

ボルト継手を有する鋼 I 桁下フランジへの高弾性 CFRP 板による 補強方法に関する実験的研究

Experimental study on strengthening method of lower flange plate of I shaped steel girder with bolted connection by high modulus CFRP strips

越智内士*, 松村政秀**, 久部修弘***

Nobuhito Ochi, Masahide Matsumura, Nobuhiro Hisabe

*博(工), 明石工業高等専門学校講師, 都市システム工学科 (〒674-8501 兵庫県明石市魚住町西岡 679-3)

**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)

*** 三菱樹脂(株), 産業資材事業本部炭素繊維事業部 (〒103-0021 東京都中央区日本橋本石町 1-2-2)

The installation of CFRP strips of high modulus can be effective for strengthening a superannuated existing steel I girder with regard to improving its load carrying capacity. Here, shear plates of the bolted connections become obstacles in installing the CFRP strips onto the lower flange plate of I shaped steel girder. Then, experimentally investigated in this study is the strengthening effect of the methods to prevent the CFRP strips of high modulus from debonding in the vicinity of the bolted connection of lower flange plate of I shaped steel girder through a bending test. It is concluded that the proposed methods are effective to prevent the debonding of the CFRP strips and further investigations are needed to develop more effective methods.

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

キーワード: 高弾性 CFRP 板, 鋼桁, 補強, 曲げ載荷実験, 剥離

1. はじめに

鋼板の腐食による板厚減少や設計自動車荷重の増加に伴い, 既設鋼橋の桁部材の耐荷力が計算上不足するケースも見られる. このような耐荷力が不足する既設の鋼桁の機能回復および耐荷力向上を目的とした補強法には, 鋼板の添接補強や, より補強効果を高めるためにプレストレスを導入して鋼板を添接する補強法, ケーブルや鋼棒を用いる補強法などが挙げられる¹⁾. ここで, これら従来の補強法では, 加熱を伴う溶接や, 母材への孔あけが必要なボルト接合などにより, 重量の大きい鋼部材を接合する必要があることから, 軽量で接着接合により施工が可能な連続繊維材料の鋼構造物への適用も検討されている²⁾.

このとき, 連続繊維材料の中でも, 引張特性に優れた炭素繊維に注目すると, 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

適用可能である. 補強効率に着目すると, 繊維体積率 V_f の大きく, かつ高い弾性率を有する高弾性 CFRP 板が補強効率に優れている. この高弾性 CFRP 板を鋼断面に貼付する補強効果は, 例えば, 文献 3), 4) で明らかにされている. しかし, 実際の鋼 I 桁はボルト継手により接合されており, 下フランジにはボルト継手部で連結板が突出している. この連結板を跨ぎ連続して CFRP 板を貼付することができないため, 鋼 I 桁下フランジに CFRP 板を接着し補強する場合にも, ボルト継手部近傍で, CFRP 板を連続して貼付できない影響と適用可能な補強方法については, 不明な点が多い.

そこで, 本研究では, ボルト継手を有する鋼 I 桁の下フランジに高弾性 CFRP 板を貼付し補強する場合を対象として, i) 連結板近傍の CFRP 板の端部における剥離防止補強, および, ii) ボルト継手を有する H 形鋼の継手部周辺の補強方法の有効性を, 継手部を有する H 形鋼供試体の下フランジに 2 層の高弾性 CFRP 板を貼付した実験供試体を用いる曲げ載荷実験にて検討している.

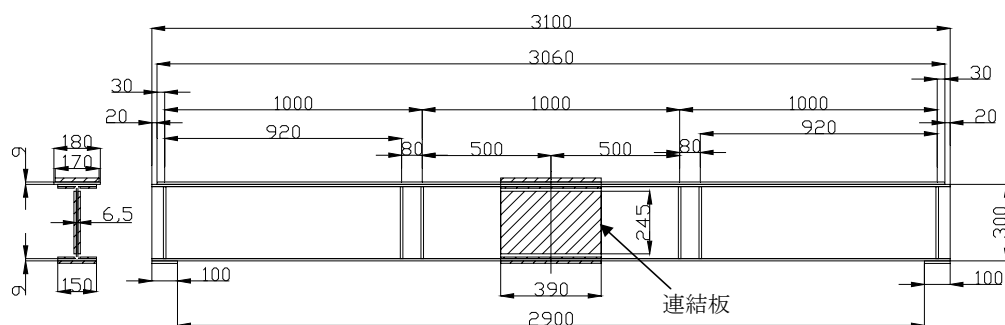


図-1 実験供試体寸法（寸法単位：mm）

表-1 実験供試体に用いた H 形鋼および鋼板の寸法
(寸法単位：mm)

断面	フランジ板厚	ウェブ板厚	カバプレート	連結板		
				上フランジ	下フランジ	ウェブ
$h \times b$ 300×150	9	6.5	180×9	(上面) 170×16 (下面) 64×6	(上面) 64×6 (下面) 150×9	245×9

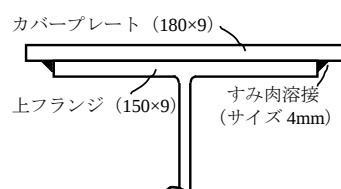


図-2 カバープレートの取り付け状況

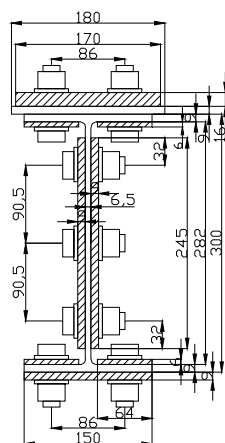


図-3 実験供試体の摩擦接合継手部 (寸法単位: mm)

