

FRP-鋼接着接合部の腐食耐久性に関する実験的研究

Experimental study on corrosion durability of FRP-steel bonded joints

北根安雄[†], 上山祐太*, 政門哲夫**, 中村一史***

Yasuo Kitane, Yuta Ueyama, Tetsuo Masakado, Hitoshi Nakamura

[†]Ph.D., 名古屋大学准教授, 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

*名古屋大学, 大学院工学研究科社会基盤工学専攻博士前期課程 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

**日本エンジニアリング(株), 技術統括本部保全技術部 (〒231-0023 横浜市中区山下町 209 番地)

***博(工), 首都大学東京准教授, 大学院都市環境科学研究科都市基盤環境学域 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

FRP-steel bonded joints have been used in different applications including FRP bonding repair on corroded steel structures and attaching FRP accessories on steel structures. However, there are not sufficient data on durability of FRP-steel bonded joint in the corrosive environment. Therefore, in this study, combined cyclic corrosion tests and tensile shear tests of FRP-steel bonded joint specimens were performed. Based on the results, a visual examination on the specimens was conducted to understand characteristics of progression of corrosion into the bonding area, and a quantitative evaluation was carried out with regard to the relationship of the tensile shear strength and the extent of corrosion in the bonding surface.

Key Words: FRP-steel bonded joint, corrosion, combined cyclic corrosion test, durability

キーワード: FRP-鋼接着接合, 腐食, 複合サイクル試験, 耐久性

1. はじめに

近年, 軽量性や耐食性等の優れた材料である FRP の土木構造物への適用が徐々に進められている。本研究では, 鋼材と FRP との接着接合部に着目する。

鋼材と FRP との接着接合が最も多く使用されている例としては, 鋼構造物の補修があげられる。腐食劣化した鋼構造物に対して従来一般的に行われてきた鋼材や鉄筋コンクリートを用いた補修に対する代替工法として, FRP 板を腐食損傷した鋼部材の表面に接着剤を用いて接合する FRP 接着補修工法が使用され始めている¹⁾。基本的には鋼板の当て板補修と同じ考え方の補修工法であり, 腐食した鋼部材の剛性または耐荷性能回復のために実施される。FRP 接着工法では, 従来の鋼板当て板工法や鉄筋コンクリート被覆工法と比較して, 材料自体が軽く, 施工時に大型重機等を使用する必要がなく, 狭隘部での補修が可能である利点を有している。

また, マンホールの蓋など構造物の付属物を, 軽量か

つ耐腐食性のある FRP 製にする事例²⁾も出てきている。その中で, 鋼構造物への接合の一部を接着接合にする検討もされている。

実際の鋼構造物に対して FRP の接着接合を適用するにあたっては, FRP およびその接着接合部が腐食環境下において十分な耐久性を保持することができるかを検討する必要がある。FRP-鋼接着接合部の劣化の原因の一つとして, 鋼材の腐食がある。鋼材の一般部の腐食が接着接合部に侵入することにより, 接着面積が減少し, 接着接合部の強度が低下する。もう一つの劣化の原因として, 樹脂の劣化があげられる。FRP は母材として樹脂を使用した複合材料であり, 接合材料である接着剤も樹脂からなる。樹脂は, 熱, 酸素, オゾン, 水, 紫外線, 薬品などの環境要因によって劣化することが知られている³⁾。したがって, 樹脂の劣化が FRP 自体および接着接合部の劣化要因となりうる。

これまでの研究では連続炭素繊維シートに対して 10 年間の暴露試験を行った場合の長期耐久性評価が行われており, 実用上問題のない力学的性能を保持し続けることが明らかにされている⁴⁾。しかし, FRP を鋼材に接着

[†] 連絡著者 / Corresponding author

E-mail: ykitane@civil.nagoya-u.ac.jp

接合した場合の接合部の腐食環境下における耐久性についてのデータは未だ少なく、特に、FRP-鋼接着接合部の腐食特性や鋼材の腐食がどのように接着接合部に進行していくかについては、明らかにされていない。今後、FRP-鋼の接着接合を広く実構造物に適用していくためには、FRP-鋼の接着接合部の腐食耐久性についてさらに多くの基礎的データの蓄積が必要である。

そこで本研究では、FRP-鋼接着接合の劣化要因のひとつである鋼材の腐食に対して、FRP-鋼接着接合部の耐久性を究明することを目的とする。

本研究ではFRP板どうし、FRP板と鋼板、および鋼板どうしを接着接合した供試体に対して、鋼板に防食塗装を行った供試体と防食塗装を行っていない供試体の2種類を準備し、それらに腐食環境を模擬した複合サイクル実験を行うことで、鋼材の腐食の接着接合部への進展挙動を明らかにし、さらに、複合サイクル実験後に引張せん断実験を行うことにより、腐食環境が接着接合部の強度低下に与える影響を定量的に明らかにする。

