

2.1 大規模土石流・深層崩壊・天然ダム等異常土砂災害の被害推定・対策に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：土砂管理研究グループ（火山・土石流チーム）

研究担当者：石塚忠範、清水孝一、木下篤彦、藤村直樹、
清水武志、高原晃宙、泉山寛明

【要旨】

深層崩壊および火山地域で発生する大規模土石流の発生箇所の抽出手法、また土石流による施設の効果評価の一例として破損した堰堤の現地調査手法を検討した。深層崩壊発生位置の抽出について、水文地形特性及び重力性変形地形に着目した結果、水文地形もしくは最小固有値比と斜面勾配比のうち少なくとも 2 要素に対して、ある閾値を設定すると概ね良好な抽出が可能であったが、要素の組合せ方法に課題が残っている。深層崩壊発生規模を空中電磁波探査の岩盤内情報から推定を試みるために比抵抗のパターンを調査した結果、深層崩壊や岩盤クリープ斜面では、風化岩盤による浅部低比抵抗と地下水で飽和した新鮮な岩盤による深部高比抵抗のパターンが確認された。火山地域において土石流が未発達な谷を越える箇所の抽出手法について検討を行い、溪流沿いの谷と尾根の比高及び土石流の水理量を用いると概ね抽出が可能であった。設定する水理量の差異による影響について詳細な検討が必要である。土石流によって破損したコンクリート砂防堰堤の内部ひび割れ分布を調査した。非破壊調査によって堤体の一部ではあるものの砂防堰堤を対象とした調査では初めて連続する内部ひび割れの 3 次元分布を計測できた。

キーワード：深層崩壊、岩盤クリープ、空中電磁探査、火山地域、土石流、地中レーダ探査、内部ひび割れ分布

1. はじめに

本研究課題は、深層崩壊に関する発生位置や規模の推定手法の提案・向上、天然ダムに対して土砂災害防止法に基づく緊急調査の支援技術の提案、大規模土石流については火山地域の未発達な谷での危険性の把握、さらに構造物対策の技術向上などを実施することを予定している。平成 26 年度は、深層崩壊および火山地域で発生する大規模土石流の発生箇所の抽出手法を検討した。また、構造物の現地調査手法について検討した。

深層崩壊は発生頻度が小さいものの通常の土砂災害に比べて規模が大きいことから、大災害につながる可能性が高い現象である。そのため、発生箇所や規模の推定手法が減災上重要となる。そこで、当チームの既往研究の考え方を援用し、より小規模な斜面単位の深層崩壊発生危険度評価を行なった。1) 斜面勾配、2) 重力変形の痕跡である岩盤クリープによって特徴的に見られる地形、3) 集水面積などの水文特性、の 3 つの要素の組み合わせから深層崩壊発生箇所の危険度を評価した。評価した斜面を実際の崩壊跡地と比較し、用いた手法の有効性を検討した。さらに、深層崩壊の規模については、どの程度の深さから斜面が崩壊するかによって災害を引き起こ

す危険性が異なるため、深層崩壊の深さを調査するためには広域における地中の情報を取得する必要がある。そこで、過去に深層崩壊が発生した斜面を対象として、空中電磁探査を用いて地下の情報を取得し、深層崩壊の発生を引き起こす可能性が高い深さを推定するための比抵抗のパターンについて調査した。

一方、火山地域の大規模土石流については、平成 25 年度に伊豆大島において土石流が発生し下流域で災害が生じたことを契機に研究に取り組み始めた。火山地域は、通常の山地とは異なり、発達していない谷がよく見られる。伊豆大島では、谷が未発達で尾根が明瞭でないために、土石流が尾根を乗り越え、被害が生じた。そこで、土石流が尾根を乗り越える可能性がある箇所を抽出する手法について検討した。

土砂災害の対策のひとつは構造物対策である。外力に対する施設の効果を評価する場合、砂防堰堤が破壊した実態を把握することは重要である。現地において亀裂が生じたコンクリート内部の状態を計測する手法が確立されていないため、地中レーダ探査による調査を試みた。

2. 地形の変状に着目した深層崩壊の発生の可能性のあ

る危険斜面抽出手法の開発

2.1 背景と目的

土砂災害の代表的な現象として挙げられる斜面崩壊は、崩壊の形態によって、表層崩壊や深層崩壊等に分けられる。深層崩壊は、発生頻度は低いと考えられているものの、生産される土砂量が大きく、崩壊後ただちに流動化して生じる土石流や、河道を閉塞する天然ダムの形成及びその決壊による下流域への甚大な被害が懸念される。よって、事前に深層崩壊の発生の恐れのある箇所を精度よく抽出することは対策立案上重要である。

