

コンクリートダム の健全性調査のための非破壊技術の開発

小堀俊秀・松下智祥・金銅将史

1. はじめに

長期供用ダムが増加する中、多数のダムがその機能を確実に発揮できるよう、限られた人員・予算で施設の健全性を保つための維持管理をより的確・効率的に行っていくことが重要な課題となっている。このような中、ダムの安全管理を目的として従来から行われている巡視と計測による日常点検、地震時等の臨時点検、定期検査等に加え、長期供用ダム等を対象に施設の状態について詳細に調査し、健全度評価を行って長寿命化のための維持管理方針を作成するダム総合点検¹⁾の取組も進んでいる。また、気候変動の影響の顕在化等に伴い、既設ダム嵩上げ等を行うダム再生事業²⁾へのニーズも高まっているが、その実現可能性等の判断に際しては、既設堤体の健全性を十分に把握する必要がある。しかし、ダム堤体の健全性の調査は、表面からの変状（コンクリートダムの場合、下流面でのひび割れ分布等）の調査が主体であり、内部状態（表面で確認されたひび割れの深さ、打継面の状態、コンクリート強度等）の把握はボーリング調査に頼っているのが現状である。ボーリング調査では、足場設置の困難さ等からダム天端や下流面低標高部、フーチング部等に限られ、得られる情報もピンポイントのものとなる。

そこで国総研では、国土交通省の河川砂防技術研究開発制度による公募を活用し、コンクリート構造物の内部状態を非破壊で調査する技術について特に高度な知見を有する所外（大学等）の専門家の参画を得て、コンクリートダムの安定性に影響を及ぼす可能性がある水平打継面沿いのひび割れ（図-1）の深さなど堤体内部の状態を非破壊で調査可能な技術の研究・開発を進めてきた³⁾。

本稿は、参画を得た各研究グループにより実施された研究・開発の成果の概要を紹介するとともに、得られた非破壊調査技術の今後のダム維持管理への活用の見通しについて述べるものである。

2. ダム堤体内部の非破壊調査技術の開発

2.1 概要

本技術開発の実施には、東京都立大学、京都大学及び富山県立大学の専門家をそれぞれ中心とする計3つのグループの参画を得た³⁾。各グループのアプローチはそれぞれ異なるが、①施工時の打継処理不足やその後の温度低下による収縮等で生じることがあり、止水上も堤体安定上も問題となる水平打継面沿いのひび割れ（図-1）を主なターゲットとした点、②コンクリート構造物や地盤調査で一定の実績がある弾性波を用いる調査技術の開発を目指した点で共通する。以下、各グループにより得られた成果の概要をダム堤体内部の健全性調査手法としての活用の見通しとともに述べる。

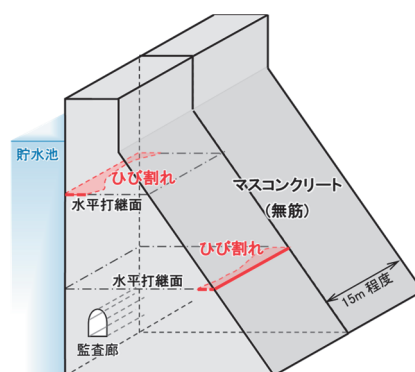


図-1 コンクリートダム堤体内部（水平打継面沿い）のひび割れ（概念図）

2.2 低周波弾性波を用いた非破壊調査技術

東京都立大学等のグループ（研究代表者：小田義也 教授）は、ひび割れ深さを把握する技術の開発として、構造物としてのダム堤体の規模の大きさを考慮し、広範囲を対象とする地盤調査で実績があり透過力が大きい低周波弾性波を用い、ひび割れ通過時の減衰に着目した検討を行った。

(1) 表面波の減衰量分析によるひび割れ深さ推定

コンクリート構造物のひび割れ深さ等を非破壊で調査する従来手法として超音波法⁴⁾があるが、超音波は減衰が大きく、ダム堤体では表面ごく近傍しか調べることができない。このため、透過力が大きい低周波の弾性波を用いて堤体表面からひ