2. 実験方法

2.1 供試体

本研究で用いる供試体の形状は引張せん断供試体であり、2枚の板を接着接合した形状である。供試体の種類は、接着する板材の材料の違いおよび鋼板の防食塗装の有無により7種類に分類される。表-1に本研究で使用した供試体一覧を示す。FRPどうしを接着接合した供試体をFRP-FRP供試体、厚さ10mmのFRP板と鋼板を接着接合し防食塗装を施した供試体をタイプE、厚さ2.3mmの鋼板入りFRP板と鋼板を接着接合し防食塗装を施した供試体をタイプF、鋼板どうしを接着接合した供試体をタイプG、またタイプE、タイプF、タイプGの供試体で鋼板に防食塗装を施していない種類の供試体をタイプE'、タイプF'、タイプG'と呼ぶ。FRP板と鋼板を接着接合した供試体については、FRP板の厚さを10mmとしたタイプEと、引張せん断実験でFRP(被着材)での破壊を防ぐためFRP板に鋼板を入れて強度増加を狙ったタイプFの2種類を用意した。図-1にFRP-FRP供試体の詳細図を、図-2にタイプE、F、G、E'、F'およびG'の供試体に用いた厚さ10mmのFRP板、厚さ2.3mmの鋼板入りFRP板および鋼板の詳細図を示す。タイプE、E'、F、F'の接着接合面は長さ50mm、幅50mmの正方形領域、タイプG、G'の接着接合面は長さ50mm、幅70mmの長方形領域とした。

これらの供試体に用いたFRP板は、強化繊維にガラス繊維、樹脂に不飽和ポリエステルを使用し、ハンドレイアップ成形したGFRPを用いており、接着を行わない面のみにゲルコート塗布している。また鋼板にはSS400を用いており、表面はブラストによる1種ケレン処理で素地調整を行った。接着剤には、メタクリレート系構造

用接着剤 PLEXUS MA530 (ITW パフォーマンスポリマーズ&フルイズ社製)を使用し、接着層厚は全供試体で1mmとした。また、鋼板の防食には、補修作業での省力化⁹⁾を目指してセラミック粉末入りエポキシ樹脂塗料 (ITW パフォーマンスポリマーズ&フルイズ社製)を用い、塗装作業は、接着完了後に行った。

また、鋼板を用いたタイプE、F、G、E'、F'およびG'の供試体では、鋼板から発生したさびが接着端部から接着面内へ進行することを抑制するために、図-3に示すように接着剤を接着端部にも塗布することによってシー

表-1 接着供試体一覧表

種類名	種類の説明	供試体名	実験サイクル数	数量
FRP	FRP-FRP	No.1~No.5	100	5
		No.6~No.10	200	5
		No.11~No.15	300	5
		No.16~No.20	400	5
		No.21~No.25	500	5
		No.26~No.32	600	7
E	10mm厚FRP-鋼	E1, E2	0	2
		E3	0 ^{注1)}	1
		E4, E5	300	2
		E6	600	1
E'	10mm厚FRP-鋼(防食無)	E'1	300	1
		E'2	600	1
F	鋼板入りFRP-鋼	F1, F2	0	2
		F3	0 ^{注2)}	1
		F4, F5	300	2
		F6	600	1
F'	鋼板入りFRP-鋼(防食無)	F'1	300	1
		F'2	600	1
G	鋼板-鋼板	G1, G2	0	2
		G3	0 ^{注3)}	1
		G4, G5	300	2
		G6	600	1
G'	鋼板(防食無)-鋼板(防食無)	G'1	300	1
		G'2	600	1

