

炭素繊維シートを用いた腐食による鋼部材断面欠損部の 補修効果に関する実験的研究

Experimental study on repair effect using carbon fiber sheets for damaged steel members due to corrosion

杉浦 江*, 大垣 賀津雄**, 稲葉 尚文***, 富田 芳男****, 長井 正嗣*****, 小林 朗*****
Hiroshi Sugiura, Kazuo Ohgaki, Naofumi Inaba, Yoshio Tomita, Masatsugu Nagai and Akira Kobayashi

* 工修, 川崎重工業株式会社, 技術研究所 (〒673-8666 兵庫県明石市川崎町 1-1)

** 工博, 川崎重工業株式会社, 営業推進本部 (〒105-6116 東京都港区浜松町 2-4-1)

*** 工修, 株式会社高速道路総合技術研究所, 道路研究部 (〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1)

**** 工修, 国際協力銀行, 開発セクター部 (〒100-8144 東京都千代田区大手町 1-4-1)

***** 工博, 長岡技術科学大学教授, 工学部環境・建設系 (〒940-2188 長岡市上富岡町 1603-1)

***** 工修, 日鉄コンポジット株式会社, 技術部 (〒103-0024 東京都中央区日本橋小舟町 3-8)

The deterioration of performance of steel structures comes from various reasons. One of main reasons of such deterioration is the corrosion of steel, and the development of a reasonable repair method is demanded. This paper presents the applicability of CFRP adhesion for the repair of corroded steel members. Steel beams with fictitious corrosion repaired by CFRP were tested under bending in order to assess the repair method of corroded steel. As a result, it was confirmed that the stress of corroded steel was improved by patching CFRP.

Key Words: corrosion, repair, carbon fiber reinforced plastic(CFRP), steel member

キーワード: 腐食, 補修, 炭素繊維シート, 鋼部材

1. はじめに

鋼構造物の損傷のうち多くを占める腐食は, 供用時間の経過とともに, その発生頻度が高くなる. 代表的な鋼構造物である橋梁においては, 機能向上対策以外の損傷が原因で架け替えとなるものの約半数は, 鋼材の腐食が原因となっている¹⁾. 近年の腐食損傷事例の増加につれて, 維持管理の重要性が広く認識されはじめ, 効率的な予防保全のためにも, 供用中の鋼構造物に対する効果的な補修工法が求められている.

このような中, 鋼構造物の補修材料として, 炭素繊維に樹脂を含浸させ硬化させた炭素繊維強化プラスチック (以下, CFRP と記す) が注目を浴びている. CFRP は, 高弾性・高強度といった特性を有しており, 樹脂で接着するため施工が簡易であることから, 補修材料としての有効性は高いと考えられる. すでに, コンクリート構造物の補強では CFRP の活用が盛んであるが, 鋼構造物においても, 炭素繊維プレートによる疲労亀裂の補修²⁾や, 炭素繊維シート巻き立てによる損傷鋼管の補修³⁾などの試みがなされている.

筆者らは, 鋼部材腐食損傷部の補修において, 鋼板を

ボルトや溶接で添接する従来工法の代替案として, CFRP を用いた工法を提案している⁴⁾. 本工法は, 炭素繊維シートに接着樹脂を含浸させながら積層し, 現場で CFRP を形成して一体化させることで, 設計時の初期性能を回復, もしくは現状維持を目的とするものである. 既往の研究⁵⁾⁶⁾において, CFRP が貼付けられた鋼材の力学的特性を実験的に調べた. その結果, 1) CFRP を接着した鋼材は, CFRP と鋼材で構成される合成部材としての計算値と一致し, 積層数 (炭素繊維シートの枚数) に応じた応力改善効果が得られること, 2) 引張応力および圧縮応力作用下ともに補修効果が期待できること等を明らかにしている. しかしながら, これらの知見は, 平滑材に CFRP を接着した条件下のものであり, 実際の腐食損傷した構造物を想定した補修効果の検証が必要である.

