

14.7 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

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：技術開発調整監付（寒地機械技術）

研究担当者：大槻 敏行、片野 浩司、
山口 和哉、岸 寛人

【要旨】

寒冷海域においては、近年の気候変動により海水が減少することで、海水の運動が活発化し、水中構造物の劣化を促進させることが懸念されている。劣化損傷が進行した水中構造物では、中詰め材の吸い出しやこれに起因する陥没事故などが発生する危険性がある。また、水中構造物に損傷を与える可能性がある海水の形状や挙動はあまり把握されていない。本研究は、水中構造物内部の劣化・損傷状況探査および可視化技術と、水中構造物に影響を及ぼす海水の形状を調査する技術の開発を目的とする。平成 26 年度は、水中構造物内部の劣化・損傷状況探査および可視化技術については、改良したパラメトリックプローブを用いて試験を実施した。寒地土木研究所内の 2 次元造波水路における試験では、パラメトリックプローブから送信する音波が鋼矢板を透過し、背後のターゲットまでの距離を計測できることを確認した。また実海域試験では、岸壁内部からの反射層を検出できることを確認した。さらに、音響計測技術を利用した沿岸施設に近づく海水の計測技術については、これまでの計測作業やデータをもとに計測装置の設置・計測条件を整理した。

キーワード：水中構造物内部状況、点検技術、パラメトリックプローブ、海水計測技術

1. はじめに

寒冷海域においては、近年の気候変動により海水が減少することで、海水の運動が活発化し、水中構造物の劣化を促進させることが懸念されている。劣化損傷が進行した水中構造物では、中詰め材の吸い出しやこれに起因する陥没事故などが発生する危険性がある。また、建設後50年を経過する岸壁が2020年には全体の約25%、更に2030年には約53%と急速に増加することから、今後一斉に補修や改修が必要となることが予想され¹⁾、近年では図-1に示すように、鋼矢板岸壁の損傷による裏込め土の吸い出しや、それに伴う岸壁内部の空洞化により路面が陥没するなどの事例も発生している。

沿岸域を継続的に利用するためには、沿岸施設の安全性の向上や効率的な保全対策が必要であり、従前の事後的維持管理から予防保全的管理へと転換し、戦略的な維持管理による機能の保持が求められている。

一方、現状の水中構造物の点検調査は、主に潜水土により実施されているが、人材不足やコスト高などの課題がある。また、効率的に水中で構造物の内部探査を行う技術は現在なく、管理者の要望は高い。

本研究では、水中構造物の内部状況を探査可能とし、

可視化する計測技術を開発する。また水中構造物に対する海水の影響を把握するため、寒冷海域の沿岸施設に近づく海水の下面形状や挙動を超音波計測機器を利用して効率的に計測する技術を開発する。

本研究は、東京大学生産技術研究所との共同研究（研



図-1 損傷した鋼矢板岸壁（上）と内部の空洞化により陥没した岸壁（下）

究期間：平成 26～27 年度、研究題目：「水中構造物内部状況の画像化点検技術に関する研究」にて行っている。

2. 水中構造物内部の劣化・損傷状況探査および可視化技術の開発

2. 1 水中構造物内部空洞探査装置の開発

現在、岸壁エプロン下部の点検には、非破壊で路面下空洞探査を行える地中レーダ探査法が採用されている。地中レーダ探査法とは、地上から地中に向けて電磁波を照射し、空洞などからの反射波を測定することで地中の状況を推定・把握する手法である。しかし、電磁波は水分を多く含んだ地中では減衰するため、水中構造物の海面以下では地中レーダによる探査は困難となる^{2,3)}。

これらの課題に対して、超音波のパラメトリック送信技術を利用した水中構造物内部点検手法の開発に取り組んでいる。パラメトリック送信技術は、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で発生する差音（2 次波）を利用する技術である。2 次波は透過性および指向性に優れているという性質を持っており、海底下地層探査技術として利用されている⁴⁾、⁵⁾。この技術を応用して、海中から水中構造物内部の点検を行う手法を研究している（図-2）。

