

港湾鋼構造物におけるパルス渦電流板厚測定の適用可能性の検討 Feasibility Study of Thickness Measurement using Pulsed Eddy Current for Port Steel Structures

○北根 安雄* 西島 悠太** 伊藤 義人*** 中野裕二郎****
Yasuo KITANE Yuta NISHIJIMA Yoshito ITOH Yujiro NAKANO

ABSTRACT The ultrasonic testing (UT) is used for thickness measurement of port steel structures in the current practice. However, it requires surface preparation work prior to the measurement. This research examines feasibility of the pulsed eddy current (PEC) thickness measurement method, which does not require the surface preparation prior to the measurement. The field thickness measurement of steel pipe piles and steel sheet piles by PEC is compared with UT. As a result of the field measurement, it is shown that thickness measurement by PEC has a potential to be used for the inspection of port steel structures.

Keywords: パルス渦電流, 非破壊検査, 板厚測定, 港湾鋼構造物
Pulsed eddy current, NDT, thickness measurement, port steel structure

1. 序論

高度経済成長期に多く建設された港湾鋼構造物は建設されてから30年以上経過している。港湾鋼構造物の耐荷力の性能は、板厚測定に基づいて健全度評価が行われているが、今後老朽化した港湾鋼構造物が増加していく中、その維持管理に要するコストの増加が問題となっており、合理的な維持管理システムの確立が重要な課題となっている^{1),2)}。

現在、港湾鋼構造物の板厚測定には、超音波厚み計を用いた板厚測定法 (Ultrasonic Testing, 以下英語の頭文字を取って UT とする) が使用されている^{3),4)}。測定では付着物を除去し、探触子を鋼材表面に接触させる。超音波厚み計からは超音波パルスが放射され、放射された超音波が鋼材裏面で反射され探触子まで戻ってくるまでの伝播時間を計測し、超音波の伝播時間が伝播した距離に比例することを利用して板厚を計るという原理である。UT は高い精度を有する一方で、海洋性付着物や腐食生成物を除去する表面処理が必要であり、時間とコストがかかり多くの箇所を効率的に測定す

ることが出来ないという欠点がある。そのため、全体の腐食状況を把握できると思われる代表箇所を選定し評価を行っている³⁾。

構造物の健全度評価やその後の補修を行うためには、正確でより多くの板厚測定データがある方が信頼性があるため、効率的に広範囲の板厚を測定できる技術が求められている。表面処理を必要としない測定法は他にも方法があるが (例えば文献5))、本研究では表面処理を必要としない、パルス渦電流 (Pulsed Eddy Current, 以下頭文字を取って PEC とする) を用いた板厚測定法に着目し、その港湾鋼構造物への適用性を明らかにするため、港湾の実構造物を測定することにより、UT に対する相対的な精度および運用性の比較を行うことを目的とする。

2. パルス渦電流 (PEC) を用いた板厚計測

PEC 測定器は、25 年程前にアメリカの ARCO 社とオランダの RTD 社の共同研究によって、世界で初めてフィールドテストに成功した板厚測定器である⁶⁾。国内における適用例はまだ少ないのが現

*Ph. D. 名古屋大学大学院 工学研究科 准教授 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町) 第2種正会員

**修士 (工学) 西日本旅客鉄道(株)神戸保線区兵庫管理室 (研究当時 名古屋大学大学院生)

(〒652-0897 神戸市兵庫区駅南通5丁目5番2号)

***工博 名古屋大学大学院 工学研究科 教授 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町) 第2種正会員

****工修 有限会社ティテイエス (〒675-8511 兵庫県加古川市野口町長砂 881)

状であるが、2011年に、若築建設がPECにより付着物を除去することなく鋼管杭の連続的な板厚測定を行うことに成功している⁷⁾。

PEC板厚測定器は、図-2に示すような測定対象に直接当てるプローブと、信号の入出力を行うデータロガーからなる。測定原理は、電磁誘導による渦電流を利用したものである^{6),8)}。図-1に示すように、まずパルス状の電気信号によりプローブから磁界を発生させる。発生した磁界は海洋性付着物の影響を受けずに鋼材表面に到達し、電磁誘導により鋼材表面には磁界による渦電流が発生する。渦電流は鋼材表面から裏面に向かって浸透していく。この時、渦電流により誘発された磁界を検出コイルにより検出する。誘発された磁界は、渦電流の浸透が進むにしたがって一様に減衰していくが、鋼材裏面に到達すると磁界は急激に減衰し、渦電流減衰曲線は折れ曲がる。この点までの渦電流の継続時間を計測し、板厚に換算している。

