

炭素繊維プレートによる鋼構造建築建物の 接着補強工法に関する基礎的研究

玉井 宏章* ・ 高松 隆夫* ・ 櫻庭 誠**
灰谷 徳治*** ・ 服部 明生****

(平成18年10月30日受理)

On Rehabilitation of Steel Building Using Bonding Carbon Fiber Reinforced Plastic Plates

Hiroyuki TAMAI, Takao TAKAMATSU, Makoto SAKURABA,
Tokuji HAITANI and Akeo HATTORI

(Received Oct. 30, 2006)

Abstract

Aging of existing steel buildings necessitate the development of simple and efficient rehabilitation technique. We have been developing a strengthening method with bonding Carbon Fiber Reinforced Plastic Plate (CFRP) to enhance the usage life of steel buildings. Coefficient of expansion of CFRP is one-tenth smaller than that of steel. The change of temperature during daytime and night amounts to 40°C so that large thermal stress occurs in adhesive layer between CFRP and steel. Cyclic thermal stress causes degradation of the bonding strength. Further, CFRP and steel have electro-conductivity. Although the adhesive between CFRP and steel has non-electro-conductivity, intense rust (galvanic corrosion) may occur when CFRP partially touches steel member. The partial galvanic corrosion may deteriorate the bonding strength between CFRP and steel. In this study, Heat cycle tests on steel plate bonding CFRP are made to evaluate the durability of cyclic thermal stress. Also, galvanic corrosion tests under dry and wet cycle atmosphere using salt water are carried out. We show these basic data for influence of galvanic corrosion and cyclic thermal stress on bonding strength between CFRP and steel plate.

Key Words: cyclic thermal history, galvanic corrosion, bonding strength, CFRP

1. は じ め に

高い剛性と強度を有する炭素繊維プレートを接着して、
鋼構造物を補強する方法が著者らを含めた研究者により開

発されつつある^{1)~3)}。しかし、性質の異なる炭素繊維プレー
トと鋼材の接着剤による接着補強工法は、様々な問題が生
じると考えられる。

例えば、炭素繊維プレートの線膨張係数が鋼材の約

* 広島工業大学工学部建築工学科

** 広島工業大学大学院工学研究科土木工学専攻

*** 東レ建設(株)理事

**** 東レ建設(株)技術設計部

表1 接着層厚測定結果

試験体名称	接着剤	接着層厚(mm)			
		①断面	②断面	③断面	④断面
N試験体	-	1.45	1.24	0.92	1.06
T試験体	耐熱タイプ	1.08	1.13	0.98	0.88

表2 接着剤の力学的特性

ヤング係数	曲げ強度	圧縮降伏強度	引張強度	引張せん断 付着強度	衝撃強度	ガラス 転移点
(kN/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(kJ/m ²)	(°C)
2.28	55.8	59.0	34.8	25.5	4.2	65
JIS K7208	JIS K7203	JIS K7208	JIS K7113	JIS K6850	JIS K7111	-

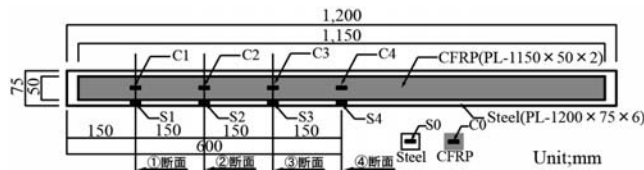


図1 試験体形状

1/10 程度と異なるので、温度変化が激しければ、大きな熱応力が生じ、接着性能の耐久性が課題になる。構造材の温度変化は、第一に炭素繊維プレートの熱伝導率がよく、また鋼材の熱容量も小さいことから日射による大きな温度上昇が起こりえる。特に夏季においては、昼間に直射日光により加熱され表面温度が60℃に達し、夜間には20℃程度に冷却される短期の温度履歴を受けることが確認されている。第二に長期には、冬季で外気温が0℃以下になる場合には鋼材の表面も0℃以下になると考えられ、夏季との温度差は60℃にもなる。発生する熱応力により、接着性能の低下が懸念される。また、鋼材と炭素繊維プレート(導電性材料)間の接着剤は非導電性であり、工法として両者が接触することは考えにくいとされているが、何らかの要因で鋼材と炭素繊維プレートが接触すれば、電池作用によって、いわゆるガルバニック腐食が生じ、鋼材の腐食が促進される可能性がある^{4)~7)}。この腐食が進行すると、炭素繊維プレートと鋼板の境界部に局部腐食が発生し、鋼材の機械的性質を著しく劣化させると考えられるため、この腐食の基本的特性を明らかにし、鋼材に及ぼす影響や必要とされる対策を検討する必要がある。

本研究では、炭素繊維プレートと鋼材とを複合化した材について、長期的、短期的に温度履歴を受けた場合を想定した熱履歴耐力試験を、また、悪腐食環境下を想定し、塩水による乾湿繰返し下におけるガルバニック腐食試験をそれぞれ行い、接着耐久性や補強効果を維持しうるかを検討する。これらの試験により、炭素繊維プレートによる鋼構造物の接着補強工法の実用化のための基礎データとする。

