

2013年台風26号によって伊豆大島で生じた 表層崩壊の発生機構について

MECHANISM OF SHALLOW LANDSLIDES IN IZU OSHIMA ISLAND

TRIGGERED BY TYPHOON WIPHA 2013

堀田 紀文¹・後藤 優弥¹・山川 陽祐¹・経隆 悠¹・正岡 直也²・今泉 文寿³
Norifumi Hotta, Yuya Goto, Yosuke Yamakawa, Haruka Tsunetaka, Naoya Masaoka
and Fumitoshi Imaizumi

¹筑波大学生命環境系 (〒305-8572 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

E-mail: hotta.norifumi.ge@u.tsukuba.ac.jp

²京都大学大学院農学研究科 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

³静岡大学農学部 (〒422-8529 静岡市駿河区大谷 836)

Key Words: Izu Oshima, Typhoon Wipha, volcanic area, shallow landslide, slope stability

1. 研究の背景と目的

2013年10月台風26号によって、伊豆大島大金沢上流域では広範囲の山地斜面で表層崩壊が発生した。表層崩壊によって供給された大量の土砂および林木が、下流域の元町地区での土石流・流木被害を伴う深刻な土砂災害を引き起こすこととなった。災害の契機である表層崩壊の発生メカニズムについては十分に解明されていない。

一般に、山地斜面では降雨の大部分は鉛直浸透後、基岩上において飽和側方流となり谷部へ集水される。このため表層崩壊は0次谷と呼ばれる谷筋に沿って発生し¹⁾、降雨規模の拡大に伴って崩壊箇所・面積が増大する^{2,3)}。しかしながら、伊豆大島のような火山地域では、周期的な噴火によって形成された土層の多層構造が存在し、土層深部まで明確な基岩(不透水層)が存在しない。また、土壌の透水性が高いため浸食による谷地形の発達が生じていない広い斜面が見られる。このような斜面では谷部への集水は起きにくいいため、伊豆大島で発生した表層崩壊は一般的な表層崩壊と異なるプロセスで発生した可能性がある。数十cm~1m程度の浅い崩壊が広範囲で斜面上部から発生するという、通常の表層崩壊とは異なる発生形態⁴⁾もそれを示唆する。

伊豆大島の崩壊地外縁部の斜面では降雨イベント中に相対的な難透水層上で一時的な飽和帯の発生が確認されており⁵⁾、このような飽和帯の形成が表層崩壊の発生に関わっていると考えられる。飽和帯は、火山灰やスコリアなどの火山噴出物からなる透水性の高いテフラ層と、火山活動の休止期間の堆積物である相対的に透水性の低いレス層の境界付近で形成される。谷地形による集水プロセスを伴わないため、飽和帯は原理的には降雨強度がレス層の浸透能を上回る間を中心とした短時間しか形成されない。すなわち、伊豆大島のような火山地域における崩壊発生危険度は、土層構造と降雨の鉛直浸透過程のみで説明できる可能性がある。

本研究では、伊豆大島の被災斜面を対象とした1次元鉛直浸透計算と斜面安定解析によって、表層崩壊発生の再現性を検討することで、上記の作業仮説の妥当性を確認することを目的とする。

2. 研究対象地

伊豆大島元町地区大金沢流域上部の崩壊斜面を対象地とした(図-1)。斜面勾配は約33~35度で、植生は、常緑・落葉広葉樹が主体で、最大でも樹高は10m、胸高直径は20cm程度である。樹木根系は60~80cmより



図-1 研究対象地



図-2 調査斜面

深い土層には見られず、崩壊のすべり面には根系はほとんど見られない。土層は主に噴火堆積物である透水性の高いテフラ層と噴火休止期間中に堆積する相対的に透水性の低いレス層の互層構造から成る。年降水量は2754mm(：大島観測所における1996年～2015年の平均値。2013年の降水量は3366mm。)である。

