

深層崩壊発生斜面の特定に向けた地盤構造調査法

鈴木隆司* 内田太郎** 田村圭司***

1. はじめに

近年、時間雨量や連続雨量の極値を更新する豪雨が頻発し、これに伴って**深層崩壊**が発生している。例えば、平成16年9月の台風21号による豪雨では、三重県旧宮川村の宮川支川春日谷で深層崩壊が発生し、一時的に天然ダムを形成した¹⁾。また、平成17年9月の台風14号による記録的な大雨では、宮崎県鰐塚山周辺地域で深層崩壊が多数発生している²⁾。

このような深層崩壊に伴う土砂災害を防止・軽減するためには、事前に深層崩壊の発生の恐れのある区域(溪流)を精度良く抽出する手法が必要である。土砂管理研究グループ 火山・土石流チームでは、深層崩壊の発生のおそれのある地域の特徴として、地盤の隆起速度が大きく、地盤が脆弱になっている地域(例えば、構造線や第三系堆積岩の付加体が分布する地域など)に注目して、地質と第四紀隆起量の分布から深層崩壊の発生危険度の高い地域を絞り込み、さらに、その地域内で、比高が大きく比較的急勾配な斜面で、厚い風化層があるなどの崩壊の発生指標となる情報に基づいて、深層崩壊の発生の恐れのある区域(溪流)を空中写真判読や数値標高データ(DEM)の解析から抽出する手法の開発を行っている^{3),4),5),6)}。

一方、より高精度な崩壊予測のためには地下構造の探査技術の発展が必要不可欠である。しかし、斜面の地下の状態を調査する手法としては、ボーリング調査や電気探査・弾性波探査等の地上物理探査法を用いているのが現状で、深層崩壊危険箇所の抽出に利用できるような同一精度で広範囲に面的に情報が得られる調査手法は、現時点では確立されていない。しかし、近年、送受信コイルをヘリコプターによって曳航することにより、地下の比抵抗を計測する空中電磁探査法が開発され、トンネル計画におけるルート選定や地すべり調査等に適用されている事例がいくつかある。

そこで本研究では、深層崩壊が多発した地域に空中電磁探査法を適用するとともに、ボーリング調査を行い、両者の結果を比較することによって、崩壊面(すべり面)となり得る部位を把握すること、及び深層崩壊の発生の恐れのある層厚を面的に把握することの可能性について検討したので報告する。

2. 研究対象地域の地形・地質及び災害の概要

本研究の対象地域は、平成17年9月台風14号の大雨によって深層崩壊が多数発生した宮崎県鰐塚山地の最高峰である鰐塚山(海拔1,118m)の北東側区域で、対象面積は約4.5 km²である(図-1)。稜線付近の斜面は、30度以上の急勾配を呈し、山腹斜面には地すべり地形が多く見られる。当該地区周辺の地質は、古第三紀四万十層群の堆積岩付加体(主に砂岩及び泥岩とその互層)に属する日向層群と日南層群である⁷⁾。

次に、台風14号によって当該地区にもたらされた大規模な土砂災害の概要について記す。平成17年9月台風14号に伴う大雨では、20~30mm/hの降雨強度が約14時間継続し、4日間(9月3~6日)

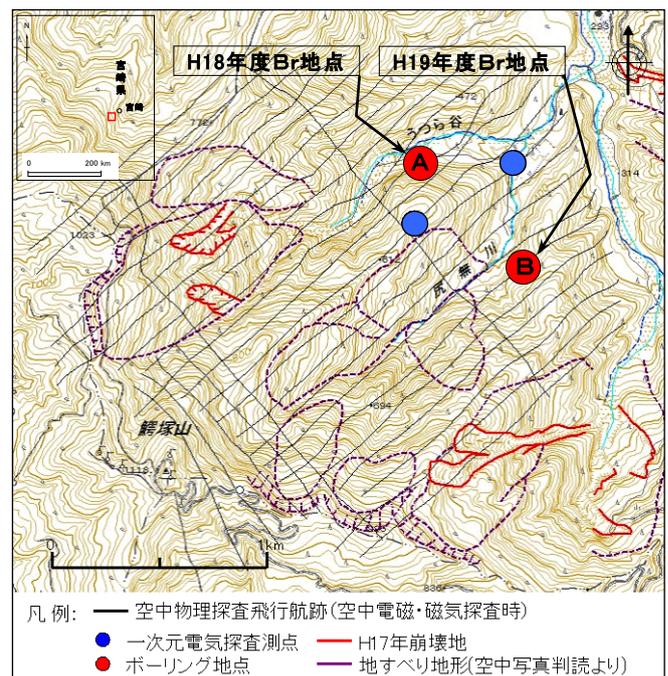


図-1 研究対象地域(宮崎県宮崎市田野町)

