

紀伊山系における深層崩壊メカニズムとリスク評価手法の提案

木下篤彦・山越隆雄・中谷洋明・鈴木大和

1. はじめに

2011年8月25日に発生した台風第12号では、紀伊半島において、72箇所¹⁾で深層崩壊が発生した¹⁾。これらの深層崩壊のメカニズムについては、災害直後から地形・地質・水文等様々な角度から研究が行われている^{2)・3)}。特に、既往研究³⁾から、断層破碎帯^{*}が地下水を遮水し、間隙水圧が上昇した可能性が指摘されている。

本稿では、断層破碎帯の分布と地下水の挙動との関係に着目し、深層崩壊発生箇所においてこれらを調査・観測事例を紹介するとともに、断層破碎帯に着目した深層崩壊リスク評価手法についても提案する。

2. 紀伊半島大水害の概要と調査地について

2011年台風第12号では、総降水量は、紀伊半島を中心に広い範囲で1,000ミリを超え、一部の地域では解析雨量で2,000ミリを超えた¹⁾。特に、深層崩壊に伴う河道閉塞(天然ダム)が発生した(図-1)¹⁾。これらのうち、直轄砂防事業の対象となったのは図-1の赤文字で示した8箇所であり、坪内地区は3箇所のうち1箇所のみが対象となった。また、写真-1に災害2日後の赤谷地区の様子を示す。深層崩壊により河道閉塞(天然ダム)が発生し、その上流に湛水池ができている。湛水池の水位が上がると、越流決壊するおそれがあった。表-1に調査対象とした深層崩壊の規模の概要を示す。

なお、調査対象エリアの地質は、図-1のように付加体に分類される白亜系日高川層群や古第三系音無川層群・牟婁層群が分布している。

3. 断層破碎帯に着目した崩壊メカニズム

断層破碎帯と地下水の動きとの関係を調査する目的で、栗平地区・熊野地区の2箇所²⁾で、物理探査やボーリング調査、ボーリング孔を用いた地下水位の時間変化について調査を行った。

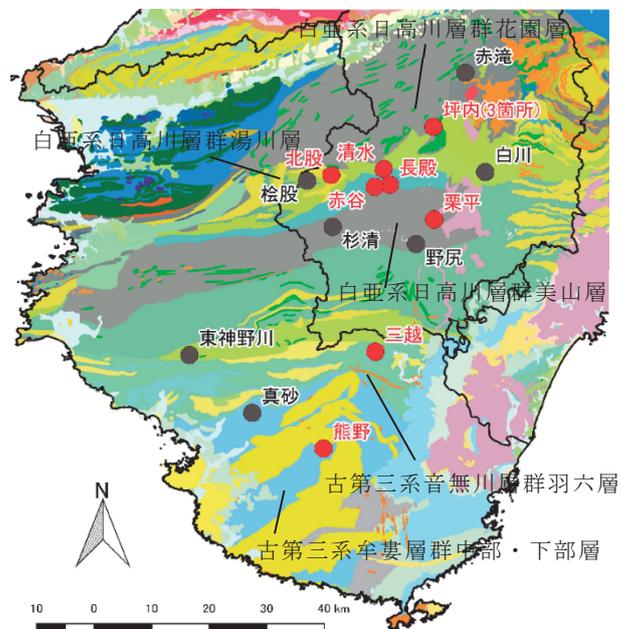


図-1 2011年台風第12号による河道閉塞(天然ダム)発生箇所(17箇所)一覧(20万分の1シームレス地質図に追記)



写真-1 災害2日後の2011年9月6日の赤谷地区(奈良県五條市)の様子

表-1 直轄事業で対象とした深層崩壊の規模の概要

| 地区名 | 長さ(m) | 高さ(m) | 幅(m) | 崩壊土砂量(m ³) |
|-----|-------|-------|------|------------------------|
| 赤谷 | 850 | 600 | 460 | 約1,138万 |
| 長殿 | 650 | 400 | 340 | 約595万 |
| 栗平 | 650 | 450 | 600 | 約2,385万 |
| 北股 | 350 | 190 | 200 | 約117万 |
| 熊野 | 480 | 250 | 440 | 約526万 |
| 清水 | 350 | 250 | 220 | 約160万 |
| 坪内 | 290 | 180 | 230 | 約140万 |
| 三越 | 330 | 180 | 200 | 約50万 |

