

平成24年度

# 港湾構造物内部探査技術の開発について

(独)土木研究所 寒地土木研究所 寒地機械技術チーム ○岸 寛人  
国立大学法人 東京大学 生産技術研究所 浅田 昭  
国立大学法人 熊本大学 沿岸域環境科学教育研究センター 秋元 和實

老朽化する港湾・漁港構造物の効率的な維持管理手法に資することを目的として、水中構造物内部の空洞化および表面の欠損状況を計測・可視化する技術の開発を行っている。平成23年度は、海底下の地層探査に利用されているパラメトリックソナーを用いて、コンクリート構造物の内部状況探査試験を行い、有効性を確認した。また、より指向性の良い音波を送信できる音響プローブを試作し性能試験を行ったので報告する。

キーワード：港湾構造物、内部状況探査、空洞化、パラメトリックソナー

## 1. はじめに

港湾施設のストックは、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%と急速に増大することから、今後一斉に補修や改修が必要となることが予想される。<sup>1)</sup>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事例も発生している。

安全で安心な沿岸域を継続的に利用するためには、港湾・漁港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、経済的な維持管理による機能の保持が求められている。

一方、現状の港湾・漁港施設の水中構造物の点検調査は、主に潜水士により実施されているが、人手不足、低水温時の効率の低下、コスト高などの問題がある。また、効率的に水中での構造物内部探査を行う技術は現在なく、管理者の要望は高い。



図-1 左：鋼矢板岸壁の損傷による裏込め土の吸い出し、右：岸壁内部の空洞化により陥没した路面

本研究は、裏込め土の吸い出し状況など水中構造物内部の空洞化および水中構造物表面の欠損状況を併せて計測し、可視化する技術の開発を目標とする。本稿では、この技術の基礎となる計測装置の開発、試験の現況について報告する。

## 2. 水中構造物内部の劣化・損傷状況探査試験

路面下の空洞を探索する技術としては、地中に向けて電磁波を送信しその反射信号を解析する地中レーダ法が知られている。しかし、電磁波は含水比の高い土や水中では減衰が大きいため、残留水位が高い岸壁などでは内部の空洞分布を把握することは困難となっている。<sup>2)</sup>

水中構造物内部空洞把握のための可能性技術調査として、浅田ら<sup>3)</sup>は超音波による非線形現象を応用した市販のパラメトリックソナーを用いて、海中から水平方向に岸壁内部の計測試験を行い、コンクリート裏面の反射波を検出した。

本章では、上述のパラメトリックソナーの内部探査能力について確認試験を行った結果について述べる。

### (1) 計測方法の検討

超音波を用いた距離計測では、音源から対象物に対し音波を送信し、対象物（媒体が変化する境界面など）で反射した音波（反射波）を受信し、送信から受信までの時間差から対象物の距離を求めている。

水中音響で使用される周波数は用途によって様々であるが、音響測深では、計測精度を高めるために指向性や

分解能が良い、高い周波数（数十～数百kHz）の音波を使用する。しかし、水中構造物の内部探査を行う場合、高い周波数の音波はコンクリートや鋼矢板の表面で反射・屈折してしまい、ほとんど透過しない（図-2上）。逆に、透過性が良い、低い周波数では音波の指向性や分解能が劣るため計測精度が下がる（図-2下）。

そこで、高い指向性や分解能を保ちながらコンクリートや鋼矢板を透過可能なパラメトリックソナーを使用した（図-3）。パラメトリックソナーとは、送波器から2つの異なる周波数の音波（1次波）を同時に送信することにより発生する差音（2次波）を利用するソナーである。差音は周波数が低いいため透過性は良い上、指向性も鋭いという特徴をもっているため、海底下数十mの表層探査等に利用されている。<sup>4)</sup>