そこで本研究では, 鋼部材の腐食損傷部を対象として, CFRP による補修効果の検討を行った. 検討に際しては, まず, CFRP を接着した孔あき鋼板の引張試験を行い, 断面欠損部の補修効果を調べた. つぎに, 実構造物に対する適用性を検証するため, 鋼製梁のフランジ部に腐食損傷を模擬した断面欠損を有する試験体を製作し, 載荷

実験を行った。断面欠損の形状は3種類とし、それぞれの箇所をCFRPで補修して引張応力および圧縮応力作用下における応力改善効果を実験的に調べた。

2. 引張試験

2.1 実験方法

鋼板にCFRPを接着して引張荷重を負荷した。試験片形状とパラメータを図-1、表-1に示す。ここでは、鋼板の断面欠損量に対するCFRPの荷重分担の程度を確認するため、鋼材試験片の中央部に貫通孔を設けた。CFRP層数は片面当り3層で統一し、孔径はφ6mm、φ12mm、φ24mmの3ケースとして、同一条件に対して各3体を準備した。ひずみゲージは、鋼材とCFRPそれぞれの荷重分担を調べるため、試験片中央の鋼材側面(#1、#2)とCFRP表面(#3、#4)に貼付した。

使用材料の特性を表-2に示す。炭素繊維シートは、材料特性の違い(高強度型、中強度型、高弾性型)と繊維目付け量の違い(200~600g/m²)により数種類が製品化されているが、シート枚数を少なくして、現場での積層作業を軽減できる高弾性型を選定した⁷⁾。繊維目付け量は、樹脂の含浸しやすさを考慮して、コンクリート構造物の補強における使用実績から決定した。また、炭素繊維シートの浮きや緩みを防止するため、断面欠損部には不陸修正材を充填して平坦に仕上げている。CFRPの施工は以下の手順で行った。

- 1) 鋼材表面を#40のディスクサンダーにてケレンして錆、汚れを除去した後、有機溶剤を用いて表面の清掃を行う。
- 2) ローラー刷毛によりプライマー(エポキシ樹脂)を均一に塗布する。
- 3) プライマーの乾燥後、欠損部に不陸修正材を充填し平坦に仕上げる。
- 4) 含浸接着剤を塗布した後、炭素繊維シートを部材軸方向に貼付け、さらに含浸接着剤を上塗りして、炭素繊維シート内にエポキシ樹脂を含浸させる。これを必要層数分繰り返した後、常温環境下で養生する。

2.2 実験結果

実験より得られた鋼材ひずみ ε_s (#1、#2の平均値)、CFRPひずみ ε_{cf} (#3、#4の平均値)より、式(1)、(2)を用いて鋼材、CFRPの荷重分担率 ξ_s 、 ξ_{cf} を算出した。

$$\xi_s = \varepsilon_s \times E_s \times A_s / P \quad (1)$$

$$\xi_{cf} = n \times \varepsilon_{cf} \times E_s \times A_{cf} / P \quad (2)$$

ここで、 E_s : 鋼材のヤング係数(kN/mm²)、 n : 炭素繊維と鋼材のヤング係数比、 A_s : 鋼材の純断面積(mm²)、 A_{cf} : 炭素繊維シートの断面積(mm²)、 P : 引張荷重(kN)である。

引張試験の結果を図-2に示す。鋼材ひずみとCFRPひずみは、各3体の試験体の平均値である。ここでは、CFRPの剥離が生じていない荷重レベル(無損傷試験体が降伏する計算上の荷重 P_y の10~30%)での結果を示す。試験片の断面欠損量に応じて、CFRPの荷重分担が増えており、その分担率は設計値(鋼材とCFRPの鋼換算した断面積比より算出)と概ね一致する。この結果より、補修対象となる部位の断面欠損部にCFRPを接着することで、CFRPが相応の荷重を負担し、応力改善効果を期待できることが明らかとなった。

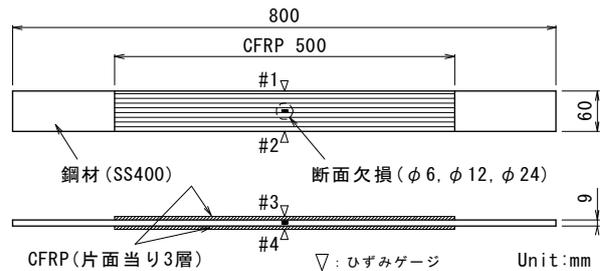


図-1 試験片形状

表-1 試験片パラメータ

試験片	CFRP		断面欠損	
	幅(mm)	積層数(片面当り)	孔径(mm)	欠損率(%)
H-6	60	3層	φ6	10
H-12			φ12	20
H-24			φ24	40