び割れ深さを推定することを目標に、Aダム（重力式、1968年完成、堤高約50m）の下流面で水平打継目沿いに確認されているひび割れをターゲットとし、図-2に示すように、堤体表面にひび割れを横切るように複数の測線を配置した。各測線上の入力点を小型プラスチックハンマーで打撃して弾性波（卓越周波数850Hz程度⁶⁾）を励起させ、ひび割れ反対側の同一測線上に配置した複数のセンサ（地盤調査で利用されるジオフォンの中で共振周波数が比較的高い40Hzのもの）で減衰が比較的小さい表面波波形を取得した。

得られた表面波波形（図-3）にはひび割れ位置通過後にその振幅の減衰が確認された。そこで、表面波波長 λ に対するひび割れ深さ d の比（ d/λ ）と振幅減衰率の関係（実験式）⁷⁾を適用すると、各測線でのひび割れ深さが1.0～1.5m程度と推定された。これはダム管理者により実施された堤体ボーリング調査の結果と概ね整合した（図-4）。これより、表面でのひび割れ位置が既知、当該ひび割れを挟むように弾性波の入出力位置を選べる場合、表面波の伝播範囲内（励起される表面波の波長 λ （本試験では約2.6m⁶⁾）に留まるひび割れであれば、その深さの推定に本手法を活用できるものと期待される。なお、より安定した計測データが得られる入出力方法として、ソレノイド（打撃部）を電圧で起動するタイプの既往の機械式振源装置や光ファイバーを利用したセンサの利用が有用な可能性を示唆する結果も得られた。

(2) 実体波を利用した物性分布の推定

表面波での調査が難しいダム堤体のより深部に対しては、実体波（P波やS波）の利用が考えられる。低周波の弾性波は波長が長く分解能の面では不利なため、透過波でのひび割れ検出は難易度が高いと考えられるが、透過力に優れる点を利用し、速度構造からコンクリート強度などの物性分布の把握に活用できる可能性がある。そこで、Aダムの表面でひび割れが認められない領域を対象に、堤体内の監査廊と堤体表面（下流面の上下方向測線上に複数配置したセンサ）との間（距離20m前後）で弾性波速度計測を実施した。監査廊内での入力にはスチールハンマー、センサは（1）と同様のジオフォンを用いた。圧縮強度の推定結果を図-5に示す。計測から得られた各伝播経路上のP波速度（図-5（a））にコンクリートの圧縮強

