

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23241050

研究課題名(和文) コンクリート構造物内部の空洞化及びコンクリート打設作業状況の音響映像診断技術開発

研究課題名(英文) Acoustic image technology of the inside inspection of concrete structure devoid of substance and pouring concrete into formwork

研究代表者

浅田 昭 (Asada, Akira)

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：60323648

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,800,000円、(間接経費) 9,540,000円

研究成果の概要(和文)：経年劣化により港湾岸壁の崩壊もしくは上面陥没が発生した事故例が数多く報告されている。このため、岸壁内部を診断するパラメトリックソナーシステムを開発した。パラメトリックソナーの2次波生成効率を向上する、 piezocomposite 製法による新しい送受波器、並びにパワーアンプ、送受信制御システムの設計を行った。サブボトムプロファイラのパラメトリックソナーSES2000を使い、近距離でフォーカスさせるフレネルレンズを設計、製造した。SES2000にレンズを装備して、岸壁および水槽で評価試験を行い、良好な計測結果を得た。音響ビデオカメラを使って岸壁表面の形状を精密に計測する新しい手法を開発した。

研究成果の概要(英文)：A lot of accident examples that the collapse of the harbor quay or top surface cave-in brought about have been reported by aged deterioration. Therefore, the parametric sonar system which diagnosed the quay inside has been developed. We designed the new transducer by the piezocomposite manufacturing method to improve the secondary wave generation efficiency of the parametric sonar and power amp, the transmission and reception control system. For parametric sonar SES2000 of sub-bottom profiler, the Fresnel lens which could focus it in a short distance was designed and produced. We equipped SES2000 with the lens and evaluated it with a quay and a water tank and examined it and got a good measurement result. New technique to measure a shape of the quay surface with an acoustic video camera precisely was developed also.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学、社会システム工学・安全システム

キーワード：パラメトリックソナー 港湾岸壁 piezocomposite フォーカスアレイ フレネルレンズ

1. 研究開始当初の背景

港湾岸壁内部を固めていた砂礫が長年の浸水により僅かずつ流出し、空洞化が拡大し、遂には岸壁上面の路面が陥没、岸壁側面が崩壊する、また内部に空洞箇所を持つ陸上の鉄筋コンクリート製の柱や壁が地震により崩壊する、といった事故が起こって始めて問題が顕在化してきた。このようなコンクリート構造物内部の空洞化状況を精度よく点検する手法、コンクリート打設作業の質を向上させるモニタリング手法、の開発が強く求められてきた。

2. 研究の目的

我々は厚さ 10 数cmの深海底のコバルトリッチクラストを線断面として 2cm の分解能で音響プロファイル計測する技術を開発し、また条件がよければ数 m 厚のコンクリート岸壁を音響プロファイル計測する、コンクリート打設作業状況を音響モニタリングできる事前研究を行ってきた。これらの優れた可能性技術を基に計測技術の発展を図り、水中、陸上のコンクリート構造物内部を音響スキャンし断面映像を得る実用レベルの技術を開発する。

3. 研究の方法

(1) マルチビームソナーを用いた岸壁外部形状・傾斜角診断

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、序潜水士による光学写真観察が主流であり、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次元図と断面図を図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、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。平均傾斜角とRoll角の間に、強い相関は見られなかった。よって、Roll角に関係なく岸壁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次元画像から腐食孔の発見が難しく、形状も正確に復元できなかった。腐食孔がマルチビーム測深機のビーム幅よりも小さい場合に

に捉えられない。また、横方向の分解能が船速に影響される問題点があげられる。

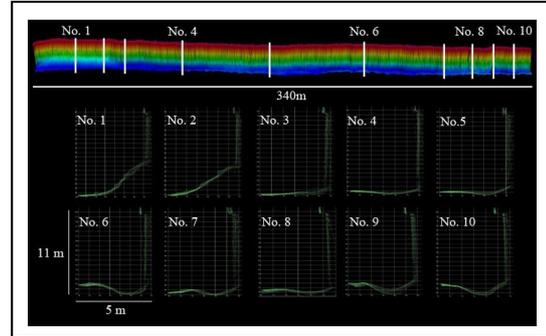


図1 岸壁の3次元形状と10ヶ所の断面図

(2) 音響ビデオカメラ(DIDSON)を用いた高解像度外部形状診断手法

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° (横方向) \times 14° (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° 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、3次元計測で得られた映像を基に3次元図を作成した。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3次元図から $26 \times 30 \times 20$ 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30cmであり、4cm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1m/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月にバックホウで岸壁から計測機器を吊り下げ、低速運行での試験を行った。試験結果により形状を誤差1cm以内で計測できた。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された。

