

高弾性CFRP板をI形断面鋼桁に貼付する補強効果に関する研究

Study on strengthening effectiveness of I shaped steel girder with high modulus CFRP strips

松村政秀*, 北田俊行**, 久部修弘***

Masahide Matsumura, Toshiyuki Kitada, Nobuhiro Hisabe

*博(工), 大阪市立大学講師, 大学院工学研究科都市系専攻 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

**工博, 大阪市立大学教授, 大学院工学研究科都市系専攻 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

*** 三菱化学産資(株), 炭素繊維事業部 (〒100-0005 東京都千代田区丸の内 1-8-2)

The use of CFRP sheets and plates of higher tensile strength than steel can be effective for strengthening a superannuated existing steel I girder with regard to improving its load carrying capacity. Experimentally investigated in this study is the strengthening effect of I shaped steel girder with high modulus CFRP strips through a bending test by using four girder specimens. The strengthening effect derived from the differences in the elastic modulus of CFRP plates are verified through the comparison between the strengthening effects by the CFRP plates of the high tensile strength and the high elastic modulus. As a result, it is concluded that CFRP plates of high elastic modulus is better than CFRP plates of high tensile strength in improving the load carrying capacity of superannuated steel girders.

Key Words: high modulus CFRP plate, steel girder, strengthening, bending test

キーワード: 高弾性CFRP板, 鋼桁, 補強, 曲げ載荷実験

1. はじめに

道路橋は、橋長15m以上だけでも全国に約13万橋が供用されており、社会基盤構造物として重要な役割を担っている。総延長の約半分を占める鋼橋において、上部構造の損傷に伴う架け替えの主な理由には、鋼材の腐食が挙げられる。とくに、架設後、30年以上経過した鋼橋の耐久性と維持管理が大きな問題となっている¹⁾。鋼板の腐食は板厚の減少を招き、耐荷力の不足にも繋がることから、老朽化した鋼構造物の延命を図る上で、耐荷力不足を補う補強を行うとともに、鋼板の腐食を防止することが重要である。

ここで、鋼部材の耐荷力に対する補強としては、鋼板を溶接により接合したり、鋼板を高力ボルトにより接合する方法が挙げられる。これらの方法では、補強部材としての鋼材の自重が大きいため、運搬や施工に大型運搬車両や重機が必要となる。

一方、近年、重機を必要とせず騒音・振動などの施工性・環境面にも有利と考えられる炭素繊維(Carbon Fiber)やアラミド繊維(Aramid Fiber)などの繊維材料の鋼構造物への適用も検討されている。一般に、このような繊維材料のFRP板を接着接合により追加する補強方法は、鋼板を追加する補強方法に比べ、工期・工費の縮小につな

がり、経済的に有利となる場合も多いと考えられる²⁾³⁾。また、接着面での鋼材の腐食も防止できると考えられる。しかしながら、全国的に見ても実鋼構造物へ繊維材料の適用例は、数例にとどまっている。

ここで、高強度から高弾性まで弾性係数の種類が豊富なCFRPは、現場にて炭素繊維シートにエポキシ樹脂を含浸・硬化させて形成されるCFRP板とプラントにて引き抜き成形により生産されるCFRP板とが選択可能である。しかし、補強効率に影響を及ぼすCFRP板の繊維体積率 V_f を考慮すると、 V_f の大きい引き抜き成形されたCFRP板の補強効率が大きく有利であると想定できる。さらに、引き抜き成形されたCFRP板の中でも、高い弾性率を有するCFRP板の方が補強効率に優れている。

そこで、本研究では、これまで鋼構造物を対象として実施されてきた高強度のCFRP板にかわり、より補強効率の向上が見込める高弾性のCFRP板を対象とする。この高弾性CFRP板を鋼I桁下フランジに貼付し、曲げモーメントを漸増させる載荷実験を行い、補強された鋼I桁の曲げ挙動および耐荷力特性を検討する。また、高強度のCFRP板を貼付する場合についても同様な載荷実験を実施し、高弾性および高強度の2種類のCFRPを鋼I桁下フランジへ適用する場合の差異について考察を加えている。

