

# ステンレス鋼製高力ボルトで接合した炭素鋼板接合部の絶縁条件の違いによる表面解析

長岡工業高等専門学校 学生会員 ○星野 由, 正会員 宮寄 靖大  
 土木研究所 正会員 大西 孝典  
 日本鋼構造協会 正会員 志村 保美  
 日本橋梁建設協会 正会員 小林 裕輔, 正会員 澁谷 敦

## 1. はじめに

ステンレス鋼は、従来の構造用炭素鋼に比べて高耐食性を有するため、長期間供用が必然である土木鋼構造物への利用に適していると考えられる。一方、ステンレス鋼は、地球希少元素の含有量が炭素鋼に比べて多いため、材料費用の増大が否めない。そこで腐食が生じやすい箇所をステンレス鋼、その他を炭素鋼として、材料を適材適所で利用した鋼構造物の耐久性能の確保を筆者らは提案している。このような構造形式を適用した場合、ステンレス鋼と炭素鋼の接合部における異種金属接触腐食の発現が懸念される。本研究は、SM490Y 材の鋼板にステンレス高力ボルト 10T-SUS を締付け、異材接合部を模擬した試験体により、絶縁方法の違いによる炭素鋼表面の腐食性状を複合サイクル試験により明らかにする。

## 2. 試験体形状および試験方法

図 1 に本研究の試験片形状を示す。試験片は、SM490Y 材の母材中央部に直径 26.5mm の孔をあけ、呼び径 M22 の高力ボルトを挿入して設計軸力まで締付けたものである。また、表 1 に各試験片の試験条件および試験前後における質量変化量を示す。表中の試験片名は、絶縁方法、促進腐食試験時の設置状態、および高力ボルトの種類を表し、母材を締付ける高力ボルトには、ステンレス高力ボルト 10T-SUS(SUS630)と、橋梁等の鋼構造物で一般的に使用されている摩擦接合用高力六角ボルト F10T を比較として用いた。異種金属接触腐食に対する絶縁方法は、1MΩ 以上の電気抵抗が得られる方法を選定し、厚さ 1mm のエポキシ樹脂板を円形に加工してステンレス座金(φ44mm)と炭素鋼の界面に配置したもの、およびステンレス座金の接触面に目標膜厚 0.3mm のアルミナ溶射を施したものの 2 種類である。これらの絶縁を行う試験片では、ボルト軸部に絶縁スリーブを設け、母材孔壁との接触についても避けている。さらに、エポキシ樹脂板を用いた絶縁方法では、絶縁材料の直径を座金と同径の φ44mm の他、φ50mm および φ56mm の 3 種類の大きさで比較を行った。なお、試験片名に None の付いた試験片では電気的絶縁を行っていない。

