

非接触型渦流探傷装置による港湾鋼構造物の肉厚測定

森 晴夫

若築建設株式会社 技術設計部



我が国の港湾には高度成長期に建設された矢板岸壁や杭式栈橋、浮き栈橋などの鋼構造物が多く存在している。平成19年に改正された「港湾の施設の技術上の基準を定める省令」では、技術基準対象施設に対して安全に供用していくために、施設の点検診断を行い損傷や劣化などを確実に把握することが求められている。その点検診断の一手法として鋼構造物の腐食調査では、通常、超音波による鋼材の肉厚測定が実施されている。一般によく用いられる超音波厚み計は、接触式であるため、測定時の前処理として、鋼材表面に付着している貝殻などを取り除かなければならず、また、探触子を当てる点での計測に留まっている。そこで本報告では、付着生物を除去することなく面的に計測できる非接触型装置を水中鋼構造物に適用できるように治具を開発したのでその概要を紹介する。

テーマ 非接触型、渦流探傷装置、肉厚測定、港湾鋼構造物

1. はじめに

日本国内の港湾鋼構造物は、昭和30年代から昭和40年代の高度経済成長期に、その多くが建設された。港湾の構造物は耐用年数を50年以上として設計されているが、海洋では過酷な腐食環境となるため、構造物の健全性を維持することは容易でなく、耐用年数を迎える前に老朽化が進んでいる状況にある（写真-1参照）。

港湾の施設は国土交通省令によって、供用期間にわたって要求性能を満足するよう維持管理計画等に基づいて適切に維持されることを規定している。このため点検診断を適切に実施することによって、構造物の損傷および劣化を的確に把握して、必要な対策を施すことの要求が高まっている。

港湾の鋼構造物の腐食調査では、超音波厚み計によ

る肉厚測定が点検診断の一手法としてよく用いられている。この測定方法は、超音波探触子を測定部表面に密着させて超音波の裏面からの反射時間を計測するものである。超音波による計測は確実かつ高精度に肉厚を測定できる長所がある一方で、その探触子を当てる点での肉厚となっている。図-1に示すように「港湾の施設の維持管理技術マニュアル」では、超音波厚み計による測定点は深度方向にa-dの4測点で10cm四方内の1測点当たり5ないし3点の平均肉厚としている。このため、図-2に示すように現状の超音波厚み計による調査方法では、探触子を当てる小さな計測箇所での肉厚で、部材全体の腐食程度を評価していることから、もっと危険なところがあるかもしれない不確かさが残る。さらに、測定前の準備工として探触子を当てる計測箇所の貝殻落としや鋼材表面のケレン作業が必要であるため、作業効率が悪く、除