板厚が減少している箇所では、健全部と比較して早く渦電流が鋼材裏面に到達するため、図-1に示すように渦電流継続時間は短くなる。基準点(板厚既知点)での渦電流継続時間と、測定箇所での渦電流継続時間を比較することで基準点に対する相対的な板厚を測定することができる。

その他、PECの特徴としては、渦電流継続時間は部材の板厚と磁性によって決定するため、板厚が同じでも磁性が異なると測定結果も異なってくる。そのため熱処理や溶接による熱影響などにより磁性が異なると統一的な測定が難しい。また、絶対値で板厚が示されるUTとは異なり、PECは基準となる点に対する相対評価であるため、板厚を求めるには基準点を設ける必要があるが、磁性が異なると測定結果も異なってくることから、基準点は測定対象物内に設けることが望ましい。

原理上、測定される板厚は、ある測定範囲の平均的な板厚として得られることから、孔食のような局所的な腐食形状の測定は出来ない。また、付着物の上からの測定が可能であることが利点であるが、測定範囲はプローブから鋼材裏面までの距離と比例関係にあることが知られており、プローブからの距離が大きいと、測定範囲が大きくなる。さらに鋼矢板のフランジ近傍部など、測定対象近傍に他の構造物がある場合は、磁界が影響を受けてしまい正しく測定できないなどの欠点もある。以上のような欠点も踏まえてPECの現場運用を

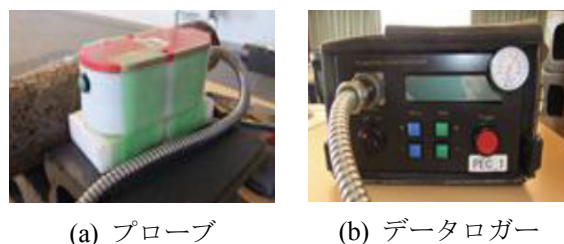


図-2 PEC板厚測定器

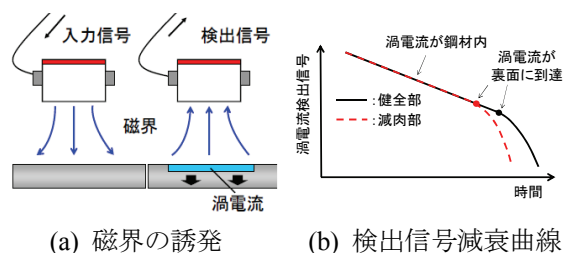


図-1 PEC測定原理

表-1 PEC板厚測定器の仕様

パラメータ	仕様
測定可能板厚	3~35mm
1点当たり測定範囲	φ30~φ250mm
金属表面とプローブ間隔	0~220mm

考慮しなければならない。表-1に今回使用したSHELL社製のPEC板厚測定器の仕様を示す。

3. 実構造物の板厚測定

3.1 測定対象と測定手法

2011年10月と2012年1月に名古屋港内のある岸壁において板厚測定を実施した。測定対象は、岸壁1の鋼管杭と、岸壁2の鋼矢板である。岸壁の概略図を図-3と図-4に示す。

岸壁1は1970年3月竣工であり、竣工後約41.5年が経過している。防食状況については、2001年から2004年にかけて鋼管杭に被覆防食が施工され、ペトロラタム+FRPまたはコンクリート+FRPで被覆されている。電気防食については、1970年9月に流電陽極(アルミニウム合金)が設置されており、その後約10年おきに陽極が取り替えられている。図-3に示す鋼管杭のうち、被覆が海底面まで及んでいない鋼管杭(海側)を鋼管杭A(φ650mm, 公称板厚12.0mm)、鋼管杭(陸側)を鋼管杭B(φ500mm, 公称板厚8.0mm)とし、これらの鋼管杭について海中部板厚測定を行った。

