

地質調査関連技術図書シリーズ
(新マーケット創出：防災・維持管理分野)

— 防災・維持管理分野における物理探査の適用 —

報 告 書

平成19年8月

社団法人全国地質調査業協会連合会

発刊に当たって

わが国の建設投資は年々減少し、ピーク時のおよそ1/2になっています。国内総生産に対する比率も徐々に低下し欧米先進国並になりつつあります。特に新規の社会資本投資は縮小に向かう一方で、地質調査業務も大幅に減少しています。わが国の社会資本整備は欧米先進諸国に比べ未だ不十分で今後も新規の社会資本投資が必要と考えられますが、限られた財源の中で必要性を厳しく吟味した上で限定的な投資が行われています。

一方これまで日本の経済成長を支えてきた社会資本の更新や維持・管理への投資の必要性が急速に拡大することが予測されています。このため社会基盤である各種構造物をできる限り安いコストで長く維持することが社会経済的にみても極めて重要になっています。そのためには、構造物の劣化や変状を正確に把握し、構造物によっては耐震調査を行った上、的確な補修を実施することが必要となっています。

全地連では、新規の社会資本整備事業が急速に縮小する中、地質調査業の向かう方向として「地質調査業の21世紀ビジョン」(平成13年度活路開拓調査・実現化事業報告書)において、環境分野、防災分野、維持管理分野を新たな市場として取上げました。

環境分野においては、土壌・地下水汚染調査を中心に新市場開拓に向けた取り組みを図り、一定の成果を挙げてまいりました。

維持管理分野については、平成16年度に「地質調査技術による維持管理分野への展開に関する調査・研究事業」を実施し、報告書として取りまとめました。

報告書では、技術的課題を整理し、市場が必要とする維持管理分野の領域に地質調査技術はどのような貢献ができるかをとりまとめています。維持管理分野で、今後拡大が予想される対象分野・地質調査手法は様々ありますが、その中から物理探査技術を取り上げ、その維持管理分野への適用を検討することにいたしました。維持管理分野では、既存構造物が存在する状態での調査の必要性から、一種の非破壊検査ともいえる物理探査手法の適用に大いに期待がもてる所です。また、16年度に実施した会員企業へのアンケート調査でも物理探査とその応用技術は、多くの企業から期待される調査技術として上げられています。対象は維持管理分野としましたが、委員会の検討の中で、関連する防災分野も含め調査検討の対象といたしました。

多くの実績がありながら、防災・維持管理分野では、まだ限定的な利用にとどまっている物理探査の可能性を検討するとともに技術と調査の対象を体系的に整理し、物理探査の適用範囲を拡大することを目的として本書をとりまとめました。本書が物理探査を防災・維持管理分野に適用したいと考える会員企業や発注機関にとって参考になれば幸いです。

最後に、本委員会に委員としてご参画いただいた以下の皆様に、厚くお礼申し上げます。

「防災・維持管理分野における物理探査の適用」に関するワーキンググループ

座長 大場 恒彦 日本物理探査株式会社 技術本部
阿蘇 弘生 株式会社ダイヤコンサルタント 物理探査・解析センター
伊藤 健二 株式会社日さく 関東支店 調査部
斉藤 正男 中央開発株式会社 関東支店 地盤技術部
佐藤 好史 応用地質株式会社 営業本部 営業企画部
篠川 俊夫 大成基礎設計株式会社 技術本部 計測グループ
鈴木 文大 日本物理探査株式会社 技術本部 技術第二部
廣田 雅彦 大成基礎設計株式会社 技術研究所
松谷 泰生 国際航業株式会社 公共ビジネス事業本部 防災統括部
三木 茂 基礎地盤コンサルタンツ株式会社 保全・防災センター
向井 和行 株式会社レアックス コンサルタント事業部
山田 茂治 川崎地質株式会社 事業本部 保全技術部
西田 道夫 協同組合地盤環境技術研究センター

平成19年8月

社団法人全国地質調査業協会連合会
会 長 瀬古 一郎

「防災・維持管理分野における物理探査の適用」報告書

目 次

はじめに

ワーキンググループ活動の概要

第1章	防災・維持管理分野で物理探査が利用できる調査項目	1
1.1	防災・維持管理分野の範囲	1
1.2	近接分野調査との違い	3
1.3	従来型物理探査による調査との違い	5
1.4	物理探査の適用項目	8
第2章	防災・維持管理分野への物理探査の適用と課題	11
2.1	防災・維持管理分野に適用される物理探査	11
2.2	分野別にみた物理探査の適用	15
2.3	物理探査の適用課題	19
2.4	物理探査のコスト調査	21
第3章	防災・維持管理分野で要求される物理探査	27
3.1	対象別にみた物理探査に求められるもの	27
3.2	物理探査の組み合わせ	32
3.3	物理探査に関するニーズ調査	34
3.4	主要ニーズに対する物理探査手法の適用性	48

別添資料(巻末CDに収録)

- ・ 防災・維持管理分野における物理探査法整理表一覧
- ・ 防災・維持管理分野における物理探査法(整理表)
- ・ 物理探査測定コスト資料一覧表(物理探査法整理表に対応)

はじめに

社団法人全国地質調査業協会連合会（全地連）では、平成16年度に「地質調査技術による構造物の維持管理分野への展開に関する調査・研究事業」を行い、委員会報告書を作成した。その中に地質調査業の動向について以下のような記述がある。

「新規の社会資本投資が縮小に向かう一方で、これまでの日本の経済成長を支えてきた、道路、橋梁、ダム等の各種構造物の管理、維持、保全、補修分野への投資が急速に拡大することが予測されており、西欧諸国並みの水準を見れば、将来的には、建設投資の3割程度を維持管理分野が占めると予想されています。

《中略》

全地連では、新規の社会資本整備事業が急速に縮小する中、地質調査業の向かう方向として『地質調査業の21世紀ビジョン』において、環境分野、防災分野、維持管理分野を新たな市場として取り上げました。」

社会的な構造改革の中、多方面にわたって“官”から“民”の流れが急速に進められ、公共投資依存型の体質が強く残る地質調査業界は、民間需要対応型への転換が必ずしも満足する状況にない。全地連の統計でも官からの受注量は毎年10～20%の減少であり、それに合わせるように民からの発注量も減少している。新たな市場として期待される環境分野も一定の成果を残しているが、減少部分を補うには決して十分ではない。防災分野においては、地すべり調査、斜面調査、地盤沈下等、本来地質調査を基礎として発展した分野でもある。これらに対して維持管理分野は、わが国の社会資本が近い将来に集中的に老朽化するため、その要求が急激に高くなると思われる。

物理探査は、地質の物理量を測定して間接的に地盤性状を解析する調査技術の総称である。古くは物理探査と呼び、地下資源の探査で使用されてきた。現在でも世界的に見ればエネルギー資源開発および鉱物資源開発の探査が主な適用範囲である。わが国では、戦後の復興に当って、狭い国土・複雑な地質という条件の中で、効率的に社会基盤の整備を進めるために、地質調査が積極的に活用され、その有効性を発揮した。その結果、地質調査は資源開発から、市場の大きい土木開発分野に主体を置くこととなった。地質調査技術の一部でもある『物理探査』もその例に漏れず、殆どが土木分野での利用であり、物理探査から物理探査へと変更せざるを得なかった。物理探査にとって、この流れが資源の乏しいわが国において適正なものであったかどうかは、将来の判断を待つしかないが、わが国にとって重要な技術、科学であることは間違いない。

地質調査の新たな市場にとって物理探査は、環境分野では実現に向け途に着いたばかりであり、一般的な利用には更なる研究・開発が期待される。防災分野では、すでに斜面調査、地すべり調査などで多くの実績があり、特殊な例ではあるが不発弾探査では磁気探査の実施が義務付けられている。維持管理分野でも、施設・構造物の維持管理、地下埋設物、地下空洞などで実績が多い。これらの事例から考えると、地下空洞探査など

は災害を防止するための維持管理調査であり、斜面調査は維持管理のための防災調査と言えよう。つまり、防災分野と維持管理分野の区分には明確な境界はないと考える。しかし、広い部門にわたり多くの実績がある物理探査ではあるが、防災・維持管理の面で主導的に使用されている部門は、不発弾探査の磁気探査、維持管理のレーダ探査などに限られている。

全地連では、このような状況を背景として、防災・維持管理部門における物理探査の可能性を検討し、その技術と調査の対象を体系的に整理し、適用範囲を拡大することを目的として、後記の委員で「防災・維持管理分野における物理探査の適用」に関するワーキンググループを、平成17年9月に立ち上げた。この報告書は平成17年度および平成18年度にわたる活動をまとめたもので、主な内容は“第1章 防災・維持管理分野で物理探査が利用できる調査項目”、“第2章 防災・維持管理分野への物理探査の適用と課題”、“第3章 防災・維持管理分野で要求される物理探査”により構成されている。特に、第3章では発注サイドからの物理探査に関するニーズ調査を行い、対象分野をニーズの多い斜面防災、河川、空洞・埋設物の3分野に絞り込んで、物理探査の適用性を整理した。

この報告書が、各社の事業を支援し、今後の物理探査の需要を増加して社会的な貢献度を高めること、そして、地質調査の有効性、重要性が社会的に認められることに効果を発揮することを、期待するものである。

平成19年8月

社団法人全国地質調査業協会連合会
技術委員会

ワーキンググループ活動の概要

(1) ワーキンググループで検討する主なテーマ

本ワーキンググループは、以下に示す4項目の課題を検討目標に、平成17年度および平成18年度内の活動を予定して作業を開始した。

1. 比較的浅い領域を対象とする物理探査手法のレビューと課題の抽出
2. 防災・維持管理分野への物理探査手法の適用性の検討
3. 市場化にあたっての課題と必要とする技術開発の方向
4. 機器類の共同保有やレンタル市場に関する検討

(2) ワーキンググループ活動状況

本ワーキンググループは平成17年9月から平成19年7月までの約2年間で、15回のワーキンググループ委員会、既存資料（手法、コストおよびニーズ）収集、機器レンタル会社への問合せ、全地連技術フォーラムでの広報等を実施し、中間報告書、本報告書の作成を行った。具体的には、前述の「ワーキンググループで検討する主なテーマ」に従い、以下の(1)～(5)までの資料収集、検討を行った。

- (1) 既存技術(基準化・要領化されているもの)の収集と同一フォーマットによる整理
- (2) 開発段階、試行段階技術(基準化・要領化されていないもの)の収集と同一フォーマットによる整理
- (3) 手法別に測定作業のコストを整理
- (4) インターネットを利用した防災・維持管理分野での物理探査へのニーズ調査
- (5) 防災・維持管理分野への物理探査の適用性を検討
 - ① ニーズ調査により選択した主要ニーズに対する適用性の検討
 - ② 探査の成果内容と適用限界
 - ③ 探査の組み合わせ提案
 - ④ 今後の課題

第 1 章

防災・維持管理分野で物理探査が利用できる調査項目

第1章 防災・維持管理分野で物理探査が利用できる調査項目

1.1 防災・維持管理分野の範囲

我が国の経済成長期において、物理探査をはじめとする地盤調査は地盤上に設ける新規構造物の計画立案のための調査であるという印象が強かったが、経済の減速期に入った現在においては、既設構造物の維持管理、土壌・地下水汚染を中心とした環境保全、土砂災害・防災に対する調査などの様々な意味合いが地盤調査の役割に付加されてきている。現時点での地盤調査の役割は、図1-1に示すように、目的別に以下の四つに大別できる。

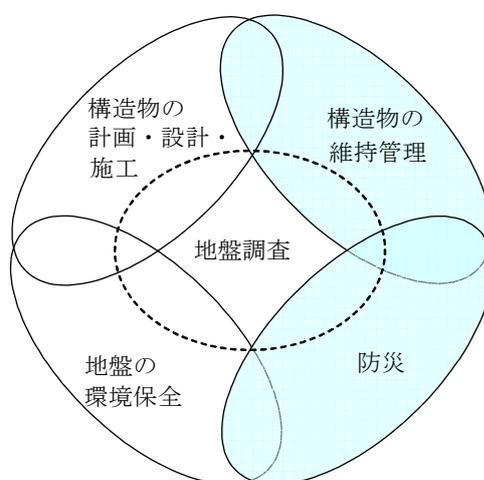


図1-1 地盤調査の主な目的

①構造物の計画・設計・施工のための調査

新規構造物を計画するうえで、構造物を安全確実に支持できる地盤を確認するため、および構造物設計・施工に必要な地盤の各種物性値情報等を求めるための調査。

②構造物の維持管理のための調査

土構造物をはじめとした既設人工構造物の劣化原因・度合いを調べ、対応方法を考えるための調査。

③地盤の環境保全のための調査

土壌汚染や地下水汚染といった人間の営みが周辺環境に与える影響度合いを調べ、対応方法を考えるための調査。

④防災調査

地盤災害が生活環境や構造物に与える外力規模、影響程度を求めるための調査。

これらのうち、本ワーキンググループでは、②構造物の維持管理のための調査および④防災調査を検討対象分野と捉えて、

防 災：斜面、地すべり、液状化、活断層

維持管理：河川堤防、ダム・貯水池・ため池、海岸・港湾、空港、埋立地、道路、
鉄道、トンネル、土地造成、ライフライン、建築

を対象に今回の調査を行った。こうした対象分野からもわかるように、地盤だけを対象とはせず、構造物も含めた土木分野を対象にした。

既存社会資本の維持管理のための調査は、近年、管理に伴う瑕疵問題への対応、ライフサイクルコストの低減（社会資本の効率的整備）などの観点から、需要が急速に高まる傾向にある。特に、高度経済成長期において大量に建設された土木構造物の耐用年数が近づきつつある中、維持管理に関する調査は緊急の社会的要求となっている。また、今後も年を経るごとに維持管理を必要とする構造物が増加することから、その重要性が更に増していくものと考えられる。一方、防災に関する調査は、急峻な地形と、年間の平均降水量が 1500mm に達するという過酷な自然条件を有する我が国においては、早くからその取り組みが進められてきた分野である。また近年、大規模な地震災害が各地で生じていることから、地盤・土砂災害への対応の期待には極めて大きいものがある。

建設事業においては、事業段階に応じて、それぞれの目的に合った検査・調査が実施される。事業段階を、計画、設計、施工、供用と区別した時、ここでいう防災は施工を除く各段階において、維持管理は供用段階において必要とされる業務である。

維持管理業務は、点検、調査、評価、予測、補修・補強およびそれらの履歴の情報化を必要とし、これら要素技術が総合的に活用されることによって、十分な維持管理成果が得られるものとする。本ワーキンググループの調査では、これら要素技術の一部である点検、調査、評価を対象にした。点検から評価を含んだ維持管理調査の概略フローを図 1-2 に示す。一次から三次のステップごとに点検、調査、評価手法も変化する。

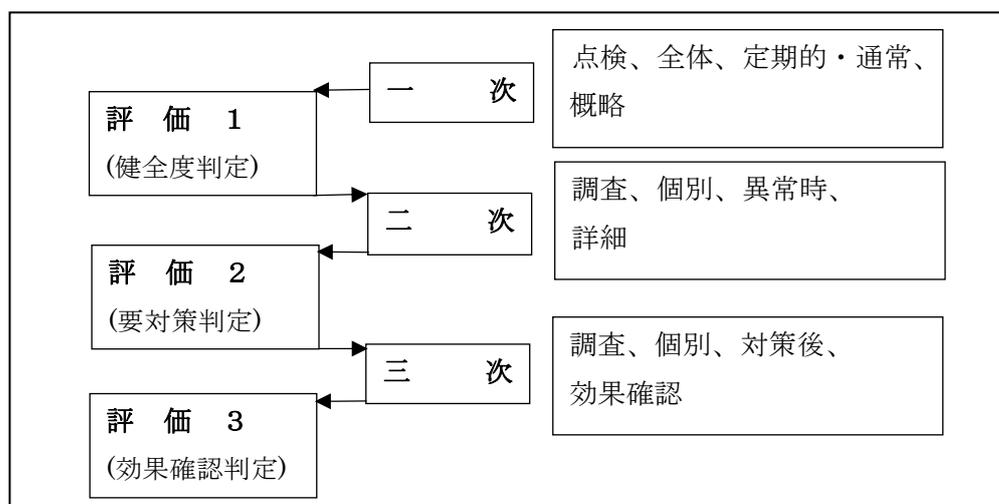


図 1-2 維持管理調査概略フロー

1. 2 近接分野調査との違い

平成16年度の「地質調査技術による建造物の維持管理分野への展開に関する調査・研究事業」報告書では、防災・維持管理分野に係わる業界は地質調査業の他に、建設コンサルタント、建築設計、測量業、ゼネコン、非破壊検査業、メンテナンス工事業、特定建造物・施設の維持管理業としている。

各業界で防災・維持管理業務への取り組みは異なるが、物理探査が利用される検査・調査を対象をしぼれば、近接調査技術としては、「非破壊」を条件に、目視観察、非破壊検査、測量が利用されているだけである。各技術は独立に発展し、本来の検査・調査目的も異なるものである。しかし、防災・維持管理分野を共通対象にすることで、より近い技術分野として認識されることとなった。さらに、保全特有技術やモニタリング手法技術、コンクリート建造物調査技術といった対象や手法等による分類も採用され、技術分類の混乱に拍車をかけている。ここでは、物理探査手法における種々の検査層は、非破壊を条件に除き、ボアホールカメラやファイバースコープによる観察は機械的な目視観察として扱い、目視観察、非破壊検査、測量と物理探査の違いを明らかにする。

物理探査、非破壊検査、測量に関する学会や協会による各技術の定義および手法を表1-1にまとめた。定義上のキーワードや手法に直接的な重複は見られず、特に、測量と他の2技術には全く重複がない。定義上で物理探査は地下を対象にしているが、維持管理分野では地下だけを対象にするわけではない。非破壊検査も「きず」や劣化だけを対象とするわけではなく、検査対象物やその大きさを広げ、物理探査と非破壊検査に重複が見られようになった。この表で示した手法以外の衝撃弾性波測定、打音測定、AE（アコースティックエミッション）測定、電磁波レーダ、自然電位測定、分極抵抗測定等は、こうした重なり合う領域の手法であり、新手法の光ファイバケーブル利用等を含め、いずれの技術に分類するかは難しい。表1-1に従って狭義の非破壊検査を非破壊検査とすれば、衝撃弾性波測定等の上記7手法は物理探査技術と分類できる。

地盤調査と非破壊検査とでは、変状の原因として①設計不備 ②施工不良 ③供用状態の逸脱 ④経年変化を考慮することは共通であるが、地盤調査ではさらに、⑤支持層等周辺地盤の経年変化による劣化（風化・変形・沈下・強度低下等）を調査対象にしている。すなわち検査・調査対象が同一であっても、検査・調査対象周辺の環境変化をも考慮する意識を持ち、かつ考慮できる技術を有することが地盤調査分野のアドバンテージと言えよう。また、非破壊検査分野においては、検査を実施する者は、基本的に対象物の設計・製造を行った者と同一である。従って検査者は検査対象物に精通しており（構造的な弱部や供用状態における磨耗の度合い等）、原因の特定において調査期間が短く、かつ確度が高いという傾向にあるとみるべきである。これに対して地盤調査分野での調査対象物（人工建造物）は設計・施工・調査の実施が全て独立した組織体系となっており、検査者の検査対象物への精通度合は幾分低いと言わざるを得ない。地盤調査分野においては、ここに改善の余地を残しているものと考えられる。

これまで、物理探査に最も近接する技術は非破壊検査であることを示した。物理探査に比べ、対象とする異常や劣化の範囲を小さく限定し、測定や解析を単純化できたケースが非破壊検査とみなせる。

表 1 - 1 物理探査、非破壊検査、測定の定義と手法

	技術の定義		利用している手法名
	内容	キーワード	
物理探査	物理探査とは、地下に存在する物質の物理的、化学的性質について人為的または自然的に生じた現象を遠隔的に観測し、その資料を解析することにより、地下の状態や状況を解明する技術（(社)物理探査学会）	地下物質の物理的性質 遠隔的に観測 解析 地下の状態や状況 解明する技術	地震探査 電気探査 表面波探査 電磁探査 地中レーダ探査 磁気探査 重力探査 地温探査 放射能探査 常時微動
非破壊検査	非破壊検査とは、“物を壊さずに”その内部のきずや表面のきずあるいは劣化の状況を調べ出す検査技術のこと（(社)日本非破壊検査協会）	物を壊さず 内部のきず 表面のきず 劣化の状況 検査技術	磁粉探傷検査(MT) 浸透探傷検査(PT) 放射線透過検査(RT) 超音波探傷検査(UT) 超音波肉厚測定(UTT) 電磁誘導検査(ET)
測量	測量は地表面上の地点の相互関係および位置を確立する科学技術（(社)日本測量協会）	地表面上 位置および相互関係	地形・変位測量 レーザースキャナーやレーザー測距儀による地形測量 GPSによる地形測量 空中写真測量（衛星画像等） レーザー光写真 リモートセンシング

1. 3 従来型物理探査による調査との違い

物理探査は、土木地質調査で概略調査手法として利用され、ボーリングのような点での成果を補完する、断面上で画像化した成果を提供する。1. 1 防災・維持管理分野の範囲においても示した建設事業における事業段階の中の、計画、設計段階において利用されてきた物理探査を従来型物理探査として、防災・維持管理分野での物理探査と比較する。従来型物理探査と防災・維持管理分野での物理探査との共通点や相違点を表1-2にまとめた。探査を計画する時点の考え方が共通するだけで、探査目的から探査結果まで両者には多くの相違点がある。

従来型物理探査は長年の経験から、探査計画、方法、結果等に対して基準化が進み、例えば、トンネル調査には地震探査屈折法の基準がある。維持管理分野では点検マニュアルを利用した点検業務は多いが、物理探査による調査に関しては、基準化が進んでいるわけではない。すなわち、従来型物理探査では基準や実績があり、測定し解析した結果までを求めれば十分な成果と判断できたが、維持管理分野においては、測定・計測や解析までの調査だけではなく、健全度を判断することができなければ、十分な成果とは認められない。従って、現状では、繰り返し測定を実施して検出確度や精度の向上を図ること、トレーサーの使用や構造物にセンサを一体化させ探査を容易にすることなどが試行されている。また、維持管理に見られる調査対象の多様化に対応する場合は、探査目的に対処できる複数の物理探査手法の特徴を考え、最も適した手法を選択することや、複数の手法および物理探査以外の手法の併用も必要になる。

維持管理分野における物理探査でも、対象物の物理的性質を測定・解析することは他の対象分野における場合と同じであるが、対象の異常や劣化状態の把握を目的とする点は維持管理分野独特のものである。従来型物理探査に対する要求とは異なる、維持管理分野での物理探査に特有な要求をまとめて以下に示す。

対象物の劣化の有無、原因を把握する。

地盤内の劣化部、異物、障害物の分布を把握する。

探査深度は比較的浅い。

分解能を小さく、位置、物性値およびその分布状況に対する探査精度を向上させる。

探査結果を健全度判定に結びつけ、定量的な評価を行う。

対象物を供用した状態で探査し、破壊しない。

種々の作業環境（狭い、広範囲、高所、交通規制等）に対応する。

探査費用を低減し、工期的にも短期間とする。

突発的で同時多量な需要にも対応する。

表 1 - 2 従来型物理探査と防災・維持管理分野での物理探査との違い

	従来型物理探査	防災・維持管理分野での物理探査
探査計画	<ul style="list-style-type: none"> 探査対象の物性値、探査深度や分解能を決め探査方法等を計画 	
探査目的	<ul style="list-style-type: none"> 設計や施工に必要なあるいは問題となる地盤情報の入手 概略調査 	<ul style="list-style-type: none"> 安全性や機能維持を求めて変状や劣化等の把握および診断 精度等がより高い詳細調査
探査場所	<ul style="list-style-type: none"> 自然状態のフィールド 探査深度は数 100m まで種々 	<ul style="list-style-type: none"> 自然状態のフィールドも対象になるが、人為的な構造物が多い 探査深度は比較的浅く、数 cm～数 10m が多い トレーサーや対象物にセンサを組み込むことで探査を容易にすることも可能
探査方法	<ul style="list-style-type: none"> 単発型調査 単純化 基準化 	<ul style="list-style-type: none"> 継続型調査も含む 多様化 センサの小型化、結果の画像化やリアルタイム性、システムの自動化が必要
探査結果	<ul style="list-style-type: none"> 探査精度 数 m～数 10m 設計や施工用の物性値および構造図 	<ul style="list-style-type: none"> 探査精度 数 cm～数 m 劣化・異常部の分布図 健全度判定結果

検層を除く主な従来型物理探査の探査深度と探査効率を表1-3に示す。この結果と上記の維持管理分野の物理探査に対する要求を合わせれば、維持管理分野で多用されている物理探査手法として、探査効率が良く、対応深さの浅い地中レーダ探査や表面波探査が挙げられる現状を理解できる。

表1-3 従来型物理探査の対応深さと探査効率

探査手法	対応深さ			探査効率	備考
	～10m	～100m	100m～		
弾性波探査	○	◎	○	○	
浅層反射法		○	○	△	
表面波探査	◎	○		◎	起振器利用と多チャンネルの2方式
常時微動	○	○	△	○	
電気探査 (比抵抗法)	○	◎	○	○	
地中レーダ探査	◎	△		◎	
電磁探査	△	△	●	○	
音波探査		○	△	○	
(海上) 磁気探査	○	△	●	○	
(精密) 重力探査	△	△	●	○	
地温探査	△	△		○	赤外線熱映像法も含む
放射能探査	△	△		○	
ジオトモグラフィー		○	○	△	

