（55）高弾性ＣＦＲＰ板を貼付する鋼Ｉ桁の補強効果に関する実験的研究

松村　政秀[1]・北田　俊行[2]

[1]正会員　大阪市立大学大学院講師　工学研究科都市系専攻（〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138）
E-mail:m_matsu@civil.eng.osaka-cu.ac.jp

[2]正会員　大阪市立大学大学院教授　工学研究科都市系専攻（〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138）
E-mail:kitada@civil.eng.osaka-cu.ac.jp

既設鋼 I 桁の耐荷力を補うための補強方法として，引張特性に優れた炭素繊維強化プラスティック板あるいは炭素繊維シートにエポキシ樹脂を含浸させて直接鋼板に接着して補強する方法が挙げられる．

本研究では，高弾性の炭素繊維強化プラスティック板に着目して，高弾性炭素繊維強化板を鋼I桁下フランジにエポキシ樹脂により接着・貼付する補強効果を，鋼 I 桁の曲げ載荷実験を実施することにより明らかにしている．また，高強度炭素繊維強化板による補強効果と比較することによって，高弾性炭素繊維強化板の実鋼構造物への適用性についても検討している．

Key Words : *CFRP of high elastic modulus ,steel girder, strengthening1bending test*

1. はじめに

道路橋は，橋長 15 m 以上のものだけでも全国に約 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．とくに，架設後，30 年以上経過した既設の鋼橋の耐久性と維持管理が大きな問題となっている [1)]．このうち，総延長の約半数を占める鋼橋の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．鋼板の腐食は板厚の減少を招き，耐荷力の低下にも繋がることから，これら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，鋼部材の耐荷力を向上できる補強方法としては，鋼板を溶接，あるいは高力ボルトにより接合し追加する方法が挙げられる．しかし，これらの方法では，補強部材としての鋼材の自体が重いため，運搬や施工に大型運搬車量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（Aramide 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，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考えられる [2), 3)]．このような繊維材料を鋼板に貼付する場合にも，剥離が生じない場合には，貼付層数に応じた補強効果が得られるが明らかにされている．また，鋼部材に貼付する場合に，最終的に繊維材料と鋼部材との界面に生じる剥離は，モードⅠ成分に因ることも指摘されている [4)]．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．

そこで，本研究では，炭素繊維にエポキシ樹脂を含浸させて板状とした CFRP 板の鋼部材への貼付した場合の基礎データを提供することを目的として，鋼 I 桁の下フランジに，高弾性の CFRP 板を貼付して，曲げモーメントを漸増させる載荷実験を行い，鋼 I 桁の曲げ挙動・耐荷力ならびに補強効果を検討している．また，高強度の CFRP 板を貼付する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 板を鋼 I 桁下フランジへ適用する場合の差異についても考察を加えている．

2. 載荷実験の概要

(1) 実験供試体および載荷方法

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 4 体の実験供試体を用いた曲げ載荷実験を行う．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，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．

