

耐海水性ステンレス鋼被覆を適用した 海洋鋼構造物の耐久性について

～人工傷を有するステンレス鋼被覆鋼管の長期曝露試験～

Durability of Offshore Steel Structures using Metallic Sheathing
Corrosion Protection Technique with Seawater Resistant Stainless Steel
～Long-Term Exposure Test of Carbon Steel Pipe covered with
Stainless Steel with Artificial Damage～

金田 文香 Fumika KANADA
技術開発第一研究所
溶接・防食・材料評価技術室

佐々木信博 Nobuhiro SASAKI
技術開発第一研究所
溶接・防食・材料評価技術室

佐藤 弘隆 Hirotaka SATOU
技術開発第一研究所
溶接・防食・材料評価技術室

抄 録

当社は、厳しい腐食環境下で供用される海洋鋼構造物のライフサイクルコスト最小化の観点から、信頼性が高く経済性に優れた耐海水性ステンレス鋼を被覆(以下、SUS被覆)した防食技術を開発し、数多くの海洋鋼構造物に適用している。

本稿では、SUS被覆の損傷部が長期間放置された場合を想定し、干満が再現できる試験水槽での約10年間の長期曝露試験の結果を述べる。SUS被覆損傷部の炭素鋼(以下、損傷部炭素鋼)は何れの部位でも異種金属接触腐食は認められず、飛沫帯の腐食速度は電気防食が効いている炭素鋼単独と同等であり、干満帯～海中部では電気防食により腐食が抑制されていることを確認した。また、SUS被覆内部の炭素鋼(以下、内部炭素鋼)の腐食速度も電気防食が効いている海中部炭素鋼の腐食速度と同程度であることを確認した。

Abstract

Nippon Steel & Sumikin Engineering Co., Ltd has developed a new reliable and economical metallic sheath corrosion protection technique with seawater resistant stainless steel (hereinafter referred to as "SUS sheath") for offshore steel structures, aiming at minimum life cycle cost under severe corrosive environments. The system has been already applied to a large number of offshore steel structures.

This paper deals with a long term exposure test of the damaged SUS sheath for 10 years in a pool simulated the tidal cycles, assuming the time once damaged and left for long time without repair. As the result, it was confirmed that galvanic corrosion has not occurred at all the damaged area where carbon steel underneath were exposed. The corrosion rate of carbon steel exposed along splash zone was equal to that under which cathodic protection was effective. In addition, the exposed carbon steel at damaged portion along tidal and submerged zone were restrained by cathodic protection. It was confirmed that corrosion rate of carbon steel under SUS sheath was kept equal to that where cathodic protection was effective.

1 緒言

海洋鋼構造物のライフサイクルコスト低減を目的に、飛沫・干満帯にSUS被覆を施し、海中部に流電陽極方式の電気防食を適用する防食工法の実績¹⁾が増えつつある(写真1)。



写真1 SUS被覆を適用した海洋鋼構造物
Photo. 1 Offshore structure using metallic sheathing corrosion protection technique

SUS被覆は、耐食性や耐衝撃性に優れるため、長期耐久性が期待できる²⁾。しかしながら、船舶の船首など、応力が集中するような鋭利な物体の衝突では、SUS被覆といえども、損傷して炭素鋼が露出する可能性がある。この場合、炭素鋼露出部では異種金属接触による腐食促進が懸念される。したがって、適切な維持管理を行うには、炭素鋼露出部の腐食状況を把握する必要がある。そこで佐藤らは、実海域でSUS被覆に人工傷を付加した試験体による暴露試験を実施し、人工傷には異種金属接触による腐食促進がないことを確認している³⁾。だが、上記暴露試験は期間が9か月と短いことから、著者らは、損傷部が長期間放置された場合を想定し、干満が再現できる試験水槽で、約10年間の長期暴露試験を実施した。本論文では、損傷部炭素鋼の他、9か月の暴露試験では確認していない内部炭素鋼の腐食状況も併せて報告する。

