

屋外暴露したハイブリッドFRP桁の 長期耐久性の評価

川島 陽子¹・西崎 到²・下村 匠³

¹正会員 国立研究開発法人土木研究所（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）
E-mail:y-kawashima@pwri.go.jp

²正会員 国立研究開発法人土木研究所（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）
E-mail:nisizaki@pwri.go.jp

³正会員 長岡技術科学大学教授 環境社会基盤工学専攻（〒940-2188新潟県長岡市上富岡町1603-1）
E-mail:takumi@nagaokaut.ac.jp

ハイブリッドFRP(HFRP)桁は、桁部の曲げ剛性に寄与するフランジ部に炭素繊維を積層し、他の部分がガラス繊維によるFRPで構成されたI型断面の引抜成形FRP部材である。本研究では長期耐久性の評価として、8年3ヶ月間の屋外暴露や促進劣化試験後の力学特性の変化を、切り出し供試体による曲げ試験及び層間せん断試験により調べた。フランジ部の屋外暴露後は曲げ・層間せん断強度ともに、初期値からの明確な強度低下は認められなかった。促進劣化試験後では若干の強度低下が認められたが、塗装による強度低下の抑制効果を確認した。一方ウェブ部では顕著な強度低下が認められたが、層間せん断強度については、層間以外の部位での破壊が生じたことによる可能性が示唆された。フランジ部の力学特性の変化が小さいことから、この特性を活かした設計が望ましいことが分かった。

Key Words : hybrid FRP, exposure test, durability, bending test, shear test

1. はじめに

FRP(繊維強化プラスチック)は、軽量性かつ高強度であり、腐食環境における優れた腐食性を有することから、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。比較的安価だが弾性率が低いG(ガラス繊維)FRPと高弾性率のC(炭素繊維)FRPを組み合わせる構築する、ハイブリッドFRP(HFRP)桁が考案されている¹⁾。これまでに、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、環境耐久性に優れたGFRPおよびCFRPの組み合わせであるため、HFRPについても鋼材が腐食しやすい過酷腐食環境における環境腐食性に優れているものと期待されている。著者らは、促進劣化試験後のHFRP桁の力学物性調査により、環境耐久性の評価をしてきた⁴⁾。しかし、実際の環境下における耐久性や、長期耐久性に関する知見については十分とはいえない。

そこで著者らは、HFRPの長期にわたる環境耐久性性能を評価するために、屋外暴露試験や既報よりも長時間にわたる促進劣化試験を実施した。本稿では、屋外暴露や

長期促進劣化後のHFRPの曲げ強度および層間せん断強度の変化を評価した結果を報告する。

2. 試験方法

(1) 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ものである。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で一体成形されている。マトリックス樹脂に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。

(2) 劣化試験方法

劣化試験として、促進耐候性試験および屋外暴露試験を実施した。促進耐候性試験は既報⁴⁾と同様であるが、本稿ではさらに長期間劣化させ、長期にわたる環境耐久性の評価を目指した。

a) 促進耐候性試験

促進耐候性試験には、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/m^2 とし、照射時間率100%、「照射102分、照射・水スプレー18分」の繰返しを試験条件にて実施した。試験層の大きさに限りがあるため、次項の評価試験に適合した寸法にてHFRP桁の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たクーポン試験片を、促進耐候性試験に供した。

クーポン試験片の数は、1種類あたり5水準とし、1水準あたりの数は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。フランジ部の供試体は内側のGFRP側をキセノンランプの照射面に向けてセットした。試験時間はすでに報告した1,000時間、2,000時間および4,000時間に加えて、20,000時間実施した。以下、促進耐候性試験により劣化した供試体を「促進劣化供試体」と表記する。なお、20,000時間の照射により、紫外線積算照射量は $2,875\text{MJ/m}^2$ となるが、これは屋外(つくば)における紫外線照射量の実測値 46.9MJ/m^2 を参考とした場合、屋外暴露61年分に相当するものと考えられる。

b) 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、沖縄県大宜味村の屋外暴露試験施設にて、2008年10月から屋外暴露試験を開始した。HFRP桁部材を長さ1.5mに切断したもので、塗装をしていないものと、白色(N9.5)のふっ素樹脂系上塗り塗料を塗装(厚さ $25\mu\text{m}$)したものと2種類を供試体とし、それぞれ2体作製して上記の施設内に設置した。今回、2017年1月に8年3ヶ月暴露した供試体を1体ずつ回収(以下、暴露供試体)し、評価試験に供した。