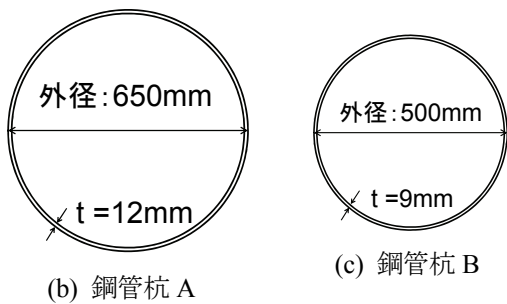
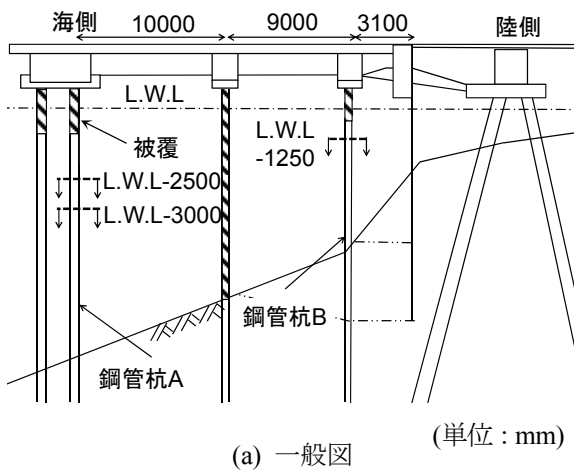


図-3 岸壁 1

腐食状況においては、電気防食の効果が大きく、目視では深刻な腐食劣化はあまり見られなかった。

岸壁2は、U形鋼矢板(ウェブ公称板厚13.0mm)からなる鋼矢板A、U形鋼矢板(ウェブ公称板厚15.5mm)からなる鋼矢板Bの海中中部板厚測定を行った。海中中部は電気防食と、コンクリート被覆がL.W.L.-1mまで施されている。測定時の付着物の状況は、岸壁1と2ともに貝等が最大厚さ約50~60mm、その他海洋性付着物が厚さ約5~10mmであった。

板厚測定は通常用いられるUTと、PECの両方で行った。1測定箇所における測定範囲は現在の板厚測定の標準である100mm四方とした。UTでは1箇所当たり5点を3回ずつ測定し、PECは1箇所当たり1回プローブを当て測定した。PECでは、プローブ表面と測定対象の間に20mm厚の板を挟んで測定した。今回測定したPEC測定器の仕様では、測定範囲がプローブと鋼材裏面までの距離に比例していることが経験的に知られているため、付着物厚さが5~10mm、公称板厚は9~15.5mmを考慮すると、1箇所当たりのPECの測定範囲はφ35~50mm程度と推定される。両測定法

