

# コンクリートダム水中部の非接触劣化調査技術に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：令3～令5

担当チーム：寒地機械技術チーム

研究担当者：片野浩司、中島淳一、永長哲也  
平地一典、小林勇一、藤川亮、  
平伴斉、岸寛人

## 【要旨】

コンクリート構造物の水中部の点検は潜水士の目視観察により行われているが、安全性・信頼性を確保するためには、水中部の劣化状況を非破壊かつ客観的に調査する技術の開発が必要である。本研究では、水中部コンクリートの亀裂幅を超音波を用いて計測する手法について検討した。実験水路での模擬実験において、2つのコンクリート供試体の間に間隙を設け模擬亀裂とし、パラメトリックサブボトムプロファイラ（Parametric Sub-Bottom Profiler、以下、PSBP）から超音波を照射し、コンクリート表面付近を伝搬した超音波を模擬亀裂前後に設置した受信子で受信した。その結果、入射角 $20^\circ$ と $35^\circ$ の受信波形の減衰から亀裂の有無を推定できること、模擬亀裂幅と模擬亀裂前後における波形ピークの振幅の間に相関がありコンクリート亀裂幅が推定できることを明らかにした。また、この送受信装置をROV（Remotely Operated Vehicle、有線で遠隔操作する水中カメラロボット）に搭載し、構造物壁面に沿って上下方向に移動させ計測を行うことで、水中部でコンクリートの亀裂を調査する手法の構想を作成し、調査方法を取りまとめた。

キーワード：コンクリート、水中部、亀裂検出、超音波、PSBP、ハイドロフォン、ROV

## 1. はじめに

「インフラ長寿命化基本計画（H25.11 関係省庁連絡会議）」において、インフラの老朽化に対応するため、非破壊検査等による劣化や損傷状況等の情報を把握・蓄積・活用する技術が求められている。コンクリート構造物の水中部（橋梁下部工、港湾構造物、河川構造物、ダム）においても老朽化による劣化や損傷が懸念されている。これらの点検は主に潜水士の目視観察により行われているが、潜水士の技量や水の濁りの影響を受け、定量的な劣化状況の把握が難しい。

また、少子高齢化による人口減少に伴い潜水士数も減少することが予想されることや、水中での点検作業が困難、過酷であることが課題となっている。

このような状況に対し、国土交通省では次世代インフラ用ロボット開発・導入の推進の中でダム水中部点検技術を公募し、その中で多数の技術が開発された<sup>1)</sup>。しかし図-1に示すように、ダム等の水中部では視界が悪い状況も多く、目視や画像などの光学的手法だけでは亀裂等の調査、発見は困難と考える。他方、地上部のコンクリート点検においては弾性波や超音波等を用いた非破壊検査技術が普及しているが、水中については事例が少ない<sup>2),3)</sup>。安全性・信頼性を確保するためには、コンクリートダム水中部の劣化状況を非破

壊かつ客観的に調査する技術の開発が必要である。

そこで本研究では、超音波による劣化状況（亀裂）検出手法とこれをROVと組み合わせて調査を行う手法について検討した。



図-1 ROVにより撮影した堤体コンクリート（水深26m付近。カメラから堤体までの距離0.1m程度。水の濁りがひどく、近接しなければ何も見えない）

## 2. 超音波を用いた亀裂検出技術の開発

本手法では既往研究<sup>4)</sup>において、東京大学生産技術研究所およびMaterials Systems Inc.と共同開発した

PSBP を使用した。PSBP とはパラメトリック送信技術を利用した超音波送受信装置である。パラメトリック送信技術とは、わずかに周波数が異なる2つの音波（1次波）を同時に送信することにより、2次波（差音）を発生するもので、2次波は高い周波数をもつ1次波の特徴である高い分解能および低い周波数をもつ差音の高い透過性を併せもつ。この技術は海底下の地層探査に用いられており、海底面に垂直に超音波を送信することで海底面および海底下の地層からの反射波を受信し、鉛直プロファイルを作成する<sup>5)</sup>。既往研究では水中における鋼矢板背面の空洞の検出<sup>4)</sup>やコンクリートの圧縮強度推定<sup>2)</sup>を目的として、PSBP から対象物へ垂直に超音波を照射し、対象物からの反射波形を利用して解析を行っているが、これらは全て音波のP波（縦波）を利用したものである。超音波を対象物に垂直に入射させ、反射波を得る場合、その一点における奥行き方向の情報しか得られないため、面的な調査が難しい。そこで、本研究では、PSBP からの超音波をコンクリート表面に斜めに入射させることで、コンクリート表面付近を伝搬するP波、S波（横波）を発生させ、これによる劣化検出を行うことを構想した（図-2）。こうすることで、超音波の入射位置から受信子までの間の情報を得ることができると考えた。

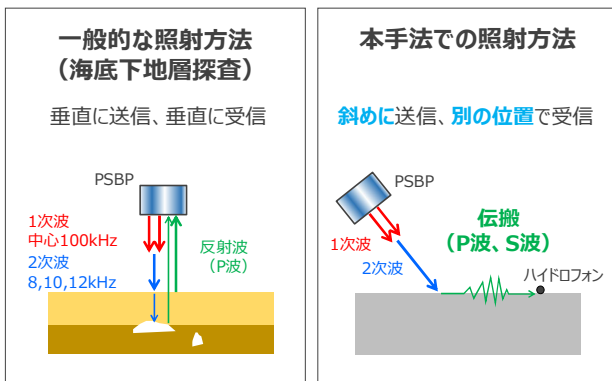


図-2 PSBP による超音波照射方法

## 2.1 超音波送受信装置

PSBP 外観および機器構成図を図-3、4 に示す。制御用 PC で送信周波数、受信レベル等を設定し測定を開始すると、送受信機からパワーアンプを経て波形信号が送受波器へ送信される。波形信号は送受波器で超音波に変換され、水中をP波として伝搬し、コンクリートへ斜めに入射する。コンクリートへ入射すると超音波は、P波、S波などに交換されてコンクリート表面付近を伝搬する。これらの超音波は離れた位置に設置