A Method of a Geophysical Structure Survey for Identifying Areas Prone to a Deep-seated Landslide Occurrence

*土木用語解説：深層崩壊

の期間雨量が1,013mm(鰐塚山；気象庁アメダス観測所)に達した。この大雨により、大規模な深層崩壊が鰐塚山地地域の12箇所で発生した。本研究の計測対象範囲においては3箇所で深層崩壊が発生し、その平均崩壊深は約10～15m、総崩壊土砂量は約75万m³と推定された²⁾。

3. 調査の概要

3.1 空中電磁探査法の概要

空中電磁探査法は、計測に適する飛行高度(対地高度30～70m)と飛行速度を保ったヘリコプターによって送受信コイルを曳航し、地盤内に発生する磁場を計測してその比抵抗分布を調べる方法である。航跡はヘリコプターに搭載した電波高度計やGPSナビゲーションシステムによって記録する。この探査法の計測精度は理論上約10mで、発信できる一次磁場の強さの制限により、探査深度は地表下100～150m程度となる。使用した計測機器の仕様を表-1に示す。

空中電磁探査によって計測されるデータは、地盤の中の電気の流れにくさを表す比抵抗(単位： $\Omega \cdot m$ [オーム・メートル])である。地盤の比抵抗は、一般的には、粘土鉱物の含有量が多いほど、体積含水率(飽和度×間隙率)が高いほど、低くなる⁸⁾。

なお、空中電磁探査は、平成18年10月12～14日に実施した。測線間隔は100mとした(図-1)。

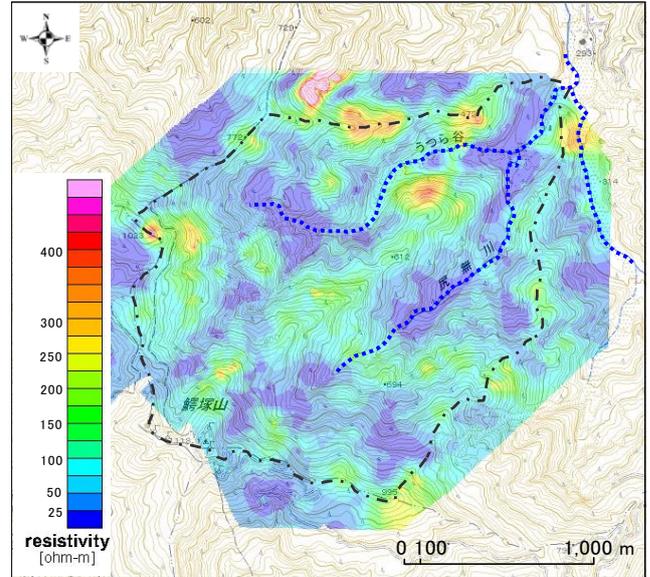
3.2 ボーリング調査

図-1に示した2地点で、土質や地盤の状態と空中電磁探査の計測結果を対比することを目的にボーリング調査を実施した。

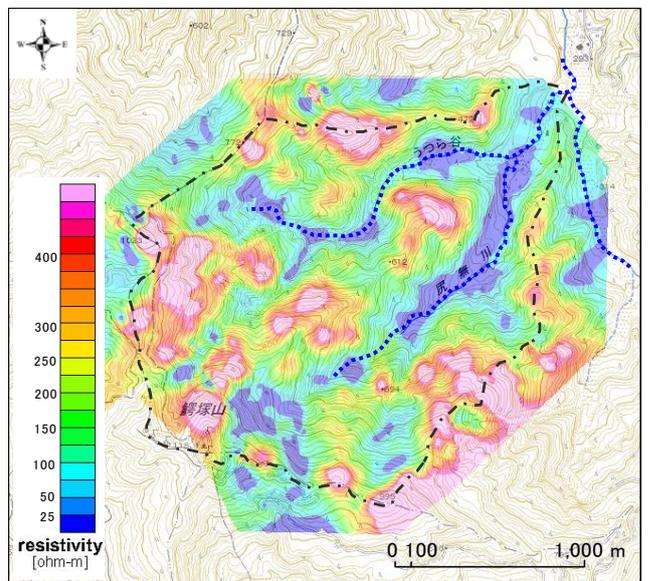
A地点は、深層崩壊履歴のない等高線が平行な平衡斜面で、平均勾配が約37度の斜面下部にあ

