



Title	空中電磁法探査による高速道路斜面の地盤性状把握と予防保全管理への適用性の研究
Author(s)	牧浦, 信一
Citation	大阪大学, 2021, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/85415
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

博士学位論文

空中電磁法探査による高速道路斜面の地盤性状把握と
予防保全管理への適用性の研究

牧 浦 信 一

2021年6月

大阪大学大学院工学研究科

目 次

第1章 序論	1
1.1 本研究の背景と目的	1
1.2 本論文の構成	2
第2章 高速道路斜面の保全管理における現状と課題	4
2.1 概説	4
2.2 高速道路の現況と課題	4
2.2.1 物流における高速道路の位置付け	4
2.2.2 高速道路の老朽化と使用環境	5
2.2.3 構造物の構成比率とのり面災害の状況	8
(1) 降雨によるのり面災害	8
(2) 地震によるのり面災害	12
2.3 高速道路のり面点検の現状と課題	12
2.3.1 のり面点検による事後保全	12
2.3.2 変位・変状による事後保全	15
(1) 降雨通行規制基準値導入の経緯	15
(2) 降雨通行規制基準値の設定	16
(3) 通行止めの解除	17
(4) 事後保全における課題	19
2.3.3 のり面点検手法とその取り組み	21
(1) 道路防災総点検の経緯	21
(2) 2006年道路防災総点検	21
(3) 防災カルテの導入	24
(4) 道路防災総点検結果を受けての対策工の進捗	24
2.4 大規模災害の事例	25
2.4.1 地震災害	25
(1) 平成21(2009)年駿河湾沖地震による盛土のり面崩壊事例	25
(2) 東北地方太平洋沖地震の被災事例	31
2.4.2 降雨災害	39
(1) 盛土のり面崩壊事例 [山陽道 甘木地区]	39
(2) 切土のり面崩壊事例 [山陰道 玉造地区]	43
(3) 土石流発生事例 [松山道 新居浜地区]	46
(4) 土砂災害防止対策の実施	49
2.5 予防保全への取り組み状況と課題	49
2.5.1 高速道路斜面の予防保全	50

2.5.2 高速道路斜面の予防保全のための条件	51
2.5.3 新たな予防保全のための「降雨の作用」	52
2.5.4 「降雨の作用」についての評価手法	54
(1) 降雨に伴うのり面内地下水評価モデル	54
(2) 評価検討事例箇所の地質状況	54
(3) n連タンクモデルの構築と現状の再現	55
2.5.5 新たな予防保全への取り組みの課題	58
2.6 むすび	59
第2章の参考文献	59
 第3章 高速道路斜面における地盤性状把握法の現状と課題	62
3.1 概説	62
3.2 既往の地盤調査法	62
3.2.1 一般的な地盤調査法の現状と課題	63
(1) 調査ボーリング	63
(2) サウンディング	64
(3) 地下水調査	64
(4) 室内試験	65
3.2.2 物理探査法の現状と課題	66
(1) 地表からの探査	67
(2) ボーリング孔を利用した探査	67
(3) 空中物理探査	68
3.2.3 地表物理探査法の特徴	68
(1) 弹性波探査	69
(2) 電気・電磁探査	71
(3) ボーリング孔間でのジオトモグラフィ	77
3.3 空中物理探査の概要	80
3.3.1 空中物理探査の概要と技術動向	80
(1) 空中電磁法探査	80
(2) 空中磁気探査	82
(3) 空中重力探査	84
(4) 空中放射能探査	88
(5) 熱赤外線探査	89
(6) リモートセンシング	90
3.4 空中物理探査の土木分野への適用	94
3.5 むすび	95

第3章の参考文献	96
第4章 空中電磁法探査の探査・解析方法と比抵抗分布表示法の開発	98
4.1 概説	98
4.2 空中電磁法探査と解析方法	98
4.2.1 空中電磁法探査の特徴	98
(1) 空中電磁法探査の概要	98
(2) 空中電磁法探査の有用性	99
(3) 空中電磁法探査システムの特徴	100
(4) 斜面予防保全分野における空中電磁法探査の位置づけ	101
4.2.2 探査手法とデータの取得	104
(1) 概要	104
(2) 探査原理	104
(3) 探査深度	106
4.3 解析方法	108
(1) レベリング	108
(2) 比抵抗解析	110
(3) 飛行測線毎の比抵抗解析	110
(4) 比抵抗平面解析	111
(5) 比抵抗3次元モデル作成	111
(6) 任意箇所の断面解析	112
4.4 比抵抗と地盤物性の一般的な関係および比抵抗から判読できる地盤情報	114
(1) 比抵抗と地盤物性の一般的な関係	114
(2) 比抵抗から判読できる地盤情報	118
4.5 比抵抗分布表示方法の開発	118
4.5.1 開発の背景と概要	118
4.5.2 比抵抗絶対値表示法	119
(1) 比抵抗絶対値(通常)表示法	119
(2) 比抵抗絶対値(高精度)表示法	120
4.5.3 比抵抗強調値表示法	121
(1) 比抵抗差分解析法	122
(2) ラプラシアン解析法(画像処理表示法)	123
4.5.4 対数比抵抗強調値表示法	123
4.5.5 対数比抵抗強調値(閾値)表示法	124
(1) 対数比抵抗強調値(閾値)表示法による表示例	125
4.6 むすび	127

第4章の参考文献	128
第5章 空中電磁法探査による高速道路斜面における適用性実験	130
5.1 概説	130
5.2 適用性実験の概要	130
5.2.1 実験地の地形地質の概要	130
(1) 地形	130
(2) 地質	131
(3) 切土のり面の状況	133
5.2.2 地形地質条件とのり面条件	133
5.2.3 地表物理探査による検証方法	134
(1) 電気探査	134
(2) 浅部地下探査	135
5.2.4 空中電磁法探査による実験方法	135
(1) 測定方法	135
(2) 測定高度	136
(3) 測線間隔	136
5.3 空中電磁法探査の結果と解釈	137
5.3.1 測定高度の違いによる比抵抗への影響	137
5.3.2 測線間隔の違いによる比抵抗への影響	140
5.3.3 金属製埋設物による影響	140
5.4 実験結果の考察	142
5.5 むすび	143
第5章の参考文献	143
第6章 空中電磁法探査データに基づく高速道路斜面における危険地域・斜面の抽出 ..	145
6.1 概説	145
6.2 比抵抗解析図による判読項目の定義、判読方法	145
6.3 空中電磁法探査の実施地域における地形・地質	146
6.3.1 徳島自動車道の地形・地質の概要	147
(1) 地形の概要	147
(2) 地質の概要	148
6.3.2 松山自動車道の地形・地質の概要	152
(1) 地形の概要	152
(2) 地質の概要	155
6.4 代表のり面における比抵抗絶対値分布とその解釈	160
6.4.1 盛土のり面への適用例	160

6.4.1.1	(1) 舞鶴若狭自動車道の盛土のり面	160
	(2) 徳島自動車道の盛土のり面	164
6.4.2	切土のり面への適用例	166
	(1) 舞鶴若狭自動車道の舞鶴東 IC 周辺(流れ盤切土のり面)	166
	(2) 舞鶴若狭自動車道の舞鶴東 ICA ランプ(受け盤切土のり面)	168
	(3) 徳島自動車道の新山トンネル～池田 PA 間の切土のり面	170
6.5	代表のり面における比抵抗強調値分布とその解釈	175
6.5.1	「中央構造線」(大規模断層破碎帯)の抽出	175
	(1) 徳島自動車道の事例	175
	(2) 松山自動車道の事例	178
6.5.2	土石流危険渓流の抽出	181
	(1) 徳島自動車道の事例	181
	(2) 松山自動車道の事例	183
6.5.3	地すべり地域の抽出	186
	(1) 徳島自動車道の事例	186
	(2) 松山自動車道の事例	188
6.6	むすび	198
第 6 章	の参考文献	199
第 7 章	予防保全管理への空中電磁法探査の適用性	201
7.1	概説	201
7.2	比抵抗分布による地盤性状の把握	201
7.2.1	高速道路に沿う広域地盤における比抵抗分布表示例	201
	(1) 広域的な地形・地質区分と比抵抗平面構造の対比	201
	(2) 地形判読結果と比抵抗平面構造の対比	203
7.2.2	比抵抗から斜面の土木分野の地質的な解釈を行う根拠	204
7.3	比抵抗データに基づく崩壊危険斜面の抽出方法	205
7.3.1	抽出方法の基本手順	205
7.3.2	比抵抗データによる地盤性状区分チャートの提案	206
	(1) 現地踏査による地盤性状と代表地点の選定	206
	(2) 比抵抗絶対値(通常)と比抵抗強調値の組み合わせによる地盤性状区分チャート	207
	(3) 比抵抗絶対値(高精度)と対数比抵抗強調値(閾値)の組み合わせによる地盤性状区分チャート	217
7.4	地盤性状区分チャートによる崩壊危険斜面のスクリーニング手法への適用	226
7.4.1	概説	226

7.4.2 高速道路の地盤調査への空中電磁法探査適用の意義	227
7.4.3 各種の比抵抗表示法の評価	228
7.4.4 地盤性状区分チャートの評価	229
7.5 空中電磁法探査に基づく高速道路斜面の予防保全管理への適用	229
7.6 今後の課題	230
7.7 むすび	231
第7章の参考文献	232
第8章 結論	234
本研究に関連した研究成果	240
その他の研究成果	240
謝辞	242

第1章 序論

1.1 本研究の背景と目的

高速道路は、産業・社会・経済を支える物流の基盤を形成するインフラとしての機能を担っており、社会・経済・文化になくてはならない社会資本であり、日々重要性を増している。高速道路ネットワークを間断なく提供することは、現代社会の要請である。一方、日本の高速道路は開通より長時間経過して老朽化が進展しているとともに、使用環境は地球温暖化による災害の激甚化や、通過交通車両の大型化などにより過酷となるなどの課題を抱えている。そのような状況の中で、高速道路の安全・安心と快適性を守っていくためには、高速道路において大きな延長比率を占める土工区間の安全確保が重要である。土工区間の安全確保は、高速道路の人工的に造られた斜面(以下のり面という)と、自然形成の斜面(人工的に造られた斜面も含み以下斜面という)の安全性にかかっている。現在では、土工部において所有権の及ぶ範囲の重要構造物である高速道路のり面を中心に、点検による管理が実施されている。ところが、現在の点検による管理には種々の問題が残されており、早期に事後保全管理から予防保全管理へ方向変換する必要性が高まっている。

予防保全管理に方向変換することによって、予算的制約の中、ミニマムコストでインフラストラクチャーの最大効用を発揮できることはアセットマネジメント解析により明らかであり、早期に予防保全管理の実施が要望されている。予防保全管理においては、対策の必要性や優先順位を決定することが保全管理システムにおいて重要となる。高速道路斜面の安定解析のためには、地盤性状を把握するとともに、安定を確保するべき想定外力(地震動の作用、降雨の作用)の設定が必要となる。地盤性状を把握する方法として、ボーリング調査や物理探査など各種の手法が開発され実用化されている。ところが、線状かつ広範囲に分布する高速道路斜面に対して、斜面地表部から既往のボーリング調査や物理探査を用いて地盤性状、断層および地下水性状を把握するには、多大な費用と時間を要する。したがって、保全対策実施箇所選定に当たって、詳細地盤調査に先立ち詳細検討箇所をスクリーニングするために、崩壊の危険性の高い地すべり、土石流危険渓流の崩積土を含むのり面・斜面や断層などの分布と安定性を精度よく、効率的かつ経済的に検出する手法の開発は不可欠である。

本論文では、まず、概ね概成したといわれる高速道路ネットワークについて調査し、高速道路が現在果たしている役割を明らかにする。一方、高速道路の安全性を確保するための東日本・中日本・西日本高速道路株式会社(以下 NEXCO 3 社という)の保全管理について調査・整理し、現在の保全管理における課題を明らかにするとともに、課題解決に向けて取り組むべき新たな保全管理手法を提案する。新たな保全管理を実施するためには、高速道路斜面の地盤性状把握を効率的に実施することが不可欠である。そこで、現在行われているボーリング調査や物理探査など各種の手法の中で、最適と考えられる調査法を選定し、高速道路斜面への適用方法について、現地実験により明らかにする。しかしながら、新たな保全管理における目的は、高速道路斜面の不安定要因である「土石流・山腹崩壊」、「岩盤崩壊」、「地すべり」、「不安定土砂」、「断層破碎帶」などを検出することであるため、ボーリング調査、現地踏査などで不安定要因を有すると判定される斜面において地盤性状把握手法により明らかにされる成果データを整理し、成果データと斜面の不安定要因との

相関を検討し、適切な補修・対策が必要な崩壊危険斜面の抽出(スクリーニング)手法を提案する。

以上の検討から、本論文は、高速道路斜面の保全管理において事後保全から予防保全へと進めるうえで必要な地盤性状把握法について、どのような手法を用いれば効率的に把握できるかについて研究し、新たな保全管理手法を実施するための地盤性状把握法と補修対策が必要となる崩壊危険斜面を抽出する方策を確立させることを目的とする。

1.2 本論文の構成

本論文の構成を図 1.2.1 に示す。

第 1 章 は、序論として本研究の背景と目的および本論文の構成について述べる。

第 2 章 は、高速道路の果たす役割・効果を明らかにすると共に、高速道路の安全・安心および快適性を確保するための保全管理の取り組みについて調査する。さらに、調査結果に基づいて、現状の保全管理の取り組みでは解決できない課題について、検証するとともに、課題解決策について提案し、方向性を示す。

第 3 章 では、予防保全において把握が必要である地盤の構成と物性値および地下水位について、広域を効率的に把握できる物理探査手法を検討し、高速道路斜面の予防保全にとって最適と考えられる物理探査手法を選定する。

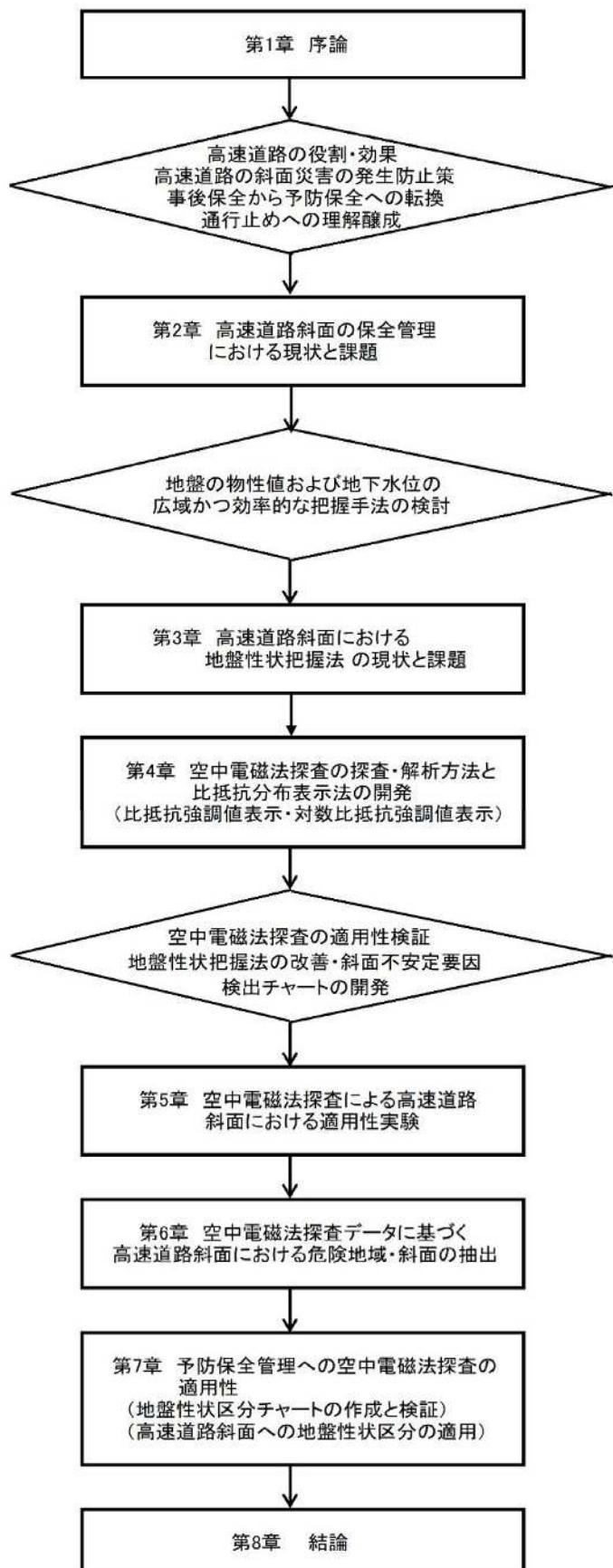


図 1.2.1 本論文の構成

第4章では、まず、空中物理探査の一種である空中電磁法探査を対象として、種々の測定法や解析法のうち本研究で採用する周波数領域法を適用した *RESOLVE* 空中電磁法探査システム(測定法と解析法)について述べる。さらに、探査結果に対しての比抵抗表示法について述べ、現在採用されている比抵抗表示法における課題解決のため、新たな比抵抗表示法(比抵抗強調値表示法・対数比抵抗強調値表示法・対数比抵抗強調値(閾値)表示法)を開発するとともに、その解析法と特徴を述べる。

第5章では、空中電磁法探査を高速道路斜面に適用し、地上電気探査、ボーリング調査のデータに基づいて検証することにより、空中電磁法探査の有用性を調査・検討するとともに、測定高度や測線間隔の最適な測定方法などを明らかにする。

第6章では、高速道路斜面の安全性を確保するうえで課題となる崩壊の危険性が高い地すべり、土石流危険渓流の崩積土および断層などを空中電磁法探査データに基づき検出するには、従来の比抵抗表示法では十分な精度が得られないため、新たな比抵抗表示法について現地解析データにより検討する。

第7章では、空中電磁法探査を予防保全管理に適用する場合、崩壊の危険性が高い地盤性状箇所を効率的に抽出するのに有用と考えられる地盤性状区分チャートを提案する。また、空中電磁法探査の予防保全管理への適用について検討する。

第8章では、全体をまとめて結論とする。

第2章 高速道路斜面の保全管理における現状と課題

2.1 概 説

我が国における物流は、宅配便の発達などにより、トラック輸送が主要な役割を果たしており、拠点間のトラック輸送に関しては、高速道路の果たす役割は大きいと考えられる。まず、高速道路が果たす役割を明らかにする。一方、高速道路は名神高速道路（栗東～尼崎）開通から、順次開通区間を延伸してきた。高速道路は、その間経年による変状や、自然環境・使用環境などにも、変化が生じていると思われる。対象構造物の置かれている過酷な状況を明確にし、その状況の中で、高速道路の機能とサービスを間断なく確保・提供するために実施されている NEXCO 3 社の取り組みを調査する。調査の過程で、現状の保全管理の課題を明らかにする。

現状の保全管理の課題を解消するための方策を検討するために、国土交通省ほかの取り組みについて調査し、予防保全管理への転換が必要であることを述べる。さらに、予防保全着手のため保証雨量基準の概念を取り込んだ「新たな予防保全管理(性能規定型予防保全管理を言う)」の試案を提案して課題解決策の方向性を示す。

現在の事後保全管理から予防保全管理へ転換する場合、高速道路斜面という特殊な構造物（広域に連なる線状の構造物）についての地盤性状の効率的な把握法および崩壊の危険性が高い斜面のスクリーニング手法が、重要な課題であることを明らかにする。

2.2 高速道路の現況と課題

2.2.1 物流における高速道路の位置付け

全国貨物純流動調査(物流センサス)¹⁾が、国土交通省により 5 年毎に実施されており、最新の平成 27(2015)年調査結果は、平成 29(2017)年 3 月に公表されている。年間出荷量の代表輸送機関別シェアをみると、図 2.2.1 に示すように、1 位が営業用トラックで 55.2 %、2 位が自家用トラック 19.8 % であり、3 位が海運 16.7 %、4 位が鉄道 1.2 %、5 位が航空 0.0 %、その他(パイプライン、ベルトコンベヤ、自動車・船舶の自走などを指す)7.0 % となっている。

代表輸送機関とは、貨物が出荷されてから届け先に到着するまでに利用された輸送機関のうち、輸送距離が最も長い輸送機関を示しており、トラック輸送は、各種輸送機関の中で、合わせると 75.0 % のシェアを占めている。

代表輸送機関でトラックが選択された理由は、輸送コストの低さ(44.9 %)、届け先に対してほかの輸送機関がない(43.2 %)、到着時間の正確さ(35.4 %)などの任意性や定時制が挙げられている。鉱産品、金属機械工業品および化学工業品のように、重量が重い产品、つまり平均流動ロットが大きい产品や輸送距離帯別にみると、701 km以上については海運がシェアを伸ばすが、発着点と港湾間の陸上輸送も含めて考えると、我が国の物流はトラック輸送が支えていることには変わりがない。

道路統計年報 2017²⁾によると、表 2.2.1 に示すように、平成 28(2016)年度当初、我が国には、1,278,184 km の道路があり、そのうち高速自動車国道は 9,319 km が開通し、路線延長比は、全体道路延長の 0.73 % となっていた。全国貨物純流動調査の 3 日間のサンプル調査によると、図 2.2.2 に示すように、代表輸送機関がトラック(フェリーを含む)輸送の

(年間調査 単位: 百万トン, %)



注)・輸送機関「その他」とは、パイプライン、ベルトコンベア、自動車・船舶の自走等を指す。

・四捨五入の関係で合計が合わない場合がある。

図 2.2.1 年間出荷量の代表輸送機関分担¹⁾

表 2.2.1 道路の現況(平成 28(2016)年度)²⁾

	高速自動車国道	一般国道	都道府県道	市町村道	合計
延長(km)	9,319	65,922	142,659	1,060,284	1,278,184
構成比率(%)	0.73	5.16	11.16	83.00	100.0

うち、件数比で 40.9 %、重量比で 19.8 % が高速道路経由である。内訳をみると、宅配便など混載の利用率が最も高く件数比で 65.0 %、重量比で 60.7 %、次いで一車貸切・トレーラーでは件数比 27.2 %、重量比 22.1 % となっている。なお、鉄道コンテナ、海運、航空についても、駅、港へのアクセスに高速道路が使用されており、重量比で航空では 60.1 %、海運 1.8 %、鉄道コンテナ 5.1 % の部分を担っている。

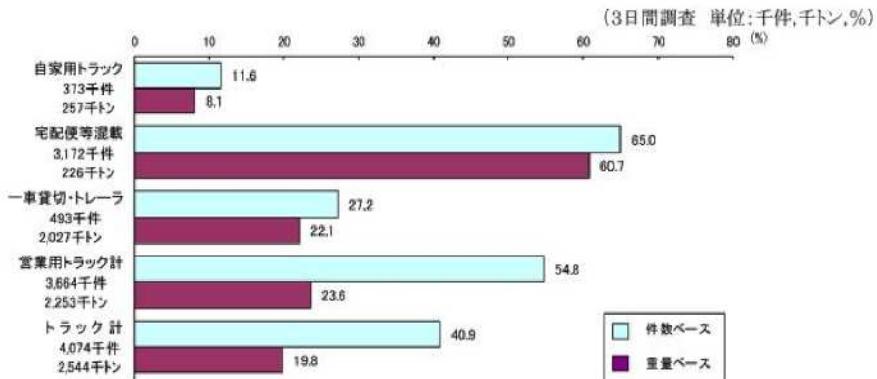
全国貨物純流動調査における高速道路とは、高速自動車国道、都市高速道路、本州四国連絡道路およびこれらの道路とリンクしている一部の自動車専用道路、有料道路（京葉道路、第二神明道路など）を指しているため、他章における東日本・中日本・西日本高速道路株式会社（以下 NEXCO 3 社という）の管理する高速道路とは異なる。

以上のように、我が国の物流におけるトラックと高速道路が占めるシェアは大きく、日本の社会・経済・文化を支える基幹インフラとなっている。

2.2.2 高速道路の老朽化と使用環境

高速道路は昭和 38(1963)年 7 月 16 日の名神高速道路（栗東～尼崎）開通より、順次整備が進められてきた。昭和 48(1973)年度に、開通延長が 1,000 km を突破、昭和 51(1976)年度 2,000 km、昭和 62(1987)年度に 4,000 km、平成 8(1996)年度に 6,000 km、平成 14(2002)年度に 7,000 km、平成 23(2011)年度に 8,000 km と順調に整備がすすめられた。NEXCO 3 社が管理する高速道路³⁾は、平成 27(2015)年度には約 8,200 km に達し、平成 30(2018)年 4 月では、図 2.2.3 に示すように、高速自動車交通のネットワークを形成している³⁾。

しかしながら、図 2.2.4 に示すように、開通から 30 年を経過した高速道路延長は、約 3,500 km（平成 27(2015)年度時点）で約 4 割を占めており、25 年後の 2040 年には、高速道路の平均



注)・輸送機関名下のトン数、件数は高速道路利用量。
 ・利用率は、高速道路利用状況不明貨物を除いた流動量に対するもの。
 ・高速道路利用状況の不明割合は以下のとおり。
 件数ベースでは自家用トラック:32%、宅配便等混載:61%、一車貨切・トレーラ:63%、トラック計:56%
 重量ベースでは自家用トラック:28%、宅配便等混載:49%、一車貨切・トレーラ:25%、トラック計:27%
 ・トラック(計)には代表輸送機関フェリーを含む。

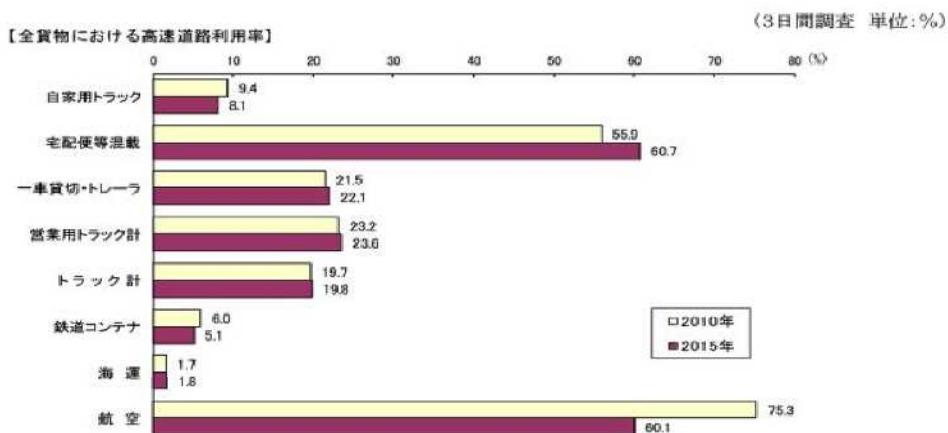


図 2.2.2 トラック輸送における高速道路利用率と利用量^{①)}

供用経過年数が約50年となる⁴⁾。このように高速道路は、笛子トンネル事故に見られるように、経年劣化による老朽化、設計条件以上に過酷な使用条件下での使用、設計指針の時代による変遷などの原因により劣化が早急に進行しており、メンテナンスが重要な時代を迎えており。高度成長期に集中的に建設された社会資本が今後急速に老朽化することを踏まえ、国土交通省は平成25(2013)年を「社会資本メンテナンス元年」と位置付け、老朽化対策に取り組むこととした⁴⁾。

以上のように、高速道路は経年劣化ばかりではなく、大型車交通量の増加、総重量違反車両のほか、物流の効率化のための車輌の大型化および積雪寒冷地では平成5(1993)年頃からスパイクタイヤ使用禁止により、冬季の交通安全確保のために凍結防止剤の散布量が増加するなど、使用環境の過酷化が進んでいます。平成27(2015)年度の全国道路・街路交通情勢調査⁵⁾では、図2.2.5に示すように、高速自動車国道の日当たり大型車走行台キロは、82.6 百万台 km/日、12 時間の大型車混入率は26.6 %に達している。図2.2.6に示すように、凍結防止剤(塩化ナトリウム)の使用量も、平成元(1989)年～5(1993)年の平均散布量36 t/kmが、スパイクタイヤの使用禁止のため平成6(1994)年～16(2004)年の平均散布量では52 t/km、平成17(2005)年～26(2014)年には高速道路の民営化により、それまで以上に安全

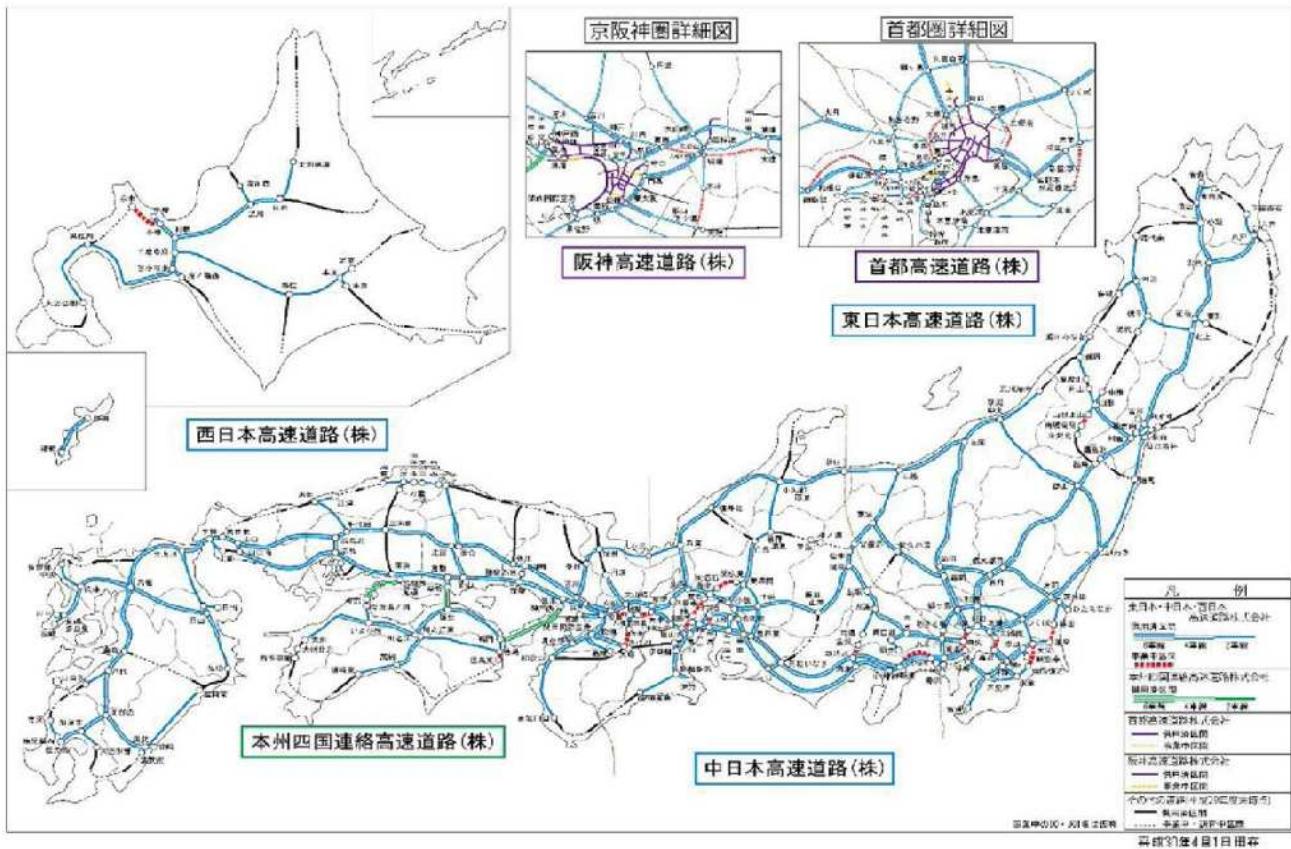


図 2.2.3 高速道路全国路線図³⁾

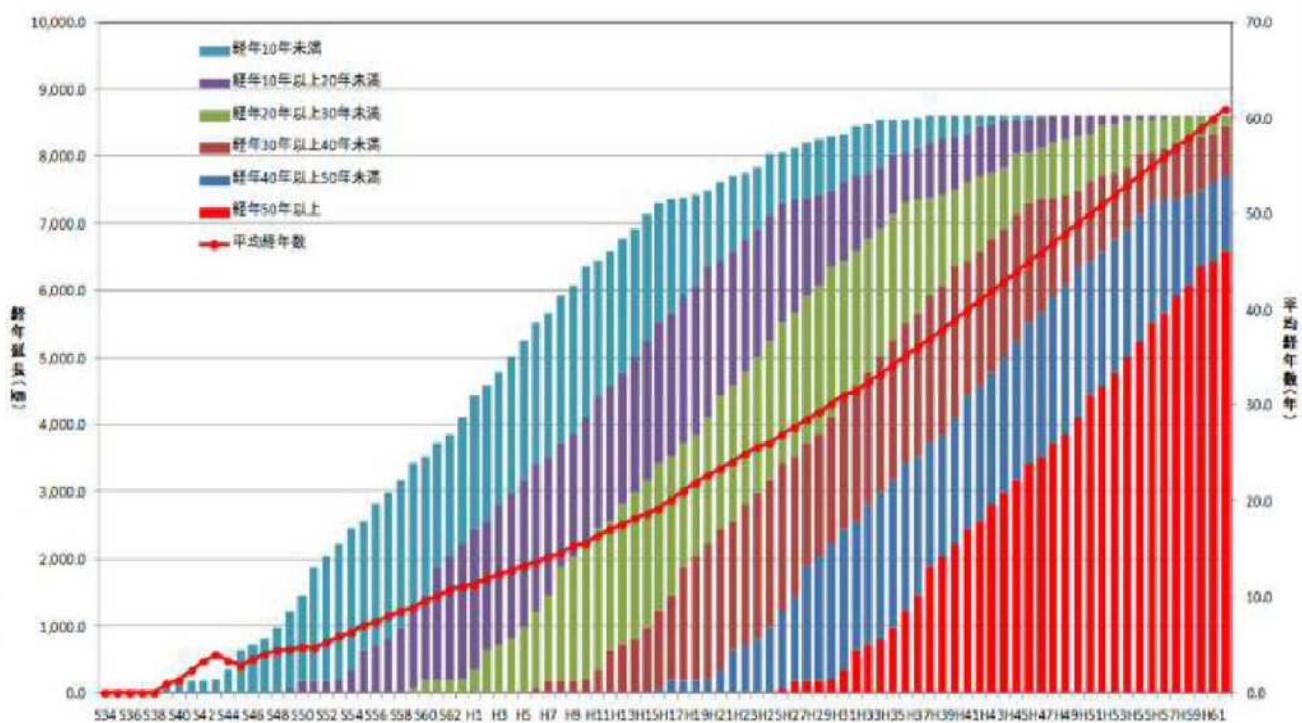


図 2.2.4 高速道路の開通延長と経年数⁴⁾

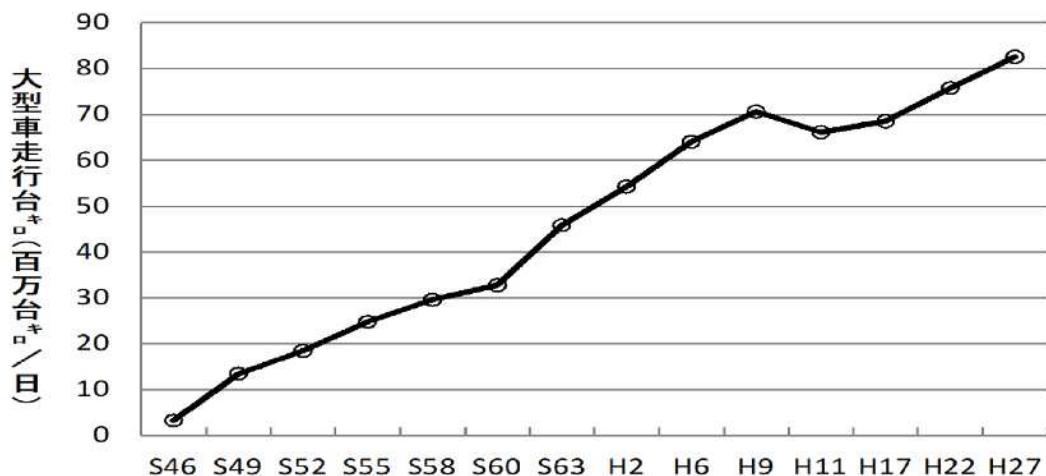


図 2.2.5 高速道路における大型車 24 時間走行台 km 推移⁵⁾

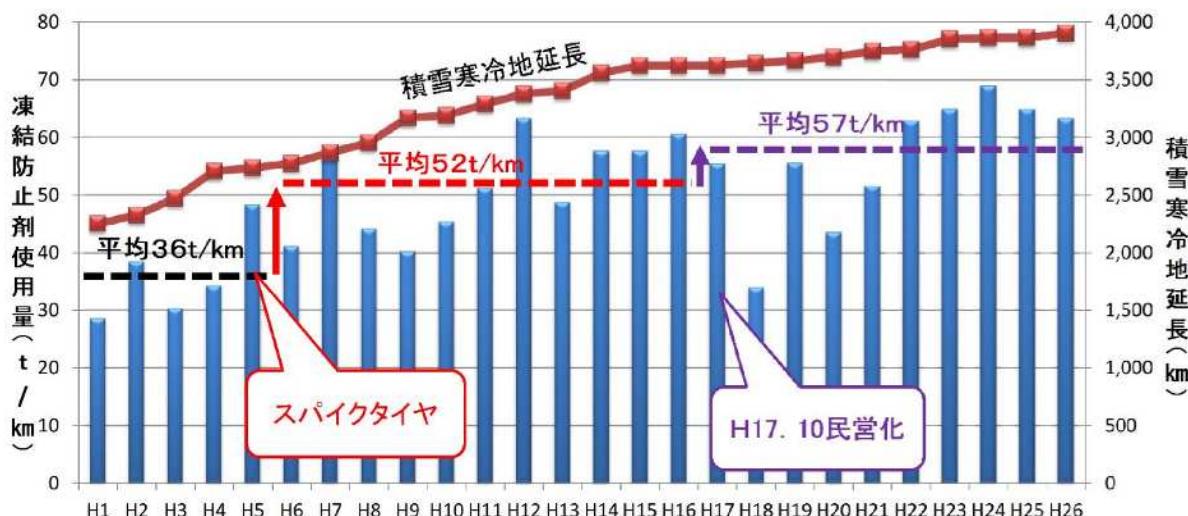


図 2.2.6 凍結防止剤使用量の推移(高速道路)⁴⁾

確保に対するニーズが高まったため平均散布量が 57 t/km に増加している。

2.2.3 構造物の構成比率とのり面災害の状況

高速道路は大別すると、3つの構造物から形成されている。すなわち、平成27(2015)年度時点の高速道路約8,200 kmのうち、橋梁区間1,259 km(15.4 %)、トンネル区間887 km(10.8 %)であるが、主要区間を占めるのは土工区間であり、6,054 km(73.8 %)と全体の約3/4である。

したがって、高速道路の自動車交通を24時間365日確保するには、高速道路の土工区間の安全性確保が重要な要素となっている。

(1) 降雨によるのり面災害

(株)高速道路総合技術研究所(以下総研という)が開催した「高速道路資産の長期保全及

び更新のあり方に関する技術検討委員会」⁴⁾において、表2.2.2に示すように、盛土・切土および自然斜面を検討対象として、過去の変状実態(土砂災害などの発生状況)について検討している。全国の高速道路ネットワークの機能を今後も永続的に活用していくことを念頭に、本体構造物の現状について、表2.2.3に示す対象数量に対して変状の要因分析を行っている。平成5(1993)年～16(2004)年の間の約1,100件の降雨などによる盛土部における被災データの分析からは、図2.2.7に示すように、盛土材料では粘性土の災害件数が最も多く、次いでまさ土、山砂、シラスなど砂質系であり、これらの材料で全被災件数の約70%を占める。また、1件あたりの被災土量は泥岩が最も多く、次いでまさ土、シラスの順となる。盛土材料として、脆弱岩を使用した場合、雨水の浸透により徐々にスレーキングが進行し、強度低下することがこれまでの経験から判明している。そのため、脆弱岩盛土に関する基準類の変更により、昭和62(1987)年以降に施工した脆弱岩盛土は転圧力の高い振動ローラーによる転圧に変更されている。よって、昭和61(1986)年以前の盛土を優先的に

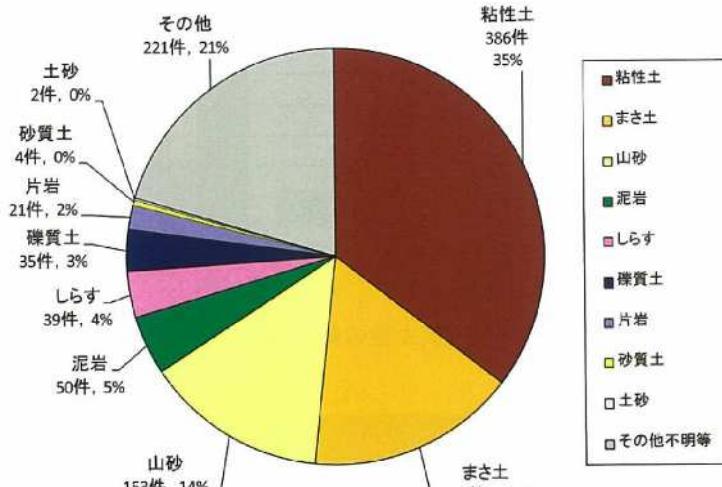
表 2.2.2 土構造物の検討事項⁴⁾

着色部:検討対象

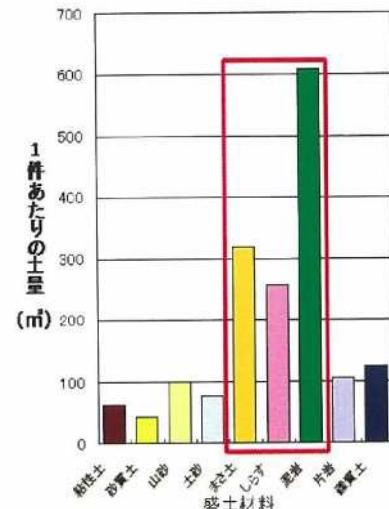
構造物	事象	変状・損傷の進行等	今回の検討	変状要因	対策種別	対策工法
盛土	崩壊	近年多発傾向	○	降雨、地盤材料の風化・劣化	補修・補強	盛土浸透水対策 盛土の強度増加 付帯構造物の変形対策
		一部で発生	今後の課題	地震	補修・補強	
		一部で発生	通常修繕	長期圧密沈下	改良	
	補強土壁の変状	一部で発生	今後の課題	裏込材料の劣化	補修・補強	
切土	グラウンドアンカーの破断	一部で発生	○	鋼材の腐食	補強	アンカーの増打ち
	のり面工、補強土工の変状	一部で発生	通常修繕	材料の劣化	補修・補強	
	崩壊	近年多発傾向	今後の課題	降雨、地盤材料の風化・劣化	補強	
盛土・切土共通	表層崩壊	近年多発傾向	○	降雨	取替え 改良	地下水排水工の維持管理 集水ます、縦溝等の追加
自然斜面	土石流	近年多発傾向	○	降雨	自衛対策	簡易対策(本線防護工)
	落石	一部で発生	今後の課題	地震	自衛対策	
付帯構造物	擁壁・カルバートの変状	多発	通常修繕	コンクリートの劣化	補修	

表 2.2.3 構造物別の分析対象数量⁴⁾(H23末時点)

区分	分析対象数量	備考
橋梁	19,608 橋	橋梁上部工型式別 ※1 ・上下線別の橋数
土構造物		
切土	52,774 本	旧タイプアンカーの本数
盛土・切土	117,606 箇所	上下線別盛土切土境界間の 箇所数 ※2
自然斜面	9,535 箇所	
トンネル	1,677 本	上下線別の本数



材料ごとの被災件数



1件あたり被災土量(材料別)

図 2.2.7 盛土材料ごとの土砂灾害の傾向および被災土量⁴⁾

西日本高速道路、関西支社内の旧タイプアンカーカー5,063本(41のり面)、新タイプアンカーカー3,766本(26のり面)について、2000(H12)、2009(H21)年度の頭部調査結果を右記の評価区分で整理。

評価	状況
I	現状のままで、良好な状態を維持できる
II	機能は多少低下しているが、対策によって機能を保持できる
III	機能が低下し今後IVになる可能性がある
IV	機能が大幅に低下しており、今後Vになる可能性がある
V	機能が著しく低下して劣化している

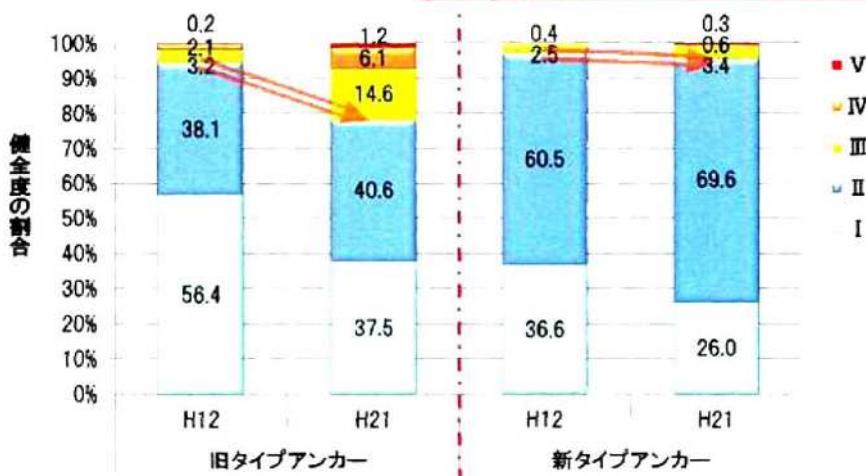


図 2.2.8 グラウンドアンカーの評価区分と旧・新タイプアンカーの健全度評価の比較⁴⁾

補修対策することが必要である。切土部においては、平成4(1992)年「グラウンドアンカー設計指針(日本道路公団)」の制定以前に施工された旧タイプグラウンドアンカーにおいて、図2.2.8に示すように、外観調査で劣化による変状が進行していることが判明している。

構造形態による被災件数をみれば、図2.2.9に示すように、切土部が46.9%，盛土部が46.7%と大部分を占めており、区域外自然斜面やトンネル坑口などは非常に少ない。しかしながら、図2.2.10に示すように、1件当たりの被災土量からみれば、昨今の林業の衰退による放置斜面の増加などにより、区域外自然斜面などの被災土量が平均600 m³を超えるなど、従前の切土300 m³以下や盛土200 m³以下に比べて規模が大きくなっている。注意を

要する。

平成 27(2015)年 11 月にフランスパリで国連気候変動枠組条約第 21 回締約国会議(COP21)が開催された。そこでは、出来るだけ早期に地球温暖化対策が策定され、温室効果ガス排出削減への取り組みを着実に実施していくための新たな法的枠組みである「パリ協定」が、12 月 12 日に採択された。今後世界中で、具体的な取り組みが実施されると思われるが、すでに温暖化現象が始まっているとの指摘もある。降雨においては昭和 51(1976)年～平成 28(2016)年のアメダスデータを解析すると、図 2.2.11 に示すように、1 時間降水量 50 mm 以上の年間発生回数が、既に 10 年あたり 1000 地点で 20.4 回増加している⁶⁾。また、図 2.2.12 に示すように、昭和 57(1982)年～平成 3(1991)年は平均 897 回/年、平成 4(1992)年～13(2001)年は平均 927 回/年、平成 14(2002)年～23(2011)年は平均 1,150 回/年というように、短時間異常降雨の発生回数と降雨による高速道路の土砂災害発

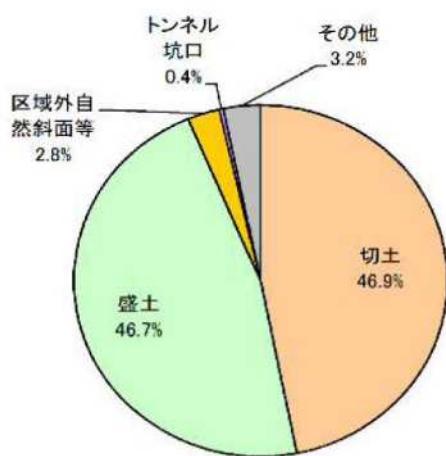


図 2.2.9 構造形態ごとの被災件数の内訳⁴⁾

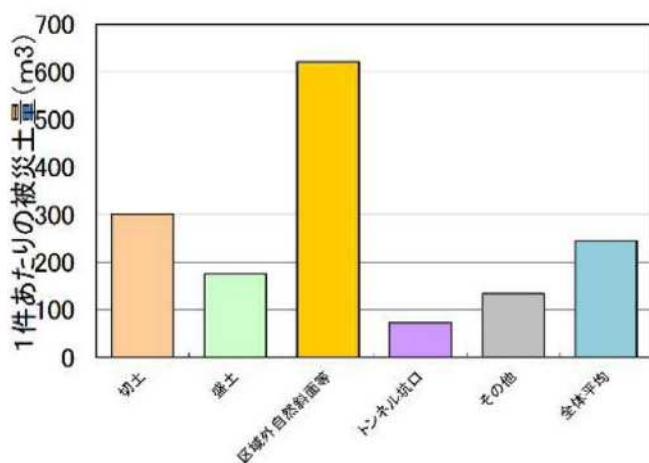


図 2.2.10 構造形態ごとの被災土量/件⁴⁾



図 2.2.11 1 時間降水量 50mm 以上の年間発生回数⁶⁾

生件数は相関がみられ、近年、降雨に起因する高速道路の災害発生リスクの高まりや激甚化が懸念されている^{6),7)}。

(2) 地震によるのり面災害

平成26(2014)年度に開催した「高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会」⁴⁾において、高速道路資産全

般について検討している。土工構造物については、盛土・切土および自然斜面を検討対象として過去の変状実態(土砂災害などの発生状況)について検討しているが、地震によるのり面災害は検討対象外としている。地震により一部でのり面崩壊災害が過去に発生しているが、要因分析するほどのデータ数が確保できないこと、巨大な海溝型地震や内陸直下型地震を見据えた耐震性の向上は、順次改定されてきている国の技術基準を適用して実施するなど、方針が明確であるとの理由から、検討対象外とされている。

東北地方太平洋沖地震発災後、平成23(2011)年3月時点での把握された高速道路本線路面上からの点検により確認された比較的大きい被害の盛土箇所302箇所について、計測震度と高速道路本線における路面の段差量の分析が行われており、その結果を図2.2.13に示す。分析結果の特徴をまとめると、以下のようである⁸⁾。

- ① 比較的大きい被害(段差量)は、計測震度5を超えるあたりから急激に増える傾向にある。
- ② 計測震度4.5を下回る箇所では、緊急交通路としての供用に支障となる段差量はほとんど発生していない。
- ③ 高速道路の盛土は、レベル2地震動に対して盛土の変形量(路面の段差)は、概ね1m程度に収まる性能(概ね24時間以内で緊急交通路の確保が可能な性能)を有している。

また、過去の実績から地震時ののり面崩落災害は地震力ばかりでなく、必ず地下水の分布が同時に作用しているため、本論文においては、主に降雨による作用について検討することとした。

2.3 高速道路のり面点検の現状と課題

2.3.1 のり面点検による事後保全

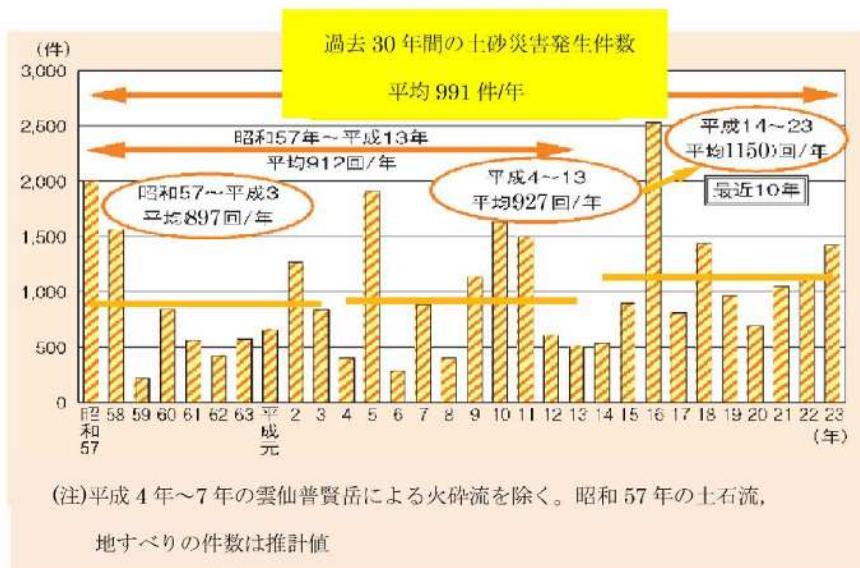


図 2.2.12 土砂災害発生件数の推移^{4),7)}

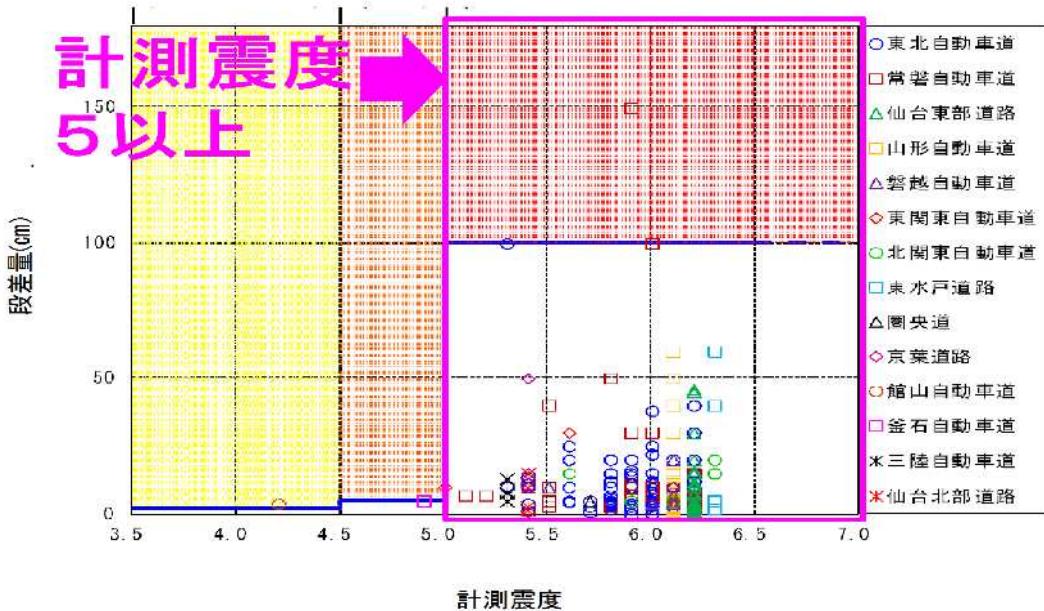


図 2.2.13 計測震度と高速道路本線における路面の段差量⁸⁾

国土交通省は、道路構造物の老朽化が顕在化したことにより道路法施行令第35条の2第2項の規定に基づいて、道路法施行規則第4条の5第2項において、具体的な点検方法や頻度を規定した。この省令は平成26(2014)年3月31日公布、同7月1日施行された。省令公布に伴いNEXCO3社においても、点検要領について再度検討され(NEXCO3社の点検体系の概要を表2.3.1に示す)，修正のうえで実施されている。供用開始前もしくは構造系の変更時などに実施する初期点検、交通量で頻度が規定された日常点検、定期点検として1回以上/年で実施する基本点検と、1回以上/5年の詳細点検、臨時点検として必要性が生じた折に随時実施する特別点検と緊急点検によって、土工構造物の安全性を確保している⁹⁾。

上記の個別の変状に対する点検結果より、判定区分は継続的に改定されており、より実用的なものとなっている。直近の変更は令和元(2019)年7月に表2.3.2に示すように変更された。個別の変状に対する判定区分は「AA, A(A1～A2), B, OK, C」の5分類から、「AAA, AA, A1, A2, B, OK, C」の7分類となるとともに、判定区分の定義も変更になり、変状に対する措置の時間的制約が追加された。「AAA」として、変状が極めて著しく、緊急措置が必要な状態が追加された。「OK」と「C」が分離され、定義も変更となった。また、第三者などへの被害に対する判定は、「E」から「E, F, e」の3判定区分に変更された。「E」は緊急的な措置が必要な状態、「F」は緊急的な対応が必要でない、若しくは応急対策が実施済みに区分され、「e」は第三者などに対して影響を及ぼす場所に位置する変状としている。今までなかった漏水の影響に対する判定は「W」判定とし、漏水して構造物本体に変化が生じている状態を指している⁹⁾。

緊急な措置が必要な場合には、詳細調査を実施して対策工法を検討し、優先順位を決定したうえで優先順位の高い箇所から対策工事を実施することとしている。ただし、対策実施までは、継続監視を行って安全を確保している。

土工構造物は地山の地質特性が一様ではなく、さらに風化の進行具合も地質、気候および天候に影響され、地表面からの点検のみでのり面の健全性を評価して、中長期的な保全

表 2.3.1 点検体系の概要⁹⁾

点検種別	点検の主な目的		点検方法	点検頻度
初期点検 (土工構造物)	初期状況把握		近接目視または遠望目視とし、必要に応じて触診や打音等の非破壊検査等を併用して行う点検	供用開始前 構造系の変更時等
初期点検 (土工構造物以外)	初期状況把握、第三者等被害の未然防止		近接目視かつ触診や打音、必要に応じて非破壊検査等を併用して行う点検	供用開始前 構造系の変更時等
	初期状況把握、健全性把握、保持		近接目視または遠望目視とし、必要に応じて触診や打音等の非破壊検査等を併用して行う点検	供用開始前 構造系の変更時等
日常点検	日常的な安全性の確認等		車上目視、車上感覚、遠望目視を適宜組み合わせて実施、必要に応じて降車確認	交通量で設定 4日以上/2週 5日以上/2週 6日以上/2週 7日以上/2週
定期点検	基本点検	安全性把握、管内全般の現状把握等		近接目視または遠望目視 1回以上/年
	詳細点検	第三者等被害の未然防止等		近接目視かつ触診や打音により行うことを原則 1回以上/5年
		健全性把握、保持等	個別判定 健全度評価	近接目視を基本とし、必要に応じて触診や打音等の非破壊検査等を併用 1回以上/5年
臨時点検	特別点検	他の点検の補完、類似構造物把握等		遠望目視、近接目視、触診、打音を適宜組み合わせて実施、必要に応じて非破壊検査等を併用 必要な都度
	緊急点検	防災関連要領等参照		遠望目視、近接目視、触診、打音を適宜組み合わせて実施、必要に応じて非破壊検査等を併用 必要な都度

計画を立案することは容易ではない。したがって、のり面点検においては、各種点検時に、変状を早期に発見することを主眼として実施している。

中でも、切土3段以上の長大のり面のほか、以下に示す項目のいずれかが該当する切土・盛土のり面を重要度の高い土工構造物として、その部分を含む一連ののり面を詳細点検の対象範囲とした。また、詳細点検範囲は、点検結果を受けて下記のように逐次見直しを行っている。

- ① ほかの点検種別においてAA,A判定とされたのり面およびH18(2006)道路防災総点検においてカルテ対応となっているのり面
- ② 崩壊・補修履歴のあるのり面(恒久対策実施までの期間)および従前より重点のり面としてきた箇所
- ③ のり面安定対策工を実施しているのり面および付帯施設
- ④ コンクリート吹付枠工、コンクリート吹付工およびこれに類するのり面保護工を実施しているのり面

表 2.3.2 個別の変状に対する判定区分⁹⁾

判定区分		定義
変状に対する判定	A A A	変状が極めて著しく、緊急措置が必要な状態。
	A A	変状が著しく、速やかな措置が必要な状態。
	A 1	変状があり、措置が必要な状態。
	A 2	変状が認められ、適切な時期に措置を行うことが望ましい状態。
	B	変状があり、変状の進行状態を継続的に監視する必要がある状態。
	O K	変状がない又は措置を必要としない変状がある状態。
	C	変状に対する判定を行うために、調査を実施する必要がある場合。
第三者等被害に対する判定	E	安全な交通又は第三者等に対し支障となる恐れがあるため、緊急的な措置が必要な状態。
	F	緊急的な対応は必要としない。若しくは応急対策は実施済みであるが、次回点検までに変状の進行によっては、第三者等被害の恐れがある状態。又は、第三者等被害の恐れがあったために応急対策を実施済みであるが、本補修が完了していない状態。
	e	第三者等に対し影響を及ぼす場所に位置する変状。
漏水の影響に対する判定	W	漏水し、構造物本体に変状が生じている状態。

- ⑤ 崩壊などにより隣接する施設に重大な影響を与えるのり面
- ⑥ 補強土壁、軽量盛土
- ⑦ 落石対策施設、土石流対策施設
- ⑧ 平成21(2009)年11月盛土のり面の緊急点検要領(案)に基づき抽出された、駿河湾地震や東北地方太平洋沖地震における被災のり面と条件が類似するのり面で、重点監視以上とされた箇所、および平成19(2007)年9月緊急点検の結果、山陽道被災のり面と類似崩壊要因を持つのり面

2.3.2 変位・変状による事後保全

前節までに述べたように、高速道路の安全を確保するため、土工構造物点検の実施により発見した変状箇所は補修するという事後保全管理の取り組みで実施しているが、異常気象(豪雨など)時や地震時での災害発生を避けることが出来ない現状にある。昭和43(1968)年国道41号飛騨川バス転落事故などの重大事故が発生した。日本道路公団は昭和48(1973)年から高速道路通行車両の安全を確保するために、異常気象時における高速道路の通行規制を導入した。通行規制における現況と課題は、以下のとおりである¹⁰⁾。

(1) 降雨通行規制基準値導入の経緯

昭和43(1968)年に、時間雨量149 mmを観測する中、104名の犠牲者がでた国道41号飛騨川バス転落事故、昭和46(1971)年に静岡市における堆積土砂6,400 m³、死者1名となった

国道150号(大崩海岸道路)岩石崩落事故、および兵庫県において時間雨量76 mmにより多数の崩落が発生した国道250号土砂崩落事故が相次いで発生するなど、人身被害が発生した災害が3箇所となり、交通の安全確保が大きな社会問題となった。

当時の日本道路公団は高速道路通行車両の安全を確保するために、昭和48(1973)年から異常気象時における通行規制を導入した。その後、平成10・11(1998・1999)年および平成13・14(2001・2002)年度に、降雨通行規制基準などに関する見直しを実施している。直近では、平成27(2015)年度よりNEXCO 総研において高速道路の降雨規制基準に関する検討として、新たな視点で検討を開始している¹⁰⁾。

(2) 降雨通行規制基準値の設定

1) 連続雨量・時間雨量法

NEXCOが降雨通行規制基準値として採用している連続雨量・時間雨量法の概要は、以下のとおりである。

- ① 過去の降雨データを横軸に連続雨量、縦軸に時間雨量をプロットし、降雨履歴より対象IC区間の降雨特性を導き出し、災害事例を勘案のうえで基準値を設定する手法である。
- ② 各IC区間の降雨特性と災害事例を統計的に処理するため、個別のり面の特性(土質など)を勘案しながら、種々の土質が混在するIC区間について、総合的に基準値を設定できる特性を有する。
- ③ 日常的にNEXCO 3社が基準値を運用する時間雨量は「正時の時間雨量」ではなく、「任意時刻の時間雨量」を用いている。連続雨量は、雨の降り始めから降り終わり累積雨量である。ただし、2 mm/hr を超える雨が6時間以上の中断を伴わずに継続した場合は継続降雨とみなしている。中断時間を3時間、6時間、9時間で比較した結果、降雨特性が最もよく読み取れるとの理由から、6時間を採用した。

2) 連続雨量・時間雨量法による設定概要

連続雨量・時間雨量法による基準値の設定方法は、図2.3.1および図2.3.2に示すように、過去20年間程度の雨量データ(NEXCO気象観測所観測データおよび高速道路沿線アメダスデータ)と災害データを用いて、下記の方法で設定している¹¹⁾。

- ① 現行基準は、災害履歴がない場合には、図2.3.3に示すように、降雨履歴図から特異な大雨を除いた20年間で3~4回降る雨の降雨量(概ね5~6年に1回発生する降雨量(6年確率雨量))を「降雨通行止めの基本的な基準値(連続雨量)」とする。
- ② 災害履歴がある場合は、災害の内容と経験降雨により基準値を設定する。
- ③ 連続雨量基準に加えて、組合せ基準を設けている。ある程度の降雨が連続した後では、時間雨量の基準値を設定する。このようにして設定されたL型の基準線を、「組合せ雨量」との表現を用いた。組合せ雨量の連続雨量と時間雨量の確率年の積を連続雨量の確率年と同等(概ね5~6年に1回)に設定する。うち、組合せ雨量での時間雨量の確率年は、のり面の用排水工の設計で用いられる3年を採用する。
- ④ 災害事例の降雨パターンを解析した結果、先行降雨の影響が考えられるパターンの災害が全体の約25 %を占めた。特に、このような場合、過去の事例では大規模災害の発生となっていることや、通行止め規制の解除後発生した場合には社会的影響が大きいことから、通常の規制基準値のみで判断することなく、それより厳しい

基準値「第二通行規制基準値」を設定している。先行雨量の影響があると考えられる災害事例があるIC区間においては、先行降雨がないあるいは影響が少ない場合に比べて、概ね50～70 mm 低い雨量あるいは先行雨量の約1/2で災害が発生しているため、先行降雨が警戒体制以上の降雨の場合は、降雨間隔(無降雨時間)が24時間以内の場合に運用する。

- ⑤ 降雨災害の発生件数は、供用後5年以内で全災害件数の約5割であり、その災害発生時の連続雨量は、供用後6年以降の連続雨量に対して概ね50 mm 低い値で発生している。よって、新規供用路線や改築区間の設定基準値は、算出した基準値から連続雨量値を概ね50 mm 減じたものを基準値とする。ただし、降雨量の少ない地域では、別途減ずる値を定めるものとする。
- ⑥ 基準値の見直しは、新規供用路線や改築区間では供用後概ね5年、または異常気象などにより見直しが必要と判断された場合、既供用路線では災害が発生した場合を含め経験降雨や被害事例などにより適宜見直しを実施する。
- ⑦ NEXCOにおいては基準値に達した場合、通行止め措置など迅速な対応を図るために時間的余裕を確保するために、基準「警戒体制基準値」を設けている。

(3) 通行止めの解除

次の事項のすべてを満たす場合には、通行止め解除をすることができる。

- ① 既に被害が発生している場合は、被害発生箇所における応急復旧対策が概ね完了し、二次被害発生の恐れがないと判断されること
- ② 通行止め解除に向けた車上点検を行い、異常がないことが確認されていること
- ③ 通行止め解除に向けた車上点検が終了した時点で、無降雨(2 mm/hr 以下)となり、

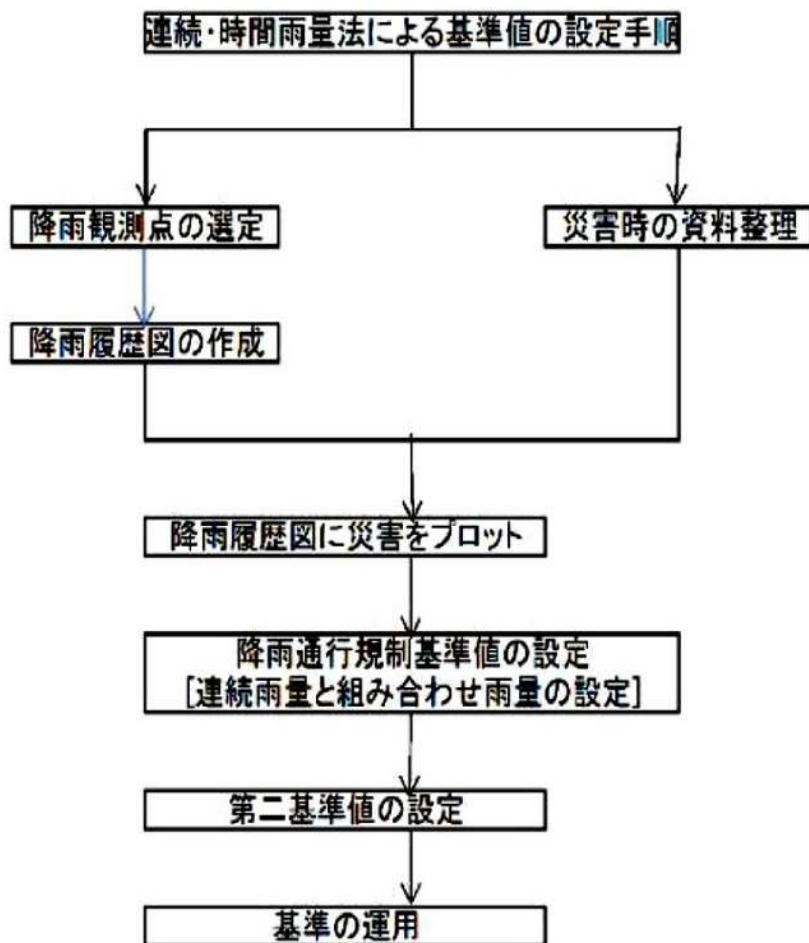


図 2.3.1 連続・時間雨量による基準値の設定手順 ¹¹⁾



図 2.3.2 降雨通行規制基準値設定のフロー図¹⁰⁾

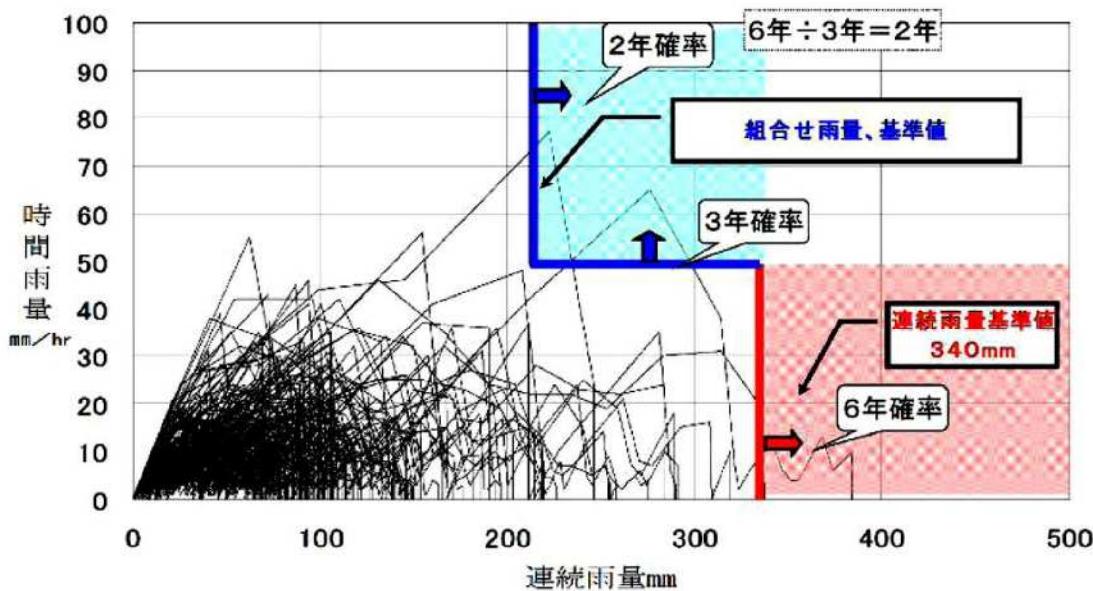


図 2.3.3 連続・時間雨量法による基準値の設定方法 ¹⁰⁾

降水短時間予報においても降雨が終息すると判断されること

④ 通行止めを解除する前に、異常がないことが確認されていること

(4) 事後保全における課題

平成5(1993)年～10(1998)年までの6年間に発生したのり面降雨災害996件について検討し、平成14(2002)年に基準が改定された。この通行止め基準の改定により通行止め実施前の災害発生が無くなるとともに、通行止めしたもの災害が発生しなかったいわゆる空振り事象も減る見込みであった。ところが、平成18(2006)年～26(2014)年の9年間の高速道路の交通に支障が発生したのり面災害78件について追跡調査したところ、現在の降雨通行規制基準により42件(54%)の災害は通行止め時に発生したが、現行通行規制基準によって捕捉できない事象が36件(46%)発生していた¹²⁾。これらの原因については、現在検討中である。NEXCO 3社では、面的な高速道路の降雨状況を全国平均間隔約7 km毎のポイント(インターチェンジ)に配置しているNEXCO雨量計で代表することにより、現在は管理しているため、昨今の短時間、局地的豪雨や台風の巨大化などに管理方式が対応しきれていないのが、一因であると考えられる。そのほか、通行止め開始が早すぎる、何時までも通行止めが解除されないという意見もあり、通行止め基準について理解が得られていないのが現状である。

現況の課題を解決するために、自前保有気象観測装置による点管理から広域にわたる面管理に移行するため、解析雨量の採用の適否の検討および地盤の安定に直接影響する土中水分量を指標として規制する方法の適用性について検討が開始された。後者については、地盤への水の供給側から判断するのみで、地盤の地形・地質条件や土質条件による雨水の浸透・排水条件が考慮されない連続雨量・時間雨量法に代わり得るものとして、実効雨量や土壤雨量指数などの検討が行われている。これらの新たな指標を適用することにより、現況より先行雨量の影響が正確に反映できることや、通行規制解除時期の決定により納得

性が高まるなどの可能性を秘めていると考える。なお、解析雨量とは、気象レーダー観測をアメダスやNEXCO雨量計などによる地上雨量観測データで補正した面的に隙間の無い雨量分布から得られる雨量をいう。これらの検討に当たっては、平成18(2006)年～27(2015)年の高速道路に隣接する斜面の崩落で発生した崩落土砂が外側線外で収まり本線交通に影響を与えたかった災害を含めた1,114件の災害データを再分析することとしている。

今までの地上雨量計観測のほかに、気象レーダーエコー強度、アメダスデータを使用することによって、10分更新で1kmメッシュ（平成13(2001)年3月以前は5kmメッシュ、平成17(2005)年以前は2.5kmメッシュ）の今まで雨量を、5～9分の時間で算出することが可能となり、これらの解析雨量を採用することで、面的に状況を把握することが可能である。**図2.3.4**は、平成29(2017)年6月24日のあるIC区間の状況を表している。A IC～C ICの区間ににおいては、IC地点を含めて6か所の雨量計で観測している。しかしながら、NEXCOにおいて把握済みのB ICの降雨履歴図より解析雨量を求めると、8.97KP地点の降雨量は、早期に通行止め雨量基準値に達していたことが認められる。気象観測点における実測雨量のほか、路線付近の解析雨量も活用することで、これらの課題を解消することが可能である¹²⁾。

鉄道では、連続雨量・時間雨量法に代わる降雨時の災害防止策として昭和60(1985)年頃より検討を開始し、平成19(2007)年から一部区間で試行導入されている。実効雨量は、土中への降雨の浸透、表面水流出、地下水流出などを反映した指標であり、以下の実効雨量になれば運転規制を実施する試みである。のり面表面の浸食をイメージした半減時間1.5時間の実効雨量の指標、のり面の浅層からの崩壊をイメージした半減時間6時間の実効雨量の指標、およびのり面の深層からの崩壊をイメージした半減時間24時間の実効雨量の指標を設定し、3つの指標のいずれかが基準値を上回った時点で運転規制に入るものである。連続雨量・時間雨量法に比較し、納得性が向上するとはいえるが、現状でのリスク回避法であることには違いがなく、安全側の判断をすればするほど、運転規制時間が増加して車両運行に支障をきたし、経済活動を阻害する恐れが増加することになる^{13),14),15)}。一方、独

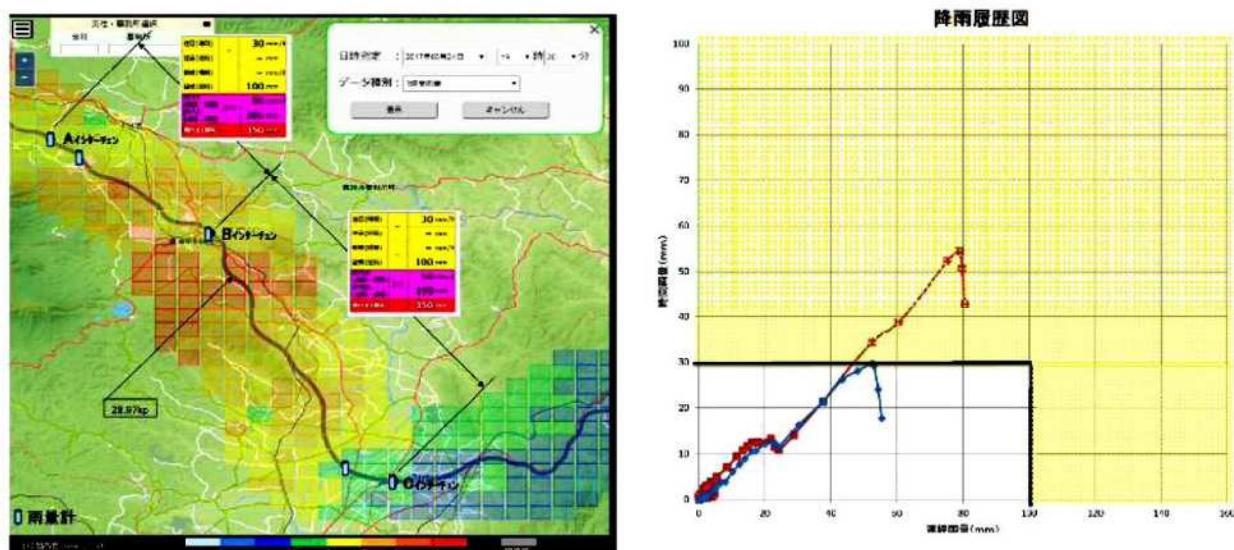


図 2.3.4 実測雨量と解析雨量のサンプル 株高速道路総合技術研究所

表 2.3.3 平成 28 年度(2018)通行止め時間実績(高速道路)¹⁶⁾

NEXCO 会社区分	東日本	中日本	西日本	全国
営業距離(km)H29(2017).3.31	3,869	2,045	3,456	9,370
通行止め時間	災害・悪天候	5	2	22
	事故・その他	6	2	2
	工事	18	11	29
	計	29	15	53
				35

立行政法人 日本高速道路保有・債務返済機構の平成28(2016)年度業務実績によると、雨、雪、事故、工事などに伴う年間の平均通行止め時間(上下線別の通行止め時間に距離を乗じた年間延べ時間・距離を営業延長で除算)が公表されている。NEXCO 3 社の高速道路に関して全体平均を算出すると、表2.3.3に示すように35 時間である¹⁶⁾。内訳としては、災害・悪天候が11時間、事故・その他が4時間、工事が20 時間となっており、全体の31 %が災害・悪天候のための通行止めであり、災害・悪天候のための通行止め時間の削減が出来れば、日本の社会・経済にとって大きな効果を發揮するものと考えられる。なお、工事による通行止めについては、2.5に述べる予防保全管理を進めることにより工事時間を最小化することができ、そのためにも予防保全管理への転換が待たれている。

2.3.3 のり面点検手法とその取り組み

我が国では、自然災害によって社会・経済に損失を与える事象がたびたび発生している。特に、その中で社会的影響が大きな災害が発生した場合は原因を検証し、類似要因を有する箇所では、詳細調査の上で対策を実施するシステムが構築されている。現在実施されている予防保全の実施例について、以下に述べる。

(1) 道路防災総点検の経緯

道路防災点検は、災害を契機として表2.3.4に示す経緯を経て進展してきた¹⁷⁾。まず第一に、昭和43(1968)年の飛騨川バス転落事故がある。この事故を契機に異常気象時の事前通行規制が導入されるという道路管理における一大転換がなされた。その後、昭和45(1970)年的一般国道56号土砂崩落事故に関する最高裁判決は、道路管理者に強い衝撃を与えた。判決において、『道路管理者は「落石注意」などの標識を設置したのみで、防護柵の設置、落下しそうな岩石の除去あるいは事前の通行止めなどの措置を取っていなかったことについて管理の瑕疵があり、そのための予算措置を講ずることが困難であるからといって、責任は免れない。』とされた。この判決を契機として、全国の主要道路の危険箇所の道路防災総点検などについて通達が出された。これが道路防災総点検の始まりである。その後、対象道路も一般国道、都道府県道、主要な地方道、高速道路および有料道路にまで広げられ実施されている。また、地震に対する施設の耐震性に関する点検についても、昭和46(1971)年以降実施されている。

(2) 2006 年道路防災総点検

平成18(2006)年度道路防災総点検の点検対象項目は、下記のとおりである。

表 2.3.4 道路防災総点検の経緯¹⁷⁾一部追加

回数	実施時期	対象道路	主な点検対象項目	点検実施の主な要因
第1回	昭和43年9月	直轄国道		一般国道41号飛騨川バス転落事故(S43.8)
第2回	昭和45年10月	一般国道 都道府県道 主な市町村道		一般国道56号土砂崩落事故の最高裁判決(S45.8)
第3回	昭和46年7月	一般国道 都道府県道 主な市町村道 高速自動車国道 首都・阪神高速 有料道路(JH)	落石・雪崩 盛土法面崩落・石積擁壁 地滑り・洗掘 橋梁・トンネル	一般国道150号大崩海岸岩石崩落事故、一般国道250号土砂崩落事故(S46.7)
第4回	昭和48年10月	一般国道 都道府県道 主な市町村道	同上	
第5回	昭和51年7月	一般国道 都道府県道 主な市町村道 高速自動車国道 首都・阪神高速 有料道路(JH)	落石、盛土切土法面擁壁・地滑り 橋梁(洗掘) トンネル・雪崩	
第6回	昭和55年3月	同上	法面・斜面 渓流・盛土法面・擁壁・橋梁(洗掘)	
第7回	昭和61年9月	同上	法面・斜面 盛土・渓流 擁壁・橋梁(洗掘)・地吹雪	
第8回	平成2年9月	同上	落石・崩壊・岩石崩壊、 地滑り・土石流、雪崩・盛土・擁壁 橋梁(洗掘)、地吹雪・ 落石覆工、トンネル	一般国道305号岩石崩落事故(H1.7)
第9回	平成8年8月	同上	落石・崩壊、岩石崩壊、 地滑り、雪崩、土石流、 盛土、地吹雪、橋梁(洗掘)、トンネル、擁壁	阪神・淡路大震災(H7.1)、一般国道229号豊浜TN崩落事故(H8.2)
第10回	平成18年9月	同上	落石・崩壊、岩盤崩壊、 地滑り、雪崩、土石流、 盛土、擁壁、橋梁(洗掘)、地吹雪	

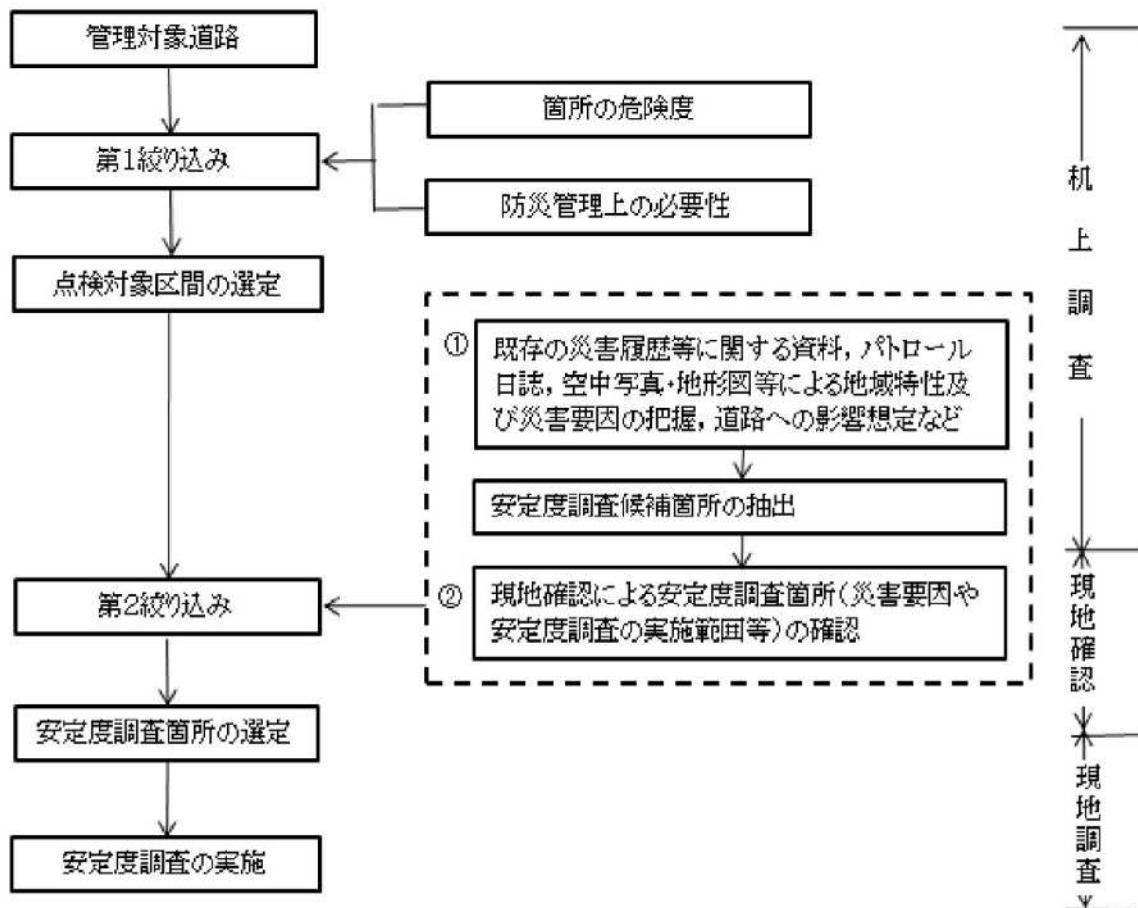


図 2.3.5 安定度調査箇所の選定手順¹⁸⁾

- ①落石・崩壊 ②岩盤崩壊 ③地すべり ④雪崩 ⑤土石流
- ⑥盛土 ⑦擁壁 ⑧橋梁基礎の洗掘 ⑨地吹雪 ⑩その他

管理対象道路における安定度調査箇所の選定は、図2.3.5に示す選定手順にしたがって、専門の点検技術者の協力または同行のもとで実施する¹⁸⁾。調査箇所選定のための絞り込みは、「第1絞込み」および「第2絞込み」の2段階で実施する。

「第1絞込み」は、管理対象道路の防災レベルを概括的に把握して、安定度調査の候補箇所を含む区間を選定するものであり、管理対象道路の中から災害発生履歴などを踏まえた箇所の危険度、防災管理上の必要性などに基づいて実施する。

「第2絞込み」は、選定した点検対象区間における災害要因を抽出し、安定度調査箇所を選定する。「第2絞込み」は、机上調査などによる地域特性の把握、災害要因の抽出と機上調査などの結果を現地で確認する現地確認からなる。

点検項目ごとに決められた要因、対策、履歴などに関する評点より、安定度評点を決定する。そのうえで、災害要因および対策工の効果、被災履歴、周辺の状況などを参考に、災害の規模や影響を総合的に勘案して検討を行い、今後の対応方針を総合評価として次の3段階で評価する。

- ① 対策が必要と判断される：災害が発生する可能性のある要因が明らかに認められる

箇所

② 防災カルテを作成し対応する：将来的には対策が必要となると想定されるが、当面防災カルテによる監視などで管理していく箇所

③ 特に新たな対応を必要としない：災害の要因となる事象が発見されず、特に新たな対応を必要としない箇所

落石・崩壊に関しては、安定度調査票の崩壊性要因を持つ地形(尾根先端など凸型斜面、オーバーハング)で、表層の状態から浮石・転石が不安定な場合には、地震時に対する安定性について「不安定」とする。

(3) 防災カルテの導入

平成8(1996)年以前の防災総点検は、点検により対策が必要な箇所を抽出し対策工を行ったが、点検後の変状の把握や日常管理において点検結果を活用できるシステムとはなっていなかった。平成8(1996)年の防災総点検から導入された防災カルテでは、高度な専門技術者が安定度調査で明らかになった変状などについて詳細な調査を行い、変状の内容や想定される災害規模・形態、災害に至る可能性のある変状の進行、適切な点検の時期を記載することになった。これに基づき、道路管理者が斜面の変状などの監視が的確かつ効率的に行うことが出来るようになった。安定度調査の結果、以下の場合は、防災カルテを作成して適正な管理を行うことになっている。

① 対策工が必要と判断されながら対策工着手までに期間があるもの

② 何らかの災害に至る可能性のある要因が発見されたが、すぐには対策工の実施が必要ではないもの

(4) 道路防災総点検結果を受けての対策工の進捗

平成18(2006)年度の道路防災総点検においては、NEXCO 3 社の高速道路における要対策箇所が243箇所、防災カルテによる監視強化箇所が2,403箇所となっている。カルテ対応箇所+要対策箇所数については、平成8(1996)年度の道路防災総点検に比べ、図2.3.6に示すように、1,313箇所より2,646箇所へ倍増している。特に、地すべり・落石・土石流に分

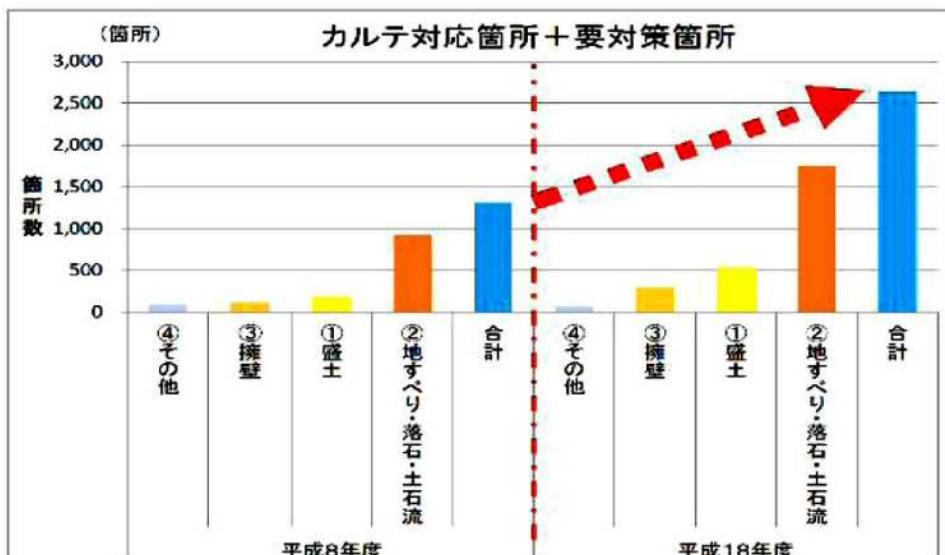


図 2.3.6 道路防災総点検での要対策箇所数等⁴⁾

類される箇所の増加が顕著である。NEXCO 3社は表2.3.5に示すように対策を進めている。表2.3.6に示すように、NEXCO 西日本関西支社においては、平成18(2006)年の防災総点検に基づき、対策が必要とされたのり面は96のり面であったが、順次対策を進め、44のり面については対策工を完了させた(平成28(2016)年度時点)。残る52のり面についても、2020年までには完了させることとしており、引き続き対策実施と継続監視に努めている。

このように、一部予防保全の取り組みが始まられている。

2.4 大規模災害の事例

わが国においては、自然災害により社会・経済に損失を与える事象がたびたび発生している。特に、社会的影響の大きな災害が発生した場合は、原因を検証するとともに類似要因を有する箇所については詳細調査を実施して必要な対策方法を決定し、対策を実施する予防保全のシステムが構築されている。これらの取り組みによってPDCA (plan-do-check-act)サイクルを回することで、高速道路構造物の保全管理システムの改善につなげられる。

2.4.1 地震災害

(1) 平成21(2009)年駿河湾沖地震による盛土のり面崩壊事例

昭和44(1969)年に供用開始した東名高速道路牧之原地区では、40年経過した盛土のり面

表 2.3.5 H18 道路防災総点検結果(2016年時点)

安定度評価 ランク	点検対象項目	箇所数			
		NEXCO 東日本	NEXCO 中日本	NEXCO 西日本	合計
対策完了	その他	61	0		
	岩石崩壊	19	0		
	橋梁基礎の洗掘	10	1		
	盛土	186	30		
	地滑り	14	1		
	土石流	2	4		
	擁壁	13	13		
	落石・崩壊	300	151		
防災カルテ により監視 強化	その他	51	2	0	
	岩石崩壊	6	19	2	
	橋梁基礎の洗掘	3	0	2	
	盛土	72	157	261	
	地滑り	53	10	39	
	土石流	15	207	124	
	擁壁	87	75	114	
	落石・崩壊	159	415	530	2,403
要対策	その他	8	0	0	
	岩石崩壊	2	0	2	
	橋梁基礎の洗掘	0	0	0	
	盛土	0	4	46	
	地滑り	7	0	5	
	土石流	0	7	13	
	擁壁	1	0	11	
	落石・崩壊	10	15	112	243

表 2.3.6 H18 道路防災総点検による要対策のり面箇所数(2016)

(NEXCO西日本 関西支社管内)

種別	対策済み	観測中	経過観察	再評価	合計
のり面数	44	1	33	18	96
比率(%)	46	1	34	19	100

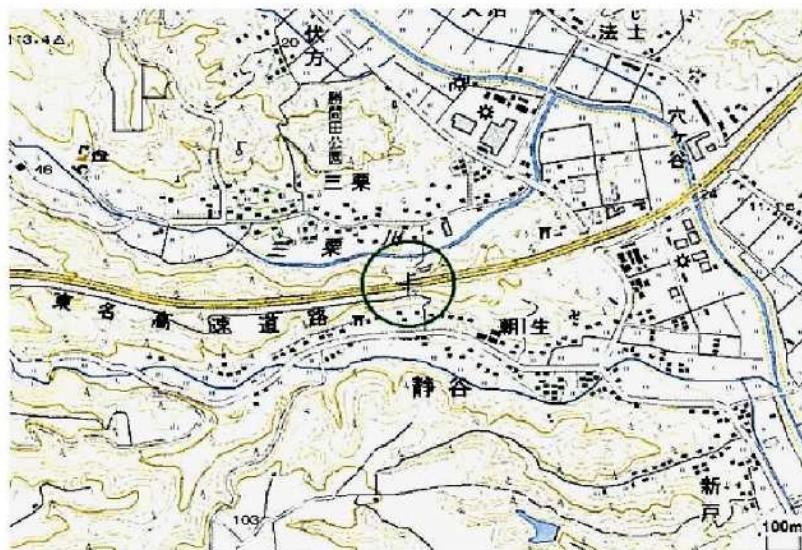


図 2.4.1 牧之原地区盛土崩壊地周辺の地形図¹⁹⁾

が平成21(2009)年8月11日に発生した駿河湾沖地震によって崩壊した。牧之原地区周辺の地形図を図2.4.1に示す。この盛土は地盤が縦断方向に凹型、横断方向に凸型の極めて特殊な地形条件に構築された盛土であり、のり肩から4.6 mの位置から擁壁天端を通過するすべり崩壊面が推定された。なお、路肩から21 mの反対車線の路面にもクラックが発生した。崩壊時の状況を、写真2.4.1に示す¹⁹⁾。

1) 地形・地質

当該盛土の地盤は、図2.4.2に示すように、縦断方向に凹型、横断方向に凸型の極めて特殊な地形をしており、崩壊箇所の原地盤は約25°の傾斜を持っている。盛土材は大きく2種類に分類され、上部は段丘砂礫、下部は周辺に分布する相良泥岩によって盛土されている。崩壊付近の粘土化した相良泥岩は、写真2.4.2に示すように、スレーキング試験を実施したところスレーキング率96 %、破碎率54 %であった。当該箇所でボーリング調査を実施したところ、崩積土は段丘砂礫を多量に含む粘性土でN値3以下、崩壊を免れた路体は礫混り粘土で一部新鮮な泥岩塊を含んだN値5程度である。地下水位は崩積土の高い位置に分布する。盛土材料の試験結果を表2.4.1に示す。

2) 地震・降雨状況と崩壊形状

駿河湾沖地震の震源は駿河湾沖の深さ23kmで、規模はマグニチュードM6.5、最大震度は6弱、加速度は吉田ICで488 gal、菊川ICで295 galであった。また、台風9号の影響もあり、



写真 2.4.1 東名高速道路牧之原地区崩壊時の状況¹⁹⁾

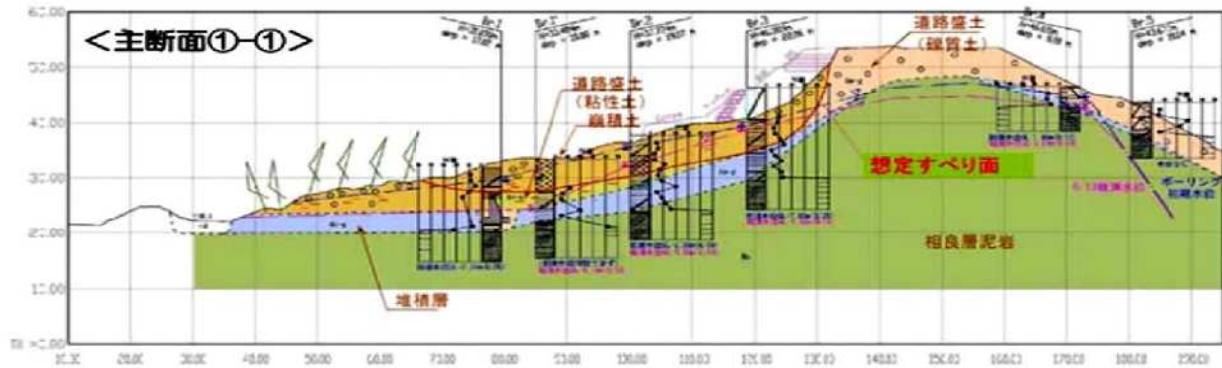


図 2.4.2 牧之原地区盛土崩壊図とボーリング結果¹⁹⁾

震災前日に連続55 mmの降雨の後、9時間程度の休止後、地震当日に連続13 mmの降雨があった。図2.4.3は牧之原ICにおける降雨データを示す。図2.4.4は崩壊範囲と対策工を示した平面図で、図2.4.5はその断面図である。崩壊した盛土は高さ約30 mで、崩壊長さ80 m、幅40 mであった。

3) 原因

本事例から考えられる原因是、以下のとおりである。

① 当該箇所は特殊な地盤での盛土であることから、伝達された地震動の複雑な挙動により崩壊したものと考えられる。

② 当該地区は大井川より牧之原台地に向かい、縦断勾配5 %で上り坂となる区間である。牧之原側400 mは、切土区間であり、切土区間の流末が当該盛土に集まる構造で、供用から40年経過しており、排水構造物の劣化が進行している可能性がある。

図2.4.5および写真2.4.3に示すように、のり尻には最大高さ5 m、延長約60 mの擁壁があった。昭和58(1983)年に壁体のクラックに伴う滲み出しが見られるため、地下水位は以前より高かった可能性がある。

③ 時期不明であるが、写真2.4.4に示すように当該箇所の舗装には車線部に一部円弧状を呈するクラックが見られた。形状は原地形からみて等高線状に発生しているので、すべりの兆候による地形に沿った変状を示す。

④ この災害原因は、脆弱岩を使用した盛土が長期供用によって劣化(スレーキング)したために盛土内の透水性が低下し、帶水により高盛土において大きな不安定要因となったためとされ、警鐘を鳴らすこととなった。これを契機に全国的に同様の盛土区間において調査・観測が行われ、必要に応じて対策が実施されている。

4) 類似箇所の対策の進捗

本災害を受け、国土交通省道路局の通達によって高速道路においても盛土のり面の緊急



写真 2.4.2 牧之原地区の粘性土¹⁹⁾

表 2.4.1 牧之原地区盛土材料の物性値¹⁹⁾

項目	段丘礫	風化泥岩†
地盤材料の工学的分類	(GS-CL)	(CLSG)
自然含水比 W_n (%)	11.1~14.2	19.4~25.9
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.692	2.682
粒度組成	最大粒径 (mm)	190
	礫分 2.00mm 以上 (%)	67.6
	砂分 2.00mm~75μm (%)	21.7
	細粒分 75μm 以下 (%)	10.7
コンシス	液性限界 W_L (%)	35.7
テンシー	塑性限界 W_P (%)	18.6
	塑性指数 I_P (%)	17.1
	透水係数 (cm/s)	3.67×10^{-4}
	岩の破碎率	-
	岩のスレーキング率	-

† 崩落箇所の盛土土塊よりコアカッター法で採取

‡ NEXCO 試験法による(周辺地山から採取した新鮮岩での試験)

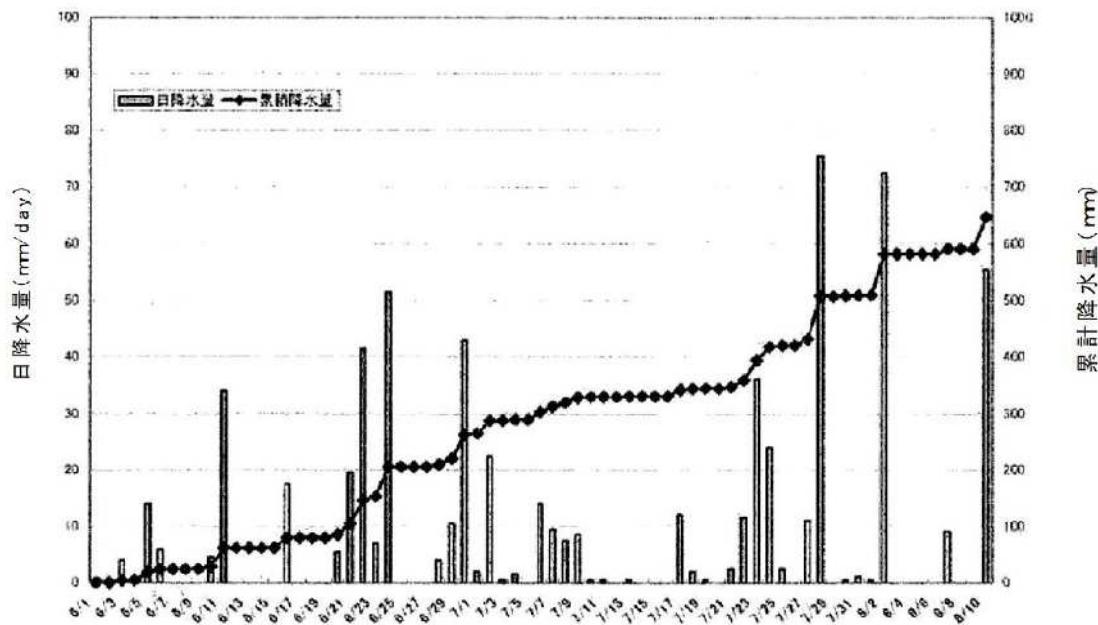


図 2.4.3 地震前の降雨量(牧之原雨量観測所)¹⁹⁾

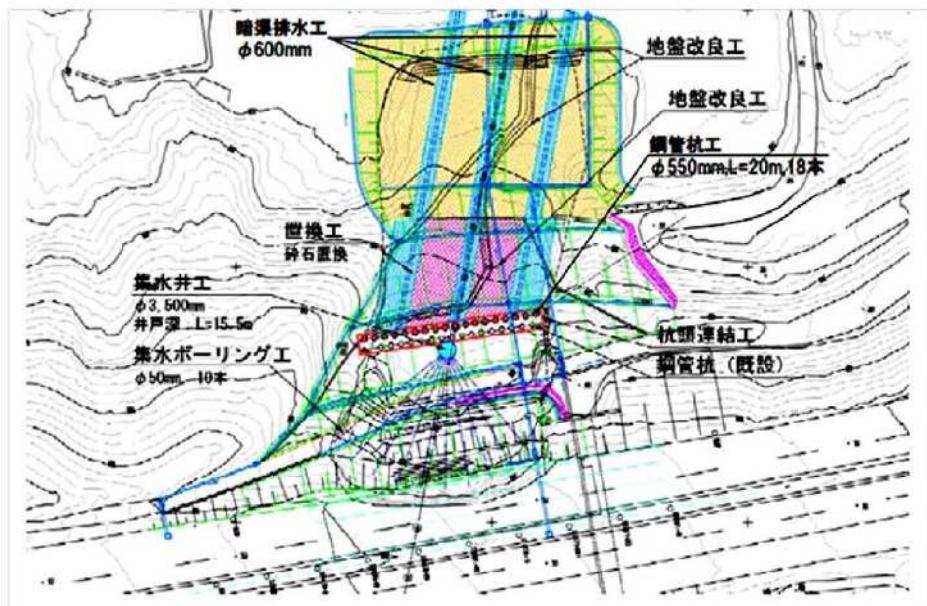


図 2.4.4 牧之原地区盛土崩壊地周辺の平面図¹⁹⁾

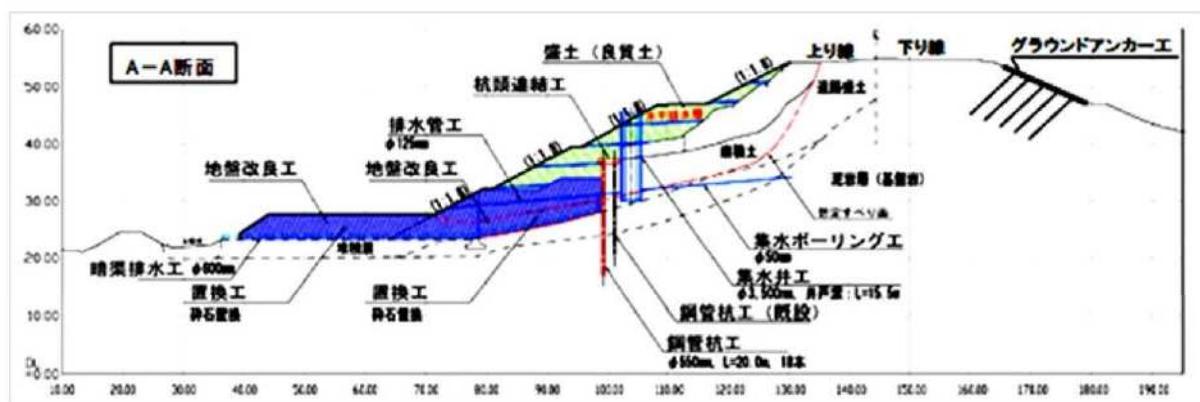
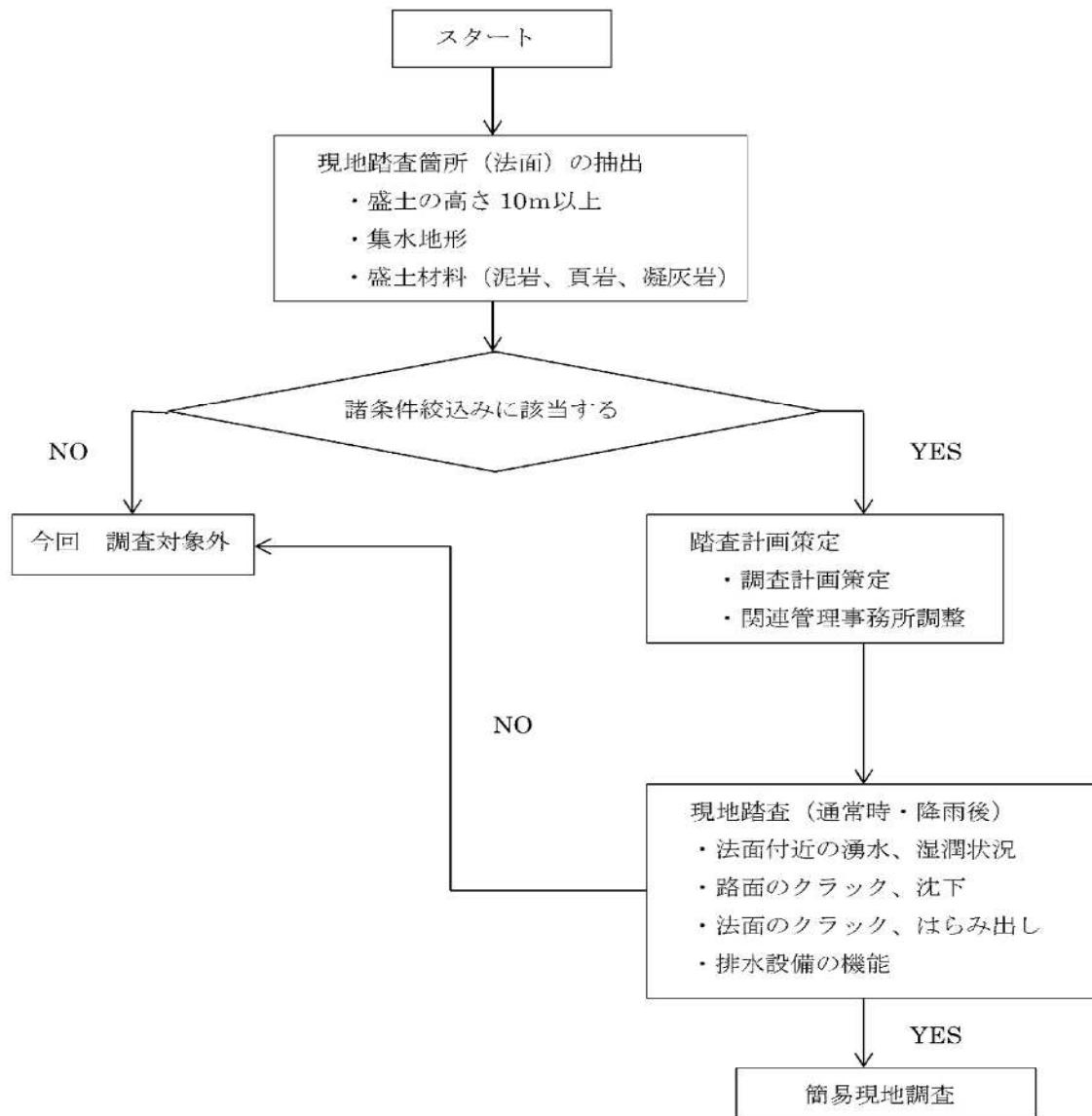


図 2.4.5 牧之原地区盛土崩壊地周辺の断面図¹⁹⁾



写真 2.4.3 崩壊箇所ののり尻擁壁の状況¹⁹⁾

写真 2.4.4 災害箇所の舗装クラック¹⁹⁾



点検が全国的に実施された。緊急点検の現地踏査フローを図2.4.6に示す¹⁸⁾。

i) 点検対象

現地踏査箇所の抽出条件は、以下の条件に該当する盛土とする。

- ① スレーキングしやすい岩質材料が用いられている可能性のある盛土(泥岩、頁岩、凝灰岩など)
- ② 谷・沢埋め部、レベルバンクなどの水の集まりやすい地形条件に造成された盛土(谷・沢埋め盛土、片切片盛、腹付け盛土、傾斜地盛土など)
- ③ 盛土のり尻から測った盛土高さ10m以上の盛土

ii) 点検の方法

机上調査では、上記3項目に該当する盛土のり面を抽出し、降雨の無い平常時と降雨後(連続降雨量あるいは24時間累積降雨量が30mm以上)1~2日以内に現地踏査を実施する。

iii) 点検項目

点検項目は、①湧水の存在および湧水の恐れ、②路面のクラック、沈下、③のり面亀裂、はらみ出し、④排水設備の機能低下であり、これらの項目について確認を行う。

上記の点検によって湧水や湧水の恐れのある盛土を確認した場合には、盛土内の地下水位が恒常的に高い可能性があり、簡易調査の対象とし、点検結果を盛土点検票にまとめる。

(2) 東北地方太平洋沖地震の被災事例

1) 地震の概要と高速道路の計測震度

平成23(2011)年3月11日14時46分に、 $M9.0$ 、最大震度7(宮城県栗原市)の東北地方太平洋沖地震が発生した。震源は三陸沖(牡鹿半島の東南東130km付近、深さ約24km)で、断層の規模は長さ約450km、幅約200km、断層のすべり量は最大20~30mとされている。高速道路の地震計においても、広範囲にわたって震度5以上が観測され、最大観測震度は北関東道の水戸南ICで震度6.3、最大観測加速度は東北道宇都宮ICで加速度1,354galである。図2.4.7に東北地方太平洋沖地震推計震度分布図を、表2.4.2に高速道路地震計での計測値を示す。