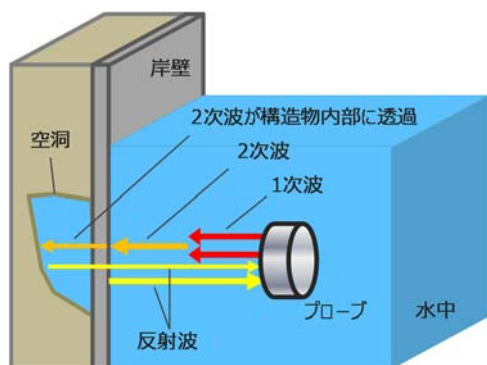


図-2 計測方法

平成 23 年度は事前確認試験として、海底下地層探査に使用される市販のパラメトリックソーナー（SES2000、Innomar 社）を用いて岸壁上部から内部空洞探査試験を行い、パラメトリック送信技術の内部空洞探査への有効性を確認した。この結果を受け、平成 24 年度は前述のパラメトリックソーナーよりも指向性の高いパラメトリックプローブを試作し性能試験を実施したが、透過性能が低いことがわかった。このため平成 25 年度は、透過性能を高めるため、大音圧の音波を生成可能な仕様を検討し、パラメトリックプローブを改良した（図-3）。また、水中構造物の計測に使用する各機器の設置、設定および

計測を簡易な操作で行うことを可能とする岸壁音響計測システムについて仕様を検討した。

平成 26 年度は、寒地土木研究所第 4 実験棟内の 2 次元造波水路（以下「試験水路」という）および北海道内の港においてパラメトリックプローブの性能試験および現場適合性試験を実施した。また、平成 25 年度に仕様を検討した岸壁音響計測システムを作成した。



図-3 パラメトリックプローブ

2. 2 試験水路におけるパラメトリックプローブの透過性能確認試験

2.2.1 試験方法

寒地土木研究所の試験水路（長さ 85m、幅 1.6m、深さ 3m）を使用し、パラメトリックプローブから送信する音波が鋼矢板を透過するか確認試験を行った。試験方法および試験状況を図-4、5 にそれぞれ示す。水路底面から水面までの深さは約 1.1m であり、パラメトリックプローブの中心が水路幅方向の中央、水面から 0.5m の深さになるよう単管で固定した。次にパラメトリックプローブ前面から 1m の位置に鋼矢板（IIw 型、有効幅 600mm、有効高さ 130mm、厚さ 10.3mm）を設置した。その際、ターゲットからの反射波が鋼矢板の周囲を回り込んでこないように、鋼矢板の両側に木板を設置し、水路を塞いだ。そしてパラメトリックプローブから 1.5m の位置にターゲットを沈め、1.5m→1m→1.5m と移動さ