表-2 材料特性

(a) 鋼材(SS400)

降伏応力(N/mm ²)	286
ヤング率(kN/mm ²)	206

(b) 炭素繊維シート(一方向材)

繊維目付け(g/m ²)	312 (300以上) JIS K7071
引張強度(N/mm ²)	2497 (1900以上) JSCE-E541-2000
ヤング率(kN/mm ²)	653 (640±64) JSCE-E541-2000

(c) 不陸修正材(エポキシ)

圧縮強度(N/mm ²)	55 (35以上) JIS K7181
引張せん断強度(N/mm ²)	19 (10以上) JIS K6850
ヤング率(kN/mm ²)	2.3 (1.0以上) JIS K7181

(d) 含浸接着材(エポキシ)

圧縮強度(N/mm ²)	74 (70以上) JIS K7181
引張せん断強度(N/mm ²)	13 (10以上) JIS K6850
ヤング率(kN/mm ²)	2.0 (1.5以上) JIS K7181

※ () 内数値は、規格値を示す。

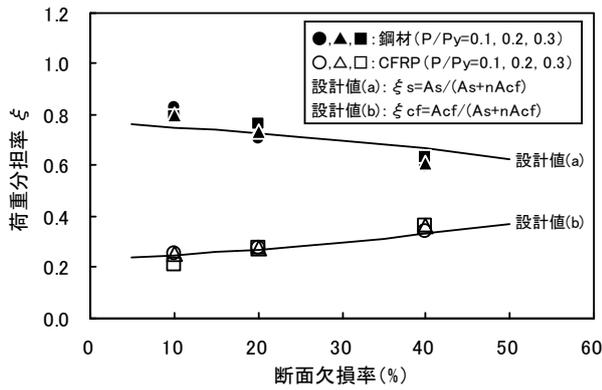


図-2 断面欠損と荷重分担の関係

3. 曲げ試験

3.1 実験方法

試験体は、H-300×300×10×15 の H 形鋼を使用し、図-3 に示すように支間 5500mm の鋼製梁に対して 4 点曲げ載荷試験を行い、荷重-ひずみ関係を測定した。試験体は 2 体準備し、等曲げを受ける区間の上フランジまたは下フランジそれぞれに、3 種類の断面欠損を設けた。断面欠損部の補修を行う前に弾性範囲内の載荷を行い、補修後のひずみ分布と比較することで、補修効果を検討するものとした。断面欠損部の補修方法は、引張試験と同様に、欠損箇所を不陸修正した後、それぞれに CFRP を接着した。使用した材料の特性を表-3 に示す。

3.2 断面欠損パラメータ

断面欠損量は、3.3 節にて述べる補修量と同等の断面積になるよう設定し、3 種類の形状とした (図-4)。パターン A は、腐食による孔食を想定し、φ38mm の貫通孔をフランジ端から 80mm の位置に設けた。パターン B は、腐食による一様な減肉を想定し、□115mm×100mm の面積をフランジ幅中央部に深さ 5mm で切削した。パターン C は、部材角部などに生じた CFRP の接着が困難な腐食損傷を想定し、パターン B と同サイズの断面欠損をフランジ端に設けた。

3.3 CFRP による補修方法

今回の実験では、炭素繊維シートの積層数は 5 層とし、CFRP の鋼換算断面積と同等になるよう欠損断面を決定している。なお、CFRP 全体の引張剛性に及ぼす樹脂の影響は 5% 程度であるため、CFRP の計算には炭素繊維シートのみを断面積を用いており、樹脂は見込んでいない⁸⁾。接着端部は、接着界面に生じるせん断応力を緩和するために、炭素繊維シートを 1 層ごとに 25mm ずつずらして接着を行った。各試験体の条件および補修後の試験体を表-4、図-5 に示す。

