

平成30年7月豪雨を誘因として 福井県内に発生した斜面崩壊の現地調査— UAVによる空撮と斜面安定解析—

辻野 和彦¹・小林 泰三²

Field survey of slope failures occurred in Fukui prefecture
due to heavy rainfall in July 2018
-Aerial photograph by using UAV and slope stability analysis-

Kazuhiko TSUJINO¹ and Taizo KOBAYASHI²

Abstract

From 4th to 8th July 2018, heavy rainfall was recorded in the Reihoku district in Fukui Prefecture. In particular, rainfall of 30 mm/hour continued for 6 hours from midnight on 7th July, causing a rapid rise in total precipitation. In this report, we describe the result of investigating the shape of slope failures caused by this heavy rainfall from aerial photographs taken by Unmanned Aerial Vehicle. In addition, soil mechanics parameters were determined by laboratory tests on soil samples collected from the site and change in safety factors of the slopes before and after the rainfall was evaluated by a slope stability analysis.

キーワード：平成30年7月豪雨，斜面崩壊，UAV，土質試験，斜面安定解析

Key words: heavy rainfall in July 2018, slope failure, UAV, soil test, slope stability analysis

1. はじめに

2018年7月3日，台風7号が東シナ海を北上し，4日には台風が日本海を北東に進み4日15時には日本海中部において温帯低気圧に変わった。その後，8日にかけて梅雨前線が本州付近に停滞

し，南から暖かく湿った空気が流れ込んだため，大気の状態が非常に不安定となり前線の活動が活発となった。このため，福井県上空の大気の状態も非常に不安定となり大雨となった。福井県では7月4日から8日までのアメダスにおける総降水

¹ 福井工業高等専門学校 環境都市工学科
Department of Civil Engineering, National Institute of
Technology, Fukui College

² 立命館大学 理工学部 環境都市工学科
Department of Civil and Environmental Engineering,
Ritsumeikan University

本報告に対する討議は2020年11月末日まで受け付ける。

量は、九頭竜で424.5 mm、三国で417.0 mm、越廼で330.0 mmに上った。福井地方気象台がまとめた総降水量の分布を図1に示す。なお、アメダス観測点の三国や越廼などでは、7月7日0時頃から30 mm/hour程度の降雨が6時間継続し、総降水量を急激に増加させたことが報告されている¹⁾。

平成30年7月豪雨では、広島県、岡山県、愛媛県などの中国・四国地方において甚大な被害が発生した^{2,3)}。また、京都府や兵庫県などの関西地方に加え^{4,5)}、岐阜県においても土砂災害が発生している⁶⁾。また、福井県においても斜面や擁壁の崩壊、河川護岸に被害が発生した。筆者らは平成30年7月豪雨地盤災害調査団(地盤工学会関西支部・福井地質調査業協会・NPO福井地域地盤防災研究所)のメンバーとして、斜面災害に関する現地調査を実施した。

本調査団が現地調査を実施した7つの対象斜面の位置と地名を図1に示す。これらのうち、本報では筆者らが調査を行った3つの斜面災害事例(同図に示す太字の地名)について、小型 UAV を用いて空撮を行い、3Dモデルやオルソモザイク画像、数値表層モデル(DSM: Digital Surface Model)を生成した。また、UAVで空撮を行った

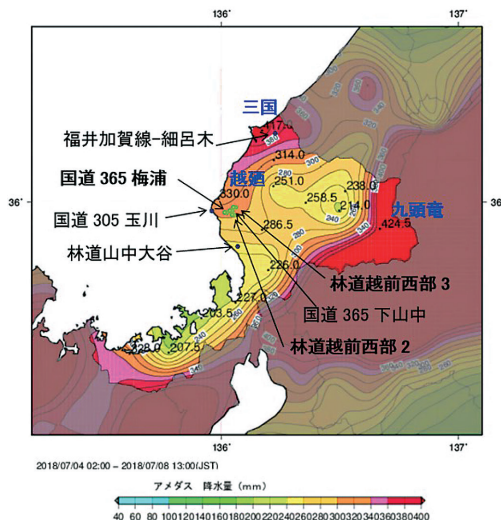


図1 2018年7月4日から8日にかけての福井県の総降水量¹⁾に調査地名等を加筆

崩壊斜面のうち、国道365号(梅浦)の切土斜面と林道越前西部2号(上山中)の盛土斜面の2斜面について試料の採取を行い、土質特性を調べた。さらに、簡易ヤンプ法による安定解析を行い地盤力学的な観点から崩壊の発生メカニズムを考察した。本報告では、UAVを用いた調査結果と斜面安定解析結果について述べる。

2. UAVによる斜面崩壊の調査

2.1 本調査で使用した UAV

本調査で使用した UAV は、DJI 社製の Phantom 3 Professional (以下、Phantom 3)である。本調査で使用した UAV を図2に示す。Phantom 3は、高解像度のカメラ(4,000画素×3,000画素)、リアルタイムのHDビデオ(4K)の撮影ができることが特長として挙げられる。機体サイズは、590 mm×590 mmで機体重量1,280 gと小型かつ軽量であり、バックパックに一式を収納できるため可搬性にも優れている。さらに、約2 kmの距離からリアルタイムで撮影状況の映像を表示でき、操縦無線機から手を放してもその場でホバリングする。また、離陸・帰還・着陸操作を全自動で行う自動帰還モードなど、操作性と安全性が考慮されている。このようなマルチコプターは、垂直離着陸が可能であり、目的に沿った空撮を自分自身の手で実行できる高い自由度を持つ。