(3) 評価試験方法と試験片寸法

屋外暴露試験から回収した供試体から、次節に示す評価試験(曲げ試験と層間せん断試験)に適合した寸法のクーポン試験片を、フランジ部及びウェブ部からそれぞれ切り出した。各試験片の切り出しは、ダイヤモンドカッターを用いて流水下で精密に行った。各試験方法及び試験片寸法は以下のとおりである。

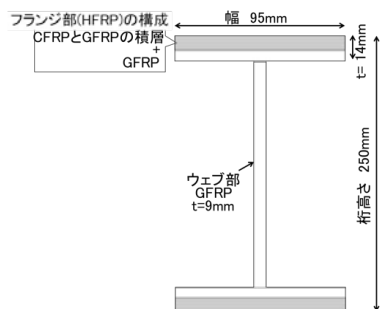


図-1 HFRP桁部材の断面

表-1 積層構成の概略

部位	繊維の種類, 方向別の体積比率			
	CF0°	GF0/90°	GF±45°	CSM
フランジ	33%	29%	13%	25%
ウェブ	0%	32%	42%	26%

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

表-2 曲げ試験条件

	厚さ mm	試験片 長さ mm	幅 mm	支点間距離/ 試験片厚さ (L/h)	試験片長さ/ 試験片厚さ (l/h)
フランジ	14	700	30	40	50
ウェブ	7	250	15	20	30

表-3 層間せん断試験条件

	厚さ mm	試験片 長さ mm	幅 mm	支点間距離/ 試験片厚さ (L/h)	試験片長さ/ 試験片厚さ (l/h)
フランジ	14	140	35	5	10
ウェブ	9	90	45	5	10

a) 力学試験

①曲げ試験

試験方法はJIS K 7017-1999(ISO 14125-1997)に準拠した、3点曲げ試験によるものである。フランジ部は試験片幅30mm、支点間距離(L)560mm、ウェブ部では試験片幅15mm、支点間距離(L)180mmである。支点間距離/試験片厚さ(L/h)や試験片長さ/試験片厚さ(l/h)等は表-2に示す。

なお、試験は室温で実施しており、2月の実施だったため、 $2^{\circ}\text{C}\sim 6^{\circ}\text{C}$ 程度であった。

②層間せん断試験

試験方法はJIS K 7075-2000(ISO 14130-1997)に準拠した、ショートビーム法による3点曲げ試験である。支点間距離/試験片厚さ比(L/h)および試験片長さ/試験片厚さ比(l/h)を表-3に示す。試験片幅(b)は、JIS K 7057によれば $b=5h$ であるが、フランジ部では規定の70mm(厚さ14mm)が採取できなかったため、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。

試験は試験速度を1mm/minで実施した。また、層間せん断強度は式(1)により算出した。

$$\tau = \frac{3P}{4wt} \quad (1)$$

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。

HFRP桁は実際の適用時には塗装して使用されることが想定されるため、層間せん断試験用試験片については、無塗装の供試体と併せて白色(N9,5)のフッ素樹脂系上塗り塗料で塗装(厚さ25 μ m)した試験片も準備した。

b) 外観観察

劣化試験終了後の試験片の外観性状を、目視により観察し記録した。

c) 透水量試験

屋外暴露試験から回収した供試体のうち、クーパーン試験片採取後に残存した部位のウェブ部を用いて、透水量試験(ロート法)を実施した。試験方法はJIS A 6909-7.12に準拠した。なお、試験数を2個として実施した。

3. 試験結果

(1) フランジ部

a) 外観観察

屋外暴露後および20,000時間促進劣化後の供試体の状態を写真-1に示す。写真-1(左の右側)の屋外暴露後の無塗装供試体はフランジ上部の上面で、桁部材の中でも最も劣化している部分である。表面の樹脂が脱落し、繊維が露出するとともに、樹脂の黄変が顕著に認められた。しかし、繊維はFRP表面から脱落はしていない状況であった。なお、この部分はHFRPの部分であるが、最外層にはガラス繊維が用いられているため、GFRPの部分と同様の劣化状況が認められている。一方、塗装供試体(写真-1(左の左側))では特に外観変化は認められなかった。促進劣化試験20,000時間後の無塗装供試体(写真-1(右))は、表面の繊維が毛羽立った状態で、表面の樹脂だけでなく繊維の脱落も進んでおり、屋外暴露8年3ヶ月のものと比べても著しい劣化状況となっていた。なお表面繊維の脱落が進んだ供試体については、タワシによって脱落する繊維を十分に除去した後、力学特性試験を実施した。

b) 力学特性

① 曲げ特性

図-2に屋外暴露試験8年3ヵ月後の曲げ試験の応力線図を示す。フランジ部は、外側に多くの炭素繊維が入っているハイブリッドFRP層であるため、試験時の載荷面によって試験結果が異なることが予想される。そのため、1水準あたり4個ある供試体のうち、試験面の上下を変えて2本ずつ試験を実施した。写真-2に無塗装供試体の曲げ試験直後の状況を示す。ガラス繊維面が上側の場合は圧縮側のGFRPで破壊した。一方、炭素繊維面が上側の場合は、圧縮側のガラス繊維と炭素繊維との積層内で、比較的薄い層で破壊した。塗装の有無に係らず破壊モードに差はなく、曲げ応力や変位の性能が極端に低いもの

