

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：水野秀明、清水孝一、木下篤彦、藤村直樹、清水武志、高原晃宙、泉山寛明、赤澤史顕

【要旨】

大規模土石流・深層崩壊・天然ダム等異常土砂災害に対応するため、それらのおそれのある危険箇所を明らかにし、危機管理および砂防施設の整備を着実に実施するための研究・技術開発を行った。危険箇所の把握のため、深層崩壊のおそれのある危険斜面の抽出技術や火山地域の土石流が尾根を乗り越えるおそれのある箇所を抽出する手法を開発した。危機管理に資する技術として、細粒土砂に注目した深層崩壊に起因する土石流の氾濫計算モデルを開発した。深層崩壊が天然ダムを形成した場合において、土石流の氾濫範囲を緊急に推定する計算プログラムの開発・改良を行った。施設整備に資するため、現行の基準に基づく設計外力に対して、どの程度の外力まで限界状態設計法により設計が可能であるか評価を行った。大規模な土石流による破壊の評価を行うため、砂防堰堤の損傷の程度を把握する調査技術を検証した。

キーワード：深層崩壊、火山地域、大規模土石流、天然ダム、砂防堰堤設計、地中レーダ探査

1. はじめに

2005年9月台風14号による九州・中国・四国地方での災害、2008年6月岩手・宮城内陸地震による災害、2009年8月台風モラコットによる台湾小林村での災害、2010年7月豪雨による鹿児島県南大隅町での災害、2011年3月の東日本大震災に伴う災害、そして、2011年9月台風12号に伴う紀伊山地における災害、2013年10月台風26号による伊豆大島災害等、近年深層崩壊や火山地域における大規模な土砂災害により国内外に甚大な被害が生じた。

大規模な土砂移動現象による災害を防止あるいは減災を実現するためには、予めそのおそれのある箇所を予測するとともに、被害範囲を推定する必要がある。また、大規模な被害が想定される場合には、平常時または緊急に対策を行う必要があるが、深層崩壊に起因する土石流あるいは天然ダムの決壊に起因する土石流といった大きな外力の土石流に対応する設計技術、対策工事の施工技術が必要となる。

本研究では、大規模土石流・深層崩壊・天然ダム等異常土砂災害に対応するため、それらのおそれのある危険箇所を明らかにし、危機管理および砂防施設の整備を着実に実施するための研究・技術開発を行った。

2. 深層崩壊に関する発生位置や規模の推定手法に関する研究

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、生産される土砂量は大量である。そのため、その発生に伴う土石流や河道を閉塞する天然ダムの形成及び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予測し、そのリスクを見積ることは極めて重要である。

そこで本節では、既往成果¹⁾による溪流単位での評価から深層崩壊へのより詳細な対応策を開発するために、深層崩壊の発生する恐れのある斜面の地形的特徴を明らかにするとともに、その抽出やリスク評価の手法を提案する。

2.2. 検討対象領域及び検討手法

本研究の対象領域は、姫川水系浦川流域（珪長岩・火山岩）、天竜川水系鹿塩川流域（領家帯・三波川帯）、富士川水系早川流域（四万十帯）、釜無川流域（花崗岩）、新宮川水系熊野川・北山川流域（四万十帯）、川辺川流域（四万十帯）である。

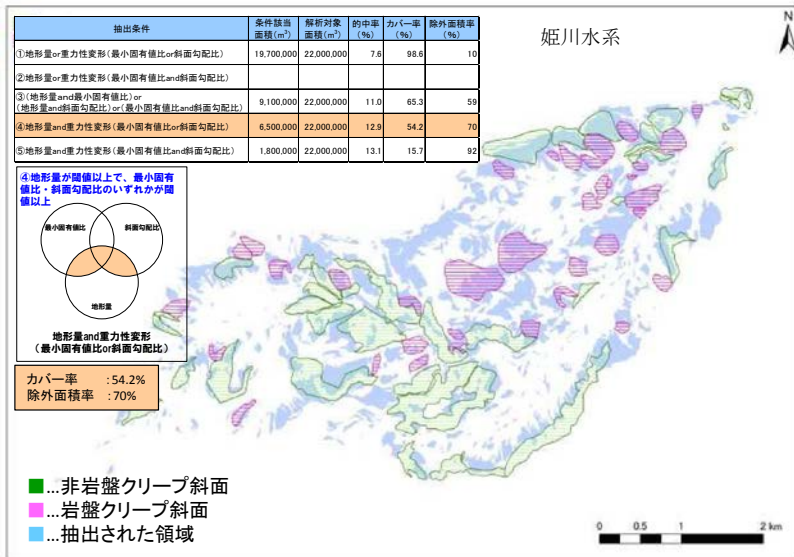


図-2.1 カバー率・除外面積率の検証結果

斜面抽出の方法として、従来から用いられている深層崩壊跡地情報の整理、微地形の判読に加え、既往成果で示された数値標高モデル (DEM) を用いた水文地形特性及び重力変形地形に着目した抽出方法について検証し、有効な絞り込み手法及び手順を検討した。

リスク評価について、一般的にリスクとは「危害の発生確率及びその危害の程度の組合せ」²⁾として表現される。そこで深層崩壊においては、発生確率を「危険度」、危害の程度を「崩壊規模」として評価する手法を検討した。

2.3. 結果

2.3.1. 深層崩壊の発生する恐れのある斜面の抽出手法

水文地形特性及び重力変形地形に着目した抽出方法を検証した結果、定量的な判定資料を得ることができる一方、岩盤クリープ斜面のカバー率が最も高くなる指標の組合せでは除外面積が10~17%程度となり、抽出による絞り込みの効果が低かった。またカバー率は89~99%が最大値となり、除外面積が増える組合せではさらに小さくなるため抽出漏れが生じることとなった³⁾(図-2.1)。このため、深層崩壊跡地情報の整理、微地形の判読を【一次抽出】、水文地形特性及び重力変形地形に着目した評価を調査優先度の設定【二次抽出】とする絞り込み手法及び手順(図-2.2)が、最も有効であった⁴⁾。

2.3.2. リスク評価手法

斜面の地形、地質、水文特性から危険度を評価する手法のうち、斜面変動の進行状況を示すひずみ率⁵⁾⁶⁾の検証を行った。なお本研究では、ひずみ率を図-2.3

のとおり定義した。この結果、いずれの地域においても1~25%の値が頻出していることがわかった。2011年台風12号で崩壊した紀伊山地の事例による5~21%と同様の値であることから、同程度の危険度を有すると考えられる。よって、地質による限界ひずみ率の算出および検討と、変形地形による危険度⁷⁾との関係性を整理することで、閾値を設けるなど定量的な評価が与えられる可能性があることを確認できた。

