

独立行政法人港湾空港技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

Vol.48 No.4 December 2009

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 48 卷 第 4 号 (Vol. 48, No. 4), 2009年12月 (December 2009)

目 次 (CONTENTS)

杭の軸直角方向抵抗性能を推定するための Chang のモデルに用いる地盤反力係数の新たな推定方法の提案 菊池喜昭.....	3
(Horizontal Subgrade Reaction Model for Estimation of Lateral Resistance of Pile Yoshiaki KIKUCHI)	
断面修復を施したコンクリート床版の鉄筋腐食性状に関する検討 加藤絵万・ 審良善和・ 岩波光保・ 横田弘.....	23
(Corrosion Behavior of Steel Bars in Reinforced Concrete Slabs Repaired by Partial Patching Ema KATO, Yoshikazu AKIRA, Mitsuyasu IWANAMI, Hiroshi YOKOTA)	
水中音響レンズを用いた超音波式三次元映像取得装置の開発 松本さゆり・ 片倉景義・ 吉住夏輝.....	53
(Development of Underwater Three-Dimensional Imaging SONAR System with Acoustic Lens Sayuri MATSUMOTO, Kageyoshi KATAKURA, Natsuki YOSHIZUMI)	
空港アスファルト舗装剥離の非破壊探査方法の提案 前川亮太・ 蘇凱・ 水上純一・ 坪川将丈.....	71
(Proposals of non-destructive methods to detect stripping damages in airport asphalt concrete layers Ryota MAEKAWA, Kai SU, Junichi MIZUKAMI, Yukitomo TSUBOKAWA)	
水中鋼構造物の非接触式肉厚測定器の開発 吉住夏輝・ 松本さゆり・ 片倉景義.....	89
(Development of Noncontact Thickness Gauging Equipment for Underwater Steel Structure Natsuki YOSHIZUMI, Sayuri MATSUMOTO, Kageyoshi KATAKURA)	
流出油回収装置への蒸気エゼクタの応用 藤田勇・ 吉江宗生・ 竹崎健二.....	109
(Steam-Driven Ejector Applied to Spilled Oil Recovery Isamu FUJITA, Muneo YOSHIE, Kenji TAKEZAKI)	

水中鋼構造物の非接触式肉厚測定器の開発

吉住 夏輝*・松本 さゆり**・片倉 景義***

要 旨

港湾構造物のような水中鋼構造物の検査を目的とした非接触式の肉厚測定機を開発した。従来の接触式の検査手法に比べ、非接触式とすることで効率的な検査が可能である。まず、非接触測定に必要なキーデバイスとして、大口径を有する広帯域超音波送受波器を製作した。この送受波器は、高出力な超音波を被測定物の表面に収束して、その一部を内部に進入させる。進入した超音波は被測定物の内部で厚さ方向に伝搬して、鋼鉄と水の境界面で反射を繰り返す多重反射と呼ばれる状態となる。本報告では、この多重反射を検出することによって非接触での肉厚測定を可能にした。提案手法の有効性を確認するために、小型水槽試験を行った。厚さ 8.5 mm から 28 mm の鋼板の肉厚測定を実施した結果、測定誤差は最大で 0.5 mm であった。更に貝の付着を再現した鋼板の肉厚測定においても同様の誤差で測定できることを確認した。以上の結果から測定原理の有効性が確かめられた。測定条件として被測定物と送受波器の位置関係について検討した結果、距離を 250 mm から 450 mm まで、角度を最大 3 °に保持しなければならないことが分かった。次に、実用性について検討するため、潜水士による水槽及び実海域試験を実施した。水槽試験では、実物大鋼管杭式栈橋模型の脚部鋼管の肉厚測定を行った。実海域試験は、北九州田野浦岸壁の鋼矢板の肉厚測定を行った。潜水士による測定を可能とするため、超音波送受波器、増幅器、水密容器、解析装置から成る非接触式肉厚測定機を製作した。試験の結果、肉厚の測定誤差は 1 mm 以下であり、実用上の性能を十分に有していることが示された。

キーワード：非接触，超音波，多重反射，肉厚測定

* 施工・制御技術部計測・制御研究チーム特別研究員

** 施工・制御技術部計測・制御研究チーム研究官

*** 客員研究官

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所

電話：046-844-5062 Fax：046-844-0575 e-mail:yoshizumi@pari.go.jp

Development of Noncontact Thickness Gauging Equipment for Underwater Steel Structure

Natsuki YOSHIZUMI*
Sayuri MATSUMOTO**
Kageyoshi KATAKURA***

Synopsis

A novel noncontact thickness gauging equipment, which aims to inspect underwater steel structures in ports, was developed. Non-contact measurement is efficient inspection method compared with conventional contact measurement. Wideband ultrasonic transducers with large aperture were developed as a key device for noncontact measurement. High power ultrasonic pulse radiated from the transducer is focused on the surface of the objective structure, and travels inside along thickness direction. Then, many reflections occur at boundary surfaces such as between water and steel. The reflections are called multiple reflections. In this report, detection of the reflections makes noncontact measurement possible. To verify the validity of this measuring principle, test tank experiments were carried out. Steel plates of varied thicknesses, from 8.5 mm to 28 mm, were measured by the test tank experiments. Thicknesses with up to 0.5 mm error were obtained. In addition, steel plate attached shells was successfully measured with the same accuracy. The results showed the validity of the proposed method. Positional relationship, distance and angle between the object and the transducer, was also evaluated. The transducer should be held at the distance from 250 mm to 450 mm and the angle up to 3 ° from the results. Next, test tank experiment with full-scale model of steel pipe pile and field tests at Tanoura wharf were carried out for verification of practicality. The measurements were performed by a diver. Consequently, the noncontact thickness gauging equipment which consists of a transducer, amplifier, watertight tank and analyzer was developed for the diver measurements. Thicknesses of objectives were measured. The obtained errors were less than 1 mm. The ability for practical use was confirmed by the results.

Key Words: noncontact, ultrasonic, multiple reflections, thickness gauging

* Postdoctoral fellow, Measurement and Control Technology Group, Construction and Control Department

** Researcher, Measurement and Control Technology Group, Construction and Control Department

*** Visiting Senior Researcher

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5062 Fax : +81-46-844-0575 e-mail:yoshizumi@pari.go.jp

目 次

要 旨	89
1. まえがき	93
2. 非接触式肉厚測定器	93
2.1 測定器の概要	93
2.2 特徴	93
2.3 測定原理	94
3. 小型水槽試験	94
3.1 試験の概要	94
3.2 使用機材	94
3.3 音軸方向の強度分布測定	95
3.4 測定距離と誤差の関係	96
3.5 入射角と振幅の関係	96
3.6 被測定物と超音波送受波器の位置関係	97
3.7 測定精度の検証	97
4. 潜水士による性能試験	98
4.1 試験の概要	98
4.2 使用機材	99
4.3 測定精度の検証	99
5. 実海域試験	100
5.1 試験の概要	100
5.2 使用機材	101
5.3 測定精度の検証	101
5.4 実運用上の問題点と改善策	101
6. 結論	103
7. あとがき	104
謝辞	104
参考文献	104
付録A	105
付録B	108

1. まえがき

周囲を海に囲まれた我が国には、数多くの港湾施設が存在している。特に、鋼矢板式岸壁や鋼管杭式栈橋等の港湾鋼構造物は、コンクリートの構造物に比べると、施工が容易で低コストに高い信頼性が得られる長所があるため、時代の要請もあり、高度経済成長期に盛んに建設された。

港湾鋼構造物は、海水・砂・波浪に直接曝される極めて過酷な環境下に置かれ、腐食から免れることができない。健全な状態を保ち、施設を安全に利用していくためには、適切な時期に点検・診断を実施して、必要に応じた補修等の対策施工を施さなければならない。

既に述べたように、我が国では一時期に多くの鋼構造物が作られた経緯がある。近年、それらの構造物が耐用年数に近づき、老朽化が問題視されるようになってきている。このような事情から点検・診断を効率的に行える技術の確立が望まれている。

現在は、点検・診断の一手法として、超音波厚み計による肉厚測定¹⁾が広く実施されている。現有の肉厚から構造物の健全度を診断する手法である。超音波を送受波する探触子を被測定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する。これに鋼材中を伝搬する超音波の速度（音速）を乗ずることで肉厚が得られる。理想的な測定環境であれば、極めて高精度で安定した測定値を取得できる。しかし、港湾領域にある構造物は、被測定物の表面に貝等の海生生物が付着していることや波浪の影響下にあつて安定した測定値の取得が難しいことなどから、理想的な測定環境とはいえない。

従来の接触式による測定では、事前にケレン棒等を用いて付着物を除去した後、研磨しなければならない。この作業は、全工程の半分以上を占めており、作業効率悪化の主たる原因となっている。全ての構造物を検査することは、時間的にもコスト的にも困難であり、現状のところ、代表点におけるサンプル測定で現有板厚の評価を行っている。また、鋼材や防食工を傷つけて、かえって腐食を進行させる恐れもあるため、防食という観点からはケレン作業はしないことが望ましい。取り除かれた付着物は産業廃棄物として処理しなければならないため、そのコスト負担などの問題も含んでいる。

係留施設の運用も考慮すると、1日当たり1パス程度を測定できることが望ましい。従来の接触式による測定手法では困難であり、ケレン作業を必要としない非接触式の測定手法が望まれる。山田ら²⁾は、電磁誘導を利用することで比較的薄い構造物の肉厚測定に成功しているが、

厚い構造物への対応には問題を残している。一方、著者らは他に例のない超音波による非接触式肉厚測定器に関する研究開発を行った³⁻⁹⁾。超音波による非接触肉厚測定は一般に困難とされており、本研究は、これを可能にして実用化することを目的としている。