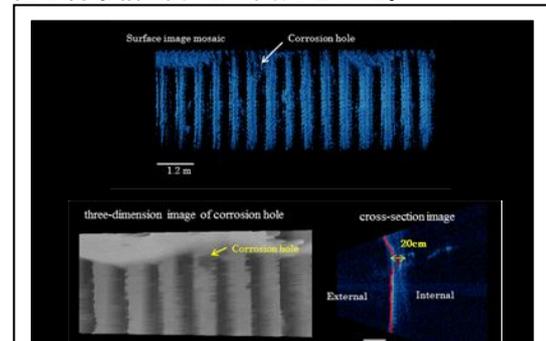


図2 岩内港岸壁のDIDSON映像のモザイク図と断面線図

(3) 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

前項(2)より外部形状や損傷の定量化を行うことができた。海中部分の構造物内部は外見から内部損傷を確認できない。そこで、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。使用したパラメトリック音源は、SES2000(Innomar, Germany)とした。SES2000は、通常、地層探査に用いられるが、本研究では岸壁内部空洞を探査するために、岸壁に向けて使用した。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 $\pm 1.8^\circ$ 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設計制作した(図3)。フレネルレンズは、距離1m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(図4)とともに、水槽試験の際、コンクリート壁の厚さ計測を行い、厚さ計測の評価を行った。



図3 距離1m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フレネルレンズ

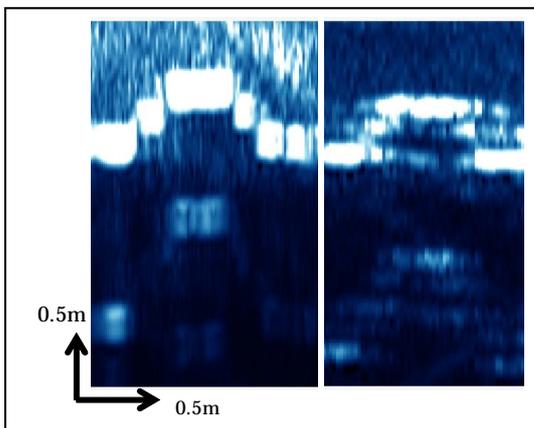


図4 矢板岸壁を観察した際の断面図(左)レンズ無し、(右)レンズ有り

(4) 集束パラメトリック音響プローブの開発と水槽実験

前述のSES2000を用いた内部空洞探査結果からパラメトリック音源を用いて岸壁内部を探査可能なことが示唆された。しかし、SES2000は汎用設計の製品であり、近距離ではサイドローブ波形の発生、決められた周波数や波形でしか発信する事が出来ない。また、取得できる情報が限られているため、構造物の内部探査には不向きであることが分かった。そこで本研究では、構造物の内部探査用の集束パラメトリック音響プローブ(以後、音響プローブ)を設計開発した。開発した音響プローブの外形図を図5に示す。音響プローブは、任意に作成した波形を送波する事が出来き、反射波を250 kpspsでサンプリングできる。フレネルレンズと同様に音響プローブから1m地点にフォーカスするようにした。また、チャンネルごとに送波タイミングを制御することが可能で、位相をずらすことにより1.0m~3.0mまでフォーカス距離を可変することができる。音波をフォーカスさせることにより、音波の強度を強めるとともに、方位分解能も向上する。岸壁との距離に応じてフォーカス距離を可変することで、内部診断可能な距離・方位分解能を試験する事が出来る。

