

博 士 論 文

地盤の防災と維持管理のための
物理探査法に関する研究

平成 2 5 年 3 月

片 山 辰 雄

岡山大学大学院
環 境 学 研 究 科

目 次

第1章 序 論

1.1 序論	1
1.2 研究の背景と目的	5
1.3 研究の構成	7
参考文献	10

第2章 防災と維持管理

2.1 はじめに	11
2.2 防災について	11
2.2.1 戦後の法制度	11
2.2.2 災害対策基本法について	12
2.3 維持管理	15
2.3.1 社会資本整備の現状	15
2.3.2 下水道施設の事例	15
2.3.3 社会資本整備の現状	16
2.3.4 計画的な改築の推進	18
2.4 「斜面」の調査方法	20
2.4.1 吹付け法面の調査手法	20
2.4.2 点検・調査項目と目的	20
2.4.3 評価のための調査手法	23
2.4.4 探査手法の選定	25
2.5 河川堤防管理	28
2.5.1 各種指針の流れ	28
2.5.2 維持管理と物理探査法の種類と内容	31
2.6 まとめ	33
参考文献	34

第3章 地盤調査に関する従来の研究

3.1 はじめに	35
3.2 地盤調査法	35
3.2.1 地質調査計画	36
3.3 物理探査法	40
3.3.1 概要	40
3.3.2 地下構造を把握するための物理探査	44
3.4 電磁探査法のあゆみ	51

3.5 電磁探査法について	52
3.6 物理探査適用の流れ	54
3.7 物理探査での留意点	55
3.8 まとめ	57
参考文献	58

第4章 周波数領域電磁探査法の開発

4.1 はじめに	59
4.2 磁場の測定	59
4.3 測定理論と逆解析	61
4.3.1 測定理論	61
4.3.2 逆解析法	63
4.4 探査機の開発	69
4.4.1 概要	69
4.4.2 FDTD法による検証	69
4.4.3 発信周波数の設定	71
4.4.4 探査深度	72
4.4.5 送受信コイル間隔について	74
4.4.6 開発した探査機の概要	76
4.4.7 シミュレーション解析	77
4.5 検証事例	79
4.6 まとめ	81
参考文献	82

第5章 同軸コイル型周波数領域電磁探査法の開発

5.1 はじめに	83
5.2 同軸コイル型周波数領域電磁探査法の概念	84
5.3 測定理論と逆解析	85
5.3.1 測定原理	85
5.3.2 逆解析理論	88
5.4 探査機の開発	90
5.4.1 探査深度について	90
5.4.2 位相角の精度	90
5.4.3 磁場強度の比較	93
5.5 同軸コイル型周波数領域電磁探査機の開発	95
5.5.1 開発した探査機の概要	95

5.6 セパレート型と同軸コイル型の比較探査	96
5.6.1 実験場所	96
5.6.2 探査結果	97
5.7 まとめ	99
参考文献	100

第6章 各種地盤への FDEM 探査の適用

6.1 はじめに	101
6.1.1 土質と比抵抗	102
6.1.2 まとめ	104
6.2 塩水を利用した水みちの探査	105
6.2.1 探査実験の目的	105
6.2.2 塩水の注入実験	105
6.2.3 比抵抗分布の計測結果	107
6.2.4 塩水注入実験結果	108
6.2.5 浸透流解析による検討	112
6.2.6 浸透流解析結果と考察	113
6.2.7 まとめ	116
6.3 トンネルにおける FDEM 探査の活用	117
6.3.1 トンネル切羽の前方探査	117
6.3.2 トンネル覆工の背面探査	122
6.3.3 まとめ	128
6.4 地すべり調査での適用	129
6.4.1 探査の目的	129
6.4.2 探査場所の概要	129
6.4.3 地質状況	130
6.4.4 ボーリング結果との対比	131
6.4.5 探査結果とパイプひずみ計観測結果との対比	132
6.4.6 まとめ	134
6.5 CPT 手法を取り入れた複合探査	135
6.5.1 探査の目的	135
6.5.2 特殊堤での調査	135
6.5.3 まとめ	139
6.6 まとめ	140
参考文献	141

第 7 章 結論と今後の課題	145
7.1 結論	145
7.2 今後の課題	147
7.3 まとめ	148
本研究に関連した研究成果	149
謝辞	153

第 1 章 序 論

1.1 序論

日本列島は、火山国であり地震多発国なので、多くの断層等が存在してきわめて複雑な地形・地質である。表 1.1 に日本の地形および自然状況に関する特徴を示す。図からも明らかなように、緯度の範囲が広く、亜熱帯から温帯に始まり亜寒帯までの広い気候の変化に富み、典型的なモンスーン気候のため、火山性地震あるいは地殻プレートに起因することによる大きな地盤災害に見舞われることも多い。また、最近では、ゲリラ豪雨と言われる現象が各地で発生し、それらによる土砂災害が多発している。

表 1.1 日本の特徴

1. 国土形成	南北 2 0 0 0 km、東西 2 0 0 0 km に及ぶ細長い国土
2. 四 島	海峡による陸地の分断。多数の島しょ部
3. 脊梁山脈	国土中央部を山地が分断
4. 平 野	海岸線と山間盆地として狭い平野が連なっている（低地：12.7%、台地：11.9%）
5. 軟弱地盤	大都市のほとんどが軟弱地盤の上にある。
6. 地 震	日本とその周辺で世界の地震の約 10% が発生
7. 豪 雨	多雨：降雨の集中（年平均降水量：1 6 0 0 ～ 1 8 0 0 mm。地球の総平均の約 2 倍）、河川勾配が急
8. 豪 雪	国土の 6 割が積雪寒冷地域 (多くの都市が年間累計降雪深 4 m 超)

日本では、毎年のように様々な災害が発生している。1 例として、図 1.1 に平成 22 年に発生した主な自然災害状況を示す。図からも明らかなように、地震以外にも津波、火山噴火、豪雪、豪雨等で災害が発生し多くの死傷者や行方不明者が発生している。これらの災害を少しでも減らすように法整備が行われている。しかしながら、決定的な対処方法が構築されていないのが現状である。特に、地震では、最大規模の地震が 2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分 18 秒(日本時間)、宮城県牡鹿半島の東南東沖 130km の海底を震源とするところで発生した。後に、「東日本大震災」¹⁾と命名された。この地震の規模はマグニチュード 9.0 で、最大震度は、宮城県栗原市で観測された震度 7 で、震源域は岩手県沖から茨城県沖までの南北約 500km、東西約 200km のおよそ 10 万

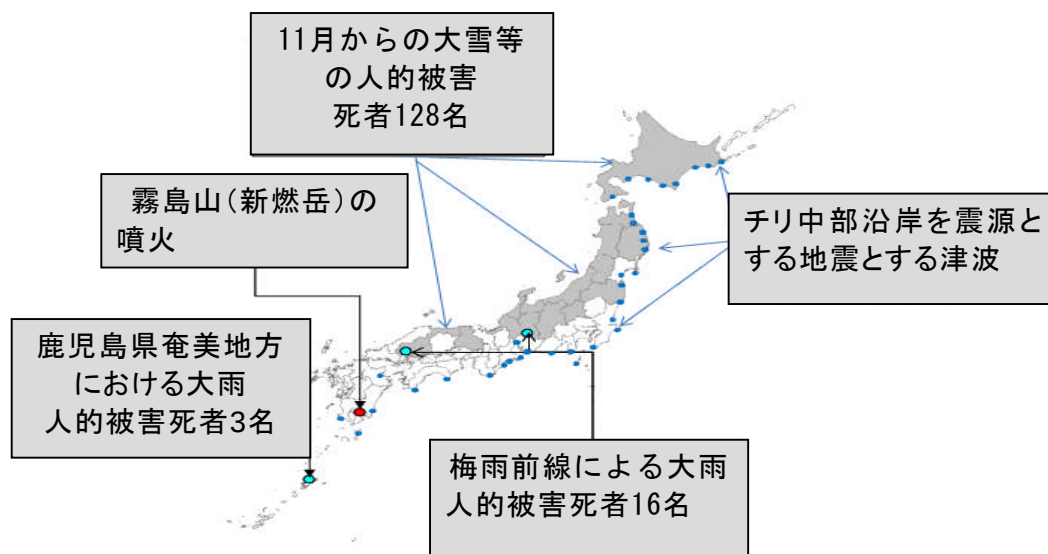


図1.1 平成22年に国内で発生した主な自然災害概況【内閣府資料】

平方キロメートルという広範囲に及んだ。この地震により、場所によっては波高 10m 以上、最大遡高 40.1m にも上る大津波が発生し、東北地方と関東地方の太平洋沿岸部に壊滅的な被害をもたらした。また、大津波以外にも、地震の揺れや液状化現象、地盤沈下、ダムの決壊などによって、北海道南岸から東北を経て東京湾を含む関東南部に至る広大な範囲で被害が発生し、各種ライフラインが寸断された¹⁾。

このような自然災害に対処するために、多数の被害が発生するたびに法制度が整備されてきている。たとえば、1945 年に発生した枕崎台風後、「水防法」が制定された。1946 年の南海地震では「災害救助法」が、1948 年の福井地震では「建築基準法」が制定されている。その後も同様なことが繰り返されている。その後、1959 年に死者 5098 人を出した伊勢湾台風後に「災害対策基本法」が制定されている。この法律は 1961 年に制定され、「災害を未然に防止し、災害が発生した場合における被害の拡大を防ぎ、および災害の復旧を図ることをいう。」と定められている。この法律が日本の今日ある防災体制の基本である。この法律が制定された後は、図 1.2 に示すように、日本の自然災害による災害発生件数と死者数は右肩下がりに推移している。

一方、戦後社会資本整備が闊達となり、1953 年からの「高度成長期」、「安定成長期」と続く 40 年間に建設されたインフラ構造物が多く、その蓄積である道路、河川、港湾、鉄道、橋梁、下水道等のストックが大量に整備された。しかし、その後の経済成長が「低成長期」に入り、公共投資が削減されてきた。その結果、インフラ構造物に対する補修や維持管理に投資する財源が激減し、多くのインフラ構造物に経年劣化の危機が生じている。具体的には、ほとんどのインフラ構造物が高度成長期に集中的に

建設され、現在では、築造後 30～50 年経過しているのが現状である。社会資本整備の現状は、50 年以上経過した道路橋で割合は 2009 年度で約 8%であったものが、その 10 年後の 2019 年度には約 25%、2029 年度には約 51%に増加する²⁾。同様に、河川管理施設（水門等）では 2009 年度に約 11%が 2019 年度には約 25%、2029 年度には約 51%に、港湾岸壁では 2009 年度に約 5%が 2019 年度には約 19%、2029 年度には約 48%に増加する。これらに対して、各施設の長寿命化・老朽化対策の進捗率は、2008 年度では、全国道路橋の長寿命化修繕計画策定率が約 41%、河川管理施設の長寿命化率が約 15%、港湾施設長寿命化計画策定率が約 13%と進んでいないのが現状である³⁾。

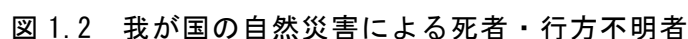
また、2012 年 12 月 2 日に山梨県を通る中央自動車道の笹子トンネルで天井の崩落が発生し死者 9 名がでる事故が起きた。他にも新幹線のトンネル内でのコンクリート塊落下事故、東名高速道路での道路法面の崩壊事故等既設インフラ構造物で大なり小なりの事故が発生している。このような現状では、日常生活や社会活動に重大な影響を及ぼす事故や機能停止が多く発生することは明白である。これらの課題を段階的に解決するため国土交通省は、社会資本整備重点計画を策定し戦略的な維持管理や更新の推進を図ろうとしている。したがって、インフラ構造物を良好に保全・維持管理することが、従来にも増して求められている。以上の自然災害に対する防災と道路・河川・法面等における維持管理に関して従来以上に対策を講じていかなければならない。

この防災と維持管理の分野での課題のほとんどは、地盤状態の変化に関与するものが多く、地盤の工学的状態が常に正しく把握されていないことが原因と考えられる。それが地震時の地盤強度の低下問題や豪雨時の地下水の挙動に関与し、地盤状態を変える因子を正しく把握しなければならないという課題にもつながることになる。このような防災・維持管理を推し進めるためには、地盤調査を実施し地盤構造を正確に把握することが必須である。そして、地盤調査は地盤が人間の生活環境の基礎や自然環境の一部としての役割を最大限に発揮できるための技術的手法であり、その分野・種類は多義にわたっている。また、対象としては、各種構造物の建設や維持管理に関するもののほか、地域開発や環境保全および地盤防災対策にかかわるものがある。調査の目的や内容によって調査の密度・精度が変わるので、効率的に立案することが重要であり国民から求められていることである。

具体的な地盤調査⁴⁾は、地表踏査、原位置試験、ボーリング、物理探査等があるが、対象規模、地域性、精度等を勘案して効率的かつ合理的な方法を選定する必要がある。そして、地下構造を調査する方法としては、直接的な方法としてボーリング地質調査、間接的な方法として物理探査が代表的な調査方法である。

直接法のボーリング地質調査は、地下の地質状況を把握するために普遍的に実施される調査方法で採取されたコアの観察によって地下情報を把握することが主体である。

間接法の物理探査⁵⁾は、目的、対象とする地下構造の規模、確認したい深度、物性などにより物理探査方法が異なる。精度を上げようとするとも規模が大きく、また、許認可を必要とするときがあり必要日数が非常に長くなる。そして、地形が複雑であると間違っ了解釈をする場合や地下構造が複雑な場合は解釈が紛らわしい等の不具合がある。特に、浅い地盤構造を評価したい建設工事等の詳細設計ではあまり利用されなかった時代が長く続いたときがあった。しかし、現在では電子工学を介する測定技術の進歩とパーソナルコンピュータの相互力の高度化により解析精度が向上してきているが、適用分野は限定的であり大規模調査等で利用されるのが一般的である。地盤における防災と維持管理で対策を必要としているのは、道路斜面と河川堤防関係がメインである。いずれも、表層から地下 20～30m 程度の地下情報が求められている。しかし、地盤の状況は、物理特性および力学特性が安定しない領域であり、評価することは非常に困難であるのが現状である。それに対して、最近では、新しい調査技術が出現しているがまだまだ調査手法が確立していないのが現状である。そのため、「簡便」、「スピーディー」、「コンパクト」な物理探査手法の出現が望まれている。



1.2 研究の背景と目的

近年、各地でゲリラ豪雨、地震、洪水、日照り等の異常気象が発生している。これが原因となって、結果として河川堤防等の土木構造物や自然斜面において災害が多々発生している。このような災害のたびに、事前事後を含めて予防保全ができないのかという議論がなされるようになってきている。その結果、災害発生メカニズムについて、多くの技術者が研究し成果も挙げられている。しかし同時に、現地におけるモデル想定が重要な要素になり、精度の高い現地調査、評価が求められている。これに対応して、ボーリング地質調査やトレンチ掘削をはじめとする直接法が解釈をする上で確実な手法であると評価されている。ただし、これらは大規模な調査になり「工程」、「場所確保」、「費用」面において難点がある。間接法として、物理探査が調査方法のひとつとして取り上げられる。また、最近では、建設分野においても非破壊で解釈・評価ができる物理探査を活用し、地下構造を解明し地盤モデルを構築するようになってきている。具体的には、斜面災害の8割程度を占める表層すべりの深度分布、道路陥没箇所の特特定、河川堤防等の土木構造物の土質状況の把握に活用されるようになってきている。しかし、建設分野での物理探査の評価は低い地位にとどまっている。理由は、地下深部の岩盤と異なり表層（0～50m程度）の土質状況のメカニズムは非常に複雑である。これによって、比重、密度、粒度分布、含水比等の物理特性、また、それらが固結した地盤の力学特性、地盤が飽和状態か不飽和状態であるか等さまざまな要因がからんでいるためと考えられる。

以上のような状況を理解しつつ、地盤状況を精度良く調査できる手法の確立が必要となってきている。と同時に、公共投資の削減等もあり調査の簡便性、費用対効果の合理性も問われるようになってきているのが現状である。

本研究は、斜面の表層崩壊をもたらす地層や河川堤防の内部構造を把握できる地下0～30m程度の探査能力を持つ物理探査機の開発をすることに決定し、また、多くの探査手法がある中で電磁探査法に着目した。そして、「簡便」、「スピーディー」、「コンパクト」をコンセプトとした周波数領域電磁探査法⁶⁾（FDEM（Frequency Domain Electromagnetic Method）探査法）に基づく探査機を開発した。開発過程を中心に探査精度・適用範囲を検証する。特に、シミュレーション解析を行い従来実施してきた解析結果の妥当性を検証する。また、キャリブレーションを既存のボーリング等の結果やCPT（電気式静的コーン貫入試験）を活用した複合探査を組み合わせることによる精度向上が見込めるか検証する。そして、現有のFDEM探査機をさらに改良開発し、中心誘導法の理論を用いた同軸コイル型周波数領域電磁探査法（CCEM⁷⁾（Coaxial Coil Frequency Domain Electromagnetic Method）による探査機が、従来のFDEM探査機と比べてどの程度精度アップできたかについても検討する。そして、調査対象分野を「斜面」、「河川」、「トンネル」をターゲットに開発を進めていたが、事例が増える

に従いニーズも多方面にまたがると同時に指向性の高い探査法の要望も増えてきた。
以上のことから、**CCEM** 探査機の性能を確認するとともに **FDEM** 探査機を含めた電
磁法探査について地盤診断技術手法の一つとして確立させたい。

1.3 研究の構成

本論文の構成は、図 1.1 のフローチャートに示されている。まず、列島の特徴と自然災害の発生状況を述べる。そして、戦後は大災害が発生するたびに防災に関わる法整備がなされ、死者・行方不明者は右肩下がりに減少し成果を挙げていることを紹介する。また、1959 年に発生した伊勢湾台風が発生し、その 2 年後に「災害対策基本法」が制定された。この法律は、現在に至るまで防災の基本を成しておりそのスキームを紹介する。次に、4 島で構成されている日本の国土は気象的・地形的に厳しく平野部の少ない中であってインフラ構造物の構築がなされてきた。特に、高度成長期には構築されたインフラ構造物に対する維持管理が遅れている現状を論述する。そして、公共投資が減少する中で、莫大な各インフラ構造物をどのように維持管理し長寿命化するかについて論述する。また、限られた公共投資の中で重要インフラストックを延命化するためにいかに効率良く点検・調査していくかを議論した。膨大な量の点検・調査をするには、効率的合理的な観点から考える必要があることの意義を論述する。現地調査の方法としては、従来からボーリング調査等の直接法で実施しているが点調査の域から面的評価にするためには多大な時間と労力を要していた。これらは解消しなおかつ効率的な調査方法として、間接法である物理探査に視野を広げて検討した。そこで、物理探査に関して論述し、土木分野で利用するのに適すると思われる電磁探査法について述べて特徴と課題を把握する。その中で、筆者は防災や維持管理に効率的に探査できる手法について研究した。その結果、コンセプトとして主に簡便でスピーディーに計測でき地盤構造を可視化できる探査機の開発を目指した。その結果、探査深度、周波数帯域等に関しての研究成果を検証し一定の成果をあげた。多くの成果を挙げた結果を検証する中で新たな課題を抽出し論述した。そして、より指向性の高い探査機が必要なフィールドがあることを認識し、数多くある電磁探査法の中から指向性のある中心誘導法の研究を行い、それにより開発した探査機に関して論述する。また、地盤の診断をする探査機として上記の 2 種類の探査機の適用性と探査実績を検証した。そして、視野の広い土木分野の中でジャンル別に分類するとともに、必要な探査深度、やモニタリングの必要性等のニーズを理解し今後の研究・開発につなげる課題を論述した。

本論文の構成を下記に示す。

第 1 章では、本論文の研究内容と背景について記述した。

第 2 章では、防災と維持管理に関する社会資本整備の現状を整理し、点検・調査の方法を議論する。特に、災害が発生しやすい「斜面」、「河川」での調査方法について整理する。そして、斜面分類の中で「吹付け法面の調査手法」に関して、目視観察と物理探査等を融合させて健全性評価のための調査フローを構築した。「河川」について

は、探査対象と物理探査法の関係において適用性について議論する。

第3章では、地盤調査に関する従来からの手法と物理探査法の概要を述べて、最近利用される地下構造把握のための物理探査法を比較表として説明する。

第4章では、地下数十mまでの地質構造が把握できる探査法として周波数領域電磁探査法を選定しその探査機（セパレート型FDEM探査機）を開発した。その探査法の測定理論と探査機としての概要に関して議論する。

第5章では、第4章で開発したセパレート型探査機で懸念される探査機直下の地質構造を捉えるために指向性を持たせるための議論を行い送受信機が同軸に納まる探査機（CCEM探査機）を開発した。第4章と同様に同軸で開発した探査機の測定理論と概要に関して議論する。

第6章では、開発した探査機による各種地盤への適用性に関して整理した。その中から目的の異なる4例を抽出し各々の適用性に関して議論する。

第7章では、結論と残された課題について整理した。

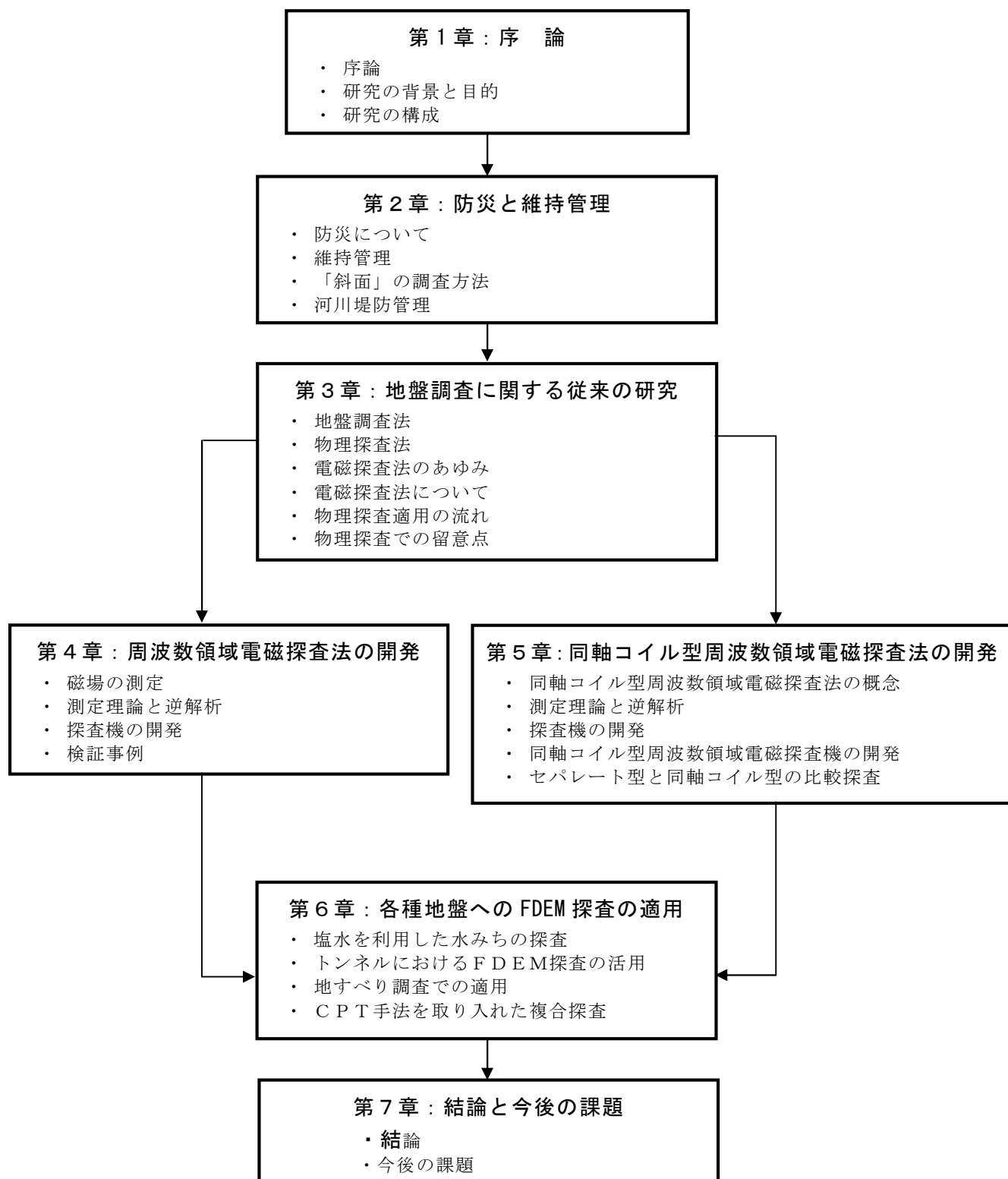


図 1.1 論文の構成フローチャート

参考文献

- 1) 国土交通省；東日本大震災，災害情報，国土交通省
- 2) 国土交通省：社会資本整備関係参考資料，2010
- 3) 防災に関してとった処置の概況 平成 24 年度の防災に関する計画 第 180 回国会（常会）提出資料
- 4) 社団法人地盤工学会：地盤調査法
- 5) 財団法人土木学会関西支部：地盤の可視とその評価法 p2-45～2-47
- 6) 周波数領域電磁探査法の開発と河川堤防調査への適用性，
片山辰雄，小里隆孝，加藤裕将，楠見晴重，松岡俊文，
地盤工学会，地盤工学ジャーナル，第 4 巻，第 4 号，331 頁～340 頁，2009.
- 7) 同軸コイル型電磁探査機の開発とその地すべり調査への適用性，
片山辰雄，渡部高広，小里隆孝，古谷元，末峯章，西垣誠，
日本応用地質学会，応用地質，2013.

第2章 防災と維持管理

2.1 はじめに

近年、地震、津波、ゲリラ豪雨等自然災害が多発しており、防災と維持管理は緊急に取り組むべき課題である。特に構築されたインフラ構造物は耐用年数が叫ばれながらも公共投資の削減と同時に劣化しない永久構造物かのごとく放置されていたのが現状である¹⁾。また、国および地方自治体においても点検・補修のマニュアルの中で形式的に現状を把握しているだけで対策の計画・立案が出来ていないのが実態である。しかし、目視点検により表面上の劣化度合いが確認できるインフラ構造物は、異常個所の特定が出来るので評価可能であるが、表面を被覆された人工構造物背後の健全性に至っては、何らかの方法で確認することが必要である。この章では、戦後の防災・維持管理についての現状把握と筆者が携わり議論を交えた吹付け法面の調査手法²⁾と河川堤防管理³⁾について述べる。

2.2 防災について

2.2.1 戦後の法制度

序論でも述べたように、国土が小さく四方を海に囲まれた日本では、自然災害が発生すると影響範囲が大きく民家・公共施設などの物的および死傷者・行方不明者などの人的な被害をもたらすことが多い。表2.1に、契機となった災害と法整備の関係を示す。

表 2.1 自然災害（戦後の防災法制度・体制の歩み）⁵⁾

年代	契機となった災害	災害対策に係る主な法制度
1945	昭和20年 枕崎台風	「水防法」
1946	昭和21年 南海地震	「災害救助法」
1948	昭和23年 福井地震	「建築基準法」
1959	昭和34年 伊勢湾台風	「災害対策基準法」
1961	昭和36年 豪雪	「豪雪地帯対策特別措置法」
1964	昭和39年 新潟地震	「地震保険に関する法律」
1973	昭和48年 桜島噴火 浅間山噴火	「活動火山周辺領域における避難施設等に関する法律」
1995	平成7年 兵庫県南部地震 (阪神・淡路大震災)	「地震防災対策特別措置法」 「建築物の耐震改修の促進に関する法律」 「災害対策基本法」 一部改正 「大規模地震対策特別措置法」 一部改正 「被災者生活再建支援法」 他
1999	平成11年 JCO臨界事故	「原子力災害対策特別措置法」
2000	平成12年 東海豪雨	「水防法」 一部改正 「特定都市河川浸水被害対策法」
2004	平成16年 新潟・福島豪雨等	「水防法」 一部改正
2011	平成23年 東北地方太平洋沖地震 (東日本大震災)	「津波防災地域づくり法」

表 2.1 で明らかなように、戦後大きな自然災害が発生するたびに法制度が整備されてきている。具体的な 1 例として、1945 年に発生した枕崎台風では、「水防法」が制定された。1946 年の南海地震では、「災害救助法」が、1948 年の福井地震では、「建築基準法」が制定されている。その後、1959 年に死者 5098 人を出した伊勢湾台風では、上記と同様な流れで「災害対策基本法」⁴⁾が制定されている。そして、現在においてもこの法律が日本の防災体制の基本となっている。この法律が制定された後は、日本における自然災害による災害発生件数と死者数は急激な減少傾向を示している。

2.2.2 災害対策基本法⁴⁾について

1959 年に発生した伊勢湾台風で 5000 名を超える多数の死者・行方不明者をだした災害が発生した。この台風災害を教訓として、その 2 年後の 1961 年に「災害対策基本法」が制定された。この法律は、災害を未然に防止し、災害が発生した場合における被害の拡大を防ぎ、および災害の復旧を図ることを主旨として制定されている。

この法律の第 1 条に、法の目的を定めている。

すなわち、「国土ならびに国民の生命、身体および財産を災害から保護するため」に、「防災計画の作成、災害予防」、「災害応急対策」、「災害復旧」など「必要な災害対策の基本を定め」、国や地方公共団体などの間での「責任の所在を明確に」し、財源などの災害対策の基本を決めながら「総合的かつ計画的な防災行政の整備および推進を図る」ことを目的としている。

そして、具体的には以下の 3 点を重要な柱としている。

(1) 防災に関する責務の明確化

災害が起こる前の対応（災害予防）

(2) 総合的防災行政の整備

災害が起きた直後の対応（災害応急対策）

(3) 計画的防災行政の整備

災害からの復旧・復興を図るための対応（災害復旧）

前記項目の要旨を具現化するため、各項目について下記に示す。

(1) 防災に関する責務の明確化（災害の予防）

a) 各公共機関は、各々、防災に関する計画を作成し、それを実施するとともに、相互協力の責務が発生し、住民等についても自発的な防災活動参加等の責務を規定する。そして、災害の発生を未然に防止し、災害の防止を図ることを記している。具体的には、地域での教育、防災会議等の組織の整備、情報発信基地の整備、備蓄（食糧、資機材）等を実施し災害時の対応を明確にする。

(2) 総合的防災行政の整備（災害応急対策）

a) 災害発生または恐れのある場合には、総合的かつ有効に災害応急対策を実施するため、各地方自治体に災害対策本部を設置することとする。

b) 災害が発生した場合の応急的救助を行う。

具体的には、災害対策本部の設置等応急体制の勧告、被害情報の把握・伝達、避難誘導、被災者への救援物資の緊急輸送等を実施する。

(3) 計画的防災行政の整備（災害復旧）

a) 中央防災会議は、防災基本計画を作成し、防災に関する総合的かつ長期的計画を定めるとともに、指定公共機関等が作成する防災業務計画および各地方自治体防災会議等が作成する地域防災計画において重点を置くべき事項を明確にする。

b) 災害により失われた施設等の復旧、生活の建て直し等を行う。

c) 生命の安全確保、二次災害の防止、地域貢献、地域との共生、事業の継続等を計画策定し実施する。

上記以外には、

(4) 災害対策の推進を速やかに行う。

(5) 激甚災害に対処する財政援助等を立案する。

(6) 災害緊急事態に対する措置を速やかに行う。

が定められている。

以上、従来の法律を包括するとともに、防災に関する行政責務の明確化を打ち出したことにより、災害の予防処置、災害発生直後の応急対策、災害後の復旧・復興が速やかに実施されるようになったため、自然災害の発生件数と死者・行方不明者数が急激に減少した。しかしながら、1995年に発生した「阪神・淡路大震災」、2012年に発生した「東日本大震災」では、過去に類を見ない地震であったこともあり死者・行方不明者が多数出現した。この点を考えると今後も災害への事前・事後の対応について更なる法制度の充実が求められる。また、今回の「東日本大震災」の災害の教訓は、限定された地区ではなく、計画・予防・応急対策を含め新たな広域での救済を考えること、情報の共有化をすることおよび、地元住民の参加・参画が重要な位置づけになることが挙げられる。特に、原子力事故も重なり抜本的な法整備がなされる予定である。特に、原子力事故は、放射能汚染が発生することもあり精神的な人的被害も広域であり長期間被災地に立ち入り出来ない可能性があるため国民的議論を行い幅広い国民の理解を得ながら行動することが肝要であると考えられる。

そのため、防災教育の充実が必要であり確実な成果を挙げていくように整備されなければならない。いずれにせよ、「自助・共助・公助」と「参加・連携・大衆」というフレームを融合させ目的を明確に打ち出し情報を共有することが一番大事である。

これらの事象を考えると、災害対策基本法の制定の原点に戻り、図 2.1 に示しているような防災スキームの適正な運用を実施することが重要である。また、今後は、災害では「想定外」と言う言語を使用する場面が無いように、そして、万が一、「想定外」といわれる災害が発生したとしても、今後はそれに耐えうる厚みのある法整備が望まれる。

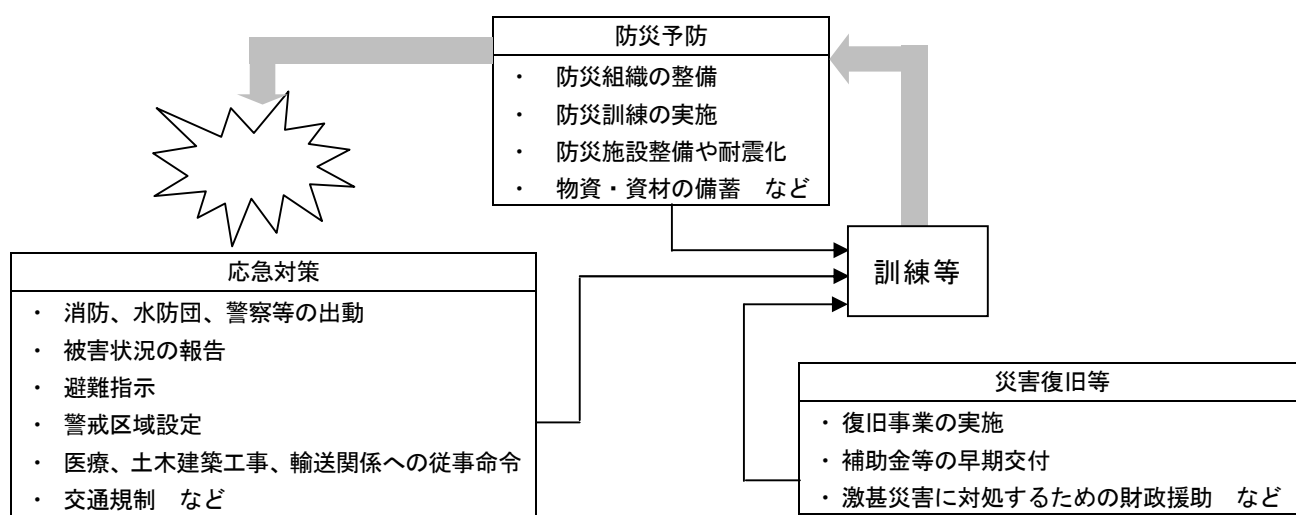


図 2.1 防災のスキーム ⁵⁾

2.3 維持管理

2.3.1 社会資本整備⁶⁾の現状

わが国では、高度経済成長期に建設されたインフラ構造物が多く、その蓄積である道路、河川、橋梁、下水道等のストックが膨大となるなか、公共投資削減という制約の下で、多くの構造物に経年劣化の危機が生じている。

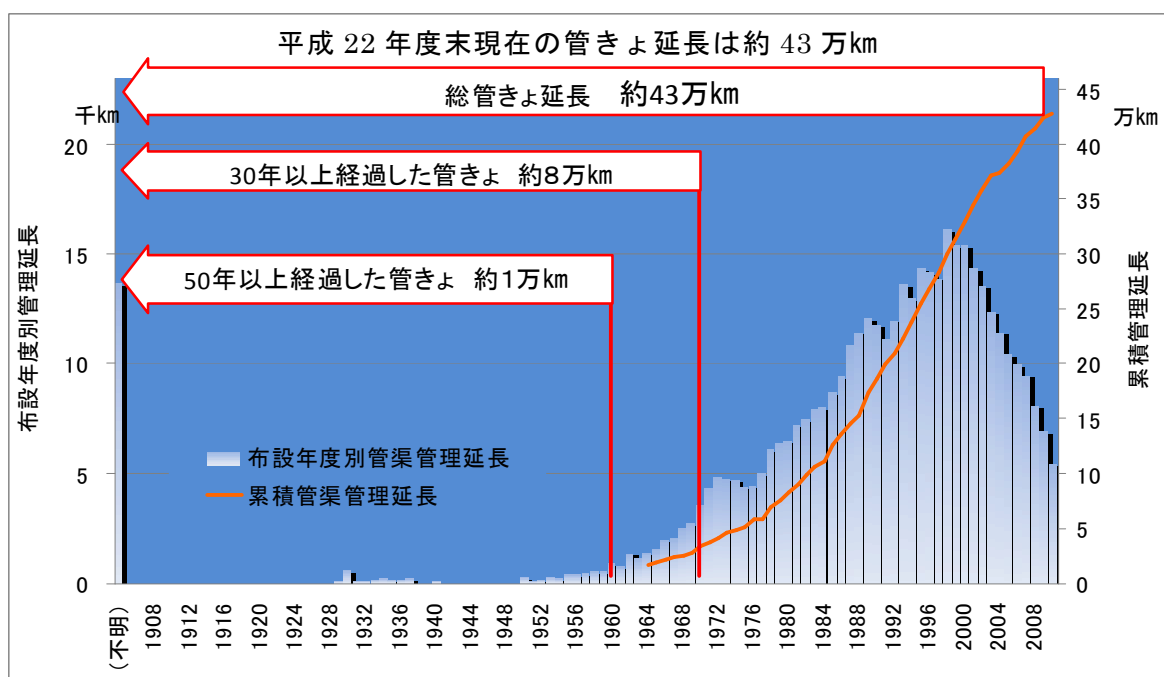
したがって、これらを良好なインフラ構造物にするため、適切な保全・維持管理することが従来にも増して求められている。

以下に、代表例として、下水道施設に関する現状把握を行った。

2.3.2 下水道施設の事例

社会資本には、道路、河川を初め多くのインフラ構造物が存在する。ここでは、そのひとつである下水道に関して整理する。他のインフラ構造物に関してもほぼ同様な事象であると考える。

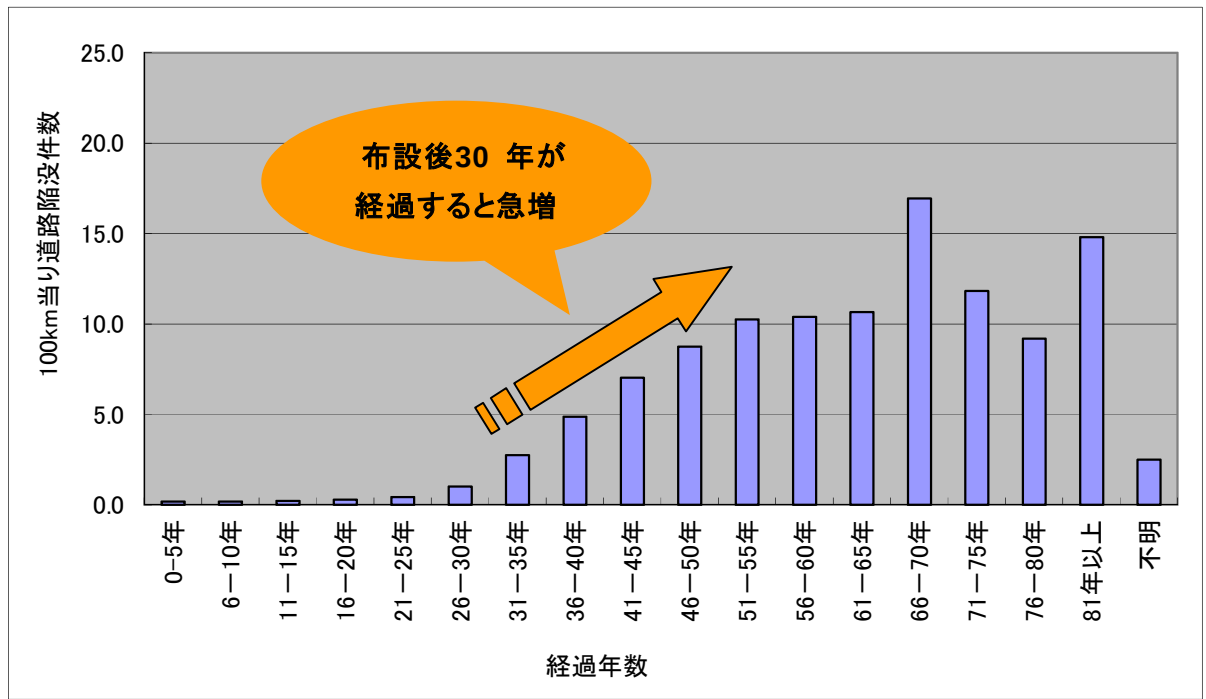
下水道管きょは、明治以降に住居とともに整備されてきた重要な施設である。平成22年度末における全国下水道管きょ延長は43万kmを超えており今後も増えることが見込まれている。図2.2に1908年以降の全国で布設された下水道管きょの年度別延長と累積管きょの延長距離を示す。この図から明らかのように、特に高度成長期には年度の管きょ延長も著しい事、30年以上経過した管きょが約8万km、50年以上経過した管きょが約1万km、50年以上経過した管きょが約8万km、50年以上経過した管きょが約1万km



出典：国土交通省

図 2.2 下水道管きょの年度別延長（全国）⁷⁾ を加筆

過した管きょが 1 万 km に達することが判明した。また、図 2.3 には、下水道管きょが原因で道路陥没した件数と布設の経過年数との関係を示す。図から明らかなように布設後 30 年経過すると陥没が一気に増加することが明確に判断できる。



経過年数別管路延長 100km 当り陥没件数 (H18～H21) 出典：国土交通省

図 2.3 経過年数別道路陥没件数⁷⁾

2.3.3 社会資本整備の現状

下水道施設の老朽化は、ひとつの事例に過ぎず他のインフラ構造物も同様に老朽化は進行している。表 2.2 に建設後 50 年以上経過した社会資本の割合を示す。2009 年当時と比較すると下水道管きょで 3 % と経過年数の割合では低く、港湾岸壁、道路橋、と続き河川管理施設にいたっては 10%を超えている。これから 16 年後の 2029 年にはほとんどのインフラ施設が 50%近い状態になっていくことが判明した。それに比べて長寿命化・老朽化対策の進捗率が低迷していることが歴然と示されている（表 2.3）。海岸保全施設の老朽化対策は 50%に達しているが、道路橋で 40%、河川管理施設や港湾施設で 10 数%にとどまり下水道に至っては、4%程度である。これは、「高度成長期」に建設したインフラ構造物の経過年数が 30 年に差し掛かるか越えている状態であるのと同時に、公共投資縮減の中で補修・修繕に予算が回らないために発生していると考ええる。また、国民生活に直結している住居に関する法面の急傾斜地崩壊危険箇所と整備箇所の推移を図 2.4 に示す。崩壊危険箇所は増加傾向にあり平成 14 年

現在で 11 万箇所を超え今後も増加する傾向であるが整備箇所数はそれに対応できず 20%弱の 2 万箇所に過ぎない。公共投資が急激に増加しない現状から考えると非常に危険な状態である。

表 2.2 建設後 50 年以上経過する社会資本の割合⁸⁾

	2009 年度	2019 年度	2029 年度
道路橋	約 8 %	約 25 %	約 51 %
河川管理施設（水門等）	約 11 %	約 25 %	約 51 %
下水道管きょ	約 3 %	約 7 %	約 22 %
港湾岸壁	約 5 %	約 19 %	約 48 %

表 2.3 施設ごとの長寿命化・老朽化対策の進捗率⁸⁾

全国道路橋の長寿命化修繕計画策定率(2008 年度)	約 41 %
下水道施設の長寿命化計画策定率（2008 年度）	約 4 %
河川管理施設の長寿命化率（2008 年度）	約 15 %
港湾施設長寿命化計画策定率（2008 年度）	約 13 %
老朽化対策が実施されている海岸保全施設の割合（2008 年度）	約 51 %

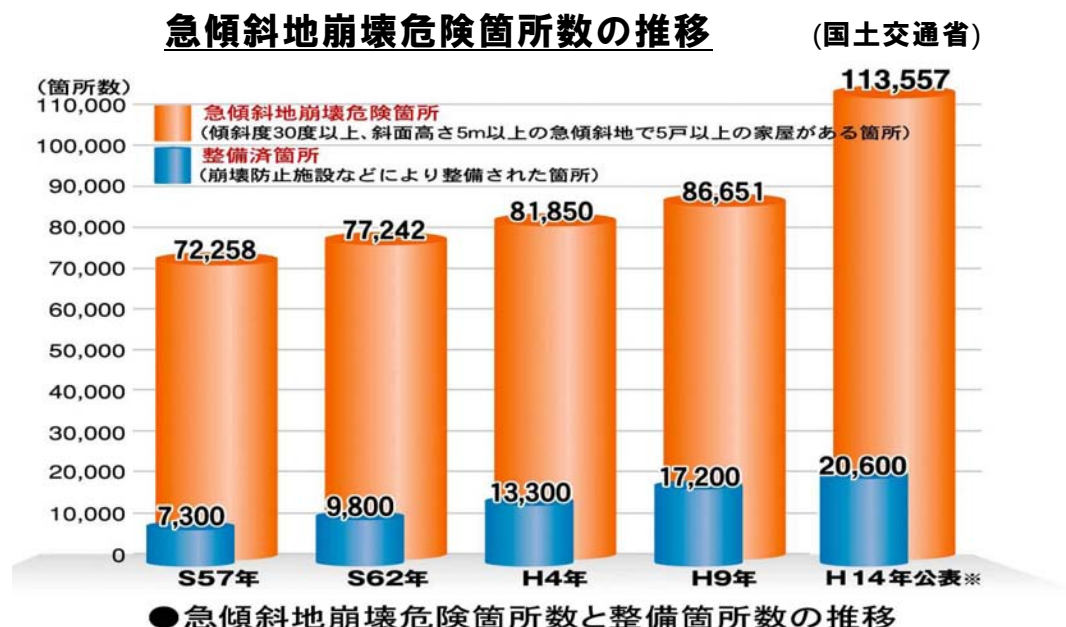
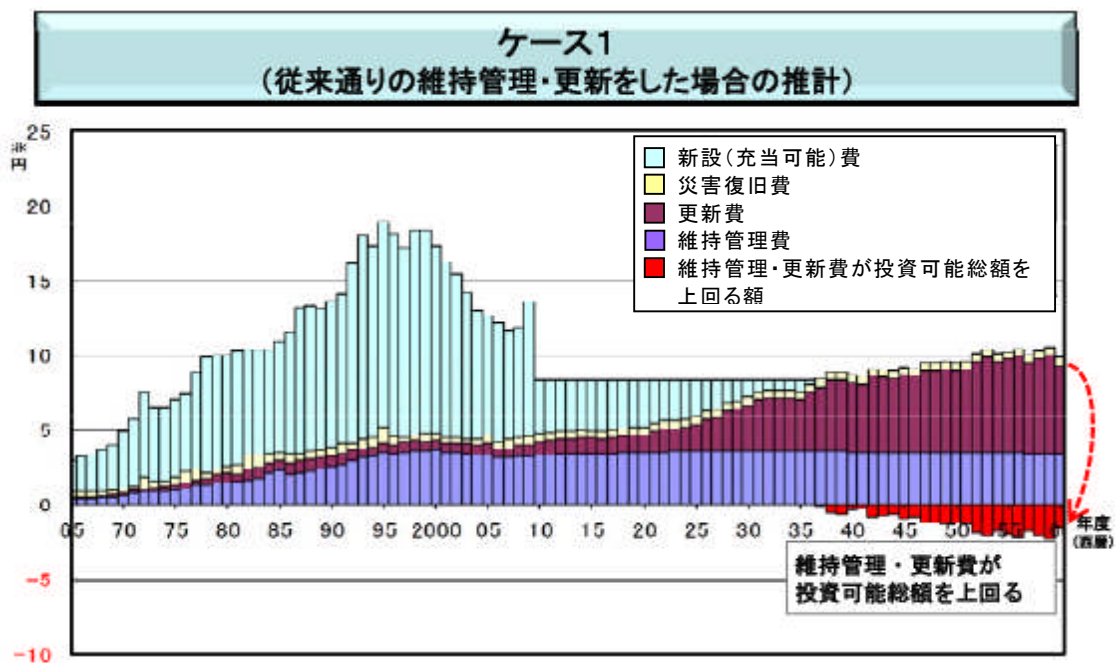


