

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
	内田 慎哉 (うちだ しんや)	富山県立大学	准教授
②技術研究 開発テーマ	名称	赤外線・弾性波を活用したコンクリートダム堤体のひび割れ・打継ぎ面の非破壊による可視化評価技術の研究開発	
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 年度
	210 万円	1,000 万円	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2年3月31日現在)		
岩野 聡史	リック株式会社・課長		
大野 健太郎	首都大学東京・助教		
木村 匡臣	東京大学大学院・助教		
鈴木 哲也	新潟大学・教授		
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>(1) 赤外線サーモグラフィ・可視画像カメラを搭載した UAV による可視化評価技術</p> <p>① 熱画像と可視画像の両者を撮影可能なカメラを UAV に搭載し、ひび割れの発生状況や漏水箇所の特 定、浮き・剥離等の評価を試みる。</p> <p>② 降雨、降雪、太陽光の反射や照り返しによる環境ノイズを低減するため、得られた熱画像 に対してkriging処理や空間拡散分析を適用し、ひび割れの発生状況および漏水箇所の検出性 能の向上を試みる。</p> <p>③ 異なる時刻における熱画像の取得と併せて、日射量、気温、湿度、風速等の気象データの 観測も行い、「大気-ダムコンクリート間の熱収支モデル」を構築し、浮き・剥離の検出、ひ び割れの深さ推定への適用も試みる。</p> <p>(2) 弾性波 (縦波・表面波) を活用した弾性波トモグラフィによる可視化評価技術</p> <p>弾性波動解析を用いて、ひび割れ深さ・打継の評価に適した弾性波の入力や受信、信号処理を決定す る方法も提案する。また、解析で得られた結果に基づき、実際のダムにてその検証実験を行う。</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) 赤外線サーモグラフィ・可視画像カメラを搭載した UAV による可視化評価技術

1. 1 UAV 搭載カメラで撮影した熱画像と可視画像特性

2020年1月21日に、厳木ダムの左岸側堤体法面を対象に、可視画像と熱画像を同時に取得可能なカメラを搭載した UAV (図1) を用いて計測調査を実施した。計測対象は主に図2に示す3ヶ所とし、11時から16時まで約1時間間隔で実施した。併せて、気象センサーを用いて気象データ(日射、気温、湿度、気圧)の取得を行った。図2中に示すエリア2において、UAV を近接させて撮影した可視画像および熱画像を図3および図4にそれぞれ示す。熱画像より、エフロレッセンス発生箇所の上部に浮き・剥離が生じているものと推察された。



図1 撮影に使用した UAV

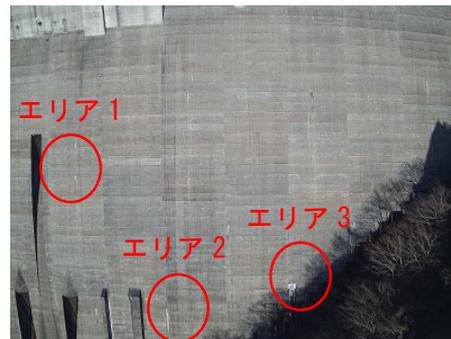


図2 撮影箇所(左岸側堤体法面)

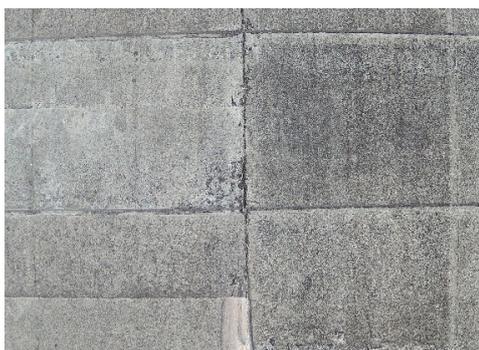


図3 エリア2にて取得した可視画像

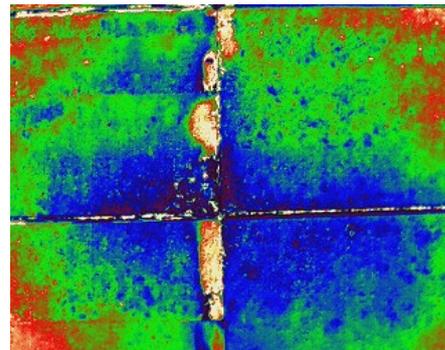


図4 エリア2にて取得した熱画像

1. 2 熱収支モデルの構築とコンクリート供試体による検証

(1) 検討の概要

本研究では、赤外線サーモグラフィ法により計測した熱画像と気象観測データを併用した大気とダムコンクリート間の熱収支モデルの構築することを目的としている。本年度の検討では、新潟大学内にモデルコンクリートを設置し(図5)、提案モデル(図6)と気象観測データ、赤外線サーモグラフィ計測結果との実証的検討を試みた。