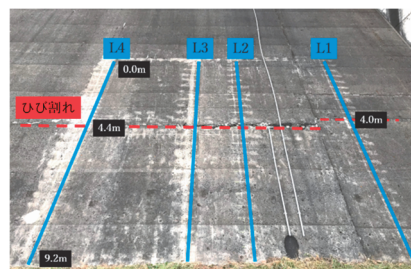


図-2 堤体下流面での表面波計測箇所の配置(Aダム)⁵⁾

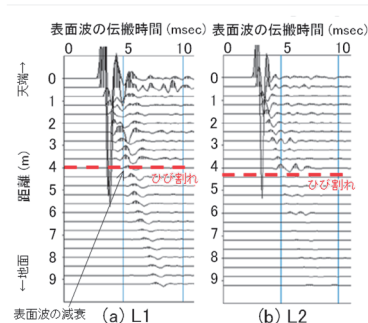


図-3 各センサ位置で得られた表面波波形の例(Aダム)⁵⁾

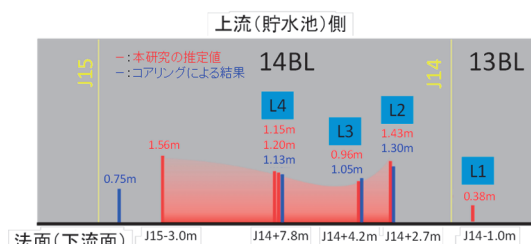
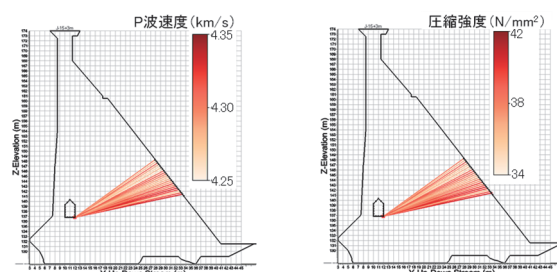


図-4 推定されたひび割れ深さとコアリングによる調査結果の比較



(a) P波速度 (b) 推定した圧縮強度

図-5 圧縮強度の推定結果 (Aダム)

度と弾性波速度の関係⁸⁾を用いて推定された堤体コンクリートの圧縮強度は、ダム管理者による堤体からの採取コア供試体での試験値よりやや大きい値となった。採取コアでの試験数が限られ、コア採取位置も弾性波での計測位置と異なるため評価は難しいが、弾性波では低標高側の方が相対的に大きな強度を示す結果（図-5（b））が得られ、コンクリート強度が標高により変化している可能性が示唆された。

2.3 弾性波トモグラフィによる非破壊調査技術

京都大学のグループ（研究代表者：塩谷智基特定教授）は、弾性波を利用したトモグラフィ法

によりひび割れの堤体内での空間分布を把握するとともに、弾性波の一種で微小破壊の発生・進展により発せられるAE (Acoustic Emission) を捉える技術の開発等を行った。

(1) 実体波の透過波を用いたひび割れ深さ推定

弾性波トモグラフィは、調査領域を多数の格子状セルに分割して弾性波 (P波) の伝播経路が多数存在するよう入出力点を多数配置し、各経路での計測で得られた伝播時間と理論計算による伝播時間が近似するように各セルの伝播速度を解析的に求める手法である。この手法は道路橋床版⁹⁾等コンクリート構造物の劣化損傷評価に適用されている。そこで、前述Aダムにおける水平打継面沿いのひび割れ (図-2の赤破線) をターゲットに、透過弾性波 (P波) のトモグラフィ解析により堤体内部のひび割れ範囲推定を試みた。入出力点は、図-6のように堤体表面 (下流面) には格子状、堤体の監査廊内には十字状に配置した。対象領域は、堤体において想定されるひび割れ範囲とし、これを通過する透過弾性波 (P波) の伝播時間を計測した。打撃による弾性波の入力には低周波の弾性波励起を考慮して鋼球 ($\phi 75\text{mm}$ 、上限周波数: 3.9kHz) を用いた。センサは加速度領域での計測を考慮して加速度センサ (帯域3~数十kHz) を用いた。

3次元トモグラフィ解析により得られた3次元速度分布より、ひび割れ奥行方向 (水平面内) におけるP波速度分布を抽出したものを図-7に示す。表面から最深1.0m程度までは弾性波速度が徐々に上昇している。この深度は管理者による堤体ボーリング調査で得られたひび割れ深さとほぼ整合する。これより、堤体内部のひび割れ範囲 (打継面沿いのひび割れ深さ) の評価手法として弾性波トモグラフィが適用できるものと期待される。なお、数値解析的検討より、弾性波の速度や減衰はひび割れ面の分離面積割合に依存していることがわかっている。すなわち、分離面積割合が大きくなるほど速度が低下し、減衰が増加する。また、その影響は高周波になるほど顕著になることがわかった。これを考慮すると、打継面沿いのひび割れは深部に至るにつれて、分離面積割合が小さくなっているものと推定された。