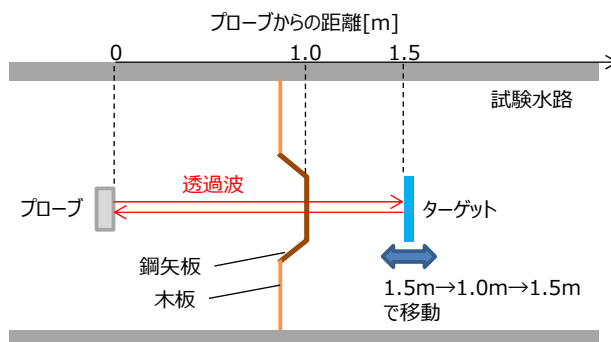


図-4 試験方法概略図

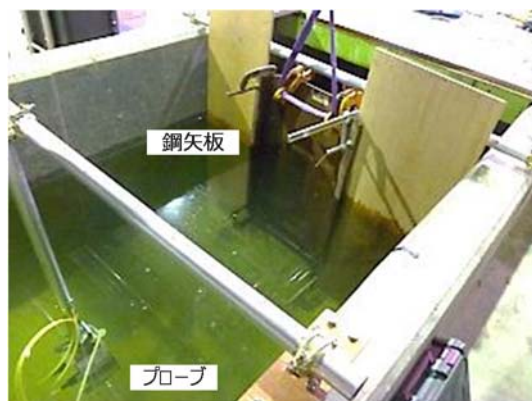


図-5 試験状況



図-6 ターゲット

せ、その様子を計測した。強い反射を得られるようターゲットには、EVA樹脂板（幅600mm、長さ845mm、厚さ20mm、図-6）を使用した。

2.2.2 試験結果

図-7に試験結果を示す。2次波周波数は5kHzである。まずパラメトリックプローブから1mの位置に強い反射が見えている。これは鋼矢板の表面からの反射である。次に、図中Aの位置から反射が現れ、時間とともに1.5mから1mまで近づき、再び1.5mまで離れ、Bの位置で消えていることがわかる。これが鋼矢板の後ろで前後に移動させたターゲットからの反射である。Aの位置で現れるのは計測を開始してからターゲットを水中（パラメトリックプローブの音軸上）に投入したため、Bの位置で消えるのはターゲットを水上に回収したためである。また、ターゲットからの反射より遠い位置に複数の線が見えている。この内、2m→1m→2mおよび2.5m→1m→2.5mと移動している線は鋼矢板とターゲットの間で発生した多重反射である。また、機械振動も含まれていると考えられる。

以上により、パラメトリックプローブから送信する音波が鋼矢板を透過し、背後のターゲットまでの距離を計

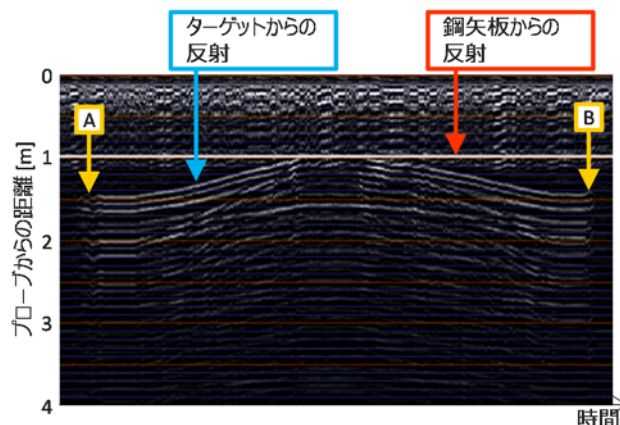


図-7 試験結果

測できることを確認した。

2. 3 実海域試験

2.3.1 試験方法

本装置を使用して、北海道内の港において実海域試験を実施した。計測方法については平成25年度に、バックホウのバケットに計測装置を取り付ける方法を検討、試行し、精度の高い計測を行えることを確認しており、平成26年度の試験も同様の方法で実施した（図-8）。バックホウのバケットに計測機器昇降装置を固定し、そこにパラメトリックプローブ、モーションセンサ（DMS-05、Teledyne TSS社、UK）、GPS移動局アンテナ（SPS851、Trimble社、USA）、GPS方位計アンテナ（SPS552H、Trimble社、USA）を取り付けた。データ収集用PCやGPS受信機本体等はバックホウ上部の旋回体側面に取り付け、計測機器収納ボックス内に固定した。各計測機器のケーブルはバックホウのアームに沿わせて、計測機器収納ボックスまで配線した。

