

(46) FRPによる鋼桁腹板の補修・補強方法の 確立に向けた実験的研究

若林 大¹・宮下 剛²・奥山 雄介³・長井 正嗣⁴
小出 宣央⁵・小林 朗⁶・秀熊 佑哉⁷・堀本 歴⁸

¹正会員 (株) 高速道路技術研究所 橋梁研究室 (〒194-0035 東京都町田市忠生1-4-1)
E-mail:d.wakabayashi.aa@ri-nexco.co.jp

²正会員 長岡技術科学大学 環境・建設系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)
E-mail:mtakeshi@vos.nagaokaut.ac.jp

³学生会員 長岡技術科学大学 環境・建設系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)
E-mail:okuyama@stn.nagaokaut.ac.jp

⁴正会員 長岡技術科学大学 環境・建設系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)
E-mail:nagai@nagaokaut.ac.jp

⁵正会員 川崎重工業(株) 営業推進本部 (〒105-6166 東京都港区浜松町2-4-1)
E-mail:koide_n@khi.co.jp

⁶正会員 新日鉄マテリアルズ(株) 技術部 (〒103-0024 東京都中央区日本橋小舟町3-8)
E-mail:a-kobayashi@nck.nsmat.co.jp

⁷正会員 新日鉄マテリアルズ(株) 技術部 (〒103-0024 東京都中央区日本橋小舟町3-8)
E-mail:y-hidekuma@nck.nsmat.co.jp

⁸正会員 倉敷紡績(株) 技術研究所 (〒572-0823 大阪府寝屋川市下木田町14-5)
E-mail:Wataru_Horimoto@kurabo.co.jp

鋼橋に発生する劣化の多くは腐食であり、補修・補強材として、軽量かつ高強度、高耐久性といった特徴を有する炭素繊維強化樹脂材料(CFRP)が注目されている。これまで、その適用性を検討した研究は数多くなされているものの、主に軸力や曲げを受ける部材を対象としている。しかし、腐食の多くは桁端部の腹板などで発生しており、ここにCFRPを接着して耐力を回復させることを意図した検討はこれまでなされていない。そこで、座屈変形に追従し、耐荷力を向上させる繊維の選定を目的として、種々の繊維を用いた一軸圧縮試験を実施する。ここでは、鋼材とFRPの間に弾性係数が小さく、破断伸びの大きいポリウレタ樹脂パテ材を挿入し、はく離の防止についても検討する。

Key Words : steel girder bridge, corrosion, Carbon Fiber Reinforced Plastic, shear, buckling

1. はじめに

鋼構造物の劣化要因の大半は腐食であり、供用期間の経過とともに劣化の進行が避けられない。劣化を生じた鋼構造物の性能を回復させるために、ボルトや溶接によって鋼板を添接する当て板補修や、損傷部材を交換する部材交換等が行なわれてきたが¹⁾、これらの補修・補強方法では、ボルト孔による断面欠損や溶接入熱による熱影響が生じ、また大型の重機や交通規制が必要となるなど、様々な制約を受けることとなる。そのため供用中の制約条件下での効果的な補修、補強工法が求められてい

る。

このような状況の中、鋼構造物の補修・補強材料として、繊維強化プラスチック（以下、FRPと記す）が注目されている。FRPは、軽量かつ高強度であり、耐候性・耐熱性・耐薬品性・防食性に対して優れた特性を持つため、構造物を延命化させる材料として期待されている。このFRPの中でも特に、炭素繊維に樹脂を含浸硬化させた炭素繊維強化プラスチック（以下、CFRPと記す）の適用を検討した事例が多く報告されている^{2)~8)}。

これらの研究では、主に、トラス橋やアーチ橋の軸力部材、桁橋のフランジなど断面の垂直応力に対する補修

表-1 FRPの材料特性

記号	繊維種類	繊維シート			FRP	
		設計値		実測値 ¹⁾	厚さ ²⁾	弾性係数 ³⁾
		厚さ	弾性係数	弾性係数		
		mm	MPa	MPa		
		t_{cd}	E_{cd}	E_{cm}	t_{FRP}	E_{FRP}
CE	高弾性炭素繊維	0.116	6.40×10^5	7.80×10^5	0.966	9.73×10^4
CU	高強度炭素繊維	0.121	2.40×10^5	2.79×10^5	0.971	3.48×10^4
CS	炭素繊維ストランドシート	0.286	6.40×10^5	7.45×10^5	1.976	1.08×10^5
G	ガラス繊維	0.123	7.40×10^4	1.05×10^5	0.973	1.29×10^4
P	高強度ポリエチレン	0.108	8.80×10^4	9.30×10^4	0.958	1.05×10^4
H	ハイブリッド繊維 (C:G = 1:1)	0.121	3.83×10^5	5.01×10^5	0.971	6.24×10^4

