

河川砂防技術研究開発【成果概要】

①研究代表者	氏名 (ふりがな)	所属	役職
	小田 義也 (おだ よしや)	東京都立大学	准教授
②技術研究開発テーマ	名称	低周波の弾性波を用いたコンクリートダムの亀裂検知および強度分布把握手法の研究開発	
③研究経費 (単位: 万円) ※端数切り捨て。	平成30年度	令和元年度	令和2年度
	290 万円	998 万円	956 万円
			総合計 2,245 万円
④研究者氏名 (研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。)			
氏名	所属機関・役職 (※令和3年3月31日現在)		
高橋 亨	(公財) 深田地質研究所・理事		
磯 真一郎	(公財) 深田地質研究所・上席研究員		
尾西 恭亮	(国研) 土木研究所・主任研究員		
⑤研究の目的・目標 (様式河水-1、河水-2に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。)			
<p>ダムの老朽化が進行する中、適切な維持更新を図るためにダム堤体の内部状態の把握が必要となる。測定対象が表層域でなく堤体内部の深い領域である場合には、透過力の高い低周波の弾性波の利用が考えられる。しかし、巨大なダム堤体の探査において、有効な周波数帯域と検知可能な対象の大きさや状態に関する基本的な情報が整理されていない。また、低周波(低い分解能)の弾性波を用いても、求めるダム堤体の状態を把握可能な探査・解析手法の整理や開発が必要となる。そこで、本研究では、低周波の弾性波を用いた重力式コンクリートダムの堤体内部の非開削探査手法の開発を目指した。</p> <p>FS では、ダム堤体の部分的な測定により開発の前提となる低周波の弾性波のダム堤体に対する透過力や異常箇所を検出する能力の基本評価を目的とした。</p> <p>一般研究では、ダム堤体全体を対象とした計測を行い、亀裂分布や強度分布の解析が可能な記録を取得できるか、表面波や透過波が、亀裂や越冬面などの構造境界を検知可能か、そして、異なる時期の測定記録から、堤体内部の状態変化を検出できるかについて評価することを目的とした。加えて、現場実装を見据えて、自然振動、簡易振源、そして、光ファイバーを用いた振動測定の実用性に関する基本評価を目的とした。</p> <p>低周波の弾性波は透過力が高いが、波長が長くなり、分解能が低下する。物理探査で亀裂や断層などの検知に一般的に用いられる反射波を用いた手法では、大きな亀裂は検知できても、微細な亀裂は検知できない。供用中のダムにおいて、開口幅が大きな亀裂が存在する可能性は低い。そこで、微細な亀裂域の通過時に発生する散乱現象を利用した、伝播波動の減衰を解析する手法の適用を試験する。</p> <p>本研究では、コンクリートダムにおいて、低周波の弾性波の、(1)伝播速度の測定、(2)減衰量の測定の2点を行い、本研究で進める技術開発の有効性を評価する。弾性波のP波およびS波の伝播速度を分析することにより、堤体のコンクリートの強度分布に関する状態把握を行うことができる。また、微細な亀裂が存在すると、伝播波動が散乱されるため、振幅が変化する。透過波の振幅の変化量を分析することにより、微細な亀裂が相対的に高い密度で存在している領域の特定を試みる。</p> <p>手法としては、重力式コンクリートダムの天端、法面、監査廊等に地震計を配置し、弾性波の計測を行い、伝播速度および振幅に着目した解析を行う。さらに貯水池の水位や堤体温度が大きく変化する前後で計測を行い、解析結果の変化が測定できることを確認する。また、低周波の弾性波の透過波の測定を実際のダムの堤体で試験し、透過した弾性波の伝播速度、振幅変化が測定可能か確認する。従来の低周波の弾性波によるダム堤体調査は、トモグラフィ法による速度異常箇所の検出がほとんどであった。これに対し、本研究では、弾性波の振幅評価による亀裂域の検出、伝播速度からの堤体強度分布の導出、表面波探査の併用、繰り返しモニタリングによる変化異常領域の検出、等の新しい探査手法を利用した調査技術の開発を目標とする。</p>			

