

厚真町で発生したテフラ層すべりにおける 土質力学特性と地震時の安全率分布

GEOTECHNICAL PROPERTIES AND EARTHQUAKE-INDUCED SLOPE STABILITY ANALYSIS OF THE TEPHRA LAYER LANDSLIDES AT ATSUMA TOWN

大川原 優希¹・後藤 聡²・Sajith Bandaranayake³

Yuki OKAWARA, Satoshi GOTO and Sajith BANDARANAYAKE

1 日本工営株式会社 新潟支店北陸事務所 (前 山梨大学大学院) (〒920-0025 金沢市駅西本町 5-4-43)

E-mail : b0891@n-koei.co.jp

2 山梨大学大学院総合研究部工学域土木環境工学系 (〒400-8511 甲府市武田 4-3-11)

E-mail : goto@yamanashi.ac.jp

3 山梨大学大学院医工農学総合研究部修士課程土木環境工学コース (〒400-8511 甲府市武田 4-3-11)

E-mail : bandaranayakesajith@gmail.com

Key Words: safety factor distribution, Hokkaido Eastern Iburi Earthquake, tephra layered landslide

1. はじめに

我が国では、地震によるテフラをすべり面とした斜面崩壊 (以下、テフラ層すべり) が発生している。特に、「北海道胆振東部地震による斜面崩壊面積は、明治以降の主要な地震災害の中で最も多い」¹⁾とされている。このような災害より、火山地域の斜面崩壊の発生場所の予測は重要であり課題が多いと考えられる。しかし、テフラ層厚や土質力学特性のデータを基に広域的な斜面安定性評価した報告は少ない。テフラとは、火山灰、軽石、スコリア等の総称で、降下火山砕屑物と同義である。

2018 年 9 月 6 日に北海道胆振地方中東部を震源とする北海道胆振東部地震が発生した。この地震により北海道厚真町や安平町でテフラ層をすべり面とする斜面崩壊が広域に発生した。厚真町には様々なテフラが堆積しており、樽前火山から約 300 年前に飛来した樽前 a,b 降下火砕堆積物 (以下、Ta-a, Ta-b)、同じく約 3000 年前の樽前 c 降下火砕堆積物 (以下、Ta-c)、同じく約 9000 年前の樽前 d 降下火砕堆積物²⁾ (以下、Ta-d)、恵庭火山から約 2 万年前に飛来した恵庭 a 降下火砕堆積物³⁾ (以下、En-a) である。

石丸ら⁴⁾は、地形発達史的観点から、斜面崩壊の生じやすい地形場や表層地質について検討し、その特徴を報告している。多くの犠牲者を出した Ta-d 層が厚く分布する吉野地区や朝日地区の側壁の土層観察を行ったところ、すべり

面となったのは Ta-d 基底部の水分を含む細粒軽石層や En-a 起源ロームであったことを確認している。

木村ら⁵⁾は、既存の噴火史研究で示されたアイソパックマップ (等層厚線図) は、噴出量の推定だけではなく、斜面災害予測にも有効であるとした。2012 年 7 月九州北部豪雨によってテフラ被覆斜面の表層崩壊が多発した阿蘇カルデラ北東部地域で発生したテフラ層すべりを対象に、アイソパックと地形の関係を明らかにした。

北海道胆振東部地震で発生したテフラ層すべりを対象とした物理・力学的性質に関する研究⁶⁾が近年増えており、本すべりの素因であるテフラ層の諸性質が明らかになりつつある。また、先行研究⁷⁾で広域テフラ斜面の地震時安定解析が行われているが、先行降雨やサクシヨンの影響を考慮せず、すべり面までの深さの推定手法にも課題があり、多くの検討事項がある。

本研究では、厚真町を対象にテフラの土質力学特性を把握し、地震時の広域斜面安定解析を実施した。胆振東部地震によるテフラ層すべりは先行降雨が観測されており、先行降雨と地震の影響により崩壊したと考えられる。Bishop⁸⁾の有効応力式やこれまで豪雨による表層崩壊に利用されてきた TRIGRS モデル⁹⁾を用いて、不飽和地盤における先行降雨と地震時の斜面安定解析手法について検討した。本研究は、本解析結果と実際の崩壊斜面とを比較し、危険斜面抽出方法の有効性について検討することを目的とする。