表 1 対象試験片

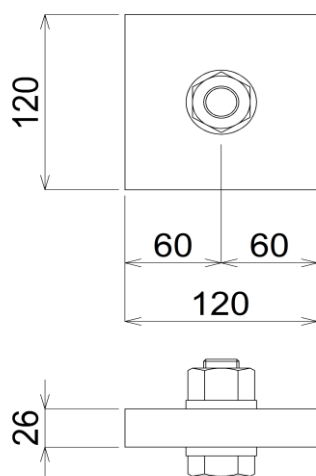


図 1 試験片形状

試験片名	絶縁材料	設置状態	高力ボルトの種類	試験片質量 (g)	腐食除去後質量 (g)	質量変化量 (g)	表面積 (mm <sup>2</sup> )	密度 (g/mm <sup>3</sup> )	
None-F-SS	1	なし	平置き	10T-SUS	2885.24	2812.49	72.76	14100.71	0.0078
	2				2895.38	2832.62	62.76	14108.53	0.0078
	3				2877.92	2815.69	62.24	14115.32	0.0077
None-V-SS	1	なし	縦置き	10T-SUS	2880.16	2818.64	61.52	14134.61	0.0077
	2				2866.28	2815.13	51.15	14079.57	0.0077
	3				2901.53	2848.99	52.53	14242.67	0.0077
None-F-CS	1	なし	平置き	F10T	2918.03	2861.14	56.89	14207.17	0.0078
	2				2880.40	2832.60	47.80	14063.02	0.0078
	3				2884.70	2838.82	45.89	14127.87	0.0078
E44-F-SS	1	エポキシ樹脂	縦置き	10T-SUS	2877.18	2819.47	57.71	14074.60	0.0078
	2				2893.21	2842.96	50.25	14129.33	0.0078
	3				2879.12	2833.09	46.03	14177.16	0.0077
E44-V-SS	1	エポキシ樹脂	平置き	10T-SUS	2826.50	2769.46	57.05	13927.33	0.0077
	2				2849.72	2794.83	54.89	13990.76	0.0078
	3				2830.72	2783.39	47.34	13938.19	0.0078
E50-F-SS	1	エポキシ樹脂	平置き	10T-SUS	2812.82	2765.66	47.16	13818.87	0.0077
	2				2839.98	2795.93	44.06	13905.23	0.0078
	3				2818.30	2774.80	43.50	13906.10	0.0078
E56-F-SS	1	エポキシ樹脂	平置き	10T-SUS	2849.02	2796.73	52.29	13936.58	0.0078
	2				2841.65	2792.90	48.74	13943.81	0.0078
	3				2815.94	2777.63	38.31	13806.08	0.0078
AS-F-SS	1	アルミナ溶射	平置き	10T-SUS	2828.63	2762.57	66.06	13932.97	0.0077
	2				2806.17	2749.74	56.43	13850.80	0.0078
	3				2842.19	2775.05	67.14	13948.22	0.0078

キーワード ステンレス高力ボルト, エポキシ樹脂板, アルミナ溶射, 異種金属接触腐食

連絡先 〒940-8532 新潟県長岡市西片貝町 888 番地 長岡工業高等専門学校 TEL 0258 - 34 - 9439

各試験ケース 3 体の試験片について腐食促進試験を行った。試験片の設置状態は、ボルト軸が鉛直となる状態を平置き、ボルト軸が水平となる状態を縦置きとしている。促進腐食試験は、塩水噴霧、乾燥、湿潤からなる複合サイクル試験とし、1 サイクル(8 時間)として 180 サイクル(1440 時間)実施した。その後、腐食性生物を除去し、試験片母材の表面観察を行った。表面観察は、3 次元マイクロ스코プ (キーエンス社製 VR-3000) を使用した。観察位置は、図 2 に示す赤い枠で示した炭素鋼板中央領域 90mm×70mm であり、ボルト孔の中心を原点とした 30°刻みの観察線 a から l の計 12 か所の線上に沿ったボルト孔の外周から 15mm の範囲を表面評価領域に設定した。

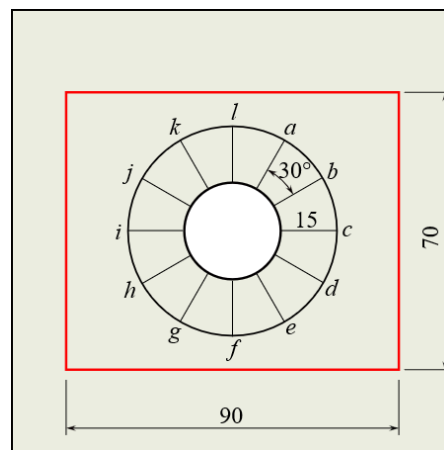


図 2 炭素鋼板表面観察領域

### 3. 絶縁条件の違いによる炭素鋼板の腐食深さ

表 2 は、各試験片について、図 2 に示した観察線 a から l の計 12 か所の観察線上の腐食深さを同一条件の試験片 3 体分、計 36 か所でさらに平均した値を平均腐食深さ、標準偏差および変動係数を示す。絶縁材料のない None-F-SS と None-F-CS の平均腐食深さを比較すると、10T-SUS で締付けられた None-F-SS の方が大きく、ボルトと母材の電位差の影響が考えられる。絶縁方法にエポキシ樹脂板を使用した試験片の結果は、その径の増加とともに平均腐食深さは減少することが確認できる。None-F-SS に対する E44-F-SS の平均腐食深さは 0.95 倍あるが、E50-F-SS では 0.66 倍、E56-F-SS では 0.47 倍となる。一方、絶縁方法にアルミナ溶射を用いた AS-F-SS の平均腐食深さは、None-F-SS の 0.86 倍であった。