(2) 表面波を利用したひび割れ深さ推定

ひび割れ深さが比較的表面に近い範囲にとどま

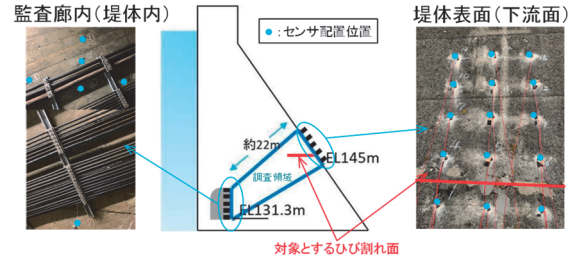
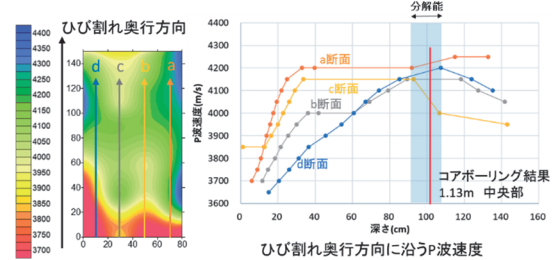


図-6 透過弾性波及び表面波のトモグラフィ解析の対象領域とセンサ配置 (Aダム)



(a) 対象面内の速度分布 (b) 図(a)各測線沿いの速度分布
図-7 表面からのひび割れを有する水平打継面に対する透過弾性波によるトモグラフィ解析結果 (Aダム)

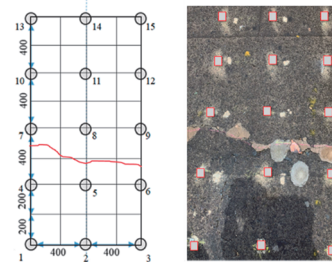


図-8 表面波トモグラフィ実施位置¹⁰⁾

る場合には、表面のみから調査が可能であり、比較的減衰も小さい表面波の利用が有利である。Aダムのひび割れは透過弾性波 (P波) の解析から比較的表面に近い範囲にとどまると推定されている。これより、表面波を利用したトモグラフィ解析も実施した。表面波の計測は、図-8に示すように堤体下流面上にひび割れを挟むように入出力点を配置し、入力には鋼球 ($\phi 30\text{mm}$ (上限周波数: 9.7kHz 、高周波の励起を考慮)) と $\phi 75\text{mm}$ (上限周波数: 3.9kHz 、低周波の励起を考慮)) を用いた。

表面波トモグラフィ解析により得られたひび割れ深さは、(1)の透過弾性波 (P波) によるトモグラフィ解析と同程度であり、管理者によるボーリング調査結果とも調和的であった。また、調査領域中の右岸側 (図-9のそれぞれ左側) の方がより低速度となる結果が得られた。この傾向も図-7に示した透過波で得られた速度分布と矛盾しないものであった。これより、比較的表面に近い範囲にとどまるひび割れであることが想定される場合で

あれば、監査廊などを利用した透過波による調査が困難な場合でも表面のみからの調査可能な表面波トモグラフィが有力な調査法となると考えられる。

(3) AE検知によるモニタリング

人為的入力で弾性波を励起させる能動的手法と異なり、構造物内部からの微小な損傷の発生や進展に起因するAEを検知することで、ダム堤体内部状態を監視できる可能性がある。そこで、ダム堤体でのAE検知によるモニタリングの可能性を検討した。Aダム監査廊内に3Hz～数十kHz帯に感度を持つ加速度センサを複数配置（図-10（a））して得られたAE計測の結果、毎分平均1イベント程度のAE（卓越周波数10kHz程度）が検知された（図-10（b））。正確な発生源特定は困難であったが、計測領域ごとのAE計測数の偏り（図-10（c））から、AEは堤体内のある程度一定の位置で発生している可能性が考えられた。なお、本計測中には地震はなかったことから、発生源としては、例えば貯水位や外気温の変動に伴い応力変化が生じる継目や既存の微小クラック等が考えられる。今後、計測データの蓄積や更なる計測方法の工夫等によりある程度発生源の特定が可能であることが確認できれば、AE計測もダム堤体の新たなモニタリング手法として活用できる可能性がある。

