

岩盤構造物を対象とした先端計測 技術利用の現状と展望

先端技術を利用した岩盤計測の体系化と実際への応用に関する研究小委員会

1. 岩盤の計測で求められるもの

エレクトロニクスの発展に伴い、様々な分野で計測技術は格段の進歩を見せている。近年では、医工連携が積極的に進められており、無侵襲での計測、機能障害修復過程の計測等、高次の生理機能計測が行われ、オーダーメイド医療の実現に寄与している。これらの計測技術の一端は、岩盤工学や地盤工学の分野に援用されているのは事実である。しかしながら、岩盤工学における先端計測技術が、どのように使われ、実際どのように役立っているのか明確に示されていないのが現状である。解釈を行い、さらにその結果から岩盤対象物が安定なのか不安定なのか、あるいはどのような維持管理をすべきなのか、等を判断するところまでが計測であると考え。仮に、無侵襲で脳内温度分布を把握できても、その結果が虚酸素状態か否かが判断できなければ、先端計測技術も意味をなさないことになる。

本委員会では、まず、「先端計測」の定義について議論を重ねた。以下に先端でも、実際に供しないものは意味を成さず、岩盤構造物で発生する問題を解決するのに有用な情報をもたらすものでなければならぬと考える。また、高精度計測しても、解析や解釈に意味のあるものだけではない。この点についても、本委員会では議論を重ねた。

ここでは、これらの議論を踏まえて、現状の岩盤計測事例紹介を行う。さらに、フローからの意見やそれによる討議を踏まえて、計測技術の「今」と「将来」について議論を行い、委員会の成果としてまとめていく予定である。

2. 変形計測の現状

小杉昌幸委員（独）産総研

(1) 変形計測の役割

岩盤構造物で発生する問題は岩盤や土質などの自然材料の複雑な構造や風雨、地震などの自然現象の影響を被っており、その「時間的範囲」、「空間的範囲」も多岐に渡っている。このような問題を解決するための計測の役割は、岩盤対象物が安定なのか不安定なのか、あるいはどのような維持管理を行うべきか、などを判断することと考えられ、変形計測もその一翼を担っている。

このためには、まずハザード要因を抽出し、その要因の変化を的確に監視できる計測方法を適用し、発生メカニズムから回避のための判断基準を設けることになり、ハザードに対応する計測とその判断基準をマトリックス表示することを目標に議論を進めている。

様々な分野において計測技術は格段に進歩し、その一部は岩盤構造物にも適用されつつある。ここでは、先端の変形計測技術として、新しい計測法のみならず、既存の計測法でもその分析や解析法の進歩によって解明される新しい解釈も対象としている。例えば、既存のGPS技術などを用いて広大な範囲の変状をモニタリングし、地すべりの危険性やその対策を施す判断基準の判定にマクロな分析を追加することも新たな解釈を加える先端技術の一つと考える。

先端の変形計測は岩盤構造物のハザード要因や問題となるメカニズムに関連した変形状態の把握にある。ここでは、的確な状態把握の基本となる「計測精度」に関する議論と先端計測の適用例としての変形計測法、解釈法、IT技術について紹介する。

(2) 計測制度の定義

従来から「精度」や「分解能」はいずれも計測の「精密さ」や「信頼性」を示す表現として用いられてきた。それらは、目に見えない変状や変形などを物理量として検出して工学的な評価や分析に用いることを目的とし、さまざまな現象のメカニズムを解明し、科学的な根拠をもって防災あるいは維持管理に役立てようとするもので

ある。

JISZ8103の解釈では、「精度」は測定結果の正確さと精密さを含めた総合的良さ、「誤差」は測定値から真の値を引いた値、と定義されている。また、これらに関連して、「分解能」は測定器の検出限界として用いられている。

岩盤計測の分野では、解析が組み込まれた計測評価法もあるため、「精度」と「分解能」が非常に近い意味で用いられている。

計量標準の専門的な解釈では、まず計測自体に「**測定の行為が物理的に間違いない**」方法を用いることを前提としている。また、これら先端計測技術を国外に適用する場合は、ISOなどの国際規格を無視できない。