2. 現地調査およびすべり面までの深さの推定

著者らは、テフラ層すべりが群発した北海道厚真町を対象とした現地調査を実施し、計25地点において、層序・層厚を測定した¹⁰⁾。図-1に厚真町東和地区、幌内地区、宇隆地区で実施した調査地点を示す。図-2に幌内地区で調査した代表的な露頭の層序・層厚を示す。

既往の研究によるすべり面までの深さの推定では、任意の一定値で残存率を設定し推定層厚を決めていたが、傾斜角に依存しないため層厚に変化が出ず、斜面の層厚を推定する方法として適切でないと考えられる。残存率とは実測層厚とアイソパックマップによる推定層厚の比である。テフラが堆積する斜面の推定では層厚と傾斜角の関係を用いるべきである。本研究で推定したアイソパックアップによる推定層厚は、古川・中川¹¹⁾のアイソパックマップのコンター画像からArcGISProによって「ジオリファレンス」機能により位置合わせを行い空間補完した。空間補完の方法は、元のコンターの線上に一定間隔のポイントを取り、ポイントに標高を与えスプライン法で補完し任意の地点でアイソパックマップによる推定層厚を算出できるようにした。図-3に現地調査で層厚を測定した地点における残存率と傾斜角の関係を示す。残存率は一定ではなく0.6から1.3とばらついていることが確認できる。

そこで現地調査によって測定した実測層厚と北海道水産林務部が作成した災害直後の標高データ(以下、DEMデータ)から得られる傾斜角の関係について検討した。図-4に実測層厚と傾斜角の関係を示す。外れ値として実測層厚が230cm以上117cm以下、傾斜角が15°以下の点を除外して検討した。本研究で実施した安定解析では、層厚は図-4に示す実測層厚と傾斜角の関係を用いて推定した。再移動による二次堆積物が存在する自然斜面を対象に測定をしているためばらつきが大きく、層厚を推定する手法の信頼性は低いのが課題である。

3. 物理・力学的性質

テフラは特殊土とされ、物理試験や力学試験に関する研究は一般的な沖積世の堆積物と比較すると少なく、特にテフラを対象とした地震時のせん断特性に関する研究は少ない。北海道胆振東部地震によるテフラ層すべりのすべり面とされるTa-d細粒やEn-aロームのせん断特性は、斜面安定解析を実施する上で重要であり、広域的に安定解析を行う場合、解析範囲内における異なる地点において強度定数の比較は重要であると考えられる。著者らはTa-d細粒の異なる地点における定体積繰返し一面せん断特性の比較をしている¹⁰⁾。本研究ではEn-aロームの定体積繰返し一面せん断試験も実施した。図-5にEn-aロームのストレスパスを示す。ストレスパスは、接線の傾きから算出される内部摩擦角 ϕ が概ね等しいが、東和川北支流で採取した試料は粘着力 c が小さい傾向を示した。