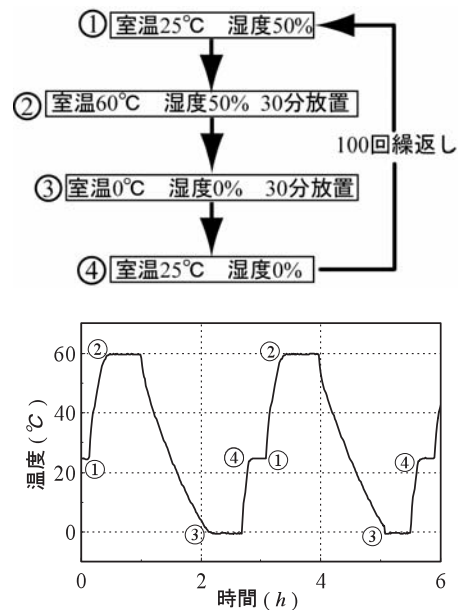


図2 試験サイクル

2. 熱履歴耐久試験

鋼材と炭素繊維プレートを複合化した材について複数回の熱履歴を受けた場合における接着耐久性に及ぼす影響を確認するため、熱履歴耐久試験を行った。

2.1 試験体

試験体の形状を図1に、各試験体の接着層厚を表1に示す。

試験体は、鋼板(PL-1200×75×6)に炭素繊維プレート(PL-1150×50×2)を全長1150mmに接着したものである。試験体の種類として、接着には常温二液硬化型エポキシ樹脂を用い通常タイプとした試験体(N試験体)を1体、耐熱タイプとした試験体(T試験体)を1体の計2体用意した。また、鋼材と炭素繊維プレート単体の拘束されていない試験体(50×50mm)を各1体用意した。

試験体に用いた接着剤単体の硬化後における力学的特性を表2に示す。尚、接着は、炭素繊維プレートと鋼材の接着面を紙ヤスリ(#100)で目粗した後、それぞれの試験体の接着剤で接着し、室温20℃以上で7日間養生した。

2.2 試験概要と計測方法

熱履歴の試験サイクルを図2に示す。

試験体を恒温・恒湿室に入れ、0℃(湿度0%)～60℃(湿度50%)を100回繰り返した。試験前及び10回、50回、100回繰り返した時点で、打音試験を行い、CFRPと鋼材との間のはく離の有無を確認した。尚、0℃から60℃へ昇温時の25℃で湿度50%とする調湿を行っている(図2の過程)。

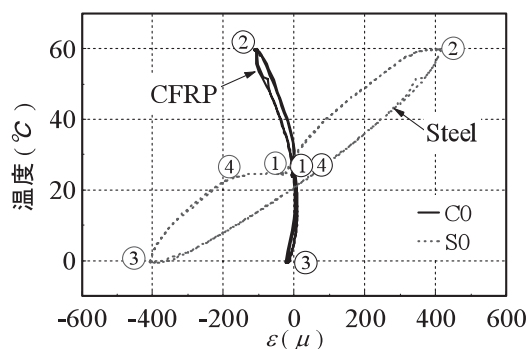


図3 鋼材と炭素繊維プレート単体の温度—ひずみ関係

計測は、ひずみの測定を端から 150mm づつ離れた 4 箇所位置の炭素繊維プレートと鋼材について、それぞれ計 8 点について材軸方向直ひずみを、鋼材では検長 3 mm、炭素繊維プレートは検長 5 mm の自己温度補償型箔ひずみゲージにより計測し、ひずみ値から自由膨張ひずみを差し引いた、応力に寄与するひずみ（機械的ひずみ）と炭素繊維プレートと鋼材との間の相対ひずみを、それぞれ、求めた。

また試験中の恒温室内の温度変化を、試験体周辺の熱電対により 3 箇所測定し、それらの値を平均し、恒温室内の温度とした。

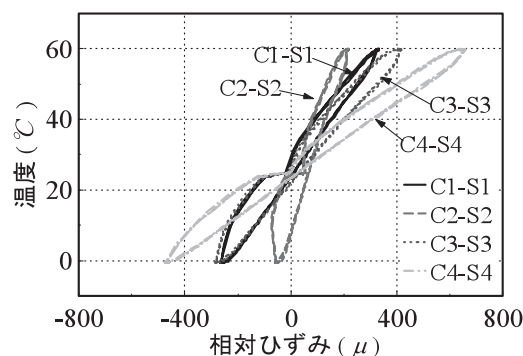
ひずみ測定位置の名称は、図 1 に示すように、端部から炭素繊維プレート上は C1, C2, C3, C4 とし、鋼材上は端より S1, S2, S3, S4 とした。また、拘束を受けない試験体もそれぞれ C0, S0 とした。また、拘束を受けない試験体もそれぞれ、C0, S0 と表している。