*土木用語解説：断層破碎帯

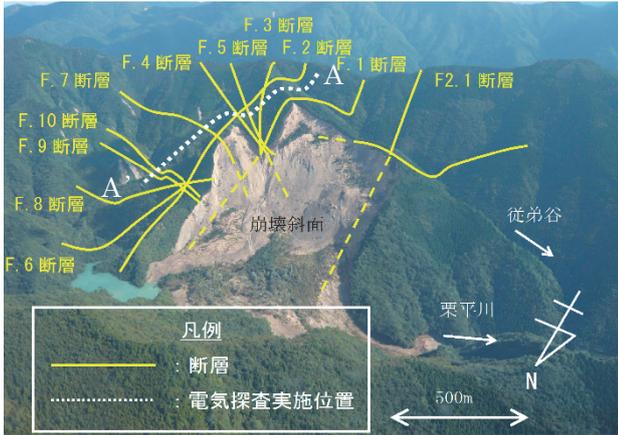


写真-2 栗平地区の崩壊斜面と断層(断層破砕帯)の分布

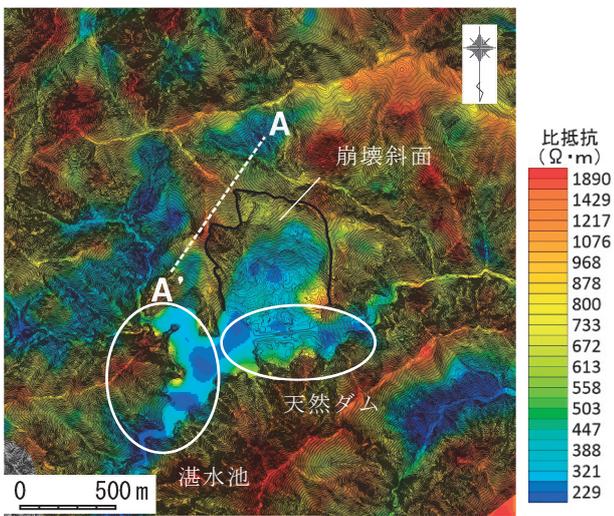


図-2 栗平地区における空中電磁探査による周波数140kHz(地下約0~10m)での見かけ比抵抗の平面分布

3.1 栗平地区での調査事例

栗平地区では、ヘリコプター空中電磁探査※によって広域的な比抵抗分布を調査するとともに、電気探査によって豪雨時の断層破砕帯周辺の地下水の挙動を調査した。

写真-2に栗平地区の崩壊斜面と現地踏査や電気探査を基にした断層(断層破砕帯)の分布図を示す。Araiら³⁾による赤谷地区での調査結果と同様、崩壊地周辺に断層破砕帯が存在することが分かった。

図-2に、ヘリコプター空中電磁探査を用いた地下約0-10mでの見かけの比抵抗分布を示す。崩壊斜面中腹から下部にかけて低比抵抗域となっており、湧水の存在が示唆された。

図-3に、乾燥期(2019年12月3~5日)のA-A'測線(写真-2・図-2)での電気探査の結果を示す。点線は断層破砕帯を表す。矢印で示した2箇所が高比抵抗の領域が計測されており、断層に伴う亀裂が生じているエリアと考えられる。