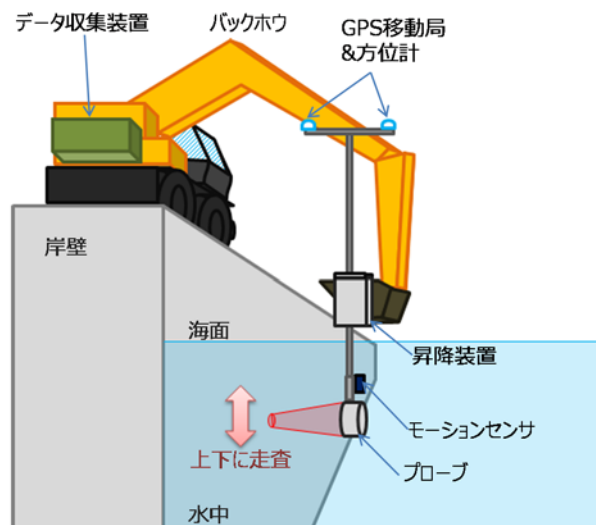


図-8 計測方法概略図

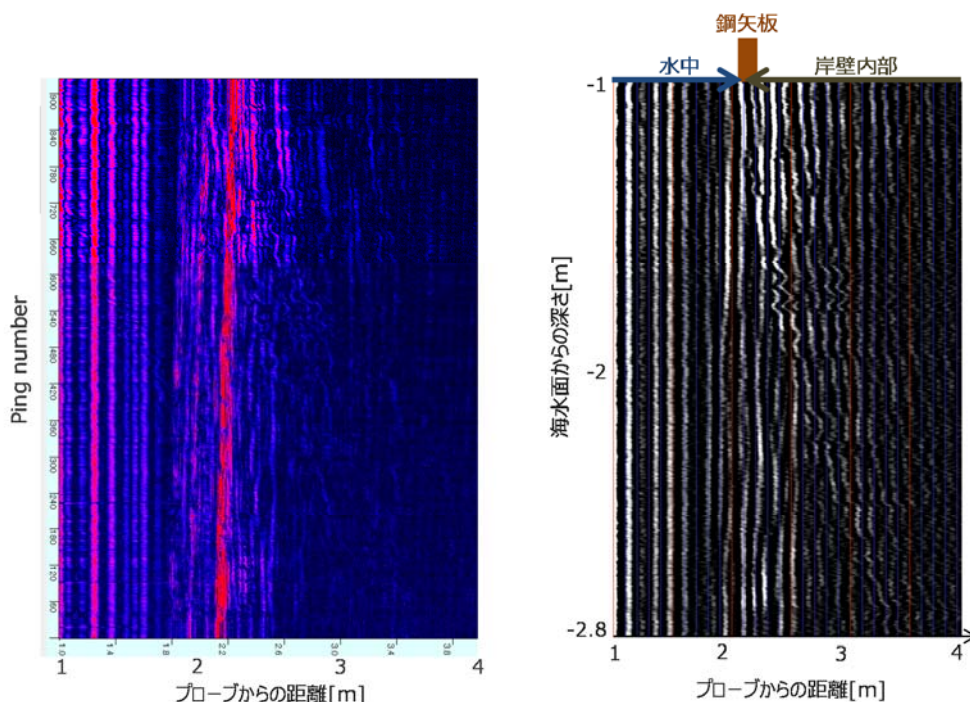


図-9 計測データ（左）と解析データ（右）

2.3.2 試験結果

バックホウを停止させた状態で、パラメトリックプローブを水深 2.8m の位置に垂下し、そこから水深 1m まで上昇させ、岸壁内部計測を行った結果について、図-9 に示す。計測した岸壁は鋼矢板岸壁である。岸壁の上部工に設置されている防舷材との接触を避けるため、パラメトリックプローブと岸壁の距離は約 2m とした。2 次波周波数は 8kHz である。

パラメトリックプローブから約 2.2m の位置に反射が見られ、岸壁表面を表している。次に、パラメトリックプローブからの距離が約 2.3m、水深約 1.6m の位置から、右斜め下に向かう反射層が見えており、これは岸壁内部からの反射を表している。この反射層は、異なる材質の境界や、水分を多く含む部分とそうでない部分の境界などの可能性が考えられる。

2. 4 岸壁音響計測システム作成

水中音響機器による水中構造物の調査では、音響プローブなどに加え、GPS やモーションセンサなど多数の機器を同時に使用するが、機器の設置や配線が煩雑であり計測開始までに時間がかかる。また各計測機器の設定が複雑であり制御ソフトウェアも異なるため、操作に習熟していないと設定ミスやデータ欠測が生じる可能性がある。また、実際の計測現場では計測できる時間は限られているため、短時間で確実に設定作業を行う必要がある。そこで、各機器の設置、設定および計測を簡易な操作で行うことを可能とするシステムについて、平成 25 年度

に仕様を検討し、平成 26 年度に作成した。詳細を以下に示す。

① 計測機器取付用機材

計測準備および撤去に要する時間を短縮するために、計測機器収納ボックスおよび収納ボックス取付台を製作した（図-10、11）。計測機器収納ボックス内に各計測機器の電源ボックスおよび受信機本体を整理して配置し、バックホウに取り付けた収納ボックス取付台に固定して使用する。計測機器収納ボックス内に一度すべての機器を固定すれば、次回の計測からは各計測機器のケーブルを接続するだけで計測状態となる。