表 3 は、各試験片について、図 2 に示した観察線 a から l の計 12 か所で計測した最大腐食深さを同一条件の試験片 3 体分、計 36 か所で平均した値を最大腐食深さ平均、標準偏差および変動係数を示す。None-F-SS と None-F-CS の最大腐食深さ平均を比較すると、10T-SUS を用いた None-F-SS の方が大きい。また、エポキシ樹脂板を使用した試験片では、その径の増加とともに最大腐食深さ平均が減少しており、前述の平均腐食深さと同じ傾向を示すものの、None-F-SS との対比により絶縁効果がみられるのは、絶縁材料が座金より大きい E50-F-SS および E56-F-SS となっている。一方、アルミナ溶射を用いた AS-F-SS の最大腐食深さ平均は、None-F-SS の 0.97 倍であった。アルミナ溶射による絶縁方法については、座金全体に施すまたは膜厚を大きくした場合の防食効果について検証する必要がある。同表より F10T を使用した None-F-CS の標準偏差は、10T-SUS を使用した None-F-SS の 0.66 倍であり、ばらつきが小さいことが確認できる。E44-F-SS と E50-F-SS の標準偏差に大きな違いは確認できないものの、

表 2 平均腐食深さ

	平均腐食深さ ( $\mu\text{m}$ )	標準偏差 ( $\mu\text{m}$ )	変動係数
None-F-SS	202.1	54.8	0.27
None-V-SS	194.5	23.7	0.12
None-F-CS	135.0	30.3	0.22
E44-F-SS	191.8	40.2	0.21
E44-V-SS	157.1	30.7	0.20
E50-F-SS	134.0	24.9	0.19
E56-F-SS	95.6	14.8	0.15
AS-F-SS	173.7	35.0	0.20

表 3 最大腐食深さ

	最大腐食深さ平均 ( $\mu\text{m}$ )	標準偏差 ( $\mu\text{m}$ )	変動係数
None-F-SS	528.3	145.5	0.28
None-V-SS	477.1	89.8	0.19
None-F-CS	454.5	96.5	0.21
E44-F-SS	551.6	99.0	0.18
E44-V-SS	437.9	111.4	0.25
E50-F-SS	474.2	106.8	0.23
E56-F-SS	256.1	56.5	0.22
AS-F-SS	514.8	121.0	0.24

E56-F-SS の標準偏差は、E44-F-SS および E50-F-SS の約 0.5 倍となることを確認できる。

表 4 は、各試験片の観察線中の最大の平均腐食深さが生じる位置を示す。なお、同表の  $a$  から  $l$  は、図 2 の観察線を意味する。同表より、平置き条件試験片の、最大平均腐食深さの発生位置は、複合サイクル試験中のローテーションにより、試験機中の配置による塩水噴霧の偏りなどの問題を除去できたことがわかる。一方、縦置き条件試験片においても最大平均腐食深さの発生位置に傾向はみられず、本研究の試験片形状では設置状況による影響は確認できない。

図 3 は、最大腐食深さ、平均腐食深さ、板厚減少量について、各条件の試験片の計測値  $D_i$  を F10T を用いた None-F-CS のこれら値  $D_{None-F-CS}$  で除した比を示す。板厚減少量  $t_r$  は式 (1) により算出する。

$$t_r = \frac{\Delta m}{2A\rho} \quad (1)$$

ここで、 $\Delta m$  は質量変化量、 $A$  は試験片表面の表面積、 $\rho$  は密度で、その計測値は表 1 に示している。なお、式(1)の板厚減少量は試験片母材片面で評価している。図 3 より、E56-F-SS は最大腐食深さ、平均腐食深さ、板厚減少量のいずれの結果においても、None-F-CS より小さい。特に最大腐食深さは 0.56 倍、平均腐食深さは 0.71 倍であり、防食効果が期待できる。図 3 における E50-F-SS の最大腐食深さは、None-F-CS の約 1.04 倍となることを確認できる。アルミナ溶射を施した AS-F-SS および  $\phi 44\text{mm}$  のエポキシ樹脂板を使用した E44-F-SS のすべての結果は、None-F-CS に比べて大きくなることを確認できる。

