

# 論文の内容の要旨

## 水中構造物の音響可視化診断

虻川 和紀

### 1. 序論

近年、港湾岸壁の背面土砂が吸出しを受け、内部空洞が発生し局所的な地盤沈下や上面陥没が発生した被害例が数多く報告されている。特に、鋼矢板や鋼管杭による港湾岸壁では、施工後の経年劣化により腐食劣化が進み腐食孔からの背面土砂流失や耐久力の低下などが発生している。また、2011年3月の東日本大震災では、内部空洞や耐久力の低下が発生した港湾岸壁の傾斜や崩壊が頻発し、見た目が健全な岸壁においても背面土砂流出による空洞化が促進した可能性が指摘されている。このような被害を未然に防ぐためには、アセットマネジメントが必要不可欠であり、現存の施設状況を正確に把握することが重要である。しかし、海中部分の構造物及び岸壁内部は外見からの劣化を確認しにくく、補修を行うにも多くの困難を伴うのが実態である。

本論では、従来手法に代わる、音波を用いた水中構造物の非破壊診断手法の検討を行う。岸壁外部形状調査は、マルチビームソナーや音響ビデオカメラなどのイメージングソナーを用い、効率的に広範囲の詳細な外部形状を取得し、ひび割れ・腐食孔などの損傷の早期発見を目的とする。岸壁内部調査では、パラメトリック音源を用いた構造物内部を可視化する手法の開発を目指す。これらの開発手法を適用した水中構造物の状況を定量的に把握可能な技術を示すことにより、今後の長期的な維持管理技術に資することを目的としている。

### 2. マルチビームソナーを用いた外部形状調査

本章では、岸壁外部形状と岸壁自体の傾斜角を定量化するため、実岸壁でマルチビームソナーを用いた調査を行った。これまでは、序章で示したように潜水士による目視調査及び計測が主流であり、岸壁全体の形状及び岸壁直下の海底地形調査は行われていなかった。岸壁の全体像を把握することにより、岸壁延長での歪みや傾斜角が明らかになると考えられた。

調査は、2011年6月に東日本大震災で被災した千葉県船橋市にある岸壁と2012年10月に北海道

岩内港で実施した。使用した機材は、マルチビーム測深機(Seabat8125、 RESON 社、 USA) を用いた。計測した測深データから、スパイクノイズ、乱反射によるノイズを消去した後で 3 次元図に構築し、岸壁形状及び岸壁付近の海底地形さらに、岸壁の傾斜を定量的に評価するため、10 スワスの平均傾斜角を求めた。

調査で得られた岸壁 3 次元図と断面図を Fig. 1 に示す。船橋港調査では、腐食孔や損傷は見られなかったが、Fig. 1 の岸壁断面図から No.8、9 で岸壁が傾斜していることが見てとれる。Fig. 2 は平均傾斜角と Roll 角の関係である。平均傾斜角と Roll 角の間に、強い相関は見られなかった( $R^2 = 0.038$ 、 $p < 0.001$ )。よって、岸壁自体が傾いていることが示唆され、本開発手法により岸壁外見形状を 10cm 精度で、傾斜角を 0.1 度の精度で定量化することが可能となった。また、岩内港での試験では、岸壁に空いた腐食孔から背面土砂の流出が見られた。しかし、3 次元画像からは腐食孔の発見が難しく、詳細な形状も再現できていない。これは腐食孔がマルチビーム測深器のビーム幅よりも小さい場合には捉えられないことや、水平方向の分解能が船速に影響されることなどがあげられる。

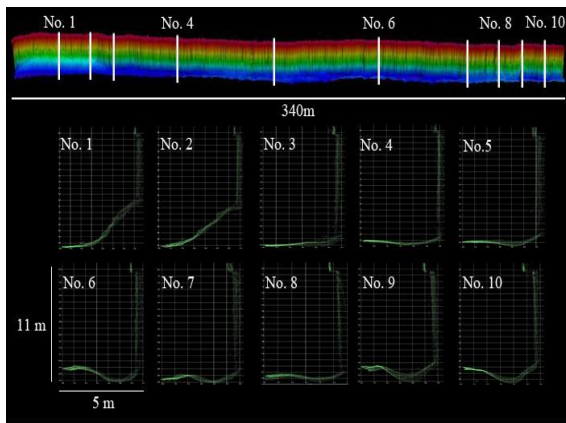


図 1. 3 次元図と各ポイントの断面形状  
Fig.1 Three-dimensional image (top) and cross-section view (bottom) of quay

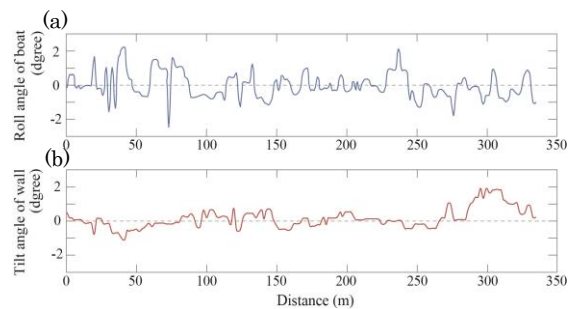


図 2. 調査船のロール角と岸壁の角度の関係  
Fig. 2 Changes of (a) roll angle of boat and (b) tilt angle of quay wall