注1) E6と同時に引張せん断試験を実施

注2) F6と同時に引張せん断試験を実施

注3) G6と同時に引張せん断試験を実施

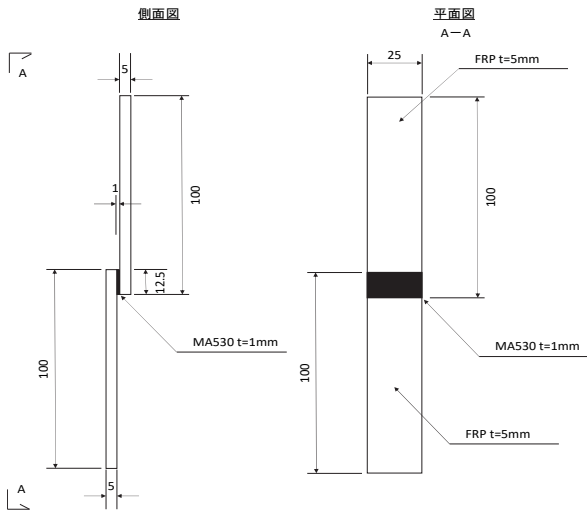


図-1 FRP-FRP 供試体詳細図

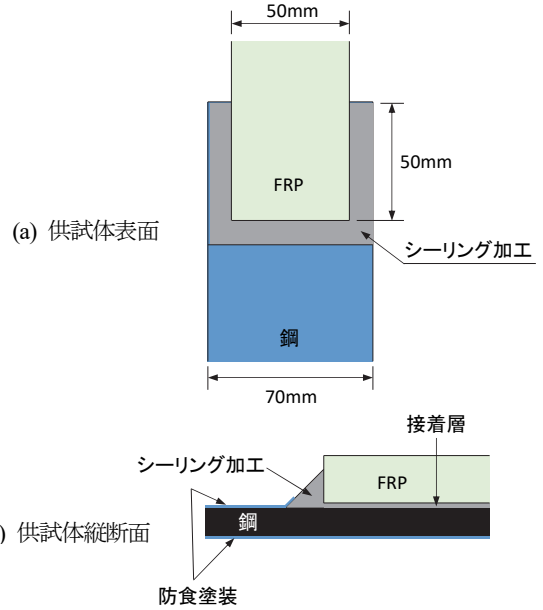
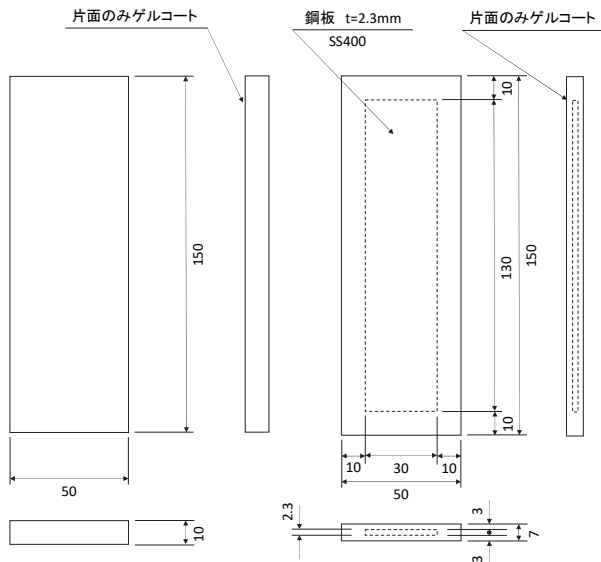
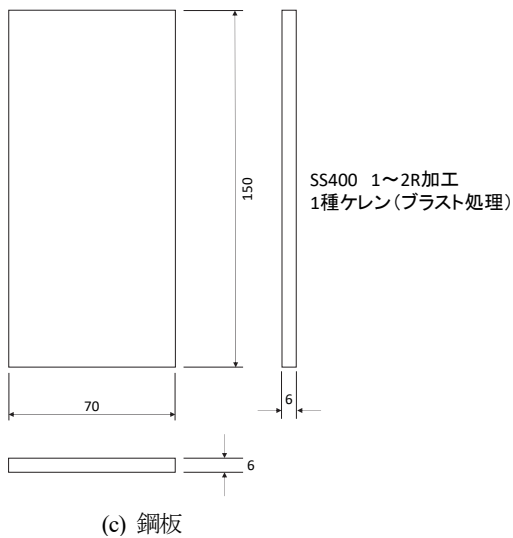


図-3 供試体接着端部のシーリング加工



(a) 10mm 厚 FRP 板

(b) 2.3mm 鋼板入り FRP 板



(c) 鋼板

図-2 タイプE~タイプG'供試体に使用した FRP 板および鋼板

表-2 接着剤の主な性能 (メーカー実験値)

引張強度 (MPa)	ヤング率 (MPa)	引張せん断強度 (MPa)
20.7-24.1	414-483	12.1-15.2

※養生: 20±2°C, 7日間

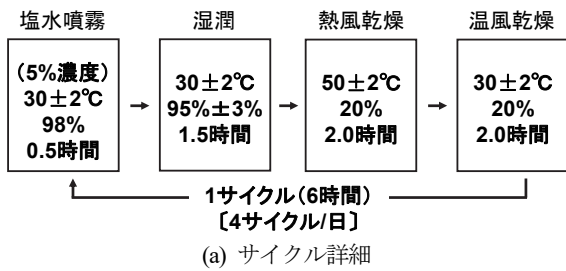
リング加工を施している。表-2 に本実験で使用する接着剤 MA530 の材料特性を示す。

表-1 には供試体の種類と数, 2.2 で説明する複合サイクル実験のサイクル数および供試体名を示している。FRP-FRP 供試体は 100 サイクル (25 日) ごとに 5 体ずつの供試体数であるが, E, F, G タイプの供試体数は初期と 300 サイクルに 2 体ずつ, 600 サイクルに 1 体となっており, E', F', G' タイプの供試体数は 300 サイクルと 600 サイクルに 1 体ずつとなっている。これは, 複合サイクル試験機の寸法から供試体数が限定されたことが理由である。

2.2 複合サイクル実験

複合サイクル実験は, スガ試験機製の複合サイクル試験機 CYP-90A を使用して, 図-4 に示す JIS K 5600-7-9 でサイクルDと呼ばれる複合サイクル条件のもと実験を行う。このサイクル条件は1サイクル6時間であるので, 1日で4サイクルであり, 100サイクルに25日を要する。試験槽内での環境の違いによる影響を少なくするため, 供試体の試験槽内での設置位置は, 20 サイクルごとにローテーションする。また, 接着供試体は試験槽内で図-5 に示すように 15°傾けて設置する。なお FRP 板と鋼板を接着した供試体では, 重量を考慮して, 鋼板が下側になるように設置する。

複合サイクル実験を 100 サイクル行うごとに, 全供試



試験条件	移行時間
塩水噴霧から湿潤	10分以内
湿潤から熱風乾燥(50°C)	15分以内
熱風乾燥から温風乾燥(30°C)	30分以内
温風乾燥から塩水噴霧	瞬時