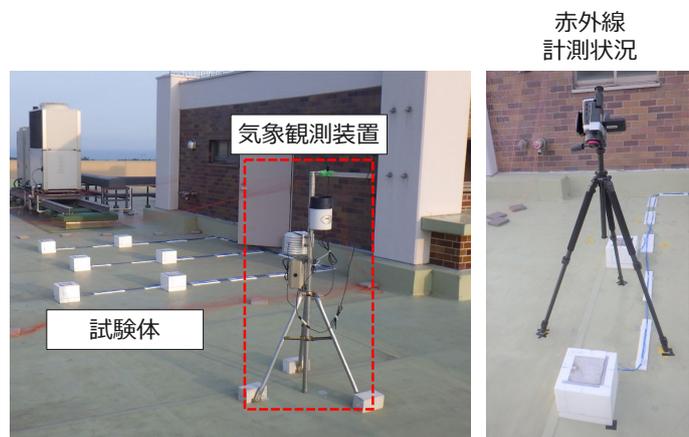


図5 モデル試験の状況

(2) 実験概要とその結果

実験は、無損傷、内部欠陥およびひび割れを模擬したコンクリート供試体 (150 mm×150 mm×150 mm) を作製して実施した。実施期間は2019年7月31日から8月30日である。計測項目は、気象観測に加えて、コンクリート表面から異なる深さの温度トレンドと供試体表面の赤外線画像を撮影した。コンクリート供試体は表面からの1次元的な熱浸透を考慮するため、側面と底面に断熱材を設置した。

検討の結果、熱電対と赤外線画像 (平均値) から検出したコンクリート表面温度は類似の計測値を確認した。一例を図7 (表層から5 cm位置に厚さ10 cm空洞を模擬した試験体) に示す。時系列の表面温度データ (熱電対実測値) を熱収支モデルに入力し、シミュレーション解析を試みた結果、実測値と解析値の密接な関係が明らかとなった (図7および図8のシミュレーション結果)。以上のことから、提案モデルによるコンクリート熱収支のシミュレーション解析が可能になるものと推察された。

(3) 今後の予定

コンクリート供試体での試験値と熱収支シミュレーションとの整合を確認したことから、既存施設での試みを検討し、提案モデルの実構造物評価への拡張を試みる。

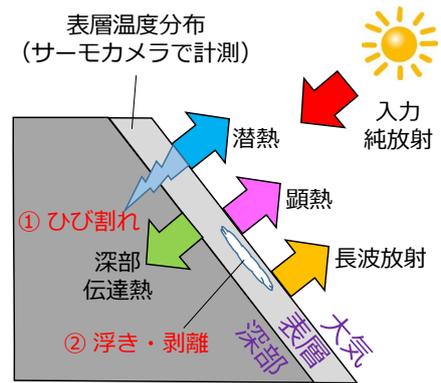


図6 熱収支モデル

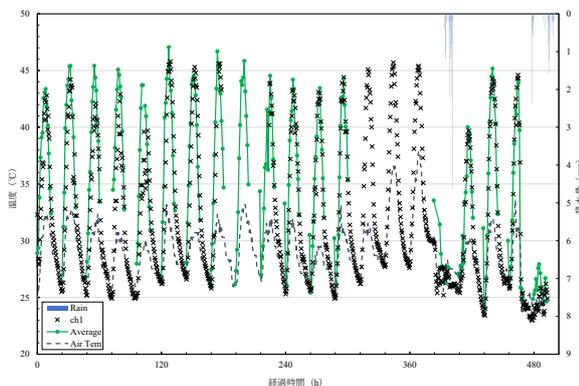


図7 熱電対計測値 (コンクリート表面) と赤外線計測結果 (平均値) との関係 (模擬空洞モデル)

