

炭素鋼板をステンレス鋼高力ボルトで接合した供試体の

絶縁方法の違いが腐食性状に及ぼす影響

CORROSION PROPERTIES DUE TO DIFFERENCES IN THE INSULATION METHOD OF SPECIMENS IN WHICH CARBON STEEL PLATES JOINED WITH STAINLESS STEEL HIGH-STRENGTH BOLTS

宮崎 靖大^{*1} 星野 由^{*2} 大西 孝典^{*3} 志村 保美^{*4} 小林 裕輔^{*5} 澁谷 敦^{*5}

Yasuhiro MIYAZAKI^{*1} Yu HOSHINO^{*2} Takanori OHNISHI^{*3} Yasumi SHIMURA^{*4}
Yusuke KOBAYASHI^{*5} Atsushi SHIBUYA^{*5}

ABSTRACT In this study, the specimens made by tightening stainless steel high-strength bolt 10T-SUS on carbon steel SM490Y plate were used. Also, epoxy resin plate and alumina spraying were adopted as the insulation method to prevent the corrosion of dissimilar metal contact, which is a concern at the contact part of different materials. Then, a combined cycle test was conducted using eight types of specimen conditions under which these conditions were changed, and the corrosion properties were investigated in detail. As a result, it was clarified that no clear phenomenon of the corrosion depth of the base carbon steel plate near the washer and the insulating material was observed in any of the insulation methods.

Keywords: ステンレス鋼高力ボルト, エポキシ樹脂板, アルミナ溶射, 異種金属接触腐食
stainless steel high-strength bolt, epoxy resin plate, alumina spraying, galvanic corrosion

1. はじめに

一般的な構造用炭素鋼に比べて優れた耐食性を有するステンレス鋼は、合金成分の違いにより数多くの種類が存在し、あらゆる分野における構造材料として利用され続けている。道路橋示方書[1]においては、100 年を標準とした設計供用期間が定められており、このような長期間供用が期待される構造物への要求性能を保持させるためには、高耐久性材料の活用が最も有効であると考えられる。一方、高度経

済成長期に構築された橋梁をはじめとした多くの土木構造物は、供用期間 50 年を経過し始め、これら構造物の維持管理に関する課題解決が早急に求められている。

従来から鋼橋に用いられている炭素鋼に比べて高耐食性を示すステンレス鋼は、地球希少元素を含有するため、一般的に材料価格やその変動が炭素鋼に比べて大きくなる。このため、鋼橋に用いられる全ての部材を、炭素鋼からステンレス鋼に置換することは、経済的観点から妥当でないといえる。鋼橋を構成する部材についてみると、雨水の侵入や塵埃の堆積しやすい箇所など腐食環境が厳しい部分とそうでない箇所が混在している。そこで、腐食環境の厳しい部材や維持管理が困難な部材のみをステンレス鋼、その他を従来の炭素鋼で構成する材料をハイブリッド化した構造形式の採用も、橋の耐久性能を確保する一手法であるといえる。

著者ら[2~7]は、ステンレス鋼と炭素鋼を併用した部材の強度特性およびこれら 2 種類の材料を接合する位置にて懸念される異種金属接触腐食について、実験および数値計算を用いて詳細に検討してきた。経年劣化に伴う塗装の塗替えが必要な鋼橋において、

^{*1} 第 2 種正会員
博士(工学) 長岡工業高等専門学校 環境都市工学科 准教授
(〒940-8532 新潟県長岡市西片貝町 888)

^{*2} 長岡工業高等専門学校 環境都市工学科
(〒940-8532 新潟県長岡市西片貝町 888)

^{*3} 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター
(〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

^{*4} 第 2 種正会員
日本鋼構造協会
(〒103-0027 東京都中央区日本橋 3-15-8 アミノ酸会館ビル 3 階)

^{*5} 日本橋梁建設協会
(〒105-0003 東京都港区西新橋 1 丁目 6-11 西新橋光和ビル 9 階)

プレートガーダー形式の橋では対傾構や横構等の 2 次部材の塗装作業は非常に煩雑となる。そこで、これら 2 次部材を無塗装でも十分な耐食性を維持するステンレス鋼に置換することは維持管理の観点から有効であると考えられる。その際、ガセット部に使用される炭素鋼と 2 次部材に用いられるステンレス鋼の高力ボルトによる接合部では、水濡れの状態が維持される場合、それらの電位差による異種金属接触腐食の影響が接合面およびその近傍で懸念される。

そこで本研究では、炭素鋼部材とステンレス鋼部材を接合した際に懸念される異種金属接触腐食の腐食性状および接合面の絶縁方法の違いが腐食性状に及ぼす影響を、炭素鋼板にステンレス鋼高力ボルトを締付けた供試体を用いた促進腐食試験により明らかにすることを目的とする。

2. 供試体形状

図 1 に本研究で用いた供試体を示す。供試体の母材は、板厚 26mm の SM490Y 材であり、幅 120mm × 長さ 120mm の試験面中央部に直径 26.5mm のボルト孔を有する。供試体の母材を締付けるボルトは、ステンレス鋼高力ボルト 10T-SUS (鋼種 SUS630) であり、摩擦接合用高力六角ボルト F10T に相当するものである。

図 2 は、促進腐食試験における供試体の設置条件および絶縁方法を示す。供試体の設置条件は、図 2 中の(b)および(e)では試験面が地面と垂直になるように、その他は試験面が地面と水平となるようにした。絶縁方法は、文献[8]の検討結果より、高い絶縁

抵抗値を示すとともに、摩擦接合面に設置しても一定のすべり耐力が得られるエポキシ樹脂板とアルミナ溶射の 2 種類とした。エポキシ樹脂板による絶縁では、厚さ 1mm のエポキシ樹脂板を円形に加工し、ステンレス鋼座金と母材との間に配置した。図 2 中の(d)から(g)のエポキシ樹脂板による絶縁方法では、その寸法を座金と同径の $\phi 44\text{mm}$ (= (d), (e)), 座金の直径よりも 6mm および 12mm 大きくした $\phi 50\text{mm}$ (= (f)) および $\phi 56\text{mm}$ (= (g)) の 3 パターンを採用した。図 2 中(h)のアルミナ溶射による絶縁では、母材との接触面に当たるステンレス鋼座金表面に目標膜厚 0.3mm のアルミナ溶射を施した。これらの絶縁方法を用いた供試体では、ボルト軸部と母材孔壁との接触を避けるため、絶縁スリーブとし