写真-1 港湾鋼構造物

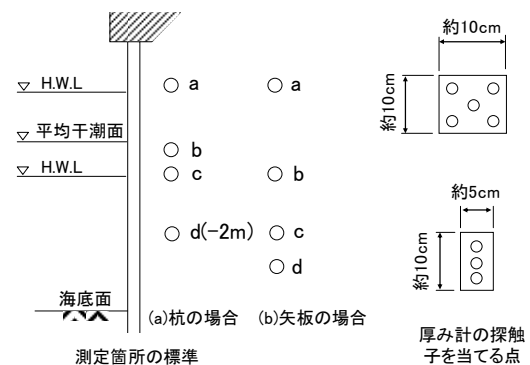


図-1 肉厚測定点

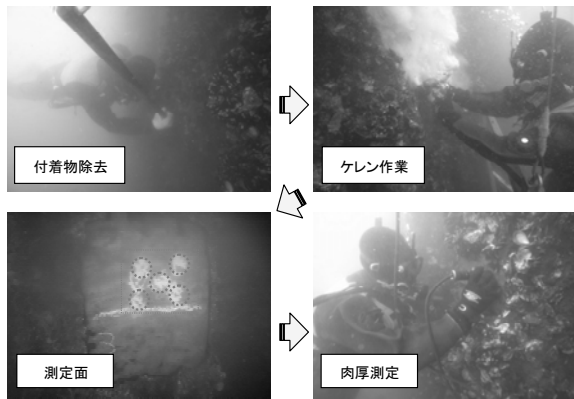


図-2 現状の調査方法

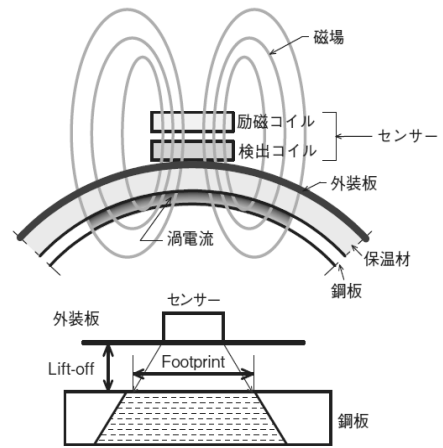


図-3 渦電流の誘起と Footprint

去した貝殻の処分も必要となる。また、研磨作業は防食塗膜や鋼材自体を傷つけ、かえって腐食を助長する恐れがある。

こうした超音波厚み計の課題は、非接触型の肉厚測定装置を水中鋼構造へ適用することにより克服できると考えられる。このため、若築建設、マリンテクノロジー、東亜非破壊検査の3社は共同で、非接触型の肉厚測定装置の一つである RTD-INCOTEST (RTD インコテスト) を水中で使用するための治具を開発し、耐水圧試験や水槽試験さらに実海域における実証試験によってその性能を検証したのでその概要を報告する。

2. RTD-INCOTESTとは

2.1 装置の概要

RTD-INCOTEST (RTD-Insulated Component Test の略称、Applus RTD 社製 (オランダ)) は、工場の配管やタンクなど磁性体の減肉状況を把握するための測定装置である (写真-2 参照)。RTD-INCOTESTは図-3に示すように電磁誘導によるパルス渦流探傷の一種である。励磁コイルで誘起された渦電流は、時間の経過とともに磁性体 (鋼板) 中を徐々に拡散しながら板厚方向に浸透し、鋼板裏面に到達すると急激に拡散減衰する。この渦電流の変化

を検出コイルで捉えている。この渦電流が急激に減衰する Point を測定することで鋼板中の渦電流持続時間がわかる。鋼板に減肉がある場合、健全部と比較して減肉分だけ渦電流持続時間が短くなる。この渦電流持続時間により健全部に対する減肉部の相対的な肉厚が求められる。

このように測定対象の肉厚は、超音波厚み計のように絶対値ではなく、健全部に対する相対値 (%) で表示され、その測定精度は、換算した残存鋼材厚さで $\pm 5\%$ 程度である。また、測定面に対して非接触で減肉状態を測定できるため、測定対象が保温材や防食材、モルタル、耐火被覆などの保護材で覆われている場合でもそれらを解体せずに測定することができる。

