

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

研究予算：運営費交付金

研究期間：平28～令2

担当チーム：寒地機械技術チーム

研究担当者：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

【要旨】

高度成長期以降に集中的に整備されたインフラが一斉に老朽化し、コンクリート構造物の水中部についても、経年による劣化や損傷が懸念されている。しかし、点検は主に潜水士の目視観察により行われているため、定量的な劣化状況の把握が難しい。構造物の安全性・信頼性確保のためには、劣化状況を的確に把握し、計画的に対処する必要がある。そこで、コンクリート構造物水中部の定量的な劣化診断手法の提案に向けた検討として、既往の研究において製作したパラメトリックソナーを活用した非接触劣化調査について実証実験を実施した。その結果、圧縮強度を推定できる可能性があることがわかり、調査手法についてとりまとめを行った。

キーワード：健全度，長寿命化，維持・管理，コンクリート水中部，超音波，教師あり学習

1. はじめに

日本国内における、道路橋やトンネル、河川・港湾施設などのインフラ施設は、高度経済成長期後期の1970年以降に集中的に整備されている。そのため、今後、一斉に建設後50年を経過し、老朽化が急激に進む見込みである¹⁾。

インフラ施設の老朽化に伴い、修繕や更新に係る費用の急増が懸念されているが、その一方で、維持管理に係る予算は非常に厳しい状況にある。限られた予算でインフラ施設の安全性・信頼性を確保するためには、従来の時間基準予防保全（Time Based Maintenance）や事後保全（Breakdown Maintenance）のみではなく、構造物の状態を定量的に把握・診断し、計画的に対処することができる状態基準予防保全（Condition Based Maintenance）を導入する必要がある。

地上からの目視確認が困難である、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）についても、経年による劣化や損傷が懸念されている。特に寒冷地では、凍結融解による劣化も加わり、さらに厳しい状況にある（写真-1）。しかし、点検は主に潜水士の目視観察により行われているため、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。

コンクリートの定量的な非破壊検査方法として、打撃試験、超音波、赤外線、レーダー、X線などがあるが²⁾、水中部に適用される事例は非常に少ない。そのため、コンクリート構造物水中部の定量的な調査手法が求められている。

寒地機械技術チームでは、水中構造物の定量的な調査技術として、既往の研究において、水中音響技術である超音波のパラメトリックソナーを活用し、非接触、非破壊で鋼矢板岸壁の内部空洞を調査する技術を開発した³⁾。この水中音響技術により水中部のコンクリートの強度を非接触で調査することができれば、劣化度の定量的な調査に利用できる可能性がある。



写真-1 橋脚部の凍結状況（北海道夕張郡由仁町）

本研究では、コンクリート構造物水中部の定量的な劣化度診断技術の提案を目的に、超音波のパラメトリックソナーを活用した非接触・非破壊で劣化度を調査する技術、および劣化状態を客観的に診断する手法について検討を行ったものである。

2. 研究方法

2. 1 既存の水中部非破壊劣化診断技術の調査

パラメトリックソナーの活用した場合の優位性について確認するため、構造物の水中部を対象とした既存の非破壊劣化診断技術について調査を実施した。

2. 2 室内計測試験

室内の実験用水槽において、パラメトリックソナーによるコンクリート供試体の計測試験を実施し、超音波を入射することで得られる受信波の音響特性について解析を行った。

2. 3 現地計測試験

現地計測試験を実施し、室内試験による解析結果が適用可能であるか、実証実験を行った。

2. 4 調査技術の開発

パラメトリックソナーによる、コンクリート構造物の現地調査技術について開発を行った。

2. 5 診断手法のとりまとめ

パラメトリックソナーにより得られる受信波の音響特性から、コンクリートの劣化状態を客観的に診断する手法を検討のうえ、とりまとめを行った。

3. 研究結果

3. 1 既存の水中部非破壊劣化診断技術の調査結果

構造物の水中部を対象とした既存の非破壊劣化診断技術について、調査した結果を図-1に示す。

調査の方法は、インターネット、書籍による調査のほか、診断技術に使用する計測機器のメーカーや点検コンサルタント等へのヒヤリングとした。また、調査にあたっては、国土交通省「次世代社会インフラ用ロボット現場検証委員会」の評価結果について参考とした⁴⁾。

まず、鋼部材を対象としたものでは、内部傷や減肉を調査する技術として、超音波およびパルス渦電流を使用した技術があった⁵⁾⁶⁾。これらの技術は既に商用化されていることから、調査技術として確立されているものと見られる。

次に、コンクリートを対象とした技術は、超音波、リバウンドハンマーおよび地中レーダーを使用した技術があった⁷⁾⁸⁾⁹⁾。このうち、超音波およびリバウンドハンマーは、気中部で使用されている試験機器を防水加工した技術であり、いずれも接触技術であるため、調査前の表面研磨や計測作業を潜水士が行う必要がある。また、地中レーダーについては、樋門・樋門等を対象とした技術であり、調査箇所の水抜きが必要であるため、調査可能な箇所が限られている。

鋼部材およびコンクリートの双方を対象とした技術としては、ROV (Remotely operated vehicle : 遠隔操作型無人探査機) による画像診断技術があった⁴⁾¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾。これは、潜水士の近接目視の代替として、損傷やクラック等を調査する技術である。光学カメラによる静止画や動画の解析が主となる技術であるため、コンクリートの強度など画像からの解析が困難なものについては診断が難しい。

パラメトリックソナーの活用にあたっては、超音波の透過性を利用することで、コンクリート内部の超音波伝搬速度を計測し、圧縮強度を推定する手法が考えられる。

もし、パラメトリックソナーによる非接触でのコンクリート水中部の調査が可能であれば、表面研磨や計測作業のための潜水士が不要となるほか、画像診断から解析困難な強度等の診断が期待できるため、既存技術と比較し、優位性が高いと考えられる。

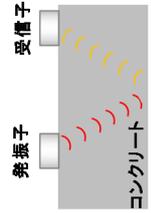
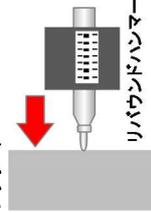
対象		鋼部材		コンクリート		鋼部材・コンクリート	
名称	水中超音波探傷検査 ⁵⁾	RTD-INCO TEST ⁶⁾	水中超音波法 ⁷⁾	水中リバウンドハンマー ^{7B)}	鉄筋コンクリート対応型空洞調査用GPRシステム ⁸⁾	自律制御による姿勢安定航行型ダム点検ロボットと損傷解析システム ⁹⁾	自律制御による姿勢安定航行型ダム点検ロボットと損傷解析システム ⁹⁾
調査技術	超音波	パルス渦電流	超音波	反発強度	地中レーダー	静止画、動画	静止画、音響カメラ、肉厚計
対象部材	鋼部材 (鋼管杭、鋼管等)	炭素鋼(強磁性体)	コンクリート	コンクリート	コンクリート (縦門・縦管等)	ダム構造物 (コンクリート、鋼部材)	ダム構造物 (コンクリート、鋼部材)
対象劣化	内部きず(亀裂)、腐食、減肉(肉厚)	減肉(肉厚)	圧縮強度	圧縮強度	背面空洞	損傷	クラック、減肉(肉厚)
技術の概要	水中超音波探傷装置により、超音波の反射を利用し、傷や空洞の位置を推定する。	パルス渦電流の原理を利用する。センサーによって発生した磁界はパイプ材質を磁化し、対象が磁化された後、磁界をオフにする。磁界の変化は磁化された範囲に渦電流を発生させ、渦電流から発生する磁界はセンサーによって検出される。	市販されている接触式超音波試験機の発振子、受信子及びケーブルの接続部分に防水加工を施した。二探触子法による表面法を用い、コンクリート内部を伝播する超音波の速度を評価する。	市販のNR型リバウンドハンマーに、専用ハウジングケースにより、防水性・耐圧性を付与させた。測定方法は、陸上の反発度法(JIS A 1155)に準拠。	鉄筋対応型GPRシステムという小型の機械から、電波を地面や構造物に向けて発射し、内部からの反射波を計測(周波数毎の時間、強度、波形)することで埋設物の検知や内部構造物を計測する。	高解像度カメラを搭載したROVで、堤体との隔離及び水深を保持する自律制御機能を有している。また、画像鮮明化技術により鮮明化した画像情報から変状や損傷等を自動抽出し、位置情報により2次元マップ化することで、経年変化の管理が可能。	高解像度カメラ及び音響カメラを搭載したROVで、水深・方位・位置を保持する自律制御を有し、伸縮ロッドで固定することで傾斜面等への位置保持が可能。画像鮮明化技術により鮮明化した画像により複合画像の作成が可能。また、点検箇所の情報、肉厚計測が可能。
写真・概要図等							
計測方法	調査箇所超音波探傷センサーを接触し、超音波の送受信を行う。 ・調査前に調査面を研磨する。(鏡面仕上げ) ・調査前の表面研磨および計測は、潜水士が行う。	調査箇所センサーを近づけることで、渦電流を発生させ、磁界を検出する。 ・センサーは調査面から170mm程度離して計測可能。 ・非磁性の被覆材等の上から調査が可(表面研磨の必要なし)。 ・潜水士のほか、ROVによる調査事例もある。	二探触子法による表面法 概要図 調査前に調査面を研磨し、平滑にする。 ・調査前の表面研磨および計測は、潜水士が行う。	リバウンドハンマーによる計測概要図 調査箇所リバウンドハンマー先端(プランジャー)を接触し、直角に押しつけることで打撃する。 ・調査前に調査面を研磨し、平滑にする。 ・調査前の表面研磨および計測は、潜水士が行う。	作業状況 NETIS記録情報より 調査員が調査面に向けて計測装置を設置し、電波の送受信を行う。 ・水中での調査は水を止めて実施。 ・調査面に土砂堆積がある場合は、事前に撤去する。 ・調査員が立ち入りできない箇所の計測は不可。	ROV外観 水中維持技術の現場検証・評価の結果より ・ROVを水中に投入し、陸上または船上から、調査員がハンドコントローラーにより操作する。 ・伸縮ロッドにより調査面との相対位置保持を行う。 ・清掃ブラシによる調査面の清掃が可能。 ・肉厚計測は、調査面へセンサーを接触して行う。	ROV外観 水中維持技術の現場検証・評価の結果より ・ROVを水中に投入し、陸上または船上から、調査員がハンドコントローラーにより操作する。 ・伸縮ロッドにより調査面との相対位置保持を行う。 ・清掃ブラシによる調査面の清掃が可能。 ・肉厚計測は、調査面へセンサーを接触して行う。
備考	・商用化技術 ・NETIS記録技術	・商用化技術 ・NETIS記録技術			・NETIS記録技術	・商用化技術	・商用化技術

図-1 水中部非破壊劣化診断技術 調査結果

3. 2 室内計測試験結果

3. 2. 1 パラメトリックソナーの概要

今回の試験に使用したパラメトリックソナーを写真-2、主要諸元を表-1に示す。この装置は鋼矢板岸壁の内部空洞調査用に製作したもので、送受波器（トランスデューサ）およびそれを駆動するパワーアンプにより構成されている。

パラメトリックソナーとは、1つの送受波器から、わずかに周波数の異なる2つの高周波（以下、「1次波」という。）を同時に同軸方向に高圧で送信することで、非線形相互作用により低周波（以下、「2次波」という。）を生成するものである¹³⁾。一般的に、音波は周波数が高いほど、指向性は良いが透過性は低く、周波数が低いほど、指向性は悪いが透過性は高いという性質を持つ。この両者の長所を持つものがパラメトリック送信技術であり、指向性の良い1次波によって透過性の高い2次波を生成することで、1次波と同等の指向性を2次波にも保つことができる（図-2）。この2次波の周波数は、海底に浸透するのに十分なほど低く、海底地層探査技術として利用されている¹³⁾¹⁴⁾。

この透過性の高い2次波により、コンクリートを透過した背面からの反射波を計測することができれば、コンクリート内部の超音波伝搬速度を算出し、圧縮強度の推定に活用できる可能性がある。