表-1 計測に用いた機器の仕様

機器	型名
ヘリコプター	ユーロコプター式 AS350B3型 (ユーロコプター社)
空中電磁探査装置 (曳航型バード)	DIGHEM V HEM (Dighem Surveys & Processing (Canada) 社製)
データ収録装置	PDAS1000 (Picodas (Canada) 社製)
電波高度計	JRA-100 (King社製)
気圧高度計	1241-M3B2C (Rosemount (U.S.A) 社製)
レーザ高度計	G150 (Optech Systems (Canada) 社製)
GPS受信機	MX4200D (Magnavox (Canada) 社製)
GPS航法システム	PNAV-2001 (Picodas (Canada) 社製)
地上GPSモニタ	MX4200D (Magnavox (Canada) 社製)



① 等深度比抵抗分布図(深度20m)



② 等深度比抵抗分布図(深度80m)

図-2 空中電磁探査の結果

たり、ボーリングの掘削深度は75.00mである。

B地点は、平成17年に深層崩壊を起こした斜面に隣接し、平均勾配約30度の斜面中腹部にあたる。この斜面は等高線に若干の乱れが認められることから岩盤クリープが生じていたと考えられる斜面である。ボーリングの掘削深度は41.00mである。

4. 調査結果

4.1 空中電磁探査結果の概要

深度が20m及び80mの空中電磁探査の結果を図-2に示す。深度80mの方が深度20mに比べて比抵抗値が高く、計測区域全体として深度が増すに

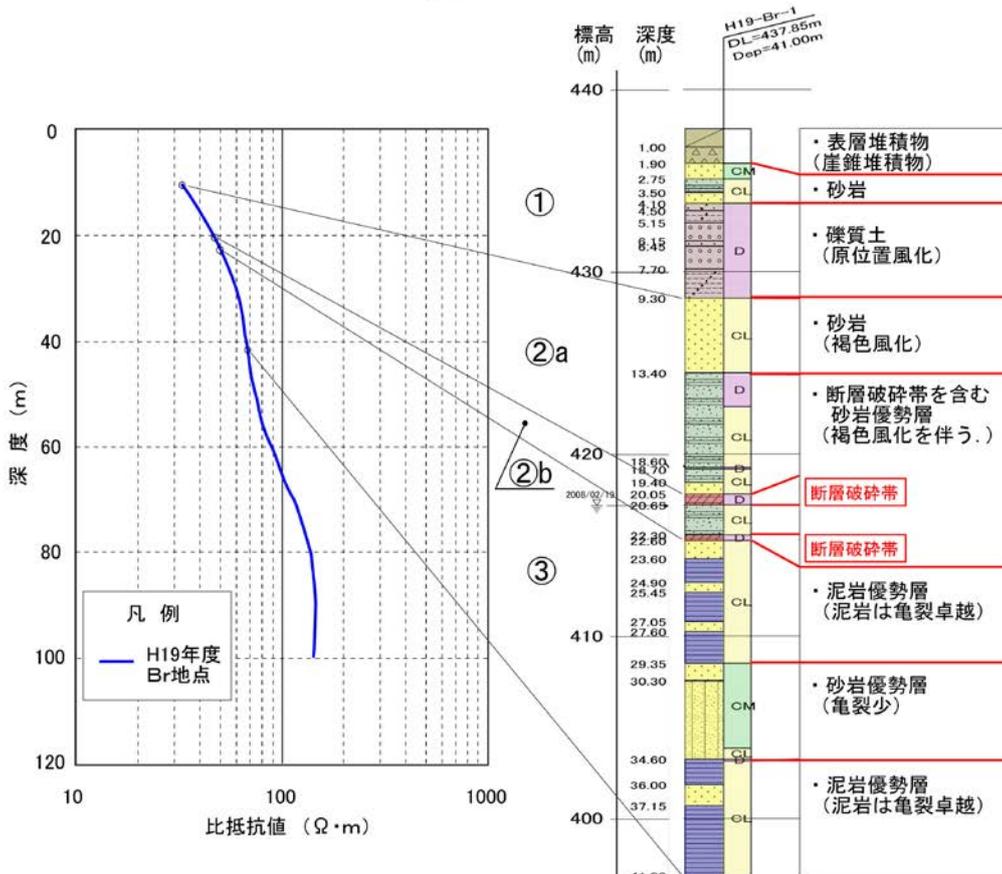
つれて比抵抗値が増大する傾向が認められる。また、谷沿いの比抵抗値は他の部位に比べて低い傾向がある。