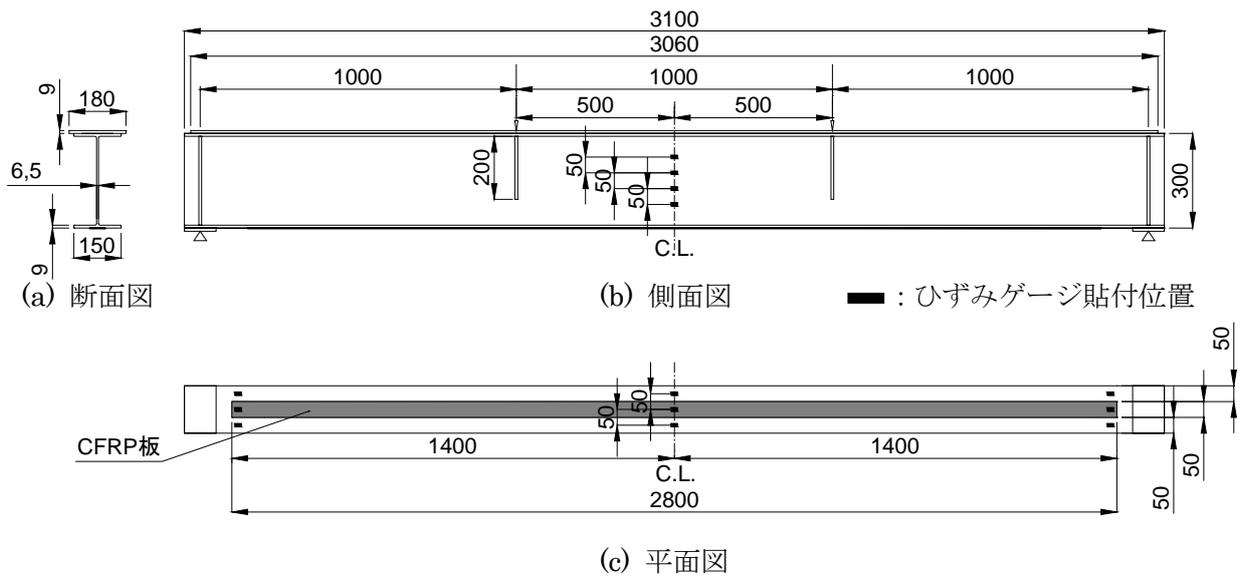


図-1 実験供試体寸法およびCFRP およびひずみゲージ貼付位置 (寸法単位: mm)

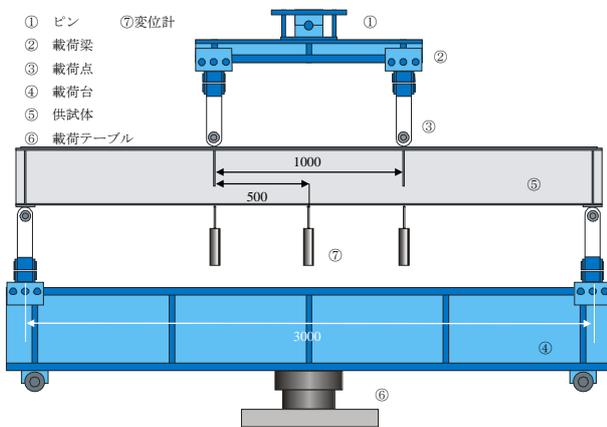


図-2 荷重装置ならびに変位計設置位置 (寸法単位: mm)

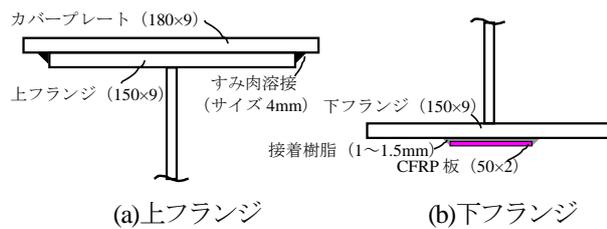


図-3 カバープレートおよびCFRP 板の貼付状況

表-1 実験供試体の内訳

実験供試体名	断面 (mm)	フランジ板厚 (mm)	ウェーブ板厚 (mm)	補強部材	補強層数	接着樹脂層厚 (mm)
st				無補強	0	
hs	$h \times b$	9	6.5	高強度 CFRP	1	1-1.5
he	300×150	(8.67)	(6.37)	高弾性 CFRP	1	
he-2				高弾性 CFRP	2	

() 内は実測値

さらに、本研究では、鋼表面にプライマー塗布などの下地処理を施さずに、CFRP 板を接着する方法を採用し

ている。従来、プライマーの塗布は、接着性の確保、および鋼と炭素材料との接触による電食の防止が期待されていた。そこで、このプライマー塗布の省略が鋼板の電食に及ぼす影響、およびCFRP 板を貼付した場合の接着面での鋼材腐食の防止効果についても検討する。

2. 実験概要

2.1 実験供試体および荷重方法

曲げモーメントが作用する鋼I 桁に対する CFRP 板による補強効果を検討するため、表-1 に示すように、無補強モデルおよび CFRP を貼付した補強モデルについて、CFRP の種類および貼付枚数をパラメータとして、計 4 体の実験供試体を用いた荷重実験を行う。ここで、実験供試体 st は無補強の鋼I 桁を想定した実験供試体であり、上フランジの座屈が先行して生じないように、上フランジには、フランジと同じ厚さのカバープレートを溶接接合により追加している。実験供試体 hs は、st の下フランジに高強度 CFRP 板を 1 層、実験供試体 he および he-2 は、st に高弾性 CFRP を 1 層あるいは 2 層、それぞれ接着した補強供試体である。

実験供試体の寸法および形状は、図-1 に示すとおりである。荷重は、図-2 に示すように、支点間隔を 3,000 mm、荷重点間の距離を 1,000 mm とし、この区間に等曲げモーメントが得られるように荷重する。

また、CFRP の貼付位置は、図-1(c) に示すように、下フランジ中央を中心として左右にそれぞれ 1,400 mm の区間であり、文献 4) を参考にして、CFRP 端部の剥離が生じないような長さまで端部を延ばし定着している。図-3 には、上フランジに溶接接合したカバープレートの接

