

池の沢溪岸斜面における土砂動態に関する一考察

山梨大学工学部 学生会員 ○大沼哲郎
 山梨大学工学部 非会員 市村彰大
 山梨大学大学院 正会員 荒木功平

1 はじめに

2014年2月、山梨県早川町では豪雪・雪崩等により全域が孤立した。2011年9月台風12号（連続雨量1228mm）では早川下流部右岸の春木川流域の池の沢渓流内から土砂が大量に流出し、宿泊施設（観光客等約300名）が孤立した¹⁾。

富士川水系早川は、大断層である糸魚川－静岡構造線沿いに流れており、極めて脆い地質となっている。上流には多数の崩壊地があり土砂生産源となっている。特に春木川流域は、上流の左岸側に七面山崩壊地を擁し、本川・各支川に多量の不安定土砂が存在しており、土砂生産が非常に著しい流域として知られる¹⁾。

近年、激しい降水（豪雨や豪雪）に伴う表層すべり型の斜面崩壊が多発している。表層すべり型斜面崩壊のすべり厚さは数十cmから1m程度である。表層すべり型斜面崩壊の原因として、降雨による土塊自重、含水比の増加、および、含水比の増加に伴うサクシオン低下に起因する粘着応力度の低下などが挙げられる。表層すべり型斜面崩壊を想定する場合、拘束圧は極めて低く（すべり厚さが1mの時10 kPa程度）、そのような圧力条件でのせん断試験の精度は低く、得られたせん断強度パラメータの不確定性は増大する。さらに、拘束圧が低い状況下では斜面の安定性評価に粘着応力度は極めて大きく影響する²⁾。

本研究では、粘着応力度 c と飽和度 S_r を確率変数とみなし、平面すべり（無限斜面法）に対する崩壊確率を誘導している。また、池の沢流域を対象に、GISを用いて斜面の安定性評価を行い、観測対象斜面を抽出する。そして、現地観測、現地調査、気象データ収集により、土砂動態等の把握を試み、考察を述べている。

2 池の沢渓流の地形特性の考察（文献・GIS等による地形・勾配把握）

写真-1¹⁾は平成23年の池の沢における土砂災害被害状況である。写真-1から自家用車を流下させるほどの規模であったことがわかり、危険性のある渓流であることがわかる。

また、池の沢流域界内は30度以下がほとんど無く、傾斜が非常に急な地域であるため、要対策箇所を抽出するのに勾配区分図だけでは難しいといえる他、池の沢の流下方向の末端部には住宅や宿泊施設等の保全対象があり、対策が必要である。

3 GISを用いた池の沢流域の斜面安定性と危険斜面の抽出

池の沢流域において、無限斜面法に表面流、不飽和浸透力を考慮した斜面安定解析を行い、降水量に伴う斜面崩壊確率の上昇、土砂流出量期待値（リスク）を算出する。

無限斜面法はすべり面の形を斜面表面に平行な直線（平面）と仮定した安定計算法で、滑動長さがすべり深さに対して、十分大きい斜面の安定計算に用いる。安全率は、すべり面の単位幅に働く垂直応力の下で、土が発揮し得るせん断抵抗力 S と滑動を抑えるのに必要なせん断抵抗力 T の比 F 、すなわち $F = S/T$ で定義される。なお、一般に、雪崩においてもすべり面が想定された崩壊発生機構が考えられている。特に、すべり面が積雪内部にある場合が表層雪崩、すべり面が地面にある場合が全層雪崩と呼ばれる（図-1参照）⁵⁾。図-2のような地表面とすべり面が平行で、降水が地表から浸透し、浸透し切れなかった水は表流水となって流れていく表層すべり型の斜面モデルを想定する。

斜面勾配 θ ・単位表土厚 H_t ・単位斜面長 l ・単位奥行き d （それぞれ1mとする）の土塊自重 W （間隙率 n 、湿潤密度 ρ_t 、重力加速度 g 、水の密度 ρ_w ）の斜面安定性を考える。本研究では、斜面安定解析（無限斜面法）に不飽和土の浮力 P_v 、浸透力 J を新たに導入する。次に降水量 h_q のもとで表面流 h_w を生じ、土を飽和させつつ浸透したときの深さ h_{sat} を導入する。そして、安全率 F が1となる表土層のす