RTD-INCOTEST は、写真-3のようにプローブと呼ばれるセンサーと PC/コントロールユニット、PC 用のバッテリー



写真-2 陸上での計測状況



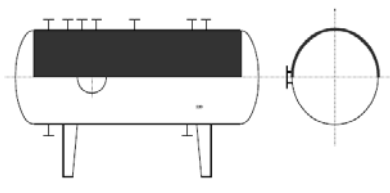
写真-3 INCOTEST の計測機器構成

表-1 RTD-INCOTEST(P1.5)の適用範囲

項目	内容
測定対象物	炭素鋼
Lift-off	150mmまで
測定肉厚	65mm以下
測定配管径	50mm以上
測定精度	$\pm 5\%$

検査	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42			
A	85	87	93	85	85	87	84	93	86	87	T	T	T	93	M	95	M	97	93	93	93	93	93	93	93	93	93	93	93	96	93	102	96	93	97	106	97	102	98	93					
B	85	85	89	83	83	93	93	93	83	86	87	T	T	102	102	102	97	97	93	93	95	95	95	95	102	93	85	101	102	105	102	102	96	93	93	93	102	102	95	94	93				
C	86	88	93	89	85	85	83	83	85	85	T	T	T	102	101	102	103	96	95	99	96	96	95	96	104	94	96	102	101	102	96	104	95	93	93	95	92	102	97	95	102	93			
D	87	83	89	88	86	88	88	83	88	T	T	T	101	97	99	96	95	93	93	93	102	102	102	97	88	93	96	102	96	96	95	102	93	95	100	106	102	102	101	93					
E	85	88	93	86	87	88	85	85	97	85	T	T	95	101	102	94	93	93	93	96	93	85	85	102	96	93	93	97	103	96	102	102	93	93	95	95	102	105	102	96	93				
F	N	93	88	93	N	87	93	N	93	N	N	93	N	97	93	93	97	104	104	97	96	93	93	93	96	100	N	N	N	97	93	96	102	97	102	N	100	93	93	95	N	N	102	97	93
G	N	93	93	93	N	N	102	N	93	N	N	93	N	100	93	112	102	97	94	N	N	N	N	N	112	104	102	102	102	102	N	N	N	96	102	N	N	N	N	N	106	102	102		
H	88	89	93	91	87	86	93	93	93	93	93	93	102	95	102	102	102	97	93	102	N	102	104	106	112	96	89	94	101	102	102	N	102	93	102	102	N	N	107	107	W	W			
I	88	83	85	93	93	93	93	93	98	93	93	93	102	103	102	94	88	83	105	103	107	102	102	102	89	88	89	102	93	97	93	102	93	92	99	106	102	96	W	W					
J	80	85	93	88	85	93	93	93	84	89	86	87	85	93	93	93	94	94	93	85	88	85	103	104	112	97	93	85	97	96	107	123	94	89	93	93	102	97	102	93	93				
K	85	85	82	84	75	77	80	82	88	86	90	94	98	101	97	99	100	93	93	102	102	102	111	126	95	178	88	104	89	97	103	95	93	85	95	100	104	100	97	98	93				
L	90	85	85	78	85	75	89	87	93	89	87	87	93	102	85	102	102	96	83	93	85	109	106	106	93	89	102	96	96	93	93	86	93	99	98	102	95	103	91						
M	88	87	83	80	85	84	85	87	92	93	94	94	93	93	97	102	102	84	85	107	102	96	102	105	93	101	94	98	102	99	102	96	102	85	101	102	86	85	102	97	86				

基準測定点



※計測値は、基準測定点の板厚を100とした場合の相対的な肉厚
 ※白色部分(T,N,M,W)は、ノズルなど障害物により測定不可な部分

図-4 陸上の圧力容器の測定事例

リーで構成される。センサーはP0.25~P1.5まで4種類があり、測定対象物の形状や測定規模に応じて使い分けられる。本開発では、鋼板との離れを最も大きく取れるRTD-INCOTEST(P1.5)を採用しその適用範囲を表-1に示す。

2.2 測定範囲とその適用性

図-4に陸上の圧力容器の肉厚測定結果の事例を示す。RTD-INCOTESTは「点」での肉厚を測定する超音波探傷とは異なり「Footprint」と呼ばれる「面」での平均的な肉厚を測定している(図-3参照)。Footprintは、鋼板表面で誘起された渦電流が拡散、浸透する部分であり、そのサイズは通常センサー側の円錐台の直径で示される。また、Footprintはセンサーと鋼板の離れ(Lift-off)と密接な関係があり Lift-off が小さくなると Footprint サイズは小さくなり、逆に Lift-off が大きくなると Footprint サイズも大きくなる。なお RTD-INCOTEST で検出可能な減肉サイズは、Footprint の10%以上の体積及び 30%以上の面積とされ、孔食のように体積の小さな欠陥の検出には適用が困難とされる。

3. 港湾鋼構造物への適用

3.1 適用方法

適用にあたっては気中仕様の RTD-INCOTEST を港湾鋼構造物などの海水中に建設された構造物に適用するためにセンサーやケーブルが直接、水に触れるのを防護する「水中プロテクタ」と、RTD-INCOTEST と測定面との Lift-off を一定に保つための「位置保持治具」を使用する。なお、この位置保持治具はダイバーによる水中作業で水中プロテクタ取り付け時の荷重や波浪によるダイバーへの外力にも耐えるようにクランプと呼ばれる治具で鋼矢板や鋼管に固定する。表-2に計測に必要な構成機器と図-5に「水中プロテクタ」と鋼矢板用の「位置保持治具」を示す。