1) FRP引張試験の荷重値を繊維シート設計厚さをを用いた断面積とひずみで除した値

2) 繊維シートの設計厚さに樹脂の厚さ(塗布量/密度)を加えた値

3) 繊維シートの弾性係数(実測値)×繊維シート厚さ/FRP厚さ

を対象としている。周知の通り、鋼橋の大部分は、鉋桁や箱桁構造であり、フランジの腐食のみならず、曲げ、せん断が作用する腹板の腐食損傷が数多く見受けられている。特に、桁端部付近の下フランジ近傍の腹板などが腐食を受けているケースが多い⁹⁾。この部位に CFRP を接着する工法について適用を検討した事例として、文献10)がある。この研究は、実橋梁の支点部補剛材に発生した腐食に対して、CFRP を用いた断面修復の試験施工の事例である。施工後のモニタリングから、補修効果に問題が無いことが確認されているものの、終局時の挙動については、十分に把握されているとは言い難い。

そこで、本研究では、鋼桁端部の腐食に対する合理的な補修・補強工法を確立することを目的とし、その基礎研究として、FRP 接着鋼桁の一軸圧縮試験と腹板をCFRP 補強した鋼桁のせん断座屈試験を計画した。

一軸圧縮試験では、座屈変形に追従し、補強効果の得られる FRP を選定することを目的とし、種々の FRP を接着した鋼板の座屈試験を実施する。

次いで、高弾性型炭素繊維シートを用いて、鋼桁腹板を補強し、せん断座屈試験を実施する。そして、各試験ケースの補強効果の評価とその評価方法の検討を行う。

ここでは、一軸圧縮試験により得られた結果について報告する。

2. FRP 接着鋼板の一軸圧縮試験

2.1 供試体

(1) 繊維シートおよび樹脂材料

本研究で使用した繊維シートは、表-1 に示す高弾性型炭素繊維(CE)、高強度型炭素繊維(CU)、炭素繊維ストランドシート(CS)、ガラス繊維(G)、高強度ポリエチレン(P)、炭素繊維とガラス繊維の複合材であるハイブリッド繊維(H,C:G=1:1)の6種類である。

表-2 樹脂材料の材料特性

樹脂材料	密度 g/cm ³	塗布量 kg/m ²	弾性係数 MPa
ポリウレアパテ	1.25	1.0	66
エポキシ樹脂	1.17	0.6	2533

ここで、CS とは樹脂を含浸・硬化させた FRP ストランド(直径 1~2mm 程度)をすだれ状に連結し、シート状に加工したものであり、現場での樹脂含浸作業がないため施工効率がよく、工場生産されるため品質が良い等特徴を持つ。また、1 層あたりの補強効果が CE3 層分に相当する¹¹⁾。なお、使用した繊維シートはすべて一方向繊維を用いており、繊維方向を試験体の長手方向に合わせて接着を行う。

座屈変形のような大変形に対して、補強効果を発揮させるためには、繊維シートのはく離を抑制する必要がある。そこで、本研究では、鋼材と FRP の間に弾性係数が小さく、破断伸びの大きいポリウレア樹脂パテ材(以下、パテと記す)を挿入することとし、はく離の抑制を図ることとした。接着に使用したエポキシ樹脂とパテの材料特性を表-2 に示す。

(2) 試験ケース

長さ 800 (400) mm、幅 60mm、板厚 9mm の鋼板の両面に FRP を接着し、表-3 に示す試験体を作製した。

ここで、FRP の貼付け工程について説明する。まず、鋼材表面の FRP 貼付け面をディスクサンダーによりケレン(二種ケレン)する。次いで、アセトンなどで表面の油分や汚れを取り除き、プライマーを塗布する。プライマーが乾燥後、パテを用いる試験体では、パテを塗布し、23℃で一晩養生させる。FRP の接着は、エポキシ樹脂の下塗り、繊維シートのセット、ローラーによる脱泡、樹脂の上塗りを積層数分繰返し、23℃で7日間養生する。図-1 に試験体の断面図を示す。

