

空中電磁法探査による比抵抗分布に着目した高速道路危険斜面の抽出技術の開発

Development of Extraction Technique for Hazardous Expressway Slopes
focused on Resistivity Distribution by Airborne Electromagnetic Exploration

牧浦信一	Nobukazu MAKIURA	(西日本高速道路エンジニアリング関西 (株))
上出定幸	Sadayuki KAMIDE	((一財) 災害科学研究所)
堤 浩志	Hiroshi TSUTSUMI	(西日本高速道路 (株))
奥村 稔	Minoru OKUMURA	(大日本コンサルタント (株))
小田和広	Kazuhiro ODA	(大阪産業大学工学部)
松井 保	Tamotsu MATSUI	((一財) 災害科学研究所・大阪大学名誉教授)

高速道路斜面の予防保全管理のためには、崩壊の危険性の高い斜面や地すべりなどの分布を精度よく、効率的かつ経済的に抽出する技術開発が不可欠である。筆者らは、そのような技術開発を目指して、広域的かつ線状の地盤比抵抗を短時間に求められる空中電磁法探査を導入した。本論文では、計測実験結果の概要を述べると共に、空中電磁法探査による比抵抗分布と現地踏査結果に基づいて、比抵抗絶対値表示法と新たに開発した比抵抗強調値表示法を組み合わせる地盤性状を区分するチャートを提案・検証した。これらの手法が危険斜面の抽出や地盤特性の把握において、有用であることを述べる。

キーワード：空中電磁法探査，比抵抗表示，斜面，予防保全管理 (IGC : C02, E06, H06)

1. はじめに

高速道路斜面の予防保全管理¹⁾のためには、崩壊の発生機構の解明と土塊の動きおよび被害範囲を予測し、危険斜面を抽出することが不可欠となる。斜面崩壊の発生要因は、崩壊性地盤や地すべり、亀裂性岩盤や断層破砕帯・変質帯など脆弱部の有無、および地盤中の水理・水文環境などの地盤性状が大きく係わっており、これらの地盤情報を得る必要がある。高速道路のような広域かつ線状に分布する崩壊の恐れのある斜面のすべてに対して、従来の地盤調査を実施することは、費用や時間の制約から事実上不可能である。そのために、広域にわたる地盤情報が得られ、迅速かつ低廉にできる空中電磁法探査の現地計測と解析手法の開発を進めてきた^{2,3)}。従来の地盤調査に先だって空中電磁法探査を実施することにより、地盤やのり面構造物が変状・破壊する前に、適切な補修・対策が必要と思われる斜面の選定・抽出が可能となり、予防保全へと進めることができる。

本論文では、空中電磁法探査を供用路線の斜面に対して行い、すでに報告している測定高度、測線間隔および金属製埋設物の影響について概要²⁾とその後得られた知見を述べるとともに、従来からの比抵抗分布表示法である比抵抗絶対値表示法に対し、新たに開発した比抵抗強調値表示法について述べる。また、地盤性状の判別が可能な比抵抗強調値表示法と現地踏査や既往資料等のデータ^{4,7)}から、両表示法の特徴を明らかにし、両表示法を組み合わせる地盤性状を区分するチャートの実用性を検証した。さらに、こ

れらの手法が高速道路斜面(切土・盛土のり面や地すべり地)や土石流危険渓流などの危険斜面の抽出や地盤特性の把握において、有用であることを述べる。

2. 空中電磁法探査の概要と実験結果

2.1 概要

2.1.1 探査の概要

空中電磁法探査は、広域の地盤情報を表す地盤の比抵抗分布を効率よく 3 次元的に把握する物理探査の一手法であり、広域の地盤情報を表す地盤の比抵抗分布を効率的に得るために、ヘリコプター等に曳航された測定器(バード)から変動磁場を地中に向かって照射し、電磁誘導現象により発生する交流磁場を測定する方法である。高速道路のような線状構造物では、箇所を絞って実施するボーリング調査等による詳細調査への前段階での調査に最適である。管理用地外からの土石流等の災害が増加している現状を勘案すると、高速道路の安全性照査のために管理用地内のみでなく、管理用地外の民地の地盤状況の把握も必要である。空中電磁法探査の採用は、民地立ち入りの承諾の必要がなく、また地表からの接近しにくい地域や広範囲を短期間に探査する場合に有効である。この探査法は比抵抗 2 次元探査と比較して分解能は劣るが、比抵抗分布が 3 次元⁸⁾に把握でき、のり面の表層や内部の地盤性状(地盤劣化の進行、体積含水率や粘土分含有率の把握)および断層の存在をマクロ的に捉えることができる。

2.1.2 探査の方法

探査方法は図-1 に示すように、計測器(バード)に収納された複数の周波数の送受信コイル対から各周波数の電磁波が連続的に送受信される。連続的に発信される1次磁場とそれによって地盤中に誘導される2次磁場の強度比を同相成分(I)と離相成分(Q)に分離して測定することにより、地盤比抵抗を求める。

高周波数では地下浅部の、低周波数では地下深部の比抵抗情報を反映する特性に基づいて、各測線沿いの比抵抗の1次磁場の平均透入深度位置に、それぞれに対応する比抵抗を配し、比抵抗断面図(一種の擬似断面表示)として表現される。表土層の層厚や地すべり面の深度を求める詳細な解析には、1次元構造の2層インバージョン解析が用いられる。詳細については、参考文献⁹⁾を参考にされたい。

空中電磁法探査では、1)時間領域法または、2)周波数領域法のいずれかを使用して地盤比抵抗の測定を行うが、本研究で採用した探査方法は後者を使用した周波数領域法である¹⁰⁾。周波数領域法におけるコイル配置は表-1 に示すように¹¹⁾、DIGHEM(水平共面・垂直同軸)タイプとRESOLVE(水平共面)タイプの両タイプがある。後述する舞鶴若狭自動車道では前者を、徳島自動車道では後者を採用した。

コイル配置の特性は、水平共面型のコイル配置では水平方向の地下水や地質構造の把握に優れており、垂直同軸型のコイル配置では鉛直の断層や地質構造の把握に優れている。

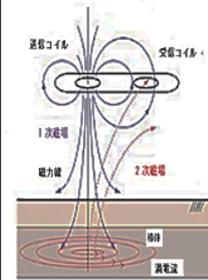
地盤比抵抗を規定するパラメータは、図-2に示す地盤の体積含水率、粘土分含有量、間隙水の比抵抗などであり、これらのパラメータの変動に伴って比抵抗は変化する。新鮮な岩盤が風化・変質を受けると割れ目の発達に伴って粘土分含有量や体積含水率が增大することによって不良地盤となり、比抵抗は低下する^{12),13)}。崩壊や地すべりなどの素因となる地盤構造(基盤内の弱部、ゆるみ域下部の飽和

層など)が浅部に分離した高比抵抗として出現する斜面(タイプA)、崩壊する可能性のある崩積土および強風化岩が浅部の低比抵抗として出現する斜面(タイプB)は、図-3 に示すように¹⁴⁾、ゆるみ域下部の飽和層と不飽和の新鮮岩盤が比抵抗の不連続面を形成していると推定される。

空中電磁法探査に影響を及ぼす各種項目(測定高度、測線間隔、金属製埋設物)に関する実験を行った地域は、舞鶴若狭道舞鶴東 IC 周辺の切土のり面を主体とする斜面が多く分布する。この地域は風化・浸食に伴った丘陵性山地であり、風化・変質した舞鶴層群の砂岩・泥質岩・砂岩泥質岩互層から構成され、斜面の多くは建設中に崩壊や地すべりが発生し、標準勾配より緩い勾配やのり面安定対策工^{4), 6)}が採用されている。

表-1 周波数領域法のコイル諸元と測定時の概要¹¹⁾

コイルの周波数配置	DIGHEM タイプ	RESOLVE タイプ
	1	137,500Hz・水平
2	27,500Hz・垂直	31,000Hz・水平
3	5,500Hz・水平	6,900Hz・水平
4	1,100Hz・垂直	1,500Hz・水平
5	220Hz・水平	340Hz・水平
6		3,300Hz・垂直

測定時の概要	コイルの水平配列	コイルの垂直配列
		

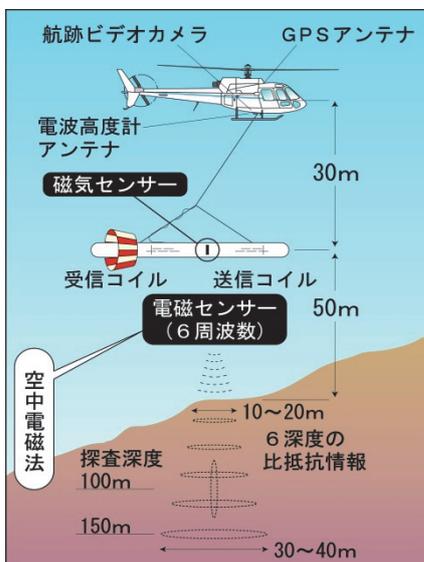


図-1 空中電磁法探査の概要¹⁰⁾

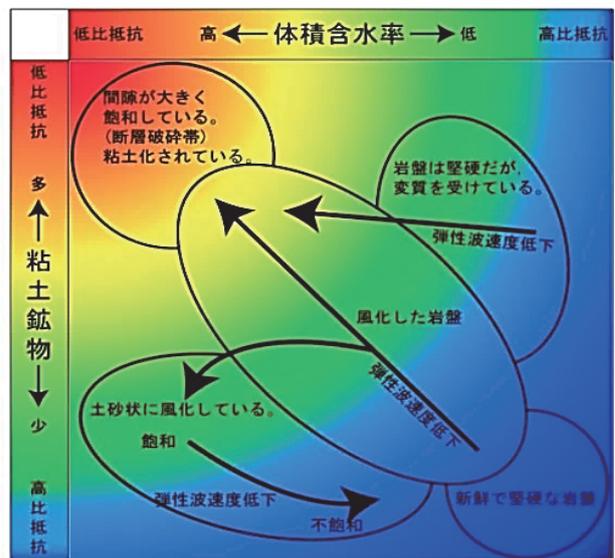


図-2 粘土鉱物含有量・体積含水率と比抵抗の関係^{12),13)}

2.2 測定高度・測線間隔および金属製埋設物の影響に関する実験

探査測線の配置方向は斜面の傾斜方向とすることがのり面安定解析上望ましいが、短い測線が多くなることによって延べ測線長が延びて測定時間がかかり、ヘリコプターの転回が多くなることによる事故の危険性、そのうえ、近接して供用中の高速道路があり、のり尻付近の測定が欠落するために、測線配置は高速道路と平行に設定した。