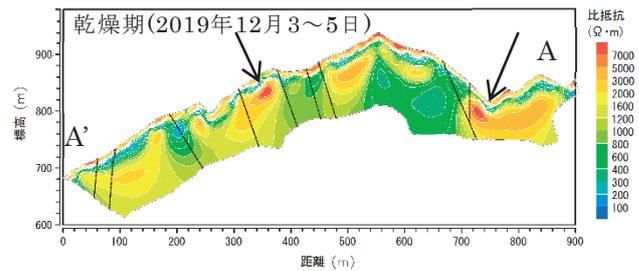


図-3 写真-1・図-2の測線A-A'での乾燥期(2019年12月3~5日)の電気探査の結果

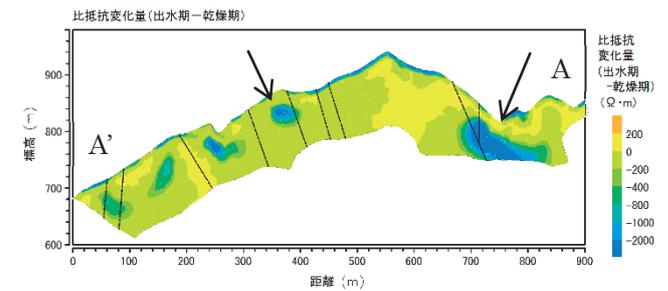


図-4 写真-1・図-2の測線A-A'での出水期(2019年8月20~23日)と乾燥期(2019年12月3~5日)の比抵抗値の差の分布。

図-4に2019年台風第10号(総雨量901mm)4日後のA-A'側線の電気探査と図-3の乾燥期との比抵抗値の差を表す。青で示したエリアが降雨によって比抵抗が大きく低下した領域であり、地下水が流入したと考えられる。図-3に矢印で示した2箇所と同じ位置を図-4でも矢印で示した。これらの箇所は、比抵抗値が大きく低下しており、地下水の通り道となったと考えられる。

以上から、断層破砕帯に伴う地下の亀裂は、降雨時には地下水の通り道となり、2011年の深層崩壊時はこれらの亀裂を通して周辺から崩壊斜面に地下水が流入したと考えられる。

3.2 熊野地区での調査事例

熊野地区では、ヘリコプターによる空中電磁探査により広域的な比抵抗分布を調査するとともに、ドローン空中電磁探査により、豪雨時の断層破砕帯周辺の地下水の挙動を調査した。

写真-3に災害1日後の熊野地区の様子と断層破砕帯の分布を示す。現地踏査や電気探査の結果から、5本の断層破砕帯の存在が確認された。

図-5にヘリコプター空中電磁探査の結果(地下約0-10m)を示す。総雨量98.5mmの降雨の2日後であり、斜面中腹から下部にかけて低比抵抗領域が広がっており、湧水の存在、もしくは地下水が多いことが確認された。

図-6にB-B'測線(写真-3・図-5)でのヘリコプター空中電磁探査による比抵抗縦断分布を示す。

※土木用語解説：空中電磁探査

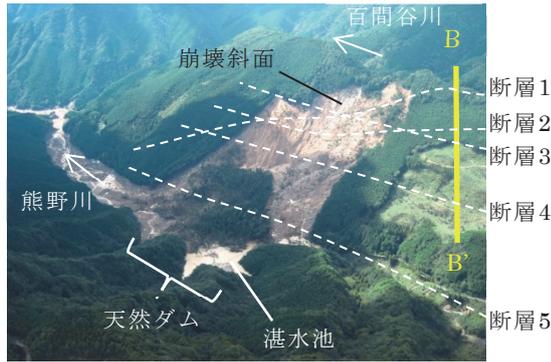


写真-3 災害1日後の熊野地区の様子と断層(断層破碎帯)の分布(2011年9月5日撮影)

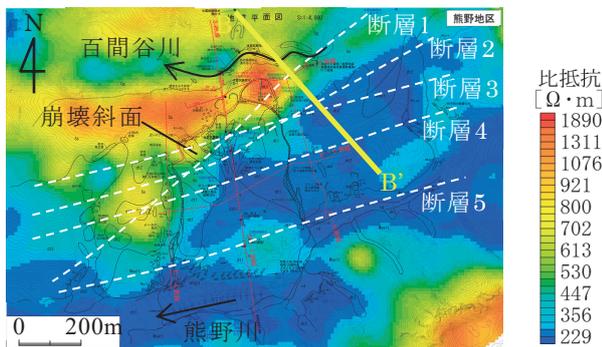


図-5 熊野地区の空中電磁探査の結果(地下約0~10m、2012年11月28日実施)と断層(断層破碎帯)の分布

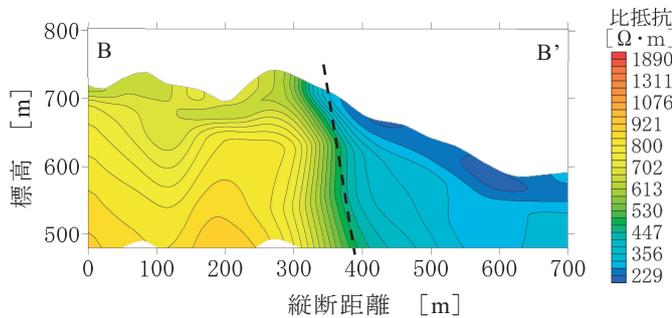


図-6 写真-4・図-5中B-B'断面でのヘリコプター空中電磁探査による縦断比抵抗分布図(地下約0~10m、2012年11月28日実施)