### 3. 音響ビデオカメラを用いた高解像度外部形状診断

前述の試験データの評価結果から、マルチビームソナーでは腐食孔の形状計測が難しく、詳細な損傷の定量化を行うことが難しいことが分かった。そこで本章では、詳細な損傷の定量化を行うため、音響ビデオカメラ(DIDSON)を用いて岸壁の詳細な外部形状の取得と岸壁表面のモザイク図の作成を行った。

DIDSON は通常状態で、 $0.3^\circ$  (横方向)  $\times$   $14^\circ$  (縦方向)  $\times$  96 本の音響ビームを形成し、ターゲットを映像化する。本章では、通常状態で岸壁を映像化しモザイク図の作成を行う 2 次元計測と、縦方向のビームを音響レンズにより  $1^\circ$  に狭め、岸壁のスライスデータ取得を行う 3 次元計測の 2 通りの開発手法を用いた。2 次元計測で得られた映像を用いてモザイク画像を、三次元計測で得られた映像を基に 3 次元図を作成した(Fig. 3)。 2012 年 10 月に北海道岩内港で行った調査では、モザイ

ク図と三次元図から 26×30×20 cmの腐食孔を計測した。しかし、実際にダイバー計測を用いて直接計測を行ったところ横幅 30 cmであり、4 cmの誤差が生じていた。また、2次元画像に画像の歪みが生じている。これは、計測時の走査速度が 1.0 m/s と速いためであり、船速を遅くすることにより横方向の誤差を抑えられると考えられた。そこで、2013年8月にバックホウに計測機器を取り付け、低速走行での試験を行った。試験結果により形状を誤差 1.0 cm以内で計測が可能となった。これにより、詳細な 3次元形状及びモザイク図を取得でき、より正確な岸壁外部状況の定量化を行う計測手法が開発した。

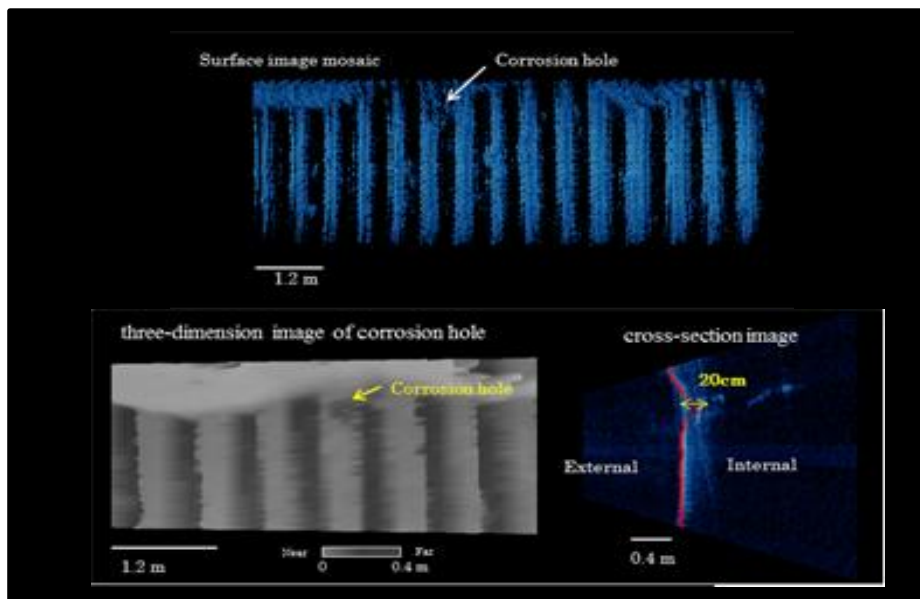


図 3. 調査岸壁の 2次元モザイク図と 3次元図

Fig.3 Surface mosaic image (top) and three-dimensional image (bottom) of the quay wall

#### 4. パラメトリック地層探査システムを用いた内部空洞探査

本章では、構造物内部の損傷の広がり を正確に調査するためにパラメトリック音源を用いた岸壁内部空洞探査手法開発の検討を行った。パラメトリック法は、周波数の異なる 2つ高周波(1次波)を 1つの送波器から同時に同軸上に放射し、2つの高周波の非線形相互作用によって生じた差分周波数(2次波)を利用する方法である。1次波の 2つの周波数を近くすれば、2次波を低くすることが可能となり、低周波にも関わらず指向性は極めて鋭くなる。