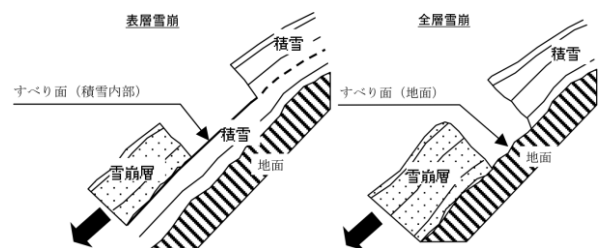
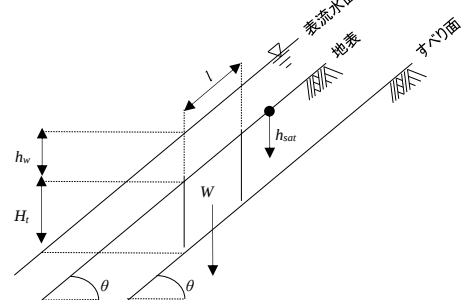
写真-1 池の沢被害状況¹⁾図-1 表層雪崩と全層雪崩の概要⁵⁾

図-2 想定した斜面モデル

キーワード 崩壊確率 雪崩 現地調査

連絡先 〒400-0016 山梨県甲府市武田 4-3-11 TEL.055-220-8528 E-mail : karaki@yamanashi.ac.jp

べり面での粘着応力度 c_F を求め、正規分布 $f(c)$ (粘着応力度 c , 標準偏差 σ_c) の c_F 以下となる確率を崩壊確率 P_f とすることにより斜面の安定性を評価するものとした⁶⁾。

$$W = \{\rho_w \cdot h_w + \rho_t \cdot (H_t - h_{sat}) + (\rho_d + n \cdot \rho_w) \cdot h_{sat}\} \cdot g \cdot l \cdot \cos \theta \cdot d \quad (1)$$

$$P_v = \rho_w g h_w + \rho_w g \cdot S_r \cdot H_t \cdot l \cdot \cos \theta \cdot d \quad (2), \quad J = P_v \sin \theta \quad (3), \quad h_{sat} = \frac{h_q - h_w}{(1 - S_r) \cdot n} \quad (4)$$

$$F = \frac{c \cdot l \cdot d + W \cos \theta \tan \phi - P_v \cos \theta \cdot \tan \phi}{W \sin \theta + J} \quad (5), \quad P_f = \int_0^{c_F} f(c) dc \quad (6), \quad c = A \cdot S_r \cdot (1 - S_r)^\lambda \quad (7)$$

表-1 入力パラメータ

土粒子の密度[g/cm3]	ρ_s	2.63
初期飽和度[%]	S_r	27.16
間隙比	e	1.21
間隙率[%]	n	54.75
乾燥密度[g/cm3]	ρ_d	1.19
湿潤密度[g/cm3]	ρ_t	1.34
内部摩擦角[°]	ϕ	22.54
粘着応力度[kN/m2]	c	19.19
c の標準偏差[kN/m2]	σ_c	1.92
自然含水比[%]	w	12.50
A	A	96.9755
λ	λ	1.00

表-1 に想定した斜面モデルにおける土質パラメータを示した。表-1 の数値は現地採取・室内実験等で求めた値 (c の標準偏差は c の 0.1 倍とした²⁾) である。図-3 に一面せん断試験から求めたせん断強さ～垂直応力関係 (初期飽和度 27.16%) を示す。図-3 から表-1 の粘着応力度 c を算出した。 A および λ は Montrasio ら³⁾ が飽和度との関係に基づき提案した式 (7) のパラメータで実験により求められる。図-3 の実験時の粘着応力度と飽和度を通して A と λ を設定すると、図-4 のように $c \sim S_r$ 関係が描かれる。これにより粘着応力度の飽和度変化を考慮することができる。

図-5 (a), (b), (c) に図-4 の粘着応力度の飽和度変化を考慮して求めた飽和度 $S_r = 93[\%]$, $93.5[\%]$, $94[\%]$ における池の沢流域域内における崩壊確率分布を示す。図-5 (a),

(b), (c) を比較すると (a) から (b), (b) から (c) にかけて急激に変化していることがわかる。わずかに飽和度 1% の変化で崩壊確率が大きく増加している。

また、図-5 (a) ～ (c) の○で囲んだ領域が飽和度の増加とともに崩壊確率が増加し池の沢に合流することがわかる。この斜面が崩壊すると土石流となる恐れがあると判断し、この斜面末端にて現地観測を行う。

