# 著しい腐食損傷を生じた鋼 I 桁に対する F R P を用いた補修工法の検討

三宅 央真1·秀熊 佑哉2·奥山 雄介3

 <sup>1</sup>正会員 日鉄ケミカル&マテリアル株式会社 コンポジット事業部 社会資本材料部 (〒103-0027 東京都梅雨王久日本橋一丁目 13 番 1 号 日鉄日本橋ビル) E-mail: miyake.3gf.hiromasa@nscm.nipponsteel.com
<sup>2</sup>正会員 日鉄ケミカル&マテリアル株式会社 コンポジット事業部 社会資本材料部 (〒103-0027 東京都梅雨王久日本橋一丁目 13 番 1 号 日鉄日本橋ビル) E-mail: hidekuma.3ae.yuya@nscm.nipponsteel.com
<sup>3</sup>正会員 長野工業高等専門学校 環境都市工学科 准教授 (〒381-8550 長野県長野市徳間 716 番 長野工業高等専門学校) E-mail: y\_okuyama@nagano-nct.ac.jp

現在,老朽化した鋼製歩道橋の効率的で合理的な維持管理をしていくことが求められている.FRP 接着 工法は当て板工法に比べて軽量で母材に損傷を与えず,施工後には空気や水を遮蔽し鋼材面が腐食しない メリットもあるため,常に風雨にさらされ続ける歩道橋には適していると考えられる. 本研究では,歩道橋などで用いられる鋼製 I 桁に著しい腐食損傷が生じた場合の FRP 接着工法による補 修効果について検討を行った.著しい腐食損傷として上フランジが腐食により全損した I 形鋼を想定し, 腐食を模擬するために上フランジを切り落とし,そこに炭素繊維シートおよびガラス繊維で成型されたア ングル材を貼付け,曲げ試験により補修効果を確認した.

Key Words : steel, corrosion, repair, Carbon Fiber Reinforced Polymer, bending test

## 1. はじめに

## (1) 研究の背景

歩道橋の現況として、老朽化が進んでおり、財政状況 に制約がある中で効率的で合理的な維持管理をしていく ことが求められている.鋼部材の老朽化の原因は、腐食 損傷が大半を占める.これらの劣化に対する補修工法と しては、部材交換法、当て板工法が適用されるが、それ らは工期が長く、また、クレーンなどの重機や溶接など の大掛かりな設備が必要となってしまうため、効率的で はない.

そのような中で,近年,炭素繊維シート接着工法の適 応性が数多く研究されている.炭素繊維シートは軽量で あるため死荷重増加が少なく,当て板工法に比べ母材に 与えるダメージが少ないことや,施工後に空気や水を遮 蔽し鋼材面が腐食しない防食というメリットがあり,常 に雨風にさらされ続ける歩道橋には適した工法であると 考えられる.また、炭素繊維束をすだれ状に含浸硬化したストランドシートを用いることで、施工現場での含浸 作業が不要になり、より簡便に炭素繊維シート接着が行 える.

#### (2) 研究の目的

本研究では、歩道橋などで用いられる鋼 I 桁に著しい 腐食損傷が生じた場合の炭素繊維シート接着工法の補修 効果について検討を行う.著しい腐食損傷を模擬するた め、上フランジが腐食により全損した鋼 I 桁を想定し、I 形鋼の上フランジを切断加工した.ここにガラス繊維で 成型されたアングル材(以下、GFRP アングルと記す)を貼 り付け上フランジとし、上下のフランジに炭素繊維スト ランドシートを貼り付けて補修した供試体に対して4 点 曲げ試験を実施し、補修効果の検討を行った.