三原山の火山活動に伴う伊豆大島全島での層序に関しては詳細な調査が存在する⁶⁾が、崩壊斜面ではそのうちY1.0/Y2.0レス層上面やY4.0/Y5.0レス層上面がすべり面となったと考えられている⁷⁾。研究対象地(図-2中のP1～P5)でも崩壊上部では50cm程度の深度ですべり面が形成されていたが、下部では約1mの深度となっており、層序なども既存の調査報告と対応していた。

伊豆大島での過去の台風・豪雨による土砂災害は「伊豆大島土砂災害対策検討委員会報告書」⁴⁾に詳しいが、2013年のような大規模な山地斜面での表層崩壊を伴うものは1958年9月の狩野川台風時以外に明確な記録は残っていない。狩野川台風の際には、2013年台風26号と同様の場所で、良く似た推移で土砂災害が発生した。本研究対象地の近くでも大規模な表層崩壊が発生した記録が残っている⁸⁾。

3. 方法

(1) 現地調査と試料分析

調査地斜面の写真と、それぞれの観測機器の設置箇所を図-2に示す。現地には転倒マス式雨量計(RG-M, Onset)を2台設置し、林内・林外の雨量を観測した。土壌水分の測定のために、崩壊外縁部の林内に、テンシオメーター(圧力センサー:PA-750, Copal)、TDR式土壌水分センサー(CS616, Cambell)を設置し、2014年10月から(TDRは2014年12月から)土壌中の間隙水圧(20, 50, 80, 90, 100, 110, 120, 150, 200cm深度)、体積含水率(50, 80, 90, 100cm深度)を連続観測した。

崩壊外縁部の複数点の土層断面において土層構造の調査を行い、土壌サンプルを採取して飽和透水係数(透水試験)と土壌水分特性(pF試験)を測定した。pF試験では、pF値に応じて砂柱法と加圧板法の2種類の試験方法を用いた。pF 0～1.5では砂柱法釜(DIK-3520, 大起理化)での砂柱法を、pF 1.5～3.2では加圧装置(DIK-9210, 大起理化)、加圧板釜(DIK-3400, 大起理化)による加圧板法を実施した。

(2) 1次元鉛直浸透計算

基礎方程式として以下の鉛直1次元Richards式を用いた。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h_m) \left(\frac{\partial h_m}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (1)$$

ただし、 θ は土壌の体積含水率、 K は不飽和透水係数、 h_m は(不飽和)圧力水頭である。

対象地の土層構造に対応して4層(表層土:0-20cm, テフラ:20-90cm, レス:90-150cm, テフラ:150-210cm)の単純化した計算領域において浸透計算を行った。計算領域の上端に降雨をフラックスとして与え、下端は開放、固定水頭とした。固定水頭の値には計算開始時点の200cm深度の測定値を用いた。数値計算は陽解差分法により実施し、CLN条件を満足するように空間刻み幅 Δz を5mm、時間刻み Δt を0.0006minとした。

各層の透水係数は現地サンプルの試験結果から与え、土壌水分特性曲線は次式で表されるvan Genuchtenモデル⁹⁾に現地サンプルの試験結果を適用することで得た。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(1 + |\alpha h_m|^n \right)^{-m} \quad (2)$$

$$K(S_e) = K_s S_e^l \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right] \quad (3)$$

ただし、 S_e は有効飽和度、 θ_r は残留体積含水率、 θ_s は飽和体積含水率、 K_s は飽和透水係数、 α 、 n 、 m 、 l は水分特性曲線の形状に関するパラメーターである。