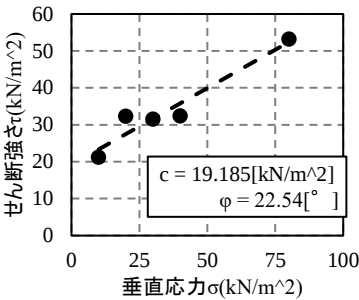


図-3 一面せん断試験結果

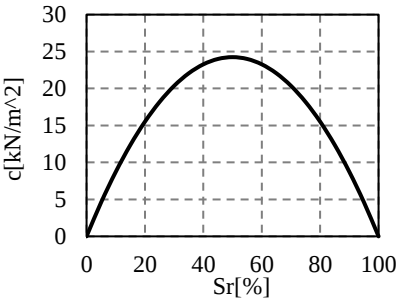
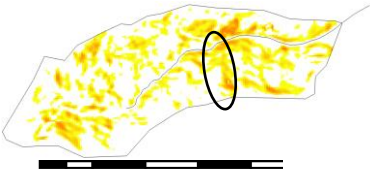


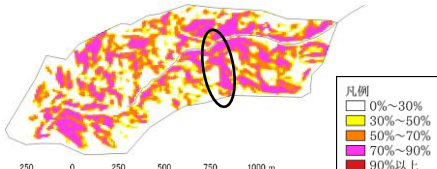
図-4 粘着応力度と飽和度の関係



(a) 飽和度 $S_r = 93 [\%]$



(b) 飽和度 $S_r = 93.5 [\%]$



(c) 飽和度 $S_r = 94 [\%]$

図-5 崩壊確率分布と観測斜面の抽出

4 危険溪岸斜面における無人カメラによる観測

写真-2 (a) ～ (d) に、抽出した危険溪岸斜面の対岸に無人カメラを設置し、撮影した結果を示す。

写真-2 (a) が 2016 年 1 月 17 日 12 時 28 分の晴天時の斜面状況であり、岩や流木等がある様子がわかる。土砂生産が極めて多い地域の特徴といえる。

写真-2 (b) が翌日 (24 時間後) の 2016 年 1 月 18 日 12 時 28 分であり、積雪により斜面が覆われたことがわかる。

写真-2 (c) が約 11 日後の 2016 年 1 月 29 日 11 時 28 分の積雪状況で、雪解けが進んでいる。しかし、まだ 1 月であり、地下水位を大きく上昇させているとは考えていない。雪解けに伴う浸透は、地表面から地中に向かって飽和度を上昇させていると考える。

写真-2 (d) は写真-2 (c) の 1 時間後に雪崩が発生したことを示している。これにより、発生時刻が 1 月 29 日 12



(a) 2016/1/17 12:28



(b) 2016/1/18 12:28



(c) 2016/1/29 11:28



(d) 2016/1/29 12:28

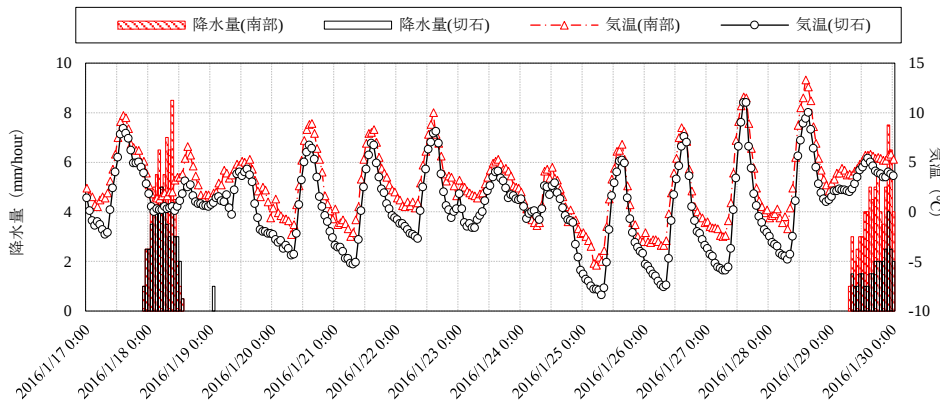
写真-2 無人カメラによる撮影結果

時（誤差±30 分）と特定できた．抽出斜面が雪崩等の斜面崩壊の危険性を有する斜面であることがわかった．

なお，2016 年 2 月 5 日に本観測対象斜面周辺で現地調査を行ったが，他に雪崩を起こした地点を視認することは出来なかった．このことから，抽出斜面は，より雪崩等を発生させやすい斜面であったと考えている．