なお、京都大学のグループでは、前述の弾性波トモグラフィ等に適した加速度領域を含む中低周波数帯（数Hz～数十kHz）からAE計測に適した高周波数帯（十kHz～数MHz）までをカバーできる幅広い周波数帯（1Hz～1MHz帯）に感度を持つSAセンサ（Super Acousticセンサ）の開発も比較的安価なMEMSセンサの技術をもとに進めている。これを用いて、Aダム堤体内で模擬的に発生させた上記周波数帯の弾性波の計測試験を実施したところ、実際に計測可能であることが確認された。

2.4 弾性波、赤外線等による非破壊調査技術

富山県立大学等のグループ（研究代表者：内田 慎哉 准教授）は、弾性波に基づく調査ならびにUAVを活用した赤外線調査を併用することで、打継面のひび割れの有無や堤体表層付近のひび割れ等変状の位置を適切かつ効率的に評価する手法の開発等を進めた。

(1) 反射波等での堤体上からのひび割れ位置推定

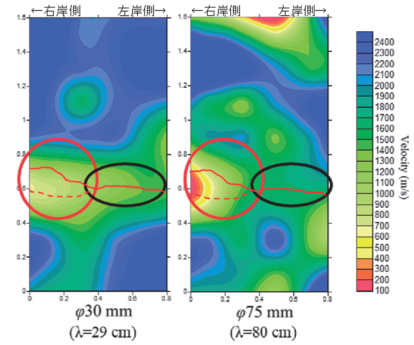
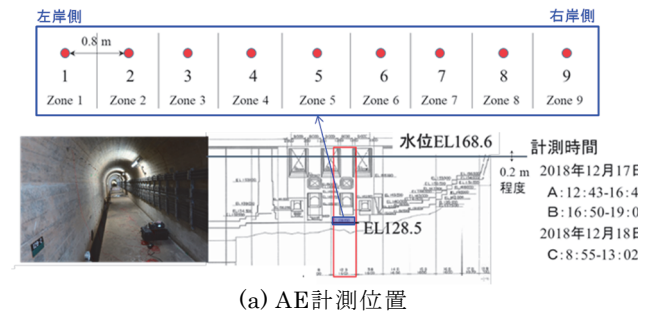
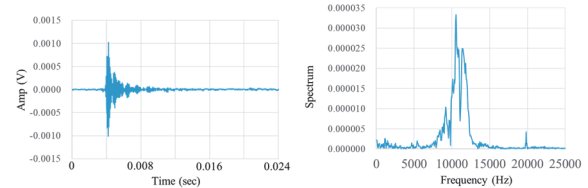


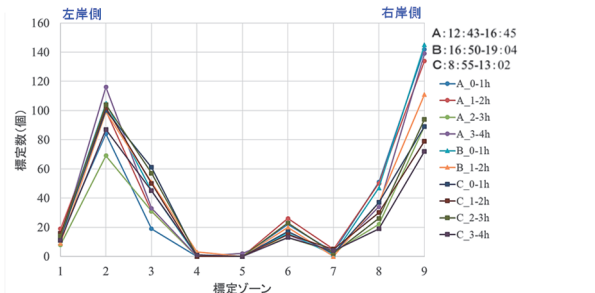
図-9 表面波トモグラフィで得られた図-7と同じ水平打継面内の速度分布（Aダム）¹⁰⁾



(a) AE計測位置



(b) 検出された波形と周波数特性の例



(c) 計測時間帯ごとの各領域のAE計測（ヒット）数
図-10 ダム堤体内でのAE計測結果の例¹⁰⁾

近接目視での確認やセンサ設置のためのアクセスが難しい高所にある水平打継面沿いのひび割れ位置をダム堤体天端からの弾性波入力により非破壊で把握する手法として、ひび割れ面からの反射波を計測し、弾性波動解析により反射面位置（標高）を推定する手法の適用性について検討した。

