

# 高感度磁気センサーを活用した鋼材厚さ測定手法の 漁港施設水中部点検への適用について

国立研究開発法人水産研究・教育機構 水産技術研究所  
一般社団法人水産土木建設技術センター  
北日本港湾コンサルタント株式会社  
(国立研究開発法人水産研究・教育機構水産技術研究所客員研究員)

大 井 邦 昭  
松 本 昭 力  
三 上 信 雄

## 目 次

|                     |    |                           |    |
|---------------------|----|---------------------------|----|
| 1. はじめに             | 37 | ②測定手順                     | 40 |
| 2. 技術の概要            | 38 | ③測定結果                     | 41 |
| ①従来技術（超音波厚さ計）       | 38 | 5. 評価と考察                  | 41 |
| ②極低周波渦電流探傷法（磁気センサー） | 38 | ①付着物及び腐食部の影響              | 41 |
| 3. 室内試験             | 39 | ②超音波厚さ計と磁気センサーの<br>測定値の差異 | 42 |
| ①基本性能               | 39 | ③鋼材厚さの適用範囲                | 42 |
| ②鋼材表面の粗さについて        | 39 | ④作業効率                     | 42 |
| 4. 現地実証試験           | 40 | 6. まとめ                    | 42 |
| ①対象施設               | 40 |                           |    |

## 1. はじめに

漁港の主要施設である防波堤や岸壁の整備済み延長は全国で5,000kmを超えるが、その多くは高度経済成長期に建設されており、今後は効率的な維持管理と適切な機能保全対策を講じていく必要がある。このため水産庁ではインフラ長寿命化計画<sup>1)</sup>を策定し、漁港施設のストックマネジメントを推進するとともに、水産基盤施設機能保全計画策定の手引き<sup>2)</sup>や水産基盤施設ストックマネジメントのためのガイドライン<sup>3)</sup>（以下、ガイドラインとする）を策定し、漁港施設の長寿命化対策を進めている。長寿命化対策を講じるためには施設の現状を知るための点検が必要不可欠であるが、点検の対象となる施設自体も膨大であることから、点検業務の効率化にかかる技術開発が求められている。このため、水産庁では上述のインフラ長寿命化計画や漁港漁場整備長期計画<sup>4)</sup>及び漁港漁場整備事業の推進に関する技術開発の方向<sup>5)</sup>において、ICT



図ー1 鋼材のケレン作業状況



図ー2 磁気センサー装置外観  
(左：プローブ 右：操作PC及び発振器等)

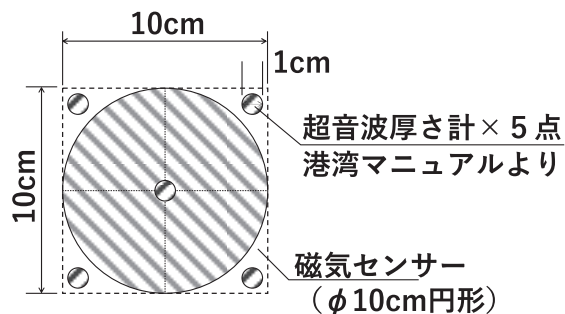
やロボット技術等の新技術の導入・活用や推進を図ることとしている。漁港施設への新技術の活用においては調査の効率化や潜水士の負担軽減の観点から水中部の点検調査への適用が期待されている。中でも鋼構造施設において不可欠とされる鋼材の肉厚測定方法に関して技術開発が進められている。矢板等の鋼材を用いた鋼構造施設の点検では、鋼材の腐食が想定範囲内に収まっているか把握するために残存している鋼材の厚さを測定するが、その測定には従来から超音波厚さ計による非破壊検査が用いられている。しかし、超音波厚さ計による測定では鋼材表面の貝殻等の付着物や錆等の腐食部を予め除去（ケレン）する必要があり（図－１）、ケレンに要する潜水士の作業負担や除去した付着物等による環境影響が課題となっている。一方、塚田ら<sup>6)</sup>が開発した高感度磁気センサーを用いた極低周波渦電流探傷法（図－２、以下、「磁気センサー」とする）は鋼材表面の付着物や腐食部を除去する必要がなく、超音波厚さ計で生じる課題の解決が期待される。本報告は鋼材を用いた漁港施設水中部の点検に磁気センサーの活用を指向し、その適用性について供用中施設を対象に検証する。