4.2 ボーリング調査と空中電磁探査結果の比較

ボーリング調査結果と空中電磁探査による比抵抗値の比較を図-3に示す。空中電磁探査の計測区

域内では、図中の右下に示すようにA,B2地点においてボーリング調査を行っている。以下では、B地点におけるボーリング調査による地盤状況と比抵抗値の関係について詳述する。

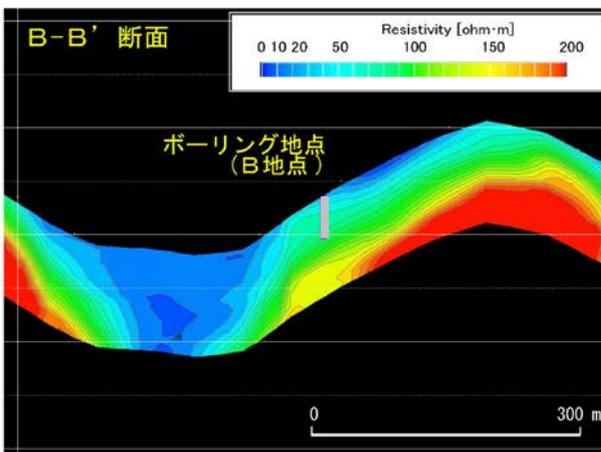
- ① 地表から深度1.90mまでの表層部分は崖錐堆積物、その下の深度9.30mまでは原位置風化の



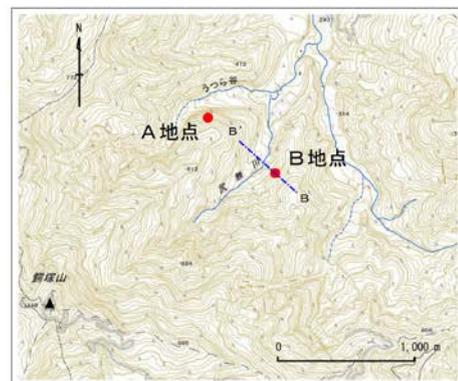
(a) 空中電磁探査データから作成したボーリング地点の比抵抗値プロファイル

※ 図中の丸数字は表-2の区分と対応する。

(c) ボーリング柱状図(簡易図)



(b) 空中電磁探査データから作成したボーリング地点を含む尻無川の谷部の比抵抗値横断面図



(d) ボーリング地点と作成した比抵抗断面図の位置図

図-3 ボーリング調査(B地点)結果と空中電磁探査(比抵抗値)結果の比較

進んだ砂岩起源の礫質土で、著しく脆弱化している。

② 深度9.30～22.60mは砂岩～砂岩優勢層で、13.40m以深では粘土状泥岩を挟在している。一部は比較的硬質な砂岩であるが、全般的には亀裂が多く、亀裂沿いには著しい褐色風化が認められることから、地下水位の変動の影響を受けていることが推定され、降雨条件によっては地下水位がこの部位(深度10m付近)まで上昇していると考えられる。深度9.30～22.60mの部分の比抵抗値は30～50Ω・mで、表層から深部に向かって値が漸次大きくなる。なお、深度20.05～22.60mは断続的に断層破碎帯を挟み、ボーリング調査時にはこの部位で地下水位が確認された。