したハイドロフォン (TC4013、Teledyne RESON 社製) で受信、電気信号に変換され、プリアンプにより増幅、フィルタ処理されてから送受信機に入り、制御用 PC に波形データとして保存される。送信周波数、入射角等のパラメータを変更しながら、この動作を繰り返すことでデータを取得した。



図-3 PSBP（左：送受波器、右：送受信機（上）とパワーアンプ（下））

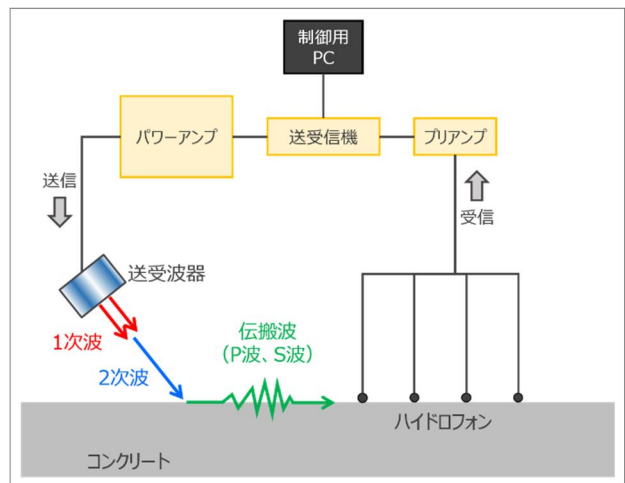


図-4 機器構成図

## 2.2 亀裂検出実験

### 2.2.1 実験方法

前述の超音波送受信装置を用いて、コンクリートの亀裂検出を想定した模擬実験を行った。図-5 に実験方法概略を示す。実験水路内の壁面に2つのコンクリート供試体 (W600 mm \* H300 mm \* D60 mm) を設置し、供試体間に間隙を設け模擬亀裂とした。2つの供試体の向かい合う面は極力平坦になるように製作したが、わずかに起伏がある。そこで、間隙幅は図-6 のように超音波が最短距離で伝搬する経路上（図-6 の x 軸上）で 0.0 mm、0.1 mm、0.2 mm、0.4 mm となるよう設定した。また、間隙幅が計測中に変化しないように、間隙上端にすき間ゲージをはさんだ状態で、供試体両側

面から x 軸方向に固定金具で軽く押さえ固定した (図-7)。図-6 のように、超音波照射位置 (以下、照射位置) から x 軸上、正方向 300 mm の位置に模擬亀裂、照射位置から x 軸上、正方向 100 mm、200 mm、400 mm、500 mm の位置にハイドロフォン H1、H2、H4、H5 を設置した。ハイドロフォンを供試体に軽く接触するように粘着テープで固定し、さらに PSBP から送信された超音波が直接ハイドロフォンに到達しないよう厚さ 10 mm の発泡ゴムシートで作成した防音カバーで覆った (図-8)。PSBP 前面から照射位置までの距離は 1000 mm とし、照射位置を中心に水平 (x-y) 面内で回転できるように設置した。入射角については、水中音速 1500 m/s 程度、コンクリート音速は配合等によって個体差があることから、著者らの実験およびコンクリートの弾性波速度について調査されている文献<sup>6), 7), 8)</sup>などを参考に P 波 4200 m/s、S 波 2400 m/s と仮定し、スネルの法則から P 波および S 波の臨界角となる  $20^\circ$  および  $35^\circ$  とした。送信波については中心周波数 100 kHz、2 次波周波数 8 kHz、10 kHz、12 kHz を使用した。

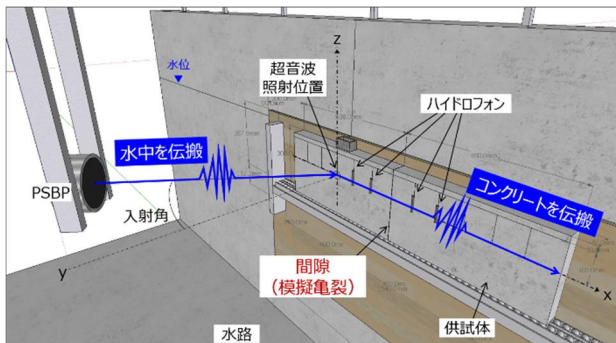


図-5 実験方法概略図

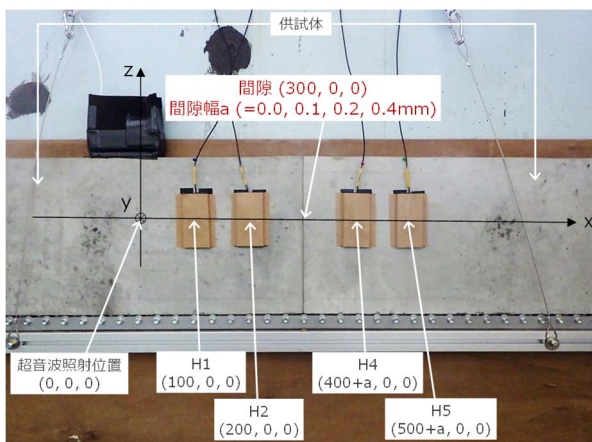


図-6 照射位置、間隙、ハイドロフォンの位置関係



図-7 間隙ゲージによる間隙保持状況 (左) と供試体固定状況 (右)

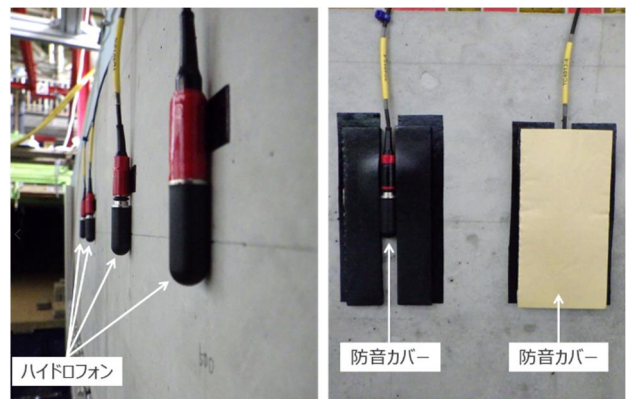


図-8 ハイドロフォン設置状況 (左) と防音カバー (右)