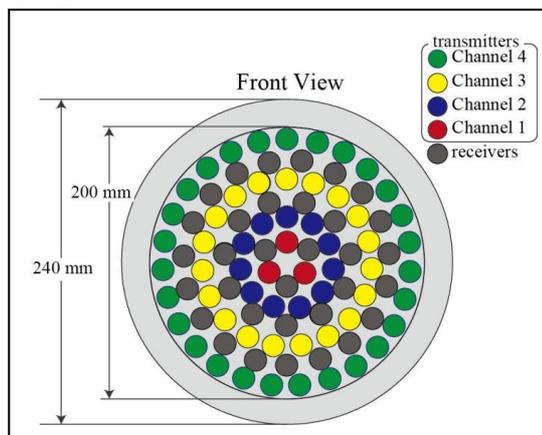


図5 多数の送波素子を1mの距離に焦点合わせをした各4chのアニュラ送波素子アレイ、その間に3つのアニュラ受波素子アレイを挿入した送受波器

(5) 多素子配列のアニュラ送受波素子を使った水槽試験

音響プローブの開発製造の後、実験水槽を用いて、音響特性試験(指向性試験や透過特性試験)、岸壁に使用されている部材を使用した透過特性試験、SES2000との比較実験を行った。試験の結果、音圧を稼ぐことの出来るLFM波形が内部探査に最も適していることが分かった。周波数に関しては、分解能と透過性を考慮すると8kHz周辺が最も適していると考えられる。しかし、設計した1次周波数の総合パワーが得られなかった。この主な原因は素子個々の位相特性が揃っておらず、位相のずれが大きすぎたと考えられる。そこ

で、ターゲットとなる矢板およびハイドロホンの表面に小さなバブルを吹きつけて、非線形現象を誘引しやすくして試験を行った。想定通り、2次波が大きく形成され、指向特性を計測した。計測結果から2次波の指向特性は理論より幅の広い、ビームを形成していることが判った(図5)。これもまた、素子の位相特性のばらつきに起因しているものと考えられる。矢板鋼板の後ろにも2次波が透過伝播していることが確認された。

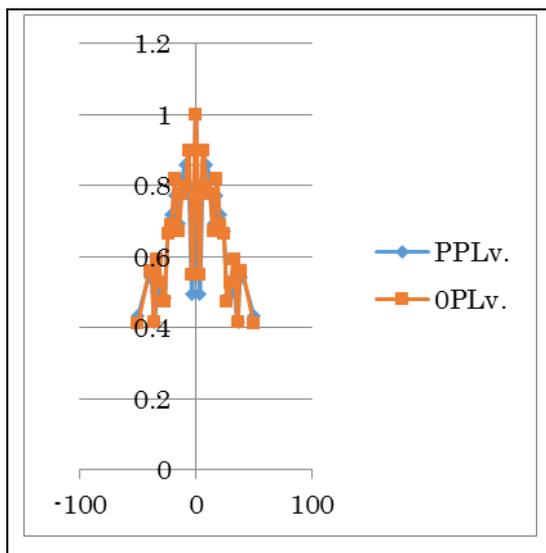


図6 多素子アニュラアレイの2次波の指向性パターン計測結果、横軸は横距離(cm)、縦軸は距離(m)、-3dB幅は27cm 15deg.

(6) 新型パラメトリックトランスデューサーの開発

音響プローブの試験結果より、最初に開発した音響プローブは設計送波レベルに比べ実際に放射される音圧が低く構造物内部を視覚化するには2次波の発生が小さく、2次波の反射波を用いた可視化は難しかった。そのため、音響プローブの試験結果を基に位相整合性の良いコンポジット製法によるパラメトリックトランスデューサーの設計開発を行った。設計した新型のパラメトリックトランスデューサーを図7に示す。トランスデューサーの形状は、同心円状に配置された10個(受信5ch、送信5ch)のリング状チャンネルを持つサーキュラーアレイとした。送信1次周波数は音響プローブと同様とし、受信周波数帯を500Hz~20kHzとした。焦点距離は、基準を0.5mと1.5mの2種類とし、チャンネルごとに送波タイミングを制御することで±0.5m前後に可変する事が出来る。アレイ音源レベルは、フォーカシング時で230dBとなるようにした。焦点距離0.5mの試作した送受波器の総合音響パワーは238dBとなり、大きく改善された。これに焦点距離1.5mの送受波器でも実用レベルのパラメトリックトランスデューサーとなることが期待される。