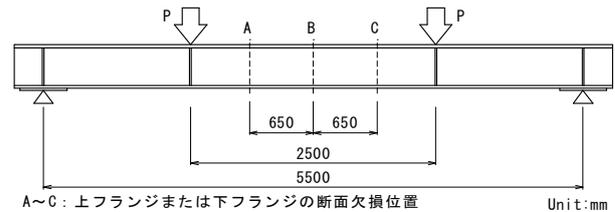


図-3 実験方法

表-3 材料特性

(a) H 形鋼 (SS400)

降伏応力 (N/mm ²)	276
ヤング率 (kN/mm ²)	204

(b) 炭素繊維シート (一方向材)

繊維目付け (g/m ²)	308 (300 以上) JIS K7071
引張強度 (N/mm ²)	2455 (1900 以上) JSCE-E541-2000
ヤング率 (kN/mm ²)	682 (640±64) JSCE-E541-2000

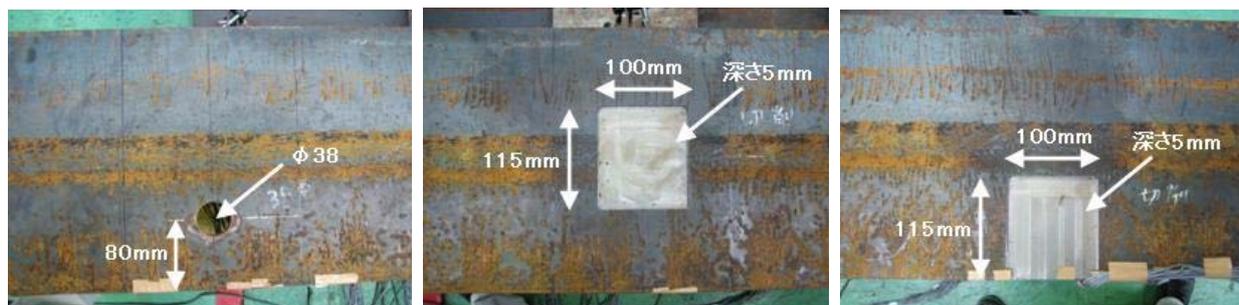
(c) 不陸修正材 (エポキシ)

圧縮強度 (N/mm ²)	54 (35 以上) JIS K7181
引張せん断強度 (N/mm ²)	13 (10 以上) JIS K6850
ヤング率 (kN/mm ²)	2.6 (1.0 以上) JIS K7181

(d) 含浸接着材 (エポキシ)

圧縮強度 (N/mm ²)	81 (70 以上) JIS K7181
引張せん断強度 (N/mm ²)	21 (10 以上) JIS K6850
ヤング率 (kN/mm ²)	2.1 (1.5 以上) JIS K7181

※ () 内数値は、規格値を示す。



(a) 欠損パターン A

(b) 欠損パターン B

(c) 欠損パターン C

図-4 断面欠損部の形状

表-4 試験体の条件

試験体 (補修対象)	断面欠損		鋼製梁	CFRP			
	形状	欠損断面積 $A_d(\text{mm}^2)$	断面2次モーメント $I_d(\text{mm}^4)$	幅 B(mm)	長さ*1 L(mm)	シート 層数	補修量**2 $A_{cfs}(\text{mm}^2)$
LF (下フランジ)	A: $\phi 38$ 貫通孔	570	1.90×10^8	250	300	5層	575
	B: $\square 115 \times 100$ 5mm 切削	575	1.89×10^8				
	C: $\square 115 \times 100$ 5mm 切削						
UF (上フランジ)	A: $\phi 38$ 貫通孔	570	1.90×10^8				
	B: $\square 115 \times 100$ 5mm 切削	575	1.89×10^8				
	C: $\square 115 \times 100$ 5mm 切削						
無損傷 (参考)	—	—	2.02×10^8	—	—	—	—

※1 最上層のシート長さを示す (接着端は各層 25mm ずらしているため、1層目~4層目は、 $L=500,450,400,350\text{mm}$ となる)