## 2.2.2 解析

本手法では波形のピークに着目して解析を行った。波形処理では必要な周波数成分を抽出するために周波数フィルタを適用する。しかし、本実験で得られたデータの内、照射位置に最も近いハイドロフォン H1 の受信波形は図-9 のように飽和していた。これは受信波形のピークが受信レンジを超えていたためである。

そこで波形の飽和を緩和し、ピークを抽出できるように以下の手順で解析を行った。

- 1) 受信波形にメディアンフィルタをかけ、細かいノイズを除去

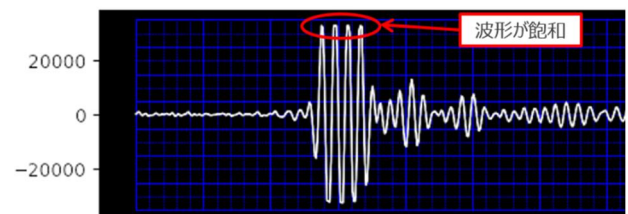


図-9 ハイドロフォン H1 における受信波形例



- 2) 1)の処理波形を微分し、飽和した波形を修正
- 3) 2)の処理波形にバンドパスフィルタ (5 kHz~150 kHz) をかけ整形
- 4) 3)の処理波形をヒルベルト変換し、包絡線を取得し、ピークを検出

各処理による波形の変化例を図-10 に示す。図-10 の上から1つ目の受信波形と3)のバンドパスフィルタ処理後の波形を比較すると、わずかではあるが3)の波形では山の高さに差が出ており、4)の包絡線において▼の位置にピークが検出されている。H1 以外のハイドロフォンでは波形の飽和は起きていなかったが、同一の条件で解析を行うため、全てのデータに対して同じ処理を施した。解析には Python 言語および数値解析ライブラリ SciPy の信号処理ツール signal を使用した。

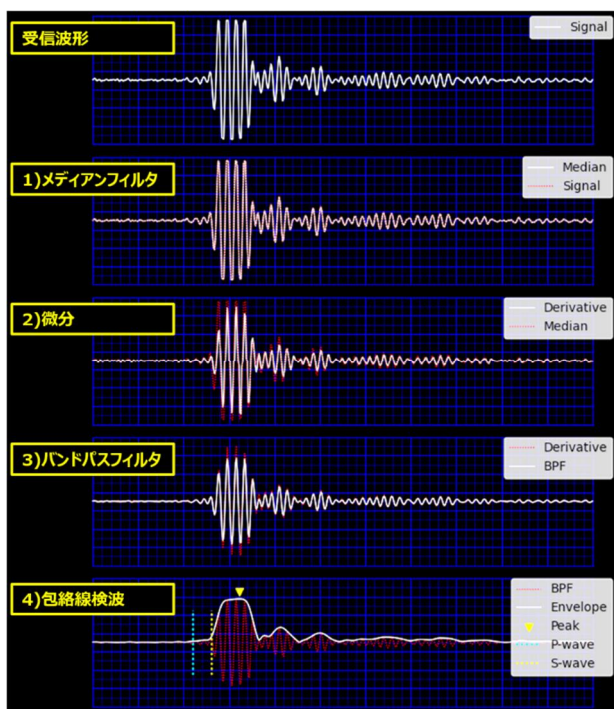


図-10 各処理による波形の変化例 (赤色点線：処理前波形、白色実線：処理後波形)

### 2.2.3 結果

図-11 に各ハイドロフォンが受信した2次波周波数8 kHzの場合の包絡線波形例を示す。各波形は送信波1 ping を処理したものであり、横軸は時間[μs]、縦軸は振幅[bit]である。凡例に示すとおり、間隔幅ごとに色を変えて波形を表示している。水色点線および黄色点線は、コンクリート中を伝搬したP波およびS波の各ハイドロフォンへの予想到達時間  $th[\mu s]$ を表しており、 $th$  は次式で求められる。

$$th = \left( \frac{xw}{Cw} + \frac{xh}{Cc} \right) \times 10^{-6}$$

ここで、 $xw$  は PSBP から照射位置までの水中伝搬距離 [m]、 $xh$  は照射位置から各ハイドロフォンまでの距離 [m]、 $Cw$  は水中の音速 (P 波 : 1466 m/s)、 $Cc$  はコンクリート中の音速 (P 波 : 4200 m/s、S 波 : 2400 m/s) である。なお、 $xw$  は 1000 mm となるように実験装置を作成したが、PSBP から送信される超音波のビームは照射位置において数 cm 程度の直径をもつため、 $xw$  は 1 m 前後となる。また水温を実測し、海水中の音速計算サイト<sup>9)</sup>の Coppens の式を利用して水中音速を求めた。水温を実験中に複数回計測したが全て 15°C で安定しており、音速は 1466 m/s となった。

- 1) 波形立ち上がり時間と振幅のハイドロフォン位置による違い

まず波形の立ち上がり位置について述べる。図-11 上段に示す入射角 20° は P 波の検出を目的として設定した P 波の臨界角に近い角度であり、P 波と S 波が生成される。間隙通過前の H1、H2 では P 波予想到達時間 (水色点線) の位置で波形の立ち上がりが顕著に現れており、S 波は多重反射を繰り返しながら遅れて伝搬すると推察される。下段に示す入射角 35° は S 波の検出を目的として設定した S 波の臨界角に近い角度であり、S 波のみが生成される。H1、H2 および間隙通過後の H4 についても S 波予想到達時間 (黄色点線) の位置で波形の立ち上がりが顕著に現れている。

次に振幅の大きさ (水色の長方形枠部分) について述べる。入射角 20° について、H1 では波形上部がほぼ平坦になっている。これは前項で述べたとおり、波形が飽和していたためであり、各種処理によりピークは得られているものの本来はさらに高い値になっていたと推察される。間隙通過前の H2 と通過後の H4、H5 を比較すると間隙通過直後の H4 では振幅の減少が小さいが、H5 では大きく減少している。入射角 35° について、H1 では入射角 20° の場合と同様に飽和により波形が平坦になっている。間隙通過前の H2 と通過直後の H4 を比較すると入射角 20° の場合よりも大きく減少していることがわかる。