2 試験方法

2.1 試験体

図1に試験体概要を示す。長さ2900mm、外径139.8mm、厚さ4.3mmの鋼管(SGP125A)の干満帯を中心に、厚さ0.4mm、長さ2000mmの耐海水性

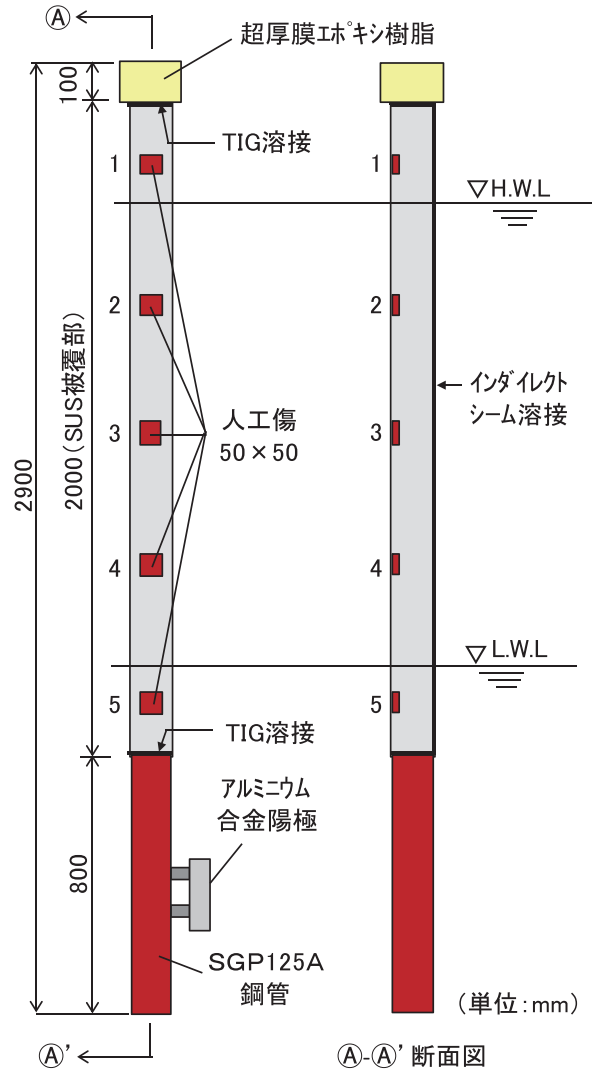


図1 試験体概要
Fig. 1 Layout of the specimen

ステンレス鋼(鋼種:SUS312L、成分:20Cr-18Ni-6Mo-0.7Cu-0.2N)を被覆し、海中部にアルミニウム合金陽極(AI-Zn-In系)を取り付けた試験体を製作した。SUS被覆は、鋼管に巻き付けた後、軸方向の重なりをインダイレクトシーム抵抗溶接、軸方向両端部の周方向をティグ溶接で接合した。ステンレス鋼シートの重ね部は、プラズマ溶接を行い、隙間構造を無くした⁴⁾。試験体には、干満帯を中心に、50mm×50mmの人工傷を5か所付与した。人工傷は、ディスクグラインダーによりSUS被覆を切断し炭素鋼を露出させた。

2.2 試験水槽

試験は、独立行政法人港湾空港技術研究所(神奈川県横須賀市)敷地内の海水循環水槽にて行った。

この試験水槽は、隣接する久里浜湾の天然海水を付属ポンプで給排水することにより、1日2回の干満を再現している。干潮から次の干潮までの周期は12時間である。試験水槽の深さは3mで、そのうち干満範囲は1.5mである。水槽の水面は、給排水時や強風でもほとんど波はたたず穏やかである。試験期間は平成15年1月～平成25年7月までの10年6ヶ月である。

2.3 調査項目及び調査方法

(1) 外観観察

試験体引き上げ後、損傷部炭素鋼の外観観察を付着物や腐食生成物除去の前後で行った。その後、SUS被覆をディスクグラインダーで切断・除去し、内部炭素鋼の外観観察を付着物や腐食生成物除去前後で行った。なお、付着物や腐食生成物の除去は、ワイヤーブラシ及びハンマーで行った。