本研究では、深層崩壊の発生の恐れのある斜面を抽出することを目的とし、既往成果¹⁾で算出及び用いられている指標（水文地形特性及び重力性変形地形）を同様に用いて抽出の検討を実施した²⁾。

2.2 検討対象領域及び検討手法

本研究の対象領域は、天竜川水系鹿塩川流域（領家帯・三波川帯）、姫川水系浦川流域（珪長岩・火山岩）及び富士川水系早川流域（四万十帯）及び釜無川流域（花崗岩）である。

既往検討¹⁾において 50 m メッシュで作成した数値標高モデル（以下、DEM）を用いて水文地形特性及び重力性変形地形を抽出する手法が示された。本検討では、抽出対象領域を斜面単位としたため、1、2、5、10 m DEM を用いてそれぞれ同様の手法で抽出を試みる。なお、水文地形特性と重力性変形地形は、次のように取り扱う。

水文地形特性は、「勾配が急なほど深層崩壊が発生しやすい」、「集水面積が広いほど地下水が集まりやすく、深層崩壊が発生しやすい」という仮定を設け、斜面勾配と集水面積を DEM から算出し、それぞれの閾値以上のメッシュを抽出対象とする。

重力性変形地形は、深層崩壊が発生した領域の近傍では岩盤クリープ斜面が存在している³⁾ことから、当該斜面を抽出することを目的として、「斜面勾配比」と岩盤クリープに特徴的な地形の存在を評価するための「最小固有値比」を DEM から算出し、設定したそれぞれの閾値以上のメッシュを抽出対象（岩盤クリープ斜面）とする。

これらの各指標によって深層崩壊のおそれのある斜面を抽出しうるか検討するため、深層崩壊跡地において確認される指標の組み合わせ（図-1）について分析した。

2.3 結果

検討結果のうち、図-1 のように、3 要素全てが該当するメッシュのみを抽出した結果、及び最低でも 2 要素で閾値以上のメッシュを抽出した結果を図-2 に示す。後者