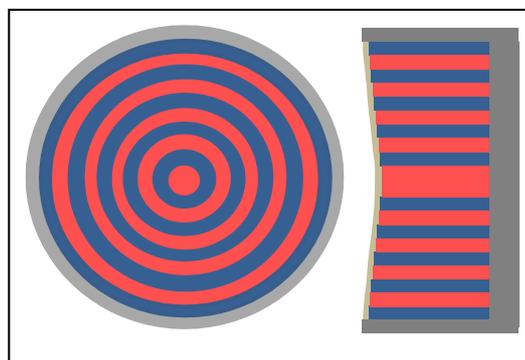


図7 コンポジット製法によるパラメトリックトランスデューサーの設計概要図、直径20cm、焦点距離0.5mおよび1.5mの2種類

4. 研究成果

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、従来の潜水士による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、SES2000の試験結果及び音響プローブの水槽試験結果により、パラメトリック音源を用いることによって構造物内部を視覚化できる可能性が示唆された。

今後は、新たに開発したコンポジットパラメトリックトランスデューサーの試作器を用いた水槽試験や実地試験を行い、水中構造物内部診断手法を確立していく予定である。さらに、水中構造物外部診断手法でも、他の水中構造物でデータを取得し、運用方法や損傷等の効率的な判別手法の開発を行い、実際に使用されるような水中構造物診断手法を開発する。これまでの開発成果を基に、水深3000mまでのコンポジットパラメトリックトランスデューサーを用いた熱水鉱床サブポットムプロファイラーの開発へと応用されている。また、極域における石油などの海底パイプラインの敷設、維持管理のため、流水が沿岸域の海底を削るガウジング痕履歴を計測研究開発することが期待されている、など本研究成果は幅広い分野に展開されている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計9件)

(1) M. Nagaso, K. Mizuno, A. Asada, K. Kobayashi, M. Matsukawa, Development of the three-dimensional visualization method for the inner structure of small size fish using 25 MHz acoustic profile measurement, Proceedings of 2013

OCEANS '13 MTS/IEEE San Diego, 2013.09.23.
(abstract 査読有)

(2) K. Abukawa, K. Mizuno, A. Asada, T. Igarashi, N. Kishi, and K. Akimoto, Diagnostic methods of quay wall with acoustic measurement systems, Proceedings of OCEANS'13 MTS/IEEE Bergen, DOI: 10.1109/OCEANS-Bergen.2013.6608100, 2013.06.13 ,(abstract 査読有)

(3) F. Maeda, J. Osaku, A. Asada, Y. Yamagata and T. Kanamaru, R&D of the Maneuver Control Techniques for Autonomous Surface Vehicle Using "Dual-Extended Kalman Filter" for the Actual Harbor Area Surveillance, Proc. of International Symposium on Underwater Technology 2013 (UT13), 2013.03.07. (abstract 査読有)

(4) K. Abukawa, A. Asada, K. Mizuno, T. Igarashi, N. Kishi, K. Akimoto, Diagnostic evaluation of quay wal using three-dimensional acoustic measurement systems, Proc. of International Symposium on Underwater Technology 2013 (UT13), poster.2013.03.07. (abstract 査読有)

(5) T. Sato, B. Thornton, A. Bodenmann, A. Asada, T. Ura, Towards real-time control of a double gimbaled acoustic probe for measurement of manganese crust thickness, Proc. of International Symposium on Underwater Technology 2013 (UT13), 2013.03.07. (abstract 査読有)

(6) Kazuki Abukawa, Akira ASADA, Tadashi Igarashi, THREE-DIMENSIONAL DIAGNOSTIC METHODS OF QUAY WALL USING FOCUSING ACOUSTIC PARAMETRIC PROBE AND IMAGING SONAR, Proc. of OCEANS '12 MTS/IEEE HAMPTON ROADS, 2012.10.18. (abstract 査読有)