表-3 試験体一覧

ケース	供試体	繊維シート		シート長	鋼材長	ポリウレア 樹脂パテ材	含浸樹脂	試験体数
	記号	1層目	2層目	1層目/2層目				
1-1	CEN	CE	-	400	800	×	エポキシ樹脂	3
1-2	CEU	CE	-	400	800	○	エポキシ樹脂	3
1-3	CUN	CU	-	400	800	×	エポキシ樹脂	3
1-4	CUU	CU	-	400	800	○	エポキシ樹脂	3
1-5	CSN	CS	-	400	800	×	エポキシ樹脂	3
1-6	CSU	CS	-	400	800	○	エポキシ樹脂	3
1-7	GN	G	-	400	800	×	エポキシ樹脂	3
1-8	GU	G	-	400	800	○	エポキシ樹脂	3
1-9	PN	P	-	400	800	×	エポキシ樹脂	3
1-10	PU	P	-	400	800	○	エポキシ樹脂	3
1-11	HN	H	-	400	800	×	エポキシ樹脂	3
1-12	HU	H	-	400	800	○	エポキシ樹脂	3
1-13	CE1	CE	-	300	400	×	エポキシ樹脂	3
1-14	CE2	CE	-	300	400	○	エポキシ樹脂	3
2-1	2CE1	CE	CE	450/400	800	×	エポキシ樹脂	3
2-2	2CE2	CE	CE	450/400	800	○	エポキシ樹脂	3
2-3	G1CE	G	CE	450/400	800	×	エポキシ樹脂	3
2-4	G2CE	G	CE	450/400	800	○	エポキシ樹脂	3
2-5	P1CE	P	CE	450/400	800	×	エポキシ樹脂	3
2-6	P2CE	P	CE	450/400	800	○	エポキシ樹脂	3
2-7	GCS	G	CS	450/400	800	○	エポキシ樹脂	3
2-8	CECS	CE	CS	750/700	800	○	エポキシ樹脂	3

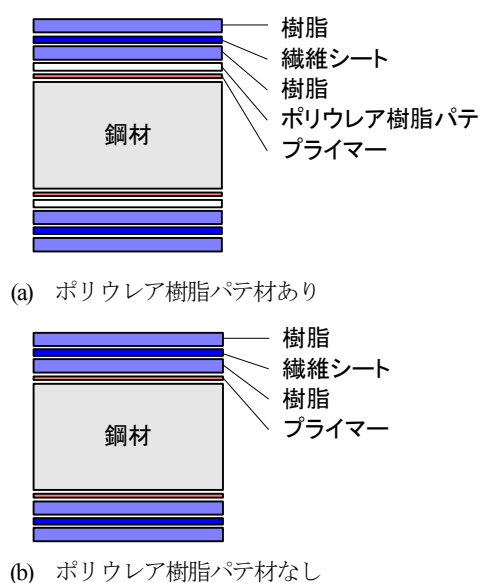


図-1 試験体断面図

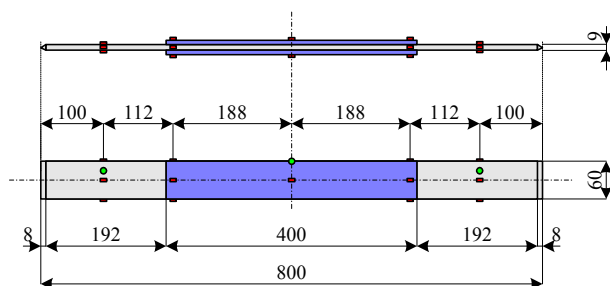


図-2 試験状況

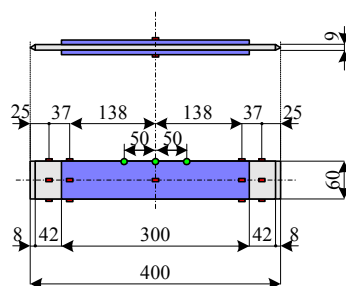
試験ケースを表-3に基づいて説明する。試験ケースはFRPの積層数によりCASE1とCASE2に分かれる。CASE1ではFRPを鋼板の両面に1層接着した場合であり、FRP接着長は鋼材長が800mmのとき400mm、400mmのとき300mmとした。CASE2はFRPを2層接着した場合であり、1層目の接着長を450mm、2層目を400mmとした。ここでは、FRP端部における応力集中を

