

非接触型港湾鋼構造物点検装置の開発

DEVELOPMENT OF NONCONTACT INSPECTION DEVICE FOR STEEL STRUCTURES IN PORTS.

吉住夏輝¹・松本さゆり²・片倉景義²・橋本洋之³・友田伸明³・石貫國郎³

Natsuki YOSHIZUMI, Sayuri MATSUMOTO, Kageyoshi KATAKURA,
Hiroyuki HASHIMOTO, Nobuaki TOMODA and Kunirou ISHINUKI

¹正会員 博(工) (独)港湾空港技術研究所 特別研究員 施工・制御技術部
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²博(工) (独)港湾空港技術研究所 施工・制御技術部
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

³国土交通省 九州地方整備局 下関港湾空港技術調査事務所
(〒750-0066 山口県下関市東大和町2丁目29-1)

We develop a novel inspection device for steel structures in ports. The device measures thickness of the structures by noncontact. We propose the method based on the ultrasonic multiple reflections to perform the noncontact measurement effectively. To verify the validity of the method, we measured the error of the measurement using a steel plate with shells in a test tank. From the results, the maximum and averaged errors were 0.5 mm and 0.3 mm, respectively. We carried out actual measurements successfully.

Key Words : *Ultrasonic transducer, Multiple reflection, Steel structure, Noncontact measurement*

1. はじめに

鋼矢板式岸壁や鋼管杭式栈橋のような港湾鋼構造物は、コンクリートによる構造物に比べると、容易な施工で高い信頼性が得られる。我が国においては、時代の要請もあり、昭和30年代から昭和40年代の高度経済成長期に盛んに建設された。今なお、供用されている構造物も多く、老朽化が問題視されるようになりつつある。港湾鋼構造物は、長年の供用に耐え得るように設計がなされているが、実際には海水に曝される腐食環境下に置かれているため、長期にわたって健全な状態を維持することは容易なことではない。したがって、適切な時期に構造物の損傷及び劣化を的確に把握して、適切な対策施工を実施する維持管理が重要である。効率的に点検できる診断手法の確立が求められている。

超音波厚み計による肉厚測定が鋼構造物の点検診断の一手法としてよく用いられている¹⁾。超音波探触子を測定対象物の表面に密着させて、超音波が表面から裏面まで伝搬する時間を測定して、その伝搬時間と超音波が鋼材中を伝わる速度(音速)の積から肉厚を算出する。確実かつ高精度に肉厚を測定できる。しかし、港湾鋼構造物の表面は、往々にして、貝等の海生生物が付着しているため、前処理として、これらの付着物を取り除き、研磨しなければならな

い。この作業は、全作業の半分以上を占め、作業効率低下の一因となっている。そのため、現在のところは、代表点におけるサンプル測定に留まっている。また除去した付着物を産業廃棄物として処理するコスト負担などの問題もある。また、研磨する工程は、防食や鋼材自体を傷つけ、かえって腐食を助長する恐れもある。

本研究は、付着生物を除去することなく、非接触で連続的に肉厚測定できる効率的な点検装置の開発を目的としている。本論文では、超音波の多重反射を積極的に利用することで、非接触測定を可能にする測定原理を提案した。また、提案手法の有効性の確認として、水槽での性能試験及び運用試験を実施して検討した。

2. 非接触型港湾鋼構造物点検装置

非接触が他港湾鋼構造物点検装置のイメージを図-1に示す。本装置は、超音波送受波器、電源・解析装置、表示器から構成される。超音波送受波器は、高電圧を印加することで超音波を発生させ、逆に超音波を受けると電圧を発生させる圧電素子から成る。この素子の材料として、1-3 コンポジット材を採用することにより、広帯域な超音波の送受波を可能と

した．電源・解析装置，表示器は，超音波信号を発生させる任意波形発生装置，超音波信号を増幅するアンプ，受波信号を記録・解析・表示する PC から成る．本手法では，液体を介することにより，超音波探触子を測定対象物に接触させることなく，非接触で肉厚を測定することができる．