従来から計測の信頼性の表現としては、「精度(accuracy)」や「誤差(error)」が用いられてきたが、分野や国によってその意味が異なるほか、「真の値」を得ることが困難であるとの共通理解にいたっている。このため、国際度量衡委員会(CIPM)は国際標準化機構(ISO)などとともに「計測における不確かさの表現ガイド(GUM,1993)」を示した。ここでは、国際的な理解として「精度」や「誤差」に代わって「**不確かさ(Uncertainty)**」が用いられている。

岩盤計測に関するでは精度や誤差が一般的に用いられており、共通する解釈をまとめるため、多くのご意見をいただき、今後も議論を重ねたい。

(1) 先端の変形計測法

ここでは実際に適用されている先端の変形計測例を紹介する。

(a) 広範な領域（マクロ）の変形計測例

- ・ 「3Dレーザスキャニング」ではレーザー測距儀を用い、三次元的な計測と解析による精度向上を図っている。発信部と反射板間の距離変化を評価する「拡散レーザー変位計」も適用されている。
- ・ 「画像による変位計測」は岩盤壁面のターゲットをデジタルカメラ撮影し、画像の比較分析から変位を求める方法で、トンネル内空変位、岩盤斜面などに適用されている。
- ・ 「GPS法」は既存のGPSを用いた一評定機能を利用し、広範囲の岩盤斜面の監視などに適用されている。同じ方法論を用い、GPSの代わりに天候に左右されない衛星の合成開口レーダーセンサを用いて地表面変位を計測する「InSAR法」、電波を発信して限られた範囲の三次元変位を計測する方法もある。

(b) 局所領域（ミクロ）の変形計測

- ・ 「FGB光ファイバ変位」は金属プレートに貼り付けた光ファイバの反射光の波長からプレート変位を計測する方法で、岩盤亀裂開口変位などに適用されて

いる。

- ・ 「光ファイバゴムセンサ」は光ファイバを敷設した天然ゴム棒をボアホール内に埋設し、地山内の変形を埋設区間の軸ひずみ曲げひずみとして計測する方法であり、埋設の多点化と連続的監視ができる。

(c) IT技術の援用計測

- ・ 「センサネットワーク」はユビキタス（どこにでも存在する）な既存のITインフラを援用し、センサと小型無線機の組み合わせで簡単にネットワーク利用し、設置の手間、電源供給（自立電源）の利点を生かして、計測の飛躍的多角化を図る方法である。既存の計測と組み合わせが容易で、挙動が緩やかな計測に適している。

これら先端の変形計測技術を、岩盤構造物の問題やハザード要因と的確な計測方法との関係で交通整理し、その判断基準をマトリックス的に理解するための議論を継続する。

3. 物理探査

相澤隆生委員（サンコーコンサルタント株式会社）

(1) 物理探査の変遷

振動・電流・電磁波などを用いて、地盤の物理的性質または地中の様子を探知する技術である物理探査は、この20年間の間、電子機器、計算機や計算技術の発展に伴い変遷を遂げてきた。技術の進歩の一つは、弾性波探査、電気探査などの従来からの探査技術に新しい電子機器及び計算機の技術が適用されることにより、測定及び解析の方法が簡略化されると共に高精度化されることである。もう一つは、電磁探査や電磁波を用いた地中レーダ探査などの従来とは異なった媒体を用いた新しい調査手法が出現したことである。最後に、計算技術やデータ処理技術の高度化により地中の様子をより微細に高精度に分析することができるようになったことが挙げられ、トモグラフィ調査やトモグラフィ解析などがこれに相当する。このように物理探査の変遷の先端で、社会的ニーズや次世代の物理探査技術を見据えて、様々な取り組みが行われている。