表-2 使用した鋼材の機械的性質

引張試験片 No.	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (×10 ⁵ N/mm ²)	ポアソン比	伸び率 (%)
I-1	308.0	474.4	2.01	0.287	47.0
I-2	294.5	471.5	1.96	0.283	44.4
I-3	308.0	474.6	1.99	0.290	45.4
平均	303.5	473.5	1.99	0.287	45.6
S-1	306.3	438.1	2.06	0.278	38.3
S-2	298.0	441.7	2.07	0.242	40.3
S-3	294.5	432.8	2.00	0.278	39.2
平均	299.6	437.5	2.04	0.266	39.3

表-3 接着樹脂の機械的性質

	試験方法	試験条	保証値	試験値
比重 (硬化物)	JIS K 7112 準	25℃	1.55~1.75	1.56
可使時間 (分)	温度上昇法	10℃	30 以上	98
引張せん断強度	JIS K 6850 準	23℃	10 以上	13
圧縮強度 (N/mm ²)	JIS K 7208 準	23℃	50 以上	61
圧縮弾性率 (N/mm ²)	JIS K 7208 準	23℃	1000 以上	2,690

表-4 高弾性CFRP板の機械的性質

高弾性	試験結果					
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	平均値
ヤング係数 (×10 ⁵ N/mm ²)	4.34	4.19	4.42	4.54	4.36	4.37
引張強度 (N/mm ²)	1005	878	840	867	868	892
厚さ (mm)	2.11	2.08	2.11	2.07	2.11	2.10
幅 (mm)	24.37	24.92	24.75	24.40	24.90	24.67
断面積 (mm ²)	51.42	51.83	52.22	50.51	52.54	51.70
重量 (g/m)						188.3
単位重量繊維量 V _f (%)						60-70

表-5 高強度CFRP板の機械的性質

高強度	試験結果					
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	平均値
ヤング係数 (×10 ⁵ N/mm ²)	1.48	1.54	1.52	1.55	1.49	1.52
引張強度 (N/mm ²)	2351	3005	2874	2580	2393	2641
厚さ (mm)	1.14	1.15	1.15	1.14	1.14	1.14
幅 (mm)	24.98	24.17	24.62	24.42	24.70	24.58
断面積 (mm ²)	28.48	27.80	28.31	27.84	28.16	28.12
重量 (g/m)						111
単位重量繊維量 V _f (%)						60-70

合状況、および下フランジへのCFRP板の貼付状況を示す。

2.2 使用材料の機械的性質

鋼I桁およびカバープレートにはSS400材を用いている。表-2には、鋼I桁(I)およびカバープレート(S)から切り出した各3本の引張試験片を用いて実施した鋼材の引張試験結果を示す。表-2によると、2種類の鋼材は、引張強度で約10%異なる以外はほぼ同様な性質を示

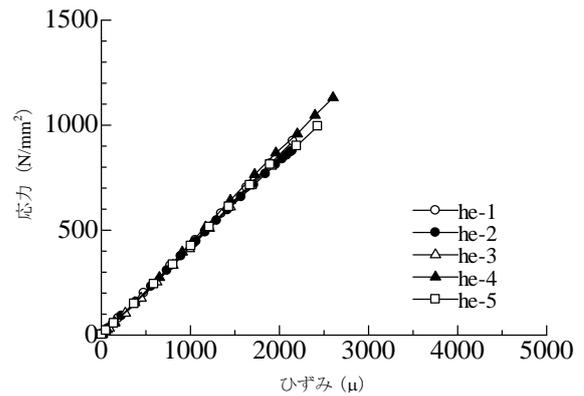


図-4 高弾性CFRP板の応力-ひずみ関係

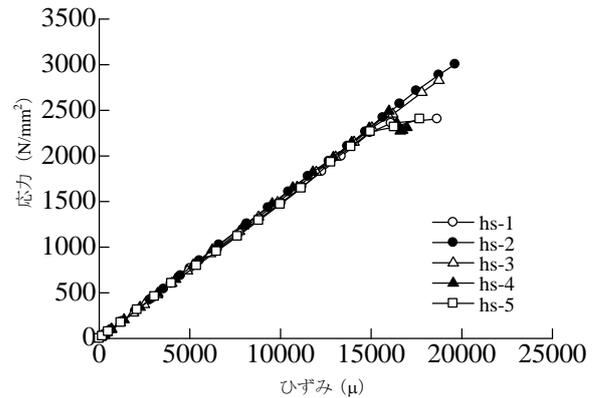


図-5 高強度CFRP板の応力-ひずみ関係

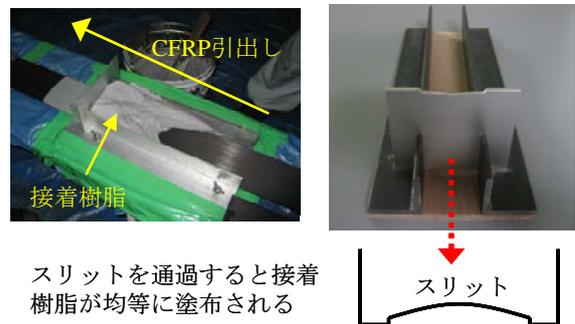
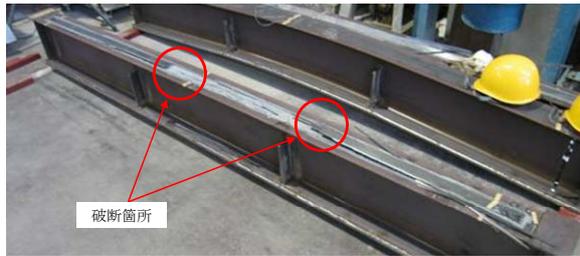