なお、本報で示す調査箇所は全て山間部にあり、携帯電話の電波が届かない場所であった。そこで、



図2 本調査で使用した UAV (Phantom 3)

オーバーラップは80%以上、サイドラップは60%以上を目標として UAV の手動飛行による空撮を行った。ここで、オーバーラップとは UAV の進行方向に対する写真の重複度である。また、対象が大きい場合は、複数のコースを飛行させて空撮を行う必要がある。サイドラップとは、このコース間の写真の重複度である。

2.2 越前町梅浦の切土斜面崩壊

対象斜面は、国道365号線沿い(越前町梅浦)の切土斜面(以降、切土斜面と称す)である。崩壊幅が約50 m、斜面長が約50 m、平均傾斜角が約43°、最大崩壊深度は3~4 m程度であった。以前から設置されていた待受け擁壁やモルタル吹付工にも変状・崩壊が見られた。現地を確認した結果、地質は風化した流紋岩から構成されており、すべり面となった強風化岩と風化岩の境界で多量の湧水が確認された。また、図3に示す通り崩壊箇所の上方に段丘地形が広がっており、段丘面およびこれより上方の斜面より雨水が流入・浸透した可能性が示唆される。

調査当日は車線規制が行われていなかったため、通行車両に注意しながら空撮を行った。現地



図3 斜面崩壊(梅浦)周辺の地形図

において斜面を確認した際、急勾配に見えたため、UAV のカメラの光軸を水平に保ち、水平方向に UAV を移動させながら崩壊斜面の撮影を行った。また、鉛直方向にコースを取り、UAV を上昇させた際には、適宜、UAV を斜面に近づけて空撮した。

70枚の画像から Agisoft 社製の PhotoScan を用いて3次元点群データを生成し、3Dモデル、DSM、オルソモザイク画像を作成した。なお、本調査は1日に多くの箇所を調査する必要があったため、GNSS 測量を同時に実施することができなかった。なお、Phantom 3などの小型 UAV で撮影した画像には GNSS の単独測位の情報が EXIF に記録される。なお、EXIF とはデジタルカメラで撮影した画像データに撮影条件に関する情報(メタデータ)を追加して保存できる規格である。この EXIF 情報に記録される高度には、GPS Altitude(楕円体高)と Relative Altitude(気圧センサーによる対地高度)の2種類があり、PhotoScan は前者を参照して3Dモデルを生成する。3次元形状復元を行う際、GPS Altitude よりも Relative Altitude の方が安定しているため、フリーソフトウェアの ExifTool を用いて GPS Altitude を Relative Altitude に書き換え、さらに飛行開始地点付近の標高(10 m メッシュ DEM を参照)を与えた。梅浦の飛行開始地点の高度は142.3 m とした。

本調査では EXIF 情報を補正した空撮画像を用いて3Dモデルを生成したが、最近では RTK システムユニットを搭載した UAV も開発されている⁷⁾。現地に立ち入ることが難しい状況で、地上基準点を設置することはさらに難しいため、今後は、位置精度を確保できる機体を用いたい。

3Dモデル等を計算した結果を図4(A)から(C)に示す。その結果、滑落崖などの形状が明瞭になっていた。しかし、オルソモザイク画像には多くの欠損が見られた。これは、正面から水平方向に空撮を行ったため、崩壊斜面中腹にある植生背面の画像が得られなかったこと、風によって樹冠が揺れていたことに起因するものと思われる。また、(B)図に示す DSM には欠損が見られないが、こ