なお、実験時のコイル配置が水平共面と垂直同軸の併用である DIGHEM タイプである。

測定高度や測線間隔の違いによる影響の検討は、比抵抗分布図を格子状に分割し、ヒストグラムを作成し、比抵抗の出現度数を集計して行った。ヒストグラムの統計量は、137.5kHz(高周波域)と 1.1kHz(低周波域)について作成した。その実験結果はすでに報告²⁾しているが、ここでは、その結果の概要を記載する。

2.2.1 測定高度が比抵抗分布に及ぼす影響

測定高度は一般的に 30m 程度としているが、供用中の高速道路や県道を走行する運転者への圧迫感を減らし、また集落と幼稚園・小学校が存在するために、ヘリコプターの騒音や低空飛行が地域の人々に与える影響を減らすためには、できる限り飛行高度を高くする必要がある。しかし、高度を高くすることによって分解能が低下する。そこで、測定高度の違いによる影響を検討するために、実測高度を 30m, 50m, 70m の 3 高度で測定した^{2)・5)}。

空中電磁法のデータ取得範囲は、バード直下では測定高度相当長を直径とする円形程度である。測定高度が増大すると側方へ電磁波が広がり、また探査深度が増大することによって、比抵抗の平滑化が進み、分解能が低下する。

3 高度での測定を行い、測定間隔 25m の場合の各測定高度の周波数ごとの比抵抗分布の変化は、比抵抗分布の統計値の算出とヒストグラムを作成することにより把握した。その結果から、(1)標準偏差値から測定高度の増大による測定時のデータの取り込み範囲と探査深度の増大に伴って平滑化する。(2)標準偏差値は両周波数ともに高度 30m と 50

m とは同じ値を示し、高度 70m では小さくなり、探査深度の増大による平滑化によって分解能が低下する。(3)平均比抵抗は、高周波数では高度 30m と 50m は同じ値を示し、低周波数では高度 50m と 70m とは同じ値を示す。その後の検討によって、(4)高度を高くすると測定精度の低下や絶対値の小さなデータ、すなわち S/N 比の悪いデータしか取得できなかった。したがって、測定時の住民等への圧迫感を避けるため、低周波数と高周波数の平均比抵抗からみると、測定高度を 50m とすることが妥当であることが分かった。

2.2.2 測線間隔の比抵抗分布に及ぼす影響

測線間隔は通常 100m 程度であるが、間隔が広い場合は欠落ゾーンの発生、あるいは小規模異常部分の通り抜けと見逃しの可能性があり、精度が低下する。本実験における測線間隔は 25m 間隔とし、解析時に測線間隔を調整することで、比抵抗分布に与える影響を検討した^{2)・5)}。

測線間隔は上記のように、100m とすることが多いが、斜面規模を考えると現実的でない。また、比抵抗分布図の作成において、測線配置の制約や補完効果を考えると、3 本以上の測線を設定することが必要であり、測線間隔が狭いことが望ましい。斜面の形状、地形の急変、飛行障害物の存在などの影響で、測線間隔を小さく設定することが困難な場合が多々ある。測定高度の影響の把握と同様に、測定高度 30m で測線間隔 25m, 50m, 75m における比抵抗の統計量を算出し、ヒストグラムを作成した。その結果、標準偏差、平均比抵抗と最大・最小比抵抗値において、測線間隔が 25m と 50m の場合と 75m の場合では明らかに異なり、平滑化による分解能の低下を示している。この結果は、データ取得範囲(測定高度相当長の円形)の 2 倍程度の測線間隔以内、つまり測線間隔が 25~50m であれば分解能は低下しないことが分かった。しかし、その後の探査実施によって、測定間隔を 25m と 50m における計測時間と解析時間を算出し、その経済性を検討した結果、測線間隔を 25m とすると、調査費用が測線間隔 50m に比べて 2 倍以上嵩むことが分かり、経済的には測線間隔を 50m とすることが妥当であることが分かった。

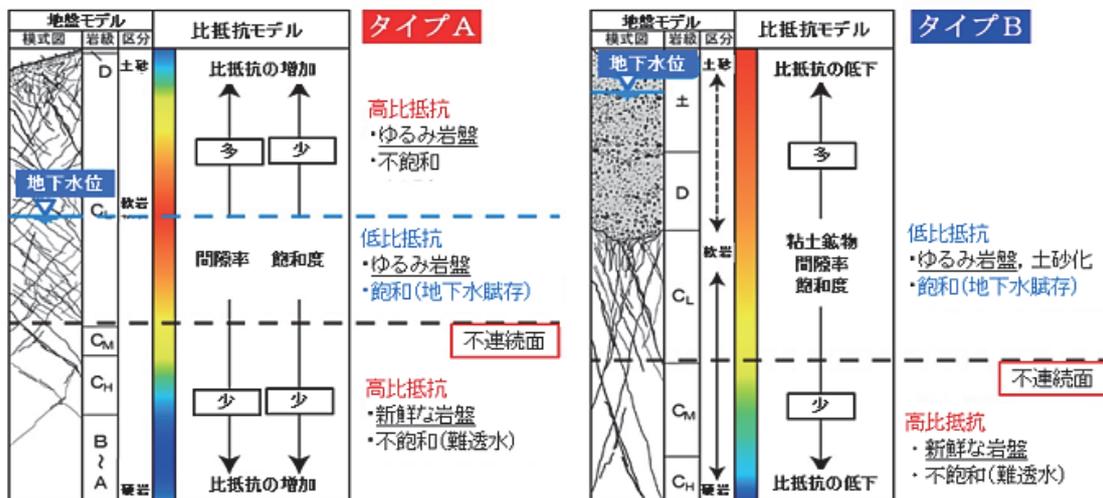


図-3 崩壊の恐れのある斜面の地盤構造と比抵抗の関係概念図¹⁴⁾

2.2.3 金属製埋設物の影響

のり面対策工であるロックボルト付のり枠工やグラウンドアンカー工など（以下、金属製埋設物という）が施工されている場合、空中電磁法探査による比抵抗分布に影響を与えるかどうか検証する必要があった。そのため空中電磁法探査に並行して、比抵抗2次元探査や表層物理探査（磁気探査・電磁探査・地下レーダ探査）を実施し、のり面性状と金属製埋設物による影響について適用性を検証した。その結果の概要を記載する^{2) 4) 5)}。

- (1) のり面対策工配置状況と空中電磁法探査による比抵抗平面分布を比較検討すると、金属製埋設物による影響は見られず、空中電磁法探査の適用に問題はない。
- (2) 空中電磁法探査による比抵抗断面図では、垂直の比抵抗分布を示し、のり面対策工が分布する箇所は周辺より高比抵抗を示し、金属製埋設物の影響を受けていない。
- (3) 比抵抗2次元探査による比抵抗分布では、ロックボルト工とラス金網工が設置箇所では表層数m前後が50～120Ωm、それ以深は180Ωm以上を示し、金属製埋設物の影響を示す。植生工では風化部の極表層で50Ωm以下と影響を示し、1m以深では180Ωm以上を示し、影響は見られない。集水井（φ250cm, Dep1500cmの中空管状導電物質）による影響を受け斜面中央に球根状低比抵抗域が存在する。
- (4) 各種地表物理探査の結果は、磁気探査による磁気プロフィールでは、ロックボルト工では著しく変動し錯乱状態を示すが、ラス金網では変動幅は小さく、植生工では変動していないが、集水井ではその影響が大きく表れる。ラス金網では各探査結果で影響を受け、明瞭な反射面が保たれるが、植生工では反射面がみられない。地下レーダ探査のプロファイルでは表層に反射波形が表れるので、金属製埋設物の影響が表れる。

空中電磁法探査による比抵抗分布は、金属埋設物の分布に対比される低比抵抗異常はみられず、その影響は認められない。この理由としては、線状構造物の場合はデータ取得範囲に比べて応答面積が小さいこと、網状構造物の場合には電磁波の影響を互いに相殺する可能性が考えられる。また空中電磁法探査では集水井の影響が表れていない。

3 新たな比抵抗表示法の開発と整合性の検証

従来からの比抵抗絶対値に基づく絶対値表示やコントラスト表示による比抵抗分布は、地盤構造の判別が必ずしも容易ではない。比抵抗分布から地盤性状が判別しやすいように、比抵抗構造の表示や判別手法の改善・開発を行った。また、現地踏査による比抵抗分布と地盤状況との整合性の検証を行い、地盤性状を区分するチャートを提案した。