⑥研究成果

(具体的にかつ明確に記入下さい。4ページ程度。)

1. 表面波解析

1.1 天端における表面波探査

実ダムの天端において表面波探査を実施した。一部区間で適用可能性を検討した後、フィル部を含む全区間の探査を実施した。(図1)。図2に得られたS波速度分布を示す。洪水吐きやフィル部の区間を明瞭に捉えている。S波速度は構造の強度との関係性が高く、老朽化進行後の健全性評価に用いることができる

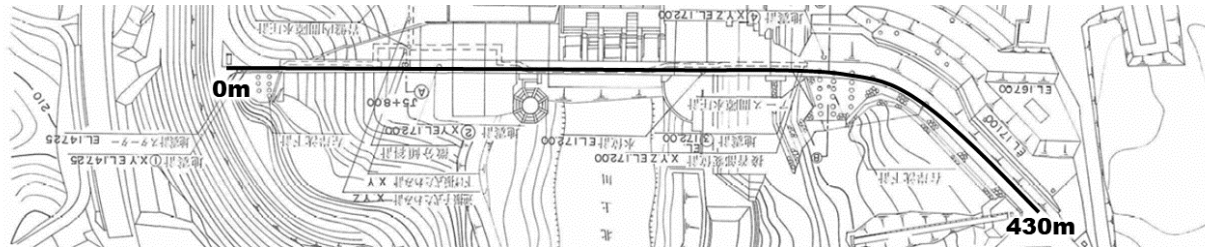


図1 天端全区間の測線図

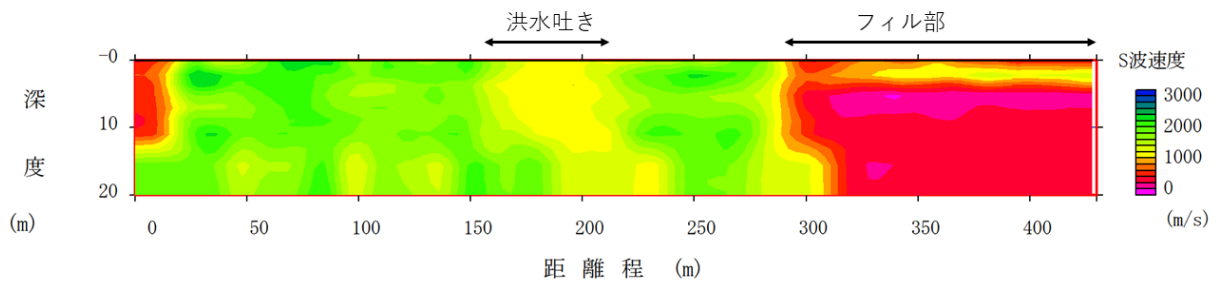


図2 S波速度分布

1.2 法面における表面波探査

実ダムの下流側法面において表面波探査を実施した。2測線で適用可能性を確認した後、13BLから15BLにかけて合計6測線で探査を実施した(図3)。なお14BLのEL.145.5m(測線4.4m)に越冬面があり、目視で確認できるひび割れが存在している。図4に得られたS波速度分布を示す。どの結果もほぼ均質な構造が推定された。季節の違いやひび割れの存在による速度変化は見られなかった。