なお、本報告は大井ら<sup>7)</sup>を基に、その後実施した現地実証試験の結果を追加したものである。

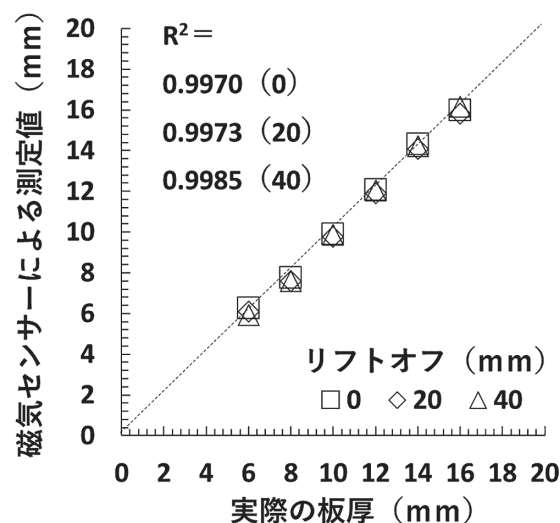
## 2. 技術の概要

### ①従来技術（超音波厚さ計）

ガイドラインでは鋼材の肉厚（厚さ）測定には超音波厚さ計を用いる手法が示されており、現在の施設点検では概ね標準的に用いられている。超音波厚さ計は20kHz以上の超音波を発振し、鋼材反対面からの反射にかかる伝播時間に基づいて厚さを推定する技術である。超音波を発振し反射波を測定する“プローブ”は直径1cm程度の円形が多く、測定時には鋼材と密着する必要があることから、付着物や錆等の腐食部を削ぎ落とす（ケレン）必要がある。測定に際しては港湾の施設の維持管理技術マニュアル<sup>8)</sup>を参考に10cm×10cmの検査領域内でZ型に5点測定し、その平均値を



図－3 超音波厚さ計と磁気センサーの測定範囲



図－4 SMA490Aによる室内試験結果

採用する場合が多い。

### ②極低周波渦電流探傷法（磁気センサー）

磁気センサーは磁気を用いた測定技術で、極低周波の交流磁場を対象物に印加し、対象物内部で生じる渦電流が起こす新たな磁場を測定するものである。このとき、印加する磁場は貝殻等の非磁性体の付着物や導電率の小さい錆等の腐食部の影響を受けないため、必ずしも鋼材と密着する必要はない。交流磁場を発振・測定するプローブは極低周波を減衰させずに鋼材反対面まで到達させるため、超音波厚さ計と比べてやや大きく、10cm×10cmの角型や直径10cmの円形である。ただし、これは超音波厚さ計で測定する場合の検査領域を一括して含むこととなるため、結果的に測定時間の低減に寄与するものである。超音波厚さ計と磁気センサーの測定範囲の模式図を図－3に示す。

### 3. 室内試験

本報告は磁気センサーの適用性を検証するために供用中の漁港施設において現地試験を行うものだが、その際には付着物や腐食部の影響があるほか、潜水作業に伴う姿勢のブレなど、様々な影響があると想定された。このため、はじめに磁気センサーの基本的な性能を把握するために劣化のない鋼材を用いた室内試験を実施した。

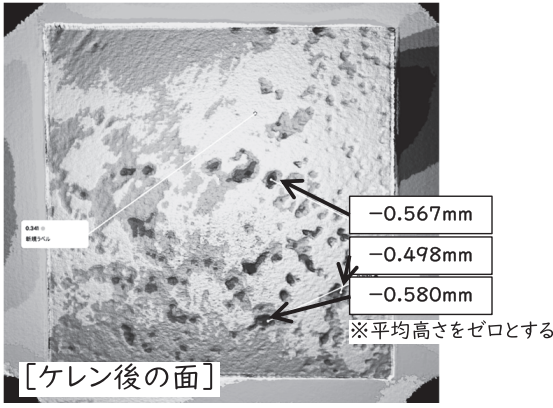
#### ①基本性能

劣化のない鋼材（JISG3106 SM490A）のフラットバーを用い、磁気センサーの基本性能を確認した結果を図－4に示す。図より、リフトオフ（鋼材表面とプローブまでの距離）がゼロの場合、磁気センサーで測定した推定厚さは実際の鋼材厚さと比較して誤差は0.03mm以下であり、鋼材の腐食速度（0.3mm/年、H.W.L.以上）に鑑みると十分な精度であることが確認できた。リフトオフを設けた測定は付着物や腐食部の存在によりプローブと鋼材が密着できない状態を想定しており、試験範囲（～40mm）では誤差は0.04mm以下と実用上問題ない精度であることを確認した。