2.3 試験結果と考察

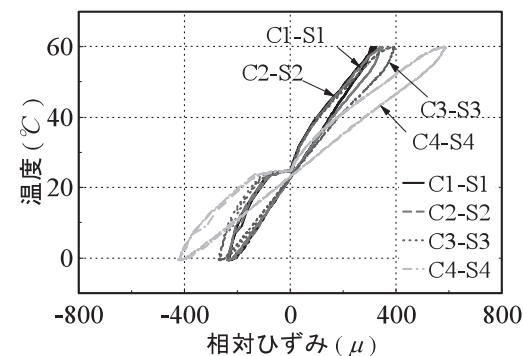
熱履歴試験を行った結果を図 3, 図 4 に示す。図 3 には、拘束のない状態の鋼材と炭素繊維プレート (CFRP) 単体の温度—ひずみ関係を示す。図 4 には両試験体各点における炭素繊維プレートと鋼材との間の相対ひずみと温度との関係を示す。

これらの結果から以下のことが分かる。

- 1) 図 3 から鋼の線膨張係数は $10 \sim 11 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ に対し炭素繊維プレートのそれは $-1 \sim 1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ であり、温度変化によらず、炭素繊維プレートはほとんど線膨張しない。
- 2) 図 4 から、炭素繊維プレートと鋼材との相対ひずみは温度とともに線形に変化し、中央部ほど大きくなり最大で、 60°C で $500 \sim 600 \mu$ 、 0°C で -400μ の差し引き 1000μ の差が生じること、通常接着剤より耐熱接着剤を用いたほうが、この相対ひずみが小さくなる傾向にあることが分かる。
- 3) 10 回、50 回、100 回サイクルの熱履歴を加えた時に

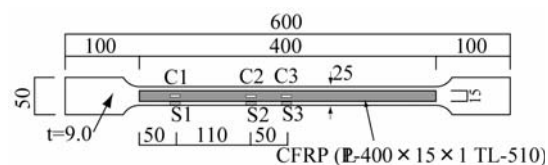


(a) N 試験体

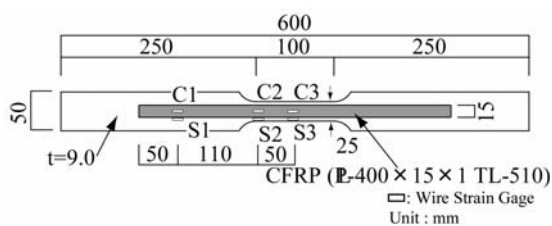


(b) T 試験体

図4 炭素繊維プレートと鋼材との相対ひずみの変化



(a) A タイプ試験体



(b) B タイプ試験体

図5 引張試験結果

打音試験を行った結果、両試験体とも接着のはく離による異音は認められず、100 サイクル程度の熱履歴下においても接着剤の耐久性には問題ないと考えられる。

3. 熱間引張試験

複数回の熱履歴を受けた複合材について、室温・高温下での引張試験を行い、接着の耐久性を確認した。

3.1 試験概要と計測方法

試験体形状を図 5 に示す。試験体は板厚 9 mm の鋼板

表3 引張試験結果

試験体名	最大荷重	破壊伸び	中央部最大ひずみ		破壊性状
	P_u/P_y	δ_u/δ_y	STEEL $\varepsilon(\mu)$	CFRP $\varepsilon(\mu)$	
A20.1	1.14	6.11	1088	1054	層内破壊
A20.2*	1.15	4.51	1318	1485	接着破壊
A20.3*	1.15	6.64	1086	1071	層内破壊
A45.1*	1.11	7.15	1008	1306	界面破壊
A45.2	1.03	3.85	1294	1668	界面破壊
A45.3*	1.07	6.64	956	1419	界面破壊
A60.1*	1.04	3.83	762	1218	界面破壊
A60.2*	1.00	3.19	688	1439	界面破壊
A60.3*	1.04	2.89	591	1295	界面破壊
A20-60.1*	0.93	8.51	1518	1336	界面破壊
A20-60.2	1.06	4.25	984	1312	層内破壊
A20-60.3	1.08	4.25	1311	1405	層内破壊
B20.1	2.00	4.25	1733	8216	接着破壊
B20.2	2.03	4.25	5745	7534	接着破壊
B20.3	2.00	2.73	3016	7034	接着破壊
B45.1	1.86	1.89	1421	6540	接着破壊
B45.2	1.83	1.67	847	7829	接着破壊
B45.3	1.81	1.64	1718	6822	接着破壊
B60.1	1.44	1.20	1304	4464	界面破壊
B60.2	1.47	1.16	1379	4579	界面破壊
B60.3	1.44	1.13	670	4649	界面破壊
B20-60.1	2.00	4.36	18183	7394	接着破壊
B20-60.2	1.97	2.29	16186	9350	接着破壊
B20-60.3	1.92	1.67	23667	6917	接着破壊
$P_y = 36\text{kN}, 27\text{kN}^* \quad \delta_y = 2.75\text{mm}, 2.35\text{mm}^*$					