③ 深度22.60m以深では、泥岩優勢層と砂岩優勢層が交互に現れる。泥岩優勢層は亀裂が卓越するが、砂岩優勢層では亀裂が少なくなり、棒状コアが採取されている。この部分(深度22.60m以深)の比抵抗値は60Ω・m以上である。

また、A地点のボーリング調査結果は省略したが、B地点と類似していた。

両地点の深度ごとの地盤状態と比抵抗値の関係をまとめると表-2のようになる。

4.3 深層崩壊の発生した斜面の比抵抗値

次に、ここまでの調査結果に基づいて、深層崩壊を起した斜面の土層の比抵抗値を推定する。

B地点に隣接する斜面では、崩壊深が約10～15mと推定される深層崩壊が発生している。空中電磁探査及びボーリング調査の結果では、崩壊地に隣接する斜面の深度10～15m付近は比抵抗値が30

～40Ω・mを示し、比較的硬質な砂岩と砂岩優勢互層が分布していて、粘土状の泥岩を挟在している。表-2で示した②の地盤状況に該当する。また、この層(深度10～20m付近)は亀裂沿いに著しい褐色風化が認められていたことから、常時は地下水位が見られないが、豪雨時には地下水位が上昇し、斜面の安定性が低下する可能性があると考えられる。

さらに、A地点を含めたボーリング調査と空中電磁探査の結果の比較(表-2)では、当該地区においては、比抵抗値が40～60Ω・mの②bの層は亀裂や破碎部が多く、風化が進行した地盤であるのに対して、比抵抗値が60Ω・m以上の③の層は比較的亀裂が少なくなっていた。

以上のことから、40～60Ω・m程度の比抵抗値の部位は風化が進行している上、地下水位の変動の痕跡(褐色風化)が見られる層と考えられる。B地点の隣りで発生した深層崩壊によって崩れた深さが概ね10～15mの部位は、表-2の②aまたは②bの層に該当するものと推定できることから、比抵抗値が概ね50Ω・m程度(あるいはそれ以下)の部分が崩れた可能性が高いと考えられる。

5. 深層崩壊の恐れのある層厚の推定

これまでの検討結果に基づいて、比抵抗値が50Ω・m以下の土層部分を深層崩壊の発生の恐れのある風化層(以下、「風化層」とする)と仮定し、50Ω・m面より下位の比抵抗値50Ω・m以上の部分を深層崩壊の発生する恐れのない新鮮な岩盤(以下、「新鮮な岩盤」とする)と仮定して、すべり面となる可能性の高い新鮮な岩盤面(比抵抗値50Ω・mの面)の勾配及びその深さまでの風化層厚を算出した(図-4)。

表-2 当該地区における土質・地盤の状態と比抵抗の関係

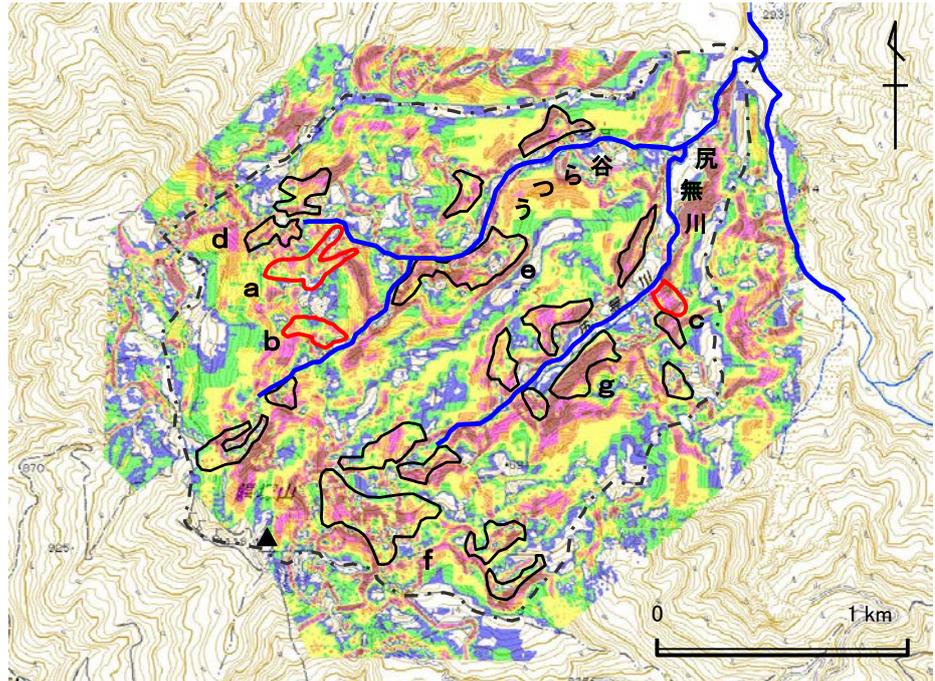
土質区分・地盤状況	深度 (m)		当該地区の
	A地点(H18)	B地点(H19)	比抵抗値(Ω・m)
① 表土層, 崖錐堆積物, 礫質土(土砂)	0.00～6.50	0.00～9.30	— (測定レンジ外)
— 塊状砂岩(褐色風化)	6.50～26.15	—	60～100
②a 砂岩～砂岩優勢層(褐色風化),	—	9.30～20.05	30～40
断層破碎帯, ②b 破碎部を持つ泥岩優勢層 または砂岩優勢層	26.15～67.90	20.05～22.60	40～60
③ 泥岩優勢層(泥岩の亀裂;多)	67.90～75.00	22.60～29.35 34.60～41.00	50～80
	—	29.35～34.60	60～