図 2.4 急斜面地崩壊危険箇所数の推移⁹⁾

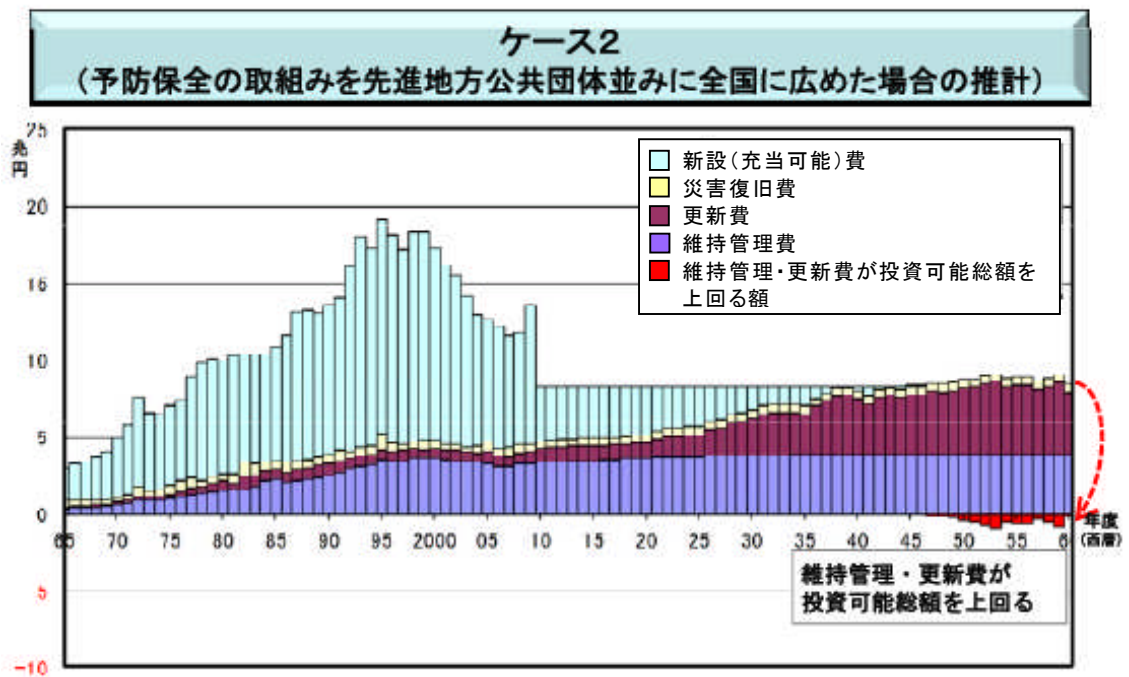
2.3.4 計画的な改築の推進¹⁰⁾

国土交通省は、社会資本8分野（道路、港湾、空港、公共賃貸住宅、下水道、都市公園、治水、海岸）を対象に、今後の維持管理・更新費を推計している。図2.5および図2.6は、平成21年に国土交通省が今後の維持管理を従来どおりに実施した場合と予防保全の取り組みを先進的に取り込んだ自治体並みに考慮した場合を試算した維持管理・更新費の推計を示す。図2.5は、従来通りの維持管理・更新をした場合で維持管理・更新費が投資可能総額を上回る年度は2037年で今から24年後と試算されている。また、2060年までの間に更新できないストック量は必要と試算されている更新費190兆円のうち30兆円に及ぶとしている。図2.6は、予防保全の取り組みを先進地方公共団体並みに全国に広めた場合は、維持管理・更新費が投資可能総額を上回る年度は2047年で今から34年後と試算されている。また、2060年までの間に更新できないストック量は必要と試算されている更新費190兆円のうち6兆円と試算している。以上のことから、計画的に長寿命化対策を実施すれば公共投資総額はかなり削減できることが理解できる。以上のことから、計画的な改築の推進をすることが健全な社会資本を生み出すことになる重要な施策である。また、人口等の長期変動を加味しながら、日常生活や社会活動に重大な影響を及ぼす事故発生や機能停止を未然に防止することが必要である。



出典：国土交通省

図2.5 従来とおりの維持管理・更新費の推計



出典：国土交通省

図 2.6 予防保全の取組を先進地方公共団体並みに全国に広めた推計

そのためには、ライフサイクルコストの最小化、予算の最適化の観点も踏まえ、予防保全を行うとともに長寿命化対策を含めた計画的な改築を促進する必要がある。図 2.7 は、予防保全の取組みを確実に進めればインフラ構造物の長寿命化につながり公共投資削減効果も確実に認められることがわかる。そのため、各インフラ構造物の健全度を的確に把握することが重要であり、そのため効率的合理的な調査が必要である。

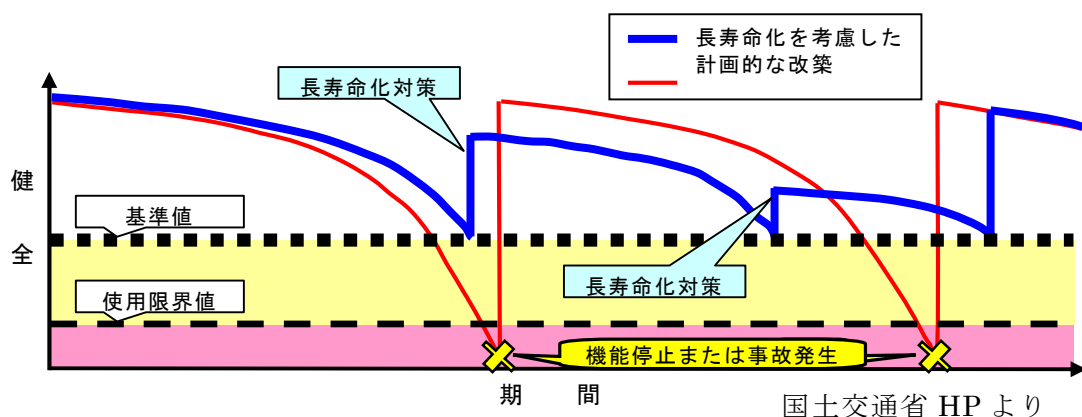


図 2.7 長寿命化対策を含めた計画的な改築の推進⁷⁾

2.4 「斜面」の調査方法

2.4.1 吹付け法面の調査手法

我が国の道路は、地形に支配的であるため山岳地域を中心に構築され、高度成長期には、道路斜面の保護対策としてモルタル吹付けによる斜面保護が多く採用されている。

斜面は自然斜面と人工斜面に分類されるが、その中の人工斜面は、さらに盛土法面と切土法面に分けられる。切土法面の場合は表面保護対策工として吹付けコンクリートやモルタル吹付けなどで保護される場合が多い。そのため、吹付け法面の健全性を評価することを目的にした調査の場合、表面から目視観察や現地調査で評価できる調査手法とは違う要素が加わることになる。すなわち、切土法面が吹付けモルタルなどで保護されているということから、吹付けモルタルと背後地山との合成構造物として捉えなければならないこと、また、防災点検や維持管理の調査においては吹付けモルタルがあるために、背後の地山を直接的に観察することができない等のリスクを考えて調査手段を選ぶ必要がある。したがって、健全性を評価するための必要な調査内容や目的などもこの点を考慮して計画しなければならない。

2.4.2 点検・調査項目と目的

維持管理における現状の点検調査については、維持管理における定期巡回（構造物点検）と定期点検（防災点検）の記録（防災カルテなど）などが整備されており、それらは現場の正確な情報であり調査手法を決める場合の基礎的、かつ重要なデータである。現状の点検作業で実施されている調査内容を表 2.4 に示す。点検・調査事項は、遠望視点検、近接目視点検の直感的な表面的事象を捉え、次に打音調査・コンクリートハンマーテストにより劣化箇所を限定する。次に、異常箇所（全体の傾向と異なる）に関しては、コア抜き調査を実施して直接的にモルタル吹付け裏面の状況を把握するとともにコア強度試験を実施してコアを含む全体の健全度評価を行う。斜面全体が非常に広い面積を有し、打音調査・コンクリートハンマーテスト等多大な時間と費用を要する場合は、時間差による温度差分布から判定できる遠赤外線映像調査を主に実施する。変位を伴う場合は、写真測量や光ファイバ計測等による変位計測を行う。また、モルタル吹付け裏面の地山の流動による空洞、地山の風化度を把握するためには、物理探査手法として、空洞調査には地下レーダ探査を、地山風化度を把握するためには弾性波探査等の時間と費用が掛かる大掛かりな調査も実施されることがある。ただし、これらは常時実施されているわけではなく、対象物の規模や変状度合い等の斜面の重要度により適宜選択して実施される手法の一つである。

表 2.4 現状の点検・調査事項と目的・対象²⁾

点検・調査事項	目的・対象
遠望視点検	法面全体を概略的に把握する。
近接目視点検	法面の表面変状を把握するため点検対象の吹付け法面に立ち入り調査する。写真やスケッチで記録する。上方も同様の点検をする。
打音調査	吹付け材と背面との密着不良や空洞化の状況を推定する。吹付け材をハンマーで打撃し音感から推定する。
コンクリートハンマーテスト	吹付け材強度を把握する。広範囲に実施し脆弱化している範囲を把握する。
穿孔・コア抜き調査	空洞化していると思われる箇所などについてコア抜きし、吹付け材の厚みや地山状況をスコープなどで観察する。コアの強度試験や中性化試験なども実施する。
熱赤外線映像調査	吹付け材背面の空洞化している箇所を把握する。早朝と午後の2回の撮影から温度差分布を解析する。
写真測量・光ファイバ計測	3D写真のデジタル情報から法面の形状を記録する。光ファイバにより2点間の変位量を記録する。
弾性波探査	背面地山の風化程度を把握する。
地中レーダ探査	背面の空洞化状態を把握する。

これらの点検・調査結果は、吹付け法面の変状タイプと状態評価として利用され対策工の検討が行われる。しかし、表面に吹付け材があるために見えない背面状況や脆弱化した地山の範囲や深さなどは直接的なボーリング・物理探査などによらなければ確認できない。したがって、現状の目視による点検・調査内容のみでは、図 2.9 に示す法面崩落の分類のうち中規模ないし大規模崩落の推定は正確にできない。むしろ、ボーリング調査を多く実施することにより詳細な法面安定性を評価できるが、安全面を含めてコストが多大になり予算化は困難が予想される。そのため、現状では、目視点検の域を出ず放置されているのが現状である。

(1) 法面崩壊規模の分類

法面崩壊は、様々の形態があると考えられるが基本的な斜面崩壊の概念である発生条件を図 2.8 に示す。一般的な自然斜面においては、図 2.9 のように a) 小規模な表層崩壊、b) 中規模な斜面崩壊、c) 大規模な斜面崩壊、のように崩壊規模による分類が可能である。当初のテーマである吹付け法面では表面だけでの変状では内部変状の把握が出来ないため、対策が違ってくる可能性がある。この規模は調査の対象深度を決める要素になるが、そのためには防災点検時の記録や事前の地質調査などの情報が必要となる。

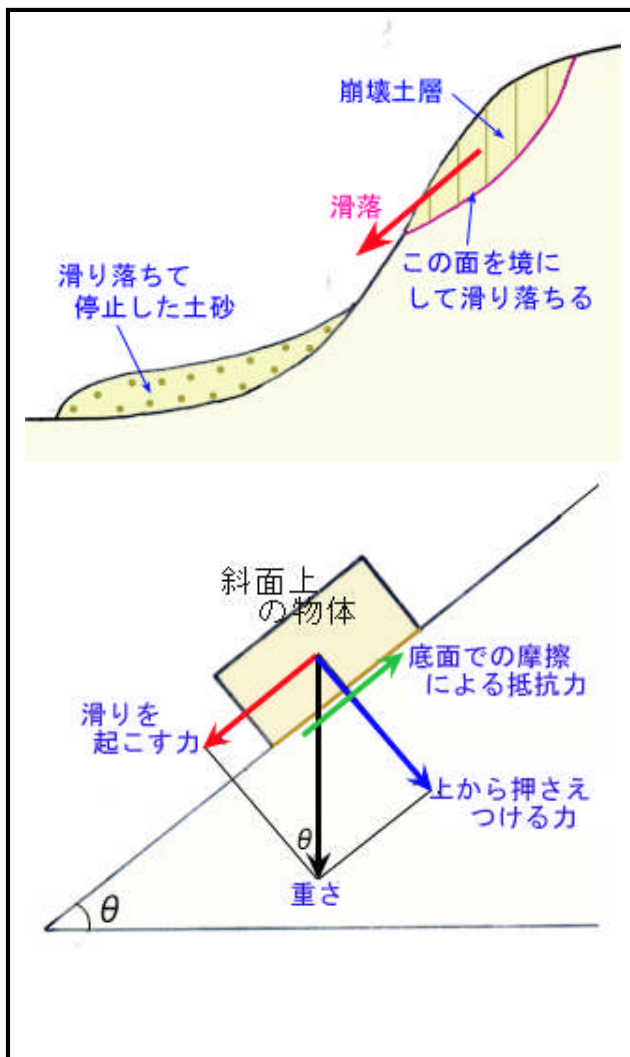


図 2.8 斜面崩壊の発生条件¹⁾

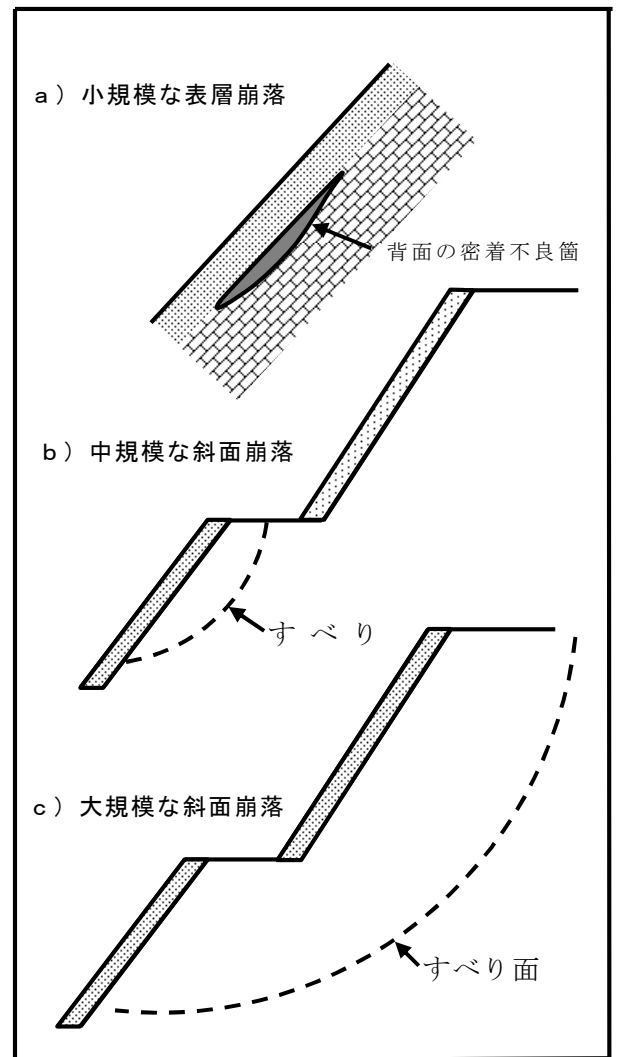


図 2.9 崩壊規模の分類²⁾

以下に、図 2.9 に示した具体的なタイプの説明を加える。

a) 小規模な表層崩落：

吹付け材と背面地山との密着不良などにより、主に表層が崩落するものとする。

b) 中規模な斜面崩落：

背面地山の風化や土砂化により表層と地山の浅い部分が崩落するものとする。

c) 大規模な斜面崩落：

背面地山の地すべりなどによる大規模な崩落を伴うものとする。

2.4.3 評価のための調査手法

前節で述べたように、法面の維持管理は、国土交通省では道路巡回または道路防災点検（防災カルテ）により行われ、点検した法面の安定度調査表を作成し評点を付ける。各現状の基本的な流れを図 2.10 に示すが、自治体関係もほぼ同様の調査フローを基本に構築されているようである。

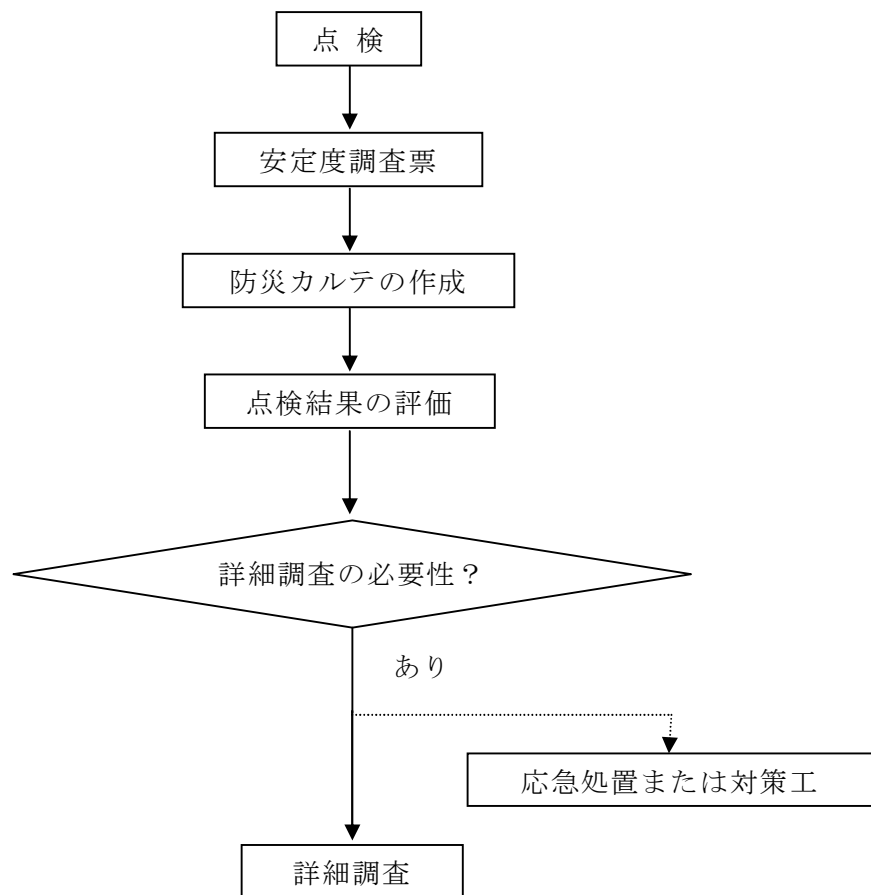


図 2.10 調査フローの基本²⁾

図 2.11 に示すように、各段階で、地表調査、遠赤外線映像、打音調査、崩壊規模による物理探査法の選定、調査範囲、測点設定や測線設定の計画、吹付け材の劣化度試験、確認ボーリングを実施する。その後は、計測による変状調査を中心とした維持管理を進める。

2.4.4 探査手法の選定

吹付けモルタル法面の調査には、目視観察が主であるが物理探査を適用することで、法面背面の、

- (1) 空洞の分布
- (2) 地山の風化や緩み分布
- (3) 地下水や含水量分布

などを推定できる可能性が高い。

ただし、それぞれ適用上の制約があるため、探査手法を選択する場合は、吹付けモルタル法面の構造と探査手法の特性を十分把握しておく必要がある。また、法面は 45°前後の急傾斜となっていることが多いため、安全面や実施上の手間を考慮する必要がある。

しかし、吹付け法面の健全性を調査するには探査法を熟知しなければ誤った結果を出す場合があるので十分に留意慰する必要がある。具体的には、熱赤外線探査では、吹付け厚が 20cm 程度より薄い場合に適応できるが、それよりも厚い場合は、温度変化が明確にならないため適応できない可能性もある。打音探査も、吹付け厚さが厚くなると、エネルギー伝播が減衰し背面空洞が捉えにくくなる。また、屈折法弾性波探査は下位層ほど速度が高くなることが前提であるため、表層にモルタルの影響を受けないように、これを削孔して受振点を設置する必要がある。また、起振点についても同様に、モルタルを削孔して、十分に地山と認識できる表層より深い地点で起振することが求められる。反射法探査でも、信頼性の高いデータを得るためには、モルタルに削孔して、受振器を地山に設置することが望まれる。また、風化や緩み域は数 m と薄いことが多いことから、浅層反射法探査の分解能は十分でないことが懸念される。表面波探査は、吹付けモルタルが薄い場合はモルタル上から探査が可能であるが、吹付けが厚くなると探査精度が低下する。また、吹付け背面が空洞の箇所では、探査精度が劣化する。

吹付けモルタル法面では、多くの場合、ラス網が敷設されている。このラス網により電気探査（高密度電気探査、自然電位法探査を含む）、電磁法探査（地中レーダ探査、EM法探査、V L F 法探査を含む）では、S/N 比が低下し、得られた物理量の絶対値や深度方向の測定精度などが低下すると考えられるが、相対的な比抵抗変化などを探査することはできる。ラス網を含む厚さ 15cm 程度未満の一般的な吹付けモルタル法面を対象とした場合、背面空洞を把握する手法として、一般的に用いられている熱赤外線探査と打音探査が有効といえる。地山の緩みや風化域を把握するための手法としては、屈折法探査と表面波探査が有効と考えられる。ただし、屈折法探査では、吹付けモ

ルタルの影響を受けないように削孔する等の工夫が必要であり、表面波探査では背面空洞がある区間では、受振器をモルタル上に置くのではなく、削孔して地山に設置することが望ましい。地山の地質構造を概査する手法として、FDEM 探査が活用できる可能性がある。

地下水を含めた漏水を対象とした手法は、ラス網の影響を受けないことと、作業効率の面から、熱赤外線探査が他の方法に比べて優位と思われる。

吹付けモルタル法面は 45° 程度の急傾斜地となっているため、斜面での測定には危険が伴う。弾性波探査や表面波探査、高密度電気探査など、斜面に機器を設置する必要のある探査は、作業性の面から小段上や小段から手の届く範囲の斜面に測線を設置することが現実的であり、探査可能場所が限られる。何れにしても、熱赤外線探査以外の探査は、急斜面上での作業が伴うために、安全に作業を行うための仮設が必要で、作業効率が低いことを念頭において計画を立案する必要がある。

以下に複合技術による斜面の健全性評価をするための探査事例と今後の提案を紹介する。

最近、モルタル吹付け斜面の健全性を評価する手法には、目視点検以外のものとして熱赤外線映像法が一般化されつつある¹²⁾。熱赤外線映像法は表面温度分布を映像化することで対象モルタル吹付け斜面の表層近傍の変状や劣化性を推定する非破壊技術である。したがって、表面から深度方向の情報については不明なため、健全性評価には目視点検や斜面周辺の踏査結果をもとに総合的に判断する必要がある。

モルタル吹付け斜面の健全性を評価し対策を考えるためには、モルタル裏面の地盤状況を十分に把握する必要がある。施工時には健全であったモルタル裏面の地盤が経年劣化や風化および雨水浸透などにより脆弱部に沿ったすべり面を構成することで斜面崩壊を引き起こす場合がある。事前にこれらを把握するためには深度方向のデータ取得が必要不可欠である。また、設計・計画では安定計算を実施するため密度、粘着力、摩擦係数の物理定数はもちろんのこと、モデル作成時の各地層の厚さが重要である。

モルタル裏面の脆弱化の状況を把握するためには、モルタル表面から深さ 10～20 m の地盤情報が得られる深査技術が要求される。適用可能な探査方法としては、表面波探査、弾性波探査、高密度電気探査、FDEM 探査、自然電位探査などの物理探査があるが、労力と時間が掛かるため実際に利用されるのは、本当に地盤情報が無く重要な使命を持ったインフラ構造物でしか採用されないのが現実である。今後は、目的によって使い分ける必要があるものの客観的評価として積極的に採用されることを望んでいる。

最近の動向として、従来の物理探査¹³⁾をより簡便に精度良くするため新しい試みがなされている。

具体的には、

- ① 二次元探査から三次元探査に移行することにより精度を向上させる。
- ② 弾性波探査において、火薬の発破にかわる震源の開発により探査を簡便にする。
- ③ 急峻な斜面でターゲットを設置せずに測定できる写真測量の開発により安全なデータ取得を可能にする。
- ④ 斜面内部にトレーサーを注入し、トレーサーの挙動から亀裂の連続性、空洞の有無を推定する¹⁴⁾。

などの試みがなされている。

また、非破壊探査機器によって面的に評価する技術も多く開発され利用されつつある。3D測量を始めリモコン飛行機からの写真測量、ターゲットによる写真測量¹⁵⁾、ランドサット撮影による経時変化（沈下、移動）の測定¹⁶⁾、光ファイバーを利用した表面変位の測定¹⁷⁾など多種多様である。

色々な検討を実施した結果、1法面を総合的に評価するための計画・設計から調査・評価するに至る調査フローを図2.12に示す。

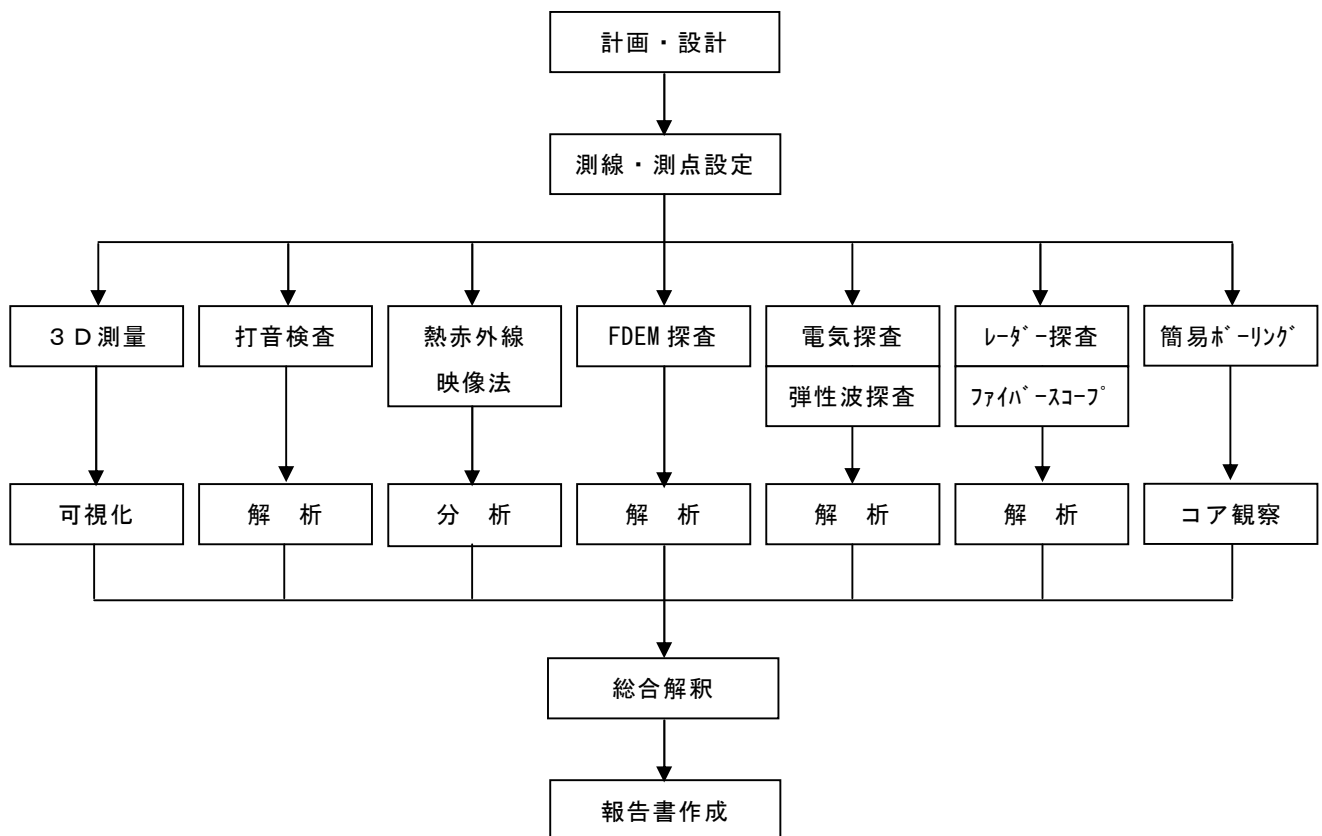


図 2.12 斜面健全性評価の調査フロー図¹⁷⁾

2.5 河川堤防管理

河川流域の施設は、施設整備が完了した段階から維持管理の対象物となる。一般的な河川堤防の形状概念図を図2.13に示す。基本的には、洪水等が発生した場合で堤防が決壊して河川から水が流れ出ないように設計しなければならない。河川流域は、都市部、農村部、山間部と多様な地域と平野部、山地部の多様な地形から成り立っており、降雨等の自然現象や人為的な改変等によって、恒常的に変化している。このため、定期的、あるいは出水後等の不定期に点検調査を実施し、ある一定の状態になったときに詳細な点検と必要な対策を行うことで河川を一定の水準に維持することができている。近年、平成16年度や平成20年8月の水害発生に見られるような施設能力を超える自然の外力の発生を受け、維持管理の重要性が認識され、維持管理についての指針や基準類の整備、「安全・安心が持続可能な河川管理のあり方について（提言）」が示され、維持管理のあり方についての議論が活発になっている。

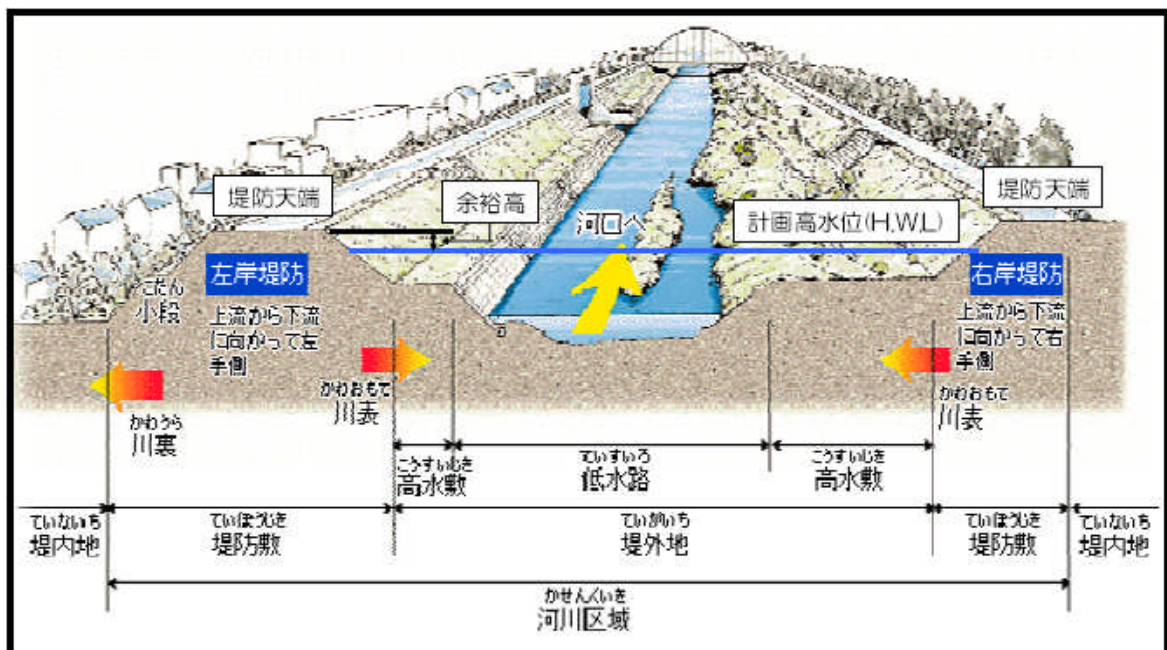


図2.13 堤防の形状概念図¹⁸⁾

2.5.1 各種指針の流れ

河川堤防設計指針では、整備から維持管理，モニタリングの情報をデータベース化することで施設の特性や履歴を管理し、信頼性の維持向上を図ることが重要であるとされている。そこで、最近の主なものを挙げると次のようなものがある。

- (1) 審議会等における提言
 - a) 平成18年7月 「安全・安心が持続可能な河川管理のあり方について」(提言)
 - (2) 持続性や老朽化に関する指摘
 - a) 平成23年11月 「行政刷新会議提言型施策仕分け：中長期的な公共事業のあり方」
 - b) 平成24年2月 「社会資本の維持管理及び更新に関する行政評価・監視結果に基づく勧告(総務省)」
 - c) 平成24年7月 社会資本整備審議会計画部会「社会資本整備重点計画(案)」
- これらをまとめて次のように課題例が指摘されている。

《提言や指定等》	《河川の管理における課題例》
厳しい予算状況	○大河川及び中小河川の維持管理水準のあり方
既存ストックの老朽化対応	○長寿命化対策
持続的な安全の確保	○河川維持管理技術の蓄積と継承
	○河川環境保全等における市民団体等との連携
	○資源としての河川を活用した民間の参画

図 2.14 社会資本整備重点計画(案)

図2.14は、社会資本整備重点計画(案)であるが、やはり、本研究に最も関与することは「河川維持管理技術の蓄積と継承」であると考えられる。そこで、ここでは平成18年7月から平成24年7月までの提言や指摘事項の中から維持管理技術についての課題を取り上げるものとした。

- (1) 平成18年7月
 - a) 維持管理の結果を評価・公表し、次年度に反映する「サイクル型維持管理体系」の構築
 - b) 河川維持管理の計画策定のための技術基準である「維持管理基準」を整備
- (2) 平成24年2月
 - a) 河川現況台帳の整備
 - b) 河川管理施設の必要な点検・補修等を一層的確に実施
 - c) 河川管理施設の長寿命化対策の推進
 - d) 河川管理者の管理責任及び説明責任を明確化
- (3) 平成24年7月
 - a) 定期的な巡視・点検等による施設状態の的確な把握

- b) 超寿命化計画の策定及びその計画的な実施
- c) 維持管理・更新の効率化を図る技術開発の推進
- d) 施設の点検、診断、補修に係る人材育成や担い手の確保・育成の推進

以上を概観して本研究の物理探査に着目すると次の提言・指摘がテーマのひとつになる。

- (4) 維持管理技術の蓄積と化粧の技術開発
- (5) 維持管理施設の点検技術の開発
- (6) 河川堤防の巡視頻度と点検技術のあり方

管理施設や堤防の点検に、地中レーダや打音探査などがすでに利用されているが必ずしも的確ではなくきちんとしたマニュアル化がなされていないのが現状である。特に、一級河川の堤防点検については、数百メートルに一本くらいの割合でボーリング調査を行い、ボーリング地点間の土質特性は同じであるとは見做して洪水時の浸透破壊に脆弱な箇所を抽出して解析し対策を検討するという方法が常態化している。そのため、堤防の維持管理のため堤防材料および状態がどのように成立しているかを正確には把握する必要がある。

堤防の構造については、河川管理施設等構造令²⁰⁾によれば、堤防は土で作ることが原則とされている。

『土堤とする理由』は、以下の８とおりが主である。

- ① 工事の費用が比較的低廉
- ② 材料の取得が容易
- ③ 構造物としての劣化現象が起きにくい
- ④ 長大構造物であり不同沈下が起きやすいが修復が容易
- ⑤ 基礎地盤と一体としてなじむ
- ⑥ 嵩上げ・拡幅等が容易
- ⑦ 地震時において被災した場合の復旧が容易
- ⑧ 豊かな自然環境を有し、地域の中においても良好な生活環境の形成に重要な役割を担う

以上のことから、各物理探査の特徴を理解しながら適切な手法を選択すれば精度の高い地盤状況を把握することが出来る。

2.5.2 維持管理と物理探査法の種類と内容

近年のゲリラ豪雨災害は、従来からの統計で出されている報告書から考えると想定している降雨強度をはるかに越えた降雨により発生している場合が多く、多大な被害をもたらしているのが現状である。特に河川堤防においては、洪水時の破堤問題であると思われる。これは洪水時の堤防の浸透性の評価になり、堤体材料や透水性の把握と脆弱な区間の把握が主体となってくる。また、堤防内の亀裂や空洞の把握も重要である。

河川における維持管理は、水源から河口に至る広範囲に及ぶとともに治水、利水はもとより市民広場等におけるレクリエーションの場でもあり、違う観点からは景観や自然環境保全の機能も有している。

河川における維持管理は、
堤防、施設、河道、流水を対象として、

- (1) 調査、点検・巡視、モニタリング
 - (2) 維持修繕
 - (3) 施設更新および施設運用
- を、実施する。

上記をもとに、一般的な河川堤防等での調査の流れを図 2.15 に示す。
予備調査から始まり第 1 次調査（ボーリング調査、サウンディング調査）で地盤構成を求め、第 2 次調査（軟弱地盤調査または透水性調査を主とした調査）で力学特性・水理特性を把握し、最後に安全性照査の調査とステップアップして設計・対策の基礎資料とする。

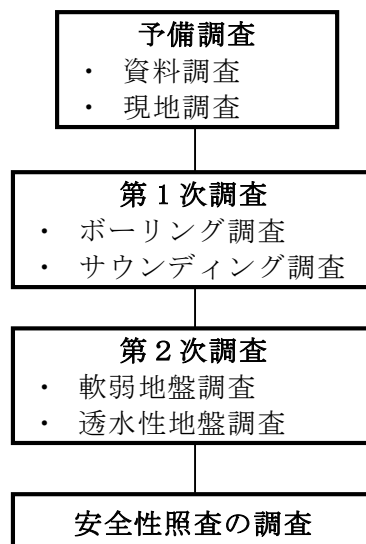


図 2.15 一般的な調査の流れ²¹⁾

河川堤防を築造する場合に問題となる地盤は軟弱地盤と透水性地盤の2つの地盤である。

軟弱地盤上に堤防を築造する際に、築造時に基礎地盤にすべり破壊が発生したり、堤防の自重によって圧密沈下が生じたりする場合がある。したがって、軟弱地盤上に堤防を築造する場合は、事前に軟弱地盤の土質、深さ方向の強度変化、層厚、広がりなどについて調査を行う必要がある。

透水性地盤に堤防を築造した場合には、洪水時の河川水位上昇によって透水性地盤を通じて堤内地の水位が上昇や湧水によって堤内地に悪影響を及ぼすことがあるので、それらが把握できる必要な調査を行う。

河川堤防は、盛土構造が大部分を占めるが、これを補強する張りブロックや用排水樋門なども設けられている。従来の調査法としてはボーリング調査が主体であるが、対象が長い堤防のため実施されるボーリングは費用の面からポイント的な調査にとどまっているのが実情である。したがって、ボーリング地点間の地質や土質が一様で変

表 2.5 河川堤防における物理探査法²²⁾

探査法	物理探査法	測定物理量	探査対象	適用性
弾性波探査	屈折法	P波（S波）初動到達時間	地盤構造、物性	○
	反射法	P波時系列データ	地盤構造、物性	○
	浅層反射法	P波（S波）時系列データ	地盤構造、物性	◎
	表面波探査	S波速度分布	浸透域抽出・脆弱部	◎
電気探査	比抵抗法（水平、垂直）	見掛け比抵抗	地盤構造、地下水	○
	二次元比抵抗探査	比抵抗分布	脆弱部・地層判別	◎
	三次元比抵抗探査		地盤構造、地下水	*
	IP法（強制分極法）		地盤構造、地下水	○
電磁探査	FDEM探査	見掛け比抵抗	地盤構造、地下水	◎
	地中レーダ	電磁波反射映像	地下水面・亀裂・空洞	○
	連続波レーダ	電磁波時系列データ	地盤構造、空洞性状	◎
トモグラフィ	弾性波	弾性波速度、減衰率	地盤構造、空洞性状	○
	比抵抗	見掛け比抵抗	地盤構造、空洞性状	○
	電磁波	電磁波速度、減衰率	地盤構造	△
その他	磁気探査	磁力強度	地盤構造	△
	重力探査（微重力探査）	重力強度	地盤構造、空洞性状	△
	放射能探査	放射能強度	断層性状	△
	地温探査	温度分布	水みち	△

化が少なければボーリング結果による対策工の設計は特に問題はない。しかし、盛土材料が非常に似たようなもので施工されているとは限らず、予想しない箇所が弱層となっていて洪水時の破堤事故が見られる。そこで、このボーリング地点間の地質や土質状態を補完的に把握する目的で各種の物理探査が採用されるようになってきた。また、盛土の下部地盤の状態把握も重要なことであるがこれに関しても物理探査で調査することがある。そこで、河川堤防のような長い調査対象の物理探査法は、迅速で効率よく探査ができること、すなわちコストパフォーマンスが高く、また探査結果が可視化され解釈のし易い手法であることが望ましいことになる。各物理探査法で河川堤防での適用性を比較したものが表 2.5 である。

表 2.5 における左の項目である「適用性」欄での評価は下記のような意味合いを持つ。

- ◎ : 探査深度と探査制度のバランスがとれ、よく利用される。
- : 調査目的との兼ね合いで利用されるが、近年◎印の探査法を選択することが多い。
- △ : 堤防探査での分解能がやや不足する、または限定した探査目的で利用されることが多い。
- ※ : 精密探査の場合に採用される。

2.6 まとめ

この章では、戦後の自然災害に関する防災と維持管理に関して文献等を収集し時系列的な経緯について整理した。その結果、インフラ構造物の多くが建設後 30 年以上経過しており、20 年後には早急に点検補修を実施し対策をしなければ事故が起こるリスクがあることを確認した。

また、災害が発生した時に一番国民生活に影響を与えるのは「道路」「河川」であり、その代表的なインフラとして「斜面」と「堤防」がある。斜面については吹付け斜面に絞って点検・調査項目および調査フロー図として体系づけた。河川堤防についても基本的には、水理的な観点を設ければ同様の調査フローが体系づけられる。

今後は、緻密な調査を踏まえて、精度の高いカルテの作成を提案する。

リスクを回避するため、確実な点検マニュアルを作成し、カルテによるデータベースを構築するとともに、明確な評価基準のもと予防保全を図る。そのため、物理探査を中心とした点検実施することを提案する。これらが機能することにより予防保全が見られ、超寿命化につながり効率的な社会資本投資ができる。

参考文献

- 1) 京都大学防災研究所監修：自然災害防災の事典、丸善出版，2011.
- 2) 芦田 譲、沖村 孝＝監修，斜面等健全性検討研究委員会編：老朽化吹付け法面の調査対策の手引き，鹿島出版会，2006.
- 3) (財)国土技術研究センター：改定 解説・河川管理施設等構造令、第3章 堤防、第19条 pp112～113
- 4) 災害対策基本法 第4章～第6章.
- 5) 京都大学防災研究所監修：自然災害防災の事典、pp258～265，2011 .
- 6) 国土交通省：社会資本整備重点計画の策定経緯等について，2010.
- 7) 計画的な改築の推進・下水道・国土交通省，HP.
- 8) 防災に関してとった処置の概況 平成24年度の防災に関する計画 第180回国会（常会）提出資料.
- 9) 建設省河川局砂防部監修：新・斜面崩壊防止工事の設計と実例、P1～6
- 10) 国土交通省：社会資本整備関係参考資料，2010.
- 11) 独立行政法人防災科学技術研究所 自然災害情報室：防災基礎講座「自然災害について学ぼう」，HP.
- 12) 建設省土木研究所：熱赤外線映像法による吹付のり面老朽化診断マニュアル，1996.
- 13) 物理探査適用の手引き：探査法概説、物理探査学会、pp17～49.
- 14) 阿南修司・佐々木靖人・大谷知世：エアートレーサー試験による岩盤斜面の亀裂調査、土木技術資料、pp24～29、2003.
- 15) 大西有三・張 春・林 訓裕：地盤変位計測における精密写真測量手法のてきよう、第44回地盤工学シンポジウム、pp139～144、1998.
- 16) 物理探査ハンドブック：手法編 第10章 リモートセンシング、物理探査学会、pp521～568、1998.
- 17) 楠見晴重・成田一真・前田 稔・川畑裕子・小熊一郎：リング手法、岩の力学連合会、第11回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、論文No.107、2002.
- 18) 伊藤洋・片山辰雄：地盤を診る物理探査，7. 防災分野への適用，土と基礎，地盤工学会，P45～47，2004.
- 19) 国土交通省：堤防の機能・構造等について（資料-3-2）.
- 20) (財)国土技術研究センター：改定 解説・河川管理施設等構造令、第3章 堤防.
- 21) (社)地盤工学関西支部：流域地盤災害の減災技術の構築に関する研究委員会報告書，第Ⅲ編流域地盤に関する調査法と維持管理・減災技術，Ⅲ-15～22，2009.
- 22) (社)地盤工学関西支部：流域地盤災害の減災技術の構築に関する研究委員会報告書，第Ⅲ編流域地盤に関する調査法と維持管理・減災技術，Ⅲ-23～30，2009.