崩壊規模を評価する手法のうち、空中電磁探査結果を活用した崩壊深度推定の検証を行った。その結果、豪雨による深層崩壊が発生した斜面では、いずれも特徴的な比抵抗構造を示し、かつ鉛直方向の物性不連続面を示す2タイプの急変部が存在していることを確認した。このうち、浅部に高比抵抗領域があるタイプでは、急変部が地下水分布域、および緩み岩盤領域の下限を示していることがボーリング調査ならびに多雨期、寡雨期の比抵抗構造の差異によって確認された。一方、浅部に低比抵抗領域があるタイプは、急変部の深度まで地山の脆弱化、粘土鉱物の介在、高い間隙率と地下水による飽和帯が形成されていることを示し、いずれも崩壊深度の下限となり得る地質構造を捉えていることが確認された。これにより、比抵抗変化を数値解析することで、空中電磁探査結果から崩壊深度の定量的な評価が行える可能性があることを確認できた(図-2.4)⁸⁾。

2.4. まとめ

本研究では、深層崩壊の発生する恐れのある斜面を抽出し、そのリスク評価を行う手法の開発を行い、より定量的な手法の適用性について検討を行った。その

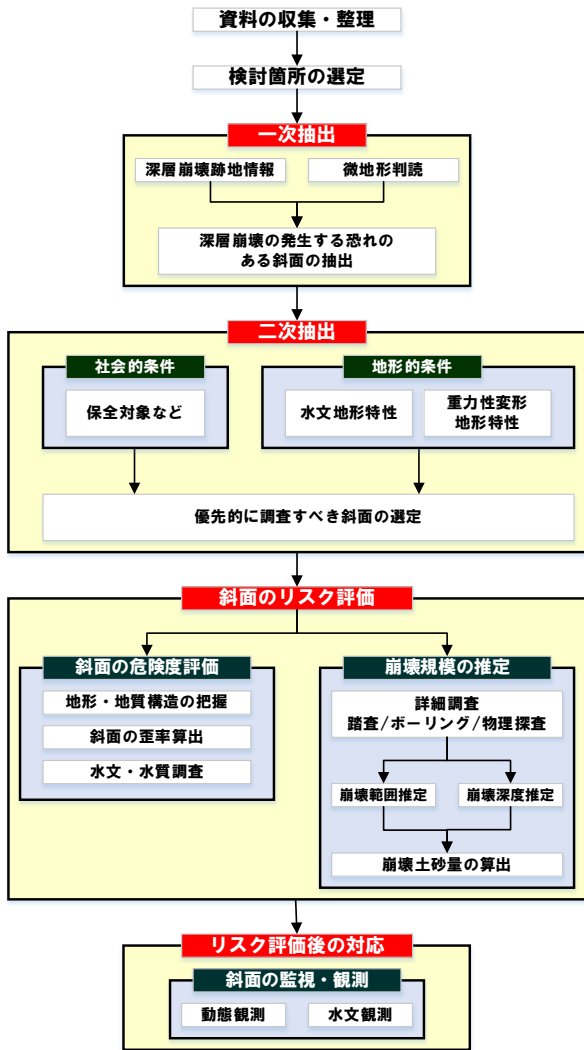


図-2.2 斜面抽出及びリスク評価フロー

結果、以下の点について確認できた。

- 地形特性の指標の組合せによる手法は、抽出漏れが生じるなど斜面の抽出には有効性が低い。調査優先度の設定を定量的に行う手法として活用できる。
- 5 斜面の危険度を定量的に評価する手法として、ひずみ率の測定が有効である。今後は地質、地形、水文水質特性との関係性を明らかにし、総合的な危険度の判定手法について検討する。
- 10 斜面の崩壊深度を定量的に推定する手法として、比抵抗構造の鉛直変化の数値解析が有効である。今後は、空中電磁探査で得られる広域かつ三次元的なデータの活用性の向上を図り、ボーリング調査結果をもとに電気探査の解釈手法を検討する。

15 3. 火山地域の土石流の調査手法に関する研究

3.1. 背景と目的

平成 25 年 10 月、台風 26 号による豪雨に伴い伊豆大島の大金沢流域では複数の斜面崩壊と土石流が発生

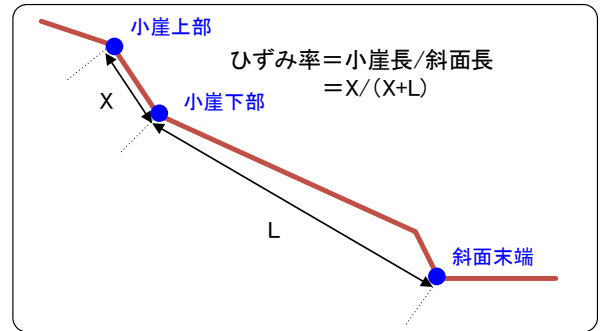


図-2.3 ひずみ率算出の概念図⁷⁾

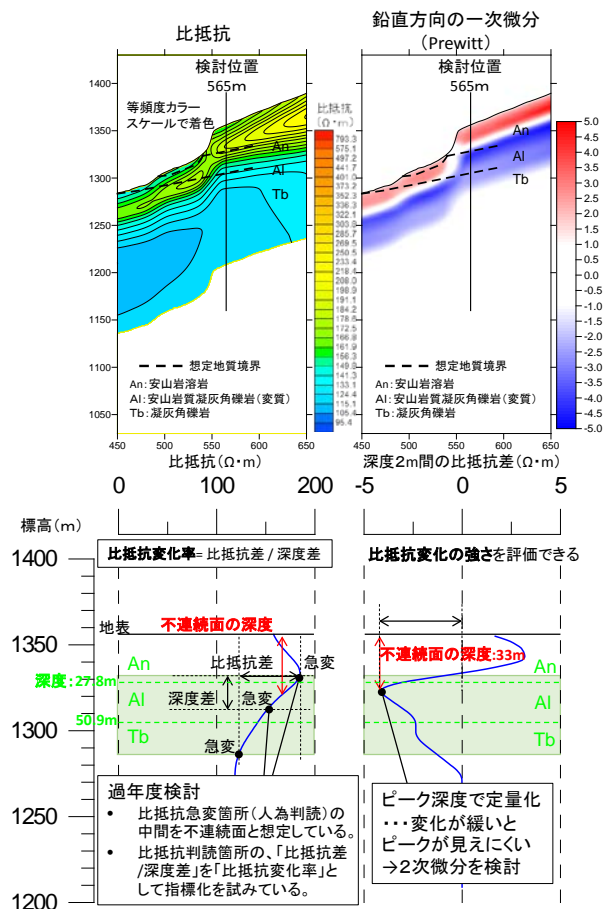


図-2.4 空中電磁探査結果を用いた崩壊深度の評価

し、死者 35 人、行方不明者 4 人^{9), 10)}と甚大な被害が生じた。本災害が発生した地域は火山地域特有の起伏の小さい地形を呈しており、この地形特性が氾濫範囲を拡大させた要因のひとつとなった可能性がある。このように起伏の小さな尾根を有する流域で土石流が発生すれば、従前の想定よりも土石流の氾濫範囲が広がるおそれがあり、その可能性を踏まえた事前の対策が求められる。今後、そのような尾根部を有する溪流を事前に把握することが望まれるが、その調査手法が存在しない¹¹⁾。そこで、土石流が乗り越える尾根の地形

