

腐食損傷に対する CFRP 及び鋼板接着の力学特性

広島大学大学院 学生会員 ○金山 惇志
 コニシ株式会社 正会員 堀井 久一

広島大学大学院 フェロー会員 藤井 堅
 新日鉄住金マテリアルズ(株) 正会員 秀熊 佑哉

1. 背景・目的

施工の容易な接着材を用いた補強方法として、CFRP 接着補強や当て板接着補強(以下; CFRP 接着, 鋼板接着)が盛んに研究され、性能回復効果が確認されている。CFRP 接着工法は、施工が容易で、鋼に比べて重量が軽く、死荷重増加を抑えられる。しかし、CFRP と鋼板の伸び剛性が異なるので、鋼材降伏前に CFRP の剥離が生じるケースもある。一方、鋼板接着工法は、鋼板特有の降伏後の優れた伸び特性、損傷に対する母材とのなじみなどの優位性を持つ。

CFRP 接着は、腐食減肉による剛性低下を健全状態まで回復するように、CFRP の枚数を設定する。一方、鋼板接着では、減肉量断面積を基に当て板の板厚を決定することが多い。しかし、設計基準の異なる二つの補強工法を比較し、その特徴や利欠点についてはあまり検討されていない。

本研究では、腐食した鋼構造物の適切な維持管理手法の確立を目指し、以下の項目について実験的に明らかにする。
 (1)設計基準の違いが使用限界および終局限界に及ぼす影響
 (2)二つの補強工法の破壊挙動の違い
 また本研究では、二つの補強方法の違いを定量的に把握するために、筆者らが開発した、人工的に同じ腐食表面を複数の鋼板に作成する技術¹⁾を用いた。

2. 実験概要

供試体の概要を Fig.1 に示す。本補強法は主桁下フランジに適用することを想定し、腐食形態は母材の両面に腐食を施した。試験に用いた腐食鋼板(母材)は、長さ 1100mm、幅 100mm、板厚 12mm の鋼板(鋼種 SS400)で、母材の中央部には、筆者らが考案した腐食表面作成モデルを用いて腐食を模擬した凹凸を設けた。採用した腐食表面を Fig.2 に示す。

CFRP シートは引張強度 1900MPa、引張弾性率 640GPa の高弾性炭素繊維シートを使用した。鋼部材の最大欠損断面位置の伸び剛性が元板厚のそれと同じになるように、CFRP の必要断面積を算定し、積層数を片面 4 層の両面 8 層とした²⁾。また、接着端部での応力集中を緩和するために、主応力方向に CFRP シートを 1 層ごとに 25mm ずらして接着した。また、今回の実験では、CFRP と鋼板接着の力学特徴を把握するために、剥離防止材の高伸度弾性パテ材は塗布し

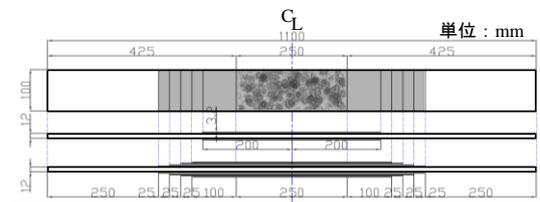


Fig.1 供試体概要

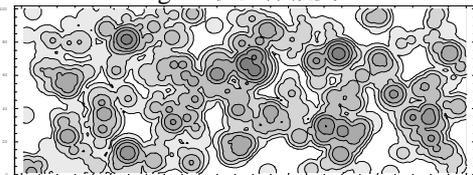


Fig.2 腐食表面再現モデル

Table 1 材料特性

鋼材	降伏応力(MPa)	引張強度(MPa)	ヤング率(GPa)	
SS400	256.8	400.1	209.2	
圧縮せん断強度(MPa)				
エポキシ樹脂	CFRP			
	エポキシプライマー	不陸修正材	含浸樹脂	
	12.96	16.49	13.62	
				鋼板接着
				28.17

ていない。よって、鋼材と CFRP が完全合成断面で挙動すると考える。補強に用いた鋼板当て板は、長さ 400mm、幅 100mm、板厚 3.2mm の鋼板(鋼種 SS400)である。板厚及び当て板の長さは、以下の考えに基づき設計した。

板厚は、最少断面積の断面欠損分を 2 枚の当て板の断面積で補う考えで設計し、当て板の板厚をそれぞれ 3.2mm とした。当て板の長さは、当て板が降伏する以前に樹脂材がせん断破壊を起こさないように接着長さを決定する。十分に応力伝達が行える長さとして、当て板長さを 400mm と決定した。

ここで、二つの設計の大きな違いは、CFRP は、鋼材の弾性係数で除した CFRP の弾性係数から得られる鋼換算断面積より、積層数を決定する。これに対して、鋼板接着では、腐食減肉断面積量を当て板の断面積で補うことにより、引張荷重を向上させる点にある。

載荷試験に先立って母材及び樹脂材の材料特性試験を行った。材料特性の結果を Table 1 に示す。

載荷は、試験速度を 0.5mm/min、変位が 20mm を超えてからは 1.0mm/min の変位制御による静的引張試験で行った。なお、本試験で言う伸びとは、局所的な伸びではなく、全体の伸び(つかみ部間の伸び)を言う。つかみ部間の距離は全供試体で 900mm である。

キーワード CFRP 接着, 鋼板接着, 樹脂材, 腐食

連絡先 〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1 広島大学大学院工学研究科社会基盤環境工学専攻 TEL 082-424-7792