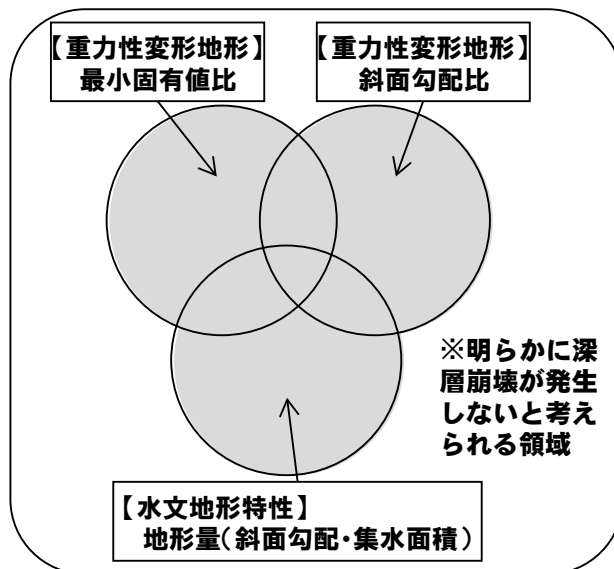


図-1 抽出要素

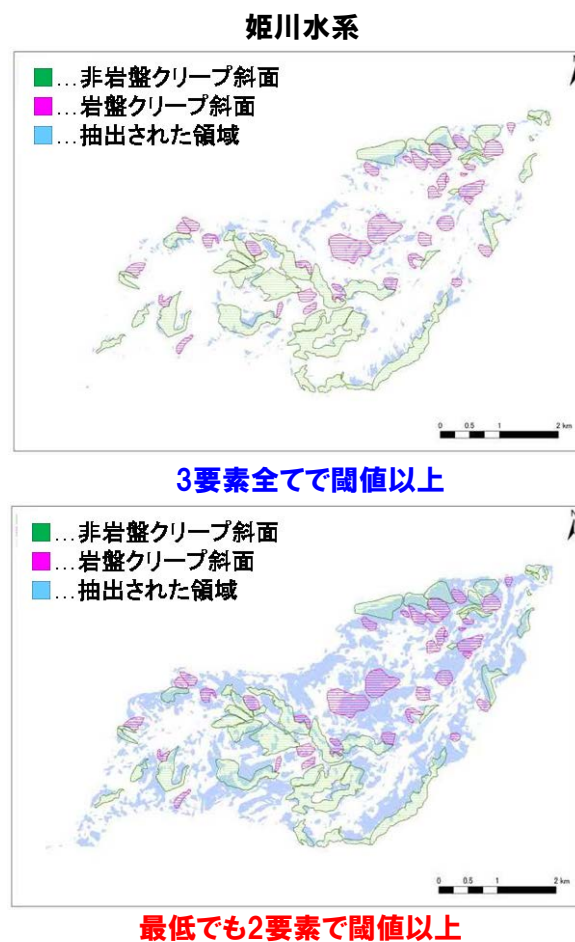


図-2 抽出結果

の2要素は、水文地形特性、重力性変形地形の最小固有値比、又は重力性変形地形の斜面勾配比のうち最低でも2要素が閾値を超過する場合を意味する。3要素全ての

抽出結果は、抽出された領域が極端に縮小されている一方で、最低でも 2 要素による抽出結果は微地形判読によって先に抽出していた岩盤クリープ斜面や深層崩壊跡地をカバーしていることが確認できた。

2.4 まとめ

本研究では、深層崩壊の発生の恐れのある斜面を抽出することを目的とし、水文地形特性及び重力性変形地形に着目して深層崩壊発生のポテンシャル斜面の抽出を試みた。その結果、以下の点について確認できた。

- ・水文地形もしくは固有値比と斜面勾配比が閾値以上となる条件で抽出すると概ね良好な抽出が可能であることがわかった。
- ・一方で、全ての指標に該当するとした条件で抽出すると、抽出領域が極端に縮小されるため対象斜面を適切に抽出できない可能性がある。よって、適切な指標の組み合わせを定量的に検討する必要がある。

3. 空中電磁探査を活用した深層崩壊の規模の推定

3.1 背景と目的

深層崩壊の発生には、岩盤の強度や岩盤中の地下水移動が関係するため、地中の情報を利用することが有効である。また、深層崩壊発生箇所を狭い領域で特定することは困難である。そこで、本研究では、岩盤内における地質・地下水情報を広域に取得できる空中電磁探査に着目し、深層崩壊発生規模の推定を目的として深層崩壊深さの推定に関する検討を行った⁴⁾⁵⁾。

3.2 検討対象領域及び検討手法

本研究の対象領域は、早川流域（山梨県）及び別府田野川流域（宮崎県）である。これらの流域で、深層崩壊発生斜面における岩盤クリープ斜面の鉛直方向の比抵抗パターンを分析した。

3.3 結果

対象領域での空中電磁探査結果を図-3 に示す。早川流域は、四万十帯瀬戸川層群の粘板岩と砂岩の互層が分布する。深層崩壊発生斜面と岩盤クリープ斜面の鉛直方向の比抵抗パターンは、浅部は高比抵抗帯を示し、密な比抵抗の等値線図をみると深部は相対的な低比抵抗帯であった。ボーリング結果では、浅部は地下水位が浅の割れ目が発達した風化岩盤で、深部は新鮮な岩が分布することが確認された。

別府田野川流域は四万十帯日向層群と日南層群の砂岩、泥岩とその互層が分布する。深層崩壊発生斜面と岩盤クリープ斜面の鉛直方向の比抵抗パターンは、浅部は高比抵抗帯を示し、密な等比抵抗コンターを介して深部の低