2. 実験概要

2.1 実験供試体概要および載荷方法

ボルト継手を有する鋼 I 桁を想定した実験供試体は、長さ 1,550mm の 2 体の H 形鋼供試体を、高力ボルト摩擦接合継手により連結して製作する。実験供試体の寸法および形状は、図-1 および表-1 に示すとおりである。

H形鋼供試体の上フランジには、上フランジの座屈が先行して生じないように、フランジと同じ板厚のカバープレートと溶接接合により設置している（図-2）。また、

高力ボルト摩擦接合継手部は高力ボルト M20 (F10.8T) を用いた摩擦接合により、道路橋示方書⁵⁾にしたがって設計した(図-3)．すなわち、H形鋼の下フランジにSS400材の公称降伏応力 ($\sigma_F=235 \text{ N/mm}^2$) が生じる作用曲げモーメントに対して、母材よりも、ボルトおよび連結板が軸方向力、せん断力、および、曲げモーメントに対して安全となるようにボルト継手部を設計した．なお、連結板の寸法は、フランジに設置の連結板の断面積 A_f およびフランジとウェブに設置の連結板の断面二次モーメント I_f が、母材フランジの断面積 A_f および母材全体の断面二次モーメント I 以上となるように決定している ($A_f=5,606 \text{ mm}^2 > A_f=4,320 \text{ mm}^2$ で、 $A_{fj}/A_f=1.298$ 、 $I_f=1.492 \times 10^8 \text{ mm}^4 > I=9.782 \times 10^7 \text{ mm}^4$ で $I_f/I=1.525$)．したがって、本実験供試体のボルト継手部は、CFRP板の剥離発生が想定される荷重レベルまで十分耐えられる設計としている．なお、連結部の接合面は、黒皮を除去した後、赤錆を発生させた状態としている．

ここで、これらの継手部を有する H 形鋼供試体の補強のため下フランジに CFRP 板を貼付する場合、連結板と下フランジ面とで段差が生じるため、CFRP 板を連続して貼付できない。そのため、下フランジ中央の連結板の左右に、それぞれ 2 層の高弾性 CFRP 板を貼付する場合を考える。

また、鋼に貼付した CFRP 板の端部では、図4 (a) に示す CFRP 板端部が開口するモードⅠと図4 (b) に示す面内でずれるモードⅡの剥離モードの発生が想定される文献6)および7)によると、曲げの作用を受ける鋼1桁の引張側に CFRP 板を貼付する場合には、これら2つの剥離モードのうち、モードⅡよりもモードⅠの剥離モードの発生が卓越しており、CFRP 板端部でのモードⅠの剥離防止が、CFRP 板の剥離発生、および剥離の進展防止に有効であることが示されている。すなわち、補強効果を高めるにはこの連結板近傍における CFRP 板端部において、モードⅠの剥離を防止するための剥離防止補強が必要である。なお、剥離防止補強とは、最も剥離が進行すると考えられる CFRP 端部に鋼板等を設置し、面外方向へ浮き上がる剥離発生と剥離後の剥離の急速な進展を防ぐ方法であり、例えば、文献8)にはコンクリート構造物を

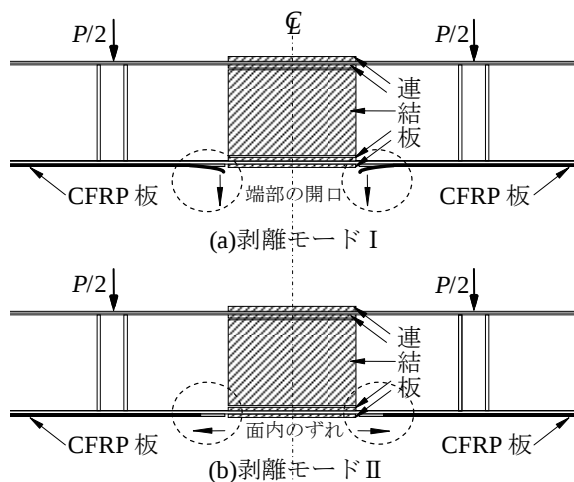


図4 鋼I桁下フランジに貼付したCFRP板端部の剥離モード

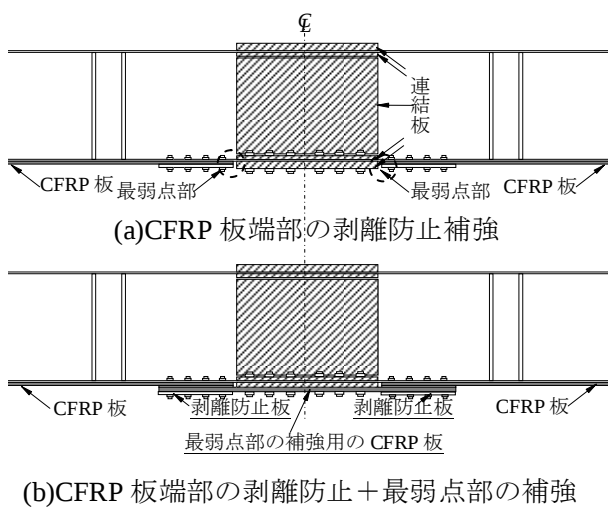


図5 剥離防止対策

対象とした剥離防止補強について提案されている。また、CFRP板端部に剥離の防止補強を施すと、CFRP板端と連結板との間の断面が無補強のまま残り、この断面が最弱点となる。