港湾鋼構造物の非接触肉厚測定

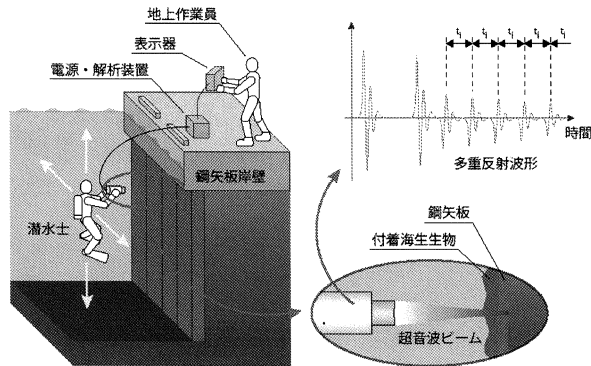


図-1 イメージ図

3. 非接触肉厚測定の原理

超音波は，音速と密度の積によって定義される固有音響インピーダンス Z の異なる境界面で反射する．境界面に入射する超音波と反射した超音波の振幅比である反射係数 R は次式(1)で与えられる．ここで Z_1 は入射側， Z_2 は反射物のインピーダンスである．

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (1)$$

水から鋼鉄に超音波が入射することを考える．水の音速は 1497 m/s，密度は $1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，音響インピーダンスは $1.5 \times 10^6 \text{ Ns/m}^3$ である．同様に鋼鉄の音速は 5941 m/s，密度 $7.84 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，音響インピーダンス $46.5 \times 10^6 \text{ Ns/m}^3$ である．鋼鉄のインピーダンスは水の約 30 倍，反射係数 R は 0.94 で，極めて強い反射となる．超音波の音響エネルギーのほとんどが反射し，一部が鋼鉄に進入する．鋼鉄から水に入射する場合も同様であるため，結果的に超音波は鋼鉄の内部に閉じ込められることとなり，図-2 のような板の厚み方向に超音波が往復して反射を繰り返す多重反射の状態となる．

多重反射が生じている状態の時，図-3 に示すような波形が観測される．最初に送波波形が観測される．次に，装置と測定対象物の距離を超音波が伝搬して往復するのに要する時間 t_0 遅れて，比較的に大きい振幅の表面からの反射が観測される．更に遅れて，一定の時間間隔 t_i の多重反射波形が観測される．ここで t_i は，超音波が表面と裏面を往復するの