送受波器（トランスデューサ）

パワーアンプ

写真-2 パラメトリックソナー外観

表-1 パラメトリックソナーの主要諸元

送信周波数	1次波	100 kHz
	2次波	5~20 kHz
送受波器	大きさ	φ240×H120
	質量	15 kg
	使用水深	30 m
	耐圧	300 m
	ケーブル長	20 m
	チャンネル数	送信5、受信5
パワーアンプ	チャンネル配置	アニュラレイ
	大きさ	H230×W430×D600
	質量	24 kg
	総出力	1,700 W
	電源	AC100V、50/60Hz
	消費電力	1,500 VA

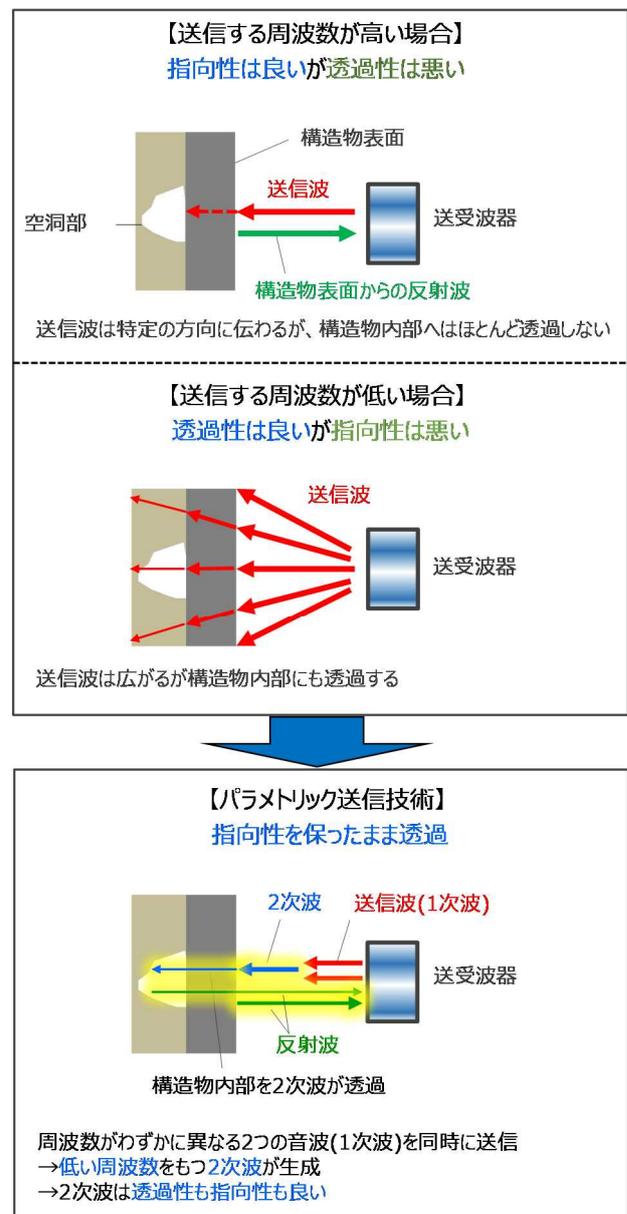


図-2 周波数による音波の性質の違い

3. 2. 2 試験方法

計測試験は室内の実験用水槽で実施した(写真-3)。使用した水槽の大きさは、幅 3.0m、奥行き 2.0m、高さ 2.2m で、深さ 1.7m まで水を溜めることができる。

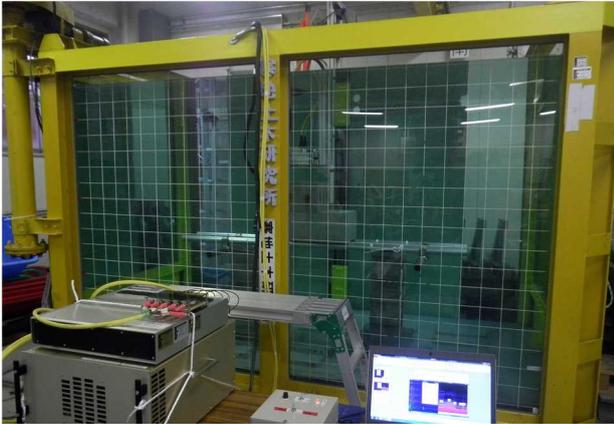


写真-3 実験状況

試験には 2 種類のコンクリート供試体を使用した(写真-4、表-2)。供試体 A は鉄筋コンクリート、供試体 B は市販のコンクリートブロックである。事前にリバウンドハンマー (Silver Schmidt、Proceq 社) により反発強度を計測し、供試体 A に比べ供試体 B の方が低い値であることを確認した。

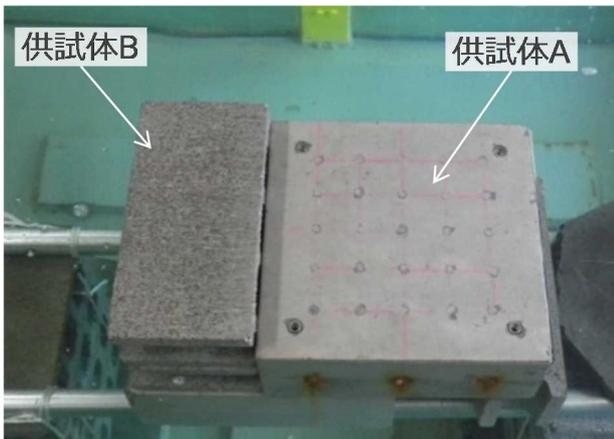


写真-4 供試体の写真

表-2 供試体の種別、寸法および反発強度

呼称	種別	寸法(cm)			反発強度(Q)※
		幅	長さ	厚さ	
供試体 A	鉄筋コンクリート	40	40	20	53.3
供試体 B	市販コンクリートブロック	19	39	12	28.2

※ 反発強度の単位(Q)はメーカー独自のもの

パラメトリックソナーによる計測方法を、図-3 に示す。送受波器から供試体に向け、鉛直下向きに超音波を送信し、供試体からの反射波形を計測した。送受波器はラックピニオン式の横行装置に懸架し、水平方向に移動できるように設置した。供試体は高さ 60cm のフレームの上に設置し、送受波器と供試体との間の距離は 60cm とした。

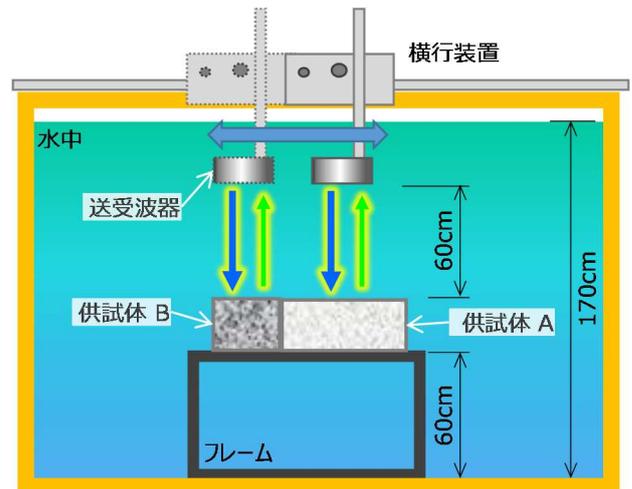


図-3 計測方法

3. 2. 3 計測結果

1) 供試体表面からの反射波の計測結果

計測により得られた受信波を図-4 に示す。縦軸は振幅、横軸は超音波を送信してから経過時間である。

送受波器から送信された超音波が、供試体表面を反射し、送受波器に到達するまでの時間は、式(1)により表される。

$$T = \frac{2D}{V_w} \times 10^6 \quad (1)$$

ここで、 T : 超音波の到達時間 (μs)

D : 送受波器と供試体表面との距離 (m)

V_w : 水の超音波伝播速度 (m/s)

水槽の水について、水中音速計(UltraSV、Valeport 社)により超音波伝播速度を計測したところ、1,460m/sであった。そのため、式(1)より、供試体表面からの反射波は、超音波を送信してから約 822 μs 後に受信されると考えられる。

計測結果から、供試体 A および B いずれの場合も、820 μs 付近で大きな振幅を受信した。これが供試体表面からの反射波と見られる。

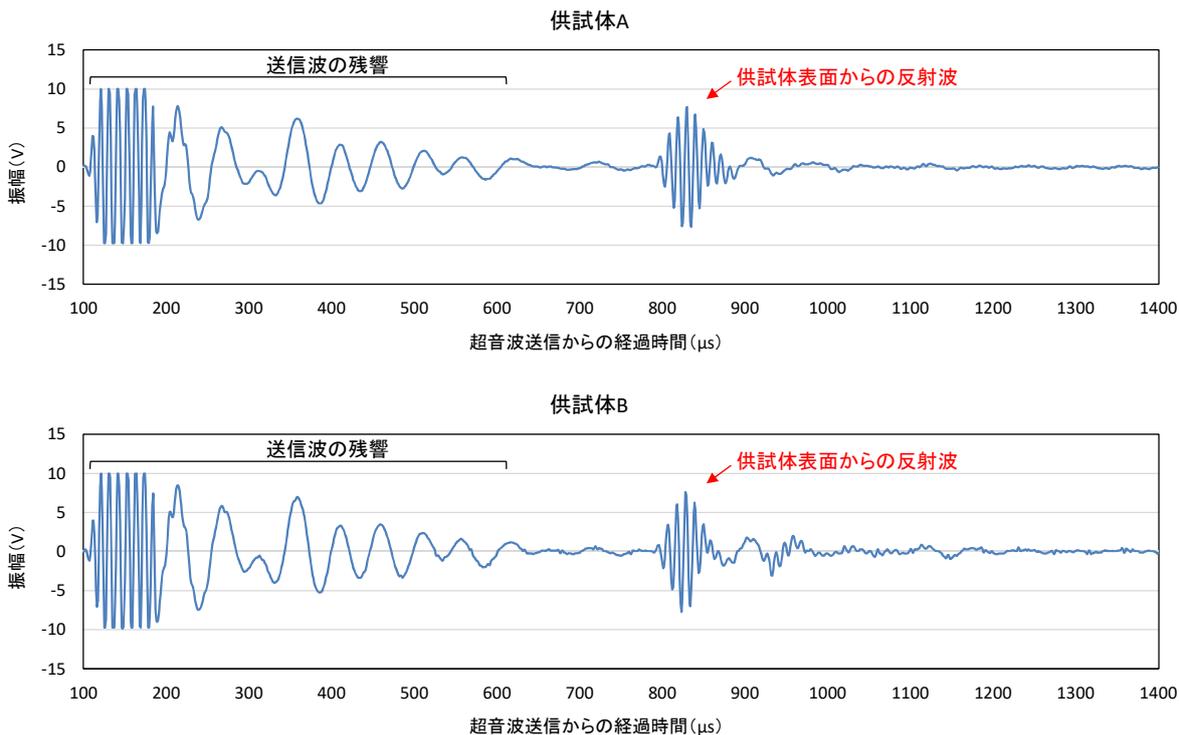


図-4 計測結果 (受信波)

2) 供試体背面からの反射波の解析結果

計測した受信波を分析し、供試体を透過して供試体背面で反射した波形の解析を行った。

受信波の分析にあたっては、バンドパス処理により1次波成分(100kHz帯)および2次波成分(10kHz帯)を抽出し、さらに包絡線処理により振幅のピーク位置の検出を行った。なお、包絡線処理とは、波形の振幅変化を確認するための処理手法であり、回転機械の振動解析などに用いられている¹⁵⁾(図-5)。

a) 供試体 A の解析結果

バンドパス処理および包絡線処理の結果を図-6に示す。上段はバンドパス処理前の受信波、中段はバンドパス処理後の1次波成分、下段は2次波成分である。グラフの横軸は、供試体表面からの反射波の近傍である700μs~1,200μsを抽出した。

超音波が供試体を透過し、供試体背面で反射した場合、反射波が送受波器に到達するまでの時間は、式(2)により表される。

$$T = \left(\frac{2D}{V_w} + \frac{2D_s}{V_c} \right) \times 10^6 \quad (2)$$

ここで、 D_s : 供試体の厚さ (m)

V_c : コンクリートの超音波伝搬速度 (m/s)

コンクリートの超音波伝搬速度は水の3倍ほど速く、4,000~5000m/s程度と考えられる¹⁶⁾。このことから、供試体 A 背面からの反射波は、式(2)より、超音波を送信してから約902μs~922μs後に受信される。