本報告では、キーデバイスとして、従来には存在しなかった非接触肉厚測定用の超音波送受波器を製作した。これに超音波信号発生器や増幅器等の要素を組み合わせることで測定器を構成した。水槽及び実海域において性能・運用試験を実施して、測定精度の検証を行った。

2. 非接触式肉厚測定器

2.1 測定器の概要

非接触式肉厚測定器の概要を図-1に示す。測定する際は、先ず、海中において潜水士が測定器を保持して被測定部に照準を合わせる。測定器に取り付けられている超音波送受波器から超音波が海中に放射され、超音波ビームを形成する。海中を伝搬した超音波は、被測定部の表面に収束して焦点を結ぶ。その一部は被測定部の内部に進入して、多重反射と呼ばれる現象を引き起こす。その多重反射波を超音波送受波器で検出することで、被測定物の肉厚が得られる。

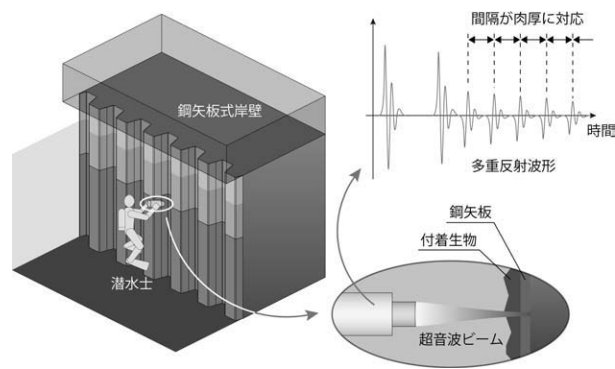


図-1 非接触式肉厚測定器の概要

2.2 特徴

この装置の特徴は、超音波の多重反射に着目して、これを積極的に利用することで、非接触での肉厚測定を可能とした点にある。非接触となることで超音波送受波器の連続走査による肉厚の空間分布測定が可能になる。従来は疎な点状の測定データに比べて密な線状の測定データが得られる。局所的に腐食が進行した食孔の検出も期待できる。

また、一度の送波に対して、多数の多重反射を検出することができたため、それらを平均することで雑音の抑圧

や測定精度の向上も期待できる。

2.3 測定原理

超音波には、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性質がある。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)によって与えられる。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であり、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。

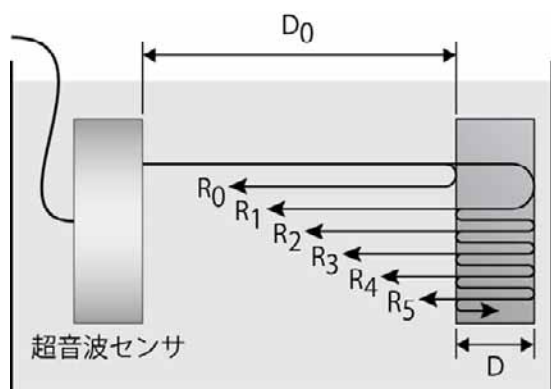


図-2 超音波の多重反射 (イメージ)

多重反射の状態の時、**図-3**に示すような波形が超音波送受波器で観測される。最初に送波波形が観測され、次に超音波送受波器と被測定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、振幅が比較的大きい表面からの反射が観測される。更に遅れて、一定間隔 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に要した時間である。被測定物の音速を c とすると、肉厚 D は次式(2)によって与えられる。

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

本手法では、空間的に密な測定データが大量に得られることから、多重反射の検出、間隔の読み取り、肉厚の算出の自動化が望まれるところであるが、現状では、測定者が各測定波形を解析して、波形の特徴点(例えば、最大値)に着目して、その時間を読み取ることで、肉厚を算出している。自動化が今後の課題である。

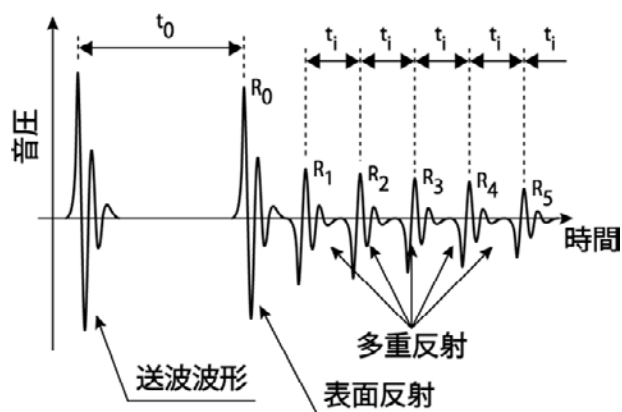


図-3 超音波の多重反射 (イメージ)

3. 小型水槽試験

3.1 試験の概要

種々の試験用鋼板について、測定原理に基づいた肉厚測定を実施して測定条件、精度について検証した。

3.2 使用機材

非接触肉厚測定用の超音波送受波器を製作した(**図-4**を参照)。広帯域なパルスを送波できるよう、圧電素子には1-3コンポジット材を採用した。超音波を送波する放射面の有効直径は80 mmである。曲率半径300 mmで弧を描いており、送受波器からの距離300 mmで幾何学的な焦点を結ぶ収束型の送受波器である。超音波を収束させると、焦点において超音波の強度が強まるとともに、方位方向の分解能が高まる。

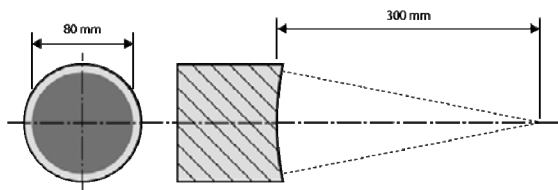


図-4 非接触肉厚測定用超音波送受波器

試験水槽中での位置決めには図-5の水中直動器を用いた。水中で広帯域超音波送受波器を保持しながら、音軸方向に任意に移動できるアルミ製の直動器である。可動範囲430 mmにわたって、0.1 mmの精度で位置決めが可能である。

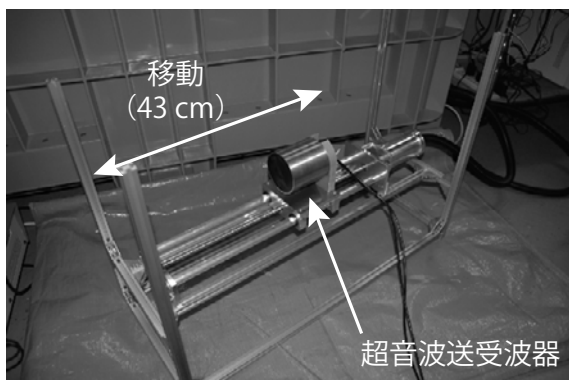


図-5 水中直動器の外観

測定系を図-6のように組んだ。超音波信号の発生器としてエヌエフ回路設計ブロック社製ファンクションジェネレータWF-1946B, 増幅器としてE&I社製RF (高周波) アンプ2100L, 波形の表示・記録装置としてLeCroy社製オシロスコープWave Surfer 454を用いた。最初に、水中直動器で超音波送受波器を位置決めする。ファンクションジェネレータで超音波信号 (750 kHz正弦波1波) を発生させる。それをRFパワーアンプで50 dB (316倍) に増幅した後、超音波送受波器に入力する。入力された電気信号は、送受波器で機械的振動 (超音波) に変換され、送受波器の前面部分から水中に放射される。超音波は水中を伝搬して、測定対象物に到達する。超音波は被測定物で

反射され、水中を伝搬して再び送受波器に戻る。超音波は、送受波器で再度変換されて電気信号が出力される。超音波送受波器の入出力信号をオシロスコープで取得する。オフラインでパーソナルコンピュータを用いて取得データを信号処理する。

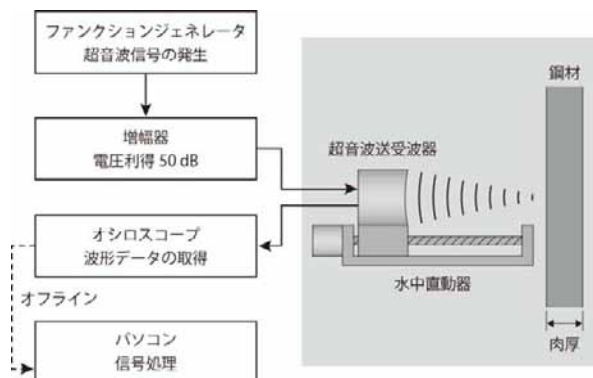


図-6 測定系

3.3 音軸方向の強度分布測定

音軸方向の超音波強度の空間分布を測定した。測定系を図-7に示す。真水の小型水槽内に反射板として18 mm厚の鋼板を設置した。水中直動器を用いて送受波器を反射板の前方150 mmから600 mmまで、20 mm間隔で移動して、各測点で超音波を送受波した。図-8に測定波形のイメージを示す。超音波強度は、反射板からの第一反射の振幅、即ち、振幅の最大値と最小値の差Appで評価する。

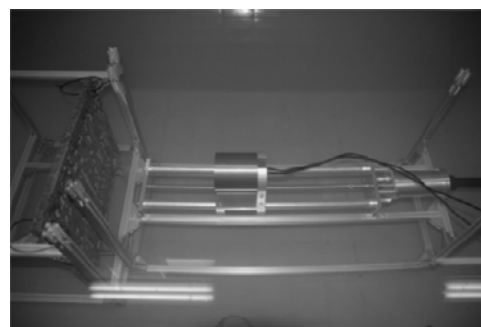
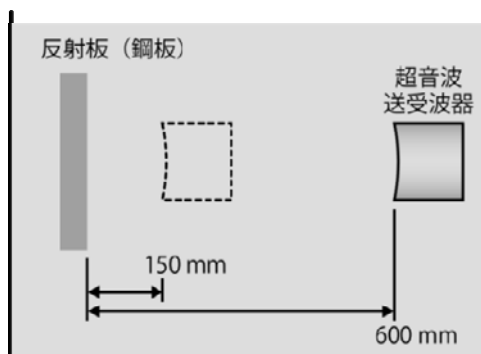