※2 炭素繊維シートの設計厚さ (0.143mm/層) およびヤング係数 (規格値: 640kN/mm^2) より求めた鋼換算断面積



図-5 CFRPにより補修した供試体

3.4 実験結果

(1) CFRP による鋼材の応力改善効果

実験で得られた試験体 LF, UF のひずみ分布を図-6, 図-7 に示す。ここでは、無損傷試験体が初期降伏する計算上の荷重 ($P_y=248\text{kN}$) に対して、載荷荷重 $P/P_y=0.2$ の時の結果を示している。ひずみの計測位置は、各欠損部の中心断面であり、それぞれ、補修の対象とした下フランジおよび上フランジに着目し、+側が引張ひずみ、-側が圧縮ひずみを示している。また、表-5には、鋼材ひずみの平均値を示す。これらの結果より、以下のことがわかる。

- 1) 補修前の鋼材に発生するひずみ分布より、断面欠損の周辺では、発生するひずみレベルが大きくなるのがわかる。
- 2) CFRP を接着して補修することで、鋼材に発生するひずみは低減される。その低減効果は、欠損部に近いほど大きくなる傾向にあり、鋼材のひずみレベルに応じて、CFRP が荷重分担していることがわかる。なお、貫通孔近傍では、鋼材ひずみが計測できていないが、CFRP のひずみ分布より、同様に、発生ひ

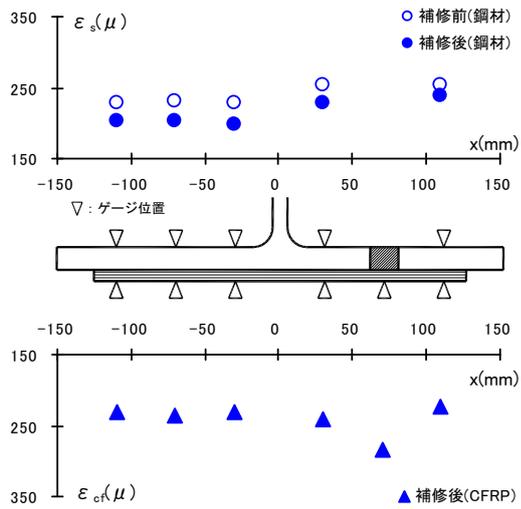
ずみが低減されていると推測できる。

- 3) 表-5 の結果より、CFRP を接着することによってフランジ部材全体に応力低減の効果がみられる。その低減率は、引張を受ける下フランジ側で9~11%、圧縮を受ける上フランジ側で7~8%であり、断面欠損部の形状による影響は少ない。なお、CFRP の剥離が生じない範囲では、荷重レベルが変わっても応力低減効果は同等であった。引張側に比べて圧縮側の応力低減効果が小さい理由は、高弾性型の炭素繊維シートの特長として、比較的小さなひずみ量 (500μ 以下) で、圧縮側の弾性係数は引張側の 80~90% 程度の値を示す⁹⁾ ことから、その影響と考えられる。
- 4) 無損傷試験体の断面2次モーメントは $I=2.02 \times 10^8 \text{mm}^4$ であり、断面欠損による発生ひずみの増加率は $(I/I_d - 1) \times 100 = 6.9\%$ である。表-5の結果から、CFRP 接着によって6.6%以上の応力改善効果が確認され、ほぼ無損傷の断面剛性まで回復していることがわかる。

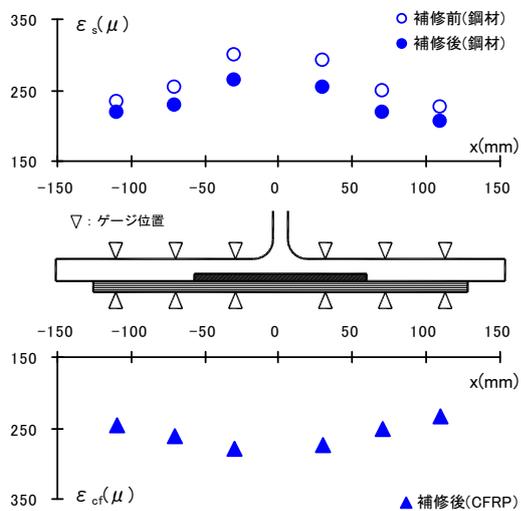
表-5 鋼材ひずみの平均値 (載荷荷重 $P/P_y=0.2$)

