【深層崩壊の発生の恐れのある斜面の抽出手法とその妥当性検討】

天竜川上流河川事務所　砂防調査課

1. はじめに

天竜川上流河川事務所では、これまでに、「深層崩壊の発生の恐れのある渓流抽出マニュアル（案）」（※1）に基づき、管内の渓流について深層崩壊発生の危険度評価を進めてきた。

その結果、評価を行った天竜川上流域2948渓流のうち、622渓流が深層崩壊発生の危険度が「高い」「やや高い」と評価されるに至った（図-1）。

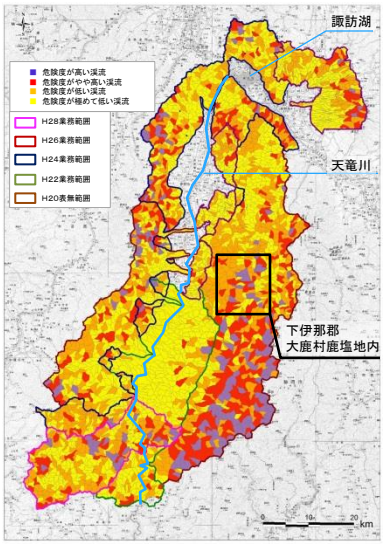


図-1. 天竜川上流域 危険度渓流評価結果と検討対象位置（下伊那郡大鹿村鹿塩地内）

ここで、「深層崩壊」の概要を以下に示す。

＜深層崩壊とは＞

「山崩れ 崖崩れなどの斜面崩壊のうち、すべり面が表層崩壊よりも深部で発生し、表土層だけでなく深層の地盤までもが崩壊土塊となる比較的規模の大きな崩壊現象。」
（「改訂 砂防用語集」）

深層崩壊は、表層崩壊に比べ崩壊土砂量が大きいため、大規模な土石流や河道閉塞（天然ダム）等を引き起こし、甚大な被害が懸念される（図-2）。

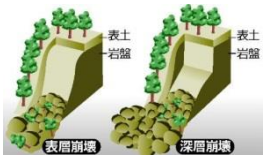


図-2. 表層崩壊と深層崩壊

本検討では、前述した深層崩壊発生の危険度が「高い」「やや高い」と評価された622渓流から、長野県下伊那郡大鹿村鹿塩地内（図-3）に位置する7渓流を対象として、「深層崩壊発生の恐れのある斜面抽出技術手法」（※2）について、妥当性の検討を行った。

2. 斜面抽出の流れ

「深層崩壊の発生する恐れのある斜面抽出技術手法」（※2）は、一次抽出、二次抽出という2通りの方法で、「深層崩壊の発生する恐れのある斜面」（以下、「危険斜面」という）の抽出行ったのち、それぞれの抽出結果を重ね合わせて「危険斜面」の深層崩壊発生危険度を5段階で評価する。

（1）一次抽出：微地形判読

一次抽出は、深層崩壊の発生と関係性の高いと言われる微地形要素に着目して空中写真等による微地形判読を行い、その発達の程度から危険度評価を行う。微地形要素の判読イメージを図-4に、対象斜面の微地形判読図の例を図-5に示す。これは岩盤クリープ斜面の判読例だが、このように、写真等から微地形を読み取ることで「危険斜面」（黄色枠内）を抽出する。