図-7 強度分布の測定状況

測定された反射強度の分布を図-9に示す。横軸は反射板と送受波器の距離、縦軸は反射強度を表している。当初の設計通り300 mm付近で反射波の強度が最大の値となり焦点を結んでいることが確認された。焦点付近の領域では、それ以外の領域に比べて10倍程度の強度となった。送受波器からの距離が250 mm から450 mmまでの区間で、反射強度が最大値の半値以上の値となっている。測定距離を350 mm ± 100 mmに保てば、比較的強い受波が得られ、雑音の少ない測定を期待できることが分かった。

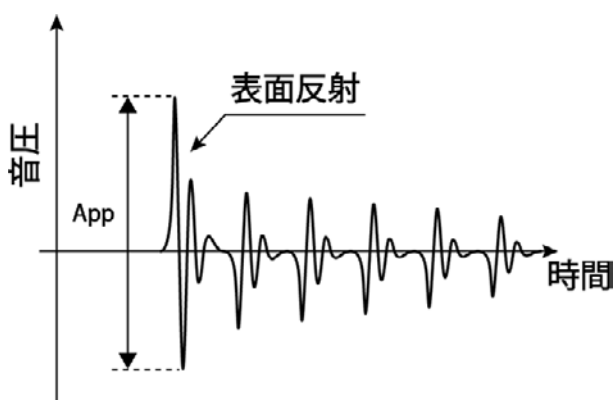


図-8 測定波形のイメージ

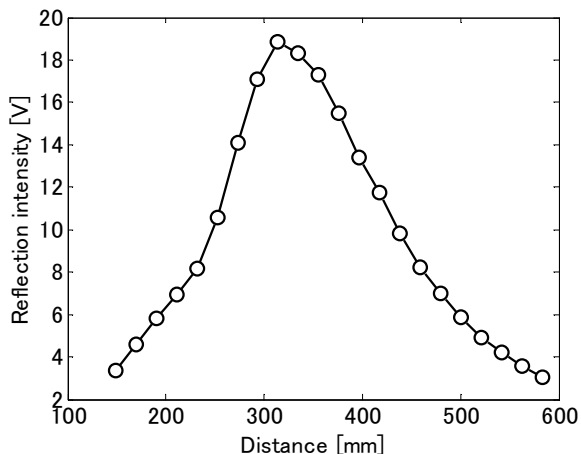


図-9 音軸方向の超音波強度分布

3.4 測定距離と誤差の関係

同様の測定条件で実際に肉厚測定を行い、測定距離と誤差の関係について検証した。図-10に誤差の測定結果を示す。横軸は超音波送受波器と鋼板の距離、縦軸は肉厚の測定誤差を表している。距離が200 mmよりも遠い領域での誤差は約1 mm程度であった。逆に200 mmよりも近い領域では誤差が増大している。これは、鋼板と超音波送受波器の距離が近い領域では、直達波以外の超音波が干渉して精度が低下したためであると考えられる。そこで

測定距離を200 mm以上に設定する必要があることが分かった。

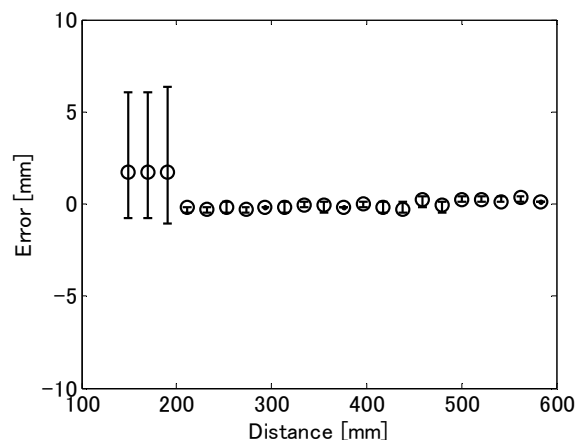


図-10 測定誤差

3.5 入射角と振幅の関係

収束型の超音波送受波器を用いているため、送受波器と被測定物が正確に正対していなくても、超音波の送受波が可能であると考えられる。実際に超音波の送受波を行って、送受波器と鋼板が成す角度、即ち入射角と受波波形の振幅の関係について検討した。鋼板と送受波器が正対して平行の状態を0°とする。図-11のように超音波送受波器を傾け、入射角を0°から5°まで変化させて測定を行った。

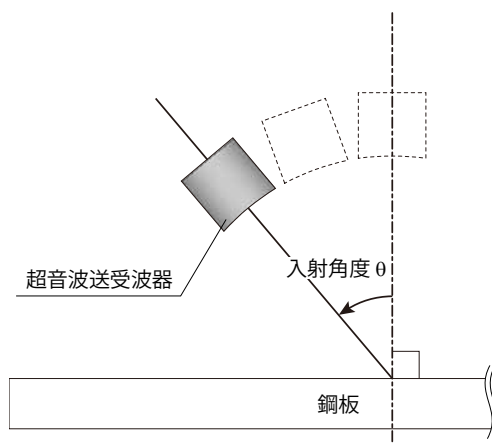


図-11 鋼板と超音波送受波器の位置関係

図-12は、入射角が0°、0.8°、1.6°の時に測定された多重反射波形である。入射角の増加にともなって、振幅が減少している。

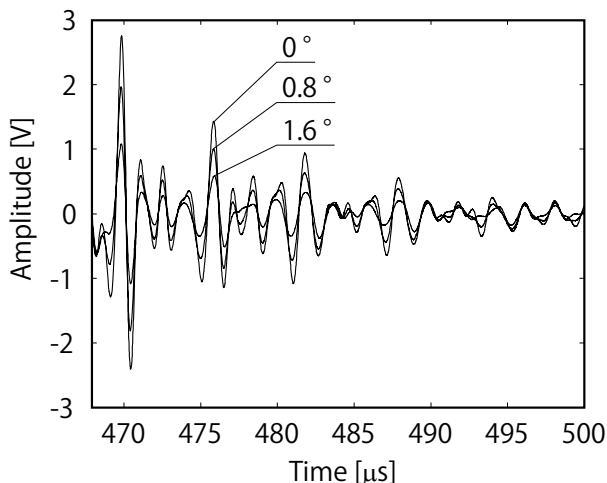


図-12 超音波の多重反射 (実測)

図-13に入射角に対する多重反射波の強度の推移を示す。横軸は入射角、縦軸は多重反射波の最大振幅である。入射角を 3° 以上とすると、振幅が小さくなり、測定器のノイズレベルとほぼ同等のレベルとなり測定が困難となった。入射角を $\pm 3^\circ$ 未満になるよう送受波器を保持する必要がある。

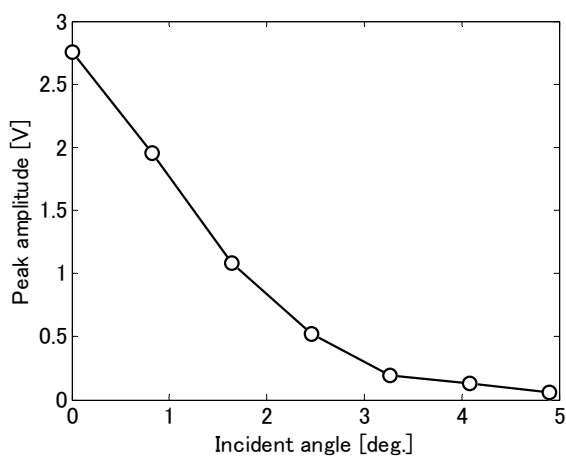


図-13 入射角と振幅の関係

3.6 被測定物と超音波送受波器の位置関係

3.4と3.5の結果から、超音波送受器を被測定物に対して、距離 $350\text{ mm} \pm 100\text{ mm}$ 以内に保持することによって、所望の性能が得られることが分かった。また、入射角を $\pm 3^\circ$ 以内に保持することで、測定に必要な受信強度が得られることが分かった。

3.7 測定精度の検証

図-14の鋼板を被測定物として、測定原理に基づく非接触肉厚測定を実施して、測定精度を検証した。一般に販

売されている鋼矢板の厚さは、およそ $8\text{ mm} \sim 28\text{ mm}$ であることから、この範囲に対応した5種類の厚さの鋼板(8.5 mm , 11.5 mm , 18.5 mm , 24.5 mm , 28.0 mm)を用意した。上記の各値は、ノギスによる測定値であり、これらを真値とする。

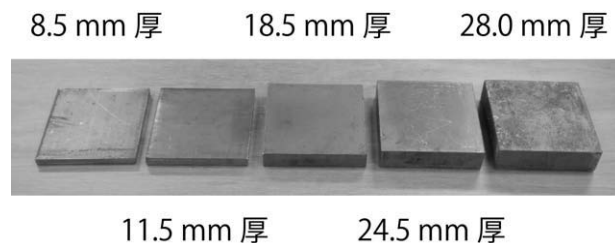


図-14 精度検証用の鋼板

小型水槽内に超音波送受波器と鋼板を正対させて設置した。その間隔は焦点距離 30 cm である。この状態で超音波を送受波して、非接触での肉厚測定を実施した。その結果を図-15に示す。図中のプロット点は提案測定法による測定値を表している。