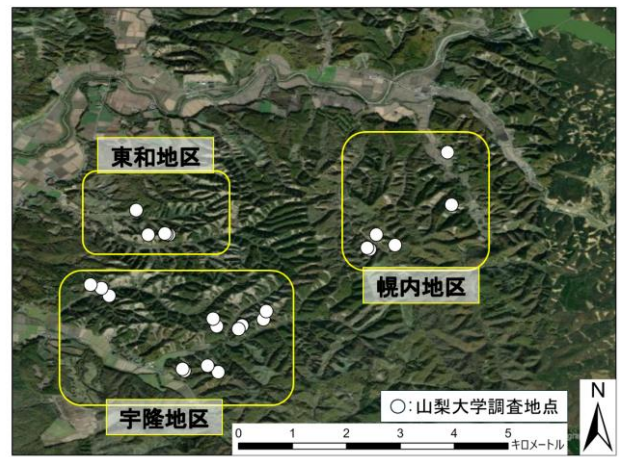


図-1 調査した地点

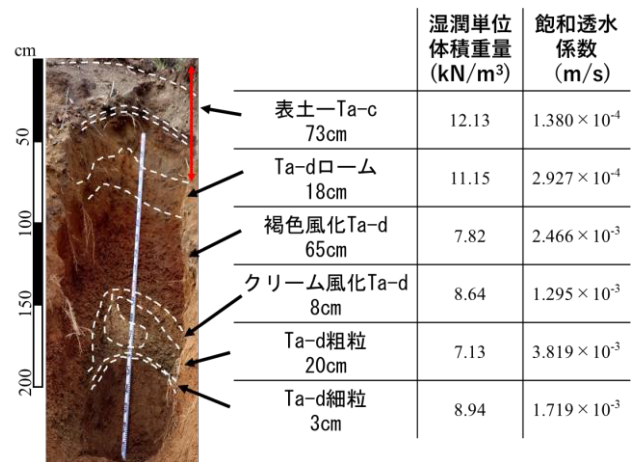


図-2 幌内地区の代表的な露頭¹¹⁾

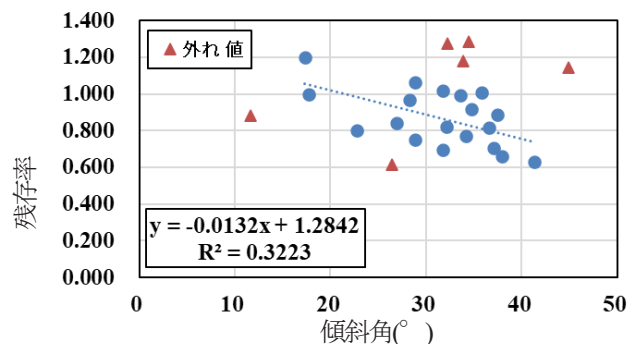


図-3 残存率と傾斜角の関係

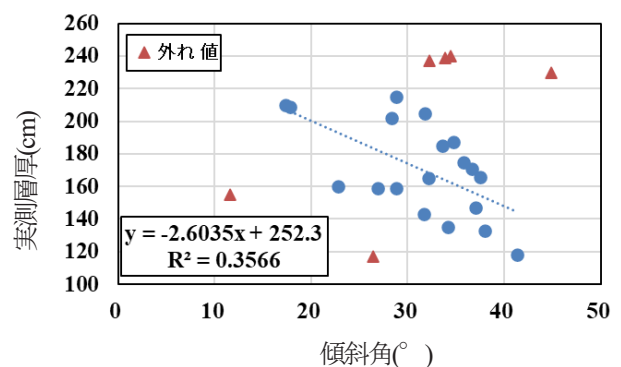


図-4 実測層厚と傾斜角の関係

日吉ら¹²⁾はテフラを対象に水分保持特性に関する報告をしており、同様に東和地区で採取した試料を用いて水分保持特性試験を実施した。図-6に示すように、層によって異なる水分保持特性を示した。解析では、層の大部分を占め、かつサクシジョンの影響がTa-d粗粒より強いと考えられる褐色風化Ta-dの水分特性曲線を用いた。ここで、Ta-d細粒の採取は層厚が小さく難しいため、Ta-d粗粒で水分保持特性試験を実施した。式(1)に示す Gardner モデル¹³⁾に基づいて得られた褐色Ta-dのデータを近似した。

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{1}{1 + \alpha\phi} \right) \quad (1)$$

ここで、 θ : 体積含水率, θ_r : 残留体積含水率, θ_s : 飽和体積含水率, α : 形状パラメータ, ϕ : サクシジョン

4. 広域斜面安定解析手法の概要

本研究では、TRIGRS モデルや Bishop の有効応力式を用いて、厚真町を対象に降雨による浸透、サクシジョンを考慮した地震時の広域的な斜面安定解析手法を検討した。図-7に解析フロー、図-8に解析地域を示す。TRIGRS モデルを用いて降雨による浸透の影響や圧力水頭の影響、サクシジョンは Bishop の有効応力式を用いて不飽和土の影響を考慮した。TRIGRS モデルとは、降雨、浸透を考慮した広域的斜面安定性評価のモデルである。図-8の解析フローのように TRIGRS モデルによる浸透流解析を実施するために、TopoIndexを得る。TopoIndexとは、DEMデータを用いて ArcGISPro で DEM と流向を作成し、TRIGRS モデルのツールで、ArcGISPro と TRIGRS モデルの互換性の調整および流域の解析を行うプログラムである。TopoIndex, 降雨データ, 層厚, 傾斜角, 水分保持特性, 物理特性等のパラメータを入力し出力された圧力水頭を用いて、提案した安全率の式に代入し安全率分布を作成した。Bishop のパラメータ χ は、出力された圧力水頭および土質実験で得られた水分特性曲線から Gardner モデルを適用して算出した。