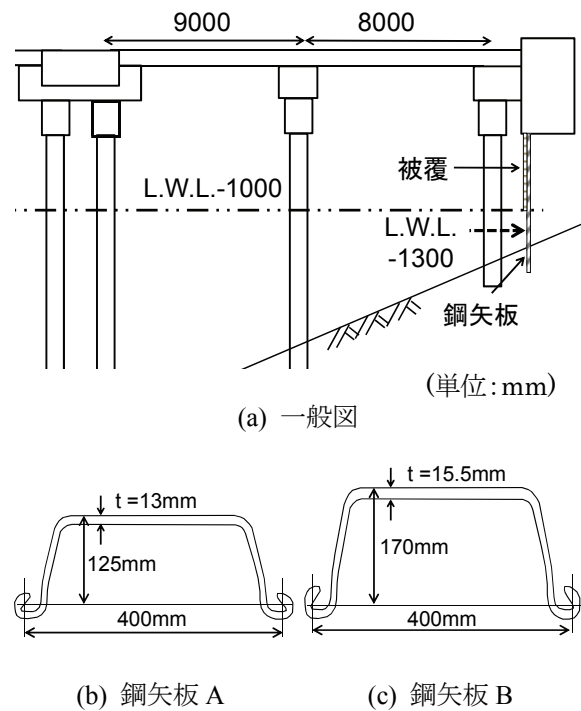


図-4 岸壁 2

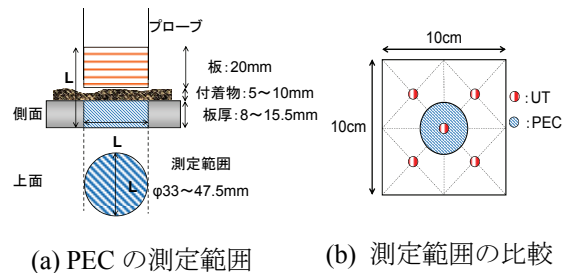


図-5 1箇所当たり測定範囲

における測定範囲を図-6に示す。測定範囲を比較すると、今回はUT測定の外側4点の正方形内にPECの測定範囲が収まる関係にある。

今回の測定では、海中中部で他の部位に比べて腐食が比較的進行している可能性のある被覆防食直下を測定した。図-6に鋼管杭の測定位置を示す。鋼管杭では、断面内で計8箇所の測定箇所を設けた。断面内の測定箇所は図-6に示すように時刻で表し、海側を12時、陸側を6時とした。高さ方向では、鋼管杭Aで2断面、鋼管杭Bで1断面を測定した。

鋼矢板での高さ方向の測定位置は、L.W.L.-1.3mの1断面(一部は-1.2m、-1.4m付近の上下2断面)とし、断面内の測定箇所は、図-7に示すように

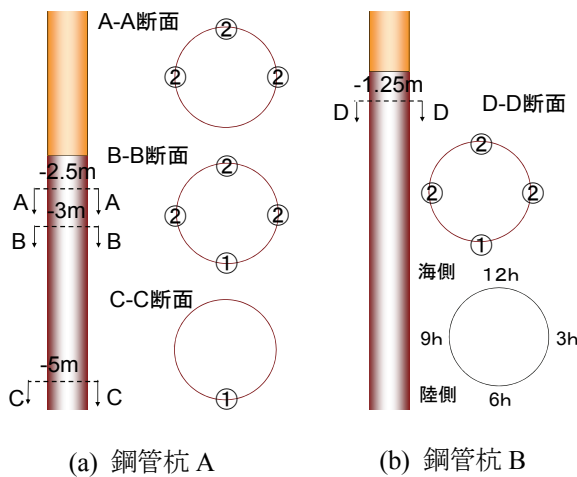


図-6 鋼管杭測定位置

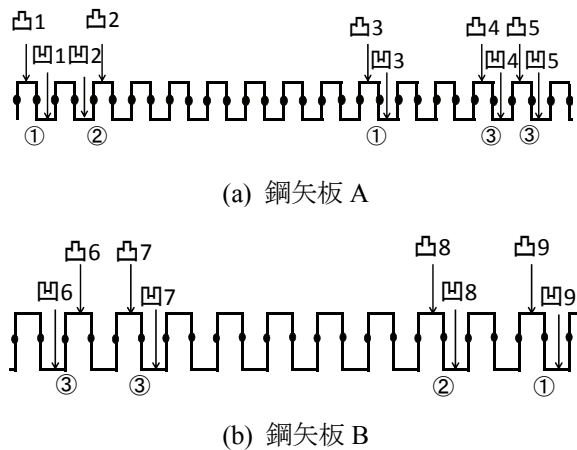
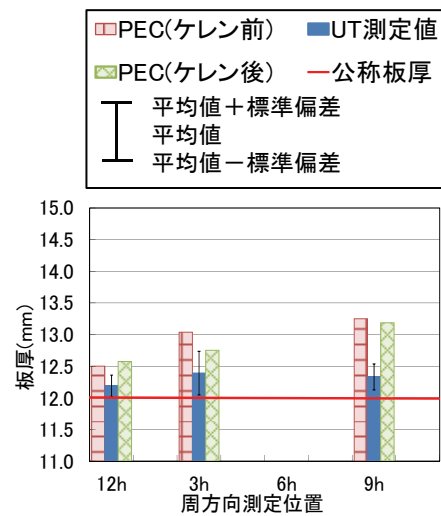