図-11 で示した波形は2次波周波数8 kHzの場合の結果であるが、これらの特徴は2次波周波数10 kHz、12 kHzでも共通して見られた。

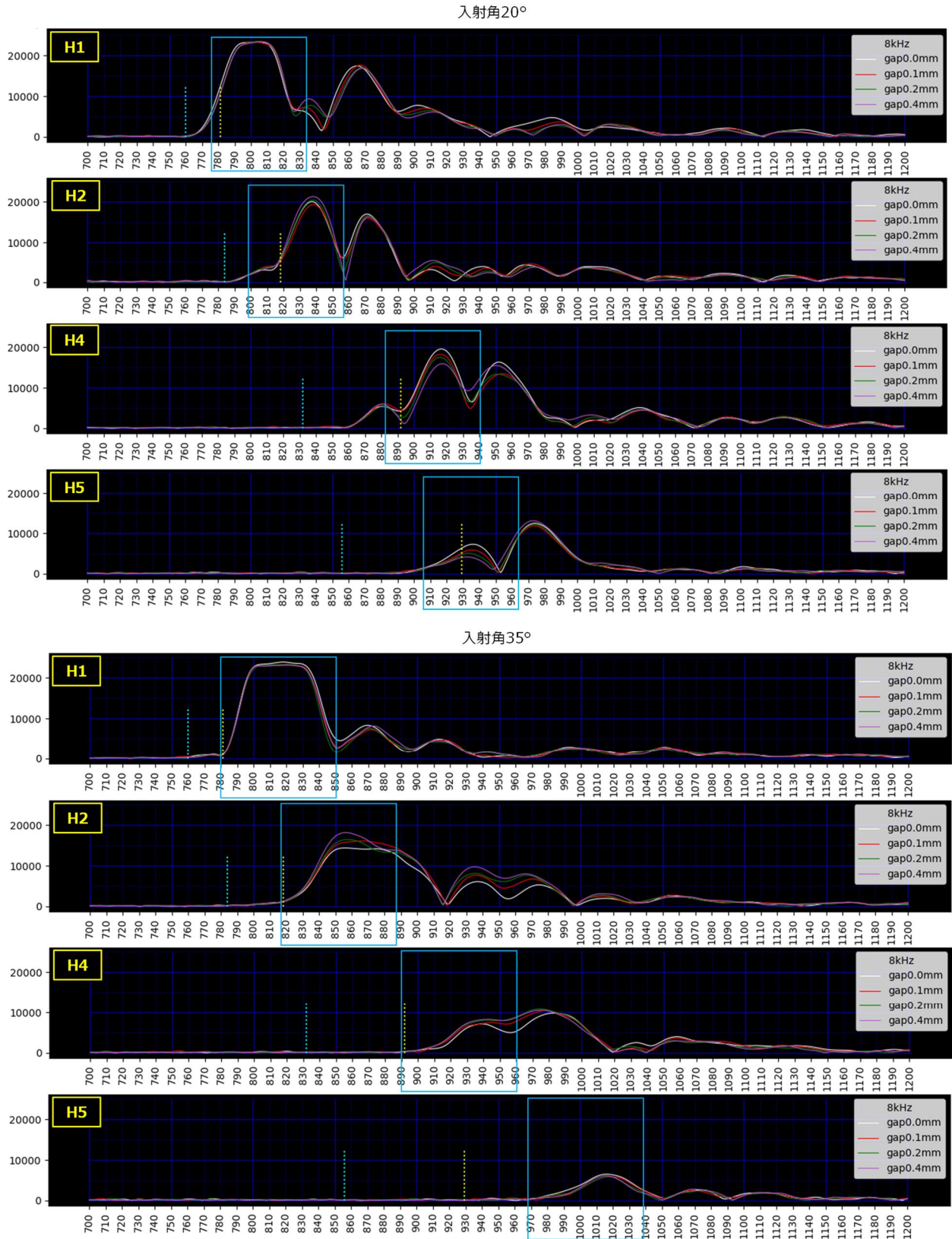


図-11 各ハイドロフォン位置における包絡線波形（2次波周波数8 kHzの例。上段：入射角20°、下段：入射角35°。横軸は時間[μs]、縦軸は振幅[bit]、凡例のgapは間隙幅を表す）



