

P9. ドローンによる空中電磁探査を用いた斜面の変状の違いと比抵抗構造の比較

Comparison of different slope deformations and resistivity structures using airborne electromagnetic survey by drone

○大宿陽輝・野々村敦子・長谷川修一（香川大学）

1. はじめに

政府は「防災・減災、国土強靱化のための5か年加速化対策」¹⁾を掲げ、激甚化・頻発化する気象災害や、今後予想される地震災害から社会システムを機能維持するために対策施工を行っている。山地が大半を占める地形的特性や高齢化急進などの社会的特性を踏まえると四国は対策の必要性が高い。対策箇所と施工方法の適切な選定のためには、斜面における崩壊の可能性が高い危険箇所を把握することが必要である。詳細な地質構造把握のためにはボーリング調査や電気探査などの物理探査が挙げられるが、近年では広域のデータを容易に調査できる手法として空中電磁探査による比抵抗データ解析の有用性が期待されており、地質・水理構造把握の検討がなされている。田中ら²⁾は、ヘリコプターからの空中電磁探査データとボーリングデータを比較し、比抵抗の相対的な関係と岩盤の緩みおよび飽和度との間に対応関係があることを示した。城森ら³⁾は、より小規模な探査実施のためのドローンを用いた空中電磁探査において、一定深度までで高密度電気探査による地盤の比抵抗構造との整合性が見られることを示した。奥村ら⁴⁾は、ドローンによる空中電磁探査とボーリングデータとの組み合わせにより、「土砂・風化岩」と「新鮮岩」の境界および地下水位の推定が可能であることを示した。

本研究では、変状の程度が異なる2つの斜面において、ドローンによる空中電磁探査より得られた比抵抗データを用いて、比抵抗構造と地質状況の関係性を明らかにすることを目的とする。はじめに雨期と乾期の2時期で比抵抗データから比抵抗断面図および探査深度平面図を作成し、斜面の地質構造の特徴を推定した。次にボーリングデータを用いて地質情報との比較から、推定した緩み域の妥当性を検証した。

2. 調査対象地域及び現地状況

本研究の調査対象地域は、徳島県三好市西祖谷山村有瀬地区(以下、有瀬地区)である。有瀬地区は昭和35年に有瀬地すべり防止区域に指定されて以降、対策施工が継続して行われている。地質は三波川帯に属しており泥質片岩が広く分布し、一部砂質片岩や塩基性片岩が優勢な部分もある。点在する緩斜面が宅地や農地として利用されている。

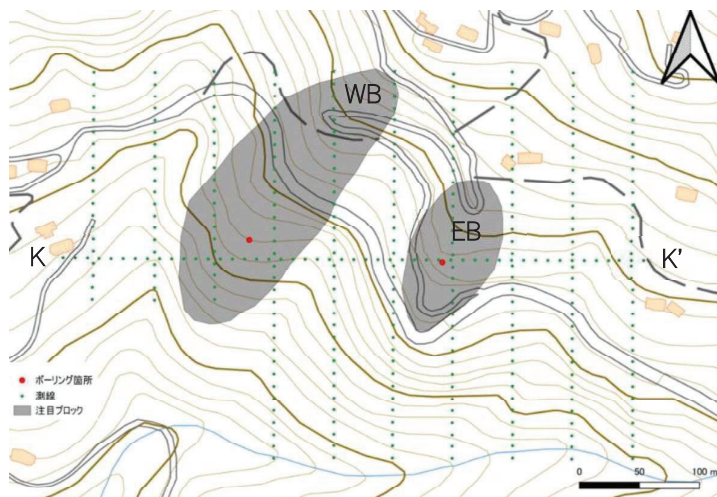


図1. 研究対象地域と着目した
東ブロック(EB)および西ブロック(WB)

現地踏査では特に東部と西部で変状の違いが顕著に確認できた。東部では擁壁が破断し、道路やガードレールが沈降した箇所が見られた。

一方、西部では変状はほとんど見られず、擁壁にクラックが入っている箇所はあるが、そのクラックが道路までは伸びていなかった。現地状況と地形図判読を基に、変状の異なる尾根を東・西ブロック(以下、EB 及び WB)として定義する。

各ブロックのボーリングデータからは以下のような特徴が見られた。EB では、地表から地下 30m まで礫、砂質片岩、塩基性片岩、泥質片岩が順に分布しており、岩盤はいずれにも風化の進行が見られた。一部空隙や粘土化した箇所も存在している。WB では、地表より 5m 程度まで崖錐の堆積が認められ、その下には 40m 付近まで新鮮かつ硬質な泥質片岩が分布している。40m 以深の領域については、WB では砂質片岩、EB では泥質片岩が分布し、ともに亀裂が多く風化した状態である。ボーリングデータからも、WB と EB との地質状態の違いが顕著に見られた。