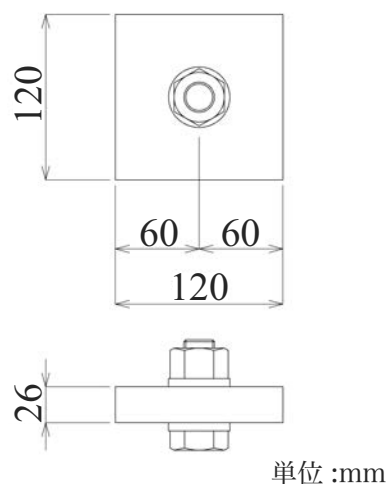


図 1 供試体形状

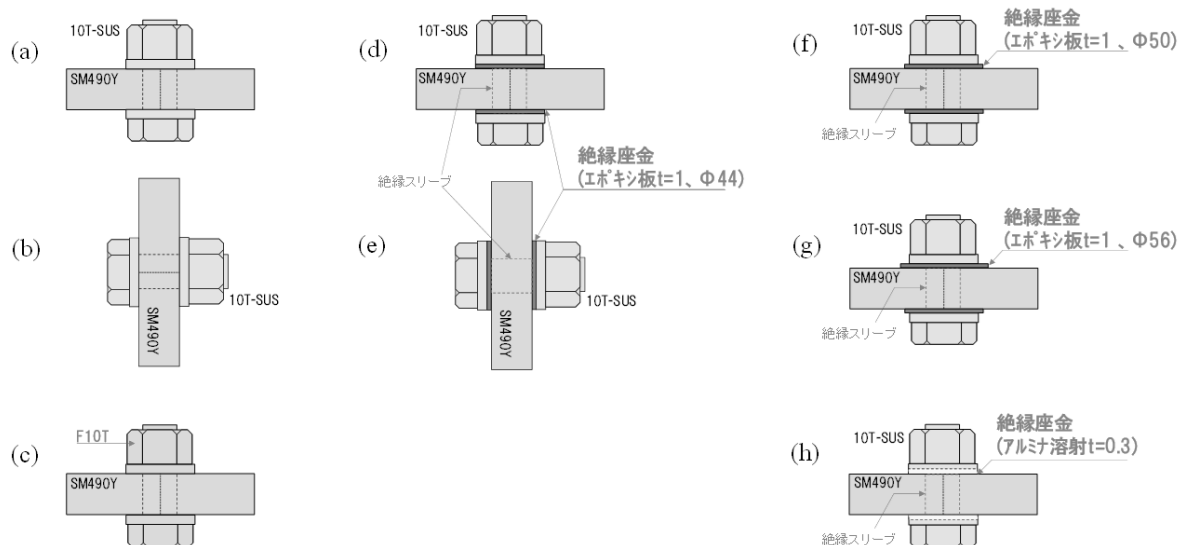


図 2 供試体の設置および絶縁条件

表1 対象供試体

供試体名	絶縁方法	設置条件	高力ボルト	図2
None-F-SS-1(,2,3)	無	水平	10T-SUS	(a)
None-V-SS-1(,2,3)	無	垂直	10T-SUS	(b)
None-F-CS-1(,2,3)	無	水平	F10T	(c)
E44-F-SS-1(,2,3)	エポキシ樹脂板(ϕ 44)	水平	10T-SUS	(d)
E44-V-SS-1(,2,3)	エポキシ樹脂板(ϕ 44)	垂直	10T-SUS	(e)
E50-F-SS-1(,2,3)	エポキシ樹脂板(ϕ 50)	水平	10T-SUS	(f)
E56-F-SS-1(,2,3)	エポキシ樹脂板(ϕ 56)	水平	10T-SUS	(g)
AS-F-SS-1(,2,3)	アルミナ溶射	水平	10T-SUS	(h)

供試体名中の括弧は、2 体目、3 体目を意味する。

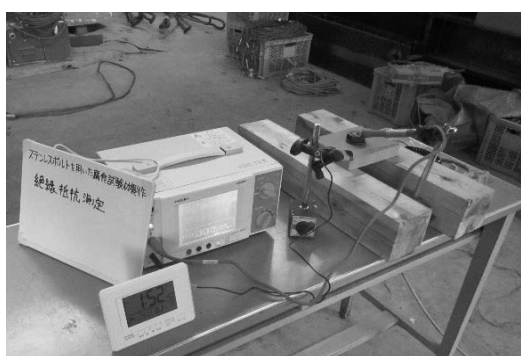


写真1 絶縁抵抗の計測状況

てボルト軸部に厚さ 1mm のテフロンチューブを設けた。また、電気的な絶縁の効果を確認するため、絶縁材料を用いない条件 (= (a), (b)) および高力ボルトに従来の F10T (= (c)) を用いた供試体も製作した。表1は、以上の供試体の条件を示す。各条件の供試体は、それぞれ3体ずつ製作した。なお、全供試体の母材は、ボルト締め付け前にブラスト処理を行って既存塗装や不純物を完全に除去して鋼材面を露出させ、母材の試験面以外の側面については、絶縁テープ（古河電気工業製：エフコテープ2号）を巻きつけ防食処理を施した。

絶縁抵抗は絶縁体の材質やその厚さ等に影響を受けるため、使用する材料によっては絶縁による腐食抑制の効果にも差があると推定される。そこで本研究では、高力ボルト継手のような重なる鋼板間の絶縁抵抗を指標として、各供試体の絶縁抵抗を調べた。重なる鋼板間の絶縁抵抗を計測する標準的な方法はないため、本研究においては電子機器の絶縁抵抗を計測する方法等を参考にし、テスタータイプの絶縁抵抗計により計測した。文献[8]の検討結果より、本研究で用いた絶縁方法は $10^6 \Omega$ ($1 \text{M}\Omega$) 以上の抵抗

表2 絶縁抵抗計測結果

絶縁方法	供試体	測定値 1分値(M Ω)	絶縁抵抗 平均 1分値(M Ω)
エポキシ樹脂板	E44-F-SS	-1	0.43×10^2
		-2	17.20×10^2
		-3	0.58×10^2
	E44-V-SS	-1	20.20×10^2
		-2	1.22×10^2
		-3	1.40×10^2
	E50-F-SS	-1	-
		-2	10.20×10^2
		-3	17.10×10^2
アルミナ溶射	E56-F-SS	-1	13.00×10^2
		-2	41.60×10^2
		-3	73.20×10^2
	AS-F-SS	-1	3.05
		-2	2.24
		-3	2.85

を得られる見込みであったため、絶縁抵抗計には超絶縁計 (HIOKI(株)製 SM-8215) を使用した。供試体のボルトを締め付けた後、写真1に示すように絶縁抵抗計の端子を供試体の炭素鋼母材と高力ボルトの頭に接触させ、炭素鋼板-SUS ボルト軸部間の絶縁抵抗を計測した。

一般に絶縁体に流れる電流の変化は収束するまでに長時間かかるものであり、抵抗の測定規格等では便宜的に電圧印加後1分経過した時の値を1分値と称して絶縁抵抗の評価に採用している[9]。これを参考に本研究においては、絶縁抵抗計の印加電圧を250Vとし、電圧印加後1分経過した時の測定値を絶縁抵抗とすることにした。