第3章 地盤調査に関する従来の研究

3.1 はじめに

社会資本のための公共投資は、平成7年度に35兆円でピークに達した後はほぼ減少の一途をたどり、平成20年度見通しでは17兆円とピーク時の57%まで落ち込んでいる¹⁾。このように公共投資が縮減される中、社会資本の整備や維持更新を図っていくためには、費用対効果や持続性の視点に立った合理的な事業計画が不可欠であり、建設コストの縮減は避けては通れない。

建設コストの縮減には、最も経済的な建設計画を立案することが必要である。そのためには、インフラ構造物などの地盤を対象とする土木構造物では、計画段階における地盤調査が重要な役割を担うこととなる。また、事前の地盤調査に適正な費用と時間を掛けることにより、不確実性を最小限とする良質な地盤情報をできるだけ事業の初期段階で得ることが重要な課題である。それによって、過大設計や過小設計によるトラブルが回避され、より実態に即した設計に基づいた適正な建設コストが可能となる。もちろん、経済的で精度の良い調査技術の開発が重要なことは言うまでもない。そして、第2章で予防保全の重要性と予防保全が長寿命化につながることを検証した。それを具現化するためには、調査・点検・修繕が必要であるが、国および地方自治体では、点検マニュアルなどを作成し実施している²⁾。また、それらの行動は、対象物の規模、地域に与える影響度、投資効果など様々な要因からその状態に応じて計画が立案される。この章では、事案が計画された時の計画・調査・施工・維持管理における地盤調査の一連の流れと効率的に実施するための手法を整理する。最近では、時間と費用が大きくなる直接法以外の、特に、非破壊で調査できる物理探査手法が注目されてきている。これら物理探査手法に関して現在の適用範囲を整理する。物理探査法は、昔から鉱山探査などに使用されてきているが、基本的には弾性波探査法と電気探査法が中心である。各探査法には、一長一短のところがあリ研究は現在もなされている。最近では、電気探査法を区分して電磁探査法も開発されてきている。筆者は、この電磁波探査法に着目して研究した。

3.2 地盤調査法

「防災」と「維持管理」の分野を考えると、「防災」は災害発生時の対応であるとは言いきれない面があり、「維持管理」の経過の中で必要とされて整理したデータと関連することもある。たとえば、地震発生による土砂災害と豪雨による土砂災害とはその成因と生起確率が基本的に異なるわけで、その維持管理も異なってくる。この「防災と維持管理」の分野での課題のほとんどは「地盤状態の変化」に関与するものが多く、

地盤の工学的状態が常に正しく把握されていることが基本となる。そして、この地盤状態を的確に把握しようと利用されてきたのが直接的に確認するボーリング調査である。日本では、標準貫入試験により地盤物性および状況を確認している。そして、地震時の地盤強度の低下問題や豪雨時の地下水の挙動に関与し、地盤状態を変える因子を正しく把握する方法を追究する必要がある。このように全体的に考えた場合、防災・維持管理を体系化することが重要であり、そのためには確実に評価できる地盤調査が必須である。

3.2.1 地質調査計画

地盤調査は地盤が人間の生活環境の基礎や自然環境の一部としての役割を最大限に発揮できるための技術的手法であり、その分野・種類は多義にわたっている。

一般的な地盤調査の手法を図 3.1 に示す。目的に応じて図 3.1 に示す中の必要の一部を実施するのが一般的である。

また、対象としては、各種構造物の建設や維持管理に関するもののほか、地域開発や環境保全および地盤防災対策にかかわるものがある。すなわち、調査の目的や内容

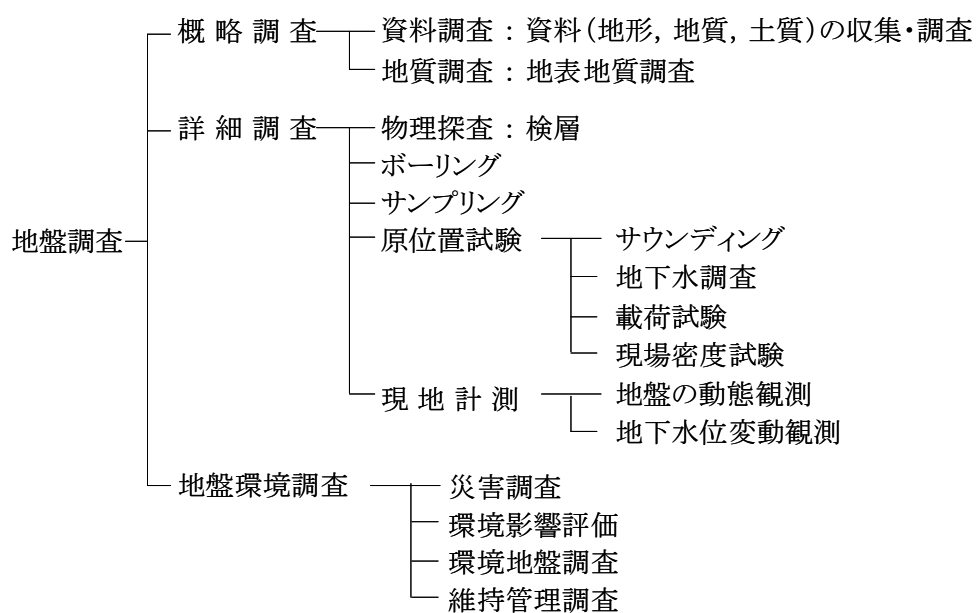


図 3.1 地盤調査³⁾

によって調査の密度・精度が変わるので効率的に立案することが重要でありかつ求められていることである。建設工事における流れと地盤調査の対応に関する 1 例を図 3.2 の地質調査計画フロー図に示す。図 3.2 に示すように、大枠の「計画」・「調査」・「施

工」・「維持管理」の流れの中で詳細にどのような項目の調査が必要かを示している。さらに、調査方法を選定するにあたり、どのような地盤工学的な検討課題がありそれに適した調査方法を提案するかが重要である。主な調査対象と対象項目の関係を表 3.1 に示す。表 3.1 から明らかなように、調査対象により評価する検討項目が異なる。技術者は、効率的で最適な組み合わせを選定する必要がある。

具体的な地盤調査は、図 3.1 に示したように、地表踏査⁴⁾、原位置試験、ボーリング、物理探査などがあげられるが、対象規模、地域性、精度等を勘案して効率的かつ合理的な方法を選定する必要がある。そして、地下構造を調査する方法としては、直接的な方法としてボーリングが一般的で大半を占めている。直接法のボーリング調査は、地下の地質状況を把握するために普遍的に実施される調査法で採取されたコアの観察によって地下情報を把握することが主体である。しかし、複雑な地質構造ではボーリングの本数を多く実施しないと構造を誤解する場合がある。地質構造が硬軟ある場合はコアの採取率が悪く確実な判定がしがたい。また、断層や層理などの走向傾斜の測定が困難等の不具合がある。技術的な内容ではないが、最近ではボーリング調査に就労するオペレーターが激減しておりこれに変わる確実に安価な調査方法が待ちわびられている。

表 3.1 主な調査対象と検討項目の関係⁵⁾

調査対象			検討項目		地層構成	物理特性	地下水・透水性	締固め特性	圧密特性	強度特性	支持力特性	変形特性	施工管理	維持管理	環境調査
構造物	道路・鉄道	切土	○						○	○	○	△	△		
		盛土	○	○		○	○	○	○	○	○	○			
		トンネル	○	○	○		△	○		○	○	○	○		
		橋梁	○	○			△	○	○	○	○		△		
	地中構造物	地下埋設物	○	○	○		△	○		○	○				
		開閉構造物	○	○	○		○	○	○	○	○		○		
		大規模地下構造物	○	○	○			○		○	○	○	○		
	ダム	ダム基礎	○	○	○			○	○		○	○	○		
		貯水池	○	○	○			○					△	○	
		材料・堤体	○	○	○	○		○					○	○	
	堤防・河川	堤防基礎地盤	○	○	○		○	○		○	○	△			
		材料・堤体	○	○	○	○	○	○		○	○				
		河川構造物	○	○	○		○	○	○	○	○				
	海岸	港湾施設	○	○	△		○	○	○	○	○	○	○		
		海域構造物	○	○			△	○	○	○	○		○		
	土地造成	埋立て	○	○			○	○	△	○	○	○	○		
		切土・盛土	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	△	
	建築	直接基礎	○	○				○	○	○	○	○		△	
		杭基礎	○	○					○	○	○	○		△	
		開削	○	○	○				○		○	○		△	
環境	地盤沈下		○	○				○				○		○	○
	地盤振動など		△	△								△	△		○
	土・地下水汚染		○	○	○									○	○
	土中ガス調査		○	△										△	○
	廃棄物処分場		○	○	○			△	△			○	○	○	○
災害	地すべり		○	○	○				○				○	○	
	斜面崩壊		○	○					○				○	○	
	落石		△											○	
	液状化		○	○	△				○					○	
備考			凡例 ○：検討すべきである △：場合により検討すべきである												

3.3 物理探査法

3.3.1 概要

物理探査法は、原理的には弾性波探査法と電気探査法とに大別することができる。最近では、従来までは電気探査法の中の分類されていた電磁探査法が大きな枠として区分されるようになった。図 3.3 に物理探査法を中分類と小分類に分けて示す。

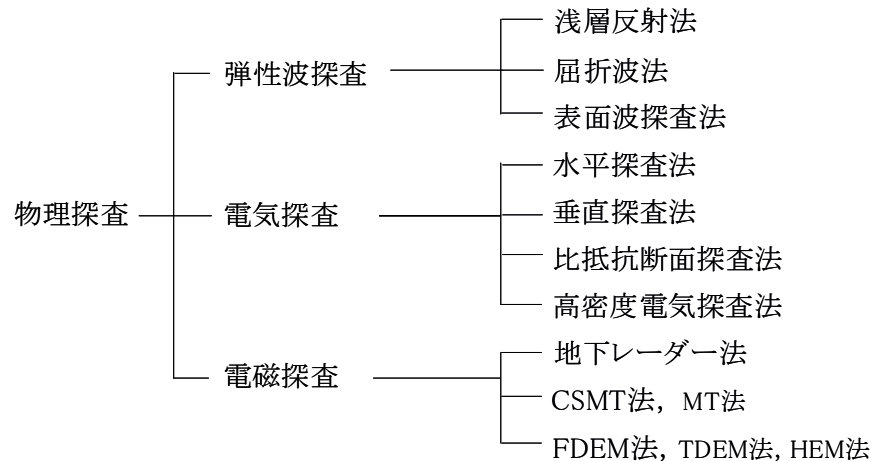


図 3.3 物理探査法の分類

物理探査法は、地盤を構成している物質そのものが持つ物理特性の物理現象を通じて地下の情報を取得する技術である。どんな調査でも同様であるが、物理探査は、目的、対象とする地下構造の規模、確認したい深度、物性把握など知り得たい項目により物理探査方法が異なる。

- (1) 精度を上げるためには、規模、本数を多くする必要がある、特に、許認可を必要とするときがあり必要日数が非常に長くなる場合がある。
- (2) 地形が複雑であると間違った解釈をする場合も想定される。
- (3) 地下構造が複雑な場合は解釈が紛らわしい等の不具合がある。

特に、浅い地盤構造を評価したい建設工事等の詳細設計ではあまり利用されなかった時代が長く続いたときがあった。しかし、現在では電子工学を介する測定技術の進歩とパーソナルコンピュータの相互力の高度化によって著しい進歩を遂げていることは言うまでもない。今後は、もっとコンパクトで高速のコンピュータが出現し 3 次元評価が当たり前になってくると考えられる。

防災と維持管理に関しては、河川、海岸、道路や建築など多くの分野に及んでおり、国をはじめとする研究機関が様々な指針や手引書⁶⁾などの資料がたくさん提供されている。しかし、今のところは費用対効果を考慮すると単価が安価であるボーリング調査などの直接法が大半を占めて掘削や目視に依存しているのが現状である。ところが、

時代の進歩より原位置の装置が簡便になると同時に、電子機器の進歩によりソフト開発が急激に発達したことにより、現在は多くの物理探査法が考案⁷⁾されるようになってきている。また、徐々にではあるが様々な建設現場をはじめとする土木分野で利用されるようになってきている。防災と維持管理において利用可能なものを調べると表 3.2 に示す調査対象の種類があり、各物理探査法により求める物理量も違うことが理解できる。ここで留意すべきで重要な点は、物理検層やトモグラフィーなど一部の探

表 3.2 物理探査法の調査対象と測定物理量

探査法	調査対象	測定物理量
2 次元比抵抗探査	堤防・地盤の比抵抗構造、堤体の漏水	比抵抗
表面波探査	S 波速度構造・地盤状況	弾性波速度
地中レーダ探査	空洞、埋設物、舗装厚調査	反射映像
超音波探査	コンクリートや堤体の亀裂、金属の腐食	伝播速度
赤外線映像探査	表面温度分布・剥離調査	温度分布
自然電位測定	護岸の防食調査	電位差
光ファイバセンサ測定	変位測定、温度分布	光パルスの反射時間
屈折法地震探査	地下の速度構造	弾性波速度
浅層反射法地震探査	深度断面図、反射断面図	弾性波速度
微動探査	S 波速度構造・振動特性	測定波形
電磁探査 (EM 法、FDEM 法)	堤防・地盤の比抵抗構造	比抵抗
磁気探査・磁気検層	埋設金属体探査、構造物の根入れ	磁気傾度
1 m 深地温探査	水脈探査	温度
音響測定	水道管漏水調査	音の到達時間差
速度検層	構造物の根入れ	弾性波速度
電磁誘導測定	コンクリート中の鉄筋位置	比抵抗 (導電率分布)
AE (アコースティック・エミッション)	コンクリートの劣化	伝達関数波形の検出時間
打音測定	コンクリートのひび割れ・背面空洞	可聴域の弾性波速度
反射法地震探査	深部の地盤構造、断層調査	弾性波速度
C S AMT 法	断層探査・深部比抵抗構造	比抵抗
弾性波トモグラフィー	孔間の速度構造	弾性波速度
比抵抗トモグラフィー	孔間の比抵抗構造	比抵抗
PS 検層	速度検層	弾性波速度
IP 法電気探査	地下水・粘土層	比抵抗と充電率分布
重力探査	重力異常による空洞・埋設物	重力 (Gal 値)

査法を除けばほとんどの物理探査法は、地表やトンネル切羽面などの一方向からの探査が中心である。ところが、医学の分野で発展しているCTスキャンやMRIなどは、対象となる人体の両方向からの測定が容易であり精度も非常に高く取れるのが現状である。地盤の物性探査もこのように両方向から行うことができれば当然精度も期待できることと近い将来において現実になることを期待している。

このような探査方向の課題は今後探査精度が議論されるほど避けて通れない大きな課題になってくると考えられる。

表 3.2 は、各物理探査法における調査対象と測定できる測定物理量を示している。表からも明らかであるが、多くの探査法も測定する物理量から見れば、結局は地盤の比抵抗（導電率の逆数）とP波やS波の速度値、あるいは地震探査や地中レーダなどにおける反射映像、磁気異常分布や地温分布の把握などの多いことが分かる。要するに、「比抵抗」と「弾性波速度」は重要なキーワードであることが理解できる。

ここに代表的な探査法の特徴を述べる。

(1) 弾性波探査法（屈折法）

弾性波探査法は、屈折法地震探査法とも呼ばれ、地表または地中での発破などによって人工的に発生させた弾性波（縦波：P波、または横波：S波）が直接または屈折して地層中を伝播する状況を地表に設置した測定装置で観測し、その結果を解析して地下構造を解明する方法である。日本では、萩原（1983）が実際の現場データの走時曲線から基盤層の速度と基盤深度を計算する「萩原の方法（ハギトリ法）」による解析法を発表しており標準的な解析法となっている。また、測線長は探査深度の5～10倍程度とする必要がある。そして、測線上へのケーブルの展開、受振器の設置、発破孔の削孔、火薬の充填を行って準備が完了する。ここで十分に配慮することは、一般的に振源として火薬を使用するが、火薬使用量、有資格者、安全対策等を計画するのと、発破に関しては火薬類取締法に準じて行い、特に発破孔付近では飛石防止には十分注意して保安物件や人・車の通行が近い地点では見張り員を配置する必要がある。

(2) 電気探査法

電気探査の代表的な手法である比抵抗法では、一对の電極を地表に接地して直流電流を流し、それによって形成される電場をもう一对の電極間の電位差として測定する。電極の位置関係にはいくつかの規則的なものが使われる（ポール・ポール法、ウィンナー法、大ポール・大ポール法等）。電位差と電流の比及び電極の位置関係から地盤の比抵抗を求めることができる。比抵抗法は基本的に直流応答に着目するのであるが、実際の測定では、周波数0.1～1 Hz程度の短形電流を用いる。近年は、地表測定だけでなく、電極を坑井や坑道に置いて測定を行うことも行われ、比抵抗トモグラフィと呼ばれている。

(3) 電磁探査法

電磁探査法は、広義の電気探査法に含まれる物理探査手法であり、このうち地層の電磁誘導現象を利用した物理探査手法を表している。送信コイルに交流電流を流すことにより、地表付近または空中において人為的に発生させた電磁波が地下へ透過すると、その電磁気的作用により地層中に誘導電流が生じる。電磁探査法では、この誘導電流を地表にて直接測定するか、あるいは誘導電流により発生した二次の電磁場電場と（磁場を地場）を地表にて測定し、地下の比抵抗情報を得るように工夫された物理探査手法である。

防災の場合は、災害を未然に防ぐ技術ということになるが、これは地震や豪雨の予知技術の確度につながる問題であり、本論文に関与が深いのは、むしろ維持管理の分野である。最終的には地盤物性の正しい把握、さらには物性間の相関性把握が重要な課題となる。また、降雨の浸透性と地盤物性の変化、あるいは外力を受けた場合の地盤強度の劣化問題や斜面や構造物の劣化性の把握なども関与することになってくる。

なお、比抵抗探査には、電極打設と直流通電による電気探査法（2次元比抵抗探査法）と本論文のテーマでもある電磁探査法などに大別できる。

電気探査法（2次元比抵抗探査法）は測定時間の長さにおいて作業性と測定場所の制約（コンクリート面や障害物による測線配置の不可など）を受けるデメリットがある。また、測定原理上、電極間隔が大きくなると探査深度も深くなるが、得られる測定値は広い範囲の平均値になって、深くなるほど測定値の精度が大まかで劣化するという問題を抱えている。

これらの問題点を抽出するとともに「簡便」、「スピーディー」な物理探査手法がないかを探求するため研究を開始した。その結果、広範囲で場所的な制限を受けないときは、断層とか比抵抗構造を解明するためによく利用される2次元比抵抗探査法が有効である。逆に道路とか堤防など仮設準備に時間が必要とする。また、交通規制を伴う場合および探査規模が大きく取れないときの調査方法を文献調査した。その結果、現状では、新規に多くの調査方法が開発途上であるということがわかった。と同時に、これからのニーズとして必要であることも理解できた。筆者は、地下レーダのように高速で地盤が調査できる手法として電磁探査法に着目し研究した。具体的には、海外で活躍している探査法として空中電磁法があることを確認しその技術を調査するため海外の研究所にも訪問した。結論は、土木分野で精度が出せて手軽な電磁探査法を開発することが「簡便」、「スピーディー」、「コンパクト」な探査機であると確信した。

3.3.2 地下構造を把握するための物理探査

最近、電子工学を基本とする測定技術の進歩により多くの探査手法があることは前節および表 3.2 で示した。この節では、地下構造を把握するために具体的に利用されている物理探査法を整理した。探査法として、地震探査、電気探査、表面波探査、地中レーダ探査、重力探査、放射能探査、電磁探査、微動探査、熱赤外線探査、トンネル切羽前方探査、地温探査に分けて、具体的な特徴を列挙した。また、物理探査法ごとに集め比較表と言う形で整理した。項目は、探査法、測定間隔、概要、測定する物理量、原理を中心にどのような呼び名の探査法であるかを整理して表 3.3～3.4 にまとめた。また、各々の測定方法、特徴、提要限界についても説明を書き添えた。これらから、一言で物理探査と言っても土木分野で使用する場合には各探査法の特徴を把握し計画しなければ意味のない調査に終わる可能性があることを理解する必要がある。

表 3.3 地下構造把握のための物理探査比較表 (1)

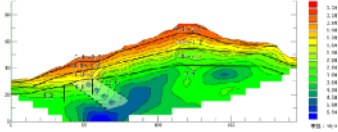
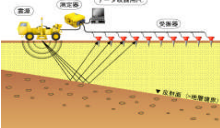
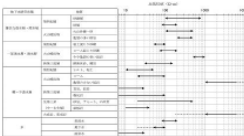
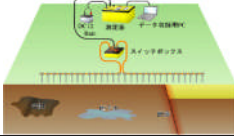
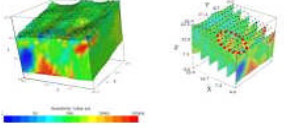
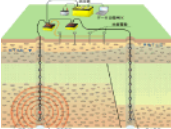
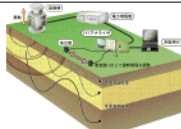
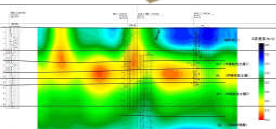
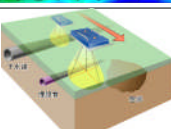
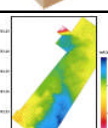
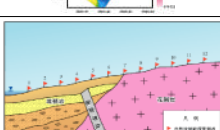
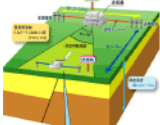
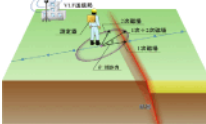
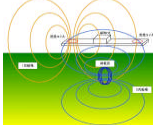
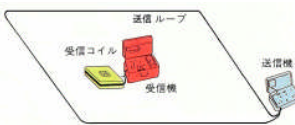
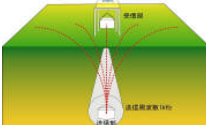
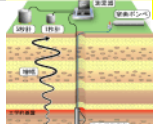
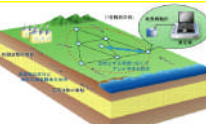
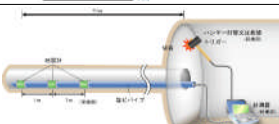
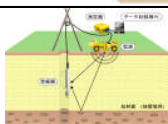
探査名		測定間隔 (精度)	概要	測定する 物理量	原理
地震探査	屈折法	数m～数10m		弾性波 (P波)	地表付近の人工起振(発破等)で発生した弾性波が地層境界で屈折して戻ってきたものを観測して速度構造を求める。
	浅層反射法	数10m～数100m		弾性波 (P波)	地表で起振し、地中の反射面で反射したものを観測して地下構造を求める。
	弾性波トモグラフィ	孔間による		弾性波 (P波)	X線CT手法に類似し、孔間と地表面間の弾性波速度を測定する。
電気探査	垂直探査	数m～数10m		比抵抗	地盤の電気的性質(比抵抗)を確認する。
	比抵抗2次探査	数m～数10m		比抵抗	同上
	比抵抗3次探査	数m～数10m		比抵抗	同上
	比抵抗トモグラフィ	孔間距離の1/10		比抵抗	X線CT手法に類似し、孔間と地表面間の比抵抗を測定する。
表面波探査	定常振動法	数m		弾性波 (レイリー波)	表面波の分散特性を確認して地盤の固有周波数から構造を確認する。
	高密度表面波2次探査	数m		弾性波 (レイリー波)	表面波の分散特性を確認して地盤の固有周波数から構造を確認する。
地中レーダ探査		数m		電磁波	アンテナを走査し、空洞や鉄管を検出する。
重力探査		数m～数10m		重力	重力測定し、地下構造を確認する。
放射能探査	自然放射能探査	数m～数10m		放射能	岩石鉱物中に含まれる同位体から放出されるガンマ線が亀裂を通して移動してくるものを測定する。

表 3.4 地下構造把握のための物理探査比較表(2)

探査名		測定間隔 (精度)	概要	測定する 物理量	原理
電磁探査	C S 法 A M T	数m～数 10m		比抵抗	2点で接地した電極に交流を流すと電磁気が放出され、周波数の高低で比抵抗分布を求める。
	V L F 法	数m		比抵抗	30kHzのVLF帯の電磁波で発生している地盤の誘導電流を測定する。
	E M 探 査	数m		比抵抗	地中における誘導電磁場から比抵抗を測定する。
	T D E M 探	数m～数 10m		比抵抗	地中における誘導電磁場から比抵抗を測定する。
	F D E M 探	数m		比抵抗	地中における誘導電磁場から比抵抗を測定する。
	電 磁 波 式 測 量 位 置 ト	数m		比抵抗	送信アンテナを推進管に挿入し、地上の受信アンテナで測定する。
微動探査	常 時 微 動 探 査	数m～数 10m		弾性波 (微振動)	地表に常時存在している微振動を測定し、地盤固有の振動特性を求める。
	微 動 ア レ イ 探 査	～数1000m		弾性波 (微振動)	同上
熱 赤 外 線 探 査	熱 赤 外 線 映 像 法	数m		温度	吹付法面の表面温度を測定して、健全土を確認する。
トンネル切羽前方探査	T S S シ ス テ ム	数m～数 10m		弾性波 (P波)	トンネル坑内とボーリング孔間の弾性波速度を測定する。
	V S P	数m～数 10m		弾性波 (P波)	孔間と地表面間の弾性波速度を測定する。
探 査 地 温	1 m 深 地 温 探 査	1m		温度	温度変化のほとんどない1mの深度の地中温度を測定する。

(1) 地震探査

a) 屈折法

測線を設定し、一定間隔に受振点を設置し、地表面付近で起振する。

弾性波速度と層厚により地盤状況が推定できる。

下層の低速度帯は把握できない。測線に平行または鋭角の高速度帯は把握できない。(高密度探査で適用可能)

b) 浅層反射法

地表に受振器を展開し、人工震源で地表面で起振する。

深い深度の地下構造を推定できる。

振動ノイズがあると妨げとなる。山岳地、急峻な地形では測定できない。

c) 弾性波トモグラフィ

孔間に受振器を設置し、起振する。

屈折法に比べ、詳細な地盤状況を推定できる。

ボーリング孔を必要とする。地表面が不規則な場合は誤差が大きくなる。

(2) 電気探査

a) 垂直探査

地表に設置した電極により電位差を測定する。電極を中心に固定し、電極を広げながら測定する。

深度方向の精度がよい

舗装路は不可。広い敷地が必要。比抵抗に差があるものしか確認できない。

b) 比抵抗 2 次元探査

一定間隔に電極を設置し、移動させる。

水平方向の精度がよい。

舗装路は不可。広い敷地が必要。比抵抗に差があるものしか確認できない。

c) 比抵抗 3 次元探査

複数の測線を格子状に配置して測定する。

より詳細な比抵抗構造が推定できる。

舗装路は不可。広い敷地が必要。比抵抗に差があるものしか確認できない。

d) 比抵抗トモグラフィ

孔間に電極を設置し、電位差を確認する。

比抵抗 2 次元探査に比べ、詳細な地盤状況を推定できる。

ボーリング孔を必要とする。孔内を水で満たす必要がある。

(3) 表面波探査

a) 定常振動法

起振してレイリー波を発生させ、既知の受振点で測定する。

S 波速度を測定できる。速度の逆転層が合っても把握できる。

傾斜地は困難である。水平方向の分解能は高くない。

b) 高密度 2 次元表面波探査

複数の測線を格子状に配置して測定する。

定常振動法より詳細な比抵抗が推定できる。

傾斜地は困難である。水平方向の分解能は高くない。

(4) 地中レーダ探査

アンテナを地表面に走らせて、地下の埋設物などの反射を測定する。

埋設物等の深度が把握できる。

深い深度は把握できない。地盤構造は不適である。

(5) 重力探査

測定点を測量した測点を設置し、重力を測定する。

省スペースである。深い深度の構造を推定できる。

詳細な地下構造を確認できない。

(6) 放射能探査

a) 自然放射能探査

NaI シンチレーション検出器で自然放射線を測定する。

断層や破砕帯の検出をする。

位置のみしか確認できない。深度が把握できない。

(7) 電磁探査

a) C S A M T 法

3～7km 離れた箇所から 0.5～2.0km の送信アンテナを設置し大電流を流す。

省スペースである。深い深度の比抵抗を推定できる。

電気・金属の影響が大である。比抵抗に差があるものしか測定できない。

b) V L F 法

宮崎県えびの送信所から送信されている電磁場から発生した誘導電流を測定する。

小型軽量で、断層や破砕帯調査に適する。

電気・金属の影響が大である。深い深度は把握できない。

c) E M 探査

5～10 秒間静止して測定する。

広範囲を迅速に測定できる。

電気・金属の影響が大である。深い深度は把握できない。

d) T D E M 探査

5～10 秒間静止して測定する。

広範囲を迅速に測定できる。

電気・金属の影響が大である。深い深度は把握できない。

e) FDEM探査

5～10 秒間静止して測定する。

広範囲を迅速に測定できる。

電気・金属の影響が大である。深い深度は把握できない。

f) 電磁波式トンネル位置測量

送信コイルを水平に接地し、地表の受信コイルを測定する。

孔間の詳細な比抵抗が推定できる。

電気・金属の影響が大である。ボーリング孔を必要とする。

(8) 微動探査

a) 常時微動探査

地表面および孔中に微動計を設置して、測定する。

耐震設計に使用可能である。

詳細な地下構造を確認できない。

b) 微動アレイ探査

地表面および孔中に微動計を設置して、測定する。

耐震設計に使用可能である。

詳細な地下構造を確認できない。

(9) 熱赤外線探査

a) 熱赤外線映像法

日中の温度差が大きい時期にサーモグラフィによって法面の表面温度を測定する。

空洞や亀裂等の多い吹付を確認できる。

雨天は不可。空洞等の深度は把握できない。

(10) トンネル切羽前方探査

a) TSSシステム

孔間に受振器を設置し、起振する。

詳細な地盤状況を推定できる。

ボーリング孔を必要とする。地表面が不規則な場合は誤差が大きくなる。

b) VSP

孔間に受振器を設置し、起振する。

詳細な地盤状況を推定できる。

ボーリング孔を必要とする。地表面が不規則な場合は誤差が大きくなる。

(11) 地温探査

a) 1 m深地温探査

φ 30mm の金属棒等を地中に打ち込み温度計を設置する。

温度変化により水みちを把握できる。

深い深度は把握できない。地盤構造は不適である。

3.4 電磁探査法のあゆみ

電磁探査法は、電磁誘導現象を利用した電気探査法のひとつであり、電磁気学や電子工学、地球物理学などを応用したもので、古くは鉱山調査として発達してきた。近年のエレクトロニクスやコンピュータの技術の進歩と普及がリンクしながら目覚ましい発展とを遂げると共に新しい手法も開発されると同時に探査能力も向上し、地下資源探査や地下水をはじめ、建設・維持管理・環境などの分野まで幅広く利用されるようになった。以下の表 3.5 に電磁探査法の歴史について概観してみた。歴史的に見れば、1940 年代以降で電磁探査法は飛躍的に進歩しているようである。本研究課題のテーマはループ・ループ法、あるいは中心誘導法の応用になるが、一般的には 1917 年の Conklin⁸⁾の試みが電磁探査法の基本になっていると考えられる。

表 3.5 電磁探査法のあゆみ⁹⁾

年 代	探査手法・発明など
1830 年	・ Fox により硫化鉱床の周辺で自然電位の異常を発見。鉱床探査の手掛かりとなる。
1865 年以降	・ 2 本の接地電極で大地の比抵抗測定を試みる。
1910 年代	・ Wenner や Schlumberger によって四電極による見掛け比抵抗の考え方による直流比抵抗法が実用化される。
1917 年	・ Conklin は、直径 50～100m のループコイルを利用して鉱床探査を試みた。1 次磁場は地下の情報を持たず、2 次磁場は微小であるため、1 次磁場のキャンセル方式が常に最大のテーマであった。
1930 年頃	・ Tennberg が日本で最初に神岡鉱山で実施した。
1940 年代	・ 京都大学の清野、吉住、谷口らによって水平ループ法、中心誘導法などが研究される。
1950 年代	・ ソ連の Tikhonov ¹⁰⁾ (1950) 日本の Rikitake ¹¹⁾ 、フランスの Cagniard ¹²⁾ らによって MT 法の研究が盛んに実施した。 ・ Wait、Yost らによって、時間領域電磁探査法の理論研究がなされ、McLaughlin により探査装置が開発される。
1960 年頃	・ Barringer は空中電磁法において INPUT 法が実用化される。
1970 年代	・ 自然電磁場による MT 法は、信号が弱く不安定であるため、Goldstein ¹³⁾ により、人工送信源を用いた CSAMT 法が考案される。

3.5 電磁探査法について

電磁探査法¹⁴⁾ (Electromagnetic Method : EM 法) には図 3.4 に示すように種々の手法がある。電磁探査法は、電磁波を利用し大地の電磁応答を測定して対象地盤の電気特性である比抵抗を探査する方法であり、地中の比抵抗構造を推定する。

具体的には、直流に近い低周波数から数 kHz 程度までの電磁波を利用して電場や磁場を測定し、その反応強さを解析することにより対象の比抵抗を求める探査である。

各電磁探査法について、概説する。

FDEM (Frequency Domain Electromagnetic Method) 探査は、送信コイルに電流を流し、地盤内に磁場を発生させファラデーの電磁誘導理論にもとづく誘導磁場を地表で測定して地盤の電気伝導度 (単位は S/m、この逆数を比抵抗と呼び単位は(Ω m)) を知る方法である。

ある周波数の交流電流を流し、その周波数をパラメータとした見掛け比抵抗を測定して逆解析手法によって周波数パラメータを絶対深度に換算する。電磁理論では、地盤にある周波数の電磁場を透過させた場合、周波数が低いほどエネルギーロスが小さいため深部まで達し、高い周波数になるほど透過深度が浅くなると言われている。したがって、たとえば、高い周波数から順次低い周波数の電流を流すことによって地盤の浅い部分から深部にかけての情報を測定することができる。

TDEM (Time Domain Electro-Magnetic method) 探査法は、地上に這わしたグラウンデッドワイヤに通常は直流電流を流し、ある時刻で瞬間的に電流を遮断し、地表で静電界による電場の強度を測り遮断後の時間減衰の様子を高速サンプリングして記録を取る。この時間減衰は指数関数的な減衰曲線を示すが、高比抵抗の地盤ほど減衰が早く、低比抵抗の地盤ほど減衰曲線は長くなる。この曲線の各時刻における時間微分を求めることから時間一見掛け抵抗の関係が求められ、これを逆解析 (Inversion) することで比抵抗の深度分布を知ることができる。

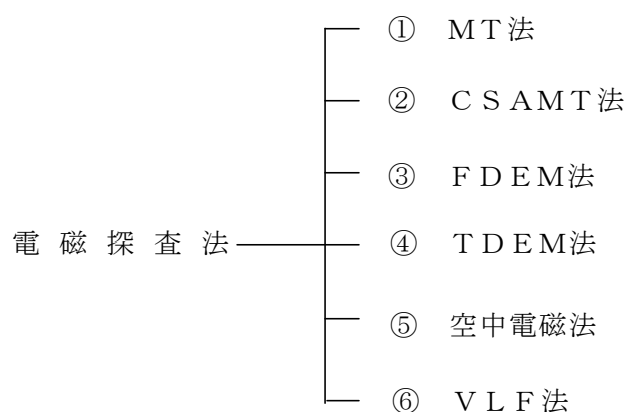


図 3.4 電磁探査法の分類

(1) MT法

MT (Magneto-telluric Method) 法は、自然界に存在する電磁場信号を利用する。例えば、太陽から飛来する荷電粒子が地球磁気圏に作用することによって発生する地磁気の変動が大地に伝わり、大地中に誘導電流を発生する。また、赤道周辺のどこかで常時発生している雷放電による電磁波が全地球規模で伝わり、大地中に誘導電流を発生する。このようにして伝わる電磁場を地表で測定することによって大地の比抵抗を求める方法である。

(2) CSAMT法

CSAMT (Controlled Source Audio-frequency Magneto-telluric) 法は、接地電線に人工電流を流すことによって形成される磁場を信号源とし、MT法と同様に互いに直交する電場と磁場の比から大地のインピーダンス（見掛け比抵抗及び位相）を求める方法である。

(3) FDEM法

FDEM (Frequency Domain Electromagnetic Method) 探査法は、電磁波が周波数の違いによって透入震度に違いが出ることを利用し、地中における誘電電磁場の応答から、地盤の比抵抗値の逆数である導電率を求める方法である。周波数と深度の関係は、周波数が高い電磁波は浅層部分の地盤状況を、周波数が低い電磁波は深層部分の地盤の状況を反映する。

誘電率とは、電流の流れやすさを示す物理量で、その値から地質の種類や地下水の有無といった地下の構造を推定する。

(4) TDEM法

TDEM (Time Domain Electro-Magnetic method) 探査法は、電磁波が大地に透入するときの応答を時間の関数として求める方法である。送信源（接地電線やループ）に流す電流を急激に変化させると、それまで形成されていた磁場（1次場）が変化するのを妨げようとする過電流が大地の表面に誘導される。過電流は地中へ拡散し、その電流経路の比抵抗に応じて減衰する。こうした過電流が作る磁場を測定し、地下の比抵抗分布を調べる。過電流は時間と共に地下深部に透入するので、より長時間測定することによって、より深部までの情報が得られる。

(5) 空中電磁法

空中電磁 (Airborne Electromagnetics Method、Helicopter Electromagnetics Method) 探査法は、小型飛行機やヘリコプタに電磁法の測定器を載せて飛行し、比較的浅部の比抵抗を迅速にマッピングし求める方法である。日本で使われているHEM法の測定装置は、送・受信コイルを内蔵した容器をヘリコプタで曳航するものが使われている。送・受信コイルの位置関係は固定されていて、送信コイルに交流電流を流すと磁場（1次場）が発生する。これが誘電性の大地に透入すると1次磁

場の変化を妨げるように2次電流が誘導され、さらに、2次磁場が形成される。2次電流の大きさと位相は、地下の比抵抗や送信コイル、大地間の相互インダクタンスに依存するので、これらの関係を用いて地下の比抵抗分布をマッピングする。

(6) VLF法

VLF (Very Low Frequency) 法は、潜水艦との交信を目的として送信されている3～30kHzのVLF帯の電磁波を利用する探査法である。VLF法には、1次磁場と2次磁場の合成で作られる楕円分極の傾きを測定するVLF-EM法とCSAMT法のように磁場と電場の比から見掛け比抵抗を測定するVLF-MT法とに分けられる。

VLF発信局は、世界各地にあり、常時大電力で電波は発信している。

3.6 物理探査適用の流れ

物理探査は、地盤調査に使われてきているが今ひとつ信頼性を得られていないのが現状である。電子工学の発展により急速に処理速度を含めた解析時間については早くなってきている。しかし、土木分野においてはまだまだ主流の調査としての存在感は無い。物理探査を実施するには、図3.20のような物理探査作業の流れがある。すなわち、計画段階→現地計測→解析・解釈→照査・報告という流れである。

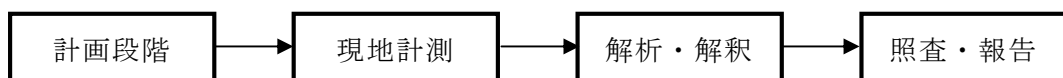


図 3.20 物理探査作業の流れ

図3.20に示す各段階において各々留意点があるので注意する必要がある。

計画段階時の留意点について1例を述べる。

屈折法探査の場合、3つの留意点を考えておく必要がある。

- (1)地質状況と適用限界
 - (2)測線設定
 - (3)測定（発破）計画
-
- (1) 地質状況と適用限界を考慮しておく。
 - 1)地盤が深部になるほど地盤速度が速くなる傾向にある。
 - 2)薄い層がある場合は、検出できないことがある。
 - (2) 測線設定を正確にする。
 - 1)地質構造に出来るだけ直行させて測線を考える。(副測線)
 - 2)探査深度と最大受信点距離を確実にとるようにする。

(3) 測定(発破)計画

- 1) 遠隔起振点位置を充分に取れる位置に配慮する。
- 2) 地を考慮した発破点を確保する。

3.7 物理探査での留意点

(1) 探査実施の悪い例

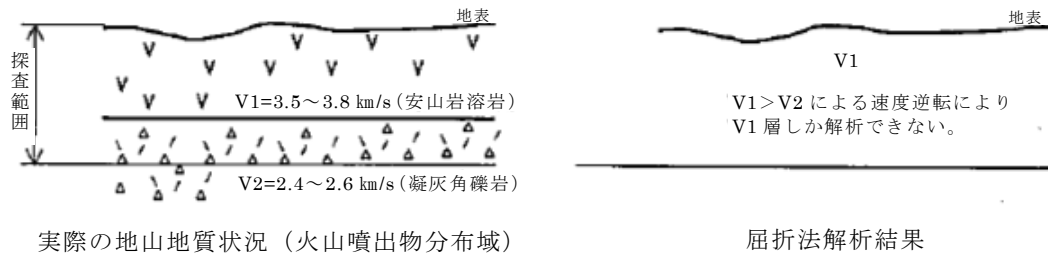


図 3.21 留意すべき地質状況 (例 1)

図 3.21 は、凝灰角礫岩の上層部に火山噴出物が分布している地質構成の現場で弾性波探査を実施した場合の例である。凝灰角礫岩と火山噴出物の速度を比較して、凝灰角礫岩 > 火山噴出物であれば速度の遅い下部層である火山噴出物は検出できない例である。すなわち、相対的な高速度層が浅部に分布し、その下位層に上層部より低い速度層を持つ地盤では下位層は検出されない。

(2) 探査実施例

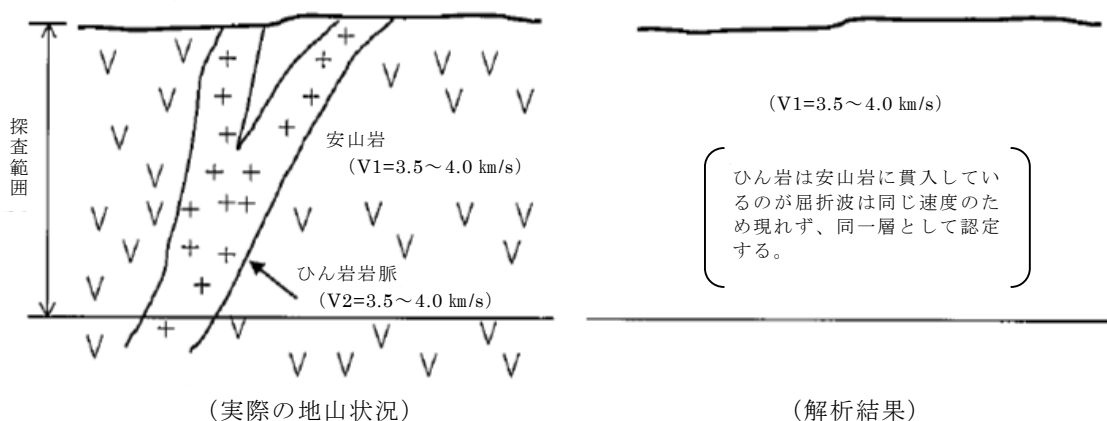


図 3.22 留意すべき地質状況 (例 3)

図 3.22 は、中・古生層や火成岩中などの地質からなる硬質岩類が分布している

地層に貫入岩類が貫入している場合である。実際の地層が図 3.22 のように構成されている場合でも安山岩とひん岩岩脈がほぼ同等の速度であれば探查結果は、違いを検出できないで同一層と認識して解析する場合がある例である。

(3) 地質解釈が難しい事例

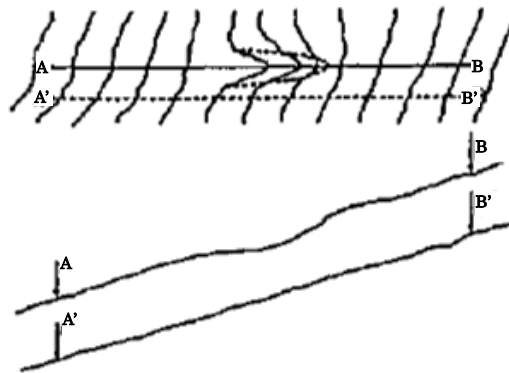


図 3.23 崖地形を避ける測線配置

図 3.23 は測線は測線に沿った地形が平坦ないしは起伏の少ない一様斜面で極端に起伏が無いところに設置することが望ましい例である。複雑な地形では掃除曲線にも反映されて複雑になり解析精度を落とす原因にもなる場合がある。

上記は、ほんの 1 例であるが、各物理探查の適用に当たっては複数手法を検討しそこ場所にあった物理探查を採用することが信頼度を上げる唯一の方策である。

以下に、物理探查の適用に当たって考慮する項目を列挙する。

- 1) 調査の目的は何か。
- 2) 調査対象の深さはどれくらいか。
- 3) 精度をどこまで要求されているか。
- 4) 地形、地質条件はどのように形成されているか。
- 5) 測定する物理量は何か。
- 6) 調査地の条件は物理探查に不整合な事柄が無い。

これらのことを十分に事前計画のときに検討し、的確な判断のもと調査を実施しないと誤解をした結果を導く可能性があるため、注意が必要である。

3.8 まとめ

地盤調査には、ボーリング等の直接法および物理探査等の間接法があることを整理した。また、調査対象の目的を明確にして各々の利便性を生かした調査が必要である。最近では、電子工学の発展に伴い解析技術が向上し今まで以上に物理探査法が利用されている。物理探査法には、弾性波探査と電気探査と電磁探査があることを整理し、各々の概要、測定する物理量、原理等に関しても整理した。地盤調査のニーズとして深度40m程度までに最適調査法が無い場合電磁探査法に着目し整理した。

参考文献

- 1) 国土交通省総合政策局情報管理部情報安全・調査課建設統計室：平成 20 年度建設投資見通し
- 2) 国土交通省：基本情報一指針・マニュアル・ガイドライン.
- 3) (社)地盤工学会：地盤調査の方法と解説、pp1-2, 2004.
- 4) 島 博保, 奥園誠之, 今村遼平：土木技術者のための現地踏査：鹿島出版会, 1982.
- 5) (社)地盤工学会：地盤調査法第 1 章, 2004.
- 6) 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, 2003.
- 7) (財)災害科学研究所トンネル調査研究会：地盤と可視化と探査技術、鹿島出版会, pp14-16, 2001.
- 8) Conklin, H.R : Prospecting with electricity, Engineering and Mining Journal, 104-8, 1917.
- 9) 物理探査学会：物理探査ハンドブック（手法編），pp301-303, 1998.
- 10) Tikhonov, A.N : On determining electrical characteristics of the deep layers of the earth's crust, Dok. Akad.Nauk,USSR,73,2,295-297,1950.
- 11) Rikitake, T. : Electromagnetic induction within the earth and its relation to the earth's interior, Bull.Earthq.Res.Inst.Tokyo,28,45-100.
- 12) Cagniard,Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting, Geophysics, 18, 605-635, 1953.
- 13) Goldstein,M.A and Strangway,D.W : Audiofrequency magnetotellurics with a grounded electricdipole source, Geophysics, 40, 669-683, 1975.
- 14) 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（とくに土木分野への利用），pp126-139, 2003.