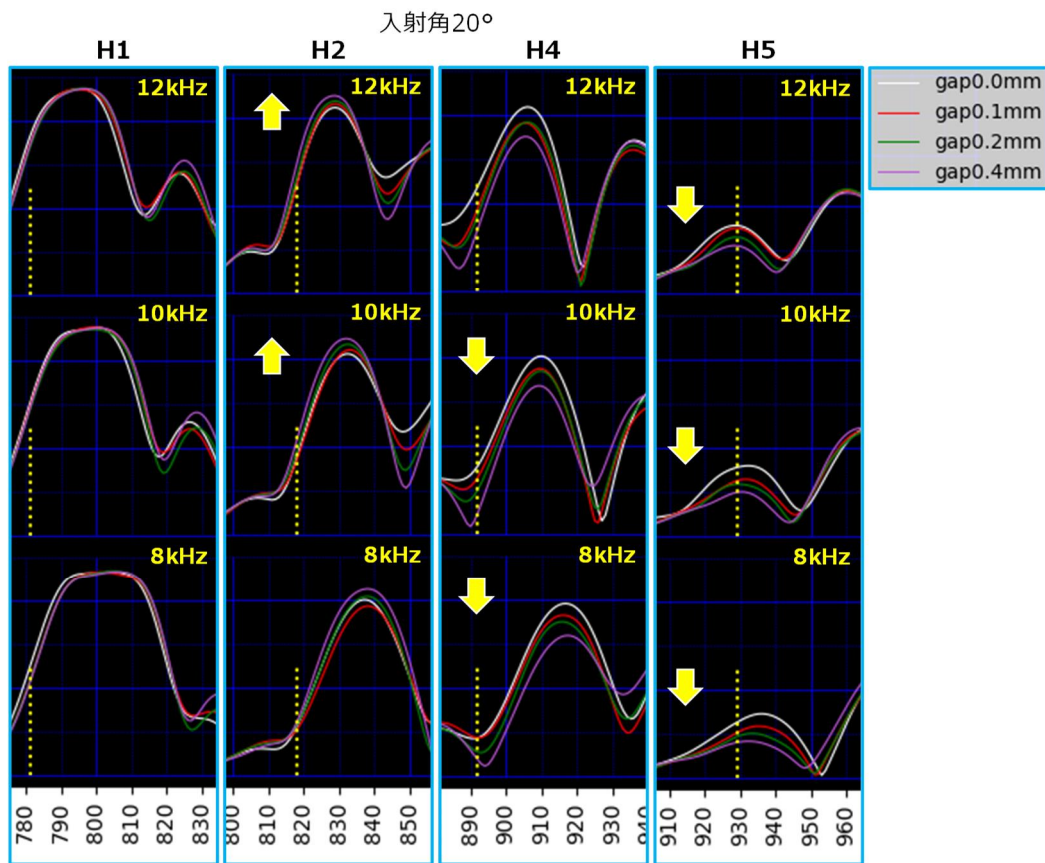


図-12 間隙幅の違いによる波形の変化（上段：入射角 $20^\circ$ 、下段：入射角 $35^\circ$ 。凡例の gap は間隙幅を表す）

## 2) 間隙幅の違いによる波形変化

図-12 に、図-11 の水色枠と同じ部分について拡大した図を示す。上段が入射角  $20^\circ$ 、下段が入射角  $35^\circ$  の場合であり、左からハイドロフォン H1、H2、H4、H5、上から2次周波数 12 kHz、10 kHz、8 kHz として表示した。この図について、間隙幅と波形振幅の関係に着目する。まず入射角  $20^\circ$  の場合について見ると、間隙通過前の H1 では波形が飽和していることにより、間隙幅によらずピーク付近がほぼ重なっている。H2 では 10 kHz、12 kHz の場合に、間隙幅が大きくなるほどピークが高くなっている。一方で、間隙通過後の H4、H5 では H4 の 12 kHz 以外の場合で、間隙幅が大きくなるほどピークが小さくなっている。次に入射角  $35^\circ$  の場合について見ると、間隙通過前の H1 では入射角  $20^\circ$  の場合と同様に間隙幅によらず振幅ピーク付近がほぼ重なっている。H2 では 8 kHz、12 kHz の場合に間隙幅が大きくなるほど、ピークが高くなっている。一方、間隙通過後の H4、H5 では間隙幅の変化に伴う振幅値の変化ははっきりと見えない。

## 3) 間隙幅とピーク振幅値の関係

2)の定性的な傾向の観察をもとに、間隙幅とピーク振幅値の関係を定量化した。図-13 の横軸は間隙幅、縦軸は H1 の間隙幅 0.0 mm における波形のピーク振幅値の3周波数の平均値で規格化した振幅値である。プロットはハイドロフォンごとに色分けし、周波数ごとに異なるマーカで表示した。振幅値は各計測パターンの3 ping 分の平均値を用いた。

入射角  $20^\circ$ 、 $35^\circ$  の両図から、H1 では波形の飽和の影響により間隙幅によらず振幅がほぼ1となった。入射角  $20^\circ$  では、間隙幅の増加に伴い、間隙通過前の H2 では振幅が増加し、間隙通過後の H4、H5 では振幅が減少する傾向があり、どのパターンにおいても間隙幅と振幅値の間に  $R^2=0.93$  以上の高い相関が得られた。入射角  $35^\circ$  の H2、H4 では間隙幅の増加に対して振幅が増加傾向ではあるが、入射角  $20^\circ$  の場合ほど明瞭ではない。H5 では間隙幅の増加に伴い、振幅は減少傾向となった。

### 2.2.4 考察

図-13 において、間隙通過直前の H2 と通過直後の H4 について比較すると、入射角  $35^\circ$  に比べ入射角  $20^\circ$  の方が振幅値の差 (H2-H4) が小さいことがわかる。これは入射角  $20^\circ$  で生成される P 波と S 波のうち P 波が間隙 (水中) を伝搬しやすく (減衰しにくく)、入射角  $35^\circ$  で生成される S 波が間隙を伝搬しにくい (減衰しやすい) という性質によるものである。この

性質を利用し、隣り合う2つのハイドロフォンの受信波形の振幅値の差をマッピングすることでコンクリートの亀裂を検出可能と考える。

また、入射角  $20^\circ$  の場合において、間隙通過前では間隙幅の増加に伴い振幅値が増大し、間隙通過後では間隙幅の増加に伴い振幅が減少するという関係が得られた。この変化率自体は調査対象により変化する可能性があるが、コンクリートの亀裂幅の推定に利用可能と考える。

