

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	
		塩谷智基 (しおたにともき)		京都大学	特定教授
②技術研究 開発テーマ	名称	超広帯域 SA センサによるコンクリートダム堤体内部のひび割れ進展・評価リモートモニタリングシステムの研究開発			
③研究経費 (単位: 万円) ※端数切り捨て。		平成 30 年度	令和 1 年度	令和 2 年度	総合計
		298 万円	982 万円	983 万円	2263 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 年3月31日現在)			
麻植久史		京都大学・特定准教授			
橋本勝文		京都大学・特定准教授			
奥出信博		京都大学・特任助教			
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>本研究では、東大・東芝と共同開発している数 Hz～MHz 帯までの超広帯域が計測できる振動&加速度&AE センサであるスーパーアコースティックセンサを巨大構造物であるコンクリートダムのひび割れ進展・評価に適用する。このセンサは、得られた信号を、専用に開発した小型信号収録・処理機器から無線でデータを転送することができる。本システムは超広帯域を対象にしているため、これまで計測できなかった初期から末期までの劣化や損傷が監視・計測できる。また、MEMS センサであるためコストも低く大規模な対象での他点計測にも優位となる。</p> <p>本研究課題では、この多点型の無線・SA センサを用いることで、広範囲を対象とした自動連続モニタリングが比較的 low コストで実現することを目的とする。また、本センサを用いることで、劣化・損傷が小さい初期から中期にかけては定期測定で経過観察し、終期に至っては連続測定でアラートの発信を行うことも可能となる。</p> <p>FS 研究では、ダムと同様のコンクリート材料からなる床版における劣化損傷・ひび割れ評価について多くの成果を上げている弾性波に基づく手法を、最新の計測システムにより運用して、得られた結果を我々の知見に基づいた評価法を構築することで、コンクリートダムに有効な維持管理を提案できるシステムの基礎的検討を実施する。コンクリートを伝播する弾性波は、コンクリート内部にひび割れのような劣化損傷が存在すると迂回、散乱する特性を有する。また、その後続波(コーダ波)も上記のような状態にあると特定の周波数帯で散乱・回析することが知られており、これら弾性波パラメータの特徴を利用した劣化・損傷評価技術の開発が国内外で精力的に進められている。そこで、これらの特徴を利用して、コンクリートダム堤体内部のひび割れ発生(時間、場所、規模)や既存ひび割れの特徴(場所、程度など)がどの程度まで把握できるかを確かめる。巨大コンクリート構造物であるダムにおいて、弾性波を堤体内で伝播させること、また、堤体内で発生する AE を観測することが可能であるかを FS 研究で確認する。これより、AE 解析、弾性波トモグラフィ、AE トモグラフィ、表面波分析、表面波トモグラフィ、および Q 値などの主に時間・空間的分析に特徴を持つ弾性波手法の適用が可能であるかどうかを確認できる。</p> <p>本研究により SA センサによるリモートモニタリングシステムの目標として、定期的に AE データを取得・解析し、劣化・損傷のモニタリングを実施しつつ、地震や豪雨等が生じた際には、トモグラフィを実施して、内部損傷が発生していないか確認することが挙げられる。これが可能となれば、維持管理のためのモニタリングを少人数かつ遠隔で実施できるようになるため、効率的な河川整備や管理実務に貢献できる。</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。)

ここでは、研究概要・成果の要旨で示した中で、主要な研究成果を示す。

1. 打ち継ぎ面等のひび割れ評価方法の精度向上

配置する打点・受信点数を表のように増やして弾性波トモグラフィを実施した結果、ひび割れ奥行方向の精度が 1.0 m に向上した。本手法により、監査廊内からの打撃を利用することで巨大構造物であるダム堤体内部の「ひび割れ」をより詳細に検知することが可能となった。

表1 打撃点・受信点の変更

		前回 (令和元年度)	令和2年度 (本研究)
打撃点・受信点	堤体表面側	15 (打・受信)	40 (打)・15 (受信)
	監査廊側	5 (打・受信)	9 (打・受信)
ひび割れの奥行方向精度		1.5 m	1.0 m
ひび割れの奥行方向分解能		45 cm	20 cm

本研究では、FS時と同じ調査面積に対して、堤体下流面側の打撃点をFS時から、さらに25点増やして40点とし、監査廊側の打撃点を9点とすることで、波線密度の向上による解析結果の高精度化を試みた。堤体下流面側は、センサ間隔の中心に打撃点を設けたため総打撃点が40点となった。また、監査廊側の打撃点は縦方向と横方向の波線を増やすために、十字型に配置した。ケーブルの位置を避けて配置すると9点となった。この9点はFS時とは異なり、堤体下流面側の受信点の逆側に収まるように配置した。分解能は一般にセンサ間隔の半分とされているため、堤体下流面側の打撃点は20 cm間隔としており、ひび割れ部は打撃・受信点が設定できないため、同ヵ所の打撃点間隔は40 cmに広げた。波線数を増やすことで、精度と分解能の向上が見込まれる。