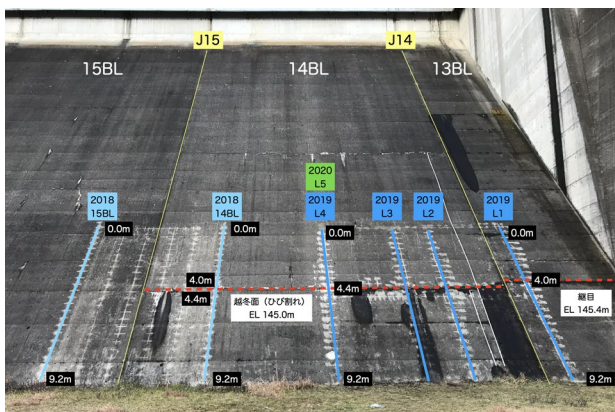


図3 法面での測線配置。

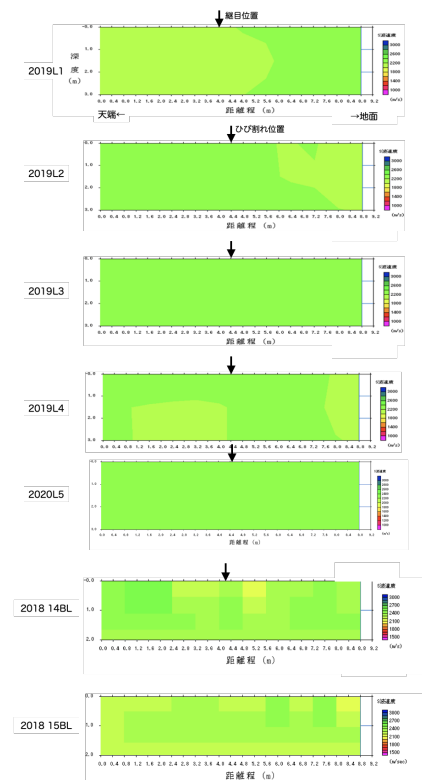


図4 各測線のS波速度分布

1.3 減衰量分析によるひび割れ深さの推定

法面における表面波探査において、ひび割れを横断する表面波の減衰が顕著であることが明らかになった。そこで、(1)式を用いて表面波の減衰量からひび割れ深さを推定した。

$$\gamma = \exp(-2.35d/\lambda) \quad (1)$$

(d : 亀裂の深さ、 λ : 表面波の波長、 γ : 亀裂による振幅減衰率)

推定結果を図 5 に示す。図 5 には別途実施されたコアリングによる評価結果も表示している。本研究の推定値とコアリング結果を比べると、その差は最大 10%程度であり高い精度でひび割れ深さが推定できることを示した。

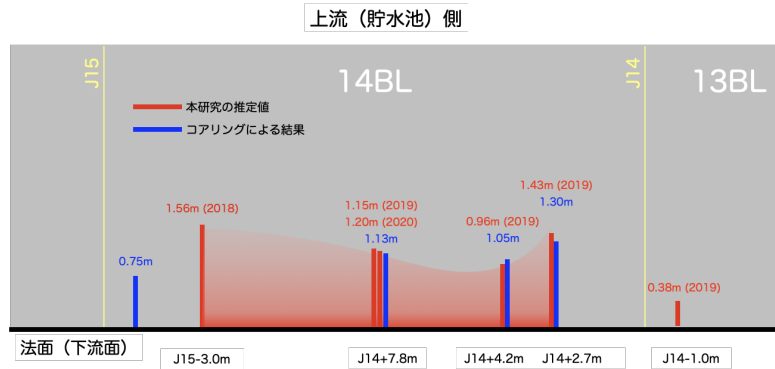


図 5 越冬面付近のひび割れ深さ (水平断面)

2. 透過波を用いた探査

監査路、法面間を伝播する透過波の測定可能性を検討した後、透過波の減衰量を用いてひび割れの有無、位置の推定を試みた。監査廊内で起振し、対向する法面に設置した受振器で測定した (図 6)。図 7 に解析の結果得られた P 波に対する減衰係数を示す。ひび割れを通過していると考えられる水平 4.0m 測線とひび割れを通過していない水平 4.8m 測線の結果を比べると、水平 4.0m の減衰係数が有意に大きいことがわかった。