表2に各供試体の絶縁抵抗の計測結果を示す。エポキシ樹脂板を絶縁材料とした供試体の絶縁抵抗値

は、ばらつきが大きいものの、平均値が $10^3\text{M}\Omega$ 以上であった。また、これらエポキシ樹脂板の大きさの違いによる測定値をみると、E44-F-SS-2 および E44-V-SS-1 にてやや値が大きくなるものの、概ね $\phi 44\text{mm}$ 、 $\phi 50\text{mm}$ および $\phi 56\text{mm}$ の順に大きくなることが確認できる。さらに、アルミナ溶射を絶縁材料とした供試体の絶縁抵抗は、平均値が約 $3\text{M}\Omega$ であり、エポキシ樹脂板と比べて低い傾向を示した。道路橋を対象とする防せい防食の基準類においては、絶縁抵抗の要求水準は示されていないものの、機械設備等の監理指針[10]においては、異種管の継手に $1\text{M}\Omega$ 以上の絶縁抵抗を求めることが示されている。これを参考とすれば、各供試体はエポキシ樹脂板およびアルミナ溶射により絶縁されていると判断できる。なお、絶縁していない None-F-SS、None-V-SS、None-F-CS の絶縁抵抗は全て $0.00\text{M}\Omega$ であった。表 2 中最右列の平均絶縁抵抗値より、絶縁材料としてエポキシ樹脂板を用いた供試体がアルミナ溶射を施した供試体に比べて絶縁効果が大きく、また、エポキシ樹脂板の大きさを座金の径より大きくすることで絶縁効果が大きくなる傾向がみられる。

3. 促進腐食試験方法

図 3 は、本研究で実施した促進腐食試験である複合サイクル試験条件[11]を示す。厳しい腐食環境下での対象供試体の腐食性状を確認するため、この条件を採用した。第 1 ステップは、試験層内の温度を 35°C として、塩分濃度 5% の中性塩化ナトリウム水溶液の塩水噴霧を 2 時間実施する。第 2 ステップは試験層内の温度を 60°C 、湿度を 20-30%RH とした乾燥を 4 時間とし、第 3 ステップは試験層内の温度を 50°C 、湿度を 95%RH 以上とした湿潤を 2 時間行

- 1 サイクル(8時間)

 1. 塩水噴霧(2時間)
 - ・温度: $35\pm 1^\circ\text{C}$
 - ・塩水の塩濃度: $5\pm 0.5\%$
 2. 乾燥(4時間)
 - ・温度: $60\pm 1^\circ\text{C}$
 - ・相対湿度: 20-30%RH
 3. 湿潤(2時間)
 - ・温度: $50\pm 1^\circ\text{C}$
 - ・相対湿度: 90%RH 以上

図 3 複合サイクル条件[11]

う。これらの 1 サイクルが 8 時間の複合条件を、180 サイクル (1440 時間) 実施した。複合サイクル試験に用いた試験機は、QLAB 社製 Q-FOG CCT1100 である。また、複合サイクル試験中には、試験機内での設置位置による塩水噴霧時の偏りの影響を除去するため、30 サイクル毎に全供試体のローテーションを行った。写真 2 は、90 サイクル経過時の試験層内の状況を示す。この写真より、対象供試体の炭素鋼母材にて、外見上はほぼ同様の発錆がみられる。

促進腐食試験後は、試験層内から取り出した供試体から高力ボルトを取り外した後、炭素鋼板母材および高力ボルトの腐食生成物の除去を、JIS Z 2371 の附属書 JB[12]および ISO 8407[13]に準拠して行った。機械的除去方法はヘラおよびワイヤブラシを用いて行い、化学的除去方法はクエン酸水素二アンモニウム 200g に蒸留水を加えて 1000mL にした溶液を 75°C 以上にした状態で 20 分間浸漬し、腐食生成物の除去後に質量を計測した。これらの作業は、腐食生物除去後の質量が一定になるまで繰返し行った。

表 3 は、炭素鋼母材のみの全供試体の試験前後の質量、表面積、板厚を示す。質量は最小目盛 10mg の秤を用い、表面積は図 1 の炭素鋼母材の幅と高さがそれぞれ公称値 120mm の範囲および炭素鋼母材の板厚をノギスにより計測した。なお、試験前後の質量変化 Δm については、次章の実験結果にて、詳細を述べる。

4. 腐食性状

4.1 供試体外観

表 4 は、各条件 1 体目の供試体について、試験前後および腐食生成物除去後の母材表面の外観を示す。同表中の腐食生成物除去後の外観についてみると、

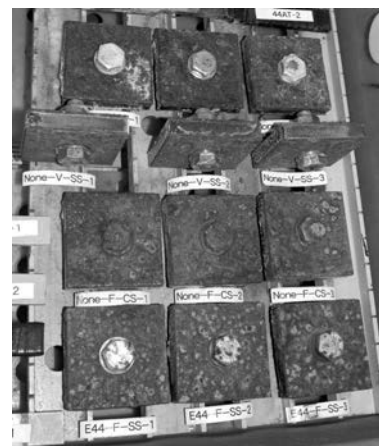
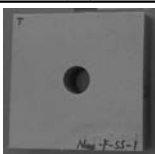
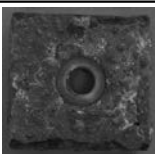
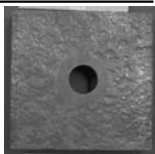
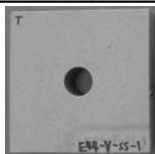
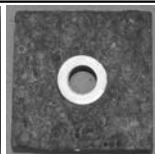
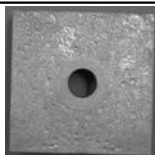
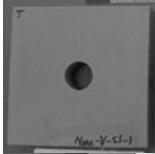
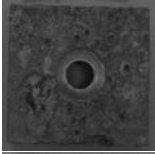
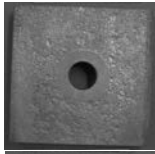
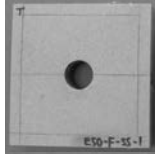
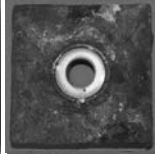
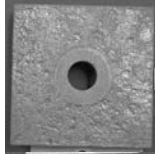
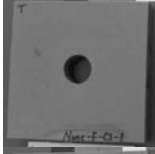
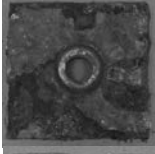
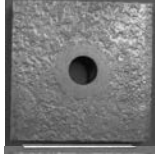

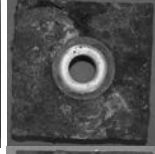
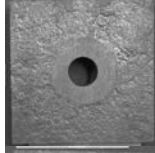

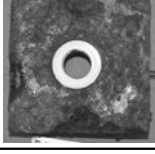

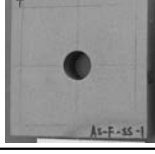

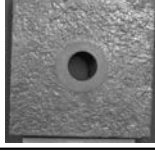


写真2 複合サイクル試験状況 (90 サイクル経過)

表3 供試体質量諸元

		試験前質量	試験後質量	質量変化量	表面積	板厚
供試体名		m_b (g)	m_a (g)	Δm (g)	A (mm ²)	t (mm)
None-F-SS	-1	2885.24	2812.49	72.76	14101	26.4
	-2	2895.38	2832.62	62.76	14109	26.2
	-3	2877.92	2815.69	62.24	14115	26.4
None-V-SS	-1	2880.16	2815.13	65.03	14135	26.4
	-2	2866.28	2818.64	47.64	14080	26.4
	-3	2901.53	2848.99	52.53	14243	26.4
None-F-CS	-1	2918.03	2861.14	56.89	14207	26.2
	-2	2880.40	2832.60	47.80	14063	26.3
	-3	2884.70	2838.82	45.89	14128	26.2
E44-F-SS	-1	2877.18	2819.47	57.71	14075	26.2
	-2	2893.21	2842.96	50.25	14129	26.1
	-3	2879.12	2833.09	46.03	14177	26.4
E44-V-SS	-1	2826.50	2769.46	57.05	13927	26.3
	-2	2849.72	2794.83	54.89	13991	26.2
	-3	2830.72	2783.39	47.34	13938	26.2
E50-F-SS	-1	2812.82	2765.66	47.16	13819	26.4
	-2	2839.98	2795.93	44.06	13905	26.1
	-3	2818.30	2774.80	43.50	13906	26.0
E56-F-SS	-1	2849.02	2792.90	56.12	13937	26.1
	-2	2841.65	2796.73	44.92	13944	26.1
	-3	2815.94	2777.63	38.31	13806	26.1
AS-F-SS	-1	2828.63	2762.57	66.06	13933	26.3
	-2	2806.17	2749.74	56.43	13851	26.0
	-3	2842.19	2775.05	67.14	13948	26.2