(SS400) の引張素材試験片に板厚 1 mm, 幅 15mm の高強度炭素繊維プレート (TL-510, PL-450x15x1) を接着したものである。鋼板の塑性化させる部位を 400mm とし, 定着部を設けない A タイプと塑性化させる部位を 100mm とし, 両端 150mm の定着部を設ける B タイプの 2 種類を用意した。

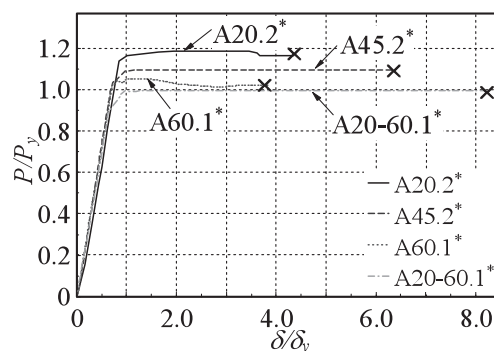
接着剤及び接着加工は前節と同様にした。温度, 载荷プログラムは室温 20℃ で単調引張するケース (A20, B20), 雰囲気温度 45℃ で単調引張するケース (A45, B45), 雰囲気温度 60℃ で単調引張するケース (A60, B60) 及び 20℃, 60℃ (30 分) の熱履歴サイクルを 10 回繰り返した後, 室温 20℃ で単調引張するケース (A20-60, B20-60) とし, A タイプ, B タイプの試験体で各ケース 3 体ずつ, 計 24 体試験を行った。

計測は荷重: P , ストローク: δ について行った。载荷にはオートグラフ万能試験機 (島津製作所 AG-IS250kN) を用いた。

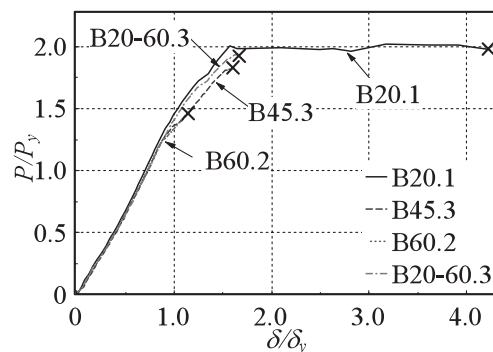
3.2 試験結果とその考察

試験結果を表 3, 図 6 に示す。

表 3 は, 鋼板の降伏荷重: P_y で無次元化した最大荷重: P_u/P_y , 鋼板の降伏伸び: δ_y で無次元化した破壊伸び: δ_u/δ_y , 接着剤または炭素繊維プレートが破壊する直前の中央部における鋼板と炭素繊維プレートのひずみ及び破壊性



(a) A タイプ試験体 ($P_y=27\text{kN}$, $\delta_y=2.35\text{mm}$)



(b) B タイプ試験体 ($P_y=36\text{kN}$, $\delta_y=2.75\text{mm}$)

図6 荷重—ストローク関係

状を示す。

尚, 試験体名に*がついた鋼板には $P_y=27\text{kN}$, $\delta_y=2.35\text{mm}$ の素材のものを, それ以外の試験体は, 鋼板には, $P_y=36\text{kN}$, $\delta_y=2.75\text{mm}$ の素材を用いている。

図 6 には, 各温度履歴, 载荷ケースの代表的なものについて, 鋼板の降伏荷重で無次元化した荷重: P/P_y と鋼板の降伏伸びで無次元化した伸び: δ/δ_y との関係を, (a) A タイプ及び (b) B タイプの試験体形状ごとに分けて示す。これらの結果から以下のことが分かる。

- 1) 弾性域に保持される定着部のない A タイプの試験体では, 雰囲気温度が 20℃, 45℃, 60℃ において炭素繊維プレートによる強度の上昇率は, 鋼板の降伏荷重の 15%, 7%, 3% と低く, 高温の 60℃ ではひずみ分布が最大となる中央部の鋼板部で 600μ , 炭素繊維プレート部で 1300μ であり, 塑性率で 2~3 程度の伸びが生じた後に接着剤と鋼板との界面ではく離が生じる。
- 2) 一方, 弾性域に留まる定着部のある B タイプ試験体では, 雰囲気温度が, 20℃, 45℃, 60℃ において強度の上昇率は, 100%, 83%, 45% と比較的高く, 高温の 60℃ においても, 中央部のひずみは鋼板部で 1300μ , 炭素繊維プレート部で 4500μ で, A タイプと同様, 接着剤と鋼板との界面ではく離が生じた。
- 3) また 20℃~60℃ の 10 回程度の熱履歴を受けても, 最

表4 試験体名称

試験体名称	接着状態
CNN	接着剤はみ出しなし
CAN	接着剤はみ出しあり
CPF	接着剤はみ出しあり，CFRP(防食塗装)
CPN	接着剤はみ出しなし，腐食部(防食塗装)