なお，実験供試体の寸法および形状は，図-1 に示

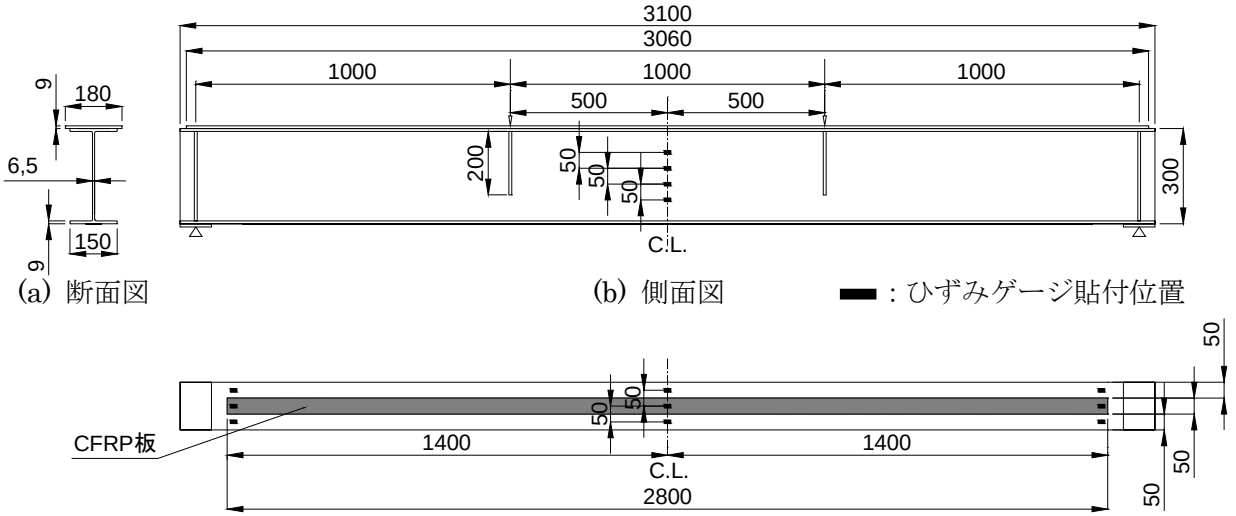

図-1　実験供試体の寸法および CFRP およびひずみゲージ貼付位置（寸法単位：mm）

表-1　実験供試体の内訳

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

（ ）内は実測値

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 ($\times10^5$ 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

すとおりである．CFRP 板は，下フランジ中央の 2,800 mm の区間に接着する．なお，文献 4)を参考にして，CFRP 端部の剥離が生じないように十分な定着長を確保している．

荷重は，図-2 に示すように，支点間隔を 3,000 mm，載荷点間の距離を 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 1,000 kN 万能試験機を用いて載荷する．また，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，フランジと同じ板厚のカバープレートを溶接接合により追加している．ひずみゲージは，載荷中の曲率が算定できるように，梁中央断面のフランジおよびウェブに貼付している．

表-3　接着樹脂の機械的性質

	試験方法	試験条件	保証値	試験値
比重（硬化物）	JIS K 7112 準拠	25℃	1.55～1.75	1.56
可使時間 （分）	温度上昇法(250g)	10℃	30 以上	98
引張せん断強度 (N/mm^2)	JIS K 6850 準拠	23℃	10 以上	13
圧縮強度 (N/mm^2)	JIS K 7208 準拠	23℃	50 以上	61
圧縮弾性率 (N/mm^2)	JIS K 7208 準拠	23℃	1000 以上	2,690

表-4　高弾性 CFRP の機械的性質

高弾性	保証値	試験結果 No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	平均値
ヤング係数 ($\times10^5N/mm^2$)	4.50	4.30	4.13	4.25	4.39	4.19	4.25
引張強度 (N/mm^2)	1200	1004.6	877.5	839.8	867.4	868.1	891.5
厚さ (mm)	2	2.11	2.08	2.11	2.07	2.11	2.10
幅 (mm)	50	24.37	24.92	24.75	24.40	24.90	24.67
断面積 (mm^2)	100	51.42	51.83	52.22	50.51	52.54	51.70
重量 (g/m)	182			–			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	保証値	試験結果 No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	平均値
ヤング係数 ($\times10^5N/mm^2$)	1.51	1.5	1.54	1.52	1.55	1.51	1.52
引張強度 (N/mm^2)	2352	2351.2	3018	2888.8	2573.4	2393.5	2645.0
厚さ (mm)	1.2	1.14	1.15	1.15	1.14	1.14	1.14
幅 (mm)	50	24.98	24.17	24.62	24.42	24.70	24.58
断面積 (mm^2)	60	28.48	27.80	28.31	27.84	28.16	28.12
重量 (g/m)	100			–			111
単位重量繊維量 V_f(%)	–			–			60-70

(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 種類の鋼材では，引張強度で約 10 %異なる以外はほぼ同様な性質を示している．