注1) 対応深さ ◎:最適 ○:適 △:適用可 ●:主として資源探査で適用

注2) 探査効率 ◎:手軽に測定 ○:普通 △:大がかりに測定

「地盤調査の方法と解説」、地盤工学会、2004.6、p79 表-3.1.1より抜粋、一部加筆

1. 4 物理探査の適用項目

防災・維持管理調査の内、頻度の高い調査として、

路面下空洞調査

河川堤防の老朽化診断調査

トンネルの変状調査

道路防災点検（切土のり面、盛土のり面、自然斜面）

基礎構造物の損傷調査

老朽ため池漏水調査

吹付のり面老朽化調査

コンクリート構造物の劣化度調査

等を挙げることができる。物理探査手法はこれらいずれの調査においても適用され、標準化されている手法もある。しかし、こうした確立された手法だけでなく、今後の継続的な技術開発を求められている場合も多い。

図1-2に示した調査ステップごとの維持管理調査に対する要求事項は、一次調査で劣化の有無を、二次調査で劣化原因・程度を、三次調査で対策の効果確認を挙げることができる。物理探査手法は主に二次調査で、劣化位置・範囲、劣化原因を示す物性値や見えない損傷の有無を知るために利用される。

本ワーキンググループの対象にした防災・維持管理対象分野ごとに、物理探査が利用されている主な調査目的を表1-4に示した。ここでは防災分野を省いたが、この分野では従来型物理探査の適用可能な調査が多く、維持管理分野のように従来型とは異なる特化した手法を必要としないと判断したためである。

維持管理分野の物理探査手法で利用される物理現象を整理して表1-5に示した。電磁気、弾性波動・振動の利用が多く見られる。維持管理分野でのニーズを受けて関係する物理現象を探し出し、既存技術の適用あるいは新規技術の必要性を判断することは、これからも変わらない技術開発のための最初のステップである。ここで示した物理現象以外にも利用できる現象は多くあり、維持管理調査に物理探査適用の可能性が高いとする期待に結びついている。

物理探査は、地表または構造物表面から地下または構造物内部・構造物背面の情報を2次元または3次的に捉えることが可能である。したがって、見えない異常や欠陥箇所を把握し、問題点を絞り込んで対策を講じることができるという点においてメリットがある。一方、物理探査がとらえる物理現象と欠陥や変状との関係が十分に検証されていないこと、探査深度や分解能でニーズへの対応能力が必ずしも十分に実証されていないという問題もある。

表 1 - 4 維持管理分野の主な調査目的

対象分野	調査目的
河川・堤防	地盤沈下、地震時の液状化・沈下、浸透への耐久性・漏水、構造物周辺の空洞・剥離
ダム・貯水池・ため池	堤体の変形・漏水・沈下・破損等、貯水池の地すべり・崩壊・堆砂
海岸・港湾	護岸・堤防の沈下、海岸地盤の洗掘・空洞、構造物の腐食・ひび割れ・沈下、危険物
空港	路面のひび割れ・わだち・空洞
埋立地	地盤沈下、地盤改良
道路・鉄道	路面下の空洞、舗装厚さ、盛土地盤の沈下 斜面の崩壊・地すべり・空洞、地震時の変状 橋梁の変位・傾斜・沈下・洗掘・ひび割れ・腐食 構造物のひび割れ・配筋、下部工の損傷・長さ・曲がり
トンネル	覆工のひび割れ・背面空洞・厚さ、トンネル・周辺地山の変位、漏水
土地造成	切土・盛土のり面崩壊、盛土の沈下、吹付のり面の空洞 擁壁のひび割れ・はらみ出し・排水不良、擁壁背面の陥没・亀裂、擁壁前面の隆起 地盤改良体の改良度・破壊・変形、改良体の不均質
ライフライン	地表の陥没、埋設管の腐食・折損、埋設管の位置確認、埋設管周辺の空洞・ゆるみ、埋設管からの漏洩
建築	構造物のひび割れ・配筋・腐食、構造物の変形・振動特性、杭の長さ
斜面	斜面の風化・緩み、地下水分布、吹付のり面の空洞

表 1 - 5 維持管理に適用される物理探査に利用される物理現象

物理探査手法	物理現象	物理探査手法	物理現象	物理探査手法	物理現象
電気探査	電場の変化(比抵抗)	磁気探査	磁場の強さ	自然電位測定	自然状態の電位差
浅層反射法地震探査	弾性波動(反射波)	重力探査	重力(ブーゲー異常)	分極抵抗測定	電場の変化(分極抵抗)
表面波探査	弾性波動(表面波)	赤外線熱映像探査	熱の伝導・放射	X線測定	X線の透過
屈折法地震探査	弾性波動(屈折波)	地温探査	地中温度	AE測定	AEの発生
微動	弾性波動(表面波)、振動	誘導分極	電磁誘導	打音測定	音の強さや周波数成分
電磁探査	電磁誘導(比抵抗)	超音波測定	弾性波動(屈折・反射波)	光ファイバ測定	光の後方散乱
地中レーダ探査	電磁波の反射	電磁誘導測定	電磁誘導	音響測定	音の強さ

第 2 章

防災・維持管理分野への物理探査の適用と課題

第2章 防災・維持管理分野への物理探査の適用と課題

2.1 防災・維持管理分野に適用される物理探査

本ワーキンググループでは、防災・維持管理分野で適用されている主な物理探査手法を抽出し、適用分野別に探査手法の概要を整理した。その結果は、物理探査手法整理表として巻末資料にまとめている。

表2-1は、抽出した物理探査手法の適用分野を整理したものである。抽出した物理探査手法は、従来の地質調査分野で適用される手法から、主に構造物検査に適用されている手法と多岐にわたる。ここでは、防災・維持管理分野に適用される物理探査について、手法別に特徴を整理するとともに、代表的な物理探査手法について、適用性、精度、課題などを示す。

(1) 手法別適用範囲

防災・維持管理分野に利用される物理探査手法は、適用形態から大きく3区別することができる(表2-2)。地盤構成物質を対象とした探査手法は、従来から地質調査に用いられており、地震探査(弾性波探査)、電気探査などがあげられる。コンクリートや杭などの構造物を対象とした探査手法としては、衝撃弾性波探査、打音探査、AE探査などがあげられる。地盤構成物質および構造物の双方を探査対象とする探査手法を中間型探査として分類した。中間型探査として代表的な探査手法としては、地中レーダ探査、赤外線熱映像探査などがあげられる。

ここで取り上げた適用分野(河川堤防などの適用分野)においては、主たる探査対象が地盤となる場合、地盤構成物質を対象とした探査が用いられている。地盤中に埋設している構造物や構造物と地盤の境界の状態を探査する手法としては、中間型探査が用いられる傾向が強い。また、光ファイバ変位計測などは、構造物と地盤の双方に適用されている。衝撃弾性波法、超音波測定などは主に構造物に適用されており、地盤構成物質を対象にして適用されることはない。また、非破壊検査、コンクリート検査分野とオーバーラップする領域となっているといえる。

各手法の探査範囲や分解能に着目すると、地盤構成物質を対象とした探査は、分解能に劣るが広範囲を探査できる手法として適用されることが多い。構造物を対象とした探査は、特定の材料について精度良く、ピンポイントで異常を検知するために適用されている。中間型探査は、特定の範囲において比較的精度良く異常を検知するために適用されることが多い。しかし、探査可能な深度は、地盤構成物質を対象とした探査に比較して劣る傾向がある。探査に要する時間は、構造物を対象とした探査、中間型探査が優れており、その場で異常を判断できる手法も多い。

表 2-1 物理探査手法の適用分野

物理探査手法		河川・堤防	ダム・貯水池・ため池	海岸・港湾・空港・埋立地	道路・鉄道・トンネル	土地造成	ライフライン	建築	地すべり・斜面	防災（活断層・液状化）
地震探査 (弾性波探査)	屈折法		○*	○*	○	○	○*		○*	
	反射法（浅層反射）					○	○		○*	○
	トモグラフィ					○*				○
	表面波（定常振動）			○		○				
	表面波（2次元）	○	○	○*	○	○	○		○*	○
電気探査	比抵抗（垂直探査）			○*	○*	○	○		○*	
	比抵抗（二次元）	○	○	○*	○	○	○		○*	○
	トモグラフィ					○*				○
	I P法									○
電磁探査	電磁法	○*				○				○
	電磁誘導法			○*	○*	○*	○*	○		
	地中レーダ	○	○	○	○	○	○	○	○	
	その他のレーダ						○			
磁気探査					○					
重力探査									○	
地温探査	赤外線熱映像探査		○*	○	○	○		○	○	
	1 m深地温	○*				○			○*	
微動	常時微動				○*	○		○	○*	
	微動探査					○		○*		○
検層	速度・P S			○*	○*	○*		○	○*	○
	磁気					○*		○		
	ボアホールレーダ		○*	○*	○*	○*		○		
その他	自然電位			○	○*	○*		○	○*	
	分極抵抗			○*				○		
	衝撃弾性波							○		
	打音				○*	○*		○		
	A E				○*	○*		○		
	超音波（速度）		○					○		
	超音波（反射）			○	○					
	X線							○		
	光ファイバ（変位）				○					
	光ファイバ（温度）		○							
	音響		○*				○			

* 整理表に記載以外に適用がある探査法

表 2-2 適用形態による物理探査手法の分類

適用形態による区分	物理探査手法
地盤構成物質を対象とした探査	地震探査、電気探査（垂直、2次元、I P、トモグラフィ） 表面波探査（定常振動、2次元）、電磁探査（電磁法）、重力探査
中間型探査	電磁探査（地中レーダ）、赤外線熱映像探査、磁気探査 その他（光ファイバ（変位、温度））
構造物を対象とした探査	その他（衝撃弾性波、打音、A E、超音波、X線、音響、自然電位、分極抵抗）

(2) 代表的な探査手法の適用性

従来から地質調査分野で適用されてきた代表的な物理探査手法について適用性を示す。なお、各探査手法の概要については巻末資料の物理探査手法整理表を参照にされたい。いずれの探査手法も探査対象の深度が増すにつれて精度や分解能は低下する。

1) 地震探査（弾性波探査）屈折法

地質調査の延長として適用されることが多い。適用分野としては、鉄道・道路・トンネル、土地造成などがあげられる。地盤の緩み範囲や風化層の厚さなどを把握するために適用されている。最近ではトモグラフィ的解析が適用されることが増加している。探査分解能は受振点間隔や起振方法などにより異なるが、概ね 1m より悪く cm 単位の異常を検知するには適さない。

2) 地震探査（弾性波探査）反射法

地層境界、地盤中の埋設物や空洞などを検知するために適用されている。代表的な適用分野としては、土地造成、ライフライン、防災（活断層）などがあげられる。数 10m 以下の比較的浅部を探査対象とする場合、浅層反射法と呼ばれている。浅層反射法の場合、探査分解能は起振方法、受振点間隔、重合数、探査深度などにより異なるが、概ね 1m より悪く cm 単位の異常を検知するには適さない。

3) 表面波探査（定常振動）

比較的表層（概ね 30m 以浅）の S 波速度分布、地盤中の異常の検知、緩み範囲把握のために適用されている。代表的な適用分野としては、海岸・港湾空港・埋立地、土地造成などがあげられる。探査分解能は表層部では概ね 1m 程度であるが深度とともに低下する。傾斜地や地表面がコンクリートで覆われている場合など、適用が困難となることがある。

4) 表面波探査（2次元）

最近実用化された探査法であり、表層（概ね 15m 以浅）の S 速度分布、緩み範囲把握のために適用されている。測線に沿った S 波速度分布が得られる特徴がある。適用分野としては、河川堤防、ダム・貯水池・ため池、土地造成など多岐にわたる。探査分解能は表層部では概ね 1m 程度であるが深度とともに低下する。地表面がコンクリートで覆われている場合、適用が困難となることがある。

5) 電気探査（2次元比抵抗）

地盤の比抵抗分布を探査することで、地質構造、土質、地下水状態、地盤中の異常、緩み範囲などを把握するために適用される。コンピュータを用いてトモグラフィ的解析を行う 2次元比抵抗探査が一般的に用いられるようになった。代表的な適用分野としては、河川堤防、ダム・貯水池・ため池、土地造成など多岐にわたる。電極間隔や測定時の電極配置などで異なるが、分解能は表層部では数 10cm 程度であるが深度とともに低下する。金属を含む構造物周辺、電極の設置が困難である場所では、適用が困難である。特に都市部周辺では、電氣的ノイズが障害となる場合がある。

6) 地中レーダ探査

地盤中の埋設物、空洞や緩みなどの検知、構造物と周辺地盤との状態を把握するために適用される。適用分野は多岐にわたるが探査可能な範囲は、測定周波数により異なるが、いずれにしても地表面から概ね2～3m程度の範囲である。地下水面以下の異常部の検知は困難なことが多い。

7) 赤外線熱映像探査

コンクリート構造物表面、岩盤斜面表面の剥離や緩みを検知するために適用されるが。コンクリート構造物が対象となる分野が多い。対象物の表面の温度差、温度変化を測定することで判定をおこなうため、十分な温度変化がない条件では判定が困難な場合がある。検知が可能な深さは表面から15～20cm程度である。剥離などが生じている範囲を把握することができるが、空隙の厚さや体積を判定することは困難である。

2. 2 分野別にみた物理探査の適用

表2-3は、防災・維持管理の各分野において問題となる現象と、その調査のために適用される物理探査手法を整理したものである。表中において、「適用物理探査(整理表)」は、本ワーキンググループにおいて整理した物理探査手法整理表の番号であり、巻末資料にまとめてある。各問題現象に対する適用物理探査手法を概観すると、地盤(地盤構成物質)を対象とする場合、地質調査で一般的に用いられる手法が適用されていることが多い。

(1) 代表的な分野における物理探査手法の適用状況

1) 河川堤防

2次元比抵抗探査、表面波探査(2次元)は、堤体盛土や基礎地盤の地質や緩みを把握するために適用されている。地中レーダ探査は、構造物周辺の緩みや空洞を把握するために適用されることが多いが、特に、堤体などの土構造物でも緩みや空洞を把握するためにも適用されることがある。最近では、電磁探査を堤体盛土の地質や状態を把握するために適用する事例も見られる。

2) ダム・貯水池・ため池

貯水池の土堰堤については、河川堤防と同様な探査法が適用されている。2次元比抵抗探査、表面波探査(2次元)は、漏水箇所、空洞や緩み箇所を把握するために適用されている。また、漏水箇所を把握するために、温度測定(モニタリング)が実施されることもある。コンクリート構造などを対象とする場合、超音波速度測定が適用されている。

3) 海岸・港湾・空港・埋立地

埋立地盤の空洞や緩みを把握するために、表面波探査(定常振動)が適用されている。地中レーダ探査は、舗装、構造物背面および地盤表層付近の空洞や緩みを把握するために適用されている。赤外線熱映像探査はコンクリート表面の剥離を把握するために、鋼構造物の防食効果の検査には、電位測定が用いられている。

4) 道路・鉄道・トンネル

盛土や基礎地盤の地質や緩みを把握するために、表面波探査(2次元)が適用されている。切土斜面の変状や崩壊を調査する探査法としては、地震探査(屈折法)や2次元比抵抗探査が適用されている。地中レーダ探査は、コンクリート構造物背面の空洞や緩み、コンクリート構造物の配筋状況などを把握するために適用されている。また、道路や軌道敷直下の空洞検出にも、地中レーダ探査が用いられている。のり面吹き付けモルタル内部の空洞の検出、岩盤斜面表層の緩みを把握する手法としては、赤外線熱映像探査が適用されている。アンカーボルト長の把握には、超音波測定が行われている。

5) 土地造成

盛土地盤、切土斜面を対象とした探査は、道路・鉄道分野における探査と類似している。切土斜面では、地震探査（屈折法）、2次元比抵抗探査などが用いられている。盛土地盤では、表面波探査（2次元、定常振動）などが適用されている。構造物周辺の空洞や緩み調査には地中レーダ探査が適用される。地盤改良効果の判定には、表面波探査、2次元比抵抗探査などが用いられている。

6) ライフライン

埋設物や空洞の検知に地中レーダ探査が用いられている。埋設管からの漏水検査には音響調査が使用されている。

7) 建築

建築分野で適用される探査は、地盤を対象とするものと、コンクリート構造物を対象とするものに大きく区分される。地盤を対象とするものとして、振動特性の把握には、常時測定が実施される。杭などの根入れ長さの調査には、速度検層、磁気検層、ボアホールレーダなどが適用されている。コンクリート構造物について、コンクリート中の配筋調査には地中レーダ（RCレーダ）探査が使用されている。コンクリートのひび割れ、剥離等の検知に地中レーダ（RCレーダ）探査、超音波速度測定、鉄筋の腐食調査には分極抵抗測定、自然電位測定が用いられている。

8) 地すべり・斜面

地すべり・斜面調査は、従来からの調査法が適用されており、調査法は確立していると言える。吹き付けのり面の変状調査には赤外線熱映像探査が適用される。

9) 活断層・液状化

比較的深部の地質構造や断層位置の把握には、反射法地震探査、2次元比抵抗探査、電磁探査などが使用されている。岩盤内部の亀裂状況や破碎帯の把握には、弾性波トモグラフィや比抵抗トモグラフィが適用される。表層部の液状化調査には、PS検層、表面波探査（2次元）などの探査が用いられている。

表 2-3 適用対象分野と適用物理探査（1）

分野・対象	災害の事象	現象	適用物理探査（整理表）	主な物理探査手法	
①河川堤防					
	変状あるいは破堤	堤体自体の沈下 基礎地盤の沈下	1-1, 3 1-1, 3	2次元比抵抗探査 地中レーダ探査 表面波探査（2次元）	
	部分的な変状	構造物と周辺地盤の剥離・空洞化 漏水による堤体材の流失・空洞化	1-2 1-2		
	漏水	構造物の損壊および周辺地盤の乱れ 亀裂や目地の緩みの発生 空洞化	1-3 1-2 1-2, 4		
②ダム・貯水池・ため池					
	堰堤の変状・破堤	堤体自体の沈下 基礎地盤の沈下	2-1, 3 2-1, 3	2次元比抵抗探査 地中レーダ探査 表面波探査（2次元） 超音波（速度） 光ファイバ（温度）	
	部分的な変状	構造物と周辺土の剥離・空洞化 漏水による堤体材の流失・空洞化	2-1, 2 2-1, 2, 3		
	漏水	構造物の損壊および周辺土の乱れ 亀裂や目地の緩みの発生 空洞化	2-2, 3 2-4 2-1, 2		
	周辺斜面の不安定化 （地すべり）	水位上昇 水際の浸食・崩壊	2-1 2-1, 2		
	堤体の変状・破損	びびり割れ・亀裂 目地の緩み	2-5 2-5		
③海岸・港湾・空港・埋立地					
1. 空港施設	路面の変状・破損	びびり割れ・亀裂・剥離あるいは舗装厚の減少	3-1, 3		地中レーダ探査 赤外線熱映像 表面波探査（定常振動） 自然電位測定 超音波測定
2. 埋立地	埋設管等施設の変状	施設と周辺土の剥離・空洞化 施設の損壊および周辺土の乱れ	3-2		
	埋立地地盤の変状	埋立地地盤自体の沈下 基礎地盤の沈下	3-4 3-4		
3. 海岸施設 （護岸・堤防）	施設の変状・破損	埋立地地盤および基礎地盤の乱れ、空洞化	3-5		
		吸出しによる空洞化 基礎地盤の沈下	3-5, 6 3-5, 6		
4. 港湾施設	3. 海岸施設と同じ	びびり割れ、剥離、および中性化、鉄筋腐食	3-7, 8		
④道路・鉄道・トンネル					
1. 道路鉄道	盛土地盤の変状	堤体自体の沈下	4-1	表面波探査（2次元） 赤外線熱映像 光ファイバ（変位） 超音波測定（反射） 地震探査屈折法 2次元比抵抗探査 地中レーダ探査	
		基礎地盤の沈下	4-1		
		埋設構造物と周辺土の剥離・空洞化	4-8		
		構造物の損壊および周辺土の乱れ	4-1		
		埋設物と周辺土の剥離・空洞化	4-8		
	路面、および軌道面 切土斜面の変状・崩壊	表層すべり・崩落	4-4, 6, 7		
		ハミ出し（盤膨れ）	4-4, 6, 7		
		崩落による空洞化	4-3, 6		
	吹付け法面の変状	吸出しによる空洞化	4-3		
		基礎地盤の乱れ・空洞化	4-6, 7		
橋梁の変状	びびり割れ、損壊	4-3, 9			
	鉄筋の不足（数量・太さ）	4-5, 9			
	びびり割れ、剥離、および中性化、鉄筋腐食				
2. トンネル	覆工の変状	流失による空洞化	4-2		
		地すべり・偏圧・盤膨れ			
	内空断面への出水	目地の緩み	4-2, (3)		

表 2-3 適用対象分野と適用物理探査 (2)

分野・対象	災害の事象	現象	適用物理探査 (整理表)	主な物理探査手法
⑤土地造成				
1. 切土地盤	法面崩壊	風化土、雨水・表流水による侵食、間隙水圧	5-1, 2, 8, 9, 10	地震探査(屈折法、浅層反射法) 比抵抗2次元探査、比抵抗法電気探査(垂直探査) 表面波探査(定常振動、2次元) 微動観測、微動探査 電磁探査 地中レーダ探査 赤外線熱映像 1m深地温 磁気探査
		流れ盤上の崩積土等に雨水・地下水の浸透	5-1, 2, 8, 9, 10	
2. 盛土地盤	吹付け法面の変状	挟在する粘性土に地下水が集中	5-1, 2, 8, 9, 10	
		浸透水の集中、地震動	5-1, 2, 8, 9, 10	
2. 盛土地盤	地盤面の変状	崩落による空洞化	5-10, 11, 12	
		吸出しによる空洞化	5-10, 11, 12	
2. 盛土地盤	盛土法面の崩壊	陥没	5-3, 4, 5, 9, 10, 11	
		不十分な締め固めに雨水の浸透	5-1, 2, 8, 9, 10	
2. 盛土地盤	盛土地盤の変状	流れ盤の基盤境界に雨水・地下水の浸透	5-1, 2, 8, 9, 10	
		堤体自体の沈下	5-4, 5, 9, 10	
3. 地盤改良	地盤面の変状	基礎地盤の沈下	5-1, 2, 4, 5, 8, 9, 10	
		埋設構造物と周辺土の剥離・空洞化	5-11	
3. 地盤改良	構造物の不同沈下	盛土の損壊および周辺土の乱れ	5-1, 2, 3, 4, 5, 8, 9, 10	
		流失による空洞化	5-3, 4, 5, 9, 10, 11, 14	
3. 地盤改良	埋没爆発物の存在	不同沈下で埋設物破損と周辺土の剥離・空洞化	5-11, 12, 14	
		改良体の破壊・変形	5-2, 4, 5, 9	
4. 文化財管理等	遺跡・遺構の保護	地盤強度の不安定、有害物質の漏洩	5-3, 4, 5, 9, 10	
		残置基礎構造物による地盤の不均質	5-10, 11, 13	
5. 擁壁	変状	不発弾の存在	5-11, 13	
		土圧・水圧の増加によるびく割れ・亀裂折損、はらみ出し、目地のずれ	5-1, 2, 9, 11, 12	
5. 擁壁	擁壁背面の変状	滑動・転倒・回転、目地のずれ、前面の隆起	5-1, 2, 8, 9	
		コンクリートのびく割れ、剥離、および中性化、鉄筋腐食	5-11, 12	
5. 擁壁	擁壁背面の変状	地盤の陥没、亀裂	5-11	
		地盤の陥没	埋設物と周辺土の剥離・空洞化	6-1, 3, 5, 6
⑥ライフライン				
	埋設管の損傷	埋設物の損壊および周辺土の乱れ	6-4	地中レーダ探査 地震探査(浅層反射法) 音響
		漏洩	6-2	
		周辺土の剥離・空洞化	6-5	
⑦建築				
	建物の経年劣化	振動特性の把握	7-1	微動観測 速度検層、磁気検層 地中レーダ探査 自然電位測定、分極抵抗測定) その他(X線測定など)
		鉄筋配置と太さ	7-7, 8, 9	
基礎構造物の確認	基礎構造物の確認	びく割れ、剥離、および中性化、鉄筋腐食	7-5, 6, 7, 10, 11, 12, 13	
		根入れ深さの把握	7-2, 3, 4	
⑧地すべり・斜面				
1. 地すべり 地すべり調査は、それ自体が防災調査であり、従来からの調査手法により防災分野の調査も確立されている				
2. 斜面	法面の変状・崩壊	風化土、雨水・表流水による侵食、間隙水圧	4-6, 7, 5-1, 2等	2次元比抵抗探査 地震探査(屈折法) 地中レーダ探査 赤外線熱映像
		流れ盤上の崩積土等に雨水・地下水の浸透	4-6, 7, 5-1, 2等	
2. 斜面	吹付け法面の変状	挟在する粘性土に地下水が集中	4-6, 7, 5-1, 2等	
		浸透水の集中、地震動	4-6, 7, 5-1, 2等	
2. 斜面	吹付け法面の変状	風化の進行による剥落	8-1, 2	
		吸出し、崩落による空洞化		
⑨防災 (活断層・液状化)				
	大規模地震の発生	活断層、破砕帯(粘土化帯)の位置	比較的広域 9-1, 2, 3, 6, 9, 10 限定エリア 9-4, 5, 7	地震探査(反射法、トモグラフィ) 2次元比抵抗探査、比抵抗トモグラフィ、IP 微動探査、検層 電磁探査、重力探査
		地盤の破壊・変形、液状化判定	9-7, 8	

2. 3 物理探査の適用課題

資源探査、地質調査分野で発展してきた物理探査技術は、非破壊で地盤状態を把握することができることから、防災・維持管理分野への適用の期待が大きい。しかし、その技術上の特性や適用方法、非破壊検査分野における検査法との違い、実施方法などについては意外と知られていない。ここでは、物理探査適用上の課題を、業務実施形態、物理探査技術、技術レベルなどの観点で示す。