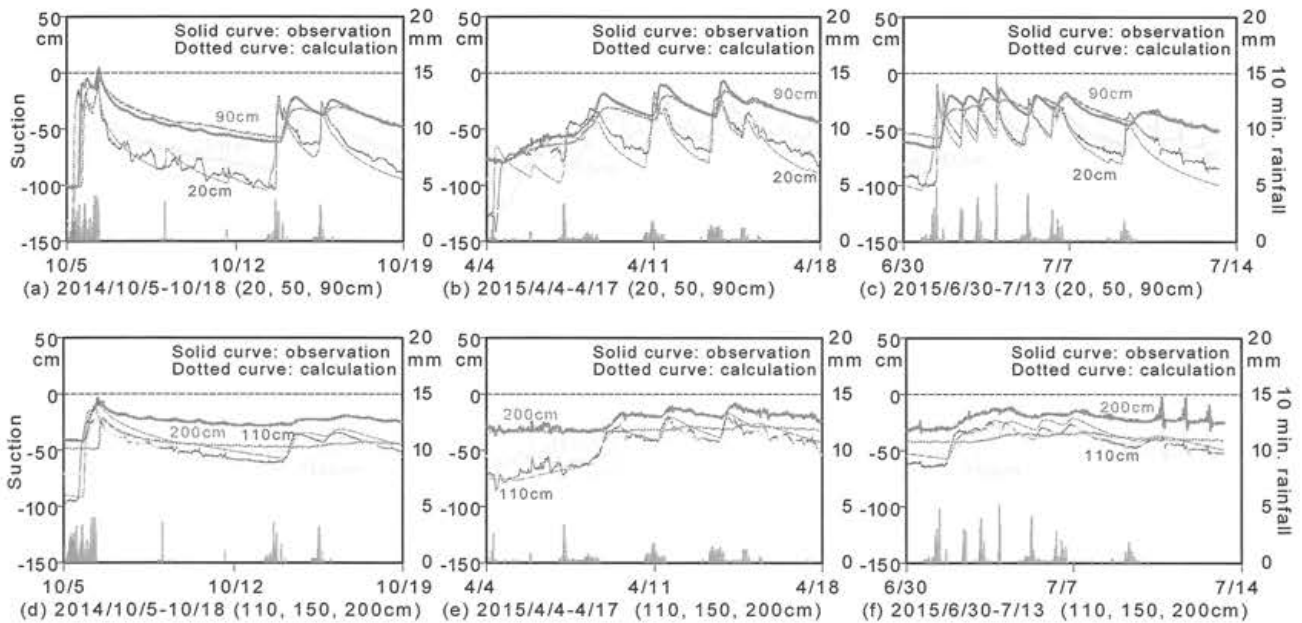


図-3 土壌中の圧力水頭の観測結果と浸透計算の比較

浸透計算では蒸散は考慮せず、基本的には降雨イベントごとに実施した。降雨前の各深度の土壌水分を実測値を参照して与え、降雨イベント後の土壌水分の時間変化について、観測結果との比較から間隙水圧の再現性を確認した。そのうえで、飽和と判定される間隙水圧の閾値(計算値)を決定し、2013年の災害を対象とした降雨-浸透計算を行った。計算の入力となる降雨は、調査斜面における観測値も、2013年の計算に用いた気象庁(大島観測所)データも10分間雨量である。なお、調査斜面と気象庁データの雨量には差異があるため、観測データとの比較に基づく補正を行った。

(3) 無限長斜面安定解析

浸透計算から得られた地下水位を用いて過去の豪雨イベントを対象とした斜面安定解析を行った。崩壊斜面が一様であるため、広く用いられている以下の式(例えば、10)で無限長斜面の安全率 F を求めて崩壊の判定を行った。

$$F = \frac{(\gamma_s Z - \gamma_w h) \cos^2 \beta \tan \phi + c}{\gamma_s Z \cos \beta \sin \beta} \quad (4)$$

ただし、 γ_s は土の密度、 Z は土層厚(安定解析は各層で実施)、 γ_w は水の密度、 h は地下水位、量有効飽和度、 β は斜面勾配、 ϕ は土の内部摩擦角、 c は土の粘着力である。

土質強度定数(内部摩擦角、粘着力)は既往調査¹¹⁾を参考に与えた。テフラとレスで土質強度に顕著な違いはないため、両者ともに内部摩擦角は34度、粘着力は3000 N/m²とした。斜面勾配は現地斜面(33~35度)の

