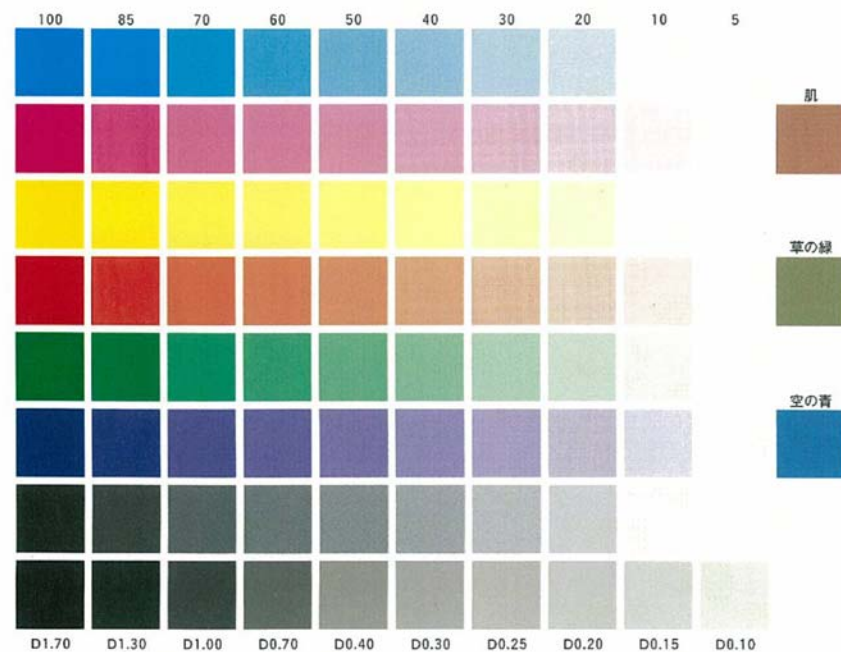


We conduct many of these
We conduct many of these
We conduct many of these



We conduct many of these
We conduct many of these
We conduct many of these

物理探査を用いた老朽化道路法面の 調査・評価手法に関する研究



平成 22 年 9 月

山 本 剛

目 次

1. 緒論

1.1 本研究の背景	1
1.2 従来の研究	2
1.2.1 電気・電磁気探査	2
1.2.2 弾性波探査	4
1.2.3 地中レーダ	5
1.2.4 既往の物理探査による法面健全性評価手法の課題	5
1.3 本研究の目的と内容	6
参考文献	9

2. 道路法面調査手法の現状と課題

2.1 道路法面管理の現状と課題	15
2.2 道路法面調査手法の現状と課題	21
2.2.1 道路法面点検の種類	21
2.2.2 道路防災総点検の内容	22
2.3 まとめ	25
参考文献	26

3. 道路法面の健全性評価の着目点

3.1 はじめに	27
3.2 盛土法面の健全性評価の着目点	27
3.2.1 各種文献からの盛土法面の不安定化要因と点検ポイント	27
3.2.2 防災総点検結果と盛土法面の技術者の着目点	29
3.2.3 防災ドクターの盛土法面の着目点	33
3.2.4 盛土法面の健全性評価のための着目点	35
3.3 切土等法面の健全性評価の着目点	38
3.3.1 各種文献からの切土等法面の不安定化要因と点検ポイント	38
3.3.2 防災総点検結果と切土等法面の技術者の着目点	41
3.3.3 防災ドクターの切土等法面の着目点	47
3.3.4 切土等法面の健全性評価のための着目点	50
3.4 まとめ	53
参考文献	53

4. 物理探査による法面内部探査方法の選定と評価

4.1 はじめに	55
4.2 物理探査手法の選定方法	55
4.2.1 文献による実施例等の調査	55
4.2.2 法面内部を調査するための物理探査手法の選定	60
4.3 実証実験場所	61
4.3.1 実証実験場所の選定の考え方	61
4.3.2 地点（1）の概要	62
4.3.3 地点（2）の概要	67
4.3.4 地点（3）の概要	71
4.4 探査技術の評価方法	78
4.5 まとめ	78
参考文献	78

5. 電気・電磁気探査による法面内部の探査方法

5.1 はじめに	79
5.2 二次元比抵抗探査	80
5.2.1 二次元比抵抗探査原理と方法	80
5.2.2 二次元比抵抗探査結果	83
5.3 VLF-EM 探査	86
5.3.1 VLF 電波について	86
5.3.2 VLF-EM 探査方法	86
5.3.3 解析方法	88
5.3.4 探査結果と考察	91
5.3.5 VLF-EM 探査の法面探査への適用性	97
5.4 FDEM 探査	99
5.4.1 FDEM 探査原理と測定方法	99
5.4.2 FDEM 探査機器	100
5.4.3 FDEM 探査結果	101
5.5 まとめ	102
参考文献	102

6. 地中レーダによる法面内部の探査方法

6.1 はじめに	105
6.2 連続波地中レーダ法の原理と測定方法	105
6.3 連続波地中レーダの実証実験と結果	109
6.3.1 実験方法	109
6.3.2 連続波地中レーダ法の解析方法	112
6.3.3 実証実験結果	113
6.4 道路法面健全性評価における連続波地中レーダの適用性	116
参考文献	117

7. 弾性波探査による法面内部の探査方法

7.1 はじめに	119
7.2 高密度表面波探査	119
7.2.1 高密度表面波探査方法と原理	119
7.2.2 高密度表面波探査結果	120
7.3 屈折法弾性波探査と反射法地震探査	123
7.3.1 屈折法弾性波探査と反射法地震探査の探査方法と原理	123
7.3.2 屈折法弾性波探査と反射法地震探査の探査結果	125
7.4. 道路法面健全性評価における弾性波探査の適用性	135
7.4.1 高密度表面波探査	135
7.4.2 屈折法弾性波探査	135
7.4.3 反射法地震探査	136
参考文献	136

8. 各種探査結果の比較及び定量的評価

8.1 地点別探査手法の適用性比較	137
8.1.1 地点(1)での比較	137
8.1.2 地点(2)での比較	141
8.1.3 地点(3)での比較	145
8.2 各種探査手法の比較	149
8.2.1 電気・電磁気探査	149
8.2.2 連続波地中レーダ	149
8.2.3 弾性波探査	150
8.2.4 各種の法面への適用性	151
8.3 道路法面の健全性評価における探査手法の課題	153

9. 複合探査による道路法面の健全性評価

9.1 複合探査の目的	155
9.2 調査地点の既往物理探査結果	155
9.2.1 地点(1)の既往物理探査結果	155
9.2.2 地点(2)の既往物理探査結果	157
9.3 変換解析の概要	159
9.4 変換解析による評価結果	162
9.4.1 変換パラメータ	162
9.4.2 地点(1)の変換解析結果	164
9.4.3 地点(2)の変換解析結果	166
9.5 まとめ	167
参考文献	168

10. 長期劣化概念に基づく道路法面の健全性評価と予防的保全対策の提案

10.1 道路法面の長期劣化概念と劣化シナリオ	169
10.1.1 道路法面の長期劣化概念	169
10.1.2 長期劣化シナリオ	170
10.2 道路法面の健全性評価手法の提案	173
10.3 劣化を考慮した予防的道路法面保全対策法の提案	174
10.4 まとめ	176
参考文献	176

11. 結論

巻末

本研究に関連した研究成果	179
用いた記号一覧	183
謝辞	185

第1章 緒 論

1.1 本研究の背景

我が国は列島の中央に山脈がそびえ、地形も急峻で多雨な気候であることから河川も多い。そこを通過する道路は橋梁やトンネルなどの多数の構造物によって作られ、特に自然斜面を含めると法面の数は膨大なものとなっている。また、我が国は地震の多発国であり地盤も大きな力を受けている。さらに、我が国は温帯モンスーン地帯に属し、四季の変化も激しく、台風の常襲地帯であり、地盤の劣化は進みやすい環境にある。

我が国の 1950 年代後半以降の高度経済成長期から多く造られた道路は、施工後かなりの年数が経過している。平成 18 年現在、国道・都道府県道の幅員 5.5m 以上の改良済み延長は 135,532km あるが、その約 60% が建設後 30 年を越えている¹⁾。道路法面は道路の拡幅改良と共に整備され、当時、法面保護工として多く使用された吹き付けコンクリート法面についても老朽化が進行しており、変状・崩壊の発生した法面のうちおよそ 3 分の 2 以上が 20 年以上経過した法面であった²⁾。さらに、近年多発する異常気象の影響で、激しい降雨強度の発生回数は増加傾向にあり土砂災害も増加傾向にある³⁾。これに対して、道路管理者は道路法面の一斉定期点検を 5 年～8 年間隔で実施している。しかし、多数の法面を点検することから、ほとんどが、亀裂や段差など表面の変状を頼りに行っているのが現状で、内部構造まで踏み込んで健全性を評価している例は少なく、法面の保全対策を実施しているにも関わらず、自然災害等による通行止め回数が減少するまでには至っていない⁴⁾。

一方、国や地方自治体の財政状況は悪化しており、道路に投資できる費用も少なくなっているため、道路法面の点検の結果、何らかの対策が必要な法面と診断されたにもかかわらず、対策ができていない法面が全国で 6 万箇所以上ある⁵⁾。このような状況において、道路の安全を確保するためには、効率的で的確な法面の保全対策が必要であり、法面の健全性を正確に評価して、適切な時期に的確な対策を講じて、予防的な保全対策を実施することが望まれる。

現在、道路法面の表面状況をモニタリングする手法は熱赤外線⁶⁾や IC チップを使用したものや^{7),8)}、カメラで撮影する方法⁹⁾など多数の手法が開発されている。しかし、道路法面の内部状態を調べる方法は、そのほとんどは、ボーリングを中心とした方法に頼っており、線情報しか得られていない。一方、物理探査は振動・電流・電磁波などを用いて、地盤の物理的性質や地中の様子を探知する技術であるが、近年、電子機器やコンピュータの発達により発展してきた。技術の進歩の一つは弾性波探査、電気探査などの従来からの探査技術に新しい電子機器や計算機の技術が適用されることにより、測定及び解釈の方法が容易となり高度化され、計算処理能力の飛躍的向上により、インバージョンが一般化し、地中を高精度に分析することが可能となった。そして、計測機器も小型化・高性能化によってデータ取得が容

易にかつ安価に行えることとなった。さらには、電磁探査や地中レーダ探査など、従来とは異なった物理現象を用いた新しい調査手法も出現した¹⁰⁾。これらの物理探査により非破壊または微破壊探査で法面内部構造を立体的に把握できれば、道路法面の健全性評価に役立つものと期待される。しかし、物理探査は資源探査や部品などの非破壊検査から発達しており、資源探査分野では 10m 以上の比較的大深度の調査を広範囲にわたり調査する手法を得意としてきた。一方、非破壊検査分野では数 cm～2m の深度までの範囲において主に活用されている。道路法面の健全性評価において必要となる、調査範囲はこの境界部分にある。

物理探査による調査手法を道路法面で適用するにあたり、現実には様々な問題がある。一つは、斜面での作業である。調査には重い機械が使用しづらい。また、崩壊を予測するためには、亀裂の厚さなどを評価する必要があることから、高い分解能が必要とされ、資源探査で使う以上のものが必要となる。さらに、法面は平坦ではないため、深度 10m までの浅い深度の探査は表面の影響を受けやすく、法面表面に設置された法面保護のための鉄筋などの金属類が探査を阻むことになる。

このように、多数の困難な要因があるが、道路法面の健全性評価に関わるニーズの高まりから、近年になり、道路法面の健全性評価のために、屈折法弾性波探査が使われるようになるなど、物理探査を道路法面に適用する事例が出てきている。しかし、新たに開発された多数の物理探査法のどれを使用するという研究は十分ではなく、経済的・効率的に道路法面内部構造を知る方法や、健全性を評価する方法は確立されていない。

1.2 従来の研究

物理探査法は、いろいろな物理現象を使って地下構造を探査する技術の総称である。ここでは、土木分野で使用される物理探査の代表的な探査法の現状と課題についてレビューを行う。

1.2.1 電気・電磁気探査

電気探査法は、地盤を構成する物質の比抵抗、誘電率あるいは電気化学的性質の違いに着目し、人工的あるいは自然的要因により発生した電位を測定し、地下構造などを調査する探査法である。地盤のもつ電気抵抗の違いに着目した探査法であり、比抵抗法、自然電位法、強制分極法（IP 法）がある¹¹⁾。電気探査の始まりは諸説あるが、1815 年の Fox によるある種の鉱物の自然分極が自然電位の異常をもたらすことを発見したのが一つの契機と考えられる¹²⁾。我が国に最初に導入されたのは、1921 年である。これは自然電位法であったが、その後、直流比抵抗法が 1930 年に鉄道省が橋梁の基礎調査に適用したのが始まりと見られる¹³⁾。戦後になって、電気探査は自然電位法と直流比抵抗法が中心となり、主に鉱山調査や地下水調査に用いられた。その後高度成長期には鉱山調査や温泉調査に直流比抵抗法の垂直探査と水平探査が中心となり用いられた。この頃の電気探査は標準曲線法といった各種の理

論曲線を用いてそれを適用することで解析を行ってきた。また同じ頃、直流比抵抗法の他に強制分極法（IP 法）が使用され始めた。1970 年代からコンピュータの発達とそれを利用したシミュレーション技術の発達により、Pelton *et al.* (1978) が比抵抗と IP のデータに二次元逆解析を提案しており、二次元構造の解析が可能となりつつあった。その後、佐々木 (1981) が比抵抗垂直探査における 2 次元構造の自動解析を提案しており、コンピュータの更なる発展に伴い精度の高い現在の**二次元比抵抗探査**が実際の地盤調査に適用され始めたのは 1984 年である¹³⁾。その後、野口ら (1991) が比抵抗法による二次元解析法におけるダイレクトインバージョン法を発表している¹²⁾。さらに、インバージョン法の研究が進み、1992 年に島は二極法電極配置データを用いた実用的な二次元比抵抗自動解析法¹⁴⁾、佐々木は 1992 年に比抵抗と IP 法の三次元インバージョン法を発表しており、二次元・三次元比抵抗電気探査は電子計算機の発展とともに逆解析が一般化して、広く使用されるようになった。現在、自然電位法は温泉や鉱物資源探査に使われることが多く、土木分野では比抵抗法が一般的で、IP 法は断層調査などに使用実績はあるが、事例は少ない。土木分野の比抵抗探査はダムの他、山岳トンネルで地山の評価の活用事例¹⁵⁾、堤防での適用事例^{16)~18)}等が報告されており、切土斜面についても劣化度を把握するための実績はあると報告されている^{19), 20)}。

電磁探査は地層を構成する岩石の種類によって電磁波に対する反応が異なる性質を利用して、地質構造を調査する探査法の総称である²¹⁾。電磁波を使用する計測法には地中レーダもあるが、計測物理現象や対象物性などが異なるため、これは電磁探査に含めないのが一般的である。現在の電磁探査は電磁場の変化から岩石中に誘導される二次的な電磁場を観測するものであるが、電磁探査の始まりは、Bergstrom が 1913 年に大地に電流を流して、等電位線の歪みを、大地に非接触ピックアップコイルを設置して測定する、直流電気探査法と電磁探査法の間中間的な流電磁法を開発した。その後、アメリカの鉱山技術者 Conklin (1917) は直径 50m~100m のループを設置して交流磁場を作り誘導電流が作る磁場をとらえようとする誘導電磁法を発表した²²⁾。1950 年代からはカナダの McPhar 社の技術者による積極的な開発がなされ、1960 年代にかけては広域帯の電磁探査装置などが開発された。この流れを受けて人工送信源を用いて電場・磁場の測定結果から地下の比抵抗分布を求める CSAMT 法が 1970 年代前半にトロント大学で研究され 1975 年に公表された²³⁾。人工送信源を用いた CSAMT 法は金属鉱業事業団によって我が国に積極的に導入され、深さ 100m~1000m の地下探査を対象としているので、現在では地下水、温泉調査や断層調査、山岳トンネル調査に活用されている。その他電磁探査法は多数の方法が開発され、現在活用されている。

VLF-EM (Very Low Frequency ElectroMagnetic) 探査法は、潜水艦通信に使用されている超長波 VLF 信号を利用する電磁探査の一種であり非常に簡便な物理探査法である。この VLF 探査は 1960 年頃鉱物探査を目的に初めて実施され、日本では 1970 年に初めてカナダ GEONICS 社製を使って実施された²⁴⁾。その後、1983 年に Karous & Hjelt がフィルター処理技術を開発し²⁵⁾、1987 年にはスウェーデン ABEM 社が VLF-EM 探査機 WADI を開発した。2001 年には農林水産省 農業工学研究所・造構部・土地地質研究室が 3 成分アンテナにより地盤探査能

率・精度を高めた VLF-EM 法の電磁探査装置を開発した²⁶⁾。

その後、水資源開発調査や²⁷⁾断層調査に²⁸⁾使用されている。道路では高速道路の法面の小段において調査された実績が紹介された資料²⁹⁾があるが、実施事例は極めて少ない。

FDEM 探査法は、周波数領域電場探査法 (Frequency Domain ElectroMagnetic Method) の略称で、物理探査では電磁法に属する。周波数領域とは、電磁波が低周波になるほど深くまで入ることを利用し、周波数をいくつか変えて探査し、周波数を深度のパラメータとしたデータを取得し逆解析により地盤の比抵抗を求める探査法である。FDEM 探査法による測定は、探鉱や地下水探査を目的に James R. Wait (1955) に測定理論が発表され³⁰⁾、Dolan (1967)、Tripp. (1978) や Hoekstra (1978) らによって研究され、その解析理論は、Backus & Gilbert (1967, 1968, 1970) により研究された。W.E. Glenn らによって逆解析理論の研究が進み³¹⁾、我が国では片山らが FDEM 探査機を開発して地盤調査結果を 2001 年に発表している³²⁾。その後、ダムや砂防関係の自然斜面で使用されている^{33), 34)}。道路では高速道路の法面において調査された実績が紹介された資料²⁹⁾がある。

1.2.2 弾性波探査

弾性波探査とは、人工的に発生させた弾性波 (地震波) の伝播特性を利用して、地下構造を推定する手法である。最初に人工的に地震波を発生させて地下探査を行ったのは Mallet である。彼は、その後 1848 年に屈折法と呼ばれる方法を提唱して、アイルランドで実験を行っている³⁵⁾。

屈折法弾性波探査は、地表又は地中で人工的に発生させた弾性波を異なった地層間で屈折して伝播する状況を観測することで、地下構造を調査するものである。我が国では、1929 年に秋田県の黒川油田で最初に使用されたのが始まりで、土木分野では山形県梵字川上流でダム建設調査のために使われたのは最初である。1938 年には萩原が実際の現場データの走時曲線から、基盤層の速度と基礎深度を計算する「萩原の方法」による解析法を発表した。その後この方式が拡張展開されて現在でも使用されている³⁵⁾。我が国では土木分野においてトンネル・ダム・造成などの地盤調査のために多数使用されている。

反射法地震探査は、地表付近で発生させた弾性波を地下の地層境界や弾性波速度境界で反射して帰ってきた反射波を地表に設置した受振器で測定して、地下構造を推定する方法である³⁶⁾。最初に行ったのは Fessenden で 1917 年に抗内で音を発生させて、鉱体からの反射を観測するもので、特許を取得している。その後、1920 年に英国の Evans が考案したのは現在の反射法地震探査と同様な探査原理である³⁷⁾。さらに油田開発のため研究や機器の開発が進み、現在では近年の計算機の処理速度の高速化・小型化を受けて、莫大なデータを扱うことが可能となり測定地点も大幅に増加させることができて、フルタリング技術やインバージョン技術の発展も相まって精度が格段に向上した。さらに小型で取り扱いが簡単な反射法地震探査機もまた多数開発され、地盤改良の施工管理のための研究^{38), 39)}など利用が土木分野にも広がってきている。

表面波探査は、地盤の表面付近を伝わる表面波（レイリー波）を観測して、深度 20m までの S 波速度分布から地盤の状況を探査する方法である⁴⁰⁾。表面波探査は、鈴木・林らによって人工振動を用いて盛土地盤と河川堤防への適用の研究が 2001 年に行われている⁴¹⁾。この研究では、S 波速度構造の把握を S 波トモグラフィーと PS 検層結果を比較して検証がされている。この探査法の特徴は多数の起振点の記録を多数の受振点で測定することである⁴²⁾。2001 年以降、住宅地盤調査⁴³⁾、廃棄物調査⁴⁴⁾、地震被害調査⁴⁵⁾、道路法面小段上での道路縦断方向の調査⁴⁶⁾などに適用された事例が報告されている。このように最近になって表面波探査は各方面で事例が報告され始めている。

1.2.3 地中レーダ

地中レーダ法は、地中に電磁波を放射し、電気特性の異なる境界で反射した電磁波を捉えることで地中構造を探査する方法である⁴⁷⁾。歴史的には、1904 年にドイツの Huelsmier によって連続波の電磁波を利用した金属体有無の検出法が提案された。その後 1910 年にドイツの Leimbach, Loewy らによって地中に埋められたアンテナを利用した地下埋設物の位置検出法の特許申請がなされた。そして、1926 年に Huelsenbech がパルス波を利用した埋設物探査に関する研究を行っている⁴⁸⁾。その後、1970 年代頃より一般的な地層などに対しての適用が始まり、1980 年代にはパルス方式の地中レーダのシステムがほぼ確立した。我が国では、道路の路面下の管渠や空洞の探査として 1980 年代から開発が進み、自動車に搭載した計測器で高速走行しながら測定するシステムも開発実用化している。これらはパルス電磁波を利用した計測法である。パルスレーダは地中部における減衰が大きく探査可能深度は 3m 程度が限界である。連続波地中レーダ探査は送信信号周波数帯域幅を広く、かつ掃引時間を長く取ることで、パルス波レーダ探査より深部まで探査できるもので、1999 年笠井らが開発を発表し、地すべりや断層調査結果と原理・解析法を発表している^{49)~51)}。その後、河川堤防での探査結果などが報告されている^{52)~54)}。

1.2.4 既往の物理探査による法面健全性評価手法の課題

土木分野ではトンネルでしばしば、屈折法弾性波探査が使われ、一部で電気探査が使用されている。屈折法弾性波探査は「萩原の方法」が発表された後、適用性に富む解析法が作られ、深い山を通過するトンネルの地質調査は、大半をこれに頼らざるを得ないこともありトンネル建設時には標準的な調査法として使用されてきた。そして弾性波速度で支保工のパターンを決めるという、設計にダイレクトに使われる手法として定着している。しかし、一方で、事前調査結果と実際の掘削が一致しないという報告もなされている。鈴木・林⁵⁵⁾ (1993) と中川⁵⁶⁾ (2000) はその原因として、地質調査技術の限界、不十分な地質調査、地質調査技術者の地山解釈の個人差、残された問題点の成果物への明記などを上げている。さらに城間⁵⁷⁾ (2002) はトンネルの地質によってゆりみ程度が異なるためでもあることを明らかにしている。

二次元比抵抗電気探査は土木分野においてトンネルや地すべり等の調査に使われる。しかし、探査結果は比抵抗値であることから、これだけで地盤状況を判断することはできない。また、道路の法面健全性評価のための調査で実施される物理探査の実施例は多くない。ここで必要とするものは、風化の程度、亀裂の位置や地下水の分布などである。もともと、物理探査は金属鉱物や石油といった地下資源の探査において、比較的深い位置の探査を行うことで発達してきた。トンネルでの活発な活用は深い深度に位置する構造物であるが故である。

近年になっての物理探査の発達が目覚ましいものがあり、各種の探査法が多数出現し土木分野にも適用が始まっている。しかし、各探査法を比較検証した論文は堤防で見受けられるが^{58), 59)}、道路法面では適用事例が少ないことから、物理探査学会で出されている「老朽化吹きつけ法面の調査・対策の手引き」での事例紹介だけであり、今後、道路法面の健全性評価のために活用するためには、物理探査方法の評価が必要である。

また、物理探査のよって得られた比抵抗値や弾性波速度などの単独の数値だけでは、地盤の評価は困難である。各種の物理探査手法の組み合わせによる評価については近年では事例も増えてきている。ところが、これらの調査結果を数学的に連立して評価している事例は多くない。これまでの評価事例として、弾性波速度と比抵抗の関係は、松井らが岩盤の比抵抗を弾性波速度に換算する手法を提案し、花崗岩などの比抵抗が大きい岩の場合には、この手法がトンネルの地山区分に適用できる可能性を示している^{60), 61)}。また、伝導性を持っている岩において比抵抗検層データを用いて、「比抵抗を弾性波速度に換算する理論式」を確立し、これを基に堆積岩地層の地山区分に適用する研究も行っている⁶²⁾。さらに岩盤の比抵抗と弾性波探査結果による総合評価として羽竜ら⁶³⁾は、花崗岩地盤において「電気比抵抗—弾性波速度モデル (R-V モデル)」を考案している。さらに、楠見ら⁶⁴⁾はトンネル建設時における弾性波速度分布・比抵抗分布を間隙率分布・体積含水率に変換する変換解析のシステム化を行い、現地での検証を行い、適用性を確認している。また、高橋・山本は、堤防の土質に関して、比抵抗と S 波速度に基づいた土質分類図を作成して、実際の堤防で土質分類の有効性を確認している⁶⁵⁾。また、宮川らは堤防を対象に 3 種の物理探査法から得られた、4 種の物理量の自己組織化マップを用いて、堤防の土質性状の分類を行った⁶⁶⁾。

ここでは道路法面の健全性評価のための調査に適用できる可能性のある物理探査法の歴史や適用事例、ならびに現状での問題点についてレビューを行う。道路法面の健全性評価調査に使用するための、物理探査の活用は始まったばかりである。道路施設が老朽化し気象が激しくなる中で、この分野での技術開発が待たれる。

1.3 本研究の目的と内容

本論文は、道路法面の健全性評価のために必要な着目点を検討して、物理探査法を用いて実証的に道路法面を調査して、その適用性を検討して道路法面の健全性評価のための調査方法と保全対策の提案を試みたものである。

図 1.1 に本論文のフローチャートと構成を示す。また、各章の概要を以下に述べる。

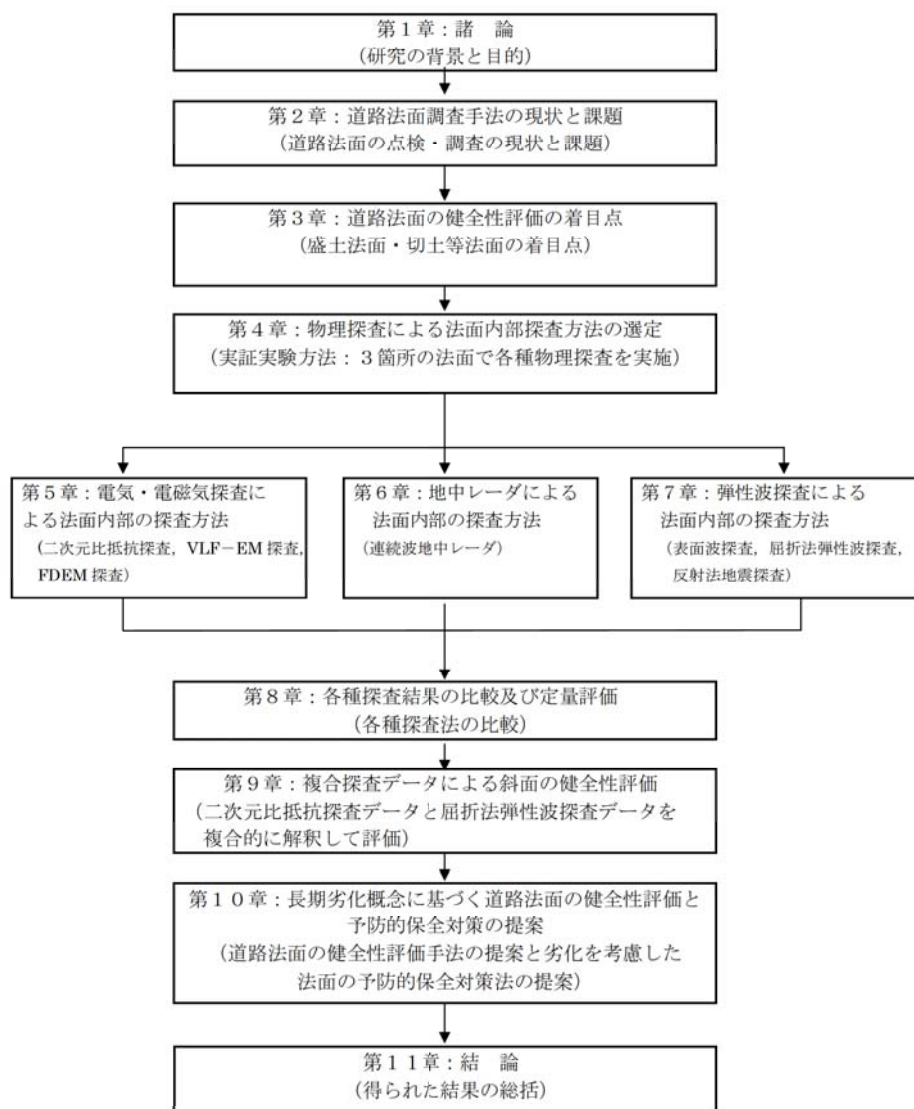


図 1.1 本論文のフローチャートと構成

第2章では、我が国は地震が多発し台風も常襲する地帯にあることから、自然災害が多く、さらに老朽化した法面が増加している中で、道路法面の健全性評価が十分にできていない現状を述べる。さらに、ほとんどの道路法面調査は、道路法面内部の情報を得ることなく、健全性が低下して変形が生じてからの調査が主体であることを示し、道路法面の内部調査の重要性を述べる。

第3章では、道路法面の健全性評価のため、盛土法面と切土等法面の評価に必要な着目点を分析して、物理探査手法でどの部分を探査すれば良いかを述べる。

文献による調査や防災ドクターの着目点から、盛土法面の健全性評価のためには、①不安定化した結果としての変状、②盛土部と基盤部の境の状況や内部空洞や内部の風化度合いなど不可視部分の地中構造、③降雨と関連する湧水・地下水の状況や変動の把握が重要であることを述べる。

そして、法面の健全性評価のためには、内部構造を調べる必要がある。また最弱点部から崩壊するため、立体的な把握が必要となる。ボーリングは線情報であることから、立体的情報を取得するためには物理探査手法を用いて、対象とする法面内部の風化程度、地中構造、地山との境界、地下水を調査する必要があることを述べる。

第4章では、物理探査による法面内部探査方法の選定と評価方法について述べる。物理探査方法の選定は各種文献の実施例を基に、近年に新たに開発された手法を勘案して、電気・電磁気探査では二次元比抵抗探査、VLF-EM 探査、FDEM 探査、弾性波探査では、高密度表面波探査、屈折法弾性波探査、反射法地震探査、地中レーダでは連続波地中レーダ探査を用いて実証実験を行った内容について述べる。

第5章では、電気・電磁気探査による法面内部の探査方法の説明と解析結果を述べる。

二次元比抵抗探査、VLF-EM 探査、FDEM 探査のそれぞれの調査方法の特徴、解析結果と調査の評価を行なった。その結果、電気・電磁気探査方法は法面を傷つけずに探査が可能であるが、反面、金属類の影響を大きく受けることから、調査対象の法面に金属物が入っていないことが前提となる。その調査結果と解釈の課題について述べる。

第6章では、連続波地中レーダによる法面内部の探査方法の説明と解析結果を述べる。連続波地中レーダによって反射面や地下水の検出などの内部構造が検出できたことや、解釈上の課題について述べ、探査方法の評価を行う。

第7章では、弾性波探査による法面内部の探査方法の説明と解析結果を述べる。

高密度表面波探査、屈折法弾性波探査、反射法地震探査のそれぞれの探査方法の特徴、調査結果と解釈の課題、適用できる法面条件について述べる。

第8章では、探査を行った各種の物理探査手法を比較して、総合的に評価し法面への適用性について述べる。

第9章では、複数の探査データを複合的に解析して地盤の評価を行う。ボーリング情報に代わるものとして、弾性波探査データと二次元比抵抗探査データを複合的に解釈して、原位置で得られた弾性波速度分布・比抵抗分布を間隙率分布・飽和度分布に変換するシステムを

用い、より正確に地盤評価を行う方法について述べる。

第10章では、道路法面の長期劣化概念を示し、健全性評価手法として、物理探査を用いた長期モニタリングや複合解析等による健全性の低下程度の評価方法を提案し、さらに、その結果を用いて予防的保全対策の提案を述べる。

第11章では、本研究で得られた結果を総括して、結論とする。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局企画課：道路統計年報2007版，pp. 22-25，2008.
- 2) 芦田謙・沖村孝，物理探査学会編：老朽化吹付け法面の調査・対策の手引き，pp. 9-13，鹿島出版会，2006.
- 3) 国土交通省：19年度国土交通白書，第1章地球温暖化とわたしたちの暮らし，pp. 8-9，2008.
- 4) 国土交通省道路局：災害時にも安定して機能する道路ネットワークのあり方，第22回基本政策部会資料，資料-3，pp. 5，2007.
- 5) 山本剛・満下淳二・楠見晴重・小山倫史・松岡俊文・大西有三：道路法面管理と物理探査，最新の物理探査事例集，pp. 87，物理探査学会創立60周年記念事業実行委員会，2008.
- 6) 建設省土木研究所：熱赤外線映像法による吹きつけのり面老朽化診断マニュアル，pp. 2，建設省土木研究所，1996.
- 7) 西山哲・大西有三・矢野隆夫・山本剛・西川啓一：リアルタイム岩盤斜面モニタリングネットワークシステムの研究，第37回岩盤力学に関するシンポジウム論文集，pp. 439-442，土木学会，2008.
- 8) 西山哲・安藤佑治・山本剛：道路防災用センサネットワークシステムの構築に関する研究，第28回日本道路会議論文集，論文番号40070，(社)日本道路協会，2009.
- 9) 山本剛・和田実：精密写真測量による道路法面等監視手法の開発と適用について，建設マネジメント技術Vol. 342，pp. 71-75，(財)経済調査会，2006.
- 10) 岩盤力学委員会先端技術を利用した岩盤計測の体系化を実際への応用に関する研究小委員会：活動報告書，pp. 44-56，土木学会，2009.
- 11) 物理探査学会標準化検討委員会：物理探査適用の手引き―土木物理探査マニュアル2008，pp. 127，2008.
- 12) 物理探査学会：物理探査ハンドブック手法編，pp. 241-243，1998.
- 13) 島裕雅・梶間和彦・神谷英樹：建設・防災・環境のための新しい電気探査法―比抵抗映像法，pp. 5-8，古今図書，1995.
- 14) 島裕雅：二極法電極配置データを用いた実用的な二次元比抵抗自動解析法，物理探査第45巻第3号，pp. 204-223，物理探査学会，1992.
- 15) 石村利明・宮川順一・真下英人：電気探査によるトンネルの地山評価，土木技術資料Vol. 41，No. 5，pp. 32-37，(財)土木研究センター，1999.
- 16) 山本剛・小段栄一・糸川政孝・京都大学河川堤防の内部構造調査と探査機器の開発研究委員会：河川堤防調査における物理探査の適用性に関する研究，最新の物理探査適用事例集，pp. 113-122，物理探査学会創立60周年記念事業実行委員会，2008.
- 17) 島中与一・今里武彦・山口伸治・山本剛・糸川政孝・船越誠二・京都大学 河川堤防の内部調査と探査機器の開発研究 研究委員会：河川堤防内部構造調査と探査機器の開発研究（その2）―三次元電気探査の適用性評価のための試験探査結果―，物理探査学会第117回学術講演会講演論文集，pp. 123-125，物理探査学会，2007.
- 18) Hatanaka, Y., Imasato, T., Yamamoto, T. : Evaluation in applicability of the three-dimensional electric survey for the river embankment, 9th SEGJ International Symposium, No. 75, 2009.
- 19) 全国地質調査業協会連合会：防災維持管理分野における物理探査の適用，pp. 15，全国地質調査業協会連合会，2007.
- 20) 物理探査学会 物理探査要領作成委員会：物理探査適用の手引き（特に土木分野への利用），pp. 4，2000.
- 21) 物理探査学会標準化検討委員会：物理探査適用の手引き―土木物理探査マニュアル2008，pp. 127，2008.
- 22) 物理探査学会：物理探査ハンドブック手法編，pp. 301-303，1998.
- 23) 物理探査学会：物理探査ハンドブック手法編，pp. 323，1998.
- 24) 竜神正夫：VLF電磁探鉱法と測定器について，物理探鉱第23巻5号，pp. 35-42，物理探査学会，1970.
- 25) M. Karous, and S. H. Hjelt: Linear filtering of VLF dip-angle measurements, Geophys. Prosp., pp. 31, 1983.
- 26) 中里裕臣・朴美京・黒田清一郎・奥山武彦：VLF電磁探査法による比抵抗モニタリング，平成14年農業土木学会講演要旨集，pp. 718-719，2002.
- 27) 北海道開発土木研究所（根岸正充 本館静吾 寺岡伸幸 今井秀紀）：VLF法による岩盤の裂か水の探査，開発土木研究所月報，No. 466，pp. 2-9，北海道開発庁北海道開発局開発土木研究所，1992.
- 28) 山口覚・宮田隆夫：物理探査法（VLF-MT，電気探査，地中レーダ）による都市伏在活断層の浅部構造調査，神戸大学都市安全研究センター研究報告，Vol. 4，pp. 197-206，2000.
- 29) 斜面等健全性検討研究委員会・芦田謙・沖村孝監修・物理探査学会：老朽化吹付け法面の調査・対策の手引き，pp. 151，鹿島出版会，2006.
- 30) James R. Wait : Mutul Electromagnetic Ccupling Of Loops Over A Homogeneous Ground, Geophysics, Vol. XX, No. 3, 1955.

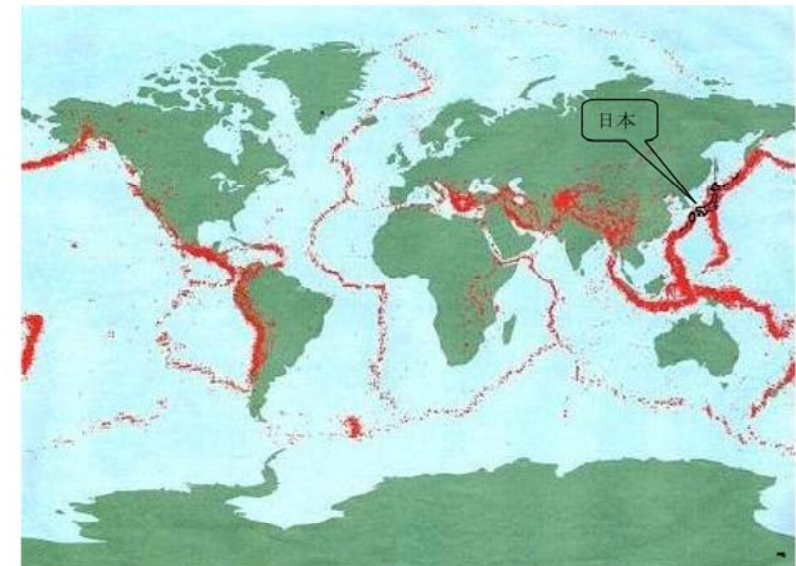
- 31) W.E.Glenn et al. : The Inversion Of Vertical Magnetic Dipole Sounding Data, Geophysics, Vol.38, No6, 1973.
- 32) 片山辰雄・尾崎克之・加藤裕将・小里隆孝: 新開発EM探査機による地盤調査, pp.23-24, 地盤工学会研究発表会, 2001.
- 33) 小林翼・片山辰雄・高橋厚志・中西達郎: 治山ダム設計における新しい調査技術 (FDEM 探査) の適用性について, pp.33-34, 地盤工学会発表会, 2003.
- 34) 山崎卓也・加藤裕将: マルチ周波数EM探査による斜面探査の効率化検討, No35, 近畿地方整備局管内技術研究発表会資料, 2006.
- 35) 物理探査学会: 物理探査ハンドブック手法編, pp.117-118, 1998.
- 36) 物理探査学会標準化検討委員会: 物理探査適用の手引きー土木物理探査マニュアル2008, pp.67, 2008.
- 37) 物理探査学会: 物理探査ハンドブック手法編, pp.5-8, 1998.
- 38) 楠見晴重・芦田譲・西田一彦・河口琢哉・林徹明: S波反射法による地盤中のセメント混合改良層の連続的な強度分布の評価法, 土木学会論文集No666/Ⅲ-53, pp.333-338, 2000.
- 39) 楠見晴重・芦田譲・西田一彦・江原竜二: S波反射法による地盤中の薄いセメント改良層の探査に関するシミュレーション解析とその適用性, 土木学会論文集No624/Ⅲ-47, pp.245-253, 1999.
- 40) 物理探査学会標準化検討委員会: 物理探査適用の手引きー土木物理探査マニュアル2008, pp.67, 2008.
- 41) 鈴木晴彦・林宏一・中山文也・石田章司・中山修: 人工震源を用いた表面波探査の土木調査への適用, 物理探査学会第105回学術講演会論文集, pp.9-12, 2001.
- 42) 林宏一・鈴木晴彦: 二次元表面波探査の地盤調査への適用, 第38回地盤工学会発表会, pp.33-34, 2003.
- 43) 林宏一・鈴木晴彦・伊集院博: 人工震源を用いた表面波探査の住宅地盤調査への適用, 物理探査学会第106回学術講演会論文集, No13, 2002.
- 44) 下山みを, 石田章司: 表面波探査を用いた「埋設廃棄物」調査事例, 全地連「技術eフォーラム2006」名古屋, 論文番号18, 全国地質調査業協会連合会, 2006.
- 45) 林宏一・平出務: 表面波探査の地震被害調査への応用, 地盤工学会誌56-6, No.605, pp.41-42, 2008.
- 46) 斜面等健全性検討研究委員会・芦田謙+沖村孝監修・(社)物理探査学会: 老朽化吹付け法面の調査・対策の手引き, pp.159-160, 鹿島出版会, 2006.
- 47) 物理探査学会標準化検討委員会: 物理探査適用の手引きー土木物理探査マニュアル2008, pp.281, 2008.
- 48) 物理探査学会: 物理探査ハンドブック手法編, pp.401, 物理探査学会, 1998.
- 49) 笠井弘幸・西山英一郎・鈴木敬一: 土木地質調査におけるGPRの適用例, 地質ニュース537号, pp.8-15, 工業技術院地質調査所, 1999.
- 50) 鈴木敬一・笠井弘幸・西山英一郎: ステップ式連続波地中レーダ探査装置を用いた地中レーダ探査, 地質ニュース537号, pp.44-52, 工業技術院地質調査所, 1999.
- 51) 西山英一郎・鈴木敬一・笠井弘幸: GPRにおけるデータ処理法, 地質ニュース537号, pp.53-60, 工業技術院地質調査所, 1999.
- 52) 鈴木敬一・山本剛・糸川政孝・船曳誠二・京都大学 河川堤防の内部調査と探査機器の開発研究 研究委員会: 河川堤防内部構造調査と探査機器の開発研究 (その3) ー連続波レーダによる実堤防試験探査ー, 物理探査学会第118回学術講演会講演論文集, pp.178-181, 物理探査学会, 2008.
- 53) Suzuki, K., Yamamoto, T. : A field feasibility study using stepped FM-CW GPR for investigation of river embankments, 9th SEGJ International Symposium, No.103, 2009.
- 54) 鈴木敬一・山本剛: 連続波レーダによる河川堤防構造探査, 全地連「技術eフォーラム2009」松江 論文集, No84, 全国地質調査業協会連合会, 2009.
- 55) 鈴木昌次・古川浩平・井上洋司・中川浩二: NETM施工実績に基づく事前調査の評価に関する一考察, 土木学会論文集, 第427号/VI-14, pp.261-270, 1991.
- 56) 中川浩二・保岡哲治・北村晴夫・三木茂・藤本陸・木村恒雄: トンネル事前設計における地質調査の問題点とその評価に関する研究, 土木学会論文集, 第658号/VI-48, pp.33-43, 2000.
- 57) 城間博通・赤木渉・岡部幸彦・中西昭友: 支保実績から分析した弾性波速度評価の一考察, トンネルと地下, Vol.39, No.9, pp.49-57, 土木工学社, 2002.
- 58) 岡二三生・小高猛司・木元小百合・芝田弘一・服部浩二・北川義治・山田茂治: 河川堤防の内部空洞構造調査における各種物理探査手法の適用性の検討, 地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム2005, pp.49-52, 地盤工学会関西支部, 2005.
- 59) 山本剛・小段栄一・糸川政孝・京都大学河川堤防の内部構造調査と探査機器の開発研究委員会: 河川堤防調査における物理探査の適用性に関する研究, 最新の物理探査適用事例集, pp.113-122, 物理探査学会創立60周年記念事業実行委員会, 2008.
- 60) 内浦慎一・谷口親平・松井保・朴三奎: 比抵抗高密度探査結果の定量的評価によるトンネル地山区分手法について, 第9回岩の力学国内シンポジウム講演会論文集, pp.1-6, 岩の力学連合会, 1994.
- 61) 内浦慎一・谷口親平・松井保・朴三奎: 比抵抗高密度探査データに基づくトンネル地山区分手法と適用性, 第26回岩の力学に関するシンポジウム講演会論文集, pp.326-330, 土木学会, 1995.
- 62) 松井保・朴三奎: 比抵抗高密度探査データによる地山区分手法の研究, 第29回土質工学会研究発表会講演会論文集, pp.153-154, 1994.

- 63) 羽竜忠男・西川貢：電気比抵抗－弾性波速度モデルによる変形係数及び透水係数の地下空間分布の推定，第32回岩の力学に関するシンポジウム講演会論文集，pp.81-88，土木学会，2003.
- 64) 楠見晴重・高橋康隆・中村真：比抵抗・弾性波速度の変換解析によるトンネル建設時の岩盤評価法，土木学会論文集F，Vol.62，No4，pp.603-608，2006.
- 65) Takahashi, T., Yamamoto, T. : An attempt of soil profiling of river embankment using geophysical data, Buturi-Tansa, Vol.63, pp.102-108, 物理探査学会，2010.
- 66) 宮川歩夢・辻建・松岡俊文・山本剛：自己組織化マップを用いた複合物理探査による堤防内土質性状の分類，土木学会論文集，pp.88-99，2009.