点線を挟んで比抵抗が大きく異なることが分かる。写真-3・図-5からも点線付近は断層破碎帯集中エリアであり、図-6のような比抵抗分布が確認された場合は断層破碎帯が存在することが示唆されることが分かった。

図-7にB-B'測線(写真-3・図-5)でのドローン空中電磁探査による、(a)乾燥期(2020年12月2日)、(b)2020年台風第14号による降雨(総雨量217mm)終了3日後の比抵抗を(a)の比抵抗で除した値の縦断分布図を示す。なお、断層と断層破碎帯は同義である。水色のゾーンは降雨時に比抵抗値が低下したことを表し、地下水の浸入が推定される。(a)から、断層1よりB側と断層2よりB'側に高比

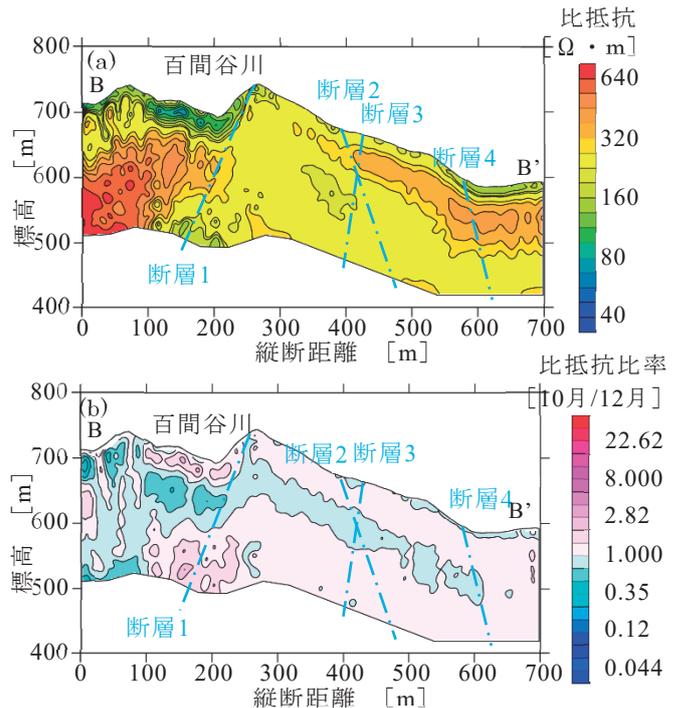


図-7 写真-3・図-5のB-B'測線での(a)ドローン探査による乾燥期(2020年12月2日)の比抵抗縦断分布図、(b)2020年台風第14号による降雨(総雨量217mm)終了3日後の比抵抗値を(a)の比抵抗値で除した値の縦断分布図

抵抗ゾーンが分布する。これらは断層により破碎されて空隙が多いゾーンと考えられる。(b)から、断層1よりB側の水色のゾーンは(a)の結果から破碎ゾーン内に地下水が浸入していると推定され、その地下水は断層1付近で止まっている。このことから、断層1は地下水を堰き止めるタイプの断層破碎帯と推定される。断層1と2の間は、水色のゾーンがB'側に向かって標高が高くなっており、地下水は百間谷に向かって流下していると考えられる。断層1と3の間は、地下水が尾根付近からB'側に向かって地下約80m付近を流下していると考えられ。断層2はボーリング調査の結果から亀裂に富むことが分かっており、さらに、断層2付近は水色のゾーンの幅が大きくなっていることから、地下水を周囲から誘導するタイプの断層と考えられる。断層3付近は、水色のゾーンの幅が断層4に向かって小さくなり、断層4付近は水色のゾーンが消失している。断層3・4は、断層1同様地下水を堰き止めるタイプの断層と考えられる。