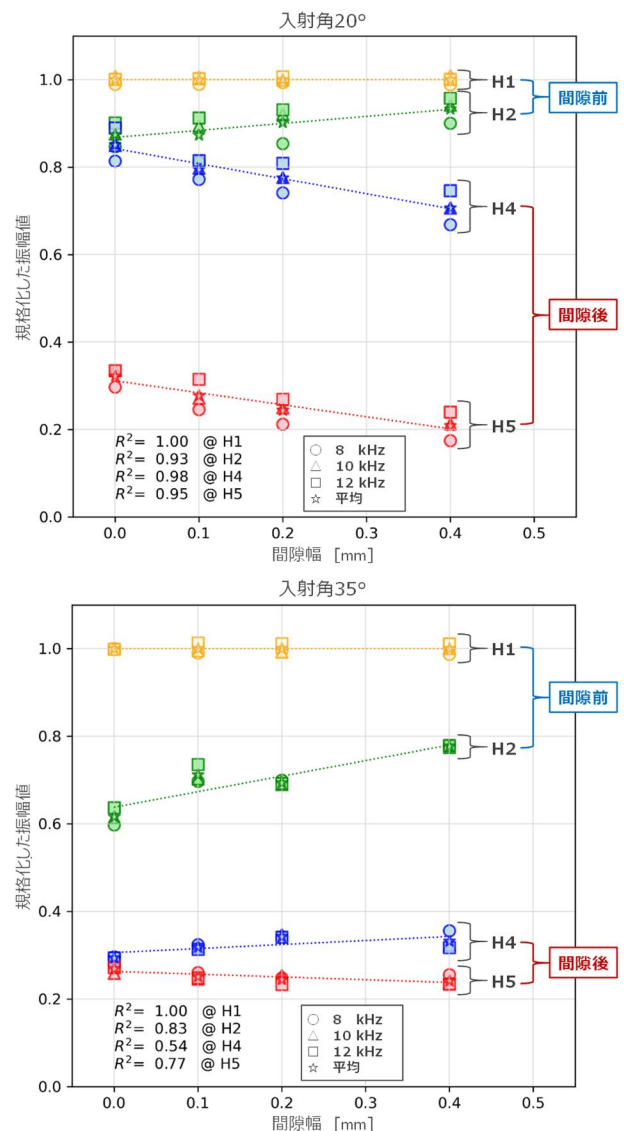


図-13 間隙幅と振幅値の関係

## 3. ROV と組み合わせた調査手法の検討

前述の送受信装置を一体化することで亀裂検出装置とし、当チームで保有する ROV に搭載して、調査を行うための機器構成、手法を検討した。

### 3.1 機器構成

当チームで保有する ROV (150m 級 ROV、広和 (株) 製) の写真、機材一覧をそれぞれ図-14 および表 1 に示す。この ROV は、前後方向スラスタ 2 基および上下方向スラスタ 2 基を搭載し、前後進、水平方向回転、上昇下降を行うことができる。また、前方の透明な半球体内部に上下左右に回転可能な光学ビデオカメラを有している。このカメラからの映像が PC モニタ BOX 内の PC に表示され、これをもとに ROV の操作を行うとともに、録画操作を行うことで同映像を記録できる。左右上部の白い円筒部品はフロートであり、ROV 全体として淡水と同じ浮力 (中性浮力) となるよう調整されている。



図-14 ROV 関係機材

表-1 ROV 機材一覧

| 機器名          | 仕様   |
|--------------|--|
| ROV本体        | 寸法W620xL840xH483.5、重量40kg<br>使用限度水深150m、光学ビデオカメラ (38万画素、パン±55°、チルト±45)、LEDライト、深度計、方位計、トランスポンダ (ROV側) |
| コントロールユニット   | 寸法W554xL610xH315、重量33kg<br>電源、制御ケーブルを接続  |
| PCモニターBOX    | 寸法W554xL610xH600、重量24kg<br>ROV状態表示PC、モニタを配置  |
| 位置表示制御BOX    | 寸法W554xL610xH261、重量8kg<br>GNSS、トランスポンダを接続  |
| トランスポンダ (船側) | 寸法φ130xH355、重量4.5kg<br>ROV相対位置把握、水中設置  |
| GNSSアンテナ     | 寸法L348xW158xH75、重量1kg<br>トランスポンダ座標把握、気中設置  |
| ハンドコントローラ    | 寸法L150xW170xH50、重量1kg  |

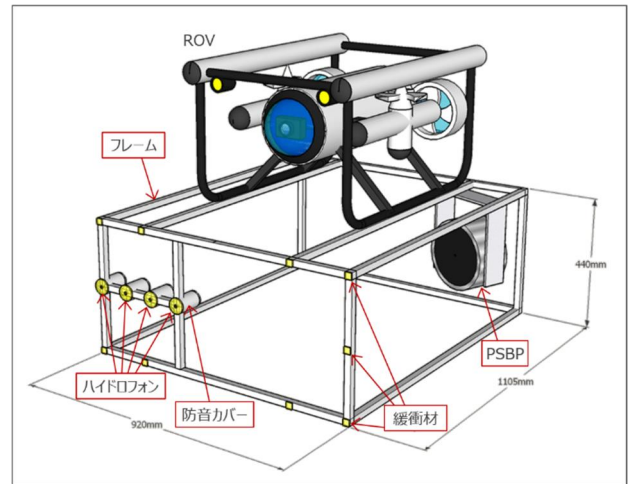


図-15 ROV への亀裂検出装置搭載構想

この ROV に亀裂検出装置を搭載する構想を図-15 のとおり考案した。

- ・ROV 前方のフレームに鉛直方向に 0.1 m 間隔でハイドロフォン 4 本を固定
- ・各ハイドロフォンは PSBP からの直達波を受信しないよう発泡ゴム素材の防音カバーで被覆
- ・入射角 20° または 35° で超音波を照射できるように ROV 後方下部に PSBP を搭載
- ・PSBP およびハイドロフォンのケーブルはフレームを経由して ROV 上部へ取り回し、ROV の電源制御ケーブルと合わせて水上機器に接続
- ・ハイドロフォンが構造物に軽く接触するようにフレーム前方に緩衝材を設置

なお、図-15 には示していないが、PSBP、ハイドロフォン、フレームの水中重量に相当するフロートを重量バランスを考慮して付加する必要がある。

### 3.2 調査手法

#### 1) 調査手法

図-15 の装置を用いて調査を行う場合の調査手法概略を図-16 に示す。ダム構造物の調査は広範囲にわたると考えられるため、基本的には図のように ROV 関係機材、亀裂検出装置関係機材、発電機をボートに搭載することを想定している。ROV 調査の経験から、ボートのサイズは 6 人乗り以上、人員は ROV 操作 2 人、亀裂検出装置操作 1 人、操船・全体監視 1 人の計 4 人が最低限必要と考える。

ボートで亀裂検出装置搭載 ROV を調査対象箇所まで曳航し、ボートを固定、亀裂検出装置搭載 ROV を一度最深部へ下降させる。そこから、亀裂検出装置前面を構造物に軽く接触させた状態で上昇させ、連続的に計測を行う。1 測線の計測が終わったら水平方向に



移動し、同作業を繰り返すことにより面的なデータを得る。面的に取得したデータから、規格化した振幅値を算出し、隣り合うハイドロフォンの振幅値の差を求めマッピングすることで、調査範囲内の異常箇所（周囲と異なる箇所）を検出、可視化することが可能になる。