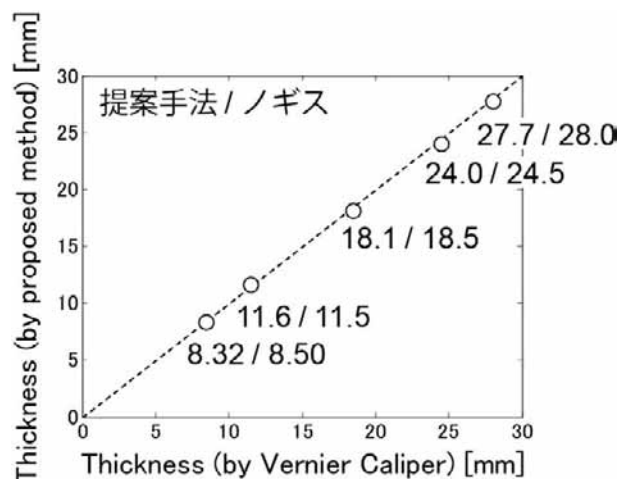


図-15 測定結果

測定値と真値が良く対応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、実際の測定環境に近い状況で測定精度を検証した。実験の状況を図-16に示す。実環境を模擬するために、主にムラサキイガイの貝殻を封入したウォータバッグを鋼板表面に取り付けて、海生物が附着した状況を再現した。なお、実際には、海水中で測定するものであるが、実験には真水を用いた。海水か真水かの違いによる影響は、主に反射率の違いとなって現れる。十分な反射強度が得られる本実験においては、精度への影響はない。

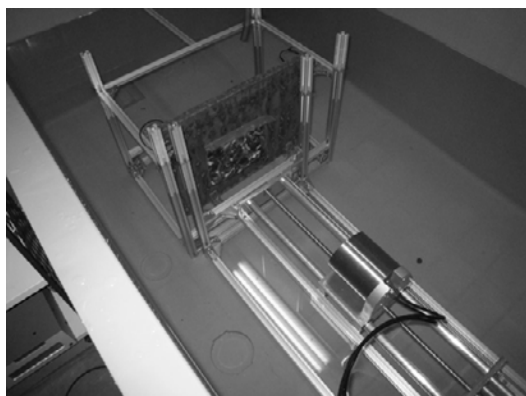


図-16 測定状況

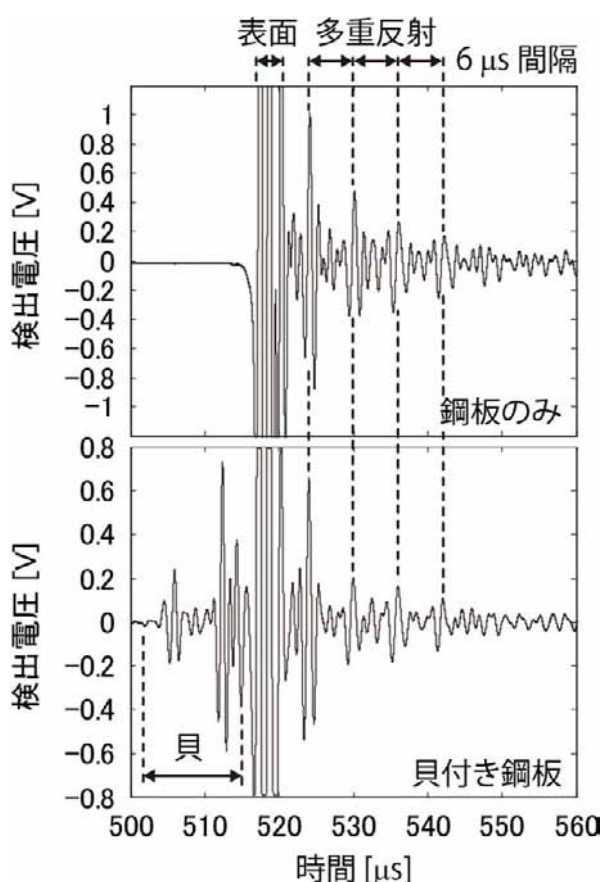


図-17 超音波の多重反射 (実測)

水中直動器により超音波送センサの位置を焦点距離の位置に調整した。測定された波形を図-17に示す。上側は何も付着していない状態の鋼板を測定して得られた波形である。付着物がないため、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することができる。この値と鋼鉄の音速 $c = 5941 \text{ m/s}$ を式(2)に代入すると、板厚は17.8 mmと算出される。誤差は0.2 mm

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。付着物がない場合とは異なり、505 μs ~ 515 μs に貝殻からの反射を確認することができる。付着物がない場合と同様に鋼板表面からの反射の後に6.0 μs 間隔の多重反射を認められる。即ち、今回の測定条件では、付着物の有無に関わらず同じ精度で測定できることが確認された。

4. 潜水士による性能試験

4.1 試験の概要

実際の測定に近い状況で実運用上の問題点を明らかにするため、平成21年1月29日(木)~30日(金)の2日間にわたり、港湾空港技術研究所・水中作業環境再現水槽(図-18)において、潜水士の運用による非接触肉厚測定装置の性能試験を実施した。当該水槽は、長さ30 m、幅10 m、水深6 mで1800 m^3 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(図-19)。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、施工時の公称板厚9 mmを維持していると考えられる。



図-18 水中作業環境再現水槽

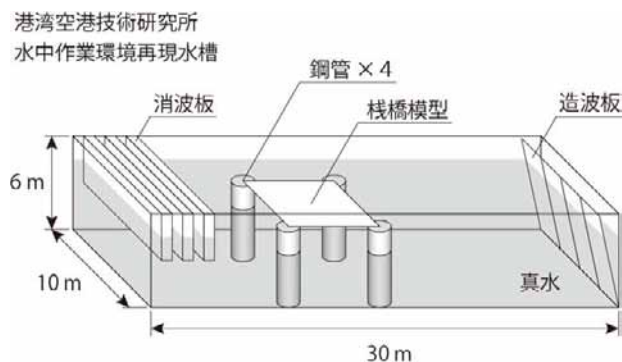


図-19 水中作業環境再現水槽

4.2 使用機材

潜水士による非接触肉厚測定を可能にするため、図-20に示すような非接触式肉厚測定器を製作した。当該測定器は、プリアンプを内蔵した水密容器、ワイヤーガイド、ハンドル、超音波送受波器用ジグ、超音波送受波器、水中コネクタ、ケーブル等から構成される。総重量は、気中で約15 kgである(但し、ケーブルの重量は含まない)。必要に応じて、浮体及び錘を取り付けることで、水中で中性浮力とするとともに、重量バランスを調整する。水深10 m以内での使用を想定した耐水压を備えている。ワイヤーガイドが設けられており、水中において鉛直方向に張られたガイドワイヤに沿って移動することができる。ガイドワイヤは図-21の実験用ジグにより設置される。50 kgの錘を電動ウインチにより昇降する。このガイドワイヤの利用により、測定器と岸壁との距離を一定に保つことが可能である。潜水士はハンドルを両手で持って装置が測定対象領域に正対するように保持する。水密容器は、水中コネクタを介して陸上部と接続されており、電源(AC 100 V)の供給、超音波信号の送受信が行われる。既存の装置に接続するため、電源ケーブルはAC 100 V、信号ケーブルのインピーダンスは50 Ωで気中部のコネクタはBNCとした。スパイラルチューブでケーブルを被覆することで、屋外での使用に対する耐久性を確保した。実際に製作された測定器及び実験用ジグを図-22と図-23にそれぞれ示す。

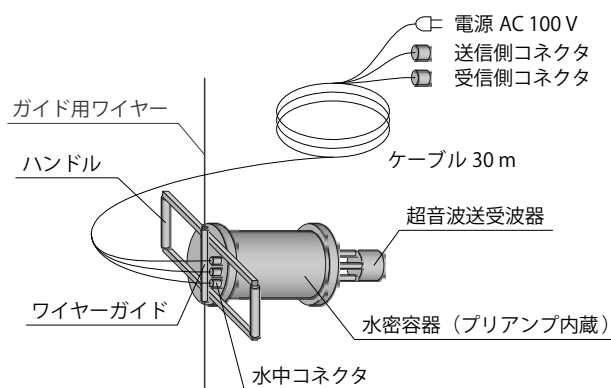


図-20 非接触式肉厚測定器 (イメージ)