3. データと解析方法

今回の分析では、ドローンによる空中電磁探査は雨期(2021/7/23)と乾期(2021/11/26)の 2 時期でともに 11 本の測線で測定した。観測日以前の 10 日間の累積雨量は雨期で 100.0mm、乾期で 31.5mm である。

比抵抗断面図は、深度 5m ごとに得られたデータを内挿して作成した。比抵抗平面図は、測線上の平面方向に 10m ずつ得られたデータを、セルサイズを 5m に設定し探査深度ごとにクリギングして作成した。雨期と乾期の比抵抗データの分布傾向を EB、WB、それぞれで分析し、ボーリングデータとの整合性を検証した。

4. 結果

4.1 比抵抗断面図

東西にブロックを通過する測線 (K-K') の比抵抗断面図及びボーリング調査箇所と空中電磁探査実施日における地下水位を図 2 に示す。地下水位は、雨期の EB が 27.61m、WB が 27.83m、乾期の EB が 29.17m、WB が 28.74m である。

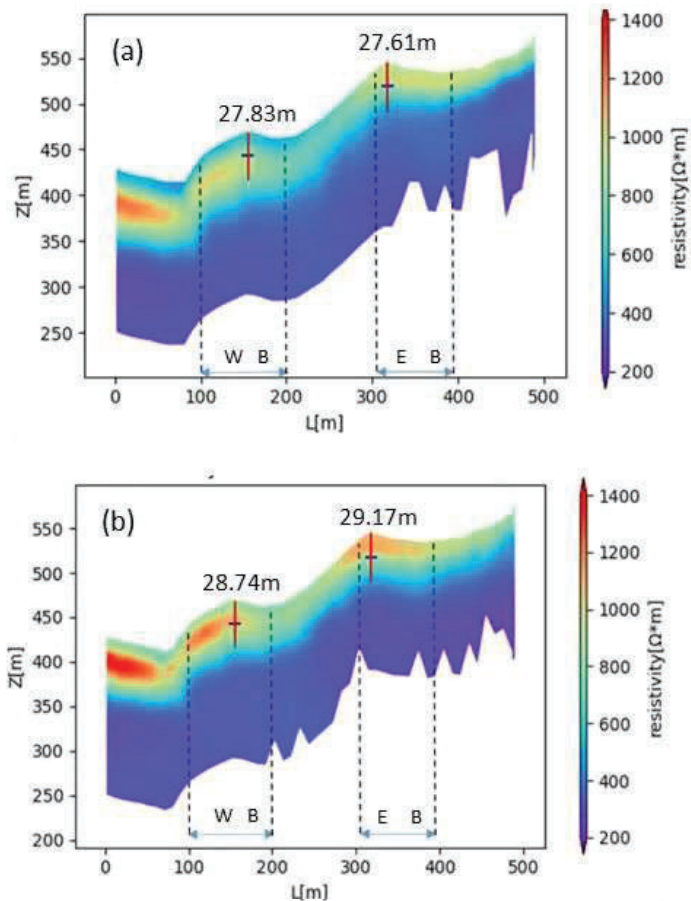


図 2. K-K' 測線の比抵抗断面図 (a) 雨期 (b) 乾期
(グラフ内の数値は地下水位を示す)

WB では、表層付近で乾期に $800\sim 900\Omega\cdot\text{m}$ 、雨期で $500\sim 600\Omega\cdot\text{m}$ の値を示し、比抵抗の低下が $300\Omega\cdot\text{m}$ 程度認められる。地下 20m-40m では両時期共に $900\Omega\cdot\text{m}$ 程度の高い値を示している。

EB では、WB と鉛直方向の分布パターンが異なり表層部から 30m 程度まで高比抵抗帯が存在し、両時期共に $1000\Omega\cdot\text{m}$ 程度の高い値を示している。地表より比抵抗が漸次的に低下する分布が見られる。EB、WB とともに地下水位は 27m 以深であることから、これらの層は不飽和の状態である。以上より、両ブロックにおける透水性の違いが比抵抗分布に反映されているといえる。

4.2 探査深度平面図

深度 5m、深度 20m、深度 50m における雨期と乾期の比抵抗平面分布を図 3~5 に示す。WB と EB の比抵抗値は各ピクセルの値より作成したヒストグラムで比較している(図 6~8)。