(2) 炭素鋼の腐食速度

外観観察終了後、超音波厚み計による肉厚測定から、損傷部炭素鋼及び内部炭素鋼の腐食速度を算出した。肉厚測定は、炭素鋼露出部では1か所当り15点、内部炭素鋼では、軸方向4列(図2に示す、0時、3時、6時、9時)において、各列100mm間隔で1か所当り5点行った。なお、6時の線上は、軸方向溶接部直近で、炭素鋼とステンレス鋼シートが接触面の抵抗発熱により部分熔融して接合している。

(1) 除去前

干満帯及び海中部の損傷部炭素鋼は、電気防食の効果により、白色の沈殿物(以下、電解皮膜)で覆われていた。また、その表面は緑色の藻(珪藻)が付着していた。藻は海水浸漬率の影響を受け、下部ほど

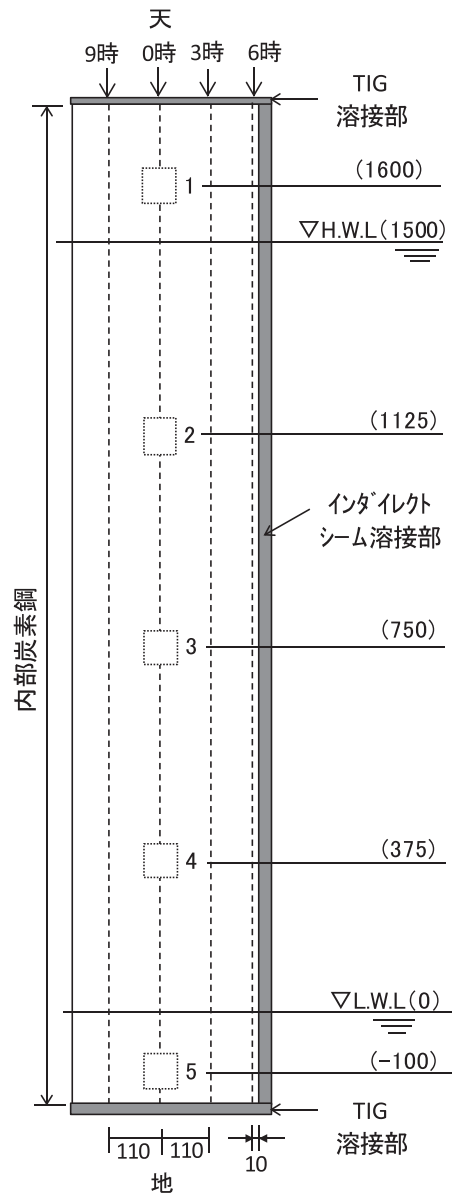


図2 内部炭素鋼肉厚測定箇所展開図
Fig. 2 Measurement location developed view of carbon steel thickness