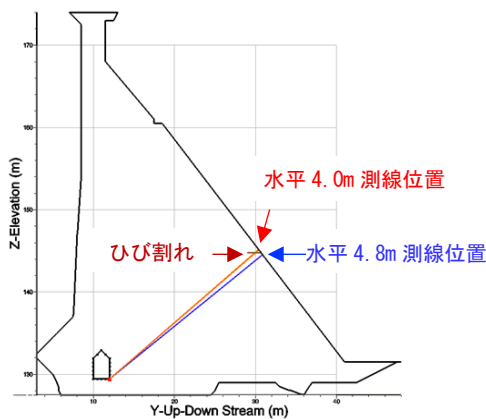


図 6 ひび割れ上下の水平測線への波線位置 (赤線 : 水平 4.0m 測線への波線、青線 : 水平 4.8m 測線への波線、茶線 : ひび割れ位置)

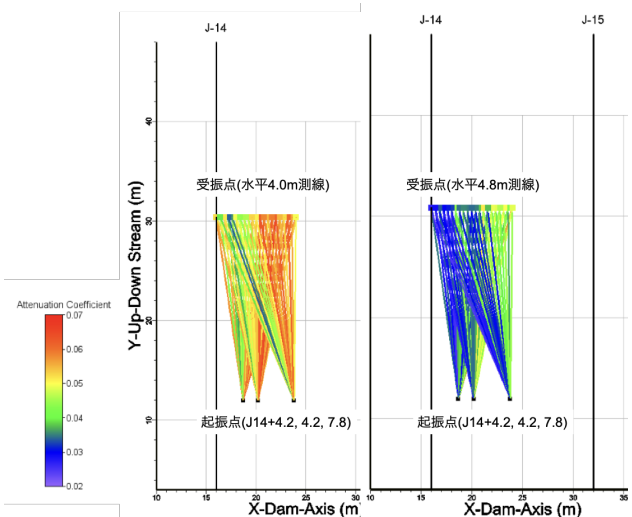


図 7 3 起振点に対する受振点水平 4.0m (左) と水平 4.8m (右) での P 波の減衰係数分布

3. 自然振動の観測および解析

自然振動の利用可能性を検討した。測定可能な周波数帯域を確認した後に、実ダムの監査廊内に受振器 24 個を線状に設置し (測線長 115m)、約 2 ヶ月間の連続観測を実施した。観測データに対して地震波干渉法を適用し、擬似的に人工振源データを合成した。端部の合成波形を時系列で並べると表面波と考えられる波の位相変化が観測され (図 8)、速度変化を捉えている可能性を示した。