5. 解析に用いた安全率式

本研究では、震度法による安全率式に加え、降雨による浸透やサクシジョンの影響を考慮するため、TRIGRSモデルの浸透流解析で算出できる圧力水頭関数 $\phi(h, t)$ や Bishop の有効応力式を用いた。震度法による無限延長直線斜面における垂直応力およびせん断応力は式(2)および式(3)に示されるとおりである。

$$\sigma = \gamma_s h \cos^2 i \{1 - k_v - k_h \tan i\} \quad (2)$$

$$\tau = \gamma_s h \cos^2 i \{(1 - k_v) \tan i + k_h\} \quad (3)$$

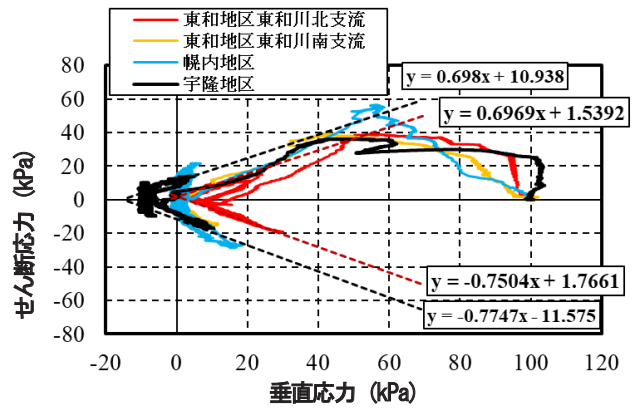


図-5 En-a ロームのストレススペース

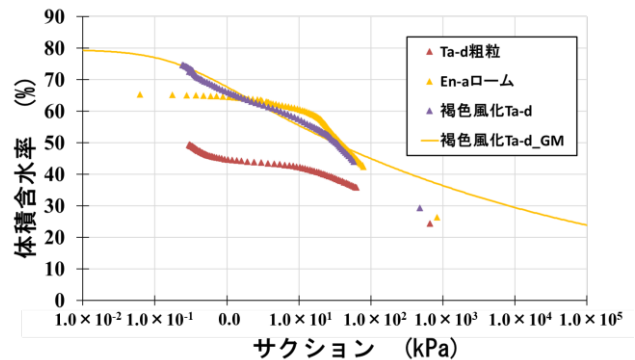


図-6 水分特性曲線

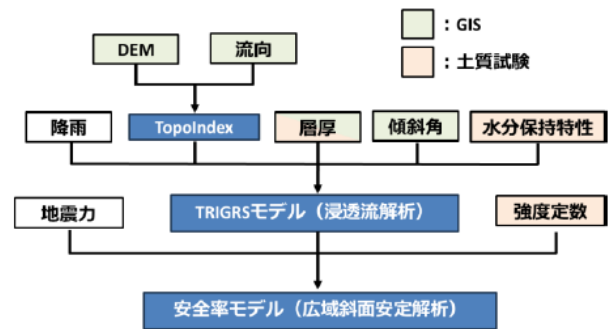


図-7 解析のフロー

また、不飽和地盤における有効応力 σ' はBishopの応力式および式(2)より式(4)のように表される。

$$\sigma' = \gamma_s h \cos^2 i \{1 - k_v - k_h \tan i\} - \chi\phi(h, t)\gamma_w \quad (4)$$

安全率 F_s は式(5)のように滑動力 τ と抵抗力の比で表される。よって、式(5)に式(3)および式(4)を代入すると、安全率の式として(6)が得られる。

$$F_s = \frac{c + \sigma' \tan \phi}{\tau} \quad (5)$$

$$F_s = \frac{(1 - k_v - k_h \tan i) \tan \phi}{(1 - k_v) \tan i + k_h} + \frac{c - \chi\phi(h, t)\gamma_w \tan \phi}{\gamma_s h \sin i \cos^2 i \{(1 - k_v) \tan i + k_h\}} \quad (6)$$

ここで、 k_v ：鉛直震度、 k_h ：水平震度、 h ：層厚、 i ：傾斜角、 γ_s ：湿潤単位体積重量、 γ_w ：水の単位体積重量、 χ ：Bishopのパラメータ、 $\varphi(h, t)$ ：圧力水頭関数