反射波での弾性波動解析は、数値解析での予察検討の上、測線上のセンサで得られた各時刻での振幅の積から内部の反射面位置を推定する相互相関法と、入力位置を測線上で順次移動させながら反射波を計測し、すべての入出力位置の組合せから得られる反射波強度の高さから反射面位置（深さ）を推定する開口合成法を適用した。

Bダム（重力式、1945年完成、堤高約20m）（図-11）天端に設けた測線上からのひび割れ位置の推定の結果を図-12に示す。相互相関法では分解能を考慮してある程度高い周波数の弾性波が励起可能な小さめの鋼球（ $\phi 30\text{mm}$ 、 $\phi 40\text{mm}$ ）を入力に用いたが、高感度のセンサ（加速度計）を用いることで天端から数m下方に反射面が推定された（図-12(a)）。この位置は下流面で漏水が認められた打継面標高（図-11）に近いとともに、表面波の伝播速度が周波数に依存する特性に着目して深さ方向の速度構造を推定する表面波探査法による低速度層の推定位置（図-12(b)）とも調和的であった。また、開口合成法では、高感度の圧電型加速度センサを用い、鋼球径により入力周波数を変えることにより、ダム基礎標高のほか下流面で漏水やエフロレッセンス（遊離石灰などの成分が析出し固化したもの）が認められる打継面付近で高い反射強度が得られた。

なお、反射波によるダム堤体の非破壊調査にはこのほか高周波衝撃弾性法の適用例¹⁰⁾もあるが、特定の手法のみでは信頼性の高い結果を得るのが難しいこともある。複数手法での検証により信頼性を高めることができると考えられる。

(2) 赤外線とUAVを用いた変状箇所の抽出

非破壊調査を含む詳細調査の必要性がある打継面沿いのひび割れ等の変状箇所を遠隔で抽出するには、コンクリート表面付近の空隙に伴う温度較差が大きい領域を赤外線（熱画像）で抽出する方法が考えられる。また、高所等アクセス困難箇所ではUAVの併用も考えられる。そこで、前述のBダムやCダム（重力式、1986年完成、堤高約120m）で堤体下流面の熱画像（図-13）を一部UAV搭載赤外線カメラも用いて取得し、必要に応じ陰影等の環境ノイズ軽減のため画像処理（Kriging処理¹²⁾）を施すことで変状箇所が抽出し易くなることを確認した。近接での確認が困難な箇所を含め、非破壊調査の対象領域の抽出など詳細調査を効率的に行う計画を立案する上で必要な場合にはこれらの技術も併せて活用することが考えられる。

3. 健全度調査での活用に向けて

本研究開発の成果をもとにコンクリートダムの健全性を非破壊で調査するために活用可能と考え

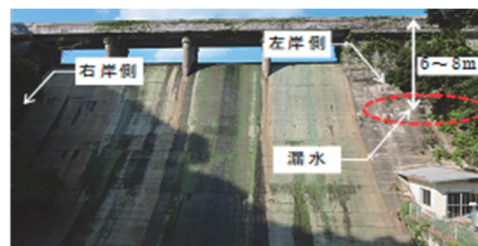
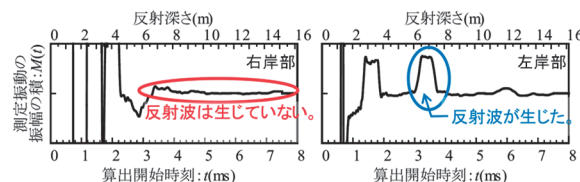
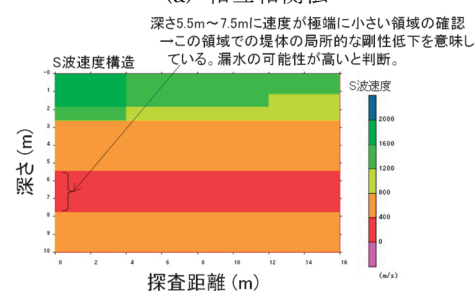