5 積雪から雪崩発生までの気温と降水量の時系列変化

図-6 (a)，(b) に最寄のアメダス（南部及び切石）⁷⁾ の 2016 年 1 月 17 日から 29 日までの気温・降水量と位置関係を示す．18 日午後までの降雪後，29 日 6 時まで降水は無い．28 日の 14 時頃が気温が最も高い．また，29 日に比べて 28 日の方が気温変化が激しい．これは 29 日は雨天の影響で気温が上がりにくかったと考えられる．29 日の雪崩までの間に融雪は進んでいるが，気温変化の小さい 29 日に雪崩が起こっていることから雪崩の直接的な誘因は 29 日朝 6 時～12 時にかけての 1～3mm/hour 程度の降水が主として寄与したと考える．すなわち，弱い雨でも雪崩は発生するといえる．警戒する必要がある，広く周知する必要があると考える．



(a) 2016 年 1 月 17 日から 2016 年 1 月 29 日までの気温と降水量



図-6 アメダスとの位置関係と気温・降水量の時系列変化

6 斜面崩壊（雪崩）前後の溪岸斜面形状の時系列的変化の把握

抽出した危険溪岸斜面は崩壊する可能性が高かったことから，雪崩前から斜面形状を継続的に観測していた．

写真-3 に斜面形状の計測状況を示す．池の沢と斜面との合流点を開始点（基点）とした．計測日は①2015 年 11 月 5 日，②11 月 23 日，③12 月 7 日，④2016 年 1 月 8 日，⑤1 月 15 日，⑥2 月 5 日である（雪崩の際（1 月 29 日）も現場近くにはいた（下流側宿泊施設で待機していた）が，雨が降っており，危険性が高かったため，この日は現地調査を行っていない）．

図-7 に計測結果を示す．図-7 から①，②，⑤の斜面形状が近く，平常状態と判断すると，③，④が堆積状態，⑥が侵食状態と判断される．

このことは継続的な現地調査により斜面状態を評価できることを示している．また，侵食状態⑥は雪崩後である．

29 日の雪崩は平常状態⑤（15 日）から約 2 週間後に発生している．18 日の降雪から 29 日までは地表面が雪で覆われており，少なくとも斜面上方からの土砂の供給・堆積は無かったと考えられる．

侵食状態を示したのは①～⑥のうち⑥のみであることから，侵食状態をもたらした主因は雪崩の影響と考えている．また，写真-2 (d) から雪崩を生じた雪は土を含んでいることがわかる．表層の雪だけでなく土を侵食した雪崩（全層雪崩）である．ただし，図-6 に示すように 29 日の雪崩後においても降水が続いている．この雪崩後の降水に伴う斜面形状変化の可能性は否定出来ない．



写真-3 ポール横断状況

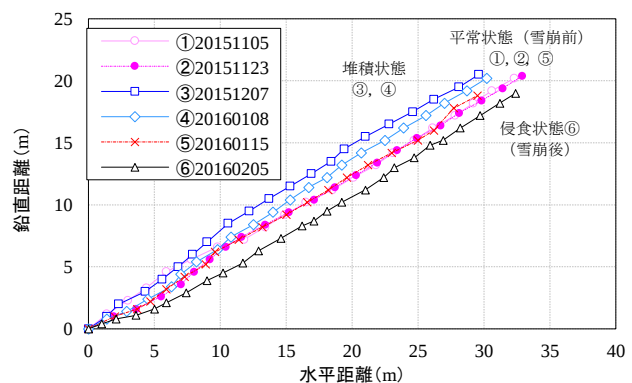


図-7 現地調査による斜面形状の時系列変化

7 長期的現地調査による気象と土砂移動に関する一考察

抽出した危険渓岸斜面を斜面崩壊（雪崩）後も継続的に観測した。図-8 は、2015 年 11 月上旬から 2017 年 1 月上旬までのポール横断測量から求めた時系列的な斜面形状の面積変化（水平距離 0～25[m]の範囲）を示している。同時に最寄のアメダス（切石）の気象データの降水量・累計降水量を示している。

斜面面積の変化に関して、累計降水量の変化勾配が大きいと（時間当たりの降水量が多い）斜面面積の変動が起きていると考えられる。6 章では池の沢溪岸では継続的な現地調査により斜面状態を三態にて評価できるとした事と、降雨によって斜面形状が変化していることから、降雨は斜面形状の変化において堆積・浸食両方の働きをすることが分かる。