(7) Akira ASADA, Ura Tamaki, THREE DIMENSIONAL SYNTHETIC AND REAL APERTURE SONAR TECHNOLOGIES WITH DOPPLER VELOCITY LOG AND SMALL FIBER OPTIC GYRO, Proc. of OCEANS '12 MTS/IEEE HAMPTON ROADS, 2012.10.18. (abstract 査読有)

(8) Tomoya Inoue, Akira Asada, Tokuihiro Katsui, Masashi Mochizuki, Hiroyuki Osawa, Ken Takagi, Hard rock coring on steep terrain, Underwater Intervention 2012 .2011001-25. 2012 .03.06. (abstract 査読有)

(9) 浅田昭, 秋元和寛, 国島英樹, コンクリート構造物の空洞化探査, 非破壊検査, pp387-390, Vol.60, 2011. (査読無)

〔学会発表〕(計 9件)

(1) 虻川和紀, 岸壁の内部・外形音響診断, 港湾及び海洋土木技術者のためのROV等水中機器類技術講習会, 平塚商工会議所会館, 2013.11.28. (招待講演)

(2) Akira ASADA, Inerferometric sonar with synthetic aperture technique for AUV, Proc. of 40th UJNR Sea Bottom Surveys Panel, Aomi, Tokyo, 2012.12.18. (招待講演)

(3) Akira ASADA, High quality debris mapping with multi-beam bathymetric sonar under the rough sea condition, Proc. of 40th UJNR Sea Bottom Surveys Panel, Aomi, Tokyo, 2012.12.18. (招待講演)

(4) A. Asada, 24-year research activities on observation technologies of seafloor crustal deformation, Proc. of Techno-Ocean2012, (CD-ROM), kobe, hyogo, 2012.11.20. (招待講演)

(5) 虻川和紀, 水野勝紀, 浅田昭, イメージングソナーを用いた岸壁外部高精度3次元可視化診断, 海洋調査技術学会第24回研究成果発表会講演要旨集, pp.35-36, 築地, 海上保安庁, 2012.11.12.

(6) 五十嵐匡, 岸寛人, 山口和哉, 浅田昭, 寒冷海域における沿岸施設に近づく海水の計測技術について, 第23回海洋工学シンポジウム, 日本大学駿河キャンパス, 2012.08.03

(7) 虻川和紀, 浅田昭, 山口和哉, 五十嵐匡, 秋元和寛, フォーカス音響パラメトリックプローブを用いた岸壁内部の診断手法開発, 第23回海洋工学シンポジウム, 日本大学駿河キャンパス, 2012.08.03.

(8) 望月将志, 浅田昭, 井上朝哉, 津久井慎吾 走行型ROVの低視程時運用をサポートする音響ビデオカメラの利用, 海洋調査技術学会第23回研究成果発表会講演要旨集, 27-28, 築地, 海上保安庁, 2011.11.01

(9) 浅田昭, 卜部浩一, 佐々木義隆, 国島英樹, 五十嵐匡 音響ビデオによる水中構造物及び水中生物の3次元撮影法について, 海洋音響学会2011年度研究発表会講演論文集, 11-19, 59-60, 東京工業大学百年記念館フェライト会議室, 2011.05.31.

〔その他〕

受賞: Akira Asada, Techno-Ocean Award 2012

6. 研究組織

(1) 研究代表者

浅田 昭 (ASADA, Akira)

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号: 60323648

(2) 研究分担者

前田 文孝 (MAEDA, Fumitaka)

東京大学・生産技術研究所・特任助教

研究者番号: 80559930

秋元 和寛 (AKIMOTO, Kazumi)

熊本大学・沿岸域環境科学教育研究センター・准教授)

研究者番号: 70222536

五十嵐 匡 (IGARASSHI, Tadashi)
土木研究所・寒地土木研究所・研究員
2011-2012 年
研究者番号：00533415

岸 寛人 (KISHI, Hirohito)
土木研究所・寒地土木研究所・研究員
2013 年
研究者番号：10588338