凡例: Rain 降水量, ch1 熱電対温度, Average 赤外線サーモグラフィ計測値 (平均値), Air Tem. 外気温

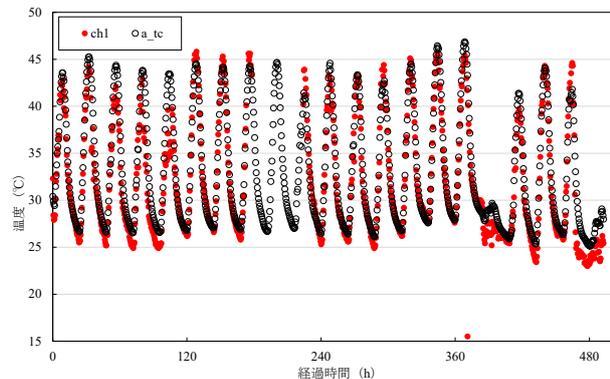


図8 熱電対計測値 (コンクリート表面) と熱収支モデル解析の関係 (模擬空洞モデル)

凡例: ch1 熱電対温度, a_tc 熱収支モデルによる解析値

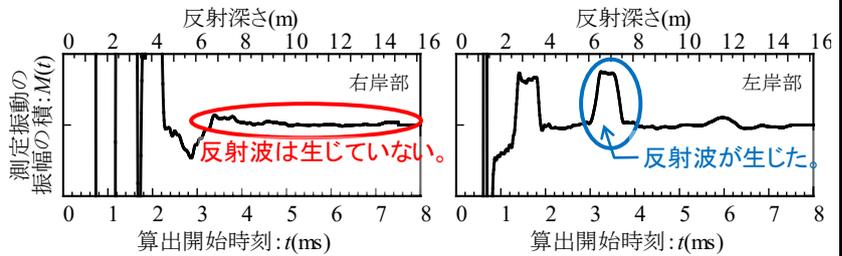
(2) 弾性波（縦波・表面波）を活用した弾性波トモグラフィによる可視化評価技術

2. 1 相互相関法による打継評価に関する数値解析

相互相関法の計測例および昨年度に実施した浦上ダムでの測定結果を図9、図10に示す。4個の加速度センサを個別に150mm間隔で設置し、センサ近傍を1箇所、直径63mmの鋼球で打撃する測定方法である。昨年度の浦上ダムでは、左岸側で天端から深さ6~8mの付近において、水平打継面からの反射であると推測される反射波が出現した。



図9 計測例（相互相関法）



(a) 右岸側

(b) 左岸側

図10 相互相関法で得られた結果

今年度は、2次元弾性体波動方程式に基づく数値解析（解析）を利用し、本法により検出可能な水平打継（ひび割れ）の条件や測定条件について検討した。

解析により得られた相互相関法の結果の一部を図11に示す。解析では試験対象のコンクリート構造物の形状を幅40m、高さ10mとし、水平打継を高さ7mの位置に、長さ200mm~20mと変化させて設定した。また、測定時に弾性波を入力する鋼球の直径、つまり、入力する弾性波の周波数（入力周波数）を変化させることを想定し、入力周波数を1.0kHz、2.0kHz、4.0kHzの3通りとした。図12より、水平打継の長さが1m以上となると、水平打継での反射波を確認できることが明らかになった。また、入力周波数が高い方が水平打継で反射する割合が高くなり、水平打継を確認しやすくなることも確認された。