3.1 検証地域の地形地質概要

検証対象地域の地形・地質の概要^{6) 7)}を以下に記す。

3.1.1 地形の概要

検証対象地は徳島県北であり、吉野川支流の馬路川を形成する“中央構造線”を境として、北側に讃岐山地が東西方向に、その南側に四国山地が連なる。高速道路は讃岐山地の中腹をトンネルで、中央構造線に沿う谷部を切土・盛土などの土工構造物を主体に建設されている。

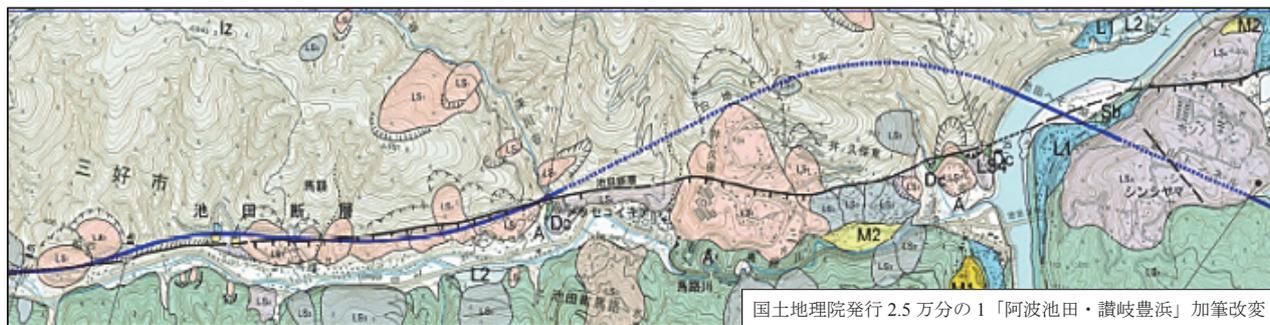
讃岐山脈の南麓斜面は比高300～600mの急斜面で、山頂部は定高性を示す。馬路川に沿う山腹～山麓斜面には、図-4に示すように、種々の規模の地すべり地形が数多く点在する。中央構造線(池田断層)の新期活動による変位地形を示し、馬路川の谷底の北縁部を通過し、断続したリニアメントが発達する。高速道路に直交する中小の溪流は、急峻かつ狭長で線状を示す。各溪流の源頭部では、遷急線を頂部とした崩壊地形を示し、溪流に沿う山地斜面でも崩壊地形や地すべり地形などが分布し、不安定な斜面を示す。各溪床は急勾配では岩盤が露頭するが、緩勾配では溪床堆積物が分布する。溪流壁には平坦面が残存し、溪床堆積物が分布する。溪流の下流域は、山麓線を扇頂とした新旧の扇状地地形(沖積錐)が複合し、数次にわたる土石流が発生したことを示す。

3.1.2 地質概要

対象地域に分布する主たる和泉層群の特徴と中央構造線および地すべり土塊の概要を以下に記す。

(1) 和泉層群

和泉層群は、主として砂岩優勢砂岩泥岩互層から構成され、一部で泥岩優勢砂岩泥岩互層を挟む。砂岩優勢互層は、厚さ数10cm～3mの厚い砂岩と数cm未満の泥岩の整然



凡 例： Ls:地すべり地 M,L:河岸段丘 Iz:和泉層群 Ms:三波川変成岩類 TTTT:中央構造線

図-4 徳島自動車道における探査実施地域の土木地形地質図⁷⁾

とした互層からなる。砂岩は灰黄色～灰緑色を呈し級化層理に富むタービダイトで、泥岩は黒～黒灰色を呈し砂粒を含む。泥岩優勢互層は厚さが数 cm～数 10cm の泥岩と厚さ数 cm の砂岩との互層からなり、泥岩は砂粒を含み黒灰色で、砂岩は中粒で灰黄色～灰緑色を呈し、級化層理に乏しい。

砂岩は比較的硬質堅固で、安定した岩盤であるが、頁岩優勢互層や砂岩優勢互層中の頁岩は、スレーキング現象の顕著な岩石である。砂岩・頁岩互層では、一部に凝灰岩が介在し、頁岩・凝灰岩の風化により第三紀層地すべりと類似の運動形式を呈するものもある。

(2) 中央構造線

中央構造線（池田断層）は高角度の断層面をもつ断層破砕帯が観察され、右横ずれの変位地形を示す。破砕部は熱水変質によって著しく粘土化しており、中央構造線に沿って地すべりや崩壊が多発している。中央構造線の多くは地すべり土塊や未固結堆積物に被覆され、直接の露頭は少ない。

(3) 地すべり土塊

地すべりは移動体が鮮明なものから浸食によって不鮮明なものまで種々あり、その性状は一定していない。讃岐山脈南麓斜面の山腹～山麓には、明瞭な地すべり地形が分布する。和泉層群の地すべり土塊は、地表では角礫層、その下部は著しく擾乱を受けた断層破砕帯から構成される。

3.2 比抵抗絶対値による表示法

比抵抗測定値を用いた表示法には、測定結果そのものを表示する比抵抗絶対値表示法と、比抵抗頻度分布にしたがって表示域を定める比抵抗コントラスト表示法がある⁷⁾。

3.2.1 比抵抗絶対値表示法

比抵抗絶対値表示は、等差・等比による対数表示で、18段階表示が一般的である。配色は、低比抵抗域で体積含水

率や粘土分含有率の大きい不良地盤を暖色系、高比抵抗域で不飽和土や岩盤などの良好地盤を寒色系で表示する。この表示法では、図-5に示すように、低比抵抗域が強調して表示され、高比抵抗域の比抵抗分布が不明瞭となる。

3.2.2 比抵抗コントラスト表示法

比抵抗絶対値表示の問題点を解決するために、対象地域の比抵抗分布に最適なカラースケールを作成した。その手順は次のとおりである⁷⁾。

- (1) カラースケールは、調査範囲に出現した比抵抗の最小値と最大値の間で作成する。
- (2) 比抵抗の頻度分布図で、頻度の高いところを細分すれば比抵抗構造のコントラストが視認しやすい。つまり、各色区分のデータ数が同数になるように等頻度で着色区分の閾値を決める。
- (3) 地盤劣化した斜面の抽出を念頭に、粘土分含有率や体積含水率の高い低比抵抗側を視認性の高い”赤”を配色する。

比抵抗コントラスト表示による比抵抗分布図を図-6に示す。その結果、低比抵抗域における比抵抗分布が明確になり、崩壊斜面や崩壊可能斜面および未固結堆積物の平面的な分布の抽出は可能となる。

3.2.3 比抵抗絶対値表示の課題

現状の比抵抗絶対値表示の課題は、次のとおりである。

- (1) カラースケールに統一したルールがないため、経験に基づく人為的な区分であるため、恣意的な比抵抗分布となる。特に探査箇所によって等差・等比・等頻度の表示スケール、区分数あるいは色調が異なるため、地質・土質などの地盤構成の解釈が異なってくる。
- (2) 比抵抗パターンが任意に区分された等値線で表現されるため微細な比抵抗構造や物性境界の判別が明瞭でなく、かつ(1)と同じく客観性の乏しいものとなる。

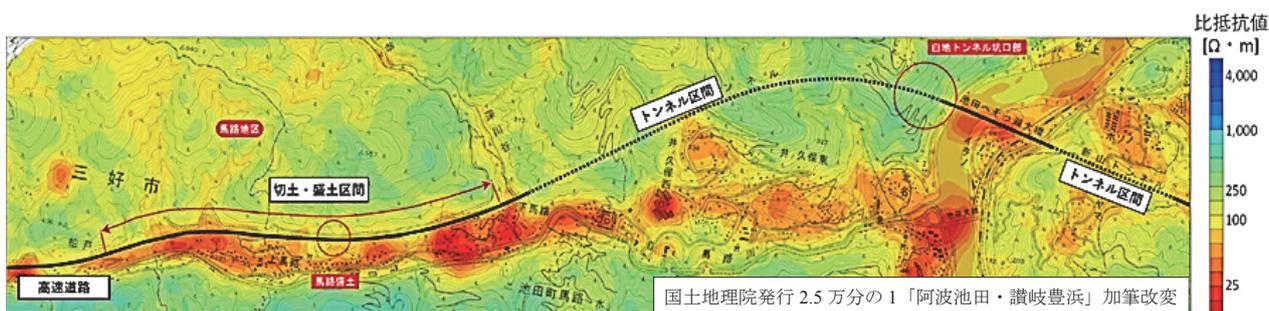


図-5 比抵抗絶対値分布(比抵抗絶対値表示, 深度 5m 付近の平面的な比抵抗構造)⁷⁾

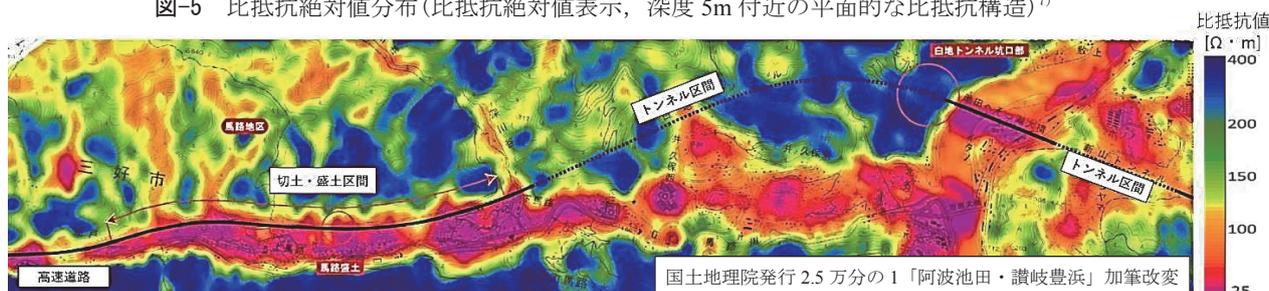


図-6 比抵抗絶対値分布(比抵抗コントラスト表示, 深度 5m 付近の平面的な比抵抗構造)⁷⁾

3.3 比抵抗強調値による表示法

このような課題を解決するために、比抵抗分布の内部構造の変化に着目した表示法である「比抵抗強調値表示法」を検討し、適用した^{3),7)}。

比抵抗強調値表示法は、比抵抗差分析^{3),7)}を行った後、着目点と上下左右の4近傍の差分を計算するラプラシアン解析法^{3),7)}により比抵抗分布の変化の傾向を画像表示する手法である。比抵抗強調値表示法による結果を図-7に示す。この場合、差分値がプラス領域を青色、マイナス領域を赤色で表示し、各着目点における比抵抗の相対的変化が視覚的に判別でき、また地盤の構造や性状とよい相関を示し、比抵抗構造が客観的で、微細な変化が捉えられる。