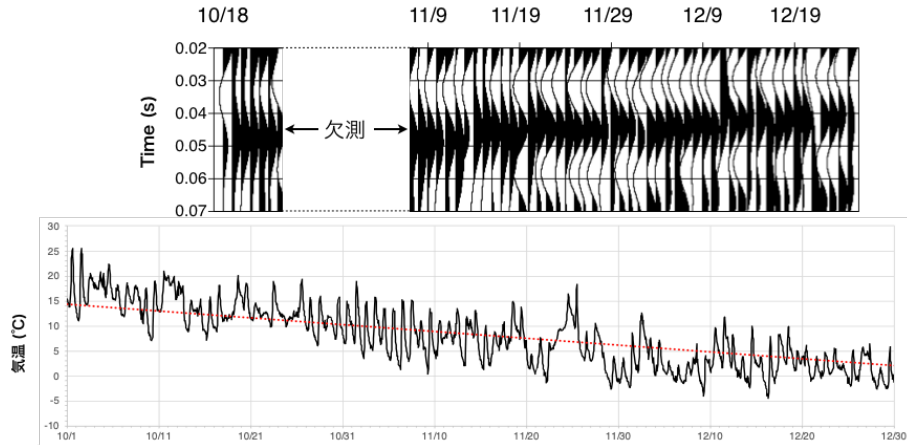


図 8 合成波形記録 (Ch24) と気温の経時変化

4. 簡易振源の開発

簡易かつ効果的な振源の開発を目的に、大型、小型 2 種類の既往機械式振源 (図 9) に対して適用試験を実施し (図 10)、その適用性を評価した。

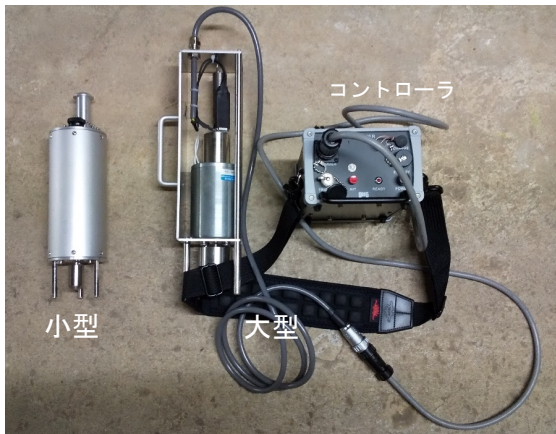


図 9 簡易振源の写真



図 10 適用試験の様子

適用試験の結果、簡易振源の卓越周波数は 1.2kHz (大型)、1.8kHz (小型) であり、表面波であれば受振点間距離 100m においても S/N 比が 1 を越える記録を得ることができ、大規模ダム堤体においても使用可能であることが確認できた (図 11)。簡易振源を用いて測定した表面波の減衰量分析を実施し、ひび割れ深さを推定した結果、コアリングによる結果と一致した。

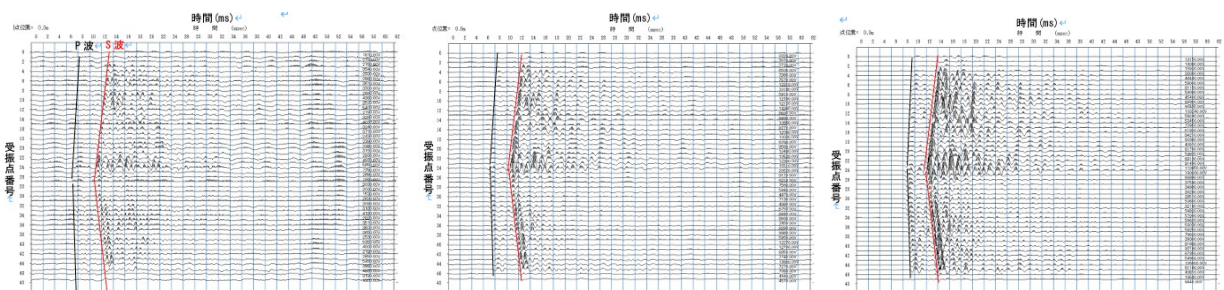


図 11 小型簡易振源 (左)、大型簡易振源 (中)、木製かけや (右) による透過波記録 (監査廊～法面間)

5. 光ファイバーを用いた振動測定

近年光ファイバーを振動センサとして利用する技術が急速に発展している。通信用の光ファイバーは安価で耐久性も高いため、常時設置することにより長期間のモニタリングが可能となる。そこで、ダム堤体において光ファイバーを用いた振動測定を実施し、その適用性を検討した。測定は、法面から監査廊まで光ファイバーでつなぎ行った。図 12 は法面でハンマーによる起振を行った記録である。監査廊から法面まで全ての記録が一度に取得できていることがわかる。さらに、表面波探査の解析を実施した結果を図 13 に示す。従来の受振器を用いた解析結果と概ね一致した結果になった。一方、減衰量分析については良好な結果が得られなかった。これは光ファイバーが点ではなく、一定区間（ゲージ長）の歪みから振動を再現していることに起因していると考えられる。