※ 掘削時地下水位 16.35 ※ 掘削時地下水位 20.65

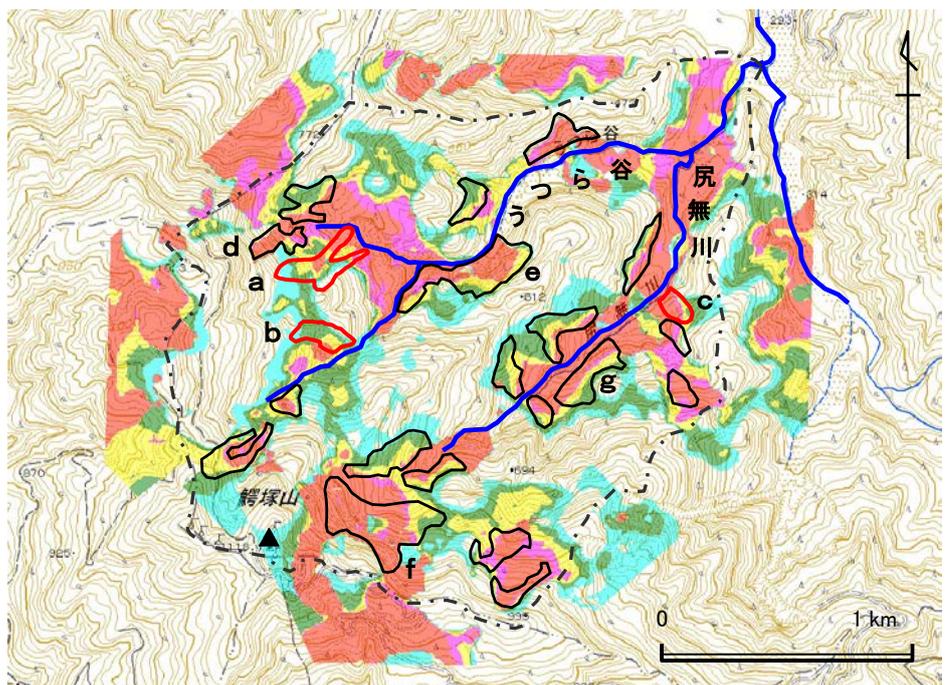
* 地点位置は図-3(c)を参照

図-4から明らかなように、計測区域内に3箇所ある深層崩壊箇所(a～cの各地点)周辺は、風化層と新鮮な岩盤との境界面の傾斜度が比較的急勾配(25～30度以上)であると考えられる区域であった。また、崩壊地周辺の斜面は、いずれも50Ω・mまでの層厚が20m以上あった。これらのことから、崩壊した斜面の部位は、崩壊前には厚い風化層を形成していた場所であったことが推定される。

図-4(b)を見ると、風化層厚(50Ω・mの比抵抗等値面から上位の層厚)が20m以上、かつ比高差100m以上の長大な斜面のある区域は、うつら谷流域では深層崩壊地aの近傍の上流部(d地点)と中流部二股分岐点付近の右岸斜面(e地点)の2箇所、尻無川流域では最上流部(f地点)と中流部右岸斜面(g地点)の2箇所に認められる。一方、谷底平坦地は低比抵抗の厚い土層を形成しているものの