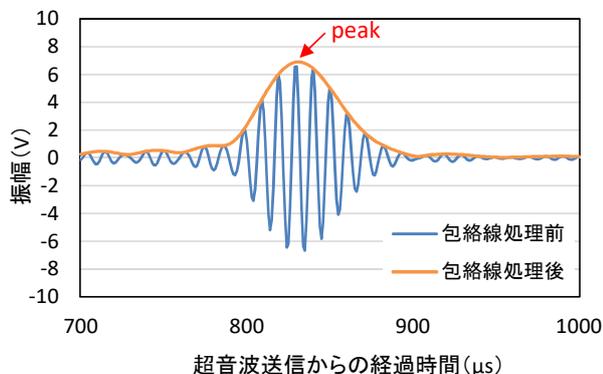


図-5 包絡線処理の例

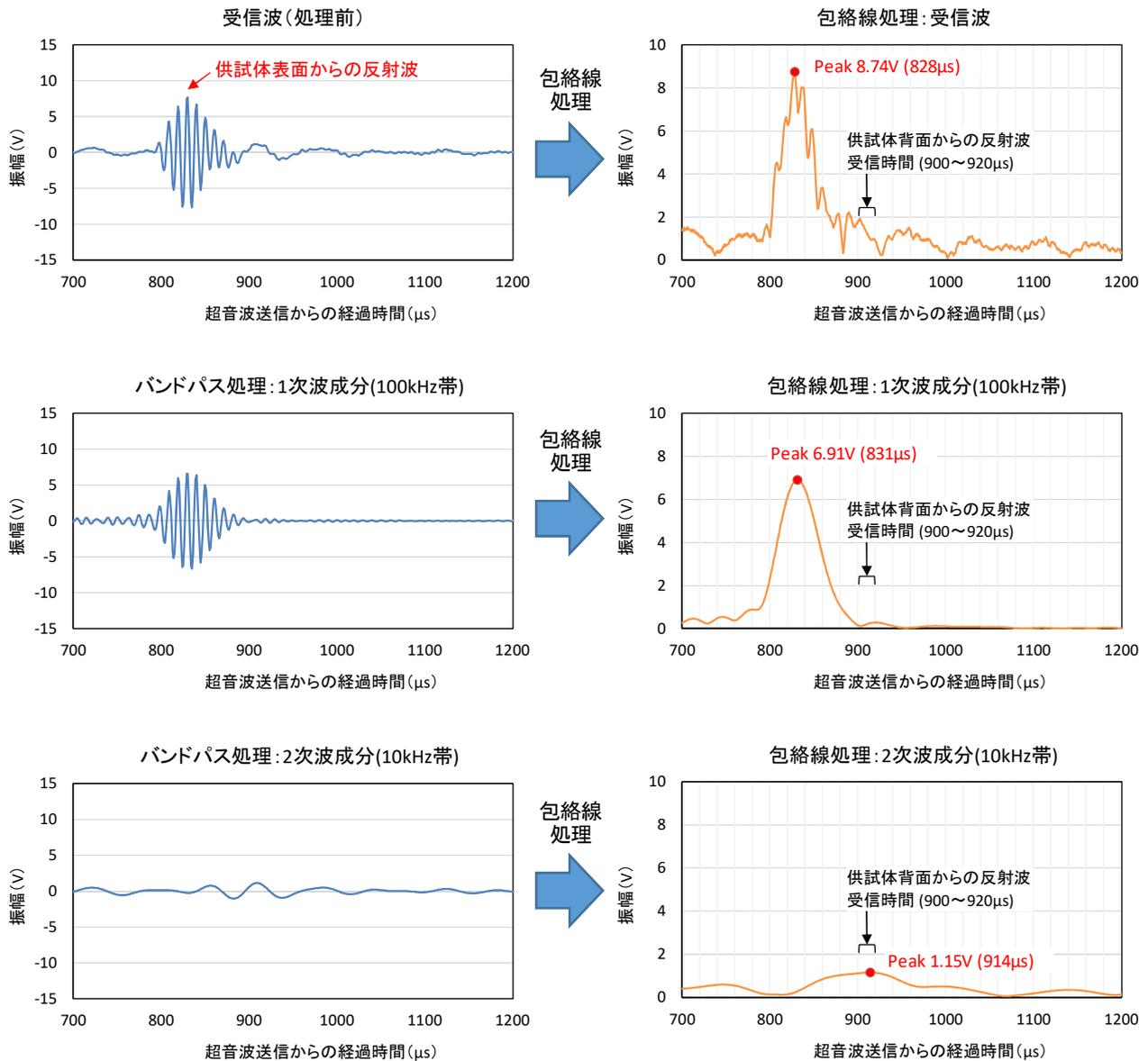


図-6 バンドパス処理および包絡線処理結果 (供試体 A)

包絡線処理の結果から受信波のピークを確認したが、受信波および1次波成分からは、供試体背面からの反射波と見られる波形のピークを確認することはできなかった。また、2次波成分からは、914 μ sに波形のピークを確認することができたが、振幅が非常に小さいため、このピークを供試体背面からの反射波によるものと判断することは難しい。

以上より、供試体 A の計測結果からは、供試体背面からの反射波を明瞭に確認することはできなかった。

b) 供試体 B の解析結果

供試体 B の側面図を図-7に示す。供試体 B には空洞が空いているため、空洞の無い箇所 (図-7 中①) と空洞のある箇所 (図-7 中②) の受信波について分析を行った。

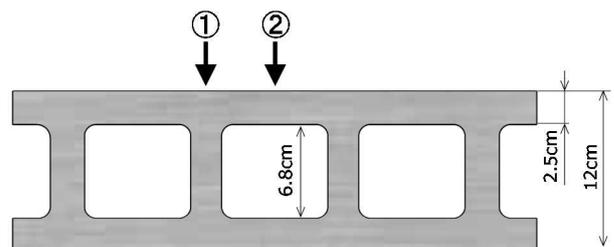


図-7 供試体 B 側面図

まず、空洞の無い箇所について、受信波の分析を行った（図-8）。

空洞背面からの反射波は、コンクリートの厚さは12cmであるため、式(2)より、約870 μ s～882 μ sに受信されると考えられる。しかし、包絡線処理の結果からは、供試体背面からの反射波とみられる振幅を確認することはできなかった。

次に、空洞のある箇所について、受信波の分析を行った（図-9）。

厚さ2.5cmのコンクリート背面からの反射波は、約832 μ s～834 μ sに受信されると考えられる。包絡線処理の結果から受信波のピークを確認したが、受信波および1次波成分では、供試体表面からの反射波に含まれてしまい、判別することはできなかった。また、2次波においても、コンクリート背面からと見られる反射波を確認することはできなかった。