緩和するため、2層目の端部を25mmずらしている⁸⁾。また、1層目の接着長を750mm、2層目を700mmとしたケース(CECS)についても検討している。

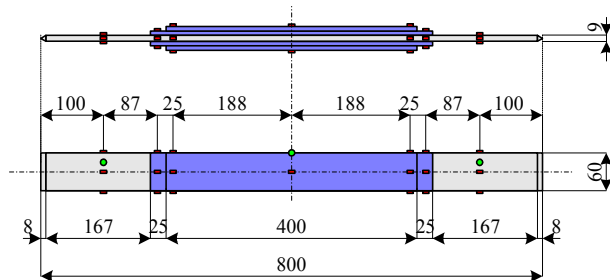
以上より、繊維シートの組合せ、パテの有無、鋼材長をパラメータとして、全22ケース(CASE1:42体、CASE2:24体、計66体)について試験を実施した。



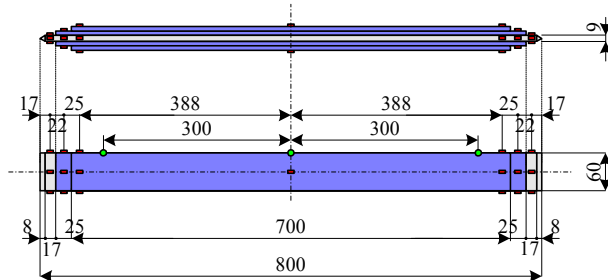
(a)CASE1 (鋼材長 800mm, FRP 接着長 400mm)



(b)CASE2 (鋼材長 400mm, FRP 接着長 300mm)



(c)CASE2 (鋼材長 800mm, FRP 接着長 450mm)



(d)CASE2 (鋼材長 800mm, FRP 接着長 750mm)

図-3 計測位置(赤：ひずみ, 緑：変位)

2.2 試験方法

(1) 荷重方法

荷重は容量2000kNのアクチュエータを1台使用し、単純支持条件を実現させるため、試験体端部に切削加工を施し、治具を用いて荷重を行っている。弾性域での予備荷重を2~3回繰り返した後、本荷重を行い、終局状態まで荷重を漸増させた。なお、荷重システムの制御は、荷重・変位関係における初期勾配の線形性が失われるまでは荷重制御とし、それ以降は変位制御により行った。試験状況を図-2に示す。

(2) 計測項目

各荷重ステップについて、試験体の両面およびコバ面のひずみを計測した。さらに、試験体の面外方向たわみを3点で計測した。ひずみゲージおよび変位計の取り付け位置は図-3に示す通りである。

2.3 一軸圧縮試験結果と考察

(1) 最大荷重と補強効果

各試験体の実験より得られた最大荷重値を表-4に示す。ここで、 P_E は鋼材単体の実寸より計算したオイラー座屈荷重理論値、 P_{max} は実験での最大荷重値である。表-4の最大荷重値を下式により、補強効果としてCASE1, CASE2のそれぞれ算出する。

$$\text{補強効果(\%)} = (P_{max} - P_E) / P_E \times 100 \quad (1)$$

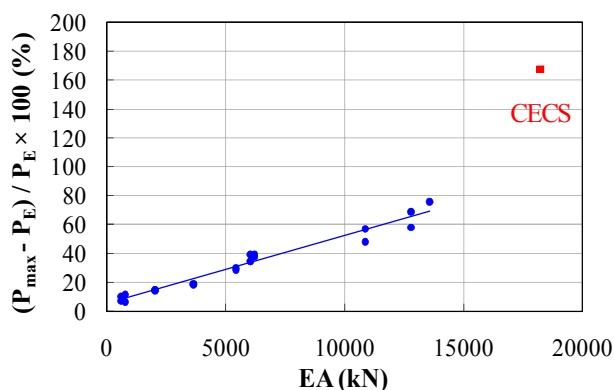


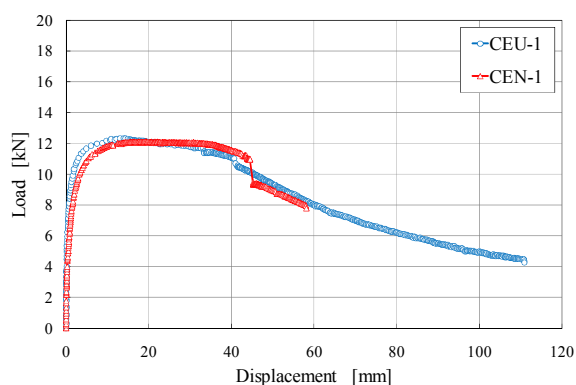
図-4 引張剛性と補強効果の関係

補強効果を比較するに当たり、各FRPの引張剛性EA(弾性係数×断面積)が異なるため、EAと補強効果で整理した関係図を図-4に示す。ここでは、鋼材長さが800mmで、最外層のFRP貼付け長さを400mmとした各タイプの平均値を青丸で示し、合わせてそれらの回帰直線も示している。赤四角は、FRP貼付け長さを鋼材のほぼ全面としたCECSの場合の平均値を示す。EAの計算では、表-1における弾性係数の実測値とFRPの厚さ、実測値の幅を利用した。