第2章 道路法面調査手法の現状と課題

2.1 道路法面管理の現状と課題

日本列島の周辺で4枚のプレートが衝突しており，我が国は，**図2.1**に示すように世界的に見ても地震多発国である¹⁾．このため地盤は多くの力を受け，亀裂や断層が発達している．さらに地形が急峻であり，**図2.2**に示すように台風の常襲地帯でもあることから²⁾，地盤は豪雨による浸食や風化の進行がしやすい状況にある．このため，**図2.3**に示すように，我が国では毎年1,000件程度の土砂災害が発生しており，近年は以前に比べて発生件数が増加している³⁾．



(1985-1994) M4以上，震源の深さ100km以浅

図2.1 世界の地震分布図¹⁾

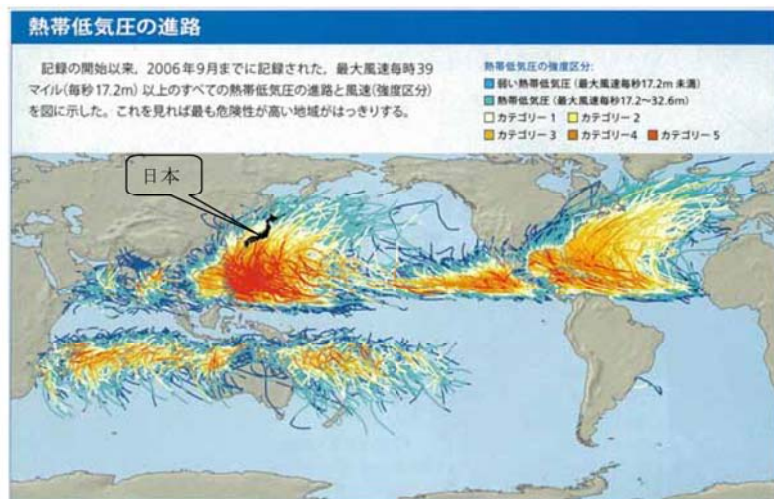


図 2.2 熱帯低気圧の進路²⁾

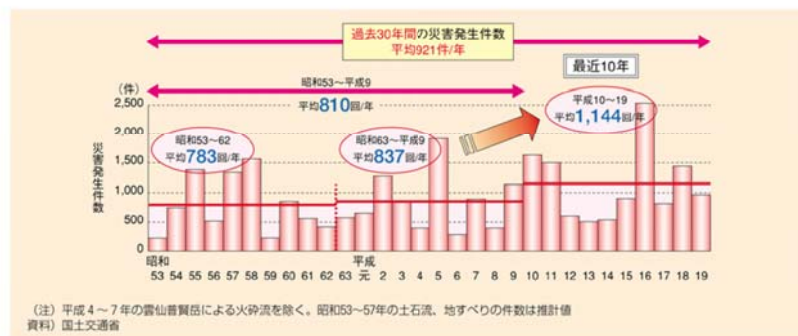


図 2.3 土砂災害発生件数の推移³⁾

全国の道路には図 2.4 に示すように、道路種別毎にばらつきがあるが「要対策箇所」および「要点検箇所(カルテ対応)」などの何らかの対策等が必要な箇所が、全国で合計約180,000箇所(平成19年3月現在)存在する⁴⁾。そのうち未対策として残されている道路法面は約65,000箇所である。このため、自然災害による通行止め回数は図 2.5 に示すように平成17年度で8,643回発生しており、台風の襲来など自然災害の発生頻度によって影響を受け、通行止め回数は年度ごとに大きな変動がある⁵⁾。そして、自然災害であっても崩落事故の程度によっては道路管理者への責任を追求される事例も発生している。

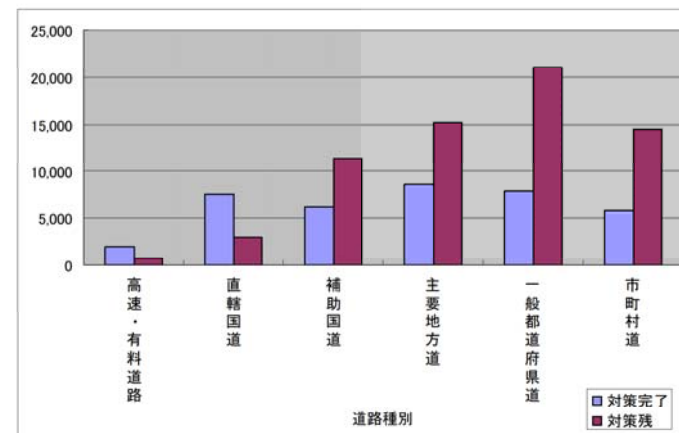
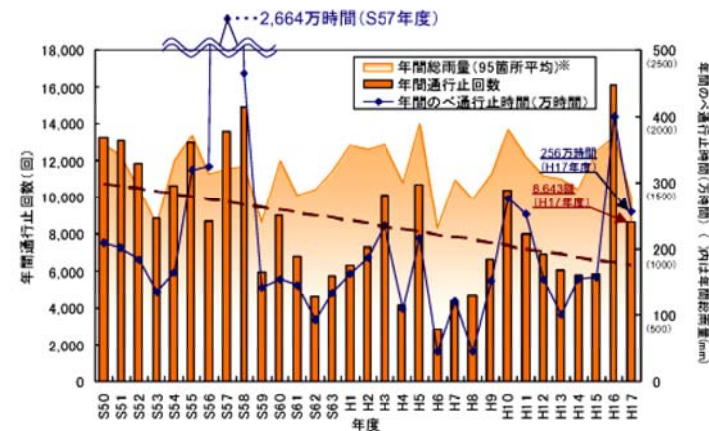


図 2.4 対策が必要となる道路法面数⁴⁾



・対象は、高速道路及び一般道路(一般国道、都道府県道、市町村道)
 ・点線は、昭和50年から平成17年までのトレンド(経年と通行止め回数の関係)を示す。

※ 年間総雨量は、全国の地方整備局、国道事務所等の所在地のアメダス95箇所の年間総雨量の平均値

図 2.5 自然災害等による通行止め回数の推移⁵⁾

また、一方で老朽化も進行している。道路は昭和 29 年を初年度とする道路整備 5 カ年計画が策定されると共に道路整備が急激になされた。図 2.6 に示すように昭和 29 年に国道・都道府県道の幅員 5.5m 以上の改良済み延長が 21,830km だったものが、オイルショックの影響が大きくなった昭和 50 年までの約 20 年間に約 6 万 km が整備され、延長は 81,195km に達した。その後は延長の伸び率は鈍化して、その後の 30 年間で 5 万数千 km が整備された⁶⁾。平成 18 年現在、改良済みの延長は 135,532km で、その約 60% が建設後 30 年を越えており、道路の老朽化が進行している。

全国の道路の法面保護工の整備量に関する統計資料はないが、図 2.7 に示すとおり、全国特定法面保護協会に加盟している会社の工種別の施行実績のデータ等から類推すると、昭和 60 年度以前はモルタル吹付けによる法面保護が多くを占めている⁷⁾。我が国の急峻な地形の特徴から、道路法面は道路の改良とともに、多くが造られた。

物理探査学会斜面健全性検討委員会が行った吹付けモルタルの劣化調査や対策工に携わっている企業へのアンケート調査結果⁸⁾では変状・崩壊が発生した法面のうち、およそ 3 分の 2 が調査した時点で 20 年以上経過した、1983 年（昭和 58 年）以前に施工された法面であることが判った。このようにモルタル・コンクリート吹付け法面の多くが老朽化してきている。

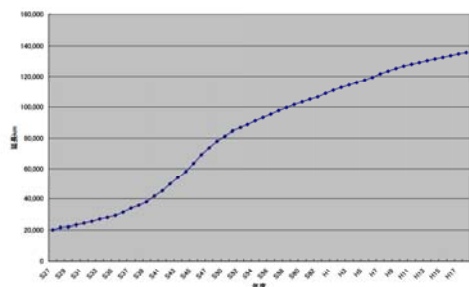


図 2.6 国道・都道府県道 幅員 5.5m 以上改良済延長⁶⁾

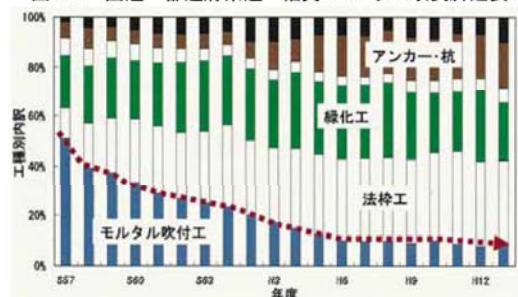


図 2.7 法面保護工の施行実績の推移⁷⁾

これに対して国や地方自治体等の道路管理者は、法面の点検を実施して、防災対策を実施している。そして、対策が完了するまでの間は、豪雨時に事前に通行止めする区間（事前規制区間）と降雨量を定めて、道路が崩壊する前に通行止めの措置を講じて人的被害の防止に努めている。しかし、事前通行規制区間における通行止め回数と災害の有無を見ると、通行止め（規制）中の災害発生確率は図 2.8 に示すように 12% と高くない⁸⁾。

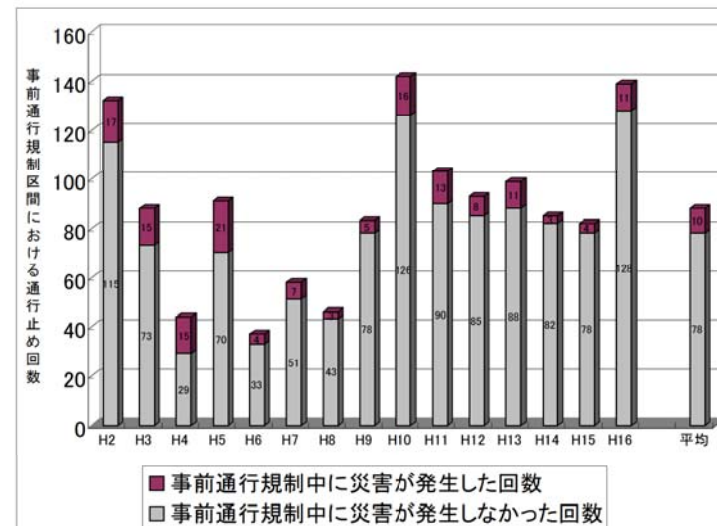


図 2.8 事前通行規制区間における通行止め回数と災害の有無（直轄国道）⁸⁾

また、図 2.9 は過去 15 年間の国直轄管理区間の被災数を事前通行規制区間内と区間外に分けて記述したもの⁹⁾であるが、これを見ると事前通行規制区間内よりも、区間外の場所で多くの災害が発生していることが判る。このように、事前通行止めによる効果は十分とは言えない。これは、予算上の制約があり、十分な調査ができないためと、法面の健全性評価が全体として十分でないためと考えられる。

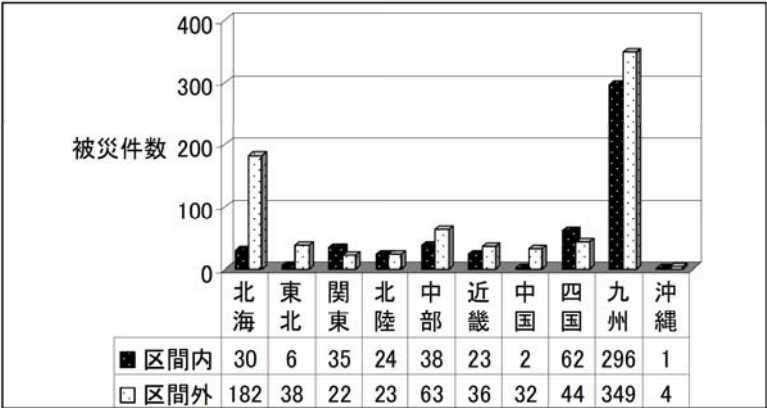


図 2.9 地域ごとの規制区間内外における被災数（15 年間）⁹⁾

2.2 道路法面調査手法の現状と課題

2.2.1 道路法面点検の種類

道路法面の点検の種類は表 2.1 に示すように日常のパトロールによる日常点検や年 1 回程度の道路巡視員の徒歩パトロールによる定期点検の他、全国一斉に 5 年から 10 年のサイクルで行われる道路防災総点検や、要対策箇所での恒久的対策が終わっていない箇所のカルテ点検、災害発生後や崩壊のおそれの有る箇所の点検である異常時点検・調査、ならびに、学識経験者から専門的学術的見地から長期にわたる指導・助言を受ける防災ドクターによる調査などがある。

全国一斉の調査である防災総点検結果は、各現場における法面管理にも活用されている。この防災総点検は地形・地質土質・湧水・変状・対策工の効果等に加えて、平成 2 年以降では災害履歴や地形判読等により、各要素を確認して点数化して評価している。しかし、多くの法面においてボーリングデータなどの法面内部情報がほとんど無いため、主に目視による法面表面の情報に基づき点検を行っているのが現状である。

表 2.1 道路斜面に関する点検等の種類と内容

点検等の種類	内容
日常点検	日常のパトロールにおける点検。 通常、路面への落石や法面保護工の変状の点検。 (道路管理者によるパトロール車内からの点検)
定期点検(法面)	亀裂や浮石・岩石の風化剥離の有無の点検。年 1 回程度。 (道路管理者による徒歩での点検)
道路防災総点検	全国一斉の法面点検。 5 年～10 年に一度の要対策・カルテ点検箇所見直しを伴う定期点検。 (専門技術者による点検)
防災カルテ点検	要対策・カルテ箇所法面の目視点検。年 1 回。 変位のおそれがある場合は年 2 回の変位計測。(専門技術者による点検)
異常時点検・調査	災害発生時に行う調査・点検。 災害発生に伴い崩壊の可能性が高い箇所の危険度把握、対策工法検討のための調査。(専門技術者、学識経験者)
防災ドクターによる調査	崩壊の可能性が高い箇所について、防災ドクターから高度な技術的検知から指導を受ける。(学識経験者)

2.2.2 道路防災総点検の内容

① 道路防災総点検

5年～10年の間隔で実施されている道路防災総点検は図2.10に示すように既存資料と現地確認調査からなりたっている。¹⁰⁾

既存資料は

- ・ 過去の定期点検記録
- ・ 過去の詳細調査などの防災カルテ
- ・ 防災対策工施工記録
- ・ 過去の災害記録
- ・ パトロール日誌など日常点検記録
- ・ 1/50,000 地質図
- ・ 1/25,000 地形図
- ・ 道路管理図
- ・ 空中写真
- ・ 降雨記録

などを収集して、地域特性や災害要因などの把握を行い、現地確認を行う安定度調査箇所の抽出を行う。

現地確認調査は、現場において図2.11に示すシート¹¹⁾に従い目視による調査を行う。この現地確認調査は主に現場で法面内部情報が無い中で実施することが多いため、点検技術者の技術力に依存することが大きい。このため、法面、自然斜面等の安定度の評価基準のばらつきを防止するために、必要に応じて安定度調査結果のキャリブレーションの実施を行うこととされているが、目視に頼った評価はどうしてもばらつきを生じてしまうことになる。

防災総点検は全国一斉に点検し、全国同じ指標で評価して、今後の防災や保全に関する必要投資費用を算出する意味からも、非常に重要である。しかし、多数の箇所を点検する必要性や費用の制約から、ひとつひとつの法面に関して内部構造の把握まで踏み込んだ、詳しい調査がされていない課題がある。

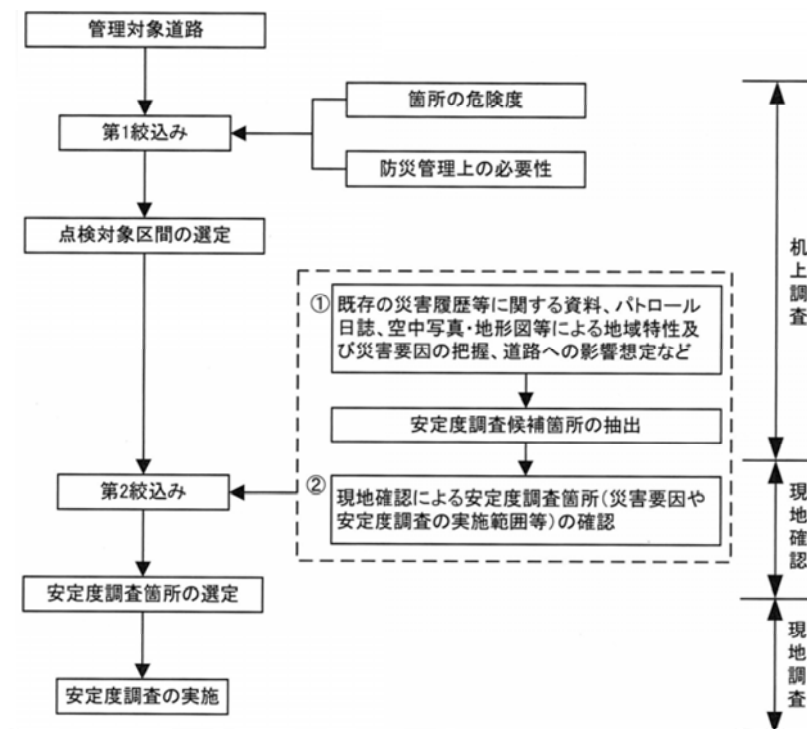


図2.10 道路防災総点検フロー¹⁰⁾

項目		調査項目	調査方法	評価	調査結果	評価
地盤	(1) 地盤調査	地盤調査	地盤調査	地盤調査	地盤調査	地盤調査
	(2) 地盤調査	地盤調査	地盤調査	地盤調査	地盤調査	地盤調査
	(3) 地盤調査	地盤調査	地盤調査	地盤調査	地盤調査	地盤調査
	(4) 地盤調査	地盤調査	地盤調査	地盤調査	地盤調査	地盤調査
基礎	(1) 基礎調査	基礎調査	基礎調査	基礎調査	基礎調査	基礎調査
	(2) 基礎調査	基礎調査	基礎調査	基礎調査	基礎調査	基礎調査
	(3) 基礎調査	基礎調査	基礎調査	基礎調査	基礎調査	基礎調査
	(4) 基礎調査	基礎調査	基礎調査	基礎調査	基礎調査	基礎調査
上部構造	(1) 上部構造調査	上部構造調査	上部構造調査	上部構造調査	上部構造調査	上部構造調査
	(2) 上部構造調査	上部構造調査	上部構造調査	上部構造調査	上部構造調査	上部構造調査
	(3) 上部構造調査	上部構造調査	上部構造調査	上部構造調査	上部構造調査	上部構造調査
	(4) 上部構造調査	上部構造調査	上部構造調査	上部構造調査	上部構造調査	上部構造調査
合計					77 点	(A1)

注1) 1)は各項目の調査結果を示す。
2)は各項目の調査結果に0点をつける上にも点数を記入する。
3)は各項目の調査結果に0点をつける上にも点数を記入する。

項目		調査項目	調査方法	評価	調査結果	評価
地盤	(1) 地盤調査	地盤調査	地盤調査	地盤調査	地盤調査	地盤調査
	(2) 地盤調査	地盤調査	地盤調査	地盤調査	地盤調査	地盤調査
	(3) 地盤調査	地盤調査	地盤調査	地盤調査	地盤調査	地盤調査
	(4) 地盤調査	地盤調査	地盤調査	地盤調査	地盤調査	地盤調査
基礎	(1) 基礎調査	基礎調査	基礎調査	基礎調査	基礎調査	基礎調査
	(2) 基礎調査	基礎調査	基礎調査	基礎調査	基礎調査	基礎調査
	(3) 基礎調査	基礎調査	基礎調査	基礎調査	基礎調査	基礎調査
	(4) 基礎調査	基礎調査	基礎調査	基礎調査	基礎調査	基礎調査
上部構造	(1) 上部構造調査	上部構造調査	上部構造調査	上部構造調査	上部構造調査	上部構造調査
	(2) 上部構造調査	上部構造調査	上部構造調査	上部構造調査	上部構造調査	上部構造調査
	(3) 上部構造調査	上部構造調査	上部構造調査	上部構造調査	上部構造調査	上部構造調査
	(4) 上部構造調査	上部構造調査	上部構造調査	上部構造調査	上部構造調査	上部構造調査
合計					77 点	(A1)

図 2.11 落石・崩壊の安定度調査表の記入例

② 防災カルテ点検

防災カルテ点検は継続観測が必要な箇所について、年1回専門技術者が目視点検を行い、亀裂の計測や新たなクラックの発生が無いかを観測するもので、法面のスケッチを残して継続的な観測を行っている。クラックが進展する場合は年2回もしくは緊急対策を実施している。防災カルテ点検も定期点検と同様に目視やクラック幅の計測が主体で表面からの情報に頼っているのが現状である。

③ 異常時点検・調査

法面に大きな変状が発見された場合や、変状の進行が止まらない等の場合は、法面の詳しい調査がされる。調査は主にボーリング調査が主体で、近年では屈折法による弾性波探査も一部で用いられている。この調査は、法面保護工などの安全対策を行う目的を主眼にのいたものである。

2.3 まとめ

近年の異常気象の多発により、土砂災害が暫増傾向にある中で、道路の老朽化も加わり道路法面災害も同じような傾向をたどると考えられる。このような状況下において、道路法面の点検や点検結果に基づいた対策や、災害が発生する前に通行止めの措置等が講じられているが、法面の被災予測は十分とは言い難い。

ボーリングや一部で行われている弾性波探査などの調査は、表面状況から危険と判断されて、対策を行う段階になってから初めて実施されるのが通例であり、一般の道路法面点検は、目視を主体とした表面クラックなどの変状等の観測に頼っており、法面の安全性評価のための内部劣化状況を十分に捉えきれていないためと考えられる。この原因は、維持管理のための予算の制約と、法面健全性評価のための法面内部探査技術上の課題が有るためである。

今後、財政的な制約が厳しくなることが予想されるなかで、法面の老朽化に対して、経済的に効率的な保全対策を実施して、安全性の確保を行っていくためには、法面の健全性を適切に評価して、適切な時期に法面への対策や対応が重要である。このためには、道路法面の内部情報を得るための適切な探査手法の開発が求められる。

参考文献

- 1) 北橋健治：これでいいのかわが国土 二十一世紀の社会資本整備の課題と展望, pp. 30, (社)全日本建設技術協会, 2004.
- 2) Kevin E. Trenberth：日経サイエンス 2007. 10, pp. 30, 日経サイエンス社, 2007.
- 3) 国土交通省：平成 19 年度国土交通白書 第 1 章 地球温暖化とわたしたちの暮らし, pp. 8-9, 2008.
- 4) 山本剛・満下淳二・楠見晴重・小山倫史・松岡俊文・大西有三：道路法面管理と物理探査, 最新の物理探査適用事例集, pp. 87-96, (社)物理探査学会創立 60 周年記念実行委員会, 2008.
- 5) 国土交通省道路局：災害時にも安定して機能する道路ネットワークのあり方, 第 22 回基本政策部会資料, 資料-3, pp. 5-10, 2007.
- 6) 国土交通省道路局企画課：道路統計年報 2007 版, pp. 22-25, 2008.
- 7) 芦田諱・沖村孝, 物理探査学会編：老朽化吹付け法面の調査・対策の手引き, pp. 5, 鹿島出版会, 2006.
- 8) 国土交通省道路局：災害時にも安定して機能する道路ネットワークのあり方, 第 22 回基本政策部会資料 資料-3, pp. 5-10, 2007.
- 9) 佐々木靖人・矢島良紀・倉橋稔幸：全国国道斜面災害データベースの構築と過去 15 年間の災害分布特性, 日本応用地質学会平成 18 年度研究発表会講演論文集, pp. 377-380, 2006.
- 10) (財)道路保全技術センター：道路防災点検の手引き（豪雨・豪雪等）平成 19 年 9 月 pp. 18, (財)道路保全技術センター, 2007.
- 11) (財)道路保全技術センター：道路防災点検の手引き（豪雨・豪雪等）平成 19 年 9 月 pp. 30, (財)道路保全技術センター, 2007.

第 3 章 道路法面の健全性評価の着目点

3.1 はじめに

この章では、道路法面健全性評価のために必要な着目点について述べる。盛土および切土等法面の健全性評価のためには、法面内部のどの部分を、物理探査手法で探査すれば良いかを分析した。

分析方法は以下の 3 つの方法で実施した。

- ① 各種文献における各種不安定要因を分析した。
- ② 防災総点検結果と専門技術者が着目した不安定要因を分析した。
- ③ 防災ドクターが着目した不安定要因を分析した。

また、上記①の分析した文献は下記の文献である。

- 1) 道路土工のり面工・斜面安定工指針¹⁾：(社)日本道路協会(H11. 3)
- 2) 道路防災総点検要領(豪雨・豪雪等)²⁾：建設省道路局発行(H8. 8)
- 3) 斜面安定評価における劣化概念の導入³⁾：(社)建設コンサルタンツ協会近畿支部、斜面防災研究委員会(H18. 4)

また上記②の分析に使用した防災総点検結果データは、近畿地方整備局が平成 8 年と平成 16 年に実施したものである。

さらに上記③の分析に使用した防災ドクターの点検結果データは、近畿地方整備局が平成 16 年度に実施したものである。

着目点の分析は「盛土」と自然斜面を含む「切土等」に分けて行う。

3.2 盛土法面の健全性評価の着目点

3.2.1 各種文献からの盛土法面の不安定化要因と点検ポイント

① 「道路土工のり面工・斜面安定工指針」による盛土崩壊メカニズムと不安定要因

盛土法面の一般的な崩壊メカニズムやその不安定化要因(素因・誘因)については、「道路土工のり面工・斜面安定工指針：(社)日本道路協会(H11. 3)」にまとめられており、以下のよう分類されている。

浅い盛土崩壊：主として盛土材料や転圧の不均一性を不安定化要因とする盛土自体の崩壊。

深い盛土崩壊：主として盛土材料や盛土設置位置を不安定化要因とする盛土自体の崩壊。

基礎地盤を含む崩壊：主として周辺地盤の状況や盛土設置位置を不安定化要因とする基礎地盤を含んだ崩壊。

盛土の崩壊メカニズムは、

【降雨や地下水の浸透、流水による洗掘等の局所的な集水によるものが支配的】であるとされている。

盛土の不安定化要因は主として、

【盛土材料や転圧の不均一性、盛土設置位置や周辺地盤の状況(降雨による流水や地下水の影響)】であるとされている。

② 「道路防災総点検」での盛土の調査の着目点

道路防災総点検は「平成8年度道路防災総点検要領(暴雨・豪雪等)」や「平成18年度道路防災総点検要領」により行われており、基本的にH18年点検はH8年点検の延長上にあり、具体的な作業手法の違いやそれに伴う書式の違いはあるが、「健全性評価のために必要な着目点」に関する変更は無い。表3.1にH18年道路防災総点検要領の盛土調査の留意点を示す。

表3.1 盛土調査の留意点²⁾

着目点・留意点	解説
変状	変状の発生箇所は、盛土本体に限らず、(谷側)法面下部の自然斜面の洗掘等、盛土体に影響のある範囲全てを対象とする。構造的な変位は特に重要な指標となる。構造的なクラック、開口亀裂には、土留擁壁のはらみ等も含む。 変状の発生原因を把握し、構造的な変状であるか評価する。路面に発生する円弧状クラックや陥没、擁壁に発生するはらみ等は構造的な変状である可能性が高い。
基礎地盤	基礎地盤が、軟弱地盤(沖積低地、埋立地、谷底平野等)や移動土塊(地すべり、表層クリープ等)である場合には、豪雨時や長雨時に盛土体を変形させる滑動を生じることがある。
盛土材	盛土材は、風化の進行の早いもの、吸水すると強度の低下しやすいものがある。盛土法面の被覆が盛土材の土質と異なる場合あり。施工時の資料を利用する。盛土施工箇所周辺の発生土を用いていると判断される場合には、発生土の土質を盛土材の土質とする。
地下水・表面水	地下水、表面水が盛土体へ浸透し、盛土法肩部のすべり、崩壊が発生する。斜面または道路面からの表面水が盛土法面を洗掘する。盛土部分のみではなく周辺部の土地利用状況、路線の線形による路面水の集中箇所も含めた排水系統を点検する。
溪流	溪流内に土石流の痕跡(流域内の崩壊地や堆砂や流木)の有無。横断排水施設の吞口部へ集水しやすい地形、施設であるかどうか。横断排水施設は十分であるかを評価する。
河川水・波浪	盛土法尻が平常時、異常時の冠水時に水衝による浸食を受ける。横断排水施設の吐口が冠水する場合は、横断排水施設の排水能力を低下させ、吞口のオーバーフローにより盛土が被災する。
既設対策工	変状対策、基礎地盤対策、地下水・表面水対策、溪流対策、河川水・波浪対策の効果の評価を行う。
被災の履歴	降雨・集水によってもたらされる災害は、地形条件が大幅に変化しない限り反復性あり。盛土設置以前の災害記録についても資料を収集する。

上記に掲げた着目点をみるとわかるとおり、盛土の劣化要因はほとんどが水に関係することがうかがえる。

H18年点検要領は、主に表層で確認される現象の目視観察を念頭に置いたものであり、盛土や地盤の内部(不可視部分)の状況把握については、言及されていない。

③ 「斜面安定評価における劣化概念の導入」による盛土の点検ポイント

「斜面安定評価における劣化概念の導入：(社)建設コンサルタンツ協会近畿支部、斜面防災研究委員会(H18.4)」の研究成果では、今後盛土法面に悪影響を及ぼす可能性のある事項や、変状を早期に捉えやすい構造物に着目して、損傷・点検ポイントが整理されている。表3.2に盛土に着目した研究成果の内容をまとめて示す。

表3.2 盛土に着目した点検のポイント、点検箇所、点検項目一覧表³⁾

過去の被災経験からの構造物点検の損傷・点検ポイント	共通する点検項目
1) 天端や打継ぎ目から水のしたたる擁壁は水を抜く必要がある。 2) コンクリート構造物による保護工のクラックは、縦よりも水平・斜方向のものに注意が必要。 3) 盛土法尻の擁壁(ブロック積み)にはクラックが入りやすい。 4) 無いより悪い欠陥水路。 5) 湧水にごる、崩壊近し。 6) 独立した大木は法面をゆるめる。	1) クラック 2) はらみ出し 3) 湧水 4) 空洞化 5) 排水機能 6) 基礎の沈下 7) 移動・傾き
変状が顕在化し易い点検項目や点検箇所	8) 洗掘
1) 法面への流下水の流入状況 2) 法面と構造物の境界部の洗掘、亀裂、空洞 3) 構造物周辺の地盤の洗掘及び沈下 4) 排水施設の配置状況、機能状態 5) 法面、構造物排水孔からの湧水、排水状況	9) 鉄筋の露出・腐食 10) 植物生育状況

3.2.2 防災総点検結果と盛土法面の技術者の着目点

① 盛土の不安定要因分析のデータ

近畿地方整備局で実施した防災総点検結果と点検した専門技術者による診断データをもとに着目点を整理する。

図3.1に示すように、「平成8年度に実施した防災総点検」のうち「調査表が収集できた箇所」で「平成16年度も引き続き経年観測していた箇所」のデータから抽出・整理した64箇所のカルテ対応盛土法面のデータを用いて、法面の健全性を定量的に評価できる項目や着目箇所、その計測手法についての検討を行う。

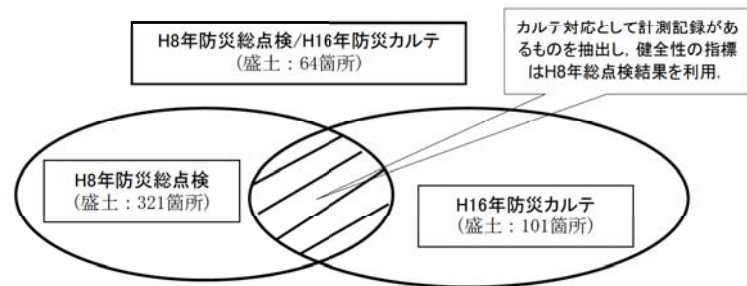


図 3.1 整理・抽出した防災総点検データ

② 盛土法面の変位・変状計測箇所

変位・変状がカルテ対応法面で実際に計測されている箇所を図 3.2 に示す。盛土法面の不安定化要因として着目されている健全性判定の着目場所は、舗装部の変状の有無が最も多く、次いで盛土表面と擁壁などのクラック変状となっている。これらは比較的発見し易く、計測も容易であるためと考えられる。水に関わる排水路変状、湧水等が比較的少ない。

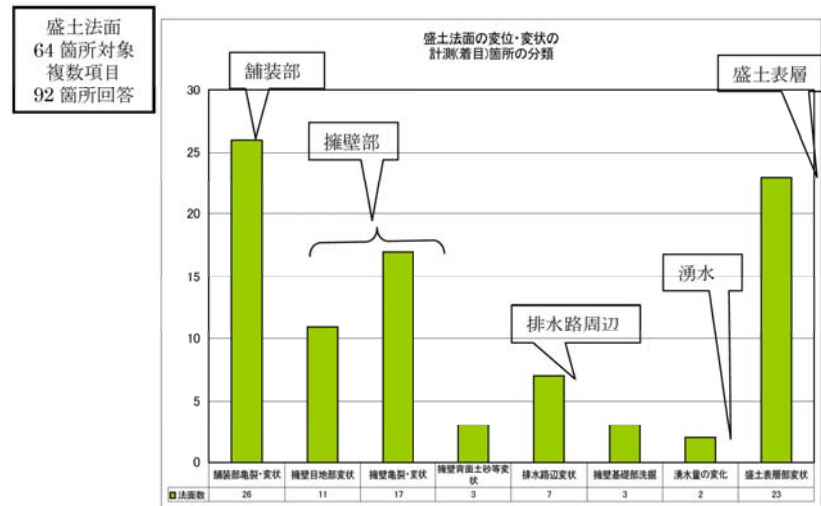


図 3.2 盛土法面の変位・変状の計測(着目)箇所の分類

③ 点検技術者の盛土法面の着目不安定化要因

近畿地方整備局が平成 16 年度に行った、防災点検結果から実際に現場において点検技術者が着目している不安定化要因を表 3.3 に項目別に整理し、表 3.4 に抽出例を示した、ここにおいても、可視範囲に留まっている。

表 3.3 点検技術者が着目する不安定化要因(盛土法面)

区分	不安定化要因(着目点)
地形・形態	越波、集水地形、切盛境
変状	側溝の段差・変状、路面の沈下・亀裂や亀裂の方向、盛土の沈下・陥没・崩壊跡・小規模すべり、法尻の洗掘
基礎地盤	—
盛土材	盛土の不均質性(置換や再転圧の提案が多い。)
地下水・地表水の盛土への影響	側溝や排水路の機能を判断
溪流状況	水衝部の洗掘、横断排水路の機能を判断
河川水・波浪の影響	越波による盛土吸い出しの予測

表 3.4 点検技術者が着目する不安定化要因の抽出例(盛土法面)

地点番号	不安定化要因(着目点)	対策・判定
1	側溝の段差・変状	表面排水設備不良
2	路面の亀裂	「継続計測」
3	歩道路面の亀裂 盛土材料の不均質に着目 切盛境界の位置	「継続計測」 盛土材の沈下を想定して良質土に置換 盛土の不等沈下の可能性
4	盛土形態に着目 路面の亀裂方向に着目 擁壁背面の盛土の沈下	切り盛り境界部のすべり面形成 切り盛り境界付近で、沈下・亀裂と判定 盛土体自体の変形が問題
5	路面の亀裂 コンクリート張り工の亀裂 側溝の傾斜・亀裂 法尻側溝の亀裂・傾斜 盛土材の沈下・変状・陥没	オーバーレイによる補修対策 「継続計測」 盛土体の沈下を推定、「継続計測」 「継続計測」 盛土材の改良を提案
6	側溝の段差・変状 盛土の崩壊跡	すべり変位と判定し、詳細地質調査
7	路面の亀裂形状・方向 に着目	盛土材料内のすべりと判定 「継続観測」 盛土材料の改良かすべり対策を提案
8	法尻の洗掘	洗掘で崩壊発生と判定、対策が必要
9	盛土の沈下と 小規模なすべり 歩道路面の亀裂	応急対策が必要 盛土材料の置換 「継続観測」
10	法尻の高潮時越波 盛土の変状	越波による盛土吸い出しと判定 盛土の置換・再転圧を提案
11	道路面の亀裂	盛土材の沈下と判定し、カルテ対応
12	盛土表面に崩壊跡	盛土材だけの変状として、良質材置換対策 「継続観測」

④ 経過年数と評点（盛土法面）

経過年数と不安定度を示す評点（H8 年点検時点）との相関を図 3.3 に示す。経過年数と評点の相関はかなり低く、形態の寄与が評点に与える影響が大きい。

表 3.3 から溪流横過部では、可視部分である溪流内の流路工や横断排水溝の整備を重要な着目点としている。片切・片盛部では、上方の切土等法面からの表流水の影響や地山からの地下水の浸透も重要な着目点であることから、平坦地部・傾斜地部に比べて着目項目が多い。着目すべき不可視部分の不安定化要因は、片切・片盛部に集約されと考えられる。

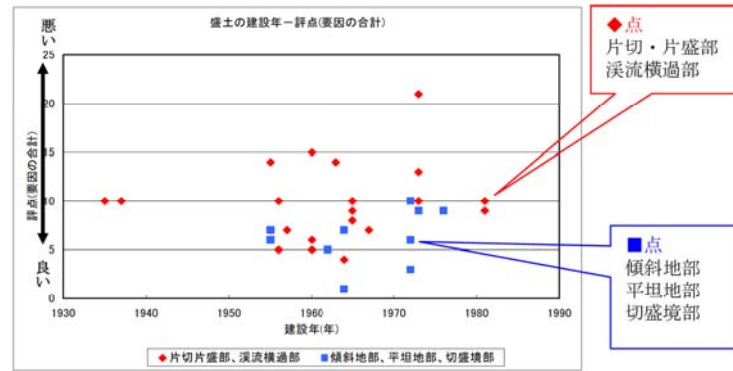


図 3.3 盛土法面の建設年と評点(要因の合計)

3.2.3 防災ドクターの盛土法面の着目点

近畿地方整備局では豪雨後等に法面の点検を行い、被災箇所や課題のある法面について、現場において学識経験者である防災ドクターと一緒に評価を行っている。この評価結果、特に豪雨災害によって崩壊した盛土法面については、貴重な意見が集約されている。近畿地方整備局で実施した平成 16 年度防災ドクター点検結果から実際に現場において防災ドクターが着目している不安定化要因を表 3.5 に項目別に整理し、表 3.6 に抽出例を示した。防災ドクターは地表付近の可視範囲だけでなく、ボーリング調査の指示など不可視領域まで踏み込んで、健全性評価を行っている。

表 3.5 防災ドクターが着目する不安定化要因(盛土法面)

区分	防災ドクターの着目点	防災ドクターの指示
地形	崩壊地形、旧地形、旧河道、小崩壊跡 波浪の影響を受けやすい地形	古地図や空中写真による地形判読 過去の災害記録調査
地質	活断層の分布 基礎部の地層構造 脆弱化しやすい地質	活断層との交差部は要注意 流れ盤（ボーリング調査） 泥岩は脆弱化しやすい（ボーリング調査や物理探査）
盛土材料	空洞 小崩壊跡、落石 経年と地下水の影響 スレーキング材料	吸い出しを受けやすい材料（ボーリング調査、レーダによる空洞探査、土質の室内試験） 今後変状が認められれば「継続計測」を行う 経年と地下水の進入による結果（ボーリング孔を利用した地下水観測） 材料特性を調査（ボーリング調査）
変状	擁壁の変状（はらみ出し） 沈下（構造物、盛土） 法枠の破断 洗掘	計測指示と程度の大小により詳細調査や対策に移行 継続計測、ハザードマップによる整理 緊急対策、打音調査 応急対策後の変化観測
水	伏流水、地下水 排水不良 波浪、越波	古地図や空中写真による地形判読（ボーリング孔を利用した地下水観測） 排水機能のチェック 地形的配慮、遮水対策、流量観測

※着目点のうち、法面の内部構造など目視不可の項目をゴシックで示した。

表 3.6 防災ドクターが着目する不安定化要因の抽出例(盛土法面)

地点 番号	変状 (誘因)	建設 年次	盛土区 分	防災ドクター診断結果	
				着目点	指示・健全性の判定
1	盛土変状 (台風と集中豪雨)	1990	片切・ 片盛	盛土材料 盛土経過年数と地下水の影響 基盤の断層位置・分布 旧地形・現在地形 排水設備不良 変状・腐食程度	透水性、粒度分布が不適当 15年の経年と地下水の進入の結果 湧水箇所と湧水量の定量的観測を指示 旧地形のため池や旧河道の位置確認 航空写真による旧地形の調査を指示 排水設備機能のチェックを指示 変状・腐食程度の計測を指示
2	路面陥没	不明	平坦地	旧地形・旧河道 地下水	資料や古地図による判定など 構造物建造による水みちの変化予測 路面下空洞調査(レーダ探査)を指示
3	コンクリート擁壁に クラックと浮き	不明	平坦地	沈下・変状	応急対策、「継続観測」 ボーリング調査、圧密沈下の計測
4	盛土はらみ出し (長期降雨と台風)	1982	片切・ 片盛	活断層と空洞 はらみ出し変状、波浪の影響	活断層と交差する箇所は、要注意 空洞調査(地中レーダ、サウンディング)
5	盛土はらみ出し (長期降雨と台風)	1982	片切・ 片盛	はらみ出し変状、波浪の影響	ボーリング調査、孔内傾斜計、伸縮計による観測
6	法面はらみ出し (台風による集中豪 雨)	1963	傾斜地	越波する地形状況	遮水対策を指示
7	盛土の小崩壊	1960	片切・ 片盛	小崩壊の跡の有無 盛土材料	崩壊跡があり、対策必要と判定 ボーリング調査による盛土性状確認 今後、変状が認められれば、「継続計測」
8	縦排水溝の沈下、防 潮堤上部の縦クラッ ク 法枠工の破断	1960	片切・ 片盛	法枠工の変位の程度と浮き	法枠工破断の場合は、緊急対応と判定 継続観測(打音調査)
9	盛土の洗掘と変状 (台風の降雨による 洗掘)	1966	片切・ 片盛	脆弱化しやすい地質 崩壊性地質構造・流れ壁 地下水の影響 河川の洗掘地形	脆弱化しやすい泥岩の存在する ボーリング調査 流れ壁が存在するため、要応急対策 豪雨により地下水位が上昇 河川増水で斜面法尻の洗掘 応急対策後の計測による累積変化観測を指示
10	盛土の洗掘と変状 (台風の降雨による 洗掘)	1966	片切・ 片盛	脆弱化しやすい地質 崩壊性地質構造・流れ壁 地下水の影響 河川の洗掘地形	脆弱化しやすい泥岩の存在する ボーリング調査 流れ壁が存在するため、要応急対策と路面変状調査 豪雨により地下水位が上昇 河川増水で斜面法尻の洗掘
11	石積み擁壁継ぎ目に 開口亀裂やはらみ出 し	1978	片切・ 片盛	石積み擁壁の変状	2段階の計測を指示 ①計測(1回/月と豪雨時) ②累積変位がある場合は詳細調査を行う (ボーリング調査、地中変位計・地下水観測)
12	盛土擁壁の変状と洗 掘 (台風の降雨による 洗掘)	1953	片切・ 片盛	河川の洗掘状況 擁壁の変状、路面の沈下 盛土材料と吸い出し空洞の形成	河床材料調査、流量観測を指示 擁壁の観測 裏込土の土質室内試験 (吸い出しを受けやすい材料)、ボーリング調査

※着目点のうち、法面内部構造など不可視の項目をゴシックで示した。

3.2.4 盛土法面の健全性評価のための着目点

以上のことを分類・整理した盛土の崩壊メカニズムに関連する不安定化要因(着目点)を経年変化の有無、目視の可否を併記して、表 3.7 にまとめ、その着目位置を図 3.4 に図示した。

盛土の不安定化要因は主として、盛土材料や転圧の不均一性、盛土設置位置や周辺地盤の状況(降雨による流水や地下水の影響)であることを考慮すると、定量的な盛土の健全性評価を行うにあたっては、以下の問題点が考察される。

【問題点】

- ① 不安定化要因の多くは定性的で、項目が多く絞り込みが困難である。
- ② 定性的な評価点の評価では点検者によるばらつきが大きい。
- ③ 地盤と盛土部の境や盛土材料や盛土施工時の基礎データが残っていない。
- ④ 変位や亀裂の伸展、湧水量の計測は定量的であるが、湧水量の計測は一部に限られており、年2回程度と測定間隔も長く、降雨や地下水との関連が不明。ただし、湧水量が年々低下する傾向が読み取れる。
- ⑤ 部分的な補修等によって、計測を中断する所があるが、補修の記録は残っていない。
- ⑥ 不安定化要因(着目点)のほとんどの項目が目視不可である。
- ⑦ 唯一定量化されている亀裂等の変位の観測結果は、盛土法面全体の健全性評価に直接結びついていないため、何らかの解析を通じてその影響の度合いを判定する必要がある。

このように法面の健全性を評価するための定量的なデータが少ないことがわかった。盛土の変状や崩壊は、設置された場所の条件と盛土内部の変化によって発生すると考えられる。

以上のことから盛土法面の健全性評価のためには、

- ① 不安定化した結果としての変状
- ② 盛土材料と基盤部の位置など不可視部分の地中構造
- ③ 降雨と関連する湧水・地下水の状況や変動

の把握が重要であることがわかった。

表 3.7 盛土法面の不安定化要因(着目点)の整理結果一覧表

不安定化要因(着目点)		経年変化		目視	
		しない	する	可	不可
1 地形	現在の集水地形と旧地形・旧河道	○			○
	崩壊地形	○		○	
	切盛境	○			○
	波浪、越波		○	○	
2 地質	活断層の分布	○			○
	脆弱化しやすい地質		○		○
3 基礎地盤	基礎地盤の流れ盤	○		○	○
4 盛土材	小崩壊跡		○	○	
	スレーキング材料		○		○
	盛土の不均質性	○			○
5 排水施設	側溝等の表面排水設備の不良		○	○	
	暗渠や排水路の排水不良		○	○	○
6 地下水	伏流水、地下水		○		○
	地下水の排水不良		○		○
	波浪、越波		○	○	
7 溪流状況	横断排水施設の排水不良		○	○	
	水衝部の洗掘		○	○	
8 河川水・波浪の影響	越波による盛土吸い出し		○	○	
不安定化した結果としての着目点					
1 変状	路面の沈下・亀裂や亀裂の方向		○	○	
	側溝の段差・変状		○	○	
	擁壁の変状(はらみ出し)		○	○	
	構造物の沈下		○	○	
	法枠の破断		○	○	
	法尻の洗掘		○	○	
	空洞		○		○
	表面水・地下水の排水不良		○	○	○

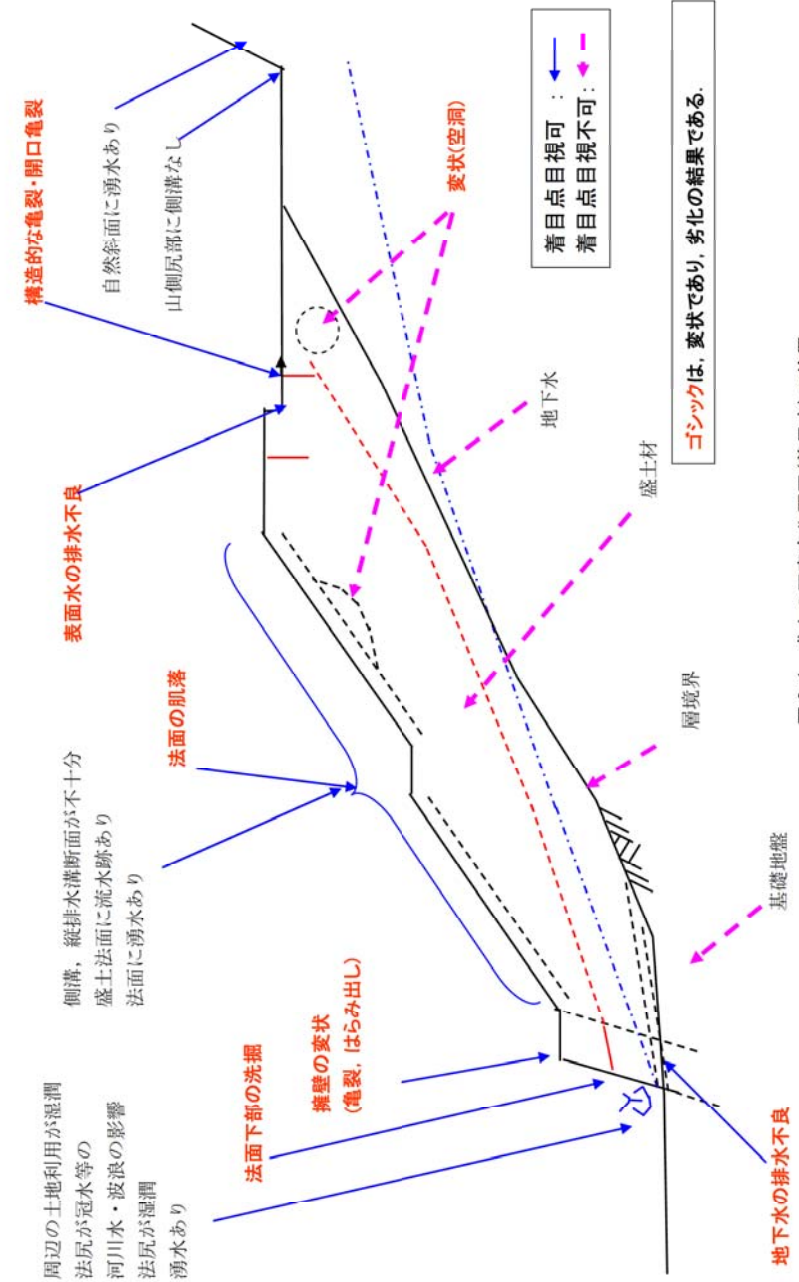


図 3.4 盛土の不安定化要因(着目点)の位置

3.3 切土等法面の健全性評価の着目点

3.3.1 各種文献からの切土等法面の不安定化要因と点検ポイント

① 「道路土工のり面工・斜面安定工指針」¹⁾ の切土等崩壊メカニズムと不安定化要因

切土法面や自然斜面の一般的な崩壊メカニズムやその不安定化要因(素因・誘因)については、「道路土工のり面工・斜面安定工指針」：(社)日本道路協会(H11.3)にまとめられており、以下のように分類されている。