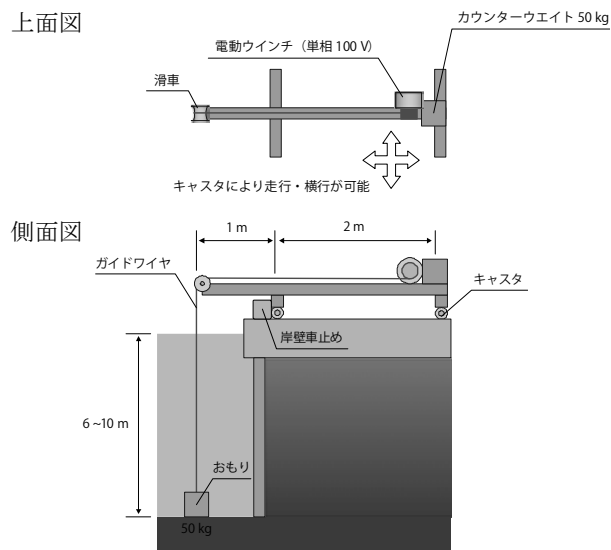


図-21 実験用ジグのイメージ図

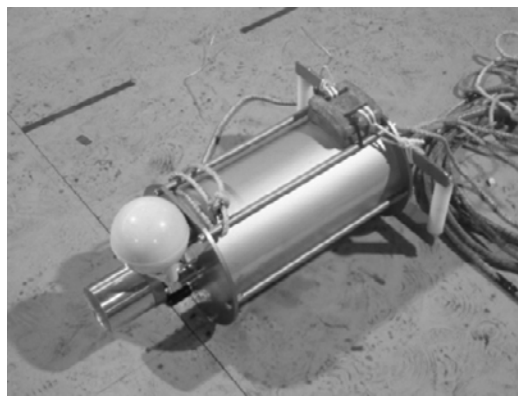


図-22 非接触式肉厚測定器

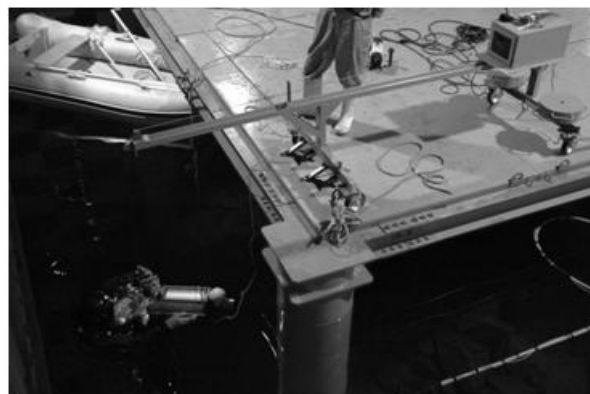


図-23 実験用ジグ

その他に、比較データを取得するために、接触式の超音波厚み計を用いた。

4.3 測定精度の検証

栈橋模型脚部の鋼管を被測定物として、非接触肉厚測

定を実施して、測定精度について検証した。水中において、潜水士が測定器を被測定物に向けて測定を行った。試験の状況を図-24に示す。

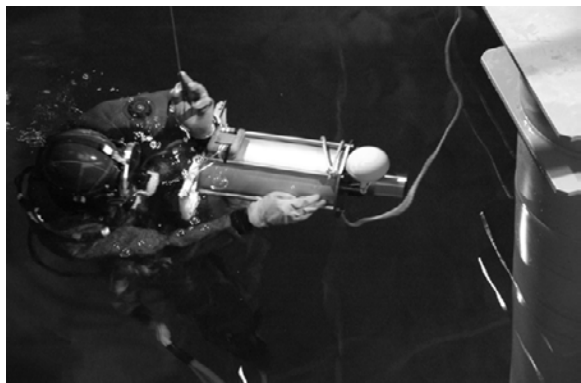


図-24 潜水士による非接触肉厚測定

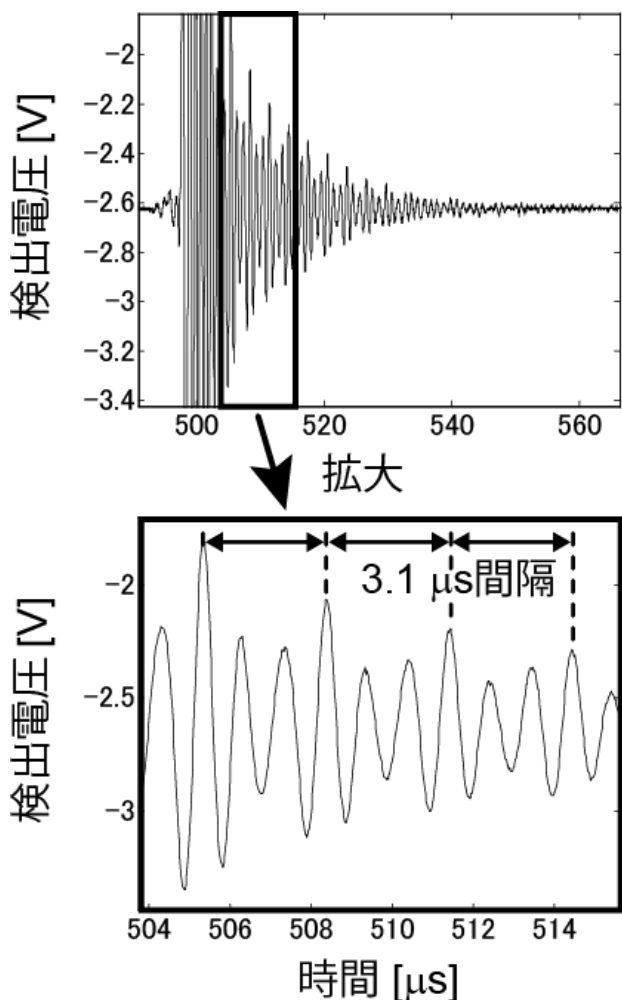


図-25 超音波の多重反射 (実測)

測定された波形の一例を図-25に示す。図の上側は、測定された波形の全体、下側は、その一部分を拡大した図

である。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、 $3.1 \mu\text{s}$ で、式(2)に代入して算出した肉厚は 9.2 mm であり、測定誤差は 0.2 mm であった。各測定点とも同様の結果であった。潜水士運用による試験でも十分な測定精度が得られることが分かった。公称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ものと考えられる。また、今回の測定よりも多重反射の間隔が狭い場合、即ち、肉厚が 9 mm 以下である場合、多重反射同士が相互に干渉して、多重反射の検出及び間隔の読み取りが困難になると考えられる。したがって、この測定器で測定可能な下限肉厚は 9 mm 程度であることが判明した。

接触式の超音波厚み計による肉厚測定結果(付録B)によれば、 9 mm 前後の肉厚があることが分かったが、安定した測定値が得られなかった。原因は、塗装が影響したことが考えられる。

5. 実海域試験

5.1 試験の概要

全2回(各2日間)にわたり、図-26の北九州港田野浦岸壁にて、潜水士の運用による非接触肉厚測定装置の実海域試験(図-27)を実施した。この試験は、先に実施した水槽試験で得られた知見を元に、実海域において当該装置の性能を試験するものである。水槽実験と同様に超音波厚み計との比較を行う。実験地及び実施日に関する情報を以下に示す。

・第1回実海域実験

実施日 : 平成21年2月12日(木)～13日(金)
 対象岸壁 : 北九州港田野浦7号岸壁東側
 構造型式 : 鋼矢板セル

・第2回実海域実験

日程 : 平成21年3月3日(火)～4日(水)
 対象岸壁 : 北九州港田野浦4号岸壁西側
 構造型式 : 組合せ矢板



図-26 実験地

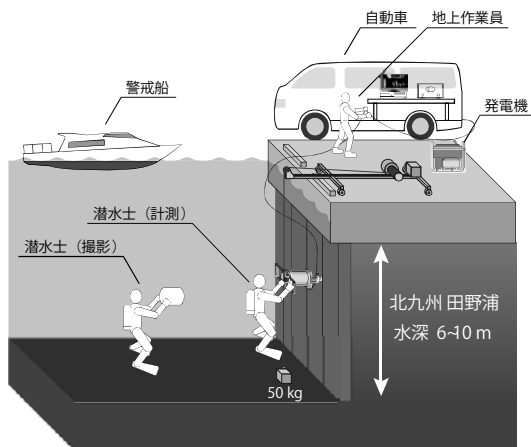


図-27 実海域試験 (イメージ)



図-28 田野浦岸壁

5.2 使用機材

肉厚測定には、水槽試験と同様の機材を使用した。その他に、海象条件の記録のため、超音波式波高計（多機能型海象観測装置<DL-2>）を用いた。

5.3 測定精度の検証

試験を実施した海域は、最大で流速が20 cm/sを超える厳しい環境であった（付録Aを参照）。田野浦7号岸壁において、非接触式肉厚測定器で取得した波形と肉厚の算出

値を図-29に示す。同様の測点を測定した結果（付録B）によれば、現有肉厚は9 mm前後である。既に述べたように、当該測定器の最低検出肉厚は9 mm程度である。水槽試験とは異なり、錆びが進行しており、また、海生生物が付着した影響もあり、十分な精度で測定できなかった。

次に、田野浦4号岸壁で試験を実施した。この岸壁の干満帯には、被覆防食が施されている。その直下から1 m間隔で測点①～③を設定して、接触式と非接触式で肉厚測定を実施した。接触式の測定結果（付録B）からは、28 mm弱の肉厚がることが分かった。図-30は、非接触肉厚測定の結果である。左側の列は付着物を除去する前、右側の列は付着物を除去した後の結果である。何れのグラフにおいても多重反射を確認することができる。各測点において左右のグラフを比較すると、付着物の影響で多重反射が不明瞭になっている。多重反射から読み取った時間間隔を元に算出した肉厚は、接触式と比較しても1 mm程度の差であった。

5.4 実運用上の問題点と改善策

(1) 測定開始までの準備作業時間

ジグの運搬、設置、アンカー設置とガイドワイヤの緊張まで、作業時間が3～4時間であった。現場の状況にあわせられるような実験用ジグの構造の工夫、移動の効率性や作業の迅速化の確保のための機械化等、今後、工夫の余地がある。

(2) 測定時の問題点と解決策

潮流、波浪、濁り等の海象条件に対する潜水作業の問題がいくつかあげられる。潜水士が肉厚測定装置をより正確に上下の垂直移動をさせるためには、潜水士自身の左右方向の身体の揺れや装置の動きを抑える必要がある。水槽実験のような海象条件が無い条件下でも、潜水士が装置を正確に固定するということが困難であった。実験用ジグにアルミ製梯子を固定し、着底させて作業上のガイドとする対策を講じた。

実海域実験においては、関門海峡という地域的な問題もあり、流速が20 cm/sec程度となると、身体が流れに大きく支配されてしまう。ガイド用の梯子を利用してもなお、自分の身体を支えていることが困難であるという意見が潜水士からあがった。また、水中が濁った状態での計測は、潜水士の視界の妨げとなり、測定位置及び潜水士の上下移動の状況の把握が困難であった。以上の運用上の問題に対して、以下の方策が考えられる

a) ガイド構造の改良

- ・ガイド用梯子を複数化
- ・強化及び大型化
- ・機械化、無人化

b) 測定器の改良

- ・レーザーポインタ等の追加による目標の補足性向上
- ・小型化による波浪や潮流などの影響軽減

(3) 潜水作業に関する考察

潜水士が直立の状態です浮上(上昇)することは自然な動きであるが、装置を両手で保持して直立した状態で下降するには、ドライスーツの空気抜きによる下降テクニ

ック等を含めて、動作的には非常にテクニックを要する。潜水作業における垂直移動は、下降するよりも上昇する方が測定しやすいと考えられる。

アルミ梯子等によるガイドを使って作業した場合には、装置からのケーブル取り出し位置が悪く、ガイドに引っかかりやすい問題があった。ケーブルの取り回しについて再検討するべきである。