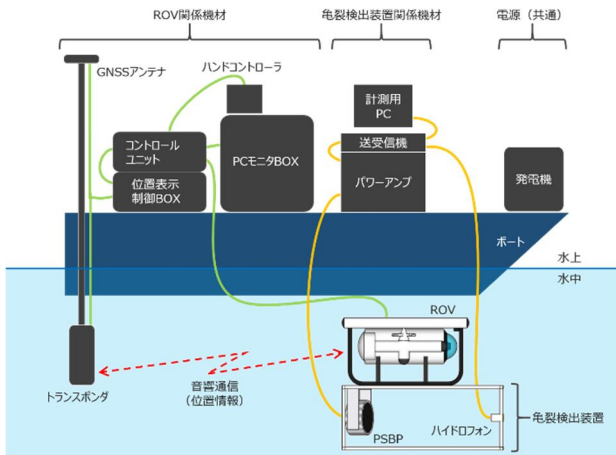


図-16 調査方法概略図

## 2) ROV を用いる場合の留意点

前述のとおり、上下方向移動による調査方法を検討したが、これは本 ROV が左右方向への移動機能を有していないこと、および視界が悪い水中での水平方向移動は危険を伴うためである。以下では、ROV を用いる調査で想定される危険な事象および留意すべき事項について述べる。

図-17 に、ROV による水中調査における課題（現状の課題）とその要因、および現状の課題に起因して起こり得る想定課題を示す。これは図-16 に示した装置による調査方法の検討を兼ねて、北海道開発局管内の 5 つのダムにおいて水中調査を実施した中で経験した事象をもとに作成したものである。現状の課題のうち、「船上の作業性低い」、「作業時間かかる」、「人手必要」については、作業方法や装置の改善が可能でありここでは議論しない。一方で「ケーブル引っかかり」は多くの想定課題につながる最も懸念すべき問題となっている。

図-18 はダム水中部において、ケーブルが構造物および湖底の沈木に引っかかったときの画像である。このような障害物に引っかかると、ROV は操作と一致しない挙動を示すため、そこで ROV に異常が起きていることに気付くことが多い。この発生要因としては、水中の視界が悪いことがまず挙げられるが、図-16 に示すよ

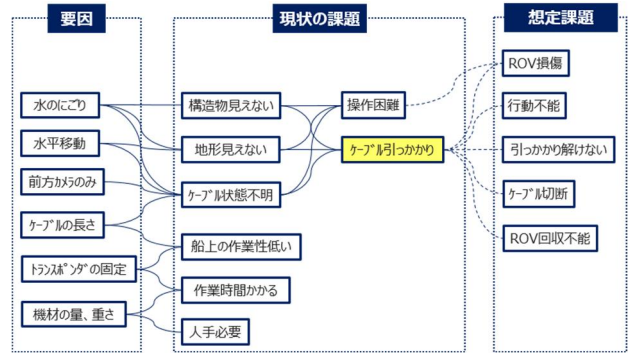


図-17 ROV による水中調査における課題と要因

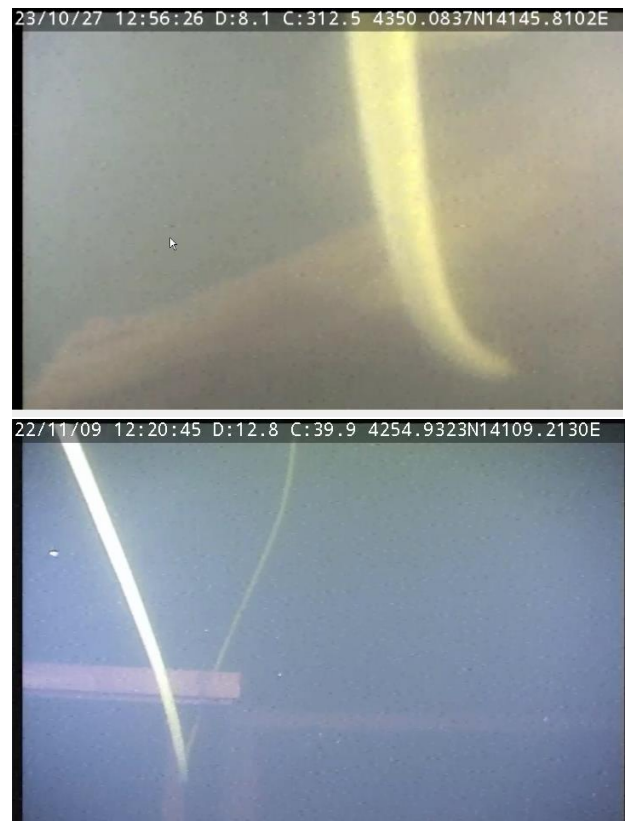


図-18 ケーブル引っかかり状況（上段：湖底の沈木、下段：ダム堤体構造物）

うに「水平移動」と「ケーブルの長さ」も大きな要因となっている。

ダムにおける水中調査は、ダム管理者からの調査要望を受けて実施したものであるが、堤体付近の湖底や網場の広範囲の調査に関する要望も多い。このような場合、調査延長が数百mに及ぶため、ケーブルを一度に100m以上繰り出していたが、これにより中性浮力であるケーブルが水中で浮き沈みを繰り返し、湖底の沈木に引っかかる事象が発生した。この場合は引っかかりが発生している直上までボートを移動させ、何度かケーブルを出し入れすることで解消することができた

が、湖底の樹木等への引っかかりはこれまでに数回発生している。

また、堤体構造物の調査では、最下部まで降下後、上昇中に左右の構造物の状況も確認したいという要望があり、ROVを水平方向に移動させたが、その後ROVが浮上できなくなり、引っかかりに気付いた。この事例では、水中における視程が2~3 m程度と水の濁りが少ない状況だったためケーブルをたどり図-18下段の引っかかり箇所を発見し解消することができた。

このように、視界の悪い状況での水平移動や複雑な経路の移動、およびそれに伴いケーブルを多く繰り出すことは、ROVの水中調査において危険と言える。

以上から、本調査手法は上下方向移動によるものとし、調査時のケーブル繰り出し量は必要最小限とすべきと考える。また、現在のROV水深やケーブル繰り出し量を常に共有しながら作業することも非常に重要である。