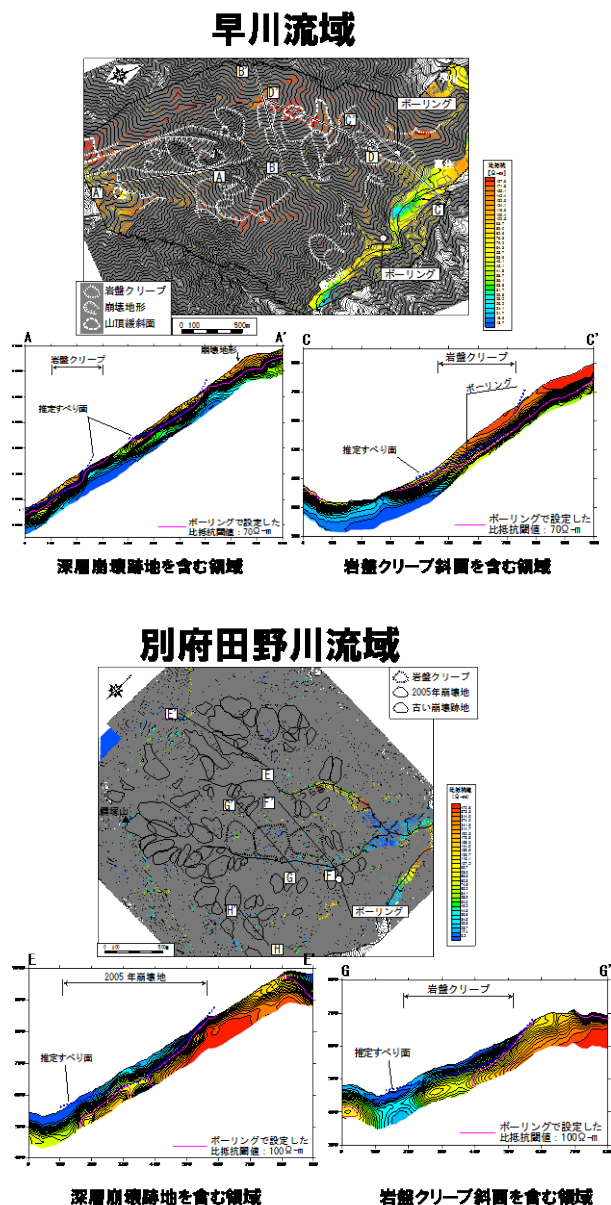


図-3 空中電磁探査結果

比抵抗と接しているケース（早川流域と同様）と浅部が低比抵抗帯を示し、深部に向かって高比抵抗になるケースが認められた。後者のようなケースを示した領域で実施されたボーリング結果では、浅部は割れ目が発達した風化岩及び多くの泥質岩、深部は新鮮岩が分布することが確認された。

3.4 まとめ

本検討では、比抵抗の鉛直分布のパターンを概ね2種類に分類できることがわかった。ひとつは浅部が高比抵抗帯で深部が低比抵抗帯を示す場合、もうひとつは逆の場合である。前者は、異なる地域・地質であっても深層

崩壊発生斜面や岩盤クリープ斜面で見られる場合があり、浅部の高比抵抗帯は割れ目が発達した風化岩盤で、深部は地下水で飽和した新鮮な岩盤であった。一方、後者は、浅部の低比抵抗帯は泥質分や風化岩盤で、深部の高比抵抗帯は新鮮岩が確認されることが多い。浅部が低比抵抗のパターンは、深層崩壊斜面や岩盤クリープ斜面では無い可能性も考えられる。

以上のことは、未解明な点は多いものの、空中電磁波探査による鉛直方向の比抵抗パターンを深層崩壊深さの推定などに応用できる可能性を示している。

4. 火山地域の尾根を乗り越えて土石流が流下するおそれのある溪流の調査

4.1 背景と目的

平成 25 年に伊豆大島の大金沢で発生した土石流の事例のように谷などの地形が未発達な火山地域においては、土石流が緩やかな尾根を乗り越えて流下するおそれがある。このような現象による被害を防止・軽減するには、土石流が尾根を乗り越えて流下するおそれのある未発達な溪流と、当該溪流における尾根を乗り越えて流下するおそれのある箇所を把握する必要がある。

このため、本研究は前述の課題を解決することを目標に地形に着目した評価手法と水理量に着目した評価手法を開発することを目的とする。前者は、地理情報システム上で評価できる 4.2 で示す地形指標を用いて火山地域の溪流の発達程度を開析程度によって表現し、また、土石流の発生の可能性を既存の土石流危険溪流調査結果で評価し、これらの情報の組み合わせによって土石流が尾根を乗り越えて流下する可能性のある溪流を抽出する手法とする。後者は、抽出された土石流危険溪流における土石流が尾根を乗り越えて流下するおそれのある箇所を水理量によって評価する手法とする。

4.2 土石流が乗り越えるおそれのある尾根を有する土石流危険溪流の調査手法

4.2.1 開析程度が小さい斜面にある土石流危険溪流の抽出手法

まず開析の程度を表現する地形指標を決定するため、開析状況が山麓斜面により異なる霧島山を対象に、DEM を用いて、地上開度や平均開度、起伏量など様々な地形指標の分析を行ない、開析程度が小さい斜面にある土石流危険溪流を抽出することを試みた。この結果、地形図等によって視認できる開析状況と地形指標の値を対比すると、起伏量によって比較的开析度合いを表現することができた。