的な特徴を明らかにすることを目的とする。さらに、その特徴と土石流の水量から尾根を抽出する手法を提案する。

3.2. 検討対象領域及び検討手法

5 検討は、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の大金沢流域を対象に行った。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抽出は、まずそのおそれのある溪流を抽出し、その溪流内にお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抽出するといった調査フローが考えられる。

3.2.1. 土石流が尾根を乗り越えるおそれのある溪流の抽出

15 土石流が尾根を乗り越えるおそれがある溪流は、伊豆大島の大金沢のように開析が進んでいない山麓斜面に位置するものと考えられる。このため、溪流の抽出として開析状況の評価を行うものとし、DEMを活用した地形指標の分析を行った。このうち、地形図等によるみかけの開析状況と対比した際に、起伏度が比較的开析度合いを表現できていると考えられる分析結果が得られた。ここで、実際に開析状況による土石流の尾根の乗り越えリスクについて評価を実施する必要があるのは、土石流が流下するおそれのある流路周辺の地形状況であることから、DEMで生成した流路に一定幅のバッファを設けてその範囲にあるメッシュの起伏度を算出し、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うこととした。

3.2.2. 土石流が尾根を乗り越えるおそれのある箇所の抽出

30 尾根越え箇所を抽出するために流路網の湾曲部において土石流の持つ全水頭と湾曲部位置の尾根の高さの比較を行った。なお伊豆大島の実績から、本研究では対象とする湾曲部の閾値として33度を採用した。

3.3. 結果

3.3.1. 土石流が尾根を乗り越えるおそれのある溪流の抽出の結果

35 伊豆大島のDEMは国土地理院基盤地図情報の5m数値標高モデルを使用して作成した。危険溪流の抽出を実施した結果を図-3.1に示す。平成25年伊豆大島豪雨災害において土石流の尾根越えが見られた大金沢流域は上流から下流にかけて概ね4以下の起伏量が主体を占めており、他の溪流と比較して相対的に起伏量が小さいことがわかる。

3.3.2. 土石流が尾根を乗り越えるおそれのある箇所の抽出の結果

45 図-3.2に評価対象とした湾曲角(16箇所)と、全水

頭を用いてその箇所を乗り越えるか否かを判定した結果を示す。検討の結果、乗り越えが実際に見られた地点では本手法により乗り越えると判定されている。また乗り越えが実際に見られなかった8箇所のうち2箇所を除いて乗り越えないという判定結果となり、おおむね実績と整合する結果となった。

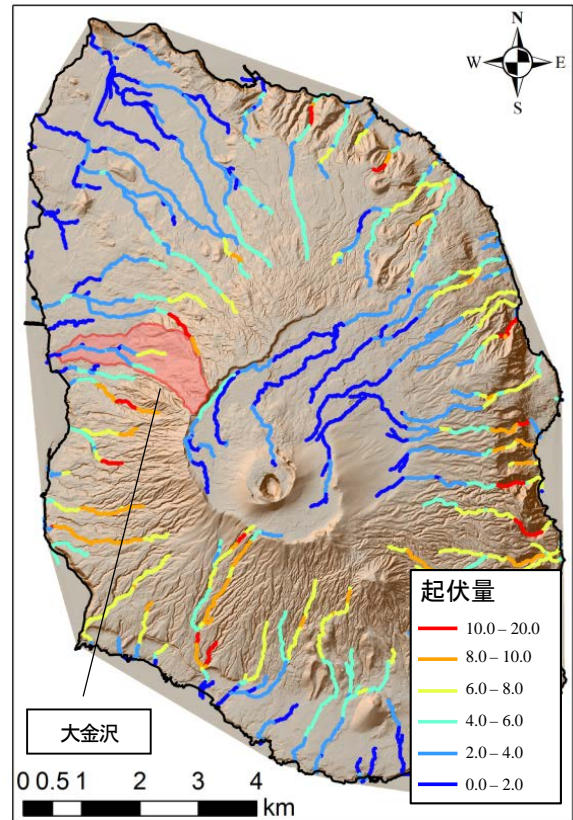
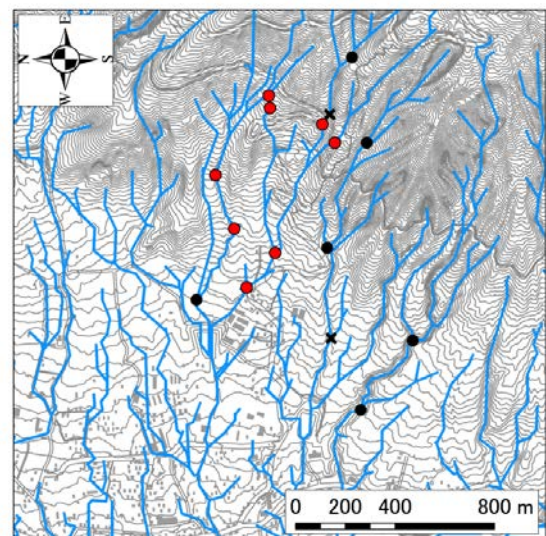


図-3.1 溪流流路沿いの起伏量



実績	判定	実績	判定
● (赤)	乗り越える	※ (赤)	乗り越えない
● (黒)	乗り越えない	※ (黒)	乗り越える

※: 該当なし

図-3.2 土石流全水頭による尾根越え判定結果

3.4. まとめ

本節では起伏量という地形的指標が土石流の乗り越えの生じる尾根の抽出に有効であることが明らかとなった。また、火山地域の溪流において土石流が乗り越えるおそれのある尾根部を定量的に抽出する方法について提案した。抽出結果と伊豆大島での乗り越え箇所とを比較した結果、概ね実績箇所を抽出できた。ただし、全水頭と尾根部の標高を比較する地点の選出方法などについては、結果に影響を及ぼす可能性があり、引き続きその影響を検討する必要がある。今後は他の火山地域を対象にした検討を行い、手法や判定基準の設定方法を明確にする必要がある。

4. 深層崩壊に起因する土石流、天然ダムに起因する土石流の危機管理に資する技術

4.1. 背景と目的

深層崩壊による崩壊土砂は、土砂が流動化し土石流として下流へと流下するものもあれば、斜面下にそのまま堆積し天然ダムを形成するものもある。

土石流による被害範囲を推定する際には、数値シミュレーションモデルが用いられ、土石流の氾濫範囲や土砂の堆積厚などが計算される。一方、深層崩壊に起因する土石流は、大きなピーク流量、つまり高速の流速、深い流動深や高い土砂容積濃度を有していると考えられ、通常の土石流とは異なる流れの挙動を示す可能性がある。そのため、深層崩壊に起因する土石流の被害範囲を想定する際には、従来の土石流の数値シミュレーションモデルとは別のモデルを開発する必要がある。