3.4 現地踏査によるチャートの提案とその検証

比抵抗絶対値分布や比抵抗強調値分布の特徴と現地状況との整合性を確認するため、現地踏査を行った。現地踏査では災害形態(土石流・土砂流出、地すべり、斜面崩壊の区分)と地盤特性(固結堆積物の岩種・岩質や風化状況および未固結堆積物の締り度、粒度組成、湧水・含水状態)を確認した。また、ボーリング調査や物理探査などの既往地質調査結果と施工記録等の資料からも検証も行っている^{6),7)}。

3.4.1 チャートの提案

現地状況と比抵抗分布の整合性の検証方法は、現地踏査によって地形特性(盛土・切土のり面や自然斜面など)と地盤特性(岩種・岩質や岩盤・土砂の区分、湧水、変位地形など)が確認できる地形や露頭を選定した。各地点の比抵抗絶対値と比抵抗強調値を比抵抗平面・断面図で確認し、各データの分散傾向から災害形態と比抵抗の関連性を検討し、チャートの提案を行っている^{3),7)}。

比抵抗と地盤物性との関係を示すチャートは、現地調査で得られた資料と各地点の比抵抗絶対値と比抵抗強調値の関係プロットし、また地盤特性との相関が分かるように図-8を作成した。その内容は、以下のとおりである。

横軸:比抵抗絶対値とともに、粘土分含有率や間隙率を示すものである。比抵抗絶対値 125 Ω m を比抵抗の高領域・低領域の境界の基準として、高比抵抗を示す領域を青色(グラフ右側)、低比抵抗を示す領域を赤色(グラフ左側)として表わした。

縦軸:比抵抗強調値とともに、相対的な含水比の大小を示すものである。比抵抗強調値 0 (白色) を基準とし

上側:飽和帯・地下水位以下)、相対的に比抵抗が高いプラス域を青色(グラフ下側:不飽和帯・地下水位以下)として表した。

図-8 にプロットした危険斜面等の地形と地盤特性との関係をチャートとして整理し直し、図-9 として示した。

3.4.2 チャートの検証

図-9に示すチャートの整合性の検証は、各検証地点の地形・地盤特性(岩種・岩質、地形種)と比抵抗絶対値・比抵抗強調値との間に相関があるかどうかの検証を行った^{3),7)}。

図-9の提案したチャートから分かるように、粘性土(風化粘土化)～礫質土(多亀裂)の不良地盤・不良岩盤と飽和(地下水位以深)～不飽和(地下水位以浅)の関係から、4種の地盤特性区分が可能である。

空中電磁法探査の解析結果と地盤性状についての検証結果は、以下に示すような関係があることが確認できた。

- (1) 地下水位や体積含水率の高い地盤では、比抵抗が低くなる傾向を示す。比抵抗絶対値の低比抵抗域と比抵抗強調値の赤色域を示す相対的な低比抵抗域とは一致し、これらの比抵抗平面図から地下水位や体積含水率の高い斜面を特定することが可能である。
- (2) 土石流堆積物などの崩積土の比抵抗は、粘土分含有率と体積含水率の大きさに依存する。崩積土の比抵抗強調値は、主に崩積土内部の粘土分含有量が周囲の地盤よりも相対的に多いため赤色域となるが、比抵抗絶対値では体積含水率の状態から低比抵抗域～高比抵抗域までの幅広い分布範囲を示す。
- (3) 比抵抗絶対値と比抵抗強調値の組合せにおいて、地下水位が崩積土の堆積地形の位置によって変化し、また比抵抗絶対値は、地下水位の高い斜面下部では低比抵抗域に、地下水位の低い斜面中腹～上部では高比抵抗域となる。岩盤分布域でも同様であり、粘土分の少ない中硬岩以上の岩盤であっても地下水位の高い斜面では、低比抵抗域となることが既往地質調査結果からも検証できた。したがって、崩積土の分布域において、地下水位の低い斜面中腹～上部では比抵抗絶対値が高比抵抗域となり、かつ比抵抗強調値は赤色域を示す。
- (4) 地すべり移動土塊は、地すべり活動の進行に伴って風化・粘土化が進行し、不動土塊と比較して低比抵抗を示す。初生的な岩盤すべりは、移動土塊が新鮮な岩

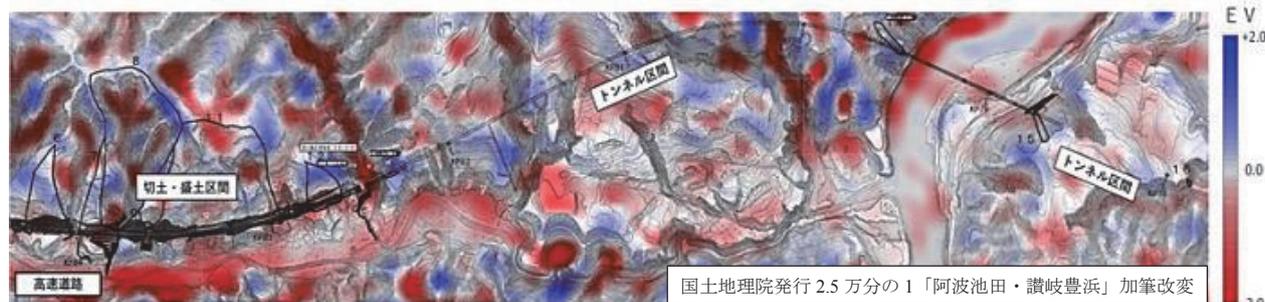


図-7 比抵抗強調値分布(深度 5m 付近の平面的な相対的比抵抗構造)⁷⁾ EV:比抵抗強調値

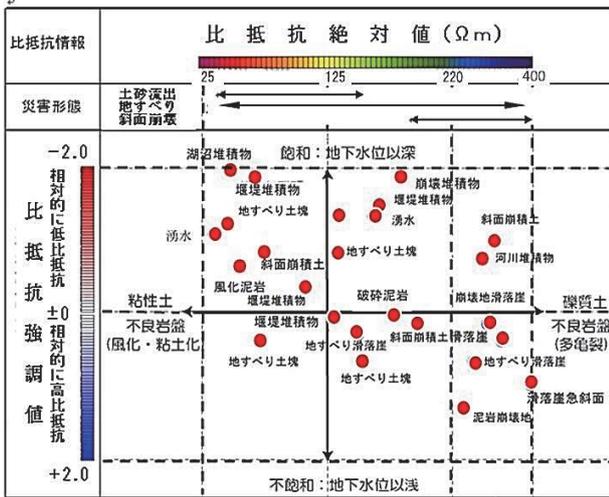


図-8 現地踏査個所の比抵抗と地盤物性との相関図^{3), 7)}

盤状態で、割れ目が開口した状態にあることから高比抵抗域を示す場合が多い¹²⁾。比抵抗絶対値が低比抵抗域～中比抵抗域を示し、比抵抗強調値は赤色域に集中することから、比抵抗構造により地すべり土塊の判別が容易にできる。

3.5 比抵抗分布断面図によるチャートの検証

整合性の検証を行った幾つかの斜面のうち、地すべりと斜面の比抵抗断面図における検証結果を以下に示す⁷⁾。なお、各斜面における1-a, 1-b等の区分は、aとbは表層部風化土砂、cとdは深部の風化岩の地盤状況を示している。

3.5.1 地すべり斜面

図-10に示す地すべり地とその周辺は和泉層群砂岩と砂岩泥岩互層からなり、地すべり中央付近は中央構造線の横断によって断層破断した角礫からなる。地下水位は地表面付近の浅層地下水とGL-14.5~15.1mのすべり面に位置する深層地下水の2系統がある。図-10(1)および(2)はそれぞれ地すべりの比抵抗絶対値断面図と比抵抗強調値断面図であり、比抵抗境界線と孔内傾斜計によるすべり面の位置とは一致する。

比抵抗絶対値と比抵抗強調値の分布から、大きく表層部における地すべり移動土塊領域と不動土塊領域、深部基盤岩の新鮮岩領域と断層破碎帯領域の4領域に分類できる。

比抵抗絶対値は、表層部の移動土塊領域では平均95Ωm、不動土塊領域では平均310Ωm前後に大別でき、深部基盤岩における新鮮岩領域では平均240Ωm、深部断層破碎帯では平均95Ωmに大別できる。一方、比抵抗強調値は、表層部の不動地盤における相対的に比抵抗が高い青色域と移動土塊における相対的に比抵抗が低い赤色域を示す。深部基盤岩では、断層破碎帯は相対的に低比抵抗を示す。なお、比抵抗絶対値での表層の青色域は浅層地下水を、地盤内部の青色域は深層地下水位の水位を示し、比抵抗強調値表示でも青色域を示すことからボーリング孔の観測結果による深層地下水位や地すべり浅部に分布する宙水とも整合性がある。4領域の各土塊の比抵抗値は以下のとおり