試験体	欠損形状	補修後の鋼材ひずみ* (補修前の鋼材ひずみ)	低減率 (%)
LF	A	212 μ (239 μ)	11.3
	B	232 μ (259 μ)	10.4
	C	223 μ (245 μ)	9.0
UF	A	228 μ (244 μ)	6.6
	B	246 μ (267 μ)	7.9
	C	235 μ (253 μ)	7.1

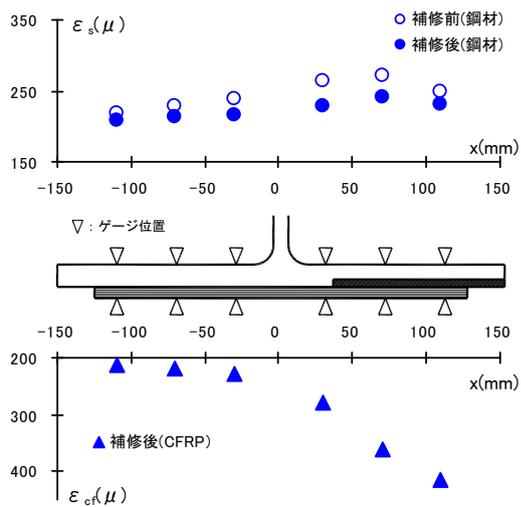
※鋼材側に貼付したひずみゲージ6点(5点)の平均値



(a) 欠損パターンA

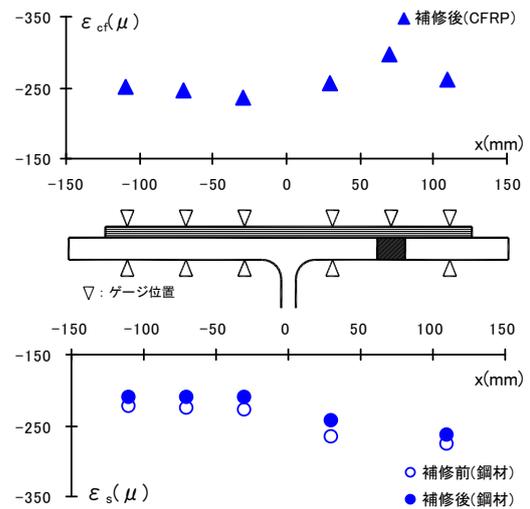


(b) 欠損パターンB

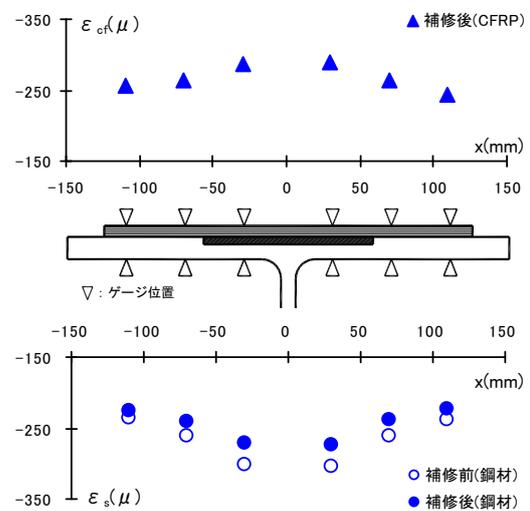


(c) 欠損パターンC

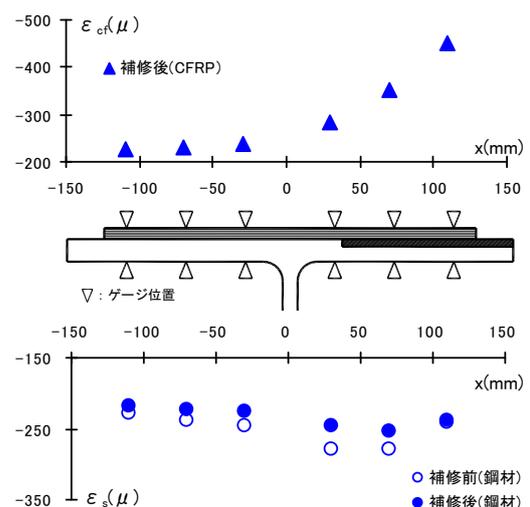
図-6 鋼材およびCFRPのひずみ分布
(試験体LF, 載荷荷重 $P/Py=0.2$)