図-6 接着樹脂塗布治具

している。

接着樹脂にはパテ状エポキシ樹脂を、CFRPには、引抜成形法によって炭素繊維を一方方向に配し、エポキシ樹脂を含浸・硬化させたCFRP板を使用した^{5),6)}。表-3には接着樹脂の、表-4および表-5にはCFRP板の主な機械的性質を示す。また、図-4および図-5には、CFRP板の応力-ひずみ関係を示す。なお、高弾性および高強度CFRP板の接着には同じ接着樹脂を使用している。

表-4および表-5により、高弾性および高強度のCFRP板ともに、各試験片間において、ヤング係数の値はほとんど差異は認められないが、引張強度のばらつきが顕著である。高強度および高弾性のCFRP板で、ヤング係数はそれぞれ1.52×10⁵ N/mm² (使用鋼材の約0.76倍) および4.37×10⁵ N/mm² (約2.2倍) であった。

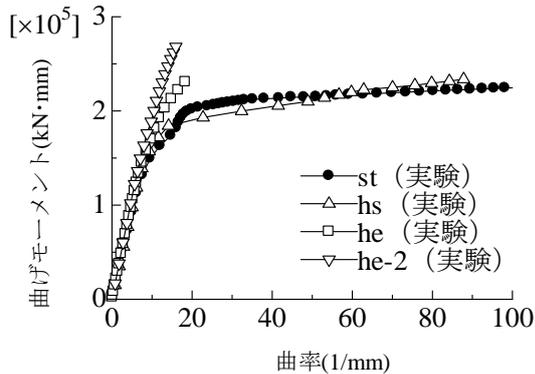


(a)実験供試体 he

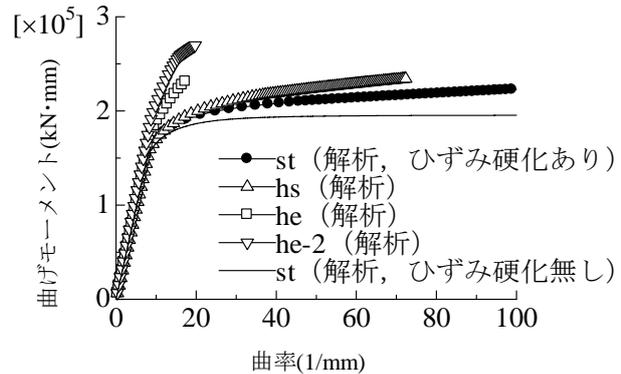


(b)実験供試体 hs (CFRP 板端部)

図-7 実験終了後のCFRPの破断(実験供試体 he および hs)



(a)実験結果



(b)解析結果

図-8 曲げモーメントー曲率関係

表-6 初期曲げ剛度($\times 10^4$ kN/mm)

ケース	実験	補強効果(%)	解析	補強効果(%)	実験/解析
st	1.899	—	1.899	—	1.00
hs	1.981	4.32	1.917	0.95	1.03
he	2.043	7.58	2.041	7.48	1.00
he-2	2.201	15.90	2.196	15.64	1.00

表-7 最大曲げモーメント($\times 10^5$ kN·mm)

ケース	実験	補強効果(%)	解析	補強効果(%)	実験/解析
st	2.254	—	2.411	—	0.93
hs	2.355	4.49	2.343	-2.81	1.01
he	2.323	3.05	2.311	-4.15	1.01
he-2	2.700	19.80	2.700	12.00	1.00

なお、図-4に示した高弾性CFRP板の引張強度については、CFRP板端部のつかみの部分で破壊等により保証値(引張強度で $1,200 \text{ N/mm}^2$ 、ヤング係数で $4.50 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$)よりも低い値を得た。ただし、同ロットに対して別途実施した試験データは、引張強度で $1,650 \text{ N/mm}^2$ (破断時のひずみは約 $4,000 \mu$)およびヤング係数は $4.80 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ と保証値以上の値を得ている。

2.3 CFRP板の貼付方法

接着樹脂には、主剤であるエポキシ樹脂(白)と硬化剤である変性脂環式ポリアミン(黒)を重量比で2:1の割合で混合したパテ状の接着樹脂を用いた。さらに、CFRPに塗布する際に気泡が生じないように、図-6に示す治具を用いて、厚さ1~1.5 mm程度(1,000 × 50 mmの面積に約500 g)の接着樹脂をCFRP板の中央部が凸となるように塗布したCFRP板を鋼I桁下フランジに、ローラーで均等に転写、貼付した。

なお、鋼材の表面は、グラインダーで錆・黒皮を除去した後、アセトンで油分を除去した状態としている。す

なわち、従来、接着効果を高めるために必要とされてきた表面処理(プライマー塗布)を施さない状態で、CFRP板を接着している。ただし、今回は、CFRP板端部で剥離が生じないと考えられる長さまでCFRP板を定着させているため、剥離が懸念される場合の必要(最小)定着長については、今後検討する必要がある。