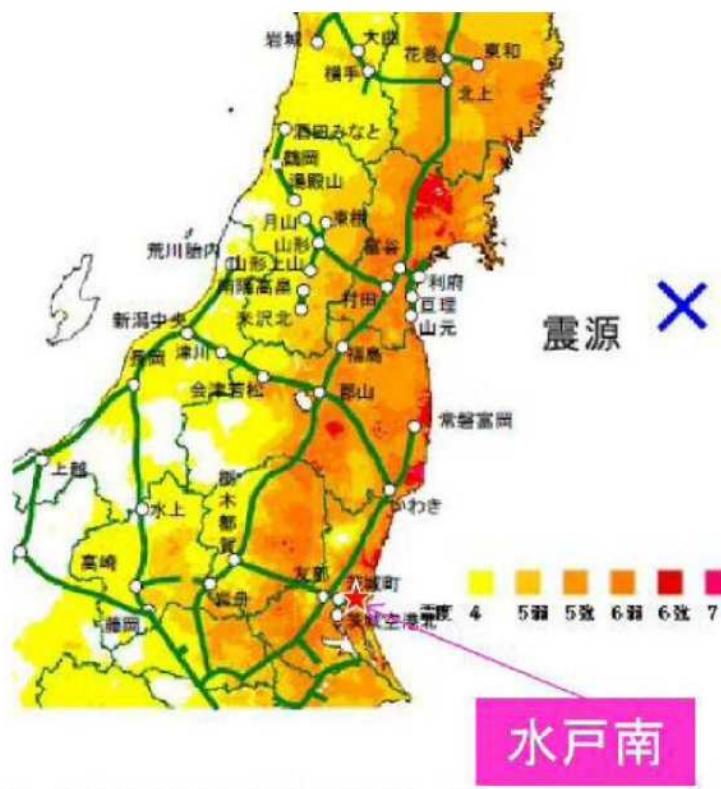


図 2.4.7 東北地方太平洋沖地震の推計深度分布図⁸⁾
水戸南観測点で最大計測震度 6.3 を観測

表 2.4.2 東北地方太平洋沖地震における高速道路地震計の計測値 (H23.3.11)⁸⁾

路線名	事務所	観測地点	計測震度	加速度(ガル)	路線名	事務所	観測地点	計測震度	加速度(ガル)
八戸道	八戸	鰺ヶ沢	5.6	421	磐越道	いわき	いわき三和	6.1	1,191
東北道	北上	北上江釣子	6.0	807	磐越道	いわき	小野	5.5	348
東北道	北上	平泉前沢	5.6	903	東北道	那須	那須	5.7	510
東北道	北上	一関	6.0	651	東北道	那須	矢板	5.7	407
東北道	古川	若柳金成	5.8	376	東北道	宇都宮	宇都宮	5.9	1,354
東北道	古川	築館	5.6	442	東北道	加須	羽生	5.6	532
東北道	古川	古川	5.8	332	常磐道	水戸	茨城	5.5	397
東北道	古川	大和	6.2	694	常磐道	水戸	日立北	6.1	762
東北道	古川	泉	6.2	893	常磐道	水戸	日立南太田	6.5	320
東北道	仙台	仙台宮城	5.5	374	常磐道	水戸	水戸	5.9	599
東北道	仙台	仙台南	5.7	536	常磐道	水戸	岩間	5.8	472
東北道	仙台	村田	5.7	547	北関東道	水戸	水戸南	6.3	995
東北道	仙台	白石	5.8	490	北関東道	水戸	茨城町東	6.1	688
三陸道	仙台	仙台港北	6.0	618	北関東道	水戸	茨城町西	5.9	1,095
仙台東部道路	仙台	仙台東	6.2	707	北関東道	水戸	茨城空港北	5.7	441
仙台東部道路	仙台	仙台空港	5.6	-	北関東道	水戸	友部	5.8	-
常磐道	仙台	山元	6.1	-	北関東道	水戸	桜川筑西	5.6	578
山形道	仙台	宮城川崎	6.1	780	常磐道	谷和原	千代田石岡	5.5	496
東北道	福島	国見	5.9	525	常磐道	谷和原	谷田部	5.5	421
東北道	福島	福島飯坂	5.6	343	常磐道	谷和原	谷和原	5.5	430
東北道	福島	本宮	6.0	806	関央道	谷和原	つくば中央	5.7	450
東北道	郡山	郡山	6.1	628	東関東道	千葉	大堀	5.6	886
東北道	郡山	白河	6.1	908					
磐越道	郡山	磐梯熱海	6.0	-					
磐越道	郡山	郡山東	5.5	-					
常磐道	いわき	広野	6.0	-					

最大値
6.0以上 震度6強相当
5.5以上 震度6弱相当

表 2.4.3 東北地方太平洋沖地震における高速道路の代表的な被災箇所⁸⁾

場 所		IC間 kp(キロポスト)	被害概要
①	常磐道 那珂	水戸～那珂 上り kp92.5付近	1段盛土が延長130mにわたり路面波うち。 盛土崩落・周辺地盤は変状なし
②	東北道 須賀川	矢吹～須賀川 上り kp107.5付近	1段盛土が延長90mにわたり大きく変形。路面の陥没1m、クラック大。 旧河道近傍・周辺護岸の変状発生。
③	東北道 国見	福島飯坂～国見 下り kp274.6付近	1段盛土が延長50mにわたり大きな段差が発生。 クラック幅80cm。基礎地盤から変状(側方流動が発生)
④	常磐道 いわき (余震被害)	いわき勿来～いわき湯元 下り kp158.4付近	5段盛土が延長約50mにわたり崩壊。 崩落土量は約3,000m ³ 。
⑤	東関東道 潮来	佐原香取～潮来 上り 73.7付近	周辺の側道等に液状化被害が発生(被害人)。 本線部の1段盛土はクラック程度(比較的軽微)
⑦	仙台東部道路	仙台港北～亘理 上下線	IC付近において、浸水や瓦礫の堆積との被害が発生。

2) 地震による被害と対策

地震発生直後、35路線2,300kmを通行止めにして道路点検を実施している。代表的な被災箇所と被災概要を表2.4.3に示す。被害状況は路面の崩落2箇所、道路本体に及ぶ大規模

な亀裂13箇所、路面の陥没36箇所、2 cm以上の路面段差(最大100 cm)174箇所であった。

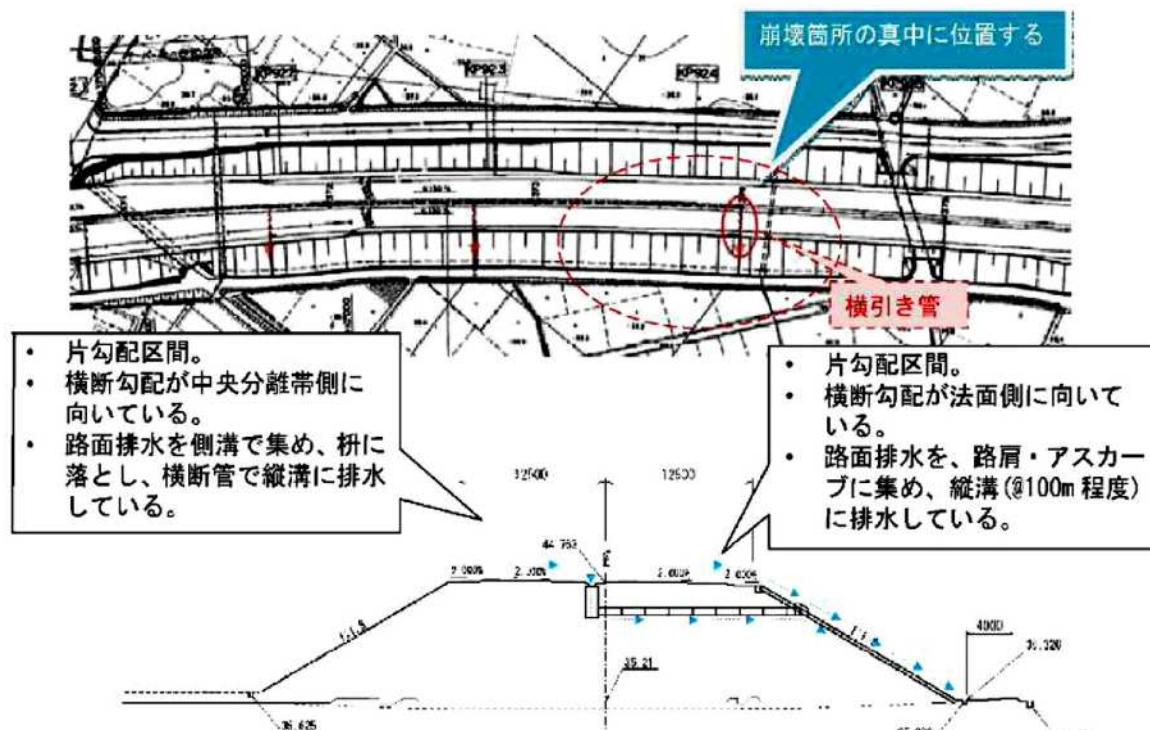
i) 東北地方太平洋沖地震の盛土のり面崩壊事例1 [常磐道 那珂地区]

常磐自動車道水戸IC～那珂IC間上り線92.5KP付近で、1段盛土が延長130 mに渡り路面波打ちと、盛土崩落(のり先破壊によるすべりとすべりの兆候が3か所発生)が発生し、その被害状況を図2.4.8と写真2.4.5に示す。盛土の崩落は舗装の打ち継ぎ目部から生じており、4車線中2車線(下り線)は通行可能であった。現地調査の結果、層厚3.5 mの軟弱地盤上のはば左右対称な両盛土であり、横断勾配は片勾配で路面排水を側溝で集め、枠に落とし、横断管で縦溝に排水する構造である。横引き管や縦断管の健全性は確認されたが、図2.4.9と図2.4.10に示すように、盛土内水位は存在せず、経年による側溝のずれ、集水枠の沈下・ずれによる排水系統からの漏水や舗装からの浸透水によって、横断勾配の低い上り線側の盛土上部は高含水比となっており、無降雨にかかわらずブロック積みからの水の滲み出しが見られた。そのため、舗装改良による水の供給防止策を講じ、また碎石堅排水工によって雨水排除を実施している。

この盛土のり面崩落箇所近傍の盛土材を採取し、土質試験を実施した。下記の試験内容に示すように、密度比(D_c)4種類、空気隙率(v_a)4種類に対して計16種類の供試体を作成し、強度を測定した。

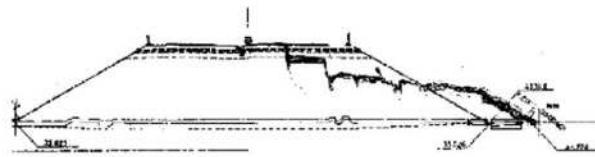
試験内容：密度比(D_c , B法) D_c : 85%, 90%, 95%, 100%

空気隙率(v_a) v_a : 5%, 10%, 15%, 20%





(横断図)



(平面図)



走行車線 約130mが崩落



H23.3.12 防災ヘリより撮影

写真 2.4.5 常磐自動車道那珂地区の被災状況⁸⁾

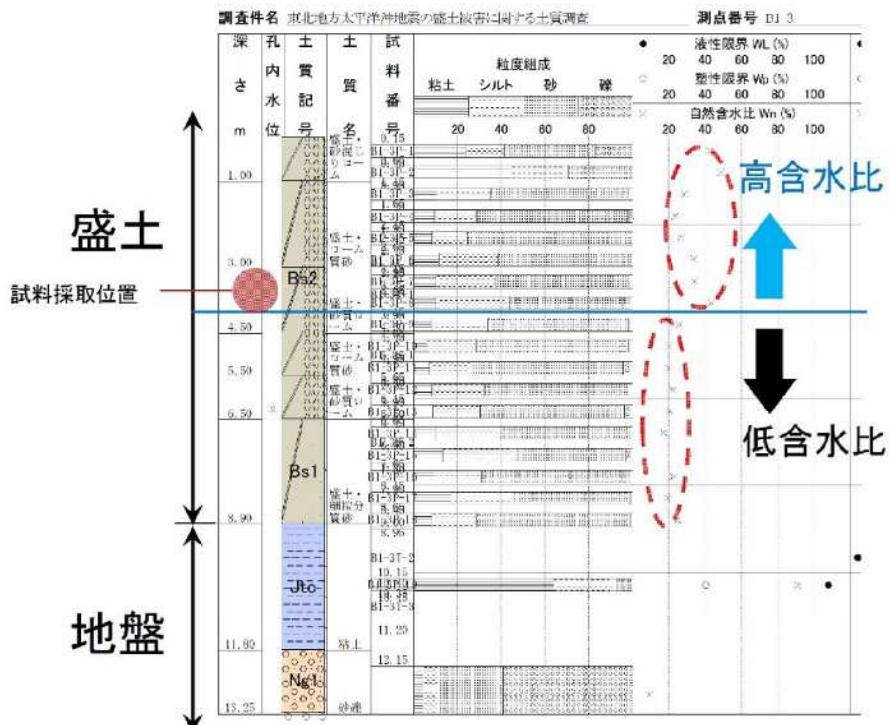


図 2.4.9 ボーリング柱状図⁸⁾

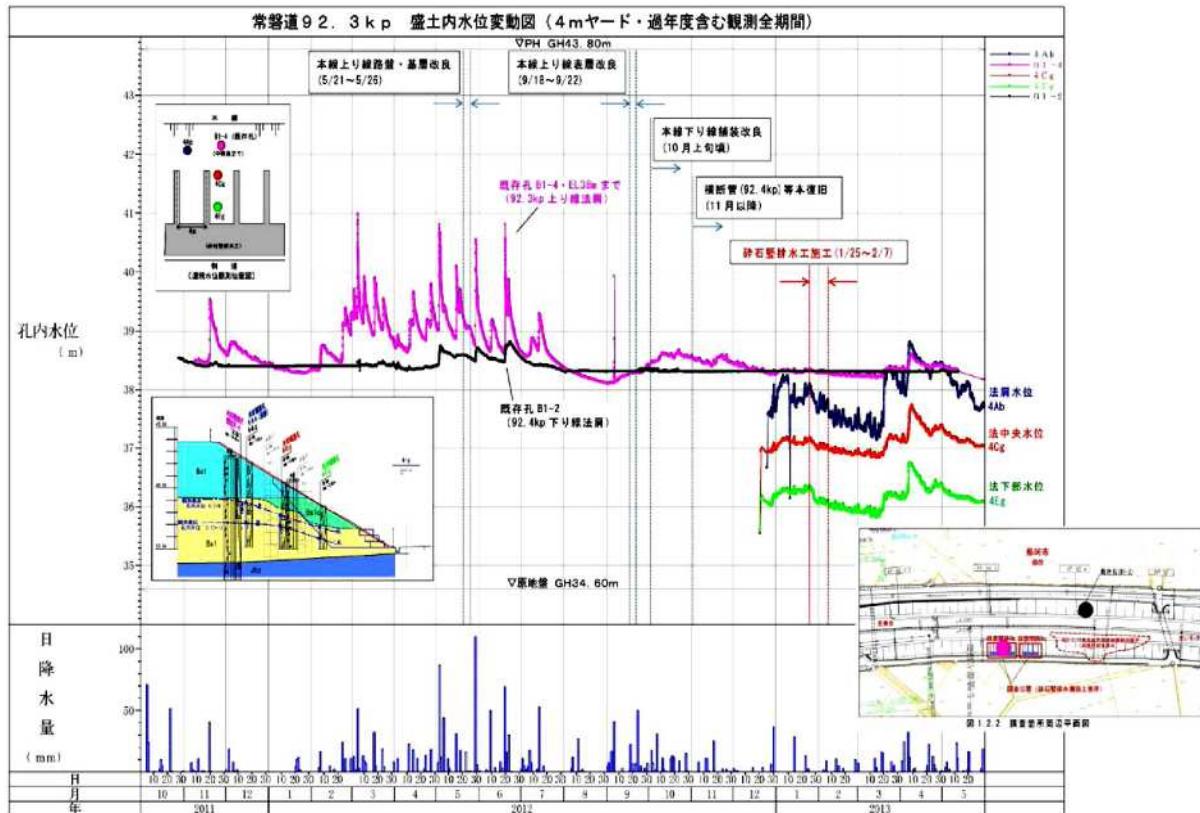


図 2.4.10 盛土内水位の動向⁸⁾

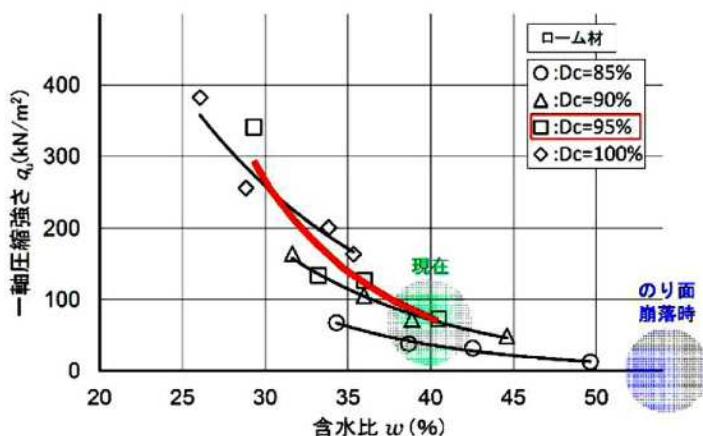


図 2.4.11 一軸圧縮強さと含水比の関係⁸⁾

その結果、図 2.4.11 に示すように、含水比(w)が増加すると、一軸圧縮強度(q_u)が低下することが検証された。また、脆弱岩材料の盛土材を試験したところ、表 2.4.4 に示すように、調査時点ではほとんどの飽和度が 90 %を超えていることが判明した。表 2.4.4 は、日本において盛土材料として採用されている脆弱岩材料（第三紀泥岩）の地区別の試験結果を示すもので、各物性値と全地区平均値・地区別平均値を示す。対象地区の盛土材料である掛川地区の脆弱岩材料は、ほかの地区的材料より、 N 値、 S 波、湿潤密度、乾燥密度は小さいが、そのほかの物性値は全地区平均値より小さいものもあり、大きいものもある。

表 2.4.4 盛土箇所の脆弱岩材料の地区別分析結果⁸⁾

項目	単位	全地区平均値 (2m以深)	地区別平均値(2m以深)								
			H22龍生	H22掛川	H23上越	H23掛川	H23神戸	H23高崎	H22神戸	H23嵐山	H22常広
N値	-	10.2	7.9	8.2	5.8	13.2	5.4	10.3	11.3	11.5	14.7
S波速度	m/s	234.5	196.7	232.5	175.3	216.7	186.2	258.2	213.1	311.3	390.0
湿潤密度	g/cm ³	1.943	1.982	1.921	1.906	1.971	1.978	1.920	1.862	1.955	2.15
乾燥密度	g/cm ³	1.542	1.569	1.507	1.466	1.569	1.604	1.496	1.457	1.575	1.854
自然含水比	%	26.1	24.4	28.1	29.9	24.9	23.9	27.2	29.4	22.5	16.3
飽和度	%	94.3	93.5	94.2	96.6	96.2	93.2	96.2	91.0	89.8	93.3
土粒子の密度	g/cm ³	2.687	2.694	2.701	2.688	2.699	2.680	2.671	2.630	2.733	2.708
液性限界	%	56.1	96.1	43.6	53.9	45.3	58.5	63.2	57.7	54.6	51.1
塑性限界	%	22.3	18.5	19.6	24.0	23.3	24.2	28.1	20.3	23.8	21.3
塑性指数	-	33.6	77.6	24.0	29.9	22.0	34.2	35.1	37.4	30.7	27.0
UU三軸試験 正縮強さ	kN/m ²	84.7	49.8	104.4	34.9	97.9	79.0	109.3	85.0	101.8	-
空気間隙率	%	2.6	2.4	2.6	1.5	1.9	2.7	2.0	4.8	4.3	2.1
強度増加率	-	0.41	0.20	0.43	0.30	0.48	0.37	0.68	0.15	0.48	-

■：強度と密度に関する項目について全地区平均値に比較して地区平均値が低い値を示す。

■：自然含水比と塑性指数について、全地区平均値に比較して地区平均値が高い値を示す。

赤字：他地区の平均値に比較して相対的に差が大きい。

したがって、特に、特異な泥岩とは、言いがたい。

ii) 東北地方太平洋沖地震の盛土のり面崩壊事例 2 [東関道 潮来地区]

東関東自動車道佐原香取 IC～潮来 IC間上り線 73.7KP付近で、周辺の側道などに液状化被害が発生した。被害状況を写真 2.4.6 と写真 2.4.7 に示す。本線部の1段盛土は軟弱地盤対策として、施工時敷金網工が施行されていたため、クラック程度の被害であった。現地調査により、写真 2.4.8 に示すように、旧河川跡であることが判明した。旧河川に沿って、液状化を示す噴砂や噴水の跡が出現した。現地の旧河道部に当たるシルト混り細砂層のサンプルを調査したところ、以下のようであった^{8),19)}。

細粒分含有率 $F_c = 5.7 \sim 28.9\%$

液状化に関する抵抗率 $FL = 0.387 \sim 1.164$

これらにより、高速道路建設前の土地利用についても調査し、維持管理に反映することが重要であると、改めて認識された。

iii) 東北地方太平洋沖地震の切土のり面崩壊事例 [常磐自動車道 いわき地区]

常磐自動車道いわき勿来IC～いわき湯本IC間下り線 158.4KP付近において、4月11日の余震により、5段切土で延長 50 m にわたり崩落土量約 3,000 m³ の崩落が発生した。崩落岩は風化が激しく脆い状態にあり、鉄塔付近の自然斜面の崩落に切土のり面が巻き込まれた状態で崩落したと考えられる。のり面上方の約 1,000 m³ の緩んだ未崩落土を撤去し、本復旧工事が実施された。常磐自動車道いわき地区の被害状況を、写真 2.4.9 に示す。

3) 地震の被害と課題

東北地方太平洋沖地震における盛土のり面崩壊がどのような課題を残したのか、その特

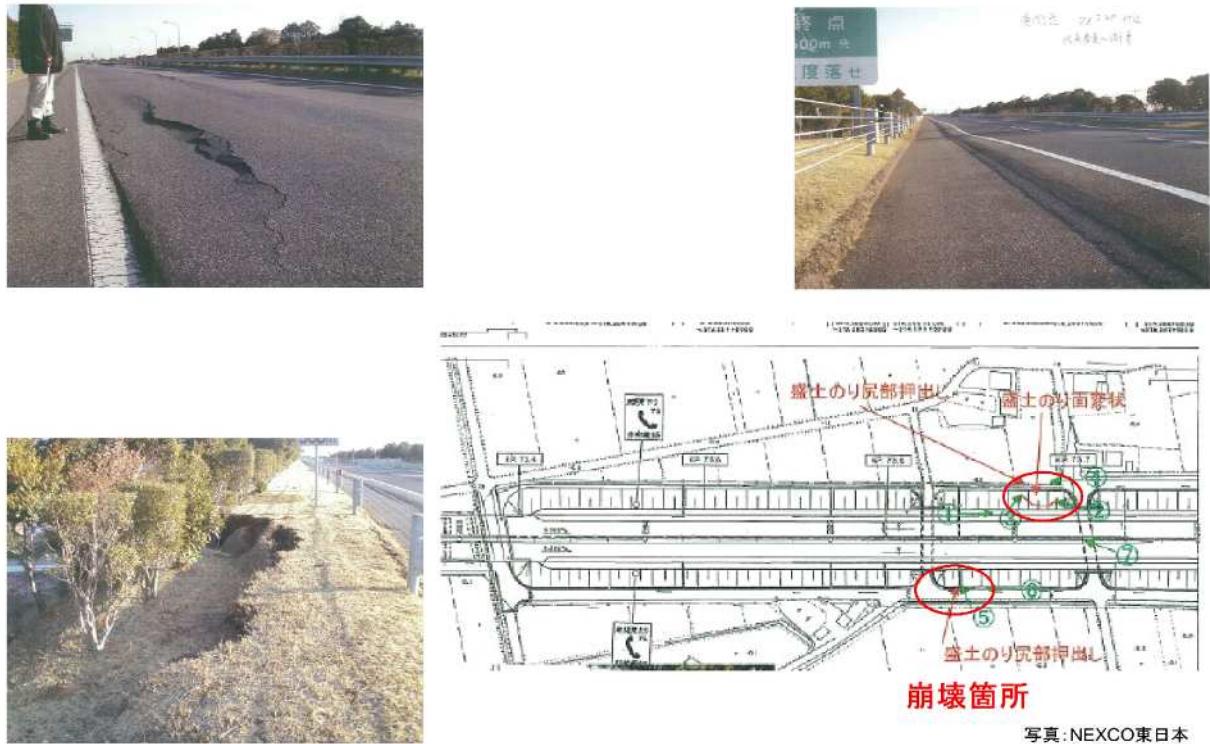


写真 2.4.6 東関東自動車道潮来地区の被害状況(本線部)⁸⁾



写真 2.4.7 東関東自動車道潮来地区の被害状況(側道部)⁸⁾

徴をまとめると、以下のようである。

- ① 地震の規模の割には、大きな被害は少なかったが、比較的盛土高の低い盛土でも被害が発生した。いずれの崩落土も高含水状態であった。
- ② 土工部と構造物(橋台やボックスカルバートなど)の境で段差が多く発生した。
- ③ 特に、窪地や谷底平野の河道跡、ため池の埋め立て地および盛土下のボックスカルバートから湧水が見られる箇所で、多くの被害が発生した。



写真 2.4.8 旧河川上での液状化の発生状況(赤線が旧河川部)⁸⁾



写真 2.4.9 常磐自動車道いわき地区の切土のり面の被害状況⁸⁾

④ 片側2車線の4車線区間では、少なくとも片側2車線の機能が残ったため、震災後の緊急車両の交通路や復旧工事の工事用道路として活用できた。

4) 類似箇所の対策の進捗

駿河湾沖地震による東名高速道路牧之原地区に引き続き、東北地方太平洋沖地震による東北各地においても、盛土の崩落災害が発生したため、被災盛土と類似した盛土に対しても対策を実施することになった。対策の進捗状況について、以下に述べる。

i) 点検対象

現地点検箇所の抽出条件は、表2.4.5に示す条件に該当する盛土とする。

- ① 谷・沢埋め部、レベルバンクなどの水の集まりやすい地形条件に造成された盛土
- ② 盛土のり尻から測った盛土高さ10 m以上の盛土

東北地方太平洋沖地震における盛土のり面の変状発生は、盛土材料の材質に関係なく発生しているため、材質の条件は除外することとされた。

ii) 点検の方法

机上調査は、上記2つの条件に該当する盛土のり面を机上調査で抽出し、降雨の無い平

常時および降雨後(連続降雨量または24時間累積降雨量が30 mm以上)1~2日以内に現地点検を実施する。

iii) 点検項目

点検は、以下の項目について確認を行う。

- ① 湧水の存在および湧水の恐れ
- ② 路面のクラック、沈下
- ③ のり面亀裂、はらみ出し
- ④ 排水設備の機能低下

上記の点検により、湧水または湧水の恐れを確認した場合は、盛土内の地下水位が恒常に高い位置にある可能性があり、簡易調査の対象とし、点検結果を盛土点検票としてまとめる。

iv) 対策実施状況

NEXCO 中日本²⁰⁾は、図2.4.12に示すように、東名牧之原地区における被災箇所と類似盛土12箇所について、対策工を平成25(2013)年4月に完了させた。東北地方太平洋沖地震被災盛土と類似盛土箇所については、同様に検討と対策を進められており、2020年度までに完了させるべく、工程に沿って実施されている。

2.4.2 降雨災害

高速道路ののり面・斜面では、毎年降雨による崩壊・落石や地すべり・土石流が発生し、高速道路の通行に支障が発生している。ここでは、降雨災害の代表例を記載する。

(1) 盛土のり面崩壊事例 [山陽道 甘木地区]

平成17(2005)年9月7日台風14号の接近に伴う豪雨によって、山陽自動車道岩国IC～玖珂IC間甘木(はたき)地区の谷埋め部の盛土のり面が本線通行止め時に崩壊した。この崩壊によって泥流化した崩壊土砂が下方80mまで流下し、のり尻に近接する家屋2軒が埋没、住民から犠牲者を出した¹⁹⁾。

1) 災害と盛土の状況

写真2.4.10は路面の崩落状況である。

滑落崖が中央分離帯のガードレールの山側に達している。図2.4.13は降雨開始から崩落までの降雨の経緯を示すとともに、併せて山陽自動車道開通以来13年間での豪雨記録も

表 2.4.5 類似盛土の抽出条件の比較²⁰⁾

抽出条件	牧之原 類似盛土	東日本大震災 類似盛土
沢埋め部等の水の集まりやすい地形条件に造成された盛土	○	○
盛土のり尻から測った盛土高が10mを上回る盛土	○	○
スレーキングしやすい岩質材料(泥岩)が用いられている可能性のある盛土	○	—

	検討フロー	牧之原 類似盛土	東日本大震災 類似盛土※
① 机上 抽出	机上による類似盛土の抽出 ・水の集まりやすい地形 ・盛土高10m超 (・泥岩等が分布する地形)	381箇所	161箇所
		H21.11	H24.4
② 現地 踏査	現地踏査 のり面湧水確認	381箇所 161箇所	H22.3 H26.7
	簡易現地試験 ・簡易動的コーン貫入試験 ・簡易地下水位調査	143箇所 21箇所	H22.5 H26.8
③ 安 定 解 析	盛土材料確認調査	99箇所	
	調査ボーリング・土質試験 安定解析(震度法、ニューマーク法)	99箇所 (検討中)	H23.8
④ 対 策 工	対策工設計	19箇所 (検討中)	H23.10
	対策工	12箇所 (検討中)	

※牧之原類似盛土との重複箇所を除く H25.4対策完了

図 2.4.12 類似盛土調査・検討フロー(NEXCO中日本)²⁰⁾



写真 2.4.10 甘木地区路面前壊状況¹⁹⁾

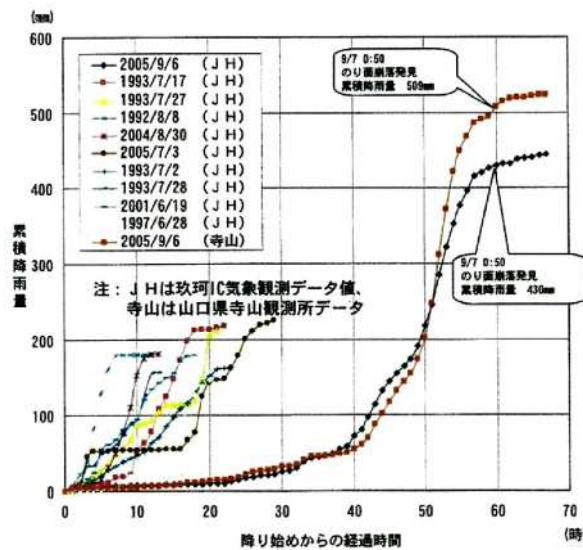


図 2.4.13 災害時および過去の降雨記録¹⁹⁾

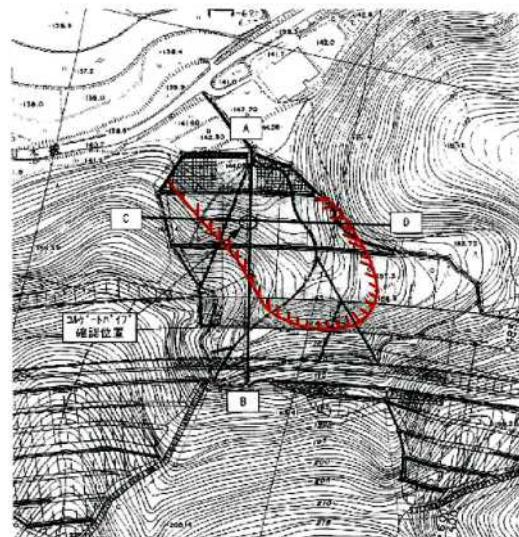
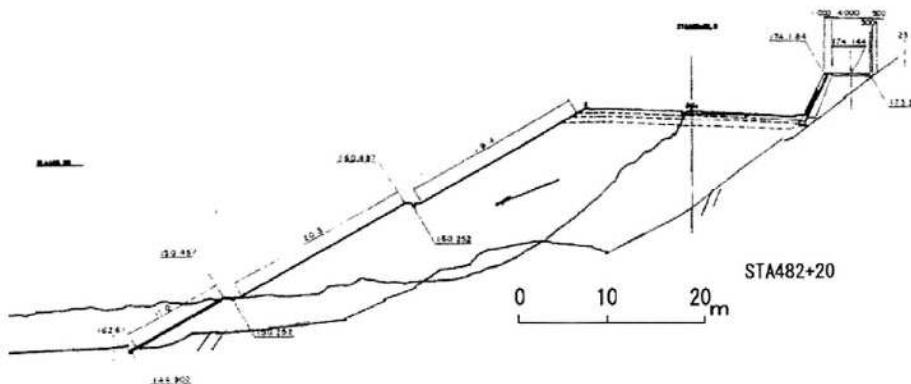


図 2.4.14 灾害箇所平面図¹⁹⁾

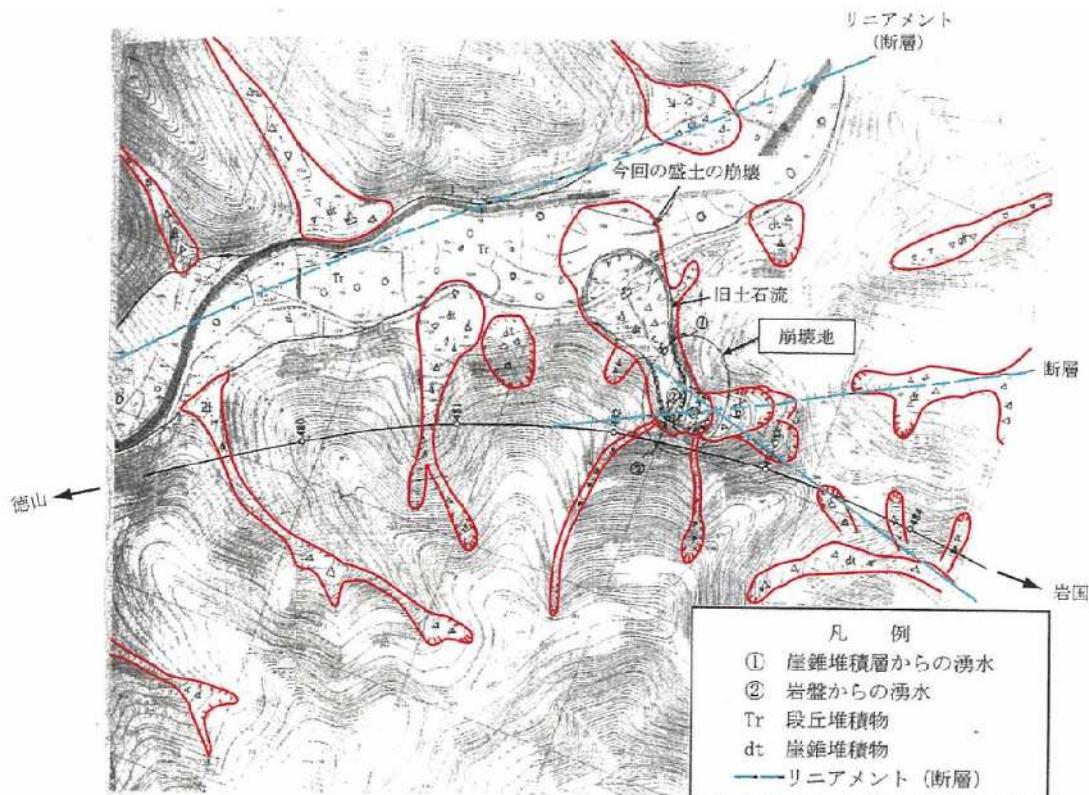


盛土材料は周辺切土区間からの掘削土(中古生代の砂岩, 貞岩, チャートおよびそれらの風化土)であり, スレーキングを起こしやすい材質ではなかった。

3) 崩壊の原因

崩壊の原因として, 以下の事項が挙げられる¹⁹⁾。

- ① 災害発生地の地形地質は, 図2.4.16に示すように, 災害発生の谷には断層(図の水色破線)が通過しており。この断層破碎帯から盛土へ地下水が浸入した。また, 谷の出口に向かって旧土石流堆積物が分布しており, この地層に伏流水が流動したために, 谷埋め盛土に浸透水が帶水したものと考えられる。
- ② 台風14号による豪雨は当区間が開通して初めて受けた異常降雨であり, 日雨量は玖珂アメダスデータから分析すると, 200~300年確率雨量に相当する。この降雨量によって盛土路体内に浸透水が飽和状態となった。
- ③ 当該区間は, 図2.4.16に示すように, 3方向の沢の合流地点で, その出口はボトルネック状に狭められて, 表流水と伏流水が一箇所に集中しやすい状態である。さらに図2.4.14でも分かるように, 暗渠排水溝のり面排水溝のり尻の一箇所に集水されており, 豪雨時にのり面部分は地下水で満たされ, ここから崩壊が始まったと考えられる。
- ④ 建設時に施工された暗渠排水溝を災害後に点検したところ, 建設時に既にあったと思われる破損箇所が発見された。ここから當時盛土路体内に水が浸透していたことは否定できない。



水色破線は断層位置 赤色枠は土石流堆積物分布箇所 黒丸が崩壊箇所

図 2.4.16 甘木地区盛土崩壊被災位置図(地形図)¹⁹⁾

(2) 切土のり面崩壊事例 [山陰道 玉造地区]

本事例は、平成13(2001)年開通し建設時に崩壊を起こした切土のり面において、開通後の平成18(2006)年7月の集中豪雨時に、グラウンドアンカーが破断して大規模な崩壊(地すべり)を起こし、崩落土砂が本線を直撃した事例である¹⁹⁾。

1) 地形地質

当該地の山陰自動車道は、写真2.4.11のように、宍道湖の南岸丘陵地の尾根部を切盛土工構造で通過している。地質は、新第三紀中新世(大森層)の凝灰岩を含む砂岩、礫岩を主体とする地層から構成されている。災害発生箇所は尾根部をオープンカットした箇所であり、南側(北向き)の切土のり面(5段)では、地層は緩い流れ盤構造を示している。

建設時掘削がほぼ終了する段階(平成11(1999)年頃)において、のり肩、のり面全体に亀裂が発生した。そのため、押え盛土を行い変形の進行を抑えたうえで、下2段ののり面からグラウンドアンカーを4段逆巻きで打設している。

2) 大規模崩壊(地すべり)の状況

平成18(2006)年7月の梅雨期に、図2.4.17に示すように、連続降雨量280 mmと先行降雨量を合わせると400 mmを超える集中豪雨に見舞われ、通行止めの処置がなされた後に、大規模崩壊(地すべり)が発生した。地すべり発生位置およびその災害状況を写真2.4.11～写真2.4.13に示す。道路路面は盤膨れにより3 m持ち上がり、建設時施工のアンカーはほぼ全数頭部破損または定着部上部破断、さらに定着部の引き抜けが発生した。のり面上方の自然斜面は、図2.4.18に示すように、尾根部を中心として、のり肩から上方80 mに渡って段差、陥没および開口亀裂などが発生し、崩壊というより地すべり形態を呈した。このすべりは施工時の変状から推定した規模を大きく上回り、斜面上部の尾根鞍部からの風化岩すべりであった。図2.4.19は地すべり地におけるボーリング調査結果によって作成した地質断面

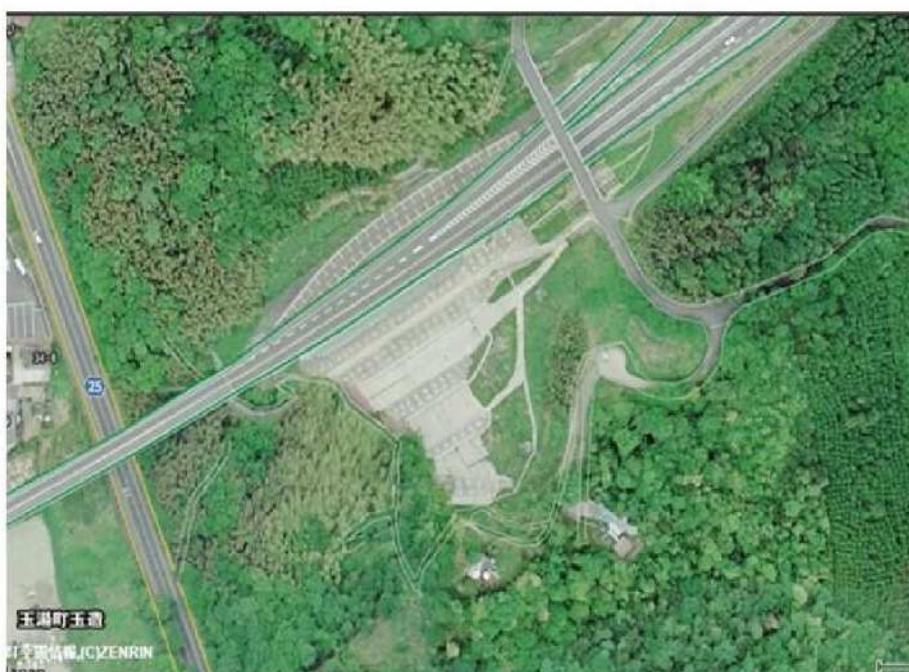


写真 2.4.11 玉造地区地すべり発生位置(復旧状況)

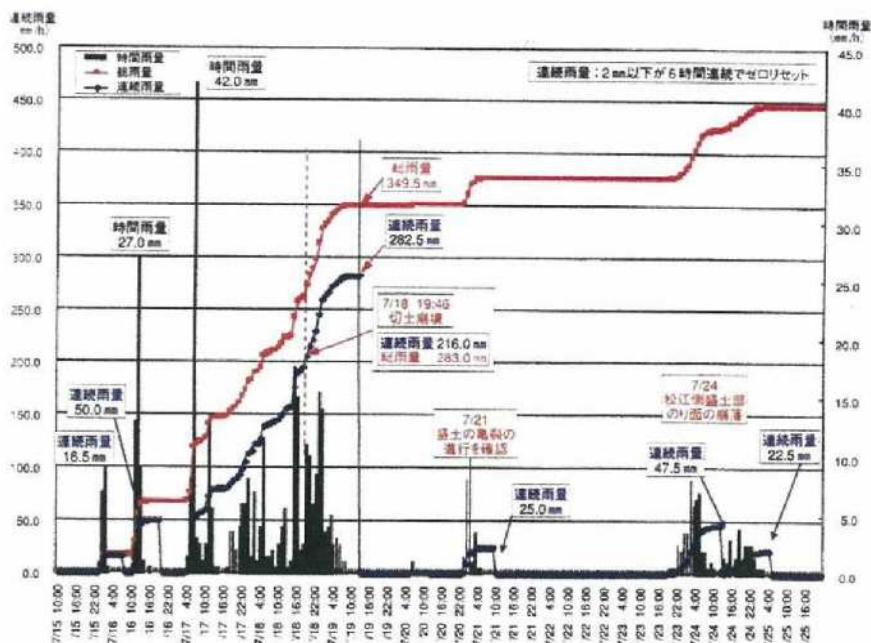


図 2.4.17 玉造地区地すべり発生前後の雨量データ(松江分室)¹⁹⁾



写真 2.4.12 玉造地区地すべり発生断面状況¹⁹⁾



写真 2.4.13 玉造地区地すべり発生 路面状況¹⁹⁾

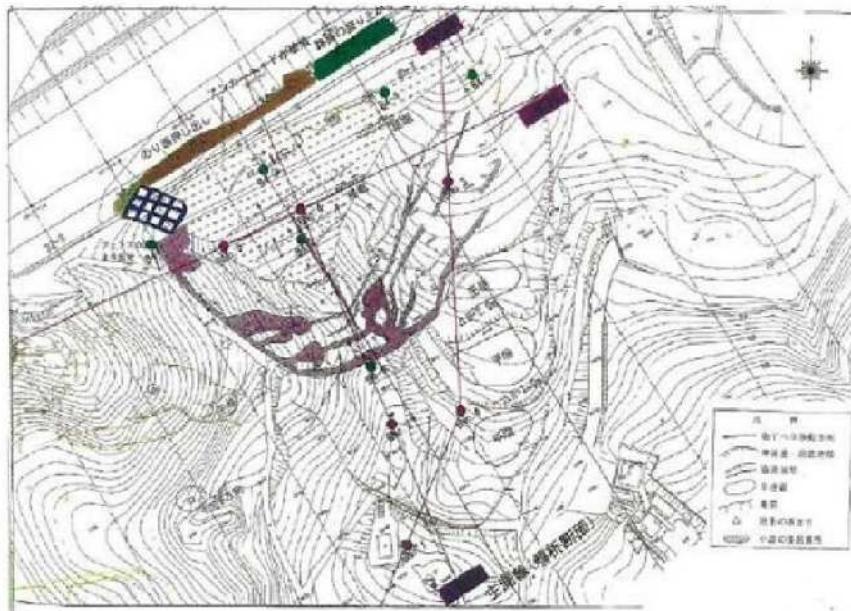


図 2.4.18 玉造地区地すべり平面図 亀裂の分布状況¹⁹⁾

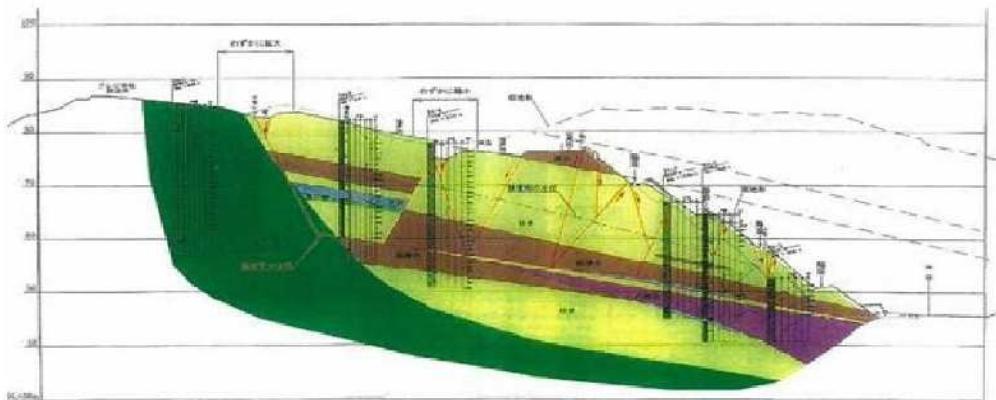


図 2.4.19 玉造地区地すべり 地質縦断図 のり面横断方向¹⁹⁾

図、図2.4.20は地すべり地形と周辺に分布するリニアメントであり、この両図から地すべり地内に断層が通過し、複雑な地質構造をなしていることが分かる。応急対策後、変位が小康状態になった時点で、直ちに現地調査に入り地質調査を実施し、地質調査結果を得た。地質断面図に示すように、この地すべりは凸状尾根型の風化岩すべりであり、すべり面は礫岩層に挟まった流れ盤の薄い泥岩層に沿うものと判断される。

3) 崩壊の原因と今後の対応

- ① 当初の計画設計段階において大規模崩壊の素因を持った地山であることに気付けなかったところに原因がある。対象地区周辺の地形図(図2.4.20)では明瞭な地すべり地が多数分布し、この切土区間にも地すべり地形が隣接している。また、周辺の地形判読からはリニアメントが当該のり面の尾根に抽出される。リニアメントが当該のり面上方の尾根に集中し、尾根には2箇所の鞍部が存在し、地山も物性的に固結度が低く、リニアメントによる地質構造に支配され、直線状の断層線や地層の走向方向に弱線が連続する。なお、鞍部の断層や岩脈などは破碎、変質を受け、その

部分が浸食されて岩盤度が低くなった結果である。

- ② 平成18(2006)年災害発生時の降雨量は、当該のり面が建設後初めて受けた降雨記録であった。したがって、建設完了後の時間経過が少ないのでり面では、地形地質特性に応じて規制基準以下の降雨量でも、巡回頻度を密にするなどの処置をとる必要があると考えられる。
- (3) 土石流発生事例 [松山道 新居浜地区]

本事例は、平成16(2004)年に松山自動車道土居IC～いよ西条IC間で、用地外からの土石流(土砂流)流入が19箇所発生し、最大4日間の通行止めとなった事例である¹⁹⁾。

1) 地形地質

四国の地形は「中央構造線」の北部には瀬戸内海から1～5 km程度の範囲で平地あるいは丘陵地が広がっており、「中央構造線」の南部は最大標高2,000 m弱の四国山地が東西に延び、30度超の急傾斜となっている。

松山自動車道は「中央構造線」の北部山裾部の和泉層群と三波川変成岩類の境界を東西に通過している。和泉層群は主に砂岩泥岩の互層からなり、砂岩の新鮮な部分は塊状硬質であるが、風化すると黄土色を呈し容易に破碎することができる。泥岩は黒色を呈し、風化により貝殻片状に割れやすく、粘土化しているところが多い。砂岩と泥岩は風化形態が異なるため、層理面が分離面となって崩壊や地すべりが多発している。三波川変成岩類のうち黒色片岩は、片理や微褶曲が発達しており、はく離が著しい。泥質片岩が塩基性片岩と接する部分では、泥質片岩側が破碎され、その境界がすべり面となっている。

2) 土石流災害の状況

松山自動車道を襲った台風21号は、時間雨量・連続雨量とも愛媛県東予地方で記録した観測史上最大級の雨台風であった。松山気象台地域気象観測所(アメダス)新居浜観測地点においても、過去の記録は、最大1時間降雨量は68 mm/hr(平成2(1990)年8月)、最大1日降雨量302 mm/day(昭和51(1976)年9月)であった。平成16(2004)年9月29日のJH(日本道路公団)新居浜IC 観測所の降雨状況は、図2.4.21に示すように、時間降雨量121.0 mm/hr、日降雨量408.0 mm/dayという最大値を記録している。また、平成16(2004)年は台風データを見ても記録ずくめの年で、日本に上陸した台風のうち特に四国に影響が大きかった台風10,11,15,16,18,21号によって、8～9月の短期間に100～400 mm連続降雨が5回も記録された。年間降雨1,500 mmの瀬戸内海気候区に記録的な豪雨が連続したことになり、土石流崩壊を

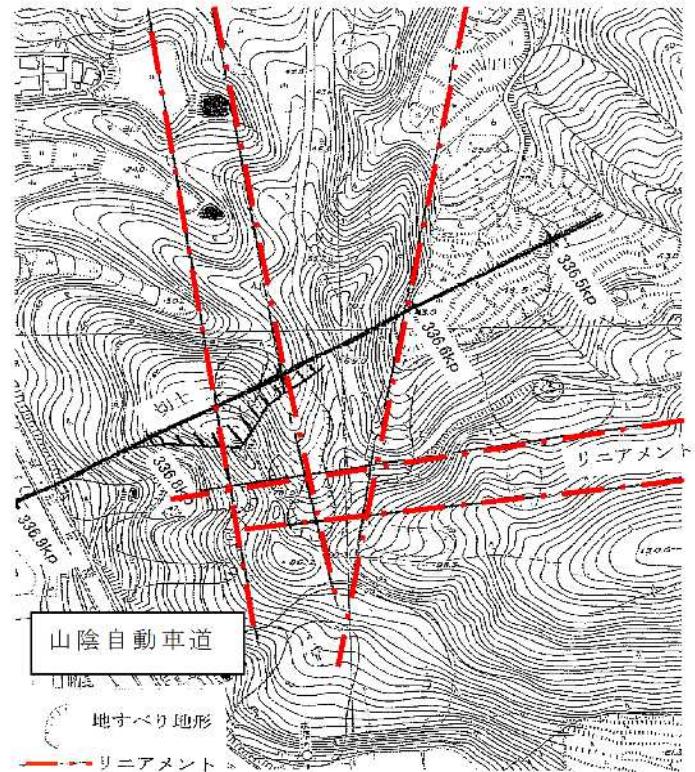


図 2.4.20 地すべり地形とリニアメント¹⁹⁾

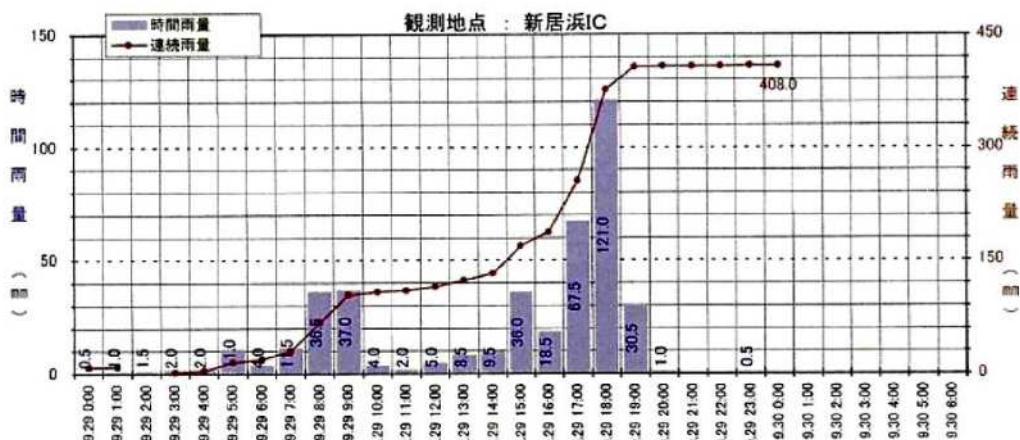


図 2.4.21 松山道新居浜ICにおける災害発生時の降雨量¹⁹⁾



写真 2.4.14 松山道 90.97KP大生院被災状況¹⁹⁾

発生させた大きな誘因となった。

平成16(2004)年9月29日午後5時過ぎ通行止め中に、松山自動車道90.97KP(新居浜市大生院地区)の南側自然斜面が2度にわたり崩落し、推定16,000 m³の土砂・流木が高速道路のガードレール・遮音壁をなぎ倒し、本線を横断したうえで北側の民家を直撃し、4名の犠牲者がいる惨事となった。写真2.4.14に被災状況、図2.4.22に崩壊箇所平面図、図2.4.23に地すべり断面図、図2.4.24に地すべり対策工の平面・断面図を示す。

3) 土石流発生の原因

土石流発生の原因は、以下のとおりである。

- ① 溪流の両岸には、過去に風化や崩壊により堆積した緩い崩積土層が1.0～5.0 m程度の層厚で分布していた。
- ② 「中央構造線」が東西方向に分断する複雑な地質構造をなし、地すべり多発地帯である。
- ③ 台風15・16号による降雨によって、表土層が流失し保水機能が低下した状況にあ

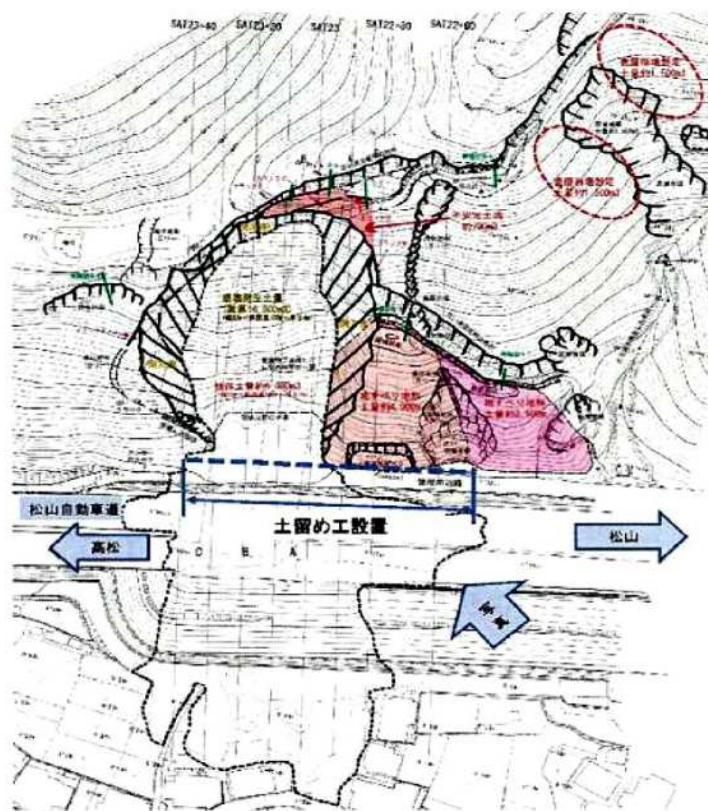
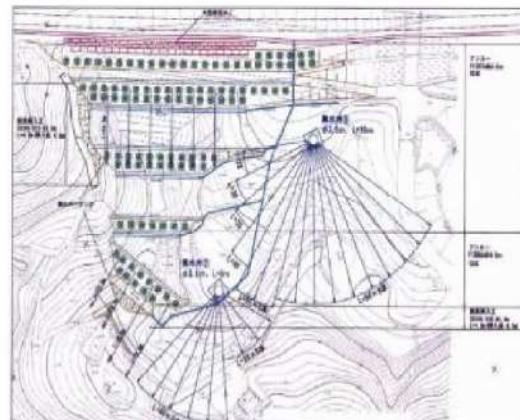


図 2.4.22 大生院地区崩壊平面図¹⁹⁾



図-1 花岩



(a) 対策工平面図

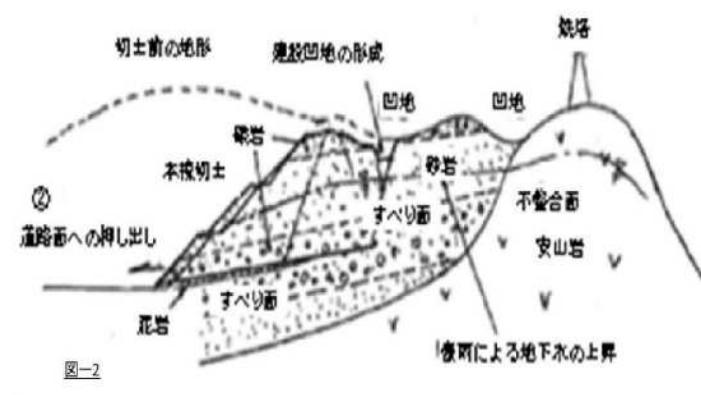
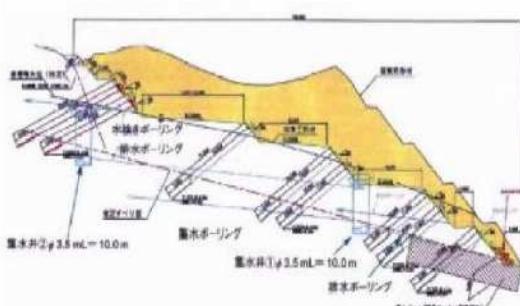


図-2

図 2.4.23 地すべり断面図¹⁹⁾



(b) 対策工断面図

図 2.4.24 地すべり対策工平面・断面図¹⁹⁾

った。

- ④ 植林された杉・檜が台風18号(風台風)によって揺らされ、根系の抵抗力が極端に低下した状況にあった(風倒木災害が多発)。
- ⑤ 降雨が少ない瀬戸内地域に、台風21号により過去の記録を大幅に更新する異常な降雨に見舞われた。

4) 対策工

大生院地区の崩壊は、砂岩礫岩の粗粒岩中に介在する泥岩をすべり面として、リニアメントとして地形に現われている潜在断層を滑落崖とする崩壊で、建設中から建設後に発生している。対策工は、図2.4.24に示すように、抑制工の排土工を主体として排水工が施工されている。しかし、これらの対策工では、安定性が十分に確保できないため、抑止工としてすべり面に達するグラウンドアンカー工をのり面下段の6段を主体として、中段に6段、上段に4段実施されている。その後、安定性が保たれ、のり面保護工などに変状は認められていない。

(4) 土砂災害防止対策の実施

高速道路においては、降雨による原因で重大災害が発生しており、その一部の事例を示した。このような事例における原因究明により、土砂崩落防止などの対策を強化している。グラウンドアンカー工や横断管路工の健全性調査を実施するとともに、豪雨時に注意をするのり面については、車上もしくは降車して、変状に注意して点検することになっている。盛土内の地下水位上昇を抑えるため、排水計画策定に当たって、その機能が地下排水施設、盛土内排水施設、表面排水施設および仮排水施設(施工中の排水施設)を一連の排水系統として計画するように「設計要領第一集土工建設編」に規定された。基礎地盤の排水処理には雨水排水工、地下排水工および基盤排水層、盛土内排水処理には水平排水層および垂直排水層、のり面排水処理にはのり肩排水溝、小段排水溝、たて排水溝、のり尻たて排水溝およびのり尻排水溝、施工中の排水処理には施工面に排水勾配の確保、豊坑および釜場を用いて、雨水もしくは地下水の滯水を排除し、速やかに盛土外に排水することが具体的に示された。「同土工保全編」においては、既設盛土の補強には、原則盛土内浸透水排除工を推奨している。大規模修繕による排水機能の強化および本線防護工の設置とともに、災害発生を受けて原因分析から明らかとなった改善策の一環である^{21),22)}。

2.5 予防保全への取り組み状況と課題

道路防災総点検や重大災害発生の類似箇所への事前対策実施のNEXCO 3社の取り組みなどは、のり面・斜面の災害リスクを低減するための取り組みの一環である。具体的には、既往の災害事例や発生した社会的影響が大きかった災害の発生要因の分析をもとに、発生要因を保有する類似のり面を抽出し、詳細調査により対策工の必要性を検討した上で、対策実施もしくは対策の完了まで継続的に観察を実施することにより、安全を担保する取り組みである。

言い換えれば、点検により変状を発見して補修する事後保全から、一步進めた予防保全の取り組みである。しかし、抽出要因の下では統一的に安全性が評価されているが、地質など地盤内部の状況も含めて高速道路の路線全体またはIC間において、統一的な外力に対する安全性を評価して同一レベルを担保する状況に至っていないのが現状である。そのため、

高速道路の安全を確保するとの使命を全うするために、降雨通行規制基準値による通行規制を伴う道路管理が実施されている。

予防保全の取り組みは始まりつつあるが、自然の威力により通行止め完了以前に発生する災害も生じている。また、降雨通行規制においては、通行止め開始時期や通行止め解除時期が、一般の利用者の感覚と合わない面があり、納得が得られているとは言えない現状である。これらの課題についての対応が待たれている。

2.5.1 高速道路斜面の予防保全

1930(昭和55)年代当初のアメリカでは、1930(昭和5)年代のニューディール政策により大量に建設された道路構造物の高齢化が進み、橋梁の約37 %が建設後40年以上を経過している状況であった。一方、昭和48(1973)年のオイルショック以降、経済成長率が鈍化し、道路投資も実質換算額が減少の一途をたどったため、満足なメンテナンスも実施されなかった。この結果、昭和58(1983)年には、橋梁の約45 %に何らかの欠陥が存在するなど道路ストックの荒廃を招き、「荒廃するアメリカ」と呼ばれた。

我が国においても、図2.2.4に示すように、開通から30 年を経過した道路延長が約4割を占め、「荒廃するアメリカ」と呼ばれた時代の状況に近づいており、筐子トンネル事故を受けて国土交通省では、平成25(2013)年を「社会資本メンテナンス元年」として老朽化対策に取り組むことになった。

これまで新設に重点がおかれ、道路構造物をルーチンとして点検し、劣化が顕著に表れたもしくは損傷がすでに発生した箇所について、対処療法的に修繕する「事後保全」管理が一般的であった。このような長期的な観点が欠如した取り組みに初めて警鐘を鳴らしたのが、平成15(2003)年4月の国土交通省が設置した道路構造物の今後の管理・更新等のあり方に関する検討委員会の『道路構造物の今後の管理・更新等のあり方提言』²³⁾である。国土交通省の試算によると、国が管理する直轄国道に現存する橋梁約19,000 橋のうち、ピーク時には年間800 橋が更新対象となる。更新ピーク時の更新費用は年間約5,600 億円が必要とされ、直轄国道の橋梁更新費用だけでも平成15(2003)年当時の維持・修繕予算の約2.6 倍に相当するので、『提言』では対応が不可能とされている。それ以上に、社会インフラの安全性が確保できる期間(寿命)が短くなり、通行規制を余儀なくされ、復旧にも長期間を要し、補修の遅れから人命に及ぶ致命的な事態を招く可能性がある²⁴⁾。

そのために、道路を資産としてとらえ、道路構造物の状態を客観的に把握・評価し、中長期的な資産の状態を予測し、また予算的制約の中でいつどのような対策をどこに行うのが最適であるかを考慮するとともに、道路構造物を計画的かつ効率的に管理するアセットマネジメントの考え方を取り入れた「予防保全」管理システムの構築が急がれる。図2.5.1に示すように、道路構造物の劣化は、経過年数とともに加速度的に進展するので、早期に予防的な対策を行った方が、維持管理を先送りして大規模改修せざるを得なくなる場合よりもトータルコストが安くなる。すなわち、適切な時期に修繕することによって、LCC(ライフサイクルコスト)の最小化が図れる可能性がある。

「予防保全」管理の概念の中には、適切な補修による道路構造物の延命化や新設構造物の長寿命化および補修・更新費用の平準化・最小化を図ることも含まれており、そのための方策として以下の取り組みが行われている^{23),24)}。

- ① すべての道路構造物で点検を実施するための点検の制度化

- ② 点検および診断の信頼性確保のための技術基準や資格制度を制定し、人材育成を図る。
- ③ 点検、診断および補修・補強の各分野の信頼性を高め、負担(労力、コスト)を軽減するための技術開発を推進する。
- ④ 高度な専門性を要する損傷について技術支援を行うために、損傷事例の集積と発信、高度な専門技術者の育成を図る。
- ⑤ 効率的な維持管理とマネジメントサイクルの確立のために、データベースの構築と利活用を図る。

NEXCO 3 社においては、管理する本体構造物全ての点検データと健全度データを用い、多数の変状要因およびその組み合せと健全度との関係を、重回帰分析により分析している。そのうえで、健全性や耐荷力の低下とともに、構造物や道路として要求される性能の管理限界を超える予測順位から、優先順位を付けた構造物ごとに、大規模更新と大規模修繕計画を決定している²⁵⁾。

2.5.2 高速道路斜面の予防保全のための条件

高速道路斜面の安定解析を行うために地盤物性・性状を把握し、また予防保全の付与条件となる想定すべき地震動と降雨による地下水位などを決定することが必要である。平成27(2015)年4月に国土交通省により制定された「道路土工構造物技術基準」²⁶⁾において、初めて“性能規定”的思想が取り入れられた。制定された「同技術基準」では、表2.5.1 に示す“要求性能”を、表2.5.2に示すように、構造物の重要度に応じて設定し、各作用に対する構造物が限界状態を越えないことを照査することになっている。常時の作用に対して、さらには必要に応じて「降雨の作用」および「地震動の作用」に対する安定性の照査を行う。降雨の

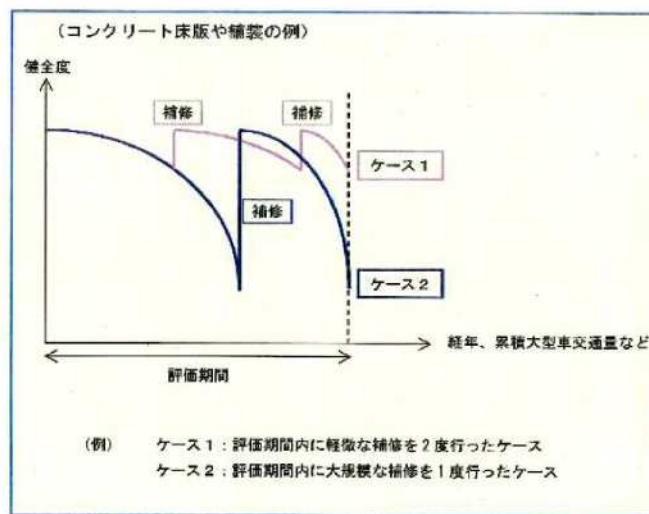


図 2.5.1 道路構造物のライフサイクル
コストのイメージ図²³⁾

表 2.5.1 要求性能の水準²⁶⁾

要求性能	要求性能の水準
性能 1	道路土工構造物が健全である、又は、道路土工構造物は損傷するが、当該道路土工構造物の存する区間の道路としての機能に支障を及ぼさない性能
性能 2	道路土工構造物の損傷が限定的なものにとどまり、当該道路土工構造物の存する区間の道路の機能の一部に支障を及ぼすが、すみやかに回復できる性能
性能 3	道路土工構造物の損傷が、当該道路土工構造物の存する区間の道路の機能に支障を及ぼすが、当該支障が致命的なものとはならない性能

表 2.5.2 重要度の区分²⁶⁾

重要度	重要度の区分
重要度 1	<p>下記(ア), (イ)に示す道路土工構造物</p> <p>(ア)下記に掲げる道路に存する道路土工構造物のうち, 当該道路の機能への影響が著しいもの</p> <ul style="list-style-type: none"> ・高速自動車国道, 都市高速道路, 指定都市高速道路, 本州四国連絡高速道路および一般国道・都道府県道及び市町村道のうち, 地域の防災計画上の位置づけや利用状況等を鑑みて, 特に重要な道路 <p>(イ)損傷すると隣接する施設に著しい影響を与える道路土工構造物</p>
重要度 2	(ア)及び(イ)以外の道路土工構造物

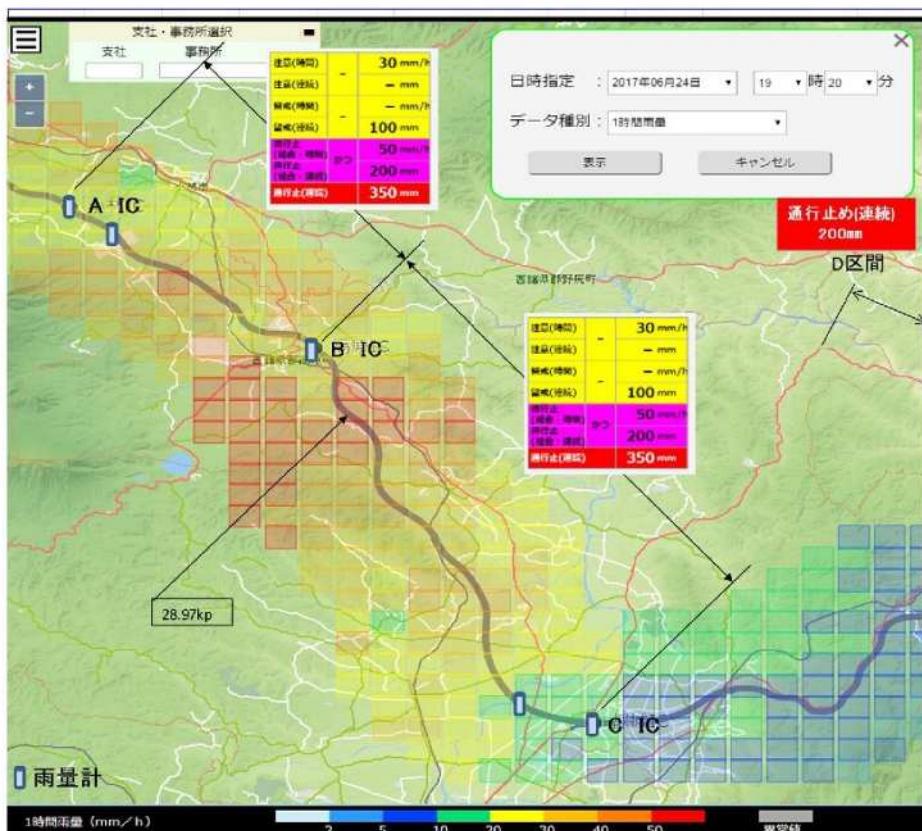


図 2.5.2 高速道路と一般道の規制雨量(例) 株高速道路総合技術研究所

作用は具体的には規定されていないが、地震動の作用ではレベル1地震動に対する性能1の照査およびレベル2地震動に対する性能2の照査が規定されている。

図2.2.13に示すように、東北地方太平洋沖地震の被害状況から計測震度4.5以下の箇所では、緊急交通路として高速道路の使用に支障となる被害は発生していない。また、高速道路の盛土の変形量は、レベル2地震動に対して概ね1 m程度に収まる性能を有している。一方、地震により災害が発生した箇所は、過去の経験より体積含水率、飽和度および地下水の存在が影響していることが分かっている^{27),28),29)}。本論文では、降雨による作用を主体に性能規定を設定した新たな予防保全管理(性能規定型予防保全管理)を構築するうえで必要な方策について検討する。

2.5.3 新たな予防保全のための「降雨の作用」

図2.5.2に示すように、高速道路のIC区間(B IC～C IC)の通行止め基準は、連続雨量350 mm、組み合せ雨量では時間雨量50 mm/hr、連続雨量200 mmとなっている。一方、ICに接続する赤線で表示した国道のD区間には異常気象時通行規制区間があり、規制雨量200 mm以上となっている。代替関係にある高速道路と一般道が同一の規制雨量であれば、同時に通行止めとなる可能性が高く、異常気象時に物流はもとより交通が一度に遮断され、地域が孤立し人命にも影響が及ぶことが考えられる。このような地域については、リダンダンシーが確保されていないわけであり、少なくとも1ルートは「命の道」として確保することが重要となる。すなわち、当該区間のような箇所においては、優先的に高速道路のり面対策などに集中投資して、高速道路の規制基準値の改善を行い、交通網が一斉に途絶する可能性を減少させて、地域の安全性の確保や向上を図ることが重要であると考える。

現況の高速道路では、のり面の断面毎の降雨に対する耐性や斜面の安全率が大きくばらついており、そのためにIC間ばかりでなく路線毎においても結果的に安全率が異なっている。路線としてのり面安定からみた厳密な保障雨量基準(道路管理者として道路利用者へ高速道路交通の安全を担保できる最大雨量基準値をいう)などは、存在しない現状である。線状構造物である高速道路においては、路線全体もしくはIC間で道路としての機能を発揮するため、安全性が最も劣る断面の保障雨量基準で通行規制を実施すると、高速道路構造物が有する機能を100%活用したことにはならず不経済である。

今後、高速道路は重要な社会インフラとして、降雨や地震などに対する性能を明確にし、その安全性をしっかりと利用者へ担保する(性能規定化)ことの必要性が社会的要請として高まっている。各IC区間の高速道路が持つ特性や並行する国道などの対降雨信頼度により、それぞれの区間が備えるべき性能に対して重要度I～IVの4ランクなどに区別する。当該路線の満足すべき重要度に相当する超過確率年の保障雨量を、例えば表2.5.3のように規定することを提案する。

保障雨量時の作用は、タンクモデル手法により保障雨量時の地下水位を推定することで対応する。推定の地下水位条件に基づいてのり面安定解析を行い、必要な対策を実施する。これらの取り組みにより、重要度I～IVに規定された保障雨量基準が、それぞれの区間毎の性能規定値と言い換えることが出来る。同時に、構造物の安全性を担保する保障雨量基準を、現地の道路管理における通行止め規制基準値として運用することで、現在利用者から得られていない通行規制開始時期に対する納得性が向上すると考える。なお、重要度設定は路線特性と費用対効果を合わせて考慮することにより決定するべきものであり、厳しい基準値の適用を一概にすすめるものではない。

表 2.5.3 インター間保証雨量の設定例

当該区間の高速道路の重要度	保障雨量の超過確率年
重要度I	200
重要度II	100
重要度III	50
重要度IV	10

2.5.4 「降雨の作用」についての評価手法

降雨の作用も含めたのり面の性能規定値による安全確保のためには、降雨による地下水位や土壤水分量への影響を考慮することが必要である^{30)~40)}。

(1) 降雨に伴うのり面内地下水評価モデル

のり面内の地下水挙動は、のり面の規模に係わらず、広義的に見て降雨浸透に起因し、降雨浸透は、斜面勾配、被覆状態、構成土壤や地質の分布と性状、含水状態、擁壁・地下排水工などの人工的な構造物などの様々な要因に影響される。このような降雨に伴うのり面内の地下水挙動を簡易に表現するモデルとして、タンクモデルがある。のり面内の地下水挙動や降雨時の変動について、タンクモデルを用いてモデル化する場合、平面的に離散化したマルチタンクモデルなどののり面全体を網羅するモデルとなる。これは数値解析法のモデルに類似して各地点の地下水位は求められるが、パラメータが多くなることや、モデルの精度などからみて、利便性に課題がある。一方、単一タンクモデルではパラメータは少ないので、のり面の平均水位を捉えることとなり、のり面内の地下水挙動を反映できない。

そのため本検討においては、図2.5.3に示すとおり、降雨と流出応答をモデル化する2段タンクよりなる1次元タンクを、上部タンクを起点としてのり面高低に準じて上部、中間、下部に連結した3連1次元タンクモデルを採用している。図2.5.4に示すように、各タンクがのり面上部の鉛直浸透、中間部の側方浸透流、下部の高含水状態や復帰流を取り扱うことにより、主要なのり面の地下水挙動の評価が可能なモデルとなっている^{33)~40)}。

(2) 評価検討事例箇所の地質状況

降雨に伴うのり面内地下水の影響検討は、図2.5.5に示した舞鶴若狭自動車道大飯ICの切土のり面(測線2と測線5)を対象とした。当該箇所の地質は、全体に褐色風化が進んだ泥岩・粘板岩が主体であり、所々にレンズ状の砂岩ブロックが点在する。また、切土近傍には多くの断層や褶曲構造が確認される。この断層は強風化が進み黒鉛状に黒色化し、切土

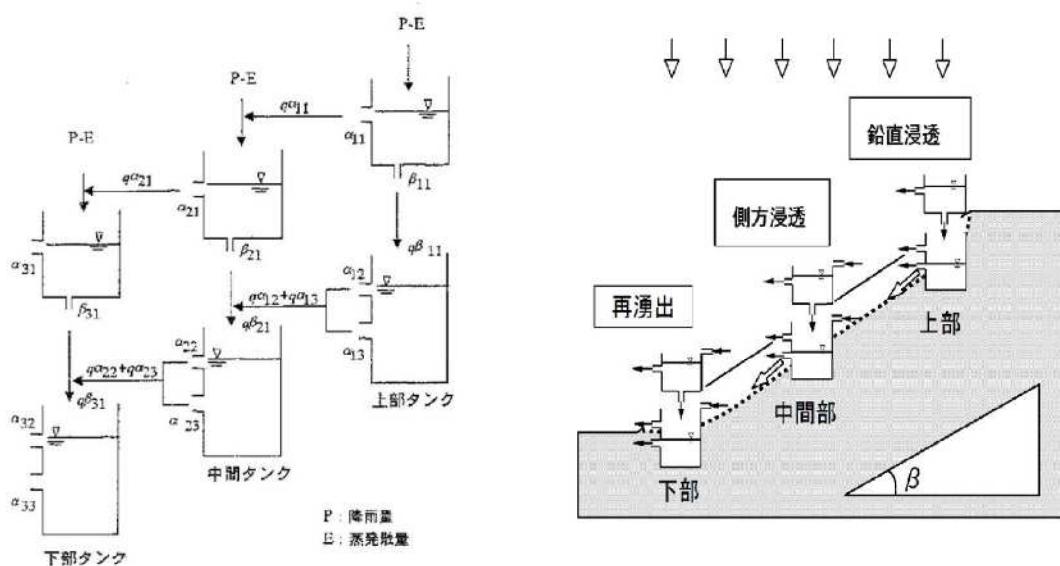


図 2.5.3 3連1次元タンクモデルの構造^{36),37)}

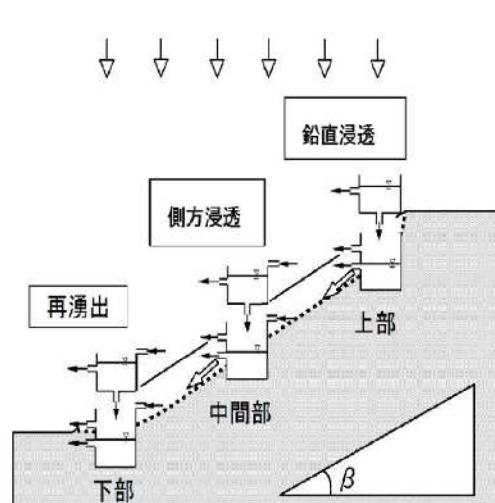


図 2.5.4 3連1次元タンクモデル
の連結方法^{36),37)}

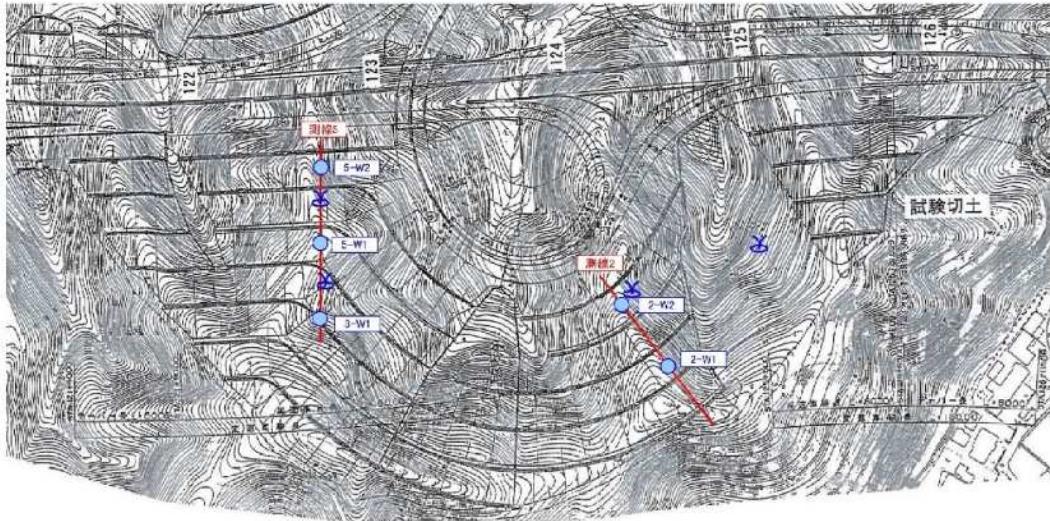


図 2.5.5 検討切土のり面の測線配置図(大飯高浜IC)^{36),37)}

面に対して低角度で斜交するものと湾曲して高角度に斜交するものとが存在する。なお、既往地質調査によれば、断層の走向傾斜は泥岩などの層理面と調和的であり、試験切土の施工時には、層理面に沿った崩落が発生している。

(3) n 連タンクモデルの構築と現状の再現

検討対象の舞鶴若狭自動車道大飯ICの場合、地すべりが随所に見られ、切土のり面に地下水排除工が実施されているため、3連1次元タンクモデルに排除工(地下水集水井)の効果を考慮する必要がある。具体的には、図2.5.6に示すように、排除工の位置に地下水排除工タンクモデルを設け、集水井を含めた連続タンクにモデル化している^{36),37)}。

[測線2]

測線2断面では、2箇所の地下水観測孔(2-W2孔, 2-W1孔)が配置されている。 n 連タンクモデルは、この2箇所とのり面最上段に1次元タンクモデルを配置した3連タンクモデル構造である。各タンクモデルは、前に述べた地下水排除工付きのタンクモデルとして取り扱っている。図2.5.7は、タンクモデルの設定係数を示している。図2.5.8は、3連1次元タンクモデルを用いて、平成11(1999)年度～16(2004)年度までの地下水位変動の

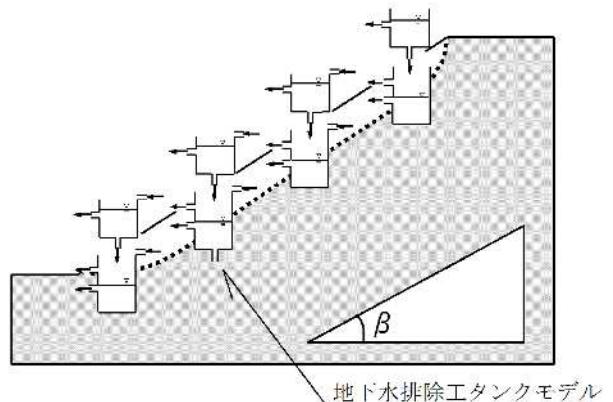
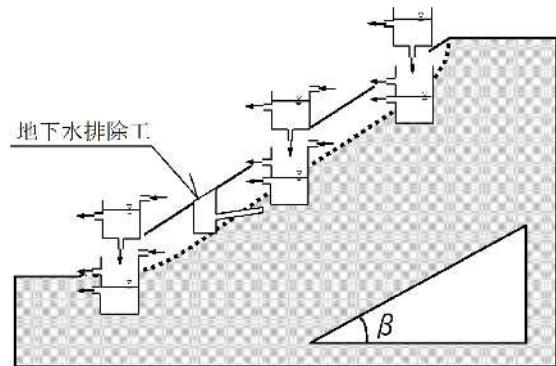


図 2.5.6 地下水排除工タンクモデルの構造^{36),37)}

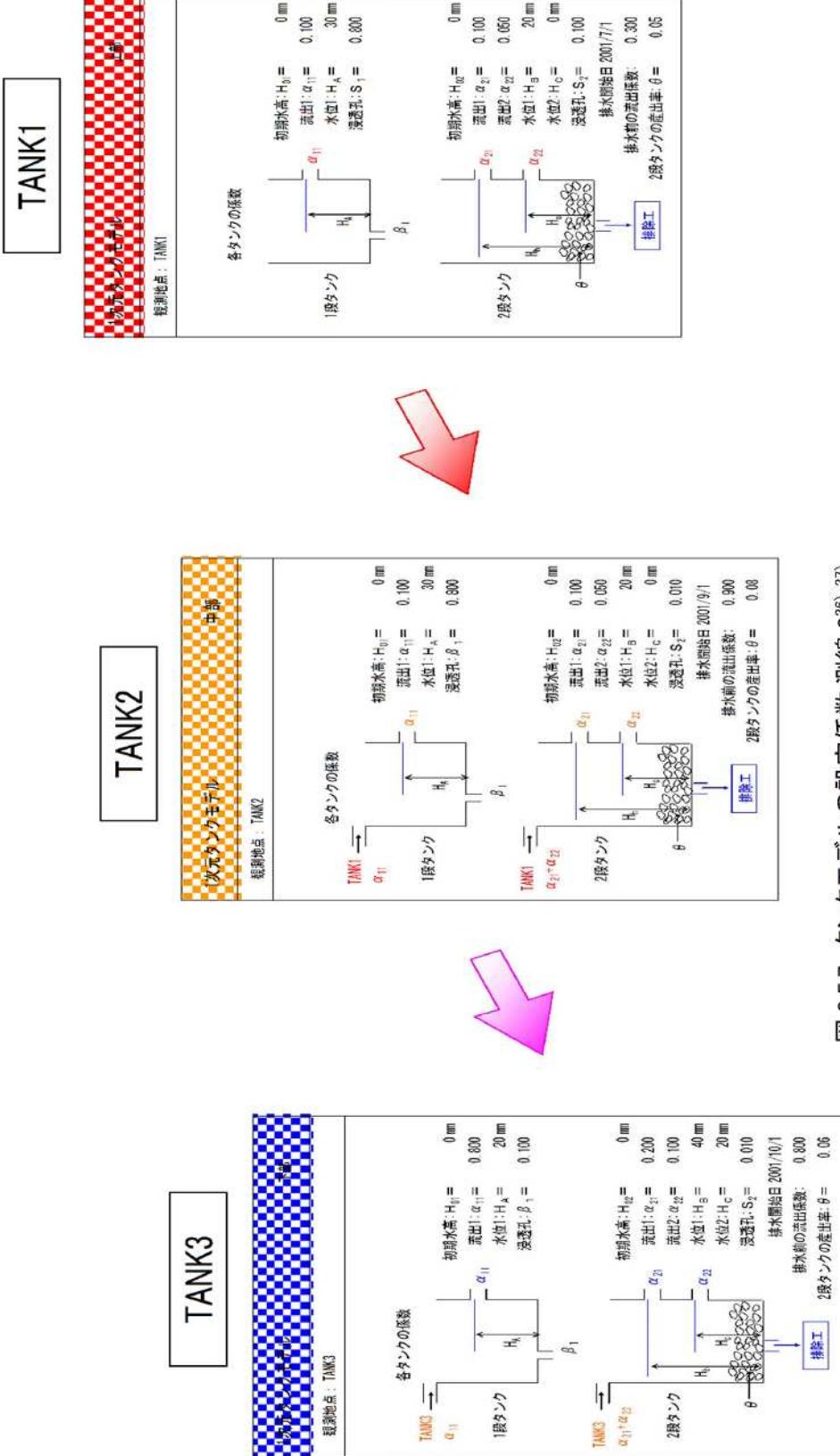


図 2.5.7 タンクモデルの設定係数・測線 2^(36), 37)

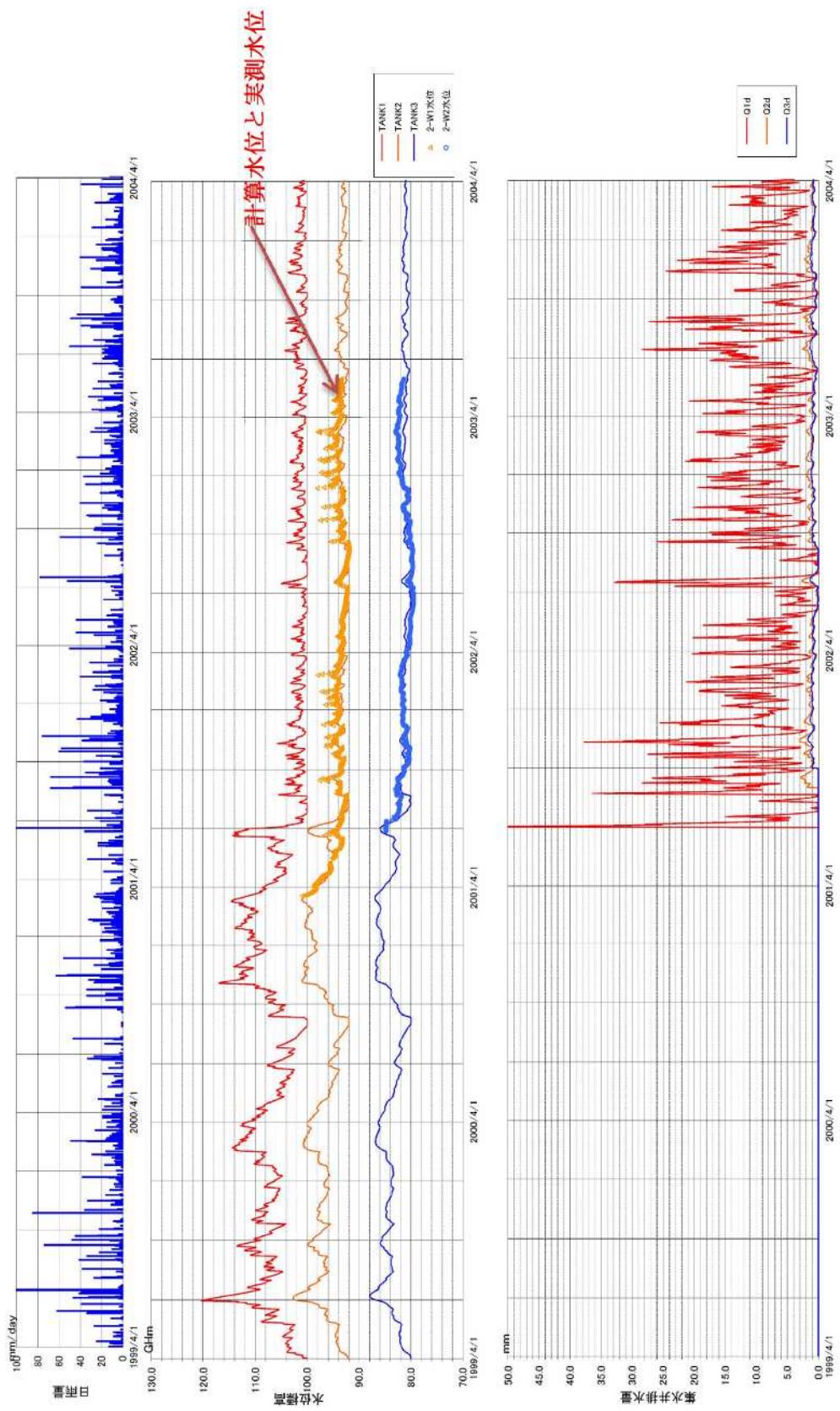


図 2.5.8 3連1次元タンクモデルによる地下水位変動解析結果：測線 2'36),37)

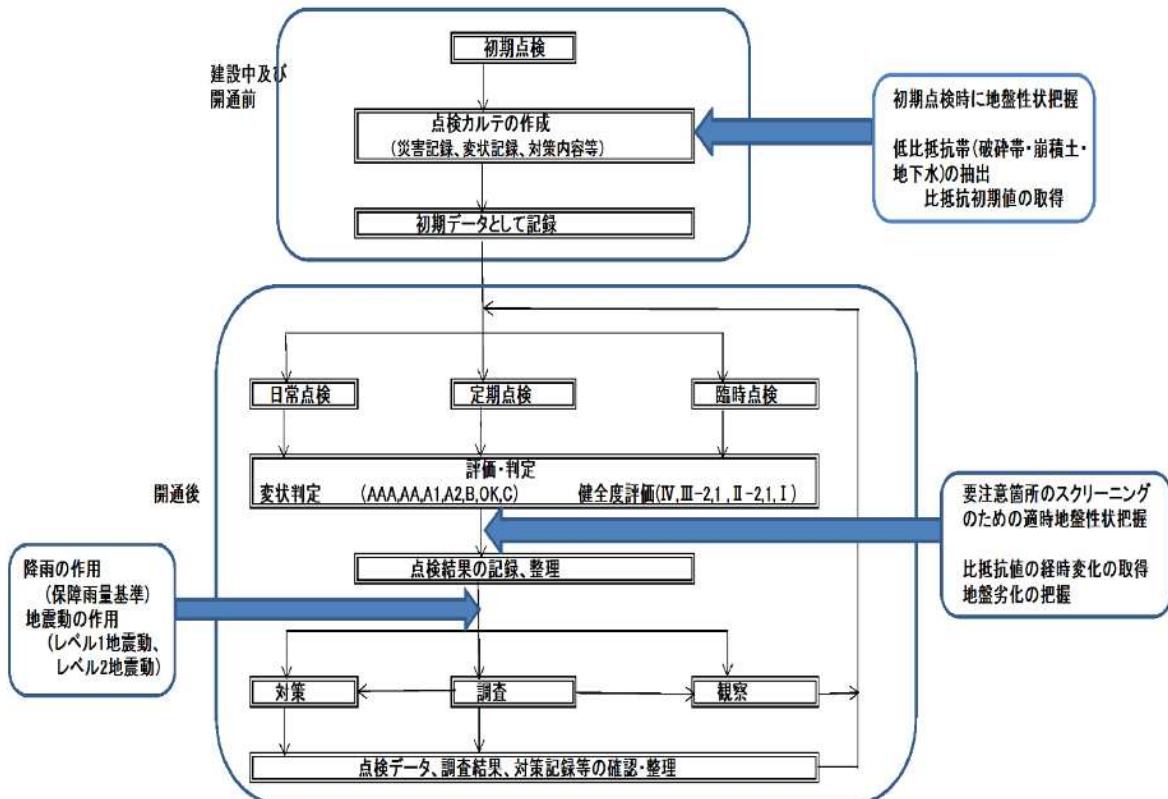


図 2.5.9 新たな予防保全管理(性能規定型予防保全管理)

実績と解析結果の推移を示したもので、降水量はアメダス舞鶴の日降水量である。なお、タンクモデル解析に使用する日蒸発散量は、アメダス舞鶴の日平均気温を基にソーンズウェト換算式を適用している。

図2.5.8では平成13(2001)年度に実施された地下水排除工(水平ボーリングによる水抜き工)の効果が良く再現され、中段部(2-W1孔)で6 m程度、下段部(2-W2孔)で4 m程度の地下水位低下の発生が再現されている。

2.5.5 新たな予防保全への取り組みの課題

現在、高速道路のり面の保全管理は、一般的には事後保全管理の枠内での対応となっている。今後は、高速道路ネットワークの安全・安心を100 %確保するためには、予防保全管理に大きく踏み出す必要性に迫られている。図2.5.9に示すように、地震動や降雨の作用について、性能規定値を設定することが必要となる。地震動については、道路土工構造物技術基準などに、レベル1、レベル2地震動と規定されている。また、降雨の作用による影響については、タンクモデル法によりシミュレーションが可能であることが、上述の過去の研究で明らかにされている。現在行われている点検・補修のサイクルの他に、より上位の点検・性能確保のための補修サイクルを、構築することが必要である。決定した性能規定値の付与条件のもとで、高速道路斜面の安定性を検討するためには、地盤性状の変化について、高速道路開通前および開通後の適時に、現状ならびに変化を把握する必要がある。一般的な地盤性状の把握法にはボーリング調査、物理探査法など各種の方法があり、調査法は確立されている。しかしながら、高速道路のような線状構造物で広域に存在する社会インフラにとって安全性を確保するために、更新もしくは修繕工事計画を策定するため地

盤性状把握が必要となる。最終的な詳細地盤調査に先立ち、多数の斜面から不安定要因を有する斜面を選定し、詳細調査箇所や優先順位を決定するためのスクリーニングを実施するために、概略の地盤性状を効率的に把握できる手法および崩壊の危険性が高い斜面のスクリーニング手法は確立されていない状況にある。そこで、図2.5.9の流れ図に沿った高速道路斜面の性能規定を設定した予防保全「新たな予防保全管理(性能規定型予防保全管理)」において重要な地盤性状の把握法および崩壊の危険性が高い斜面のスクリーニング手法について、次章以降において研究する。

2.6 むすび

本章において、高速道路の果たす役割および置かれている過酷な環境について、調査・検討した。それらの状況の中で、高速道路交通の安全性を確保するために実施されているNEXCO 3社の保全管理について整理し、課題について明らかにした。現状の課題を解消するには、国土交通省により制定された「道路土工構造物技術基準」に取り上げられた性能規定の採用および予防保全管理への転換が重要であることを示した。性能規定型予防保全管理の「新たな予防保全管理」の試案を提案するとともに、実施に当たり高速道路斜面の効率的な地盤性状把握法および崩壊の危険性が高い斜面のスクリーニング手法の研究が不可欠であることを示した。本章において具体的に得られた内容は、以下のとおりである。

- (1) 高速道路は、全道路の延長比で 0.7 % であるが、トラック輸送が我が国の物流（出荷量）の 75 % を担い、うち件数比 41 % が高速道路経由で輸送されており、社会を支える重要な役割を担っている。
- (2) 高速道路は名神高速道路（栗東～尼崎）間の開通より順次延伸したが、開通から 30 年以上経過した区間が約 4 割となり、経年劣化により老朽化が進んでいる。そのうえ、建設時の設計条件以上の過酷な使用条件下にあること、自然災害の増加など厳しい環境にさらされている。
- (3) 高速道路延長の 74 % が土工区間であり、過去の災害データより土工区間の安全確保は重要である。NEXCO 3社においては、のり面点検による保全や降雨通行規制による道路管理を実施しているが、平成 28 (2016) 年度は災害・悪天候による通行止めが平均 11 時間/年となり、通行止め以前の災害発生も見られるなど、喫緊に解決すべき課題が残っている。
- (4) 高速道路のライフサイクルコスト最小化を図るため、予防保全管理への転換が必要である。国土交通省により制定された「道路土工構造物技術基準（平成 27 (2015) 年 4 月）」において、性能規定の考え方を取り入れられており、地震動の作用については規定されているため、降雨の作用について試案を示した。
- (5) 「新たな予防保全管理」の流れ図を提案し、課題解決への方向性を示した。降雨の作用については、重要度に応じた保証雨量を設定すれば、タンクモデルにより推計可能であることが各種文献より明らかなるため、このようなシステム構築には、高速道路沿線の広域の効率的な地盤性状把握法および崩壊の危険性が高い斜面のスクリーニング手法が不可欠であることを指摘した。

[第2章の参考文献]

- 1) 国土交通省：全国貨物純流動調査(物流センサス)報告書, 2017.
- 2) 国土交通省：道路統計年報 2017(2016.4.1.時点データ), 2017.
- 3) 独立行政法人日本高速道路保有・債務返済機構：全国路線図, HP, 2019.
<https://www.jehdra.go.jp/pdf/1173.pdf>.
- 4) 東・中・西日本高速道路株式会社：高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会報告書, 2014.
- 5) 国土交通省：2013 全国道路・街路交通情勢調査 一般交通量調査, 2017.
- 6) 気象庁：アメダスで見た短時間強雨発生回数の長期変化について, HP, 2016.
https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme_p.html.
- 7) 国土交通省：国土交通白書(2011), 2011.
- 8) 株式会社高速道路総合技術研究所土工研究室:高速道路盛土の地震被害の実態について, 研修資料, 2013.
- 9) 西日本高速道路株式会社：保全点検要領 構造物編, 2019.
- 10) 株式会社高速道路総合技術研究所:高速道路における降雨基準設定と課題, 資料, 2015.
- 11) 財団法人 高速道路技術センター：1999 年度 東京第一管理局管内 降雨通行規制基準に関する検討(その 2), 報告書, 2000.
- 12) 株式会社高速道路総合技術研究所:降雨規制基準の課題と新たな気象技術に関する研究, 資料, 2017.
- 13) 東日本旅客鉄道(株):降雨災害との関連性がよい雨量指数「実効雨量」の導入について, HP, 2008. <https://www.jreast.co.jp/press/2008/20080601.pdf>.
- 14) 島村誠：実効雨を用いた降雨警報の有効性の検証, JR EAST Technical Review-No.3, pp.45～48, 2004.
- 15) 鳥居宣之, 小野泰東：豪雨時の事前通行規制のための雨量観測体制に関する一考察, 神戸高専研究紀要第 54 号, pp.39～44, 2016.
- 16) 独立行政法人 日本高速道路保有・債務返済機構:2016 年度業務実績報告書, HP, 2016.
<https://www.jehdra.go.jp/index.html>.
- 17) 伊藤正秀：防災点検と道路防災対策の方向, 砂防学会誌, Vol.50, No.2(211), pp.36～41, 1997.
- 18) 国土交通省:「道路における災害危険箇所の再確認について」, 点検要領 2006 年 9 月, 2006 年 9 月 29 日付け国土交通省道路局課長補佐事務連絡の参考資料, 2006
- 19) 公益財団法人 高速道路調査会：道路斜面防災に関する調査研究報告書, 2014.
- 20) 長濱正憲, 森山陽一, 緒方健治, 清水章一：駿河湾地震と東北地方太平洋沖地震を踏まえた盛土法面の補強対策, 土木学会第 70 回年次学術講演会 I -156, 2015.
- 21) 西日本高速道路株式会社：設計要領 第一集 土工 建設編, 2016.
- 22) 西日本高速道路株式会社：設計要領 第一集 土工 保全編, 2016.
- 23) 国土交通省：道路構造物の今後の管理・更新等のあり方に関する検討委員会, 道路構造物の今後の管理・更新等のあり方提言, 2003.
- 24) 国土交通省：道路橋の予防保全に向けた有識者会議, 道路橋の予防保全に向けた提言, 2008.
- 25) 松坂敏博, 森山陽一, 小笠浩司, 太田秀樹, 藤野 陽三, 宮川 豊章, 西村 和夫：高

速道路の構造物における大規模更新および大規模修繕の導入と課題, 土木学会論文集F4 (建設マネジメント) Vol.73, No.1, pp.1~18, 2017.

- 26) 国土交通省: 道路土工構造物技術基準, 2015.
- 27) 公益社団法人 日本道路協会: 道路土工要綱 (2009年度版), 2009.
- 28) 公益社団法人 日本道路協会: 道路土工-盛土工指針(2010年度版), 2010.
- 29) 公益社団法人 日本道路協会: 道路土工-切土工・斜面安定工指針(2009年度版), 2009.
- 30) 高橋健二, 大津宏康, 大西有三: タンクモデルを用いた地下水位変動挙動を考慮した斜面リスク評価の研究, 土と基礎, Vol.51, No.10, pp.15~17, 2003.
- 31) 大津宏康, 大西有三, 西山哲: 岩盤崩壊による社会経済的損失を考慮したリスク評価に関する研究, 土木学会論文集, No.707 / VI-55, pp.207~275, 2002.
- 32) 高橋健二, 大津宏康, 大西有三: タンクモデル法による斜面の降雨時リスク評価法の研究, 建設マネジメント研究論文集, Vol.10, pp.341~348, 2003.
- 33) 上出定幸, 小西貴史: 豪雨・豪雪におけるのり面リスク評価手法に関する検討, 西日本高速道路エンジニアリング関西株, 第22回業務改善研究発表会, 論文番号No.6, pp.11~14, 2006.
- 34) 上出定幸, 小西貴史: 豪雨・豪雪におけるのり面リスク評価手法に関する検討(その2), 西日本高速道路エンジニアリング関西株, 第23回業務改善研究発表会, 論文番号No.8, pp.19~22, 2007.
- 35) 上出定幸, 小西貴史: 豪雨・豪雪におけるのり面リスク評価手法に関する検討, 高速道路技術センター, 平成19年度高速道路保全業務研究発表会論文集, pp.13~18, 2007.
- 36) 京都大学, オーデックス株: 豪雨・豪雪における法面リスク評価手法に関する検討, 京都大学大学院大津宏康教授・オーデックス(株)共同研究成果報告書, 2008.
- 37) 上出定幸, 大津宏康, 高橋健二: リスクを指標とするのり面安定性の評価モデルの構築, 土木学会建設マネジメント研究論文集, No.16, pp.197~204, 2009.
- 38) 上出定幸, 土肥泰之, 小泉圭吾, 細木康夫, 殿垣内正人, 中辻啓二: 降雨を考慮した斜面の崩壊危険度評価に関する考察, 地盤工学会, 地盤工学ジャーナル, Vol.5, No.1, pp.159~168, 2010.
- 39) 上出定幸, 大津宏康, 田山聰, 高橋健二: リスクを指標とするのり面安定性の評価モデルの構築, 土木学会第39回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, No.39, pp.352~357, 2010.
- 40) 上出定幸: 道路切土法面のリスクマネジメント手法を用いた安定性評価に関する研究, 関西大学学位論文, 247 pp., 2011.