平均的な値となる34度とした。

4. 結果および考察

(1) 現地観測と浸透計算の比較

図-3に土壌中の圧力水頭の観測結果と浸透計算の結果の例を示す。降雨終了後には森林の蒸散に起因する観測結果と計算結果の差異が見られるものの、降雨開始後の圧力水頭の急激な増大と降雨直後の低下の波形は全ての降雨イベントで概ね一致していた。浸透計算でも、観測結果と同じく相対的な難透水層である深度90cmのレス層上において降雨時の圧力水頭の上昇がもっとも顕著であった。深度110cm以深において、無降雨期間の圧力水頭が深度90cmより大きな値をとっている場合でも、降雨時の圧力水頭の上昇は、150cm以深のテフラ層も含めて顕著ではなく、その点についても計算結果は観測結果を良く再現していた。これは90cmのレス層の透水係数が小さいことと対応していると考えられる。深度200cmでは測定値と計算値に乖離が見られるが、これは境界条件によるものである。深度150cmでは両者が概ね一致していることから、その影響は限定的だと考えられる。

観測期間内で飽和帯が確認されたのは、総雨量230mm(最大時間雨量15mm)を記録した2014年10月5~6日の降雨イベントのみであり、深度も90cmに限られた。しかしながら、計算結果では圧力水頭は0に達していない(図-3a)。その他の降雨イベントにおいても、土壌中の圧力水頭が0に近づいたときに観測値と計算値の差異が大きくなっていることが分かる。2014年10月

の降雨イベントの結果から、圧力水頭が-6cm に達したときに飽和とみなすこととした。各層の計算結果から飽和帯の厚さを求め、式(4)の地下水位を与えることで斜面安定解析を実施した。

(2) 表層崩壊発生時の安全率

図-4 は、2013 年台風 26 号による降雨イベント中の、土壌中の圧力水頭の計算結果を示している。降雨開始直後から圧力水頭が敏感に変化するの図-3 と同様であるが、土層中に飽和帯が形成されるのは 10 月 16 日午前 0:00 頃に降雨強度が増大してからである。午前 2:00~5:00 頃には時間雨量 100 mm を越える降雨があったが、前節で導入した閾値 (-6cm) から、その時間帯には 90cm 以浅の土層中に広く飽和帯が形成されていることが分かる。なお、100cm 深度付近までほぼ同時刻に飽和帯の形成が確認されたが、それより深い土層では飽和帯はほとんど形成されず、飽和帯が生じた時間帯も遅れていた。

飽和帯の厚さから地下水深さを求め、各深度において安定解析を実施した。図-5 に 90cm 深度において計算された斜面安全率の変化を示す。土層中に飽和帯が形成された午前 0:00 頃から急激に安全率が低下し、午前 0 時 40 分から午前 5 時 30 分の間に安全率が 1 を下回