また，接着樹脂には三菱化学産資（株）製のエポサームパテ L-600（冬用）を使用した．表-3 には接着樹脂の機械的性質を示す．

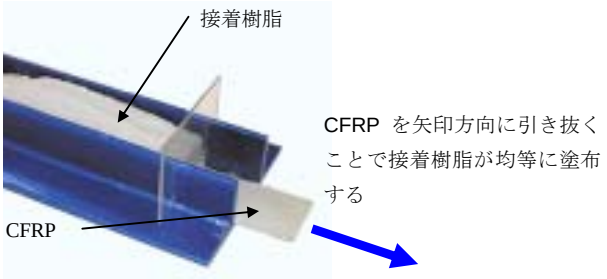

図-2　接着樹脂塗布治具

さらに，高弾性 CFRP 板には e プレート高弾性グレード（HM520）[5]，および高強度 CFRP 板には，CABOCON 工法研究会事務局製の CABOCON 高強度（S）[6]を使用した．各 5 本の引張試験片を作成して引張試験結果を実施した．表-4 および表-5 には主な機械的性質を示す．

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．

表-4 および表-5 によると，高強度 CFRP では，ヤング係数は 1.52×10^5 N/mm^2（使用鋼材の 0.76 倍）および 4.25×10^5 N/mm^2（約 2.1 倍）であった．

なお，高弾性 CFRP 板の引張強度については保証値よりも低い値を得た．この原因には，CFRP 板端部のつかみの部分で破壊等が考えられる．

(3) CFRP 板の貼付方法

接着には，主剤であるエポキシ樹脂（白色）と硬化剤である変性脂環式ポリアミン（黒色）を重量比 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，図-2 に示す治具を用いて，CFRP 板に厚さ 1～1.5 mm 程度（1,000 ×50 mm の面積に約 500 g）の CFRP 板中央部が凸となるように接着樹脂を塗布した CFRP 板を鋼 I 桁下フランジに貼付する．

なお，鋼材の表面は，グラインダーで錆・黒皮を除去した状態としている．すなわち，サンドブラスト処理や不陸修正（パテ）処理，プライマー塗布などは行っていない．また，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，実験供試体を上限反転させることにより，下向き姿勢で CFRP 板を接着している．

3. 実験結果

(1) 曲げモーメント－曲率関係

図-3 には，曲げモーメントと曲率の関係を示す．ここで，曲率は，スパン中央における鋼断面ウェブの軸方向に貼付したひずみゲージの計測値から断面内のひずみ勾配を算出して求めている．なお，CFRP で補強した実験供試体 hs，he および he-2 は，CFRP の破断が認められた時点で載荷を終了した．実験供試体 st は，ひずみ硬化域に入って最大荷重が得られないと判断したため，実験を終了した．

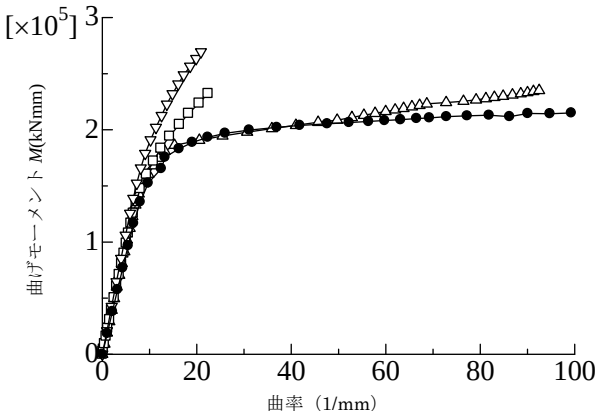

図-3　曲げモーメント－曲率関係

表-6　初期曲げ剛度および最大曲げモーメント

ケース	初期曲げ剛度 ($\times10^4$ kN/mm	補強効果 (%)	最大曲げモーメント ($\times10^5$ kN･mm)	補強効果 (%)
st	1.899	－	2.254	－
hs	1.981	4.32	2.355	4.49
he	2.043	7.58	2.323	3.05
he-2	2.201	15.90	2.700	19.80