#### ②鋼材表面の粗さについて

陸上のインフラ施設に対する磁気センサーの適用性検証を行った先行研究<sup>9)</sup>では、供用中のインフラ施設で用いられている鋼材を調べた結果、およそ1.0mm程度の凹凸が存在することが指摘されている。本試験では水中構造物に対する適用性を従来の計測器である超音波厚さ計の測定値と比較することで検証することとしており、陸上インフラと同様に鋼材表面の凹凸の影響も懸念されたことから、水中構造物で用いられる鋼材（実際に1年間程度水中で使用された経験のある廃材）を対象に先行研究と同様に3Dスキャンにより鋼材表面の凹凸を測定した。

図－5には測定した鋼材おもて面（10cm×10cm）の等高線を示す。図より、鋼材面には最大0.6mm弱の孔食が点在していることが確認された（黒ずんでいる箇所が孔食）。裏面においても0.2～0.3mm程度の孔食の分布が



図－5 鋼材表面の等高線

表－1 現地試験対象施設一覧（陸上試験含む）

| 試験種別 | 場所    | 矢板 Or 鋼管 | 矢板型式 または鋼管径        | 施設名 | 初期厚さ (mm) | 供用年数  | 主な付着物   |
|------|-------|----------|--------------------|-----|-----------|-------|---------|
| 陸上試験 | A 試験場 | 矢板       | JFESP-IIIw         |     | 13.4      | 0     |         |
|      |       |          | FSP-III            |     | 13.0      |       |         |
|      | B 試験場 | 矢板       | FSP-IV             |     | 15.5      |       |         |
|      |       |          | YSP-IV             |     | 15.5      |       |         |
|      |       |          | FSP-Z38            |     | 11.4      |       |         |
|      |       |          | FSP-V <sub>L</sub> |     | 24.3      |       |         |
| 現地試験 | A 漁港  | 矢板       | NSSP-10H           | 岸壁  | 10.8      | 15    | 海藻類 貝殻類 |
|      |       |          | NSSP-25H           | 岸壁  | 13.2      | 15    |         |
|      |       |          | SP-II <sub>W</sub> | 岸壁  | 10.3      | 15    |         |
|      |       |          | FSP-III A          | 護岸  | 13.1      | 41    |         |
|      | B 漁港  | 矢板       | SP-III             | 岸壁  | 13.0      | 39    | 貝殻類     |
|      |       |          | SP-IV              | 岸壁  | 15.5      | ～69   |         |
|      |       |          | SPU-IV             | 物揚場 | 16.1      | 40    |         |
|      |       |          | SPU-VI             | 物揚場 | 27.6      | ～71   |         |
|      |       | 鋼管       | Φ700               | 栈橋  | 12        | 41～70 | 貝殻類     |
|      |       |          |                    |     |           |       |         |
|      | C 漁港  | 鋼管       | Φ800 (SKK41)       | 防波堤 | 12        | 37    | 貝殻類     |
|      |       |          |                    | 防波堤 | 14        |       |         |
|      |       |          | Φ1000              | 防波堤 | 12        | 33    |         |
|      |       |          |                    | 防波堤 | 14        |       |         |
|      |       |          | Φ500               | 防波堤 | 12        | 17～22 |         |
|      |       |          | Φ800 (SKK490)      | 防波堤 | 12        |       |         |
|      |       |          | Φ1000              | 岸壁  | 16        | 32～35 |         |
|      |       |          | Φ900               | 浮栈橋 | 12        | 19    |         |

表－2 磁気センサーによる測定時間の区分  
unit：秒

| 測定回数 (回) | 鋼材厚さ (mm) |       |        |
|----------|-----------|-------|--------|
|          | ～14       | 14～20 | (20～)  |
| 1        | 2.2       | 4.2   | (7.6)  |
| 2        | 3.9       | 7.9   | (14.5) |
| 3        | 5.5       | 11.5  | (21.5) |