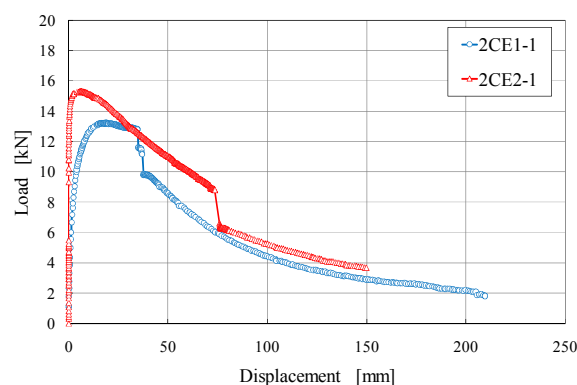
図-4より、最外層のFRP貼付け長さを400mmとした同一のグループでは、EAに比例して補強効果が得られていることがわかる。また、CECSのケースから、最外層のFRP貼付け長さが長くなると、補強効果が大きくなることがわかる。

表-4 一軸圧縮試験結果

試験体記号		CEN-1	CEN-2	CEN-3	CEU-1	CEU-2	CEU-3	CUN-1	CUN-2	CUN-3	CUU-1	CUU-2	CUU-3
弾性座屈荷重: P_E	kN	9.57	9.52	9.45	9.69	9.47	9.52	9.57	9.57	9.63	9.57	9.80	9.48
最大荷重: P_{max}	kN	12.13	12.29	12.28	12.32	12.03	12.90	10.82	11.06	10.93	10.96	11.18	10.91
はく離(破断)時の中央変位: δ	mm	43.65	52.60	49.65	33.05	38.90	33.05	97.80	111.95	91.50	80.30	94.10	94.35
試験体記号		CSN-1	CSN-2	CSN-3	CSU-1	CSU-2	CSU-3	GN-1	GN-2	GN-3	GU-1	GU-2	GU-3
弾性座屈荷重: P_E	kN	10.04	9.54	9.58	9.68	9.58	9.43	9.67	9.57	9.77	9.73	9.71	9.50
最大荷重: P_{max}	kN	16.44	16.47	16.31	15.34	15.15	14.81	10.77	10.62	10.93	9.86	10.36	10.50
はく離(破断)時の中央変位: δ	mm	25.15	23.05	33.90	64.30	64.40	39.25	-	198.75	155.95	79.65	100.95	77.75
試験体記号		PN-1	PN-2	PN-3	PU-1	PU-2	PU-3	HN-1	HN-2	HN-3	HU-1	HU-2	HU-3
弾性座屈荷重: P_E	kN	9.57	9.60	9.46	9.70	9.46	9.55	9.58	9.47	9.64	9.68	9.75	9.54
最大荷重: P_{max}	kN	10.05	10.36	10.24	10.13	10.76	10.71	11.96	11.35	10.85	11.21	12.07	11.03
はく離(破断)時の中央変位: δ	mm	212.05	219.55	125.45	109.65	229.05	179.40	45.45	49.80	74.65	25.00	41.15	26.25
試験体記号		CE1-1	CE1-2	CE1-3	CE2-1	CE2-2	CE2-3						
弾性座屈荷重: P_E	kN	38.15	38.47	38.50	38.11	38.19	37.62						
最大荷重: P_{max}	kN	49.64	47.41	50.99	53.60	53.20	51.57						
はく離(破断)時の中央変位: δ	mm	12.75	14.55	19.10	23.40	21.35	12.95						
試験体記号		2CE1-1	2CE1-2	2CE1-3	2CE2-1	2CE2-2	2CE2-3	G1CE-1	G1CE-2	G1CE-3	G2CE-1	G2CE-2	G2CE-3
弾性座屈荷重: P_E	kN	9.61	9.57	9.60	9.20	9.99	9.43	10.00	9.53	9.49	9.96	10.00	9.54
最大荷重: P_{max}	kN	13.25	15.64	13.69	15.33	15.27	14.27	14.48	12.82	12.65	14.41	14.49	12.24
はく離(破断)時の中央変位: δ	mm	35.15	34.40	39.60	75.95	62.00	62.40	43.40	46.05	52.05	44.80	46.60	54.90
試験体記号		P1CE-1	P1CE-2	P1CE-3	P2CE-1	P2CE-2	P2CE-3	GCS-1	GCS-2	GCS-3	CECS-1	CECS-2	CECS-3
弾性座屈荷重: P_E	kN	9.49	10.04	9.31	9.50	10.00	9.87	9.44	10.05	9.79	10.21	9.56	9.86
最大荷重: P_{max}	kN	11.15	13.80	13.82	12.86	14.07	13.99	16.82	17.32	17.31	26.55	25.48	27.24
はく離(破断)時の中央変位: δ	mm	50.70	43.95	49.65	57.40	51.25	53.40	49.40	35.60	55.65	52.15	60.45	23.75