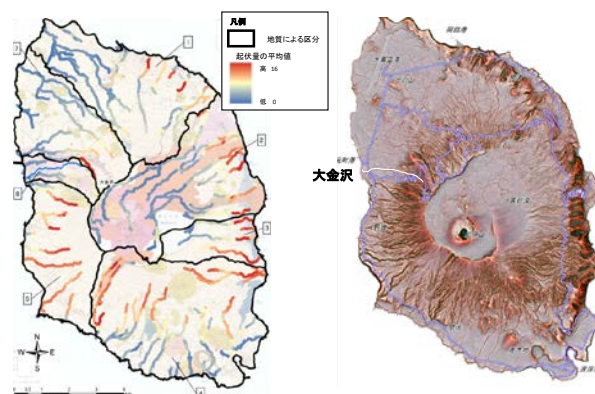


図-4 伊豆大島の溪流沿い起伏量（左）と赤色立体地図による開析状況（右）

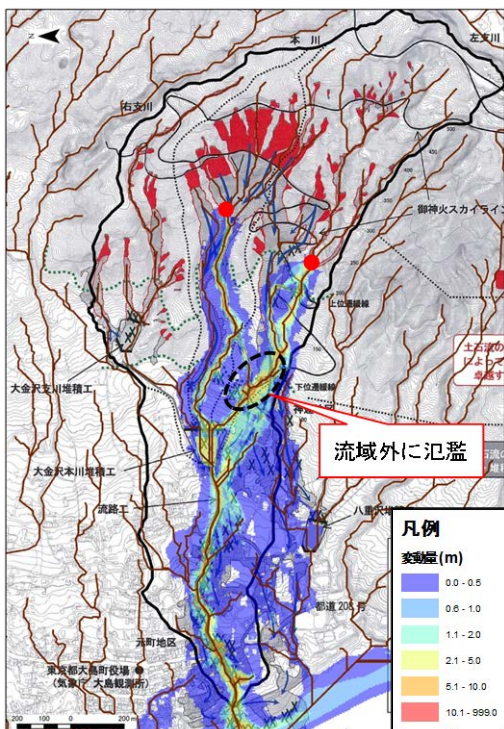
次に、土石流が乗り越える可能性が高い尾根を有する土石流危険溪流を地形によって評価する。土石流が流下する流路周辺の地形を評価すればよいため、DEM で生成した流路から一定幅の範囲にあるメッシュの起伏量を算出し、それらの平均値を得ることで溪流の流路沿いの開析状況の評価を行った。分析対象は、土石流が尾根を乗り越えて流下した実績のある伊豆大島とした。島内にある全土石流危険溪流の流路沿いに起伏量を計算し、土石流が尾根を乗り越えるおそれが高い溪流を評価した

(図-4)。土石流が尾根を乗り越えた大金沢は、開析が進んでいると考えられる島の南側の溪流と比較して開析が進んでいない溪流（未発達な谷）であることを示す結果となった。

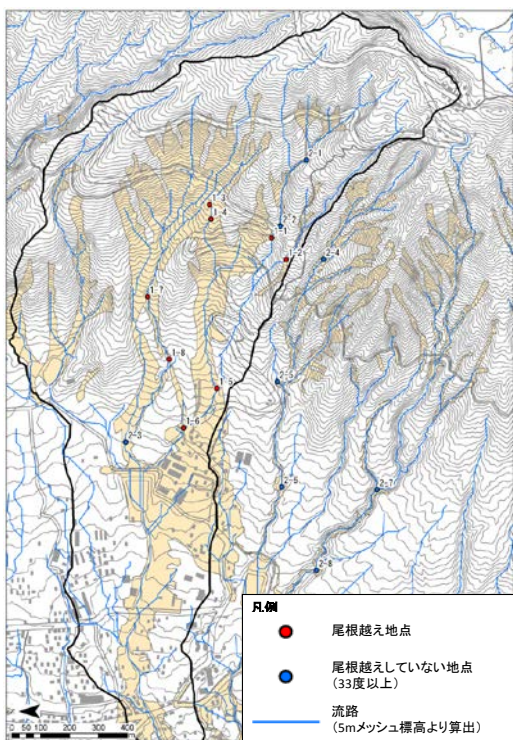
4.2.2 土石流が乗り越える可能性のある尾根の抽出

土石流が尾根を乗り越えるリスクは、4.2.1 で示したような地形の評価だけでなく、発生しうる土石流の外力の大きさに基づく評価が必要である。そこで、数値シミュレーションによって、土石流が尾根を越えて流下するリスクについて評価を行う。対象は土石流が尾根を乗り越えた実績のある大金沢とした。計算開始点は、土石流の流下区間における尾根の乗り越え地点を抽出することが目的のため、従前の土石流危険溪流の基準点の谷次数よりも低い谷次数の溪流の上流端に設定した。その点から与える流量は、計画対象雨量と災害時の実績雨量の2種類の雨量を用いて推定した値とした。数値計算に用いる計算モデルは流出形態や粒径の実績を考慮して泥流モデルとした。