表4 試験前後における各供試体外観

供試体	試験前 (0h)	試験後 (1440h)	腐食生成物 除去後	供試体	試験前 (0h)	試験後 (1440h)	腐食生成物 除去後
None-F-SS-1				E44-V-SS-1			
None-V-SS-1				E50-F-SS-1			
None-F-CS-1				E56-F-SS-1			
E44-F-SS-1				AS-F-SS-1			

写真からは分かり難いが、いずれの供試体においても座金接触面の輪郭が確認できるものの、外観写真のみでは試験条件による差は考察できない。本研究では、紙面の都合上割愛する各条件 2 体目および 3 体目の供試体についても表 4 と同様な外見を示す結果を得ている。このことから、本研究で実施した促進腐食試験では、絶縁材料を用いずに炭素鋼板とステンレス鋼高力ボルト用いた None-F-SS および None-V-SS の腐食表面外観において、明確な腐食性状の違いが確認できないといえる。

4.2 質量変化

図 4 は、表 3 に示した各供試体の試験前後の質量変化量 Δm を試験前に測定した各供試体の表面積 A で除した腐食量を示す。

$$\text{腐食量 (g/m}^2\text{)} : \frac{m_b - m_a}{A} = \frac{\Delta m}{A} \quad (1)$$

なお、供試体の表面積 A は、ボルト孔を除いた供試体片側の表面を意味する。また、図 4 中の各供試体条件における実線と数値は、同じ供試体条件 3 体の結果の平均を表している。図 4 より、AS-F-SS の供試体を除いた各供試体条件にて、1 体目の供試体の腐食量が最も大きく表れている。この結果については、促進腐食試験中の全供試体に対する定期的なローテーションを行ったにも拘らず発生しており、この原因を特定することはできなかった。

母材と高力ボルトの組合せの影響についてみると、絶縁材料を用いない None-F-SS の腐食量は、炭素鋼同士の組合せである F10T を用いた None-F-CS に比べて平均で約 1.32 倍となることがわかる。None-F-SS-1 から None-F-SS-3 の全ての供試体の腐食量は、None-F-CS の最大値に比べて大きくなっていることから、絶縁材料を用いない炭素鋼とステンレス

鋼高力ボルトの組合せは、炭素鋼同士の組合せより腐食量が大きくなると判断できる。

水平置き F と垂直置き V の設置条件の違いによる腐食量についてみると、絶縁材料を用いない場合は水平置きの条件が、エポキシ樹脂板(φ44)を用いた場合は垂直置きの条件が、それぞれ大きくなる傾向がみられる。供試体表面の水分等の滞留時間が長くなる水平置き条件が、垂直置き条件に比べて腐食環境が厳しいと考えられるが、図 4 のエポキシ樹脂板を用いた場合の腐食量は、垂直置き条件が水平置き条件よりも大きくなっている。この要因については、エポキシ樹脂板と炭素鋼母材の隙間部に水分が侵入し、水分の滞留時間が長くなったことが影響したことも考えられるが、その詳細についてはより多くの腐食試験等を行い調べる必要がある。

つぎに、炭素鋼同士を接合する条件の供試体 None-F-CS と、水平置きの各絶縁材料を用いた供試体の腐食量を比較し絶縁方法の効果を比較する。エポキシ樹脂板を用いた場合、座金と同じ大きさにした E44-F-SS は None-F-CS よりも腐食量が大きくなり、座金よりもエポキシ樹脂板の径を大きくした E50-F-SS および E56-F-SS は None-F-CS の 91% および 94% 程度の腐食量になることが確認できる。このことから、エポキシ樹脂板を絶縁材料として用いる場合には、座金よりもエポキシ樹脂板の径を大きくすることで腐食量を抑制できるといえる。一方、アルミナ溶射を用いた場合は、None-F-CS の腐食量の約 1.28 倍となり、この供試体に施した絶縁方法では腐食を抑制する効果が見られないといえる。AS-F-SS の座金部におけるアルミナ溶射の範囲は、2 章で記述したように、炭素鋼板との接触面のみであったため、改めて座金表面全体に溶射する方法なども検

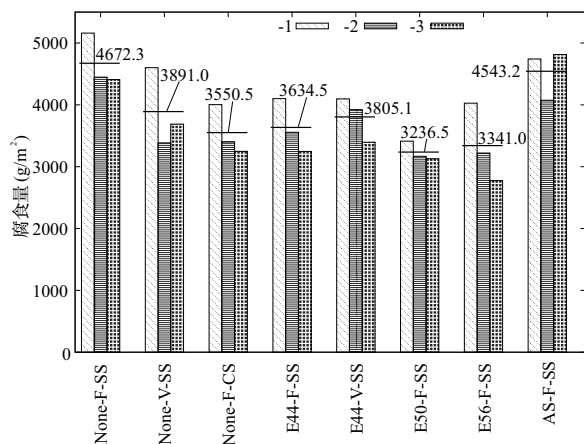


図 4 各供試体の腐食量

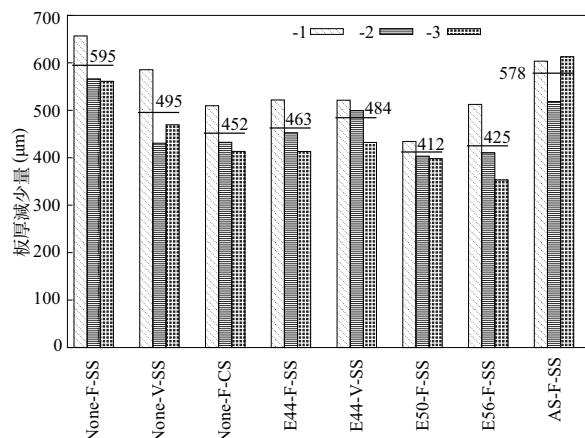


図 5 各供試体の板厚減少量

証すべきであるといえる。

図5は、式(2)により算出した各供試体の板厚減少量 D を示す。

$$D = \Delta m / \rho A \quad (2)$$

ここで、 Δm および A は表3に示した値を、 ρ は鋼材の単位体積重量 ($=77\text{kN/m}^3$) を意味する。なお、図5中の各供試体条件における実線と値は、図4と同様に同じ供試体条件3体の結果の平均を表している。図5のNone-F-CSの板厚減少量は平均で約 $452\mu\text{m}$ であり、設置条件を地面と平行にしたSM400製材厚板を離岸距離30mの厳しい腐食環境下で3年間の大気暴露した場合の板厚減少量(約 $255\mu\text{m}$) [14]の1.8倍程度となる。したがって、本研究で実施した複合サイクル試験は、十分な促進腐食が行えたと判断する。