切土法面崩壊や自然斜面崩壊は、

浸食・崩落：土砂・風化土斜面や斜面上のオーバーハング部分、亀裂の多い岩盤を不安定化要因とする崩壊。

表層崩壊：斜面上の土砂や湧水、斜面上の風化土、亀裂の多い岩盤を不安定化要因とする崩壊。

大規模崩壊・地すべり性崩壊：斜面上の土砂や地下水、斜面背面の断層・破碎帯や斜面の流れ盤等の地質構造を不安定化要因とする崩壊。

落石は、

抜落ち型(転石型)落石：礫を含む土砂斜面や岩盤上の土砂斜面内の礫を不安定化要因とする崩壊。

はく離型(浮石型)落石：亀裂の多い岩盤や風化・浸食しやすい岩盤の剥離を不安定化要因とする崩壊。

その他：風化・浸食の残留物を不安定化要因とする崩壊。

切土法面の崩壊と自然斜面における崩壊メカニズムは、ほとんど現象が同じであるため両者を併せて取り扱っている。切土法面および自然斜面の崩壊メカニズムは、

『斜面を構成する土質、地質や地層構成、地質構造および湧水や地下水によるものが支配的』であるとされている。

切土等法面の不安定化要因は主として、

『土砂・風化土斜面、亀裂の多い岩盤や断層・破碎帯、オーバーハング、斜面上の湧水や地下水』であるとされている。

② 「道路防災総点検」⁴⁾ での切土等の調査の着目点

道路防災総点検は盛土と同様に「平成8年度道路防災総点検要領(暴雨・豪雪等)」や「平成18年度道路防災総点検要領」により行われており、基本的にH18年総点検はH8年点検の延長上にあり、具体的な作業手法の違いやそれに伴う書式の違いはあるが、「健全性評価のために必要な着目点」に関する変更は無い。

表3.8にH18年道路防災総点検要領の落石・崩壊に記載されている調査の留意点を示す。

落石・崩壊は、特に切土等法面で認められる災害である。盛土の劣化要因がほとんど水に関係していたのに対し、切土等法面の劣化要因は水だけでなく、切土等法面を構成する土質地質構造が関係するとの認識が示されている。

H18年点検要領は、主に表層で確認される現象の目視観察を念頭に置いたものであり、切土等法面の地盤内部(不可視部分)の状況把握については、言及されていない。

表3.8 切土等法面の落石・崩壊調査の留意点

着目点・留意点	解説
地形	落石・崩壊現象が比較的活発な箇所では、その結果として形成された特有の地形や落石・崩壊現象を促進する地形(崖錐地形、崩壊跡地、明瞭な遷急線、台地の裾部や急崖、著しい脚部浸食、オーバーハング、集水型斜面、土石流跡地、尾根先端と凸型斜面)が見られる場合がある。
土質地質構造	崩壊現象が発生しやすい(落石・崩壊のサイクルが速い)土質(浸食に弱い土質、強度低下しやすい土質)、地質(極めて柔らかい岩、劣化の速い岩、割れ目や弱層の密度が高い岩)、構造(不透水性基盤上の土砂、割れ目や弱層)を、法面内だけでなく、点検箇所の前後や周辺の地山状況から判断する。
表層の状況	表土及び浮石・転石の状況、湧水状況、表層の被覆状況を観察する。
形状	勾配は急なほど、法高が高いほど安定度は低い。ただし、法勾配は高さと土質岩質に応じて、経験的にほぼ安全と考えられる勾配が採用されており、この勾配との関係で安定度を評価する。
変状	肌落ち、小落石、ガリ浸食 ^{注)} 、洗掘、パイピング孔、陥没、はらみ出し、根曲がり、倒木、亀裂、開口亀裂等の変状について、明瞭さとその有無に基づき、隣接法面・斜面の状況も参考に判断する。
被災の履歴	最近の対策工実施以降の被災があれば、その頻度と交通への支障の程度より、安定度を評価する。
既設対策工	想定される災害のパターンや規模とその発生頻度を念頭に行う。構造物の対策工自体の老朽化や破損などの状況、法面・斜面からの離隔距離についても考慮する。

注) ガリ浸食：水の流れにより浸食を受けた地形

③ 「斜面安定評価における劣化概念の導入」による切土等法面の点検ポイント

「斜面安定評価における劣化概念の導入：(社)建設コンサルタンツ協会近畿支部，斜面防災研究委員会(H18.4)」の研究成果では，変状を早期に捉えやすい切土等法面の構造物に着目して，過去の被災経験から，構造物に絡む損傷・点検ポイントが整理されている。表 3.9 に切土等に着目した研究成果の内容を記載する。

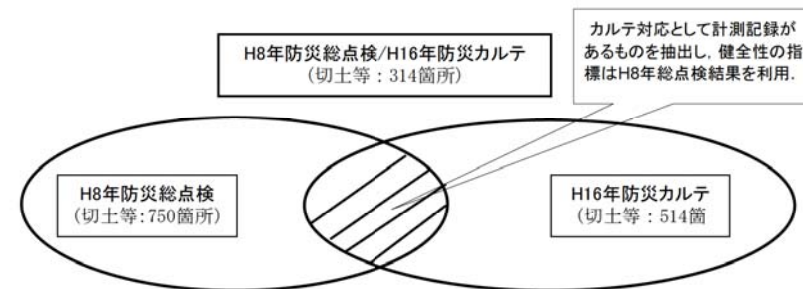
表 3.9 切土等に着目した点検のポイント，点検箇所，点検項目一覧表³⁾

過去の被災経験からの構造物点検の損傷・点検ポイント	共通する点検項目
1) コンクリート吹付けの欠陥（空洞）は，熱映像とハンマー打診で探査する。 2) 厚めのコンクリート吹付けは，法先のせり出しに注意する。 3) 天端や打継ぎ目から水のしたたる擁壁は水を抜く必要がある。 4) コンクリート構築物による保護工のクラックは，縦よりも水平・斜方向のものに注意が必要。 5) 無いより悪い欠陥水路。 6) 湧水にごる，崩壊近し。 7) 独立した大木は法面をゆるめる。	1) クラック 2) はらみ出し 3) 湧水 4) 空洞化 5) 排水機能 6) 基礎の沈下 7) 移動・傾き 8) 洗掘 9) 鉄筋の露出・腐食 10) 頭部定着部材料の損傷・腐食・変形・沈下 11) 杭の変位・周辺の沈下・盤ぶくれ 12) 斜面の亀裂 13) 支柱の変位 14) ロープの緩み 15) 生育状況（基盤の流出・有害植物の侵入）
変状が顕在化し易い点検項目や点検箇所	
1) 法肩上部地山の亀裂，沈下，浮石の有無 2) 法肩上部地山の植生の変化（枯損状況） 3) 法面への流下水の流入状況 4) 法面と構造物の境界部の洗掘，亀裂，空洞 5) 構造物周辺の地盤の洗掘及び沈下 6) 排水施設の配置状況，機能状態 7) 法面，構造物排水孔からの湧水，排水状況	

3.3.2 防災総点検結果と切土等法面の技術者の着目点

① 不安定要因分析のデータ（切土等法面）

近畿地方整備局で実施した防災総点検結果と点検した専門技術者による診断データをもとに着目点を整理する。図 3.5 に示すように，「平成 8 年度に実施した防災総点検」のうち「調査表が収集できた箇所」で「平成 16 年度も引き続き経年観測していた箇所」のデータから抽出・整理した 314 箇所のカルテ対応切土等法面を用いて，法面の健全性を定量的に評価できる項目や着目箇所の検討を行う。



② 切土等法面の種類と地質構造

切土等法面等の地盤の種類と地質構造との関係を図 3.6 に示す。カルテ対応の法面では，第三紀層が最も多く，次いで中～古生層の砂・粘板岩と流紋岩・花崗岩などが多い。未固結層では崖錐・崩積土などの土質が多い。いずれの地質においても，着目点として「流れ盤」が過半数を占めている。

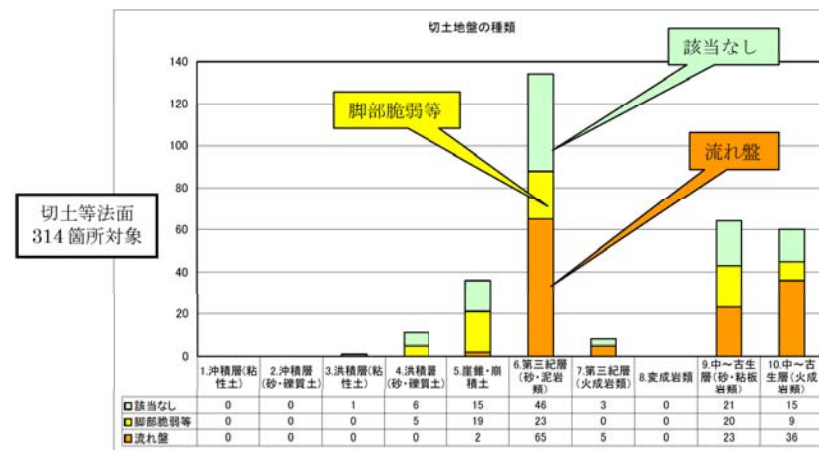


図 3.6 切土等法面の設置箇所の地質

③ 経過年数と評点

経過年数と不安定化要因の安定度を示す評点(H8点検時点)との相関を図3.7～図3.8に示す。経過年数と評点の相関はかなり低いことが判った。豪雨地域と豪雪地域では、評点の高い(悪い)法面に変位が見られる傾向が多少見られる。

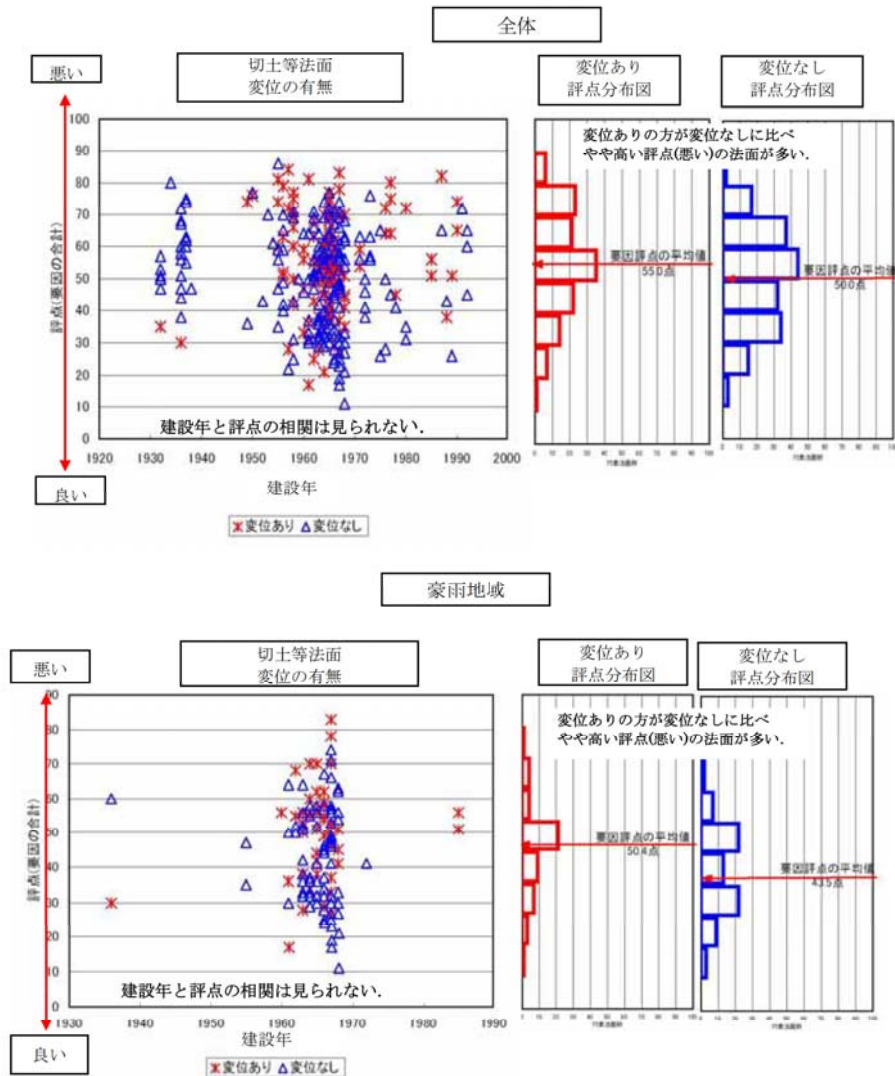


図 3.7 切土等法面の経過年数と評点 (上: 全体, 下: 豪雨地域)

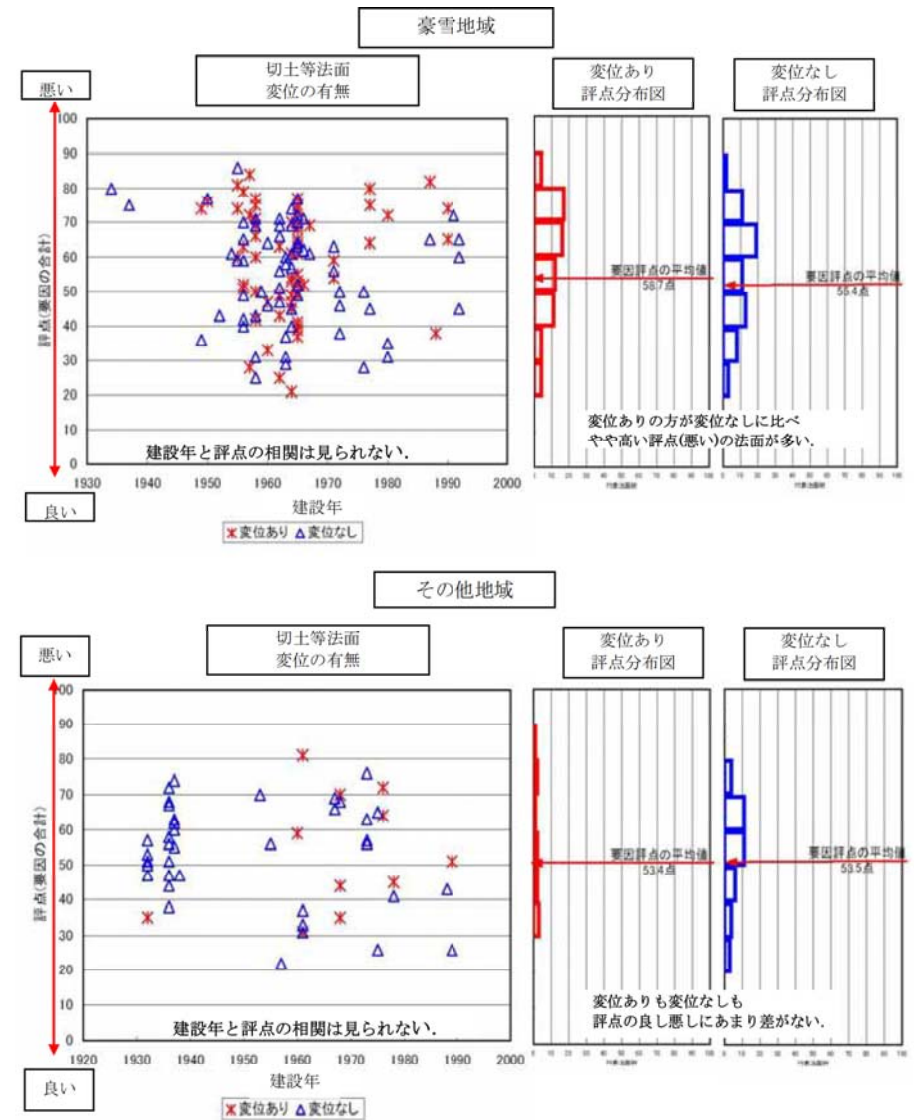


図 3.8 切土等法面の経過年数と評点 (上: 豪雪地域, 下: その他地域)

④ 変位・変状計測箇所（切土等法面）

変位・変状がカルテ対応法面で実際に計測されている箇所を図 3.9 に示す。切土等法面で不安定化要因として着目されている健全性判定の着目場所は、吹付けや擁壁等構造物の亀裂・変状の有無が大半を占めている。舗装部や湧水については比較的少ない。自然斜面で不安定化要因として着目されている健全性判定の着目場所は、斜面上の土質や地質の状況が最も多く、次いで落石防護柵背面の状況で占められている。

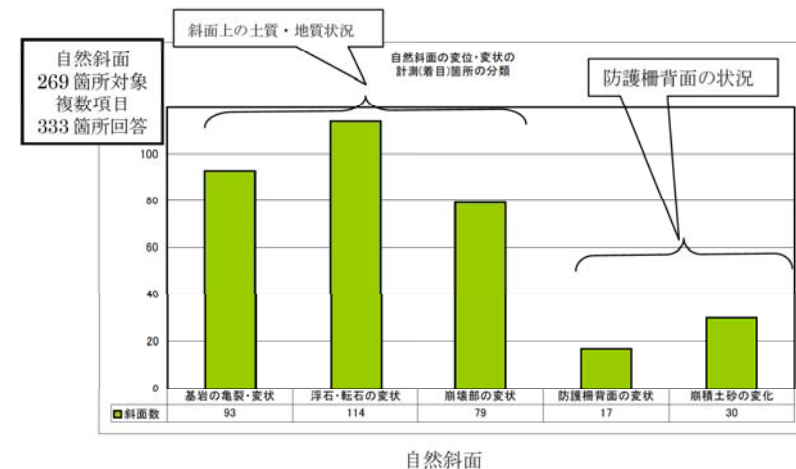
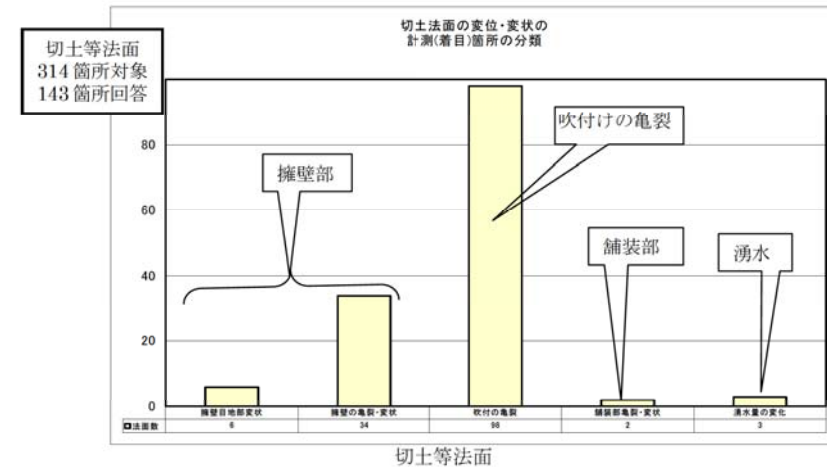


図 3.9 切土等法面の変位・変状の計測(着目)箇所の分類

⑤ 点検技術者の切土等法面の着目不安定化要因

防災総点検結果から実際に現場において点検技術者が着目している不安定化要因を表 3.10 に項目別に整理し、表 3.11 に抽出例を示した。

表 3.10 点検技術者が着目する不安定化要因(切土等法面)

区分	不安定化要因(着目点)
地形	オーバーハング、崩壊跡地、集水地形による土砂流出跡地
土質・地質	土砂(崩積土)、軟岩、硬岩(風化の程度、亀裂、緩みの程度)
地質構造	流れ盤
表土及び浮き石・転石の状況	斜面上の浮石・転石の有無、落石防止網や柵の背面の分布状況
湧水状況	湧水の有無を判断(量は不明)
コンクリート吹付け、法枠の変状	亀裂や亀裂からの湧水

表 3.11 点検技術者が着目する不安定化要因の抽出例(切土等法面)

地点番号	不安定化要因(着目点)	対策・判定
1	地質 転石の有無 地形 湧水の有無 擁壁のクラック	古期崩積土の分布により、崩壊の可能性があるとは判定 浮き石の不安定性を指摘 オーバーハングとなっており、落石可能性があるとは判定 湧水量が多く、落石発生を予測 崩壊地形となっており、継続計測
2	土質・地質 地形 湧水 転石の有無	未固結の崖堆積物があり、緩みやすく崩壊の可能性があるとは判定 崩壊跡地が認められ、崩壊発生の可能性あるとは判定 湧水があり、崩壊への誘引と判定 浮き石の存在が多数あり、要対策と判定
3	地形 地質構造 湧水 法枠の変状	地形から地すべりと判断、要詳細調査及び要対策と判定 流紋岩で硬質であるが、節理など亀裂が発達 亀裂のブロック状により、開口状況から緩んでいるとは判定し、崩壊の可能性があると判定 湧水は認められる コンクリートブロック法面に段差、継続計測
4	地形 湧水 露岩の程度 地質構造 転石の有無 コンクリート吹付けの剥離	オーバーハングと開口亀裂が認められ、要対策と判定 コンクリート吹付けのクラックから湧水 露岩であるが、硬質で安定 亀裂は水平で、流れ盤ではなく安定 転石があり、要対策 継続計測
5	地形 地質 コンクリート吹付け 転石の有無	オーバーハングと崩壊地形が認められ、継続計測及び要対策と判定 地質は硬質な流紋岩で、安定 割れ目に植生があり、変状が進行すると判定 落石防護柵裏面に落石があり注意を要すると指摘
6	地質 浮き石の有無	流紋岩で硬質、ただし亀裂が発達し緩みの進行を継続計測 浮き石が認められ、要対策
7	自然斜面の転石の有無 地質・地質構造	浮き石が認められ、要対策 流れ盤の発達する流紋岩では、緩みから浮き石の発生を判定 目視継続監視
8	浮き石の有無 地質・地質構造	植生の薄い部分は崖堆積層で、転石が多量に含まれる 転石が移動すると予測され、要対策が必要と判定 露岩部では、亀裂状況(開口亀裂)から転石発生が予測され継続計測
9	浮き石の有無 地質構造 地形	φ3mの浮き石が認められ、継続計測 流れ盤の節理発達を認め、浮き石の発生が予測されるため継続計測 小規模な崩壊地形、転石を含む崩積土を形成している 豪雨による再崩壊が予測されるため、土砂堆積量の変化を継続計測
10	浮き石有無 地形	φ1～2mの浮き石が認められ、要対策と判定 硬質な火成岩では、亀裂の緩みから浮き石が有るため、継続計測 斜面に流路跡が認められ、崩壊跡地である 土砂流出部の土砂堆積変化量を継続計測

3.3.3 防災ドクターの切土等法面の着目点

近畿地方整備局では豪雨後等に法面の点検を行い、被災箇所や課題のある法面について現場で学識経験者である防災ドクターと一緒に評価を行っている。この評価結果、特に豪雨災害によって崩壊した切土法面や自然斜面については、貴重な意見が集約されている。近畿地方整備局で実施した平成16年度防災ドクター点検結果から、実際に現場において防災ドクターが着目している不安定化要因を表3.12に項目別に整理し、表3.13に抽出例を示した。防災ドクターは表面の変状以外に内部情報を含めて健全性を評価している。

表 3.12 防災ドクターが着目する不安定化要因(切土等法面)

区分	防災ドクターの着目点	防災ドクターの健全性の判定
地形	オーバーハング 崩壊跡とその周辺 集水地形	対策 弾性波探査、ボーリング 地形測量して集水・排水のバランス調査
地質	流れ盤 風化の程度(崩積土層の深さ) 転石・浮き石 スレーキング 倒木 開口亀裂の状況	ボーリング調査 ボーリング、簡易ボーリング、コーン貫入試験 転石・浮き石除去または対策 粘土鉱物(スメクタイト)の調査 倒木除去 調査
変状	地山クラックの開口 擁壁・吹付けの変状 落石の発生 はらみ出し 擁壁・吹付けのクラック	調査 程度の大小により対策 パトロールによる監視 観測 計測
地下水	排水不良、湧水、雪解け水	排水処理、水抜き孔設置、集水地形の把握

※着目点のうち、法面の内部構造など目視不可の項目をゴシックで示した。

表 3.13 防災ドクターが着目する不安定化要因の抽出例(切土等法面)

地点 番号	変状 (要因)	(推定) 建設年次	防災ドクター診断結果	
			防災ドクターの着目点	防災ドクターの健全性の判定・指示
1	擁壁変状 (台風による降雨)	1932 (S7)	構造物の変形 岩盤の風化状況	構造物の変位の確認を指示 岩盤の風化の程度と風化深度を調査指示(ボーリング調査)
2	斜面崩壊 (台風による降雨)	1932 (S7)	地表近くの崩壊性土砂の分布	緩い土砂が斜面に残っていたことを指摘
3	斜面崩壊 (台風による降雨)	1932 (S7)	地表近くの崩壊性土砂の分布 排水不良	緩い崩壊性土砂の分布を指摘 排水処理対策を指示
4	斜面崩壊 (台風による降雨)	1932 (S7)	降水量と表層崩壊の関係 地下水の湧水状況 岩盤の亀裂分布状況	降雨による表層部の不安定化と判定 地下水の流況から、安全側と判定 亀裂分布からメカニズム判定可能として調査を指示 亀裂の伸縮計による計測とボーリング調査を指示
5	岩壁にクラック、剥離、浸食、一部 剥落	1951 (S26)	風化の程度 崖麓部の厚さ	風化の程度が著しいため、対策必要と判定 崖麓部の厚さにより、岩層すべりの可能性を指摘 簡易ボーリング調査を指示
6	浮石と剥離、吹付法面と擁壁にクラ ック	1960 (S35)	擁壁など構造物のクラック 落石の有無	クラックの計測による変位観測を指示 落石の発生を確認して、防護策対策必要 道路パトロール時の落石発生の確認
7	擁壁のはらみ出し、落面のクラック	-	はらみ出し変状	擁壁部クラックの計測を指示
8	斜面崩壊 (地震による崩落)	-	地震 降雨による浸食で浮き石がでやすい地質	3次元計測を実施した後、今後変化が認められれば要対策 風化帯の中に硬岩(コアストーン)が残留する地質(花崗岩)
9	斜面表層崩壊 (台風の降雨と暴風)	1964 (S39)	阿木状況 雨水浸透と表層崩壊	風による効果もありと判定、倒木の除去を指示
10	ロックシェッド上への落石 (台風など?)	1964 (S39)	雪解け水の浸透	地下水上昇による不安定化と判定、復旧工事中の観測指示
11	法面表層崩壊 (台風等の降雨)	1998 (H10)	地質構造(互層)と地下水の関係 スレーキニングによる材料の劣化、地層構造(節 理)、粘土鉱物の含有	砕石などの敷設を指示 難透水性の地層で地下水が遮断され、透水性地層に地下水が 滞留したと判断し、排水処理対策が必要と判定 スレーキニングによる脆弱部に要対策 X線回折によるスプレックタイトの同定を指示

地点 番号	変状 (要因)	(推定) 建設年次	防災ドクター診断結果	
			防災ドクターの着目点	防災ドクターの健全性の判定・指示
12	法面表層崩壊 (台風と集中豪雨)	1962 (S37)	雨水と表層崩壊の関係 自然斜面の崩壊の連鎖作用	硬質の基盤岩に薄い表土がある部分が危険と判定 集水地形の把握が必要で地形測量を指示
13	法面表層崩壊 (台風と集中豪雨)	1962 (S37)	降水と表層崩壊の関係	集水地形の把握が必要で地形測量と水抜き孔設置を指示
14	法面表層崩壊 (台風と集中豪雨)	1962 (S37)	降水と表層崩壊の関係	集水地形の把握が必要で地形測量と水抜き孔設置を指示
15	法面表層崩壊 (台風と集中豪雨)	1962 (S37)	降水と表層崩壊の関係	集水地形の把握が必要で地形測量と水抜き孔設置を指示
16	法面表層崩壊 (台風と集中豪雨)	1963 (S38)	降水と表層崩壊の関係 地質構造と地下水の関係、排水設備不良	集水地形の把握が必要で地形測量と地質調査を指示 排水機能の確認を指示
17	法面表層崩壊 (台風と集中豪雨)	1963 (S38)	降水と表層崩壊の関係 浮き石の有無	水抜き孔設置を指示 浮き石の除去
18	法面表層崩壊 (台風と集中豪雨)	1963 (S38)	降水と表層崩壊の関係	集水地形の把握が必要で地形測量と水抜き孔設置を指示
19	吹付け工の長期劣化	1960 (S35)	吹付け工の劣化程度に着目	劣化程度が大きいため対策必要と判定
20	割れ目の見られる岩の露出	1960 (S35)	岩石の風化の進行に着目 露岩の風化と亀裂の発達度に着目	風化と亀裂の組み合わせによるブロックの抜け落ちの 可能性に対して対策が必要と判定
21	法面表層崩壊 (台風と集中豪雨)	1964 (S39)	降水と表層崩壊の関係	恒久対策まで伸縮計での継続計測を指示
22	法面表層崩壊 (台風と集中豪雨)	1964 (S39)	雨水と表層崩壊の関係 硬質基盤の深さ(薄さ)に着目	集水地形の把握が必要で地形測量を指示 硬質の基盤岩に薄い表土がある部分が危険 コーン貫入サウンディングを指示
23	剥離した小岩塊や土砂崩落	1953 (S28)	流れ盤 亀裂の開口、オーバーハング地形 浮き石の有無に着目	いずれも崩落が続く可能性ありと判定 不安定な浮き石の除去を指示
24	落石発生原因となる浮石が多く分布	1971 (S46)	崩壊跡の有無に着目	崩壊跡地があるため要対策と判定 地表踏査、弾性波探査、ボーリング調査の指示
25	ネットの破損、落石の堆積	1971 (S46)	地質と流れ盤の有無に着目	記質岩の層理が流れ盤であり対策が必要と判定し ボーリング調査を指示 チャートの硬岩部は、対策の必要なしと判定

※着目点のうち、法面の内部構造など目視不可の項目をゴシックで示した。

3.3.4 切土等法面の健全性評価のための着目点

以上のことを分類・整理した切土等の崩壊メカニズムに関連する不安定化要因(着目点)の経年変化の有無、目視の可否を併記して、表 3.14 にまとめるとともに、その着目位置を図 3.11 に図示した。

切土等法面の不安定化要因は主として、土砂・風化土斜面、亀裂の多い岩盤や断層・破碎帯、オーバーハング、斜面上の湧水や地下水であることを考慮すると、定量的な健全性評価を行うにあたっては、以下の問題点が考察される。

【問題点】

- ① 不安定化要因の多くは定性的で、項目が多く絞り込みが困難である。
- ② 定性的な評点の評価では点検者によるばらつきが大きい。
- ③ 切土法面では、切土時の応力開放によって施工時に最も地山の緩みの影響を受けることが知られているが、切土施工時の基礎データが残っていない。
- ④ 変位や亀裂の伸展、湧水量の計測は定量的であるが、湧水量の計測は一部に限られており、年2回程度と測定間隔も長く、降雨や地下水との関連が不明。
- ⑤ 部分的な補修等によって、計測を中断する所があるが、補修の記録は残っていない。
- ⑥ 吹付け等の亀裂や変状の原因が、吹付け等の構造物の劣化から地山の劣化に至ったものか、地山の劣化から吹付け等の構造物の劣化に至ったものかが確定できていない。
- ⑦ 唯一定量化されている亀裂等の変位の観測結果は、切土等法面全体の健全性評価に直接結び付いていないため、何らかの解析を通じてその影響度を判定する手法を作っておく必要がある。

このように法面の健全性への影響度を明らかにするための定量評価可能なデータが少ないことがわかった。

以上のことから切土等法面の健全性評価のためには、不安定化要因(着目点)の分類・整理結果から、

- ① 不安定化した結果としての変状
- ② 切土等内部の風化度合いや亀裂など不可視部分の地中構造
- ③ 降雨と関連する湧水・地下水の状況や変動

の把握が重要であることがわかった。

表 3.14 切土等法面の不安定化要因(着目点)の整理結果一覧表

不安定化要因(着目点)			経年変化		目視	
			しない	する	可	不可
1	地形	オーバーハング		○	○	
		崩壊跡		○	○	
		集水地形	○		○	
2	地質	崩積土層の厚さ・深さ	○			○
		コアストーンなど転石になりやすい地質		○	○	
		風化の程度		○	○	○
		スレーキング		○		○
		開口亀裂の状況		○	○	
		緩みの程度		○		○
3	地質構造	浮き石・転石		○	○	
4	地下水	流れ盤	○		○	○
		地下水の排水不良		○	○	○
5	変状	湧水、擁壁・吹付け亀裂からの湧水		○	○	
		落石の発生		○	○	
		地山クラックの開口		○	○	
		はらみ出し		○	○	
		擁壁・吹付けの亀裂		○	○	
		法枠の破断		○	○	

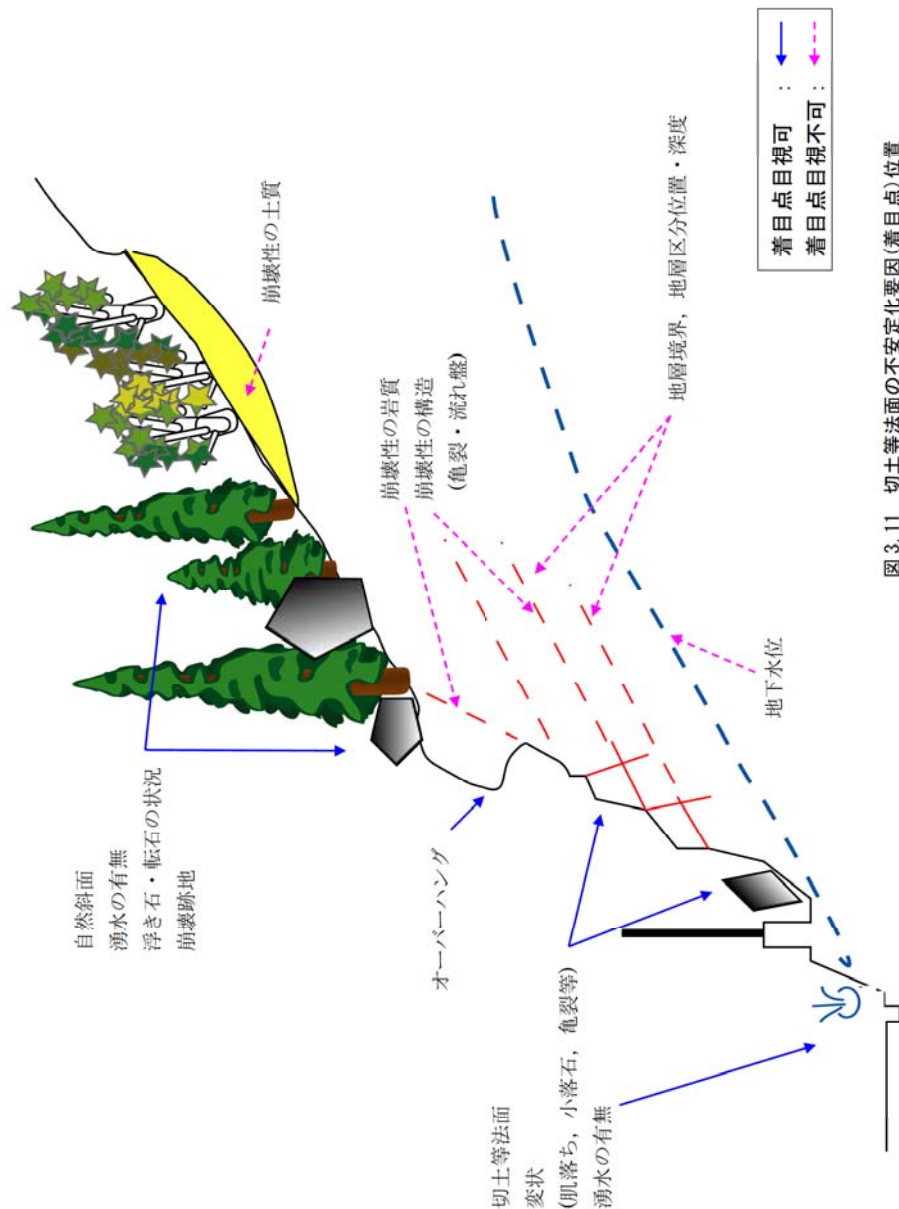


図 3.11 切土等法面の不安定化要因(着目点)位置

3.4 まとめ

現在、盛土法面と切土等法面の点検時等における調査では、健全性を評価するための定量的なデータは少ないことがわかった。

盛土および切土等の法面健全性評価のためには、不安定化要因(着目点)の分類・整理結果から、表 3.15 に示す項目の把握が重要であることがわかった。

表 3.15 道路法面の健全性評価のための着目点

- ・不安定化した結果としての変状
- ・盛土材料や基盤部の位置など不可視部分の地中構造
- ・切土等内部の風化度合いや亀裂など不可視部分の地中の構造
- ・降雨と関連する湧水・地下水の状況や変動

このように、法面の健全性評価のためには、内部構造を調べる必要がある。また最弱点部から崩壊するため、面的に調査が必要となる。

ボーリングは線情報であることから、立体的情報を取得するためには物理探査手法を用いて、対象とする法面の内部の風化の程度、地中構造、地山との境界、地下水を調査する必要がある。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路土工のり面工・斜面安定工指針，pp.13-32，1999.
- 2) 建設省道路局：道路防災総点検要領(豪雨・豪雪等)，pp.116-132，建設省．1999.
- 3) (社)建設コンサルタンツ協会近畿支部，斜面防災研究委員会：斜面安定評価における劣化概念の導入，pp199-221，2006.

第4章 物理探査による法面内部探査方法の選定と評価

4.1 はじめに

物理探査手法は多数の種類があるが、法面の維持管理に適した物理探査の調査方法で確立した手法はない。この章では法面調査の実証実験を行う物理探査手法の選定について述べる。適切な物理探査手法を選定するために、同一の箇所でも種の物理探査を実施して、それが適切に法面内部構造を探査できているかどうかを、ボーリング調査を用いて検証した。まず、物理探査の種類と手法の選定方法について述べる。次に実証実験を行った場所の説明と探査結果の検証方法について記載する。

具体的な個々の探査については第5章から第7章にかけて述べる。

4.2 物理探査手法の選定方法

4.2.1 文献による実施例等の調査

道路法面の維持管理を目的とした法面内部の物理探査方法について、既存文献で適用されている手法を調査した。

① 物理探査適用の手引き

物理探査適用の手引き¹⁾によると表4.1に示すように物理探査手法は数多くの種類があり様々な調査目的に用いられている。このうち維持管理の事例として10例以上あるのは、地中レーダ、速度検層、屈折法地震（弾性波）探査、電気探査（二次元比抵抗探査）である。このうち地中レーダは主にトンネルの覆工背面の空洞探査に使用された例が多い。地中レーダ以外の探査は10数件であり他の構造物に比べて少ない。

また、同じ文献で構造物の物理探査の適用性においては、表4.2に示すように道路の維持管理段階では、地表からの手法として、「適用を是非検討すべき探査法」は無く、「現地条件によっては、適用できると考えられる探査法」として、リモートセンシング、屈折法地震（弾性波）探査、電気探査、地中レーダ、熱赤外線探査が挙げられている。

このうち文献で紹介されている、リモートセンシングは主として地表面付近の情報を人工衛星や航空機から観測するもので、法面内部の情報を主に探査するものではない。また熱赤外線映像法は対象物を熱赤外線装置で撮影することにより、表面の微少な温度差から物体の性質や物体内部の状況について調査する方法で、表面近くの情報しか得られない²⁾。

表 4.1 物理探査・調査研究一覧（平成4年～平成8年）集計結果¹⁾

項目	予備調査	切土・新築	地すべり	盛土	構造物	トンネル	施工	維持管理	ダム	崩石山	地下空洞	港湾	地下水	地下埋設	不発路	土地造成	崖道	総合計
反射法地震探査	14	0	0	2	8	22	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	49
屈折法地震探査	93	271	37	7	33	358	19	14	125	20	1	1	0	0	0	14	0	993
微小地震	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
AE	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
振動	5	1	0	0	6	7	2	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27
電気探査/2次元	19	52	15	2	8	40	4	12	16	0	10	0	1	0	0	2	2	183
電磁探査	2	8	0	0	1	2	0	8	9	0	2	0	0	0	2	0	0	34
地中レーダ	52	0	1	0	11	3	33	176	2	0	24	0	1	17	0	0	0	320
重力探査	2	0	0	1	2	2	0	2	2	0	1	0	0	0	0	0	0	12
磁気探査	18	0	0	0	0	2	2	1	0	1	0	1	0	2	284	0	0	311
熱・温度	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	5
放射能探査	6	5	1	0	3	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	1	0	19
速度検層	25	34	3	2	60	80	11	16	9	0	1	0	1	0	0	0	0	245
電気検層	5	4	0	0	3	6	2	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	25
その他の検層	5	3	1	0	5	3	2	4	2	0	0	0	3	0	0	0	0	28
VSP	3	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	7
ジオトモ・速度	1	2	0	0	15	1	5	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	31
ジオトモ・電気	1	1	0	0	1	1	2	0	5	0	1	0	1	0	0	0	0	12
音波探査	12	1	0	0	8	2	1	2	0	0	15	0	0	0	0	0	0	41
空中電磁	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
孔間速度測定	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2
電気探査/垂直	2	0	0	0	0	2	0	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	7
切羽前方地山探査	0	0	0	0	0	4	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12
表面波探査	1	2	0	0	0	1	0	2	1	0	1	0	0	0	0	0	0	10
総合計	280	393	58	16	174	540	91	250	192	21	43	17	9	19	287	16	2	2408

項目欄、総合計欄の は、ベスト5を示す 中の欄の は30件以上の実施例を示す

表 4.2 道路建設における物理探査の適用¹⁾

[illegible]

○ 適用と照会検討すべき調査法 ○ 照会条件によっては、適用できると考えられる調査法 △過去に適用実績のある調査法

② 物理探査技術の地盤工学への利用に関する研究報告書

表 4.3 に示す「物理探査技術の地盤工学への利用に関する研究 報告書」³⁾における調査対象に対する物理探査ベスト5によると、維持管理関係の物理探査手法は多くない。

また表 4.4 に示す各種構造物に対する物理探査手法ベスト 5 は、法面を「土構造物」と捉えた場合、屈折法、電気探査、電気検層が主に用いられる手法であることがわかる。

表 4.3 各種調査対象に対する物理探査手法ベスト5³⁾

	調査対象	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
計 画	地質構造	屈折法	電気探査	PS検層	反射法	放射能探査
	地下水特性	電気探査	電気検層	比抵抗2次元探査	放射能探査	地温探査
	岩盤区分	屈折法	PS検層	弾性波1次元774		
	環境7次元774	774-774-774				
	既設構造物の調査	地表面型774-774				
調 査 ・ 設 計	地質構造	屈折法	電気探査	PS検層	反射法	比抵抗2次元探査
	水理水文特性	電気探査	電気検層	比抵抗2次元探査	温度検層	
	断層破砕帯	屈折法	放射能探査	比抵抗2次元探査	電気探査	弾性波1次元774
	亀裂特性	電気検層	PS検層	屈折法	774-774-774	
	水みち	電気検層	電気探査	温度検層	地温探査	比抵抗2次元探査
	物質移動	(電気探査)				
	透気特性	無し				
	熱特性	温度検層	地温探査			
	劣化特性	無し				
	静的物性	密度検層	PS検層			
	動的物性	PS検層	常時振動	774-774の型PS検層	密度検層	
	疲労特性	無し				
	岩盤区分	屈折法	PS検層	774-774の型PS検層	弾性波1次元774	
	空洞分布	地表面型774-774	微重力探査			
	埋設物検出	地表面型774-774	磁気探査			
施 工	岩盤区分	屈折法				
	変形挙動	無し				
	地下水挙動	電気検層				
	短期的劣化作用・緩み	(PS検層)				
	熱特性	(温度検層)				
	静的・動的物性	PS検層				
	前方予知	HSP法	TSP法			
	空洞分布	地表面型774-774	電気探査			
	地盤改良・774774効果	電気探査	比抵抗1次元774	密度検層		
	埋設物検出	磁気探査	地表面型774-774			
維 持 管 理	変形挙動	無し				
	地下水挙動	無し				
	汚染物質の挙動	無し				
	長期的劣化作用・緩み	(地表面型774-774)				
	構造物の非破壊検査	地表面型774-774	(微重力探査)			

表 4.4 各種構造物に対する物理探手法ベスト5³⁾

構造物	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
土構造物	屈折法	電気探査	電気探査	PS探査	比抵抗2次元探査
軟弱地盤	PS探査	電気探査	電気探査	密度探査	1次元/2次元型PS探査
トンネル関連	PS探査	屈折法	1次元/2次元型PS探査	密度探査	常時微動
ダム	屈折法	弾性波探査	電気探査	PS探査	比抵抗1次元/2次元
砂防	屈折法	電気探査			
橋梁・高架橋	PS探査	屈折法	常時微動	1次元/2次元型PS探査	電気探査
港湾・海洋	音波探査	磁気探査	1次元/2次元型PS探査	PS探査	
河川	(地表面型レーダー)	(電気探査)			
建築工事	常時微動	PS探査	1次元/2次元型PS探査	密度探査	
開削・トンネル	地表面型レーダー	PS探査	電気探査	反射法	表面波探査
山岳トンネル	屈折法	比抵抗2次元探査	PS探査	電気探査	電気探査
大規模地下空洞	弾性波探査	屈折法	比抵抗1次元/2次元	PS探査	
大規模掘削・土留	PS探査	電気探査	(屈折法)		
環境保全・環境汚染	電気探査	電気探査	(比抵抗2次元探査)		
文化財・遺跡保護	地表面型レーダー				
農業土木・造園	電気探査	(電気探査)			
土木材料	地表面型レーダー				
資源開発	電気探査	電気探査	温度探査	放射能探査	C S A M T法
その他	反射法	地表面型レーダー	磁気探査	屈折法	電気探査

表 4.5 吹付け法面の構造と探手法⁴⁾

探査対象	探査手法	ラス網なし モルタル厚 15cm 程度未満	ラス網あり モルタル厚 15cm 程度未満	ラス網あり コンクリート吹付け 厚さ 15cm 以上	ラス網、鉄筋あり コンクリート吹付け 厚さ 15cm 以上	備 考
背面空洞	熱赤外線探査	○	○	△	△	吹付け厚 20cm 程度まで
	打音探査	○	○	△	△	吹付け厚が厚くなると精度低下
	地中レーダ	○	△	△	△	1GHz 程度の高周波アンテナが必要
背面地質 (風化・緩みの厚さ)	屈折法弾性波探査	○	○	○	○	超振、受振点を削孔必要
	反射法地震探査	△	△	△	△	削孔必要 分解能が不十分なケースもあり
	表面波探査	○	○	△	△	背面空洞箇所では精度低下
	二次元比抵抗探査	○	△	△	△	ラス網があれば精度は悪化
	電磁法探査 FDEM 法など	○	○	○	○	ラス網の影響は少ない
地下水・ 表層水	熱赤外線探査	○	○	△	△	吹付け厚 20cm 程度まで
	二次元比抵抗探査	○	△	△	△	ラス網があれば精度悪化
	電磁法探査 FDEM 法など	○	○	○	○	ラス網の影響は少ない
	自然電位法探査	○	△	△	△	ラス網により S/N 比低下

○：適用可，△：条件によっては適用可，×：適用不可

③ 老朽化吹付け法面の調査・対策の手引き

表 4.5 に示す「老朽化吹付け法面の調査・対策の手引き」⁴⁾における、吹付け法面の構造と探手法によると、背面地山の地質（風化・緩みの厚さ）を調査するには屈折法による弾性波探査、表面波弾性波探査法、電磁探査法（FDEM 法など）が挙げられている。また反射法による地震探査では表面コンクリートを削孔して受振器等を設置することが条件となっている。また法面表面のモルタルやコンクリートの中にある金属製の網であるラス網の存在によっては S/N 比が低下して測定精度が落ちるとの指摘がなされている。

このように、物理探査による調査は、道路法面工事における調査では屈折法弾性波（地震）探査が比較的多いが、道路法面の維持管理を目的とした物理探手法の適用事例は多くなく、探手法の選定方法を実証的に比較検討されたものは無い。

文献からは、維持管理のために用いる可能性がある地表面からの法面内部探査方法は以下の通りである。

- ・屈折法・反射法・表面波弾性波探査
- ・二次元比抵抗探査
- ・FDEM 法などの電磁法探査

4.2.2 法面内部を調査するための物理探手法の選定

現状の物理探査技術は主に石油や地下水探査や活断層調査など深い震度で活用されている。また、地中レーダによる路面下の空洞探査やコンクリート構造物の鉄筋探査など、数センチ～2m 程度の深度まで探査可能な製品が商品化されるなど、その活用頻度は高い。

しかし、この研究で対象としているのは、法面の内部構造の探査で、要求領域は約 2m～20m 間の探査で、分解能は数 cm～m オーダーで探査手法の空白域にあたる。このため、これまでは実施事例は多いとは言えなかったが、近年の技術開発により事例は出てきている。