そこで、本研究では i) 連結板近傍のCFRP板の端部における剥離防止補強 (図-5(a))、および、ii) ボルト継手を有する鋼I桁の継手部周辺の補強方法 (図-5(b)) の有効性を、継手を有するH形鋼供試体の下フランジに2層の高弾性CFRP板を貼付した実験供試体を用いて実験的に検討する。ここで、実際の鋼I桁には、設計荷重載荷時に曲げモーメントとせん断力が作用する桁端部寄りに連結部が設けられることが多く、連結部近傍の梁断面には曲げモーメントに比較して相対的に大きなせん断力が作用している。この連結部近傍の下フランジにCFRP板を貼付する場合、CFRP板端部には、桁のたわみ変形によりCFRP板が面外方向に浮き上がって剥離するモードI、およびせん断力の作用により下フランジとCFRP板が面内方向にズレることにより剥離するモードIIの剥離が懸

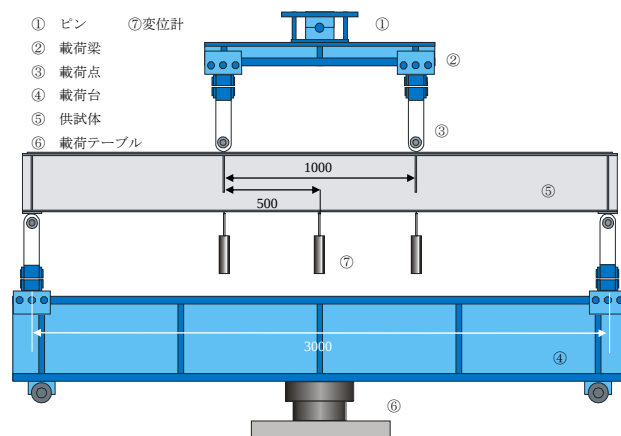


図-6 曲げ載荷試験概要 (寸法単位: mm)



図-7 実験供試体の設置状況

表-2 使用した鋼材の機械的性質

引張試験片	実測板厚 (mm)	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 (%)
6mm	5.59	307.0	435.0	2.02	0.282	46.6
9mm	8.66	297.7	431.5	2.01	0.283	45.4
16mm	15.50	288.6	436.3	2.00	0.282	44.3
H形鋼	8.40	303.7	479.5	1.98	0.286	39.0

念される。部分縮小模型を用いる実験では、実際の鋼I桁と同様な連結部の応力状態を再現することは困難であるため、載荷実験では、図-6に示すように曲げモーメントのみが作用する梁の中央部にCFRP板端部を設け、CFRP板端部にモードIの剥離モードが顕著に生じる載荷条件を採用している。図-7に実験供試体の設置状況を示す。

2.2 鋼材の機械的性質

実験供試体を構成するH形鋼、カバープレートおよび連結板にはSM400材を用いている。表-2には、板厚の異なる各鋼板から切り出した各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。同表より、4種類の鋼材は、降伏点で約6%、引張強度で約11%異なる以外はほぼ同様な性質を示していることが確認できる。

2.3 CFRP 板の貼付方法および機械的性質

CFRP 板の接着樹脂には、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。CFRP 板は、引抜成形法によって炭素繊維を一方向に配し、エポキシ樹脂を含浸・硬化させた CFRP 板を使用した^{3) 4)}。さらに、CFRP に塗布する際に気泡が生じないように、図-8 に示す治具を用いて、厚さ 0.5~1mm 程度 (1,000×50mm) の面積に約 250g) 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圧、貼付した (図-9)。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。また、載荷実験までの養生期間は、すべての実験供試体とも 9 日間である。使用した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。接着樹脂は表-3 に示している JIS の試験方法に準拠して強度試験などを行い表-3 の機械的性質を得ている。

また、CFRP 板の機械的性質を調べるため、JIS K 7073 炭素繊維強化プラスチックの引張試験方法に準拠して引張試験を行った。ここで、引張試験に用いた CFRP 板試験片の形状を図-10 に示す。CFRP 板の両端部には、板厚 2mm のアルミ製のタブをエポキシ樹脂接着剤で接着し、試験片の中央には、繊維方向にひずみゲージを貼付している。CFRP 板の引張試験によって得られた主な機械的性質を表-4 に示す。また、図-11 には CFRP 板の応力-ひずみ関係を示す。CFRP 板の引張試験は、計 8 本の試験片を用いて行ったが、このうち 4 体はアルミ板を接着した CFRP 板端部のつかみ部で試験中にズレが生じたため、表-4 に



図-8 接着樹脂塗布治具

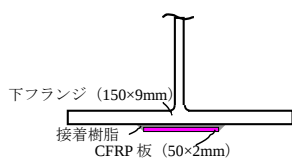


図-9 CFRP 板の貼付状況

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~	1.60
可使時間 (分)	温度上昇法	10℃	30 以上	87
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	84
圧縮弾性率 (N/mm ²)	JIS K 7208 準	23℃	1000 以	2,240

