

先端技術を利用した岩盤計測の体系化と 実際への応用に関する研究小委員会

活動報告書

平成21年3月

土木学会岩盤力学委員会
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

まえがき

本研究小委員会は、岩盤力学委員会の1研究小委員会として、平成19年5月から立ち上がったものであり、委員は産官学から幅広く集まった。過去においては、岩盤力学の分野の一部には、岩盤計測が含まれているが、その大半は岩盤の変位挙動、もしくは岩盤内の応力挙動を計測することが主眼であった。この分野は現在でも重要であることに変わりがなく、未知な部分が多く残されていることも確かである。しかし、近年ではコンピュータの飛躍的な発展により、多くのデータを短時間で処理することが可能となっている。そのために従来ではできなかった膨大な計測データを用いた空間的計測、3次元さらには時間を考慮した4次元計測が可能となりつつある。またこれらに加えて、先端技術を応用した種々なセンサーが開発されており、これらのセンサー機器を岩盤計測に適用することが試みられている。あるいは精密な数値解析手法の発達によって、インプットデータの信頼性向上が求められているが、その高精度な計測手法などの開発が期待されている。

この小委員会では、このような背景から先端技術を利用した岩盤計測の体系化を試みるとともに、これらの計測手法を用いて、岩盤構造物のライフサイクルコストの評価へ適用できる可能性について検討したものである。具体的には変形計測の現状と先端技術応用による変形計測、変形計測を用いた岩盤構造物のライフサイクルコストの評価法、特に既設ダムを対象とした変形計測を実施し、その計測結果を用いてダムのライフサイクルコストの評価法について検討した。更には現状の物理探査技術と新しい物理探査技術、物理探査法を用いた岩盤構造物のライフサイクルコストの評価法、特に老朽化した道路の法面の健全性評価法として物理探査を用いた手法の可能性について検討した。

これらは、今までの岩盤計測分野では扱っていなかった内容であり、近年のインフラ基盤構造物が直面している維持管理手法に関して、既設岩盤構造物に対しても例外ではなく、多くの問題を有しているが、その手法について言及したことは大きな意義があるものと思われる。また今後の発展が期待される新しい室内岩石、岩盤計測技術に関しても検討しており、本研究小委員会の成果は大変充実したものとなっている。

委員会活動の詳細は第1章に記されているが、平成20年1月に土木学会本部で開催された第37回岩盤力学に関するシンポジウムでは、パネルディスカッション「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」が本小委員会で主催し、委員会の成果ならびに検討結果を報告するとともに、活発なディスカッションがなされ、多くの貴重な意見を頂き、その後の委員会活動にも反映することができた。

以上、本委員会で得られた成果は今後さらに各機関で検討が加えられ、進化していくものと思われるが、種々な岩盤計測法が適切な維持管理手法を確立するとともに、新しく建設される岩盤構造物に対して、事前調査として適用され、安全で合理的な施工が遂行されることに繋がることにも期待される。

最後に、本研究委員会において、多くの方々から大変貴重かつ有益な話題をご提供頂き、一部は本報告書にも利用させて頂きました。感謝申し上げます。また本小委員会岸田潔幹事長、中島慎一郎幹事、相澤隆生幹事はじめ委員の方々には公務ご多忙中にも関わらず、絶大なるご尽力を頂き誠に有り難うございました。

本研究成果が、今後の岩盤力学の発展に寄与できることを祈念申し上げます。

平成21年3月

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
委員長 楠見晴重

委 員 名 簿

委員長	楠見 晴重	関西大学
幹事長	岸田 潔	京都大学
委員	芥川 真一	神戸大学
委員	井上 宏	明治コンサルタント(株)
委員	江口 貴弘	(独)水資源機構
委員	大友 譲	(株)ニュージェック
委員	尾西 恭亮	京都大学
委員	小杉 昌幸	(独)産業技術総合研究所
委員	真田 佳典	(独)海洋研究開発機構
委員	高橋 亨	技術士事務所 ジェー・ジ・オフィスカ
委員	田中 莊一	(財)深田地質研究所
委員	塚本 耕治	(株)奥村組
委員	中岡 健一	(株)大林組
委員	名見耶 薫	鹿島建設(株)
委員	島山 秀喜	応用地質(株)
委員	八野 祐二	基礎地盤コンサルタント(株)
委員	細野 高康	(株)ダイヤコンサルタント
委員	松島 潤	東京大学
委員	安原 英明	愛媛大学
委員	山本 剛	国土交通省 近畿地方整備局
委員	結城 則行	川崎地質(株)
委員兼幹事	相澤 隆生	サンコーコンサルタント(株)
委員兼幹事	中島 伸一郎	京都大学(元(独)土木研究所)
元委員	菅 智浩	(元)基礎地盤コンサルタント(株)
元委員	寺田 道直	(元)(株)奥村組

目 次

1. はじめに	1
1.1 岩盤計測で求められるもの	1
1.2 活動記録	1
1.3 本報告書の構成	1
2. 変形計測の現状	4
2.1 変形計測の役割	4
2.2 計測精度の定義	4
2.3 先端の変形計測法	4
2.4 計測事例紹介	10
参考文献	19
3. 岩盤応力測定の実例紹介	20
3.1 岩盤応力測定について	20
3.2 AE法を用いた計測事例	20
3.3 大深度地殻応力計測を目的としたBABHY式水圧破砕法	22
参考文献	24
4. 物理探査の方向性と実例紹介	26
4.1 物理探査の変遷	26
4.2 物理探査の方向性とその実例紹介	27
参考文献	32
5. 変形計測による岩盤構造物のライフサイクルコスト評価の現状と課題	34
5.1 岩盤斜面におけるライフサイクルコストの評価	34
5.2 ダム基礎岩盤の長期計測	42
参考文献	43
6. 物理探査による岩盤構造物の健全性評価の取り組み	44
6.1 必要に迫られる道路法面健全性の評価	44
6.2 物理探査技術を使った法面調査実証実験	45
6.3 各物理探査手法の概要と結果	46
6.4 法面の健全性評価の適応性	54
6.5 今後の課題	55
参考文献	56
7. 室内での岩石・岩盤計測	57
7.1 概要	57
7.2 X線CT	57
7.3 岩石の化学分析	65
7.4 最新の多機能岩石物性能総合試験装置	71
参考文献	76
8. まとめ	80

1. はじめに

1.1 岩盤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。いかに先端でも、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ないと考える。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。その上で、実際に用いられている岩盤計測技術についての検討を行った。実際の計測に必要な要件は、「確からしさ」「計測範囲」「時間的キャパレージ」「経済性」である。これらの要件が十分に満たされることにより、最先端の計測がなされているといえる。

また、時代とともに社会のパラダイムが変革してきている。従来は、土木構造物・岩盤構造物を造るための計測が求められてきた。「造る」ことが主眼に置かれた20世紀と異なり、21世紀では、既にあるものを以下に保生・再生するかが、一つの課題となっている。構造物がある性能を担保した範囲内で、何らかの手を加えることで、保生していくことが求められている。ただし、どのタイミングでどのような手を加えるのかは、非常に難しい議論である。これらの判断基準として、継続的な計測（時間的なキャパレージを有する計測）が有効であると考え。本委員会でも、長期にわたり計測されているじれ大地で情報収集を行い、検討を重ねたが、計測技術や事例はあるものの、構造物の保生に対する判断を行った事例が乏しいのが現状である。本報告では、第4章や第5章に維持管理に関する変位計測・物理探査計測の事例を示している。「どのように判断するのか」は、今後の課題であり、本書がその議論の出発点となると期待している。

1.2 活動記録

本委員会の活動期間は、平成18年度から平成20年度までの3年間である。活動の内容を表1.1～1.3に記載する。

1.3 本報告書の構成

本報告書は、3年間に渡る委員会の成果をまとめたものである。

第2章では、計測そのものの精度や分解能に関する議論を取りまとめるとともに、岩盤工学分野で用いられている主として現時点で最新の変形計測についての紹介を行った。第3章では、物理探査による岩盤計測の現状と将来について述べたものである。特に、空間的なキャパレージや時間的にキャパレージについて言及し、土木・岩盤分野への物理探査技術の適用について述べている。第4章は、変位計測による岩盤構造物の維持管理に関する事例を紹介を行っている。同様に、第5章では物理探査手法による斜面・岩盤構造物の維持管理に関する事例紹介を行っている。岩盤構造物や斜面等の社会基盤インフラの維持管理は、大量生産・大量消費の20世紀型社会から

再生・保生を考慮に入れたローエミッションを目指す21世紀型社会には不可欠な要件であり、いかに効率的・経済的に維持管理を行うかは、21世紀型社会を目指すうえで重要な課題である。第6章に岩盤工学における室内試験での最新の計測動向を記述している。また、第7章で初期応力の計測法についてとりあげている。

事例紹介に関しては、実際に用いられていて先端と思われるものを計測事例と共に取り上げた。

表1.1 平成18年度の活動内容

回数	日時場所	内容
1	平成18年6月12日（月） 14:00～17:00 土木学会会議室	委員の紹介 話題提供：断層直接監視技術とメカニズム研究 平成18年度活動計画について データシートについて
2	平成19年9月11日（月） 14:30～17:00 土木学会会議室	話題提供：ロックフィジックスを用いた物理探査結果の解釈 計測技術情報アンケート調査結果について
3	平成19年10月15日（月） 15:00～17:30 土木学会会議室	話題提供：センサーネットワークの概要と要望 計測技術情報アンケート調査結果について シンポジウムポスター案について
4	平成19年1月29日（月） 15:00～17:30 土木学会会議室	話題提供：地震探査による岩盤の水理特性評価 精度と分解能について シンポジウムポスターセッション報告及び運営小委員会報告

表1.2 平成19年度の活動内容

回数	日時場所	内容
1	平成19年4月13日（金） 15:00～18:00 京都大学百周年時計台記念館 会議室	話題提供：温故知新：嘗ての先端岩盤計測技術の一例 —泥質岩石・岩盤のクリープ特性把握方法について— シンポジウムパネルディスカッション企画案について 報告書の取りまとめについて
2	平成19年7月27日（金） 15:00～18:00 土木学会会議室	話題提供：掘削斜面における計測事例 シンポジウムパネルディスカッションについて 報告書の取りまとめについて
3	平成19年10月15日（月） 15:00～18:00 土木学会会議室	話題提供：自動車用センサーを用いた岩盤計測 話題提供：斜面計測に関する近畿地方整備局の取り組み について パネルディスカッションについて（原稿執筆など）
4	平成19年12月17日（月） 15:00～18:00 土木学会会議室	話題提供：デジタル写真測量の現場への適用について パネルディスカッションについて シンポジウム掲載ポスターについて
パネルディスカッション		第37回岩盤力学シンポジウムにおいて 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
5	平成20年3月14日（金） 10:00～13:00 土木学会会議室	話題提供：磁歪法による鋼構造物の非破壊応力測定 話題提供：光る変位計による構造物の変状把握と結果の 原位置表示 報告書の取りまとめについて

表1.3 平成20年度の活動内容

回数	日時場所	内容
1	平成20年6月6日（金） 13:00～17:00 国土交通省近畿地方整備局福 知山河川国道事務所	現場見学会 報告書の作成について
2	平成20年9月11日（木） 15:00～17:00 東北大学流体科学研究所COE 棟3階セミナー室	話題提供：大深度（km 級）を対象とした現位置地殻応力 評価法の課題と解決策 報告書の作成について
3	平成20年12月9日（火） 15:00～18:00 スクワール麴町	報告書の作成について 今後について

2. 変形計測の現状

2.1 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。

2.2 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、先ず計測自体に「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。

2.3 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。委員会で収集した情報は、表2.1～2.5のような形式でまとめた。

表2.1 先端技術を利用した岩盤計測手法(変形 GPS, 衛星)

提供者	菅	安原	松島, 安原, 真田
分類	3次元計測	3次元計測	3次元計測
名称	GPS計測	電波を利用した岩盤モニタリング	(PS)InSAR
概要	計測変数	地表面変位	地表面変位
	計測対象	岩盤斜面	岩盤斜面
	対象岩種	制約なし	制約なし
	計測位置	地表面	地表面
	実施時期	随時	随時
	詳細	GPSを用いて岩盤斜面の挙動を計測する技術。計測結果は、3次元の絶対座標として出力され、変位量でグラフ表示するほか、地形図等に落として表示させることも可能。	GPSと同じ原理を利用するものである。GPSは人工衛星から発信された電波を受信する地上のセンサの位置を知ることによって、当該受信局の3次元位置を検知するものであるが、提案手法は岩盤斜面に設置した発信局の電波を受信局で検知し、発信局の位置を計測するもの。
仕様	測定精度	$(5-10\text{mm})+(0.5-2\text{ppm}) \times \text{基線長}$	数mm
	分解能	波長の1/100程度(2mm程度)	発信局間隔(計測分解能)
	測定範囲	~10km	発信, 受信装置数・密度に依存
	測定時間	0.5-2時間	
	備考	測定方法:スタティック測位 使用受信機:1波形式 2台	
特徴	長所	測定点同士の視通は必要なく、基線長10km程度までは、計測可能。自動データ取得・連続測定が可能で、悪天候下でも対応可能。	発信・受信装置の小型化が可能。受信機を3次元に設置すれば、3次元計測も可能。
	短所	上空が開けていることが絶対条件。測定点及び基準点(既知点)にGPS受信機の設置が必要となる。また計測方法により測定時間、精度等が異なる。	データの評価手法(フィルター処理等)の確立が必要
費用			衛星画像購入およびデータ解析 500万円(推定)
実績・実用可能性	適用実績あり	検証実験のみ	実用化技術
備考(特筆点等)			参考: TRE, http://www.treuropa.com/

表2.2 先端技術を利用した岩盤計測手法(変形レーザースキャニング)

提供者	安原	中島	中島	中島	
分類	3次元計測	3次元計測	3次元計測	3次元計測	
名称	3Dレーザースキャニング	3Dレーザースキャナーによる地形計測システム(CB-050034)	3Dレーザースキャニングによる斜面調査システム(HK-040012)	画像・レーザ制御による自動測量システム(KT-010152)	
概要	計測変数	3D形状, 地表面変位	3D形状, 地表面変位	3D形状, 地表面変位	
	計測対象	岩盤斜面, トンネル内壁	斜面	斜面	
	対象岩種	制約なし	制約なし	制約なし	
	計測位置	地表面	地表面	地表面	
	実施時期	随時	随時	随時	
詳細	反射鏡不要のレーザ測距儀を使用し, 対象物の3次元形状を高速・高密度・高精度に計測する技術。計測データは, 3次元座標を持つ点群データとして取り扱われ, 平面図・断面図の作成, 面積・体積計算が可能。	1箇所から半径800mもの地形データをパソコンに取り込む事が可能な3次元のスキャナーです。 ・離れた場所から地形そのものをパソコン内に取り込む事が可能 ・距離800m・1秒間に8000点水平360度、上下40度の範囲で座標の取得が可能		本システムは、出来形測量や動態観測を迅速かつ無人で行うことを目標として開発を行った。CCDカメラを用いた画像処理技術と、ノンプリズム・レーザを用いたレーザ誘導技術を組み合わせ、コンピュータで制御することにより自動計測を実現した。	
仕様	測定精度	±4mm(距離)	±10mm		
	分解能	6mm(最小ビーム径)	0.1m(計測分解能)		
	測定範囲	1.5-150m	2-800m		
	測定時間	1000点/秒	8000点/秒		
備考	座標精度: ±6mm 角度精度: ±12秒 測定間隔: 最小0.25mm 測定視野: 360×270° 反射ターゲット: 不要	測定視野: 360×80°		測定距離500mまでの範囲は計測できる。1点あたり1秒で計測できる。	
特徴	長所	複雑な形状や危険な箇所でも計測可能。3次元形状を高速・高密度・高精度にスキャン可能。平・断面図の作成, 面積や体積の計算が可能	従来の測量では見る事の出来なかった形状変位が測定可能。地形その物をデジタル化する事で、設計変更に伴う地形の再測の必要無し。崖や法面崩落等、緊急時の現況が速やかに把握できる。	複雑な形状や危険な箇所に立ち入ることなく安全に計測可能。繰り返し観測データの比較による変位算出が可能。短時間に広範囲の計測でコスト縮減。表面積や体積(土工量等)の算出が可能。	直接見通すことができ、測定距離500mまでの範囲は計測できる。また、昼夜の別なく、連続計測が可能である。
	短所	変位計測には、不動標定点が3点必要。植生の濃い場所、降雨・降雪時の測定不可。分解能を高くするほど、データ処理速度の低下につながる。	構造物のモデリングソフトウェアが不十分	大雨、霧、雪等の気象条件によって測定が出来ない	計測を遠隔地から行う場合は、機械には、雨、風から防ぐための小屋の中に収める必要がある。
費用	測定 45万円; データ処理・解析 60万円(注1)	1日1~6箇所からのスキャニング+解析+横断面図=40万円	5,000m ² (100*50m) 当たり 約440,000円(直工)		
実績・実用可能性	適用実績あり	適用実績あり	適用実績あり	適用実績あり	
備考(特筆点等)	参考: (株)開発調査研究所, RapidFormTM 注) 斜面長50m×斜面延長100m程度急崖斜面測定時				

表2.3 先端技術を利用した岩盤計測手法（変形 画像処理）

提供者	中岡	名見耶	井上	
分類	変位計測	3次元計測	3次元計測	
名称	デジタル画像変位計測システム	デジタル写真測量	写真測量(案)	
概要	計測変数	トンネル内空変位	地表面変位	地表面形状
	計測対象	岩盤壁面	岩盤斜面、トンネル内壁	岩盤斜面、崩壊地、溪床等
	対象岩種	制約なし	制約なし	制約なし
	計測位置	地下空洞内	地表面	制約なし
	実施時期	随時	随時	随時
	詳細	デジタルカメラで空洞壁面に取り付けられた複数のターゲットを撮影し、その画像からターゲット間の距離を求める。何度か計測を行い、得られたターゲット間の距離から、内空変位を求める。	計測箇所に設置した反射ターゲットを、高解像度デジタルカメラで様々な位置からストロボ撮影する。得られた複数枚の画像上のターゲット位置をもとに収束計算を行い、各ターゲットの三次元位置を高精度に算出する。	デジタルカメラにより撮影した画像データを使用し、対象物の3次元地形形状を計測する技術。取得データは、3次元座標を持つ点群データとして取り扱われ、平面図・断面図の作成、面積・体積計算が可能。
仕様	測定精度	0.5mm程度	±1mm / 撮影距離 数十m	0.02～0.03%(対象サイズによる)
	分解能	ターゲット間隔(計測分解能)	ターゲット間隔(計測分解能)	0.008mm(装置分解能)
	測定範囲	数m - 20m程度	制約なし	
	測定時間	20分程度(評価含む)	現地観測10分程度、解析数時間	
	備考	ターゲットは壁面からはっきり区別できるものであれば可。画像処理によって色調調整後、RGB輝度値からターゲット形状を認識し、重心点を算出する。	精度は、撮影距離の1/10000～1/50000 必要機材: デジタルカメラ、パソコン 反射ターゲット: 5～50mm	必要画像データ: 対象物を重複撮影した複数の写真 取得データ: 3次元座標、座標付けされた既知点(ターゲット等)により公共測量座標の取得が可能。
特徴	長所	必要な器具はカメラだけで、メモの必要がなく、作業が簡単。そのため、従来の計測方法に比べて短時間で済む。また、壁面に設置するターゲットは専用のもではなく、設置が簡易である。	一度ターゲットを設置すれば現場作業は写真撮影のみ ・市販のデジタルカメラを利用するため特殊技能は必要なく、簡易に短時間に計測が可能。 ・測点数が増えても現場作業時間は増えない。	・複雑な形状、危険箇所の計測が可能。 ・データの取得がカメラによる撮影なので容易。 ・画像データから任意に計測点の設定が可能。 ・撮影条件が分かれば、既存写真等からのデータ取得も可能。
	短所	カメラを据え置きする場合は、例えば、2点のレーザーポイントのような、長さの基準となるものを画像内に入れる必要がある。	・変位計測には、不動標定点が3点必要。 ・ターゲットの設置に手間がかかる。	・計測対象、撮影条件(天候/植生)、撮影機材により測量精度が異なる。 ・所定の精度の確保にはターゲットの設置、計測等の作業が必要。
費用	150万円(一式)	ターゲット設置30万円: 撮影・解析20万円 / 1回(注1)		
実績・実用可能性	適用実績あり	適用実績あり	適用実績あり	
備考(特筆点等)	トンネル現場に適用し、一定の成果を挙げている。	(注1)ターゲット100個程度で計測する場合の費用	主に、土量管理に利用	

表2.4 先端技術を利用した岩盤計測手法(変形 変位計, 傾斜計, 加速度計)

提供者	中岡	安原, 真田	寺田	結城, 真田	
分類	変位計測	変位計測	3次元計測	岩盤モニタリング	
名称	FGB光ファイバ変位計測計	光ファイバゴムセンサ (B-OTDR方式)	複合AE計測システム	崩壊斜面リアルモニタリングシステム	
概要	計測変数	変位計測	地山内ひずみ	振動速度および加速度	落石振動
	計測対象	岩盤亀裂開口変位など	岩盤斜面, トンネル内壁等	岩盤(固体)	岩盤斜面
	対象岩種	制約なし	制約なし	制約なし	制約なし
	計測位置	地下空洞内	岩盤内	表面および孔内	岩盤表面
	実施時期	随時	随時	随時	リアルタイム
詳細	光ファイバに加工されたFGBに照射し, 反射光の波長を測ることによりFGBの長さの変化を求める. FGBは回折格子を加工したものであり, その長さが変化すると, 反射光の波長も変化する.	光ファイバを敷設した弾性体(天然ゴム棒)を地山に埋設することで地山と弾性体を一体化させ, 地山に追従して変形する弾性体の連続したひずみを計測するものである.	周波数帯域102~104Hz(通常AE: 加速度)と10~103Hz(低周波AE: 振動速度)の2つのAE計測方法を組合せ, 特定亀裂と斜面全体の挙動を複合的に監視するシステム. 微小破壊の3次元位置標定が可能.	落石振動を小型地震計で捉え, 記録した波形を処理して得られるパラメータから, 大規模崩壊を事前に予測する.	
仕様	測定精度	±0.5%程度	cm単位	ノイズレベルで異なる	最大80dB
	分解能	0.01mm	-	0.0025cm/sおよび0.1cm/s ²	落下物重量と距離, 雑音
	測定範囲		基本長4m×本数	数m~数十m	1mkine~100mkine
	測定時間	リアルタイム	随時	リアルタイム	16秒
備考	折り曲げた金属プレートに光ファイバを貼り付け, 変位計としている. その両端に相対変位が生じると金属プレートが変形し, 光ファイバの長さが変化し, 変位量を算出する.	トンネル施工時の地盤変位, 山岳トンネルにおける切羽近傍法線方向の変位やインバート部の変位, 斜面や堤体, 護岸等の長期モニタリング, 構造物の変位, など幅広い適用	携帯電話とデータ通信システムを利用した遠隔監視システムを構築し, AE発生数・ディスク空き容量などを随時および毎日定時に取得.	測定成分最大16ch フィルター部: 0.1~1kHz	
特徴	長所	耐食性, 防爆性に優れ, 電気ノイズがないため, 落雷被害を受けない. 取扱いがシンプルである. また, 信号を長距離伝送できるので, 遠隔測定が可能である.	地山とセンサを一体化させ, 地山変位(軸・曲げひずみ)を広域かつ連続的に計測可能.	微小エネルギーの解放に伴う弾性波動を計測対象とするため, 岩盤の力学的挙動に関して時間分解能(10-3~10-6秒)や空間分解能(10-1~10-3cm)が高い情報が得られる.	斜面の傾斜に関係なく設置可能, リアルタイムで計測出来る. また, インターネットを利用して発注者などの社外関係者に対しても情報の発信が可能である.
	短所	ケーブルの接続に技術が必要である.	mm単位の精度で対応することが出来ない. 精度の向上が必要.	岩盤は不均質で異方向性が強いいため, 計測対象によってセンサーの選定や観測点の配置などが大きく影響を受ける. 静的計測に比して高価である.	落石や斜面崩落と高い相関性のある降雨データ(アメダス)とリンクしていない.
費用				装置+センサー(16ch)600万円 (設置費 上記費用×1.0程度)	
実績・実用可能性		開発中	適用実績あり	適用実績あり	
備考(特筆点等)			国道229号雷電トンネル終点斜面, 刀掛覆道斜面の崩壊モニタリングに適用(北海道開発局開発土木研究所(当時)・(株)奥村組・川崎地質(株)・(株)間組の共同研究)		

表2.5 先端技術を利用した岩盤計測手法(変形 変位計, 傾斜

提供者	井上	井上	松島	
分類	変位計測	変位計測	傾斜計測	
名称	拡散レーザー変位計	三次元ジョイント変位計	高精度傾斜計	
概要	計測変数	地表面変位	地中の不連続面の変位	傾斜角度
	計測対象	崩壊地、岩盤斜面、トンネル内壁	岩盤斜面	岩盤斜面
	対象岩種	制約なし	中硬岩以上が望ましい	制約なし
	計測位置	地表面	開口幅10cmまでの不連続面	抗井内
	実施時期	随時	-	随時
詳細	人体への影響を少なくし、雨・雪・汚れ等の影響を受けにくくするために、大きなスポット光のレーザービームを用いた変位計で、対象物の変位を遠距離から高速・高精度に計測する技術。計測データは、レーザー発振部と反射板の距離データが取得され、一定方向にスライドする変位計測が可能。	ボーリング孔内の不連続面をまたぐように設置し、不連続面の三次元的な挙動を監視する。	傾斜変化による気泡の移動により生じた電極間電位変化を傾斜に変換。	
仕様	測定精度	1mm以内(人工気象室内実験結果)	> 0.002mm	設置状態による
	分解能	0.1mm	0.002mm	1nrad
	測定範囲	2m ~ 100m	0 ~ 5mm(軸方向のみ6mm)	鉛直から±8度
	測定時間	1秒未満/回	-	数秒~数分
	備考	レーザー出力:1mW以下 レーザー規格(JIS規格):クラス2 ビーム径: 50mm程度 計測間隔:1秒~12時間(任意) 反射板:30cm×30cm程度	外径58mm, 全長425mmであり、スベーター装着により、ボーリング口径 66~86mmに対応。	深部設置が望ましい。通常10数m以深に設置。
特徴	長所	1)設置や移設が容易。本体と反射板の簡単な構成で、投光方向と反射板の移動で位置を変更。2)設置場所を選ばない。道路や谷間を横断する位置、上下方向に離れた場所も設置可能。3)拡張性が高い。複数台を用いた多点計測への拡張	地中の不連続面の変位を直接、高い精度で監視可能。 危険度予測に用いる場合、監視対象ブロックの形状がある程度の精度で捉えられていることが必要。	傾斜角の検出精度は高く、岩盤変位の高精度観測が可能。
	短所	1)反射板が必要 ・反射効率が高いシートを貼った反射板が必要で、レーザー発振方向に対して垂直方向に設置。 2)厳しい気象条件下での不安定化 ・濃霧や陽炎・層気楼などの条件	測定範囲が小さいため、大きな変位の計測には不向き。	設置ミスにより簡単にノイズが増す。設置位置の設計も難しい。
費用			設置およびデータ解析 一千万以上	
実績・実用可能性	適用実績なし	適用実績あり	実用化技術	
備考(特筆点等)	・試作機による検証中。 ・伸縮計などの接触式計測と同程度の性能と価格を目指して改良中。	施工中の危険岩塊挙動監視に使用	参考:Pinnacle	

(1) 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。

(2) 局所領域（マイクロ）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。

(3) 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易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。

2.4 計測事例紹介

ここでは、実際に用いられている先端計測事例について紹介を行う。

2.4.1 画像解析を用いたトンネル内空変位計測技術

(1) 技術の概要

トンネル壁面のデジタル画像に歪曲収差および光軸補正を施すことで、高精度に壁面変位を計測する技術である。

(2) システムの概要

トンネル壁面に設置した複数のターゲットを撮影し、その画像からターゲット間の距離を求める。計測を漸次行なうことで、トンネル内空変位が得られる。ターゲット位置を識別するため、画像処理によって色調調整後、RGB輝度値からターゲット形状を認識し、重心点を求める。

(3) 歪曲収差補正および光軸補正

被写体画像には図2.1に示すような樽型あるいは糸巻型のひずみが発生することが知られている。本技術は、図2.2に示すようなアルゴリズムにより、このひずみを補正する。また、レンズ光軸と撮像素子(CCD, CMOS)中心との偏差を補正することで、計測精度は撮影画角の0.004%を確保している(例えば、幅12mのトンネルを1枚の画像で計測した場合、精度は0.5mm程度)。

(4) 適用事例

- ・ トンネル：照度が低いトンネルで適用するために計測ターゲットとして、図2.3に示すような赤色LEDを用いる。現場適用のイメージを図2.4に示す。
- ・ 模型実験での変位計測：亀裂性岩盤に掘削される空洞の模型における変位計測への適用例を示す。模型および計測結果を図2.5に示す。空洞内に設置した接触式変位計による結果と、画像解析による結果とよく一致している。

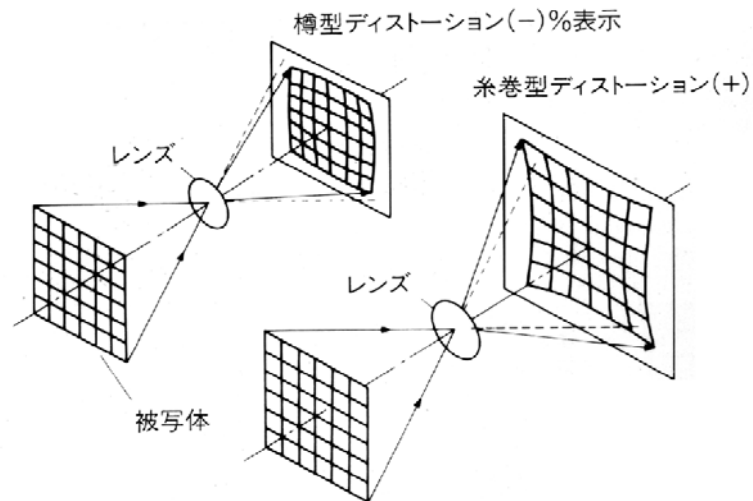


図2.1 歪曲収差のイメージ

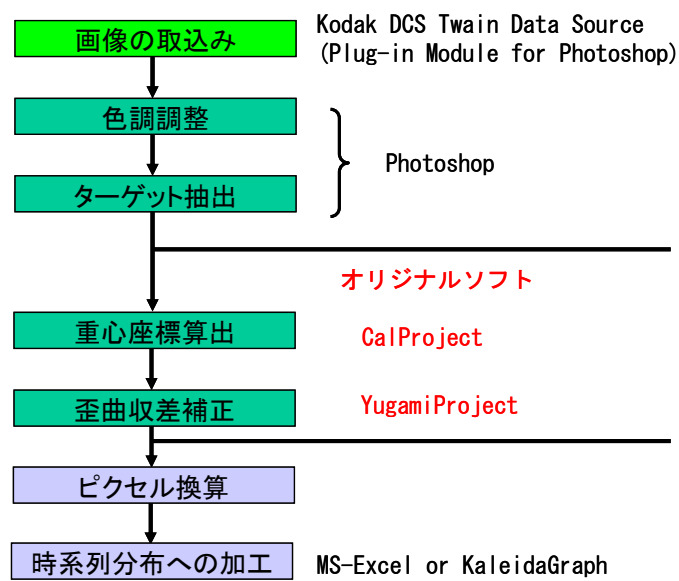


図2.2 歪補正解析のアルゴリズム



図2.3 トンネル計測専用ターゲット

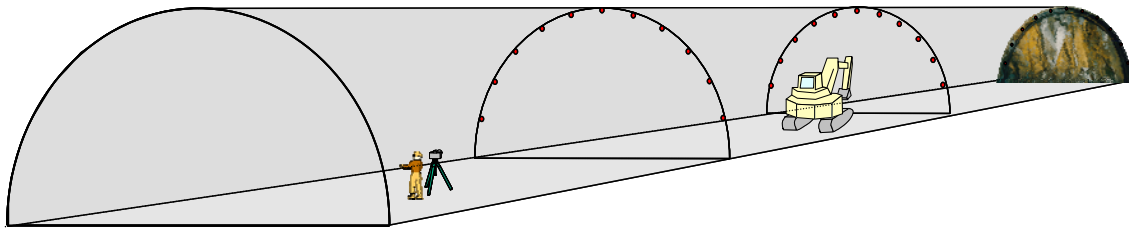


図2.4 現場適用のイメージ

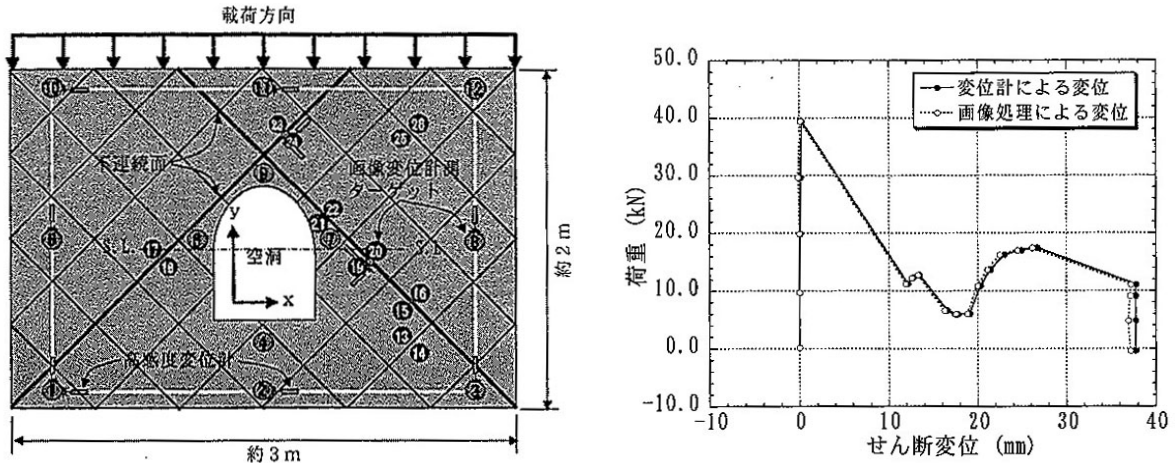


図2.5 模型実験(左)および実験の計測結果の比較(右)