また、FS時のトモグラフィ結果と、今回のトモグラフィ結果より導かれた、ひび割れ奥行方向の面における2次元速度分布とひび割れ奥行方向に沿うP波速度グラフをそれぞれ図1と図2に示す。2次元速度分布の位置は図3の赤囲み部分である。FS時の結果(図1)では、波線数が少ないためかd断面以外の表層付近から100 cmまでの速度が4000 m/s以上と高速度になっている。しかし、どの断面も奥行方向120~160 cmの間に3800 m/s以下の低速度帯が表れており、4000 m/s以下の速度帯は100~200 cmまで確認できている。ひび割れ方向に沿うP波速度もすべての断面において140 cm付近で3800 m/s以下を示しており、グラフから判断できる分解能は(点と点の間の速度が3800 m/s以下の部分)45 cm程である(図1)。本研究の結果では、FS時の結果と異なり、ひび割れが確認できる表層部から3800 m/s以下の速度が確認でき、100 cm付近まで速度が徐々に上昇している(図2)。これは、ひび割れが奥行方向に行くにつれて接触面積が大きくなることに起因していると推定できる。グラフから判断できる分解能(変局部分の点と点の間隔)は20 cm程度である。これより、40 cm間隔のセンサ配置の中央にも打撃点を設けると、解析結果が表層のひび割れを反映できることがわかった。これより、センサ間隔の半分(20 cm)

