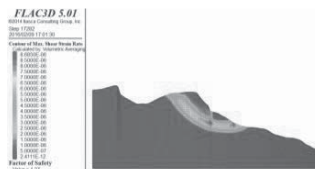


図-5 常時の最大せん断ひずみ速度コンター

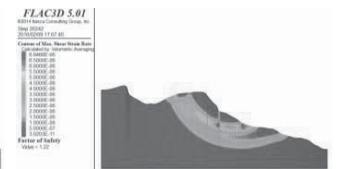


図-6 地下水水位を考慮した場合の最大せん断ひずみ速度コンター

要度別補正係数 c_s の値は 0.75 とした。稲子岳における地盤種別は「II 種地盤」とし、設計水平震度の標準値 k_{h0} の値は 0.2 である。従って、水平震度 k_h の値は 0.15 となる。解析の結果、最大せん断ひずみ速度コンター

は図-7となり、点線の滑落崖形状、及びDInSAR画像(図-1)の稲子岳の変位エリア境界と概ね一致した。安全率は1.06となった。

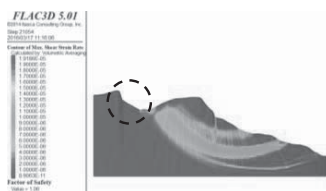


図-7 震度法による最大せん断ひずみ速度コンター

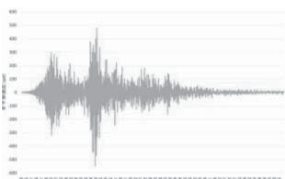


図-8 宮城県大崎市古川三日町で記録した東日本大震災の震度6強の地震波形

2.3 地震波を用いた動的解析による斜面安定評価

本解析で使用した入力地震動は、気象庁が2011年3月11日東日本大震災で観測した宮城県大崎市古川三日町のNS地震波形を採用した。280秒間の地震波形を図-8に示す。最大加速度は549gal、震度は6強を記録している。

解析の結果、秒経過に伴い変化するせん断ひずみコンターにおいて、「せん断ひずみ速度の高い層」の位置が概ね一定し、いわゆる臨界すべり面が形成された(図-9)。また、「せん断ひずみ速度の高い層」の位置と形状は、せん断強度低減法の地下水を考慮した図-6と概ね一致し、静的解析の震度法図-7による位置とは異なった。なお、本解析では地震波形を用いているため、斜面安定性を判断する指標として一般的な「安全率」での評価は実施していない。

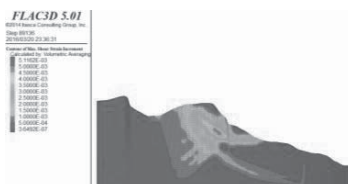


図-9 「地震波を用いた動的解析」の38秒時のせん断ひずみコンター

3. 稲子岳の数値氾濫シミュレーション

今回の解析結果では、次期海溝型地震により稲子岳が崩壊するかどうかはまだ未解明である。しかし、西暦887年8月の海溝型地震(南海-東海地震)で大規模崩壊(約3.5億m³)した発災履歴の指摘があることから、崩壊流下による被害の影響範囲について計算した。崩壊すべり面の面的形状は未調査であるので、数値氾濫シミュレーションの計算条件は、①崩壊エリアが図-3に示すDInSARで得られた地すべり移動エリア、崩壊すべり面が図-7の「最大せん断ひずみ速度の高い層」として、崩壊土砂量約2億m³が崩壊した場合、及び②地すべり移動速度の大きいP-1測点付近の620万m³が崩壊した場合の2ケースを想定して解析した。

本研究では、斜面崩壊の発生過程から千曲川に天然ダムを形成するまで(土砂は流下中)の過程を追跡した。砂礫の運動支配式は、下記の連続式と運動式により構成される(Gray et al., 1999; Wang et al., 2008)。