岸壁から目標海域へ投入する際や波等の海象条件により装置が岸壁に衝突する可能性があるため、特に超音波送受波器等の繊細な部分に関しては、物理的な保護を強化する必要があると考えられる。

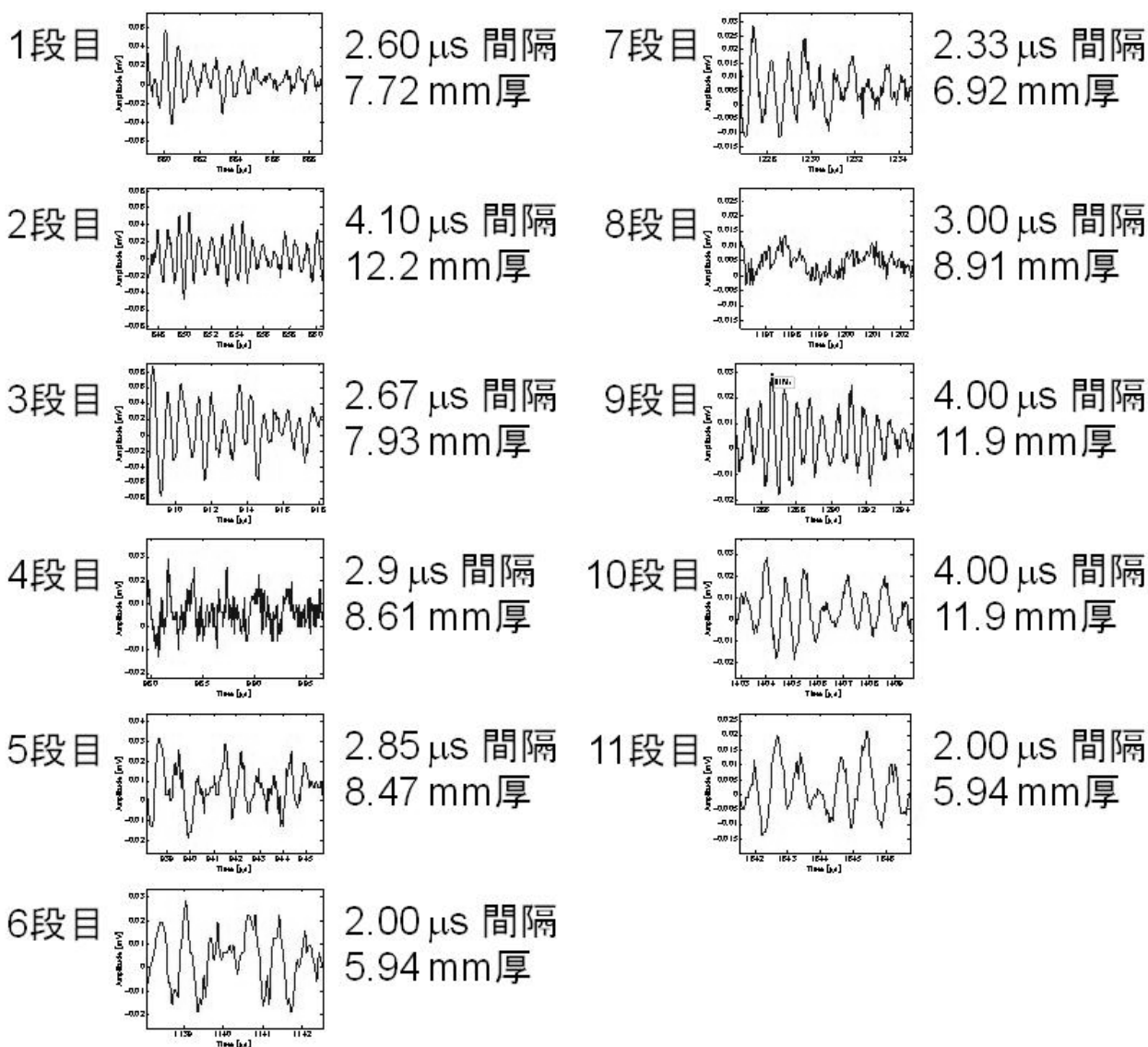


図-29 超音波の多重反射 (実測)

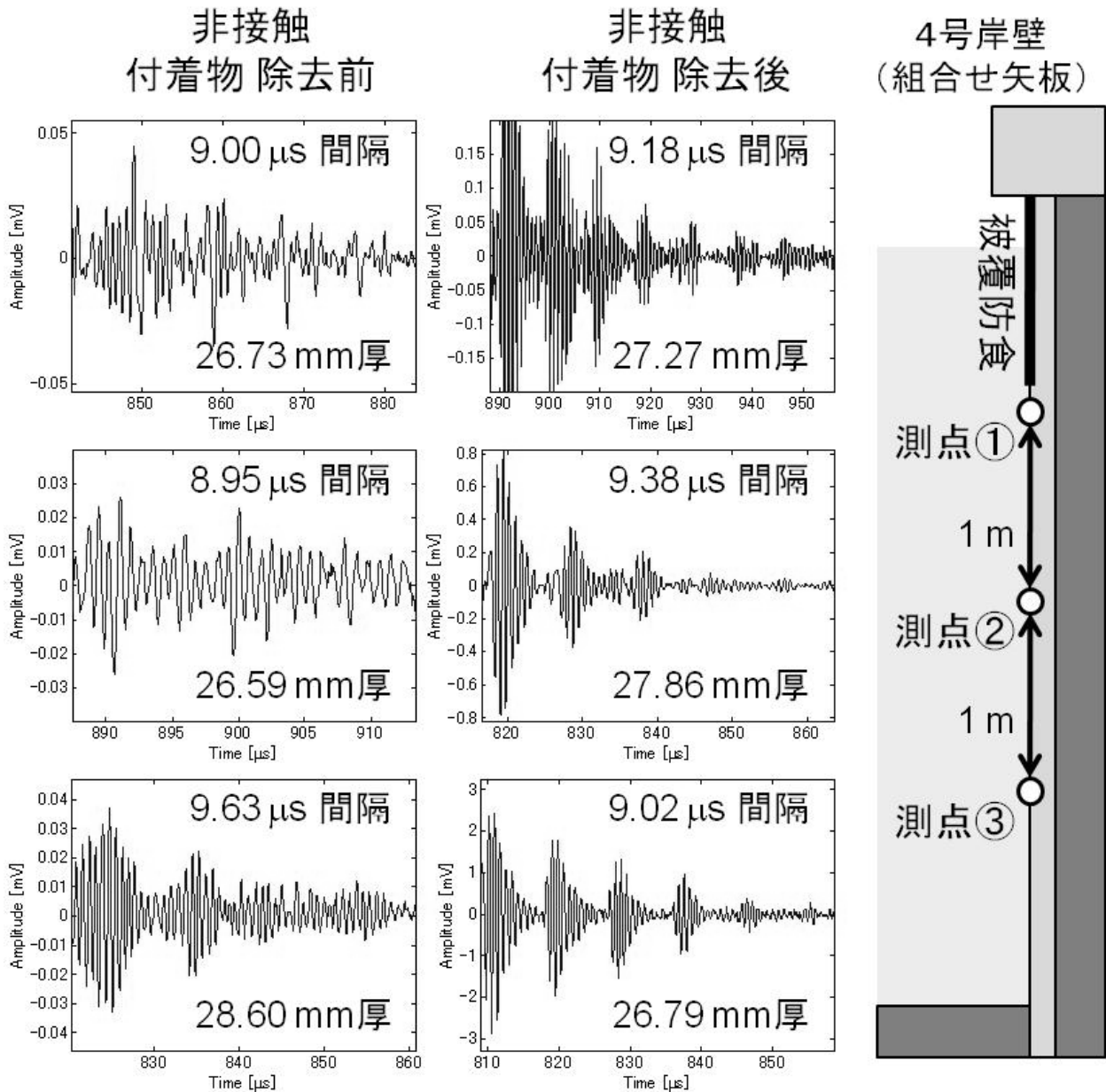


図-30 超音波の多重反射 (実測)

6. 結論

- ・他に類例のない超音波による非接触式肉厚測定器を開発した。
- ・非接触肉厚測定に必要なキーデバイスとして大口径(直径80 mm)の収束型広帯域超音波送受波器を製作した。
- ・超音波の多重反射を利用する測定原理を提案した。
- ・小型水槽試験の実施により、測定原理の有効性が確かめられ、理想的な測定条件下では、0.5 mm以下の精度で測定できることが示された。
- ・超音波送受波器と測定対象物の距離を 350 ± 100 mm以

内に保持することで、所望の精度で測定できることが示された。

- ・超音波送受波器と測定対象物の角度を $\pm 3^\circ$ 以内に保持することで、測定に必要な受波強度を確保できることが分かった。
- ・実運用性を検証するため、潜水士による実物大模型を用いた水槽試験及び実海域試験を実施した。
- ・今回製作した超音波送受波器で送波できるパルス幅は $3 \mu\text{s}$ 程度であるため、本測定器を用いて測定できる下限の肉厚が9 mmであることが判明した。
- ・実運用試験で、誤差1 mm以下で測定可能なことが示され、試験器として十分な能力を有していることが確認