今後、時系列的な降水量だけでなく他の気象データやサクションとの関係を算出出来る方法を確認し、より精度の高い土砂移動の関係性を見つけていきたい。

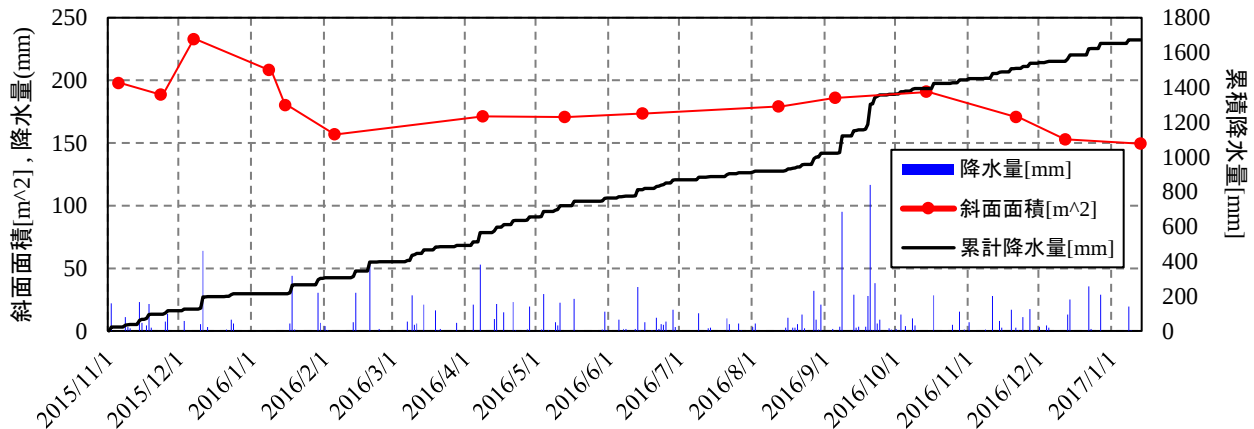


図-8 2015 年 11 月上旬～2017 年 1 月上旬の池の沢溪岸の気象（切石）と斜面形状の面積変化関係

8 おわりに

本研究では、早川町春木川流域右支溪池の沢を対象とし、GIS を用いて危険斜面を抽出し、無人カメラを設置した。その結果、雪崩（2016 年 1 月 29 日）の撮影に成功した。加えて雪崩発生時の気象（降水量及び気温の時系列変化）に関する考察を行い、気温が低い 1 月の時期でも融雪等が進み、1～3mm/h の弱い雨で雪崩が発生したことを示した。弱い雨でも雪崩の発生を警戒する必要がある、広く周知する必要がある。また、継続的に現地調査（ポール横断）を行うことで、雪崩前と雪崩後の斜面形状の把握に成功した。この結果、現在の斜面状態が平常、堆積、侵食状態の何れであるかを判断できることを示した。この結果、29 日の雪崩は平常状態から発生し、表層の雪だけでなく土を侵食した雪崩（全層雪崩）であることを示した。今後、29 日の降水に伴う崩壊確率分布と比較し当該斜面における特性を示す必要がある。

謝辞：本研究は、国土交通省河川砂防技術研究開発公募地域課題分野（砂防）（研究代表者：荒木功平）により実施されました。

また、国土交通省関東地方整備局富士川砂防事務所や株式会社早野組の関係者各位、石井篤志氏（日本工営株式会社（前 山梨大学工学部））を始めとする荒木研究室 OB・現役学生など多くの方に多大なご支援・ご協力をいただきました。ここに深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省：平成 27 年度富士川砂防事務所の事業内容，
http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000621888.pdf（2016 年 1 月 13 日閲覧）
- 2) 荒木功平，石野孝樹，北村良介，斜面崩壊確率の変動に関する一考察，第 2 回土砂災害に関するシンポジウム発表論文集，pp.161-164，2004.
- 3) 大久保佳美，善功企，陳光齊，笠間新伸：降雨による粘着力の低下を考慮した斜面崩壊危険度評価，土木学会西部支部研究発表会(2011.3)
- 4) 国土地理院：基盤地図情報ダウンロードサービス，<http://fgd.gsi.go.jp/download/>，（2016 年 1 月 13 日閲覧）
- 5) 独立行政法人土木研究所 つくば中央研究所 土砂管理研究グループ 雪崩・地すべり研究センター 寒地土木研究所 寒地道路研究グループ 雪氷チーム：土木研究所資料 豪雪時における雪崩斜面の点検と応急対策事例，p.2-2，2010.
- 6) 荒木功平，奥村謙一郎，安福規之，大嶺聖，ハザリカヘマンタ：降雨に伴う表流水と浸透力に着目した緩勾配斜面の安定解析と土砂量評価，土木学会第 67 回年次学術講演会講演論文集，pp.727-728，2012.
- 7) 国土交通省気象庁：過去のデータ検索，<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>，（2016 年 4 月 2 日閲覧）