(2) 物理探査の方向性と事例紹介

物理探査の方向性として、本委員会では、先端計測技術として①間隔の短い精密な調査、②時間をおいて差をとることにより状態変化を把握する調査、③複数の方法を組み合わせることにより性質を明らかにする調査に注目している。

物理探査を用いた、先端計測技術の調査事例について

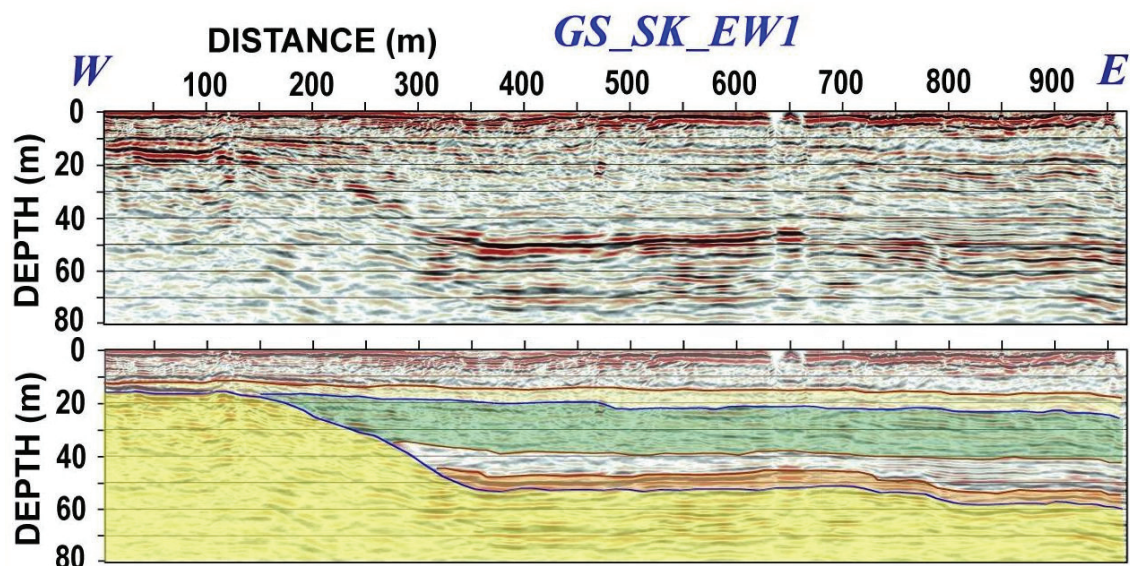


図-1 S波ランドストリーマを利用した高分解能反射法探査による浅層構造探査事例

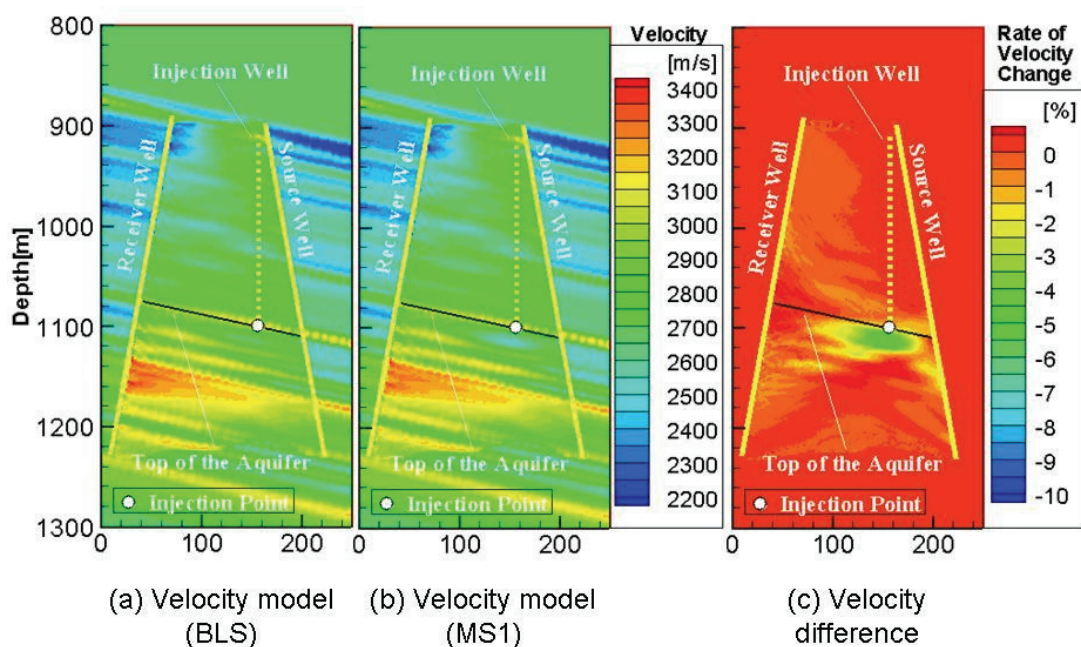


図-2 CO2圧入テストサイトにおける弾性波トモグラフィ事例

次に述べる。

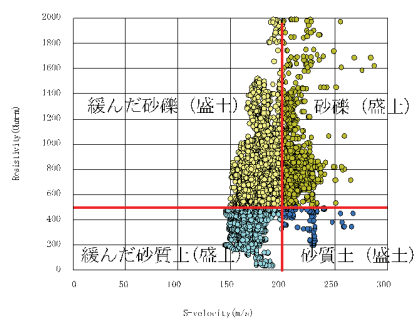
(a) 間隔の短い精密な調査

従来の（浅層反射法）地震探査では、センサー（受振器）間隔をこれまでの数mから1/10程度の数cmにすることにより、従来の反射法地震探査に比べて微細な地質構造を把握することが可能になった。図-1は、沖積層の内部構造および基底構造を高精度で把握することを目的として実施したS波ランドストリーマを利用した高分解能反射法探査の調査結果である。受振器を高密度に配置することにより、ここでは深さ10～50m程度までの沖積層の内部構造を詳細に読み取ることが可能となり、その結果沖積層の堆積課程の解明に役立っている。