(a)CE (CASE1, 鋼材長 800mm)



(b)2CE (CASE2, 鋼材長 800mm)

図-5 荷重-中央変位関係曲線

(2) 変形性能

表-4 には、FRP シートがはく離あるいは破断した時の試験片中央部水平変位を合わせて示している。ここでは、FRP に貼付したひずみゲージの値が急減した時点を、はく離あるいは破断の発生と判定した。

CASE1 では、P や G の変形に対する追従性が、他の FRP シートと比較して高いことがわかる。これに対し、CS や CE などの弾性率の大きい繊維シートでは、変形に対する追従性が低い。

荷重-中央変位関係曲線の代表例として、CE および 2CE を図-5 に示す。図-5(a)より、パテ材を使用していない CEN では、中央変位 50mm 付近で、荷重が急激に低下している。これは、FRP シートが試験片中央部で、破断したためである。これに対し、パテ材を使用した

CEU では、試験片中央部で FRP シートに破断が生じたが、破断後の荷重低下は見られなかった。また、FRP シートを 2 層貼り付けた図-5(b)でも、パテ材を使用していない 2CE1 では、中央変位 40mm 付近で FRP シートのはく離により、荷重が急激に低下している。これに対し、パテ材を使用した 2CE2 では、中央変位が 70mm 付近で FRP シートにはく離が生じている。これより、パテ材によって大変形に追従し、FRP シートのはく離が抑制されていることが分かる。

以上より、本研究で使用したポリウレタ樹脂パテ材は、P や G などの弾性係数の小さな FRP シートを用いた場合、その効果がほとんど見られないが、CS や CE などの弾性係数の大きなものでは、はく離の抑制に非常に効果的である。

表-5 破壊形態

ケース	供試体 記号	破壊形態			ケース	供試体 記号	破壊形態		
		1体目	2体目	3体目			1体目	2体目	3体目
1-1	CEN	引張側中央 破断	引張側中央 破断	引張側中央 破断	1-13	CE1	引張側中央 破断	引張側中央 破断	引張側中央 破断
1-2	CEU	引張側中央 破断	引張側中央 破断	引張側中央 破断	1-14	CE2	引張側中央 破断	引張側中央 破断	引張側中央 破断
1-3	CUN	引張側中央 破断	引張側中央 破断	引張側中央 破断	2-1	2CE1	引張側端部 はく離	引張側端部 はく離	引張側端部 はく離
1-4	CUU	引張側中央 破断	引張側中央 破断	引張側中央 破断	2-2	2CE2	引張側端部 はく離	引張側端部 はく離	引張側端部 はく離
1-5	CSN	引張側端部 はく離	引張側端部 はく離	引張側端部 はく離	2-3	G1CE	引張側中央 破断→はく離	引張側中央 破断→はく離	引張側中央 破断→はく離
1-6	CSU	引張側端部 はく離	引張側端部 はく離	引張側中央 破断	2-4	G2CE	引張側中央 破断	引張側中央 破断	引張側中央 破断
1-7	GN	(注1)	引張側中央 破断	引張側中央 破断	2-5	P1CE	引張側中央 はく離&破断	引張側中央 はく離&破断	引張側中央 はく離&破断
1-8	GU	引張側中央 破断	引張側中央 破断	引張側中央 破断	2-6	P2CE	引張側中央 破断	引張側中央 破断	引張側中央 破断
1-9	PN	引張側中央 破断	引張側中央 破断	引張側中央 破断	2-7	GCS	引張側端部 はく離	引張側端部 はく離	引張側端部 はく離
1-10	PU	引張側中央 破断	引張側中央 破断	引張側中央 破断	2-8	CECS	引張側中央 破断	引張側中央 破断	引張側端部 はく離
1-11	HN	引張側中央 破断	引張側中央 破断	引張側中央 破断	注1 : GN-1では、中央部の水平変位140mmで載荷を終了したため、FRPシートの破断およびはく離は確認されなかった。				
1-12	HU	引張側中央 破断	引張側中央 破断	引張側中央 破断					