された。

- ・付着物及び錆びの影響により、多重反射の検出が困難な波形が観測された。今後、多重反射の検出、間隔の読み取り、肉厚の算出の自動化が望まれる。
- ・潮流が速い場合には、ガイドワイヤだけでは姿勢の保持が困難であることがあった。今後、より堅牢なガイドが望まれる。

7. あとがき

非接触肉厚測定は、従来のケレン作業が必要な接触肉厚測定方法に比べると、測定面積、測定までの作業量が時間的・経済的にも改善が見込める。また、付着海生生物の除去等の環境面、時間短縮によるバース利用面等からも、今後、港湾構造物の維持管理、アセットマネジメントの調査上、活用が望まれる。

非接触肉厚測定で得られるデータは、従来よりも密に得られることから、構造物の変状がより詳細に把握できるという面では、健全度評価全体の精度を向上に資すると考えられる。

現在、サンプル調査から全体の状況を予想しているが、実際に現場施工で全面をケレンしてみると、大きく違っていたという事例も多い。非接触肉厚測定技術の応用により、これら現場リスクの軽減が期待される。

(2009年8月14日受付)

謝辞

本研究は、国土交通省九州地方整備局からの受託研究及び港湾空港技術研究所特定萌芽的研究の支援を得て行われました。関係各位には多大なご協力を頂きました。ここに記し、深く感謝の意を表します。

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，1999年，No. 26，pp.105-110.
- 2) 山田孝行，鈴木功：電磁誘導現象を用いた肉厚測定法，電子情報通信学会論文誌 A Vol.J71-A，No.7，1988年，pp.1453-1460.
- 3) 松本さゆり，内藤史貴，白井一洋：貝が付着した鋼管杭の板厚計測法の開発～送受波方式の検討～，海洋音響学会2007年度研究発表会講演論文集，2007年，pp.29-32.
- 4) 松本さゆり，吉住夏輝，片倉景義，野村茂：貝が付着した鋼構造物の板厚計測法～送受波方式の検討(2)～，海洋音響学会2008年度研究発表会講演論文集，2008年，pp.67-68.
- 5) 吉住夏輝，松本さゆり，片倉景義，橋本洋之，友田伸明，石貫國郎：超音波による港湾鋼構造物の非接触板厚計測，電子情報通信学会技術研究報告US2008-62，2008年，pp.7-12.
- 6) 吉住夏輝，松本さゆり，片倉景義，橋本洋之，友田伸明，石貫國郎：港湾鋼構造物の非接触肉厚測定に関する研究，日本音響学会2009年春季研究発表会講演論文集CD-ROM，2009年.
- 7) 吉住夏輝，松本さゆり，片倉景義，橋本洋之，友田伸明，石貫國郎：港湾鋼構造物の非接触肉厚測定装置の開発－水槽及び実海域試験について－，海洋音響学会2009年度研究発表会講演論文集，2009年，pp.75-76.
- 8) 吉住夏輝，松本さゆり，片倉景義，橋本洋之，友田伸明，石貫國郎：非接触型港湾鋼構造物点検装置の開発，土木学会海洋開発論文集，2009年，第25巻，pp.187-190.
- 9) 吉住夏輝，松本さゆり，片倉景義，松本崇司，福田治美，久米英輝：超音波による港湾鋼構造物の非接触板厚計測～北九州田野浦岸壁での実海域試験について～，電子情報通信学会技術研究報告US2009-37，2009年，pp.43-48.

付録A 実海域試験時の海象条件

実験時の海象条件を記録するために、**図-A.1**の超音波式波高計（多機能型海象観測装置<DL-2>）を実験海域海底面に設置した。20分毎に波高、周期及び流速等を測定、記録した（**図-A.2**）。その結果を**表-A.1**～**表-A.4**に示す。20 cm/sを超える流速が観測された。岸壁としては速く、ガイドなしでは、潜水士の姿勢維持は困難であった。

非接触肉厚測定を実施した時間帯は、以下に示す通りである。

- ・平成21年2月12日（木） 13:30～15:00
- ・平成21年2月13日（金） 12:30～14:30、15:00～16:30
- ・平成21年3月3日（火） 10:20～12:00、14:00～16:00
- ・平成21年3月4日（水） 10:00～12:00、13:00～16:00



図-A.2 波高計の設置



図-A.1 波高計

表-A.1 波高計の測定結果 (H21/2/12)

年月日時分	波数	平均波		有義波		1/10最大波		最大波		平均 水位 (m)	平均流速	
		波高 (m)	周期 (sec)	波高 (m)	周期 (sec)	波高 (m)	周期 (sec)	波高 (m)	周期 (sec)		流向 (度)	流速 (cm/s)
2009/2/12 11:00	269	0.14	3.0	0.20	3.4	0.26	3.4	0.33	4.0	13.64	85	16.3
2009/2/12 11:20	288	0.18	2.9	0.26	3.0	0.33	3.0	0.46	2.9	13.56	81	10.6
2009/2/12 11:40	228	0.15	3.0	0.21	3.2	0.26	3.4	0.32	3.4	13.46	85	9.7
2009/2/12 12:00	270	0.18	3.0	0.28	3.1	0.36	3.2	0.53	3.3	13.34	86	9.4
2009/2/12 12:20	269	0.17	3.1	0.26	3.5	0.33	3.7	0.43	4.1	13.17	85	11.4
2009/2/12 12:40	270	0.17	2.9	0.25	3.0	0.32	3.0	0.49	3.0	12.97	81	5.3
2009/2/12 13:00	267	0.16	2.8	0.23	2.9	0.28	2.9	0.35	2.7	12.74	82	6.9
2009/2/12 13:20	253	0.12	3.1	0.18	3.4	0.23	3.4	0.37	3.5	12.49	87	11.8
2009/2/12 13:40	290	0.22	3.2	0.38	3.5	0.59	3.8	0.94	4.1	12.22	86	13.7
2009/2/12 14:00	294	0.15	3.0	0.21	3.3	0.27	3.1	0.36	2.9	11.95	87	16.1
2009/2/12 14:20	277	0.16	3.4	0.26	3.8	0.33	3.9	0.43	5.5	11.67	88	18.8
2009/2/12 14:40	291	0.17	3.1	0.27	3.4	0.36	3.5	0.54	3.3	11.47	86	14.1
2009/2/12 15:00	293	0.14	2.9	0.23	3.0	0.35	3.2	0.56	3.1	11.29	88	17.7
2009/2/12 15:20	226	0.12	2.8	0.17	2.9	0.21	2.7	0.26	2.1	11.08	88	16.4
2009/2/12 15:40	283	0.14	2.9	0.21	2.8	0.26	2.8	0.34	2.7	10.89	87	10.2
2009/2/12 16:00	269	0.16	3.0	0.24	3.2	0.29	3.2	0.37	2.3	10.70	296	1.0

表-A.2 波高計の測定結果 (H21/2/13)

年月日時分	波数	平均波		有義波		1/10最大波		最大波		平均 水位 (m)	平均流速	
		波高 (m)	周期 (sec)	波高 (m)	周期 (sec)	波高 (m)	周期 (sec)	波高 (m)	周期 (sec)		流向 (度)	流速 (cm/s)
2009/2/13 11:40	303	0.24	2.9	0.34	3.1	0.40	3.1	0.52	3.1	13.56	85	10.1
2009/2/13 12:00	292	0.25	3.0	0.36	3.1	0.44	3.1	0.55	3.3	13.48	82	7.7
2009/2/13 12:20	297	0.23	3.1	0.34	3.3	0.43	3.3	0.58	3.3	13.38	81	7.0
2009/2/13 12:40	294	0.25	3.2	0.35	3.3	0.43	3.2	0.54	3.1	13.27	82	12.7
2009/2/13 13:00	276	0.24	3.1	0.35	3.3	0.42	3.2	0.57	3.3	13.08	83	10.5
2009/2/13 13:20	284	0.23	3.1	0.33	3.1	0.41	3.2	0.53	2.6	12.87	85	10.3
2009/2/13 13:40	297	0.24	3.1	0.35	3.3	0.46	3.2	0.91	3.2	12.64	86	14.9
2009/2/13 14:00	283	0.20	3.1	0.30	3.3	0.37	3.2	0.48	3.6	12.41	83	13.5
2009/2/13 14:20	269	0.15	3.1	0.21	3.4	0.24	3.4	0.30	2.3	12.16	82	10.6
2009/2/13 14:40	280	0.18	3.1	0.26	3.2	0.34	3.6	0.54	3.6	11.94	84	10.6
2009/2/13 15:00	265	0.16	3.0	0.24	3.2	0.32	3.0	0.49	2.3	11.73	80	8.0
2009/2/13 15:20	264	0.13	2.9	0.20	3.1	0.25	3.1	0.41	2.2	11.52	83	10.4
2009/2/13 15:40	244	0.12	2.9	0.17	3.2	0.22	3.2	0.28	2.3	11.31	83	11.3
2009/2/13 16:00	267	0.14	3.0	0.21	3.2	0.29	3.4	0.51	4.8	11.13	82	9.6
2009/2/13 16:20	262	0.16	3.0	0.23	3.1	0.30	3.1	0.47	3.2	10.92	79	2.4

表-A.3 波高計の測定結果 (H21/3/3)