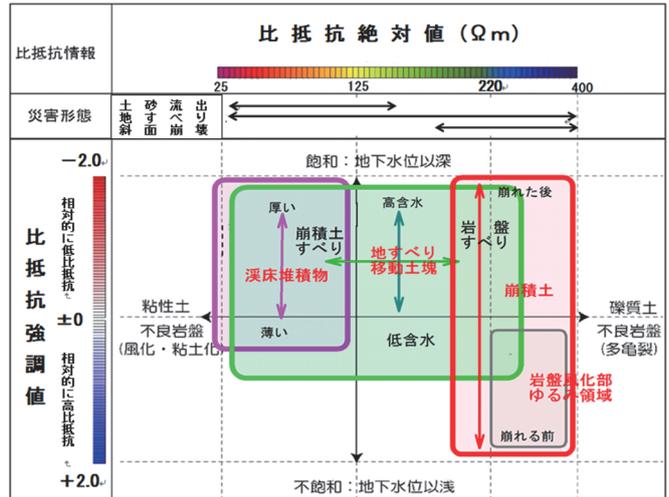
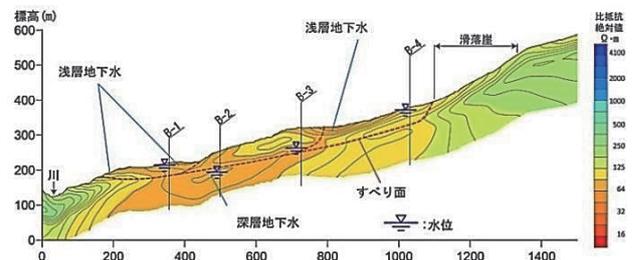
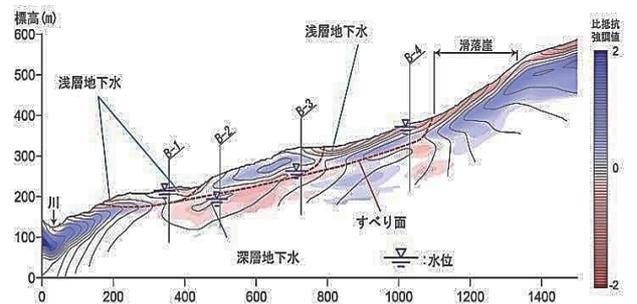


図-9 比抵抗絶対値・強調値による地盤性状区分チャート^{3), 7)}



(1) 比抵抗絶対値表示



(2) 比抵抗強調値表示

図-10 地すべり地における地盤性状区分チャートの妥当性の検証⁷⁾

である。なお、図-3のタイプ分けでは、タイプBに分類される。

1-a 表層移動土塊	絶対値 62~125 Ωm	平均 95 Ωm
	強調値 -1.5~-0.5	平均 -1.0
1-b 表層不動土塊	絶対値 256~362 Ωm	平均 310 Ωm
	強調値 +0.5~+1.5	平均 +1.0
1-c 深層不動土塊	絶対値 125~362 Ωm	平均 240 Ωm
	強調値 +1.0~+2.0	平均 +1.5
1-d 深層不動土塊 (破碎帯)	絶対値 62~125 Ωm	平均 95 Ωm
	強調値 -0.5~-1.5	平均 -1.0

この両者の関係を地盤性状区分チャートにプロットし、後述の図-14に示すと、地すべり移動土塊は崩積土すべりの飽和した粘性土に区分される。不動土塊は岩盤風化部～緩み域の不飽和状態の多亀裂岩盤に区分され、地盤性状区分チャートの妥当性が検証された。

3.5.2 凸型斜面：緩斜面+急斜面(切土のり面)

この凸型急斜面は、地質調査から切土によって崩壊や地すべりが発生する恐れがあり、事前対策としてグラウンドアンカー工等の対策工が施工されている。

尾根頂部から斜面中腹は地すべり地形の緩斜面、斜面中腹から斜面麓の遷緩線にかけて階段状急斜面となる。この斜面と河床の間を中央構造線が通過し、緩斜面～平坦面は沖積錐を形成する。この斜面の被覆層は粘土分を含む軟質な砂礫層で、斜面中央から斜面麓にかけて厚くなる。基盤岩は中央構造線の影響を受け、破碎している。地下水位は、急斜面部ではGL-24.7mと低いが、低地部の沖積錐では高水位で、一部で湧水帯や湿潤帯となる。

図-11はこの斜面の比抵抗絶対値と比抵抗強調値の断面図であり、比抵抗絶対値分布は鉛直構造を示し、斜面頂部から山麓～谷底にかけて中央構造線の影響を受けて次第に低下し、中央構造線周辺では50Ωm以下の低比抵抗となる。この断面図では、地質境界や地下水位などの物性境界の判別が難しい。一方、比抵抗強調値断面は地盤面より25～30mを境に上部は赤色域、下部は青色域を示し、被覆層と基盤岩の境界や地下水位の有無として比抵抗構造の違いとして捉えられる。赤色域は崩積土や破碎岩盤の相対的に比抵抗の低い領域となり、基盤岩の比抵抗強調値が赤色域に急変する箇所が中央構造線と一致している。

この斜面では、比抵抗絶対値分布から、斜面中央付近の鉛直方向を境界として128Ωm以上を示す尾根側領域と128Ωm以下の山麓側領域および中央構造線より谷側の低比抵抗領域に区分される。比抵抗強調値分布から、表層の風化帯の相対的に低比抵抗の赤色域、深部の新鮮な基盤岩で相対的に高比抵抗の青色域、および中央構造線より谷側平坦部の相対的に低比抵抗の赤色域の3領域に区分できる。

このような比抵抗分布から下記の4領域に区分できる。なお、図-3のタイプ分けでは、タイプAに分類される。

2-a 斜面上部表層風化帯

絶対値 128～256Ωm 平均 190 Ωm
強調値 -0.5～-1.0 平均 -0.8

2-b 斜面下部表層風化帯

絶対値 64～128Ωm 平均 100 Ωm
強調値 -0.5～-1.0 平均 -0.8

2-c 斜面深部基盤岩

絶対値 128～256Ωm 平均 190 Ωm
強調値 +0.3～+1.7 平均 +1.0

2-d 斜面麓～河床部 (断層破碎帯)

絶対値 32～64Ωm 平均 50 Ωm
強調値 -0.7～-1.3 平均 -1.0

この両者の関係を地盤性状区分チャートにプロットし、後述の図-14に示すと、不飽和状態で多亀裂岩盤に区分され、地盤性状区分チャートの妥当性が検証された。

3.5.3 平滑型急斜面(トンネル東坑口)

この平滑型急斜面は河川の攻撃斜面にあたる急崖斜面で、被覆層は欠如し、地表面から基盤岩が分布する箇所、図-12に示す比抵抗断面図は高速道路のトンネル坑口に位置する断面図である。

坑口周辺でのボーリング調査は鉛直・水平ボーリングの計3箇所実施された。この結果、斜面の表土層は欠如するか、2m以内と薄く、浅所から基盤岩の砂岩泥岩互層が分布する。泥岩は強風化を受けて土砂状コア(D級)、砂岩は短柱状コア(CL～CM級)を呈し、亀裂面は褐色化した流入粘土が充填しており、亀裂の多い岩盤に区分される。地下水位は低く、ボーリング調査位置では地下水位や湧水は確認されていないが、斜面下方で湧水が認められ、風化岩と新鮮岩との境界を流動していることが考えられる。

比抵抗絶対値の分布は、トンネル坑口の上部で180Ωm以上、下部で90～250Ωmを示し、不飽和状態で間隙率の大きい状態を示す。比抵抗強調値の分布はGL-25m付近より浅部で相対的に比抵抗が高い青色域、GL-25m付近