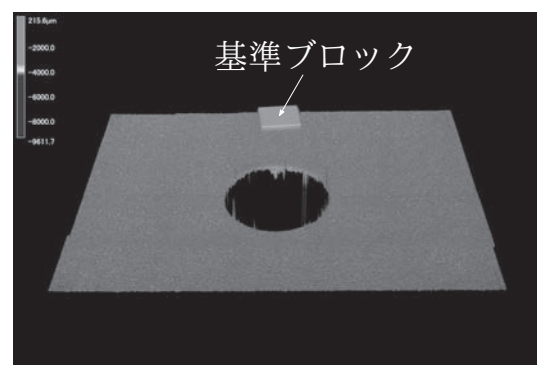
4.3 表面腐食深さ

4.3.1 腐食断面分析

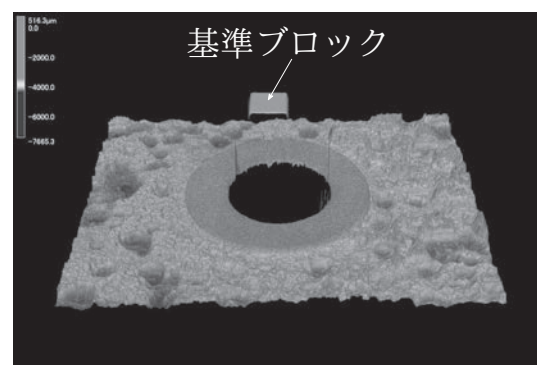
図6は、促進腐食試験前後の供試体母材の表面観察結果の一例を示す。同図の表面観察は、全供試体について、図7に示すボルト孔を中心とした $70\text{mm} \times 90\text{mm}$ の実線で囲む枠内を観察領域とし、3次元マイクロスコプ(KEYENCE社製VR-3000)を用いて腐食前後の高さを計測した。図6中の基準ブロックは、腐食前後での高さの変化が発生しない基準高さを表すものであり、この基準ブロックを母材中央部のボルト孔の位置に設置して計測を行った。供試体母材表面の評価は、腐食前後の高さの差を腐食深さとし、図7に示す供試体中央部のボルト孔縁から 21mm の領域内において、ボルト孔の中心から 30° の間隔で放射状に設定した a から l の12ライン上で行った。以上の炭素鋼母材の表面観察は、供試体上面の片面のみを対象としている。図6(b)に示すE44-F-SS-1の計測結果では、エポキシ樹脂板の接触面における腐食が、その他の領域に比べてほとんど発生していないことがわかる。また、炭素鋼表面の腐食は、座金やエポキシ樹脂板と炭素鋼母材との境界部にて腐食深さが大きくなるような領域が見られず、腐食孔の大きさや深さの分布が無作為に生じていることがわかる。

図8は、各条件における1体目の供試体について、計測ライン c (図7参照)の試験前後の断面分析結果を示す。同図中の破線と数値(μm)は、ボルト孔縁から 21mm の範囲内の最大腐食深さ発生位置およびその値を表している。なお、図中の点線は、座金またはエポキシ樹脂板の外縁位置を表している。同

図(a), (d), (e)および(h)の試験後の断面形状は、その他の結果に比べて座金の外縁位置から急に腐食深さが大きくなっていることがわかる。一方、炭素鋼同士の組合せである(c)については、座金位置からの距離が大きくなるに従い、緩やかに腐食深さが大きくなっていることがわかる。このような結果は、エポキシ樹脂板の径を座金より大きくした(f)および(g)についても同じ傾向を示していることが確認できる。これより、異種金属接触腐食の可能性があるステン



(a) 試験前



(b) 試験後

図6 供試体母材の表面観察結果の一例 (E44-F-SS-1)

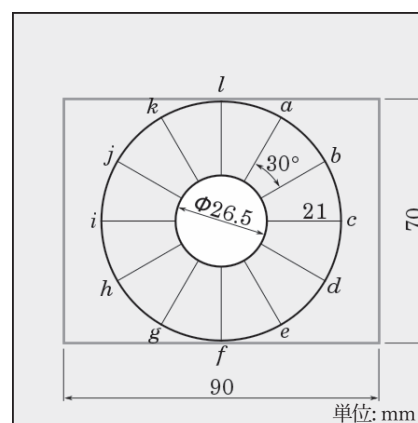


図7 供試体表面高さ計測位置

レス鋼と炭素鋼の境界部で腐食深さが大きく生じる現象は、ステンレス鋼座金と炭素鋼母材の間に座金の接触面積よりも大きいエポキシ樹脂板を絶縁材料として用いることで抑制されるといえる。

つぎに、座金またはエポキシ樹脂板との接触位置での腐食深さをみると、絶縁材料を用いない平置き条件の(a)および(c)の腐食断面は、その他の供試体条件の腐食断面の結果に比べて小さいことが確認できる。これより、垂直置き条件とした供試体および絶縁材料を用いた供試体では、座金または絶縁材料が接触する母材表面にて、(a)および(c)に比べて多少の腐食が発生しているといえる。割愛するその他のライン上および供試体についても、ばらつきはあるものの、試験後の腐食断面においては、図8と同様の結果を示した。これらの結果は、座金または絶縁材料と炭素鋼母材の接触面に水分が侵入するなど、何らかの腐食要因によるものと考えられるがその詳細については、より多くの実験等を行い明らかにする必要がある。

4.3.2 表面腐食深さおよび最大腐食深さ発生位置

図9および図10は、対象とした全供試体について、図7に示した各ライン上の平均腐食深さおよび

最大腐食深さを示す。なお、図8の結果に示したように、座金またはエポキシ樹脂板位置での炭素鋼母材の腐食が他の領域に比べて僅かであることから、図9および図10では、座金またはエポキシ樹脂板の接触面（図11参照）の結果を除いて示している。