深度 5m では、WB における比抵抗の最頻値が乾期で $800\sim 900\Omega\cdot\text{m}$ 、雨期で $500\sim 600\Omega\cdot\text{m}$ であり、全体的に低下する傾向が見られる(図 3,図 6b)。一方、EB は乾期で 90%程度のデータが 900

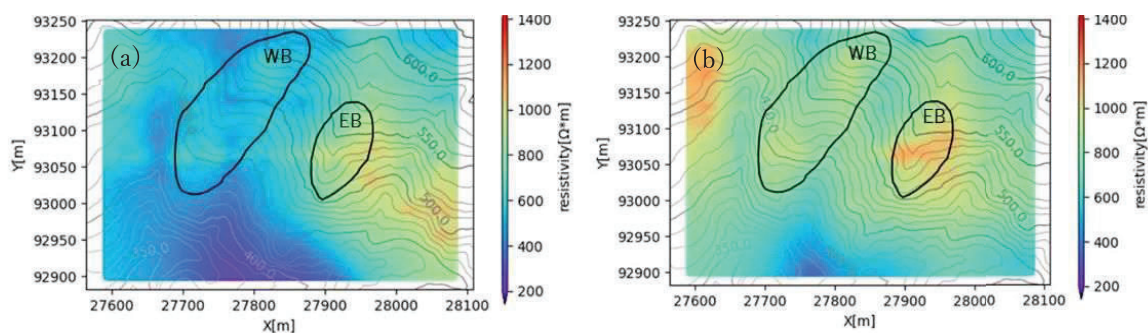


図 3. 深度 5m 比抵抗平面図 (a) 雨期 (b) 乾期

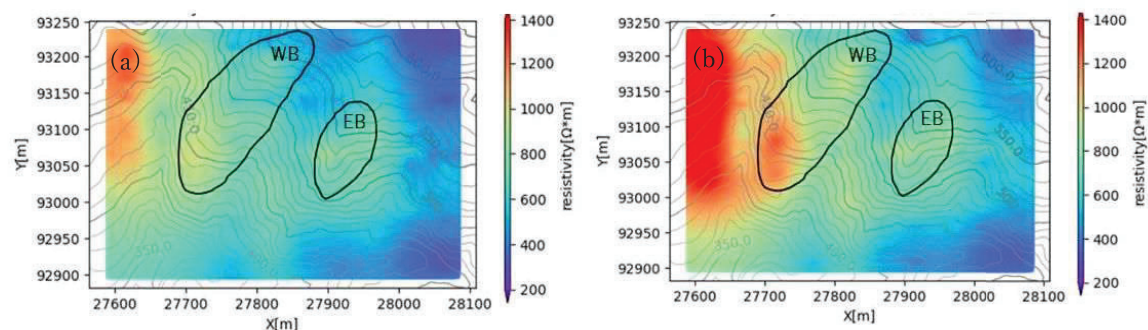


図 4. 深度 20m 比抵抗平面図 (a) 雨期 (b) 乾期

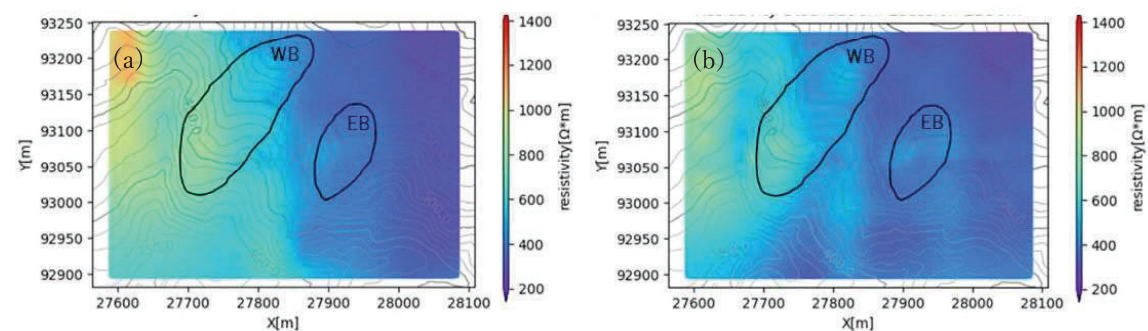


図 5. 深度 50m 比抵抗平面図 (a) 雨期 (b) 乾期

$\Omega \cdot m$ 以上であり、雨期には $700-1000 \Omega \cdot m$ に低下しているものの、WB と比べて低下量は小さい (図 3, 図 6a)。