図-11 堤体下流面の状況（Bダム）

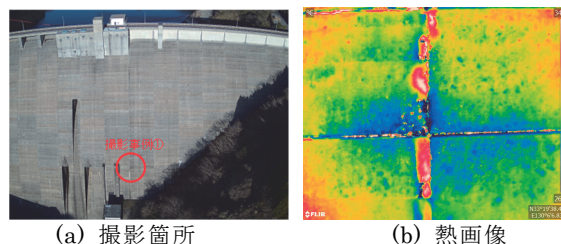


(a) 相互相関法



(b) 表面波探査

図-12 ダム天端からのひび割れ位置推定結果（Bダム）



(a) 撮影箇所

(b) 熱画像

図-13 赤外線カメラとUAVによる変状箇所抽出（Cダム）

られる技術を整理すると表-1のようになる。目的・用途や現場条件に応じた手法や機器を選ぶことにより、堤体内部の状態に関する情報をこれまでよりも効率的に得ることが可能になるものと考えられる。なお、本研究開発の中で実施した実証試験とは条件が異なるケースも想定されるため、各調査法については、今後も具体のダムへの適用を通じ、活用にあたっての留意点やノウハウの蓄積を進めていく必要があると考えている。

そのため、本研究開発で得られた成果は、他の各種調査・診断技術とともに、ダムの維持管理の現場での活用を検討する上で参考となるよう、技術資料等としてまとめる予定である。

謝 辞

本研究開発の実施に際し、実証試験のためのフィールド提供など関係ダム管理所の各位には多大な協力を得た。ここに記して謝意を表します。

表-1 弾性波を用いた非破壊調査技術のコンクリートダム堤体内部の健全性調査への活用法

目的・用途	調査方法	入出力箇所	適用要件・特徴	本研究での主な実施条件・使用機器等	
				ターゲット・使用した弾性波等	入出力機器等
ひび割れの奥行き方向の範囲(深さ)の推定	・低周波弾性波(表面波)による減衰量分析 [2.2]	堤体表面上(下流面等)	・基本的には励起される表面波の波長程度の深さまでのひび割れが対象 ・堤体表面で位置が確認でき、表面からの入力やセンサ設置が可能な場合は、表面のみからの調査で深さの推定が可能 ・既往の地盤調査技術を応用して比較的容易に測定が可能	・表面波波長約2m(周波数1kHz程度) ・測線長9.2m(センサ間隔0.4m程度)	・プラスチックハンマー打撃 ・ジオフォン(40Hz帯)
	・表面波トモグラフィ [2.3]			・表面波波長0.29m(周波数10kHz程度) ・測線長1.6m(センサ間隔0.4m程度)	・鋼球打撃(Φ30,75mm) ・加速度計(1~10kHz帯)
	・弾性波(透過波)トモグラフィ [2.3]	堤体表面～堤体内部間		・表面波波長0.8m(周波数3kHz程度) ・受信点距離最大約20m	・鋼球打撃(Φ100mm) ・加速度計(1~10kHz帯)
打継面沿いのひび割れ等の位置(標高)の把握	・反射波(相互相関法、開口合成法) ・表面波探査法 ・UAVを用いた赤外線 [2.4]	堤体表面上(ダム天端等)	・堤体表面の高標高等アクセス困難な場合でもダム天端からの調査が可能 ・赤外線(熱画像)やUAVの活用による表面からの調査と組み合わせも ・ダム天端直下の打継面等の検出に有効	ダム天端の直下(10m程度)までの位置にあるひび割れ	・鋼玉打撃(Φ70mm前後、場合によってはゴム板を併用) ・加速度計(1Hz~10kHzまたは15kHz帯)
堤体内の物性分布の把握(コンクリート強度等)	・低周波弾性波(透過波)の速度計測 [2.2]	堤体表面～堤体内部間	・堤体表面と内部(監査廊等)の間での計測が可能な場合 ・分解能よりも透過力を活かした調査法	堤体コンクリートの強度分布(入出力点間距離約20m)	・スチールハンマー打撃 ・ジオフォン(4.5Hz~40Hz帯)
堤体内での微小破壊の検知	・AE計測及びトモグラフィ解析 [2.3]	堤体内又は堤体表面上(受動計測)	・微小なAEを検出可能なセンサの使用・配置 ・常時のモニタリング ・発生源の正確な特定には計測データの蓄積等を通じた更なる検討が必要	堤体内からのAE(受信点までの距離最大約50m*)	・AEセンサ(10kHz~数百kHz帯) ・加速度センサ(3~数十kHz帯) ・SAセンサ(1Hz~1MHz帯)