① 50Ω・m面の傾斜分布図



② 50Ω・m面までの層厚分布図

図-4 深層崩壊危険箇所を抽出するための解析図の例

二次移動堆積物が分布しているものと考えられ、また比抵抗値 $50 \Omega \cdot m$ の境界面の勾配も緩い。すなわち、境界面が急勾配(30度以上)で風化層厚が20m以上ある深層崩壊が発生する可能性のある箇所は、上記に述べた4箇所に限られる。

これらのことは、 $50 \Omega \cdot m$ 程度の比抵抗値を指標(閾値)とすることによって、崩壊面となり得る境界面の勾配とその地点の層厚から、深層崩壊の発生の恐れのある斜面の候補を抽出できる可能性があることを示唆している。

6. まとめ

本研究では、深層崩壊の発生区域において空中電磁探査を実施し、比抵抗値の3次元的な解析から深層崩壊の発生をコントロールすると考えられる地下構造の実態把握の可能性について検討した。解析では、物性値である「比抵抗値」とボーリング調査の柱状図を対比した。

その結果、ボーリング調査結果と空中電磁探査結果を対比することにより、深層崩壊によって崩れる可能性がある風化層と崩れる可能性の低い新鮮な岩盤との境界面の比抵抗値を推定することができ、その結果として風化層厚の空間分布が推定できた。この結果から、深層崩壊の発生する危険性が高い箇所の抽出ができる可能性のあることがわかった。

今後の課題としては、深層崩壊発生の恐れのある風化層の比抵抗値が地質によって異なることが十分に考えられるため、風化層と新鮮な岩盤との境界となる比抵抗値(閾値)の設定をいかに的確に行えるかということが挙げられる。それを踏まえた上で、深層崩壊発生の危険性を定量的に表す手法を開発する必要がある。

謝 辞

本研究を進めるにあたっては、国土交通省九州地方整備局宮崎河川国道事務所をはじめ、宮崎県土木部(現 県土整備部)砂防課、宮崎森林管理署等の関係機関にご協力を頂きました。また、空中電磁探査の計測とデータ処理については応用地質株式会社東京本社 ジオテクニカルセンターに実施してもらいました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 近藤観慈、林 拙郎、沼本晋也：2004(平成16)年台風21号による三重県宮川村の斜面災害、日本地すべり学会誌、第41巻、第4号、p.97～100、2004.
- 2) 鰐塚山山系土砂災害対策検討委員会：鰐塚山山系土砂災害対策検討委員会 報告書、pp.68、2006.
- 3) 鈴木隆司、栗原淳一、桜井 亘、酒井直樹：豪雨を誘因とする深層崩壊発生箇所の特徴とその抽出手法について、土木技術資料、第49巻、第5号、p.58～63、2007.
- 4) 鈴木隆司、栗原淳一、桜井 亘、堤 宏泰、下西浩治、井上亨郁：深層崩壊の発生危険区域抽出のための定量的評価の試み、平成19年度砂防学会研究発表会概要集、p.34～35、2007.
- 5) 内田太郎、鈴木隆司、田村圭司：地質及び隆起量に基づく深層崩壊発生危険地域の抽出、土木技術資料、第49巻、第9号、p.32～37、2007.
- 6) 鈴木隆司、内田太郎、田村圭司、寺田秀樹、堤宏泰、下西浩治、井上亨郁、相馬竜司：深層崩壊発生危険度評価に有効な地形指標の提案、平成20年度砂防学会研究発表会概要集、p.10～11、2008.
- 7) 旧 通商産業省工業技術院 地質調査所：1/20万地質図幅「宮崎」、1997.
- 8) 物理探査学会 物理探査要領作成委員会編：物理探査適用の手引き(とくに土木分野への利用)、p.108、2000.

鈴木隆司*



砂防エンジニアリング株式会社(前独立行政法人土木研究所つくば中央研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム 交流研究員)
Ryuji SUZUKI

内田太郎**



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム 主任研究員、農博
Dr. Taroh UCHIDA

田村圭司***



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム 上席研究員
Keiji TAMURA