図-4 複合サイクル実験サイクル条件

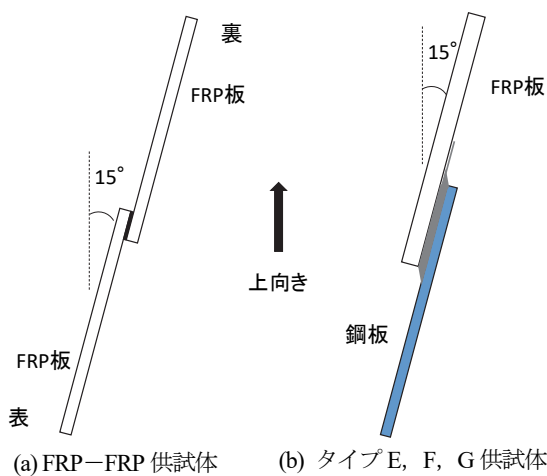


図-5 供試体の設置方法

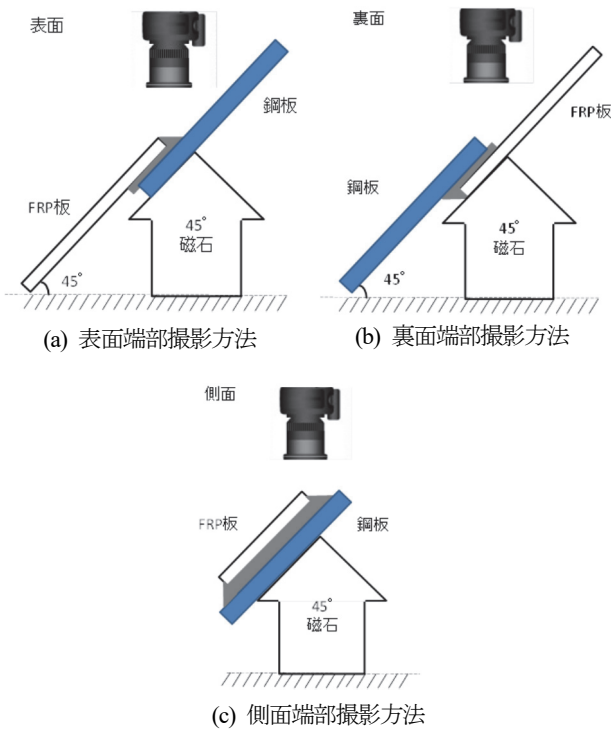


図-6 接着端部の撮影方法



図-7 引張せん断試験の様子

体を試験槽から取り出し、写真撮影を行う。写真撮影は、供試体全体の表面、裏面、側面1（左側）、側面2（右側）および接着端部の表面、裏面、側面を全ての供試体で撮影する。供試体における表面とは複合サイクル実験で試験槽内に図-5に示すように設置した際に、上側を向いている面で、裏面はその逆の面である。側面1は表面に向かって左側の側面、側面2はその反対側の側面である。また、接着端部は図-6に示すようにデジタルカメラの接写レンズを用いて、斜め45°から拡大写真を撮影する。

2.3 引張せん断実験

本研究の引張せん断実験はJIS K 6850に従って、材料試験機を用いて供試体端部をつかみ、供試体に引張荷重を載荷することにより実験を行う。図-7に引張せん断試験の様子を示す。載荷速度1mm/minで載荷を行い、試験機のストローク値と与えた荷重を計測する。そこで得られた荷重を接着面積で除することにより、平均引張せん断応力を計算する。

FRP-FRP 供試体は100サイクルごとに実験を行う。またタイプE, F, Gの供試体は0サイクル, 300サイクルおよび600サイクル後に、タイプE', F', G'の試験体は300サイクルおよび600サイクル後に実験を行う。

3. 実験結果と考察

3.1 複合サイクル実験

表-3にFRP-FRP 供試体の初期および200, 400, 600サイクル終了時の表面および側面の外観写真を示す。FRP-FRP 供試体については、600サイクル終了時にも明らかな変色やチョーキング、または繊維の露出などの外観の大きな変化は見られない。

表-4にタイプEからタイプG'までの供試体について、各タイプ1供試体ずつの初期および600サイクル終

表-3 FRP-FRP 供試体 No.26 の外観変化

サイクル	表面	側面
0		
300		
600		

了時の表面と裏面の外観写真を示す。鋼板に防食塗装を施していないタイプ E', F', G' の供試体については、サイクル数の増加とともに鋼板全体で腐食が進行し、600 サイクル終了時には著しく腐食していることが確認できる。また一方で、鋼板に防食塗装を施しているタイプ E, F, G の供試体については、600 サイクル終了時でも鋼板のコバ部の一部でのみ腐食が確認できる程度である。これまでの研究でもコバ部から腐食が発生しやすいことは知られており、これはコバ部で防食塗装の塗膜厚が薄いことが原因であると考えられる。

表-5 にタイプ E からタイプ G' までの供試体について、各タイプ 1 供試体ずつの 600 サイクル終了時の表面と側面の接着端部の拡大写真を示す。鋼板に防食塗装を施していないタイプ E', F', G' の供試体の表面の接着端部を見ると、腐食の進行とともに鋼板から発生したさびがシーリング内部へ進行していき、600 サイクル終了時にはシーリング加工した接着剤の一部がめくれ上がっている。側面の接着端部でも同様の変化が見られる。一方で、鋼板に防食塗装を施しているタイプ E, F, G の供試体の表面および側面の接着端部を見ると、600 サイクル終了時には、塗膜厚が不十分であった一部のコバ部やシーリングと塗膜の境界からさびが発生し、シーリング内部に部分的に進行していることが確認できる。ただし、鋼板どうしを接着接合したタイプ G の供試体については、供試体全体に対して防食塗装を施しているため、接着端部から腐食の進行は見られなかった。

3.2 引張せん断実験

図-8 に FRP-FRP 供試体の初期および 600 サイクル終了時までの引張せん断実験による引張せん断強度を示す。図中の棒グラフは各サイクルの 5 体の平均値を示しており、誤差範囲として土標準偏差を合わせて示している。複合サイクル実験を行っていない初期段階での引張せん断強度は 11.7MPa であるのに対し、600 サイクル後の強度は 11.2MPa となっており、4%程度の強度低下に留

表-4 供試体(E6, E'2, F6, F'2, G6, G'2)の外観変化

供試体名	面	初期	600 サイクル終了時
E6	表		
	裏		
E'2	表		
	裏		
F6	表		
	裏		
F'2	表		
	裏		
G6	表		
	裏		
G'2	表		
	裏		