注)「調査方法」欄の[]書きは本文中の記載箇所を示す。*は鉱山での計測実績を踏まえた解析的検討による推定値。

参考文献

- 国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課：ダム総合点検実施要領・同解説、2013.
- 国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課 流水管理室・治水課 事業監理室：ダム再生ガイドライン、2018.
- 国土交通省 水管理国土保全局：河川砂防技術研究開発公募(河川・水防災技術分野)
<https://www.mlit.go.jp/river/gijutsu/kenkyu.html>
- 例えば 魚本健人、加藤佳孝：コンクリート構造物の検査・診断-非破壊検査ガイドブック-、理工図書、pp.107~136、2003.
- 南 佳希、東 宏幸、小田義也、高橋 亨、尾西恭亮、磯真一郎：表面波の減衰効果を利用したコンクリートのひび割れの深さ推定、物理探査学会第145回学術講演会論文集、pp.27~30、2021.
- 高橋 亨、細田大樹、小田義也、尾西恭亮：弾性波を利用したコンクリートダム堤体の亀裂および強度分布評価手法に関する研究開発(その2)-表面波の減衰特性-、物理探査学会141回学術講演論文集、pp.37~40、2019.
- 江島 淳、吉岡 修、坂田英洋、吉村正義：空溝と地中壁による振動遮断効果、土と基礎、28(3)、pp.49~55、1980.
- 国立研究開発法人土木研究所：衝撃弾性波試験表面2点法による新設の構造体コンクリート強度測定要領(案)、2010.
- Shiotani, T., Hashimoto, K., Asaue, H., Nishida, T., Takamine, H., Watanabe, K., and Fukuda, M.: Lateral Damage Identification in RC Slabs by Several Tomographic Approaches with Rainy Induced Elastic Waves, Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering, vol.64, no.11, pp.657-664, 2018.
- Asaue, H., Shiotani, T., Hashimoto, K. and Yang, Y.: Damage Evaluation Inside the Concrete Dam by Elastic Wave Methods, The 3rd ACF Symposium 2019, Asian Concrete Federation, 2019.
- 市川滋己、新屋敷隆、鎌田敏郎：衝撃弾性波法を用いたコンクリートダム堤体の水平打継面調査、ダム工学、27巻1号、pp.16~25、2017.
- 鈴木哲也、青木正雄、山本大祐：Kriging法を用いた赤外線画像の環境ノイズ除去に関する解析的検討、農業農村工学会全国大会講演要旨集、pp.426~427、2010.

小堀俊秀



国土交通省国土技術政策総合研究所
河川研究部大規模河川構造物研究室
主任研究官、博士(工学)
Dr. KOBORI Toshihide

松下智祥



国土交通省国土技術政策総合研究所
河川研究部大規模河川構造物研究室
研究官
MATSUSHITA Tomoaki

金銅将史



国土交通省国土技術政策総合研究所
河川研究部大規模河川構造物研究室
室長、博士(工学)
Dr. KONDO Masafumi