表-4 高弾性 CFRP 板の機械的性質

	高弾性 CFRP 板				
	No.1	No.2	No.3	No.4	平均値
ヤング係数 (×10 ⁵ N/mm ²)	4.54	4.50	4.45	4.51	4.50
引張強度 (N/mm ²)	1169	1254	1350	1467	1310
厚さ (mm)	2.11	2.12	2.06	2.05	2.08
幅 (mm)	11.74	11.72	11.48	12.33	11.75
重量 (g/m)					187.6
単位重量繊維量 V _f (%)					60-70

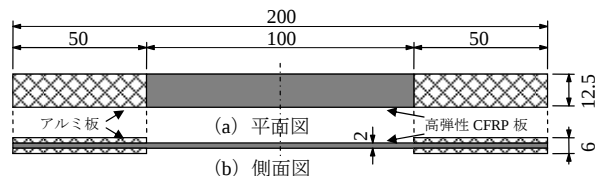


図-10 高弾性 CFRP 板の引張試験片寸法 (寸法単位: mm)

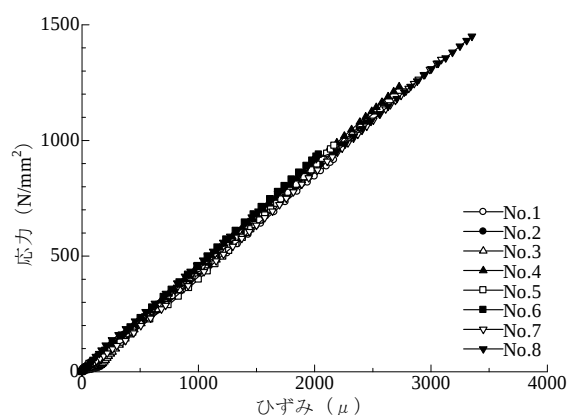


図-11 高弾性 CFRP 板の応力-ひずみ関係

はズレの生じなかった 4 体の試験片より得られた結果をまとめている。

表-4 より、各試験片間において、ヤング係数の値はほとんど差異が認められないが、引張強度のばらつきが顕著である。ただし、いずれも保証値 (引張強度で 1,200 N/mm², ヤング係数で 4.50×10⁵ N/mm²) を満たしていることが確認できる。

2.4 実験供試体の種類および補強方法

表-5 に示す計 4 種類の補強供試体を設定した。表中、実験供試体 S0 は継手部を有さない CFRP 板補強なしの H 形鋼供試体、実験供試体 He0 は S0 の下フランジに 2 層の高弾性 CFRP 板 (長さ 2,800mm) を図-12 に示すように貼付した実験供試体⁴⁾である。なお、積層構造は下フランジ表面から、接着樹脂-CFRP 板 (1 層目)-接着樹脂-CFRP 板 (2 層目)であり、CFRP 板の側面には溢れた樹脂を約 45 度の角度で整形した。

実験供試体 He は、下フランジ中央の連結板の左右に、それぞれ 2 層の高弾性 CFRP 板 (長さ 1,200 mm) を接着樹脂により貼付した実験供試体である (図-13 参照)。なお、貼付順序は実験供試体 He0 と同様である。また、実

表-5 実験供試体の内訳

実験供試体名	高弾性 CFRP 板の貼付	備考
He (St)	連結部の左右にそれぞれ 2 層	継手部あり
He-R-t	連結部の左右にそれぞれ 2 層 端部剥離防止補強, 継手部補強 (3 層)	継手部あり テフロンシート挿入
He-R	連結部の左右にそれぞれ 2 層 端部剥離防止補強, 継手部補強 (3 層)	継手部あり
St0 ⁽⁴⁾	貼付なし	継手部なし
He0 ⁽⁴⁾	2 層	継手部なし

表-6 鋼材および高弾性 CFRP 板の機械的性質

部材	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	ポアソン 比	伸び率 (%)
鋼板	297.8	434.3	2.01×10^5	0.282	45.4
H 形鋼	303.7	479.5	1.98×10^5	0.286	39.0
CFRP 板	—	1310.1	4.52×10^5	—	—