第3章 高速道路斜面における地盤性状把握法の現状と課題

3.1 概 説

現在、前章で述べた事後保全管理主体の課題を解決し、高速道路ネットワークの安全・安心を100%確保するために、予防保全管理へと大きく足を踏み出す必要性に迫られている。予防保全の観点から崩壊の発生機構の解明、土塊の動きおよび被害の及ぶ範囲を予測し危険箇所を抽出するとともに、優先順位を付け対策を講ずることが不可欠である。自然斜面や切土・盛土のり面（人工斜面）における崩壊の発生原因には地盤の性状が大きく係わっている。地盤性状のほか崩壊の危険性の高い地すべり、土石流危険渓流の崩積土および断層などの分布や安定性を精度よく、効率的かつ経済的に検出できる手法の開発が不可欠である。地盤調査法には、調査ボーリングや物理探査など各種の手法が開発され実用化されている。これまでの地盤情報は、地表面からの調査ボーリングや物理探査などで取得されている。日常的に行われている地盤調査における調査ボーリング（サンプリングや原位置試験などを含む）や物理探査の技術には、種々の方法があり、調査の目的や対象となる地盤性状によって使い分けられる^{1)～5)}。高速道路斜面の地盤構造や地盤特性の把握には、現在、調査ボーリング、原位置試験あるいは物理探査が実施されている。斜面の地盤調査に限らず全ての地盤調査において、従来どおりの手法がそのまま採用されている傾向がある。地盤調査手法は日進月歩で進化しており、リモートセンシングなども開発・研究されている。新しい調査技術も採用し、より精度よく地盤特性を取得する取り組みが必要である。

高速道路のように広域に線状につながるインフラにおいて、調査ボーリングや地表物理探査を用いて地盤性状や地下水性状の全体像を把握するには、多大の費用と時間をする。そこで、本章では、高速道路斜面に適用可能な地盤調査法を広く調査するとともに、各種の調査法の中から、広域の地盤性状や地下水性状の全体像の把握に適するとともに経済性に優れた地盤調査法を選定することを目的とする。その選定に際しては、2段階方式で調査精度向上を図ることとし、詳細調査に先立つ概略調査時点においては、広域の地盤性状をマクロにとらえて、斜面の安定性について詳細検討する箇所をスクリーニングできる可能性を選定の判断基準とする。

3.2 既往の地盤調査法

斜面・のり面（盛土・切土）の健全性評価のためには、地盤の内部構造を統一的な視点で調べることが必要である。高速道路のような線状構造物の健全性を把握するためには、点で捉えるのではなく、面的に統一的に捉えたスクリーニングを行い、危険度などの優先順位に従って、箇所ごとに詳細地盤調査を実施し、対策を実施する必要がある。

調査ボーリングやサウンディングは、斜面のすべり面や亀裂、地下水性状ならびに物理・力学特性などの地盤特性を正確に捉え、また孔内での原位置試験や諸検層を行うために、最良のコア採取と孔壁を作成する必要がある。そのために、通常のコア採取手法に代わる高品質の掘削技術（削孔技術とコア採取技術）の採用が必要となる。なお、これらの調査法は点としての情報であり、個々ののり面で多数の調査が必要であり、調査に対する費用と時間がかかるなどの欠点がある。

ある¹⁾。

一方、物理探査を行う場合には、地上で実施する方法と空中で実施する方法の2種類がある。土木分野における地盤調査法として前者は従前の探査方法であり、後者は近年急速に発達した探査方法で、ヘリコプターなどに測定器を搭載して実施する空中物理探査手法である。従来の探査方法の一種である弾性波探査、電気探査などにおいては、多種多様な手法があり、求める成果のみではなく探査深度・分解能や地形地質などの探査実施条件によって採用する探査手法を選定する必要がある。また、最近普及した弾性波探査や比抵抗探査におけるトモグラフィ的解析による2次元あるいは3次元探査、あるいは地表部からの探査に代わる孔一孔間、孔一地表間におけるトモグラフィなどの技術を適用することも必要である。空中物理探査方法においても、地表物理探査方法と同様に、適切な探査方法を選定し実施することが重要となる。

3.2.1 一般的な地盤調査法の現状と課題^{1)~4)}

(1) 調査ボーリング

自然斜面や切土・盛土のり面などの人工斜面の地盤調査における調査ボーリングの役割は、調査対象である斜面の地盤構成、地盤構造および地下水特性がどのようにになっているか把握するものである^{1),3)}。盛土の場合は、良く締め固められた土砂～岩碎からなる。切土のり面の場合は、緩い～締まった状態の土砂、あるいは強風化岩～風化岩～新鮮岩などの岩盤からなるが、変朽安山岩などの膨張性岩盤、断層破碎帯の破碎粘土・破碎岩などの斜面に問題を生じさせる特殊岩盤が分布する。このような斜面の地盤性状を把握するには、土砂や岩盤のサンプリング（コアリング）と削孔を目的として開発されたコアボーリングで、良好なコア採取、孔内試験や孔内検層などの目的に適合した孔を削孔し、孔壁の安定性維持と清掃を行うことに重点が置かれ、どちらかといえば調査技術の補助的手段になっている場合が多い。しかし、原位置試験や孔内検層の結果に大きく影響を与える孔壁の平滑な仕上がりに重点が置かれていないことに大きな課題がある。

斜面における調査ボーリングは岩盤を対象に、掘削深度が浅く、ボーリング孔の出来・不出来（鉛直性、孔壁の保持）よりも、孔内試験、孔内検層、地下水調査などが実施できるか、また正確なデータを取得できるかどうかで、その成否が問われている。特に、1～数cm前後の薄いすべり面の検出や幅数mm以下の亀裂に介在する粘土の状態が把握できる不搅乱状態のコア採取が出来ることが大きな条件となる。

1) 調査ボーリング技術

調査ボーリング工法としては、地盤調査で採用されるワイヤーライン式を含むロータリー式ボーリングと、井戸掘りや工事用に採用されるパーカッション式ボーリング、ダウンザホールパーカッションドリル（ダウンザホールドリル）などがある。ロータリー式ボーリングは適用地盤の範囲が広く、掘進性能に優れているが、ベントナイトなどの泥水を使用せざるを得ないことに問題がある。泥水はスライムの排除や孔壁保護のために用いるが、孔壁周辺や孔底以下の岩盤に浸透したり、泥膜を形成したりするため、地下水に関する調査（水位観測孔や現場透水試験）の妨げとなる。また、コアは搅乱状態を示し、すべり粘土や亀裂間の構成物質の状態が把握できない場合が多い。しかし近年、コアチューブの改良やコアパックの開発によって、コアサンプリング技術は従前に比べ改善され、進歩している。しかし、スライム排除のために循環水を用いているので、コアの品質、孔壁の品質に

限界が来ている。

2) 高品質コア採取ボーリング

泥水やスライムによる影響を取り除くために、泥水などの循環水に変わる種々の工法が考案され、高品質コア採取工法が開発されている。その一つには、循環水に代わって空気を循環させ、掘進とスライムの排除を行うエアボーリングがある。掘削の機具や操作は泥水循環と同じであるが、地熱井で採用されている程度で一般化されていない。そのほかに、循環水に代わって気泡を用いる気泡式ボーリングがある。この方式には、ハイブリッド工法やミストエア工法などがあり、良質なコア採取が出来ることから高品質コア採取工法として位置付けられ、その適用は増加しているが、まだ適用数は少ない。また、半割れアクリル管装着のダブルコアチューブやダイヤモンドビットの開発によって、従来採取が困難であった岩盤亀裂中の細粒充填物や砂礫層、断層破碎帯などのコア採取に成果をあげている。

このように、斜面の崩壊や地すべり、あるいはその可能性がある斜面に対する地盤調査において、循環水に代わる気泡式ボーリング工法などによる高品質ボーリング工法の普及、適用が急がれる。しかし、機械運搬などの仮設は通常のボーリング手法と同じ費用と工期であるが、掘削費用は通常のボーリング手法に比べて1.2～1.4倍割高である。

(2) サウンディング

斜面崩壊や小規模な地すべりにおいて、すべり面を特定するために、調査ボーリングに代わってスエーデン式や動的コーン貫入式などのサウンディングを実施する場合が多い^{1),3)}。

サウンディングは、「ロッドに付けた抵抗体を地中に挿入し、貫入、回転、引抜きなどの抵抗から土層の性状（相対密度、相対稠（ちゅう）度、コーン指数、せん断強度など）を調査する」工法である。サウンディングには、地表面から直接実施するものが多く、測定方法には静的方法と動的方法があり、適用可能な地盤は、崩壊地や地すべりの崩積土、未崩壊部分の風化土砂などであり、その厚さや強度の測定に適用される。

サウンディングの有効性を発揮するのは、一般に5.0m以浅の盛土層と斜面の崩積土や風化土砂あるいは完新統の地盤である。これはサウンディング機器類の大部分が装置の規模に比べ、耐荷圧が小さいためで、貫入や回転の抵抗が大きい硬い粘土、締った砂・砂礫や岩盤では、採用は不適切である。また、試験が出来たとしても、その精度に問題が残る場合がある。崩壊や地すべりなどに採用する場合は、見方、考え方を変えて、試験機構の改変・改良を行い、新規に試験機器類を開発する必要がある。

硬質土の場合は、ロッド荷重によるセンサーへの影響、ロッドの孔壁密着によるエネルギーロス、機器類操作の複雑化が発生する。これらを改善するには、ロッドを使用する場合と使用しない場合に分かれ、前者ではロッドと計器類との間の伝達エネルギーを測定し、自動記録する装置を兼ね備えた装置の工夫が必要である。後者の場合は、ワイヤーなどに吊り下げる方法によって計器類を設置し、計器操作は遠隔操作で作動・測定し、自記記録できるなどの工夫が必要である。

(3) 地下水調査

自然斜面や盛土・切土のり面などの人工斜面における地下水特性を把握することは、崩壊や地すべりの安定性を評価する場合の重要な項目であり、その内容は間隙水圧、流向・

流速である。しかし、斜面ごとに固有の地盤構造を有し、また帶水層構造も一律でないことから、地盤条件に適した調査手法を選定しなければならない^{1),3)}。特に、重要となる項目は、間隙水圧(地下水位)と流向・流速である。

斜面の間隙水圧(自由地下水や被圧地下水の水位・水頭)は、地盤の水理特性のみだけでなく、力学特性に大きく影響を与える要因であるため、斜面の安定性解析や地下水解析に必要となる地盤条件である。間隙水圧調査には、以下の2方法がある。

① ボーリング孔底に計器を設置して計測する方法

② 削孔後に専用ケーシングを挿入して、移動式計器(プローブ)により計測する方法

測定法の特徴は透水試験法と同様に、測定対象区間の設定方法により分類される。また、測定においては、対象とする地層の透水係数の大きさによって測定データが安定するまでの時間が異なり、泥岩などの軟岩では砂岩や節理の多い硬岩よりも時間がかかるなど、透水係数に与える影響は大きい。また孔壁の仕上がり具合が試験結果に大きく影響を及ぼすため、入念なボーリング孔の削孔と清掃を行うことが重要である。

流向・流速は、斜面の地下水排除工の設置に大きく影響を与える。また、地盤の不連続性なども直接評価でき、地下水に関する解析結果を評価する資料となる。流向・流速の測定は、トレーサの移動と希釈状況を測定解析する方法、トレーサ検出濃度の経時変化を解析する方法などがあるが、いずれの手法ともトレーサとして何を使用するかで試験方法は細分される。各々の方法に長所短所があり、いずれの方法を採用するかは地盤・地下水条件を考慮して慎重に検討する必要がある。

(4) 室内試験

崩壊や地すべりの分類に必要な物理・力学特性は、基本的には含水比、比重、湿潤密度などの物理特性と、圧縮強度、粘着力・内部摩擦角などの力学特性とがある^{2),3)}。しかし、岩石の劣化特性は崩壊や地すべりに大きく関与するため、その特性を把握する必要がある。その主たる室内試験としては、以下のような試験法がある。

浸水崩壊度試験は、24時間乾燥・水浸の過程を5サイクル行うスレーキング試験の一種である。泥質岩などの細粒分含有量の多い軟岩に主に適用され、切土のり面の勾配や盛土の施工への資料を提供する試験である。

スレーキング試験は、乾燥湿潤の繰返しによる岩石の固結力の低下を調べる試験であり、岩石材料の性質として重要な位置を占めている。しかし、スレーキング現象のメカニズムは未だ十分には解明されておらず、また試験方法も統一されていないのが現状である。

吸水膨張試験および膨潤圧試験は、それぞれ自由膨張時、あるいは低荷重載荷時の体積変化および膨潤によって発生する圧力を求める試験であり、いずれも泥質岩に適用される。

地盤を深く掘削して切土のり面を建設する場合、いずれも重要な要素ではあるが、統一した試験法や解釈法がなく、試験法の統一が望まれる。

地盤鉱物学的試験のうち、偏光顕微鏡観察では岩石鑑定、微化石分析などで地層や岩種の判定に利用され、現状の技術の延長であらゆる地盤に適用できる有効な手段である。X線回析分析は全ての地盤材料に適用でき、含有する粘土鉱物の種類と含有量、特にスマクタイトの含有、あるいは地盤の鉱物特性を把握のために行われる。この分析法は確立された技術ではあるが、岩石物性値や力学挙動との関連性を把握するために、データを集積し、また分類を行うことが必要となる。CEC試験は陽イオン交換容量の測定を行なうもので、

膨潤性地山の判定や地すべり粘土の推定に利用される。

以上に、室内試験の概要についての現状を述べたが、いずれの試験も基本的には試料が準備できれば現状の技術、あるいはその延長上で実施することが可能であり、設計、施工および施工管理、特に切土のり面の勾配決定に必要な情報は得ることができる。

3.2.2 物理探査法の現状と課題

物理探査は、地球の持つ物理的性質を利用して遠隔的かつ非破壊でその内部の状態を把握する技術である^{1),5)}。表3.2.1は物理探査技術とその背景となる物理的性質との関係を示している⁶⁾。また、表3.2.2は各種物理探査技術を利用する物理特性（利用技法）により分類して示している^{5)~7)}。これらの表に挙げた物理探査技術は、一般に行なわれる手法をほぼ網羅しており、探査手法の名称については、『物理探査ハンドブック』⁷⁾に準じた。周辺地盤と物理的特性が異なる物理的性質を探査するもので、いわゆる地盤性状探査ということができる。

データが取得される場所としては、地表、空中、水上および坑井であり、データの流れからみると、現場でのデータの取得、コンピュータによる処理および解釈に分けられる。物理探査技術は、当初、石油・天然ガス、金属、地熱などの各種資源探査に適用された。その後、土木・環境調査および地球規模での地球環境調査などの分野に適用されている。表面や内部をよりミクロに、かつ精密に調べるとともに、一方では、よりマクロにかつ大的にみるという適用範囲が急速に拡大している。それに伴い、単に物理学にとどまらず、地球科学、地盤工学、情報工学、電子工学などを組み入れた技術の総合化、システム化が要求される。具体的には、現場でいかにS/N比と分解能の高いデータを取得し、コンピュータを用いたデータ処理により、いかにそれらを増進するかといったフォワードあるいは

表 3.2.1 物理探査技術とその背景となる物理的性質⁶⁾

方 法	現 象	物質・状態	自然 人工	主な応用分野
弾性波探査	弾性波動現象	伝播速度	人工	石炭・石油・その他一般地質構造 基礎地盤・特殊鉱床
重力探査	万有引力現象 (重力界)	密度	自然	石炭・石油・その他一般地質構造 特殊鉱床
電気探査	電気分極現象 定常電流現象 電磁現象	分極 比抵抗 透磁率 誘電率	自然 人工	一般鉱床 地下水・地質構造 基礎地盤
磁気探査	地磁気現象 (地球磁界)	透磁率 残留磁気	自然	磁性鉱床・特殊地質構造
放射能探査	放射能現象	放射能	自然 人工	放射能鉱床・特殊地質構造 放射能追跡因子の利用
地温探査	熱現象	発熱 熱伝導度	自然	地熱源・温泉・特殊鉱床
物理検層	坑井内の物理探査(電気検層・放射能検層・温度検層・速度検層)			地質構造 石油層・石炭層・鉱床の確認

表 3.2.2 各種物理探査技術の分類^{5)~7)}

利用する物理特性(利用技法)による区分							
測定場所	電気(電磁を含む)	弹性波 (超音波を含む)	赤外線 (温度を含む)	重力	磁気	放射能	光 (センシング)
地表物理探査	電気探査 自然電位法 比抵抗法 強制分極法 (IP)	反射法探査 屈折法探査 微動探査 常時微動探査 表面波探査	赤外線熱画像 地温探査	重力探査	磁気探査	放射能探査	
	電磁探査 MT VLF CSA-MT TDEM 周波数領域 (EM)						
	地下レーダー						
孔内調査(単孔)	流電電位法 ボアホールレーダ 孔中EM	VSP シングルホール イメージング		孔内重力探査	孔内磁気探査		
孔内検層	電気検層 自然電位検層 インダクション検層 誇重率検層 NMR検層	速度検層 (音波検層) ボアホールカメラ	温度検層			孔隙率検層 中性子密度検層 ガンマ線検層 自然ガンマ線検層	ボアホールカメラ
複数孔間探査 または 地表/孔間	比抵抗トモグラフィ IP トモグラフィ EM トモグラフィ レーダトモグラフィ	弹性波TOMO 孔間反射法 フルウェーブTOMO 音響TOMO					
空中物理探査	空中電磁法 周波数領域 (AEMorEM) 時間領域 (TDEM)			空中重力探査	空中磁気探査	空中放射能探査	光学リモートセンシング (MSS) マイクロ波リモートセンシング (SAR)

順問題（地下の物性値を忠実に反映したデータを得るために必要とされる技術）と、得られたデータを解釈し、いかに精確に地下構造を再現するかというインバージョンあるいは逆問題（数学的手法を用いて解釈を行い、地下の構造形態やその中の物性値を再構築する技術）が課せられている。

以下に、各物理探査技術の適用性を検討する。

(1) 地表からの探査⁵⁾

地表からの探査には、利用する物理特性により多くの探査手法がある。これらの物理探査手法のうち、地盤探査に利用されているのは、探査対象物の大きさが深度と同程度かそれ以上の場合には、電気探査(比抵抗法)、反射法地震探査、表面波探査などであり、このほかに、地中レーダー、電磁探査(時間領域 EM、周波数領域 EM)、磁気探査、重力探査などがあり、これらは地盤条件や探査対象物によって適用の可能性がある^{1),5),7)}。

推定される地盤状況に応じて、より適切な探査手法を検討し、場合によっては複数の手法を用いて探査を行なうことが必要である。

(2) ボーリング孔を利用した探査

ボーリング孔を利用した探査手法のうち、孔内検層（物理検層）は、ボーリング孔の極めて近傍地盤の物理特性を測定するものであり、狭小で特定位置の地盤探査には適用可能である。トモグラフィもボーリング孔を利用した探査法である。なお、他のボーリング孔を利用した探査手法の場合も、探査対象物の近傍にボーリング孔を設けること、また

は探査対象物を挟むように複数のボーリング孔を設けることが必要となる^{1),5),7)}。この場合は経費がかさみ、技術的に難しい点がある。

(3) 空中物理探査

空中物理探査は、3.3に述べたように、ヘリコプターや航空機などに測定器を搭載し、資源探査や地質構造探査など比較的大規模な地質構造を対象として、広範囲を迅速に探査する場合に行なうのが一般的である。探査対象が金属や磁性体である場合には、電磁法および磁気探査による手法の適用が可能であり、埋設範囲の植生や地盤・土壌の種類が周囲と異なる場合の手法としては、光学リモートセンシング適用の可能性が考えられる。しかし、一般に行なわれている現状の空中探査技術は高高度(例えば高度50m以上)からのヘリコプターや航空機を利用した大規模な探査であり、狭小で特定位置での地盤調査への適用は困難である。非常に低空において小型で安全かつ安定した測定が可能なシステム、例えばドローンを用いた技術の開発が進められつつある。

物理探査は斜面や地すべり地などの地盤や地下水の状況を把握する調査手段として、地表物理探査手法が採用され、その期待感は以下のように集約できる^{6),8),9)}。

- ① 経済的な理由、立地上の理由、施工上の理由などから多数のボーリング孔を掘削することが困難で、それを補う調査手段として物理探査に期待
- ② 調査設計段階、施工段階、管理段階などの様々な局面で物理探査を実施し、高精度で効率良く地盤情報を得たい。特に管理段階での地盤劣化の進行を把握するという期待
- ③ 地下の状況(構造および物性)を物理探査法で調査し、調査ボーリングはその妥当性を検証する程度に止めたいといった期待
- ④ 少数のボーリング孔で得られた地盤情報を地表、ボーリング孔内あるいはボーリング孔間の物理探査により、断面あるいは立体的な情報へと広がればとよいという期待
- ⑤ 斜面における地盤構造や地盤物性の分布を探る地盤調査手法としてだけでなく、地下の状態の変化(地下水位や応力分布)を簡便にモニタリングできる手法としての期待
- ⑥ 得られた物性値によって斜面の勾配が決定できる期待

なお、現状の地表物理探査は、「地表からの物理探査」、「ボーリング孔間・ボーリング孔-地表間の物理探査」の2種類に分けられる。斜面での採用は、以下のとおりである。

① 地表からの物理探査法

弾性波探査/反射法、屈折法、微小弾性波観測、表面波探査法etc.

電気探査/比抵抗法、IP法、自然電位法etc.

電磁探査/MT法、CSAMT法、TEM(TDEM)法、VLIF法etc.

② ボーリング孔間での物理探査法

トモグラフィ/弾性波トモグラフィ、比抵抗トモグラフィ、レーダートモグラフィ

3.2.3 地表物理探査法の特徴

地表物理探査法の全般的な特徴について、以下に述べる。

地表からの物理探査は前述したように、古くから石油・ガスなどの資源探査、地熱貯留

層探査、金属・非金属鉱床探査、あるいは土木・建築構造物のための地盤調査手法として盛んに利用されてきた。地表からの物理探査は概査調査段階の調査手法であることが多く、この結果をもとに斜面での調査ボーリングの位置決定や問題箇所を抽出し、後続調査の実施計画作成に採用されることが多い^{1),5)}。

ボーリング孔間での物理探査は、近年開発された探査法である。対象構造物周辺の地盤状況をより詳細に把握し、またボーリング孔間の地盤状況を正確に把握する目的で利用されるようになってきた。地表のノイズの影響が少ないボーリング孔内での測定であり、目的とする地層のそばで高精度のデータが取得できることから、測定・解析手法の技術革新にも支えられ、地盤調査手法として多くの期待を集めている。しかし、この手法の課題は、技術的問題ばかりか実施費用が高額で、実施・解析に時間をするなどの欠点を解決することが必要であると考える。

なお、物理探査に対する期待は、単に切土のり面施工前の事前調査法としてだけでなく、施工中の地盤の緩みや地盤構造の確認、あるいは施工後の健全度評価や地盤の劣化の進行を把握するための探査法としても採用されている。

(1) 弹性波探査

1) 屈折法弹性波探査

屈折法弹性波探査(以下、屈折法探査という)は速度層境界で屈折した弾性波を地表で観測し、地下の速度層構造を解析する探査法であり、岩盤分類や設計・施工のための地盤調査法として多用されている。得られた地盤の速度値から岩盤分類やのり面勾配などの岩盤評価基準が設けられるに至っている。このような点からみても斜面を含む土木分野の地盤調査で最も実績の多い探査法であるといえる。

屈折法探査は、図3.2.1に示すように、地表面付近で発破などによって人工的に弾性波(地震波)を発生させ、地下の地層境界で屈折して戻ってきた屈折波を地表に設置した測定装置で観測し、各地層の層厚や弾性波の伝わる速度(弾性波速度)などの地下の速度構造を求める探査法である。屈折法探査で求められる速度構造から地質分布、硬軟あるいは割れ目の程度や風化・変質帯などの地質状況および断層破碎帯の有無や規模などの地質構造が推定できるが、地下水位や体積含水率・粘土分含有率などは把握できない。しかし、解析の前提条件から深部の地層ほど速度が速い地質構造に適用する必要があり、上位に高速度層が存在し下位が低速度となるいわゆる速度逆転層が存在する場合は、低速度層からの屈折波

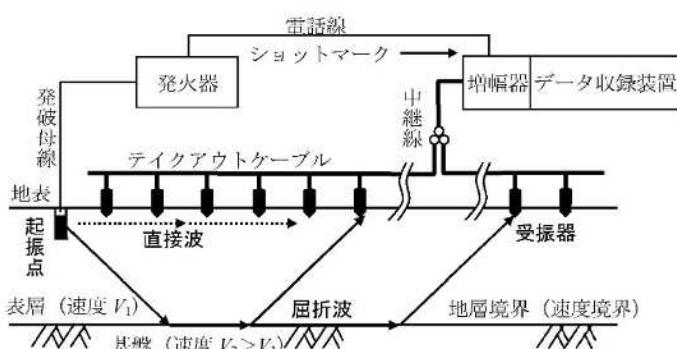


図 3.2.1 屈折法地震探査の測定概念図⁵⁾

は地表で観測されないので、地下構造を知ることが出来ない。そのほかに、深部に薄い速度層がないこと、地形や速度層境界の凹凸が解析誤差に影響するため境界が平滑であること、測線に平行または鋭角に交わる高速度層が存在しないことが必要である。これらの短所を補うために、反射法弾性波探査や速度検層の併用や、深度方向ならびに横方向に速度分布が連続的に変化するモデルによって観測値への逆解析を行う場合もある。

以下に、屈折法探査(*P*波と*S*波)の特徴などを述べる。

*P*波屈折法：*P*波を用いた屈折法を適用した場合、ブラインド層が存在する場合には、

地下水面が速度境界として検出されることが多いが、これ以外に地盤工学上有意な情報を求めることが困難な場合が多い。

*S*波屈折法：土質地盤における*S*波速度は、粘性土や砂質土といった地層の層相や力学的な性質を反映するために地盤情報を検出しようと*S*波屈折法探査を試みた例はあるが、多くの場合成功していない。それは、土質地盤では地層の堆積環境が複雑で地層構成も複雑であり、地盤改良や舗装などによって地表層の方が深部の地層より速度値が大きいといった速度の逆転が生じており、屈折法探査適用に当たっての原理的な条件である地下深部ほど速度値が大きいといった条件を満たさないことが多いのである。

以上の理由から、屈折法探査を土質地盤に適用した場合、*P*波の場合は地下水面だけが抽出され、*S*波の場合は目的とする地盤情報を得ることが困難といった問題が生じやすい。

2) 反射法弾性波探査

反射法弾性波探査(以下、反射法探査という)は、屈折法探査のような速度の逆転層が存在すると適用できないといった問題はない。また、屈折法探査が探査深度の5倍程度の最大受振距離が必要であるのに対し、反射法探査の場合は探査深度と同程度の受振距離でよい。ただし、反射法探査の短所は、屈折法探査に比べ速度の検出精度が劣ることである。

反射法探査は、図3.2.2に示すように、地表付近で人工的に弾性波(地震波)を発生させ、地下の地層境界や弾性波速度境界で反射して再び地表に戻ってきた反射波を、地表に多数設置した受振器で測定して、地下の反射面イメージから地下構造を推定する探査法である。浅層反射法は地形が平坦で概ね成層を成す地盤において、第四紀堆積層が分布する沖積平野における浅層部を対象とした調査、断層活動に伴う浅部地盤調査および比較的規模の大きい空洞調査に適用される。また、屈折法地震探査では、把握しにくい褶曲構造、撓曲(とうきょく)構造や堆積環境の違いを可視的に把握できるが、急峻な地形や地表面が凸凹に富

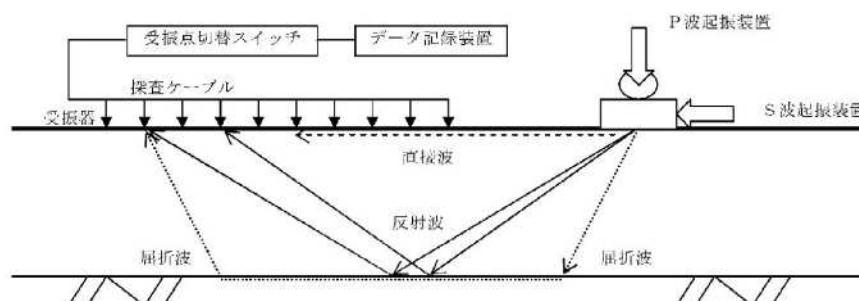


図 3.2.2 浅層反射法弾性波探査測定概念図⁵⁾

む地盤の把握、上位と下位に位置する地層の弾性波速度のコントラストが低い地盤の層境界の把握および地盤を伝播する弾性波の波長の1/4より薄い層厚の地層の検出は難しい。

以下に、反射法探査（*P*波と*S*波）の特徴などを述べる。

*P*波反射法探査：*P*波反射法探査を土質地盤に適用した場合、地下水面がコントラストの大きい速度境界面となり、地下水面の分布状況を反射法断面として表現できる可能性は高い。この問題を解決するには、高周波で強力な*P*波の震源が必要であり、望ましい震源を開発することが必要である。しかし、岩盤の場合は、明瞭な不連続面が存在しないと反射面が現れず、断面図としての体裁をなさない場合がある。

*S*波反射法探査：*S*波反射法探査の場合、層相の変化の激しい土質地盤においても地層構造のイメージをとらえることが可能である。なお、通常の簡単な板叩き震源を用いた場合でも、深度150 m程度の探査は可能である。しかし、より明瞭な調査目的とする場合、*P*波と同様、高周波で強力な*S*波震源の開発が急務となる。

なお、*S*波速度は土質地盤の力学的な性質に良く対応することから、反射法断面にインバージョン手法を適用し、より詳細な物性断面(例えば、*N*値断面など)を求めることも実用化され、その意味でも探査手法としての有用性は大きいといえる。しかし、探査の際の弾性波の周波数と交通振動などのノイズの周波数が似通っており、いかにノイズが少なくS/N比の高い探査ができるかが今後の開発のテーマとなる。

(2) 電気・電磁探査

地下構造の調査をその電気的物性の差異に基づいて行う電気・電磁法探査は、鉱山、地下水、石油などの探査分野で古くから利用されてきた。近年は電子工学やコンピュータ関連技術の進歩に伴って、測定・解析技術が飛躍的に発展し、土木・建設分野に多用されている。

電気探査法は大地に電流を流して、それによって生じる電位差を測定する比抵抗法や流電電位法、さらに鉱物の電気化学分極を利用する強制分極法(*IP*法)、自然電位法(*SP*法)などがある。電磁法探査は、大地のような導体中で磁場が変化すると、それを妨げるような渦電流が流れる電磁誘導現象を利用する手法で、多くの測定手法や測定装置がある。

電気・電磁探査で測定される物性は、ともに比抵抗である。得られる地盤情報である比抵抗は、造岩鉱物の多くは電気的に絶縁体であり、電気伝導はほとんどがその間隙水に含まれるイオン濃度によって決定する。また、地層の比抵抗は、主にその体積含水率や間隙水の比抵抗に依存する。粘性土は、その粒子の表面の化学的な特性から低比抵抗となる。同様に風化、粘土化変質作用を受けた岩石も低比抵抗になり、逆に珪化変質を受けた岩石は高比抵抗になる。このように、比抵抗は、地盤工学的な地層の境界を現すことが多く、地層の区分、連続性、断層、傾斜、亀裂、変質、異方性、地下水位などの把握に有効である。しかし、比抵抗を地層の強度特性や変形特性などの力学的な性質に直接関連させることは困難であり、適用に注意が必要である。

電気・電磁探査を実施する場合は、次のような問題点が考えられる。

- ① 送電線、電灯線などによる、50, 60 Hzとその高調波の電磁波、地電流のノイズ
- ② マイクロウェーブ、放送、通信、電話線などによる電磁波ノイズ
- ③ 工場、ビル、家庭の電気機器からの電磁波ノイズと振動
- ④ 自動車、鉄道などからの電磁波ノイズと振動

- ⑤ 建造物、地下埋設物などの地表付近の複雑な構造
- ⑥ 舗装、建造物などによる地表のアクセスの制約
- ⑦ 測定装置が発生する電磁波による電波障害
- ⑧ 測定に使用される高圧電線に対する安全の確保

①～④は外来のノイズであり、送信源と同期を取ったスタッキングや、送信電流の増加、あるいは測定時間をずらすなどによって、ある程度は解決できる。⑤と⑥はこうした方法では解決できない問題で、これらの制約に耐えられる探査手法を選定、開発して行く必要がある。⑦と⑧は測定する側の問題で、電気設備に関する通産省令61号や、電波管理法に準拠して対策を講ずることが可能である。

切土のり面で電気・電磁探査を実施する場合は、電磁波、地電流、振動などのノイズに対して充分なS/Nが確保できる。なお、地表の限られたアクセスに対して適用できる探査手法を選定し、さらにそれらの能力や限界、改良すべき点を明確にしておく必要がある。

電気探査法として多くの手法があるが、SP法のような自然に存在する電場を測定する方法は、ノイズのため測定が困難であり、また、流電電位法のように地表での電位分布を細かく測定する手法も、地表のアクセスの点で測定が困難になる。さらに、IP法は、粘性土と砂質土の区別などに有効であるが、ノイズの多い環境でIP効果を精度良く測定することは難しい。比抵抗法は、測線の制約などがあるが、デジタル化した測定とスタッキングやタルフィルタ処理によってS/Nの良いデータを得ることが可能である。

電磁法探査で、MT法、VLF法のような自然電磁場を測定する手法は、ノイズの点で実施は困難である。また、人工送信源を利用するCSAMT法も地表付近の異常に敏感であり、かつ送信機を充分に離れた所に設置する必要から、良好なS/Nデータを得るのは難しい。TEM(TDEM)法は、地上に置いたコイルだけで測定できるため、舗装などに影響されず、また地表付近の複雑な構造の影響も時間とともに小さくなる。

比抵抗法やTEM(TDEM)法は、ともに水平多層構造を前提にしての解析が主流である。近年は、有限要素法や積分方程式法などの2次元・3次元解析プログラムも開発されており、積極的に利用して行く必要がある。比抵抗法では、浅い部分の影響が電極間隔を大きくしても残るため、はぎ取り法のような手法や空間フィルター処理技術の開発も必要となる。

地表の電磁場の測定結果から、地下の電磁場を順次計算し、地下構造を積極的に図化する手法も取り入れて行くことも必要である。対象となる地盤の力学的な特性は、比抵抗だけで直接結び付けるのは困難であるが、弾性波速度と比抵抗を用いた複合解析によって種々の物性値(体積含水率など)を求める方法の採用も重要なとなる。また、多数のデータを蓄積してデータベース化し、より有効な活用が可能となるものと考えられる。

以下に、適用の可能性が高い比抵抗および電磁探査(特にTEM(TDEM)法)について、検討結果を述べる。

1) 比抵抗

大地に電流電極を設置し、直流か数Hz程度の低周波の電流を流し、生じる電位差を地表やボーリング孔、坑道などに設置した電位電極で測定し、地下の比抵抗分布を求める手法である。電極の配置方法には、ウェンナー法、シュランベルジャー法、ダイポール・ダイポール法など多くある。電極間隔が小さいときは浅い部分の、大きくなると深い部分の見

掛け比抵抗を捕らえることができる。また、測定法には、電極系を中心から左右に展開して、ある地点での深度方向の比抵抗変化を調べる垂直探査と、電極系を平行移動して横方向の比抵抗変化を調べる水平探査とがあり、高密度に探査する場合は、後者を採用する。

通常は、直線にとった測線上で電極を移動させるが、電流電極を固定して電位電極を平面的に移動させるような電極配置やボーリング孔内で電位を測定する場合もある。 S/N を良くするために、送信

電流を大きくすることや装置のシールド、商用周波とその高調波のノッチフィルターの使用、スタッキングなどのデジタル処理が必要となる。

i) 垂直電気探査

垂直電気探査には、比抵抗法、自然電位法、強制分極法（IP法）など、いくつかの種類があるが、土木分野では比抵抗法が一般的な手法として用いられている。

比抵抗法は、人工的に外部から地盤に電流を流し、このとき発生した電位分布から比抵抗を求め地盤状況を把握する手法であり、水平探査、垂直探査、2次元探査などの種類がある。ここでは、比抵抗法のうち、探査深度が深く、地層構造が水平層状構造に近い場合、深度方向の比抵抗分布を探査するのに経済的な垂直探査方式（シュランベルジャー配置をはじめとするウェンナー法など）について述べる。

代表的な電極配置であるシュランベルジャー法の電極配置の例を図3.2.3に示す。シュランベルジャー法は、中心点に対して電位電極がある間隔で固定し、電流電極だけを中心点に対して対称的関係を保ちながら順次拡大し、見掛け比抵抗を測定する方法である。

電流電極間隔が拡大されるにつれて電流 I の透入深度が増大し深部の比抵抗情報が得られる。しかし、その反面、電位電極間に誘起される電位差は次第に小さくなり測定誤差が増大することになる。そこで、電位電極間隔を適宜大きくして測定誤差が増大するのを防いでいる。

ii) 2次元比抵抗探査

1916年にアメリカのウェンナーによって2本の電流電極と2本の電位電極を使用する四極法が発明され、接地抵抗に左右されない比抵抗測定が可能になった。以来、地盤の水平構造を前提とした測点を中心に電極系を対数的に広げて電位を測定する垂直探査と電極系全体を測線沿いに移動させる水平探査が主流であった。しかし、大地は垂直方向にも水平方向にも変化していることから、1次元解析では十分とはいえない。今日のコンピューター技術の発達と新しい解析理論や計算手法によって、任意の比抵抗構造の見掛け比抵抗分布が容易に計算できるようになり、2次元比抵抗探査(高密度電気探査)が主流となった。探査深度は電極の配置法と電極間隔によって異なる。通常、測定に用いられる2極法は、

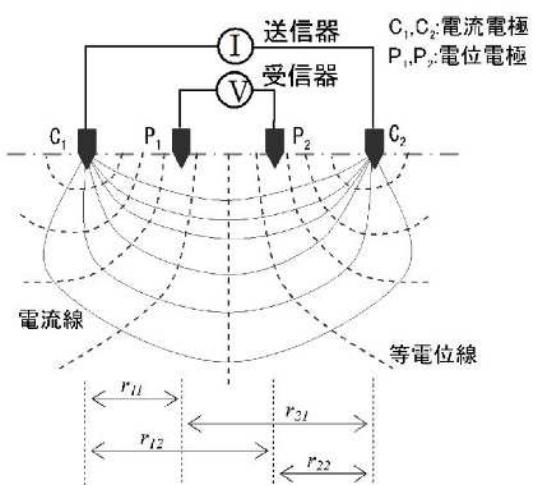


図 3.2.3 比抵抗法の基本原理 ¹⁾⁵⁾

測線内の電流と電位の電極間隔が見掛け深度にあたる。

観測方法は解析深度、作業効率の点から電極配置は通常2極法を用いられる。2極法電極配置(*pole-pole*法)は、電流を探査深度の10倍ほどの距離に離した遠電極(*C2*)と測線内の電極(*C1*)の間に流し、電位もまた探査深度の10倍ほどの距離に離した遠電極(*P2*)と測線内の電極(*P1*)の間で、見掛け比抵抗を測定する方法である(図3.2.3)。電流電極を固定し、電位電極の間隔を拡げながら水平方向に移動して観測して、データを取得する。図3.2.4は見掛け比抵抗の断面の作成方法である。実際の展開作業は設定した測線に一定間隔で電極棒を設置する。各電極棒と電気探査器の間を、テクアウトケーブルおよびターミナルボックスで電気探査器(デジタルスタッキング型)と接続する。通常は、2.5~10 m間隔で15成分または20成分のテクアウトケーブルを複数用い、最大70電極が接続する。測定本部の作業員は、遠電極、測線内電極の接続と接地抵抗を確認、電気探査器を調整して測定作業に入る。通電に際してはS/N比を向上させるために、できるだけ大きな電流を流す。一つの電流(*C1*)電極に対して電位(*P1*)は最小で10、最大で30電極分のデータを取得していく。電極間隔×電極数が探査深度となる。ターミナルボックス上で電極を切り替えながら測定された電流、電位、自然電位データは、現場にてノートPCに抵抗値の減衰曲線を確認しながら収録する。

現場においてノートPCへ収録した測定データのファイルは、表計算ソフトなどで所定のフォーマットに編集してから、2次元比抵抗解析ソフトウェアに入力する。また、遠電極の座標、地形データなど一定のパラメータを入力する。解析プログラムは、実測されたデータの値に最も近い理論値を与える地下比抵抗分布モデルを最小2乗法により決定する。いわゆる逆解析の手法を用いる。まず、計測データに最小2乗法による地形補正を行い、図3.2.5に示すように、地下を複数の層と複数の矩形(菱形)ブロックに分割する。次に、そのブロックの各比抵抗が実地に計測した見掛け比抵抗値と合致するように実測値と

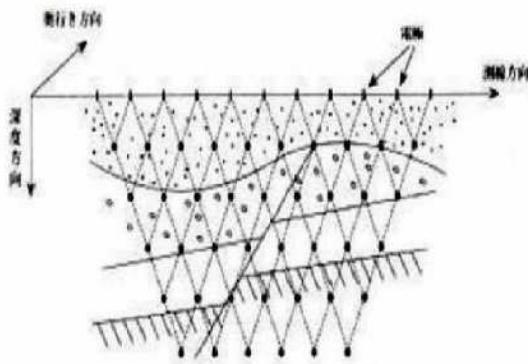


図 3.2.4 高密度電気探査の概念図^{1), 5)}

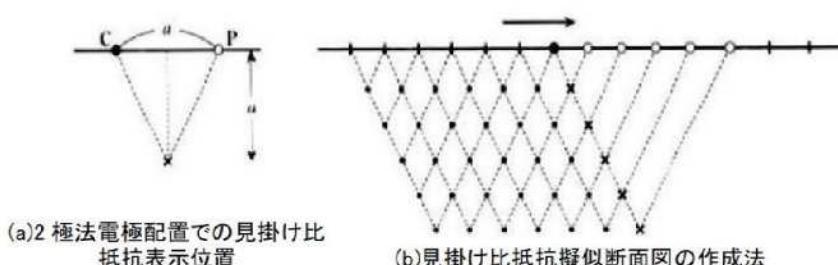


図 3.2.5 見掛け比抵抗の断面図の作成方法^{1), 5)}

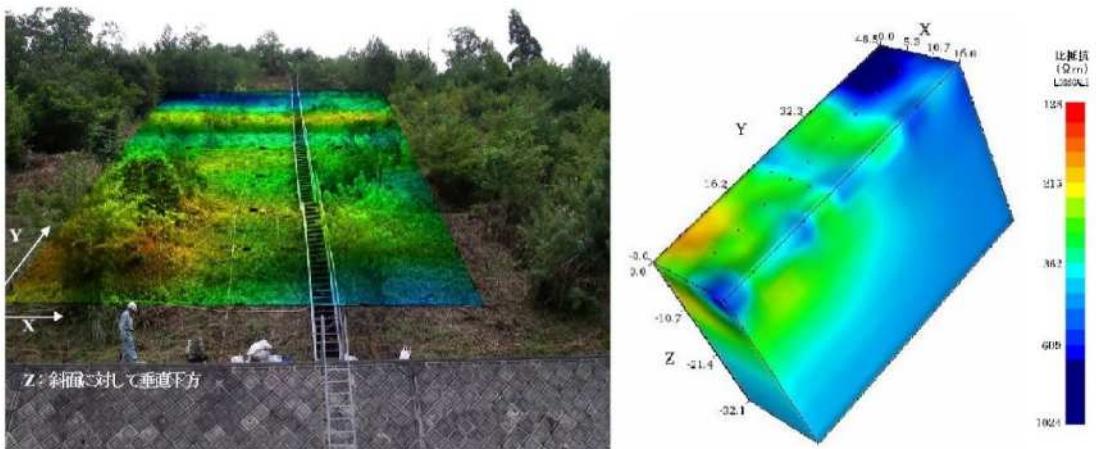


図 3.2.6 舞鶴東 IC A ランプ切土のり面における 3 次元比抵抗探査結果

理論値の残差を縮める反復計算を実行させ、一定の条件の下に収束させて解析結果を得る。複数の測線であれば、比抵抗断面図を3次元的に表現することが出来る。その一例として、舞鶴若狭道舞鶴東ICで実施した3次元比抵抗探査の結果を図3.2.6に示す。

2) 電磁探査^{5),8)}

電磁探査は、地層を構成する岩石の種類によって電磁波(電波)に対する反応が異なる性質を利用し、地質、地下水・石油・天然ガス・石炭・鉱石などの地下資源および断層・褶曲などの地質構造を調査する探査法である。電磁探査は、表3.2.3に示すように、種々の方法があり、そのうちの代表的な探査法の特徴と適用方法を表3.2.4に示し、その原理概念図を図3.2.7に示す。電磁探査で用いる電磁場変化の周波数は0.001～100 kHzであり、電磁場の変化から岩石中で誘導される2次的な電磁場を観測する。高導電率(=低比抵抗)の地質構造の検出に優れ、高い周波数ほど分解能が高く、探査深度は浅い。調査効率の良さを活かして、概略調査段階に適用されることが多い。しかし、ノイズ発生源近傍や、ノイズ発生源が密集する市街地には適用できない。

電磁探査の主な探査方法には、下記の方法がある。

- ① *MT(Magneto-Telluric)・AMT(Audio-frequency Magneto-Telluric)*法：磁気センサーと電気センサーで自然の地磁気と地電流を観測して地下深部の地下構造を探査する。
- ② *CSAMT(Controlled Source Audio-frequency Magneto-Telluric)*法：人工的に発生させた電磁波に対する地層の反応を磁気センサーと電気センサーで観測し、地下構造を探査する。
- ③ *TEM(Transient Electromagnetic)*法：人工的な磁場が消失した時の磁場の経時変化を観測して、地下構造を探査する。
- ④ ループ・ループ法(スリングラム法)：送信ループから発信した交流磁場に対する地下での反応を受信ループで捉えて、簡便に地下を探査する。
- ⑤ *VLF(Very Low Frequency)*法：常設の送信源(潜水艦と通信するための巨大アンテナ施設から送信される電波)を利用して、受信器を持ち歩きながら地下を探査する。

表 3.2.3 電磁法探査の分類と測定周波数・時間範囲^{1),5)}

測定量	信号源	名称	測定周波数・時間範囲
電場 磁場	受動信号	MT	0.001~300 Hz
		地磁気脈動 ELF-MT	8~40 Hz
		雷共振 AMT	1~20 kHz
		送電線 PLMT	50~600 Hz
	VLF 送信局	VLF-MT	15 k~30 kHz
	人工信号	CSAMT	1~10 kHz
磁場	受動信号	超高周波帯域 CSMT	1 k~100 kHz
		VLF 送信局 VLF-EM	15 k~30 kHz
		ループ・ループ (HLEM)	100~50 kHz
	周波数領域	導電率計 (GCM)	1 kHz前後
		空中電磁法 (HEM)	100~100 kHz
	人工信号	TDEM (TEM)	数sec~数usec
		空中電磁法 (AEM)	数 msec~数 10 usec

表 3.2.4 代表的な電磁法探査の特徴と適用方法^{1),5)}

手法	周波数 (Hz)	可探深度 (m)	測点間隔 (m)	測定時間 (分/点)	適用調査	特徴
MT 法・AMT 法	10 ⁻³ ~10 ⁴	10 ³ ~10 ⁴	10 ² ~10 ⁵	10 ² ~10 ⁴	断層・温泉 山岳トンネル	深部探査に適 花崗岩地帯
CSAMT 法	10 ⁻¹ ~10 ⁴	10 ³ 程度	50~10 ⁴	30~60	断層・温泉 山岳トンネル	花崗岩地帯不利
TEM 法	10 ² ~10	10 ² ~10 ³	50~0	5~30	断層・温泉・地下水 山岳トンネル・埋設物	測定法に多くの バリエーション
空中電磁法	10 ² ~10 ⁵	10 ² 以下	5 程度	1 以下	斜面・断層・温泉 山岳トンネル	広域・急傾斜地に適
ループループ法	10 ³ ~10 ⁵	10~10 ²	5~10 ²	5 程度	地下水・浅層地盤 埋設物	2~3 名で測定可
VLF 法	10~10 ²	50 以下	5~10 ²	5 程度	地下水・浅層地盤 埋設物	1 名でも測定可

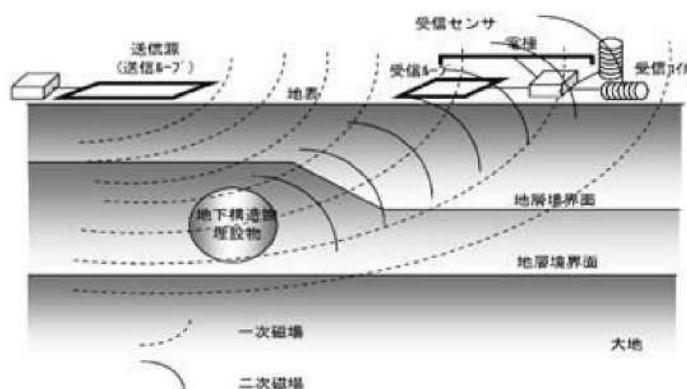


図 3.2.7 電磁法探査の基本原理の概念図⁵⁾

TEM(TDEM)法は送信電流を遮断した後に生じる渦電流の地下への浸透と減衰の状態を、時間の関数として測定して、地下の比抵抗を求めるもので、測定中に1次磁場がないという大きな特徴がある。200 m程度までの探査では、磁場センサーの周波数帯域を広く

し，サンプリング周波数を速くするなどの改良が必要である。 S/N を良くするために送信電流を大きくするか，スタッキングやフィルター処理などが必要になる。*CSAMT*法と違って送受信器間隔を小さくできるため，信号は大きくなり，ダイナミックレンジの大きな測定器を使用することが重要となる。

(3) ボーリング孔間でのジオトモグラフィ

地盤内部の地盤構造や物性値の分布を詳細に把握する技術として，ジオトモグラフィ技術が注目され，国内外において研究開発が進められている。現在，ジオトモグラフィ技術として実用化段階にあるものは，弾性波トモグラフィ，比抵抗トモグラフィおよびレーダートモグラフィの3手法である^{1),5)}。

ジオトモグラフィ技術の土木分野における適用としては，弾性波トモグラフィでは，地下空洞周囲の緩み領域の評価，地盤構造の把握，変質帶の分布などの調査に適用し，比抵抗トモグラフィでは，断層・破碎帶の連続性や岩盤内部の水理地盤学的特性の分布などの調査に適用している。実施例は少ないが，レーダートモグラフィは，高比抵抗の岩盤内の割れ目や埋設物・空洞などの調査に用いられている。

以下に，ジオトモグラフィの各手法の特徴と今後の技術課題について述べる。

1) ジオトモグラフィ手法の特徴

i) 探査対象領域

ジオトモグラフィ技術の特徴は，数少ないボーリング孔を用いて，ボーリング孔間を対象領域として地盤構造や物性値の分布が詳細に把握できることである。ボーリング孔間距離は，弾性波トモグラフィおよび比抵抗トモグラフィは50 m程度であり，レーダートモグラフィでは，比抵抗の小さい所では透過能力が低下する。現状の技術レベルでは20 m以下である。なお，深さ方向は，各手法ともに，計測機器類の能力や装置の規模によって決まるが，切土のり面などでは比較的浅所を対象とするため，特に問題はない。

ii) 調査すべき地盤情報

地層・岩質の情報は，それぞれの手法とも地層の連続性および岩質・地層対比に威力を発揮する。また，レーダートモグラフィは，岩盤内の亀裂ゾーンの把握や地下埋設物・空洞の検出にも威力を発揮する。地層の空隙率や密度などの物理的性質の把握は，地盤の比抵抗が土質・岩質の差異や風化・変質の程度，体積含水率の変化により極めて大きな範囲で変化することから，3手法の中では比抵抗トモグラフィが用いられ，体積含水率の情報を間接的に得ることができる。また，地層の強度特性や変形特性などの力学的性質は， S 波を利用する弾性波トモグラフィによって，静的・動的な強度特性や変形特性の情報を得ることが可能である。地層の水理学的性質の把握は，比抵抗トモグラフィおよびレーダートモグラフィが優れており，特に水頭の検出には有効である。また，比抵抗トモグラフィでは，低比抵抗トレーサ(塩水)をボーリング孔から注入して，注入前後の比抵抗分布の変化より地層の透水性を把握することも可能である。

iii) 探査の対象となる地盤条件

ジオトモグラフィの対象地盤は，比抵抗トモグラフィでは土質地盤および岩盤での測定実績があり，あらゆる地盤に対して測定可能である。弾性波トモグラフィやレーダートモグラフィは，岩盤での実績が多く，土質地盤での実績は少ない。レーダートモグラフィの

場合は、比抵抗の小さい土質地盤などでは透過能力が低下する。また、弾性波トモグラフィの場合は、土質地盤へ適用する場合は波長が短く、高分解能探査が可能な *S* 波を用いることが望ましく、*P* 波では精度が低下する。

探査条件の一つである保孔において、鋼製ケーシングを用いる場合は、比抵抗トモグラフィでは電流がケーシングを伝わり地盤に流れないことから測定が不可能である。ただし、樹脂製の場合は、適切な開孔率を有するストレーナを切れば測定可能である。レーダートモグラフィの場合も、ケーシングが樹脂製の場合は問題がないが、鉄製の場合は、電波が遮蔽されて透過できなければ測定不可能である。一方、弾性波トモグラフィの場合は、ケーシングが鉄製や樹脂製の場合でも、大きな問題はない。

切土のり面背後の適用条件は、ボーリング孔が削孔できる場所が確保されているという条件下では、3 手法ともボーリング孔内にソースおよびレシーバを配置することから考えると、地表から行う弾性波探査、電気探査、地下レーダーに比べ、電気・磁気ノイズや音響・振動ノイズの影響は小さいと考えられる。ただし、弾性波トモグラフィでは、通行車両などの音響・振動ノイズの影響を受ける可能性が大きい。

法的規制では、弾性波トモグラフィで振源として火薬や高圧ガスを使用する場合は各保安法に、レーダートモグラフィでは電波法に、それぞれ準拠する必要がある。

2) ジオトモグラフィにおける主要な技術課題

ジオトモグラフィ技術の今後の技術課題としては、特に高速道路沿いの斜面への適用という観点から、以下に示す項目が考えられる。

i) 弹性波トモグラフィ

弾性波トモグラフィの測定模式図を図3.2.8に示す。深度が深くなり、調査対象領域が大きくなれば、多チャンネルを同時に測定できるシステムが必要となる。また、高速サンプリングが可能な広域ダイナミックレンジのデジタル処理装置やエネルギーの大きさや指向性を制御できる振源の開発が必要である。*P* 波初動のほかに、*S* 波成分やアフターフェーズを利用したトモグラフィ処理の開発が期待される。

土木工学分野では、地盤の力学的特性を捉えるには、地盤の弾性波速度を重要な指標としている。従来からの屈折法弾性波探査に比べて、より詳細な地下の速度分布が再構成できる弾性波トモグラフィは、山岳地帯でのダムサイトやトンネルなどの地盤調査法として採用されるようになってきた。この場合、震源として雷管や爆薬を比較的容易に使用できるが、この技術を高速道路に沿う斜面の地盤調査法として活用するためには、雷管や爆薬に代わる震源の開発が急務といえる。特に、泥岩の場合、*S* 波速度が地盤の強度特性と密

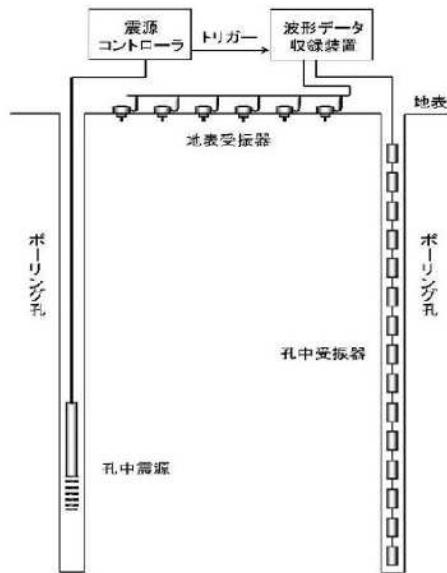


図 3.2.8 弾性波トモグラフィの模式図 ^{1),5)}

接に関係づけられることから、*S*波を用いた弾性波トモグラフィが重要な開発課題となる。

この場合、*S*波用の孔内震源の開発と同時に、*S*波を適切に受振する多チャンネルの孔中受振システムの開発が重要となる。また、今後は弾性波の初動の走時や振幅に着目し、地盤の速度あるいは減衰度の分布を再構成するだけでなく、記録内に含まれる反射波などを精度良く抽出して地下構造のイメージを再構成する技術(*offset VSP*的な解析技術との結合)も重要な開発テーマとなる。

ii) 比抵抗トモグラフィ

比抵抗トモグラフィの測定模式図を図3.2.9に示す。含水率など物性値分布の把握に有効な複素比抵抗トモグラフィの開発が望まれる。比抵抗トモグラフィは、地下の詳細な比抵抗分布を再編成することによって、地盤構造や地下水特性が把握できる探査法である。弾性波トモグラフィと同様、ダムや地すべり、あるいは地下水問題における山岳部の地盤調査法として採用されるようになっている。地下の3次元構造の影響を大きく受けた電位データを測定することから3次元構造をターゲットとした測定法や解析法が開発課題となる。

上記のいずれの手法とも、原位置での測定結果の再構成断面は、断面のセル分割方法、初期値の設定、モデルの修正法、あるいはソースおよびレシーバの配置の制限などに起因して、真実の内部イメージを再構成することが困難な場合もある。したがって、真実の内部イメージをより確実に再構成するために、ハード面の測定機器の改良・開発を行い、またソフト面での改良・開発も行う必要がある。

ジオトモグラフィ技術の斜面への適用においては、今後解決すべき技術的開発課題が残っているが、数少ないボーリング孔でボーリング孔間の対象領域の地盤構造や物性値の分布状況を詳細に把握することを特徴としており、3手法とも斜面の地盤調査技術への適用性は非常に高く、今後さらに改良あるいは開発すべき調査技術として位置付けられる。

比抵抗トモグラフィの実施例を図3.2.10に示す。この事例は、中国自動車道42.6KPの切土のり面であり、モルタル吹付け工によって全面覆われ劣化が進んでいる。地質は砂岩・礫岩と泥岩の互層からなり、地下水は各砂岩・礫岩に帶水している。泥岩は経年変化によってスレーキングが進行・粘土化し、この粘土化した箇所から崩壊が発生した。対策工検討のために、調査ボーリングや比抵抗トモグラフィなどの地質調査が実施され、泥岩は低

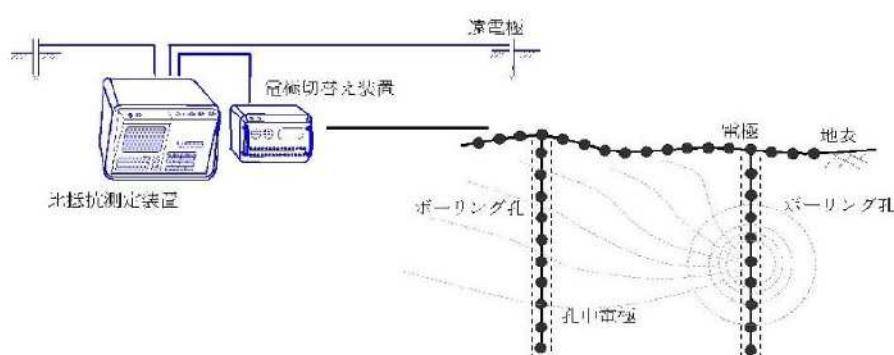


図 3.2.9 2次元比抵抗トモグラフィの測定模式図 ^{1), 5)}

(2極法配置の例)

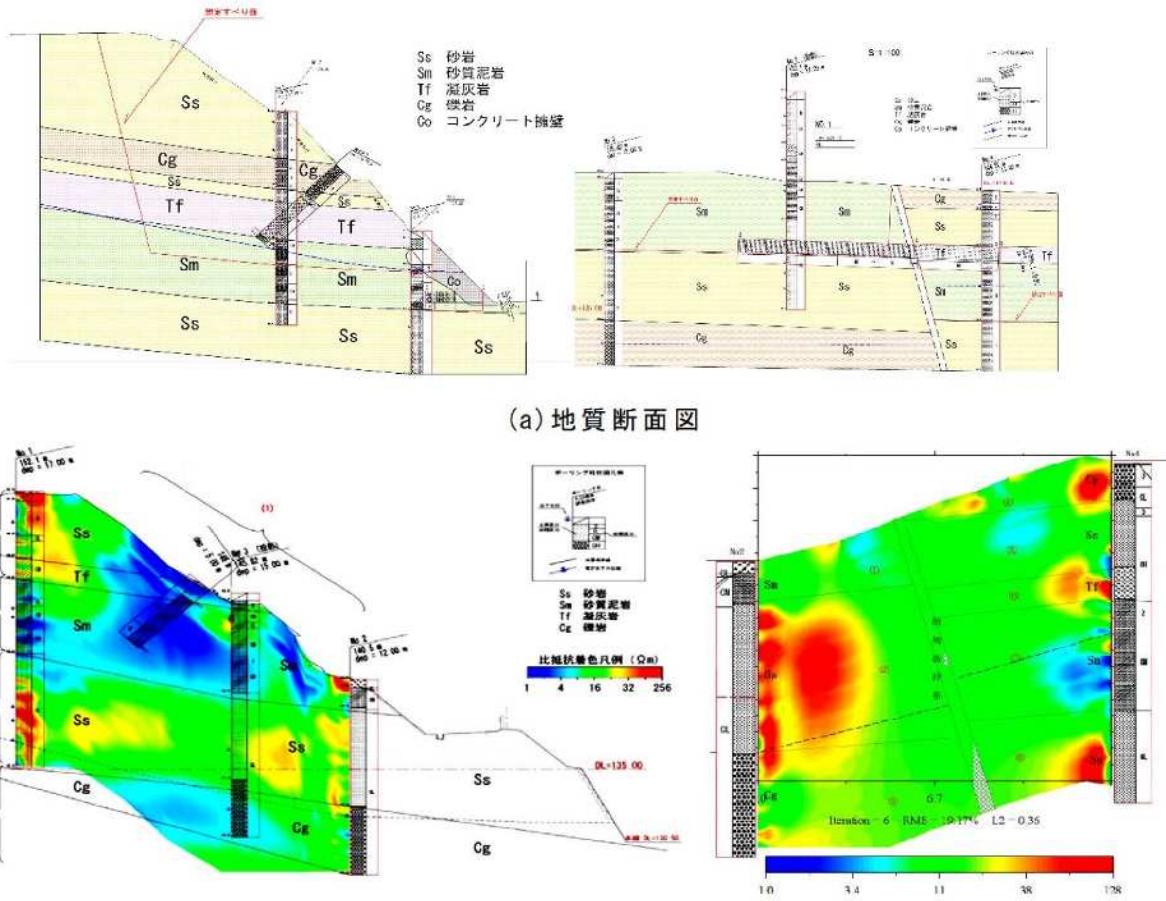


図 3.2.10 切土のり面における比抵抗トモグラフィの事例

(中国自動車道 42.6KP 断層とすべり面の位置確認)

比抵抗、砂岩・礫岩は高比抵抗を示す。調査結果を基に修正設計を行い、現在グラウンドアンカー工による対策が施工されている。

3.3 空中物理探査の概要

物理探査は地盤の物理特性を非破壊的に測定し、地盤情報を間接的に探査する手法である。このうち、大地と非接触で測定が行える物理量については、測定器をヘリコプターなどに搭載し、上空から探査を行うことが可能であり、これらは総称して空中物理探査と呼ばれ、表3.2.2に示したように、空中電磁法探査をはじめとし、空中重力探査、空中磁気探査、空中放射能探査、光学(MSS)・マイクロ波(SAR)リモートセンシングなどがあり、赤外線熱画像による探査も行われている^{6)~15)}。

3.3.1 空中物理探査の概要と技術動向

空中物理探査は、もともと広域的な地質構造把握や資源探査を目的に開発されたが、近年では測定器の改良とともに、GPS測位技術およびセンサーの姿勢制御技術の進歩により探査精度が向上し、土木分野における適用事例も増加している。ここでは、各探査手法の概要と技術動向について述べる^{6),8),11)~13)}。

(1) 空中電磁法探査

1) 概 要

空中電磁法探査は、上空から発信した電磁波により地盤中に誘導される2次磁場を測定し、地下の比抵抗構造を求める手法である。日本では主にヘリコプターによる探査システムが運用されており、鉱床探査手法の一つで、広い地域の地下深部に潜在する塊状硫化鉱体などの電導性鉱体を空中から迅速かつ低コストで探知することを目的として開発され発展してきた。空中電磁法探査の国際的な適用は、現在も鉱床探査が主流である。1970年代に金属鉱業事業団が試験導入し、1978年には菱刈鉱山の発見につながる比抵抗異常を捉えるなどの成果上げた。その後、1990年代に日本国内では、建設省土木研究所(現(独)土木研究所)との官民連携研究によって、空中電磁法探査の測定機器仕様などの変更により地盤浅部の分解能を高めるための高周波数システムを実現し、土木地質分野への適用が可能となった。現在、国内で稼働している空中電磁法の測定システムは、従来の鉱床資源探査用(深部)システムと土木地質調査用(浅部)システムの2種類があり、土木地質調査用システムでの土木地質分野(地すべり、トンネル、道路など)で地質調査手法として活用されている。地盤の比抵抗は、体積含水率および粘土分含有率によって大きく変化し、脆弱地盤として問題となる地すべりと崩積土、熱水変質部、断層破碎帶などは一般に低比抵抗を示すことが知られている。

このため、空中電磁法探査は低比抵抗異常を危険斜面指標として広域的な斜面の危険度区分調査や道路のルート選定に適用されている。また、平成16(2004)年新潟県中越地震被災地では、現地立入調査が困難で、積雪期を控えて時間的余裕のない状況下で、非接触・高能率の特性を活かして緊急地すべり斜面調査として適用された。空中電磁法探査による探査結果は、周波数ごとの見かけ比抵抗分布として取扱われることが多いが、最近では3次元逆解析手法が提案され、地形を考慮した定量的な解析が可能になりつつある。

空中電磁法探査についての詳細は、第4章に記載する。したがって、ここでは概要にとどめる。

2) 探査方法

空中電磁法探査は電磁探査装置を航空機や有人ヘリコプターに搭載、ないし曳航して調査する探査手法で、広域において電導性鉱床を迅速に探査する目的で開発され、発展してきた。土木分野では、送信・受信コイルを収納したバードを有人ヘリコプターで曳航し、多周波数・多重コイルを用いた方式が用いられている。空中電磁法は、電気探査・電磁気探査法と同じく土壤・岩石の電気比抵抗(抵抗率: 1 m^3 の電気抵抗に相当)を求め、地質状況を判定する手法である。得られた比抵抗情報は、風化層や粘土化変質帯などの地質脆弱部を探査するのに優れているほか、地下水に関する情報も反映している。

通常の電気探査では、一対の電流電極を用いて地表から地下に直流電流を流し、それによって生ずる電位差を別対の電位電極で測定して地盤の比抵抗分布を求めている。これに対して、有人ヘリコプターを用いた空中電磁法は、複数の周波数により空中から人工的に発生させた交流磁場が地中を透過する際に生ずる電磁誘導現象を利用して、地盤の比抵抗分布を求めている。

測定システムでは、1周波数毎に交流磁場の発生とそれによる地盤の2次磁場を計測するための送信・受信コイル対を5~6組(5周波の場合; 137.5 kHz, 27.5 kHz, 5.5 kHz, 1.1 kHz および 220 Hz)保有し、高周波数で地盤浅部、低周波数で地盤深部の比抵抗情報

を同時に取得している。また、データは毎秒 10 サンプリングであることから、 30 km/h の場合、 0.8 m 毎に 5 深度のデータを同時に取得している。このように、有人ヘリコプターを用いた空中電磁法は、周波数の異なる 5 対の送信・受信コイルを用いて、空中から大地に非接触で、広域を非常に高密度で測定している。

3) 探査原理

ヘリコプターを用いて上空数 10 m に配置した電磁コイル(送信・受信コイル対)のうち、送信コイルに交流電流を通じると、コイルの周辺に交流磁場(1次磁場)が発生する。この交流磁場が地盤中を通過するときに、地盤中にはこの磁場を打ち消すように渦電流が誘起され、これが別の交流磁場(2次磁場)を発生させる。2次磁場の強さは地盤の比抵抗と負の相関があるので、1次磁場に対する2次磁場の割合を受信コイルで測定することにより、磁場が透入した深度までの地盤の平均的な比抵抗が測定される。

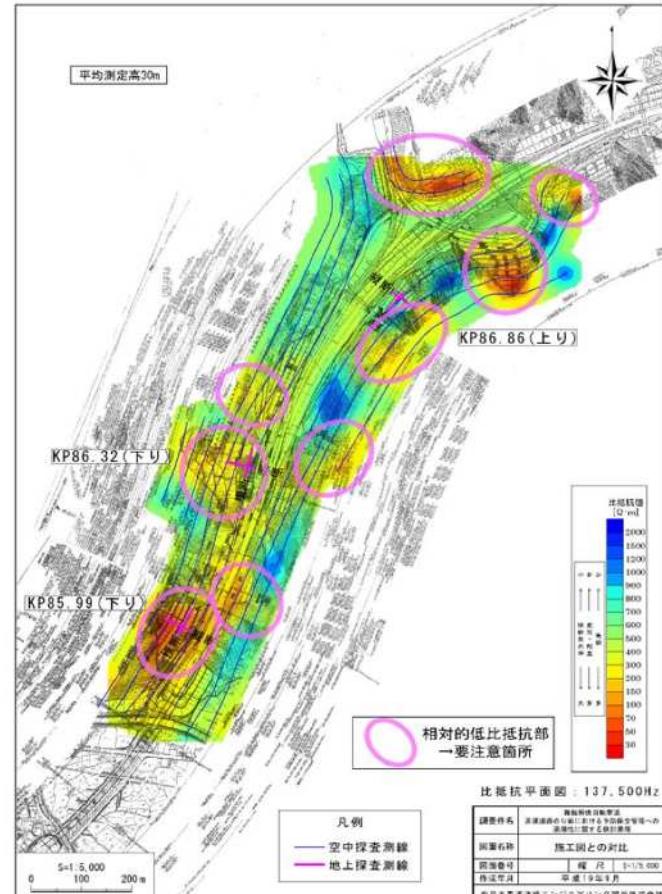
交流電流の周波数が高くなるにつれて、磁場の透入深度が小さくなるので、同時に複数の周波数を用いて測定し、その各々の周波数での平均比抵抗を求めて解析することにより、地盤の比抵抗断面図を描くことができる。図 3.3.1 に解析例を示す。

4) 探査深度

送信コイルから発信された電磁場が地盤へ広がって行くが、その透入深度は、測定周波数(f)ばかりではなく、地盤の比抵抗(ρ)の関数にもなっており、実際には両者の比の平方根($\sqrt{\rho/f}$)に比例する。つまり、高周波数では地盤浅部の、低周波数では地盤深部の比抵抗情報をそれぞれ取得できる。また、同一の周波数であっても、地盤の比抵抗が低いところでは浅部の、地盤の比抵抗が高いところではより深部の比抵抗情報が取得できる。したがって、各周波数から得られる地盤の比抵抗値は、各探査深度区間での平均比抵抗分布を測定することになる。

得られた比抵抗データを解析し、見掛け比抵抗分布平面・断面図、2層構造解析断面図、換算弾性波速度断面図などの図面を作成し、体積含水率や粘土分含有率を推定するとともに、現地踏査結果を踏まえて地盤構成を推定する。図 3.3.1 は、舞鶴東 IC の高速道路のり面での解析事例で、比抵抗分布と要注意箇所を示す。

(2) 空中磁気探査



(舞鶴東 IC における比抵抗分布と要注意箇所)

図 3.3.1 空中電磁法探査の解析例

空中磁気探査は、地質分布の判定、変質帯の抽出、断層・破碎帯などの断裂構造の探査、貫入岩・岩脈などの識別に用いるため、空中で地球磁場を測定して地盤の磁気強度分布を求める方法である。解析例を図3.3.2に示す。

1) 概要

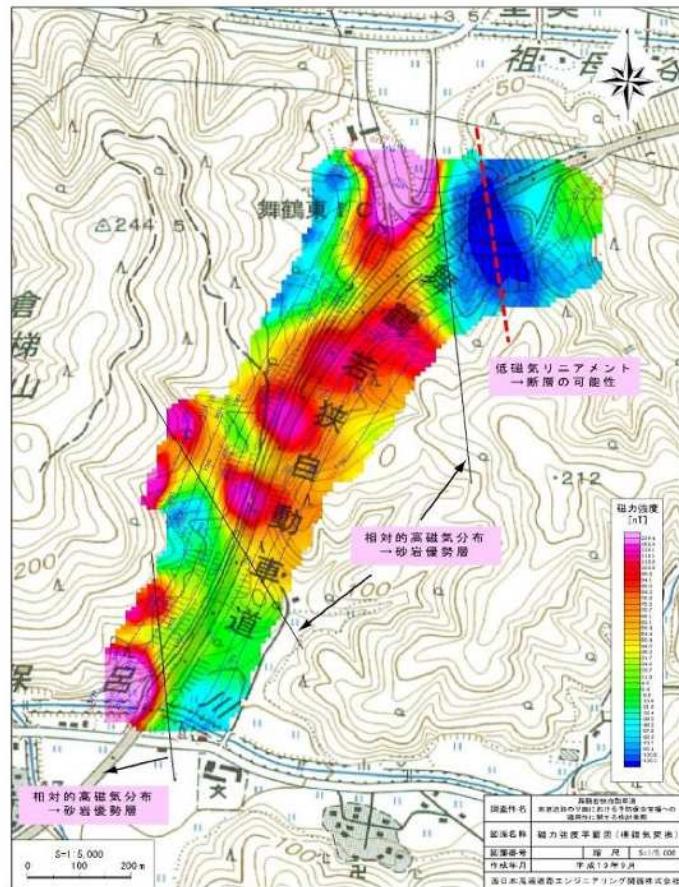
磁気探査の歴史は、岩石の残留磁化や磁化率の違いによる標準磁場からの差を磁気異常として測定し、地下構造や地熱分布の推定や金属埋設物探査を行う手法として、日本では地質調査所(現産業技術総合研究所)、新エネルギー総合開発機構(NEDO)などにより、全国の陸域および周辺海域を網羅する空中磁気探査が実施され、その成果の利用が可能である。最近では、探査区域ごとのデータの再基準化とデータベース化が検討されている。測定密度を上げた高分解能空中磁気探査は、地震・火山災害調査に用いられ、平野部地下の伏在断層や火山岩の熱水変質部が検出されている。

空中磁気探査で求められる磁性は、空中電磁法探査が対象とする比抵抗とは独立した物理量であり、互いに干渉しない。このため、空中電磁法探査により得られる地盤の比抵抗と空中磁気探査により得られる地盤の磁性とを併せて検討することで、土木地質的検討の精度向上が期待できる。また、磁気強度を測定する磁力計は、非常に小型かつ軽量である。こうした理由から、空中電磁法探査と併せて空中磁気探査が実施される場合が多い。

2) 探査原理と解析内容

岩石は、磁鉄鉱のような強磁性物質の含有量に応じた磁性を持っており、国際標準磁場(IGRF)によって誘発される誘導磁化や岩石固有の残留磁化を発生させている。国際標準磁場とは、巨大な磁石としての地球が生成する磁場をさし、位置がわかれれば算出できる量である。一方、地球表層部における岩石の磁気的性質(磁化率)の違いに基づく局所的な磁気異常がある。これは、IGRFに比べて非常に小さいが、測定された地球磁場からIGRFを差し引くことにより「磁気異常」として検出される。IGRFは伏角を有しているために、誘発される誘導磁気異常は異常部の直上には現れない。そこで、異常部の直上に磁気異常が現れるように、測定された全磁力値を伏角90°の全磁力値に変換する操作(極磁気変換)を行い、極磁気変換磁気強度分布図を作成する。

一般に、岩石は磁性をもっており、岩石の磁気的性質は、残留磁化や誘導磁化によって特徴づけられる。残留磁化とは、永久磁石のように外部磁場とは無関係に岩石そのものに



(舞鶴東 IC における磁気強度分布と地質構造)

図 3.3.2 空中磁気探査の解析例

常に存在する磁化成分である。一方、誘導磁化とは、岩石の帶磁率と外部磁場の積で表されるもので、こちらの方は外部磁場がなくなると消失する。一般に残留磁化と誘導磁化の和を磁化と呼び、磁化の強さは岩石の種類によって異なり、平均的には、玄武岩 > 安山岩 > 石英安山岩の順に磁化が小さくなる傾向が見られる。また、磁化には温度依存性があり、一般に高温になるほど岩石の磁化は小さくなり、磁化が完全に失われる温度はキュリーポイントと呼ばれていて、代表的な強磁性鉱物である磁鉄鉱のキュリーポイントは約 580 °C である。磁化の温度特性は磁性鉱物の種類と内部構造によって異なるが、キュリーポイントを境として磁化が 100 % から 0 % まで一気に減少するというものではなく、温度の上昇とともに徐々に磁化が失われる場合が多いので、この性質を利用すると火山の地下における温度異常を捉えることができる。

磁気探査は岩石や埋設物の誘導磁化を利用した物理探査で、プロトン磁力計やフラックスゲート磁力計などを使って地磁気を測定し、磁鉄鉱・チタン鉄鉱などの鉱床の位置や地質構造を推定したり、火山の地下構造や地殻構造の調査などにも広く活用されている。また、磁力計による測定は地上だけでなく、航空機や調査船によって空中や海上でも行なわれる。磁気探査は、地下構造の探査以外にも、不発弾などの鉄製埋設物探査や遺跡探査にも利用されている。図 3.3.2 は、舞鶴東 IC の高速道路のり面での解析事例で、磁気強度分布から粘土化が進んだ粘板岩と粘土化が進んでいない砂岩の地質分布の違いが読み取れる。

(3) 空中重力探査⁸⁾

1) 概 要

重力とは重力加速度(絶対重力値)で 9.8 m/sec^2 、単位はガル($1 \text{ gal} = 10^{-2} \text{ m/sec}^2$)であり、地表で観測される重力は基本的には万有引力をさす。ジオイドの決定や地殻構造、地殻変動、鉱床、地震断層分布などの調査のために、重力の地域的な変化を $1.0 \sim 0.01 \text{ mgal}$ 程度と細かい精度が要求されている。重力探査の歴史は 1921 年に潜水艦上での重力測定、1959 年に陸上・海上・空中重力計の開発、1970～1980 年代にヘリコプターによる重力測定、1980～1990 年代に固定翼機による重力概査などがその主なものである。その後、1990 年代から今日にかけて、各国で様々な空中重力測定の技術開発がなされている。重力センサーは従来の加速度計だけでなく、慣性センサー、重力偏差センサー、絶対重力センサーなどのセンサー開発の挑戦も行なわれ、また陸海空のみならず宇宙からの重力測定も行われている。重力データのギャップは重力の精度の悪さ以上に実質的には悪影響があり、ジオイド、地下構造、地殻変動などの探査の障害であり、空中重力測定はこの重力データのギャップを迅速に埋める手段となっている。

ヘリコプターなどは GPS に従って正規橈円体面からの高さ he を一定に保ちながら飛行することによって、橈円体面上の正規重力 γ_e との差から「重力乱れ」が得られる。ジオイド高を hg とすると航空機のジオイドからの高さは $(he - hg)$ となり、これからフリーエア補正を行った重力 ghg よりフリーエア重力異常が得られる。しかし、空中重力と地上・海上重力との比較を行うときは、その場所のジオイド高を考慮する必要がある。重力探査によって任意の場所で重力を測定し、基盤構造の決定、褶曲構造、潜在断層、カルデラ構造の検出や金属鉱床の分布を把握する。地層が厚く堆積している場合は、下部の地層ほど古く密度が大きく、この高密度の下部地層が褶曲によって上昇して背斜部となった場合はブーゲー異常が大きくなり、逆に向斜部ではブーゲー異常が小さくなる。

2) ヘリコプターなどを使った空中重力探査

図 3.3.3 は、空中重力探査システム(上)と断層と重力異常との関係(下)を模式的に示している。このシステムはヘリコプターに搭載された航空重力計とヘリコプターの位置を cm の精度で決める GPS システムより成り立っている。重力測定は $1/100$ 万 G の精度で測る必要があるが、航空重力計の動搖は $1/10G$ のノイズが生じる。この S/N 比 = $1/100,000$ という環境の中で精密位置変化の時間の 2 階微分により加速度ノイズを評価し、それを除去する。活断層は異質の岩盤の相接する所であり、多くの場合は岩盤の密度が異なる。図 3.3.3(下)には、密度 $2.40 g/cm^3$ の堆積岩、 $2.75 g/cm^3$ の玄武岩、 $2.67 g/cm^3$ の花崗岩が接する断層の例を示すが、断層を横切ると重力異常は $10\sim50 mgal$ 程度の顕著な変化を示す。

空中からこのような重力変化を探査することにより、陸海を問わず断層を追跡できると考えられる。図 3.3.4 は、国産航空重力計である Segawa/Tokimec 重力計 FGA-1 とその付属機器類(サーボ型加速度計など)を示し、鉛直保持は光ファイバージャイロで行われる。

3) 空中重力の測定

空中重力測定の精度は、低速低空測定では $1\sim3 mgal$ 、高速高空測定では $5\sim10 mgal$ と言われているが、地震調査などの目的を考えると、あと $\pm 0.5 mgal$ の精度向上が必要である。

そのためには、以下のような改良点が挙げられる。

- ① ヘリコプターの低空低速飛行により重力変化の振幅を増やし、短波長分解能を上げる。
- ② GPSによる 2 周波干渉測位を行い、飛行の 3 次元位置を cm 単位の精度で決める。
- ③ 重力計機器類は重力センサー部、水平安定台、光ファイバージャイロ、制御・記録部の 4 ブロックに分ける。
- ④ 空中重力測定の精度を決める要因を論じる時、重力計の各部のセッティングの自由度が欠かせないため、その自由度を広げる。

4) 重力探査の解析法

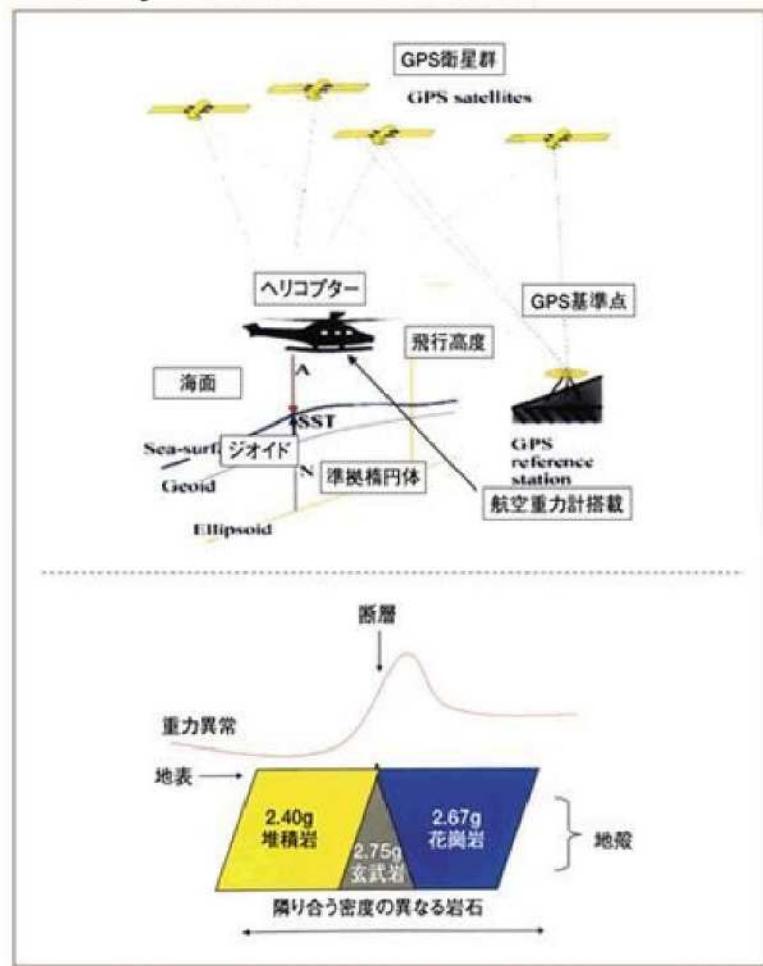


図 3.3.3 空中重力探査の概要図

空中重力探査は安価・迅速に広域の地下構造（堆積構造の範囲や堆積層の層厚、地質構造など）を把握するために採用される。また、広域的な地下深部の構造調査において、用地的・経済的理由で弾性波探査や深部ボーリングなどが十分な調査密度で行えない場合に、補完データとして空中重力探査結果を適用して3次元的な地下構造モデルが作成できる。

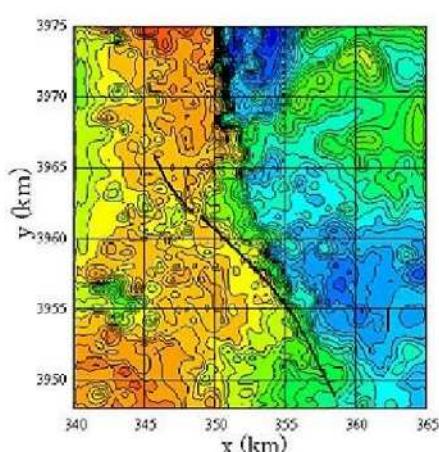
地表あるいは空中で測定された重力値に対し、観測点の緯度・標高、周辺の地形などの影響を補正し、地下の密度分布に起因する重力異常（ブーゲー異常）を求める。この重力異常データから解析対象としている深度に対応する成分を抽出するために、フィルタ処理などを行い、3次元構造解析を行って地下の密度構造モデルを求める。活断層を対象として実施した重力探査の解析例を図3.3.5に示す。図3.3.5(1)は仮定密度を 21 g/cm^3 として得られたブーゲー異常で、センター間隔は 2.5 mgal 。黒線は推定断層位置である。図3.3.5(2)は表層と基盤の密度差 0.5 g/cm^3 、均質2層モデル、3次元構造解析結果であり、重力基盤の標高 100 m である。

5) 重力偏差データの表層密度値推定方法

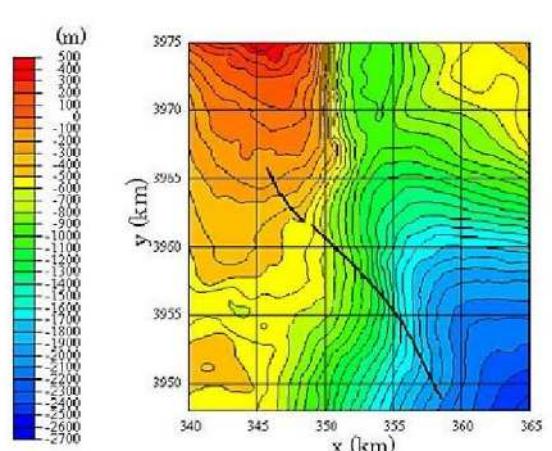
近年、空中物理探査法の発達は著しく、ヘリコプターを用いた空中重力偏差法探査データも取得されている。短時間に細かい間隔にて広範囲な測定ができ、空間的分解能が従来の地上での重力・重力偏差測定に比べ大幅に改善している。空間的高分解能データを速く取得できる空中重力偏差法は、重力探査データが地下の岩石密度差を反映していることから、深部基盤岩深度や断裂帯分布推定に利用されて



図3.3.4 空中重力探査の測定機器類



(1)重力図(ブーゲー異常図)



(2)重力基盤標高図

図3.3.5 重力探査解析例

いる。

山岳地帯における適用は、測定する重力偏差値が急峻な凸凹した地形に敏感で、また表層の密度、層厚も大きく変化するため、測定する重力偏差値に必要な地形補正值も大きく変化する。しかし、空中重力偏差法データ解析では、従来の重力探査解析で適用する一定の地形補正密度値による地形補正值計算が採用される。

測定する重力偏差値は、地下深い地層密度変化に起因する影響、表層の層厚や密度からの影響およびその他測定高度、潮汐・変動大気圧や雑音からの影響を受けていることから、地下深部の地質解釈を目的とした空中重力偏差法では、地下深部の地層密度変化に起因する影響以外の項目をデータ処理で補正する。

重力偏差値は測定点と質量異常点との距離の逆数の3乗と質量異常値の積に比例するので、標高変化が大きく表層密度の影響が大きい山岳地帯の場合は問題となる。このため平面的に高分解能なデータを取得し、表層地形、層厚や密度を加味した空間的分解能の高い地形補正值を適用して、補正後の重力偏差異常値や細かい地下深い地層密度変化を把握する。

6) 空中重力測定精度を決める要因

空中重力探査による測定精度を決定する要因として幾つかあるが、その代表的なものは、以下の通りである。

- ① 重力センサーに起因するもの：空中重力測定は一区切りの測定が比較的短時間なので、ドリフトの問題は小さい。1日 5~10 $mgal$ のドリフトがあっても、線型補正で 0.5 $mgal$ 程度の精度は保証できる。重力センサーの問題は型だけではなくて、データの読み取り方法に関係する。近年、データ処理はデジタル的に行われるため、すべての重力センサーは *Digital readout* を行う。デジタルの読み取りは、重力 + 動搖加速度 + 振動加速度の時間スペクトルを考慮してサンプリング間隔を決め、非線型誤差が生じないように考慮する。
- ② 航空機の測位精度に起因するもの：*GPS*による2周波干渉測位法によって航空機のアンテナの位置を cm の精度で3次元的に決める。現在、位置測定は *Ashtech PNAV* ソフトに従って行うが、このソフトにより条件の良い時には水平位置 $\pm 5\text{ cm}$ 、高さ $\pm 10\text{ cm}$ 程度で決めている。*PNAV* は *GPS* の信号が弱くなると急に位置の計算精度が低下するが、*Grafnan* は *GPS* のデジタル信号に加えて *Doppler* 信号も併用するため、連続した位置データの出力が可能である。重力測定では、 10^{-6} の相対精度を必要とするが、*Doppler Shift* を使う場合は 10^{-5} の数倍の誤差を含む。
- ③ 時刻の問題：*GPS*による位置測定は原子時(*TAI*)、*GPS*時(*GPS Time*)、協定世界時(*UTC*)が関わっている。特に、空中重力測定では *UTC* と *GPS Time* の比較が重要である。現在の重力計は重力変化が *UTC* で測られ、位置、高さが *GPS Time* で測られている。これは重力計の時間軸は *DGPS*で行う必要があったことが理由である。今後は、その必要がなくなると予想される。ただし、重力計の時間軸と *GPS*受信機の時間軸とは機器内部の遅延の違いにより多少異なることが予想され、その点の注意は必要である。
- ④ 姿勢制御：重力測定は重力計の測定軸を重力の方向に合わせてから、力の絶対値を測定するのが伝統的なやり方であり、このために水準儀を使う。しかし、移動体上

では水平加速度が働くので、単純には鉛直方向が分からない。このため鉛直ジャイロが開発された。水準儀とジャイロの才差運動を組み合せて、移動体の前後左右の動搖にも影響されずに鉛直を維持し続ける装置である。鉛直ジャイロは持続的に大きな水平加速度に対して、大きく傾くという弱点がある。この弱点は光の波長が地球の自転の向きによって変化すること(サニヤック効果)を利用した光ファイバージャイロによって克服された。重力計は光ファイバージャイロで鉛直が保持されるが、光効果だけでは精度が維持できないため、水準儀も組み込み、鉛直方向が確認される。

(5) データ処理技術：データ処理には、幾つかの技術が必要である。

データサンプリングは機体振動を含めた振動揺スペクトラムを考慮して、データ読み取りの速さを決める。重力計には機械的な防振処理が施されている。重力値バイアスの重力計は相対測定用であり、重力既知点を使って、重力のバイアス値を与える。重力計の感度は検定値を用いる。ノイズフィルタリングについては、幅が数分時の *Hamming Window* を使う。フィルターの幅は対象信号の波長によって決める。*Free-air Effect* 補正は、航空機は上下に揺れながら飛行するが、この揺れの加速度とは別に地球の重力場が高さによって異なることの影響を受ける。その値は $0.3086 \text{ mgal}/m \times \Delta h(m)$ であり、これが高度補正である。水平加速度補正では、重力計の測定軸は数分角の精度で鉛直であるが、水平加速度が大きいとその数分角の傾きにより無視できない誤差が発生する。この補正を水平加速度補正という。水平加速度 ah 、傾きを θ から $ah \cdot \sin \theta$ だけ重力値に影響を与える。そのため水平加速度計を使って θ を別に測り、補正をする。

(4) 空中放射能探査

1) 概要

空中放射能探査における測定対象は、地表に由来する γ 線であり、大容量のヨウ化ナトリウム検出器を用いた γ 線スペクトロメトリにより、放射性核種(主に U , Th , K)ごとに γ 線強度が求められる。これらの放射性核種は、地質ごとにある幅の濃度で存在するため、 γ 線強度分布に基づく地質区分やある母岩起源の碎屑物分布調査が行われている。また、断層や破碎帯は裂かの開口度により正・負の γ 線強度異常を示すことが知られており、温泉や地下水開発を目的とした広域的な探査も行われている。地上探査では U と Th など地化学的挙動の異なる核種比を用いた岩盤の風化度評価が試みられており⁴⁾、空中からの広域地盤調査への適用が考えられる。

空中放射能探査はエアボーン、カーボーン、マンボーンなどと呼ばれ、1960～1970 年代に活用した放射線測定の方法で、日本では地質調査所が核原料資源の調査計画に取り入れて、ウラン鉱などの存在の可能性のある地点の一部で探査が実施されている。ウラン鉱床調査に放射能測定器(ガイガーカウンタ、シンチレーションカウンタなど)を利用して自然放射能の測定を行う。核原料物質として、その調査方法の検討に重点をおき、ペグマタイト鉱床に伴う放射性鉱物を対象として、カウンタ類の使用法、各地点における測定値の比較、自然放射能測定値と異常値の比較などの初步的なものから出発している。

2) 放射能強度分布調査と放射能異常地調査

飛行機あるいはジープなどで相当広範囲に放射能強度の調査を行うことを主とするほか、飛行機やジープには不適当な山岳地形の地帶には直接、人による調査を行う。エアボーン

は、飛行機に高性能のシンチレーションカウンタや附属装置を搭載し、高度平均 200 m を格子線状に飛んで強度分布を調べる。カーボーンは車にシンチレーションカウンタを積み、車で走り得る道路を組織的に走って、強度分布を調べる。

強度分布調査の結果異常を認めた場合には、カーボーンによってさらにその周辺を調査するが、直接人によって異常地点の確認とその分布範囲などを調べる。

3) 鉱床調査

2) によって相当強度の異常地点を確認した場合には、この地点を中心にして試料の採取、鉱床の胚胎状況などを主として測量を伴う調査を行い、さらに必要と認めたときは、地質構造や鉱床分布状況調査のため、試錐あるいは物理探鉱、化学探鉱などを併用する。

(5) 热赤外線探査

热赤外線探査の概要と原理は、次のとおりである。

岩盤斜面における热赤外線探査は、斜面表面の温度分布・温度変化を測定することにより、岩盤の風化・開口亀裂の発達具合・岩盤の緩み状況・湿潤状態などを把握する目的で行われるものである。

また、その原理は以下のようである。空気の性質である暖まりやすく冷めやすく、さらに空気は熱を伝えにくい。一方、水は温まりにくく冷めにくい。岩盤の温度は、空気や水の存在比率、すなわち岩石中の空隙率と含水比によって、温度変化の大きさが変わることになる。風化が進んでいて乾いているような部分や、空隙が多い部分は温度変化が大きく、健全部分や湿潤部分は温度変化が小さくなる。

1) 調査の留意点

撮影方法において、一括撮影(1画面で対象斜面全体を撮影)方法と、複数の画像に分割する方法がある。热赤外線探査では、現地で2時刻間の岩盤表面温度分布を観測する。この際、2時刻間でカメラの方向がずれると、正しい温度差分布がとれなくなる。そこで分割撮影の場合は、各分割撮影の方向を正確に再現する必要があるため、カメラを固定して一括撮影をした方が能率的である。しかし、地形の制約などで斜面からの距離が迫っているなど、斜面を分割撮影せざるを得ない場合は、定点に人を立たせたり、斜面にアルミ板などの温度のコントラストのあるものを指標として、撮影方向を合わせる。また、分割撮影する場合は三脚を複数用意して動かさないようにする。

自然岩盤への热赤外線探査の適用事例はまだ少ないので、解釈・評価手法は確立していない。現状で考えられる解釈を以下に述べる。解析を行う際には、温度の経時変化図を作成すると理解しやすい。また温度計で、気温や斜面の温度変化を測定しておくと有用である。

2) 解釈での留意点

- ① 解釈の際には、気温・日射・前日や当日の天候・表面の凹凸・湧水・植生などを把握しながら、熱容量・熱伝導度を考慮して判断する。上記の判断にはステレオ写真との重ね合わせや経時変化図の作成が有用である。
- ② 自然岩盤の場合には、凹凸が激しく、温度分布・温度変化もその影響を受けやすい(凸部ほど温度が高く、温度変化が大きい)。
- ③ 植生や湧水部は温度変化が小さい。

3) 温度と解釈

自然岩盤斜面の赤外線探査で、検出が期待できるのは、以下に示すような岩の緩みや浮石・風化部・湿潤部・開口亀裂・岩質の違いなどである。

- ① 岩の緩みや浮石：岩の緩んでいる部分は空隙率が大きいため、温度変化が大きい領域として検出される可能性がある。浮石に関しても、開口亀裂が背後に存在すれば熱の伝導が遮断されるため、温度変化が大きくなる可能性があると考えられる。
- ② 風化部：空隙率が大きいため、温度変化大の領域として検出・区画化しやすい。
- ③ 湿潤部：含水比が大きいために熱容量も大きく、温度変化が小さい領域として検出されやすい。
- ④ 岩質の違い：岩種による熱容量の違いが大きければ検出されうる。
- ⑤ 開口亀裂：空気は断熱材としての効果があるため、開口亀裂付近では温度変化が大きくなりやすい。開口部の周辺が線状の温度変化大の領域として検出される場合が多い。また、表面近くの浅いところで表面に平行に近い走向で亀裂が走っている場合には、温度変化が大きい領域が広がりをもって検出できる。

(6) リモートセンシング^{14),15)}

1) 概要

リモートセンシング技術は、広域にわたる面的情報を継続的に取得でき、対象地域の地形・地質性状や環境調査のための手段の一つとして利用が可能である。**図 3.3.6** にリモートセンシング技術の概念図を示す。最近、各国の軍事技術の規制緩和に伴い、高空間分解能センサーや高波長分解能センサーを搭載した次世代の商用衛星が実用化された。高分解能センサーは、従来の商用衛星に搭載されたセンサーと比べて、空間分解能が飛躍的に向上したもので、現在入手可能な衛星画像で最も分解能が高いものはパンクロマチックセンター(モノクロ)で 0.6 m、マルチスペクトルセンサー(カラー)で 2.45 m である。一方、高波長分解能センサーは可視～赤外域の電磁波を数百のバンドで捉える新型センサーで、多くのバンドデータが得られるため、従来の画像解析手法とは異なる画像処理により観測対象物の質的な情報が把握できるようになった。これらの衛星センターが実用化されてきたことから、災害・防災調査や地盤・環境調査にリモートセンシング技術の適用が可能となった。

2) リモートセンシングの現状(衛星センターの種類と特徴)

衛星やセンサーには様々な種類があり、日本における主な地球観測衛星におけるセンサーの種類と仕様¹⁵⁾を表 3.3.1 に示す。

i) パンクロマチックセンサ

一

このセンサー画像はいわゆる可視域～近赤外域の白黒の画像

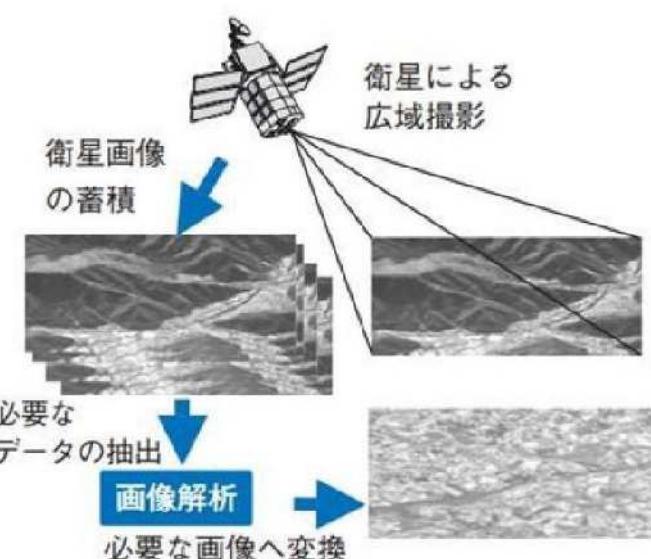


図 3.3.6 リモートセンシング技術概念図¹⁴⁾

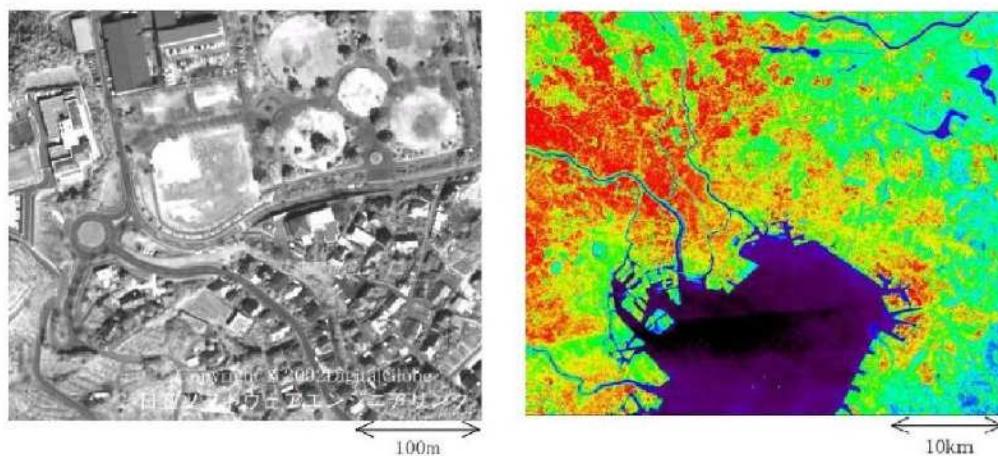
で、現在商用で利用できる画像では、*Quick Bird*衛星から得られる約 0.6 m 分解能の画像が最も高解像度である。図 3.3.7 左図に高分解能の *Quick Bird* 画像を示す。また、同一箇所を別の角度から撮影した 2 枚のパンクロマチック画像をステレオ解析することにより、高さ情報へ変換が可能であり、またポインティング機能を有することから、数日の回帰で同一地点の継続的な撮影が可能である。

ii) マルチスペクトルセンサー

このセンサーは可視から赤外域の波長帯の電磁波を一度に複数(数～十数個)のバンドで

表 3.3.1 日本の主な地球観測衛星におけるセンサーの種類と仕様 ¹⁵⁾

衛星名	主なセンサ	運用期間	高度	回帰日数	分解能	観測幅
MOS-1, 1b	MESSR 可視近赤外放射計	1987.2 ~ 1998.4	909km	17日	50m	100 km
	VTIR 可視熱赤外放射計				900m(V), 2700m(IR)	1500 km
	MSR マイクロ波放射計				32km(23.8GHz), 23km(31.4GHz)	370 km
JERS-1	SAR 合成開口レーダ(バンド)	1992.9 ~ 1998.10	568km	44日	18m	75 km
	VNIR 可視近赤外放射計				18.3m x 24.2m	75 km
	SWIR 短波長赤外放射計				18.3m x 24.2m	75 km
ADEOS	AVNIR 高性能可視近赤外放射計	1996.8 ~ 1997.6	797 km	41日	16m(Multi) 8m(Pan)	80 km
	OCTS 海色海温走査放射計				700m	1400km
	(ILAS,IMG,NSCAT,TOMS,POLDER)					
ADEOS-2	AMSR 高性能マイクロ波放射計	2002.12 ~ 2003.10	803km	4日	5~50km	1600km
	GLI グローバルイメージヤー				250m, 1km	1600km
	(IRAS-II, POLDER, SeaWinds)					
ALOS	PRISM パンクロマチック立体視センサ	2006.1 ~ 2011.5	692km	46日	2.5m	35km, 70 km
	AVNIR-2 高性能可視近赤外放射計2				10m	70 km
	PALSAR フェーズドアレイ方式 レバンド合成開口レーダ				10m 100m	70 km 250~350 km
ALOS-2	PALSAR-2 フェーズドアレイ方式 レバンド合成開口レーダ	2013	628km	14日	1~3m 3~10m 100m	25km 50~70km 350km



左:高分解能パンクロマチックセンサ画像の例(*Quick Bird*)
右:熱赤外センサ画像の例(ASTER:熱画像に変換)

図 3.3.7 热赤外センサの実施例 ¹⁵⁾

観測するもので、商用利用ができる画像では *Quick Bird* 衛星から得られる約 2.4 m の高分解能である。この高分解能衛星センサーは赤、緑、青、近赤外の 4 バンド(一部短波長赤外を含む)で、これらの画像からは人間の見た目に近いカラー画像の作成が可能であることから、目視による物体や状況の判読に利用される。また、近赤外は一般に植物の活性度と強い相関があり、植物情報の取得に利用され、短波長赤外は主に鉱物資源探査の分野で有効性が確認されている。ポインティング機能を有している。

iii) 热赤外センサー

热赤外センサーは地上からの热赤外波長の電磁波の放射を捉えるもので、温度測定が可能である。**図 3.3.7** 右図に *ASTER* センサーの热赤外画像を示す。一般には、火山および火災監視、地熱の上昇、湧水地点把握による地下水流动の評価、都市域ヒートアイランド現象の監視などに利用されるが、衛星センサーの分解能から利用範囲は限定される。また、ヘリコプターなどの搭載センサーもあり撮影範囲が狭くなるが、高空間分解能で撮影可能である。

iv) ハイパースペクトルセンサー

このセンサーは可視～赤外域の電磁波を数百のバンドで捉えるものであり、得られた画像は 1980 年代から各国で資源探査などの分野を対象に利用されている（ただし航空機搭載センサーで取得）。多数のスペクトルデータを取得するため、観測対象物の分光スペクトルを解析することにより、対象物の質的な性質の把握が可能であり、植生種類や岩石種類、土質種類などの識別に利用される。

v) 合成開口レーダー(SAR)

このセンサーから照射したマイクロ波の反射波の強さや位相を観測するもので、取得可能な衛星画像の分解能は数 cm の分解能を持つセンサーを搭載した衛星が打ち上げられ、利用の範囲が広がっている。また、このセンサーはマイクロ波を用いるため曇天や夜間の撮影も可能であり、植生透過により地形状況の把握には有効である。照射する周波数帯(波長帯)や偏波の種類によって、地表面での透過状況や反射状況が異なることから、植生の観測や植生下の地表面状態の把握、土壤水分量の把握、水面の波の状況把握などの分野で利用されている。さらに、インタフェロメトリ情報(位相差情報)を用いて、高精度な高さ情報(高さ方向の誤差：数 cm)を収集することや、ポラリメトリ情報(偏波情報)を用いて多チャンネル画像を作成し地形情報抽出することも可能である。

vi) その他のセンサー

空間分解能が 10～100 km で、広域情報の収集を目的としているセンサーとして、「マイクロ波放射計」や「マイクロ波反射計」がある。マイクロ波放射計は、地球の表面および大気を構成する物質から熱放射により放射されるマイクロ波を観測するもので、主に海洋気象を中心とするグローバルな地球観測に利用されている。複数の異なる周波数や偏波の観測により、水蒸気量、降水量、海面温度、海洋塩分濃度、大気成分(オゾン、エアロゾル、NO_x)などの情報を取得できる。マイクロ波散乱計は、レーダーの一種であり、マイクロ波を照射して、反射する散乱波の強さや位相差を観測するもので、主に海洋気象を中心とするグローバルな地球観測に関する情報を取得する。複数の偏波や位相差の観測により、降水強度、土壤水分、海洋波浪、海上風の風向き・風速、海水分布、積雪分布などの情報を取得できる。

3) 衛星画像の最近の活用事例

高波長分解能を有する衛星が実用化され、リモートセンシング技術は、多方面で活用されている。衛星センサーで取得したデータは、多くの情報を含むデジタルデータであり、画像処理技術により各種解析業務への有用な情報に変換できる。画像処理の技術は、①画像空間情報を解析処理により他の画像空間に変換することにより、見やすい画像や他の単位の画像を作成する射影的処理技術、および②画像空間から目的とする情報を解析処理により、区分認識して抽出する分類的処理技術に分けられる。現実的には、これらの処理技術は、複合的に使われ、より視覚的な情報へと加工され利用される。

ここでは、処理技術の複合利用例として、以下に事例を示す。

- ・事例① 熱赤外の温度観測を利用した事例

地下伏流水湧水地点周辺の温度変化を熱赤外衛星画像で解析した事例である。

a 温度情報への変換、b 温度変化の小さい領域の抽出

- ・事例② 高分解能衛星3次元画像による仮想地形地質調査をした事例

高空間分解能衛星画像と、デジタル標高データをもとに、コンピュータ上に3次元地形を再現し、仮想空間上で地形・地質調査を行った事例である。

a 現地の再現、b 地形構造の強調、c 急傾斜崩壊危険地区の把握

この調査ではマルチスペクトル画像に対して、スペクトル分析およびパターンマッチング分析で土地被覆分類処理を行い、土地被覆図を作成できる。また、標高データを傾斜解析して地表傾斜分布図を作成し、土地被覆分類図の裸地に区分された箇所と傾斜分布図で一定傾斜角以上の箇所を同一に満たす箇所を抽出し、急傾斜崩壊危険図を作成できる。3次元地形図は、任意の方向からの視線で確認できるほか、視点を移動しながらの動画（バーチャル画像）も可能である。

- ・事例③ ハイパースペクトルセンサーを利用して植生調査をした事例

4) リモートセンシングの今後

リモートセンシング技術は、広域の面的情報を継続的に取得でき、空間分解能、周波数分解能ともに高度化してきたことで、対象地域での災害・防災のための地質環境調査に適用できる技術となってきた。高解像度衛星写真は、日本のはほぼ全域をカバーして撮影されており、希望する地域の撮影要請にも応じている。このような状況を踏まえて、対象地域の地質環境調査や長期地質安定性などの検討にリモートセンシング技術の利用が広がっている。

長期地質安定性評価で着目する地震・断層活動の影響評価、火山・火成活動、隆起・沈降・浸食の評価に対して、リモートセンシング技術から提供できる主な情報は、「リニアメント」、「地表変位」、「地表被覆」、「地形面区分」、「地表温度」などに関するものである。これらの情報は、衛星画像から、直接評価できるものや複合解析によって提供されるものまで、様々である。また、合成開口レーダーセンサーによるインタフェロメトリ画像処理を使用したcm台精度の地表変位情報や熱赤外センサーを使用した1°C以下の温度分解能の地表温度情報に関しては、面的で広範囲な情報を迅速に継続的に得られるという意味では、衛星リモートセンシング技術は、ほかの調査手法では取得できない情報を提供できるといえる。

我が国でこれから実施される見込みの廃棄物処分地選定調査は、今まで述べた最新のリ

モートセンシング技術を活用できる可能性がある。リモートセンシング技術は、地球環境保全・防災など今世紀における人類の大きな課題に対応して、センシング技術および解析技術の高度化が益々進展するものと思われる。このような先端技術分野のニーズを踏まえた開発を促進していくとともに、我が国の災害・防災に関する地盤環境調査への信頼性と効率性を図るとともに、国内外における最新情報を整備していく必要がある。

3.4 空中物理探査の土木分野への適用

空中物理探査システム（空中電磁法探査、空中磁気探査、空中放射能探査など）を実施することにより、表層から地下深部までの各物性値の空間分布と地質分布・構造との対応を検討することができる。本項では、空中物理探査、特に空中電磁法探査の土木地質分野への適用性を中心として述べる。

空中電磁法探査は、当初は鉱床探査手法の一つで、広い地域の地下深部に潜在する塊状硫化鉱体などの電導性鉱体を空中から迅速かつ低コストで探知することを目的として開発された。その後、日本国内では、1990年代空中電磁法探査の測定機器仕様などの変更により地盤浅部の分解能を高めるための高周波数システムを実現し、土木地質分野への適用が可能となり、大規模地すべりやトンネルなどの地盤調査として広く適用されるようになってきた。海外では、1990年代から固定翼による時間領域システムの高性能化と、周波数領域システムで低い送信周波数（数十Hz）が利用可能となり、データの周波数帯域も格段に広くなつたため、土木地質分野へ適用されている。2005年開催の米国物理探査学会の講演やポスターセッションでは、8割が石油探査、2割が金属資源、土木、環境に関する発表であり、増加傾向にはあるが土木利用は少ない。また、広域の範囲には、空中磁気探査が使用される場合が多い¹⁶⁾。

近年、梅雨前線や台風、異常気象などによる記録的な集中豪雨が多く発生しており、それに伴う土砂災害の発生も少なくない。また、30年以上経過した高速道路斜面の経年劣化による不安定化に伴う崩壊・変状や道路防災総点検では網羅しきれない死角からの災害が目立ち始めている。そのため、高速道路とその沿線斜面の地盤内部の性状把握および踏査に立ち入り許可を必要とする領域（管理用地外）で発生する災害への新たな対応が必要とされている。しかし、管理用地外における危険箇所抽出は従来の航空写真や地形図などからの判読だけからでは難しく、調査点検員による点検についても、調査対象が広範囲であり、かつ樹木も繁茂しているため非効率であると考えられる。さらに、地質情報としてのボーリングや地表物理探査などの資料は、点あるいは線状の情報、地表地質踏査の資料は表層のみの情報であり、広範囲（平面的・断面的）に情報を収集するのは時間的・経費的にも困難である。

高速道路は、広域につながる線状構造物であり、間断ない自動車交通を支えている。近年地球温暖化の影響もあり、高速道路域外からの災害が増加しており、かつ被害も甚大となっている。空中電磁法探査は、工場などから発生する電磁ノイズの影響を受けやすいが、高速道路の土工区間は都市部より郊外に多いため、市街地を除き適用可能である。

空中電磁法探査は、広域の概略地盤調査に適し、かつ地表地質踏査で推定した地質構造と空中電磁法探査の比抵抗構造から推定した地質構造が整合しており、また地盤の比抵抗は、体積含水率および粘土分含有率によって大きく変化し、崩壊の危険性が高い斜面とし

て問題となる地すべりと崩積土、熱水変質部、断層破碎帶などは一般に低比抵抗を示すことが知られている。したがって、概略検討時点の高速道路斜面の地盤性状調査については、空中電磁法探査が最適と考えられる。

一方、空中磁気探査では、磁気異常図から断層による地盤構造の違いや、石灰岩分布域を推定することができる。また、空中放射能探査では、放射能強度分布と表層地質分布との対応性があることが確認できる。特に、泥岩は高放射能分布域として捉えることが可能である。ただし、現状では、これら2つの探査法の土木分野への適用は比較的特殊なケースに限られている。

このような空中物理探査システムによって、複数の物理量の探査データを得ることができるために、今後は、これらのデータを総合的に解析することにより、地盤性状を総合的に把握する手法へと発展していくものと考えられる。特に、広域の線状構造物である高速道路斜面の地盤性状把握には、空中電磁法探査が最適であり、この探査法を崩壊の危険性が高い斜面のスクリーニング手法の基本データとすべく選定する。また、地表地質踏査やボーリング調査など、地上探査のデータを空中物理探査結果の検証データとして活用することにより、地質解析の精度が大幅に向かうことが可能となる。さらに、地上からの探査データをリファレンスとして利用し、地盤の工学的性質と関連付けて空中物理探査データ、特に空中電磁法探査データを指標化することにより、土木分野や防災分野など広い範囲での活用が期待できる。

3.5 むすび

本章において、高速道路の保全管理を事後保全の段階から予防保全の段階へ進めるのに必要な地盤性状の把握手法を確立するために、調査ボーリング（サンプリングや原位置試験などを含む）や物理探査について調査・検討するとともに、その適用性を明らかにした。その結果に基づいて、高速道路斜面の予防保全管理を実施するうえで、崩壊の危険性が高い斜面をスクリーニングするための地盤性状把握においては、現状で空中電磁法探査が最も有望であると判断するとともに、将来においては、空中物理探査システム（空中電磁法探査、空中磁気探査、空中放射能探査など）による複数の探査データを用いた総合的な地盤性状把握手法へと発展させる方向性を指摘した。

本章において具体的に得られた内容は、以下のとおりである。

- (1) 調査ボーリングやサウインディングの高精度化に対する課題を指摘した。すなわち、斜面のすべり面や亀裂、地下水性状ならびに物理・力学特性などの地盤特性を正確に捉え、また孔内での原位置試験や諸検層を行うために、最良のコア採取と孔壁を作成する必要がある。そのために、通常のコア採取手法に変わる高品質の掘削技術（削孔技術とコア採取技術）の採用が必要となる。なお、これらの調査法は点としての情報であり、個々の斜面で多数の調査が必要であり、調査に対し多くの費用と時間がかかる。
- (2) 地表からの探査あるいはボーリング孔を利用した探査による地表物理探査法を、広域の線状構造物である高速道路へ適用する場合の課題を指摘した。すなわち、地表物理探査法は、地表面に測線を設置して探査するので精度が良い一方で、広域の探査では、広域に測線を設置しなければならず、作業上も経済性も効率が悪く、