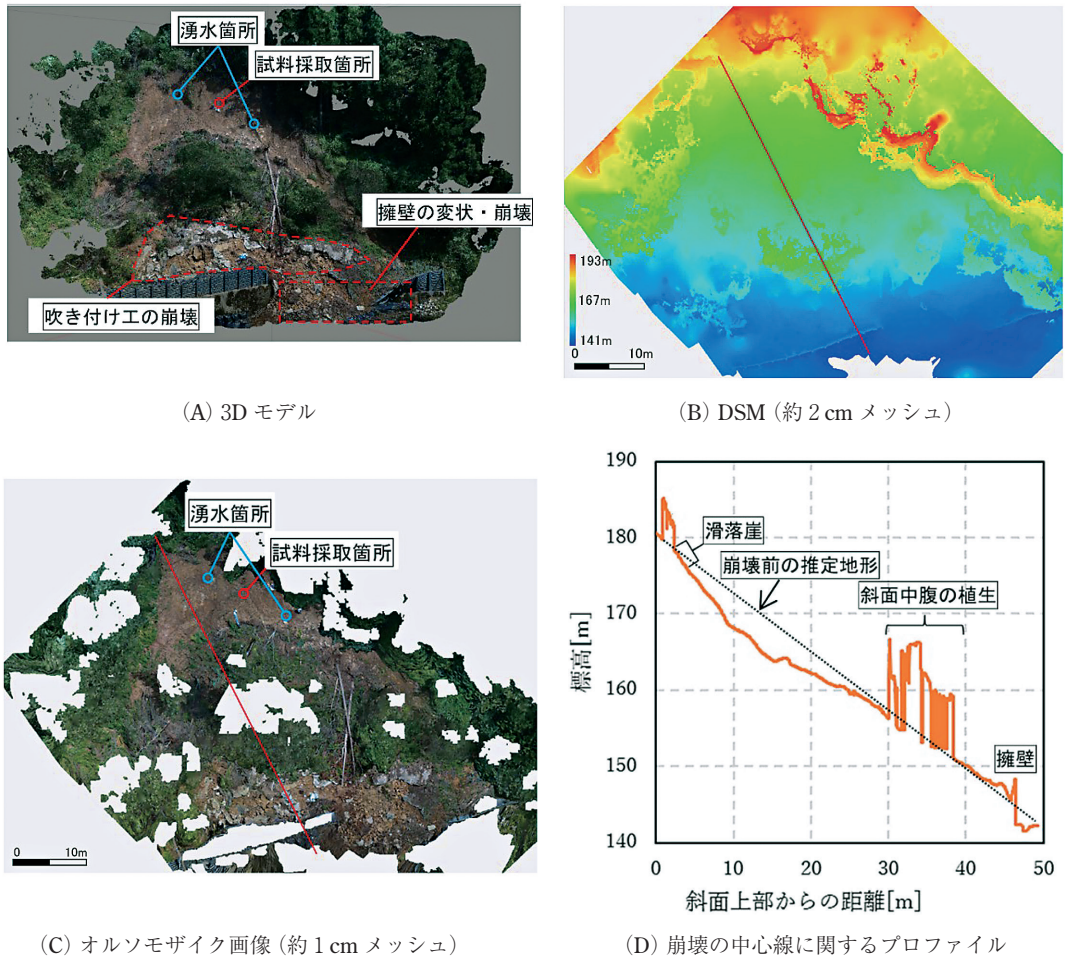


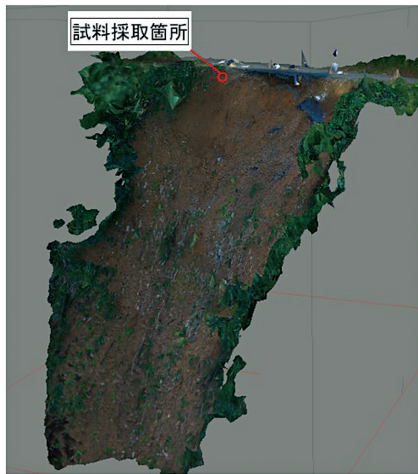
図4 梅浦の切土斜面崩壊に関する3Dモデル等の生成結果

これは内挿処理により補間しているためである。なお、前述の湧水の位置は(A)図および(C)図に示した。崩壊の中心線(図4(C)の赤線)に関する断面図を作成した結果(図4(D))、滑落崖から擁壁までの形状を捉えることができた。なお、図中の斜面中腹のノイズは植生の影響を受けたものである。滑落崖の斜面勾配は約 55° であることが判った。このDSMのプロファイルの精度を確認するために、道路台帳の等高線(1m間隔)を参照し、同図中に崩壊前の推定地形をプロットした。その結果、斜面上部から道路面までの高さを概ね捉えていることが確認できた。

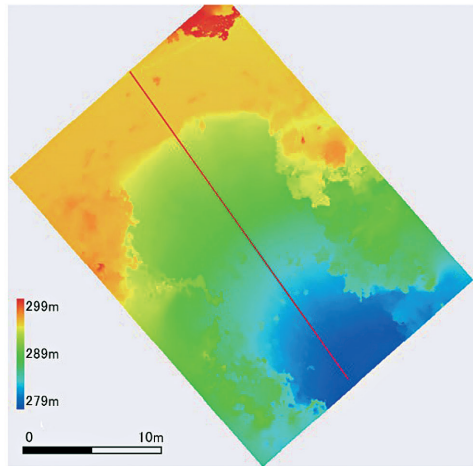
2.3 越前町西部2号線の盛土斜面崩壊

本斜面は、林道越前西部2号(上山中)の盛土斜面(以降、盛土斜面と称す)である。林道の路肩を含む盛土斜面の崩壊であり、崩壊幅が約10m、斜面長が約10m、最大崩壊深度は1~2m程度であった。崩壊面には礫混じりの砂質土が非常にゆるい状態で露出しており、十分な締固めが行われた盛土というより捨土のような状況と思われる。とくに路面水の集まりやすい条件とは言えないが、道路上を流下してきた路面水の一部がこの斜面へ流出したことが誘因となったと考えられる。

