(34) ハイブリッドFRP桁の環境耐久性に関する試験

西崎 到1・下村 匠2・栗田 守朗3・竹田 宣典4・睦好 宏史5

 ¹正会員 (独) 土木研究所 新材料チーム (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6) E-mail:nisizaki@pwri.go.jp
²正会員 長岡技術科学大学准教授 工学部環境・建設系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1) E-mail: takumi@nagaokaut.ac.jp
³正会員 清水建設(株) 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17) E-mail: morio.kurita@shimz.co.jp
⁴正会員 (株) 大林組 技術研究所 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640) E-mail: takeda.nobufumi@obayashi.co.jp
⁵正会員 埼玉大学教授 工学部建設工学科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255) E-mail: mutuyosi@mail.saitama-u.ac.jp

ハイブリッドFRP(HFRP)桁は、曲げ剛性向上に特に寄与するフランジ部分に炭素繊維を混入し、他の 部分はガラス繊維で構成した、I形断面の引抜成形FRP部材であり、線路上空自由通路や港湾施設の渡橋な どのFRP歩道橋主部材としての適用が検討されている.HFRPは、いずれも環境耐久性に優れた、CFRPと GFRPの組み合わせであることから、HFRPについても、鋼材が腐食しやすい苛酷な腐食環境における環境耐 食性に優れているものと期待されるが、これを裏付ける十分なデータが得られていなかったのが現状であ った.筆者らはHFRPの環境耐久性を調べるために、HFRP桁から作成した供試体を用いて、促進耐候性試験、 水中浸せき試験、屋外暴露試験を実施し、劣化試験後の性能を、力学物性を中心に調査した結果を報告す る.

Key Words : FRP, hybrid, carbon fiber, glass fiber, durability, bending test, shear test

1. はじめに

FRP(繊維強化プラスチックス)は、軽量性かつ高強 度を有することや、腐食環境における優れた耐食性など の特長から、従来の構造材料を補完する構造材料として の用途が注目されていた.補強繊維にガラス繊維を用い たGFRPは比較的安価であるが、弾性率が低いために部材 の剛性も低くなりがちであり、炭素繊維を用いたCFRPは 弾性率が高く、剛性の高い部材が得られるが、高価とな ってしまうのが欠点であった.このため、考案されたの がガラス繊維と炭素繊維を組み合わせて構築する、ハイ ブリッドFRP(HFRP)桁である¹⁾.HFRP桁は、曲げ剛性向 上に特に寄与するフランジ部分に炭素繊維を混入し、他 の部分はガラス繊維で構成した、I形断面のFRP部材であ る.既にこの使用を前提とした、線路上空自由通路や港 湾施設の渡橋などのFRP歩道橋主部材としての適用検討 例が報告されている²⁻³⁾.HFRPは、いずれも環境耐久性 に優れた、CFRPとGFRPの組み合わせである.このため、 HFRPについても、鋼材が腐食しやすい苛酷な腐食環境に おける環境耐食性に優れているものと期待されるが、こ れを裏付ける十分なデータが得られていなかったのが現 状であった.筆者らはHFRPの環境耐久性を調べるために、 HFRP桁から作成した供試体を用いて、促進耐候性試験、 水中浸せき試験を実施し、劣化試験後の性能を、力学物 性を中心に調査行ったので、ここにその概要とこれまで に得られている結果を報告する.

2. 試験方法

(1) 使用したHFRP桁

図-1に本試験で使用した,HFRP桁部材の断面を示す. 桁高さ250mm,フランジ幅95mm,ウェブ厚さ9mm,フラン ジ厚さ14mmのI断面桁であり,引抜成形法により製作さ れた.フランジ部はガラス繊維と炭素繊維によるハイブ リッドFRPであり、ウェブ部はガラス繊維のみによる GFRPで一体成型されている.マトリックス樹脂はビニル エステル樹脂を採用している.積層構成の概略を表-1に 示す.