6. 解析に用いたパラメータ

TRIGRS モデルでは、層を複数にして浸透流解析できないため、単一の層として検討した。広域斜面安定解析に用いたパラメータを表-1に示し、傾斜角、すべり面までの深さ、強度定数、湿潤単位体積重量、飽和透水係数、水分特性曲線、水平震度、鉛直震度、降雨データについて以下に示す。

(1) 傾斜角

任意の斜面勾配は、ArcGISPro を用いて DEM データおよび地震以前の DEM データから「傾斜角」ツールを用いて算出した。

(2) すべり面までの深さ

層厚 $h(m)$ は、2章で述べたが実測層厚と傾斜角の関係式を用いて推定する。(1)の傾斜角を用いて、ArcGISPro の「ラスター演算」によって傾斜角から層厚を推定した。本研究における層厚の推定は、2章で述べたが、式(7)に示す傾斜角と実測層厚の関係より得られた関係式を用いる。

$$h = -0.026035 i + 2.523 \quad (7)$$

(3) 強度定数

強度定数の粘着力 c と内部摩擦角 ϕ は、すべり面が En-a ロームと仮定し、東和川北支流地点ですべり面付近から試料を採取した。採取した試料を対象に実施した定体積繰返し面せん断試験によって得られた強度定数の値を用いた。図-5 のストレスパスは検討事項が多くあるが、本研究の目的は斜面安定解析手法の有効性検討のため、安全側の粘着力 c が小さい方で仮定した。強度定数はストレスパスの接線の正の傾きと負の傾きから求めており、粘着力 c は絶対値の平均、内部摩擦角 ϕ は平均を用いた。

(4) 湿潤単位体積重量および飽和透水係数

解析で用いた湿潤単位体積重量および飽和透水係数は、大起理化学工業株式会社製の「土壌透水性測定器4点式」を用いて試験を実施した。東和地区で採土円筒（内体積 100cm^3 ）を用いて採取した試料の物理試験結果と、解析領域に最も近い幌内地区で調査した地点の層厚を用いて湿潤単位体積重量および飽和透水係数を求めた。TRIGRS モデルでは、地表からすべり面まで同じ層であると仮定されるため、図-2に示す各層の湿潤単位体積重量を層厚で加重平均した値を解析で用いた湿潤単位体積重量とした。飽和透水係数は、観測された層厚をそれぞれ、表土も含めた

Ta-c (h_1)、Ta-d ローム (h_2)、褐色風化 Ta-d (h_3)、クリーム状風化 Ta-d (h_4)、Ta-d 粗粒 (h_5)、Ta-d 細粒 (h_6)、全層厚を H とすると、式 (8) のように表される。なお、Ta-c より上の層は試料採取が難しく、かつ層厚も小さいので Ta-c として計算した。

$$K_s = \frac{H}{\frac{h_1}{K_1} + \frac{h_2}{K_2} + \frac{h_3}{K_3} + \frac{h_4}{K_4} + \frac{h_5}{K_5} + \frac{h_6}{K_6}} \quad (8)$$

(5) 水分保持特性

TRIGRS モデルの浸透流解析では、水分特性曲線から得られる残留体積含水率 θ_r 、飽和体積含水率 θ_s 、曲線の形状パラメータ α を用いる。水分特性曲線は Hyprop 試験から算出した。土の水分保持特性を表す水分特性曲線と透水性を表す不飽和透水係数は、不飽和土中の水分移動特性を与える重要な物性である。調査した地点において褐色風化 Ta-d が露頭の大部分を占めており、TRIGRS モデルを用いるためには、地表からすべり面まで土質力学特性が一樣な層と仮定しなければいけないため、層で最も厚いと考えられる褐色風化 Ta-d の水分保持特性を用いた。図-6 に示した褐色風化 Ta-d 水分特性曲線から θ_r 、 θ_s 、 α の値を求めた。

(6) 水平震度・鉛直震度

安田ら¹⁴⁾によると、厚幌ダムに設置されている地震計により観測された加速度最大値は、ダムの上下流方向では 450cm/s^2 、鉛直方向では 133cm/s^2 と報告している。水平震度および鉛直震度はそれぞれ重力加速度 9.81m/s^2 で除した値で、0.4587 および 0.1357 である。