年月日時分	波数	平均波		有義波		1/10最大波		最大波		平均 水位 (m)	平均流速	
		波高 (m)	周期 (sec)	波高 (m)	周期 (sec)	波高 (m)	周期 (sec)	波高 (m)	周期 (sec)		流向 (度)	流速 (cm/s)
2009/3/3 9:20	280	0.25	2.9	0.35	3.2	0.44	3.2	0.67	3.6	12.52	266	8.9
2009/3/3 9:40	275	0.26	3.0	0.37	3.3	0.46	3.4	0.59	2.6	12.66	271	11.6
2009/3/3 10:00	279	0.20	3.0	0.28	3.2	0.34	3.5	0.43	3.7	12.76	266	22.1
2009/3/3 10:20	257	0.22	3.1	0.31	3.3	0.39	3.3	0.49	3.5	12.95	265	25.3
2009/3/3 10:40	254	0.21	2.9	0.32	3.1	0.43	3.1	0.77	3.1	13.10	266	20.5
2009/3/3 11:00	241	0.21	3.0	0.30	3.3	0.37	3.5	0.45	3.1	13.23	266	22.6
2009/3/3 11:20	234	0.19	2.9	0.27	3.0	0.34	3.0	0.45	3.3	13.31	265	22.5
2009/3/3 11:40	254	0.21	2.9	0.29	3.1	0.35	3.0	0.44	3.9	13.41	264	21.3
2009/3/3 12:00	257	0.20	3.0	0.29	3.2	0.36	3.2	0.50	2.9	13.44	264	21.4
2009/3/3 12:20	260	0.21	3.1	0.31	3.4	0.39	3.7	0.53	3.6	13.45	267	17.3
2009/3/3 12:40	257	0.23	3.1	0.32	3.3	0.41	3.3	0.62	3.2	13.45	269	12.2
2009/3/3 13:00	266	0.26	3.1	0.37	3.4	0.45	3.5	0.57	4.3	13.39	269	8.3
2009/3/3 13:20	270	0.25	3.0	0.37	3.2	0.46	3.2	0.59	3.3	13.28	268	10.8
2009/3/3 13:40	266	0.25	3.0	0.35	3.2	0.42	3.2	0.55	2.8	13.17	277	6.3
2009/3/3 14:00	261	0.24	3.1	0.34	3.2	0.42	3.4	0.65	4.1	13.02	292	3.0
2009/3/3 14:20	256	0.22	3.1	0.33	3.3	0.42	3.5	0.56	3.3	12.84	327	0.1
2009/3/3 14:40	273	0.20	3.0	0.27	3.1	0.33	3.2	0.40	2.6	12.67	70	2.7
2009/3/3 15:00	273	0.21	2.9	0.30	2.9	0.41	3.0	0.59	3.2	12.52	61	8.9
2009/3/3 15:20	268	0.20	3.2	0.29	3.3	0.40	3.6	0.68	3.6	12.32	73	13.4
2009/3/3 15:40	286	0.20	2.9	0.28	3.2	0.35	3.4	0.47	10.0	12.11	71	14.6

表-A.4 波高計の測定結果 (H21/3/4)

年月日時分	波数	平均波		有義波		1/10最大波		最大波		平均 水位 (m)	平均流速	
		波高 (m)	周期 (sec)	波高 (m)	周期 (sec)	波高 (m)	周期 (sec)	波高 (m)	周期 (sec)		流向 (度)	流速 (cm/s)
2009/3/4 9:20	264	0.26	2.9	0.38	3.0	0.48	3.1	0.63	3.2	12.17	279	15.3
2009/3/4 9:40	280	0.31	3.0	0.47	3.2	0.60	3.2	0.84	2.1	12.36	280	15.6
2009/3/4 10:00	260	0.26	3.0	0.38	3.0	0.45	2.9	0.51	3.1	12.47	281	12.3
2009/3/4 10:20	266	0.26	3.0	0.37	3.3	0.44	3.2	0.55	2.2	12.58	280	11.1
2009/3/4 10:40	269	0.23	2.8	0.34	2.7	0.43	2.8	0.65	2.5	12.63	280	13.2
2009/3/4 11:00	252	0.24	3.0	0.35	3.2	0.46	3.2	0.59	2.3	12.66	279	17.9
2009/3/4 11:20	235	0.21	2.9	0.31	3.1	0.37	3.3	0.47	3.1	12.75	280	24.2
2009/3/4 11:40	241	0.24	3.0	0.34	3.2	0.43	3.3	0.64	4.1	12.85	280	21.0
2009/3/4 12:00	248	0.27	3.1	0.39	3.5	0.49	3.6	0.58	4.0	12.93	280	20.4
2009/3/4 12:20	240	0.21	3.1	0.32	3.2	0.40	3.5	0.55	3.8	12.97	281	19.0
2009/3/4 12:40	256	0.26	3.1	0.39	3.4	0.52	3.3	0.76	4.7	12.98	280	20.1
2009/3/4 13:00	240	0.19	2.9	0.28	3.2	0.36	2.9	0.50	3.0	12.97	277	25.2
2009/3/4 13:20	235	0.23	3.0	0.32	3.5	0.39	3.5	0.54	3.3	12.93	277	20.2
2009/3/4 13:40	237	0.19	3.0	0.28	3.2	0.35	3.1	0.50	2.4	12.89	273	11.1
2009/3/4 14:00	224	0.20	2.9	0.30	3.2	0.40	3.2	0.80	3.6	12.80	273	7.5
2009/3/4 14:20	232	0.19	3.0	0.27	3.3	0.34	3.2	0.47	3.2	12.81	183	1.8
2009/3/4 14:40	216	0.20	3.0	0.30	3.2	0.37	3.3	0.58	4.2	12.71	106	5.0
2009/3/4 15:00	245	0.26	3.1	0.38	3.3	0.51	3.3	0.64	3.4	12.57	114	3.1
2009/3/4 15:20	242	0.22	2.9	0.32	2.9	0.42	3.1	0.59	2.4	12.46	111	2.3
2009/3/4 15:40	233	0.19	2.8	0.27	2.9	0.33	3.0	0.39	2.3	12.39	106	9.6

付録B 超音波厚み計による接触肉厚測定

B.1 水中作業環境再現水槽

超音波厚み計を用いて、既設の鋼管杭棧橋模型の接触型の肉厚測定を行った。測定水深は、水面下-0.50 m, -1.50 m, -2.50 m, -3.50 m, -4.50 mの5水深とした。測定点は、測定水深毎に1点×3回とし、その平均を現有板厚とした。測定結果を表-b.1に示す。

水深毎の平均肉厚は、7.68 mm ~ 9.56 mmであった。棧橋模型の鋼管杭の公称肉厚は9.0 mmであり、鋼管杭全体が被覆防食されているため、腐食しない状況である。結果にばらつきが発生した原因は、使用した超音波厚み計が鋼材のみに対応した製品であったためと考えられる。被覆防食のある場合では、十分な精度が得られなかった。

表-B.1 肉厚測定結果 (H21/1/29)

測定水深 (m)	現有肉厚 (mm)			
	1回目	2回目	3回目	平均
水面下 -0.50m	9.63	9.29	7.47	8.80
水面下 -1.50m	10.41	10.50	7.78	9.56
水面下 -2.50m	10.54	7.36	7.30	8.40
水面下 -3.50m	9.42	7.54	7.96	8.31
水面下 -4.50m	7.91	7.53	7.60	7.68

※棧橋模型の鋼管杭の公称肉厚：9.0mm

B.2 田野浦岸壁

超音波厚み計を用いて、田野浦4号岸壁(組合せ矢板)、田野浦7号岸壁(鋼矢板セル)の接触式による肉厚測定を行った。測定点は、測定水深毎に1点×3回として、その平均を現有肉厚とした。肉厚測定結果を表-6、表-7に示す。

表-B.2 田野浦7号岸壁 肉厚測定結果 (H21/2/13)

測定水深 (m)	現有肉厚 (mm)			
	1回目	2回目	3回目	平均
1段目 (+1.0m)	8.19	8.21	8.01	8.14
2段目 (±0.0m)	8.45	9.31	8.77	8.84
3段目 (-1.0m)	8.75	8.60	8.80	8.72
4段目 (-2.0m)	8.95	8.77	8.73	8.82
5段目 (-3.0m)	9.10	9.70	9.25	9.35
6段目 (-4.0m)	9.80	9.45	9.64	9.63
7段目 (-5.0m)	9.45	9.80	9.12	9.46
8段目 (-6.0m)	9.15	9.56	9.60	9.44
9段目 (-7.0m)	9.80	9.64	9.45	9.63
10段目 (-8.0m)	9.56	9.63	9.25	9.48
11段目 (-9.0m)	9.30	9.49	9.23	9.34

表-B.3 田野浦4号岸壁 肉厚測定結果 (H21/3/4)

測定水深 (m)	現有肉厚 (mm)			
	1回目	2回目	3回目	平均
1段目 (-1.0m)	27.37	27.37	27.71	27.48
2段目 (-2.0m)	27.77	27.73	27.82	27.77
3段目 (-3.0m)	27.86	28.04	27.86	27.92

港湾空港技術研究所報告 第48巻第4号

2009.12

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 昭和情報プロセス株式会社

Copyright © (2009) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

CONTENTS

Horizontal Subgrade Reaction Model for Estimation of Lateral Resistance of Pile	Yoshiaki KIKUCHI	3
Corrosion Behavior of Steel Bars in Reinforced Concrete Slabs Repaired by Partial Patching	Ema KATO, Yoshikazu AKIRA, Mitsuyasu IWANAMI, Hiroshi YOKOTA	23
Development of Underwater Three-Dimensional Imaging SONAR System with Acoustic Lens	Sayuri MATSUMOTO, Kageyoshi KATAKURA, Natsuki YOSHIZUMI.....	53
Proposals of non-destructive methods to detect stripping damages in airport asphalt concrete layers	Ryota MAEKAWA, Kai SU, Junichi MIZUKAMI, Yukitomo TSUBOKAWA	71
Development of Noncontact Thickness Gauging Equipment for Underwater Steel Structure	Natsuki YOSHIZUMI, Sayuri MATSUMOTO, Kageyoshi KATAKURA	89
Steam-Driven Ejector Applied to Spilled Oil Recovery	Isamu FUJITA, Muneo YOSHIE, Kenji TAKEZAKI	109