特に地中レーダについては、連続波を用いて地中深くまで減衰量を少なくした探査法が開発されている。また電磁気探査については、FDEM 探査の他に超長波を使った VLF-EM 探査が非常に簡便な探査法として開発されている。

以上のことから、実証実験を行う物理探査手法は、既存文献を基に近年に新たに開発された手法を勘案して

- ・弾性波探査

高密度表面波探査、屈折法弾性波探査、反射法地震探査

- ・電気・電磁気探査

二次元比抵抗探査、VLF-EM 探査、FDEM 探査

- ・地中レーダ

連続波地中レーダ

とした。

4.3 実証実験場所

4.3.1 実証実験場所の選定の考え方

ここでは実証実験場所の選定の考え方について述べる。

これまで法面は主に劣化の結果としての変状を観測して法面の健全性を評価してきた。変状は重要な評価指標であり、法面内部を調査して健全性を評価する場合の判断材料にもなる。このため、豪雨地帯であり、具体的に変状が生じた国道 42 号の道路法面を実証実験の法面に選定することとした。

切土等法面の健全性評価項目は、

- ・カルテ対応の法面では、第三紀層が最も多く、着目点として流れ盤が過半数を占めている。
- ・亀裂の伸展や伸展の率は、豪雨地域ほど大きく、土砂法面ほど同様の傾向が見られる。
- ・湧水や地下水の影響が大きいと考えられるが、定量的に計測されていない。

以上のことから国道 42 号で第三紀層が基盤となっている変状の見られる切土等法面の中から、比較的急峻な地点（1）と流れ盤等の不安定な地質構造が想定される地点（2）を選定した。

地点（1）と地点（2）の写真と平面図を写真 4.1、4.2 および図 4.1、図 4.6 に示す。

盛土法面の健全性評価項目は、

- ・片方が切土で片方が盛土の片切・片盛構造の法面は、他の盛土形状の法面に比べ着目項目が多く、変位の伸展や伸展率が大きい傾向が見られた。
- ・湧水や地下水の影響が大きいと考えられるが、定量的に計測されていない。
- ・定量的に計測できるものとしては、目視可能な変状のみである。

以上のことから 42 号で変状の見られる片切・片盛法面の中から地点（3）を選定した。

地点（3）の写真と平面図を写真 4.3 と図 4.10 に示す。

4.3.2 地点（1）の概要

① 調査位置

地点（1）の調査場所は図 4.1 に示す国道 42 号の和歌山県西牟婁郡白浜町地先で、写真 4.1 および図 4.2 に示すように、法勾配が 5 分～7 分の比較的急峻な法高 17m コンクリート吹付け切土法面となっている。

② 地質概要

地点（1）の地質は新第三紀の田辺層群の頁岩を基盤とし、法面はその強風化帯を切土施工したものである。図 4.3 及び図 4.4 は物理探査を実施した後に確認のために行ったボーリングの柱状図である。これによると、頁岩強風化帯は、層厚が 6～9.45m で、コアは角礫状主体で、全体に粘土分を不均一に含む。N 値は N=8～57 とばらつきを示し、電研式岩盤分類では D 級に分類される。

基盤の頁岩は、角礫～岩片状コア主体の D～CL 級部分と、岩片～短棒状コア主体の CL～CM 級部分が互層状をなしている。最上部では、標準貫入試験が行える程度に軟質化している部分もみられる。また、ボーリング調査の最深部では、頁岩の下位に砂岩が確認されている。層理面などの地質構造面の見掛け傾斜角は 24.8 度であり国道法面に対し受け盤構造を示している。ボーリング結果、孔内 PS 速度検層およびボアホールカメラ調査結果を基に、推定した地質横断面図は図 4.2 に示す通りである。また、ボーリング No. 1-1 の孔内 PS 速度検層結果を図 4.5 に示す。

③ 地表および地下水状況

国道側の吹付け法面法尻付近の亀裂部では、降雨量の多い時には多量な湧水が認められた。ボーリング掘削時の孔内水位は、No. 1-1 では GL-5.6m 付近と GL-11.4m 付近で観測され、No. 1-2 では GL-1.7m 付近と GL-7.6m 付近に孔内水位が確認された。掘削後の孔内水位は低下しており、GL-15.5m 付近が常時の地下水位と考えられる。



写真 4.1 調査地点（1）現況写真（左：法面中央部 右：法面中央部より起点側を望む）

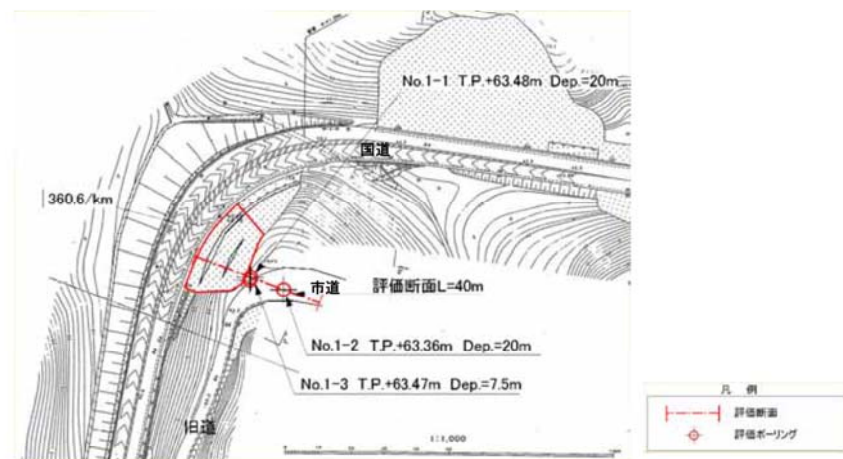


図 4.1 調査地点（１）平面図

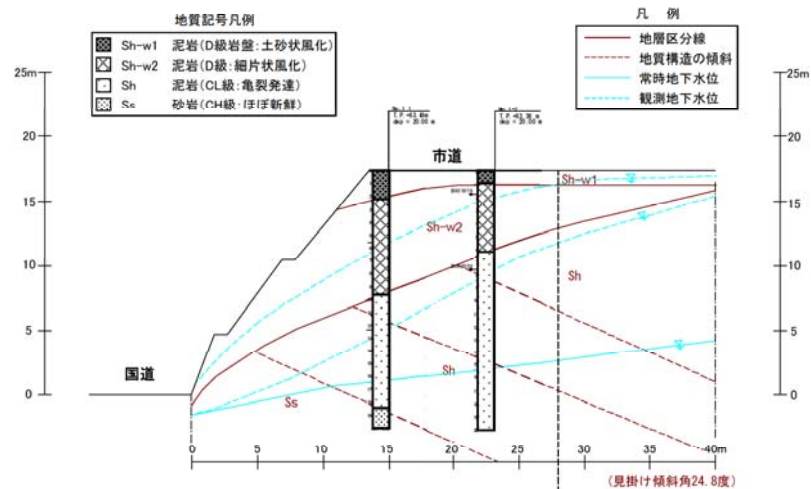
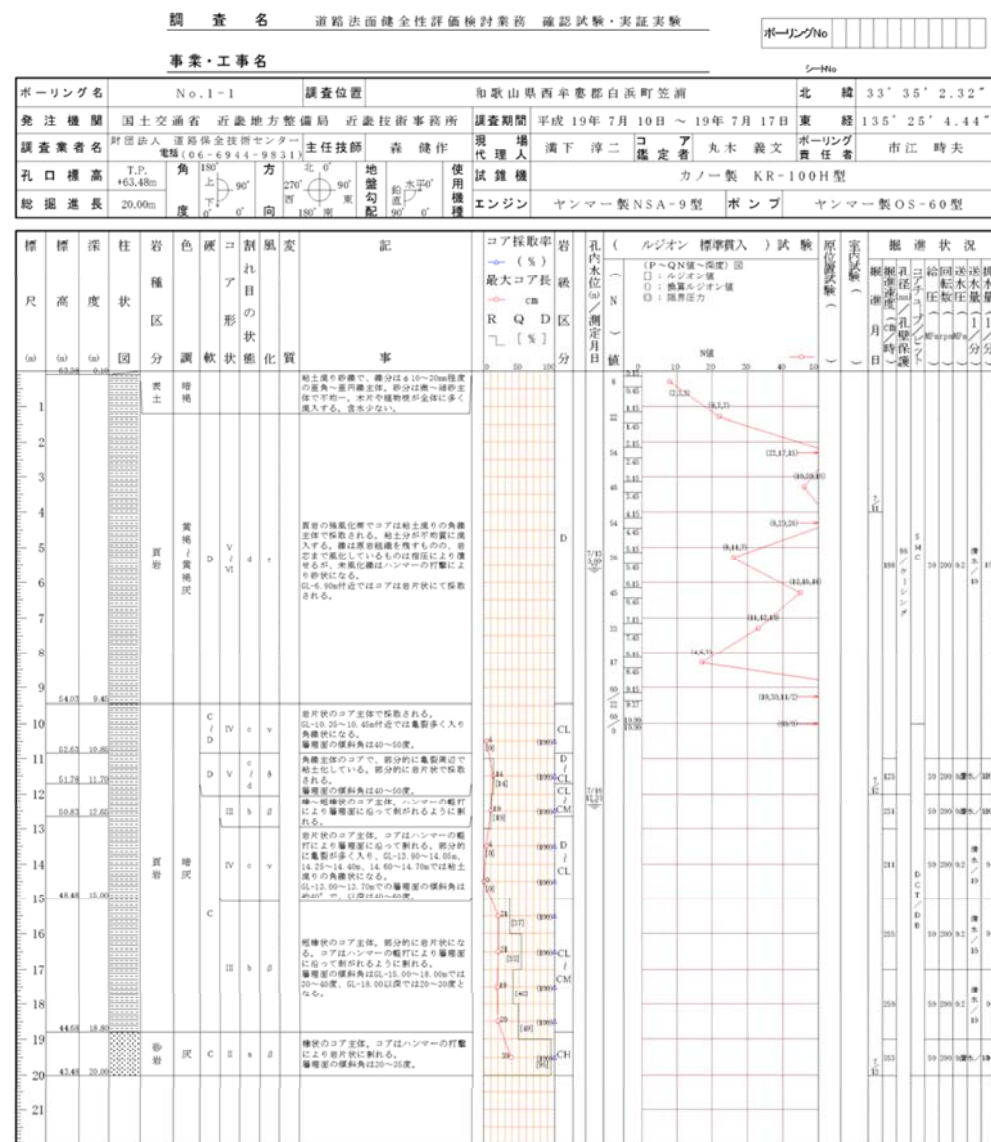


図 4.2 調査地点（１）地質横断面図

ボーリング柱状図



ボーリング柱状図

調査名 道路法面健全性評価検討業務 確認試験・実証実験

ボーリングNo

事業・工事名

シートNo

ボーリング名	No.1-2	調査位置	和歌山県西牟婁郡白浜町笠浦	北緯	33° 35' 2.35"
発注機関	国土交通省 近畿地方整備局 近畿技術事務所	調査期間	平成19年7月17日～19年7月20日	東経	135° 25' 3.86"
調査業者名	財団法人 道路保全技術センター 電話(06-6944-9831)	主任技師	森健作	現場代理人	高下 淳二
孔口標高	T.P. +63.36m	角	130°	方	北
総掘進長	20.00m	度	0°	向	西
		度	0°	向	東
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度	0°	向	北
		度	0°	向	東
		度	0°	向	西
		度	0°	向	南
		度			

4.3.3 地点（２）の概要

① 調査位置

地点（２）の調査場所は図 4.6 に示す国道 42 号の和歌山県西牟婁郡白浜町地先で、写真 4.2 および図 4.7 に示すように、法勾配が 8 分～1 割の比較的緩やかな法高 7m コンクリート吹付け切土法面となっている。

② 地質概要

地点（２）の地質は新第三紀の砂岩泥岩の互層となっており、法面はその強風化帯を切土施工したものである。図 4.8 は物理探査を実施した後に確認のために行ったボーリングの柱状図である。図 4.9 はボーリング孔を利用した孔内 PS 速度検層結果である。

法面上部には、層厚 0.9m 程度で、N 値が N=3～6 を示す粘性土及び砂質土が分布している。砂岩強風化帯は、層厚が 3m で、角礫状が主体となり、全体に粘土分を帯びている。N 値が N=16～21 を示す非常に軟質なもので、電研式岩盤分類では D 級に分類される。

基盤の砂岩は、粘土分を帯びる角礫状コア主体の D 級部分と、岩片～棒状コア主体の CL ～CM 級部分が互層状をなしている。D 級部分では、N 値が N=15 を示す部分もみられる。層理面などの地質構造面の見掛け傾斜角は、道路法面に対し縦断方向では 8.3 度、横断方向では 16.8 度の流れ盤構造を示している。

ボーリング結果およびボアホールカメラ調査結果を基に、推定した地質横断面図を図 4.7 に示す。

③ 地表および地下水状況

国道に面する吹付け法面の中腹～法尻部の亀裂沿いに、降雨の翌日に法面が乾燥した後においてもにじみ出し程度の湧水が認められた。

ボーリング No. 2 では掘削開始日の作業後に GL-3.7m 付近に一時的に水位を確認したが、翌朝に水位は確認されなかった。調査深度で浅での地下水位は常時は存在しないと考えられる。



写真 4.2 調査地点（２）現況写真（左：法面中央部から終点側を望む 右：法面終点側より起点側を望む）



図 4.6 調査地点（２）平面図

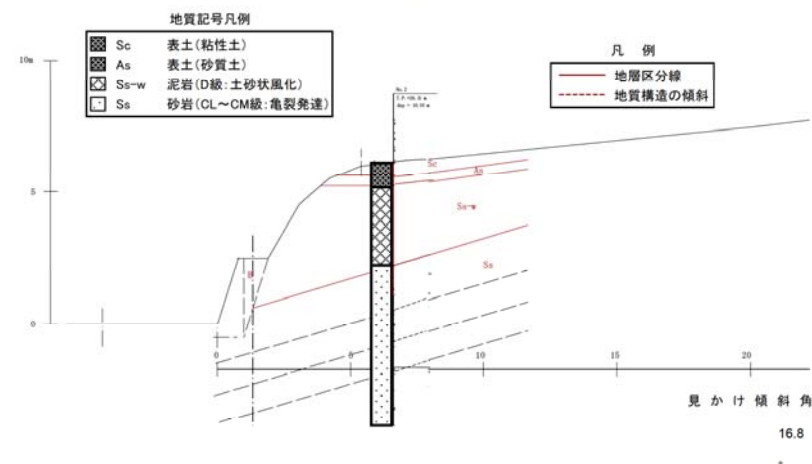


図 4.7 地点（２）地質横断面図

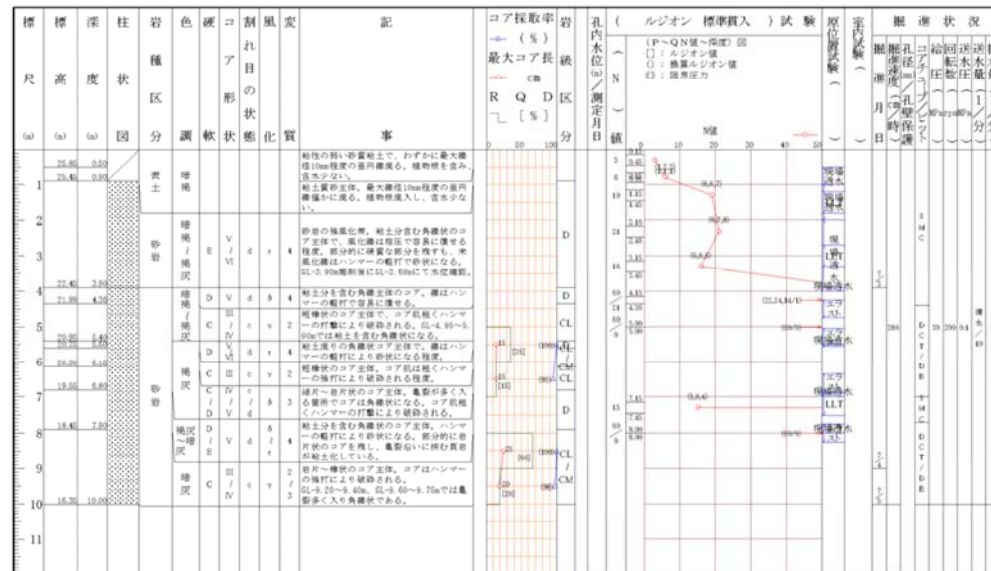
ボーリング柱状図

調査名 道路法面健全性評価検討業務 確認試験・実証実験

ボーリングNo

事業・工事名

ボーリング名	No. 2		調査位置	和歌山県西牟婁郡白浜町袋谷				北 緯	33° 37' 8.34"			
発 注 機 関	国土交通省 近畿地方整備局 近畿技術事務所			調査期間	平成 19 年 7 月 2 日 ~ 19 年 7 月 6 日			東 経	135° 23' 51.50"			
調査業者名	財団法人 道路保全技術センター 電話(06-6944-9531)		主任技師	森 健作		現場代理人	濱下 淳二		コ ア 監 定 者	丸木 義文	ボーリング責任者	市江 時夫
孔口標高	T.P. +26.35m		角	180°	方	北 0°	地盤勾配	270°	使用機種	カノー製 KR-100H型		
総掘進長	10.00m		度	0°	向	西 180°	距離	0°	エンジン	ヤンマー製 NSA-9 型	ポンプ	ヤンマー製 OS-60 型



4.3.4 地点（3）の概要

① 調査位置

地点（3）の調査場所は図 4.10 に示す国道 42 号の和歌山県日高郡みなべ町山内地区で、写真 4.3 および図 4.11 に示すように、法勾配が 1 割 5 分勾配で法高 12m のコンクリート張法面で、建設から 37 年が経過しており、最初の建設から 7 年後に崩壊履歴がある片切・片盛構造の法面である。

② 地質概要

地点（3）の地質は新第三紀の砂岩泥岩の泥岩を基質とする礫岩である。図 4.12 と図 4.13 は物理探査を実施した後に確認のために行ったボーリングの柱状図である。

図 4.11 にボーリング結果及び孔内 PS 検層結果から推定した地質横断面図を示す。盛土は、層厚が 2～2.7m であり、礫泥り砂質粘土で構成されている。N 値は N=1～6 を示す。また、図 4.14 と図 4.15 に孔内 PS 速度検層結果を示す。

法面下部のボーリング No. 3-2 では、盛土層の直下に礫岩の強風化帯が層厚 4.0m 程度分布する。コアは棒状であるが、手で折れる程度に軟質である。N 値は N=14～24、電研式岩盤分類では D 級に分類される。

基盤の礫岩は、短棒～棒状コア主体で採取されるが、ハンマーの軽打で容易に折れる程度に風化しており、最上部では標準貫入試験が行える程度に軟質化している。岩盤分類は CL 級に分類される。

③ 地表および地下水状況

地表はコンクリート保護工で覆われているが、縦側溝に沿ってコンクリート目地から雑草が生えている。

ボーリング掘削時の孔内水位は No. 3-1 では、盛土層内の GL-1.8m 付近と基盤岩内の GL-3.8m 付近、GL-5.9m 付近で確認されている。

法面下部のボーリング No. 3-2 では、掘削時に盛土層境付近の GL-2.0m 付近で孔内水位が確認されており、基盤岩部分を対象とした水位観測孔設置後の観測では基盤岩の強風化帯内の GL-2.7～2.9m 付近で水位が確認されている。この付近が常時の地下水位と考えられる。



写真 4.3 調査地点（3）現況写真
（左：中央部より終点側を望む 右：起点側より終点側を望む）

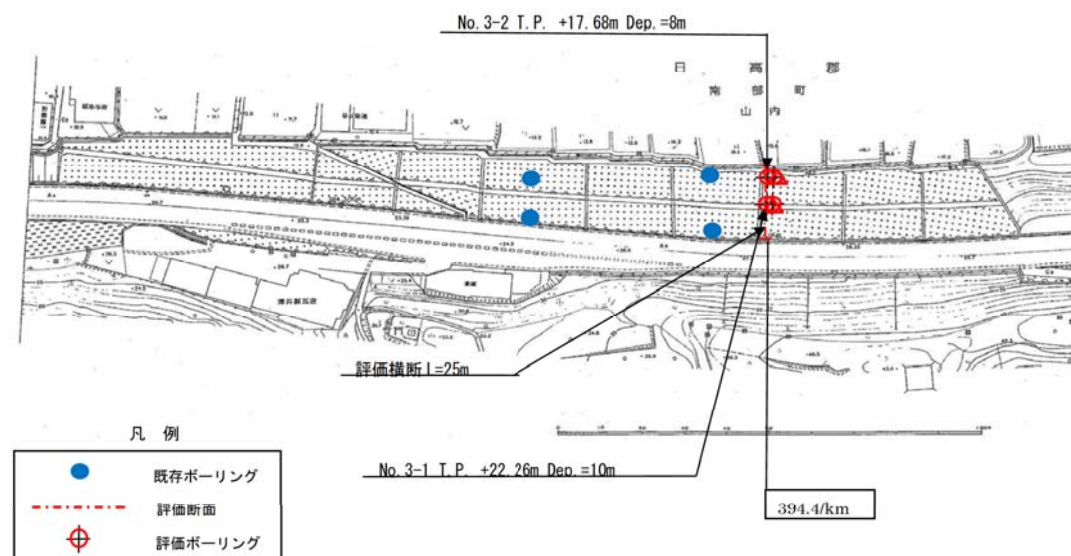


図 4.10 地点（3）平面図

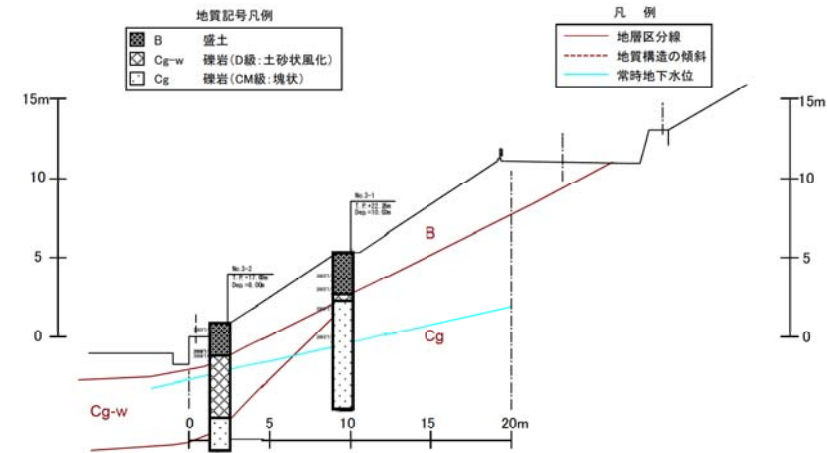
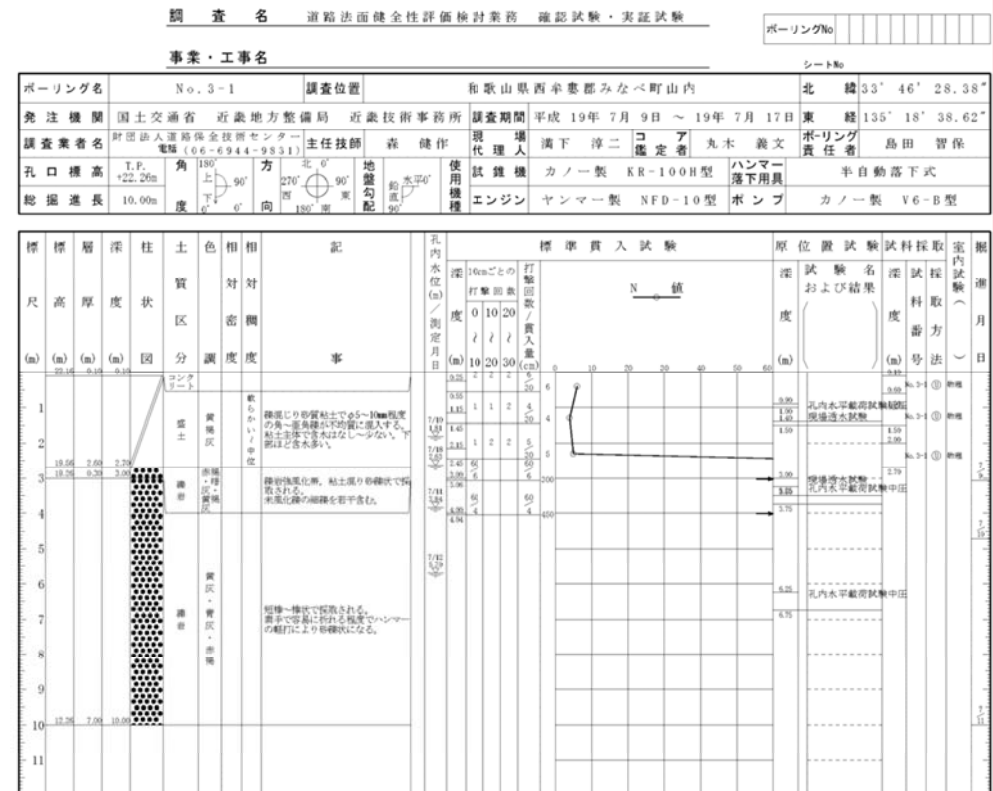


図 4.11 調査地点（３）地質横断面図

ボーリング柱状図



ボーリング柱状図

調査名 道路路面健全性評価検測業務 確認試験・実証試験

ボーリングNo.

事業・工事名

シートNo.

ボーリング名	No. 3-2		調査位置	和歌山県西牟婁郡みなべ町山内		北緯	33° 46' 28.20"	
発注機関	国土交通省 近畿地方整備局 近畿技術事務所		調査期間	平成 19 年 7 月 17 日 ~ 19 年 7 月 21 日		東経	135° 18' 38.34"	
調査業者名	財団法人道路保全技術センター 電話 (06-6944-9831)		主任技師	森 健作		現代人	満下 淳二	
ボーリング者	田辺 隆		代理人	コバエ 義文		ボーリング責任者	島田 智保	
孔口標高	T.P. +17.68m		地盤勾配	水平 40'		試験機	カノー製 KR-100H型	
孔口標高	角 180° 下 90°		方位	北 0° 西 270° 南 90° 東 180°		ハンマー落下用具	半自動落下式	
総掘進長	8.00m		使用機種	エンジン		ヤンマー製 NFD-10 型	ポンプ	
	度 0' 0'						カノー製 V6-B 型	

標準貫入試験	原位置試験	試験採取	室内試験	標準貫入試験				原位置試験				試験採取				室内試験			
				深	度	打撃回数	貫入量	深	度	試験名	試験結果	深	度	試験名	試験結果	深	度	試験名	試験結果
1	17.00	0.10	0.10	1	0	10	20	1	0	10	20	1	0	10	20	1	0	10	20
2	15.60	1.80	2.00	2	0	10	20	2	0	10	20	2	0	10	20	2	0	10	20
3				3	0	10	20	3	0	10	20	3	0	10	20	3	0	10	20
4				4	0	10	20	4	0	10	20	4	0	10	20	4	0	10	20
5				5	0	10	20	5	0	10	20	5	0	10	20	5	0	10	20
6	11.60	4.90	6.00	6	0	10	20	6	0	10	20	6	0	10	20	6	0	10	20
7				7	0	10	20	7	0	10	20	7	0	10	20	7	0	10	20
8	8.60	7.00	8.00	8	0	10	20	8	0	10	20	8	0	10	20	8	0	10	20
9				9	0	10	20	9	0	10	20	9	0	10	20	9	0	10	20

図 4.13 地点 (3) No. 3-2 ポーリング柱状図

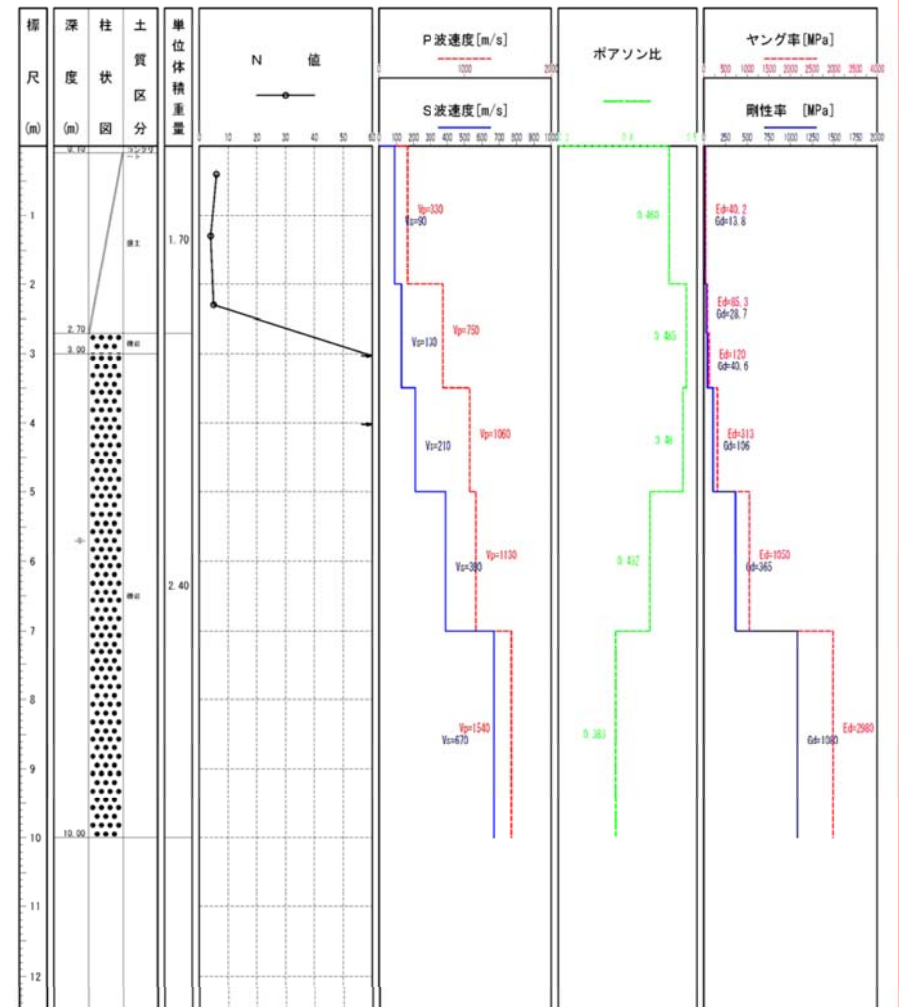


圖 4.14 地点 (3) No.3-1 孔内 PS 検層結果

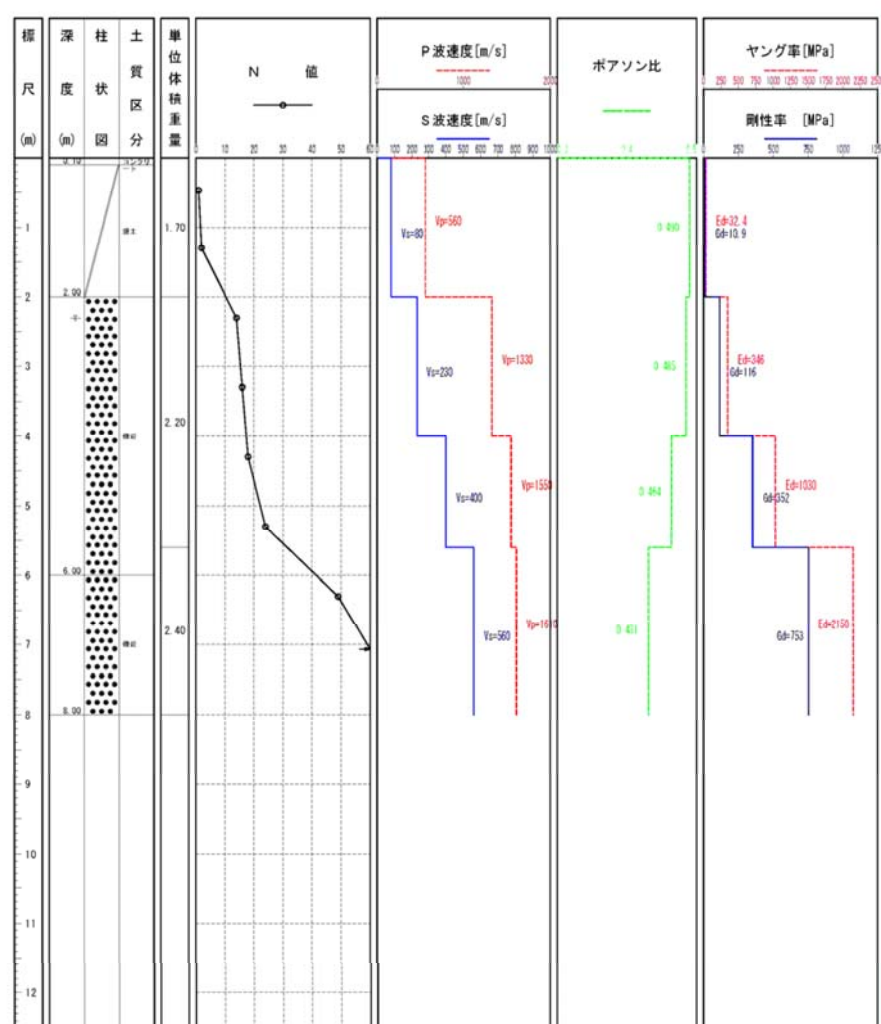


図 4.15 地点（3）No.3-2 孔内 PS 検層結果

4.4 探査技術の評価方法

物理探査は各種の物理量を検出するもので、何らかのデータは出てくる。しかし、それが正しく地下構造を表しているかどうかは、測定技術とともに、解釈技術も重要なファクターとなる。このため、物理探査調査を実施して、解釈を行った後に、確認ボーリングを行い、それと比較して再度解釈を行い、その後に探査技術の評価を行うこととした。

4.5 まとめ

表 4.6 に示す方法と場所で法面内部の物理探査を行う。

表 4.6 比較を行う物理探査の種類と法面

物理探査種別	物理探査名	切土受け盤 地点（1）	切土流れ盤 地点（2）	盛土 地点（3）
電気・電磁気	二次元比抵抗	○	○	○
	VLF-EM	◎	◎	—
	FDEM	—	○	—
レーダ波	連続波地中レーダ	◎	—	◎
弾性波	高密度表面波	—	—	◎
	屈折法弾性波	○	○	○
	反射法地震	◎	◎	◎

凡例 ◎：初めて道路法面（横断方向）で実施した探査法 ○：実施した探査法 —：実施しなかった探査法

参考文献

- 1) 物理探査要領作成委員会：物理探査適用の手引き（特に土木分野への利用），pp. 1-50，物理探査学会，2000。
- 2) 建設省土木研究所：熱赤外線映像法による吹付け面老朽化診断マニュアル，pp. 1-2，（財）土木研究センター，1996。
- 3) 物理探査技術の地盤工学への利用に関する研究委員会：物理探査技術の地盤工学への利用に関する研究報告書，pp. 66-70，（社）地盤工学会，1997。
- 4) 斜面等健全性検討研究委員会・芦田謙＋沖村孝監修・（社）物理探査学会：老朽化吹付け法面の調査・対策の手引き，pp. 35，鹿島出版会，2006。

第5章 電気・電磁気探査による法面内部の探査方法

5.1 はじめに

電気・電磁気探査は、地盤の電氣的性質を比抵抗（単位： Ωm ，電気伝導度の逆数）なる物理量で測定し、含水比の多少、地盤の硬軟などを評価するものである。

特に、比抵抗は、間隙率と体積含水率に、良い相関のあることが実証されている¹⁾ので、法面の老朽化の要因を評価するのに適用性があると考えられる。

電気探査法は、比抵抗法とも呼ばれ探査深度に見合う間隔で電極棒を打設して測定するため、吹付け法面のように表面がコンクリートで覆われているような場所ではコンクリートを削孔して地山に電極を打設する必要がある、手数が掛かる作業となる。このため、今回の実証実験では、できるだけ法面を傷つけない方法として電極棒の打設を必要としないジオゲル電極の使用による二次元比抵抗探査法を用いた。二次元比抵抗探査法は、堤防やトンネル地山の調査実績は多数あるが、法面での適用事例はほとんど無い。

電磁気探査法には、CSAMT法、FDEM法や空中電磁法、VLF-EM法など各種あるが、いずれも適当な周波数の電磁波を発信源として、これによる地盤内の電磁誘導による二次磁場を測定して比抵抗分布を知るものである。磁場のみの測定であるため、測定器を地表面に置くだけで済み、法面表面を傷つけないというメリットがある。今回の電磁気探査は、FDEM法とVLF-EM法で実験を行った。FDEM法は砂防対策やダム関係での法面で数例の実績がある。また、VLF-EM法は法面の適用例が一例確認できただけである²⁾。しかし、VLF-EM法は非常に簡易な計測が可能であり、現地で計測しながら概略的な調査結果が分かる。このため、目視調査を補完する探査手法として期待されることから実証実験の対象とした。

実証実験は地点（1）、および地点（2）で行った。しかし、地点（1）は急な斜面であることから、FDEM法の機器が重い現状では作業上の課題があるため、実施しなかった。また、地点（3）は二次元比抵抗探査法を実施したが、盛土の表面保護工に鉄筋が使用されており、電気や電磁気による探査は鉄筋の影響を受けるため、適用性がなかった。

5.2 二次元比抵抗探査

5.2.1 二次元比抵抗探査原理と方法

この探査法は、高密度電気探査法とも呼ばれるもので、図5.1に示すように適当な最小電極間隔 A で多数の電極を測線上に置き、水平方向について電極間隔を、 A 、 $2A$ 、 $3A$ 、・・・と広げて測定し深度方向の測定データを二次元断面に展開する方法である。解析は、二次元FEM理論などを適用した非線形最小二乗法による逆解析によることが一般的であり、今回の解析もこの方法によった。調査の実施にあたって電極を設置する時に、一般的には吹付けコンクリートや地山にアンカーボルトを直接打設して実施しているが、容易に電極設置するために、ジオゲル電極を使用した。ジオゲル電極は粘着力を持った低抵抗導電性高分子ゲルを利用した電極である。

写真5.1にジオゲル電極の配置、写真5.2に測定機器の写真を示す。

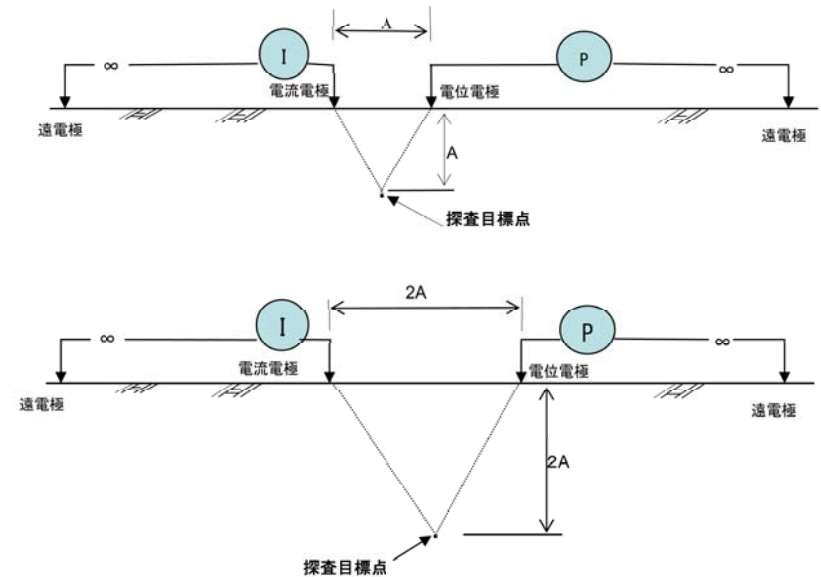


図 5.1 二次元比抵抗法の測定概念³⁾



写真 5.1 ジオゲル電極と測定状況 (地点 (2))



写真5.2 比抵抗探索測定装置 McOHM Profiler4

測定は、二極法で、電極間隔は1mピッチで行った。解析フローは図5.2の通りである。

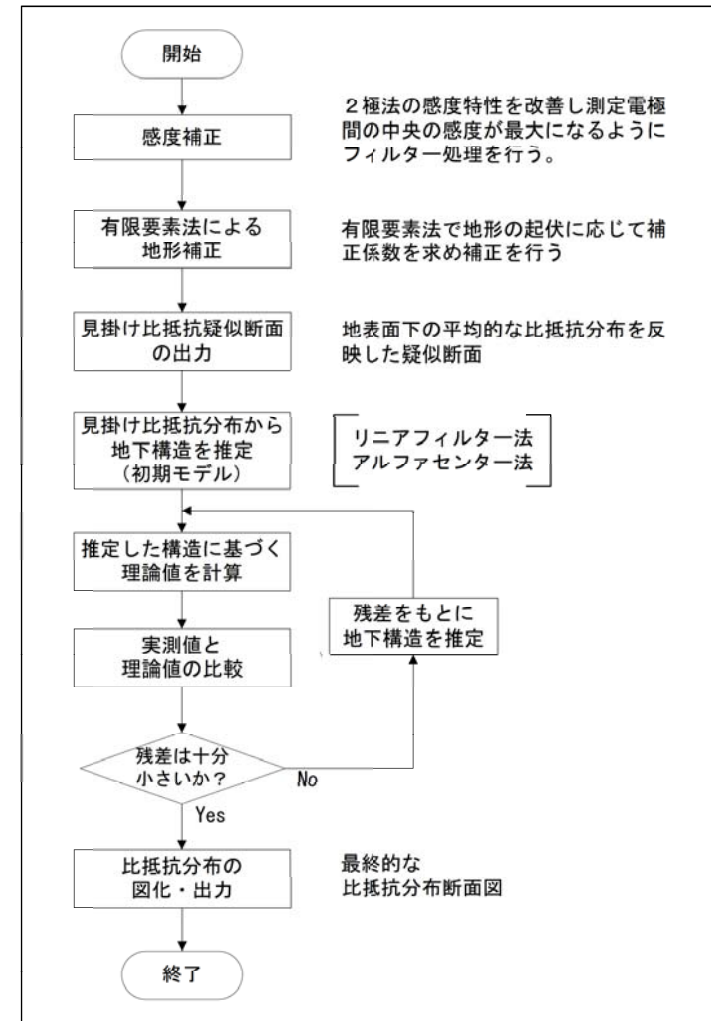
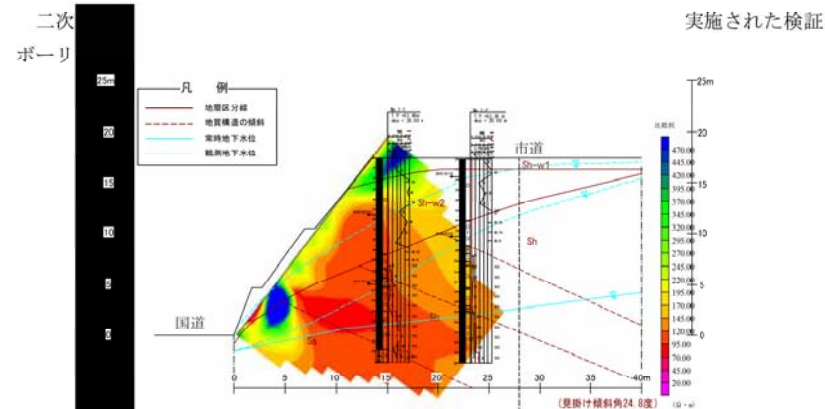


図5.2 二次元電気深査 解析フロー³⁾

5.2.2 二次元比抵抗探査結果

地点（１）は晴天が続いた日に測定したが、地点（２）は前日3mmの降雨後に測定、地点（３）は当日3mmの降雨後に測定した。

5.2.2.1 地点（１）



道路で法肩はコンクリートと思われる。

吹付け法面部分は深部ほど低比抵抗になる傾向が認められ、表層部分は高比抵抗であることから、晴天が続いた後に調査をしていることから背後に空洞もしくは空隙率が高い土砂化した地山が存在すると判断できる。

法肩はジオゲルを市道の舗装上に設置したため、高比抵抗となっている。

地下水については比抵抗分布からは明瞭な地下水ゾーンは認められないが、深部ほど低比抵抗で含水比が高いと判断できる。

ジオゲル電極を用いることで、金属体が存在しないコンクリートであれば削孔を行わずに測定が可能である。

5.2.2.2 地点（２）

二次元比抵抗探査による探査結果を図 5.4 に示す。この図には探査後に実施された検証ボーリングを基に推定した地質構造図も示す。

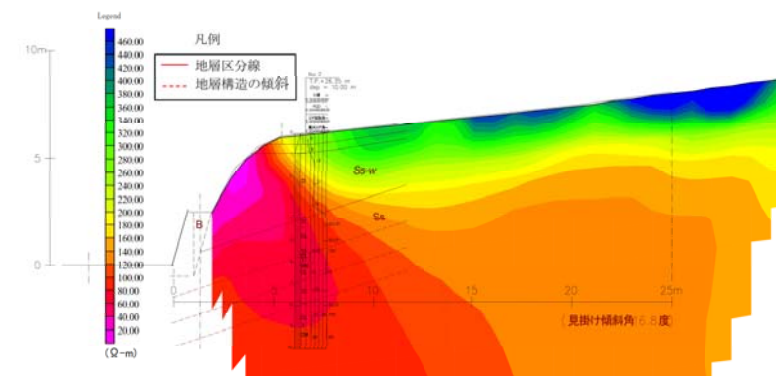


図 5.4 二次元比抵抗探査による探査結果（地点（２））

比抵抗分布の状況から、吹付け法面から上の緩い背後斜面の表層は集水地形であるにもかかわらず、高比抵抗が見られることから、転石や崖すいが分布しているものと考えられる。下層に行くほど低比抵抗になっている。吹付け法面部は低比抵抗であり、吹付けコンクリートに入っている鋼製網の影響を受けている。

地下水については比抵抗分布からは明瞭な地下水ゾーンは認められない。

比抵抗分布から浅部の崖すい堆積物、風化部およびその下の岩盤分布を推定することができた。風化度合も相対的に評価できた。図 4.8 のボーリング柱状図を見ると、1m までは崩積土、1～3、4m までは岩とはいえN値 50 以下の強風化岩である。この部分が、比抵抗断面の表層付近の高比抵抗部に対応するものと考えられる。

この調査方法の短所としては、表面に金属体がある箇所では測定できない。

5.2.2.3 地点（3）

二次元比抵抗探査による探査結果を図 5.5 に縦断面図を図5.6 に示す。この図には探査後に実施された検証ボーリングに基づく地質構造図も示す。

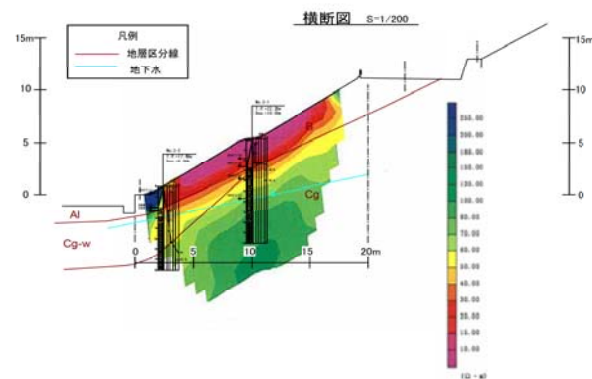


図 5.5 二次元比抵抗探査による探査結果：横断面図（地点（3））

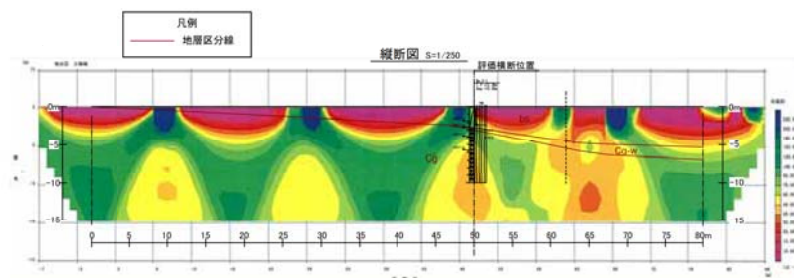


図 5.6 二次元比抵抗探査による探査結果：縦断面図（地点（3））

地点（3）の表面保護工には1.5m間隔で鉄筋が入っている。このため、電気探査はこの鉄筋の影響を大きく受ける。図5.6は二次元比抵抗探査の縦断方向の解析図である。図中の青い部分は縦溝の箇所が高比抵抗を示している。この原因として、法枠工に張り巡らされた鉄筋が縦溝部分で分断されているため、あたかも高比抵抗であるかのような値となっていると考えられる。二次元比抵抗探査は表面の法枠に入っている鉄筋の影響を受けて、それより深部の探査はできなかった。