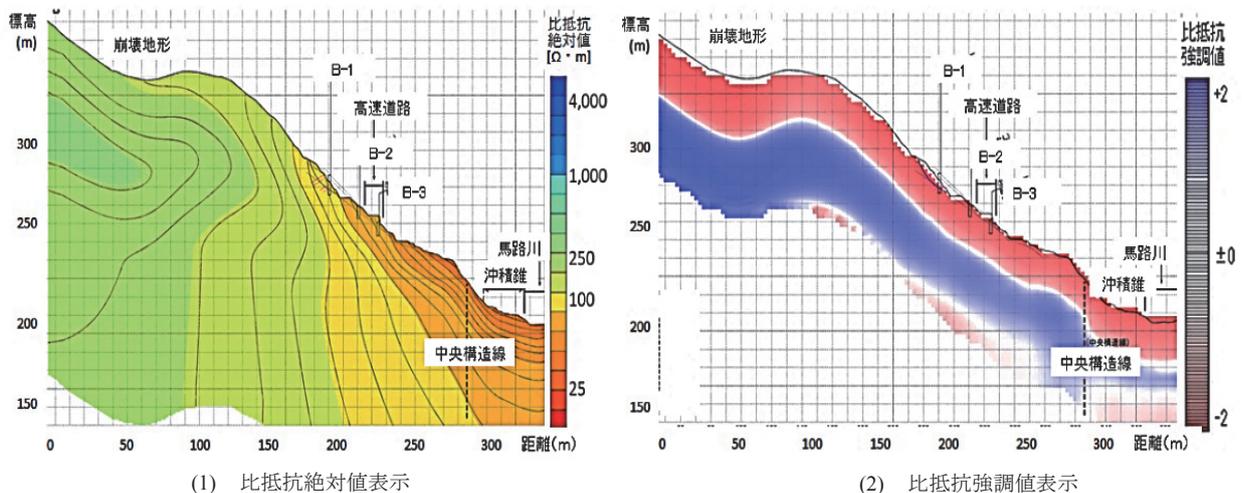


図-11 凸型斜面(緩斜面+急斜面：切土のり面)の地盤性状区分チャートの妥当性の検証⁷⁾

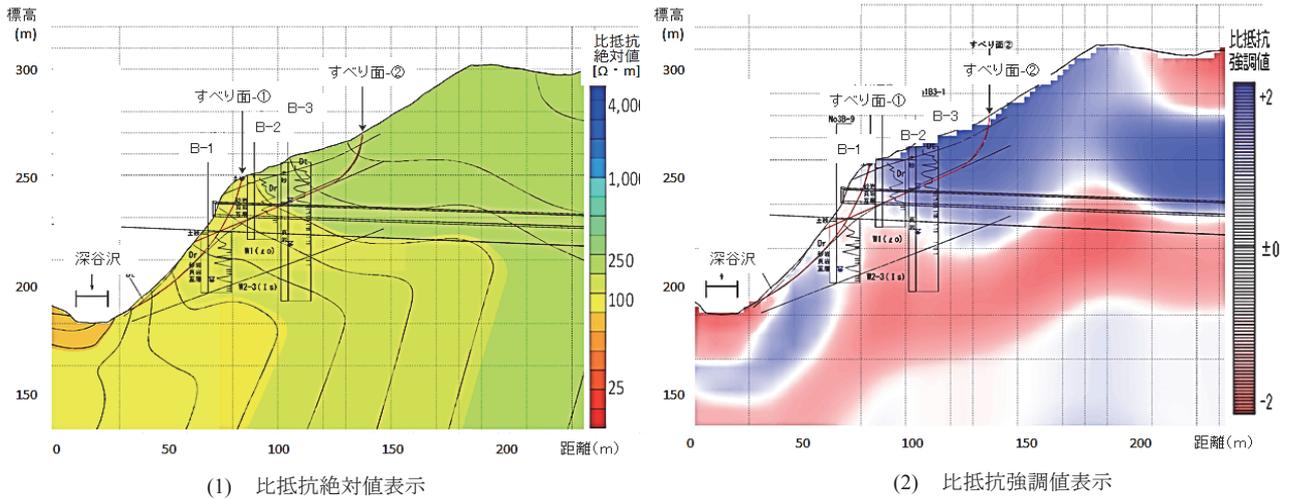


図-13 平滑型斜面（緩斜面+急斜面(トンネル西坑口)の地盤性状区分チャートの妥当性の検証⁷⁾

この両者の関係を地盤性状区分チャートにプロットし図-14に示すと、坑口上方の緩斜面では不飽和状態で多亀裂岩盤～ゆるみ域を示し、坑口下方の急崖斜面は飽和状態で粘土化が進んでいる状態を示し、地盤性状区分チャートの妥当性が検証された。

4. 盛土および土石流危険渓流への適用事例

空中電磁法探査における比抵抗分布に着目して、供用中の高速道路盛土における崩壊危険のり面の地盤性状把握と土石流危険渓流の抽出に適用した事例を以下に示す。

4.1 盛土のり面への適用事例

高速道路盛土は種々の地形・地盤条件の箇所を通過する。舞鶴若狭自動車道の盛土は沖積低地を主体とし、一部山麓を通過し片切片盛となっている。徳島自動車道では、山麓緩斜面の沖積錐（新規扇状地）と段丘面上を通過するが、一部地すべり地や中央構造線上を通過する。

4.1.1 舞鶴若狭自動車道の斜面(盛土のり面)

舞鶴若狭自動車道で空中電磁法探査を実施した盛土は、狭長な谷底平野と丘陵性山地との境界に沿う平地部～沖積錐～谷部～山地末端部に建設され、一部で片切片盛となる。この区間は暫定2車線区間であるが、完成形で盛土され盛土高さは8mである。

盛土における比抵抗分布から、元地形図やボーリング調査結果および盛土施工記録を参考にして地盤状態を推測すると、以下のとおりである。

図-15と図-16に示す盛土は沖積低地～山地斜面にかけて建設され、沖積低地では礫質土上に、丘陵性山地では崩積土と風化土砂～軟岩からなる傾斜地盤で、片切片盛となっている。盛土のり面の表層部では湧水や流水跡は見られないが、のり尻では湿潤状態にあり、地下排水施設から20～30ℓ/minの湧水が認められ、旧河道や砂礫層中またはサ

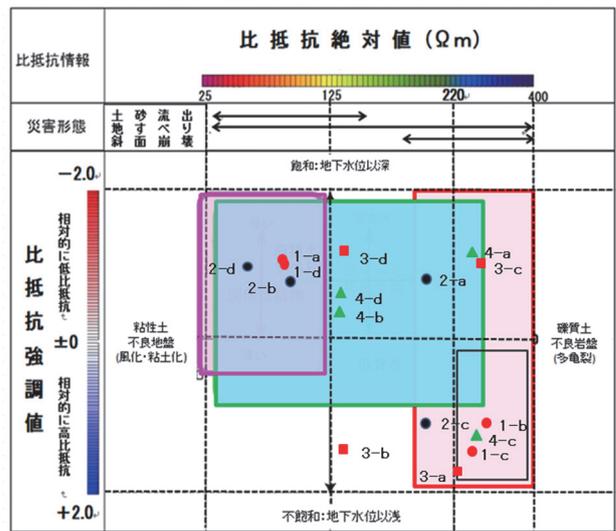


図-14 各地点の地盤性状区分チャートの妥当性確認

ンドマット中の流動地下水、もしくは傾斜地盤によって形成された被圧地下水が盛土内に流入している可能性がある。盛土は45～80Ωmと低比抵抗を示し、細粒分含有率や体積含水率が高い状態にある。基盤岩は150Ωm程度の比抵抗を示し、風化軟岩の値を示す。

盛土性状が悪い低比抵抗域が抽出される箇所は、次のとおりである。

- (1) 粘土分含有率や体積含水率が高い軟弱な土砂から構成され、盛土のり面の崩壊や舗装のポットホールが発生する可能性が大きく、定期点検における点検箇所の選定に活用できる。
- (2) 盛土の路体材や路床材は切土やトンネルの掘削岩塊からなり、高比抵抗を示す。粘板岩等の岩塊は風化の進行が早く、短期に細粒化するため、長期間にわたって空中電磁法探査を実施しなければ、経年的変化を捉えることが難しい。
- (3) 透水性の良い盛土の比抵抗は体積含水率に大きく左右される。体積含水率に寄与する降雨条件が異なることで比抵抗分布も異なる。晴天・降雨が長時間続いた各

時期の探査を行い、各比抵抗を比較することで、地盤劣化箇所の抽出が可能であると考える。

予防保全管理のために盛土性状の悪い軟弱部の抽出は、低比抵抗域を抽出することによって可能であるが、地盤の工学的特性を把握するためにはボーリング調査等の追加地質調査が必要となる。

4.1.2 徳島自動車道の盛土のり面

徳島自動車道において空中電磁法探査を実施した盛土は、和泉層群を主体として、和泉層群と三波川帯の境界部の中央構造線上か、近接した所である。多くの盛土は片切片盛で小規模であるが、数段の小段を有する高盛土は、高速道路と小河川と交差する谷部の下流部や沖積錐および段丘面上に建設されている。これらの盛土の基礎地盤は、風化土砂・軟岩と断層破砕帯、および被覆層の土石流堆積物や地すべり土塊の礫混り粘性土から構成される。盛土材は現地発生材で、粘板岩の風化土砂～風化岩の掘削土砂～岩塊が主体で、粘土分が多く、含水比の高い材料である。

対象高盛土の比抵抗分布は図-17 に示すように、50～100Ωmを主体に、一部20Ωm以下の箇所が分布する。一般に同一盛土内で盛土材が変化することは少なく、20Ωm以下の低比抵抗を示す箇所は、その後のボーリング調査で岩塊の細片化に伴って粘土化していることが分かった。

盛土施工前後の平面図と比抵抗分布を重ね合わせると、図-17(1)に示すように、低比抵抗分布域は旧谷筋と一致する。この低比抵抗域は盛土内へ表流水の浸透、つまり盛土の排水施設が不十分な場合や排水施設の破損によって盛

土内へ浸透し、帯水に伴って盛土の飽和度が高くなり、スレーキング等によって盛土材の劣化が進行した可能性がある。盛土の比抵抗分布が低比抵抗を示す場合、以下の地盤工学的問題がある。

- (1) 地下水が流入している盛土では、盛土材の劣化(スレーキング)や車両の繰り返しの輪加重に伴って細片化し、盛土の沈下やポットホールが発生する。
- (2) 降雨時に体積含水率の上昇に伴うせん断強度の低下によって、変位・変状や崩壊が発生する可能性がある。

図-17 の比抵抗絶対値と比抵抗強調値の関係を図-9 の

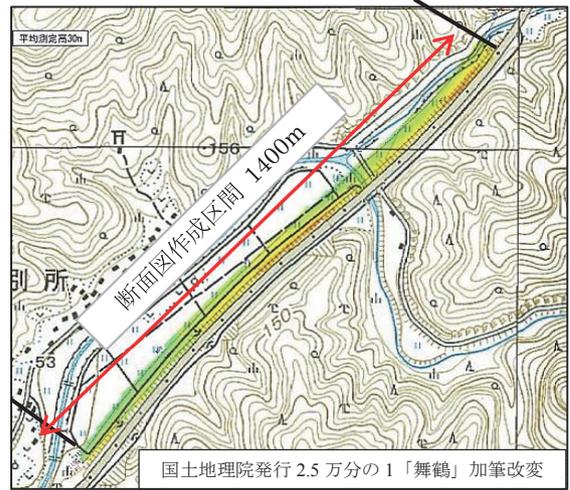


図-15 盛土区間における比抵抗平面分布図⁵⁾
(高度 30m, 137.5kHz)