天然ダムが形成された場合は、天然ダムの決壊によって発生する土石流の被害範囲や決壊する時期について、土砂災害防止法に基づいて緊急調査を行い、都道府県等に通知し、周知する必要がある。天然ダムに起因する土石流については、天然ダム決壊時の流出流量が大きく影響するため、流出流量を精度良く推定し、氾濫計算を行う必要がある。決壊する時期の予測に関しては、従来、水深の変化により湛水位を予測していたが、ダム堤体からの漏水や浸透を考慮しておらず、実際の事例と予測した水位が異なるという課題があった。

そこで、本節では、大規模土砂災害の危機管理に資するため、深層崩壊に起因する土石流と天然ダムに起因する土石流の被害範囲を推定するための数値シミュレーションモデルを開発し、また、天然ダムが決壊する時期を予測する手法の改良を行った。

4.2. 深層崩壊に起因する土石流の危機管理に資する技術

4.2.1. 深層崩壊に起因する土石流に関する数値シミュレーションの提案

従来、石礫型土石流の数値計算の一般的なモデルでは、層流状態で流れの骨格を形成して流れる土石と、土石の間隙を乱流状態で移動する間隙水とに分けて取り扱われてきた。一方、深層崩壊に起因する土石流は流動深が大きく、必然的に相対水深が大きくなるため、間隙水の乱れの影響等により、土石の一部は間隙水と同様に乱流状態で移動することが考えられる。そのため、従来の石礫型土石流の数値計算モデルを深層崩壊に起因する土石流に適用すると、到達距離が実際よりも小さく計算される恐れがある¹²⁾。そこで、そのような深層崩壊に起因する土石流の挙動を表現するため、土石流を構成する土石のうち、一部(細粒土砂)が間隙流体に取り込まれ、間隙流体の一部として振舞う土石流(図4.1)の数値シミュレーションを提案した。

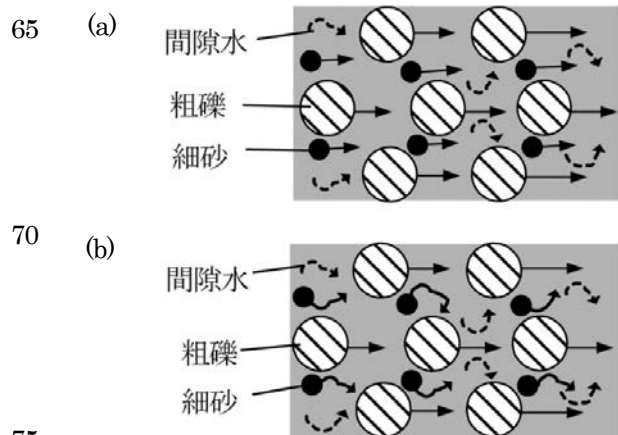


図4.1 石礫型土石流の概念図

(a) 全ての土石は層流状態で移動

(b) 土石の一部(細粒土砂)は間隙水と一体となって乱流状態で移動

表4.1 計算ケース

ケース	細砂の最大粒径	計算区間上流端の土砂量	移動可能層厚	流下幅
	$D_c(\text{mm})$	$V_s(\text{m}^3)$	$D_s(\text{m})$	B
1.1	0	21350	5	最大流下幅と発生前溪床幅の平均値
1.2	1	21350	5	
1.3	10	21350	5	
1.4	100	21350	5	
1.5	15	21350	5	

4.2.2. 数値シミュレーションの適用と計算条件

提案したモデルを 2003 年熊本県水俣市における深層崩壊に起因する土石流に適用した¹³⁾。適用にあたって、現場の詳細なデータを収集し、できるだけ土石流の数値シミュレーションに必要な情報を集めた。その上で、間隙流体に取り込まれる土砂の最大粒径をいくつか変化させて計算を行い、間隙流体として振舞う土砂の最大粒径を同定することを試みた。計算ケースを表-4.1 に示す。間隙流体に取り込まれる細粒土砂の最大粒径を 5 通りに変化させて計算を行った。最大流下幅は LP 測量による数値表層モデルと数値標高モデルを重ね合わせて求めた。発生前の溪床幅は航空写真、数値標高モデルにより求めた。

4.2.3. 結果

ケース 1.1~1.4 の河床変動高の計算結果を図-4.2 に示す。ケース 1.1 のとき ($D_c=0\text{mm}$)、すなわち、細粒分の影響を考慮しなかった場合、計算で求めた土石流の到達距離は約 600m で、実際の土石流の 4 割程度であった。一方、ケース 1.2~1.4 では、 D_c の値が大きくなるにつれて、計算での土石流の到達距離および溪床の侵食区間末端までの距離は長くなった。図より、 D_c が 10mm のとき (ケース 1.3) は、侵食距離、到達距離はそれぞれ約 400m、1200m であり、それぞれ実際の侵食距離、到達距離より小さかった。 D_c が 100mm のとき (ケース 1.4) は、侵食距離、到達距離とも実際に比べて大きかった。このことから、 D_c を 10mm と 100mm の間で 5mm 刻みに変化させ、最も結果を良好に再現できる D_c を探索した結果、 $D_c=15\text{mm}$ のとき、計算結果の到達距離および侵食距離は実際の土石流と概ね等しかった(図-4.3)。

4.3. 天然ダムに起因する土石流の被害範囲を予測する 氾濫計算プログラム

4.3.1. QUAD の概要

天然ダムが形成された場合、土砂災害防止法に基づいて「緊急調査」が実施され、重大な土砂災害が想定される土地の区域および時期を推定する必要がある。区域の情報を作成するため、緊急時の情報が乏しい状況であっても、一定程度の精度を有する推定を迅速に実施する手法が必要となった。そこで、土石流氾濫域を緊急時に簡便に推定できる数値計算システム QUAD-L (Quick Analysis system for Debris flow induced by Landslide dam) を開発した¹⁴⁾。

QUAD-L は、緊急調査開始後、土砂災害緊急情報を如何なる状況でも迅速に、国土交通省職員が独力で、調査・解析できるようにするため、汎用性を犠牲にし

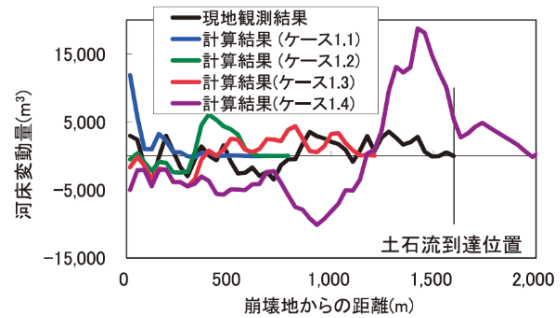


図-4.2 実績および計算 (ケース 1.1~1.4) で求めた侵食・堆積量

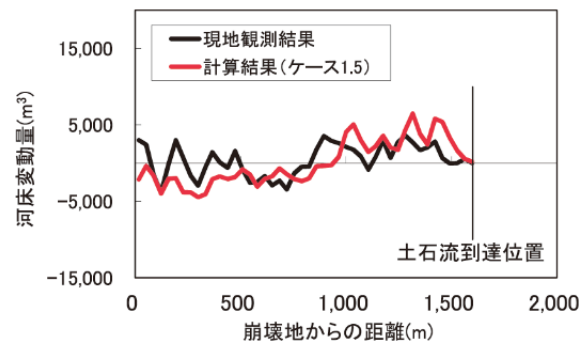


図-4.3 実績および計算 (ケース 1.5) で求めた侵食・堆積量

て緊急調査に必要な最低限必要な処理を実行する数値計算システムとして設計した。特長としては、標準的なコンピュータで 2~3 時間で一定程度の精度の土砂氾濫想定区域を算出できること、簡便に操作できること、国土交通省内のどの子分局の端末でも作動するという特長を持っている。