※最適な測定時間は鋼材厚さに応じて線形に増加するが、処理ソフトの都合により3つに区分した  
※鋼材厚さ20mm以上は実質適用範囲外（後述）

みられた。腐食が軽微な本鋼材サンプルにおいても最大で0.8～0.9mm程度の厚さのばらつきが生じる可能性があることから、供用中の施設においてもそれ以上の厚さのばらつきがあると推察される。すなわち、超音波厚さ計と磁気センサーではセンサーのプローブ径

に違いがあることに鑑みると、両者の測定値に1mm程度の差が生じても許容範囲と考えられる。

## 4. 現地実証試験

室内試験の結果を踏まえ、供用中の漁港施設を対象に現地実証試験を実施した。試験では供用年数が10年を越え、付着物や腐食部がある鋼材を対象とした。

### ①対象施設

現地試験の対象とする施設は現在供用中の漁港施設から利用環境や付着物の特性が異なる3箇所を選定した。測定を行った施設の概要を表-1に示す。なお、現地試験では異なるのべ8種類の鋼矢板、7種類の鋼管を対象としたが、サンプル数の拡充と、足場のよい環境での測定を目的として陸上保管されている6種類の鋼矢板の測定も行った。

なお、磁気センサーによる測定は極低周波を用いるため超音波厚さ計と比較して測定時間が長くなるが、特に鋼材が厚い場合は顕著となる。本試験で主に使用したプローブ（直径10cmの円形）の場合の測定時間を表-2に示す（超音波厚さ計は1秒未満）。

### ②測定手順

磁気センサーおよび超音波厚さ計を用いた測定は図-6に示すフローで行った。現状において磁気センサーは異なる組成の鋼材ご

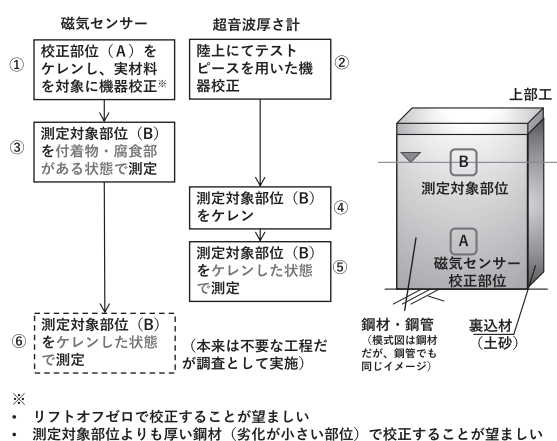


図-6 測定フロー

とにセンサーの校正（≒初期設定）が必要とされている。校正を行うには対象となる鋼材の厚さの数値が必要となるが、供用中施設では部材を切り取ることができないことから、超音波厚さ計の測定値を用いる。このため、磁気センサーの校正のために少なくとも1箇所

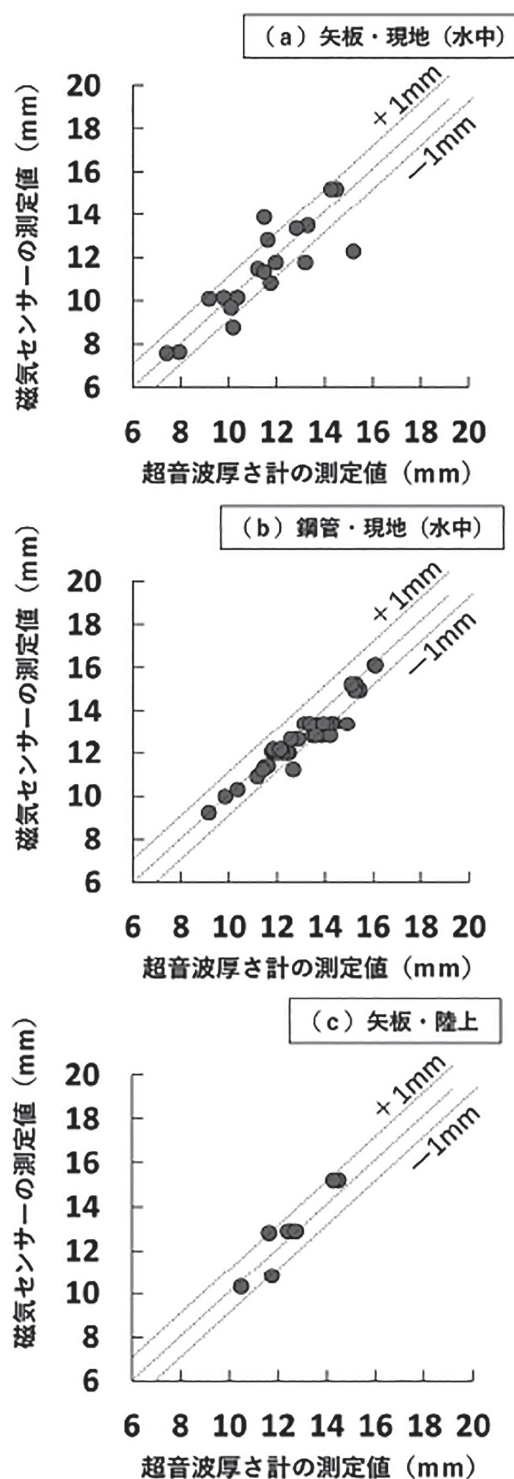
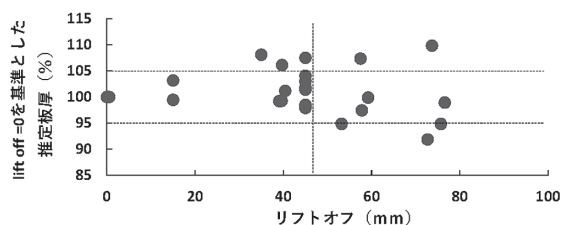