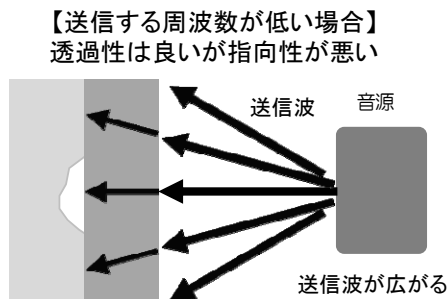
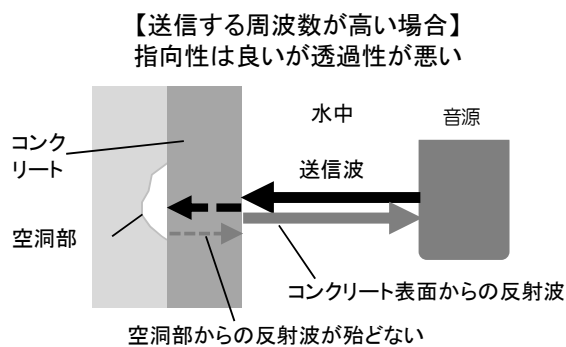


図-2 周波数による音波の性質の違い

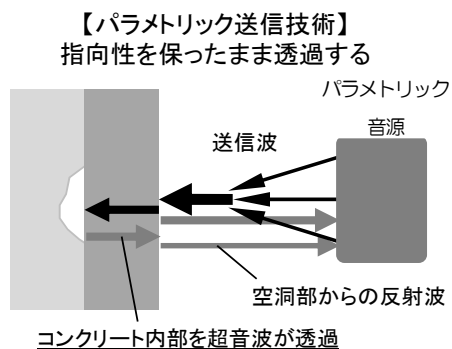


図-3 パラメトリックソナーによる計測

## (2) 現地試験

パラメトリックソナーの構造物内部探査能力確認試験を、北海道開発局室蘭開発建設部室蘭港湾事務所の協力により、追直港で実施した。

### ・試験方法

試験方法を図-4に示す。試験では、市販のパラメトリックソナーSES2000<sup>9)</sup>（Innomar社製、図-5）を使い、岸壁エプロン部から下方の空洞箇所を計測した。岸壁エプロン下にある空洞部を計測するため、海水を満たしたドラム缶上部中央にソナーを南向きに設置した。また、SES2000で使用する周波数帯の超音波は空気中では伝搬しにくいいため、計測方向に空気層ができないよう、湿らせたアスファルト上に布を敷き、その上に散水した後、海水を満たしたレジャー用のプールを介してドラム缶を設置した。

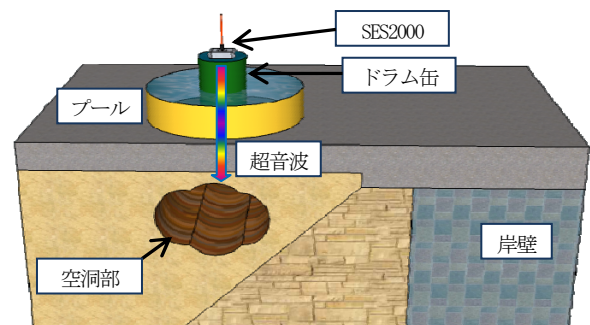


図-4 試験方法



図-5 SES2000（左）と計測状況（右）

### ・試験結果

SES2000は1次波周波数100kHzの音波とそれとわずかに異なる周波数の音波を同時に発信することで2次波周波数を生成する。本試験では2次波周波数10、8、6、5、4kHzを使って透過試験を行った。

図-6に試験結果の一例を示す。上段は健全箇所、下段は空洞箇所での計測した結果である。周波数別の分布図は上方がソナー位置で下方に向かってドラム缶底、アスファルト、地中となる。各々の分布図は送信を100回連続したデータ群であり、白い部分が音波の反射強度が強い箇所、黒い部分が反射の無い箇所を示しており、各反射層が見えている。縦の緑線は振幅を示し、反射強度の強さに比例する。