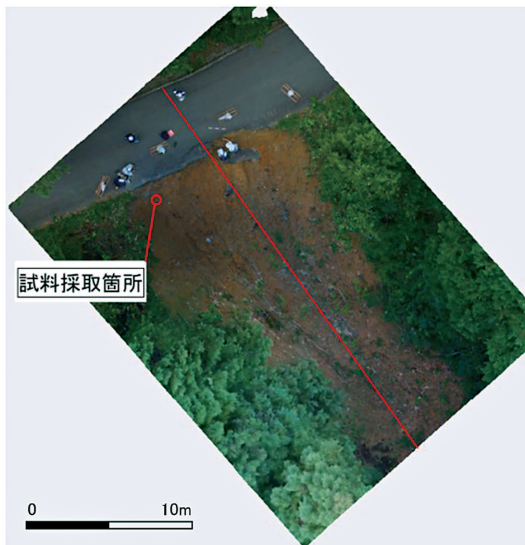
崩壊の横幅が約10mと比較的小規模であり、



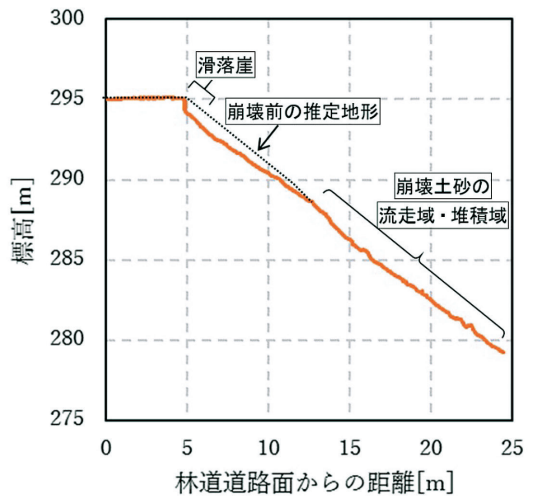
(A) 3D モデル



(B) DSM (約 6 mm メッシュ)



(C) オルソモザイク画像 (約 6 mm メッシュ)



(D) 崩壊の中心線に関するプロフィール

図 5 越前西部 2 号線の斜面崩壊に関する 3D モデル等の生成結果

上空から鉛直方向に空撮を行った。なお、飛行開始地点の高度は 295.8 m とした。写真の撮影枚数は 36 枚であり、比較的少なかったため PhotoScan では最高品質にて計算を行った。なお、高や中などの品質も選択することができるが、オルソモザイク画像は撮影した際の地上画素寸法、DSM は三次元点群の密度 (最高・高・中) に依存して決定される。最高品質の場合は、撮影時の地上画素

寸法のサイズで DSM を生成することができる。したがって、この場所については 6 mm メッシュの DSM を生成することができた。

図 5 (A) に 3D モデル、(B) に DSM、(C) にオルソモザイク画像を生成した結果を示す。比較的、近接して空撮を行ったため、細密に崩壊形状を捉えることができています。また、崩壊の中心線付近でプロフィールを求めた結果を図 5 (D) に

示す。アスファルトが流された箇所(滑落崖付近)から傾斜角(約 43°)がほとんど変わらずに崩落していることが判る。また、同図中にも地形図の等高線から読み取った崩壊前の推定地形を示した。変状の無かった林道の道路面の高さが、推定地形と合っていることが確認できた。

2.4 越前町西部3号線の盛土斜面崩壊と土石流

この崩壊箇所に関しては、土石流化に伴い崩壊規模が大きかったため、林道の崩壊(滑落崖付近)および下流の土砂や流木の堆積区域の2箇所から

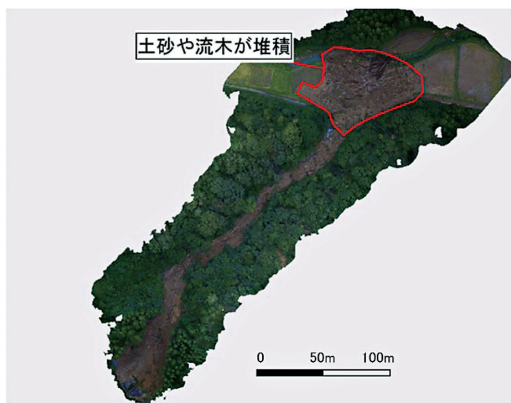
空撮を行った。図6は下流側から上流側に向かって全景を空撮した結果を利用し3Dモデル等を生成した結果である。なお、この場所の飛行開始地点の高度は205.6 mと設定した。現地では土石流区間の全長が不明であったため飛行高度を約100 mとし、撮影範囲を広くとって空撮し43枚の画像を得た。Google Earth®において、土石流発生前(図6(A))と土石流発生後(図6(B))の比較を行った。図6(A)の画像取得日は2015年4月26日となっており、右側に別の崩壊も確認できる。なお、図6(B)を見ると、下流の水田の区画で若干のズレが見られた。また、現地で多くの土砂



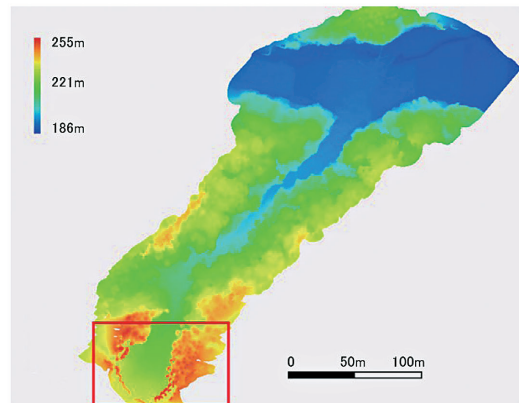
(A) 土石流発生前の地形 (Google Earth®)



(B) 土石流発生後の地形



(C) オルソモザイク画像 (約2.8 cm メッシュ)



(D) DSM (約5.6 cm メッシュ)