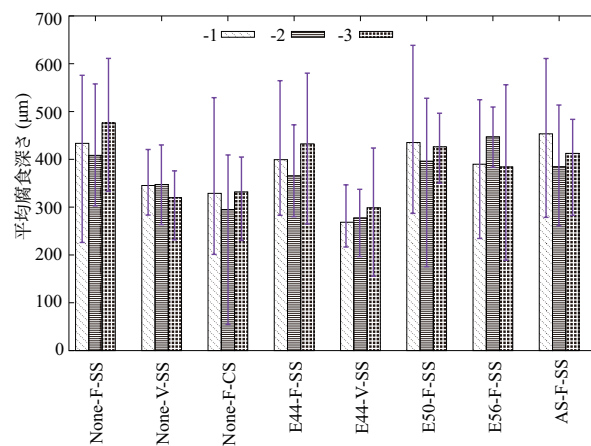


図9 各供試体の平均腐食深さ

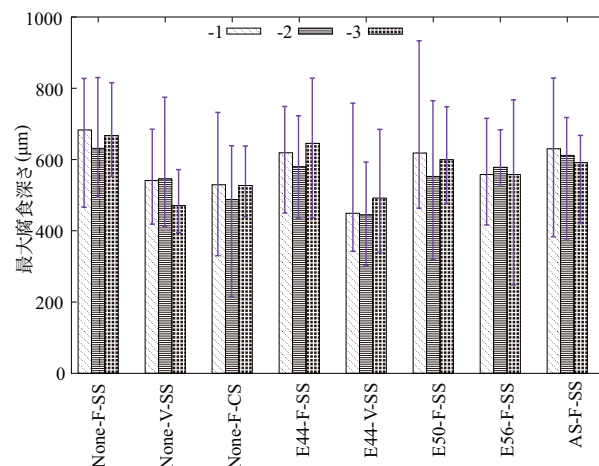


図10 各供試体の最大腐食深さ

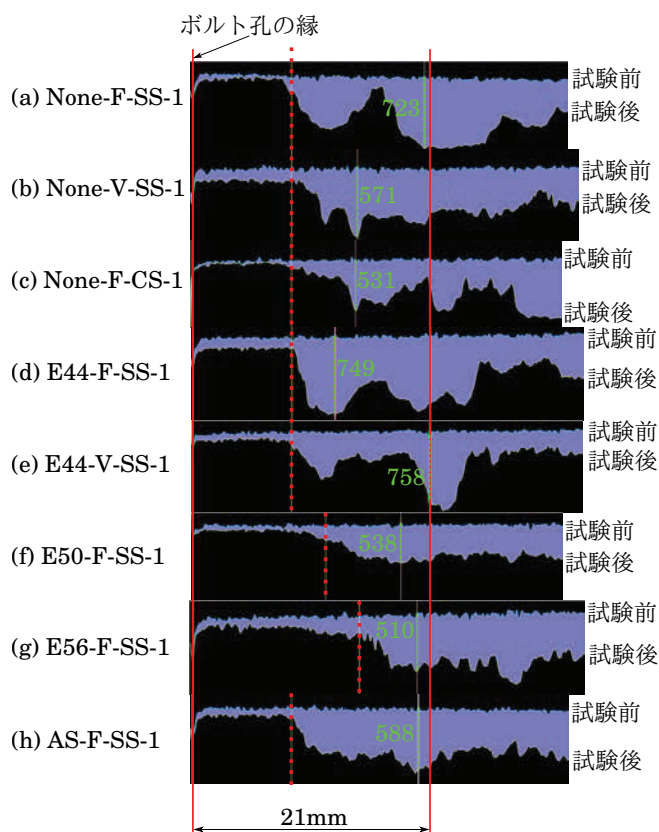


図8 供試体のcライン上の腐食断面(μm)

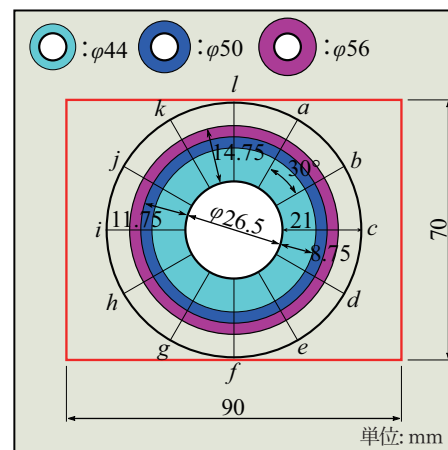


図11 平均腐食深さ分析領域

また、図9および図10中には、各供試体の12ライン上で計測した腐食深さのばらつきを示すため、最小値および最大値の範囲も併記している。表5には平均腐食深さが最小値および最大値となったラインを、図12には各ライン上で腐食深さの最大値が計測された位置を点で示している。表5の平均腐食深さが最小および最大のラインについてみると、同一条件および全ての供試体において、特徴的な傾向はみられず特定部位が集中的に腐食するような現象が表れていないことが確認できる。これより、複合サイクル試験中に全供試体のローテーションを行った結果、試験機内での設置位置による塩水噴霧時の偏りの影響を除去できたといえる。

図9の平均腐食深さについてみると、図4または図5で示したような各条件1体目の供試体の腐食量が大きくなる結果は確認できない。図4または図5の結果は、供試体の表裏面の腐食量を考慮しているため、図9との結果に差が生じたものと判断する。図9および図10の水平置きと垂直置き条件の腐食深さについてみると、平均値および最大値ともに水平置きの方が垂直置きに比べて1.1倍から1.5倍程度大きくなることが確認できる。これは、水平置き条件の供試体は、垂直置き条件の供試体に比べて炭素鋼母材表面の水分滞留時間が長くなることが影響したものと考える。

図12において、供試体(b)および(e)の各ライン上の最大腐食深さ発生位置についてみると、(b)のlおよびgライン、(e)のe,fおよびgラインでは、各条件3体全ての供試体で、座金とエポキシ樹脂板位置の境界近傍に最大腐食深さが現れている。異種金属接触腐食が明確に表れた場合、座金外縁の極近傍にて最大腐食深さが発生すると考えられる。(b)および(e)の供試体は垂直置き条件のため、(b)のlラインを除いて地面側となるe,fおよびgラインは、その他のラインに比べて水の滞留時間が長い。この水の滞留による異種金属接触腐食の発現環境の継続が影響したものと推察される。一方、その他の各条件3体の最大腐食深さ発生位置は、ばらついているまたは座金外縁から離れた位置で発生していることがわかる。

図13は、平均および最大腐食深さについて、図5に示した板厚減少量で正規化した結果を示す。ここで、図13の値は、図9および図10で示した各供試体条件3体を平均した結果で表すとともに、最小および最大値を表している。図13の平均腐食深さ率の

表5 平均腐食深さが最大および最小となるライン位置

供試体	平均最大 平均最小	
	発生位置	発生位置
None-F-SS	-1 k	b
	-2 b	l
	-3 g	c
None-V-SS	-1 h	e
	-2 a	h
	-3 f	k
None-F-CS	-1 j	i
	-2 j	c
	-3 b, c	h
E44-F-SS	-1 c	j
	-2 k	l
	-3 f	a
E44-V-SS	-1 c	e
	-2 l	f
	-3 j	e
E50-F-SS	-1 i	d
	-2 c	k
	-3 g	e
E56-F-SS	-1 f	k
	-2 f	c
	-3 a	h
AS-F-SS	-1 l	e
	-2 c	a
	-3 f	h

結果についてみると、E44-V-SS および None-V-SS が板厚減少量の0.58倍および0.68倍となっている。これは、垂直置き条件の場合、供試体母材の表裏面に腐食が発生しているため、板厚減少量は表裏の腐食量を含んでいることに対して、マイクロスコープによる測定結果については片側表面のみの結果であることが要因であるといえる。平均腐食深さ率が板厚減少量の1.02倍程度と他の供試体より大きいE50-F-SSについてみると、図12(f)では座金またはエポキシ樹脂板の外縁近傍で顕著な腐食の発生は見られない。したがって、異種金属接触腐食の影響により板厚減少量が大きくなったものでなく、通常の炭素鋼母材の腐食によるものと考えられる。