(a) CSN



(b) CSU

図-6 CS (CASE1, 鋼材長 800mm)

2.4 破壊形態

(1) CASE1

表-5 に、各試験体の破壊形態を示す。CASE1 では、ほとんどのケースで、引張側中央部の FRP が破断するという結果になった。しかし、CS についてのみ、引張側端部ではく離が発生するケースが見られた。図-6 に、CS の終局状態を示す。

図-6(a) より、CSN では、試験体の変形が小さい段階で、FRP シートの端部ではく離が生じた。CSN の他の 2 体でも、同様に変形量の小さい段階ではく離が生じた。これに対し、図-6(b) の CSU では、端部でわずかにはく

離が生じたものの、ポリウレア樹脂パテ材の効果により、変形が進んでからも、はく離が進行することはなかった。

図-7 には、CSU1-1 と CSU1-3 の中央変位の計測結果を最大荷重、FRP 破断時、試験終了時の 3 ケースについて示す。図中の○印が計測結果、破線で示したものが 1 次座屈モードの理論値（サインカーブ）となっている。これらの図から、最大荷重時の計測値は理論値と良好な一致を示していることから、最大荷重時では 1 次モードの変形を生じていたことが確認できる。これに対して、FRP に破断が生じたときの CSU1-3 では理論値と良好な一致を示しているものの、CSU1-1 では、試験体上部で

理論値よりも大きな変形が生じていることが確認できる。このことから、最大荷重に達するまでは、1 次の座屈モードでの変形であったが、最大荷重後には、僅かな偏心曲げによって、断面変化点で応力集中を生じ、異なる破壊状態に至ったものと考えられる。

(2) CASE2

CASE2 では、表-5 に示すように、FRP シートの組合せによって、破壊形態が異なる結果となった。2 層とも CE を用いた 2CE では、ポリウレア樹脂パテ材の有無によらず、FRP シート端部でのはく離となった。

1 層目に G や P といった弾性係数が小さく、大きな変形が可能である繊維を用いたケースでは、ポリウレア樹脂パテ材の有無によるわずかな違いがあるものの、ほとんどのケースで FRP シート中央部での破断となった。

1 層目に G、2 層目に CS を用いた GCS では、3 体ともに FRP シートの端部ではく離が生じた。また、接着長を 750mm とした CECS では、3 体中 2 体で FRP 中央部の破断となった。

以上より、CS のように剛性が高く、また補強範囲が短い場合には、破壊形態に違いが見られるため、補強範囲の影響を考慮する必要がある。

3. まとめ

本研究では、鋼桁端部の腹板腐食に対する合理的な補修・補強工法を確立するための基礎研究を行った。具体的には、座屈変形に追従し、補強効果が得られる FRP シートを選定するために、様々な FRP シートを接着した鋼板の一軸圧縮実験を実施した。また、FRP シートを大変形に追従させ、十分な補強効果を発揮させるために、鋼板と FRP シートの間にポリウレア樹脂パテ材を挿入する場合についても検討した。本研究から得られた知見を以下に示す。

- 1) FRP 接着鋼板の弾性座屈荷重は、最外層の FRP シート長さが同一の場合、その引張剛性に比例して増加する。
- 2) 鋼板と FRP シートの間に挿入したポリウレア樹脂パテ材は、FRP シートを大変形に追従させ、はく離を抑制して補強効果を十分に発揮させる。
- 3) 低弾性の FRP シートである G や P は、座屈変形への追従性が高いことが確認されたものの、座屈耐荷力の向上という観点からは、高弾性の FRP シートである CE や CS を用いるべきである。
- 4) 鋼板の両面に 2 層の FRP シートを貼り付けた場合 (CASE2) では、1 層の FRP シートを貼り付けた場合 (CASE1) よりも大きな補強効果が得られることを確