図 4 は、各試験片の観察線上で最大腐食深さが計測された位置を試験片ごとに平均した結果を示す。縦軸の最大腐食深さ発生位置は、孔の縁端から最大腐食深さが計測された位置までの離れを示す。同図より、最大腐食深さ発生位置は、12mm から 15mm の領域であることがわかる。設置条件の違いによる差を比較するため同一条件の試験片 36 か所を平均した値を比較したところ、None-F-SS と None-V-SS が 5%、E44-F-SS と E44-V-SS が 10%の差となることを確認した。図 4 の None-F-CS および None-F-SS は、同等の値を示しており、ボルトの違いによる最大腐食深さ発生位置の明確な差が確認できない。E50-F-SS および E56-F-SS の最大腐食深さ発生位置は、他の条件の試験片に比べてボルト孔から離れているが、これはエポキシ樹脂板の径が大きくなることによる。

図 5 は、促進腐食試験前後の炭素鋼板表面のプロファイルを示す。同図の青い領域は、腐食による炭素鋼板表面の減少

表 4 腐食発生位置

試験片名	最大平均腐食発生ライン	
None-F-SS	1	a
	2	c
	3	g
None-V-SS	1	g
	2	a
	3	j
None-F-CS	1	j
	2	l
	3	i
E44-F-SS	1	c
	2	g
	3	f
E44-V-SS	1	c
	2	l
	3	j
E50-F-SS	1	f
	2	e
	3	c
E56-F-SS	1	g
	2	h
	3	i
AS-F-SS	1	l
	2	c
	3	l