3 結果および考察

3.1 外観観察

3.1.1 炭素鋼露出部

写真2に試験体引き上げ直後の外観を、写真3に損傷部炭素鋼の付着物や腐食生成物除去前後の外観をそれぞれ示す。

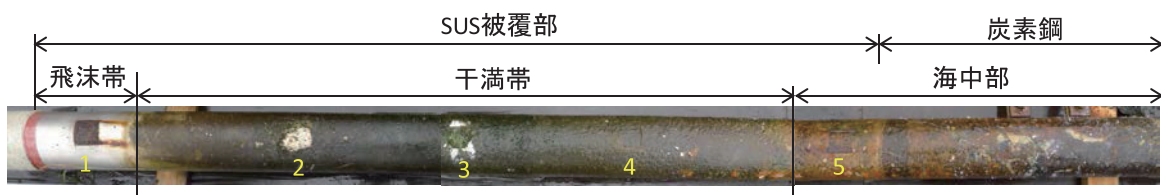
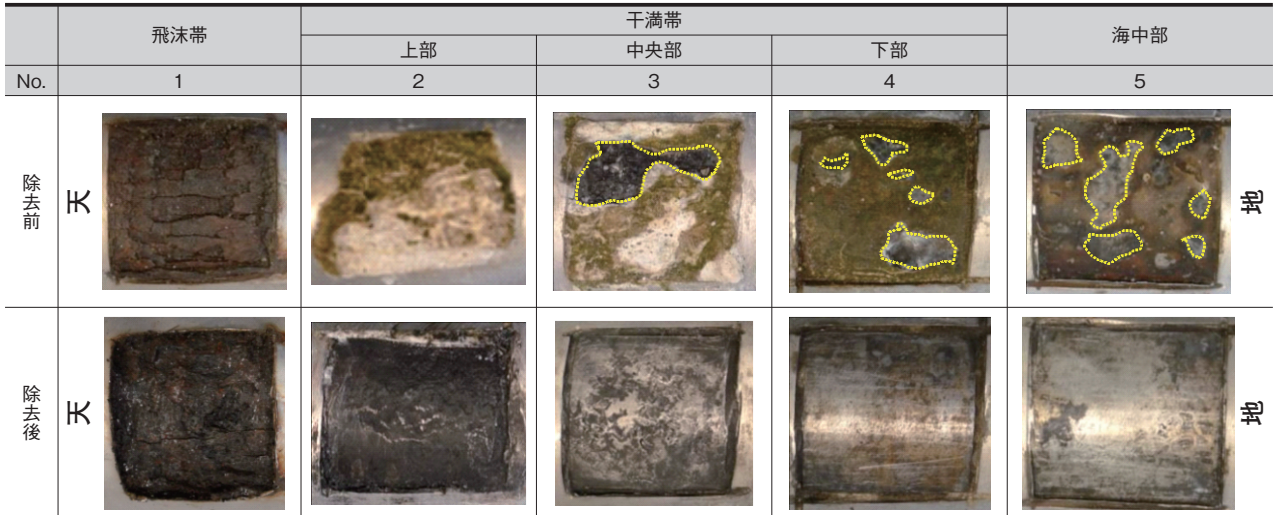


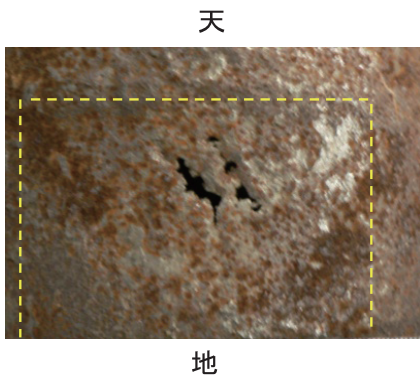
写真2 試験体引き上げ直後の外観
Photo. 2 Specimen appearance immediately after the end of exposure test



*点線は、試験体運搬時に付着物が剥がれた範囲を示す。

写真3 損傷部炭素鋼における付着物や腐食生成物除去後の外観

Photo. 3 Carbon steel appearance at the damaged SUS sheath after removing deposit and corrosion product



*点線の内側が損傷部炭素鋼

写真4 損傷部炭素鋼の腐食生成物除去後(飛沫帯)

Photo. 4 Carbon steel appearance at the damaged SUS sheath after removal of corrosion product (splash zone)

密集していた。さらに、SUS被覆と損傷部炭素鋼の境界は、電解皮膜や藻で充填されていた。電気防食が効かない飛沫帯の損傷部炭素鋼は、激しく腐食し、赤錆が鋼表面全体に固着していた。

(2) 除去後

干満帯の損傷部炭素鋼は海水浸漬時間に比例して表面状態に差異があった。干満帯の上部・中央部の損傷部炭素鋼には、一部に小さい凹凸がみられ、わずかだが腐食した形跡があった。凹凸以外は平滑な表面状態が見られ、平滑な面積は干満帯上部より中央部の方が多かった。干満帯下部及び海中部の損傷部炭素鋼は、全面が平滑な表面状態でほとんど腐食が見られず、金属光沢を示している部分もあった。電解皮膜を除去した干満帯及び海中部の鋼表面は

pH=12であった。電気防食電流が流入しない飛沫帯の損傷部炭素鋼に固着していた赤錆の除去は、ワイヤーブラシでは困難で、ハンマーによった。赤錆を除去した損傷部炭素鋼には貫通孔が発生していた(写真4)。SUS被覆損傷箇所は、長期にわたって放置すれば、単独の炭素鋼と同様、鋼管の肉厚によっては、貫通に至ることを確認した。