図-10 収納ボックス内部



図-11 バックホウに取り付けた収納ボックスと収納ボックス取付台

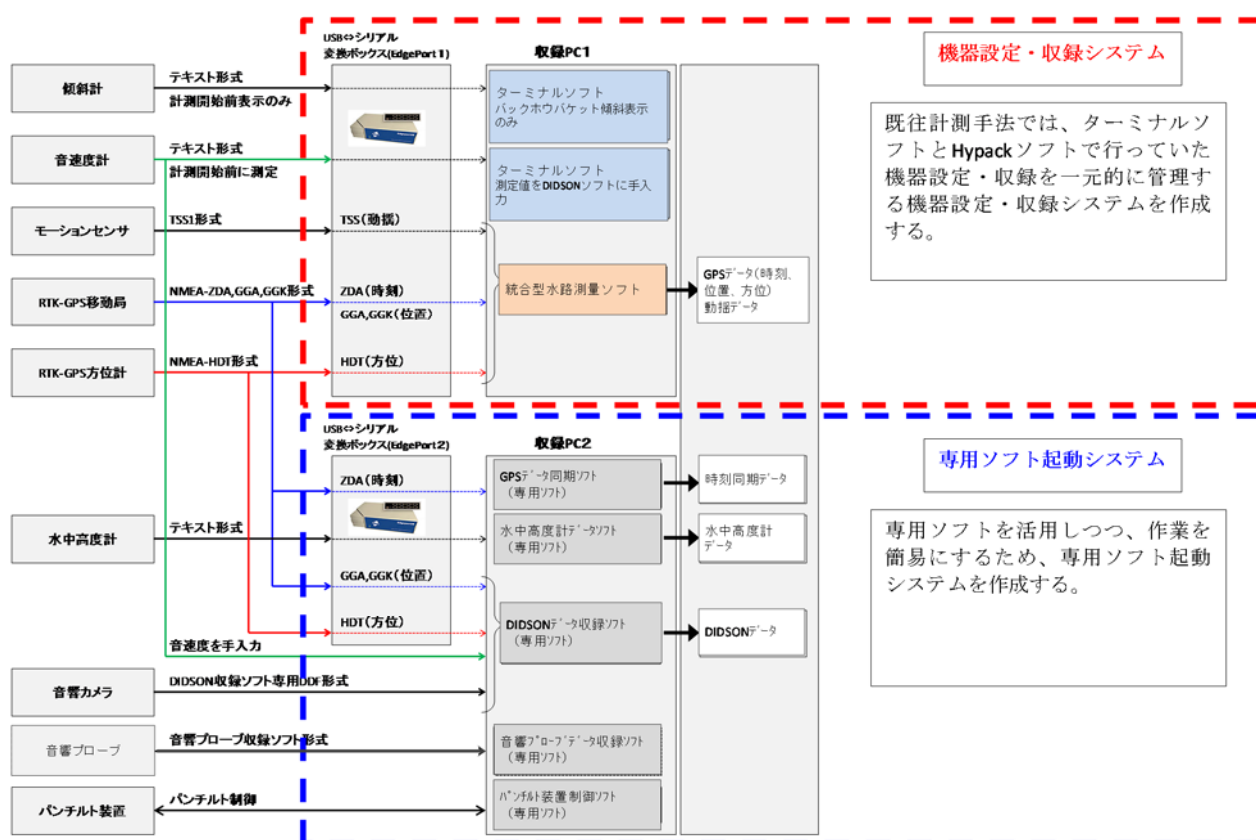
② 専用ソフト起動システムおよび機器設定・収録システム

本手法で使用している機器には、音響カメラやパラメトリックプローブ、パンチルト装置、水中高度計のように専用の計測・制御ソフトウェアによりデータを取得するものと、GPS受信機やモーションセンサ、傾斜計、音速度計のように専用の収録ソフトウェアをもたないものがある。

そこで前者については、「専用ソフト起動システム」を作成し、1つのソフトウェアからそれぞれの専用の計測・制御ソフトウェアを起動することで、計測作業を簡易に行えるものとした。後者については、各計測機器の設定作業を一元的に1つのソフトウェア上で行えるようにするため、「機器設定・収録システム」を作成した。1つのソフトウェア画面上に各計測機器のデータをリアルタイムに表示させることで、データを正常に取得できているか、取り忘れないかを常時確認しながら設定作業を行うことができるものとした（図-12、13）。