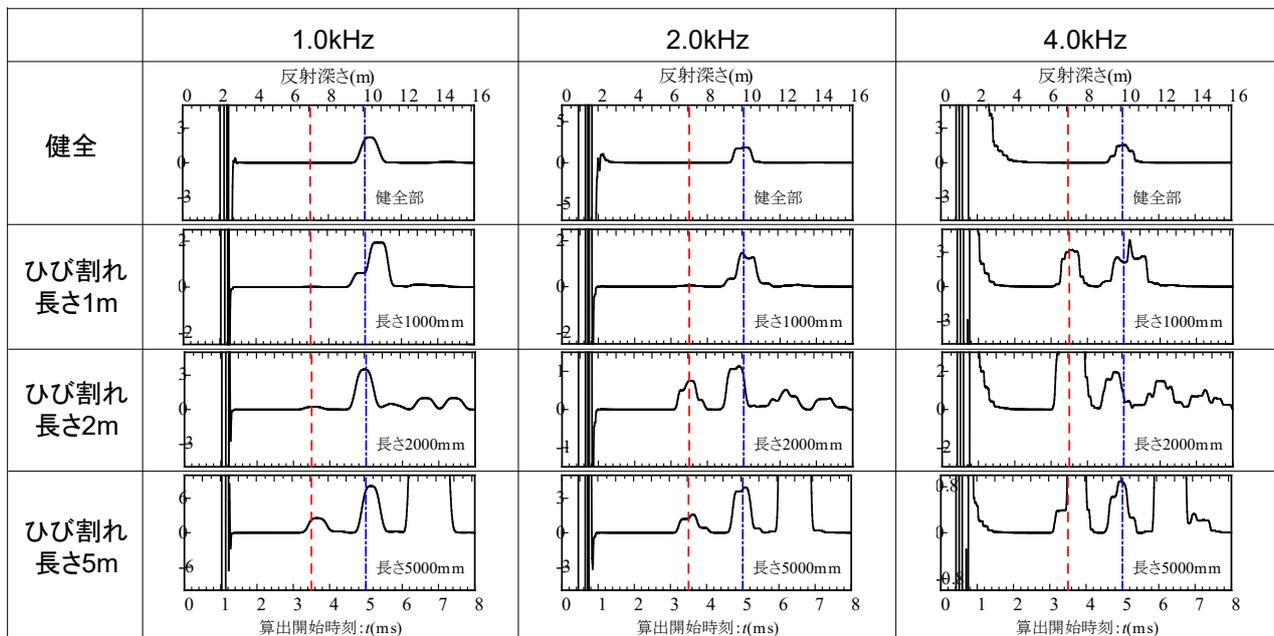


図12 解析により得られた相互相関法の結果

(| : 水平打継での反射波の到達時刻 | : 底面での反射波の到達時刻)

2. 2 開口合成法による打継評価に関する数値解析

本検討では、コンクリートダム堤体内部に水平打継（ひび割れ）が存在する場合を想定し、多点入力多点受信による衝撃弾性波法を実施した場合に得られる波形を、2次元弾性体波動方程式に基づく数値解析（解析）から生成した。その後、得られた測定波形を開口合成法に適用し、断面内を可視化した画像から水平打継の検出を行う手法についてその適用性を検討した。

本検討での波形生成の解析条件は、図-13に示すように解析範囲を80×10mの2次元とし、深さ7の位置に3種類の長さの異なる水平打継を模擬し、弾性波の入力を9箇所、受信を8箇所とした。なお、波形生成においては、異なる鋼球径で弾性波を入力した場合を想定し、0.8、1.0および2.0kHzの周波数で弾性波が入力された場合とした。また、弾性波の速度は、P波速度を4000m/s、S波速度を2320m/sとし、波形のサンプリング間隔は25μsとした。

図-14に開口合成による解析結果を示す。なお、開口合成法にて設定した弾性波速度は、P波速度とS波速度の平均値とした。また、本解析の分解能は水平方向を0.4m、深さ方向を0.05mとし、解析範囲を80×12mとした。解析結果のカラー指標の範囲は解析結果の最小値と最大値の範囲内とした。図より、健全の場合では比較的高い反射が入力点付近に集中しており、底面にて僅かに反射強度が高くなっていることがわかる。また、入力周波数が2.0kHzの場合には、0.8kHzおよび1.0kHzと異なり、反射強度の出現が小刻みになっており、入力周波数の影響が伺える。次に、ひび割れ長さ5mおよび10mの結果では、入力周波数が0.8kHzおよび1.0kHzの場合に水平打継端部および底面にて高い反射が得られている。一方、入力周波数2.0kHzでは水平打継の検出が難しい結果となった。最後に、水平打継の長さ15mでは、いずれの解析結果においても水平打継位置に明瞭な反射は得られていない。これは、弾性波の入出力範囲と水平打継の長さがほぼ等しいためであると推察される。