<b>表</b> -1 材料特性			
	I形鋼	GFRP アングル	
寸法 [mm]	I-200 $\times$ 100 $\times$ 7 $\times$	L-50×50×4	
	10		
材質	SS400	GFRP	
弹性係数 [GPa]	200	18.1	
降伏点 [MPa]	325		

表-2 炭素繊維シートストランドシートの材料特性

種類	高弾性型炭素繊維ストランドシート
	FSS-HM900
設計厚 [mm]	0.429
弹性係数 [GPa]	703
引張強度 [MPa]	1,900

## **表-3** 試験ケース

試験ケース	Case①	Case(2)	Case3
試験体名称	健全モデル	FRP 接着補修 (3 層)	FRP 接着補修 (7 層)
断面2次モーメント	22,130,193 mm <sup>4</sup>	18,027,269 mm <sup>4</sup>	26,892,791 mm <sup>4</sup>
偏心量	-	16.9 mm	-6.8 mm
補修方法	-	GFRP アングル接着後、炭素繊維ストランドシート積層	
高伸度弾性パテ	-	なし	あり





(b) 欠損モデル(Case<sup>2</sup>), ③)図-1 供試体寸法

#### 2. 実験概要

使用した材料の寸法及び物性を表-1,表-2に供試体図 を図-1,図-2に示す.試験はスパン3,400mm,等曲げ区 間500mmの4点曲げとし,荷重が低下するまで変位制 御での単調載荷とした.載荷は,載荷容量2,000kNの圧 縮試験機により実施する.試験時には鉛直変位および等 曲げ区間中央部のひずみの計測を行った.

試験ケースを表-3 に基づいて説明する. Case①は腐食 損傷のない健全なケース, Case②, ③は上フランジが全 損した腐食モデルである. Case②, Case③では, 先述し た通り, GFRP アングルで上フランジを成形し, 炭素繊 維ストランドシートで補修したケースである. 炭素繊維 シートの積層数は, Case②では上下フランジともに3 層 積層し, Case③では上フランジに7 層, 下フランジに3





層積層した.ここで、炭素繊維ストランドシートの積層 数の決定方法について説明する.上フランジ切断したこ とによって、I形鋼の断面2次モーメントが健全時の29% まで低減する.これを炭素繊維ストランドシートにより 回復させることで補修を行う.Case②では健全時の81%, Case③では健全時の122%まで回復するように積層数を 設定した.また, Case③については GFRP アングルと鋼 材及び炭素繊維ストランドシートとの付着性能を向上さ せるために,高伸度弾性パテ<sup>2)~5)</sup>を GFRP アングルの表 面に塗布している.

## 3. 実験結果

#### (1) 荷重変位関係

図-3に、各供試体の荷重と供試体中央の鉛直変位の 関係を示す。各モデルの計算値は次式により計算した。



試験ケース	最大荷重	Case ①に対する比率
Case(1)	114.64 kN	1.000
Case <sup>(2)</sup>	55.70 kN	0.486
Case <sup>3</sup>	74.23 kN	0.648

$$\delta_{max} = \frac{Pl^3}{24El} \left( \frac{3a}{l} - \frac{4a^3}{l^3} \right) \tag{1}$$

ここで, *l*=3,400 mm, *a*=1,450 mm, *E*=200 GPa とし, I は炭素繊維ストランドシートと鋼材の完全合成断面と した場合の断面 2 次モーメントである.また,**表-4** には 試験により得られた最大荷重と Case①に対する比率を 示す.

図-3より、補修を行うことで上フランジが欠損した 状態よりも曲げ剛性および耐力が回復しており補修効果 が確認できる.しかしながら、計算値と比較すると、補 修後曲げ剛性および耐力ともに小さくなっている.これ はGFRP アングルと炭素繊維シートとの剥離及び炭素 繊維シートの層内破壊により、炭素繊維シートの補修効 果が十分に得られなかったためだと考えられる.