第4章 周波数領域電磁探査法の開発

4.1 はじめに

第1章～第3章で述べたように、比抵抗探査法が土木分野の地盤調査でよく採用されるようになってきている。調査対象も適用範囲も拡大し、従来から利用されている断層・破砕帯調査、地下水探査から、地形的に複雑な法面調査や地滑り調査にまで及んでいる。それらの探査法の多くは、電気探査法の高密度探査やCSAMT探査などである。特に、堤防や平地部における30m未満の浅い部分での空洞や坑道跡調査も増加している。また、地表面直下では地下レーダの適用は多いが、現状の測定機器では測定に使用する電磁波の周波数が高いこと、水があればすぐ反射することなどから5m以上の深度では地下レーダは適用範囲外となる。電気探査法では地表での電極間隔の大きさが深度パラメータになっているため、深部になるほど側方の地盤情報が測定値に加わるため深度方向の分解能が落ちる傾向にある。一方、CSAMT法は比較的垂直方向の指向性が良いが低周波の機器が多く周波数と表皮深度の関係から周波数を上げた帯域の探査機の出現が望まれていた。筆者は、主に斜面や河川堤防などで簡便で小型可搬式の装置で、スピーディーに計測できる探査法の開発を目指して周波数領域電磁探査法に着目した。この探査法は、古くから多くの研究者により研究されてきたが現在に至るまで広域での断層調査などで利用されるのがほとんどと思われる。一般的に、周波数領域電磁探査法（Frequency Domain Electromagnetic Method 探査法：以下、略して FDEM 探査と呼ぶ）とは、磁場を発生させることにより地下の比抵抗分布を調べる探査法である。具体的には、送・受信コイルの位置を固定して送信コイルに交流電流を流すことにより、1次磁場を地中に透入する。次に、電磁誘導作用によりその磁束の変化を打ち消すように過電流が流れる。ここでも、電磁誘導作用により2次磁場が発生する。その2次磁場は地下の比抵抗分布に依存するためその2次磁場を測定することにより比抵抗値を得ることができる。透入する周波数を変化させて繰り返すことで異なる地下情報が得られるのを利用する方法である。筆者は、従来からある FDEM 探査を土木分野でいかに発展利用されるようにするために工夫できないかを研究してきた。

4.2 磁場の測定

送信コイルに流れる電流によって生じる1次磁場の位相は1次電流と同相である。1次電流を複素数表示すると式(4.1)で表される。

$$i = I_p e^{j\omega t} \quad (4.1)$$

この時の1次磁場は、式(4.2)で表される。

$$H_p = I_p e^{j\omega t} \quad (4.2)$$

ここに、

I_p : 電流の振幅値、 $\omega : 2\pi f$ 、 f : 周波数、

j : 虚数単位、 t : 時間

である。

誘導によって生じる起電力 e は位相が 90° 遅れるため、

$$e = -d(\mu_0 H_p)/dt = -j\omega\mu_0 I_p e^{j\omega t} \quad (4.3)$$

この起電力による 2 次電流 I_s は、地盤の抵抗を R 、イダクタンスを L とした時、

$$H_s \propto I_s = -(j\omega\mu_0 I_p e^{j\omega t}) / (R + j\omega L) \quad (4.4)$$

となり、2 次磁場は R と L で変わる。また、 R と L は地盤の鉱物材料や空隙、含水状態によって決まる。これらの関係をベクトル図で表すと図 4.1 のようになる。

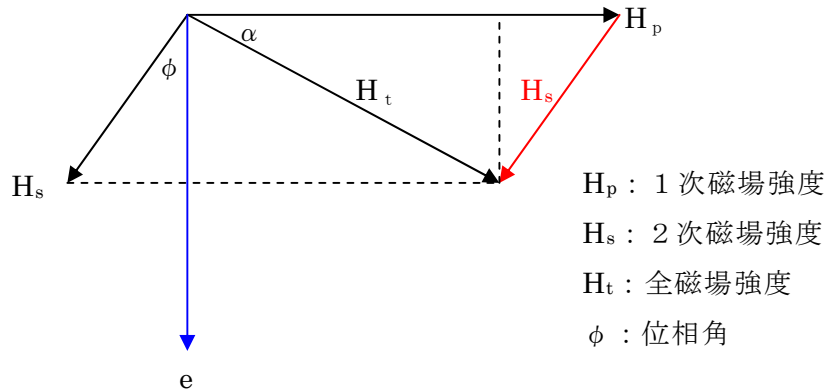


図 4.1 磁場のベクトル図

図 4.1 において H_t は、

$$H_t = H_p + H_s \quad (4.5)$$

なる全磁場である。 ϕ は 1 次電流と 2 次磁場の位相差であり、 α は H_p と H_t の位相差である。 R が非常に大きいと ϕ は 0 近くになり H_s は H_p よりも 90° 位相が遅れる。また R が非常に小さいとき ϕ は 90° になり、 H_p とは 180° 位相が遅れることになる。なお、 $H_t \cos \alpha$ は 1 次磁場と同じ位相で大きさが変わる。これを全磁場の同相成分（実

数部)、 $H_t \sin \alpha$ は 90° 位相が遅れて変わり全磁場の離相成分（虚数部）という。したがって、全磁場を測定してこれの同相成分と離相成分とを位相検波器などで測定すれば地盤の状態の変化を調べることが可能である。

4.3 測定理論と逆解析

4.3.1 測定理論

FDEM 探査の均質地盤での理論解析については、James R.Wait²⁾が水平発信コイルによる電磁誘導の理論解析を行い発表している。2 年後には、同じく均質地盤における種々のコイル配置におけるレスポンスの理論解を導いた。これらをもとにして、地表に送信コイルを配置し、送信コイルに周波数 f の交流電流を流して発生する 1 次磁場が、地盤内の鉱物などの導電体との電磁誘導により渦電流が発生する。その渦電流によって、さらに 2 次磁場が発生するが、この 2 次磁場強度が地盤の導電率により変化する。これらの測定原理を図 4.2 に模式的に示す。

FDEM 探査は、この 1 次磁場強度（同相成分）とその 2 次磁場強度（離相成分）を地表で測定し、両者の比率(磁場の応答レスポンスと呼ばれる)から見掛け比抵抗を求める。また、送信周波数を変えることにより、深度方向の比抵抗の変化を測定することができる。そして、後述するが、得られた見掛け比抵抗データを、逆解析して地盤の真の比抵抗を求める。

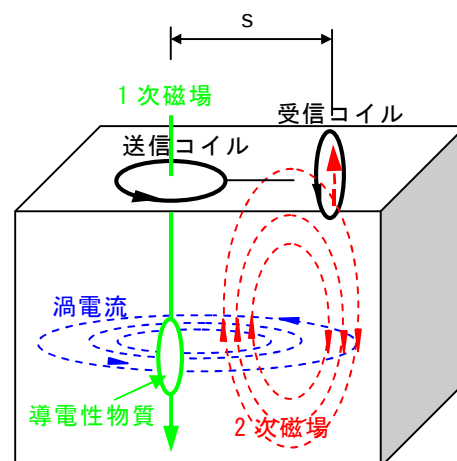


図 4.2 FDEM 探査の測定原理の模式図

均質地盤における磁場の応答レスポンス H_s/H_p の理論解は、一般に、図 4.3 に示すような 3 種のコイルタイプがある。タイプⅠは、水平—水平タイプ、タイプⅡは、水平—垂直タイプ、タイプⅢは、垂直—垂直タイプと称している。最もオーソドックスな配置は、初期のループ・ループ法で利用されていたⅠタイプの水平—水平タイプで

ある。タイプⅠ～Ⅲの場合は式(4.6)～(4.8)で与えられる。この応答レスポンスを測定して式(4.6)～(4.8)を γ について解けば比抵抗が求まる。なお、式(4.9)は、式(4.6)において表皮深度 δ とコイル間隔 s の比が $s/\delta \ll 1$ の場合の簡略式である。

$$H_s/H_p = \left(2/\gamma^2 s^2\right) \left\{9 - \left(9 + 9\gamma s + 4\gamma^2 s^2 + \gamma^3 s^3\right) e^{-\gamma s}\right\} \quad (4.6)$$

$$H_s/H_p = -(1/2) \left\{ \gamma^2 s^2 (I_1 K_1 - I_0 K_0) + 4\gamma s (I_1 K_0 - I_0 K_1) + 16 I_1 K_1 \right\} \quad (4.7)$$

$$H_s/H_p = \left(e^{-\gamma s} / \gamma^2 s^2 \right) \left(12 + 12\gamma s + 5\gamma^2 s^2 + \gamma^3 s^3 \right) + 2 - \left(12 / \gamma^2 s^2 \right) \quad (4.8)$$

$$\rho_a = \mu_0 \omega s^2 (H_p/H_s) / 4 \quad (4.9)$$

ここで、 ρ_a : 均質地盤の見掛け比抵抗

μ_0 : 自由空間での透磁率 ($=4\pi \times 10^{-7}$ (H/m))

H_p : 1次磁場強度 (同相成分)

H_s : 2次磁場強度 (離相成分)

γ : $(i\omega\mu_0/\rho)^{1/2}$ 、 i : 虚数単位

s : コイル間隔、 I_0 、 I_1 、 K_0 、 K_1 : ベッセル関数

ω : 測定周波数の角振動数 $=2\pi f$ 、 f : 測定周波数

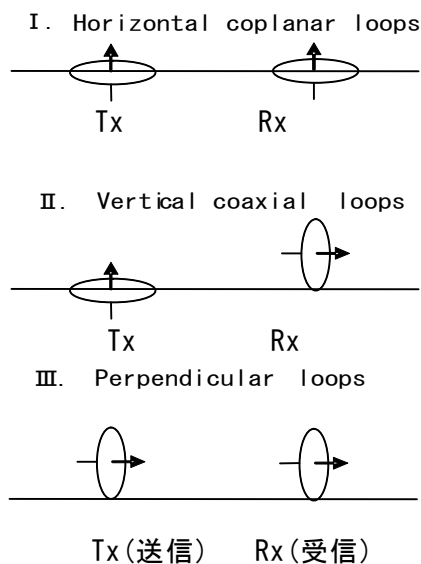


図 4.3 各種のコイル配置

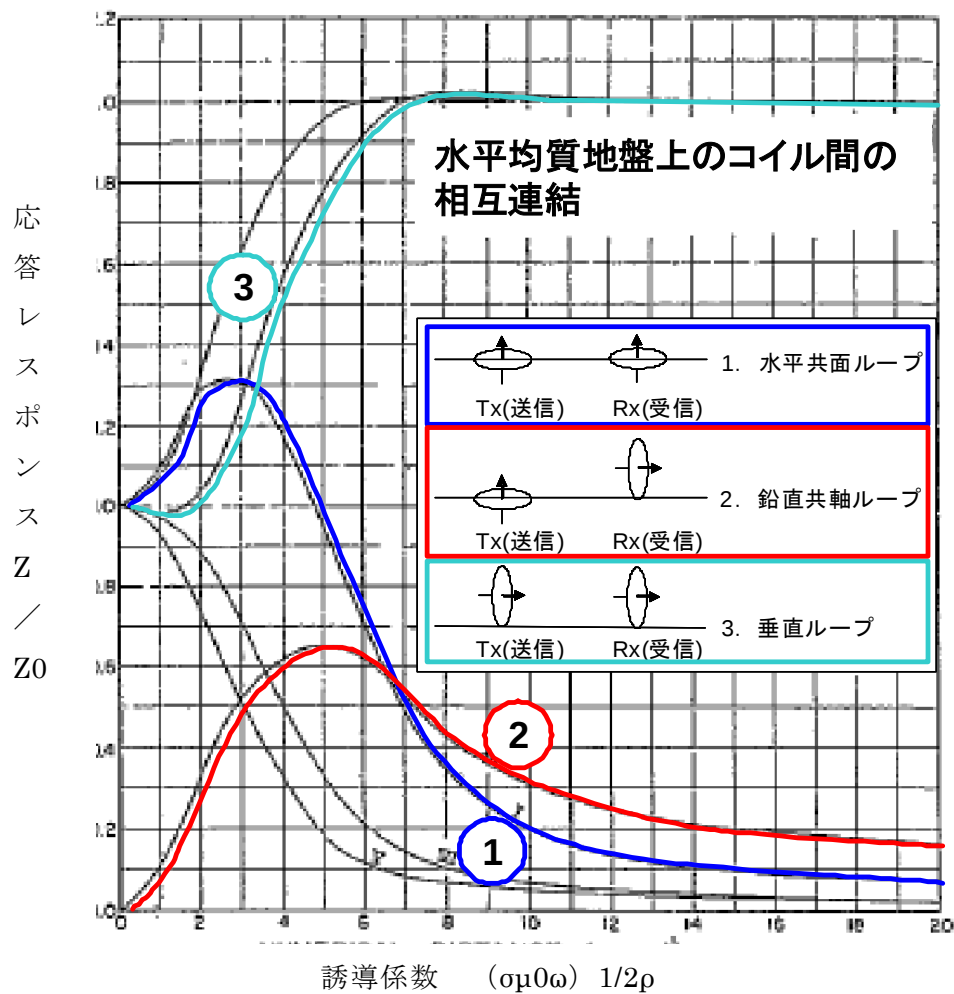


図 4.4 誘導係数と距離の関係

図 4.4 より応答レスポンスの大きいのは②の鉛直共軸クープであることがわかる。

4.3.2 逆解析法

FDEM 探査で測定されるデータは、周波数ごとの見掛け比抵抗データである。周波数は深度のパラメータとなっているが、これを逆解析 (inversion) によって比抵抗の深度分布を求める必要がある。

いま、測定周波数を f_i ($i=1, 2, 3, \dots, N$) とし、観測されたレスポンスを $G^m = (f_i)$ 、理論レスポンスを $G^m = (f_i)$ とする。地下構造を表す地層パラメータを $P = (P_1, P_2, P_3, \dots, P_M)$ とし、 P_j を第 j 層の比抵抗と層厚とする。観測レスポンス G^m と理論レスポンス G の最小二乗近似は、式 (4.10) で示される Φ を最小とする問題になる。

$$\Phi = \Phi = \sum_{i=1}^N \left\{ \ln G^m(f_i) \cdot \ln G(f_i) \right\}^2 \quad (4.10)$$

したがって、式 (4.10) の Φ を最小とする地層パラメータ P からなるモデルを決定すると、そのモデルは測定値と理論値がマッチングしたモデルの最確値であるということになる。

レスポンス $G(P, f_i)$ は、地層パラメータ P に関して非線形であるから、 P の近傍の値 $P^0 = (P_1^0, P_2^0, P_3^0, \dots, P_M^0)$ についてテーラー展開し、2 次の項を省略する

と、次のように ΔP_j に関して線形方程式(4.11)を得ることになる。

$$G(P, f_i) = G(P^0, f_i) + \sum_{j=1}^M \left\{ \partial G(P^0, f_i) / \partial P_j \right\} \Delta P_j \quad (4.11)$$

ここで、 $\Delta P_j = P_j - P_j^0$ 、 P^0 は地層パラメータ P_j の初期値である。式 (4.10) で定義される Φ を最小にする条件は、

$$\partial \Phi / \partial \Delta P_j = 0 \quad (j = 1, 2, \dots, M) \quad (4.12)$$

したがって、

$$\sum_{i=1}^N \partial G(P^0, f_i) / \partial P_j [\ln G(P, f_i) - \ln G(P^0, f_i)] - \sum_{j=1}^M \left\{ \partial G(P^0, f_i) / \partial P_j \right\} \Delta P_j = 0 \quad (4.13)$$

となり、式 (4.13) を行列で表すと、

$$A^T (\Delta F - A \Delta P) = 0 \quad (4.14)$$

ここで A^T は A の転置行列である。また、

$$[\Delta F]_i = \ln G(P, f_i) - \ln G(P_0, f_i) \quad (4.15)$$

$$[\Delta P]_j = P_j - P_j^0 \quad (4.16)$$

$$[A]_{ij} = \partial \ln G(P_0, f_i) / \partial P_j \quad (4.17)$$

ただし、 $N \geq M$ である。

式 (4.14) を ΔP に関して解くと、

$$\Delta P = (A^T A)^{-1} A^T \cdot \Delta F \quad (4.18)$$

となり、パラメータの初期値 P^0 が与えられると式 (4.18) を解くことによってパラメータの修正量 ΔP を計算でき、 $P = P^0 + \Delta P$ から 1 回目のパラメータが求まる。したがって、第 k 次の地層パラメータは繰り返し計算して

$$P^{(k+1)} = P^{(k)} + \alpha \Delta P^{(k)} \quad (4.19)$$

より求められる。この α は収束を最適の方向に進めるための係数であり、最急降下法 (steepest descent method、S D 法) や共役傾斜法 (conjugate gradients、CG 法) などを利用して安定に収束する方法をとる必要がある。筆者は CG 法を採用した。また、理論レスポンスについては、図 4.5 に示すような半無限の水平多層地盤のモデルを考えた理論解を適用するのが一般的である。現実的には、測定する場所が全て水平構造であるのはまれであり誤差の原因であると考えている。

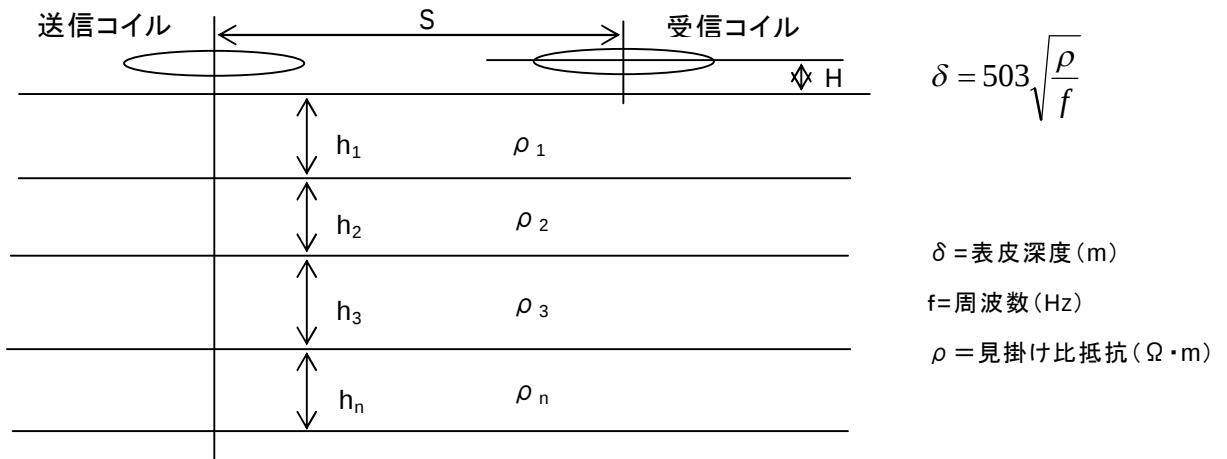


図 4.5 水平多層地盤のモデル図

周波数に関して 16 種類を使用しているが周波数と深度識別の考え方に関して図 4.6 に示す。開発しようとしている探査機は、周波数を多数変えて送信することから各々の見掛け比抵抗から差分をとれば表皮深度との関係から層沢が詳細になるものと考えている。なお、解析は逆解析で実施している。そして、理論解析に関する研究事例とし

ては、たとえば、Kozulin³⁾や Ward⁴⁾、あるいは Morrison et al.⁵⁾などがある。また、2 層モデルにおける電磁応答の理論解析については、たとえば、Frischknecht⁶⁾らによって詳しく解析されている。

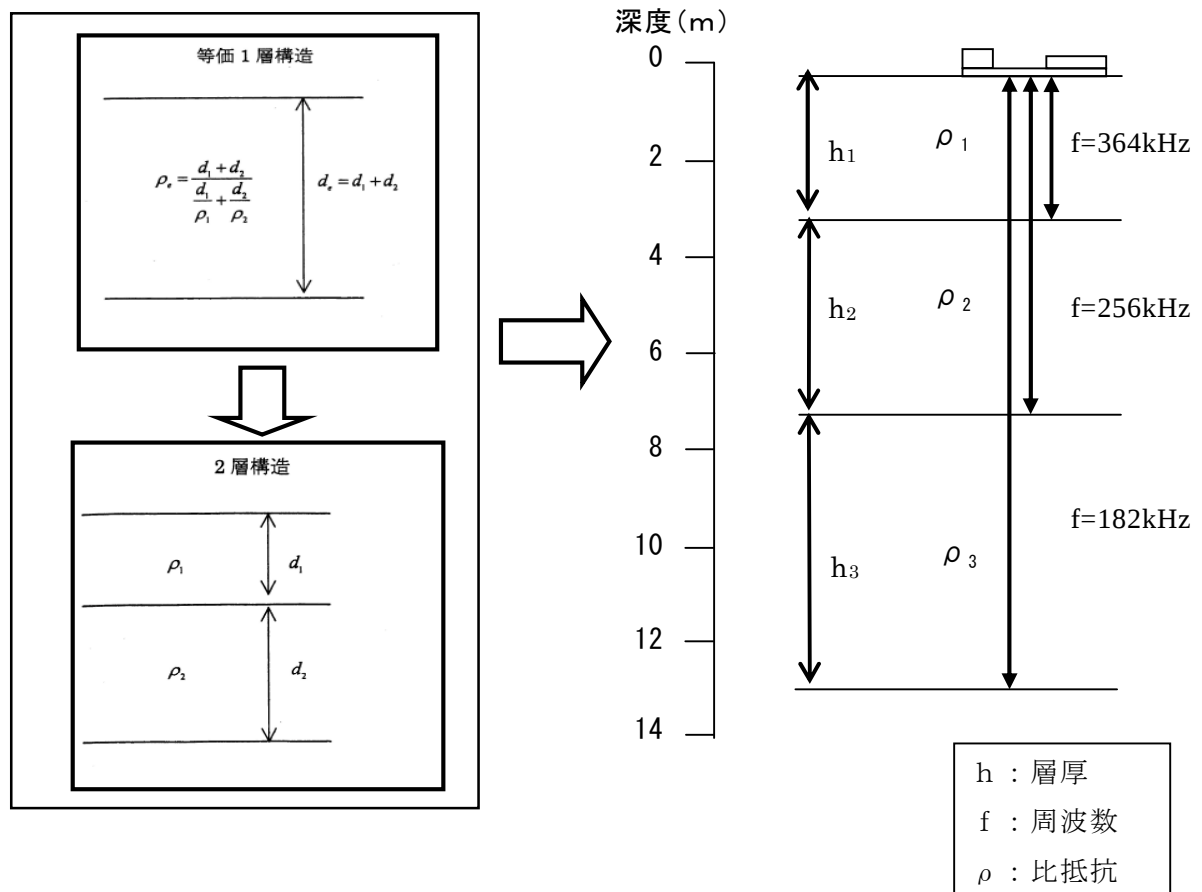


図 4.6 周波数と識別深度

図 4.5 に示す座標系における地表での理論レスポンス F_z は、Koefoed et al.⁷⁾らによれば、式 (4.20) で与えられる。

$$F_z = C \left[1/D + \int_0^\infty R(\lambda, h_i, \sigma_j, f) e^{-\lambda z} \cdot J_0(\lambda_r) \cdot d\lambda \right] \quad (4.20)$$

ここに、

S : 送信コイルと受信コイルまでの距離、

a : 送信コイルの半径、

$$D = (r^2 + z^2)^{1/2},$$

C : 積分定数、
 h_j : j 層の層厚、
 σ_j : j 層の導電率、
 f : 周波数、
 $R(\lambda, h_j, \sigma_j, f)$: カーネル関数、
 λ : 積分変数、
 J_0 : ベッセル関数 である。

また、カーネル関数 $R(\lambda, h_j, \sigma_j, f)$ は、各層の厚さ h 、導電率 σ および周波数 f をパラメータとした式(4.21)～(4.22)の漸化式で与えられる。 $R_{j-1,n}$ は第 n 層と $j-1$ 層のレスポンスを意味する。

$$R_{j-1,n} = \frac{v_{j-1,n} + R_{j,n} \exp(-2h_j v_j)}{1 + v_{j-1,n} R_{j,n} \exp(-2h_j v_j)} \quad (4.21)$$

$$R_{n,n} = 0 \quad (4.22)$$

ただし、 $R_{n,n}$: 最下層 n での値を表わし、 R_0 は地表での値である。

また、

$$v_j = (\lambda^2 + \gamma_j^2)^{1/2} \quad (4.23)$$

ここに、 λ は積分変数で、

$$\gamma_j^2 = i \cdot 2\pi\mu_0\sigma_j f \quad (4.24)$$

である。

ここに、 γ は波数で、地表空間では $\sigma = 0$ より $\gamma_0 = 0$ となる。

また、

$$v_{j,k} = \frac{v_j - v_k}{v_j + v_k} \quad (4.25)$$

である。式(4.21)は、最下層の n 層から順次上層に向けて計算することで R_0 が求められるが、無限積分になっているため、リニアフィルター法などの数値解析によらね

ばならない。筆者らは Ghosh⁸⁾らによるフィルター係数を採用している。

以上、示した解析方法による比抵抗モデリングのフローを示すと図 4.7 のようになる。

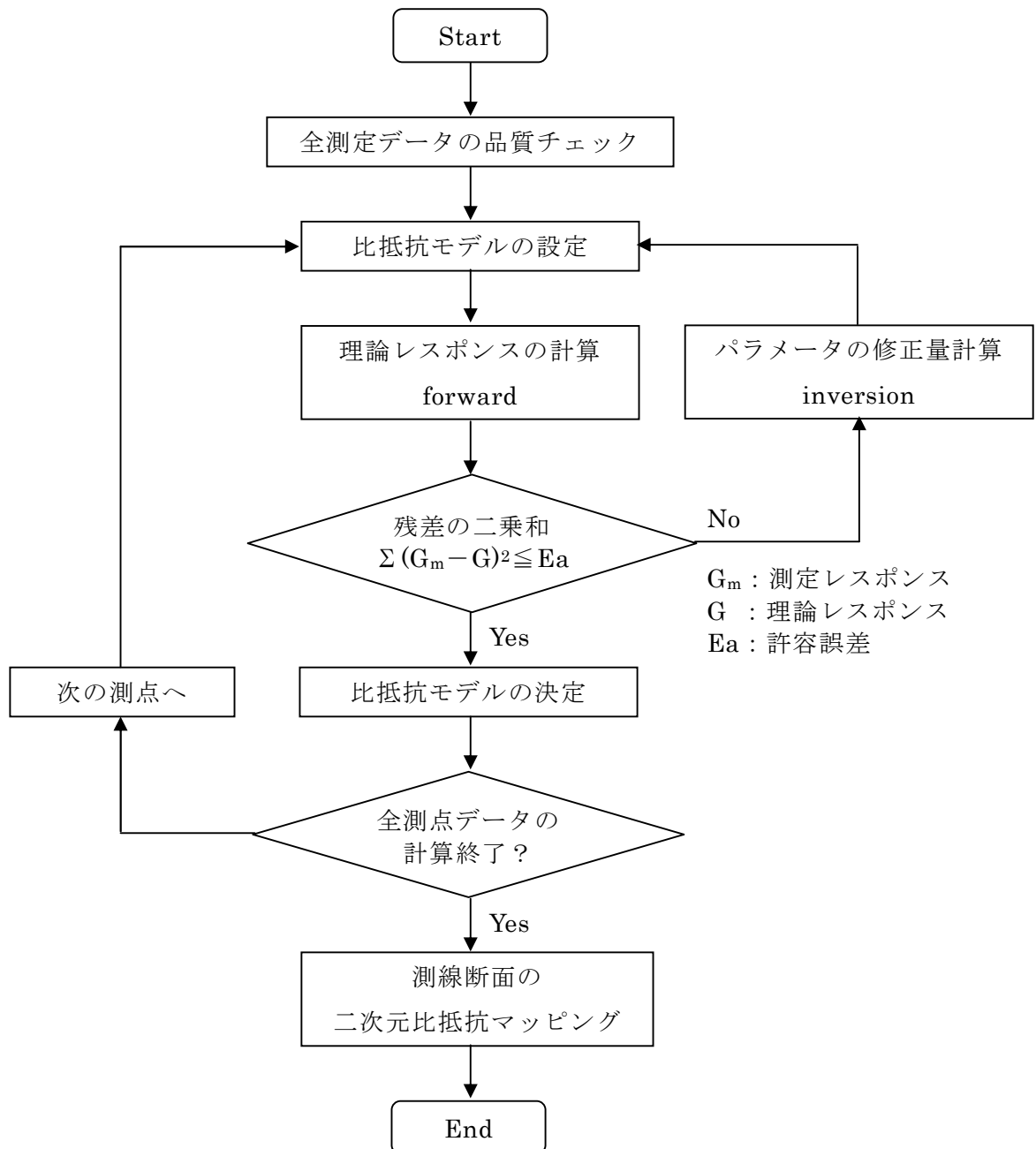


図 4.7 比抵抗モデリングの基本フロー

理論レスポンスを求めるのが順解析（forward）で、式（4.18）の解を求めるのが

逆解析 (inversion) となる。これらの計算が許容誤差内に収束するまで繰返し計算することで解を得る。そして、全測点の計算が終われば測線断面の二次元比抵抗マッピングを行うことで地質構造を解釈する。

4.4 探査機の開発

4.4.1 概要

今回、新たな探査機を開発するに当たって、調査対象分野を「河川」、「法面」、「トンネル」とし、探査深度を 50m 程度とした。具体的な調査場所は「堤防」、「斜面」、「トンネル坑内」である。

課題は、従来法では、電極を地盤に設置する、養生がいる、移動が頻繁に発生する、短時間に測定する、などである。それに対して「簡便」、「スピーディー」、「分解能を上げる」のコンセプトとして研究開発した。

具体的には、以下の項目を検討した。

- (1) 発信周波数の範囲
- (2) 対象の探査深度
- (3) 探査機のコイル間隔

土木分野での調査対象が深度 50m 程度までの地盤情報であることを考えると、実験設備の大きさやコストなどから考えて実験することにより、探査機に関する十分な検討を行うことは困難である。そこで、電磁界解析手法を用いることにより FDEM 探査の理論的な検証および小型で高感度な測定機器を製作する上で必要となる条件をシミュレーションにより得られる結果も参考にした。

以上のことを検討した結果、地盤探査として最適であると思われる探査機を開発製作した。

以下に検討項目ごとに整理した。

4.4.2 FDTD 法による検証⁹⁾

電磁界解析の分野において、差分法、有限要素法、境界要素法、モーメント法など、各種数値計算法が極めて大きな威力を発揮し、複雑な形状や構造の解析が容易に行われるようになってきている。これらの電磁界解析手法の中で、最も古い歴史をもつ差分法は導関数を差分近似し、微分方程式を直接離散化する手法である。今回は、従来の差分法を時間領域まで拡張した有限差分時間領域法 (Finite Difference Time Domain method: 以下 FDTD 法という) を用いる。この手法の特徴は最終的な結果や、更にその結果に至るまでの時間領域での電磁界の変化を観察できることにある。またアルゴリズムが非常に簡単であり、さらに解析対象のモデリングが容易に行えるといった特徴を

有する計算手法である。

そして、シミュレーションを用いて **FDEM** 探査の解析を行うことにより様々な検討を行った。まず理論的な検証を行うために地盤が一層構造の場合における理論式をもちいて複数の周波数・比抵抗を用いて計算を行い、正規化磁界の変化の傾向を確認した。その結果、高周波・低比抵抗では送信コイル近傍での変化が大きく、低周波・高比抵抗になるにつれて正規化磁界の変化の傾向が大きくなることが確認された。このことから正規化磁界の変化が大きい場所で測定することで地盤情報を感度良く測定できると思われたが、実際には磁界を測定し、その値から正規化磁界を算出するため、受信磁界を測定するための送受信コイル間隔に関して検討を行った。その結果、送信コイル中心からの距離が 1.5～3.0m 程度を受信点とする場合に受信磁界の変化を測定しやすいことが分かった。次に、シミュレーションにより **FDEM** 探査の解析を行うため、**FDTD** 法を円筒座標系で定式化を行いその精度検討を行った。その結果、領域を大きく設定することで比較的精度良く解析できることが分かった。これをもとに **FDEM** 探査の基本的な検討として一層構造での理論式と比較することで正規化磁界の変化の傾向がほぼ一致したことから、軸対称 **F D T D** 法が **FDEM** 探査解析に利用可能であることが確認できた。

上述のような確認ができたことから、一層構造での理論式では考慮していない送信コイルの半径の大きさについて検討したところ、コイル半径が 0.5m 以下の場合に正規化磁界の変化が大きくなる結果となった。また、コイルの配置高さについて検討を行った結果、送信コイルは地表に近い場合が最も感度良く測定を行うことができることが分かった。

さらに地盤が多層構造を形成している最も簡単な場合として、地盤の比抵抗分布が二層構造を形成している場合についても検討を行った。その結果、二層目の影響を確認するには一層目の層厚が表皮深度に対して小さな場合でなければならないことが分かった。また、層厚を満たすような表皮深度であっても一層目の比抵抗・層厚によっては地上からその影響を得ることが難しい場合があることが確認できた。

これらの検討をもとに、降下法を用いて逆解析を行うことで、測定を行う側面からの検討を行った。周波数の測定数の違いにより逆解析結果がどのように変化するか計算した結果、比抵抗・深度の探査範囲で詳細な結果を必要とするのであれば、周波数測定数は 3 通り設ければよいことが分かった。また、実際に測定される正規化磁界の値に対してどの程度、測定において有効桁数を必要とするのか検討を行った。その結果、比抵抗が $200 \Omega \cdot \text{m}$ 程度までの範囲であれば有効桁数は 4 桁あれば地盤情報を推定することができ、より高比抵抗の地盤に対しては有効桁数 4 桁では十分な推定を行うことができることが分かった。

以上の結果から、機器の設計に関して、送信コイルの半径は 0.5m 以下で、送受信

コイル間隔は 1.5～3.0m 程度にすることで、比較的感度良く測定を行えるのではないかとということが分かった。また、地盤情報を推定するためには、周波数を複数用いて実施すること、正規化磁界の変化を有効桁数 4 桁以上まで測定できる測定機器の設計するのが理想的であるのではないかと考えられる。

4.4.3 発信周波数の設定

電磁法において測定できる物理量は誘電率 ε と導電率 σ と透磁率 μ であるが、 μ は地球上ではどこでも一定で真空の透磁率 μ_0 と同じ値をとる。測定周波数の非常に高い（数 100MHz～1000MHz くらい）地下レーダでは誘電率が支配的となり導電率の効果は考えなくてもよく、逆に CSMT 法や FDEM 探査の周波数では誘電率の効果は無視できることになっている。このことについて以下に説明する。

電磁波が地中に透過する場合、マクスウェルの電場に関する方程式は、

$$\frac{\partial^2 E(z)}{\partial z^2} + (\varepsilon\mu\omega^2) - (i\mu\sigma\omega)E(z) = 0 \quad (4.26)$$

ここで、

$E(z)$: 深度方向 (z 方向) の電場

μ : 地盤の透磁率

で真空の透磁率 μ_0 で置き換えられる ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$)。電磁波から見れば真空中も岩石も同じ透磁率で一定とみなせる。

ε は誘電率であり地盤の比誘電率を ε_r とすれば、真空での誘電率 $\varepsilon_0 (= 8.855 \times 10^{-12} \text{ F/m})$ について $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ で置き換えられる。

角振動数は $\omega = 2\pi f$ であり、 i は虚数単位である。

いま、空間周波数を k とし、 $k = \pm\omega/v$ 、 $v = 1/\sqrt{\varepsilon\mu}$ (v は電磁波の速度) とすれば、 $E(z)$ の解は簡単に次のようになる。

$$E(z) = E_0 e^{-tkz} \quad (4.27)$$

この式を上の方方程式に代入すると、次の式が得られる。この式が解を持つためには、 $[]$ 内が 0 でなければならない。

$$[-k^2 + (\varepsilon\mu\omega^2 - i\mu\sigma\omega)]E_0 = 0 \quad (4.28)$$

$$k^2 = \varepsilon\mu\omega^2 - i\mu\sigma\omega \quad (4.29)$$

ここで、 $\varepsilon\mu\omega^2$ は誘電率に関する項であり、 $i\mu\sigma\omega$ は導電率に関する項である。これらはいずれも周波数に関与する項であり、両者の大小関係でいずれかの項が他項に比べて無視できる場合がある。通常は、周波数が高くなるほど（MHz 帯）誘電率の項が導電率の項より大きくなって導電率の項は効かなくなる。逆に、FDEM 探査の周波数帯では誘電率の項は効かなくなる。

導電率・誘電率と周波数の関係を図 4.8 に示す。たとえば、比抵抗が $\rho=100\Omega m$ で、比誘電率 $\varepsilon_r=10$ の地盤であれば、周波数が 600kHz 以下では導電率が優勢でこれ以上では誘電率が優勢となる。また、高比抵抗の地盤ほど誘電率が効いてくることが図 4.8 中のグラフから読み取れる。

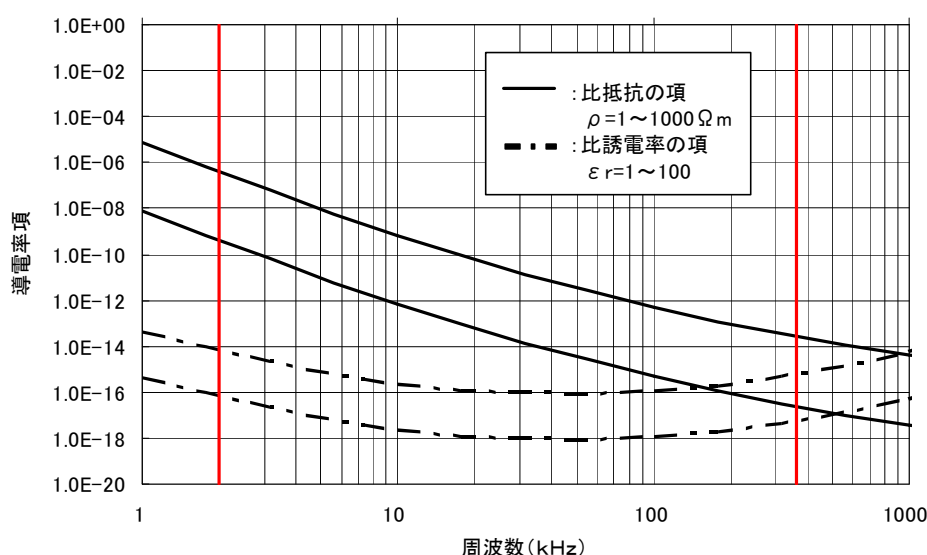


図 4.8 導電率と周波数の関係

以上の検討結果から、今回開発する発信周波数帯は、2～500kHz の中で適宜考える。

4.4.4 探査深度

一般に、電磁探査法においては、探査深度の目安に表皮深度の概念がよく利用されている。表皮深度とは、周波数の高い平面電磁波が、地表から地盤内に入射する場合、指数関数的に減衰し、地表での強度の $1/e$ = 約 37%（ e は自然対数の底）になる深度で定義されている。この表皮深度 δ は式 (4.28) で与えられる。

$$\delta = (2\rho/\omega\mu)^{1/2} \quad (4.30)$$

ここに、 δ : 表皮深度、
 ρ : 媒体の比抵抗、
 ω : 角振動数、
 μ : 透磁率、

である。

通常、電磁探査法の CSAMT 法などでは、送信アンテナと受信コイルの間隔を探査深度の 4～5 倍ほど離せば、ファーフィールドの領域に入り平面電磁場の理論が成立し、地層では $\mu = \mu_0$ になるので式 (4.30) は式 (4.31) で表される。

$$\delta = 503(\rho/f)^{1/2} \quad (4.31)$$

ここに、 f は周波数である。

図 4.9 は均質地盤の比抵抗と表皮深度（探査深度の目安）の関係を、測定周波数 f について表したグラフである。

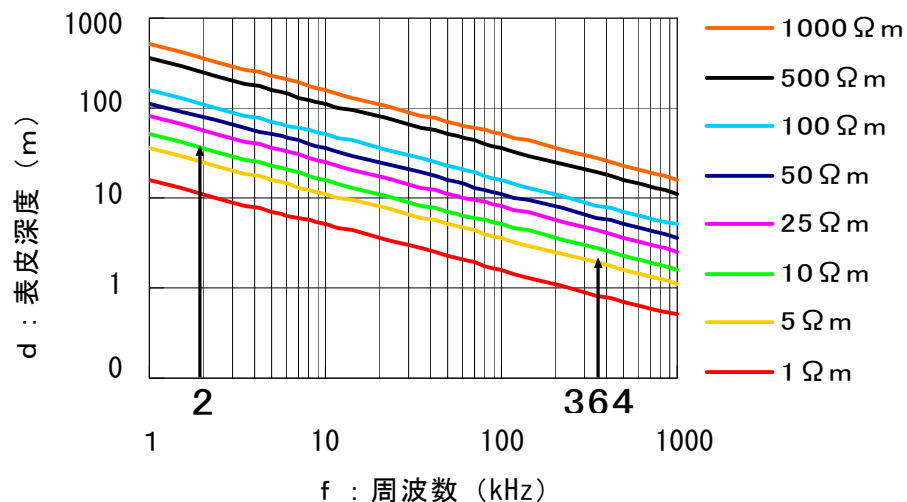


図 4.9 FDEM 探査における表皮深度と比抵抗の関係

しかし、図 4.9 に示すような FDEM 探査では、明らかにニアフィールド（送受信間隔が小さくて平面電磁場の理論が成立しない領域）の場合であるため、式(4.31)による目安をダイレクトに利用するには問題がある。しかしながら、開発に当たっては、この比抵抗と表皮深度の関係は十分に参考となる。たとえば、地すべり地区のすべり面を構成する層の比抵抗は低い値になる。地盤状況によっては、10 Ω m 前後の比抵抗を示したと仮定する。その場合、図 4.9 から読み取れるのは、発信周波数を 2 kHz と

仮定した場合は、 $10\Omega\text{m}$ を有する地盤のでは、深度 50m程度まで探査可能である結果が読み取れる。

筆者は、文献等から調査対象分野から考慮して、地盤比抵抗を $10\sim 500\Omega\text{m}$ 、探査深度を $20\sim 50\text{m}$ 程度計測できる探査機を開発することとした。図 4.9 から明らかなように周波数帯は、低い場合は表深度が深くなり、逆に高い場合は、表皮深度が浅くなることが読み取れる。また、前節で述べたように、開発しようとする探査機精度との関係から $2\sim 500\text{kHz}$ であれば十分に計測可能範囲となる。

以上の事から、今回開発する発信周波数帯は、低い周波数を 2kHz とし、高い周波数帯は $\sqrt{2}$ 乗倍して 500kHz 以下となるように設定した。結果的には、 $2\sim 364\text{kHz}$ の周波数帯に決定した。発信周波数帯の種類は、製作可能な 16 種類とした。

4.4.5 送受信コイル間隔について

(1) 送受信間隔の距離

筆者は、調査対象分野を絞りその場所で効率的に探査できる方法として送受信間コイルの距離関係を一定にすることが合理的と考えて、送受信コイル間隔について検証した。図 4.10 に周波数 32kHz について送受信コイル間隔と測定見掛け比抵抗(式(4.31)の ρ に相当する) の関係を電磁解析 (使用ソフト：フォトン) して表した。

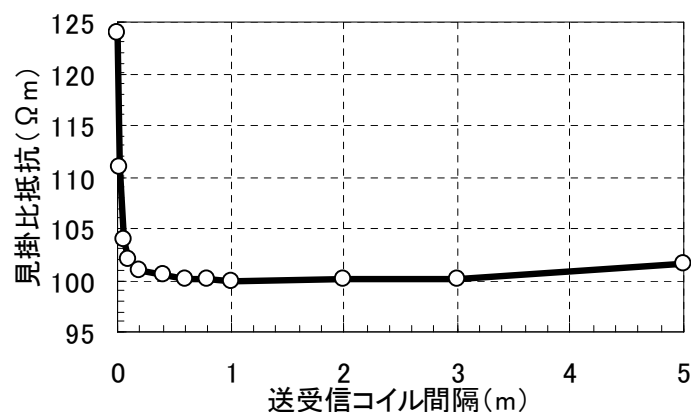


図 4.10 コイル間隔と測定見掛け比抵抗

図 4.10 から測定する見掛け比抵抗は、送受信コイル間隔がおよそ 0.5m 以下になると $100\Omega\text{m}$ の均質半無限地盤の場合であっても見掛け比抵抗値は急激に $100\Omega\text{m}$ 以上になる。この図から明らかなようにコイル間隔が 0.5m 以下になると、セパレートコイル型探査機では地盤の比抵抗を正しく測定できなくなることが判断できる。また、 $70\text{cm}\sim 3\text{m}$ までは安定した結果が求められることから、探査機のコイル間隔は 1m とした。

(2) 送受信コイルの固定

送受信コイル間隔を 1 m とした時の測定見掛け比抵抗がどのように検出されるかを検証した。前節で、FDEM 探査機の発信周波数は 2～364 k Hz (16 チャンネル) と決定したので、地盤の比抵抗が 10 Ω m であれば、式(4.31)の簡易的な表皮深度の式から探査深度は 2.5～35m、100 Ω m の地盤であれば 8～100m という結果を得る。地盤の比抵抗が低く、高い周波数帯で測定するほど表皮深度 δ が小さくなり、送受信コイル間隔 s が一定であれば $s/\delta \ll 1$ の条件を満足しなくなる。開発した機器は、コンパクト化のため送受信間隔は 1.0m で製作しているので、この条件を満たしているかどうかについては、三次元電磁解析により、いくつかのコイル間隔に対して測定見掛け比抵抗が均質地盤の比抵抗を反映しているかどうか検討し、その結果を表 4.1 に示した。送受信コイル配置が図 4.4 に示したタイプ II でコイル間隔が 0.5m の場合、100 Ω m の地盤比抵抗に対し測定見掛け比抵抗は 40 Ω m と低めに出ることが分かり、間隔が 1.0m の場合は 85 Ω m と少し低めに出ることが分かった。現場測定を優先させた場合は、探査機をコンパクトにして持ち運びやすさを考慮する必要性があり今回は 1 m に固定した。なお、少し低めに出るこの差異については機器校正により解決した。なお、開発した FDEM 探査機の受信できる信号強度は S/N 比の関係で限界があるため、最大探査深度はおおむね 30～50m 程度と想定した。

表 4.1 送受信コイル間隔による測定見掛け比抵抗の 3 次元電磁解析結果

受信点間隔 (m)	I 型レスポンス	II 型レスポンス	見掛け比抵抗 (Ω m) I 型配置	見掛け比抵抗 (Ω m) II 型配置
0.5	3.67×10^{-3}	2.28×10^{-3}	25	40
1	4.25×10^{-3}	4.30×10^{-3}	86	85
1.5	6.35×10^{-3}	8.41×10^{-3}	129	97
2	8.27×10^{-3}	1.46×10^{-2}	167	100