(1) 地質調査業における物理探査技術の展開と課題

防災・維持管理分野への物理探査技術の適用について、地質調査業界では期待がもたれている。また、物理探査技術の潜在的な需要は高いと考えられる。しかし、電子機器を用いた測定や解析処理が必要であることから、専門業者への外注依存が高い業種となっていると考えられる。また、物理探査を独自に実施できる地質調査業者も数が限られていると考えられる。

(2) 物理探査技術の現状と特有の課題

物理探査技術は、地盤（岩盤）を対象として発達してきた技術である。また、防災・維持管理分野においても主に地盤を対象として適用されている。地盤を対象としていることから、非破壊検査技術とは異なった物理探査技術固有の問題がある。

1) 探査深度と分解能

図2-1は、主な物理探査手法の探査深度と分解能の範囲を模式的に示したものである。従来からの地震探査や電気探査では、探査深度は概ね1mより深く、cmオーダーの異常を検知することは困難である。地中レーダ探査の探査深度は2~3m程度であるが、数cmオーダーの異常を検知することが可能である。

地表から十数mの範囲において、数cm~mオーダーの分解能で探査できる技術が空白となっており、防災・維持管理分において要求される探査領域であると推定される。今後の技術的課題になると言える。

2) 探査結果の解釈

非破壊検査においては、測定数値から直接的に判断できるものが多いが、物理探査においては、速度分野や比抵抗分布などから間接的に判断を行うことが多い。判断は定性的となる場合が多く、また、物理探査単独では難しく他の調査結果を組み合わせる総合的に判断しなければならない場合も多い。このため、経験や技術力による個人差が生じやすい。また、地中レーダ探査では測定値である反射パターンから直接的に判断できることもあるが、地盤状態や測定状態によって反射パターンが不明瞭となり、経験や技術力の差が表れることもある。定性的な判定の信頼性について問題とされることがしばしばあり、解決すべき課題となっている。

3) 総合的判定

多くの事象で地盤を対象とすることから、物理探査単独で判断されることは少なく、地形地質状況、施工状況、他の調査結果などを含めて総合的に判断しなければならない

場面が多い。このことが非破壊検査とは大きく異なり、物理探査や地質調査に関する技術とともに、設計・施工に関する知識も必要となる。反面、経験や技術力の差が生じやすい。

(3) 物理探査技術の普及と技術力の維持向上

物理探査技術は、防災・維持管理分野への適用の期待が大きい。しかし、前述のように物理探査の実施に際しては、専門業者への外注依存度が高いと考えられる。外注元、外注先ともに物理探査の測定技術、解析技術、解釈・判断技術についてのレベルは様々である。適切な測定、解析、解釈がなされなければ良い探査結果は得られない。

一方、防災・維持管理分野では、一般地質調査に比較して高い精度や分解能が求められている。また、単に探査結果を提示するだけでなく、地盤や構造物の状態、設計や施工法、周辺環境への影響などを含めた探査結果の総合的解釈が求められる場面も増加している。

コンピュータ技術の発達により測定装置や解析手法は高度化の傾向にあり、測定値や解析処理過程などがブラックボックス化している。物理探査技術者の高齢化も懸念されており、基本となる測定技術やノウハウの継承も懸念材料となっている。

このような状況下において、適切に物理探査技術が適用され、有効な技術として評価されるためには、物理探査技術の普及と、物理探査技術者の技術力を維持向上させることが必要である。個々の企業努力による技術普及や伝承には限界があり、学会や業界団体などによる技術普及、教育、実習が重要である。

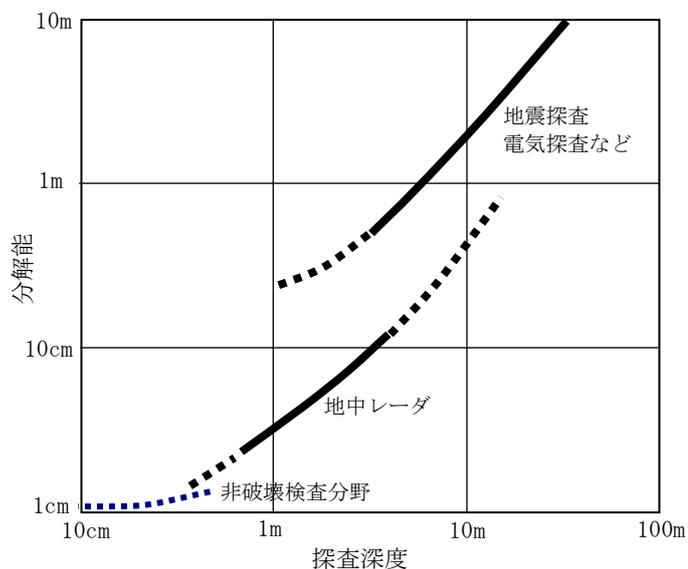


図2-1 一般的な物理探査の探査深度と分解能

2. 4 物理探査のコスト調査

公共工事のコスト縮減という動きに連動して、調査業務の受注金額にも低下の傾向が見られる。そこで、現状での調査業務のコストを、本ワーキンググループで作成した物理探査手法整理表の各対象における測定作業だけに限って調べた。その結果および測定作業上のコスト縮減に向けての留意事項を以下にまとめる。

(1) 物理探査手法整理表に対応する必要コスト

物理探査手法整理表で収集した各対象における物理探査測定作業での必要コストを調査し、その結果を巻末資料として添付した。その資料には、現状での人工や作業能率および主な使用機材の構成や購入価格等をまとめてある。

全地連では、平成 12 年度に、地質調査用人件費機材等価格調査表を作成し、関係機関への陳情や実務上の見積時の利用に供している。今回の調査で、その資料と大きく異なる点は使用機材の低価格化であった。表 2-4 は平成 12 年度資料と、今回の調査資料における物理探査器価格の対比を示している。今回調べた価格が平成 12 年度の最低価格よりもほとんどの機器で低く、今回の資料における弾性波トモグラフィの価格を従来機器の購入価格とみれば全データで低価格となる。

表 2-4 物理探査器価格の対比（平成 12 年度資料と今回調査資料）

名称	規格	平成 12 年度資料		今回調査資料 購入価格(万円)
		購入価格(万円)		
		範囲	最多	
弾性波探査器 (屈折法地震探査、 表面波探査他)	発破法 12 成分	393~520	450	
	発破法 24 成分	513~1058	584	
	重合法 12 成分	246~373	303	
	重合法 24 成分	381~926	452	250
	弾性波トモグラフィ	599~1279	1113	1500
浅層反射法探査器	データ収録装置(60ch、ロールアロングスイッチ他)	1554~1720	1670	700
	起振機(重錘落下装置)	461~623	542	
	パソコン(CPU CELELON400MHz クラス)	23~29	26	
表面波探査器 (定常振動)	浅部探査用(0~20m)		2000	900
	中深部探査用(20~50m)		5830	
常時微動(微動観測 用)	換振器(地表用、1ch)	28~	30	10~
	換振器(地中用、3ch)	80~	90	
	換振器(長周期地表用、3ch)	147~	150	
	微動収録装置(デジタルタイプ、増幅器、記録器一体型)	250~523	386	180~
電気探査器	メガー型(探査深度 50m 程度)	54~218	107	
	小規模探査用(探査深度 50m~100m、デジタル)	218~246	240	
	中規模探査用(探査深度 100m~300m、デジタル)	288~521	438	220
	大規模探査用(探査深度 300m~1000m、デジタル)		725	
	比抵抗 2 次元探査用(デジタル、小規模探査)	238~555	362	
	比抵抗 2 次元探査用(デジタル、中規模探査)	620~793	703	620
	比抵抗 トモグラフィ用	660~901	743	900
地下レーダー	アンテナ 400MHz クラス	675~1366	730	500

この理由として、現在の物理探査機器のほとんどがパソコンを内蔵し、平成 12 年頃と比較すると高仕様、低価格となっていることがあげられる。ただし、材料の金属の高騰で価格が上がっているものもある。いずれにしろ、損料見積基礎データとしての機材価格見直しを検討する必要があるだろう。

また、地質調査業務の技術者単価（いわゆる三省単価）の推移として、データが公開されている平成13年度から平成19年度までを図2-2に示す。これによると、地質調査技師などの人件費は平成15年から平成17年にかけて一度低下したが、その後、平成13年度の段階まで復活してきた。その変動は一割強までで、技術者単価の変化は大きくないと考えられる。

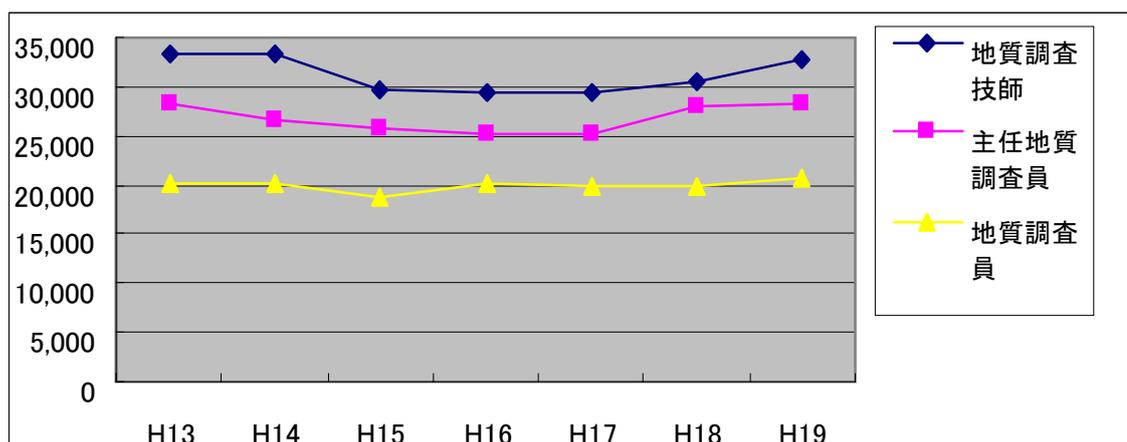


図2-2 地質業務の技術者単価の推移 (単位：円)

探査器、特にパソコンが組み込まれた探査器の低価格化は認められるものの、それぞれの機器は依然として数100万円と高価であり、機器に対する投資が簡単にできる状況にはない。レンタルや共同購入といった方策で対応しているのが現状である。今後、従来型の物理探査機材とは異なり、維持管理業務用の新機材は小型化、低価格化を求められるとみられ、機器購入が容易になることを期待したい。今回の調査において収集できた物理探査機器の製造や販売を行っている業者を表2-5に示す。

表2-5 物理探査機器の販売および製造業者

販売および製造業者	URL
応用地質株式会社 (物理探査全般)	http://www.oyo.co.jp/
ビイック株式会社 (表面波探査 (定常振動))	http://www.vic-ltd.co.jp/index.html
GEOMETRICS (物理探査全般)	http://www.geometrics.com/
ABEM (電気探査)	http://www.abem.se/
IRIS Instruments (電気探査)	http://www.iris-instruments.com/
Geophysical Survey Systems, Inc. (地中レーダ)	http://www.geophysical.com/
日本無線株式会社 (地中レーダ、RCレーダ)	http://www.jrc.co.jp/
SCINTREX (重力)	http://www.scintrexltd.com/
日本パナメトリクス社 (超音波)	http://www.panametrix.co.jp/intro/index.htm
横河電機 (光ファイバ)	http://www.yokogawa.co.jp/
Geonics (電磁探査)	http://www.geonics.com/
Geophex (電磁探査)	http://www.geophex.com/
Fugro Instruments (物理探査全般)	http://www.fugroinstruments.com/index.html

次に、測定作業一編成あたりの構成人数について、表 2-2 で示した防災・維持管理分野での適用形態による物理探査手法の分類に従って今回の調査結果を区分けし、表 2-6 に示した。含まれる手法ごとに構成人数が異なるため、含まれる全手法の構成人数のバラツキそのままを示したが、このバラツキは現場状況や作業内容にも影響を受ける。例えば、地盤を対象とした探査の場合、点での測定は少人数で作業を処理できるが、2次元に展開しての測定はある程度の人数が必要で、構造物を対象にした探査の場合は、変化の少ない現場状況と小規模な測定が多いため、手法による差が少なく、少人数で作業処理可能である。

表 2-6 物理探査適用形態別測定作業一編成あたりの人数

		構成人数(人)
地盤構成物質を対象とした探査	地震探査、電気探査(垂直、2次元、I P、トモグラフィ)、表面波探査(定常振動、2次元)、電磁探査、重力探査	2~11
中間型探査	電磁探査(地中レーダ)、赤外線熱映像探査、磁気探査、その他(光ファイバ(変位))	3~11
構造物を対象とした探査	その他(衝撃弾性波、超音波、音響、自然電位、分極抵抗)	1~4

(2) 測定作業コスト削減のための留意事項

最近の公共工事のコスト削減により、物理探査のコストも低下しつつある。そのため、物理探査を実施するにあたり、どのような機器を用いるか、また、どの程度の人員が必要かを計画時に十分検討しておかなければならない。この検討を誤ると、目的とする結果が得られず、現場で手戻りが発生し、ひいては工程やコストに多大な影響を及ぼす。

ここでは機器選定やその取り扱い時の留意事項について述べる。

1) 機器選定にあたっての留意事項

①実施前に留意する事項

- ・調査地の地質や構造物状況、地下水位、ノイズ環境等を踏まえ、調査の目的に最適な物性値の選択
 - 探査手法の決定
- ・選択した物性値の変動範囲を想定
 - 最大値、最小値を予想し、それを測定可能な機器を選択
- ・ノイズや周辺環境を勘案した信号源の選択
 - S/N比 (S/N) や分解能を上げるため、最適な信号源を選択

②機器選定時に留意する事項

- ・実施前検討を満足した機器であること
- ・サンプリング間隔とワード長の決定
 - それらを掛け合わせたものが最大レンジ (レコード長)。
 - サンプリング間隔によりローパスフィルターが決まる。
- ・再現性のよい機器であること
 - スタッキングが可能な機器

2) 代表的な探査手法の測定全般および機器取扱時の留意事項

防災・維持管理分野の物理探査で多く利用されている地震探査、電気探査、地中レーダ探査について、測定実施上および機器取扱時の留意点を述べる。

①地震探査

地震探査は地盤の速度構造を求めるもので、調査地の地質状況を事前に把握し、速度構造を想定することが有用である。

地震探査 (屈折法) では、目的とする探査深度に応じて最大受振距離が決められ、その距離に対し弾性波の伝播でどの程度の時間が費やされるかを計算し、それに合うように機器の測定レンジ (サンプリング時間、ワード長) を決めていく。

起振に火薬類を使用できない場合、例えば住宅地に隣接する不安定斜面の調査や都心部での調査の場合、重錘落下やカケヤなどを使わざるを得ない。この場合、発生するエネルギーが火薬類に比べて小さく、S/N比を上げるためにはスタッキング機能が有効で

ある。測定器にスタッキング機能がないと作業能率が低下するため、事前にノイズ状況を把握し、それに合った機器の性能確認が必要である。

また、地震探査では地盤の速度構造に応じて、最適なサンプリング間隔やフィルタ、起振方法を定める必要がある。例えば、硬岩では軟岩と比較すると高速度であり、精度よく速度値を求めるには、起振でより高い周波数を発生させ、測定器側でもサンプリング間隔を小さくして時間分解能を上げ、初動を読み取る必要がある。

②電気探査

電気探査も基本は地震探査と同様に、調査地の地質構造から比抵抗構造を想定し、S/N比を上げるための方法を考える。そのため、測定器の通電レンジ、測定される電位レンジを考慮に入れ、通電電流の設定を行う。特に、低比抵抗の地盤では得られる電位差が小さく、S/N比を上げるために、電極棒の本数を多くし、通電電流の電極周辺に塩水をまくなどして、出来るだけ通電電流を大きくする。

電気探査の測定装置で波形記録を表示するものは少ないため、都市部のノイズの多い環境や低比抵抗地盤での測定では、実際にきちんと波形記録を確認する必要がある。そのような環境下では、スタッキングなどを行い、得られるデータの再現性、S/N比向上をはかることも重要である。

③地中レーダ探査

地中レーダ探査は、トンネル覆工裏および路面下の空洞や埋設物、鉄筋位置把握などの目的で利用されている。信号には電磁波を用いるため、探査深度は地盤の比抵抗や地下水の有無に影響を受け、軟弱地盤のような低比抵抗地盤では電磁波が減衰し探査深度が浅く、地下水以深ではさらに減衰する。岩盤のような高比抵抗地盤では減衰が少ないため、探査深度が深い。また、発信アンテナの周波数によっても探査深度や分解能が変わり、周波数が高いほど分解能は高くなるが、逆に探査深度を深くできない。周波数を低くするとその逆になる。

地盤中の空洞や埋設物などをターゲットとする際には探査深度に、逆に、鉄筋をターゲットとする場合には分解能に注意して、適切な周波数のアンテナを選択する必要がある。

第3章

防災・維持管理分野で要求される物理探査

第3章 防災・維持管理分野で要求される物理探査

3.1 対象別にみた物理探査に求められるもの

第1章において、防災・維持管理分野における物理探査が適用可能な対象分野を述べた。さらに、防災・維持管理に関係する災害の事象や現象等を示し、それらに対する物理探査の適用技術をまとめて表3-1（巻末75頁）に示した。

この節では各分野別に物理探査の適用対象を絞り、それぞれの分野での維持管理上の要求内容と適用している物理探査技術から判明する事項を示す。

(1) 河川堤防

河川堤防での防災・維持管理での留意点として、以下の4点があげられる。

- ①破堤の原因となる堤防土材の不均質や強度不足
- ②浸透や漏水
- ③堤防護岸や構造物周辺に存在する空洞
- ④越水

これらの問題点のうち、①、②について物理探査に求められるものは、堤防という広範囲な全体構造の中から、物理量の違いをもとに各弱点箇所の範囲を抽出することである。③については、限られた箇所およびその周辺といった狭範囲から弱点箇所を抽出することになる。④は物理探査に対する要求項目ではない。

以下に、抽出すべき弱点と、その探査に適用する物理探査手法と測定する物理量をまとめる。

- ・ 堤防土材の不均質箇所の抽出
⇒2次元比抵抗探査（比抵抗により粘土・砂・砂礫等の土質区分を行う）
- ・ 強度不足箇所の抽出
⇒表面波探査（S波速度からN値に変換することで、締固め度の区分を行う）
- ・ 浸透危険箇所の抽出
⇒2次元比抵抗探査（比抵抗により浸透の可能性が考えられる箇所の抽出を行う）
- ・ 漏水危険箇所の抽出
⇒2次元比抵抗探査（トレーサー等を用い、周囲より比抵抗の低下するゾーンを検出）
- ・ 堤防護岸や構造物周辺に存在する空洞箇所の抽出
⇒地中レーダ探査（空洞上面から反射する電磁波を抽出し、空洞箇所を検出）

(2) ダム・貯水池・ため池

ダム・貯水池・ため池での防災・維持管理での留意点として、以下の3点があげられる。

①ダム貯水池沿いの斜面の不安定化

②堆砂による貯水量の低下

③堤体劣化、堤体からの漏水

このうち、①ダム貯水池斜面の不安定問題については、後で述べる（8）地すべり・斜面と重なるため、さらに、②についても堆砂量の把握で音波探査等のモニタリング手法があるがここでは割愛し、上記③に対し物理探査の適用を考えてみる。

- ・ ダム・貯水池・ため池のコンクリート堤体劣化箇所の把握
⇒赤外線熱映像法、超音波測定（コンクリート堤体であれば亀裂からの漏水が考えられ、周囲との表面温度変化や超音波速度変化をとらえる）
- ・ 貯水池・ため池の土堰堤劣化箇所の把握
⇒強度不足箇所を表面波探査で抽出（S波速度から速度低下ゾーンを抽出）
- ・ ため池堤体からの漏水箇所の把握
⇒2次元比抵抗探査（満水時と渇水時との比抵抗の差分、トレーサー投入前後の比抵抗の差分から漏水箇所を検出）

（3）海岸・港湾・空港・埋立地

海岸・港湾・空港・埋立地での防災・維持管理での留意点として、以下の2点があげられる。

①海岸護岸や港湾埠頭、空港滑走路下の空洞・緩み

②埋立地での液状化

これらについて物理探査の適用を考えてみる。

- ・ 海岸護岸や港湾埠頭、空港滑走路下に存在する緩みの検出
⇒表面波探査（S波速度の低下箇所を抽出し、緩み範囲を特定。ただし、緩みと空洞の区分は不可）
- ・ 海岸護岸や港湾埠頭、空港滑走路下に存在する空洞の検出
⇒地中レーダ探査（構造物下に発生した空洞上面から反射する電磁波を抽出し、空洞箇所を検出）
- ・ 埋立地での液状化
⇒表面波探査、2次元比抵抗探査（S波速度で締め固め具合を、比抵抗で埋め立て土材の推定を行い、両物理量から液状化しやすい箇所を抽出）
※表面がコンクリートで覆われている地点での適用は難しい。

（4）道路・鉄道・トンネル

道路・鉄道・トンネルでの防災・維持管理での留意点として、以下の3点があげられる。

①道路・鉄道沿いの不安定斜面

②道路・鉄道の盛土地盤の変状

③トンネル覆工裏の空洞

①については後で述べる(8)地すべり・斜面と重なるためここでは割愛し、上記②、③について物理探査の適用を考えてみる。

- ・ 道路や鉄道の盛土地盤の変状

⇒表面波探査（S波速度により盛土等の地盤の締め固め具合を把握）

- ・ トンネル覆工裏の空洞

⇒地中レーダ探査（覆工コンクリートの厚みと空洞箇所を抽出）

(5) 土地造成

土地造成の問題点で一番留意すべき箇所は、斜面であった旧地形の谷を埋めた造成地、いわゆる谷埋め盛土である。谷埋め盛土の場所は元々が谷であったため水の通りみちにあたり、地下水が集まりやすい。そのため、降雨時の地下水上昇により盛土崩壊の危険が生じる。また盛土材が砂質土であれば、地震時の液状化により盛土崩壊の危険も考えなければならない。

①地震時や降雨時の盛土崩壊

これについて物理探査の適用を考えてみる。

- ・ 盛土厚と地山との境界部の把握

⇒地震探査（屈折法）、表面波探査（盛土と地山との境界、盛土強度の把握）

- ・ 盛土中の地下水位分布の把握

⇒2次元比抵抗探査（盛土中の地下水位の把握）

- ・ 液状化による盛土崩壊の検討

⇒表面波探査、2次元比抵抗探査（S波速度で締め固め具合を、比抵抗で埋め立て土材の推定を行い、両物理量から液状化しやすい箇所を抽出）

(6) ライフライン

ライフラインでの防災・維持管理での留意点として、以下の2点があげられる。

①地盤の不同沈下に伴う埋設管破損

②埋設管劣化に伴う空洞・緩み

これらについて物理探査の適用を考えてみる。

- ・ 地盤の不同沈下の把握

⇒表面波探査（S波速度断面から強度断面に変換し、強度低下箇所を抽出する）

- ・ 埋設管劣化に伴う空洞・緩み

⇒表面波探査、地中レーダ探査（埋設管が劣化し水漏れが生じれば、その直近の地盤が緩み、空洞が発生する。そこで、表面波探査で地盤の緩みを把握し、空洞については地中レーダ探査で検出する）

(7) 建築

建築での防災・維持管理での留意点として、以下の3点があげられる。

- ①コンクリートの強度低下
- ②鉄筋間隔不足、鉄筋腐食
- ③構造物基礎の把握（基礎杭の深度不足・腐食）

これら3点のうち、③の構造物基礎の把握を物理探査で行うことは現状として難しい。そこで、これを除いた①、②について物理探査の適用を考えてみる。

- ・ コンクリートの強度低下
⇒超音波速度測定（強度と速度が比例関係にあるため、速度低下するゾーンを把握する）
- ・ 鉄筋間隔
⇒地中レーダ探査（RCレーダ）（建造物の鉄筋を把握するためには高い周波数のアンテナが必要。）
⇒電磁探査（電磁誘導法）
- ・ 鉄筋腐食
⇒自然電位測定（照合電極による自然電位の判定基準との比較）

(8) 地すべり・斜面

地すべりも斜面における災害であり斜面に含めて扱うこととし、斜面全般への物理探査の適用について考える。

斜面での適用で重要な留意点として、以下の点が考えられる。特に①については、表層崩壊のすべり面把握の他に、降雨による含水状態の変化や強度低下箇所の検出が重要である。

- ①降雨時の表層崩壊
- ②吹付け法面の劣化

まず、降雨時の表層崩壊について、物理探査の適用を考える。

- ・ 表層崩壊のすべり面の把握
⇒地震探査（屈折法）（地山の風化状況の把握）
- ・ 降雨時の含水状態の変化
⇒2次元比抵抗探査（降雨時と乾燥時の2回実施し比抵抗差分をとることで、降雨による地下水上昇が把握できる。特に多チャンネルの測定器などで測定することで、比抵抗の時刻による変化をモニタリングできる。さらに降水量もモニタリングし、降水量と比抵抗の時刻変化が追従できる。）
- ・ 降雨時の強度低下箇所の抽出
⇒表面波探査（速度低下ゾーンの検出）
※表面波探査では一様な傾斜が望ましい。

また吹付け法面の劣化については、以下の方法で実施する。

- ・ 吹付け法面背面の空洞、亀裂箇所の検出
⇒赤外線熱映像法（健全な法面との比較や、2つの時間帯（明け方、日中）データの比較で劣化場所を特定）

（9）防災（活断層・液状化等）

活断層や液状化の調査範囲は広い。その中で、活断層調査にとって重要な手法は反射法地震探査である。一方、液状化では表面波探査や2次元比抵抗探査が有効である。

①活断層調査

②地震による液状化

これら2点について物理探査の適用を考えてみる。

- ・ 活断層箇所の推定
⇒地震探査（反射法）（2次元反射断面の作成、反射境界の検出）
- ・ 地震による液状化箇所の推定
⇒表面波探査、2次元比抵抗探査（表面波探査のS波速度断面から強度断面に変換し、強度低下箇所を抽出する。また2次元比抵抗探査により、土質や地下水位を求め、液状化しやすい地盤を探す）