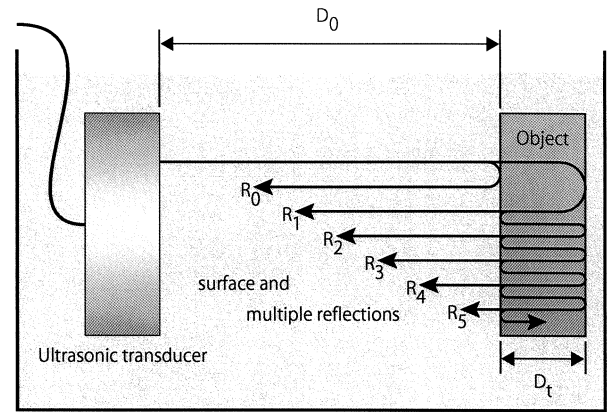


図-2 超音波の多重反射

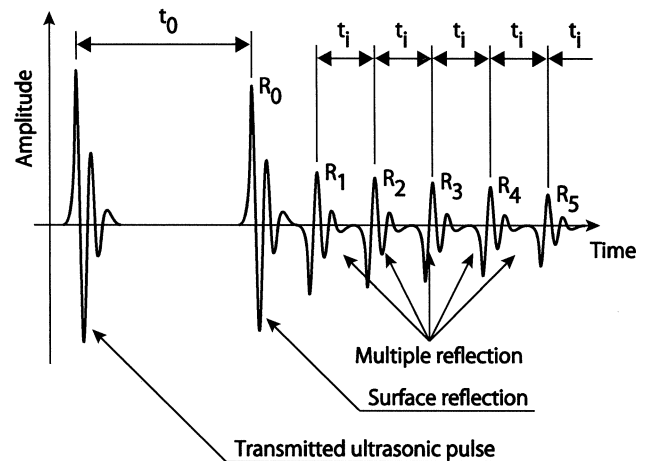


図-3 多重反射の波形（イメージ図）

に要した時間であり，測定対象物の音速を c とすれば，肉厚 D は次式(2)により与えられる．

$$D = \frac{1}{2} c \cdot t_i \quad (2)$$

この手法の特徴は，一度の送波で多くの多重反射波が得られるため，それらの平均を求めることで，精度の向上，SN 比の改善が期待できることである．

この手法は，多重反射の発生が見込める幾何学的な形状をした鋼構造物の肉厚測定に適用することができる．港湾構造物では，鋼矢板式岸壁や鋼管杭式栈橋などへの適用が可能である．非接触で肉厚を測定することができるため，センサを連続に動かすことができれば，測定対象物の肉厚分布を測定することも原理的には可能である．

3. サンプル鋼板の非接触肉厚測定

提案手法の有効性を確認するためにサンプル鋼板を測定対象物とした．非接触肉厚測定試験を実施した．試験の測定系を図-4 に示す．ファンクション

ジェネレータ（エヌエフ回路設計ブロック WF-1946B）を用いて、周波数 750 kHz、波数 1 波、振幅 1 Vpp の超音波パルス信号を発生させ、増幅器（E&I 2100L）で 50 dB 増幅後、広帯域超音波送受波器に印加し超音波パルスを送波する。測定対象物からの反射波を送受波器で受波して、デジタルオシロスコープ（LeCroy Wave Surfer 454）でサンプリングした後、PC に取り込んで信号処理により肉厚を算出する。

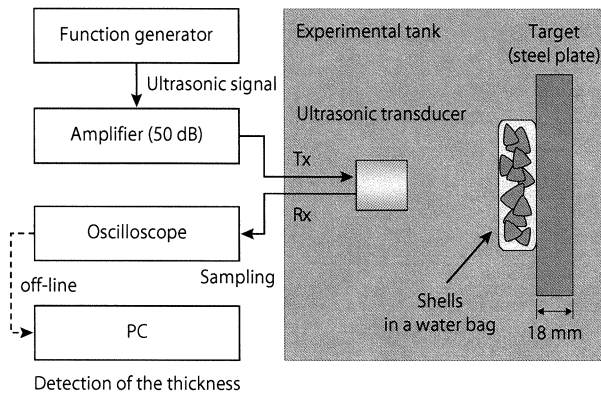


図-4 非接触肉厚測定の実験系

一般に販売されている鋼矢板の厚さは、およそ 8 mm ～ 28 mm である。先ず、この範囲を対象として、提案手法の検証を行った。5 種類の厚さの鋼板（8.5 mm, 11.5 mm, 18.5 mm, 24.5 mm, 28.0 mm）の非接触肉厚測定を行った結果を図-5 に示す。図中のプロット点は測定値、点線は真値を示している。

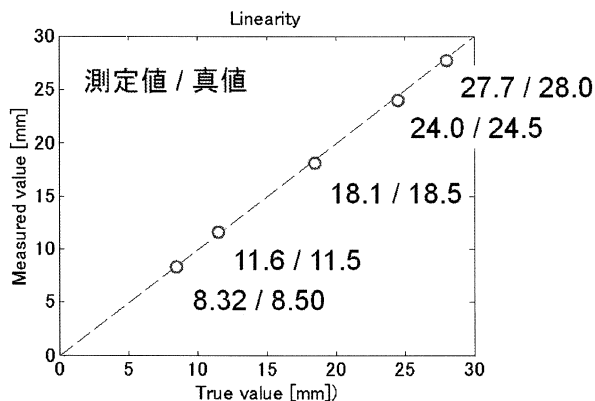


図-5 肉厚測定の結果

測定結果のグラフを見ると、測定値と真値が良く一致していることが分かる。測定値と真値の誤差は、最大で 0.5 mm、二乗平均誤差 0.3 mm であった。

次に、実際の状況を再現した非接触肉厚測定を行った。測定対象物には、鋼板（400 mm × 400 mm × 18 mm）を用いた。その際、付着生物の影響を調べるために、貝殻（主にムラサキガイ）を封入したウォータバッグを鋼板表面に取り付けることで、海生生物が付着した鋼構造物の状況を模擬した。