また、Case①では降伏荷重に到達した後も、座屈等の変化は見られなかった.これに対して、Case②では等曲げ区間内で炭素繊維ストランドシートとGFRPアングルに

剥離が生じ、Case③ではせん断区間で炭素繊維ストラン ドシートの層内破壊が生じた.終局時の状態を図-4に示 す. Case②と Case③で終局状態が異なった原因として、 高伸度弾性パテの影響が考えられる. Case②では, GFRP アングルの成型に使用しているビニルエステル樹脂と炭 素繊維ストランドシートの含浸接着に使用しているエポ キシ樹脂との付着力が低く、等曲げ区間にて剛性の低い GFRP アングルに圧縮応力が集中したことにより剥離が 生じ、剥離後は炭素繊維ストランドシートに応力集中し 炭素繊維ストランドシートの圧縮破壊が発生したと考え られる.一方、Case③では高伸度弾性パテにより GFRP アングルと炭素繊維ストランドシートとの付着力が向上 したことで、等曲げ区間での GFRP アングルと炭素繊維 ストランドシートとの剥離が生じず、せん断区間での圧 縮力とせん断力の複合で炭素繊維ストランドシートの層 内で破壊が生じたものと考えられる.



(a) Case<sup>2</sup>



(b) Case③ 図-4 終局状態

## (2) 曲げ耐力

歩道橋床版の活荷重の設計値として、5.0 kN/m<sup>2</sup>が採用 されている<sup>の</sup>. このことから、本供試体の鋼製横吊桁が 3 メートル間隔であるとした場合、等分布荷重として活 荷重が 5.0 kN/m<sup>2</sup> であれば桁の最大曲げモーメントは式

$$M_{max} = \frac{wl^2}{8}$$
(2)

本試験において,最大曲げモーメントが21.7 kN・mとなる荷重は式(3)より30 kNとなる.

$$M_{max} = Pa \tag{3}$$

各試験ケースの降伏荷重と上フランジが全損した場合 の降伏荷重の計算値及び設計耐荷重に対する比率を表-5 に示す.上フランジが全損した場合は30kNに満たずに 降伏すると予想されるのに対し、本試験で行った補修を

試験ケース	降伏荷重	設計耐力に 対する比率
Case①	101 kN	3.37
Case <sup>(2)</sup>	45 kN	1.50
Case(3)	65 kN	2.17
上フランジ全損	23 kN	0.77

表-5 設計耐力に対する比率

行うことで, Case②では設計値の 1.5 倍, Case ③では設計値の 2.17 倍の耐力となった. Case①の降伏荷重には満たないものの, Case②, Case③の補修を行うことで活荷重の設計値の 1.5 倍以上の安全率を得ることが出来る.



図-5 ひずみ分布 (30kN 載荷時)

表-6 断面2次モーメントの比較

試験ケース	断面 2 次モーメント I <sub>cal</sub> (計算値)	断面 2 次モーメント I (実測値)	I / Ical
Case①	22,130,193 mm <sup>4</sup>	19,669,128 mm <sup>4</sup>	89 %
Case(2)	18,027,269 mm <sup>4</sup>	14,224,237 mm <sup>4</sup>	79 %
Case3	26,892,791 mm <sup>4</sup>	23,474,219 mm <sup>4</sup>	87 %

## (3) ひずみ分布

弾性域である 30 kN 載荷時における載荷点中央のひず み分布を図-5 に示す. Case②に比べて Case③の方がひず み分布が健全時に近づいており、上フランジの積層数を 増やすことで中立軸が回復することが確認できる.

また、Case②と Case③の中立軸の位置が Case①よりも 低い位置にあることから、上フランジ近傍の応力が増加 し、層内の圧縮破壊が発生したと考察される.

## (4) 活荷重載荷時の断面二次モーメントの算出

3.(2)にて求めた歩道橋の設計活荷重 5.0 kN/m<sup>2</sup> が載荷 された場合,すなわち 30 kN 載荷時における断面二次モ ーメントの値を荷重一鉛直変位の実測値及び式(4)より 求め,表-3 の断面二次モーメントの計算値と比較し,表 -6 に示す.

$$y = \frac{Pa}{6EI} \left(\frac{3}{4}l^2 - a^2\right) \tag{4}$$

表-6より、いずれのケースも断面二次モーメントの実

測値が計算値よりも小さい傾向にあった.これは,はり がせん断変形を起こしたことにより,見かけの変位が大 きくなったためだと考察できる.また,Case②に比べ Case③のI/Icalが Case①と同等の値になっている.これ は炭素繊維ストランドシートの積層数を増やすことで含 浸接着樹脂の塗布量も増え,炭素繊維ストランドシート の設計厚み以上の厚みが出たことで剛性が高くなったと 考えられる.