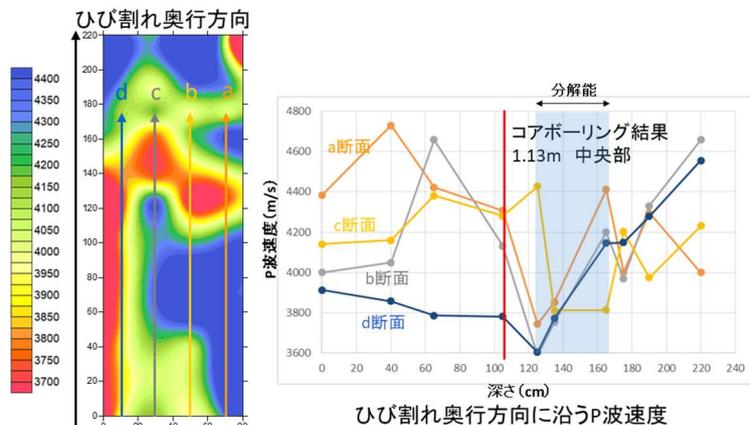


図1 FS時の結果(解析セル 40 cm × 40 cm)におけるひび割れ奥行方向の2次元速度分布とひび割れ奥行方向に沿うP波速度グラフ

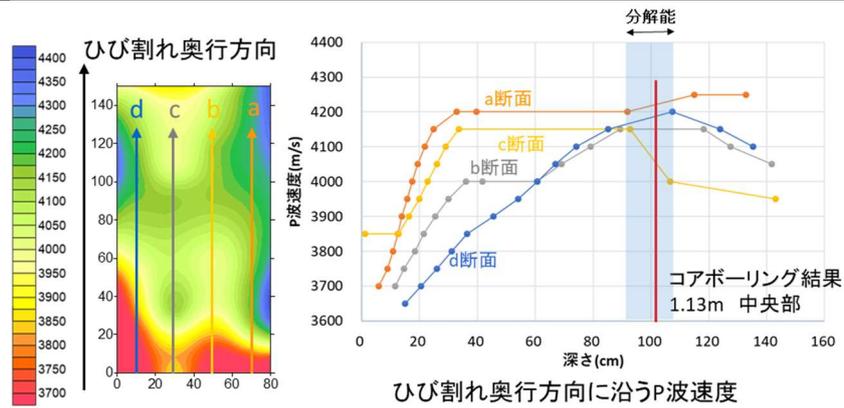


図2 本年度の結果（解析セル 20 cm × 20 cm）におけるひび割れ奥行方向の2次元速度分布とひび割れ奥行方向に沿うP波速度グラフ

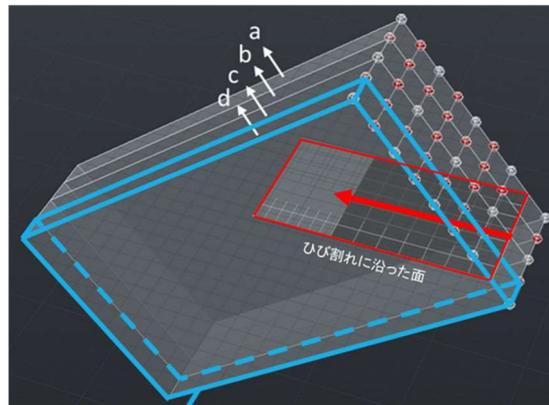


図3 図1, 2の2次元速度分布位置と断面abcdの位置

にも打撃点を配置することでトモグラフィ結果の信頼性が向上するだけでなく、解析メッシュの詳細な分割も可能となるため分解能も向上することが確認できた。

本研究では、上述した通り堤体下流面側の打撃点を20 cm間隔で40点、監査廊側の打撃点を20～50 cmで9点とし、受信点を堤体下流面側で間隔40 cmを15点、監査廊側を間隔20～50 cmで9点と設定して、分解能向上の作業仮設検証を行った。理論上、打撃点・受信点をさらに増やすことで、より分解能の高い解析結果を導出することが可能となるが、その一方で、計測に要するコストと時間を多く消費する。センサ間隔が40 cmの時の打撃点間隔と分解能の関係を図4に示す。点数は少ないが、堤体下流面側のセンサ間隔が同じ（40 cm）でも監査廊側のセンサ・打撃点間隔を改良することにより、打撃点を増やすことで分解能の向上が可能であると検証できた。センサ間隔が40 cmの時、打撃点の間隔を中点である20 cmにすることは、打撃点の均一な配置を容易とするため、理想的な配置となる。また図4で示した関係より、例えばx cmの分解能の結果を得たいときは、センサ間隔を2x cm、打撃点間隔をx cmで設定するとよい。

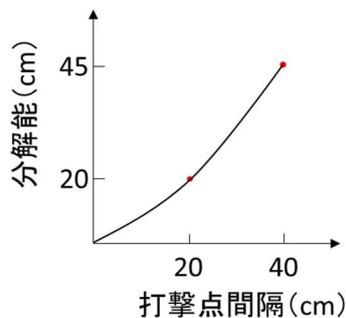


図4 ダムにおける打撃点間隔と分解能の関係

2. 改良 SA センサの検討

送信センサと改良SAセンサ、AEセンサ、加速度センサをFace to Faceで接触させた（図5後、ファンクションジェネレータで100 kHz、50 kHz（ともにAEセンサ領域）と10 kHz、1 kHz（ともに加速度領域）の弾性波を励起し、各受信波形を確認した。励起された弾性波はサイン波である。サンプリングレートは100 kHzで1.28 μ s、50 kHzで2.56 μ s、10 kHzで20.5 μ s、1 kHzで2 msである。改良SAセンサとAEセンサ、加速度センサの感度比を表2に示す。この結果、どの周波数においてもAEセンサや加速度センサのような専用のセンサに比べると改良SAセンサは若干感度が低下しているが、AE領域と加速度領域の両方でデータ取得が可能であった。この結果はセンサ感度に関する仕様書と比較して、妥当な結果であった。これより、改良SAセンサがAE領域と加速度領域の両方の周波数帯を計測できることが示された。また、改良SAセンサは加速度センサの領域も取得可能であり、弾性波トモグラフィで使用した低周波励起ハンマーの周波数帯（2.9 kHz）や Φ 75 mmの鋼球（3.9 kHz）の範囲の周波数も取得可能であるため、前述で構築したダム堤体内部のひび割れ可視化の計測・試験においても改良SAセンサは適用可能であると考えられる。



図5 Face to Face計測

また、実ダムにおいて弾性波増幅回路（図6）を伴った改良SAセンサの現地適用試験を実施し、本研究で構築したダム堤体内部のひび割れ等可視化のための計測試験における、改良SAセンサの適用性を検証した。通常の鋼球打撃やペンシルリードブレイク法に加えて、本研究において作成した試作型低周波励起ハンマーを用いて励起された加速度領域～AE領域の弾性波を、改良SAセンサにより取得し、データの周波数や振幅に着目してひび割れ等の可視化性能を評価した。改良SAセンサ、AEセンサ、加速度センサの計測の装置がいずれも異なるため、各センサで取得された振幅の増幅の程度が異なるため、単純な比較で感度の高低を述べることができない。そのため、信号とノイズの強さの比を表すSN比に着目した。改良SAセンサとAEセンサ・加速度センサデータからSN比を求めたものを表3（アンプ無し）と表4（アンプ有り）に示す。いずれもアンプ有りの時に大きくSN比が低下するようなことはないので、アンプでノイズ成分が増幅されて、データの品質が大きく落ちることはない判断できる。これより、改良SAセンサは専用の帯域のセンサと比べると若干SN比が落ちるが、SN比自体は20 dB（信号の大きさがノイズの大きさの100倍）を超えているので、計測に十分耐えるSN比をもっていることがわかる。