以上の検討結果より、開口合成による水平打継の検出は、入力周波数を低く設定する必要があるが、センサ配置距離と同等以上の水平打継の長さを有する場合には検出が難しい可能性が示唆された。

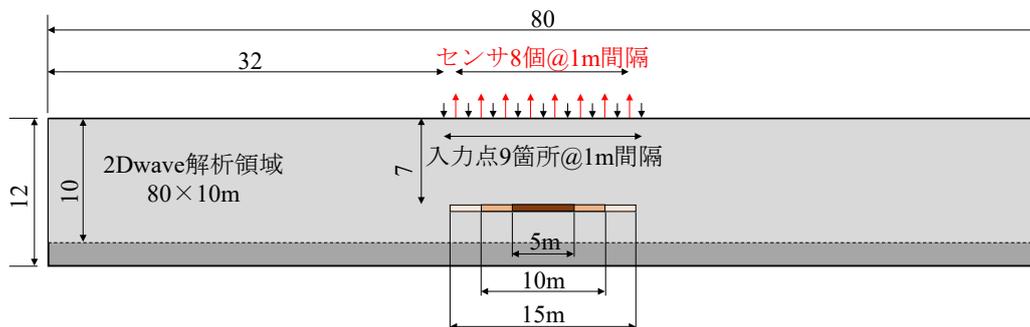


図-13 2Dwave 波形生成時の条件

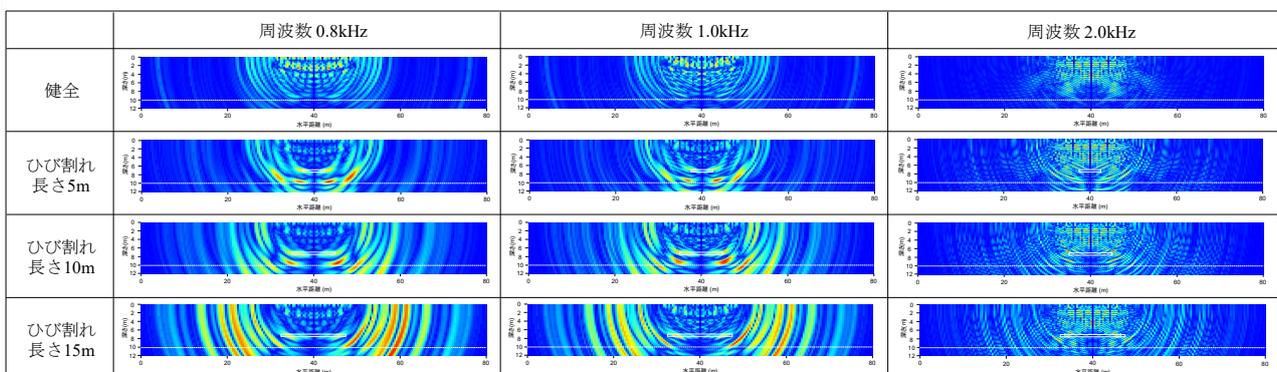


図-14 開口合成法による解析結果

【「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。)

【研究成果の発表状況】

無し。

【研究成果の発表予定】

FS研究および一般研究（1年目）で対象とした厳木ダムおよび浦上ダムでの測定結果を、「土木学会論文集」や「ダム工学会 論文」へ投稿する予定である。

【企業とのタイアップ状況】

ダム工学会交流研究事業の補助金の支援を受けて、また水資源機構協力のもと、矢木沢ダムでの計測も実施している。

【「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。)

本研究で提案する手法を社会実装するには、測定データの蓄積ならびにコア採取等による損傷実態との比較が必要不可欠である。これらを実現するために、損傷が疑われる箇所の情報提供とその箇所での測定できるような足場の設置を強く希望する。

【「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。)

本研究で提案する各手法それぞれに対して、規格・規準、マニュアル、測定要領等を作成することにより、特記仕様書に各手法を記載することができ、その結果、技術力のあるコンサルタントや測定会社が業務として受注することも可能となる。

ただし、提案技術は、測定装置の選定、測定方法のノウハウ、信号処理の方法等、いずれも高度な技術を有する。そのため、規格・規準、マニュアル、測定要領等を作成するだけでなく、運用にあたっては、測定・解析技術者の教育も同時に必要となる。