タイプについては、図 4.4 に表する。

4.4.6 開発した探査機の概要

開発した FDEM 探査機の外形写真を写真 4.1 に、探査機的主要仕様を表 4.2 に示した。写真 4.1 からわかるように固定型なので 2 人で移動が簡単に出来ることがわかる。

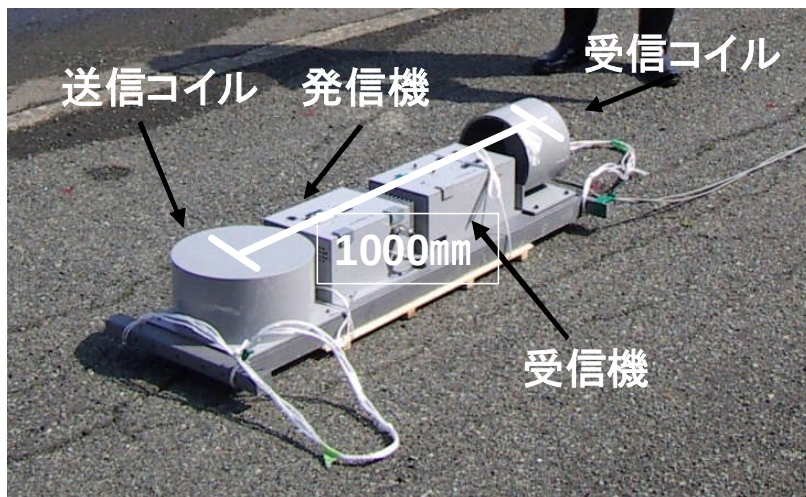


写真 4.1 開発した FDEM 探査機

過去に存在する同様な電磁探査機の測定周波数は 2～3 チャンネルのものが大半であったため、深度方向の分解能が小さく細かい地層分解はできなかった。そのため、今回開発した FDEM 探査機は、測定周波数を 16 チャンネルと多くし分解能を高くし

表 4.2 FDEM 探査機的主要仕様

測定周波数 16Ch	364, 256, 182, 128, 91, 64, 45.5, 32 22.8, 16, 11.4, 8, 5.7, 4, 2.8, 2 (kHz)
コイル	送信コイル：直径 30cm、巻数 10 回 受信コイル：直径 20cm、巻数 100 回 (送受信コイル間隔：1.0m)
送信機	高周波リニアアンプ (送信電流：正弦波 2～6A)
受信機	DDS(Direct Digital Synthesizer)による 位相差検出回路：位相ドリフト 0.02 度以下
寸法、質量	1200(L)×500(W)×300(H) mm、約 20kg
データ通信	RS232C ケーブル (max50m)
計測ソフト	パーソナルコンピュータ制御 計測時間：最速 1 分／測点、
電源	AC100V (ポータブル発電機)

た。次に、レスポンスを求めるには、通常、1 次磁場をキャンセルした信号について位相検波して同相成分（実数成分）と離相成分（虚数成分）を求めるが、位相検波は受信信号のレベルが小さいと虚数成分の S/N が悪くなりデータのばらつきが大きくなる。そこで、開発機では、一次磁場と二次磁場の位相差 Φ を検出してレスポンス $H_s/H_p = \tan(\Phi)$ で求めるようにした。このため、送受信コイル間隔は、1 次磁場をキャンセルする位置を微調整して置かれている。

4.4.7 シミュレーション解析

前節までに、発信周波数の設定、探査深度、送受信コイル間隔に関して検討とした。その結果として、写真 4.1 に示す FDEM 探査機が完成した。この探査機が、本当に精度が出るのかをフォトン製の 3 次元電磁解析ソフトを使用して検証した。

FDEM 探査機は、送信コイルと受信コイルの中心間隔が 1m（送受信コイル外縁 1.2m）で製作され、送信コイルの直径は $\phi 300\text{mm}$ である。このコイルに電流を流した場合（周波数 182kHz、電流 1A、均質地盤の比抵抗 $100\Omega\text{m}$ ）の地表面における磁場分布の様子を三次元電磁解析ソフトで解析したものが図 4.11 である。FDEM 探査

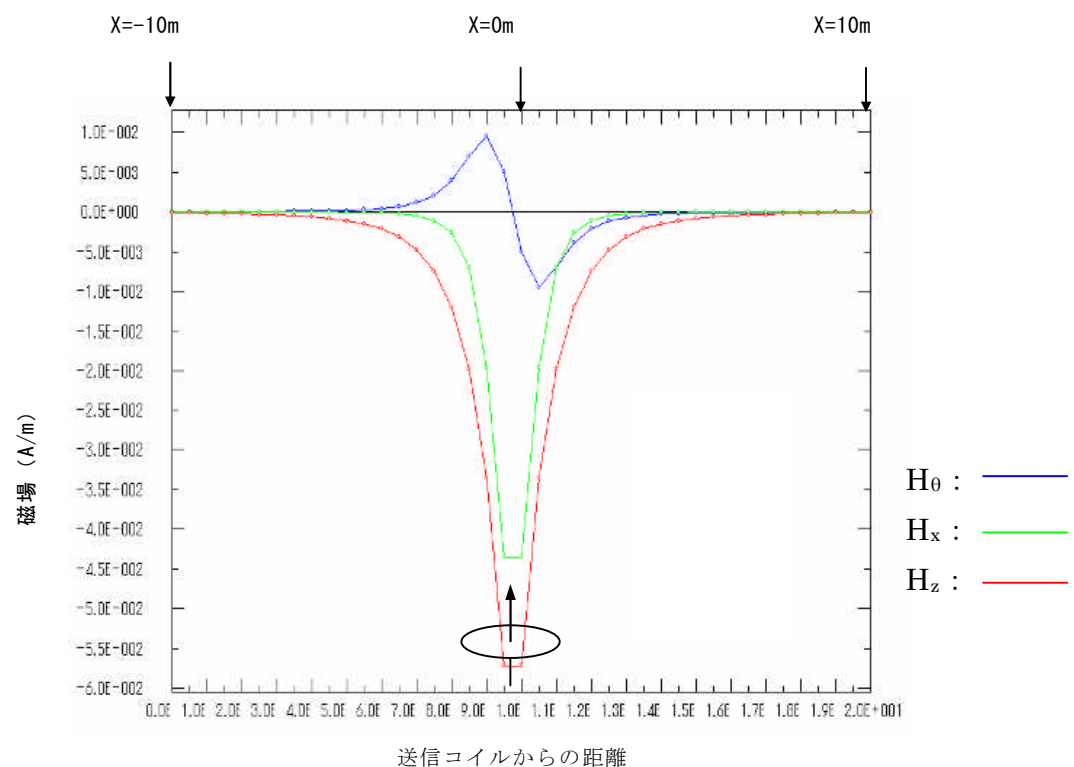


図 4.11 送信コイルの磁場分布

機はこの垂直成分 H_z の電磁誘導によって生じた渦電流による二次磁場 H_s を測定して見掛け比抵抗を求めている。コイル中心からの距離減衰の形が探査機の指向性の目安になるが、その距離減衰は図 4.11 から分かるようにコイル中心からおよそ 1.5m 付近になると急激に減衰するので、測定している範囲はコイルを中心として幅 3m までの範囲と思われる。したがって、図 4.11 の測定位置関係からすると B 断面の測定位置では A 断面付近の地下情報の影響はそれほど含まれていないと見て差し支えないものと思われる。

4.5 検証事例

A堤防は図 4.12 に示す形状であり、探査は河川側の堤防肩部において、2m ピッチで約 500m 区間を探索した。探査時間は約 5 時間であった。図 4.13 に解析した比抵抗分布図を示す。

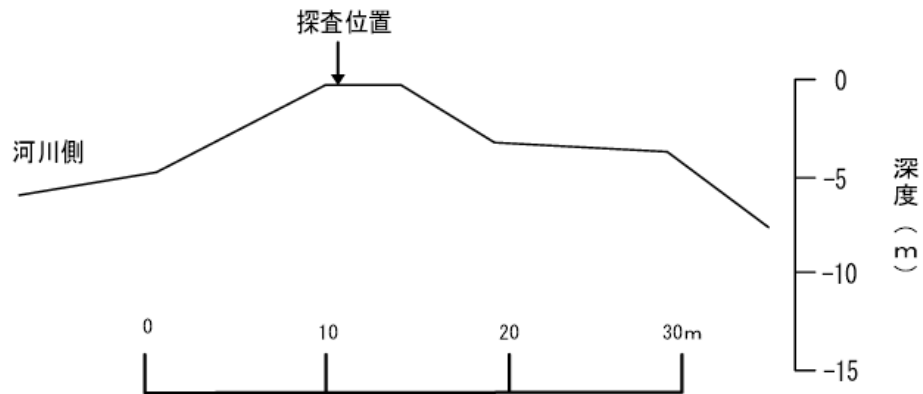


図 4.12 A堤防の標準断面図

この探索区間においては 3 箇所事前にボーリング調査が行われ、図 4.14 に示す地質断面図（水平距離は図 4.13 に合わせている）が作成されていた。図 4.14 を見れば、堤防盛土の高さは 7m から 9m であり、下部地盤は沖積層であり粘性土、細粒砂質土、礫混じり砂～礫質土という地層区分が見られる。

図 4.13 の比抵抗分布と照合すると、粘性土層の比抵抗は低く探索され、距離 200 m 付近から 400m にかけて層厚が徐々に厚くなる探索結果で、おおむねボーリング結果の地層区分と整合している。しかし、粘性土層の中に介在する細粒砂質土層や礫混じり砂～礫質土からなる互層区間（図 4.14 の赤線枠 A の付近）では、細かな比抵抗区分は探索できていない。第 2 礫混じり砂～礫質土層（Asg2）での比抵抗は高く探索され、0m～300m 付近までのこの層の上面の深度は浅いが、これより 500m にかけて徐々に深くなる傾向は、比抵抗分布図でもおおむね探索されているが、第 2 細粒砂質土層（Asf2）と第 2 礫混じり砂～礫質土層（Asg2）の境界は、比抵抗分布図では明瞭ではない（図 4.14 の赤線枠 B の付近）。

図 4.13 に示す開削工事区間では、比抵抗は高く探索され、新しい盛土材と古い盛土材の違いが比抵抗の差となって表れたようである。また、樋門位置の比抵抗は、局所的な高比抵抗として探索されており、樋門の位置、深度とも良く整合している。高比抵抗になる理由としては、測定位置の下にはカルバート構造の樋管があり、幅 10m、高さ 2.5m の矩形断面内による空間の影響があったと思われる。

なお、この探索区間で現われた細粒砂質土の比抵抗がどの程度であるかは不明で

あるが、細粒であるということから普通の砂より孔隙率が小さくなって比抵抗も少し低くなり粘土層と似たような値を持っていると考えられる。いずれにせよ、比抵抗による地層区分の評価は、探査された比抵抗分布図で急に低比抵抗になる、あるいは高くなる箇所の判定によることになるため、土質が明らかに違っていても、その電気的性質が類似して比抵抗が似た値で探査された場合は、それらの識別は難しいということになる。

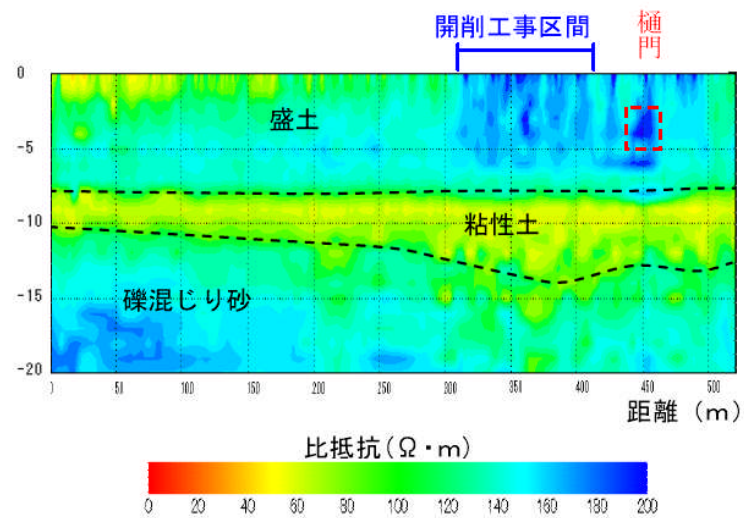


図 4.13 A 堤防の比抵抗分布

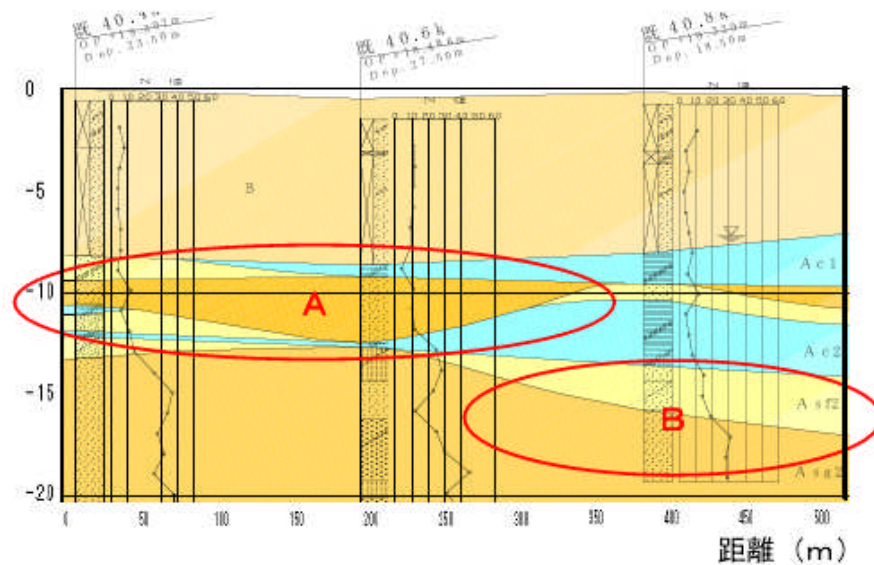


図 4.14 A 堤防のボーリング結果と地質縦断図

FDEM 探査によって堤防の比抵抗分布を求め、比抵抗値が急に低くなる、あるいは高くなる箇所から地層区分をするという試みは、二つの探査事例から概ね可能であると評価できる。しかし、土質は異なるが比抵抗値が似ている箇所では識別は困難である。少なくとも礫、砂、粘土の地層区分は、FDEM 探査による探査でほぼ可能であると言え、探査区間においてもボーリングデータがあればより精度の高い地層区分が出来ることになろう。したがって、長い堤防区間を FDEM 探査で探査した場合、その間のボーリング調査を少なくしても、比較的精度のある地層区分が出来ると考えられる。

4.6 まとめ

地盤に透入する周波数を変化させて地盤の見掛け比抵抗を測定する探査方法に着目し研究を実施した。海外では、徐々に採用されたようであるが透入する周波数の種類が少なく分解能が低いのではないかと考えた。周波数変化を増やすことにより分解能が高まると考え周波数の数を色々と検討した。その結果、周波数領域電磁探査法を開発することとし研究した。

以下に、検討した項目を整理する。

(1) 発信周波数

探査深度を仮定して探査可能な周波数を設定した。

(2) 送受信コイル間隔の決定

送受信コイルの間隔は長い距離 1ー3mまでが安定し短ければ測定する比抵抗値が想定 of 1.3 倍程度になるという結論を得た。結果として、簡便にするには、最短距離であることが望ましく 1mとした。

(3) 探査機のシミュレーション解析を行い精度の確認をした。

参考文献

- 1) McNeill, J. D. : Electromagnetic terrain conductivity Measurement at low induction numbers, Technical note TN-6, Geonics Ltd., 1980.
- 2) Wait, J. R. : Mutual coupling of wire loops lying on a homogeneous ground, Geophysics, v. 19, pp. 290-296, 1954.
- 3) Kozulin, Y. N. : A reflection method for computing the electromagnetic field above horizontal lamellar structures, Izvestiya Academy of Sciences USSR, Geophysics Series (english edition), NO. 3, pp. 267-273, 1963.
- 4) Ward, S. H. : Electromagnetic theory for geophysical application, in Mining geophysics, Vol. 2, S. E. G., Tulsa, 1967.
- 5) Morrison, H. F. Phillips, R. J. O' Brien, D. P. : Quantitative interpretation of transient electromagnetic fields over a layered half space, Geophys. Prosp., v. 17, pp. 82-101, 1969.
- 6) Frischknecht, F. C. : Fields about an oscillating magnetic dipole over a two-layer earth, and application to ground and airborne electromagnetic surveys, Quarterly of The Colorado School of Mines, v. 62, pp. 1-81, 1967.
- 7) Koefoed, O., Ghosh, D. P. and Polman, G. J. : Computation of type curves for electromagnetic depth sounding with a horizontal transmitting coil by means of a digital linear filter, Geophys, V. 20, pp. 406-420, 1971.
- 8) Ghosh, D. P. (1971) : The application of linear filter theory to the direct interpretation of geoelectrical resistivity sounding measurements, Geoph. Prosp. 19, pp. 192-217, 1971.
- 9) 阿南尚弘, 米津大吾, 原武久, 櫻木大介, 小里隆考, 片山辰雄 : EM探査法におけるFDTD法の計算効率化, 日本シミュレーション学会大会発表論文集 JST 資料番号 : X0291B, Vol. 22nd ppt133-136 (2003.06.18)

第5章 同軸コイル型周波数領域電磁探査法の開発

5.1 はじめに

筆者は、第4章で述べている通り、送受信がセパレート型の FDEM 探査機¹⁾を研究開発した。その結果、土木分野特に河川堤防を中心に護岸、空洞探査等で実績を積上げてきた。しかし、送受信がセパレート型になっているため、均質地盤の場合は理論的には問題ないが、地下にある導電体の規模、場所によっては正確にどの箇所の結果を検出しているかを懸念する場合があった。具体的には、図 5.1 にセパレート型 FDEM 探査機を模式した図を示すが、送信コイル直下と離れた地点での磁場分布の様子を模式的に表現したものである。また、図中の距離 A、B、C の記入は模式的なもので深くなるにつれて磁場強度が減衰する様子を示したものである。また、同じ深度ならば受信コイルは送信コイルとの距離が短いほど 1 次磁場強度が強く、それだけ 2 次磁場も強くなり、受信機での検出が明確になる。

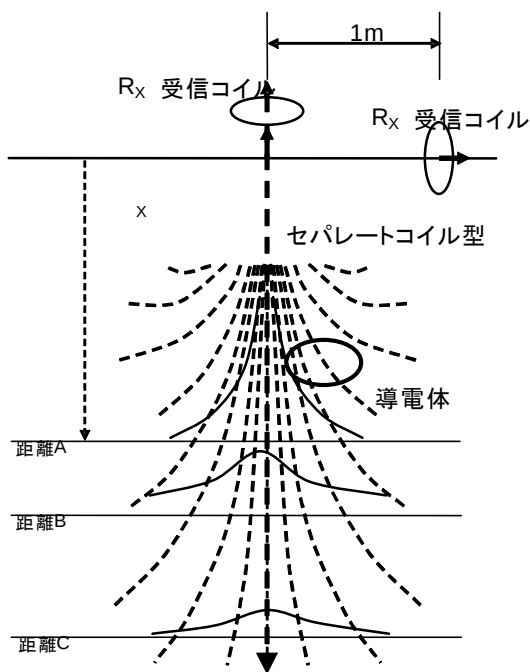


図 5.1 深度方向での磁場強度発生概念（セパレート型）

筆者は、送受信間が 1m なので概略調査としては問題が送信コイルと受信コイルが同軸であれば上記したどの場所の地下構造を検出しているかという懸念は払拭されるところと考え文献調査から中心誘導法（CIM：Central Induction Method）が研究されているのを見つけた。これは、J.G.Koenigsberger²⁾ および W.Nunier³⁾ によってこの原理に基づいて水平層状構造の探査を行う方法を提案している。日本では、昭和 30 年

代にかなり研究されているが実用化に至っていないと判断した。筆者としては、この研究成果物として中心誘導法の理論を踏襲した探査機を研究開発することにした。文献によれば、地表面に置かれた円形ループに交流を流して磁場を発生させれば、ループ中心に生ずる2次磁場は1次磁場と同相にならない。この位相差は地盤の電気的性質に関係するので2次磁場の成分や位相差を測定することから地下構造を探索することができることがわかっている。S. S. Stefanescu⁴⁾はこれを理論的に発展させ、円形ループのほかに矩形ループ法を考案した。清野、吉住、谷口、空知⁵⁾らは、C. I. M. の基礎理論を検討し、結果解釈に必要な函数の数値表を作り、更に測定上の諸問題を考察し一つの新しい方式を提案している。

本研究は、筆者がすでに開発している FDEM 探査機をモデルとした探査機で、探査機直下の地盤状況が正確に把握するため、中心誘導法に着目し、それを原理とした探査機の開発を目指した。そして、同軸に巻かれた送信コイルにより発生させた電磁波を地中に透入し地盤内に出来る2次磁場を測定する探査機を研究開発することに決定した。これは、地盤の導電率（比抵抗の逆数）を求め地盤構造を把握する手法である。この探査機を CCEM (Coaxial Coil Frequency Domain Electromagnetic Method) 探査機（以下、同軸コイル型探査機）と称する。

5.2 同軸コイル型周波数領域電磁探査法 の概念

この探査機の特徴は、透入磁場を円形コイルで与えるため、指向性が鋭くなる利点を持つことである（図 5.2）。図 5.1 に示すセパレート型に比べて強い磁場強度を感知

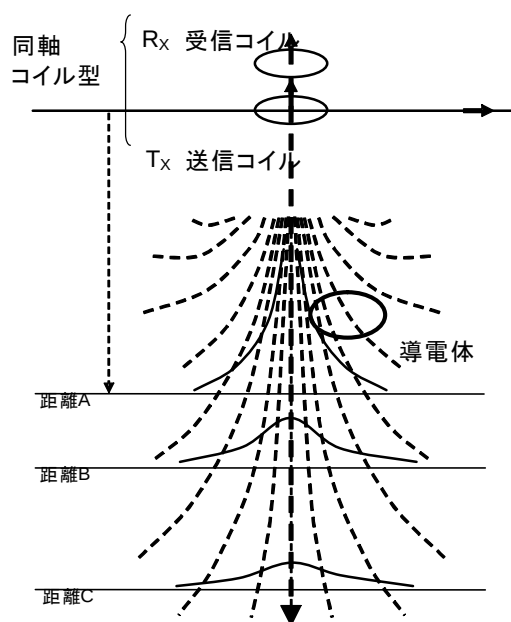


図 5.2 深度方向での磁場強度発生 の概念（同軸コイル型）

できる概念が見て取れる。ここでは、送信コイルから発生する 1 次磁場によって渦電流が発生しさらに 2 次磁場が誘導され、これを地表で測定することで地盤内の比抵抗が求められる。しかし、この 2 次磁場の強度は弱く、一般に 1 次磁場の 10^{-3} から 10^{-6} まで減衰するので、これを感知できる高感度な受信機が必要となる。

このため、コンセプトは、

- (1) 深部からの 2 次磁場は小さいため、高 S/N (Signal to Noise ratio) を有する受信機を開発する。
- (2) 1 次磁場を強くして 2 次磁場強度を上げる工夫が要る。

開発機は上記(1)、(2)の両者の工夫を凝らして製作されたものである。受信機の S/N を上げる、あるいは 1 次磁場の強度をより大きくする対応は、結局、探査の分解能を上げることにつながる。

また、コイル中心磁場が最も強くなることを応用した中心誘導理論を測定原理にしているため、従来機（以下、セパレートコイル型と称する）とは異なり、より深部まで送信磁場を送り込むことができる。

基本的には、測定原理は異なるが、送信コイルから磁場を発生させ 2 次磁場を測定する概念は同じであるので発振させる周波数の数は、セパレート型 FDEM 探査機と同様、測定周波数を多くして測定データを取るにより地層を細かい深度ピッチで探査していることになるので開発機も測定周波数を 16 チャンネルと多くしている。

5.3 測定理論と逆解析

5.3.1 測定原理

いま、地盤の透磁率 μ を簡易のため $\mu=1$ とし、導電率 σ (S/m) と仮定し、地表面に半径 a (m) の送信コイルを設置し、これに電流 I (A)、周波数 f (Hz) の交流電流を流したとき、コイル中心に生じる磁場は垂直成分 H_{0z} のみが式 (5.1) で与えられる²⁾。

$$H_{0z} = 2\pi a I \int_0^\infty \frac{2\lambda^2}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 - k^2}} J_1(a\lambda) d\lambda \quad (5.1)$$

ここで、

λ : 積分変数、

k : 波数、

J_1 : 第 1 種変形ベッセル関数

である。

光の速度を c (m/s)、虚数単位を j としたとき、式(5.1)の k は次式で与えられる。

$$k^2 = j \frac{\omega 4\pi\sigma}{c^2} \quad (5.2)$$

ここで、 $\omega = 2\pi f$ である。

式(5.1)の積分は複素数になっているので、実数部 R_r と虚数部 I_m に分けると次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} R_r \left(\frac{aH_{0z}}{2\pi I} \right) &= \frac{-e^{-\gamma}}{\gamma^2} \left\{ (2\gamma^2 + 3\gamma) \cos \gamma - (3\gamma + 3) \sin \gamma \right\} \\ I_m \left(\frac{aH_{0z}}{2\pi I} \right) &= \frac{1}{\gamma^2} \left[3 - e^{\gamma} (3\gamma + 3) \cos \gamma + (2\gamma^2 + 3\gamma) \sin \gamma \right] \end{aligned} \right\} \quad (5.3)$$

ただし、

$$\gamma^2 = \frac{\omega 2\pi\sigma}{c^2} \cdot a^2 \quad (5.4)$$

式(5.4)の γ は角周波数($\omega = 2\pi f$)の関数であり、角周波数によってそのオーダーは大きく変化する。

また、開発機の測定周波数は、セパレート型と同様に 2kHz から 364kHz の 16 周波数として製作することにする。この周波数範囲において γ の値を計算すると、明らかに $\gamma \ll 1$ となる。

この場合、式(5.3)は簡略化され、

$$\left. \begin{aligned} R_r \left(\frac{aH_{0z}}{2\pi I} \right) &= 1 - \frac{4}{15} \gamma^2 \\ I_m \left(\frac{aH_{0z}}{2\pi I} \right) &= \frac{\gamma^2}{2} \end{aligned} \right\} \quad (5.5)$$

となる。測定機の位相差計によって 2 次磁場の実数成分と虚数成分とが測定でき、両者の位相角 ϕ が分かると、式(5.6)の関係を得る。

$$\tan \phi = \frac{I_m(H_{0z})}{R_r(H_{0z})} \quad (5.6)$$

式(5.6)の位相角が測定できれば式(5.5)から γ の値が決まり、さらに式(5.4)から導電率を求めることができる。

図 5.3 は、 γ の値によって決まる式(5.3)の値を計算し、式(5.6)の $\tan \phi$ (測定レスポンスとも言われる)を計算した図表である。実際には、開発機の位相差計において $\tan \phi$ が測定されるので、この値が知れると図 5.3 から γ が分かり、式(5.4)から測定したい導電率 σ が求められる。

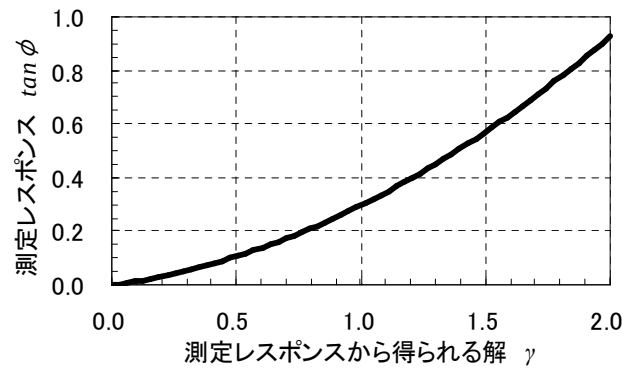


図 5.3 γ と $\tan \phi$ の関係

なお、式(5.6)は SI 単位系の表示であるから、これを emu (electromagnetic unit : 実用単位) で書けば、式(5.7)のようになる。

$$\tan \phi \cong 2.461 f \sigma a^2 \times 10^{-6} \quad (5.7)$$

また、セパレートコイル型の測定式は一般に式(4.8)で表される。

$$\rho = \mu_0 \omega s^2 (H_p / H_s) / 4 \quad (5.8)$$

ここに、

ρ : 比抵抗 ; $\rho = 1/\sigma$ (Ωm) の単位

H_p : 1 次磁場強度、

H_s : 2 次磁場強度、

s : 送受信コイル間隔

である。

また、 $(H_p/H_s) \cong 1/\tan \phi$ に相当するので書き直すと、

$$\tan \phi = 1.974 f \sigma s^2 \times 10^{-6} \quad (5.9)$$

となる。

式(5.7)と式(5.9)を比べると a が s に 2.461 が 1.974 に代っている。この定数の違いは単位変換上の違いであるが、式(5.7)ではコイル半径 a の 2 乗になっているものが、式(5.9)では送受信コイル間隔 s の 2 乗になっている。開発機では a が約 30cm で、セパレートコイル型では s が 100cm となっているので同じパワーの送信コイルであれば後者の方が受信電圧が大きくなる利点が考えられる。

5.3.2 逆解析理論

n 層からなる水平多層構造上(図 5.4)に半径 a のループが置かれている場合の垂直方向の中心磁場は、式(5.10)で与えられる。

$$H_{0z} = \frac{aI}{2} \int_0^\infty \left(\frac{2\lambda}{\lambda + \lambda_1} + \frac{2\lambda_1}{\lambda + \lambda_1} B_1^{(n)} \right) J_1(a\lambda) \lambda d\lambda \quad (5.10)$$

ここで、 J_1 : 1 次のベッセル関数、

λ : 積分変数、

$B_1^{(n)}$: 角周波数 ω , 透磁率 μ_0 , 各層の導電率 σ_i , 深さ h_i および積分変数 λ の関数

であり

$$\lambda = \sqrt{\lambda^2 - j\omega\mu_0\sigma_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5.11)$$

λ : 積分変数、

μ_0 : 透磁率、

σ_i : 各層の導電率、

h_i : 深さ、

である。

式 (5.11) の積分関数を用いれば、

$B_1^{(n)}$ は

$$B_1^{(n)} = \frac{-2\lambda D_n(\lambda_1, \lambda_n)}{(\lambda + \lambda_1)D_n(-\lambda_1, \lambda_n) - (\lambda - \lambda_1)D_n(\lambda_1, \lambda_n)} \quad (5.12)$$

で与えられ、式(5.12)中の $D_n(\lambda_1, \lambda_n)$ については次の漸化式が成立する。

$$D_n(\lambda_1, \lambda_n) = (\lambda_{n-1} + \lambda_n)e^{(\lambda_{n-1} - \lambda_n)h_{n-1}} D_{n-1}(\lambda_1, \lambda_{n-1}) \\ + (\lambda_{n-1} - \lambda_n)e^{-(\lambda_{n-1} + \lambda_n)h_{n-1}} D_{n-1}(\lambda_1, -\lambda_{n-1}) \quad (5.13)$$

ここで、

$$D_2(\lambda_1, \lambda_2) = -(\lambda_1 + \lambda_2)e^{(\lambda_1 + \lambda_2)h_1} \quad (5.14)$$

である。なお、地盤の導電率が一樣な場合は $B_1^{(n)} = 0$ である。

式(5.13)、(5.14)の漸化式は、最下層の n 層から順次計算される。式(5.10)は垂直磁場の理論解であるが、探査機ではこれに対応する測定磁場が求められる。この理論磁場と測定磁場による逆解析は、第4章の図4.5に示すようなフローで示したのと同様であり理論レスポンスの計算式が異なるだけである。非線形最小二乗法を基本とした電算処理で求められる。

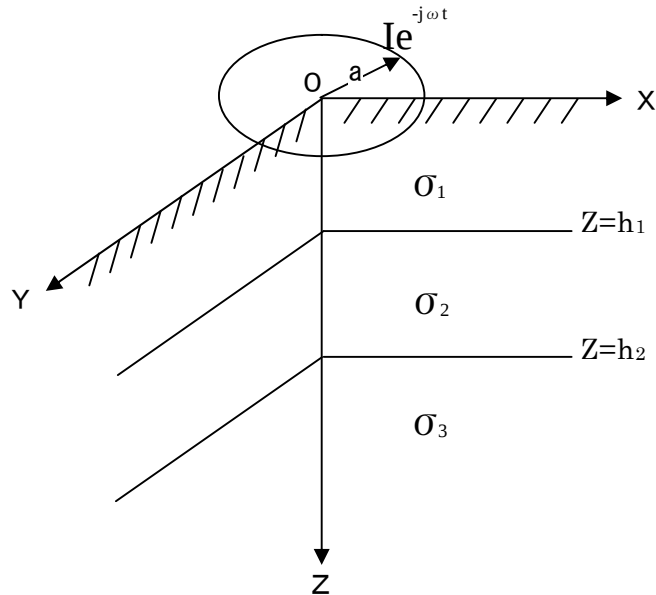


図 5.4 多層地盤上のループコイル

5.4 探査機の開発

5.4.1 探査深度について

第4章で詳細に述べたが、FDEM 探査は電磁法⁶⁾のひとつであり、この手法における探査機の可探深度は測定周波数と探査機における2次磁場の受信機の分解能に左右される。しかし、この分解能は3次元的な地盤を対象とする場合、比抵抗の分布が複雑になっていることがあるため、一定の分解能を規定することは困難である。

FDEM 探査は測定周波数を変えてデータを取り、逆解析理論から絶対深度を知る手法であるため実際の探査深度は逆解析結果で決まる。中心誘導法の原理では、半径 a のループでの見掛け比抵抗は、

$$\sigma_a \doteq \frac{2 \tan \phi}{\pi \mu_0 a^2 f} \quad (5.15)$$

ここで、 σ_a ：媒体の比抵抗、

a ：ループ半径

f ：周波数、

μ ：透磁率、

ϕ ：位相角、である。

が成り立つ。

5.4.2 位相角の精度

文献では、周波数 f を高くし図 5.5 のような正方形ループの1辺($2a$)をいろいろ変えて実験し、図 5.5 のような結果を報告している。この提案によれば、地表置かれた半径 a の円形ループあるいは一辺 a の正方形ループによる見掛け導電率 σ_a は次式で表される(式の誘導過程は省略)。

$$\text{円形ループ} \quad \sigma_a = (\pi \mu_0 a^2 f) / (2 \tan \phi) \quad (5.16)$$

$$\text{正方形ループ} \quad \sigma_a = (\pi \mu_0 a^2 f) \ln(\sqrt{2}+1) / (\sqrt{2} \tan \phi) \quad (5.17)$$

ここに、

a ：コイル寸法、

f ：周波数、

μ_0 ：真空での透磁率 $= 4\pi \times 10^{-7}$,

ϕ ：位相差である。

これに基づいた長谷川、吉住、角田⁷⁾らの試験例を以下に紹介する。

正方形ループの一边を $a=0.1\text{m}, 0.15\text{m}, 0.2\text{m}, 0.25\text{m}, 0.3\text{m}, 0.35\text{m}$ の 6 種類について深度方向の見掛導電率 $\sigma_a (=1/\rho_a)$ を求めている。まず、 a について図 5.5 に示すように位相差 ϕ を周波数 f を下げながら測定する。この実験では、導電率が σ が $4.8\Omega/\text{m}$ 、深さ h が 12cm のときの位相角 ϕ の測定結果を記している。得られた位相角 ϕ を式 5.17 に代入して σ と周波数の関係を示したのが図 5.6 である。次に ϕ と f から上式 5.17 により σ_a を計算し比抵抗法のような電極間隔 a と見掛導電率の関係に相当するグラフが図 5.7 のように得られている。

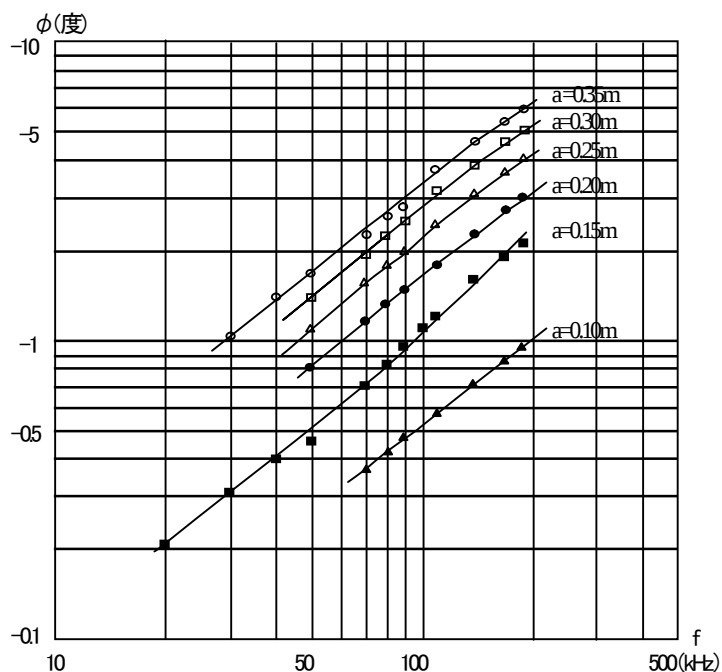
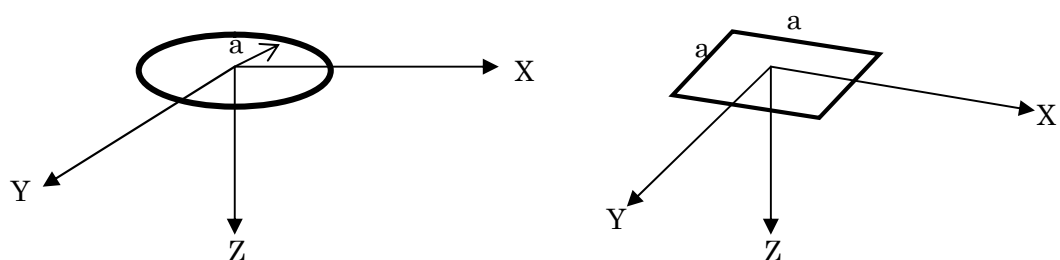


図 5.5 ループ形状と測定周波数による位相角

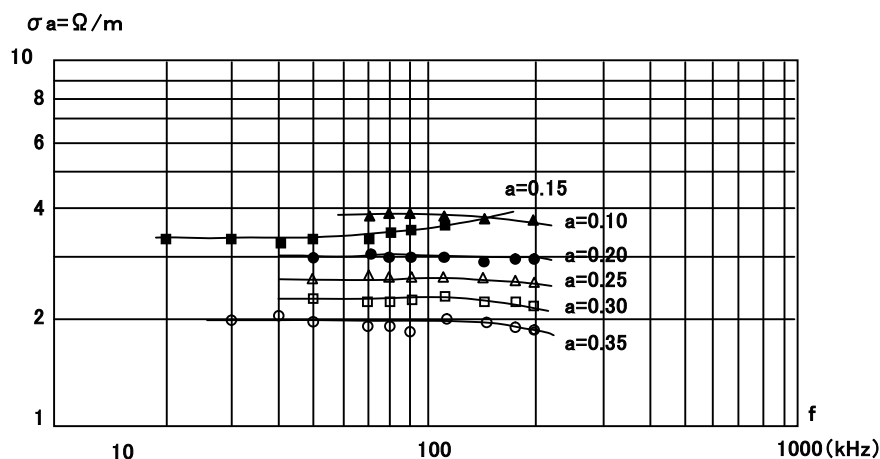


図 5.6 σ_a と f の関係

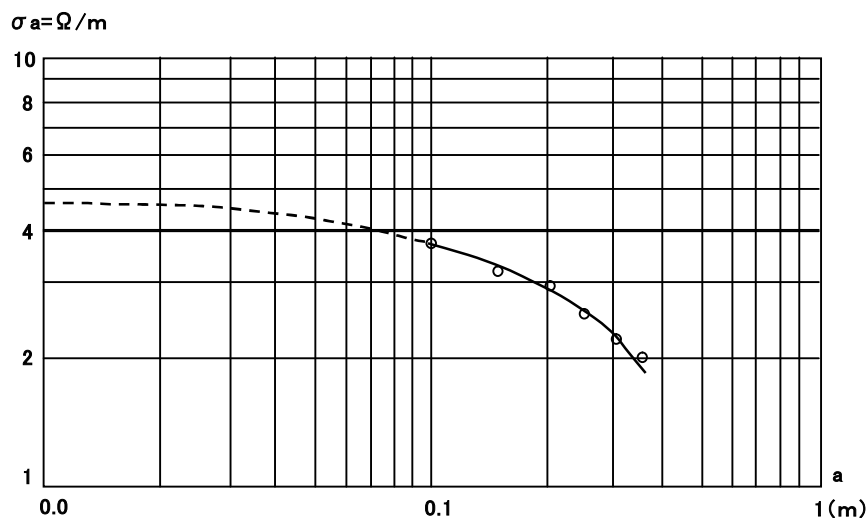


図 5.7 σ_a — a 曲線

この図から分かるように、たとえば、 $a=0.15\text{m}$ の場合、周波数が $20\sim 200\text{kHz}$ において位相角が $0.2\sim 2$ 度の範囲をとり、 a が一定であっても周波数を変えて測定すれば位相角 ϕ が変化し、したがって、式(5.15)から見掛比抵抗も変わることが分かる。

以上、位相角を測定すれば比抵抗が求められるので、同軸コイル型では受信機が位相角 ϕ を測定するように製作している。位相角の精度を検定した結果を表 5.1 に示す。この表の値は機器の電源 ON 後 30 分(機器のウォーミングアップ後)の値である。この結果では、測定周波数によって異なる結果を得た。結果では、 $f=128\text{kHz}$ と 64kHz とが最大位相差で 0.02 度を超えているが、測定周波数全体ではほぼ 0.02 度以下の値になっており、全体的に十分な性能はあると考えられる。

式(5.6)において γ の値がわかると他の係数は既知であるから、導電率 σ 、すなわちこの逆数である比抵抗 ρ を求めることができる。 γ の値は周波数 f によって変化するが、開発した探査機の測定周波数の上限は 364kHz であり、下限は 2kHz と設定した。この上限と下限に対する γ の値を送信コイル半径 $a=0.2\text{m}$ として計算すると、いずれも γ の値は $\gamma \leq 1$ となる。この場合、式(5.4)は簡略化できて式(5.6)のようになることは前述したとおりである。

表 5.1 開発機の位相角の精度試験結果

周波数 f (kHz)	364	256	182	128	91	64	45.5	32
位相角 (度)	0.011	0.006	0.006	0.032	0.000	0.022	0.000	0.017
周波数 f (kHz)	22.8	16	11.4	8	5.7	4	2.8	2
位相角 (度)	0.005	0.011	0.000	0.000	0.001	0.007	0.000	0.012

いま、表 5.1 に示した試験結果より位相差角の精度を $\phi=0.02$ 度とすれば、 $\tan \phi=3.49 \times 10^{-4}$ となるから、このときの導電率は、送信コイル半径を開発機と同じ $a=0.1\text{m}$ とすれば、周波数 $f=364\text{kHz}$ では $25.7\Omega\text{m}$ 、 2kHz では $0.14\Omega\text{m}$ となるので、かなりの低比抵抗を測定できることが分かる。たとえば、地すべり土塊（土層）の比抵抗は低く⁸⁾、 $10\Omega\text{m}$ 前後で探査されることが多いが、この探査機の測定周波数で十分に測定可能であることが分かる。

5.4.3 磁場強度の比較

既存のセパレートコイル型は、前述したように送信コイルから中心間隔で 1.0m 離れた位置に受信コイルを置いている。これに対して同軸コイル型は送信コイルの中心に受信コイルを置いて 2 次磁場強度を測定できる仕様になっている点で異なる。送信電流が同じであればコイル中心の磁場が最大であり、中心から離れるにつれて概ね $1/3$ 乗で磁場強度が減衰する。したがって、セパレートコイル型では同軸コイル型よりも磁場強度が小さくなる。この距離の影響について FEM3 次元電磁解析によって定量的に評価した。この解析では、均質地盤を仮定して比抵抗は $100\Omega\text{m}$ 、コイル半径を開発機の 0.1m 、送信電流を 4A、周波数 182kHz とした。また、最小メッシュサイズを 0.1m の円筒座標を用いて FEM 全体の寸法を直径 100m、地盤層を 50m、空気層を 50m とし、解析領域の周囲を全て電気壁理論⁹⁾の対象条件を設定した。なお、送信コイルは円筒の中心で地表面に置かれているものとした。図 5.8 に FEM 軸対称モデルの全領域の透視図を示す。

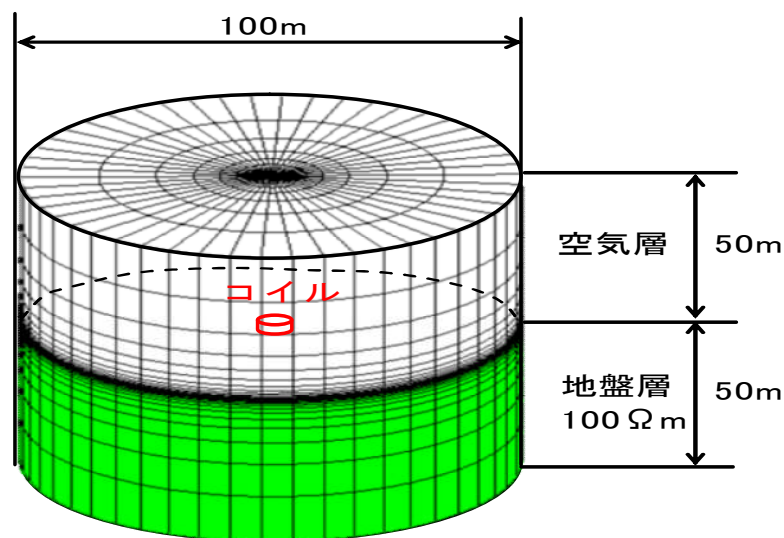


図 5.8 FEM 軸対称モデル

解析結果である図 5.9 のグラフの縦軸は深度 (m)、横軸は磁場強度である。点線のグラフの距離 1m 地点直下の磁場強度(A/m)を示し、地表での値は、 2.42×10^{-4} (A/m) となっている。コイル中心の地表での値は、図 5.9 では表現できていないがコイル外周では 3.36×10^{-3} (A/m) となっている。この結果から分かるように、コイル中心から 1m 離れると磁場強度は約 1/10 に減衰する。すなわち、セパレートコイル型は、同軸コイル型に比べ 2 次磁場強度は両者の比率から約 1/10 になっていることが分かる。この差は探査機の感度の良否になる。しかし、深度が深くなるにつれて両者の差は徐々に小さくなる。