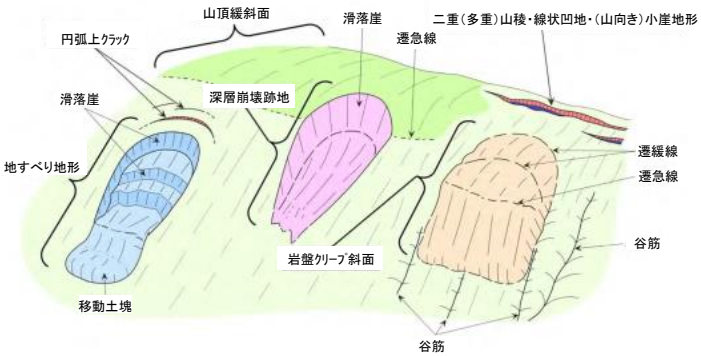


図-4.　深層崩壊発生に関係する微地形要素のイメージ

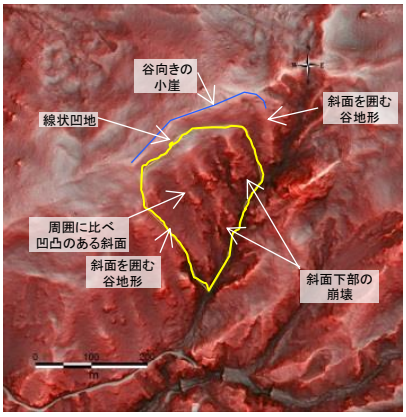
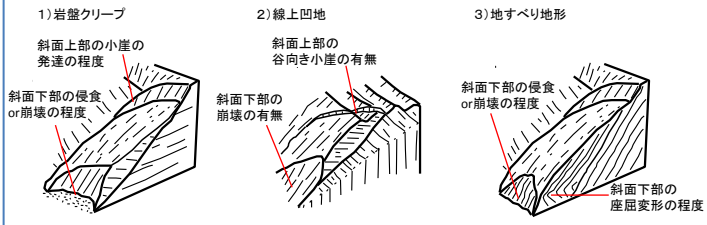


図-5.　対象斜面の微地形判読図の例（岩盤クリープ斜面）

微地形要素発達程度から評価する危険度については、主として次の1）～3）の微地形要素について、それぞれの状態の発達の程度から危険度をⅠ～Ⅳに分類して評価した（※3より抜粋）。



一次抽出で抽出された「危険斜面」の危険度評価は、以下に区分される。

Ⅰ：斜面は重力によって変形しているが、深層崩壊発生の危険度は非常に低い
Ⅱ：斜面は重力によって変形しているが、深層崩壊発生の危険度は低い
Ⅲ：斜面は重力によって変形しており、深層崩壊発生の危険度は高い
Ⅳ：斜面は重力によって変形しており、深層崩壊発生の危険度は非常に高い

（2）二次抽出：水文地形特性と岩盤クリープ（重力性変形）地形を指標とした抽出

二次抽出は、深層崩壊の発生に影響する地形的条件である「水文地形特性」と「岩盤クリープ地形」を危険度の高い地形量として、「危険斜面」に対してどの程度の占有率があるかによって危険度評価を行う。水文地形特性では、集水地形が大きいほど、また斜面勾配が大きいほど崩壊しやすくなるため、危険度が高くなるとして危険度評価を行った。岩盤クリープ地形では、斜面勾配が大きくなるほど、また固有地比（注）が小さくなるほど、崩壊が発生しやすくなるため、危険度が高くなるとして危険度評価を行った。

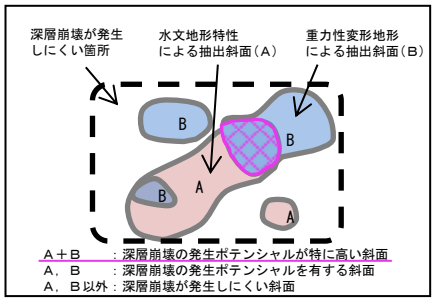
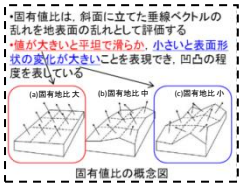


図-6.　深層崩壊の発生する恐れのある斜面の抽出イメージ

（注）固有地比と岩盤クリープの関係性

固有地比とは、地表面の粗さ（乱れ）を数値で表現する指標。
岩盤クリープは、斜面が動き始めているため、本来の地表面に比べ滑らかになる方向へ向かっており、結果的に固有地比が大きくなる。



二次抽出で抽出された「危険斜面」の危険度評価は、以下のようになっている。

ⅰ：危険度の高い地形量の斜面に対する占有率が0～25%の斜面（危険性が低い）
ⅱ：危険度の高い地形量の斜面に対する占有率が25～50%の斜面（危険性がやや低い）
ⅲ：危険度の高い地形量の斜面に対する占有率が50～75%の斜面（危険性がやや高い）
ⅳ：危険度の高い地形量の斜面に対する占有率が75～100%の斜面（危険性が高い）

（3）一次、二次抽出重ね合わせ評価

一次抽出、二次抽出の関係を 表-1 のとおり整理し、抽出後の地形に重ね合わせることで、「危険斜面」の深層崩壊発生危険度を最終的に5段階で評価した。（図-8）。

表-1.　一次抽出・二次抽出重ね合わせ評価表

			一次抽出			
			低 ← 危険性 → 高			
			Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
二次抽出	低↑危険性↓高	ⅰ	1	1	2	3
		ⅱ	1	2	3	4
		ⅲ	2	3	4	5
		ⅳ	3	4	5	5