2.4.2 デジタルカメラによるトンネル内空変位計測技術^{1),2)}

(1) 技術の概要

計測作業は、必要な計測点に設置したターゲットを、様々な位置や方向からデジタルカメラで撮影するだけです。これによって、誰でも簡単に高精度な計測が可能であり、今まで困難であったトンネル壁面の全体的な挙動も容易に把握することができます。さらに、非接触の計測方法ですので安全かつ迅速な作業で、計測作業の省力化を実現します。

(2) システムの概要

作業の流れを図2.6に、撮影状況を写真2.1に示す。

(3) 計測事例と特徴

計測事例を図2.7に示す。特徴としては、

- ・ 非接触で短時間に高精度な3次元計測が可能である（精度1mm程度以下）。
- ・ ターゲットを数多く設置することによってトンネル壁面全体の3次元形状が計測可能である。（図2.8、計測時間に影響なし）。
- ・ システムのキャリブレーションやカメラのピント合わせなど複雑な操作は一切不要である。
- ・ 解析は全てデジタルデータを自動処理するため、人為誤差なくスピーディです。

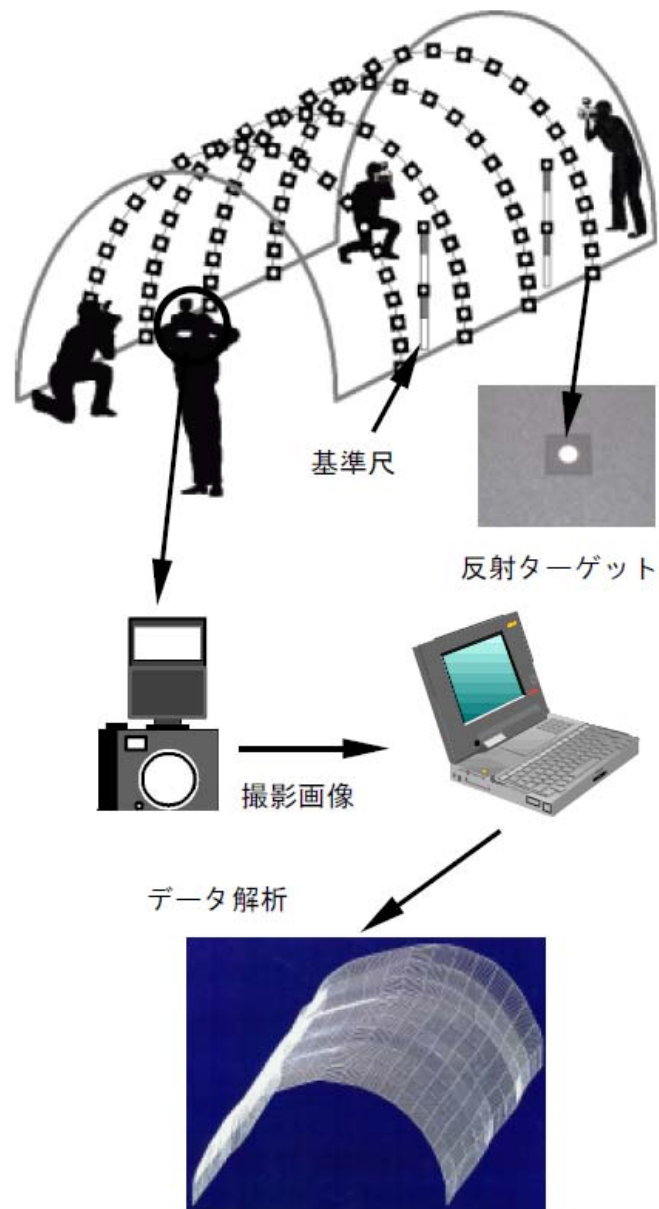


図2.6 デジタルカメラによるトンネル内空変位計測技術の作業の流れ



写真2.1 デジタルカメラによるトンネル内空変位計測の撮影状況

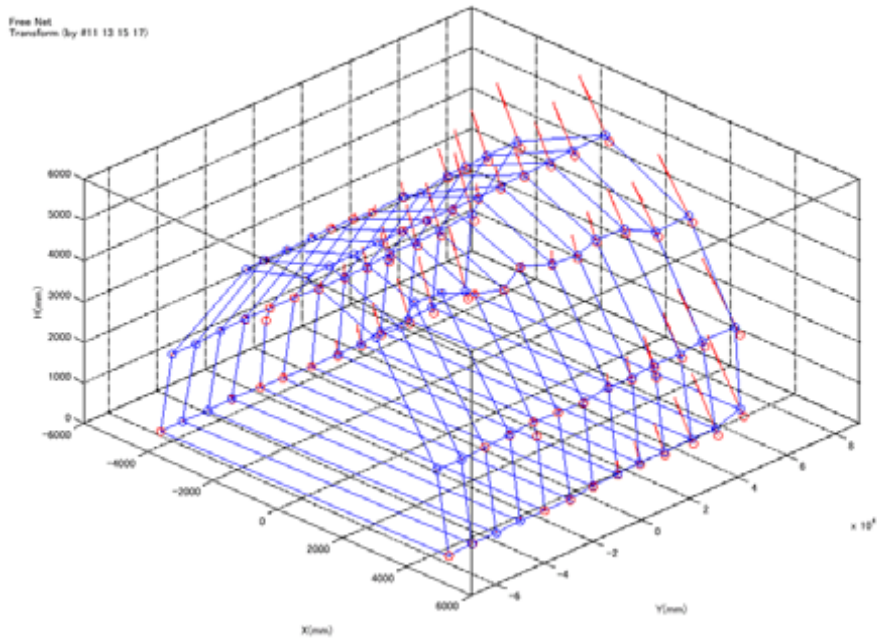


図2.7 内空変位計測事例

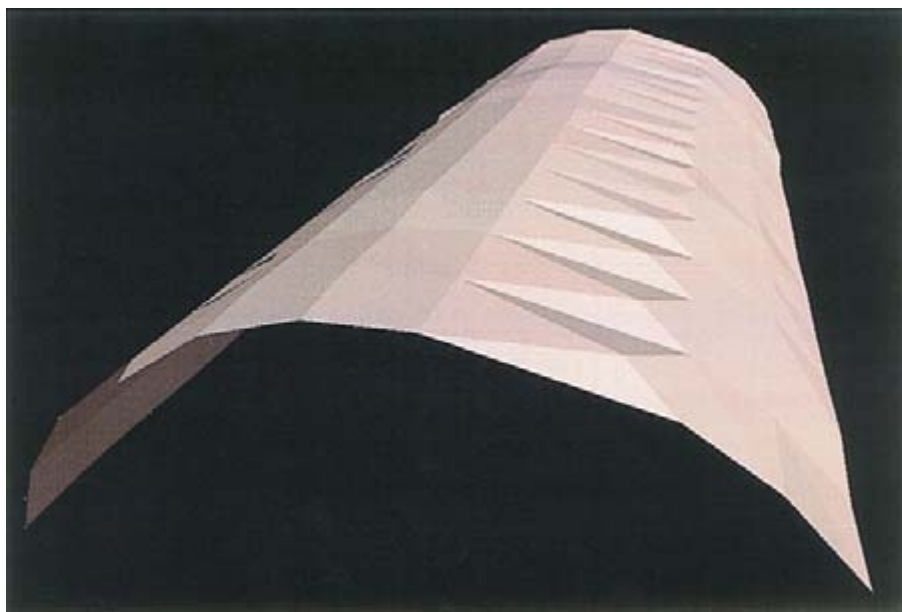


図2.8 計測結果の3次元表示例

2.4.3 光ファイバセンサによるトンネル覆工ひずみ計測技術³⁾

(1) 技術の概要

図2.9にシステムの構成を示す。

光ファイバ内で生じる散乱光のひとつは、ひずみによってその周波数に変化することが知られている（ブリルアン散乱光）。この原理を利用したひずみ計測技術であるBOCDA方式を、実物大（内径約9m）のトンネル覆工コンクリート試験体へ適用が行われた（写真2.2）。载荷ステップごとに光ファイバセンサによってひずみ分布を計測し、近傍のひずみゲージの計測値と比較したところ、両者は良く一致していることが確認されている（図2.10）。

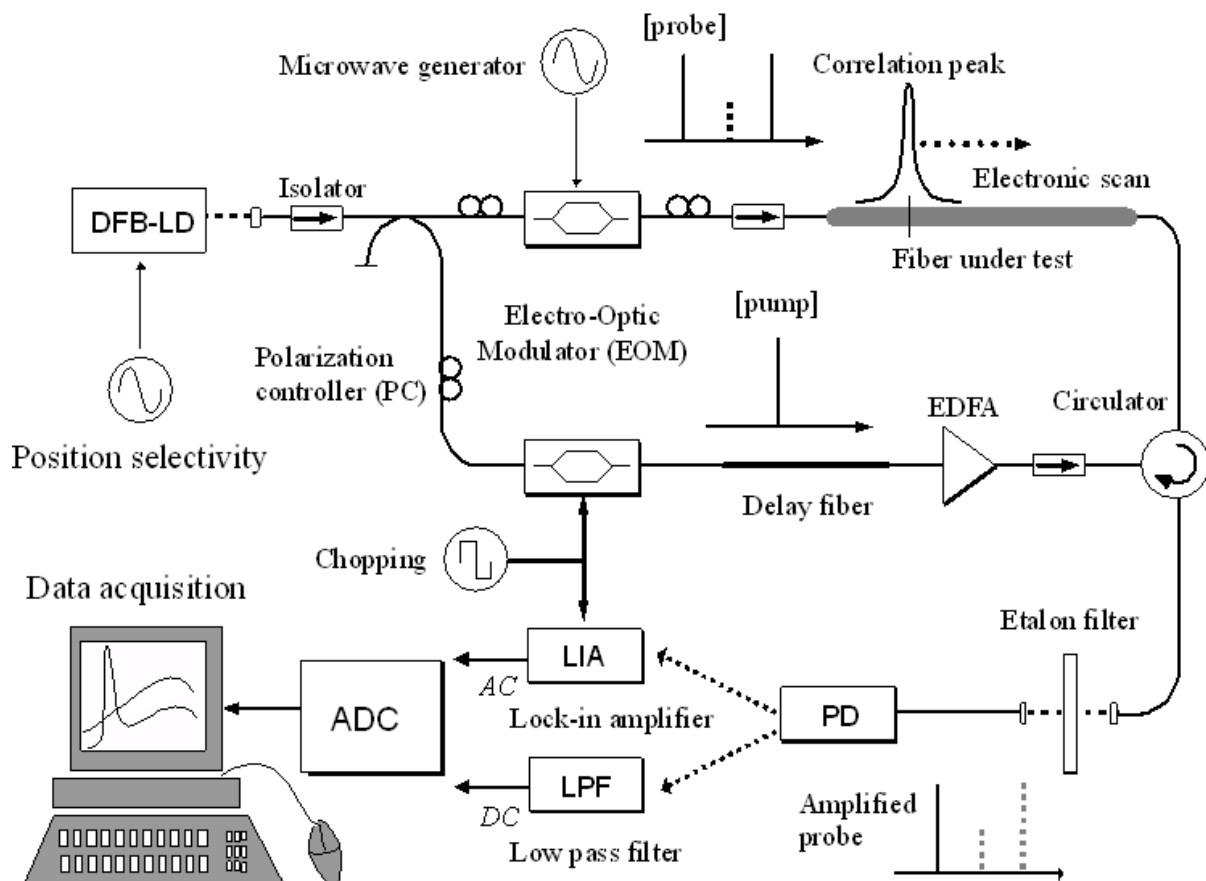


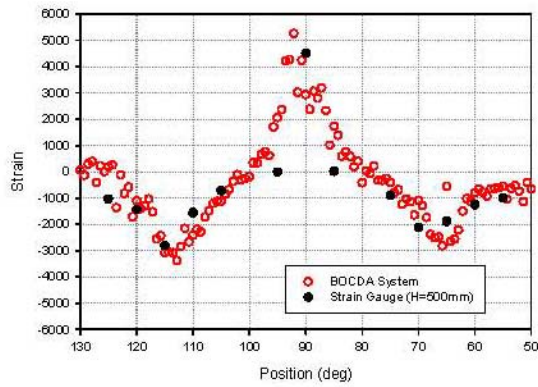
図2.9 光ファイバセンサ計測システム



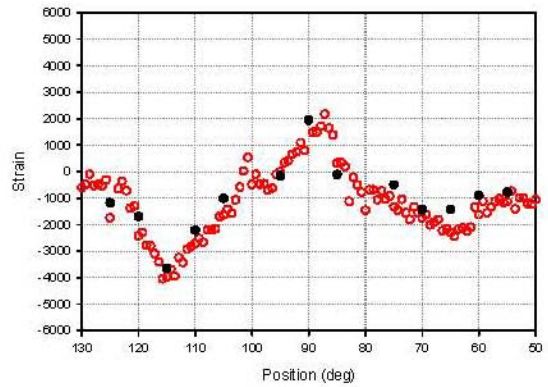
写真2.2 トンネル覆工コンクリート試験体

(2) 計測事例と特徴

- 光ファイバ自体の利点（小型軽量，長寿命，防爆など）を活用できる。
- ひずみゲージなどの離散的なセンサと異なり，光ファイバに沿って連続的に変化するひずみの分布を計測可能。
- 高い位置分解能（約0.05m）で計測可能。
- 計測可能範囲と位置分解能がトレードオフの関係にあり，現状での適用範囲は50m 程度である。



ひずみ分布計測結果1



ひずみ分布計測結果2

図2.10 光ファイバセンサによるトンネル覆工のひずみ分布計測事例

2.4.4 デジタル写真測量によるダンプ積載土量計測技術⁴⁾

(1) 技術の概要

このシステムはデジタル写真測量による立体形状計測を応用したもので、計測のフローを図2.11に示す。走行中のダンプを2台のカメラで同時に撮影した画像から積載土砂表面の立体形状を解析し、予め保有するダンプベッセル形状と合成することで、両者の差を土砂体積（土量）として算出するものである。ダンプを停止させることなくリアルタイムに計測を行うことができ、全ての処理は自動化されているため、土量管理の効率化を図ることが可能となる（写真2.3、2.4）。

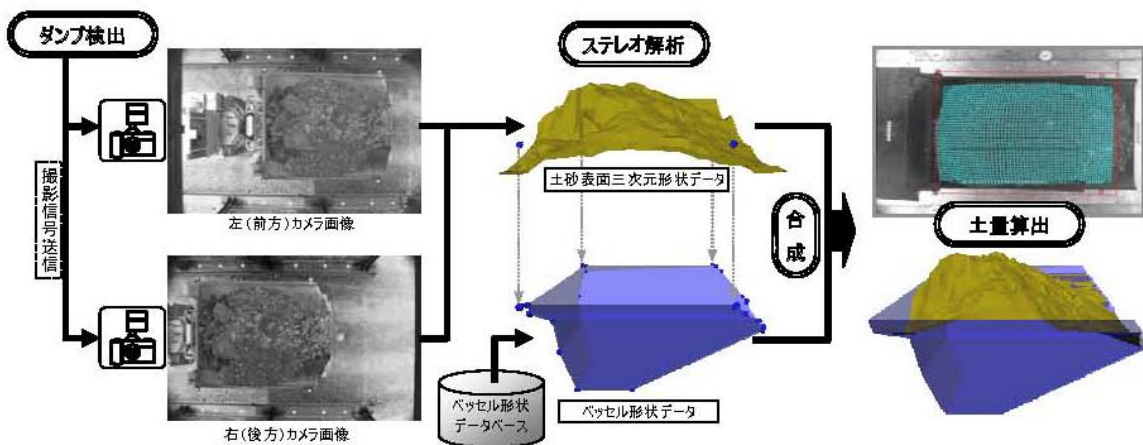


図2.11 計測フロー



写真2.3 ダンプ撮影建屋全景



写真2.4 撮影建屋内部

(2) 計測事例と特徴

- ・ 約10km/h以下の速度であればダンプを停止させることなく計測可能。
- ・ 撮影から土量算出まで全自動で処理され、撮影後数十秒で結果を得ることが出来る。
- ・ 従来の台数管理に代わり、一台ごとの積載土量を精度よく計測可能（ばらつき1%以下）。
- ・ 施工記録として計測時の画像を保存可能。

2.4.5 磁歪法を用いたグラウンドアンカーの軸力推定法

(1) はじめに

地下構造物は岩盤、コンクリート、鋼製部材、その他材料を複合的に使用して一般的に施工が実施されるが、最終的な仕上がり面はコンクリートになることが多い。コンクリートなどの材料は一般的に切断などの作業を伴わない限り現状の応力状態を知ることができない。したがって、維持管理における「現状の応力状態把握」が難しい。一方で、鉄などの強磁性体に対しては磁歪法⁵⁾という非破壊応力測定法が存在するため、それが表面に露出していれば「現状の応力把握」が可能になる。ここでは、岩盤空洞を施工し、表面に露出している鋼材の一例としてナット式のグラウンドアンカーを取り上げ、その軸力を磁歪センサを用いた非破壊計測手法によって推定する技術を紹介する。

(2) 技術の概要

鉄などの強磁性体には応力を受けたときに、その方向において透磁率が変化するという性質がある⁵⁾。磁歪センサ（図2.12）を用いれば、この性質（磁気異方性）を利用して、鋼材を励磁し、その磁位差に起因する電磁誘導により発生する電圧を検出することで、受けている応力の向きと大きさを測定することができる。これまでに橋梁⁵⁾、トンネル⁶⁾などで適用され、良好な成果を得ている。

(3) ナットに作用する応力からアンカー軸力を間接的に求める手法

図2.13にナット式のグラウンドアンカーの一般的構成を示す。この状態で、軸力が作用するとナットに応力が発生するため、ナット側面の中央で磁歪センサによって電圧を測定することによって、アンカーの軸力を間接的に推定できる⁷⁾。図2.14に室内実験で求めたアンカー軸力とナット表面における電圧の関係を示す。Method 1, Method 2は載荷方法の違いを表す。なお、この校正曲線においては載荷時のデータを軸力推定に使用することとしている⁷⁾。

現場測定においては、露出しているアンカー頭部において、磁歪センサを用いてナット表面の電圧を計測する（図2.15）。防錆用の油をふき取るなどの作業を終えたのち、1本のアンカーに対して電圧を読み取る作業は10分程度である。6面の電圧計測結果を平均し図2.14の校正曲線を用いれば、直ちに現在の軸力を推定することができる。



図2.12 磁歪センサ（直径20 mm程度）

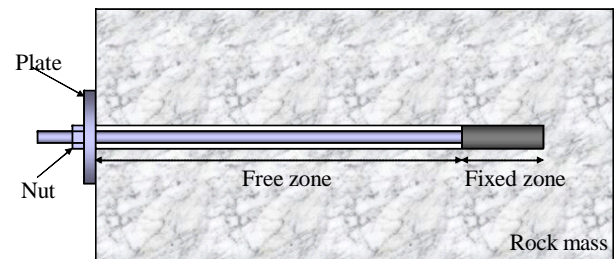


図2.13 ナット式のグラウンドアンカーの一般的構成

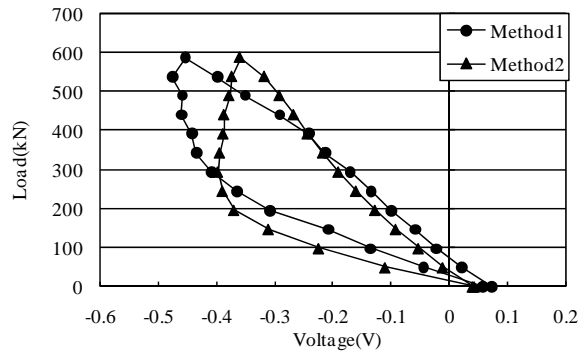


図2.14 アンカー軸力とナット表面における電圧の関係⁷⁾

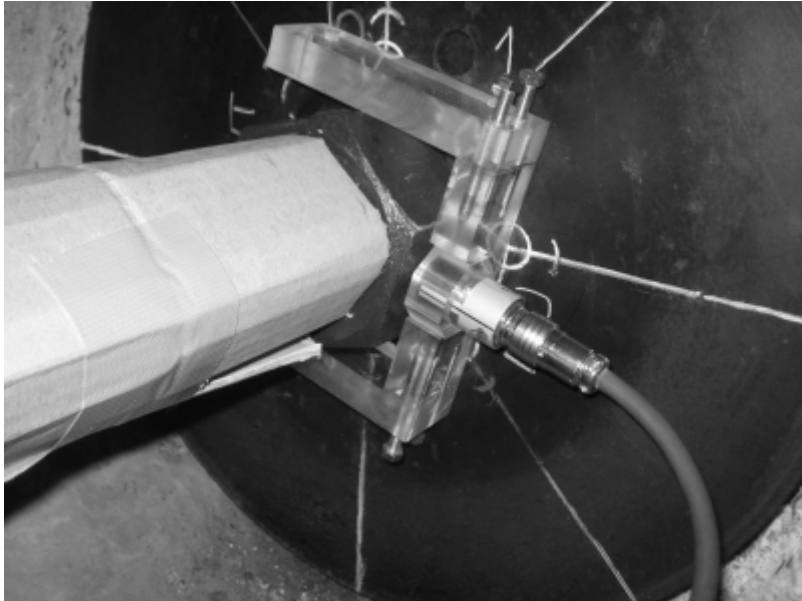


図2.15 現場におけるナット表面の電圧計測の様子

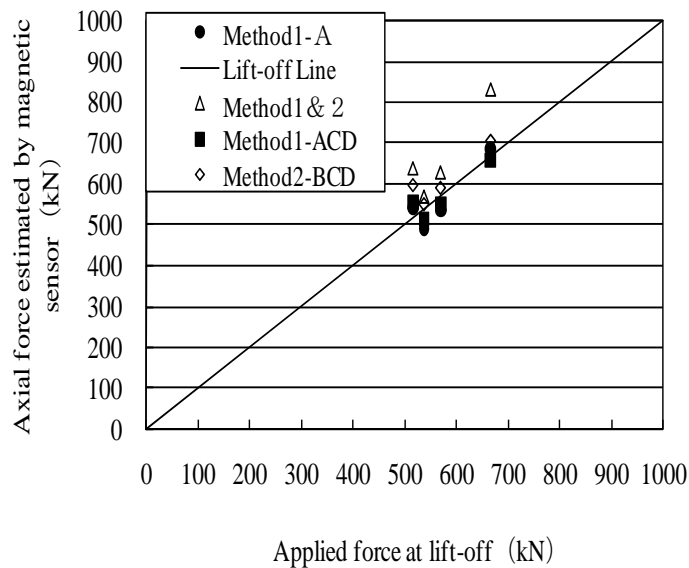


図2.16 磁歪センサから求めた軸力とリフトオフ試験から求めた軸力の比較

図2.16に磁歪センサから推測した軸力をリフトオフ試験において検証した結果を示す。この図ではMethod1-ACDで示されているデータが、もっとも誤差の小さい推定結果を示している。軸力推定の概略誤差は30 kNであることが判明している。

磁歪センサは直径20mm程度のプローブであり、センサ本体はノートパソコン程度の大きさである。データ収録にはノートパソコンを用いるが、全体として装置一式はコンパクトであり、計測作業に要する時間も短い。鋼材を対象とした維持管理手法の有力な方法論として今後注目されると思われる。

参考文献

- 1) 山本拓治, 松山政雄, 三浦悟, 今井道男, 大西有三: デジタル写真測量技術のトンネル断面変位計測への応用検討, 土木学会第55回年次学術講演会概要集, 446-447, 2000.
- 2) 三浦悟, 山本拓治, 松山政雄, 今井道男, 岩野圭太, 大西有三: デジタル画像計測技術を用いた変位・形状計測, 第11回岩の力学国内シンポジウム, 論文No.J02, 2002.
- 3) 今井道男, 名児耶薫, 三浦悟, 保立和夫: BOCDA方式光ファイバセンサ高度化技術の検証実験, 土木学会第60回年次学術講演会概要集, 283-284, 2005.
- 4) 黒沼出, 三浦悟: デジタル写真測量による土量計測システム, 土木学会第58回年次学術講演会概要集, 143-144, 2003.
- 5) 安福精一, 村井亮介, 藤井堅, 池田誠, 末宗仁吉, 黒瀬義幸, 境禎明: 磁気を用いた鋼構造物の応力測定, 橋梁と基礎, pp.33-39, 2001.
- 6) 芥川真一, 太田道宏, 安原幸二, 大井健史, 志村常彰, 松岡敬: 磁歪法を用いたトンネル鋼製支保工の応力状態の計測, 土木学会論文集, No.805号/IV-67, 117-130, 2005.
- 7) 芥川真一, 有村有紀, 中森絵美, 櫻井春輔, 馬場修二, 森聡: 磁歪法を用いたPSアンカー軸力推定手法の提案と大規模地下空洞における検証例, 土木学会論文集F, Vol.64, No.4, pp.413-430, 2008.12.

3. 岩盤応力測定の実例紹介

3.1 岩盤応力測定について

岩盤構造物を設計・施工する際に、その挙動を予測するには、主として原位置の3つの情報が必要となる。すなわち、1)地質情報、不連続面の幾何学情報、2)岩盤の物性（強度、変形性）、3)初期応力（地山応力）である。

岩盤の応力測定法は、数多く提案されてきている。表3.1に代表的な方法を示す¹⁾。広く用いられる方法は、水圧破碎法と応力解放法である。

表3.1 物理探査手法の変遷¹⁾

岩盤応力測定法	手法
応力解放法	孔径変化法、孔径ひずみ法 平面孔底ひずみ法 球面孔底ひずみ法 円錐孔底ひずみ法
水圧破碎法	水圧破碎法 スリーブフラクチャリング法
コア法	AE法、DSCA法 ASR法、DRA法
ボアホール分析法	ボアホールブレイクアウト法 コアディスクキング法 弾性波速度法
応力補償法	フラットジャッキ法

3.2 AE法を用いた計測事例

岩盤中にマイクロクラックが発生・伸展する際には、微小破壊音(アコースティック・エミッション:AE)が生じる。この現象をピエゾ式センサ(図3.1)で計測し、AEの発生頻度や発生位置を求めることで、初期地圧や空洞掘削にともなうゆるみ域の評価を行なう。



図3.1 AEセンサ

3.2.1 初期地圧測定システム

原位置から採取した岩石コアは、初期地圧以上の荷重を受けると急激にAE発生頻度が高くなる現象(カイザー効果)が存在する。この現象を利用し、一軸圧縮载荷条件の下で生じるAE発生頻度の急増点から岩石コアが受けていた初期地圧を評価する。試験状況を図3.2に示す。本システムによる測定事例を図3.3に示す。



図3.2 AEによる初期地圧測定状況

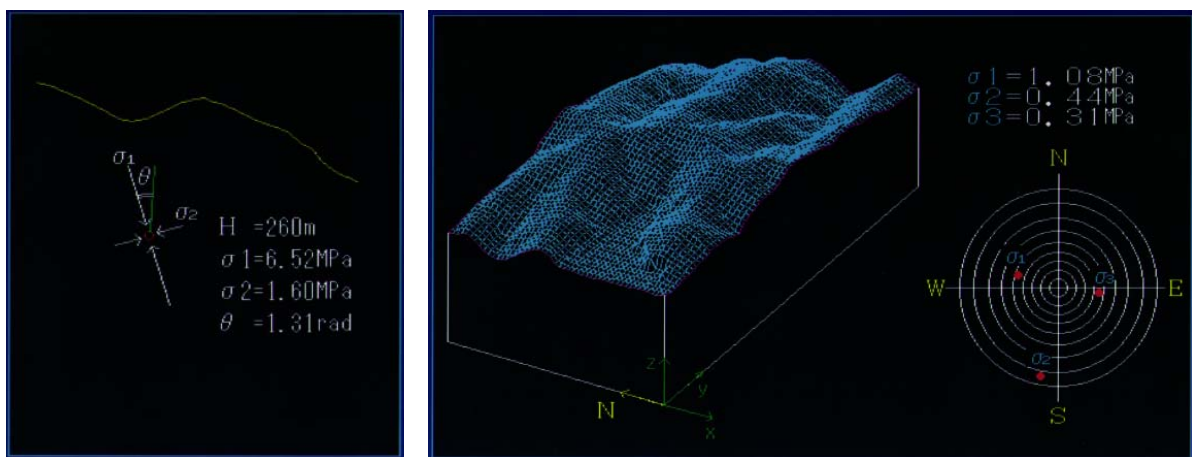


図3.3 AEによる初期地圧測定事例

3.2.2 ゆるみ域評価システム

岩盤中に設置された複数のAEセンサへの波動到達時間差からAE震源を解析し、空洞周辺の二次元もしくは三次元的なゆるみ域を評価する。また、AE波の特性から、発生したマイクロクラックが引張りによるものか、せん断によるものか識別できる。図3.4に、埋設用AEセンサとゆるみ域評価システムの概要を示す。また、図3.5にゆるみ域の評価事例を示す。

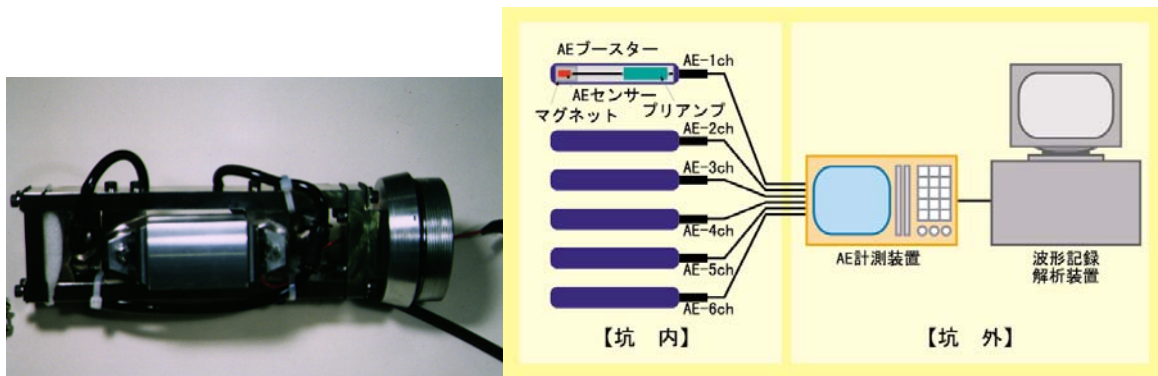


図3.4 埋設用AEセンサ(回収可能型, 左)とゆるみ域評価システム(右)

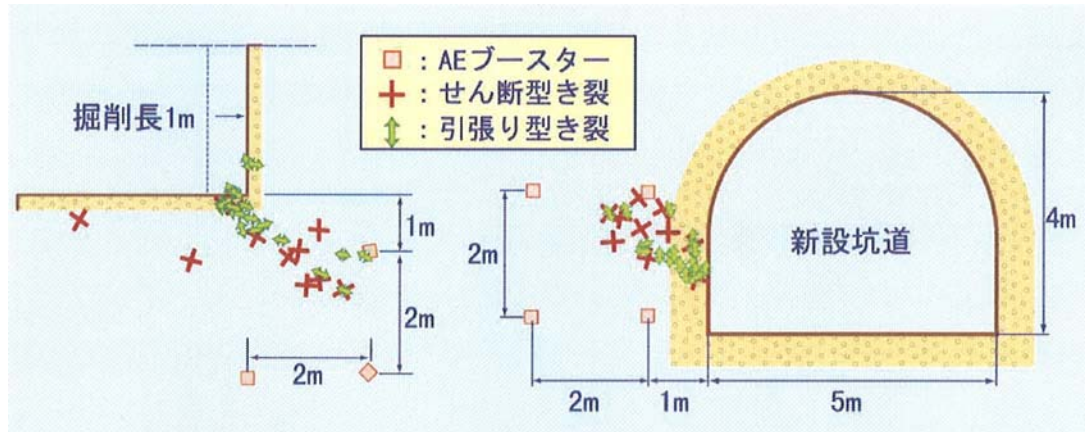


図3.5 ゆるみ域の評価事例

3.3 大深度地殻応力計測を目的としたBABHY式水圧破砕法²⁾

水圧破砕法は、km級の深度における地殻応力の原位置計測を可能とする唯一の実用的手段として従来から広く用いられてきた。ところが、この方法によってボアホール直交面内における最大応力 S_{max} を評価する要領に欠陥のあることが明らかになっている^{3)~5)}。この欠陥を解決するため、Ito, et al.⁶⁾はBABHY (Baby Borehole Hydro-fracturing) と名付けた方式を新たに考案している。

3.3.1 BABHY方式の概要と特長

BABHY方式では、ボアホールの坑底に直径の小さい試験孔を新たに掘削し、その中で水圧破砕を実施する(図3.6)。これを実行するために、(a) マッドモーター内蔵のコンパクトドリリング装置⁷⁾、および(b) 電動の水圧ポンプとデジタルコンパス及びパッカーからなる装置(以下、ゾンデ)の2つを用いる。前者は、直径が数十mmで長さが2 m程度の試験孔を掘削するための装置であり、後者は作成した試験孔の中で水圧破砕試験を実施するための装置である。いずれの装置も予め設置したコアビット付きのロッドの中を、基本的にワイヤーラインで昇降させる。ここでは、本体のボアホールをマザー孔 (Mother hole)、その坑底に掘削する小口径の試験孔をベビー孔 (Baby hole) と呼んでいる。