3.1.2 内部炭素鋼

写真5に、SUS被覆除去後の内部炭素鋼表面の付着物や腐食生成物を除去する前後の外観を示す。

(1) 除去前

干満帯～海中部の内部炭素鋼には、黒錆や電気防食の効果と思われる白色の電解皮膜が混在して生成していた。黒錆は、内部炭素鋼全面にわたって付着していた。一方、電解皮膜は、損傷部炭素鋼周辺に多く見られ、損傷部炭素鋼の端部から周辺に向かって上下関係なく沈殿していた。但し、干満帯上部のH.W.L近傍の内部炭素鋼には、黒錆、電解皮膜の他、赤錆が混在して生成していた。飛沫帯の内部炭素鋼は、損傷部炭素鋼周辺は激しく腐食しており、赤錆が積層して生成していた。しかしながら、損傷部炭素鋼から離れるにつれ赤錆は減り、上端の周溶接部及び軸方向溶接部直近は点錆びのみであった。

(2) 除去後

干満帯の中央部～海中部の内部炭素鋼は、損傷部炭素鋼周辺や下端の周溶接部及び軸方向溶接部直近も含め、ほとんど腐食がみられず、平滑な表面状態

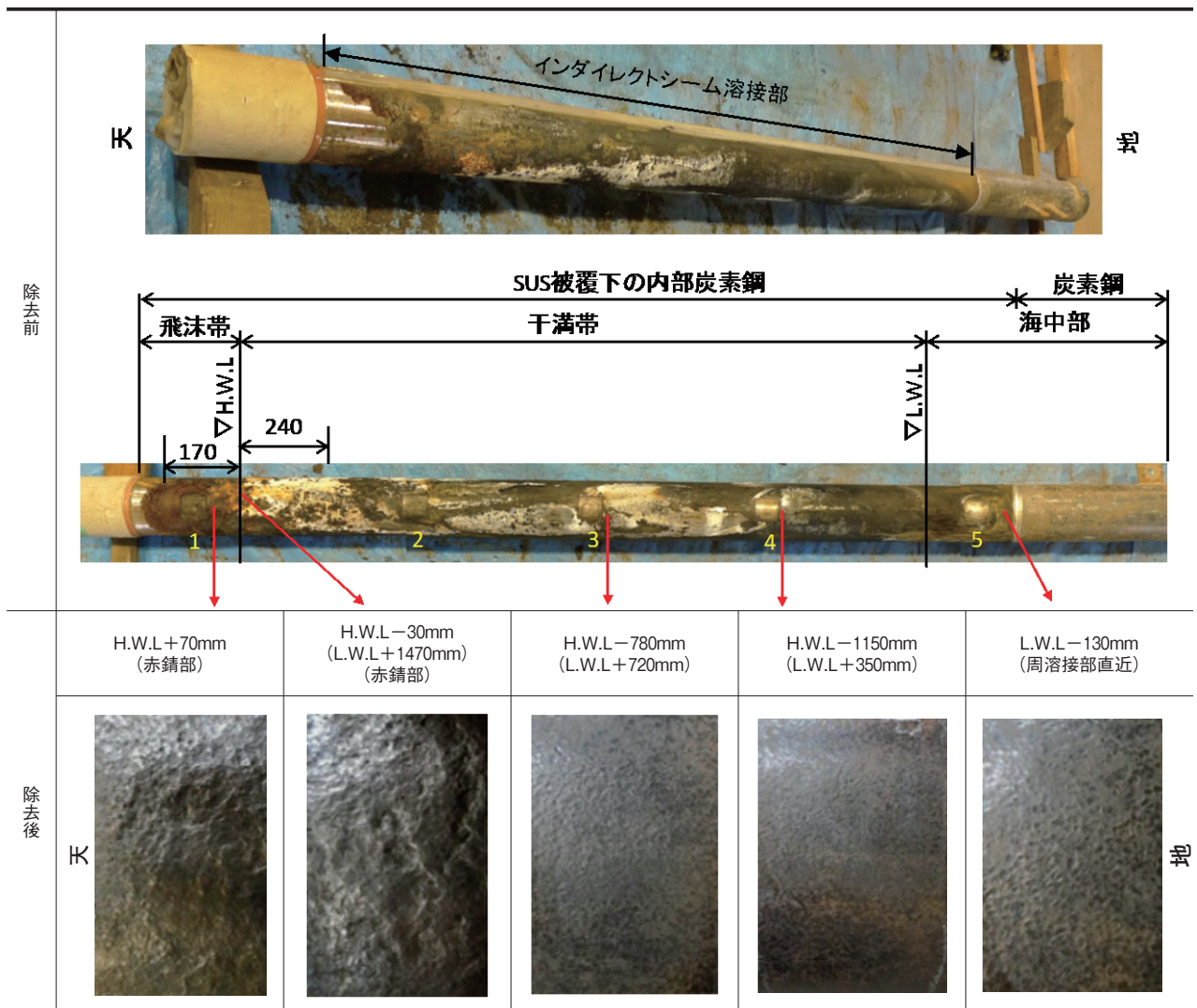


写真5 内部炭素鋼における付着物や腐食生成物除去前後の外観
Photo. 5 Appearance of carbon steel underneath SUS sheath before and after removing deposit and corrosion product