図-7 測定結果

所は超音波厚さ計による測定のためにケレンが必要となる。また、校正はその後磁気センサーで測定を行う鋼材よりも厚い部材で行うことが望ましいため、劣化が小さく厚みが残るL.W.L.以下の部位で行った(①)。なお、超音波厚さ計は同じ鋼材規格であれば組成の違いによる誤差は小さいため、テストピースによる校正のみでよい(②)。測定対象部位(B)での測定は、はじめにケレンなしの状態では磁気センサーの測定を行い(③)、同じ箇所(10×10cm)のケレンを行った上で(④)超音波厚さ計による測定(⑤)、および参考として磁気センサーの再測定を行った(⑥)。

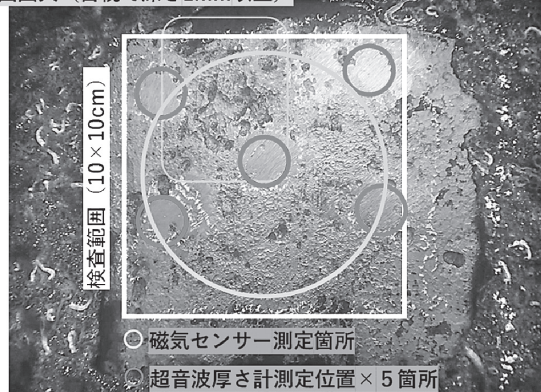
表－3 ケレンの有無による磁気センサーの測定値

| 鋼材型式               | 部位     | 磁気センサー測定値 (mm) |       | ケレンなし (－) ケレンあり | ケレンなし (±) ケレンあり |
|--------------------|--------|----------------|-------|-----------------|-----------------|
|                    |        | ケレンなし          | ケレンあり | mm              | (%)             |
| NSSP-10H           | -1.0m凹 | 11.22          | 11.06 | 0.16            | 101.45          |
|                    | 0m凹    | 11.97          | 11.93 | 0.04            | 100.34          |
| NSSP-25H           | -1.0m凹 | 12.83          | 12.65 | 0.18            | 101.42          |
|                    | 0m凹    | 13.31          | 13.41 | -0.10           | 99.25           |
| SP-II <sub>w</sub> | -2.0m凹 | 9.21           | 9.59  | -0.38           | 96.04           |
|                    | -2.0m凸 | 10.10          | 10.13 | -0.03           | 99.70           |
|                    | -1.0m凹 | 10.37          | 9.91  | 0.46            | 104.64          |
|                    | -1.0m凸 | 9.82           | 9.68  | 0.14            | 101.45          |
| SP-III             | 凹      | 11.10          | 10.77 | 0.33            | 103.06          |
|                    | 凸      | 6.60           | 6.38  | 0.22            | 103.45          |



図－8 リフトオフの影響

凹凸大 (目視で深さ1mm以上)