図-7 鋼矢板測定位置

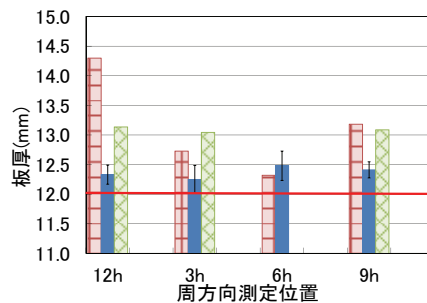
凸部と凹部で計 21 箇所を測定した。

以下に現場での測定手順を示す。

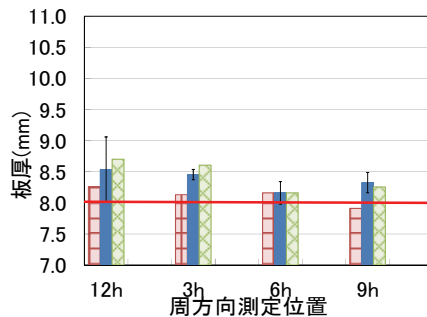
- 基準点の UT 測定を行った。基準点は同部材内の健全部が望ましいため、測定箇所は図-6 と図-7 の①に示す箇所とした。ただし、鋼矢板の基準点は測定後に決定した。
- 付着物やさびを除去する前に PEC にて測定した。測定箇所は図-6 と図-7 の①、②に示す箇所である。
- 表面処理後、図-6 と図-7 の②、③と示す箇所にて UT 測定を行った。
- 付着物が無い状態で再び PEC による測定を行った。測定箇所は図-6 の②と図-7 の①、②、③に示す箇所である。



(a) 鋼管杭 A (L.W.L.-2.5m)



(b) 鋼管杭 A



(c) 鋼管杭 B (L.W.L.-1.25m)

図-8 板厚測定結果 (鋼管杭)

3. 2 板厚測定結果

図-8 に鋼管杭, 図-9 に鋼矢板の測定結果を示す。UT 測定値は 100mm 四方の 5 点の平均値と標準偏差を, PEC 測定値はケレン前後の両結果を算出する。本研究では UT 測定値に対する PEC 測定値の誤差を検証するため, 真値を UT 測定値とし, PEC 測定値との差異を誤差とする。UT と PEC の測定誤差について, 鋼管杭を表-2 に, 鋼矢板を表-3 にまとめる。

測定に要した時間は, UT が平均 15~20 分/箇所

表-2 UT からの測定誤差 (鋼管杭)

(a) 鋼管杭 A

水深位置	周位置	表面処理	誤差	
			mm	%
L.W.L. -2.5m	12h	前	0.31	2.5
		後	0.38	3.1
	3h	前	0.65	5.2
		後	0.36	2.9
	9h	前	0.92	7.5
		後	0.85	6.9
L.W.L. -3m	12h	前	1.97	14
		後	0.81	6.5
	3h	前	0.48	3.8
		後	0.79	6.5
	6h	前	-0.16	1.2
		後	-	-
	9h	前	0.77	5.9
		後	0.68	5.5