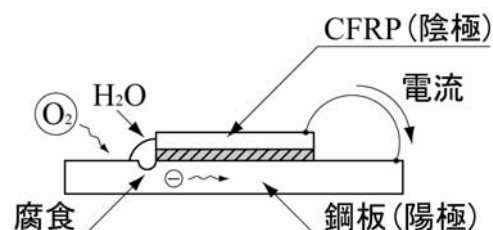


図7 ガルバニック腐食のメカニズム

大荷重、破壊伸び等の性状に変化はなく、十分な耐久性を有する等のが分かる。

4. ガルバニック腐食試験

鋼の腐食は、水分・酸素の雰囲気下で鉄がイオン化して酸化される電気化学反応である。腐食のメカニズム概要を図7に示す。導電性のある異種金属すなわち、炭素繊維プレートと鋼板とが接触すると、イオン化傾向が異なるため、炭素繊維プレートは陰極（カソード）、鋼板は陽極（アノード）となって電池が形成される。電流が流れるとアノードとなる鋼板の腐食速度は加速される。

本節では、鋼と炭素繊維プレートとのガルバニック腐食の基本特性を示すために行なった試験結果を示す。

4.1 試験体

試験体の種類・形状を図8に、試験体名称を整理して表4に示す。

試験体は、鋼板（PL-250×150×6mm）の上面に、高強度型炭素繊維プレート（TL-520，150×50×2mm）を接着したCNN試験体，CNN試験体に加えて炭素繊維プレート（CFRP）の周辺に接着剤を5mm程度はみ出させ、端部の保護対策を施したCAN試験体，CAN試験体に加えて、炭素繊維プレートの表面全体を防食塗料で保護したCPF試験体，及び，CNN試験体に加えて、炭素繊維プレート周辺の鋼板15mm幅を防食塗料で保護したCPN試験体の4種類とした。各種類についてそれぞれ4体ずつ、計16体の試験体を製作した。各試験体の半数は、導線を炭素繊維プレート中央と鋼板側部に取付けて短絡状態試験を、残りは、電氣的導通を施さない絶縁状態試験を行う。導線と炭素繊維、鋼板との接合には、塩水に強い銀粉を混入したアクリル系導電性接着剤を用いた。

炭素繊維プレートと鋼板の接着は、接着面を紙ヤスリ（＃100）で目粗しした後、脱脂し、常温二液硬化型エポキシ樹脂接着剤で接着し、室温20℃以上で7日間養生した。

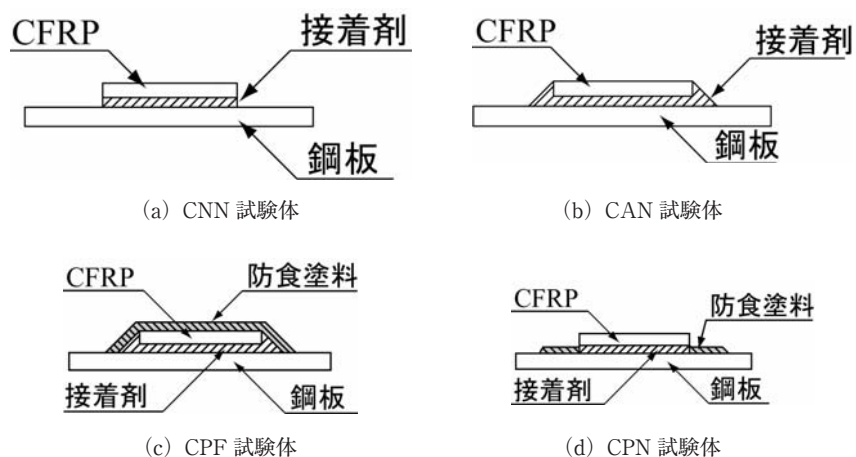


図8 試験体の種類

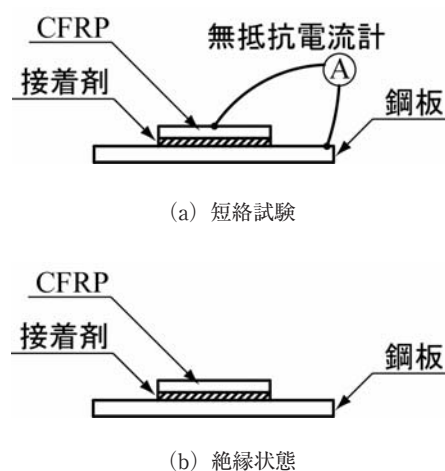


図9 短絡、絶縁の方法

尚、この接着面では、炭素繊維プレートと鋼板とは絶縁状態にあることを全試験体について確認している。防食塗装は、下塗り、上塗りの2段階を施し、下塗りについては、エポキシ樹脂系塗料を、上塗りについては、ポリウレタン樹脂系塗料を用いた。また、試験体の裏面は、防食塗装を施した。