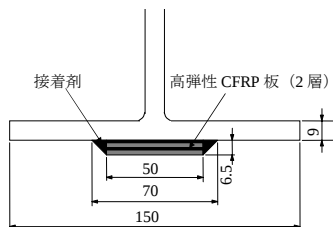
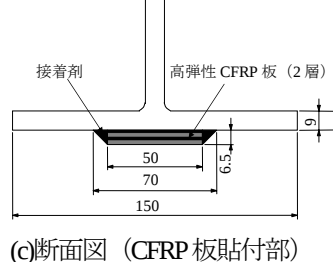
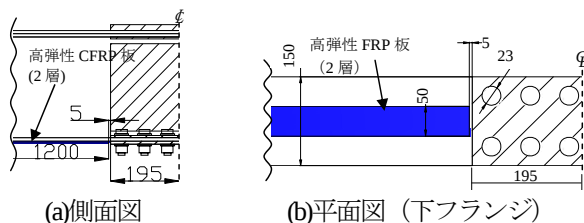
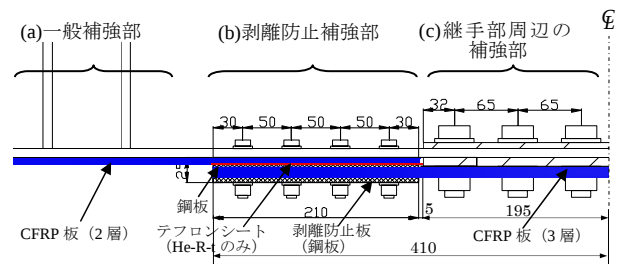
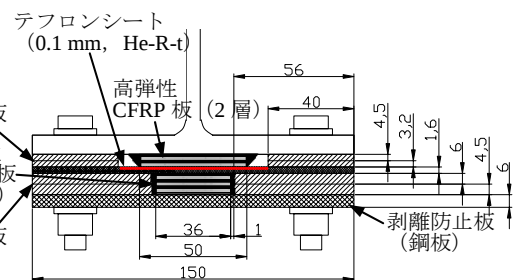
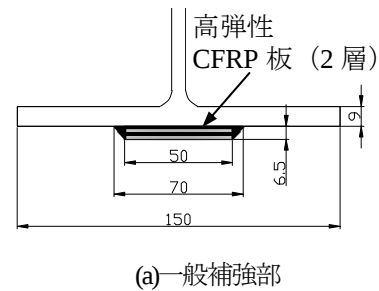
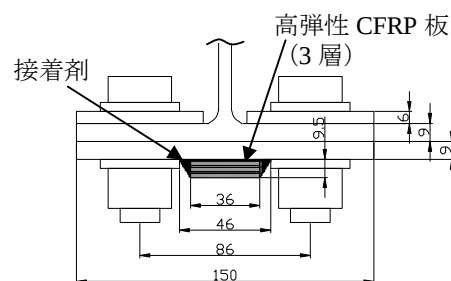
図-12 CFRP 板貼付断面位置
(実験供試体 He0, 寸法単位: mm)

図-13 CFRP 板貼付位置および継手周辺部 (実験供試体 He, 寸法単位: mm)

実験供試体 He の载荷中、弾性域内において、連結部側の CFRP 板端部でモード I の剥離が生じたため、この時点で一度除荷し、着目区間において CFRP 板が剥離した状態、すなわち、無補強に相当する状態で再度载荷実験を行った。これを実験供試体 St と称する。

図-14 CFRP 板の貼付位置および下フランジ継手周辺部
(実験供試体 He-R-t および He-R, 寸法単位: mm)

(b)剥離防止補強部



(c)継手部周辺の補強部

図-15 剥離防止および継手周辺部の補強方法 (実験供試体 He-R-t および He-R, 寸法単位: mm)

また、実験供試体 He の継手部、継手部周辺の補強および CFRP 板端部での剥離を防止するために、剥離防止補強を施した 2 体の補強実験供試体、すなわち実験供試体 He-R-t および He-R を設定する。これらの 2 体の補強供試体では、図-14 および図-15 に示すように、下フランジ中央の連結板の左右にそれぞれ 2 層の高弾性 CFRP 板（長さ 1,200 mm）を貼付し、これらの 2 層の CFRP 板端部の剥離防止補強を施している。さらに、下フランジ中央を中心として左右にそれぞれ 410mm の区間には、継手部周辺の補強を施すために、高弾性 CFRP 板（長さ 820mm）



図-16 継手部の高力ボルト配置 (実験供試体 He-Rt および He-R)

を 3 層貼付する。積層構造は下フランジ表面から、接着樹脂-CFRP 板 (1 層目)-接着樹脂-CFRP 板 (2 層目)-接着樹脂-剥離防止板、この上に継手部周辺の補強用に、接着樹脂-CFRP 板 (3 層目)-接着樹脂-CFRP 板 (4 層目)-接着樹脂-CFRP 板 (5 層目)-接着樹脂-剥離防止板であり、CFRP 板の側面には溢れた樹脂を約 45 度の角度で整形した。

ここで、剥離防止補強のための鋼板および継手部周辺の補強に用いた CFRP 板定着のための鋼板を同一箇所、すなわち、CFRP 板が重なる 210mm の区間で、同一の鋼板を用いて補強している。なお、これらの鋼板の H 形鋼への接合には、M10 (F10.8T) の高力ボルトを用いている (図-16)。さらに、これら 2 体の補強実験供試体では、接着剤と鋼板の間のテフロンシートの有無の違いを設定している。すなわち、実験供試体 He-Rt には、図-14 (b) に示すように、テフロンシートを鋼板と接着剤の間に挟み、2 層の CFRP 板上面の摩擦を低減している。したがって、実験供試体 He-R は 2 層の CFRP 体のモード I とモード II の両者に対する補強の効果、実験供試体 He-Rt は 2 層の CFRP 板のモード I のみに対する補強の効果をも、それぞれ期待した補強供試体である。なお、図-14 中の (a) ~ (c) はそれぞれ、(a) 一般補強部、(b) 定着部 (継手部の端部に近い一般部) および (c) 継手補強部であり、図-15 にそれらの断面図を示している。なお、実験供試体 He-Rt および He-R において、剥離防止板の追加によって積層の CFRP 層へ面圧が作用する場合には、摩擦力が大きくなり剥離発生時期が変化することが懸念される。そこで、実験では、剥離防止板の直下の接着剤が硬化する前に、実験で計画した積層 CFRP 層の合計層厚とほぼ同じ板厚の鋼板を介して剥離防止板を設置し、積層の CFRP 層へ面圧が生じないように配慮している。この工夫は文献 6) における部分供試体を用いた剥離制御板の設置効果の検討の際に用いた方法と同様であり、CFRP 板自体に大きい面圧は作用していないと考えている。ただし、実験時の作用面圧については測定値を得ていないため、今後、面圧が及ぼす影響については精査が必要である。