3. 2 物理探査の組み合わせ

物理探査は、ある手法を単独で実施する場合は1つの物理量しか提供することができないが、2種類以上の探査を行いその結果を組み合わせることで、より多くの情報を提供することが可能となる。

ここでは探査の組み合わせについて取り上げ、その有効性について述べる。

(1) 2つの探査手法の組み合わせ (1)

河川堤防での表面波探査と2次元比抵抗探査の組み合わせ事例をあげる。

表3-2 2つの探査手法の組み合わせ (1)

探査名、(測定する物理量)	各探査で得られる情報	結果を組み合わせることで得られること
表面波探査 (S波速度)	<ul style="list-style-type: none"> ・S波速度からN値へ変換した地盤強度情報 ・締め固め度の把握 	<ul style="list-style-type: none"> ・土質区分の精度が大幅に向上される。 ・同じ比抵抗エリアでS波速度が低下している箇所があれば、土質は同じではあるが緩みの可能性があり、広範囲の中からウィークポイントの抽出が可能となる。 ・そのため、ボーリング位置・原位置試験箇所を効果的に選定することが可能。 ・両手法の解析はセルで行うため、精度は1m。
2次元比抵抗探査 (比抵抗)	<ul style="list-style-type: none"> ・比抵抗から分類した土質区分(粘土・砂・礫) 	

(2) 2つの探査手法の組み合わせ (2)

道路下に敷設された埋設管の劣化に起因して発生する空洞の検出について、表面波探査と地中レーダ探査の組み合わせ事例をあげる。

表3-3 2つの探査手法の組み合わせ (2)

探査名、(測定する物理量)	各探査で得られる情報	結果を組み合わせることで得られること
表面波探査 (S波速度)	<ul style="list-style-type: none"> ・S波速度からN値へ変換した地盤強度情報 	<ul style="list-style-type: none"> ・埋設管路線沿いで強度低下が見られる範囲を表面波探査で抽出する。ただし、表面波探査からだけでは緩み領域であるのか、空洞であるかは不明。 ・そのため、空洞であるか緩みであるかの選別を地中レーダ探査で行う。 ・これにより、緊急に対処すべき箇所、今後注意を払う箇所の選別が可能となる。
地中レーダ探査 (電磁波反射強度)	<ul style="list-style-type: none"> ・空洞 	

(3) 3つの探査手法の組み合わせ

斜面災害で発生が多い表層崩壊を対象とした地震探査（屈折法）、表面波探査と2次元比抵抗探査の組み合わせ事例をあげる。

表3-4 3つの探査手法の組み合わせ

探査名、(測定する物理量)	各探査で得られる情報	結果を組み合わせることで得られること
地震探査(屈折法) (P波速度)	・表層の風化層の層厚	<ul style="list-style-type: none"> ・地震探査で風化層が求まり、その中の強度が低下している範囲を表面波探査で、降雨時の水位上昇箇所は2次元比抵抗探査で求まる。 ・これにより、危険性箇所の抽出が可能となり、最適なボーリング箇所や計測箇所の選定が可能となる。
表面波探査 (S波速度)	<ul style="list-style-type: none"> ・S波速度からN値へ変換した地盤強度情報 ・締め固め度 	
2次元比抵抗探査 (比抵抗)	<ul style="list-style-type: none"> ・比抵抗から分類した土質区分(粘土・砂・礫) ・乾燥時、降雨時の2回測定で、地下水位変化を把握 	

今まで物理探査は1つの手法で実施することが多かった。2つの手法を適用した事例としては、トンネルルート選定の地質調査における、地震探査（屈折法）と2次元比抵抗探査の併用に限定されていた。今後、防災や維持管理分野に物理探査を適用するにあたっては、数種類の探査手法を組み合わせることでより視野の広い解釈を行い、最適かつ精度の高い提案を可能にすべきである。

現状では、限られた時間の中で物理探査やボーリング、原位置試験が実施されるため、物理探査の解釈結果を生かして次の調査に進む流れにはなっておらず、物理探査の役割が十分に果たせない場合がある。今後の課題としては、最適な探査手法の選択・組み合わせおよび測定・解析時間の効率化とともに、解釈技術の底上げを図っていくことが肝要である。

3. 3 物理探査に関するニーズ調査

本ワーキンググループでは、防災・維持管理分野への物理探査手法の適用性や市場化にあたっての課題と必要とする技術開発の方向を検討するために、物理探査技術に対するニーズの把握作業を行った。

地質調査業界での防災・維持管理業務に対する物理探査の利用状況を、全地連会員のホームページで確認した。物理探査を利用した維持管理や防災調査を営業品目、業務内容等に挙げている会社は全会員の一割強の 82 社であった。それらの業務実績によると、コンクリートや構造物（橋、トンネル、建築物）の診断業務が圧倒的に多く、他に、斜面・急傾斜地調査、地すべり調査、道路防災調査、空洞・埋設管調査と続いている。こうした現状での需要に対する対応とは別に、今回のニーズ調査では、発注サイド・受注サイドのニーズ、技術面・コスト面のニーズ、ソフト・ハードのニーズといった種々のニーズを考慮し、特に、発注サイドから物理探査の技術面に対してソフト・ハードの区別なく求められているニーズを収集した。

中間報告書作成段階までに、防災・維持管理分野で適用されている主な物理探査手法を抽出し、適用分野別に探査手法の概要をまとめた物理探査手法整理表を作成した。その中で、現状で利用されている仕様書等を把握し、その発行機関は、国土交通省、日本道路公団、学会等であることがわかった。そのことを参考に、ニーズ所有先として一次官庁およびその関連行政法人、道路・鉄道・ガス・電気・電話・空港といったライフライン事業者を取り上げ、それら機関における物理探査に対するニーズを収集した。

ニーズ調査作業は、図 3-1 に示すように、大きくはニーズの収集とその絞り込みの 2 段階に分かれる。いわゆる文献調査ではなく、インターネットを利用した検索作業での収集と、収集したニーズから物理探査適用の検討対象の絞り込みが作業内容である。

インターネットを利用した収集、キーワード、収集先といった三項目を規定し、全委員で合計約 170 件のニーズを収集したが、重複分を除いた 115 件が本報告の基礎データとなっている。各委員で収集したニーズ資料にはばらつきがあったが、それらを調整し、収集先や期間を各委員間で均質化することは行っていない。

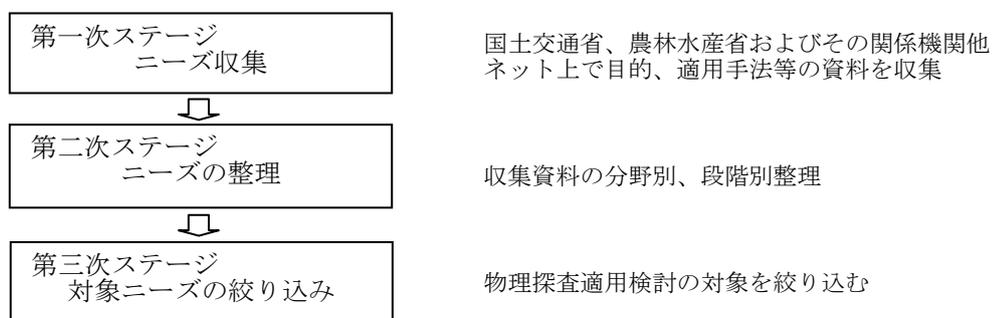


図 3-1 ニーズ調査のステージ

(1) 第一次ステージ：ニーズ収集作業

インターネットを利用して、防災・維持管理分野で物理探査に対するニーズを次のような条件で収集した。

検索方法：Google、電子政府の総合窓口等のエンジンを利用し、「維持管理、防災、物理探査、点検等」のキーワード検索。他に、各機関のホームページから、キーワード検索および研究開発、重点施策、記者発表、白書等の項目検索

対象：5 省(国土交通省、農林水産省、経済産業省、文部科学省、環境省)およびその外局、独立行政法人（土木研究所、港湾空港技術研究所、農村工学研究所他）、民間・法人（高速道路株式会社、旅客鉄道株式会社等）

時期：直近～5 年程前まで

ニーズが収集できた機関を図 3-2 に示す。地方自治体については一次官庁との重複が多いと考えられること、大学は基礎的研究が多いことや官庁、研究所といわゆる産学官共同開発に参加している場合があると判断して、収集先からは省いた。

国土交通省 本省、地方整備局、技術事務所 国土技術政策総合研究所 国土交通政策研究所 (独)土木研究所 (独)寒地土木研究所 (独)水資源機構 (独)建築研究所 (独)港湾空港技術研究所	(社)土壌環境センター 電力会社 各社 (財)電力中央研究所 高速道路株式会社 JH 分社、旧 4 公団 NEXCO 中央研究所 旅客鉄道株式会社 JR 各社 (財)鉄道総合技術研究所 国際空港株式会社 各社 ガス会社 各社 NTTR&D
農林水産省 本省 林野庁 (独)農業工学研究所 (独)水産工学研究所 (独)森林総合研究所	
文部科学省 (独)日本原子力研究開発機構 (独)防災科学技術研究所 (独)科学技術振興機構	
経済産業省 本省 資源エネルギー庁 (独)産業技術総合研究所	
環境省 本省	

図 3-2 ニーズ収集機関

収集したニーズを分野別および目的別に分類すると、図3-3、図3-4のようになる。分野別では、道路・鉄道・トンネル、海岸・港湾他、地すべり・斜面、河川、その他の構造物、コンクリート分野にニーズが多く見られた。目的別では、斜面・地すべり、河川、空洞・埋設管に約半数の件数が集中し、その他では、舗装の厚さ・剥離・たわみ等、コンクリート構造物の変状・劣化・品質評価、鉄筋・鋼構造物の腐食に複数の機関からのニーズが見られた。

道路・鉄道・トンネル	27件	防災	5件
海岸・港湾他	14件	建築	3件
地すべり・斜面	13件	ライフライン	2件
河川	12件	土地造成	2件
ダム・貯水池他	6件		
その他（構造物、調査（一般、災害）、コンクリート、環境、雪崩が含まれる）			31件
			合計 115件

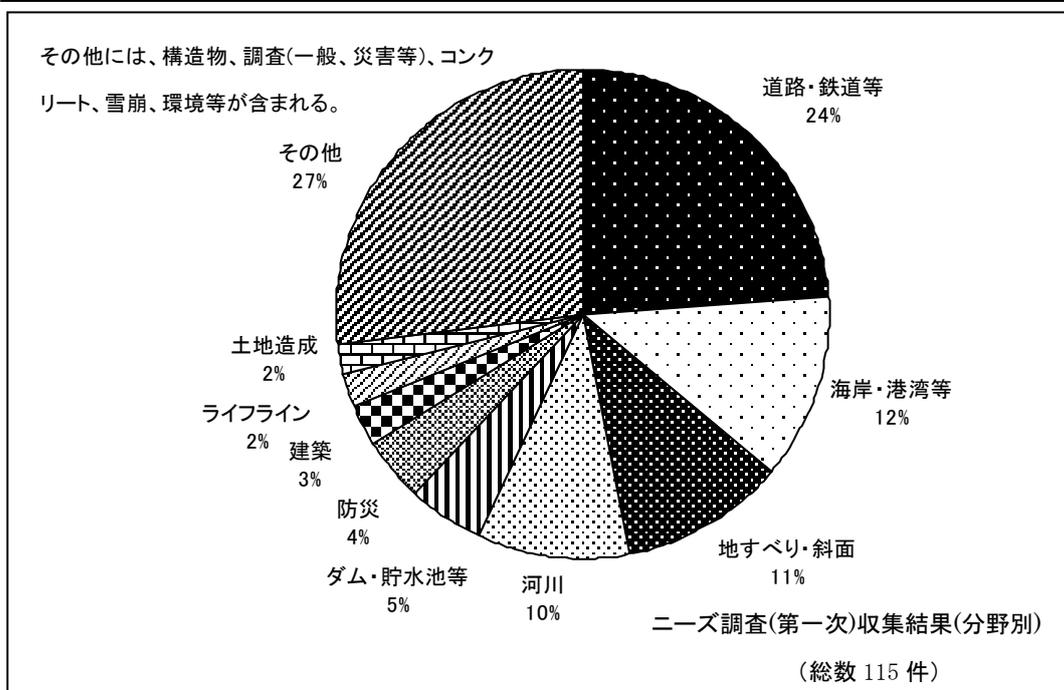


図3-3 分野別のニーズ件数

次に、ニーズ対象を3分野（斜面防災、河川、空洞・埋設管）に絞り込んだ場合の収集結果を表3-5にまとめた。斜面や河川を対象にしたことにより、管轄する機関である国土交通省関連のニーズが7割以上を占めた。

収集作業とは別に、以下の事項についてワーキンググループ内で情報交換を行った。

- ・災害時点検、岩盤斜面での点検、河川の樋門・樋管周囲の空洞、埋設農薬・化学弾、下水道位置・点検、橋梁の鉄筋検査のような、すでに実施済みの点検・調査について
- ・国土交通省のNETISにおけるテーマ設定技術募集（フィールド提供）、(独)科学技術振興機構における独創的シーズ展開事業 委託開発のような、ニーズの提案および開発におけるリスク低減が図れる事業

斜面・地すべり	32 件	鉄筋形状・位置	3 件
河川	23 件	トンネル覆工(亀裂、背面岩盤他)	3 件
空洞・埋設管	16 件	津波・高潮点検の効率化	3 件
舗装点検(亀裂、たわみ、厚さ他)	11 件	路面性状	2 件
コンクリート構造物点検(亀裂、剥離他)	10 件	宅地造成地危険度	2 件
腐食(鉄筋、鋼構造物)	9 件	大深度地下構造	2 件
コンクリート品質評価	4 件	都市部浅部地下構造	2 件
ダム基礎地盤	4 件		
その他(埋設農薬位置他、活断層地下構造、橋梁下部地盤構造、ため池老朽化他)		各 1 件 合計 29 件	
		合計	155 件

その他には、埋設農薬位置、活断層地下構造、橋梁下部地盤、ため池老朽化等が含まれる。

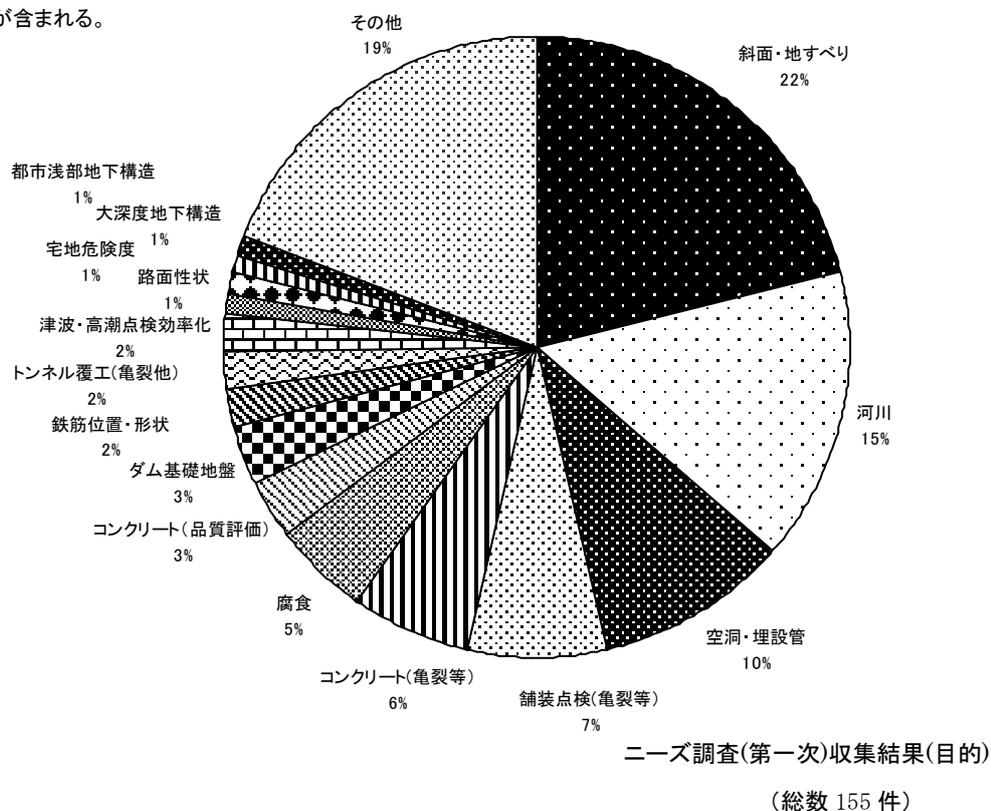


図 3-4 目的別のニーズ件数

表 3-5 ニーズ収集結果表(第一次) (1)

斜面防災

関係機関	ニーズ	リソース先 (URL)
国土交通省 道路局	岩盤・斜面崩壊のリスクマネジメント技術	http://www.mlit.go.jp/road/road/new5/05/5-1.html
国土交通省 河川局砂防部	土砂災害ハザードマップ	http://www.mlit.go.jp/river/sabo/kisya/200507_12/050729/050729.pdf
国土交通省 河川局砂防部砂防計画課 (独)土木研究所 土砂管理研究G 火山・土石流T	河川事業における環境影響分析手法の高度化に関する研究 山地地域における土砂生産予測手法の研究	http://www.mlit.go.jp/chosahokoku/h16giken/goto/shitei/04/1704.pdf
国土交通省 道路局 立命館大学総合理工学研究機構防災システム研究センター	センサネットワークを利用した次世代型斜面防災システムの構築	http://www.mlit.go.jp/road/tech/h18shinki.html
国土交通省 技術調査課 国土技術政策総合研究所 高度情報化研究センター	土砂災害の初期変動を検知する技術	http://www.mlit.go.jp/tec/gijutu/kaihatu/pdf/06.pdf http://www.mlim.go.jp/engineer/index.html http://www.mlit.go.jp/tec/gijutu/rd17/pdf/10.pdf
国土交通省 東北地方整備局 東北技術事務所 北陸地方整備局	路面防災監視技術 低コストで保守管理性にすぐれる監視機器および監視データ伝送システム 落石感知センサ機器、岩盤変位感知センサ機器、伝送手法	http://www.thr.mlit.go.jp/tougi/shingijutsu/juten/anzen.html http://www.thr.mlit.go.jp/tougi/koho/file_formosus/f22.pdf
国土交通省 近畿地方整備局 道路管理課、近畿技術事務所	岩盤斜面崩壊のリスクマネジメント技術 斜面安定度調査の効率化・簡素化技術の開発、岩盤斜面内部構造の探査技術の開発、予知技術(監視) 土石流発生検知システムの技術、落石対策に関する技術	http://www.hrr.mlit.go.jp/index.html
国土交通省 近畿地方整備局 道路管理課、近畿技術事務所	道路法面健全性評価	http://www.hrr.mlit.go.jp/gijyutu/singijyutu/index.html http://www.kkr.mlit.go.jp/n_info/zuii/h18/kpdf/29/11.pdf
国土交通省 近畿地方整備局 大和川河川事務所	地すべり防止工事の効果判定 移動状況の監視	http://www.yamato.kkr.mlit.go.jp/YKNET/outline/landslide/land_04.html
国土技術政策総合研究所	斜面崩壊規模の推定(電磁探査)	http://www.nlim.go.jp/lab/bcg/survey/hk13/km13027.pdf
(独)土木研究所 18	年度に実施する一般・萌芽的研究課題(土砂管理分野に関する研究)	http://www.pwri.go.jp/renewal/outline/pdf/h18keikaku.pdf
(独)土木研究所 土砂管理研究G 地すべりT 火山・土石流T	土砂災害の初期の変動を予知する技術に関する研究 初生地すべりの計測評価に関する研究 地すべり災害箇所の応急緊急対策支援技術の開発(不安定斜面監視、地すべり拳動) 崩壊・土石流危険度評価手法、火山性堆積物の侵食速度	http://www.pwri.go.jp/team/landslide/theme/h18fiber.pdf http://www.pwri.go.jp/team/landslide/theme/h18primary.pdf http://www.pwri.go.jp/team/landslide/theme/h18emergency.pdf http://www.pwri.go.jp/pp/reeruit/20051014/kadai.pdf

(独)土木研究所 材料地盤研究 G 土質 T 地質 T 地質、土質 T	豪雨による斜面崩壊監視および防災技術 斜面のリスク評価 (斜面等の崩壊危険度等の評価) に対する投資効果の検討) 岩盤斜面の調査・計測・ハザード評価技術の調査 道路斜面のリスク評価・マネジメント技術の開発	http://www.pwri.go.jp/ipn/recruit/20051014/kadai.pdf http://www.pwri.go.jp/team/doshitsu/theme_i.pdf http://www.pwri.go.jp/team/fishitsu/index.htm http://www.pwri.go.jp/ipn/news/20020228/kouensyu-6.pdf
(独)寒地土木研究所 寒地基礎技術研究 G 防災地質 T	岩盤崩落監視警戒システムに関する研究 (GPS)、岩盤内地下水挙動に関する研究 空中電磁探査および空中磁気探査を用いた道路斜面の地質構造の推定	http://chishitsu.ceri.go.jp/chuuki_05.htm http://thesis.ceri.go.jp/center/info/thesis/chishitsu/0013749000.html
NEXCO中央研究所 土工研究室	法面防災マナネジメントシステム (法面監視システム)	http://www.expri.c-nexco.co.jp/expri/Research/geot/geot-j.html
東日本旅客鉄道(株)	リモートセンシング技術を用いた雪崩パトロール手法の開発	http://www.jreast.co.jp/development/theme/safety/safety03.html
東海旅客鉄道(株)	落石対策	http://jr-central.co.jp/co.nsf/CorporateInfo/co_0970
鉄道総合技術研究所 地盤防災研究室 気象防災研究室	鉄道沿線の危険斜面抽出方法と評価プログラムの開発 雪崩発生検知システムの開発(振動センサー)	http://www.rtri.or.jp/rd/openpublic/rd46/rd4620/geotech_rd1.html http://www.rtri.or.jp/rd/openpublic/rd46/rd4610/meteo_rd4.html
農林水産省	農地・森林・水域の持つ国土保全機能と自然循環環境の向上技術の開発	http://www.s.affrc.go.jp/docs/press/2005/0331a/press_050331b.pdf
(独)農業工学研究所 造構部 農村工学研究所に移行	空中電磁法の改良と地すべり地における3次元比抵抗分布探査 地震災害および地すべりの要因並びに土構造物の安全性の解明とセンシング手法等の開発	http://nkk.naro.affrc.go.jp/library/publication/seika/seikajyoho/2003/46/46.html http://ss.nkk.affrc.go.jp/kenkyu/kadai/14/14.html

表3-5 ニーズ収集結果表(第一次)(2)

河川

関係機関	ニーズ	リソース先 (URL)
国土交通省 河川局治水課	中小河川浸水想定区域図作成の手引き 洪水ハザードマップ	http://www.mlit.go.jp/river/press/200507_12/050705/050705_tebiki.pdf http://www.mlit.go.jp/river/saigai/tisiki/hazardmap/index.html
国土交通省 河川局河川環境課	中小河川における堤防点検・対策ガイドライン 河川堤防質的整備技術ガイドライン、モニタリング技術ガイドライン	http://www.mlit.go.jp/river/press/200407_12/041102/041102.html http://www.mlit.go.jp/kisha/04/05/050609_html
国土交通省 技術調査課	河川事業における環境影響分析手法の高度化に関する研究 河川変動等	http://www.mlit.go.jp/chosahokoku/h16giken/goto/shitei/04/1704.pdf
国土交通省 国土技術政策総合研究所	河川堤防内の水位を観測する技術 河川構造物（護岸、樋門等）の変状を検知する技術	http://www.mlit.go.jp/tec/gijutu/kaihatu/pdf/06.pdf http://www.nilim.go.jp/engineer/index.html
国土交通省 高度情報化研究センター	堤防内の空洞探査、侵食・浸透モニタリング・センサ	http://www.mlit.go.jp/tec/gijutu/rd17/pdf/10.pdf
国土交通省 16年風水害検討チーム	堤防内の空洞探査、侵食・浸透モニタリング・センサ	http://www.nilim.go.jp/japanese/technical/
安全・安心が持続可能な河川管理のあり方検討委員会(国土交通省)	見つける（診る）技術 維持管理技術の高度化	http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai/shakai/kansenkanri/060605/s01.pdf
国土交通省 東北地方整備局 東北技術事務所	光ファイバー活用した堤体監視技術 堤体、基礎地盤の物理的破壊現象の予兆把握技術、堤体の挙動把握(地震時)、河道水理現象の把握 堤体の湿潤線、間隙水圧、歪、および基礎地盤漏水センサ	http://www.thr.mlit.go.jp/tougi/koho/file_formosus/f22.pdf
国土交通省 九州地方整備局 武雄河川事務所	六角川堤防漏水検計業務 漏水・空洞化範囲（電気探査、サウンディング等）	http://www.qsr.mlit.go.jp/takeo/keivaku_joho/zuike/H17/kouji_consai/H170725_rokkaku_teibourousuichousa_kentou.pdf
国土交通省 九州地方整備局	堤防漏水調査	
(独)土木研究所 技術推進本部	堤防内部構造（表面波探査、電気探査、電磁探査）	http://www.pwri.go.jp/team/geosearch/wadai_01.html
(独)土木研究所 材料地盤研究G 土質工	堤防の安定度評価 治水安全度向上のための河川堤防の質的強化技術他(堤防内部構造探査他)	http://www.pwri.go.jp/team/doshitsu/theme_i.pdf http://www.pwri.go.jp/renewal/outline/pdf/h18keikaku.pdf
(独)農業工学研究所 造構部 農村工学研究所に移行	農業水利施設の機能診断のための非破壊調査法の評価（ひび割れ、老朽化診断） 効率的な農業用水路維持管理のための非破壊調査および劣化診断システムの開発 農業用ため池の豪雨災害に関する研究 地中レーダによる堤体内漏水経路の調査	http://ss.nkk.affrc.go.jp/library/publication/seika/seikajyoho/2002/39/39.html http://ss.nkk.affrc.go.jp/library/publication/seika/hokoku/44/44-5.pdf