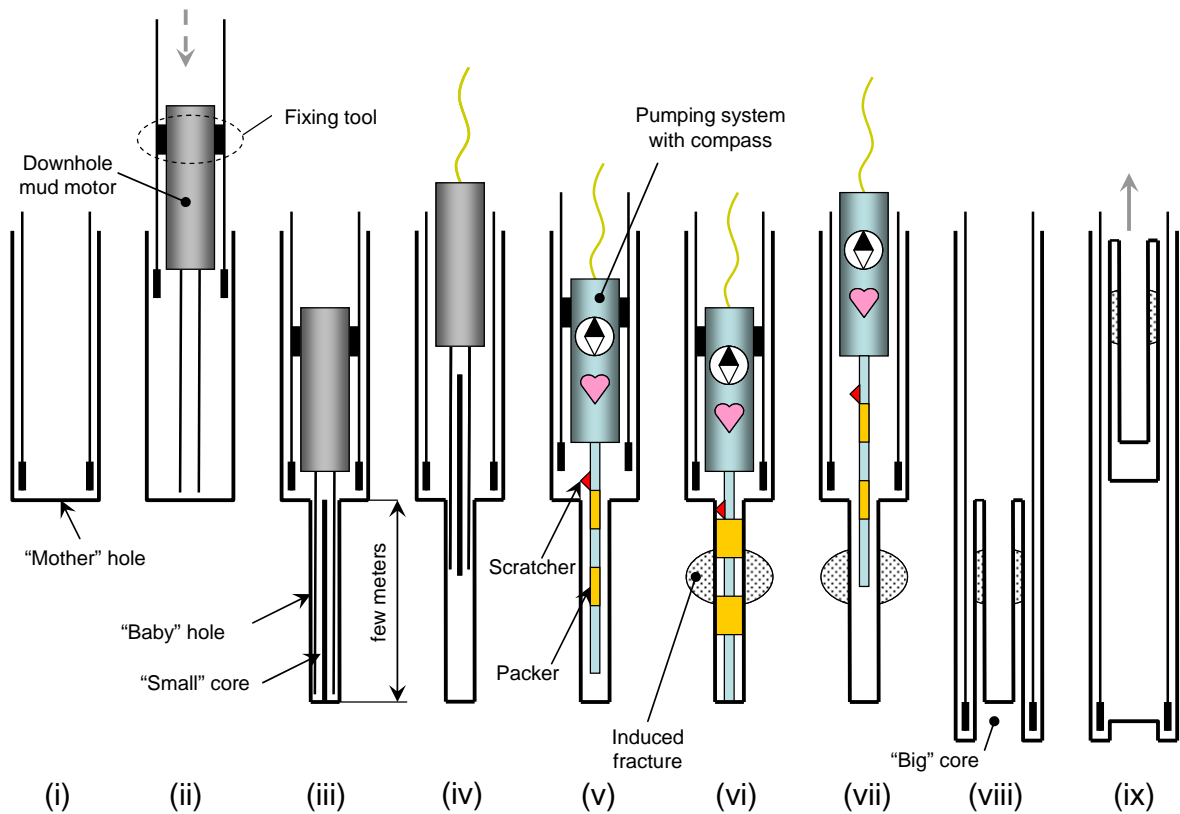


図3.6 BABHY方式水圧破碎地殻応力計測法の実施手順²⁾

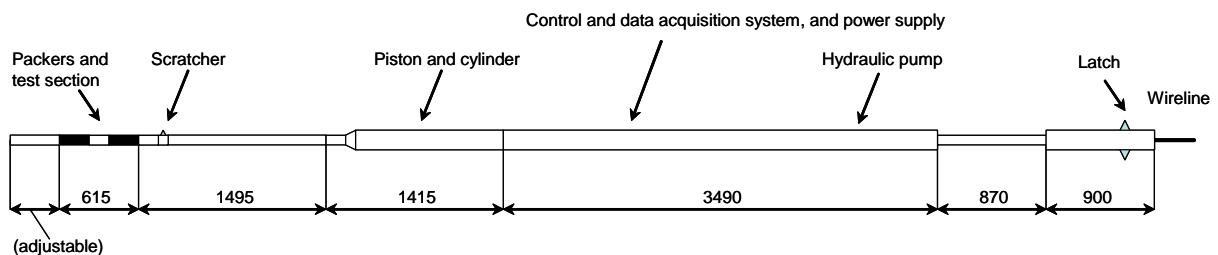


図3.7 BABHYゾンデ²⁾

3.3.2 BABHYゾンデ

開発されたゾンデを図3.7に示す。対象としたマザー孔の大きさはPQサイズ（ $\phi 122$ ）であり、測定深度は1.5 kmである。水圧ポンプの能力として圧力は50 MPa以上とし、また、既存き裂の影響を抑えるために圧の立ち上がりは早めにすべきという経験則から流量は200 cm³/min以上とすることを目標として開発されている。水圧ポンプは、回転式の油圧ポンプをサーボモータで駆動し、発生した油圧でピストンを動かしてシリンダー内の水を加圧区間側に押し出す構造としている。流量は、上記ピストンの変位をマグネット式の変位計で測定し、その変位にシリンダー断面積を乗じた量として測定が可能である。また、油圧シリンダーと油タンクの間にバルブがあり、油圧ポンプ用とは別のサーボモータで開閉できるようになっている。一方、2つのサーボモータの制御と、圧力、流量（ピストン変位）およびゾンデ方位の計測は、ゾンデ内にある基板と地上受信部の間を改良RS422方式で双方向通信することで実施される。また、使用温度範囲は主に電気部品の制限から0~70℃となっている。

3.3.3 適用事例

実証実験の状況を図3.8に示す。対象とされた岩質は、石英安山岩質溶結凝灰岩である。加圧区間水圧とピストン位置の時間変化を図3.9に示す。ブレイクダウン現象が観測され、そのときの最大圧力は約39 MPaであることが確認できる。



図3.8 実証試験現場の状況²⁾

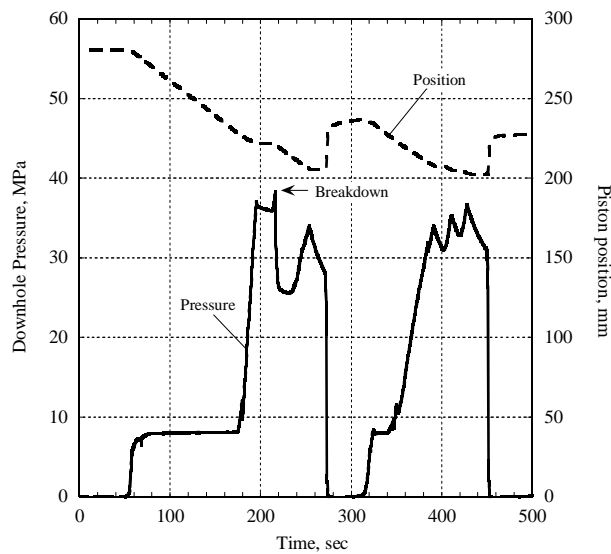


図3.9 水圧破碎試験で測定された坑底圧と水圧負荷ピストン位置の時間変化²⁾

参考文献

- 1) 日本材料学会編：ロックメカニクス, p.25, 2002.
- 2) 伊藤高敏, 伊藤久男, 小村健太郎, 田中 博, 加藤春實, 狩野嘉昭: 大深度地殻応力計測を目的としたBABHY式水圧破碎法とその実用化, 第37回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 土木学会, pp. 447 – 452, 2008.
- 3) Ito, T., Evans, K., Kawai, K. and Hayashi, K. Hydraulic fracture reopening pressure and the estimation of maximum horizontal stress. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abst.* 36, pp.811-826, 1999.

- 4) 伊藤高敏: 水圧破碎地殻応力評価の問題点とき裂開口圧の物理的意味, 月刊地球, 26, pp.84-89, 2004.
- 5) Ito, T., Igarashi A., Ito, H. and Sano, O. Crucial effect of system compliance on the maximum stress estimation in hydrofracturing method: Theoretical consideration and field test verification. *Earth Planets and Space*. 58, pp.963-971, 2006.
- 6) Ito, T., Kato, T. and Tanaka T. Innovative concept of hydrofracturing for deep stress measurement. *Proc. Int. Symp. on In-situ Rock Stress*, Trondheim, pp.53-60, 2006.
- 7) 加藤春實, 田中博: 大深度応力解放法におけるボーリングのためのワイヤーラインツールズ, 月刊地球, 26, pp.80-83, 2004.

4. 物理探査の方向性と事例紹介

4.1 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20～30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たことにより、測定及び解析の方法が簡略化され、高精度化されたことである。1970年代以降の半導体技術の発展により、デジタル化が進み、アナログでは考えられなかった大量の高分解能なデータ取得が可能になり、機器自体の小型化によってデータ取得そのものを容易かつ安価に実施することが可能となった。データ処理および解析にとっては、計算技術やデータ処理技術の高度化によりインバージョン（逆解析法）が一般化し、地中をより微細に高精度に分析することが可能となったことは周知のことである。

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物理現象を用いた新しい調査手法が出現したことである。新しい手法は、従来の手法では診ることのできなかつた極浅部や深部の対象をカバーする方法として重要な探査手法の一つとなっている。また、表面波探査や地震波干渉法のように、調査対象や調査精度の面で従来法と比較して著しく優れる訳ではないが経済性や調査の簡便性に着目した新しい方法も実施されている。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。

物理探査手法の変遷を表4.1に示す。

表4.1 物理探査手法の変遷

手 法	変 遷			
	1980	1990	2000	2010
弾性波探査	●1984 弾性波トモグラフィ	●1990 デジタル測定機	●1996 高精度解析	
電気探査	●1986 比抵抗トモグラフィ	●1987 デジタル測定機	●1989 二次元比抵抗探査	
新しい現象	●1984 地中レーダ	●1985 電磁探査(CSAMT)		

4.2 物理探査の方向性とその事例紹介

物理探査法は、信号源からセンサまで信号が地盤を伝播する過程で変化する様子を測定し、それによって地盤の物性分布を把握する間接的調査方法であり、土木・建築構造物周辺の地盤や地下水の調査、または石油や鉱物などの資源調査に古くから用いられ、また変遷を遂げてきた。

本委員会では、物理探査の先端技術に関する方向性として、a)間隔の短い精密な調査、b)時間において差をとることにより状態変化を把握する調査、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に注目している。また、近年のセンサ技術及びデータ処理技術の発展によりd)3次元調査及び解析の事例が見られるようになった。物理探査を用いた、これらの先端計測技術の調査事例について次に述べる。

4.2.1 間隔の短い精密な調査

従来の浅層反射法地震探査では、受振器（センサー）間隔を2～5m程度に並べて測定を実施していたが、受振器間隔を従来の10倍程度の20～50cm間隔で高密度に配置することにより、従来の反射法地震探査に比べて浅層の微細な地質構造を把握することができる。従来の方法で受振器を10倍の密度で設置すると、受振点数の増加に伴って作業効率も低下するが、調査箇所をアスファルト場に限定し、ランドストリーマと称する受振器群を路面上で牽引することにより、受振器を地面に固定することなく探査することが可能となった。図4.1は、ランドストリーマによる探査状況の写真である。図4.2は、S波ランドストリーマを用いて、沖積層の内部構造および基底構造を高



図4.1 ランドストリーマ探査状況写真¹⁾

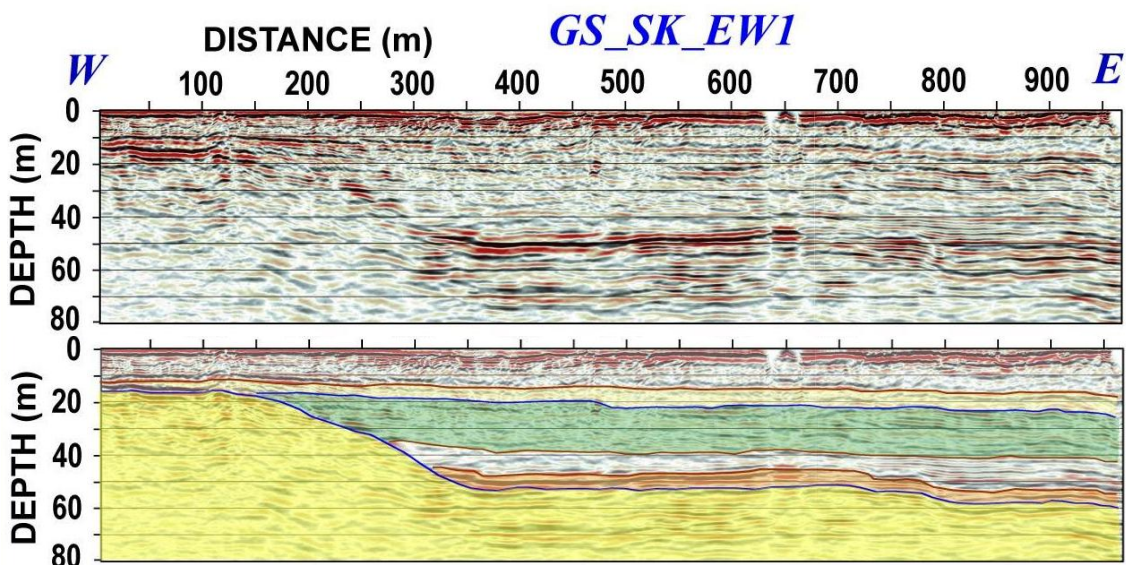


図4.2 S波ランドストリーマによる高分解能反射法地震探査断面の例²⁾

精度で把握することを目的として実施した高分解能反射法探査の調査結果を示す¹⁾。受振器を高密度に配置することにより、分可能が向上し反射波の連続性が読み取れるようになった。その結果として、深さ10~50m程度までの沖積層の内部構造を詳細に把握することが可能となり、沖積層の堆積課程の解明に役立てることができた事例である。

4.2.2 時間をおいて差を取ることで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取ることで地盤状態の変化および変化の場所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。実施例としては、岩盤内の「水みち」調査として、トレーサーとなる低比抵抗物質（食塩水など）を流下前後に比抵抗トモグラフィを実施して時系列データを取得しトレーサーの流下経路や透水係数を探知する場合や、地表からの比抵抗2次元探査で地下水面の季節変動を比抵抗の変化で探知する場合など、比抵抗や弾性波速度などの物性変化をとらえることにより岩盤の状態変化を探知することに用いることができる。

図4.3は、CO₂の貯蔵実験サイトに於いて時間をおいて、地層にCO₂を圧入した場合に、注入したCO₂の移動により、地層中の弾性波速度が変化することに着目して、弾性波トモグラフィを実施した事例である²⁾。目視による対比では、CO₂の注入前と注入後の弾性波トモグラフィ断面からは速度変化が明確には読み取れないが、2断面の差を取ることでCO₂の注入におよび移動に起因すると考えられる弾性波速度変化を確認することができる。さらに時間をおいて、経過時間と共に地層内を移動するCO₂の様子をモニタリングすることが可能となる。時間をおいて測定された2断面の違いを求める方法は、弾性は探査では差を、比抵抗探査では比を求める場合が多い。その際に、2つの断面を直接的に対比するのではなく初期値データの解析結果をリファレンスモデルとして、その理論測定値を利用して時系列データを正規化して、変化後の値をインバージョンによって求める方法³⁾などが有効であることが知られている。

4.2.3 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

物理探査から求められる結果は速度や比抵抗などの物性値であり、多くのユーザーが求めようとする硬さや透水性や脆弱部を推定するためには専門的な解釈を必要とする。一方で地盤の物理的性質は生成時の鉱物組成、割れ目や劣化の程度および地下水の状況等により変化するため、例えば、同じ弾性波速度の岩盤が同一の強度を示さないことは明らかである。これに対し、複数の手法を適切に組み合わせて実施し、得られた異なる物性情報に対して地質状況や試験結果などの

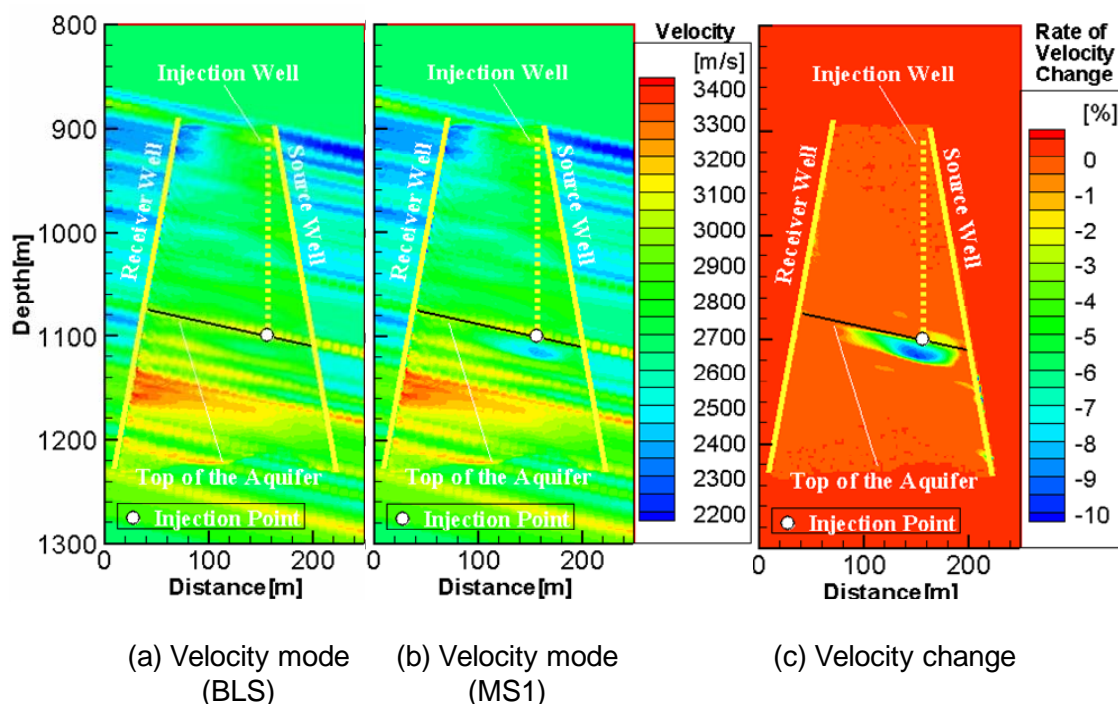
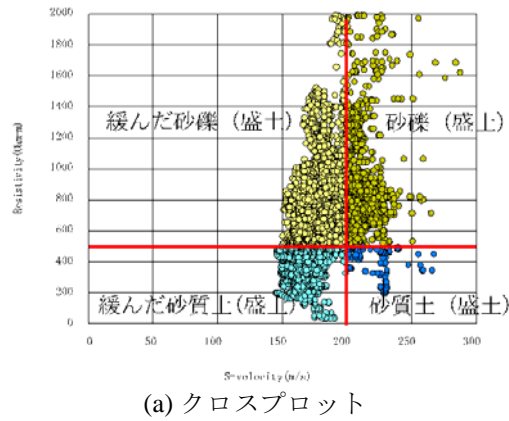
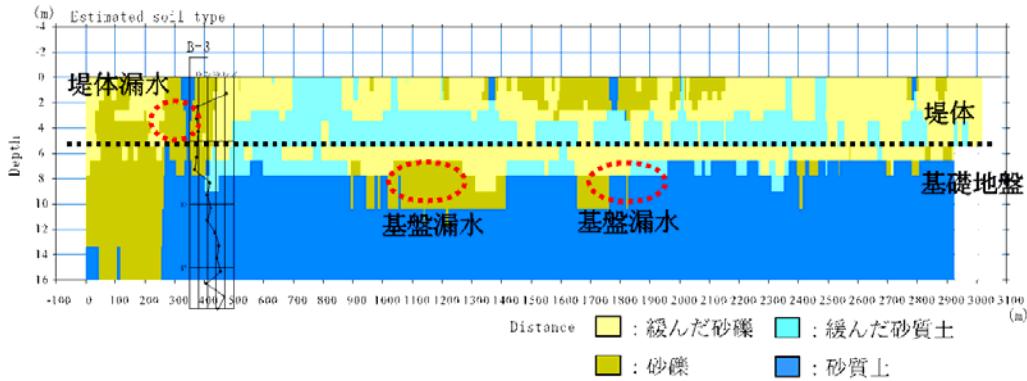


図4.3 CO₂圧入テストサイトにおける弾性波トモグラフィ事例³⁾



(a) クロスプロット



(b) 地盤区分

図4.4 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⁵⁾

総合的な解釈を加えれば、解析能力を一気に向上させることが可能となることが期待される。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て、提供フィールドを構成する地盤毎の関係を求めることにより、求めたい物性分布を得ることができる。

図4.4は、河川堤防及びその基礎地盤に対して2次元比抵抗探査と高密度表面波探査を実施し、異常部分の検出を行った事例である⁴⁾。探査結果となる比抵抗とS波速度を土質区分毎にクロスプロットすることにより、目的とする地盤区分を行い、堤体内の漏水箇所や基礎地盤内の漏水箇所を求めた事例である。

地盤を構成する岩石が単一の場合には、地盤の比抵抗または弾性波速度の変化を大きく支配する物性を選択し、その物性に変換することにより土木施工を行う上で有効な情報となる場合がある。次に紹介する方法は、ボーリングコアの比抵抗と有効間隙率の関係、ボーリングコアの弾性波速度と飽和度の関係を理論式から求めておいて、それらと比抵抗探査及び弾性波探査のそれぞれの結果とを対比させることにより、次式によって比抵抗と弾性波速度から間隙率と体積含水率に変換する変換解析のシステム化を行った事例である。

$$V_p = f(\phi, S_r)$$

$$\rho = g(\phi, S_r)$$

$$V_p: P波速度 \quad \rho: 比抵抗 \quad \phi: 間隙率 \quad S_r: 飽和度$$

花崗岩地帯における変換解析の事例(図4.5)では、変換解析によって求められた間隙率分布は、トンネル支保実施パターンとよく一致(図4.5)している。また体積含水率と孔壁地質展開図を対比(図4.6)すると、体積含水率の高い箇所で湧水が認められたことから、変換結果である体積含水率分布が湧水の推定に有効であることが示唆された。これら2つの手法を用いた変換解析を実施することにより、湧水箇所と支保パターンというトンネルを施工する上での重要な情報を提供できる可能性が示された。

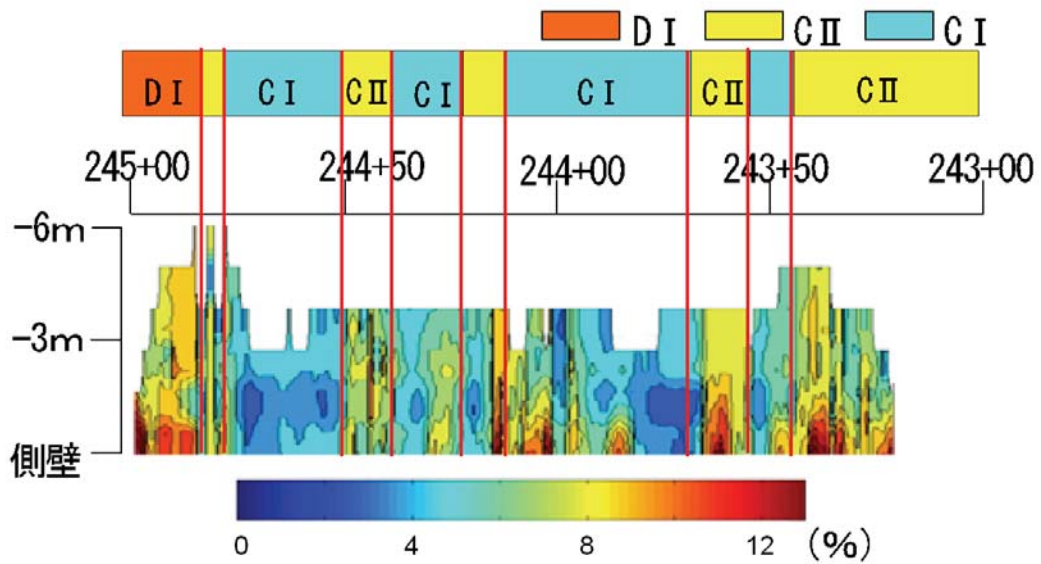


図 4.5 間隙率分布と支保実施パターンの対比⁶⁾

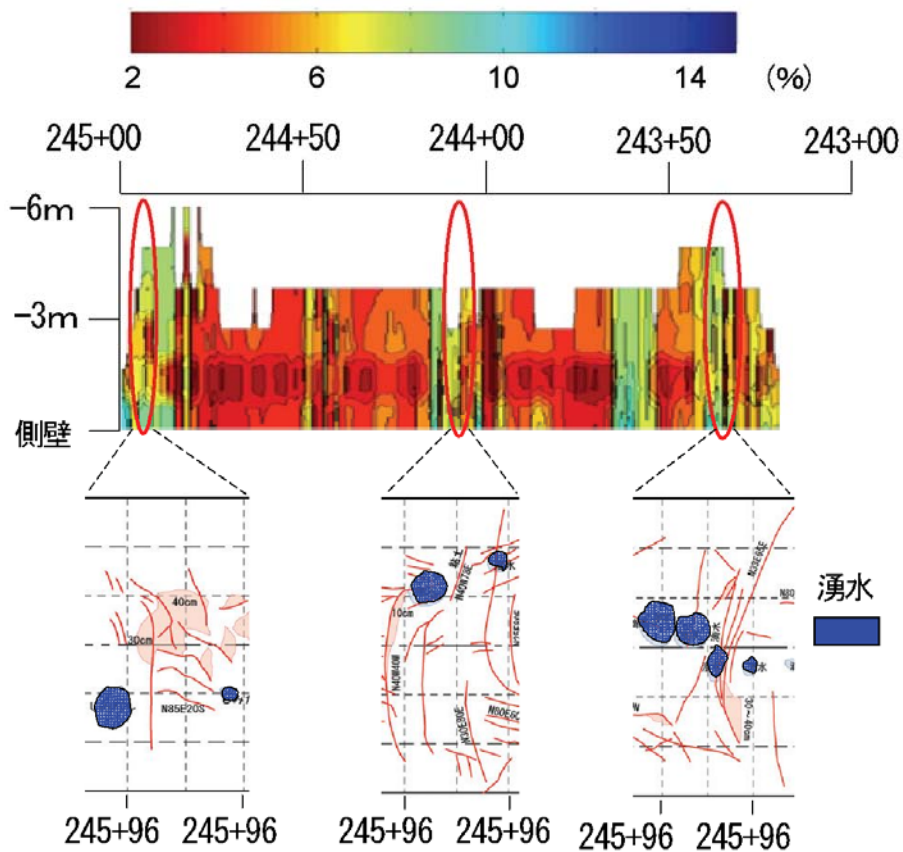


図 4.6 体積含水率と坑壁地質展開図との対比⁶⁾

4.2.3 3次元探査事例紹介

(1) 3次元屈折法トモグラフィ探査

a. 技術の概要

平面的に配置した受振点で、走時を多チャンネルのデジタルデータとして取得し、トモグラフィ的解析をすることで、3次元的な地盤の弾性波速度構造を解析する探査法である。任意の平面図・断面図の作成が可能である。

b. システムの概要

測点配置例を図 4.7 に示す.

c. 解析事例と特徴

解析事例を図 4.8 に示す. 特徴は, 以下の通りである.

- ・ 起振点及び受振点に関しては直線上に制約されない任意点を選定可能.
- ・ 解析方法の迅速化による解析時間の短縮.
- ・ 設計に有用な任意の2次元断面の出力が可能.
- ・ 等速度面図の出力による速度基盤面の表示可能.

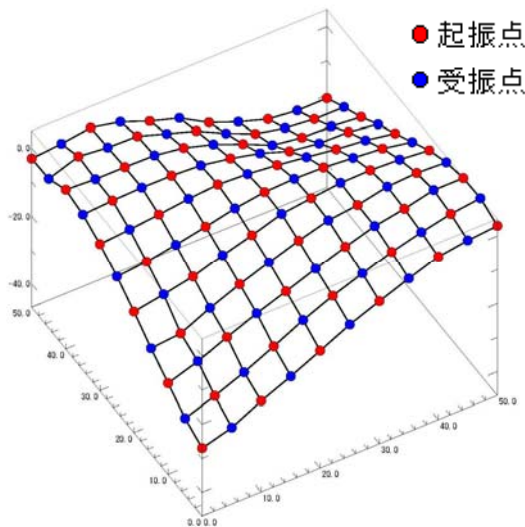


図 3.7 3次元屈折法トモグラフィ探査の測点配置例

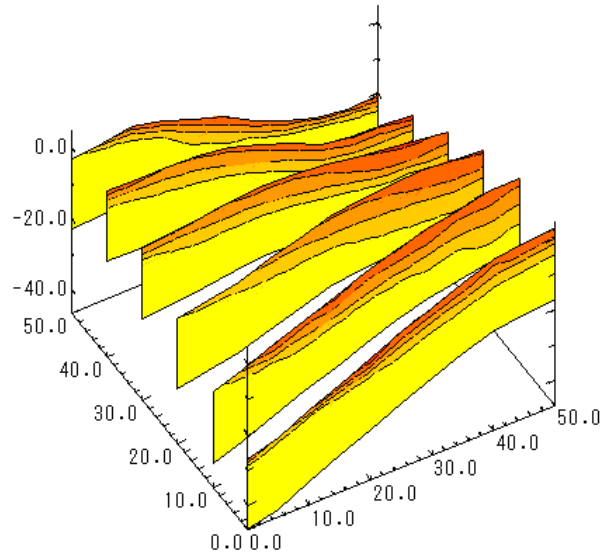


図 3.8 3次元屈折法トモグラフィ探査の解析事例

(2) トンネル三次元反射法弾性波探査技術⁷⁾

a. 技術の概要

ハンマや超磁歪型のSweep 波発生装置など人工的に発生させた振動を, 切羽から20~30m 後方のトンネル壁面に設置した受振点 (通常7~10点程度) で記録する. 波形を反射トモグラフィ解析することにより, 切羽前方の不連続面 (破碎帯などの岩盤物性が変化する面) からの反射波を抽出し, 不連続面や空洞の位置・傾きなどを三次元的に把握することが可能となる. また, 探査システムを無線化することで, 計測作業の大幅な省力化が可能である.

b. システムの概要

作業の流れを図4.9に, 構成機器を図4.10に示す.

c. 解析事例と特徴

解析事例を図4.11に示す. 特徴としては,

- ・ 探査距離は地質等に依存するが, 約100m程度である.
- ・ 速度構造と反射面深度を同時に求める解析手法を用いるため, 高い精度で地質構造と反射面の位置が把握可能である.
- ・ 地質構造を三次元表示できるため, よりビジュアルな表現が可能.
- ・ 取得した波形データを無線送信することで, 計測作業の省力化が図れ, また, ケーブルラインの電磁誘導ノイズがなく精度の高い解析が可能.

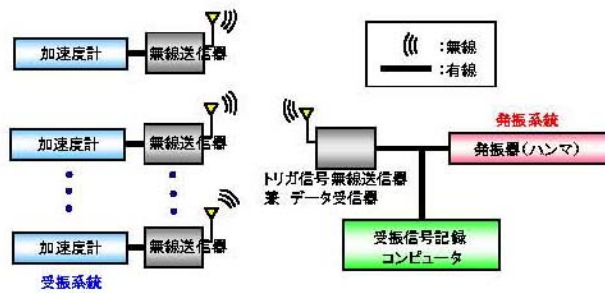


図4.9 無線式TRT探査システムの構成



図4.10 無線式TRT探査システムの構成機器 (左：無線送信器，右：記録コンピュータ)

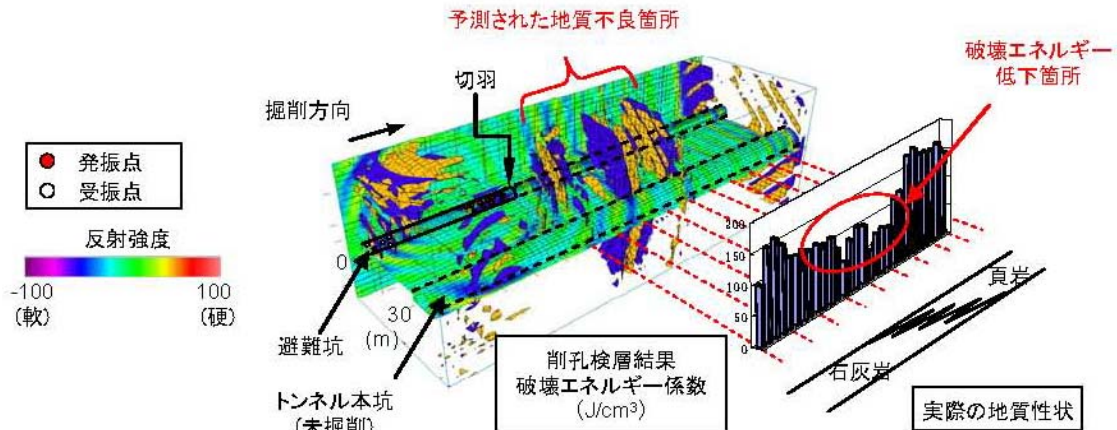


図4.11 無線式TRT探査システムの解析事例 (3次元イメージ図)

参考文献

- 1) 新版物理探査適用の手引き (物理探査マニュアル2008) : 社団法人物理探査学会, pp77, 2008.
- 2) 稲崎富士, 相澤隆生: S波ランドストリーマーを利用した首都圏における高分解能沖積層調査, 物理探査学会第113回学術講演会論文集, 171-174, 2005.
- 3) Onishi, K., Ueyama, T., Matsuoka, T., Nobuoka, D., Saito, H., Xue, Z.: Applying differential analysis to cross-well seismic survey for monitoring CO2 sequestration, Expanded Abs., Soc. Explor. Geophys. 77th Annual Mtg., 2832-2836, 2007.
- 4) 杉本芳平博: 比抵抗トモグラフィによる電解質トレーサーのモニタリングー数値的検討ー, 物理探査学会第92回学術講演会論文集, 57-62, 1995.
- 5) 林宏一・稲崎富士・河川堤防の統合物理探査委員会: 河川堤防への統合物理探査手法の適用性検討 (その3), 物理探査学会第116回学術講演会論文集, 116-119, 2007.

- 6) 楠見晴重・高橋康隆・中村真(2006): 比抵抗・弾性波速度の変換解析によるトンネル建設時の岩盤評価手法,土木学会論文集F,Vol.62 No.4,603-608
- 7) 八野祐二, 吉川 猛, 久保田正史: 3次元屈折法トモグラフィ探査の地盤調査への適用, 物理探査学会第110回学術講演会論文集, 215-217, 2004.
- 8) 横田泰宏, 山本拓治, 名児耶薫, 白鷺卓: 無線式トンネル三次元反射法弾性波探査技術の開発, 第38回岩盤力学に関するシンポジウム, 2009.