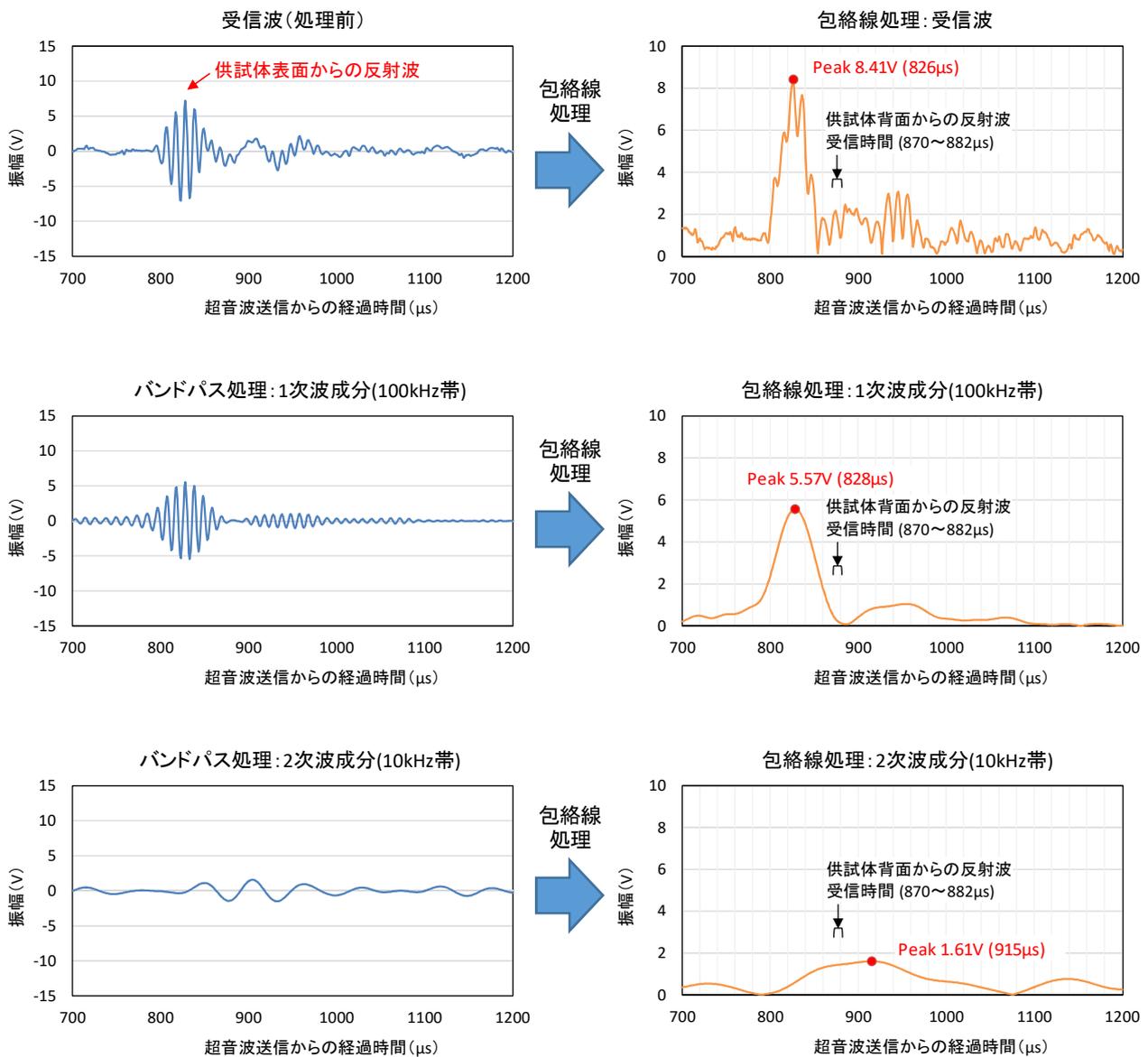


図-8 バンドパス処理および包絡線処理結果（供試体 B：①空洞の無い箇所）

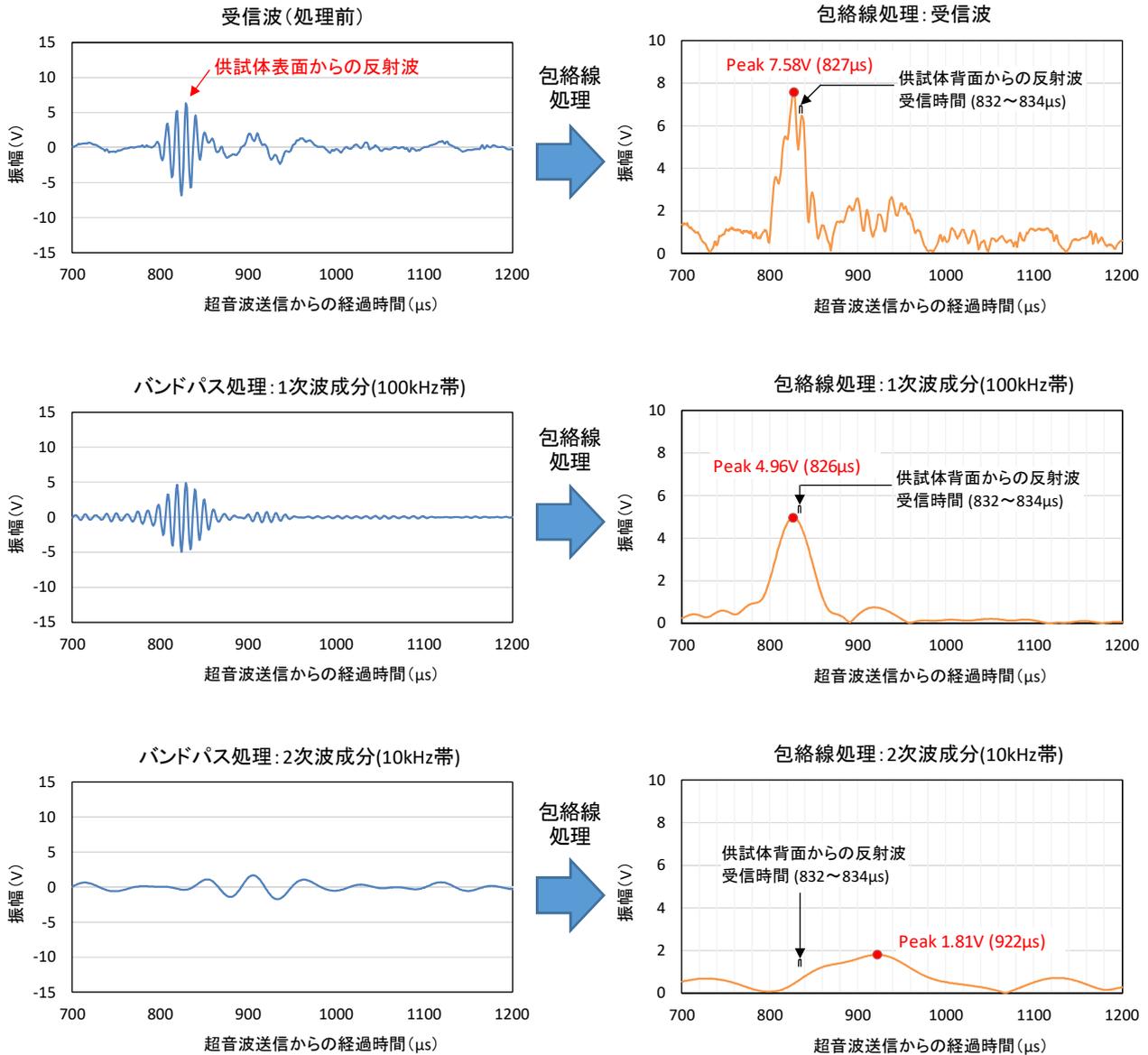
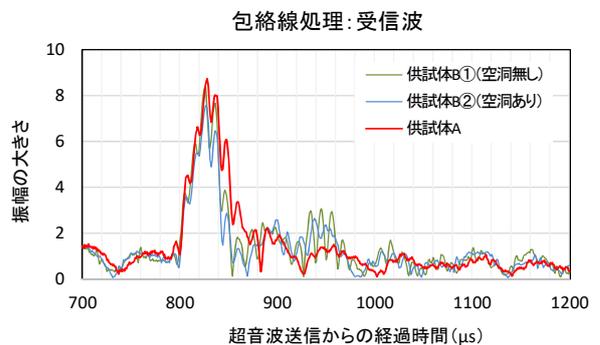


図-9 バンドパス処理および包絡線処理結果 (供試体 B : ②空洞のある箇所)

ここで、図-8 と図-9 を比較すると、供試体表面からの反射波の形状が似ており、また図-6 の形状とは異なっていると見受けられた。そこで、受信波の形状について比較を行った (図-10)。比較にあたっては、包絡線処理の結果を用いるものとし、波形に相関があるかを確認するため、相関係数を算出した。

比較の結果、受信波と 1 次波において、供試体 B①と②の相関係数が、供試体 A との相関係数よりも高くなった。

このことから、供試体 A と供試体 B の供試体表面からの反射波は、形状に違いがある可能性があることがわかった。そこで、反射波の形状の違いについて分析を行った。



相関係数	供試体 A	供試体 A	供試体 B①
波形 1	供試体 A	供試体 A	供試体 B①
波形 2	供試体 B①	供試体 B②	供試体 B②
受信波	0.9173	0.9018	0.9519
1次波	0.9729	0.9776	0.9831
2次波	0.4899	0.8655	0.7042

図-10 受信波の形状の比較

3. 2. 4 反射波の形状の解析結果

1) 供試体 A および供試体 B の解析結果

供試体 A および B の反射波の形状の違いについて、分析を行った。

まず、データ収集のため、図-3 の計測方法により、計測位置を移動しながら計測を実施し、供試体 A から 134 箇所、供試体 B から 15 箇所の反射波を取得した。これに前項のデータを加え、供試体 A は 135 箇所、供試体 B は 17 箇所のデータについて分析した。

計測した受信波を図-11 に示す。図は受信波を包絡線処理し、その振幅を 2 次元等高図により現したものである。色が青いほど振幅が小さく、赤いほど振幅が大きい。縦軸は受信波の番号であり、供試体 A からの受信波を 1~135 番、供試体 B からの受信波を 136~152 番とした。横軸は超音波を送信してからの経過時間であり、約 820 μ s 付近に受信した大きな振幅が供試体表面からの反射波と見られる。

反射波の形状の分析にあたっては、図-10 より、供試体 B の①と②で相関係数が最も高かった 1 次波について行うものとした。

まず、バンドパス処理により 1 次波を抽出し、包絡線処理を行い、式(3)による標準化処理により、振幅のスケールを統一した。

$$x_s = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (3)$$

ここで、 x : 振幅 (V)

x_s : 標準化された x

x_{min} : x の最小値 (V)

x_{max} : x の最大値 (V)

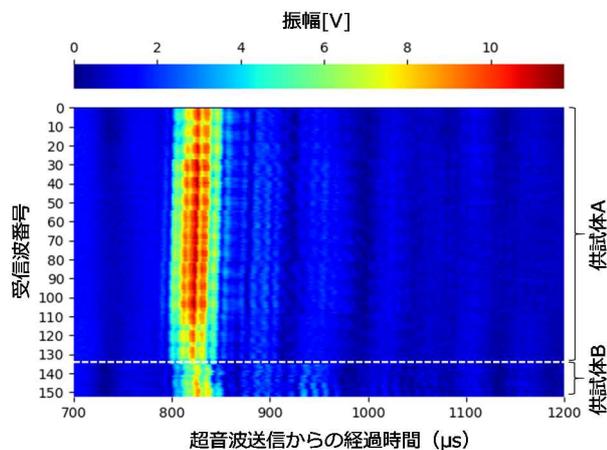


図-11 受信波の振幅

処理した結果を図-12に示す。横軸は、振幅のピークを0 μ sとした場合の経過時間であり、ピーク前の100 μ sからピーク後の300 μ sまでを抽出した。

次に、データごとの振幅の違いを現すため、式(3)により、経過時間ごとに標準化処理を行った。

処理結果を図-13に示す。供試体Aと供試体Bの境目から振幅の違いが現れていることが確認できた。このことから、供試体Aと供試体Bでは反射波の形状に違いがあることがわかった。

反射波の形状が異なる要因としては、供試体の物性値や表面形状の違いなどが考えられる。供試体 A と供試体 B では、外観から表面荒さが違うと見受けられることから、表面形状の違いが反射波の形状に影響した可能性がある。

そこで、表面形状が同じく圧縮強度が異なる供試体を製作し、反射波の形状を分析した。

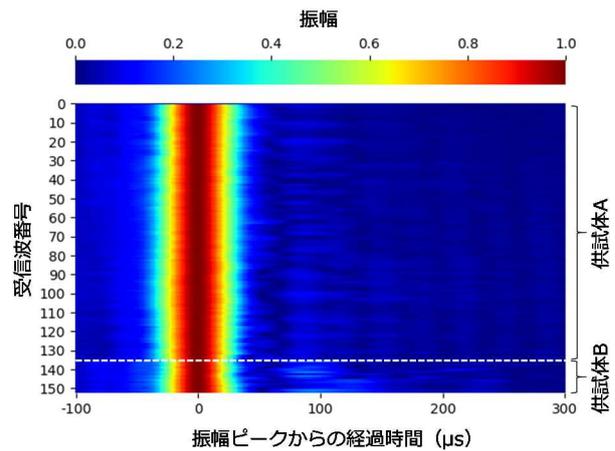


図-12 1次波の振幅 (標準化処理後)

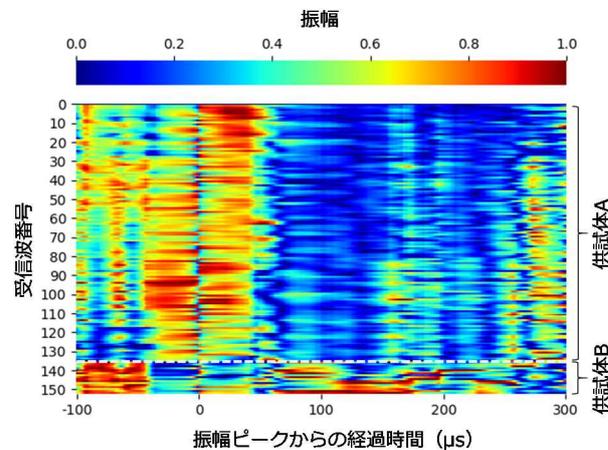


図-13 経過時間ごとの標準化処理結果

2) 表面形状が同じく圧縮強度が異なる供試体の解析結果

試験のために製作した供試体を写真-5 に、コンクリート配合表を表-3 に示す。

供試体は4種類製作し、それぞれの呼称をN50、N60、N70およびN80とした。各供試体の大きさは、幅40cm、長さ40cm、厚さ20cmであり、製作する際に水セメント比を調整し、圧縮強度が異なるものとした(図-14)。

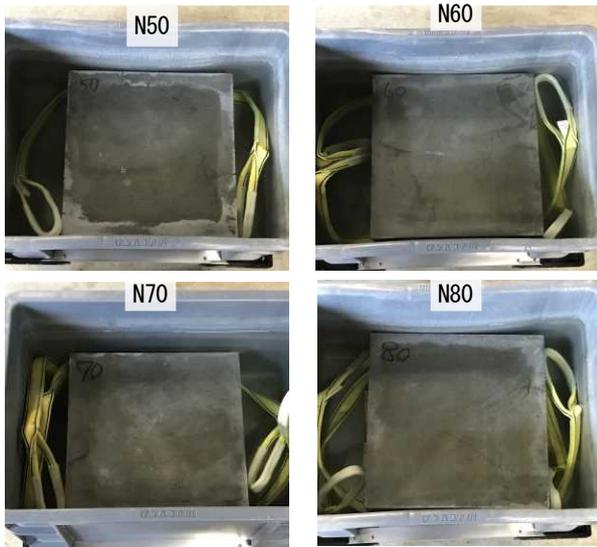


写真-5 製作した供試体

表-3 コンクリート配合表

呼称	N50	N60	N70	N80	
セメント種類	普通ポルトランドセメント				
水セメント比 W/C	50%	60%	70%	80%	
細骨材比 s/a	44%	46%	48%	50%	
単位量 (kg/m ³)	水	148	150	160	163
	セメント	296	250	229	204
	空気	45	45	45	45
	細骨材	838	892	926	971
	粗骨材	1070	1050	1008	975

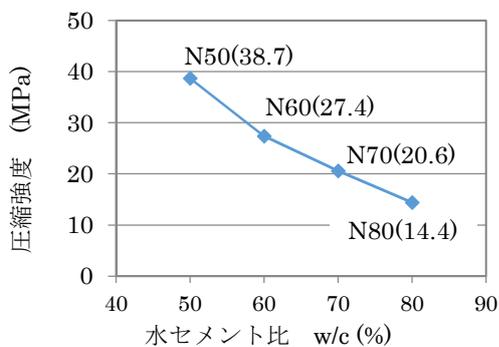


図-14 圧縮強度試験結果

製作した各供試体の外観はほぼ同一であり、表面形状の違いを目視で判別することは困難である。

パラメトリックソナーによる計測方法を図-15 に示す。ここでは、直立したコンクリート構造物の計測を想定し、水平方向に超音波を送信し、受信波を計測した。送受波器と供試体の距離は、実験用水槽内で可能な限り遠ざけた距離とし、ここでは約2.0mとした。