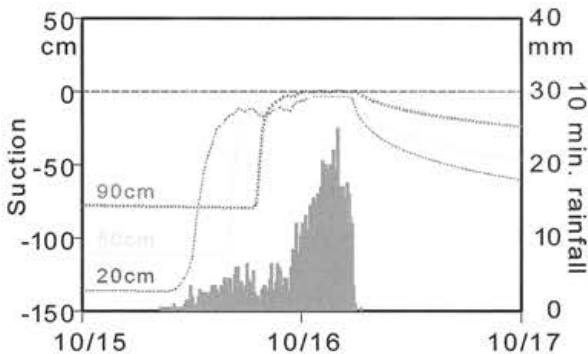


図-4 台風 26 号時の圧力水頭の計算結果

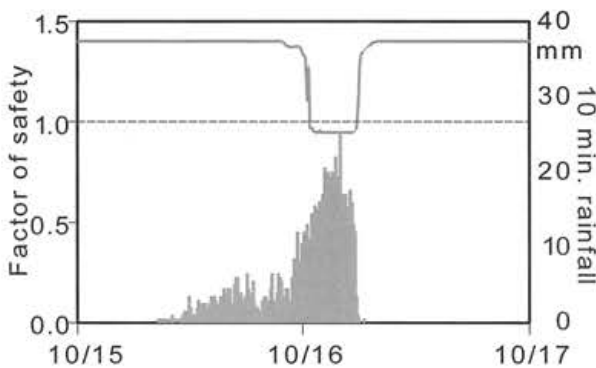


図-5 台風 26 号時の安全率の計算結果

った。これは地震計の記録等から実際に崩壊が発生したと考えられる時間帯(午前 2 時から 3 時の間)¹²⁾より長い。90cm より浅い層や深い層でも安全率が 1 を下回る結果が得られたが、その時間帯は 90cm 深度より遅れるため、すべり面が形成される深度は、観測点付近で実際に生じた深度である、レス層上面の 90cm と対応している。

実際に崩壊が発生した、とされる時間に先行して斜面安全率が 1.0 を下回るという意味で、図-5 の結果は崩壊危険度をやや過大評価していたと言える。その要因として、斜面安定解析が斜面勾配 34 度という固定条件下で実施されたのに対して、実斜面は僅かな起伏を伴っているため、崩壊斜面の全ての地点の安全率が同時に 1 を下回らないことが挙げられよう。一定のまとまった土塊の安全率が同時に 1 を下回ったときに斜面崩壊が発生すると考えられるからである。いずれにしても、鉛直浸透計算と斜面安定解析で伊豆大島での表層崩壊の発生の有無は精度良く判定できた。本研究の作業仮説である「伊豆大島での表層崩壊は火山地域特有の土層構造と鉛直浸透過程のみで説明できる」との考えを支持する結果である。本研究は単一斜面のみを対象としているため、さらなる検討は必要であるが、伊豆大島での表層崩壊の大部分が広大な面積を伴い、同程度の勾配で、ほぼ同時刻に発生していることから、その他の表層崩壊も同様に考えることが可能であろう。

(3) 火山地域で生じる斜面崩壊の特徴とその対策

本研究で得られた結果の信頼性を検証するためには、例えば伊豆大島の過去の豪雨イベントでも同様の解析を行い、実際の崩壊発生・非発生との対応をより詳細に検討することが必要である。また、一般性の担保には他の火山地域での検討も必要になるだろう。それらは今後行っていく予定であるが、ひとまずここで得られた知見をもとに、火山地域での土砂災害の特徴について考察したい。

土砂災害のソフト対策として、危険降雨量¹³⁾に基づく警戒・避難態勢の整備が挙げられる。しかしながら、危険降雨量は災害発生地点や時刻を正確に予測することを目的とした指標ではないため、必ずしも十分な精度で警戒・避難を行えるとは限らない。それに対して、斜面における地下水位の再現計算と斜面安定解析を用いて崩壊発生の位置やタイミングを予測しようという試み^{3), 14)}もあるが、降雨の短期予測の難しさとともに、斜面における水文プロセスの複雑さのために、正確な地下水位とそれによって生じる土砂移動の予測が困難であり、実用化はされていない。ところが、伊豆大島のような土層構造をもった火山地域であれば、土層構造や地形を事前

に調べておくことで、斜面崩壊の発生危険度をきわめて正確に評価できる可能性があることを、本研究の結果は示唆している。

その一方で、火山地域での土砂災害には別の危険性がある。明確な基岩がなく、透水性が高い土層からなる火山地域では、そもそも斜面崩壊が発生しにくいと言える。すなわち、斜面崩壊発生の危険度が式(4)のように評価できる時、土質強度や降雨条件に差異がなければ、地下水位が形成されにくい火山地域での崩壊発生頻度は低い筈である。通常の表層崩壊は、降雨量の増大とともに崩壊規模が増大することが知られている²⁾。これは、飽和側方流による集水とともに谷地形での飽和帯が拡大することによって生じる。しかしながら、伊豆大島のように谷地形が不明瞭な地域では、鉛直浸透のみで形成される飽和帯によってほとんど同時に安全率が1を下回る斜面が広く存在するために、突発的に大規模な土砂災害を引き起こし得る。崩壊発生頻度が低いにも関わらず、発生時の規模が大きいという火山地域の特徴を踏まえた対策を講じることが重要だと考えられる。