3.2 RTD-INCOTEST を用いた肉厚測定の特長

RTD-INCOTEST を用いた港湾鋼構造物の肉厚測定の大きな特長として以下のことが挙げられる。

- 測定面と非接触で測定できる。

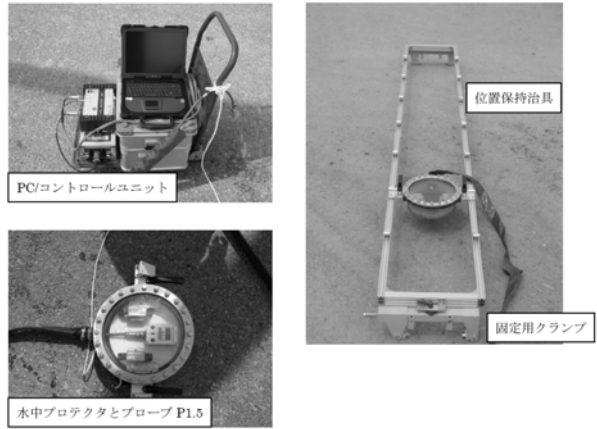
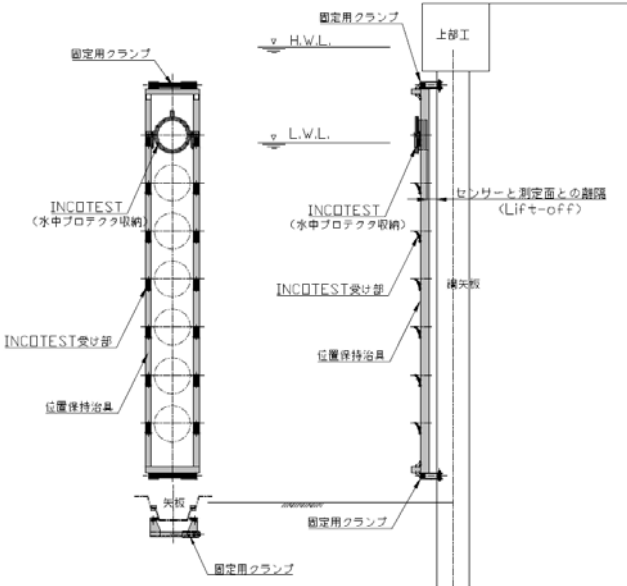


図-5 港湾鋼構造物への適用(鋼矢板)

表-2 計測に必要な機器構成

項目	機器・器具名	規格・仕様
RTD-INCOTEST	プローブ	P1.5 Lift-off 50~150mm 重量14.5kg(水中プロテクタ装備)
	PCコントロールユニット	解析ソフト内蔵
	バッテリー	-
水中用器具*	水中プロテクタ	非磁性ステンレス製 φ300
	ケーブル保護ホース	-
	位置保持治具	アルミ製, 重量20kg
	固定用クランプ(上下)	鋼製, 重量10kg

※: 水中用器具は特許申請中

- 測定対象が貝殻などの付着物や防食材で被われていても肉厚測定が可能である。
- Footprint と呼ばれる範囲内の平均的な肉厚（健全部に対する相対値）を測定する。
- 面的に測定するため、測定対象の減肉状況を連続的に把握できる。

RTD-INCOTEST を使って港湾鋼構造物の肉厚を測定する場合のイメージを図-6に示す。位置保持治具の水中重量は30kg程度であり、陸上から介助すれば、ダイバー1人でも取り付けが可能である。また、RTD-INCOTESTの測定時間は、1箇所当たり数秒程度であり大幅な時間短縮が可能である。

4. 水中におけるRTD-INCOTESTの性能確認

4.1 試験の概要

水中におけるRTD-INCOTESTの性能を確認するため図-7に示すように港湾鋼構造物の腐食状況や海生生物の付着状況を模擬した供試体(鋼矢板Ⅲ型)を用意し、陸上と試験水槽内でこれらの肉厚測定を行い、水中におけるRTD-INCOTESTの測定性能と測定精度を確認した。