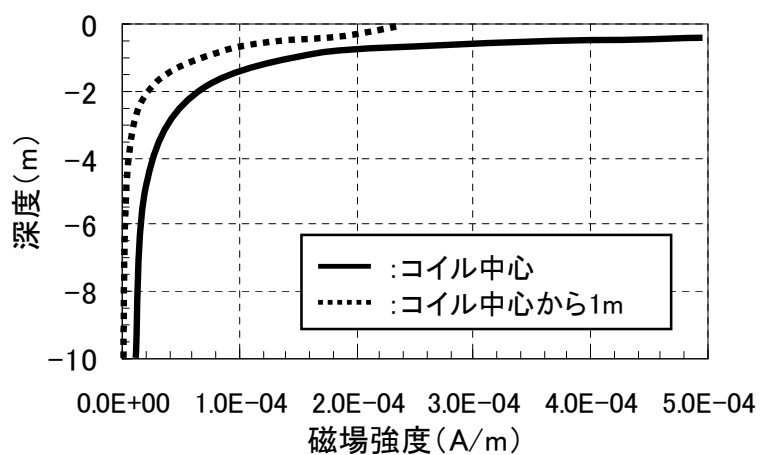


図 5.9 コイル間隔と磁場強度

5.5 同軸コイル型周波数領域電磁探査機の開発

5.5.1 開発した探査機の概要

新しく開発した CCEM 探査機の外観は写真 5.1 に、主な仕様を表 5.2 に示す。

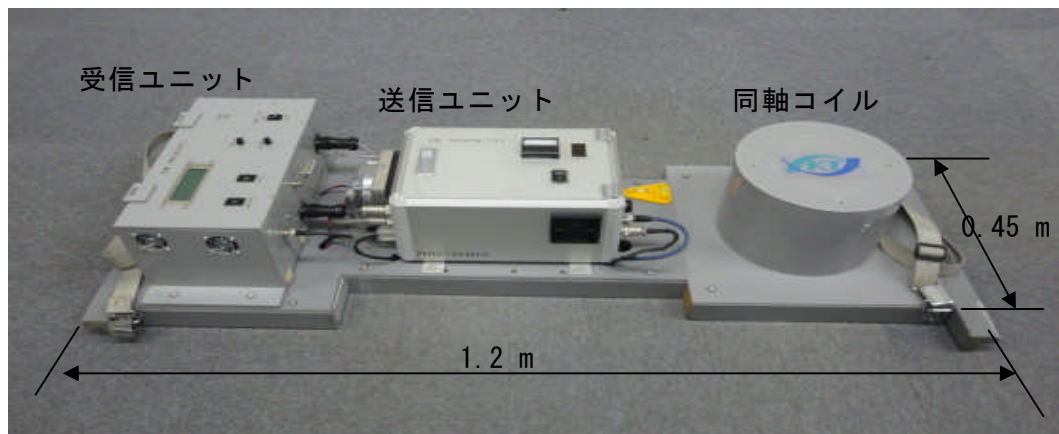


写真 5.1 開発した同軸コイル型探査機

受信ユニットと送信ユニットおよび同軸コイルとからなり、電源は外部の小型発電機による。外郭寸法は長さ 1.2m、幅 0.45m である。セパレート型とは異なり、送受信コイルが同軸となっているため、磁場照射の指向性が鋭くなっているためポイント探査になり水平方向の分解能が高くなっている。

表 5.2 同軸コイル型 FDEM 探査機の仕様

測定周波数 16Ch	364, 256, 182, 128, 91, 64, 45.5, 32, 22.8, 16, 11.4, 8, 5.7, 4, 2.8, 2 kHz
コイル	送信コイル：直径 20cm、巻数上下各 10 回 受信コイル：直径 20cm、巻数 120 回
送信機	高周波リニアアンプ：300w (送信電流：正弦波 4A)
受信機	DDS(Direct Digital Synthesizer)による 位相差検出回路：位相ドリフト 0.02 度以下
寸法、質量	1200(L)×450(W)×300(H) mm、約 20kg
データ通信	RS232C ケーブル (max50m)
計測ソフト	パーソナルコンピュータ制御 計測時間：最速 1 分／測点、
電源	AC100V (ポータブル発電機)

5.6 セパレート型と同軸コイル型の比較探査

同軸コイル型探査機は指向性があり精度が上がるのが前提で開発した経緯から、実際の現場において同軸コイル型とセパレートコイル型で測定し、両者の差を比抵抗分布図で比較検討した。

5.6.1 実験場所

測定は、静岡県にある白糸の滝周辺の駐車場近くで実施した。図 5.10、図 5.11 に調査地の地形図（国土交通省国土地理院旧 2 万 5 千分 1）及び探査測線を示す。測定ピッチは 1.0m とした。測線の東端に位置する既往ボーリング B-1 の調査結果¹⁰⁾と探査結果を照合した。



図 5.10 調査地

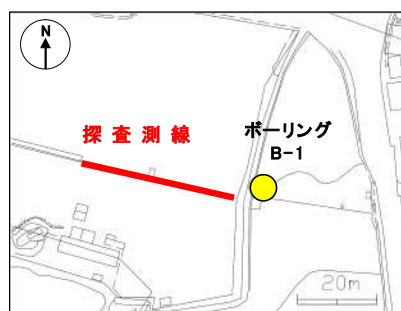
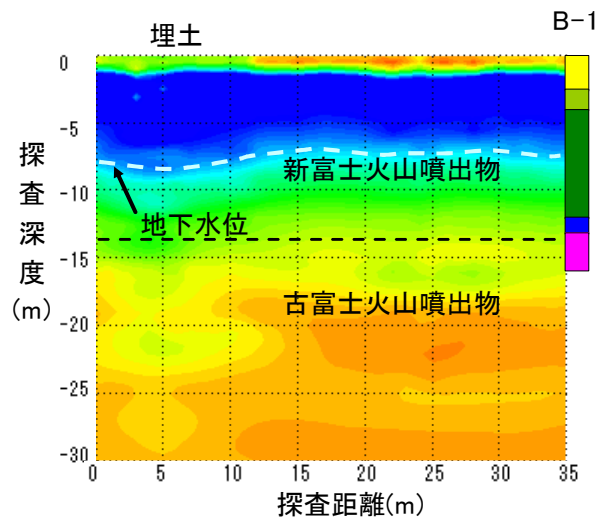


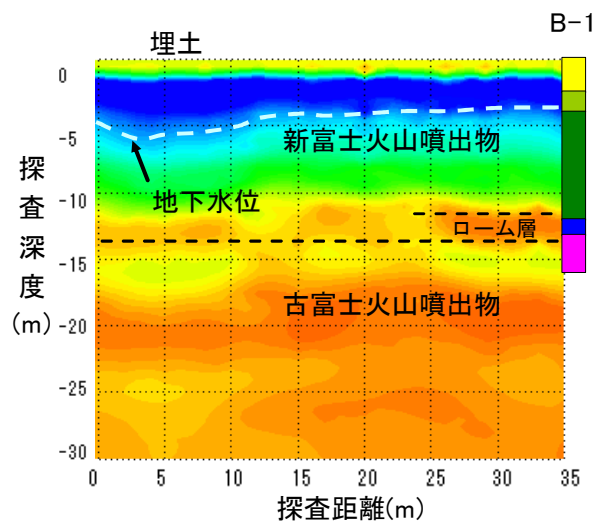
図 5.11 測線位置

5.6.2 探査結果

解析は、セパレートコイル型と同軸コイル型で同じパラメータを用い、図 5.12 に比抵抗分布図を並べた。



(a) 従来機による比抵抗分布図



(b) 開発機による比抵抗分布図

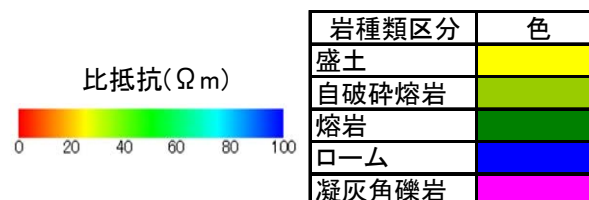


図 5.12 従来機と開発機の比抵抗分布の比較

既往ボーリング B-1 は、上位から盛土、自破碎溶岩、溶岩、ローム、凝灰角礫岩の層序となっている。また、ボーリング水位記録によれば、B-1 では地下水位が GL-3.3m 付近にある。既往ボーリングと新旧の FDEM 探査結果から以下のことが言える。

- (1) 開発した同軸コイル型による比抵抗分布図から区分した地層と B-1 の柱状図による地層区分は概ね整合している。
- (2) 地下水位線に相当すると思われる比抵抗変化は、同軸コイル型では自破碎溶岩の下位で区分できるが、従来機では溶岩層の中間付近に表われボーリングによる地層区分と比抵抗区分が一致していない。
- (3) ローム層は一般に低比抵抗で表れるが、同軸コイル型ではこの層に対応する低比抵抗ゾーンを一部捉えるが、従来機では捉えていない。
- (4) ボーリングにおける凝灰角礫岩とローム層との地層境界と同軸コイル型による比抵抗区分の境界がおおむね一致している。

なお、同軸コイル型の比抵抗分布図では、凝灰角礫岩のすぐ上位で低比抵抗の層が薄く分布するが、これらはローム層に似た火山灰の堆積物と思われる。

5.7 まとめ

第4章で記したとおりFDEM探査機を開発しかなりの事例を残し実績を上げている。しかし、ニアフィールド現象を解消しているとはいえより精度の高い探査機が作成できないかを追究し多くの研究者が手がけた中心誘導法を原理とした探査機の開発研究を行った。その結果、より感度の高い探査機の開発に成功した。これは、過去の研究者が手がけた成果を根拠に製作したものである。今後、事例を増やすことにより課題が出ないかを慎重に見極め今後の開発機へのチャレンジとしたい。

参考文献

- 1) 片山辰雄・小里隆孝・加藤裕将・楠見晴重・松岡俊文：周波数領域電磁探査法の開発と河川堤防調査への適用性，地盤工学ジャーナル，Vol.4，NO.4，pp.331 - 340, 2009
- 2) J.G.Koenigsberger：Zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit der Erde durch Induction, Phys. A., 31, 487-496, 1930
Elektrische Vertikalsondierung von der Erdoberfläche aus mit der Zentralinductionmethode, Beitr. Z. angew.Geophys.,7,112-161, 1939
- 3) W.Nuniew：Messung der elektrischen Leitfähigkeit der Erde in verschiedenen Tiefen durch die von einem Kreisstrom induzierten Ströme, Gerl. Beitr. Z. Geophys., 3,370-391, 1933
- 4) S.S.Stefanescu：Sur la mesure des resistivites apparentes par la methode de la spire circulaire, Beitr.Z. angew.Geophys.,5, 182-192, 1935
- 5) 清野 武・吉住永三郎・谷口敬一郎・空知公二：中心誘導法による地下構造の探査について，電気評論，第43巻，第1号，pp.1-7, 1955
- 6) 物理探査学会：図解 物理探査，pp.64-65. 1989.
- 7) 長谷川 健，吉住永三郎，角田晴信 1：電磁誘導法の研究，物理探査 第35巻 第4号，pp.1-7, 1982
- 8) 谷口敏雄・藤原明敏：地すべり調査と解析，理工図書，pp.31-36, 1970.
- 9) 棚橋隆彦，微分形式と有限要素法，三恵社，pp.11-13.
- 10) 富士宮市：白糸の滝周辺地下水流調査，ボーリング柱状図 B-1 他，2011.

第6章 各種地盤へのFDEM探査の適用

6.1 はじめに

FDEM 探査の研究開発を開始してから実務を兼ねた実施場所は、161 件に達している。内訳は、「斜面」^{1),2),3),4),5)}が 10 件、「河川」が 52 件（内訳：「堤防」^{6),7),8),9),10)} 32 件、「護岸」¹¹⁾ 20 件）、「トンネル」^{12),13),14)}が 19 件、「空洞」^{15),16),17)}が 31 件、「その他」^{18),19),20),21),22),23),24)}が 49 件である。当初、開発した時点では、対象調査分野は「斜面」、「河川」、「トンネル」を中心に検討していたが「その他」の分野に広がっている。「その他」に関しては、鉄道、地盤改良、治山ダム、改修場所での塩水注入実験などである。このことは、研究目的である土木分野での活用と言う初期の目的は達成できたと考える。ただ、図 6.1 からわかるように使用用途が広がっている理由としては、「防災」と「維持管理」に関して緊急かつ重要な課題であり、より効率良く地盤情報を得て設計・対策の一助にするための論議をする。

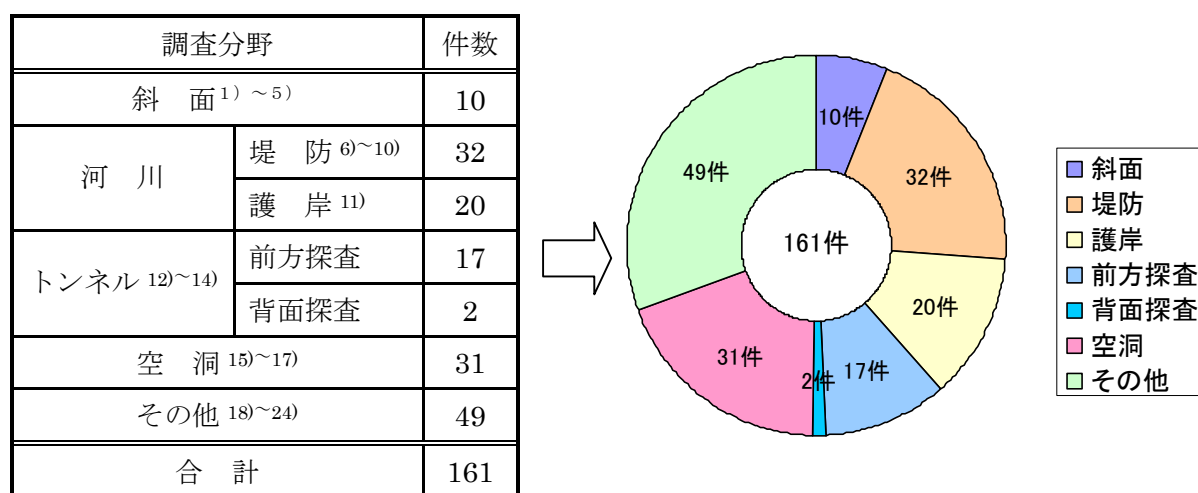


図 6.1 FDEM探査の調査分野

筆者は、防災と維持管理で一番適用性の高い「斜面」および「河川」に関して研究結果を以下に述べる。

今回、研究成果として報告するのは、以下の通りである。

- (1) 塩水を利用した水みちの探査。
- (2) トンネルにおけるFDEM探査の活用。
- (3) 地すべり調査での適用。
- (4) CPT手法を取り入れた複合探査。

6.1.1 土質と比抵抗

筆者が開発した FDEM 探査は、地盤の比抵抗を測定することにより地盤構造を把握する探査方法である。しかし、比抵抗は、地盤や岩盤等の状態等によりかなり変化する。そして、岩石の比抵抗に関する実験や研究事例は比較的多いが、土や砂の比抵抗についての実験や研究事例は、朴ほか²⁵⁾、沖村ほか²⁶⁾、あるいは茂木ほか、高倉ほかからによるものがある。土の場合、比抵抗に及ぼす要因としては、含水比、間隙率や粘土、礫の含有量、組成鉱物の種類など様々である。図 6.2 は、種々の土質や地質について調査された比抵抗の範囲について、まとめられたものである。これをみると分かるように比抵抗値はかなり広い範囲を示す。

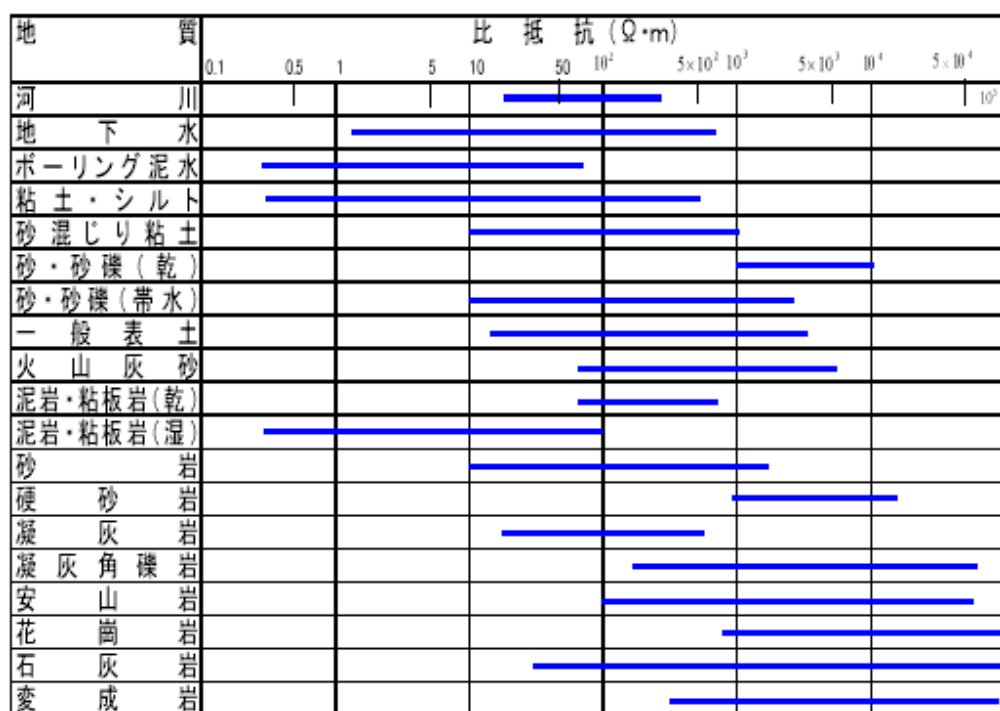


図 6.2 地質別比抵抗値

次に、堤防盛土の材料は、礫質土や粘土あるいはシルト混じりの砂など様々な材料になると思われるが、基本的には、礫、砂、粘土およびシルトから構成されてその混合比率が異なるだけである。文献等では、様々な研究がなされているのでこれらの材料の違いと比抵抗の関係についての実験事例を提示する。表 6.1 に実験材料の土性を示す。実験材料は、4 種類を使用しており、土質材料は一般的に指標になる豊浦標準砂を中心に、砂、シルト混じり砂、粘土質砂である。表 6.1 は、図 6.3 に示される各種材料の土性である。この結果では、含水比がおおよそ 10%以下では材料の違いによる比抵抗の違いは比較的大きいが、含水比が 10%あたりを越え、最適含水比より高くなると比抵抗は一定の値に落ち着く。この

表 6.1 実験材料の土性

土質	粒径(mm)	礫(%)	砂(%)	シルト(%)	粘土(%)	孔隙率(%)
豊浦標準砂	0.10-0.42	0	100	0	0	38
砂	0.10-4.75	9	91	0	0	32
シルト混じり砂	0.034-4.75	20	75	5	0	44
粘土質砂	0.0017-4.75	11	62	13	14	36

ように含水比が高くなると、15%の場合も 20%の場合も比抵抗は同じような値になってしまいうため、含水比の変化を比抵抗では捉えにくいことになる。また、シルト質砂と粘土質砂の実験カーブを見ると似たような値を示しているため、やはり、このような土質の差は比抵抗では捉えにくいということになる。しかし、豊浦標準砂と実験した砂のように含水比に対する比抵抗の差が大きいほど探査結果での識別が容易となる。今までの探査結果の実績からは、礫、砂、粘土の識別を比抵抗の差で判定することは概ね可能であるが、シルト質砂や粘土質砂の識別やシルト混じり砂礫や粘土混じり砂礫の識別は難しい場合が多いようである。

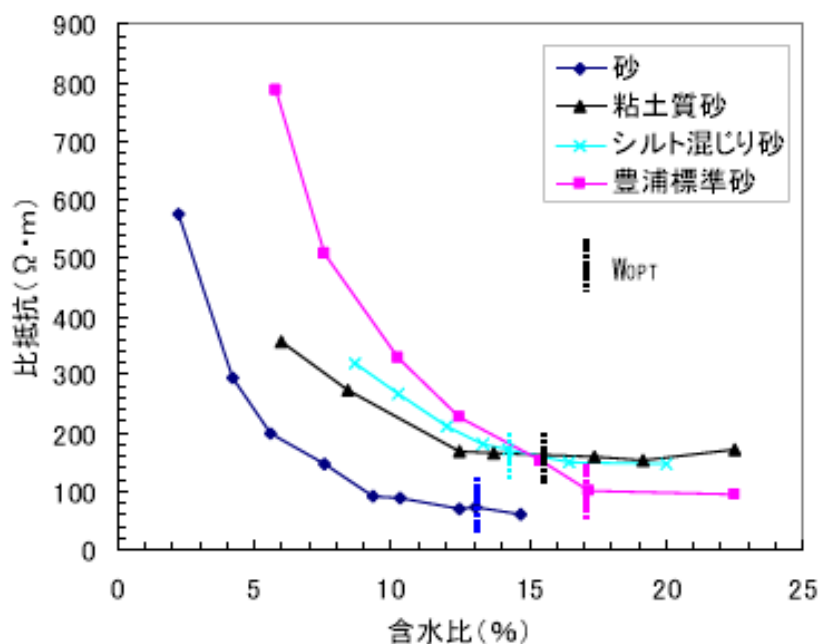


図 6.3 土質の違いによる比抵抗値と含水比の関係

6.1.2 まとめ

FDEM 探査の研究事例が進んでおり、土木分野の浅部（地下 40m 程度）で十分に使用できることが実証できた。今後は、より利用される分野を開拓し新たな課題が抽出されれば研究し論議したい。また、比抵抗の特性の幅をより精度よく特定できる研究を提案する。

6.2 塩水を利用した水みちの探査

6.2.1 探査実験の目的

河川堤防や自然斜面などには水みちが存在することがあり、その位置を調べることでより堤防の浸潤破壊や斜面の安定性等が検討されている。水みちの調査法として地温探査や電気探査がしばしば用いられるが、設置に要する時間や測定時間がかかるといった問題点がある。塩水をトレーサとして注入した場合、塩水の比抵抗は周辺地盤よりも低いため比抵抗探査の感度が良くなり、その流動範囲や拡散範囲を比抵抗分布の測定結果から推定できるものと考えられる。本実験では、塩水を注入しながら非破壊的かつ迅速に比抵抗を測定できる筆者らが開発した FDEM 探査機を使用して行い、比抵抗分布の時間変化を求めることから水みちを推定し、また、塩水注入の鉛直浸透流解析による飽和度分布の解析結果と比抵抗分布との比較検討から、地盤内の比抵抗分布を計測することで「水みち」探査の可能性を探求する。また、堤防内部や不飽和帯の不均質構造の把握や物性調査は通常困難であるが、浸透実験で比抵抗分布を測定して間接的に不均質性を考察できれば、今後の浸透問題を検討する上で非常に有意義なこととなる。また、不飽和浸透問題において間隙空気の影響は無視しがたい場合があるが、その影響については、あまり解明されていないので合わせて研究する。

6.2.2 塩水の注入実験

実験場所は、図 6.4 に示す長野県小布施町大島地先の千曲川右岸堤防における樋門新設工事現場で堤体を掘削した跡地である（写真 6.1）。

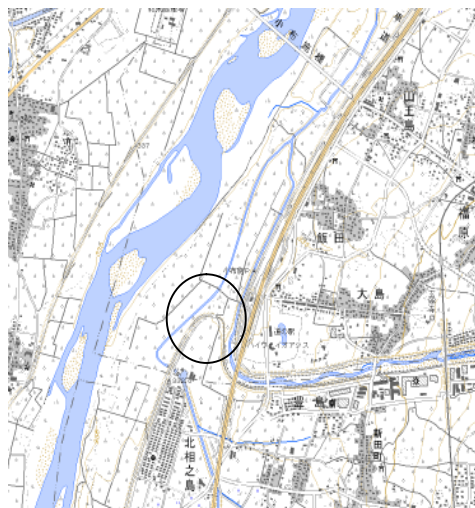


図 6.4 実施場所



写真 6.1 実験現場の状況

塩水注入は、あらかじめ用意した塩水濃度の重量比 10%の塩水入りポリバケツから塩ビ管（ $\phi 300\text{mm}$ ）に塩水を継ぎ足し流し込み、ほぼ 50cm の定水位を保つようにしながら注入を開始した（写真 6.2）。塩水の注入時間は、午前 9 時から 12 時までの 3 時間とした。

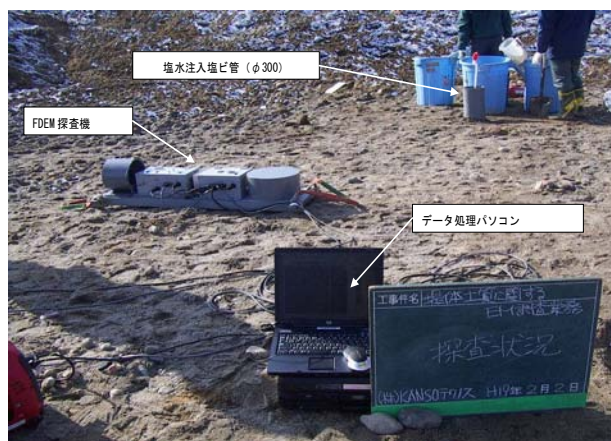


写真 6.2 注入実験と比抵抗測定状況

FDEM 探査による比抵抗測定は開始後 30 分ごとに測定し、14 時 30 分まで行った。注入点と比抵抗測定点の位置関係を図 6.5 に示す。塩水の全注入量は約 3600 で塩分濃度は重量比で 10%とした。したがって、平均注入量は 1.20/分であった。FDEM 探査での測定時間は 1 地点約 1 分であるため、測点 1 番から始めて 10 番まで終了するのに約 15 分要することになった。

6.2.3 比抵抗分布の計測結果

図 6.5 に示した測点位置番号 1～10 について、以下の測点番号とした。

- ・ A 断面：測点 6～10 （注入点から 1m 離れた面）
- ・ B 断面：測点 1～5 （注入点から 3m 離れた面）

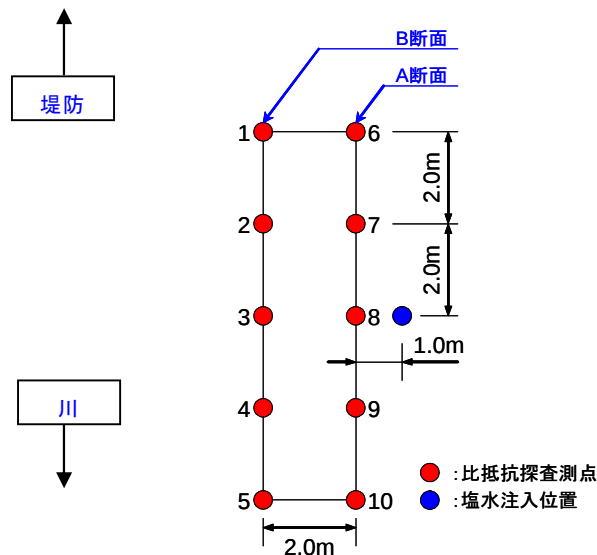


図 6.5 注入地点と FDEM 探索地点の位置関係

各断面の解析した比抵抗分布図を測定時刻毎に図 6.6 と図 6.7 にまとめた。各時刻の探索結果を逆解析し、これらの図の縦軸は深度(m)を横軸には測定点番号を記入している。図のスケールは縦：横＝2：1 となっている。また、青色の矢線は注入点の投影位置である。なお、測定現場付近における地層構造が判明するボーリング調査等の既往資料がなかったため、パワーショベルで掘削して地層状態を確認した(写真 6.3)。その結果、地下水位は測定現場の約 6m の深さにあった。したがって、比抵抗分布図は深度 7m までの表示とした。また、注入地点は深部まで砂地盤に見えたが、掘削すると、かなり不均質であり、所々に砂礫や粘性土が混在しているようで、とくに、深度 4 m 付近から粘性土が優勢であるように見えた。

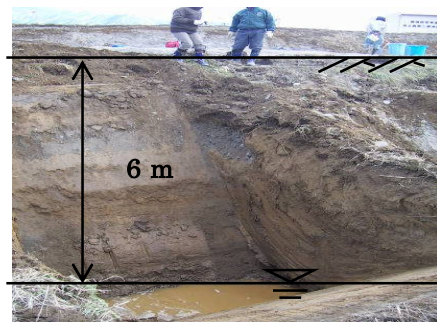


写真 6.3 掘削による地層と地下水位の確認

6.2.4 塩水注入実験結果

各時刻の比抵抗分布の特徴について以下にコメントを記す。

① 10:00 (60 分後)

塩水注入後 1 時間の比抵抗分布である。A 断面では注入点の近傍で深度 0.5m 付近において塩水が浸透したため周囲より低い比抵抗の領域が現れている。一方、B 断面は A 断面と比して注入点から 2m 離れているため、ほとんど影響を受けなかった探査結果となっている。深度 4m 付近から 7m にかけて比抵抗が急に低下している要因として、掘削後の写真からも分かるように粘性土があることと、6m 付近の地下水面の影響と考えられる。

② 10:30 (90 分後)

A 断面の注入点の近傍の低比抵抗の領域はさらに深度 1m 付近まで拡がり、また、深度 4m 以深の比抵抗分布も変化している。B 断面でも注入点近傍の深度 0.5m 付近で比抵抗が低下し始めている。

③ 11:00 (120 分後)

A 断面の表層は深度 1m 付近まで横方向に低比抵抗の領域が拡がっているが、注入点の下方には拡がっていない。B 断面はとくに変化はなさそうである。

④ 11:30 (150 分後)

この時刻になると A 断面の注入点直下は深度 3m 付近まで幅 4m 弱にわたり低比抵抗領域が拡がり、ようやく鉛直浸透が優勢していると思われる比抵抗分布が探査されている。B 断面も全面的に比抵抗が少し低下しているようである。A 断面の直下において深度 3m から 4m 付近で周囲より比抵抗の高い領域が現れ、紙面左斜め上方にも高い領域が連なっている。これは、間隙空気が押されて移動している様子ではないかと考えられる。B 断面では、11:00 頃よりは全面的に比抵抗は低下しているが程度は弱いようである。

⑤ 12:00 (180 分後)

11:30 頃に見られた注入点直下の深度 3～4m 付近で見られた比抵抗の高い領域は消えて、塩水浸透の範囲が拡がり全面的に低比抵抗で探査されている。しかし、B 断面では、11:30 頃に比べ中央から左よりに比抵抗の高い領域が現れ、それらの周囲が逆に 11:30 頃より低比抵抗に変わっている。地盤の不均質性によって浸透領域も不均質的になったと考えられる。あるいは、間隙空気の複雑な振る舞いによっても考えられる。

⑥ 12:30 (210 分後)

塩水注入を停止させてから 30 分後の比抵抗分布である。A 断面では、深度 2m くらいまでに比抵抗が高くなる箇所が 3 箇所ほど確認できる。B 断面では 2 箇所ほど比抵抗の高い部分が認められるが、全面的にまだ低比抵抗である。

⑦ 13:00～14:00 (240～300 分後)

この時間帯での比抵抗分布は、13:00 頃に両断面の表層部等で比抵抗が高くなり始めているが、まだ全面的に比抵抗は低い状態である。浸透範囲が広範囲に行き渡っているものと考えられる。同様の状態が 14:00 頃まで続いている。

⑧ 14:30 (300 分後)

この時刻になって比抵抗分布の状況は塩水注入開始から 2 時間後の 11:00 頃とよく似た状況であり、元の比抵抗分布にほぼ戻っている。

以上の結果からとくに注目すべき点は、11:00 頃から 11:30 頃までの比抵抗分布の急激な低下と、14:00 頃から 14:30 にかけての比抵抗分布の急激な上昇が、いずれも 30 分程度の内に起こったことである。この現象は以下のように考えることができる。

(a) 給水過程

注入してから始めのうちは間隙率の大きい表層部について述べる。

この現場では A 断面の 11:00(120 分後)頃の比抵抗分布の形状から深度 1m くらいの部分に主として塩水が浸透し、やがて注入量が浸透能を超えると急に鉛直浸透が卓越し A 断面の 11:30(150 分後)頃のように、このことを裏づけるような比抵抗分布が探查されたと思われる。また、A 断面の 10:30～11:00(90～120 分後)にかけては低比抵抗領域の拡がり、1m 付近までの表層に集中していることから見て、水平方向の透水係数が鉛直方向よりも大きいことによって、注入の初期 2 時間くらいは主に横方向に浸透が卓越していたのではないかと考えられる。また、11:30(150 分後)頃の A 断面における高比抵抗の領域の形状が楕円形であるため、表層部の塩水注入によって圧縮された間隙空気が逃げ出そうとしている状況が推測される。

(b) 排水過程

塩水注入を停止してから約 2 時間における比抵抗は低いままであるが、14:00(300 分後)頃以降において急に比抵抗が高くなっている。これは、飽和度がまだ大きいときは透気係数が小さく、間隙空気の侵入は少ないが、透気係数が大きくなると間隙空気の侵入が本格化し飽和度が小さくなったためと考えられる。

総じて、水の浸透によって飽和度が増加し、可逆的に間隙空気が排出されるという状況が裏づけできる実験結果であったと評価できる。

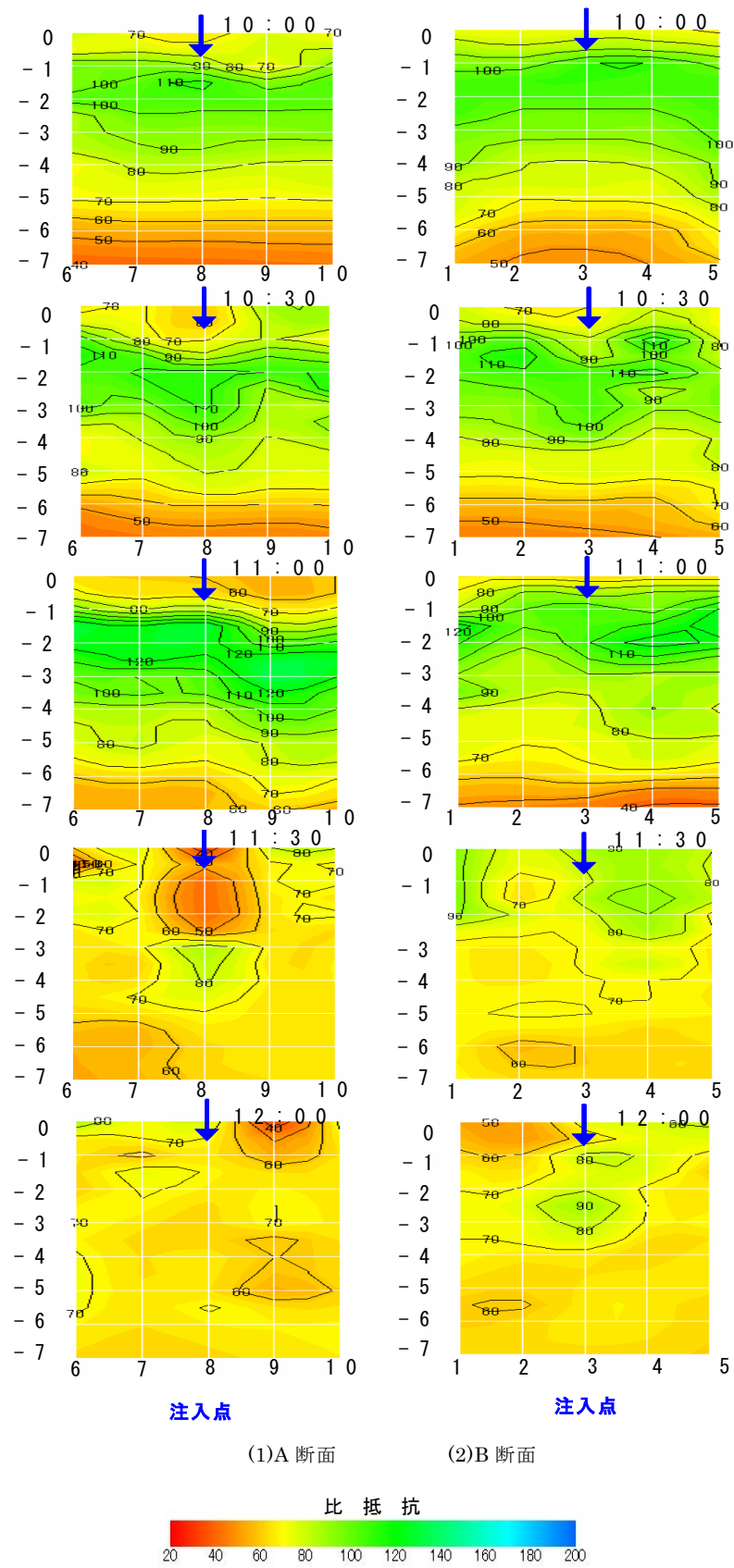


図 6.6 10:00~12:00 の比抵抗分布の時間変化

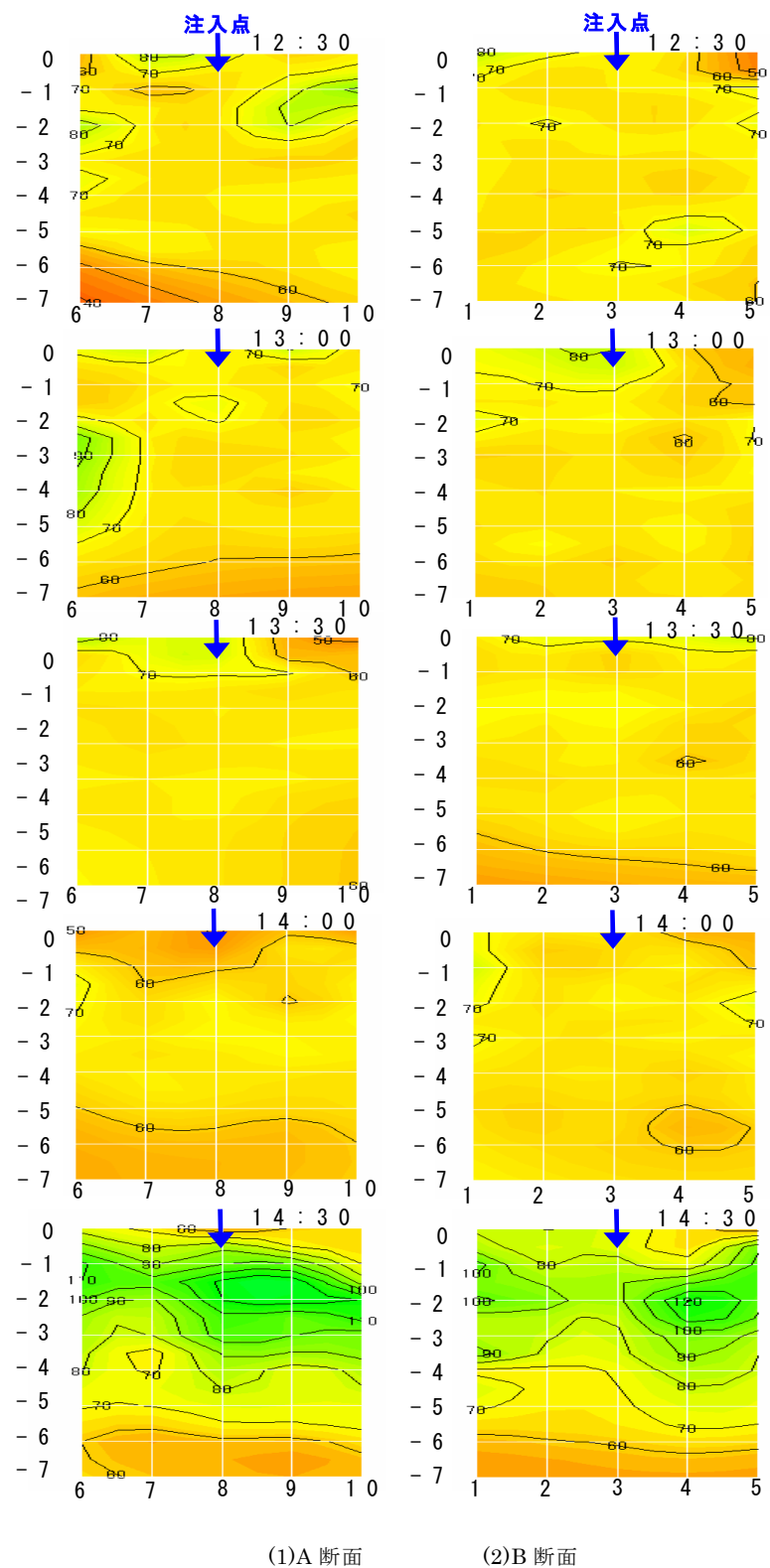


図 6.7 12:30~14:00 の比抵抗分布の時間変化

6.2.5 浸透流解析による検討

(1) 浸透流解析理論

この実験の三次元浸透流解析のプログラムとしては、「Dtransu3D-EL」を使用した。

(2) 解析モデルの設定

浸透流解析の領域は、注入点を中心にして平面を 20m の正方形とし、深度 8m までの領域とした。有限要素法のメッシュ分割は図 6.8 に示すように、水平方向では注入点付近を細かくし、その次はやや粗くという具合に分割した。鉛直方向も図 6.8 に示すように地表付近は 0.2m ピッチと細かくし下方にかけて徐々に粗く分割とした。総節点数 8122、総要素数 6900 の三次元モデルである。

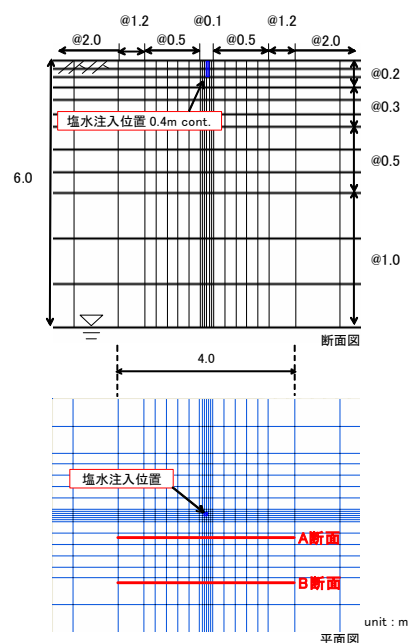


図 6.8 三次元浸透流解析の有限要素メッシュ

(3) 浸透流解析におけるパラメータの設定

浸透流解析を実行するために、不飽和浸透特性などの地盤固有のパラメータを設定する必要がある。塩水注入実験現場の掘削断面写真から、一般的な砂地盤の下層に粘性土地盤が見られ、地下水面は地表から約-6.0mにあると設定した。

まず、砂地盤、粘性土地盤で図 6.9 に示す限界毛管水頭 ψ_{cr} がそれぞれ、0.1m、0.5m となるよう位置係数 α を設定した²⁷⁾。次に、河川堤防における初期飽和度は砂地盤において 60%程度、粘性土地盤で 90%程度であるため²⁸⁾、砂地盤の水分保持曲線が-6m で 60%を通るように、粘性土のそれが-2m で 90%を通るように傾き係数 n^* を設定した。設定した van Genuchten モデルパラメータを表 6.2 に、不

飽和浸透特性を図 6.10 に示す。

作成した地盤モデルを用いて、定水位注入（水深－0.4m,断面積 0.2×0.2m、塩水濃度 10%、密度 1.07）における浸透流解析を実施した。注水開始から 3 時間後の地盤内飽和度から平均流量を仮計算した結果、実測値(Q=1.2ℓ/分)と計算値とのオーダーがほぼ一致した。

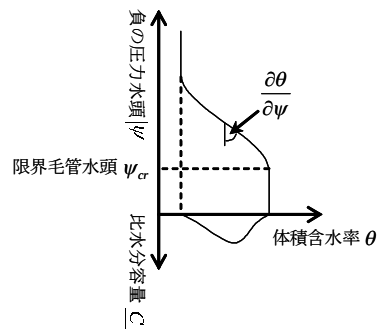


図 6.9 負の圧力水頭と体積含水率の関係

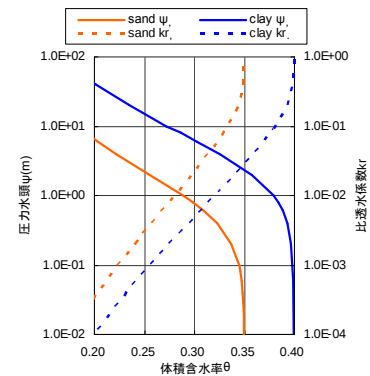


図 6.10 解析に用いた不飽和浸透特性

表 6.2 van Genuchten モデルパラメータ

対象土質	$k_s(\text{m/sec})$	θ_s	θ_r	$\alpha(\text{m}^{-1})$	n^*
sand	1.0×10^{-4}	0.35	0.05	0.23	2.5
clay	1.0×10^{-6}	0.40	0.05	0.30	1.5

6.2.6 浸透流解析結果と考察

解析において、注入終了時刻 12 : 00 以降、さらに 3 時間経過までの地盤内飽和度の変化を計算した。塩水注入点から 1.0m 離れている A 断面中央の深度-0.9m 地点における飽和度（浸透流解析結果）と深度-1.0m 地点における比抵抗値（FDEM 探索結果）の時間変化を図 6.11 に示す。また、解析結果の 1 時間毎の A 断面での飽和度分布を図 6.12 に示す。縦横比は 1 : 1 である。解析結果と FDEM 探索結果を比較し、得られた知見を以下に列挙する。

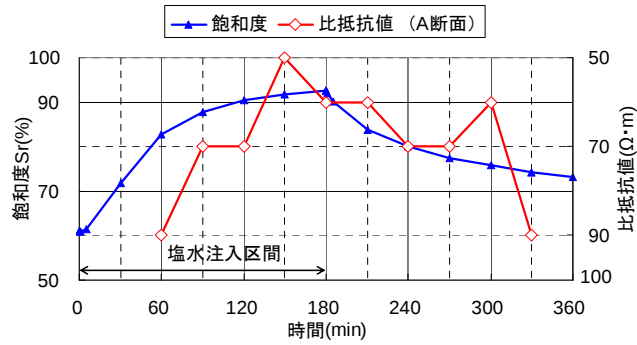


図 6.11 浸透流解析による飽和度の時間変化

① 浸透の時間的变化

FDEM 探査では約 30 分間で比抵抗値が急激に低下する（飽和度が上昇する）結果が得られた。図 6.12 から見てとれるように、塩水注入開始から 60～120 分付近で飽和度が急激に上昇しており、FDEM 探査結果の比抵抗の時間変化とほぼ整合している。また、180 分以降において飽和度が徐々に低減する様子に対応する比抵抗の時間変化は 270 分頃までは整合性が良好である。なお、FDEM 探査は地上から電磁波を透過させて、地盤内部の導電体（粘土や溶存物質を含む地下水など）から誘導される渦電流の強度から比抵抗を求めるため、塩水注入の場合、注入前の地盤の比抵抗に塩水付加による比抵抗低下の二つの効果を測定していることになる。