多くの困難を伴う。また、これらの調査法は測線に沿っての線としての情報であり、断層破碎帯などの重要な情報を漏れなく把握するためには、地表からの探査においては、探査対象物の大きさや地盤状況により探査手法を検討する必要がある。その上、調査地点については立ち入る必要があり、管理用地外や急峻な地形については、課題が多い。ボーリング孔を利用するには、複数のボーリング孔を設置するための経費がよりかさむこととなる。

- (3) 空中電磁法探査を高速道路斜面における地盤性状把握手法とするまでの利点を指摘した。すなわち、空中から面としての情報を把握できるため、断層破碎帯などの重要な情報を漏れなく把握できる。また、現地に立ち入る必要がないため、管理用地外や急峻な地形についても適用可能である。広域の線状構造物の高速道路に適用しても、効率的に、経費的にも安価に地盤性状把握が可能である。なお、調査ボーリングや地表からの探査に比べ分解能は劣るもの、崩壊の危険性が高い斜面のスクリーニングするための地盤性状把握法としては、十分な精度を有すると考えられる。
- (4) 以上の結果、広域の線状構造物である高速道路斜面における地盤性状の把握および崩壊の危険性が高い斜面のスクリーニング手法の基本データとすべく、空中電磁法探査を選定し、第4章以降の検討を進める。
- (5) 将来においては、空中電磁法探査のみならず、空中電磁法探査、空中磁気探査、空中放射能探査などを同時に測定する空中物理探査システムによる複数の探査データに基づいて、総合的に地盤性状を解析・把握する手法へと発展させる方向性を指摘した。

[第3章の参考文献]

- 1) (社)地盤工学会：地盤工学基準書 改定版 地盤調査の方法と解説、1300pp., 2013.
- 2) (社)地盤工学会：地盤工学基準書 地盤材料試験の方法と解説、1156pp., 2009.
- 3) (社)地盤工学会：地盤工学ハンドブック、1828pp., 1999.
- 4) (社)地盤工学会：地盤工学用語辞典、661pp., 2006.
- 5) (社)物理探査学会：新版物理探査適用の手引き—土木物理探査マニュアル 2008-, 2008.
- 6) 日外勝仁、伊藤佳彦、中川伸一、岡崎健治：空中物理探査による広域的な地質構造調査、基礎工、Vol.61, No.8, pp.31～33, 2006.
- 7) 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.
- 8) 小西尚俊、塚田幸広：空中電磁法による地質評価への実際的検証、土木学会論文集、No.680/III-55, pp.285～294, 2001.
- 9) 岡崎健治、伊東佳彦、有田政博：空中電磁探査及び空中磁気探査を用いた道路斜面の地質構造の推定、物理探査学会第113回学術講演会講演論文集、No.113, pp.247～250, 2005.
- 10) 中里裕臣、黒田清一郎、奥山武彦、伊藤吾一：破碎帶地すべり地域における空中電磁法探査、農業土木学会講演要旨、pp.934～935, 2003.
- 11) 中里裕臣、黒田清一郎、奥山武彦、伊藤吾一、佐々木裕：地すべり危険度区分における

- る空中電磁法の適用性, 農業工学研究所技法, No.202, pp.197~204, 2004.
- 12) 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.
- 13) 長谷川健, 山田信人, 遠藤令誕, 小出馨: ヘリコプターを用いた空中物理探査データの再解析, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research, 2013-028, pp.1~47, 2013.
- 14) 磯野賀寿夫: 平成25年度 REDD プラスに係る森林技術者講習会(基礎講習) 衛星データの種類と入手の際の留意点, (一財)リモート・センシング技術センター, 講習会資料, 62 pp., 2013.
- 15) 林俊夫, 吉村公孝: 最近のリモートセンシング技術の動向 - 地質環境調査への適用性 -, 原環センタートピックス, No.65, pp.1~78, 2003.
- 16) 荒井英一 : 米国物理探査学会参加報告, 金属資源レポート 2005.3, pp.833~842, 2005

第4章 空中電磁法探査の探査・解析方法と比抵抗分布表示法の開発

4.1 概 説

空中電磁法探査は、広域の地盤情報を表す地盤の比抵抗を効率よく3次元的に把握する物理探査の一手法であり、電磁気探査法と同じく土壌・岩石の電気比抵抗（抵抗率^{1),2)}：断面積1m²、長さ1mの時の電気抵抗に相当）を求め、地盤状況を判定する手法である。得られた比抵抗情報は、体積含水率（飽和度×間隙率であり、値が高いほど比抵抗は低くなる）や粘土分含有率を示し、風化層や粘土化変質帯などの地質脆弱部を探査するのに優れているほか、地下水に関する情報も反映している。このような性質を有する空中電磁法探査^{3)～5)}を予防保全の一環として高速道路に沿うのり面・斜面に採用することは、十分意義がある。

空中電磁波探査によって得られた解析データは、詳細点検のように目視点検、たたき点検、赤外線点検などの対象物の表層付近を主体とした点検とは異なり、詳細点検で得られない地下内部の地盤状況（岩盤劣化の進行や地下水位の変動）をマクロ的に捉えることが可能であり、その劣化の進行状況によって補修計画策定へと進展させることが重要となってくる。

本章では、まず高速道路に沿う斜面の予防保全の一環として、空中電磁法探査の特徴としての地盤調査の新規性とともに、探査方法、データの取得方法、解析方法、比抵抗と地盤物性の一般的な関係および判読できる地盤情報について述べる。次に、本論文の主題である比抵抗分布表示法の開発を行うとともに、各種の比抵抗表示法の比較を行い、それぞれの特徴や長所・短所を明らかにするとともに、空中電磁法探査の優位性と課題を述べる。

4.2 空中電磁法探査と解析方法

4.2.1 空中電磁法探査の特徴^{1)～16)}

(1) 空中電磁法探査の概要

空中電磁法探査は図4.2.1に示すように、ヘリコプターに曳航された送受信コイルを用い

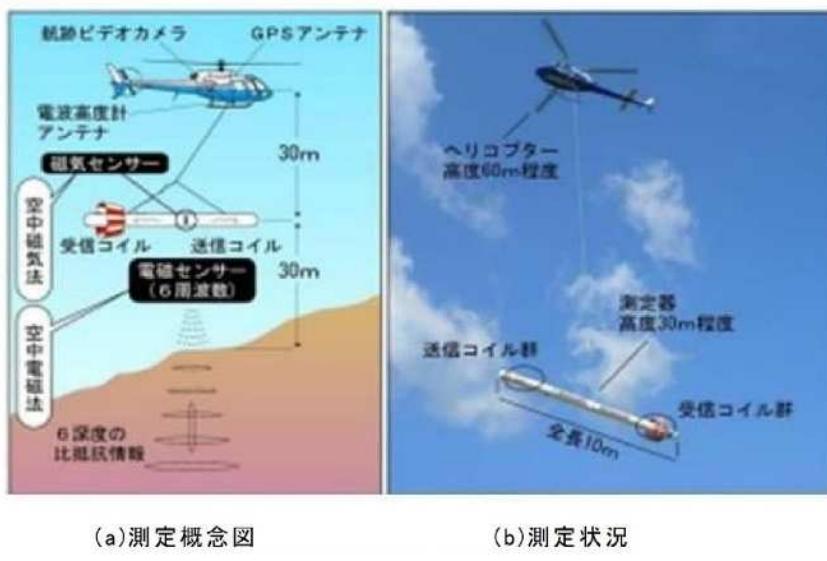


図 4.2.1 空中電磁法探査の概要図^{15),16)}

て、送信コイルからある周波数で連続的に発信される1次磁場(交流磁場)が地中に入ると、電磁誘導現象によりその磁束の変化を打ち消すように渦電流が誘起され、これが別の交流磁場(2次磁場)を発生させる。生ずる渦電流の大きさや形状は地下の比抵抗分布に依存するため、渦電流に関する2次磁場を観測することによって地下の比抵抗情報が求められる。地盤内部の電気的性質を計測することで、広範囲の斜面の3次元的な地盤性状^{1)～14)}(地盤区分、体積含水率・粘土分含有率、飽和・不飽和状態、地下水状態など)を空中から確認できる地質調査手法である。

透入した交流磁場によって地盤には渦電流が生じるが、その渦電流の大きさは地盤の電気的性質によって異なる。図4.2.2に示すように、渦電流が大きければ「低比抵抗」となり、探査深度は浅い。逆に、渦電流が小さければ「高比抵抗」となり、探査深度は深くなる。得られた比抵抗から、地盤の体積含水率(間隙率×飽和度)と粘土分(細粒分)含有量の相対的な状態を判断する。

(2) 空中電磁法探査の有用性

空中電磁法による地質調査は、用地外を含めた高速道路沿いの広域斜面の地質調査において、既存の地質調査手法と比較して以下の新規性を有する。

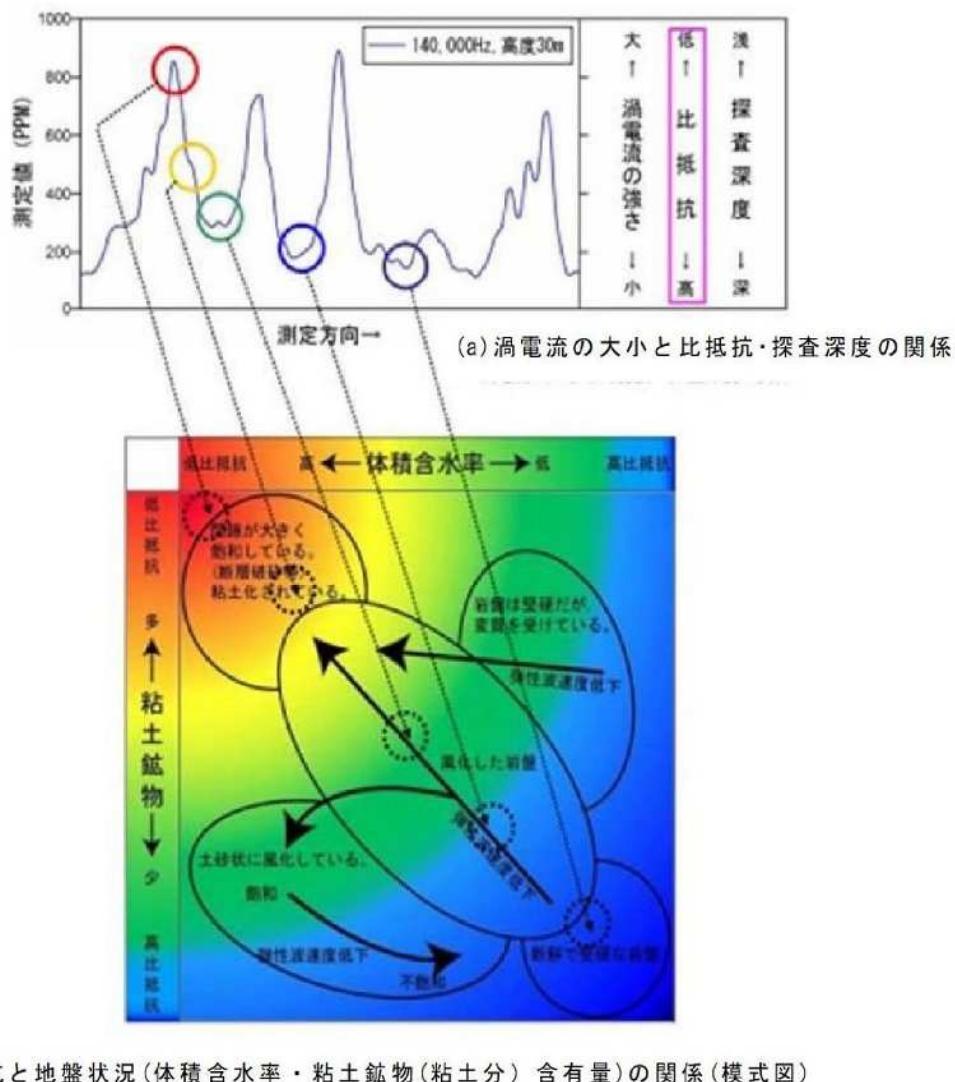


図 4-2-2 空中電磁法探査の測定結果と地盤の解釈^{13),14)}

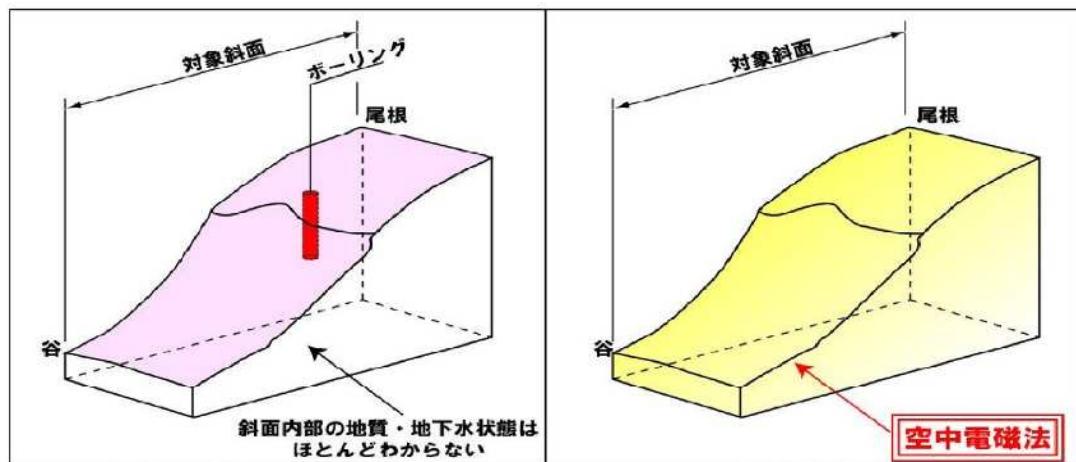
- ① 帯状で広範な高速道路周辺の斜面の3次元的な地質・地下水状況が、分解能は低いが効率的に把握できる。
- ② 一般的には、調査のために用地に立ち入る必要があるが、立入らずに効率的に迅速な調査ができる。
- ③ 既往地盤情報を基にして、空中電磁法により得られた比抵抗により、広域の地盤情報へ拡大、類推することが可能である。
- ④ 活断層の切土のり面を一度変状・崩壊させると、変状が多発することや安定性を回復するには長い時間と多大な労力を要することが明らかである。これら切土のり面の不安定要因については、建設時点に把握するのが重要である。断層や地すべりの分布を確実に捉えられる可能性を有する。

(3) 空中電磁法探査システムの特徴

空中電磁法探査の土木地質調査用(浅部)システムの仕様を表4.2.1に示す。この空中電磁法探査システムの最大の特徴は、浅部地盤の分解能が高いことにある。空中電磁法探査と既往地質調査手法を比較したものを、図4.2.3と表4.2.2に示す。

表 4.2.1 飛行測定時の使用機器一覧表

使用機材名称		規格・形式	数量	性能・備考
測定機器	空中電磁法測定器	空中電磁法システム - RESOLVE (6周波数: 140KHz, 31KHz, 6.9kHz 3.3kHz, 1.5kHz, 0.34kHz)	一式	測定器:L=10m, ϕ 0.5m 重量: 200kg ※空中磁気測定器を含む
	空中磁気法測定器	SCINTREX CS-3	一式	セシウム磁力計
	電波高度計	Honeywell AA300	一式	
	航跡評定システム	Ashtech GPSナビゲーションシステム Panasonicビデオカメラ WV-CP464	一式 一式	5m
	地上GPS測定器	Fugro CF1 DATA LOGGER	一式	感度0.001Nt 1サンプリング/秒
ヘリコプター		アエロスパシアルAS350B3	一機	JA508A 積載重量: 1,076kg



(a) 従来調査手法(1~2次元データ)

地形情報(+ボーリング数箇所)

(b) 空中電磁法(3次元データ)

地質・地下水情報

図 4.2.3 空中電磁法探査の調査精度

表 4.2.2 既往地質調査手法と空中電磁法探査の比較

(調査対象区間: 数～数 10 km)

	地表踏査	調査ボーリング	物理探査		
	地表地質踏査	機械ボーリング	弾性波探査	電気探査 (比抵抗二次元探査)	空中電磁法探査
地盤情報	ルートマップ、微地形	柱状図	弾性波速度	比抵抗値	比抵抗値
成果と精度	平面情報 ○ (2次元情報)	鉛直断面情報 ○ (1次元情報)	鉛直断面情報 ○ (2次元情報)	鉛直断面情報 ○ (2次元情報)	平面・鉛直断面・ 水平断面情報 ○ (3次元情報)
土地の立入り	必要	必要	必要	必要	不要
調査期間	△	×	×	×	○
コスト	△	×	×	×	○
広域調査への適用性	△	×	×	×	○
備考	断層破碎帯把握可能	調査箇所の選定による	調査測線の選定による	断層破碎帯把握可能、 電磁波の影響受ける	

空中電磁法探査は、調査ボーリング・物理探査調査などの既往地質調査法と異なる。図 4.2.3 に示すように、既往地質調査法は 1～2 次元的つまり点調査～線状調査であるが、空中電磁法探査は 3 次元的つまり平面～立体的な調査で、広域となれば効率性と経済性に優れている。ただし、空中電磁法探査は分解能が比較すると低く精度が劣ることがある。

既往地質調査法(地表踏査・調査ボーリング・地表物理探査)と空中電磁法探査における精度、土地の立ち入り、調査期間、コストなどを比較したものを表 4.2.2 に示す。前者では、精度は 1～2 次元的で立ち入りが必要であり、調査期間・コスト・広域への適用性が悪い。後者は直接土地への立ち入りが不要で、また短期間での 3 次元調査を低コストで実施でき、また広域への適用性が極めてよいことを示している。

(4) 斜面予防保全分野における空中電磁法探査の位置づけ

斜面予防保全のための道路防災点検において必要となる資料は、図 4.2.4 に示す既往情報としての既往道路保全資料の整理(災害記録・防災カルテ・道路建設・防災対策工の施工記録など)をはじめとして、地形情報としての地形条件(空中写真・地形図(DEM))と地質情報としての地質条件(表層地質図・既往地盤情報)がある。この地盤情報において第 1 次絞込み条件として、広域の地盤情報が必要である。広域地盤情報を効率的・短期間で得られる手法として、空中電磁法探査の採用が適していることを示している。道路防災総点検における安定度調査箇所選定における過程の中で、空中電磁法探査の位置付けを図 4.2.5 に示す。ここでは、参考とする資料のうちの災害要因に関する資料の一部となっているが、第 2 絞り込み①の主体となる資料が得られると考える。図 4.2.6 は第 1 絞り込みから第 2 絞り込み①および②の手順を示したもので、道路防災総点検における道路防災カルテや既往点検資料を活用した新しい安定度調査箇所選定のイメージにおける空中電磁法探査の位置付けを示す。空中電磁法探査の第 2 絞り込みに対する役割は、地下水・風化・変質の進行状況、道路建設後新たに発生した地すべりや崩壊箇所の地盤状況、崖錐斜面上の崩壊地

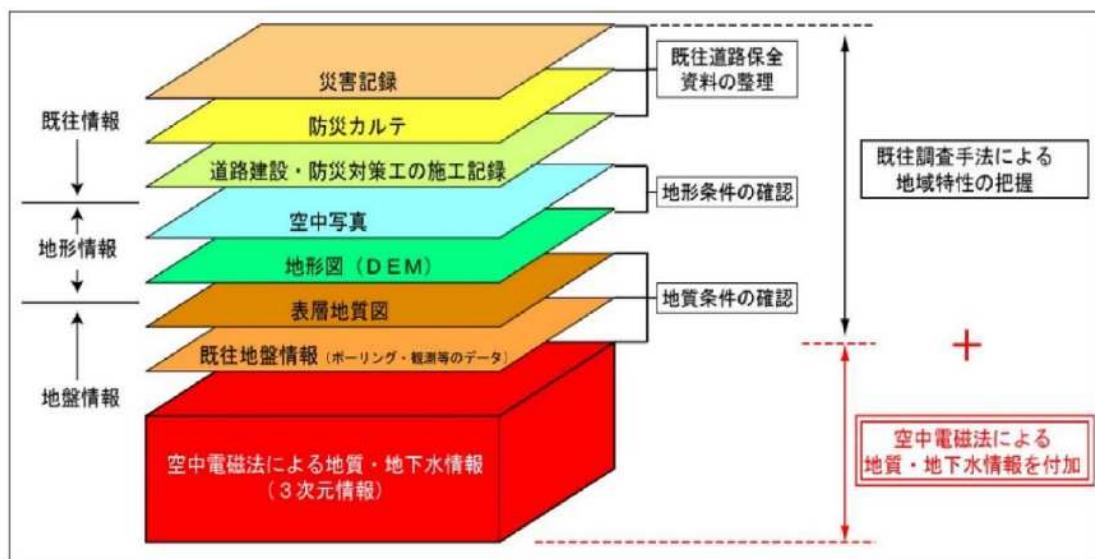


図 4.2.4 のり面予防保全における空中電磁法探査の位置付け¹⁷⁾に加筆

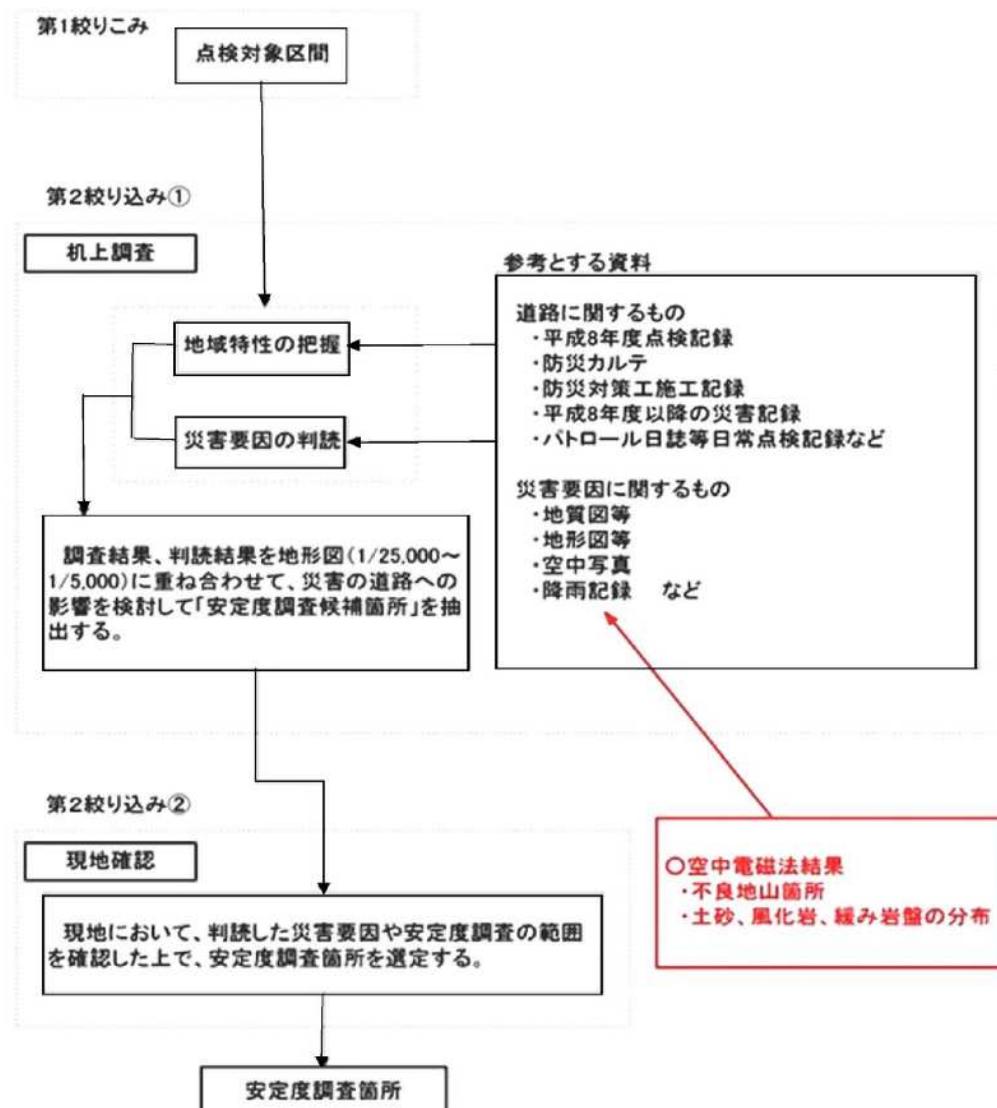
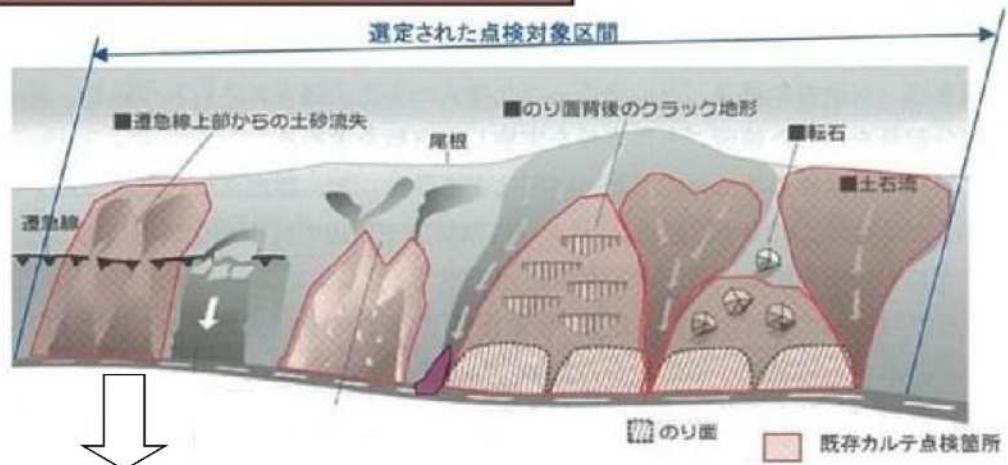
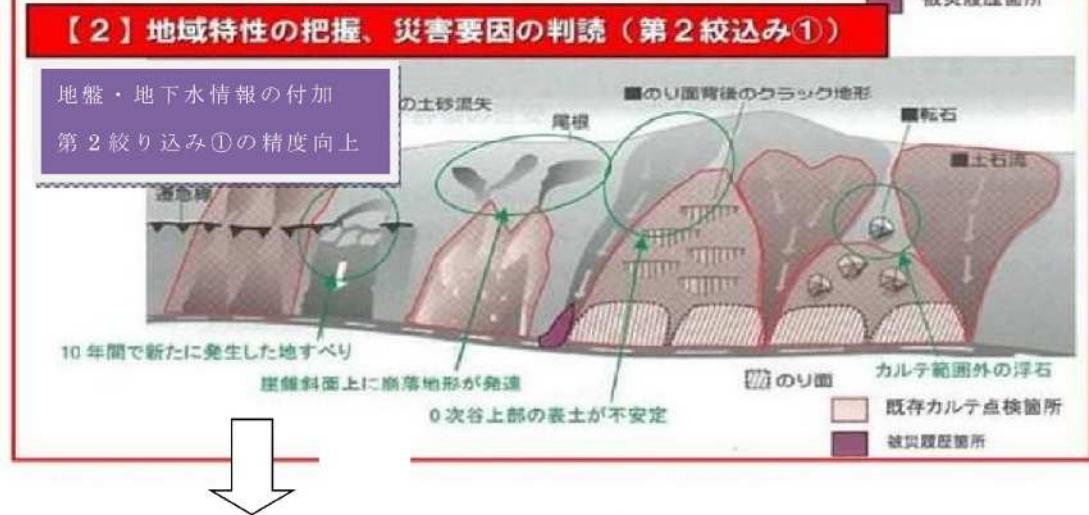


図 4.2.5 安定度調査箇所選定における空中電磁法探査の位置付け¹⁷⁾に加筆

【1】点検対象区間の選定（第1絞込み）



【2】地域特性の把握、災害要因の判読（第2絞込み①）



【3】現地確認に基づく安定度調査実施箇所の選定（第2絞込み②）

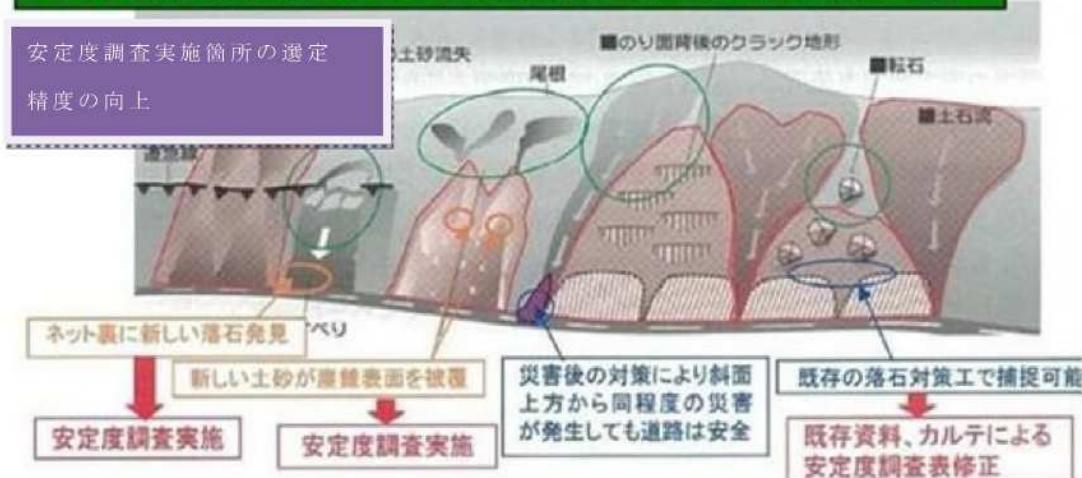


図 4.2.6 地質・地下水情報を把握する範囲¹⁷⁾に加筆
(安定度調査箇所選定のための絞込み手順)

形の発達、0次谷上部・遷急線における不安定地盤の分布、溪流の不安定土砂の分布と土石流発生渓流の地盤性状の把握などの抽出である。

4.2.2 探査手法とデータの取得

(1) 概要

空中電磁法探査は、時間領域法と周波数領域法のいずれかを利用して地盤の比抵抗を求めるもので、本研究では、後者を利用した *NE-RESOLVE* 空中電磁法探査システムを採用し、周波数として $140\text{ kHz} \sim 340\text{ Hz}$ を利用した^{15),16)}。

高周波数では地下浅部、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、複数の周波数で測定すれば、複数の深度の比抵抗情報が測定点において1次元的に得られる。各測線沿いの周波数ごとの1次磁場の透入深度位置に、それぞれ対応する比抵抗を配し、比抵抗断面図として表現され、平面的に多数の測点データと合わせることにより3次元的な地盤情報が得られる。空中電磁法探査の測定概要を図4.2.7に示す。

(2) 探査原理

1) 理論式の構成

ヘリコプターを用いて上空数10 mに配置した電磁コイル(送信・受信コイル対)のうち送信コイルに交流電流を通じると、コイルの周辺に交流磁場(1次磁場)が発生する。この交流磁場が地中へ透入するときに、地中にこの磁場を打ち消すように渦電流が誘起され、これが別の交流磁場(2次磁場)を発生させる(図4.2.7参照)。ここで、2次磁場の強さは地盤

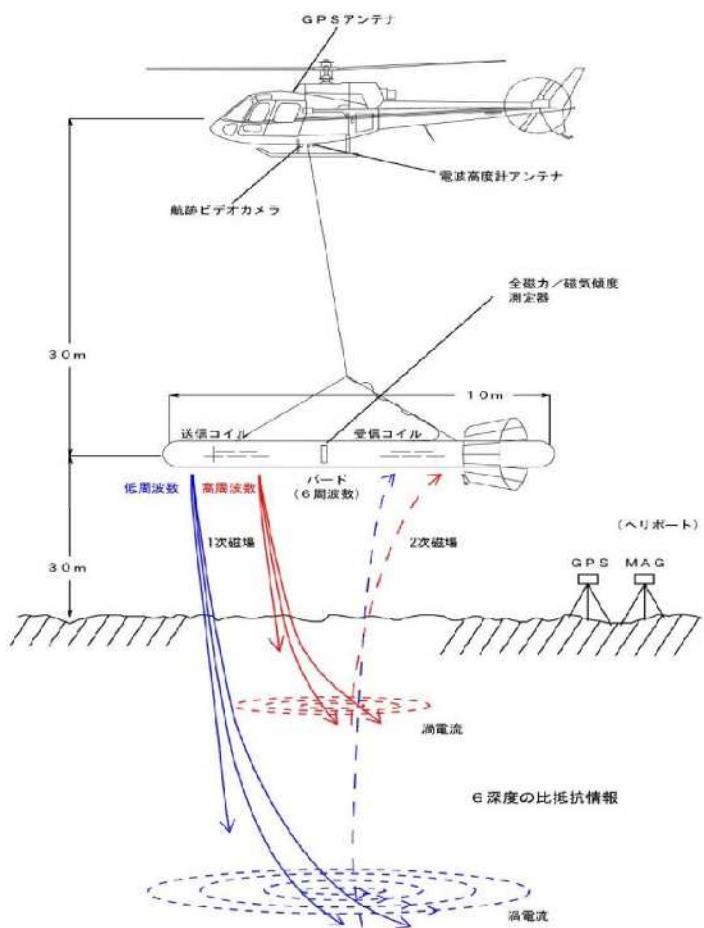


図 4.2.7 空中電磁法探査の測定概要

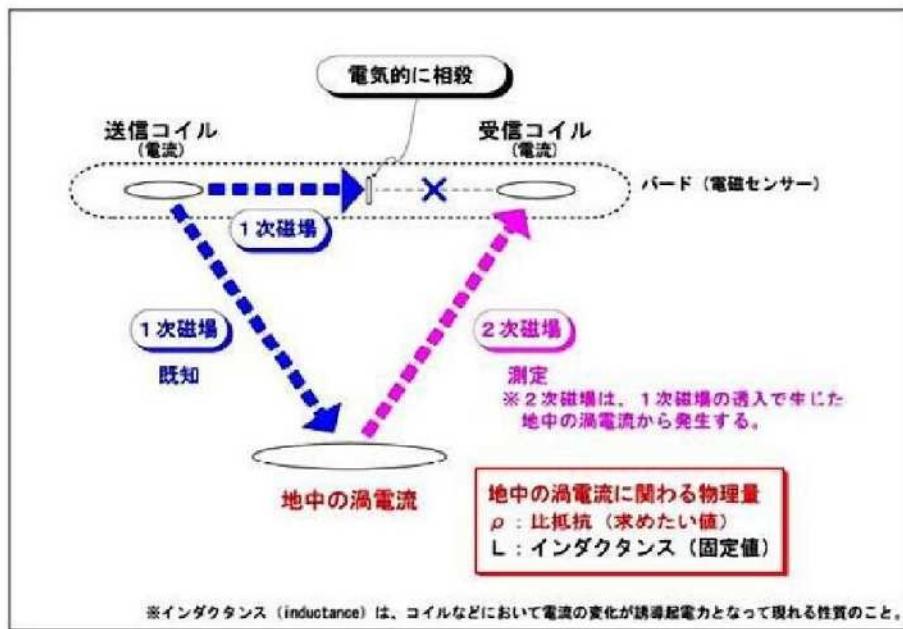


図 4.2.8 空中電磁法の探査原理(地盤の応答)

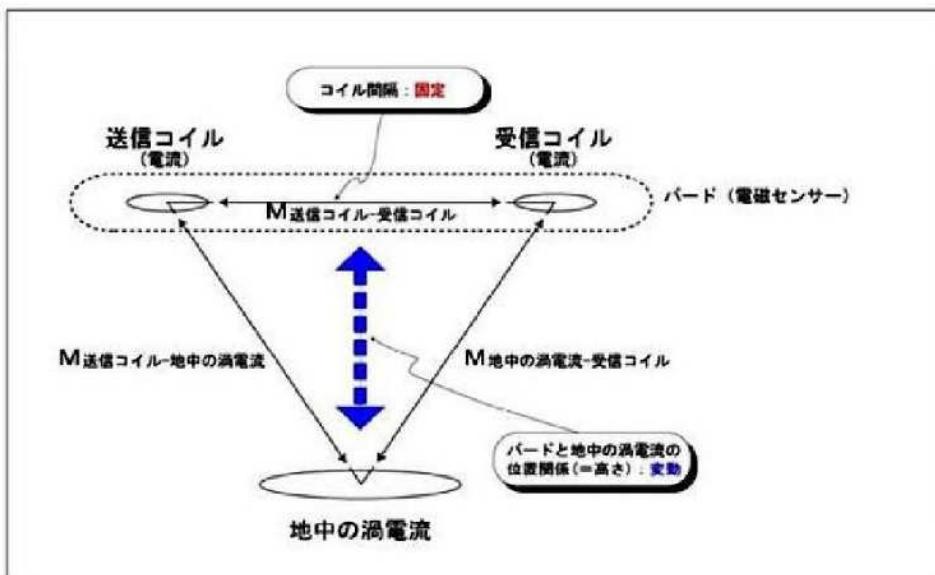


図 4.2.9 空中電磁法の探査原理(相互係数)

の比抵抗と負の相関がある(2次磁場が強いほど低比抵抗)ので、1次磁場に対する2次磁場の割合を受信コイルで測定することにより、磁場が透入した深度までの地盤の平均的な比抵抗を測定するのが空中電磁法の探査原理である。

実際の測定においてはヘリコプターの飛行高度が変化するため、測定高度が低ければ(地盤とバードの距離が近ければ)2次磁場が大きくなり、測定高度が高ければ2次磁場が小さくなる。また、使用するコイルの大きさや間隔によっても発生する磁場の大きさに違いが生じる。そのため、地盤の応答以外で測定値に影響する因子を整理し式4.2.1に示した。ただし、現実的には図に示したとおり、送信コイルと受信コイルはバードに固定されており、バードの高さが主な影響因子となる。

図4.2.8から得られる応答係数と、図4.2.9から得られる相互係数を合わせた空中電磁法の

理論式を式4.2.1に示す。なお、応答係数が複素数で与えられるため、相互係数との乗算で得られる2次磁場の強さ(1次磁場に対する2次磁場の割合)も複素数で表されるが、ここではその実部を同相成分比(I)、虚部を離相成分比(Q)と呼ぶ。

$$\frac{H_s}{H_p} = -\frac{M_{rc} \cdot M_{cr}}{M_{rr}} \left(\underbrace{\frac{\alpha^2}{1+\alpha^2}}_{\text{実部}} + j \underbrace{\frac{\alpha}{1+\alpha^2}}_{\text{虚部}} \right) \quad (\alpha = \omega L / \rho)$$

j:虚数単位, ω :角周波数 ($2\pi \times$ 周波数)

$$= (I + jQ) \quad (I : \text{同相成分比(ppm)}, Q : \text{離相成分比(ppm)}) \quad (4.2.1)$$

H_p : 1次磁場の強さ

H_s : 2次磁場の強さ

M_{rc}, M_{rr}, M_{cr} : 相互結合係数(mutual coupling coefficient)

M_{rc} : 送信コイル-地中の渦電流間の相互結合係数

M_{rr} : 送信コイル-受信コイル間の相互結合係数

M_{cr} : 地中の渦電流-受信コイル間の相互結合係数

ρ : 地中過電流の電気抵抗: 求める情報

L : 地中過電流のインダクタンス: 固定値

2) I/Q の計測

受信コイルで受けた2次磁場を同相成分比と離相成分比に分離する原理を図4.2.10に示す。同図の「送信信号と受信信号の関係」に示したとおり、1次磁場と2次磁場は振幅と位相が異なる(注: 2次磁場の振幅は図示のため大幅に増幅している)。

ここで、振幅と位相の組合せの別の表現が同相成分比と離相成分比の組合せとなる。この変換処理は、電子回路的には図に示すように送信信号を基準にした開閉信号と、それから90度(1/4周期)位相をずらした開閉信号を準備し、受信信号をそれぞれの開閉信号で処理(そのままの通過または±を反転して通過を区分)し、平均値を取ることで得られる。

3) 見掛け比抵抗と見掛け高度の計算

2)で求めた同相成分比(I)と離相成分比(Q)を入力値として、各データの見掛け比抵抗および見掛け測定高度を求める。ここでいう“見掛け”は、單一周波数では深度方向の変化を考慮しないことから用いている。また、“見掛け測定高度”は、高度に応じて2次磁場の大きさが異なることから、副次的に求まる値であり深度計算に關係する。

この計算の詳細は、後述の4.3に示すが、あらかじめ多数の計算を行っておき、計算結果をフェーザー図(図4.3.3)に示す $I \cdot Q$ から参照する方法をとっている^{8), 9)}。

(3) 探査深度

1) 基本原理

空中電磁法で得られる比抵抗値に対する探査深度を計算で求め、それを複数の周波数(コイル)を組合せることで深度解析が可能になる。

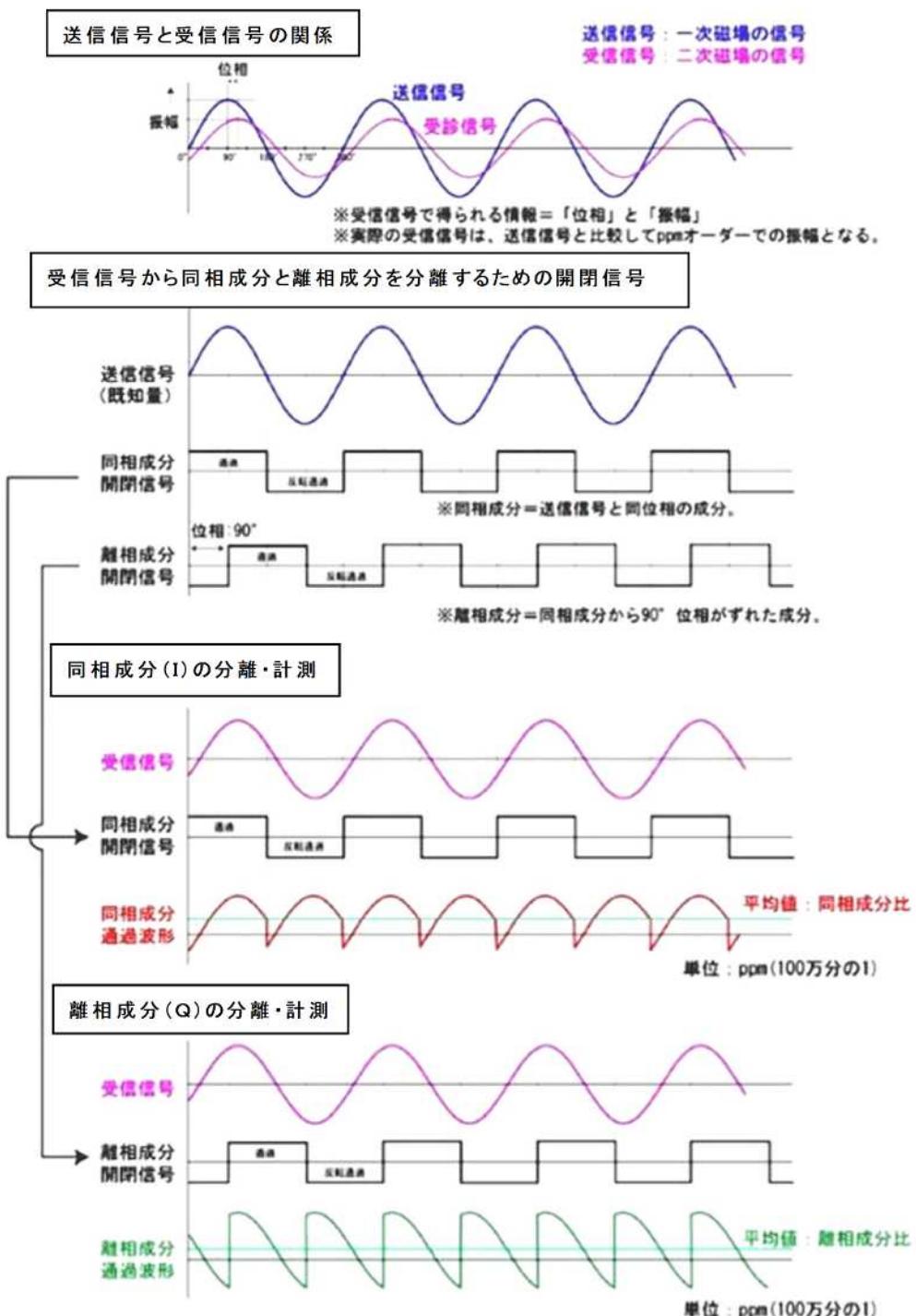
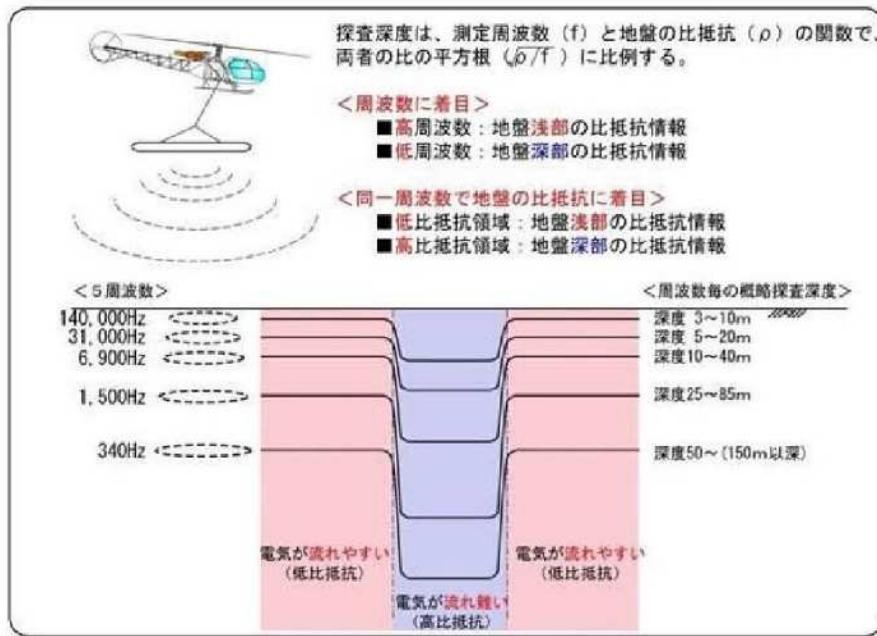


図4.2.10 空中電磁法の探査原理(同相・離相の分離)

送信コイルから発信された磁場の地盤内部への透入深度は、主に測定周波数 (f) と地盤の比抵抗 (ρ) の関数になっており、両者の比の平方根 ($\sqrt{\rho/f}$) に比例する。つまり、高周波数では浅部の、低周波数では深部の比抵抗情報をそれぞれ取得できる。また、図4.2.11に示すように、同一の周波数であっても地盤の比抵抗が低いところでは浅部の、地盤の比抵抗が高いところではより深部の比抵抗情報が取得できる。したがって、各周波数から得られる地盤の比抵抗値は、各探査深度区間での平均比抵抗分布を測定することになる。

2) 高度補正を考慮した計算



図中では省略した3.3kHzの概略探査深度は、6.9kHzと1.5kHzの間になる。
※高度：測定器高さ + 地面への磁場透入深度。

図 4.2.11 空中電磁法の探査深度(周波数別の概略イメージ)

実際の計算は、比抵抗計算で副次的に求まる“見掛け測定高度”を用いた高度補正を組み込んだ原理で行っている(図4.2.12参照)。これは、例えば樹木などで電波高度計の高度に誤差がある場合(電波高度計は樹木を透過しない)などに効果がある。

4.3 解析方法

比抵抗解析のフローを図4.3.1に示すとともに、各解析工程の概要について以下に述べる。

(1) レベリング

1次磁場に対する2次磁場の変化率を精度良く測定するために、空中電磁法探査では見掛け上1次磁場を相殺し、アンプにより2次

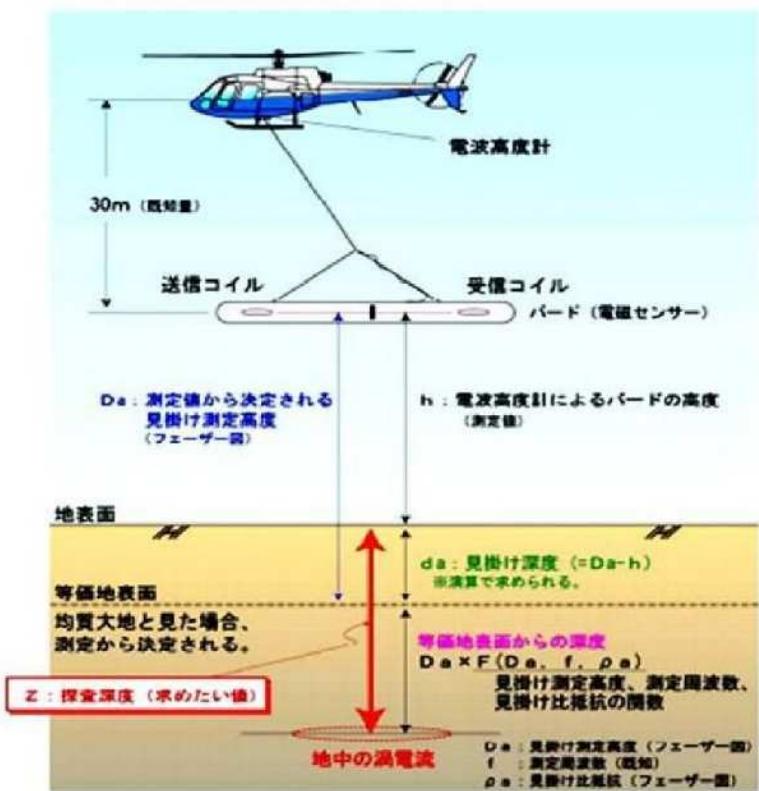


図 4.2.12 空中電磁法の探査深度(高度補正)

磁場を増幅させていることなどから、全体の0レベル(基準値)の調整が必要である(図4.3.2上図参照)。測線間および周波数間のバランスがとれるように適切な0レベルのレベリングを行う(図4.3.2下図参照)。

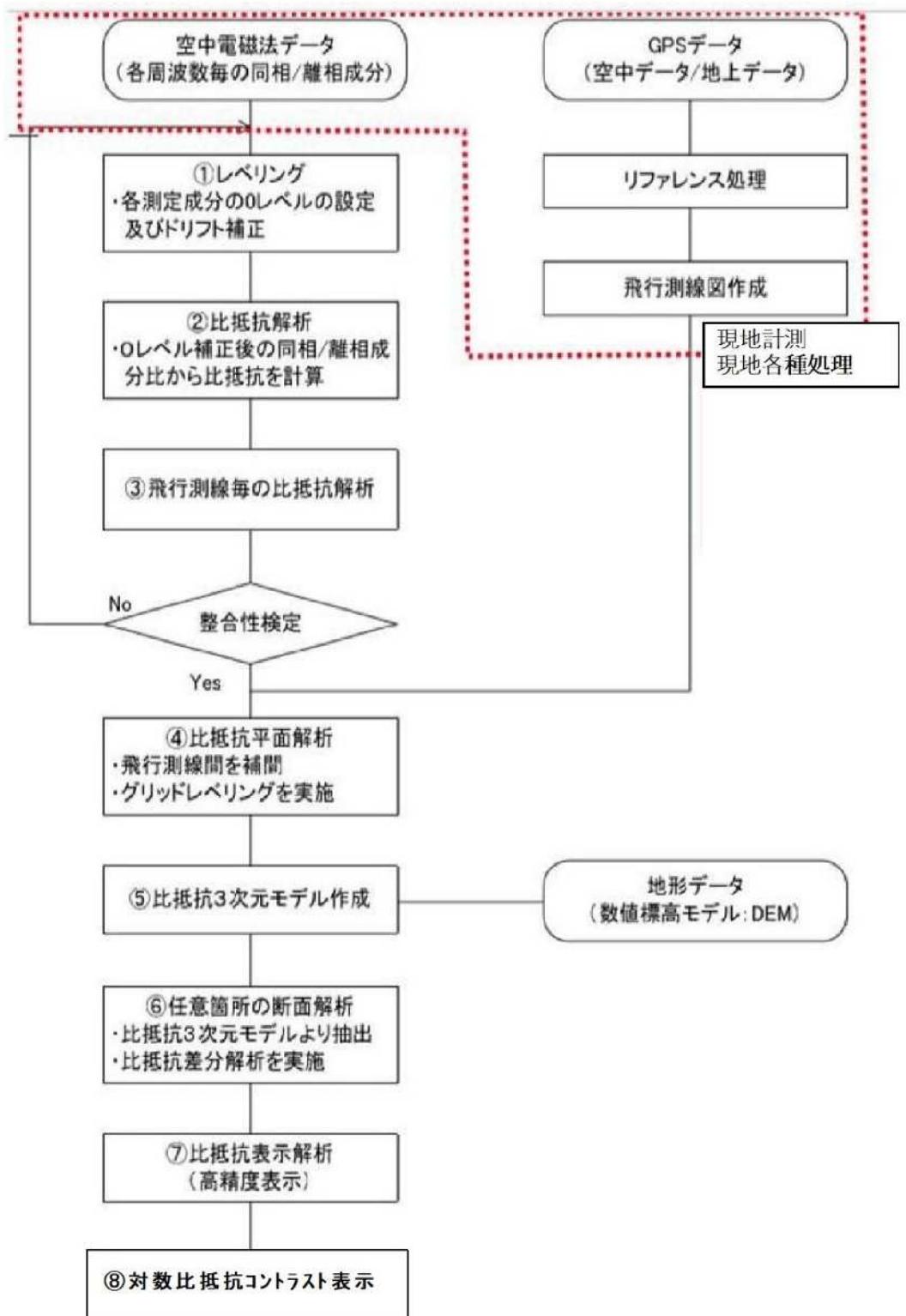


図 4.3.1 空中電磁法探査の解析フロー図

(2) 比抵抗解析

測定で得られる1次磁場と2次磁場の変化の割合は、地盤の比抵抗、測定高度、磁場の周波数および送・受信コイル間の距離によって変化する。これまでの研究により、磁場の変化の割合と比抵抗および測定高度の関係式は、数理モデル計算(水平構造)や模型実験により求められる。この関係式を図化したものが図4.3.3に示すフェーザー図であり、技術的に確立している^{8),9)}。

空中電磁法探査では、フェーザー図を用いて、測定した磁場の変化の割合の同相成分比(I)と離相成分比(Q)を入力し、各データの比抵抗値および測定高度(見掛け測定高度)を求めることができる。ここで得られる比抵抗値および見掛け測定高度と電波高度計で得られた測定器の対地高度を用いることで探査深度を計算する。フェーザー図を用いて測定周波数毎に比抵抗解析(比抵抗値と探査深度の決定)を行うが、これは後続の比抵抗解析作業の基本となる極めて重要な解析プロセスである。

(3) 飛行測線毎の比抵抗解析

飛行測線毎に各周波数の比抵抗および探査深度(平均透入深度)を計算し、図4.3.4に示すプロファイルを作成する。このプロファイルでデータの整合性を検定する。検

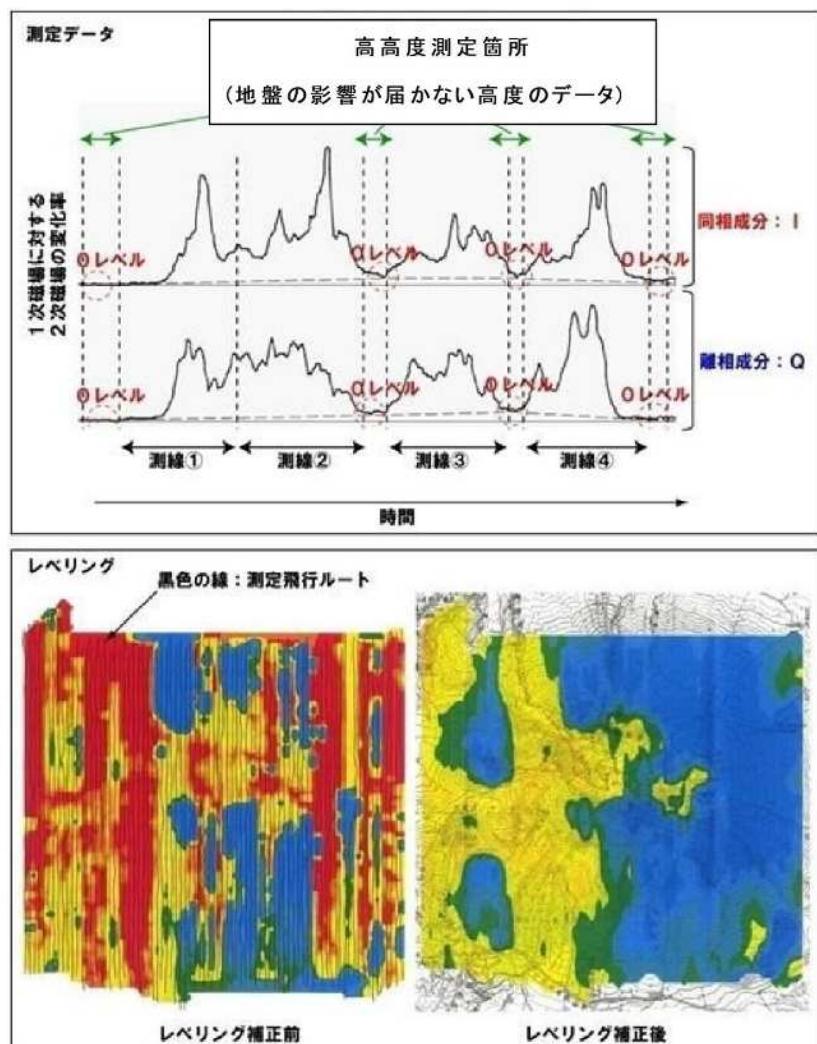


図 4.3.2 空中電磁法のレベリング説明図

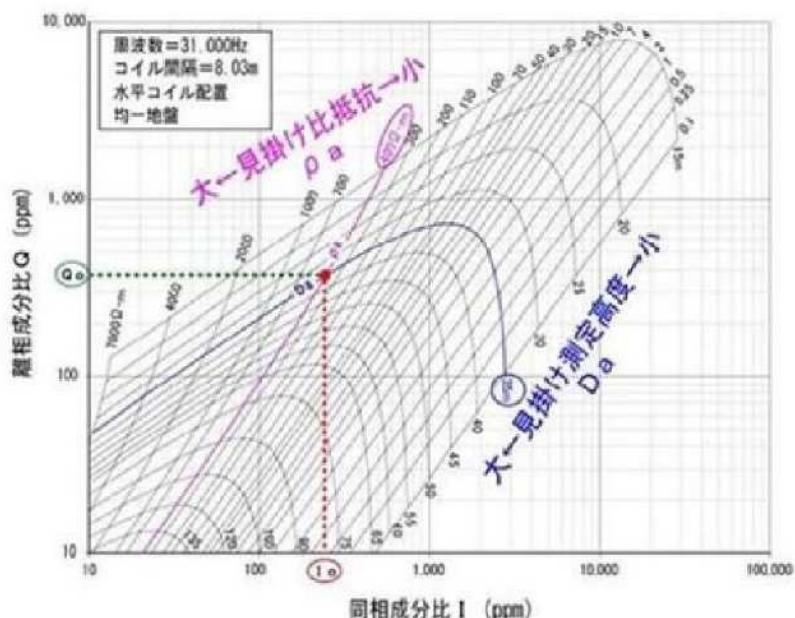


図 4.3.3 フェーザー図による比抵抗および高度の求め方

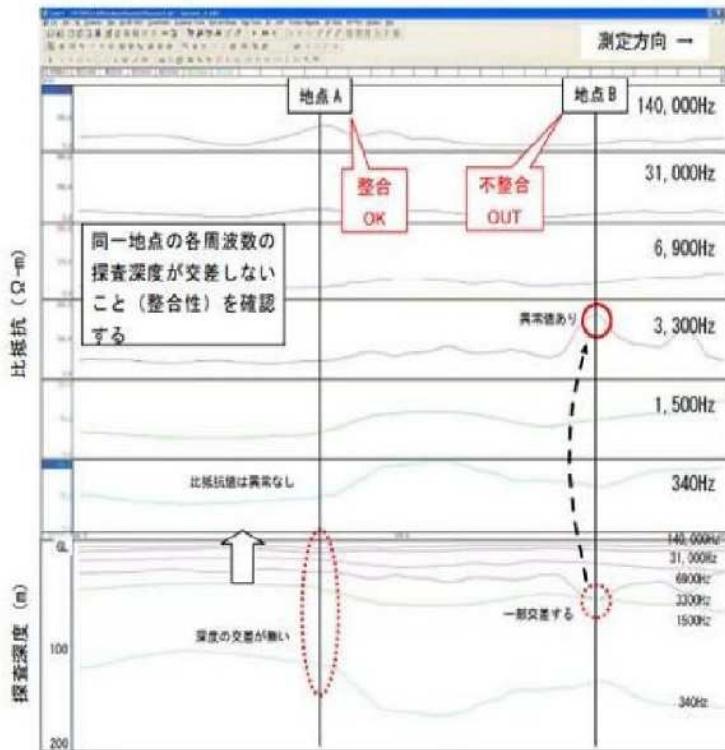


図 4.3.4 比抵抗プロファイルの例

定の方法は、プロファイル上で同一地点の各周波数の探査深度が交差しないことを確認するもので、交差があった場合、いずれかの周波数の比抵抗値に異常値が含まれる。その場合は(1)に戻る。

(4) 比抵抗平面解析

(3)までの過程で確定した飛行測線毎のデータを用いて測線間を補間し、周波数毎に比抵抗平面グリッドを作成する。その上で、測線間の平面分解能の向上を図るためにグリッドレベリング(2次元補正)を実施する。図4.3.5に空中電磁探査によって得られた比抵抗分布の補間・補正方法と表示方法を示す。生データは空白部分が存在するため、その部分を補完する必要がある。また、ノイズなどにより特異値を示すエリアもあるため、平滑化しその部分を補正し、比抵抗分布のカラースケールの検討を行う。得られた比抵抗分布は比抵抗値によって青、赤や黄により色づけしてグラフィック化する必要がある。その表示方法には、等差スケール・等比スケール・等頻度スケールの3タイプがある。

これについては、それぞれの地質や箇所毎に異なり、崩壊面や地下水位などが等頻度スケールにした場合に最も見やすく表示されるスケールを適用する。泥質岩のような低比抵抗分布が主体の場合は、等頻度スケールで表示する。

図 4.3.6 に鉛直方向の比抵抗断面の作成プロセスを示す。電磁波の周波数によって、5深度の比抵抗データが得られる。これらを平面の場合と同様に補間・補正を行う。一般に、地下 200 m を超える場合は空白部分が多いため、地表から地下 200 m までとすることが多い。

(5) 比抵抗 3 次元モデル作成

同一周波数でも、図4.3.6に示すように、解析された比抵抗値に応じて探査深度は異なる。

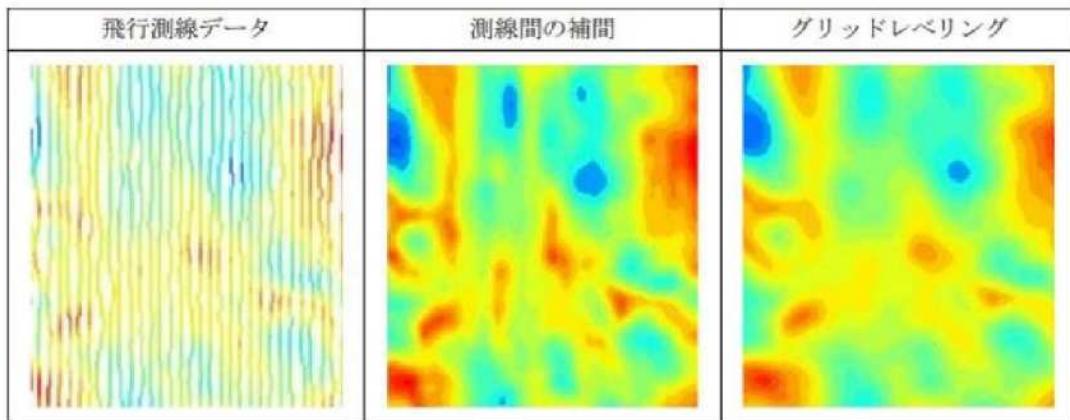


図 4.3.5 空中電磁法の比抵抗平面図作成プロセス

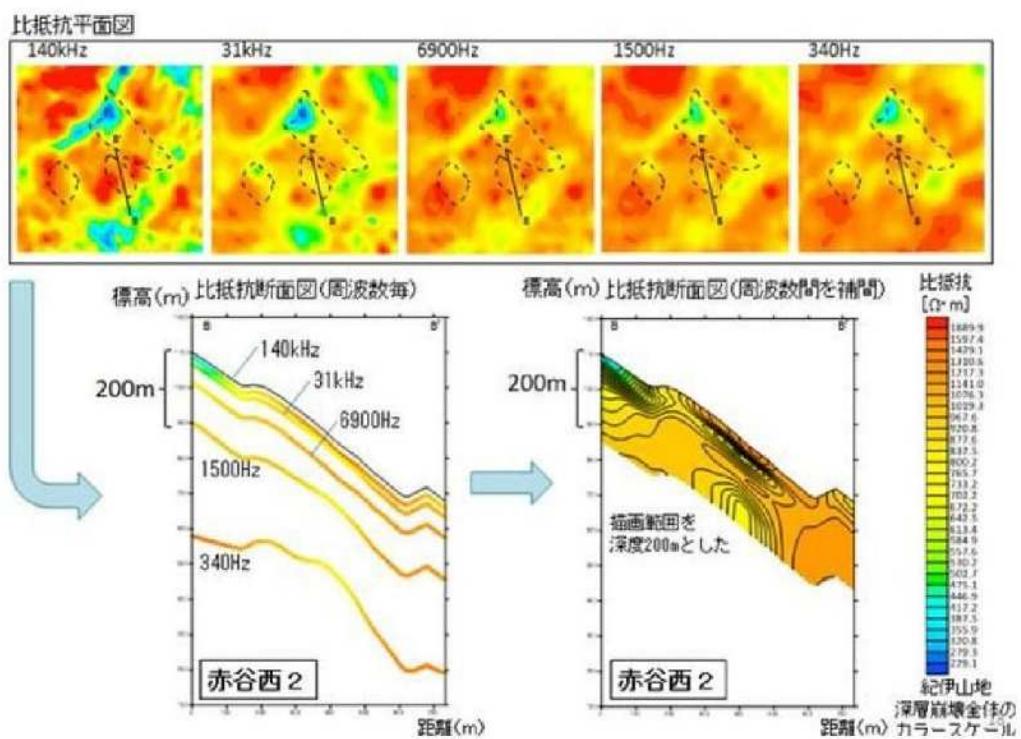


図 4.3.6 比抵抗分布断面図作成プロセス

航空レーザ測量で取得済の数値標高モデル(DEM)と比抵抗値とその探査深度についてGISを利用して整理し、図4.3.7に示すように、比抵抗3次元モデルを作成する。

(6) 任意箇所の断面解析

比抵抗断面図は、各周波数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、深度方向に3次のスプライン補間を施して表現したものであり、比抵抗解析の基本断面図となる。比抵抗断面図を作成するための比抵抗データは、図4.3.8に示すように、比抵抗3次元モデルから抽出する。

空中電磁法探査では高い周波数では浅い深度を計測し、低い周波数では深い深度を計測する。このため深い深度の計測結果は、上層を通過し下層に達するために上層の影響を受けてしまう。その影響を除去するため、解析対象周波数の上層の比抵抗値から確定し、表示深度の調整も併せて行う比抵抗差分解析を実施する。

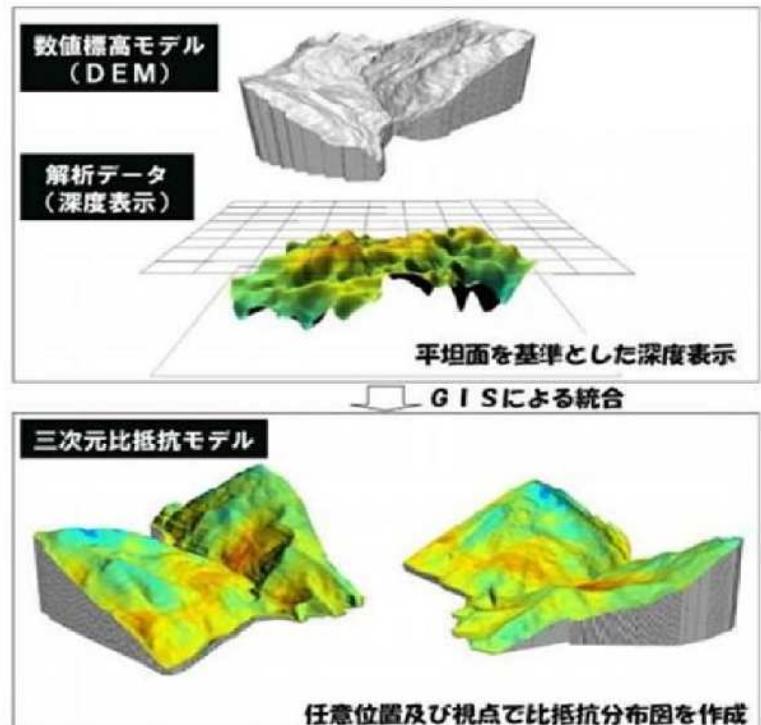


図 4.3.7 3 次元比抵抗モデル説明図

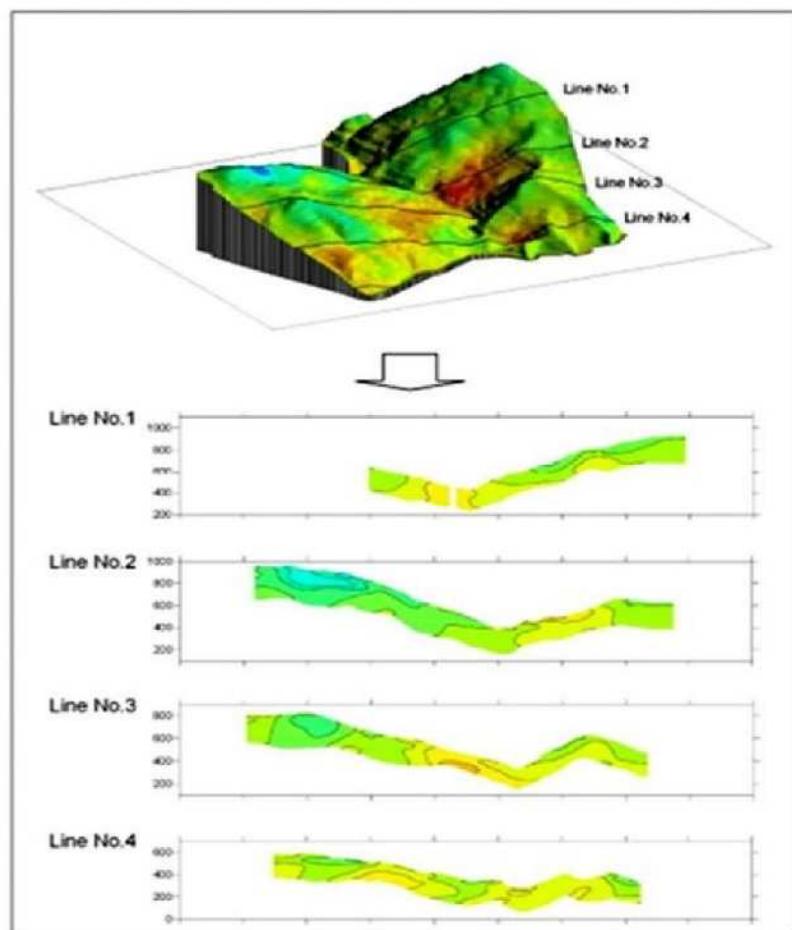


図 4.3.8 比抵抗断面図の抽出イメージ

4.4 比抵抗と地盤物性の一般的な関係および比抵抗から判読できる地盤情報

この項では、比抵抗と地盤物性の一般的な関係および比抵抗から判読できる地盤情報について述べる。

(1) 比抵抗と地盤物性の一般的な関係

1) 比抵抗

比抵抗は単位断面積を通る電流に対する単位長さ当たりの電気抵抗である。単位体積当たりの電気抵抗ではない。導電率の逆数である。単位は $\Omega \text{ m}$ で、通常は記号 ρ で示す。断面積 $S (\text{m}^2)$ 、長さ $L (\text{m})$ の均質な導体の電気抵抗 $R (\Omega)$ は、 $R = \rho L / S$ で表され、このときの比抵抗定数 ρ が比抵抗である。異方性を示すこともあるが、物質固有の電気特性として取り扱うことができるので、電気探査や電磁探査の基本物性として用いられる。

2) 比抵抗に影響する要因

地盤の比抵抗は、岩石や土の組成、破碎帯および亀裂に伴う間隙率、飽和度、地下水の比抵抗、風化および変質に伴う細粒分(粘土鉱物)含有量などによって変化する。飽和地盤の比抵抗に影響を及ぼす要因として、間隙率、地下水の比抵抗、鉱物組成および細粒分(粘土鉱物)含有量などが挙げられるが、地下水の比抵抗が大きく変わらない場合は、間隙率と細粒分(粘土鉱物)含有量に大きく影響される。一方、不飽和地盤の比抵抗は、飽和度の増加に伴って大きく低下し、飽和度が高くなると比抵抗の低下率は小さくなる。

地盤の生成過程と風化・変質過程における比抵抗変化の概念図を図4.4.1に示す。

新鮮な岩盤が、風化に伴う亀裂や断層によって間隙比が増加し、地盤の比抵抗は飽和度や地下水の比抵抗の影響を大きく受けることが読み取れる。一方、マグマによる作用(火成作用)によって変質(熱水変質)を受けることで細粒分の含有量が増加すると、比抵抗が低下する。風化・浸食・堆積作用によって生成された未固結土砂は、間隙率がさらに増加して比抵抗は低下する。

地盤の比抵抗に及ぼす影響の主な要因と比抵抗との関係を表4.4.1にまとめた。

実際の地盤の比抵抗は、いろいろな要因が複合して比抵抗に影響を及ぼしており、どの

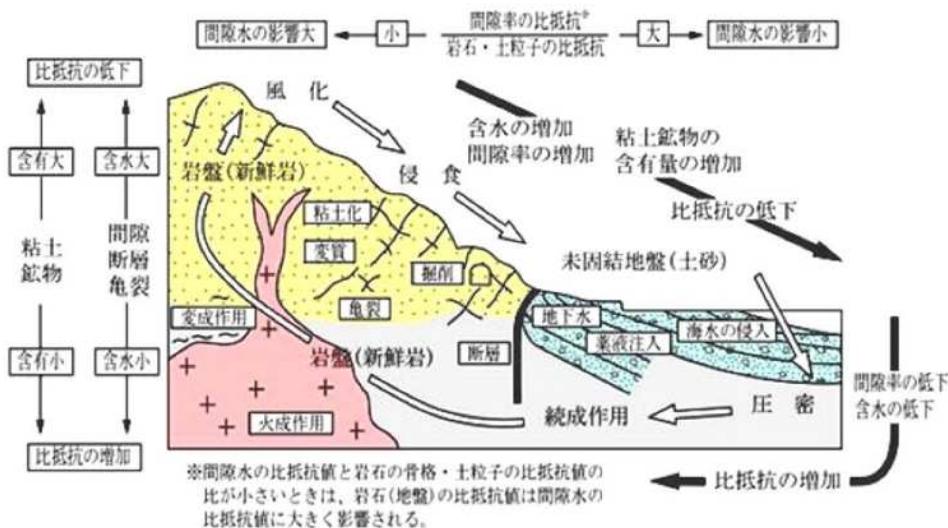


図 4.4.1 地盤の比抵抗の変化に概念図 ^{13), 14)}

表 4.4.1 比抵抗に影響を及ぼす要因

低	←	岩石・土壌の比抵抗 ρ	→	高
湿 (水比抵抗)	←	乾・湿状態 (支配要因)	→	乾 (電導性鉱物の量)
低 (イオン濃度大)	←	間隙水の比抵抗 ρ_w	→	高 (イオン濃度小)
大	↖	間隙率	↗	小
大	↖	間隙水の飽和度	↗	小
多 (25%以上影響大)	↖	電導性鉱物の量	↗	少 (5%以下は影響なし)
多	↖	粘土鉱物	↗	少
大	↖	粘土鉱物の 陽イオン交換能	↗	小

要因がどの程度比抵抗に影響を与えていているのかを定量的に確認することは難しい。たとえば、間隙率の場合、乾燥した状態での比抵抗は間隙を空気で満たされた緩み岩や礫質土は高比抵抗となり、間隙が地下水で満たされた間隙率が小さい緩みの少ない岩盤は低比抵抗となるなど、上表の高低が逆転する現象も多々知られている。しかし最近では、探査事例や、岩石・土質の物性と比抵抗との関係が明らかになりつつあり、これらの研究成果を利用することにより、比抵抗から地盤性状を評価できるようになってきた。

3) 岩石・土質の比抵抗

岩石や土質の比抵抗の分布範囲を図4.4.2に示す。この図は、トンネル地質調査において事前調査として行った比抵抗2次元探査結果から、含水状態や風化程度などを考慮せずに比抵抗を読み取ったものである。この図から、同じ種類の岩石・土質であっても2~3桁も異なる比抵抗を示すこと、異なる岩石・土質であってもほぼ同じ比抵抗を示す場合が読み取れ、比抵抗だけで岩石・土質の種類を判別することが難しいことが読み取れる。

これは、個々の岩石・土質が受けた圧密、続成、膠結、变成、変質の程度や地下水の飽和状態が異なるため、間隙率、間隙水の比抵抗、飽和度、含有粘土鉱物の種類や量などに違いが生じた結果である。したがって、比抵抗の違いを確認することにより、逆に地盤の物理的・化学的環境を知ることができ、特に、同一の地質で比抵抗の違いに着目することにより、その地盤性状を確認できることを意味する。

4) 比抵抗と地盤性状の関係

岩石は、主に石英、長石、黒雲母などの珪酸塩鉱物からなる。これらの鉱物は遊離した電子を持たないため、珪酸塩鉱物を含む岩石は、一般的に高い比抵抗を示す。一方、吸水した粘土鉱物(例えば、膨潤性をしめすことで知られるスマクタイト)は、一般に岩石よりも低い比抵抗を示す。このため、風化・変質の影響で亀裂が地下水で飽和していたり、あるいは細粒分(粘土鉱物)が生じてそれが水を吸着した岩石の場合は、新鮮な岩石よりも低い比抵抗を示すようになる。図4.4.1に示すように、同じ岩石であっても風化・変質などの影響によって、また、地下水の飽和度の違いによって、その比抵抗は大きく変化すること

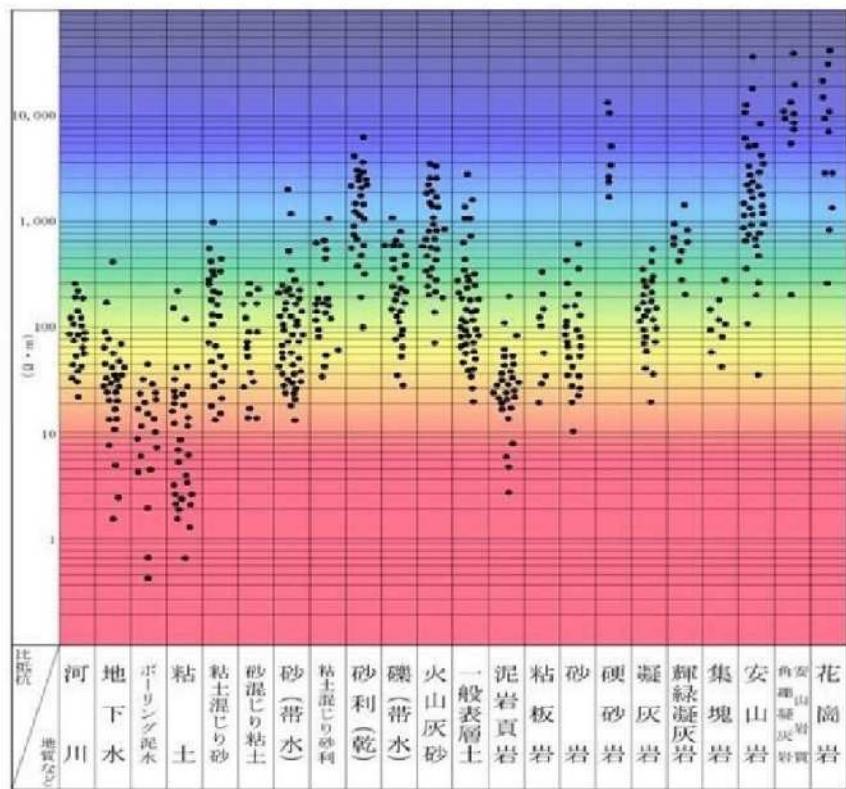


図 4.4.2 一般的な土壤・岩石の比抵抗値¹⁸⁾

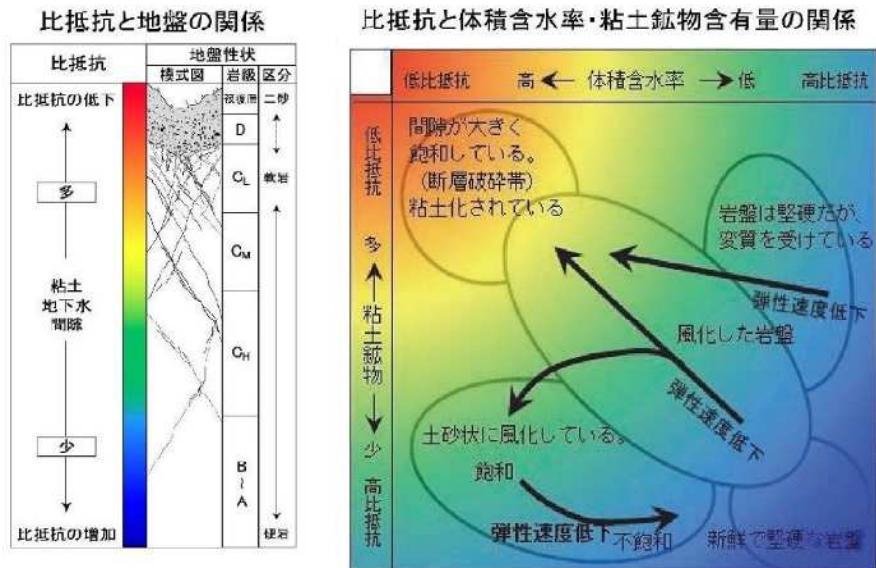


図 4.4.3 比抵抗と地盤状況(体積含水率・粘土鉱物)の関係(模式図)^{8),13),14)}

になる。

四国の「中央構造線」沿いでは、多くの地点で熱水変質に伴うスメクタイトが確認されており¹⁹⁾、堅硬な岩盤といえども低比抵抗を示すことが多い。

5) 比抵抗から土木分野の地質的な解釈を行う根拠

比抵抗から対象とする地盤の状態を解釈する際の根拠を図4.4.3に示す。以下に、地盤状態の解釈に必要な語句の説明を述べる。

i) 間隙率と比抵抗

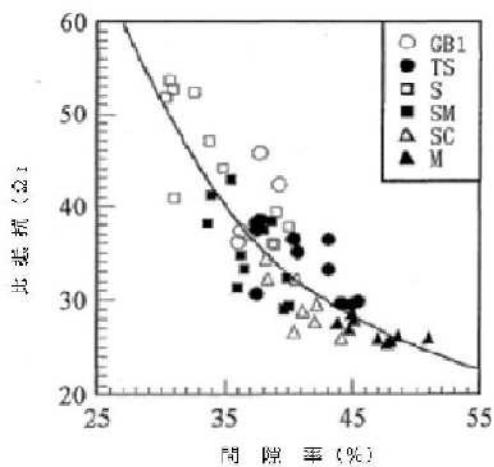


図 4.4.4 比抵抗と間隙率の関係¹¹⁾

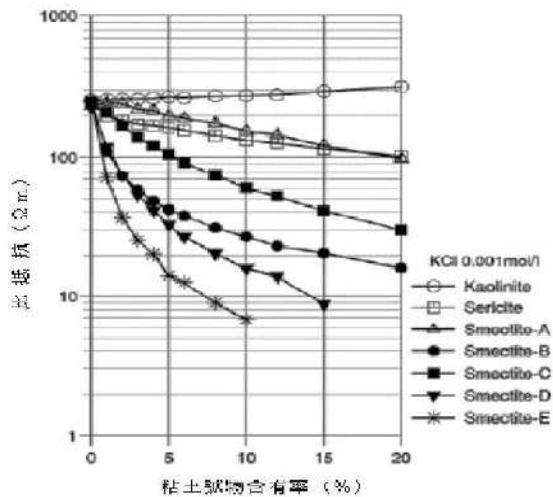


図 4.4.5 比抵抗と粘土鉱物含有率の関係¹¹⁾

一般に、地下水で飽和した地盤の比抵抗は、図4.4.4および図4.4.5に示すように、間隙率が大きいほど低く、小さいほど高い値を示す。したがって、比抵抗が高い岩盤の中にある低比抵抗部は、一般に断層・破碎帶や風化・変質岩と解釈される。一方、乾燥した状態での比抵抗は、間隙率が大きいほど高く、小さいほど低い値を示す。間隙を空気で満たされた緩み岩や礫質土は高比抵抗となり、間隙が地下水で満たされた間隙率が小さい緩みの少ない岩盤は低比抵抗となる。また、未固結土砂の場合には飽和・不飽和にかかわらず、比抵抗が高い場合は砂礫層、低い場合は粘土やシルトなどの細粒分の多い地層である。地下水の流動という観点になると、含水比の小さい砂礫層を流動し、含水比の大きい粘土、シルト層中は流動しない。このため、水分の多少と地下水の流動とは区別して取り扱う必要がある。

ii) 飽和度

地盤の間隙率は、地盤の風化・破碎の程度や未固結土砂の粒度構成や締まり具合などを反映していると考えられる。図4.4.6に示すように、間隙率が一定である地盤の比抵抗は、飽和度が高いほど低く、低いほど高い値を示す。これより、表層に分布する風化岩や未固結土砂に地下水面がある場合には、その比抵抗は地下水面よりも上部は高く、下部は低い値を示し、その境界付近に地下水面がある場合が多い。しかし、第三紀層の泥岩のようにその岩石自体の比抵抗が地下水よりも低い場合には、比抵抗の違いが明瞭ではなく、地下水面は識別できないことがある。

iii) 体積含水率（間隙率×飽和度）

上記 i) と ii) から、地盤の単位体積あたりの水分量が比抵抗に影響を与えていていることが

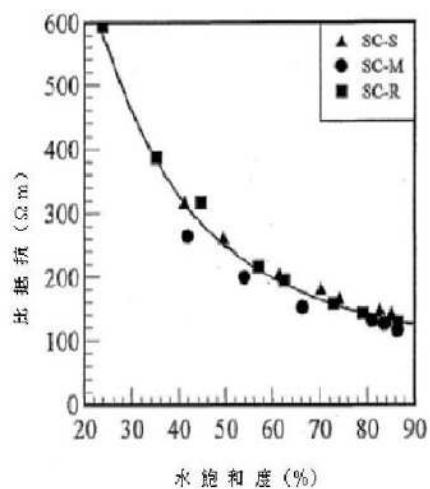


図 4.4.6 比抵抗と水飽和度の関係¹⁰⁾

わかる。この単位体積あたりの水分量を示す指標として、前掲の図4.4.3に示すように、間隙率に飽和度を乗じた体積含水率が用いられている。地盤の比抵抗は体積含水率が大きいと低く、小さいと高くなる。稜線や斜面の表層に沿って分布する高比抵抗領域は、図4.4.1に示すように、地下水面上に分布する不飽和で間隙率の大きい表土・風化土・風化岩、あるいは崖錐であると解釈される。また、地下水面上に分布する低比抵抗領域は、地下水面上で体積含水率の高い風化岩や地すべり土塊として、さらに下部に分布する高比抵抗領域は亀裂や間隙の少ない未風化岩や基盤岩として解釈される。間隙率が周囲よりも高く、地下水を伴う断層・破碎帯は低い比抵抗を示す^{10)~12)}。

iv) 粘土鉱物

地盤の比抵抗は、粘土鉱物の含有量の増加により大きく低下する。粘土分が20%程度の砂質土であっても、その比抵抗は数 Ωm ～数 $10 \Omega m$ と低い。粘土層、泥岩、頁岩や、断層・破碎帯、風化した岩脈、玄武岩やはんれい岩などの風化岩などからなる粘土分が多い地盤の比抵抗は低い。

(2) 比抵抗から判読できる地盤情報

1) “低比抵抗(電気を流しやすい)”地盤

土砂および軟岩は、間隙率が大きいほど密度や強度が小さく、圧縮性や透水性が大きく、地下水を含む場合が多い。このような地盤は工学的には好ましくなく、崩壊や地すべりなどの土砂移動現象の地質的な素因になっている。これら間隙率、体積含水率(間隙率×飽和度)、細粒分(粘土鉱物)含有量が大きいほど、比抵抗は低下する。すなわち、地盤の劣化部を反映し、かつ、相対的に低比抵抗ほど地盤の劣化の程度が大きいことを示す低比抵抗は、不良地盤を抽出する際の重要な指標である。

2) “高比抵抗(電気を流しにくい)”地盤(特に表層部の高比抵抗)

割れ目のない新鮮な硬質岩は、小さな間隙率や透水性で、大きな密度や強度特性を示すことから、工学的に良好な地盤をなす。このような地盤は、図4.4.3に示すように、間隙率、体積含水率(間隙率×飽和度)、細粒分(粘土鉱物)含有量が小さいため高比抵抗を示す。一方、地表付近の硬質岩で、割れ目が卓越するが地下水が不飽和な地盤(緩んだ地盤)の場合でも高比抵抗を示す。これは、割れ目の間隙に電気的に絶縁体である空気が入っているために生じる現象である。このため、同一の岩石で不飽和な状態のまま割れ目が卓越する(間隙率が増加する)ほど、高比抵抗の度合いが増し、割れ目のない新鮮な硬質岩よりも高比抵抗を示すことも知られている。

尾根や凸型斜面の表層に高比抵抗領域が出現する場合は、比抵抗断面図など深部の比抵抗情報を踏まえて「良好な地盤」であるか、「緩んだ地盤」であるかを判定しなければならない。

4.5 比抵抗分布表示方法の開発

4.5.1 開発の背景と概要

従来の比抵抗表示法は、比抵抗測定解析値そのものを表示する方法である。以下では、この表示法を「比抵抗絶対値(通常)表示法」という。この表示法では比抵抗測定解析値の測定箇所ごとの頻度分布の偏りによらず一般的な配色区分によって表示するため、表示に不必要的領域が含まれていることや、頻度分布が部分的に集中し勝ちになることから、配

色区分により人為的な差異が生じ、斜面崩壊などの危険斜面の統一した色調分布や、他地域との測定解析結果との比較ができなくなる。そこで、比抵抗絶対値(通常)表示法の短所を取り除くために、各種の検討を経て、種々の比抵抗分布の表示方法の開発が進められた^{16),20)~22)}。

まず、比抵抗測定解析値の頻度分布を計算し、それにしたがって解析値の分布する強調域を定めて等頻度で色区分して表示する「比抵抗絶対値(高精度)表示法」を適用した。ただし、この表示法では、対象域の比抵抗の差が小さい場合でも細かく配色区分され、色調の違いを過大評価する可能性がある。そこで、比抵抗絶対値表示法の短所を補うために、比抵抗解析値の空間的变化に着目し、周辺との相対的高低を強調する解析・表示手法として、「比抵抗強調値表示法」を開発した。

ところがこの表示法では、高比抵抗域と低比抵抗域での比抵抗変化度の大きさが異なるので、片方の比抵抗変化度に合うスケールでは、もう一方の表示が明瞭でなくなるという短所が生じる。そこで、比抵抗強調値表示法の短所を補うために、上述の比抵抗解析値の対数値のグリッド間の変化度(空間2次微分)を表示する解析・表示手法として、「対数比抵抗強調値表示法」を開発した。

ただし、この表示法では、比抵抗変化度の対数区分を階調で示すために、どの値が有意な地盤情報であるかが判読できない。このため、実際の地盤情報を反映した閾値を設定し、比抵抗変化度を大きくグループ分けする「対数比抵抗強調値(閾値)表示法」へと発展させた。

以上の各種の比抵抗表示法の名称と内容の一覧表を表4.5.1に示す。それぞれの表示法の概要を以下に示す。各表示法の評価は、第7章 7.4.3に改めて詳述する。

4.5.2 比抵抗絶対値表示法

比抵抗絶対値表示法は、比抵抗測定解析値そのものを表示する比抵抗絶対値(通常)表示法と、比抵抗測定解析値の頻度分布に基づいて等頻度で色区分して表示する比抵抗絶対値(高精度)表示法がある。

(1) 比抵抗絶対値(通常)表示法

表 4.5.1 比抵抗表示法の名称と内容の対比

	比抵抗表示法の名称	表示の内容
A	比抵抗絶対値(通常)表示法	比抵抗を等比スケールの18階調で表示
B	比抵抗絶対値(高精度)表示法	比抵抗を等頻度スケール表示
C	比抵抗強調値表示法	比抵抗のラプラスアンフィルター適用値
D ₁	対数比抵抗強調値表示法	比抵抗の2次微分への対数に対するラプラスアンフィルター適用値
D ₂	対数比抵抗閾値(閾値)表示法	5段階の閾値を設定した区分表示

比抵抗2次元探査に用いられる解析結果の比抵抗絶対値(通常)表示法は、浅層部把握に用いられる周波数($f=140\text{ kHz}$)の比抵抗解析値の一般的な区分であり、等比表示(対数表示)による18段階表示が主体である。配色は体積含水率や細粒分含有率の大きい不良地盤に着目して、低比抵抗域を暖色系、良好地盤の高比抵抗域を寒色系で表示するのが一般的である。ここで、周波数($f=140\text{ kHz}$)の解析結果として、比抵抗絶対値(通常)表示法の一例を図4.5.1に示す。この表示法では一定の比抵抗幅を表示範囲とするため、低比抵抗域が強調して表示され、高比抵抗領域の比抵抗分布が不明瞭となる場合が多い。

比抵抗絶対値(通常)表示法は比抵抗値の出現頻度を考慮せず、過去より一般的に行われている任意の閾値で配色を区分した表示法であり、微細な比抵抗構造の判別が難しく、地盤性状の特徴が見落とされる場合がある。

(2) 比抵抗絶対値(高精度)表示法

比抵抗絶対値(通常)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^{3),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(図4.5.2参照)。
- ③ 地盤劣化した斜面の抽出を念頭に、細粒分含有率や体積含水率の高い低比抵抗側に対して暖色系視認性の高い”赤”を配色する。

比抵抗絶対値(通常)表示法の問題点を解決するために、通常、比抵抗値は等差・等比で対数表示されるが、対象地の比抵抗解析値の頻度分布に着目し、等頻度で色区分しデータの集中する領域を細分化表示し、データの少ない領域を粗にすることで、比抵抗データに重み付けを行い、地質解釈の精度を上げる解析手法である。図4.5.2に示すように、周波数 $f=140\text{ kHz}$ における比抵抗の最小値 $6\text{ }\Omega\text{m}$ 、最大値 $950\text{ }\Omega\text{m}$ の比抵抗分布領域における頻度分布を統計処理で求め、その領域における比抵抗の頻度分布と累積曲線を作成し、その最頻値 $250\text{ }\Omega\text{m}$ を求める。最頻値より高比抵抗域では急激に減少する。地盤劣化した斜面において比抵抗構造のコントラストが視認しやすいように、細粒分含有率や体積含水率の高い箇所に着目した区分として、最小値 $20\text{ }\Omega\text{m}$ から最大値 $400\text{ }\Omega\text{m}$ の比抵抗を等頻度区分で表示を行い、配色する。深度 5 m における比抵抗平面図(比抵抗絶対値(高精度)表示法の一例を図4.5.3に示す。比抵抗絶対値(通常)表示法と比較すると、 $150\text{ }\Omega\text{m}$ 以下の低比抵抗域における比抵抗の分布状態が明確になり、崩壊斜面や崩壊の可

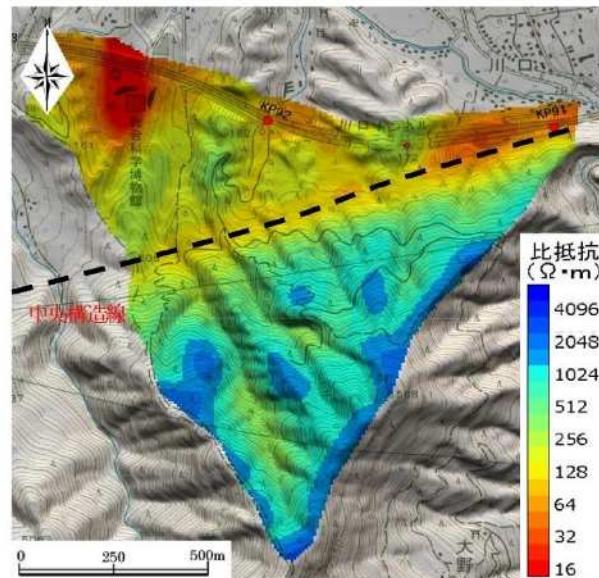


図 4.5.1 比抵抗絶対値(通常)表示平面図

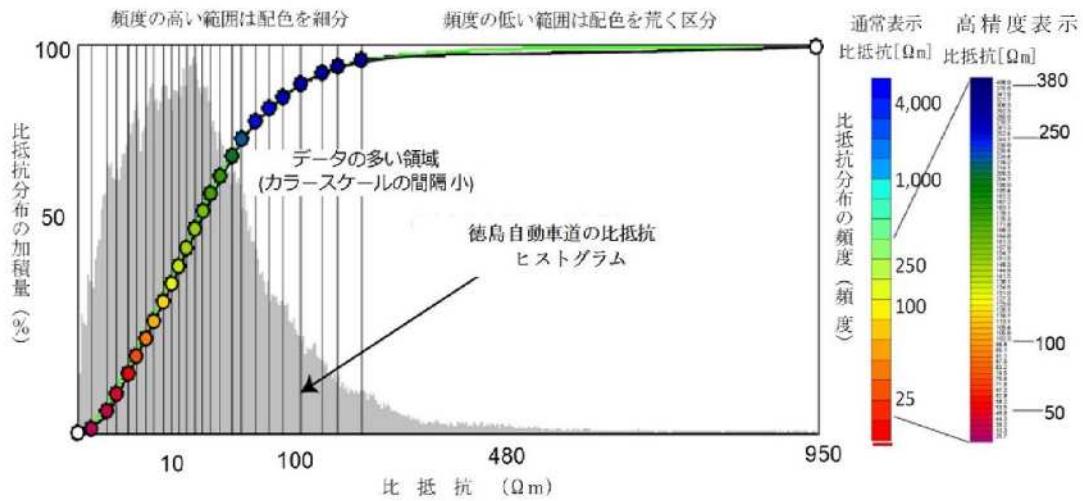


図 4.5.2 比抵抗絶対値(高精度)表示の比抵抗区分とカラースケール

能性が高い斜面の平面的な分布の抽出は可能であるが、断面的分布での地層の抽出は困難な場合がある。したがって、比抵抗絶対値表示法としては、より精度よく地盤性状を把握するためには、比抵抗絶対値(高精度)表示法を用いることが推奨される。

ただし、比抵抗絶対値(高精度)表示法は、探査範囲に分布する比抵抗値にあまり違いがない場合でも細かい配色で区分されるため、色調の違いを過大に評価してしまう可能性がある。

4.5.3 比抵抗強調値表示法

比抵抗絶対値による比抵抗の通常および高精度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場合がある。そこで、すべての自然斜面・人工斜面への適用に向けて、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・解析手法の改善・開発を行う必要がある。現状の比抵抗絶対値表示の課題としては、以下に示す4点が挙げられる^{20),21)}。

- 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值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。

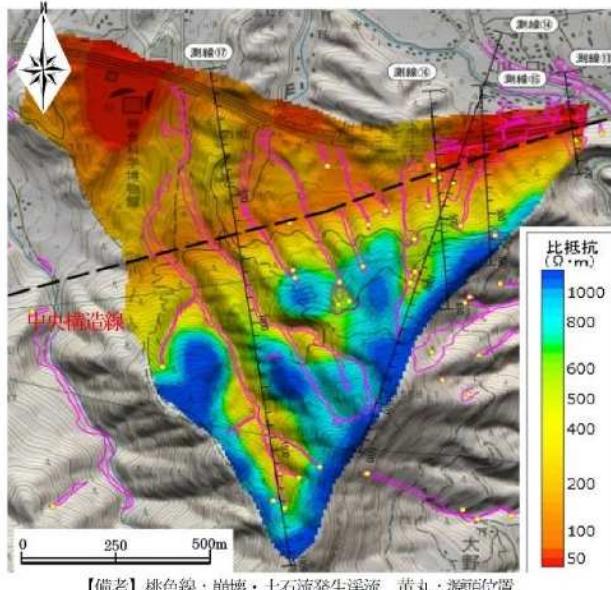


図 4.5.3 比抵抗絶対値(高精度)表示平面図

③ 比抵抗絶対値(通常)表示法は、比抵抗の出現頻度を考慮せず、任意の閾値で配色を区分した表示法であり、微細な比抵抗構造の判別が難しく、地盤性状の特徴が見落とされる場合がある。

④ 比抵抗絶対値(高精度)表示法は、探査範囲に分布する比抵抗値にあまり違いがない場合でも細かく配色が区分されるため、色調の違いを過大に評価してしまう可能性がある。

このような問題点を解決するために、比抵抗解析値の大小ではなく、グリッド間の比抵抗解析値の変化に着目して比抵抗差分解析とラプラスian解析法を用いて解析・表示する手法である比抵抗強調値表示法を開発し、比抵抗の相対的変化を表示する。その表示法を以下に示す。

(1) 比抵抗差分解析法

空中電磁法探査では、高い周波数では浅い深度の部分を計測し、低い周波数では深い深度の部分を計測するが、深い深度を解析する場合は電磁波が上層を通過して下層に達するため、上層の影響を累積して受ける。その影響による比抵抗の誤差を補正するために、図4.5.4に示すように、10 mの比抵抗値グリッドで隣接するグリッドの比抵抗差分に着目し、表示深度の調整も併せて行う手法が比抵抗差分解析である。比抵抗差分解析は、ある周波数 f の深度(差分深度)と比抵抗(差分比抵抗)を、その周波数よりも1ランク高い周波数の所定の項目値との差から求めるもので、その結果は、比抵抗差分解析では浅層部の影響が相殺され、通常解析と比較して、地山深部の比抵抗構造がより鮮明に表現される。すなわち、2次元データの分布に対し、着目するデータとその上下左右4方向の差分を計算し、表示する。具体的には、使用している周波数のうち、最も高い周波数を「周波数A」とし、周波数の高い順に、「周波数B」、「周波数C」…としたとき、周波数Bの差分深度 B と差分比抵抗 B を、周波数Aとの差から求め、周波数Cの差分深度 C と差分比抵抗 C を、周波数Bとの差から求める。その結果、比抵抗差分解析では地表付近の影響が除去され、通常解析と比較して地山深部の比抵抗構造がより鮮明に表現される。すなわち、比抵抗強調値表示による結果は、図4.5.5に示すように、表示法として差分値がプラスの領域(周囲より相対的に高比抵抗)を青色、マイナスの領域(周囲より相対的に低比抵抗)を赤色で表示することとした。

この手法により、着目点における比抵抗の相対的な変化の傾向が視覚的に判別でき、また地盤の構造や性状と良い相関が得られ、比抵抗構造の客観的で微細な変化の傾向を捉えることができる。詳細については、参考文献^{15),16),20)}を参照されたい。

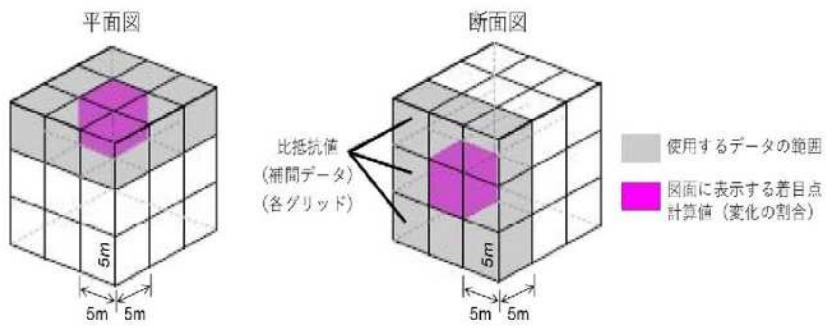


図 4.5.4 比抵抗強調値の表示手法の概要図

(2) ラプラシアン解析法（画像処理表示法）

ラプラシアン解析は画像処理技術の一つであり、対象地点と周辺画素データとの相対変化を抽出し、比抵抗分布の変化的傾向を強調表示するための手法として採用されている。空中電磁法探査における比抵抗の処理に応用する場合は、測定密度の異方性とそのために生じる補間領域の処理が問題となる。比抵抗差分解析を行ったグリッド形式の比抵抗測定値に対してスムージング処理を行い、測定値に含まれるすべての格子点の比抵抗を、その周辺において一定の距離にある複数（平面もしくは断面方向に隣接する8つ）の格子点の比抵抗の平均値との変化度に置き換える。ラプラシアン解析を行って出力した任意の断面の比抵抗構造を示す断面図において階調模様のうち、「青色表示」は周囲より相対的に比抵抗が高いところ、「赤色表示」は周囲より相対的に比抵抗が低いところ、また「白色表示」は比抵抗が周囲と相対的に変化のないところを示す。つまり、着目点の比抵抗が周辺の比抵抗に比べて、その増減傾向を解析するもので、上記の着目点の比抵抗が周囲より差分値の高低差を表す青色・白色・赤色で表示したラプラシアン解析図を作成する。ラプラシアン解析によって得られた探査地域の比抵抗強調値分布平面図の一例を図4.5.5(図4.5.6と比較するため青・赤着色を反転して表示した。)に示す。この「比抵抗強調値表示法」による結果は、図4.5.5に示すように、山地部の高比抵抗域では明瞭に表示されるけれども、平野部などの低比抵抗域では明瞭には表示されないことが分かる。これは高比抵抗域での比抵抗の変化度に合わせると、低比抵抗域では、変化度が小さいため、明瞭に表示できないことが原因である。

4.5.4 対数比抵抗強調値表示法

改善のため開発した対数比抵抗強調値表示法は、比抵抗解析値の大小ではなく、グリッド位置の比抵抗解析値間の対数値での変化度（空間2次微分）を表示する方法である。つまり、対数比抵抗強調値表示の解析は、10 m間隔の比抵抗値グリッドに空間フィルターを適用して比抵抗の変化度を算出するもので、このフィルタリングの内容は空間2次微分（空間座標（ここでは二次元のX, Y）の関数としての比抵抗値（スカラー値）の距離による2階の偏微分）で、東西と南北方向の距離微分をそれぞれ2回繰り返した「ラプラシアン」である。この表示法による結果の一例を図4.5.6に示す。この図では、平野から山地にかけて比抵抗値の変化をより明瞭に可視化できる。したがって、より精度よく地盤性状を把握するためには、新たに開発した対数比抵抗強調値表示法を用いることが推奨される。

しかし、対数比抵抗強調値表示法において、比抵抗変化度の対数区分を階調で表しているため、どの値が崩壊危険斜面の抽出に有意な地盤情報であるかが的確に判定できない問題が生じる。そこで、この課題を解決するために、現地で確認された地盤情報を反映して

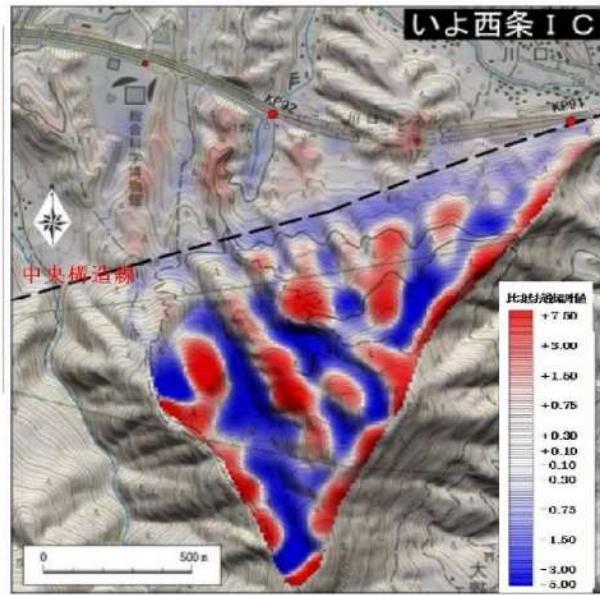


図 4.5.5 比抵抗強調値表示平面図

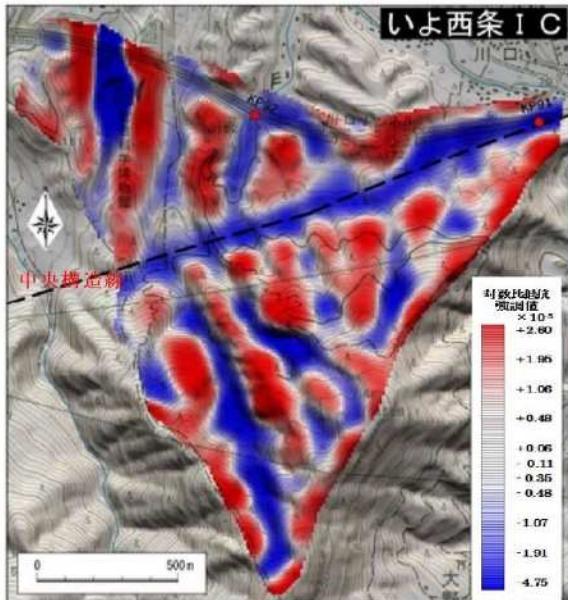


図 4.5.6 対数比抵抗強調値表示平面図

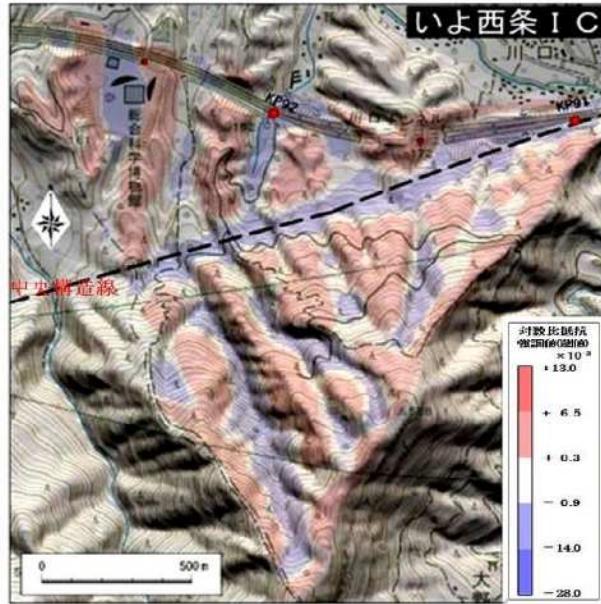


図 4.5.7 対数比抵抗強調値(閾値)表示平面図

試行前後	対数比抵抗強調値(閾値)					
	+28.0	+14.0	+0.7	-0.7	-14.0	-28.0 $\times 10^{-3}$
初期値						
最終値	+13.0	+6.5	+0.3	-0.9	-14.0	-28.0 $\times 10^{-3}$

図 4.5.8 閾値のカラースケールの試行結果²²⁾

閾値を設定し、閾値間の比抵抗変化度により崩壊危険斜面を大掴みに区分する対数比抵抗強調値(閾値)表示法へと発展させた。

4.5.5 対数比抵抗強調値(閾値)表示法

閾値の区分は、地盤性状を大掴みにするために、比抵抗変化度増加域(赤色系)2区分、比抵抗変化度増減の境界域(白色)、比抵抗変化度減少域(青色系)2区分の合計5区分とした。この表示法による結果の一例を図4.5.7に示す。