図-1 使用したHFRP桁部材の断面

			100 1		
部位	繊維の種類,方向		向別の体積比率		
	CF0° GF0/90° G		$GF\pm45^{\circ}$	CSM	
フランジ	33%	29%	13%	25%	
ウェブ	0%	32%	42%	26%	

表-1 積層構成の概略

注)CF: 炭素繊維, GF: ガラス繊維, CSM: コンティニュアスス・ストランド・マット

(2) 評価試験方法と試験片寸法

評価試験方法は,I桁部材から切り出したクーポン試 験片を用いた曲げ試験,層間せん断試験,圧縮試験,引 張試験の4種類としたが,本報告では曲げ試験と層間せ ん断試験の結果を報告する.各評価試験の方法および試 験片寸法は以下のとおりである.

a) 曲げ試験

試験方法はJIS K 7017-1999 (ISO 14125-1997) に準拠 した,3点曲げ試験によった.フランジ部では支点間距 離/試験片厚さ比 (L/h) 40,試験片長さ/試験片厚さ比

(1/h) 50とし、ウェブ部では支点間距離/試験片厚さ比
(L/h) 20、試験片長さ/試験片厚さ比 (1/h) 30とした.
フランジ部は試験片幅30mm幅,支点間距離560mm,ウェ
ブ部は試験片幅15mm幅,支点間距離180mmである.

b) 層間せん断試験

試験方法はJIS K 7057-2000 (ISO 14130-1997) に準拠 した,ショートビーム法による3点曲げ試験とした.支 点間距離/試験片厚さ比 (L/h) は5,供試体長さ/試験片 厚さ比 (1/h) は10とした.試験片の幅は,JIS K 7057に よればb=5hであるが,フランジ部では既定の70mm (厚さ 14mm) が採取できないため,幅35mmで実施した.なお, ウェブ部では規定通り45mm (厚さ9mm)で実施した. 試験は試験速度1mm/minで実施し,層間せん断強さは,式(1)により算出した.

$$\tau = \frac{3P}{4wt} \tag{1}$$

τ: 層間せん断強度 (MPa)

P:層間せん断荷重(N)

w:試験片幅(mm)

t:試験片厚さ(mm)

なお、層間せん断荷重は第一ピークとした.

各試験片の切り出しは、ダイヤモンドカッターにより 流水下で精密に行った.また、HFRP桁は実際の適用では 塗装して使用されることが想定されていることから、層 間せん断試験用試験片については無塗装の供試体とあわ せて、白色(N9.5)のふっ素樹脂系上塗り塗料で塗装 (厚さ25μm)した試験片も準備した.

(3) 劣化試験方法

劣化試験方法は、促進耐候性試験、水中浸せき試験、 屋外暴露試験の3種類とした.屋外暴露試験については まだ結果が得られていないので、本報告では概要のみを 紹介し、結果については前者の2つについて報告する.

a) 促進耐候性試験

キセノンランプ式の促進耐候性試験機を使用した.照 射強さは40W/m²とし,照射時間率100%(「照射102分」 -「照射・水スプレー18分」の繰り返し)とした.試験 槽の大きさに限りがあるため,HFRP桁を前項の評価試 験に適合した寸法にフランジ部及びウェブ部からそれぞ れ試験片を切り出して,これを供試体として促進耐候性 試験に供し,劣化試験後の供試体の物性を,促進耐候性 試験に供していない供試体と比較することとした.塗装 供試体については,切り出した試験片それぞれについて 塗装を行ったものと供試体とした.

供試体の数は、1種類あたり5水準作成し、1水準あた りの供試体数は4個とした.5水準のうち1水準は初期値 用とし、それ以外の4水準を促進耐候性試験に供した. フランジ部供試体では内側をキセノンランプの照射面に むけてセットした.劣化試験に供した4水準は、それぞ れ、1000時間、2000時間、4000時間、4000時間を超える 予備用とした.4000時間を超える予備用については、 800~10000時間程度を目標の目安として設定したが、 現時点では評価が完了していない.なお、4000時間の照 射により、紫外線積算照射量は575 MJ/㎡となるが、屋外 (つくば)における紫外線照射量の実測値は46.9 MJ/㎡ であったことから、屋外暴露12年分程度に相当するもの