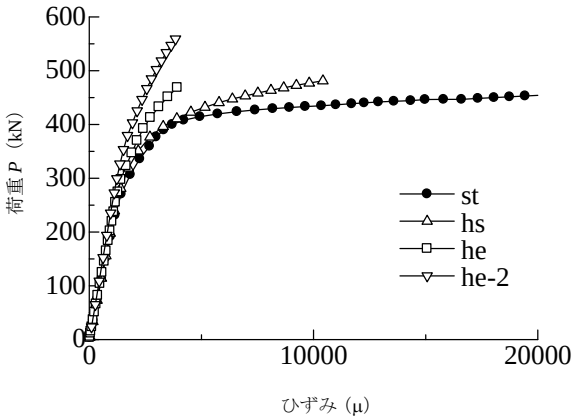

図-4　梁中央部の荷重―ひずみ関係

表-7　各供試体における同荷重でのひずみの比較

荷重(kN)	ひずみ			
	st	hs	he	he-2
200	985	953	918	800
300	1,658	1,572	1,425	1,228
400	3,701	3,407	2,525	1,905
450	17,982	6,612	3,459	2,394

図-3 および表-6 より，CFRP 板を貼付した供試体は，いずれも無補強の供試体に比べ，初期曲げ剛度が上昇している．高強度の CFRP 板を 1 層貼付した hs が 4.3 %，高弾性 1 層の he が 7.6 %，高弾性 2 層の he-2 が 15.9 %，それぞれ向上しており，鋼 I 桁に対する CFRP 板の補強効果が確認できる．また，表-6 より，最大曲げモーメントは，無補強モデルの st に比べ，高強度の CFRP を 1 層貼付した hs は 4.5 %，高弾性 1 層の he は 3.1 %，高弾性 2 層の he-

2 は 19.8 %，それぞれ向上していることがわかる．

(2) 梁中央でのひずみ分布

図-4 には，梁中央部の CFRP 板表面における荷重－ひずみ関係を示す（ただし，実験供試体 st については鋼表面上）．図-4 および表-7 から，同じ荷重で比較すると，いずれも，無補強モデルのひずみに比べ，補強モデルでは小さい値を示しており，CFRP 板の補強効果は，鋼材降伏後に顕著に認められることがわかる．

(3) 実験供試体の実験終了後の崩壊状況

無補強の供試体 st 以外の実験供試体は，載荷中，CFRP 板端部での剥離は認められず，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，曲げモーメントとせん断力が作用する載荷点の近傍で CFRP が破断が認められた．高強度 CFRP 板を貼付した実験供試体 hs では，高弾性 CFRP を貼付した実験供試体と同様の箇所で CFRP 板が破断した．高強度の CFRP 板では，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-4 および表-5 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．なお，CFRP 板の破断時の終局ひずみは，高弾性で約 3,800μ，高強度で約 17,000μ であった．

4. 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．

本研究より得られた主な結論は次の通りまとめる．

1)使用した高強度および高弾性の CFRP 板のヤング係数はそれぞれ 1.52×10^5 N/mm^2（使用鋼材の 0.76 倍）および 4.25×10^5 N/mm^2（約 2.1 倍）であった．

2)CFRP 板を貼付した鋼 I 桁の曲げ載荷実験では，いずれも，曲げモーメントとせん断力がともに作用する載荷点近傍で 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 3,800μ，高強度で約 17,000μ であった．

3) 接着剤の性能の向上もあり，従来，炭素繊維シートを接着する際に必要であった接着効果を高めるための鋼材の表面処理（サンドブラストやプライマー塗布など）を施さない状態でも，十分な補強効果が得られることを確認した．

謝辞：実験の実施には，三菱化学産資(株)の久部修弘氏，および(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・LLC 部会：鋼橋の LLC 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 polymaer 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.

EXPERIMENTAL STUDY ON STRENGTHENING EFFECT OF STEEL GIRDER BY CFRP PLATE OF HIGH ELASTIC MODULUS

Masahide MATSUMURA and Toshiyuki KITADA

The use of CFRP sheet and plate of tensile strength can be an effective stgrengthening method for a superannuated exsistinge steel I girder in terms of improving its load carrying capacity.

Experimentally investigated in this study strengthening effect of steel girder of I-shape by CFRP plate of high elastic modulus through a bending test. Strengthening effect derived from the differences in elastic modulus of CFRP Plate is verified by campared with an strengthening effect in the case strengthened by CFRP plate of high tensile strength.