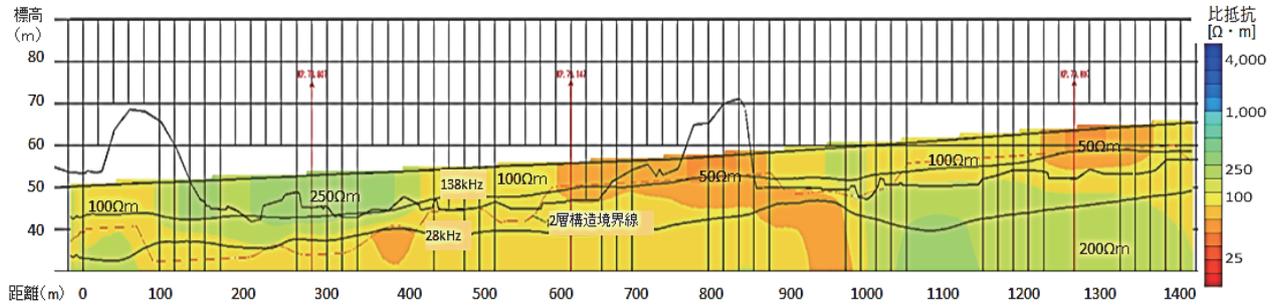
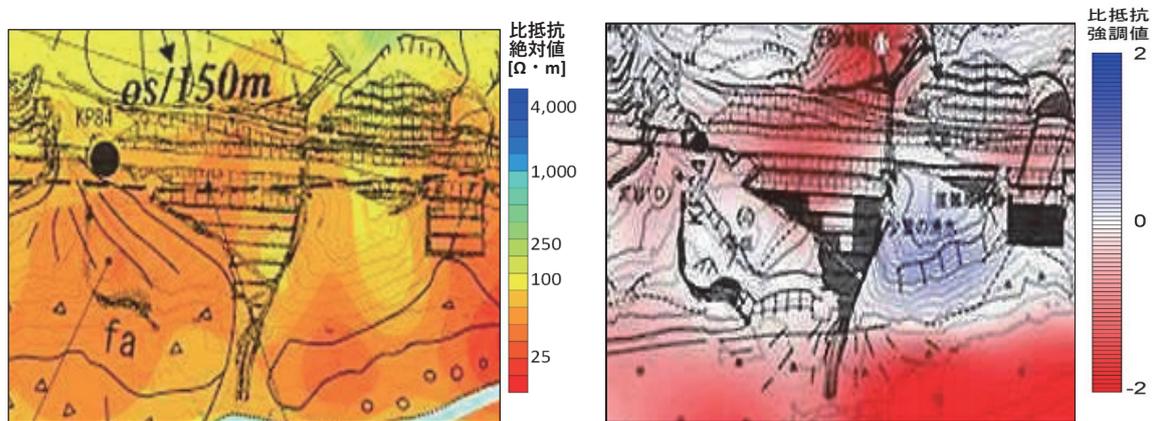


図-16 盛土区間における比抵抗断面図(舞鶴若狭自動車道)⁵⁾



(1) 比抵抗絶対値表示

(2) 比抵抗強調値表示

図-17 盛土のり面の空中電磁法探査による比抵抗分布図⁷⁾

チャートに適用すると、比抵抗絶対値分布の大部分が100Ωm以下であり、比抵抗強調値分布では高速道路本線と盛土のり面の多くが、相対的に比抵抗の低い赤色域を示す。盛土周辺の相対的に比抵抗が高い青色域は、安定した基盤岩や段丘堆積物を示す。このことから、盛土のり面は細粒分含有率や体積含水率の高い厚い粘性土からなり、崩壊が発生する可能性のあることを示している。

4.2 土石流危険渓流への適用事例

土石流危険渓流の抽出を徳島自動車道へ適用し、抽出手法の有効性を検討した。

渓床などの谷底低地には山地斜面から供給された崩壊土砂が堆積し、比抵抗は堆積場所と土砂の粒度組成や体積含水率によって変化し、上流域の礫・岩塊を多く含む土砂は高比抵抗を、下流域の細粒分含有率や体積含水率の高い土砂は低比抵抗を示す。対象地域のハザードマップでは、土石流危険渓流は高速道路に直交して多数分布するが、危険渓流に未指定の渓流も存在する。このような未指定渓流は、高速道路建設による高盛土や砂防堰堤の建設に伴って指定が解除されたものである。

図-18は、危険渓流周辺の比抵抗分布（絶対値分布および強調値分布）を示したもので、前者の比抵抗絶対値分布では、渓床堆積物の分布が読み取れるが、不明瞭である。後者の比抵抗強調値分布では、渓床堆積物や沖積錐の分布が明瞭に読み取れる。

土石流危険渓流の比抵抗分布と現地踏査の結果から、和泉層群分布域では細粒分からなり低比抵抗領域に、三波川変成岩類分布域では玉石・転石等の粗粒土が多く高比抵抗を示し低比抵抗の分布は少ない。よって、渓床堆積物の比抵抗は、流域の地質を反映し、粒度組成によって異なる。谷底低地のうち、20Ωm以下の低比抵抗域は、細粒分含有率や体積含水率の高い細粒堆積物が分布し、地下水で飽和されている地域に対比され、また土石流堆積物の級化構造を反映していることが、現地踏査や既往調査結果から推定したものである。図-18の比抵抗絶対値と比抵抗強調値の各値を図-9のチャートに適用すると、土石流危険渓流の絶対値は100Ωm以下で、強調値は相対的に比抵抗の低い赤

色域であり、体積含水率が高い細粒土からなる渓床堆積物に区分され、崩積土すべりが発生する可能性があることが読み取れ、土石流危険渓流の抽出に有効と思われる。

5. 危険斜面抽出のための空中電磁法探査の適用

5.1 探査実験結果から得られた知見の概要

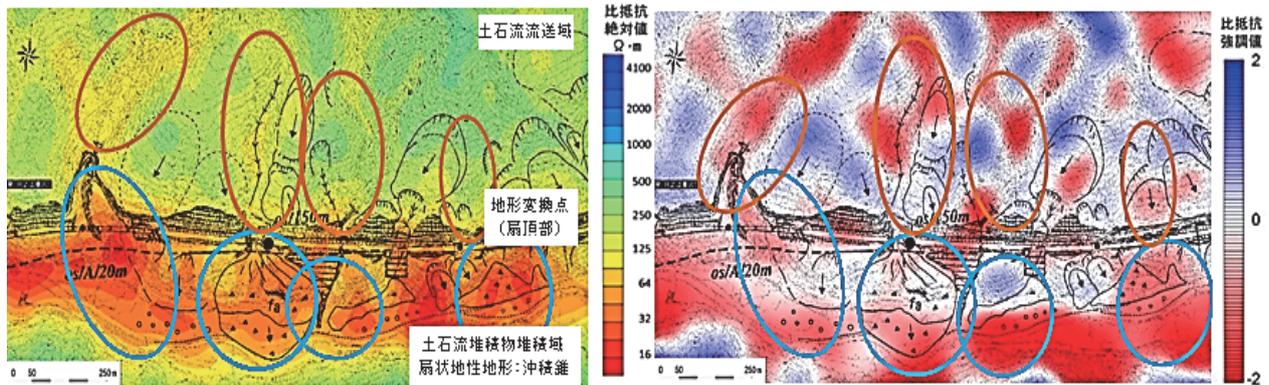
これまでの空中電磁法探査実験で得られた知見とその後への検討や技術開発によって得られた知見の概要を以下に記す。

- (1) 金属製埋設物の存在による空中電磁法探査の比抵抗分布への影響は、ほとんど認められず、金属製埋設物が施工されている斜面に対して空中電磁法探査を適用することに問題はない。コイル配置法(RESOLVE型)や解析技術の開発によって、垂直構造である連続地中壁のような埋設物が検出できる可能性がある。
- (2) 各地層は深部まで風化が進んでいることが多く、地層境界での比抵抗変化は認められない。切土のり面の小規模な破碎帯や亀裂の抽出も困難であるが、それらが密集している所では、相対的に低比抵抗を示す。その後、ラプラシアン解析法を採用して表示する比抵抗強調値表示法になどの解析技術の開発によって地盤性状境界が把握できるようになってきた。
- (3) 浅部で認められる低比抵抗域は、破碎帯や風化帯などの脆弱部や風化残積土砂などの高体積含水率を示す箇所に対比される。空中電磁法探査は、斜面(盛土・切土のり面)における要注意箇所の抽出に有用である。

5.2 比抵抗絶対値および強調値表示法の有用性

空中電磁法探査による地盤性状把握の精度向上を目指して、従来の比抵抗絶対値表示法（絶対値表示とコンストラスト表示）と比抵抗強調値表示法を適用し、現地踏査や既往調査資料・施工記録に基づいて検証を行い、地盤性状区分のチャートを作成し、その有用性を確認した。主な結論は、以下のとおりである。

- (1) 比抵抗絶対値の表示は、任意区分の分布であり、微細な



(1) 比抵抗絶対値表示

(2) 比抵抗強調値表示

図-18 比抵抗分布による土石流危険渓流の抽出 赤丸：渓床堆積物分布域，青丸：沖積錐分布域

比抵抗構造の判別が難しい。また配色が人為的であり、恣意的な比抵抗分布図となるなどの課題がある。この課題を解決するために、比抵抗強調値表示法を適用した。この表示法は比抵抗絶対値を用い、着目点とその周辺の差分を計算し、比抵抗分布の変化を表示するもので、微細な比抵抗構造を示す。