4.2 試験概要

○試験方法

各種類の試験体について、炭素繊維プレートと鋼板とを

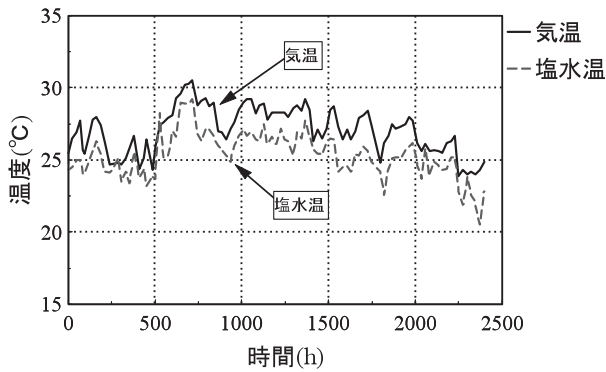


図 10 温度—時間関係 (100 日間)

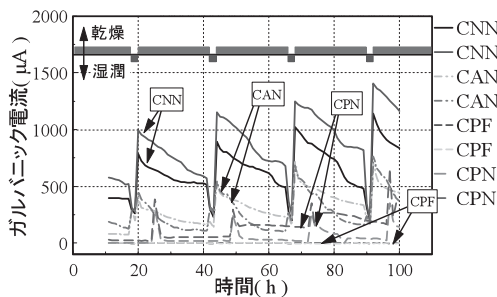


図 11 ガルバニック電流—時間関係 (4 日間)

無抵抗電流計を介して短絡させた状態及び絶縁させた状態 (図 9 参照) で、3 %濃度の食塩水に2時間浸漬させた後22時間空气中に放置することを1サイクルとする乾湿繰り返し試験を100日 (100 サイクル) 行った。

また腐食試験終了後、短絡状態、絶縁状態での腐食状況の差異及び絶縁状態試験体の導通の有無を電位差計で確認する (導通状態であれば電位差は0Vとなる) とともに、炭素繊維プレートを除去して、接着面の状況を検査した。

○計測方法

塩水乾湿繰り返し試験では、短絡状態の試験体について、ゼロ抵抗電流計により、ガルバニック電流を、また、気温、塩水温を熱電対で計測した。

計測したガルバニック電流から、ガルバニック腐食電流密度を次式により算定した⁸⁾。

$$I_{corr} = \frac{I}{S} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

- I : ガルバニック電流 (μA)
- I_{corr} : ガルバニック腐食電流密度 ($\mu A/cm^2$)
- S : 鋼板の表面積 (cm^2)

鋼板の表面積： S は、試験体の表面の炭素繊維プレートの接着位置と裏面を除いた面積とする。また、ガルバニック腐食電流密度から、腐食減量を次式により算定した。

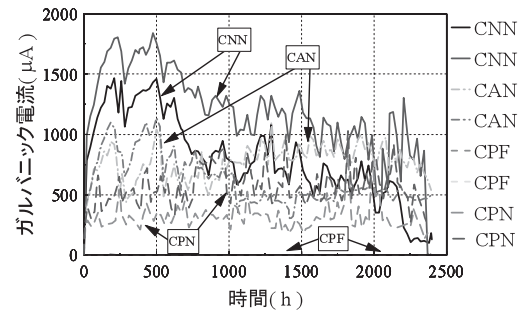


図 12 ガルバニック電流—時間関係 (100 日間)

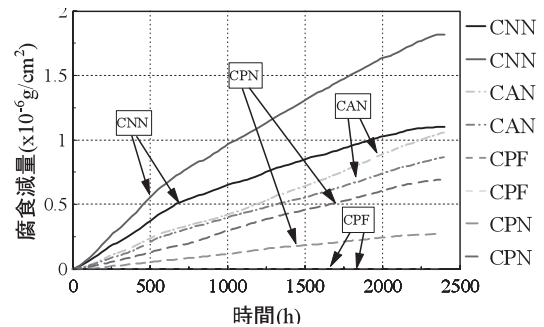


図 13 腐食減量—時間関係 (100 日間)

$$G = \frac{M}{2 \cdot F_a} \int I_{corr} dt \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、

- G : 腐食減量 ($\times 10^{-6} g/cm^2$)
- M : 鉄1モルの質量 ($55.8 g/mol$)
- F_a : ファラデー数 ($96500 C/g\text{-eq}$)

4.3 試験結果とその考察

試験結果を図 10～13、表 5、6 及び写真 1 に示す。図 10 には、日最高気温及び日最高塩水温と時間関係を、図 11 には、試験の初期段階の4日間におけるガルバニック電流量と時間の関係を、図 12 には全100日間のガルバニック電流と時間の関係の包絡線を、図 13 には、(1)、(2) 式から求めた腐食減量と時間の関係を、表 5 には、絶縁状態試験における腐食試験後の、炭素繊維プレートと鋼板の電気抵抗と電位差を、表 6 には、絶縁状態試験体における腐食試験後の炭素繊維プレートと鋼板の導通の有無と、炭素繊維プレート裏面の腐食状況を、写真 1 には、各試験の腐食状況を示す。