供試体の計測箇所は図-16 のとおりとし、計測数は1供試体あたり169箇所、4供試体で計676箇所分とした。

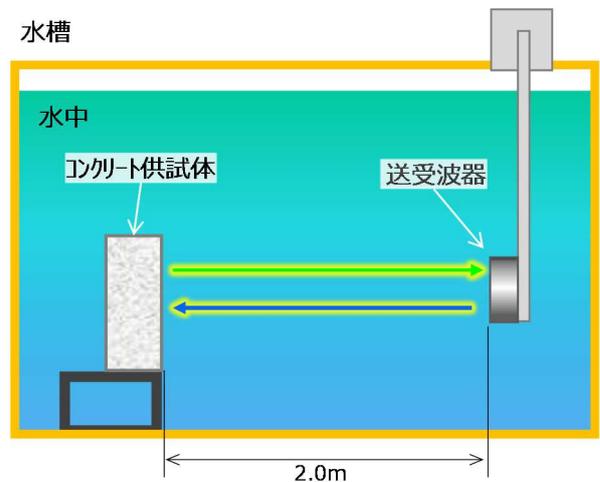


図-15 計測方法

・1供試体あたり169点(13点×13点)

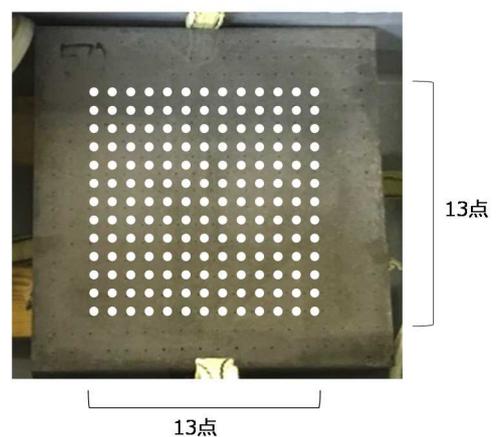


図-16 計測箇所

計測結果を図-17に示す。図は、受信波を包絡線処理し、その振幅を2次元等高図により現したものである。縦軸は受信波の番号であり、供試体N50からの受信波を1~169番、N60からの受信波を170~338番、N70からの受信波を339~507番、およびN80からの受信波を508~676番とした。横軸は超音波を送信してから経過時間である。送受波器と供試体の距離は約2.0mであるので、式(1)より、供試体表面からの反射波が受信される時間は約2,740 μ sであるが、計測結

果からは2,700~2,800 μ s付近に大きな振幅を確認した。これは、供試体を設置する際、設置位置が若干前後したためと考えられる。

まず、前項と同様に、1次波について包絡線処理を行い、標準化処理を行った。処理結果を図-18に示す。横軸は、振幅のピークを0 μ sとした経過時間であり、ピーク前の100 μ sからピーク後の300 μ sまでを抽出した。

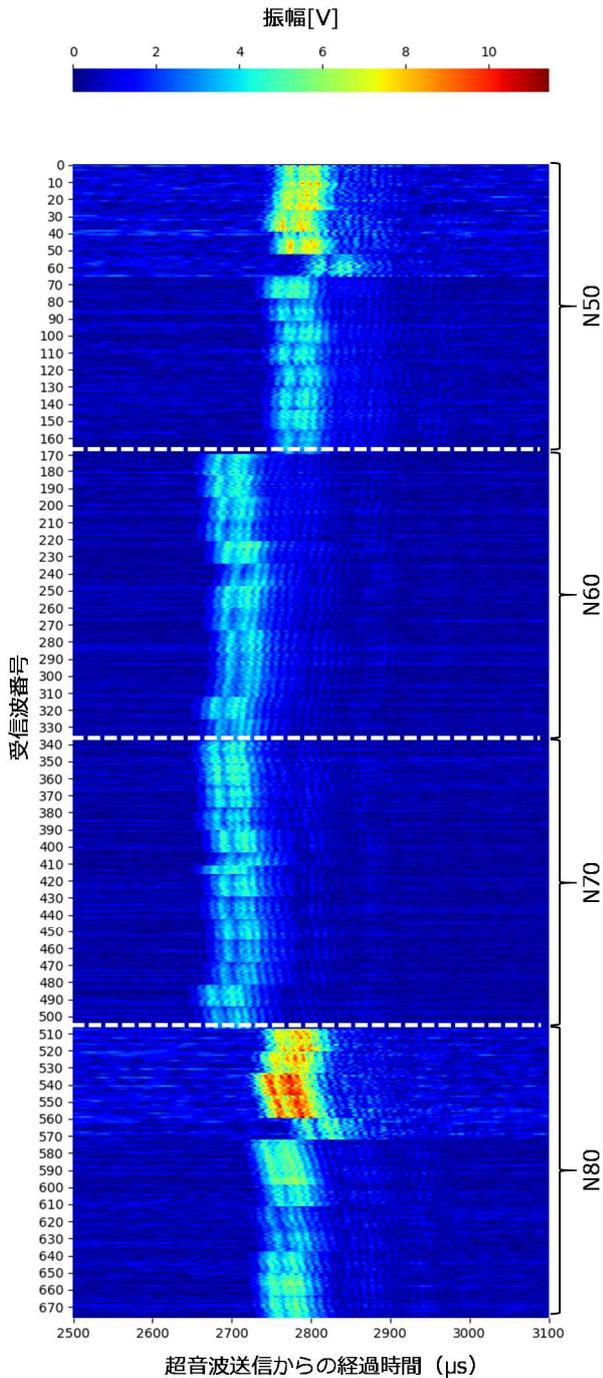


図-17 受信波の振幅

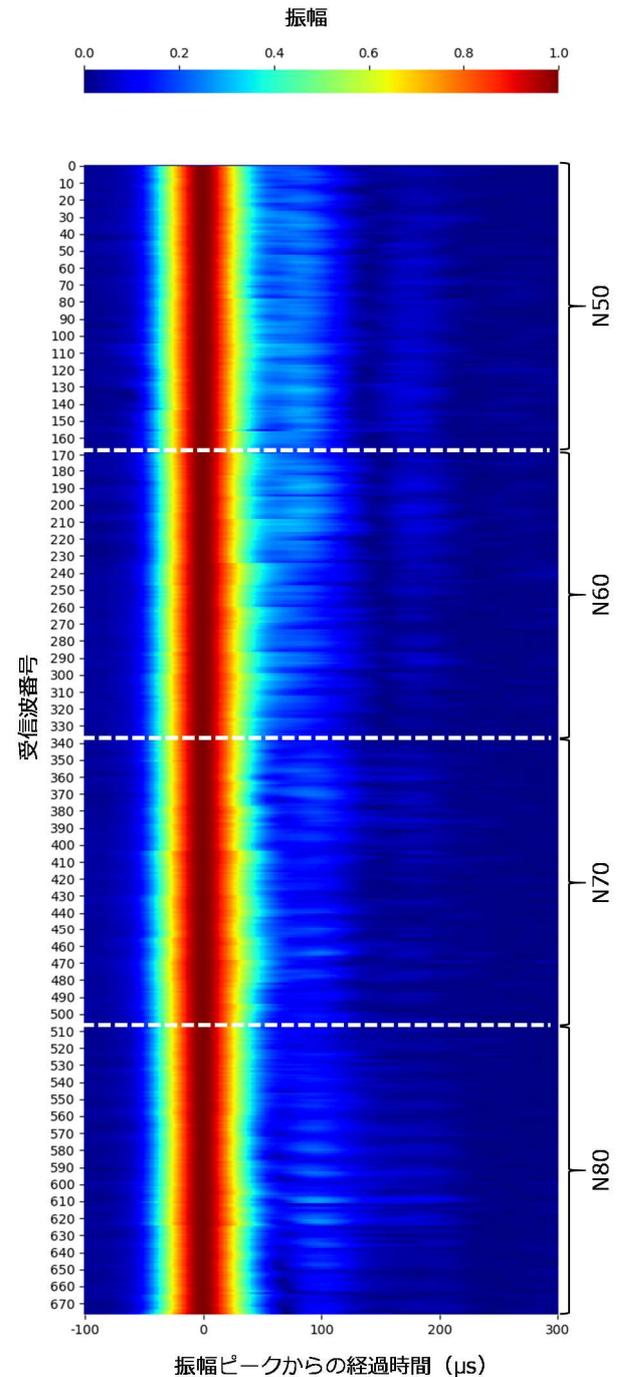


図-18 1次波の振幅 (標準化処理後)

次に、式(3)により、経過時間ごとに標準化処理を行った。処理結果を図-19に示す。

供試体により振幅が大きくなる時間が異なり、N50では振幅ピークから80 μ s~100 μ s付近、N60では60 μ s~80 μ s付近、N70では-100 μ s~50 μ s付近の振幅が大きい傾向になった(図中、赤の点線で囲った箇所)。また、N80では振幅が大きくなる時間が無かった。

このことから、反射波の形状の違いは、表面形状が同じ場合でも、圧縮強度の違いにより現れることがわかった。

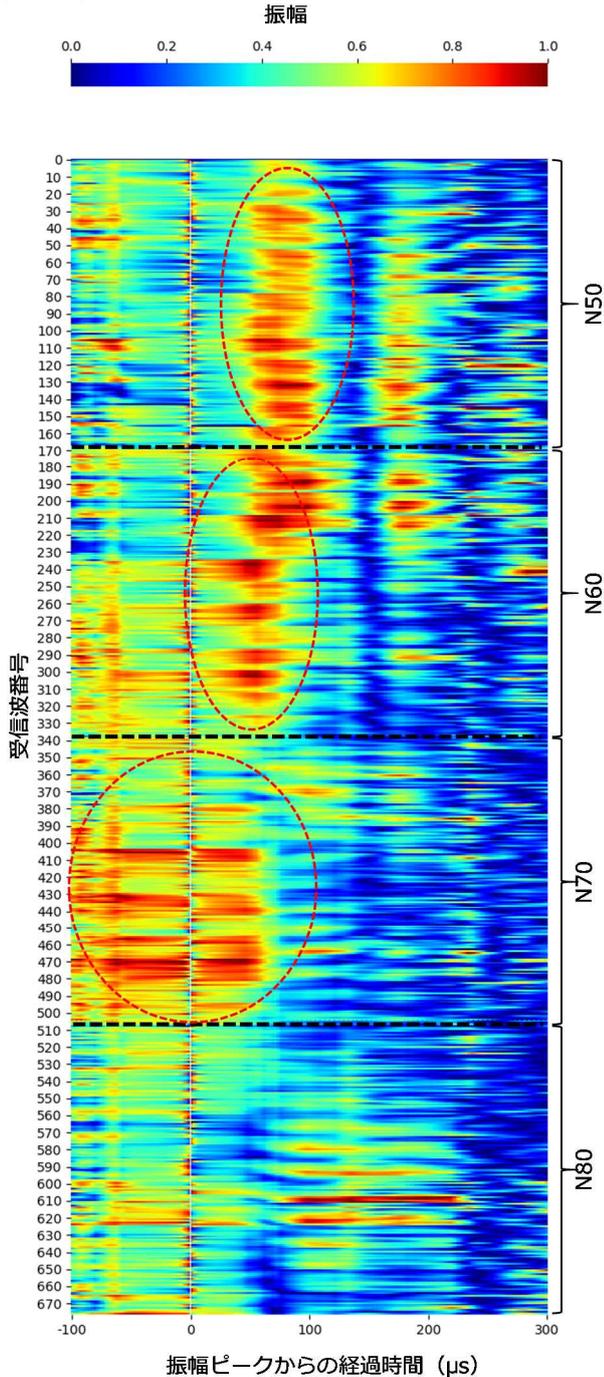


図-19 経過時間ごとの標準化処理結果

3. 3 現地計測試験結果

3. 3. 1 試験概要

現地計測試験は、北海道石狩市茨戸川の岡崎式単床ブロック護岸で実施した(写真-6)。岡崎式単床ブロックは、岡崎文吉により考案された鉄筋コンクリートブロックであり、このブロックを使用した護岸が、大正5年から大正6年にかけて茨戸川の伏古別地区に施工された。その一部は現存しており、平成27年度に土木学会推奨土木遺産に認定されている。

現地より採取した護岸ブロックを写真-7に示す。採取したブロックの大きさは、高さ約9cm、幅約15cm、長さ約60cmである。ブロックの大きさは製造年により異なっており、採取したブロックは、大正3~6年に製造されたものと考えられる。