表-5 供試体(E6, E'2, F6, F'2, G6, G'2)の 600 サイクル終了時の接着端部の拡大写真

供試体名	表面	裏面	側面 (左)	側面 (右)
E6				
E'2				
F6				
F'2				
G6				
G'2				

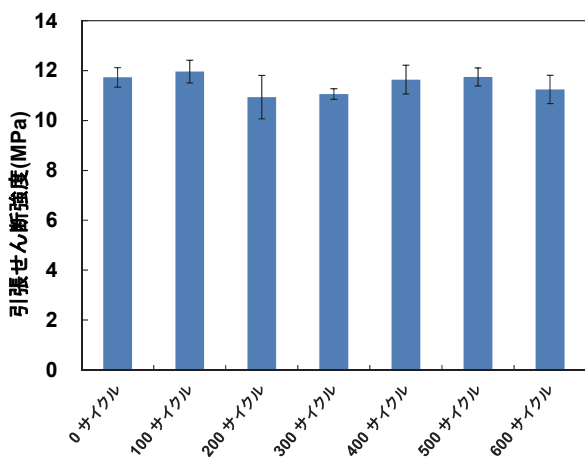


図-8 FRP-FRP 供試体の引張せん断強度

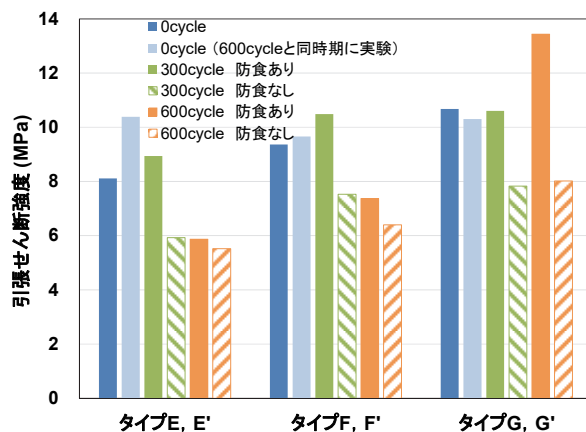


図-9 供試体 (タイプ E~タイプ G') の引張せん断強度

まっている。このことから、FRP どうしを接着した供試体は、今回実施した複合サイクル実験の腐食環境においては接着強度がほとんど低下しないことが確認でき、複合サイクル実験の腐食環境下においては FRP 自体や接着剤自体および接着接合部の劣化はほとんどないことが明らかになった。

また、図-9 にタイプ E からタイプ G' の供試体の引張せん断強度の比較を、表-6 に供試体タイプ E からタイプ G' までの引張せん断実験結果を、表-7 に代表的な供

試体の破壊後の接着面を示す。

表-6 からわかるように、FRP 板と鋼板を接着した供試体 (タイプ E, E', F, F') の破壊モードは、被着材で破壊した F3 を除き、鋼板側界面で界面剥離を生じた接着破壊である。一方、鋼板どうしを接着した供試体 (タイプ G, G') の破壊モードは、多くが接着剤の凝集破壊であり、一部の供試体では接着破壊と凝集破壊の混合モードとなっている。ただし、G'2 に関しては接着剤と鋼板の界面に腐食が進行したため、界面剥離による接着破

表-6 引張せん断実験結果のまとめ

種類	供試体	サイクル	引張せん断強度(MPa)	破壊モード
E	E1	0	7.9	接着破壊 (鋼板側界面剥離)
	E2	0	8.3	接着破壊 (鋼板側界面剥離)
	E3	0*	10.4	接着破壊 (鋼板側界面剥離)
	E4	300	7.4	接着破壊 (鋼板側界面剥離)
	E5	300	10.5	接着破壊 (鋼板側界面剥離)
	E6	600	5.9	接着破壊 (鋼板側界面剥離)
E'	E'1	300	5.9	接着破壊 (鋼板側界面剥離)
	E'2	600	5.5	接着破壊 (鋼板側界面剥離)
F	F1	0	9.1	接着破壊 (鋼板側界面剥離)
	F2	0	9.6	接着破壊 (鋼板側界面剥離)
	F3	0*	9.7	被着材 (FRP) 破壊
	F4	300	11.0	接着破壊 (鋼板側界面剥離)
	F5	300	10.0	接着破壊 (鋼板側界面剥離)
	F6	600	7.4	接着破壊 (鋼板側界面剥離)
F'	F'1	300	7.5	接着破壊 (鋼板側界面剥離)
	F'2	600	6.4	接着破壊 (鋼板側界面剥離)
G	G1	0	12.2	凝集破壊
	G2	0	9.2	凝集破壊
	G3	0*	10.3	接着破壊/一部凝集破壊
	G4	300	10.2	凝集破壊
	G5	300	11.0	凝集破壊
	G6	600	13.4	凝集破壊
G'	G'1	300	7.8	接着破壊/一部凝集破壊
	G'2	600	8.0	接着破壊 (界面剥離)