② 等ポテンシャル線の形状

塩水注入開始から 2.5 時間後（時刻 11:30 頃）における FDEM 探査結果の等ポテンシャル線（比抵抗値 $70 m \cdot \Omega$ ）と、3 時間後（時刻 12:00）における解析結果の等ポテンシャル線（飽和度 60%）の形状が釣鐘状であり、類似している。

③ 空気層の問題

塩水注入点直下付近に高比抵抗領域（FDEM 探査結果 11:30）と、低飽和度領域（解析結果 12:00）が存在する。FDEM 探査結果に関しては、その形状が楕円形であるため、同領域が空気層であると推測できる。考えられる要因は、塩水注入によって表層部の透気係数が小さくなったこと²⁾⁹⁾、および、地盤材料の不均質性や浸透時の間隙空気の振る舞い³⁾⁰⁾などが挙げられる。一方、本研究で用いた浸透流解析プログラムは、間隙空気圧が間隙水の浸透に及ぼす影響について考慮していないものであるが、低飽和度領域が認められた。この要因は、透水係数のオーダーと浸透域拡大のタイムラグによるものではないかと考えられる。

以上のことから、FDEM 探査による比抵抗探査は、計測に少々タイムラグが生じる可能性があるものの、飽和度測定方法として有用性があると考えられる。また、吸水過程と排水過程のヒステリシスを考慮することで、解析モデルを実地盤に近づけることができると考える。

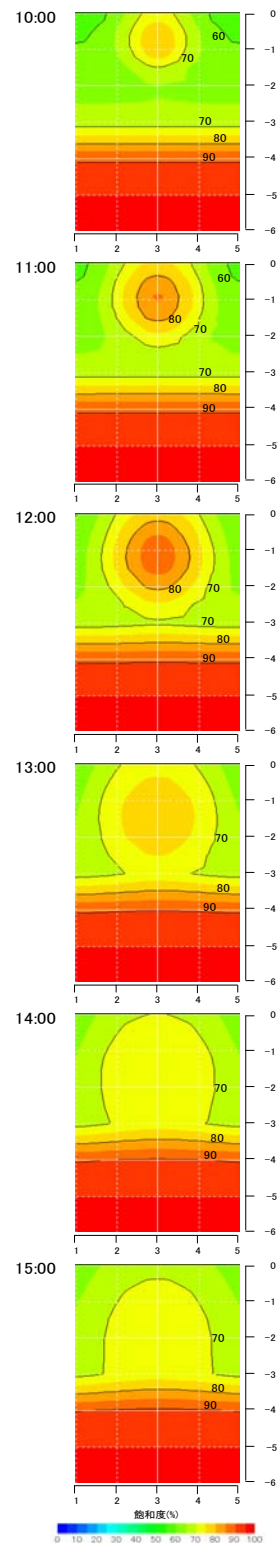


図 6.12 A 断面での飽和度の時間変化

6.2.7 まとめ

水注入による浸透領域の時間変化を FDEM 探査による比抵抗分布の時間変化で概ね捉えることが可能であると確認できた。また、三次元不飽和浸透解析から求めた飽和度の時間変化と照合したところ適当なパラメータを設定することで両者の時間変化がほぼ整合することも確認できた。したがって、短時間で簡便に測定できる FDEM 探査による比抵抗測定は地盤や堤防などの飽和度の時間変化などを調べるモニタリングのツールとして利用できるものと考えられる。

6.3 トンネルにおけるFDEM探査の活用

トンネルでは、新設トンネルと既設トンネルにおいて調査の目的が違う。新設トンネルでは、掘削工事におけるトンネル前方の湧水および弱層の存在である。また、既設トンネルにおいては、トンネル覆工コンクリートの劣化に伴う陥没事項である。そのため裏面の状況把握特に空洞の有無等に関して点検する必要がある。今回は、上記の場合に関して、各々の事例で検証した。

6.3.1 トンネル切羽の前方探査

(1) 概要

トンネル掘削工事において、懸念されることはやはり突発湧水による切羽崩壊の事故と断層等の弱層部の出現によりトンネル掘削の手法の段取換え等である。そのため、切羽から掘削する前に水平ボーリングによる水抜きや地層判定を行うことが多い。この場合のボーリングは1本のみで左壁側か右壁側で実施されるが、ポイント調査ということと、地質に変化が激しく左右断面で異なることが予想される場合に、TPS やトンネル HSP と呼称される反射法地震探査が実施されていたが探査を行うために事前準備の時間が掛かるために常時実施可能な探査ではない。その点では、FDEM 探査では「簡便」、「コンパクト」、「スピーディー」であることから掘削終了後に探査可能なので前方探査を実施しボーリング結果を補完してできるだけ断面全体の地質を評価する目的で採用できるか適用性の検証を実施した。

(2) FDEM 探査によるトンネル前方探査の配置

FDEM 探査では、探査機の総重量が 20～30kg であるため 2 名で気軽に持ち運ぶことが出来る。具体的な計測配置を図 6.13 に示す。

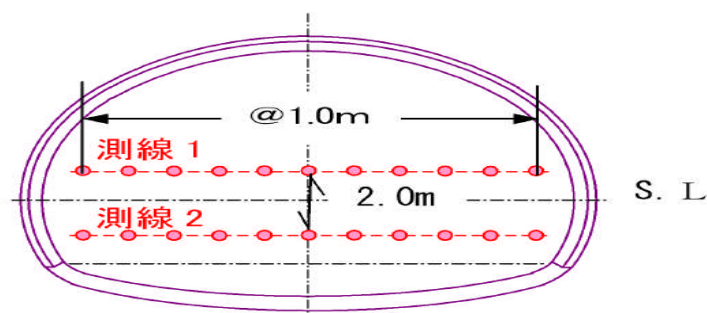


図 6.13 FDEM探査の測点配置図の一例

従来、トンネル掘削での地質情報は1本でのボーリング調査により結果をもとに推察されている。その結果、大断面では左右どちらの側壁に沿って調査するかによって全く違う解釈をする結果になることもあり得た。過去に実施された物理探査も

側壁を利用するため解釈が困難な場合があった。その点、FDEM 探査での探査は、ボーリング調査と同様の 1 次元調査ではあるが掘削断面から計測でき出来る利点がある。また、前方探査の測定結果図と位置図との関係模式図を図 6.14 に示す。

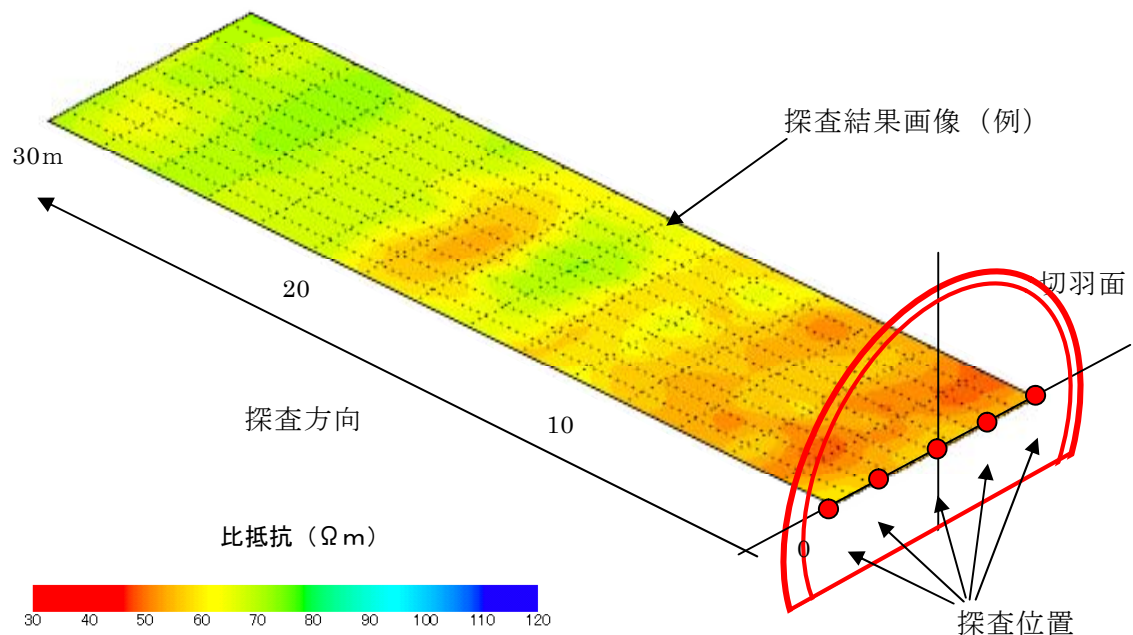


図 6.14 前方探査結果の位置関係

具体的な、計測作業を含む一連の写真を写真 6.4 に示す。仮設として事前に準備することなく探査機とパソコン等に周辺機器だけを持ち込めば計測が出来る。そのため、現場の掘削完了後の休憩時間とか交代時間の合間に実施することが可能である。この探査機を開発したコンセプトに一番合致している対象分野であることが理解できる。



測定状況



測点設置状況



探査機設置状況

写真 6.4 切羽前方探査の例

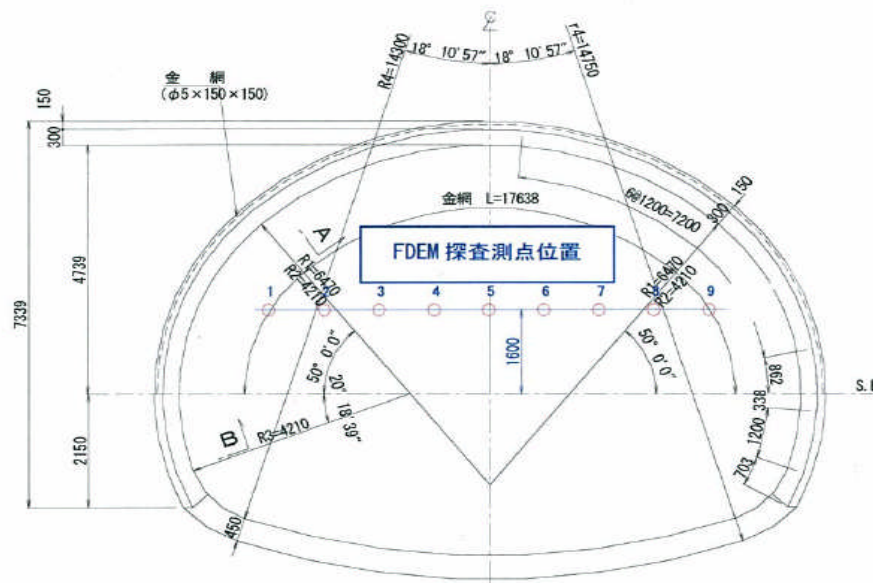
(3) 調査の目的

場所は、紀伊半島に建設中のトンネルである。トンネル地山の地質は全面的に砂岩・頁岩の互層地帯であり、場所によっては砂岩優勢であったり、頁岩優勢であったりと様々である。また、事前の地表からの弾性波探査結果などから断層・破碎帯の位置も推定されていた。地表からの情報と掘削面との差異等も含めて断層・破碎帯の位置確認することが目的である。今回は、その一部である。

(4) 探査場所の概要

図 6.15 がこのトンネルの標準断面であり、トンネル工事のスプリング線 (S.L) から上 1.6m の位置で探査測点 1～9 点を設定し、切羽面に垂直に探査機を置き前方探査した。この場合、トンネル内にある重機類は金属の影響を避けるため、探査時は後方に退避させた。

探査結果を図 6.16 に示した。この探査結果の位置での地質は、やはり、砂岩・頁岩の互層地帯である。一般に硬岩になるほど比抵抗は高く出るが、硬岩でも亀裂や断層があり地下水が廻っていると比抵抗は低く出る。湧水記録によれば、切羽から前方 5 m 区間で 25(L/min)の湧水があり、岩級区分は D～E であった。これと比



進捗を安全に評価しながら行える利点があると考える。

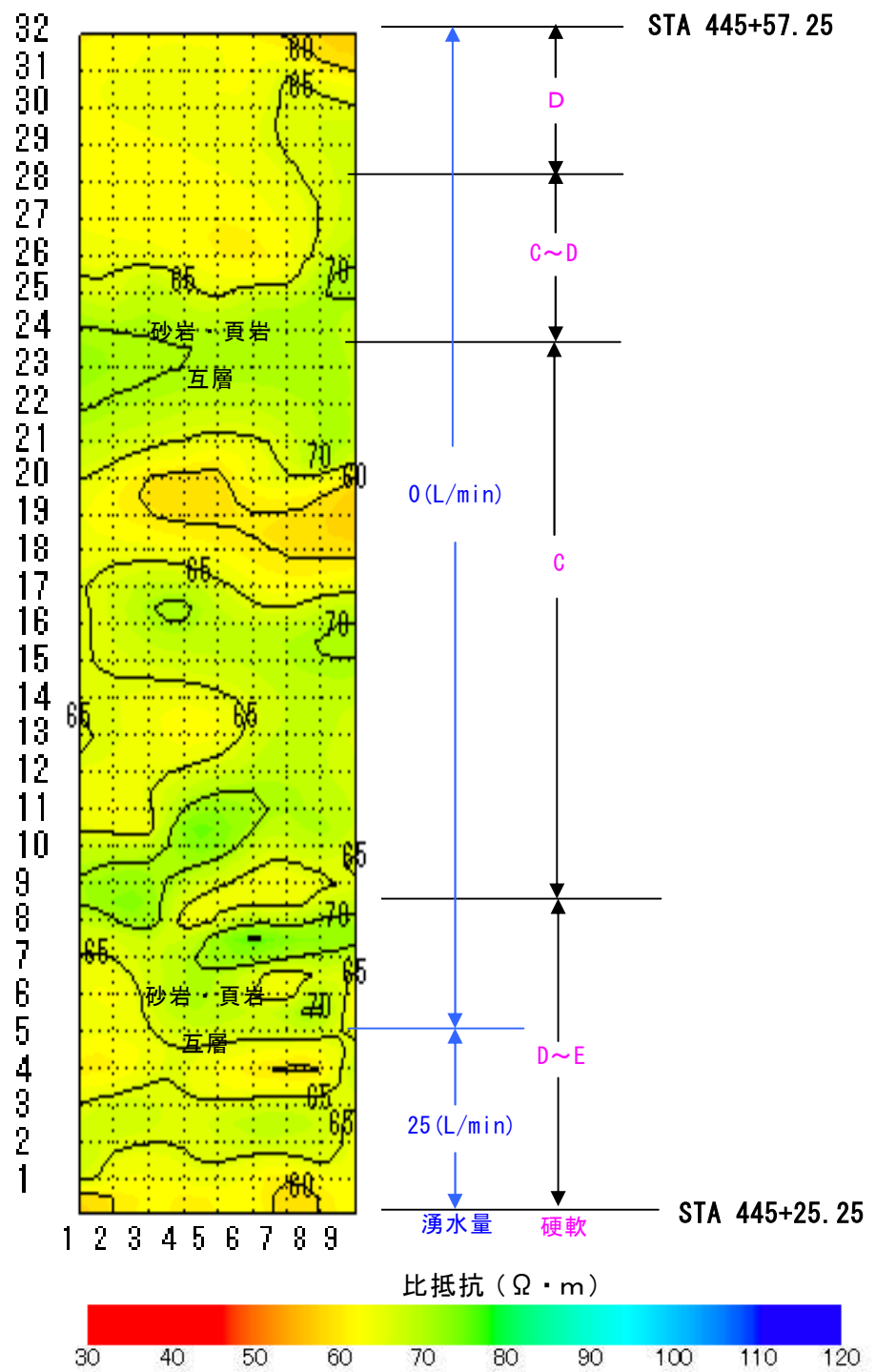


図 6.16 トンネル前方探査結果

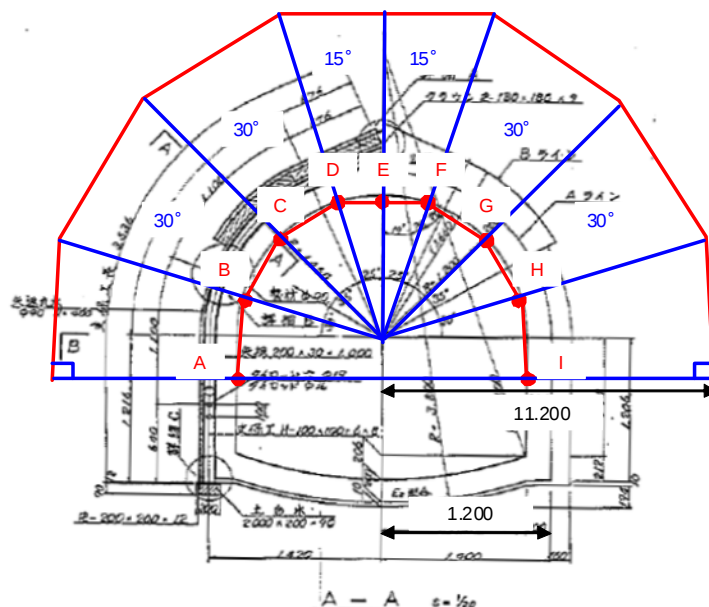
6.3.2 トンネル覆工の背面探査

(1) 概要

トンネル覆工裏面の空洞調査は、従来から実施されており地下レーダ探査機を使用していた。目的は、覆工コンクリートと地山岩盤との空隙が存在するかどうかのである。空洞の小さい場合は地下レーダが万全であるが、最近は、空洞の大きな場合の規模の推定、空洞に発展する前のゆるみ領域の判定等の調査が増えてきている。従来であれば、コンクリートの恣意なボーリングをして目視観察やボアホールカメラ等で直視していたがトンネル全線を調査するには莫大な時間と労力が掛かるためそれに変わる簡便な探査方法とFDEM探査が利用されるようになってきている。従来の探査法とは違う事例として取り上げた。

(2) 調査の目的

トンネルは昭和30年代に施工された古い導水路であり、覆工の背面の特に天頂付近に空洞の発生している恐れがあるということで、グラウト注入の試験工事を実施したものである。工事区間は170mであり、FDEM探査は、縦断方向は2mピッチで、また、覆工から背面方向にかけては、図6.17に示した標準断面に青線で示すようにA,B,C,D,E,F,G,H,Iの9方向について実施した。また、探査側線は、図6.18に示す。



横断測点位置図(A~I)

図 6.17 覆工からの探査測点と位置図

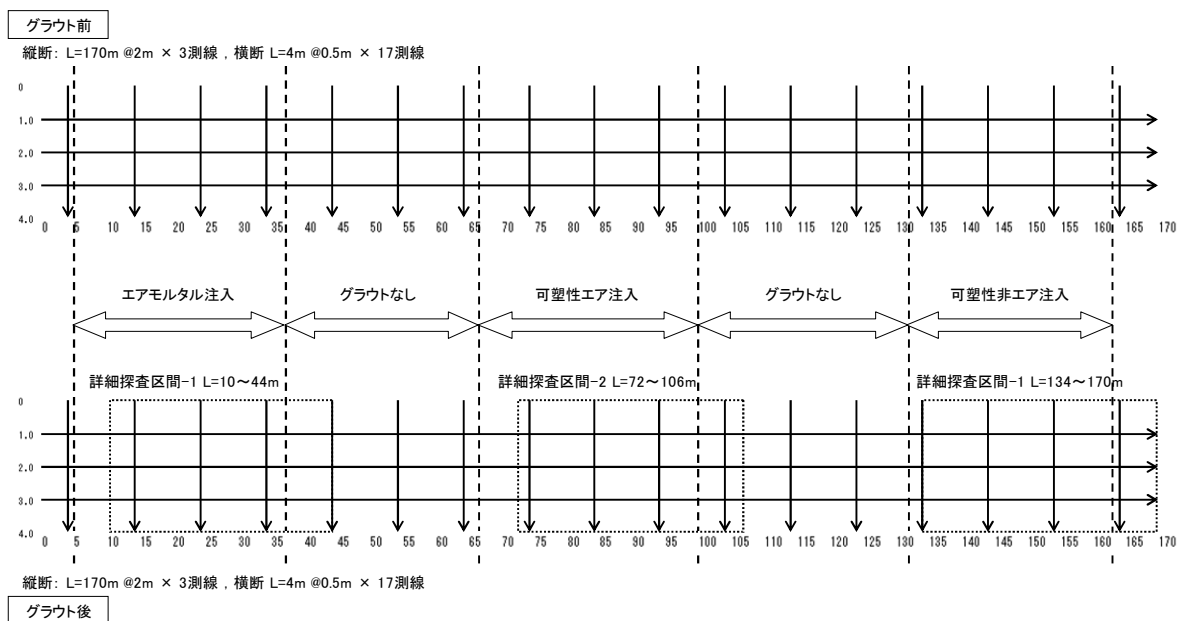


図 6.18 探査測線図

グラウト注入は、試験工事であるため注入剤の違いによる効果も見るため、エアモルタル注入、グラウトなし、可塑性エア注入および可塑性非エア注入の4種類の比較を行っている。なお、FDEM探査での探査状況写真を写真6.5に示す。

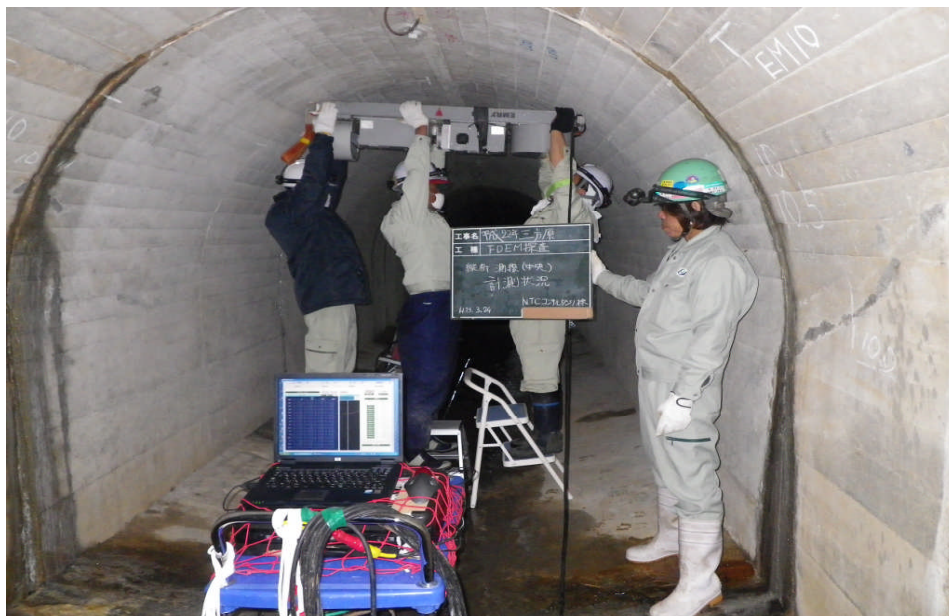


写真 6.5 トンネル覆工裏面の探査状況

(3) グラウト注入前後の比抵抗変化

従来と同様の比抵抗分布図のみの解析結果を表示するだけでは非常に解釈が困難なので、(グラウト後)―(グラウト前)の差分比抵抗分布図を図 6.19 に作成した。

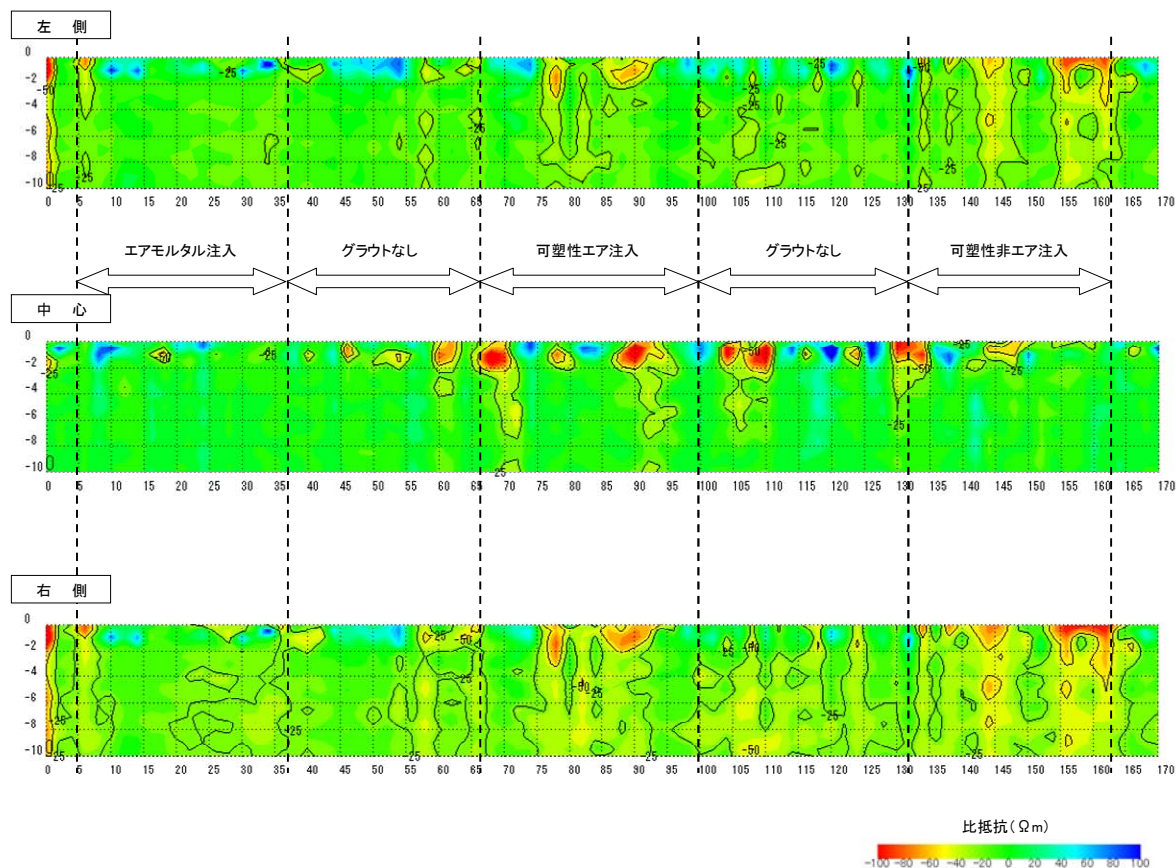


図 6.19 探査結果その 1 (比抵抗差分縦断面図)

グラウト注入剤はセメントやフライアッシュが成分であるため、通常は低比抵抗（湿潤状態で）を示すので、これが注入されるとそこでの比抵抗が低下するのが一般的である。ただし、グラウト前の地盤の比抵抗によっては変化の仕方が異なることもある。したがって、図 6.19 において暖色系の赤いゾーンなどが注入の影響をよく受けた箇所と思われる。この図では、参考に -25 、 -50 、 $-75 \Omega m$ の 3 本の線コンターを記入しておいた。グラウト注入した区間となしの区間を見ると、距離 $X=132 \sim 163m$ 区間の左縦断と右縦断での結果はよく整合している。しかし、中心縦断では、差異は大きいがグラウトなしの区間でも低比抵抗になっている箇所が現れている。これは、地下水の廻り方や水みちによって注入剤が拡がったためと考える。エアモルタル注入区間での差異はあまり出ていないが、これは注入剤の成分に関与しているためと考える。

図 6.20 は、縦断方向の差分比抵抗分布を扇形 3 次元解析して展開図で表したも

のである。表示深度は-0.5m から 0.5m ピッチで-3.0m までを表示している。これによれば注入範囲の 3 次元的な拡がりなどが良くわかる。これからすれば、深度-2m より深部への影響は少ないように見える。また、暖色で比抵抗の低い箇所（赤い箇所）がグラウト剤のよく注入されている箇所に当たる。今後は、より明瞭なラインが引けるかを検討したい。

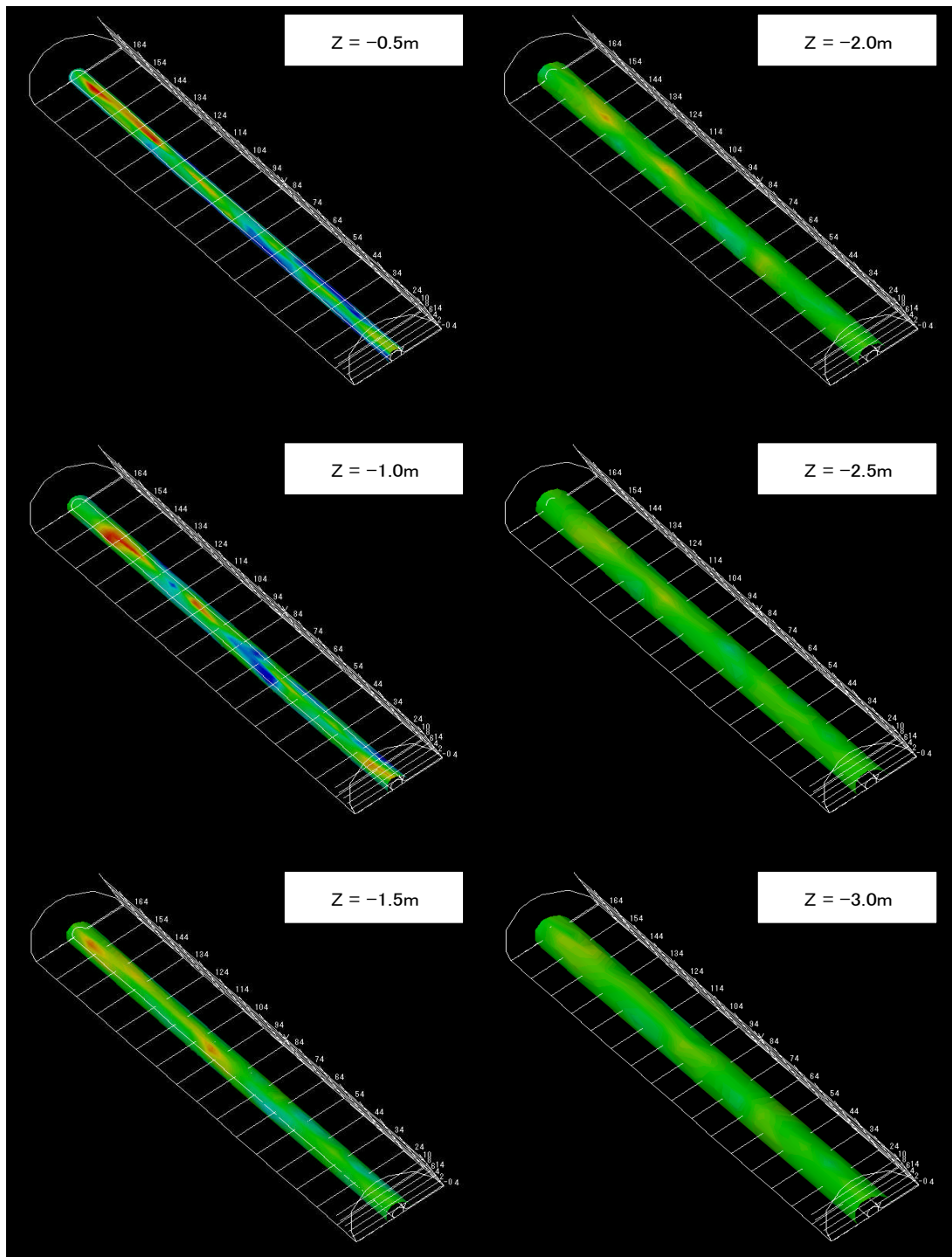


図 6.20 探査結果その 2（覆工展開図）

(4) グラウト注入量の推定

探査結果から空隙範囲を推定することは、前節で述べた。ここでは、比抵抗の閾値で何 Ωm 以下のゾーンがどのようなになっているかを 3 次元的に表現した。ある閾値を決めた結果の比抵抗ボリュームを図 6.21 に示した。

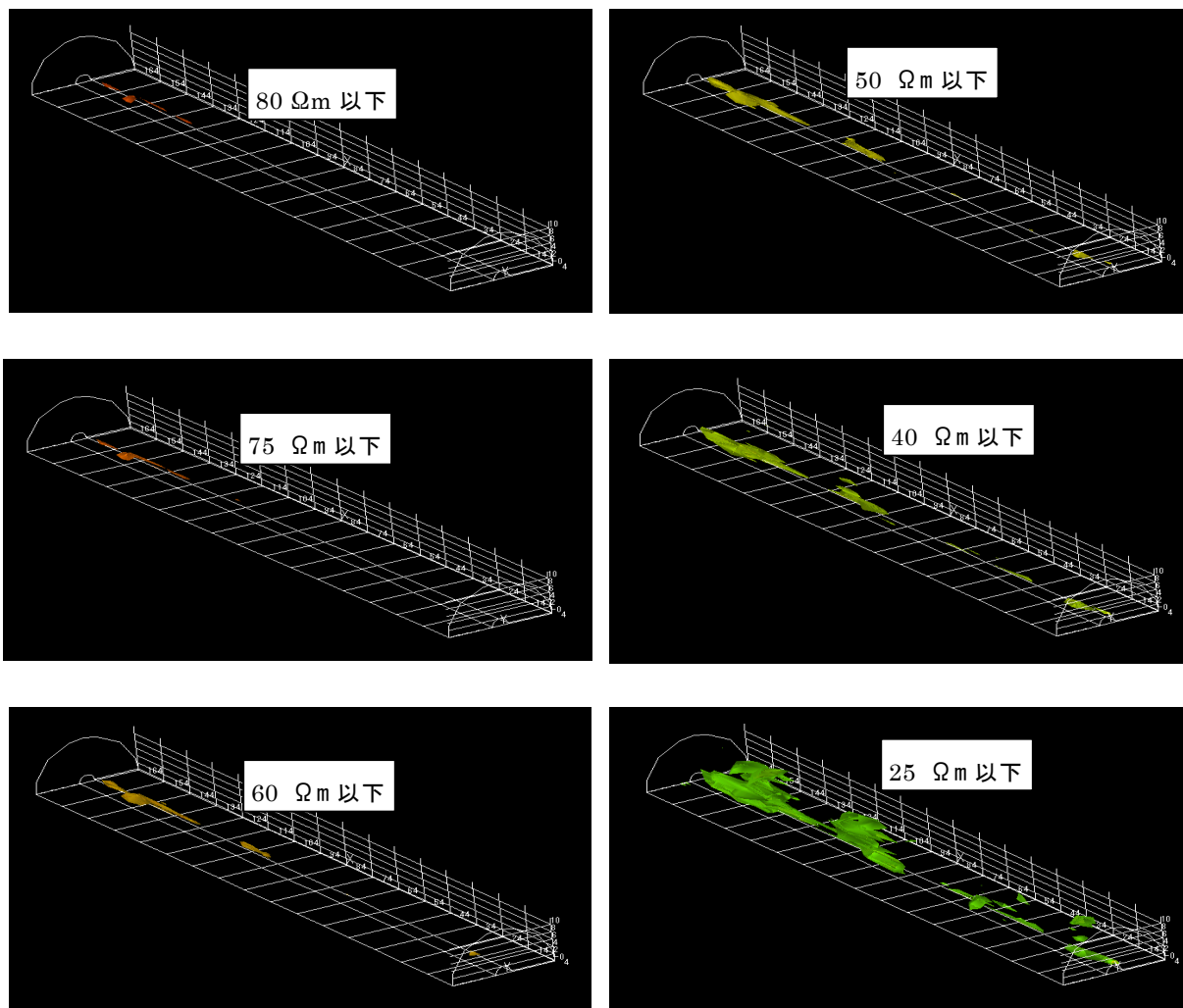


図 6.21 探査結果その 3（比抵抗ボリューム表示）

注入範囲に相当するかはこれからのキャリブレーションで検討しなければならないが、ここでは基礎的なまとめとして図 6.22 に示すように 3 次元プログラムにより種々の閾値で現れる空間量の体積（ 空 m^3 ）を求めた。結果を表 6.3 に示した。

ちなみに、50 Ωm 以下の範囲がおよその注入範囲であると見做せば、54.6 空 m^3 となるので、注入前後の空隙率の差を乗ずれば注入量が推定できる。注入の影響が認められる比抵抗の閾値は、注入剤の種類や地盤の地質や土質によっても変わるた

め難しい面があるが、今回の注入試験の諸データを分析すればその傾向はつかめるものと思われる。今後は、探査機の精度向上を目指しより設計等に役立つ探査技術の確立のために研究を進めたい。

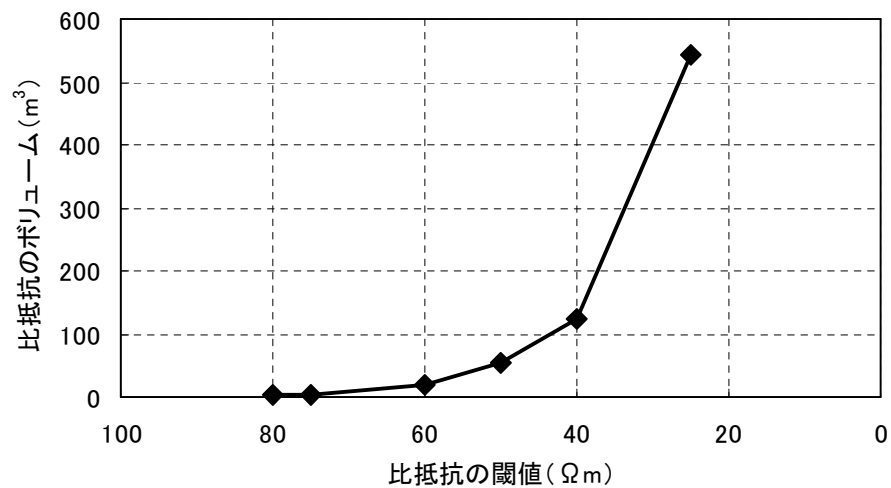


図 6.22 比抵抗の閾値とボリュームとの関係

表 6.3 比抵抗の閾値とボリューム

比抵抗の閾値 (Ωm)	80以下	75以下	60以下	50以下	40以下	25以下
比抵抗のボリューム (m^3)	2.3	4.3	19.4	54.6	124.9	544.3

6.3.3 まとめ

トンネル探査での活用を 2 ケース検討実施したが実施できることが検証できた。ケース 1 のトンネル前方探査では、今後十分に、従来実施されている HSP や TSP と同等の精度で簡便に探査でき評価できることを確認検証した。具体的には、ボーリング結果等で比較しても相関性が認められた。従来から実施している探査では、発破震源にもよるが最低でも 5 50m は解析できる。それに比べると現状の FDEM 探査機では距離が伸びないという短所があるが、仮設のために時間を要しないことから適宜採用すれば距離の伸びない部分は補うことが可能である。

ケース 2 の覆工裏面の空洞調査は、地中レーダとか打音検査が主体であった。完璧な空洞であれば問題はないが、背面に空洞がありその後落石等で詰まる場合もあり見過ごす場合がある。また、緩み等の情報に簡単に得られないのが現状でありそれをフォローできることが確認できた。

6.4 地すべり調査での適用

6.4.1 探査の目的

地すべりのメカニズム³¹⁾³²⁾³³⁾は、複雑な地質や地下水流動に起因することが多く、不明な事柄も多く存在する。地すべり地帯では、地質構造を解釈する場合、ボーリング結果に基づいて推定することが一般的であるが、データが限定的で解釈が難しい場合がある。かねてより、ボーリング調査を補完するために物理探査を併用し、それによって地質構造解釈の高度化が図られている。しかし、現状の物理探査法は装置が大掛かりになる場合が多く、設置時に地形における制約を受ける場合がある。本研究では、筆者らが開発した FDEM 探査を使用し、より一層改良して原位置での計測精度を向上させる方法について論述する。

6.4.2 探査場所の概要

探査場所は徳島県三好市西井川に位置（図 6.23）し、地すべり地³⁴⁾は吉野川流域の諏訪谷の東斜面にある。昭和 48 年 11 月下旬頃、木工団地設立を目ざして切土をして、現在建物が建っている約南半分の地域を埋め戻して約 50m×50m の平坦な土地造成を行ったところ、地すべりが発生した。この地すべり地は降雨に対応して変動を繰り返し、現在幅約 130m、長さ約 170m の地すべり地となっている。



図 6.23 調査位置図

西井川地すべり地の地形は、四国山地の吉野川に面する斜面から派生する小規模の緩やかな尾根の中央部から西に向いた標高約 180m から約 230m の部分である。また、以前から多数のボーリングが実施され、傾斜計や伸縮計、あるいは間隙水圧観測などが行われデータがかなり蓄積されている³⁵⁾。その結果、地盤の挙動が判明しており FDEM 探査の適用性が検証できた。図 6.24 が調査地の平面図である。

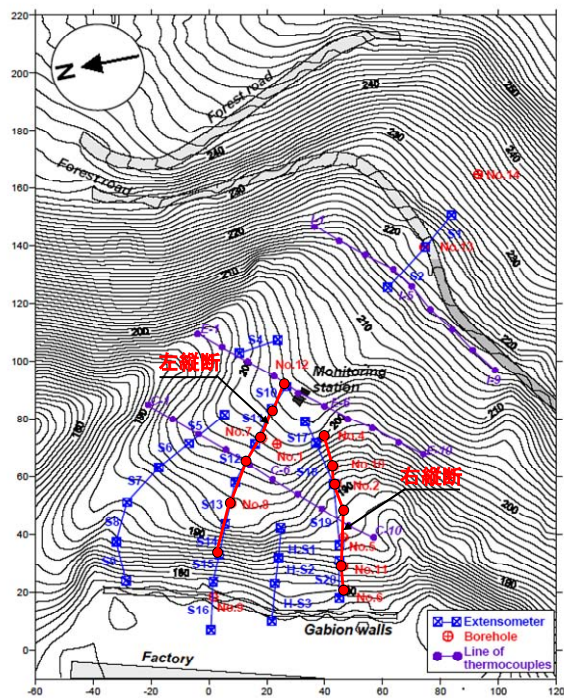


図 6.24 調査地平面図と調査地点

6.4.3 地質状況

図 6.25 は調査地周辺の地質図である。西井川地すべり地は丸印の箇所になり、吉野川右岸側の赤丸印に示す位置に当たる。吉野川は中央構造線が走り、そのすぐ南側には御荷鉾構造線、さらに南側には仏像構造線が走る。したがって、中央構造線の横ずれ断層のため岩盤が揉まれ四国地方でも有数の地すべり地が各地で見られる。

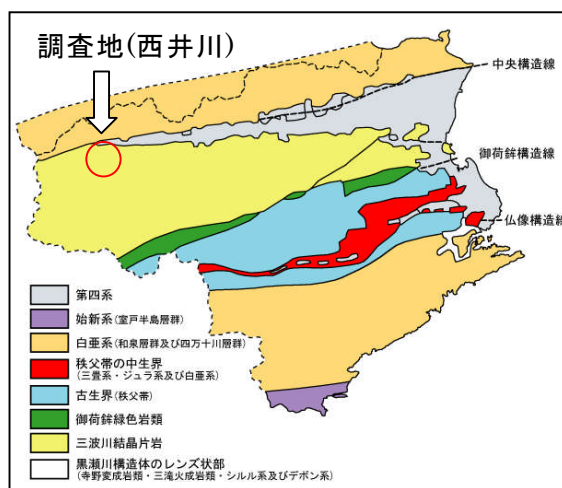


図 6.25 調査地周辺の地質

中央構造線の北側は白亜紀の堆積岩類の和泉層群の砂岩帯が分布する。すぐ南側では、三波川変成帯の結晶片岩になり、さらに南になると秩父累帯、四万十帯と続く。したがって、調査地は三波川変成帯の中であり、ボーリング記録でも基盤岩は緑色片岩、あるいは黒色片岩が分布する。

図 6.26 は西井川地すべり地帯に対応した地形標高のワイヤーフレームの立体図である。

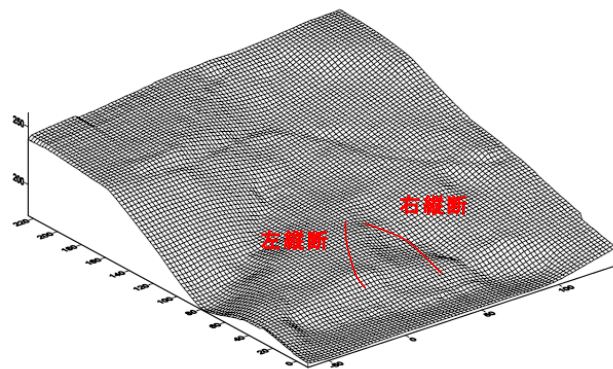


図 6.26 調査地の地形（ワイヤーフレーム）

ボーリング調査はいくつか異なる年次で実施されているが、図 6.24 において赤字で示した NO.1 から NO.14（うち NO.3 はなし）のボーリングでの記録が比較的充実している。新しく開発した探査機の測定点は、右縦断、左縦断測線上のボーリング位置とそれらの中間点で探査するものとした。なお、NO.9 ボーリング位置においても探査したが、土留め壁の近傍であったのとビニールハウス鉄骨があったため測定データがシフトを受けたため解析から除外した。

6.4.4 ボーリング結果との対比

各測点の比抵抗柱状図とボーリング柱状図を測線断面で並べ図 6.27 に示した。この図において、探査結果の比抵抗柱状図は、比抵抗の低い側を赤い暖色系で、高い側を青色の寒色系のグラデーションで表示している。ボーリング地点と探査箇所の標高が少し異なっているのは、地形の関係や障害物があったため探査機をボーリング地点に置けなかったことと、探査機を水平に置くために地ならし等をしたためである。これらの比抵抗柱状図において、急激に、もしくは著しく値が低い箇所が存在する。探査結果より想定したすべり面の位置は、比抵抗柱状図で比抵抗の最も小さい区間の下面とする。なお、図 6.27 において比抵抗による推定すべり面を赤の実線、ボーリングによる推定すべり面を青の点線で示す。図 6.27 において、ボーリング結果によれば、およそ深度 8m 前後で軟弱粘土が見られる。これらの軟弱粘土の深度と N 値の分布を

調べると NO.5 以外は全て N 値が急に大きくなる深度に相当している。これら表 6.4 歪計によるすべり面の深度は概ね整合している。とくに NO.5 地点は深い箇所まで低い比抵抗となっているが、ボーリング結果においても N 値は徐々に大きくなる傾向であり、全般的に軟弱な個所となっていると考えられる。NO.2、NO.10 および NO.4 の表層には、砂質土や土砂が分布するが、比抵抗分布の比抵抗が急変する深度付近ですべり面が存在すると推定できる。比抵抗柱状図より比抵抗が最も低い区間の下面とボーリング結果から推定したすべり面との位置関係に関わっていると考えられる。NO.2、NO.10 および NO.4 の表層には、砂質土や土砂が分布するが、比抵抗分布も 30～100Ωm と高く出ており、ボーリング結果を反映している。