つぎに、図13の最大腐食深さ率をみると、E44-V-SSを除いて、板厚減少量の1.05倍から1.43倍の結果となっている。板厚減少量に対して最大腐食深さ

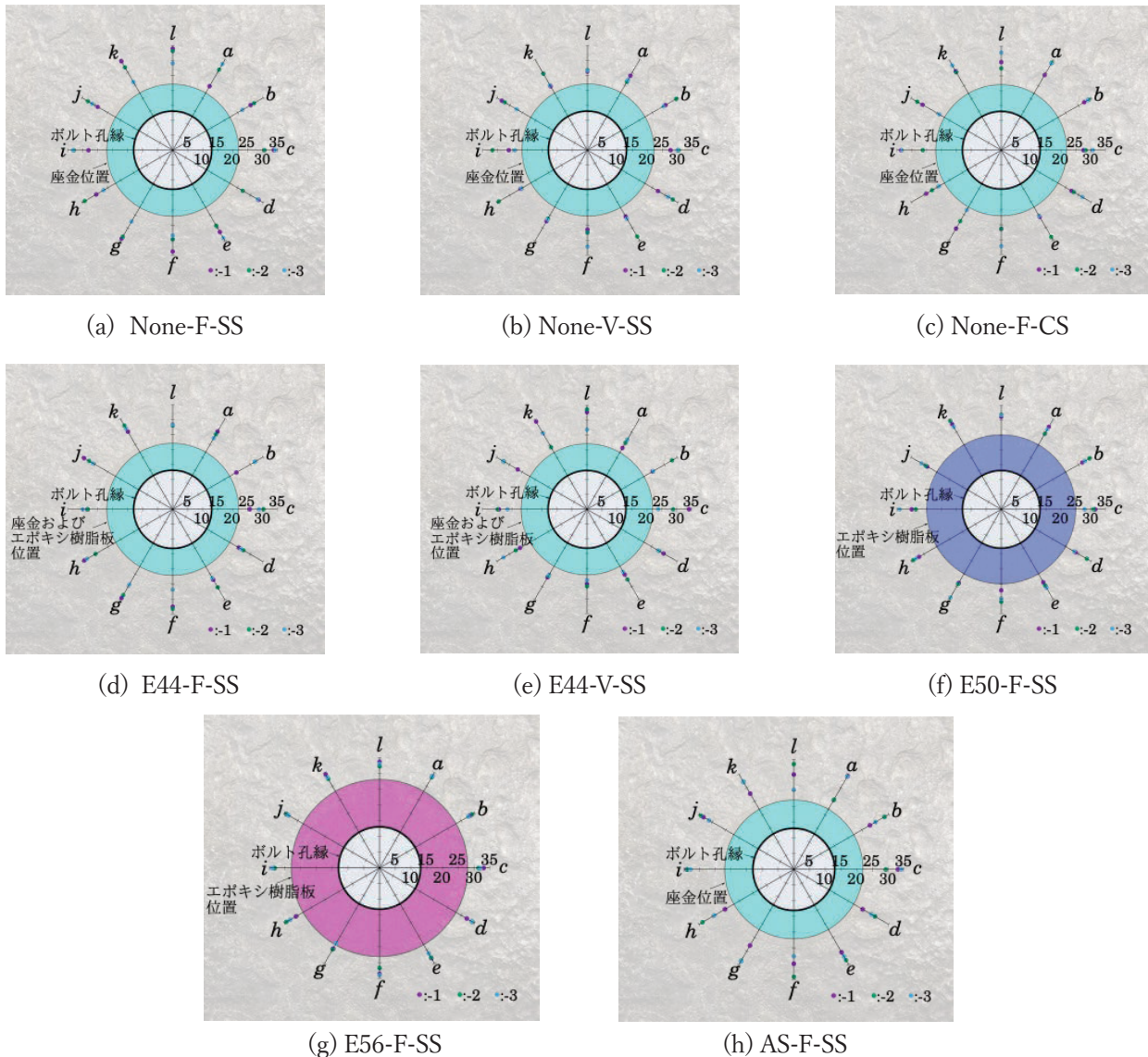


図12 測定ライン上での最大腐食深さ発生位置

が最大となる E50-F-SS について、図12の各ライン上での最大腐食発生位置をみると、エポキシ樹脂板位置から離れた領域に点在しており、通常の炭素鋼母材の腐食であるものと判断する。最大腐食深さについては、E44-V-SSの結果を除いて、板厚減少量と同様に、平均腐食深さに比べて1.2倍から1.5倍程度となることがわかる。これらの結果は、炭素鋼同士の組合せである None-F-CS でも同様であり、ステンレス鋼と炭素鋼の組合せの供試体にて特徴的な腐食深さの傾向はみられないことが確認できる。いずれの供試体においても、図13の最大腐食深さは、平均腐食深さに比べてそのばらつきが大きくなることが確認できる。

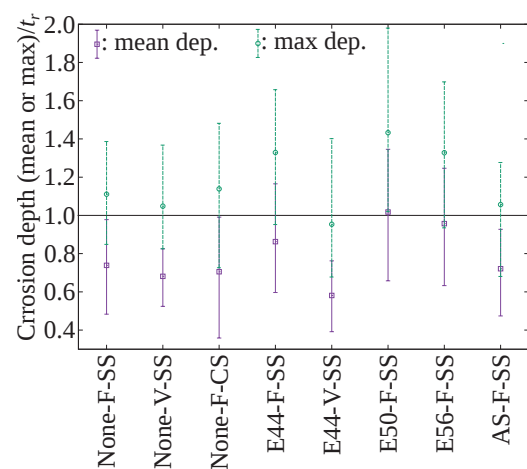


図13 板厚減少量に対する平均および最大腐食深さ率

4.3.3 ステンレス鋼高力ボルトを用いた供試体と炭素鋼のみの供試体の腐食量の比較

図14は、F10Tボルトを用いたNone-F-CS条件供試体の板厚減少量、平均および最大腐食深さ $D_{i,NFC}$ に対するステンレス鋼高力ボルトを用いた供試体の板厚減少量、平均および最大腐食深さ D_i の比を示す。ここで、同図中のハッチング部は、None-F-CS条件供試体3体のばらつき範囲を表している。なお、各供試体条件の結果は、図5および図13に示した3体の平均を用いたものである。まず、板厚減少量比に着目してみると、図9の結果と同様に、エポキシ樹脂板を座金よりも大きくしたE50-F-SSおよびE56-F-SS供試体の結果が炭素鋼同士の供試体の結果の91%および94%程度となり、これら2条件の供試体は、炭素鋼を組合せた供試体に比べて板厚減少量が小さくなることが確認できる。これは、E50-F-SSおよびE56-F-SS供試体では、炭素鋼母材表面にその他の供試体条件に比べて大きなエポキシ樹脂板が存在することにより、表面の腐食領域が小さくなったためである。一方、None-F-SSおよびAS-F-SSの板厚減少量をみると、None-F-CSの1.32倍および1.28倍程度となり、炭素鋼のみの供試体に比べて大きくなることが確認できる。

つぎに、平均腐食深さ比および最大腐食深さ比についてみると、E44-V-SSを除くいずれの供試体条件においても、None-F-CSの結果より大きくなることが確認できる。ステンレス鋼高力ボルトを用いた平置き条件の供試体の平均腐食深さ比は、絶縁材料の無いNone-F-SSで1.39となることにに対して、座金よりも大きいエポキシ樹脂板を用いたE50-F-SSお