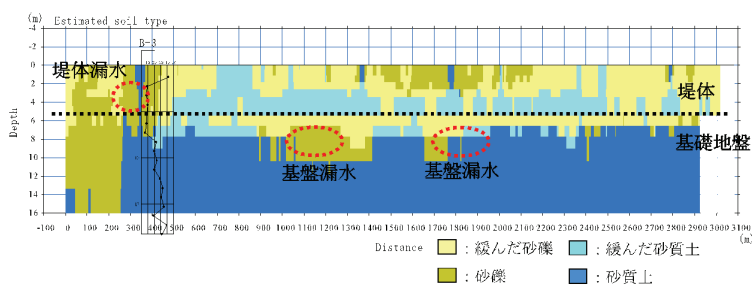
(b) 時間をおいて差をとることにより状態変化を把握する調査

時間をおいて地盤の物理的性質または地中の構造を求めることにより、または2つの探査結果の差をとることにより地盤状態の変化を把握することができるため、流体の移動や物性変化のモニタリングに用いることができる。事例（図-2）は、CO2の貯蔵実験サイトに於いて時間をおいて弾性波トモグラフィを実施したものであり、経過時間と共に地層内を移動するCO2の様子を弾性波速度の微小な変化によって捉えている。

(c) 複数の方法を組み合わせることにより性質を明らかにする調査



(a) クロスプロット



(b) 地盤区分

図-3 河川堤防で2次元比抵抗法探査と高密度表面波探査から地盤区分を行った事例

比抵抗と弾性波など、2つの異なる探査結果を組み合わせ、求めたい他の物性との間で相関をとることにより、求めたい物性分布を得ることができる。事例(図-3)は、河川堤防及びその基礎地盤に対して2次元比抵抗法探査と高密度表面波探査を実施し、探査結果の比抵抗とS波速度をクロスプロットすることにより地盤区分を行い、比抵抗断面及びS波速度断面から堤体内の漏水箇所や基礎地盤内の漏水箇所を求めたものである。