図-5に示す数値シミュレーションの結果から、計画規模の降雨では、既往調査と同様に土石流が尾根を乗り越えて流下し流域界外に氾濫範囲を拡大させた箇所を確認できた。一方で、実績の氾濫範囲と比較して氾濫範



図一5 数値計算による土石流の尾根乗り越え箇所（石川ら⁵⁾に加筆）



図一5 水衝部における水頭比較結果

囲が過大に生じる傾向にあることから、より詳細な評価が必要となる。より詳細な評価の手法として、土石流が尾根を乗り越えるおそれがある湾曲部等において土石流が当たる尾根部直上流の全水頭と尾根部における位置水

表一1 土石流の尾根乗り越えリスク評価結果

地点	縦断状況 尾根の高さ z ₂ (m)	全水頭H (m)		判定 (H>Z ₂ : 乗り越える)
		計画対象雨量時	実績雨量時	
1-1	0.8	3.19	4.25	乗り越える
1-2	0.8	2.52	3.32	乗り越える
1-3	1.2	1.65	2.29	乗り越える
1-4	0.5	1.14	1.50	乗り越える
1-5	2.1	3.07	2.68	乗り越える
1-6	0.9	1.48	1.88	乗り越える
1-7	1.2	3.54	4.84	乗り越える
1-8	1.7	2.94	3.86	乗り越える
2-1	7.3	2.51	3.39	乗り越えない
2-2	0.3	3.53	4.84	乗り越える
2-3	2.0	1.13	1.44	乗り越えない
2-4	6.8	3.00	4.14	乗り越えない
2-5	10.6	2.12	2.33	乗り越えない
2-6	2.4	2.52	3.38	乗り越える
2-7	12.1	3.33	4.44	乗り越えない
2-8	15.4	2.96	4.00	乗り越えない

頭の比較を行った（図一6、表一1）。この比較により、大金沢で実際に土石流が尾根を乗り越えて流下した概ねの地点を抽出することができた。

4.3 結論

火山地域の地形が未発達な地域で、土石流が尾根を乗り越えるおそれのある土石流危険渓流を、起伏量を指標として抽出した。また、それらの渓流で数値シミュレーションを行うことにより、尾根を乗り越えるおそれのある箇所の抽出が概ね可能であった。しかしながら、計算した氾濫範囲が実績と比較して広めとなる傾向があることから、具体的な尾根を乗り越える地点の特定が困難な場合がある。これに対して、流路の湾曲部で水衝部の直上流における全水頭と尾根部の標高の比較を行うことにより、より精度の高い絞り込みが行える可能性がある。

今後は、4.2で示した手法について、計算条件の違いによる影響を確認するとともに他の火山地域での調査に適用して土石流が尾根を乗り越える地点の抽出を試みる。

5 破損した砂防堰堤の内部ひび割れ調査

5.1 はじめに

2014年7月9日長野県南木曾町において土石流が発生した。この土石流によって、不透過型コンクリート砂防堰堤である梨子沢砂防堰堤（以下、堰堤）の左岸の袖部が欠損した。さらに水通し部より左岸側の上袖部のコンクリートが打継目を境界に約13cmブロック状に押し出された。打継目に沿った縦の亀裂と上下段から成る横の亀裂が生じ、堤体の下部の表面には多数のひび割れが見られた（図一7）。これまで砂防堰堤の内部ひび割れ