まず、始めに既製品のパラメトリックソーナーを用いて岸壁内部空洞探査評価を行った。使用するパラメトリック音源は、SES2000(Innomar, Germany)とした。SES2000は、一般的に浅海域の地層探査等に用いられるが、本研究では岸壁内部空洞を探索するために岸壁方向にビームを向けて使用している。実岸壁を使用した試験では、岸壁に空いた腐食孔内部の広がりを捉えることができた。しかし、SES2000は数 m 以内の近距離探査が難しく、指向角がビーム幅±1.8° と広く、スキャン方位分解能の正確な計測が困難であった。そこで、SES2000の指向性改善と音響エネルギーの集束を目的とし、トランスデューサーの前面に取り付け式のビームを集束させるフレネルレンズを制作し

た。フレネルレンズは、距離 1.0 m の地点に位相距離を合わせて集束させるように設計した。これにより、方位分解能と探査距離分解能の向上を図る事が可能となった。

SES2000 に集束型音響レンズを装着したことにより、近距離でフォーカシングさせ探査能力の向上と方向分解能の向上を行うことが出来た。しかし、岸壁内部調査を行う上で、指定された周波数や波形しか使用できない点や取得できる情報が限られる等の問題点が浮上した。これらの問題点を解決するために、コンポジット製法による素子一体型の新型パラメトリックソナーの開発を行い、室内実験や水路試験、現地試験を行った。まず始めに、新しく開発した集束パラメトリックソナーを用いて、鋼矢板をターゲットとしたターゲット奥からの反射波・ターゲットの透過波測定を研究室保有の実験水槽で行った。水槽試験の結果、鋼矢板のさらに後ろにある反射板からの反射を捉えることができ、新開発したパラメトリックソナーを用いて鋼矢板のさらに後ろにある物体を捉えられることを確認した。次に、実験水路にて実岸壁で実際に用いられている鋼矢板を使用し、鋼矢板裏からの反射を捉えられるか実験を行った。反射板を鋼矢板側に徐々に移動させ、鋼矢板すぐ背面に付くまで移動させる。その後、背面に移動させた速度で始めの設置位置まで移動させ測定を行った。水路実験の結果、鋼矢板の奥に設置した反射板の動きを捉えることが出来、内部空洞探査への可能性を示した(Fig.4)。最後に有効性と実用性を検証するため、バックホウに艀装する手法を用いて、実岸壁において内部空洞探査試験を行った。内部空洞探査試験の結果、鋼矢板岸壁に出来た内部空洞だと考えられる、鋼矢板岸壁内部 1.5 m 付近からの反射を捉えることを可能とした(Fig.5)。

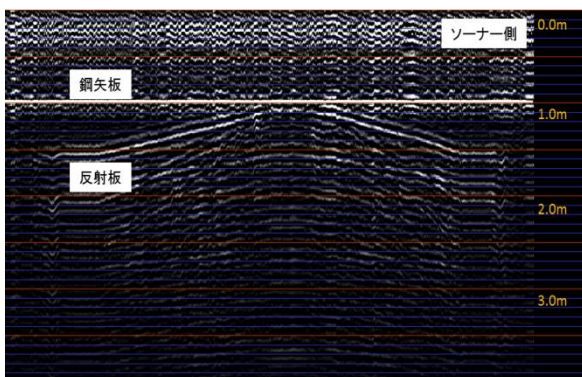


図 4. 鋼矢板裏の反射板の移動

Fig. 4 Movement of the light reflector of the steel sheet pile back

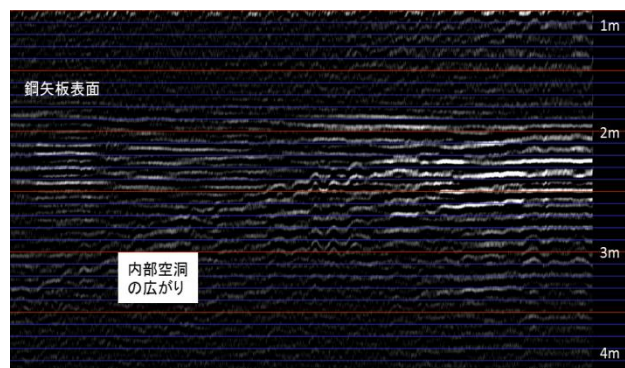


図 5. 鋼矢板岸壁の内部空洞の広がり

Fig. 5 Internal hollow expense of the steel sheet pile quay wall

## 5. 結論

本研究で示した水中構造物外部診断手法は、実地試験において岸壁外部の損傷や歪み・傾斜を定量化でき、診断手法としての性能を持つことを確認した。その結果、イメージングソナーを用いた水中構造物外部診断手法を用いることによって、従来の潜水士の目視調査及び計測では実現が困難であった水中構造物状況の定量化が可能になり、長期的な維持管理技術に資することが可能と考えられる。構造物内部診断手法については、開発したパラメトリックソナーを用いることによって鋼矢板岸壁内の内部空洞を捉えることが可能であり、構造物内部を視覚化できる可能性が示唆された。