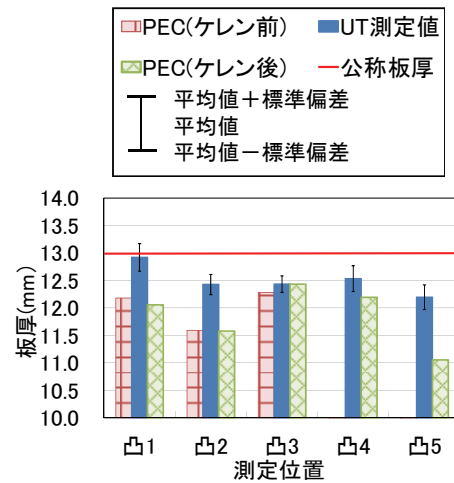
(b) 鋼管杭 B

水深位置	周位置	表面処理	誤差	
			mm	%
L.W.L. -2.5m	12h	前	0.27	3.3
		後	0.44	5.3
	3h	前	0.32	4.0
		後	0.48	5.9
	9h	前	0.42	5.3
		後	0.34	4.4

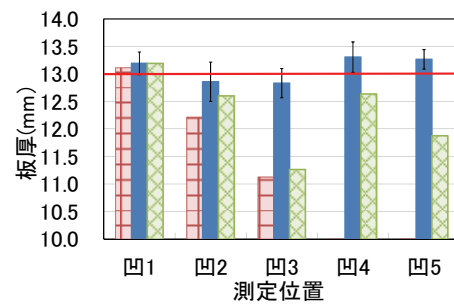
所であるのに対して PEC が平均 15~30 秒/箇所であった。このことから、PEC は効率的に広範囲の測定が可能であることが確認できる。また、海洋性付着物の除去は比較的容易であったため、海洋性付着物を粗く除去した後に錆の上から PEC による測定を行うことで測定対象からの距離を一定に保ち、測定範囲の変動を小さくするという方法が有効であると考えられる。

鋼管杭 A では、UT 測定値は公称板厚である 12mm を上回り、12.2~12.5mm となった。各測定箇所の 5 点の標準偏差は 0.1~0.35mm 程度であり、大きな孔食も見られない。PEC 測定値は、他測定箇所と比較して値がかなり大きい L.W.L.-3m の 12 時のケレン前の結果を除いて 12.1~13.9mm となり、ケレン前後の PEC 測定値の変動は ±0.3mm 以内となった。付着物が PEC の板厚測定に大きな影響を与えていないことがわかる。

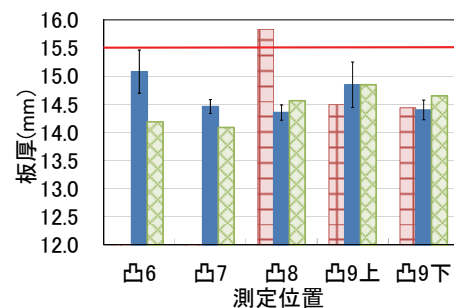
PEC 測定値の UT 測定値からの誤差についてみ



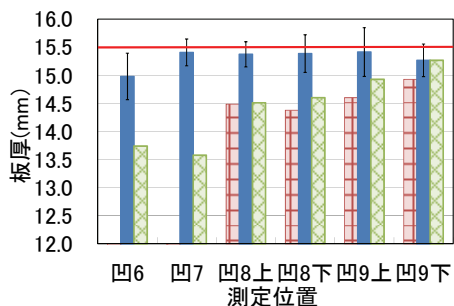
(a) 鋼矢板 A (凸部)



(b) 鋼矢板 A (凹部)



(c) 鋼矢板 B (凸部)



(d) 鋼矢板 B (凹部)

図-9 板厚測定結果 (鋼矢板)

表-3 UT からの測定誤差 (鋼矢板)
(a) 鋼矢板 A

水深位置	測定箇所	表面処理	誤差	
			mm	%
L.W.L. -1.3m	凸 1	前	-0.74	-5.7
		後	-0.86	-6.7
	凸 2	前	-0.83	-6.7
		後	-0.85	-6.8
	凸 3	前	-0.15	-1.2
		後	0.00	0.0
	凸 4	前	—	—
		後	-0.34	-2.7
	凸 5	前	—	—
		後	-1.14	-9.4
	凹 1	前	-0.08	-0.6
		後	0.00	0.0
	凹 2	前	-0.65	-5.0
		後	-0.26	-2.0
	凹 3	前	-1.71	-13
		後	-1.57	-12
凹 4	前	—	—	
	後	-0.67	-5.0	
凹 5	前	—	—	
	後	-1.39	-11	