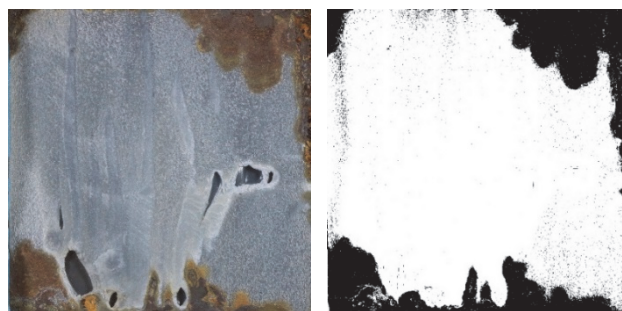
※600 サイクル終了後まで保管して実験を実施

壊となっている。

表-7 を見ると防食塗装を施した FRP-鋼供試体 (タイプ E, F) では, 300 サイクル終了時にはシーリング下へ腐食が進行していることがわかる。しかし引張せん断強度の低下は見られず, むしろ複合サイクル実験での加温による養生の効果により, 初期に比べて強度が 10%ほど増加していた。600 サイクル終了時にはシーリング下および接着面内にも一部腐食が進行していることがわかる。引張せん断強度に関してはタイプ E, F で初期に比べてそれぞれ 28%と 21%低下していた。

防食塗装を施した鋼-鋼供試体(タイプ G)では, 300, 600 サイクル終了時ともに接着面内への腐食の進行はなく, 防食が十分に機能しており, 引張せん断強度の低下も見られなかった。

防食塗装を施していない供試体 (タイプ E', F', G') では, 300 サイクル終了時には E'1, F'1 でシーリング下への腐食の進行が顕著であり, G'1 はシーリング下および接着面内の一部にも腐食が進行していることがわかる。ただし, E'1, F'1, G'1 の引張せん断強度は初期に比べて



(a)二値化処理前の接着面 (b)二値化処理後の接着面

図-10 二値化処理前後の接着面

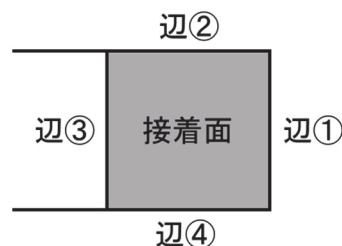


図-11 接着面の辺番号

それぞれ 27%, 20%, 27%の低下となっており, 必ずしも接着面内への腐食の進行と強度低下率に明確な関係はみられない。また, 600 サイクル終了時においてはタイプ E', F', G'全てでシーリング下および接着面内の一部に腐食が進行していることがわかる。しかし, 300 サイクル終了時と比べると腐食はそれほど進行しておらず, 腐食の進行速度が速くないことがわかる。引張せん断強度に関しても E', F', G'タイプで初期に比べてそれぞれ 32%, 31%, 25%の低下となっており, 300 サイクル終了時と比べてもわずかな低下に留まっていた。

また, 室温中での養生効果を見るために, 複合サイクル実験を行わず 600 サイクル終了時の供試体と同時期に引張せん断実験を行った供試体 (E3, F3, G3) の引張せん断強度を見ると, それぞれ初期に比べて, +28%, +3%, -4%の変化とばらついており, 一定の傾向は確認できなかった。


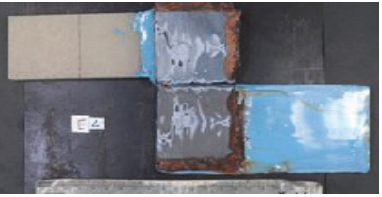
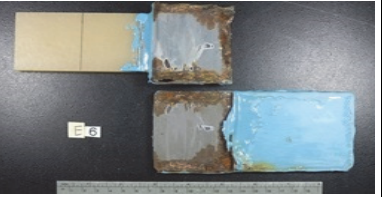
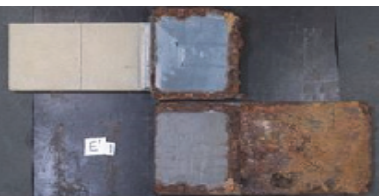


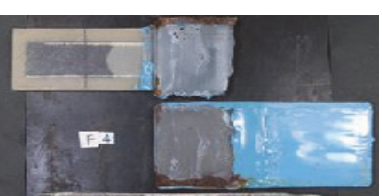
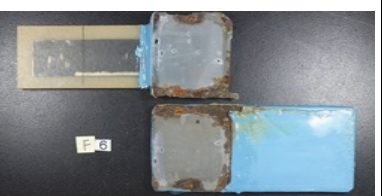

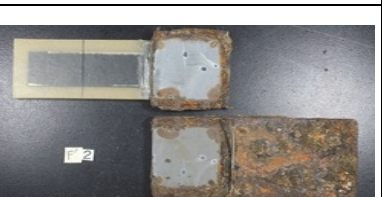
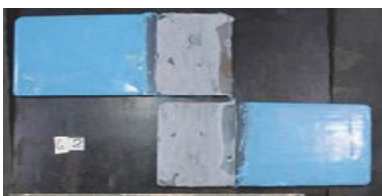




以上より, 十分な防食性能が保持され, 接着面内への腐食の進行を防ぐことができれば, 接着強度が低下しないことが明らかになった。

4. 接着面における腐食の進行と接着強度の関係性

4.1 腐食面積と腐食進行距離の測定

接着接合部供試体の接着面内に進行した腐食の面積および進行距離と引張せん断強度の関係について定量的に明らかにするために, 破壊後の供試体の接着面における腐食面積と腐食進行距離の測定を行った。本研究では画像解析ソフト Image J を用いて, 引張せん断実験後の供試体の接着面の拡大写真から腐食面積と腐食進行距離を測定した。引張せん断実験後の供試体を確認した結果,

表-7 各タイプ供試体の破壊後の接着面

種類	0 サイクル(初期)	300 サイクル	600 サイクル
E			
E'			
F			
F'			
G			
G'			