図において、最初に反射強度の強い箇所が各周波数の同位置に現れたが、これはドラム缶底及びアスファルト上面での反射である。図中、上の赤線は音の伝搬速度を

1,500m/s（水中）とした場合のドラム缶底位置であり、ソナー位置からの距離は0.77mであり、反射強度の強い箇所とほぼ一致する。それより下方の解析では媒質が異なるため音の伝搬速度が変化するが、本試験では音波の反射強度の有無に主眼を置いたため、分布図上の音の伝搬速度は1500m/sで換算している。従って、以深のアスファルト、地中での音の伝搬速度は水中の倍程度になることを考慮する必要がある。ドラム缶底で反射した音波が再び水面で反射することで現れる2回反射の位置も分布図上1.5m付近に確認できる。最も明瞭である10kHzの図について、健全箇所（上段）と空洞箇所（下段）を比較すると、空洞箇所の図だけに図中赤丸部の反射が見えており、空洞を検出していると考えられる。

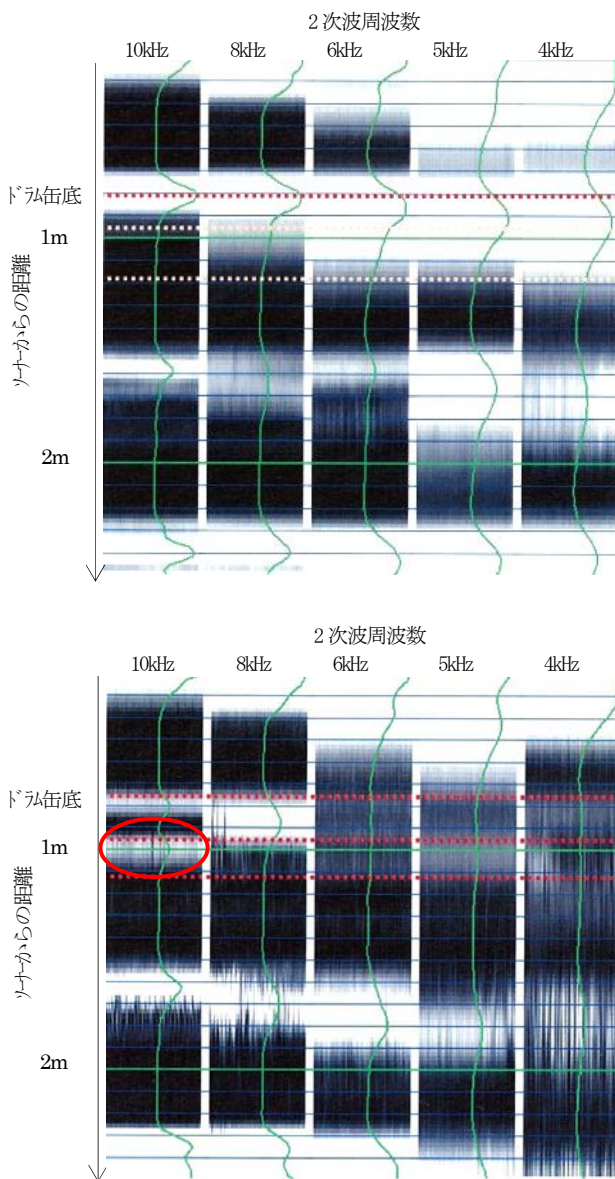


図-6 SES2000による計測結果例（上：健全箇所、下：空洞箇所）

### 3. 音響プローブの試作、性能試験

前述の試験では、海底表層探査用ソナーによりパラメトリック送信技術の利用可能性を確認したが、より指向性の良い音波を用いて構造物探査に適した計測を行うことを目的として、フォーカス音響パラメトリックプローブ（図-7 左、以下、音響プローブという）、信号受信制御回路、パワーアンプを試作した。音響プローブは、送信プローブ60個、受信プローブ33個とそれらを取り付ける保持具とコネクタ、配線を保護するための保護カバーで構成されている。保持具表面は曲率半径1500mmの曲面となっており、また送信プローブから送信する音波の位相をずらすことでフォーカス距離を1.0m～3.0mまで変えることができる。これにより音波の強度を強めるとともに、方位分解能も向上する。この音響プローブの音響透過試験を東京大学生産技術研究所の試験水槽（図-7 右）で実施した。