4. 岩盤斜面の管理におけるライフサイクルコスト評価へ向けた計測の現状と課題

江口貴弘委員 ((独)水資源機構)

(1) 概要

ダム建設等で発生する長大法面のライフサイクルコスト評価については、建設中における対策工の施工もさることながら、管理段階における斜面の管理が重要な課題となる。特に予算規模の小さい管理段階においては、斜面の安定性を確認するための観測態勢の合理化が避けられない現状がある。

ただし、観測態勢の合理化を実施するにあたり、その考え方については、各々の斜面の安定性の評価結果次第であることはもちろんであるが、各斜面における地形地質条件や計測状況(採用計器・計測精度等)の違いもあり、一律の考え方が存在していない状況である。

そのため、観測態勢の合理化の考え方を策定するにあたり、個々の斜面観測の事例を挙げることにより、合理化を実施するにあたっての条件整理と課題の抽出が必要となる。

本論では、あるダムにおける斜面管理の事例、特に観測態勢合理化の経緯を示すことで、斜面管理におけるライフサイクルコスト評価へ向けた計測の現状と課題について述べる。

(2) Tダム原石山

(a) 経緯

Tダムにおける原石採取を目的とし、112mの法高で計画。掘削はH13年5月～H16年7月に実施。観測はGPSと岩盤変位計(自動計測)孔内傾斜計(当初自動計測、後に手動計測)を実施。GPSと岩盤変位計はH17年2月まで実施。このときの観測データより挙動がほとんど確認されなかったため、以降は観測中止。孔内傾斜計はH17年2月まで自動観測を実施。H17年2月の評価の際に、深部に若干の変位の累積が確認されたためH19年3月まで手動観測を実施。H19年3月の評価時に深部の変位も収束が確認されたため以降観測を中止。

(b) ライフサイクルコスト

図-4に示すモデルを用いた。

(c) 不安定性の評価

観測計器による総合的な判断。挙動がほとんど見られないため管理基準値はなし。

(3) Tダムダムサイト左岸天端以上法面

(a) 経緯

Tダムにおけるダム堤体より上側の斜面。掘削はH11年5月～H11年12月に実施。当初の観測は光波測量(自動計測)を実施。

光波観測により挙動が確認されたため、H12年1月より孔内傾斜計、岩盤変位計、伸縮計(自動計測)による観測を実施し、H12年3月～H12年8月にアンカーによる対策工を実施し、現在は挙動が収束。

段階的(H16年4月、H19年4月)に斜面挙動の評価を行い、挙動収束を確認し、観測の合理化を段階的に実施。合理化の具体内容は、H16年4月：光波測量および伸縮計の中止、孔内傾斜計の削減(ただし、光波測量中止の理由は光波測量機器劣化に伴う誤差の増加が挙げられる。)とH19年4月：孔内傾斜計の削減である。

(b) ライフサイクルコストモデル

図-5に示す。

(c) 不安定性の評価

観測計器による評価、特に孔内傾斜計の傾斜角速度による評価を実施。

ケース1: 対策工未実施斜面(Tダム原石山)

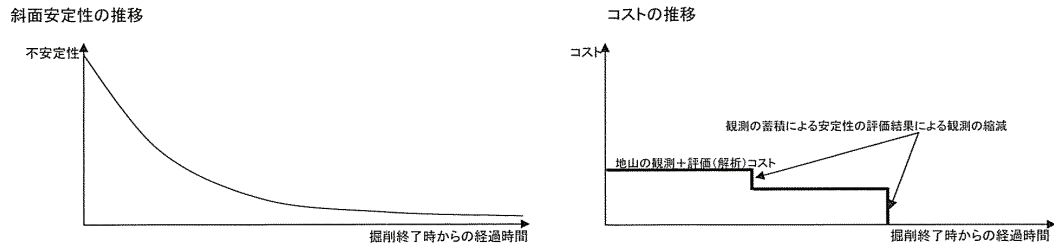


図-4 T ダム原石山でのライフサイクルモデル

ケース2-1: 対策工施工後安定に向かっているもの(Tダムサイト左岸天端以上)