### 3) 実装に向けての課題

亀裂検出装置およびROVへの搭載方法の検討を行ったが、これらを現場へ適用するためには以下の課題を解決する必要がある。

- ・亀裂検出装置にはハイドロフォンを4本使用することを想定しているが、現在の送受信機では100 kHzの信号を受信できるチャンネルが1つしかないため、4チャンネル用に改造する必要がある。
- ・機材が多数かつ重いため、搬入、ボートへの搭載等の準備作業を現地で行うと非常に時間がかかる（準備撤去で4時間程度と推定）。実際の使用に向けては、ROV関係機材および亀裂検出装置関係機材を搭載したボートを用意し、現地へ搬入する方法を検討する必要がある。

## 4. まとめ

PSBPとハイドロフォンを組み合わせた超音波による水中部コンクリートの亀裂検出手法の考案と基礎実験、および送受信装置を一体化しROVに搭載する構想について検討を行い、以下の結果を得た。

- 1) 間隙通過直前と間隙通過直後の受信波形振幅の大きさについて、入射角 $20^\circ$ の場合の方が入射角 $35^\circ$ の場合よりも減衰が小さいことを明らかにした。この性質を利用し、隣り合う2つのハイドロフォンの受信波形の振幅値の差をマッピングすることでコンクリートの亀裂を検出可能と考える。
- 2) 入射角 $20^\circ$ の場合において、間隙通過前では間隙幅の増加に伴い振幅値が増大し、間隙通過後では

間隙幅の増加に伴い振幅が減少するという関係を明らかにした。この変化率自体は調査対象により異なる可能性があるが、コンクリートの亀裂幅の推定に利用可能である。

- 3) 1)、2)で検討した技術をROVに搭載するための構想、調査方法、ROVを用いて調査を行う場合の留意点、現場適用のための課題についてとりまとめた。

本研究では、供試体上の模擬亀裂に対して基礎実験を実施し、亀裂検出および亀裂幅推定の可能性を示したが、実装に向けては、既知の異常が存在する構造物で試験を行い、実現可能性を評価する必要がある。また、実装に向けての課題に示したように主にハードウェアの改造等が必要である。本研究ではダムの中中部をターゲットとして検討を行ったが、近年の洋上風力発電の実用化などによりコンクリート浮体構造物の利用も増えることも予想されることから、学会での公表や意見交換を通じて、今後も知見を深めるとともに、ニーズ等についても情報収集を行っていく。

## 参考文献

- 1) 国土交通省総合政策局公共事業企画調整課：水中部点検におけるロボット活用マニュアル(案)【ダム堤体編】、[https://www.mlit.go.jp/river/shishin\\_guideline/dam8/pdf/suit-yubutenken\\_robot\\_manual\\_dam.pdf](https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/dam8/pdf/suit-yubutenken_robot_manual_dam.pdf)(2022年12月13日確認)
- 2) 魚本健人：コンクリート診断学入門 構造物の劣化対策、朝倉書店、pp.52-54、2004
- 3) 大槻敏行、巖博、片野浩司、田所登、澤口重夫、中島淳一、永長哲也、平地一典、岸寛人、小林勇一：コンクリート構造物の水中部劣化診断技術に関する研究、土木研究所研究成果報告書、令和2年度研究開発プログラム報告書、6. メンテナンスサイクルの効率化・信頼性向上に関する研究【巻末資料】、pp.2-12、2022
- 4) 大槻敏行、山口和哉、田所登、岸寛人：寒冷海域における沿岸施設の水中調査技術に関する研究、土木研究所研究成果報告書、平成27年度プロジェクト研究14.7、pp.5-7、2016
- 5) 海洋音響学会編：海洋音響の基礎と応用、成山堂書店、p.177、2004
- 6) 岩野聡史、森濱和正、極壇邦夫、境友昭：弾性波速度の測定によるコンクリートの圧縮強度の推定、コンクリート工学年次論文集、Vol.25、No.1、2003
- 7) 立見栄司、中田善久、河谷史郎：衝撃弾性波によるコンクリートの圧縮強度推定方法に関する基礎的研究、日本建築学会構造系論文集、第587号、15-21、2005

- 8) 倉持貢、矢部喜堂、今井実：超音波によるコンクリート圧縮強度推定方法に関する研究、清水建設研究報告、第48号、1988
- 9) 海水中の音速計算：<http://www.tsuchiya2.org/>（2023年6月27日確認）



# A STUDY ON NON-CONTACT DETERIORATION INSPECTION TECHNIQUE FOR UNDERWATER PART OF CONCRETE DAM

Research Period: FY2021-2024

Research Team: Machinery Technology Research Team, R&D Promotion Group

Author: KATANO Koji

NAKAJIMA Junichi

EINAGA Tetsuya

HIRACHI Kazunori

KOBAYASHI Yuichi

KISHI Norihito

**Abstract:** Underwater part of concrete structures is inspected by visual observation by divers, but to ensure safety and reliability, it is necessary to develop a non-destructive and objective technique to inspect the deterioration status of underwater parts. In this study, a method for measuring the crack width of underwater concrete using ultrasonic waves was examined. In a simulated experiment in a test channel, a gap was created between two concrete specimens to simulate a crack. Ultrasonic waves were irradiated from a parametric sub-bottom profiler (PSBP), and ultrasonic waves propagating near the concrete surface were received by receivers placed in front of and behind the simulated crack. The results showed that the presence of cracks can be estimated from the attenuation of received waveforms at incident angles of 20° and 35°, and that there is a correlation between the simulated crack width and the amplitude of the waveform peaks in front of and behind the simulated crack, which allows estimation of the concrete crack width. We also developed a concept for a method to inspect concrete cracks underwater by mounting this transmitter/receiver on a remotely operated vehicle (ROV) and moving it vertically along the wall of the structure, and summarized the inspection method.

**Keywords:** Concrete, Underwater, Crack detection, Ultrasonic wave, PSBP, Hydrophone, ROV