また、採取した護岸ブロックについては、JIS A 1108に基づく圧縮強度試験を実施し、圧縮強度は、平均で20.0MPaとなった(表-4)。

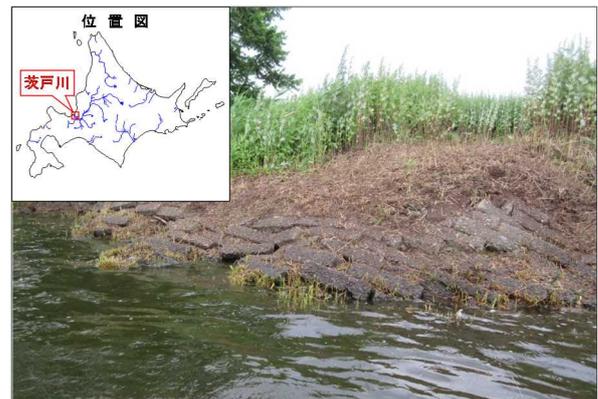


写真-6 現存する岡崎式単床ブロック護岸



写真-7 現地より採取した岡崎式単床ブロック

表-4 圧縮強度試験結果

供試体	大きさ (mm)		圧縮強度 (MPa)	
	直径	高さ	平均	
1本目	58.6	129.4	17.5	20.0
2本目	58.6	128.1	23.1	
3本目	58.6	127.3	19.4	

3. 3. 2 計測試験箇所および計測試験方法

計測箇所を図-20、計測状況を写真-8 に示す。計測は、護岸工事終点標付近で実施した。

計測は、船外機付きボートを使用して実施した。

ボートにはパワーアンプ、バッテリー、解析用PC等の機材を積み込み、送受波器を取り付けた双胴フロートをボートの側面に固定し、ボートで移動しながら計測を実施した。



図-20 計測箇所

国土地理院ウェブサイト¹⁷⁾に加筆



写真-8 計測状況

双胴フロートへの送受波器の取り付け状況を写真-9 に示す。送受波器は、河床を計測するため送受波面を下向きとし、位置情報測位のためのGNSSアンテナも併せて取り付けた。



写真-9 双胴フロートへの送受波器取り付け状況

3. 3. 3 計測試験結果

1) GNSS 位置測位結果

GNSSにより測位した計測軌跡を図-21 に示す。図中の赤丸がGNSSによる測位位置である。

計測は0.2秒間隔で行い、連続で980点のデータを取得した。

なお、計測時に河床を棒で突くことで、計測箇所に護岸ブロックがあることを確認した。

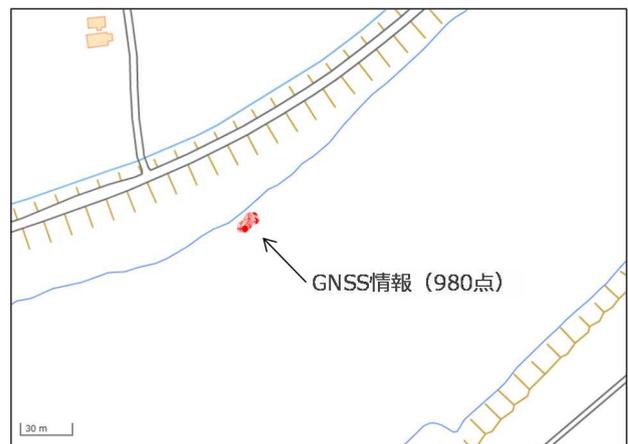


図-21 GNSS計測軌跡

国土地理院ウェブサイト¹⁷⁾に加筆

2) 受信波計測結果

計測した受信波を図-22 に示す。図は、受信波を包絡線処理し、その振幅を2次元等高図により現したものである。縦軸は受信波の番号であり、980 点のデータを計測順に並べたものである。

超音波送信から、2000 μ s \sim 4500 μ s 付近で、河床からの反射波と見られる受信波を確認した。

次に、バンドパス処理により1次波を抽出したものを

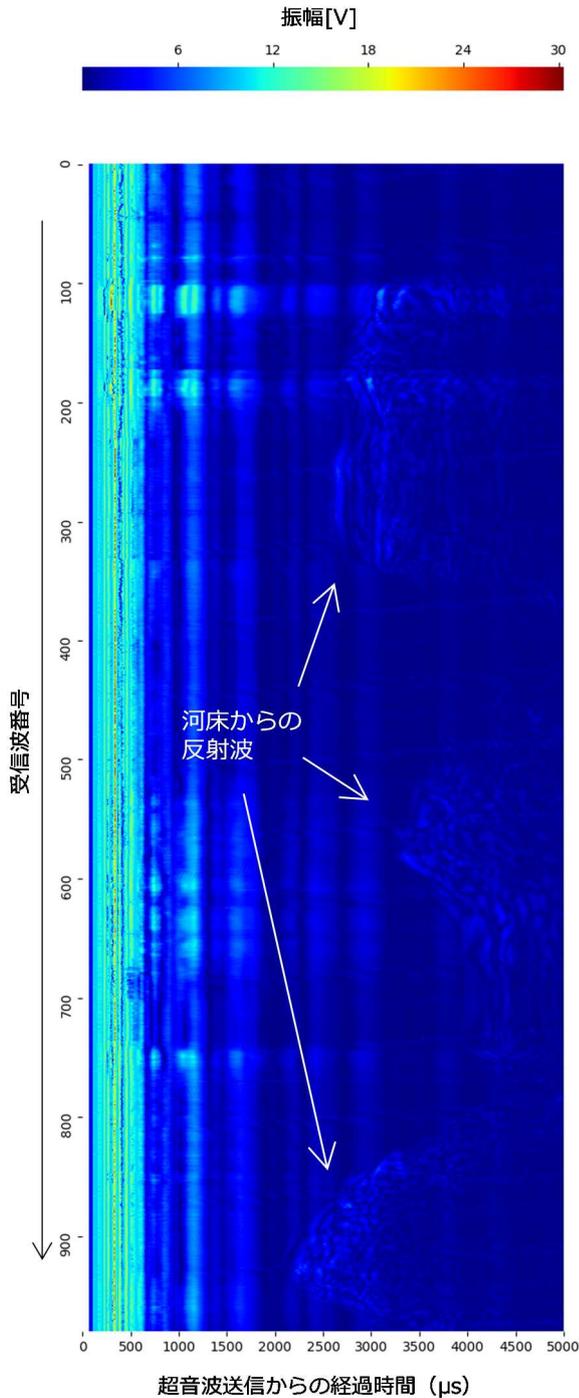


図-22 計測結果

を図-23 に示す。河床からと見られる反射波の受信時間には、大きな変動が見られた。これは、ボートが河川に流され定点に留まることが難しかったこと、また、フロートが揺動し送受波器の向きが変動したことなどが原因と考えられる。

受信波番号が100 \sim 350 付近(図中、白の点線で囲った箇所)で、比較的安定した反射波を確認することができた。そのため、この反射波について形状を確認し、室内試験の結果と比較を行った。

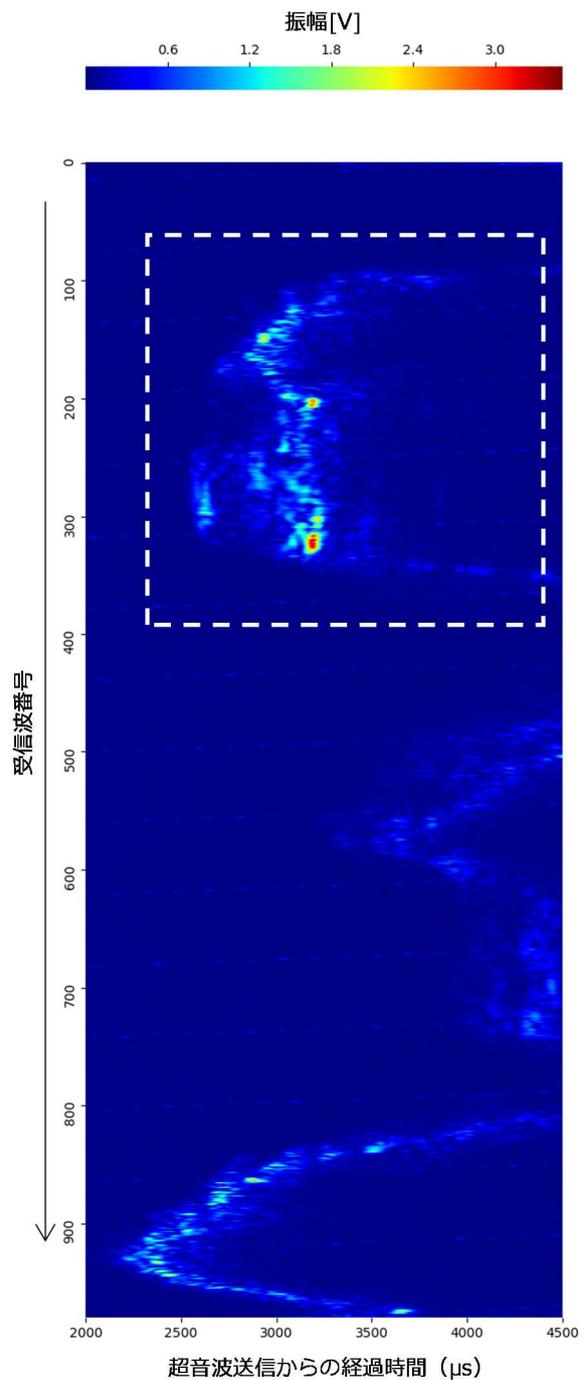


図-23 解析結果(1次波)

図-23 から受信波番号 100~350 を抽出したものを図-24 に示す。

超音波送信からの経過時間が 3,000 μ s 付近に現れている大きな振幅が、河床護岸からの反射波と見られる。なお、2,500 μ s 付近に現れている振幅は、護岸上に堆積している土砂表面からの反射波と見られ、1 次波が堆積土砂を透過したと考えられる。

振幅のピークを 0 μ s とし、ピーク前の 100 μ s からピーク後の 300 μ s までを抽出したものを図-25 に示す。ここで、反射波の形状を個別に確認すると、振幅の小さいものは形状が不明瞭であることがわかった(図-26)。そのため、振幅が大きく反射波の形状が明瞭である 29 点のデータを抽出し、室内試験で得た供試体 N50 から N80 の反射波との形状の比較を行った。

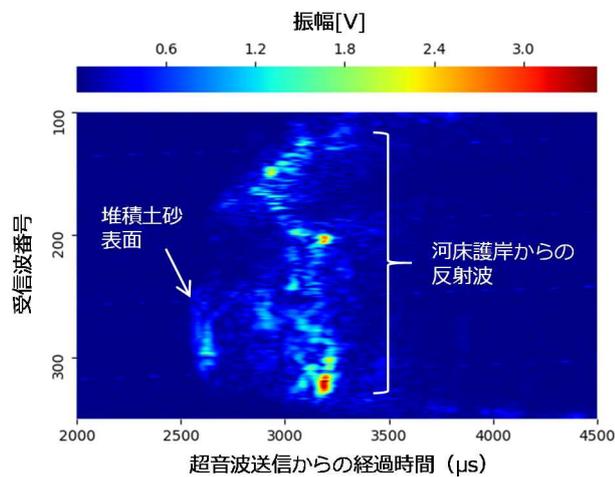


図-24 解析結果 (1次波) の抽出

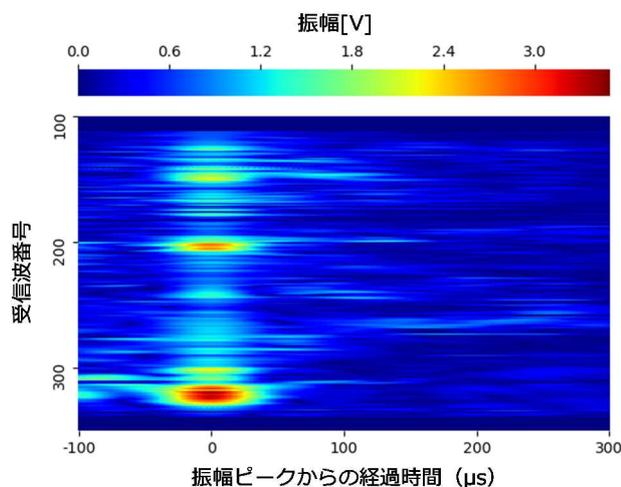


図-25 1次波の振幅

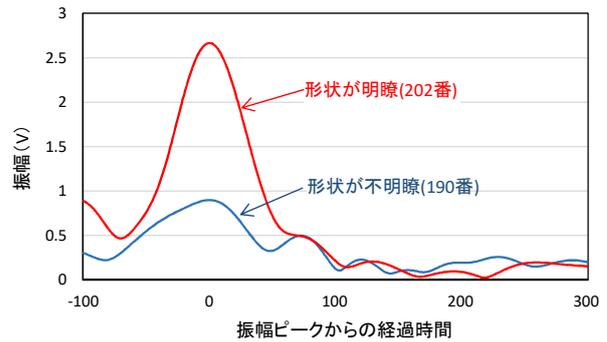
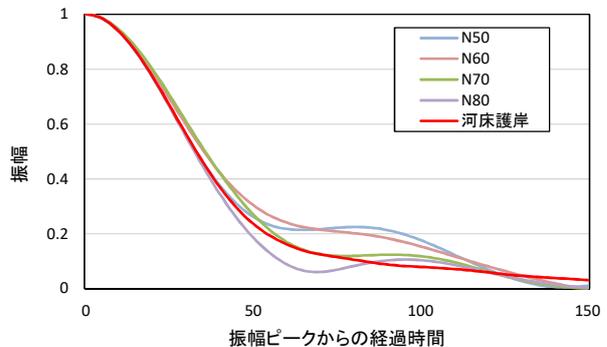