と考えられる.

b)水中浸せき試験

40℃の恒温槽中に大型水槽を静置し,その中にHFRP桁 部材を浸せきすることにより実施した. HFRP桁部材を, 長さ1.0mに切断した無塗装の供試体,および,長さ0.3m に切断したのちに白色(№.5)ふっ素樹脂系上塗り塗料 で塗装(厚さ25µm)した供試体を,それぞれ4個製作し, このまま浸せき試験に供した.それぞれ4個の供試体は, 4つの異なる浸せき試験期間水準用とした.目標浸せき 試験期間は,3か月,6か月,12か月,12か月を超える予 備用とした.所定の浸せき試験期間終了後に供試体を回 収し,その後,前述の評価試験用試験片を切り出した. なお,塗装供試体からは層間せん断試験用試験片を,無 塗装供試体からは層間せん断試験用試験片および曲げ試 験用試験片を切り出し,それぞれの評価試験に供した.

(圧縮試験用試験片も切り出したが、本報告では報告しない.)

c)長期屋外暴露試験

実際の環境における長期耐久性を評価するために,沖 縄県大宜味村の暴露試験施設において,屋外暴露試験を 開始した.HFRP桁部材を長さ1.5mに切断したものそのま まと,これに白色(N9.5)のふっ素樹脂系上塗り塗料を 塗装(厚さ25µm)したものの2種類を供試体とし,それ ぞれ2体作成して上記施設内に設置した(図-2).設置 は2008年10月であり,5年後と10年後に回収し,フラン ジ部・ウェブ部双方の曲げ,層間せん断,圧縮の3種類 の物性の変化の調査を行う計画としている.



図-2 屋外暴露試験の状況

3. 試験結果-曲げ試験

(1) フランジ部

表-2に促進耐候性試験後のフランジ部曲げ試験結果を 示す.フランジ部は、外側は炭素繊維の多く入っている ハイブリッドFRP層であるが、内側はウェブ部につなが るGFRP層でできていることから、どちらを曲げ試験の上 側に置くかで試験結果が異なる.ここでは、4つの繰り 返し試験片の2つずつに分けて試験を行った.

	表-2	促進耐候性試験後	のフラ	ランシ	シ部曲げ強	度
--	-----	----------	-----	-----	-------	---

試験時間	フランジタ	┞面が上側	フランジ	り面が上側	平均值
初期値	614	621	443	407	521
1000h	600	636	407	414	514
2000h	650	564	421	429	516
4000h	586	571	414	493	516

(単位:MPa)

試験の結果から、フランジ外側(炭素繊維の多い 側)を上側において試験した方が、曲げ強度が大きくな ることが分かった.2つの試験片の差が比較的大きな場 合もあり、ばらつきが少なくはないものと考えられる. 4つの試験片の平均値からは、試験時間の経過による変 化は明確に認められなかった.

表-3は水中浸せき試験後のフランジ部曲げ試験結果で ある.促進耐候性試験と同様に試験時間の経過による曲 げ強度の明確な低下は認められなかった.

表-3 水中浸せき試験後のフランジ部曲げ強度

H 102 C 11/3	フランシダ	ト面が上側	フランジ内面が上側		平均值
初期値	614	621	443	407	521
3か月	621	593	450	443	527
6か月	600	600	479	557	559
12か月	629	593	464	421	527

(単位:MPa)

(2) ウェブ部

表-4に促進耐候性試験後のウェブ部曲げ試験結果を示 す.ウェブ部は左右対称であるため,試験の繰り返し数 を4として実施している.また,本試験においては照射 面を引張側(曲げ試験の下側)として試験を実施した.