であった。飛沫帯の損傷部炭素鋼から雨水が浸透しやすい干満帯上部の内部炭素鋼は、H.W.L. 近傍の損傷部炭素鋼周辺のみ腐食した形跡がみられ、凹凸のある表面状態であった。この凹凸した表面状態は赤錆が付着していた鋼表面に見られた。範囲は、高さ方向が H.W.L. - 240mm ~ H.W.L.、周方向が損傷部炭素鋼中心から両端に70mm 幅程度であった。一方、黒錆や電解皮膜が沈殿していた鋼表面の腐食は軽微であり、比較的平滑な表面状態であった。また、損傷部炭素鋼から離れるにつれ凹凸は無くなり、軸方向溶接部直近の内部炭素鋼は平滑な表面状態であった。飛沫帯の内部炭素鋼は、干満帯上部と同様の傾向を示し、H.W.L. 近傍の損傷部炭素鋼周辺では凹凸のある表面状態が見られた。範囲は、高さ方向が

H.W.L. ~ H.W.L. + 170mm、周方向が損傷部炭素鋼中心から両端に70mm 幅程度であった。しかしながら、損傷部炭素鋼周辺から離れるにつれ凹凸は無くなり、軸方向溶接部直近及び上端の周溶接部の内部炭素鋼は平滑な表面状態であった。

3.2 炭素鋼の腐食速度

3.2.1 損傷部炭素鋼

図3に損傷部炭素鋼で測定した最大腐食速度を示す。

干満帯の最大腐食速度は、上部：0.052mm/y、中央部：0.047mm/y、下部：0.015mm/y と下部になるにつれ腐食速度は小さく、海水浸漬時間に比例して電気防食されている傾向にあった。干満帯の損

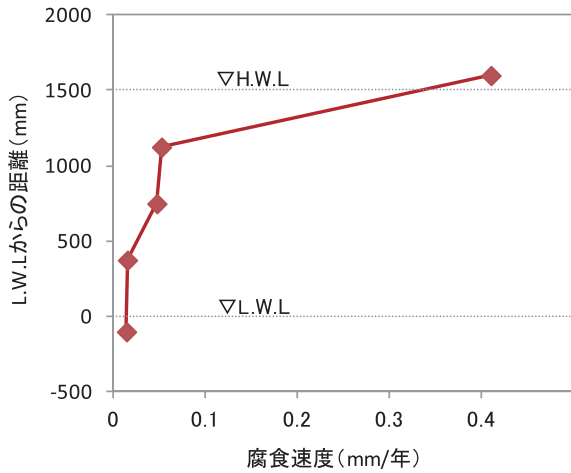


図3 損傷部炭素鋼の最大腐食速度
Fig. 3 Maximum corrosion rate of Carbon steel at SUS damaged sheath