図-26 反射波の形状の一例

比較結果を図-27 に示す。ここで、振幅ピーク前のデータは堆積土砂の影響を受けると考えられることから、振幅ピークの 0 μ s から 150 μ s までを抽出し比較した。各波形はそれぞれの平均値とし、標準化処理により振幅のスケールを統一したものである。

相関係数を比較したところ、N70 が最も高くなった。圧縮強度試験の結果 (図-14 および表-4) から、護岸ブロックの圧縮強度は N70 に最も近いため、圧縮強度と反射波の形状には相関がある可能性が高いことがわかった。



河床護岸との相関係数

N50	N60	N70	N80
0.9869	0.9922	0.9973	0.9962

図-27 反射波の形状の比較

3. 4 調査技術の開発結果

パラメトリックソナーによる現地調査は、従来、双胴フロートまたはバックホウにより実施してきた（図-28）。しかし、双胴フロートによる調査は、水流による移動や揺動の影響が大きく、またバックホウによる調査は、調査範囲がアームの届く範囲に限られ、バックホウが近寄れない橋脚やダム等の調査はできない。

そこで、調査箇所の制約が少なく、安定した姿勢制御が可能な ROV による現地調査技術を開発し、計測試験による検証を実施した。

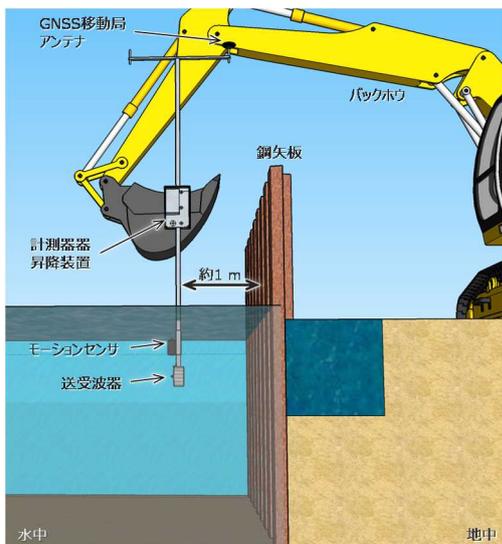


図-28 バックホウによる調査方法

3. 4. 1 ROV の概要

ROV の外観を写真-10、主要諸元を表-5 に示す。

ROV は、ROV 本体、コントローラーBOX、表示装置およびハンドコントローラーからなり、表示装置に表示されるカメラ映像をもとに、ハンドコントローラーによる操作を行う。

ROV は市販のものを使用し、送受波器の架装用に製作したフレームを下部に取り付ける仕様とした。架装用フレームは容易に着脱できるため、運搬や ROV 単独調査の際には取り外すことが可能である。

ROV は深度・方向保持機能を有していることから、調査時の姿勢制御が可能である。また、ROV 搭載の光学カメラにより、パラメトリックソナーによる調査にあわせて画像の確認もできる。

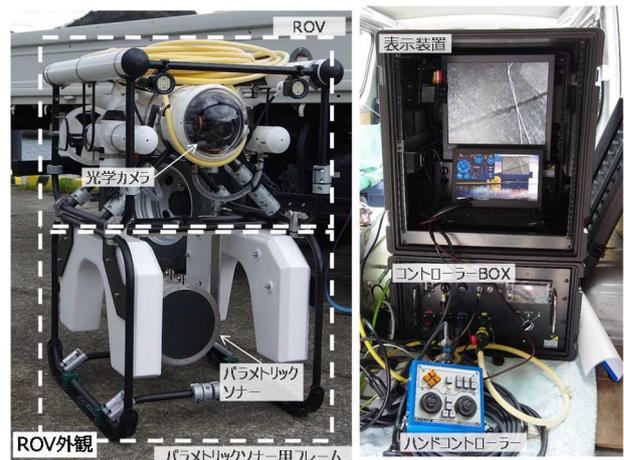


写真-10 ROV 外観

表-5 ROVの主要諸元

寸法	W620×H1,023×L762
質量	80 kg (送受波器搭載時) 40 kg (ROV 本体)
使用可能水深	150 m (ROV 本体) 30 m (送受波器)
スラスタ出力	200W × 2 基
操作支援機能	深度保持、方向保持
光学カメラ	1/4' CCD カラー 38 万画素
電源	AC100V、50/60Hz
必要電力	3.0 kVA (スラスタ最大出力)

3. 4. 2 計測試験による検証結果

1) 計測試験の概要

ROV による調査技術を検証するため、国土交通省北海道開発局所管の漁川ダムにて、ダム堤体コンクリート部の計測試験を実施した。

計測箇所を図-29 に示す。計測は、漁川ダム上流右岸側のコンクリート堤体部で実施した。



図-29 計測箇所

国土地理院ウェブサイト¹⁷⁾に加筆

計測状況を写真-11 に示す。計測には ROV のほかに船外機付きボートを使用した。船外機付きボートには、パラメトリックソナーおよび ROV の機材を積み込み、船上から ROV を操作しながら計測を実施した。



写真-11 計測状況

2) 計測試験結果

計測した受信波を図-30 に示す。計測は 0.2 秒間隔で行い、連続で 285 点のデータを取得した。

超音波送信から、6000 μ s 付近 (図中、白の点線で囲った箇所) で、コンクリート堤体部からの反射波と見られる受信波を確認した。

次に、バンドパス処理により 1 次波を抽出したものを図-31 に示す。超音波送信からの経過時間を 3,000 μ s ~ 8,000 μ s で抽出したものである。

反射波の受信時間は、前節の双胴フロートによる計測結果 (図-22) と比較し、安定していることがわかった。これは、ROV の深度・方向保持機能により、送受波器の姿勢が安定していたためと考えられる。

振幅のピークを 0 μ s とし、ピーク前の 100 μ s からピーク後の 300 μ s までを抽出したものを図-32 に示す。

個別の波形を確認したところ、285 点のデータのうち 108 点 (約 38%) のデータについて、反射波の形状が明瞭であることを確認した。前項の双胴フロートによる計測では、反射波の形状が明瞭なデータは 250 点のうち 29 点 (約 12%) であったため、約 3 倍のデータを取得することができた。

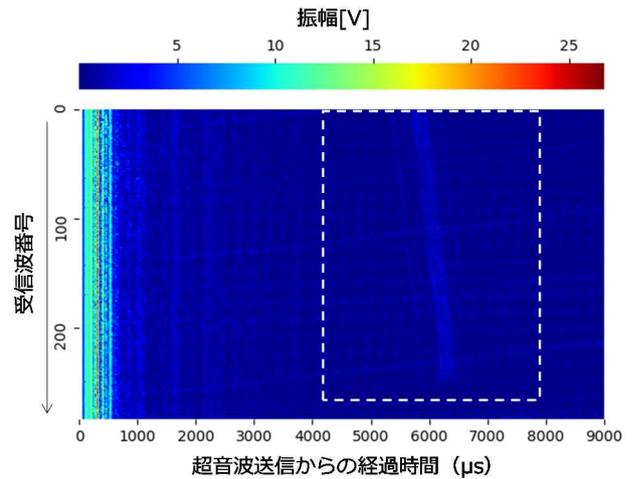


図-30 計測結果

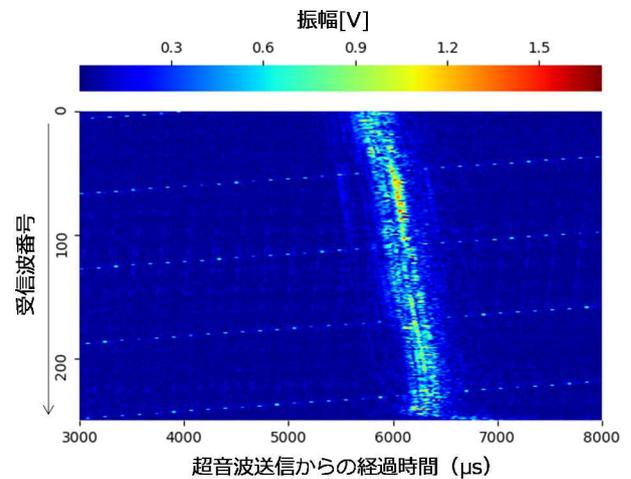


図-31 解析結果 (1次波)

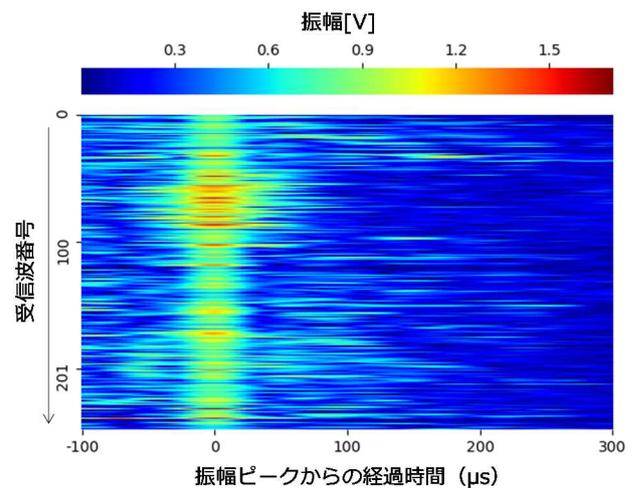


図-32 1次波の振幅

3. 4. 3 調査技術のとりまとめ

ROVによる調査に必要となる、人員および資機材等を表-6に示す。

人員は4名程度で、資機材の運搬は商用ワンボックス1台で可能である。陸上からの計測が可能であれば、計測用機材をワンボックス車内に設置することもできる(写真-12)。

ROVの投入はクレーン付トラックを標準とするが、浅瀬やスロープなど人員が入っていける箇所があれば、人力による投入も可能である。なお、投入にクレーン付トラックを使用する場合は、投入後にフックを外す対策を行う必要がある。

現地に到着してから計測を開始するまでの準備時間は、1時間程度である。バックホウによる計測では、バックホウへの装置架装に約1日かかったことから、準備時間は大幅に短縮された。

表-6 必要人員、資機材等

必要人員	4名程度※1
運搬車両	商用ワンボックス 1台
ROV投入機材	クレーン付トラック 4t2.9t吊※2
発動発電機	インバータ付 2.0kVA
準備時間	1時間程度

※1 人員はROVの投入箇所に車両で近づく場合であり、車両から離れた箇所への運搬が必要な場合は増員となる

※2 投入箇所が浅瀬等で人が入れる場合は、人力での投入も可能



写真-12 計測用機材設置状況

3. 5 診断手法のとりまとめ結果

現地計測試験では、平均値の相関により波形を確認したが、反射波の形状にはバラツキが見られ、平均値では正しく診断できない可能性がある。そこで、個別の波形の特徴を解析したうえで、反射波の形状を客観的に評価するため、機械学習の一つである教師あり学習の適用を検討した。