4. 断層に着目した深層崩壊リスクマップ

3章から、断層破碎帯が地下水を誘導、もしくは、堰き止めることが深層崩壊の一因になったこ

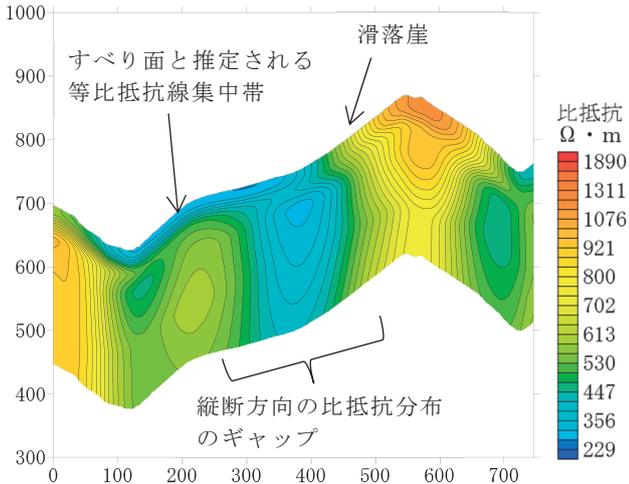


図-8 リスクレベル3の斜面の一例

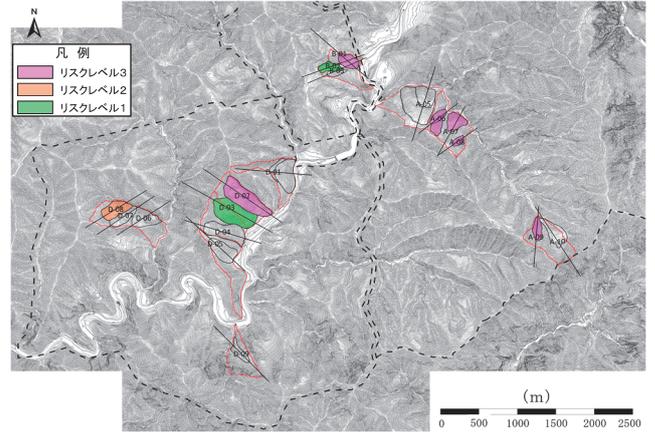


図-9 レーザプロファイラとヘリコプター空中電磁探査による比抵抗分布を基にした深層崩壊リスク評価マップ図の一例

とが示唆された。この成果を基に、紀伊山系において、レーザプロファイラによる地形判読図と空中電磁探査による比抵抗分布を用いて、断層破碎帯の有無に着目した深層崩壊リスク評価マップを作成した。

リスクレベルは3段階とした。レベル1は、ひずみ率(滑落崖の長さを斜面長で除した値)が5%以上であることとした²⁾。レベル2は、それに加えて、空中電磁探査の比抵抗分布の縦断図からすべり面の存在が確認された斜面とした。レベル3は、レベル1・2の条件に加え、図-6のような、斜面縦断方向の比抵抗の違いが見られる斜面とした。リスクレベル3の一例を図-8に示す。このレベルでは、斜面の変形が見られること、緩み域が確認できること、縦断方向の比抵抗分布の違いが確認できる。

リスク評価結果の一例を図-9に示す。このように、レーザプロファイラの取得とヘリコプター空中電磁探査の実施により、大まかに深層崩壊危険箇所を把握できると考えられる。

5. まとめ

本稿では、主に物理探査を用いて、断層破碎帯やそれに連動した地下水の動きに着目して、深層崩壊メカニズム評価やリスク評価手法の提案を行った。実際には、これ以外にも複数の要因が合わさって深層崩壊が発生していると考えられるため、今後とも現地での観測や物理探査、ボーリング調査等を通して検討していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所・独立行政法人土木研究所：平成23年(2011年)紀伊半島台風12号土砂災害調査報告、213p、2013
- 2) Chigira, M., Tsou, C., Matsushi, Y., Hiraiishi, N. and Matsuzawa, M. : Topographic precursors and geological structures of deep-seated catastrophic landslides caused by Typhoon Talas, *Geomorphology*, 201, pp. 479-493, 2013
- 3) Arai, N. and Chigira, M. : Rain-induced deep-seated catastrophic rockslides controlled by a thrust fault and river incision in an accretionary complex in the Shimanto Belt, Japan, *Island Arc*.2018 ; 27 : e12245, 2018

木下篤彦



国土交通省国土技術政策総合研究所土砂災害研究部砂防研究室(近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術センター) 主任研究官、博士(農学)
Dr. KINOSHITA Atsuhiko

山越隆雄



国土交通省国土技術政策総合研究所土砂災害研究部砂防研究室長、博士(農学)
Dr. YAMAKOSHI Takao

中谷洋明



国土交通省国土技術政策総合研究所土砂災害研究部土砂災害研究室長、博士(農学)
Dr. NAKAYA Hiroaki

鈴木大和



国土交通省国土技術政策総合研究所土砂災害研究部土砂災害研究室 研究官
SUZUKI Yamato