- (2) 比抵抗絶対値表示は、未固結堆積物と地すべり堆積物の分布が強調され、山地斜面では一部の崩壊性斜面を除き大きな変化が読み取れない。比抵抗コントラスト表示は、山麓堆積物などの低比抵抗域の詳細が表示され、その性状が把握できる。
- (3) 現地踏査による精度の検証では、地すべり移動土塊は比抵抗絶対値は広範囲に広がり、比抵抗強調値では赤色域を主体とするが、一部でゼロ域～青色域に分布する状態にある。崩積土すべりを含む溪床堆積物では、低比抵抗域で、赤色域に分布する。岩盤すべりを含む崩積土では高比抵抗域で、赤色域～青色域と広範囲な分布を示す。岩盤の風化による亀裂性岩盤やゆるみ域では高比抵抗域で、青色域を示す。このように地盤性状の区分は、比抵抗絶対値と比抵抗強調値の組合せによって区分できる。
- (4) 現地踏査や既往地質調査結果および施工記録による精度の検証では、比抵抗絶対値分布における表層の高比抵抗域は不飽和状態の風化帯や崩積土からなり、急斜面上のゆるみ域を有する岩盤や古い大規模な地すべりなどの不飽和帯と一致する。比抵抗強調値分布は青色域(相対的に比抵抗が高い)が表層に分布する場合は岩盤のゆるみ域を示す。また、比抵抗変化において、赤色域が地形面と平行に伸びる場合は、被覆層や風化岩(D級岩盤)の分布深度を示す場合が多い。赤色域と青

色域の境界が鉛直の場合は、断層破碎帯や変質帯の位置を示す。

- (5) 空中電磁法探査による地盤性状把握の精度向上を目指して、従来の比抵抗絶対値による表示法(絶対値表示とコントラスト表示)のほかに、新たに開発した比抵抗強調値表示法を開発し、現地踏査や既往調査資料・施工記録に基づいて検証を行い、地盤性状区分のチャートを作成し、その有用性を示した。

比抵抗絶対値と今回開発した比抵抗強調値の組み合わせによって作成したチャートを用いることで、地盤性状の区分が可能であるため、自然斜面、切土のり面、盛土のり面や土石流などの危険個所の選定・抽出が可能となり、予防保全管理の有効な手段となる。

5.3 空中電磁法探査を利用した予防保全管理

現在高速道路切土のり面の保全是、事後保全管理の枠内での対応となっているが、今後は、予防保全管理に方向転換しつつある。そこで、空中電磁法探査を適用することは高速道路のり面の予防保全管理を行う上での地盤情報把握の有効な手法である。その管理手法のフローを、図-19に示す。

空中電磁法探査によって、建設時、あるいは建設直後に比抵抗分布の初期データを取得し、風化の進んだ箇所や断層破碎帯を示す低比抵抗帯、あるいは建設中に作成された「斜面カルテ」や「崩壊履歴」との比較、変状や崩壊のあった斜面に対し目視点検を行う。その結果、低比抵抗帯とその周辺に変状がある場合には、その性状がどのような状態にあるかについて弾性波探査やボーリング調査によって確認することが肝要である。

供用後、ある期間後に詳細点検の一環として、再度空中

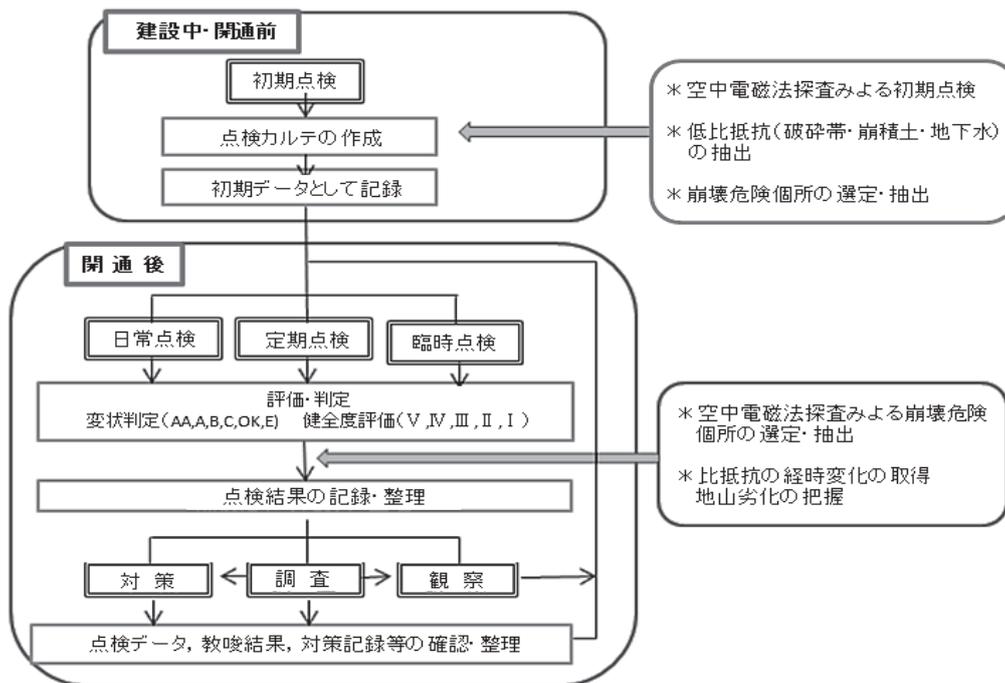


図-19 空中電磁法探査を利用した予防保全管理

電磁法探査を実施し、その結果を初期データと比較することにより、有用な知見を得ることができる。すなわち、含水率の変化した箇所を抽出することが可能となり、劣化の進行や地下水水位の上昇、建設時に分からなかった、あるいは顕在化していなかった潜在的脆弱部を捕捉できる可能性があり、「要注意箇所」あるいは「詳細調査箇所」の見直しを予防保全につなげると共に、詳細点検ならびにボーリング調査や物理探査等の詳細調査の効率化や経済性を図ることができると考えられる。

6. おわりに

本論文は、空中電磁法探査による比抵抗絶対値と比抵抗強調値の比抵抗分布に着目し、危険斜面を抽出するための地盤性状区分チャートを開発した。このチャートを利用して、危険斜面の抽出や地盤特性を把握することが有効であることが確認された。

今後は、さらに調査事例を増やし高速道路斜面の予防保全管理のために地盤性状区分チャートの精度を高め、危険斜面の効率的な抽出を可能にしていきたい。

参考文献

- 1) 西日本高速道路：保全点検要領（構造物編），2016.
- 2) 上出定幸，牧浦信一，渡邊喜義，梶原三永，松井 保：高速道路のり面に対する予防保全管理への空中電磁法探査手法の適用性，地盤工学ジャーナル，Vol.6，No.1，pp.57-68，2010.
- 3) Makiura N., Sakuradani K., Kamide S., Oda K. and Matsui T.: Development of a New Resistivity Presentation Method for HEM Data to Detect Ground Characteristics of Expressway Slopes, ISOPE2018 Sapporo, CD-ROM, 2018.
- 4) 日本道路公団関西支社管内：舞鶴若狭自動車道関連土質地質調査報告書，1990～2001，2007.
 - ・舞鶴西IC～舞鶴東IC間第一次土質調査報告書
 - ・舞鶴東IC第二次詳細土質調査報告書
 - ・舞鶴～大飯間地すべり対策検討委員会報告書
 - ・舞鶴東IC工事関連施工記録
- 5) 西日本高速道路(株)関西支社：高速道路のり面の予防保全管理への適応性検討業務 業務報告書，西日本高速道路エンジニアリング関西(株)，p.155，2007.
- 6) 日本道路公団四国支社管内：徳島自動車道関連土質地質調査報告書，1993～1999.
 - ・池田町馬路地区(その2)第二次詳細土質調査
 - ・馬路工事地質調査
 - ・徳島自動車道池田工事区工事関連施工記録
 - ・白地トンネル切羽観察記録・地山変状計測記録
- 7) 西日本高速道路(株)四国支社：のり面防災として要注意箇所の抽出技術開発業務(空中電磁波による地質調査)業務報告書，西日本高速道路エンジニアリング四国(株)p.95，2010.
- 8) 小西尚俊：空中電磁波法による3次元探査，物理探査，Vol.51，No.6，pp.643～658，1998.
- 9) たとえば，物理探査学会：物理探査ハンドブック，第6章電磁探査，創立50周年記念物理探査学会，pp.297-398，1998.
- 10) 大日本コンサルタント(株)：空中電磁法探査による地盤の解析方法，特許No. A524337，【公開番号】特開2011-220911(P2011-220911A)，【公開日】平成23年11月4日.
- 11) 大日本コンサルタント(株)：NE-RESOLVE空中電磁法探査，ニュースリリース，<https://www.ne-con.co.jp/news/>，(参照2018.9.20).
- 12) 土木学会関西支部：比抵抗高密度探査に基づく地盤評価に関する調査・研究委員会：比抵抗高密度探査に基づく地盤評価，平成9年度講習・研究検討会テキスト，p.107，1997.
- 13) 災害科学研究所トンネル調査研究会：地盤の可視化と探査技術，鹿島出版会，2001.
- 14) 林幸一郎，木下篤彦，田中健貴，今森直紀，河戸克志，奥村稔：重力変形斜面における空中電磁探査を用いた崩壊深推定手法の検討，平成25年度砂防学会研究発表会概要集B，pp.356-357，2017.

(2018年6月17日 受付)