また、今回使用したようなパテ状の接着樹脂を用いる場合には上向き姿勢での施工も可能であるが、今回は、実験供試体を上下反転させた状態で、下向き姿勢でCFRP板を接着している。

3. 実験結果

3.1 実験終了時の崩壊状況

CFRP板を接着した実験供試体hs, he, およびhe-2は、いずれも載荷中、CFRP板端部での剥離は発生しなかった。したがって、CFRP板が破断した時点で載荷を終了

した。高弾性 CFRP 板を貼付した実験供試体 he および he-2 では、図-7(a)に示すように、載荷点近傍で、曲げモーメントとせん断力がともに作用するため CFRP 板が破断した。その後、破断の衝撃により、CFRP 板がほぼ全長にわたって剥離した。

一方、高強度の CFRP 板を貼付した実験供試体 hs においても、載荷点付近で CFRP 板が破断したため載荷を終了したが、高弾性の CFRP 板に比べて CFRP 板自体の破断ひずみが大きいため（表-3 および表-4 参照）、CFRP 板端部では剥離に至らなかったものの、接着樹脂のせん断変形が認められた（図-7(b)参照）。なお、CFRP 板の破断時の終局ひずみは、高弾性で約 3,800 μ 、高強度で約 17,000 μ であった。

3.2 曲げモーメント-曲率関係

図-8(a)には、載荷実験より得られた曲げモーメントと曲率の関係を示す。ここで、曲率は、スパン中央断面のウェブおよびフランジに貼付したひずみゲージの計測値から平均的なひずみ勾配を算出して求めている。図-8(b)には、表-2～表-5 に示した実験供試体の製作材料の機械的性質を用いて、断面分割法により解析した鋼 I 桁断面の曲げモーメントと曲率関係を示す。

なお、断面分割法による計算においては、以下の仮定を設けている。すなわち、実験供試体 hs, he, および he-2 は、CFRP 板の破断が認められた時点で載荷を終了した。そのため、解析においても、実験で計測された CFRP 板の破断時のひずみを参考にして CFRP 板の終局ひずみを設定し、計算を終了した。ここで、設定した CFRP 板の終局ひずみは、高弾性で 3,800 μ 、高強度で 17,000 μ である。また、鋼材の応力-ひずみ関係は、降伏以降で勾配がゼロとなるバイリニア型、CFRP 板は破断まで線形の応力-ひずみ関係を仮定している。鋼供試体については、降伏以降で $E/100$ (E は鋼材のヤング係数) の 2 次勾配を有するひずみ硬化を考慮したバイリニア型も設定している。接着樹脂については表-3 に示した圧縮弾性率を有し最大強度が圧縮強度、最大強度以降はゼロとなるようにモデル化した。以上の仮定に従って、式(1)および式(2)を満足する I 形断面の中立軸の位置と、曲げモーメント M および曲率 ϕ を断面分割法により算定した。ここで、 y は図心軸からの距離である。

$$N = \int \sigma dA \quad (1)$$

$$M = \int \sigma y dA \quad (2)$$

表-6 および表-7 には、実験および解析から得た初期曲げ剛度、および最大曲げモーメントの値をまとめて示す。

図-8(a)および表-6 より、CFRP 板を貼付した実験供試体は、いずれも無補強の供試体に比べ、初期曲げ剛度が高強度の CFRP 板を 1 層貼付した供試体 hs で 4.2%

表-8 鋼および CFRP 板表面上の計測ひずみ

	$\phi=5$		$\phi=10$		$\phi=15$	
	鋼	CFRP	鋼	CFRP	鋼	CFRP
st	1077	-	2133	-	2458	-
hs	1021	992	1702	1989	1850	3012
he	1002	967	1678	1941	2760	3140
he-2	992	967	1623	1946	2195	3434

(1.0%)、高弾性 1 層の供試体 he で 7.6% (7.7%)、高弾性 2 層の供試体 he-2 で 15.9% (15.9%)、向上しており、鋼 I 桁に対する CFRP 板の貼付効果が確認できる。ここで、() 内数値は解析結果であり、解析結果は実験結果を良好に再現できていることが確認できる。また、st が hs を曲げ剛度の勾配が変化する辺りまで下回っているが、これは、鋼供試体 st が載荷に伴って若干面外に変形したため、上フランジおよびウェブに発生した座屈変形の影響によるものである。

また、表-7 によると、最大曲げモーメントは、無補強モデルの st に比べ、hs で 4.5%、he で 3.1%、he-2 で 19.8%、それぞれ向上していることがわかる。鋼供試体である st の最大曲げモーメントの値は、鋼材のひずみ硬化の影響により、実験と解析とで若干異なるため、補強効果の値には差違が認められる。しかし、CFRP 板を貼付する場合には、実験値と解析値はほぼ等しいことから、CFRP 板の破断を仮定する必要がある最大曲げモーメントについても、解析結果は実験結果を良好に再現できることが確認できる。

以上より、端部で剥離が生じない条件下では、断面分割法を用いる簡易な解析により、CFRP 板を鋼 I 桁下フランジに接着した場合の補強効果を算定することが可能である。