5. 変形計測による岩盤構造物のライフサイクルコスト評価の現状と課題

5.1 岩盤斜面におけるライフサイクルコストの評価

5.1.1 はじめに

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ため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で、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。

本章では、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。

5.1.2 岩盤斜面におけるライフサイクルコストのモデル

岩盤斜面におけるライフサイクルコストのモデルとして次の2つのケースをここに示す。

まずケース1として、斜面施工時に、観測の結果、対策工を実施しなかった斜面におけるケースを挙げる。

なお、この安定性の評価およびライフサイクルコストについては、斜面掘削直後から比較的短期間の状況を示しており、超長期にわたる対策工や斜面全体の経年劣化によるものは考えておらず、あくまで、斜面形成時から比較的短期間の斜面の安定性の検討を元に作成したものである。

図5.1に対策工未実施斜面における斜面安定性の推移とライフサイクルコストの推移を示した概念図を示す。

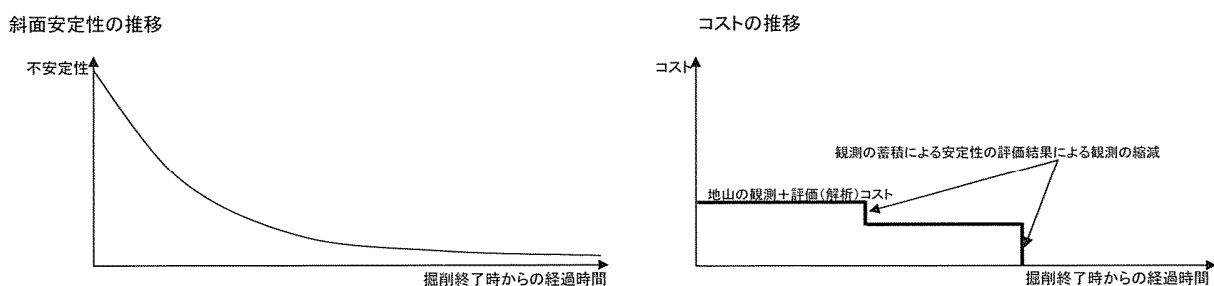


図5.1 ケース1における斜面安定性の推移とライフサイクルコストの推移を示した概念図

このケースの場合、斜面施工時からある程度安定した状態であるため、時間がたつとともに安定した状態に向かっていくと想定される。

その際観測の蓄積と評価により安定性が確認されていけば、段階的に観測コストを削減して、最終的には観測を終了することができると考えられる。

続いては対策工を実施して、対策工完了以降、斜面が安定した場合のケースをケース2として示す。

図5.2に対策工実施後に安定した斜面における斜面安定性の推移とライフサイクルコストの推移を示し

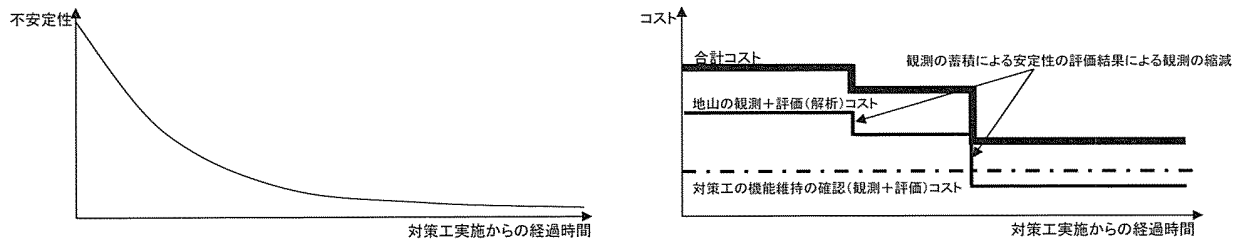


図5.2 ケース2における斜面安定性の推移とライフサイクルコストの推移を示した概念図

た概念図を示す。

対策工の結果、斜面が安定している方向に向かっているため、この場合も斜面の安定性の評価とともに段階的に観測のコストを削減していくことができると考えられる。

ただし、先のケース1と比較すると、対策工の効果を確認するための計器観測および解析の費用は常に必要であると考えられる。また、一度何らかの変状はおきているため、変状の再発を監視するための最低限の観測は常に必要となると考えられる。

5.1.3 ライフサイクルコストモデル検討のための実例

5.1.2で示したライフサイクルコストモデルを検証するため、それぞれのケースについて計測事例を示す。

a. ケース1

法面の高さは約100m、地質はほぼ全体的に砂岩で構成されている。地質上、法面の安定性に影響を及ぼす弱層や断層等は確認されなかった。

観測計器の選定と配置については以下の観点で実施した。¹⁾

①法面全体の平面的挙動を確認するためにGPSを中央測線に4カ所、補助測線に2カ所ずつ計8箇所設置した。GPSは1時間に1回の頻度でX-Y-Z3軸と基準点からの距離を測定した。なお、このGPSのカタログ上の精度は以下の通りである。

- ・水平方向：± (5+1ppm×D) mm
- ・鉛直方向：± (10+2ppm×D) mm D：基線間距離（この現場で約3km）

水平方向でも±8mm程度の誤差があることから、観測値だけでなく168区間（7日分）の移動平均データによる管理も行った。

②主測線沿いにおける岩盤の浮き上がりを測定するため、主測線に2箇所の岩盤変位計を設置した。岩盤変位計は50mのボーリング孔を掘削し、孔口から10m間隔で測定点を設け、孔口と測定点とをワイヤーで結びその伸び縮みを測定するものである。測定データは1日1回の自動計測を行っている。

なお、この岩盤変位計のカタログ上の精度は±2mm程度である。

③主測線沿いにおける深部の岩盤挙動を平面的に測定するため、孔内傾斜計を3箇所設置した。

孔内傾斜計は上から84m、80m、45mの深度まで設置し、0.5m毎に観測点を設けた。観測頻度は、当初1週間に1回の自動観測、後に安定性の評価後1月に1回の手動観測を実施した。

なお孔内傾斜計は傾斜計の機械的固有誤差については相殺するよう反転計測を実施し、温度平衡等による誤差については測定後補正を行った。これらの作業を行うことで、仕様では0.5m区間で±0.01mm程度の精度を有するものとされている。

図5.3にケース1法面における観測平面図を示す。

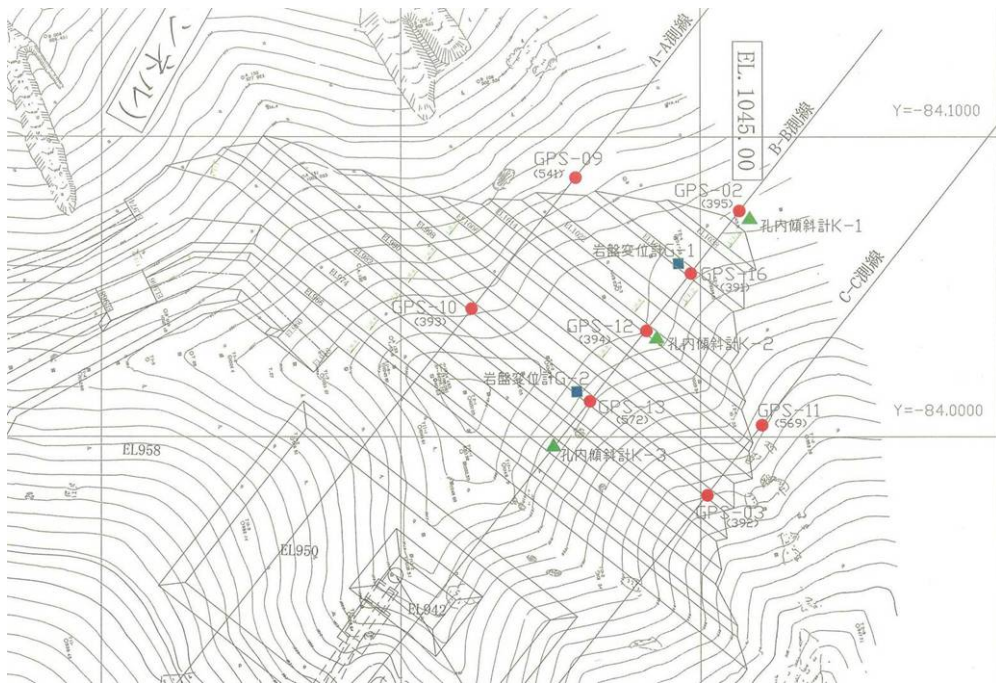
図5.4に孔内傾斜計の観測結果を示す。

ここでは法面の上部に設置した全長84mのK-1孔内傾斜計のデータを示す。

35m深度から上側では変位の累積が見られるが、A軸（法面の山谷）ではH14年7月以降、B軸（A軸の直交方向）ではH15年7月以降、変位増加が小さくなっている状況が確認される。

また、GPS、岩盤変位計でもH14年以降は変位増加が小さくなっており、H17年度末に斜面安定性の評価をし、観測体制の見直しを実施した。

その際、GPSおよび岩盤変位計は観測終了とした。



凡 例	
	GPS
	岩盤変位計 φ86mm 2箇所 (多段ワイヤ式変位計)(5段)
	孔内傾斜計 φ86mm 3箇所 (ロタリ/ホトタイプB耐震ボード付き) K-3: 支給品

図5.3 ケース1観測平面図

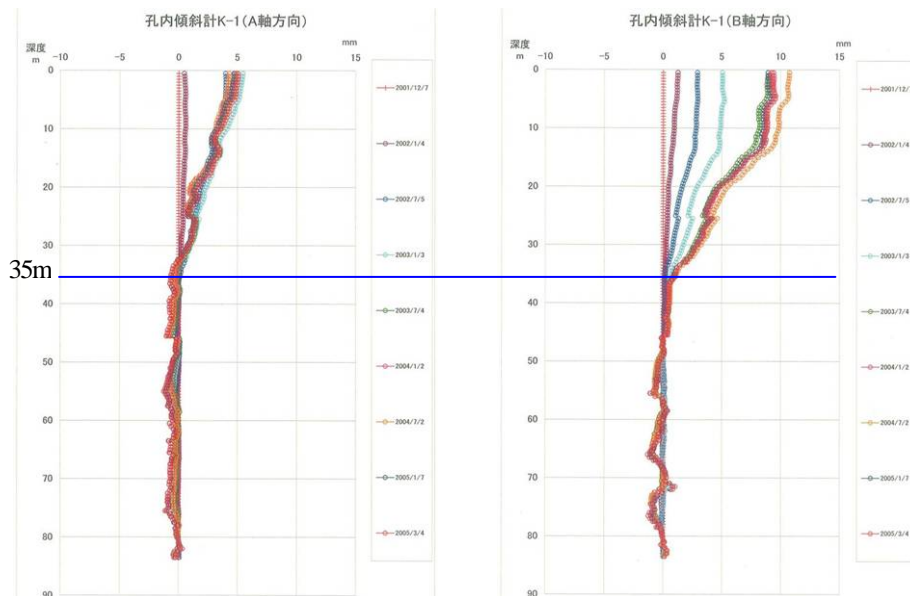


図5.4 孔内傾斜計の観測結果 (K-1)

ただし、孔内傾斜計K-1の深度63m付近では、図5.5に示されるとおり、わずかではあるが変位の増加傾向が見られたため、孔内傾斜計については、観測終了とせず、H17年以降1月に1回の手動計測として継続した。

図5.6にH17年度以降における孔内傾斜計の手動観測の結果を示す。

H17年度1年間観測した結果、63m深度あるいは他の深度においても変位の累積は確認されなかった。

この結果をもって、斜面深部においても変状がほとんど無いことが確認されたため、H18年度をもって

観測を終了とした。

ケース1における観測体制の移行を、ライフサイクルコストモデルに当てはめたものを図5.7に示す。

一度H17年2月に安定性の評価を行い、GPS、岩盤変位計の観測終了および孔内傾斜計の手動観測への以降を実施した。さらにH19年3月に再度安定性の評価を行い、全観測を終了している。

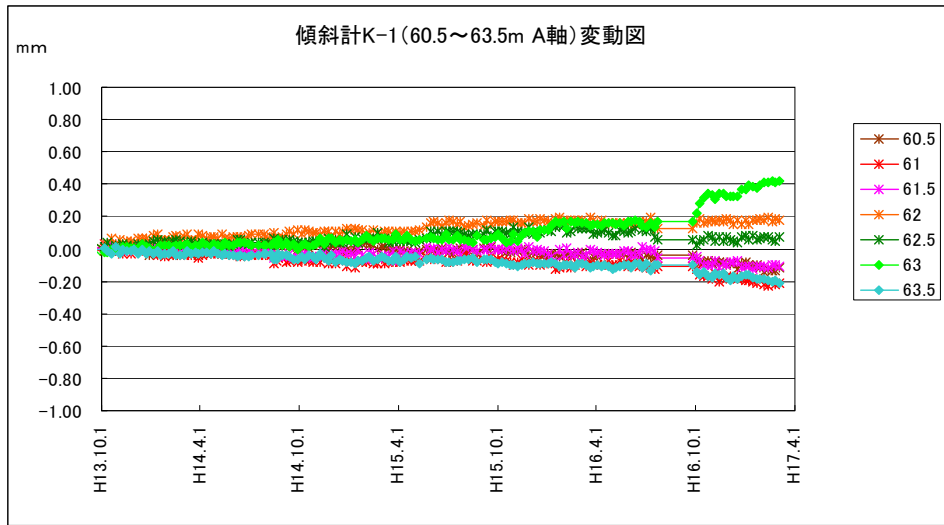


図5.5 孔内傾斜計K-1 60.5m~63.5mにおける観測結果 (時系列整理)

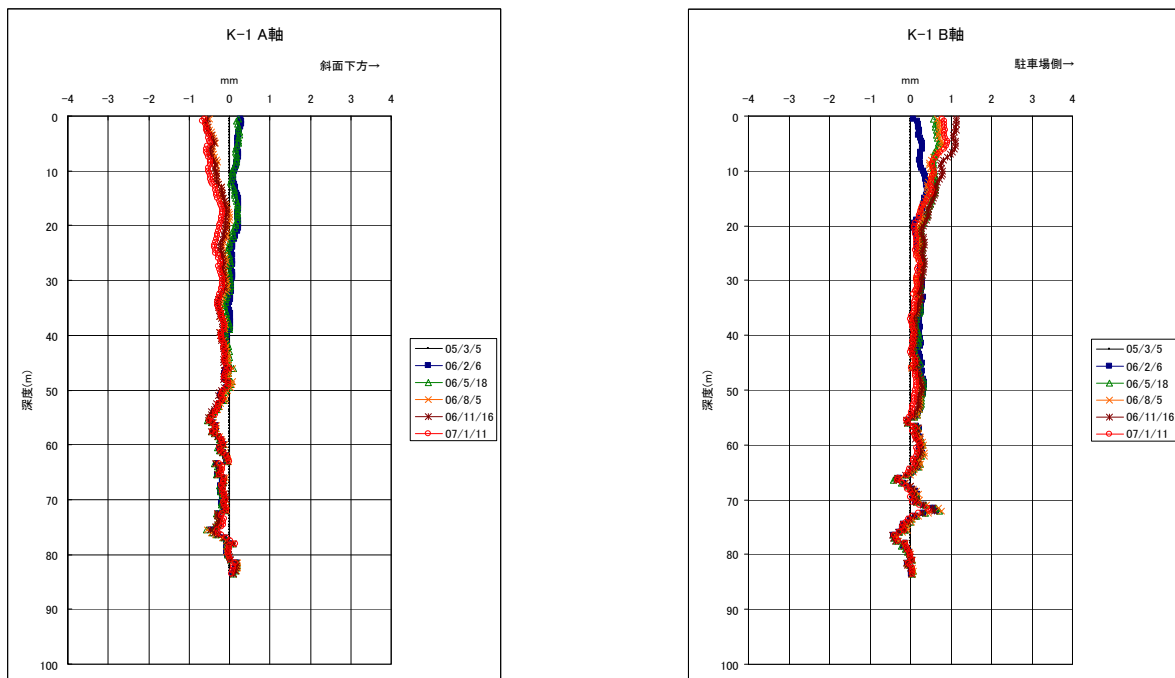


図5.6 H17年度における孔内傾斜計の観測結果 (K-1)

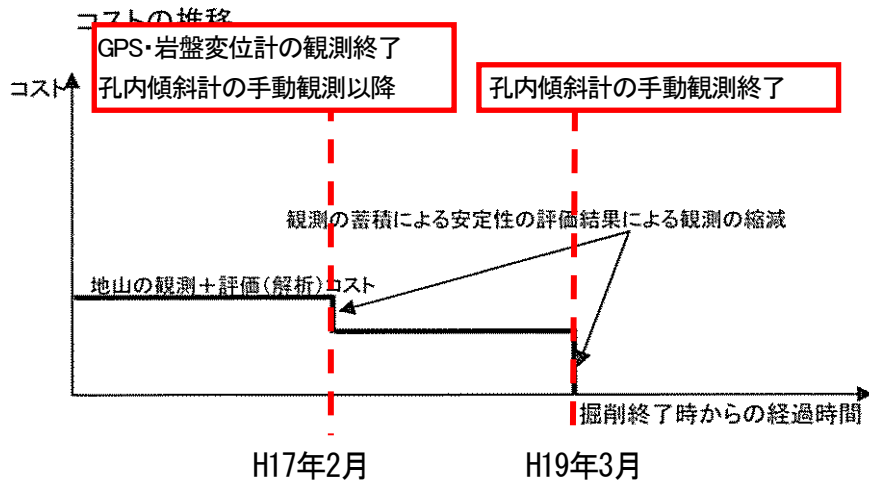


図5.7 ケース1におけるライフサイクルコストモデル

b. ケース2

法面の高さは約80mで掘削勾配は1：0.5～0.8である。斜面の地質は粘板岩・輝緑凝灰岩・石灰岩・砂岩と多種の岩種が混在するが、これらの岩種がおおむね上下流走行・山差しの層状構造をなしている。なお、法面の法尻下部に低角度断層（FL-0）が分布しており、これより下位の堤敷の基盤においては地質構造に変化が見られるが、法面内部にはすべり変状を示すような弱部は確認されなかった。

図5.8に法面の観測計器配置図を、図5.9に法面の断面図と孔内傾斜計等による観測状況を示す。

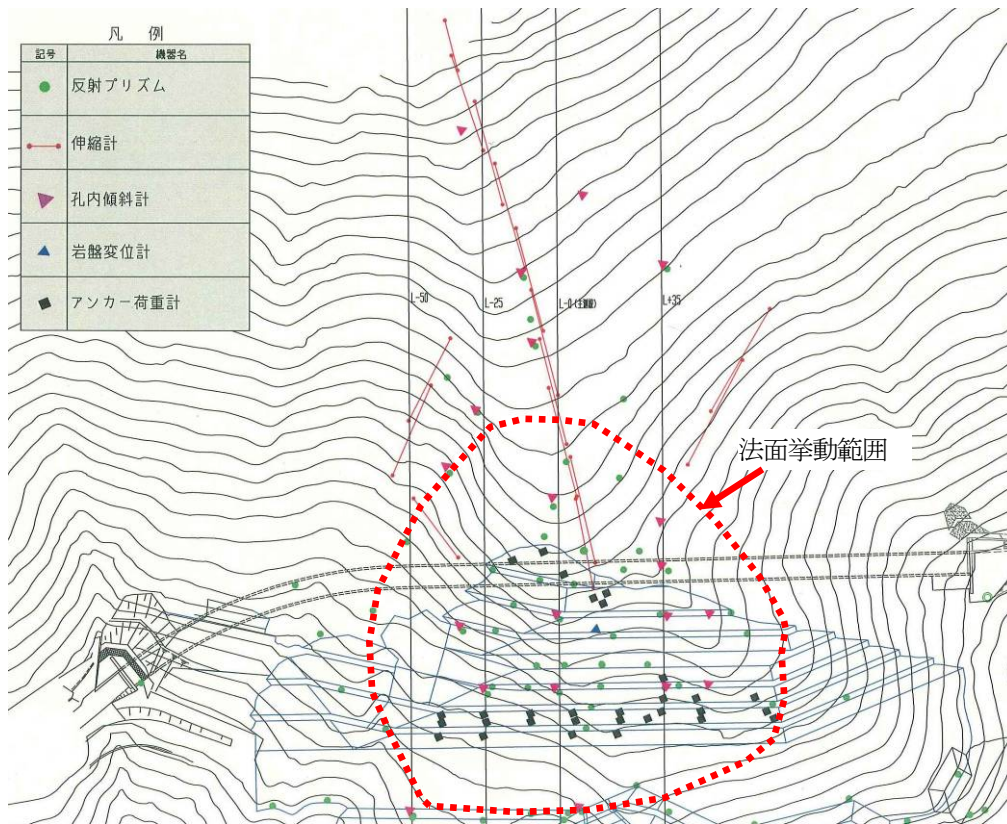


図5.8 観測計器配置図

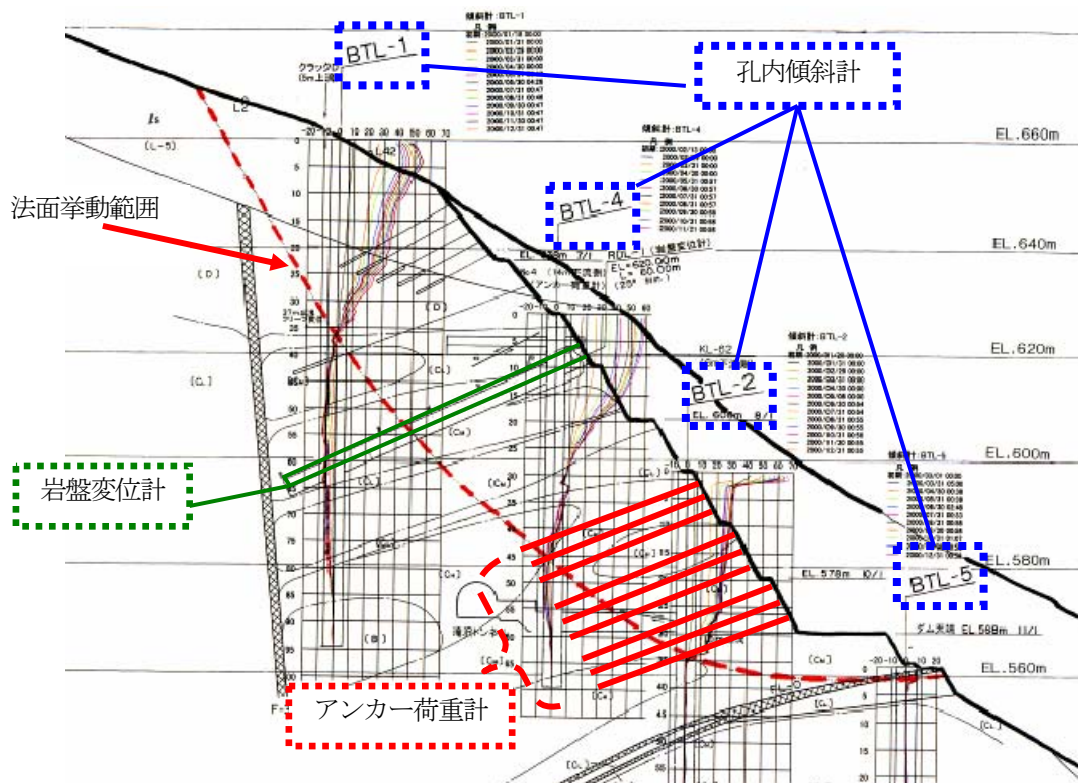


図5.9 ダムサイト天端以上左岸法面断面図および光波による観測計器設置状況²⁾

観測計器の選定と配置については以下の観点で実施した。

①光波観測（反射プリズム）

変動範囲を平面的に確認するため、トータルステーションによる自動観測で、法面の内外に約60基以上設置した。観測頻度は最大で1日4回で、X-Y-Z軸の変位を観測した。

なお、計器の精度はカタログ上では $\pm (1+2\text{ppm} \times D)$ mm D ：トータルステーションとプリズムとの距離（この現場で約0.5km）とされている。

②伸縮計

変動範囲の上端部を確認するため、法面の頂部から上部斜面にかけて合計10基の伸縮計を設置した。端部の2つの伸縮計を除き観測区間長を40mとり、20mずつラップさせて観測区間の漏れをなくすよう配置した。

この伸縮計のカタログ上の精度は $\pm 1\text{mm}$ 程度である。

③孔内傾斜計

主測線および副測線における変動範囲の深度を確認するため、主測線に4基、副測線に2基、必要に応じ法面外に4基設置した。これらは当初は1日1回の自動観測を行い、観測状況の進展に伴い法面の安定性の評価を実施後、観測頻度の軽減や手動観測への切り替え等を実施した。なお、計器の仕様についてはケース1で使用したものと同等である。

④岩盤変位計

主測線における変動範囲の深度を確認するため1基設置した。

深度は60mとし、10m毎に測定区間を設けた。1時間に1回の自動観測を実施した。なお、計器の仕様についてはケース1で使用したものと同等である。

⑤アンカー荷重計

対策工として実施したアンカーの荷重を測定するため設置した。9段施工したアンカーの内3段において6～8本おきに荷重計を配置した。

最大荷重で200kN測定可能で、カタログ上の精度は約 $\pm 0.2\text{kN}$ であった。

観測結果から、法面の挙動範囲を図5.8および図5.9にて赤点線で示す。

以下に対策工実施前から現在に至る代表的な計器による観測状況と法面の安定性について述べる。

図5.10に光波観測のある一点の観測データを示す。

図5.10では、茶色が斜面の山谷方向の軸で、プラスが川側方向への動きを示す。

なお、この斜面はH11年5月に掘削を開始し、H12年3月より対策工を開始、対策工はH12年8月に完了し、現在に至っている。

光波観測のデータからは、H12年3月まで変位が急増し、対策工施工後は変位挙動が緩やかとなり、特にH15年以降は変位の顕著な累積は見られなくなっている。

しかし、対策工施工後は誤差が目立つようになった。また、H14年以降頻繁に機械のメンテナンスを実施する必要に迫られ欠測が多くなり、またメンテナンスのコストがかかるようになるといった問題が発生した。

また、法面頂部に設置した伸縮計についても表面での動きが小さくなったため、観測値に変化が見られないようになり、かつ直射日光による保護管の曲がり等が頻繁に発生することによるメンテナンスコストの増大が発生した。

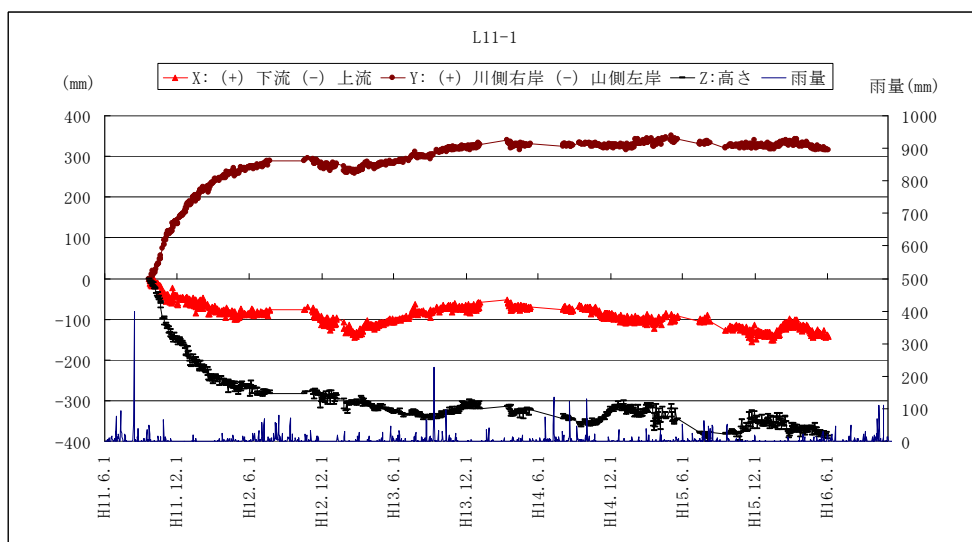


図5.10 光波観測データ（時系列整理）

続いて図5.11に孔内傾斜計における各深度の時系列変化の一例を示す。

孔内傾斜計のデータは気温等の影響があるものの補正が可能であり、また地中の傾斜を直に測定するため、光波観測より精度が高い。また、孔曲がりの影響で欠測した期間があるものの、光波観測ほどメンテナンスの頻度は高くなく、比較的長期の観測を実現している。

また、岩盤変位計、アンカー荷重計についても誤差のほとんどない状態で、長期にわたってほとんどメンテナンスを行わず長期の計測を実現している。

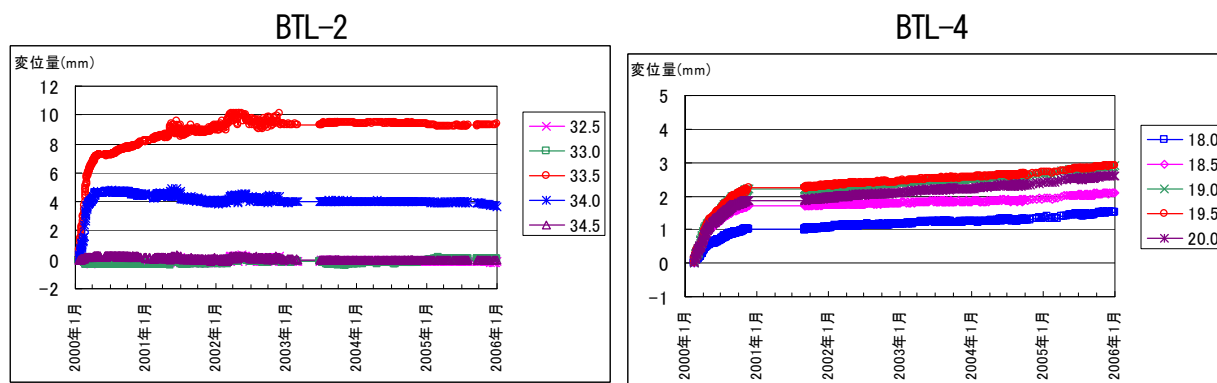


図5.11 孔内傾斜計観測データ（時系列整理）²⁾

これらの観測結果および観測計器の状況から、ダムサイト左岸天端以上斜面については、H16年10月に法面の安定性の検討および計測状態の確認を実施した。その結果、表面を計測する光波観測・伸縮計については、地表における変状がほとんど確認されなくなったこと、誤差の増大やメンテナンス頻度の増大の問題が生じたことから観測を終了した。

また、孔内傾斜計、岩盤変位計といった地中の変動を計測する計器、アンカー荷重計のような対策工の効果を確認する観測計器については引き続き観測を継続することとした。

さらに、H19年3月に再度データを検証し法面の安定性の評価を実施した。その結果、法面にはほとんど変状が確認されなかったことから、対策工効果確認としてアンカー荷重計と、地中の変動を計測する計器としては主測線に配置された孔内傾斜計の内2基と岩盤変位計のみを観測継続とした。

このケースにおける観測体制の移行を、ライフサイクルコストモデルに当てはめたものを図5.12に示す。

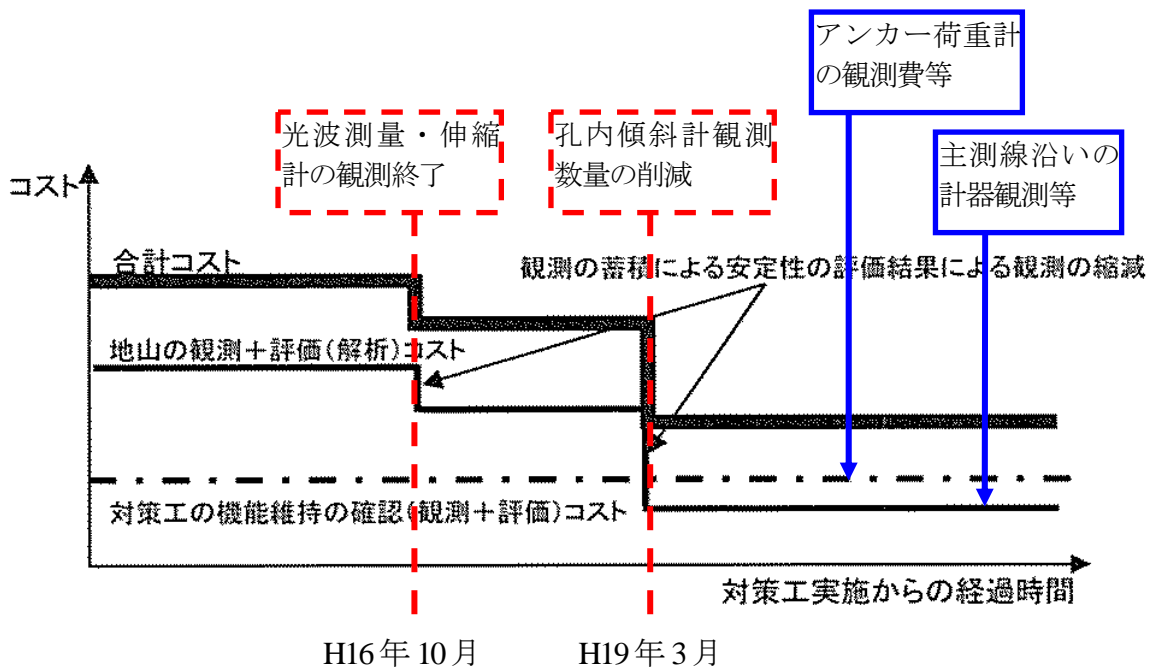


図5.12 ケース2におけるライフサイクルコストモデル

5.1.4 ライフサイクルコストモデル検討における課題

a. 安定性の評価材料となる管理基準値の設定

ライフサイクルコストモデルに基づき、観測を軽減していく過程においては、斜面の安定性を評価する必要がある。その際、安定性を評価し、観測を削減するための管理基準値の設定が重要となる。今回検討したケースにおける管理基準値は以下の通りである。

- ①ケース1では全体的に変動量が小さく、管理基準値の適用の場面がなかった。
- ②ケース2では孔内傾斜計で管理基準値を設定。

ケース2では図5.13に示すような地表面傾斜計を用いた岩盤斜面の安定度評価法の提案(菅原1998)³⁾の傾斜計による角速度基準を準用している。

ただし、斜面管理の実態として、変動時はいろいろな計器において管理基準を設定されているが、挙動が小さくなった管理時における管理基準値の例はあまり存在しないのが実態である。

傾斜角速度 (rad/d)	斜面の安定度評価
	日常斜面の変動.
10^{-5}	崩壊の可能性を持った斜面の変動.
10^{-4}	崩壊の危険があり, 警戒を要す.
10^{-3}	崩壊の危険が迫っている. 対応策を検討する必要あり.

図5.13 地表面傾斜計を用いた岩盤斜面の安定度評価法(菅原1998)

b. 観測計器の耐用年数, 誤差

ケース2で見られた例を検証すると, 安定性評価を行うための観測計器には耐用年数や誤差に関する点で以下のような問題が発生している.

①光波測距儀は誤差が大きく, かつ欠測等が発生しやすいことから, 定期・不定期の点検が多くコストがかかる.

②孔内傾斜計は耐用年数を超えて使用しているが, 耐用年数を超えた計器の精度については不明確である.

これらは観測計器が持つ計器としての根本問題である. これらの問題を考慮に入れつつ効果的なメンテナンスを実施しながらの安定性評価, 観測の削減を実施していくためには, 今後いろいろな斜面計測の事例を収集・検討していく必要があるものと考え.

5.2 ダム基礎岩盤の長期計測

5.2.1 概要

ダム等の大型構造物は, 長期にわたって使用されるので, その間, 設計時に想定された性能が十分に保たれているのかを監視する必要がある. 計測によって得られたデータが, ダムの安全性の評価につながるものである. ここでは, 黒部ダムでの計測例を示す.

5.2.2 黒部ダムでの計測項目⁴⁾

黒部ダムでは, 約40年以上に亘ってダム本体のみならず基礎岩盤の挙動についても計測監視が続けられている. 一般に計測の目的は, 「ダムの安全性の確認」と「ダム設計技術の向上」の二つに分けられる. これらの目的のため, 組織的かつ長期的に様々な計測が実施されている.