ウォータバッグを取り付けた状態の実験状況を図-6 に示す。なお、実験には真水を用いている。



図-6 非接触肉厚測定の実験状況

超音波送受波器は、水中直動機を用いて鋼板から焦点距離の位置に固定した。測定された波形を図-7 に示す。上側は何も付着していない状態の鋼板を計測して得られた波形である。付着物がいないため、515 μs 以前の時刻に応答はない。515 μs ～ 520 μs に振幅の大きい鋼板表面からの反射があり、その後 6 μs 間隔の多重反射を確認できる。この値と鋼鉄の音速 $c = 5941 \text{ m/s}$ を式(2)に代入すると、肉厚 D は 17.8 mm と算出される。誤差は 0.2 mm (1 %) である。下側は同様の鋼板に貝殻入りのウォータバッグを取り付け場合に測定された波形である。付着物がいない場合とは異なり、505 μs ～ 515 μs に貝殻からの反射を確認できる。付着物がいない場合と同様に鋼板表面からの反射の後に 6 μs 間隔の多重反射を認められる。今回の測定条件では、付着物の有無に関わらず同じ精度 1 % で計測できた。

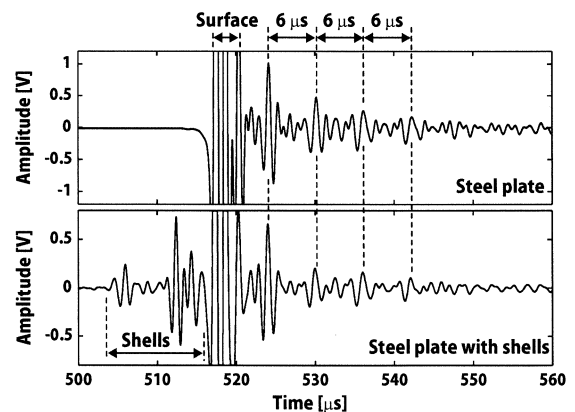


図-7 測定された波形

4. 鋼管杭式栈橋模型の非接触肉厚測定

提案手法の有効性を確認するために、潜水士による性能・運用試験を実施した。実際の測定環境を模

擬するため、試験は図-8の港湾空港技術研究所・水中作業環境再現水槽において行われた。当該水槽は、長さ30 m、幅10 m、水深6 mで1800 m³の容量があり、最大波高50 cm、周期0.7～2.4秒の規則波／不規則波を造波することが可能である。また、鋼管杭式栈橋模型が設置されており、実環境に近い条件で試験が行える。栈橋模型の脚部（鋼管）には塗装による被覆防食が施されており、施工時の公称肉厚は9 mmを維持していると考えられる。

測定対象物を栈橋模型脚部の鋼管とした。水中において、潜水士が超音波送受波器を保持して、測定対象物に向け、位置を固定した状態で測定を実施した。試験の状況を図-9に示す。