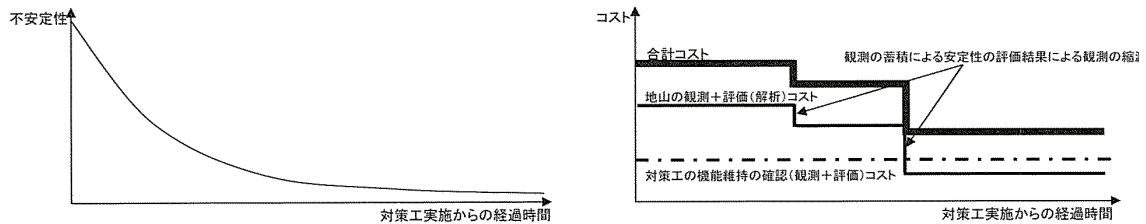


図-5 T ダムサイト左岸でのライフサイクルモデル

(4) 議論の材料

以下の点について議論を行いたい。

- ・ 不安定性の評価材料となる管理基準値の設定
- ・ 観測計器の耐用年数、誤差と管理基準値
- ・ 不安定性の評価方法として評点法や解析結果等に基づく定量的な方法が必要か？
- ・ 対策工の機能維持についての超長期的な評価法が不明
- ・ 管理段階においても追加の対策工等が必要なケースについて（コスト管理がさらに重要となるケースであるが、事例が不足）

5. 国土交通省近畿地方整備局尾取組み一道路法面の健全性評価一

山本 剛委員（国土交通省近畿地方整備局）

(1) 必要に迫られる道路法面健全性の評価

わが国の道路は高度経済成長に伴うモータリゼーションの進展に合わせて整備されてきたが、供用後35年を経過するものも多く、老朽化が進展している。しかし国の財政事情も悪化し、道路投資は大幅に減少している。さらに近年、時間雨量が増加するなど、異常気象が多発する傾向にあり、国民の安全・安心を確保する意味からも効率的、効果的な道路の的確な保全が求められている。

このような背景から近畿地方整備局では、道路法面・斜面を良好に保ち、災害を未然に防止するために、道路法面の健全性評価方法について「道路法面健全性評価検討委員会」を組織して検討を進めている。

委員会は、京都大学大学院工学研究科大西有三教授を委員長とし、学識委員、国交省職員の計11名とアドバイザー1名で構成している。委員会の下には、盛土検討部会、切土等検討部会、調査手法検討部会の3つの部会を設置しており、民間の建設コンサルタンツ協会部会員、物理探査学会部会員も参加している。

(2) 各部会の検討内容

盛土検討部会、切土等検討部会では、主に道路法面の健全性評価項目の整理・分析及び評価手法についての検討を行い、平成8年度防災点検データや毎年調査している防災カルテ及び防災ドクターでの成果などから、法面の健全性を評価するための着目箇所を抽出・整理している。また、法面は地下水の影響、地山の緩みなどによって時間経過とともに健全性が低下することを科学的に説明するモデルを作成し、解析を進めている。

調査手法検討部会は、法面の内部(目に見えない部分)の健全性を評価する手法の検討を行う。このため、非破壊による探査法に関して、広く一般から技術提案を募り、現地実証試験を行い、その結果について評価・検証を実施している。

(3) 探査技術の選定・評価方法

物理探査技術の評価のための現地実証試験の箇所として、近畿での多雨地域である和歌山県南部の国道42号の法面3箇所を選定した。

地点(1): 比較的急峻なコンクリート吹付切土法面。

地点(2): 比較的緩やかなコンクリート吹付切土法面。

地点(3): 過去に崩壊履歴があるコンクリート張盛土法面。

探查対象項目は、以下の3項目とした。

- ① 土質・地質の物性値
- ② 地層境界・空洞・不均一性の有無
- ③ 地下水位

現地実証試験を行う物理探查技術等の選定については、広く一般から技術を公募し、16社からの応募があった。現地実証試験参加企業の選定を実施し、応募16社全社が選定され現地実証試験を行った。現地実証試験は、前記の法面において、特定したポイントの探查を、各社がそれぞれの技術を使って調査し、調査結果を解析した(図-6)。