試験で使用した供試体は、400mmに区画割りした3つのブロックを以下のような2タイプに加工したものである。

【タイプ1】(研磨加工により腐食を模擬)

- B-①: 腐食なし(肉厚100%残存)
- B-②: 肉厚が85%残存
- B-③: 肉厚が70%残存

【タイプ2】(海生生物の付着や被覆防食を模擬)

- B-①: 腐食なし(肉厚100%残存)
- B-②: 鋼材表面に貝殻接着
- B-③: 鋼材表面に防食テープ貼付

4.2 性能確認の結果

図-8に陸上及び水中における真値との比較結果を示す。この結果より以下のことが確認された。

- いずれの測定結果を見ても陸上で値と試験水槽内の値にほとんど差はなく、RTD-INCOTESTの水中

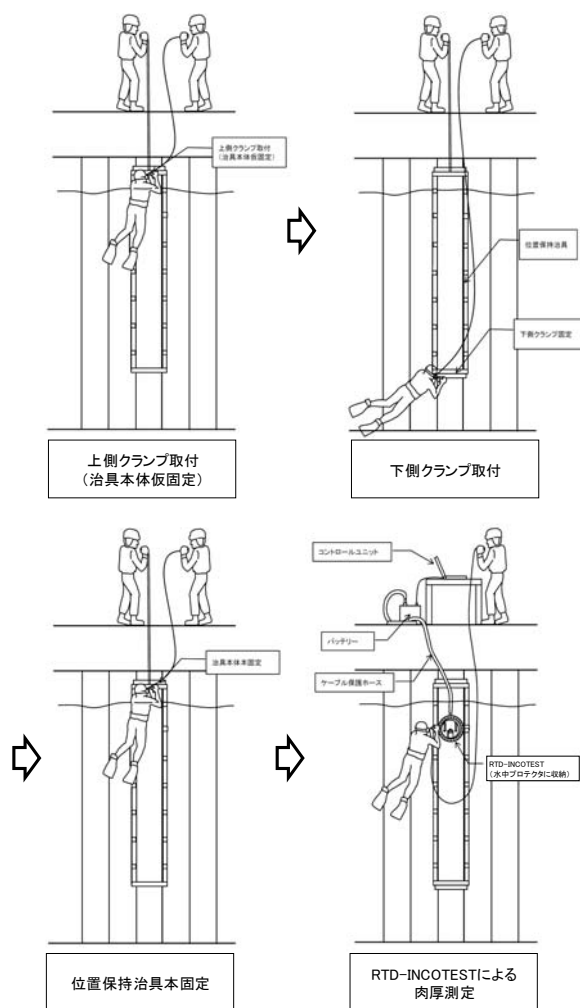


図-6 施工イメージ

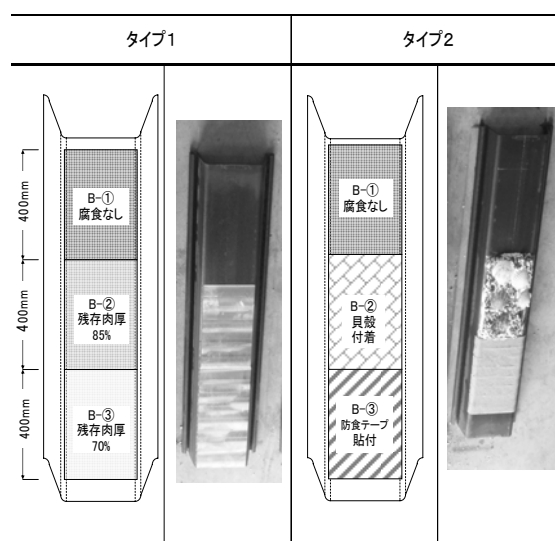


図-7 供試体

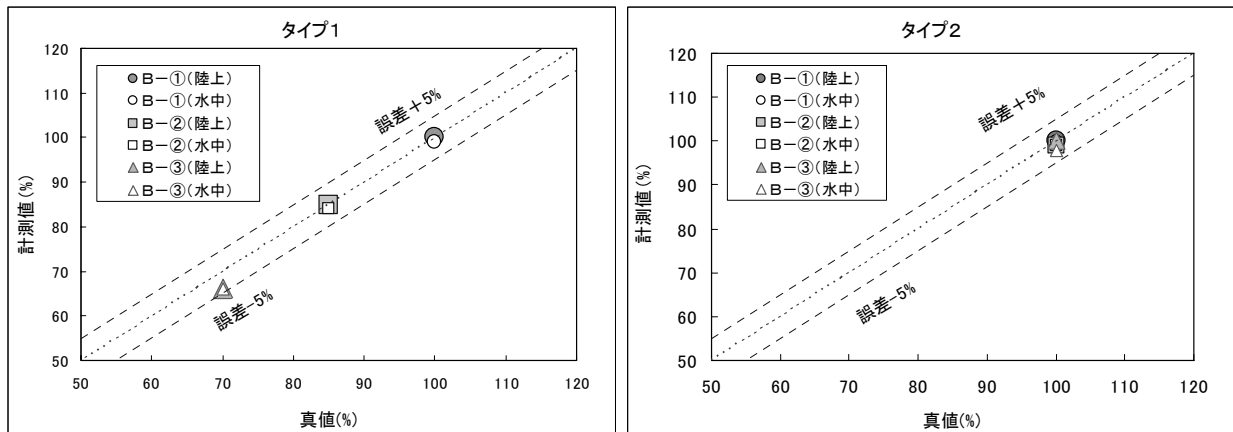


図-8 水槽試験での測定結果(陸上及び水中における真値と計測値の比較)

での使用に問題がないことが確認できた。

- 陸上、水中いずれにおいても、真値に対する測定誤差は±5%以内であり、これはRTD-INCOTESTの公称誤差の範囲内である。