図-7 南梨子沢堰堤のひび割れ位置

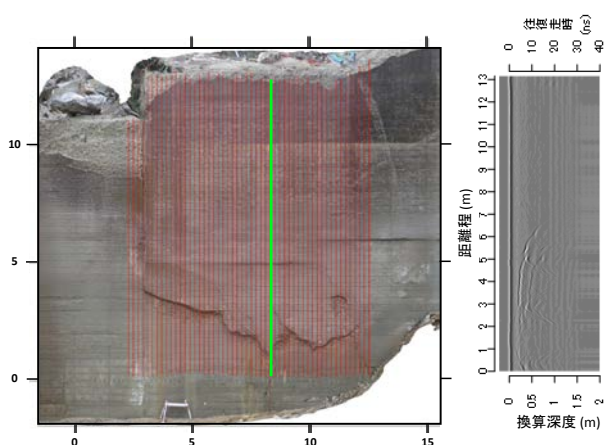


図-8 測線配置と一測線の計測結果

の分布や大きさを3次元的に調査した事例は見られない。そこで、非破壊検査により破壊・損傷した砂防堰堤（マスコンクリート）の内部に生じたひび割れの分布を計測する現地調査手法を見出すことを目標として、非破壊で調査可能な種々の調査手法を調べた結果、内部ひび割れの分布を3次元的に把握できる可能性が高い方法の一つとして地中レーダ探査（以下、GPR；Ground Penetrating Radar の略）が考えられた。そこで、GPRを用いて南木曾町の土石流で損傷した堰堤を対象としてコンクリート内部ひび割れ分布が計測可能か試行した^{7)、8)}。

5.2 方法

GPRは使用するアンテナの大きさによって送信されるインパルスの周波数帯域が変化する。使用した機材はGeophysical Survey Systems, Inc.製のUtilityScan-DFである。アンテナは中心周波数800MHzと300MHzの2種類が内蔵されている。通常はカート型の構造であるが、垂直に近い法面を測定するためアンテナを取り出して使用した。今回の調査ではレーダの中心周波

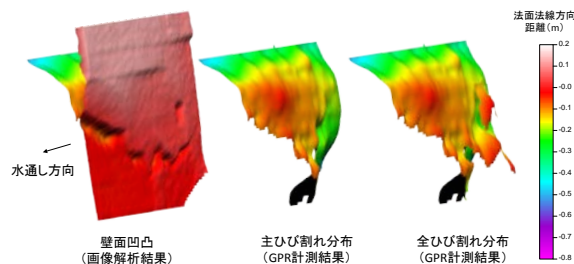


図-9 GPRによるひび割れ分布

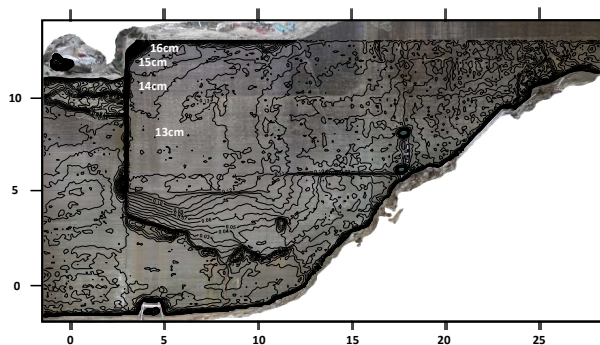


図-10 SLMによる下流側法面の変位

数800MHzを用いた。堰堤の下流側の法面の下部におけるひび割れの分布範囲を覆うように、天端から基部へ向かって測線を0.2m間隔で52本設けた。各測線における計測結果は電磁波速度9cm/nsを仮定しマイグレーション処理した後、反射波の走時を読み取って3次元のひび割れ分布を推定した。

5.3 結果

測定結果（中心周波数800MHz）の一例を図-8に示す。緑で図示した測線において、縦軸1m付近にある下流法面の下部におけるひび割れ開口部より上方に向かって連続的な境界面の分布が明瞭に分かる。これは開口部からコンクリートの内部へと低角で傾斜し分布するひび割れからの反射波と考えられる。全測線のマイグレーション処理結果から再構成したひび割れ面を図-9に示す。色は図-7の(0,0)の下流側法面の変位を0としたときの法面から法線方向の相対的な距離を表している。プラスは壁面の凹凸、マイナスはコンクリートの内部のひび割れ分布までの距離を表す。図-9の左図は図-10に示す画像解析による壁面の変位量図とGPRによるひび割れ分布を重ねている。図-9の中図は連続した主なひび割れ分布を、右図は主ひび割れからの派生も含めた全ひび割れ分布を示した。これらの図から、表面から観察できるひび割れは、最大約80cmの深度まで横断方向ほぼ一様に連続していることが分かる。また、GPRによって検出できたひび割れの上端は、横断方向に存在す