(4) 現地実証実験

現地実証試験を行った探查手法の種類は図-7に示す。

(5) 現地確認調査

現地確認調査は、実施された現地実証試験結果の確認と公正な評価を行うことを目的として実施した。

ボーリング調査

①土質・地質、②地層境界・不均一性の有無、③地下水位などを確認するために標準貫入試験を併用した調査ボーリングを行い、現地実証試験結果の確認・評価実施のための地質想定断面図を作成した。

孔内PS検層、電気検層

土質・地質の物性値を確認する目的で、調査後のボーリング孔を利用して実施した。ボーリング孔内に直接受信器や電極を設置することで、地層の弾性波速度や比抵抗値を測定した。

ボアホールカメラ観察

地層境界や層理面などの地質構造を確認する目的で、調査後のボーリング孔にボアホールカメラを挿入・撮影し解析を行った。

コア抜き調査

吹付け背面の空洞などの状況を確認する目的で、現地実証試験結果をもとに実施箇所を特定して吹付コンクリート背面の状況確認を行った。

(6) 先験情報がない場合の探查結果と評価

熱赤外線探查

法面は、日中には日射により温められ、夜間には外気によって冷やされる。地山の変状や湧水等による法面の表面温度の変化から背面の空洞や地下水を把握しようとする技術である。気温、撮影時間や法面の向きによる日射の関係により、確実な空洞発見がやや困難であった。