黒部ダムのようなアーチダムは, 岩盤とダムとの接触面積が重力式ダムに比べて少ないため, 岩盤は狭い範囲に大きな力を受けることになる. したがって, 岩盤の挙動を把握することは, ダム自体の挙動の把握と同様重要である. しかしながら, 岩盤には断層や割れ目があり, 均質でなく測定する方法や場所により局所的な現象が目立ち評価が難しい. また, 局所的な現象が全体の挙動を左右することも考えられ, 計測器の配置と配置箇所の地質状況を踏まえて上で, 評価を行う必要がある. 黒部ダムでは, ダム本体の測定はもとより岩盤中にも多くのトンネルを設け, 下げ振り, 岩盤変位計, 精密水管傾斜計等で測定がなされている.

測定は, 静的挙動測定と動的挙動測定に分類される. 静的挙動測定は,

- ① 作用荷重の測定: 貯水池水位, 貯水池水温, 気温
- ② 水平変位測定: ペンジュラム, 精密三角測量, 視準測量, 岩盤変位計
- ③ 鉛直変位測定: 精密水準測量, 精密水管傾斜計

- ④ 角変位測定：精密水管傾斜計，クリノメータ
- ⑤ ダムのひずみ，応力，温度の測定：ひずみ計，応力計，温度計
- ⑥ その他の測定：継目計，断層変位計，浸透水流の測定，ダムコンクリートの力学的特性に関する測定，ダムの弦長および谷幅測定

である。動的挙動測定は、

- ① 岩盤の微小地震波の測定
- ② 地震時のダム及び岩盤の地震応答測定

に大別される。

5.2.3 黒部ダムの挙動⁹⁾

計測結果及びその評価について、文献4)に詳細が記載されている。定常的な既設変動は、計測されており、有限要素法などによる数値解析を実施し、それら計測結果との比較検討がなされている。現状では、計測結果は十分に議論されており、維持管理上の問題点や明確に補修すべき点などは計測結果から得られていない。安定した挙動である。

一方で、あと40年の年月が経てば、計測結果に何らかのサインが示されるかもしれない。その時の判断基準やどのような保守・管理を行うのかは、議論を開始してもいい時期に来ている。

参考文献

- 1) 榎暁史・向居忠昭・富田浩史：滝沢ダム原石山における法面挙動観測と安定性評価，平成16年度水資源機構技術研究発表会関東ブロック大会講演集，2004.9
- 2) 江口貴弘・木戸研太郎・津久井正明：滝沢ダム左岸ダム天端以上掘削に伴う変位挙動の長期観測，平成18年度水資源機構技術研究発表会関東ブロック大会講演集，2006.9
- 3) 菅原紀明：地表面傾斜計を用いた岩盤斜面の安定度評価法の提案，大規模岩盤崩落と計測・監視技術ワークショップ話題提供資料，地盤工学会北海道小平町国道229号崩落調査委員会，1998.2
- 4) 関西電力株式会社編：黒部ダム測定報告書-1960～1995-，1998.

6. 物理探査による岩盤構造物の健全性評価の取り組み

6.1 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。

切土法面は、建設直後から降雨による地下水の出入りなど様々な要因により長期的に見ると劣化が進行している（図6.1¹⁾）。しかし、従来の考え方ではそれを考慮していないのが一般的である。これらの劣化過程は、目に見えない法面内部で進行するため、強度低下が相当量進行し地表部に変位として現れるまで確認できないのが現状である。

道路防災総点検等は、表面に現れる現象（亀裂や湧水など）を目視で確認し、簡易的な計測によりその進行状況を確認するもので²⁾、法面内部の状況把握までには至っていない。これら目に見えない劣化状況を正確、客観的に確認することができれば、それに応じた対策工を実施し、未然に災害発生を防止するとともに、人的・経済的損失を最小限に抑え、かつ既設道路の延命化や将来的には、ライフサイクルコストの算出に繋がり、アセットマネジメントシステムの適用にもつながることが期待される。

物理探査は、これまで比較的深い位置での探査や均質な形状の探査を得意としてきており、斜面では屈折法弾性波探査や2次元電気探査や速度検層が用いられてきた。ところが、複雑な地形や表面の凹凸や手法によっては金属物などの影響も受けやすく、十分に活用されてきたとは言い難い。しかし、近年のコンピュータによる処理技術の発展に伴い物理探査技術の発展もめざましく、フィルタリング技術や可視化技術によって、精緻でわかりやすい表現方法で表示できるようになってきた。

これらのことから、道路法面において最新の物理探査手法の有効性を実証した。さらに、実証試験結果に基づき、物理探査の適用性、適用にあたっての注意・問題点を整理し、物理探査手法を用いた法面健全性評価における今後の展望を示す。

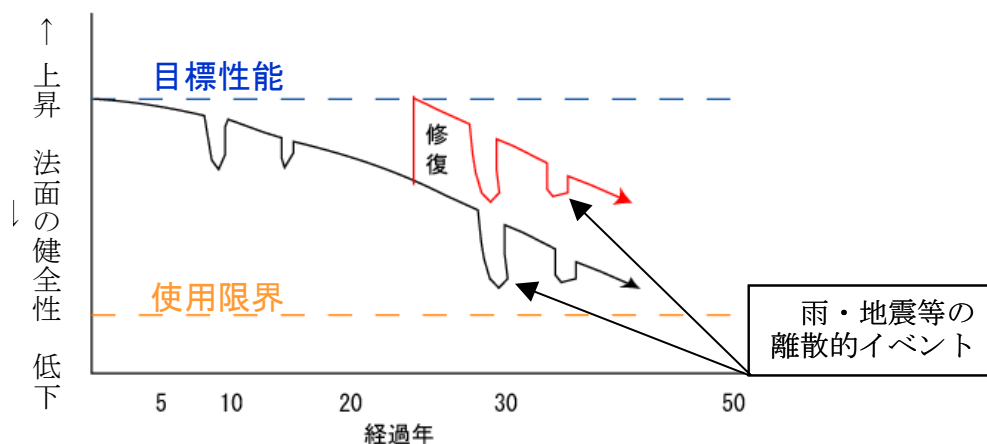


図6.1 劣化を考慮した法面健全性の考え方¹⁾

6.2 物理探査技術を使った法面調査実証実験

6.2.1 実証試験現場の概要

実証試験は、和山内の国道42号沿いの切土法面2箇所、盛土法面1箇所である（表6.1³⁾）。

6.2.2 物理探査手法の選択

目視では確認できない法面内部の健全性を評価する手法を検討するため、比較的短時間で安価に調査できる手法を公した。16グループ（20社）から応があり、法面内部の調査法として大別すると3手法が提案された。

- (1)：地中レーダ探査
- (2)：弾性波探査
- (3)：電気・電磁気探査

各社とも、実証試験地点の特徴と、物理探査手法の特性を考えた結果、表6.2³⁾に示す使い分けとなった。表に示すと は探査を実施し、有効な結果を得られたものを示す。このうち は本報告にて探査結果を紹介する。

物理探査結果は、道路管理上要求される精度を満足している必要がある。このため物理探査実施後に、同一地点にてコア きやボーリング調査等を実施し、物理探査結果の有効性を検証した。道路法面管理上特に必要と判断し、着目した物理探査対象項目は、以下の3項目である。

- 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

表6.1 実証試験地点の概要³⁾

	地点(1)	地点(2)	地点(3)
種別	切土	切土	盛土
築経過年	約45年	約45年	約45年
法高	17m	7m	12m
法勾配	1:0.5~1:0.7	1:0.8~1:1.0	1:1.5
構成地質	新第三紀砂岩泥岩互層	新第三紀砂岩泥岩互層	新第三紀層岩(基盤)
地質構造	受け盤	流れ盤	—
法面工	コンクリート付	コンクリート付	コンクリート張

表6.2 物理探査手法と実証試験地点の内訳³⁾

物理探査手法		地点(1)	地点(2)	地点(3)
地中レーダ探査	パルス波地中レーダ			—
	連続波地中レーダ	(高周波型)	—	(低周波型)
弾性波探査	屈折法探査			—
	反射法探査			—
	表面波探査	—	—	—
電気・電磁気探査	比抵抗探査			—
	VLF探査	—	—	—
	FDEM探査	—	—	—

6.3 各物理探査手法の概要と結果

6.3.1 地中レーダ探査

地中レーダ探査は、**図6.2**⁴⁾に示すように電磁波を地中に発射してその反射波を捉えるもので、地中探査では道路路面下の空洞探査などで実用化されている技術である。

(1) パルス波地中レーダ

実証試験で使用したパルス波地中レーダ探査装置は中心周波数200・300・400・700・900MHzのものである。アンテナは、ロープ等を用いて法面に設置し、距離計等も配置を工夫して探査位置の精度を確保した(**図6.3**⁴⁾)。

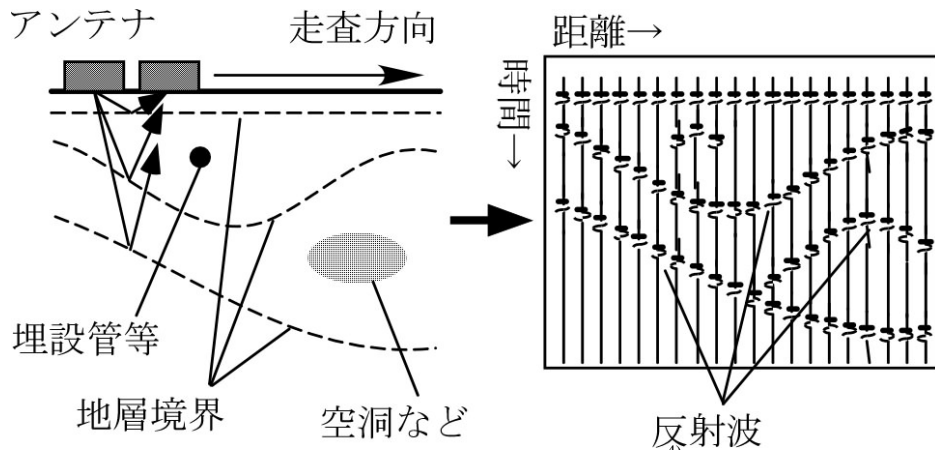


図6.2 地中レーダ探査の原理⁴⁾



図6.3 パルス波地中レーダによる探査状況⁴⁾



図6.4 連続波地中レーダによる探査状況⁴⁾

(2) 連続波地中レーダ

連続波地中レーダは、周波数帯域5～160MHz（低周波型）と50～500MHz（高周波型）を用いた。パルス波地中レーダのアンテナに比べるとかなり大きく、各アンテナには2名の作業員（計4名）を配置し、アンテナを法面に押さえながらの作業になる(**図6.4**⁴⁾)。

(3) 探査結果

図6.5は、中心周波数700MHzのアンテナによる 付コンクリート背面に空洞が確認された例である⁴⁾。測線中央の深度20cm付近から深度方向に強い反射波が検出されている。

図6.6は、中心周波数200MHzのアンテナによる探査結果の例で、探査深度は約3mである⁴⁾。深度50cmより深いところに右側に傾斜した反射面が同じ方向に傾斜する姿が断続的に検出されている。これらから岩盤内部の層理面の構造を知ることができる。ここから、層理面の構造が流れ盤か、受け盤か判断することが可能である。

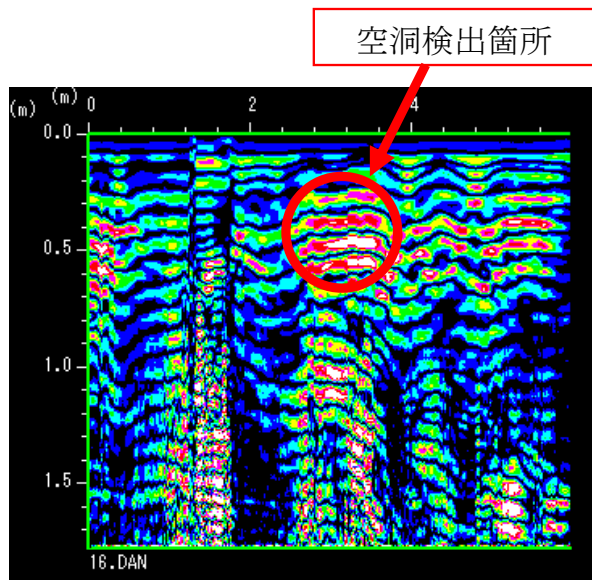


図6.5 700MHzアンテナによる空洞探査事例⁴⁾

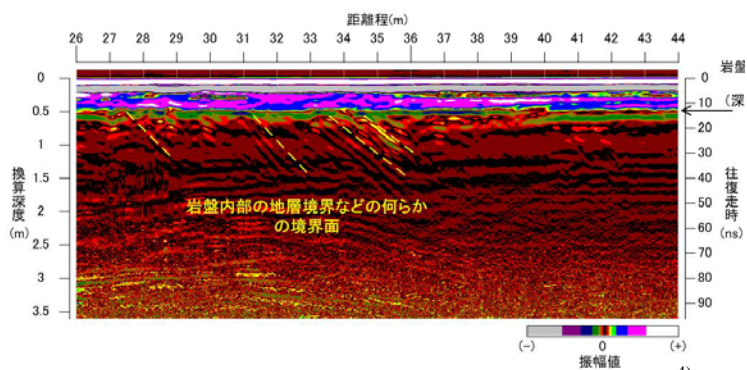


図6.6 200MHz周波数による地層境界検出事例⁴⁾

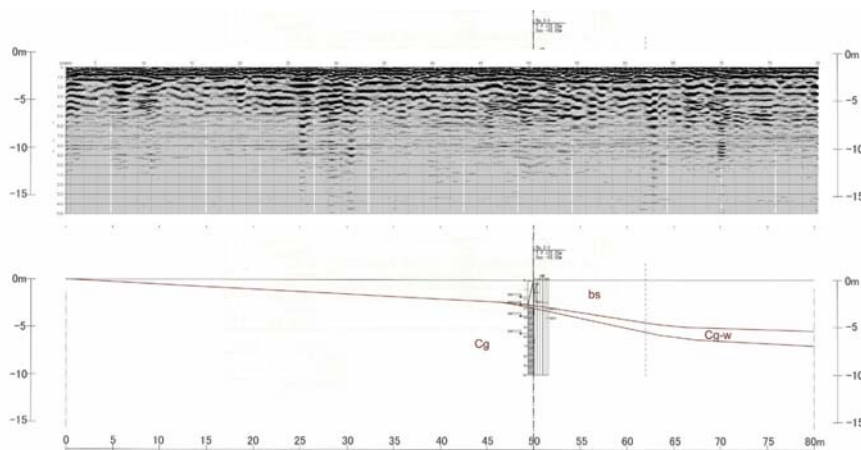


図6.7 連続波レーダ（低周波型）の探査事例（地点(3)）：断測線⁴⁾

図6.7は、地点(3)における連続波レーダによる盛土法面小段沿いの探査結果である⁴⁾。左から右に深くなる傾斜を持った反射面が検出されているが、同図下段の地質断面図から、盛土 地山境界線とほぼ一致することが確認できる。

地点(3)では、法面表層の張コンクリートに鉄筋が存在していたが、ほぼその影響を受けずに探査することができた。

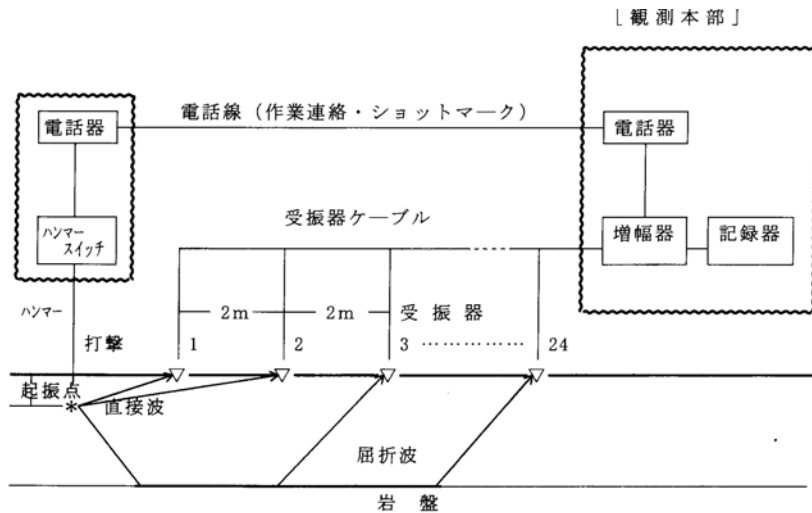


図6.8 屈折法弾性波探査の測定概念⁵⁾

6.3.2 弾性波探査

(1) 屈折法探査

屈折法弾性波探査（屈折法探査）は、地表でカケヤキ等によって弾性波（波または波）を発生させ、地下の速度の異なる境界面を屈折して伝播する屈折波を測定することにより、地下の速度構造を求める手法である。この方法は、土木地質調査で用いられる一般的な調査手法である(図6.8⁵⁾).

起振・受振点間隔は、斜面上の実距離2.0 m程度とした。受振点では付面にハンマドリル等で孔を開け、受振器を地山に取り付けた。

(2) 反射法地震探査

反射法地震探査（反射法探査）は、地表でカケヤキ等によって弾性波（波または波）を発生させ、その弾性波が地中を伝播し音響インピーダンス（速度×密度）の変化する境界から反射して地表に届ってくる微弱な反射波を測定することにより、地下の速度の異なる境界面および地下の速度構造を求める手法である(図6.9⁵⁾).

測線展開方法および起振方法は屈折法弾性波探査と同様であるが、ほぼ全ての受振点で起振も実施する必要がある。

(3) 表面波探査

高密度表面波探査（表面波探査）は、地盤の地表付近を伝わる表面波（レイリー波）を多チャンネルで測定・解析することにより、深度20m程度までの地盤の波速度を求める手法である(図6.10⁵⁾).

測点展開は上下動受振器24個を1m間隔で地表に配置し、起振は地表でカケヤキにより波起振を行った。受振器は、平面では三台を使用し、傾斜地では粘土を用いて水平を確保した(図6.11⁵⁾).

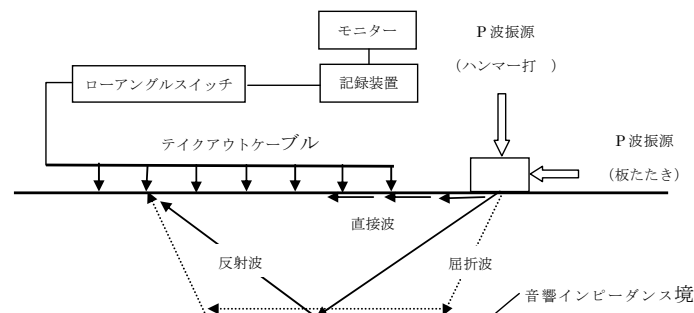


図6.9 反射法地震探査の測定概念⁵⁾

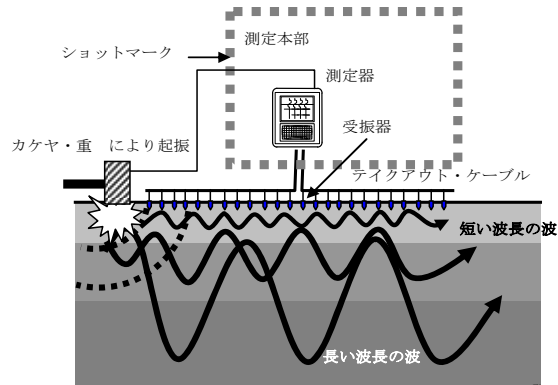


図6.10 高密度表面波探査の測定概念⁵⁾

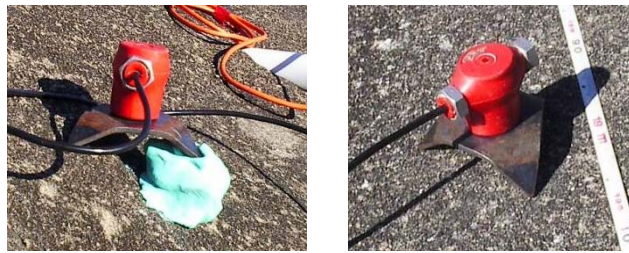


図6.11 受振器設置状況 (左: 傾斜地, 右: 平地)⁶⁾

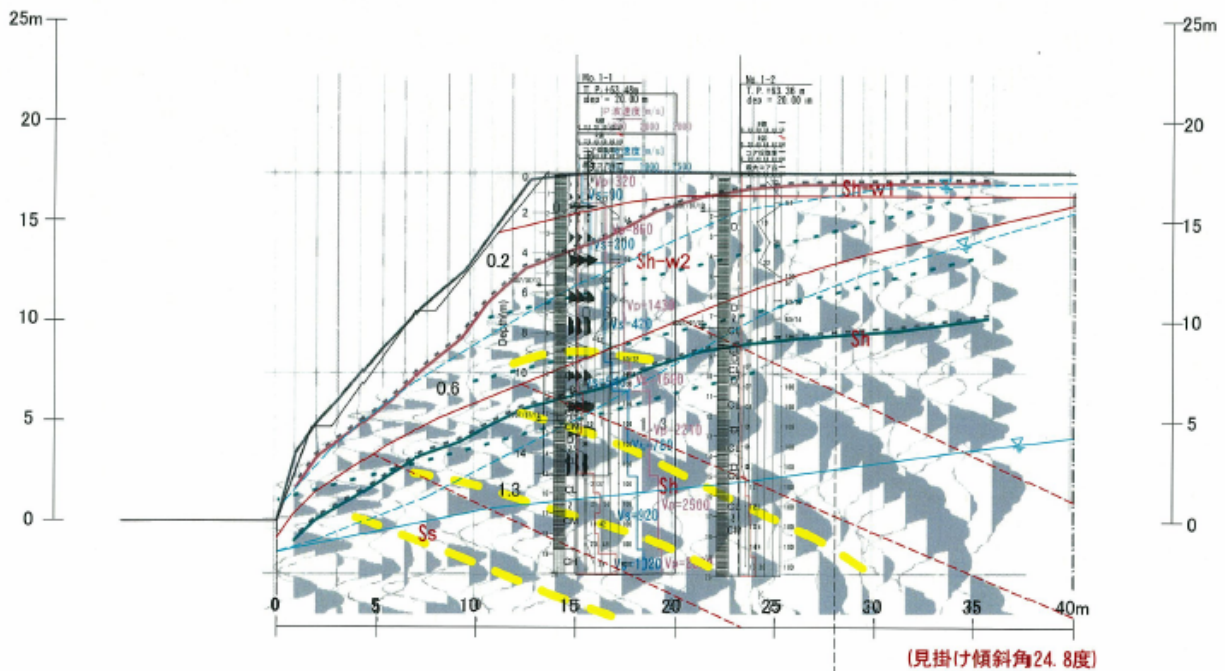


図6.12 地点(1)における屈折法および反射法地震探査事例⁶⁾

(4) 解析結果

図6.12は、地点(1)における屈折法弾性波探査および反射法地震探査事例である⁶⁾。

屈折法弾性波探査では、P波およびS波の速度層境界は一致し、強風化部に相当する第一速度層は、斜面および法で厚く、頂上の平部では薄い。また、風化岩に相当する第二速度層は、斜面方向に緩やかに傾斜する。ボーリングで確認した基盤深度と第二速度層の下面深度はほぼ一致している。

地点(3) みなべ町山内

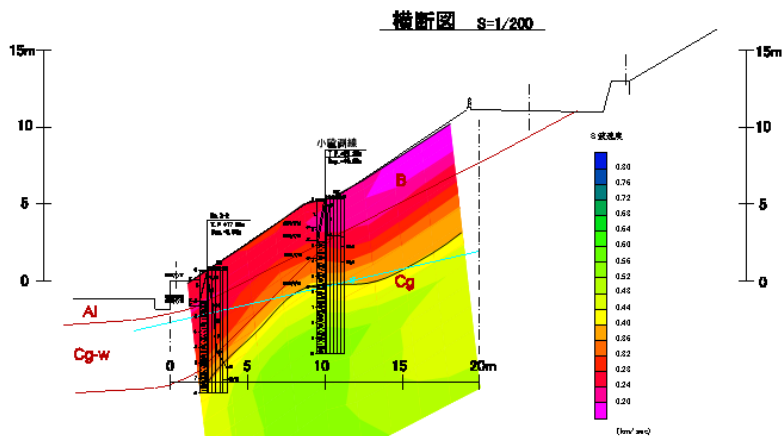


図6.13 表面波探査事例（地点(3)：横断測線）⁶⁾

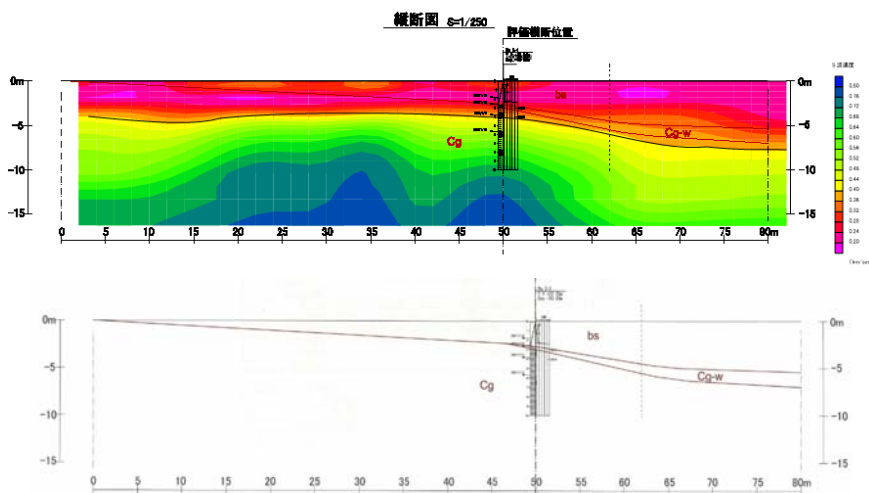


図6.14 表面波探査事例（地点(3)：断測線）⁶⁾

反射法地震探査では、ボーリング孔で実施したPS検層データを用いたVSP解析結果と対比すると、風化層内の構造はVSPと一致するものが認められている。基盤内の構造はVSPとは必ずしも一致しないが、基盤内の受け盤構造が得られており、本調査地の地質構造と良く一致している。

図6.13は、地点(3)横断測線で実施した高密度表面波探査事例である⁶⁾。上段部分の盛土部(B)、および下段部分の岩の風化部(Cg-w)を低速度部として捉えている。また、堅硬な岩盤部(Cg)を高速度部として捉えている。孔内速度検層の結果と比較すると、上段部分の盛土部(B)の下の厚さ4m程度の部分は低速度部であり、表面波探査結果と良く一致している。

図6.14は、地点(3)断測線の事例である。Vs=400m/sの境界が、下段の地質断面図から、盛土地山境界線とほぼ一致することが確認できる。

6.3.3 電気・電磁気探査

(1) 比抵抗探査

比抵抗探査（高密度電気探査）は、図6.15に示すように適当な最小電極間隔aで多数の電極を測線上に置き、水平方向について電極間隔を、a,2a,3a,・・・と拡げて測定し深度方向の測定データを2次元断面に展開する方法である⁴⁾。付面上ではジオゲル電極の使用により削孔が不要（非破壊）で、コストの低減や作業の省力化にもなっている(図6.16⁴⁾)。

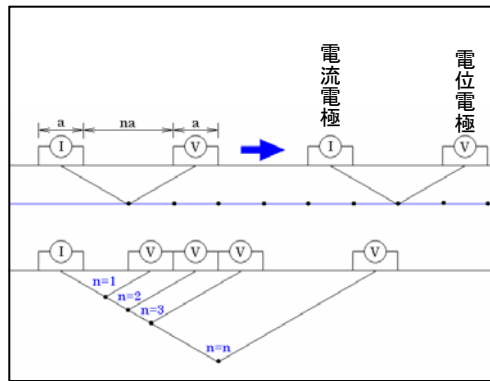


図6.15 2次元比抵抗法の測定概念⁴⁾



図6.16 ジオゲル電極と測定状況⁴⁾

(2) VLF探査

VLF(Very Low Frequency)探査法は、対水向けに発信している大電力のVLF局（えびのJJI局、周波数22.2kHz）からの信号が十分離れた測定地点では平面波ができているという仮定から、測定磁場のベクトルの位相差や偏角などから異常地点を探査する方法である。図6.17が測定概念、図6.18は測定機器と測定状況である⁴⁾。測定器は携帯可能であり、磁場のみの測定法の場合は短時間に多数点の測定が可能である。

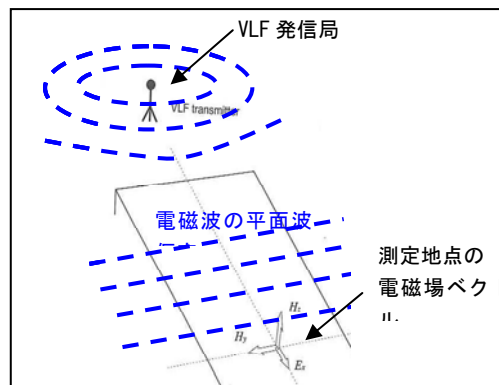


図6.17 VLF探査法の測定概念⁴⁾



図6.18 VLF法の測定機器と測定状況⁴⁾

(3) FDEM探査

FDEM (Frequency-Domain Electromagnetic) 探査法は、従来のEM法の発信周波数を多数にし、高い周波数で浅部を低い周波数では深部を探査するものである。図6.19に測定原理の概念を示す。送信コイルで1次磁場を発生し地盤内の導電体から生ずる渦電流によって誘導される2次磁場の強度を測定し1次磁場の比率から測定周波数ごとの見掛け比抵抗を求める。図6.20は探査状況を示す⁴⁾。FDEM探査機の発信周波数は11.4kHz～364.0kHzまでを16チャンネルで自動切換え発信で測定できるものである。

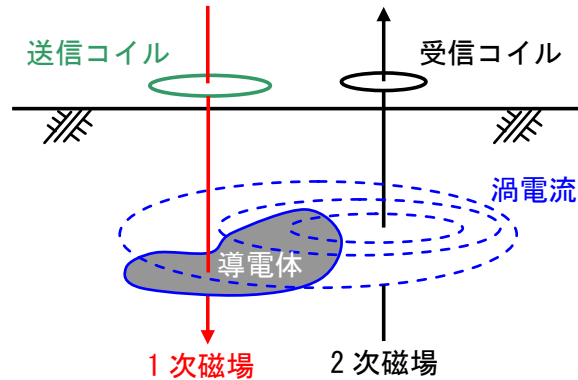


図6.19 FDEM探査の測定原理の概念図



図6.20 FDEM探査の測定状況⁴⁾

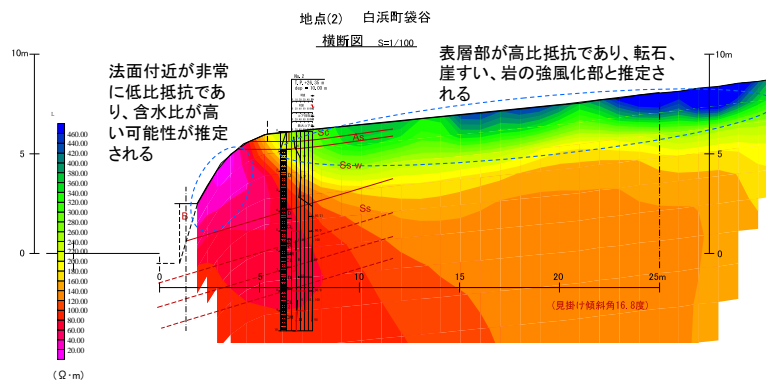


図6.21 2次元比抵抗探査による比抵抗断面図⁴⁾

(4) 探査結果

比抵抗探査結果事例を図6.21に示す⁴⁾。

ボーリングの結果より、付法面より上方、緩斜面表層に認められる高比抵抗部は、低含水状態の表土あるいは砂岩の強風化部と考えられる。付法面部の低比抵抗部は含水比が高いあるいは風化が進み粘土化した状態と考えられる。岩盤の地質構造が流れ盤であるかどうかは評価できない。

地下水は、ボーリング結果からは認められなかった。比抵抗が法面下部の左斜め下方にかけて徐々に低くなる様子は含水比の違いを反映していると考えられるが、地下水の有無は判定できない。

VLF探査結果事例を図6.22に示す⁴⁾。折線グラフの上の折線は生データ（1次磁場と同相の応答磁場）であり、下の折線は応答磁場の傾斜角を用いフィルター理論による処理で求めた電流密度の割合の測点変化である。この折線の山谷の急な箇所が異常点で、地層や地質の変化点、あるいは地下水の多くなる箇所などを反映するとされる。

下図の電流密度がプラス側は低比抵抗側、色系は高比抵抗側に概ね対応する。比抵抗値を知るためには電場の成分も測定する必要があるが、今回は電極棒の打設を要するが、今回は実施していない。

法尻と法 付近に低比抵抗部が認められる。また、地山の斜面の中央付近の下方が低比抵抗となっている。VLF探査法は、利用する周波数が単一であるため深度情報が不足しているため表層の状態しか探査できない点を留意しなければならない。