± 1	口、仕工に子を取るのよ	- デカロー (1) エー・ション・
77-4	- 11-11-11-11-11-11-11-11-11-11-11-11-11	
-11		

試験時間	1	2	3	4	平均值
初期値	344	311	311	356	331
1000h	207	229	200	229	216
2000h	200	207	236	221	216
4000h	200	193	179	171	186

(単位:MPa)

本試験では、初期値の曲げ載荷試験においては両支点 の水平方向の変位を許して実施したところ、水平変位が 大きく、破壊前に試験体が支点付近の載荷治具に接触す ることが判明した.そこで劣化後の試験では支点の水平 変位を固定して実施することとした.表-4の曲げ強度の 初期値が劣化試験後の曲げ強度に比べてかなり高いのは、 この支点条件の違いの影響によるものである.初期値は 参考値として掲載した.促進耐候性試験1000時間から 4000時間にかけては明確な強度低下傾向は認められなか った.

表-5は水中浸せき試験後のウェブ部曲げ試験結果である.一部のケースではばらつきがかなり大きくなった (変動係数約15%)こともあり,促進耐候性試験と同様 に劣化試験の時間経過による曲げ強さの変化は明確には 認められなかった.表-5には塗装供試体の結果も示して いるが,これも同様の結果となっている.

試験時間	1	2	3	4	平均值
初期値	344	311	311	356	331
3か月	200	207	193	186	196
6か月	250	264	207	193	229
12か月	243	179	200	179	200
3か月	207	220	221	207	216
(塗装有)	207	229	221	207	210
6か月	207	207	200	103	220
(塗装有)	207	207	200	195	229
12か月	186	186	164	200	19/
(塗装有)	100	100	104	200	104

表-5 水中浸せき試験後のウェブ部曲げ強度

(単位:MPa)

図-3から6には、ウェブ部とフランジ部の曲げ応力-中 央変位線図の例(試験片1本ずつ)を示す。曲げ応力は ばらつきがかなり大きいものの、曲げ応力、変位の性能 が極端に低い試験片は認められなかった。また、図-7及 び8は曲げ試験の実施状況を示す。











図-5 ウェブ部曲げ試験の応力-変位線図の例 (曲げ応力-中央変位,促進耐候性試験)



図-6 ウェブ部曲げ試験の応力-変位線図の例 (曲げ応力-中央変位,水中浸せき試験)



図-7 フランジ部曲げ試験の実施状況



図-8 ウェブ部曲げ試験の実施状況

4. 試験結果-層間せん断試験

(1) 促進耐候性試験

表-6に促進耐候性試験後のフランジ部の,また表-7に ウェブ部の層間せん断試験結果を示す.すべてのフラン ジ部の試験では内面を下側に向けて試験を実施している. フランジ部とウェブ部の層間せん断強度では比較的同程 度の層間せん断強度が得られた.変動係数は平均で4% 程度であり、曲げ試験(平均で7%程度)に比べて全般 にばらつきが少なかった.無塗装供試体の場合,試験時 間の経過に従って若干の層間せん断強度の低下傾向が認 められる.強度低下率は400時間で0.88-0.91程度であっ た.また,塗装のある場合には特にウェブ部では強度低 下が認められないなど,全般としては塗膜には促進耐候 性試験に対する保護効果が期待できると考えられる結果 となった.

試験時間	1	2	3	4	平均值
初期値	32.9	32.9	34.3	32.1	33.0
1000h	33.9	34.0	33.0	32.9	33.5
2000h	31.1	29.7	26.9	30.0	30.2
4000h	29.7	30.7	30.3	29.8	30.1
初期値	33.6	32.2	31.8	33.2	32.7
1000h (塗装有)	30.7	34.0	33.0	31.8	32.4
2000h (塗装有)	28.4	31.6	29.0	30.8	30.0
4000h (塗装有)	30.7	33.1	31.5	30.4	31.4

表-6 促進耐候性試験後のフランジ部層間せん断強度

(単位:MPa)

(単位:MPa)

表-7 促進耐候性試験後のウェブ部層間せん断強度

試験時間	(1)	(2)	(3)	(4)	平均值
初期値	35.1	35.7	35.0	33.8	34.9
1000h	33.0	35.8	32.1	33.1	33.5
2000h	33.4	30.2	30.5	34.6	32.2
4000h	33.3	26.8	32.5	29.9	30.6
初期値	33.8	35.7	33.3	35.7	34.6
1000h (塗装有)	34.2	35.6	31.7	32.0	33.4
2000h (塗装有)	33.4	33.3	35.6	34.2	34.1
4000h (塗装有)	35.0	35.5	32.9	34.2	34.4