深度 20m では両ブロック共に 2 時期の変化が小さい (図 4 および図 7)。WB では、乾期の最頻値が $1000-\Omega \cdot m$ で、雨期の比抵抗は 70%程度が $700 \Omega \cdot m$ 以上の値を示し、深度 5m と比較して増加が見られる (図 7b, 図 8b)。一方、EB では雨期と乾期ともに最頻値が $700-800 \Omega \cdot m$ であり、こちらは深度 5m と比較して分布の低下が見られた (図 6a, 図 7a)。以上より、表層からの比抵抗の鉛直分布が EB では高比抵抗から低比抵抗へ、WB では低比抵抗から高比抵抗へ変化するパターンの違いがあることが分かった (図 8)。

深度 50m では、各ブロックで両時期共に似た分布を示している。EB は $500 \Omega \cdot m$ 以下の低い比抵抗値を示しており、2 時期の変化もほとんど見られない (図 5)。

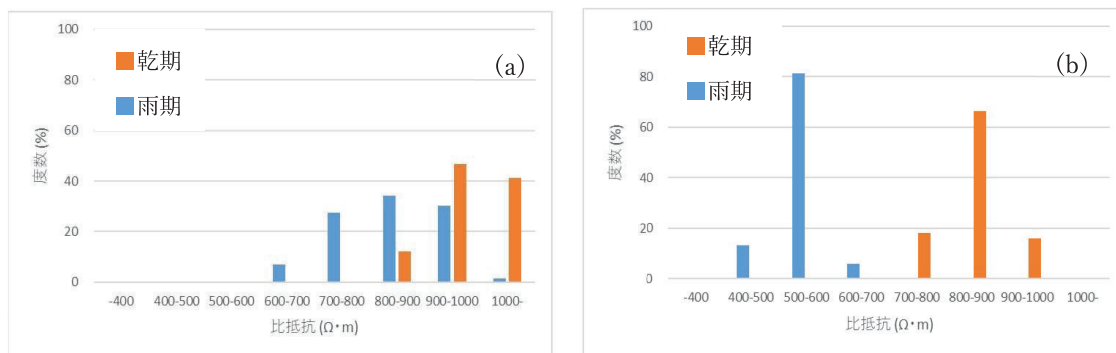


図 6. 深度 5m における 2 時期の比抵抗分布の比較 (a) EB (b) WB

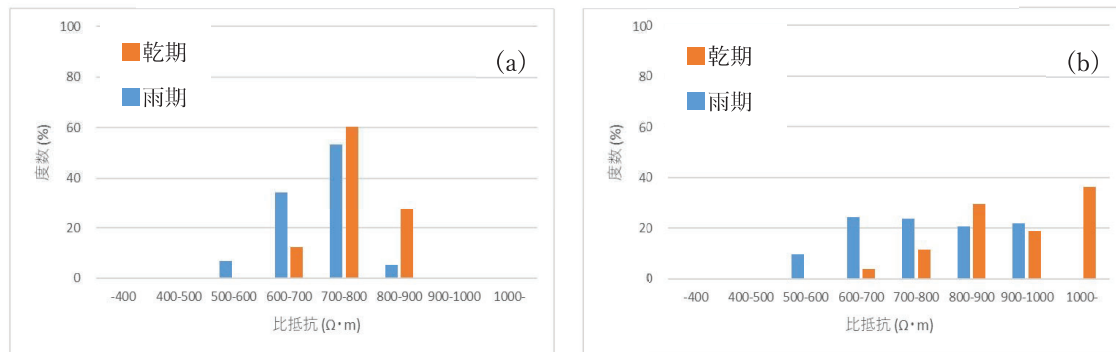


図 7. 深度 20m における 2 時期の比抵抗分布の比較 (a) EB (b) WB

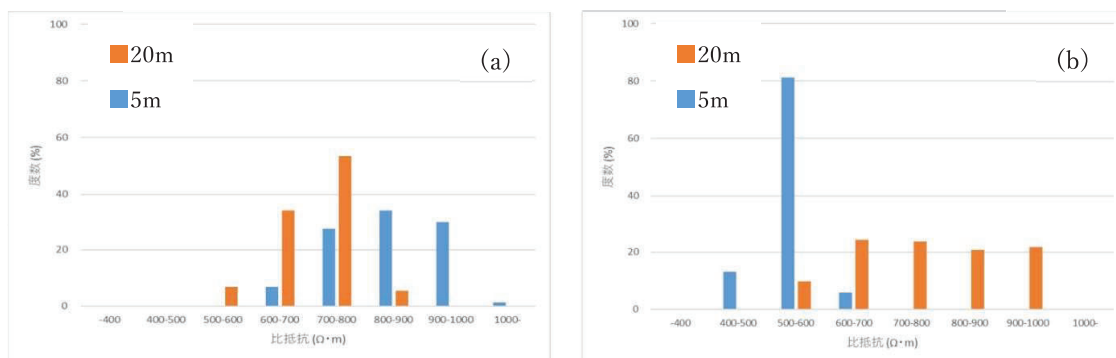


図 8. 深度 5m と深度 20m における雨期比抵抗分布の比較 (a) EB (b) WB

5. 考察

断面図および平面図の評価により、それぞれのブロックで鉛直方向の比抵抗分布と降雨に伴う比抵抗変化パターンに違いが見られた。WB では地下に高比抵抗帯が分布しており、雨期において表層の比抵抗が大きく低下する。ここから、高比抵抗帯は遮水層としての新鮮な岩盤の特徴を示し、表層は降雨を保水すると考えられる。EB では地表より高比抵抗帯が分布しており、両時期の比抵抗変化が小さい。ここから、高比抵抗帯は透水性が高い緩み地形の特徴を示していると考えられる。

ボーリングデータでは、EB で表層の崖錐層の下に新鮮かつ硬質な層が厚く分布していることと、WB で地下 30m まで風化や緩み域が多く見られることから、比抵抗構造から解釈できる地質構造とボーリングデータは良い対応を示した。これらは、現地で確認された斜面の変状の違いとも整合しているといえる。

断面図では、深度 50m~70m を境界として、比抵抗の値が $400\Omega\cdot\text{m}$ 以下に急激に低くなっていた。50m 以深については有瀬地区が大規模な地すべり地形であることから、かつての地すべりによってすべり面が形成されていると考えられる。しかしながら、これがすべり面付近が飽和するなどの地下水の影響によるものなのか、または使用したドローンの探査限界であるのかは判断できなかった。