(a) 欠損パターンA



(b) 欠損パターンB



(c) 欠損パターンC

図-7 鋼材およびCFRPのひずみ分布
(試験体UF, 載荷荷重 $P/Py=0.2$)

(2) CFRP の剥離荷重

無損傷試験体の初期降伏荷重 ($P_y=248\text{kN}$) で無次元化した載荷荷重と、鋼材およびCFRPに発生するひずみの関係を図-8~図-10に示す。また、表-6には、各試験体の剥離荷重を示す。なお、圧縮側は、試験後も明確な剥離は確認されなかったが、CFRPひずみが急減した時点を剥離荷重と定義した。

- 1) 図-8 および図-9 は、引張側試験体の例であり、欠損部周辺の鋼材が降伏し、ひずみの増大にともなってCFRPが剥離した。欠損パターンCにおいては、G4位置のCFRPで比較的大きなひずみが発生している。これは、CFRPの端部が母材と直接接着されておらず、剛性の低い不陸修正材のみで拘束されているため、平面保持されずに、過度な荷重分担が生じていると考えられる。
- 2) 図-10 は、圧縮側試験体の例であり、CFRPのひずみが急減した時点で補修効果を失い、鋼材ひずみが急激に増加し始める。試験後は、鋼材とCFRP間での剥離は確認されなかったが、欠損部周辺のCFRPに、梁軸直角方向に沿って炭素繊維が切断されている圧縮破壊が生じていた。これは、CFRP内で回りを取り囲む樹脂により支持されていた炭素繊維が、CFRPに作用する圧縮力により座屈して破壊する現象であり、一般に一方向繊維強化樹脂複合材料にみられる現象である。CFRPひずみが急減した理由としては、不陸修正材の部分的な剥離、欠損部近傍での局部座屈が考えられる。
- 3) 表-6より、CFRPの最小剥離荷重は、 $P/P_y=0.68$ であることがわかる。なお、試験体UF-Cの剥離荷重が比較的低いのは、CFRP端部(図-10中のG4)における過度な荷重分担により、圧縮側試験体では不陸修正材の部分的な剥離、欠損部近傍の局部座屈が早期に生じたと考えられる。

表-6 CFRPの剥離荷重

試験体	欠損パターン	剥離荷重 P/P_y
LF	A	0.94
	B	0.84
	C	0.96
UF	A	0.89*
	B	0.89*
	C	0.68*

*明確な剥離は観察されなかったが、CFRPひずみが急減した時点を剥離荷重とした。

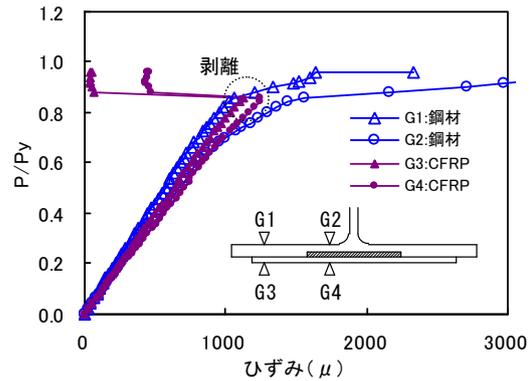


図-8 荷重-ひずみ関係 (試験体: LF-B)

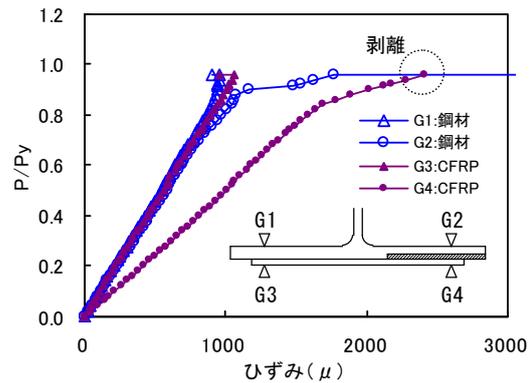


図-9 荷重-ひずみ関係 (試験体: LF-C)