解析に必要な諸元については、緊急調査時に容易に計測可能なもののみ限定されており、氾濫計算に必要な地形データについても、国土地理院基盤地図情報のサイトから全国同程度の精度で整備されている数値標高モデル 10m メッシュデータをダウンロードすることにより計算を行うことができる。計算結果は、国土地理院の WebGIS 「電子国土」に計算結果のファイルを読みこむことにより、結果を表示できる。電子国土では背景に日本全国の地形図が整備されており、計算結果のファイルを読み込むとその上に氾濫範囲が表示される。

4.3.2. QUAD の適用と評価

平成 23 年台風 12 号に伴う豪雨により、深層崩壊に伴う天然ダムが数多く形成され、その決壊による土石流の被害が懸念されたことから緊急調査が実施された。大規模な天然ダムが決壊すると、大規模な土石流によって下流域で多大な被害が生じる可能性があるため、

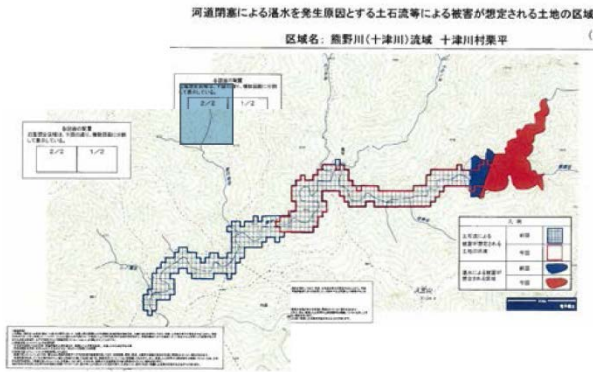


図-4.4 栗平地区における土石流氾濫想定区域

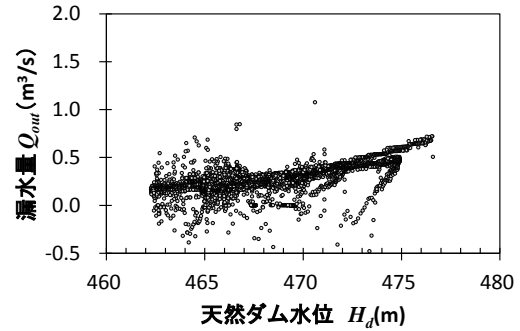


図-4.5 紀伊半島長殿地区における漏水量と天然ダム水位の関係

QUADにより土石流氾濫想定区域の解析を行い、その結果を速やかに公表した。アクセスが困難な山地に天然ダムが形成したにも関わらず、QUADを用いることにより土石流氾濫想定区域を発災後数日以内に発表できた。このように、QUAD-Lは迅速にかつ簡便に土石流氾濫域を推定できたことから、当初の期待どおりに機能したと評価できる。

4.4. 天然ダム決壊に起因する土石流による被害時期の予測

4.4.1. 被害時期予測における課題

天然ダムの形成直後や初動期における被害時期の予測では、ダムの規模などの正確な情報が得られないなかで、越流のタイミングを迅速に予測する必要があり、比較的簡易な方法が用いられる。これに対して、継続監視期には、越流による被害のおそれのある時期を可能な限り精度よく予測することが望まれる。その際、天然ダム堤体からの自然漏水量が相当量存在することから¹⁵⁾、その把握や推定手法の確立が重要な課題の一つとなっている。また、紀伊半島長殿地区における天然ダム水位と漏水量との関係を示す図-4.5より、漏水量は天然ダム水位に支配されており、越流時期予測においてその動態把握が重要であることがわかる。しかしながら、天然ダムの漏水量については明らかでない部分が多く、その推定手法は確立されていない。

そこで、本研究では、継続監視期における天然ダムの越流時期の予測精度向上を目指し、比較的観測しやすい水文データである平水時の流量とボーリング孔の地下水位データを用いて、漏水量を推定する手法を提案した。さらに、現地観測データをもとに、本手法の妥当性を検証するとともに、同手法を用いて天然ダムの水収支を推定し、漏水量の影響を考察した。さらに、漏水量を考慮した天然ダムの水位予測プログラムを作成した。

40

研究対象地域は、2011年台風12号により紀伊半島に形成された天然ダムのうち、長期間にわたって天然ダムの水位や湛水域への流入量等のデータが蓄積されている長殿地区とした。天然ダム上流域の流域面積は4.6km²である。

4.4.2. 漏水量の推定方法

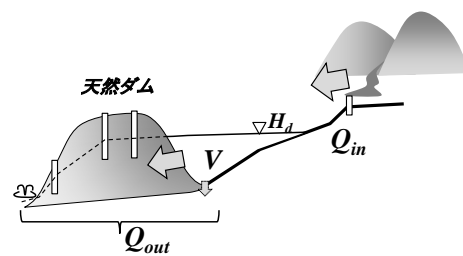
天然ダムの上流側に継続して湛水域が生じ、水位が上下している状況下では、堤体内に上流側からの水圧が生じ地下水面が形成されている状態であり、天然ダム堤体内の浸透は、一部飽和状態に近い状態であることが考えられる。そこで、湛水してある程度時間が経過した天然ダムにおいては、ダルシー則に従って、湛水域から飽和浸透が発生していると仮定して、天然ダム水位から間接的に漏水量を推定する方法¹⁶⁾を提案した。漏水量推定概念を図-4.6に示す。天然ダム湛水域への流入量をもとに飽和透水係数を求め(3)式、(2)式を用いて漏水量を推定した。

45

50

55

60



$$Q_{in} = \frac{dV}{dt} + Q_{out} \quad \dots\dots (1)$$

$$K_s = \frac{Q_{in} - \frac{dV}{dt}}{-\frac{dz}{dx} \cdot A} \quad \dots (3)$$

$$Q_{out} = -K_s \cdot \frac{dz}{dx} \cdot A \quad \dots (2)$$

Q_{in} : 天然ダム湛水域への流入量

Q_{out} : 漏水量(天然ダム湛水域からの流出量)