比抵抗を変化させる要因は様々であるが、高比抵抗を示す条件として、「緩んでいて空隙が多い場合」と「新鮮な岩盤の岩質が示す場合」が挙げられる。これらは互いに相反しており、現在の比抵抗解析におけるネックとなっている点である。しかしながら、2 時期の比較を行い降雨による比抵抗低下に着目することで、緩みによる透水や安定地盤の遮水などの地盤状況を比抵抗構造より推測し、空間分布を把握する手法は有効であると考えられる。

6. まとめ

本論では、変状の異なる 2 つの尾根を対象に、2 時期の断面図を用いて各ブロックの鉛直方向の比抵抗変化パターンから地質構造の推定を行った。ボーリングデータを用いた地質データとの比較からは比抵抗構造による推定との整合性が確認できた。探査深度ごとの平面図からは推定した地盤状況の空間的な分布を見ることができた。

緩みが顕著で変状が進行した EB では、表層より分布する不飽和な状態にある高比抵抗帯が両時期問わず高い比抵抗値を示し、それが緩み域と整合していた。変状がほとんど見られない WB では、地下に高比抵抗帯が分布し、表層付近で降雨による比抵抗低下が明瞭である傾向が見られ、高比抵抗の層は新鮮な岩盤と整合していることを明らかにした。同じ高比抵抗の層であっても 2 時期の比較によって緩み域と安定域を区別することができた。

今後は、更なるパターンの細分化を目指し、尾根や谷、地下水分布といった地形条件を踏まえた、緩みと安定状態の評価を行っていく。

謝辞：本研究では国土交通省四国地方整備局四国山地砂防事務所から提供いただいた空中電磁探査データを使用した。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

1. 内閣官房:“防災・減災、国土強靱化のための5か年加速化対策“。(2023/9/14 閲覧)
https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo_kyoujinka/5kanenkasokuka/index.html
2. 田中健貴,吉村元吾,今村直紀,木下篤彦,森加代子,林幸一郎,小山内良人,横山修,河戸克志:
空中電磁探査による比抵抗の分布に着目した深層崩壊危険斜面の抽出技術の開発,
河川技術論文集,23 巻,pp.435-440,2017
3. 城森明,城森信豪,城森敦善,近藤隆資,結城洋一,新清晃:
ドローンを用いた過渡応答空中電磁探査装置の開発－D-GREATEM,D-TEM[GLS],D-
TEM[ALS]－,物理探査,73 巻,pp.83-95,2020
4. 奥村稔,馬場敬之,河戸克志,金山健太郎,城森明,小杉恵,竹下航,北本楽:
空中物理探査等を用いた紀伊山系における重力変形斜面内の比抵抗特性,
令和5年度砂防学会研究発表会概要集,P-91.2023