3.3 梁中央でのひずみ分布

表-8 には、梁中央部における下フランジ表面あるいは CFRP 板表面において、曲率が $\phi=5, 10$, および 15 1/mm の時の計測ひずみを示す。弾性範囲内の $\phi=5$ 1/mm で比較すると、鋼表面のひずみは CFRP 板を貼付する場合に小さくなり、he-2 の場合が最小となる。鋼材の降伏後の $\phi=10$ 1/mm でも同様な傾向が認められる。また、曲率が大きくなるにつれて、鋼よりも CFRP 板表面のひずみが増大することから、CFRP 板の補強効果は、鋼材の降伏後に顕著に認められる。ただし、表-8 の値は、CFRP 上と鋼表面とで、同一位置におけるひずみの計測値ではないことに注意が必要である。

3.4 補強効率

上述のとおり、載荷実験の結果等に基づいて、適切な CFRP 板の終局ひずみを設定することができれば、断面

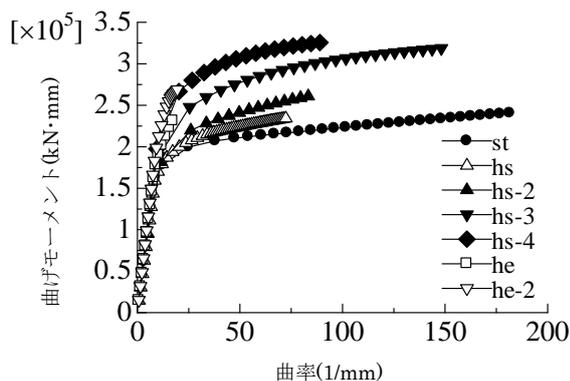


図-9 曲げモーメント-曲率関係 (解析)

表-9 主な解析結果

解析モデル	初期曲げ剛度 ($\times 10^4$ kN/mm)	最大曲げモーメント ($\times 10^5$ kN·mm)
st	1.899	2.411
hs	1.917	2.343
hs-2	1.940	2.609
hs-3	2.024	3.186
hs-4	2.166	3.264
he	2.041	2.311
he2	2.196	2.700

分割法によって、CFRP 板による鋼 I 桁の補強効果および耐荷力特性を良好に推定することが可能である。また、載荷実験に用いた高弾性の CFRP 板は板厚が 2.1 mm、高強度の CFRP 板は 1.14 mm であり、板厚が異なる。そこで、高弾性および高強度の CFRP 板の補強効率に着目して、表-9 に示す 7 つの解析モデルを設定して、解析を実施した。いずれも、CFRP 板の終局ひずみは、高弾性で $3,800 \mu$ 、高強度で $17,000 \mu$ と仮定している。

7 つの解析モデルのうち、4 つの解析モデル st, hs, he, および he-2 の寸法および材料特性については、前述の実験供試体 (図-1 および表-2~表-5) と同じである。その他の解析モデル he-2~he-4 は次の通り設定している。

解析モデル hs-2 は、高弾性の CFRP 板 (解析モデル he) と同じ、板厚 2.1 mm の高弾性の CFRP 板を貼付したモデルである。解析モデル hs-3 は、解析モデル he と $E_f A_f$ (ここに、 E_f は CFRP 板のヤング係数、 A_f は CFRP 板の断面積) を合わせた、板厚 5.151 mm の高強度の CFRP 板を貼付したモデルである。解析モデル hs-4 は、解析モデル he-2 と $E_f A_f$ を合わせた、板厚 10.30 mm の高強度の CFRP 板を貼付したモデルである。

図-9 には、解析より得られた曲げモーメント-曲率関係を、表-9 には主な解析結果をまとめて示す。

解析モデル he と hs-2 とを比較すると、高弾性および高強度の CFRP 板とで同じ板厚の場合には、初期曲げ剛度と弾性域の剛性の向上には高弾性の CFRP 板の方が有

利である。破断ひずみが大きい高強度 CFRP 板が最大曲げモーメントの向上には有効であることがわかる。

解析モデル he と hs-3 とを比較すると、 $E_f A_f$ の値が等しい両者では、終局ひずみの関係で終局曲率が異なるものの、ほぼ同じ経路 (図-9) を辿っていることが確認できる。

解析モデル he-2 と hs-4 とを比較すると、解析モデル he と hs-3 と同様な傾向を示している。

ここで、高強度の CFRP 板を複数層重ねることによって、高弾性の CFRP 板 (1 層あるいは 2 層) を貼付する場合と同等な補剛効果を得ることが可能であることが確認できる。そのため、複数層重ねて貼付することによる施工性ならびに経済性を考慮すると、高弾性の CFRP 板の適用が極めて効率的である。

ただし、実験により複数層重ねた場合における曲率が大きい領域での CFRP 板の終局ひずみが未確認であるため、特に、高弾性の CFRP 板を貼付する場合 (解析モデル hs, hs-2, hs-3, および hs-4) に、解析どおりの最大曲げモーメントを得ることかできるか否かは不明である。また、今回の解析では、鋼板、とりわけウェブの座屈発生を考慮していない点にも注意が必要である。