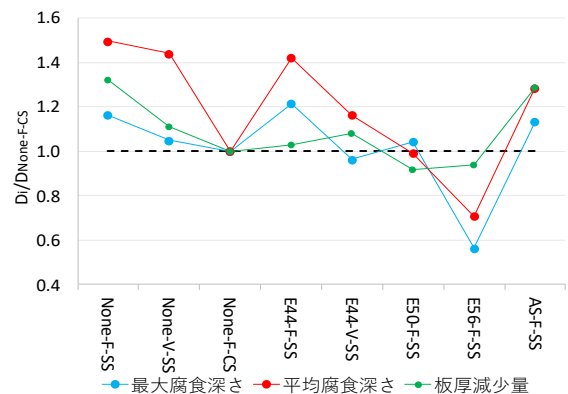


図 3 None-F-CS を基準とした炭素鋼表面減少比

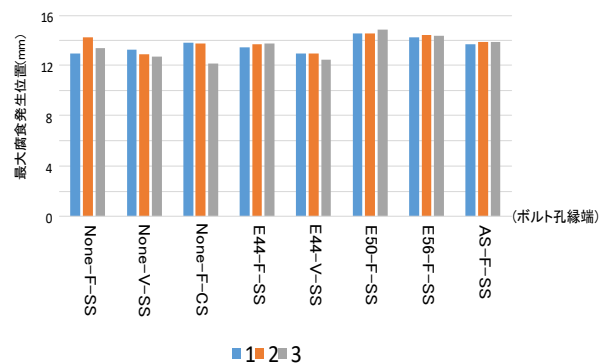


図 4 最大腐食発生位置

を、緑の線で挟まれた領域が 15mm の評価領域を、赤い線と値が最大腐食発生位置とその値を、それぞれ意味している。同図より、None-F-CS-1 では座金縁端から緩やかに表面が減少しているのに対し、10T-SUS を使用した None-F-SS では座金縁端からの表面の減少が急となっている。紙面の都合上割愛するその他の試験片においても同様な傾向を示すことを確認した。E44-F-SS-1 および AS-F-SS-1 の結果は、None-F-CS-1 に比べて、絶縁材料縁端から急な表面の減少が発生している。一方 E50-F-SS-1 および E56-F-SS-1 は、None-F-CS-1 と同様に座金縁端からの表面減少が緩やかとなっていることがわかる。しかし、E50-F-SS の他の観察線において、None-F-SS-1、E44-F-SS-1、AS-F-SS-1 のような急な表面の減少が確認された箇所もあった。また、エポキシ樹脂板およびアルミナ溶射の両絶縁方法において、絶縁材料と母材の接触面に促進腐食試験前後で表面の減少が確認された。促進腐食試験中に絶縁材料と母材との接触面に塩水が侵入していたと考えられる。これについては縦置き試験片でも同様の表面減少が確認されており、試験片の設置条件によるものではないといえる。

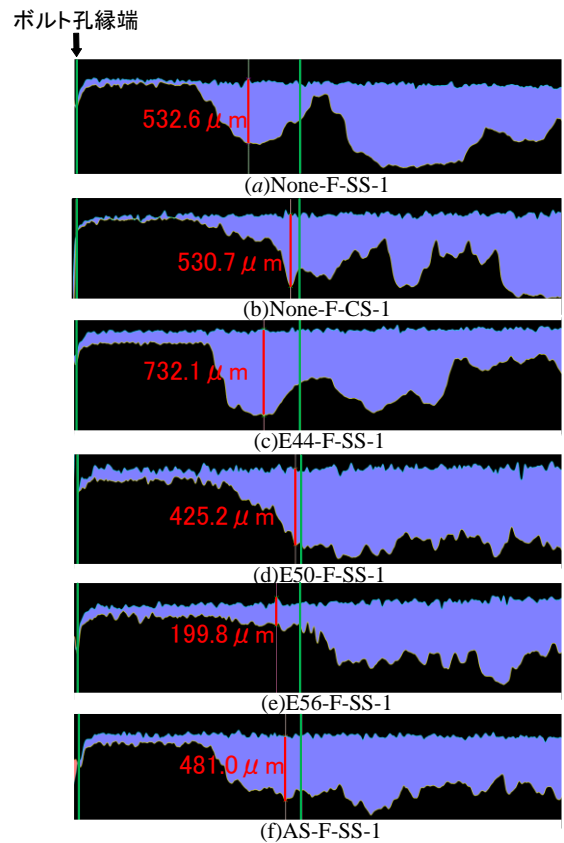


図5 腐食前後のCライン位置でのプロファイル

#### 4. おわりに

本研究は、SM490Y材の鋼板にステンレス高力ボルト10T-SUSを締付け、異材接合部の絶縁方法の違いによる試験片表面の腐食性状を確認した。本研究で得られた成果は、以下のとおりである。

- (1) 10T-SUSを使用したNone-F-SSとF10Tを使用したNone-F-CSとで、平均腐食深さ、最大腐食深さ、および母材表面の凹凸形状に、ボルトと母材の電位差の影響と考えられる差がみられるものの、本研究の範囲では明確な異種金属接触腐食が発現したとは考察できない。
- (2) 絶縁材料にエポキシ樹脂板を使用した試験片では、絶縁材料の径の増加とともに平均腐食深さおよび最大腐食深さ平均が減少する傾向がみられた。
- (3) F10Tを使用したNone-F-CSと10T-SUSを使用したNone-F-SSの最大腐食深さの発生位置は、明確な違いがみられなかった。
- (4) 絶縁材料としてエポキシ樹脂板またはアルミナ溶射を設置した試験片では、絶縁材料と炭素鋼板の接触部に腐食が発生していることを明らかにした。一方、絶縁材料を設置しない試験片では、この腐食の発生はみられなかった。これについては、継手部の耐久性を確保するうえで、より詳細に調べる必要がある。

#### 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「耐久性向上のための高性能鋼材の道路橋への適用に関する共同研究」にて実施したものです。関係者の皆様に深く感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 星野由, 宮寄靖大, 大西孝典, 志村保美, 小林裕輔, 澁谷敦: ステンレス高力ボルトで接合した炭素鋼板における接合部の腐食性状に関する実験的研究, 令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会, I-88, 2020.9.