25 25 20 Ξ. (N) 15 15 画画 重重 10 10 0 ίō. 0.5 2 2.5 0.5 1 1.5 2 2.5 麦位 (mm) 麦位 (mm)



図-9はフランジ部、図-10はウェブ部(いずれも無塗装、 初期値と促進劣化試験4000時間)の、層間せん断強度に おける荷重-変位線図の例である.各線は、試験片ひと つずつのデータを示している.4つの試験片の曲線は殆 ど同様であることが確認された.塗装有の場合でも同様 の結果であった.フランジ部はハイブリッドFRP、ウェ ブ部はGFRPであるが、両者の促進耐候性試験後の特性 に大きな差があるとは認められなかった.なお、図-11 に層間せん断試験の実施状況写真を示す.



図-11 層間せん断試験の実施状況

図-12は促進耐候性試験の時間経過に対する層間せん 断強度の初期値に対する変化率をグラフにしたものであ る.無塗装の場合の層間せん断強度のわずかな低下傾向 と、塗装による強度低下の保護効果が認められる.





277

(2) 水中浸せき試験

表-8にフランジ部の、表-9にウェブ部の水中浸せき試 験後の層間せん断強度の結果を示す.無塗装供試体では ウェブ部では必ずしも明確とはいいがたいものの、全般 としては、試験時間の進行にともなう若干の強度低下傾 向が認められた、初期値に対する強度低下比率は12か月 浸せきにおいて0.91-0.93程度である. また, 塗装供試 体においても同程度の強度低下が認められていることか ら、水中浸せき試験における途膜による層間せん断強度 保護効果は認められなかった.

表-8	水中浸せき	試験後の	フラ	ンジ	部層間せ/	し断強度
-----	-------	------	----	----	-------	------

試験時間	1	2	3	4	平均值
初期値	32.9	32.9	34.3	32.1	33.0
3か月	33.9	32.1	31.4	34.4	32.9
6か月	32.9	30.6	31.1	30.0	31.1
12か月	28.6	30.6	29.7	31.0	30.0
初期値	33.6	32.2	31.8	33.2	32.7
3か月	21.4	24.0	21.2	21.0	21.0
(塗装有)	51.4	54.0	51.5	51.0	51.9
6か月	21.0	20.6	20.6	20.4	20.4
(塗装有)	51.0	50.0	29.0	30.4	50.4
12か月	21.1	20.7	21.0	20.2	20.5
(塗装有)	51.1	50.7	51.0	29.2	50.5
注)初期值	直は促進耐候		6) と共通	(単	位:MPa)

注) 初期値は促進耐候性試験(表-6) と共通

表-9 水中浸せき試験後のウェブ部層間せん断強度

試験時間	1	2	3	4	平均值
初期値	35.1	35.7	35.0	33.8	34.9
3か月	32.0	32.0	31.9	29.2	31.3
6か月	34.1	32.5	33.7	34.5	33.7
12か月	34.1	29.6	32.4	33.6	32.4
初期値	33.8	35.7	33.3	35.7	34.6
3か月 (塗装有)	31.8	31.7	29.7	31.9	31.3
6か月 (塗装有)	34.1	35.5	34.0	31.9	33.9
12か月 (塗装有)	30.6	33.0	31.5	33.0	32.0

注) 初期値は促進耐候性試験(表-7) と共通

(単位:MPa)

図-13は水中浸せき試験後の層間せん断強度における 荷重-変位線図の例である、図-9.10と同様に4つの試験片 の曲線は殆ど同様であることが確認された.また、塗装 有の場合でも同様の結果であった.

図-14は水中浸せき試験の時間経過に対する層間せん 断強度の初期値に対する変化率をグラフにしたものであ 全体にわずかながら層間せん断強度が低下していく 傾向があることと、塗装による強度低下の保護効果が明 確ではないことが認められる.