なお、耐荷力の不足を補うという CFRP 板貼付の目的を考慮すると、弾性域 (線形域) の剛性向上が期待できる高弾性の CFRP 板による補強が、高強度の CFRP 板を用いる補強方法よりも、効果的である。また、実寸法の鋼 I 桁に CFRP 板を適用する場合には、所用の補強効果を得るために必要な複数層の CFRP 板を貼付する必要がある点からも、補強効率に有利な高弾性の CFRP 板の適用が効果的である。

4. 炭素繊維接着による鋼板の電食可能性

本研究では、鋼表面にプライマー塗布などの下地処理を施さずに、CFRP 板を接着している。従来、プライマーの塗布は、接着性の確保、および鋼と炭素材料との接触による電食の防止が期待されていた。

そこで、本節では、鋼板と CFRP 板をモデル化した小型試験片を用いて実験を行い、CFRP 板を接着することによる鋼板の電食可能性、および CFRP 板を貼付した場合の接着面での鋼材腐食の防止効果について、基礎的な資料を得る。

4.1 実験の概要

実験では、鋼板 (50×200×1.6 mm) と高強度の CFRP 板 (50×200×1.2 mm, 表-5 参照) とを直流電源に接続し、2 枚の試験体の間に定電流 (試行実験の結果より 40 mA とした) を 300 分間通電した。その間 10 分ごとに電圧を計測して腐食の様子を観察する。

表-10 各試験体と試験条件

実験名	通電条件	電流方向
D40-L-1	NaCl溶液中(L)	電源不使用 (1)
D40-L-2		腐食促進方向 (2)
ER-L-1	NaCl溶液中(L)	電源不使用 (1)
ER-L-2		腐食促進方向 (2)
D0-A-1	空气中(A)	電源不使用 (1)
D0-A-2		腐食促進方向 (2)

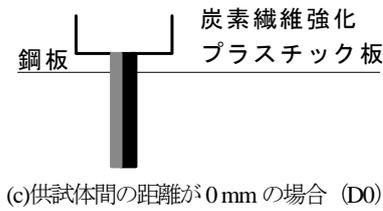
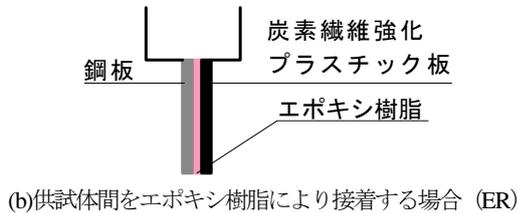
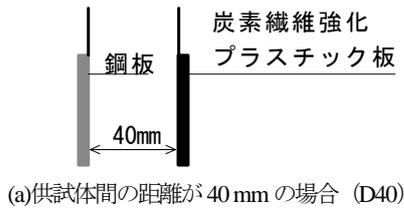


図-10 各供試体の設置条件

4.2 実験結果

表-10には各供試体と試験条件を、図-10には供試体の設置条件を示す。実験条件は、鋼板とCFRP板との間の距離が0, 40mm (D0, D40), およびプライマーを塗布せずにパテ状のエポキシ樹脂 (ER) で接着したものの3種類を対象として、(1)流電電流を通電しないもの、および(2)腐食促進方向に通電するもの、の2種類を設定した。また、D40およびERは供試体の50mmの区間を塩化ナトリウム水溶液 (3.5%) 中に浸した状態で、D0は空气中で実験を行った。

図-11および図-12には、D40-L-1, およびD40-L-2の時間と電圧の関係を示す。D40-L-1は、時間の経過につれて電圧・電流とも増加し、やがて一定となる。D40-L-2は時間の経過とともに電圧が減少し、やがて0.8Vでほぼ一定となる。いずれも、時間の経過とともに電流が流れやすくなり、鋼板の腐食が進行しやすい状態であることが確認できる。

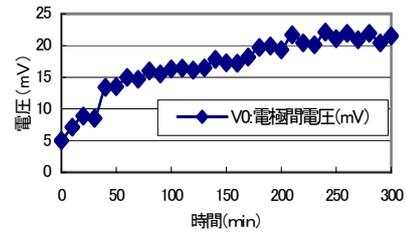


図-11 時間と電圧との関係 (D40-L-1)

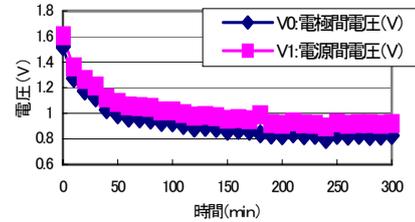


図-12 時間と電圧との関係 (D40-L-2)

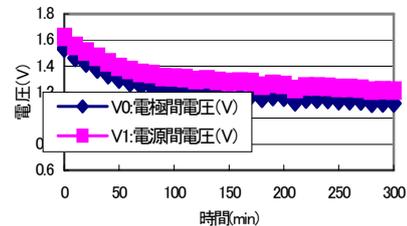


図-13 時間と電圧との関係 (ER-L-2)

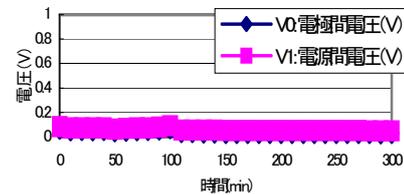


図-14 時間と電圧との関係 (D0-A-2)