地下水は、低比抵抗になっている箇所が高含水比であると評価できるが、地下水の有無は判定できない。

FDEM探査結果事例を図6.23に示す⁴⁾。法尻付近は10 Ω・m前後の低比抵抗で全般的には100 Ω・mで分布する。比抵抗探査結果とは概ね整合している。

図にはボーリング結果による地層の傾斜角の線が表示されているが、比抵抗分布図の高比抵抗部の連なりから流れ盤になっているように見える。

なお、FDEMの実施日の前日に降雨があった関係で、緩斜面表層が低比抵抗となっている点が、比抵抗探査結果と異なる。

法尻部には比抵抗探査結果と同様に低比抵抗部が認められるが、地下水の有無は判定できない。

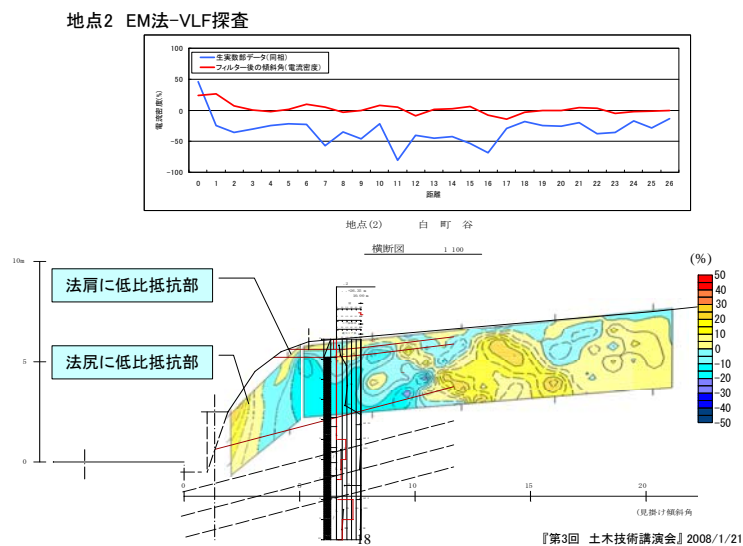


図6.22 VLF探査結果の解釈図⁴⁾

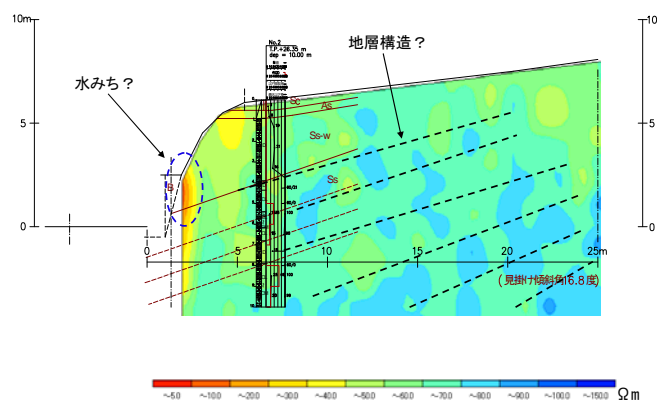


図6.23 FDEM探査による比抵抗断面図⁴⁾

6.4 法面の健全性評価の適応性

6.4.1 各探査手法の有効性

(1) 地中レーダ探査

地中レーダ探査は、パルス波地中レーダと、連続波地中レーダの2種類が実施された。今回の実証試験結果からその特徴をまとめると次の通りである。

- ・ パルス波地中レーダは、高分解能であるが、探査深度は約2mまでである。比較的lowコストであるため測線を多く設定し面的な探査が可能である。主に、付面背面の空洞探査、浅い深度での地質構造確認に適すと考えられる。留意点としては、鉄の配置とアンテナの設置方法を工夫することにより鉄を探査する、あるいは逆に鉄の影響を低減することも可能であり、調査目的に応じて使い分けことが可能である。
- ・ 連続波地中レーダは、パルス波地中レーダよりは干分解能は低下するが、深度10m程度まで探査可能である。主に、切土および盛土法面の地質構造確認に適すと考えられる。さらに鉄の配置にもよるが、法面表面の鉄の影響を極力減らして、その下位の地盤状況を確認することが可能である。

(2) 弾性波探査

弾性波探査は、屈折法探査、反射法探査、表面波探査の3種類が実施された。今回の実証試験結果からその特徴をまとめると次の通りである。

- ・ 屈折法探査は、地盤のP波およびS波速度層分布を捉えることができる。一般に高い速度ほど固い地盤を表し、低速度になると土砂部あるいは破砕帯等の劣化部の存在が考えられる。今後の劣化進行が特に念される切土法面においては、定期的に長期モニタリングによりP波およびS波速度の変化（低下度合）を捉えることで、切土を構成する地質の劣化進行状況の把握に適することが考えられる。
- ・ 反射法探査は、10m～20m程度の深さまで地質構造確認に適すと考えられる。
- ・ 表面波探査は、対象が盛土に限定されるが、作業が比較的簡便で低コストであることから、盛土地盤線境界の把握に適することが考えられる。また、S波分布図からN値分布図に解釈できる特徴がある。

地下水については、今回の実証試験の結果では、その存在を捉えることができなかった。しかし、地下水が飽和状態で存在する場合は、不飽和部よりもP波速度が上昇することが知られている。他の手法と組み合わせ等による精度向上が期待でき、今後の研究成果が待たれる。

(3) 電気・電磁気探査

電気・電磁気探査は、多数の探査手法の中から、VLF探査、FDEM探査、比抵抗探査の3種類が実施された。今回の実証試験結果からその特徴をまとめると次の通りである。

- ・ VLF探査は、安価・簡便な手法であり、広域な地盤情報収集に適するため、切土劣化部の絞り込みに適する可能性がある。
- ・ FDEM探査と比抵抗探査は、地盤の比抵抗分布を捉えることができる。地下水の飽和・不飽和状態と地盤の物性により、比抵抗値に変化が生じるため、解釈に注意が必要である。今後の劣化進行が特に念される切土および盛土法面においては、長期モニタリングにより地下水の状態、および地盤の劣化を把握できる手法として期待される。しかし、現時点ではボーリング孔を用いて直接地下水を計測する手法と比較できる段階には至っていない。今後地下水条件が異なる時期に複数回測定し、その差分を求めることで地下水の存在を捉えられるか、検証する予定である。

なお、本手法の留意点としては、近傍に鉄工作物などの低比抵抗体が存在しないことが条件であり、一般に都部では適用できない場合がある。

6.4.2 道路法面管理における探査手法の選択

今回の実証試験は、和山の国道42号という実際の現場で、公という手法で様々な探査を同じ道路法面で試みたものである。

この結果を、道路法面の管理に活用するという観点から適用性を評価したものを表6.3に示す。

この試験結果は、上記の条件下における物理探査手法の現状での実力や限界と今後の可能性を示唆していると考えている。これまで、目視という表面情報を主体とした法面の健全性評価に対して、法面の立体的に内部構造まで踏み込んだ情報を基に健全性を評価することが現在の技術でも可能であることがわかった。

これらは、広域的、経済的に実施できる概略調査に適した調査や、より深く精密に実施できる詳細調査に適した調査方法に分類できる。しかし、これらは今後の技術開発により、コスト、精度、および探査条件等の向上が期待できる。

表6.3 道路法面管理における探査手法の適用性一³⁾

物理探査手法		切土法面	盛土法面
地中レーダ探査	パルス波地中レーダ	付背面の空洞、金属類の位置確認に有効。 概ね 2m までの地質構造(流れ盤か受け盤か)確認に有効。 コストは安価。	(評価対象外)
	連続波地中レーダ	地質構造(流れ盤か受け盤か)確認に有効。コストはやや高価。	盛土支持地盤境界線確認に有効。
弾性波探査	屈折法探査	風化度合の確認に有効。コストはやや高価。	盛土支持地盤境界線確認に有効。
	反射法探査	地質構造(流れ盤か受け盤か)確認に有効。 コストは高価。	盛土支持地盤境界線確認に有効。
	表面波探査	(評価対象外)	盛土支持地盤境界線の概略把握 コストは安価。
電気・電磁気探査	比抵抗探査	水分量変化の確認に有効。 風化度合の確認に有効。コストはやや安価。	(評価対象外)
	VLF 探査	水分量や風化度の変化点の絞り込みに有効。コストは安価。	(評価対象外)
	FDEM 探査	水分量変化の確認に有効。 風化度合の確認に有効。コストはやや高価。	(評価対象外)

6.5 今後の課題

今回の実証試験の結果、今後の法面維持管理のために必要な多くの地盤情報を物理探査により得られることがわかった。しかし、一方でこれらの手法を広く及ぼさせるためには、今後解決しなければならない幾つかの課題が見えてきた。

6.5.1 地下水探査手法の開発

今回の実証試験結果では、地下水の有無については満足できる情報を得るには至らなかった。

特に電気・電磁気探査は、一般に地盤の水分量把握に有効とされているため期待が大きかった。しかし今回の成果では、同一地点で複数の探査を実施したが、探査毎に探査日時を別にする必要があったこともあり、前日までの天候に起因する地盤中の水分量の日変化とみられる比抵抗値の差が認められ、地下水の有無、あるいは水分量の解釈が難しかった。

道路法面は、常に外気に露された環境下であり、長期的に見れば、法面を劣化させる要因として地下水情報は最も把握しておきたい項目である。現在の調査手法では、ボーリング孔を利用した水位観測による把握が一般的であるが、ボーリングによる地下水観測は、法面全体のなかの一部の点情報であり、それが法面全体の地盤の地下水を代表しているか確認が難しい。

今後は、物理探査手法を用いて、できるだけ法面全体の地下水状態を把握できる手法の開発を期待したい。

6.5.2 法面調査に適した機器の開発

今回の実証試験では、もともと斜面を対象とされていなかった手法も、その実用性を検証した。いずれの手法も、法面健全性検証に有用な地盤情報を得ることができたが、一方では斜面

を計測対象とした機器ではないために、満足できる結果をだせなかったものも見受けられた。たとえば、観測機器そのものが大きく重いために、急斜面では適用しにくいものがあった。また、ほとんどの斜面では深度10m前後まで精度良く探査できればよいことを踏まえて、測定ピッチをより細かくすれば精度向上が期待できるものもあった。

探査結果の解析については、たとえば弾性波探査と電気探査の解析が個別に行われているのが現状である。両者を組みあわせて詳細な情報、たとえば地盤の飽和度を求めるような解析手法は、研究段階にあり、確立されるまでには至っていない。

一方では、地中レーダ解析結果から地下水の存在捉える手法が研究開発中と いている。

道路管理者としては、法面健全性評価により適した物理探査機器、および解析手法の開発が行われていくことを期待したい。

6.5.3 長期モニタリング手法の選定

道路法面には、「要対策箇所」および「要点検箇所（カルテ対応）」が、合計約180,000箇所（平成19年3月現在）残されている。これらの法面を適切に管理していくためには、現在行われている目視主体の点検と組み合わせて、より精度の高い点検を実施することが望まれる。

道路法面において、地下水位の変化、地盤の劣化状況を長期的に確認するためには、同一地点をモニタリングし、その変化（差分）を捉える必要がある。そのためには長期的、少なくとも10年以上の観測に耐えうる手法でなければならない。また一方で長期観測あたっては測定者の固有差による誤差も 除する必要がある。

また、長期モニタリングに耐えうる手法は、管理者への経済的負担を軽減するために、コストパフォーマンスにも優れている必要がある。

ほぼ非破壊的な手法である物理探査は、長期モニタリングに適する条件を備えていると認識しており、これまでの実証試験成果を発展させて、今後長期観測のための、各手法の適用性の研究・実験も進める予定である。

参考文献

- 1) 山本剛・糸川政孝・船 誠二(2007)：道路法面の健全性評価に関する取組み,土木学会誌,92,10,64-67.
- 2) 財団法人道路保全技術センター(2007)：道路防災点検の手引き（雨・雪等）,1-68.
- 3) 山本・満下・楠見・小山・松岡・大西：道路法面管理と物理探査，最新の物理探査適用事例集，物理探査学会（2008），87-96
- 4) 国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所道路法面健全性検討委員会(2008)：第3回土木技術講演会「探査技術の法面健全性評価への適応性」資料，近畿技術事務所他.
- 5) 社団法人物理探査学会斜面等健全性検討研究委員会(2006)：老朽化 付法面の調査・対策の手引き,鹿島出版会，43-48.
- 6) 山本・相澤・太井子・ 藤・利岡・満下・楠見・松岡：老朽化 付け法面の弾性波探査によるモニタリングの適用性，地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム(2008)，(社)地盤工学会関西支部，1-6.

7. 室内での岩石・岩盤計測

7.1 概要

放射性廃棄物地層処分施設や二酸化炭素の地中貯留に係る対象岩盤の長期性能評価，地熱発電所や石油・天然ガス貯留池におけるエネルギーの効率的な回収，メタンハイドレート回収に伴う岩盤の安定性評価等の工学的諸問題を扱う場合，高拘束圧，（高温）条件での岩盤と流体の相互作用現象を詳細に把握する必要がある。つまり，熱（Thermal）・水（Hydraulic）・応力（Mechanical）・化学（Chemical）－（THMC）の連成挙動を精度良く記述する解析モデルの開発が不可欠である。THMC 連成挙動に対する研究は，世界的にも萌芽のレベルを脱しておらず，今後より広範囲かつ詳細に検討することが不可避である。

上述の工学的諸問題を扱う場合，対象岩石・岩盤を用いた THMC 連成場における室内での要素試験や対象を模擬した模型実験を行うことが有用である。しかしながら，HM 連成場での遠心加速実験とは異なり，化学現象を加速させることは容易ではないため，タイムスケールが大きな制約条件となる。従って，実験前・中・後での THMC 連成挙動，特に化学現象に起因する影響を詳細に把握することは困難を伴い，精度・分解能の観点から高い計測技術が必要である。

さらに，THMC 連成挙動に起因して，岩石の内部構造骨格が変化するが，その変化を細密に高精度で把握することも必要不可欠である。そこで本章では特に，岩石の微視的内部構造を非破壊観察可能である X 線 Computerized Tomography（CT）技術と，鉱物溶解・沈殿等の化学現象を計測する分析手法について詳述すると共に，適用事例について紹介する。

7.2 X線CT

X線CT（Computerized Tomography）は，X線が物体を通過するときの減衰や散乱をもとに，試料内部の状況を3次元かつ非接触・非破壊で可視化する技術である¹⁾。岩石に対するCTには，X線のほかにも，弾性波（超音波顕微鏡）や核磁気共鳴も利用可能であるが，現時点ではX線CTが一般的であり，簡便かつ精密な方法である²⁾。とくに，X線CTは，空間分解能の点では，最近の技術革新によって核磁気共鳴法をはるかに凌駕してマイクロオーダー，サブマイクロオーダーを達成している³⁾。また，実験上の工夫や解析技術の進歩によって，単なる可視化にとどまらず，現象や物性の定量的評価も行われるようになってきている。本節では，X線CTの原理，スキャナの種類と特徴について概観したのち，岩盤・岩石への適用例を紹介する。

7.2.1 X線CTの原理^{1), 3)}

X線CTは，X線CTスキャナを用いて，様々な光路で試料にX線を入射し透過したX線の強度を測定し，試料内部のX線吸収係数の空間分布を示す画像を計算機で再構成するものである。X線CT撮影における生データは投影データと言われるもので，健康診断で撮影されるレントゲン写真のように，ある方向からX線を照射して作っただけの試料の「影絵」である。試料をX線が透過するときX線は吸収されるが，その吸収の程度は密度と原子番号とともに大きくなる。したがって，試料内部に密度もしくは元素組成の不均一があれば，それは検出器に飛び込んだ光子のカウント数の不均一性に反映され，影絵として記録される。そして，試料を回転させながらあらゆる方向からの影絵セットを収集することが，CT撮影作業の中身である（図 7.1⁴⁾）。おおざっぱに言えば，この影絵セットは試料内部の密度・元素分布のフーリエ変換データなので，元の実空間分布を画像再構成するには，逆フーリエ変換を行えばよい。このように Back Projection 法で投影データから再構成されたCT画像は，X線の線吸収係数の大小を，たとえば8ビット（256階調）で表示したものになる。線吸収係数とは，長さの逆数の次元を持つ量で，X線が Lambert-Beer の法則にしたがって物体中を吸収されつつ進む場合に，X線強度が $1/e$ （ $\sim 37\%$ ）に減衰する間に進

む距離の逆数と定義される。線吸収係数は、原子番号と密度とともに増加するので、Si や Fe 程度の原子番号からなる密度約 3g/cm^3 の岩石実質部分と、密度がほぼ 0g/cm^3 の空隙や亀裂とでは非常に強い吸収コントラストが生じる。これが、X 線 CT が岩石の内部状況を可視化するのに適している背景である。

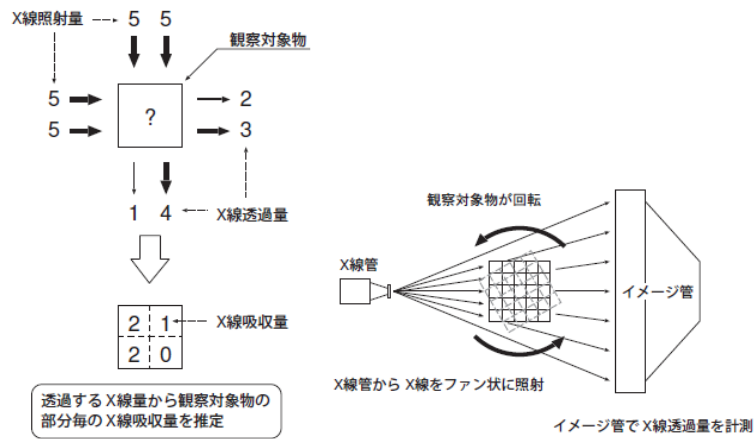


図 7.1 X 線 CT の原理⁴⁾

7.2.2 X 線 CT スキャナ

X 線 CT スキャナは、スキャン機構や、測定に用いる X 線の強度とスペクトルによって分類される¹⁾。また、試料のサイズ・材質によってハードウェアが特化され、医療用、工業用、放射光利用型、マイクロフォーカス型などに分化している³⁾。

X 線 CT は、元々、医療用に発明されたものである。医療用スキャナは、常に動き続ける心臓を静止状態で撮像することを究極の目的とし、また、患者の負担を軽減するために検査時間を短縮する必要性もあって、スキャンの高速化に重点をおいた技術開発が進められた。スキャン機構は、表 7.1⁵⁾のように世代分類され、世代が進むにつれて CT 画像の再構成に必要なデータを短時間で測定できる。ただし、スキャン機構が違っていても、再構成計算の段階で調整されるため、CT 画像に本質的な違いは生じない¹⁾。

医療用スキャナは、使用する X 線の強度が小さいため、金属や岩石のように高い密度の材料を取り扱う場合には試料サイズに制限が生じるが、岩盤・岩石に関わる多くの研究で用いられている。たとえば、断層の発生メカニズムに関する模型実験⁶⁾や、岩石中の重イオンの拡散実験⁷⁾、砂岩の透水実験⁸⁾、軟岩の層構造の 3 次元観察⁹⁾、メタンハイドレート試料の分析¹⁰⁾などがある。医療用スキャナのメリットとして、スキャン時間が短いことと、工業用に比べて装置の利用や操作が容易なこと、とくに、医療用スキャナでは比較的精密な密度検定が自動的に行われていることが多く、工業用スキャナのような密度の検定が不要な点が挙げられる¹¹⁾。

表 7.1 スキャン機構による世代分類⁵⁾

世代	X 線形状	1 断面あたりの 検出器数	撮像方式	1 断面あたりの 撮像時間
I	ペンシルビーム	1	線源・検出器ともに回転・走査	4 分半
II	小角扇状ビーム	3~60	線源・検出器ともに回転・走査	20~120 秒
III	広角扇状ビーム	100~300	線源・検出器とも回転	3~10 秒
IV	広角扇状ビーム	600 以上	線源回転・検出器固定	1~10 秒

工業用スキャナが医療用スキャナと大きく異なる点は X 線管電圧である。医療用では人体に悪影響を及ぼさない程度の X 線を発生させるために管電圧は 140 kV 程度であるのに対し、主に鉄やアルミニウムなどのような金属を対象としている工業用では 200 kV 以上の管電圧を使用する¹³⁾。

なかには、数百 kV の高電圧を加えた管球¹¹⁾や MeV レベルの加速電圧の小型電子加速器¹²⁾などを用いて、高い透過能力を持つ X 線を使用する場合もある。工業用において高強度の X 線を使用する理由としては、医療用スキャナのように強度が弱く透過能力の低い X 線を用いて、サイズが大きい試料もしくは高原子番号の元素（高密度の物質）を含んだ試料を撮影すると、透過 X 線の強度不足によってノイズの影響が大きくなり、CT 画像に偽像 (artifact) が生じる可能性があるからである¹⁾。図 7.2¹⁾は、医療用 (130 kV) および工業用 (3MeV) の X 線 CT スキャナを用いて同じ岩石サンプルを撮影した CT 画像を比較したものである¹⁾。医療用で撮影した CT 画像 (図 7.2(a)) には X 線強度の不足に起因する線状の偽像が多数生じている。図 7.3²⁾は、透過能力の観点から、使用する X 線エネルギーと撮影可能な試料サイズとの関係をプロットしたのがである。

工業用スキャナの開発により、試料サイズや模型の設置の自由度も大幅に広がった。すなわち、サイズの小さな岩石試料を撮影するだけでなく、三軸セルや載荷・透水装置、模型実験装置などの、システム全体をテーブルにのせて撮影できるので、実験中の過渡現象を可視化することが可能である。亀裂開口幅の評価¹⁴⁾⁻¹⁷⁾、透水現象の可視化¹⁸⁾⁻²⁴⁾、トンネル切羽崩壊に関する模型実験²⁵⁾など、地盤工学に関わるさまざまな分野に利用されている。

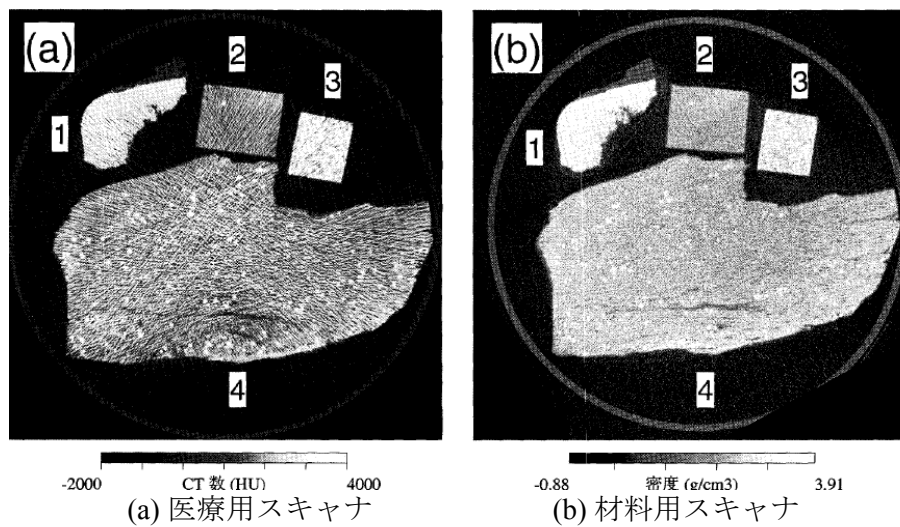


図 7.2 医療用および材料用の X 線 CT スキャナを用いて同じ岩石サンプルを撮影した CT 画像¹⁾

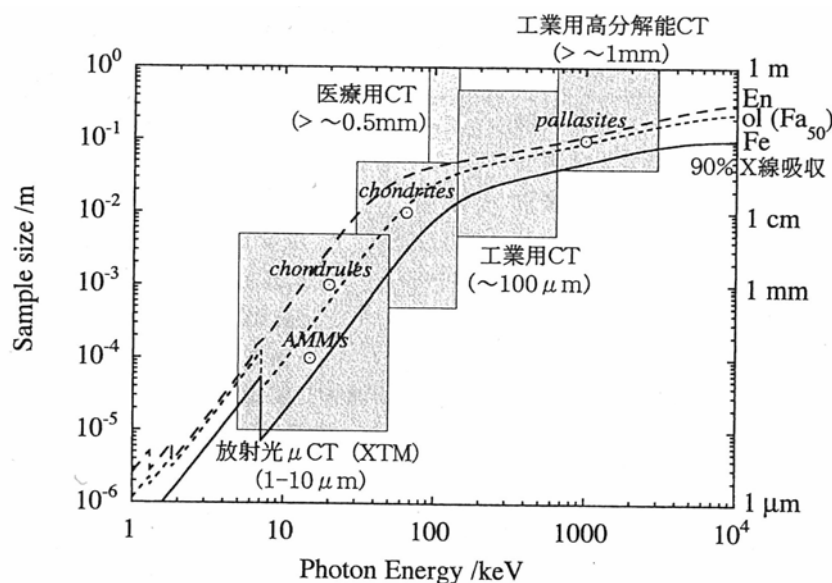


図 7.3 各種スキャナを試料サイズと X 線エネルギーの図にプロットしたもの²⁾

岩石の空隙や亀裂などの幾何学的情報を定量的に評価する場合には、CT 画像の空間分解能（画素サイズ、どれほど小さいものまで区別して表示できるか）が重要となる。空間分解能は、基本的に検出器もしくは X 線ビームの間隔や幅によって決まるが、検出器の個数の制限のため結局試料サイズ（視野サイズ）で決まることが多い。1 画素あたりのサイズはおおよそ試料サイズ（視野サイズ）を画素数で割ったものであり、画素が数個あれば物体を認識できるので、空間分解能はこの数倍程度となる。装置によっては、スライスの厚みが画素サイズよりも大きく、これが空間分解能を決めることも多い。医療用スキャナの空間分解能は 0.1~1mm 程度、通常の工業用スキャナでは、数百 μm 程度である。さらに、ミクロンレベルでの観察には、すでに放射光を用いたものが行われているが²⁾、この場合、高エネルギー加速器といった特殊な設備が必要となり、試料サイズも数 mm 程度に制限される。一方、近年、半導体チップ等の工業部品の非破壊観察のために、マイクロフォーカス X 線 CT スキャナが開発され、高解像度の非破壊観察が可能となっている。

マイクロフォーカス型スキャナは、空間分解能をミクロンオーダーまで高度化した工業用スキャナである。X 線 CT において、X 線は加速された電子ビームがターゲットに衝突して発生するが、この衝突域のことを焦点といい、焦点が小さいほど X 線画像の幾何学的なボケが抑えられる。マイクロフォーカス型スキャナは、電子ビームを極端に絞り、焦点径を 50~2 μm にまで小さくすることで、ミクロンオーダーの空間分解能を達成している。焦点径は、通常の X 線 CT では約 2 mm、ミニフォーカス X 線 CT でも 0.5~0.1 mm である²⁶⁾。マイクロフォーカス X 線 CT スキャナは、その空間分解能の高さを活かし、多孔質岩石の空隙や亀裂の詳細な形状やその変化の可視化²⁶⁾⁻³¹⁾、断層模型実験における岩石内部の亀裂の可視化³²⁾などに用いられている。

7.2.3 X線CTの岩盤工学への適用例

X 線 CT の岩石・岩盤工学への適用例として、亀裂や空隙など岩石マトリクス部分とは密度が異なる構造の可視化、岩石や不連続面内を流れる流体の可視化、鉱物や密度の分布の観察などが挙げられる。

(1) 岩石試料の変形・破壊の可視化

岩石試料の変形や破壊状況の可視化事例として、例えば、三軸試験後の岩石供試体をマイクロフォーカス型スキャナを用いて撮像することにより、三軸圧縮による破断面付近の粒子破碎の様子²⁷⁾ (図 7.4) や、三軸伸張による破断面におけるラフネスの拘束圧による差異³⁰⁾ (図 7.5) などが観察されている。また、応力をかけた状態での試料撮影を可能にするため、CT スキャナのテーブルに載せることができる小型軽量の圧力容器を開発し (図 7.6²⁹⁾)、泥岩供試体における数十 μm の亀裂開口が拘束圧によって閉鎖する過程を観察したり²⁸⁾、拘束圧・間隙水圧が作用した円柱岩石供試体の直径変化率を CT 画像から読み取り、岩石の変形を詳細に計測することが試みられている²⁹⁾。

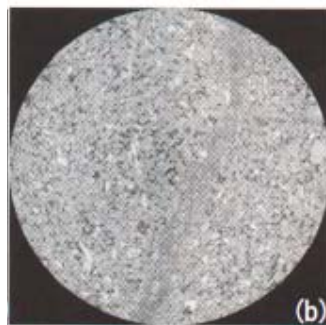


図 7.4 三軸圧縮試験後のベリア砂岩供試体中心部の CT 画像 (直径約 11mm)²⁷⁾

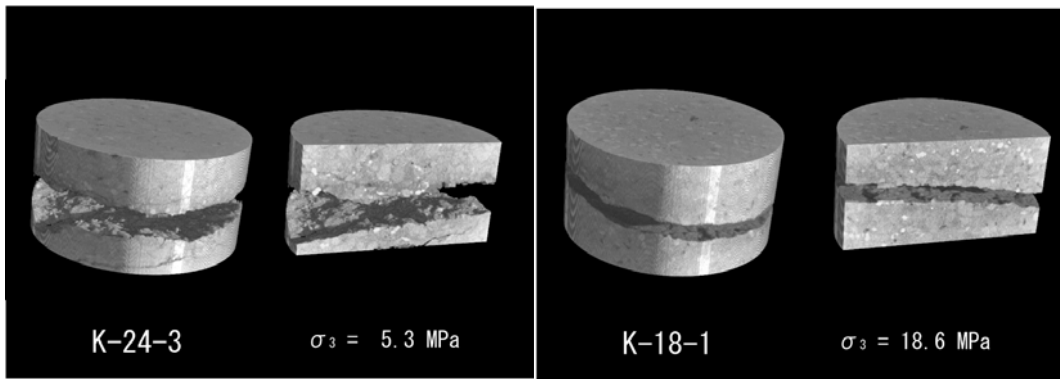


図 7.5 三軸伸張試験後の来待砂岩の破断面の CT 画像²⁸⁾.

番号	名称	材質
①	上蓋	SUS304
②	圧力容器本体	Engineering Plastic
③	エンドプラグ	SUS304
④	供試体	Rock
⑤	六角穴付ボルト	SUS304
⑥	ニードルバルブ	SUS304 他

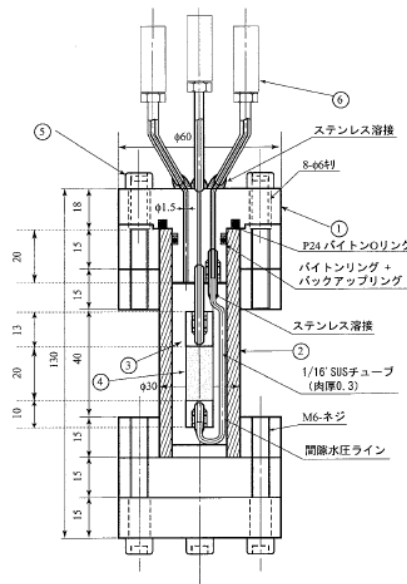


図 7.6 拘束圧・間隙水圧作用下での CT 撮像のために開発された圧力容器²⁹⁾

(2) 亀裂開口幅の定量的評価

岩石亀裂のように密度が階段状に急変する端部では画像再構成の段階で CT 値の乱れが生じるため、画像上はエッジが強調される。亀裂を観察するだけならばエッジの強調は有効であるが、開口幅などの情報を定量的に評価する場合には開口幅を過大評価する危険性がある。佐藤ら¹⁵⁾は、ノイズや偽像を含む CT 画像から亀裂開口幅を精度良く求める手法として、亀裂投影法に画像間差分の概念を適用する方法を提案している。すなわち、亀裂内部を水および空気ですみわたした状態でそれぞれ CT 画像を撮影し、両者の画像間差分により亀裂情報を抽出するものである。その結果、偽像の影響や亀裂以外の岩石マトリクスに関する情報は取り除かれ、空気と水が入れ替わった亀裂部分の情報のみが抽出されることになる。花崗岩試料内に作成した割裂亀裂の開口幅分布の評価にこの手法を適用した結果、算定された亀裂開口幅分布は 3 次元測定器によって求めたものとおおよそ一致することを示している¹⁶⁾ (図 7.7¹⁷⁾, 図 7.8¹⁶⁾)。

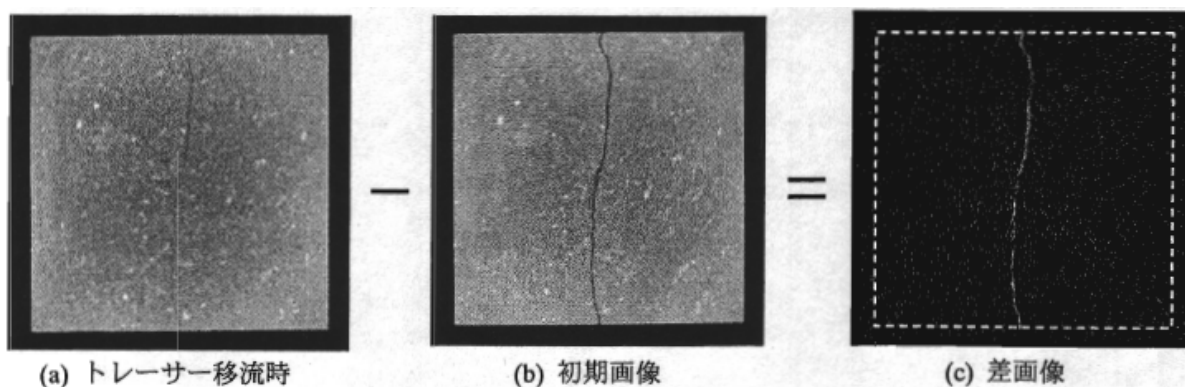


図 7.7 割裂亀裂内トレーサー試験により得られた X 線 CT 画像¹⁷⁾

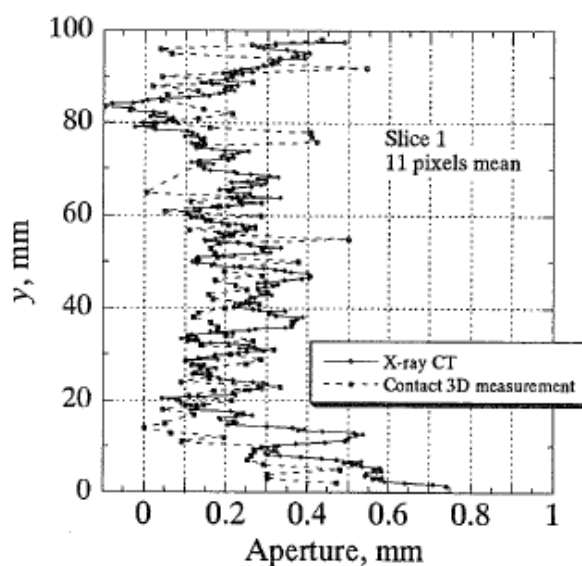


図 7.8 亀裂開口幅評価結果（接触式 3 次元測定器による算定結果との比較）¹⁶⁾

(3) 空隙構造の定量的評価

多孔質岩石の空隙を単に観察するだけでなく、空隙の 3 次元的位置や形状などの詳細情報を抽出し定量的に評価する研究が行われている。中島³⁾は、シンクロトロン CT によって撮影した秩父砂岩の CT 画像 (2.6^3mm^3 , 空間分解能 $5.86\mu\text{m}$) を用いて、空隙の連結性や屈曲度を解析している。また、高橋ら³⁰⁾は、マイクロフォーカス X 線 CT によって撮影したガラスビーズ試料の 3 次元 CT 画像から、空隙の連結性の判断、孤立空隙の体積分布、連結空隙のくびれ部の半径・面積・体積分布、隣接空隙の半径・体積分布、空隙の隣接数などの空隙の詳細情報を評価する手法を示している (図 7.9³⁰⁾)。また、同手法によって、Berea 砂岩を用いて拘束圧 12MPa の载荷に伴う空隙率の減少を空間的な詳細情報として取得している。