5.3 VLF-EM探査

VLFは、潜水艦との通信のため発信されている電波であり、この電波を利用したVLF探査は電磁気探査法の一つである。VLF探査は1964年頃よりカナダで研究されはじめ、日本では1970年頃より鉱床探査の概調査法の一つとして導入された方法である⁴⁾。VLF探査は、これまで主に鉱床探査や断層探査、地下水探査の手法として利用、研究されてきた。一方、道路法面など土木構造物に対する利用は、極めて稀な状況にある。

5.3.1 VLF電波について

VLFは3kHz～30kHzの周波数範囲にあたり、潜水艦通信に利用されている超長波の電磁波である。日本では図5.7に示すように宮崎県えびの高原に発信局があり、22.2kHzの周波数で発信されている。日本におけるVLF-EM探査では、このえびの局からの電磁波を利用することが一般的であるが、通信状況がよければハワイ局やオーストラリア局からの電磁波も受信可能である。

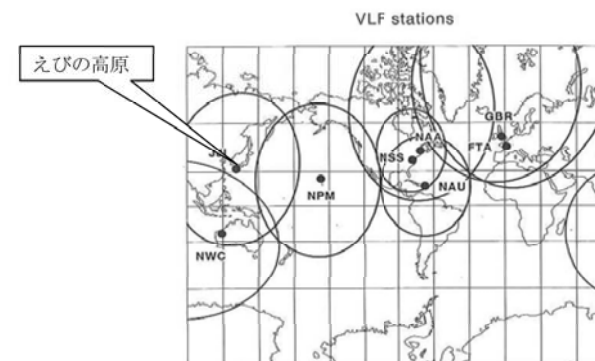


図5.7 VLF発信局⁵⁾

5.3.2 VLF-EM探査（Very Low Frequency ElectroMagnetic）方法

VLF探査は、磁場の2成分（垂直成分と水平成分）を測定するEM法と、電場、磁場を測定するMT法の2種類がある。今回は比較的用いられることが多いVLF-EM法で測定を行う。

図5.8はVLF発信局から遠方での電磁場の概念図である。

VLF電波は、VLF発信局から十分に遠方では平面波とみなすことができるが⁵⁾、地下に異常部（低比抵抗物質）があった場合、二次電流が発生し二次磁場が形成される。

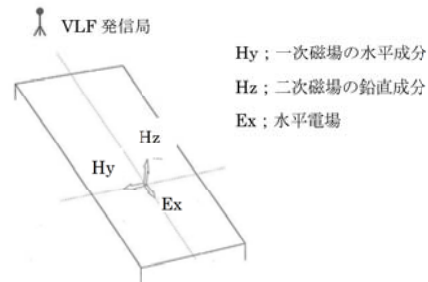


図5.8 VLF発信局から遠方での電磁場⁵⁾

VLF-EM探査は、この水平磁場と同じ位相の垂直磁場成分および90°位相のずれた成分をアンテナで測定することにより、地下の異常部を検出する方法である。

水平成分と垂直成分は、同じ周期で変動しているが位相が異なっているため、その合成ベクトルは楕円を描く。

この楕円の長軸と水平軸とのなす角 θ 、楕円直軸と短軸との比 ε を求める。

垂直二次磁場成分は水平成分に比較して小さいため、次の近似式が成り立つ。

$$\begin{aligned} \tan \varphi &= R \cos D \\ e &= R \sin D \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、

$$\begin{aligned} R &= |H_z / H_y| \\ D &= \varphi - \varphi' \end{aligned} \quad (2)$$

R : 垂直磁場と水平磁場の強度比の絶対値

Δ : 垂直磁場と水平磁場の位相差

式(1)の $\tan \theta$ を同相成分、 ε を離相成分と呼びパーセントで示される。

なお、写真5.3に示すように測定は、直線となる測線を設け、測線上に等間隔に測定点を設けて行う。

測定中は、各測定点において、常にアンテナをVLF発信局に向ける必要がある⁶⁾。

写真5.4に測定器を示す。



写真5.3 VLF-EM法探査状況



写真5.4 VLF-EM法測定装置

5.3.3 解析方法

VLF-EM探査による探査結果および解釈について、物理探査学会は、図5.9に示すような岩脈モデルを例にあげている^{5), 7)}。

図5.10に示すように周辺と異なる比抵抗部（以下、異常帯と記す）では二次磁場（Hz）が発生する。この二次磁場の鉛直成分の方向は図5.11に示す方向を有する。VLF-EM探査でこの二次磁場を測定すると図5.12に示すような測定値が得られる。この測定値から式(3)⁸⁾に示す微分フィルター的一种であるフレーザーフィルタ処理を用いて等価電流密度（ F_0 ）を計算する。

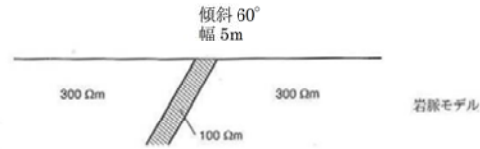


図5.9 岩脈モデル⁵⁾ (一部加筆)

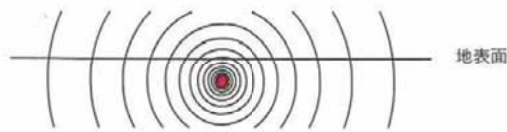


図5.10 図5.9のモデルによる二次磁場のイメージ⁷⁾



図5.11 図5.9による二次磁場の鉛直成分方向のイメージ⁷⁾
(図5.10の測定値に整合するように左右を反転させている)

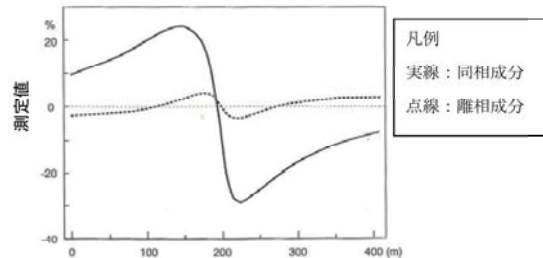


図5.12 図5.9のモデルにおけるVLF測定結果例⁴⁾ (一部加筆)

フレーザーフィルタ処理は、1983年にKarous and Hjeltが提案した式⁸⁾で、電気探査結果とVLF-EM探査による探査結果との対比から得られたものである。フレーザーフィルタ処理により得られる値は、等価電流密度と呼ばれ、測定点間隔距離と同じ深度に電流が集中していると考えた場合の電流密度として定義されている。図5.12に示すようにVLF-EM探査においては異常帯付近において測定値が急変する。この測定値急変部をフレーザーフィルタ処理することにより、図5.13に示すように異常帯直上にピークが生じるよう処理し、異常帯位置の特

定を行い易くしている。なお、図5.12 および図5.13 中の実線で示すグラフが同相成分 (式(1)の $\tan \theta$)、点線で示すグラフが離相成分 (式(1)の ϵ) である。VLF-EM探査結果の解釈としては、図5.13 に示すように式(3)により等価電流密度に変換した測定結果の高い値を示す箇所が低比抵抗部を示していることとなる。

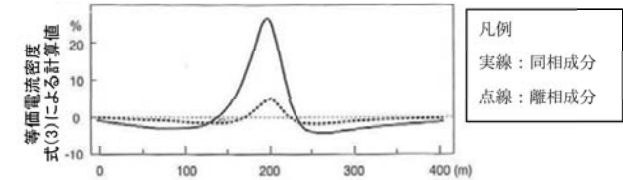


図5.13 図5.10のフレーザーフィルタによる処理結果⁴⁾ (一部加筆)

$$F_0 = -0.102H_{-3} + 0.059H_{-2} - 0.561H_{-1} + 0.561H_1 - 0.059H_2 + 0.102H_3 \quad (3)$$

ここに、

F_0 : 着目地点の着目深度の計算値
 H_{-3}, H_3 : 着目深度×3 の測定結果
 H_{-2}, H_2 : 着目深度×2 の測定結果
 H_{-1}, H_1 : 着目深度×1 の測定結果

また、式(3)によるフレーザーフィルタ処理後の測定値を用いて等価電流密度のコンタ図 (断面図) を作成することができる。

表5.1に本事例における測定結果の一部を示し、図5.14に式(3)を用いて、深度方向の測定値を得るための具体的な計算方法を示す。深度方向の測定値を得るには、求めようとする深度と同じ距離だけ左右に離れた測定点の測定値を用いて式(3)により計算する。求めようとする深度毎に、着目する測定点から左右に深度と同じ距離だけ離れた測定点の測定値を式(3)のIIIに代入していき、深度方向の等価電流密度を得ることになる。

図5.12に示すフレーザーフィルタ処理前の各々の測定点における測定値は、浅い深度から深い深度までの情報を含んだ値である。異常帯が浅い深度に分布している場合には、測定値に与える影響の範囲は狭く、深い深度に分布する異常帯は広範囲の測定値に影響を及ぼす。すなわち図5.12に示す測定値から図5.13に示すフレーザーフィルタ処理後の値を求める場合、求めたい深度と同じ測定点間隔距離の測定値を用いて計算することにより、深度方向の情報を得ることになる。

表5.1 測定結果（一部）

測点(距離 m)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
同相成分(tan θ)	-8.9	0.0	12.4	-20.6	18.6	-0.7	-20.9	4.5	-12.3	-31.9	11.2	18.0	17.7
離相成分(ε)	-6.5	-7.0	-7.1	-8.2	-8.1	-9.4	-8.7	-8.8	-8.7	-9.9	-9.7	-12.0	-10.9

測点(距離 m)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
深度(m)	0.0	-8.9	0.0	12.4	18.6	-0.7	-20.9	4.5	-12.3	-31.9	11.2	18.0	17.7

測点(距離 m)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
測定値(同相成分)	-8.9	0.0	12.4	-20.6	18.6	-0.7	-20.9	4.5	-12.3	-31.9	11.2	18.0	17.7
深度1mの値を求める際のH _n	H ₋₃	H ₋₂	H ₋₁	着目点	H ₁	H ₂	H ₃						

式(3)により算出

深度1mの値				2.3	13.6	-26.2	3.6	5.9					
--------	--	--	--	-----	------	-------	-----	-----	--	--	--	--	--

測点(距離 m)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
測定値(同相成分)	-8.9	0.0	12.4	-20.6	18.6	-0.7	-20.9	4.5	-12.3	-31.9	11.2	18.0	17.7
深度2mの値を求める際のH _n	H ₋₃	H ₋₂	H ₋₁	着目点	H ₁	H ₂	H ₃						

式(3)により算出

深度2mの値						-14.6							
--------	--	--	--	--	--	-------	--	--	--	--	--	--	--

測定値および算出した深度の値を整理

測点(距離 m)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
深度(m)	0.0	-8.9	0.0	12.4	18.6	-0.7	-20.9	4.5	-12.3	-31.9	11.2	18.0	17.7
	1.0			2.3	13.6	-26.2	3.6	5.9	-20.4	16.3			
	2.0						-14.6						

深度と算出値を用いて、コンタ図に図化（図5.16）

図5.14 式(3)による深度方向の等価電流密度の算出例

5.3.4 調査結果と考察

VLF-EM法による調査は地点（1）、（2）の2箇所の法面において実施した。両地点とも降雨二日後に測定した。以下、各法面の調査結果について示す。

5.3.4.1 地点（1）の調査結果および考察

調査は、上部2段の法面および法面背後の道路上で測線長43m・測定間隔1mで実施した。測定可能な法面下端を測点番号42とし、1m間隔で測定点を設けた。なお、法面上の測定に当っては、縄梯子を用いて実施した。

表5.1に地点（1）で計測した測定結果の一部を示す。図5.15は今回の測定結果であり、横軸に測点番号、縦軸に同相成分の測定値および式(3)による深度1mにおけるフレイザーフィルタ処理後の値を示している。

各測点における深度方向への等価電流密度の算出方法は図5.14に示す通りである。深度1mの等価電流密度を求める場合は、その着目した測点（図5.14では測点3）から前後1m、2m、3mの各測定値を式(3)に代入することにより求められる。深度2mの等価電流密度を求める場合（図5.14では測点6）は、前後2m、4m、6mの測定値を用いて式(3)より算出できる。

このようにして順次深さ方向に1m毎に求めた等価電流密度値をコンタ図として示すと図5.16が得られる。本事例では暖色系になるほど相対的に等価電流密度がプラス側の値を示すような結果になった。等価電流密度がプラス側の値を示すためには、異常帯が浅い深度にある場合、もしくは周辺部より、より低抵抗な場合である。なお、このプラス側の異常が生じている要因の区別はフレイザーフィルタ処理によるコンタ図の作成により判別する。

図5.16に示す地点（1）の調査結果では、等価電流密度のコントラストは全体的には弱く、測点番号30付近から右下に伸びるガードレールによる異常帯のほかには、顕著な異常帯は認められない。VLF-EM調査における等価電流密度のコントラストと異常帯の有無の関係や不均質性について、既往の文献などに統一的な基準値は示されていないが、竜神⁴⁾は鉱床探査や地下水探査を主体とした探査では±10%で中程度の異常としており、これを引用すると今回の調査結果は概ね均質な状態にあるものと考えられる。この傾向は、ボーリングコアで見られるほぼ均質な風化状況や市道脇の露頭の風化状況と一致している。

測点番号5～20付近の深度6m付近までは、プラス値の等価電流密度範囲とマイナス値の範囲が複雑に分布している。この地点は市道の舗装部分に当たり降雨の影響が少ないため、基盤部より等価電流密度がマイナス値となっており、高抵抗側となり、この範囲がボーリングNo1-2で確認されているN値50以下の風化帯と概ね一致し、風化境界が検出されていると考えられる。

法面部では、図5.16に示す測点番号35～40付近の地表面付近に等価電流密度がプラス値を示す部分が認められ、異常帯を形成している。ボーリング結果からは法面部は全体に土砂化が進んだ箇所と想定されている。VLF-EM調査で法面部に検出されている異常帯箇所は、写真5.5の丸印の範囲にあたる。この近景を写真5.6に示すが他の箇所よりモルタル吹付け面に亀裂が多く、植生が繁茂している。一般的に電磁気探査の一種であるVLF-EM調査では周辺より低抵抗を示す部分が異常帯として検出されることから、法面内のプラス値を示す部分は、前々日の降雨のため特に土砂化が進行した部分で含水比が高い部分と推察される。

ボーリング調査により地下水位を、深度15m付近に確認している。今回の調査結果では、地

下水位を示すような異常帯は確認されていない。これは、今回の探査深度下限付近に地下水位が分布していたことが原因と考えられる。

また、VLF-EM探査は電磁気探査の一種であるため、地下のケーブル、金属パイプなどの影響を受け、本来の探査目標と異なる部分に影響が大きく出ることもある⁵⁾。図5.16の測点番号30付近の法肩から右下りに見られる強いプラス側の異常帯は、図5.15では測点番号30付近のピークに相当しており、良電導体である金属性のガードレールにより生じたものである。特に測点番号20～30において大きく影響を受けているのは、図5.17に示すように、ガードレールが測点番号20～30に大きく湾曲しているため、ガードレールとの離隔距離が確保できないことに起因し、深い深度まで異常値が現れ、結果として法肩から右下方向の異常帯として表現されていると考えられる。ガードレールなど金属物のような特異な電導体が測線上に部分的に存在する場合の測定値の処理や図示の方法については今後の検討が必要である。

しかし、VLF-EM探査は、概略調査のため相対的な評価になるが、現地地で結果がわかり、目視調査の補完になり、迅速安価である。

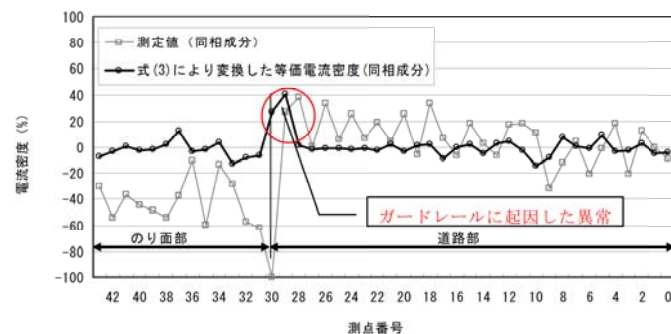


図5.15 探査結果（地点（1））地表面の測定結果と等価電流密度

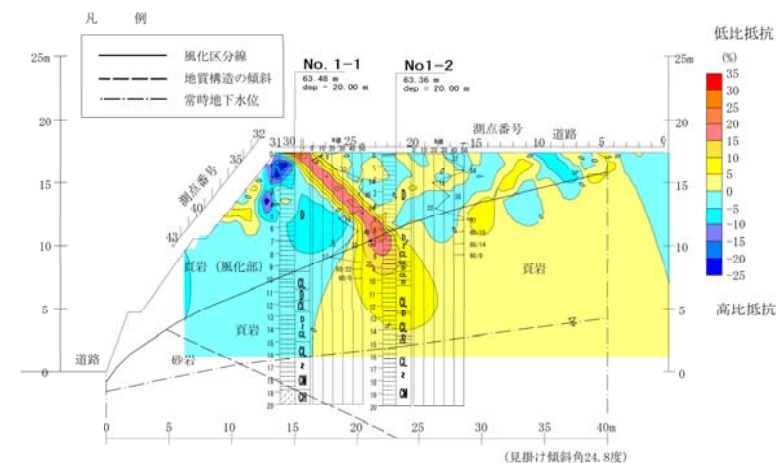


図5.16 VLF-EM探査による探査結果（地点（1））



写真5.5 法面内でプラス値を示す位置



写真5.6 プラス値を示す付近の近景

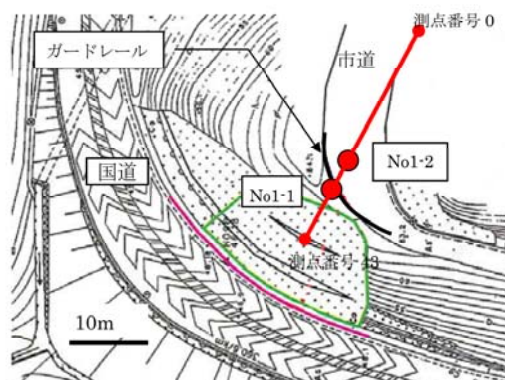


図5.17 調査位置平面図

5.3.4.2 地点（２）の調査結果および考察

調査は、擁壁天端から自然斜面にかけて実施した。擁壁天端を測点番号0とし斜面上部に向かって順次1m間隔で測定点を設置した。測線長は27mである。調査の前々日に降雨があった。

図5.18に地点（２）における同相成分のVLF-EM調査による調査結果および式(3)により得られた等価電流密度を示す。

また、式(3)を用いて各深度における等価電流密度を求め、その結果をコンタ図として示したものが図5.19である。

ボーリング調査により得られた風化の境界を図5.19中に実線で示しているが、ボーリング地点では崩積土の部分の等価電流密度が高く、低比抵抗部を示している。またボーリング地点より山側（測点番号10～27）の自然斜面部では、転石に富む崩積土が分布しているためか、プラスとマイナス値が繰り返し認められ、不均質な状態にあるものと考えられる。

ボーリングで得られた岩盤部の風化境界については、今回の調査結果からは不明瞭である。法面部では、表層にほぼ等厚でやや等価電流密度の高い部分（低比抵抗部）が形成されている。この低比抵抗部は、モルタル吹付け背後の土砂化進行部と推定される。

法尻部の等価電流密度の高い部分は擁壁に入っている金属の影響である。

流盤の地質構造については、把握できていない。

地下水については、特に低比抵抗の部分が無いことから調査可能領域では地下水が存在しないと考えられる。

この調査方法は電磁法的一种であるため、ボリュームがある金属物の影響を受けやすい。しかし、吹付けコンクリートの中にある金網は金属ボリュームが少なくほとんど影響を受けていない。概略調査のため相対的な評価になるが、現地で結果がわかり、目視調査の補完になり、迅速安価である。

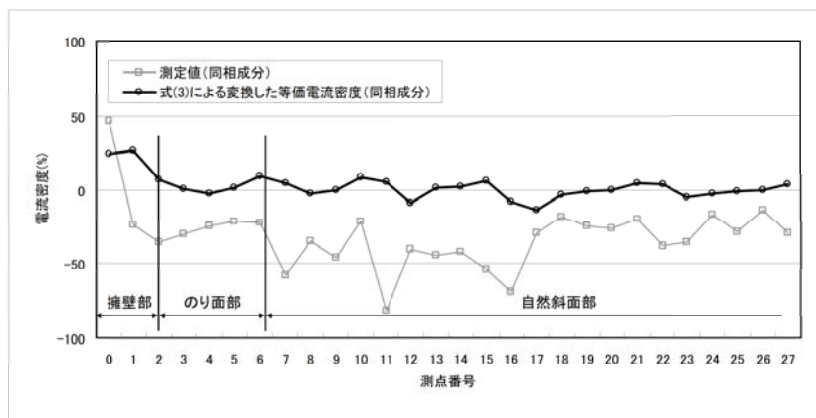


図5.18 探査結果（地点（2））地表面の測定結果と等価電流密度）

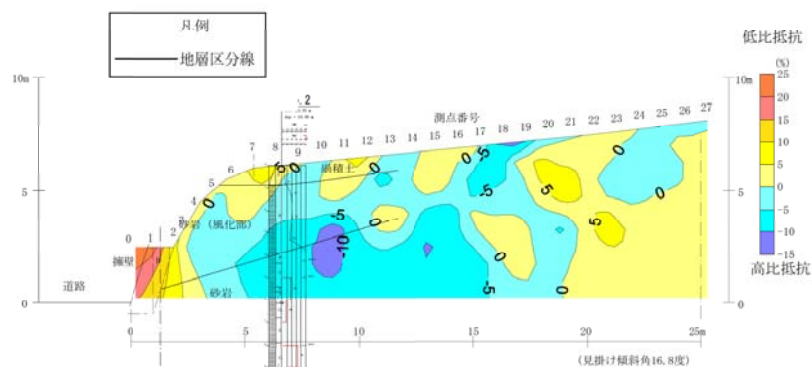


図5.19 VLF-EM探査による探査結果（地点（2））

5.3.5 VLF-EM探査の法面探査への適用性

これまで、ほとんど道路法面では適用されなかったVLF-EM探査による法面深部の探査を行った。この結果、測線を長く取れないとの制約から探査深度が浅かったため、地下水位の分布検出はできなかったものの、ボーリング結果や近傍の露頭状況から、定性的ではあるが風化状況の推定が可能であり、かつ低比抵抗部を示す等価電流密度のプラス値の分布深度とボーリングで確認された地山の風化帯の分布深度が概ね一致し、VLF-EM探査の法面探査への適用の可能性が見出せた。

法面の数は多く、広域的にかつ簡易に法面内部の情報を取得する探査法が求められている。その中で、非常に簡便な探査法であるVLF-EM探査による方法は、地表面における測定結果を表示させながら測定できるため、ある程度、異常帯の即時把握を可能にした。このことから、VLF-EM探査による探査は、内部情報を捉えながら点検評価を行う等、法面の内部を調査し、点検・診断のための情報収集方法の一つとして有効であると考えられるが、金属類の影響を大きく受けるため、保護工に金属を使用していない法面や自然斜面などの目視点検時に限られると思われる。

また、法面の安定性は降雨時や雨水の浸透後に低下することから、同一法面において無降雨時と降雨時のVLF-EM探査による探査結果を比較し、比抵抗値の変化を捉えることにより、法面の地下水の情報を得ることができると考えられる。他の調査手法との併用で精度を向上させる利用法も有効と考えられる。

なお、今回の探査対象法面における、安全対策を除いた実質の探査時間は約30分間程度である。

今後は、測定事例を増やすとともに、ボーリング結果や他の物理探査結果との相関性を検証するとともに、相対的な評価となっているVLF-EM探査による結果を地山比抵抗値に変換する手法の開発を行うことにより、より精度の高い法面評価が可能になるものとする。

5.4 FDEM探査

5.4.1 FDEM探査原理と測定方法

FDEM (Frequency-Domain ElectroMagnetic) 探査法は、従来の EM 法の発信周波数を多数にし、周波数の低い電磁波ほど深部まで透入する性質から、高い周波数で浅部を低い周波数では深部を探索するという原理を用いたものである⁹⁾。図 5.20 に測定原理の概念を示す。送信コイルで 1 次磁場を発信し地盤内の導電体（粘土や鉱物あるいは地下水のイオン体など）から生ずる渦電流によって誘導される二次磁場の強度を測定し 1 次磁場の比率から測定周波数ごとの見掛け比抵抗を求める方法である。解析は、地盤が水平多層構造であると仮定した理論磁場応答と、測定した磁場応答とが概ね整合する場合の層圧区分と、真の比抵抗区分を、非線形最小二乗法などによって求める。そして測点ごとに解析した比抵抗柱状図を測線に沿った二次元断面について比抵抗コンタの平滑化解析により比抵抗断面図を作成して評価する。
写真 5.7 は今回の実験に用いた測定機材で写真 5.8 は測定状況である。この FDEM 探査機の発信周波数は 11.4kHz～364.0kHz までを 16 チャンネルで自動切換え発信で測定できるものである。重量は約 22kg で最大長は 1.3m である。

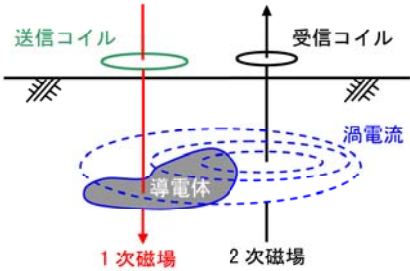


図 5.20 FDEM探査の測定原理の概念図



写真 5.7 FDEM法の測定機材



写真 5.8 FDEM探査の測定状況

5.4.2 FDEM探査機器

本研究で用いた FDEM 探査機の特長と基本仕様を表 5.2 に示す。

- (1) 従来の EM 探査機に比べ、測定周波数を 16 チャンネルの多周波で測定することにより、同じ深度であれば少ない測定周波数の探査機より地層分解能が高い。また、最高周波数を 364.0kHz まで高く延ばしているため浅部での分解能が高い。
- (2) 送受信コイル間隔を短く (1m) 製作することで、1 次磁場の指向性がシャープになり水平方向での分解能も高い。
- (3) 探査機は小型軽量に製作されているため、測定地点に置くだけで非破壊的に測定できるので調査地点の制約をほとんど受けない。
- (4) 1 地点の測定に係る時間は約 1 分程度で、多地点の測定を迅速にできる。

表 5.2 FDEM探査機：基本仕様	
二次磁場の検出方式	位相差検出・ベクトル演算方式
測定周波数	16 周波数 (364～11.4kHz) 364, 256, 216, 182, 128, 108, 91, 64, 54, 45 ^{・5} , 32, 27, 22 ^{・8} , 16, 13 ^{・5} , 11 ^{・4} kHz
送信機	高速DDS回路+リニアア送信機
送信コイル	φ 30cm, 分割巻き, 送信電流最大 4A (正弦波)
受信コイル	φ 25cm, 100 回巻
データ処理	パソコンとの連動による自動測定処理
寸法	1280 (L) × 450 (W) × 280 (H) mm, 約 22kg

5.4.3 FDEM探査結果

探査結果の比抵抗断面を図5.21に示す。

全体的にコントラストは少なく、比抵抗は大きな変化はない。

法尻の低比抵抗部分は擁壁内にある金属の影響である。

探査を実施した前日に降雨があった。

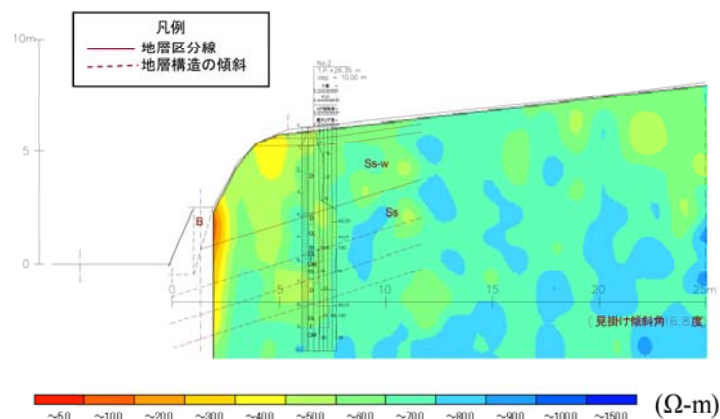


図 5.21 FDEM探査による探査結果 (地点 (2))

比抵抗分布図から高比抵抗部の連なりから地層の傾斜がうかがえ、流れ盤になっているようにも見えるが地層構造を捉えているとは判断できない。

FDEM探査の実施された日は前日に降雨があり、地山の斜面表層は比較的低い比抵抗となっている。

法肩部は低比抵抗が見られ風化が進んでいるようである。ボーリング結果による電研式岩盤分類の深度分布と比抵抗の深度分布を対比すると、D等級の箇所は40~50 (Ωm)、CL~CM等級の箇所は60~70 (Ωm) に対応し風化度合を定量化できる可能性が伺える。

地下水については明瞭な低比抵抗の部分が無いことから、地下水は探査可能領域では存在していないものと考えられる。

FDEM探査の測定機器の重量は22kgで急な斜面には特別な対策が必要となる。また、ボリュームのある金属物の影響を大きく受けるが、吹付けコンクリート内のラス網はボリュームが少ないため、ほとんど影響を受けていない。また法面には削孔などは空けないため、簡便な調査方法である。

5.5 まとめ

① 二次元比抵抗探査

金属物が有る箇所以外は、風化度合いが推定できた。

② VLF-EM探査

分解能は低いが低比抵抗部の位置から地山の風化度が推定された。

なお、非常に簡便な探査法であるVLF-EM法は、目視点検時にVLF-EM探査で内部情報を捉えながら点検評価を行う等、法面の内部を調査し点検・診断のための概略的な情報収集方法の一つとして有効であると考えられる。

③ FDEM探査

この方法も探査機を法面に置くだけで探査できるメリットがあり、今回の実験結果では地層の傾斜がそれなりに識別できたようにも見えるが地層構造を捉えたとは判断できない。しかし、比抵抗の分布がボーリングによる岩級区分と概ね整合しているの、さらに探査性能を改良できれば老朽化の判定に適用できる可能性がある。

④ 全体まとめ

電気・電磁気探査方法は法面を傷つけずに探査が可能であるが、反面金属類の影響を大きく受けることから、調査対象の法面に金属物が入っていないことが前提となる。電気・電磁気探査全体としては、地点(1)においては実施日が異なるため降雨による影響もあり、比抵抗値も差が出ている。しかし、地点(2)では降雨後数日に測定したVLF-EM探査とFDEM探査は同じような傾向がみられた。

電気・電磁気探査方法は水の影響を大きく受けるため、降雨の前後で測定することにより、法面内部が乾湿を繰り返していることを測定できることから、モニタリング調査に使用できることが期待される。

参考文献

- 1) 物理探査学会：物理探査ハンドブック手法編，pp. 243，物理探査学会，1998。
- 2) 斜面等健全性検討研究委員会・芦田謙＋沖村孝監修・(社)物理探査学会：老朽化吹付け法面の調査・対策の手引き，pp. 151，鹿島出版会，2006。
- 3) (財)道路保全技術センター：道路法面健全性検討業務報告書，pp. 8-10，2007。
- 4) 竜神正夫：VLF 電磁探査法と測定器について，物理探査，Vol. 23，No. 5，pp. 40，1970。
- 5) 物理探査学会：物理探査ハンドブック手法編，pp. 366-367，物理探査学会，1998。

- 6) Tohmas Enmark : WADI Instruction Manual, pp.5, ABEM Co., 1989.
- 7) 物理探査学会:図解物理探査, pp.72, 1989.
- 8) Karous, M. and Hjelt, S.E. : Linear filtering of VLF dip-angle measurements, pp.31, Geophys. Prosp., 1983.
- 9) Katayama, T., Takahashi, A. and Ashida, Y. : Non Contacting Survey of the Shallow Underground by Compact FDEM System, Proceedings of the 10th International Symposium on RAEG 2006, pp.101-107, 2006.

第6章 地中レーダによる法面内部の探査方法

6.1 はじめに

地中レーダによる探査は、非常に分解能力が優れた物理探査であるため、空洞や埋設物等の細かい物標の調査を得意としてきた。

笠井他^りの研究では、送信信号の周波数を高めれば10cm以下の分解能力を持つ反面、探査できる深度が2~3m程度と浅いことから地層や地下水調査には不向きであることが指摘されており、道路法面では十分に活用されてきたとは言い難い。

地中レーダの探査深度不足を克服するため、最近になってレーダ波を連続的に発生させることによって探査深度を増大させる連続波地中レーダ法が開発された。この手法によって地下10m程度までの地層境界で反射したレーダ波形が鮮明に得られるようになったため、本手法の道路法面への適用性について検討した。

具体的には、探査深度を従来の数倍に向上させた地中レーダ法である連続波地中レーダ機器を使用して、国内で初めて法面調査を実施し、さらに調査結果をボーリングや地下水観測による実証試験結果に基づいて検証し、道路法面の内部構造調査に対する連続波地中レーダ法の適用性を検討した。

6.2 連続波地中レーダ法の原理と測定方法

地中レーダ法は、**図6.1**に示したように、地表面から地中に向かって電磁波を放射し、電気特性の異なる境界で発生した反射波を捕らえることにより、地下構造を探査する方法である^{2)~4)}。電気特性の異なる境界とは、具体的には空洞・埋設管・埋設物・地層境界・亀裂や破砕帯などである。地中レーダは、物理探査の中でも最も分解能の高い調査手法のひとつである。

地中レーダで使用される電磁波は、数十MHzから数GHzであり、使用する周波数に応じてアンテナを使い分ける。送信周波数成分の中央の周波数を中心周波数といい、中心周波数が高いほど分解能が高く、探査深度は浅い。中心周波数が低くなるにつれ、探査深度が向上するが、分解能は低下する。

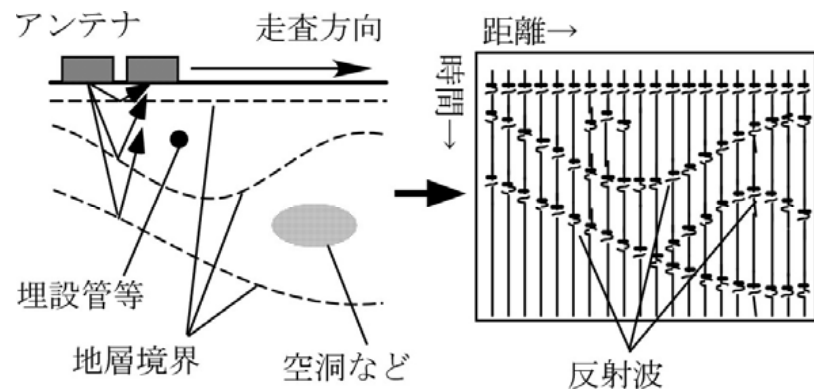


図 6.1 地中レーダ探査の計測原理

一般に地中レーダは、パルス波地中レーダといわれる方式のことを言う。パルス波地中レーダは、図6.2に示したように送信信号にインパルスを用いる。分解能は最大20cm程度、探査深度は2～3m程度である。パルス波地中レーダは、作業性が非常に良く、高密度のデータを取得することができる反面、可探深度が少ないことが弱点である。このことを解消するためには、パルスの尖頭電圧を上げることや、あるいは低周波パルスを用いることが考えられるが、いずれも高周波数成分の減衰や低下を招き、特徴である高分解能力を失ってしまう。したがって、電磁波パルスを送信する方式では高分解能力を維持したまま探査深度を増大させることは両立しない。

パルス波地中レーダの探査深度を向上させるため、送信方式を変更した新しい地中レーダ法が連続波地中レーダ法である¹⁾。連続波地中レーダは、図6.3に示したように、インパルスを正弦波に分解して時間をかけて地中に電磁波を放射する方式である。同じ周波数の正弦波を一定時間送り続けた後、図6.4に示したようにステップ式に周波数を変化させ、送信を繰り返す。またこの方法は受信後の波形をパルス圧縮（時間領域における相関処理）しており、通常の地中パルスレーダ装置等と同様の波形解析が可能となる。分解能力は最大50cm程度に低下するが、探査深度は10m程度まで向上する。

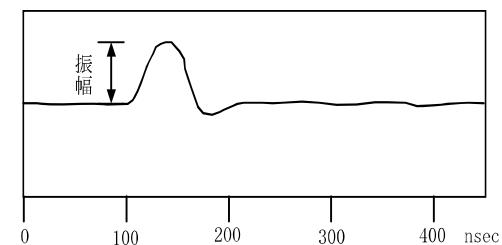


図 6.2 インパルス送信波形

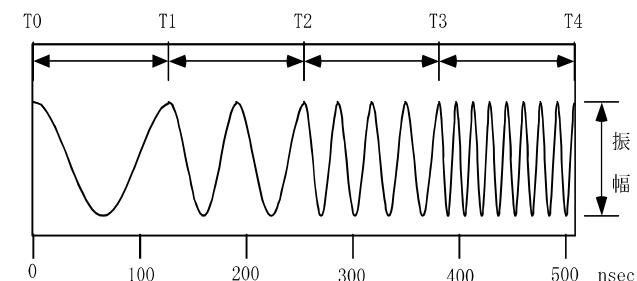


図 6.3 連続波送信波形

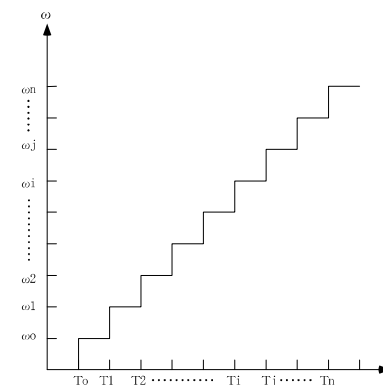
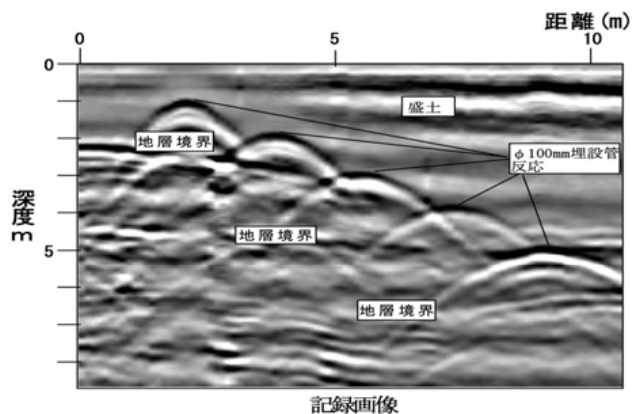


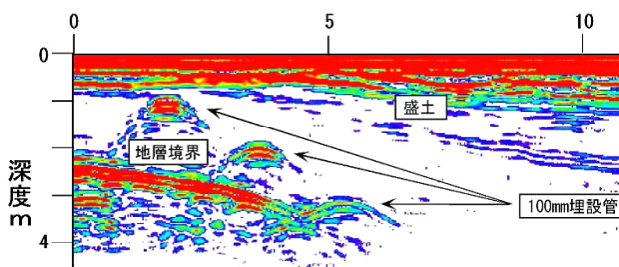
図 6.4 ステップ式周波数掃引方法

図 6.5 は、鈴木ら⁵⁾によって連続波地中レーダ法の能力検証を行った実験事例である。

図 6.5(b)に示すパルス波地中レーダ法による反射断面図であるが、1m 深度間隔で地下 5m まで埋設された $\phi 100\text{mm}$ の地下埋設管のうち深度 3m まで検出されているに対して、連続波地中レーダは深度 5m まで全て検出されており、連続波地中レーダ法が分解能力を保持しながら探査深度を向上させたことが認められている。



(a) 連続波地中レーダ法反射面断面図



(b) パルス波地中レーダ法反射面断面図

図 6.5 連続波地中レーダ法の能力検証例⁵⁾

6.3 連続波地中レーダの実証実験と結果

6.3.1 実験方法

実証実験は、地点（１）の切土等法面と、地点（３）の盛土法面の二地点で行った。

連続波地中レーダ装置には、送信出力の大きい大型アンテナと送信出力は小さいが作業性の良い小型アンテナがある。

アンテナ重量は前者が50kg、後者が15kgであり、送信と受信とあわせて2台である。大型アンテナの長所は可探深度が10m以上と大きいことであり、短所はアンテナが大きく重いことである。小型アンテナは可探深度が10m以下に劣化するが、アンテナが小型軽量であるため急峻な地形でも計測作業が行えることが長所である。

写真6.1に示した地点（１）は、急峻かつ足場の悪い吹付け法面であるため、作業性が良い小型アンテナを利用した。計測は法面を横断する場所で行った。

写真6.2に示した地点（３）は、足場の良い張りコンクリートであるが鉄筋が配筋されている。地表面の鉄筋コンクリートは、地中に入射する電磁波を大きく減衰させるため、その対応として可探深度が大きい大型アンテナを使用した。

なお、地点（２）は吹付けコンクリート法面の凹凸が激しく、地中レーダ機器の地盤への密着性が悪く、地表面の反射が大きくなるため、解析が難しくなると判断し、実施しなかった。



写真6.1 地点（１）計測状況



写真6.2 地点（3）計測状況

実証実験に使用装置の仕様は下記の通りである。

表 6.1 連続波地中レーダ装置主仕様

項目	仕 様		
送信器	送信周波数	: 5～160MHz (大型)	
		: 50～500MHz (小型)	
	送信波形	: ステップ可変周波数正弦波	
	電力増幅方式	: C級プッシュプル	
受信器	受信周波数	: 5～160MHz (大型)	
		: 50～500MHz (小型)	
	雑音指数	: 1.2dB	
受信方式	: スーパーヘテロダイン検波方式		
入出力インピーダンス50Ω			
アンテナ部	方式	: ダイポールアンテナ (ボリタイプ)	
	寸法	: 2000×800mm (大型)	
		: 400×500mm (小型)	
ケーブル	種類	: 光ファイバー (50/125、G1)	
	長さ	: 100m	
従来法との比較		連続波レーダ	地中レーダ
	送信方式	連続波	パルス波
	探査深度	8～10m	2～3m
収録器	ノート型パソコン		
電源	DC12V (最大20Ah)、またはAC100V		

制御収録部を写真6.3に、高周波型（小型）アンテナを写真6.4に、低周波型（大型）アンテナを写真6.5にそれぞれ示す。



写真6.3 連続波レーダ制御収録部



写真6.4 連続波地中レーダ高周波アンテナ（小型タイプ）



写真6.5 連続波地中レーダ低周波アンテナ（大型タイプ）

6.3.2 連続波地中レーダ法の解析方法

解析は、測線分の波形列であるデータセットを作成し、これに対してデータ処理を実施し、処理後の波形列を用いて反射面断面図を作成した。

具体的には、図6.6に示す手順により50cm間隔で計測した波形データを集めてデータセットを作成し、これら波形列に対して各種データ処理を実施した。地中レーダは反射法探査の一種であるため、そのデータ処理の体系は、先達の反射法地震探査と同様となり、デコンボリューションとマイグレーションが中心になる⁶⁾。

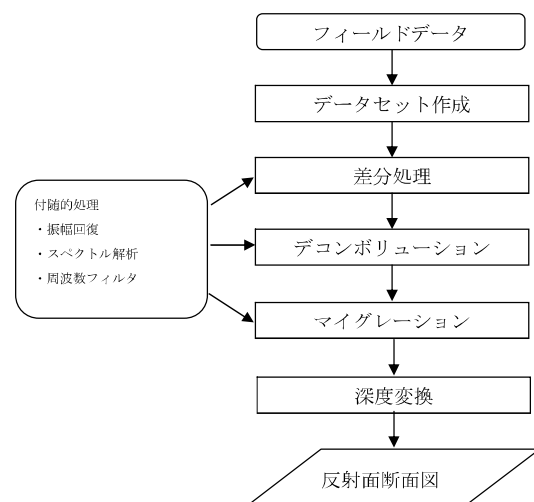


図6.6 連続波地中レーダ法の解析手順⁶⁾

デコンボリューションは地層特性等で変形した波形記録を補正して分解能力を向上させる処理であり、マイグレーションは記録断面上の回折波を除去して傾斜した反射波の列を地下の真の位置に戻す処理である。

また法面調査では、地表の凹凸や保護工の影響から地表や表層でエネルギーの大きい波が卓越し、その影響が地下深部の波形にまで残存するため、この対応として差分処理を実施した。

差分処理は、データセットから平均波形を作成し、各測点の波形から差分する方法である。平均波形は、測線全体で同じ深度に表れる波形が強調されるため、平均波形を差分することによって地表と同じ傾斜を持つ波形の並びを除去できる。地表と同傾斜の地質境界面からの信号も除外されるが、このような地質境界面が少ない急峻な道路法面では有効な

データ処理技術であった。

以上の主要なデータ処理の効果を向上させるため、必要に応じて付随的なデータ処理を行う。実施した処理は、振幅回復処理と周波数フィルタである。振幅回復は、波形の振幅が減衰する深部データの振幅を回復させる補正である。周波数フィルタは、スペクトル解析によって地下構造に起因する周波数成分を検討し、その成分のみを残す周波数フィルタを設計して実施した。

6.3.3 実証実験結果

① 地点（1）

図6.7は、ボーリングなどの詳細調査から評価した地点（1）の地質構造である。新第三紀砂岩泥岩互層から成り、その中の地質境界を赤線で示した。赤破線は受け盤構造を示す層理面である。また水色線は、ボーリング孔内の水位観測から得られた地下水位面であり、浅部から雨天直後、ボーリング掘削時、晴天時の観測結果である。計測日は降雨直後であったため、地下水面は浅層部で観測されることが予想された。

図6.8は、地点（1）における連続波地中レーダ法の評価結果である。電磁波の地中反射面断面図に対して振幅が大きくて連続性のある波形の並びを地質境界面と評価し、図6.7に示した実際の地質構造と対比できるようにそれぞれ同色で示した。

ボーリングデータ等の結果と連続波地中レーダの反射面データと比較すると、地質境界面や層理面と概ね整合する傾斜方向に反射波形の並びが検出でき、全体として一致し、連続波地中レーダを用いて風化領域の把握ができていると評価できる。しかし、一部に地質境界面と整合しない反射面も検出された。これは深度2～3m付近に連続的に検出された反射面に当たり、雨天直後の地下水面の場所と概ね一致している。このため、これは飽和領域の地盤または地下水面と推定できる。このように、探査結果はボーリング等の先見情報が無いと解釈が困難であった。

また地点（1）はモルタル吹付け法面であるため、表面の凹凸による強い直接波の発生によるデータ劣化が懸念されたが、差分処理によって影響を削減できた。

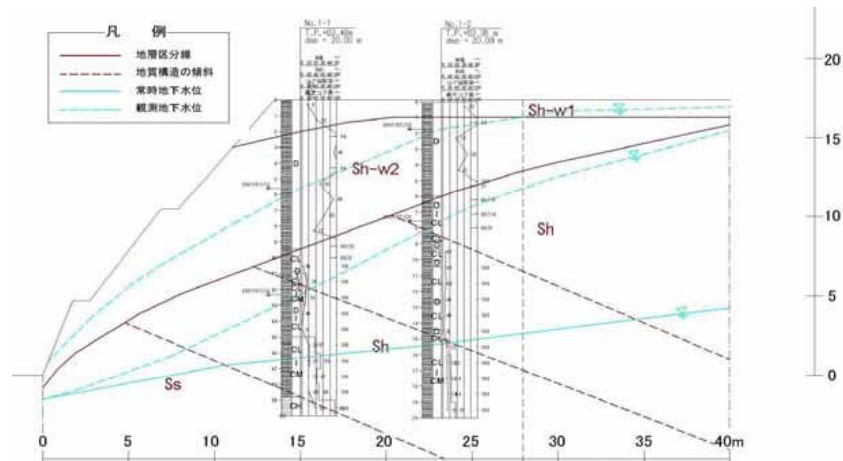


図 6.7 地点（１）の地質構造

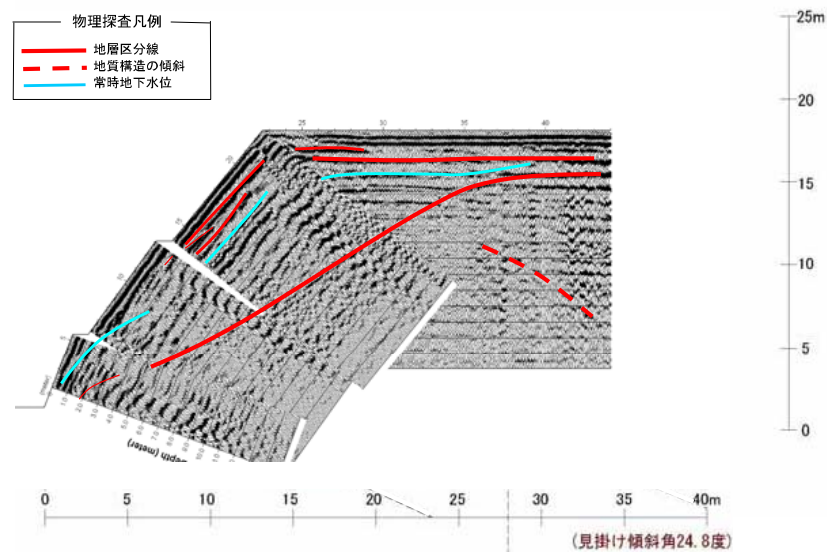


図 6.8 連続波地中レーダによる探査結果（地点（１））

② 地点（３）

図6.9は、ボーリングなどの詳細調査から評価した地点（３）の地質構造である。図中の赤線は地質境界であり、盛土と基盤の境界面を示す。基盤は新第三紀礫岩である。

図6.10は、地点（３）における連続波地中レーダ法の評価結果である。電磁波の地中反射面断面図に対して振幅が大きくて連続性のある波形の並びを地質境界面と評価し、図6.9に示した実際の地質構造と対比できるようにそれぞれ同色で示した。