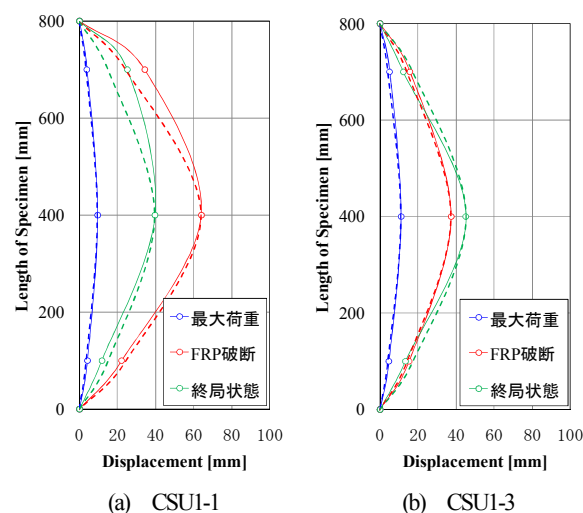


図-7 面外たわみ計測結果

認した。特に、1 層目に CE、2 層目に CS を鋼板のほぼ全長にわたりポリウレア樹脂パテ材を挿入して貼り付けて補強量を大きくした場合でも、パテ材の効果により、はく離が発生し難いことを確認した。

以上より、鋼桁端部の腹板腐食に対する合理的な補修・補強工法として、大変形を伴う座屈変形に追従させるために、まず鋼材と FRP シートの間にポリウレア樹脂パテ材を挿入し、さらに、補強効果を得るために弾性率の高い FRP シート (CE, CS) を貼り付ける方法が良いと言える。

今後は、本研究の結果に基づき、実橋を想定した鋼桁小型試験体の腹板に FRP を貼り付けた載荷試験とともに、補修・補強効果、耐荷力の予測、設計方法の確立などについて検討を進める予定である。

参考文献

- 1) 日本鋼構造協会：土木構造物の点検・診断・対策技術(2009年度改訂版)，2009。
- 2) 大倉一郎，福井唯夫，中村圭吾，松上泰三：炭素繊維シートによる鋼板応力の低下とはく離せん断応力，土木学会論文集，No.689，I-57，pp.239-249，2001。
- 3) 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，pp.425-430，2004。
- 4) 伊藤久継，野坂克義，鈴川研二，伊藤満：CFRP 板補強鋼桁の耐荷力に関する実験的研究，土木学会構造工学論文集，Vol.52A，pp.813-820，2006。
- 5) 玉井宏章，高松隆夫，服部明生，灰谷徳治，櫻庭誠：炭素繊維プレートによる鋼構造物の接着補強

- 工法に関する基礎的研究, 鋼構造年次論文報告集, 第 14 巻, pp.445-452, 2006.
- 6) 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, 土木学会構造工学論文集, Vol.54A, pp.834-841, 2008.
 - 7) 石川敏之, 大倉一郎, 西田貴裕, 横田季彦, 斎藤誠: CFRP 板付着端近傍への低弾性接着剤の使用によるはく離せん断応力の低減, 土木学会構造工学論文集, Vol.54A, pp.842-849, 2008.
 - 8) 杉浦江, 小林朗, 大垣賀津雄, 稲葉尚文, 富田芳男, 長井正嗣: 鋼部材腐食損傷部の補修における炭素繊維シート接着方法に関する解析的研究, 土木学会論文集 A, Vol.64, No.4, pp.806-813, 2008.
 - 9) 国土交通省 国土総合技術研究所: 鋼道路橋の局部腐食に関する調査研究, 国土技術総合研究所資料, No.294, 2006.
 - 10) 藤野和雄, 酒井修平, 明石直光, 川瀬政人: CFRP シートによるけた端部の腐食補修に関する解析的検討, 平成 22 年度土木学会年次学術講演会概要集, pp.9-10, 2010.
 - 11) 秀熊佑哉, 小林朗, 長井正嗣, 宮下剛, 和久井譲: FRP シート接着による鋼部材の補修に関する研究, 土木学会第 3 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム, pp.91-96, 2009.

EXPERIMENTAL STUDY ON REPAIR AND REINFORCEMENT METHOD FOR WEB IN STEEL GIRDER BRIDGE USING FRP

Dai WAKABAYASHI, Takeshi MIYASHITA, Yusuke OKUYAMA, Masatsugu NAGAI,
Norio KOIDE, Akira KOBAYASHI, Yuya HIDEKUMA, Wataru HORIMOTO

The main reason of degradation for steel girder is corrosion. Therefore, fiber reinforced plastic (FRP) is paid to attentions for repairing and reinforcing the steel bridge since FRP is light weight, high strength and high durability. Many studies have been reported so far. Previous studies mainly focus on axial or bending members. However, most of the corrosion in steel bridge is found in web at the end of the girder. There has never been investigated on repairing or reinforcing of the web using FRP.

In this study, uniaxial compression test of steel plates bonded by various FRP sheets is carried out. This test aims to select FRP sheets that have reinforcing effect following large deformation induced by buckling.