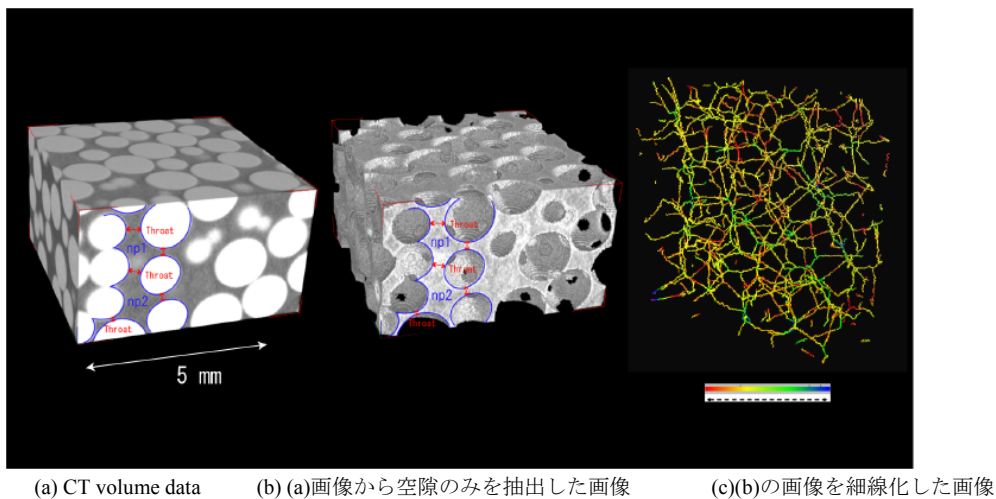


図 7.9 直径 1mm のガラスビーズを用いた各種画像処理³⁰⁾

(4) 流体の可視化と定量的評価

岩石や亀裂を流れる流体の観察ではトレーサーが用いられることが多い。トレーサーには、ヨウ化カリウム水溶液がよく用いられている。この水溶液は①分子量が 166.0 と大きいため X 線の吸収が大きい、②ヨウ素イオンは鉱物表面への吸着の効果がほかのイオンに比べて少ない、③人体への影響が少ないなど、造影剤として適した性質を持っている⁸⁾。廣野ら⁸⁾は、X 線の吸収が弱い有機系材料の亚克力樹脂を用いて透水試験器を製作し、造影剤を透水させることによって供試体内の移流像を医療用 X 線 CT 装置で撮影する試験法を開発した。新第三系の凝灰質砂岩に発達する小断層では、断層内の砂粒子の破碎作用の有無が、その断層内の透水性を左右することを確認している。菅原ら¹⁸⁾は、間隙率が比較的大きい来待砂岩を取り上げ、X 線 CT による透水係数の測定と透水フロントの可視化について考察し、飽和度の等高線を利用する透水フロントの自動可視化を提案し、必要なデータ処理法を明らかにした。また、画像解析から間隙率、ならびに透水フロントの移動速度が定量可能であることを明らかにしている。さらに、圧力容器内にセットした岩石供試体の端面から水や気体、トレーサー等を圧入して一次元流れを作り出し（図 7.10²²⁾）、経時的に撮像した CT 画像から、岩石内部の飽和定常流や岩石の乾燥・湿潤過程、汚染物質の輸送現象などを定量的に分析する手法の開発が行われている¹⁹⁾⁻²⁴⁾。

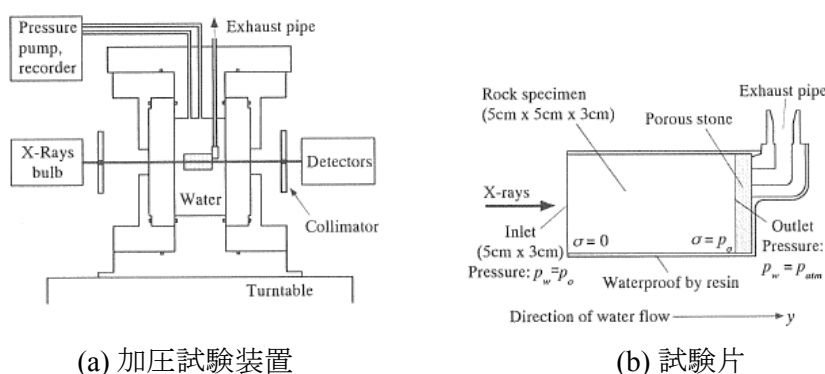


図 7.10 加圧試験装置および試験片²²⁾

(5) 鉱物や密度の評価

X 線 CT では、試料中の密度や元素の差が画像上の濃淡で現れるため、CT 値から鉱物や密度を特定することも原理的には可能である。しかし、実際には、撮影条件（管電圧や管電流など）、光線硬化、量子ノイズ、試料サイズ、材質、X 線 CT の空間分解能と粒径との兼ね合いなどの要因による誤差が含まれるため³³⁾、CT 値から密度や物質を評価することは難しい。特に、一般的な X

線 CT スキャナ（医療用，産業用，マイクロフォーカス）のように白色 X 線を用いている場合には，CT 画像中に光線硬化と呼ばれる偽像（CT 値の空間変動）が生じ，サンプルが均質でも内部に比べて縁の部分の CT 値が高い値に再構成されてしまうので注意が必要である．CT 値と密度の関係に関する研究として，Hirano ら³⁴⁾は，シンクロトロン放射光による単色で高強度の X 線を用いて撮影した CT 画像により 0.1 重量%以下の特定元素の定量に成功している．一方，白色 X 線を用いた医療用スキャナで撮影した画像の CT 値の分解能は密度に換算すると実質的にはせいぜい $0.1\text{g}/\text{cm}^3$ 程度である¹⁾．中野ら¹²⁾は，線形電子加速器で発生させた高強度の X 線を用い，密度が既知の 20 個以上の岩石サンプルを画像処理によって識別し，それぞれに対して求めた平均 CT 値から画像上での CT 値と物体密度の関係式を求めている．これによって求めた関係式によって画像上の CT 値から物体密度を求めると $0.3\text{g}/\text{cm}^3$ 程度の決定精度であると報告している．

7.3 岩石の化学分析

岩盤の水理学・力学特性を把握するためには、対象となる岩盤および構成岩石の物理的性質を前もって理解しておく必要がある。本章では特に、岩石の化学分析手法に着目して、岩石鉱物を同定する手法、鉱物の溶解に起因する溶解物質の定性・定量分析手法について詳述する。

7.3.1 岩石鉱物の同定

(1) 光学顕微鏡を用いた手法

まず岩石鉱物の同定の一つの方法として、光学顕微鏡を使用する方法がある。光学顕微鏡には、「観察する試料を透過した光を観察する顕微鏡」と、「観察する試料から反射した光を観察する顕微鏡」に大別される。岩石を顕微鏡で観察する場合、「試料を透過した光を観察する偏光顕微鏡」を使用するため、岩石中を光が通るほどに薄くする必要がある。この観察用に作成した岩石の「切片」を岩石薄片という。岩石は複数種の「鉱物」粒子から構成され、「鉱物」は元素が規則正しく配列したものであり、その配列は鉱物ごとに異なる。これらの鉱物に光を通すと、光は鉱物ごとに異なる屈折・反射・吸収などの影響を受けるため、それぞれの鉱物に固有の見え方をする。この固有の見え方を偏光顕微鏡で観察することで、鉱物を同定することができる。

鉱物の同定には、オルソスコープ観察法、オープンニコル（開放ニコル）観察法、クロスニコル（直交ニコル）観察法、コノスコープ観察の4つの観察手法がある。オルソスコープ観察法は、コンデンサ、およびベルトランレンズを用いずに観察を行う方法であり、偏光顕微鏡では通常この方法を指す。オープンニコル観察法とは、光路に偏光子のみを差し込んだ状態で観察を行う場合を指し、試料プレパラートを入れない状態で接眼レンズを覗くと白から薄い黄色に見える。通常の光学顕微鏡では、白色透明に見える石英、長石などは、鉱物の種類・結晶の方向に従って減光が起こり、白色から灰色、黒色と変化する。ステージを回すとこの減光は変化し、その周期は90°ごとに異なる。これを利用して試料の形、色、屈折角などが測定される。クロスニコル観察法は、光路に偏光子と検光子を差し込んで観察を行う。偏光版によって光が遮断されているため、試料プレパラートを入れずに覗くと暗視野に見える。オープンニコルの場合と同様にステージを回転させると90°ごとい減光が生じる。また偏光特性によって位相が乱されることにより、紫色、緑色、青色、オレンジ色などの干渉色が観察される。この増光、減光の周期は消光角と呼ばれ、ステージの目盛りを用いて測定を行うことが出来る。コノスコープ観察法は、コンデンサとベルトランレンズを用いて測定する。この観察法では試料の形は測定できず、試料を透過した光によってできる干渉渦を測定できる。この方法は試料の一軸性と二軸性の識別や、光軸角の測定に用いられる。観察法とその特徴と測定対象を表7.2に示す。

表7.2 偏光顕微鏡の観察法とその特徴・測定対象

観察法	特徴	測定対象
オルソスコープ観察法	コンデンサ・ベルトランレンズなし	試料の形
オープンニコル観察法	光路に偏光子あり	試料の形、色、屈折率
クロスニコル観察法	光路に偏光子・検光子あり	干渉色、消光角
コノスコープ観察法	コンデンサ・ベルトランレンズあり	干渉渦、一軸性、二軸性、光軸角

(2) X線を用いた手法

鉱物の同定には、X線を用いた分析手法が多数存在する。物体にX線を照射すると様々な現象が発生するが、そのうち重要な現象は次の3つである。1)一次X線が吸収されて、透過X線が減衰する。2)X線が散乱する。3)二次特性X線（蛍光X線）が放射される。この3種類のそれぞれの現象を利用する手法が、1)X線透過法、2)X線回折法、3)X線分光法である³⁵⁾。1)のX線透過法は、前節で示しているX線CTに用いられる手法であり、鉱物の同定には不向きである。

X線回折法（X-Ray Diffraction, XRD）とは、上記で述べた通りX線の照射よりX線が散乱する現象を利用している。原子の大きさと同程度の波長をもつ特性X線を結晶に照射すると、各電子によって生じる散乱波が互いに干渉して回折現象を起こす。X線が結晶によって回折されるとき

の回折方向と回折された X 線（回折 X 線）の強さは、その結晶に特有なものであるから、回折が起こった角度と回折された X 線の強度をはかることによって、物質中の結晶がどのような構造であるかを知ることができる³⁵⁾。さらに試料中の結晶の濃度と回折 X 線の強度が比例することを利用して、その濃度を知ること、すなわち定量することもできる。X線回折法の特徴は、分析しようとする成分を元素種やイオン種ではなく、結晶形態で知ることができる点にある。一般に固体からなる物質は結晶している物が多いため、X線回折法は有効な固体の研究手段として用いられてきている³⁶⁾。

粉末 X 線回折で定量分析を行う場合、回折 X 線の強度を用いて、検量線を引く必要がある。検量線を求める方法として、対象となる鉱物の標準試料の回折強度から直接検量線を作成して被検試料内対象鉱物の含有量を求める直接法と、被検試料で他の含有鉱物とピークが重複しないと考えられる標準物質を一定量測定試料に混合し、対象鉱物の標準試料と標準物質の回折強度の比から検量線を作成し、鉱物の含有量を求める内部標準法がよく実施されている。直接法は簡便性に優れるが、共存鉱物の質量吸収係数の違いや X 線管球の劣化による検量線作成時と被検試料測定時の回折強度の差による誤差が考えられ、精度的には内部標準法が優れている。八島³⁷⁾は、内部標準法を用いて、標準物質として蛍石を用いて実験を行っている。図 7.11 にスメクタイト検量線用試料の X 線回折チャート、図 7.12 にスメクタイト検量線を示す。

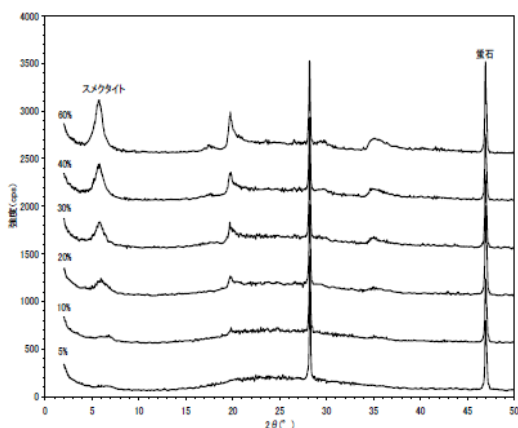


図 7.11 スメクタイト X 線回折チャート³⁷⁾

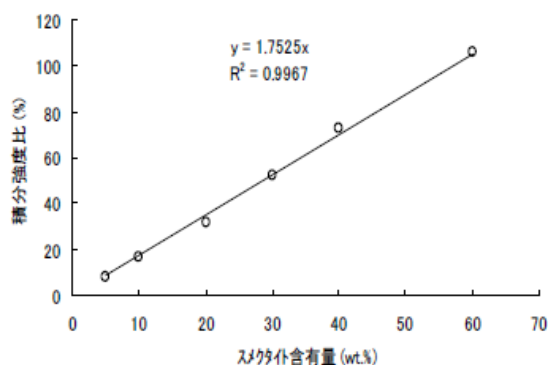


図 7.12 スメクタイト検量線³⁷⁾

次に X 線分光法について説明する。X 線分光装置は、連続 X 線や特性 X 線を使って試料に含まれている元素の特性 X 線を励起する蛍光 X 線分析 (X-Ray Fluorescence, XRF) 装置と、電子ビームで特性 X 線を励起する電子線励起 X 線分析装置に大別できる。蛍光 X 線分析は次節で詳述する。電子線励起 X 線分析装置は試料の微構造を観察しながら任意の微小部分の化学組成を測定する。測定はすべて真空中で行い、透過型分析電子顕微鏡 (Transmission Electron Microscope, TEM)、走査型分析電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope, SEM)、電子プローブアナライザ (Electron Probe Micro Analyzer, EPMA) などに分類される。TEM と SEM についても次節で言及する。EPMA は極めて細かい電子ビームで試料を走査して、発生する蛍光 X 線を WDX 方式の検出器で測定する。EPMA は、どこ (μm オーダー) に、どんな元素 (${}_{4}\text{Be}$ – ${}_{92}\text{U}$) がどれだけ (0.001–100wt%) あるか正確に分析する装置である。定量分析と元素の正確な二次元的分布の測定が可能である。例えば石田³⁸⁾は、ひすい輝石岩に含まれる Na, Ca, Fe の定量分析、面分析 (濃度分布の測定) を行っている (図 7.13)。

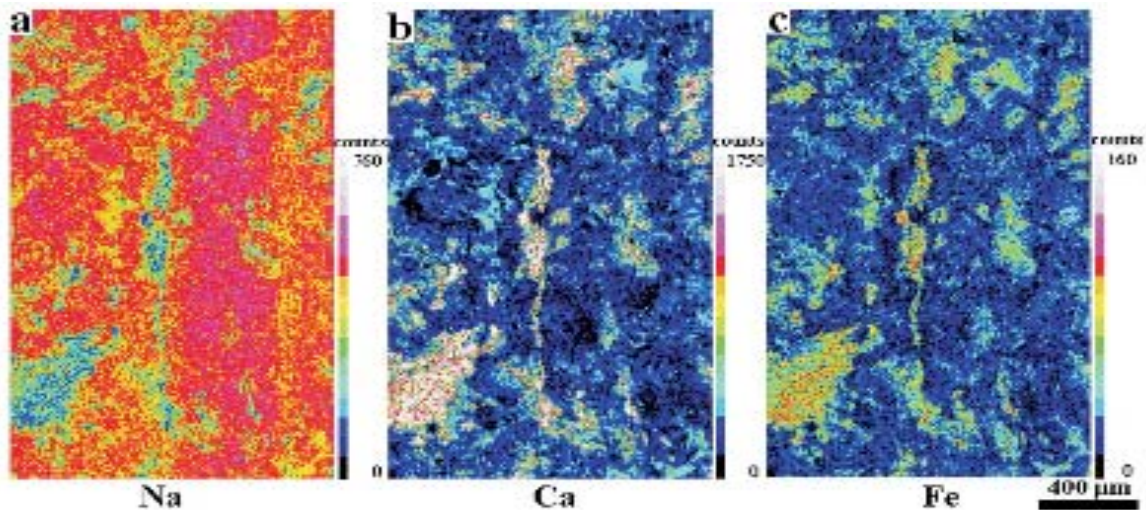


図 7.13 ひすい輝石岩中の Na, Ca, Fe 面分析結果³⁸⁾

(3) 岩石表面の観察

本項では、岩石の表面観察に関する手法について説明する。表面観察を行う手法として、大別すると走査形と透過型の電子顕微鏡の2つが挙げられる。

走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope, SEM) は、試料に電子線を照射し、試料から出てくる信号を検出することにより像を得る。通常は二次電子を用いる。電子銃から出た電子ビームをコンデンサレンズで細く絞った後、偏光コイルで走査する。この電子ビームを対物レンズで焦点合わせなどを行って試料にあてると、試料表面の状態を反映した二次電子が試料から出る。二次電子とは、入射線の一部が試料中の原子に衝突する際に、原子中の電子にエネルギーを与え、与えたエネルギーがある値以上であるとき、原子中の電子が試料から飛び出してくる電子のことである。この二次電子を二次電子検出器でとらえ、二次電子の量をブラウン管の明るさに変換するとともに、電子ビームの走査とブラウン管の走査を同期させると、CRT 上に像が得られる³⁹⁾。一般の SEM の二次電子検出器では、特に試料からの反射電子を除く手段を持たないため、検出器には二次電子だけでなく反射電子も捕捉されている。二次電子捕捉のためには検出器に正の電位 (10kV) を印加しているが、この電位を印加しないとエネルギーの小さな二次電子は検出されなくなるが、反射電子は入射電子とほぼ同程度のエネルギーであり試料から放出した方向へ直進するため、検出器に向かって放出された反射電子のみが検出器に捕捉される。このようにして得られた反射電子は二次電子像とは異なり、試料の凹凸に対応した情報の影響ができる。

一方、透過型電子顕微鏡 (Transmission Electron Microscope, TEM) は、薄膜試料 (厚さ 100nm 以下) に電子線を透過させ、その際に試料中で原子により散乱・回折された電子を電子線回折パターンまたは透過電子顕微鏡像 (TEM 像) として得ることにより、物質の内部構造を観察できる。像は、電磁コイルを用いて透過電子線を拡大し、電子線があたると光を発する蛍光板にあてて映るものを観察したり、専用のネガフィルムや CCD カメラで写真を撮影したりすることにより得られる。TEM 像のコントラストには、散乱コントラスト、回折コントラストおよび位相コントラストがある。それらには物質の組織的、構造的な情報が含まれている。電子線回折パターンには結晶構造や結晶方位などの情報が含まれている。これら種々の情報を組み合わせることにより、試料の組織形態、原子レベル構造、結晶構造、極微小領域の観察が可能である⁴⁰⁾。

SEM は TEM と異なり表面の観察であり、試料はバルクのままで観察可能である。また SEM の結像は TEM のように真の意味で結像レンズをもっていない。TEM においてはレンズを用いて試料の拡大像を空間的な対応をもって同時に結像させるのに対し、SEM では試料上の場所的な分離を時系列の信号として取り出し結像する。このような走査方式による結像の方式はいろいろな異なる信号を用いても容易に画像にできることや、信号を電氣的に処理でき、画像処理が容易であるなどの特徴をもっている。

SEM は、入射プローブで照射された試料表面から出てくる二次電子または後方散乱電子を用いて、試料を視覚的に調べるためのもので、従って、工学分野でも試料を微視的に観察するために用いられている。DeJong ら⁴¹⁾は、細菌の代謝活動によってグラウト材としてカルサイトが析出する原理を利用して、供試体の土粒子間に析出しているカルサイトの分布の様子を確認している。松本ら⁴²⁾は、SEM に装着したエネルギー分散型エネルギー検出器を用いて、従来の点分析、線分析および面分析に加え、定量・定性分析の自動化や自動多点分析を実施している。また、吉田ら⁴³⁾は、二次的な元素の移動は基本的に岩石内部に分布する微小空隙や結晶粒界を満たす空隙水中を拡散していくという観点から、採取した岩石試料の一部の内部構造を壊さないように数ミリ四方のサイズにピックアップし SEM 観察を行っている。

また、田崎ら⁴⁴⁾は、ロックウールを観察、分析するために SEM と TEM を用い、その比較検討を実施している。図 7.14 にその画像を示す。

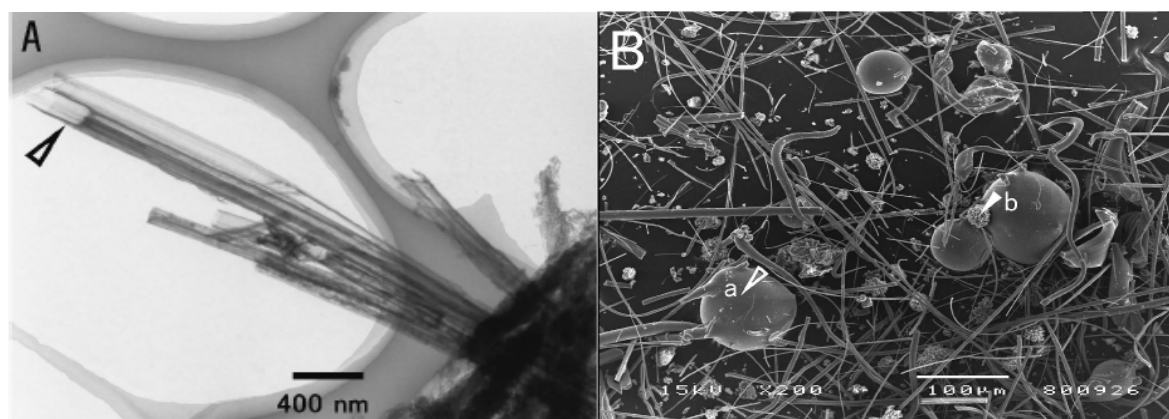


図 7.14 TEM および SEM 画像の一例 (A.TEM, B. SEM 画像)⁴⁴⁾

7.3.2 溶解鉱物の同定

ここでは、溶液中に溶解している鉱物の同定および定量方法について、言及する。特に、誘導結合プラズマ発光分光分析 (Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry, ICP-AES)、誘導結合プラズマ質量分析 (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, ICP-MS)、イオンクロマトグラフィーについて、詳述する。

(1)ICP発光分光分析 (ICP-AES)

試料溶液を霧状にして高温の熱媒体に導入し、解離原子およびイオンが発する光の共鳴信号を得ることが、定量的原子スペクトル分析法に共通の原理であるが、ICP 発光分光分析の特徴は、フレーム原子吸光分析のような科学炎ではなく、5000~6000K に及ぶ高温の物理炎を使用すること、直流プラズマのような電極を有しない無極の誘導プラズマであることなどが特徴的である。

ICP-AES は ICP 励起源、試料導入システム、分光器、検出器、データ演算・処理部、記録部から構成されている⁴⁵⁾。装置の構成によって

- ①定速波長掃引システム (単元素分析用)
- ②多重速度波長掃引システム (多元素迅速分析用)
- ③直読分光システム (多元素同時分析用)

の 3 つに分類される。基本的な違いは、使用する分光器・検出部によるものである。①と②のシステムでは分光器としてモノクロメーターが用いられ、①では通常定速波長掃引をおこなって特定波位置に止めて測定するのに対して、②では分光器がコンピューター制御による高速波長掃引ができるように設計されている。そのため②の分析システムは 1 分間に 5~10 元素と迅速な他元素分析が可能である。一方③の多元素同時分析システムではポリクロメーターと呼ばれる分光器を用いて多元素を同時に検出可能にしたマルチチャンネル型分光検出システムが用いられ、これによって原理的には最大約 50 元素の同時分析が可能になっている。また、ICP-AES の特徴として以下のことが挙げられる⁴⁵⁾。

- (a) ほとんどの元素について $1/10^9$ オーダーといった極微量の元素レベルの分析ができる。

- (b) 短時間および長時間の分析精度がよい
- (c) 検量線の直線範囲（ダイナミックレンジ）が4~5桁と広い
- (d) 多元素同時または多元素迅速分析が可能である
- (e) 化学干渉やイオン化干渉などの元素間の妨害がほとんどない

分析対象としては、溶液化可能であるものは、ほとんど分析を行うことができ、例えば、雨水、河川水、金属、酸化物、セラミック、セメント、岩石、触媒、食品、土壌、植物等様々なものの分析が可能である。

岩石分野の適用例として、石川ら⁴⁶⁾は、ICP-AESを使い島孤火山岩における Nb, B の分析を行っている。これまでは、島孤火山岩の Nb を精度良く分析するのに分光干渉や物理干渉が大きいことから、これらの元素分析は ICP-AES で行われていなかった。石川らは、HF-マンニット法による酸分解と、HF を用いたイオン交換法を組み合わせる事によって新しい前処理法を開発し、Nb, B の同時定量を試み、その手法の有用性を確認している。また、木下ら⁴⁷⁾は、花崗岩不連続面を用いた透水試験を実施し、透過流体内に溶出している元素の同定および定量を行い、溶解量と透水性の経時変化の関係に着目した研究を行っている（図 7.15）。さらに、檀崎ら⁴⁸⁾は、ICP-AES を用いて SiC 中の Si 定量を試みている。これまで Si 濃度を測定する際、試料をアルカリ融解し酸性溶液にして測定されてきたが、アルカリ溶液中で測定している例はほとんど見られない。具体的には、SiC 試料を Na₂CO₃ 融解後、水で溶出し、内標準として Ga を加えることにより、Si 濃度を測定し、良好な分析結果が得られることを確認している。

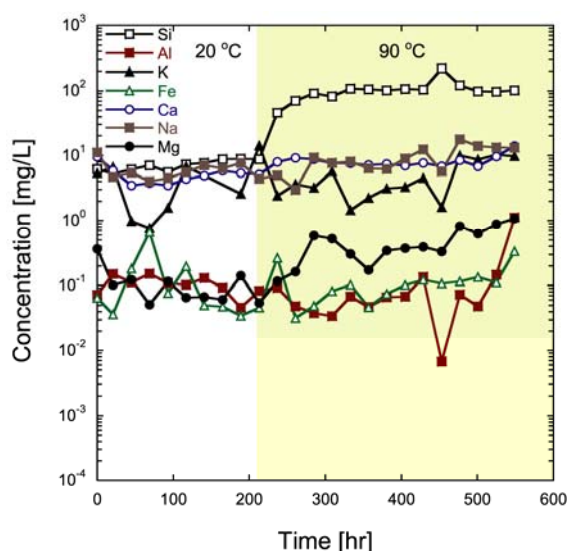


図 7.15 花崗岩不連続面透水試験中の溶出元素の経時変化⁴⁷⁾

(2) ICP 質量分析 (ICP-MS)

ICP-MS では、質量分析部に磁場と電場の 2 つの分解部を持っており、磁場分析部で質量収束を、電場分析部でエネルギー収縮を行うことによって高分解能を得ることができる。このことから分子イオンによる干渉の有無や変動による影響を受けずに精度の高い測定を行うことができる⁴⁹⁾。また、ICP-AES よりも高感度の分析が可能である。その特徴として、以下のことが挙げられる。

- (a) 分析可能な元素が多い (H, C, N, O, F と放射性同位体及び希ガスを除いた 73 元素)
- (b) 高感度であるため検出限界が低い (ppb~ppt)
- (c) 検量線の直線領域が広い (6~8 桁)
- (d) 多元素同時分析ができる
- (e) 定性、半定量分析が迅速にできる

測定対象としては、ICP-AES と同様に様々なものに適用が可能である。

岩石分野の適用例として、松藤ら⁵⁰⁾は、これまでに報告のなかった、比較的単斜輝石を多く含む BDH 系列に属する、かんらん岩 (高 Mg, Cr かんらん岩) を新たに記載し、鉍物の主要、微量元素

組成からその特徴を明らかにしている。矢嶋ら⁵¹⁾は、試料から元素分離を行わずに、化学的に調整された標準溶液を外標準として定量する方法には問題があると指摘しており、新たな測定手法を提案している。その中で、地質調査所発行の岩石標準試料 8 個について ICP-MS を用いて定量分析を行っている。実験の結果から ICP-MS で定量する際には、機械ドリフトの補正が重要であり、これには標準溶液と試料溶液を交互に計測することが重要であるとしている。

(3)イオンクロマトグラフィー

イオンクロマトグラフィーは、クロマトグラフィーの原理を用いて液体に含まれるイオン成分を測定する方法である。クロマトグラフィーとは、試料溶液中の各成分を分離して検出、定量を行う手法であり、固定相（カラムに固定されている）と、これに接して流れる移動相との間に分離すべき成分を分配させる物理的方法のことである。また、イオン成分とは水溶液中においてプラスまたはマイナスに帯電する成分であり、塩化物イオンや硫酸イオンなどの陰イオン、ナトリウムイオンや銅、ニッケルなどの陽イオンが挙げられる。さらに、近年では測定条件を最適化することにより、完全にイオン化してはいない化合物も測定可能となっている⁵²⁾。イオンクロマトグラフィーの特徴として、煩雑な前処理を必要としない点が挙げられる（例えば、めっき液の測定においては純水希釈とろ過だけでよい事例が多い）。ただし、試料によっては測定の妨害となる成分や装置内（主に消耗品）を劣化させる成分が含まれているものもあるので、その場合には問題物質を除去する必要がある。また、基本的には測定対象成分よりも 1000 倍以上高濃度な成分や分子量の大きな成分が共存する場合には除去したほうが良いとされている。測定対象としては、ICP と同様に、溶液化できる試料であれば、ほとんどの対象物に対して分析が可能である。特に、公害分析（主として大気）、食品分析（主として食パン分析）、臨床分析（主として尿）、などが主体であるが、様々な分野で応用が可能である。

岩石分野の適用として、浅田ら⁵³⁾は α -HIBA（ヒドロキシイソ酪酸）を用いたイオンクロマトグラフィーによる岩石中の希土類元素の分析をおこなっている。陽イオン交換法により岩石試料から主成分元素を分離した後、希土類元素を主体とする溶液を直接イオンクロマトグラフに注入する方法を用いて、従来法を上回る良好な分離と感度を得ることができることを報告している（図 7.16）。

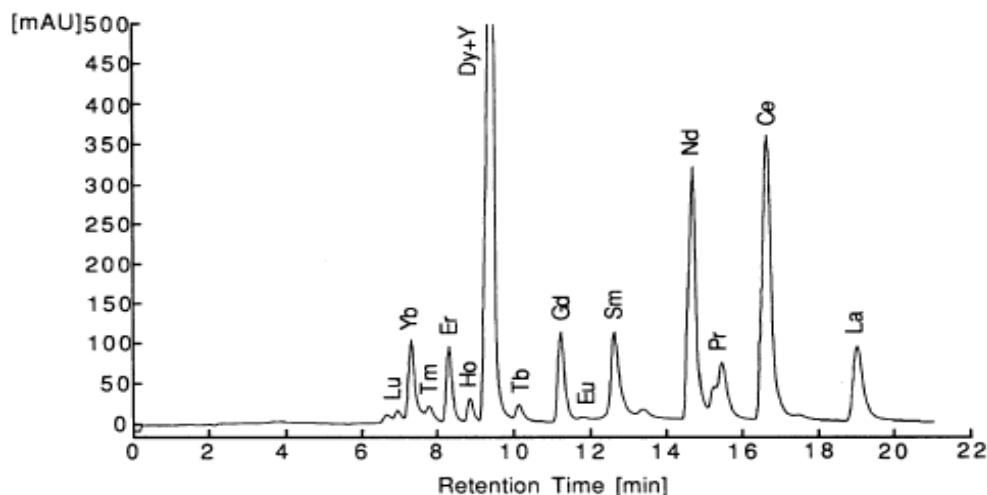


図 7.16 岩石標準試料のイオンクロマトグラフィー結果例⁵³⁾

また、児玉ら⁵⁴⁾は、異なる雰囲気下での岩石の溶出速度を求めることで岩石の化学的風化の進行速度を定量化することを試みている。実験の試料には花崗岩（滝谷加工閃緑岩：1.2~1.1Ma）を粉末状にしたものを使用し、岩石の溶出速度・量と二酸化炭素の影響を評価している。その分析に、イオンクロマトグラフィーを用い、ナトリウム、カリウム、カルシウム、マグネシウムの各陽イオンを定量している。杉田ら⁵⁵⁾は、モンモリロナイト（月布、三川）、カオリナイト（関白）、ディッカイト（勝光山）、サポナイト（合成）の粘土鉱物に着目し、イオンクロマトグラフィーを用いて試料中のフッ化物イオン濃度を定量し、フッ素の粘土鉱物への吸着挙動について報告している。

7.4 最新の多機能岩石物性能総合試験装置

最近の岩石の力学特性、透水特性、熱力学的特性やこれらの連成特性に関する研究には、いろいろと工夫された装置が開発され成果を上げている。既述の X 線 CT 装置を用いた破壊挙動の 3 次元解析法や熱-水-化学-力学 (T-H-C-M) の相互作用を考慮した特性解明などもその例である。その中で、今注目を浴びているのがカナダのトロント大学の副学長 Prof. Paul Young (Geoscientist, the Lassonde Institute) が中心となって設立した Rock Fracture Dynamics Laboratory (RFDL) であり、MTS System Corporation や DELL Canada Inc. などの企業の積極的な協力を得て開発された統合的岩石物性研究のための多機能試験・解析装置とコンピュータシステム (図 7.9) ならびにカナダ全土の地盤構造情報 DB から成っている。この RFDL は Canadian Foundation for Innovation (CFI), Ontario Innovation Trust, Keck Foundation などの基金をもとに 5 億円以上を費やし 5 年の歳月を掛けて現在も拡張されつつあるもので、その試験・解析システムの規模の大きさと製作に費やした費用は他に類をみないものである。

その特徴は、ジオフィジカル・モニタリング機構を備えており岩石破壊過程の可視化と逐次破壊解析を行うことができ、さらにコンピュータシステムに基づく高精度岩石モデルを提起し数値計算結果と実験結果の対比を通してモデルを確定する総合施設という点にある。このユニークな施設を用いる国際的な岩盤工学、地球物理学、地質学や物理学の専門家の協働を促すと共に、鉱山・石油開発、建設や各分野の研究者・技術者が利用を始めている (米・欧及び中・韓等の研究者が集い、HLW 地中処分, CC, メタハイ等研究に対応)。