6.4.5 探査結果とパイプひずみ計観測結果との対比

表 6.4 は末峯によるパイプひずみ計観測結果から推定したすべり面の位置¹⁴⁾と低比抵抗ゾーンの下面深度を整理したものである。このことから比較すると、すべり面の位置が概ね合っていると判断できる。これらを比較すると、すべり面の位置がほぼ一致している。なお、探査した場所の地形は、図 6.27 から分かるように標高差が激しく起伏のある場所であったが、同軸コイル型探査機で測定することによりコイル中心の強い磁場が地盤に垂直に照射されているため、探査結果はかなり薄い低比抵抗の層を捉え、また、地点間の地層深度や比抵抗分布の差を明瞭に捉えられることが分かった。

表 6.4 歪計によるすべり面の深度

ボーリング位置	NO.11	NO.5	NO.2	NO.10	NO.4
パイプ歪計による深度(m)	6.9	8.3	7.5	7.5	11.0
比抵抗分布による深度(m)	7.0	9.2	10.5	8.7	12.5

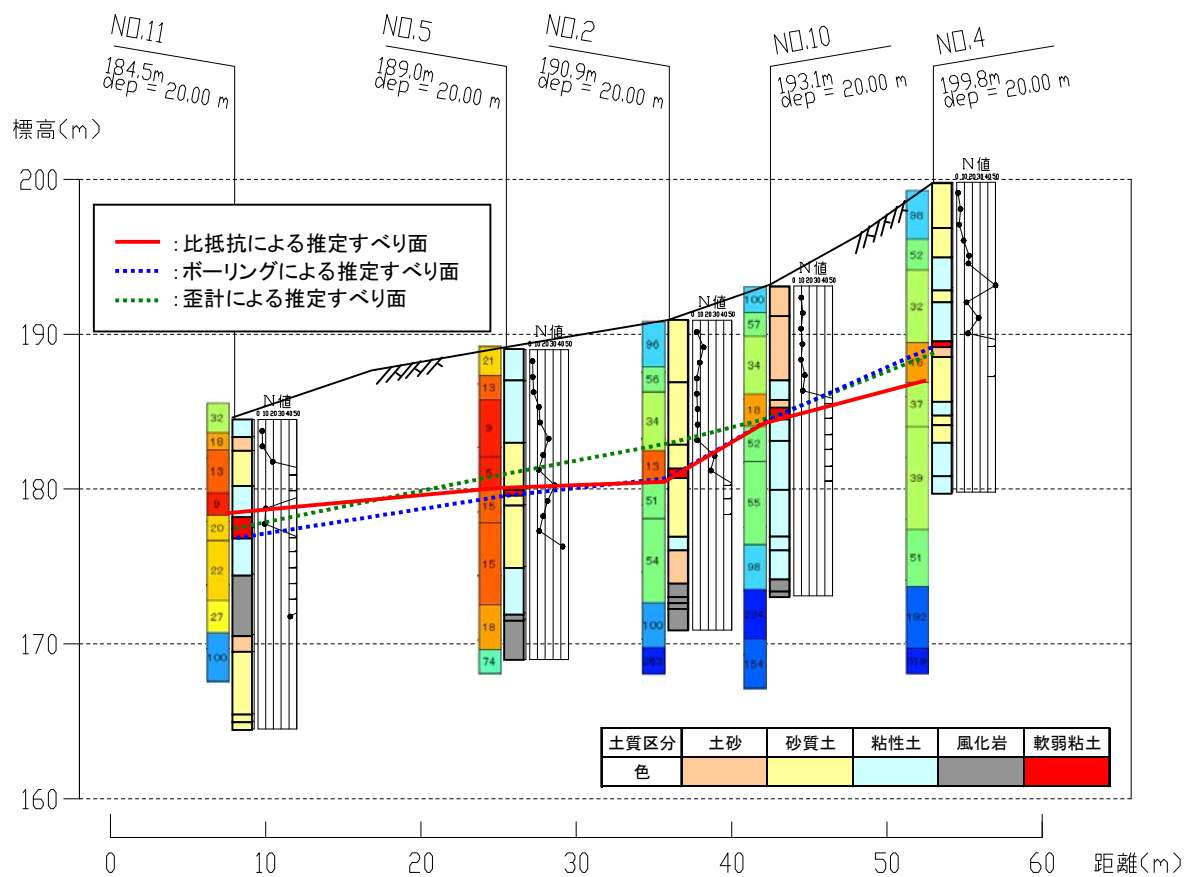


図 6.27 右側縦断面図

6.4.6 まとめ

一般的にすべり面の厚さは土塊全体の構造に比べて薄い。FDEM 探査のような電磁探査法では地盤の電氣的性質の違いを調べる関係で、探査される最小層厚は原理的にすべり面の厚さよりも大きく出てしまうことが考えられる。このことについては、今後、事例を増やして検討を行う必要がある。

6.5 CPT手法を取り入れた複合探査

6.5.1 探査の目的

複合探査には、様々な方法があり調査対象および目的に応じて対処すべきと考える。今回は、直接法である CPT 技術と FDEM 探査との複合探査および弾性波探査と比抵抗探査の物性変換が可能であるという文献を基に検証した。

6.5.2 特殊堤での調査

そのため、比抵抗探査だけで明瞭な解釈が出来る対象かは探査目的を明確にしておかないと品質の高い調査はできない。本事例は、特殊堤において変状原因追及と設計基礎資料を得るために踏査、コア調査、レーダー探査、FDEM 探査、電気式静的コーン貫入試験(CPT)、ボーリング調査を実施した。踏査結果では、堤防天端に縦断方向のクラック、表法面上部の枠には凹み、下部の枠にはハラミが認められた。クラックの発生は特殊堤上流区間で多く認められた。ボーリング調査では堤防地盤状況は堤体および基礎地盤とも砂礫主体で砂層を挟み、緩い状況（N 値：3～10）の区間が認められたがレーダー探査では法面部の空洞は認められなかった。このため、堤防縦断方向のゆるみ域（相対密度 D_r ）を連続的に把握するため、港湾調査で実績のある手法である FDEM 探査・電気式コーン貫入試験（CPT）の組合せた複合探査の検証を実施した。

(1) 調査手法の検討

対象となる特殊堤に対して適用を検討した調査手法の長所・短所の一覧を表 6.5 に、調査内容・目的を表 6.6 に示す。

表 6.5 対象となる特殊堤における調査手法の長所・短所

対象構造物 (項目)	現 状	予想される事象と影響	対策上の確認・検討 項目	確認・検討の手法	手法の長所・短所
堤体天端の変状	- 堤防天端に横断方向のクラック - 数箇所のコア調査による舗装直下の空洞確認（緩みは未確認） - 緩い堤体材料と軟弱な A s 層（局所的な既往ボーリングで確認）	- 地盤と堤体沈下が「堤体の緩み・天端舗装下の空洞」を生じた - 現象の進行による堤体のり面損傷・堤体安定性低下（すべり）が懸念される	対象範囲の基礎地盤の確認も含めた地盤状況の把握と沈下原因追求が必要	- ボーリング調査 - 電気式静的コーン貫入 - FDEM 探査（ボーリング結果と対比が必要）	○：点の調査、直接地盤と土性確認が可能 △：点の調査で、地盤と土性確認が間接的に可能 △：経済的に広範囲の探査可能だが、ボーリング結果と対比が必要
			堤体全体の緩み範囲とその程度の把握が必要	- ボーリング（標準貫入試験） - FDEM 探査＋電気式静的コーン貫入試験	△：N 値から緩み評価（間隙率）が可能。点の調査となるため、広範囲になると不経済となり、ピッチが粗いと調査精度が落ちる。 ○：相対密度から緩み評価（間隙率）が可能。線の調査となるため、広範囲になると経済的となる。

表 6.6 特殊堤における空洞調査内容・目的

内容	目的	仕様	摘要
① 現地踏査	・天端と表・裏法面ブロック背面の変状状況把握		調査・設計計画を立案する上で全体の状況把握が必要
② レーダー探査	・表と裏法面ブロック背面縦断方向の空洞把握	法面縦断方向 3 測線 延 1492m	設計には、ブロック背面空洞の定量的な把握が必要
③ ボーリング調査	・堤防と基礎地盤状況の把握	5 箇所、延 52m	設計には、空洞の定量的な把握が必要
④ コア調査（堤防天端）	・堤防天端の空洞の把握	3 箇所	設計には、空洞の定量的な把握が必要
⑤-1 FDEM 探査	・縦断方向の堤体の緩み状況把握 ・堤体（又は樋管横）の深度方向の緩み状況把握	堤防天端 1 測線 延 490m（5 mピッチ）	設計には、N 値等から間隙率把握が必要
⑤-2 電気式静的コーン貫入試験（CPT）	・相対密度の比抵抗値の相関把握	堤防天端 3 箇所 延 5.65m	

(2) 探査の現場

特殊堤の形状は三面張り構造となっており、表法は法枠＋枠内コンクリート張、裏法はブロック積擁壁、天端はコンクリート舗装になっている。図 6.28 には特殊堤の形状および調査位置の模式図を、調査内容の一覧を表 6.6 に示す。

今回の調査では堤防全体の連続的なゆるみ域を定量的、効率的に把握することを目的として、パイロットボーリング・CPT と堤防天端縦断方向の FDEM 探査を実施し、堤体全体の緩みを相対密度 D_r によって定量的に評価した。

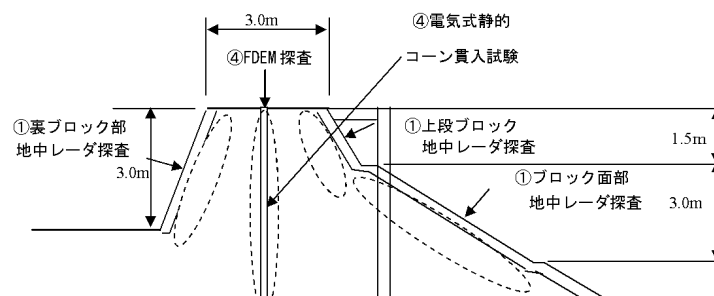


図 6.28 特殊堤の形状および調査位置の模式図

(3) FDEM探査とCPTによるDrの把握の原理

① 土質区分

比抵抗は粘土含有量が多いほど小さくなり、同一の砂でも含水量が多いほど比抵抗は小さくなる。礫そのものの比抵抗は高いため礫が混入すると比抵抗は高くなる。比抵抗断面図による土質区分は、相対的な比抵抗コントラストから判定し、ボーリング調査・土質試験結果から設定した。

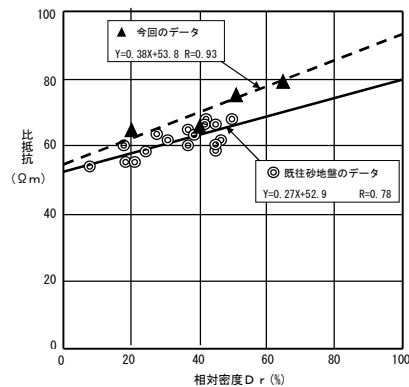


図 6.29 比抵抗値と相対密度 Dr の相関図

② 比抵抗値と相対密度 (Dr) の相関把握

緩み域の定量的評価の手法は、比抵抗値マップを図 6.30 に示した。CPT 試験結果の先端抵抗 q_c から次のランセロッタの式から相対密度 Dr を求め、比抵抗の深度分布と照査して図 6.29 の相関図を作成する。この図には参考として港湾関連の既往砂地盤での相関を示しておく。

表 6.7 今回調査の Dr と試験値の目安

緩みの状態	相対密度 Dr (%)	Mayerhofによる砂のN-Dr- ϕ の関係			今回調査による砂・砂礫		
		N値	内部摩擦角 ϕ (度)	静的コーン 支持力 q_c (kPa)	N値	内部摩擦角 ϕ (度)	静的コーン 支持力 q_c (kPa)
非常に緩い	<20	<4	<30	<1340	3~9 (6.5)	32.1	<2000
緩い	20~40	4~10	30~35	1340~ 3580	7~17 (11)	35.3~35.8	2000~ 3580
締まった	40~	10~	35~	3580~	15~	39.4~	3580~

ランセロッタの式 $Dr(\%) = -98 + 66 \log[(q_t / 98) / (\sigma_v / 98)^{0.5}]$

ここに、 q_t : CPT による先端抵抗(kN/m²)、

σ_v : 鉛直有効応力(kN/m²) である。

次に、緩みの目安としては、表 6.7 を参考に、 $Dr=20\%$ 以下 : 非常に緩い、 $Dr=20\sim 40\%$: 緩いで区分し、この閾値に対応する比抵抗を相関図からそれぞれ 55、65($\Omega \cdot m$)を設定した。

③ 調査結果と評価

図 6.30 の下段は、 $Dr=20$ と 40%に対応する比抵抗の堤防縦断方向のコンターマップである。これより、緩い 区間と非常に緩い区間が 230m～470mに集中しており、クラック分布状況と良く整合している事を確認し、各区間で安定検討を行い、対策工の必要性を検討した。

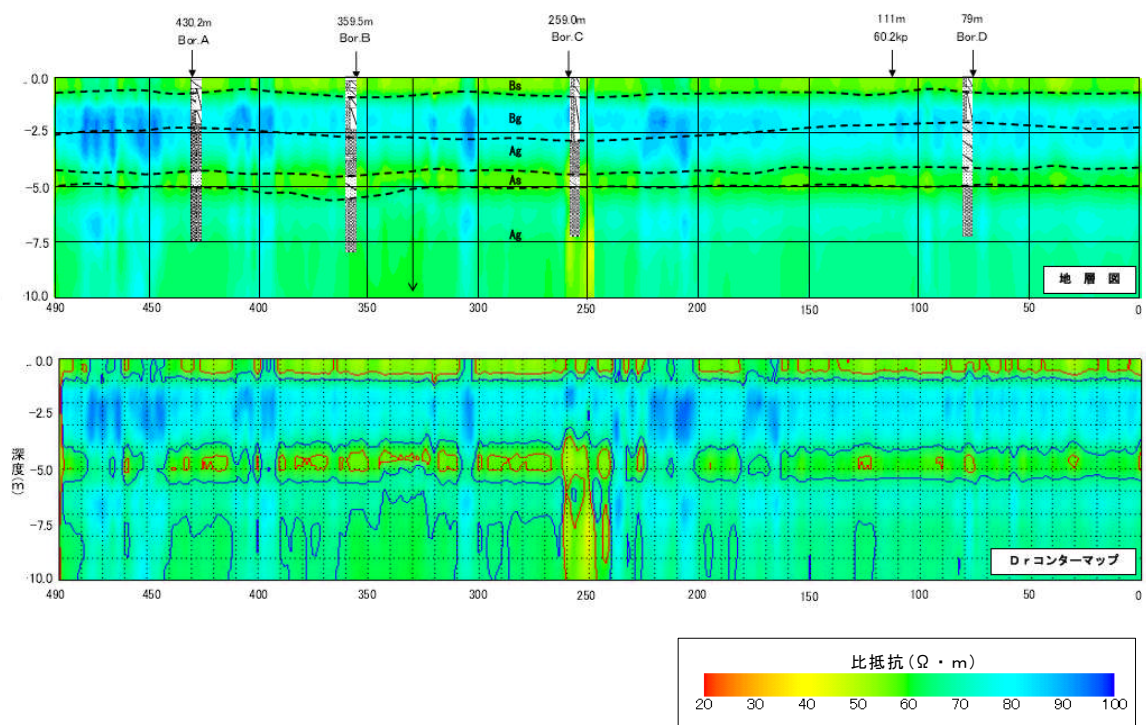


図 6.30 堤防縦断方向の Dr コンターマップ

6.5.3 まとめ

複合探査として CPT 調査を実施した。今回の現場では比抵抗と相対密度との相関性が非常に良い結果であった。CPT 調査は、点での調査であり FDEM 探査は面的な調査であるので今回のように相関性が高ければ CPT 調査を実施していない箇所での信頼性も高く地盤構造を正確に把握できる。よって、堤防縦断方向の連続的なゆるみ域の把握には FDEM 探査と CPT の組合せが有効な手段であると判断できた。

今後は、異常値が発生した場合にデータの削除を行うべきか削除する場合の削除方法を考慮する必要があるのではと考える。また、CPT 試験は礫質土では貫入不能となるケースがあるため、そのような現場では対処方法の開発等が課題である。

6.6 まとめ

FDEM探査の開発研究のコンセプトは、「簡便」、「スピーディー」、「コンパクト」であったが事例が増えていることから、テーマが現状を反映していたと理解している。また、土木分野の浅部（地下 40m程度）で十分に使用できることが実証できた。今後は、より利用される分野を開拓し新たな課題が抽出されれば研究し論議したい。また、比抵抗の特性の幅をより精度よく特定できる研究を提案する。

この章では、通常実施している河川堤防や斜面では付加価値があると考えられる探査事例を 4 事例紹介した。

1) 塩水を水地盤に注入して塩水が空隙に流れ込み水みちを流下することが FDEM 探査で捉えることの可能性を検証した。また、浸透量解析で飽和度の時間経緯を計算した。そして、塩水が注入による浸透領域の時間変化を FDEM 探査による比抵抗分布の時間変化で概ね捉えることが可能であると確認できた。また、三次元不飽和浸透解析から求めた飽和度の時間変化と照合したところ適当なパラメータを設定することで両者の時間変化がほぼ整合することも確認できた。したがって、短時間で簡便に測定できる FDEM 探査による比抵抗測定は地盤や堤防などの飽和度の時間変化などを調べるモニタリングのツールとして利用できる。それ以外にも適用できるか今後論議する。

2) トンネル探査での活用を 2 ケース検討したが実施できることが検証できた。

ケース 1 のトンネル前方探査では、従来実施されている HSP や TSP と同等の精度で簡便に探査でき評価できることを確認検証した。また、ボーリング結果等で比較して相関性が認められた。従来から実施している探査では、発破震源にもよるが約 50 m は解析できるが、現状の FDEM 探査機では地盤の比抵抗に依存するが距離が伸びないという短所がある。しかし、仮設のために時間を要しないことから適宜採用すれば距離の伸びない部分は補うことが可能である。また、ハード面の改良で探査深度を伸ばせるかどうか論議する。

ケース 2 の覆工裏面の空洞調査は、従来は地中レーダとか打音検査が主体であった。完璧な空洞であれば問題はないが、背面に空洞がありその後落石等で詰まる場合もあり見過ごす場合がある。また、緩み等の情報に簡単に得られないのが現状でありそれをフォローできることが確認できた。今後は、空洞、緩み、湧水が精度よく捉えられるかを論議したい。

4) すべり面の厚さは土塊全体の構造に比べて薄い。FDEM 探査のような電磁探査法では地盤の電氣的性質の違いを調べる関係で、探査される最小層厚は原理的にすべり面の厚さよりも大きく出てしまうことが考えられる。このことについては、今後、事例を増やして論議したい。

5) 複合探査として CPT 調査を実施した。今回の現場では比抵抗と相対密度との相関性が非常に良い結果であった。CPT 調査は、点での調査であり FDEM 探査は面的な調査

であるので今回のように相関性が高ければ CPT 調査を実施していない箇所での信頼性も高く地盤構造を正確に把握できる。よって、堤防縦断方向の連続的なゆるみ域の把握には FDEM 探査と CPT の組合せが有効な手段であると判断できた。

今後は、異常値が発生した場合にデータの削除を行うべきか削除する場合の削除方法を考慮する必要があるのではと考える。また、CPT 試験は礫質土では貫入不能となるケースがあるため、そのような現場では対処方法の開発等が課題である。

参考文献

- 1) 片山辰雄, 渡部高広, 小里隆孝, 古谷元, 末峯章, 西垣誠: 同軸コイル型電磁探査機の開発とその地すべり調査への適用性, 日本応用地質学会, 応用地質, 2013.
掲載通知, 平成 24 年 10 月 15 日付 原稿受理.
- 2) 楠見晴重, 片山辰雄, 高橋厚志: 新しい電磁探査法の開発と斜面調査への適用例, 土木春秋社/全国地質調査業強化連合会 編, 地質と調査, 第 1 号, 24 頁~28 頁, 2007.
- 3) 片山辰雄, 小里隆孝, 渡部高広, 古谷元, 末峯章: 地すべり調査における周波数領域電磁探査法(FDEM)の適用性, 地盤工学研究発表会発表講演集, 第 46 巻, ROMBUNNO.26, 2011.
- 4) 片山辰雄, 小里隆孝, 高橋厚志, 佐々木章, 楠見晴重: 周波数領域電磁探査法(FDEM)の斜面モニタリング調査への適用性, 地盤工学研究発表会発表講演集, 第 46 巻, ROMBUNNO.1001, 2011.
- 5) 古谷元, 末峯章, 片山辰雄, 小里隆孝, 渡部高広: 周波数領域電磁探査法による地すべり調査, 日本地すべり学会研究発表会講演集, 第 50 巻, 159 頁~160 頁, 2011.
- 6) 片山辰雄, 小里隆孝, 加藤裕将, 楠見晴重, 松岡俊文: 周波数領域電磁探査法の開発と河川堤防調査への適用性, 地盤工学会, 地盤工学ジャーナル, 第 4 巻, 第 4 号, 331 頁~340 頁, 2009.
- 7) 櫻木大介, 片山辰雄, 小林翼, 加藤裕将: マルチ周波数型 EM 探査の取組みと現状について, 地盤工学研究発表会発表講演集, 第 37 巻, 79 頁~80 頁, 2002.
- 8) 林健太郎, 若狭聡, 舘山逸朗, 片山辰雄, 加藤裕将: 河川堤防の浸透安定性の詳細点検における FDEM 探査の適用事例, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第 61 巻, ROMBUNNO.2-229, 2006.
- 9) 舘川逸朗, 渡邊武志, 片山辰雄, 加藤裕将: 特殊堤における静的コーン貫入試験と FDEM 探査を用いた相対密度による緩み評価事例, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第 65 巻, ROMBUNNO.II-038, 2010.
- 10) 高橋厚志, 片山辰雄, 小里隆孝, 渡部高広, 西垣誠: 周波数領域電磁探査法(FDEM)の河川堤防調査への適用性, 地盤工学研究発表会発表講演集, 第 46 巻, ROMBUNNO.542, 2011.
- 11) 渡邊武志, 舘川逸朗, 松尾健治, 片山辰雄, 加藤裕将: 護岸変状調査における FDEM 探査の適用事例, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第 65 巻, ROMBUNNO.II-042, 2010.
- 12) 城まゆみ, 川上純, 片山辰雄, 高橋厚志: 2種類の物理探査法を組み合わせたトンネル切羽前方探査, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第57巻, 1333頁~1334頁, 2002.

- 13) 高橋厚志, 片山辰雄, 櫻木大介, 加藤裕将: 施工中の物理探査: トンネル切羽前方探査への適用性について, 地盤工学研究発表会発表講演集, 第 37 巻, 65 頁～66 頁, 2002.
- 14) 高橋康隆, 楠見晴重, 阪本一生, 片山辰雄, 菅智浩, 中村真: 弾性波および比抵抗併用探査による岩盤の工学的評価法, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第 59 巻, 877 頁～878 頁, 2004.
- 15) 片山辰雄, 尾崎克之, 加藤裕将, 小里隆孝, 朴美京: 多周波数を用いた EM (Electromagnetic) 探査の開発, 土木学会関西支部年次学術講演会講演会, 第Ⅲ分野, III-30-1 頁～III-30-2 頁, 2001.
- 16) 北村良介, 中田文雄, 赤崎秀敏, 板井秀典, 宇都洋一, 片山辰雄, 黒木久達, 林篤, 三田和郎, 八百山孝: 物理探査手法によるシラス地盤に現存する特殊地下壕探査の実証実験, 物理探査学会学術講演会講演論文集, 第 112 巻, 161 頁～164 頁, 2005.
- 17) 北村良介, 中田文雄, 赤崎秀敏, 板井秀典, 宇都洋一, 片山辰雄, 黒木久達, 林篤, 三田和郎, 八百山孝: 物理探査手法によるシラス地盤に現存する特殊地下壕探査の実証実験(2), 物理探査学会学術講演会講演論文集, 第 117 回, 235 頁～238 頁, 2007.
- 18) 片山辰雄, 小里隆孝, 加藤裕将, 古本一司: 塩水浸透と FDEM 比抵抗探査法による地下水流向調査, 地盤工学会関西支部, 地盤の環境・計測に関するシンポジウム 2007 論文集, 23 頁～28 頁, 2007.
- 19) 片山辰雄, 尾崎克之, 加藤裕将, 小里隆孝: 土木分野における EM 探査の探査事例, 土木学会年次学術講演会講演概要集 第 3 部, 第 56 巻, 第 A 号, 600 頁～601 頁, 2001.
- 20) 上野勝大, 片山辰雄, 佐藤亮, 尾崎克之: 鉄道盛土に対する比抵抗探査手法 (EM 探査法) の適用に関する一考察, 土木学会年次学術講演会講演概要集第 4 部, 第 56 巻, 628 頁～629 頁, 2001.
- 21) 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, 地盤工学研究発表会発表講演集, 第 36 巻, 2563 頁～2564 頁, 2001.
- 22) 岡二三生, 八嶋厚, 大野康年, 関口宏二, 片山辰雄: EM 法を用いた薬液浸透注入改良地盤の形状確認実験について, 地盤工学研究発表会発表講演集, 第 38 巻, 845 頁～846 頁, 2003.
- 23) 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, 地盤工学研究発表会発表講演集, 第 38 巻, 63 頁～64 頁, 2003.
- 24) 松岡俊文, 内田利弘, 長谷川信介, 片山辰雄: 各種 EM 探査装置の比較実験, 物理探査学会学術講演会講演論文集, 第 111 巻, 89 頁～92 頁, 2004.
- 25) 朴 三奎、藤原 寛、朴 美京、松井 保: 土の比抵抗に関する基礎的研究、物理探査、第 52 巻、第 4 号、pp.299-306, 1999.

- 26) 沖村 孝、鳥居宣之、中村 勉：地盤比抵抗を用いた盛土施工管理手法に関する研究、建設工学研究所論文報告集第 42-A 号〔論文〕, 2000.
- 27) 中澤式仁：改訂 地下水ハンドブック, 建設産業調査会, pp.25-26, 1998.
- 28) 李圭太・日宇洋平・小林猛嗣・小山倫史・大西有三（建設技術研究所）：河川堤防を対象とした飽和 - 不飽和浸透流解析における初期飽和度に関する一考察, 土木学会全国大会第 64 回年次学術講演会, III-296, 2009.
- 29) 中島秀雄：図説 河川堤防, 技報堂出版, 2003.
- 30) 小高猛司：地盤防災に対する数値地盤力学—地盤材料・間隙流体相互作用のモデリング、地学雑誌 Journal of Geography 115(3), pp.295-308, 2006.
- 31) 佐々恭二：地すべりダイナミクスの発展, 京都大学防災研究所年報, 第 50 号 A, pp.93-109. 2007.
- 32) 千木良雅弘(2006)：地すべり・崩壊の発生場所予測—地形と地質からみた技術の現状と今後の展開, 土木学会論文集 C, Vol.62, NO.4, pp.722-735, 2006.
- 33) 山崎新太郎・千木良雅弘：泥質片岩の風化メカニズム, および, 風化と地すべりの関係について；四国三波川帯の不攪乱ボーリングコアを用いた解析, 地質学会誌, 第 114 巻, 第 3 号, pp.109-126, 2008.
- 34) 末峯 章：地すべり発生機構に関する二・三の知見, 京大防災研究所年報, 第 23 号, B-1, pp.345-355, 1980.
- 35) 末峯 章：地すべり発生時の地下水の観測事例, J. of the Jpn.Landslide Soc., Vol.41, NO.1, pp.43-48, 2004.

第7章 結論と今後の課題

本論文では、防災と維持管理に関する現状を理解することに努めた。結果、戦後復興に向けて経済成長とともに道路・河川をはじめとするインフラ整備が急速に行われた。その後、経済が低成長期に入り公共投資が減少する中インフラ整備が進まず補修や修繕のないインフラ構造物が増えた。と同時に、建設後30年50年経過した社会資本が増え続け10～20年後には50%を超えるインフラ構造物の出現もありうることを整理した。その結果、時代に沿った調査方法が必然として必要であることを学んだ。とともに、今後の地盤調査のひとつとしては、従来からある点の調査では到底追いつかない現実を理解した。なかなか主流の調査手法にならない物理探査を取り上げた。最近では、かなりの調査手法が開発されているが費用対効果の中で調査の選択肢の一つにならないのではないかと考えた。

昨今の公共投資の縮減により、今後はインフラ構造物の経年劣化が進行し続けると同時に耐用年数を越え事故が多発することが十分に考えられる。その中でも、道路・河川に関係する分野が大半である。そして、道路であれば斜面、河川であれば堤防および斜面等の地盤調査が必要であるが、それらの調査深度は深度50mまで解明できれば充分である。また、斜面では崖錐層と岩盤部との境界、河川では、盛土部の状態（砂礫、砂、粘土）を把握することがわかれば予防保全および対策が可能になる。また、従来開発された物理探査は大掛かりであることから建設現場とか交通量の多い堤防や傾斜のある斜面等では不向きである可能性がある。同時に、調査に費用が回らなかったことも影響していると考えた。

以上、土木分野における0～50m程度の地盤構造を把握することが対策設計の一助となることから、効率的に「簡便」、「スピーディー」、「コンパクト」をコンセプトとした周波数領域電磁探査法の開発を試み多くの事例を積み上げた。そして、事例の研究の中から次代のニーズにあった指向性のある探査機の開発に着手しプロトタイプの探査機を開発し事例を積み上げている。研究を進める中、対象分野ごとに特化した探査機が必要であることを痛感したが、それに関しては今後の研究にゆだねたい。

本研究で得られた知見と結論を論述する。

7.1 結論

- (1) 第2章では、防災と維持管理の現状を把握するため、主に官庁から発信される文献を収集し、限られた原資のもと緊急かつ効率的な資本投資を実施することの必要性が急務であることを整理した。防災と維持管理に関して「斜面」と「河川」に関して現状の調査手法に関して研究を行った。特に、斜面では人工斜面である表面を被覆する吹付け斜面の健全性評価をどのように解釈するかを重点的に研究した。ま

た、河川に関しては、管理の法整備の流れを整理した。

- (2) 第3章では、防災・維持管理を含む土木工事現場において、良く用いられている地盤調査法に関して整理するとともにその中の物理探査法に関して文献収集を実施し整理した。特に、電磁探査法に関する過去の研究を収集するとともに土木分野、特に、地下構造を把握するための物理探査を整理し項目別に整理した。そして、実際に活用する場合は、十分に目的を明確にしてそれに適した探査を選択する必要性を論議した。
- (3) 第4章では、物理探査の中で特に比抵抗を求める探査法に的を絞り研究した。その結果、「簡便」で「スピーディー」に調査できる周波数領域電磁探査法の開発を手がけるため、コイル配置とかコイル間隔等を考慮した測定理論と逆解析理論を整理研究した。また、分解能をどのようにして向上させることが可能か検討した。そして、周波数に関しては16周波数に限定して開発研究した。その結果、16周波数を発信できるセパレート型の周波数領域電磁探査機を開発した。また、直接法であるボーリング結果とも整合性が合うデータを回収することができた。分野も当初、「斜面」、「河川」、「トンネル」と限定したが開発途中から広範囲の探査目的があることが判明し成果を挙げた。今後、電子部品の発展とともにより品質の高い探査機の開発の研究を続けたい。
- (4) 第5章では、「斜面」、「河川」とは異なる「空洞」、「地盤改良」、「地すべり面」等のニーズに応えるべく指向性の高い探査が出来ないか研究し、第4章で開発したセパレート型FDEM探査機よりも指向性の高い探査機の開発を目指して、文献収集から中心誘導理論を論議し研究した。これは、位相角を測定することにより見掛け比抵抗を導く手法であるが理論的には可能でも受信機の位相角測定の精度に依存するため開発には研究を積み重ねた。解析手法に関しては、理論そのものには相違があるが逆解析で実施すること、周波数の種類を16種類にすることなど第4章で開発したFDEM探査機の課題を取り入れた。なお、原理がわかりやすくするため同軸コイル型FDEM探査機とし事例研究を重ねている。
- (5) 第6章は、第4章、第5章で開発した探査機を使用した探査事例を紹介した。
- この章では、従来の単発探査ではなく今後につながる研究としてテーマを考えて4種類の研究について報告した。
- 1) 「河川」におけるモニタリングの初期過程として堤防等での「水みち」の流路が探査できるかと実験し浸透流解析で整合性があるか検証した。
 - 2) ①HSPやTPSに変わる「簡便」な手法としてのセパレート型FDEM探査の紹介を行った。
 - ②トンネル背面での緩み調査を実施し、従来の地下レーダ探査と同様の結果が得られることと地下レーダ探査では測定できない緩み領域の探査が出

来ることを実証した。また、比抵抗値で空洞部、緩み部、岩盤部の閾値を決定することでその容積の計算を実施し対策工の計画・積算の一助になるか検討した。

- 3) 長年実施されている地すべり地においてセパレート型と同軸コイル型の両方のFDEM探査を実施して他の地すべり計とか地温探査等の整合性を検証し今後も探査を積み重ねて現在も進行している地すべり線の解明とより精度の高いモニタリング手法として利用できるかを検証した。

7.2 今後の課題

「簡便」、「スピーディー」、「コンパクト」というコンセプトはクリアしたがまだまだ解決しなければならないことがあると考えている。現状は、2～364kHzの周波数領域でのセパレート型FDEM探査および同軸コイル型探査であり実探査法として活用されている。これはあくまで土木分野で利用される最大探査深度50m程度を想定している。また、セパレート型FDEM探査機で検出する見掛け比抵抗は地盤の比抵抗に依存しているため比抵抗の低い地盤では探査深度が浅くなるし、高い比抵抗の場合は粗くなると考える。当然のことながら、対象を再整理するとともに対象探査目的に整合した探査機の開発が必要と考える。

今考えている課題を列举する。

- (1) 現状の理論は、水平多層構造をモデルとして解析しているが複雑な地層を探査したときの信憑性の確認を実施する。
- (2) 「スピーディー」をコンセプトとしているが、地下レーダのように地面を走らせる、または自動車搭載して探査可能な探査機開発の可能性を探る。この場合は、現在地表に設置している探査機が空中に浮く形になるので磁場発生がどのようになるかシミュレーション解析を実施し現実性の確認を実施する。
- (3) 広域を同時に計測できる探査装置の開発。具体的には、受信機をメッシュ上に配置しておき送信機から交流電流を流すことにより各受信機配置位置での計測が可能であればより精度の高い「水みち」調査が可能になるのではと考えている。
- (4) 現在の土木分野での活用に止まらず大深度を対象にしたときの不具合点の抽出を実施し現状の電磁波理論での限界を充分に理解するとともに大深度での「簡便」、「スピーディー」、「コンパクト」をコンセプトとしたFDEM探査機の開発の可能性の有無を確認した。具体的には、大深度の断層調査等に利用可能かどうかを研究する。また、この探査法が目的を達成できないと判明したとき、これに変わる探査法が開発できるかの研究を実施する。現状では、大深度調査にはCSAMT法を中心とした探査法が存在するが、仮設が大掛かりになると同時に精度が荒いため温泉調査とか大きな断層調査には利用されているが土木分野での利用は極めて少ない

と思っている。

7.3 まとめ

以上のことから、今後は、事例を増やすにつれ様々な課題が発掘されるがこの課題を解決していかなければならない。そうした中で、今後の研究テーマとして整理しなければならない案件も発生するものと考えている。比抵抗探査は、今回の研究でも述べているが、地盤の諸状態によってかなりの幅を持っている。そのため、地盤構造を解明するためにはFDEM探査を補完する技術の必要性を痛感した。

解釈の向上のためには、地盤および岩盤の比抵抗をきめ細かく解釈する要素を整理することが重要である。同一の岩盤でも岩級とか変状により比抵抗値は幅を持っているため分類項目を増やして測定できた比抵抗値の解釈を適正に実施することが可能かどうかを議論する。また、他の調査も同時に実施する複合探査の必要性和適切な調査技術の組合せを構築する研究を実施する。そして、他の調査結果との相関性を図ることによる異常値の削除を論理的に行う方法とそれによる精度向上を図る。

比抵抗値は現地盤での電気的な性状を把握するための探査であり、断層とか湧水とかその周辺とのコントラストがある場合には非常に有効であり理解できる。しかし、設計に反映できない欠点も持ち合わせる。今後は、力学的な試験と融合した形で結果を出せるような論議をしたい。一つは、過去にも研究されている物性変換技術の向上を目指す。

以上、研究するテーマが多く存在するので、ソフト面、ハード面から整理する必要性和課題解決の手順構築を今後の最優先のテーマとし着実に研究を積み重ねて成果を挙げ、調査および設計技術者の役に立ちたい。

本研究に関連した研究成果

【学術論文（査読あり）】

1. 片山辰雄, 小里隆孝, 加藤裕将, 楠見晴重, 松岡俊文 ; 周波数領域電磁探査法の開発と河川堤防調査への適用性, 地盤工学会, 地盤工学ジャーナル, Vol.4, №4, 331-340, 2009.
2. Gen Furuya, Tatsuo Katayama, Akira Suemine, Takayuki Kozato, Takahiro Watanabe, and Hideaki Marui ; Application of the Newly Frequency Domain Electromagnetic Method Survey in a Landslide Area, C. Margottini et al. (eds.), Landslide Science and Practice., Vol. 2, 169-175 2013 掲載予定
3. 片山辰雄, 渡部高広, 小里隆孝, 古谷元, 末峯章, 西垣誠 ; 同軸コイル型電磁探査機の開発とその地すべり調査への適用性, 日本応用地質学会, 応用地質, 2013 掲載通知

【著書】

1. 市民環境工学 第7巻 地圏環境情報学 地価を診る最先端技術
山海堂、258-270、2005年5月30日
(芦田譲編著)
2. 老朽化吹付け法面の調査・対策の手引き
鹿島出版会、1-2, 23-29、2006年9月10日
(芦田譲+沖村孝=監修)
3. 流量地盤災害の減災技術の構築に関する研究委員会 報告書
地盤工学会、□-23-30, □-44-53、2009年9月
4. 地盤を診る物理探査 7.防災分野への適用
地盤工学会土と基礎 8、vol.59、No.8、Ser.No.559、
小特集 土の構造モデルと数値地盤解析への応用、pp.45-47、2004
共著 (伊藤洋、片山辰雄)
5. 新しい電磁探査法の開発と斜面調査への適用例
地質と調査 土木春秋社/全国地質調査業強化連合会 編、2007年(1)、2007
共著 (楠見晴重、片山辰雄、高橋厚)

【英語論文（国際会議）】

1. T.Katayama, K.Ozaki, Y.Yoshizu, E.Kurata, T.Kozato, Y.Ashida; Nondestructive survey of the shallow underground by electromagnetic method, 地盤工学会, IS-KYOTO、2001
2. Yoichi YOSHIZU, Tatsuo KATAYAMA, Yuzuru ASHIDA ; Nondestructive Survey of the Shallow Underground by Compact FDEM (Frequency Domain Electromagnetic Method) System, Tai-workshop、2002

【学術論文（査読なし）】

1. 片山辰雄, 尾崎克之, 加藤裕将, 小里隆孝, 朴美京; 多周波数を用いた EM (Electromagnetic) 探査の開発, 土木学会関西支部年次学術講演会講演会, 第三分野, III-30-1-III-30-2, 2001.
2. 片山辰雄, 尾崎克之, 加藤裕将, 小里隆孝; 土木分野における EM 探査の探査事例, 土木学会年次学術講演会講演会第3部, 56巻, 600-601, 2001
3. 片山辰雄, 桜木大介, 小里隆孝; 土木分野における EM 探査の探査事例, 建設技術展, 2001 近畿, 2001.
4. 上野勝大, 片山辰雄, 佐藤亮, 尾崎克之; 鉄道盛土に対する比抵抗探査手法 (EM 探査法) の適用に関する一考察, 土木学会年次学術講演会講演会第3部, 56巻, 628-629, 2001.
5. 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, 地盤工学会第36回地盤工学研究発表会, 2001.
6. 城まゆみ, 川上純, 片山辰雄, 高橋厚志; 2種類の物理探査法を組み合わせたトンネル切羽前方探査, 土木学会論文年次学術講演会講演概要集, 57巻, 1333-1334, 2002.
7. 高橋厚志, 片山辰雄, 桜木大介, 加藤裕将; 施工中の物理探査: トンネル切羽前方探査への適用性について, 地盤工学会第37回地盤工学研究発表会, 2002.
8. 桜木大介, 片山辰雄, 小林翼, 加藤裕将; マルチ周波数型 EM 探査の取組みと現状について, 地盤工学研究発表会, 第37回, 65-66, 2002.
9. 岡二三生, 八嶋厚, 大野康年, 関口宏二, 片山辰雄; 薬液浸透注入改良地盤の形状確認手法について, 地盤工学会, 第38回地盤工学研究発表会, 2003.
10. 高橋康隆, 楠見晴重, 阪本一生, 片山辰雄, 菅智浩, 中村真; 弾性波および比抵抗併用探査による岩盤の工学的評価法, 土木学会第59回年次学術講演, 877-878, 2004.
11. 楠見晴重, 成田一真, 長谷川靖明, 片山辰雄; 光ファイバセンサによる岩盤斜面のモニタリング手法に関する研究, 土木学会論文集, No.742, VI-60, 17-26, 2003.
12. 阿南尚宏, 米津大吾, 原武久, 桜木大介, 小里隆孝, 片山辰雄; EM 探査法にお

- ける FDTD 法の計算効率化, 日本シミュレーション学会大会発表論文集, 第 22 回, 133-136, 2003.
13. 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, 地盤工学研究発表会発表講演集, 第 38 回, 63-64, 2003.
 14. 松岡俊文, 内田利弘, 長谷川信介, 片山辰雄; 各種 EM 探査装置の比較実験, 物理探査学会, 学術講演会講演論文集, 第 111 回, 89-92, 2004.
 15. 北村良介, 中田文雄, 赤崎秀敏, 板井秀典, 宇都洋一, 片山辰雄, 黒木久達, 林篤, 三田和郎, 八百山孝; 物理探査手法によるシラス地盤に現存する特殊地下壕探査の実証実験, 物理探査学会学術講演会講演論文集, 第 112 回, 161-164, 2005
 16. 林健太郎, 若狭聡, 舘山逸朗, 片山辰雄, 加藤裕将; 河川堤防の浸透安定性の詳細点検における FDEM 探査の適用事例, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第 61 回, ROMBUNNO.2-229, 2006
 17. 片山辰雄, 小里隆孝, 加藤裕将, 古本一司; 塩水浸透と FDEM 比抵抗探査法による地下水流向調査, 地盤工学会関西支部, 地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム 2007 論文集, 23-28, 2007
 18. 北村良介, 中田文雄, 赤崎秀敏, 板井秀典, 宇都洋一, 片山辰雄, 黒木久達, 林篤, 三田和郎, 八百山孝; 物理探査手法によるシラス地盤に現存する特殊地下壕探査の実証実験(2), 物理探査学会学術講演会講演論文集, 第 117 回, 235-238, 2007
 19. 舘川逸朗, 渡邊武志, 片山辰雄, 加藤裕将; 特殊堤における静的コーン貫入試験と FDEM 探査を用いた相対密度による緩み評価事例, 土木学会, 全国大会第 65 回年次学術講演会, 第 2 部門, 2010.
 20. 渡邊武志, 舘川逸朗, 松尾健治, 加藤裕将, 片山辰雄; 護岸変状調査における FDEM 探査の適用事例, 土木学会, 全国大会第 65 回年次学術講演会, 第 2 部門, 2010.

【講演・発表】

1. 片山辰雄：“電磁探査法について”－その概要と探査事例－，物理探査学会，ワンデーセミナー，2003.10.13.
2. 片山辰雄：斜面の健全性のための物理探査，物理探査研究会，物理探査講習会，2004.3.11.
3. 片山辰雄：FDEM探査による土木分野への適用，物理探査学会，第2回交流フォーラム，2004.11.8.
4. 片山辰雄：－防災と維持管理に関する土木技術者の役割－，富山県立大学，～企業経営概論～講義，2012.11.8.

【特許関係】

4. 探査システム（特許4205917号）
特願2002-260021
出願日 平成14年9月5日
5. 地中空洞探査方法（特許第4229371号）
特願2003-147120
出願日 平成15年5月26日
6. 比抵抗値を用いた砂質地盤の空洞・ゆるみ領域の評価方法（特許第4169633号）
特願2003-152159
出願日 平成15年5月29日

謝 辞

本論文をまとめるにあたり、ご多忙にもかかわらず多くの時間を割いていただき、終始暖かいご指導と貴重なご助言を賜りました岡山大学大学院 西垣誠教授（環境生命科学研究科）・河原長美教授（環境生命科学研究科）・小松満准教授（環境生命科学研究科）に心からお礼申し上げます。また、本論文に対して有益なご指導とご助言を賜りました関西大学 楠見晴重学長（環境都市工学部）に対して厚くお礼申し上げます。

本研究を進めるに際しては、以下の諸先生方に貴重なご討議とご助言および資料の提供等をいただき、ここに記して深く感謝しお礼申し上げます。

京都大学防災研究所 末峰章准教授、富山県立大学 古谷元講師（工学部環境工学科）、京都大学 芦田譲名誉教授、京都大学大学院 松岡俊文教授（工学研究科都市社会工学専攻）、関西大学 米津大吾専任講師（システム理工学部）からご指導ご助言や励ましを頂きました。

本論文は、筆者が 2001 年以来、今日まで関電興業㈱および㈱環境総合テクノスにおいて担当した業務や共同研究を通じて行った研究成果を取りまとめたものであり、多くの方々のご支援やご協力、ならびにご助力によって、この論文を完成させることができました。

論文執筆に際して、全般にわたり有限会社東西基礎調査 小里隆孝様（元建設企画コンサルタント）のご協力をいただきました。10 年余の長きに渡り比抵抗の基礎から丁寧にご指導していただくとともに後半は闘病と戦いながらでのご指導を賜り厚くお礼申し上げます。また、研究に当たり各種の委員会の場を与えてくださった一般財団法人 日本建設情報総合センター近畿地方センター長 山本 剛様（元国土交通省）にはご助言ご協力をいただきました。

本論文をまとめる機会と暖かい激励ならびにご配慮を頂きました㈱環境総合テクノス前取締役社長 今井武様、現代表取締役社長 中山崇様には感謝いたします。また、常務取締役 小笠原正治様と取締役統括土木部長 景山学様には、激励と種々のご配慮を賜り、深く感謝いたします。

私に科学技術や最新技術の情報を得る機会を与えていただきました京都大学 大西有三名誉教授、私が物理探査に興味を持たせていただきました恩師、関西大学 故谷口敬一郎名誉教授に感謝致します。

この論文の執筆に際して大学の先生方、地質調査会社の方々ならびに㈱環境総合テクノス土木部職員の皆様に感謝いたします。

最後に、著者を支えてくれた妻 雅子と娘 裕子、純子と 息子 晴雄に心から感謝の意を表し、謝辞の結びとします。