ボーリングデータ等の結果と連続波地中レーダの反射面データと比較すると、盛土境界や地質境界面と概ね整合する深度に反射波形の並びが検出でき、全体として一致しており、連続波地中レーダを用いて地盤構造が把握できていると評価できる。また、一般に盛土を行う場合は、地山と盛土の密着性を高めるために地山を階段状にカットする。その階段状の形状が検出できており、非常に詳細な結果が得られた評価できる。

しかし、一部に地質境界面と整合しない反射面も検出された。これは深度4.5～6m付近に法尻から法面中腹の小段にかけて検出された反射面に当たり、常時地下水面の場所と概ね一致している。このため、これは地下水面と推定できる。しかし小段から法肩にかけては探査深度が不足して反射面を検出することができなかった。

また地点（３）においては、盛土法面の保護工である鉄筋コンクリート版の影響が懸念された。地中レーダ法のように電磁波を取り扱う探査手法は、鉄筋等の金属物の影響を受けて著しく測定データが劣化する。本実験では、鉄筋が持つ電界の振動方向と逆転する方向の電界を検出しやすい測定を採用して鉄筋の影響を極力削減した。また差分処理も実施した結果、探査深度は5m程に低下したが、内部構造の情報を評価できる程度にデータ低下を緩和することが可能になった。

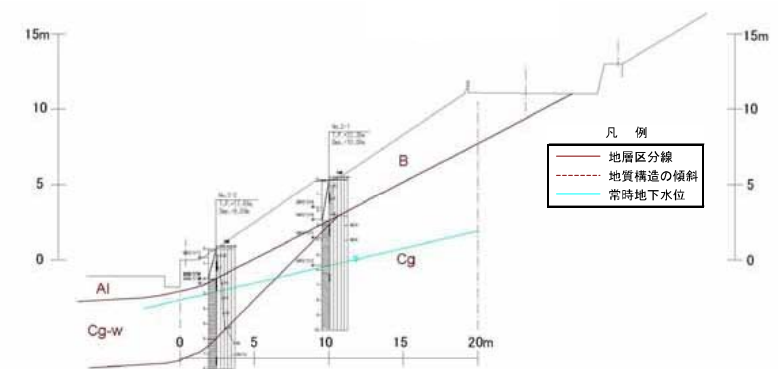


図 6.9 地点（３）の地質構造

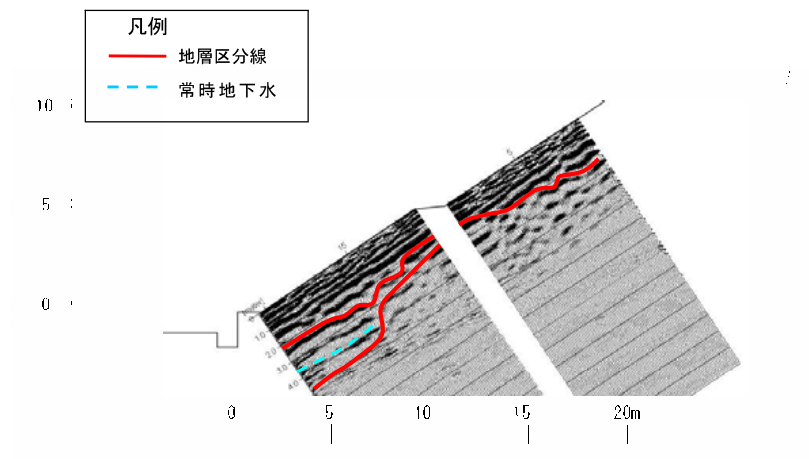


図 6.10 連続波地中レーダによる探査結果（地点（3））

6.4 道路法面健全性評価における連続波地中レーダの適用性

実証実験を行った様な切土等法面および盛土法面においては、連続波地中レーダによって地質境界面に対応する反射面が検出でき、また地下水面と推定できる反射面も検出できたことが判った。切土等法面では、風化帯に応じた反射面が概ね検出できており、探査結果から受け盤や流れ盤等の評価を行うことや、少ないボーリングデータから孔間の地質構造の連続性を詳しく評価することに有効であった。盛土法面では、盛土境界面が詳細に検出されるとともに、地下水面と推定できる反射面も検出できたため、排水機能の低下を示唆する地下情報が評価可能であることが判断できる。またこれら評価は、凹凸する急峻地形や鉄筋を含む保護工が存在する上で得られたものであるため、現在のデータ処理技術によって法面データの補正が可能であることも同時に検証できた。

以上の様に連続波地中レーダ法は、道路法面の内部構造調査に適用できる有効な手法の一つであると思われる。しかし地層境界面と地下水位面で発生する反射波には明確な差異が見られないことや、解析断面図の中の反射面は、地質境界面や地下水面以外にも偽造や歪み波形等のノイズが含まれるため、明確な区別を行うためにはボーリングデータと合わせて探査結果を分析することが重要である。また今回の実証実験は二箇所だけであり、今後多数の箇所でも検証を行うことや、同じ箇所を複数回計測して地下水位に関わる反射波の変化状況を分析する等、さらに適用性について検討を続けて行く必要がある。

連続波地中レーダ法の探査装置の適用条件を整理すると、地点（1）のような吹付けコ

ンクリート防護の切土等法面では、急峻な地形が多いことから作業性と安全性を重視して小型装置を用いる。この場合の探査可能深度は、地点（1）の実験で評価できた10m程度となる。地点（3）のような盛土法面では、探査深度を劣化させる鉄筋コンクリートによって防護されている場合が多いが、この場合は緩斜面も多いため、探査できる深度が大きい大型装置を用いる。この場合の探査可能深度の目安は、地点（3）の実験で評価できた6～7m程度となる。

参考文献

- 1) 笠井弘幸，西山英一郎，鈴木敬一：土木地質調査におけるGPRの適用例，地質ニュース537号，pp. 8-15，工業技術院地質調査所，1999.
- 2) 物理探査学会編：物理探査適用の手引き（とくに土木分野への利用），第Ⅲ編物理探査計画実施要領（案），pp. 140-148，2000.
- 3) 物理探査学会編：物理探査ハンドブック「手法編」，第7章地中レーダ，pp. 399-429，1998.
- 4) 物理探査学会編：新版物理探査用語辞典，pp. 288，愛智出版，2005.
- 5) 鈴木敬一，伊藤牧人，田辺一夫：ステップ式FM-CWレーダによる埋設管探査実験，物理探査学会第96回学術講演論文集，pp. 376-380，1997.
- 6) 西山英一郎，笠井弘幸，鈴木敬一：GPRにおけるデータ処理法，地質ニュース537号，pp. 53-60，工業技術院地質調査所，1999.

第7章 弾性波探査による法面内部の探査方法

7.1 はじめに

弾性波探査は弾性波（P波、S波、レイリー波）を地表付近で発生させて、その弾性波が地下の地質構造等が異なる箇所などで透過、反射、屈折し地中を伝播した後地上等で受振して、地下構造を探査するものである。

弾性体を伝わる弾性波は大きく実体波と表面波に分けられる。実体波にはP波とS波があり、表面波にはレイリー波とラブ波がある。このうち均質無限媒質中を伝わることは実体波だけである。均質媒質において地表面が存在した場合、地表面に沿って表面波の一種であるレイリー波が伝播する。もう一つ表面波には水平方向に振動するラブ波も伝播するが、レイリー波ほど物理探査には用いられていない¹⁾。

弾性波探査による地下構造の探査は、平坦な場所やトンネルなどで多くの実績がある。屈折法弾性波探査はこれまでも法面調査に利用されているが、反射法地震探査と表面波探査は、道路法面に対してはほとんど用いられていない。しかし、弾性波速度と強度の相関性は高く、弾性波速度から設計に用いる地盤の力学特性値への換算も数多く提案されている。

そこで、本研究では、弾性波探査のうち、高密度表面波（レイリー波）探査、屈折法弾性波探査、反射法地震探査の3手法について、道路法面で実証実験を行い、法面の健全性評価のための探査手法について検討した。

7.2 高密度表面波探査

7.2.1 高密度表面波探査方法と原理

高密度表面波探査は、図7.1に示すように地盤の地表付近を伝わる表面波（レイリー波）を多チャンネルで測定・解析することにより、深度20m程度までの地盤の表面波速度を求める手法である。この手法は、S波やP波の弾性波探査に比べて測定時間が短く、解析が比較的容易であることから、効率的・経済的な探査である。

S波速度は地盤の動的特性の把握や検討等には不可欠なパラメータであり、N値との相関が高いことから¹⁾、地盤の硬軟や盛土と地山の境界や弱部などの把握に優れている。表面波速度はS波速度と相関が高く、レイリー波の伝播速度は一般にS波速度の0.9～0.95倍（ポアソン体の場合には0.9194倍）であり、地表面に垂直な方向に大きく振動するという特徴を持っている。したがって、仮にレイリー波を正しく測定できれば、最大5%の誤差でS波速度に換算することができるといえる¹⁾。表面波探査は、表面を伝播する表面波（レイリー波）から速度を求め、表面付近の地盤特定を把握するものである¹⁾。表面波（レイリー波）は、

地盤表面の物体粒子が楕円運動をする波で、実体波のように地下に向かって進行することができず、地盤の表層を水平方向のみに伝播する性質がある。よって、表面波は凹凸のある地形では、表面形状の影響を大きく受けるため、表面波探査は比較的凹凸が少ない地形の場所に適用性が高い。

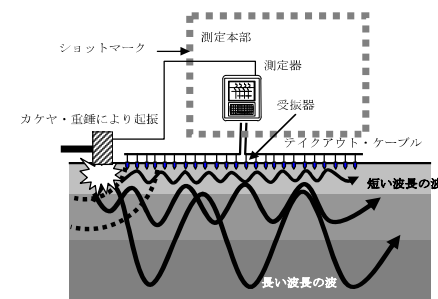


図7.1 高密度表面波探査の測定概念¹⁾

7.2.2 高密度表面波探査結果

高密度表面波探査は、比較的高低差と凹凸の少ない地点（3）の法面に縦横断の測線を設定し実施した。使用した機器を写真7.1に示す。測線に沿って上下動受振器24個を1m間隔で地表に配置し、写真7.2に示すように地表でカケヤ叩きによる起振を行った。受振器は、写真7.3に示すように平坦面では吹付け面の上に三脚台座を使用できるが、傾斜地では粘土を用いて水平を確保した。



写真7.1 高密度表面波探査使用機器



写真 7.2 弾性波探査起振状況



写真 7.3 高密度表面波探査受振器設置状況

高密度表面波探査結果は図 7.2 に示すように、上段部分の盛土部 (B) および下段部分の礫岩の風化部 (Cg-w) を低速度部として捉えている。また、堅硬な岩盤部 (Cg) を高速度部として捉えている。図 7.3 に示すように孔内速度検層の結果と比較すると、上段部分の盛土部 (B) の下の厚さ 4m 程度の部分は低速度部であり、高密度表面波探査結果と一致していた。しかし、地山と盛土部の境界部の検出はボーリングデータ等の先見情報が無いと困難であった。

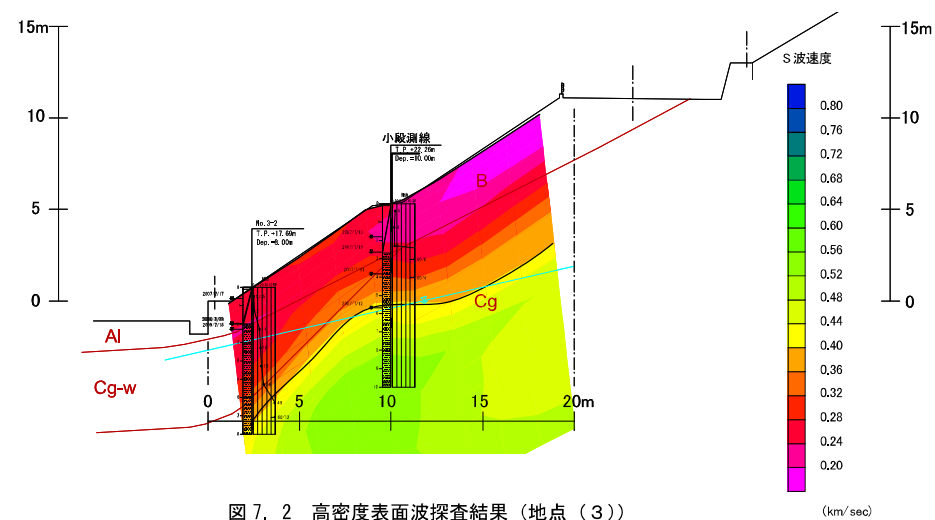


図 7.2 高密度表面波探査結果 (地点 (3))

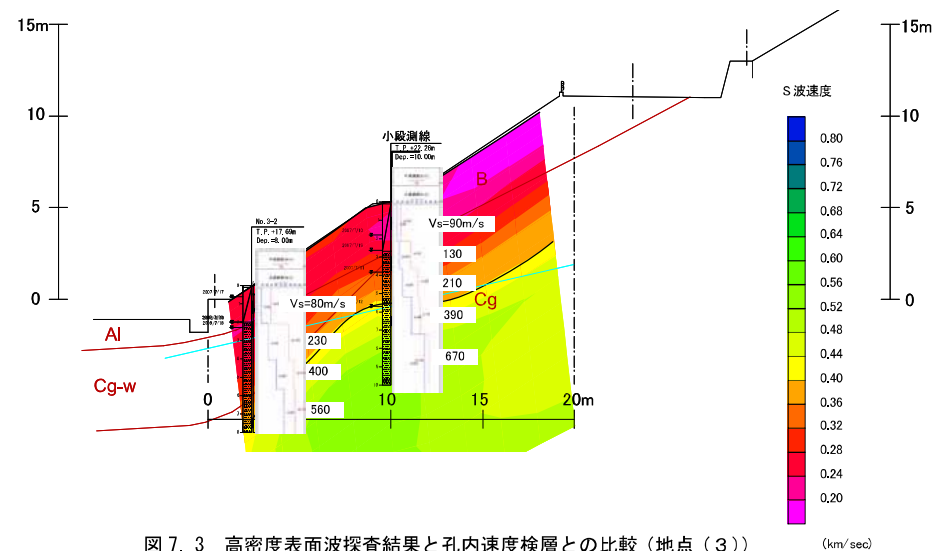


図 7.3 高密度表面波探査結果と孔内速度検層との比較 (地点 (3))

7.3 屈折法弾性波探査と反射法地震探査

7.3.1 屈折法弾性波探査と反射法地震探査の探査方法と原理

屈折法弾性波探査は、土木分野ではトンネルなどの地盤調査にしばしば使用されている手法である。反射法地震探査は、石油や天然ガスの資源探査として技術的に発展し、国内では活断層調査として地震防災分野などにおいて多用されており、大深度の探査で実績がある。両者とも弾性波の伝播を地表に設置した地震計により測定し、地下の音響インピーダンス（弾性波の伝播速度と密度の積）の境界で生じる屈折波や反射波に着目したデータ処理解析を行う手法である。したがって、探査結果は地盤の弾性波伝播速度に関する情報を提供してくれる。

探査結果から、屈折法弾性波探査では速度層境界として地盤の速度分布が表現されるとともに、工学的パラメータである地盤の弾性波伝播速度値が得られる。反射法地震探査では反射断面図として出力され、地下の内部構造をイメージングできる。それぞれ地盤の速度構造に関する情報を提供してくれるが、異なった地盤状況を反映した結果である。

屈折法弾性波探査は、速度層境界として地下の速度構造を区分することができるが、反射法地震探査の結果のように地下の地層構造をイメージングすることはできない。反射法地震探査では CDP 重合のための速度解析により RMS 速度分布として求められるが、屈折法弾性波探査と比べて明瞭な速度層境界として把握することはできない。また、両手法とも PS 検層のように詳細な速度プロファイル取得することはできない。

そのため、複数の探査手法の結果を組み合わせることによりそれぞれの探査手法の特徴を生かし、長所・短所をお互いに補完すること、ボーリング調査の結果やボーリング孔を利用した PS 検層や VSP 探査などの地盤状況と地表からの物理探査結果の対比ができるデータを取得するなどして、応答する地盤状況の不確定要素の低減を図り、探査精度を向上させることができる。と考える。

ここでは、屈折法弾性波探査と反射法地震探査のそれぞれの探査結果から得られる地下の地盤状況に関する情報について検証ボーリング調査の結果と合わせて評価した。

① 屈折法弾性波探査

屈折法弾性波探査は、地表でカケヤ叩き等によって人工的に弾性波（P 波または S 波）を発生させ、**図 7.4** に示すように、地盤を直接伝播する直接波と地下の速度の異なる境界面を屈折して伝播する屈折波とを測定することにより、地下の速度構造を求める手法である。これにより地盤の硬軟・風化の程度・基盤の深さを把握し、または速度境界の形状からはすべり面形状などを推定することができる。

地点（1）～地点（3）において測線を設定し、受振点あるいは振源は斜面上の実距離 2.0 m 間隔とした。受振点は**写真 7.4** に示すように、吹付け法面にコアドリル等で孔を開けて受振器を直接地山に取り付けた。起振は、P 波を発生させる場合では吹付け法面にハンマドリ

ル等で穿孔し、鉄筋棒等を介して地山を直接的にハンマ打撃した。S 波を発生させる場合は表面に長さ 1m 程度の木製の打撃板を設置して板叩き法により行った。

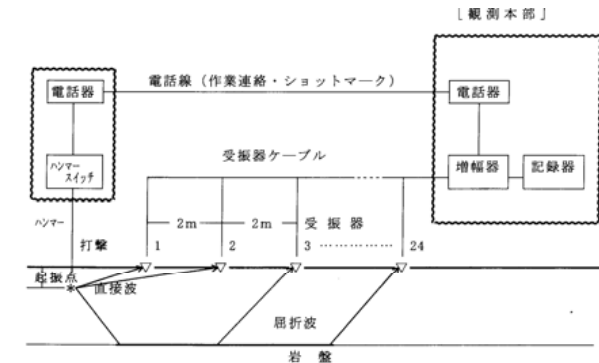


図 7.4 屈折法弾性波探査の測定概念²⁾



S 波用受振器



P 波用受振器

写真 7.4 反射法・屈折法の受振器

② 反射法地震探査

反射法地震探査（反射法探査）は、**図 7.5** に示すように、地表でカケヤ叩き等によって人工的に弾性波（P 波または S 波）を発生させ、その弾性波が地中を伝播し地下の音響インピーダンス境界から反射して地表に戻ってくる微弱な反射波を測定することにより、地下の速度や密度の異なる境界面を可視化することにより地層の走向・傾斜やその形状などを把握する。

反射法地震探査は屈折法弾性波探査と異なり、ほぼ全ての受振点で起振する必要があるが、地点（１）～地点（３）において屈折法弾性波探査と同一の測線、同一の振源・受振点を設定した。したがって、今回の実験では屈折法と反射法を同時に測定した。

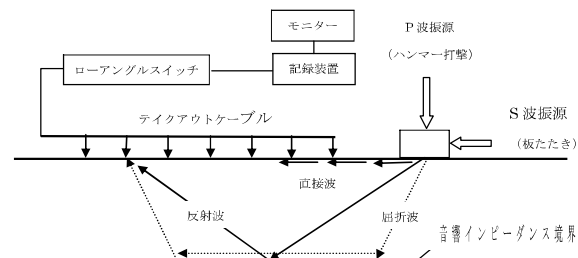


図 7.5 反射法地震探査の測定概念²⁾

7.3.2 屈折法弾性波探査と反射法地震探査の探査結果

屈折法弾性波探査は、弾性波速度によって地盤を層構造に分類することができる。一方、反射法地震探査は、主に速度や密度の異なる境界面からの反射波を抽出するため、屈折法弾性波で得られた速度境界と反射法地震探査で得られた反射面は一致するが、屈折法弾性波探査では調べることでできない基盤層の内部構造などを明らかにできる利点がある。斜面における物理探査法の適用は、地形や地盤状況が複雑であるため必ずしも最適な条件で適用されるときは限らない。そのため、二つの手法を対比することにより、例えば風化部と新鮮部との境界の深さや形状を確認したり、地盤を構成する地層構造を求めたりして、相互確認を行いながら不確定要素の低減を図り、探査精度を向上させることができると考える。

また、屈折法弾性波探査の解析は「萩原の方法（ハギトリ法）」とその拡張法が一般的であるが、近年トモグラフィによる解析が可能となってきた。このため、この研究では両者の解析法を用い比較を行うとともに、S波とP波の比較も行った。

7.3.2.1 地点（１）の解析結果

地点（１）の屈折法弾性波探査のP波の結果を図7.6にS波の結果を図7.7に示す。カラーのグラディエーションで示した図はトモグラフィ解析の結果である。灰色と紺色で示したラインはハギトリ法による速度層境界である。また茶色でボーリングから想定した地質断面図を示す。数字はS波とP波の速度である。

屈折法弾性波探査の結果、ハギトリ法ではP波およびS波の速度層境界は一致し、強風化部に相当する第一層速度層は、斜面および法肩で厚く、頂上の平坦部では薄い。また、風化岩に相当する第二層速度層は、斜面方向に緩やかに傾斜する傾向が認められる。

トモグラフィ法のP波とS波を比較すると、大局的な速度層の構造は同じである。しかし、表層付近の強風化部を示す赤桃色、基盤を示す緑青色の構造はP波とS波で同様であるが、中間の速度層ではコンタの形状が異なっている。P波とS波の速度構造は必ずしも一致するわけではないが、この差異はP波とS波の速度構造の違いを表すものではなく、トモグラフィ法の場合連続的にコンタ表示をするために現れた違いではないかと考えられる。

ボーリング結果より推定された地質構造と比較すると、その形状はハギトリ法による解析結果及びトモグラフィ解析結果と似ているが、急斜面の法面部において地層境界と速度層境界が大きく異なる。法面部分は急斜面であったため、ボーリングを行なえず、実際の地質構造は確認できていない。2本のボーリングから法面全体の風化状況を説明することは不可能であるため、この様な物理探査手法によって平面的な広がりや推定することが重要である。ボーリング地点においてもハギトリ法による最下層の速度層境界とボーリング結果より推定された地層境界は3m程度の不一致を示すが、ハギトリ法による速度境界は、PS検層による速度層境界とほぼ一致している。この位置は地下水位面と一致しており、PS検層結果からもここでS波速度が大きく変化していることが分かる。ボーリングコアの岩級区分では、この速度層境界付近にD級が出現しており、また、コア形状や硬軟においても速度層境界付近までは風化の影響と見られるコア状況の低下が認められる。PS検層による速度プロファイルにおいても、ボーリングコアと同様にコントラストのある速度層境界ではなく、深部へ徐々に弾性波速度が増してゆくミラージュ的な速度層分布を示しており、堆積岩の風化による法面の老朽化の現状を表すものと考えられる。

屈折法弾性波探査結果から、ボーリング等の先見情報がなくても風化領域を捉えることができたと考えられる。しかし、それよりも下の受け盤となっている地質構造は把握できなかった。

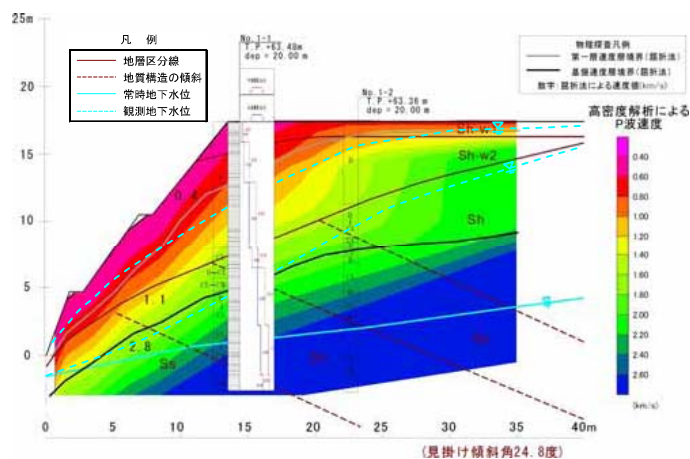


図 7.6 屈折法弾性波探査結果 (P 波) 地点 (1)

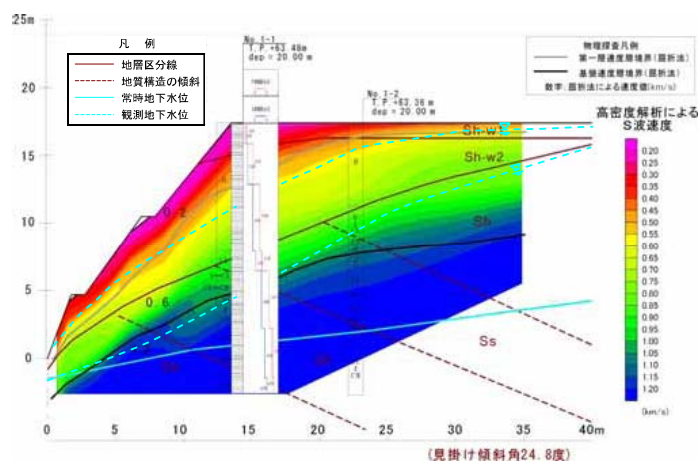


図 7.7 屈折法弾性波探査結果 (S 波) 地点 (1)

地点 (1) の反射法地震探査の P 波の結果を図 7.8 に示し、S 波の結果を図 7.9 に示す。青い破線が反射法地震探査から導きだした地層構造である。

P 波と S 波を比較すると、反射面のパターンは同じ傾向を示し、大きな差異は認められない。浅部にはやや不鮮明ながら法面の流れ盤方向に連続する反射波が認められ、深部では法面に対して受け盤方向の反射波群が認められる。

ボーリング結果から出した地質構造図と比較すると、流れ盤方向に認められる反射波は、風化部と基盤部の地層境界付近に位置する。深部の受け盤方向の反射面は砂岩泥岩互層とはほぼ同じ傾斜方向を示しており、反射法により法面内部の層構造を捉えていると考えられる。しかし、反射法の結果のみで風化帯や地層構造の解釈を行うことは難しく断定は困難である。

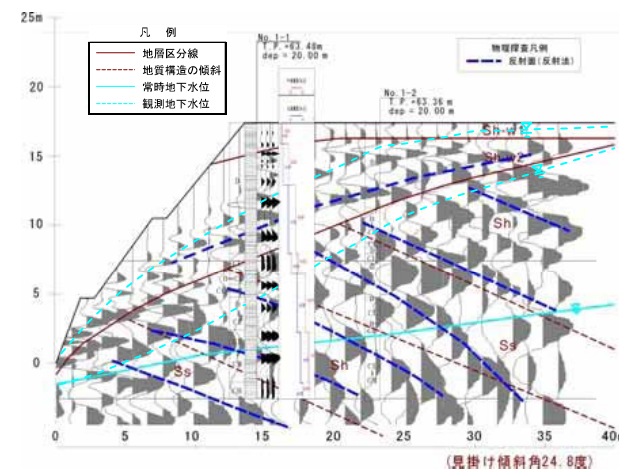


図 7.8 反射法地震探査結果 (P 波) 地点 (1)

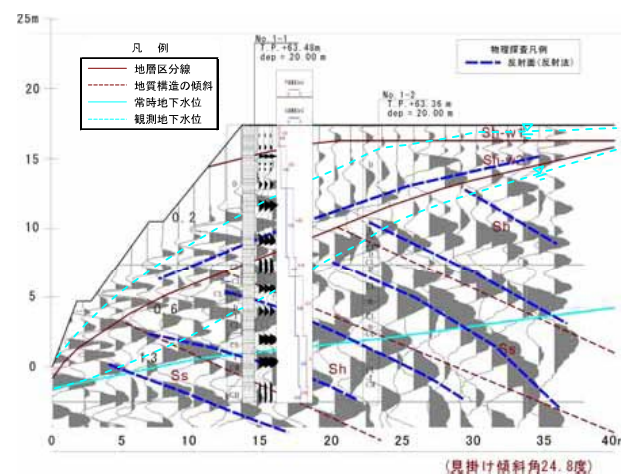


図 7.9 反射法地震探査結果 (S 波) 地点 (1)

地点（１）のP波の屈折法弾性波探査と反射法地震探査の解析結果を重ね合わせたものを図7.10に、S波を図7.11に示す。屈折法と反射法を比較すると、反射法では、深さ5m程度の浅部の構造は捉えることができなかった。反射法でやや不鮮明ながら認められる流れ盤方向の反射面は、屈折法で求められた基盤速度層内部の地質構造に相当すると考えられる。

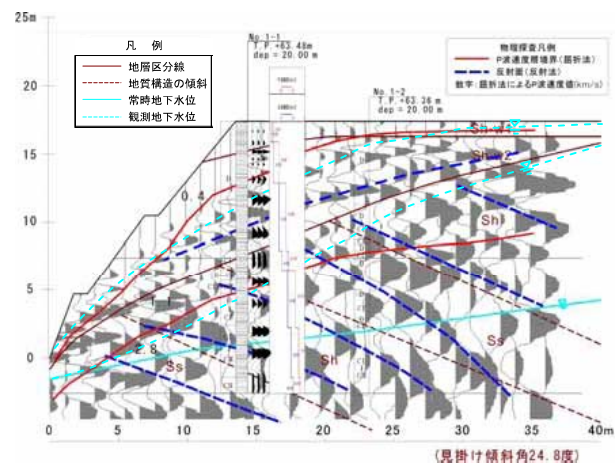


図 7.10 屈折法弾性波探査・反射法地震探査結果（P波）地点（１）

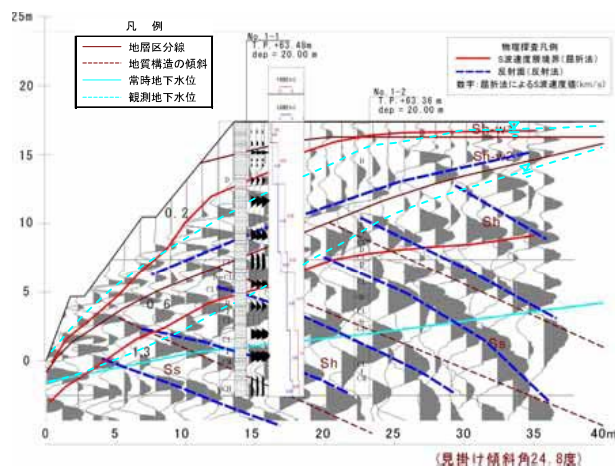


図 7.11 屈折法弾性波探査・反射法地震探査結果（S波）地点（１）

7.3.2.2 地点（２）の解析結果

地点（２）の屈折法弾性波探査のP波の結果を図7.12にS波の結果を図7.13に示す。カラーのグラディエーションで示した図はトモグラフィ解析の結果である。灰色と紺色で示したラインはハギトリ法による速度層境界である。また茶色でボーリングから想定した地質断面図を示す。数字はP波とS波の速度である。

これらの図から、強風化帯または未固結層を示す領域が、法面上部に2m～3mの厚さで分布しているのがわかる。

P波とS波を比較すると、速度構造の形状は、極めて良く一致している。ハギトリ法の解析では、法尻での地表地形の急激な変化に対して追従することができないため、そこではトモグラフィ解析によるコンタの方が速度分布に凹凸変化があるのがわかる。それ以外の場所ではハギトリ法とトモグラフィ法は良く一致している。

ボーリング調査により推定された大局的地質構造は、速度構造と良く一致する。屈折法による速度層境界は、PS 検層による速度層境界深度と1.5m程度の違いがあるものの、屈折法弾性波探査結果から、ボーリング等の先見情報がなくても概ね風化領域を捉えることができたと考えられる。

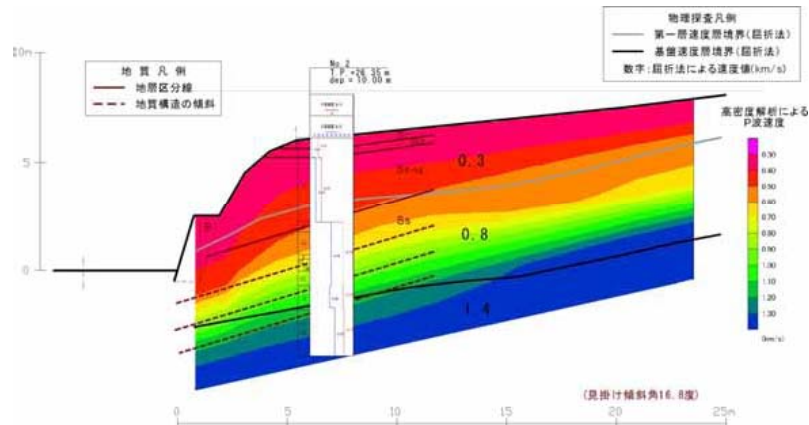


図 7.12 屈折法弾性波探査結果 (P 波) 地点 (2)

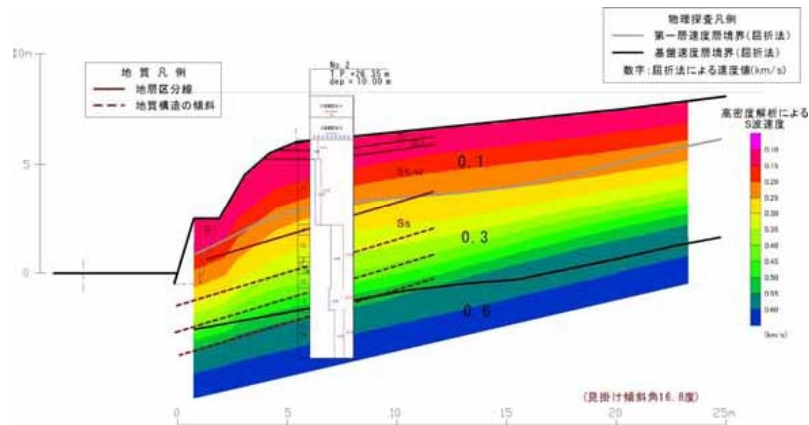


図 7.13 屈折法弾性波探査結果 (S 波) 地点 (2)

地点 (2) の反射法地震探査の P 波の結果を図 7.14 に示し、S 波の結果を図 7.15 に示す。青い破線が反射法地震探査から導きだした地層構造である。

P 波と S 波を比較すると、反射面のパターンはやや不鮮明ながら P 波と S 波で同じ傾向を示し、大きな差異は認められない。反射面のパターンは、流れ盤方向に連続性のある反射波が P 波 S 波ともに認められる。

ボーリング結果から想定して地質構造図と比較すると、流れ盤方向に認められる反射波は、地質構造と整合的であった。

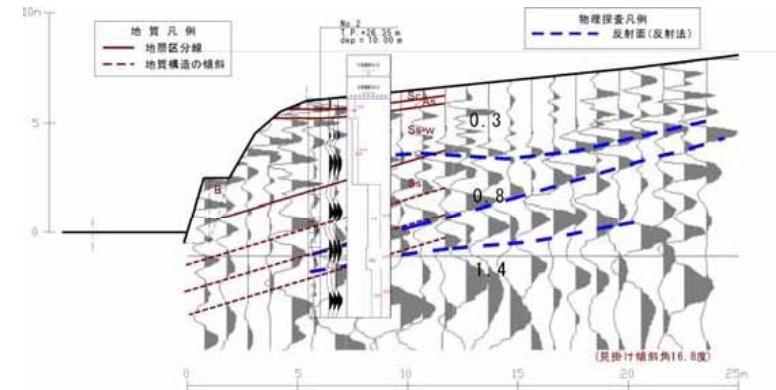


図 7.14 反射法地震探査結果 (P 波) 地点 (2)

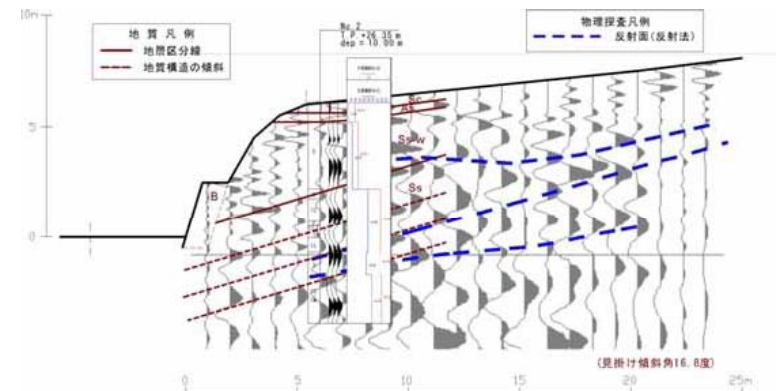


図 7.15 反射法地震探査結果 (S 波) 地点 (2)

地点（２）のP波の屈折法弾性波探査と反射法地震探査の解析結果を重ね合わせたものを図 7.16 に、S波を図 7.17 に示す。

屈折法弾性波探査結果と反射法地震探査結果を比較すると、屈折法による速度層境界と反射面の形状は良く一致し、緩い流れ盤構造を示している。風化層と基盤層の境界は、屈折法による速度層境界として認められ、反射法では特にP波において比較的明瞭な反射面として認められる。ボーリング結果と弾性波探査結果は概ね一致する。強風化部に相当する第一層速度境界層が地表付近に2～3m程度の厚さでほぼ一様に分布する。第二層速度境界層下面となる基盤は、深さ10m程度に分布しているが、確認ボーリングが浅いため、直接確認はしていない。

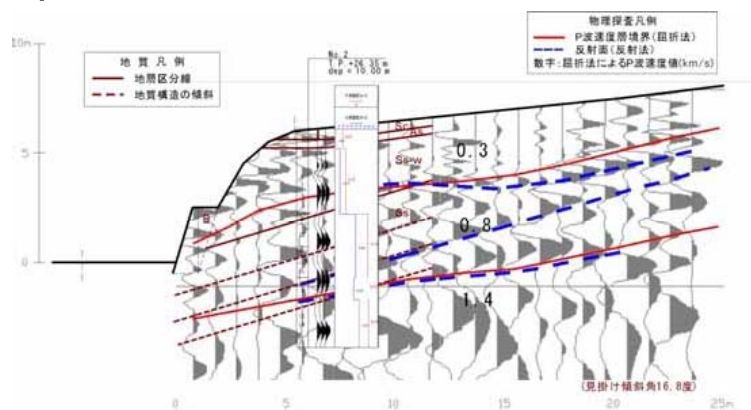


図 7.16 屈折法弾性波探査・反射法地震探査結果（P波）地点（２）

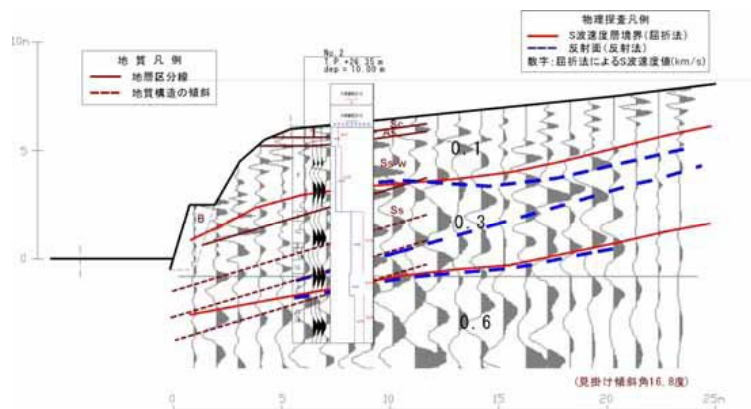


図 7.17 屈折法弾性波探査・反射法地震探査結果（S波）地点（２）

7.3.2.3 地点（３）の解析結果

地点（３）は過去に崩壊履歴があり、コンクリートに覆われた盛土である。このため、屈折法弾性波探査および反射法地震探査ではコンクリート表面に取り付け用の孔を開けて直接地山に受振器を設置した。起振はコンクリートを直接ハンマで打撃することによりP波を発生させ、打撃用の板をコンクリート上に設置して板の側面を打撃することによりS波を発生させた。

弾性波探査結果とボーリング調査結果との比較検証した図の、P波とS波それぞれを図 7.18 と図 7.19 に示す。

両図の赤の太い実線は屈折法弾性波探査解析結果から出された層境で、それより上がP波速度0.4km/sec、それより下が1.2m/secであった。概ね1m前後の風化帯があるとの結果である。

これは、ボーリング結果と一致していない。この理由として、屈折法弾性波探査において盛土から堅い表面保護コンクリートにも弾性波が伝播したため、コンクリートを伝播した弾性波が初動走時となったためと考えられる。

また両図の青い破線は反射法地震探査の解析結果である。これのよると、ほぼ水平の反射面が確認できる。反射法地震探査においても、ボーリング結果と整合しない結果となった。この原因として、盛土施工時に地山と盛土境界で滑らないように、地山を階段状にカットするため、その面で弾性波が多重反射し明確な解釈ができなかったためと考えられる。

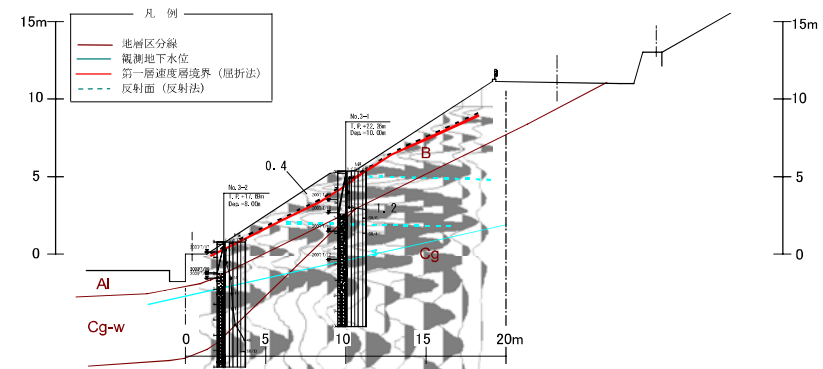


図 7.18 弾性波探査による探査結果（P波）地点（３）

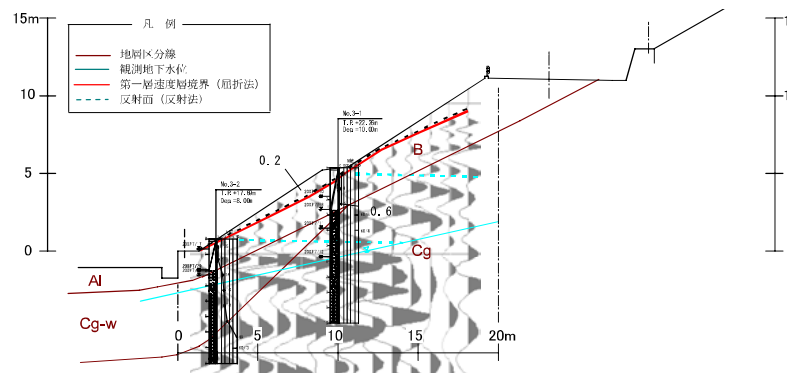


図 7.19 弾性波探査による探査結果（S 波）地点（3）

7.4 道路法面健全性評価における弾性波探査の適用性

7.4.1 高密度表面波探査

高密度表面波探査の結果、地盤の硬軟、弱部等の把握が可能であることがわかった。ただし本手法は、表面波を使用していることから、比較的表面形状の凹凸の少ない地形に適用性が高い。さらに、本手法は、表面保護コンクリート等が地山に密着する場合は、他の物理探査手法のように法面保護コンクリート等に削孔する必要が無いために作業時間が短縮できること、ならびに解析が比較的容易かつ効率的であり、かつボーリングデータ等の先見情報がなくても相当程度適切な解釈が可能であり、他の探査手法より経済的であることが挙げられる。

7.4.2 屈折法弾性波探査

屈折法弾性波探査の結果では、P 波と S 波の速度層境界が一致しており、P 波 S 波速度から法面背面地山の強風化部、弱風化部、基盤岩の分布とその形状を捉えることができた。

本手法は、様々な形状の道路法面に対応できると考える。しかし、盛土に比べて表面の保護コンクリート等が堅い場合は、コンクリートを伝播した弾性波が初動走時となり解釈を誤る場合がある。また探査原理上、浅部（表層面部）が硬く、深部が軟らかい地盤の場合や層が薄い場合には適用できないことに留意する必要がある。

本手法を道路法面調査に適用し、より良好な結果を得るためには、表層を保護する吹付けコンクリート等に孔を開け、地山に直接受振器を設置する必要がある。また、起振点では、地山を直接打撃し吹付けコンクリートの影響を低減する必要がある。

探査結果の解釈を行う際には、現地の条件によっては解釈を誤る場合があることから、ボーリング調査結果を基に岩石物性との対比を行うことが望ましい。

7.4.3 反射法地震探査

反射法地震探査の結果から、地盤の P 波および S 波による反射構造として、風化帯および基盤層の内部構造を捉えることができた。反射法地震探査結果に示される反射波は地質境界や速度層境界などであり、地盤内の地層構造すなわち法面傾斜に対する地層の傾斜方向を把握する調査に有効と考えられる。

本手法も屈折法弾性波探査と同様、様々な形状の道路法面に対応できる可能性を示すことができた。しかし、地山を階段状にカットされた盛土については反射波の解釈が難しいので、これらの場所での適用は難しいと考えられる。

本手法を道路法面調査に適用し、より良好な結果を得るためには、屈折法弾性波探査と同様に地山に直接受振器を設置することが必要である。また、探査結果の解釈が難しいため、ボーリングで地質構造を把握することや、ボーリング孔を利用した PS 検層を実施して地盤の速度構造を把握するとともに、VSP 解析を実施して反射波の検証を行うことが望ましい。

参考文献

- 1) 林宏一・鈴木晴彦・斎藤英樹：人工震源を用いた表面波探査の開発とその土木地質調査への適用，物理探査学会第 105 回学術講演会論文集，pp. 9-10，2001.
- 2) 物理探査学会斜面等健全性検討研究委員会：老朽化吹付け法面の調査・対策の手引き，pp. 43-46，鹿島出版会，2006.