港湾空港技術研究所
水中作業環境再現水槽

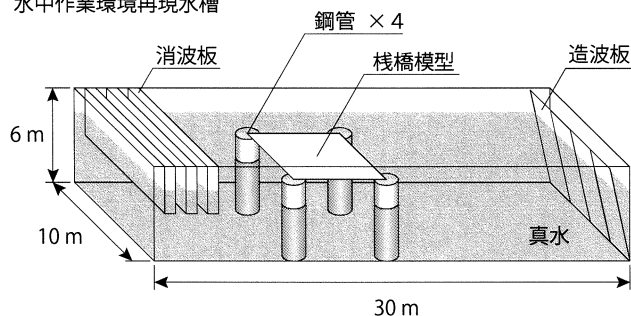


図-8 水中作業環境再現水槽

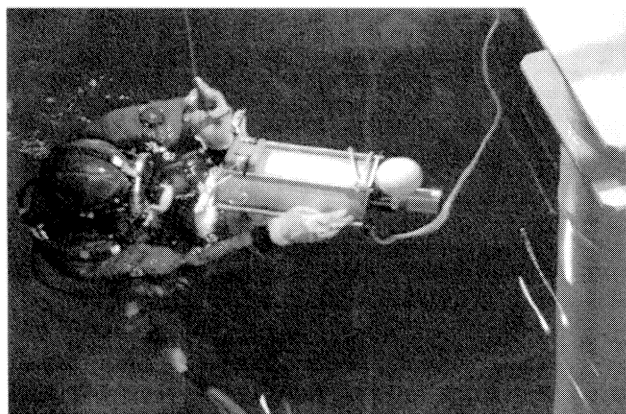


図-9 性能・運用試験の状況

測定された波形の一例を図-10に示す。図上側は、測定された波形の全体、下側は、その一部分の拡大となっている。拡大部を見ると、多重反射を確認することができる。その間隔は、3.1 μsであり、式(2)に代入して算出した肉厚は9.2 mmであった。したがって、誤差は+0.2 mmである。公称の肉厚よりも厚い測定結果となったのは、被覆防食の厚みが影響したことによると考えられる。

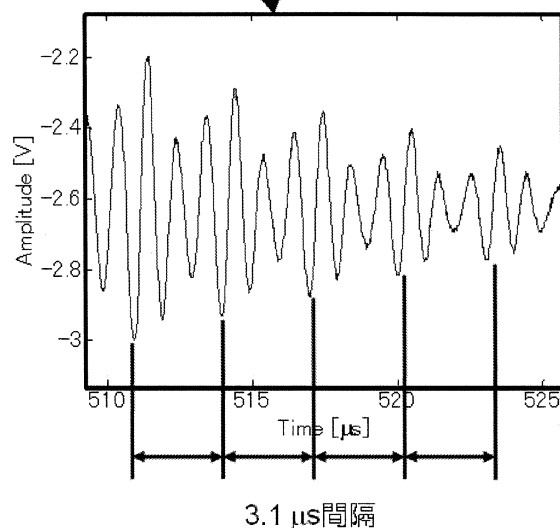
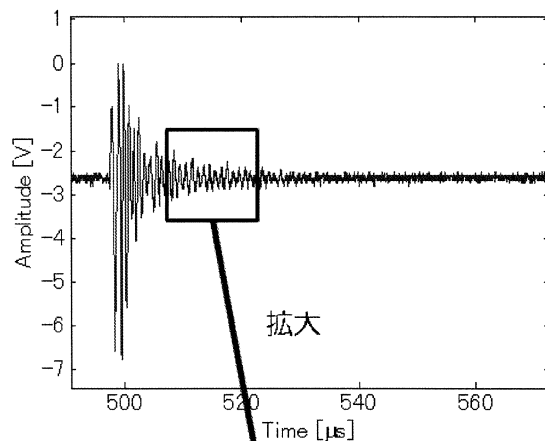


図-10 観測された多重反射波形の一例

5. まとめ

港湾鋼構造物を点検診断する手法のひとつとして、超音波による肉厚測定手法について検討した。超音波の多重反射を利用することで、非接触で肉厚を計測できる手法を提案して、実際の状況を模擬した水槽試験により提案手法の有効性の検証を行った。その結果、最大誤差0.5 mm以下で肉厚を測定できることを確認した。また、潜水士の運用による鋼管杭式栈橋模型の測定試験においても十分な精度で肉厚測定できることを確認し、本手法の有効性を示した。

参考文献

- 1) 財団法人 沿岸開発技術研究センター、港湾の施設の維持管理技術マニュアル、沿岸技術ライブラリー、No. 26、pp. 105-110 (1999)。