図6 越前西部3号線の斜面崩壊と土石流に関する3Dモデル等の生成結果

や流木の堆積を確認したが、図 6 (A) および (C) の谷筋を見ると、幼齢のスギが流されたことが判る。図 6 (C) に示す崩壊箇所全景のオルソモザイク画像は約 2.8 cm メッシュ、図 6 (D) に示す DSM は約 5.6 cm メッシュで生成することができた。

図 7 (A) は、林道崩落箇所(滑落崖付近)から飛行して得られた空撮画像のみを用いて生成したオルソモザイク画像である。この場所の飛行開始地点の高度は 254.8 m とした。飛行高度は約 50 m とした結果、約 1.8 cm メッシュのオルソモザイク画像を生成できた。同図の赤線で示す場所について、プロファイルを生成した結果を図 7 (B) に示す。滑落崖の傾斜角は約 35.3° であった。

2.5 空撮による現地調査のまとめ

平成30年7月豪雨を誘因として発生した斜面崩壊について3箇所の斜面崩壊を対象として UAV を用いて空撮を行った。今回の空撮は、1箇所あたり15分程度で実施した。基本的にはバッテリー1本で斜面1箇所を調査することができた。ただし、越前西部3号線の林道の盛土斜面崩壊と土石流に関しては、全長が長かったため滑落崖付近と土石流の堆積域から上流側に向かっての2方向から空撮を行った。安全面を考慮すると周囲や UAV を監視する人員も必要であるが、少人数で空撮作業を実施することができた。

また、得られた画像から3Dモデル等を計算し

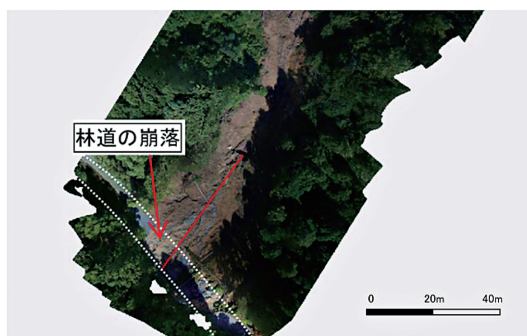
た。前述の通り、今回は並行して GNSS の RTK 測位を実施することができなかったため、一般的な空撮による測定の誤差(検証点で約 5 cm 以内)と比較すると今回の調査による誤差は大きいと言わざるを得ない。しかし、ExifTool によって楕円体高を対地高度に書き換え、飛行し始めた高度を与えることにより計算した DSM と崩壊前の地形(1 m 間隔の等高線図)を比較したところ、概ね地形形状を捉えていることが確認できた。

3. 切土斜面と盛土斜面の安定解析

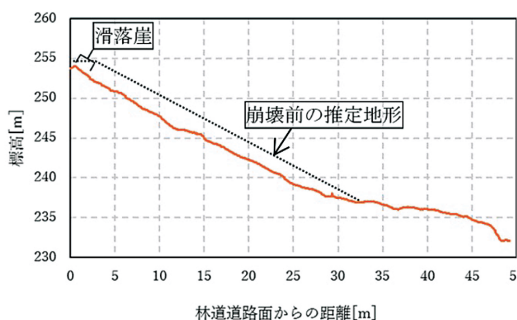
3.1 対象斜面の土質特性

検討対象とした崩壊斜面は、前述の国道365号(梅浦)の切土斜面と越前町林道越前西部2号(上山中)の盛土斜面の2斜面である。本調査では、これらの斜面において露出したすべり面の表層部で試料採取を行い、粒度試験、土粒子密度試験、含水比試験等の土質試験を実施した。試料採取は複数箇所で行うべきであるが、フレッシュなすべり面が露出している箇所が限られていることや作業安全面を考慮して、本調査では、いずれの斜面もすべり面上方に位置する1か所から試料を採取した。表1に土質試験で得られた基本的土質特性を示す。試料の採取日は、豪雨の襲来から2か月あまり経過した2018年9月11日であり、含水比や飽和度は、崩壊前後の状態とは異なっている可能性が高い。

本調査ではさらに、剛性の円筒形薄肉サンブ



(A) 滑落崖付近のオルソモザイク画像(約1.8 cm メッシュ)



(B) 滑落崖から土砂の流送区域のプロファイル

図7 崩壊の中心線に関するプロファイル

表1 採取した試料の基本的土質特性

項目		国道365号線(梅浦) (切土斜面)	林道西部2号(上山中) (盛土斜面)
粒度特性	工学的分類 [JGS0051]	細粒分質礫質砂 [SFG]	細粒分質砂 [SF]
	礫分：砂分：細粒分 [%]	23 : 59 : 18	1 : 55 : 44
	平均粒径 D_{50} [mm]	0.11	0.48
	最大粒径 [mm]	19.0	9.5
土質特性	湿潤密度 ρ_t [g/cm ³]	1.590	1.968
	土粒子密度 ρ_s [g/cm ³]	2.574	2.532
	間隙比 e [-]	1.089	0.496
	含水比 w [%]	28.3	16.2
	飽和度 S_r [%]	68.3	83.0
強度特性	内部摩擦角 ϕ_d [deg]	16.5 (14.5)	24.6 (27.1)
	粘着力 c_d [kN/m ²]	12.32 (10.18)	15.12 (4.77)