第8章 各種探査結果の比較および定量的評価

8.1 地点別の探査手法の適用性比較

8.1.1 地点（１）での比較

地点（１）における物理探査手法の適用性の比較を行う。この地点のボーリング等の結果から推定した地質断面図は図8.1である。その他各種調査結果を比較のために再掲する。

二次元比抵抗探査では、図8.2（図5.3の再掲）に示すように、晴天が続いた後に調査したため、コンクリート吹付け法面部の地山が表面より数mにわたり高比抵抗となっており、劣化が生じていることが探査できた。VLF-EM探査は前々日に降雨があったので、図8.3（図5.16の再掲）に示すように法面部分は逆に高比抵抗となっており、これも風化が進んでいると同様の解釈ができる。このように、電気・電磁気探査で測定する比抵抗等は測定前の降雨状況が大きく影響することから、降雨前後で測定することで、地下水の変化や乾湿を繰り返すなどの内部状況が把握できる。

一方で、二次元比抵抗探査は図8.2に示すように左下の道路際の擁壁部分は鉄筋の影響を受けている。さらにVLF-EM探査は、図8.3に示すように法肩の部分はガードレールにより強い影響を受けている。このように、電気・電磁気探査にとって金属類は調査に有害である。

屈折法弾性波探査の結果を図8.4（図7.6の再掲）に、反射法地震探査の探査を図8.5（図7.8の再掲）に示す。

屈折法弾性波探査ではボーリング等の先見情報が無くても上層部の風化領域の把握ができたが、基盤層内に速度変化がないためそれより下の部分の把握はできなかった。反射法地震探査は、最上層の浅部の風化帯の構造は捉えることができなかったが、それより下層の風化帯と基盤層の境界、及びそれより下の基盤内の受け盤という地盤構造が把握できた。しかし、ボーリング等の先見情報が無いと解釈が困難であった。また、地山に孔を掘りそれに受振器や起振点を設置するなど、調査自体と多数の解析に手間がかかり、費用も必要とした。連続波地中レーダによる探査は、図8.6（図6.8の再掲）に示すように風化領域の把握と、それより深部についても地質構造が把握出来た。反射法地震探査と連続波地中レーダは共に深部の概ね同じ位置の反射波を捉えているが、反射法地震探査のほうが、より多くの反射構造を捉えることができた。

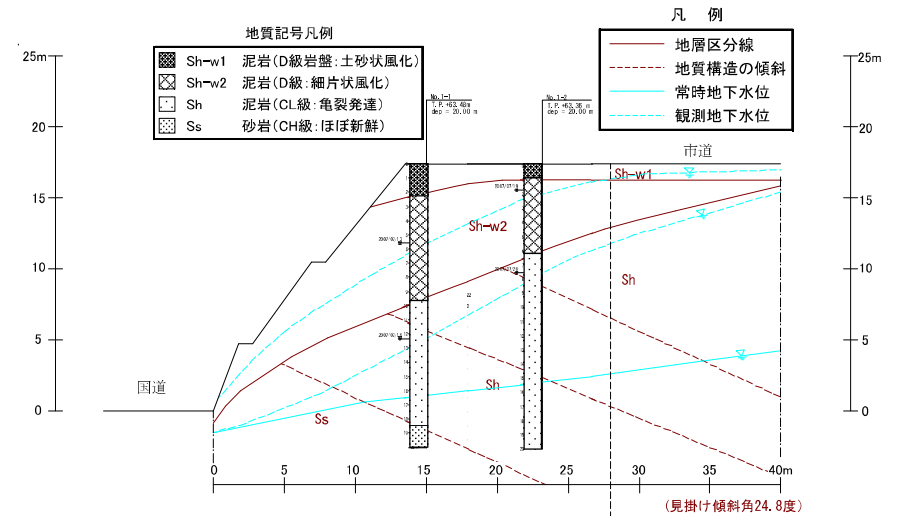


図8.1 地点（１）地質断面図

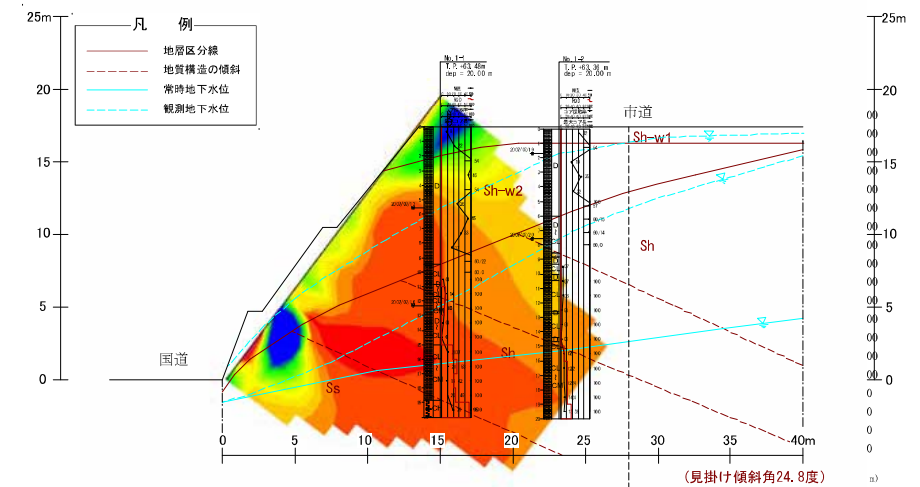


図8.2 二次元比抵抗探査による探査結果（地点（１））

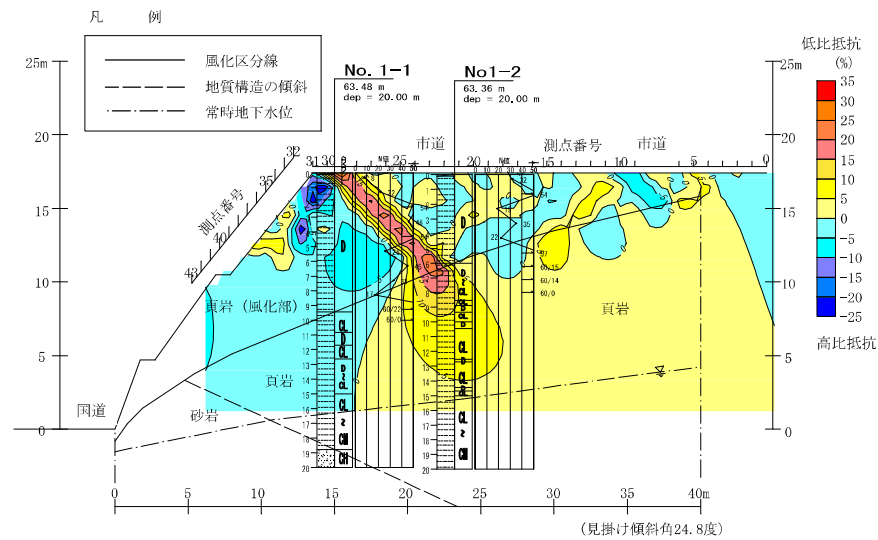


図 8.3 VLF-EM 探査による探査結果（地点（1））

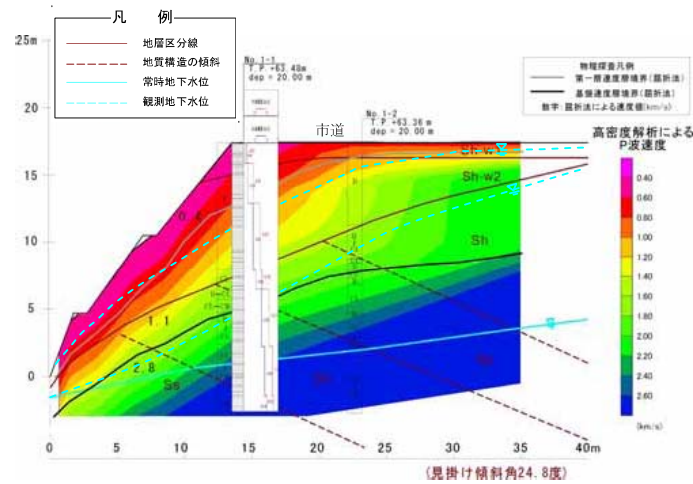


図 8.4 屈折法弾性波探査による探査結果 P 波（地点（1））

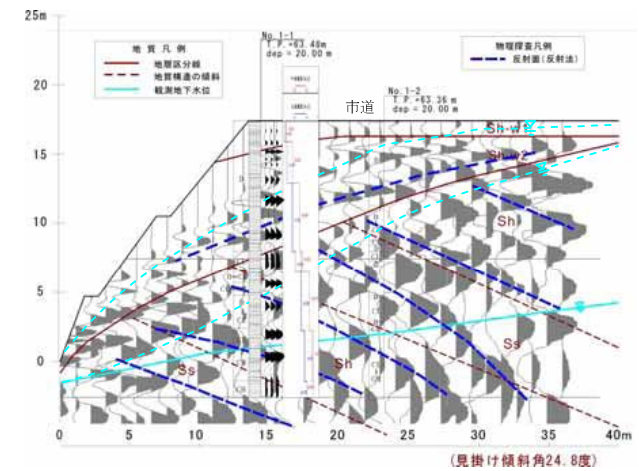


図 8.5 反射法地震探査による探査結果 P 波（地点（1））

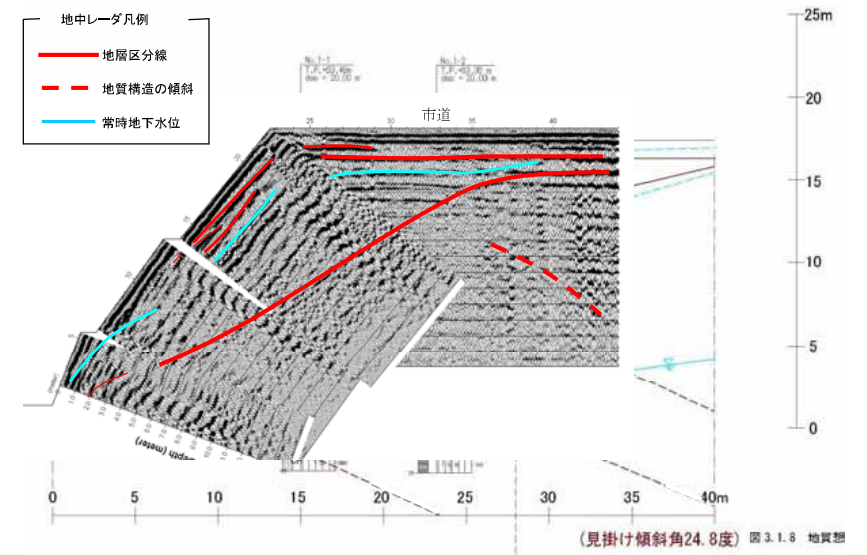


図 8.6 連続波地中レーダによる探査結果（地点（1））

8.1.2 地点（２）での比較

地点（２）における物理探査手法の適用性の比較を行う。この地点のボーリング等の結果から推定した地質断面図は図 8.7 である。この地点の地下水面は常時には存在しないと考えられる。その他、各種調査結果を比較のために再掲する。

二次元比抵抗法では、図 8.8（図 5.4 の再掲）に示すように緩傾斜の部分の比抵抗の分布は屈折法弾性波探査の速度分布と似通った傾向を示している。

VLF-EM 探査は図 8.9（図 5.19 の再掲）に示すように道路法面部の表面部の等価電流密度が高く（低比抵抗）なっている。FDEM 探査も図 8.10（図 5.21 の再掲）に示すように道路法面部が低比抵抗となっており、二つの方法は低比抵抗という結果で同じ傾向を示し、深部の傾向も概ね一致する。しかし、両方とも地層構造までは評価できない。

一方、二次元比抵抗探査は、左側の法面部分はラス網の影響を受けて探査できていない。しかし、VLF-EM 探査と FDEM 探査は余り影響を受けていない。これは二次元比抵抗探査が表面にジオゲルを貼り付け比抵抗を測定しているため、網状に連続しているものに大きな影響を受けている。それに対して、VLF-EM 探査や FDEM 探査は地中の二次磁場を捉えるものであるため、ボリュームのある金属類に影響を受けるものと考えられる。

屈折法弾性波探査は、図 8.11（図 7.2 の再掲）に示すようにボーリングデータが無くて、大局的には速度構造が把握でき、風化帯の探査もできた。しかし、これだけで流れ盤構造は把握できなかった。反射法地震探査は図 8.12（図 7.14 の再掲）に示すように屈折法弾性波探査結果と整合している。特に緩傾斜の部分はよく一致している。この二つを組み合わせて解釈することで、流れ盤構造と風化領域が解釈できる。

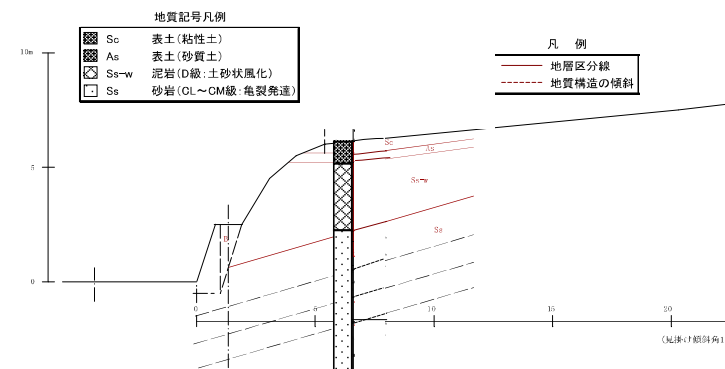


図 8.7 地点（２）地質断面図

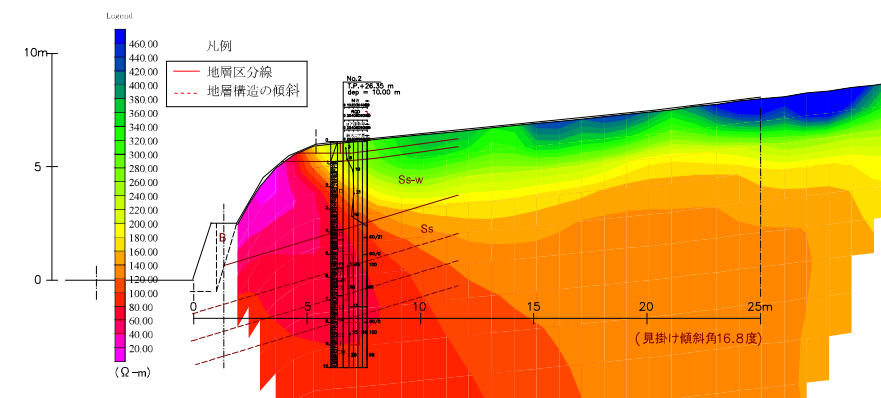


図 8.8 二次元比抵抗探査による探査結果（地点（２））

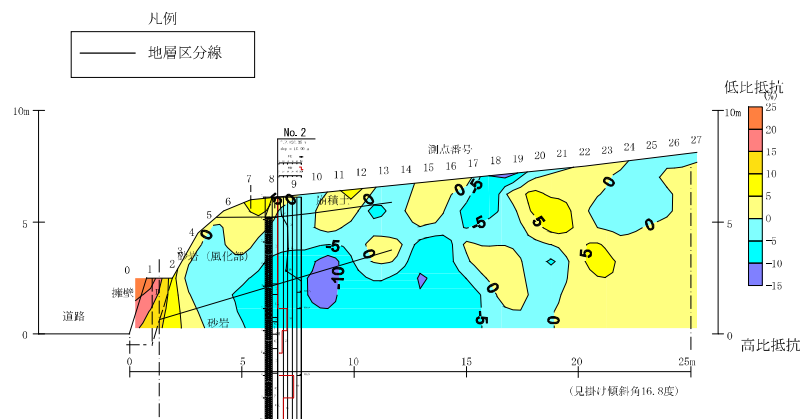


図 8.9 VLF-EM 探査による探査結果（地点（2））

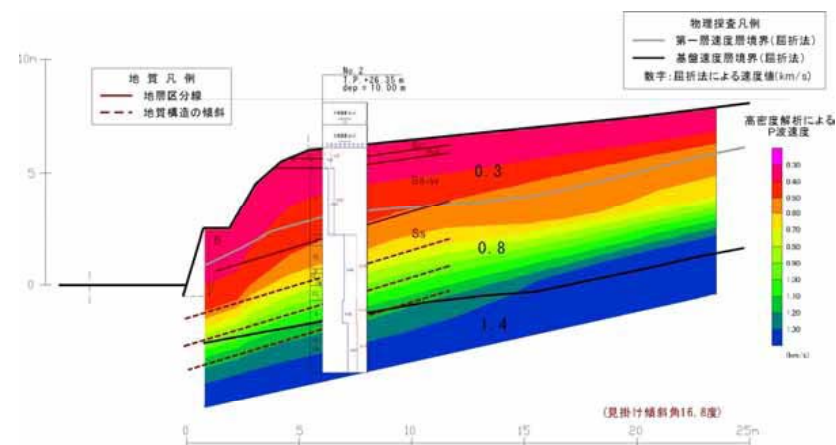


図 8.11 屈折法弾性波探査のよる探査結果 P 波（地点（2））

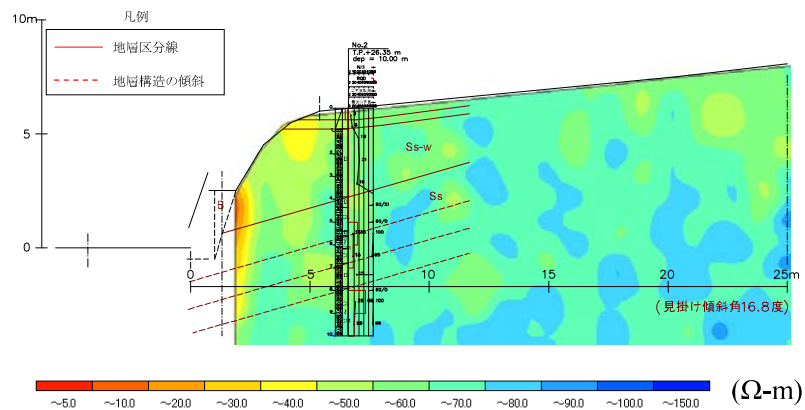


図8.10 FDEM探査による探査結果（地点（2））

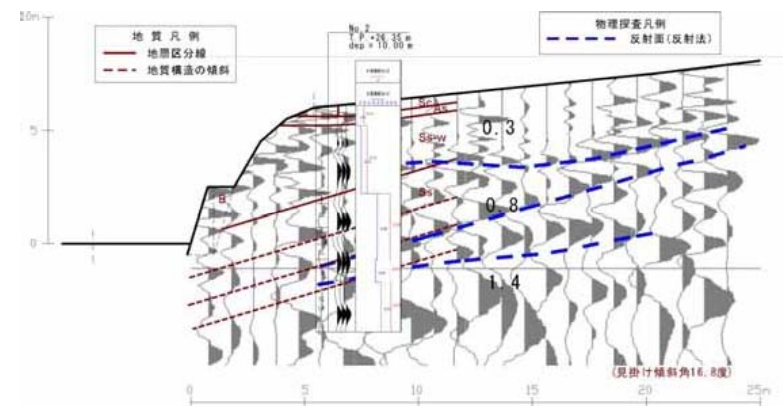


図 8.12 反射法地震探査のよる探査結果 P 波（地点（2））

8.1.3 地点（３）での比較

地点（３）における物理探査手法の適用性の比較を行う。この地点のボーリング等の結果から推定した地質断面図は図 8.13 である。その他各種調査結果を比較のために再掲する。

二次元比抵抗探査結果は図 8.14（図 5.5 の再掲）の横断面図を見ると盛土部分が低比抵抗の分布を示しているように見えるが、コンクリート法枠工に入っている鉄筋の影響をかなり受けている。鉄筋等の伝導性の高い物がある箇所では電気探査・電磁気探査は行えない。

連続波地中レーダ結果では、図 8.15（図 6.10 の再掲）に示すようにボーリングデータと整合する反射面が観測されている。パルス式地中レーダの探査深度が 2m から 3m に対して、連続波地中レーダについては 5m 程度の探査深度が確保できた。特に地山と盛土の境が階段状にカットして施工されている形状がどの探査手法よりも精緻に探査できている。

また、地下水については一部であるが、地下水面と推定できる反射面を検出することができた。

高密度表面波探査は先見情報を取得する前に解析・解釈を行い、その後に行ったボーリングデータと概ね一致した。図 8.16（図 7.2 の再掲）に示す盛土と地山の境界部分は不明瞭であるものの、法尻部の風化礫岩部は検知でき、速度構造も把握できた。

屈折法弾性波探査結果と反射法地震探査結果を図 8.17（図 7.18 の再掲）に示す。屈折法弾性波探査は、表面保護工のコンクリートを伝播した弾性波が初動走時となったため、内部の速度構造が把握できなかったと考えられる。

また反射法地震探査においては、階段状にカットした地山の形状を捉えることができなかったためと考えられる。

このように鉄筋コンクリートで表面保護されたものは、各種の制約により実施できる探査方法が限られてくる。そのような箇所においても、連続波地中レーダや表面波探査は適用性があり、特に連続波地中レーダは詳細な探査ができた。

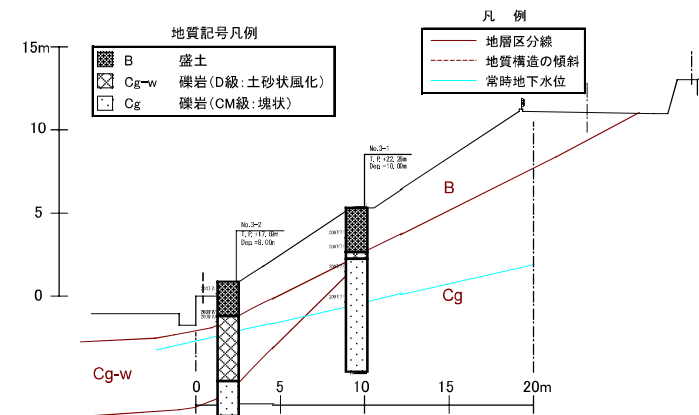


図 8.13 調査地点（３） 地質横断面図

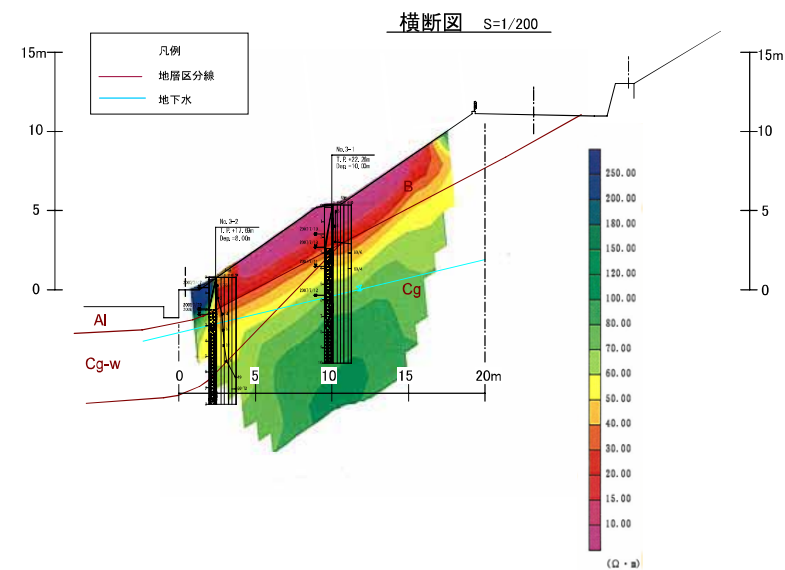


図8.14 二次元比抵抗探査による探査結果 横断面図（地点（３））

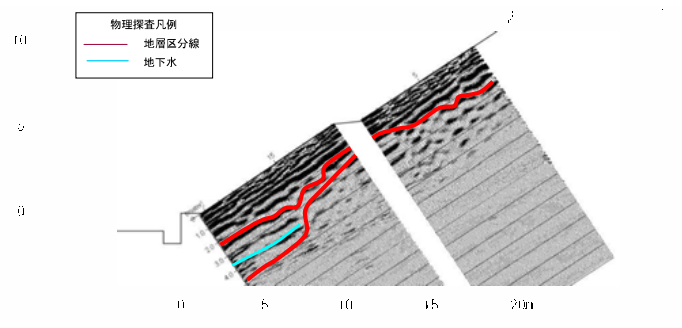


図 8.15 連続波地中レーダによる探査結果（地点（3））

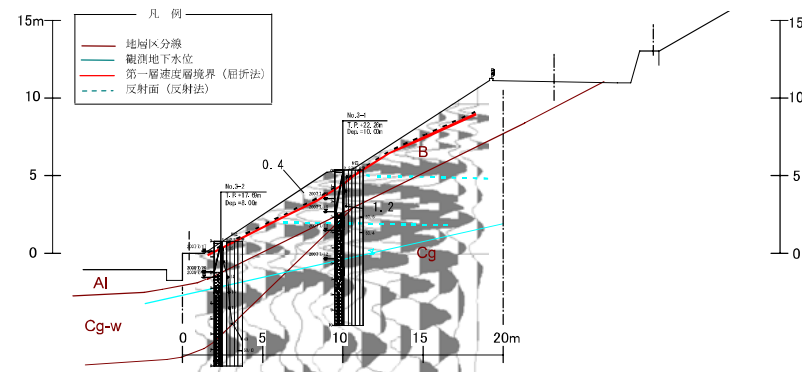


図 8.17 弾性波探査による探査結果：P 波（地点（3））

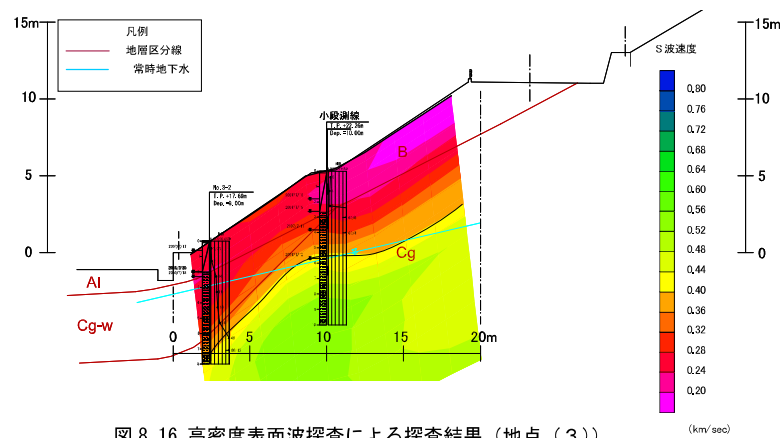


図 8.16 高密度表面波探査による探査結果（地点（3））

8.2 各探査手法の比較

8.2.1 電気・電磁気探査

電気・電磁気探査は、VLF-EM 探査、FDEM 探査、二次元比抵抗探査の3種類を実施した。実証試験結果からその特徴をまとめると次の通りである。

本手法の全体的な留意点としては、近傍に金属物などの低比抵抗体が存在しないことが条件であり、鉄筋の入った法面保護工などのある法面や都市部では適用できない場合がある。このことから最も適用性が高いのは金属物を使用していない法面や自然法面である。また、水の存在により比抵抗値が大きく変化することから、探査を行う以前の降雨状況に大きく影響を受けることに注意が必要である。逆にそれを利用し、降雨前と降雨後に測定することにより、劣化状況がより明確に探査できる可能性がある。

VLF-EM 探査は、安価・簡便な手法であり、広域地盤情報収集に適するため、切土等の劣化部の絞り込みに適する可能性がある。電波の性質上、分解能は低く金属物の影響を大きく受けるが、自然斜面等の概略調査として使用できる。

FDEM 探査は置くだけで探査できる手法で探査時間は短い。しかし、金属類の影響を受けるため、自然斜面等に適している。

二次元比抵抗探査は、地盤の比抵抗分布を捉えることができるが、連続した金属物の影響を受けるため自然斜面や金属物の入っていない斜面で適用できる。

これら電気・電磁気探査は地下水の飽和・不飽和状態と地盤の物性により、比抵抗値に変化が生じるため、解釈に注意が必要で他の探査結果と併せて解釈することが望ましい。

今後の劣化進行が特に懸念される自然斜面、切土等および盛土法面においては、長期モニタリングにより地下水の状態、および地盤の劣化を把握できる手法として期待される。

8.2.2 連続波地中レーダ

連続波地中レーダは、パルス波地中レーダよりは若干分解能は低下するが、切土等法面および盛土法面共に、地質境界面に対応する反射面が検出できることがわかり、鉄筋等が無ければ深度10m程度まで探査可能である。切土等および盛土法面の地質構造確認に適する。さらに鉄筋の配置にもよるが、法面表面の鉄筋の影響を避けて、その下位の地盤状況を確認することが可能であった。特に連続波地中レーダは地山を階段状にカットしたものも探査できるなど、今回の探査手法の中で最も精密に探査が出来た手法であった。反射法地震探査や屈折法弾性波探査に比べて調査が比較的簡単であり、強い反射面の場合は現場でもすぐに発見できる特徴がある。また地下水についてはこの探査手法で捉えることができた。しかし、この手法は地下水の解釈が難しいため、ボーリングデータ等の先見情報が必要である。

8.2.3 弾性波探査

弾性波探査は、高密度表面波探査、屈折法弾性波探査、反射法地震探査の3種類を実施した。全体としては、地質の弾性波速度という地盤の強度に比較的近い物性値を測定しているため、弾性波探査は地盤の状態を最も的確に探査できると期待される。

高密度表面波探査は、地盤の硬軟、弱部等の把握が可能であることがわかった。ただし本手法は、表面波を使用していることから、比較的表面形状の凹凸の少ない地形に適用性が高い。さらに、本手法は、表面保護コンクリート等が地山に密着している場合は、他の物理探査手法のように法面保護コンクリート等に削孔する必要が無いために作業時間が短縮できること、ならびに解析が比較的容易かつ効率的であり、かつボーリングデータ等の先見情報がなくても相当程度適切な解釈が可能であり、他の探査手法より経済的であることが挙げられる。

屈折法弾性波探査は、地盤のP波およびS波速度層分布を捉えることができ、表層の風化部の厚さやその程度を探査できた。本手法は、様々な形状の道路法面に対応できると考える。しかし、地山に直接受振器を設置する必要がある。このため、地山表面を覆う吹付けコンクリートなどが浮いている場合は、コンクリートに多数の孔を開けて地山に起振点ならびに受振器などを設置する必要がある。また、盛土に比べて表面の保護コンクリート等が堅い場合は、そこに弾性波の初動波が伝播して解釈を誤る場合がある。さらに、探査原理上、浅部（表層面部）が硬く、深部が軟らかい地盤の場合や層が薄い場合には適用できないことに留意する必要がある。

反射法地震探査は、3m程度以上の深度での地質構造確認に適すると考えられる。表層の風化部の厚さや風化の程度を把握できると共に、さらにそれよりも深部の反射面を捉えることができるため、流れ盤などの地層構造の把握が可能となる。しかし、地山に直接受振器を設置する必要がある。このため、地山表面を覆う吹付けコンクリートなど浮いている場合は、コンクリートに多数の孔を掘り地山に起振点ならびに受振器などを設置する必要がある。また解析に手間がかかりコストも高く、探査結果の解釈には、ボーリング等で地質構造を把握することが必要である。

8.2.4 各種法面への適用性

各種法面探査技術の比較のため、様々な探査を同じ道路法面で試みた。各種探査方法の特徴を表 8.1 にまとめた。

表 8.1 老朽化法面に適用できる物理探査手法の特徴

物理探査手法		利点	欠点	コスト ^(注1)
電気・電磁気探査	二次元比抵抗探査	水分量変化の確認に有効 風化度合いの確認に有効	表面に金属物がある場合は適用できない	やや安価
	VLF-EM 探査	概略的な調査に有効 水分量変化の確認に有効	付近にガードレールがある場合 や表面に鉄筋などの金属物が有る場合は適用できない	安価
	FDEM 探査	水分量変化の確認に有効	付近にガードレールがある場合 や表面に鉄筋などの金属物が有る場合は適用できない	高価
連続波地中レーダ	連続波地中レーダ	詳細な探査に有効 深度 10m までの探査に有効 表面保護工に入っている鉄筋が密で無ければそれを透過して探査できる	法面表面の凹凸が大きいと適用できない 地下水面か地層面かの判断が難しい	高価
弾性波探査	屈折法弾性波探査	風化度合の確認に有効 金属の入った表面保護工があっても探査できる	地層構造の把握はできない 表面保護工が堅固な場合や、深い層が表面より柔らかい場合は適用できない。	やや安価 ～高価 ^(注2)
	反射法地震探査	地質構造(流れ盤か受け盤か)確認に有効 金属の入った表面保護工があっても探査できる	反射面は確認できるが風化程度は確認できない 階段状の境界面は解釈が困難	やや安価 ～高価 ^(注2)
	高密度表面波探査	風化度の把握に有効 金属の入った表面保護工があっても探査できる	フラットな法面のみの適用	やや安価 ～高価 ^(注2)

(注 1) 1 箇所当たりの調査費用で高価とは概ね 100 万円程度、やや安価とは 50 万円前後、安価とは 10 万円程度を言う

(注 2) 受振器設置のために保護工削孔が必要な場合があり、コストが変動する

探査結果を、道路法面の健全性評価に活用するという観点から、各種法面の特性ごとに、その目的に応じた物理探査等の適用性について切土等法面を表 8.2 に、盛土法面を表 8.3 にまとめた。いずれの方法も、ボーリングデータなどの結果を用いてキャリブレーションや結果の確認を行いながらの解釈が望ましい。

表 8.2 老朽化道路切土等法面における物理探査等の適用性一覧

切土等法面の特徴	調査する内容	適した物理探査等の種類
自然斜面	法面点検時の参考情報	VLF-EM 探査
	乾湿の繰り返し状況	二次元比抵抗電気探査
	風化状況	屈折法弾性波探査または FDEM 探査
	詳しい風化状況と地質構造	屈折法弾性波探査と反射法地震探査
	モニタリング	二次元比抵抗電気探査と屈折法弾性波探査
保護工のない成形された切土法面	法面点検時の参考情報	VLF-EM 探査
	乾湿の繰り返し状況	二次元比抵抗電気探査
	風化状況	高密度表面波探査または FDEM 探査
	詳しい風化状況と地質構造	屈折法弾性波探査と反射法地震探査
	モニタリング	二次元比抵抗電気探査と高密度表面波探査
鉄筋等金属の入った保護工のある表面の凹凸のある切土等法面	乾湿の繰り返し状況	ボーリング孔等を利用した地下水調査
	風化状況	屈折法弾性波探査**
	詳しい風化状況と地質構造	屈折法弾性波探査**と反射法地震探査
	モニタリング	屈折法弾性波探査**と反射法地震探査
鉄筋等金属の入った保護工のあるフラットな切土等法面	乾湿の繰り返し状況	ボーリング孔等を利用した地下水調査または連続波地中レーダ*
	風化状況	高密度表面波探査
	詳しい風化状況と地質構造	連続波地中レーダ(比較的浅い場合)*または屈折法弾性波探査**と反射法地震探査射法
	モニタリング	高密度表面波探査

* 金属類が密であると連続波地中レーダは適用できない。

** 保護工が地山に比べて堅固な場合は適用できない。

表 8.3 老朽化道路盛土法面における物理探査等の適用性一覧

盛土法面の特徴	調査する内容	適した物理探査等の種類
表面保護工が無いが、 表面保護工に金属類が 入っていない盛土法面	法面点検時の参考情報	VLF-EM 探査
	盛土と地盤の境界の把握	連続波地中レーダ
	乾湿の繰り返し状況	二次元比抵抗電気探査
	盛土内の空洞	連続波地中レーダ
	盛土の緩み状況	高密度表面波探査
	モニタリング	高密度表面波探査および 二次元比抵抗探査
鉄筋等金属の入った保 護工のある盛土法面	盛土と地盤の境界の把握	連続波地中レーダ*
	乾湿の繰り返し状況	ボーリング孔等を利用した地下水調査または 連続波地中レーダ*
	盛土内の空洞	連続波地中レーダ*
	盛土の緩み状況	高密度表面波探査
	モニタリング	高密度表面波探査および 連続波地中レーダ*

* 金属類が多くあると連続波地中レーダは適用できない。

8.3 道路法面の健全性評価における探査手法の課題

以上に述べた各種の探査手法の実証実験は、まず、物理探査手法で探査・解釈を行い、その後、ボーリング調査を行い、先見情報が無い中での探査が可能かどうかを実証した。

その結果、先見情報が全く無い場合は一部の屈折法弾性波探査以外の手法において完全に満足のいく結果が得られなかった。

なぜなら、物理探査は弾性波の速度や比抵抗や電波の反射量を測定するもので、直接的に、岩盤や土の硬さなどの強度や性状を測定するものではない。満足のいく結果を得るには、物理量を岩盤などの強度などに置き換えるためのキャリブレーションデータが必要であったり、いくつかの原因で解釈を誤ったりすることを回避するため、確認のためボーリングデータが必要となった。しかし、現実的にはボーリング調査は費用面からすべての法面で実施するのは困難であり、今後の技術開発によって物理探査の様に大きくコストが下がることは、期待できない。このため、物理探査だけで地盤を評価する手法の開発が必要である。

第9章 複合探査による道路法面の健全性評価

9.1 複合探査の目的

これまで述べてきたように、物理探査手法を用いて法面の内部情報を得ることが出来る。しかし単独の探査だけでは調査は可能であるが、物理量を地盤性状に解釈する時点でほとんどの場合、各物理量と地盤の良好度や含水量の閾値を評価するにあたり、ボーリングデータを必要としている。しかし、ボーリング調査は費用面からすべての法面で実施することは困難である。このため、ボーリング情報に代わるものとして、弾性波探査データと二次元比抵抗探査データを複合的に解釈して、原位置で得られた弾性波速度分布・比抵抗分布を間隙率分布・飽和度分布に変換するシステム¹⁾を用い、より正確に地盤評価を行なうことを試みたものである²⁾³⁾。

9.2 調査地点の既往物理探査結果

9.2.1 地点（１）の既往物理探査結果

① 弾性波探査結果

図9.1に、地点（１）の高密度屈折法地震探査により得られたP波弾性波速度分布を示す。ここでは、解析時期の都合により図7.6に示す探査とほぼに同時期に実施したトモグラフィのデータを用いて解析を行った。図9.1より、吹付け法面では深さ数m程度の弾性波速度1km/sec以下の領域が、天端では少し深く分布し、最深部の弾性波速度は3km/sec程度であることが確認できる。

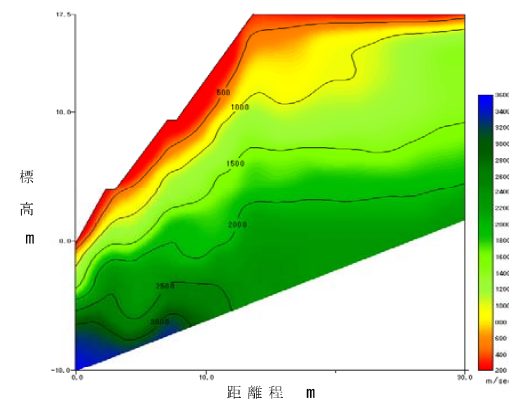


図9.1 弾性波探査結果：地点（１）

② 二次元比抵抗探査結果

図9.2（図5.3の再掲）に、地点（1）の二次元比抵抗探査による比抵抗分布を示す。同図からは、法面近傍は岩盤表層の風化や含水率が少ないことが原因と考えられる高比抵抗の領域が広がっているが、岩盤内部ほど含水比が高く低比抵抗を呈しているのがわかる。なお、法面脚部の低比抵抗帯は擁壁内にある鉄筋の影響であり、法肩部の高比抵抗はアスファルト舗装部による影響と解釈できる。

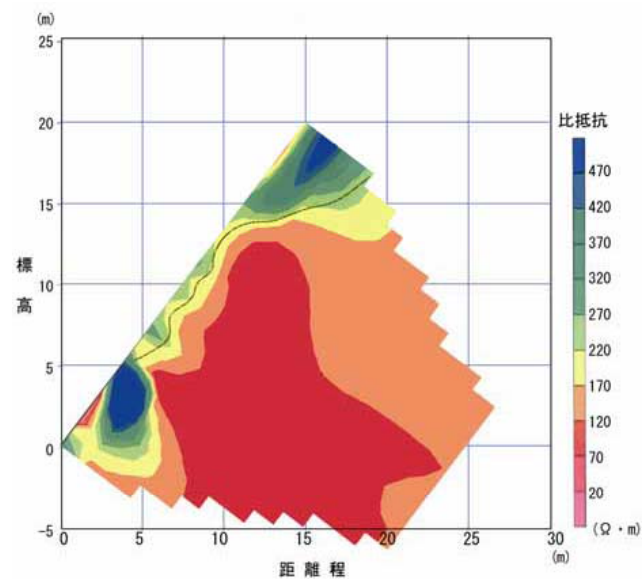


図9.2 二次元比抵抗探査結果：地点（1）

9.2.2 地点（2）の既往物理探査結果

① 弾性波探査結果

図9.3に、地点（2）における屈折法弾性波探査で得られたデータを用いてハギトリ法で解析したP波弾性波速度分布を示す。ここでは、ハギトリ法（拡張版）で実施したデータを用いて解析を行う。同図より、吹付け法面から上の緩い背後斜面とほぼ平行に深さ7m程度の深さで弾性波速度1km/sec以下の領域が分布し、最深部の弾性波速度でも1.4km/sec程度と、若干遅い弾性波速度分布であることが確認できる。

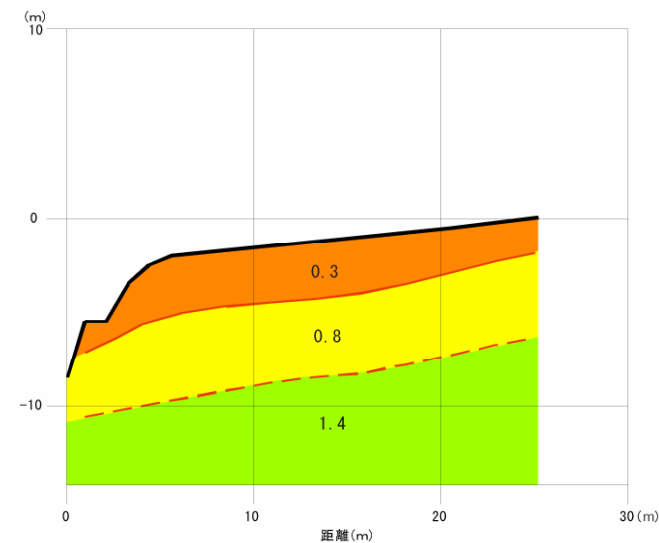


図9.3 弾性波探査結果：地点（2）

② 二次元比抵抗探査結果

図9.4（図5.4の再掲）に、地点（2）の二次元比抵抗探査による比抵抗分布を示す。同図からは、吹付け法面から上の緩い背後斜面の表層は高比抵抗が見られることから、転石や崖すいあるいは低含水状態になっているものと考えられる。

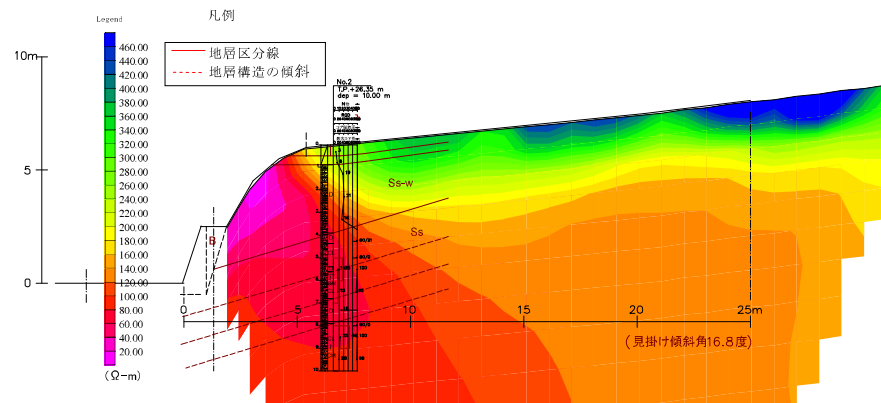


図9.4 二次元比抵抗探査結果：地点（2）

9.3 変換解析の概要

原位置岩盤における弾性波速度と比抵抗は異なる物理量ではあるが、岩盤の間隙率や水の飽和度を未知数として関係付けることができる。弾性波速度については式(1)に示すWyllieの式⁴⁾が、比抵抗については式(2)に示すArchieらの式⁵⁾が一般に知られている。

$$\frac{1}{V_p} = \frac{(1-f)}{V_m} + \frac{f \cdot Sr}{V_f} + \frac{f \cdot (1-Sr)}{V_a} \quad (1)$$

$$r = a \cdot r_w \cdot f^{-m} \cdot Sr^{-n} \quad (2)$$

ただし、

V_p : 岩盤の弾性波速度 (km/sec)

V_m : 岩石実質部の弾性波速度 (km/sec)

V_f : 間隙水の弾性波速度 (km/sec)

V_a : 空気間隙の弾性波速度 (km/sec)

ρ : 岩盤の比抵抗 ($\Omega \cdot m$) で比抵抗探査により求めたもの

ρ_w : 間隙水の比抵抗 ($\Omega \cdot m$)

a, m, n : 地質の違いによる係数 (変換パラメータ)

ϕ : 間隙率, Sr : 飽和度

Archieらの式については、最近の研究によれば、この式は砂層ではよく適合するが、岩盤ではあまりよく適合しないとされているので、本システムでは式(3)の並列回路モデルを採用するものとした。

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{F} \cdot \frac{1}{r_w} + \frac{1}{r_c} + \frac{1}{r_0} \quad (3)$$

ただし、

F : 地層比抵抗係数 ($a \cdot \phi^{-m} \cdot Sr^{-n}$)

ρ_c : 粘土等による間隙中の導電性粒子の比抵抗 ($\Omega \cdot m$)

ρ_0 : 岩石実質部の比抵抗 ($\Omega \cdot m$)

式(1)および式(3)は、間隙率 ϕ と飽和度 Sr を変換して、図9.5に示すような、ひとつの岩盤要素（小要素に分割したセル）について、それぞれ次の連立した方程式として表される。

$$V_p = f(\epsilon, S_r) \quad (4)$$

$$\epsilon = g(\epsilon, S_r) \quad (5)$$

したがって、地山の弾性波速度と比抵抗とが既知であれば、式(4)と式(5)から逆解析（最適化手法）により、未知の間隙率と飽和度を求めることができる。

図9.6に変換手法による地質構造評価システムのフローを示す。先述したような岩盤要素（小要素に分割したセル）において、各セルごとに1対の比抵抗と弾性波速度が求められると、別途室内試験により変換パラメータの設定を行い、変換解析と称する逆解析（最適化手法）により間隙率と飽和度が得られる。

変換パラメータの設定は、検討地点の岩石コアから求めるのが望ましいが入手不可能の場合には、変換パラメータデータベースと呼ぶ既存の試験結果に基づくデータベースにより対応する岩種のパラメータを用いることができる。

変換解析によって求められた間隙率分布と飽和度分布のうち、間隙率分布においては、ボーリング等で岩級分布が既知の位置で間隙率から岩級区分への変換の閾値を決定して、調査地点の岩級区分を求める。一方、間隙率と飽和度の積から体積含水率を求め、体積含水率の急変箇所から湧水箇所を推定する。

以上の手順により、それぞれ単独かつ定性的に評価されていた弾性波探査や二次元比抵抗探査結果を、連立することによって調査、設計、施工時に必要な地盤特性として定量的に把握することが可能となる。

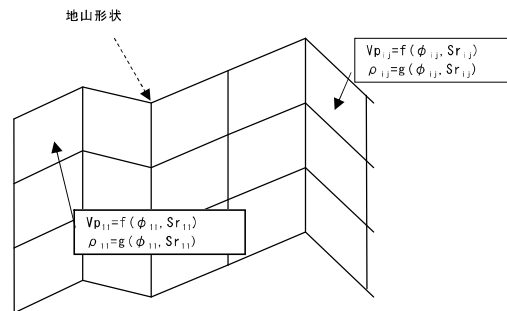


図9.5 変換解析における岩盤要素のイメージ

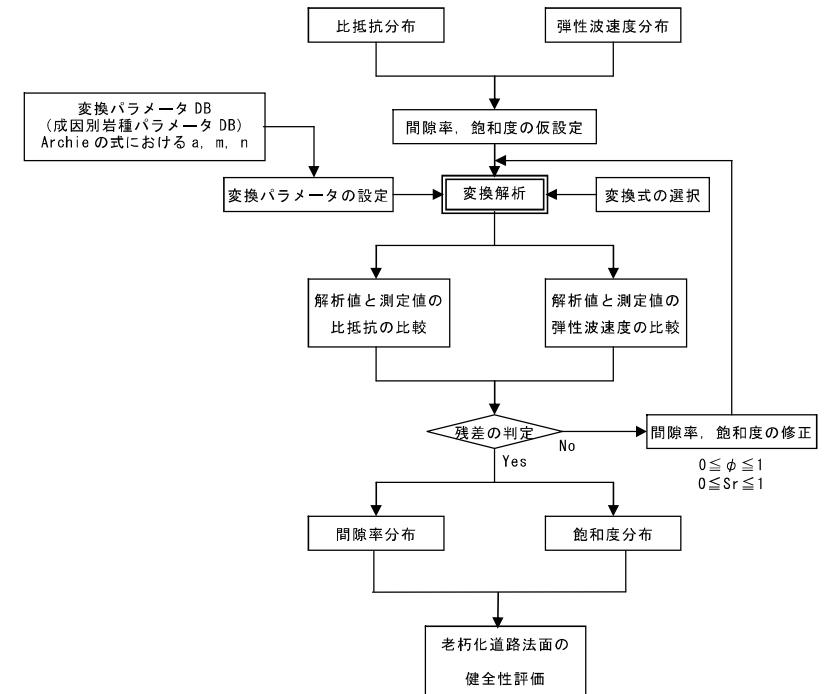


図9.6 変換解析における岩盤評価フロー

9.4 変換解析による評価結果

9.4.1 変換パラメータ

パラメータの決定においては、検討地点におけるボーリングコアまたは同地点から採取された岩塊を用いて室内実験を行ない、変換パラメータを決定することが望ましい。しかしながら本研究では、図9.7および図9.8に示すボーリングを実施する前に解析を行ったため、従来の研究で構築されたデータベースを用い、パラメータを決定している。本研究サイトにおいては、各解析対象の地質が泥岩であるため、両変換解析には表9.1に示す変換パラメータを用いた。