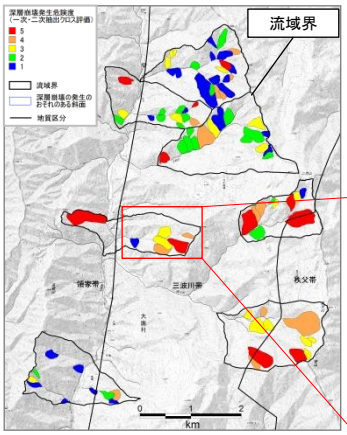


図-8.　一次抽出・二次抽出重ね合わせ評価結果

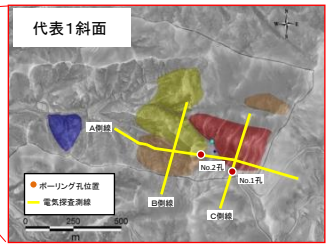


図-9.　妥当性検討対象とした代表1斜面

ここまでで、一次、二次抽出重ね合わせ評価により、「危険斜面」が危険度別に抽出された。

しかし、一次、二次抽出は、いずれも机上での抽出である。したがって、これら抽出結果について、現地状況を確認することで、「現地状況から見ても確かに深層崩壊発生の可能性がある斜面である」ことを確かめる必要がある。このあとは、抽出された「危険斜面」のうち、代表1斜面（図-9）について、原位置における内部構造や水文、地質構造の調査の結果を用いて、その妥当性を検討する。

（※1）深層崩壊の発生の恐れのある渓流抽出マニュアル（案）（土木研究所資料第4115号2008.11）
（※2）深層崩壊の発生する恐れのある斜面抽出技術手法及びリスク評価手法に関する研究
（土木研究所資料第4333号2016.3）
（※3）千木良ほか、平成26年度砂防学会研究発表会概要集

3. 原位置調査結果による妥当性の検討

抽出結果の妥当性を検討するために、原位置においてすべり面が存在する可能性があるか、また斜面が動く兆候があるかに着目し、物理探査による内部構造の推定、ボーリングによる内部構造の把握と地下水検層、ひずみ率の計測、電気伝導度の計測を行った。

（1）物理探査（電気探査）による内部構造の推定

地中の破砕の著しい層における水の存在が、すべり面形成を促進するとされる。このことから、まず内部構造を把握するため、水があると比抵抗値が低くなる（電気が通りやすくなる）ことを利用して、水の存在を確認するために電気探査を行った。その結果、深度40～50mに顕著な低比抵抗帯（電気の通りやすい層）が存在した（図-10）。これにより、深度40～50mに帯水層の存在が示唆された。このあと、深度40～50mでの破砕の著しい層と水の有無を確認する。

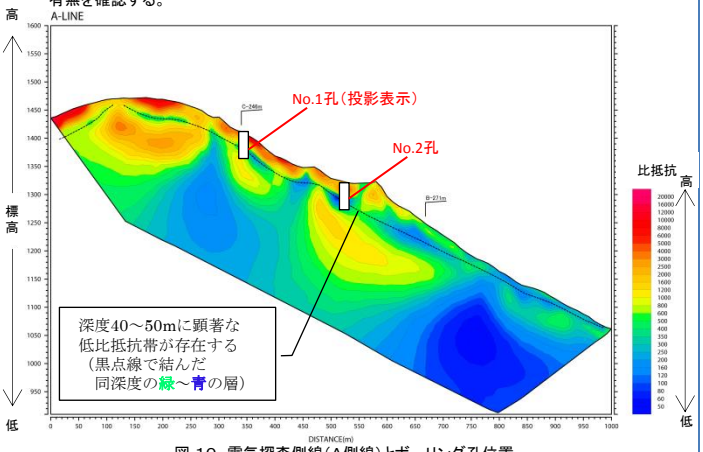


図-10. 電気探査側線（A側線）とボーリング孔位置

（2）ボーリングによる内部構造の把握と地下水検層

先の電気探査により、深度40～50mに帯水層の存在が示唆された。ここでは、同深度で、破砕の著しい層と水の有無について、ボーリング調査と地下水検層により確認した。

ボーリング位置は、電気探査に結果に基づき、表層から深層に向かって比抵抗値の変化が顕著に見られる箇所を選定した。

ボーリングコア（No. 2孔）と地下水検層結果を図-11に示す。

ボーリングコアから、破砕の著しい層が複数の深度に存在することがわかった。破砕の著しいコアが採取された深度の底面には、風化の違いに起因するすべり面が形成されている可能性がある。特に、破砕の著しいコアはNo. 2孔の深度49mにも確認された。