表3-5 ニーズ収集結果表(第一次)(3)

空洞・埋設管

関係機関	ニーズ	リソース先 (URL)
国土交通省 東京航空局	東京国際空港国際線地区旅客ターミナルビル等整備・運営事業業務要求水準書 地下埋設物調査	http://www.mlit.go.jp/tokyo_cab/12pfi/20051209/pdf/ryokuyaku/data-01.pdf
国土交通省、農林水産省、林野庁	平成17年度特殊地下壕実態調査	
国土技術政策総合研究所	下水道管渠の適正な管理手法に関する研究	http://www.nilim.go.jp/lab/beg/hvouka/h17/pdf/17-1b0801/S4_09.pdf
国土交通省 高度情報化研究センター	維持管理3次元物理探査(地下、トンネル) (CALS/ECによる業務改善)	http://www.nilim.go.jp/engineer/index.html
国土交通省 国土交通政策研究所	路面下空洞調査	http://www.mlit.go.jp/pri/houkokoku/gaiyou/pdf/kkk11.pdf
国土交通省 北海道開発局 室蘭開発建設部	エプロン下の空洞化調査	http://www.hkd.mlit.go.jp/topics/giivutu/pdf_files_h17/04anzen/aa-15.pdf
国土交通省 東北地方整備局	路面防災監視技術 コンクリートの背面空洞化計測技術 路面下空洞計測技術	http://www.thr.mlit.go.jp/tougi/shingijutsu/juten/anzen.html
国土交通省 東北技術事務所	土構造物の空洞探査他	http://www.thr.mlit.go.jp/tougi/kocho/file_formosus/f24.pdf
国土交通省 中部地方整備局	路面空洞探査車	http://www.meigi.pa.cbr.mlit.go.jp/img/houkokoku/14/file012.pdf
名古屋港湾空港技術調査事務所環境課	河川堤防内の空洞調査法と探査機器の開発研究	
国土交通省 近畿地方整備局	道路空洞調査と道路空洞パトロールへの展開 適用対象の物性値の把握 複数の物理探査技術を用いた総合解釈 対象の物理的スケールの把握 物理探査技術の正しい理解と限界の把握	http://www.kkr.mlit.go.jp/plan/kannai/2006/03/21.pdf
国土交通省 近畿地方整備局 近畿技術事務所	塩屋町線路脇陥没事故の調査について	http://www.kkr.mlit.go.jp/kingi/database/kannai/h15/04/407-enyacyousen.pdf
(独)土木研究所 材料地盤研究G 土質工	構造物周辺地盤の安定評価	http://www.pwri.go.jp/team/doshitsu/theme_i.pdf
(独)水産工学研究所 水産土木工学部	地中埋設施設の合理的維持管理方策	http://www.pwri.go.jp/pn/recruit/20051014/kadai.pdf
鉄道総合技術研究所 地質研究室	レーダーを用いた海岸堤防の空洞探査事例	http://www.nri.go.jp/affrc/technical/report25/A398.pdf
関西国際空港(株)	トンネル覆工打音検査	http://www.rtri.or.jp/rd/openpublic/rd46/rd4630/geol_rd1.html
(財)高速道路技術センター	舗装面下の深度3m以上で、かつ水面下でも空洞探査が行える技術 地下埋設ケーブルの位置を地表から容易に探査する技術	http://www.kiac.co.jp/new_tech/request/request.htm#03
(財)電力中央研究所	新しい覆工背面空洞調査手法の検証 地下空洞周辺の緩み領域を可視化	http://www.extec.or.jp/h/pdf/extec72/p034.pdf http://criepi.denken.or.jp/pub/news/pdf/den370.pdf

(2) 第二次ステージ：ニーズ整理作業

第一次収集作業で絞り込んだ3分野（斜面防災、河川、空洞・埋設物）のニーズについて、防災・維持管理業務でも必要とする予測、点検・調査、評価にならって、災害予測、点検・調査、監視の3段階に分けて整理した。そこでは、ニーズ項目、ニーズに対する要望・課題の他に、適用する探査手法、将来期待できる効果、想定されるユーザー等を含めて整理項目とした。

図3-5の物理探査に対する分野および段階別ニーズ件数において目立った特徴は、空洞・埋設物における監視ニーズ、河川における災害予測ニーズが少ないことである。その原因は、空洞・埋設物の監視においては、確実に成果を挙げられるロボットあるいは人間の目視確認にニーズが向かっていること、河川の災害予測においては、スクリーニング、広域調査、利用するソフトの開発といった内容が必要とされ、それらに対する物理探査のコストや評価技術が障害になっているためと見られる。

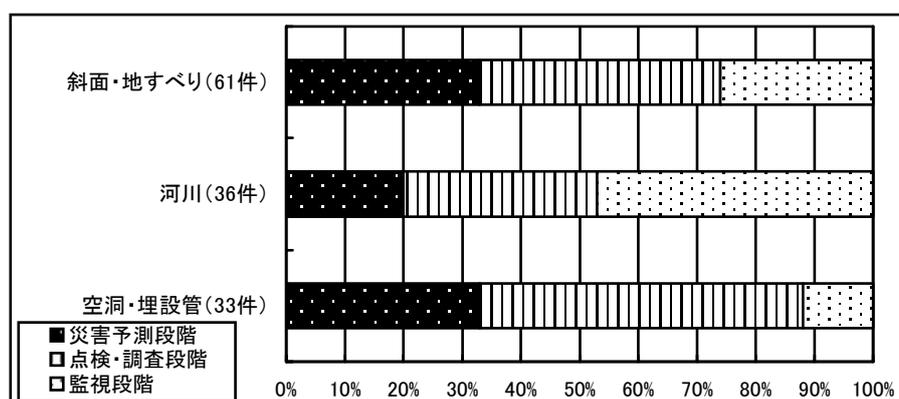


図3-5 分野および段階別ニーズ件数 (%)

防災・維持管理業務の監視段階においては、ハザード評価や取得物理量と災害要因の結びつけに長期的の研究が必要な状況であり、物理探査が直ちに適用できる状況ではない。こうしたことから、物理探査適用の頻度が多い点検・調査段階だけをニーズ調査の対象に絞って作業を進めることにした。表3-6は、点検・調査段階でのニーズ項目およびニーズに対する要望・課題を示している。全分野で16項目のニーズ項目の他に、要望・課題として、それらニーズ項目に対するより高度なあるいは具体的なニーズを各分野で10項目程度あげて整理した。

一方、ニーズを絞り込むためには、ニーズに対する発注量、社会資本整備上での重要度、既存の技術には無いオリジナリティ、将来予想される環境に対する需要といった点を考慮すべきとの指摘もあった。

整理作業検討の中で以下の認識を共有した。

- ・国土交通省では、平成 15 年～19 年間の技術基本計画として、安全、コスト、環境等をキーワードにし、非破壊検査等による社会資本の健全度評価技術の開発等を重点プロジェクトとして取り上げている。その観点から、道路、河川災害対応、下水道老朽化対策等の需要が見込まれる。
- ・災害予測に関するニーズに対して測量が適用手法として取り上げられる場合がある。測量は一次調査として地表の可視領域に適用する技術、物理探査は地盤内部のような不可視領域に適用する技術として捕らえ、それぞれ得られる精度も異なり、互いに補完する手法との認識で扱うようにする。
- ・近年、斜面防災等で利用されている光ファイバによる計測業務は、センサネットの展開方法の検討、崩壊時期・場所の予測を成果とする等の高度化が図られるようになり、計測手法を越えて調査手法と言える段階に近づいている。
- ・補修・補強での対策工に対する点検に関してのニーズがほとんど見られなかった。

ニーズに対して開発等が行われ実用化された場合のユーザーとしては、一次官庁や地方自治体の道路、河川、砂防、港湾、上下水道の管理者とする場合がほとんどで、民間サイドの鉄道、道路、通信事業者や施工・調査会社を想定した場合は少なかった。民間サイドでは自社内に開発や維持管理部門が稼働しているためアウトソーシングは少なく、維持管理業務の発注は一次官庁や地方自治体から見込めると判断した結果であろう。

表 3-6 点検・調査に関するニーズ項目

1. 斜面防災

項目等	要望・課題（研究や技術革新等が必要となる高度なニーズ）
<ul style="list-style-type: none"> ・岩盤斜面(内部構造特に風化・弱層・間隙率・含水率、亀裂分布、地下水挙動、表面形状) ・地すべり(すべり面形状・範囲、機構、地質構造、崩壊規模、アンカー工の維持管理) ・斜面内部の水利特性(地下水、雨水表流水の浸透・浸食の影響) ・斜面と地震動の関係 ・吹付法面 ・アンカー工維持管理 ・雪崩 	センサの開発 センシング技術の高度化 ノイズパルス除去 岩盤および地すべり内部構造の3次元的把握 岩盤斜面内部構造を探索する技術 健全度評価方法 斜面でも計測可能な探索システム 取得物理量と災害要因との関連付け 多点数試験実施方法 探索分解能の高精度化 面的に表層厚・表層の水分状態を定量的に探索する技術

2. 河川

項目等	要望・課題（研究や技術革新等が必要となる高度なニーズ）
<ul style="list-style-type: none"> ・堤体内部構造・弱点部・空洞 ・堤防・堤体内漏水箇所水位・湿潤線 ・基礎地盤・河床変動(洗掘等)調査 ・河川構造物・管理施設(護岸、樋門等)の損傷・変状・老朽化 	センサの開発(堤体湿潤線センサ、堤体間隙水圧センサ、堤体歪みセンサ、基礎地盤漏水センサ) センシング技術の高度化 健全度評価方法 広域概査手法 精度良く空洞・緩みを検知する探索法 探索分解能の向上 堤防内部構造の時系列変化の把握 電氣的ノイズの影響除去 連続的に堤体内部構造を探索する方法 漏水経路の検知

3. 空洞・埋設物

項目等	要望・課題（研究や技術革新等が必要となる高度なニーズ）
<ul style="list-style-type: none"> ・路面下、舗装・コンクリート背面空洞 ・トンネル覆工の浮きや背面空洞 ・海岸堤防・護岸・エプロン下背面空洞 ・特殊地下壕実体調査 ・地下埋設物状況(亀裂、位置、有無、敷設) 	センシング技術の高度化 海岸構造物対応の精度の高い空洞検知技術 空洞周辺の緩み域の可視化 空洞の大きさ等探索限界の把握 空洞判定の自動化 小規模空洞の検知 深度2~20mの埋設物・地下構造探索手法 水位以深での探索 赤外線熱映像法の作業効率向上 探索深度・精度の向上 低コスト広域探索機器の開発(例：地中レーダ探索車両)

(3) 第三次ステージ：対象ニーズ絞り込み作業

物理探査適用の検討作業の方向性を明確にするために、各分野でのニーズ項目の絞り込み作業を行った。表3-6に示したニーズ項目および要望・課題を参考に、ニーズ項目を対象と点検・調査目的に振り分け、物理探査適用検討の対象を明確化した。その結果を表3-7に示す。さらに、適用検討を以下の項目について行い、図3-6に示すように14対象、47目的のニーズ項目を11対象、7目的に絞り込んだ。

- ・適用する探査・調査手法：選択した点検・調査目的に対する探査・調査手法を「単一」または「複数組み合わせ」で記入する（2次元比抵抗探査や2次元比抵抗探査・屈折法地震探査など）
- ・適用した手法により得られるデータ：解釈や判定を含まない段階で入手できるデータまたは情報の内容（比抵抗断面や比抵抗断面・弾性波速度および速度断面）
- ・判定方法：入手データから点検・調査結果を求める場合の判定方法や解釈方法
- ・結果を得るために参考とするデータ：物理探査手法以外で得られる参考とすべきデータ（ボーリング柱状図や地質図など）
- ・点検・調査結果：適用した物理探査手法で得られる診断・健全度判定結果
- ・点検・調査限界：適用した物理探査手法で判定不能な状態・条件等
- ・適用手法の効果：適用した手法が従来から利用されている従来型でも、新規の複数手法利用のような場合でも、従来型や物理探査以外の手法に比べての効果
- ・必要な改良・開発：適用した手法においてさらに進めるべき改良

表3-7 物理探査適用検討のニーズ項目

斜面防災		河川		空洞・埋設物	
対象	点検・調査目的	対象	点検・調査目的	対象	点検・調査目的
岩盤斜面	内部構造特に風化・弱層	堤防・堤体内部	内部構造	空洞(路面下)	有無
	内部構造特に間隙率・含水率		弱点部		位置
	亀裂分布		空洞		規模
	地下水形状		漏水箇所	空洞（トンネル）	有無
	表面形状		水位・湿潤線		規模
地すべり	すべり面形状	基礎地盤・河床	地山風化	空洞（海岸堤防・護岸・エプロン）	覆工の浮き
	範囲		弱点部		有無
	地質構造	河川構造物・管理施設	洗掘	位置	
	崩壊規模		損傷	規模	
アンカー工の維持管理	変状	特殊地下壕（防空壕・坑道・古洞）	有無		
吹付法面	空洞		老朽化	位置	
	亀裂		地下埋設物	規模	
	劣化			有無	
地山風化	位置				
斜面	地下水			亀裂状況	
	雨水・表流水の浸透・浸食			敷設状況	
雪崩	範囲・規模	地震動と斜面			
	発生時期				
地震動と斜面	崩落				
	地すべり				

物理探査適用性検討では、

- ・ 空洞に関するニーズには地中レーダ手法がほとんど適用されていること
- ・ 適用手法はこれまで利用されている従来型手法を越えるような提案は少ないこと
- ・ 測定の精度を向上させ、調査結果の検証を含めた総合的判定結果を提供し発注者の信頼を得ること
- ・ 提供できる技術を分かりやすく説明すること
- ・ 協会員が実施可能な手法を基本とすること

等が話し合われた。また、ニーズは監視や災害予測段階にも多くあるので、それらへの対応を常に怠らないような姿勢が必要であるとの意見もあった。

(4) ニーズ調査のまとめ

防災・維持管理業務では、日常点検や定期点検等で、目視点検が重要な役割を担っている。複雑な地形を精密に測定する測量技術や局所的な浅部の調査に適応した非破壊検査技術も実用化、開発に向けて動きを見せている。そうした環境の中で、種々のニーズに応える手法として物理探査にも大きな期待が寄せられたことから、このワーキンググループの作業が始まった。

インターネットを利用したニーズの収集から整理、絞り込み作業において、国土交通省関連のニーズが多くを占めた 100 件余りのニーズ収集結果を、各委員からの収集結果、意見を元に、意見やデータがより多くそろったことを判断のよりどころにして絞り込んだ。図 3-6 にニーズ絞り込みの流れを示す。

その結果として、

- ・ 斜面防災では、岩盤斜面－内部構造特に風化・弱層、地すべり－すべり面形状、吹付法面－空洞、
- ・ 河川では、堤防・堤体内部－内部構造、基礎地盤・河床－弱点部、河川構造物・管理施設－老朽化(劣化)、
- ・ 空洞・埋設物では、空洞・地下埋設物－位置(路面下、トンネル等の区別を残す)

を適用性検討の主要ニーズとした。

斜面防災	岩盤斜面	内部構造特に風化・弱層 亀裂分布 地下水形状 表面形状 すべり面形状 範囲
	地すべり	地質構造 崩壊規模 アンカー工の維持管理 空洞
	吹付法面	亀裂 劣化
	斜面	地山風化 地下水
雪崩	雨水・表流水の浸透・浸食 範囲・規模 発生時期	
地震動と斜面	崩落 地すべり	

河川	堤防・堤体内部	内部構造 弱点部 空洞
	基礎地盤・河床	漏水箇所 水位・遡潮線 地山風化 弱点部
	河川構造物・管理施設	洗掘 損傷 変状 老朽化
	特殊地盤・河床	弱点部

空洞・埋設物	空洞(路面下)	有無 位置 規模
	空洞(トンネル)	有無 規模
	空洞(海岸堤防・護岸・エプロン)	覆工の浮き 有無 位置 規模
	特殊地下壕(防空壕・坑道・古洞)	有無 位置 規模
地下埋設物	有無 位置 規模 亀裂状況 敷設状況	

物理探査適用検討で概数(5~8)回答があった目的

岩盤斜面	内部構造特に風化・弱層 すべり面形状 範囲
地すべり	地質構造 崩壊規模 空洞
吹付法面	亀裂 劣化 地山風化

堤防・堤体内部	内部構造 弱点部 空洞
基礎地盤・河床	漏水箇所 水位・遡潮線 地山風化 弱点部
河川構造物・管理施設	損傷 変状 老朽化

空洞(路面下)	有無 位置 規模
空洞(トンネル)	有無 規模
空洞(海岸堤防・護岸・エプロン)	覆工の浮き 有無 位置 規模
特殊地下壕(防空壕・坑道・古洞)	有無 位置 規模
地下埋設物	有無 位置

物理探査適用検討で回答がほぼ全員からあり、需要も多いと見られた目的

岩盤斜面	内部構造特に風化・弱層
地すべり	すべり面形状
吹付法面	空洞

堤防・堤体内部	内部構造、弱点部、漏水
基礎地盤・河床	弱点部
河川構造物・管理施設	老朽化、劣化

空洞(路面下)	位置
空洞(トンネル)	位置
空洞(海岸堤防・護岸・エプロン)	位置
特殊地下壕(防空壕・坑道・古洞)	位置
地下埋設物	位置

図3-6 ニーズ項目絞り込みの流れ

3. 4 主要ニーズに対する物理探査手法の適用性

第3章では、ここまで、防災・維持管理分野で物理探査に求められるもの、複数の物理探査手法を併用する利点および防災・維持管理分野での物理探査に対する主要なニーズを示してきた。第3章最後のこの節では、3. 3物理探査に関するニーズ調査において絞り込んだ主要ニーズに対して物理探査を適用した場合に得られる結果、適用限界、および適用効果等を示すとともに、物理探査に対する今後の課題をまとめた。

(1) 主要ニーズに対する物理探査手法の適用性 (斜面防災)

1) 斜面・地すべり分野における主要ニーズの概要

年間の平均降水量が1500mmを超え、かつ国土の70%以上を山間部が占める我が国では、旺盛な土砂浸食作用により多発する斜面災害に対して古来より様々な取組みがなされてきた。このため地盤を調査対象とする我々地質調査業の分野においても斜面防災に対するニーズは自ずと高く、このニーズに応えるべく物理探査をはじめとした各種の技術開発が行われてきたところである。斜面防災分野における調査へのニーズを一言で言い表すと、それは人的被害に直結する災害の「予知」という言葉に集約される。すなわち、発生場所の予知（どこで?）、発生時間の予知（いつ?）、発生規模の予知（被害想定含めて、どれくらいの規模で?）の3点である。

①発生場所の予知：

平成19年3月末の時点で全国における土砂災害警戒区域の指定数は43,722箇所、土砂災害特別警戒区域は17,926箇所であり、また、この土砂災害警戒区域以外にも、全国には約52万箇所の土砂災害危険箇所が存在している。傾斜地の多い国土の中から危険度の高い斜面を確実に抽出するには、高精度な地形解析技術と災害素因（地下水の集中や風化層厚の分布等）を広域的に把握する探査技術が求められている。前者は主に航空測量技術と空中写真判読技術等により解決されるべきものであり、後者が物理探査による解決が期待される分野であるが、経験豊かな地質技術者が両者の長所を有機的に融合していく試みが求められているところである。

②発生規模の予知：

これまで、斜面災害に対しては斜面对策工の設置を急ぐというハード対策が主に進められてきた我が国において、調査の役割は3点の予知のうち、対策工設計のための外力規模を算出するという、「災害発生規模の予知」の役割を主に担ってきた。発生規模の予知とは即ち地すべり、斜面崩壊等の移動土塊の規模を把握することにあるが、この規模を把握するためには想定される移動土塊の平面および深度方向の範囲を把握する必要がある。前者は主に写真判読や地表踏査で決定される場合が多く、後者はボーリングや物理探査等によりおこなわれてきた。ここでの物理探査の役割は、ボーリング孔間の情報を補完し2次元・3次元的地盤情報を取得することや、物理探査で得られた各種物理量を元に地盤の物性値に関する基礎資料を取得することなどにある。

③発生時間の予知：

一方、近年では予算の制約による整備率の不十分さや、宅地開発の拡大による新たな危険箇所の増加等の要因により、災害対策はハード対策から危険区域への宅地侵入の制限や避難誘導などの施策を急ぐというソフト対策へと軸足を移しつつある。ソフト対策におけるニーズとは即ち発生場所の予知、発生時間の予知を正確におこなうことにあるが、この解決には①の技術とあわせて、物理探査や計器観測等による斜面の変動等を監視する動態観測の技術も今後重要になってくるものと考えられる。ただし発生時期予知手法として、表層設置型が多い物理探査でのモニタリングは開発途上であり、例えばボーリング孔を利用した計器計測によるモニタリングと比較すると著しく精度は劣ることに注意を要する。

これらを踏まえて、以下ではこれまで物理探査の主たる役割であった“災害発生規模の予知”に対するその適用性について述べる。

2) 発生規模の予知に対する物理探査の適用

本ワーキンググループでは、斜面・地すべり分野における物理探査適用の主な対象は、表3-8(76頁)のように選択された。上述の通り、災害発生規模の予知における物理探査の役割は主に移動土塊の深度方向範囲の把握であったが、これらの対象に対する適用例を以下に示す。

①対策工設計の外力算出

抗土圧構造物設計時の外力条件を設定するため、移動土塊の深度を決定するための調査である。地すべりや斜面崩壊調査ではボーリングコア観察やボーリング孔を用いた変位計測等をおこなう事ですべり面の深度や形状が決定されるが、物理探査はこのボーリング調査の地点間補完手法として採用される場合が多い。この際、地震探査結果や比抵抗法電気探査結果による亀裂の分布量推定や風化の程度に応じた岩盤の硬軟区分が行われ、移動土塊の深度が決定される。

②災害発生要因（トリガー）の発見

土砂災害の発生誘因は主に豪雨・地震等であるが、特に因果関係が強いものに斜面内の水分移動（浸透流）がある。斜面防災においてこれらは主に浸水強度低下や浸透圧破壊の問題として取り扱われるが、いずれも斜面内に貯存する水分量を把握し、対策工はこれら要因の除去・低減をおこなうことに他ならない。この際には主として比抵抗法電気探査等による斜面内水分の分布状況等の確認がおこなわれ、水抜き工の設置等による要因の除去・低減が図られる場合が多い。

③対策工整備の為の優先順位付加（危険度ランクの決定）

予算的な制限から現状で万全の対策を期すことができない場合には、優先度（緊急度）に応じた対応を行う必要がある。優先度の高い対象斜面・法面の抽出を行うこと、ある

いは同一斜面・法面において優先度の高い区間の抽出を行うことが常に求められるが、例えば、吹付法面における赤外線熱映像調査は、劣化度の判定から対策工優先度の判断を行い、短時間で、広い範囲の抽出作業に対応している。

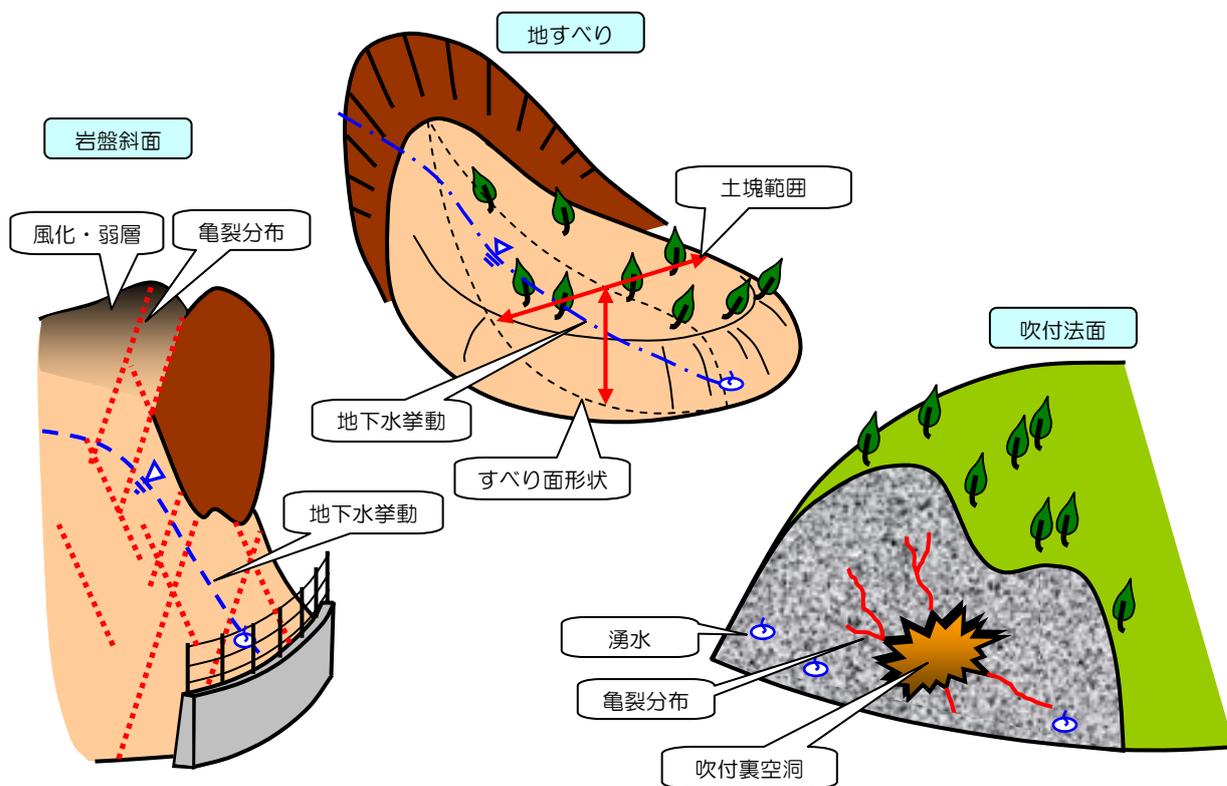


図 3-7 斜面防災における着目点

3) 主要ニーズに対する代表的な物理探査手法の適用性

①吹付法面における吹付背後の空洞分布等の把握

・ニーズの意味：

吹付工と地山との間に生じた空洞は吹付材のひびわれや剥落、陥没等の発生を促進させ、場合によっては吹付材を広範囲に落下させる可能性もあるため、分布位置・範囲を把握する必要がある。この際、法面全域の空洞発生状況を、極力破壊を伴わない方法で面的に調査する必要がある。