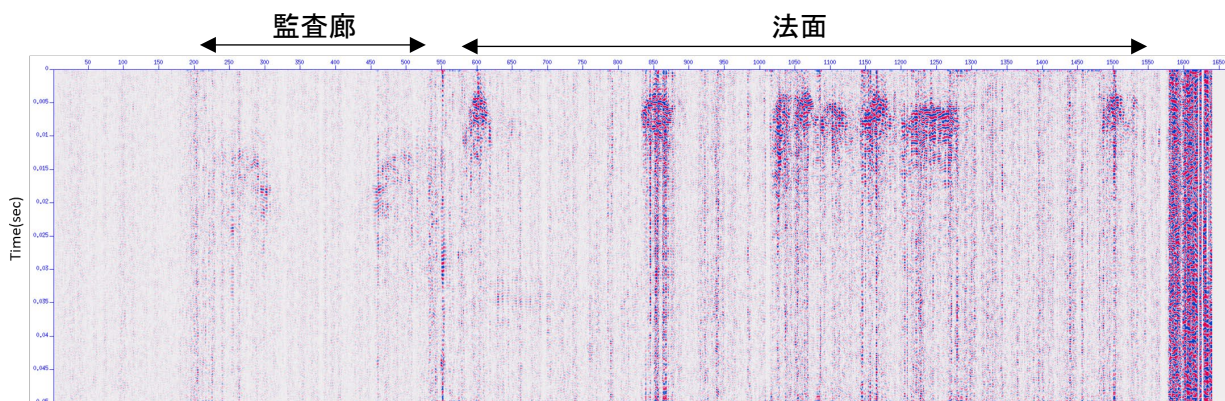


図 12 法面をハンマー打撃した時の測定記録

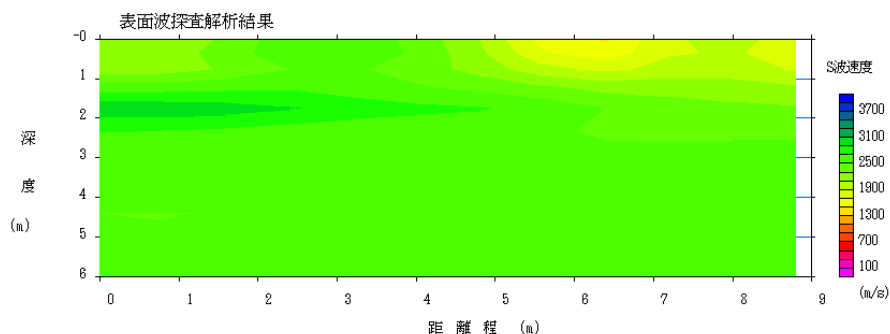


図 13 光ファイバーによる測定記録を用いて推定した S 波速度分布

6. 堤体内部の物性評価

堤体透過波から求めた P 波および S 波速度を用いてダム堤体の物性評価を行った。既往の研究で提案されている、P 波速度、圧縮強度、そして、静弾性係数の回帰式を用いて、本研究で得られた P 波速度から圧縮強度および静弾性係数を推定した (図 14)。その結果、コア供試体の圧縮試験結果と整合的な結果となった。

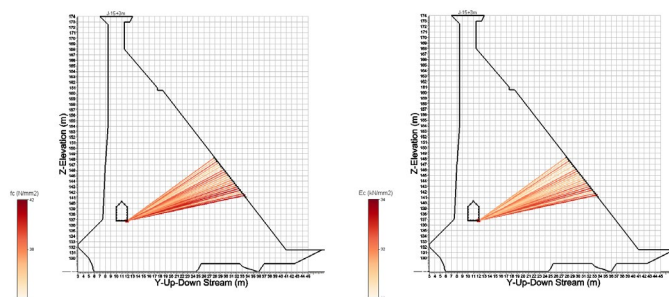


図 14 測定で得られた P 波速度から推定した圧縮強度 (左) と静弾性係数 (右)

さらに S 波速度の推定結果を用いて剛性率や動弾性係数の推定も可能であることを示した。弾性波の測定から堤体内部の強度や弾性係数を合理的に推定できる可能性を示した。