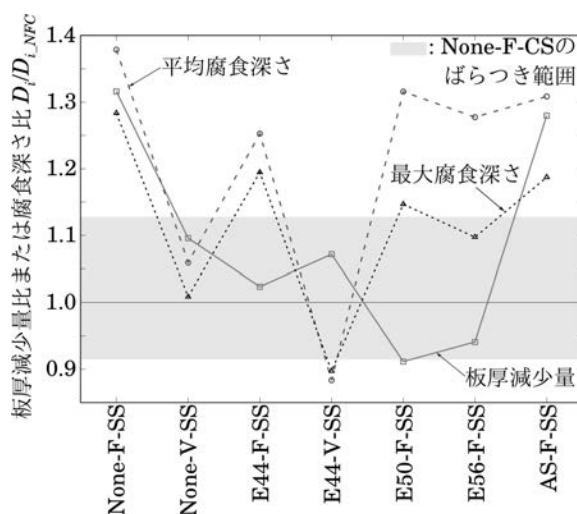


図14 F10T供試体に対するステンレス高力ボルトを用いた供試体の腐食深さ比

よびE56-F-SSにおいても1.32および1.28程度であり、絶縁材料による有効な防食の効果が確認できない。一方、水平置き条件供試体の最大腐食深さ比についてみると、絶縁材料の無いNone-F-SSに比べて、アルミナ溶射した場合、エポキシ樹脂板を用いた場合の順に最大腐食深さ比が小さくなっており、エポキシ樹脂板を用いた条件ではその大きさを大きくすることでより最大腐食深さ比が小さくなっていることが確認できる。しかしながら、これらの最大腐食深さ比についても、E56-F-SSを除いて、None-F-CSのばらつき範囲を超過することが確認できる。

以上の結果より、炭素鋼母材の水分の滞留時間を短くできる垂直条件、かつ座金の径より大きいエポキシ樹脂板を配置することで、ステンレス鋼と炭素鋼の境界部に生じる腐食に対して効果がみられる。一方、本研究で対象とした絶縁方法では、ステンレス鋼との境界部から離れた部位における炭素鋼の腐食に対する防食効果が認められないといえる。

5. おわりに

本研究では、適材適所の観点からステンレス鋼と炭素鋼を併用する際に懸念される異種金属接触腐食について、腐食性状および絶縁方法の違いが腐食性状に及ぼす影響を炭素鋼板にステンレス鋼高力ボルトを締付けた供試体を対象に、複合サイクル試験により確認した。本研究で得られた成果は、次のとおりである。

- (1)炭素鋼母材と高力ボルトの組合せの違いによる腐食量から換算した板厚減少量は、10T-SUSを用い絶縁材料を用いない平置き条件のNone-F-SSが、従来の高力ボルトF10Tを用いたNone-F-CSに比べて約1.32倍となる。
- (2)SM490Y製板にステンレス鋼高力ボルト10T-SUSを締付ける際の絶縁方法として、炭素鋼板と座金の接触面に厚さ1mm、直径を座金よりも6mmおよび12mm大きくしたエポキシ樹脂板を配置した場合の腐食量は、従来のF10Tを用いた供試体の91%から94%程度となる。
- (3)本研究で実施した複合サイクル試験による供試体母材の板厚減少量は、厳しい腐食環境下で3年間大気暴露した試験結果の1.8倍程度となる。
- (4)ステンレス鋼高力ボルトを用いた平置き条件供試体の座金およびエポキシ樹脂板境界部近傍の炭素鋼側母材の平均腐食深さは、F10Tを用いた供試体の1.25から1.38倍程度となる。

(5)本研究で対象としたステンレス鋼高力ボルトを用いた供試体において、座金および絶縁材料近傍の炭素鋼側母材の腐食を抑制する効果としては、水分の滞留時間を短くし、エポキシ樹脂板で絶縁することが有効であることを明らかにした。

今後は、複数のボルト配列とした場合や炭素鋼側に被覆防食を施した場合など、より現実的な継手仕様での耐久性を確認する必要がある。また、この絶縁方法を採用した状態でのすべり強度など、耐力設計に必要な基本特性を明確にする必要がある。

謝辞

本研究は、土木研究所、日本鋼構造協会、日本橋梁建設協会、長岡技術科学大学、長岡工業高等専門学校、早稲田大学、本州四国連絡高速道路との共同研究「耐久性向上の高機能鋼材の道路橋への適用に関する共同研究」の一環として実施したものです。関係者の皆様に感謝申し上げます。

参考文献

- [1]日本道路協会：道路示方書・同解説（I 共通編），日本道路協会，2017.
- [2]堀澤英太郎，宮寄靖大：部材両端をステンレス鋼とした鋼製部材の圧縮および曲げ強度評価法，構造工学論文集，Vol. 65A, pp. 1-14, 2019.
- [3]宮寄靖大，大垣賀津雄：SUS323L および SM570 製溶接組立て短柱の圧縮強度特性，鋼構造年次論文報告集，第 26 巻，pp.462-469, 2018.
- [4]西脇天太，宮寄靖大，小見恒介，中野幸広：ステンレス鋼と炭素鋼を接合した厚板の 2 年間大気暴露試験，鋼構造年次論文報告集，第 25 巻，pp.696-703, 2017.
- [5]井比亨，宮寄靖大，奈良敬：ステンレス鋼と炭素

鋼で構成される圧縮補剛板の強度評価法，構造工学論文集，Vol.63A, pp.78-91, 2017.

- [6]和田勇輝，宮寄靖大：ステンレス鋼と構造用炭素鋼で構成される I 形断面梁の曲げ強度特性および曲げ強度評価法，構造工学論文集，Vol.63A, pp.92-105, 2017.

[7] Y. Miyazaki, K. Komi, "Galvanic corrosion behavior of the welding of stainless steel and carbon steel", Mechanics of Structures and Materials: Advancements and Challenges -- Hao & Zhang (Eds), pp.207-213, 2016.

- [8]大西孝典，村井啓太，澁谷敦，上仙靖：異種金属間に絶縁材を配置した摩擦接合継手のすべり耐力，土木技術資料，Vol.61, No.12, pp.52-55, 2019.

[9]JIS C 2139-3-2：固体電気絶縁材料の誘電特性及び抵抗特性－第 3-2 部：直流電圧印加による抵抗特性の測定－表面抵抗及び表面抵抗率，日本産業規格，2018.

- [10] 公共建築協会：機械設備工事監理指針 平成 25 年版，pp.165-166, 2013.

[11]自動車技術会規格会議：自動車規格 JASO M 609-91 自動車用材料腐食試験方法，自動車技術会，1991.

- [12]日本工業標準調査会：JIS Z2371 塩水噴霧試験方法，日本規格協会，2015.

[13] International standard: ISO 8407 Corrosion of metals and alloys - Removal of corrosion products from corrosion test specimens, ISO, 2009.

- [14]西脇天太，佐藤龍輝，宮寄靖大：3 年間大気暴露したステンレス鋼と炭素鋼の接合部における腐食表面性状，令和元年度土木学会全国大会第 74 回年次学術講演会，I-383, 2019.

(2021 年 2 月 5 日原稿受理)