(b) 鋼矢板 B

水深位置	測定箇所	表面処理	誤差	
			mm	%
L.W.L. -1.3m	凸 6	前	—	—
		後	-0.89	-5.9
	凸 7	前	—	—
		後	-0.37	-2.6
	凸 8	前	1.48	10
		後	0.21	1.5
L.W.L. -1.2m	凸 9 上	前	-0.35	-2.4
後		0.00	0.0	
L.W.L. -1.4m	凸 9 下	前	0.04	0.3
		後	0.25	1.7
L.W.L. -1.3m	凹 6	前	—	—
		後	-1.24	-8.3
	凹 7	前	—	—
		後	-1.83	-12
L.W.L. -1.2m	凹 8 上	前	-0.89	-5.8
		後	-0.86	-5.6
L.W.L. -1.4m	凹 8 下	前	-1.01	-6.6
		後	-0.78	-5.1
L.W.L. -1.2m	凹 9 上	前	-0.81	-5.3
		後	-0.49	-3.1
L.W.L. -1.4m	凹 9 下	前	-0.34	-2.2
		後	0.00	0.0

ると、L.W.L.-3m の 12 時の位置におけるケレン前の測定以外では、UT 測定値に対して最大 1mm 以内、割合では 1~8% となり、誤差の平均は 0.68mm であり、UT 測定値の 5.5% であった。また、PEC 測定値の方が UT 測定値より大きな値をとる傾向にあったが、基準点の取り方およびその位置での板厚に影響を受けるものと考えられる。

鋼管杭 B においても、鋼管杭 A と同様に、UT と PEC の両測定結果において、公称板厚 8mm を上回る傾向にあった。UT 測定値は 7.9~8.3mm となった。標準偏差は 12 時の位置で 0.53mm と比較的大きな値となっているが、これは UT 測定点の左上において 9.2mm という公称板厚や他の測定点より大きな値が得られたためである。PEC 測定値は 8.3~8.7mm となった。ケレン前後の PEC 測定値の変動は ±0.2mm 以内となり小さい。PEC 測定値の UT 測定値に対する誤差については、UT 測定値に対して 0.2~0.5mm、割合では 3~6% となり、誤差平均値は 0.38mm、4.7% であった。

鋼矢板の測定結果では、UT 測定値を PEC 測定値が下回る傾向にあった。UT 測定値は鋼矢板 A では 12.2~13.3mm、鋼矢板 B では 14.4~15.4mm となった。UT の標準偏差は 0.1~0.4mm であった。鋼矢板 B の凸 8 のケレン前の測定で大きな誤差が生じており、原因は現時点で不明であるが、ケレン後ではそのような異常は見られなかった。ケレン前後の PEC 測定値の変動は、鋼矢板 B の凸 8 を除いて ±0.35mm 以内となり、大きな誤差は見られない。PEC 測定値の UT 測定値に対する誤差については、凸部では鋼矢板 A で -0.15~-1.1mm、割合では -1.2~-9.4% 程度、鋼矢板 B では鋼矢板 B の凸 8 を除いて -0.2~-0.9mm、割合では -1.5~-6.0% 程度の誤差となり、凹部では鋼矢板 A で -0.1~-1.7mm、割合では -1~-13%、鋼矢板 B では -0.5~-2.0mm、割合では -2.0~-12% 程度の誤差となった。

3. 3 考察

鋼管杭の測定結果では、鋼管杭 A も鋼管杭 B も全体的に UT 測定値より PEC 測定値の方が大きな値となったが、これは基準点の取り方によると考えられる。PEC 測定値の UT 測定値からの誤差の大きさとしては、最大で 10% 程度となる箇所も見られたが平均としては約 5% であった。