得られた知見は以下のように要約できる。

○ガルバニック電流・腐食減量特性について

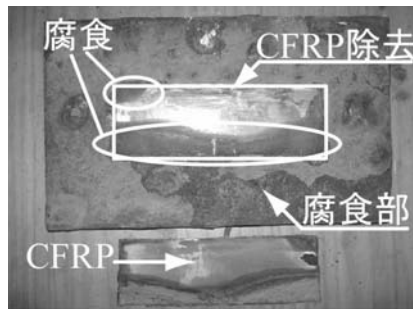
炭素繊維プレートと鋼板が短絡した条件では、図 11～13 に示すように、CPF 試験体を除き、初期段階からガルバニック電流が発生することが認められた。一方、その影響は CNN, CAN, CPN 試験体の順に、小さくなった。また、

表5 絶縁状態試験の電気抵抗と電位差

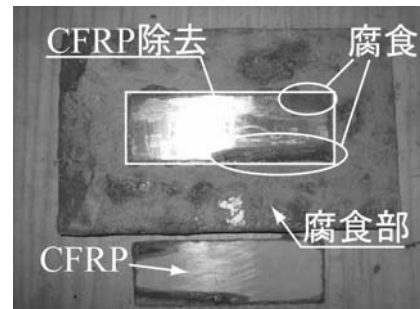
試験体名称	電気抵抗(MΩ) (乾燥状態)	電位差(V) (湿潤状態)
CNN	2000以上	0.28
CAN	2000以上	0.39
CPF	2000以上	0.29
CPN	2000以上	0.27

表6 100日後の絶縁状態試験体の状況

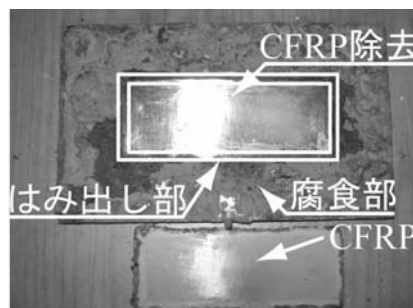
試験体名称	導通の有無	CFRP接着面の状況
CNN	絶縁	腐食あり
CAN	絶縁	接着部の腐食なし(はみ出し部の腐食)
CPF	絶縁	接着部の腐食なし(はみ出し部の腐食)
CPN	絶縁	接着部の腐食なし