地下水検層は、ボーリング孔に食塩水を投下し、地下水の流入量によって溶解イオン濃度に差が出る（水比抵抗値の高低）ことを利用して、地下水の流入量の大小を確認するものである。その結果、No. 2孔の深度43～67m付近で地下水の流入（溶解イオン濃度の低下＝水比抵抗値の上昇）が確認され、電気探査の結果と同様、深度45～50m付近に特に多い地下水の流入確認された。

以上、電気探査により低比抵抗帯（電気のとおりやすい層）が確認された深度と、ボーリングで破砕の著しい層が確認された深度、さらに地下水検層で地下水の流入が確認された深度が一致した。

これらのことから、破砕の著しい箇所が地下水を呼び込み、帯水層を形成している可能性が確認できた。このことは破砕の著しい層と水の存在により、すべり面の形成が促進されている可能性を示している。

さらに、今回のボーリングコアにおいて、深度49mの破砕の著しい層に粘土層が確認された。一般に、すべり面では、「スメクタイト」という水を含むと膨潤する粘土鉱物が確認される。スメクタイトはその膨潤性により、せん断強度が弱いため、すべり面形成の要因となっていると考えられている。ボーリングコアの破砕の著しい層において、スメクタイトと見られる粘土層が確認されたことからも、当該深度において、すべり面形成が促進されていると考えられる。

No. 1孔についても、概ね同様の結果が得られたが、ここでは割愛する。

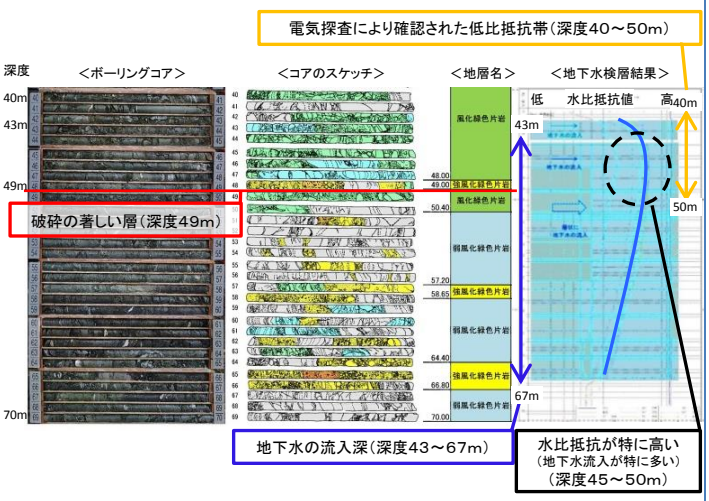


図-11. ボーリングコア（No. 2孔）と地下水検層結果

（3）ひずみ率の計測

ここでは、ひずみ率を計測することで、「危険斜面」が動く兆候があるか否かを確認した。

ひずみ率の計測概念図を図-12に、またひずみ率の計測結果を図-13に示す。クリープ現象は深層崩壊の前兆的な微地形要素と言われている。岩盤クリープ斜面のひずみ率について、比較的ひずみ率が大きい斜面は、表層部分が動き始めている可能性が高いと考えられるため、一部の岩盤クリープ斜面に「危険斜面」として動く兆候が見られたと言える。

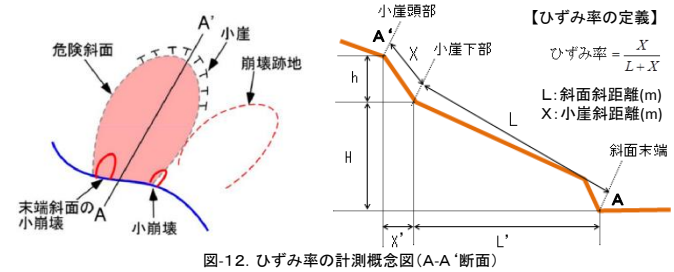


図-12. ひずみ率の計測概念図（A-A'断面）

（4）電気伝導度の計測

地下水の影響が大きいほど「危険斜面」は動く可能性がある。このことから、「危険斜面」から流れ出た渓流の電気伝導度を計測し、その高低により「危険斜面」の動く兆候を捉えることを試みた。計測結果を図-13に示す。一部の岩盤クリープ斜面下の渓流について、高い電気伝導度が計測された。