- 鋼材表面に海生生物などの付着物があっても、測定値への影響がないことが確認された。

5. 港湾構造物への適用事例

千葉県袖ヶ浦市の実海域の岸壁(鋼矢板IV型)を使って、RTD-INCOTESTや水中プロテクタ、位置保持治具の性能を検証した。現地では、位置保持治具を岸壁鋼矢板に設置して、ダイバーが所定の位置(3計測線(I-III)×7計測点(深度方向))の肉厚を測定した。図-9の左側にRTD-INCOTESTによる計測結果と写真4に水中での計測状況を示す。

このRTD-INCOTESTによる測定値を検証するために、同じ箇所の肉厚を超音波厚み計で測定(5点計測の平均値)して両者を比較した。図-10にRTD-INCOTESTと超

RTD-INCOTEST計測結

位置	III	II	I
1	100	99	100
2	97	99	99
3	93	98	98
4	98	98	97
5	99	98	99
6	100	98	99
7	99	100	99



図-9 鋼矢板岸壁の計測結果

音波厚み計の計測結果の比較を示す。実海域での適用により以下のことが確認できた。

- 実海域において鋼矢板前面に位置保持治具を設置し、水中プロテクタを装着したRTD-INCOTESTにより、鋼材の残存肉厚を計測できることを確認した。
- 実海域の鋼矢板の肉厚測定で、RTD-INCOTESTの計