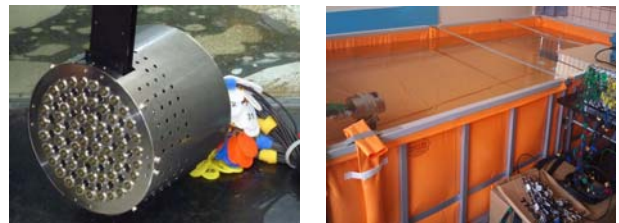


図-7 音響プローブ（左）と試験水槽（右）

#### ・試験方法

図-8 のように、試験水槽（3500mm×1800mm×700mm）内に音響プローブ、ターゲットとするコンクリート板（250mm×250mm×70mm）、受信部であるハイドロフォン（TC-4013、Reson 社製）を配置し、音響プローブから図-9 の3種類の波形（Summing1、Summing2、LFM）の音波を送信し、送信波の違いによる透過性能の確認試験を行った。フォーカス点はターゲットの表面に設定し、ターゲット中心とハイドロフォンの高さは音響プローブの中心と同じ高さとした。

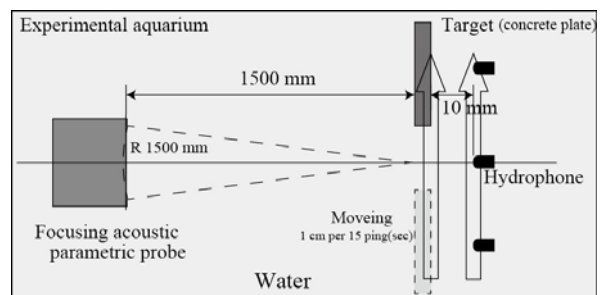


図-8 試験方法

#### ・試験結果

送信波形ごとの透過波計測結果を図-10 に示す。各送

信波形の上段の図は2次波 13kHzの透過波、下段は透過波に10~16kHzのバンドパスフィルタ(BPF)をかけた波形である。縦軸が振幅(mV)、横軸が送信してから時間(ms)を表している。Summing1を基準として最大振幅を比較すると、Summing2が2.3倍、LFMが3.2倍であり、LFMがもっとも良く透過することがわかった。

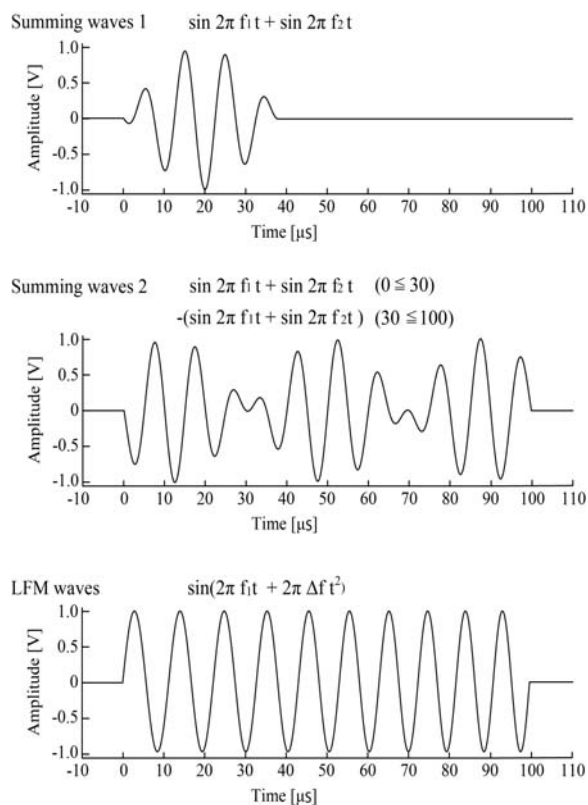


図-9 送信波形

#### 4. まとめ

水中構造物内部の劣化・損傷状況探査及び可視化技術の開発のため、市販のパラメトリックソナーによる岸壁内部の空洞化探査の事前可能性試験を行い、構造物内部の探査に利用可能であることを確認した。また、音波をフォーカスできる音響プローブを試作し、実験水槽でコンクリート板に対する音響透過試験を実施し、LFM波形がもっとも良く透過することを確認した。