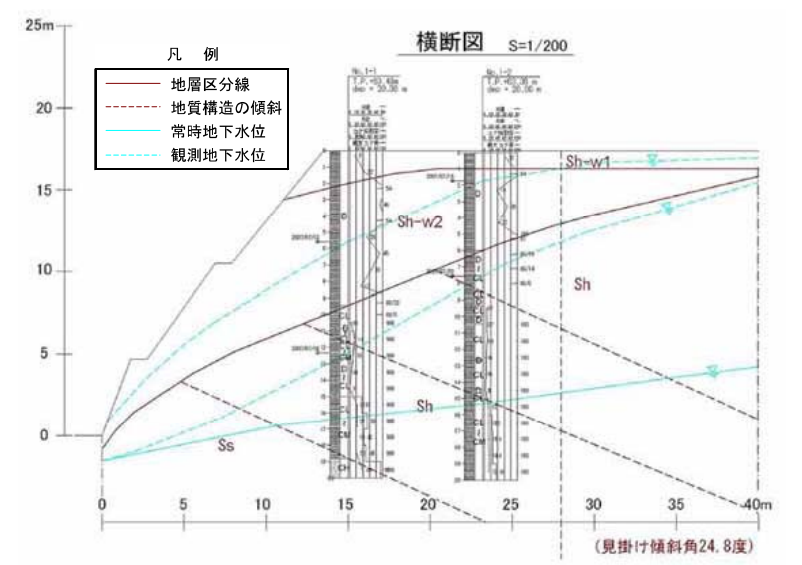


図9.7 ボーリングによる地質構造評価結果：地点（１）

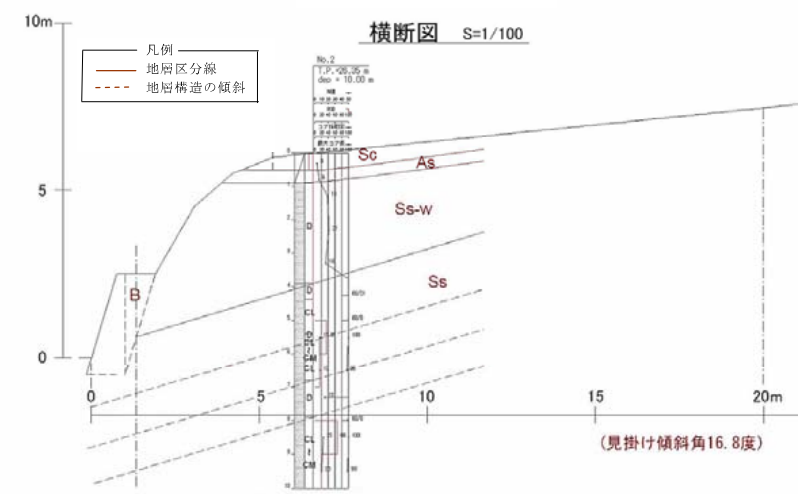


図9.8 ボーリングによる地質構造評価結果：地点（２）

表9.1 解析に用いた変換パラメータ

岩種	泥岩
地層係数 F の係数 a	0.1
間隙率 ϕ の指数 m	1.2
飽和度 S_r の指数 n	0.8
岩石実質部の弾性波速度 V_m (m/sec)	6,000
間隙水の弾性波速度 V_f (m/sec)	1,500
空気間隙の弾性波速度 V_a (m/sec)	330
岩石実質部の比抵抗 ρ_o ($\Omega \cdot m$)	10,000
間隙水の比抵抗 ρ_w ($\Omega \cdot m$)	50
伝導性粒子の比抵抗 ρ_c ($\Omega \cdot m$)	3,000

9.4.2 地点（１）の変換解析結果

① 間隙率分布

図9.9に変換解析により得られた間隙率分布と、解析後に実施されたボーリング結果の比較を示す。同地点のボーリングより深度10m程度まではD級岩盤が続き、以深は徐々に硬質になっていくのがわかる。間隙率分布では間隙率0.2のコンタが概ねD級の境界と一致しているのがわかる。また、間隙率0.4以上の領域が法面脚部にはほとんどないが、上部になるにつれ広くなり、天端部分にも広く分布していることが認められる。

② 飽和度分布

図9.10に変換解析により得られた飽和度分布と、解析後に実施されたボーリングによる地下水位の比較を示す。法面近傍では0.2以下の飽和度が、深部になるにつれ増加するのがわかる。また、今回の解析結果では飽和度0.4以上の領域がボーリングによる地下水位と概ね一致するのが認められる。解析結果では、飽和度が全体的に低めとなったが、データベースから用いた泥岩の変換パラメータと現位置での泥岩の変換パラメータに多少の差異があったことが原因と考えられる。

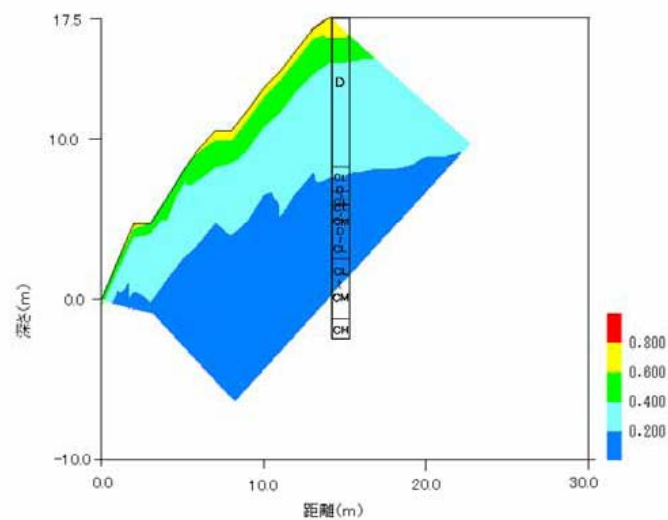


図9.9 間隙率分布とボーリング結果の比較：地点（１）

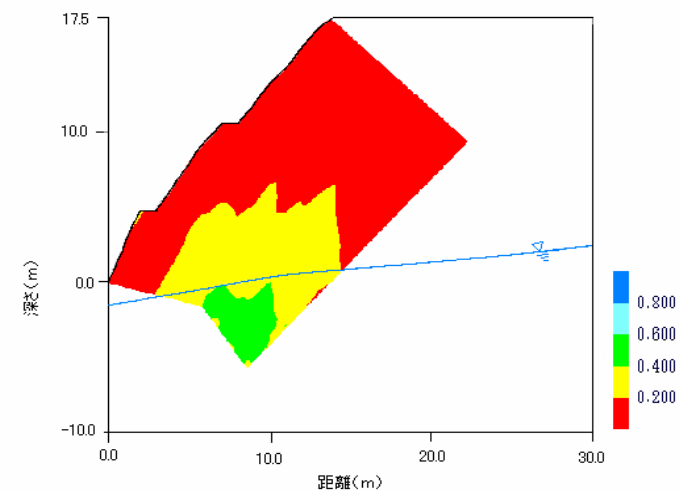


図9.10 飽和度分布と地下水位の比較：地点（１）

9.4.3 地点（２）の変換解析結果

① 間隙率分布

図9.11に変換解析により得られた間隙率分布と、解析後に実施されたボーリング結果の比較を示す。同地点のボーリングより深度5m程度まではD級岩盤が続き、複雑な岩級分布を呈するものの、それ以深は徐々に硬質になっていくのがわかる。間隙率分布では間隙率0.4のコンタが概ねD級の境界と一致しているのがわかる。また、地点（１）では間隙率が若干小さめに評価されたが、間隙率0.4程度がD級岩級としては妥当な境界と考えられることから、地点（２）の方がデータベースで用いた泥岩の性状に近いと予想される。

② 飽和度分布

図9.12に変換解析により得られた飽和度分布を示す。当地点では解析結果における飽和度は、全領域でほぼ0.2以下となった。実際のボーリング結果においても、地下水位は観察されず、地下水位は解析領域より深部に存在すると推定されることより、変換解析結果との整合は良いことが認められる。

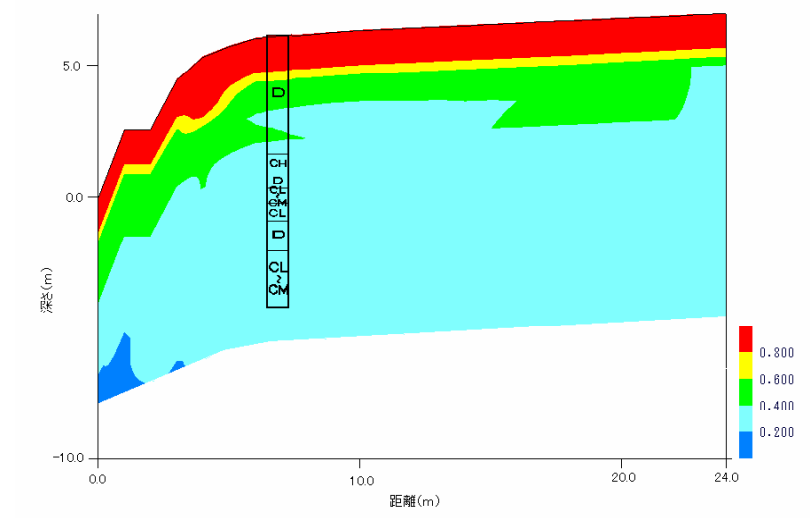


図9.11 間隙率分布とボーリング結果の比較：地点（２）

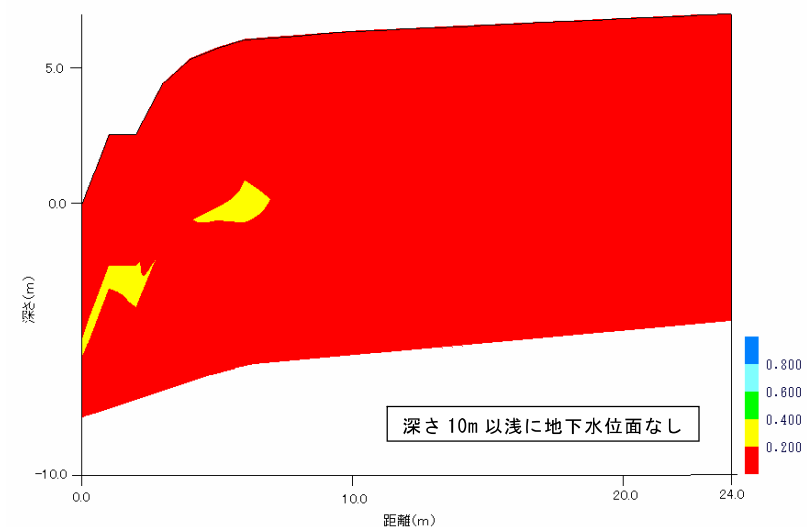


図9.12 飽和度分布：地点（２）

9.5 まとめ

この章では、地下構造物を計画・設計するにあたって事前調査としてよく利用される弾性波探査と二次元比抵抗探査に着目し、これらを老朽化した吹付け法面を対象に実施された調査結果を用いて、変換解析による評価を試みた。

変換解析に用いるパラメータの絶対値についてはさらに検討を必要とするが、変換結果が得られた間隙率分布より、表層の緩み領域の分布が確認できた。よって、法面の間隙率の評価が風化の現状の推定に有効である可能性を示した。

一方、変換解析より得られた飽和度分布では、地下水の存在の有無を予見できた。岩盤の劣化は乾湿を繰り返すことにより促進される⁶⁾ことから、飽和度の変化は劣化が進行するかどうかの一つの指標である。特に降雨前後で測定したデータを解析することにより、乾湿の変化を繰り返す箇所の特定に有効である。さらに、弾性波探査と二次元比抵抗探査による長期モニタリング調査を行うことにより、弾性波速度・比抵抗・間隙率・飽和度などの地盤の劣化状況を把握することが出来る可能性を示した。

以上のことにより、これらの探査と解析が、法面の劣化の状況と今後の劣化進行の

推定に有効であり、健全性評価のための有効な手法である可能性を示したと言える。

今後、物理探査は計算機の高度化や法面専門の測定機器の開発により、探査費用の低下が期待できる。ボーリング調査はこのような調査結果を基に、より精密な検討が必要な箇所だけを調査して検証を進め、より経済的で効率的な法面管理に努めて行く必要がある。

参考文献

- 1) 中村真・近藤悦吉・楠見晴重：併用探査によるトンネル施工ルートの岩盤および湧水予測評価法，土木学会論文集，No. 735/VI-59，pp. 209-214，2003.
- 2) 楠見晴重・山本剛・中村真：比抵抗・弾性波併用探査による老朽化法面の工学的評価法，第38回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp. 35-38，土木学会，2009.
- 3) Kusumi, H., Yamamoto, T., and Nakamura, M. : Engineering estimation method of decrepit slope by compound survey, pp. 557-560, The ISRM Regional Symposium EUROCK2009, 2009.
- 4) Wyllie, M.R., Gregoty, A.R. and Gardner, L.W. : Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media, Geophysics, 21(1), pp. 41-70, 1956.
- 5) Archie, G.E. : The Electrical Resistive Log as Aid in Determining Some Reservoir Characteristics, Trans. A. I. M. E., Vol. 146, pp. 54-62, 1941.
- 6) 北海道開発土木研究所地質研究室：岩石岩盤の風化について，北海道開発土木研究所月報No589，2002年6月号，pp. 46-47，2002.

第10章 長期劣化概念に基づく道路法面の健全性評価と

予防的保全対策の提案

10.1 道路法面の長期劣化概念と劣化シナリオ

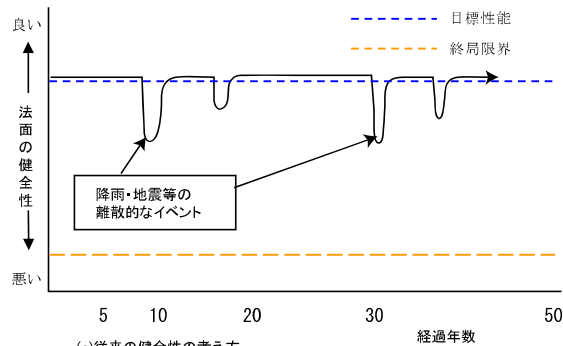
10.1.1 道路法面の長期劣化概念

道路の維持管理では、道路法面を良好に保ち、安全で円滑な交通を確保し、災害を未然に防止することが必要とされる。供用時には、安全に構築されていた法面であっても、時の流れを経て、開発により法面の上部に集水地形が出現するなどの環境が変化すること、法面の構成材料の強度が経年的に劣化すること、同様に透水性が低下すること（透水性が良くなることもあり得る）などの原因によって、初期に設定されていた所定の安定性が確保できなくなることがあり得る。数多くの道路の老朽化が進行している中で、道路法面の劣化過程は、目に見えない法面内部で進行するため、強度低下が相当量進行し地表部に変位として現れるまで確認できないのが現状である。

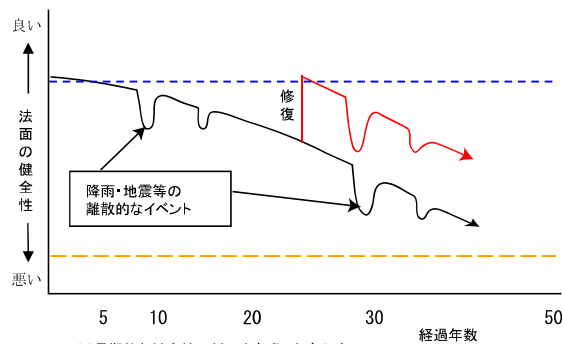
道路防災総点検等は、表面に現れる現象（亀裂や変状など）を目視し、簡易的な計測によりその進行状況を確認するもので、法面内部の状況把握までには至っていない。これら目に見えない劣化状況を定量的に評価することができれば、それに応じた対策工を実施し、未然に災害発生を防止することができ、人的・経済的損失を最小限に抑え、かつ既設道路の延命化にもつながることが期待される¹⁾。

図 10.1 は、法面の健全性の長期的な推移の概念を示したものである。上段の(a)図は、豪雨等の一時的なイベントによって、離散的に健全性が低下するものの、長期的には法面は安定しており、健全性は低下しないことを表している。現在の法面の維持管理手法は、主にこの考え方に基づいている。しかしながら、下段の(b)図に示すように、法面は降雨浸透や地下水の影響、またそれに伴う地山の緩みなどによって長期的に健全性が低下していくと考えられる。豪雨などの一時的なイベントによって離散的な健全性の低下があるとともに、それらの累積によって長期的にも健全性が低下していく。この曲線が「性能劣化曲線」であり、劣化の度合いを表すこの曲線の傾きを定量的に求めることができれば、具体的な耐用年数の議論も可能となり、より適切なタイミングでの保全対策が可能となる。

そこで本章では、これまで述べてきた物理探査による長期モニタリングや、その探査データを用いた法面の健全性の評価方法と、劣化を考慮した予防的道路法面保全対策を提案する。



(a)従来の健全性の考え方



(b)長期的な健全性の低下を考慮した考え方

図 10.1 法面の長期劣化の概念

10.1.2 長期劣化のシナリオ

第3章で述べたように、各種指針や法面の専門家の着目点からは、道路法面の健全性評価のための着目点は表10.1（表3.15の再掲）に整理される。

表 10.1 道路法面の健全性評価のための着目点

- ・不安定化した結果としての変状
- ・盛土材料や基盤部の位置など不可視部分の地中構造
- ・切土等内部の風化度合いや亀裂など不可視部分の地中の構造
- ・降雨と関連する湧水・地下水の状況や変動

これらを基に、法面の長期劣化のシナリオを考察する。

① 盛土法面の劣化シナリオ

盛土法面においては、長年にわたり繰り返される降雨とその降雨浸透によって形成される地下水に起因して、法面全体の排水機能が低下することを、長期的な法面劣化の原因のひとつとして考えた。盛土の排水機能を健全に保つために水抜き排水孔が設置されることがあるが、盛土に設置された水抜き排水孔は施工後数年で目詰まりを起こすことが多い。その主因として、ストレーナー部やパイプ内、あるいはパイプ外周辺と盛土間隙部に盛土中の細粒土分や地下水に含まれる成分が盛土や地山内から移動して付着することが挙げられている²⁾。水抜き排水孔が設置されていない盛土も多いが、その有無にかかわらず、降雨時の地下水の集水によって、地下水位の昇降が繰り返される盛土法尻部分においては、土粒子の細粒分の移動・累積などによって長期的に透水性が低下していくと考えられる。具体的には以下のシナリオを設定している。

図10.2に盛土法面の長期劣化の概念図を示す。図の下段から上段にかけて、任意の降雨イベントにおける降水量と地下水位の変化を表しており、図が右に移動するにつれて、長期的な時間の経過を表す。すなわち、縦軸は降雨時間（累積降雨量）であり、横軸は長期時間軸であるが、縦軸の時間はせいぜい50時間の範囲とすれば、横軸の時間は10～20年に及ぶ長いスケールである。左側の一列は、法面供用時における任意の降雨時の降雨時間に伴う法面内部の地下水位の変化が示されている。法面供用時には、排水機能は良好であるために、比較的大きな降雨イベントであっても、法面に変状が現れるような危険な地下水位には達していない。しかし、同じ盛土法面が5年、10年と経過し、法尻付近の透水性が徐々に低下してくることにより、供用時と同規模の降雨イベントであっても、法面の地下水位は上がりやすくなっており、法面全体としての危険度は徐々に上昇することになる。これが盛土法面の健全性低下が起こりうる原因の一つと考察される。

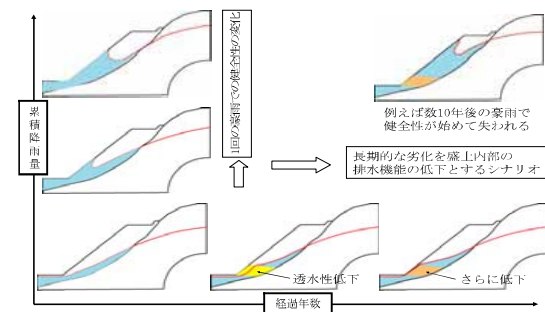


図 10.2 盛土法面の長期劣化の概念図

② 切土法面の劣化シナリオ

切土法面における長期劣化の主因は、降雨毎に水が法面内のクラック等に浸透し、間隙に入り込んだ水の乾湿繰り返しに伴うスレーキングによって地山の強度が徐々に低下するためと考えられる。切土地山内の複数点の弾性波速度推移を約 12 年間にわたり定点調査した結果³⁾によると、法面奥行き方向の比較的広範囲にわたり、切土直後の一時的な緩みに引き続き、長期的にも地山の強度が徐々に低下していくことが明らかにされている。特に、切土法面においては、背面に断層等の不安定要素がない場合には、経験則に基づく地山地質に応じた安定勾配で切土が施工されるため、施工直後の応力解放や緩み域の存在が長期的な変位や変状の主原因となる。多くの切土法面では、表層保護の観点から吹付け工が施されているが、地山側から吹付け工背面への雨水の浸透は許容される状況にあるため、先述のように降雨に伴う乾湿繰り返しによるスレーキングが法面の緩み域をより一層劣化させると考えられる。

図 10.3 に切土法面の長期劣化の概念図を示す。図の縦軸と横軸は図 10.2 の盛土法面の場合と同様に、それぞれ降雨イベント毎の降雨時間（累積降雨量）と長期時間軸を表している。左側の一列は、法面供用時における任意の降雨時の降雨時間に伴う法面内部の飽和領域の広がりが見られている。法面供用時には、法面表層部の地山の強度はそれほど低下していないために、比較的大きな降雨イベントであっても、法面に変状が現れる事態には至っていない。しかし、同じ切土法面が 5 年、10 年と経過し、法面表層部の地山強度が低下することにより、供用時と同規模の降雨イベントであっても、切土法面の安定性は低下しており、法面全体としての危険度は徐々に上昇することになる。これが切土法面の健全性低下が起こりうる原因の一つと考察される。自然斜面においても同様である。

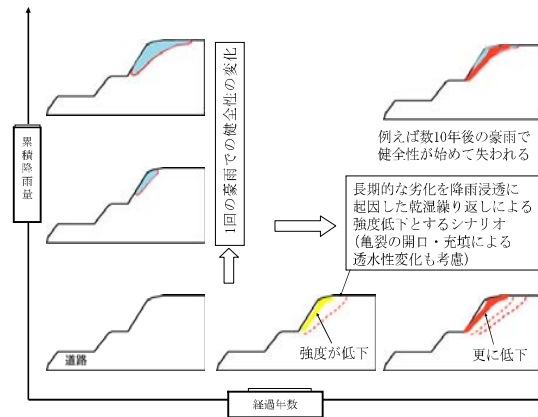


図 10.3 切土法面の長期劣化の概念図

10.2 道路法面の健全性評価手法の提案

前節の考え方にに基づき、

- ① 盛土については繰り返される降雨浸透に起因する盛土法尻部の透水性低下
- ② 切土等法面については繰り返される降雨浸透に伴う乾湿繰り返しによる表層土の強度低下

について、物理探査結果を活用した、法面の健全性評価手法を提案する。

盛土については、法面内部の地山と盛土の境界の位置や、地山の風化程度を 8 章で述べた物理探査で把握して、一般的には最も弱点となる箇所を特定して安定計算を行うことになる。その場合の水位などは、第 9 章で述べた複合解析手法で法面内部の間隙率や飽和度の分布から設定することができる。そして地下水位を変化させてそこから導き出された安全率が基準を下回る場合の地下水位が使用限界となり、現場で観測される地下水位と比較することにより健全性を評価できることになる。この場合の健全性評価の指標は地下水位となる。

さらに、詳しい検討を行う場合は、法面の性能低下曲線を得る方法として、飽和-不飽和非常浸透場を連成した弾塑性有限要素解析⁴⁾が有効である。この手法は対象となる法面の構成土を、土粒子と間隙水の 2 相混合体として扱うとともに、地下水位より上部の地盤を不飽和領域として降雨浸透に伴う飽和-不飽和非常浸透過程における法面の不安定化を検討できる。また、健全性の評価は、法面内部の塑性ひずみの発生をもって脆弱域ができたものとし、その塑性域の拡大に伴い健全性が徐々に消失していくと判定する。本論文で取り上げた斜面のうち地点（3）の法面は、供用開始から 7 年経過後に豪雨により被災した経歴を持つ法面である。これらの法面に対して、供用時と長期劣化のシナリオで想定した法面劣化時での解析結果を比較することにより、法面の健全性の低下を詳細に検討することができる。その際、地点（3）の盛土法面については、解析断面に被災断面を用い、外力として実際に観測された降雨量を用いることから、安全率を直接求められる円弧すべり解析と併用することにより、時間的な劣化度合いを示す性能低下曲線の提案も可能である。

切土等法面については、同様に物理探査により法面内部情報を取得して解析することになるが、岩盤の場合は亀裂の評価が難しい。しかし、弾性波速度で全体的な劣化程度の把握や、反射面を調査することで地層構造の把握も可能である。さらに、二次元比抵抗探査により地山の含水状況の把握も可能である。これらの情報を基に、モニタリングを行い、複合解析の結果から飽和度が変化して乾湿を繰り返す箇所がわかれば、今後劣化する可能性のある地点も特定できる。これにより、精度上の課題はあるものの健全性評価は可能である。

今後はこれらの成果を基に合理的な予防的保全対策やモニタリング手法の提案をするとともに、より正確にライフサイクルコストが算出できるような精密な性能劣化曲線を得るように努力していく必要がある。そのためには、物理探査を用いた法面内部の長期モニ

タリングを実施しながら性能低下曲線の見直しを行っていくことが重要であるとする。
また、ライフサイクルコストを最小とする安全で合理的な維持保全計画を立てることも可能であるとする。

10.3 劣化を考慮した予防的road路面保全対策法の提案

これまで述べてきたように、道路の点検は主に表面からの目視情報に頼ってきた。しかし、点検を行っても道路路面崩壊を防止できていないのが現状である。これは、法面内部の状況を把握することなく、点検・評価を行ってきたためである。今後、ますます道路予算が少なくなると予想される中で、道路の予防的延命化策や人命に関わる事故の発生を抑制する必要がある。このための道路路面保全対策の新しい提案をする。

これまでの切土等法面の崩壊対策は、目視を中心とした点検で変位や小規模な崩壊を見つけて、法面が不安定になったのを確認してから、法面勾配を緩くするための法面の切り直しや、アンカー工などの設置を行ってきた。変状については、不安定化した結果としての現象である。降雨と関連する表面水や地下水の移動が亀裂の風化を促進すると考えられる。

特に、岩石が乾湿の繰り返しでスレーキングを起こすのは良く知られている⁵⁾。さらに水の移動はクラックに存在する土粒子を移動させ、クラックの間隙を拡大させる。また、空気供給や水質によって岩石の化学的劣化やスレーキング特性に影響を及ぼすことが報告されている⁶⁾。このことから、亀裂の進行の原因と考えられる新たな空気や水の供給を少なくすれば、クラックに沿って生じるスレーキングの進行を抑えることができると考えられる。このため、法面内の岩盤の地層境界やクラックが発見できれば、たとえば、図 10.4 に示すように法面上部の水の供給源の箇所に、アスファルト舗装やセメントミルクの注入など、簡単な浸透防止措置を施し、クラックに進入する水を減少させることにより、法面の健全性低下の速度が落ち、法面の寿命を延ばすことが可能と考えられる。

さらに、法面内部の地下水位が上昇して、飽和化に伴い法面が不安定化してくることから⁴⁾、浸透防止処理は地下水の飽和化の低減にも寄与し、不安定化の防止に繋がるものと考えられる。

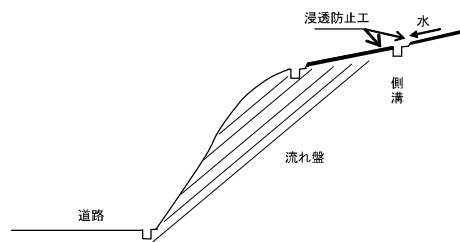


図 10.4 切土法面の延命化工法の一例

図 10.5 は切土法面の延命化対策の考え方を示している。横軸が時間軸で概ね 10 年から 50 年程度の長い時間を示している。下の図は、これまでの予防的対策がなされない法面の劣化を示しており、中段のグラフの赤い線で性能劣化を示している。これに対して、上段は法面上部に浸透防止対策などの予防的対策を行った法面で、地下水の浸透を少なくすることで、法面劣化の速度を緩和することができる。図中の中段のグラフでは青い線に相当する。

盛土法面についても同様である。盛土法面は地盤と盛土の境界で、崩壊をしやすことが知られている。本章の事例解析で現象を説明したように、盛土部分の排水機能が悪化すると間隙水圧の増加や重量の増加により、法面は不安定になる。このため、法面表面からの水の進入を防ぐための法面コンクリート張工の設置や、図 10.6 に示すように法面内部の水はけが悪化してきた段階で、水抜きパイプを増設することなどにより法面の健全性が回復できると考えられる。

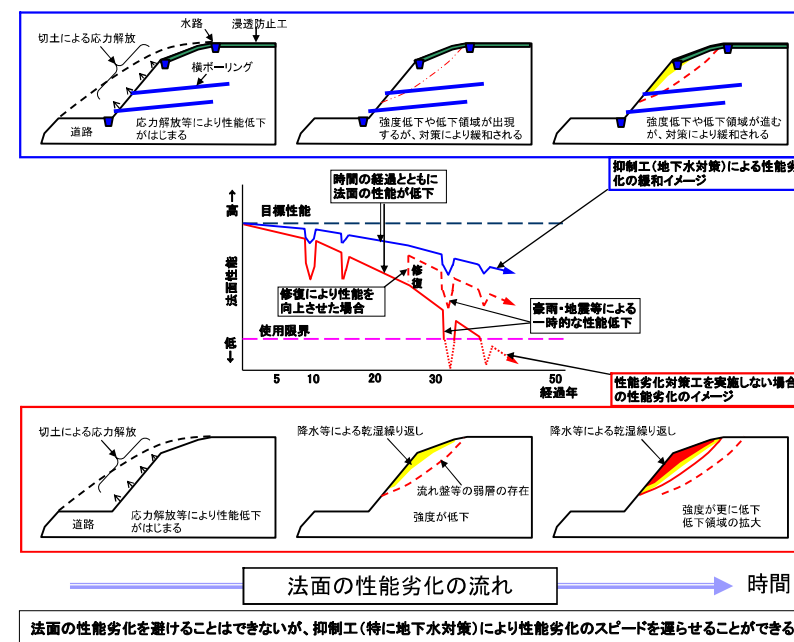


図 10.5 道路法面の延命化対策の考え方

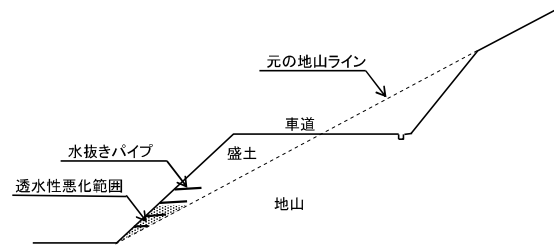


図 10.6 盛土法面の延命化工法の一例

10.4 まとめ

今後、ますます道路は老朽化して行く中で、道路に投資する予算の増加は見込めない。そのような状況下では、劣化してから対策を行うのではなく、劣化を抑える予防的対策を行い、法面の寿命を延ばすことが重要である。そのためには物理探手法や複合解析や数値解析等を用いて道路法面の健全性を的確に評価することが必要である。この章では、健全性評価のための手法の提案をするとともに、これまでほとんど行われて来なかった、予防的保全や法面の延命化という観点から、具体的な対策手法について提案した。

参考文献

- 1) 山本剛・満下淳二・楠見晴重・小山倫史・大西有三：道路法面管理と物理探査，最新の物理探査適用事例集，pp. 87-96，物理探査学会創立 60 周年記念事業実行委員会，2008.
- 2) 奥園誠之：これだけは知っておきたい斜面防災 100 のポイント，pp. 130，鹿島出版会，1986.
- 3) 多賀直大・田山聡・奥園誠之・八木沢孝哉：長期追跡調査による切土のり面の風化の進行と安定性，地盤工学会誌(土と基礎)，Vol. 39-6，pp. 41-47，1991.
- 4) 山本剛・中井卓巳・丸木義文・小高猛司・岸田潔・大西有三：長期劣化の概念を導入した道路法面の健全性評価手法の提案，地盤工学ジャーナル，Vol. 4 (2009) No. 1，pp. 21-33，2009.
- 5) 北海道開発土木研究所地質研究室：岩石岩盤の風化について，北海道開発土木研究所月報 No589，2002 年 6 月号，pp. 46-47，2002.
- 6) 島田久美子・小峰秀雄・安原一哉・村上哲・関根一郎・岡田哲実：地下水質と空気供給状況を考慮した堆積岩の新しいスレーキング試験方法，土木学会論文集 C，Vol. 62，No. 2，pp. 335-345，2006.

第 11 章 結 論

本論文では、同じ道路法面において各種の物理探手法を用いて実証実験を行い、物理探手法の比較検討を行い、さらに複数のデータを複合的に解析して、物理探査による道路法面の健全性評価や保全方法のための活用方法を提案したものである。

本研究で得られた知見と結論を述べる。

二次元比抵抗探査と屈折法弾性波探査以外は道路法面調査で使用されたことがほとんど無かった、各種の物理探手法を用いて、同じ道路法面の現場で実証的にを行い比較した結果、以下の事がわかった。

- ① 電磁気探査において、地点（2）の法面部分が低比抵抗で風化が進んでいるという共通の評価結果であり、概略的な風化度合いは電磁気探査で概ね把握できたと考えられる。ただし、電気探査を含めて鉄筋等の金属類が存在すると探査ができなかった。
- ② 連続波地中レーダは深度 10m 程度までは詳細な探査が可能であった。また、鉄筋などが有っても、密な配置でなければ探査深度は 5m 程度に落ちるものの、透過して測定が可能であることがわかった。これまで道路法面で使用されたことが無かったが、法面の探査に使用できることがわかった。
- ③ 表面波弾性波探査は表面が平滑な道路法面で探査が可能で、測定・解析が他の弾性波探査に比べて効率的で容易であることがわかった。
- ④ 屈折法弾性波探査は風化程度に差がある箇所について、他の探査法に比べて明瞭に探査が可能であるが、表面保護工が堅い場合は、探査できないこともあることがわかった。
- ⑤ 反射法地震探査は地質構造の探査にも使用できた。しかし、反射面が階段状となっているようなものは探査ができないこともあることがわかった。
- ⑥ ほとんどの場合、ボーリング等の先見データが無いと単独の解釈が困難であることがわかった。
- ⑦ 二次元比抵抗探査と弾性波探査とを複合的に解釈することで、間隙率という地盤の緩み度合いと、飽和度という含水状態を容易に評価できる指標に変換できる可能性が確認できた。

ボーリング調査は線的な情報しか得られないが、物理探査は面的または立体的な情報を得ることができる。この物理探査結果から得られた道路法面内部の情報を使用して、

複合解析や飽和－不飽和浸透連成変形解析を用いて性能劣化曲線を推定して、健全性を評価することが可能である。そしてこれらの解析結果からこれまでほとんど行われてこなかった、法面の健全性低下防止のための予防的保全対策を講じて法面の延命化を行う具体的な対策手法を提案できた。具体には以下の通りである。

- ① 切土等法面の予防的保全対策として、法面の上部に簡易的な浸透防止措置等を施し、水の進入を抑制することにより、クラックの発達を抑制させる。
- ② 盛土法面の予防的保全対策として、排水機能の回復や雨水の浸入を抑制することで、法面の健全性を回復させる。

これらの提案は、予算の制約下の中で、より効率的・効果的で安全な道路法面の保全に役立つものと考えている。

道路法面は長期的に健全性が低下するとともに、豪雨などの一時的なイベントによって、離散的な低下が起きる。これまでの法面の点検評価は、主に健全性が失われてきた結果として法面表面に生じた変形や変状を対象に行ってきた。我が国においては老朽化や気象の激化の原因も考えられるが、結果として道路法面の崩壊を減少させることはできなかった。これからは、この研究で行った、道路法面の物理探査手法適用性の評価を参考にして、法面内部の探査やこれを使ったモニタリング調査や対策を積極的に進めて行くべきであろう。

今後は、探査機器の高度化や法面専用の探査機器の開発による精度向上や物理探査費用の低減や、さらには新たな複合的な測定・解析方法も出現することも期待できる。更なる物理探査を用いた道路法面の探査技術の発展に期待して、この研究論文の締めとしたい。

本研究に関連した研究成果

【学術論文（審査あり）】

- 1) 山本剛・中井卓巳・丸木義文・小高猛司・岸田潔・大西有三：長期劣化の概念を導入した道路法面の健全性評価手法の提案，地盤工学ジャーナルVol.4, No.1, 2009.3.
- 2) 宮川歩夢・辻建・松岡俊文・山本剛：自己組織化マップを用いた複合物理探査による堤防内土質性状の分類，土木学会論文集C, Vol.66, No.1, pp.88-99, 2010.2.
- 3) 山本剛・山田茂治・鈴木敬一・楠見晴重・松岡俊文：連続波地中レーダ法の開発とその法面調査への適用性，地盤と建設，Vol.27, No.1, pp.33-40, 地盤工学会中国支部，2010.3.
- 4) 山本剛・藤原康正・楠見晴重・松岡俊文：VLFを利用した探査法による老朽化法面調査の適用性，地盤と建設，Vol.27, No.1, pp.211-218，地盤工学会中国支部，2010.3.
- 5) Toru Takahashi・Tsuyoshi Yamamoto:An attempt of soil profiling of river embankment using geophysical data, Buturi-Tansa, Vol.63, pp.102-108, 物理探査学会，2010.3.
- 6) Harushige Kusumi・Tsuyoshi Yamamoto・Makoto Nakamura：Soundness evaluation of decrepit slopes with the conversion analysis of geophysical data, JCRM, Vol.6, No.1, pp.7-11, 2010.5.

【学術論文（審査なし）】

- 1) 高橋亨・田中荘一・山本剛・糸川政孝・船曳誠二・京都大学 河川堤防の内部調査と探査機器の開発研究 研究委員会：河川堤防内部構造調査と探査機器の開発研究（その1）—研究の全体計画と平成18年度研究成果の概要—，物理探査学会第117回学術講演会講演論文集，pp.119-122，物理探査学会，2007.10.
- 2) 畠中与一・今里武彦・山口伸治・山本剛・糸川政孝・船曳誠二・京都大学 河川堤防の内部調査と探査機器の開発研究 研究委員会：河川堤防内部構造調査と探査機器の開発研究（その2）—三次元電気探査の適用性評価のための試験探査結果—，物理探査学会第117回学術講演会講演論文集，pp.123-125，物理探査学会，2007.10.
- 3) 西山哲・大西有三・矢野隆夫・山本剛・西川啓一：リアルタイム岩盤斜面モニタリングネットワークシステムの研究，第37回岩盤力学に関するシンポジウム論文集，pp.439-442，土木学会，2008.1.
- 4) 楠見晴重・小杉昌幸・相澤隆生・江口貴弘・山本剛：岩盤構造物を対象とした先端計測技術利用の現状と展望，第37回岩盤力学に関するシンポジウム論文集，pp.479-485，土木学会，2008.1.

- 5) 鈴木敬一・山本剛・糸川政孝・船曳誠二・京都大学 河川堤防の内部調査と探査機器の開発研究 研究委員会：河川堤防内部構造調査と探査機器の開発研究（その3）—連続波レーダによる実堤防試験探査—, 物理探査学会第 118 回学術講演会講演論文集, pp. 178-181, 物理探査学会, 2008. 5.
- 6) 山本剛・満下淳二・楠見晴重・小山倫史・松岡俊文・大西有三：道路法面管理と物理探査, 最新の物理探査適用事例集, pp. 87-96, (社)物理探査学会創立 60 周年記念実行委員会, 2008. 10.
- 7) 山本剛・小段栄一・糸川政孝・京都大学河川堤防の内部調査と探査機器の開発研究 研究委員会：河川堤防調査における物理探査の適用性に関する研究, 最新の物理探査適用事例集, pp. 113-122, (社)物理探査学会創立 60 周年記念実行委員会, 2008. 10.
- 8) 山本剛・相澤隆生・太井子宏和・斉藤義之・利岡徹馬・満下淳二・楠見晴重・松岡俊文：老朽化吹きつけ法面の弾性波探査によるモニタリングの適用性, 地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム 2008 論文集, pp. 1-6, 地盤工学会関西支部, 2008. 12.
- 9) 楠見晴重・山本剛・中村真：比抵抗・弾性波探査併用探査による老朽化のり面の工学的評価法, 第 38 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp. 35-38, 土木学会, 2009. 1.
- 10) 山本剛：物理探査技術を使った法面調査実証実験, 先端技術を利用した岩盤計測の体系化と実際への応用に関する研究小委員会活動報告書, pp. 44-56, 土木学会岩盤力学委員会, 2009. 3.
- 11) 西山哲・安藤佑治・山本剛：道路防災用センサネットワークシステムの構築に関する研究, 第 28 回日本道路会議論文集, 論文番号 40070, (社)日本道路協会, 2009. 10.
- 12) 畠中与一・今里武彦・安藤大・山本剛・楠見晴重：繰返し比抵抗 3 次元探査による斜面地盤の物性値評価, 物理探査学会第 121 回学術講演会論文集, 論文番号 60, 物理探査学会, 2009. 11.

【国際会議】

- 1) Yoichi Hatanaka・Takehiko Imasato・Tsuyoshi Yamamoto :Evaluation in applicability of the three-dimensional electric survey for the river embankment. 9th SEGJ International Symposium, No. 75, 2009.10.
- 2) Keiichi Suzuki・Tsuyoshi Yamamoto : A field feasibility study using stepped FM-CW GPR for investigation of river embankments, 9th SEGJ International Symposium, No. 103, 2009. 10.
- 3) Harushige Kusumi・Tsuyoshi Yamamoto・Makoto Nakamura : Engineering estimation method of decrepit slope by compound survey, The ISRM Regional Symposium EUROCK2009, pp. 557-560, 2009. 10.

【書籍等発表】

- 1) 山本剛・和田実：精密写真測量による道路法面等監視手法の開発と適用について, 建設マネジメント技術 Vol. 342, pp. 71-75, (財)経済調査会, 2006. 11.
- 2) 山本剛・糸川政孝・船曳誠二：道路法面の健全性評価に関する取り組み, 土木学会誌 Vol. 92, pp. 64-67, 土木学会, 2007. 10.

【講演・発表】

- 1) 山本剛：近畿地方整備局における地盤構造物の現状と対策, 地盤工学会地盤構造物の再生技術に関する研究会, 2007. 06. 15.
- 2) 楠見晴重・利岡徹馬・山田茂治・宮川充・山本剛：探査技術の法面健全性評価への応用性, パネルディスカッション, 近畿地方整備局第 3 回土木技術講演会, 2008. 1. 21.
- 3) 山本剛：道路法面健全性評価のための取り組み, 土木学会関西支部土木構造物の効率的・効果的な補強技術に関する研究会, 2008. 05. 23.
- 4) 常田賢一・小田和広・山本剛・上田幸一・中平明憲・横田善弘・竜田尚希・関口陽高：盛土天端一体化工法に関する現場実験, 第 43 回地盤工学会研究発表会, 論文番号 783, 2008. 7. 10.
- 5) 山本剛：自然災害と安全・防災, 大阪大学 地球総合工学特論, 2008. 06. 18.
- 6) 山本剛：近畿地区における地盤の係わるアセットマネジメントの取り組み, 岐阜大学地盤に関連した防災・アセットマネジメント研究会, 2008. 10. 17.
- 7) 山本剛：我が国の災害の歴史と国土交通省近畿地方整備局の防災の取り組み, 京都地盤研究会, 2008. 11. 13.
- 8) 山本剛：土木構造物の強化・補強技術に関する新技術・新工法, 土木構造物の効率的・効果的な強化・補強技術に関する講習会, 土木学会関西支部, 2009. 7. 24.
- 9) 鈴木敬一・山本剛：連続波レーダによる河川堤防構造探査, 全地連「技術 e フォーラム 2009」松江, 論文番号 84, 全国地質調査業協会連合会, 2009. 9. 11.

謝 辞

用いた記号一覧

記号	名称	出典
A	電極間隔	5 章
a	地質の違いによる係数	9 章
F	地層比抵抗係数	9 章
F_0	着目地点の着目深度の計算値	5 章
Ex	VLF 局からの一次磁場の強度	5 章
Hy	水平磁場の強度	5 章
Hz	垂直磁場の強度	5 章
m	間隙率 ϕ の指数	9 章
n	飽和度 S_r の指数	9 章
R	垂直磁場と水平磁場の強度比の絶対値	5 章
S_r	飽和度	9 章
V_a	空気間隙の弾性波速度	9 章
V_f	間隙水の弾性波速度	9 章
V_m	岩石実質部の弾性波速度	9 章
V_p	岩盤または岩石供試体の弾性波P波速度	9 章
V_s	岩盤または岩石供試体の弾性波S波速度	9 章
Δ	垂直磁場と水平磁場の位相差	5 章
ε	離相成分	5 章
θ	VLF の水平・垂直成分の合成ベクトルの橢円の長軸と水平軸の角度	5 章
ρ	岩盤または岩石供試体の比抵抗	9 章
ρ_0	岩石実質部の比抵抗	9 章
ρ_c	粘土等による間隙中の導電性粒子の比抵抗	9 章
ρ_w	間隙水の比抵抗	9 章
ϕ	岩盤または岩石供試体の(有効)間隙率	9 章

本論文は、筆者が近畿地方整備局近畿技術事務所在籍中に従事した業務の成果を取りまとめたものである。

本論文をまとめるにあたり、学長という激務の中、終始温かいご指導とご鞭撻を賜りました関西大学学長・楠見晴重博士に心から感謝の意を表するとともに、ご教示を賜りました関西大学環境都市工学部都市システム工学科教授・坂野昌弘博士、同環境都市工学部都市システム工学科教授・西形達明博士に厚くお礼を申し上げます。さらに、楠見学長とともに、本論文の細部にわたるご指導をいただきました同環境都市工学部都市システム工学科特任准教授・中村真博士に深く感謝申し上げます。

研究遂行時には、京都大学副学長・大西有三博士、ならびに京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻・松岡俊文博士から全般にわたりご指導をいただきました。また、名城大学理工学部建設システム工学科・小高猛司博士から連成解析に関するご指導をいただきました。さらに、京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻・岸田潔博士、西山哲博士、小山倫史博士、辻健博士、矢野隆夫博士、京都大学芦田讓名誉教授からご指導、ご助言や励ましをいただきました。

論文執筆に際して、全般にわたり応用地質株式会社満下淳二上級専門職（元財団法人道路保全技術センター）のご協力をいただきました。さらに、株式会社アーステック東洋代表取締役中井卓巳博士、同丸木義文課長のご協力をいただきました。また、サンコーコンサルタント株式会社事業開発室長の相澤隆生氏から弾性波探査についてご助言ご協力をいただきました。川崎地質株式会社山田茂治部長ならびに、同鈴木敏一課長から連続波地中レーダに関するご助言ご協力をいただきました。株式会社エイト日本技術開発の藤原康正部長からはVLF-EM探査に関するご助言ご協力をいただきました。応用地質株式会社チームリーダー利岡徹馬氏から二次元比抵抗探査と表面波探査に関するご助言ご協力をいただきました。株式会社環境総合テクノスの片山辰雄部長から FDEM 探査についてのご助言ご協力をいただきました。ここに厚くお礼を申し上げます。

研究過程では関西大学大学院理工学研究科山本龍氏、京都大学大学院工学研究科宮川歩夢氏、財団法人深田地質研究所高橋亨氏、株式会社日本地下探査畠中与一氏、同今里武彦氏、株式会社キンキ地質センター太井子宏和氏のご協力をいただきました。

国土交通省近畿地方整備局の木下誠也前局長ならびに深澤淳志前企画部長から論文執筆を快諾頂くとともに、上総周平局長ならびに塚田幸広企画部長にはご助言とご配慮をいただきました。また、一緒に研究に参加していただいた当時の近畿地方整備局近畿技術事務所の和田實氏、小段栄一氏、糸川政孝氏、上田幸一氏、船曳誠二氏、ならびに現在でも近畿技術事務所でもモニタリングを行っていただいている木村健治氏に感謝申し上げます。

この論文の執筆に際して大学の先生方、地質調査業界の方々、国土交通省の諸先輩方、関西大学学友の方々ならびに友人から沢山の応援をいただきました。この場をお借りして深くお礼を申し上げます。

最後に、著者を支えてくれた家族に心からの感謝の意を表し、謝辞の結びとします。