閾値の設定方法は、既往ボーリング位置における比抵抗柱状図を作成し、地盤の比抵抗に影響を与える粘土分含有率、体積含水率に関連する地盤情報と比抵抗絶対値(高精度)および対数比抵抗強調値を対比し、精度検証をしつつ試行を繰り返して、比抵抗の閾値を決定した。具体的には、対数比抵抗強調値区分における閾値のカラースケールの初期値として、プラスマイナスを均等にした。その際には、比抵抗変化度増減の境界域である白色領域を比抵抗変化度の小さい淡青色域の5%とした(図4.5.8参照)。この閾値に対する対数比抵抗強調値柱状図とボーリング柱状図などの地盤データを対比し、各区分における的中率がバランスよく100%にできるだけ近付けることを目標に、白色域に対して比抵抗変化度減少域をほとんど変化させずに比抵抗変化度増加域を狭くしながら3回試行した。対象

表 4.5.2 対数比抵抗強調値表示区分と閾値および地盤性状²²⁾

対数比抵抗強調値(閾値)表示区分	閾値 (対数比抵抗変化度)	地盤性状
比抵抗変化度増加域(濃赤色系) 区分 b(大きい変化)	$+6.5 \times 10^{-3}$ 以上～ $+13.0 \times 10^{-3}$ 未満	体積含水率・粘土分含有率が低い。 亀裂性岩盤・中硬岩・硬岩
比抵抗変化度増加域(淡赤色系) 区分 a(小さい変化)	$+0.3 \times 10^{-3}$ 以上～ $+6.5 \times 10^{-3}$ 未満	体積含水率・粘土分含有率がやや低い。 礫質土・強風化軟岩・軟岩
比抵抗変化度増減の境界域(白色) 区分 0(変化なし)	-0.9×10^{-3} 以上～ $+0.3 \times 10^{-3}$ 未満	体積含水率・粘土分含有率の境界域で、変化なし。
比抵抗変化度減少域(淡青色系) 区分 a(小さい変化)	-14.0×10^{-3} 以上～ -0.9×10^{-3} 未満	体積含水率・粘土分含有率がやや高い。 土砂、風化岩、変質帶、破碎岩等。
比抵抗変化度減少域(濃青色系) 区分 b(大きい変化)	-28.0×10^{-3} 以上～ -14.0×10^{-3} 未満	体積含水率・粘土分含有率が高い。 土砂、風化土砂、変質帶、破碎帶粘土等。

とした柱状図などの地盤データは、徳島自動車道と松山自動車道の4地区におけるボーリングデータである。試行の結果、最終的に得られた閾値のカラースケールを図4.5.8に示す。最終的なカラースケールを用いた場合のボーリング柱状図と閾値区分との的中率は、概ね下記のとおりであった。

- ・比抵抗変化度減少域の大きい濃青色は、85%が崩積土・風化土砂、変質・破碎帯などである。
- ・比抵抗変化度増加域全体の濃・淡赤色は、100%が岩盤である。
- ・比抵抗変化度増加域の大きい濃赤色は、90%が風化岩・緩み岩盤などである。

以上の結果に基づけば、対数比抵抗強調値表示における閾値による数値区分は、表4.5.2に示すように、地盤性状を反映させた5区分となる^{21),22)}。したがって、対数比抵抗強調値(閾値)表示法によって、斜面の崩壊危険度評価を数値区分として行うことが可能となる。なお、今回得られた閾値の一般性については、7.3.2(3)4)において後述する。

(1) 対数比抵抗強調値(閾値)表示法による表示例

図4.5.7は、対数比抵抗強調値(閾値)表示法による表示例を示したものである。この図では、平野部から山地部にかけて比抵抗の変化を明瞭に可視化できることが分かる。ただし、このケースでは地下浅所の体積含水率や粘土分含有率の変化の小さい状況を表しているため、比抵抗変化度の増加域と減少域の区分b(大きい変化)は表れていない。そこで、体積含水率や粘土分含有率の変化度の大きく図4.5.8の5区分すべてが現れる例として、比抵抗絶対値(高精度)表示法と対数比抵抗強調値(閾値)表示法による断面図をそれぞれ図4.5.9および図4.5.10に示す。この斜面は、地質断面図の図4.5.11に示すように、頂部から斜面中腹にかけて地すべり地形の緩斜面、中腹から山麓の遷急線にかけて階段状の斜面をなし、「中央構造線」が通過する。山麓緩斜面～河床平坦面では土石流堆積物による沖積錐を形成する。この断面の比抵抗絶対値分布は、図4.5.9に示すように、斜面頂部～中腹では200Ωm以上の垂直方向、山麓～河床側では水平方向の比抵抗分布を示す。被覆層の冲積錐は64Ωm以下の粘土分含有率・体積含水率が高い軟弱な砂礫層からなる。基盤岩は、「中央構造線」の影響を受け変質し64～130Ωmで深部に向かって比抵抗が大きくなる。一方、対数比抵抗強調値(閾値)分布は、図4.5.10に示すように、色調は図4.5.7と異

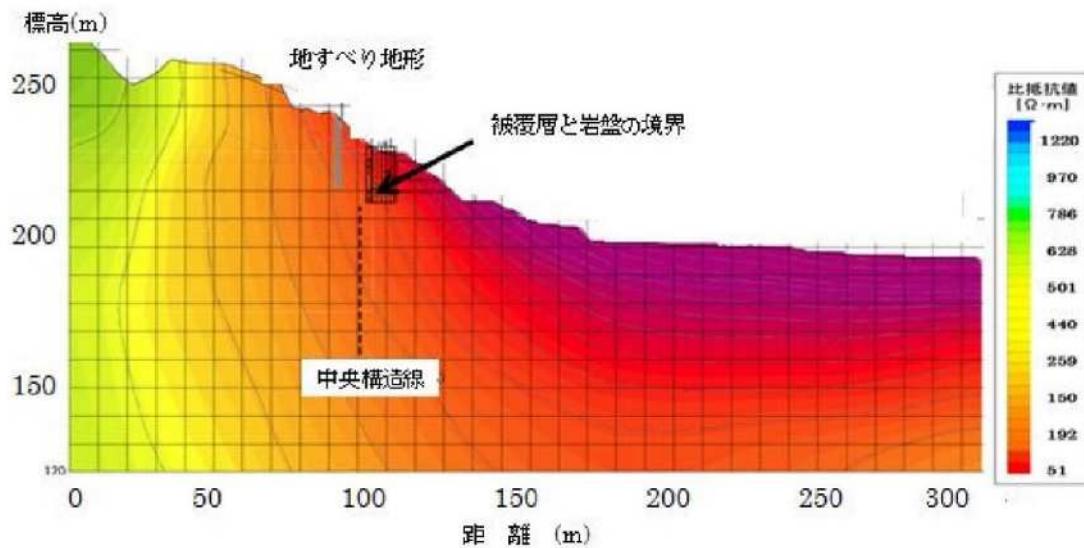


図 4.5.9 比抵抗絶対値(高精度)表示断面図²²⁾

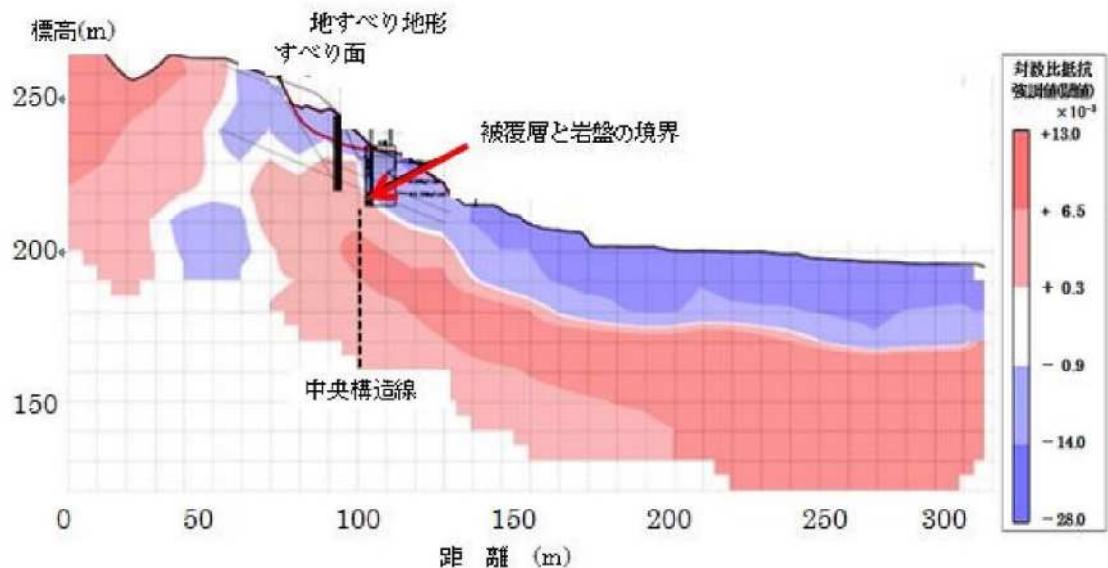


図 4.5.10 対数比抵抗強調値(閾値)表示断面図²²⁾

なり 5 段階(変化度減少域区分 $a \cdot b$, 境界域, 増加域区分 $a \cdot b$)に明確に分かれる。表層 20 m は青色域で, 沖積錐は減少域区分 b , その間の風化岩は減少域区分 a を示し, 高い体積含水率や粘土分含有率を示す。境界域の白色域は明瞭に狭い範囲で連続しており, 被覆層と岩盤の境界を示す。白色域より下部の赤色域は基盤岩であり, 增加域区分 $a \cdot b$ で体積含水率・粘土分含有率が低い亀裂の少ない硬質岩であることを示す。その結果, 「対数比抵抗強調値(閾値)表示」は, 「中央構造線」位置や地すべり土塊および土石流堆積物など現地踏査結果やボーリング調査結果で確認された地盤情報をよく反映した区分になっている。このため, この「対数比抵抗強調値(閾値)表示」により, 地域(地質)特性に関係なく, 数値的に地山評価をすることが可能となる。

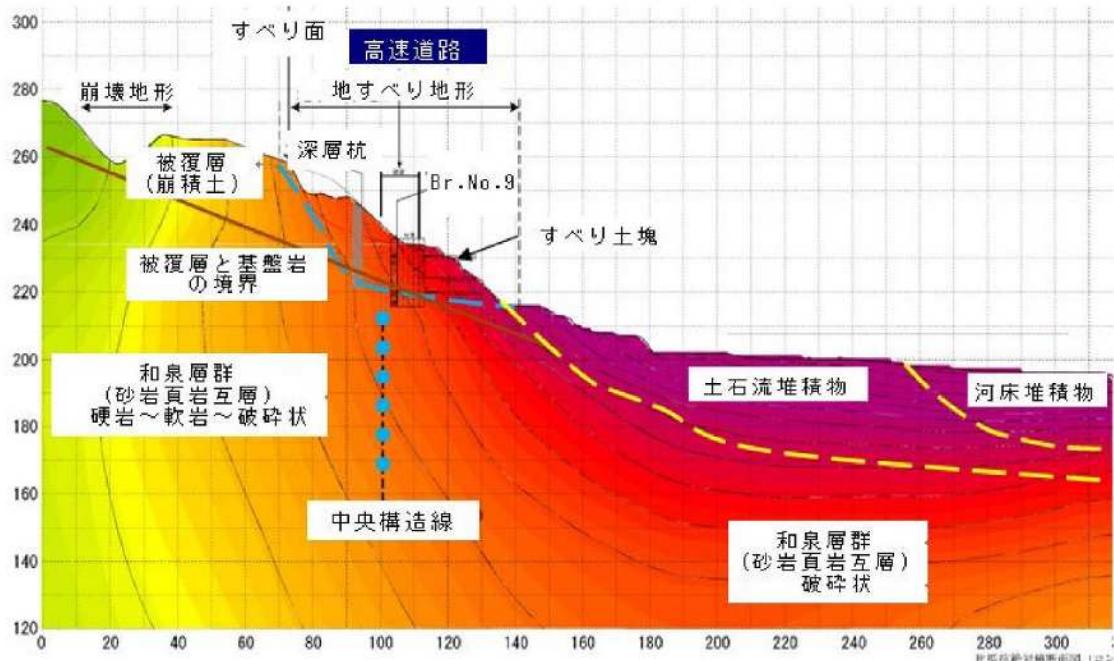


図 4.5.11 地質断面図²²⁾

4.6 むすび

本章では、まず高速道路に沿う斜面の予防保全の一環の地盤性状把握手法として、空中電磁法探査の概要および特徴としての地盤調査の新規性、ならびに比抵抗と地盤物性の一般的な関係および判読できる地盤情報について述べるとともに、比抵抗分布表示法の開発を行った。その結果、空中電磁法探査の優位性と課題を明らかにするとともに、各種の比抵抗表示法の特徴および長所・短所を明らかにした。

本章で具体的に得られた内容は、以下のとおりである。

- (1) 空中電磁法探査による地盤調査は、帯状で広範な高速道路周辺の斜面における3次元的な比抵抗状況を効率的に把握でき、かつ得られる地盤の比抵抗は、岩石や土の組成、破碎帶および亀裂に伴う間隙率、飽和度、地下水の比抵抗、風化および変質に伴う細粒分(粘土鉱物)含有量などによって変化するので、高速道路の崩壊の危険性が高い斜面のスクリーニングに有用な基本データとなり得ることを示した。
- (2) 従来の比抵抗表示法は、比抵抗測定解析値そのものを表示する比抵抗絶対値(通常・高精度)表示法であり、以下の長所・短所を有する。すなわち、比抵抗絶対値(通常)表示法では配色区分において頻度分布が部分的に集中し勝ちになることから、配色区分により人為的な差異が生じ、斜面崩壊などの危険斜面の統一した色調の分布や、他地域との測定解析結果との比較ができなくなる。また、比抵抗測定解析値の頻度分布から等頻度で色区分して表示する比抵抗絶対値(高精度)表示法では、比抵抗絶対値(通常)表示より高精度に比抵抗分布を表示できる。ただし、配色区分が人為的な差異が生じるとともに、対象域の比抵抗の差が小さい場合でも細かく配色区分され、色調の違いを過大評価する可能性がある。
- (3) 比抵抗絶対値(通常・高精度)表示法の短所を補足するために、各種の検討を経て、

比抵抗強調値表示法、対数比抵抗強調値表示法および対数比抵抗強調値(閾値)表示法の3種の比抵抗分布表示法を開発し、それぞれの特徴および長所・短所を実例に基づいて明らかにした。

- (4) 上記した3種の比抵抗表示法における具体的な特徴および長所・短所は以下のようであり、それぞれ高速道路の崩壊の危険性が高い斜面のスクリーニングに有用であり、用途により使い分けることを推奨する。
- ① 3種の比抵抗表示法とも、比抵抗解析データ(比抵抗絶対値)ではなく、グリッド間の比抵抗解析データの変化量を表示する指標であり、体積含水率や細粒分(粘土)含有率などの変化を明瞭に表示することができる。
 - ② 比抵抗強調値表示法では、山地や丘陵部での変化が明瞭に表示されるスケールを用いると、平野部や谷地部での変化が明瞭に表示できなくなる。この短所は、対数比抵抗強調値表示法では解消され、山地部や平野部にかかわらず変化の表示が明瞭になされる。
 - ③ 対数比抵抗強調値表示法では、比抵抗変化度の対数区分が階調表示のため、どの値が有意な地盤情報であるかが判読できない。そのため、地盤情報を数値的に反映できるように、閾値を設定した対数比抵抗強調値(閾値)表示法へ発展させた。

[第4章の参考文献]

- 1) 物理探査学会:新版 物理探査適用の手引き—土木物理探査マニュアル—2008, 2008.
- 2) 日外勝仁, 伊藤佳彦, 中川伸一, 岡崎健治:空中物理探査による広域的な地質構造調査, 基礎工, Vol.61, No.8, pp.31~33, 2006.
- 3) 岡崎健治, 伊東佳彦, 有田政博:空中電磁探査及び空中磁気探査を用いた道路斜面の地質構造の推定, 物理探査学会第113回学術講演会講演論文集, No.113, pp.247~250, 2005.
- 4) 中里裕臣, 黒田清一郎, 奥山武彦, 伊藤吾一:破碎帶地すべり地域における空中電磁法探査, 農業土木学会講演要旨, pp.934~935, 2003.
- 5) 中里裕臣, 黒田清一郎, 奥山武彦, 伊藤吾一, 佐々木裕:地すべり危険度区分における空中電磁法の適用性, 農業工学研究所技法, No.202, pp.197~204, 2004.
- 6) 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.
- 7) 小西尚俊, 塚田幸広:空中電磁法による地質評価への実際的検証, 土木学会論文集, No.680/III-55, pp.285~294, 2001.
- 8) 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.
- 9) 長谷川健, 山田信人, 遠藤令誕, 小出馨:ヘリコプターを用いた空中物理探査データの再解析, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research, 2013-028, pp.1~47, 2013.
- 10) 高倉伸一:粘土鉱物を含有する岩石の比抵抗—間隙水の塩分濃度と温度が及ぼす影響—, 物理探査, Vol.62, pp.385~396, 2009.
- 11) 朴三奎, 藤原寛, 朴美京, 松井保:土の比抵抗に関する基礎的研究, 物理探査, Vol.52, pp.299~306, 1999.
- 12) 高倉伸一:粘土鉱物を含む試料の比抵抗と物理・化学・力学的特性との関係, 物理探

査, Vol.53, pp.415~426, 2000.

- 13) 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, pp.107, 1997.
- 14) 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.
- 15) 大日本コンサルタント(株)：特許No. A524337 空中電磁法探査による地盤の解析方法, 2013.
- 16) 牧浦信一, 上出定幸, 堤 浩志, 奥村 稔, 小田和広, 松井 保：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, 地盤工学会中国支部, 地盤と建設, Vol.36, No.1, pp.17-30, 2018.
- 17) 道路保全技術センター 道路防災点検の手引き編集委員会:道路防災点検の手引き(降雨・豪雪等)2007, 2007.
- 18) 島 裕雅・梶間和彦・神谷英樹編:建設・防災・環境のための新しい電気探査法「比抵抗影像法」, 古今書院, 1995
- 19) 矢田部龍一, 八木則男, 佐藤修治, 長谷川修一：道路建設に伴う四国の中中央構造線沿いの地すべりの特性, 地すべり, Vol.34, No.2, pp.422~49, 1997.
- 20) 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, 2018-TPC-0735, pp.682-687, 2018.
- 21) 牧浦信一, 上出定幸, 堤浩志, 奥村稔, 小田和広, 松井 保: 高速道路斜面の予防保全管理のための空中電磁法探査の利用,Kansai Geo-Symposium 2019, P-01, 地盤工学会関西支部 地下水地盤環境に関する研究協議会, 2019.
- 22) 牧浦信一, 上出定幸, 櫻谷慶治, 奥村稔, 小田和広, 松井保: 高速道路斜面の予防保全管理への空中電磁探査の適用, 土木学会論文集F4(建設マネジメント), Vol.77, No.1, pp.83-95, 2021.

第5章 空中電磁法探査による高速道路斜面における適用性実験

5.1 概 説

高速道路斜面の予防保全管理のための空中電磁法探査の最適な測定方法とその適用性を検討するために、舞鶴若狭自動車道舞鶴東 IC周辺で実験を行う。

この適用実験は、広域的に地盤性状を把握するための地盤比抵抗を求めることが可能な空中電磁法探査を供用路線の自然斜面や人工斜面(切土・盛土のり面)に適用する調査実験を行い、測定条件の相違(測線間隔、測定高度の違いによる分解能などの精度)、探査障害物(斜面に設置されているロックボルト工などの金属製埋設物)の影響について検討とともに、最適な測線間隔と測定高度を提案する。

また、空中電磁法探査で得られた地盤の比抵抗構造の妥当性について、地上電気・電磁法探査での比抵抗データ、既往の地質調査資料、工事中の施工記録および現地踏査から得られた地質・岩質・地下水などの地盤情報などによって検証し、空中電磁法探査の適用性を明らかにする。なお、この適用性実験における表示法は、比抵抗絶対値(通常)表示法を採用している。

5.2 適用性実験の概要

適用調査のための実験地は、図 5.2.1 に示す京都府北部の舞鶴若狭自動車道 舞鶴東 IC 周辺の舞鶴市木ノ下～堂奥地区の区間であり、多くの人工斜面が分布する箇所である。

対象箇所は丘陵地形～緩い山地地形を示し、定高性の山頂は準平原の平坦面をなし、風化が進み風化土砂が厚く分布する。直線状の谷や沢は、断層破碎帯^{1),2)}や褶曲などの地質構造に支配され、谷頭部では 0 次谷が発達し、明瞭な緩急線が見られる。また、自然斜面は等高線の乱れや滑落崖などの異状地形がみられ、地すべり地や崩壊跡地が多く分布し、谷や沢には常時流水がみられる。人工斜面では地すべり・崩壊防止のための抑制工が施工され、横ボーリングからの湧水も多く、GL-5 m付近に分布する地下水位は降雨による影響が大きく、降雨後 1 週間を経て最高水位に達し、地下水の形態は地層水ではなく、破碎帯からの供給による裂か水である。

5.2.1 実験地の地形地質の概要

適用調査実験地周辺の地質は、図 5.2.2 に示すように、西南日本内帯^{1),2)}の古生界後期の付加体「舞鶴帯」に属する舞鶴層群であり、地質構造は複雑である。この区間の人工斜面は建設中にも崩壊や地すべりが発生、あるいは発生する可能性が高かったために、様々な対策工が施工されており、道路供用後も台風など集中豪雨による被害も発生している。北側の斜面は、流れ盤であることから地すべりの発生、あるいは発生する可能性が大きいために様々な抑止工(集水井、グラウンドアンカー工、ロックボルト付きのり枠工、横ボーリング工など)が採用されている。南側斜面は受け盤であり、層理などの剥離面に沿う崩壊は少なく、そのほとんどが風化土砂による崩壊であり、緩勾配にして植生工の採用が主体であるが、地形条件からブロック積み擁壁工やテールアルメ工が採用されている箇所がある(図 5.2.3 参照)。

(1) 地 形

適用実験地の地形は標高 500～1,000 m の定高性山地で、東に高く西に低い傾動地塊を



図 5.2.1 高速道路と探査実験地位置図

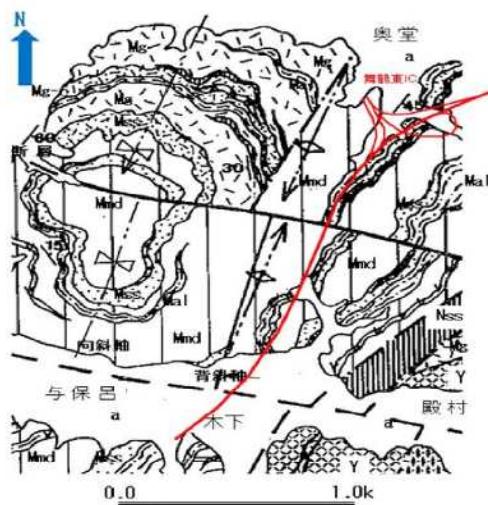


図 5.2.2 探査実験地周辺の地質図

文献¹⁾に加筆

示す丘陵性山地～山地である。定高性山地は、過去の海水準に近いレベルをもつ準平原状態にあった丹波山地が隆起し、そのまま切削されず今なお残存しているもので、耐浸食性の高い堅固な地質体(付加体堆積物)から構成される。舞鶴西 IC から舞鶴東 IC 付近までの一帯のトンネル区間を除く山間部では、ほぼ直線状のリニアメントと判読される谷底低地が多数分布する。谷や山地の方向性は NE-SW 系を主体に、一部 N-S 系であり、基盤岩の地質構造を反映したものである。

実験区間には、図 5.2.4 に示す空中写真判読結果を併記した土木地形地質図から、明瞭な遷急線をはじめとする地すべり地形や崩壊跡地などの異常地形が多く分布する。これらの地すべり地形は地質構造的に見て、背斜軸に相当する流れ盤構造に起因したものである。切土のり面を対象とした山体は、北東側では異常な等高線を示す地点が確認でき、またやや不鮮明ながらも滑落崖を伴い、その崖下には山側へ傾斜した樹木が認められ、各地すべりや崩壊は現在もなお活動中である可能性が高い。鞍部や直線状の谷、ならびに崩壊地、湧水点などがほぼ直線状に配列し、リニアメントや断層の存在を示唆している。

(2) 地 質

地質構造区分は、古生代ペルム紀の舞鶴層群とトリアス紀に難波江層群や夜久野貫入岩類からなる「舞鶴帯」に属し、その分布の走向は ENE-WSW である。この区間の地質分布は、図 5.2.2 に示すように、舞鶴層群の粘板岩を主体とし、砂岩や砂岩粘板岩互層の薄層が挟在し、一部に酸性凝灰岩や緑色岩類が分布する。地質構造は層理面および葉理面から、走向 NE ないし NNE、傾斜 0~40° SE の単斜構造で、一部 NW~NNW 系の緩やかな褶曲構造をなす。また、これとは別にスレートへき開面(破碎へき開)は、同じ層向 NE ないし NNE を示す。傾斜は 65~80° SE の高角度で、ほぼ一定した値を示す。堆積岩類では、中構造的な層内褶曲が発達することが多いが、実験区間では層理面の変動(垂直層あるいは逆方向への傾斜)が比較的少なく、またスレートへき開面もほぼ一定した傾斜方向と角度を示し、層

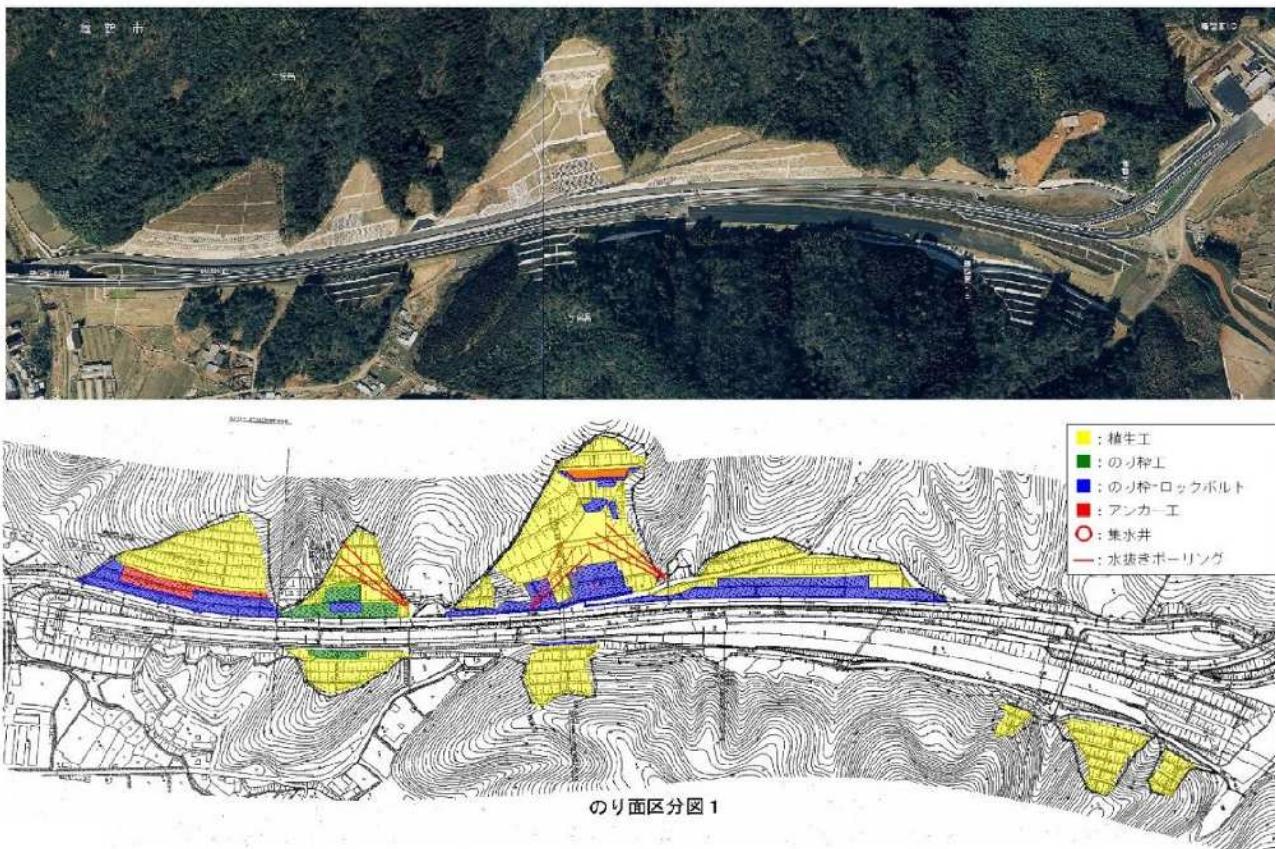


図 5.2.3 探査実験区間の空中写真と切土のり面対策工図

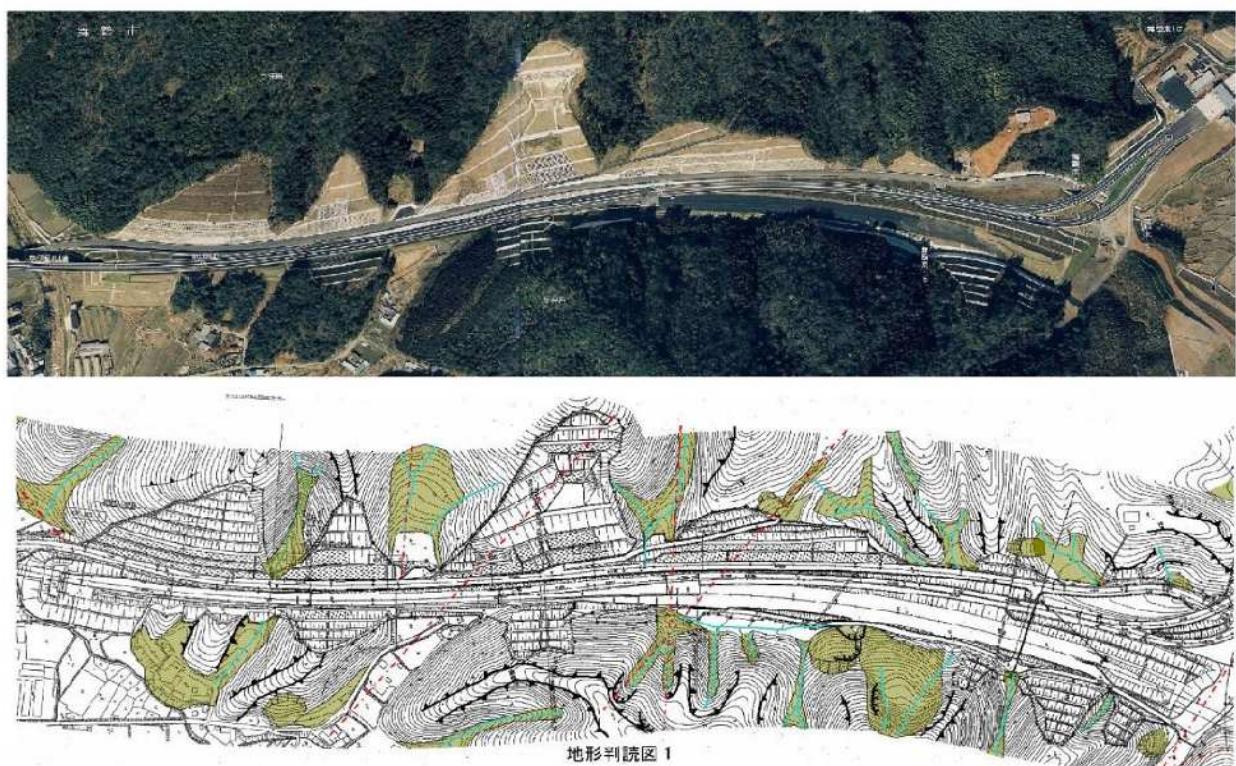


図 5.2.4 探査実験区間の空中写真と地形判読図

内褶曲は少ない状態にある^{1),2)}。

対象地域の地層の層理面の走向状態から NW系あるいは NWW系の 3 本の緩やかな褶曲構造が推定される。これらは切土のり面における見掛けの傾斜角度から崩壊に最も影響を及ぼす角度(30~50°)となっている。また、5 本の断層破碎帯が分布し、断層群は走向断層、褶曲軸面断層、この 2 タイプとは全く異なるものの 3 タイプに区分できる。これらの断層群は、幅は様々であるが、連続性が非常に良い。

(3) 切土のり面の状況³⁾

各地層面の傾斜方向と切土のり面(人工斜面)の傾斜方向における見掛けの傾斜角は、崩壊が発生しやすい「流れ盤」となっている。また、断層破碎帯が分布し、断層には走向断層と褶曲軸面断層があり、両断層とも連続性は良いが、断層の幅はさまざまである。

実験地における切土のり面の標準勾配は、硬岩で 1:0.3~1:0.5、軟岩で 1:0.8~1:1.0、風化土砂で 1:1.2 を採用している。しかし、建設中に崩壊や地すべりが発生あるいは予想された箇所では、標準勾配より緩く、場所によっては 1:1.8 程度を採用し、またはのり面安定対策工を採用している。のり面安定対策工はのり面勾配を緩くして植生工を採用した箇所を除けば、グラウンドアンカー工、ロックボルト付のり枠工、排水ボーリング工、集水井などが採用されている。

なお、確認された各断層(断層破碎帯)群のタイプは、以下の 3 形態に区分できる。

① 層理や葉理などの地質的分離面が発達して形成された断層(走向断層)

走向 : NE~NNE, 傾斜 : 10~30° SE~ESE, 破碎幅 : 1~2 m

性状 : 連続性は良いが破碎幅が狭い

② スレートへき開面(あるいは褶曲軸面)が発達して形成された断層

走向 : NNE, 傾斜 : 75° ESE, 破碎幅 : 10~20 m

性状 : ガウジ帶や角礫帶で連続性が良く、規模も大きい

③ 上記 2 タイプとは全く異なるもの

走向 : NW, 傾斜 : 80° NE, 破碎幅 : 不明

比抵抗の出現の状況によっては、比抵抗による探査法(2 次元比抵抗探査と空中電磁法探査、地下レーダーなど)の採用の適否が決定される。

5.2.2 地形地質条件とのり面条件

舞鶴若狭自動車道の舞鶴東 IC 周辺の切土のり面では、空中電磁法探査のほか、地表物理探査(2 次元比抵抗探査と電磁気探査・地中レーダー探査)を実施し、その結果と既往地質調査結果資料を用いて、切土のり面性状を検討した。また、この舞鶴東 IC 周辺において、空中電磁法探査を実施する場合の測定高度と測線間隔の適正化に関する実験と、のり面崩壊防止対策工に採用されている金属製埋設物による影響について実験した³⁾。

実験対象地域の切土のり面は粘板岩を主体としており、剥離性に富み全体に深層風化が進む厚い粘性土化帯を形成している。切土のり面の多くは、のり肩からのり面中央にかけて旧地すべりの崩積土と風化土砂が分布し、のり面中央からのり尻にかけて破碎帯が分布する。地下水位は風化軟岩中に位置し、降雨に伴う地下水位変動は、最大 2.5 m である。脆弱部をなす粘板岩(断層破碎帯や剥離性粘板岩など)の分布によって、施工中に崩壊などの種々の変位・変状が発生した。それらの中には幅 10 数 m、高さ 6 m、奥行き 1 m の崩壊と亀裂が発生している。

5.2.3 地表物理探査による検証方法

空中電磁法探査を切土のり面に適用した場合、ロックボルト付きのり枠工やグラウンドアンカー工、ラス金網工などの金属製構造物(以下、金属製埋設物という)が、比抵抗分布にどの様な影響を与えるか検討しておく必要がある。そこで、空中電磁法探査で得られた地盤の比抵抗構造の妥当性を検証するために、地上電気・電磁法探査を実施した。その主なものは、比抵抗2次元探査(ウェンナー法、ダイポール・ダイポール法)、地上電磁法探査(*TDEM*) (図 5.2.5 参照)、地上磁気探査(*MAG*)、地中レーダー(*GPR*)を、探査区間の金属製埋設物で保護された切土のり面において、代表 5 切土のり面で縦横断方向に実施し、空中電磁法探査で求めた 137.5 kHz の周波数の比抵抗分布と比較し、地盤性状および金属埋設物の影響を調べる。

(1) 電気探査

空中物理探査におけるキャリブレーションとして行うもので、シュランベルジャー法によって実施した。なお、実施に当たってはアクセスが容易で平坦なヘリポートを選定し、測線長は 200 m とし、探査深度は $AB/2=100\text{ m}$ (展開長は全長 200 m) まで測定とする。

シュランベルジャー法は、中心点(測点)0に対して電位電極 M, N 極がある間隔で固定し、電流電極 A, B 極だけを中心点に対して対称的関係を保ちながら順次拡大し、見掛け比抵抗を測定する方法である。電流電極間隔(AB)が拡大されるにつれて電流 I の透入深度が増大し深部の比抵抗情報が得られる。しかしその反面、電位電極 MN 間に誘起される電位差 V はしだいに小さくなり、測定誤差が増大することになる。そこで、 $A B \geq 5 MN$ の条件の下に電位電極間隔(MN)を適宜大きくして、測定誤差が増大するのを防いでいる。地表面は一般に平坦でも均質でもないので、この式を用いて決定される比抵抗は、真の比抵抗と区別する意味で、「見掛け比抵抗」と呼ばれ、探査曲線(見掛け比抵抗-深度曲線)を解析することによって、真の比抵抗に近い値が得られる。

2次元比抵抗探査は、地上に電極を一定間隔(2 m 間隔)に設置し、直流電流を印加して地盤の比抵抗を測定するもので、比抵抗の大きさや分布状況から地盤性状、地下水状況、および地中埋設物の出現状況を把握する。また、地盤の内部構造を3次元的に把握できるように、電極配列を田型に配列する。

探査実施のり面と測線配置は空中電磁波探査の結果で決定し、その測線に沿って電極を配置し

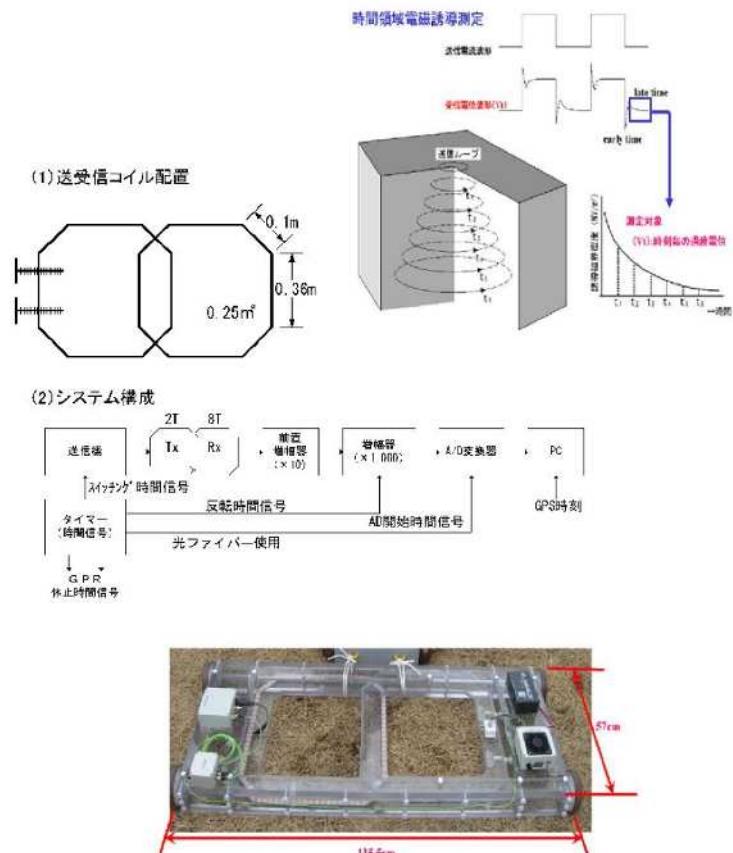


図 5.2.5 TDEM 法の原理とシステム

て測定する。なお、岩盤劣化部で継続的、かつ経年に比抵抗変化の記録を蓄積して岩盤劣化の進行状況や、地下水変動(雨季乾季の変動、降雨時の変動)をモニタリングできるよう電極を代表のり面に設置する。

(2) 浅部地下探査

地下レーダー(誘導率測定)、電磁誘導測定(比抵抗測定)、磁力計(透磁率測定)が一体化した測定器を用いる。誘電率、比抵抗、透磁率の大きさや分布状況から地盤と地下水の性状および地中埋設物の出現状況を把握し、空中電磁探査解析の基礎資料とする。探査深度は地中レーダーおよび磁力計で2~5 m程度、電磁誘導測定で10~20 mである。

各探査結果の突合せによって、検討・解析し、各種のり面保護工(植生工・モルタル吹付け工・のり枠工・グラウンドアンカー工など)による比抵抗分布にどのような違いが生じるかを確認する。

地上磁気探査では探査区域において、予め測量で座標値を求める。この基準点をもとに、1ヶ所直交座標を設定し、原則として測線は連続的、あるいは座標軸に平行に0.5 m間隔をとることにする。

探査にあたってはまず、探査区域内の地表面に露出している鉄類を可能な限り除去したあと探査測線に間縄を張り、この間縄に沿って探査コイルを移動させる。この時、探査コイルは測線方向に向け両端を固定した台車、あるいは作業員が水平に吊り下げ、表面より10 cm上方を1 m/秒で歩行移動させ探査を行い、測定される磁気傾度を記録する。計測は自記記録あるいは、間縄に0・10・20···のように10 m間隔に顕著な印をつけ、探査コイルの中心がその印の直上を通過する瞬間原記録にマークを入れ測線と記録の対応をつける。記録から読み取る異常点の位置は、現地に再現できるようにする。地表面だけの測定では探査する事が出来ない深部(地表面より0.5 m以上)に埋没する金属製埋設物(アンカーアー工・金網工・不発弾など)の探査は、順次表面を掘り下げてその面で測定する経層探査方法で行うこともある。

5.2.4 空中電磁法探査による実験方法

本研究で採用した空中電磁法探査は、周波数領域法を活用した大日本コンサルタント株式会社のNE-RESOLVE空中電磁法システムである。この実験における測定は、5周波数(137.5 kHz, 27.5 kHz, 5.5 kHz, 1.1 kHz, 220 Hz)を用いる。

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の方法を使用して地盤比抵抗の測定を行うが、今回調査に用いた方法は、周波数領域法を用いた大日本コンサルタント(株)のNE-RESOLVE空中電磁法システムである。周波数領域法におけるコイル配置は、表5.2.1に示すように、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。なお、舞鶴自動車道の調査・探査では前者を、徳島自動車道の調査探査では後者を採用した^{3)~6)}。

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、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。

(1) 測定方法

空中電磁法探査の測線方向は、切土のり面の傾斜方向とすることがのり面安定解析上望ましい。しかし、その場合短い測線が多く、延べ測線長が長くなり測定に時間がかかりすぎ、また供用中の高速道路であるため、のり尻付近の測定が欠落する可能性がある。そこ

で、本実験の測線長はさまざまとなるが、図5.2.6に示すように、高速道路と平行に11測線を設定する。なお、計測方向は、通行車両の運転者に与える心理的影響を考えて、上り線側と下り線側ともにそれぞれ車輌進行方向とする。

(2) 測定高度³⁾

空中電磁法探査のデータ取得範囲は、バード直下において測定高度相当長を直径とする円形部分である。測定高度が高くなると側方へ電磁波が広がり、より広範囲の比抵抗分布が平滑化されるため、分解能が低下する。また、測定高度が増大すると探査深度も増大するため、より一層比抵抗の平滑化が進み、分解能の低下を加速させる。そのため、測定高度は通常の調査においては約30mを目安にしているが、今回の実験は供用中の高速道路であることを考え合わせると、運転者への圧迫感低減のため測定高度はできる限り高い高度の方が望ましいが、高度を高くすることによって測定精度が低下することになる。そこで、30m、50mおよび70mの3高度で測定し、解析結果から測定高度が比抵抗分布に与える影響について検討した。なお、測定高度には、電波高度計などによる実測高度と解析時に副次的に求まる見掛け高度がある。通常、電波高度計などによる実測高度は、樹木などからの電波の反射のために見掛け高度よりも精度が低いが、本実験では、高度の違いによる影響を検討するため、測定高度は実測高度を指している。

(3) 測線間隔³⁾

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、小規模異常部分の通り抜け、あるいは見逃しの可能性が大きく、精度が低い結果となるため間隔を狭

表5.2.1 周波数領域法におけるコイル配置⁵⁾

NE-RESOLVE 空中電磁法システム

コイルの周波数配置	1	137,500Hz・水平	140,000Hz・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
	コイルの水平配列		コイルの垂直配列

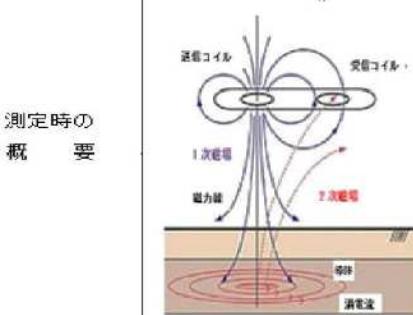
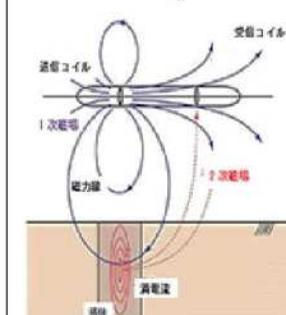





図5.2.6 空中電磁法探査の測線設定と飛行航路

くすることが望ましいが、そのことによって調査費用と測定時間がともに増大する。そこで、本調査実験における測線間隔は 25 m 間隔とし、解析時に測線(1 測線または 2 測線)を間引いたケースを比較することによって、測線間隔が比抵抗分布に与える影響について検討することとする。

空中電磁法探査のデータ解析により、成果として 5 周波数の見掛け比抵抗平面図、任意に設定可能な断面沿いの見掛け比抵抗断面図および 1 次元構造の 2 層インバージョン解析結果の断面図が得られる。また、見掛け比抵抗とは、解析時に大地が平坦で均質な比抵抗と仮定して測定値から算出される比抵抗で、実際の比抵抗とは必ずしも一致しない。なお、1 次元 2 層インバージョンとは、大地を水平 2 層からなると仮定して、層厚と上下 2 層の比抵抗値を求める方法で、風化層などを求めるのに有用である。

5.3 空中電磁法探査の結果と解釈^{3)~7)}

空中電磁法探査のデータを解析した成果として表現されるものは、5 周波数の見掛け比抵抗平面図、任意に設定可能な断面沿いの見掛け比抵抗断面図および 1 次元構造の 2 層インバージョン解析結果の断面表示が主たるものである。なお、見掛け比抵抗とは、解析時に大地が平坦で均質な比抵抗と仮定して測定値から算出される比抵抗で、実体の比抵抗を反映しているとはいえないが、空中電磁法探査で用いる磁場は真下に指向性が強く、通常、真の比抵抗に近い値が得られる。また、1 次元 2 層インバージョンとは、大地を水平 2 層からなると仮定して、層厚と上下 2 層の比抵抗値を求める方法で、風化層などを求めるのに有用である。

総合解析として、次に示す内容を検討する。

- ① 測定高度と測線間隔が比抵抗分布に与える影響について検討し、供用中の高速道路に対する安定性と費用対効果に配慮して最適な測定高度と測線間隔を決定すること。
- ② 各種のり面保護工などの金属製構造物による比抵抗への影響や比抵抗分布の乱れの様子を把握すること。
- ③ 崩壊要因である地質要素や地下水要素と比抵抗の関係、あるいは崩壊箇所と非崩壊箇所の比抵抗分布の違いを把握すること。
- ④ 最終的には、のり面における予防保全に対する空中電磁法探査の適用性を検討し、また非接触・非破壊法による点検システムの構築（データの蓄積、活用法を含む）を行うこと。

5.3.1 測定高度の違いによる比抵抗への影響^{3)~7)}

空中電磁法探査のデータ取得範囲は、測定高度相当長を直径とする円形方向へ電磁波が広がり、測定高度が大きいことにより広範囲の比抵抗分布を平滑化するために、分解能を低下させることになる。そのうえ、測定高度が増大すると探査深度も増大するために、より一層比抵抗の平滑化が進み、分解能の低下を加速されることになる³⁾。

供用中の高速道路切土のり面への適用を考えた場合、自動車運転者への圧迫感を低減するには測定高度は大きい方が望ましい。また、地形沿いに低空を低速飛行するよりも、測定高度が大きい上空を高速飛行する方が、調査費用の面からも望ましい。

測定高度の違いが比抵抗分布に及ぼす影響を検討するために、30 m, 50 m および 70 m

の 3 高度で測定を行った。**図 5.3.1** に測線間隔 25 m の場合における各測定高度での周波数ごとの比抵抗分布を示す。図の縮尺による制約、調査全体と比抵抗異状の大きさの関係および比抵抗

分布の問題から、**図 5.3.1** では測定高度の違いによる比抵抗分布の変化の様子は、必ずしも判然としない。そこで、**図 5.3.2** に示すように、比抵抗分布のヒストグラムを作成して検討した。全測定域の比抵抗平面図を 25 m × 25 m の格子状に分割し、各格子に対応する見掛け比抵抗の出現度数を集計してヒストグラムを作成した。ここで集計に用いた見掛け比抵抗は比抵抗平面図を作成する時に、すでに補間処理が施されたのちの比抵抗である。なお、このヒストグラムの表示は対数等比で行い、また比抵抗探査の結果を表現する際の比抵抗区分は対数等比を採用した。例えば、探査対象が比抵抗異常として認識されるためには、周辺の比抵抗分布よりある程度異なっている必要があることなどを考慮して、目的の構造を強調するように比抵抗区分が行われる。比抵抗区分は、調査地域の比抵抗分布の変化幅が小さい場合には、対数等比ではなく等差分割などで比抵抗の区分を行う。今回、対象地域の高周波

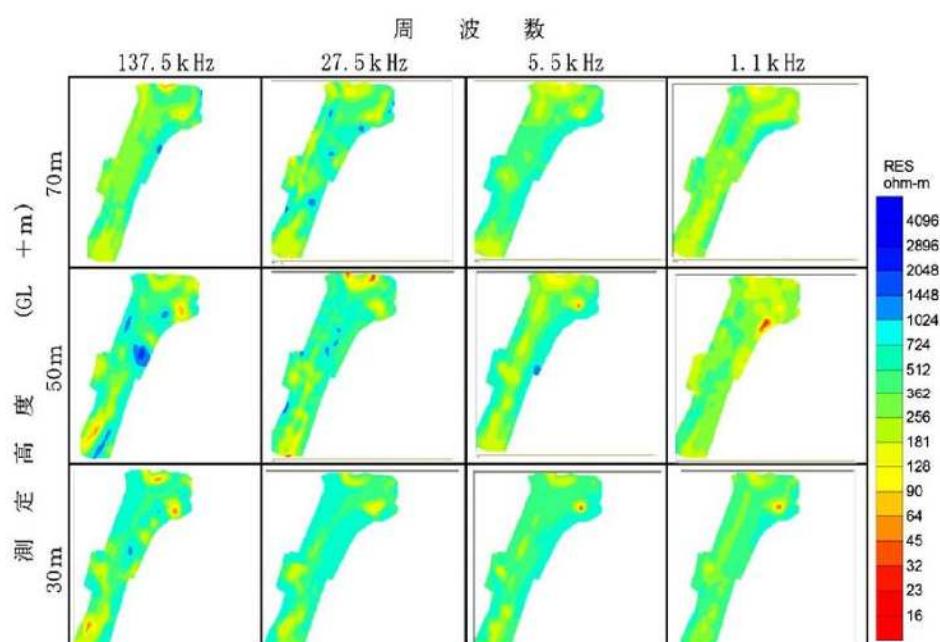


図 5.3.1 種々の高度での周波数ごとの比抵抗分布 ^{3)~7)}
(測線間隔 25m)

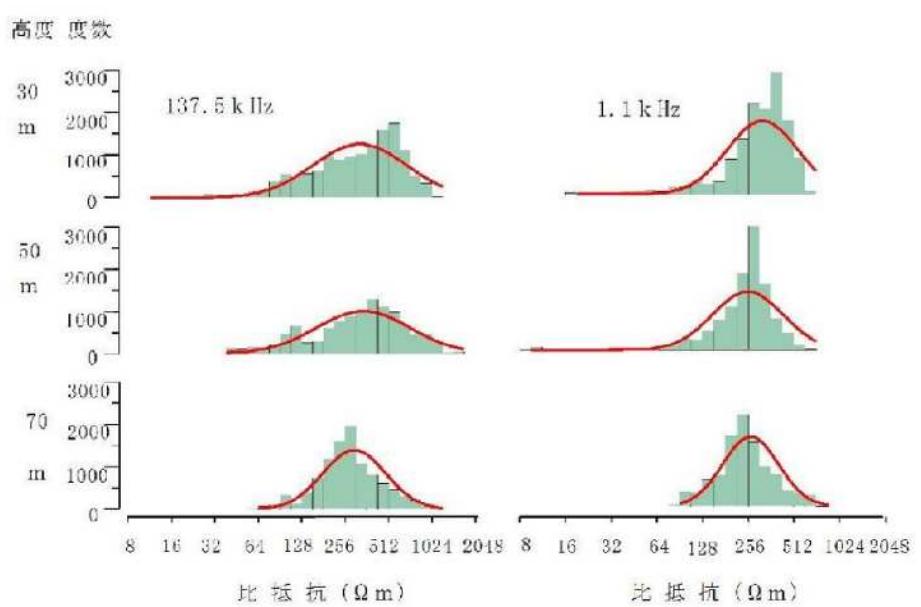


図 5.3.2 各測定高度における比抵抗分布ヒストグラム ^{3)~7)}
(測線間隔 25m) 赤線: 対数正規分布

数、低高度の比抵抗分布は、広範囲の比抵抗分布を示すことから、対数等比表示を採用する。

なお、図 5.3.2 には 137.5 kHz (高周波数)と 1.1 kHz (低周波数)の 2 つの周波数でのヒストグラムだけを示したが、 137.5 kHz と 27.5 kHz および 5.5 kHz と 1.1 kHz は、それぞれ同じ傾向を示

している。また、表 5.3.1 に図 5.3.2 のヒストグラムの統計量を示す。

表 5.3.1 および図 5.3.2 の結果から以下のように考えられる。

- ① 表 5.3.1において、標準偏差が大きいということは、測定された比抵抗の分布範囲が低比抵抗から高比抵抗まで幅広く広がっていることに対応している。一方、標準偏差が小さいことは、測定比抵抗の分布範囲が比較的狭いということを意味する。測定比抵抗の分布範囲が狭くなる要因としては、大地の実際の比抵抗分布が比較的均一な場合を除けば、空中電磁法探査では、測定高度の増大による測定時のデータの取込み範囲および探査深度の増大に起因する平滑化の広がりの影響が第一に挙げられる。
- ② 表 5.3.1において、 137.5 kHz と 1.1 kHz 双方の場合とも、測定高度 30 m と 50 m とではほぼ同じ値の標準偏差を示しているが、測定高度 70 m は明らかに小さい値となっている。また、 1.1 kHz の場合の方が 137.5 kHz よりも標準偏差が小さくなっている。また、探査深度の増大による平滑化が認められ、上記①の知見と整合している。
- ③ 標準偏差からみると、測定高度 30 m と 50 m とでは大差がないが、測定高度 70 m の場合は、標準偏差が明らかに小さくなっている。平滑化の進行などによる分解能の低下が認められる。
- ④ 平均比抵抗(R_{ave})は、 137.5 kHz では測定高度 30 m と 50 m とでは、ほぼ同じ値を示し、 1.1 kHz では測定高度 50 m と 70 m とが近い値を示している。また、最大比抵抗(R_{max})に変化があるが、斜面防災の立場から深部の比抵抗分布を反映する低周波数(1.1 kHz)よりも、崩壊に関して高周波数 137.5 kHz の浅部や軟弱の比抵抗分布が重要となる。この 137.5 kHz の平均比抵抗をみると測定高度 30 m と 50 m は大差なく、上記③の標準偏差と同じ傾向を示している。

表 5.3.1 測定高度の変化における比抵抗分布特性の相違^{3)~7)}

(a) 137.5 kHz				
測定高度 (m)	R_{ave} ($\Omega\text{ m}$)	R_{min} ($\Omega\text{ m}$)	R_{max} ($\Omega\text{ m}$)	標準偏差
30m	443	12	1258	430
50m	447	32	1939	435
70m	366	56	1427	290

(b) 1.1 kHz				
測定高度 (m)	R_{ave} ($\Omega\text{ m}$)	R_{min} ($\Omega\text{ m}$)	R_{max} ($\Omega\text{ m}$)	標準偏差
30m	386	20	777	310
50m	308	10	776	314
70m	316	105	882	245

注) R_{ave} : 平均比抵抗, R_{min} : 最小比抵抗, R_{max} : 最大比抵抗

測定高度の影響は、測定高度が増大するにつれて本来地盤が有する多様な比抵抗分布が平滑化され、分解能が低下すると考えられるが、本実験の結果、測定高度が 30 m と 50 m とでは、大差がないことが分かった。

5.3.2 測線間隔の違いによる比抵抗への影響^{3)~7)}

測線間隔は通常 100 m の場合が多いが、切土のり面の規模を考えると、測線間隔 100 m は現実的ではない。また、比抵抗平面分布図を作成する際の補間処理を考えると、終端の影響の低減を図る上では、3 本以上の測線がほぼ並行して設定することが望ましい。また、測線配置の制約や補完効果を考えると、本調査実験で採用した 25 m という測線間隔が望ましい。しかし、飛行測定や解析費用といった経費が嵩み、妥当な測線間隔とはいえない。

切土のり面の形状、地形の急変、飛行障害物の存在などの影響で、測線間隔を十分に小さく設定することが困難な場合が多くある。そこで、測線間隔の比抵抗分布に及ぼす影響を検討するために、測定高度 30 m で測線間隔 25 m, 50 m および 75 m の 3 種の測線間隔についての比抵抗平面図を作成し、測定域内の 25 m × 25 m の格子における見掛け比抵抗のヒストグラムを作成し、統計量を算出して表 5.3.2 に示した。

表 5.3.2において測線間隔が 25 m と 50 m の場合は、標準偏差、平均比抵抗(R_{ave})および最大・最小比抵抗値(R_{max} ・ R_{min})はほぼ同じであるが、75 m の場合には標準偏差および最小比抵抗値が明らかに変化し、平滑化による分解能の低下が認められる。

この結果、空中電磁法探査ではデータ取得範囲(測定高度相当長の円形)の 2 倍程度の測線間隔以内であれば、分解能はほとんど低下しないということを意味している。また、それと同時に、測線間隔と測定高度との関連性を示している。

以上から、測線間隔を 50 m 以下とすれば、問題ないことが判明した。

5.3.3 金属製埋設物による影響

金属製埋設物の影響を調べるために、空中電磁法探査を実施したのり面において、のり面保護工が施工されているのり面 5箇所を選定し、地表物理探査(比抵抗 2 次元探査、地上電磁法探査(TDEM)、地上磁気探査(MAG)、地中レーダー(GPR))を実施した^{3)~8)}。

地表物理探査を実施した切土のり面対策工の設置状況を図 5.3.3(a)に、空中電磁法探査で得られた比抵抗平面分布図を図 5.3.3(b)に示す。

図 5.3.3 に示す代表のり面における空中電磁法探査と比抵抗 2 次元探査の比抵抗断面分布図を図 5.3.4(a), (b) に示し、表層物理探査における金属製埋設物の影響を図 5.3.4(c) に示した。

図 5.3.4(a) は空中電磁法探査における比抵抗分布であり、地質構造を示し、表層の金属製埋設物による低比抵抗分布は見られないため、その影響は認められない。図 5.3.4(b) は比抵抗 2 次元探査による比抵抗分布であり、ロック

表 5.3.2 測線間隔の変化における比抵抗

分布特性の相違^{3)~7)}

(a) 137.5kHz				
測定間隔 (m)	R_{ave} ($\Omega \text{ m}$)	R_{min} ($\Omega \text{ m}$)	R_{max} ($\Omega \text{ m}$)	標準偏差
25m	443	12	1258	430
50m	438	12	1258	458
75m	421	32	1215	381

(b) 1.1kHz				
測定間隔 (m)	R_{ave} ($\Omega \text{ m}$)	R_{min} ($\Omega \text{ m}$)	R_{max} ($\Omega \text{ m}$)	標準偏差
25m	386	20	777	310
50m	375	20	777	330
75m	397	68	777	271

注) R_{ave} : 平均比抵抗, R_{min} : 最小比抵抗, R_{max} : 最大比抵抗

ボルト工が設置されている箇所では表層 10 m は 10~50 Ωm , ラス金網工では表層 2 m 前後が 50~120 Ωm と低比抵抗を示し, 金属製埋設物の影響が認められる。植生工の箇所ではごく表面は風化によって低比抵抗を示すのみで, 1~2 m 以深では 180 Ωm 以上の地盤比抵抗を示す。なお, のり面中央付近で球根状の低比抵抗域は, 集水井 ($\phi 250 \text{ cm}$, Dep1,500 cm の中空管状導電物質) 設置の影響によるものである。図 5.3.4(c) は表層物理探査の結果で, 上段の MAG の磁気プロファイルでは, ロックボルト工設置箇所での変動が著しく錯乱状となっており, ラス金網では変動幅の小さい変動を示し, 植生工での変動は見られない。TDEM および GPR は, ロックボルト工設置箇所では不陸が大きく計測できなかった。拉斯金網工設置箇所ではいずれも拉斯金網の影響を受け, 明瞭な反射面が認められるが, 植生工の箇所では反射面がみられず, 表層から深部までほぼ同じ比抵抗分布を示す。

金属製埋設物の影響を受けていない箇所における両者の比抵抗断面図を比較すると比抵抗の概略値がほぼ一致し, 全体的な地質構造との対応が取れている。なお, 空中電磁法

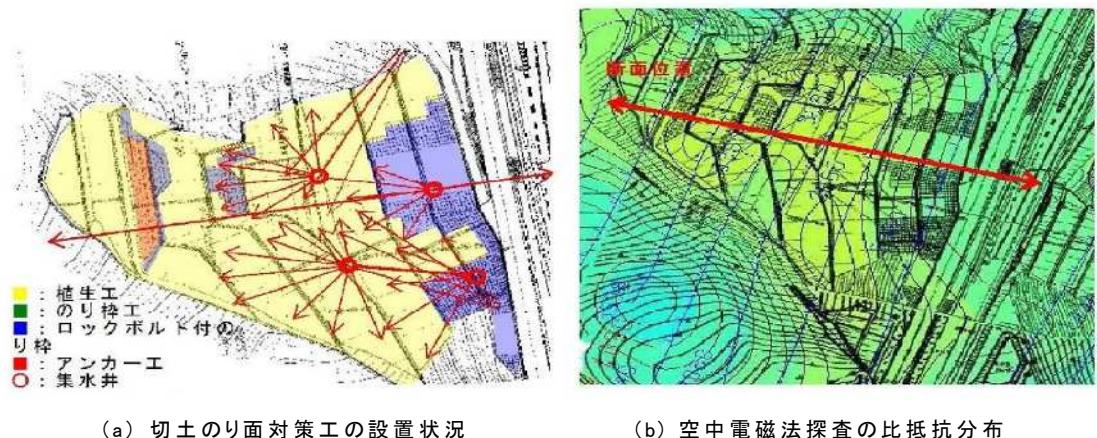


図 5.3.3 切土のり面対策工と空中電磁法探査の比抵抗分布の関係^{7),8)}

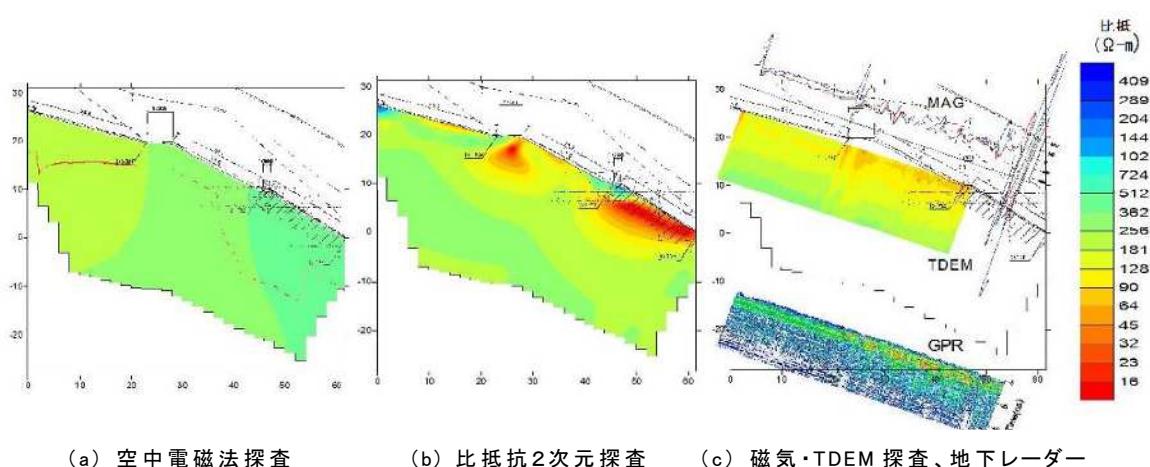


図 5.3.4 金属製埋設物による各物理探査の比抵抗分布の違い^{7),8)}

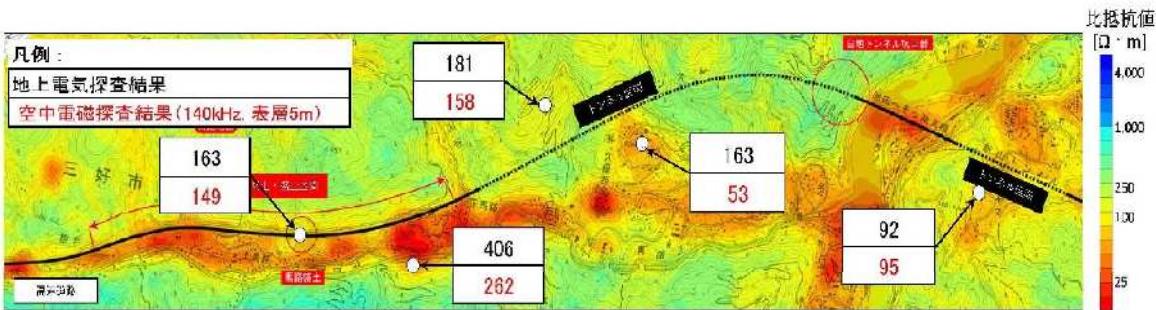


図 5.3.5 地上電気探査実施位置と比抵抗分布

探査によるいずれの周波数における比抵抗分布においても、金属埋設物(金属製構造物)の分布に対比される低比抵抗異常が認められない。よって、空中電磁法探査では、これらの金属製構造物の存在による比抵抗分布への影響はほとんど認められない。この理由については、データ取得範囲に比べて(特に、線状構造物の場合)応答面積が小さいことおよび網状の金属製構造物の場合には電磁波の影響を互いに相殺している可能性が考えられる。

空中電磁法探査で得られた地盤の比抵抗構造の妥当性を検証するために、徳島自動車道においても、地上電気探査(電極配置法の1種であるシュランベルジャー法)を5地点で実施した。地上電気探査によって得られた地盤の比抵抗に対して、空中電磁法探査の比抵抗は周波数140 kHzの解析による表層5 m付近の比抵抗を用いて検証した。図5.3.5は地上電気探査と空中電磁探査によって得られた表層部分の比抵抗値の対比図である。比抵抗は地上電気探査では第1層目の解析値を、空中電磁法探査では表層5 m付近の値を示す。河川や沢部などの降雨の影響を受けやすい条件や、地下水位の変動の著しい水理地質条件の一部地点で、地上電気探査の値が空中電磁法探査の値の2~3倍を示すが、その他の差は15%以内となっており、地上電気探査と空中電磁法探査の比抵抗値のオーダーは同等であり、両者ともに切土のり面では高く、谷底低地および地すべり地で低くなる傾向を示すことから、空中電磁法探査による比抵抗解析結果は妥当であると判断できる。

5.4 実験結果の考察

本調査実験の結果から、空中電磁法探査についての測定条件、分解能などに及ぼす要因および比抵抗分布と地質との関連などに関する考察結果をまとめると、以下のとおりである。

- ① 測定速度などの調査効率の観点からは、測定高度が高い方が望ましいが、分解能などの精度の面から、測定高度を30~50 m程度とすることが適当である。測定高度を高くすると、データの取り込み範囲と探査深度が増大し、平滑化が広がることにより分解能が低下する。
- ② 測線間隔は25 mと50 mとでは、大差がなかった。比抵抗平面分布図を作成する際の補間処理の点を考慮すると、3本以上の測線が配置されることが望ましい。そこで、切土のり面の規模を考えると、25 mの測線間隔が推奨される。
- ③ 地上で実施した比抵抗2次元探査結果と空中電磁法探査結果と対比したところ、比抵抗2次元探査では補強材などの金属材の影響を受けているが、空中電磁法探査では受けていないことが分かり、人工構造物の存在が空中電磁法探査の実施に当たつ

て大きな障害とはならないことが判明した。金属材の影響を受けていると思われる部分以外の両者の探査結果では、比抵抗の概略値と共に全体的な地質構造の対応が取れていることを確認した。両者の比抵抗分布から空中電磁法探査を適用することに問題はないものと考えられる。

- ④ 各地層は深部まで風化が進んでおり、地層境界での比抵抗変化は認められなかつた。切土のり面上に現れる小規模な断層破碎帯や亀裂の検出も困難であるが、それらが密集しているところでは、相対的に低比抵抗を示すことも分かった。
- ⑤ 浅部で認められる低比抵抗分布は、いずれも断層破碎帯や風化帯などの地盤の脆弱部、風化残積土および崩壊跡地に対比され、低比抵抗を示す原因が特定でき、空中電磁法探査は切土のり面や自然斜面における要注意箇所の抽出に有用であると判断される。

5.5 むすび

本章では、高速道路斜面における空中電磁法探査の適用実験ならびに供用路線の自然斜面や切土・盛土のり面(人工斜面)で調査実験を行い、測定条件の相違(測定高度、測線間隔の違いによる分解能などの精度)、探査障害物(斜面に設置されているグラウンドアンカー工・ロックボルト工などの金属製埋設物)の影響について検討するとともに、空中電磁法探査で得られた地盤の比抵抗構造の適用性について、地上電気・電磁法探査での比抵抗データによって検証した。その結果、空中電磁法探査の測定高度および測線間隔の推奨範囲を明らかとともに、空中電磁法探査で得られた比抵抗への金属埋設物による影響がないことを明らかにした。

本章で得られた主な具体的知見は、以下のとおりである。

- (1) 空中電磁法探査における測定高度については、測定高度を高くすると、データの取り込み範囲と探査深度が増大し、平滑化が広がることにより分解能が低下することを示すとともに、分解能などの精度の面から、測定高度は30~50 m程度が推奨されることを明らかにした。
- (2) 空中電磁法探査における測線間隔については、25 mと50 mとの実験データの比抵抗ヒストグラムに大差がないことを示すとともに、高速道路の切土のり面規模を考慮して、25 mの測線間隔を採用することが推奨されることを明らかにした。
- (3) 比抵抗2次元探査・地上電磁法探査の結果と空中電磁法探査結果を対比した結果、比抵抗2次元探査などでは補強材などの金属製埋設物の影響を受けるが、空中電磁法探査ではその影響を受けないことを明らかにした。

[第5章の参考文献]

- 1) 日本の地質「近畿地方」編集員会：日本の地質6、近畿地方、共立出版、pp.8~22、1987.
- 2) 鈴木茂之、杉田宗満、光野千春：舞鶴地域における舞鶴層群の層序と地質構造、地質学雑誌、Vol.86、p.835~848、1982.
- 3) 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、2011.

- 4) 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, Paper No.2018 -TPC- 0735, CD-ROM, 2018.
- 5) 大日本コンサルタント(株)：特許 No. A524337 空中電磁法探査による地盤の解析方法, 2013.
- 6) 牧浦信一, 上出定幸, 堤 浩志, 奥村 稔, 小田和広, 松井 保 : 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, 地盤工学会中国支部論文報告集[地盤と建設], Vol.36, No.1, pp.17-30, 2018.
- 7) 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報告書, 西日本高速道路エンジニアリング関西(株), 155 pp., 2007.
- 8) 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
 - ・道路防災総点検結果報告書（舞鶴西 IC～舞鶴東 IC 間）

第6章 空中電磁法探査データに基づく高速道路斜面における危険地域・斜面の抽出

6.1 概説

本章では、空中電磁法探査で得られた比抵抗分布から地盤性状(地盤構成・地下水分布)を把握するための方法を検討するとともに、その検討結果から高速道路に沿って広範に分布する斜面の地盤性状や地下水性状を把握して、危険地域・斜面を抽出する手法を検討する。危険地域・斜面の抽出は、舞鶴若狭自動車道舞鶴東 IC周辺、徳島自動車道井川池田 IC～池田 PA間と松山自動車道土居 IC～いよ西条 IC間で実施した空中電磁法探査によって取得した比抵抗情報に基づいて、これらの地域・区間に分布する高速道路斜面について、対象地域の地形・地質特性¹⁾を踏まえた地形判読結果と対比し、地表部の面的な比抵抗情報から読み取れる地盤性状について検討する。また、既往地質調査資料と現地踏査^{2),3)}から得られた地質・岩質・地下水などの地盤情報を用いて比較・検討し、精度の検証を行う。

この比較検討および検証における表示法は、舞鶴若狭道では「比抵抗絶対値(通常)表示法」を採用し、徳島自動車道では新規に開発した「比抵抗絶対値(高精度)表示法」と「比抵抗強調値表示法」を、松山自動車道では「比抵抗絶対値(高精度)表示法」と「対数比抵抗強調値(閾値)表示法」を採用して、広域にわたって分布する危険地域・斜面である土石流危険渓流、地すべり地域および崩壊危険斜面の抽出を行うとともに、建設時に発生した斜面崩壊について地盤情報(地盤性状と地下水性状など)に対する精度の検証を行う。

6.2 比抵抗解析図による判読項目の定義、判読方法

本研究では、比抵抗平面図と比抵抗断面図を、比抵抗解析図と呼ぶこととする。

空中電磁法探査^{1),4)～12)}における比抵抗解析図は地盤の比抵抗情報を示したものであるが、判読項目は下記の3項目である。

- ① 比抵抗パターン（比抵抗センターによる形状）
- ② 比抵抗の値（比抵抗絶対値による通常表示と高精度表示）
- ③ 比抵抗変化点と傾向（比抵抗強調値表示と対数比抵抗強調値表示）

これらの判読項目は、深度5 mの比抵抗平面図と任意の比抵抗断面図を用いて判読する。

比抵抗情報を判読する際に重要なのは、判読された領域の地形情報²⁾である。例えば、リニアメント位置での比抵抗情報、滑落崖などの地すべり特有の変位地形での比抵抗情報など、地形判読された地形がどのような比抵抗情報であるかを判読することにより抽出する。

抽出する項目は、土石流・山腹崩壊、岩盤崩壊、地すべり、不安定土砂、「中央構造線」などの大規模断層破碎帯の5項目である。「落石」は空中電磁法探査の分解能では判読できないため対象外とする。また、斜面区分やガリ浸食、崩壊跡、0字谷など微地形判定は、空中電磁法探査の解析結果から求められるものではなく、空中電磁法探査の解析や画像診断する際に必要な情報である。

以下、「中央構造線」と災害形態毎の比抵抗解析図による各判読項目の定義と判読方法を記す。

1) 土石流・山腹崩壊

土石流は土砂が水(雨水や地下水)と混合して、河川・渓流などを流下する現象であり、

発生のメカニズムは大きく次の3つに区分される場合が多い。

- ① 溪流内に堆積している不安定な土砂が、集中豪雨などによる異常な出水の作用で流动化し、土石流となる場合。
- ② 集中豪雨あるいはその他の自然現象が原因となって発生した山腹・山体崩壊の崩壊土砂が、多量の湧水や表流水を得て流动化し、溪流内に流れ込みそのまま土石流化する場合。このケースの物理的なメカニズムは、解明されていない。
- ③ 集中豪雨あるいはその他の自然現象が原因となり、地すべりや山腹崩壊が発生した際、その崩壊土砂により河川が一時的に閉塞されて天然ダムを形成する。その後、湛水に伴う水位上昇により、それが決壊して土石流化する場合。

松山自動車道における平成16(2004)年の土石流災害は、溪流内における山腹崩壊の崩壊土砂が流动化しており、本研究では土石流となる崩壊土砂の生産場である山腹崩壊を対象とする。なお、表層崩壊は崩壊深2 m未満の崩壊を指すが、空中電磁法探査の浅部分解能は5 m以上であるため、表層崩壊となる2 m未満の溪床堆積物や斜面上の土砂は対象外とする。

土石流災害の発生箇所である山腹崩壊は、比抵抗変化点周辺に位置することから、集水型～平滑型斜面や谷沿いの山腹斜面で比抵抗変化点周辺が山腹崩壊発生の危険箇所として判読する。

2) 岩盤崩壊

岩盤崩壊は崩壊深5 m以上の斜面崩壊で、地形的に明瞭な変位地形を伴わないものとする。尾根部などと凸型斜面において、比抵抗平面図で高比抵抗異常として判読され、かつ、比抵抗断面図で表層のみが独立した高比抵抗異常を示す場合を岩盤崩壊として判読する。

3) 地すべり

地すべりは崩壊深5 m以上の斜面崩壊で、滑落崖などの明瞭な変位地形を有するものとする。比抵抗解析図で、移動土塊が中～高比抵抗を示すものは「風化岩地すべり」、移動土塊が低比抵抗を示すものは「崩積土地すべり」と判読され、比抵抗解析図から地すべりの概略的な規模を判読する。

4) 不安定土砂（崖錐堆積物・段丘堆積物など）

斜面における層厚5 m以上の崖錐堆積物や段丘堆積物などの土砂は、集中豪雨などで不安定化する可能性がある。本研究では、斜面上の層厚5 m以上の土砂を不安定土砂として抽出の対象とする。比抵抗解析図で、滑落崖などの明瞭な変位地形を伴わず、比抵抗平面図で低比抵抗かつ比抵抗断面図で表層部の低比抵抗の地域を不安定土砂として判読する。

5) 「中央構造線」などの大規模断層破碎帯

「中央構造線」などの大規模断層破碎帯は、リニアメントと呼ばれる地形的な傾斜変換点の連続的な線状模様の位置として判読される。比抵抗解析図では、リニアメント位置を基準として低比抵抗の範囲から、「中央構造線」などの大規模断層破碎帯沿いの不良地盤の範囲として判読する^{13)～24)}。

6.3 空中電磁法探査の実施地域における地形・地質

徳島自動車道と松山自動車道における空中電磁法探査実験対象地域の地形・地質の概要を述べ、地形・地質特性を踏まえた地形判読結果と取得した比抵抗情報と対比し、地表部

の面的な比抵抗情報から読み取れる地盤性状について検討する。また、既往地質調査資料および現地踏査から得られた地質・岩質・地下水などの地盤情報を用いて比較・検討し、精度の検証を行う。

6.3.1 徳島自動車道の地形・地質の概要

徳島自動車道における対象地域の地形と地質の概要は、以下のとおりである^{18)~20),22)}。

(1) 地形の概要

空中電磁法探査を実施した阿波池田地区は、図 6.3.1 に示すように、東へ細長く開く三角形の吉野川低地の西端部に位置している。探査対象地域では、四国山地を南北方向に横断した吉野川が、讃岐山脈にぶつかり、その流れを直角に変え、東流する馬路川と合流して東流している。馬路川および東流する吉野川は東西方向の谷を形成しており、その北側に讃岐山脈、その南側に四国山地の山裾が東西方向に連なっている。

吉野川本流に沿っては、本流起源の河成段丘が発達し、古いものから高位、中位および低位段丘（群）に区分される。高位段丘面は中西の東部の標高 195～210 m の平坦地を形成している。中位段丘面は白地の簡易保険保養センターのある平坦地（標高 130 m）などを形成している。低位段丘群は白地から中西にかけての標高 110～115 m の平坦地を形成して、池田町市街地の池田上位面（122～145 m）、池田下位面（標高 100～110 m）に連続している。また、池田町市街地より下流側では、池田側より州津下位面（標高 96～99 m）、州津上位面（標高 106～112 m）、昼間面（標高 80～82 m）が分布している。

「中央構造線」の新期活動を示す池田断層は、図 6.3.2 に示すように、馬路川および東流する吉野川の谷底の北縁部、すなわち讃岐山脈の山裾に沿って走っている。すなわち、馬路川から吉野川下流沿いの段丘面および地すべり緩斜面には N75° E の走向で、断続するリニアメントがほぼ一直線に並んでいる。これらのリニアメントは、中央構造線池田断層による断層運動による変位地形と考えられ、池田下位面と池田上位面との間に比高 20～30 m、州津下位面と州津上位面との間に最大比高約 10 m の断層崖を形成している。

讃岐山脈の南部には、雲辺寺山から西山牧場にかけて標高 650～900 m の定高性の良い山陵が東北東－西南西方向に連なっている。また、この山頂部では小起伏面が保存されているところがある。讃岐山脈の南縁部は比高 300～600 m の急斜面となっており、「中央構造線」の開析された断層崖に相当する。馬路川沿いの讃岐山脈山麓には、馬路、井ノ久保

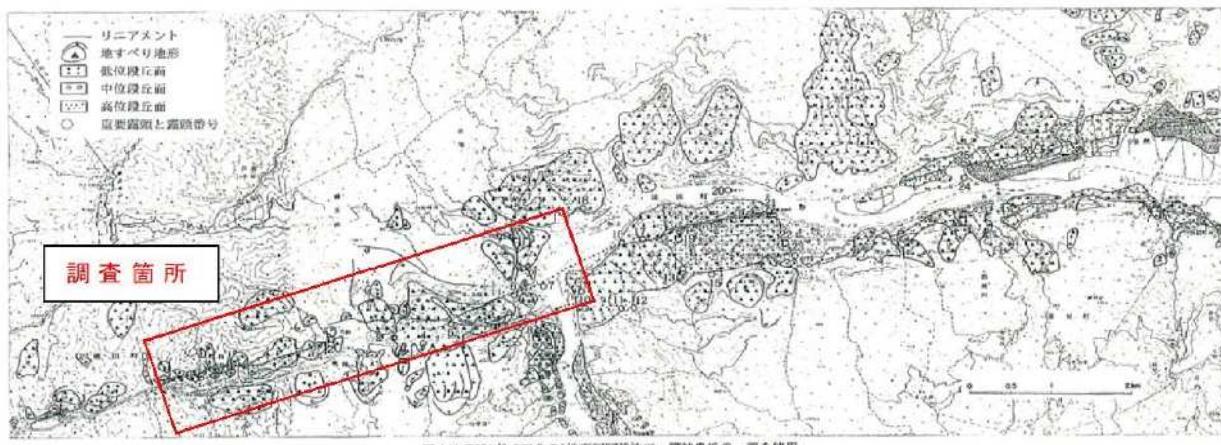


図 6.3.1 調査地の地形判読図¹³⁾

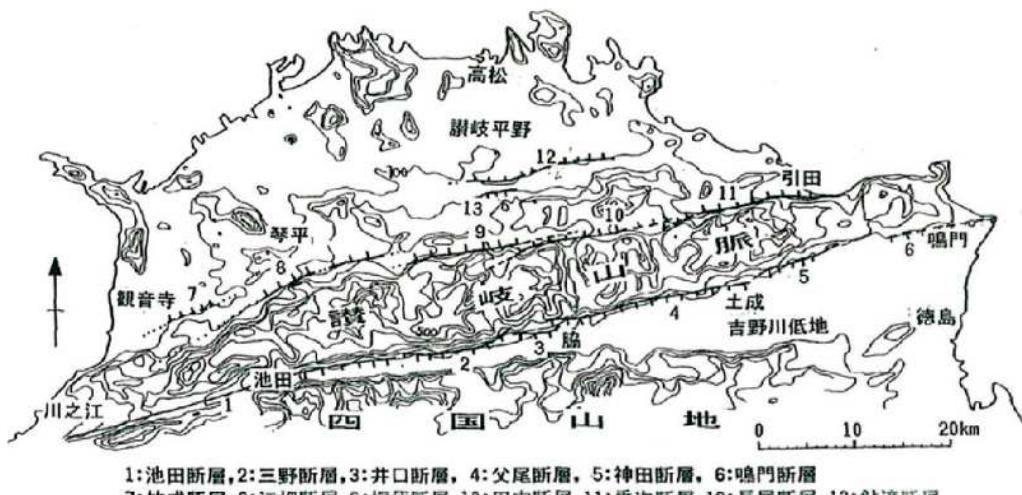


図 6.3.2 讃岐山脈周辺の第四紀断層分布図¹³⁾

など多くの地すべり地形が形成されている。また、中央構造線の北側の讃岐山脈の中腹部馬場、洞草、西山にかけて、標高 300~600 m のところに緩斜面が形成されている。その背後には滑落崖跡の急斜面が形成され、また緩斜面の下部は比高 100~400 m の急斜面が形成されている。

以上の地形の特徴から、これらの緩斜面は古い地すべり地形と判断される。このような、古い地すべり地形は、鮎苗谷川に沿っても分布している。徳島自動車道に直交する小河川や沢は、図 6.3.1 に示すように、急峻かつ狭長で線状を示し、上流部では樹枝状の水系を示す。各沢の 0 次谷の源頭部では、遷急線を頂部とした崩壊地形を示すことが多く、ほぼ直線状に分布していることから、地質構造からみて、脆弱な岩質の分布や、断層・断層破碎帯が通過していることを示唆している。各沢の渓床は急勾配を示し岩盤が露頭するが、谷壁には平坦面が残存し、渓床堆積物が堆積している場合が多い。このように山地斜面は、地すべり地形や崩壊地形などの不安定斜面を示し、各渓流や沢は、土石流危険渓流に指定されている。土石流危険渓流の下流域は、山麓線を扇頂とした新旧の扇状地地形(沖積錐)が複合した状態で分布し、数次にわたる土石流が発生したことを示している。

(2) 地質の概要

調査地の地質図を図 6.3.3、探査実施範囲と地形地質図を図 6.3.4 に示す。ここでは、調査範囲の基盤岩の主体となる三波川変成岩類および和泉層群と、調査箇所に認められる地すべり岩体について述べる。

1) 三波川変成岩類

三波川変成岩類の分布と岩質は、馬路川以南の山地および池田町市街の南側の山地を構成している。馬路川沿いでは、主として、泥質片岩および砂質片岩が分布し、珪質片岩および塩基性片岩を伴っている。馬路川沿いでは、河床部に断層破碎を受けていない本岩が露出しているので、「中央構造線」は讃岐山脈の山裾を通過すると推定される。

池田町市街地南側の山地には、幅 500~1000 m にわたって連続性の良い塩基性片岩がほぼ東西方向に分布している。池田町市街地の古池で実施されたボーリング調査によれば、厚さ約 79 m の堆積物の下位に、風化した砂質片岩の基盤が確認された。

三波川変成岩類の地質構造は、露頭では一般に ENE~WNW の走向で、北へ 30° ~ 60°

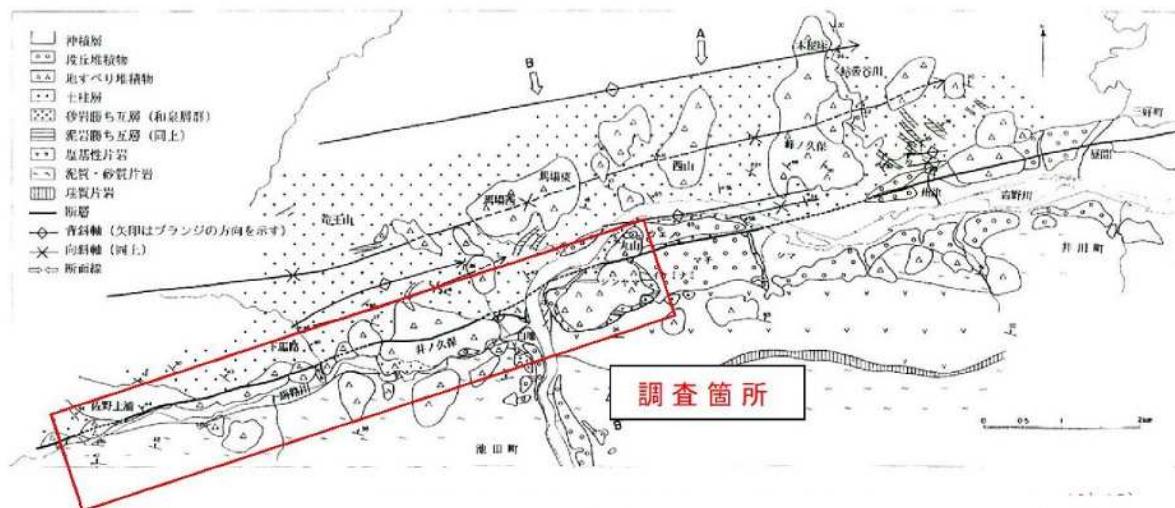


図 6.3.3 徳島自動車道の探査実施地域の地質図^{13), 17)}



図 6.3.4 徳島自動車道における探査実施範囲と地形地質図^{14)に加筆}

傾斜している。池田町市街地の南に分布する厚い塩基性片岩の一般走向はほぼ東西である。この塩基性片岩は連続性が良く、分布から判断して南北性の断層による変位は受けていないと考えられる。

2) 和泉層群

和泉層群の分布と岩質は、馬路川の北側および吉野川の北側の讃岐山脈を構成すると共に、池田町市街西部のシンヤマの丘陵に分布している。

讃岐山脈南部の和泉層群は主として砂岩優勢砂岩泥岩互層(砂岩勝ち互層)から構成され、西部の上浦付近、東部の洲津付近では、シンヤマ泥岩優勢砂岩泥岩互層(泥岩勝ち互層)が多く挟まれる。砂岩勝ち互層は、厚さ数 10 cm~3 m の厚い砂岩と数 cm 未満の泥岩の整然とした互層から構成される。砂岩は灰黄色~灰緑色を呈し、級化層理に富み、タービダイトである。泥岩は黒~黒灰色を呈し、砂粒を含む。本層中には厚さ数 m 程度の酸性ガラス質凝灰岩が含まれるが、その連続性は悪い。泥岩勝ち互層は、数 cm~数 10 cm の泥岩と厚さ数 cm の砂岩との互層からなる。泥岩は黒灰色で砂粒を含む。砂岩は灰黄色~灰緑色で、中粒で級化層理に乏しい。

地質構造は、「中央構造線」の北側の讃岐山脈には地すべり地形が発達しているので、地形上明らかに地すべり岩体と判断される露頭を除き、未崩壊箇所の和泉層群は一般に開いた褶曲構造を形成している。

探査実施地域では、「中央構造線」から北へ 1.2 km の所に、北へフランジする N75° E

の方向の向斜軸（峰ノ久保向斜）がある。その南翼の和泉層群は $N40\sim50^\circ W$ の走向で、北へ $30\sim50^\circ$ 傾斜し、北翼では $N50\sim60^\circ E$ の走向で、南へ約 20° 傾斜している。軸部では、和泉層群は波長約 10 m 開いた東へ $10\sim20^\circ$ フランジする小褶曲を形成している。向斜軸の 800 m 北側の木屋床には背斜軸（木屋床背斜）がある。洲津から下馬路間では、中央構造線の約 500 m 北側に、東西方向の向斜と背斜構造が形成されている。背斜軸は池田ダムを通り、ほぼ吉野川に沿って走る。背斜軸部は池田ダムの基礎に露出し、破碎帯を伴っている。南翼では、 ENE の走向で南へ約 60° 傾斜している。北翼では $NW\sim NNW$ の走向で、 $20^\circ \sim 65^\circ$ 北東へ傾斜している。すなわち、この背斜構造は和泉層群の一般的な開いた褶曲と異なり、閉じており、かつ軸部に破断を伴う脆性変形を受けている。この褶曲構造は連續性が悪く、下馬路より西方の和泉層群には、このような褶曲構造は認められない。

3) 酸性貫入岩

佐野土浦の馬路川支流の出口付近では、泥質片岩の破碎部に岩脈が貫入している。岩脈は黄褐色を呈し、完全に粘土化しているため、原岩が判定できないが、色調からデイサイト～流紋岩と推定される。本岩のすぐ北側には和泉層群が分布するので、本岩は愛媛県の「中央構造線」と同様に、「中央構造線」の破碎帶に貫入した中期中新世の岩脈類と推定される。

4) 地すべり岩体

吉野川北岸の和泉層群分布域では、馬場西、馬場東、洞草、西山、峰の久保など、「中央構造線」の北側に位置する讃岐山脈の山腹には、開析された地すべり地形が分布している。また、馬路川の北岸には、図 6.3.5 に示すように、井ノ久保、上馬路、上浦などにおいて明瞭な地すべり地形が発達している。これらの地すべり地形の緩斜面は、地表では和泉層群からなる角礫層、その下部は著しく擾乱を受けた和泉層群から構成される。

一方、馬路川南岸の三波川変成岩類分布域においても地すべり地形が発達している。また、池田町市街地の南の山腹にも開析された地すべり地形が分布している。これらの地すべり地形の地表は三波川変成岩類からなる角礫層および岩屑が堆積している^{13),17)}。岩層中の礫は風化を受けて、くさり礫状になり、基質も赤褐色になっているところが多い。

それぞれの代表的な地すべり地形を構成する和泉層群の地すべり岩体の岩質と変形構造を記載し、類似した特徴を持つシンヤマの和泉層群についても記載する。調査地区の和泉



図 6.3.5 高速道路に沿う規模の大きい地すべり(橙色の地域)^{13)~16)}

層群の地すべり岩体は、タービダイト起源の砂岩泥岩互層からなる。これは、地すべりや岩盤クリープの影響を受けていない河床部では、元来整然とした成層構造を保っている。しかしながら、地すべり地形中では、成層構造は大まかに保たれているものの、開口割れ目が発達し、また著しく擾乱を受け角礫状になった砂岩泥岩互層になったものもある。

本論文では、露頭で観察される砂岩泥岩互層を角礫化の程度により、下記に示すようなA～Dクラスに分類し、地形および地質構造との関係を調査するとともに、変形構造を記載した。

- ① Aクラス：砂岩泥岩互層の砂岩層および泥岩層は、ほとんど擾乱されておらず、整然とした成層構造が保たれている。砂岩層中には、層理面とほぼ直交する数10cm間隔の節理がある。泥岩層の破碎は認められない。
- ② Bクラス：砂岩泥岩互層の砂岩層には、不規則で小規模な開口割れ目が多く形成されている。開口割れ目によって分断された岩塊間の変位は小さく、成層構造の乱れは少ない。泥岩層は層理面沿いのせん断を受け、角礫になっている。
- ③ Cクラス：砂岩泥岩互層の砂岩層は、完全に角礫の集合体になっているが、成層構造は大まかに保たれている。泥岩層は、完全に粉碎され、鏡肌が形成されている。泥岩層の膨縮は激しく、砂岩層もレンズ状になっている。
- ④ Dクラス：砂岩泥岩互層の成層構造がほとんどまたは完全に破壊されて、一見崖錐堆積物状を呈する。しかし、角礫は砂岩泥岩互層から由来するものだけで異質礫を含まず、基質もないので、地すべり岩塊と認定できる。

各地すべりの変形構造は、以下のとおりである。

i) 井ノ久保地すべり

井ノ久保の地すべり地形は、東西幅1.5km、南北幅1.0kmと馬路川沿いで最大級の規模を持つ。地すべり堆積物は馬路川を越えて約400m南へ滑動した結果、その先端が対岸の山裾まで達している。このため、和泉層群からなる地すべり岩体は、三波川変成岩類と直接接している。現在の馬路川は、地すべり岩体の先端を下刻する渓谷となっている。地すべり岩体は、表層部を和泉層群の砂岩角礫を主体とする角礫層からなり、その下部は著しく擾乱を受けた和泉層群から構成される。角礫層は黄褐色～明赤褐色を呈している。場所によっては、数cm～数10cmの砂岩角礫層中に計約2mの砂岩勝ち互層の岩塊が取り込まれている。この岩塊には開口割れ目がcmのオーダーで密に形成されて、多角形状の破断面も発達している。また、cm間隔で開口割れ目が発達し、角礫状に破碎された砂岩泥岩互層が露出している。ここでは、大部分の砂岩泥岩互層は大まかには層状構造を保ってはいるが、砂岩層、泥岩層が共に不規則な形のブロックに分断され、角礫の集合体の様相を呈する(Cクラス；写真6.3.1左下)。また、砂岩と泥岩の層状構造が完全に破碎されて、角礫層になっているところもある。これらの砂岩泥岩互層は連続性が悪く、走向・傾斜も変化に富み、多角形状の開口割れ目が発達している(Dクラス；写真6.3.1右下)。角礫と角礫との間は、黄褐色を呈したシルトの基質を持つマイクロブレッチャーによって充填されている。ここには平坦な画然としたせん断面は認められず、境界面の連続性が悪く、方向性も認められない。なお、上述の和泉層群の破碎を「中央構造線」による断層破碎によるとする考え方と、地すべり地形の範囲の表層部に分布する岩屑上の角礫層、開口割れ目を多数伴う不規則な破断状況から、この破碎は地すべりに伴う破碎とする考え方がある。

ii) 船戸地すべり

徳島県船戸の地すべり地形は、開析をほとんど受けていないため、完新世に形成されたと推定される。地すべり堆積物は角礫状に破碎された和泉層群の泥岩勝ち互層を主体にし、馬路川を越えて

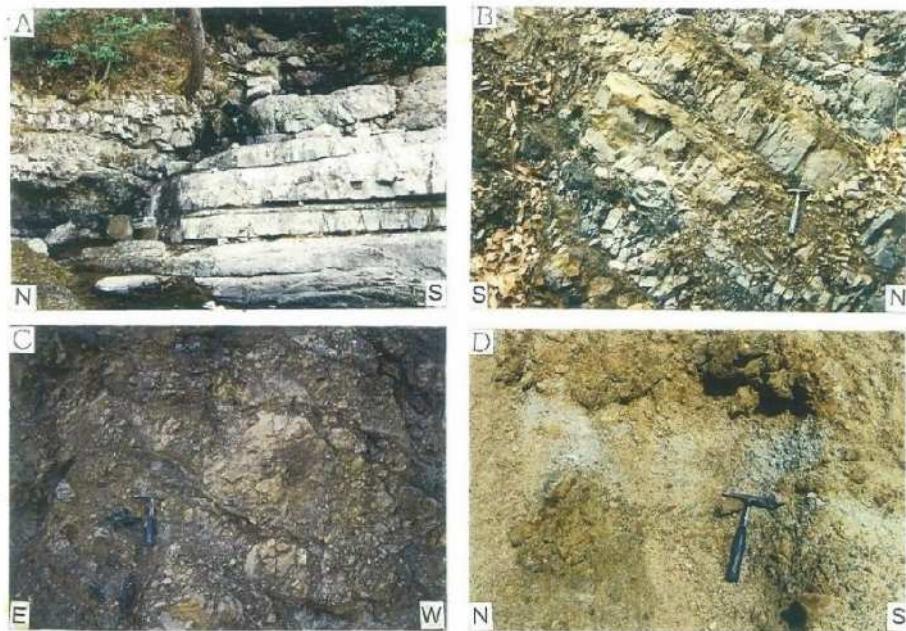


写真 6.3.1 和泉層群の砂岩泥岩互層の角礫化の程度(A~Dクラス)

約 150 m 南へ滑動した結果、その先端が対岸の山裾まで達し、三波川変成岩類と接している。地すべりによる堰止め湖堆積物中に埋没した木片の ^{14}C 年代は、 7120 ± 260 yrsBP である。したがって、この年代の少し前に地すべりが発生した可能性が高い。馬路川に南流する瀬戸谷の出口の右屈曲は、地すべり岩体が「中央構造線」池田断層によって、地すべり発生後約 30 m 右横ずれ変位を受けた可能性を示している。

iii) シンヤマ地すべり

池田断層の南側に位置する池田町シンヤマの和泉層群は、讃岐山脈の和泉層群が岩盤すべりを発生して、山麓の土石流堆積物とともに、古吉野川の河床礫を取り込みながら、約 500 m 南へ滑動したと推定される。シンヤマの地すべり岩体は、中期更新世前半に形成された可能性が高い。また、地すべり岩体を地形、地質的に復元すると、地すべり岩体は滑動後池田断層によって 5~6 km 右ずれ変位を受けていると推定される。

6.3.2 松山自動車道の地形・地質の概要

(1) 地形の概要

対象地域とその周辺は、愛媛県の東部、いわゆる予讃回廊地帯（燧灘沿岸）の中地区と、その南方に比高 1,500 m 前後の高度差をもって屹立する四国山地石鎚山系の一部（主として法皇山脈の西部）を含める地域^{18),19)}である。

地形的にみれば、回廊地帯には、内帯側の丘陵性山地（和泉層群）である下島山山地と長野山山地（いずれも標高 250~200 m 級）が孤立し、その低地空間を埋めるようにして、古期扇状地（丘陵・台地）～沖積扇状地～扇状地性氾濫原～三角州性低地からなる新居浜低地および宇摩平野の西部が開けている。またその南方には、N75° E の方向へほぼ一直線状に伸びる「中央構造線」を境に、標高 1,700~1,200 m 級の上昇地塊、すなわち石鎚山系（三波川帶結晶片岩類）が屏風のようにそそり立ち、その断層崖（石鎚断層崖）中の最大級を含む大小規模の三角末端面がみごとに連なっている。最近、この狭義の「中央構造線」自体による石鎚断層の活動とともに、図 6.3.6 に示すように、これと並行して北側の第四系堆積



図 6.3.6 四国中央における中央構造線の配列と讃岐・石鎚山地

表 6.3.1 四国中央地域の地形区分

I	山 地	II	丘陵・台地（含む一部沖積錐）
I a	四国（外帯）山地	II a	新新居浜平野周辺丘陵・台地
I a1	石鎚山地	II b	宇摩平野南縁丘陵・台地
I a2	四国背梁山地		
I a3	法皇山脈	III	低地（含む一部低地性台地）
I b	瀬戸内（内帯）山地	III a	新居浜平野
I b1	下島山山地	III b	宇摩平野
I b2	長野山山地		

物を切る右横ずれの活断層群が認められ、「中央構造線系」の中の「中央構造線」活断層系として別称されている。

「中央構造線」以南の山地、上記の石鎚山系のほか四国(外帯)山地は、南側にその本体をおく四国背梁山地の北縁部にあたり、ほぼ全域が 850~400 m の起伏量を持つ満壯年期性大起伏山地である。一部に前輪廻性老年地形の遺構を載せているが、勾配 60~20° を示す大小の幼年谷とともに、現在なお隆起・浸食の激しい相剋が進行中の山地区もある。本地域とその周辺は、表 6.3.1 に示すような地形区に区分される。

ここで、土石流発生危険渓流に關係のある四国(外帯)山地の地形特性を以下に述べる。四国山地は「中央構造線」以南の地域の広範囲な地形区である。山頂部の標高 1,700~1,200 m、ほぼ全域が三波川帶結晶片岩類から構成される満壯年期性の大起伏山地である。

四国背梁山地の主梁をなす石鎚山脈は、最高峰の石鎚山からそのまま東北東に連なり、本地域のすぐ南方、 笹ヶ峰 1,860 m あたりに達するが、ここからは支脈としての法皇山脈が東北東に枝分かれしており、四国背梁山地の主部は銅山川を隔てた南の高知県境を東進している。したがって、本地域は、 笹ヶ峰山体の北稜(黒森山 1,678 m)、すなわちプロパーとしての石鎚山地(I a1)とこの法皇山脈(I a3)の北側が千数百 m を越える比高の石鎚断層崖であり、四国背梁山地(I a2)の主稜は直接これに接していない。

1) 石鎚断層崖

西日本の地形・地質を内帯と外帯に二分して縦走する「中央構造線」が、最大規模かつ典型的な断層地形を表現しているのは中四国の北部(予讃回廊地帯)とされている。その中

でもとりわけ本地域には、断層比高の最大値が現われ、そのほかの地形的特徴も最も標識的な区間と見られる加茂川(市之川)～赤星山(土居町)の範囲にほぼ一致している。すなわち、この区間の山麓線はほとんど一直線であり、これに大小の規模の三角末端面が屏風を立てたように連なっている。大規模なものはいずれもその上端を背後の山脈主分水嶺と、痩せた南北方向の尾根で結ばれている。石鎚断層崖中、最大の三角末端面と認定されているのは黒森山北面のもので、比高 1,540 m、ついで上兜山北面のもので比高約 1,480 mである。

2) 石鎚山地 (*I a1*)

石鎚山脈の北縁部、すなわち笛ヶ峰を母体としてその一部を張り出している黒森山ブロックのことである。それは断層崖中最大の三角末端面を構成しているほぼ三角錐状の山地ブロックのことである。黒森山(1,678 m)はそのまま巨大な三角末端面の頂点であり、東に国領川、西に加茂川の谷壁で仕切られ、背後の笛ヶ峰(石鎚山脈)本体のみ、痩せた一本の尾根で結ばれている。起伏量 600～500 m、斜面勾配 50～25°、谷密度 60～40 本/km²程度が一般的であるが、浸食斜面のいたるところに露岩や崖(岩)が現われ、特に東側の女廊川渓谷一円には、起伏量 850 m の極値が現われている。

3) 四国背梁山地 (*I a2*)

対象地区の南東の銅山川の南側を貫いている山地ブロックにあたり、笛ヶ峰あたりで法皇山脈が分岐したあと、その南側に隠れて細々とその正統性を守り、東方に入っても四国背梁山脈としての優勢を盛り返す山脈である。東光森山を最高点として山頂の高度配置 1,486～1,300 m、起伏量 600～250 m、谷密度 65～30 本/km²が一般的である。雄大な V 字谷で谷底平野は皆無であるが、比高 180 m 以下に断片的な砂礫段丘の上・中・下位がみられる。また、主に南岸の谷壁に比高 700～400 m、300～200 m の山腹緩斜面(地すべり地形が多い)が点在し、これらの多くを含む斜面一円に、本地形区では珍しい起伏量 400～200 m の中起伏山地が現われ、最も集落分布の多い地域となっているが、そのほかの地域では、地形測定値が示すとおりの陥没な浸食斜面が広がっている。

4) 法皇山脈 (*I a3*)

北側の回廊地帯から見渡すことができる本地形区最大の山地ブロックであり、南の背梁部(石鎚山脈)から分岐した直線状の主稜は、北東方向に進んで「中央構造線」に近づく区間と、東北東に折れて「中央構造線」に並列する区間とがある。西赤石山(1,626 m)～峨藏峠東方 (1,340 m) 間の 9.5 km と、赤星山(1,453 m)以東が「中央構造線」に並列する区間であり、「中央構造線」との距離は前者が 9.5 km、後者になると約 3.5 km まで近づいている。そのために前者は、北面の石鎚断層崖上限、つまり大規模な三角末端面の上端との間に距離があり、これを結ぶ南北方向の支稜 2.5～0.8 km が存在するが、後者ではこれがなく、山脈の北側斜面がそのまま断層崖になっている(ただし、これらの石鎚断層崖は、地下の断層面より勾配が緩く、正確には階段状地形で单一の断層崖ではないとされる)。また、当然のことながら前者には、断層崖を奥深く分断する国領川、関川、浦山川のようなスケールの大きい必従谷が成長し、その規模や進行度を表す各測定値がいずれも大または極大を示している。一方、東赤石山(1,707 m)を最高峰とするこの区間の山脈主分水嶺プロパーには、珍しく蛇紋岩、かんらん岩、角閃岩などからなる時代未詳の火成岩類が露出し、その上に 1,650～1,550 m、1,500～1,400 m 級の山頂緩斜面遺構(図 6.3.7 の切峰面判読)

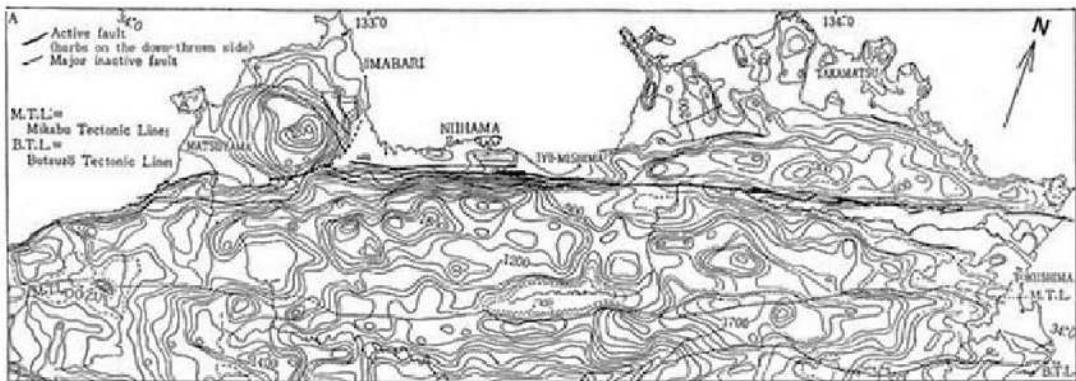


図 6.3.7 北四国における活断層と主要地質構造線分布図¹⁵⁾

基図は岡田（1953）による接峰面図で等高線間隔は100m

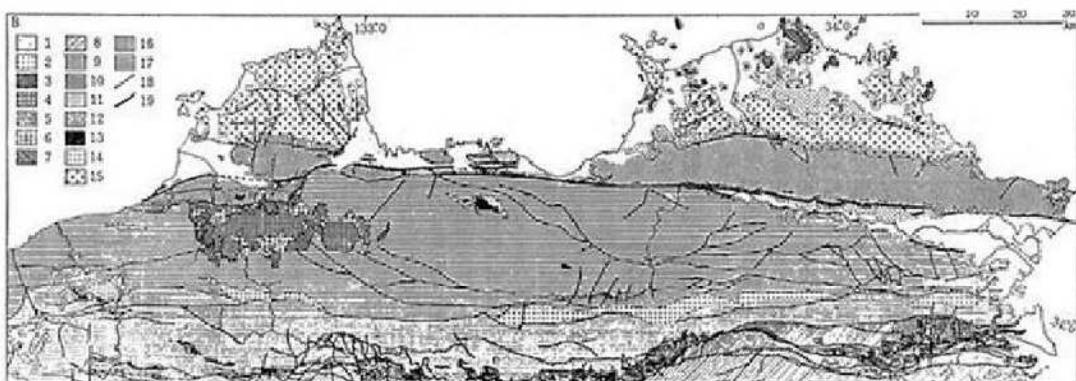


図 6.3.8 北四国の地質略図¹⁵⁾

地質調査所 1/200000 地質図などを編集、簡略化。

- 1: 沖積層, 2: 更新世層, 3:瀬戸内火山岩類(中新世～鮮新世), 4:黒雲母安山岩, 5:石鎚層群(両輝石安山岩), 6:石鎚層群, 7:久万層群, 8:四十萬層群, 9:和泉層群, 10:外和泉層群, 11:ジュラ紀層, 12:二疊(ペルム)紀～三疊紀, 13:かんらん岩～蛇紋岩, 14:御荷鉢綠色岩類(斑レイ岩～角閃岩),
15:領家帶花崗岩類, 16:領家變成岩類, 17:三波川變成岩, 18:断層, 19:活断層

が西高東低の高度配置でのっている。なお、この地形ブロック全体では起伏量 800～450 m, 斜面勾配 65～25°, 谷密度 70～35 本/km²が一般的である。

(2) 地質の概要

四国中央地域は、西側から北東方向にかけて「西南日本中央構造線」がほぼ一直線となって通過している。「中央構造線」よりも南側の地域は、急峻な石鎚山地であって、三波川变成岩類で構成されている。石鎚山地の北面は「中央構造線」によって形成された石鎚断層崖である^{18)～20)}。

「中央構造線」の北側の地域のほぼ中央には、図 6.3.8 に示すように、「中央構造線」の方向にほぼ並行して、白亜紀和泉層群の丘陵がある。この 2 つの丘陵の間を国領川が北流している。新居浜市街は国領川の扇状地と沖積氾濫原の上にある。土井町や旧伊予三島市の平野は、関川や浦田川などの石鎚断層崖を北流する必従河川の扇状地や氾濫原である。旧新居浜市の大島、黒島、垣生、御代島は中生代の領家貫入岩である。黒島、垣生、御代島は島であったが、埋立てによって現在は陸続きになっている。