今後はこの音響プローブの性能向上を図るとともに、港湾の現場で容易に使用できるようなシステム構成の検討を行っていきたい。

#### 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：2012年11月。
- 2) 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

Norihito Kishi, Akira Asada, Kazumi Akimoto

洋開発論文集：2010年6月。

- 3) 浅田昭、秋元和實、国島英樹：コンクリート構造物の空洞化探査：非破壊検査第60巻7号：2011年7月。

- 4) 海洋音響学会：海洋音響の基礎と応用：2009年3月。

- 5) <http://www.innomar.com/products.php> : Parametric Technology for High Resolution Sub-bottom Profiling

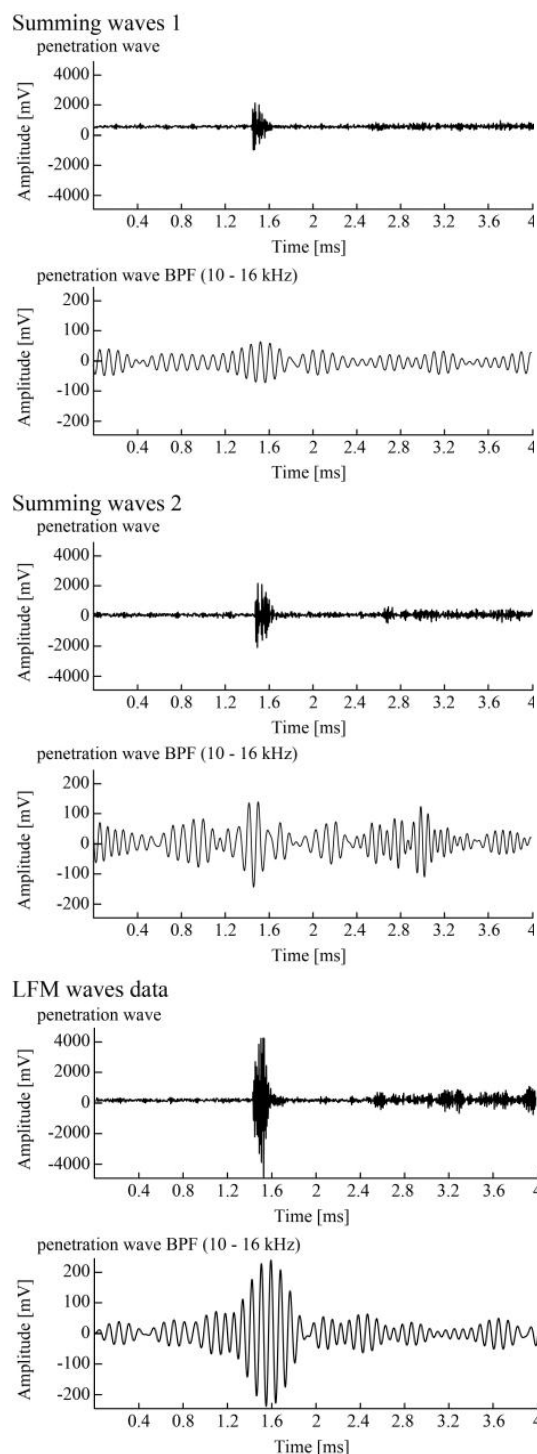


図-10 各送信波形における透過波形(上段)と透過波にバンドパスフィルタ(13±3kHz)をかけた波形(下段)