## 4. まとめ

本研究では、上フランジが全損した I 形鋼を炭素繊維 ストランドシート及び GFRP アングルにより補修するこ とで、曲げ剛性及び耐力が上がり歩行者による活荷重に も耐えうる補修効果が得られることを確認した.また、 設計活荷重までの初期剛性も健全と同等まで回復し、耐 力も設計値の2倍近くまで回復した.補修した鋼桁は、 中立軸の位置が健全時よりも低くなるため、上フランジ での応力が大きくなる.そのため、補修時のアングル材 に応力が集中し、座屈が生じる結果となった.また、高 伸度弾性パテを使用することにより、GFRP アングルと 炭素繊維ストランドシートとの付着力が向上し、等曲げ 区間でのGFRP アングルと炭素繊維ストランドシートと の剥離を抑制でき、炭素繊維ストランドシートの含浸接 着樹脂のせん断破壊強度よりも高い接着強度が得られる ことが分かった.

## 参考文献

- 秀熊佑哉,小林朗,宮下剛,奥山雄介,石川敏之: 断面欠損を有する鋼板の炭素繊維ストランドシー ト接着による補修方法,土木学会第68回年次学術 講演会,I-340, 2013
- 奥山雄介,宮下剛,若林大,小出宜央,小林朗, 秀熊佑哉,堀本歴,長井正嗣:腹板を CFRP 補 強した鋼桁のせん断座屈試験と強度評価法,土 木学会論文集 A1, Vol.68, No.3, pp.635-654, 2012.

- 3) 奥山雄介, 宮下剛, 若林大, 小出宜央, 小林朗, 秀熊佑哉, 堀本歴, 長井正嗣: 鋼橋桁端部腹板 の腐食に対する CFRP を用いた補修工法の実験 的研究, 土木学会構造工学論文集, Vol.58A, pp.710-720, 2012.
- 4) 奥山雄介,宮下剛,若林大,秀熊佑哉,小林朗, 小出宜央,堀本歴,長井正嗣:鋼橋桁端部腹板 の腐食に対する炭素繊維シートを用いた補修・ 補強法の最適設計方法に関する一考察,土木学 会構造工学論文集,Vol.60A, 2014.
- 若林大,宮下剛,奥山雄介,秀熊佑哉,小林 明,小出宜央,堀本歴,長井正嗣:高伸度弾性 パテ材を用いた炭素繊維シート接着による鋼桁 補修設計法の提案,土木学会論文集 F4, Vol. 71, No. 1, 44-63, 2015.
- 財団法人国土技術研究センター:木歩道橋設計 施工に関する技術資料, 1-5, 2003

(Received August 28, 2020)

## REPAIR METHOD USING FRP FOR CORRODED STEEL I-SECTION

## Hiromasa MIYAKE, Yuya HIDEKUMA and Yusuke OKUYAMA

At present, it is required to efficiently maintain and manage old steel footbridges. FRP is lighter than steel plates, and the FRP bonding method does not damage the base metal compared to the patch plate method. It has the advantage of shielding air and water and preventing the steel surface from corroding after construction. Therefore, it is considered suitable for pedestrian bridges that are constantly exposed to wind and rain.

In this study, we examined the repair effect of the FRP bonding method when a steel I girder used in the pedestrian bridge is significantly corroded. We assumed the I-shaped steel whose upper flange was totally damaged by corrosion as significant corrosion damage. The upper flange was cut off to simulate the corrosion, and the CFRP sheet and GFRP angle were attached to it. The repair effect was confirmed by bending test of the specimen.