(7) 降雨データ

北海道胆振東部地震により発生したテフラ層すべりは、先行降雨が観測されている。解析では気象庁が公開する厚真町で観測された降雨データを用いた。8月9日から9月5日に観測された1日毎の降雨データをダウンロードした。

表-1 解析で用いたパラメータ

入力項目	パラメータ	数値
傾斜角	i (°)	任意の傾斜角
層厚	h (m)	換算式
強度定数	c, ϕ (kPa)	1.66, 35.9
湿潤体積重量	γ_t (kN/m ³)	9.80
残留体積含水率	θ_r (%)	0.2
飽和体積含水率	θ_s (%)	0.816
形状パラメータ	α (1/cm)	0.5
飽和透水係数	k_s (m/s)	2.932×10^{-4}
降雨量	r_i (mm/day)	任意の降雨量
降雨時間	t (s)	0~2332800
Bishopのパラメータ	χ (-)	Gardnerモデル
水平震度・鉛直震度	k_h, k_v (-)	0.4587, 0.1357

(8) Bishop のパラメータ

飽和状態および残留状態におけるパラメータ χ の値を基準にして、水分特性曲線上でのサクシジョンの値を用いて Bishop パラメータの χ の値を相対的に決定できる。 Bishop パラメータの χ を決定する方法は様々な議論がされているが、「地盤工学会・実務シリーズ 23 豪雨時における斜面崩壊のメカニズムおよび危険度予想」¹⁵⁾より単純である $\chi = s_e$ として求めた。本研究ではパラータの数が少ない簡単な Gardner モデルを適用し、式(9)より TRIGRS モデルの一次元浸透解析で出力された圧力水頭から算出した。よって、水分特性曲線および TRIGRS モデルの浸透流解析で算出された ϕ の値から χ を求めることができる。

$$\chi = s_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{1}{1 + \alpha\phi} \right) \quad (9)$$

7. 広域斜面安定解析

テフラ層すべりが群発した厚真町周辺には地震前の DEM データがほとんど存在していないが、厚幌ダム周辺

にのみ地震前の DEM データが存在していた。本研究ではダム周辺を対象に広域斜面安定解析を実施した。図-9 は地震前の DEM データから地震後の DEM データを引いたもので、正の値を可視化し、実際の崩壊斜面を抽出した。図-10 は、降雨と浸透流解析後の圧力水頭の分布である。地震前の斜面上部で負圧が大きく働いていることが分かる。斜面上部の尾根付近では負圧が大きいが、斜面上は負圧が小さく水圧が上昇していることが予想される。図-11 は地震直前、図-12 は地震後の解析結果で地震前は安全率が 1.0 以上であったのに対し、地震を考慮すると安全率が 1.0 を下回る斜面が確認できた。図-13 に安全率 1.0 以下及び図-9 の崩壊斜面の分布を示す。安全率 1.0 以下及び崩壊斜面の分布が概ね重なっていることが認められる。地震前の安全率の最小値は 1.305 であったのに対し、地震後の安全率は 0.92 であった。地震によって安全率が 1.0 を下回った。

提案した解析手法の精度を評価するため、Ciurleo ら¹⁶⁾の手法を利用した。誤差指数と予測指数に従って計算した。誤差指数と予測指数は式(10)および式(11)のように定義されている。