接着面の拡大写真で確認できない腐食部はないことから、写真から腐食面積を測定できると判断した。

まず破壊後の供試体の写真から、腐食面積および腐食進行距離を測定する領域として接着面のみをトリミングし取り出す。FRP 板と鋼板を接着した供試体(タイプ E, E', F, F') では、50mm×50mm の正方形領域を、鋼板どうしを接着した供試体(タイプ G, G') では、長さ 50mm 幅 70mm の長方形領域を接着面として定義する。したが

って、シーリング下の腐食は考慮しない。腐食面積測定に関しては、取り出した接着面に対して、図-10 に示すように二値化処理を行い、腐食している部分を黒色、腐食していない部分を白色に区別する。その後、二値化処理後の画像における黒色の領域の面積を測定することで腐食面積とする。また腐食進行距離に関しては、接着面における接着端部の 4 辺を図-11 に示すように辺①～④と定義し、各辺から接着面内部へ進行した腐食の距離の

表-8 各供試体の腐食面積

種類	供試体	サイ クル	腐食面積 (mm ²)
E	E3	0*	0
	E4	300	77.0
	E5		20.6
	E6	600	479.2
E'	E'1	300	83.2
	E'2	600	304.0
F	F3	0*	0
	F4	300	43.0
	F5		89.0
	F6	600	122.6
F'	F'1	300	221.3
	F'2	600	522.7
G	G3	0*	0
	G4	300	0
	G5		0
	G6	600	0
G'	G'1	300	824.0
	G'2	600	861.7

※600 サイクル終了後まで保管して実験を実施

最大値を測定し、腐食進行距離とする。

4.2 腐食面積と接着強度の関係性の評価

表-8 に腐食面積の測定結果を示す。ただし、初期段階で引張せん断実験を行った供試体に関しては、腐食が発生していないためここでは省略する。タイプ E, F, E', F', G' の供試体では、複合サイクル実験のサイクル数が進行するにつれて接着面内の腐食面積も増加していた。また、タイプ G の供試体では 600 サイクル後でも防食塗装が健全であり、腐食は接着面内へ進行していなかったため、腐食面積はゼロであった。また、室温中で保管していた供試体 E3, F3, G3 では腐食の発生は確認されず、腐食面積はゼロであった。

また、接着面における残存面積率と供試体の残存強度率をそれぞれ式(1)と式(2)で算出し、図-12 に各供試体の残存面積率と残存強度率を比較する。

$$\text{残存面積率(\%)} = 100 - \frac{\text{腐食面積}}{\text{接着面積}} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{残存強度率(\%)} = \frac{\text{残存引張せん断強度}}{\text{初期引張せん断強度}} \times 100 \quad (2)$$

図-12 を見ると、残存面積率が 90%未滿の供試体では、残存強度率も同様に 90%未滿になっていることから、接着面内に腐食が進行することによって接着接合部の引張せん断強度が低下することが確認できた。一方で、残存面積率が 90%以上の供試体では残存強度率の値に一定の

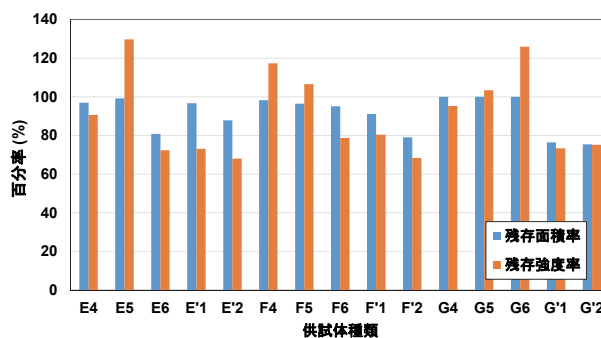


図-12 各供試体の残存面積率と残存強度率

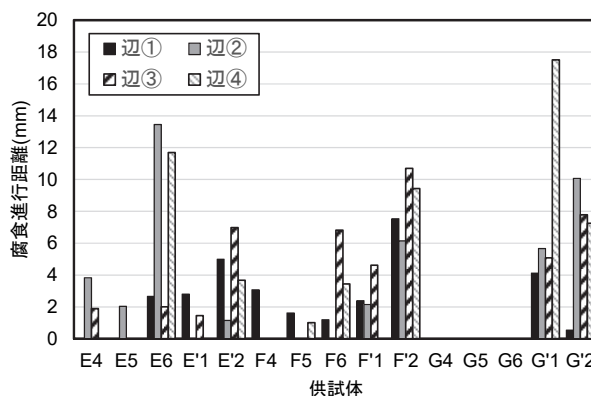


図-13 腐食進行距離

傾向は見られなかった。これは、これらの供試体では接着面の腐食面積が少なく腐食による影響が小さいため、養生による接着剤の強度上昇やシーリングが受け持っていた強度の低下、供試体間での初期の接着強度のばらつき等の影響が支配的になっていることが原因だと考えられる。

残存面積率と残存強度率を比較することで、腐食面積がある程度大きくなれば、それに伴って引張せん断強度も低下することが確認できたが、残存面積率と残存強度率は必ずしも同等の値になっていない。これは、接着接合部におけるせん断応力は接着面内で様ではなく、端部で大きくなるため、接着破壊では端部の影響が大きいことが原因だと考えられ、単純に残存面積と接着強度が比例関係にないことがわかる。

4.3 腐食進行距離と接着強度の関係性の評価

図-13 に複合サイクル実験を行った供試体の各辺で腐食進行距離を示す。辺①から④は、図-5 に示す下側の鋼板の接着面における辺の番号を示している。各辺からの腐食進行距離は、供試体ごとにばらつきが大きく明確な傾向を示すことが難しいが、全体的には、複合サイクル実験の設置方向で、上下の接着端である辺①と辺③よりも、左右の接着端である辺②と辺④の方が約 25%大きかった。また辺①と辺③の腐食進行距離を比較すると、辺③が辺①に比べて約 50%程度大きかったのに対し、辺