V : 天然ダム湛水量

K_s : 飽和透水係数

$\frac{dz}{dx}$: 動水勾配(ボーリング工の地下水位より推定)

A : 浸透面積(災害後の地形データより推定)

70

図-4.6 天然ダムの水収支と漏水量の推定概念

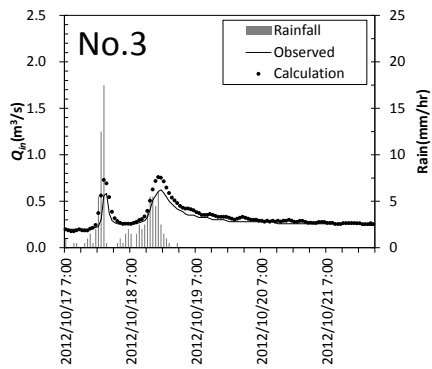


図-4.7 天然ダム湛水域への流入流量の実測値と計算値の比較

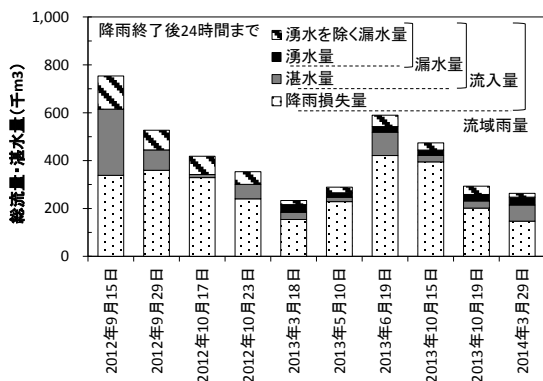


図-4.8 天然ダムの水収支

同手法の妥当性を検証するため、実測値である天然ダム湛水域への流入量と、本手法に基づく漏水量から逆算される流入量(計算値)を比較したところ(図-4.7)、これらは概ね一致した。ただし、式(1)~(3)よりなる数

4.4.3. 天然ダムの水位予測に及ぼす漏水量の影響

降雨イベントごとに、流域内の総雨量と本手法により推定した漏水量および流入量、天然ダム下端で観測された湧水量をもとに、天然ダムの水収支を整理した結果を図-4.8に示す。同図より、流入量に対する漏水量(湧水として計測された流量を含む)の比率は約30%~90%であり、無視できない程度の量が漏水量として天然ダム湛水域から外へ流出しており、天然ダムの水位(越流時期)の予測に漏水量の影響が大きいことが分かった。

4.4.4. 漏水量を考慮した天然ダムの水位予測プログラムの作成

天然ダム決壊に伴う土石流による被害時期予測の支援ツールとして、流出解析に基づく天然ダムの水位予

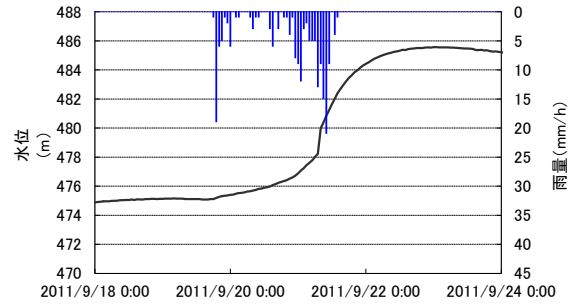


図-4.9 本プログラムによる水位予測結果例

測プログラムを作成した。流出解析の方法は、汎用性が高く、紀伊半島の天然ダムにおける緊急調査でも用いられた貯留関数法とした。同プログラムには、天然ダムからの漏水の影響に加えて、対策工の整備による排水の影響も加味し、水文環境の変化が想定される長期の監視期間において臨機応変に水位予測が可能となる仕組みとした。本ツールにより、天然ダムをとりまく環境にあわせた、より精度の高い水位予測が可能となる。

以上に示した天然ダム決壊に起因する土石流による被害時期の推定に関わる知見や手法は、「土砂災害防止法に基づく緊急調査の手引き(河道閉塞による土砂災害対策編)」¹⁷⁾に反映した。

4.5. おわりに

本研究により、深層崩壊に起因する土石流、天然ダムに起因する土石流の被害範囲を推定するための数値シミュレーションモデル、被害範囲を推定するための手法が開発された。

深層崩壊に起因する土石流に関する数値シミュレーションモデルに関しては、深層崩壊による大規模な土石流中に含まれる細砂を、間隙流体の一部として取り扱う数値シミュレーションモデルを提案し、それを2003年集川で発生した土石流事例に対して適用し、間隙流体として振る舞う細砂の粒径を検討した。その結果、細砂を間隙流体の一部として扱うことで、深層崩壊による土石流の流下・堆積過程の再現性が向上することが確認された。

天然ダムに起因する土石流に関しては、緊急調査時に氾濫範囲を速やかに計算できる数値計算システムQUAD-Lを開発した。QUAD-Lは、実際に平成23年の台風12号に伴う豪雨により形成された天然ダムの緊急調査時に適用され、山間地に天然ダムが形成されたにも関わらず、数日以内に氾濫想定区域を公表することができた。ただ、データ計測方法や精度を考慮した説明の方法など幾つかの課題が明らかとなり、今後も継続的に改良していく予定である。

表-5.1 本体の安定性の緩和の区分

安定条件	設計技術指針 ← → 緩和			
	設計技術指針 以内	緩和した安定性 以内	極限の安定性 以内	極限の安定性 以上
滑動	土砂地盤 1.2以上	1.2~1.1	1.1~1.0	1.0未満
	岩盤地盤 4.0以上	4.0~3.0	3.0~2.0	2.0未満
転倒	B/6 以内	B/3 以内	B/2 以内	B/2 以上
地盤反力	許容支持力以内 (極限支持力×1/3)	極限支持力× 2/3以内	極限支持力以内	極限支持力以上

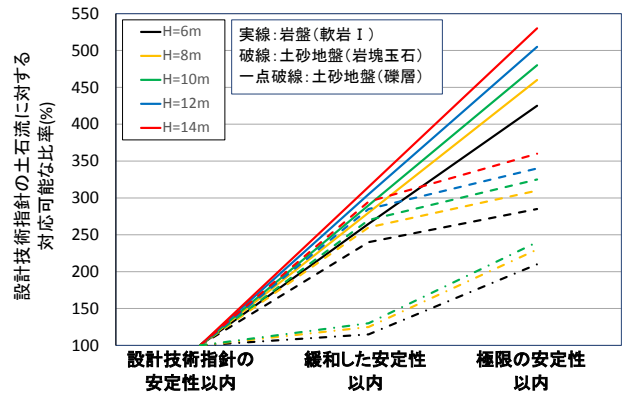


図-5.1 安定性を緩和した場合の土石流対応の限界

天然ダム決壊時期の予測については、従来考慮していなかったダム堤体からの漏水、浸透について考慮できる湛水位予測モデルを開発した。開発したモデルは、平成 23 年台風 12 号の天然ダムの湛水位の事例と比較・検証した。その結果、従来の湛水位の予測モデルよりも、精度良く湛水位変化を計算できることが分かった。