各実験供試体には、継手部周辺の曲率を求めるために、図-17 および図-18 に示すようにスパン中央断面から 345 mm の位置のフランジおよびウェブにひずみゲージを貼

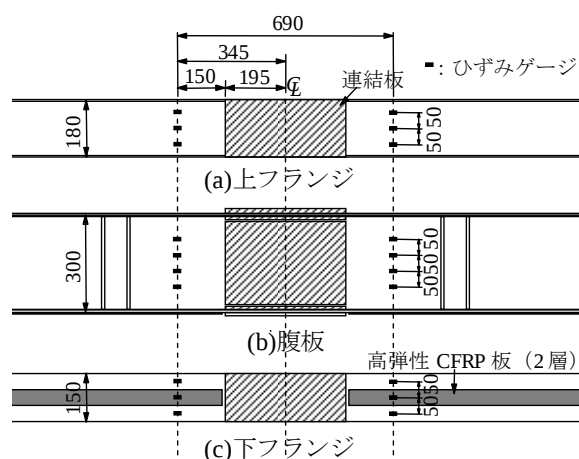


図-17 実験供試体 He (St) のひずみゲージ貼付位置 (寸法単位: mm)

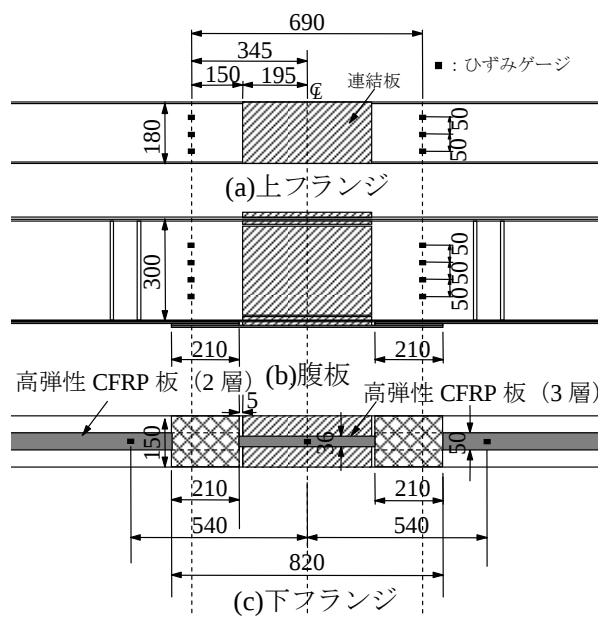
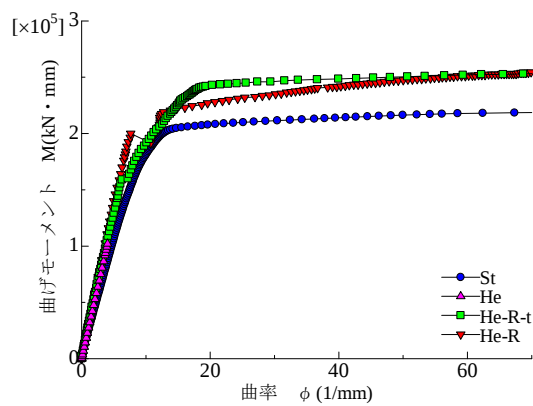


図-18 実験供試体 He-Rt および He-R のひずみゲージ貼付位置 (寸法単位: mm)

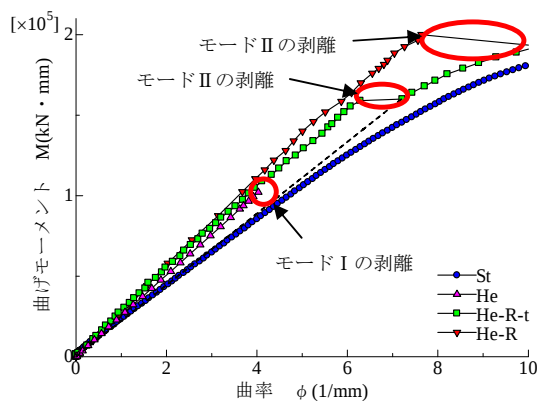
付している。ただし、実験供試体 He-Rt および He-R では、スパン中央断面から 345 mm の位置の下フランジには、剥離防止補強を施しているため、下フランジ側面にひずみゲージを貼付している。さらに、実験供試体 He では、CFRP 板と実験供試体の鋼材とのひずみの違いおよび CFRP 板剥離のひずみの値を確認するために、スパン中央断面から 345 mm の位置の CFRP 板上に、実験供試体 He-Rt および He-R では、CFRP スパン中央、および、スパン中央断面から 540 mm の位置の CFRP 板上に、それぞれひずみゲージを貼付している。

3. 実験結果

図-19 には、載荷実験より得られた曲げモーメント-曲率関係を示す。曲率は、スパン中央断面から左右に 345 mm 離れた位置のフランジおよびウェブに貼付したひず



(a)終局限界状態



(b)初期荷荷状態

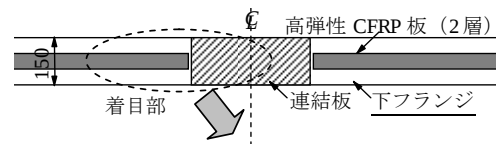
図-19 曲げモーメントー曲率関係

みゲージの計測値から求めた断面の平均的なひずみ勾配を用いて算出している。図-19(b)には各実験供試体の初期曲げ剛性を比較するため、おおむね鋼板が降伏に至るまでを拡大してプロットしている。