表-11 各供試体の腐食量

実験名	腐食量(g)
D40-L-1	0.066
D40-L-2	0.294
ER-L-1	0.101
ER-L-2	0.234
D0-A-1	0.000
D0-A-2	0.000

図-13には、ER-L-2の結果を示す。ER-L-2では時間の経過とともに電圧が減少し、やがて1.1Vで一定となる。これには、鋼板の片面にエポキシ樹脂を塗布しているため腐食面積はD40-L-2に比べて1/2に減少している影響を含んでいるが、鋼材の腐食が進行していることが確認できる。なお、ER-L-1の電流の値は、D40-L-1の約1/2となり、片面にエポキシ樹脂を塗布した影響が顕著であった。

一方、図-14にはD0-A-2の時間と電圧の関係を示す。

同図によると、時間が経過しても電圧はほとんど変化せず、その値も小さい。すなわち、空气中に供試体を設置した状態では、鋼材の腐食促進方向に通電する場合でも、鋼板が腐食しない（進行しない）ことが確認できる。ここで、表-11には、通電前・後における各鋼板の質量の差、すなわち腐食量をまとめて示す。表-11によると、NaCl水溶液中の場合には、通電しない場合でも、鋼板の腐食の発生が認められる。また、腐食促進方向に通電する場合には、通電しない場合に比べ鋼板の腐食の発生が顕著に認められることがわかる。一方、空气中では、通電しない場合、および腐食促進方向に通電する場合ともに、腐食の発生は認められず、CFRP板と鋼板が直接接していても空气中であれば、鋼材の電食の可能性は低いことが確認できる。なお、ERの腐食面積はD40の約1/2であったが、電極間の距離や腐食面積の違いから、腐食量は、必ずしも1/2となっていない。また、実験終了後、CFRP板を鋼板から剥離させて、鋼板表面を観察した結果、CFRP板接着側の鋼板には腐食発生は認められなかった。

以上より、限定された条件ではあるが、CFRP板と鋼板が水分を介して接触していない条件では、鋼板の電食可能性はほとんど認められないこと、およびCFRP板の接着面で鋼材の腐食が認められないことがわかった。

5. まとめ

本研究では、高弾性CFRP板を鋼I桁下フランジに貼付し、曲げモーメントを漸増させる載荷実験を行い、補強された鋼I桁の曲げ挙動および耐荷力特性を検討した。また、この効果を、高強度のCFRP板を貼付する場合と比較して補強効率について考察を加えた。また、CFRP板を接着することによる鋼板の電食可能性に関する基礎的な資料を得た。

本研究より得られた主な結論は次の通りまとめられる。

- 1) CFRP板を貼付した鋼I桁の曲げ載荷実験では、いずれも、載荷点近傍で、曲げモーメントとせん断力がともに作用するためCFRPが破断した。なお、CFRP板の破断時の終局ひずみは、高弾性で約3,800 μ 、高強度で約17,000 μ であった。
- 2) CFRP板を鋼I桁下フランジに接着した場合の補強効果は、断面分割法を用いる簡易な解析により算定が可能であることがわかった。

- 3) 耐荷力の不足を補うというCFRP板貼付の目的を考慮すると、弾性域（線形域）の剛性向上が期待できる高弾性のCFRP板による補強が高強度のCFRP板よりも、効果的である。
- 4) CFRP板と鋼板が水分を介して接触していない条件では、鋼板の電食可能性はほとんど認められないこと、およびCFRP板の接着面で鋼材の腐食が認められないことがわかった。

なお、本研究においては、CFRP板の破断によって最大耐力を得たが、CFRP板の定着長さが短い場合には、CFRP板が早期に剥離することが予想される。この必要（最小）定着長さについて明確にすることは、もちろん今後の検討課題である。

また、鋼I桁下フランジは、乾湿の繰返しの影響を受けやすい箇所であり、接着状態の健全度評価、および電食の有無および水分によるCFRP板と鋼板間の局所的な電池形成の影響に関しては、実橋梁での長期的なモニタリング等を通じて検討することが必要である。

謝辞：実験の実施には、(株)大林組の中井章人氏（研究当時、大阪市立大学工学研究科前期博士課程）の協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本鋼構造協会・鋼橋の性能照査型設計対応研究委員会、鋼橋の防食・LCC部会：鋼橋のLCC評価と防食設計，pp.57-84，2002.9
- 2) コンクリートライブラリー95，コンクリート構造物の補強指針（案），土木学会，pp.4-5，1999
- 3) コンクリートライブラリー101，連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補強指針，土木学会，2000
- 4) 松村政秀，北田俊行，北田 健，並木宏徳：プレストレスを導入したCFRPによる鋼桁のポストテンション補強法と補強効果に関する研究，構造工学論文集，51A，土木学会，pp.183-192，2005.3
- 5) Rizkalla, S.: Design guidelines for the use of HM strips, strengthening of steel-concrete composite bridges with high modulus carbon fiber reinforced polymer strips, 2005.10
- 6) Suzuki, H., Itagaki K. and Watanabe K., Reinforcement of steel bridge girder by using CFRP plate, Repair and Strengthening Report of steel Structure, pp.49-54, 2002.
(2007年9月18日受付)