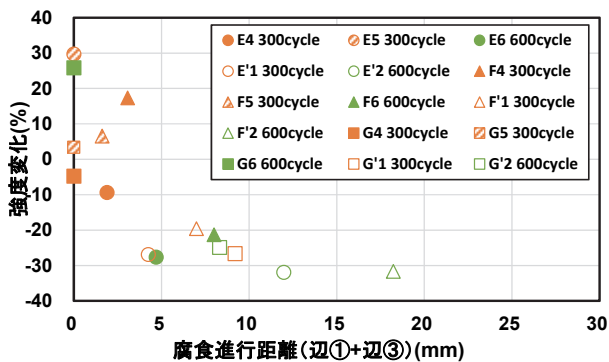


図-14 腐食進行距離 (辺①+辺③) と強度変化

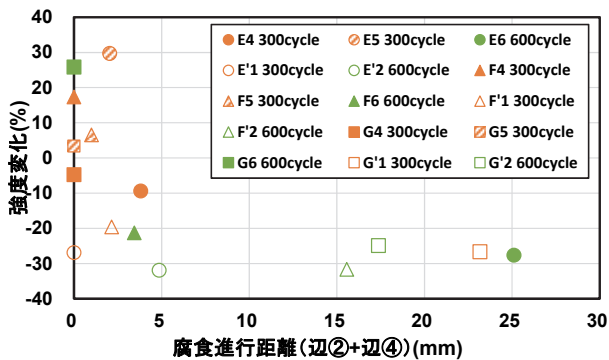


図-15 腐食進行距離 (辺②+辺④) と強度変化

②と辺④は約 20%の差にとどまっていた。辺③と辺①では、複合サイクル実験において表面と裏面という環境の違いがあったことがその原因として考えられる。

図-14 と図-15 に辺①と辺③からの腐食進行距離の和および辺②と辺④からの腐食進行距離の和と引張せん断強度の変化率との関係をそれぞれ示す。辺①と辺③は、引張せん断実験において荷重に垂直な辺であり、せん断応力が接着面中央に比べて大きくなる特徴を持つ。これらの辺からの腐食進行は、接着長さが減少することを意味する。また、辺②と辺④は、引張せん断実験において荷重に平行な辺であり、これらの辺からの腐食進行は接着幅が減少することを意味する。

両方のグラフで腐食進行距離が増加するにつれて引張せん断強度が低下するという関係性が表れている。しかし、辺①と辺③の腐食進行距離と辺②と辺④の腐食進行距離のどちらが引張せん断強度の低下に、より寄与しているかについては、明確な差が見られなかった。

5. 結論

本研究では、GFRP 板または鋼板を接着接合した 7 種類の供試体に対して、複合サイクル実験および引張せん断実験を行うことで、腐食環境下における鋼構造物に対する FRP 接着補修の耐久性について検討を行った。また、接着面内に進行した腐食面積および腐食進行距離を測定し、接着接合部の引張せん断強度との関係性について評

価を行った。本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) FRP どうしを接着接合した供試体では、複合サイクル実験 600 サイクル後でも、明らかな変色や繊維の露出等の外観の変化はほとんど見られなかった。また引張せん断強度に関しても、初期の強度に比べて 4%ほどの低下に留まっており、今回行ったサイクル条件下では FRP 自体や接着剤自体および接着接合部は劣化しないことが確認できた。
- (2) FRP と鋼板および鋼板どうしを接着接合した供試体では、鋼板に防食塗装が施され、防食性能が十分保持されていれば、複合サイクル実験 600 サイクル終了後も接着面内やシーリング内部への腐食の進行は防ぐことができ、引張せん断強度が低下しないことが確認できた。ただし、接着端部やコバ部などの塗装が不十分であると、サイクル数の増加とともに鋼板から発生したさびがシーリング下や接着面内に浸入し、引張せん断強度が低下することが確認できた。
- (3) 接着面の腐食面積率が 10%程度以上になると、明らかに引張せん断強度が低下することが確認できた。ただし、腐食面積率が 10%程度以下の腐食の進行が小さいうちは、養生による接着部の強度上昇やシーリングが受け持っていた強度の低下等の影響が支配的であり、引張せん断強度の低下は明確ではなかった。

謝辞

本研究は、首都高速道路(株)、首都高メンテナンス西東京(株)との共同研究の一部として実施された。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 土木学会複合構造委員会：FRP 部材の接合および鋼と FRP の接着接合に関する先端技術，複合構造レポート 09，2013。
- 2) 栗田繁実，佐藤昌義，久保圭吾：FRP 製橋梁付属物の特徴と今後の展望，宮地技報，No.23，pp.13-18，2008。
- 3) 本間精一：プラスチックの実用強さと耐久性(7)，プラスチック，Vol.55，No.4，pp.143-152，2004。
- 4) 富山禎人，西崎到：コンクリート補強用連続繊維シート (CFRP) の長期耐久性，第 9 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム論文集，pp.290-295，2011。
- 5) 石橋正博，田中誠，政門哲夫：省工程防食材料の比較検証試験，一般社団法人日本橋梁・鋼構造物塗装技術協会第 19 回技術発表大会予稿集，2016，pp.25-35。
(2016 年 9 月 26 日受付)
(2017 年 2 月 1 日受理)