改良SAセンサのデータを間引いて、他センサのサンプリングレートに近づけてFFTを実施した結果の例を図7に示す。これより、改良SAセンサはAEセンサ領域の高周波成分と加速度センサ領域

表2 改良SAセンサとAEセンサ、加速度センサの感度比

	改良SAセンサ/AEセンサ	改良SAセンサ/加速度センサ
100 kHz	0.8	-
50 kHz	0.7	-
10 kHz	-	0.4
1 kHz	-	0.9

の低周波成分の両方を単一で取得できることから、改良SAセンサの優位性が現地試験からも立証された。

表3 室内試験におけるセンサごとのSN比比較

	改良SAセンサ	AEセンサ	加速度センサ
100 kHz	17.6 dB	34.4 dB	-
50 kHz	20.9 dB	34.9 dB	-
10 kHz	26.7 dB	-	47.2 dB
1 kHz	12.3 dB	-	13.9 dB

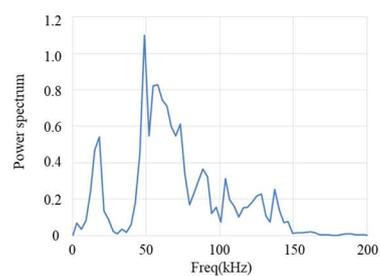
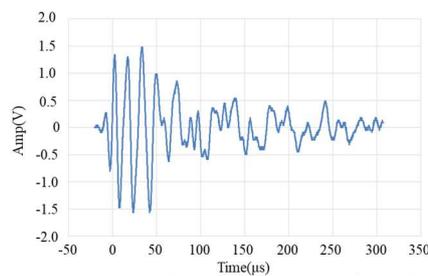
表4 現地適用試験におけるセンサごとのSN比比較

SN比	改良SAセンサ	AEセンサ	加速度センサ
PLB (5cm)	30.3 dB	36.4 dB	-
Φ75 mm (5cm)	29.2 dB	-	42.8 dB



図6 増幅回路

改良SAセンサ(ペンシルブレイク_5cm), サンプリングレート0.08 μs



AEセンサ(ペンシルブレイク_5cm), サンプリングレート1 μs

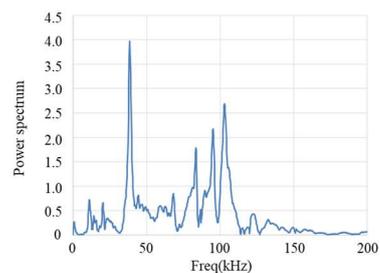
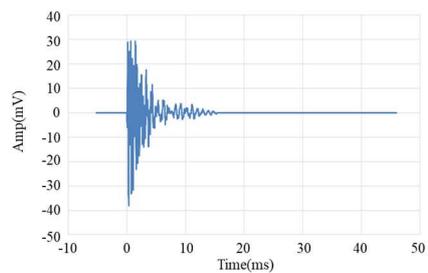


図7 ペンシルブレイクのFFT結果

【「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。)

国際会議：

Asaue, H., Shiotani, T., Hashimoto, K. and Yang, Y.: F DAMAGE EVALUATION INSIDE THE CONCRETE DAM BY ELASTIC WAVE METHODS, The 3rd ACF Symposium 2019, Asian Concrete Federation, 2019.(CD-ROM)

【「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。)

弾性波トモグラフィ技術の巨大構造物への適用を容易にするため、遠隔打撃方法の検討、ドローン等によるセンサの設置を検討する。また、得られた内部データを外観画像と統合し、時間軸を加えることで維持管理に資する可視化方法を検討する。また、補修補強方法の検討、およびその効果の確認方法の構築も進めていき、ダム の維持管理を効率的に実施できる手法を構築したい。

【「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。)

本研究における超広帯域 SA センサによるコンクリートダムのひび割れ評価、モニタリングが可能になれば、現在まで曖昧であったひび割れの 3 次元的な評価および地震や台風などの災害後にダムがどのような状態であるかを把握することが出来る。また、ダム内部状況の把握により、予防保全が実施可能となる。これにより、コンクリートダムの状態をこれまでより正確に維持管理することが可能となり、河川政策の質の向上に貢献できると考える。