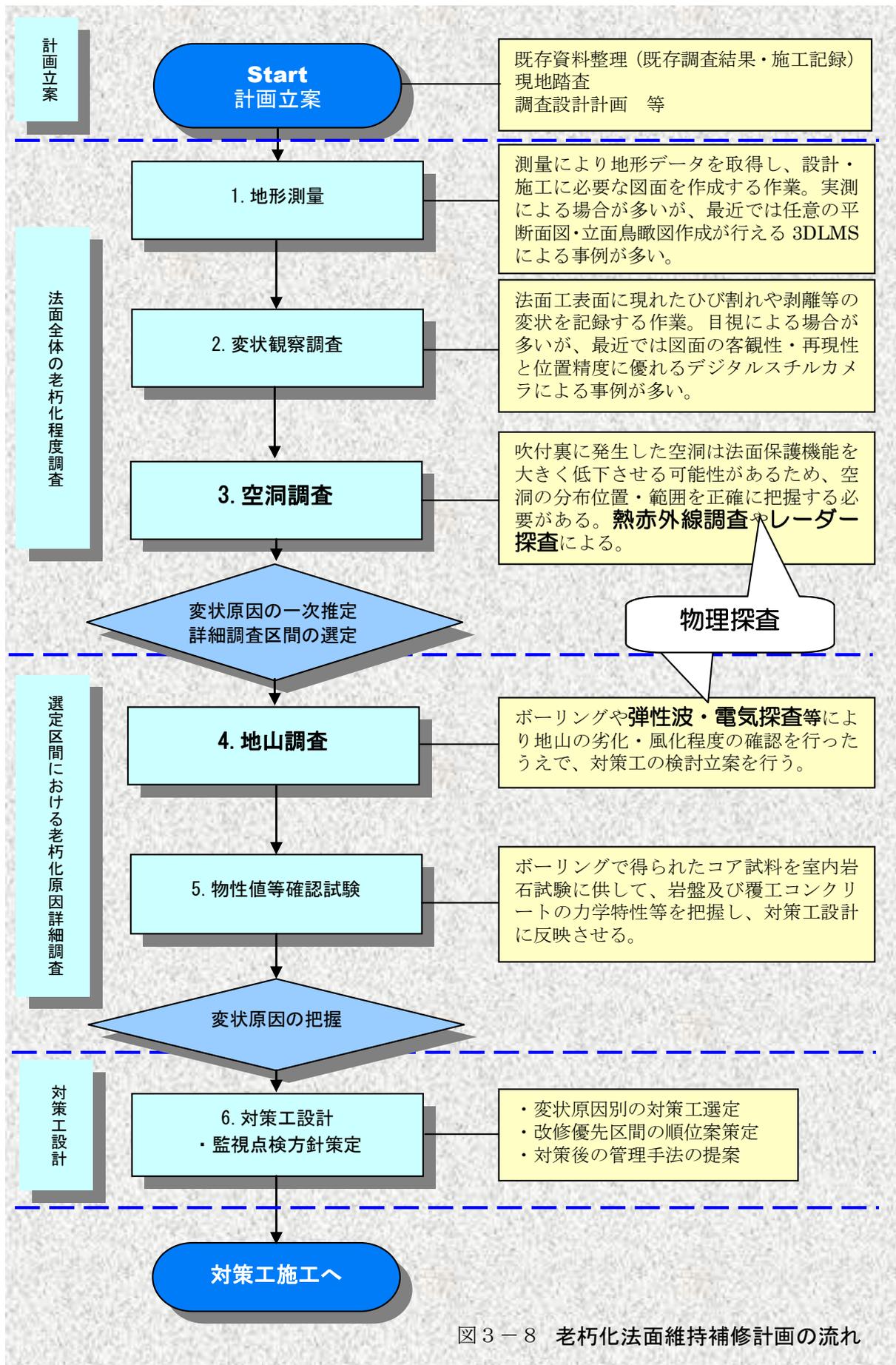
・適用手法：

ア. 赤外線熱映像法探査：法面表面の微小な温度差から内部の状況について調査する手法である。吹付背後に空洞があれば他の健全部分より熱容量が小さくなる（熱しやすく冷めやすい状態になる）ため、複数時期間の温度変化量を求めることで、その分布が確認できる。空洞の分布を非接触・非破壊で、かつ面的に把握できるという大きい長所を有するが、画像処理技術が依然一般的ではないこと、調査結果の良否が日照や気温変化等の気象条件に支配されるなどの短所も有する。通常、気温日格差が大きい時期の晴天日を選んで調査がおこなわれ、日中の最高温時と日没後の低温時の撮影を行い、画像処理にて温度差分布画像を作成することがおこなわれる。

イ. 地中レーダ探査：地中に向けて発した電磁波の反射パターンにより吹付背後の状態を探査する手法である。深度方向にある程度の探査深度を有する（通常使用する高周波数帯域機器では数10cmのオーダー）ため、熱赤外線より信頼度は高く、結果の定量化にもなじみやすい。他方、法面内での高所作業が必要なこと、探査測線は線状であること（面的な探査は行えない）等の課題がある。通常、高周波数タイプ（1GHz程度）のアンテナが探査に用いられ、これを法面表面で転がすように探査するため、法面上部では高所作業員（クライマー）がザイルを使って測定作業を行う。

・結果の利用：

図3-8に示したようにこれら物理探査は法面全域にわたる老朽化程度の判定に用いられる。得られた空洞調査結果を基に変状原因の一次推定、詳細調査区間の選定等が行われ、地山の劣化まで懸念される場合には、ボーリングや岩石試験等を含めた老朽化原因の詳細調査として地震探査や電気探査の必要性が検討される。



②地すべり・斜面崩壊におけるすべり面形状・地質構造等の把握

・ニーズの意味：

対策工設計のための必要抑止力を算出するには、地すべりや斜面崩壊の移動土塊の規模・形状を正確に把握する必要がある。

・適用手法：

ア.地震探査（屈折法）：弾性波速度分布断面から地盤の状態を推定する手法である。得られる物性値はあくまで地山の速度値であり、探査により直接すべり面位置の情報が得られる訳ではないため、速度値が示す地盤の状態を、ボーリングコアとの対比の中で確認しておく必要がある。速度値は地山の硬軟や亀裂分布量に依存するため、この情報を基に基盤位置を確認し、すべり面が到達する可能性のある深度を決定していくこととなる。

地すべり・斜面調査における地震探査の手法は屈折法が用いられ、通常受振点間隔は2～5m間隔、解析手法としてははざとり法や2次元インバージョン解析などが採用される場合が多い。

イ.2次元比抵抗探査：比抵抗値の分布断面から地盤の状態を推定する手法である。地震探査と同様に、探査により得られる物性値は地山の比抵抗分布であるため、抵抗値が示す地盤の状態を、ボーリングコアとの対比の中で確認しておく必要がある。土や岩などの地盤を構成する物質は本来極めて高比抵抗な物質であり、地盤内で抵抗値を低下させている物質は（極論すれば）水である。このため比抵抗法電気探査は主に斜面内の水分分布を探査する手法といえる。ただし水には粘土鉱物内に取り込まれた結晶水や自由地下水・斜面内浸透水等の様々な要因が存在するため、比抵抗値分布の結果解釈には注意を要する。地下水面を持たないような斜面問題の場合では、一般に比抵抗値の大小は風化程度に依存する場合が多く、これより地山性状の推定を行い、すべり面深度を決定することとなる。一方、裂罅水等の存在が懸念されるような斜面問題の場合では、比抵抗分布から斜面内における水分の貯存状況を把握することにより、水抜き工等の抑制工を検討する判断材料として利用されることになる。これら地すべり・斜面調査における比抵抗法電気探査の電極配置は2極法、4極法等で、電極間隔は2～5m程度、最近では、2次元比抵抗探査が多く、解析手法も2次元インバージョン解析が用いられる。

・結果の利用：

主測線上に複数配置されたボーリングにより採取されたコアの観察からすべり面位置が決定されていくが、このボーリングの地点間補完手法として屈折法地震探査や電気探査等の物理探査が採用され、連続的なすべり面形状を確認していくことが行われる。このため常にコア性状と（物理探査で取得される）物理定数との対比が必要である。

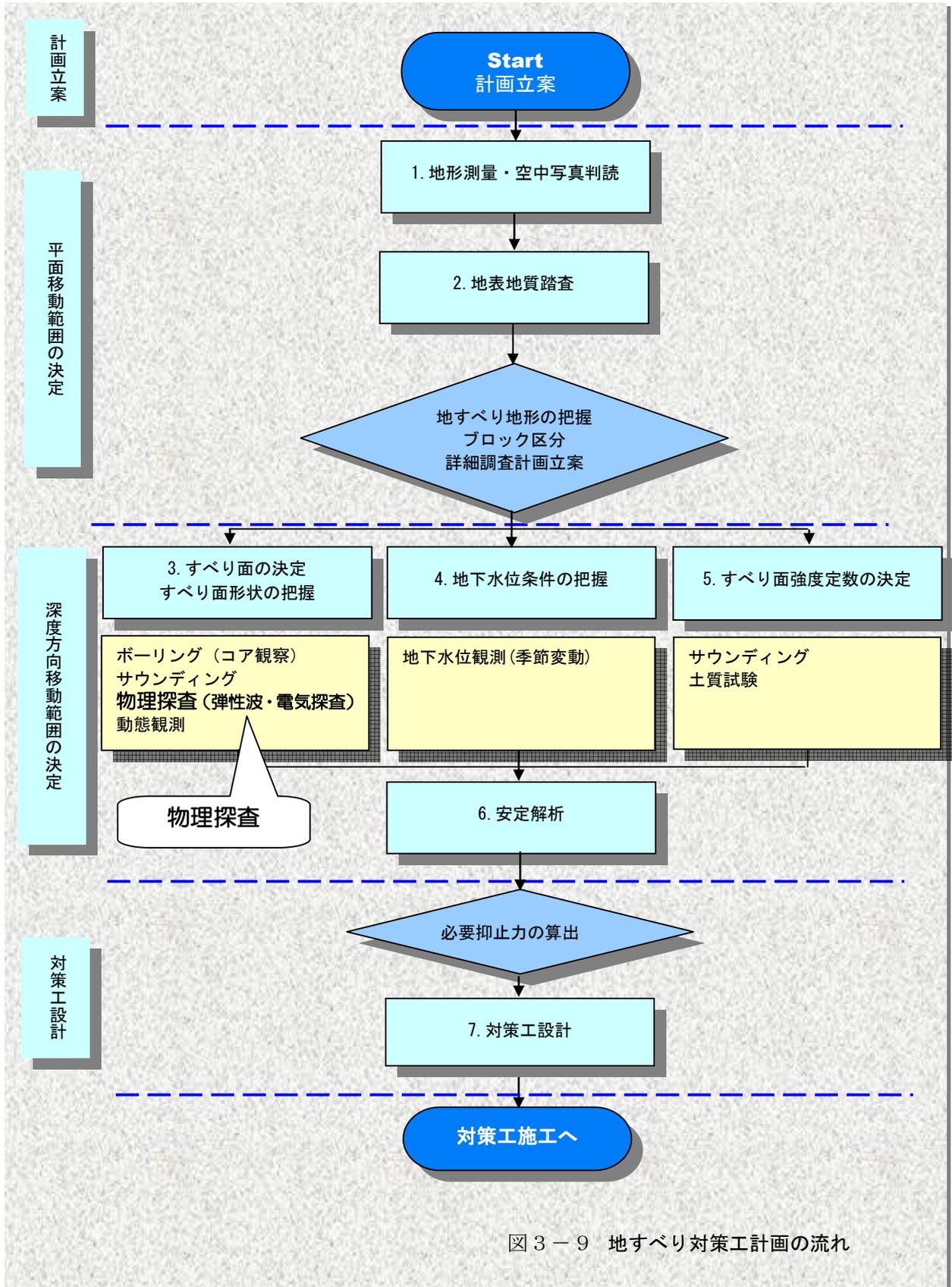


図 3 - 9 地すべり対策工計画の流れ

③岩盤斜面における風化構造・弱層の把握

・ニーズの意味：

地すべり・斜面崩壊と同様に岩盤斜面の問題でもすべり面となりうる亀裂面、弱層面の位置把握が重要であり、想定される災害発生規模を把握して、対策工設計のための外力算定がおこなわれる。

・適用手法：

適用される手法もほぼ地すべり・斜面崩壊の場合と同様で、地震探査（屈折法）、2次元比抵抗探査などが主に用いられる。ここでもボーリングコア性状と物理定数との対比が行われ、結果が解釈されていくが、岩盤斜面における崩壊は地盤中の亀裂や弱層など極端に不連続な面を境に突発的に発生する機会が多いため、以下のような点に注意して解釈する必要がある。

- a. 地震探査における高速度層中に挟在した低速度層の検出不能など、原理的に不連続面を検知できない場合があること。
- b. 探査により得られる物理量はある程度まとまった範囲の代表値を示しているものであり、例えば個々の亀裂面の検出までは不可能であること。

・結果の利用：

岩盤斜面においても地すべりと同じくボーリング地点間の補完方法として物理探査が採用され、連続的なすべり面形状を推定していく場合が多い。岩盤斜面の場合は、特にすべり面ともなりうるべき亀裂の分布傾向等に注目して推定が行われることになる。推定されたすべり面形状より災害発生規模を把握して、対策工設計のための外力算定が行われるわけであるが、ここでもコア性状と（物理探査で取得される）物理定数との対比が特に重要となってくる。

4) 今後の課題

冒頭でも述べたとおり、従来の物理探査の役割は場所・時間・規模の3つの予知のうち、対策工設計のための外力規模を算出するという、「災害発生規模の予知」の役割を主に担ってきた。その適用性における特徴を再度整理すると以下の通りである。

- ア.主として深度方向の土塊移動範囲を把握する目的において、
- イ.ボーリング地点間の情報を補完する手段として、
- ウ.ボーリングコア性状との対比により、物理探査で取得される物理定数から地盤の各種性状を推定・説明する。

この意味において、これまで物理探査はすべり面に関する地中の連続的な情報を提供し、かつ調査全体の経済性を確保するという一定の成果を提供することができていた。

一方で、調査に対する主たるニーズが発生場所の予知・発生時間の予知へと力点を移すなかで、広域の対象範囲から危険区域を迅速・正確に抽出する役割が物理探査にも求められているところである。広域を調査対象とすることは、その性格上、物理探査の得手とするところであるが、一方で探査により取得される物理量と斜面危険度の因果関係において、直接の決め手に欠ける部分が残されていることも事実である。今後、これらの問題は複合技術（調査）により地盤判定の精度を向上することや、航空測量、GPSのような衛星測量および空中写真判読技術等の高度な地形解析技術との融合により解決されていくことが期待されるところである。

(2) 主要ニーズに対する物理探査手法の適用性 (河川)

1) 河川堤防の維持管理の特徴とニーズ

河川堤防は、治水および利水目的に構築された長大な線状構造物であり、その大部分が土質材料で構築されている。変化に富んだ基礎地盤上に構築されており、長い構築の歴史、河川の氾濫による被災、土地利用の変化などを反映して複雑な内部構造を有している。また、その記録も整備されていないことがある。外見上、堤防は連続した構造物であるが、上記を反映して内部構造は不均質であり、所々に設けられている樋門や水門の存在は、構造上、不連続な部分となっている。

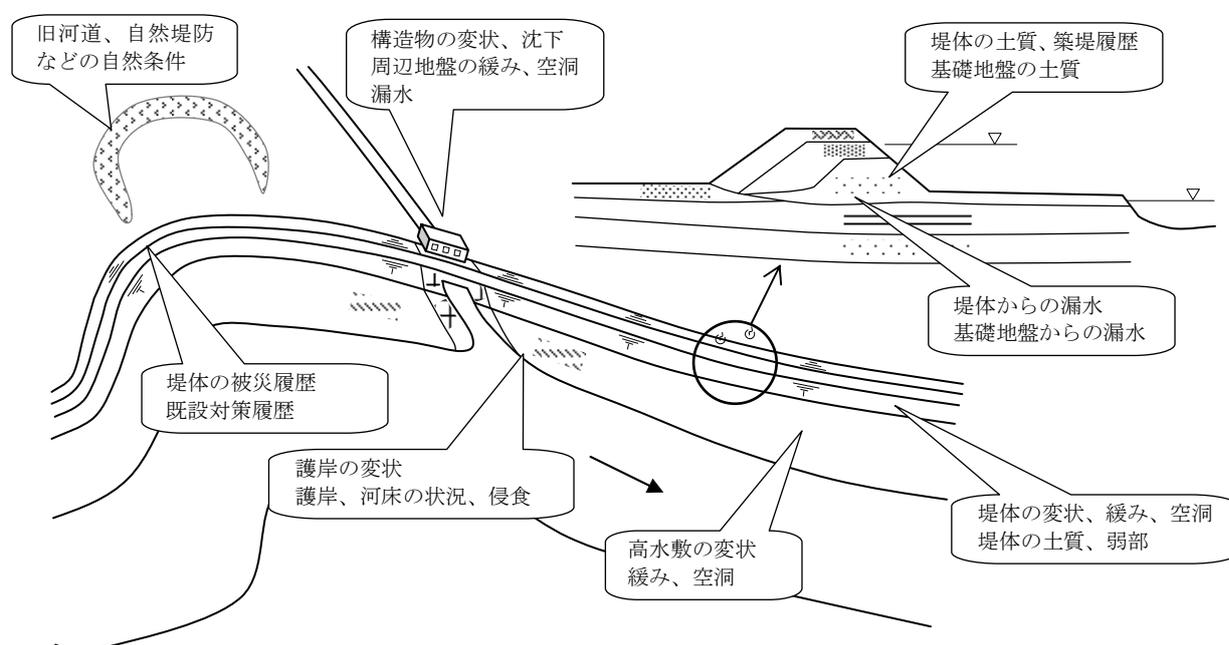


図 3-10 堤防調査における着目点

堤防は、洪水時の越流水や流水による浸食、堤体内部および基礎地盤の浸透に対して安全性を有する必要がある。また、樋門などの堤防横断構造物と土構造物である堤体との境界が洪水時の弱部となつてはいけない。一方、大地震時においては、液状化による堤防の沈下、変形に起因する二次災害（河川水の流入）に対しても安全性を確保する必要がある。このため、表 3-9 に示すような項目や内容で調査が行われている。堤防は長大な線形構造物であること、調査のための削孔が弱部となる可能性があることなどから、非破壊で経済的な長区間の調査が望まれており、物理探査に対するニーズの高い分野である。また、概略を把握する点において、物理探査の適用性が高い分野であると言

える。

表3-9中の「内容」で下線を付した調査については物理探査の適用が考えられ、表3-6のニーズ項目にも重複するものが多い。

表3-9 河川堤防の維持管理調査

大項目	中項目	内 容
堤防弱点箇所抽出のための調査	概略調査	自然条件調査 <u>構造物現況調査</u> <u>堤防現況調査</u> 被災履歴調査
	浸透に対する安全性の検討	降雨特性調査 洪水波形調査 地下水位調査 <u>堤防縦断方向土質調査</u> <u>堤防横断方向土質調査</u>
	地震に対する安全性の検討	地形・水文資料整理 地震被災資料整理 土質調査
	構造物周辺堤防の安全性の検討	<u>構造物変状調査</u> 連通試験 モニタリング
<u>堤体漏水調査</u>		
<u>堤防地盤漏水調査</u>		

* 下線は、物理探査の適用が考えられる調査項目

2) 物理探査手法の適用性

河川堤防に関して、抽出されたニーズと適用が考えられる物理探査手法を整理して表3-10(77頁)に示す。適用される代表的な物理探査としては、

- ・ 表面波探査(表面波探査(2次元))
- ・ 屈折法地震探査
- ・ 2次元比抵抗探査
- ・ 電磁探査(スリングラム法EM探査)
- ・ 地中レーダ探査

があげられる。大きく区分すると、堤体および基礎地盤の土質を調査する探査と、堤体中あるいは構造物との境界付近に分布する空洞や緩みを調査する手法に区分される。前者の代表的な探査手法としては、表面波探査(2次元)、2次元比抵抗探査があげられる。

後者については、地中レーダ探査が用いられることが多い。表面波探査（2次元）、2次元比抵抗探査などは概略調査として、堤防縦断方向に実施され、ボーリング調査などの詳細調査を実施する位置を選定するために用いられることが多い。

以下、河川堤防調査における代表的な探査手法の概要を示す。

①表面波探査（2次元）

連続的に非破壊で堤体および基礎地盤の土質構造、強度的弱部を把握するため、堤防天端において縦断方向に実施される。また、比較的短時間で探査が実施できることから、広域概査に適した探査手法である。探査原理上の制限から、堤防横断方向に実施されることはない。探査結果としては、S波速度断面が得られる。S波速度は、標準貫入試験N値と相関性が高く、S波速度が低い箇所が強度的な弱部、あるいは緩みと判断する。また、探査結果の判断に際しては、S波速度分布の連続性についても検討され、速度の急変箇所は着目される。

探査に際しては、1m間隔に多数の受振子を並べ、カケヤでの地面の強打による起振を2～5m間隔で行われている。長区間を効率的に探査するため、ランドストリーマが使用されることが多い。

探査可能な深さは概ね10～15m程度であるが、高速度層の下位の低速度層についても探査が可能な利点がある。探査結果はS波速度断面であるため、土質の判定が難しい場合がある（例えば砂と砂礫）。図3-11に探査結果例を示す。

②2次元比抵抗探査

連続的に非破壊で堤体および基礎地盤の土質構造、堤体の水分状態を把握するため、堤防天端において縦断方向に実施されることが多い。また、ボーリング調査を補間するために堤防横断方向で実施されることもある。探査結果としては、比抵抗断面が得られる。比抵抗は、含水が高いほど、粘土成分が多いほど低い値となる。粘性土では低比抵抗となり、砂礫では高比抵抗となることを利用して、堤体を構成している土質を区分するために用いられることが多い。また、地下水面より上部では、間隙の大きい部分が高比抵抗となる。探査に際しては、1～2m間隔に多数の電極を設置し、多数の電極の組み合わせで測定を行う。測定に時間を要することが多く、高速の測定装置、測定手法が望まれている。

探査可能な深さに制限はないが、深度の増加とともに分解能は低下する。河口付近では、海水の浸入により深部（基礎地盤）が低比抵抗となり、土質の判定に留意を要する場合がある。比抵抗値の大小は、必ずしも土質の強度と一致しないこと、地下水位の上下で判定が異なる場合があることに留意しなければならない。

一方、2次元比抵抗探査は、堤体内部の水分状態の時系列変化を把握するためのモニタリング手法として利用された事例もある。

③地中レーダ探査

地下に埋設された構造物、構造物周辺で生じた堤体および基礎地盤の緩みや空洞を検知するために用いられる。短時間で比較的精度良く探査できる特徴がある。探査結果として2次元の電磁波反射断面図が得られ、そのパターンから埋設物の位置や大きさ、緩みや空洞の範囲などを判定する。ただし、反射断面の判定には経験を要する。

探査装置には、パルス波を用いたものと連続波を用いたものがある。パルス波を用いた探査装置は広く普及しているが、対象の深さや大きさ、探査条件に合わせて探査する周波数を選択する。土構造物の場合、探査できる深さは概ね2~3m程度であり、地下水面以下の部分の探査が困難であることが多い。

④電磁探査（スリングラム法）

最近、堤防への適用が見られるようになった探査で、地盤の導電率（比抵抗の逆数）を探査する手法である。連続的に非破壊で堤体および基礎地盤の土質構造、堤体の水分状態を把握するため、堤防天端、高水敷などで実施される。また、平面的な探査を行い、水みちなどを検知することも考えら。探査結果としては、導電率断面（比抵抗断面）、導電率平面分布（比抵抗平面分布）が得られる。含水が高いほど、粘土成分が多いほど高い導電率となる。電極の設置を行う必要はなく、2次元比抵抗探査に比較して、短時間に探査を行うことができるが、2次元比抵抗探査に比較して探査可能な深度は浅い。測定に際しては、センサ形状や使用周波数帯等に依存した測点間隔（探査深度が浅い場合は2~5m）で測定を行う。図3-11に探査結果例を示す。

⑤その他の探査法

水みち調査として、1m深地温探査、自然電位探査が用いられることがある。1m深地温探査では、流動水と地温に温度差が必要であり、探査を実施する時節に制限がある。また、堤体や基礎地盤の土質構造を把握するため、屈折法地震探査（トモグラフィ法）が適用されることもある。この場合、S波が利用されることが多い。