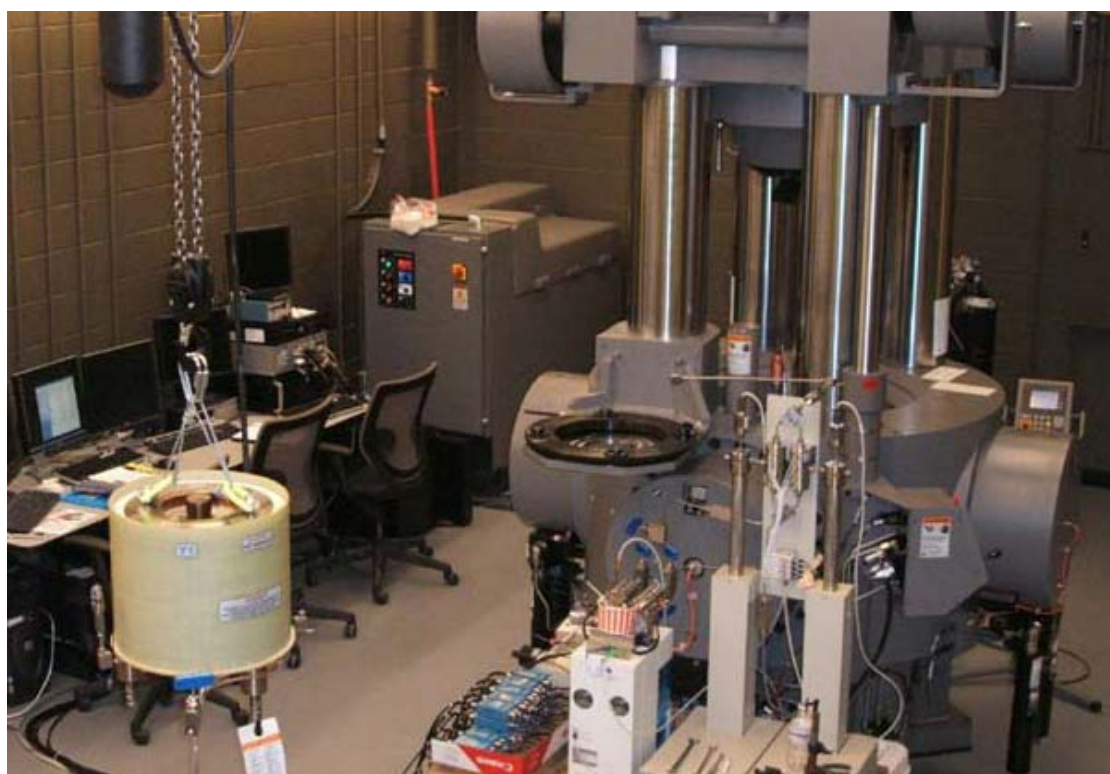
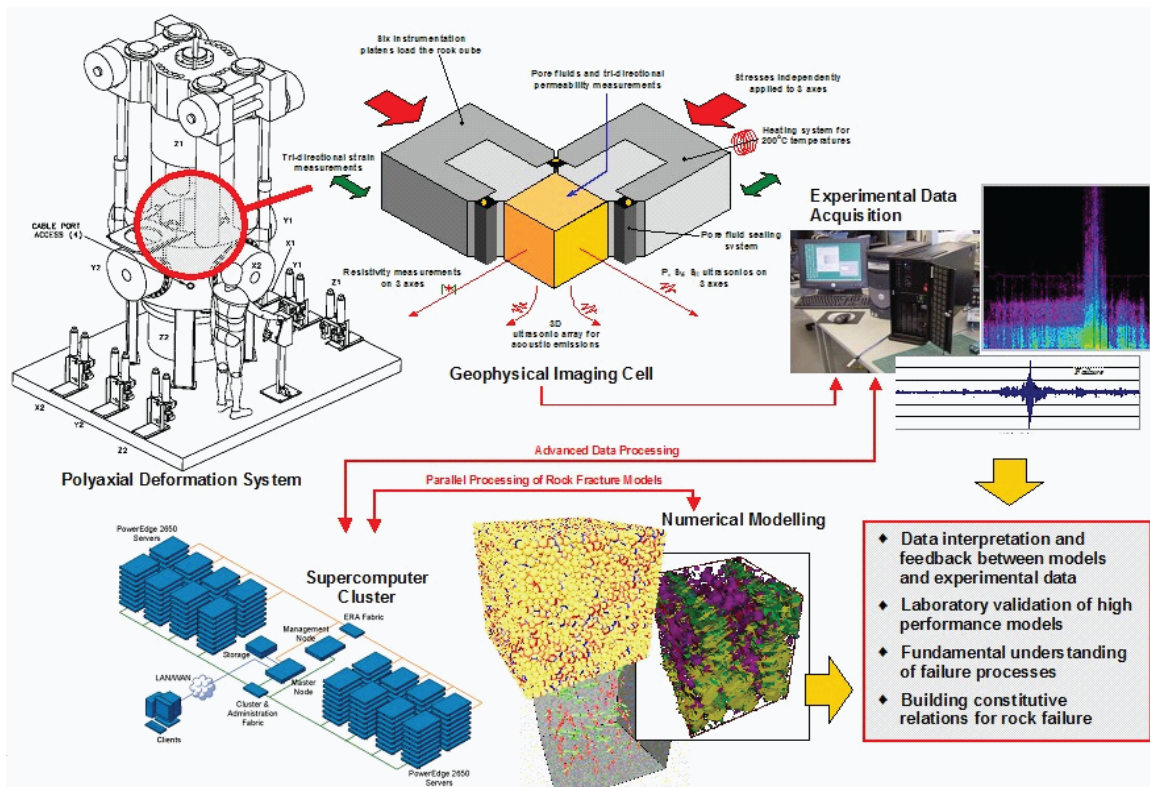


図 7.9 RFDL 実験装置 (多機能戴荷装置と高温用チャンバー)

7.4.1 概要

総合多機能な岩石試験設備は、ジオフィジカル・モニタリング、リアルタイム・ビジュアライゼーションおよび数理解析モデリングができるように設計されており、その概要と基本構成を図 7.10 に示す。



- ・ 多軸サーボコントロール戴荷装置 (左上)
 - * 軸荷重 6800kN
 - * 横方向荷重 3400kN
- ・ 多軸地殻応力イメージングセル (上中央)
 - * 真三軸状態 (世界唯一の高圧真三軸: 供試体 80mm 立方体)
 - * 三軸状態 ($\phi 50\text{mm} \times h125\text{mm}$)
- ・ 温度制御
 - * $\sim 200^\circ\text{C}$
- ・ AE モニタリング
 - * フルウェーブ 連続 AE
- ・ 3次元速度測定
 - * ロックフィジクスの概念によるアップスケール・実現場規模の物性予測
- ・ 間隙水圧制御と透水係数測定システム
- ・ 比抵抗測定システム
- ・ パラレルコンピュータシステムによるモデリングとリアルタイムデータ解析 (左下)
 - * 256プロセッサ(64ノード)
 - * データアキュイジションシステム (右上)
 - * 数値解析モデリング (下中央)

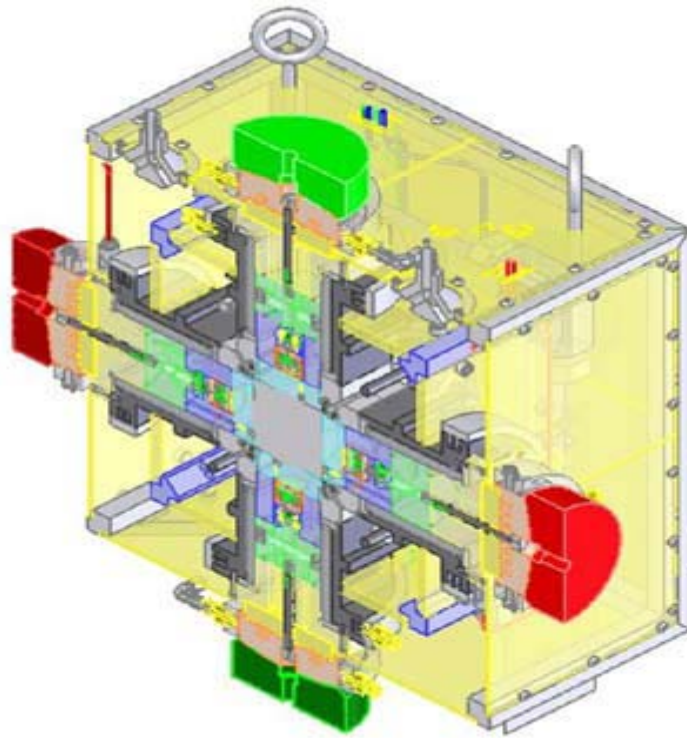
図 7.9 RFDL 実験装置の基本構成と概要

7.4.2 実験内容

実験装置は、通常真三軸状態で透水測定とジオフィジカル・イメージングを行えるよう治具をセットしてサーボ制御で戴荷する。まずは、花崗岩でも泥岩でも破壊後の十分なひずみ領域まで、同時に熱的・物理的・水理的な測定を行うことができる。図 7.10 に装置の概念を示す。多軸戴荷装置もジオフィジカル・イメージングセルも、 200°C に至る深度 4km 以深に対応した原位置での 3次元応力下でも堪えることができる。

8cm 立方体の供試体をコンピュータ油圧制御のラムに挟み、慎重に透水、速度、比抵抗、AE の 3次元測定の前準備をする。処理能力は次のようである。

立方体の供試体と同様に、円柱供試体 ($\phi 50\text{mm} \times h125\text{mm}$) を用いて、図 7.10 に記す測定が可能である (比抵抗測定を除く)。



- 軸荷重：～1063MPa
- 水平荷重：～532MPa
- AEセンサー：18（受・発信用）
- AEセンサーによる連続波形記録とAEセンサーによる速度測定
- 3軸方向のP, S1, S2速度測定
- 三軸方向の比抵抗測定
- 三軸方向の透水係数測定
- 間隙水圧による制御
- 温度制御(200℃)
- 応力・ひずみ計測

図 7.10 真三軸試験装置と各種計測機器の配置の概念図

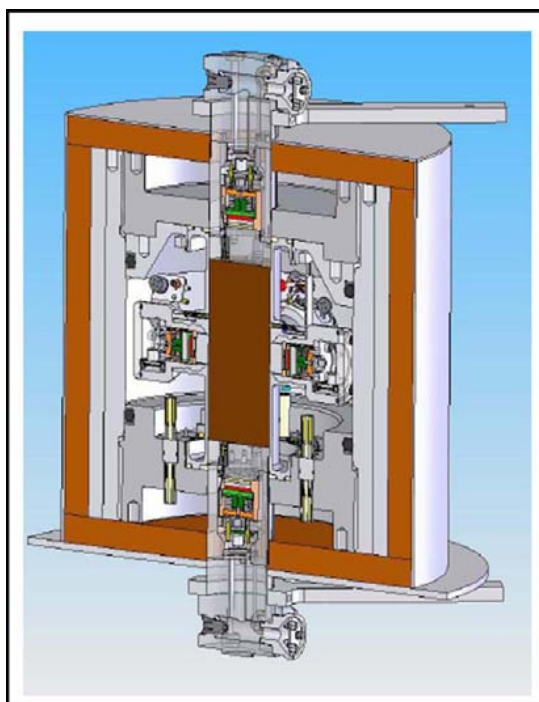


図 7.11 三軸チャンバーの内部構造（左）とチャンバー内の内部構造（右）



図 7.12 真三軸試験装置に設置するジオフィジカル・イメージングセル

7.4.3 パラレルコンピュータシステム

RFDL のデータ取込み収録と解析のためのコンピュータシステムは HPCC(A High- Performance Computing Cluster)と呼ばれている。このシステムを用いることで、これまで以上の高精度な離散化モデル作成が可能となった。さらに、多点の連続 AE データのリアルタイムな解析に用いられている。そのためには、アキュイジション・コンピュータからのデータを 360MB/s で転送し書き込む必要があり、同時に時系周波数解析のために各処理ノードにデータを送ることが求められる。データと処理結果は 6 つの 46 インチスクリーンに表示され、速やかな逐次的分析と集中討論に供せられている。



図 7.13 HPCC(左の部屋)と 6 つのスクリーンを備えた会議室

この HPPC には、64 ビットプロセッサ、各プロセッサには 4~8GB の RAM が搭載されている。総計 256 のプロセッシング・コアを有し理論的には 2.7 テラフロップ（1 秒あたり 2.7trillion フローティングポイント処理）の情報処理能力がある。64 のサーバーノードとディスク収納 18.9 テラバイト（高速 15,000 回転 SAS ディスク使用）は、高速データ転送とノード間通信のためのギガビットネットワークによって繋がれている。2 つの独立したマスターノードは Linux でも Windows Cluster O/S のいずれでも起動できるようになっており、また、ノード群を 2 つのクラスターに分け両方の O/S を組み合わせることもできるようになっている。

7.4.4 実験事例

(1) 岩石破壊挙動の連続 AE によるモニタリング

これまでの室内岩石実験での AE モニタリングの限界の一つは、全波形システムにはサチュレーションポイント(多くは、10~20 イベント/s)が存在することである。限界破壊状態では 1 秒間に数百のイベントが発生するが、従来のモニタリング・システムではこれらのデータを捕捉出来ない。

そこで、この限界を打破するため機器メーカーやソフトウェアメーカー等の協力を得て、先端的な連続 AE モニタリング技術と解析技術を開発している。その結果、RFDL では最新の電子技術とデータ収録技術を用いて数時間にわたる 1 秒当たり 1000 万に及ぶ AE のサンプリングを可能にした。したがって、岩石の破壊、破壊後の挙動、クラックの閉合での AE 情報を十分得ることができ、周波数分析、スペクトル解析、位相変化などによって破壊挙動を把握できる。

図 7.14 は、Westerly Granite の三軸圧縮試験時の破壊の状態と連続モニタリングによる AE の発生状況を示したものである。図は、断層岩のスティック・スリップ現象を模擬するため、一旦岩石試料を破壊させた後、再戴荷過程で発生する AE の分布状況を X 線 CT によって得られたイメージ上に重ねて示したものである。

図中の A,B,C は主破壊面上で活発に AE を発生して領域を抽出している。A,B 領域は主破壊面に交差する二次的な破壊を提示し、C 領域は主破壊面に対し副次的な併走する破壊面を明示している。

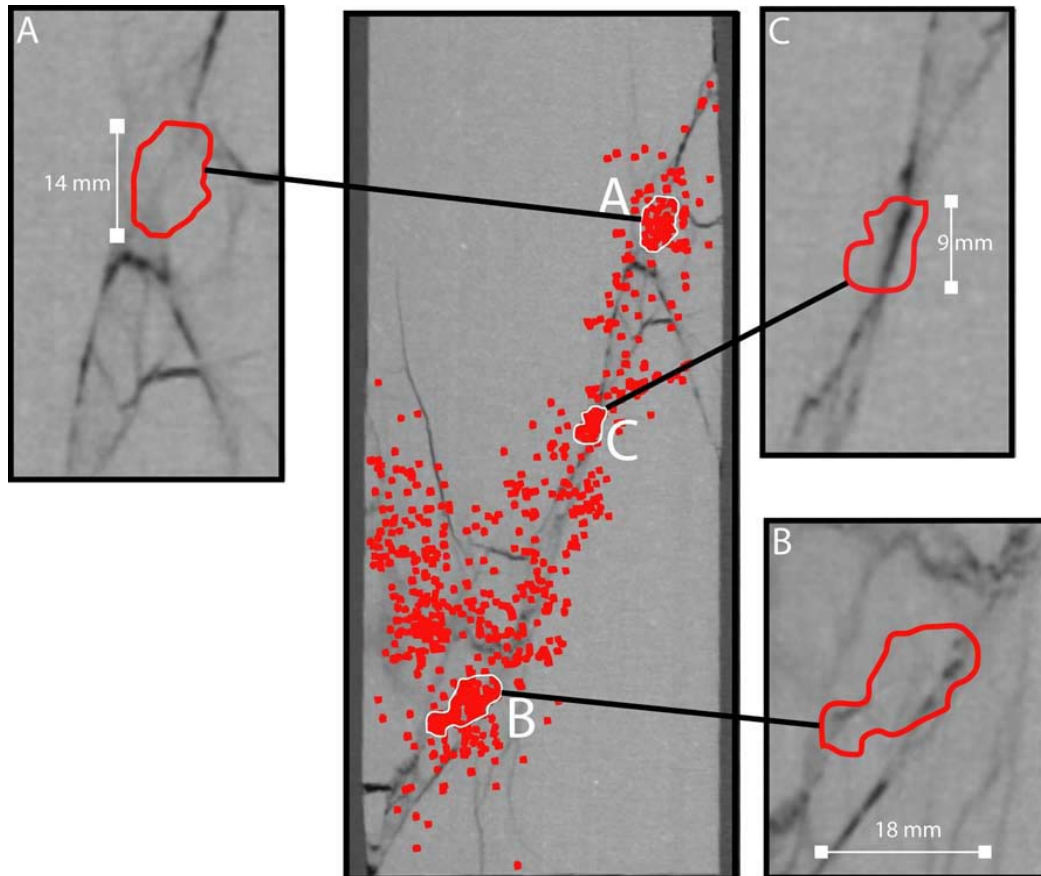


図 7.14 再戴荷過程でプレスリップ面から発生する AE の分布と AE の集中領域⁵⁶⁾

(2) 岩石挙動のモデリング例

図 7.15 に岩石挙動モデルの検討例を示す。高温加熱によるマイクロクラックの発生の実験例を検証するため、花崗岩を 3 種の鉱物の集合体としそれぞれを球体で表して（総計 48000 球状粒子体）、PFC3D ソフトによって解析を行っている。赤い印はマイクロクラックの発生位置を示している。

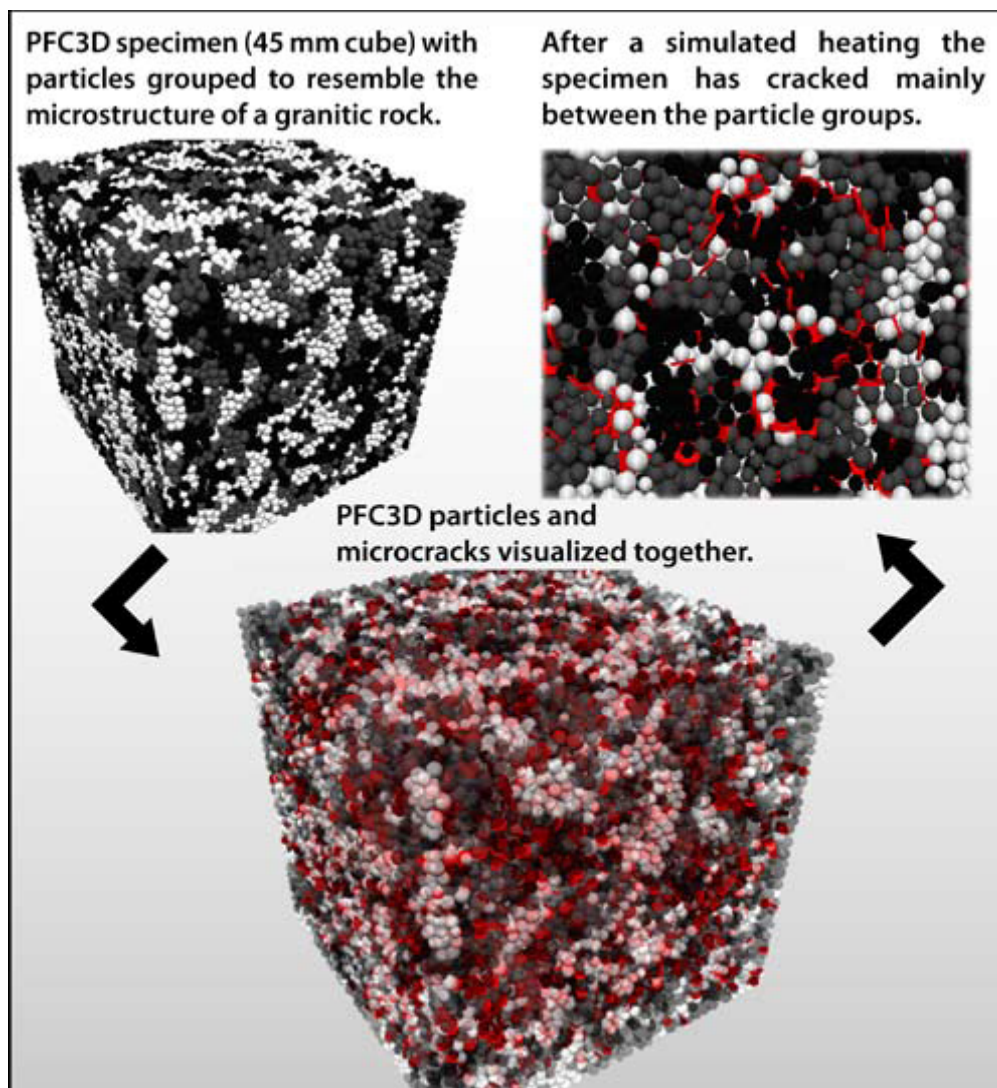


図 7.15 PFC3D による岩石挙動モデルの検討例

参考文献

- 1) 中野司, 中島善人, 中村光一, 池田進: X線CTによる岩石内部構造の観察・解析法, 地質学雑誌, Vol.106, No.5, pp.363-378, 2000.
- 2) 土山明, 上杉健太郎, 中野司: 高分解能X線CT法による岩石・鉱物の3次元構造の研究—太陽系初期物質とコンドリュール—, 地学雑誌, Vol.109, No.6, pp.845-858, 2000.
- 3) 中島善人: X線CTで岩石中の空隙をイメージングする, 地学雑誌, Vol.114, No. 6, pp.1032-1048, 2005.
- 4) 菊池喜昭, 水谷崇亮, 永留健, 畠俊郎: マイクロフォーカスX線CTスキャナの地盤工学への適用性の検討, 港湾空港技術研究所資料, No.1125, 2006.
- 5) 西澤修, 中野司, 野呂春文, 稲崎富士: X線CTによる地球科学試料の内部構造分析技術の最近の進歩について, 地質調査所月報, Vol.46, No.11, pp.565-571, 2995.
- 6) Tani, K. : X-ray computed tomography technique to observe shear bands, Deformation and progressive

- failure in geomechanics IS Nagoya 97, pp.315-320, 1997.
- 7) Nakashima, Y.: The use of X-ray CT to measure diffusion coefficients of heavy ions in water saturated porous media, *Engineering Geology*, Vol.56, pp.11-17, 2000.
 - 8) 廣野哲朗, 高橋学, 中嶋悟, 池原研: X線 CT装置を用いた移流像その場観察透水試験法の開発, *応用地質*, Vol.42, No.5, pp.294-299, 2001.
 - 9) 稲崎富士, 井内美郎, 中野司: 湖沼底質試料の非破壊・密度構造分析への医療用 X線 CT スキャナの利用, *地質調査所月報*, Vol.46, No.11, pp.629-642, 1995.
 - 10) 内田隆, 山本純治, 岡田真一, 早稲田周, 馬場敬, 岡津弘明, 松本良, ODP Leg 164 乗船研究者: 深海底下に胚胎するメタンハイドレート-ODP Leg 164 ハイドレートの X線 CT および NMR を用いた分析一, *地質ニュース*, Vol.510, pp.36-42, 1997.
 - 11) 稲角忠弘, 中野正則, 笠間俊次: X線 CT による鉄鉱石焼結鉱の通気構造解析, *地質調査所月報*, Vol.46, No.11, pp.573-594, 1995
 - 12) 中野司, 中村光一, 染谷利明, 大塚浩士: X線 CT による岩石内部構造の 3次元観察(1) CT 値と物体密度の関係式の決定, *情報地質*, Vol.8, No.4, pp.239-255, 1997.
 - 13) 大谷順, 尾原祐三, 菅原勝彦, 椋木俊文: 地盤工学における産業用 X線 CT スキャナーの適用, *土と基礎*, Vol.48, No.2, pp.17-20, 2000.
 - 14) 菅原勝彦, 小島隆輔, 尾原祐二, 佐藤晃, 島田英樹: X線 CT による亀裂開口解析, *資源と素材*, Vol. 114, No. 12, pp. 881-887, 1998.
 - 15) 佐藤晃, 深堀大介, 澤田淳, 菅原勝彦: X線 CT による不均質材料中の亀裂開口量評価, *資源と素材*, Vol. 120, No. 6, 7, pp.365-371, 2004.
 - 16) 佐藤晃, 内田雅大, 澤田淳, 武部篤治, 佐藤久: X線 CT による亀裂性岩盤内の移流・分散現象の分析, *核燃料サイクル開発機構技術資料*, JNC TY8400 2005-001, 2005.
 - 17) 佐藤晃, 有水拓人, 米村拓峰, 谷口貴子, 緒方奨大: X線 CT スキャナーで岩石を“はかる”, *資源・素材学会平成 19 年度秋季大会*, pp.125-128, 2007.
 - 18) 菅原勝彦, 佐藤晃, 尾原祐二, 柳迫将秀: X線 CT による岩石の透水係数の測定, *資源と素材* Vol.115, No.11, pp.803-808, 1999.
 - 19) 佐藤晃, 菅原勝彦, 久保田智, 河口達也, 江副賢一: X線 CT を用いた固有透過度の評価, 第 11 回岩の力学国内シンポジウム, B04, 2002.
 - 20) 森永大輔, 深堀大介, 菅原勝彦: 多孔質岩の飽和度の精密測定とその応用, *資源素材学会平成 18 年度春季大会*, pp.71-72, 2006.
 - 21) 深堀大介, 菅原勝彦: X線 CT 法による多孔質岩石内透水現象の可視化と分析, *資源・素材学会平成 18 年度秋季大会*, pp.35-36, 2006.
 - 22) 緒方奨大, 深堀大介, 齊藤幸良, 菅原勝彦: X線 CT トレーサー法による岩石の透水係数の測定, *資源・素材学会平成 19 年度春季大会*, pp.119-120, 2007.
 - 23) 深堀大介, 菅原勝彦: X線 CT による来待砂岩の比透過係数の分析, *資源・素材学会平成 19 年度秋季大会*, pp.135-138, 2007.
 - 24) 有水拓人, 田中克也, 米村拓峰, 佐藤晃: X線 CT 法による水-空気置換プロセスにおける置換率と残留飽和度の評価, 第 12 回岩の力学国内シンポジウム, pp.99-102, 2008.
 - 25) 大谷順, 永谷英基, 高野大樹: X線 CT を用いたトンネル切羽崩壊機構の評価, *土木学会論文集 C*, Vol.62, No.4, pp.814-824, 2006.
 - 26) 廣野哲朗, 横山正, 高橋学, 山本由弦, 林為人: マイクロフォーカス X線 CT 装置を用いた堆積物・岩石の内部構造の非破壊観察, *地質学雑誌*, Vol.108, No.9, pp.606-609, 2002.
 - 27) 高橋学, 林為人, 廣野哲朗, 山本由弦: マイクロフォーカス X線 CT による岩石内部構造の可視化について, *応用地質*, Vol. 43, No. 4, pp.235-238, 2002.
 - 28) 高橋学, 竹村貴人, 加藤昌治: マイクロフォーカス X線 CT を用いた拘束圧下における岩石の構造観察について, *応用地質*, Vol. 45, No. 4, pp.192-196, 2004.
 - 29) 高橋学, 藤野翔, 竹村貴人, 道口陽子: マイクロフォーカス X線 CT を用いた拘束圧および間隙水圧変気による岩石の変形挙動観察について, *応用地質*, Vol. 48, No. 5, pp.253-257, 2007.
 - 30) 高橋学, 高橋直樹, 木山保, 漆松雪彦, 竹村貴人: 来待砂岩の三軸圧縮・三軸伸張応力によ

- る変形特性と内部構造の差異について，第12回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp.717-722，2008.
- 31) 高橋学，漆松雪彦，平井秀和：空隙構造定量化の試みーガラスビーズを用いた検証実験についてー，第12回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp.541-546，2008.
 - 32) 澤田昌孝，上田圭一，小早川博亮，金谷守：横ずれ断層変位に伴う断層上部岩盤の破壊形態に関する岩石模型実験，第36回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，pp.367-372，2007.
 - 33) 廣野哲朗，西村征洋，竹村貴人，徐垣，村山雅史，安田尚登：医療用 X 線 CT 装置における階調値の誤差の検証，地質学雑誌，Vol.110，No.9，pp.552-556，2004.
 - 34) Hirano, T., Eguchi, S. and Usami, K., Study of quantitative elemental analysis of monochromatic X-ray CT using synchrotron radiation, Jpn. Jour. Appl. Phys., 28, pp.135-139, 1989.
 - 35) 加藤誠軌，田口昌司，赤井孝夫：X 線分光分析，内田老鶴圃，368pp.，1998.
 - 36) 大野勝美・川瀬晃・中村利廣：X 線分析法，日本分析化学会，pp.39-91，1987.
 - 37) 八島 隆志：粉末 X 線回折による軟岩中のスメクタイトの定量方法について，北海道土質試験共同組合，技術 e-フォーラム 2006.
 - 38) 石田直哉：青色ひすい輝石岩中のコットレル雰囲気によるオンファス輝石の生成，岩石鉱物科学，34，pp.288-293，2005.
 - 39) 紀本静雄：オートレイ走査電子顕微鏡，コロナ社，187pp.
 - 40) 日本電子顕微鏡学会関東支部編：走査電子顕微鏡，共立出版株式会社，289pp.
 - 41) Jason T. DeJong , Michael B. Fritzges, and Klaus Nusslein : Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 132, pp. 1381-1392, 2006.
 - 42) 松本啓作，平島崇男：走査型電子顕微鏡を用いたモード測定，岩石鉱物科学 Vol. 35, pp.97-108, 2006.
 - 43) 吉田英一，山田鋼志，田中姿郎，興語節生，A.E.Milodowski：酸化還元フロントの形成と二次的物質移動現象 - 地質環境中汚染物質の移動と長期的固定に関するアナログ研究 - ，地質学雑誌 Vol. 109, pp.548-558，2003.
 - 44) 田崎和江，朝田隆二，渡辺弘明，白木康一：アズベストの代替品ロックウールの特性と安全性について，岩石鉱物科学，Vol. 35，pp.22-33，2006.
 - 45) 原口紘き，久保田正明，森田昌敏，宮崎章，不破敬一郎，古田直紀著：ICP 発光分析法，日本分析化学会編，共立出版株式会社，pp.12-23，1998.
 - 46) 石川剛志，長尾光高，中沢敏和：ICP-AES による岩石試料中の Nb,B の同時分析，静岡大学地球科学研究報告，Vol.24，pp.59-67，1997.
 - 47) 木下尚樹，安原英明，中島伸一郎，岸田潔：拘束圧および温度を制御した花崗岩不連続面の透水性経時変化の実験による検討，第12回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp.965-970，2008.
 - 48) 檀崎祐悦，我妻和明：誘導結合プラズマ発光分析法による炭化ケイ素中のケイ素定量のための炭酸ナトリウム融解/アルカリ溶液測定法，分析化学，Vol. 52, No. 5, pp.347-350，2003.
 - 49) 上本道久，阿部孝，稲垣和三，井上達也，岡田章，川田哲，貴田晶子著：ICP 発光分析・ICP 質量分析の基礎と実際，社会法人日本分析化学会関東支部編，株式会社オーム社，231pp，2008.
 - 50) 松藤行信，荒井章司，森下知晃，石田義人：幌満かんらん岩体中の異質な高 Mg, Cr かんらん岩塊の岩石学，岩石鉱物科学，Vol.35, No. 5, pp.231-243，2006.
 - 51) 矢嶋一仁，藤巻宏和：誘導結合プラズマ質量分析法による岩石試料の微量元素の定量分析，岩石鉱物科学，Vol. 31, No. 5, pp.249-260，2002.
 - 52) 渡辺一夫：イオンクロマトグラフィーの原理とめっき液組成の分析事例，表面技術，Vol. 54, No. 4, pp.257-262，2003.
 - 53) 浅原良浩，田中剛，山本弘： α -HIBA を溶離液に用いたイオンクロマトグラフィーによる岩石中の希土類元素の分析，岩鉱，Vol. 90, No. 4, pp.103-108，1995.
 - 54) 児玉竜，福島和夫：岩石の化学的風化に及ぼす二酸化炭素の影響評価，日本陸水学会，講演要旨集，Vol. R68 No. SPACE, pp.148，2003.

- 55) 杉田創, 駒井武, 沖田伸介, 徳永修三, 松永烈 : 粘土鉱物へのフッ素吸着挙動に関する Freundlich 吸着式による解析, 資源と素材, Vol.121, No.9, pp.416-422, 2005.
- 56) R. Paul Young and Ben D. Thompson : Imaging dynamic rock fracture with acoustic emission and x-ray tomography, Proc. of 11th Congress of ISRM, 2007.

8. まとめ

本報告では、従来の岩盤計測で主導的に議論されてきた変形計測だけでなく、物理探査分野の先進的な計測方法も網羅し、さらに、岩盤構造物の継続的な維持管理に供する計測事例の紹介を行っている。

第2章では、変形計測の役割や計測精度の定義について議論を行い、先端的な計測の事例紹介を行った。第3章では、岩盤応力測定について、特に近年研究がすすめられているAE法を用いた計測事例や大深度地殻応力計測を目的とした水圧破碎法について紹介を行った。第4章では、物理探査の方向性とその計測事例紹介を行った。第5章では、変位計測による岩盤構造物のライフサイクルコスト評価の現状と課題を、岩盤斜面計測やダム基礎岩盤の計測事例を示しながら議論を行った。第6章では、法面の健全性について、物理探査で行った評価事例の紹介を示し、今後の課題を示した。最後に、第7章で室内での岩石・岩盤計測の現状と課題を述べている。

本報告では、種々の先端計測技術を紹介するだけでなく、先端技術を利用した岩盤計測の体系化を試みるとともに、これらの計測手法を用いて、岩盤構造物のライフサイクルコストの評価へ適用できる可能性について検討を行った。具体的には変形計測の現状と先端技術応用による変形計測、変形計測を用いた岩盤構造物のライフサイクルコストの評価法、特に既設ダムを対象としたライフサイクルコストの評価法について提案した。更には現状の物理探査技術と新しい物理探査技術、物理探査法を用いた岩盤構造物のライフサイクルコストの評価法、とりわけ老朽化した道路の法面の健全性評価として物理探査を用いた手法を提案した。

事例が十分ではないが、これらの計測法や事例から、今後の岩盤計測技術の方向性が導き出されるものと確信している。

本研究小委員会で得られた成果が、岩盤力学の発展に少しでも寄与でき、さらには、実際の岩盤構造物の設計、施工、維持・管理に対して、何らかの示唆を与えることができることを期待している次第である。