5. 深層崩壊に起因する土石流、天然ダムの決壊に起因する土石流のハード対策の検討に資する技術

5.1. 背景と目的

深層崩壊に起因する土石流は、土石流が頻発する溪流で発生する土石流と比較してピーク流量、流速等が大きくなる傾向にあり¹⁸⁾、砂防堰堤等により対策を行うためには、現行の土石流対策関係の指針（以降、「現行指針」という。）^{19),20)}に基づき計画される外力よりも大きな外力を想定して施設設計を行う必要がある。現行指針が示す安定計算において想定する外力の算出に必要な土石流ピーク流量の推定には、4.2.1 で示した数値計算モデルを用いることとしている²¹⁾が、その計算に基づき得られる土石流ピーク流量が通常の計画で想定するものより大きな値を示した場合は、限界状態設計法を用いることが設計方法として考えられる。

また、土石流ピーク流量といった外力は上述の数値計算によって推定が可能であるものの、極めて大きな外力が砂防堰堤に働いた場合において、それらが施設に与える影響についての評価は、事例も少なく十分ではない。

このため、本節では限界状態設計法を採用する場合において、どの程度の外力まで設計が可能か検証し、また極めて大きな外力が働いた場合の影響を評価するための砂防堰堤の損傷の計測手法について試行し、その有効性について確認を行った。

5.2. 外力が大きな土石流に対する砂防堰堤の設計

5.2.1. 外力が大きな土石流に対する砂防堰堤の設計の課題

砂防堰堤に作用する土石流の外力が極めて大きい場合は、限界状態設計法を採用することが考えられる。その場合、現行の指針で想定される規模の土石流を基本的な設計条件として、その設計断面が深層崩壊に起因する土石流に対して安定性を確保できるか限界状態設計により照査することが方法のひとつに考えられる。この際に、深層崩壊に起因する土石流を想定した対策の可否の判断として、通常の規模に対してどの程度の大きな外力まで耐えることができるか把握する必要がある。

そこで、本節では、通常の規模の土石流に対して設計した砂防堰堤が、限界状態設計法として現行指針が定める安定条件を緩和した場合、どの程度の大きな外力に対して設計しうるか評価を行った。

5.2.2. 検討方法

砂防堰堤はモデルケースを用いて土石流ピーク流量による安定性への影響を評価した。作用する外力の違いによる安定性の感度分析を行うための基本形状は、洪水時を元に設定し、この基本形状に対して、現行の設計基準によってどの程度の土石流ピーク流量まで対応可能であるか確認した。そのうえで、基礎地盤条件を岩盤基礎（軟岩 I）、土砂地盤（岩塊玉石）、土砂地盤（礫層）の 3 種類に分け、表-5.1 に示す安定条件の緩和の区分に対して、どの程度の外力まで安定すると評価できるか確認した。安定計算は、深層崩壊に起因する土石流の流量が大きく砂防堰堤天端を越流して流下することを想定し、直撃時と通過時の 2 つの条件で行った。

5.2.3. 検討結果

砂防堰堤の高さを 6 m から 14 m まで 2 m 刻みで、評価を行った。その結果を図-5.1 に示す。堤高の観点では、堤高が高いほど設計した外力よりも大きな外力が作用した場合に対応できる流量が大きく、極限の安定性では岩盤基礎で 4~5 倍、岩塊玉石で 2.5~3.5 倍、礫層で 2 倍程度の流量まで対応することが可能という傾向が示された。

5.2.4. まとめ

砂防堰堤に作用する土石流の外力が極めて大きい場合に、限界状態設計法を適用して、どの程度の大きな外力に耐えうるか評価した。個別の現場条件により、安定条件のクリティカルとなる要件は変わりうるが、それらの条件を一般化したモデルケースを用いて、どの程度の大きな外力まで砂防堰堤の設計が可能か、傾向を把握することができた。これにより、砂防堰堤の設計を行う前の施設計画の段階で対策の可否が判断できるようになると期待できる。

5.3. 破損した砂防堰堤の内部ひび割れ調査

5.3.1. 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-5.2）。これまで砂防堰



図-5.2 南梨子沢堰堤のひび割れ位置

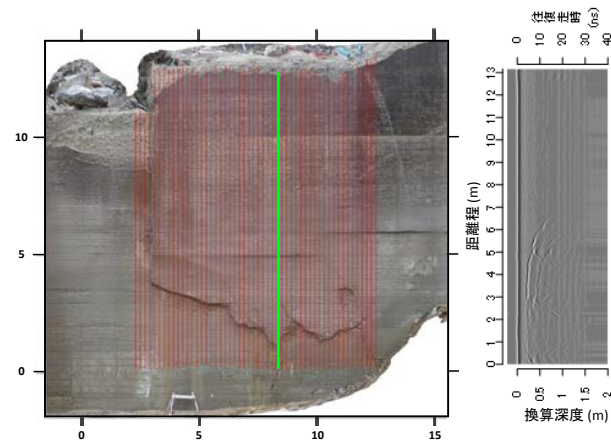


図-5.3 測線配置と一測線の計測結果

堤の内部ひび割れの分布や大きさを3次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)}。

5.3.2. 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。

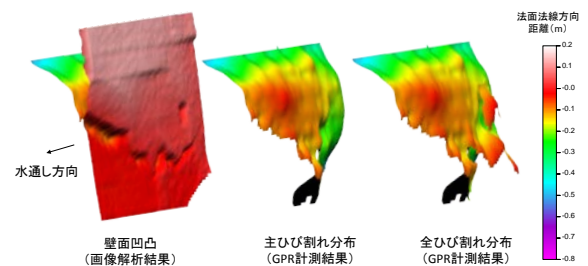


図-5.4 GPRによるひび割れ分布

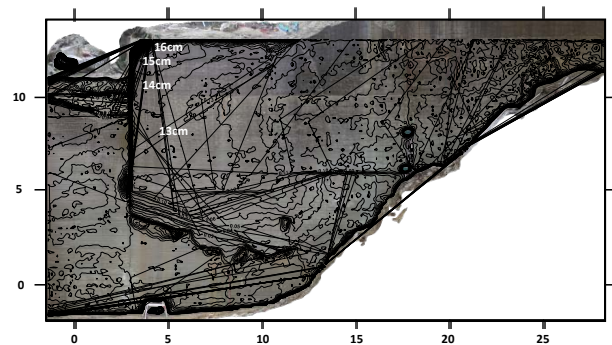


図-5.5 SfMによる下流側法面の変位

5.3.3. 結果

測定結果（中心周波数 800 MHz）の一例を図-5.3 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 5 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-5.4 に示す。色は図-5.3 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-5.4 の左図は図-5.5 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 10 -5.4 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 80 cm 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 20 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。