5. 結論

2013年10月台風26号によって伊豆大島で生じた表層崩壊は、1次元鉛直浸透のみを考慮した斜面安定解析によって説明できることが明らかになった。テフラ成層を有する火山地域での斜面崩壊の発生プロセスは、このように通常の表層崩壊より単純であり、本研究と同様の方法を用いることで精度の高い崩壊発生予測を行える可能性がある。その一方で、斜面勾配および土層構造が広範囲にわたって一様で、豪雨時に鉛直浸透だけで崩壊が発生するという火山地域の特徴は、ある閾値を超える降雨に対して突発的に大規模な土砂災害を発生させるという点で通常の山地斜面と異なることにも注意が必要であろう。

謝辞：本研究を進めるにあたって、東京都大島支庁、大島町役場の皆さまに大変お世話になった。ここに記して感謝いたします。なお、本研究は国土交通省河川砂防技術研究開発制度「砂防技術分野、火山地域における大規模土砂災害への対応に関する技術開発研究「火山地域における水文・土砂流出メカニズムの解明と土砂災害防止 事業支援のための数値シミュレーション法の開発」(H26-28, 研究代表者名 里深好文・江頭進治)の一部として実施された。

参考文献

- 1) 塚本良則:森林・水・土の保全, 朝倉書店, 1998.
- 2) 打萩珠男:ひと雨による山腹崩壊について, 新砂防, 23 巻, 4 号, pp.21-34, 1971.
- 3) 平松晋也・水山高久・石川芳治:雨水の浸透・流下過程を考慮した表層崩壊発生予測手法に関する研究, 砂防学会誌, 43 巻, 1 号, pp. 5-15, 1990.
- 4) 伊豆大島土砂災害対策検討委員会:伊豆大島土砂災害対策検討委員会報告書, 東京都, 2015.
- 5) 経隆悠・田名網浩貴・正岡直也・今泉文寿・堀田紀文・山川陽祐・小杉賢一朗:多層構造に着目した火山地帯での間隙水圧の鉛直分布に関する検討, 第 126 回日本森林学会大会, 2015.
- 6) 小山真人・早川由紀夫:伊豆大島火山カルデラ形成以降の噴火史, 地学雑誌, 105 巻, 2 号, pp. 133-162, 1996.
- 7) 小山真人・鈴木雄介:伊豆大島の噴火史からみた 2013 年 10 月の火山泥流災害, 地理, 59 巻, 5 号, pp. 34-41, 2014.
- 8) 井上公夫:伊豆大島・元町の土砂災害史, 地理, 59 巻, 2 号, pp. 10-19, 2014.
- 9) van Genuchten, M.Th.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, Vol. 44, pp.892-898, 1980.
- 10) 執印康裕・堀田紀文・鈴木雅一・小山内信智・岡本敦:地震後の崩壊発生降雨基準に関する一考察, 砂防学会誌, 65 巻, 2 号, pp.16-22, 2012.
- 11) 高原晃宙・清水武志・磯貝尚弘・一色弘充・木下篤彦・石塚忠範・長谷川陽一・柴崎達也:平成 25 年度伊豆大島における表層崩壊箇所の土質特性. 平成 26 年度砂防学会研究発表会概要集 B: pp. 98-99, 2014.
- 12) 国土交通省国土技術政策総合研究所土砂災害研究部・国立研究開発法人土木研究所土砂管理研究グループ:平成 25 年(2013 年)台風 26 号伊豆大島土砂災害調査報告, 国土技術政策総合研究所資料, 第 875 号, 2015.
- 13) 国土交通省河川局砂防部・気象庁予報部・国土交通省国土技術政策総合研究所:国土交通省河川局砂防部と気象庁予報部の連携による土砂災害警戒避難基準雨量の設定手法(案), 2005.
- 14) Okimura T, Ichikawa R: A prediction method for surface failures by movements of infiltrated water in a surface soil layer. Natural disaster science Vol. 7, No. 1, pp. 41-51, 1985.

(2016. 5. 31 受付)