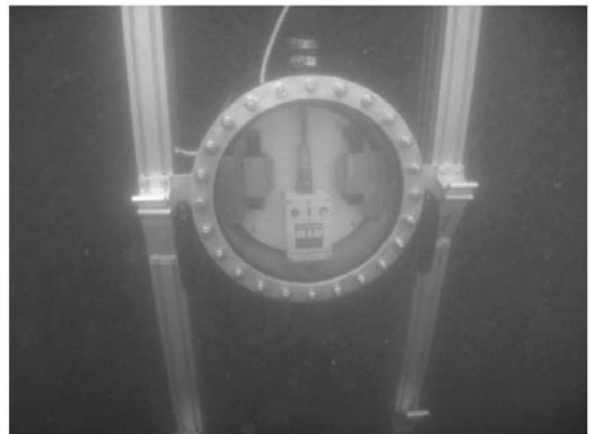


写真4 実海域での計測状況

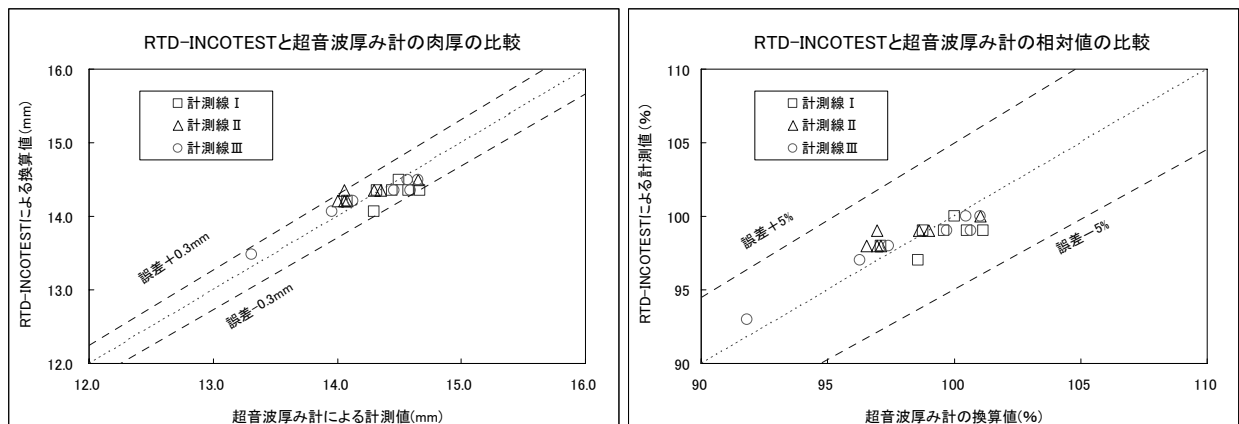


図-10 実海域での RTD-INCOTEST と超音波厚み計の測定値の対比

測結果から換算した肉厚（計測線 I の計測点 1 を 100%とした場合の相対肉厚）は、超音波厚み計の計測値と比較すると両者の差異は $\pm 0.3\text{mm}$ 以内の精度で計測され（図-10 左参照）、両者はほぼ一致する結果となった。

- RTD-INCOTEST の計測結果と超音波厚み計の相対比率（計測線 I の計測点 1 を 100%とした場合の相対肉厚比）と比較すると差異は $\pm 2\%$ 以内で RTD-INCOTEST の許容誤差以内の精度で計測された（図-10 右参照）。
- 位置保持治具はクランプにより鋼矢板に確実に取り付けられており、水中プロテクタの取り付け時の荷重、波浪による不意の外力にも耐え得る状態であった。
- 位置保持治具の移動、取り付け、取り外しの作業時間を含めた計測時間は、超音波厚み計による計測時間と比べかなり短縮できることが確認できた。

また、図-9の左側の RTD-INCOTEST の測定結果より、鋼矢板の肉厚は、腐食状況により面的に色分され連続的に把握できた。

6. まとめ

非接触型渦流探傷装置である RTD-INCOTEST は、水中プロテクタに搭載し位置保持治具によりセンサーと測定面の Lift-off を一定に保つことで実海域の港湾鋼構造物の肉厚測定に十分適用できることが確認できた。また、

RTD-INCOTEST は、超音波厚み計に対して以下の優位点があることから、今後、港湾鋼構造物の腐食調査への普及が期待される。

- 面的に連続的データの取得が可能であり、施設の腐食状況をより広範囲に把握できる。
- 海生物の除去が殆どなく作業性が改善されるとともに、鋼材表面のケレン作業による鋼材の損傷やその部分から腐食が助長する恐れもなくなる。

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、2007.
- 2) 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. 89-108、2009.
- 3) 古海寛：保温材や防食材上からの肉厚測定（INCOTEST）、検査技術（日本工業出版）、2005 年 7 月号
- 4) 古海寛：保温材上や防食材上からの肉厚測定—INCOTEST 一、非破壊検査（社団法人 日本非破壊検査協会機関誌）、Vol. 55、2006 年 3 月号