A漁港NSSP-25H\_ケレン後

図－9 鋼材表面の凹凸

### ③測定結果

図－7には磁気センサー(ケレンなし)と超音波厚さ計(ケレンあり)の測定値を示す。対象とする施設は供用中であるため鋼材厚さの真値を測定することができないため、グラフは両センサーの測定値を比較した形式で示している。図より、両センサーの測定値は概ね対応しており、その差は±1.0mm程度以内となっている。ただし、(a)の矢板ではやや両センサーの差が大きい箇所があるが、これは一部の供用年数が著しく長い箇所(40年以上)が該当しており、不均質な劣化進行や組成の偏りがある可能性がある。

## 5. 評価と考察

図－7(a、b:水中)と(c:陸上)を比較すると、一部の経年劣化が著しい箇所を除けば超音波厚さ計と磁気センサーの差は同程度であった。また、水中作業に伴うセンサーのブレの影響も見られず操作性の面も含めて問題がないことが確認できた。ここでは、さらに以下に複数の観点から磁気センサーの適用に関する評価と考察を示す。

### ①付着物及び腐食部の影響

表－3には現地試験結果の一部からケレンの有無による測定値の影響度合いを示す。表より、ケレンありの場合のほうがやや厚さを薄く評価する傾向にあるが、「ケレン」では鋼材表面の付着物を除去するためにグラインダーで研磨していることから必然の結果と言える。ただしその差は±5%程度以内であり、磁気センサーは付着物や腐食部の影響を有意には受けないことが確認できた。

また、付着物や腐食部の存在によりプローブが鋼材と密着できない場合の影響(=リフトオフの影響)を検証するため、現地試験(a)において長さの異なるアタッチメントを用いて人為的にリフトオフを増大させた場合の測定値の変化を図－8に示す。図より、リフトオフの増加に伴い誤差が増大する傾向がみられた。これはリフトオフがある状態で推定する鋼材厚さの補正処理(計測ソフト内でのアルゴリズム)の影響と考えられ、機器

校正時に異なるリフトオフ値に対する測定を実施した上で補正係数を再設定することで誤差は減少することを確認した。現状では実用上、測定現場において補正係数の再設定を行うことは困難であるが、付着物や腐食部の厚さとして想定される範囲（～60mmと仮定）では誤差の多くは5%以内であり支障ないと考えられる。

## ②超音波厚さ計と磁気センサーの測定値の差異

超音波厚さ計と磁気センサーの測定精度については、現地・陸上試験の結果から実用上問題ないと整理したが、厳密には±1mm程度の差が生じており、その原因について考察する。この原因のひとつとしては、鋼材表面粗さの影響があると推察される。3. ②では鋼材表面には1.0mm程度の凹凸が存在することを明らかにしたが、本報告における現地調査においても図-9に示すように検査範囲（10×10cm）内には凹凸が存在している様子が確認された（黄色枠内の黒ずんでいる箇所が孔食と思われる凹み）。図中には超音波厚さ計と磁気センサーのそれぞれのプローブのフットプリントを示すが、両者は包括する検査範囲としては同じであっても測定位置は完全には一致せず、鋼材表面の凹凸の存在によって測定値に差異が生じたものと考えられる。

表-4 鋼材厚さ測定1地点あたりの作業時間

| ■測定条件                                                  |         |                          |
|--------------------------------------------------------|---------|--------------------------|
| 項目                                                     | 値       | 備考                       |
| 鋼材種類                                                   | U型鋼矢板   |                          |
| 測定地点数                                                  | 1       |                          |
| 測定箇所数                                                  | 2       | 測定地点1箇所あたり、異なる2水深で測定する   |
| 測定点数                                                   | 4       | 測定箇所1箇所あたり、鋼矢板凸部と凹部で測定する |
| 測定箇所数は港湾マニュアル <sup>5)</sup> では4水深となっているが、本調査では2水深でのみ実施 |         |                          |
| ■所要時間                                                  |         |                          |
| 手順                                                     | 時間（分）   |                          |
|                                                        | 超音波厚さ計  | ELECT                    |
| 準備                                                     | 3       | 3                        |
| 位置だし、撮影                                                | 3       | 3                        |
| Calibration（機器校正）                                      | 2       | 10（ケレン1箇所含む）             |
| ケレン                                                    | 20（4箇所） | 0                        |
| 測定                                                     | 15      | 4                        |
| 片付け                                                    | 3       | 3                        |
| 合計                                                     | 46      | 23                       |
| 時間短縮率                                                  |         | -50%                     |