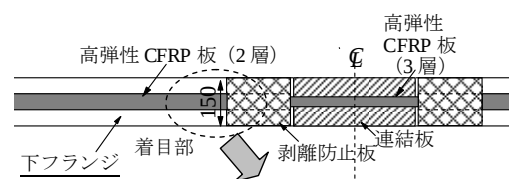
なお、高弾性 CFRP 板の剥離モードとしては、実験供試体 He-R-t および He-R ではモード I、He ではモード II の剥離が生じた。図-19(b)中ではそれらの CFRP 板の剥離の生じた点をプロットしている。これらの図より、実験供試体 He-R-t および He-R は CFRP 板のモード II の剥離が発生した後、急激にひずみが増大していることがわかる。

実験供試体 He-R-t および He-R の初期荷荷状態の挙動について比較すると、鋼板と接着剤との間に生じる摩擦の差により、実験供試体 He-R の方が He-R-t よりも大きな荷重レベルで CFRP の剥離が生じている。なお、いずれの実験供試体においても、ボルト継手部の損傷や部材の離間は認められなかった。

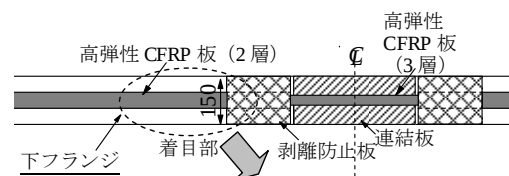
また、図-20 には、CFRP 板の剥離の様子を示す。同図(a)より、実験供試体 He ではボルト継手部近傍の CFRP 板端部を起点とするモード I の剥離が発生し、その衝撃により広い範囲にわたって CFRP 板が剥離したことが確認できる。一方、同図(b)および(c)より、剥離防止板を設置した実験供試体 He-R-t および He-R では、モード I の剥離は発生せず、下フランジと CFRP 板間で剥離したことが



(a)実験供試体 He



(b)実験供試体 He-R-t



(c)実験供試体 He-R

図-20 鋼桁下フランジの CFRP 板の剥離の状態

確認できる。さらに、実験供試体 He-R-t と比べ、実験供試体 He-R では剥離した CFRP 板の浮き上がりも観察され、モード II による剥離発生後、一気に剥離が進展したと推察できる。なお、図-19 に示したとおり、剥離防止板を設置した実験供試体 He-R-t および He-R では、実験供試体 He におけるモード I の剥離発生時よりも大きな変位まで剥離は生じておらず、剥離防止板による補強効果が認められる。また、剥離防止板により、剥離した CFRP 板が落下等も防止できると考えられる。

表-7 初期曲げ剛性および最大曲げモーメント

実験 供試体	初期曲げ剛性 ($\text{kN} \cdot \text{mm}^2$)	CFRP 板によ る補強効果 (%)	最大曲げモー メント($\text{kN} \cdot$ mm)	CFRP 板によ る補強効果 (%)
St	2.153×10^4	—	2.400×10^5	—
He	2.527×10^4	17.4	1.044×10^5 *	—
He-R-t	2.721×10^4	26.4	2.625×10^5	9.4
	2.224×10^4 **	3.3 **	—	—
He-R	2.819×10^4	30.9	2.625×10^5	9.4
St0 ¹⁾	1.899×10^4	—	2.254×10^5	—
He0 ¹⁾	2.201×10^4	15.9 ***	2.700×10^5	19.8 ***

*は載荷終了時の値、**は剥離防止補強部でのせん断型剥離発生後、継手部周辺の補強のみが有効であるときの値および***はSt0に対する補強効果であることを示す。

表-7には、実験から得た初期曲げ剛性および最大曲げモーメントの値をまとめて示す。なお、同表において、CFRPによる補強効果は、継手部を有する実験供試体については実験供試体 St、継手部が無い実験供試体については実験供試体 St0 の初期曲げ剛性および最大曲げモーメントの値を基準として算出している。

継手部の無い、実験供試体 He0 (CFRP 板 2 層貼付) と St0 とを比較すると、CFRP 板に剥離が生じず、かつ継手部が無い場合には、2 層の高弾性 CFRP 板を貼付することによって、初期曲げ剛性は 15.9%、最大曲げモーメントは 19.8%、それぞれ向上することがわかる。一方、無補強の実験供試体 St0 (継手部なし) と St (継手部あり) とを比較すると、継手部の有無による初期曲げ剛性および最大曲げモーメントの差は、それぞれ、13.4%および 6.5%であり、これは、主として継手部の設置によって増加する H 形鋼の実験供試体の曲げ剛性の増加による影響である。

継手部を有する場合には、初期曲げ剛性が、高弾性 CFRP 板を 2 層貼付した実験供試体 He で 17.4%、剥離防止補強および継手部補強を施した実験供試体 He-Rt および He-R で、26.4%および 30.9%、それぞれ向上しており、これは、継手部、剥離防止補強部および継手部補強部の設置による曲げ剛性の増加による影響を表している。