図-8 解析領域



図-9 崩壊地

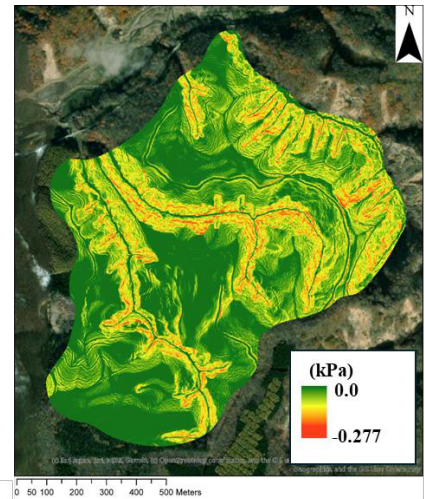


図-10 地震前の圧力水頭分布

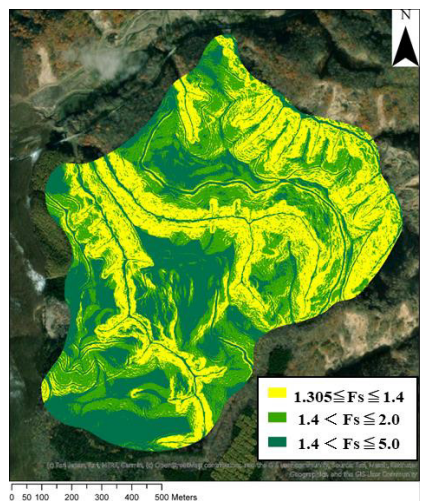


図-11 地震前の安全率分布

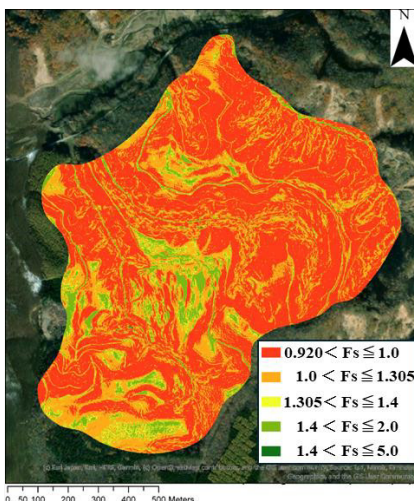


図-12 地震後の安全率分布

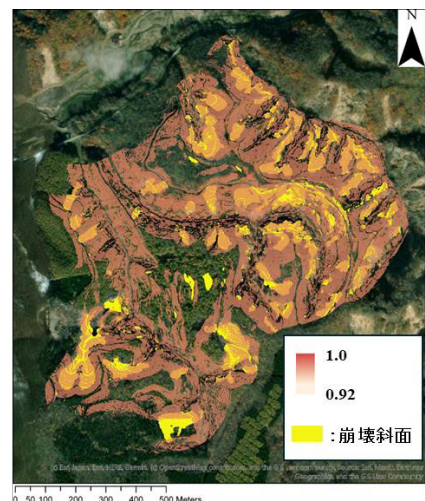


図-13 安全率 1.0 以下および崩壊地の分布

$$EI = \frac{A_{TL} - A_{UTL}}{A_{TL}} \quad (10) \quad FI = \frac{A_{UN} - A_{UTL}}{A_{ST}} \quad (11)$$

ここで面積 A は、 A_{TL} ：実際の崩壊斜面、 A_{UTL} ：実際の崩壊斜面上の予測された危険斜面、 A_{UN} ：予想された危険斜面、 A_{ST} ：実際の斜面および解析においても安定斜面

解析で用いた DEM データは 1m メッシュであるため、計算はセル数に基づいている。各パラメータのピクセル数は ArcGISPro を使用して計算した。 A_{TL} は 177,671 ピクセル、 A_{UTL} は 128,798 ピクセル、 A_{UN} は 587,705 ピクセル、 A_{ST} は 3,800,588 ピクセルであった、よって誤差指数 EI は 27.51% で 72.5% は正しく予測された。予測指数 FI は 12.07% で不正確な予測率は 12.07% であることが示された。後藤ら⁷⁾による斜面安定解析では、層厚と傾斜角の関係や降雨の影響を考慮していないため、危険斜面を抽出方法に課題がある。提案した解析手法は、降雨による間隙水圧の上昇等を考慮したことで精度が上がったと考える。TRIGRS モデルより算出した圧力水頭と提案した安全率式による解析手法は有効であると示唆する。

8. 結論

本研究のまとめを以下に示す。

- ① 北海道胆振東部地震で発生したテフラ層すべりを対象とし、斜面安定解析に必要なパラメータを現地調査および土質試験を実施し把握した。
- ② TRIGRS モデル、Bishop の有効応力式、震度法を組み合わせ、先行降雨を考慮した地震時の不飽和地盤の広域斜面安定解析手法を提案した。
- ③ 地震前の DEM データが存在する厚幌ダム周辺を対象とし提案した解析手法を用いて、広域的に斜面安定解析を実施した。地震による斜面崩壊は、適応率が高く 72.5% は正しく予想され、地震前に TRIGRS モデルを用いて実行された圧力水頭の計算と提案した安全率式を用いた解析手法の有効性を確認した。