対象地周辺では「中央構造線」の露頭が観察できる所が多く、「中央構造線」の研究が進んでいる。石鎚山脈の北端を区切る石鎚断層の北側には、岡村断層、畠野断層、寒川断層、坂之下断層、東田断層およびそのほかの断層が石鎚断層と並行して通過している。これら

の断層を含む一帯は「中央構造線」断層帯と呼ぶことができる。

石鎚断層の基本的な構造は、和泉層群と三波川変成岩類とが断層で接触している形であるが、新居浜市の川口、出口、御蔵では和泉層群を覆っている古期の扇状地堆積物と三波川変成岩類とが断層で接触しているのが見られる。岡村断層、畠野断層、寒川断層は古期の扇状地堆積物を切っている。

「中央構造線」は、上部白亜紀和泉層群堆積後、中部始新世二名層堆積前の期間中に和泉層群と三波川変成岩類とが接触する断層として出現したものである（上灘時階の運動）。その後、上部始新世明神層堆積後、上部中新世ないし下部鮮新世石鎚層群堆積前の期間中にはほぼ古い断層に沿って運動が起こったと考えられている（砥部時階の運動）¹⁶⁾。

対象地域に見られる「中央構造線」は、さらにそれ以後の鮮新世末期ないし更新世初期から引き続き現在まで活動している運動によって形成されたものである(新居浜時階の運動)。この時期の運動には、石鎚断層のように古い断層に沿って再活動したものと、岡村断層や畠野断層などのように石鎚断層の北側の地帯に発生したもので、右横ずれ断層である。

1) 三波川結晶片岩類

地層・岩層の特徴の詳細は、高速道路に影響を及ぼす石鎚断層とその周辺を形成する石鎚山脈などに分布する三波川帯の三波川変成岩類について記載する。

三波川帯は関東山地から中部・近畿を経て四国地方に至り、さらに西は九州地方へ延長する長大な広域変成帯であって、その大部分は各種の結晶片岩類からなる。新居浜市から高知県本山地区にかけては三波川帯の幅の最も広い所であり、しかもその変成度が低いものから高いものへまたがり、日本の三波川帯の模式的分布地域である。なお、結晶片岩には別子鉱山をはじめとする含銅硫化鉄鉱を伴っている。対象地域周辺に見られる結晶片岩類は、緑色片岩、泥質片岩、砂質片岩、珪質片岩、角閃岩の5種類に大別され、図6.3.9に示すような構造をなし、これらを構成する変成岩層は表6.3.2のように区分されている。

i) 緑色片岩(塩基性片岩) Gs

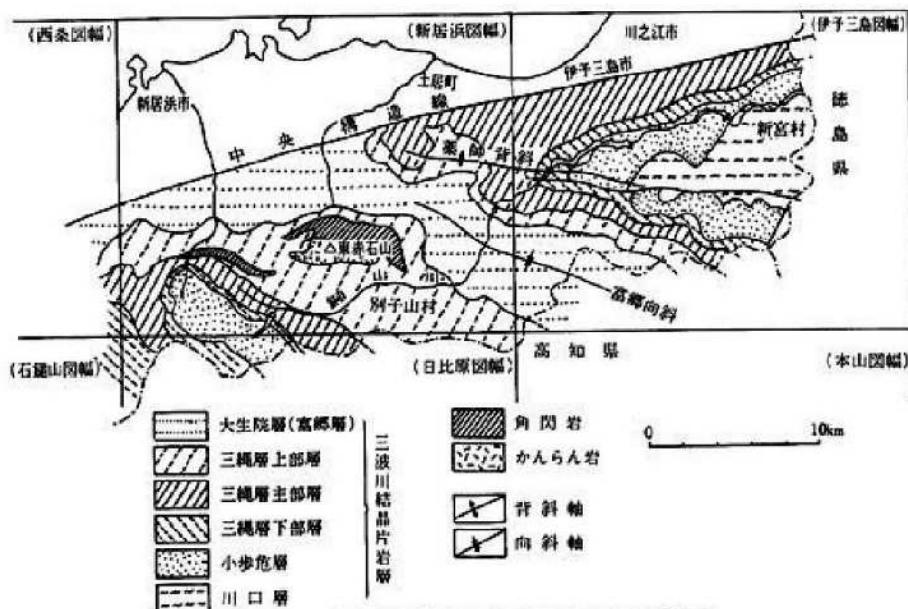


図 6.3.9 対象地域とその周辺の三波川帶地質略図

表 6.3.2 対象地周辺における三波川帯の結晶片岩層の層序表

層群名	地層名	層 厚	特 徴
吉野川 層群	上部層群 (大生院層) (富郷層)	層厚不明	泥質片岩を主として砂質片岩を伴う
	中部層群 三綱層上部層	1,000m+	泥質片岩・緑色片岩互層からなり、下位付近に別子鉱床層準を伴う
	三綱層中部層	500~600	緑色片岩を主とし珪質片岩を伴う
	三綱層下部層	700~800m	泥質片岩を主とする
	小歩危層	層厚不明	砂質片岩を主とする
下部層群	対象地域では欠如、旧伊予三島市以東に分布		

淡緑色～濃緑色で片状を示す。原岩は塩基性の火山噴出物(熔岩または火成碎屑物)で、化学成分が苦鉄質であるため、变成作用の進行とともに緑泥石族、緑れん石族または角閃石族の苦鉄質緑色鉱物が生じて全体として緑色となる。变成度は鹿森ダム付近から銅山峰を経て東赤石山の連峰にかけての付近に高く、南は比較的急激に、また北も次第に变成度が低下する。高变成度のところは粗粒状の角閃片岩または緑れん角閃片岩からなって、角閃岩に外觀が酷似するものとなり、かつ曹長石の白色班晶(変班晶)を伴う点紋片岩となるのが普通である。变成度が低下すると点紋が消失し、全体として細粒となり、構成鉱物としては角閃石族の中の透緑閃石(陽起石)を主とし緑泥石を伴い、さらに低下するとパンペリー石を含むようになるとともに、結晶片岩から千枚岩に移化する。緑色片岩はかなり緻密かつ均質でやや硬質であり、弾性波速度も 4 km/sec 程度を示し、岩盤としてはやや安定である。風化帶はあまり厚くないが、風化を受けると緑色鉱物中の鉄分は水酸化鉄となって全体が褐色化し、その表土はラテライトに似た赤褐色土である。一方、新鮮な岩盤でも破碎を受けた部分は、粘土化して軟弱となりやすい。また、泥質片岩などの細互層部分や变成度の低い千枚岩質部なども脆弱である。

ii) 泥質片岩(黒色片岩)Ps

泥質片岩は一般に黒色であるが、時には石英および絹雲母を多く含んで灰白色を呈することもある。しかし、灰白色のものは差質片岩に移化する性質の片岩である。黒色片岩は対象地周辺に広く分布する。全体として黒色である場合と、白黒の細縞の重なりからなる場合とがある。構成鉱物は、变成度の高いときは黒雲母・斜長石・石英、また变成低下の場合は絹雲母(白雲母)から、さらに粘土鉱物のイライトとなり、かつ次第に細粒化する。黒色片岩は片理がよく発達するが、①剥げ易いへき開面をなすこと、②大小様々な模様に褶曲することがどこでも見られ、また③褶曲するときはその軸面がへき開面に転じていることが多い。岩質はいずれも岩盤としての性質を脆弱化する要素であり、弾性波速度も 3 km/sec 以下と低い。なお、砂質片岩は泥質片岩にしばしば伴われ、暗灰～灰白色で泥質片岩よりも堅硬である。

iii) 硅質片岩(石英片岩)Qs

白色～灰白色のものと赤味帯びたものがあり、後者は紅れん石絹雲母石英片岩(紅れん片岩)の名称で知られている。いずれも石英を主成分鉱物とするため極めて堅硬で、風化に耐え、地表で突起した露岩をなしている。

iv) 角閃岩(*Am*)

岩石種としてはやや特殊なものに属する角閃岩が対象地域周辺に多量に分布している。普通、角閃岩からなる単鉱物岩が典型的であり、塊状ないし片状ときに片麻岩状で、片理が認められる場合も剥離性は顕著でなく、しかも結晶粒は粗大で、これらの性質は火成岩(深成岩)に近い。苦鉄質鉱物からなるため、比重は3.1~3.2で、化学成分は緑色片岩にはほぼ共通するが、より堅硬で風化に対する抵抗も強い。

2) 深成岩類と火山性岩石

深成岩類は、①三波川帯のかんらん岩・蛇紋岩などの超塩基性岩と、②北部は海岸付近から大島にかけての領家帶を構成する花崗岩類の2つに大別される。深成岩類と火山性岩石の特徴は下記のとおりである。

i) 深成岩類

苦土かんらん岩からなるものが最も純粹で、ダンかんらん岩である輝石や角閃石を含むもの、さらに蛇紋岩化したものなどが多い。塊状緻密質堅硬で、最大200mに達する規模の大きい岩体で結晶片岩および角閃岩中に貫入する。しばしば不均質で軟弱な蛇紋岩に変化して風化が進む。蛇紋岩はかんらん岩からの変質によって生じ、かんらん岩の蛇紋岩化によって鉄分と水分が増加した硬軟様々の岩質となる。葉片状構造の蛇紋岩の散在のため岩体内にすべり面が生じやすい。比較的大きい岩体として分布し、かんらん岩を主としてあまり軟弱化していることない。ほぼ完全に蛇紋岩化するものは狭小な岩脈～岩床状のもので、自然災害の点では特に問題はない。花崗岩類は中粒ないし粗粒で、有色鉱物として黒雲母、角閃石を含む。特に、風化が進んでいて、まさ土化している。分布は、大島・黒島・垣生とこれらより南側の山麓に分布する。

ii) 火山性岩石

火山性岩石は、領家帶の花崗岩を貫く岩脈状の安山岩質岩石と半深成岩のメンバーのもの、「中央構造線」に沿うあるいは三波川帯の変成岩中に岩脈をなす安山岩とその変質岩であり、幅2m以下である。

3) 和泉層群

対象地域の固結堆積物は、上部白亜紀和泉層群の岩石のみである。この層群の分布の北限は領家貫入岩体と不整合または断層で接している。南限は三波川変成岩類と「中央構造線」の断層で接している。地層は下記の4種類に大別できる。

- ① 砂岩優勢砂岩頁岩互層：砂岩厚層と頁岩薄層の互層で、和泉層群で最も広範囲に分布する。砂岩は硬質堅硬で、コンクリート骨材などに利用されている。地表近くに分布するものは、節理に沿って風化が進んでいて、崩壊や落石が発生しやすい。
- ② 頁岩層：頁岩層は頁岩を主体として、部分的に薄い砂岩を挟んでいる。頁岩は最も脆弱で、風化も早く、土砂崩壊などの災害を起こしやすい。
- ③ 磯岩層：磯岩層は和泉層群分布域の北縁部に分布する。層序でいえば、和泉層群の基底に近い部分にあたる。構成磯は斑岩・珪岩・変成古生層の円磯である。
- ④ 凝灰岩層：灰色、黄土色、乳白色、黒色など酸性凝灰岩で、和泉層群の岩石中最も硬い。細粒、粗粒あるいは磯岩質のものもある。特有の節理が発達しており、ほかの岩石と容易に区別できる。風化すると白色が強くなり、陶土状を呈する。2枚の層厚約30mと層厚1m内外のものが多く見られる。

4) 未固結堆積物

未固結堆積物は更新統以降の堆積物であり、石鎚山地内と石鎚断層崖直下に分布する斜面堆積物、台地を形成する扇状地段丘堆積物および沖積低地を形成する氾濫原堆積物などの低地堆積物からなる。

i) 斜面堆積物

石鎚山脈内とその周辺山地斜面や谷壁斜面に見られる崖錐、地すべり・土石流堆積物、および石鎚断層に沿って三角錐状の新しい沖積錐堆積物、「中央構造線」の運動によって形成されたものが岩盤すべりによって移動した泥質片岩の岩塊・角礫からなる岩盤すべり堆積物の3種類に区分できる。

ii) 扇状地段丘堆積物

石鎚断層崖に沿って新旧の扇状地堆積物が分布しており、旧期扇状地は開析された段丘の地形面を形成している。旧期扇状地は堆積物の固結度、風化や開析の程度から旧期・中期・新期扇状地に区分され、それらは地形面からいえば、古期段丘・中期段丘・新期段丘にあたる。各段丘堆積物の性状は、古期ではくさり礫を多く含み、著しく開析されている。中期ではやや固結しており、くさり礫を含み、開析は進んでいるが原地形はかなり残っている。新期では未風化、未固結であまり開析されていない。沖積扇状地堆積物は石鎚断層崖の北部に形成されている扇状地である。

iii) 低地堆積物

未固結堆積物であり、人工改変地として塩田跡・工業用埋立地・農業用埋立地の人工堆積物があり、そのほかは自然堆積物で海浜・海岸低地堆積物と現在および旧河道堆積物、谷底堆積物、沖積氾濫原堆積物がある。

5) 「中央構造線」の各断層の分布

石鎚山脈北麓の石鎚断層は、西南日本の内帯と外帯を区分する広義の「中央構造線」のほかに、図6.3.10に示すように、内帯側にはこの構造線と並行する狭義の「中央構造線」（内部の畠野断層・寒川断層、中部の岡村断層・坂之下断層、外部の東田断層）が分布し、これらは段丘層などを変位させており、活断層とされている。

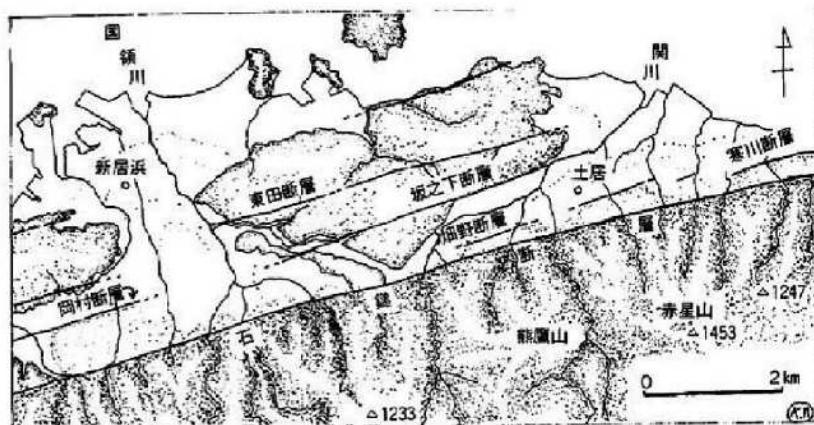


図 6.3.10 対象地域の「中央構造線」の各断層の分布

6.4 代表のり面における比抵抗絶対値分布とその解釈

探査対象の地域と区間に分布する斜面(自然斜面・のり面)について、比抵抗絶対値分布と盛土および切土の各斜面の地盤性状との関係を検討・検証する。

6.4.1 盛土のり面への適用例

盛土への適用は、舞鶴若狭自動車道では 79.15 KP , 79.80 KP 付近の 2箇所(盛土のり面)と、徳島自動車道では 83.90 KP 付近の人工斜面(盛土のり面)を対象とした。その結果は、以下のとおりである。

(1) 舞鶴若狭自動車道の盛土のり面

舞鶴若狭自動車道における盛土では、空中電磁法探査と 2次元比抵抗探査や地上電磁気探査・地中レーダー探査などの地表物理探査を実施した^{4),25)}。

盛土は、狭長な谷底平野(断層谷)と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、一部片切片盛となる。対象区間は暫定 2車線区間であるが、完成形で盛土され、盛土の平均高さは 8 m である。

盛土は沖積低地～山地末端部切土のり面にかけて構築されており、沖積低地では礫質土上に、山地末端部では崩積土と風化土砂～軟岩からなる傾斜地盤であり、地下排水施設から $20\sim30\text{ }\ell/\text{min}$ の湧水が見られ、基盤岩上を流動する地下水、あるいは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 $45\sim80\text{ }\Omega\text{m}$ と低比抵抗を示し、体積含水率の高い状態となっている。基盤岩は $150\text{ }\Omega\text{m}$ 前後の比抵抗を示し、風化軟岩～軟岩状を示す。

1) 現地概要

舞鶴若狭自動車道で空中電磁法探査を実施した盛土区間は、NE-SW方向の明瞭なリニアメントが分布し、これと一致する方向に狭長な谷底平野(断層谷)が発達している。この谷底平野と直線的な山地との境界部に沿って盛土されており、平地部～沖積錐～谷部～山地末端部が交互に出現する地形で、丘陵がせり出した部分では丘陵の片切片盛となっている。当区間は暫定 2車線区間であるが、完成断面で盛土されており、平均的な盛土高さは約 8 m である。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、盛土内の地下排水施設から $20\sim30\text{ }\ell/\text{min}$ の湧水が見られ、鉄バクテリアの沈着がみられるが、一部は清水である。清水の湧水は、沖積錐から谷部にかけた盛土や山がせり出し片切片盛となっている箇所で多い。そのため、旧河道や砂礫層中またはサ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。

図 6.4.1 は盛土区間の比抵抗平面分布を示したもので、盛土箇所は非盛土箇所に比べて比抵抗は小さく $45\sim80\text{ }\Omega\text{m}$ であり、細粒分含有率や体積含水率が高い状態にある。砂礫などの粗粒土からなる沖積錐上の盛土の比抵抗は、やや大きい比抵抗 $150\text{ }\Omega\text{m}$ 前後を示す。図 6.4.2 は盛土探査区間の比抵抗縦断図であり、比抵抗の平面分布と同様、 $30\text{ }\Omega\text{m}$ の低比抵抗と $150\text{ }\Omega\text{m}$ の高比抵抗が交互に分布する。その分布は盛土の高さに関係なく、原地盤面の性状(沖積低地・沖積錐・崖錐など)に依存する。また、盛土の基礎地盤の比抵抗は $50\text{ }\Omega\text{m}$ 前後の風化軟岩の性状を示し、横断する河川より北側では $100\text{ }\Omega\text{m}$ 以上の比抵抗を示し、比較的良好な岩盤となっている。

盛土区間の代表箇所の各種物理探査結果を、図 6.4.3～図 6.4.7 に示す。図 6.4.3 は代表地点の垂直方向の比抵抗分布を示したもので、図 6.4.4 は 2次元比抵抗探査による比抵抗

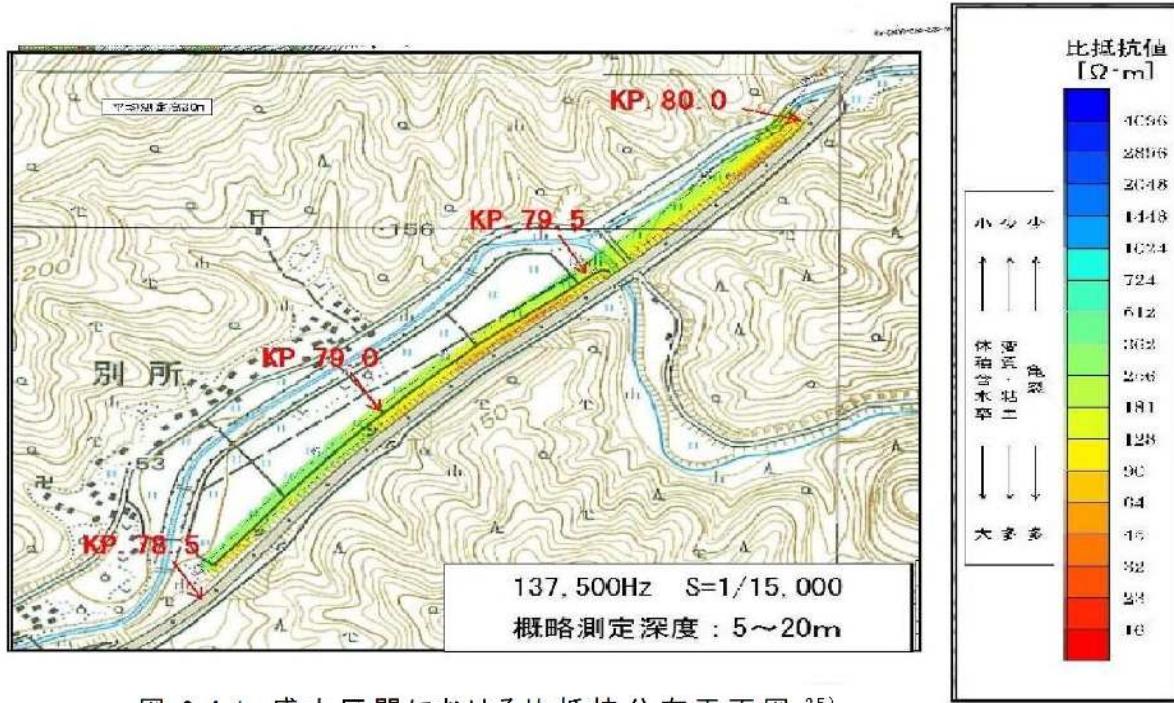


図 6.4.1 盛土区間における比抵抗分布平面図²⁵⁾
(高度 30m, 137.5kHz)

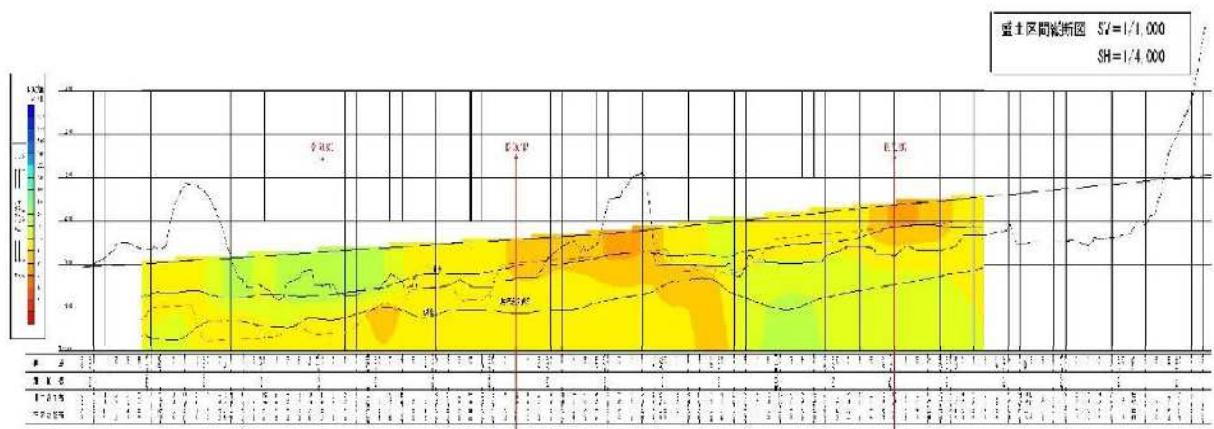


図 6.4.2 盛土区間における比抵抗分布縦断図 (高度 30m, 137.5kHz)²⁵⁾

分布である。盛土の比抵抗はほぼ同じであり、基礎地盤では沖積層は同じであるが、基盤岩は $30 \Omega\text{m}$ の低比抵抗と $150 \Omega\text{m}$ のやや高比抵抗を示す部分に分かれ、岩盤性状が異なることを示す。比抵抗分布の形状は両地点ともほぼ同じ形態を示し、盛土材料および盛土内の体積含水率(間隙率・飽和度・粘土鉱物(細粒分)含有率など)の分布もほぼ同じで、比抵抗分布 $60 \sim 100 \Omega\text{m}$ のり尻に向かって分布する。これは盛土内排水工(暗渠排水工)による地下水の流動を示し、横断的にはほぼ水平構造を示し、均質な盛土であることを示している。

図 6.4.5 および図 6.4.6 は各種探査の解析縦断図を示すが、それぞれ異なった比抵抗分布を示し、その相互の解釈は難しい。横断方向の比抵抗分布を示す図 6.4.7 では、2次元比抵抗探査以外の断面は解釈が困難である。

2) 盛土状況と比抵抗分布との対比

i) 盛土 79.15KP

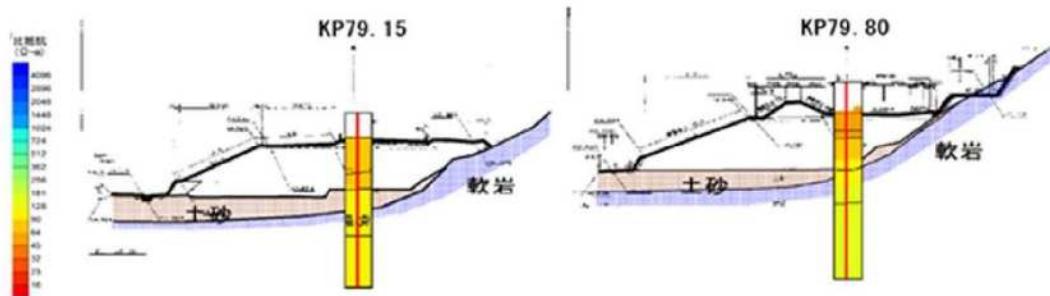


図 6.4.3 空中電磁法探査解析位置の盛土断面形状と解析結果²⁵⁾

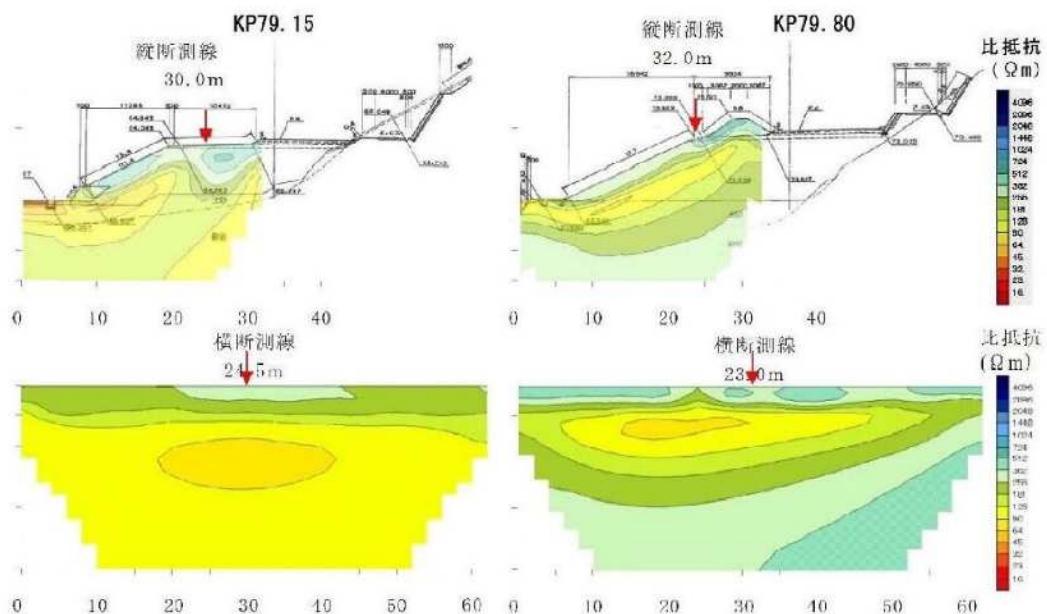


図 6.4.4 2次元比抵抗探査の解析結果(上段:横断図 下段:縦断図)²⁵⁾

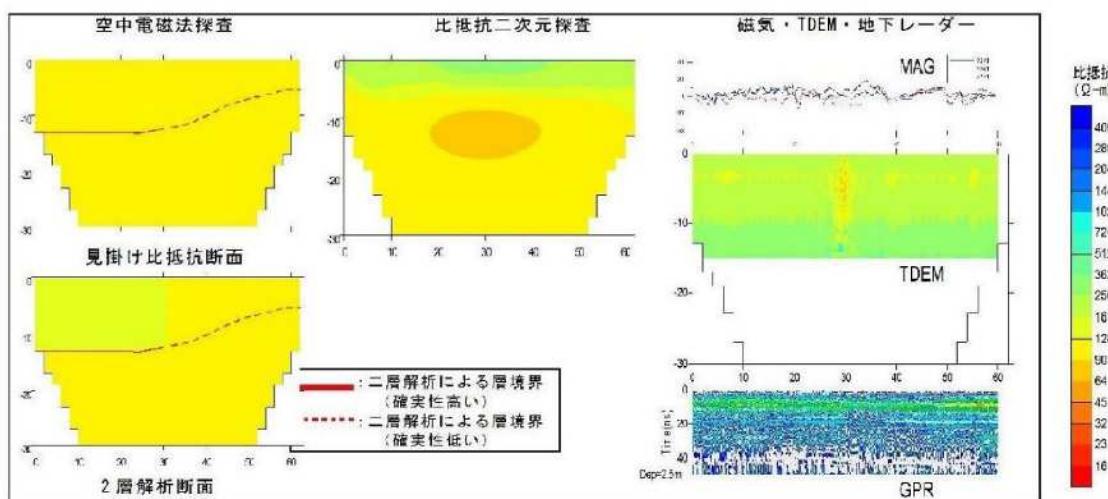


図 6.4.5 空中電磁法探査解析結果と地上物理探査結果の縦断方向の比較(79.15KP)²⁵⁾

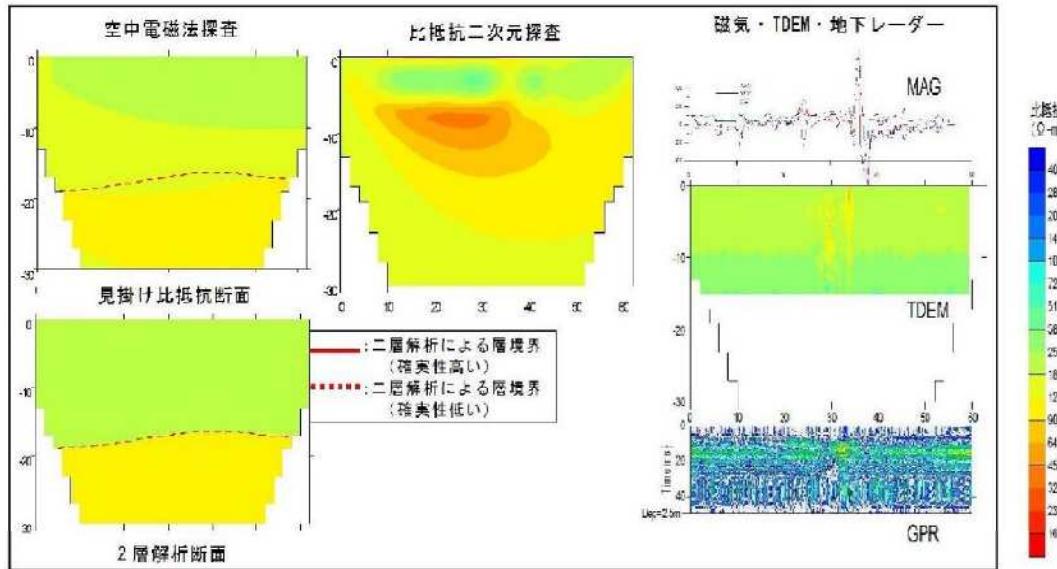


図 6.4.6 空中電磁法探査解析結果と地上物理探査結果の縦断方向の比較(79.80KP)²⁵⁾

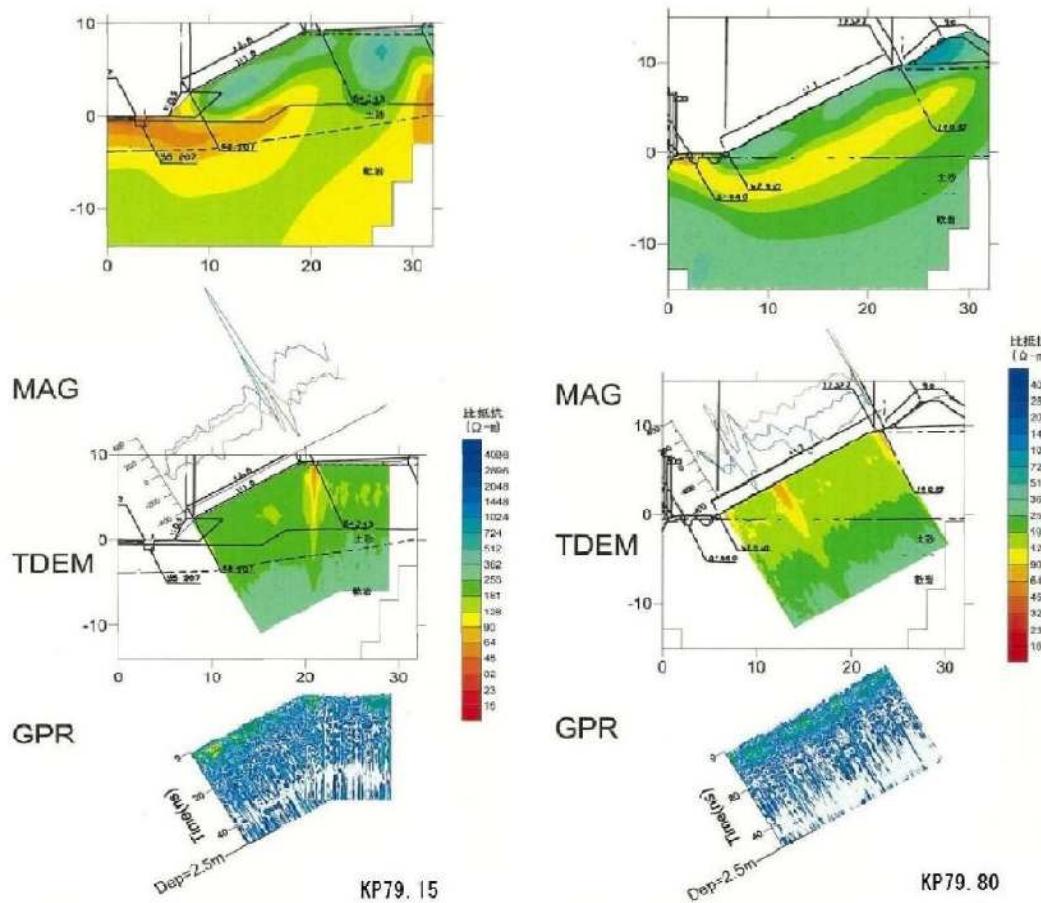


図 6.4.7 各種地上物理探査結果の横断方向の比較(左欄: 79.15KP 右欄: 79.80KP)²⁵⁾

沖積低地～沖積錐(沢末端)上の盛土であり、基礎地盤は軟弱な土砂と軟岩より構成される。盛土は下り線側で 6.5 m, 上り線側で 5 m である。のり面での湧水や流出跡は認められないが、排水施設からの湧水は比較的多く認められる。盛土は低い比抵抗(80 Ω·m程度)を示し比較的体積含水率が高い状態であり、沖積錐から基盤岩もやや低い比抵抗(100 Ω·m

程度)を示す。盛土は傾斜地盤であるため、基盤岩上を流下する流動水が盛土内に流入している可能性がある。

ii) 盛土 79.80KP

沖積低地～山地斜面にかけての盛土であり、盛土は低地部では中位の締り具合を示す礫質土上に、山地では崩積土と風化岩からなる傾斜地盤となる。上り線側道は片切片盛となり、盛土高は最大 9 m である。のり面の湧水や流水跡は認められないが、のり尻は湿潤状態で排水施設からの湧水は 20～30 ℓ/min あり、清水状態を示す。盛土上部が低い比抵抗 (45 Ωm 程度) を示し、体積含水率が高い状態にあり、基盤岩はやや高い比抵抗 (150 Ωm 程度) を示す。のり面での湧水や流出跡は認められないが、のり尻が湿潤状態で排水施設からの湧水も多く、清水状態を示している。基盤岩上を流下する流動水もしくは被圧水が、盛土内に流入している可能性がある。ほかの区間と比較して基盤岩は高比抵抗を示し、地質の違いを表している。

低比抵抗域の盛土性状が悪い箇所が抽出されるのは、以下のとおりである。

- 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い盛土について、定期点検における重点点検箇所として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。しかし、粘板岩類の岩塊は風化の進行が速く、短期に細粒化するため長期間にわたって調査し、経年的変化を捉えることが必要である。
- 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が、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降雨の影響は検討できるが、現実的には費用などを考えると困難が伴う場合が多い。

以上のことから、比抵抗絶対値(通常)表示による比抵抗分布から盛土の軟弱部(粘土分含有率や体積含水率の高い箇所)の検出が可能であるが、地盤状況や地盤工学的特性を詳細に把握するためには追加調査などが必要である。

(2) 徳島自動車道の盛土のり面

徳島自動車道が盛土で通過する箇所は、和泉層群と三波川帯の境界部で、「中央構造線」上か、それに近接した位置となっている。盛土の多くは片切片盛で小規模であるが、数段の小段を有する規模の大きな高盛土は、83.9KP 付近の高速道路と 0 次谷が交差する規模の比較的小さな谷部の下流部、つまり土石流危険渓流下流域の沖積扇状地面(沖積錐)の扇頂部～段丘平坦面にかけて施工されている。このような高盛土箇所の基礎地盤の構成は、和泉層群風化土砂と「中央構造線」に伴う断層破碎帯を基盤として、これらの基盤岩を覆う未固結堆積物(段丘堆積物と土石流堆積物や地すべり崩壊土砂)からなる礫混り粘性土～粘性土混り砂礫から構成されている。盛土材料は現地切土発生材である和泉層群泥岩の風化土砂～風化岩を主体としており、細粒分(粘土分)含有率や体積含水率が大きい材料が用いられている²⁶⁾。

図 6.4.8 は探査区間のうち、最も盛土高の大きい盛土(83.9KP 付近)とその周辺の比抵抗分布を示す。図 6.4.8(a)は比抵抗絶対値(通常)表示、図 6.4.8(b)は比抵抗絶対値(高精度)表示、図 6.4.8(c)は比抵抗強調値表示を示している。

図 6.4.8(b)の比抵抗絶対値(高精度)表示は、細粒分(粘土分)含有率や体積含水率の大きい盛土と未固結堆積物の分布が低比抵抗として強調されすぎ、それぞれの地盤性状や比抵抗分布の判別が難しい状態となっている。

高盛土区間における比抵抗は $50 \sim 100 \Omega m$ を主体に、一部 $250 \Omega m$ 以上、あるいは $20 \Omega m$ 以下の箇所が分布する。同一盛土内で盛土材料が大きく変化するとは考え難いため、 $20 \Omega m$ 以下の極端な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、細粒分(粘土分)含有率や体積含水率が高いことを示している。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 6.4.8(c)に示すように低比抵抗の分布箇所は旧谷筋と一致し、表面水の浸透水を盛土内から排水する施設が十分でないため、帶水に伴って盛土の水分飽和度が高く、それに伴いスレーキングなどによって盛土の地盤性状が劣化している可能性が大きい。盛土の比抵抗分布が低比抵抗を示す場合は、以下の地盤工学的问题がある。

① 地下水が流入し

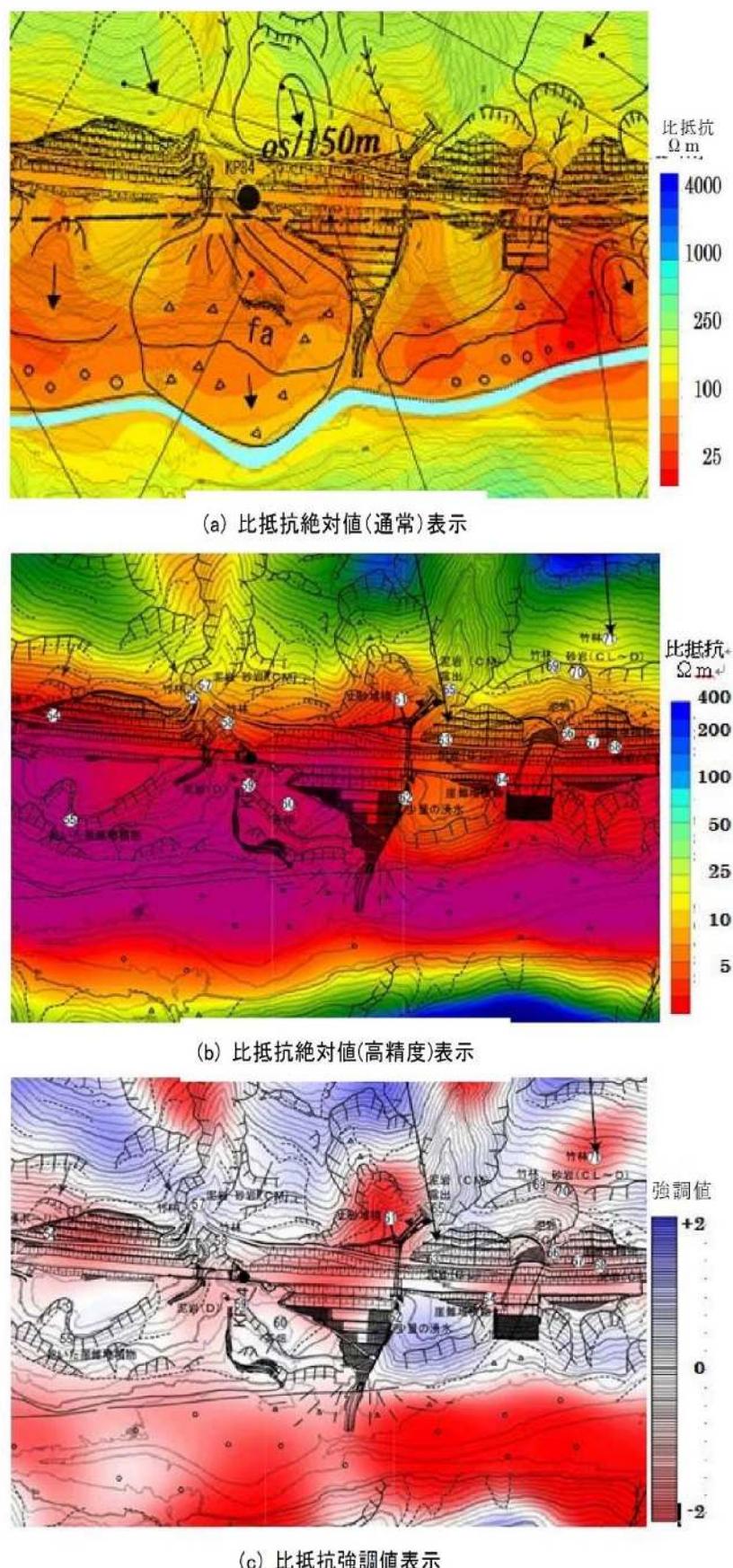


図 6.4.8 空中電磁法探査結果による各種
比抵抗表示の違い(83.9KP 付近)²⁶⁾

ている盛土では、盛土材の劣化(スレーキング)や車両の繰り返し輪荷重によって細片化し、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。

6.4.2 切土のり面への適用例

切土のり面への適用例として、舞鶴若狭自動車道では舞鶴東 IC の流れ盤のり面と受け盤のり面に対し、また徳島自動車道では新山トンネル～池田 PA 間の切土のり面に対して検討し、その結果を以下に述べる。

- (1) 舞鶴若狭自動車道の舞鶴東 IC 周辺(流れ盤切土のり面)

1) 現地概要

流れ盤の代表切土のり面として、舞鶴若狭自動車道距離程 86.0 KP の切土のり面を取り上げる。図 6.4.9(a) はその全景であり、このり面の探査結果と既往資料を用いてのり面状況と比抵抗分布の関係を検討した²⁵⁾。

この切土のり面の元地形は構造性の谷に囲まれた斜面で、側面は急峻な斜面状態となっている。全体に山頂から斜面中腹にかけて地すべり性の緩斜面を形成し等高線に乱れがみられ、古い地すべり跡地や崩壊跡地も見られる。のり肩やのり尻に近接して、断層に伴う NE-SW 方向のリニアメントが通過する。基盤岩は古生界の付加体堆積物である舞鶴層群から構成されており、剥離性に富む粘板岩を主体に、砂岩粘板岩互層や緑色岩類が挟在する。粘板岩については、未風化部は硬質であるが、全体に深層風化が進み赤褐色に変質した厚い粘性土化帯を形成し、のり面中央からのり尻にかけて粘板岩破碎帯が分布する。また、のり面中央からのり肩にかけては、旧地すべりに伴う崩積土や風化土砂が分布する。

地下水位は岩質境界付近に位置するが、降雨に伴う水位変動は降雨後 7～10 日に最高水位に達し、その最大変動量は 2.5 m である。この切土のり面には多数の排水ボーリングによって排水対策が取られ、湧水はのり面中段にある集水井とのり尻に限定された排水ボーリングからであり、湧水量は降雨条件によって増減するが、枯渇はほとんど見られない。なお、のり面中段の排水ボーリングについては、平常時には湧水がみられないが、降雨時には少量の湧水がみられる。

こののり面は、施工中に幅 10 m、高さ 6 m、奥行き 1 m 程度の崩壊や亀裂が発生している。崩壊や地すべりの発生要因となる脆弱部(断層破碎帯や剥離の著しい粘板岩など)が発見されたために、図 6.4.9(b) の対策工配置図に示すように、集水井 + 排水ボーリング工 18 本 : 1 基、排水ボーリング工 2 段 21 本、アンカー工 150 本、ロックボルト付のり枠 3,140 m² の対策工が採用されている。

2) のり面状況と比抵抗分布との対比

図 6.4.9(a) および図 6.4.9(b) に示すのり面の下段 3 段の勾配は 1:0.3～1.0 であり、のり枠工 + ロックボルト工および一部でアンカー工が採用され、4 段目より上部ではのり面勾配は 1:1.0～1.2 で、植生工が採用されている。なお、3 段目小段中央に集水井が設置され、その中から 9 本の排水ボーリング工が、またのり尻と 3 段目小段に排水ボーリング工がほぼ等間隔に設置されているが、のり尻の中央付近の 6 本のみ常時湧水がみられる。

図 6.4.9(c) は 137.5 kHz での比抵抗分布平面図であり、のり面中段からのり肩にかけて分布する明瞭な低比抵抗分布域は、旧滑落崖下位の崖錐分布域と対比される。図 6.4.9(e)

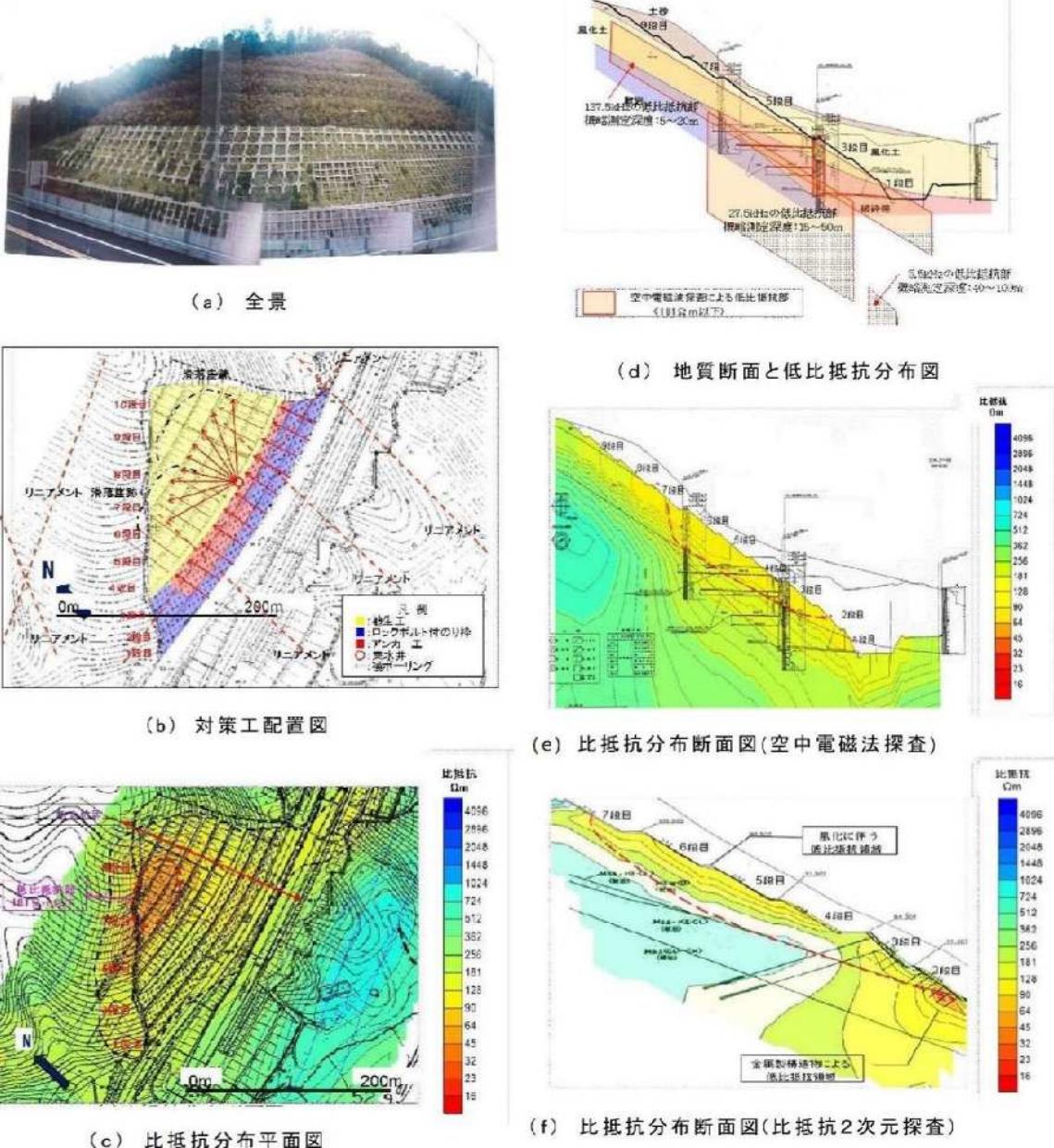


図 6.4.9 流れ盤のり面の状況と比抵抗分布 4.2.5)

はのり面中央付近の空中電磁法探査による比抵抗断面図(比抵抗絶対値(通常)表示)であり、のり尻にかけて $100 \Omega m$ 以下の領域が舌状に張り出し、張り出し部に位置する排水ボーリング工では常時湧水がみられ、比抵抗が $50 \sim 100 \Omega m$ (地層係数 $F=0.5 \sim 1.0$) の範囲が帶水層となっている。

のり面中段の 6 段目からのり肩に分布する $137.5 kHz$ での低比抵抗領域は、風化土砂・風化岩の分布とほぼ一致し、6 段目以上が含水比の高い粘土化した土砂状風化帯、5 段目以下が亀裂の多い軟岩で帶水層となっていることが低比抵抗を示す要因である。

図 6.4.9(f)は切土のり面ののり肩からのり尻にかけて実施した比抵抗 2 次元探査による比抵抗分布である。この比抵抗分布をみると、のり面補強用の金属製構造物(鉄筋挿入工、グラウンドアンカー工、ラス金網工など)の影響を受け $30 \Omega m$ 以下の低比抵抗部が分布する結果であった。そこで、金属製構造物の設置がなく金属類の影響を受けていないのり面

中段からのり肩において空中電磁法探査による比抵抗分布と対比した。

図 6.4.9(f)に示す比抵抗 2 次元探査による比抵抗分布は、5 m付近までは $50\sim100 \Omega m$ を示し、それ以深では漸次比抵抗が高くなり、10 m以深では $400 \Omega m$ 前後の風化岩～新鮮岩の値を示す。図 6.4.9(e)の空中電磁法探査による比抵抗分布と比較すると、概ね一致した値を示し、また地質構造の対応性も整合している。

この様に比抵抗 2 次元探査による比抵抗分布は、のり尻付近ののり枠工+アンカー工の施工範囲において低比抵抗を示し、空中電磁法探査結果との大きな違いとして捉えることができる。

図 6.4.9(d)は各周波数における低比抵抗分布域を示したもので、 $27.5 kHz$ 以下の周波数での比抵抗分布は、のり面 5 段目以下にも粘土化が進み、やや低い比抵抗領域が分布するが、既に抑制工や抑止工などの対策工が施工されており、現在のところ安定性に関する問題は小さい。また、6 段目以上で認められる低比抵抗領域は、体積含水率の高い粘土化した風化帶に対比され、定期点検などで地表面の変状や湧水・風化状況の変化を監視していく必要がある。

(2) 舞鶴若狭自動車道の舞鶴東 IC A ランプ(受け盤切土のり面)

1) 現地概要

舞鶴若狭自動車道舞鶴東 IC の A ランプの切土のり面は、実験地周辺における受け盤のり面の代表的なもので、図 6.4.10(a)はその全景である。こののり面の探査結果と既往資料を用いて、のり面状況と比抵抗分布の関係を検討する。

この長大切土のり面の原地形は緩やかな山地斜面を示し、崩壊跡地も多くみられ、斜面や尾根先端には地すべり跡地やのり面を挟んで NW-SE 系と N-S 系のリニアメントが判読される。このような山地斜面を切土したもので、図 6.4.10(c)に示すように、のり面上段では風化土砂が厚く、のり面中段～下段では層理や亀裂の多い軟岩が分布する。また、切土のり面の上段から下段にかけて、表層部と深部に破碎帶が流れ盤状に通過し、のり尻付近には高角度の受け盤状に破碎帶が分布することが、ボーリング調査や弾性波探査などによって確認されている。

切土のり面は小段 10 段、全長 70 m 以上の長大切土のり面であり、のり面勾配は下段 3 段では $1:0.8\sim1.0$ 、それより上部では $1:1.2$ が採用されている。図 6.4.10(b)は、のり面対策工配置図を示したもので、のり面中央の最下段から 6 段目にかけてロックボルト工+のり枠工が約 $3,000 m^2$ と広範囲に採用され、下段 2 段目にはグラウンドアンカー工：66 本、最下段にはブロック積擁壁が施工され、のり面の両側面は植生工となっている。

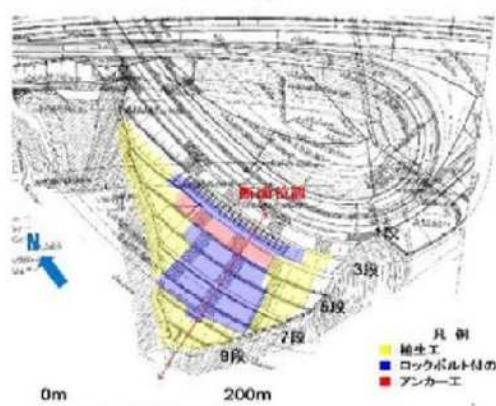
施工時におけるのり面の亀裂観察の結果を図 6.4.10(d)に示すが、亀裂密度が高く、全体に流入粘土が挟在しており、開口亀裂が多く緩んだ状態にある。亀裂は $N40^\circ E, 73^\circ SE$ および $N54^\circ E, 35^\circ NW$ と走向はほぼ同じであるが、傾斜は南北正反対の 2 方向が存在し、くさび状崩壊および層理・節理や断層破碎帶などの弱線に沿うすべりが懸念された切土のり面である。また、のり尻では浸み出し湧水がみられる。なお、調査段階で切土のり面背後からのり面下段にかけて断層破碎帶が確認されており、施工中に一部で亀裂が発生し、動態観測(孔内傾斜計測定など)が実施されている。

2) のり面状況と比抵抗分布との対比

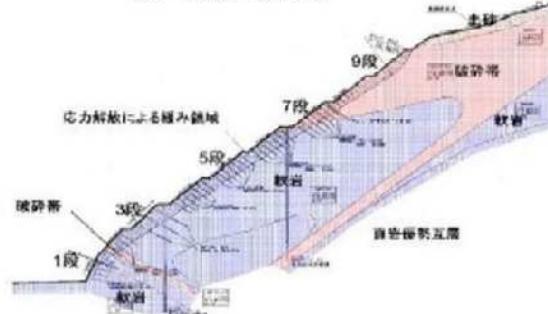
図 6.4.10(e)は $137.5 kHz$ における平面的な比抵抗分布(比抵抗絶対値(通常)表示)を示し、



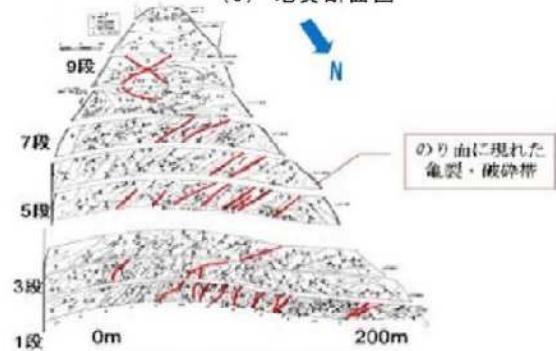
(a) 全景



(b) 対策工配置図

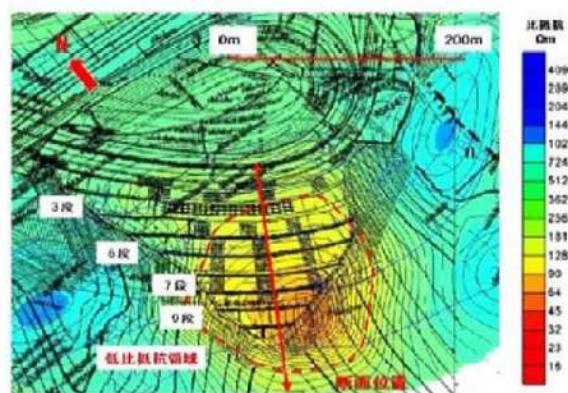


(c) 地質断面図

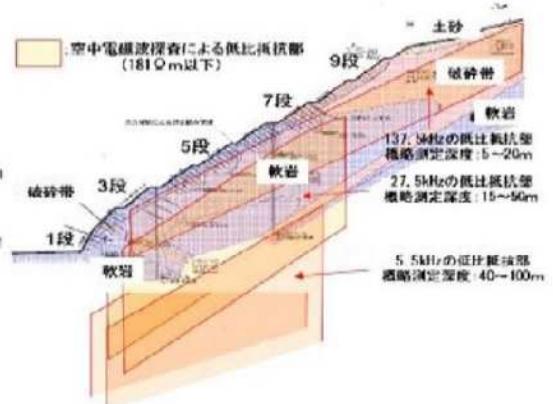


(d) 施工時のスケッチ

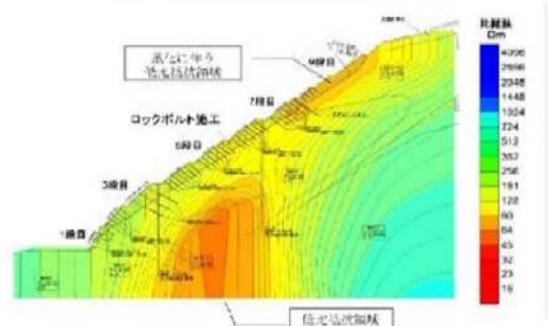
亀裂は N40E73SE と N54E35NW が卓越



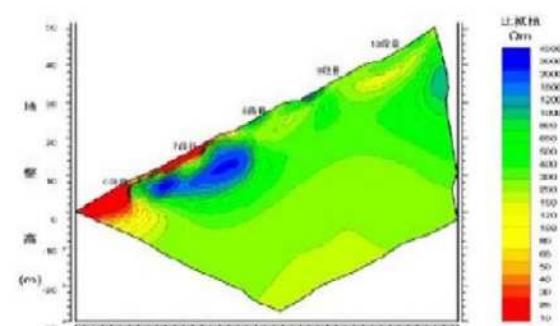
(e) 比抵抗平面図



(f) 地質断面と低比抵抗分布図



(g) 比抵抗分布断面図(空中電磁法探査)



(h) 比抵抗分布断面図(比抵抗 2 次元探査)

図 6.4.10 受け盤のり面の状況と比抵抗分布^{4), 25)}

上段から下段にかけて明瞭な低比抵抗分布が認められる。この低比抵抗領域は、地表面踏査や弾性波探査の結果から推定される切土のり面背面からのり尻深部にかけて分布する断層破碎帯に対比される。

図 6.4.10(f)は地質断面に低比抵抗分布を重ねたもので、 137.5 kHz の低比抵抗分布は浅層風化層を示し、 27.5 kHz での低比抵抗分布は深部における断層破碎帯とその周辺の亀裂の多い地質構造を示す。

図 6.4.10(g)は空中電磁法探査による比抵抗断面図(比抵抗絶対値(通常)表示)を、図 6.4.10(h)は比抵抗2次元探査による比抵抗断面図を示す。図 6.4.10(g)では、明瞭な低比抵抗分布が認められ、上段から下段にかけての破碎帯の延長部と、のり尻付近の破碎帯との交差部付近が特に明瞭である。切土のり面の7段目以上で認められる浅部の低比抵抗分布は、山頂部での風化帶(風化土砂、風化軟岩)および破碎帯の影響を受けたものである。なお、最下段から8段目まで崩壊の危険性があり、グラウンドアンカー工やロックボルト付のり枠工が採用されている。しかし、比抵抗分布は漸次変化し、またボーリング調査の岩盤分類とも整合性のある状態を示すことから、グラウンドアンカー工やロックボルト工などの金属製構造物による比抵抗への影響は認められない。

図 6.4.10(h)に示す比抵抗分布は空中電磁法探査の実施時期(梅雨末期)と異なる時期(夏季末期の乾燥期)に実施したもので、図 6.4.10(h)は全体に比抵抗が高くなり、体積含水率の違いが現れている。ただし、6~7段目の表層部の低比抵抗分布はロックボルト工の影響を受けたものである。7段目の低比抵抗の下部には高比抵抗帯が分布する。この高比抵抗範囲を囲むようにパイプひずみ計、ロックボルト工、孔内傾斜計ガイド管などが設置されており、これらの影響を受けて高比抵抗化している可能性が大きい。この様に空中電磁法探査と比抵抗2次元探査の結果を比較すると、比抵抗はほぼ同様で、金属製埋設物の影響が無い箇所では地質構造も概略同じといえる。

このように切土のり面において、空中電磁法探査や比抵抗2次元探査を適用する場合は、それぞれの特徴を有効に生かして適用する必要がある。

(3) 徳島自動車道の新山トンネル～池田 PA 間の切土のり面

ここでは、空中電磁法探査によって取得した比抵抗情報に基づいて、徳島自動車道の対象地域の地形・地質特性を踏まえた既往の地形判読結果と対比し、地表部の面的な比抵抗情報から読み取れる地盤性状について検討する。また、既往地質調査資料および現地踏査から得られた地質・岩質・地下水などの地盤情報を用いて比較・検討し、精度の検証を行う^{5),26)}。

比抵抗分布とそれぞれの形態を示す各斜面の性状との関係を、以下に示す。

1) 凸型急斜面(切土のり面)

この凸型急斜面の切土のり面は、崩壊や地すべりが発生する恐れがあるため、事前対策としてグランドアンカー工が施工されている。この検証斜面は凸型の急斜面であり、背後に断層地形である鞍部(ケルンコル)が分布し、斜面中腹は平滑な斜面をなし、地すべり地形が認められる。また、斜面麓の遷緩線より谷側では階段状緩斜面となり、谷底の急崖斜面には「中央構造線」が通過し、谷底の緩斜面には土石流堆積物からなる沖積錐が分布する。基盤岩は「中央構造線」より山側では風化砂岩と破碎した砂岩が深部まで分布し、 N 値は50以上が主体で部分的に N 値50未満の土砂状軟岩となり、谷側では短柱状コアが主

体の風化軟岩が分布する。表層の強風化帶の厚さは 2~4 m で、粘性土や粘土質砂礫からなる。地下水位は山側の急斜面部は低いが、遷緩線から谷側の沖積錐が分布する範囲では高水位の状態にあり、一部で湧水帯や湿潤帯となる箇所が分布する。

この斜面の比抵抗絶対値(高精度)表示平面図、ならびに比抵抗絶対値(通常)表示、比抵抗絶対値(高精度)表示および比抵抗強調値表示の各断面図の比抵抗分布状況を図 6.4.11 に示す。比抵抗絶対値(高精度)分布では、斜面背後の鞍部から山麓～谷底にかけて「中央構造線」の影響を受け、鉛直方向の比抵抗構造を示しながら比抵抗は小さくなり、「中央構造線」付近では $50 \Omega \text{m}$ 以下の低比抵抗を示す。この比抵抗絶対値(高精度)分布により、大局的な地質構造は確認できるが、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、比抵抗強調値分布では、地盤面より 25~30 m を境に上部では赤色域(周囲より相対的に低比抵抗)、下部では青色域(周囲より相対的に高比抵抗)を示し、細粒分(粘土分)含有率と体積含水率の大きい崩積土と破碎岩盤が赤色域として捉えられている。また、「中央構造線」を境に比抵抗強調値が急変し、赤色域となり、「中央構造線」の位置が明らかとなる。

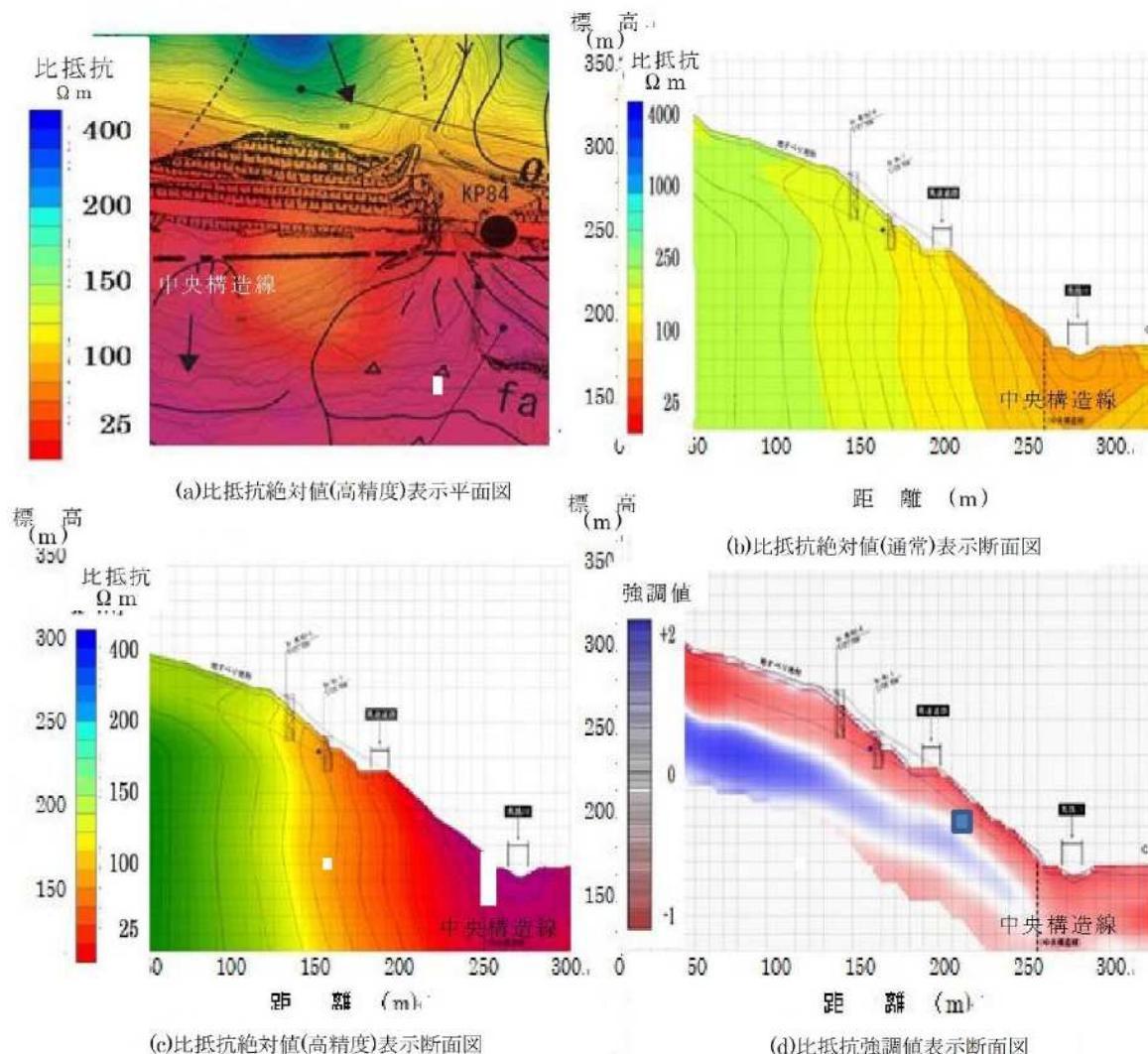


図 6.4.11 凸型急斜面の比抵抗絶対値と強調値の分布²⁶⁾

2) 凹型緩斜面(切土のり面)

この切土のり面は、崩壊や地すべりが発生する恐れがあるため、事前対策としてロックボルト工やグランドアンカー工が施工されている。

この斜面は凹型緩斜面であり、いくつかの滑落崖を有するが、比較的平滑な斜面で、現在安定した状態の地すべり地である。「中央構造線」のストリップマップでは、高速道路線上を通過するとされている。比抵抗解析結果においても高速道路線上を傾斜した状態で通過し、マップの分布位置と一致することが分かる。

強風化帯の被覆層は厚さ 2~4 m で、礫質粘土や粘土質砂礫からなる。基盤岩は「中央構造線」を境に、山側のコア形状は短柱状～柱状を示す比較的新鮮な岩盤が分布するが、谷側は風化・破碎した岩盤からなり、 N 値は 50 以上を主体とする。「中央構造線」周辺では構造線の影響を受け、破碎粘土や変質・軟質化した部分では、 $N=50$ 未満と脆弱である。

この斜面の比抵抗絶対値(高精度)表示平面図、ならびに比抵抗絶対値(通常)表示と比抵抗絶対値(高精度)表示および比抵抗強調値表示の各断面図の比抵抗分布状況を、図 6.4.12 に示す。比抵抗絶対値(高精度)分布では、山側から「中央構造線」が通過する谷側にかけて基盤岩を覆う状態で崩積土と強風化軟岩などの低比抵抗帯が凹状を示す。その下部の基盤岩の比抵抗分布は山頂から山腹斜面を通過する「中央構造線」に向かって鉛直構造を示すが、「中央構造線」から谷側では水平構造となり、大局的な地質構造は確認できる。しか

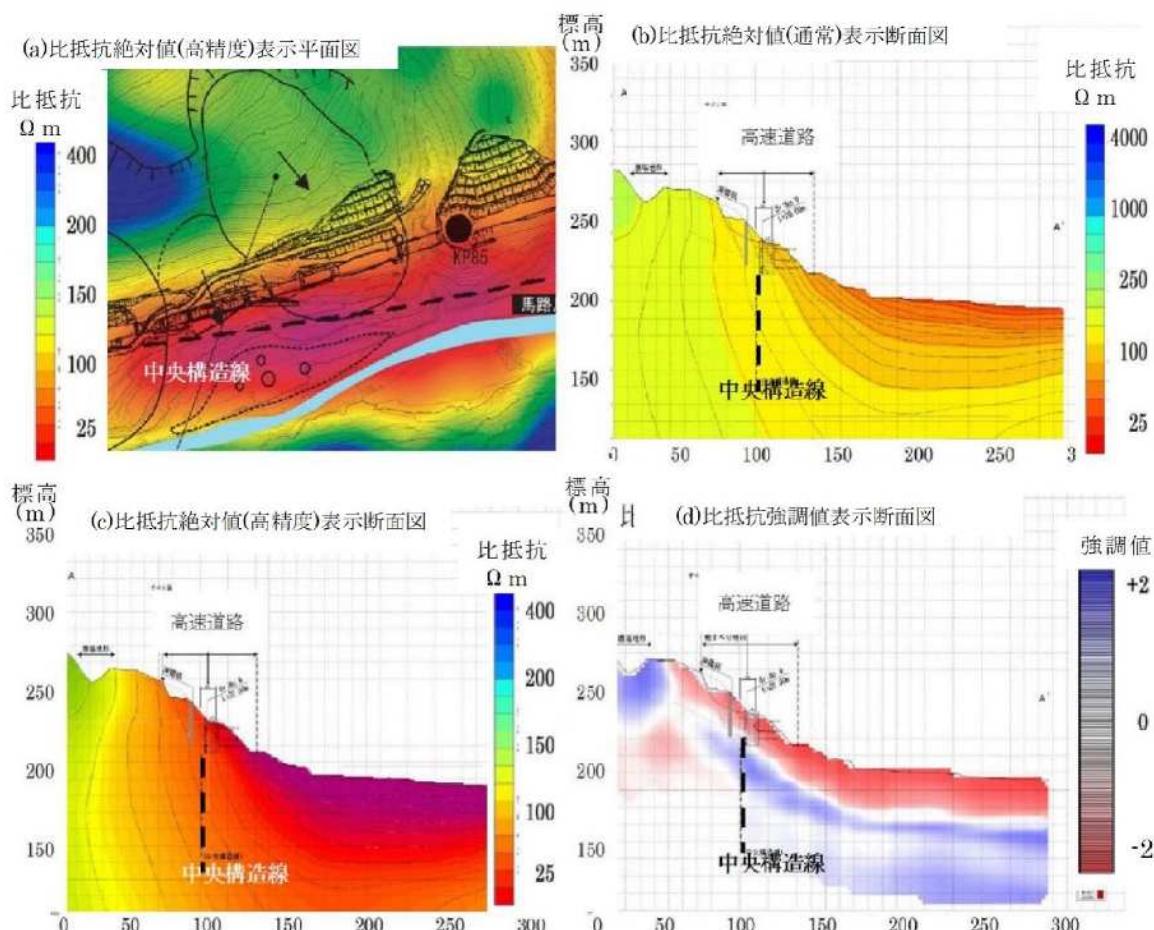


図 6.4.12 凹型緩斜面の比抵抗絶対値と強調値の分布 ²⁶⁾

し、詳細な地質境界や地下水位などの境界の判別は難しい。

比抵抗絶対値(高精度)分布は被覆層と基盤岩の境界は捉え難いが、比抵抗強調値分布は、地表面より 20 m付近を境に被覆層や基盤岩の風化帯と新鮮岩の境界が赤色域と青色域として明瞭に区分できる。また、「中央構造線」の通過位置が赤色域と青色域の食い違いによって、明瞭となっている。

このように、地下水位の低い地山の被覆層と風化・破碎地盤のような劣化した岩盤は、比抵抗構造で捉えることが可能である。

3) 平滑型急斜面(トンネル坑口付近)

このトンネル坑口の斜面は「中央構造線」の影響を受け、また潜在的大規模地すべり地内に位置するため、岩質が脆弱で土砂化しておらず、切土によって表層崩壊が発生しやすい状態にある。そのため、トンネル坑口付けにおいては、事前対策として垂直縫地工が実施されている。

坑口より上部は凹型斜面で、地すべり地形の側壁部にあたる。下部は平滑型急斜面で、風化の進んだ不動地盤となっている。坑口上方の緩斜面には、厚さ 10 m未満の崩積土が堆積している。基盤岩上部は破碎を受けた砂岩泥岩互層からなり、ボーリングコアは全体が礫状となる。基盤岩下部は新鮮な砂岩優勢層で、短柱状～柱状コアからなり、地下水位は基盤岩上部の砂岩泥岩互層中に位置する。

この斜面のトンネル坑口付近平面図、ならびに比抵抗絶対値(通常)表示、比抵抗絶対値(高精度)表示および比抵抗強調値表示の各断面図の比抵抗分布状況を図 6.4.13 に示す。比

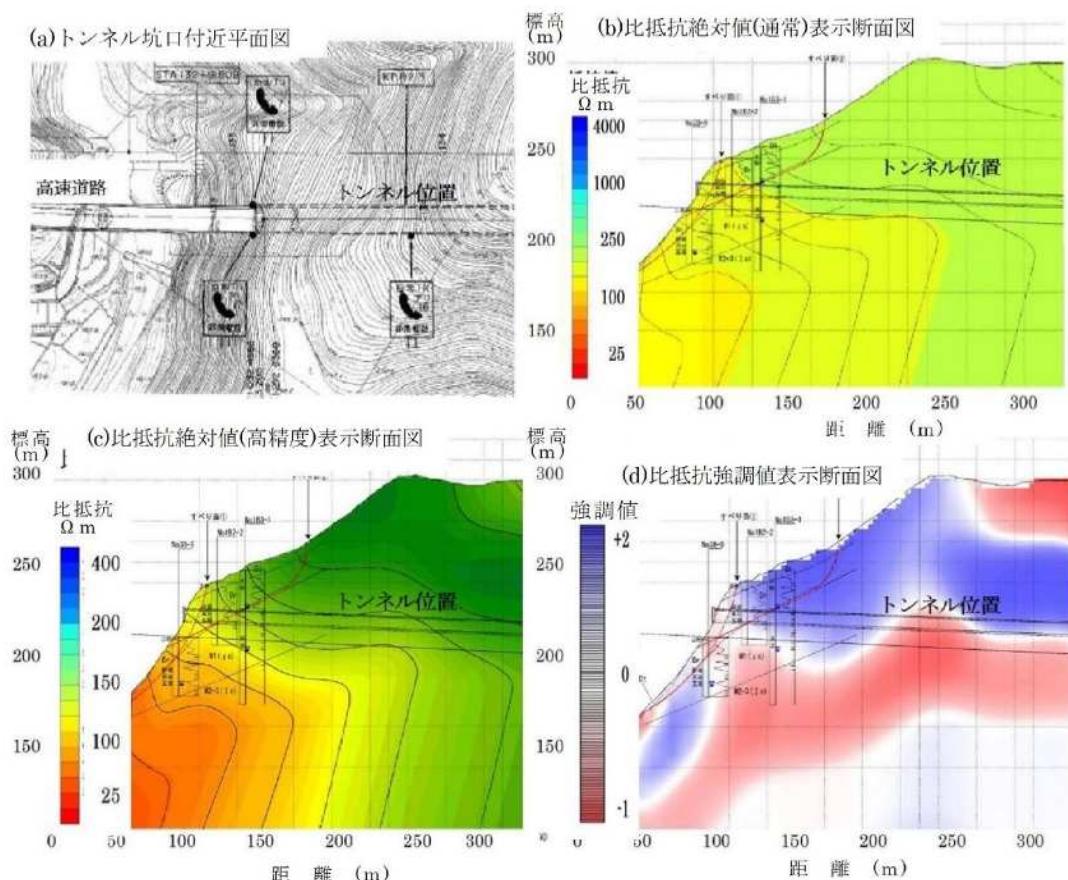


図 6.4.13 平滑型急斜面の比抵抗絶対値と強調値の分布²⁶⁾

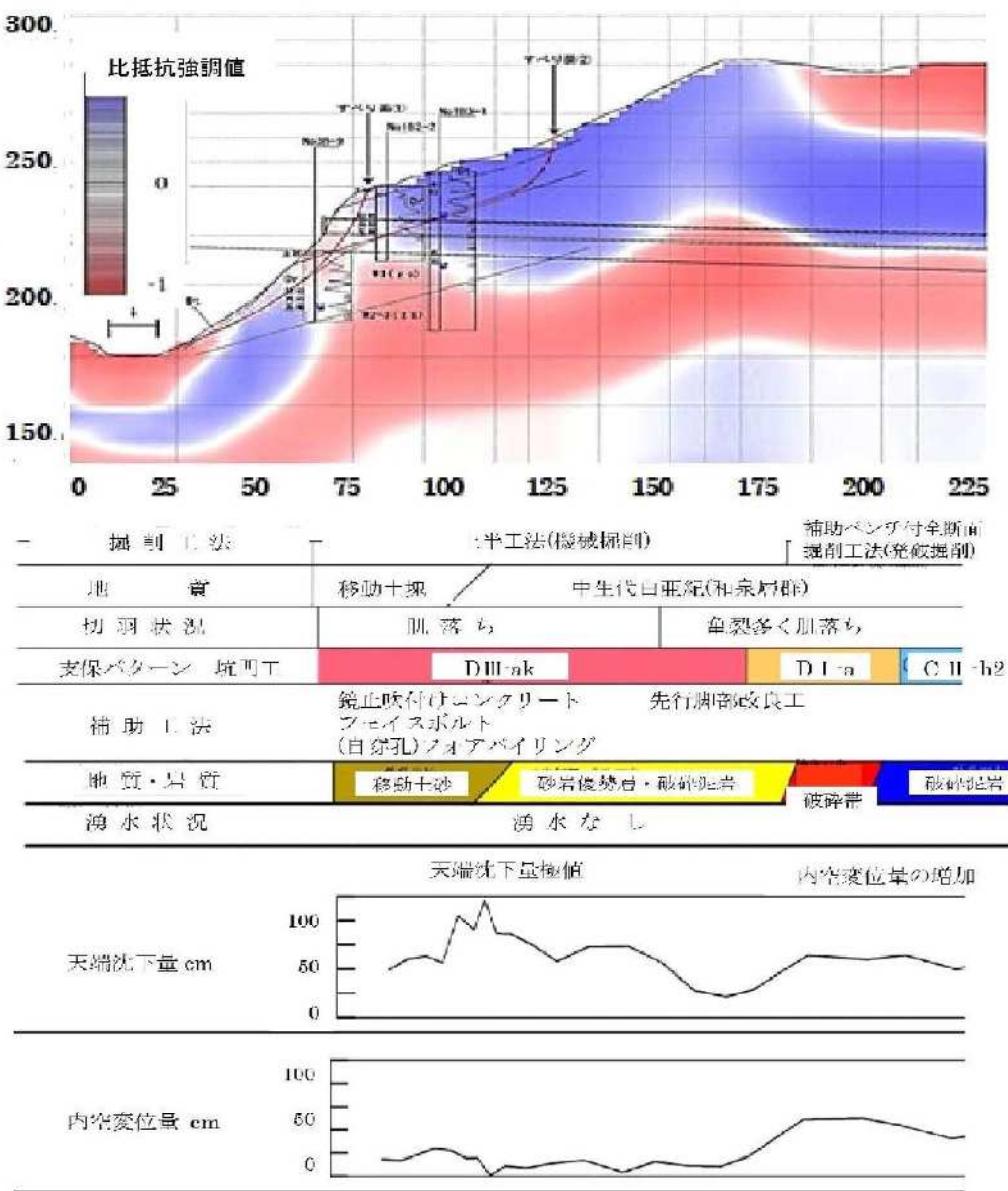


図 6.4.14 トンネル坑口付近の比抵抗強調値分布と地質・補助工法・変位の関係²⁶⁾

抵抗絶対値(高精度)分布の表層部は水平方向の構造を示し、斜面上部では 150~200 Ωm の比抵抗域、谷側の斜面下部では 150 Ωm 以下の比抵抗領域となる。基盤岩では、「中央構造線」の影響を受け、鉛直構造を示す。崩積土と風化を受けた基盤岩の境界は同じ礫質地盤であり、比抵抗絶対値(高精度)では捉えにくい。

比抵抗強調値分布は、斜面上部では基盤岩内部の風化部と新鮮部の境界が、相対的高比抵抗域(青色域)と相対的低比抵抗域(赤色域)の境界として捉えられている。また、斜面下部では、崩積土と谷底堆積物の分布が相対的低比抵抗域(赤色域)として捉えられている。また、斜面下部から斜面上部にかけて連続した赤色域は、含水体積率または粘土分含有率が高いことを示す。なお、赤色域の分布形状を見ると、下向きに凸状構造となり、垂直な断層破碎帯の分布を示唆している。比抵抗分布とトンネル掘削時の実績支保パターンの関係においては、図 6.4.14 に示すように、DIIIパターンの区間と地山の緩み域を示す赤色域区間とが一致するとともに、天端沈下量の大きい区間と赤色域の領域が一致する。内空変

位置は補助工法を採用しているため、その関係は明瞭でない。

6.5 代表のり面における比抵抗強調値分布とその解釈

比抵抗絶対値(高精度)表示分布では、断層(「中央構造線」など)および土石流渓流、地すべりなどの特異地形・地質における明瞭な地質構造が可視化・判別ができない場合がある。ここでは比抵抗強調値表示、もしくは対数比抵抗強調値(閾値)表示によって、地盤の可視化を行い、特異地形・地質を示す危険地域・斜面の地質構造の抽出を行う。

6.5.1 「中央構造線」(大規模断層破碎帯)の抽出

「中央構造線」などの大規模断層破碎帯は、断層地形としての地形変位や尾根の鞍部として連続的な線状模様として現われるので、リニアメントなどの地形的変換点が空中写真や地形図で判読できる。比抵抗平面・断面図などの比抵抗解析図では、リニアメント位置を基準に低比抵抗帯の分布として地盤の劣化した不良地盤(粘土化・細片化して高含水状態で体積含水率が大きい)として抽出できる。「中央構造線」が通過する徳島自動車道では、讃岐山地の南縁を帶状に探査し、松山自動車道では石鎚山脈(石鎚断層崖)の北縁を3地区に分けて探査し、破碎帯の抽出を行った。

対象地域の「中央構造線」の特徴は、吉野川上流域においてほぼ直線状に北流する南北性の河道が直角に曲って東西方向にほぼ直線状に伸び、東へ細長く開く三角形の吉野川低地の西端部に位置している。四国山地を南北方向に横断した吉野川が讃岐山脈に出合い、その流れを直角に変え、東流する馬路川と合流して東流している。馬路川および東流する吉野川は東西方向の谷を形成しており、その北側に讃岐山脈、その南側に四国山地の山裾が東西方向に連なっている。

「中央構造線」の新期活動を示す池田断層は馬路川および東流する吉野川の谷底の北縁部、すなわち讃岐山脈の山裾に沿って走っている。馬路川から吉野川下流沿いの段丘面および地すべり緩斜面には $N75^{\circ} E$ の走向で、断続するリニアメントがほぼ一直線に並んでいる。これらのリニアメントは、「中央構造線」池田断層による断層運動による変位地形と考えられ、池田下位面と池田上位面との間に比高 $20\sim30\ m$ 、州津下位面と州津上位面との間に最大比高約 $10\ m$ の断層崖を形成している。

対象地域の「中央構造線」池田断層に沿っては、和泉層群と泥質片岩の高角度の断層面をもつ断層破碎帯が観察され、また泥質片岩破碎部は熱水変質によって著しく粘土化している。なお、和泉層群と土柱層との低角断層は、地すべりによる物質境界と推定される。馬路川沿いでは河床部に断層破碎を受けていない泥質片岩が露出しており、「中央構造線」の破碎幅は $100\ m$ 前後と推定される。

(1) 徳島自動車道の事例

まず、研究対象地域全域の「中央構造線」の分布について、比抵抗平面図と断面図に基づいて記載する。

1) 比抵抗平面図と比抵抗水平断面図

探査区域の比抵抗絶対値(高精度)平面図を図 6.5.1 に示す。また標高 $150\ m$ の位置でスライスしたものを図 6.5.2 に、標高 $200\ m$ の位置でスライスしたものを図 6.5.3 に示す。

図 6.5.1 では、馬路川および吉野川の河床部は著しい低比抵抗帯になっており、また馬路川に沿う東西方向の低比抵抗帯は、河床部だけでなく井ノ久保地すべりの直下も連続し、

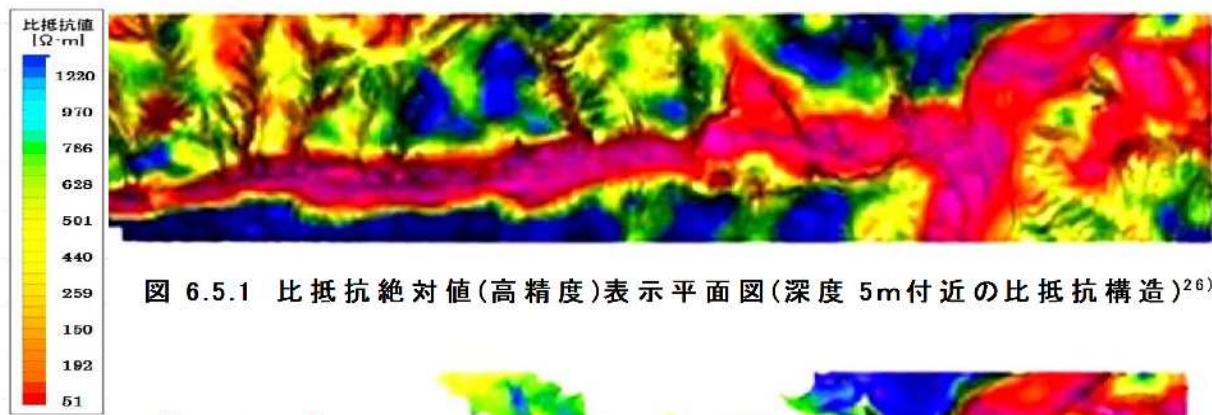


図 6.5.1 比抵抗絶対値(高精度)表示平面図(深度 5m付近の比抵抗構造)²⁶⁾

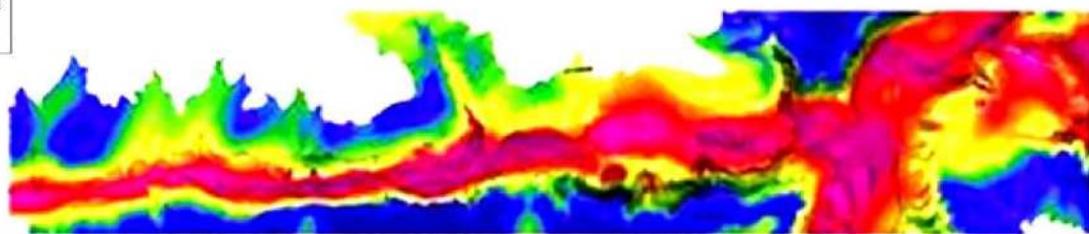


図 6.5.2 比抵抗絶対値(高精度)表示水平平面図(標高 150mの比抵抗構造)²⁶⁾

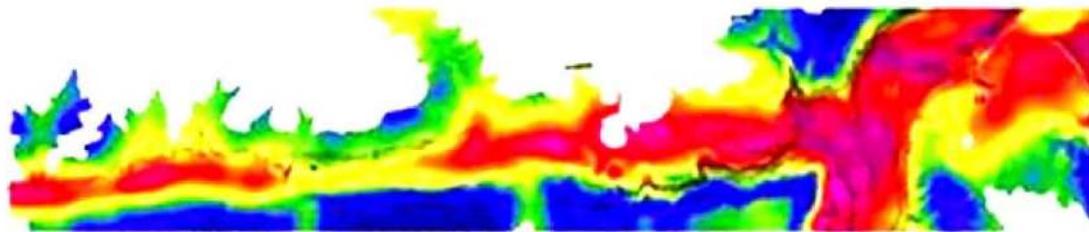


図 6.5.3 比抵抗絶対値(高精度)表示水平平面図(標高 200mの比抵抗構造)²⁶⁾

その北限は池田断層とほぼ一致している。和泉層群および三波川変成岩類からなる斜面は一般に高比抵抗であるが、井ノ久保地すべり、シンヤマ地すべりなどの大規模地すべりブロックは低比抵抗を示す。図 6.5.2 および図 6.5.3 の比抵抗絶対値(高精度)水平断面図から、馬路川に沿う低比抵抗帯は、河床堆積物や段丘堆積物（土柱層）だけでなく基盤岩の深部まで明瞭に認められる。低比抵抗帯の幅は膨縮が著しく、池田断層に沿う熱水変質帯が分布している可能性が高い。井ノ久保地すべり、シンヤマ地すべりなどの地すべり地は、すべり面より下位の基盤岩も低比抵抗を示している²⁶⁾。

2) 比抵抗断面図

「中央構造線」池田断層の位置と比抵抗横断面の位置を図 6.5.4 に示し、各比抵抗横断図を図 6.5.5(a)～(f)に示す。比抵抗構造から、斜面が地下深部まで高比抵抗の場合には、堅岩から構成されていると推定できる。これに対して、地表付近の低比抵抗は風化帯、地表付近の高比抵抗帯は岩盤の緩みを反映していると推定される。なお、地すべり地形を構成する堆積物もしくは岩塊には低比抵抗と高比抵抗の 2 種類ある。これは、地すべり地形構成物が粘土分に富む崩積土か、岩塊に富むか、あるいは地下水位が高いか低いかを示しているため、地すべり地形の安定性を評価する資料になる。

池田断層に沿う低比抵抗帯はいずれの断面でも高角度であり、その北縁がほぼ池田断層に対応している。これは池田断層が北へ高角度で傾斜する見解と一致している。また、比抵抗帯の幅は膨縮が著しく、井ノ久保地すべりでは池田断層を越えて、大きく北へ張り出



図 6.5.4 比抵抗横断図の位置²⁶⁾

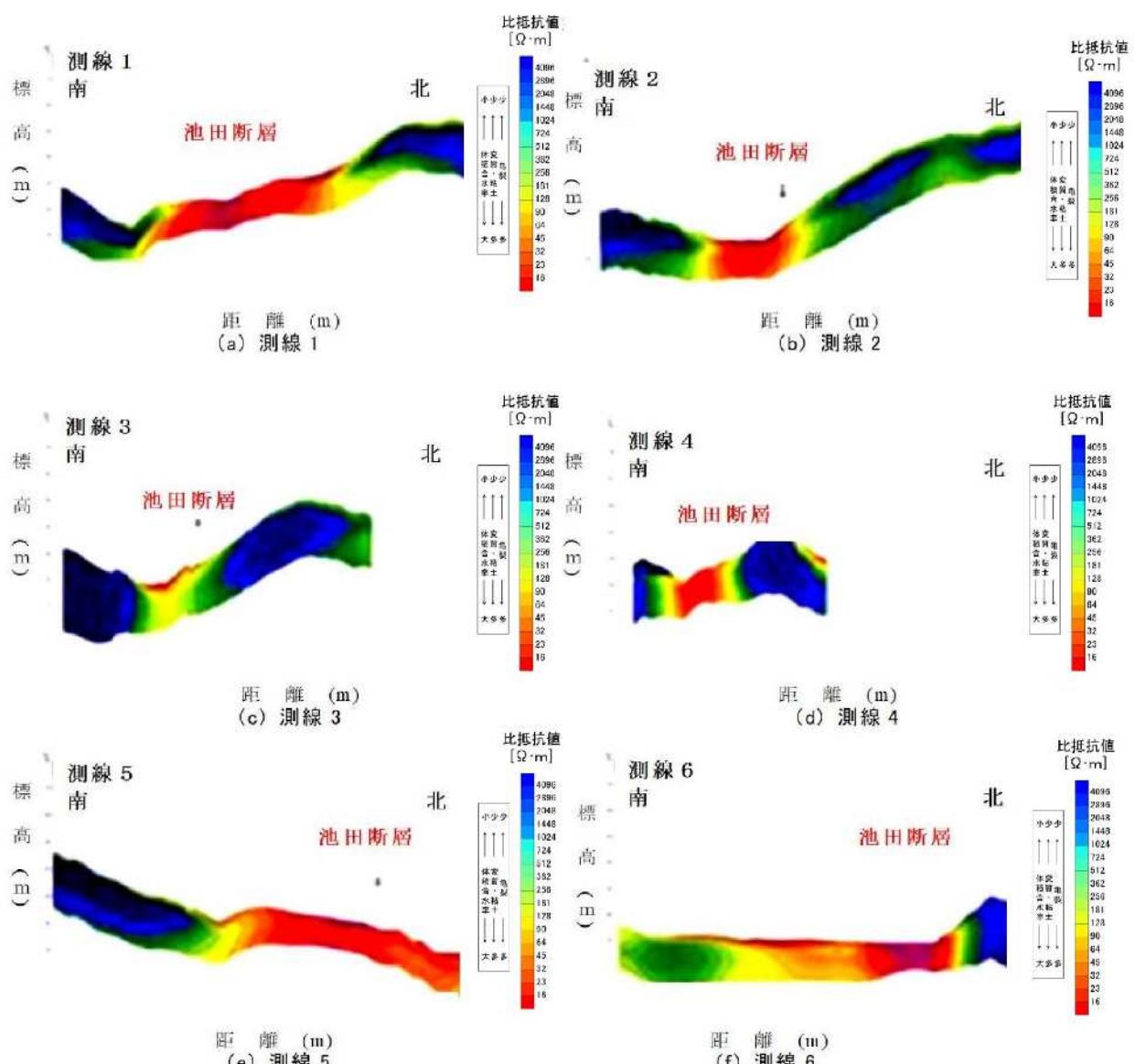


図 6.5.5 比抵抗絶対値(通常)断面図(測線 1～測線 6)²⁶⁾

している。これは、池田断層の北側の讃岐山脈の地下に伏在する低比抵抗帯が大規模地すべりの素因として注目される。これに対して、船戸地すべりでは、すべり面より下位の基盤岩は高比抵抗であるため、大規模な地すべりが発生しなかったことを示している。

徳島県馬路川沿いの「中央構造線」周辺地域において空中電磁法探査を適用した結果、

「中央構造線」に沿う低比抵抗帯および大規模地すべり地形の基盤に広がる低比抵抗帯を把握することができた。得られた知見は以下のとおりである。

- ① 「中央構造線」は地質境界断層に沿って幅広い低比抵抗帯を形成している。低比抵抗帯は、高角度で、主に三波川帶側に広がっている。これは、「中央構造線」に沿って熱水変質による粘土化が進行していることを示唆している。
- ② 比抵抗構造から、「中央構造線」北側の和泉層群からなる斜面の岩盤状況を推定することができる。すなわち、堅岩からなる地山は高比抵抗であるが、地すべり堆積物は低比抵抗になることが多い。
- ③ 井ノ久保の大規模地すべりでは、地すべり堆積物だけでなく、基盤岩まで低比抵抗である。大規模地すべりの発生には地下の低比抵抗帯、すなわち熱水変質帯が素因となっている可能性がある。
- ④ 空中電磁法は、高比抵抗の斜面の下部に低角度で斜面に沿う低比抵抗帯が伏在するような斜面を大規模地すべり候補地として抽出するために、有効な探査手法である。

(2) 松山自動車道の事例

松山自動車道における「中央構造線」に伴う地盤劣化の状況を把握するための空中電磁法探査は、土石流危険渓流の性状把握のために実施した3地区(入野 PA 地区: 74.00 KP, 新居浜 IC 地区: 84.00 KP, いよ西条 IC: 92.00 KP)である²⁷⁾。

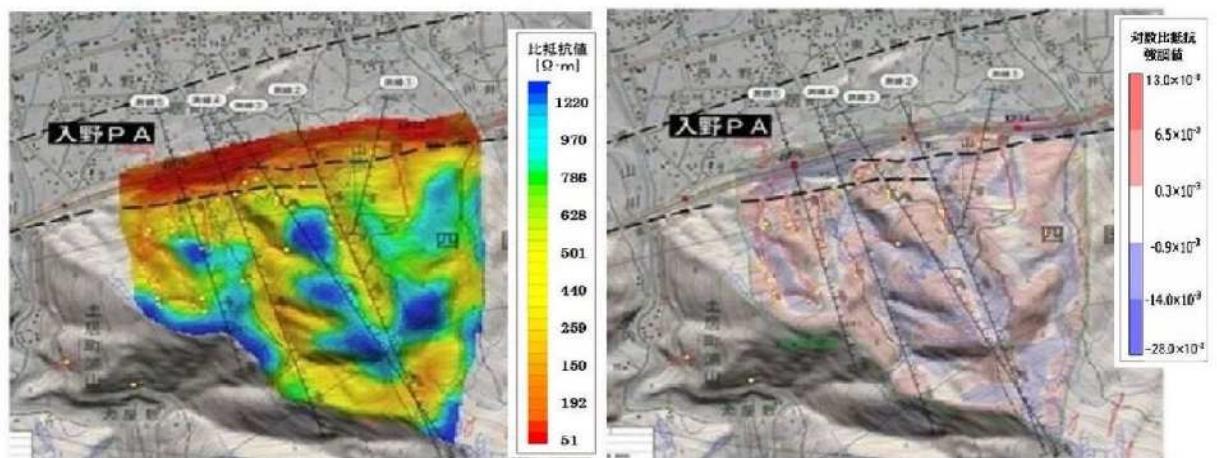
松山自動車道は、「中央構造線」によって形成された石鎚断層崖麓に沿って建設されたものである。「中央構造線」の本体は、急峻な断層崖から流出した土砂によって形成された新・旧扇状地地形や沖積錐に埋没していることが多く、場所によっては断層崖の一部として窪地状となっているところがある。活断層に分類される新期断層は、岡村断層・寒川断層をはじめとする種々の断層が「中央構造線」に並行して分布し、更新統の高位～低位段丘堆積物を切っており、窪地や谷筋の変位を示す断層地形が分布する。いよ西条 IC 地区では、強度の風化や緩み岩盤となっている箇所が局的に観察され、礫質土に漸移する。また、片理面は概ね N60° E, 40° N で、流れ盤構造となっている。

空中電磁法探査の結果である比抵抗平面図(比抵抗絶対値(高精度)表示、対数比抵抗強調値表示)を図 6.5.6(黒破線: 中央構造線)に示す。

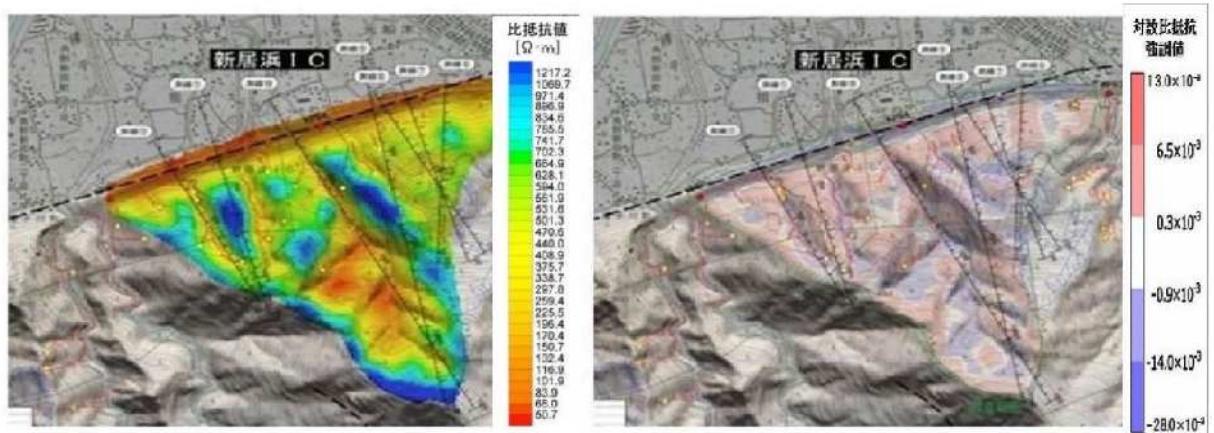
対数比抵抗強調値(閾値)表示においては比抵抗強調値表示と異なり、比抵抗変化度増加域を赤色、比抵抗変化度減少域を青色表示する。

図 6.5.6(a)～(b)に示すように、松山自動車道(入野 PA, 新居浜 IC)と「中央構造線」の通過位置はほぼ一致しており、石鎚断層崖と未固結の段丘堆積物との境界とも一致している。「中央構造線」は入野 PA では雁行状、新居浜 IC では一直線に断層崖線上に通過している。両比抵抗分布と「中央構造線」との関係を見ると、比抵抗絶対値(高精度)表示では 100 Ωm 以下、場所によっては 50 Ωm 以下の低比抵抗を示し、細粒分含有量が多く、高体積含水率のゾーンが帶状に分布していることが分かる。一方、対数比抵抗強調値(閾値)表示では、入野 PA では、「中央構造線」が雁行状に分布するため比抵抗変化度(減少域と増加域)の区分は不明瞭であるが、新居浜 IC では比抵抗変化度の減少域と増加域は明瞭に分かれ、「中央構造線」の通過位置が明瞭に現われている。

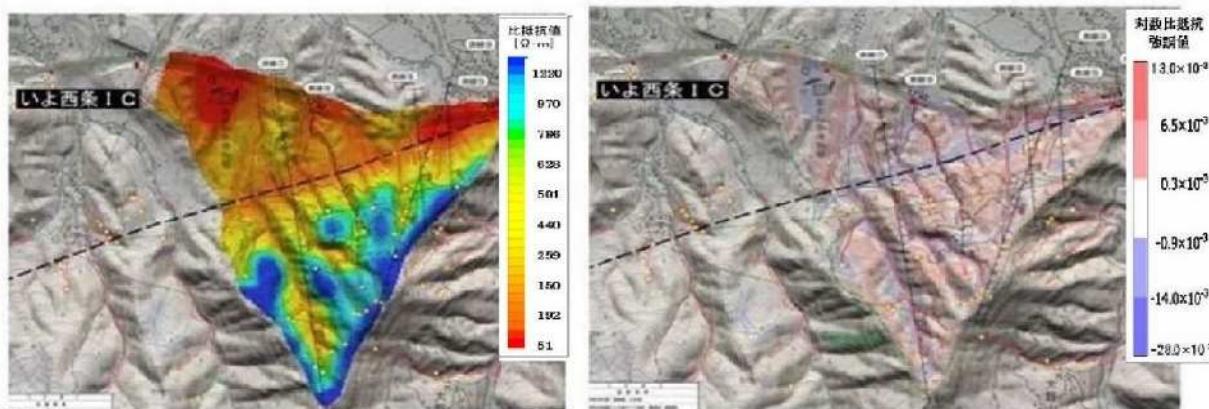
図 6.5.6(c)に、いよ西条 IC(92.0 KP)における比抵抗平面図を示す。この平面図において



(a) 入野PA(74.0KPa)比抵抗平面図



(b) 新居浜IC(84.0KPa)比抵抗平面図



(c) いよ西条IC(92.0KPa)比抵抗平面図

図 6.5.6 比抵抗絶対値(高精度)表示・「対数比抵抗強調値(閾値)表示」平面図²⁷⁾

は、松山自動車道は図面の北縁を、「中央構造線」は図面の中央を東西に通過している。比抵抗絶対値(高精度)表示平面図では、「中央構造線」が通過するところでは連続した低比抵抗帯を示し、またその北側の谷部を含む未固結堆積層の丘陵でも低比抵抗を示し、体積含水率や粘土分含有量が高いことを示す。しかし、「中央構造線」より南側の尾根部では高比抵抗を示し、谷部では低比抵抗を示す。一方、対数比抵抗強調値(閾値)表示平面図では、

「中央構造線」が通過するところに、比抵抗変化度減少域が帶状に分布するが、「中央構造線」を挟む両側は、尾根部では比抵抗変化度増加域を示し、一部の斜面や谷部では比抵抗変化度減少域を示す。このように比抵抗平面図から「中央構造線」では、基盤岩は破碎され粘土化が進み、体積含水率や細粒分含有率の高い状態を示す。

図 6.5.7(a)～(b) および 図 6.5.8(a)～(b) は、それぞれいよ西条 IC の代表断面位置 (92.00KP と 92.20KP) の比抵抗絶対値(高精度)表示断面図と対数比抵抗強調値(閾値)表示断面図である。図 6.5.7 では「中央構造線」を中心にして両側の比抵抗絶対値(高精度)分布と対数比抵抗強調値(閾値)分布をみると、地下深部の比抵抗は広範囲にわたって低比抵抗 ($100 \Omega\text{m}$ 以下) を示し、広範囲にわたって破碎または熱水変質を受けている可能性が大きい。また比抵抗変化度は、「中央構造線」を境として変化度減少域あるいは変化度増加域を示し、断層による比抵抗分布の差が明瞭である。対数比抵抗強調値(閾値)分布から「中央構造線」を境として南側(山側)は比抵抗変度減少域を示し、地下水が貯留している。一方、図 6.5.8 の断面図では、松山自動車道は北側(低地側)、「中央構造線」は概ね中央部に位置する。比抵抗絶対値(高精度)表示では、山側の表層部で $700 \Omega\text{m}$ 以上の高比抵抗を示し岩盤の緩み域と推定される。また、低地側の表層部でも $200 \Omega\text{m}$ 前後のやや高い比抵抗を示し未固結堆積物である段丘堆積物の礫質土からなる。表層部はこのように比抵抗分布が異なるが、深部では $150 \Omega\text{m}$ の低比抵抗を示し、破碎あるいは熱水変質を受け粘土化が進んでいることを示す。「中央構造線」は地形的にはリニアメントとして判読されるが、比抵抗分布平面図では低比抵抗帯として現われ、断面図では比抵抗コンターが鋭角な山形

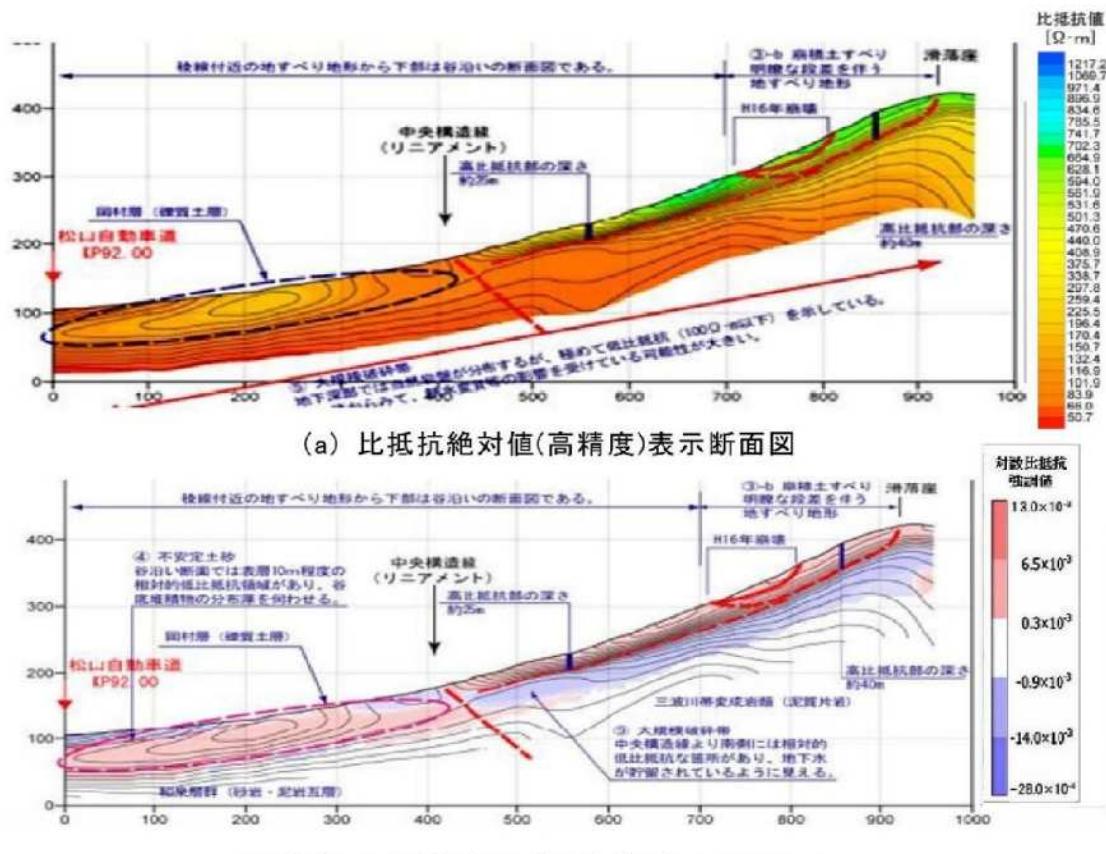
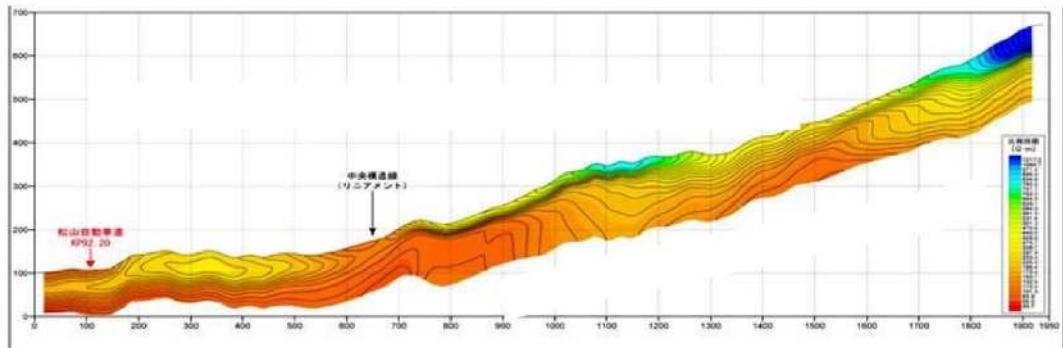
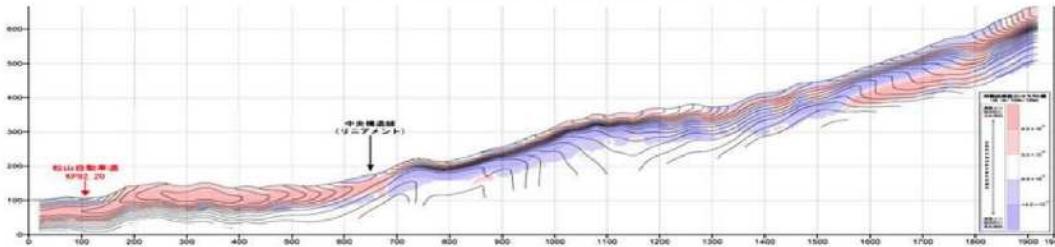