7. 現場実装方法および必要情報の提示

7.1 最適な調査方法の検討

ダムのように大規模なコンクリート構造物調査に一般的に用いられている周波数帯域よりも透過力の高い低周波の弾性波を中心に最適な調査方法を整理した。表 1 に調査対象に対する手法の整理、表 2 に症状に応じた調査手法の整理を示す。

表 1 調査対象による調査手法の対応

調査対象	調査箇所	弾性波調査手法
堤体異常検知, 経年変化	堤体全体	微動探査
健全性, 剛性	天端表層域 法面表層域 フィル部	表面波探査
	フィル部との接合域	
	堤体内部 基礎地盤との接合域	トモグラフィ探査
	基礎地盤	屈折法探査
亀裂, ジョイント	破碎域	トモグラフィ探査
	大規模な亀裂	反射法探査
	表面からの深さ	表面波の減衰量の解析

表 2 症状と調査手法の対応

監視/調査箇所	症状	調査対象	弾性波調査手法
堤体表層域	漏水, クラック	コンクリートの剛性	表面波探査
		ひび割れの深さ	表面波の減衰量の解析
	剥離, 遊離石灰	コンクリートの剛性	表面波探査
	ハンマー試験による剛性低下	剛性低下範囲	表面波探査
	フィル部との接合域の変状	接合域の健全性	表面波探査
堤体内奥部	季節変動(変位等)の異常	異常箇所の検出	微動アレー探査
	深部の漏水	弱部の特定	トモグラフィ探査
	基礎地盤の風化	基礎地盤の健全性	屈折法探査
	多数の亀裂	破碎域の存在範囲	トモグラフィ探査
ひび割れ伸長域	大規模な亀裂	亀裂の存在分布	反射法探査
		漏水	ひび割れの深さ

7.2 現場実装方法および必要情報の提示

現場実装のために、本研究で得られた結果から、起振方法と使用する受振器について整理するとともに、設置方法についてまとめた。

さらに、将来の受振方法として光ファイバーを用いた振動観測技術について整理した。光ファイバーによる測定は、信号対雑音比が低いこと、空間分解能が低いことなど課題があるものの、安価な光ファイバーと簡便な設置方法でも長大測線の測定が可能であることから、モニタリングなどに活用可能となることが期待される。

現場実装において必要となる機材の特徴と調査条件を整理した(表 3)。

最後にダム堤体調査特有の注意点として、本研究の調査手法を実施する場合に現場において有用となるにおけるノウハウを整理した。

表 3 調査手法に対する機材の特徴と調査条件

調査手法	機材の特徴	条件の特徴
微動アレー探査	2Hz以下のジオフォン, 長時間測定が可能な記録収録機	長時間測定
表面波探査	4.5Hzのジオフォン	斜度の変化しない直線区間
トモグラフィ探査	孔井を使用する場合は孔井用の起震機と受振器	起振点と受振点で調査対象を挟み込む。孔井を用いることもできる。
反射法探査	多数のジオフォン, 同時測定点数の高い記録収録機	長い直線区間
屈折法探査	水平成分のジオフォン	深部の剛性が浅部よりも高い

【「一般研究」の場合記載】

【「FS研究（新規課題）」の場合記載】【非公表】

⑧研究成果の発表状況・予定

(本研究の成果について、論文や学会への投稿等又はその予定があれば記入して下さい。)

小田義也・高橋亨・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 -研究開発の概要-, 物理探査学会第141回学術講演会論文集, 35-36, 2019.

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) -表面波の減衰特性の利用-, 物理探査学会第141回学術講演会論文集, 37-40, 2019.

小田義也・尾西恭亮・高橋亨・磯慎一郎, コンクリートダム堤体内部の非破壊調査技術の開発研究の紹介, 岩の力学ニュース137号, 2020.