5.4. 深層崩壊に起因する土石流に対する対策技術のまとめ

深層崩壊に起因する土石流対策のための砂防堰堤の設計に際し、限界状態設計法を導入した場合にどの程度大きな外力まで対応できうるか傾向を示した。一方で、深層崩壊に起因する土石流といった極めて大きな 30 外力が砂防堰堤に作用する場合に、どのような破壊が生じるかは、引き続きその評価手法などの技術開発が必要である。このためには、大きな外力が作用した場合の破壊実績のデータを蓄積する必要があるが、本研究課題で示した地中レーダ探査による砂防堰堤の損傷の把握技術により、これまで十分に把握することができなかった内部の損傷状況の情報の蓄積が可能となった。今後は、損傷状況のデータの蓄積を行うとともに、その情報を踏まえた砂防堰堤の破壊形態やその程度を評価する手法について検討を行う必要がある。

6. おわりに

本研究課題において、危険箇所を把握するため、深層崩壊のおそれのある危険斜面の抽出技術や火山地域の土石流が尾根を乗り越えるおそれのある箇所を抽出する手法を開発した。危機管理に資する技術として、細 45 粒土砂に注目した深層崩壊に起因する土石流の氾濫計

算モデルを開発した。深層崩壊が天然ダムを形成した場合において、緊急に土石流の氾濫範囲を緊急に推定する計算プログラムの開発・改良を行った。施設整備に資するため、大規模な土石流の外力の推定のため、 50 砂防堰堤の損傷の程度を把握する調査技術を検証した。現行の基準に基づく設計荷重に対して、どの程度の設計荷重まで限界状態設計法により設計が可能であるか評価を行った。今後、国土交通省が実施する調査や対策の検討に反映されるよう技術の普及を推進するとともに、その過程で生じた課題を研究成果にフィードバックしていきたい。

7. 謝辞

深層崩壊に関する発生位置や規模の推定手法の研究に際し、国土交通省北海道開発局室蘭開発建設部、北 60 陸地方整備局松本砂防事務所、関東地方整備局富士川砂防事務所にデータを貸与頂いた。火山地域の土石流危険渓流の調査手法の研究に際し、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。天然ダム決壊に起因する土石流による被害時期の予測技術については、近畿地方整備局紀伊山地砂防事務所より天然ダムの湛水位や地下水のデータを提供いただいた。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。深層崩壊に起因する土石流、天然ダムの決壊に起因する土石流のハード対策の検討に資する技術の検討については、関東地方整備局利根川水系砂防事務所に実施した解析データを提供いただいた。ここに記して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) JIS Z 8051:安全側面規格への導入指針,2004
- 3) 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概要集B,pp.352-353,2015
- 4) 城ヶ崎正人・渡邊剛・廣瀬昌宏・木下篤彦・高原晃宙・瀬戸秀治・野池耕平・中野真帆・松原智生・田中智:浦川流域における深層崩壊発生のおそれのある斜面の抽出手法と発生土砂量の検討,平成27年度砂防学会研究発表講演集B,pp.118-119,2015

- 5) 千木良雅弘・ツォウチンイン・松四雄騎・平石成美・松澤真：台風 12 号による深層崩壊の発生場—発生前後の詳細 DEM を用いた地形解析結果—, 京都大学防災研究所特定研究集会深層崩壊の実態、予測、対応, pp.24-34, 2012
- 5 6) 小野田敏・高山陶子・ハスパートル：ひずみ率等による斜面安定度の推定, 平成 26 年度日本応用地質学会特別講演およびシンポジウム予稿集, pp.49-55, 2014
- 7) 千木良雅弘・坂島俊彦・渋谷研一：深層崩壊発生危険斜面の地質・地形的抽出法について, 平成 26 年度砂防学会研究発表会概要集 A, pp.16-17, 2014
- 10 8) 瀬戸秀治・高原晃宙・木下篤彦・水野秀明・奥村稔・河戸克志・影浦亮太・阿部征輝：空中電磁探査を活用した崩壊するおそれのある斜面における崩壊深度の推定手法に関する検討, 平成 28 年度砂防学会研究発表会概要集 A, pp.244-245, 2016
- 15 9) 石川芳治・池田暁彦・柏原佳明・牛山素行・林 真一郎・森田耕司・飛岡啓之・小野寺智久・宮田直樹・西尾陽介・小川洋・鈴木崇・岩佐直人・青木 規・池田武穂：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, pp. 61-72, 2014
- 20 10) 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, 平成 26 年 3 月, 2014
- 11) 藤村直樹・泉山寛明・高橋佑弥・水野秀明：土石流が乗り越える可能性のある尾根の抽出方法, 土木技術資料, 第 58 巻, 第 2 号, pp.16-19, 2016
- 25 12) 独立行政法人土木研究所：深層崩壊に起因する土石流の流下・氾濫計算マニュアル (案), 土木研究所資料第 4240 号, 2013
- 13) 西口幸希, 内田太郎, 石塚忠範, 里深好文, 中谷加奈：細粒土砂の挙動に着目した大規模土石流の流下過程に関する数値シミュレーション—深層崩壊に起因する土石流への適用—, 砂防学会誌, vol.64, No.3, pp.11-20, 2011
- 14) 清水武志, 内田太郎, 山越隆雄, 石塚忠範：天然ダムによる土石流想定範囲計算システム (QUAD-L) の開発と 2011 年台風 12 号災害における適用, 土木技術資料, 第 54 号, 第 10 号, pp.14-17, 2012
- 35 15) 吉野弘祐・水野秀明・梶昭仁・石塚忠範：2011 年台風 12 号により紀伊半島で発生した天然ダムの形状及び湛水位変化, 平成 24 年度砂防学会研究発表会概要集, pp.608-609, 2012
- 40 16) 秋山怜子・藤村直樹・石塚忠範・内田太郎・桜井亘・酒井良・海原荘一・只熊典子：天然ダムの水位予測に漏水量が与える影響, 砂防学会誌, vol.67, No.4, pp.31-37, 2014
- 17) 国土交通省砂防部砂防計画・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：土砂災害防止法に基づく緊急調査実施の手引き (河道閉塞による土砂災害対策編), 平成 28 年 3 月一部改訂, 2016
- 45 18) 武澤永純・内田太郎・鈴木隆司・田村圭司：鹿児島県船石川で発生した深層崩壊に起因する土石流の推定, 砂防学会誌, Vol62, No.2, pp. 21-28, 2009
- 50 19) 国土技術政策総合研究所土砂災害研究部砂防研究室：砂防基本計画策定指針 (土石流・流木対策編) 解説, 国総資料第 904 号, 2016
- 55 20) 国土技術政策総合研究所土砂災害研究部砂防研究室：土石流・流木対策設計技術指針解説, 国総資料第 905 号, 2016
- 21) 蒲原潤一・内田太郎：深層崩壊対策技術に関する基本的事項, 国総資料第 807 号, 2014
- 60

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 : MIZUNO Hideaki, 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)