3) 探査の組み合わせ

河川堤防における物理探査では、探査を組み合わせることによる探査結果の向上が期待できる。代表的な探査の組み合わせとしては、表面波探査と2次元比抵抗探査（表3-11）、あるいは表面波探査と電磁探査（図3-11）があげられる。いずれも、S波速度と比抵抗（導電率）の組み合わせとなる。探査を組み合わせることにより、土質区分の判定精度、緩みや弱部の検知精度が向上することが期待される。また、詳細調査のためのボーリング調査位置の選定資料として利用できる。

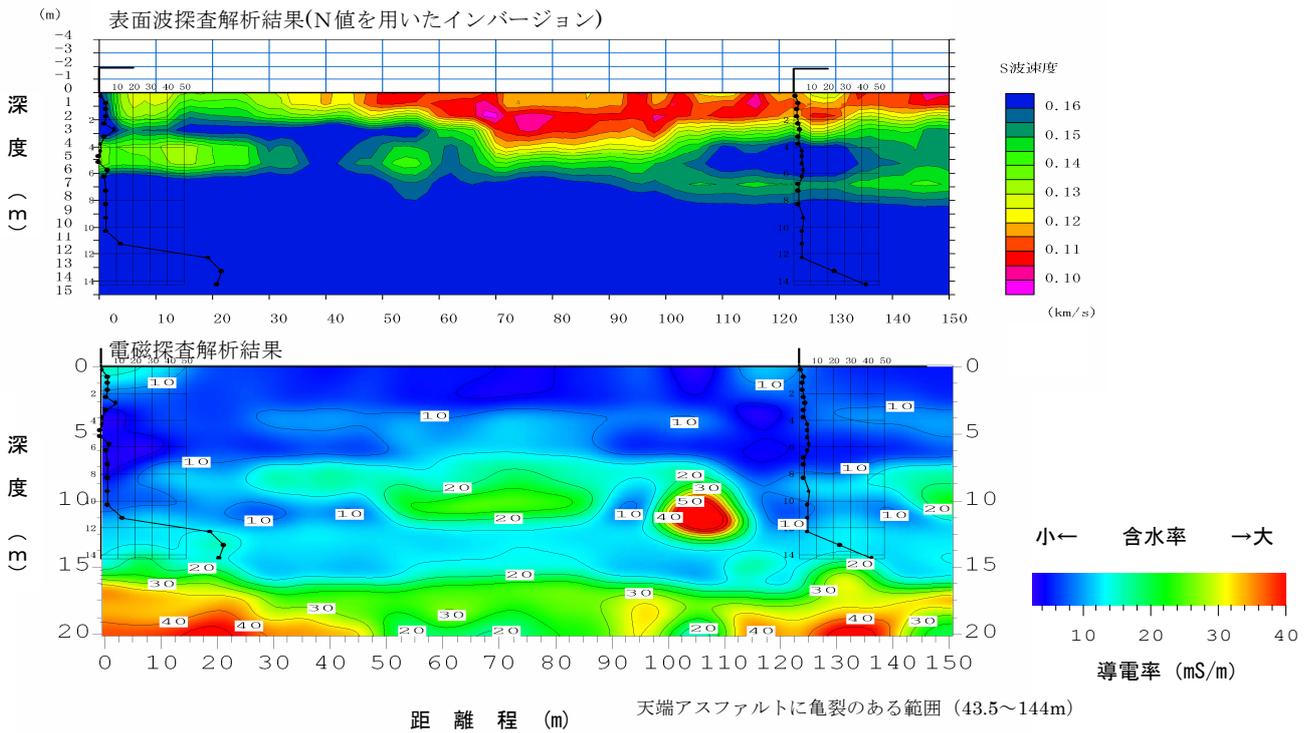


図3-11 堤防における探査事例¹⁾。上図は表面波探査結果、下図は電磁探査結果（導電率は比抵抗の逆数）

表3-11 堤防調査における組み合わせ探査の例

探査法、測定する物理量	探査で得られる情報	結果の組み合わせで得られること
表面波探査 (S波速度)	<ul style="list-style-type: none"> S波速度からN値に換算した地盤強度分布 締め固め度 弱部 	<ul style="list-style-type: none"> 土質区分の精度向上。比抵抗とS波速度で判定。例えば、S波速度が低く比抵抗が小さい場合は、粘性土。 弱部、緩み箇所の判定精度の向上。同じ比抵抗であれば、S波速度が低い箇所が弱部の可能性あり。緩んでいる箇所は、比抵抗が高くS波速度が低い。
2次元比抵抗探査 (比抵抗)	<ul style="list-style-type: none"> 比抵抗から分類した土質区分（粘土、砂、礫） 定性的な含水状態 	

4) 今後の課題

堤防調査における表面波探査や2次元比抵抗探査などは、従来型の探査技術を、探査対象に合わせた仕様で測定、解析を行っているものである。このため、長大な土構造物の土質構成や異常個所の抽出には適しているが、詳細構造を把握するためにはボーリング調査やサウンディングなどによるキャリブレーションが必要である。また、築堤履歴などの詳細構造を把握するために、ボーリング調査を補間する技術として物理探査の適用が試みられたことがあるが、わずかな締め固めの差や、わずかな土質の差を区別することができていない場合が多い。したがって、従来型の探査技術は、概査としての位置づけとなる。表3-6に示した研究や技術革新等が必要となる高度なニーズとして、「探査分解能の向上」「精度良く空洞・緩みを検知する探査法」があげられているのは、このような現状を反映した結果であると考えられる。

一方、堤防は長大な構造物であることから、「広域概査手法」「連続的に堤体内部構造を探査する方法」などのニーズがあげられている。ここで取り上げた表面波探査などは、このニーズに応えた代表的な探査手法であると言える。また、電磁探査（スリングラム法）は、2次元比抵抗探査の短所を解消し、このようなニーズに応えようとするものである。また、電極を地面に打ち込む必要のない電気探査の研究開発も進められている。

河川堤防では、現状技術とその限界を十分把握して適用すれば、ある程度、ニーズに応えたサービスが適用できるものと言えそうである。組み合わせ探査を活用すべきであろう。一方、S波速度や比抵抗などから、間隙率や飽和度などのおおよその値が推定できれば（ボーリング調査、土質試験結果でキャリブレーションして推定できれば）、堤防調査における物理探査の利用価値は向上すると思われる。シーズとして提供すべく研究開発が望まれる所である。

引用文献

- 1) 岡二三生ほか：河川堤防の内部構造調査における各種物理探査手法の適用性の検討，地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム 2005 論文集，地盤工学会関西支部，pp. 49-52，2005.

(3) 主要ニーズに対する物理探査手法の適用性（空洞・埋設物）

空洞・埋設物に対するニーズは、図3-12に示す路面下、トンネル、海岸堤防・港湾、特殊地下壕、地下埋設物などに高い。ここではそれらを対象とした物理探査の適用性について述べ、表3-12（78～80頁）に、点検・調査段階での主要なニーズと各ニーズに対して適用が考えられる物理探査手法を整理した一覧表を示す。

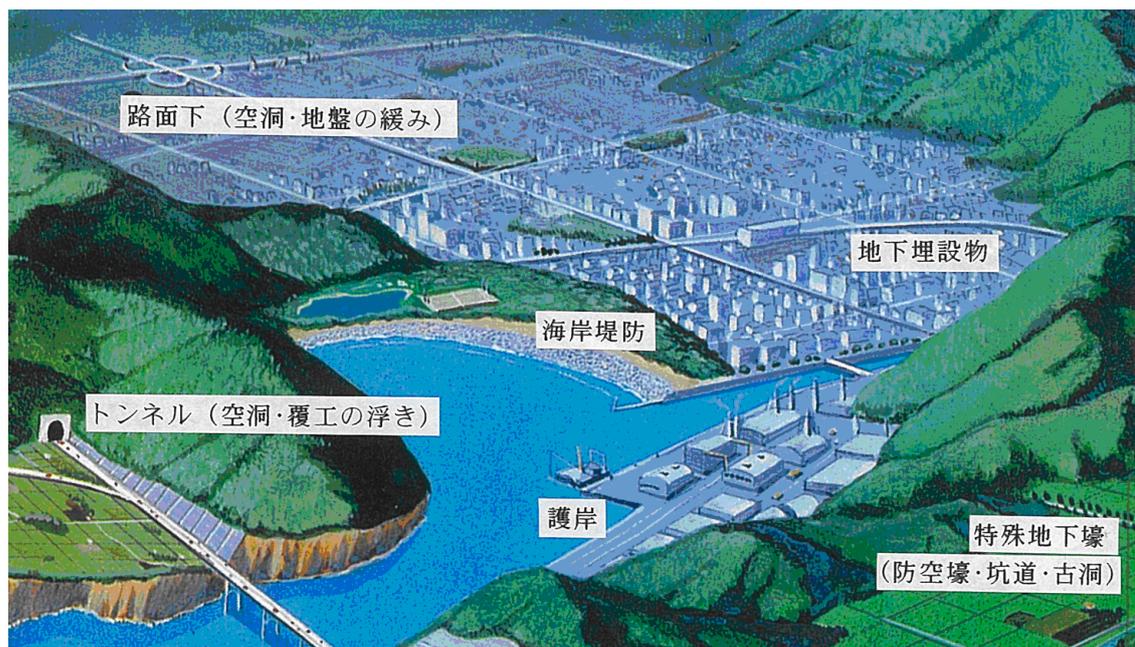


図3-12 空洞・埋設物を対象としたニーズ

1) 空洞調査における物理探査の適用

構造物またはその周辺に隣接する空洞は、構造物の強度や周辺地盤の強度を低下させて構造物に影響を及ぼす。また構造物周辺に「みずみち」を作り、空洞を拡大させる原因となる。そのために早期に空洞を発見して位置・規模を把握し、対策工の検討が必要である。トンネル覆工コンクリート背面、吹き付けのり面背面、道路路面下、港湾護岸周辺など、コンクリートで覆われたほとんどのインフラストラクチャーにおいて、空洞調査が必要とされている。これらの空洞は目視確認できない位置に存在するため、物理探査手法を用いての調査に対する期待も大きい。また、空洞の規模を得ることは、対策工において埋め戻しの量を見積るために必要とされる。

①路面下空洞調査

空洞調査の多くは、下水・雨水・汚水などの比較的深部の埋設管が設置されている路面下を対象としたものである。埋設管工事、シールド工事、地下鉄工事などが行なわれた路線に発生する空洞は、埋め戻しの不良や周辺土砂の取り込みなどに起因することが

ほとんどであるが、工事の直後に空洞が発見されない限り、空洞発生との因果関係を明らかにすることは難しい。多くの場合は陥没事故が発生することによって空洞の存在を知ることになるが、陥没後の調査では空洞が埋まり新たな空洞が発見されないこともある。そのため、事前に路面下の調査を実施しておき、工事完了後（定期的に）路面下調査を実施するという方法がある。事前調査との比較により、変化の起こった地点を空洞が発生した箇所として抽出できるので空洞の検知確度を上げることができ、陥没事故が発生する前に空洞を検知することが可能となる。

調査手法としては、地中レーダ探査がもっとも多く利用されている。1m程度の測線間隔の概査で、調査路線全体をカバーすることは容易である。現地で直ちに測定記録の確認ができるため、測定パラメータを変更しての再測定や調査測線の追加などが容易であり、現地状況に応じた測定に適した手法である。探査深度と分解能から、中心周波数200～500MHz程度のアンテナを使用する人が多い。探査可能深度は地盤条件等で異なるが、3m程度までである。地盤の土質や地下水によって探査可能深度が変わるので、地盤状況を事前に入手しておく必要がある。図3-13に地中レーダ探査記録とその解釈結果例を示す。空洞の判定は、強反射パターン（これを異常点と呼ぶことにする）を抽出し、既往データ（台帳、記録簿）などで調べた埋設管・埋設物などに対応する異常点を除外する消去法で行なう。残った異常箇所が空洞である可能性が高いが、空洞ではない場合もある。既往データの台帳等に載っていない埋設管・埋設物、石、木の根、地層面などがその例である。レーダ探査の結果のみから空洞を精度良く判定するまでには至っていない。最終的に空洞かどうかを確認するには、開削や削孔が必要となる。空洞の規模（体積）を把握する作業はこの際実施し、孔内カメラ等により目視確認するなどの方法がとられる。近年では、空洞内に挿入した機器のレーザー光や音波で壁面までの距離を計測して、空洞の規模（体積）を得る方法がある。

空洞調査の対象深度が2～3mを超える場合には他の手法を検討することになり、表面波探査（定常振動）は、やや深い深度の空洞調査について実績がある。基本的に一次元の調査であるため、面的な調査が必要な場合には時間もコストもかかることが難点である。したがって、別の情報から空洞の予想箇所を絞り込んだのちに適用した方が良い。空洞は、区間速度分布の乱れや低速度帯を捉えることで判断する。平面的な位置については、調査ポイントを細かく取ることによって精度を上げることが可能である。速度変化を捉えられる、メートルオーダー以上の大きさの空洞でなければ検知は難しい。土被り2～3mを超えていれば差し迫った危険は少ないと判断し、深部から成長して深度2～3mに達した空洞についてのみ、地中レーダ探査を実施している場合も多い。

空洞を高比抵抗部とみた場合の二次元比抵抗探査や電磁探査、低速度部とした場合の地震探査、低密度として捉えたときの微重力探査も理論的には可能であるが、これら調査手法の精度に比して対象とする空洞規模が大きくない場合が多く、前述2つの手法に比べ成果を得にくい。

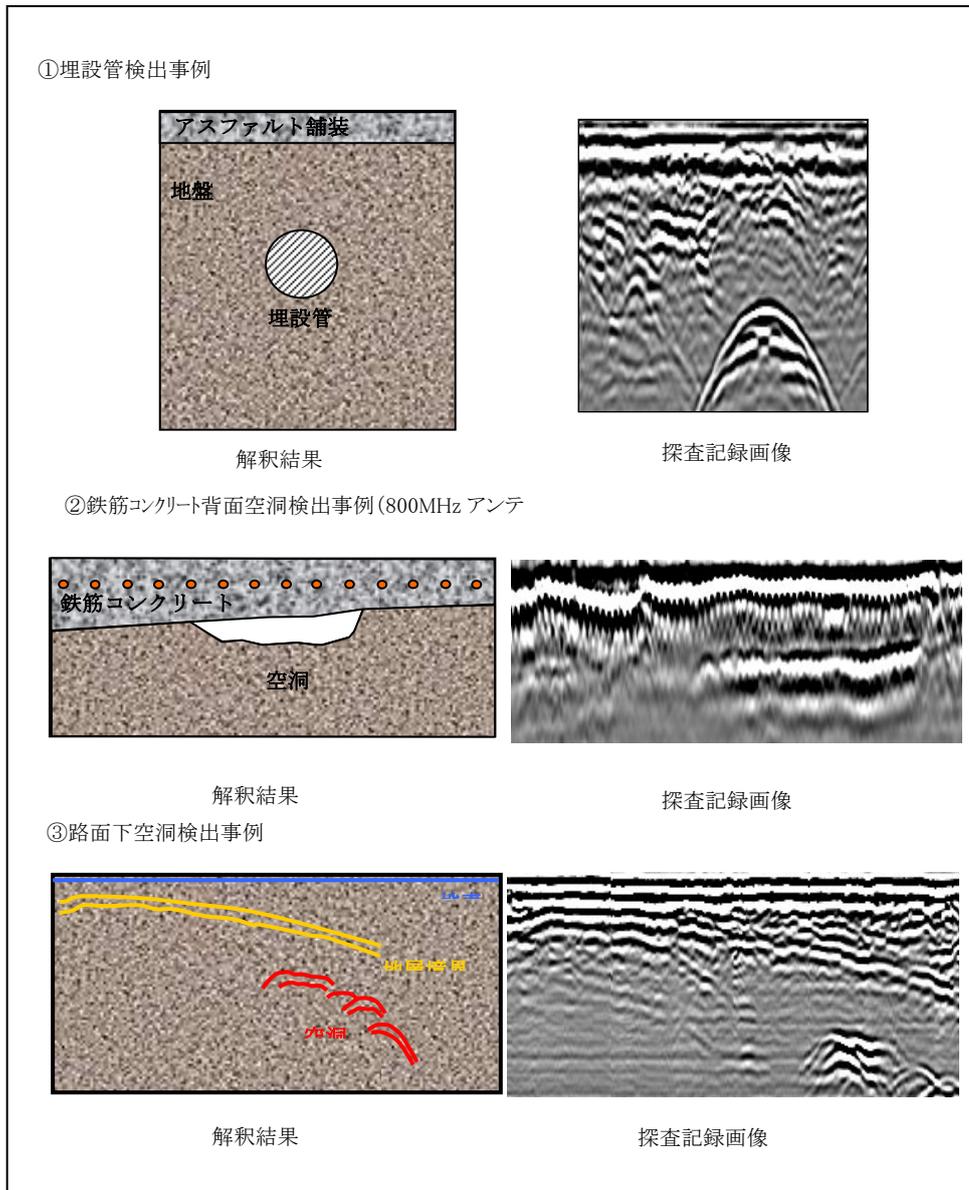


図 3-13 地中レーダ探査結果例（記録と解釈結果）

対象深度が 1～数 m 程度の場合は、路面下空洞、土木建設基礎周辺の空洞、堤体（盛土）内の空洞、空洞に伴う埋設管損傷等が探査対象となることが多い。これらの空洞の場合は、維持管理上大きな問題であり、路面下空洞の場合は即、道路陥没事故に直結する 경우가ほとんどである。更に安全性の観点からも迅速な対応や対策が求められるのが現状である。このような場合は、比較的簡便で、作業能率も良好で且つ、直接的な画像がリアルタイムで得られる地中レーダ探査を適用する事例が多く、適用探査手法の 5～6 割程度を占めていると推測する。表 3-13～表 3-14 に地中レーダ探査における使用周波数と探査深度、対象物・条件別の探査適用の可否、図 3-14～図 3-15 に使用周波数・探査深度と分解能および含水比・土質と探査深度の模式的な相関を示す。

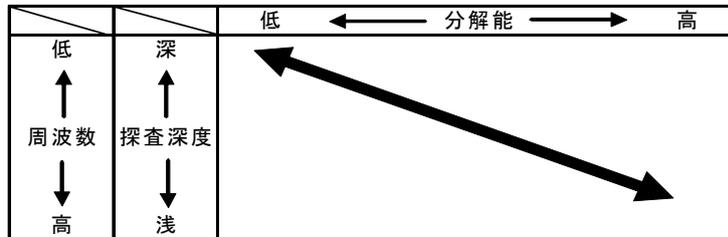
表 3-13 地中レーダ探査の使用周波数と探査深度

対象物	使用周波数	探査深度(m)
地中埋設管	300~500MHz	0.5~2
	80~120MHz	2~10
路面下空洞	500~700MHz	直下
	200~500MHz	0.5~3
岩盤内空洞	500MHz	1~2
	300MHz	2~5
	80MHz	5~10
コンクリート主鉄筋	1000MHz	0.05~0.3
	900MHz	0.1~0.5
舗装の厚さ	1000MHz	0.05~0.3
	900MHz	0.1~0.5

表 3-14 対象物・条件別の地中レーダ探査適用の可否

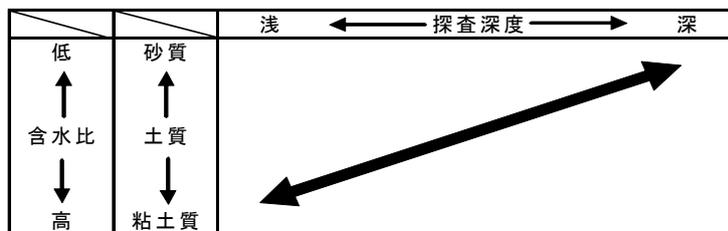
対象物	金属物				空洞				遺跡			
	有		無		有		無		有		無	
表層部の鉄筋・鉄網の有無												
地下水面に対する対象物の位置関係*	上	下	上	下	上	下	上	下	上	下	上	下
形状の大小	大	小	大	小	大	小	大	小	大	小	大	小
探査の可否	△	△	×	×	◎	○	△	×	△	△	×	×

* 海水が地下水に混じる場合、さらに条件は悪くなる。
 (記号：◎:最適、○:可、×:不可、△:場合による)



注) 縦軸パラメータはそれぞれ独立

図 3-14 地中レーダ探査での周波数・探査深度と分解能の関係



注) 縦軸パラメータはそれぞれ独立

図 3-15 含水比・土質と地中レーダ探査探査深度の関係

②トンネル覆工背面空洞調査

トンネル覆工背面の空洞には、裏込めの施工不良で施工時から存在するもの、地下水の影響などで経年的に発生するものがある。覆工が厚ければ空洞があってもその強度である程度支えられるが、覆工が薄くてその背面に空洞が存在する場合には、覆工の剥離・落下の危険度が増すので緊急の対策工が必要になる。トンネル覆工背面の空洞の多くは、天端および天端から45度付近までに多いとされる。

この場合も地中レーダ探査が適用される。高所作業用機能をもった装置を用いて、アンテナをトンネル内部の覆工面に押し当てて調査を行なうことになる。深部までの情報を必要としないので周波数が高めのアンテナ(400MHz～1GHz)を使用する。1m間隔程度の測線で埋めることで、調査対象区域全体をカバーすることができる。トンネル専用開発された車輜では、複数のアンテナを使って同時に計測することで効率の良い作業が可能となっている。測定記録では支保工や巻厚の情報も得られる。空洞の判定は強反射パターンを抽出することで行うが、湧水箇所では空洞と判定できない場合がある。条件が良ければ空洞の下端だけでなく上端からの反射が得られることもあり、空洞上端からの反射が得られた場合には、厚さが求められるので、規模(体積)を算出することができる。多くの場合は厚さを知ることができないため、覆工コンクリートを削孔してカメラで目視確認する。削孔にはコアドリルなどを使う。ファイバースコープで目視確認する場合には、削孔にミストドリルを使えば少量の水でホコリを出さずに小さい穴を開けることができる。

特殊な機器としてマルチパスアレイレーダがある。アレイ状に配置されたレーダ素子が組み込まれたアンテナで覆工面を走査し、3次元的な情報を得ることができる。精度や分解能において優れているが、非常に高価である。

覆工背面空洞に対しては、従来から聴覚による打音調査が日常点検の中で行なわれているが、近年では打音データを客観的に評価する種々の打音調査法が考案されている。背面が空洞であれば、打撃によって覆工コンクリートが低周波のたわみ振動を発生するので、これを捉えようとするものである。空洞の平面的な位置については、測定点数を細かく取って打音が変化する範囲を調べればよい。打音法で空洞の厚さを知ることができないが、覆工の浮き・剥離箇所などの覆工表面に近い欠陥については適用することができる。しかし、欠陥箇所の位置を知ることができても、それが空洞なのか他の欠陥なのかを区別するまでには至っていない。背面空洞であれば覆工厚20～30cm以下の場合でなければ検知はできない。

空洞部と健全部の比熱の差を利用して、熱赤外線カメラで視覚的に空洞部を把握する熱赤外線映像法の利用も考えられる。ただし、トンネル内部で自然に温度差を得ることはできないので、覆工面を強制的に熱してその温度変化を捉えるなどの方法がとられる。厚いコンクリート構造物であるトンネルでは、覆工背面空洞を検知するのは困難で、浮き・剥離など浅部の欠陥を調べる手法と考えるべきである。

③港湾・海岸部の空洞調査

港湾・海岸に発生する空洞の多くは、コンクリート構造物に生じた隙間から、海水の移動にともなって砂などの地盤が吸出されて発生する。潮汐により経年的に発生する場合や、台風などの影響で短期間に発生する場合が想定される。対処としては空洞を探して埋め戻すことになるが、「吸出し」の原因である隙間を発見し塞ぐことが根本的な対策工である。

ここでも地中レーダ探査が有効である。調査の方法は路面下と同様である。エプロンに鉄筋が入っている場合には、鉄筋の間隔によっては調査ができない場合が多く、適用するレーダアンテナの周波数が制限を受ける場合もある。また、海水面以下の空洞に対しては適用できない。地表の陥没がすでに発生していれば、空洞が埋まっている場合も多い。事前に空洞を発見するためには、調査時期を適切に選択する必要がある。頻繁に空洞が発生するようなケースでは、定期的な調査も考慮すべきである。

④特殊地下壕の調査

かつての防空壕、採掘跡やイモ穴などは人為的に作られた地下空洞で、利用せず放置されたものが残っている。その近傍で社会生活が営まれるようになって、地表のひび割れや陥没などが発生し、こうした特殊地下壕が発見されるケースが増えている。これらの特殊地下壕は大規模なものや、深度が深いものがある。また周辺地盤の崩落やガス滞留などの危険性から、内部に立ち入った調査を容易に実施できない場合が多い。したがって、位置、深度、規模を把握するための手法として、物理探査にその役割が求められている。特殊地下壕は、深く、規模が大きいという点で他の空洞とは違い、周辺の世界環境によって取り扱いも変わってくる。

特殊地下壕の深さが2～3mであれば、地中レーダ探査が適用できるが、これより深い場合には、他の物理探査手法を使うことになる。地下壕が水没している場合には、空洞とは物理的に異なる性質となるので考慮しておく必要がある。

表面波探査（定常振動）は一次元調査であること、また起振器の移動に手間が必要で車輛が入り込めないような場所での調査には向かない。

弾性波を利用した屈折法探査、浅層反射法探査、表面波探査は、特殊地下壕を低速度帯と想定し適用する。波長と同等か、それより大きい地下壕であれば検知できる可能性がある。発振点、受振点の間隔と扱う波長で位置の精度も決まる。浅層反射法では地下壕の上部で音響インピーダンスのコントラストが大きい場合には検知が可能である。

2次元比抵抗探査や電磁探査では、地下壕は空洞として高比抵抗の箇所と検知されるのが一般的であるが、水没している場合には低比抵抗になる。周辺地盤も低比抵抗である場合には区別が付きにくい状況となる。基本的にはインバージョンによって解析されるため、データの精度が最も重要である。計測としては必要十分なデータが得られても、解析結果に異常部が明瞭に現れないような地下条件もありうるので、地盤・地質条件な