ここで、CFRP 板剥離時の CFRP 板のひずみは、モード I の剥離が生じた実験供試体 He では約 760μ 、モード II の剥離が生じた実験供試体 He-Rt および He-R では、約 $1,100 \mu$ 、および約 $1,400 \mu$ であった。一方、実験供試体 He0 では、CFRP 板が破断して終局状態となり、この時の CFRP 板のひずみは約 $3,800 \mu$ であった。すなわち、実験供試体 He-Rt および He-R に施した剥離防止補強は、高弾性 CFRP 板の破断ひずみの約 29~37%に相当する、 $1,100 \sim 1,400 \mu$ のひずみまで、モード I の剥離防止とモード II の剥離抑制に有効であることがわかった。

表-8には、下フランジおよび CFRP 板表面上において、

表-8 鋼および CFRP 板表面上の計測ひずみ (μ)

実験供試体	$\phi=3$ (1/mm)		$\phi=6$ (1/mm)		$\phi=9$ (1/mm)	
	鋼	CFRP 板	鋼	CFRP 板	鋼	CFRP 板
St	617	—	1206	—	1799	—
He	564	614	—	—	—	—
He-R-t	569	620	1024	1185	1807	—
He-R	566	640	1086	1247	2092	—

曲率が、 $\phi=3, 6, 9$ (1/mm) のときの計測ひずみを示す。なお、実験供試体 He は、スパン中央断面から 345mm の位置、実験供試体 He-Rt および He-R は、スパン中央断面からスパン中央断面から 540mm の位置の CFRP 板表面の計測ひずみである。同表より、CFRP 板が剥離するまでは、鋼表面のひずみは、CFRP 板を貼付した実験供試体の方が鋼供試体よりも小さく、CFRP 板の補強効果が認められる。

4. まとめ

ボルト継手を有する鋼 I 桁下フランジに高弾性 CFRP 板を貼付する場合、連結板と下フランジ面との段差により CFRP 板を連続して貼付することができないため、この継手部付近の CFRP 板端部を起点とする剥離が発生し十分な補強効果が得られないことが懸念される。そこで、本研究では、この影響とこれまでの研究成果を踏まえた適用可能な補強方法として、CFRP 板端部の剥離防止補強および継手部周辺の補強を施し、継手部付近での CFRP 板の剥離発生と、これらに対する補強効果を曲げ載荷実験により実験的に検討した。本研究より得られた主な結論は、以下の通りである。

- 1) 鋼 I 桁下フランジに高弾性 CFRP を貼付する場合に、ボルト継手部付近で CFRP 板を不連続に貼付する場合には、この CFRP 板端部を起点とする CFRP 板の面外方向の剥離（主にモード I の剥離）が早期に発生するため十分な補強効果が得られない。したがって、この面外方向の剥離に対する何らかの剥離防止対策を施す必要がある。
- 2) CFRP 板端部に剥離防止板を設置すると、CFRP 板端部を起点とする面外方向の剥離防止に有効であり、下フランジと CFRP 板間で面内方向の剥離（モード II の剥離）が発生するまで、CFRP 板による補強効果が期待できる。また、剥離防止版の設置は、CFRP 板端部の剥離後に衝撃的に進行する CFRP 板の剥離による CFRP 板の落下防止にも有効である。
- 3) 剥離防止板設置後の終局状態は、剥離防止補強部におけるモード II の剥離発生であり、今回行った実験では、実験数や条件が限られるが、このときの CFRP 板のひずみは、約 $1,100 \sim 1,400 \mu$ であった。これは、高弾性 CFRP 板の破断ひずみの約 29~37%に相当する。

以上のとおり，本研究では，ボルト継手部近傍における CFRP 板端部の剥離に対する補強の必要性を実験結果に基づいて提起した．本研究で実施した実験数や実験条件は限られているため，今後，引き続き実験データを収集し，継手部を有する鋼 I 桁の下フランジに CFRP 板を貼付する補強に有用な資料を作成していきたいと考えている．また，本研究で提案した補強方法によっても，剥離が生じない条件で鋼 I 桁下フランジに高弾性 CFRP 板を貼付する場合に比べると，十分な補強効果が得られたわけではない．今後，引き続き検討を進めたいと考えている．

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，2002.9
- 2) 渡辺憲市，板垣一也，鈴木博之：炭素繊維強化樹脂版による鋼橋の補強，鋼構造年次論文報告集，第 8 巻，日本鋼構造協会，pp.679-682，2000.11
- 3) David Schnerch, Mina Dawood, Sami Rizkalla, Design Guidelines for the Use of HM Strips: Strengthening of Steel-concrete composite bridges with high modulus carbon fiber reinforced polymer (CFRP) strips, Technical Report No.IS-06-02, North Carolina State University, 2006.2
- 4) 松村政秀，北田俊行，久部修弘：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，構造工学論文集，Vol.54A，土木学会，pp.834-841，2008.3
- 5) 道路橋示方書・同解説，II．鋼橋編，社団法人 日本道路協会，2002.3
- 6) 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，Vol.51A，土木学会，pp.183-192，2005.3
- 7) 小笹弘晃，北條正樹，田中基嗣，松村政秀，北田俊行，並木宏徳：鋼橋の CFRP Pre-Stress 補強における接着はく離破壊の有限要素法による検討，第 33 回 FRP シンポジウム講演論文集，日本材料学会，pp.348-350，2004.3
- 8) 堀川教世，日下貴之，並木宏徳，高木宣章，井上真澄，丸山康平，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレードシンポジウム論文報告集，第 2 巻，pp.103-106，2002.10.

(2008 年 9 月 18 日受付)