粒度特性：礫分(粒径2~75mm)、砂分(粒径75 μ m~2mm)、細粒分(粒径75 μ m以下)
強度特性：(カッコ)内の数値は、浸水供試体のデータ

ラー(内径60mm、高さ20mm、肉厚1.5mm、先端テーパ加工)を用いて採取した不攪乱試料に対して定圧一面せん断試験を行い、排水せん断強度(c_d , ϕ_d)を求めた。本試験では、採取したときの自然含水状態の試験に加え、供試体を飽和化・浸水させた状態での試験も実施し、降雨による浸水前後による強度定数の変化を調べた。

一面せん断試験によって得られた各試料の破壊線と浸水前後の圧密排水せん断強度(c_d , ϕ_d)を図8に示す。本試験では、浸水によって切土斜面で約2割、盛土斜面で約7割の粘着力の低減が見られた。浸水によるサクシオン低下で見かけ粘着力が小さくなることは、既に多くの研究によって明らかにされていることであり、本試験結果もそれに従うものと考えられる。一方、内部摩擦角については、本試験でも浸水による多少の増減が見られたが、そのメカニズムについては学術的には結論は得られていない⁸⁾のが現状である。両試料は、いずれも砂質土に分類される土質であるものの、強度的には粘着力と内部摩擦角の両方を有する中間土に位置づけられる。

3.2 簡易ヤンプ法に基づく崩壊斜面の安全率算出と崩壊メカニズムの検討

本節では、調査を行った斜面の安定解析を行い、土質力学的な観点から崩壊に至ったメカニズムを検討する。本報では、調査によってすべり面形状

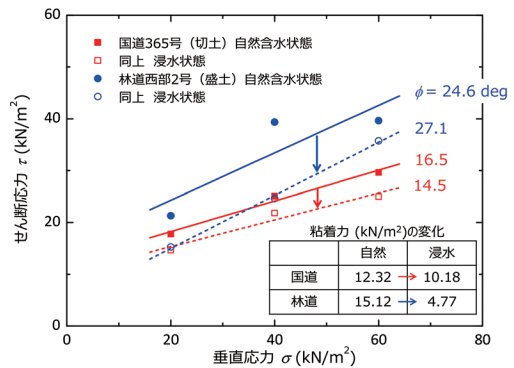


図8 一面せん断試験結果(浸水による破壊線の変化)

が判明していることを受け、非円弧すべり面に適用できる簡易ヤンプ法⁹⁾による解析を行った。

簡易ヤンプ法では、図9に示すように、すべり土塊を n 個(本解析では切土斜面： $n=12$ 、盛土斜面： $n=8$)に分割し、 i 番目のスライス側面に作用する水平方向の力 H_i がすべり面全体として釣り合うという条件： $\sum (H_{i+1} - H_i) = 0$ と、スライス両側面に作用する鉛直方向の力 V_i が釣り合うという条件： $V_{i+1} - V_i = 0$ に基づいて、安全率 F が次式のように定式化される。

$$F = \frac{1}{\sum W_i \tan \theta_i} \sum \left\{ \frac{cb_i + (W_i - u_i b_i) \tan \phi}{\cos^2 \theta_i (1 + \tan \theta_i \tan \phi / F)} \right\} \quad (1)$$

ここに、 c ：粘着力、 ϕ ：内部摩擦角、 W_i ：スラ

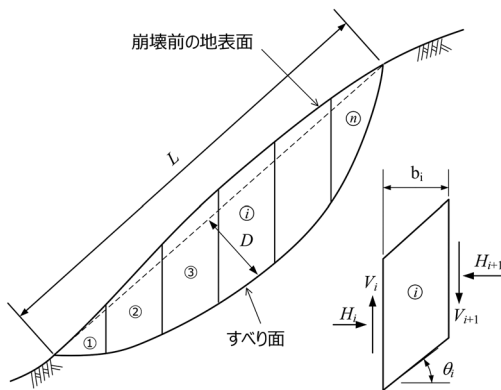


図9 すべり土塊の分割

イスの土塊重量, $\Delta\theta_i$: スライス底面の傾斜角, b_i : スライス幅, u_i : スライス底面に作用する水圧である。

式(1)には右辺にも F が含まれているため, 両辺の F が許容誤差内に一致するまで繰り返し計算を行って F を決定する。なお, 簡易ヤンプ法では, $V_{i+1} - V_i = 0$ を仮定することで計算を簡略化しており, この仮定に対する解の補正を行うために, F に補正係数 f_0 を乗じて最終的な安全率が求められる。本研究では, Abramson ら¹⁰⁾の近似式に従って, 次式に示す補正係数 f_0 を用いることにした。

$$f_0 = 1 + 0.5 \left\{ \frac{D}{L} - 1.4 \left(\frac{D}{L} \right)^2 \right\} \quad (2)$$

ここに, L : 斜面長(すべり面上端と下端を結んだ直線の長さ), D : 最大崩壊厚さ(すべり面が最も深い点と斜面長を結んだ垂線の長さ)であり(図9参照), 上式は c と ϕ を有する材料(いわゆる $c-\phi$ 材)に対して適用される。

降雨による斜面崩壊は, 雨水の浸透によるせん断強度(粘着力)の低下, すべり土塊の自重増加, 地下水位形成による間隙水圧の発生・増加が複合的に影響することが知られている。これらの影響を考慮するためには, 浸水前後の強度定数変化に加え, 地下水位の分布やすべり土塊の自重の変動を解析に取り入れる必要がある。しかしながら本調査では地下水位に関する情報が得られておら