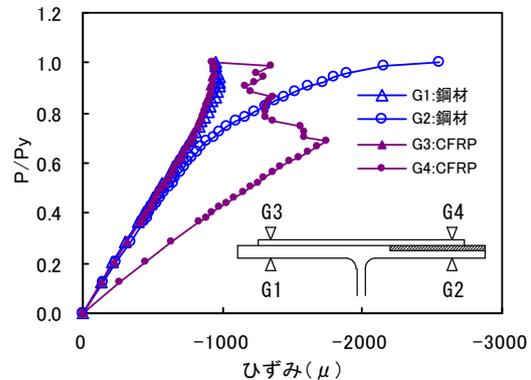


図-10 荷重-ひずみ関係 (試験体: UF-C)

5. まとめ

本研究では、CFRPを用いた鋼部材の補修工法の実用化を目指して、腐食損傷を模擬した試験体を用いて、CFRPによる補修効果の検討を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 鋼材の断面欠損部に対して、CFRPを接着して補修することで、鋼材に発生するひずみは低減され、応力改善効果が期待できる。また、その効果は欠損部形状によらないが、引張応力の方が圧縮応力より2%程度大きい。

- 2) 鋼材の欠損断面積に応じて、同等の鋼換算断面積となる CFRP を接着することで、CFRP が剥離しない荷重範囲内においては、引張応力、圧縮応力共に無損傷の断面剛性まで回復することができる。本検討では、部材の平均応力による評価であるため、欠損部近傍の応力集中の低減は対象としていないが、設計時の初期性能を回復、もしくは現状維持を目的とすれば、十分効果的であるといえる。
- 3) CFRP の剥離などにより、補修効果を失う最小荷重は、引張側で $P/Py=0.84$ 、圧縮側で $P/Py=0.68$ であった。既設構造物への適用に際しては、死荷重応力等がすでに作用していることを考えると、欠損断面の補修として十分適用できるものといえる。なお、この最小荷重は、炭素繊維シートおよび樹脂の材料特性が本研究で使用したものと同じであれば、同様の結果が得られると考えられる。

今後の課題としては、既設構造物の補修設計の整理と、実橋における施工確認および補修効果の確認を行い、設計・施工マニュアルとしてまとめることである。

参考文献

- 1) 土木学会：鋼橋における劣化現象と損傷の評価，1996。
- 2) 中村一史，諸井敬嘉，鈴木博之，前田研一，入部孝夫：溶接継手に発生した疲労き裂の CFRP 板による補修，鋼構造年次論文報告集，第 12 巻，日本鋼構造協会，pp.425-430，2004。
- 3) 小野紘一，杉浦邦征，三木亮二，小牧秀之，若原直樹：

炭素繊維シート巻き立てによる損傷鋼管の補修効果に関する検討，鋼構造年次論文報告集，第 10 巻，日本鋼構造協会，pp.225-230，2002。

- 4) 杉浦江，大垣賀津雄，長井正嗣，小林朗：炭素繊維シート (CFRP) を用いた鋼部材部分補修に関する実験研究，第 6 回複合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，pp.48-1 - 48-6，2005。
- 5) 杉浦江，大垣賀津雄，富田芳男，稲葉尚文，長井正嗣，小林朗：炭素繊維シート (CFRP) による鋼構造物の補修に関する基礎実験，土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集，CD-ROM，I - 658，2006。
- 6) 富田芳男，稲葉尚文，大垣賀津雄，杉浦江，長井正嗣，小林朗：炭素繊維シートにより補強された鋼製梁の強度特性に関する実験研究，土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集，CD-ROM，I - 659，2006。
- 7) 杉浦江，大垣賀津雄，長井正嗣，稲葉尚文，小林朗：炭素繊維シート (CFRP) を用いた鋼橋の補修・補強に関する一検討，FRP の橋梁への適用に関する国際コロキウム/第 2 回 FRP 橋梁に関するシンポジウム論文集，土木学会，pp.93-98，2006。
- 8) 土木研究センター：炭素繊維シートによる鋼製橋脚の補強工法ガイドライン(案)，2002。
- 9) 木村浩巳，久保村健二：ピッチ系炭素繊維複合材料の特性と応用，新日鉄技報第 349 号，pp.61-66，1993。

(2007 年 9 月 18 日受付)