またそれぞれのシステム画面上に、基本的な操作方法および通常の計測に使用する設定値を記載したマニュアル表示ボタンを設置し、使用者が効率的に設定・計測作業を進められるものとした。

これらにより、計測作業における設置作業時間の縮減、設定作業の正確さを向上させることができる。



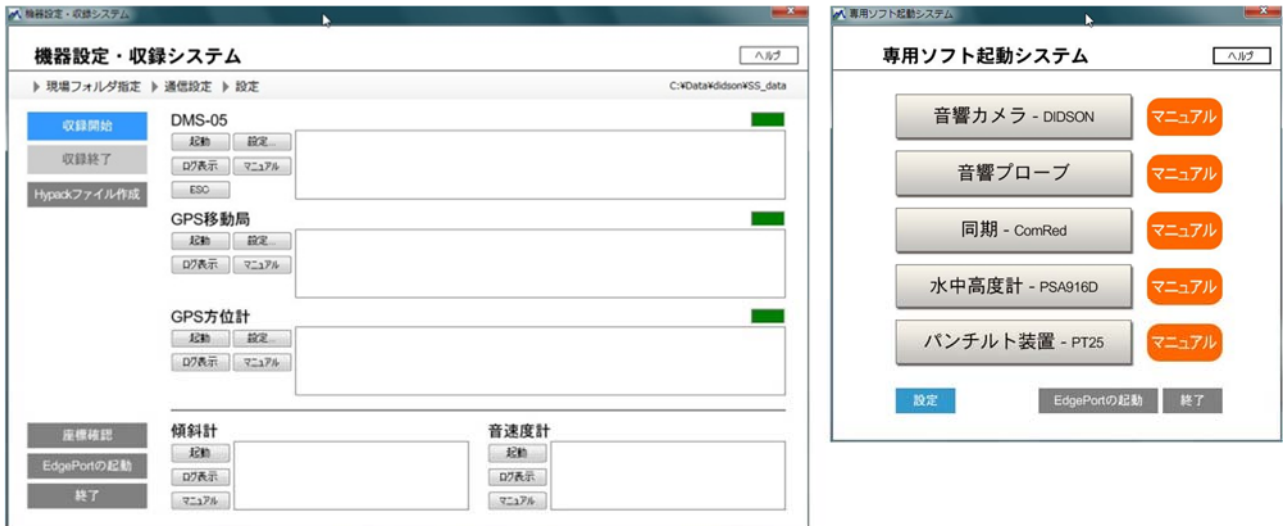


図-13 機器設定・収録システムおよび専用ソフト起動システム画面

3. 音響計測技術を利用した沿岸施設に近づく海水の計測技術の開発

平成 24 年度以降、電動回転装置（パンチルト装置）にマルチビームソナーを取り付け鉛直軸周りに一定速度で回転させることで海水下面を計測する装置を作製し計測を行っている（図-14）。本装置は鉛直軸から 60 度傾いた方向にマルチビームソナーの送波ファンビームの中心が向くように取り付け回転計測することで、海底から海水下面形状を計測するものである（図-15、16）。