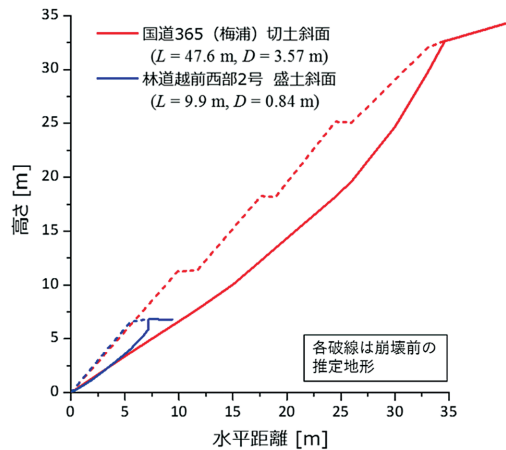


図10 安定解析に用いたすべり面断面図

ず, 本報では, 一面せん断試験によって実測した浸水前後の強度定数変化に着目し, それが斜面の不安定化にどのように影響したのかを明らかにすることにした。

安定解析には, 表1に示した土質パラメータ(湿潤密度, 内部摩擦角, 粘着力)と図10に示すすべり面断面図を用いた。前述したように, 本報では地下水位(間隙水圧)は想定せず, 採取した試料の浸水前と浸水後のそれぞれの強度定数を用いて安定解析を行った。また, 浸水後には土の密度は増加するはずであるが, それを予測することは困難であるため, 便宜上, すべり土塊の湿潤密度は浸水前と同じ値を用いた。なお, 表1は, 崩壊後しばらく経過した後に採取した試料の土質特性であり, ここでは「浸水前」とは呼ぶものの, 降雨前(崩壊前)の状態と必ずしも一致するものではないことを付記しておく。

図10の断面図は, 両斜面の崩壊部下端を原点にとり, 実線をすべり面(2章で説明した UAV 写真測量による実測値と対策工検討時の図面に基づく。崩積土が残っていた部分は推測), 点線を崩壊前の地表面(道路台帳の等高線地図に基づく推測)で表している。偶然ではあるが, 崩壊前の地表面の平均傾斜度は, 切土斜面が 43.2° , 盛土斜面が 43.3° とほぼ一致しており, とともに急な傾斜をもつ斜面であった。一方で, 盛土斜面に比べて

切土斜面の斜面長や最大崩壊厚さは大きく、崩壊規模が大きい。

安定解析によって算出された両斜面の安全率を表2に示す。いずれの斜面も浸水前後の強度定数の変化によって安全率が低下していることが分かる。切土斜面については、浸水前の安全率が1を下回っており、計算上では、強度変化が生じる前であっても安定性を維持できないことを示す結果となった。浸水状態では、さらに安全率は低下した。

図11は、浸水前後の試料の強度定数の変化と、計算上 $F=1$ となる c - $\tan \phi$ 関係線を図示したものである。浸水前の強度定数は、 c - $\tan \phi$ 関係線より上方に位置しなければならないが、切土斜面については下方に位置していることが分かる。本斜面は、過去にも崩壊を繰り返していた可能性があり、待受け擁壁やモルタル吹付工が設置されていたことから、以前から危険視されてきた不安定性の高い斜面であったことがうかがえる。ただし、降雨前には斜面は安定していたことは事実であり、本計算結果と整合しない。推測の域を出ない

表2 安全率の計算結果

浸水条件	国道365号線(梅浦)切土斜面	林道西部2号(上山中)盛土斜面
浸水前	0.768	1.638
浸水後	0.650	0.966

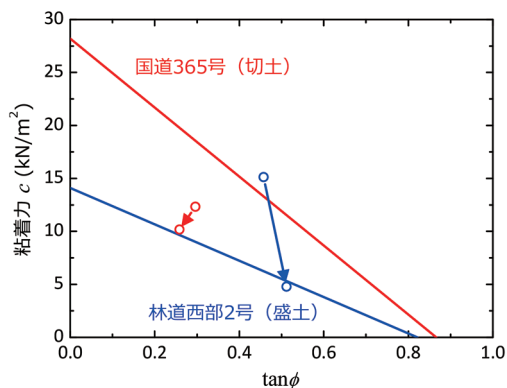


図11 採取資料の強度定数変化と $F=1$ となる c - $\tan \phi$ 関係線

が、降雨前(安定時)の実際の含水状態と試料採取時の含水状態の不一致により強度定数を過小評価していること、あるいは、すべり面に強度のばらつきがあり、採取した試料の強度がすべり面全体の平均的なものより小さかったことが可能性として考えられる。