ここで、図-13のひずみ率と電気伝導度の関係を見ると、ひずみ率が大きい岩盤クリープ斜面の直下流ほど、電気伝導度が高いという正比例の傾向を示している（図-13、14）。電気伝導度の高い渓流は、その直上の斜面が地下水の影響を多く受けている（溶解性イオンの濃度が高い）のであり、その結果、斜面が動き始めているためにひずみ率が大きくなっていると考えられる。

瀬戸ら2016（※3）では、おおむね、ひずみ率の大きい斜面ほど危険度が高いとしている。ひずみ率とその直下流の電気伝導度が正比例の傾向であったという結果は、瀬戸らの研究結果とも整合する。

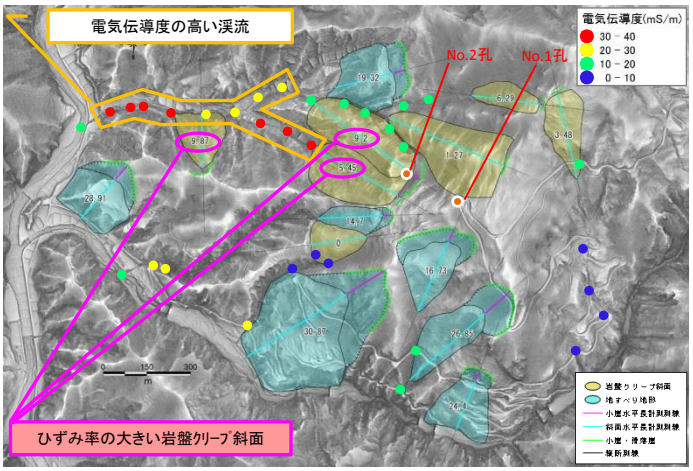
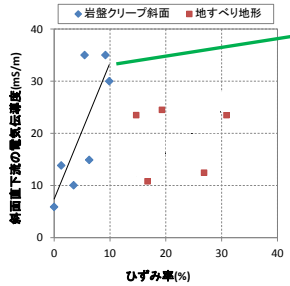


図-13. ひずみ率と電気伝導度の計測結果



ひずみ率と電気伝導度が正比例

（4）妥当性検討の結果

「危険斜面」のうち、危険度が高いとして抽出された斜面が、原位置による内部構造、水文、地質構造等からみても深層崩壊の発生する可能性が高い斜面であることが確認できた。

検討した斜面数が1斜面と少ないが、この斜面においては深層崩壊の発生する恐れのある斜面抽出技術手法について、その妥当性を検証できた。

図-14. ひずみ率と斜面直下流の電気伝導度の関係

4. 今後の課題

本検討で、三波川帯における深層崩壊の発生する恐れのある斜面について、その抽出技術手法の妥当性を検証できたとともに、深層崩壊の発生原因となる水文、地質特性等の知見を蓄積できた。しかし、天竜川上流域には、三波川帯以外に、三つの地質帯（領家帯、秩父帯、四万十帯）がある（図-15）。今後は、これら三つの地質帯においても「危険斜面」の抽出を行い、電気探査や水文、地質調査等を実施し、管内全質帯において斜面抽出手法の妥当性を検証し、その汎用性を確認することで、管内全域の「危険斜面」のリスク評価を目指したい。

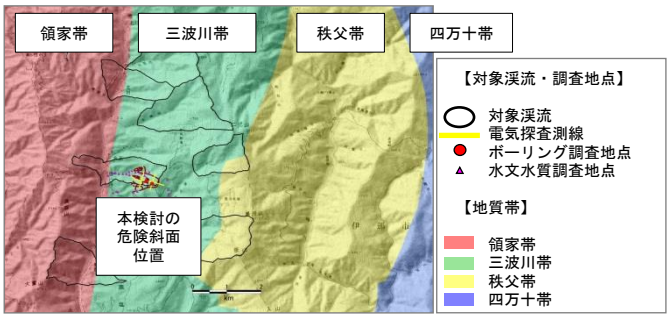


図-15. 本検討の「危険斜面」位置と地質帯