連続方程式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad \text{式(4)}$$

運動方程式

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(M\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(M\bar{v})}{\partial y} = -\frac{\partial H}{\partial x}gh + \frac{1}{\rho_a} \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) - gh \cos \theta, \tan \phi \quad \text{式(5)}$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(N\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(N\bar{v})}{\partial y} = -\frac{\partial H}{\partial y}gh + \frac{1}{\rho_a} \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) - gh \cos \theta, \tan \phi \quad \text{式(6)}$$

ここに、 t は時間、 M と N は x 、 y 方向の単位幅当たりの流量、 \bar{u} と \bar{v} は x 、 y 方向の平均流速、 g は重力加速

度、 h は流動深、 H は標高+ h 、 ρ_a は砂礫の等価密度、 $\tan \phi$ は等価摩擦係数である。

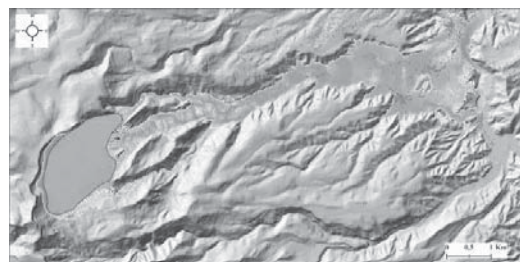


図-10 ① 約2億m³崩壊から345秒後の氾濫範囲

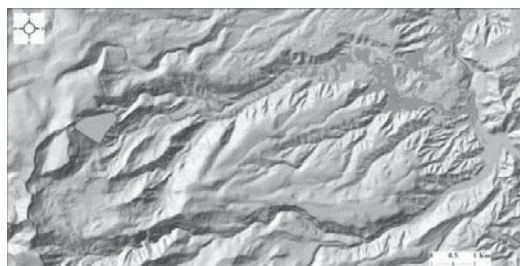


図-11 ② 620万m³崩壊から570秒後の氾濫範囲

運動方程式および連続方程式の離散化は有限差分法によって行う。GISのグリッドメッシュを有限差分法のメッシュとして、連続流体の連続式と運動方程式の基礎式を差分法により離散化する。

数値氾濫シミュレーションの結果を図-10、図-11に示す。図-10では、崩壊後約300秒で流下土砂が約8km下流にある千曲川まで到達した。

4. おわりに

本研究の結果、稲子岳山体において、すべり面や崩壊面となる可能性がある「最大せん断ひずみ速度の高い層」の位置と形状を崩壊発生前の段階で把握した。さらに、大規模深層崩壊が発生した場合に想定される氾濫範囲や到達時間を明らかにした。しかし、今回の解析結果では、岩盤物性値、地下水位、すべり面位置、崩壊土砂の体積などについて、現時点でのデータ情報に基づいて仮定している。さらに、次期海溝型地震や豪雨等により大規模崩壊が発生するかどうかについては、解析に必要な調査データがまだ無い。そこで、解析精度及び信頼性の向上と大規模崩壊可能性の評価のため、今後も詳細な調査と検討の実施を要する。

謝辞：本研究は、(一財)砂防・地すべり技術センターの助成を受けた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

1. 水野他、衛星干渉SARとGPS測量による長野県稲子岳山体移動エリアの抽出事例、平成28年度砂防学会研究発表会、2016。
2. 大西有三、谷本親伯訳、グッドマン R.E. 著、わかりやすい岩盤力学、鹿島出版会、1984。
3. トンネル工学委員会、トンネル岩盤分類検討部会報告書、トンネル工事における岩盤分類の適用と課題、2005。
4. 若井明彦、蔡飛、地すべり解析における有限要素法の利用第4回、日本地すべり学会誌、Vol. 40, No. 3(155), 76-80。
5. Gray J.M.N.T., Wieland M. and Hutter K., Gravity-driven free surface flow of granular avalanches over complex basal topography. *Proc. R. Soc. Lond. Ser. A*, 1841-1874, 1999。
6. Wang C., Li S., Esaki T. GIS-based two dimensional numerical simulation of rainfall-induced debris flow. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 8, 47-58, 2008。