一方の盛土斜面については、すべり面がほぼ全面露呈しており、一部コンクリート殻等の混入は認められたが、目視では土質の不均質性は特段確認されなかった。ある程度均質な土質によって構成された盛土斜面であることを想定すると、表1の土質特性を代表値とすることの信頼性は切土斜面よりは高いと考えられる。表2に示すように、盛土斜面については、降雨前に1.638であった安全率が、降雨後に0.966となる計算結果を得た。図11からも分かるように、 c - $\tan \phi$ 関係線より上方にあった強度定数のプロットが、浸水することで同関係線 ($F=1$) 付近に移動している。このことは、強度定数の変化のみで崩壊に至った可能性を示唆している。斜面への降雨浸透過程として、雨水の鉛直浸透、あるいは斜面上流からの地下水流入によってすべり面近傍の土がまず飽和化し、次いで地下水位が上昇するという段階的なプロセスがあるとすると、斜面の不安定化(安全率低下)にも、粘着力低下が先行して影響し、次いで間隙水圧の発生・増大が影響するという順序があると考えられる。このプロセスを踏まえると、当該盛土斜面は、地下水位の形成・上昇を待たずに、雨水がすべり面に到達し、粘着力が低下した段階で崩壊した可能性を示唆している。実際には、粘着力低下も地下水位発生も時間的・空間的に分布すると考えられるので、このように単純化した考え方がすべてに当てはまる保証はないが、本事例は、強度定数の変化のみで斜面の安全率が大幅に低下し、それによって崩壊に至った可能性があることを示す結果と言える。

4. おわりに

本研究では、平成30年7月豪雨を誘因として発生した2か所の斜面崩壊現場を事例とし、UAVによる写真測量で生成したすべり面形状と採取し

た試料の土質試験結果に基づいて、簡易ヤンプ法を用いた安定解析を行った。

土質試験においては、浸水供試体による一面せん断試験を実施し、雨水の浸透によって粘着力が低下することを明らかにした。さらにその結果を安定解析に反映させて、浸水前後の斜面の安全率の変化を評価した。降雨前でも安全率が1を切るという不合理な結果となった斜面もあったが、本検討を通じて斜面の不安定化に粘着力低下が大きく影響することが示された。

雨水浸透による強度定数変化の計測が行える試験機が一般化していない中で、その影響をどのように反映していくかがひとつの課題になると考えられる。加えて、土質の不均質性の高い現場では、原位置で試料を採取したとしても、その現場の特性を代表するものには必ずしもならず、場合によっては不適切な安定性評価に繋がる危険性があることを改めて実感する教訓にもなった。精緻化を目指す数値解析技術が進展する中で、入力パラメータをどのようにして得るのかという根本問題はまだ解決していない。斜面の安定性を合理的に評価するためには、測量技術や解析技術の発展もさることながら、地盤調査の合理化・高度化が不可欠と考えられる。

崩壊斜面の現地調査において UAV を活用すれば、比較的簡単にかつ安全に地形情報を得ることができるようになる。本報では、現地調査における UAV 活用法のひとつとして、UAV 空撮と安定解析を結び付けた調査の事例を報告した。防災分野においても ICT 技術の導入が進む中、斜面の現地調査や危険度診断の効率化・高度化の一助になれば幸いである。

謝辞

本災害調査は、NPO 福井地域地盤防災研究所 荒井克彦氏、国土防災技術株式会社福井支店 古

林孝史氏、株式会社デルタコンサルタント 梅田祐一氏の協力を得て実施しました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 福井地方気象台：平成30年7月4日から8日にかけての大雨に関する福井県の気象速報，pp.1-20，2018.
- 2) 海堀正博，他18名：平成30年7月豪雨により広島県で発生した土砂災害，砂防学会誌，Vol.71，No.4，pp.49-60，2018.
- 3) 笹原克夫，他14名：平成30年7月豪雨によって四国地方で発生した土砂災害，砂防学会誌，Vol.71，No.5，pp.43-53，2019.
- 4) 小林 浩：平成30年7月豪雨における取組と解析事例紹介，写真測量とリモートセンシング，Vol.57，No.6，pp.262-263，2018.
- 5) 里深好文・小杉賢朗・中谷加奈・正岡直也・岡野和行・笠原拓造・柳崎 剛・山口雄一：平成30年7月豪雨による関西における災害，砂防学会誌，Vol.71，No.4，pp.38-48，2018.
- 6) 田中隆文・土屋 智・湯川典子・古田 清・中澤耕司：2018年（平成30）7月の長雨により岐阜県郡上市で発生した山腹崩壊と崩土の流出，砂防学会誌，Vol.71，No.5，pp.38-42，2019.
- 7) 和久津龍太・村木広和・陳 斌・王 丁丁・李 秀英：DJI 社製 PHANTOM 4 RTK 性能に関する検討，平成30年度日本写真測量学会秋季学術講演会講演概要集，pp.71-74，2018.
- 8) 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度予測，第3章 豪雨時における斜面崩壊のメカニズム，pp.35-48，2006.
- 9) Janbu, N.: Slope stability computations, Embankment-Dam Engineering, Casagrande Volume, John Wiley and Sons, pp. 47-86, 1973.
- 10) Abramson, L.W., Lee, T.S., Sharma, S. and Boyce, G.M.: Slope stability and stabilization methods (Second edition), John Wiley and Sons, pp. 360-362, 2001.

(投稿受理：平成31年3月6日
訂正稿受理：令和元年11月7日)

要 旨

2018年7月4日から8日にかけて、福井県嶺北地方において豪雨が記録された。とくに、7月7日の深夜から6時間、30 mm/hourの雨が降り続いたことにより、総降水量が急激に増加した。本報告において、筆者らは、UAV（無人航空機）による空撮画像を用いて、この豪雨によって発生した斜面崩壊の形状を調査した結果について述べる。さらに、土質力学パラメータは、崩壊斜面から収集した試料の室内試験によって決定し、降雨前後の安全率の変化は、斜面安定解析によって評価した。