## ③鋼材厚さの適用範囲

磁気センサーが発振する極低周波の交流磁場は対象とする鋼材の厚さに応じて周波数を適宜変更する必要がある。鋼材が厚くなるに従って周波数は低くなり、20mm以上の厚さの鋼材の場合、7.6～21.5秒以上の測定時間（静止時間）が必要となる（表-2）。その場合、水中で潜水士がセンサーを手動で密着させるのが困難になる。実際に現地試験において20mm以上の厚さの鋼材に対して測定を試みたが正常な値が得られなかった。このことから、現時点での磁気センサーの適用範囲は鋼材厚さ20mmまでと考える。

## ④作業効率

現地試験（a）の結果から超音波厚さ計と磁気センサーの作業時間を整理したものを表-4に示す。磁気センサーは測定対象とする鋼材そのものを用いた機器校正が必要となる一方で測定に際してケレンが不要となること、および測定回数が1箇所あたり1回で済むことから、準備から撤去の全ての工程に必要な時間が超音波厚さ計を用いる場合と比べて50%であることがわかった。

## 6. まとめ

鋼構造の漁港施設の点検項目のひとつである鋼材の厚さ測定に対し、高感度磁気センサーを活用した厚さ測定手法（磁気センサー）は従来技術として用いられる超音波厚さ計を用いた手法が抱える諸問題（潜水士の作業負担、ケレン作業で生じた除去物による環境影響）を解決し、実用上問題ない精度で測定できることを明らかにした。また、本報告における試験結果をとりまとめた「磁気センサーを活用した水産基盤施設の点検の手引き」が水産庁HPに公表されている<sup>10)</sup>。一方、磁気センサーを活用する留意点、または今後の課題としては以下が挙げられる。

- ・適用できる鋼材厚さは20mmまでである。
- ・鋼材厚さが14～20mmの条件ではセンサーを11.5秒間静止する必要があるが、波浪条件によっては10秒以上のセンサー静止が難しい場合も想定される。

- ・現時点の技術では機器校正のため点検を実施する鋼材ごとにケレンをおこなったうえで機器校正する必要がある。

今後、アタッチメントの改善等により操作性を向上させるとともに、超音波厚さ計と同様にテストピースによる陸上での機器校正が可能となれば、さらに時間的・経済的なメリットが増加する余地がある。

### 謝辞

本報告は水産庁による令和4、5年度水産基盤整備調査委託事業「水産基盤施設の長寿命化対策強化に向けた検討調査」の内容に基づくものであり、関係各位に謝意を表す。

### 参考文献

- 1) 水産庁：インフラ長寿命化計画(行動計画)，2021.
- 2) 水産庁漁港漁場整備部：水産基盤施設機能保全計画策定の手引き，2024.
- 3) 水産庁漁港漁場整備部：水産基盤施設ストックマネジメントのためのガイドライン，2024.
- 4) 水産庁：漁港漁場整備長期計画，2022.
- 5) 水産庁漁港漁場整備部：漁港漁場整備事業の推進に関する技術開発の方向(改訂版)，2022.
- 6) K. Tsukada, Y. Haga, K. Morita, N. Song, K. Sakai, T. Kiwa, W. Cheng: Detection of Inner Corrosion of Steel Construction Using Magnetic Resistance Sensor and Magnetic Spectroscopy Analysis, IEEE Trans. Magn, vol. 52, No. 7, 6201504 (2016).
- 7) 大井邦昭，塚田啓二，三上信雄，松本力，武田真典，渡辺創：高感度磁気センサーを活用した鋼材厚さ測定手法の漁港施設水中部点検に対する適用性，土木学会論文集特集号(海洋開発)，vol. 79, 2023.
- 8) (一財)沿岸技術研究センター：港湾の施設の維持管理技術マニュアル(改訂版)，2018.
- 9) 堀謙吾，塚田啓二，久積和正：磁気を利用した新しい非破壊検査技術による鋼製構造物の腐食部残存板厚測定の試み，インフラメンテナンス実践研究論文集，Vol. 1, No. 1, p288-296, 2022.
- 10) 水産庁漁港漁場整備部整備課：磁気センサーを活用した水産基盤施設の点検の手引き，2024.