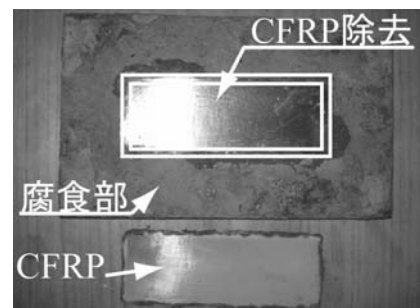
(a) 短絡・CNN 試験体



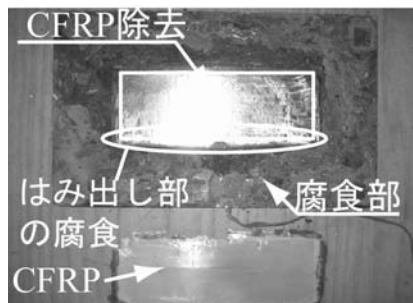
(b) 絶縁・CNN 試験体



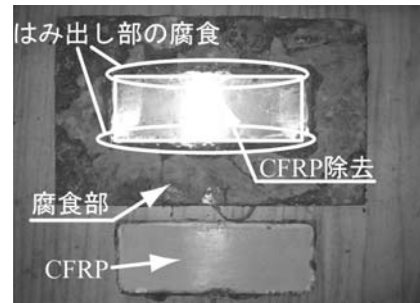
(c) 短絡・CAN 試験体



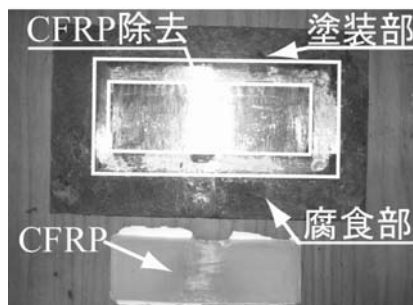
(d) 絶縁・CAN 試験体



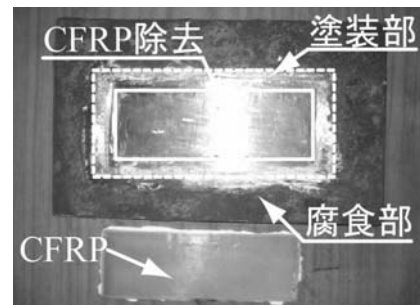
(e) 短絡・CPF 試験体



(f) 絶縁・CPF 試験体



(g) 短絡・CPN 試験体



(h) 絶縁・CPN 試験体

写真1 2400時間(100日間)経過後の各試験体の接着面と腐食状況

500時間を過ぎた時点からCNN試験体の腐食減量の増加量は減少傾向を示した。

○ガルバニック腐食特性について

写真1より、いずれの試験体においても絶縁状態と短絡状態との錆の形状には、差異はなく、孔食は見られなかつ

た。これは、塩水を用いての湿乾繰り返しという過酷な腐食条件であったことに加え、裸鋼板部の面積が大きかったことが主原因と考えられる。CPN 試験体では、ガルバニック電流が生じていないことから、塗装で炭素繊維プレート进行全面被覆すれば、ガルバニック腐食は防ぐことができることが分かる。

○接着面下の腐食状況について

表 5, 6 に示すように、腐食試験後の絶縁状態の各試験体は、0.3V 程度の電位差が計測された。このことから、試験後も絶縁状態が保たれていた。また、表 6 から判るように、CNN 試験体では接着面下の鋼板に腐食が認められたのに対し、CAN, CPN, CPF 試験体では、はみ出し部の端部に僅かな腐食が認められるのみで、炭素繊維プレート直下では、腐食は生じていなかった。

使用した接着剤は、絶縁性と水密性を有しているものの、長期間の湿潤状態では、境目から塩水と空気が浸入し、腐食が生じる。炭素繊維プレート及び炭素繊維プレート周辺 10mm 程度に塗装を施せば、炭素繊維プレート直下への腐食は抑制できると考えられる。

5. ま と め

炭素繊維プレートと鋼材の接着剤による接着補強工法の問題点として考えられる長期間熱履歴を受けた場合の複合材の接着耐久性を熱履歴耐力試験により、また腐食の問題を過酷な環境下での乾湿繰り返しにおけるガルバニック試験を行なった。

得られた知見を以下のように要約できる。

○熱履歴耐力試験より

- 1) 100 回の熱履歴に対して、接着剤の耐久性は保たれる。
- 2) 弾性部に保持される定着部が両端に 150mm 程度あれば、高温下 (60℃) においても強度は 45% 上昇できる。
- 3) 20 ~ 60℃ の熱履歴を 10 回程度受けても最大荷重、破壊伸び等の性状に変化はなく、接着剤は十分な耐久性を示す。

○ガルバニック腐食試験より

- 4) 炭素繊維プレートと鋼板が短絡した場合には、CPF 試験体を除き、初期段階からガルバニック電流が発生した。
- 5) CPF 試験体にガルバニック腐食の影響が見られなかったことから、塗装等で炭素繊維プレートを全面被覆す

れば、ガルバニック腐食は防止できる。

- 6) 絶縁試験体には試験終了後にも電位差が計測され、炭素繊維プレートと鋼板とは、絶縁された状態を保っていた。
- 7) 炭素繊維プレート周辺に 10mm 程度の塗装を施せばプレート直下への腐食の進行を防ぐことができると考えられる。
- 8) ガルバニック腐食の影響は基本的に問題ないものの、安全性を考慮した場合は塗装との併用が好ましい。

以上の結果より、この炭素繊維プレートによる鋼構造物接着補強工法は、長期的にみても接着耐久性に問題ないと考えられる。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、2005 年度玉井研究室卒業生の協力を得た。また、本試験を行なうにあたり、東レ(株) 鈴川研二、中林伊織諸氏には、多大な協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 玉井宏章, 高松隆夫, 原 伸幸, 灰谷徳治, 服部明生: 炭素繊維プレートによる鋼構造建物小ばりの曲げ補強について, 鋼構造年次論文報告集, 第 13 巻, pp. 523-530, 2005. 11
- 2) 玉井宏章, 高松隆夫, 櫻庭 誠, 灰谷徳治, 服部明生: 炭素繊維プレートによる山形鋼プレース材の圧縮補強について, 鋼構造年次論文報告集, 第 13 巻, pp. 553-560, 2005. 11
- 3) 玉井宏章, 高松隆夫, 服部明生, 灰谷徳治, 櫻庭 誠: 炭素繊維プレートによる化学プラント架構小ばり補剛の施工例, 鋼構造年次論文報告集, 第 13 巻, pp. 545-552, 2005. 11.
- 4) 友野理平: 腐食・防食用語辞典, オーム社, 1975. 7.
- 5) 藤井哲雄: 初歩から学ぶ防錆の科学, 工業調査会, 2001. 3.
- 6) 松島 巖: 腐食防食の実務知識, オーム社, 2002. 2.
- 7) 社団法人 日本コンクリート工学協会: コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに基準(案), 1987.
- 8) 太星鎬, 柳東佑, 王政宏, 兼松学, 野口貴文, 宇城工: Cr 鋼防食鉄筋による RC 造建築物の耐久性向上技術に関する基礎的研究(その 4), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp. 553, 2003. 9.