どから、結果についてある程度の予測をしておく必要がある。

地下壕を低密度部分と想定すれば、微重力探査が適用できる。地下壕による重力異常を捉えることができれば、解析によりその位置を求められる可能性がある。市街地など地表構造物がある場合や地形が複雑な場合には、測定値にこれらの影響があり、解析においても複雑な密度の仮定が必要となり、成果の精度も低下する。

経路が不明な地下水路の位置を調査したいというニーズがある。水路内部の状況が不明なので、作業員が安易に立ち入るのは危険である。これを解決するために、水路にトレーサとなる強力な磁石を流し、感度を揃えた多数の磁気センサを地表に並べて測定する方法がある。徐々に磁気センサの間隔を狭めて、平面的な位置を絞り込むことができる。深度を正確に求めることはできないので、推定された地下水路の直上よりボーリングを行い確認する。

2) 地下埋設物調査における物理探査の適用

ライフラインが輻輳する都市部では、毎年のように路面が掘り返されて、補修工事や埋設管の新設工事などが行なわれている。このような場合、既存の地下埋設物の有無を事前に把握しておかないと、埋設管の破損、地下ケーブルの切断などの事故が発生する。複数の埋設物が混在するような環境においては、分解能がより高い探査を利用しなければならない。

ここでも地中レーダ探査が多用される。埋設管の探査では、反射パターンが凸型の逆双曲線形状であり、規則的・直線的な空間分布を示し、埋設物台帳と位置が一致するか近いことで埋設管と判断する。台帳と全く一致しない埋設管や、残置管が存在する場合もあるので注意が必要である。共同溝やボックスカルバートであれば、平坦な反射面の両端に双曲線状の反射が続くパターンである。熟練技術者が、地中レーダ探査の測定記録だけから地下埋設物を判読できる場合も有るが、これには種々の条件を考慮した上で判断している場合が多い。同じ探査対象物であっても、地盤条件により誘電率のコントラストが変わってしまい、反射波が十分得られない場合がある。地盤の土質や地下水位・湿潤状況などの地盤条件、探査対象物の条件（埋設管であれば、材質、直径、埋設深度など）によって探査深度限界も変わるので、事前に地盤情報や他の関連情報を入手しておく必要がある。

探査対象物の材質が磁性物であると分かっているならば、磁気探査を利用する方法がある。磁性埋設管の位置を特定するために、近傍にボーリング孔を削孔し、これを利用して磁気検層を行う。できるだけ近接した位置で探査を行えば位置の精度が上がる。磁性埋設管の位置の調査、シールド工事や地下鉄工事などで前方の磁性障害物の有無を確認する等の調査で実施されている。

近年、土地の売却に伴った地下埋設物調査が行なわれている。土地利用の変遷が不明であるために何処に何が埋まっているかの情報が全く無い場合もある。埋設物の撤去費用を見積もるために、仕様として埋設物の位置、材質、規模の調査が求められていることが多い。建物の基礎や埋設管の残存が確認でき、廃棄物が発見されることもある。このような調査においても、まず地中レーダ探査が欠かせない。地中レーダ探査では、材質を知ることができないため、水平磁気探査を併用することもある。物理探査の調査結果からは、規模や材質を正確に求めることはできないので、代表的なポイントで試掘やボーリングなどを実施して、最終的な調査結果がまとめられる場合が多い。

その他の手法としては、地中のケーブルから漏れる信号および埋設管に電磁誘導を引き起こし誘導電流による2次信号を捉えて埋設管の位置を調べる電磁（誘導）探査がある。また、鉄筋コンクリートに特化した手法であるため探査可能深度は20cm程度であるが、鉄筋コンクリート内の6mm程度の鉄筋も検出することができるRCレーダ探査がある。

3) 探査の組み合わせ

空洞・埋設物調査においては地中レーダの利用が多くみられる。しかし、この探査手法では特に鉄筋コンクリートで表面が覆われている場合、地表からわずか50cmほどに埋設された100万ボルトの電力ケーブルでさえ、慎重に、出来る限りの手を尽くして探査を行わないと、なかなか捉えることはできない。一方、農道等の水道管探査では、水道管は見つからなくとも、本管のリモートコントロール用の信号ケーブルが簡単に見つかりたりする。こうした探査成果の不確実性をなくすために、異種手法の混成すなわちハイブリッド化で相乗効果を生み、成果を向上させることが本報告での組み合わせ探査の有効性であるとしてきた。3. 2 物理探査の適用方法 2) にも路面下空洞探査に地中レーダと表面波探査の組み合わせを示したように、空洞の規模、深度、地形地質状況により、適用条件や測定される情報の精度が異なる場合がほとんどであり、コスト面からは難しい点があるが単独手法に頼らずに複数手法を用いることも検討に値する。

ここでは、地下埋設物、特に埋設管についての探査の組み合わせを検討する。地下埋設物の探査は、手法の簡便性から次の3種を使用するのが一般的である。

地中レーダ探査は、コンクリート内の鉄筋が明瞭に見られ、その下の埋設管や地層構造も読み取れる。上位の鉄筋の影響でその下部はレーダ反射が途切れ途切れで、慎重な読み取りが必要となる。

RCレーダ探査は、鉄筋コンクリートに特化した探査で、探査可能範囲(20cm程度)であれば探査結果は深度表示でコンクリート内の異物を明瞭に視認できる。使用機器および探査状況を図3-16に示す。

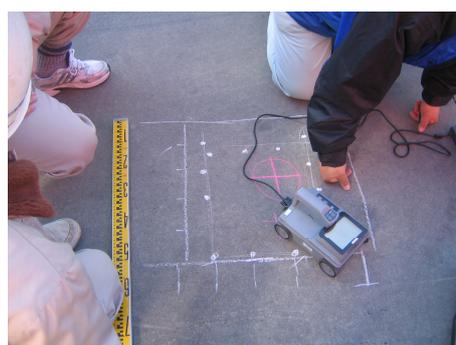
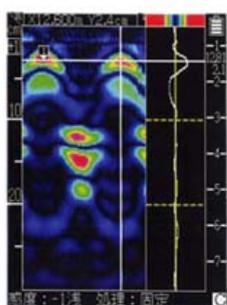


図3-16 RCレーダ機器および探査状況

地中のケーブルから漏れる信号を捉える、あるいは、埋設管に電磁誘導を引き起し、誘導電流による2次信号を捉えて埋設管の位置を調べる、電磁誘導法によるケーブル・鉄管探査(ロケータ)手法がある。受信器単独での探査(間接法)に加え、発信器を用いた探査(直接法)を行う。使用機器および探査状況を図3-17に示す。電磁誘導法については、原理的にはPOS、動力・弱電について、間接法でも十分な適応性があるの

が普通で、それらのケーブルと探査器の間に鉄筋がある場合に、鉄筋内に起こる電磁誘導による信号が非常に邪魔になり、特定のケーブルを追跡するのが困難となる。そこで、ケーブルや鉄管に発信器の信号をクリップまたはコイルにより伝えその信号を地表で追跡する直接法は、かなり信号が絞られ、ケーブルや鉄管位置を追跡可能と判断される。また、RD400CLには受信コイルが先端付近と指示器付近の2箇所があり、直接法では、発信器の信号の電流値やケーブル深度を求める機能があり、この機能を使うことにより、偽の信号を排除することも可能である。

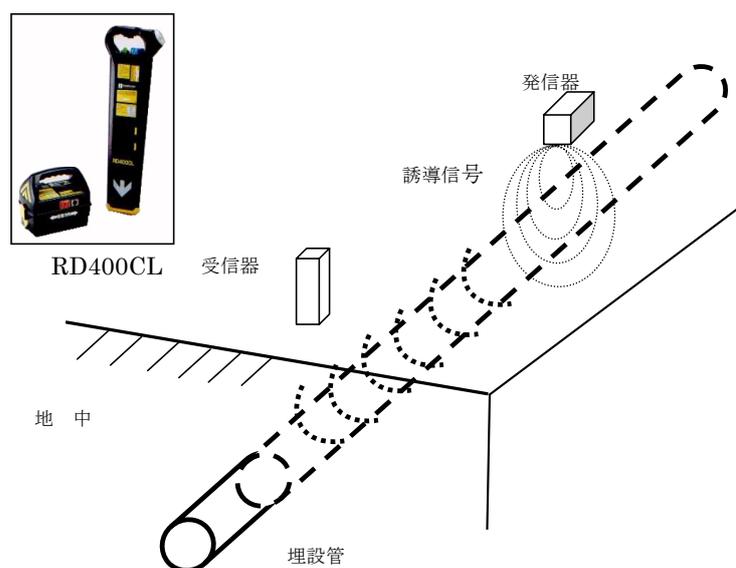


図3-17 電磁誘導方式による埋設管探査の概念および測定状況

表3-15に、これら3手法のいくつかの埋設管種に対する適応性を示したが、探査条件等の把握とこのような基礎データも念頭において、組み合わせの可否、組み合わせ方法等を慎重に検討する必要がある。

表3-15 埋設管の探査器と探査対象の適応性

	RCレーダ	地中レーダ	電磁誘導法	
			間接法	直接法
油配管	×	○	△	○
鋼管	○	○	△	○
塩ビ管	○	○	×	×
POS	×	△	△	○
動力・弱電	○	△	△	○

○：探知可能、△：今後の検証が更に必要、×：探知困難

4) 今後の課題

道路、トンネル、ダム、河川堤防、港湾等の施設を維持管理する上で、「空洞」の有無・形状や「埋設管（埋設物）」の位置・形状を把握することは事故防止に関する重要な要素であり、課題でもある。近年、これらのニーズに応えるべく、適用性の拡大や精度の向上を目指して技術開発が進められている。

近年の比較的新しい技術としては、以下のものがある。

- ・ 地中レーダ探査：
 - ・ 連続波発信
 - ・ トンネル掘削機への装着
 - ・ 斜め方向の測定
 - ・ 共通反射点重合法
 - ・ ウェーブレット変換
 - ・ 三次元探査
- ・ 比抵抗探査：
 - ・ 多電極を利用した探査
 - ・ 三次元探査
- ・ 電磁気探査：
 - ・ 過渡現象、電磁誘導の利用
- ・ 弾性波探査：
 - ・ 高密度間隔の受/発振（トモグラフィ的解析）
 - ・ S波の利用
 - ・ 三次元探査
- ・ トモグラフィ：
 - ・ フルウェーブ解析

地中レーダ探査などではアンテナ軽量化やデータ収録装置の改良など機器的な改良も急速に進みつつあり、他の手法で使用される機器類についても、電子機器、部品の能力向上、価格低下の相乗効果で演算処理の向上が認められる傾向にある。解析についても、データ精度向上や解析手法の改良に伴う解析精度の向上も図られている現状にある。

また、最近の事例によると、空洞の発生には地下埋設物との関連性だけでなく、気温が高いと陥没の発生頻度が高くなるなど、気候や気温とも密接な関係があるとの指摘も出てきており、今後、更に技術革新をはかるためには物性に関する基礎的研究やケーススタディ的な実証実験だけではなく、幅広い分野の各種データの蓄積も必要になるものと考えられる。

表 3-8 斜面防災における点検・調査のニーズと適用物理探査

ニーズ項目		適用する探査手法	適用した手法により得られるデータ	判定方法	結果を得るために参考とするデータ	点検・調査結果	点検・調査限界	適用手法の効果	必要な改良・開発
対象	点検・調査目的								
岩盤斜面	内部構造特に風化、弱層 内部構造特に間隙率、含水率 亀裂分布	地震探査(屈折)	弾性波速度・速度断面	弾性波速度変化	ボーリングデータ 室内岩石試験 変位計測結果 崩落検知 間隙水圧 雨量 踏査結果 目視観測	健全度判定・評価結果図 風化層・弱層分布平面・断面図	地震探査における高速度層中に挟在した低速度層の検出不能など、原理的に不連続面を検知できないような場合がある。 不安定岩塊の直接的な崩落予測が困難である。 岩盤内地下水の賦存形態と流動評価が困難である。	複合技術(調査)により地盤判定の精度向上が期待される。	簡易・高精度調査技術の開発。 岩盤内部構造の三次元的把握技術。
		電磁探査	磁場・電磁場分布	磁場・電磁場変化					
		赤外線熱映像探査	表面温度分布	温度変化					
		AE・MS	AE波形等	発生場所・頻度の特定					
地すべり	すべり面形状 範囲 地質構造 崩壊規模	地震探査(屈折・反射)	弾性波速度・速度断面	弾性波速度変化・速度構造変化	ボーリングデータ 検層データ 室内岩石試験 変位計測結果 間隙水圧 雨量 踏査結果	総合地質平面・断面図 すべり面平面・断面図	地震探査における高速度層中に挟在した低速度層の検出不能など、原理的に不連続面を検知できないような場合がある。 直接的なすべり面形状の把握が困難である。	複合技術(調査)により地盤判定の精度向上が期待される。	簡易・高精度調査技術の開発。 すべり面の三次元形状の把握技術。
		電気探査	比抵抗分布	比抵抗変化					
		1m深地温探査	1m深温度分布	温度変化					
		自然放射能探査	ガンマ線強度分布	ガンマ線強度変化					
		トモグラフィ	物性分布	物性変化					
吹付法面	空洞 亀裂 劣化 地山風化	赤外線熱映像探査	表面温度分布	温度変化	ボーリングデータ 雨量 吹付材料 健全部と劣化部対比資料 目視観測	健全度判定・評価(緩み、剥離、老朽化)結果図	健全度の定量的評価手法の開発が課題。	非破壊検査手法が主流となりつつある。 複合技術(調査)により健全度判定の精度向上や結果のビジュアル的表現が期待される。	深部地盤構造の把握技術。
		地中レーダ探査	電磁反射波断面	パターン認識					
		超音波	透過波・弾性波	透過・減衰					
		打音(衝撃弾性波)	打音波形	波形分析結果による判定					

表3-10 河川における点検・調査のニーズと適用物理探査

ニーズ項目		適用する探査手法	適用した手法により得られるデータ	判定方法	結果を得るために参考とするデータ	点検・調査結果	点検・調査限界	適用手法の効果	必要な改良・開発
対象	点検・調査目的								
堤防 堤体内部	内部構造 弱点部 緩み・空洞	表面波探査	S波速度断面図	S波速度から強度分布を判定	ボーリング調査結果 サウンディング結果 土質試験結果 築堤履歴・施工記録, 被災記録などの河川 データ 空中写真 地形分類図	堤体・基礎地盤土質 縦断面図、横断面図 空洞・緩み範囲分布 図 水みち、漏水箇所分 布図	物理探査は、堤防縦断方 向の土質構成や弱部の抽 出には適している。しか し、堤防の詳細な構造の 把握には、ボーリング調 査やサウンディング等を 用いて解釈する必要があ る。 局所的な空洞や緩みを抽 出するには、地中レーダ 探査が有効であるが、探査 可能な深度が限られてい る。 地温探査では、表層近く の水みちの推定に限れ、 地温と流動水の温度差が 小さい場合は、適用が困 難である。また、測定時 期に制限がある。	経済的および迅速に広範 囲の構造を把握し、異常 箇所を抽出すること、精 査を行う箇所を抽出す ること、物理探査は優れ ている。 適用される物理探査は、 既に実用化されている。 2次元比抵抗探査につい ては、堤体のモニタリン グ適用されることがあ る。	物理探査による内 部構造把握の高精 度化には、探査物理 量と土質物性の相 関を現場ごとに把 握する必要がある。 探査物理量の組み 合わせにより、大ま かな土質物性が推 定できれば、探査結 果の利用価値が向 上する。 電極を地面に打設 しない電気探査の 実用化が試みられ ている。 地中レーダの探査 深度・分解能の向上 が望まれている。
		2次元比抵抗探査	比抵抗断面図	比抵抗(導電率)分布から土質 の判定					
		電磁探査(EM探査)	導電率(比抵抗)断面 図						
		地中レーダ探査	電磁波反射断面図	反射断面から空洞、緩み、内部 構造の判定					
	漏水箇所 水位・湿潤線	表面波探査	S波速度断面図	S波速度から局所的な緩みを 判定					
		自然電位探査	自然電位平面図	自然電位異常から水分状態を 判定					
		2次元比抵抗探査	比抵抗断面図	比抵抗(導電率)分布の異常か ら緩み、水分状態を判定					
		電磁探査(EM探査)	導電率(比抵抗)断面 ・平面図						
		1m深地温探査	地温分布図	地温分布から水みちを判定					
	基礎地盤 河床	地山風化 弱点部	表面波探査	S波速度断面図					
屈折法地震探査			速度断面図						
2次元比抵抗探査			比抵抗断面図	比抵抗(導電率)分布から地盤 構造、弱部を判定					
電磁探査(EM探査)			導電率(比抵抗)断面 図						
河川構造 物 管理施設	損傷・変状 老朽化	地中レーダ探査	電磁波反射断面図	反射断面から埋設構造物、構造 物周りの緩み、空洞を判定	ボーリング調査結果 設計図、施工・補修記 録 変状調査結果 連通試験結果	埋設物分布図 空洞・緩み範囲分布 図	地下水面以下では、電磁 波の減衰が大きく、探査 不可能の場合もある。埋 設物の大きさ、深度、地 下水により探査限界が決 まる。	既に実用化されている手 法である。	地中レーダの探査 深度・分解能の向上 が望まれている。
		表面波探査	S波速度断面図	構造物周りの地盤の緩み、空洞 を判定					

表3-12 空洞・埋設物における点検・調査のニーズと適用物理探査(1)

ニーズ項目		適用する探査手法	適用した手法により得られるデータ	判定方法	結果を得るために参考とするデータ	点検・調査結果	点検・調査限界	適用手法の効果	必要な改良・開発
対象	点検・調査目的								
路面下	空洞	地中レーダ探査	電磁波反射断面図	反射断面から空洞と考えられる異常箇所を抽出	ボーリング調査結果(柱状図、検層他) サウンディング結果 開削データ結果 埋設管・埋設物位置図 ボアホールカメラ結果 地表踏査結果	空洞位置図(深度、規模)	(地中レーダ探査) 電磁波の減衰が大きく、地下水面以下では検知できない場合が多い。 探査可能な深度は2~3m程度(土質地盤)。 空洞の検出規模は牽引速度に依存し、車載牽引型では数十cmが限界。 単一の探査だけでは反射断面に地盤緩み、空洞の区別がつきにくい場合があるため、サウンディングなど直接的な手法での確認必要。 ある程度の大きさ(数mオーダー)を持った空洞でないと検知できない。 (表面波探査) 探査深度は15~30m程度 (2次元比抵抗探査) 近傍の金属の影響が大きい。舗装面では電極用の穿孔が必要。	陥没事故の回避。 既に実用化されている手法である。 地中レーダ探査では車載型アンテナを用いれば広範囲の探査可能。	空洞箇所検出精度の向上 地中レーダ探査を迅速に低コストで実施するには、アンテナを数台セットした車載型アンテナを製作し、牽引車両で牽引する方法が望ましい。 表面波探査の場合、ランドストリーマーケーブルを用いることで、コストの省力化を図る事が可能。
		表面波探査	S波速度断面図	低速度、速度変化など速度分布に着目し判定					
		2次元比抵抗探査	比抵抗断面図	比抵抗分布に着目し判定					
トンネル	空洞 覆工の浮き	地中レーダ探査	電磁波反射断面図	反射断面から空洞と考えられる異常箇所を抽出	施工図 削孔データ結果 目視点検観察結果 ボーリング調査結果(柱状図、検層他) 地質断面図	空洞分布図(平面図、断面図) 覆工厚分布図 覆工内部空隙分布図、コ 覆工状況図(コンクリート厚さ、ひび割れの深さ 覆工状態) 健全度指数図	(地中レーダ探査) 空洞による多重反射が発生し、地山からの反射波のみを抽出することは難しく、正確な空洞厚が解析不能。 空洞厚が薄いと検知できない。 (打音調査) 打撃による、たわみ振動が発生する覆工厚、空洞の大きさが同時条件で存在しないと、検知できない。 覆工背面に水が満たされている場合や覆工表面の状況で打音波形が変化する場合があるので打音調査判定には注意が必要。 (熱赤外線映像法) 加熱部が大型機材、加熱なしでは、地下水等の影響が大きい	既に実用化されている手法である 空洞箇所の把握、補修情報の取得	空洞箇所検出精度の向上 空洞の可能性の高い強反射部抽出の自動化。 トンネル覆工に利用できる、安価で簡便な測定システム 精度の高い空洞厚の測定・解析手法の開発。
		打音調査	打音波形、波形分析図	打音により得られる音響特性分析から異常箇所を抽出					
		超音波測定	超音波波形、初動走時、弾性波速度	超音波の伝播速度からコンクリート内部の空隙、ひび割れ深度を把握					
		熱赤外線映像法	温度分布図、温度差分布図	覆工を強制的に熱して表面の温度変化を捉え判定					

表3-12 空洞・埋設物における点検・調査のニーズと適用物理探査(2)

ニーズ項目		適用する探査手法	適用した手法により得られるデータ	判定方法	結果を得るために参考とするデータ	点検・調査結果	点検・調査限界	適用手法の効果	必要な改良・開発
対象	点検・調査目的								
海岸堤防 護岸、 エプロン	空洞	地中レーダ探査	電磁波反射断面図	反射断面から空洞と考えられる異常箇所を抽出	開削データ結果 ボーリング調査結果(柱状図、検層他) サウンディング結果 地表踏査結果	空洞位置図(深度、規模) 緩み範囲分布図(平面図、断面図)	(地中レーダ探査) コンクリート厚、鉄筋配置によっては探査不可能。 地下水面以下、海水面以下より深部にある空洞は検出できない。 空洞に類似した反応があり、サウンディングなど直接的な手法での確認必要。 陥没などの現象が起こってからの調査では、既に空洞が埋まっており、検知しにくい場合がある。 (浅層反射法探査) 極浅部の探査は困難、S波利用で検出効果確保。 コストがかかる。	既に実用化されている手法である 空洞箇所の把握、補修情報の取得	コンクリートの厚い場所での空洞把握は、微重力探査の併用も必要。 吸出しによる空洞化が多数と考えられるので、海側からの情報を得る方法(探査)の開発。
		表面波探査	S波速度断面図	低速度、速度変化などS速度分布に着目し判定					
		2次元比抵抗探査	比抵抗断面図	比抵抗分布に着目し判定					
		浅層反射法探査	反射断面図 地中の弾性波速度	反射面の形状、反射時間から空洞の深度も推定					
特殊地下 壕	防空壕 坑道 古洞	微重力探査(深部)	重力異常図	低重力異常箇所	過去の位置図が含まれる資料 地表踏査結果 証言情報 ボーリング調査結果(柱状図、検層他)	空洞(防空壕・坑道・古洞)分布推定図	(微重力探査) 高精度の測量が必要、地表や地下の急変で誤差拡大。 (地中レーダ探査) 浅部の特殊地下壕に対応可能、連続波レーダ探査でさらに適用深度を拡大。 単一の探査だけでは反射断面に地盤緩み、空洞の区別がつきにくい場合があり、サウンディングなど直接的な手法での確認必要(2次元比抵抗探査、高周波CSMT探査、表面波探査においても)。 (高周波CSMT探査) 近傍の金属物質に影響を受ける。 (2次元比抵抗探査) 近傍の金属物質に影響を受ける。 水平分解能が小さく、位置や深度の検出誤差が大きい。 (表面波探査) 定常振動利用では、車両搬入を要し、探査場所に制約。	浅部の特殊地下壕であれば、地中レーダ探査により既に実用化されている手法である	逆解析手法による3次元ソフトの開発。
		高周波CSMT探査	比抵抗断面図	比抵抗分布、位相特性に着目し判定					
		2次元比抵抗探査	比抵抗断面図	比抵抗分布に着目し判定					
		地中レーダ探査	電磁波反射断面図(3D断面図)	反射断面から空洞と考えられる異常箇所を抽出					
		表面波探査	S波速度断面図	低速度、速度変化などS速度分布に着目し判定					

表3-12 空洞・埋設物における点検・調査のニーズと適用物理探査(3)

ニーズ項目		適用する探査手法	適用した手法により得られるデータ	判定方法	結果を得るために参考とするデータ	点検・調査結果	点検・調査限界	適用手法の効果	必要な改良・開発
対象	点検・調査目的								
地下埋設物	有無 位置 亀裂 敷設状況	地中レーダ探査	電磁波反射断面図(3D断面図)	反射断面から地下埋設物と考えられる異常箇所を抽出	地下埋設物の設計図面 工事記録 掘削による目視確認結果 地表踏査	埋設物分布推定図 (位置、深度、敷設状況)	(地中レーダ探査) 埋設管の直径、埋設深度、地下水位により、探査限界が決まる。 地下水面以下では電磁波の減衰が著しく、探査不可能。埋設物の実際の位置と埋設物設計図面とは一致しないことがある。 (表面波探査、2次元比抵抗探査) ある程度の大きさ(数mオーダー)を持った対象物でないと検知できない。 (EM探査) 探査深度が浅い。 近傍の金属構造物の影響を受けやすい。 (磁気探査) 磁気反応が見られる対象物だけで可能。輻輳した埋設物は識別不能。	地中レーダ探査は、既に実用化されている手法である	地下埋設管の破断原因を考えるには、地盤の緩み(強度情報)を考慮に入れた考察が必要となる。その場合、(高精度)表面波探査を加味することは有益。 三次元化(埋設物の形状の把握)
		表面波探査	S波速度断面図	低速度、速度変化などS速度分布に着目し判定					
		2次元比抵抗探査	比抵抗断面図	比抵抗分布に着目し判定					
		電磁(EM)探査	比抵抗(導電率)断面図	比抵抗(導電率)分布に着目し判定					
		磁気探査	磁気異常点分布図	磁気変化、異常点の抽出					