謝辞：現地調査および試料採取において北海道立総合研究機構地質研究所の石丸聡氏、小安浩理氏、新潟大学災害・復興科学研究所の渡部直喜先生には多大なご協力をいただきました。また、現地調査及び室内実験については山梨大学地盤工学研究室の学生より協力を得た。関係各位に感謝します。

参考文献

- 1) 国土交通省：平成 30 年北海道胆振東部地震土砂災害関連情報、平成 30 年北海道胆振東部地震の崩壊面積は明治以降の地震災害で最大、http://www.mlit.go.jp/river/sabo/h30_iburitobu/top.html, 2021.

- 2) 長谷川健、花岡正光、古川竜太、重野聖之、七山太、中川光弘、安藤寿男：北海道東部、釧路地域における樽前 d 降下火砕堆積物の発見とその意義、地質学雑誌、第 119 巻、第 7 号、pp.446-456, 2013.
- 3) 梅津讓：恵庭 a 降下軽石及び樽前 d 降下軽石の年代に関する資料、東北地理、第 39 巻、第 2 号、ppt.141-143, 1987.
- 4) 石丸聡、廣瀬亘、川上源太郎、輿水健一、小安浩理、加瀬善洋、高橋良、千木良雅弘、田近淳：2018 年北海 道胆振東部地震により多発したテフラ層すべり：地形発達史的にみた崩壊発生場の特徴、地形、Vol.41, pp.147-167, 2020.
- 5) 木村壽、後藤聡、佐藤剛、若井明彦、林信太郎、檜垣大助：テフラ層厚分布を考慮した斜面安定解析による崩壊危険地の抽出：-阿蘇カルデラ北東部地域における検討事例、日本地すべり学会誌、56 巻、Special_Issue 号、pp.240-249, 2019.
- 6) 岡田健杜、後藤聡、日吉優米、Mega Lia Istiyanti、石丸聡、小安浩理、渡部直喜：北海道胆振東部地震において厚真町東和地区に分布する降下火砕堆積物の物理的性質、令和 3 年度土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会、III-3381, 2021.
- 7) 後藤 聡、岡田健杜、日吉優米、大川原優希、陳 柯宇、石原奨真、小幡隼士、石丸 聡、小安浩理、渡部直喜：残存率による広域テフラ斜面の地震時安定解析、第 57 回地盤工学研究発表会、22-11-1-05, 2022.
- 8) Bishop, A. The Measurement of Pore Pressure in the Triaxial Test, Pore Pressure and Suction in Soils, London, Butterworth, pp.38-46, 1961.
- 9) Rex, L. B, William Z. S, and Jonathan W. G : TRIGRS-A Fortran Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis, Version 2.0, science for a changing world, 2008.
- 10) 大川原 優希、後藤 聡、小幡 隼士、陳 柯宇、石丸 聡、小安浩理、渡部 直喜：2018 年北海道胆振東部地震で発生したテフラ層すべりに関する異なる場所で採取した Ta-d 層の定体積繰返し一面せん断特性、第 11 回土砂災害に関するシンポジウム論文集、11, pp. 49-52, 2022.
- 11) 古川竜太、中川光弘：樽前火山地質図、火山地質 15、産業技術総合研究所地質調査総合センター、2010.
- 12) 日吉優米、後藤聡、岡田健杜：北海道胆振東部地震において安平町で発生したテフラ層すべりに関するすべり面の物理的性質および水分保持特性の把握、第 56 回地盤工学研究発表会、13-9-2-03, 2021.
- 13) Gardner, W.R., Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table: Soil Science, v. 85, pp. 228-232, 1958.
- 14) 安田成夫、曹増延、安藤駿平：実地震時に基づく台形 CSG ダムの材料特性及び耐震性評価、土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)、Vol.78, No.2, pp254-268, 2022.
- 15) (公社)地盤工学会：豪雨時における斜面崩壊のメカニズムおよび危険斜面の予測、地盤工学・実務シリーズ、pp35-48, 2006.
- 16) Ciurleo, M., Clorinda, M.M., and Moraci, N : Landslide susceptibility assessment by TRIGRS in a frequently affected shallow instability area, Landslides 16, pp175-188, 2019.

(2024.5.31 受付)