平成 26 年度はこれまでの計測作業やデータをもとに、

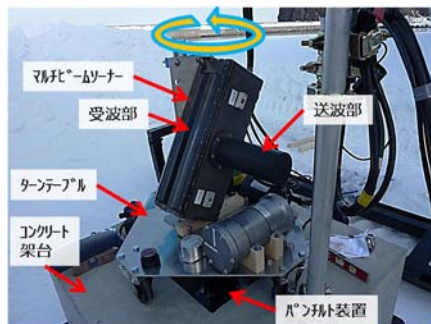


図-14 計測装置

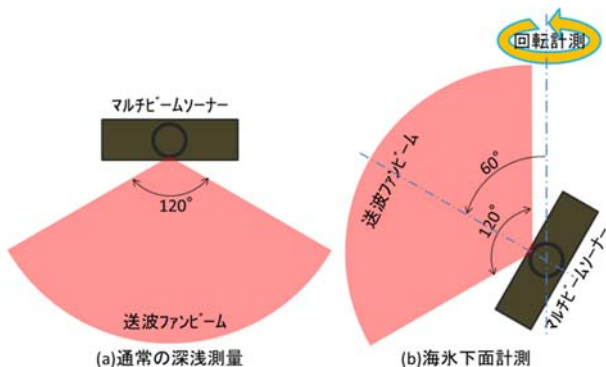


図-15 マルチビームソナー設置向き

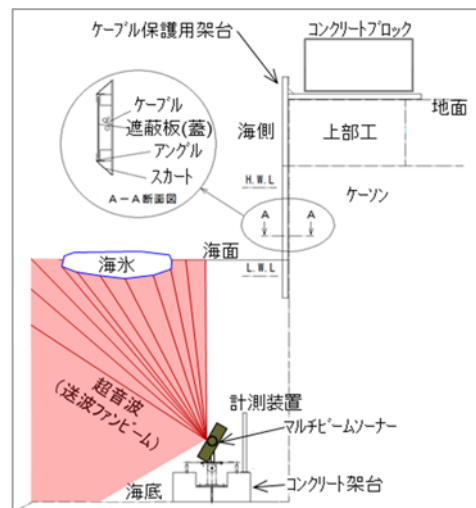


図-16 計測手法

本装置の設置・計測条件を整理した。

3. 1 設置条件

本装置の設置方法上、計測の際には以下の条件について確認する必要がある。

- ・重機の進入可否

計測箇所 snowy 多く積もっている場合はバックホウやホイールローダ等で除雪を行う必要がある。また、計測装置設置箇所が結水している場合はバックホウにより砕氷する必要がある（図-17）。よってこれらの重機が進入できるか確認する。

- ・設置作業スペース

これまでの計測ではクレーン付きトラックを岸壁に平行に配置し、トラックの横方向に装置を下ろす方法で設置作業を行っている。計測準備作業場所および計測用車両設置位置（データ収録用 PC 等を設置した車両）はこ

のトラックの周囲となる。よって図-18 に示すように、岸壁に垂直な方向に10m程度、岸壁に平行な方向に20m程度のスペースが必要となる。

また、過年度の計測では7.5m 岸壁で行っており、計測装置を吊るワイヤロープは 10m のものを使用した。この場合、計測装置を吊り上げる際、クレーンブーム先端は 11m 以上の高さまで立ち上がることになる。図-19 のような 2 階部分などがある施設の場合は、計測装置の吊り上げ時に、クレーンと施設が干渉することなく作業できるか確認する必要がある。

・重機等の待機場所

これまでの計測では、計測中、緊急的に計測装置を引き揚げる場合に備えて、クレーン付きトラックおよび、砕氷用バックホウを待機させており、そのための場所を確保する必要がある。

・海底面の傾斜、起伏

本手法ではターンテーブル上に設置したマルチビームソナーを回転させて計測するが、海底面に傾斜や起伏があることによりコンクリート架台が斜めに設置されると、解析結果で海面が水平にならない。よって海底の起伏が小さく、傾きも小さい箇所を選定し、設置時には計測装置のターンテーブルに取り付けている傾斜計により、計測装置の傾斜を確認する。

・計測装置係留用ワイヤロープ固定箇所

計測装置は 10m のワイヤロープ 4 本をクレーンで吊り、海底に設置しているが、装置の漂流を防ぐためのこれらのワイヤロープを装置の固定にも使用している。そのため岸壁上にワイヤロープを固定できる箇所（係船柱など）が必要となる。またワイヤロープの取り回しには、計測装置の回転を妨げないように注意する。

3. 2 計測条件

計測作業は気象・海象条件および海水の状態に影響を受ける。これまでの計測において、港内における実際の海水を観察し、以下のような状態があることを確認している。

- ① いくつかの海水塊がまばらに浮遊し非常に遅い速度（分速 1m 程度）で移動している場合
- ② 全面結氷してほとんど動きがない場合（潮位の変化による上下動はあり）
- ③ 港内に密集した海水塊が波浪によりうねる場合

このうち、①と②の場合はどちらも穏やかな気象条件であった。これらの場合では、設置作業を安全に行うことができ、また計測機器のケーブルが海水塊により切断される心配がなかったため、ケーブル保護架台を設置す

る必要がなく、その分の作業量を減らすこともできた。特に①の場合はバックホウによる砕氷作業の必要もなく、さらに作業量を減らすことが可能であり、これらのような条件下で計測を行うことが適切である。