鋼矢板の測定結果は、鋼管杭とは反対に、UT 測定値を PEC 測定値が下回る傾向にあった。しかし、局所的に 10% を越える箇所が見られ、特に凹

部でPEC測定値がUT測定値を大きく下回っている場合が多い。これは測定箇所がフランジに挟まれており、磁界が影響を受けた可能性が考えられる。

凸部に関しては、UT値に対するPEC値の誤差が、鋼矢板Aでは平均-5%、鋼矢板Bでは凸8を除き平均-1%となり、全体的に小さくなっている。

また、付着物の有無による測定結果への影響については、鋼管杭では付着物の有無による測定値の変動は±0.3mm以内と小さい値となった。鋼矢板においても誤差の大きい鋼矢板Bの凸8を除いて-0.4~0.1mm程度であり付着物がPECの測定に与える影響は小さいことが確認できた。

これらを考慮すると、鋼矢板の凹部における問題点が残ることから鋼矢板におけるPECの使用は、磁界の影響範囲を考慮して、今後適用範囲をさらに検討していく必要がある。

PECによる板厚測定は基準点からの相対評価のため、基準点の板厚値の精度に大きく影響を受けることになる。基準点を数箇所設けて基準板厚の精度の向上に努めるなど、基準点の取り方についても、今後検討が必要である。

4. 結論

本研究では、鋼管杭と鋼矢板の板厚測定において一般的である超音波測定法と、付着物の影響を受けず測定が可能なパルス渦電流板厚測定法の両方で測定を行い、それらの結果を比較するとともに、港湾鋼構造物におけるパルス渦電流測定法の適用性を検討した。

以下に、本論文で得られた結論を示す。

- (1) 海中でもパルス渦電流測定法による板厚測定は可能であり、測定に要する時間も15~30秒/箇所と陸上とほぼ変わらず、表面処理も含めて15~20分/箇所を要する超音波測定と比較して効率的な測定が可能であった。
- (2) 渦電流測定の超音波測定の結果に対する誤差は、鋼管杭では平均して±5%以内となり、海中であっても陸上と同程度の精度で測定できることがわかった。しかし、鋼矢板では局所的に誤差が10%を越える箇所が見られた。これは、フランジが磁界に影響を及ぼしたことが原因だと考えられる。
- (3) 渦電流測定における付着物の有無によって、プローブから鋼材までの距離が5~10mm変

動したが、表面処理前後における測定誤差の増減には傾向が見られなかった。

- (4) 海洋性付着物の除去は比較的容易であるため、渦電流による板厚測定の実用的な運用方法として、測定範囲の変動を小さくするために海洋性付着物を粗く除去した後に、さびの上から測定を行うといった方法が有効であると考えられる。

謝辞

本研究の一部は、一般社団法人日本鉄鋼連盟2011年度「鋼構造研究・教育助成事業」の助成のもとに行われたものである。また、板厚測定に関しては、新日本製鐵株式会社名古屋製鉄所(当時)と日鉄防蝕株式会社(当時)に多大なご協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表す。

【参考文献】

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所：港湾施設の維持補修・更新費の将来推計，pp.1-14，2005。
- 2) 国土交通省港湾局：港湾の施設の維持管理，第23回港湾行政実務研修資料，pp.1-10，2011。
- 3) 財団法人沿岸開発技術研究センター：港湾鋼構造物防食・補修マニュアル(2009年度版)，2009。
- 4) 渡邊英一(監修)：海洋環境における鋼構造物の耐久・耐荷性能評価ガイドライン，構造工学シリーズ19，土木学会，2009。
- 5) 吉住夏輝，松本さゆり，片倉景義：水中鋼構造物の非接触式肉厚測定器の開発，港湾空港技術研究所報告，第48巻，第4号，pp.89-104，2009。
- 6) Scottini, R. and Quakkelsteijn, H.J. : Inspection of coated subsea piping and risers, Proc. of 4th Middle East NDT Conference and Exhibition, Kingdom of Bahrain, 2007.
- 7) 若築建設：環境・社会報告書2011，www.wakachiku.co.jp/csr/report.html，2011。
- 8) 古海寛：保温材や防食材上からの肉厚測定，東亜非破壊検査(株)，検査技術，pp.53-59，2005。