【「一般研究」の場合記載】

⑨研究成果の社会への情報発信

(ウェブ、マスメディア、公開イベント等による研究成果の情報発信について記入下さい。ウェブについてはURL、新聞掲載は新聞名、掲載日等、公開イベントは実施日、テーマ、参加者数等を記入下さい。)

なし

【「一般研究」の場合記載】

⑩表彰、受賞歴

(単なる成果発表は⑧⑨に記載して下さい。大臣賞、学会等の技術開発賞、優秀賞等を記入下さい。)

なし

【「一般研究」の場合記載】

⑪研究の今後の課題・展望等

(研究目的の進捗状況・達成状況や得られた研究成果を踏まえ、研究の更なる発展や河川政策の質の向上への貢献等に向けた、研究の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

老朽化したダムの継続的な活用には、健全性の確認や劣化範囲の特定が必要である。ダムの供用年数が年々増す中で、将来新規に生じる様々な状況に対応できる様に、普及技術かつ低費用の実用性が高い測定技術を多種類保有しておくことが重要となる。そこで、本研究では、地盤調査で活用されている技術の応用による、コンクリートダム堤体内部の亀裂検知や健全性評価の性能を評価した。

本研究により、目視確認できている亀裂の深さを、表面波の振幅減衰を解析することにより推定することができることを示した。低周波の弾性波は、比較的簡単に設置した受振器で測定することができ、品質の維持が容易である。また、透過波や表面波の測定が可能であること、解析によりP波やS波の速度の測定が可能であることを示した。さらに、伝播速度から健全性評価を行う工程を示した。

ダム堤体で調査を実施し、法面での起振や受振器の設置作業の作業性の向上が課題であることが明白となった。これに対し、起振は本研究で検討評価した簡易振源の利用が解決策のひとつとなる。ダム堤体調査専用の起振装置の開発が望まれる。また、受振においては、コンクリートダム表面において振動測定が可能であることがわかった光ファイバーによる振動測定が有望である。

低周波帯域の弾性波を用いることにより、ダム堤体深部を通過する波動の取得が容易であることがわかった。そこで、技術開発を進めれば堤体深部の調査を実施できる可能性がある。

また、連続モニタリングや3次元調査への将来展開に際し、雑微動の空間連続記録が監査廊等のダム堤体で得られることがわかったため、これの研究展開が期待される。また、光ファイバーを張り巡らせることにより、堤体の3次元モニタリングも低コストで可能となり、DXを活用した生産性の高いダム管理の一端を担うことができる。

【「一般研究」の場合記載】

⑫研究成果の河川砂防行政への反映

(本研究で得られた研究成果の実務への反映等、河川政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。)

本研究の成果は、コンクリートダム堤体の亀裂分布や強度分布を、汎用技術を用いて非破壊で調査することができ、実用的な堤体内部の調査手法をダム管理者に提供する。これにより、ボーリングの調査本数を抑制することができる。また、季節変化や経時変化などのモニタリング調査を行うことができ、調査経費の抑制や、調査対象に即した調査手法を選択することができる。

地盤調査技術を活用する利点は、全国に存在する多数の地盤調査会社が、調査の実施例や注意事項を参考に簡単な改良を行うことで、即時的に高品質な調査が行うことができ、実用性が高い点である。地盤調査において汎用的な機材を用いて、多数の技術者が調査を実施可能であることは、緊急的な調査や同時多数の調査も可能であることを意味し、管理業務の柔軟性を高める。

本研究では、堤体の広範囲の健全性の確認から、特定箇所の詳細調査まで、検知対象に対応した低周波弾性波を用いた調査手法を整理した。利用可能な調査技術は多種存在し、専門技術者でも選択判断が難しい場合も存在する。本研究で示した個別の状況や対象に対する利用指針を参考とすることにより、調査手法の活用が容易となることが期待される。調査手法の柔軟な活用は、経費削減だけでなく適切な対応措置による供用年数の延長に貢献する。ダムの供用年数の延長は、社会資本の安定した提供による安心な社会の実現に加え、高度な低炭素社会への対応に貢献する。