一方、③のような動きが激しい場合については、設置作業の危険性、海水塊の接触や衝突によるケーブルの切断や計測機器の破損の危険性が高まる。このような状況では、設置・計測作業が危険である上、装置の性能面でも計測に適していない。しかし、長期的に装置を設置する必要がある場合には、このような状況に遭遇することを考慮し、ケーブル保護架台を設置しケーブルを保護するとともに、計測用車両を岸壁から遠ざける等の安全対策が必要となる。



図-17 バックホウによる砕氷作業

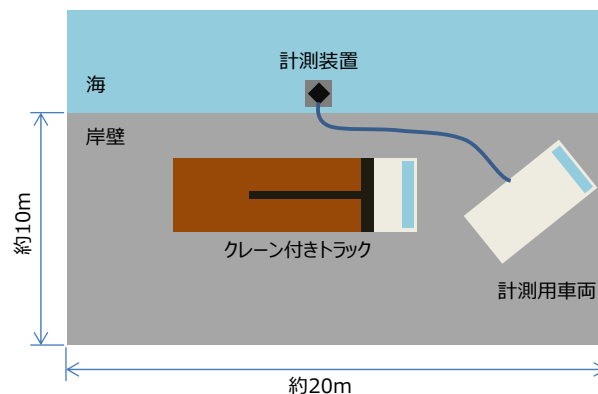


図-18 計測装置設置作業範囲（平面図）



図-19 計測装置設置作業

4. まとめ

水中構造物内部の劣化・損傷状況探査および可視化技術の開発については、改良したパラメトリックプローブを用いて試験を実施した。試験水路における試験では、パラメトリックプローブから送信する音波が鋼矢板を透過し、背後のターゲットまでの距離を計測できることを確認した。また実海域試験では、岸壁内部からの反射層を検出できることを確認した。

音響計測技術を利用した沿岸施設に近づく海氷の計測技術の開発については、これまでの計測作業やデータをもとに本装置の設置・計測条件を整理した。

参考文献

- 1) 藤原弘道：港湾施設の戦略的な維持管理・更新の取り組みについて、建設マネジメント技術、第 414 号、pp. 28-32、

2012. 11.

- 2) 利岡徹馬：レーダ探査による河床部探査実験、地質ニュース、537 号、pp. 24-28、1999. 5.
- 3) 小池豊、三木偉信：三次元地中レーダを活用した鋼矢板岸壁エプロン部の補修履歴と吸出し空洞の評価、海洋開発論文集、第 26 号、pp. 171-176、2010. 6.
- 4) 海洋音響学会編：海洋音響の基礎と応用、pp. 277-280、2009. 3.
- 5) F. Madricardo, S. Buogo, P. Calicchia, G. B. Cannelli and A. Lezziero, “Acoustical Prospecting in Extremely Shallow Water in The Venice Lagoon: First Results and Comparisons”, Proceedings of the Eighth European Conference on Underwater Acoustics, 2006. 6.

STUDY ON UNDERWATER SURVEY TECHNOLOGY FOR COASTAL FACILITIES IN COLD SEA AREAS

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2011-2015

Research Team : Director for Cold-Region Technology

Development Coordination

(Machinery Technology)

Author : OTSUKI Toshiyuki

KATANO Koji

YAMAGUCHI Kazuya

KISHI Norihito

Abstract : In cold sea areas, recent environmental changes have led to greater movement of sea ice, thereby raising the risk of accelerated deterioration in underwater structures. As a result, filling materials in aging coastal facilities may be lost, which can lead to structural collapse. However, as no investigation of sea ice forms that may damage underwater structures has been conducted, the related impacts are not understood. Accordingly, this study was intended to develop a measurement technique that can be used to determine the inside states of underwater structures and a technique for surveying sea ice forms that may impact coastal facilities. In FY2014, water channel experiments and field experiments were carried out by using the improved parametric acoustic probe for development of an inspection technique for inside states of underwater structures. It was found that the sound transmitted by parametric probe can penetrate a sheet pile and measure the distance to a target or a reflection layer behind the sheet pile. Installation requirements of the measurement device and measurement condition for sea ice measurement were collected based on the data and records of the past experiments.

Key words : inside states of underwater structures, inspection technique, parametric acoustic probe, sea ice measurement technique