傷部炭素鋼は、電気防食の電流により、極わずかな腐食速度にとどまることが確認できた。また、電気防食の効果が最も高い海中部の最大腐食速度は、0.01mm/yであった。10年の暴露試験結果は、9か月間の暴露試験結果³⁾と同様の腐食傾向を示し、腐食速度も同程度であった。電気防食の電流が流入しない飛沫帯の最大腐食速度は0.41mm/yで、海上大気部での炭素鋼単独の腐食速度(0.3mm/y)⁵⁾と同程度であった。

以上より、万一SUS被覆が損傷しても、何れの部位も、損傷部炭素鋼において異種金属接触による腐食促進は発生しないことが確認できた。

飛沫帯において異種金属接触腐食が認められなかった理由は、結露や潮解により水膜が生成したとしても、アノードである炭素鋼とカソードであるSUS被覆間の回路抵抗が大きく、異種金属接触腐食によるマクロセル電流が非常に小さかったためと考えている。一方、海中部の炭素鋼露出部が電気防食を施していたにも関わらず極わずかでも腐食していた理由は、試験水槽での作業により、水位がアルミニウム合金陽極設置位置よりも低くなることもあり、大気腐食が生じたためである。

3.2.2 内部炭素鋼

図4に、0時(損傷部炭素鋼の中心線上)、3時・9時(0時から両サイドに110mm離れた場所)、6時(軸方向溶接部直近)の線上で測定した内部炭素鋼の最大腐食速度を示す。

干満帯中央部～海中部の内部炭素鋼では、全ての

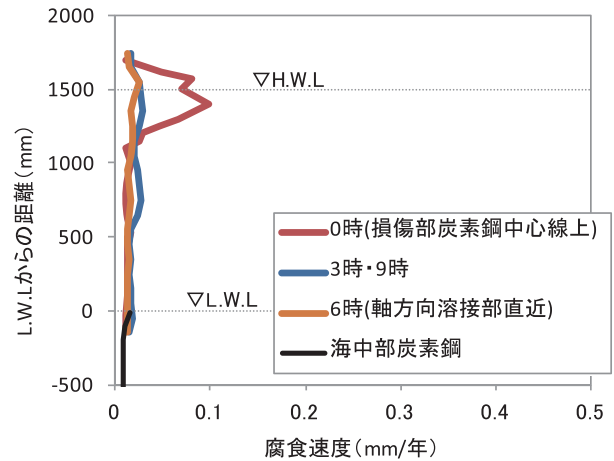


図4 内部炭素鋼の最大腐食速度
Fig. 4 Maximum corrosion rate of carbon steel underneath SUS sheath

面ではほとんど腐食が進行していなかった。最大腐食速度は0.01mm/y～0.03mm/yで、電気防食電流が流入する海中部の炭素鋼と同程度であった。干満帯上部では、損傷部炭素鋼中心線上(0時)の腐食速度が最大で、H.W.L.-350mm付近から腐食速度が増大し始め、H.W.L.-100mm付近で最大値:0.1mm/yを示した。一方、3時・9時、6時(軸方向溶接部直近)の腐食は軽微で、最大腐食速度は0.03mm/y程度であった。飛沫帯では、干満帯上部と同様、損傷部炭素鋼中心線上(0時)は腐食が見られ、H.W.L.+70mm付近で最大値:0.08mm/yを示し、SUS被覆上端の周溶接部に近づくと腐食速度は低下した。一方、3時・9時、6時(軸方向溶接部直近)の腐食は軽微で、最大腐食速度は0.02mm/y程度であった。また鋼表面に付着していた黒錆及び電解皮膜(図2示す損傷部炭素鋼2と3の中間から採取)をX線回折で分析すると Fe_3O_4 (マグネタイト)、 $Mg(OH)_2$ 、 $CaCO_3$ などが検出された。