図-13 水中浸せき後の層間せん断試験の荷重-変位線図 (無塗装, 3か月浸せき, 左:フランジ部, 右:ウェブ部)



図-14 水中浸せき試験による層間せん断強度の変化

5. 結論

フランジ部に炭素繊維を配置したハイブリッドFRP桁 部材について、促進耐候性試験および40℃水中浸せき試 験を実施し、劣化試験後の曲げ試験および層間せん断試 験により耐久性を調査した. 主たる結果は以下のように まとめられる.

曲げ試験では促進耐候性試験(最大4000時間),水中 浸せき試験(最大12か月)ともに、明確な物性変化を認 めることができなかった.曲げ試験では比較的ばらつき が大きくなる場合があったが、曲げ応力、変位の性能が 極端に低いものは認められなかった.

層間せん断試験では,促進耐候性試験,水中浸せき試 験ともに若干の強度低下傾向が認められた. とはいえそ の程度は無途装供試体の場合、促進劣化試験4000時間で 初期値の0.88-0.91、水中浸せき試験12か月で初期値の 0.91-0.93程度とわずかであり、良好な耐久性能を有す ることが分かった. 塗装は、促進耐候性試験においては 強度低下保護効果を有する可能性が期待される結果とな ったが、水中浸せき試験については、保護効果は認めら

れなかった.フランジ部とウェブ部は、フランジ部がハ イブリッドFRP、ウェブ部がGFRPと、材質や積層構成が 異なるにも係わらず、層間せん断特性や、その促進耐候 性試験や水中浸せき試験に対する耐久性能には大きな相 違が認められなかった.また、本試験の結果からは、層 間せん断試験は曲げ試験に比べてばらつきが比較的少な く、物性変化を見出しやすかったこと、さらには材料の 必要量も比較的少なくてすむことから、FRPの耐久性評 価の手法として適しているものと考えられる.

なお、本報告はより筆者らの検討の中間的なとりまと めである.劣化試験についてはより長期にわたる供試体 の試験を継続中であるとともに、ここでは報告していな い屋外暴露試験も実施している.また、引張試験、圧縮 試験による評価も別途実施しているところであるので、 今後これらの試験をとりまとめて、結果を報告する計画 である.

謝辞

本研究は、国土交通省建設開発技術助成制度「革新的 材料を用いた社会基盤施設の再構築」(平成18~20年度、 研究代表者:睦好宏史)の研究の一環として実施された ものである.

参考文献

1) 複合構造レポート 01, pp.121-138, 土木学会, 2007.

- 2) FRP 複合橋梁小委員会報告:第3回 FRP 複合構造・橋梁に関 するシンポジウム論文報告集, pp.1-9, 土木学会, 2009.
- 3) 中村一史,前田研一,睦好宏史,柳沼謙一,松井孝洋,渡辺 哲也:第3回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム論 文報告集, pp.175-182, 土木学会, 2009.

ENVIRONMENTAL DURABILITY TESTS OF HYBRID FIBER REINFORCED POLYMER (HFRP) GIRDER

Itaru NISHIZAKI, Takumi SHIMOMURA, Morio KURITA, Yoshinori TAKEDA and Hiroshi MUTSUYOSHI

Hybrid FRP (HFRP) I- section girder developed by the authors are mainly made of pultuded GFRP but has cabon fiber layers in the flanges to obtain higher rigidity with a relatively low cost, and its application feasibility to footbrides have been studied previously. HFRP is a combination of GFRP and CFRP.Both GFRP and CFRP have good environmental durability in the severe corrosive conditions, hence HFRP is also expected to have a good environmental durability, however there are still lack of the data to show its durability. The authors carried out accelerated weathering test for 4000 hours and water immersion test at 40 degree for 12 months for the HFRP specimens, and evaluated its durability by bending test and interlaminar shear test. However the results of interlaminar shear test showed slight reduction in the strength, considering the values and the test conditions, overall, the durability of HFRP is good and not so different to that of CFRP and GFRP.