図 6.5.7 比抵抗解析図 (いよ西条 IC(92.00KP))²⁷⁾



(a) 比抵抗絶対値(高精度)表示断面図



(b) 対数比抵抗強調値(閾値)表示断面図

図 6.5.8 比抵抗解析図(いよ西条 IC(92.20KP))

を示し、低比抵抗帯が上昇して「中央構造線」の通過が確認できる。対数比抵抗強調値(閾値)表示では、基盤岩は比抵抗変化度減少域部の急激な落差を示し、断層を境に南側(山側)では地下水が貯留している状態を示している。なお、図 6.5.8 の両図における基盤岩の比抵抗絶対値(高精度)分布や対数比抵抗強調値(閾値)分布は一定した状態のコンター分布を示さず、凹凸のある状態を示しているので、「中央構造線」に伴う破碎帶や変質帶の分布を示唆している。入野 PA 地区や新居浜 IC 地区の比抵抗断面図でも、同様な比抵抗分布を示している。

6.5.2 土石流危険渓流の抽出

土石流発生のメカニズムは、比抵抗分布や現地踏査・既往資料整理から大きく次の 3 種類に区分できる。

- ① 流域内に堆積している不安定土塊が集中豪雨などによる異常な出水の作用によって流動化し、土石流となる場合。
- ② 集中豪雨あるいはその他の自然現象が原因となり発生した山腹斜面の崩壊(土砂崩れ・深層崩壊)の土砂が、多量の湧水や表流水を得て流動化し、渓流内に流れ込みそのまま土石流化する場合。
- ③ 集中豪雨あるいはその他の自然現象が原因となり、地すべりや山腹斜面崩壊が発生した場合に、その崩壊土砂によって河川が一時的に閉塞されて天然ダムを形成する。その後、湛水に伴って水位が上昇し、堤体が不安定化して決壊する場合。

これらの土石流発生メカニズムを念頭に、各自動車道の事例について述べる。

(1) 徳島自動車道の事例

空中電磁法探査において、土石流危険渓流の抽出の可能性について徳島自動車道へ適用し、検討する²⁶⁾。

図 6.5.9 は探査地域の立体地形図であり、1:25,000 の大縮尺にも係わらず沢や渓流などの急勾配の渓床が抽出でき、土石流危険渓流の抽出の可能性を示唆している。図 6.5.10 は探査地域周辺の土石流危険渓流(空色部)を含む急傾斜斜面を抽出したものであり、土石流危険渓流を抽出するために重要な資料である。谷底低地や渓床などの谷部は山地斜面を含む尾根部の浸食・運搬・堆積作用で生じた土砂が分布する。このため、谷部の比抵抗は土砂の粒度組成や体積含水率によって変化し、下流域の細粒分(粘土分)含有率や体積含水率の高い箇所は低比抵抗を、上流域の砂礫および岩塊を多く含む箇所は高比抵抗を示すと考えられる。

図 6.5.11 は徳島県三好市が作成した馬路川流域のハザードマップであり、高速道路に沿う馬路地区では土石流危険渓流に指定されている渓流が高速道路に直交して並列している。なお、一部の沢では危険渓流に指定されていない渓流(沢や谷)があるが、この渓流は高速道路建設による高盛土、あるいは砂防堰堤の建設によって、指定が解除された渓流である。図 6.5.12 および図 6.5.13 は、馬路地区における地形判読図に比抵抗絶対値(高精度)分布および比抵抗強調値分布を重ね合わせたものである。比抵抗絶対値(高精度)分布では渓床堆積物の分布が判読できるが、明瞭でない場合が多い。しかし、比抵抗強調値分布では、渓床堆積物や流末の扇状地堆積物(沖積錐)の分布が明瞭に判読でき、また複数回の堆積が行われたことも読み取れる。

得られた知見は、以下のとおりである。

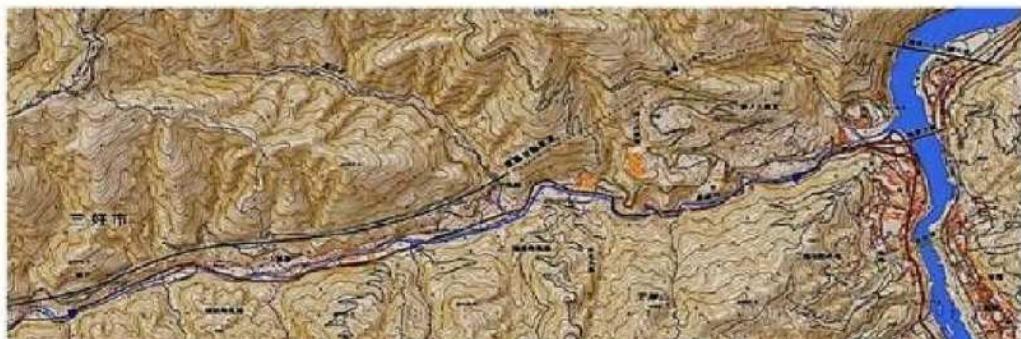


図 6.5.9 空中電磁法探査実施区間の立体地形図
(土石流危険渓流が立体的に抽出できる)

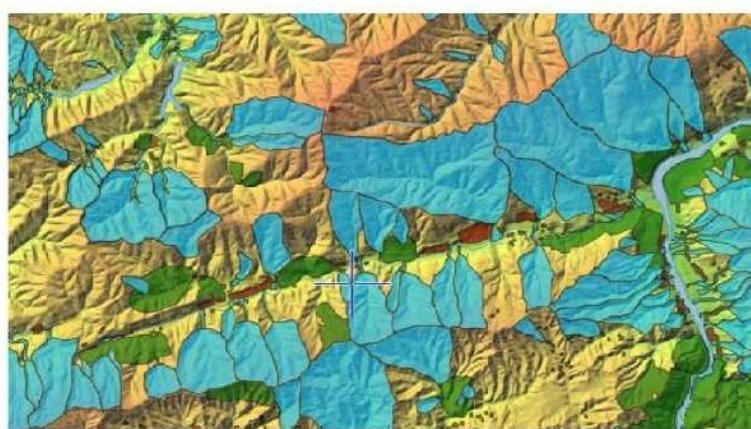


図 6.5.10 探査実施区間の土石流危険渓流(空色部)の抽出



黄色区域：土石流災害監視区域 赤色区域：土石流災害特別監視区域
図 6.5.11 採査実施区間のハザードマップ(土石流危険渓流)

- ① 馬路川流域の谷底低地および渓流(谷および沢)は、低比抵抗を示す。
- ② 馬路川左岸側(北岸側)の和泉層群分布域の渓床には、低比抵抗が分布する。馬路川右岸側(南岸側)の三波川変成岩類分布の渓床では、玉石・転石などの粗粒分が多く、低比抵抗分布がほとんど認められない。表層部の露頭では、渓床堆積物の構成粒子が和泉層群分布域では細粒で、三波川変成岩類分布域では岩塊が主体であることから、渓床部の比抵抗の高低は、渓床堆積物の構成粒子の差異を反映する。
- ③ 馬路川沿いの谷底低地のうち、 $20 \Omega m$ 以下の極端な低比抵抗分布は、沖積錐や背後に渓流のある箇所に対比できる。このため、谷底低地部の $20 \Omega m$ 以下の極端な低比抵抗分布は土石流堆積物の分布を反映している。

(2) 松山自動車道の事例

松山自動車道における土石流発生の事例として、平成16(2004)年に発生した松山自動車道92.0KP付近[大生院地区]の土石流について、2.4.2(3)で既に述べている。土石流に関する既往資料の整理を行い、図6.5.14(a)～(c)にその検討結果の事例を示す。斜面番号(黒丸)、平成16(2004)年度災害(赤色実線：崩壊地・土石流)、斜面渓流、ガリ・浸食痕(青色実線：3地区のみ記載)および「中央構造線」・活断層(桃色破線)で示した²⁷⁾。

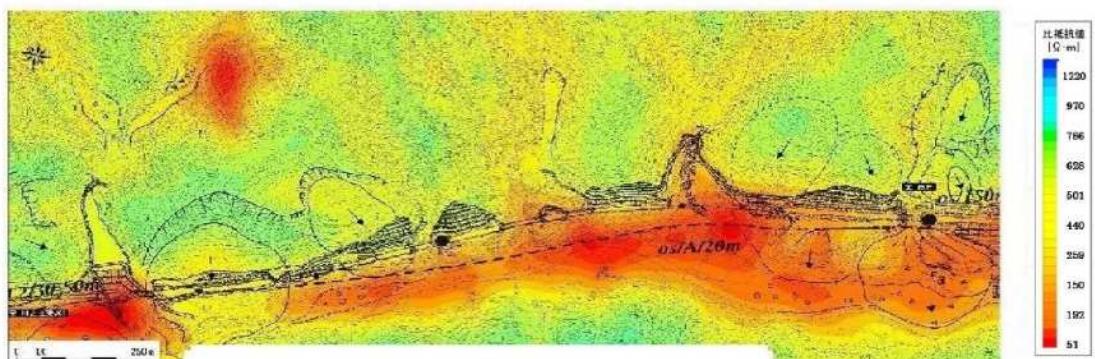
いよ西条地区(92.00 KP付近)の比抵抗分布の平面図と断面図は、図 6.5.6(c)および図 6.5.7(a)～(b)に示した。土石流危険渓流とその流域の側方斜面には崩積土砂が堆積し、相対的に低比抵抗を示し、体積含水率や細粒分含有量が高い状態を示す。

前述したように、松山自動車道における平成16(2004)年に発生した土石流災害は、各渓流内における山腹斜面の崩壊による崩壊土砂が流動化している。このことから、空中電磁法探査による比抵抗解析図解釈の対象は、土石流となる崩壊土砂の生産場である山腹斜面崩壊となる。表層崩壊は崩壊深2 m未満の崩壊を指すが、空中電磁法探査の浅部分解能は5 m以上であるため、2 m未満の表層崩壊や渓床堆積物となる土砂は対象外とした。

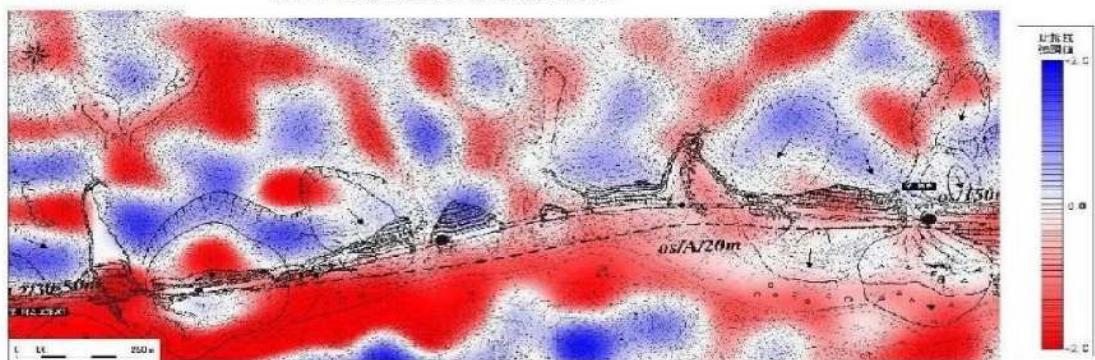
平成16(2004)年の土砂災害の発生箇所である山腹斜面の崩壊は、対数比抵抗強調値(閾値)表示の比抵抗変化点の周辺に位置することから、集水型～平滑型斜面や谷沿いの山腹斜面で対数比抵抗強調値(閾値)表示の比抵抗変化点周辺が山腹斜面の崩壊発生の懸念箇所とすることができます。

いよ西条IC地区の土石流渓流や山腹斜面崩壊における比抵抗表示の特徴は、以下のとおりである²⁷⁾。

1) 比抵抗絶対値(高精度)表示

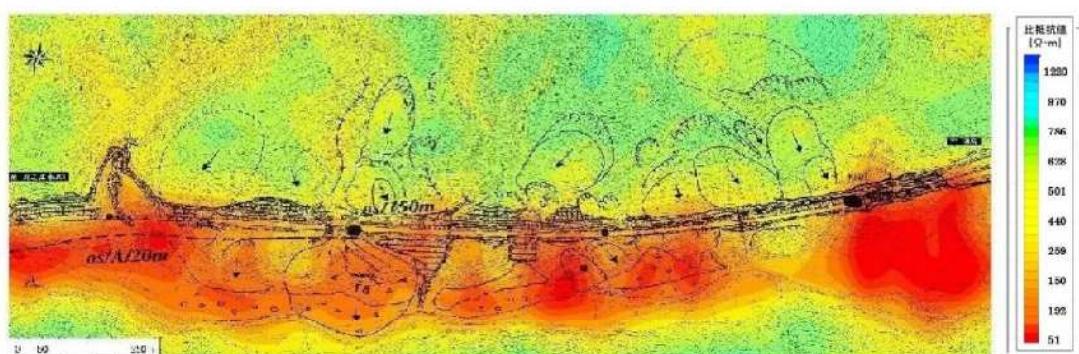


(a)比抵抗絶対値(高精度)表示

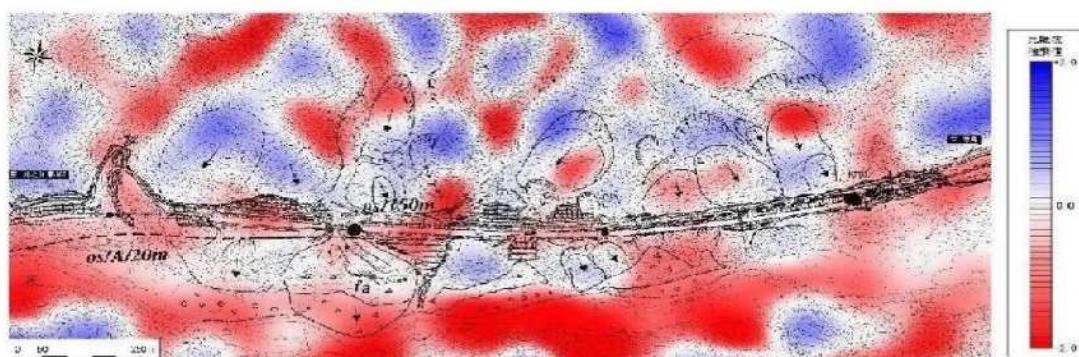


(b)比抵抗強調値表示

図 6.5.12 探査実施区間の土石流危険渓流の抽出(1)²⁶⁾



(a)比抵抗絶対値(高精度)表示

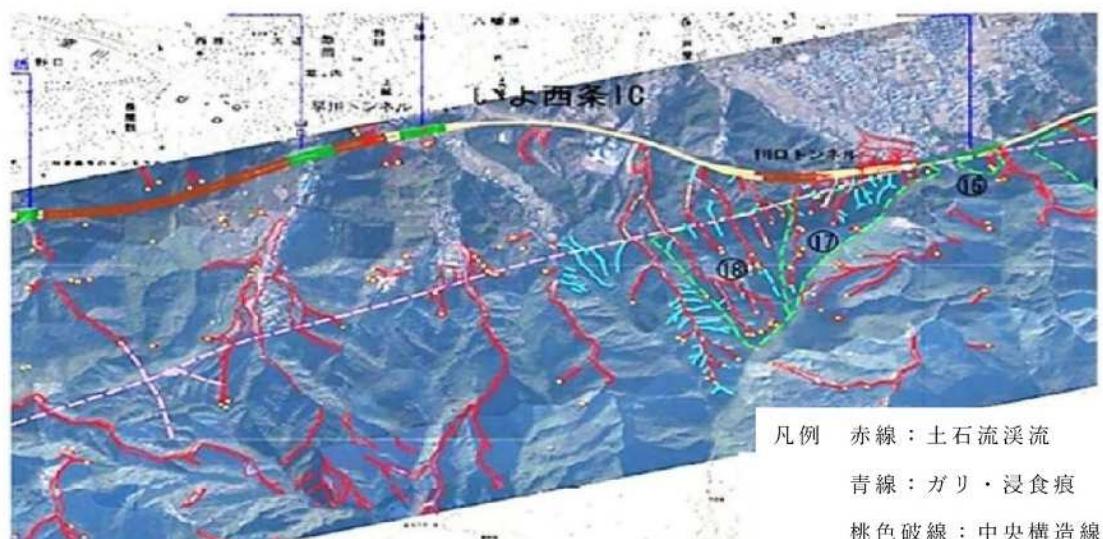


(b)比抵抗強調値表示

図 6.5.13 探査実施区間の土石流危険渓流の抽出(2)²⁶⁾



(a) 既往資料整理・検討図



(b) オルソフォト・検討図



(c) 赤色立体図・検討図

図 6.5.14 既往資料検討結果いよ西条 IC 地区(92.0KP 付近)²⁷⁾

- ① $150 \Omega m$ 以下の領域は、厚い未固結堆積物または湿潤な岩盤が分布する。特に、「中央構造線」沿いや松山自動車道沿いは、含水比の高い未固結堆積物や盛土の分布を良く反映している。「中央構造線」から北側は、未固結の岡村層が分布する。
- ② 尾根沿いは $500 \Omega m$ 以上の高比抵抗領域となっており、水分の少ない岩盤や堅硬な岩盤、緩み岩の分布を反映している。
- ③ 主要な谷沿いは全て低比抵抗を示し、地下水が多い湿潤な環境を示している。湿潤な岩盤と未固結堆積物の判別は困難である。

2) 対数比抵抗強調値(閾値)表示

- ① 中央構造線沿いは全て比抵抗変化度減少域となっており、破碎帯、変質帯、地下水状況(体積含水率・細粒分含有量)を反映している。
- ② 松山自動車道沿いや山麓部の比抵抗変化度減少域内でも、比抵抗変化度増減の境界域から増加域となる部分は、含水比の小さい礫質土の分布が推定される。
- ③ 山腹斜面上には比抵抗変化度減少域が明瞭に表示され、 $5 m$ 深における崩積土の分布を暗示している。
- ④ 平成16(2004)年の崩壊発生地点は、比抵抗の変化度増減の境界域から増加域の下部で発生していることが多い。

一方、比抵抗断面図における主要な測線の比抵抗分布は、以下のとおりである。

1) 測線⑮ (92.00KP)

斜面中腹部の崩壊は斜面形の凹凸を問わず、比抵抗変化度増加域の領域内で発生しており、表層土が薄く、地下浅所に岩盤が分布する所で表層土の崩壊が発生している。薄いことが降雨に対して飽和し易いという特性を反映している。

2) 測線⑯ (92.20KP)

この測線では、稜線部に近いところでは、稜線より $10 \sim 30 m$ 程度低いところから比抵抗変化度減少領域が広がっていることが多く、この付近が崩壊の発生源となっている。すなわち、稜線部に近い比抵抗変化度減少領域は、地山に地下水含有量が多いと考えられ、降雨に対して飽和し易い条件が揃っていると考えられる。

6.5.3 地すべり地域の抽出

(1) 徳島自動車道の事例

徳島自動車道の対象地域の地すべりは、図 6.5.15 に示すように、高速道路トンネル通過部の地表部に位置し、東西幅 $1.5 km$ 、南北幅 $1.0 km$ の規模で、吉野川支流馬路川沿いで最大級である。地すべり土塊は馬路川を越えて約 $400 m$ 南へ滑動した結果、その先端が対岸の山裾まで達し、舌端部は河川による下刻作用によって渓谷を形成している。地すべり土塊の表層部は和泉層群砂岩の角礫層を主体とし、地すべり周辺の和泉層群は砂岩泥岩互層なり層状構造を保っているが、「中央構造線」の通過により破碎を受けて断層角礫状～不規則なブロックに破断し、角礫の集合体の様相を呈する。

地すべり地の比抵抗絶対値(高精度)表示・比抵抗強調値表示断面図を図 6.5.16 に示す。地すべり土塊では低比抵抗域を、周辺部の不動地盤では高比抵抗域を示し、風化状態を示す細粒分(粘土分)含有率や体積含水率が異なる。また、比抵抗差分値を示す比抵抗強調値表示でも、地すべり土塊の赤色域、滑落崖と不動地盤の青色域とが明瞭に異なっている。

この地すべりに対してボーリング調査などが実施されており、各ボーリング孔を利用し

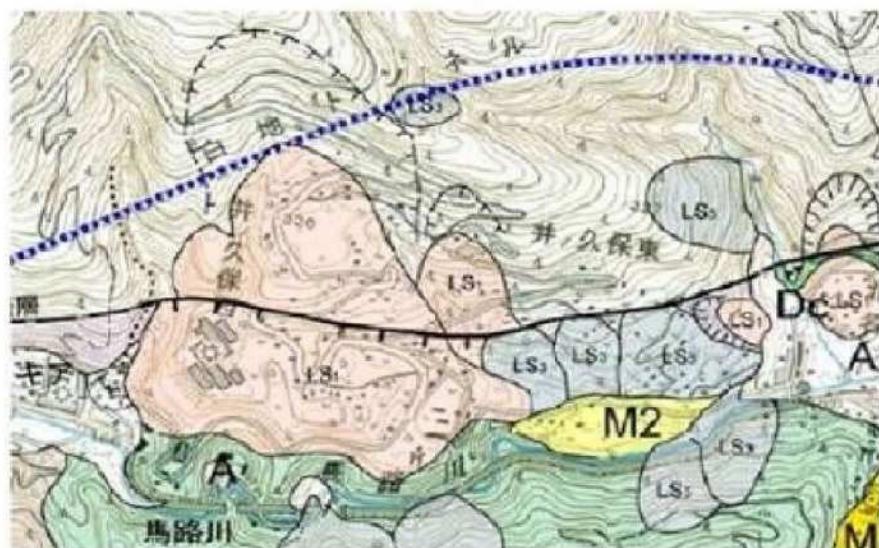
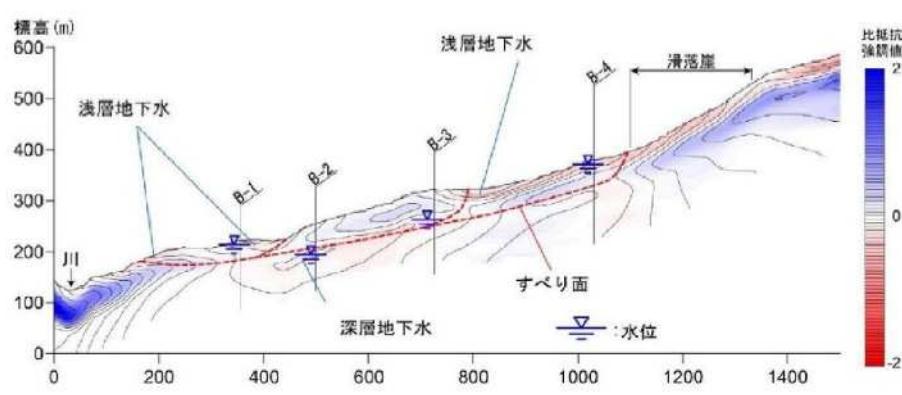
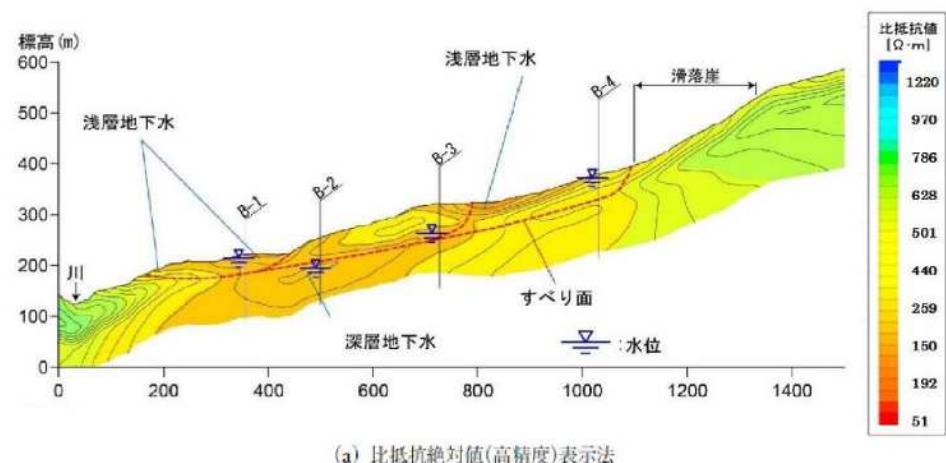


図 6.5.15 地すべり地とその周辺の地形状況(井の久保地すべり)²⁶⁾



(b) 比抵抗強調値表示法

図 6.5.16 地すべり地中央の比抵抗絶対値(高精度)・強調値表示断面図²⁶⁾

た孔内傾斜計と自記地下水位計によって、すべり面の検出と地下水位測定が行われている。各ボーリング孔におけるすべり面は、 $GL -14.5 \sim 15.1 m$ である。地下水流动は2系統あり、浅層地下水はボーリング掘削時の水位として地表面付近に、深層地下水は $GL -15 m$ 付近のすべり面に位置する。

図 6.5.17(上図)は比抵抗絶対値(高精度)断面図に比抵抗解析境界線と孔内傾斜計による変動位置(すべり面)を併記したもので、比抵抗境界線と変動位置はほぼ一致している。比抵抗値は、地すべり移動土塊では $150 \sim 200 \Omega m$ 、不動土塊の基盤岩では $200 \Omega m$ 前後と $700 \Omega m$ に大別でき、前者が破碎状態にある。図 6.5.16(b)では、比抵抗強調値表示で2箇所において赤色を示すが、表層の赤色は浅層地下水を、地盤内部の赤色は深層地下水の水位を示す。図 6.5.17 の下表は各ボーリング孔におけるすべり面深度と比抵抗解析境界線の深度を示したもので、精度の検証としてこの2種類の深度の誤差を求めている。その結果、解析境界線は実測すべり面の深度より $1.0 \sim 1.8 m$ 深くなっている、誤差割合としては $6.7 \sim 12.4\%$ (平均 9.2%)となっている。

地すべり地における比抵抗構造解析の結果、求められた上部層の厚さは、ボーリング孔で確認されるすべり層の厚さと 10% 程度以内の差異でもって概ね合致している。図 6.5.16(b)の比抵抗強調値表示では、赤色部が既存ボーリングによる地下水分布と整合性があり、かつ地すべり浅部に分布する宙水の状況とも一致している。また赤色部は地すべり地の山側の斜面に連続しており、稜線部方向から地下水が供給されていることが分かる。なお、大規模地すべりへの適用結果から、深層崩壊や高速地すべりのような急速な移動で、しかも移動距離の長い土石流などによる災害発生箇所の抽出などにも有効であることが分かる。

(2) 松山自動車道の事例

松山自動車道における地すべりの事例として、新居浜 IC 地区($83.40 KP$)といよ西条 IC 地区($92.00 KP$)を取り上げる²⁷⁾。

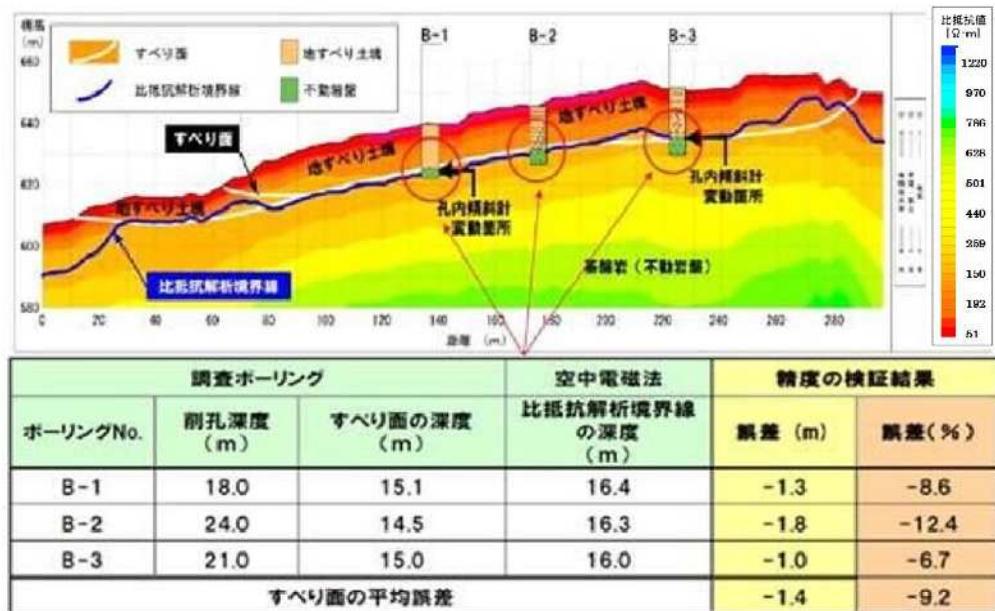


図 6.5.17 地すべり地における比抵抗絶対値(高精度)断面図と地すべり面の関係²⁶⁾
(井の久保地すべり)

松山自動車道が通過する位置は石鎚断層崖麓と崖錐性段丘堆積物の未固結堆積物分布域との境界、つまり中央構造線が通過する位置である。石鎚断層崖は既に述べたように、三波川変成岩類の泥質片岩(黒色片岩)が広範囲に分布し、まれに砂質片岩が狭在する。泥質片岩は強度の風化やゆるみ岩盤を呈し、礫質土化している。三波川変成岩類のもつ片理面は概ね $N60^{\circ} E, 40^{\circ} N$ で、流れ盤構造である。中央構造線とその周辺の基盤岩は破碎され、熱水変質して粘土化あるいは礫質土化している。表土層は基質が粘性土で構成される礫質土と粘性土からなり、2 m程度の厚さで広範囲に分布し、乾燥した状態を示す。

三波川変成岩類が分布するところでは、大小さまざまな地すべりや崩壊が発生し、地すべり地形や崩壊地形を示す。

1) 新居浜 IC 地区(83.40KP周辺地すべり)

新居浜 IC 地区における「中央構造線」と地すべり地形(L_s)の分布図を図 6.5.18 に示し、最大地すべり部の比抵抗分布平面図を図 6.5.19(a)～(b)に示す。また、探査地域内には様々な規模の地すべりが分布し、その中でも基点側の地すべりが最も大きく、比抵抗断面図を4断面作成した。そのうちの代表比抵抗断面図として、83.40KP の比抵抗分布断面図を図 6.5.20 に示し、図 6.5.21 はその解釈図である。

地すべり地の比抵抗絶対値(高精度)表示と 対数比抵抗強調値(閾値)表示の特徴は、以下のとおりである。

i) 比抵抗絶対値(高精度)表示

- ① 概ね $150 \ \Omega m$ 以下の領域は、厚い未固結堆積物または湿潤状態の岩盤が分布する。特に、松山自動車道沿いは未固結堆積物の分布を反映する。
- ② 尾根沿いは $500 \ \Omega m$ 以上の高比抵抗領域となっており、水分の少ない岩盤、堅硬な岩盤、緩み岩盤の分布を反映する。
- ③ 主要な谷沿いは全て低比抵抗を示し、地下水が多い湿潤な環境を示している。湿潤

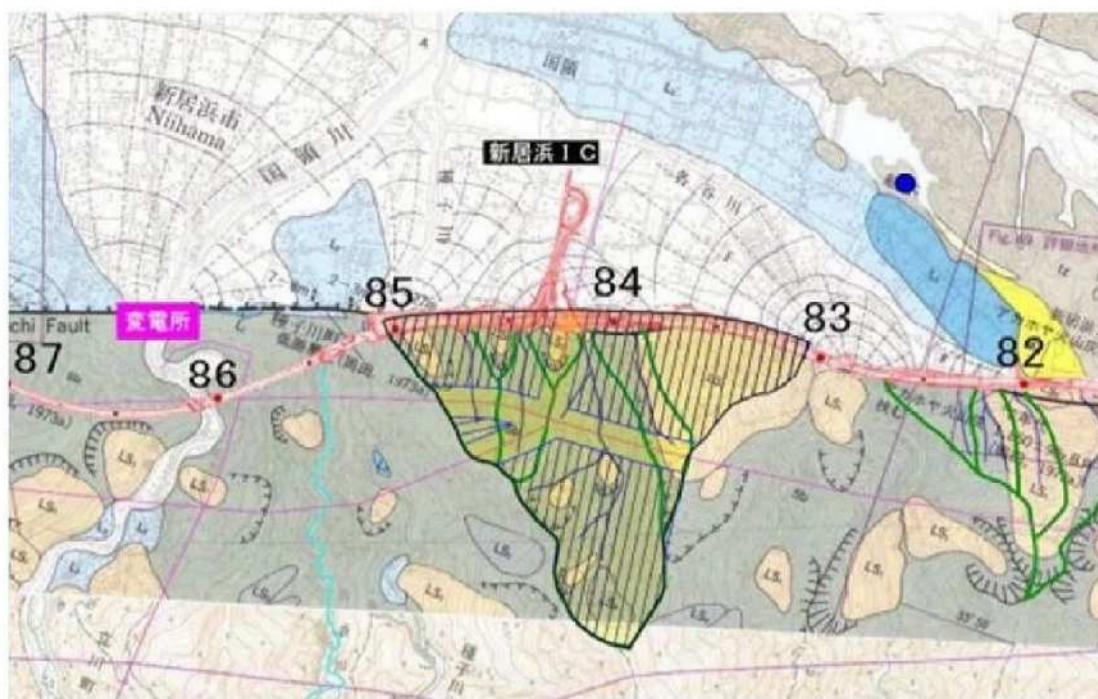
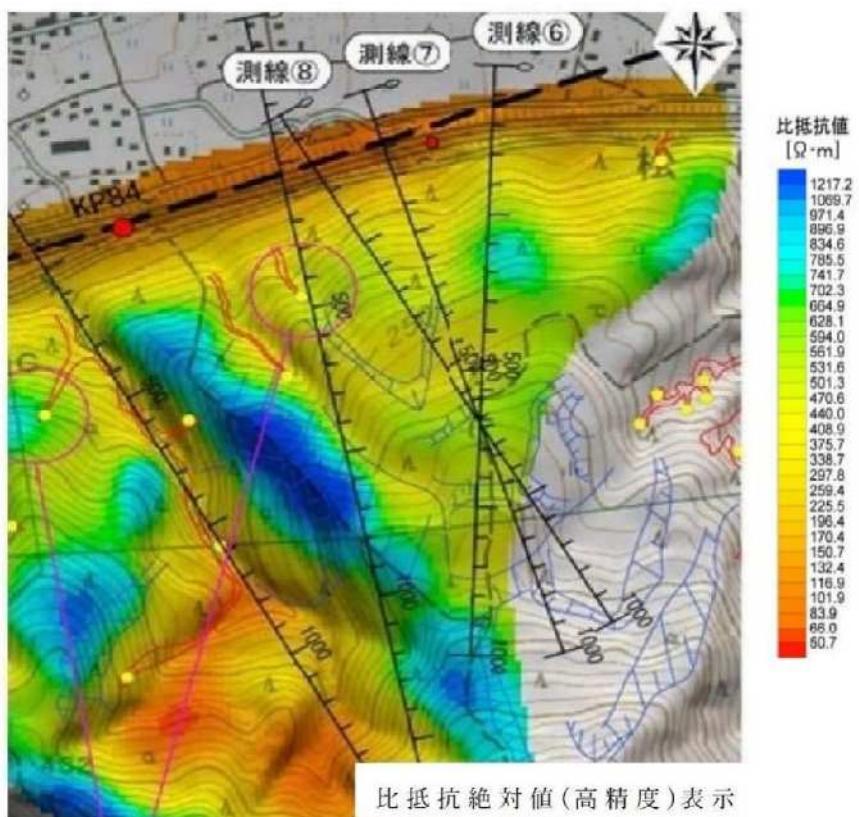
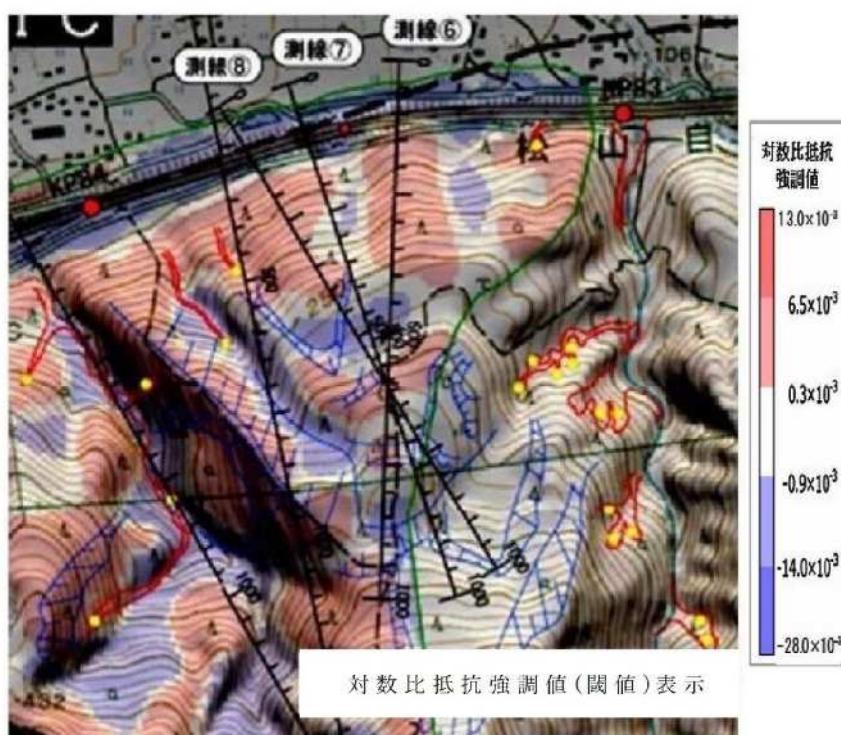


図 6.5.18 空中電磁法探査・現地踏査位置図と地すべり分布図(新居浜 IC)^{14),27)}



(a) 比抵抗絶対値(高精度)表示



(b) 対数比抵抗強調値(閾値)表示

図 6.5.19 比抵抗分布図(新居浜IC 地区地すべり)²⁷⁾

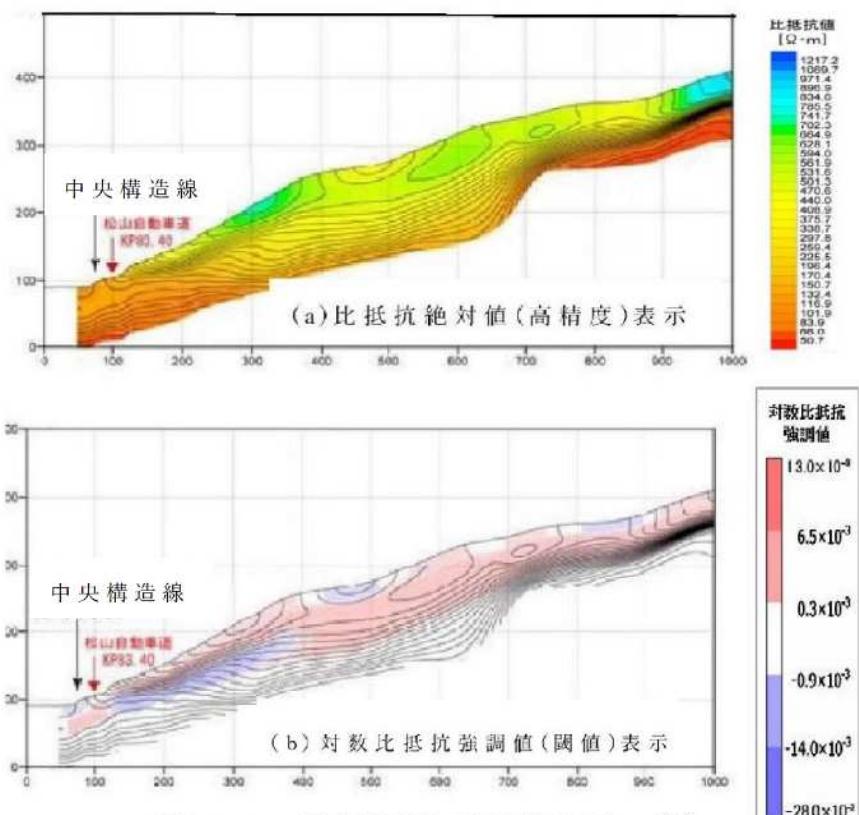


図 6.5.20 比抵抗断面図(新居浜 IC)²⁷⁾

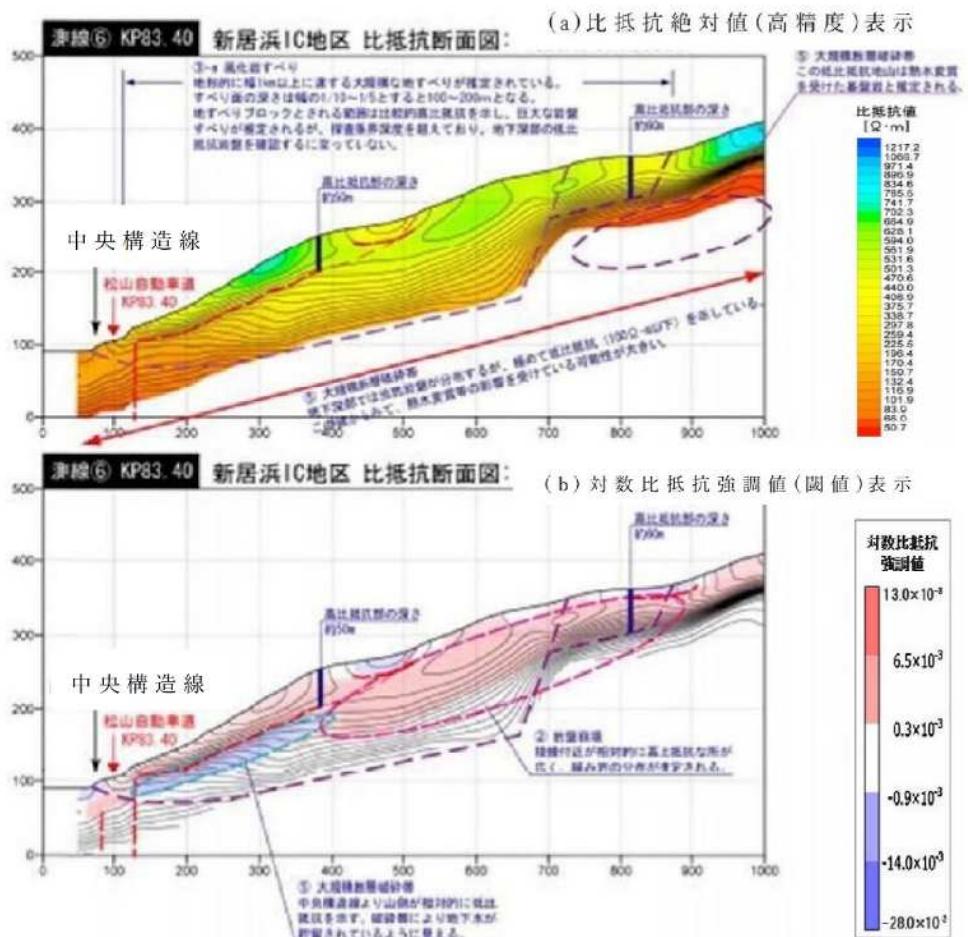


図 6.5.21 比抵抗解析図(新居浜 IC)²⁷⁾

な岩盤と未固結堆積物の判別は困難で、現地踏査にとって区分する必要がある。

- ④ 比抵抗のリニアメントは中央構造線沿いのほか、NW-SE方向に見られる。断層破碎帶や変質帶が分布する。

ii) 対数比抵抗強調値(閾値)表示

- ① 対数比抵抗強調値(閾値)表示平面図は、隣接地域に比較して比抵抗変化度減少域か、増加域かを示す。高比抵抗領域での比抵抗変化度減少域や低比抵抗領域での比抵抗変化度増加域が示される。
- ② 松山自動車道沿いは低比抵抗領域が広がるが、その中でも比抵抗変化度減少域部が表示され、含水比の高い地すべり土塊や盛土の分布を示す。
- ③ 松山自動車道沿いや山麓部の低比抵抗領域内でも、比抵抗変化度増減の境界域から増加域となる部分は、含水比の小さい礫質土が分布する。
- ④ 山腹斜面上には、比抵抗変化度減少域が明瞭に表示され、5 m深における地すべり土塊や崩積土の分布を示す。

地すべり地周辺の稜線部に近接するところでは、稜線より10~30 m低いところから比抵抗変化度減少域が広がることが多く、この部分が地すべりや崩壊の発生源(滑落崖)となっている。すなわち、稜線部に近い比抵抗変化度減少域は、地山に地下水が帯水して体積含水率や細粒分含有量が多いことを示し、降雨に対して飽和し易い条件となっている。また、斜面中腹部の崩壊は斜面形の凹凸を問わず、比抵抗変化度増加域の領域内で発生しており、表層土が薄く地下浅所に岩盤が分布する所で表層土の崩壊が発生している。表層が薄いことは、降雨に対して飽和し易い特性を反映している。

iii) 比抵抗分布断面図

比抵抗分布断面図において、対象区域の風化岩すべりの範囲は、距離程110~520 mにかけて厚さが約50 mで、地形的に幅1 km以上に達する大規模な地すべりとなっていることが地質踏査で確認されている。すべり面の深さは幅の1/10~1/5とすると100~200 mとなり、この深度は探査限界深度を超えており、地下深部の低比抵抗岩盤を確認するに至っていない。

地すべり地の表層の比抵抗分布は高比抵抗で、比抵抗変化度増加域を示し、岩盤の緩みによって地下水位が低位状態にあり、体積含水率が低いことを示す。深部では低比抵抗で、比抵抗変化度増減の境界域の比抵抗となっており、熱水変質して大規模な破碎帶となっている可能性が高い。地すべり舌端部において、比抵抗変化度増加域を示す範囲に比抵抗変化度減少域が介在しているが、末端の「中央構造線」による破碎帶により、地下水が貯留している可能性も大きい。

2) いよ西条 IC 92.00 KP付近の地すべり地

松山自動車道いよ西条 IC 地区における空中電磁法探査・現地踏査位置図と地すべり分布図(いよ西条 IC)を図 6.5.22 に示す。また、いよ西条 IC 地区(92.00 KP 地点)の地すべり地の比抵抗平面図と比抵抗断面図をそれぞれ図 6.5.23 と図 6.5.24 に示す。図 6.5.25 は、同地区の地質平面図・ボーリング位置図を示す。図 6.5.26(a)~(b)は、地質断面図とともに、各調査ボーリング位置の空中電磁法探査で得られた比抵抗絶対値(高精度)表示と対数比抵抗強調値(閾値)表示を合わせて示す。

いよ西条 IC 地区は、図 6.5.22 に示すように、①活断層とされている石鎚断層以南、②

石鎚断層と第四紀断層(活断層)の岡村断層との間、③岡村断層以北の3地形区に大きく分かれる。石鎚断層以南は急峻な山地地形を示し、三波川変成岩類が分布する。石鎚断層と岡村断層との間は、やや平坦な中位・低位段丘面と緩斜面の扇状地面からなり、前者は更新統の砂・砂礫からなる段丘堆積物、後者は砂礫主体の扇状地堆積物からなる。岡村断層以北は平坦で、河川堆積物や海浜堆積物などの完新統を主体として、一部に低位段丘堆積物が分布する。

検討対象箇所は、図中央の水系・尾根線が記されている範囲であり、三波川変成岩類からなり、周辺には地すべり地形が多く見られる。三波川変成岩類が分布する尾根や谷・沢部では、それぞれ両側が急峻な痩せ尾根やV字谷を呈する。これとは対照的に礫質土・粘性土が被覆するところでは、平坦ないし丸みを帯び、尾根部は丸餅形、谷部は馬蹄形の緩やかな凹型斜面を呈する。礫質土や粘性土の堆積によって形成された小尾根も確認でき、前者は比較的急で、後者は比較的緩い傾向を示す。

この地すべり地は、図6.5.25に示すように、砂質片岩を基盤岩として、その形態はほかの地すべり地と同様、周辺の不動地盤に比べて緩く、その形態による大きく3ブロックに分かれる。地すべり上部の砂質片岩の移動岩塊ブロック(Bブロック)、地すべり下部の崩壊土砂ブロック(Aブロック)と崖錐堆積物ブロック(Cブロック)に別れ、引張や圧縮亀裂が分布する。2~10mの滑落崖を伴う明瞭な緩急線が確認される。地すべり縁を形成する沢には、溪床堆積物や土石流堆積物が分布する。

対象地の比抵抗絶対値(通常)分布は、図6.5.23(a)に示すように、崩積土砂や残存小ブロックでは約 $150\ \Omega m$ 以下の低比抵抗に対応し、移動ブロック(砂質片岩)は約 $200\ \Omega m$ 以上の高比抵抗に対応し、深部の砂質片岩と比較して大きな値を示す。また、図6.5.23(b)に示す対数比抵抗強調値(閾値)表示の比抵抗分布図や図6.5.24(a)~(b)に示す比抵抗解析図においては、崩積土砂や残存小ブロックが比抵抗変化度減少域側(青色)、移動ブロック

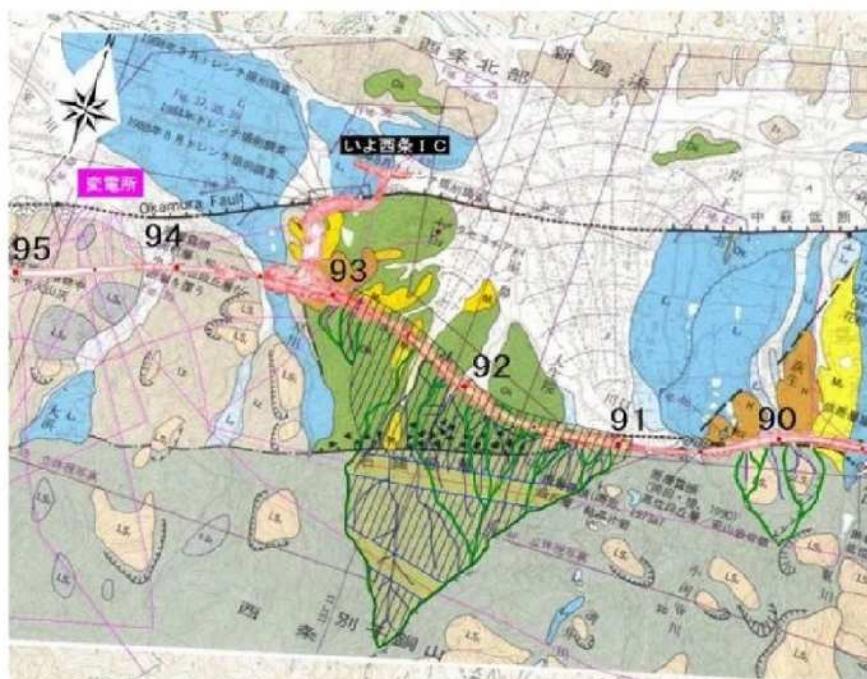
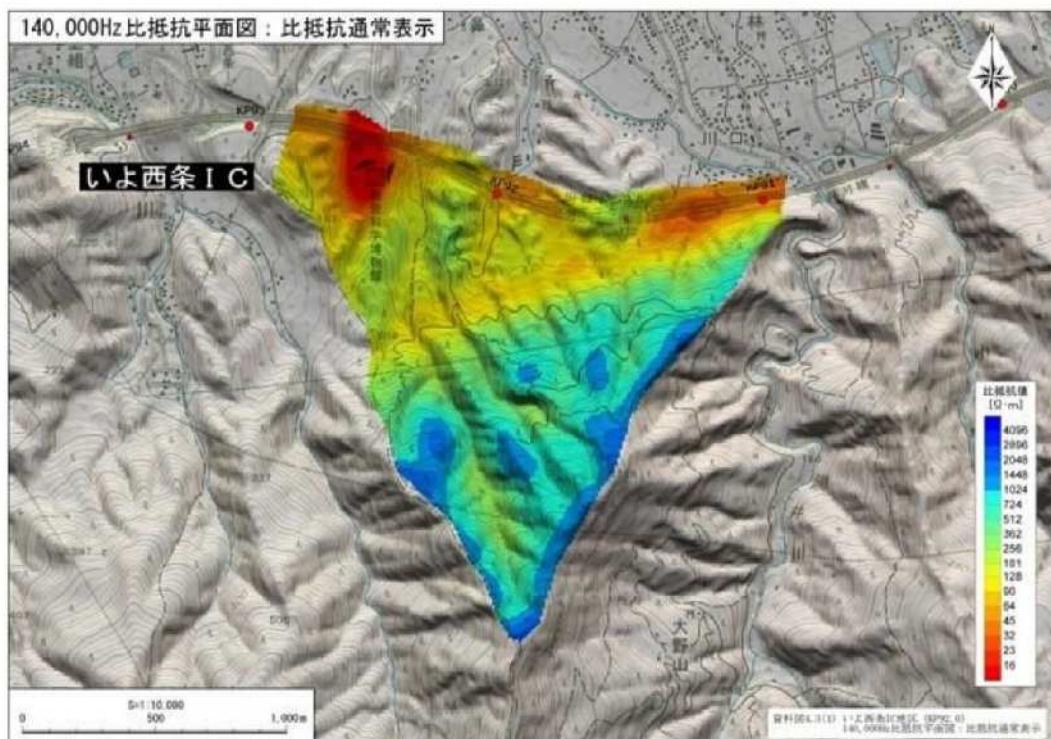


図 6.5.22 空中電磁法探査・現地踏査位置図と地すべり分布図(いよ西条 IC)^{14), 27)}

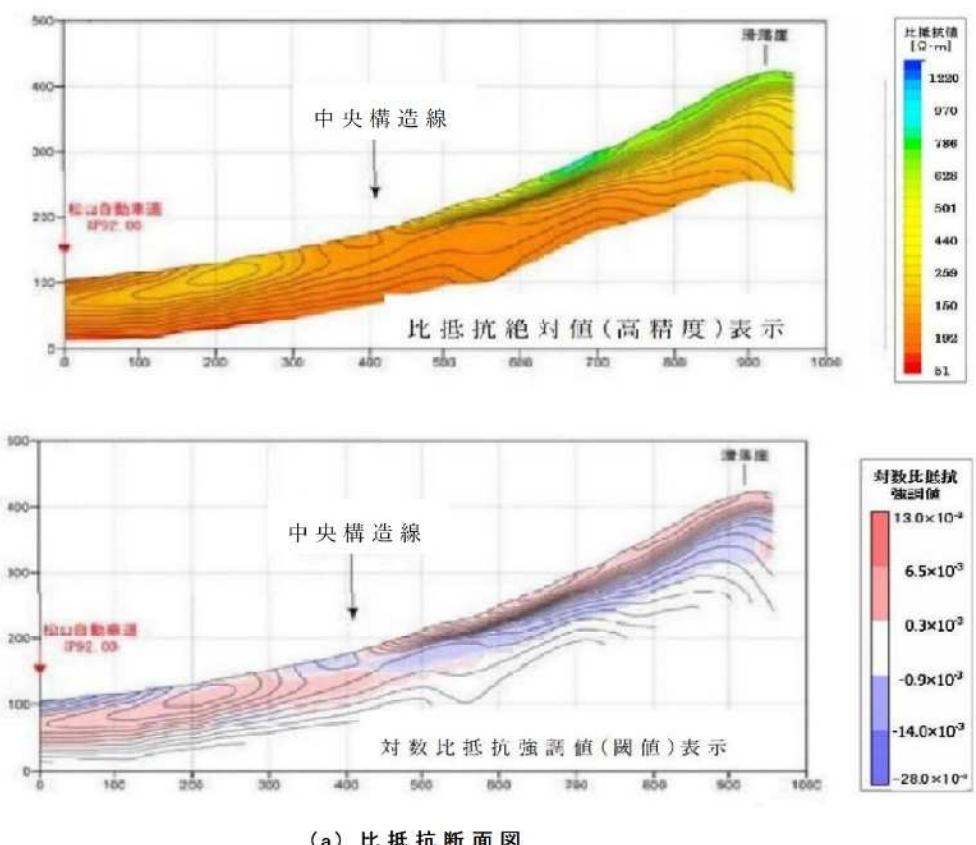


(a) 比抵抗絶対値(通常)表示

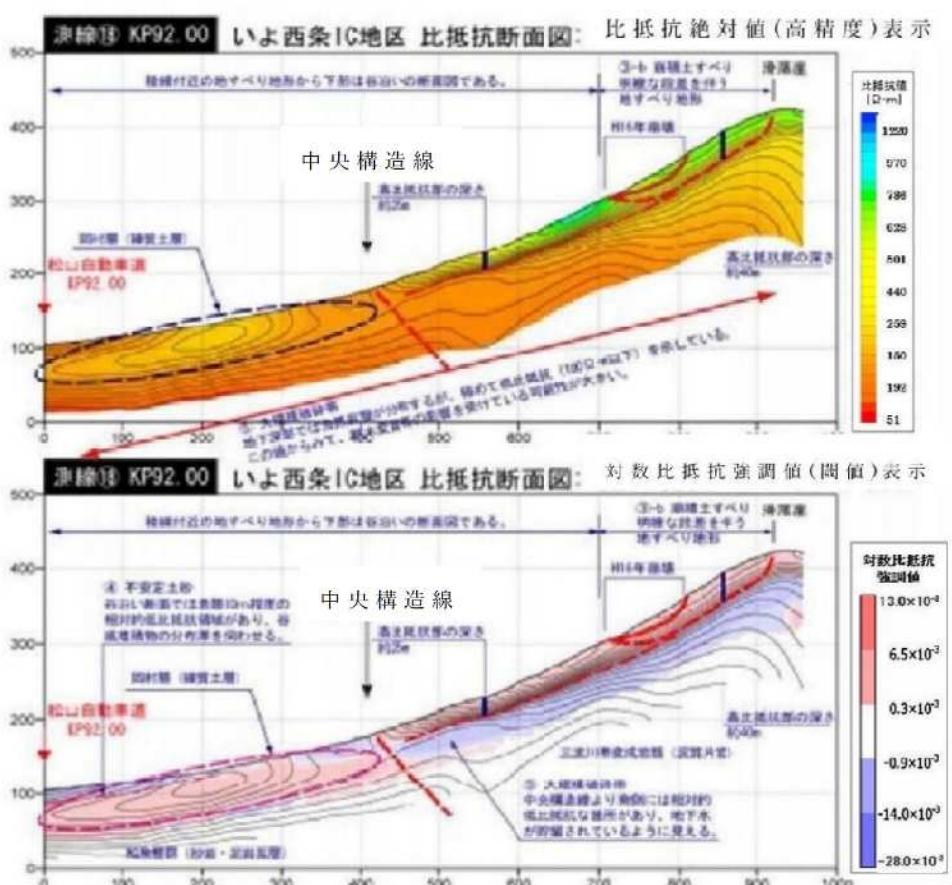


(b) 対数比抵抗強調値(閾値)表示

図 6.5.23 比抵抗表示平面図(いよ西条)²⁷⁾



(a) 比抵抗断面図



(b) 比抵抗断面解釈図

図 6.5.24 比抵抗断面図および解釈図(いよ西条 IC)²⁷⁾

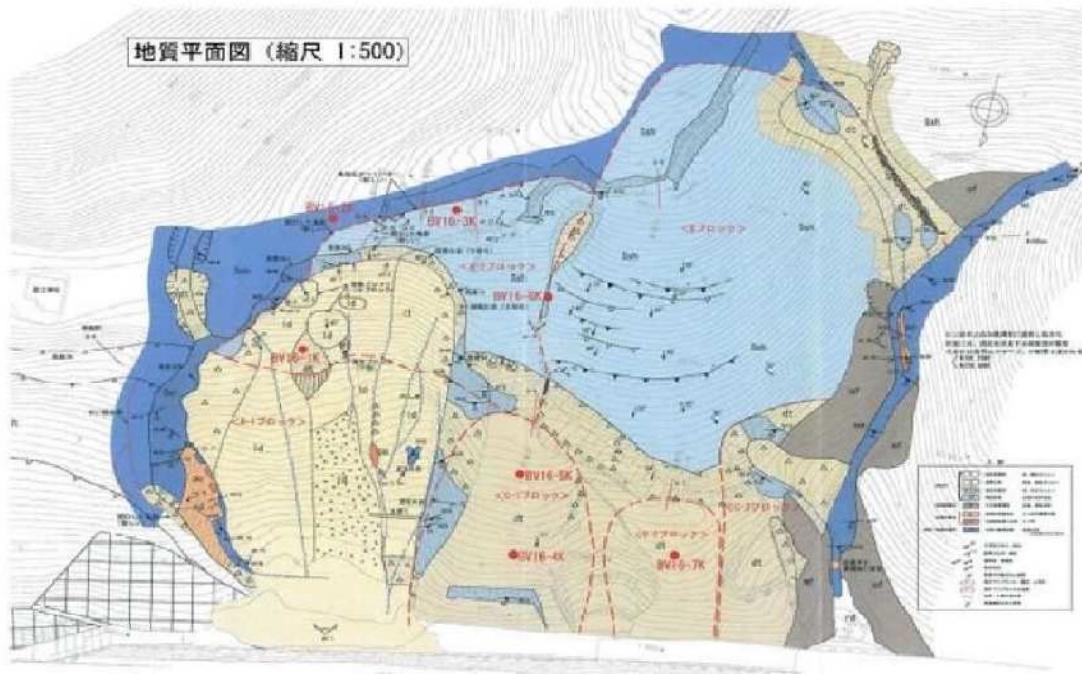


図 6.5.25 地質平面図・ボーリング調査位置図(いよ西条 IC 90.97KP)²⁷⁾

(砂質片岩)や岩盤(砂質片岩)が比抵抗変化度増加域側(赤色)に対応している。

地すべり地における比抵抗絶対値(高精度)表示による断面図を図 6.5.26(a), 対数比抵抗強調値(閾値)表示による断面図を図 6.5.26(b)に示す。

代表的なボーリング地点の比抵抗解析結果は、以下のとおりである。

- ① *BV16-1K*: この地点では水位の形成はなく、動態観測では、深度 5 m 以浅の崖錐堆積物でわずかな変位があり、残存小ブロックと判定される。対数比抵抗強調値(閾値)表示による区分は比抵抗変化度減少域区分 *a* と増加域区分 *a·b* に区分され、その境界深度 2.5~4.5 m である。比抵抗変化度減少域区分 *a* はシルト混り砂が主体で、礫混り砂質土や礫混り粘性土を含む崖錐堆積物に対応し、細粒分が多い土砂を反映している。増加域区分 *a* は *D~CL* 級岩盤に相当し、その深度は 4.5~12.0 m である。増加域区分 *b* は *CM* 級岩盤に相当し、分布は深度 12.0 m~孔底である。このことから、増加域は体積含水率が低く、粘土鉱物が少ないことを反映している。
- ② *BV16-3K*: この地点では、明瞭な地下水流动は認められない。被覆層は厚さ 0.4 m の粘性土(表土)と薄く、5 m の分解能では検出できない。移動岩塊と基盤岩は砂質片岩からなるが、対数比抵抗強調値(閾値)表示による両者の識別や岩盤等級の相違では区分できない。全体の区分は比抵抗変化度増加域区分 *b* に区分される。このことから難透水性地盤で、体積含水率が低く、細粒分が少ないことを反映している。
- ③ *BV16-4K*: この地点では、表土は砂礫、移動岩塊は割れ目沿いに風化変質・軟質からなる風化砂質片岩と変質による粘土状コアが主体で、下位は砂状を示す風化ひん岩からなる。地下水位は深度 2.7 m に分布し、8 m を境にして浅部は難透水層、深部は透水層となっている。比抵抗変化度区分は減少域区分 *a·b* であ

り、減少域区分 *b* は崖錐堆積物（深度 0.0~8.0 m）, 減少域区分 *a* は基盤岩（深度 8.0 m~孔底に分布する *D*~*CL* 級岩盤の風化砂質片岩）に対応する。この区間は透水性地盤であり、粘土鉱物が多い土砂からなる表土と移動岩塊に対応する。

- ④ *BV16-7K*: この地点の崖錐堆積物は高含水の礫混り砂質シルトを主体とし、移動

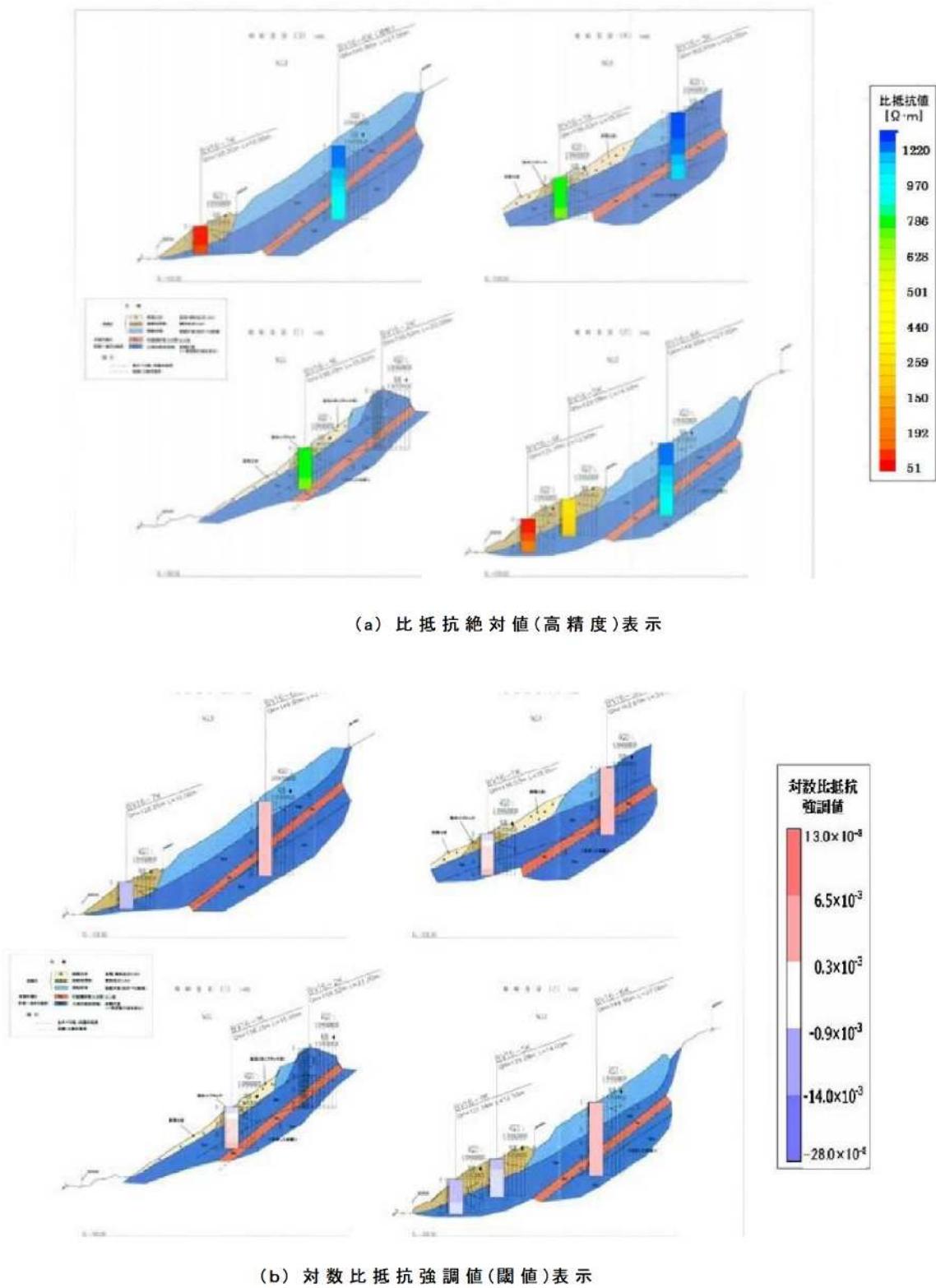


図 6.5.26 地質断面図および比抵抗断面図(いよ西条 IC90.97KP)²⁷⁾

岩塊と基盤岩はいずれも風化砂質片岩からなり、基盤岩は CL 級岩盤からなる。体積含水率は低く、難透水性地盤であり、比抵抗変化度減少域区分 b に区分される。この減少域区分 b は高含水の細粒分の多い地層を反映している。

6.6 むすび

本章においては、各種比抵抗表示法を舞鶴若狭自動車道、徳島自動車道、および松山自動車道における種々の地盤に適用して検証した。すなわち、高速道路に沿って分布する斜面で実施した空中電磁法探査によって取得した比抵抗情報に基づいて、地域・区間に分布する斜面の地形・地質特性を踏まえた地形判読結果と対比し、地表部の面的な比抵抗情報から読み取れる地盤性状について、既往地質調査資料および現地踏査から得られた地質・岩質・地下水などの地盤情報を用いて比較し、空中電磁法探査による比抵抗分布データの精度を各種の比抵抗表示法により検証した。

その結果、比抵抗絶対値(通常)表示法、比抵抗絶対値(高精度)表示法、比抵抗強調値表示法、対数比抵抗強調値表示法、および対数比抵抗強調値(閾値)表示法において、それぞれ単独の解析データのみでは、得られる情報が限られて地盤性状の把握や構造の判別が必ずしも明確ではないが、比抵抗絶対値(通常・高精度)表示法と比抵抗強調値表示法もしくは対数比抵抗強調値(閾値)表示法を併用することにより、地盤性状の把握や構造の判別がより明確に行うことができるなど開発した表示法の有用性を確認した。

本章において得られた結果を具体的にまとめると、以下のとおりである。

- (1) 比抵抗絶対値(高精度)表示では、斜面表層部の水平方向の構造が「中央構造線」の影響を受ける範囲では鉛直構造に変化することが明らかになるなど、比抵抗絶対値(通常)表示より高精度であることを確認した。
- (2) 比抵抗絶対値表示では、崩積土と風化を受けた基盤岩の境界は捉えにくいが、比抵抗強調値表示、および対数比抵抗強調値(閾値)表示では、斜面上の風化部と新鮮部の境界が、相対的高比抵抗域と相対的低比抵抗域の境界として捉えられることを確認した。
- (3) 比抵抗絶対値(高精度)表示では、土石流危険渓流や山腹斜面崩壊における低比抵抗域により、体積含水率や細粒分含有率の高い未固結堆積物または盛土の分布が反映され、地下水が多い湿潤な環境を示すことを確認したが、湿潤な岩盤と未固結堆積物の判別は困難である。しかし、対数比抵抗強調値(閾値)表示を併用することにより、破碎帯、変質帯、地下水状況(体積含水率・細粒分含有量)を反映し、崩壊地は比抵抗変化度増減の境界域から増加域としてとらえられることを確認した。
- (4) 比抵抗絶対値(高精度)表示では、地すべり地における低比抵抗域には、厚い未固結堆積物または湿潤状態の岩盤が分布することを確認した。一方、対数比抵抗強調値(閾値)表示では、湿潤な岩盤と未固結堆積物の判別が比抵抗変化度減少域や増加域として示されることを確認した。
- (5) 比抵抗絶対値(通常・高精度)表示法と比抵抗強調値表示法もしくは対数比抵抗強調値(閾値)表示法の比抵抗解析データを併用することにより、土石流・山腹崩壊、岩盤崩壊、地すべり、不安定土砂、大規模断層破碎帯の 5 項目について、検討し抽出が可能であることを確認した。

[第6章の参考文献]

- 1) 西日本高速道路(株)：保全点検要領（構造物編），250pp., 2019.
- 2) 島 博保，奥園誠之，今村遼平：土木技術者のための現地踏査，鹿島出版会，328pp., 1981.
- 3) (財)道路保全技術センター：平成8年度道路防災総点検要領(豪雨豪雪等), 160pp., 1996.
- 4) 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, 2011.
- 5) 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, No.2018-TPC-0735, 2018.
- 6) 大日本コンサルタンツ(株)：特許 No. A524337 空中電磁法探査による地盤の解析方法, 2013.
- 7) 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.
- 8) 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，107 pp., 1997.
- 9) 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.
- 10) 日外勝仁，伊東佳彦，中川伸一，岡崎健治：空中物理探査による広域的な地質構造調査，基礎工, Vol.61, No.8, pp.31-33, 2006.
- 11) 小西尚俊，塙田幸広：空中電磁法による地質評価への実際的検証，土木学会論文集, No.680/III-55, pp.285-294, 2001.
- 12) 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.
- 13) 長谷川修一：中央構造線沿いの大規模地すべりと第四紀断層運動，地質学論集, No.40, pp.143-170, 1992.
- 14) 水野清秀，岡田篤正，寒川 旭，清水文隆：中央構造線活断層系(四国地域) ストリップマップ及び説明書，構造図8，地質調査所, p.63, 1993.
- 15) 岡田篤正：四国中央北縁部における中央構造線の第四紀断層運動，地理学評論, Vol.46 , pp.295-322, 1973.
- 16) 後藤秀昭，中田 高：四国の中構造線活断層系—詳細断層線分布図と資料—，広島大学総合地誌研究資料センター，総合地誌研 研究叢書35, 2000.
- 17) 長谷川修一：中央構造線沿いの大規模地すべり－その特徴と地盤工学上の問題点－，地盤工学会誌, Vol.47, pp.21-24, 1999.
- 18) 経済企画庁：土地分類基本調査 地形・表層地質・土じょう, [西条]5万分の1, p.34. 1987.
- 19) 愛媛県：国土調査 土地分類基本調査 東予地区新産業都市建設地域 [新居浜] 5万分の1, p.45, 1977.

- 20) 岡田篤正, 杉戸信彦: 四国中央部の中央構造線活断層帯の地形・地質・地下構造, 地質学雑誌, Vol.112, 補遺, pp.117-136, 2006.
- 21) 地質調査所:1/200000 地質図.
- 22) 香川県・徳島県: 国土調査 土地分類基本調査, 阿讚山地開発地域[池田][観音寺] 5万分の1, p.38, 1972.
- 23) 岡田篤正: 阿波池田付近の中央構造線の新期断層運動, 第四紀研究, Vol.7, pp.15-26, 1968.
- 24) 堤 浩之, 岡田篤正, 中田 高, 後藤秀昭, 丹羽俊二, 小田切聰子: 1:25,000 都市圏活断層図「伊予三島」, 国土地理院技術資料, 日本地図センター, 1999.
- 25) 日本道路公団関西支社管内: 舞鶴若狭自動車道関連土質調査報告書, 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
・高速道路のり面の予防保全管理への適応性検討業務報告書
・舞鶴若狭自動車道 災害記録(災害箇所調査記録・降雨データ)
・舞鶴若狭自動車道 道路防災総点検記録・のり面カルテ
・舞鶴若狭自動車道 沿線空中写真・10m DEMデータ・赤色立体地図
- 26) 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, 2009.
・池田町馬路地区 (その2) 第二次詳細土質調査報告書
・馬路工事地質調査報告書
・白地トンネル地すべり対策工調査報告書
・のり面防災として要注意箇所の抽出技術開発業務報告書
・地すべり事前対策地質報告書
・空からの災害危険箇所の抽出方法の検討(空中電磁探査による地質調査)報告書
・徳島自動車道 池田工事区関連施工記録
・徳島自動車道 災害記録(災害箇所調査記録・降雨データ)
・徳島自動車道 道路防災総点検記録・のり面カルテ
・徳島自動車道 沿線空中写真・10m DEMデータ・赤色立体地図
- 27) 日本道路公団四国支社管内: 松山自動車道関連土質地質調査報告書, 1993-1999, 2009.
・伊予三島～西条間第一次・第二次詳細土質調査報告書
・平成16年度松山自動車道災害事例 (被災箇所データ・降雨データ等)
・いよ西条IC地区 災害関連緊急治山調査委託業務報告書
・のり面防災として要注意箇所の抽出技術開発業務報告書
・土石流災害等危険度評価検討業務(空中電磁探査) 報告書
・松山自動車道 池田工事区関連施工記録
・松山自動車道 災害記録(災害箇所調査記録・降雨データ)
・松山自動車道 道路防災総点検記録・のり面カルテ
・松山自動車道 沿線空中写真・10m DEMデータ・赤色立体地図

第7章 予防保全管理への空中電磁法探査の適用性

7.1 概説

新たな予防保全管理(性能規定型予防保全管理)では、高速道路の膨大な数の斜面から性能規定値を満足しないであろう斜面をスクリーニングし、詳細調査後、安定解析により必要な災害防止対策工を決定・実施する。そのために、災害防止対策工の検討箇所および優先度決定のスクリーニング手法を検討する必要がある。そこで現地踏査を行い、災害形態(斜面崩壊、地すべり、土石流・土砂流出などの区分)と地盤特性および地下水特性を確認、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などの資料を収集整理する。その結果と空中電磁法探査の比抵抗値を整理し、法則性がないか検討する。比抵抗値には比抵抗絶対値(通常・高精度)と比抵抗強調値および対数比抵抗強調値(閾値)(以下比抵抗強調値という)が存在するが、単独では斜面の変位地形および土石流・土砂流出、地すべり、斜面崩壊などの災害形態の抽出、ならびにこれらの地形特性と表層地盤特性、特に固結堆積物の岩種・岩質と風化・亀裂状況、未固結堆積物の軟質度、粒度組成、湧水・含水状態を確認することが出来ないため、比抵抗絶対値と比抵抗強調値などを併用することで確認できないか検討する。検討により、崩壊の危険性が高い斜面(災害発生が考えられる注意すべき地盤情報)を効率的に選定するためのスクリーニング手法を確立する。

7.2 比抵抗分布による地盤性状の把握

7.2.1 高速道路に沿う広域地盤における比抵抗分布表示例

高速道路に沿う広域的な地盤性状を概略的に把握するためには、空中電磁法探査が適している。そこで、徳島自動車道馬路地区で実施した空中電磁法探査データに基づいて、地形地質図とともに、比抵抗絶対値(高精度)表示および対数比抵抗強調値と同(閾値)表示による比抵抗分布平面図を図7.2.1に示す。図7.2.1は比抵抗分布平面図のみを示しているが、空中電磁法探査により広域地盤における3次元比抵抗分布データが得られるので、必要に応じて任意断面における比抵抗分布断面図も表示できる。これらの比抵抗分布データに基づいて地盤性状を把握するためには、ボーリングなどによる地盤データが少なくともリファレンスとして必要であることは言うまでもない。

図7.2.1(a)から分かるように、高速道路に沿う馬路川は中央構造線に並走しており、その北側は主に砂岩優勢砂岩泥岩互層、南側は三波川結晶片岩類からなる。いずれの地域にも、大小様々な地すべり地形が発達する。図7.2.1(b)の比抵抗絶対値(高精度)表示では、崩壊土や未固結堆積物は低比抵抗、岩盤などは高比抵抗となり、崩壊斜面や崩壊危険斜面および未固結堆積物の平面分布が明瞭となる。図7.2.1(c)および(d)の対数比抵抗強調値表示および同(閾値)表示では、各着目点における比抵抗の相対的变化が視覚的に判別でき、また地盤の構成や性状と良い相関を示し、前述のようなそれぞれの特徴に応じて、比抵抗構造が客観的に微細な変化として捉えられる。

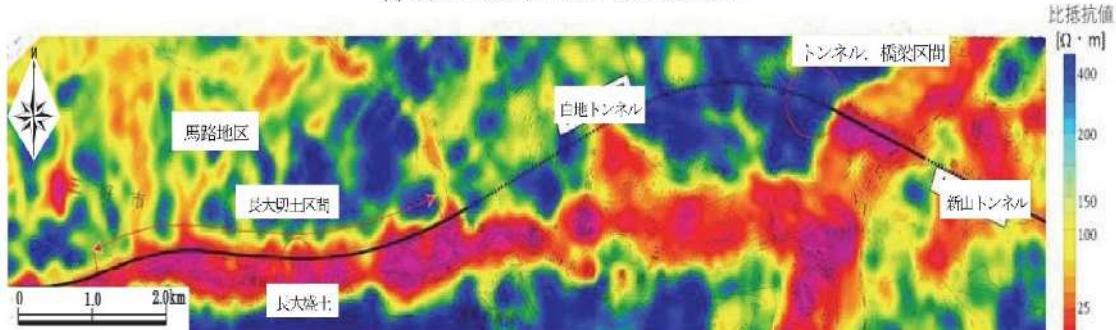
なお、空中電磁法探査による広域地盤の地盤性状の概略的な把握の詳細については、以下に示すが、6.4章も参照されたい。

(1) 広域的な地形・地質区分と比抵抗平面構造の対比

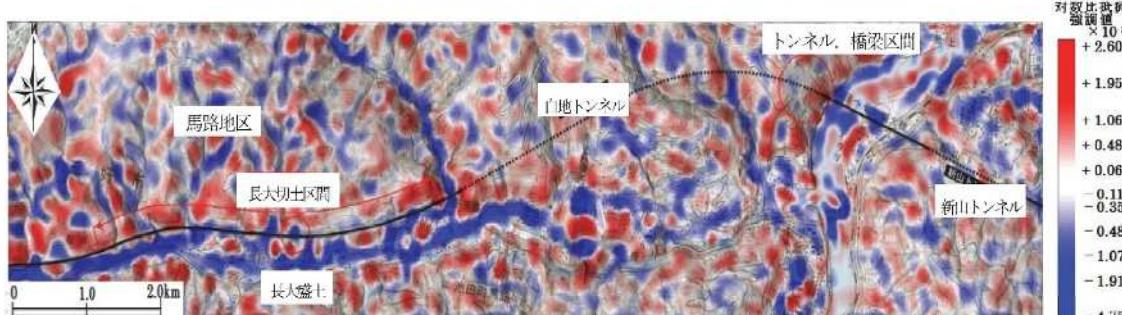
徳島自動車道馬路地区において、長大切土や高盛土ののり面(人工斜面)および渓床・谷



【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, └─┘: 中央構造線
(a) 徳島自動車道における地形地質図



(b) 比抵抗絶対値(高精度)表示(深度 5 m 付近の平面的な比抵抗構造)



(c) 対数比抵抗強調値表示(深度 5 m 付近の平面的な比抵抗構造)



(d) 対数比抵抗強調値(閾値)表示(深度 5 m 付近の平面的な比抵抗構造)

図 7.2.1 徳島自動車道における地形地質状況と各種の比抵抗分布(図幅: 13.7km)

地形、山腹急斜面、地すべり地の緩斜面などの現地情報を確認するため、現地踏査を行う。現地踏査前に地形判読から地形特性、特に盛土・切土のり面(人工斜面)と自然斜面の変位地形および土石流・土砂流出、地すべり、斜面崩壊などの災害形態の抽出、ならびにこれらの地形特性と表層地盤特性、特に固結堆積物の岩種・岩質と風化・亀裂状況、未固結堆積物の軟質度、粒度組成、湧水・含水状態を確認するために、代表地点を選定した。現地踏査は、これらの代表地点において上記の地形特性と表層地盤特性を確認し、また GPS

による座標の記録と写真撮影を行った^{1)~3)}。

広域的な地形・地質区分（谷・谷底低地・渓床，山腹斜面・尾根部，断層・破碎帯，地すべり）と比抵抗分布の平面構造との対比は，以下のとおりである^{4),5)}。

1) 谷(谷底低地・渓床)

- ① 谷底低地は，顕著な低比抵抗を示す。和泉層群分布域の渓床には，低比抵抗領域が分布し，三波川変成岩類分布域の渓床には，低比抵抗領域がほとんど認められない。表層部の露頭では，渓床堆積物の構成粒子が和泉層群分布域では細粒で，三波川変成岩類分布域では岩塊が主体であり，渓床部の比抵抗の高低は，渓床堆積物の構成粒子の差異を反映する。
- ② 谷底低地のうち， $20 \Omega m$ 以下の極端な低比抵抗領域は，沖積錐や背後に渓流のある箇所に対比できる。谷底低地下流域の $20 \Omega m$ 以下の極端な低比抵抗領域は，土石流堆積物と沖積錐の分布を反映している。

2) 山腹斜面および尾根部

- ① 山腹斜面や尾根部の比抵抗は， $220 \Omega m$ 以上の高比抵抗を示す領域および $120 \Omega m$ 以下の低比抵抗を示す領域に分けられる。山腹斜面や尾根部には，高比抵抗領域が分布し，岩盤緩み域，不飽和帶あるいは良好岩盤の分布を反映する。山腹斜面や尾根部の低比抵抗領域は，風化の進んだ厚い表土層や体積含水率や細粒分含有率の大きい不良地山を反映する。

3) 断層・破碎帯

- ① 「中央構造線(池田断層)」の断層崖は，併走する河川に沿って直線的に延びる低比抵抗領域の北縁よりやや南側を通過する。これは，断層破碎帯と共に伴う風化・変質地山が北側の高速道路山側のり面付近まで広がっていることを反映している。
- ② 「中央構造線」の南側は併走する河川沿いの谷底低地の河床堆積物と重複しているため，断層破碎帯の南縁部は，周波数 $140 kHz$ による浅部の比抵抗平面図のみでは判読できない。

4) 地すべり

- ① 山腹斜面や尾根の地すべり地では，地すべり岩体毎に比抵抗が大きく異なる。これは地すべり岩体の風化の進行状態，つまり細粒分(粘土分)含有率および地すべり岩体内部の体積含水率(間隙率・飽和度)の差異を反映している。

(2) 地形判読結果と比抵抗平面構造の対比

地形判読結果による地すべり地形と比抵抗平面分布の関係は，以下のとおりである。

1) 船戸地区(地すべり)

- ① 徳島自動車道の船戸地すべり($85.50 KP$ 付近)は堰き止め湖を生じさせた。滑落崖が高比抵抗領域に，地すべり岩体が低比抵抗領域に対比される。滑落崖の高比抵抗領域は良好地山を反映するのか，または岩盤の緩み域を反映するのかは，周波数 $140 kHz$ の比抵抗絶対値(高精度)平面図だけからは判別できない。
- ② 船戸地すべり末端部の谷底低地では， $20 \Omega m$ 以下の極端な低比抵抗領域が， $100 \Omega m$ 程度の比抵抗領域に分断されている。この比抵抗構造は，谷底低地に押し出した地すべり岩体による堰止め湖の形態を反映している。
- ③ $85.10 KP$ 付近の地すべりは，地すべり岩体が $170 \Omega m$ 程度の中比抵抗を示す。こ

の中の比抵抗領域は、地形判読による滑落崖の背後まで広がっており、背後斜面まで地すべりが懸念される範囲が広がっている可能性がある。

- ④ 85.10KP付近の地すべりは、河床まで連続する地形が認められないので、85.50KP付近の地すべりに比べて現在までの移動量が少ない。また、この地すべり岩体の比抵抗は、堰止め湖を生じた85.50KP付近の地すべり岩体よりも相対的に高い。探査地域では、地すべりの移動量に応じて地すべり岩体の性状が異なり、比抵抗は性状の差異（地すべりの古さや進行度など）を反映している可能性がある。
- ⑤ 84.50KPや84.75KPで交差する渓床の上流部には、低比抵抗領域が分布する。特に、谷頭部の背後や急勾配の斜面上に低比抵抗領域が伸びる箇所があり、断層破碎帯や風化部の厚い部分などの体積含水率の大きい部分で、崩壊の懸念される不良地山を反映する。ただし、風化によるものか、体積含水率によるものは、周波数140kHzの比抵抗絶対値(高精度)平面図だけでは判別できない。
- ⑥ 高速道路沿いの切土のり面(人工斜面)は、のり尻側が低比抵抗を示す。のり面の形状と原地形の関係や飽和度にもよるが、「中央構造線」に近いのり尻側が特に風化・変質した不良地山からなることを反映している。

2) 馬路地区(高盛土)

- ① 高盛土となっている83.90KP付近は、同一盛土内に20Ωm以下の極端な低比抵抗領域が認められる。同一堤体内で盛土材料が大きく変化することは考え難いため、20Ωm以下の極端な低比抵抗領域は、飽和度が特に高い部分を反映している。
- ② 83.00KP, 83.45KP, 84.00KP, 84.25KPおよび84.50KPにおける20Ωm以下の極端な低比抵抗領域は、沖積錐や崖錐堆積物の分布に対比できる。高速道路山側の地すべり地形は、滑落崖が高比抵抗領域に、地すべり岩体が中～低比抵抗領域に対比できる。
- ③ 82.95KP付近で横断する沢の谷頭斜面は、低比抵抗領域を示す緩斜面で、側方に地すべり地形が認められ、地すべり・崩壊の懸念のある不良地山が分布する。
- ④ 河川南岸側の三波川变成岩類分布域は一様に高比抵抗を示す。この高比抵抗領域が良好地山なのか、全体が不飽和の岩盤緩み域に該当するものは、周波数140kHzの比抵抗絶対値(高精度)平面図だけでは判別できない。

3) 井ノ久保地区(地すべり)

- ① 探査範囲内で最も規模の大きな地すべりであり、地すべり岩体全体の土砂化が進み、顕著な低比抵抗領域を示す。
- ② 地すべり岩体内部の比抵抗の高低は、移動土塊内部の粘土分含有量および地下水(水みち)の存在を示唆している。ただし、どちらの影響が強いのかは、周波数140kHzの比抵抗絶対値(高精度)平面図だけでは判断できない。

7.2.2 比抵抗から斜面の土木分野の地質的な解釈を行う根拠

地盤比抵抗値を規定するパラメータは、既に述べたように、体積含水率、粘土分含有率、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値は変化する。新鮮な岩盤が風化・変質を受けると、亀裂の発達によって体積含水率や粘土分含有率の増大や地下水による飽和により比抵抗は低下し、不良地盤となっている場合が多い。不飽和状態で体積含水率が小さい緩み岩盤や地下水位以下の飽和状態であっても新鮮な岩盤(難透

水性岩盤)の場合は高比抵抗となる。このことから、深度方向の比抵抗パターンと想定される斜面構造は、図 7.2.2 に示す 3 パターンに区分できる⁶⁾。

これらの比抵抗構造と斜面崩壊との関係については、A タイプは崩壊する可能性のある崩積土および強風化岩(風化土砂)が浅部の低比抵抗として出現する斜面で、緩み域下端は比抵抗の急変部に相当する。B タイプは通常斜面のタイプで、崩壊はごく浅層の低比抵抗の風化土砂で発生する表層崩壊であり、深部に向かって次第に新鮮な岩盤となり、高比抵抗域へと漸移する。C タイプは崩壊する可能性のある風化岩が浅部に分離した高比抵抗域として出現する斜面で、緩み域下部の体積含水率の高い飽和層と体積含水率の低い不飽和層の新鮮岩が比抵抗の不連続面を形成している。

各タイプにおける緩み域下端は、低比抵抗域から高比抵抗域への変化部上部の急変部に相当する。この急変部は、斜面崩壊や地すべりなどの素因となる地盤内の体積含水率の低い脆弱部や緩み域などに当たるもので、高比抵抗域を示す不飽和岩盤中に体積含水率の高い低比抵抗域が不連続面として分布する場合を示す。

7.3 比抵抗データに基づく崩壊危険斜面の抽出方法

7.3.1 抽出方法の基本手順

現在実施されている斜面の崩壊危険箇所の抽出方法は道路防災総点検要領(豪雨,豪雪)に記されている⁷⁾。これに基づいて、危険斜面の抽出を地形・地質要因と対数比抵抗強調値(閾値)表示法による比抵抗の相対的な変化の傾向に着目し、災害形態分類および崩壊危険斜面の抽出方法の基本手順について検討する。

崩壊危険斜面の抽出において、まず崩壊などによる災害要因となり得る地形要素を、基本的な地形単元(地形変換点(遷急線・遷緩線), 水系, 緩斜面)から抽出する必要がある。地形変換点(遷急線・遷緩線)は斜面の傾斜が急変する箇所で、浸食・運搬のプロセス以外の変位の痕跡(表層崩壊や地すべり)として形成された可能性が大きい。ただし、特に浸食

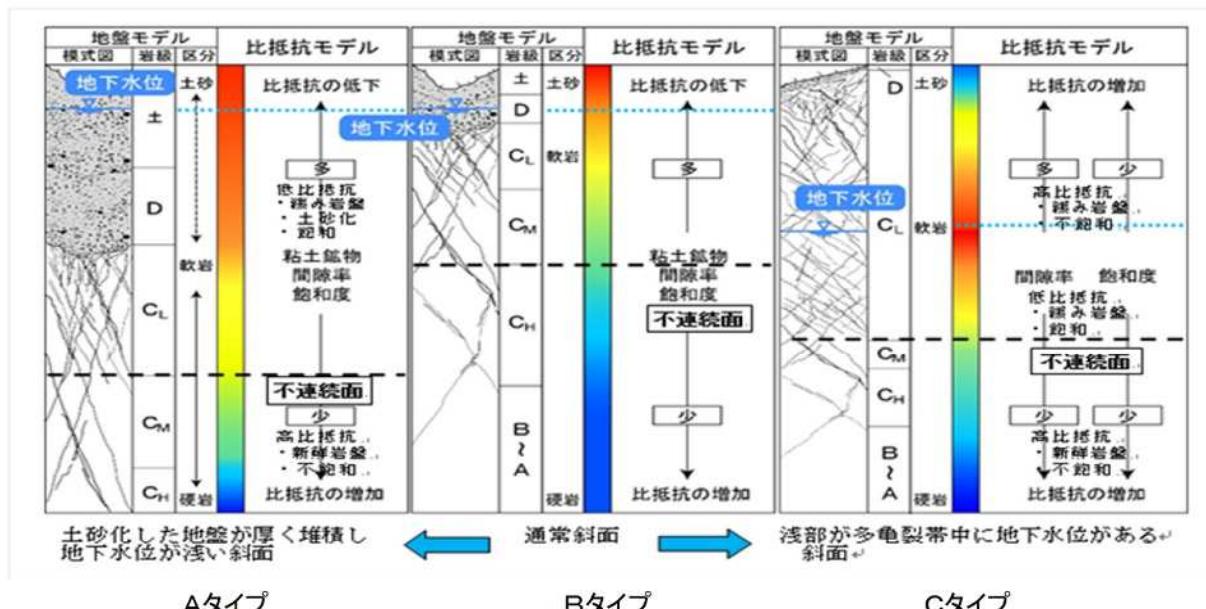


図 7.2.2 深度方向の比抵抗パターンと想定される斜面の地盤構造図⁶⁾(一部加筆)

が活発であることを示す場合がある。水系(河川・溪流)は斜面の浸食が進行しつつある場所であり、不安定化しやすい。また、表流水は地下水位の基準面となるため、地下水位の高低の大まかな目安となる。斜面上の緩斜面は段丘面や地すべり頭部である場合がある。緩斜面背後に急崖が分布する場合は、崩積土が堆積した崖錐地形の場合がある。また、地形変換点と水系、緩斜面の平面分布を判読し、斜面上部の背後に馬蹄形状の急崖を有する緩斜面がある場合とない場合がある。前者は典型的な地すべり地形のため「繰り返し地すべり」が発生しやすい。後者は地形要素の一つである斜面形状によって異なり、集水型斜面(凹型斜面)と散水型斜面(凸型斜面)に区分でき、以下のように、斜面崩壊の形態に大きな違いがある。

集水型斜面(凹型斜面)：降雨時に表流水や地下水が集水し、容易に水位上昇する。比抵抗変化度の傾向において、比抵抗変化度減少域で集水範囲内の被覆層厚が薄い場合は、小規模な土砂流出により「小規模な土石流」が頻発しやすい。一方、厚い場合は長雨が続いた時に大規模な土砂流出により「大規模な土石流」が発生しやすい。比抵抗変化度増加域の場合は、風化した岩盤や被覆層の崩壊土砂層が浸食されて薄層状態にあるか欠如しているため、土砂災害が発生しにくく、「当面の対応なし」である。

散水型斜面(凸型斜面)：硬質岩盤が分布するため選択浸食の結果残った場合と脆弱な岩盤からなるが浸食から取り残された場合がある。比抵抗変化度の傾向において、比抵抗変化度減少域の場合は、強度が低く斜面が急勾配のため「斜面崩壊」が発生しやすい。

比抵抗変化度増加域の場合は、浸食地形(ガリ・急崖など)の有無によって異なり、浸食地形がある場合は浸食が進んで岩盤が亀裂沿いに緩んでいるため、「岩盤崩壊・落石」が発生しやすい。浸食地形がない場合は硬い岩盤が残った斜面のため土砂災害が発生しにくく、「当面の対応なし」である。ただし、振動エネルギーが集積しやすく、地震時に斜面崩壊が発生しやすい。

以上の知見に基づいて、崩壊危険斜面の抽出方法の基本手順を示すと以下のようになる。まず、地形要素と比抵抗変化度の相対的傾向によって詳細検討箇所の抽出を行う。次に、抽出された詳細検討箇所に対し、比抵抗平面・断面図の検討・現地踏査(道路との離隔・既設対策工の有無)・地盤調査(物理探査・ボーリング調査など)による詳細調査を実施し、性能規定条件での被害想定(崩壊や地すべりの発生規模など)を行う。また、被害金額・発生確率・発生規模に基づく行動方針(ハード対策/ソフト対策)を決定する。

以下では、上述した崩壊危険斜面の抽出をより効率的かつ精度良く行うために、比抵抗データの活用について検討する。

7.3.2 比抵抗データによる地盤性状区分チャートの提案

(1) 現地踏査による地盤性状と代表地点の選定

山腹急斜面や地すべり地の緩斜面などの自然斜面と切土・盛土の人工斜面の現地情報を取得するため、現地踏査を行った。事前の地形判読から地形特性の確認、特に斜面の変位・変状および斜面崩壊、土石流・土砂流出、地すべりなどの災害形態と地盤情報(固結堆積物の岩種・岩質と風化・亀裂状況、未固結堆積物の軟質度、粒度組成、湧水・含水状態など)を確認した。

確認箇所は、徳島自動車道の探査範囲である井川池田 IC～池田 PA 間($L=13.7\ km$, $S=8.22\ km^2$, 図 7.2.1 参照)における馬路地区の 4 崩壊危険斜面、および松山自動車道の土居 IC～いよ西条 IC 間における 3 箇所の探査範囲(延べ $L=5.66\ km$, $S=4.70\ km^2$)内のいよ西条地区の人工斜面(2004 年に地すべりが発生)である。これらの地点の地盤性状は多種多様であり、①粘土・粘性土、②砂・砂質土、③礫質土・強風化軟岩、④亀裂性岩盤・硬岩の 4 グループからなる。

(2) 比抵抗絶対値(通常)と比抵抗強調値の組み合わせによる地盤性状区分チャート

1) 地盤性状と各比抵抗との相関図の作成

選定した各地点(GPS 座標による)における「比抵抗絶対値(通常)」および「比抵抗強調値」を解析データや解析平面図から確認し、各地点の比抵抗絶対値(通常)・強調値と地形特性・表層地盤特性の関係を確認し、表 7.3.1 に示す。この表における地盤性状は、第 1 グループは粘土・粘性土(1～8)、第 2 グループは砂・砂質土(9～18)、第 3 グループは礫質土・強風化軟岩(19～22)、第 4 グループは亀裂性岩盤・硬岩(23～25)の 4 グループに区分している。この表をもとに、各データの分散傾向から災害形態と比抵抗情報の関連性を

表 7.3.1 各地点における比抵抗と地盤状況の関係^{3),4)}

絶対値: 絶対値(通常)

グループ	検証番号	比抵抗		地形・地盤状況	
		絶対値	強調値	地形	堆積物区分・地盤
第 1 グループ	1	45	-1.98	沢源流部	湖沼堆積物・飽和粘性土
	2	60	-1.81	堰堤背後	堰堤堆積物・飽和粘性土
	3	30	-1.00	地すべり末端部	湧水帶・飽和粘性土
	4	40	-1.10	地すべり土塊上部	地すべり移動土塊・粘性土
	5	50	-0.82	泥岩スレーキング	風化泥岩・粘性土～砂質土
	6	75	-0.90	崩壊斜面	斜面崩積土・粘性土
	7	100	-0.30	堰堤	築堤土砂・粘性土～砂質土
	8	60	0.24	地すべり中央部	移動土塊・不飽和粘性土～砂質土
第 2 グループ	9	175	-1.88	急斜面滑落崖下部	崩壊堆積物・砂質土～礫質土
	10	155	-1.58	地すべり側方背面	堰堤堆積物・飽和砂質土～礫質土
	11	135	-1.48	地すべり中央部	地すべり土塊・礫質土～粘性土
	12	150	-1.48	崩壊斜面下部	湧水帶・飽和砂質土
	13	135	-0.92	地すべり中央部	地すべり移動土塊・不飽和砂質土
	14	130	0.05	高盛土背面	溪床堆積物・不飽和砂質土
	15	160	0.02	中央構造線	破碎泥岩・不飽和砂質土～礫質土
	16	185	0.20	急斜面崩壊地下部	崩積土・礫質土～岩塊
	17	140	0.05	地すべり滑落崖下部	崩積土～強風化岩・礫質土
	18	145	0.60	地すべり土塊下部	移動土塊・不飽和砂質土～礫質土
第 3	19	310	-1.00	急斜面崩壊地上部	崩積土・礫質土～軟岩
	20	285	-0.82	河床	河川堆積物～露岩・転石～軟岩
	21	295	0.20	急斜面崩壊跡地	崩積土～強風化岩・礫質土～軟岩
	22	250	0.65	地すべり滑落崖	強風化岩～風化軟岩～礫質土
第 4	23	320	0.35	急斜面滑落崖	風化帶・風化軟岩～硬岩
	24	230	1.25	斜面崩壊跡地	泥岩露頭・亀裂性岩盤
	25	410	0.95	急斜面滑落崖	砂岩泥岩互層・亀裂性岩盤

第 1 グループ：粘土・粘性土

第 3 グループ：礫質土・強風化岩

第 2 グループ：砂質土・砂

第 4 グループ：亀裂性岩盤・硬岩

以下に検討する。

i) 地盤性状区分チャートの作成

地盤物性と「比抵抗絶対値(通常)」・「比抵抗強調値」との相関を把握するために、比抵抗値と地盤物性との関係を表す相関図を図 7.3.1 に示す。この相関図の内容は、以下のとおりである^{2),3)}。

横軸：「比抵抗絶対値(通常)」と比抵抗に影響を与える主要因である体積含水率や細粒分(粘土分)含有率を示すものである。比抵抗絶対値 $125 \Omega m$ 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寒色系(グラフ右側)、低比抵抗を示す領域を暖色系(グラフ左側)として表わしている。

縦軸：「比抵抗強調値」は相対的な含水比の差の大小を示すものである。比抵抗強調値 0(白色)を基準として、飽和帶・地下水位以深を示す領域を赤色(グラフ上側)、不飽和帶・地下水位以浅の領域を青色(グラフ下側)として表わしている。

この相関図に表 7.3.1 に示す各地点の比抵抗絶対値(通常)と比抵抗強調値をプロットすると、図 7.3.2 に示すようになる。

ii) 地盤性状と比抵抗の関係整理の意義

表 7.3.1 で行ったグループ分けに基づいて、図 7.3.2 に示す各比抵抗と地盤特性の相関図から、図 7.3.3 に示す地盤性状区分のチャートを作成した。この図において、比抵抗強調値は地盤の含水状態の評価に用いており、同一の地質の広がりにおいて、含水状態が相対的に変化する場合の指標(比抵抗閾値)と仮定すると、例えば、比抵抗絶対値で高比抵抗域と低比抵抗域を区分したとしても、それぞれの飽和状態の比抵抗閾値と不飽和状態の比抵抗閾値は異なる。そのため、局部的に比抵抗の相対性を評価する「比抵抗強調値」は、独立した指標となる。したがって、現実には調査前に、地質分布や含水による比抵抗の低

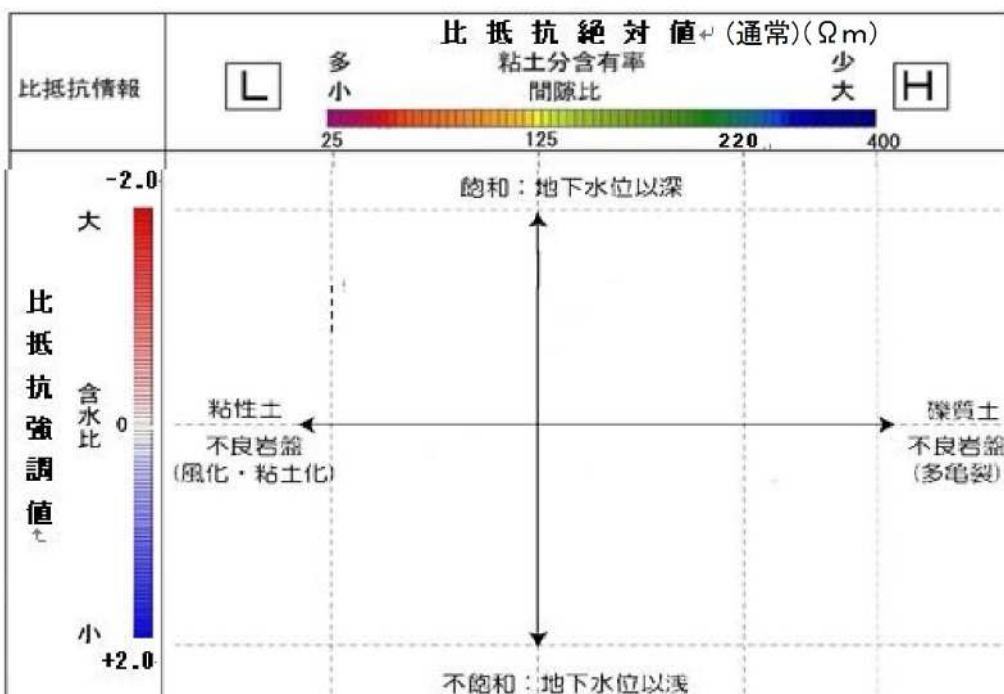
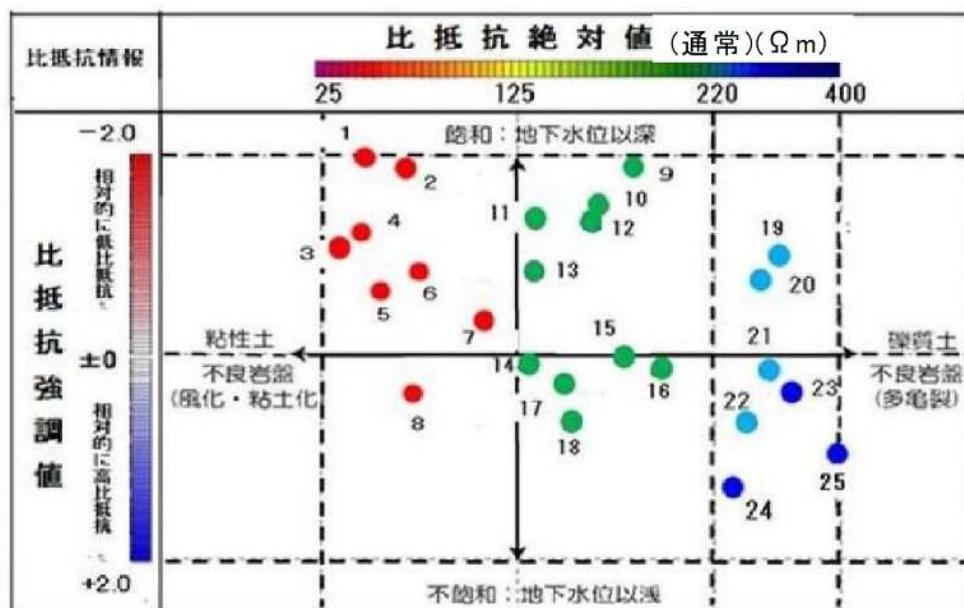


図 7.3.1 比抵抗絶対値(通常)と比抵抗強調値との相関図



第1グループ：赤丸， 第2グループ：緑丸
第3グループ：青丸， 第4グループ：藍丸

図 7.3.2 現地踏査箇所の各比抵抗と地盤特性の相関図^{2),3)}

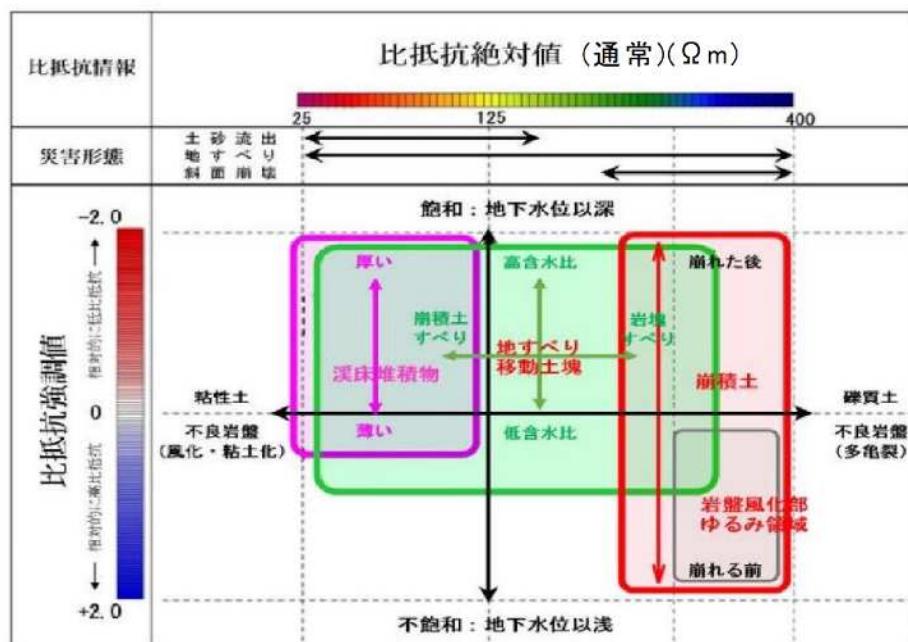


図 7.3.3 比抵抗絶対値(通常)・強調値による地盤性状区分チャート^{2),3)}

下の程度が確定できない場合に、図 7.3.3 のようなクロスプロットをすることにより、地盤性状をより詳細に区分し分析することができるようになる。

iii) 地盤性状区分チャートの特徴

図 7.3.3 の地盤性状区分チャートには、以下の関係があることが分かる。

- ① 地下水飽和帯や体積含水率の高い地盤は比抵抗絶対値が低く、比抵抗強調値は赤色域を示す相対的な低比抵抗域と一致する。このことから、地下水飽和帯や体積含水率の高い箇所を特定することができる。
 - ② 崩積土の比抵抗は土砂の粒子組成と体積含水率に依存するため、比抵抗絶対値は低～高比抵抗域の幅広い分布範囲を示す。比抵抗強調値は細粒分(粘土分)含有率が周囲の地盤よりも相対的に高いため赤色域となる。
 - ③ 崩積土の地下水位は堆積位置によって異なるので、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で、地下水位の低い斜面中腹～上部では高比抵抗域を示す。岩盤地帯でも同様であり、細粒分(粘土分)含有率の少ない中硬岩以上の岩盤で、地下水位の高い斜面では低比抵抗域となる。崩積土分布域で地下水位の低い斜面中腹～上部では、比抵抗絶対値は高比抵抗域、比抵抗強調値は青色域を示す。
 - ④ 地すべり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。比抵抗絶対値が低比抵抗域～中比抵抗域で、比抵抗強調値は赤色域に集中することから、比抵抗分布から地すべり土塊の判別が容易である。
- 一方、初生的な岩盤すべりでは、移動土塊が新鮮な岩盤状態にあり、また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。
- ⑤ 図 7.3.3 の地盤性状区分チャートから、地下水位以深の飽和帯における地盤特性は、①粘性土(風化粘性土)、②礫質土(多亀裂)の不良岩盤、③不良岩盤、および④地下水位以浅の不飽和帯における不飽和岩盤(亀裂性岩盤)の4種に区分される。ただし、これらの区分は、図 7.3.2 に示す限られたデータポイントに基づくものであり、各区分間の境界は漸移した状態にあることは十分に考えられる。