3. 5. 1 教師あり学習の適用方法の概要

教師あり学習の適用イメージを図-33に示す。教師あり学習では、個別のデータから特徴を学習し、算出した特徴量により新しいデータの評価を行う。そこで、室内試験で使用した供試体N50~N80の反射波のデータを学習用データとして特徴量を算出し、現地計測試験データの予測を行うことで、その適用性について検討した。

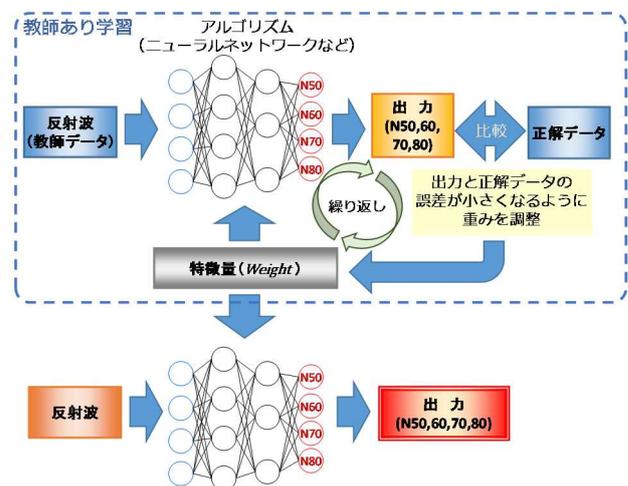


図-33 教師あり学習の適用イメージ

3. 5. 2 学習データの選定

学習用データとして使用したデータを図-34に示す。供試体N50~N80の反射波について、バンドパス処理により1次波を抽出後に包絡線処理を行い、標準化処理を行った。振幅がピークとなる時間を0 μ sとし、150 μ sまでを抽出したものを学習用データとした。

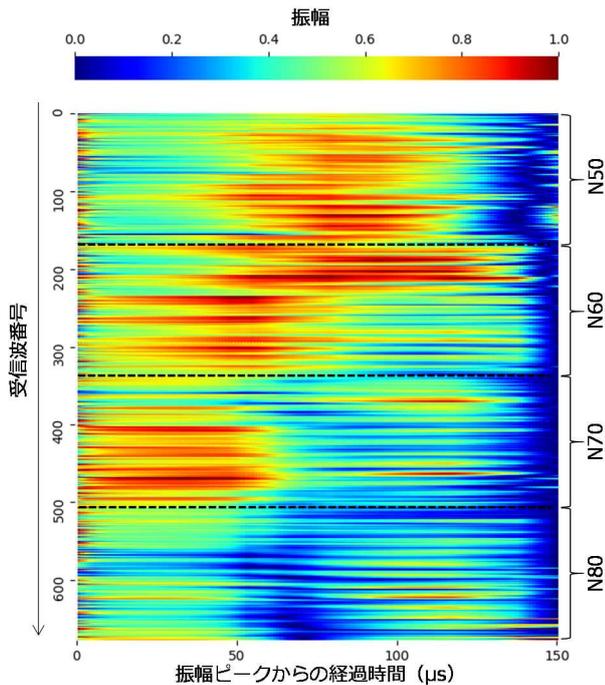


図-34 学習用データ

3. 5. 3 教師あり学習の設定

教師あり学習の設定値を表-7に示す。

学習用のアルゴリズムはニューラルネットワークとし、入力数は振幅ピークからの経過時間である 0μs ~ 150μs の振幅値、出力は N50~N80 の 4 種類とした。

表-7 教師あり学習の設定値

項目	設定値
アルゴリズム	ニューラルネットワーク
入力数	151
出力数	4 (N50,N60,N70,N80)
中間層数	3
中間層ニューロン数	20
学習繰り返し回数	10000
学習率	0.001
活性化関数	ReLU
最適化手法	Adam

3. 5. 4 現地計測試験データの出力結果

教師あり学習により算出した特徴量により、現地計測試験データの出力を行った。

出力結果を表-8に示す。使用したデータは、河床護岸 29 点、およびダム堤体部 108 点のデータで、それぞれを N50、N60、N70 および N80 のいずれかに出力されたかを確認した。

表-8 現地計測試験データの出力結果

		N50	N60	N70	N80
河床護岸 (29 点)	評価数	0	14	10	5
	割合	0%	48%	35%	17%
ダム堤体 (108 点)	評価数	10	67	14	17
	割合	9%	62%	13%	16%

河床護岸では、N60 と出力された点が 14 点と最も多く、N70 も 10 点と多かったが、N80 は 5 点と少なく、N50 は 0 点となった。

ダム堤体では、N60 と出力された点が 67 点と突出して多かったが、N50、N70 および N80 と出力された点も各 10~17 点あった。

評価結果にはバラツキが生じたが、圧縮強度試験やリバウンドハンマー試験においてもバラツキが生じることから、バラツキの傾向を把握することで、圧縮強度の推定に活用できると考えられる。

3. 5. 5 プログラム作成

教師あり学習の適用手法についてとりまとめ、データ処理を行うプログラムを作成した。プログラム構成を図-35に示す。

本プログラムの機能は、大きく「データ下処理」と「教師あり学習処理」に分けられる。

パラメトリックソナー処理用プログラム

データ下処理

- ・ファイル結合
- ・周波数分析
- ・バンドパス処理
- ・逆フーリエ変換
- ・包絡線処理
- ・距離フィルター処理
- ・アベレージング処理
- ・振幅フィルター処理
- ・振幅ピーク検出
- ・標準化処理

教師あり学習処理

- ・学習データ生成
- ・教師あり学習処理
(ニューラルネットワーク)
- ・データ予測

図-35 プログラム構成

1) データ下処理

パラメトリックソナーにより計測した受信波について、今回の解析で実施したバンドパス処理、包絡線処理、振幅ピーク検出および標準化処理まで、一連のデータ処理を行う機能である。

入力フォームでは、受信波のサンプリング周波数や超音波の伝搬速度、バンドパス処理の周波数範囲の設定等が行うことができる（図-36）。

図-36 入力フォーム（データ下処理）

2) 教師あり学習処理

データ下処理により作成したデータをもとに学習用データを生成し、教師あり学習を行う機能である。また、教師あり学習により出力された特徴量をもとに、新規入力データの予測を行うことができる。

入力フォームでは、正解ラベル、学習の繰り返し回数や学習率、活性化関数の設定などを行うことができる（図-37）。

図-37 入力フォーム（教師あり学習）

4. まとめ

本研究では、コンクリート構造物水中部の定量的な劣化度診断技術の提案を目的に、超音波のパラメトリックソナーを活用した非接触・非破壊で劣化度を調査する技術、および劣化状態を客観的に診断する手法について検討を行った。その結果、以下のことがわかった。

- 1) パラメトリックソナーによる水中コンクリート供試体の内部音速の計測は困難であったが、供試体により反射波の形状に違いが現れることがわかった。
 - 2) 表面形状が同じく圧縮強度が異なる供試体を製作し、反射波を分析した結果、反射波の形状の違いは表面形状によるものでは無いことがわかった。
 - 3) 河床護岸にて現地試験を実施し、データを解析した結果、反射波の形状は、圧縮強度の近い供試体との相関係数が最も高い結果となった。この結果から、反射波の形状の違いは、圧縮強度の違いが影響している可能性が高いことがわかった。
 - 4) ROV による計測技術を開発し、ダムにて現地試験を実施した結果、ROV の水深・方位保持機能により、ボートを使用した場合に比べて送受波器の姿勢が安定し、明瞭な形状の反射波が多く得られることがわかった。この結果から、ROV による調査技術についてとりまとめを行った。
 - 5) 劣化状態を客観的に診断する手法として、教師あり学習の適用について検討した。その結果、圧縮強度の推定に活用できる可能性が確認できたことから、適用手法についてとりまとめ、ソフトウェアを作成した。
- 今後は、現地データを収集し、より多くの教師データを取得することで、圧縮強度推定精度の向上を行っていく必要がある。

謝辞： 現地試験にご協力いただいた国土交通省北海道開発局に感謝いたします。

参考文献

- 1) 国土交通省ホームページ： http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/02research/02_01.html (2021.5 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) 岸寛人、山口和哉、大槻敏行：超音波を用いた岸壁水中部の内部点検技術について、寒地土木研究所月報、No.761、pp.11-19、2016

- 4) 次世代社会インフラ用ロボット現場検証委員会、水中維持管理部会：次世代社会インフラ用ロボット開発・導入の推進 水中維持技術の現場検証・評価の結果、2015
- 5) 第一検査株式会社ホームページ：<http://www.fi-c.jp/business/underwater/ultrasonic> (2021.5 確認)
- 6) RTD B.V. Netherlands、Advantec-IS 株式会社、若築建設株式会社：RTD-INCOTEST、NETIS 新技術情報提供システム、登録番号 KKK-140002-VR、2014.11.6 登録
- 7) 渡邊晋也：水中コンクリート構造物の非破壊検査手法に関する研究、建設の施工企画、No.735、pp. 66 - 69、2011
- 8) 渡邊晋也、迫田恵三、鉄芳松、望月智弘：水中リバウンドハンマーを用いた水中不分離性コンクリートの品質管理に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.28 No.1、pp.1925-1930、2006
- 9) 川崎地質株式会社：鉄筋コンクリート対応型空洞調査用 GPR システム、NETIS 新技術情報提供システム、登録番号 QS-150036-A、2016.2.15 登録
- 10) 九郎丸俊一、中西清史、久保聖治、海老名明弘、江澤弘造：自律制御による姿勢安定航行型ダム点検ロボットと損傷解析システム、Panasonic technical journal、Vol.64 No.1、pp.48-53、2018
- 11) 杉本英樹、小笠原哲也、森屋 陽一：遠隔操作無人探査機による水中構造物診断システム、日本ロボット学会誌、Vol.34 No8、pp.505-506、2016
- 12) いであ株式会社ホームページ：https://ideacon.jp/technology/leaflet/e4-13_rov.html (2021.5 確認)
- 13) 海洋音響学会：海洋音響の基礎と応用、成山堂書店、pp.277-279、2004
- 14) F. Madricardo, S. Buogo, P. Calicchia, G. B. Cannelli, S. Donnici, A. Lezziero. : Acoustical Prospecting in Extremely Shallow Water in The Venice Lagoon, Proceedings of the Eighth European Conference on Underwater Acoustics, 2006
- 15) 振動技術研究会：ISO に基づく機械設備の状態監視と診断（振動 カテゴリーⅢ）、pp.103-104、2010
- 16) 木村芳幹：超音波トモグラフィ法によるコンクリート構造物品質の推定、GBRC、Vol.33 No.2、pp.13-21、2008
- 17) 国土地理院ウェブサイト：<https://www.gsi.go.jp>

A STUDY ON DETERIORATION DIAGNOSIS FOR UNDERWATER SECTIONS OF CONCRETE STRUCTURES

Research Period : FY2016-2020

Research Team : Director for Cold-Region
Technology Development
Coordination
(Machinery Technology)

Author : OTSUKI Toshiyuki

IWAO Hiroshi

KATANO Koji

TADOKORO Noboru

SAWAGUCHI Shigeo

NAKAJIMA Junichi

EINAGA Tetsuya

HIRACHI Kazunori

KISHI Norihito

KOBAYASHI Yuichi

Abstract : Infrastructures developed intensively since the period of rapid economic has deteriorated all age at the same time, and with regard to underwater sections of concrete structures, too, there are concerns about deterioration and damage over time. However, as most inspections are in the form of visual checks carried out by divers, it is difficult to understand the quantitative deterioration status. In order to ensure the safety and reliability of structures, it is necessary to accurately comprehend the deterioration status and take planned measures. Therefore, in order to proposing a quantitative deterioration diagnosis method for underwater sections of concrete structures, we conducted experiments regarding non-contact deterioration survey using the parametric sonar produced in previous research. As a result, it was found that there is a possibility that the compression strength can be estimated, and the survey methods were summarized.

Key words : Soundness, Life extension, Maintenance and Management, Underwater sections of concrete structures, Ultrasound, Supervised learning