打音調査

測点毎に集音マイクで収録したハンマー打撃音をウェーブレット変換し、その波形の特徴を指数として表すことによって、空洞やコンクリートの老朽化を判定する技

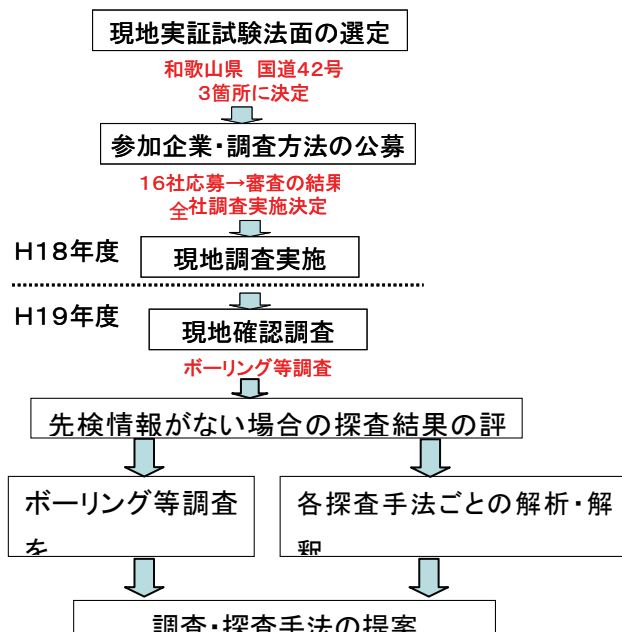


図-6 公募型現地調査のフロー

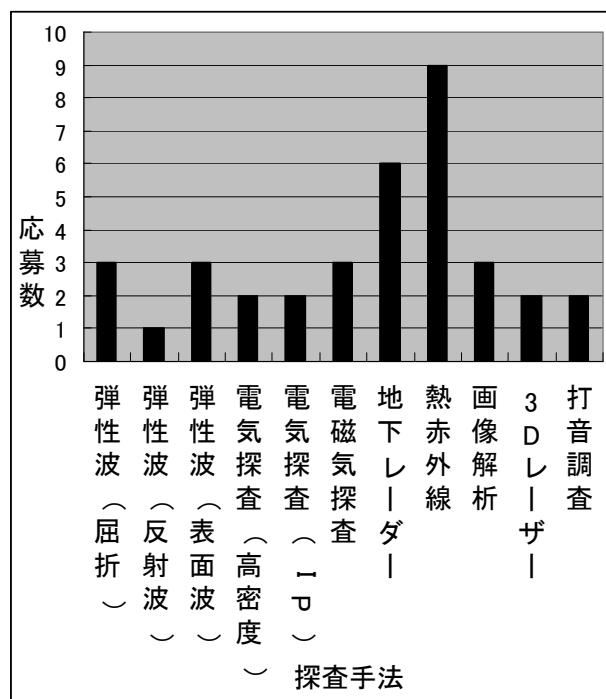


図-7 適用された物理探查

術である。コンクリート厚さの変化や背面の土砂化によって、波形の特定が困難であったため、確実な空洞発見がやや困難であった。

表面波探查

地盤を伝わる表面波(レイリー波)を測定・解析することにより、深度 20m 程度までの地盤の S 波構造を求める技術である。P 波速度よりも S 波速度がより地盤の強度評価に適している可能性があるが、傾斜面への起震機の設置が困難であった。

地中レーダ探查

アンテナから地中に向けて発射された電磁波が、電気

的性質の異なる物質の境界面で反射する特性を利用して地下構造を探索する技術である。反射面から地質構造が探索できたが、探索深度が浅かった。また鉄筋などのアース体があるとデータの取得が困難である。

電気探索

地盤に人工的に電流を通電したときの電位応答から、地盤の電気特性(比抵抗)を把握し、地盤構造や地下水を探索する技術である。見掛け比抵抗から地質構造が解析されたが、鉄筋などのアース体があるとデータの取得が困難であった。

電磁気探索

自然電磁場の変動や人工的に発生させた磁場を信号源とし、その磁場によって誘導される地電流の変化を測定して、地下の地質構造(比抵抗構造)を探索する技術である。比抵抗断面図から地質構造が解析されたが、比抵抗値と地盤の応力や変形に関する物性値との対応は不明瞭であった。

弾性波探索

土木地質調査で用いられる一般的手法で、地盤を弾性波速度によって速度層区分し、風化、変質、亀裂の過多について、数10mの深さを断面で評価する技術である。高価になるが屈折波法より反射法の方が比較的容易に地質構造が解釈できていた。

実施された現地実証試験は、表面部分に現れる状況の評価と深部の状況を探索する手法に大別される。

表面部分に現れる状況の評価する手法の代表的なものとして、熱赤外線探索が数社により行われている。熱赤

外線探索は、法面の表面温度の変化から背面の空洞や地下水を把握しようとするものである。同一メーカーの赤外線カメラであるにもかかわらず、撮影時間、撮影時の気温・気象等の条件の違いや解析・解釈方法の違いにより、診断結果は各社で異なる点も多く見られた。最適な撮影時間、気温等の諸条件や解釈技術の確立など、統一的な探索手法を検討する必要があると思われる結果であった。

深部の状況を探索する手法としては、弾性波探索、表面波探索、電気探索等が実施されている。解析された地質構造等には、探索対象に応じた探索手法の選定、鉄筋やガードレールなどの制約、斜面上の作業と解析手法などのノウハウなどにより、評価・解析結果に差違が見られた。

(7) 今後の予定

現在、現地調査結果を各社に示して、このデータを基に再解析を進めるとともに、探索手法ごとに、解析・解釈手法について、各社が集まり検討を進めているところである。先検情報が無い状態での物理探索手法だけの調査は、道路を管理する者としては不十分な結果に終わった。しかし、ボーリング等のデータは先検情報として、キャリブレーションに使用でき、ボーリングの点の調査と物理探索を組み合わせることにより、面的・立体的調査として活用できるものとして期待している。

今後、各手法のノウハウや適用性を検討・整理して、道路法面の健全性を把握するために適切な探索手法の選定を検討していくこととしている。