る2段の亀裂うち上段までである。さらに、右図をみると、特に左岸側には主なひび割れ以外にも比較的小さなひび割れが見える。

6. おわりに

平成27年度は深層崩壊の調査手法について一定の成果を得た。また、火山地域において土石流が乗り越える可能性がある流域界の調査手法や、破損した堰堤の調査手法など、新たな課題に取り組んだ。次年度は、本研究課題の最終年度であるため、これまでの要素技術の成果を体系的に整理する予定である。

7. 謝辞

姫川流域の深層崩壊跡地判読結果は、国土交通省北陸地方整備局松本砂防事務所にご貸与して頂いた。早川流域の空中電磁探査の計測データは、国土交通省関東地方整備局富士川砂防事務所にご貸与して頂いた。伊豆大島の地形データの使用を東京都に許可して頂いた。長野県南木曾町における砂防堰堤の調査については、長野県砂防課、同県木曾土木事務所に多大なご協力を頂いた。GPRの測定及びSfMの測定については共同で研究・調査を行った土木研究所地質・地盤研究グループの稲崎様、青池様および小川原様にご協力を頂いた。以上の関係各位に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 独立行政法人土木研究所：深層崩壊の発生の恐れのある溪流抽出マニュアル（案）、土木研究所資料第4115号、2009
- 2) 高原晃宙、瀬戸秀治、野池耕平、木下篤彦、清水孝一、石塚忠範、横山 修、磯貝尚弘：深層崩壊の発生の恐れのある斜面抽出のための検討事例、平成27年度砂防学会研究発表会、B-352、2015
- 3) 横山修、内田太郎、田村圭司、鈴木隆司、井上亨都：宮崎県鰐塚山地における深層崩壊と微地形・地質的特徴の関係、砂防学会誌、Vol.63、No.5、p.3-13、2011
- 4) 高原晃宙、瀬戸秀治、野池耕平、木下篤彦、清水孝一、石塚忠範、河戸克志、奥村稔、影浦亮太：空中電磁探査を活用した深層崩壊の発生の恐れのある斜面抽出のための検討、日本地球惑星科学連合2015年大会、STT52-P02、2015
- 5) 瀬戸秀治、清水孝一、木下篤彦、高原晃宙、石塚忠範、河戸克志、奥村 稔、影浦 亮太：空中電磁探査を活用した火山体調査事例、平成27年度砂防学会研究発表会 A-292、2015
- 6) 石川芳治ら：2013年10月16日台風26号による伊豆大島土砂災害、砂防学会誌、vol.66 No.5、p.61-72、2014
- 7) 清水武志、泉山寛明、藤村直樹、瀬戸秀治、石塚忠範、青池邦夫、稲崎富士：地中レーダ探査を適用した土石流による砂防堰堤の損傷に伴うひび割れ分布調査（速報）、平成27年度砂防学会研究発表会、B、186、2015
- 8) 青池邦夫、稲崎富士、清水武志、泉山寛明、藤村直樹：GPRによる土石流被災砂防堰堤の内部亀裂イメージング、物理探査学会（平成27年度春季）研究発表会、2015

A STUDY ON DAMAGE ESTIMATION AND MEASURES FOR SEDIMENT-RELATED DISASTERS CAUSED BY DEEP CATASTROPHIC LANDSLIDES

Budgeted : Grants for operating expenses General account

Research Period : FY2011-2015

Research Team : Erosion and Sediment Control Research Group (Volcano and Debris flow)

Author : ISHIZUKA Tadanori, SHIMIZU Yoshikazu, KINOSHITA Atsuhiko, FUJIMURA Naoki, SHIMIZU Takeshi, TAKAHARA Teruyoshi, IZUMIYAMA Hiroaki

Abstract : In fiscal 26 year, research topics about occurrence location of deep-catastrophic landslides (DCLs) and lahar overflow detection on ridges in volcanic region were studied. About extraction of location of DCLs, setting threshold value about hydrological index and geomorphic feature of mass rock creep is good method to extracting the place of actual location of DCLs. Airborne electromagnetic method was conducted in order to extract the pattern of change of relative resistance which indicate the slide location. About lahar overflow, geomorphological index indicate the small relative height between ridge and river bed in volcanic catchments which means the potential location of overflow. Debris flow rarely destroys concrete check dam. The state of interior destruction such as distribution of crack is important information to evaluate the effect of the structure. Ground Penetration Radar method was applied to survey the distribution of interior cracks in-situ.

Key words : deep-seated landslide, mass rock creep, airborne electromagnetic method, volcanic area, debris flow, lahar, ground penetration radar (GPR)