3. 実験結果

Table 2に各供試体の試験結果を示す。表中、降伏応力とは、得られた応力-ひずみ曲線の勾配が変化してその後の上昇勾配が小さくなる応力値、また、終局応力は、試験における最大応力である。降伏までは、CFRP及び鋼板接着で同様の補修効果を得られた。

供試体	降伏応力	終局応力
	MPa	
無補強	215.5	310.3
CFRP	287.2	309.9
鋼板接着	282.7	317.4

Fig.3に応力-ひずみ曲線を示す。ここで言う応力とは載荷荷重を母材の元断面積で除した値で、ひずみとはつかみ部間隔長の変化を初期の長さで除して無次元化したものである。図から、降伏をむかえるまでは、CFRP接着、鋼板接着ともに同じ挙動を呈していることがわかる。これは両補強法ともに十分な補強効果があるために、補強部に先行して母材健全部が降伏していることを示す。その後、剥離が発生して荷重が大きく低下する。剥離が母材の最小断面積位置まで達した後、無補強供試体と同じ挙動となる。剥離発生時のひずみは、CFRP接着した供試体の方が鋼板接着より小さい。これはCFRPと鋼板の伸び剛性の違いに起因する。

以上をまとめると、設計基準が異なる二つの工法に対し、降伏までは両工法で同等の性能回復効果が得られる。降伏後の剥離時のひずみは、鋼板接着工法が幾分高めである。

CFRP(図左)及び鋼板接着工法(図右)の破壊性状をFig.4に示す。最初に、両工法ともに補強部端部で剥離が発生する。その後、剥離は試験体の中心に向かって進展する。接着部の平滑部と腐食減肉部に着目すると、徐々に剥離した平滑部では、母材側に、CFRP繊維及び樹脂材が付着していることがわかる。これは、平滑部では接着層間での凝集破壊による破壊を示したことを意味する。一方、腐食減肉部では、CFRP及び当て板鋼板側に樹脂材が付着し、母材側にはあまり付着していない。腐食減肉部では、母材界面での界面破壊を示したと言える。

Fig.5に各供試体の母材のひずみ分布と、完全合成断面を仮定した時の理論値を示す。図に示すひずみは、全て弾性域での値である。図から、腐食部を除いた点でのひずみは、理論値とよく一致していることがわかる。ここで、鋼板接着の270MPaでの当て板端部では、理論値よりも大きいひずみを示していることに気付く。これは、剥離発生により、当て板が負担していた応力が母材へ再分配されたと考えられる。以上、異なる設計法の両工法に対して、ともに十分な性能回復効果があることを、ひずみの観点からも明らかにした。

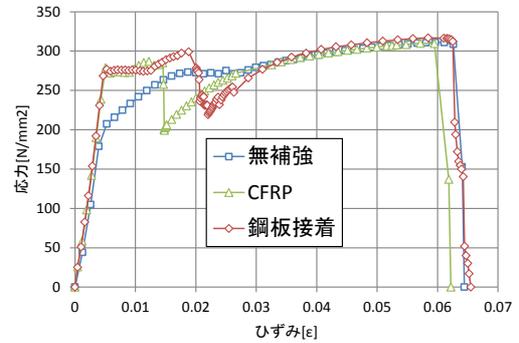


Fig.3 応力-ひずみ曲線

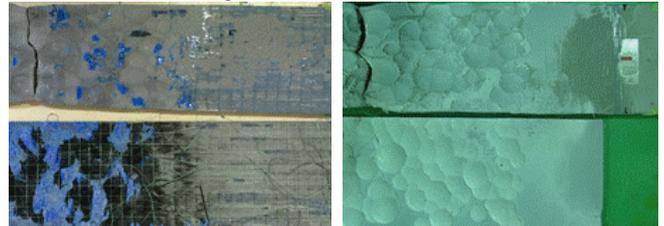


Fig.4 破壊性状(左: CFRP 接着, 右: 鋼板接着)

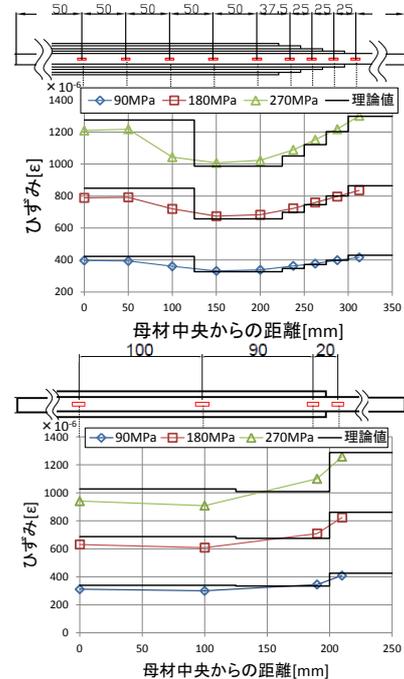


Fig.5 ひずみ分布(上: CFRP 接着, 下: 鋼板接着)

まとめ

- ①設計基準が異なる二つの工法に対し、降伏までは両工法で同等の性能回復効果が得られることを、剛性及びひずみの観点から明らかにした。降伏後の剥離時のひずみは、鋼板接着工法が幾分高めである。
- ②破壊挙動は両工法で、接着部の平滑部では接着層間での凝集破壊、腐食減肉部では母材界面での界面破壊を示す。

参考文献

- 1) 藤井堅, 海田辰将, 平井勝志, 奥村誠: 腐食鋼板表面形状モデル作成における空間的自己相関モデルの適用性, 構造工学論文集, Vol.48A, pp.1031-1038, 2002.
- 2) 高速道路総合技術研究所: 炭素繊維シートによる鋼構造物の補修・補強工法設計・施工マニュアル