以上より、内部炭素鋼の腐食速度は、損傷部炭素鋼の裏面にある軸方向溶接部直近及び周方向溶接部直近も含め、電気防食が効いている海中部炭素鋼の腐食速度と同程度であり、異種金属接触による腐食促進は発生していなかった。内部炭素鋼で腐食速度が小さい理由は、海中部に設置したアルミニウム合金陽極から発生する防食電流による効果と考えている。すなわち損傷部炭素鋼周辺の内部炭素鋼は、損傷部から流入した電流により防食され、たとえ損傷部から離れた部位でも内部炭素鋼の周辺環境は脱気

状態になるため防食的になり、赤錆より保護的な被膜である黒錆が生成するものと考えている。

4 結言

飛沫・干満帯に人工傷を付加した SUS 被覆鋼管の損傷部炭素鋼及び内部炭素鋼の腐食状況を、約10年間の曝露試験により確認した。得られた主な知見は以下の通りである。

- (1) 炭素鋼露出部の腐食速度は、飛沫帯では炭素鋼単独の腐食速度と同程度、干満帯～海中部は電気防食により腐食が抑制されており、何れの部位も異種金属接触による腐食促進は認められなかった。
- (2) 内部炭素鋼では、干満帯～海中部の炭素鋼表面には Fe_3O_4 (マグネタイト) と電解皮膜が混在して生成していた。腐食速度は、損傷部炭素鋼の裏面にある軸方向溶接部直近及び周方向溶接部直近も含め、電気防食が効いている海中部炭素鋼の腐食速度と同程度であり、異種金属接触腐食による腐食促進は認められなかった。飛沫帯の内部炭素鋼では、損傷部炭素鋼周辺は腐食していたが、最大腐食速度は 0.08mm/y 程度と海中部炭素鋼単独の腐食速度よりも小さかった。それ以外は、ほとんど腐食していなかった。内部炭素鋼の腐食速度が小さい理由は、海中部に設置したアルミニウム合金陽極から発生する防食電流の効果により損傷部炭素鋼周辺の内部炭素鋼は防食状態にあること、そして、たとえ損傷部炭素鋼から離れて防食電流の流入が少なくても SUS 被覆内部は溶存酸素が少なく脱気状態になることから防食されると考えている。

なお、損傷部が長期間放置された場合を想定した試験体は、日鉄住金鋼構(株)の若松工場内の岸壁にある海洋曝露試験場にて曝露試験を継続中である。今後も、実構造物の経過調査結果のフィードバックも行いながら、耐海水性ステンレス被覆による防食技術の信頼性向上に努める。

参考文献

- 1) 石田雅己, 佐藤弘隆, 関口太郎, 野口孝俊, 鈴木紀慶: 羽田空港再拡張事業 - 棧橋部ジャケット式鋼構造物の防食 -, 防錆管理, Vol. 51, No. 11, p. 551~557 (2007)
- 2) 佐藤弘隆, 石田雅己, 金井久, 岩見博志, 高橋陽一, 盛高裕生: 海洋鋼構造物防食ライニングへの高耐食性ステンレス鋼の適用開発, 新日鉄技報, No. 377, p. 34~38 (2002)
- 3) 佐藤弘隆, 石田雅己, 宮田義一, 濱田秀則: ステンレス鋼ライニングを適用した海洋鋼構造物における普通鋼の腐食挙動, 防錆管理, Vol. 49, No. 11, p. 413~417 (2005)
- 4) 岩見博志, 阪上精希, 関口太郎, 風野裕明: D滑走路における棧橋ステンスライニングの溶接技術, 東京国際空港建設技術報告会(第7回)技術報告集, 報告6, p6-1 (2009)
- 5) 港湾の施設の技術上の基準・同解説(上巻), 社団法人日本港湾協会, p. 438~441 (2007)