2) 地盤性状区分チャートの検証

地盤性状区分チャートの検証は、比抵抗絶対値(通常)と比抵抗強調値を用いた比抵抗分布断面図によって行う。その結果を踏まえて、比抵抗絶対値(通常)平面図と比抵抗強調値平面図を用いて地盤性状区分チャートを修正し、再検証を行った。

検証方法は、検証箇所において既往地質調査資料としての地形判読・現地踏査をはじめとするボーリング調査(地盤・地質区分、孔内水位、 N 値など)と弾性波探査や電気探査などの物理探査結果などが実施されて地盤情報(岩質・岩級、地下水位など)が把握されている斜面やのり面を用いる。この斜面やのり面において、比抵抗絶対値と比抵抗強調値を比抵抗絶対値・強調値平面図から読み取る。その結果を図 7.3.3 に示す地盤性状区分チャートにプロットし、地盤性状区分と一致しているかどうかを確認し、その妥当性を検証する。

検証結果は、各比抵抗と地盤特性の相関図の作成に用いた、表 7.3.1 に示す 25 か所以外の地すべり斜面、自然斜面と切土のり面などを対象とした。以下に、比抵抗情報と地質情報の明確な 4 か所に対する検証結果を示す。

3) 比抵抗分布断面図による検証

整合性の検証を行う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。なお、各斜面における 1-a, 1-b などの区分において、数字は斜面番号を示し、 $a \sim b$ で地形的位置に基づいた分類を示している。また、比抵抗値の平均とは、比

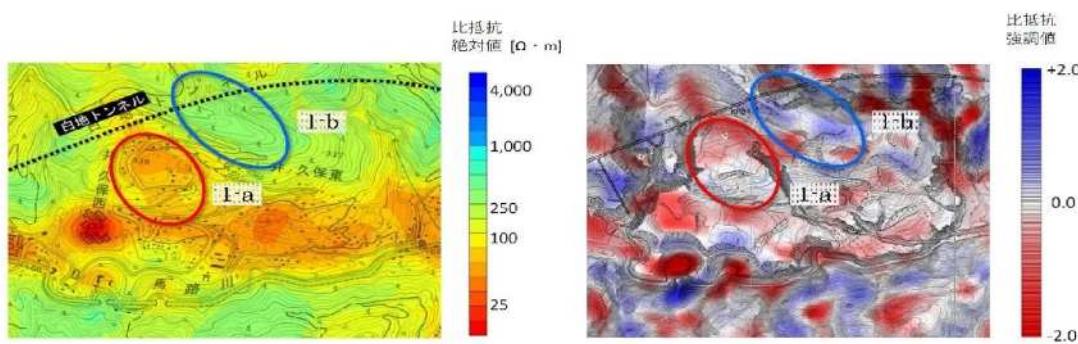
抵抗平面図の色調を概観し、その色調の示すカラーレンジの最大値と最小値の平均とする。

i) 地すべり斜面

図 7.3.4 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壊した角礫からなる。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。

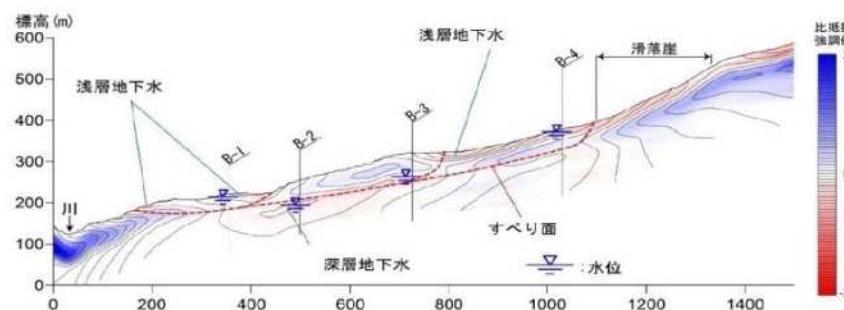
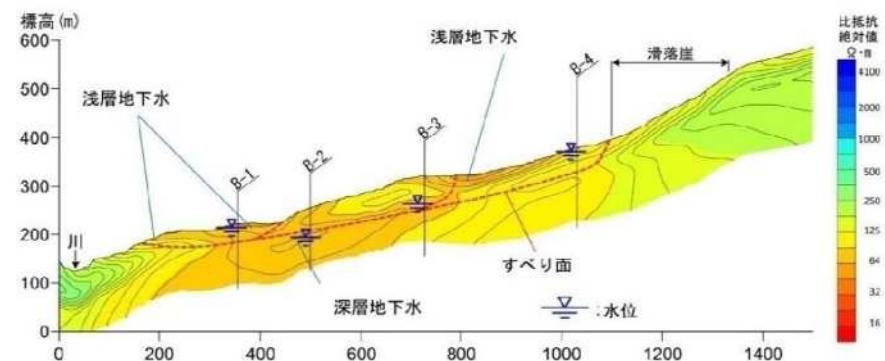
図 7.3.4 (a) ~ (c) は、それぞれ地すべりの比抵抗絶対値(通常)断面図と比抵抗強調値平面図・断面図であり、比抵抗境界線と孔内傾斜計によるすべり面の位置とは一致する。比抵抗絶対値と比抵抗強調値の分布から、大きく表層部における地すべり移動土塊領域と不動土塊領域、深部基盤岩の新鮮岩領域と断層破碎帶領域の 4 領域に分類できる。

比抵抗絶対値は、表層部の移動土塊領域では平均 $95 \Omega \cdot m$ 、不動土塊領域では平均 $310 \Omega \cdot m$ 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 $240 \Omega \cdot m$ 、深部断層破碎帶で



(a) 比抵抗絶対値(通常)分布平面図

(b) 比抵抗強調値分布平面図



(c) 上段：比抵抗絶対値(通常)表示断面図 下段：比抵抗強調値表示断面図

図 7.3.4 地すべり斜面における地盤性状区分チャートの妥当性の検証^{3.4)}

は平均 $95 \Omega m$ 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暖色域は浅層地下水を、地盤内部の暖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。各土塊の比抵抗値は以下のとおりである。なお、図7.2.2のタイプ分けでは、タイプAに分類される。

1-a	移動土塊	崩積土 磯混り粘土	飽和帶
	絶対値	62~125 Ωm	(平均 $95 \Omega m$)
	強調値	-0.2~-1.5	(平均 -0.8)
1-b	不動土塊	風化岩・破碎岩	不飽和帶
	絶対値	256~362 Ωm	(平均 $310 \Omega m$)
	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 $240 \Omega m$)
	強調値	+1.0~+2.0	(平均 +1.5)
1-d	深層不動土塊(破碎帶)		
	絶対値	62~125 Ωm	(平均 $95 \Omega m$)
	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7.3.8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、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。

ii) 凸型斜面(緩斜面+切土のり面の急斜面)

図7.3.5に示す凸型急斜面は、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 $N=6\sim 35$ と粘土分を含む軟質な砂礫層で、斜面中腹から斜面麓にかけて $20 m$ 前後と厚くなる。基盤岩は「中央構造線」の影響を受け、破碎しD級岩盤主体とする。地下水位は、急斜面部では $GL-24.7 m$ と低いが低地部の沖積錐では高水位で、一部で湧水帶や湿潤帶となる。また、この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ンドアンカーアンカーワークなどの対策工が施工されている。

図7.3.5(a)～(d)はこの斜面の比抵抗絶対値(通常)と比抵抗強調値の平面図・断面図である。この図から分かるように、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 $50 \Omega m$ 以下の低比抵抗となる。この比抵抗絶対値断面図では、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 $25\sim 30 m$ 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が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」と一致する。

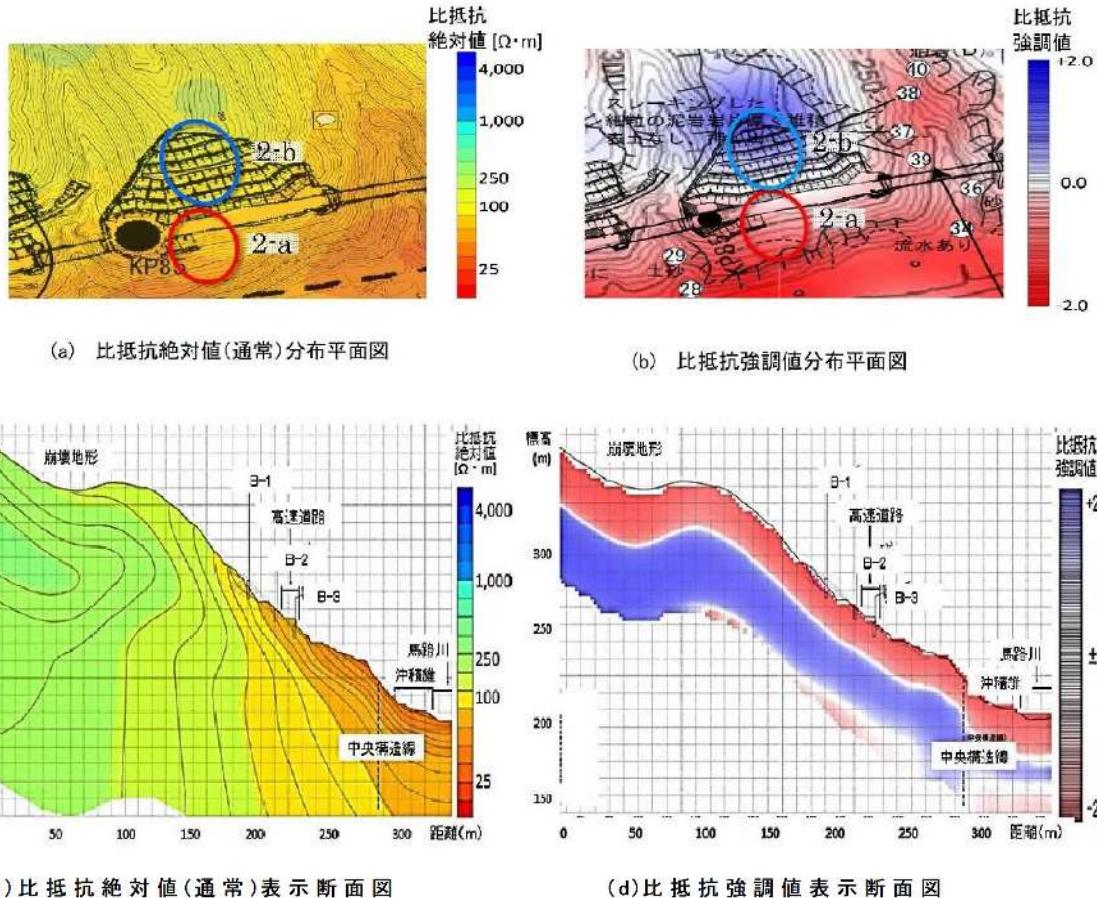


図 7.3.5 凸型斜面(緩斜面+切土のり面の急斜面)の地盤性状区分

チャートの妥当性の検証^{3),4)}

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、 $128 \Omega m$ 以上を示す尾根側領域と $128 \Omega m$ 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ように4領域に区分でき、それぞれの比抵抗値とともに示す。なお、図7.2.2のタイプ分けでは、タイプCに分類される。

2-a 斜面 崩積土 磯混り粘土 飽和帶

絶対値 $64 \sim 128 \Omega m$ (平均 $96 \Omega m$)

強調値 $-0.5 \sim -1.0$ (平均 -0.8)

2-b 切土のり面 風化岩 D級岩盤 飽和帶

絶対値 $128 \sim 256 \Omega m$ (平均 $190 \Omega m$)

強調値 $+0.2 \sim +1.5$ (平均 $+0.8$)

2-c 斜面深部基盤岩

絶対値 $128 \sim 256 \Omega m$ (平均 $190 \Omega m$)

強調値 $+0.3 \sim +1.7$ (平均 $+1.0$)

2-d 斜面麓~河床部 (断層破碎帶)

絶対値 $32 \sim 64 \Omega m$ (平均 $50 \Omega m$)

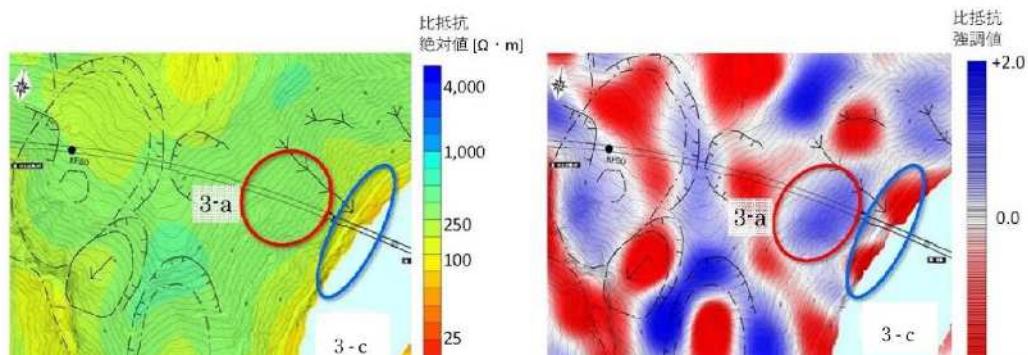
強調値 -0.7～-1.3 (平均 -1.0)

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 7.3.8 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。

iii) 平滑型急崖斜面(トンネル東坑口斜面)

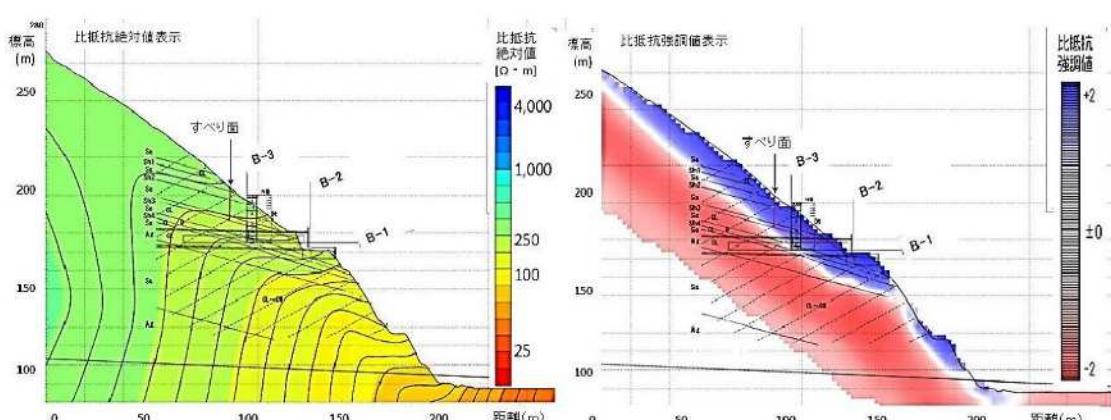
図7.3.6に示す平滑型急崖斜面は河川の攻撃斜面にあたる急崖斜面で、トンネル坑口周辺でのボーリング調査は鉛直・水平ボーリングの計3箇所実施された。この結果によれば、斜面の表土層は欠如するか、2 m以内と薄く、浅所から基盤岩の砂岩泥岩互層が分布する。泥岩は強風化を受けて土砂状コア(D級)、砂岩は短柱状コア(CL～CM級)を呈し、亀裂面は褐色化した流入粘土が充填しており、亀裂の多い岩盤に区分される。地下水位は低く、ボーリング調査位置では、地下水位や湧水は確認されていないが、斜面下方で湧水が認められ、風化岩と新鮮岩との境界を流動していることが考えられる。

図7.3.6(a)～(d)は、この斜面の比抵抗絶対値(通常)と比抵抗強調値の平面図・断面図である。比抵抗絶対値(通常)の分布は、トンネル坑口の上部で $181 \Omega \cdot m$ 以上、下部で $90 \sim 181 \Omega \cdot m$ 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 $GL - 25 m$ 付近より浅部で相対的に比抵抗が高い青色域、 $GL - 25 m$ 付近より深部で相対的に比抵抗が低い赤色域を示す。青色域では、コア状態や対策工法(垂直縫地工)およびトンネル掘削に伴う変位・変状から緩み域であると判断される。また、深部の相対的に低比抵抗を示す



(a) 比抵抗絶対値(通常)分布平面図

(b) 比抵抗強調値分布平面図



(c) 比抵抗絶対値(通常)表示断面図

(d) 比抵抗強調値表示断面図

図 7.3.6 平滑型急崖斜面(トンネル東坑口斜面)の地盤性状区分チャートの妥当性の検証^{3), 4)}

赤色域は、斜面下方の湧水位置に繋がることから地下水位を示すと考えられる。

比抵抗分布は斜面表層の風化帯と斜面深部の新鮮な基盤岩では異なり、表層部風化部と新鮮岩の比抵抗値は以下のように4領域に区分でき、それぞれの比抵抗値とともに示す。なお、図7.2.2のタイプ分けでは、タイプCに分類される。

3-a 斜面上部 風化岩 亀裂性岩盤 不飽和帶

絶対値	181～362 Ωm	(平均 270 Ωm)
強調値	+1.0～+1.5	(平均 +1.2)

3-b 深部基盤岩 (風化土砂～風化岩)

絶対値	90～181 Ωm	(平均 140 Ωm)
強調値	+1.3～+1.7	(平均 +1.5)

3-c 斜面下部 風化岩～風化土砂 飽和帶

絶対値	80～181 Ωm	(平均 130 Ωm)
強調値	-0.7～-1.3	(平均 -1.0)

3-d 深部基盤岩

絶対値	90～181 Ωm	(平均 140 Ωm)
強調値	-0.7～-1.6	(平均 -1.2)

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7.3.8に示すと、急崖斜面中央部では不飽和状態で多亀裂岩盤～緩み域を示し、それを取り囲むように飽和状態で粘土化が進んでいるゾーンが分布する。なお、この斜面と隣接する地すべり地形では、移動土塊は岩盤すべりの赤色域、不動土塊が岩盤風化域～緩み域の青色域を示し、地盤性状区分チャートの妥当性が検証された。

iv) 平滑型斜面(緩斜面+トンネル西坑口の急崖斜面)

図7.3.7に示す平滑型斜面のトンネル坑口の急崖斜面は、地質調査の結果、「中央構造線」の影響と、潜在的な大規模地すべり地内に位置する。そのため、岩質が脆弱で土砂状化し、坑口付けによって表層崩壊の恐れがあり、事前対策として垂直縫地工が施工された。坑口より上部は凹型緩斜面で、地すべり地形の側壁部にあたり、N=3～30の崩積土や風化土砂が8～15 m分布し、下部は平滑型急斜面で風化の進んだ不動地盤となる。この斜面の表層は緩い～締まった状態の砂礫層からなり、基盤岩上部は破碎を受けた風化砂岩泥岩互層の土砂～礫状コア(D級)、基盤岩下部は新鮮な砂岩泥岩互層で、礫状～短柱状主体で一部柱状コア(泥岩：D級、砂岩：CL級)からなる。地下水位は、被覆層下面付近に位置する浅層地下水と基盤岩上面に位置する深層地下水(GL-20～-22 m付近)の2形態が確認される。

図7.3.7(a)～(d)は、この斜面の比抵抗絶対値(通常)と比抵抗強調値の平面図・断面図である。比抵抗絶対値の分布は、表層部では水平構造を示し、斜面上部では150～360 Ωm の比抵抗、谷側の斜面下部では150 Ωm 以下の比抵抗を示し、基盤岩は「中央構造線」の影響を受け、鉛直構造を示す。崩積土と風化岩との境界は同じ礫質地盤であり、比抵抗絶対値では捉えにくい。比抵抗強調値の分布は、斜面上部では、基盤岩内部の風化部と新鮮部の境界が青色域と赤色域の境界として捉えられる。斜面下部では、崩積土と谷底堆積物の分布が赤色域を示す。また、斜面上部から斜面下部にかけて連なる赤色域は、含水体積率や細粒分(粘土分)含有率が高いことを示す。赤色域の分布は下に凸状構造となり、鉛直な断層破碎帯の分布を示唆している。

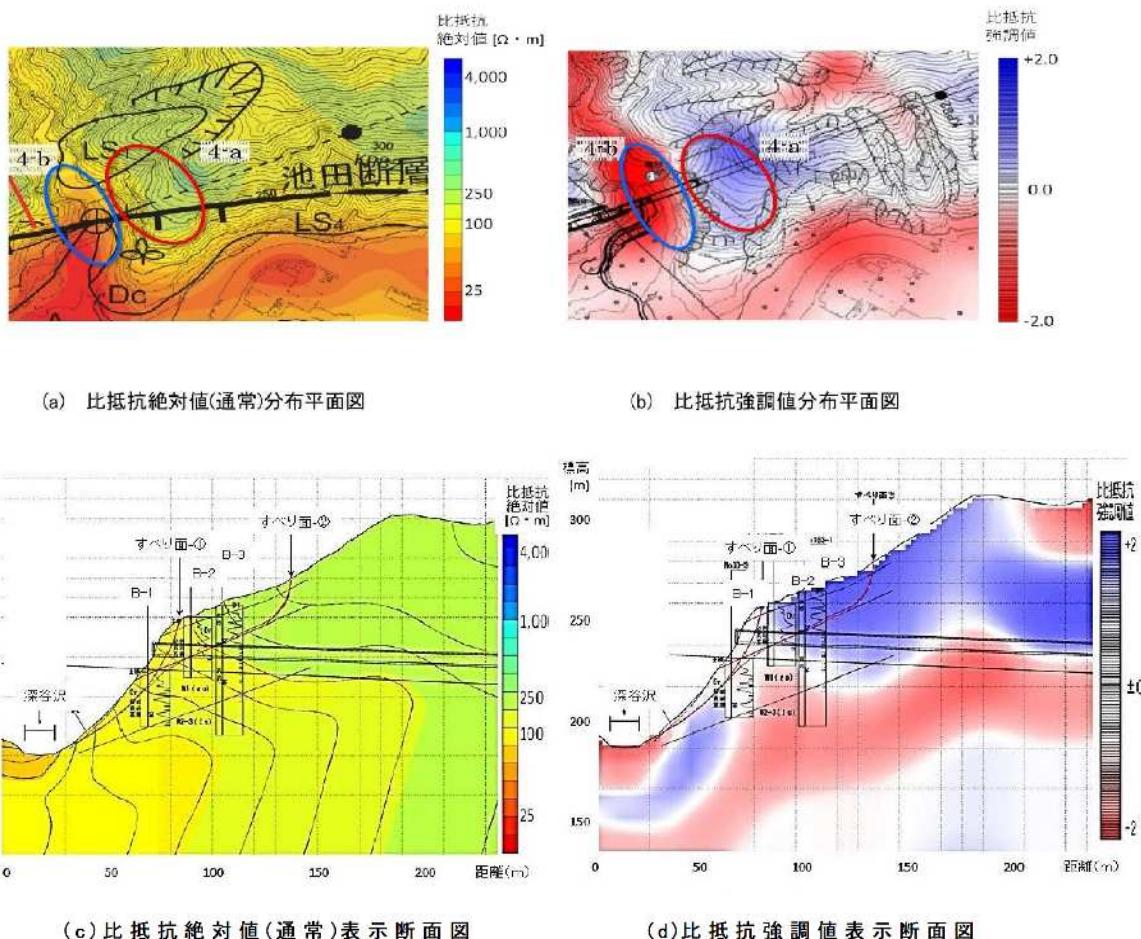


図 7.3.7 平滑型斜面(緩斜面+トンネル西坑口の急崖斜面)の地盤性状区分チャートの妥当性の検証^{3),4)}

比抵抗分布は坑口上方の緩斜面と下方の急崖斜面およびそれぞれの基盤岩に分かれ、それら4領域の比抵抗値は次のとおりである。なお、図7.2.2のタイプ分けでは、タイプAに分類される。

4-a 上部緩斜面 崩積土～風化岩・多亀裂 不飽和帶

絶対値 150～360 $\Omega\text{ m}$ (平均 255 $\Omega\text{ m}$)

強調値 +0.7～+1.7 (平均 +1.2)

4-b 下部急崖斜面 風化土砂～風化岩 飽和帶

絶対値 90～151 $\Omega\text{ m}$ (平均 130 $\Omega\text{ m}$)

強調値 -0.7～±0.0 (平均 -0.3)

4-c 上部緩斜面基盤岩

絶対値 151～362 $\Omega\text{ m}$ (平均 250 $\Omega\text{ m}$)

強調値 +0.8～+1.7 (平均 +1.3)

4-d 下部急崖斜面基盤岩

絶対値 90～151 $\Omega\text{ m}$ (平均 130 $\Omega\text{ m}$)

強調値 -0.3～-0.8 (平均 -0.6)

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7.3.8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～緩み域を示し、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。

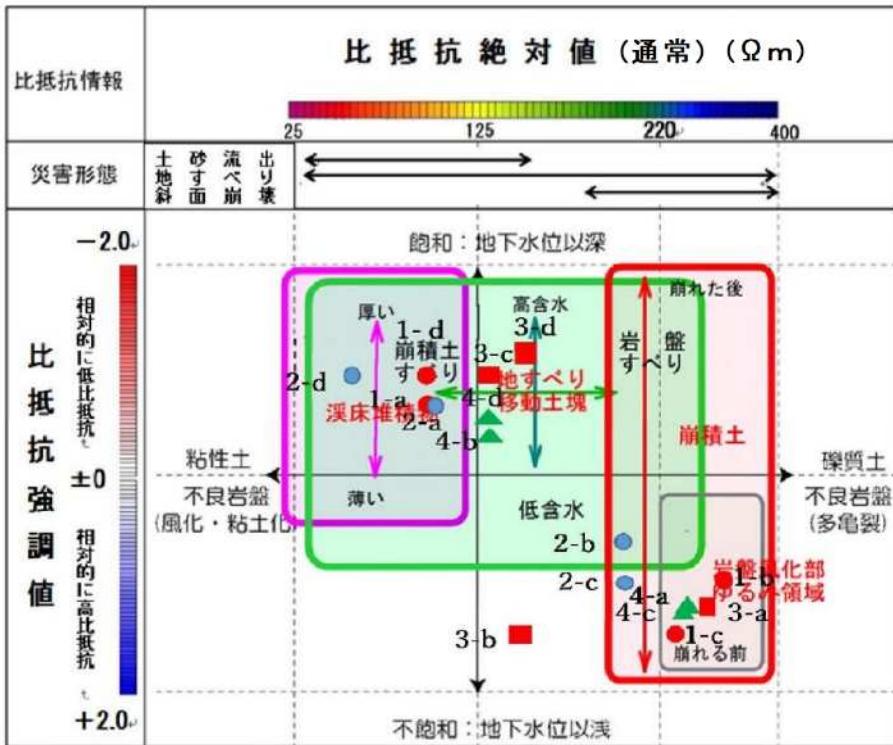


図 7.3.8 各地点における地盤性状区分チャートの妥当性の確認^{3), 4)}

(3) 比抵抗絶対値(高精度)と対数比抵抗強調値(閾値)の組み合わせによる地盤性状区分チャート

1) 各比抵抗値と地盤性状との相関図の作成

上記(2)で採用した比抵抗絶対値(通常)と比抵抗強調値による地盤性状区分チャートでは、各地盤性状の分布範囲が重複し特定しにくいことや、より広い範囲に分布する兆候も見られた。そこで、崩壊危険斜面の抽出についての精度向上を目指して、比抵抗絶対値(高精度)と対数比抵抗強調値による地盤性状区分チャートを採用することとした。その際、対数比抵抗強調値は変化度をグラデーションで示すため、どの値が有意な地盤情報であるか判読できないので、対数比抵抗強調値としては、表 7.3.2 に示すように、解析上の特異点に着目して閾値を設定した対数比抵抗強調値(閾値)を用いる^{8), 9)}。したがって、対数比抵抗強調値(閾値)表示では、既往の表示のような数値表示ではなく、上記のように地盤性状は閾値を境とする 5 区分に分類している。

i) 徳島自動車道再解析によるデータ解析

徳島自動車道における再解析の解析・表示法は、比抵抗絶対値(高精度)表示と対数比抵抗強調値(閾値)表示である。再解析は従来の観測データを用いて行ったものであり、平面位置や断面位置は従来の位置(井ノ久保地すべり・2箇所の地すべり防止対策工を実施した切土のり面・白地トンネル両坑口)と同じである。対比の方法は既存ボーリング位置における比抵抗柱状図を作成し、地盤の比抵抗に影響を与える細粒分含有量、体積含水率と間隙比に関連する地盤情報と比抵抗絶対値(高精度)および対数比抵抗強調値(閾値)を対比し、

表 7.3.2 対数比抵抗強調値表示区分の閾値および地盤性状⁹⁾

対数比抵抗強調値(閾値)表示区分	閾値 (対数比抵抗変化度)	地盤性状
比抵抗変化度増加域(濃赤色系) 区分 b(大きい変化)	+ 6.5×10^{-3} 以上～ + 13.0×10^{-3} 未満	体積含水率・粘土分含有率が低い。 亀裂性岩盤・中硬岩・硬岩
比抵抗変化度増加域(淡赤色系) 区分 a(小さい変化)	+ 0.3×10^{-3} 以上～ + 6.5×10^{-3} 未満	体積含水率・粘土分含有率がやや低い。 礫質土・強風化軟岩・軟岩
比抵抗変化度増減の境界域(白色) 区分 0(変化なし)	- 0.9×10^{-3} 以上～ + 0.3×10^{-3} 未満	体積含水率・粘土分含有率の境界域で、変化なし。
比抵抗変化度減少域(淡青色系) 区分 a(小さい変化)	- 14.0×10^{-3} 以上～ - 0.9×10^{-3} 未満	体積含水率・粘土分含有率がやや高い。 土砂、風化岩、変質帶、破碎岩等。
比抵抗変化度減少域(濃青色系) 区分 b(大きい変化)	- 28.0×10^{-3} 以上～ - 14.0×10^{-3} 未満	体積含水率・粘土分含有率が高い。 土砂、風化土砂、変質帶、破碎帶粘土等。

精度検証と比抵抗の閾値を決定している⁴⁾。

各地点の比抵抗分布の特徴について、比抵抗絶対値(高精度)と対数比抵抗強調値(閾値)を対比して示すと、以下のとおりである。

- a) 地すべり対策箇所(井ノ久保地すべり)および地すべり事前対策箇所(切土のり面)
地すべり対策箇所(82.46KP)および地すべり事前対策箇所(84.20KP, 85.10KP付近)
の3地区における検証結果を表7.3.3に示す。

- ① 比抵抗絶対値(高精度)表示：対極的な地盤構造を反映しているが、地質境界や地下水位などの物性境界は確認できない。
② 対数比抵抗強調値(閾値)表示：細粒分(粘土分)含有量や体積含水率の大小を、個別もしくは両者が融合した結果を反映している。

b) 白地トンネル東側坑口

白地トンネル東側坑口における検証結果を表7.3.3に示す。ただし、トンネル掘削によって既往調査時と空中電磁法探査による測定時とは、地下水位などの地山状態が変化している。

- ① 比抵抗絶対値(高精度)表示：岩盤は $200 \Omega m$ 以上の高比抵抗を示しており、深部に向かった低比抵抗を示す傾向があることから、浅部が緩んだ岩盤となっており、既往調査資料と調和的である。
② 対数比抵抗強調値(閾値)表示：比抵抗変化度増加域側(赤色)を示し、その割合は深部に向かって低下することから、浅部が緩んだ岩盤となっていることを示しており、既往調査結果と調和的である。

c) 白地トンネル西側坑口

白地トンネル西側坑口における検証結果を表7.3.3に示す。ただし、トンネル掘削によって既往調査時と空中電磁法探査による測定時とは、地下水位などの地山状態が変化している。

- ① 比抵抗絶対値(高精度)表示：崩積土砂は $220 \Omega m$ 以上の高比抵抗に対応するが、深部に向かって低比抵抗を示すことから、浅部が緩んだ地盤になっており、既往調査結果と調和的である。

表 7.3.3 比抵抗絶対値(高精度)と対数比抵抗強調値(閾値)との比較表⁴⁾
【徳島自動車道】

断面距離程	場所	地盤区分	比抵抗絶対値 (高精度) ()内は平均 Ωm	対数比抵抗 強調値(閾 値)区分	精度検証
KP82.46	斜面下部	1-a 風化帯	84-102(93)	減少域 区分a	土砂状風化岩(D級) 地下水なし
	斜面下部	1-b 基盤岩	102-117(110)	増加域 区分a	風化軟岩～中硬岩(CL～CM級) 地下水なし
	山麓緩斜面	1-c 崖錐層	32-45(38)	減少域 区分b	礫混り粘土 地下水あり、湧水・湿潤帶
	山麓緩斜面	1-d 基盤岩	45-64(55)	減少域 区分a	風化軟岩(D～CL級)、粘土分多い 地下水あり
KP84.20	斜面上部	2-a 風化帯	90-128(110)	減少域 区分a	土砂状軟岩(D級) 地下水位なし
	斜面上部	2-b 基盤岩	90-128(110)	増加域 区分a	風化岩(D～CL級) 地下水位なし
	斜面下部	2-c 風化帯	32-45(38)	減少域 区分b	風化破碎岩(D級) 地下水位浅い
	斜面下部	2-d 基盤岩	45-64(55)	増加域 区分b	土砂状破碎岩(D級) 地下水あり
KP85.10	斜面上部	3-a 風化帯	128-181(155)	減少域 区分a	土砂状風化岩(D級) 地下水位なし
	斜面上部	3-b 基盤岩	128-181(155)	増加域 区分a	風化軟岩(D～CL級) 地下水なし
	斜面下部	3-c 風化帯	45-64(55)	減少域 区分a	崖錐～風化土砂(D級)、粘土分多い 地下水位高い、一部湧水
	斜面下部	3-d 基盤岩	64-90(75)	減少域 区分a	風化軟岩(D～CL級) 地下水あり
白地TN 東坑口	斜面中腹	4-a 風化帯	256-362(310)	増加域 区分a	軟岩～中硬岩(CL～CM級)、亀裂多 い、地下水なし
	斜面中腹	4-b 基盤岩	181-256(220)	減少域 区分a	中硬岩(CM級)、亀裂少ない 地下水あり、トンネル底盤以下
	斜面下部	4-c 風化帯	128-181(155)	減少域 区分a	風化軟岩～軟岩(CL～CM級) 地下水あり、一部湧水
	斜面下部	4-d 基盤岩	90-128(110)	増加域 区分a	軟岩(CL～CM級) 地下水あり
白地TN 西坑口	上部緩斜面	5-a 風化帯	256-362(310)	増加域 区分b	土砂状軟岩(CM級)、亀裂多い 地下水なし
	上部緩斜面	5-b 基盤岩	128-181(155)	減少域 区分a	軟岩(CL～CM級)、亀裂多い 地下水あり、トンネル底盤以下
	下部急斜面	5-c 風化帯	128-151(140)	減少域 区分a	破碎岩、土砂状軟岩(D級) 地下水位なし
	下部急斜面	5-d 基盤岩	90-128(110)	減少域 区分b	破碎岩、土砂状軟岩(D級) 地下水あり

- ② 対数比抵抗強調値(閾値)表示：表層が比抵抗変化度増加域側(赤色)，下位が比抵抗変化度減少域側(青色)を示す。この結果，浅部は緩んだ地盤となっており，既往調査結果と調和的である。また，高い体積含水率を示す比抵抗変化度減少域側(青色)の表示の出現深度は，既往の調査時と比較して同じか低下しているが，トンネル掘削を考慮すると矛盾しない。

徳島自動車道における比抵抗分布の特徴をまとめると，以下のとおりである。

- ① 地下水(体積含水率)の分布によって，対数比抵抗強調値(閾値)が明確に区分できる。対数比抵抗強調値(閾値)表示では，地下水があり体積含水率が高い場合は比抵抗変化度減少域を，地下水がなく体積含水率が低い場合は比抵抗変化度増加域を示す。
- ② 比抵抗は土砂～土砂状軟岩($D \sim CL$ 級)では低比抵抗，軟岩～中硬岩($D \sim CL$ 級， $CL \sim CM$ 級)では高比抵抗を示す。その境界は $110 \ \Omega m$ である。 $D \sim CL$ 級， $CL \sim CM$ 級においてはその体積含水率・細粒分(粘土分)含有率によって比抵抗が区分される。
- ③ 破碎岩～破碎土砂は低比抵抗を示すが，体積含水率によって対数比抵抗強調値(閾値)表示による比抵抗変化度は大きく異なる。体積含水率が高い状態では変化度減少域区分 b ，体積含水率が低い状態では変化度増加域区分 b となる。
- ④ 亀裂があり緩み状態の中硬岩(CM 級)は高比抵抗を示すが，体積含水率状態によって対数比抵抗強調値(閾値)表示による比抵抗変化度は，体積含水率が高い状態で変化度減少域区分 a ，体積含水率が低い状態で変化度増加域区分 $a \cdot b$ を示す。

表 7.3.3 には，各比抵抗断面における地盤区分と比抵抗区分(比抵抗絶対値(高精度)・対数比抵抗強調値(閾値))の状態を示し，その精度検証の結果を併記した。

ii) 松山自動車道いよ西条 IC(92.00KP)によるデータ解析

松山自動車道いよ西条 IC(92.00KP)における検証結果を表 7.3.4 に示す。比抵抗絶対値(高精度)と対数比抵抗強調値(閾値)を対比して比抵抗分布の特徴について示すと，以下のとおりである⁵⁾。

- ① 比抵抗絶対値(高精度)表示：比抵抗 $110 \ \Omega m$ 以下のは，体積含水率や細粒分含有量の大きい崩積土砂で残存ブロックは小さくなる。 $140 \sim 160 \ \Omega m$ 程度以上の場合は，基盤岩の砂質片岩からなる移動ブロックや風化岩地すべりであり，深部になるほど比抵抗は低くなる傾向は破碎や変質が進むとともに，地下水が帶水する緩んだ岩盤を示す。
- ② 対数比抵抗強調値(閾値)表示：比抵抗変化度減少域側(青色)を示すのは，体積含水率が大きい崩積土砂で，残存ブロックが小さい。比抵抗変化度増加域側(赤色)を示すのは，浅部であり，砂質片岩の移動ブロックや風化岩地すべりであり，体積含水率は小さい。下位ほど比抵抗変化度が減少域になる傾向は緩んだ岩盤を示す。深部が比抵抗変化度増加域側となっている場合は，良好な状態にある岩盤からなる。

いよ西条 IC(92.00KP)における比抵抗絶対値(高精度)は，崩積土砂や残存小ブロックでは $110 \ \Omega m$ 以下の比抵抗に対応する。また，砂質片岩の移動ブロックは $150 \ \Omega m$ 以上の高比抵抗に対応し，深部の砂質片岩と比較して大きな値を示す。一方，対数比抵抗強調値(閾値)では，比抵抗変化度減少域側(青色系)が崩積土砂や残存小ブロックに，変化度増加域側(赤色系)は砂質片岩の移動ブロックや岩盤に対応している。

表 7.3.4 比抵抗絶対値(高精度)と対数比抵抗強調値(閾値)および既往ボーリングの比較表⁵⁾【松山自動車道いよ西条 IC】

試錐孔名	地盤区分	比抵抗絶対値(高精度) $\Omega \text{ m}$	対数比抵抗強調値(閾値)区分	境界深度	精度検証
BV16-1k	崖錐堆積物	147～154	減少域区分a	4.5m	崖錐堆積物に対応するシルト混り砂が主体で礫混り砂質土・粘性土を含む。地下水位はない。土砂 → 減少域区分: 土砂状で粘土分が多い。
	移動土塊 (D～CL級) (軟岩)	145～147	増加域区分a	12.0m	D～CL級軟岩相当の岩盤状態の移動土塊。 → 増加域区分: 地下水位がなく、粘土分が少ない。
	基盤岩 (CM級) (硬岩)	140～145	増加域区分b	15.0m	CM級相当の基盤岩で、地下水位はない。 → 増加域区分: 地下水位がなく、粘土分が少ない。
BV16-3k	表土層 (極薄層)	226<	増加域区分b	0.4m	粘性土の表土で、探知できない。難透水性地盤で地下水は分布しない。D級 → 增加域区分: 地下水位がなく、粘土分が少ない。
	移動土塊 (D～CL級) (軟岩)	203～226	増加域区分b	9.5m	移動岩塊は砂質片岩からなるが、移動土塊と基盤岩の識別や岩盤等級の相違は区分し難い。 → 増加域区分: 地下水位がなく、粘土分が少ない。
	基盤岩 (CL～CM) (硬岩)	154～167	増加域区分b	25.0m	砂質片岩で、CL～CM級の硬質岩盤からなる。
BV16-4k	崖錐堆積物	74.9>	減少域区分b	5.0m	層厚5.00mの崖錐堆積物で、粘性土の多い砂礫からなる。難透水性地盤で、地下水位は深度2.7mと浅い。 → 減少域区分: 地下水位が高く、粘土分が多い。
	移動土塊 (D級)	74.9～83.0	減少域区分b	8.0m	風化砂質片岩(割れ目沿いに風化変質。軟質) 移動岩塊: 風化ヒン岩(変質による粘土状コアが主体。下位は砂状)
	基盤岩 (土砂・軟岩)	83.0～89.7	減少域区分a	12.5m	基盤岩(深度8.0m～孔底)、風化砂質片岩(D～CL級)で、透水性地盤に対応する。 → 減少域区分: 地下水位は高く、粘土鉱物が多い。
BV16-5k	崖錐堆積物	106～110	減少域区分b	4.0m	層厚4mの崖錐堆積物で、地下水はない 粘性土に対応する。難透水性地盤。土砂
	移動土塊	106～110	減少域区分b	8.5m	基盤岩(深度4.0m～孔底) 移動岩塊で、風化砂質片岩(D～CL級)からなる。
	基盤岩 (軟岩)	102～106	減少域区分a	14.0m	D～CL級からなる風化砂質片岩の基盤岩である。上位は難透水性地盤。地下水位はない。下位のCL級は透水性地盤で、地下水位がある。 → 減少域区分: 粘土鉱物が多い。
BV16-6k	被覆層 (極薄層)	226<	減少域区分a	0.2m	被覆層は厚さ0.2mの粘性土(表土)からなる。D級
	移動土塊 (土砂・軟岩)	203～226	増加域区分b	8.0m	移動岩塊でD～CL級の砂質片岩を主体とする。 難透水性地盤からなる。 → 増加域区分: 地下水位がなく、粘土分が少ない。
	基盤岩 (CL～CM級) (硬岩)	154～161	増加域区分b	27.0m	CL～CM級の砂質片岩からなる基盤岩からなる。 移動岩塊と基盤岩との両者の識別や岩盤等級の相違は区分が困難である。透水性地盤からなる。
BV16-7k	崖錐堆積物	74.9>	減少域区分b	4.0m	崖錐堆積物、高含水の礫混り砂質シルト主体の土砂。 → 減少域区分: 高含水の粘土鉱物が多い。
	移動土塊 (土砂・軟岩)	74.9>	減少域区分b	7.5m	風化砂質片(D～CL級)岩からなる移動岩塊である。 難透水性地盤であるが、地下水位は高い。

対象地域の比抵抗分布の状態をまとめると、以下のとおりである。

- ① 比抵抗絶対値(高精度)は、地盤・岩盤状態によって明確に区分される。土砂～土砂状軟岩(D 級, $D \sim CL$ 級)では、 $110 \ \Omega m$ 以下の低比抵抗、軟岩～中硬岩($CL \sim CM$ 級, CM 級)では、 $150 \ \Omega m$ 以上の高比抵抗を示す。なお、礫状軟岩(D 級)では $150 \ \Omega m$ 程度以上、粘土を挟む亀裂性の軟岩～中硬岩($CL \sim CM$ 級)では $110 \ \Omega m$ 以下を示す場合がある。
- ② 対数比抵抗強調値(閾値)による区分では、体積含水率状態によって異なる。体積含水率が高い状態の土砂～土砂状軟岩(D 級)では、比抵抗変化度減少域区分 b を、($D \sim CL$ 級)では、変化度減少域区分 a を主体とし、体積含水率の低い状態の(CL 級)では、変化度増加域区分 a を、軟岩～中硬岩($CL \sim CM$ 級)では、変化度増加域区分 b に区分される。
- ③ ボーリング結果による地盤性状区分は、低比抵抗で比抵抗変化度減少域区分 b 、高比抵抗で変化度増加域区分 b となり、2極化が顕著である。

表 7.3.4 には、各比抵抗断面における地盤区分と比抵抗区分（比抵抗絶対値(高精度)・対数比抵抗強調値(閾値)）の状態を示し、その精度検証の結果を併記した。

2) 地盤性状区分チャートによる崩壊危険斜面の評価

選定地点の比抵抗データは、比抵抗絶対値と対数比抵抗強調値(閾値)の解析データや解析平面・断面図から確認し、地形特性・地盤特性との関係を整理した。これらの比抵抗情報と地盤物性との相関関係が分かるように、図 7.3.9 に示す相関図、すなわち「地盤性状区分チャート」を提案する。この図の横軸は比抵抗絶対値(高精度)であり、比抵抗に影響を与える主要因(風化や粘土化の程度、含水状態など)を示し、比抵抗絶対値 $150 \ \Omega m$ を境界の基準として高比抵抗域を寒色系、低比抵抗域を暖色系とする。また、縦軸は対数比抵抗強調値(閾値)区分であり、体積含水率や粘土分含有率の高低を示すもので、比抵抗変化度増減の境界域(白色)を基準として、増加域(低い体積含水率・粘土分含有率)を赤色系、減少域(高い体積含水率・粘土分含有率)を青色系とする。

地盤性状区分チャートにおける横軸の比抵抗絶対値(高精度)において、同一の地質分布での高比抵抗域と低比抵抗域を区分しても、それぞれの比抵抗は体積含水率や粘土分含有率の違いによって異なる。一方、縦軸の対数比抵抗強調値(閾値)は、局部的に比抵抗の相対性を評価する独立した指標で、地盤の含水および粘土分含有状態の相対的変化度を表す指標となる。そこで、地盤の含水状態を大掴みに捉えて、比抵抗変化度増加・減少域のそれぞれに対して、大小の変化度 2 区分(a : 小さい変化, b : 大きい変化)に分けた(表 7.3.2 参照)。したがって、事前に地質分布や含水による比抵抗低下の程度が確定できない場合は、図 7.3.9 の地盤性状区分チャートにプロットすることによって、崩壊危険斜面の地盤性状を概略的に区分できることになる。

高速道路における崩壊危険斜面の評価をするために、7.3.2(1)で選定した崩壊危険斜面で実施された地盤調査(ボーリング調査)結果をもとに、地盤性状と比抵抗情報を整理し、地盤性状区分チャートを作成する。それぞれのデータポイントを図 7.3.9 にプロットして図 7.3.10 に示す。図中の□印は徳島自動車道馬路地区、○印は松山自動車道いよ西条地区におけるデータポイントを示す。

徳島自動車道における既設対策箇所(自然斜面)と新規対策箇所(人工斜面)の地すべりに

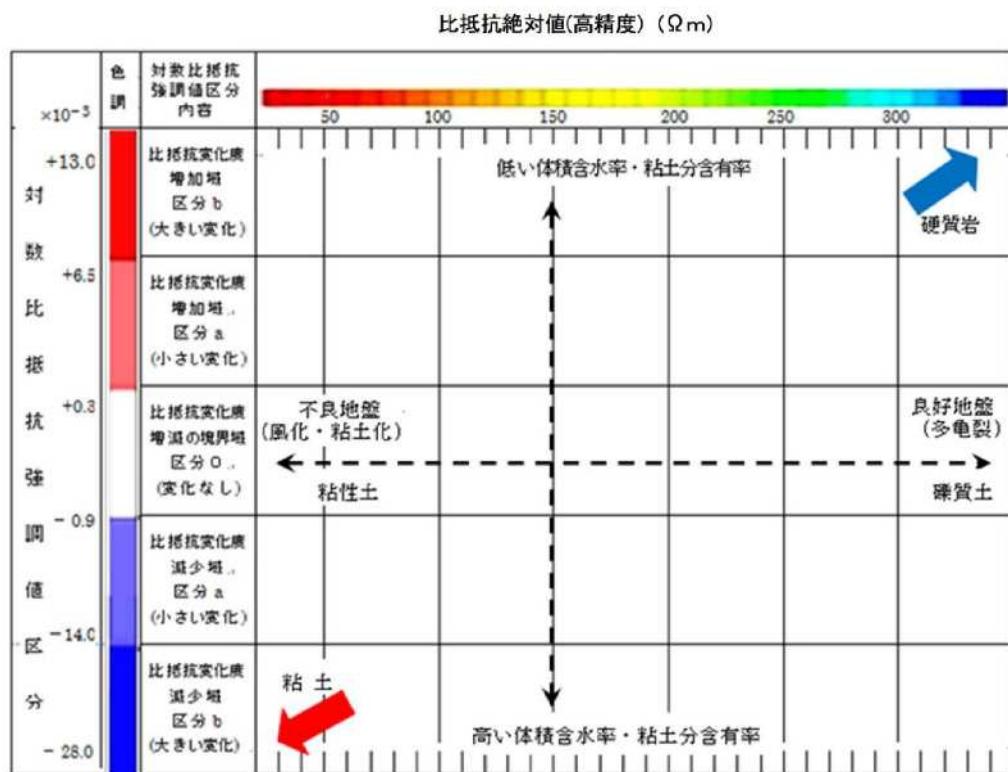


図 7.3.9 地盤性状区分チャート基本図^{8),9)}

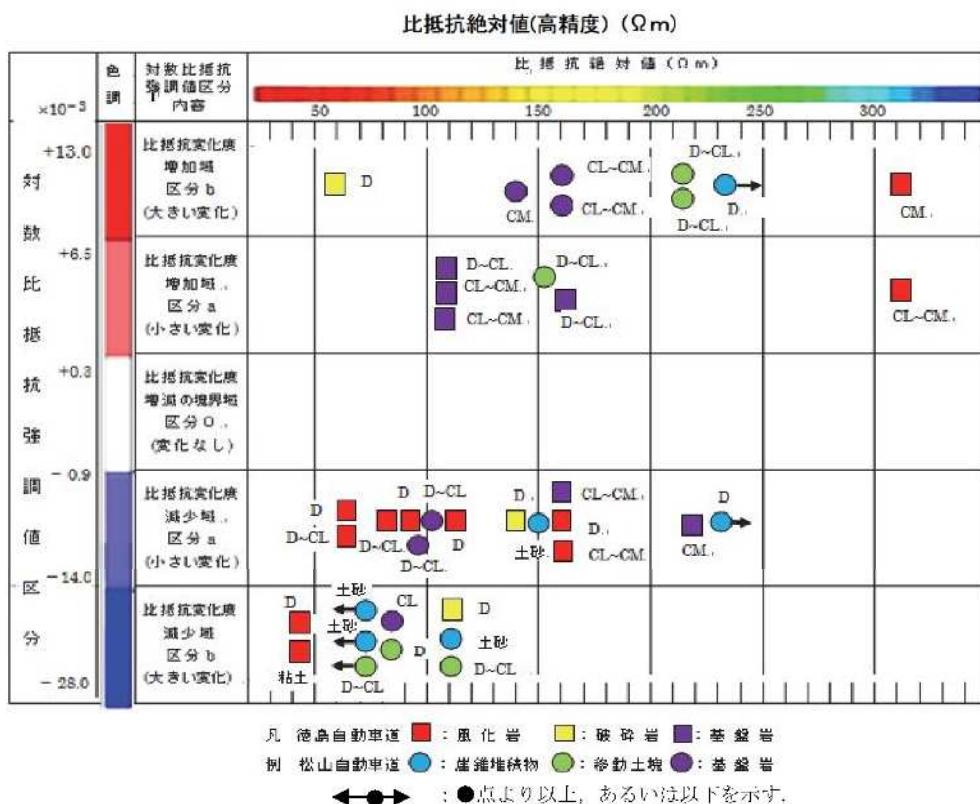


図 7.3.10 地盤性状区分チャートにおける各比抵抗と地盤特性の関係^{8),9)}
 (徳島自動車道馬路地区、松山自動車道いよ西条地区)

おける比抵抗絶対値は、土砂～土砂状軟岩($D \sim CL$ 級)では $110 \ \Omega m$ 以下の低比抵抗を示し、軟岩～中硬岩($D \sim CL$ 級・ $CL \sim CM$ 級)では風化状態、特に体積含水率や粘土分含有率によって異なるが、 $110 \ \Omega m$ 以上の高比抵抗を示す。ただし、破碎岩～破碎土砂では一部を除いては低比抵抗を示す。一方、対数比抵抗強調値(閾値)は、破碎岩～破碎土砂では体積含水率によって比抵抗変化度は大きく異なり、体積含水率の高い状態では比抵抗変化度減少域(区分 $a \sim b$)、体積含水率の低い状態では比抵抗変化度増加域(区分 $a \sim b$)に区分される。なお、亀裂があり緩み状態の中硬岩(CM 級)の比抵抗は高比抵抗を示すが、比抵抗変化度は体積含水率の高低によって大きく異なり、体積含水率の高い状態では比抵抗変化度減少域(区分 a)、体積含水率の低い状態では比抵抗変化度増加域(区分 $a \sim b$)に区分される。

松山自動車道における地すべりの比抵抗絶対値が $110 \ \Omega m$ 以下(時には $110 \ \Omega m$ を超えることもある)の場合は、体積含水率や粘土分含有率の高い崩積土砂の残存ブロックからなり、 $140 \sim 160 \ \Omega m$ 程度以上の場合は基盤岩の移動ブロックや風化岩地すべりである。深部になるにしたがって比抵抗が低くなり、破碎や変質が進むとともに、地下水が帶水する緩んだ岩盤を示す。一方、体積含水率の高い崩積土砂の対数比抵抗強調値では、比抵抗変化度減少域(区分 $a \sim b$)を示し、表層部の乾燥した体積含水率の低い土砂、基盤岩の移動ブロックや風化岩すべり土塊では、比抵抗変化度増加域(区分 $a \sim b$)を示す。深部になるほど風化の程度が小さく、比抵抗変化度増加域(区分 b)となり、体積含水率が低く、地下水が帶水する緩んだ岩盤～新鮮堅硬な岩盤となっている。

図7.3.10に示す比抵抗は岩盤特性と体積含水率や粘土分含有率によって規定され、体積含水率の高い風化岩～軟岩(D 級・ $D \sim CL$ 級)では $110 \ \Omega m$ 以下の低比抵抗、軟岩～中硬岩($CL \sim CM$ 級・ CM 級)では体積含水率の高い・低いの何れの状態でも $150 \ \Omega m$ 程度以上の高比抵抗を示す。なお、礫状軟岩(D 級)では $150 \ \Omega m$ 程度以上、粘土を挟む亀裂性の軟岩～中硬岩($CL \sim CM$ 級)では $110 \ \Omega m$ 以下を示す場合がある。対数比抵抗強調値(閾値)による区分は体積含水率の状態によって異なる。体積含水率の高い状態の土砂・ D 級では比抵抗変化度減少域(区分 b)を、 $D \sim CL$ 級では比抵抗変化度減少域(区分 a)を主体とする。体積含水率の低い状態の CL 級では比抵抗変化度増加域(区分 a)を、 $CL \sim CM$ 級では比抵抗変化度増加域(区分 b)に区分される。

3) 地盤性状区分チャートによる崩壊危険斜面の地盤区分

崩壊危険斜面の地盤性状と比抵抗区分(比抵抗絶対値(高精度)と対数比抵抗強調値(閾値))との相関に対する関係を示す図 7.3.10 のデータポイントを総合的に判断すれば、図 7.3.11 に示すように、4 ブロック(I～IV)5 区分(I a ブロック：地すべり移動土塊で風化岩・軟岩、I b ブロック：地すべり移動土塊で土砂・風化岩、II ブロック：崩積土すべりを含む渓床堆積物、III ブロック：岩盤すべりを含む崩積土、IV ブロック：岩盤の風化による亀裂性岩盤や緩み領域の岩盤)の地盤・岩盤特性に分けることができる。各ブロックの特徴は、以下のとおりである。

I ブロック：比抵抗が $110 \ \Omega m$ 以下、比抵抗変化度が減少域(区分 $a \sim b$)に区分され、さらに I a と I b に分けられる。変化の大きい I b では表土層(粘土)と破碎土砂、 D 級岩盤が主体で、体積含水率や粘土分含有率の高い地盤であり、変化の小さい I a では D 級、 $D \sim CL$ 級岩盤が主体で、全体に体積含水率や粘土分含有率のやや高い

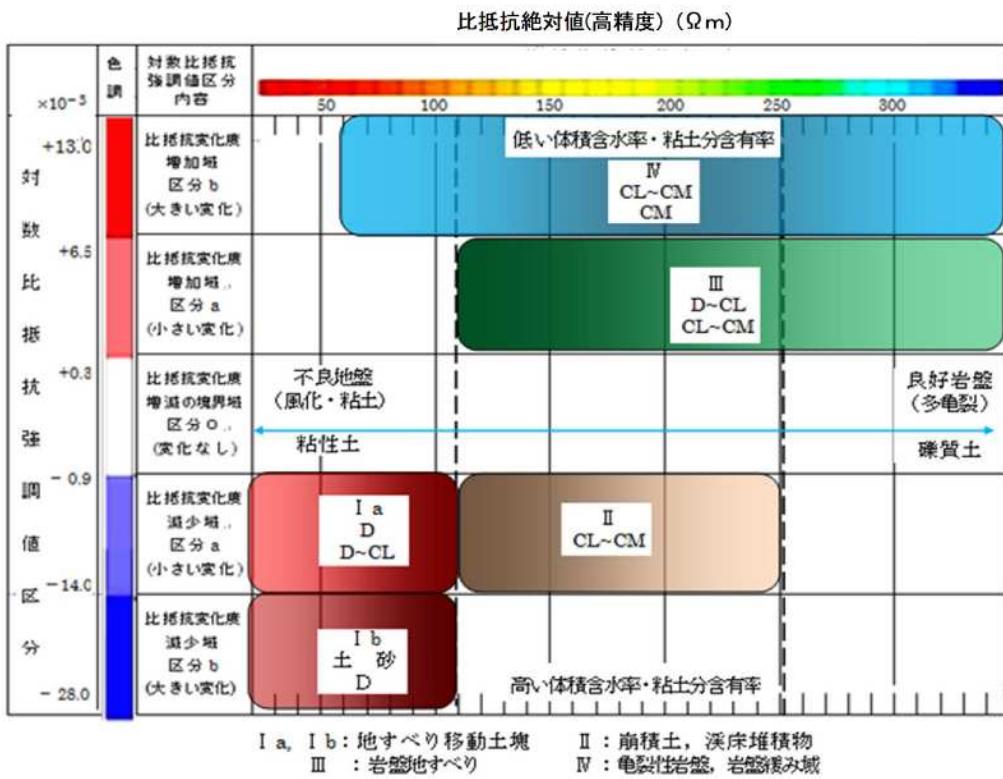


図 7.3.11 地盤性状区分チャートにおける崩壊危険斜面の地盤区分^{8),9)}

地盤である。

II ブロック：比抵抗が $110 \sim 250 \Omega\text{m}$ 、比抵抗変化度が減少域(区分 a)に区分され、 $CL \sim CM$ 級の風化岩～中硬岩(新鮮岩)からなる体積含水率や粘土分含有率のやや高い地盤である。

III ブロック：比抵抗が $110 \Omega\text{m}$ 以上、比抵抗変化度が増加域(区分 a)に区分され、 $D \sim CL$ 級、 $CL \sim CM$ 級の軟岩～中硬岩、中硬岩の新鮮岩を示す。体積含水率がやや低い地盤である。

IV ブロック：比抵抗が $60 \Omega\text{m}$ 以上、比抵抗変化度が増加域(区分 b)に区分され、主に $CL \sim CM$ 級と CM 級の硬質岩盤で、体積含水率が低い緩い状態の岩盤である。

上述のように、空中電磁法探査によって得られるデータに基づいて、比抵抗絶対値(高精度)と対数比抵抗強調値(閾値)の組み合せによる地盤性状区分チャートを活用することによって、崩壊危険斜面の地盤区分が可能となる。また、空中電磁法探査における画像の判読項目(土石流・山腹崩壊、岩盤崩壊、地すべり(風化岩・崩積土)、不安定土砂の堆積、断層破碎帯)と地形・地質要因・地盤情報と比抵抗値(絶対値(高精度)・強調値(閾値))の関係を整理すると、表 7.3.5 に示すような関係があることが分かった。

4) 地盤性状区分チャートの妥当性と有用性

地盤性状区分チャートの妥当性に関連して、表 7.3.2 で採用した閾値の一般性について述べる。閾値として比抵抗絶対値ではなく、比抵抗変化度(空間 2 次微分値)を用いているので、少なくとも一般性指標として定性的に適している。また定量的には、表 7.3.2 の閾値の決定に用いた地盤データとは異なる多数の地盤データを対象に、図 7.3.10 に示すように、地盤性状区分チャートに比抵抗データと地盤性状との関係をプロットした結果、図

表 7.3.5 判読項目と地形・比抵抗情報(空中電磁法による画像診断)

判読項目	地形	地質要因	対象とする地盤情報	比抵抗絶対値(高精度)	対数比抵抗強調値(閾値)	備考
土石流 山腹崩壊	集水型～平滑型斜面 谷沿いの山腹斜面	土砂 基盤岩の分布深度	斜面の状態変化	(表層) 低比抵抗と高比抵抗の中間領域	(表層) 増加域区分と減少域区分に挟まれた境界領域周辺	山腹崩壊を対象とする
岩盤崩壊 (岩盤すべり) (深層崩壊)	凸型斜面	開口亀裂	岩盤の緩み領域	(表層) 高比抵抗(深部) 低比抵抗	(表層) 増加域区分(深部) 減少域区分	緩み岩盤が高比抵抗異常を示す 変位地形不明瞭
地すべり (風化岩)	馬蹄形急崖頭部緩斜面	地下水すべり面	地下水 移動土塊	(移動土塊) 高比抵抗(基盤) 低比抵抗	(移動土塊) 増加域区分(基盤) 減少域区分	変位地形明瞭 地形要因が最も強く反映される
地すべり (崩積土)				(移動土塊) 低比抵抗(基盤) 高比抵抗	(移動土塊) 減少域区分(基盤) 増加域区分	
不安定土砂 層厚5m以上	緩斜面 崖錐地形 段丘地形	土砂	粘土含有量 含水量	(表層) 低比抵抗	(表層) 減少域区分	崖錐堆積物 段丘堆積物
中央構造線等 大規模断層破碎帶	リニアメント	断層 破碎帶	変質帶 破碎帶	(表層) 低比抵抗(深部) 低比抵抗	(表層) 減少域区分(深部) 減少域区分	断層破碎帶沿いの変質による不良地山範囲を判定

7.3.11 に示すように、崩壊危険斜面の地盤区分が概ね良好に表現できた。このことから、表 7.3.2 で採用した閾値の一般性、ひいては地盤性状区分チャートの妥当性が確認できる。したがって、少なくとも同種の地質条件では、表 7.3.2 の閾値は一般性をもって展開できると考える。今後、より多くの種類の地盤データを追加することにより、さらに一般性を持たすことができると考えている。

以上の結果、空中電磁探査による地盤の比抵抗情報と提案した地盤性状区分チャートを用いれば、地盤安定に悪影響を及ぼす土石流、土砂流出、地すべり、斜面崩壊、断層破碎帶などの災害要因箇所を経済的、かつ効率的に抽出することが可能である。したがって、図 7.3.12 に示す高速道路斜面の予防保全管理の流れ図において、適切な補修・対策が必要な崩壊危険斜面の抽出(スクリーニング)が可能となるので、抽出後に詳細調査を実施し対策工の実施へつなげることにより、高速道路斜面の保全管理を予防保全レベルへと進めることができる。

7.4 地盤性状区分チャートによる崩壊危険斜面のスクリーニング手法への適用

7.4.1 概説

高速道路斜面の保全管理は、現在、事後保全管理の枠内での対応となっている。今後、構造物の老朽化が進み、使用環境がますます厳しく変化することは明らかであり、限られた予算投資の中で効率的に、高速道路ネットワークの 100 % の安全・安心を確保するためには、予防保全管理に大きく足を踏み出す必要性に迫られている。予防保全管理のために、点検・補修の現在の事後保全のサイクルに加えて、適時地盤性状を把握し、性能規定で与えられる地震動や降雨の作用の下での、斜面の安定性を確保するための改良工事を実

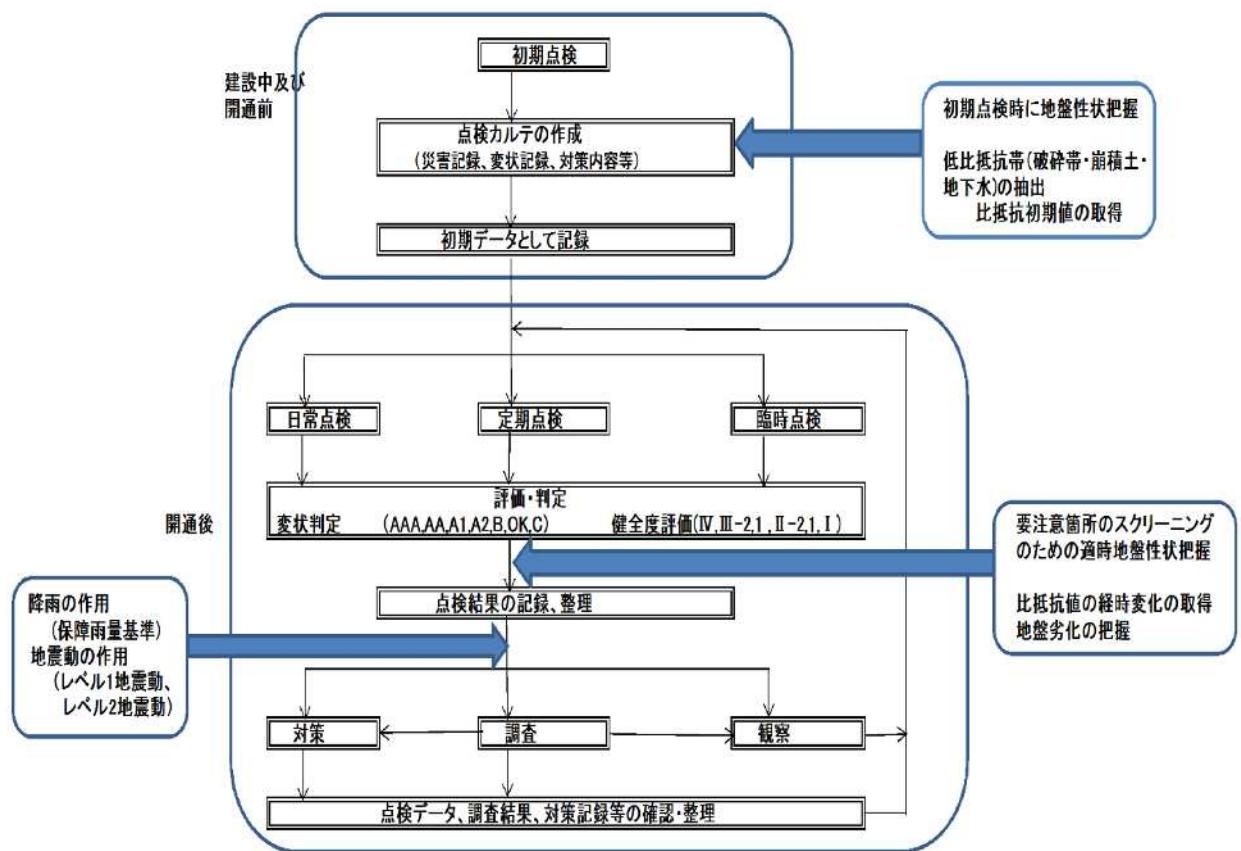


図 7.3.12 高速道路斜面の予防保全管理の流れ(再掲)³⁾

施するサイクルを確立することが必要である。その性能規定としての付与条件のもとで、高速道路斜面の安定性を検討するために地盤性状について、高速道路開通時および開通後適時、現況ならびに変化状況を把握する必要がある。しかし、高速道路のような線状構造物で広域に存在する社会インフラ(土木構造物)において、詳細調査に先立ち、調査箇所やその優先順位を決定するための概略の地盤性状を効率的に把握し、崩壊危険斜面の検討箇所や優先順位をスクリーニングする手法は確立されていなかった。したがって、高速道路斜面の新たな予防保全管理(性能規定型予防保全管理)において不可欠である、効率的な概略の地盤性状把握法についての研究を進めた意義は大きい。

しかし、高速道路は大きな資産量を保有しており、地盤性状把握が実施されても、具体的にどの斜面の安定性について詳細調査するか、優先順位はどのようにつけるかが、課題として残ることとなる。そこで、地盤性状と比抵抗値との相関性について研究を進め、崩壊危険斜面のスクリーニング手法として、地盤性状区分チャートのアイデアを実現させた。これらの成果により、高速道路斜面の予防保全管理手法が確立できたと考える。

7.4.2 高速道路の地盤調査への空中電磁法探査適用の意義

空中電磁法探査を高速道路斜面の予防保全管理に活用するに当たっては、高速道路のような広域の線状構造物においては、経費的には有利になることは想定されたが、実際測定する場合の実施条件が未知数であった。また、空中電磁法探査による解析比抵抗データが、高速道路斜面の予防保全管理を進めるうえで必要な分解能を十分有しているかについては、

明確に示されていなかった。しかし、そのような背景の下で、実際に測定条件を変えた現地測定実験を実施し、推奨される測定条件を明確にしたこと、および十分な分解能を有していることを証明した意義は大きい。すなわち、管理用地外を含めた広域の比抵抗分布に基づきリニアメントなど不良地質の可能性のある箇所や不良地盤との相関性を効率的に検出できる手法として、空中電磁法探査を高速道路の概略地盤調査として適用する意義は大きい。

7.4.3 各種の比抵抗表示法の評価

地層の比抵抗を規定するパラメータは、地層の体積含水率(飽和度×間隙率)、細粒分(粘土分)含有率、間隙水の比抵抗などであり、これらの変動に伴って比抵抗は変化する。したがって、空中電磁法探査により斜面表層や内部の地盤情報と岩盤劣化の進行や地下水の変動などをマクロ的にとらえることができる。また、空中電磁法探査で得られた地盤の比抵抗構造の妥当性は地上電気探査によって検証されている。空中電磁法探査による高速道路斜面の予防保全管理を進めるうえで、空中電磁法探査による比抵抗分布に基づいて地盤性状を解釈する際には、比抵抗表示法による影響を受ける。そこで、従来から使用されている表示法を調査するとともに、課題を解決するために、新たな3種の表示法を開発し、実際に使用して評価し、それらの有用性を確認した。

以下に、本研究の適用結果を踏まえて、各種の比抵抗表示法の評価について述べる。

- 1) 従来の比抵抗表示法は、比抵抗測定解析値そのものを表示する比抵抗絶対値(通常・高精度)表示法であり、以下の長所・短所を有する。すなわち、比抵抗絶対値(通常)表示法では配色区分において頻度分布が部分的に集中し勝ちになることから、配色区分により人為的な差異が生じ、斜面崩壊などの危険斜面の統一した色調の分布や、他地域との測定解析結果との比較ができなくなる。また、比抵抗測定解析値の頻度分布から等頻度で色区分して表示する比抵抗絶対値(高精度)表示法では、比抵抗絶対値(通常)表示より高精度に比抵抗分布を表示できる。ただし、配色区分が人為的な差異が生じるとともに、対象域の比抵抗の差が小さい場合でも細かく配色区分され、色調の違いを過大評価する可能性がある。
- 2) 比抵抗絶対値(通常・高精度)表示法の短所を補足するために、各種の検討を経て、比抵抗強調値表示法、対数比抵抗強調値表示法および対数比抵抗強調値(閾値)表示法の3種の比抵抗分布表示法を開発し、それぞれの特徴および長所・短所を実例に基づいて明らかにした。
- 3) 上記した3種の比抵抗表示法における具体的な特徴および長所・短所は以下のようであり、それぞれ高速道路の崩壊の危険性が高い斜面のスクリーニングに有用であり、用途により使い分けることを推奨する。
 - ① 3種の比抵抗表示法とも、比抵抗解析データ(比抵抗絶対値)ではなく、グリッド間の比抵抗解析データの変化量を表示する指標であり、体積含水率や細粒分(粘土)含有率などの変化を明瞭に表示することができるため、層変化位置を特定することが可能となる。
 - ② 比抵抗強調値表示法では、山地や丘陵部での変化が明瞭に表示されるスケールを用いると、平野部や谷地部での変化が明瞭に表示できなくなる。この短所は、対数比抵抗強調値表示法では解消され、山地部や平野部にかかわらず変化の表示が

明瞭になされる。

- ③ 対数比抵抗強調値表示法では、比抵抗変化度の対数区分が階調表示のため、どの値が有意な地盤情報であるかが判読できない。そのため、地盤情報を数値的に反映できるように、閾値を設定した対数比抵抗強調値(閾値)表示法へ発展させた。

7.4.4 地盤性状区分チャートの評価

高速道路斜面における崩壊危険斜面のスクリーニング手法として、以下に示す2種の地盤性状区分チャートを提案した。

- ① 比抵抗絶対値(通常)・比抵抗強調値による区分チャート

横軸：比抵抗絶対値(通常)

縦軸：比抵抗強調値

- ② 比抵抗絶対値(高精度)・対数比抵抗強調値(閾値)による区分チャート

横軸：比抵抗絶対値(高精度)

縦軸：対数比抵抗強調値(閾値)

以下に、本研究における適用結果を踏まえて、各地盤性状区分チャートの評価を述べる。

①比抵抗絶対値(通常)・比抵抗強調値の地盤性状区分チャートは、グリッド間の比抵抗値の変化量は、隣接部の平均値との変化量(比抵抗強調値)を指標とするため、空間2次微分の変化量を用いる対数比抵抗強調値より扱いやすい。しかし、図7.3.8に見られるように、物性ごとの包含範囲の重複部分が広く、特定できること、検証において範囲外へ表示されるデータが存在し範囲の拡大傾向が見られる短所を持つことを明らかにした。一方、②比抵抗絶対値(高精度)・対数比抵抗強調値(閾値)の地盤性状区分チャートでは、物性ごとの包含範囲の重複部分が少なく特定できることが明らかとなった。これらの検討により、地盤性状区分チャートの範囲に検討箇所の比抵抗解析データが含まれた場合は、崩壊の危険性が高い斜面である可能性が高いとして、現地踏査、詳細調査へ、検討を進める必要があると判断できる。今後もデータを補充して、チャートの精度向上を図るべきであるが、地盤性状区分チャートというスクリーニング手法を確立した意義は大きい。

7.5 空中電磁法探査に基づく高速道路斜面の予防保全管理への適用

高速道路斜面の保全管理は、現在事後保全管理の枠内での対応となっている。予算的制約の中で、膨大な数量の道路構造物の状態を客観的に把握・評価し、中長期的な資産の状態を予測し、アセットマネジメントの考え方を導入して、最適な対策を実施する予防保全管理への転換が急がれている。予防保全管理の実施により、道路構造物の延命化による長期の安全確保による使用可能な期間延長、補修・更新費用の平準化・最小化を図ることも可能となる。

予防保全管理のためには、図7.3.12に示すように、点検から補修へのサイクルの他に、適時地盤性状把握のうえ、性能規定時(地震動と降雨の作用)の斜面安定性を確保するサイクルを確立することが必要である。地震動の作用については、道路土工構造物基準などで、レベル1, 2 地震動と規定されているが、降雨の作用については使用状態での想定条件、つまり性能規定値を設定することが必要で、具体的に本研究で提案した。その付与条件のもとで、高速道路斜面の安定性を検討するためには、地盤性状について、高速道路開通時および開通後適時、現況ならびに変化状況を把握する必要がある。地盤性状の把握法には、

ボーリング調査、物理探査法他各種の方法があり、調査法が確立されている。しかしながら、高速道路のような線状構造物で広域に存在する社会インフラ(土工構造物)にとって、詳細調査に先立ち詳細調査箇所、優先順位を決定するため、現地に立ち入ることなく大枠の地盤性状を効率的に把握し、崩壊危険斜面をスクリーニングする手法は確立されていない。そこで、高速道路斜面の新たな予防保全管理(性能規定型予防保全管理)において不可欠な効率的に広域を調査できる概略地盤性状把握法と崩壊危険斜面のスクリーニング手法について研究した。

空中電磁法探査は2次元比抵抗探査と比較して分解能は劣るが、金属製埋設物の影響を受けにくいくこと、地表からアクセスが悪い地域を対象とする場合や、広範囲の比抵抗分布を短期間の調査で把握する場合に有効な手法といえるため、空中電磁法探査の高速道路斜面の予防保全管理への適用性を検討した。まず空中電磁法探査による比抵抗分布に基づいて地盤性状を解釈する際に必要な表示法について検討した。ところが現在用いられている表示法では、地盤性状について把握することは、不可能であった。そこで、比抵抗絶対値(通常・高精度)表示法の課題解決のために、比抵抗強調値表示法、対数比抵抗強調値表示法、および対数比抵抗強調値(閾値)表示法を開発した。しかし、比抵抗は多くの要素により変動するため、比抵抗絶対値表示あるいは比抵抗強調値表示のみから地盤性状を推定することは困難であるが、比抵抗絶対値(通常・高精度)表示と比抵抗強調値表示もしくは対数比抵抗強調値(閾値)表示を併用すれば、広域斜面・のり面の風化状態や地質構造、断層破碎帯および地すべり土塊などをマクロ的に把握できることを示した。つまり、空中電磁法探査のデータ精度については、十分満足できるものであることが示され、データ解釈に当たっては、比抵抗絶対値(通常・高精度)表示と比抵抗強調値表示もしくは対数比抵抗強調値(閾値)表示を併用すればよいことを提案した。また、膨大な資産量を持つ高速道路斜面において、具体的に詳細検討する斜面をどの様に選定するかや、優先順位のつけ方については、比抵抗解析データと現地踏査による地盤情報との関係の相関性より地盤性状区分チャートを作成した。そして地盤性状区分チャートが、崩壊危険斜面として詳細検討箇所のスクリーニング手法として有効であり、斜面崩壊などを含む比較的広い範囲の地質的問題点を平面的に抽出することに適している。空中電磁法探査の実施により、当面の崩壊危険箇所の地盤の現況のみならず、その近傍に存在するかも知れない地質的問題点を把握できるので、将来のメンテナンスを含めた総合的な判断が可能になり、今後の調査・点検の効率化・精度の向上が図れるものと考える。

これらの成果により、「新たな予防保全管理(性能規定型予防保全管理)」への空中電磁法探査の適用性が確認できるとともに、空中電磁法探査、対数比抵抗強調値(閾値)表示法などや地盤性状区分チャートを活用することにより、効率的に、地盤安定に悪影響を及ぼす土石流、土砂流出、地すべり、斜面崩壊、断層破碎帯などの災害要因を抽出することが可能となり、「新たな予防保全管理(性能規定型予防保全管理)」への手法が確立できたものと考える。

7.6 今後の課題

高速道路における「新たな予防保全管理(性能規定型予防保全管理)」への転換の必要性について述べたが、目標とする性能規定については、提案はしたもののが検証などが未実施

である。具体的に実施するためには、利用者から理解が得られ納得される妥当な基準値を設定する必要があるのでこれらの検討を進める必要がある。一方、高速道路斜面の予防保全管理を進めるために必要、かつ効率的な調査手法については、空中電磁法探査が必要要件を満足することが明らかとなった。空中電磁法探査により崩壊の危険性の高い斜面を選定するために必要な比抵抗表示法やスクリーニングのための地盤性状区分チャートを、提案した。しかしながら、十分なデータによる根拠付けが未了なため引き続きデータの集積による検証を継続する必要がある。また、比抵抗の増加・減少を区分表示する強調値系表示法の優位性は解明できたものの、選定には至っていない。数値解析法の変更によっては各種の表示法が考えられるため、表示法を追求することにより、改善につなげることが必要だと考える。

7.7 むすび

本章においては、高速道路斜面の「新たな予防保全管理(性能規定型予防保全管理)」手法を確立するために、空中電磁法探査データに基づいて、地盤性状の把握とともに、崩壊の危険性が高い斜面のスクリーニング手法を提案することにより、空中電磁法探査の適用性を検討した。その結果、空中電磁法探査データによる広域地盤性状把握の妥当性と土木地質的視点からの根拠を示すとともに、2種の地盤性状区分チャートを提示し、崩壊危険斜面のスクリーニング手法を提案した。すなわち、比抵抗絶対値(通常)・比抵抗強調値の地盤性状区分チャートは、指標値(比抵抗強調値)が扱いやすいものの、地盤性状区分の境界が重複して明確でなく、一方、比抵抗絶対値(高精度)・対数比抵抗強調値(閾値)の地盤性状区分チャートでは、地盤性状区分の境界が明確に分離され、崩壊危険斜面のスクリーニングに活用できることを明らかにした。

本章において具体的に得られた知見は、以下のとおりである。

- (1) 空中電磁法探査の比抵抗分布による広域地盤性状把握の妥当性を各種表示法により比較するとともに、斜面の比抵抗データから土木分野の地質的解釈ができる根拠を明らかにした。
- (2) 比抵抗絶対値(通常)と比抵抗強調値の情報と地盤性状との関係が把握できる地盤性状区分チャートを提案した。比抵抗絶対値スケールによる粘性土と不良岩盤(風化・粘土化)～礫質土と不良岩盤(多亀裂)、および比抵抗強調値スケールによる飽和・地下水位以深～不飽和・地下水位以浅(体積含水費の高低)の組み合せよって、① 地すべり移動土塊、② 崩積土すべりを含む溪床堆積物、③ 岩盤すべりを含む崩積土、および④ 岩盤の風化による亀裂性岩盤やゆるみ領域の4種の地盤特性に区分できることが分かった。ただし、それぞれの区分の境界が必ずしも明確でない点が短所として指摘できる。
- (3) (2)で述べた地盤性状区分チャートの短所を除くことを目指して、比抵抗絶対値(高精度)と対数比抵抗強調値(閾値)の比抵抗区分と地盤性状との関係が把握できる地盤性状区分チャートを提案した。このチャートに多数のデータをプロットしたところ、それぞれの境界が明確な4ブロック5区分に分類できた。
各ブロックの特徴は、以下のとおりである。
 - ① [地すべり移動土塊]：比抵抗が $110 \text{ } \Omega m$ 以下で、対数比抵抗変化度減少域(区

分 a および b) のブロック (I a, I b)

- ② [崩積土, 溝床堆積物] : 比抵抗が $110 \sim 250 \ \Omega m$ で, 対数比抵抗変化度減少域(区分 a)のブロック (II)
 - ③ [岩盤地すべり] : 比抵抗が $110 \ \Omega m$ 以上で, 対数比抵抗変化度増加域(区分 a)のブロック (III)
 - ④ [亀裂性岩盤, 岩盤緩み域] : 比抵抗が $60 \ \Omega m$ 以上で, 対数比抵抗変化度増加域(区分 b)のブロック (IV)
- (4) 比抵抗絶対値(通常)と比抵抗強調値による地盤性状区分チャートは, 各性状の分布範囲が重複しており特定しにくいことや, より広い範囲に分布する兆候も見られた。一方, 精度向上を目指して検討を進めた比抵抗絶対値(高精度)と対数比抵抗強調値(閾値)による地盤性状区分チャートは, 崩壊危険斜面のスクリーニング手法として地盤性状の特定に大いに寄与することを明らかにした。

[第 7 章の参考文献]

- 1) 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)報告書, 西日本高速道路エンジニアリング四国(株), 95pp., 2010.
- 2) 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, No.2018-TPC-0735, 2018.
- 3) 牧浦信一, 上出定幸, 堤浩志, 奥村稔, 小田和広, 松井保 : 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 : 地盤と建設, 地盤工学会中国支部, Vol.36, No.1, pp.17~30, 2018.
- 4) 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, 2009.
 - ・池田町馬路地区 (その 2) 第二次詳細土質調査報告書
 - ・馬路工事地質調査報告書
 - ・白地トンネル地すべり対策工調査報告書
 - ・のり面防災として要注意箇所の抽出技術開発業務報告書
 - ・地すべり事前対策地質報告書
 - ・空からの災害危険箇所の抽出方法の検討(空中電磁探査による地質調査)報告書
 - ・徳島自動車道 池田工事区関連施工記録
 - ・徳島自動車道 災害記録(災害箇所調査記録・降雨データ)
 - ・徳島自動車道 道路防災総点検記録・のり面カルテ
- 5) 日本道路公団四国支社管内 : 松山自動車道関連土質地質調査報告書, 1993~1999, 2009.
 - ・伊予三島~西条間第一次・第二次詳細土質調査報告書
 - ・平成16年度松山自動車道災害事例 (被災箇所データ・降雨データ等)
 - ・いよ西条IC地区地 災害関連緊急治山調査委託業務報告書
 - ・のり面防災として要注意箇所の抽出技術開発業務報告書
 - ・土石流災害等危険度評価検討業務報告書(空中電磁探査)
 - ・松山自動車道 池田工事区関連施工記録

- ・松山自動車道 災害記録(災害箇所調査記録・降雨データ)
 - ・松山自動車道 道路防災総点検記録・のり面カルテ
- 6) 林幸一郎, 木下篤彦, 田中健喜, 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 29 年度砂防学会研究発表会概要集, pp.62 – 63, 2017.
- 7) 道路保全技術センター: 道路防災総点検要領(豪雨, 豪雪), p.179, 2006.
- 8) 牧浦信一, 上出定幸, 堤浩志, 奥村稔, 小田和広, 松井 保: 高速道路斜面の予防保全管理のための空中電磁法探査の利用,Kansai Geo-Symposium 2019, P-01, 地盤工学会関西支部 地下水地盤環境に関する研究協議会, 2019.
- 9) 牧浦信一, 上出定幸, 櫻谷慶治, 奥村稔, 小田和広, 松井保: 高速道路斜面の予防保全管理への空中電磁探査の適用, 土木学会論文集 F4(建設マネジメント), Vol.77, No.1, pp.83-95, 2021.

第8章 結論

高速道路斜面の保全管理は、これまで事後保全管理で対応してきたが、経年劣化に伴い高速道路構造物の老朽化、降雨形態などの環境の悪化や災害の甚大化が進行する現況において、限定した予算の中で、効率的に高速道路ネットワークの安全・安心を確保するためには、土工構造物をはじめとする各種構造物において、予防保全管理への転換が要求されている。

高速道路斜面の安定性を確保するための地盤性状の把握は、従来の地質調査法が採用されている。しかし、広域にわたる線状構造物として存在する高速道路斜面および切土・盛土などの土工構造物の詳細調査に先立ち、対象調査箇所をスクリーニングし、優先順位を決定するための効率的な地盤性状の概略調査手法は確立されていない。そこで、広域に分布する高速道路斜面の地盤性状を迅速、効率的かつ経済的に把握する手法の開発が、喫緊の課題となっていた。

これまでの地盤情報は、日常的に行われている地盤調査における調査ボーリング（サンプリング、原位置試験など）や物理探査などの種々の方法で、調査の目的や対象となる地盤性状によって使い分けられ、また新しく開発されたセンシング技術も活用されつつある。その中で、浅層探査が比較的精度よく可能となった空中電磁法探査に着目して、高速道路斜面の地盤性状把握への予防保全管理における適用性について、検討を進めその適用性を明らかにした。

空中電磁法探査による比抵抗分布に基づいて地盤性状を解釈する際に、比抵抗表示法が重要な要素となる。既往の比抵抗表示法を検討したところ課題が見られたために、比抵抗強調値表示法、対数比抵抗強調値表示法、および対数比抵抗強調値(閾値)表示法を開発し、それらの特徴および長所・短所を明らかにすることにより評価した。

また、高速道路斜面の予防保全管理を進めるうえで、高速道路は大きな資産量を保有しており、地盤性状把握が実施されても、具体的にどの斜面の安定について詳細調査するか、優先順位はどのようにつけるかが、課題として残ることとなる。そこで、地盤性状と比抵抗値との相関性について研究を進め、地盤性状区分チャートを崩壊危険斜面のスクリーニング手法として、提案した。

第1章は、本研究の背景と目的を示すとともに、本論文の構成について述べた。

第2章において、高速道路の果たす役割および置かれている過酷な環境について、調査・検討した。それらの状況の中で、高速道路交通の安全性を確保するために実施されているNEXCO3社の保全管理について整理し、課題について明らかにした。現状の課題を解消するには、国土交通省により制定された「道路土工構造物技術基準」に取り上げられた性能規定の採用および予防保全管理への転換が重要であることを示した。性能規定型予防保全管理の「新たな予防保全管理」の試案を提案するとともに、実施に当たり高速道路斜面の効率的な地盤性状把握法および崩壊の危険性が高い斜面のスクリーニング手法の研究が不可欠であることを示した。

本章において具体的に得られた内容は、以下のとおりである。

- (1) 高速道路は、全道路の延長比で 0.7 % であるが、トラック輸送が我が国の物流（出荷量）の 75 % を担い、うち件数比 41 % が高速道路経由で輸送されており、社会

を支える重要な役割を担っている。

- (2) 高速道路は名神高速道路（栗東～尼崎）間の開通より順次延伸したが、開通から30年以上経過した区間が約4割となり、経年劣化により老朽化が進んでいる。そのうえ、建設時の設計条件以上の過酷な使用条件下にあること、自然災害の増加など厳しい環境にさらされている。
- (3) 高速道路延長の74%が土工区間であり、過去の災害データより土工区間の安全確保は重要である。NEXCO3社においては、のり面点検による保全や降雨通行規制による道路管理を実施しているが、平成28（2016）年度は災害・悪天候による通行止めが平均11時間/年となり、通行止め以前の災害発生も見られるなど、喫緊に解決すべき課題が残っている。
- (4) 高速道路のライフサイクルコスト最小化を図るため、予防保全管理への転換が必要である。国土交通省により制定された「道路土工構造物技術基準（平成27（2015）年4月）」において、性能規定の考え方を取り入れられており、地震動の作用については規定されているため、降雨の作用について試案を示した。
- (5) 「新たな予防保全管理（性能規定型予防保全管理）」の流れ図を提案し、課題解決への方向性を示した。降雨の作用については、重要度に応じた保証雨量を設定すれば、タンクモデルにより推計可能であることが各種文献より明らかため、このようなシステム構築には、高速道路沿線の広域の効率的な地盤性状把握法および崩壊の危険性が高い斜面のスクリーニング手法が不可欠であることを指摘した。

第3章において、高速道路の保全管理を事後保全の段階から予防保全の段階へ進めるのに必要な地盤性状の把握手法を確立するために、調査ボーリング（サンプリングや原位置試験などを含む）や物理探査について調査・検討するとともに、その適用性を明らかにした。その結果に基づいて、高速道路斜面の予防保全管理を実施するうえで、崩壊の危険性が高い斜面をスクリーニングするための地盤性状把握においては、現状で空中電磁法探査が最も有望であると判断するとともに、将来においては、空中物理探査システム（空中電磁法探査、空中磁気探査、空中放射能探査など）による複数の探査データを用いた総合的な地盤性状把握手法へと発展させる方向性を指摘した。

本章において具体的に得られた内容は、以下のとおりである。

- (1) 調査ボーリングやサウインディングの高精度化に対する課題を指摘した。すなわち、斜面のすべり面や亀裂、地下水性状ならびに物理・力学特性などの地盤特性を正確に捉え、また孔内での原位置試験や諸検層を行うために、最良のコア採取と孔壁を作成する必要がある。そのために、通常のコア採取手法に変わる高品質の掘削技術（削孔技術とコア採取技術）の採用が必要となる。なお、これらの調査法は点としての情報であり、個々の斜面で多数の調査が必要であり、調査に対し多くの費用と時間がかかる。
- (2) 地表からの探査あるいはボーリング孔を利用した探査による地表物理探査法を、広域の線状構造物である高速道路へ適用する場合の課題を指摘した。すなわち、地表物理探査法は、地表面に測線を設置して探査するので精度がよい一方で、広域の探査では、広域に測線を設置しなければならず、作業上も経済性も効率が悪く、多くの困難を伴う。また、これらの調査法は測線に沿っての線としての情報であり、

断層破碎帯などの重要な情報を漏れなく把握するためには、地表からの探査においては、探査対象物の大きさや地盤状況により探査手法を検討する必要がある。その上、調査地点については立ち入る必要があり、管理用地外や急峻な地形については、課題が多い。ボーリング孔を利用するには、複数のボーリング孔を設置するための経費がよりかさむこととなる。

- (3) 空中電磁法探査を高速道路斜面における地盤性状把握手法とするまでの利点を指摘した。すなわち、空中から面としての情報を把握できるため、断層破碎帯などの重要な情報を漏れなく把握できる。また、現地に立ち入る必要がないため、管理用地外や急峻な地形についても、適用可能である。広域の線状構造物の高速道路に適用しても、効率的に、経費的にも安価に地盤性状把握が可能である。なお、調査ボーリングや地表からの探査に比べ分解能は劣るもの、崩壊の危険性が高い斜面のスクリーニングするための地盤性状把握法としては、十分な精度を有すると考えられる。
- (4) 以上の結果、広域の線状構造物である高速道路斜面における地盤性状の把握および崩壊の危険性が高い斜面のスクリーニング手法の基本データとすべく、空中電磁法探査を選定し、第4章以降の検討を進める。
- (5) 将来においては、空中電磁法探査のみならず、空中電磁法探査、空中磁気探査、空中放射能探査などを同時に測定する空中物理探査システムによる複数の探査データに基づいて、総合的に地盤性状を解析・把握する手法へと発展させる方向性を指摘した。

第4章では、まず高速道路に沿う斜面の予防保全の一環の地盤性状把握手法として、空中電磁法探査の概要および特徴としての地盤調査の新規性、ならびに比抵抗と地盤物性の一般的な関係および判読できる地盤情報について述べるとともに、比抵抗分布表示法の開発を行った。その結果、空中電磁法探査の優位性と課題を明らかにするとともに、各種の比抵抗表示法の特徴および長所・短所を明らかにした。

本章で具体的に得られた内容は、以下のとおりである。

- (1) 空中電磁法探査による地盤調査は、帶状で広範な高速道路周辺の斜面における3次元的な比抵抗状況を、効率的に把握でき、かつ得られる地盤の比抵抗は、岩石や土の組成、破碎帯および亀裂に伴う間隙率、飽和度、地下水の比抵抗、風化および変質に伴う細粒分(粘土鉱物)含有量などによって変化するので、高速道路の崩壊の危険性が高い斜面のスクリーニングに有用な基本データとなり得ることを示した。
- (2) 従来の比抵抗表示法は、比抵抗測定解析値そのものを表示する比抵抗絶対値(通常・高精度)表示法であり、以下の長所・短所を有する。すなわち、比抵抗絶対値(通常)表示法では配色区分において頻度分布が部分的に集中し勝ちになることから、配色区分により人為的な差異が生じ、斜面崩壊などの危険斜面の統一した色調の分布や、他地域との測定解析結果との比較ができなくなる。また、比抵抗測定解析値の頻度分布から等頻度で色区分して表示する比抵抗絶対値(高精度)表示法では、比抵抗絶対値(通常)表示より高精度に比抵抗分布を表示できる。ただし、配色区分が人為的な差異が生じるとともに、対象域の比抵抗の差が小さい場合でも細かく配色区分され、色調の違いを過大評価する可能性がある。

- (3) 比抵抗絶対値(通常・高精度)表示法の短所を補足するために、各種の検討を経て、比抵抗強調値表示法、対数比抵抗強調値表示法および対数比抵抗強調値(閾値)表示法の3種の比抵抗分布表示法を開発し、それぞれの特徴および長所・短所を実例に基づいて明らかにした。
- (4) 上記した3種の比抵抗表示法における具体的な特徴および長所・短所は以下のようであり、それぞれ高速道路の崩壊の危険性が高い斜面のスクリーニングに有用であり、用途により使い分けることを推奨する。
 - ① 3種の比抵抗表示法とも、比抵抗解析データ(比抵抗絶対値)ではなく、グリッド間の比抵抗解析データの変化量を表示する指標であり、体積含水率や細粒分(粘土)含有率などの変化を明瞭に表示することができる。
 - ② 比抵抗強調値表示法では、山地や丘陵部での変化が明瞭に表示されるスケールを用いると、平野部や谷地部での変化が明瞭に表示できなくなる。この短所は、対数比抵抗強調値表示法では解消され、山地部や平野部にかかわらず変化の表示が明瞭になされる。
 - ③ 対数比抵抗強調値表示法では、比抵抗変化度の対数区分が階調表示のため、どの値が有意な地盤情報であるかが判読できない。そのため、地盤情報を数値的に反映できるように、閾値を設定した対数比抵抗強調値(閾値)表示法へ発展させた。

第5章では、高速道路斜面における空中電磁法探査の適用実験、ならびに供用路線の自然斜面や切土・盛土のり面(人工斜面)で調査実験を行い、測定条件の相違(測定高度、測線間隔の違いによる分解能などの精度)、探査障害物(斜面に設置されているグラウンドアンカー工・ロックボルト工などの金属製埋設物)の影響について検討するとともに、空中電磁法探査で得られた地盤の比抵抗構造の適用性について、地上電気・電磁法探査での比抵抗データによって検証した。その結果、空中電磁法探査の測定高度および測線間隔の推奨範囲を明らかとともに、空中電磁法探査で得られた比抵抗への金属埋設物による影響がないことを明らかにした。

本章で得られた主な具体的知見は、以下のとおりである。

- (1) 空中電磁法探査における測定高度については、測定高度を高くすると、データの取り込み範囲と探査深度が増大し、平滑化が広がることにより分解能が低下することを示すとともに、分解能などの精度の面から、測定高度は30~50 m程度が推奨されることを明らかにした。
- (2) 空中電磁法探査における測線間隔については、25 mと50 mとの実験データの比抵抗ヒストグラムに大差がないことを示すとともに、高速道路の切土のり面規模を考慮して、25 mの測線間隔を採用することが推奨されることを明らかにした。
- (3) 比抵抗2次元探査・地上電磁法探査の結果と空中電磁法探査結果を対比した結果、比抵抗2次元探査などでは補強材などの金属製埋設物の影響を受けるが、空中電磁法探査ではその影響を受けないことを明らかにした。

第6章においては、各種比抵抗表示法を舞鶴若狭自動車道、徳島自動車道、および松山自動車道における種々の地盤に適用して検証した。すなわち、高速道路に沿って分布する斜面で実施した空中電磁法探査によって取得した比抵抗情報に基づいて、地域・区間に分布する斜面の地形・地質特性を踏まえた地形判読結果と対比し、地表部の面的な比抵抗情

報から読み取れる地盤性状について、既往地質調査資料および現地踏査から得られた地質・岩質・地下水などの地盤情報を用いて比較し、空中電磁法探査による比抵抗分布データの精度を各種の比抵抗表示法により検証した。

その結果、比抵抗絶対値(通常)表示法、比抵抗絶対値(高精度)表示法、比抵抗強調値表示法、対数比抵抗強調値表示法、および対数比抵抗強調値(閾値)表示法において、それぞれ単独の解析データのみでは、得られる情報が限られて地盤性状の把握や構造の判別が必ずしも明確ではないが、比抵抗絶対値(通常・高精度)表示法と比抵抗強調値表示法もしくは対数比抵抗強調値(閾値)表示法を併用することにより、地盤性状の把握や構造の判別がより明確に行うことができるなど開発した表示法の有用性を確認した。

本章において得られた結果を具体的にまとめると、以下のとおりである。

- (1) 比抵抗絶対値(高精度)表示では、斜面表層部の水平方向の構造が「中央構造線」の影響を受ける範囲では鉛直構造に変化することが明らかになるなど、比抵抗絶対値(通常)表示より高精度であることを確認した。
- (2) 比抵抗絶対値表示では、崩積土と風化を受けた基盤岩の境界は捉えにくいが、比抵抗強調値表示、および対数比抵抗強調値(閾値)表示では、斜面上の風化部と新鮮部の境界が、相対的高比抵抗域と相対的低比抵抗域の境界として捉えられることを確認した。
- (3) 比抵抗絶対値(高精度)表示では、土石流危険渓流や山腹斜面崩壊における低比抵抗域により、体積含水率や細粒分含有率の高い未固結堆積物または盛土の分布が反映され、地下水が多い湿潤な環境を示すことを確認したが、湿潤な岩盤と未固結堆積物の判別は困難である。しかし、対数比抵抗強調値(閾値)表示を併用することにより、破碎帯、変質帯、地下水状況(体積含水率・細粒分含有量)を反映し、崩壊地は比抵抗変化度増減の境界域から増加域としてとらえられることを確認した。
- (4) 比抵抗絶対値(高精度)表示では、地すべり地における低比抵抗域には、厚い未固結堆積物または湿潤状態の岩盤が分布することを確認した。一方、対数比抵抗強調値(閾値)表示では、湿潤な岩盤と未固結堆積物の判別が比抵抗変化度減少域や増加域として示されることを確認した。
- (5) 比抵抗絶対値(通常・高精度)表示法と比抵抗強調値表示法もしくは対数比抵抗強調値(閾値)表示法の比抵抗解析データを併用することにより、土石流・山腹崩壊、岩盤崩壊、地すべり、不安定土砂、大規模断層破碎帯の5項目について、検討し抽出が可能であることを確認した。

第7章においては、高速道路斜面の「新たな予防保全管理(性能規定型予防保全管理)」手法を確立するために、空中電磁法探査データに基づいて、地盤性状の把握とともに、崩壊の危険性が高い斜面のスクリーニング手法を提案することにより、空中電磁法探査の適用性を検討した。その結果、空中電磁法探査データによる広域地盤性状把握の妥当性と土木分野の地質的視点からの根拠を示すとともに、2種の地盤性状区分チャートを提示し、崩壊危険斜面のスクリーニング手法を提案した。すなわち、比抵抗絶対値(通常)・比抵抗強調値の地盤性状区分チャートは、指標値(比抵抗強調値)が扱いやすいものの、地盤性状区分の境界が重複して明確でなく、一方、比抵抗絶対値(高精度)・対数比抵抗強調値(閾値)の地盤性状区分チャートでは、地盤性状区分の境界が明確に分離され、崩壊危険斜面のス

クリーニングに活用できることを明らかにした。

本章において具体的に得られた知見は、以下のとおりである。

- (1) 空中電磁法探査の比抵抗分布による広域地盤性状把握の妥当性を各種表示法により比較するとともに、斜面の比抵抗データから土木分野の地質的解釈ができる根拠を明らかにした。
- (2) 比抵抗絶対値(通常)と比抵抗強調値の情報と地盤性状との関係が把握できる地盤性状区分チャートを提案した。比抵抗絶対値スケールによる粘性土と不良岩盤(風化・粘土化)～礫質土と不良岩盤(多亀裂)，および比抵抗強調値スケールによる飽和・地下水位以深～不飽和・地下水位以浅(体積含水費の高低)の組み合せよって、① 地すべり移動土塊，② 崩積土すべりを含む渓床堆積物，③ 岩盤すべりを含む崩積土，および ④ 岩盤の風化による亀裂性岩盤やゆるみ領域の 4 種の地盤特性に区分できることが分かった。ただし、それぞれの区分の境界が必ずしも明確でない点が短所として指摘できる。
- (3) (2)で述べた地盤性状区分チャートの短所を除くことを目指して、比抵抗絶対値(高精度)と対数比抵抗強調値(閾値)の比抵抗区分と地盤性状との関係が把握できる地盤性状区分チャートを提案した。このチャートに多数のデータをプロットしたところ、それぞれの境界が明確な 4 ブロック 5 区分に分類できた。
各ブロックの特徴は、以下のとおりである。
 - ① [地すべり移動土塊]：比抵抗が $110 \ \Omega m$ 以下で、対数比抵抗変化度減少域(区分 a および b)のブロック(I a , I b)
 - ② [崩積土、渓床堆積物]：比抵抗が $110 \sim 250 \ \Omega m$ で、対数比抵抗変化度減少域(区分 a)のブロック(II)
 - ③ [岩盤地すべり]：比抵抗が $110 \ \Omega m$ 以上で、対数比抵抗変化度増加域(区分 a)のブロック(III)
 - ④ [亀裂性岩盤、岩盤緩み域]：比抵抗が $60 \ \Omega m$ 以上で、対数比抵抗変化度増加域(区分 b)のブロック(IV)
- (4) 比抵抗絶対値(通常)と比抵抗強調値による地盤性状区分チャートは、各性状の分布範囲が重複しており特定しにくいことや、より広い範囲に分布する兆候も見られた。一方、精度向上を目指して検討を進めた比抵抗絶対値(高精度)と対数比抵抗強調値(閾値)による地盤性状区分チャートは、崩壊危険斜面のスクリーニング手法として地盤性状の特定に大いに寄与することを明らかにした。

第8章は、本研究の目的、内容および結果を総括した。

[本研究に関連した研究成果]

- 1) 牧浦信一, 上出定幸, 櫻谷慶治, 奥村稔, 小田和広, 松井保:「高速道路斜面の予防保全管理への空中電磁探査の適用」, 『土木学会論文集』F4(建設マネジメント), Vol.77, No.1, pp.83-95, 2021.
- 2) 牧浦信一, 上出定幸, 堤浩志, 奥村稔, 小田和広, 松井 保: 「高速道路斜面の予防保全管理のための空中電磁法探査の利用」, 『Kansai Geo-Symposium 2019』, P-01, 地盤工学会関西支部 地下水地盤環境に関する研究協議会, 2019.
- 3) 牧浦信一, 上出定幸, 堤浩志, 奥村稔, 小田和広, 松井保 :
「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」, 『地盤と建設』地盤工学会中国支部, Vol.36, No.1, pp.17~30, 2018.
- 4) 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, pp.682-687, Paper No. 018-TPC-0735, 2018.
- 5) 上出定幸, 牧浦信一, 渡邊善義, 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(Web)』, Vol.6, No.1, pp.57-68, 2011.

[その他の研究成果]

- 1) 牧浦信一:「メンテナンス時代の高速道路技術に望むもの」, 『橋梁と基礎』, Vol.50, No.3, pp.1, 2016.
- 2) 牧浦信一:「高速道路メンテナンス時代の舗装」, 『舗装』, Vol.51, No.1, pp.1-2, 2016.
- 3) 牧浦信一:「高速道路 新たな半世紀へ」, 『NEXCO 技術情報』, Vol.22, pp.1-2, 2014.
- 4) 加藤久人, 佐藤知明, 牧浦信一, 西村宣男:「波形鋼板ウェブを有する PC 箱桁の断面変形理論」, 『土木学会論文集』, No.766, I -68, pp.109-127, 2004.
- 5) 鈴木久尚, 牧浦信一, 橋本正:「超大断面へん平シールドの施行過程を考慮した数値解析」, 『土木学会年次学術講演会』, Vol.57, 部門VI -031, pp.61-62, 2002.
- 6) 金井誠, 牧浦信一, 橋本正, 野本寿:「超大断面へん平シールドの設計法」, 『土木学会年次学術講演会』, Vol.57, 部門VI -032, pp.63-64, 2002.
- 7) 北川滋樹, 牧浦信一, 加島豊, 井田隆久:「超大断面へん平シールドの掘削機械設備」, 『土木学会年次学術講演会』, Vol.57, 部門VI -033, pp.65-66, 2002.
- 8) 久保井泰博, 牧浦信一, 児玉輝明:「超大断面へん平シールドの計画と適用性」, 『土木学会年次学術講演会』, Vol.57, 部門VI -034, pp.67-68, 2002.
- 9) 高木攻, 牧浦信一, 中尾努:「超大断面へん平シールドの施行方法について」, 『土木学会年次学術講演会』, Vol.57, 部門VI -035, pp.69-70, 2002.
- 10) 水嶋忠雄, 牧浦信一:「JH・高速自動車道等の被災状況と応急復旧等」, 『道路』, No.652, pp.27-35, 1995.

- 11) 牧浦信一, 飯田茂, 牛田和之, 安本文彦:「長野自動車道地すべり対策工—姥捨 SA 地区についてー」, 『日本道路公団業務研究発表会』, Vol.33, No.812, pp.596-600, 1991.
- 12) 牧浦信一, 新井俊夫, 野口英正:「トルシア型高力ボルトと普通高力ボルトの応力特性」, 『日本道路公団技術情報』, No.102, pp.13-17, 1990.
- 13) 牧浦信一, 向井翌, 野口英正, 木下康秀:「高架橋における段階施工の設計検討—東名阪自動車道新地蔵川高架橋ー」, 『日本道路公団業務研究発表会』, Vol.31(2), No.1114, pp.134-138, 1989.
- 14) 今川史郎, 牧浦信一, 石橋彰:「メンテナンスフリーを目指して—東名阪自動車道 PC 連続ラーメン橋ー」, 『橋梁と基礎』, Vol.22, No.10, pp.2-7, 1988.
- 15) 牧浦信一, 八木恵治, 宮添政志:「山岳急峻斜面における擁壁計画について」, 『日本道路公団業務研究発表会』, Vol.30(2), No.1012, pp.52-56, 1988.
- 16) 三田村収, 牧浦信一, 新井俊夫:「清洲跨線橋の床版型わくについて」, 『日本道路公団業務研究発表会』, Vol.29(2), No.1053, pp.448-452, 1987.
- 17) 明石行雄, 吉井等志, 牧浦信一:「PC 連続ラーメン高架橋の計画及び設計—近畿自動車道名古屋亀山線・名古屋西～清洲間ー」, 『橋梁』, No.83, pp.19-23, 1986.
- 18) 明石行雄, 牧浦信一, 吉井等志:「ラーメン橋のフレーム解析」, 『日本道路公団業務研究発表会』, Vol.28, No.1010, pp.964-968, 1986.
- 19) 井上義之, 明石行雄, 牧浦信一:「PC ラーメン橋の計画及び設計近畿自動車道名古屋亀山線(名古屋西～清洲)」, 『橋梁』, Vol.21, No.11, pp.2-10, 1985.
- 20) 吉井等志, 牧浦信一:「近畿自動車道(名古屋～名古屋西間)の橋梁計画について」, 『日本道路公団業務研究発表会』, Vol.26, No.910, pp.773-777, 1984.
- 21) 牧浦信一:「溶融亜鉛メッキ橋梁の残留応力測定」, 『日本道路公団業務研究発表会』, Vol.24, No.1150, pp.869-873, 1982.
- 22) 野村昌弘, 牧浦信一:「溶融亜鉛めっき高力ボルトのリラクゼーションに関する実験調査」, 『日本道路公団技術情報』, No.62, pp.50-55, 1982.
- 23) 川人達男, 牧浦信一, 稲葉英憲:「打込みぐいの施工例」, 『土木技術』, Vol.36, No.4, pp.68-78, 1981.

以上

[謝辞]

本論文は、筆者が1977年以来、日本道路公団、西日本高速道路株式会社、株式会社高速道路総合技術研究所、西日本高速道路エンジニアリング関西株式会社においての経験を通じて、業務を通じて行った研究成果を取りまとめたものである。多くの先輩、同僚、後輩の方々のご指導、御支援やご協力によって、この論文をまとめることが出来た。

本論文をまとめるに当たり、終始熱心に温かいご指導とご助言を賜りました大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻教授 乾徹様、一般財団法人災害科学研究所理事長 大阪大学名誉教授松井保様、大阪産業大学教授(元大阪大学准教授) 小田和広様、一般財団法人災害科学研究所研究員 上出定幸様、元株式会社高速道路総合技術研究所管理基盤推進担当部長 源谷秋義様、元株式会社高速道路総合技術研究所土構造物専門主幹兼土工研究室長 藤岡一頼様、西日本高速道路株式会社関西支社保全サービス事業部改築課長代理 梶原三永様、西日本高速道路エンジニアリング関西株式会社技師長 殿垣内正人様及び神戸大学名誉教授田中泰雄様、論文審査を実施し貴重なご指摘を頂きました大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻教授 鎌田敏郎様、同准教授 廣畠幹人様に対して厚くお礼申し上げます。

また、本論文をまとめるための経験や着想を与えていただき、育てていただいた、今までにお世話になったすべての組織および関係者の皆様に対しても、改めましてお礼を申し上げます。もしこれらの経験が無ければ、本論文の着想を得ることが出来なかつたことを、改めて付け加えさせていただきます。大変ありがとうございました。それぞれの組織のますますのご隆盛と、土木技術が社会の課題解決への要請に応え、社会が発展することをお祈りいたします。