は見られなかった。表-4に屋外暴露後の曲げ強度を示す。塗装の有無に関わらず、初期値と比較して明確な強度低下は認められなかった。

促進劣化供試体の試験結果は、著者らの既報⁴⁾にて4,000時間までの試験結果を報告済みであるが、20,000時間後の結果と比較するために併せて結果を掲載する。促進劣化供試体についても、2個ずつ試験面を変えて曲げ



写真-1 フランジ部供試体
(左：屋外暴露，右：促進劣化20,000時間)

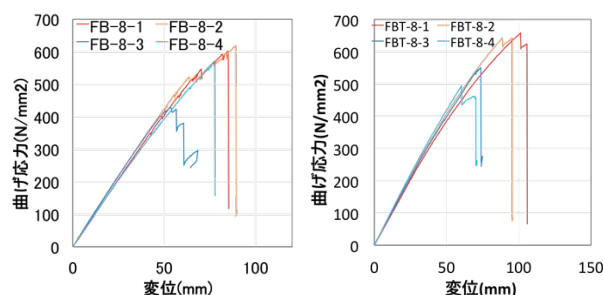
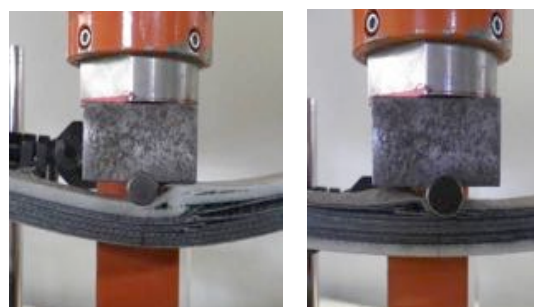


図-2 屋外暴露後のフランジ部の
曲げ試験の応力線図(左：無塗装，右：塗装有)



a)ガラス繊維面が上側 b)炭素繊維面が上側
写真-2 屋外暴露8年3ヵ月後(無塗装)の曲げ試験

表-4 屋外暴露試験後のフランジ部の曲げ強度

	ガラス繊維面が上			炭素繊維面が上		
	①	②	平均	③	④	平均
0h	614	621	618	443	407	425
屋外暴露 (塗装無)	601	619	610	429	570	500
屋外暴露 (塗装有)	658	643	651	551	494	523

(単位：MPa)

試験を実施した。なお、曲げ試験には無塗装のもののみ試験に供した。

20,000時間促進劣化供試体の曲げ試験の応力線図を図-3に示す。曲げ応力および変位の性能が極端に低い試験片は見られず、比較的ばらつきは少ないものと判断した。また、曲げ応力の結果に基づき、曲げ弾性率を算出したところ、屋外暴露後の塗装有した供試体で31.6GPaであり、促進劣化20,000時間後で32.5GPaであった。劣化試験の内容にかかわらず、長期間の劣化による曲げ弾性率の違いは認められなかった。

写真-3に曲げ試験直後の供試体の様子を示す。ガラス繊維面を上にした場合、圧縮側のGFRP側で破壊していた。一方、炭素繊維面を上にした場合には、圧縮側のGFRPの表層での破壊とともに、引張側のGFRPの破壊が確認された。

促進劣化試験後の曲げ強度の結果を表-5に示す。また、フランジ部の曲げ強度の経時変化を図-4に示す。なお、0から4,000時間までの結果について、既報⁴⁾では試験面と曲げ強度が逆になっているが、著者らの記載の誤りであり、本稿で示している通りの強度と試験面の関係が正しい。炭素繊維面を上にした場合では、初期値から20,000時間まで曲げ強度の低下は認められなかった。促進劣化20,000時間では、暴露試験後の供試体では認められなかった引張側のGFRPの破断が認められた。また、暴露試験後の曲げ強度が、促進劣化試験よりもやや高いのは、引張側GFRPがある程度寄与している可能性が考えられる。一方、ガラス繊維面を上にした場合は、初期値から徐々に強度が低下した。このことから、ガラス繊維面の

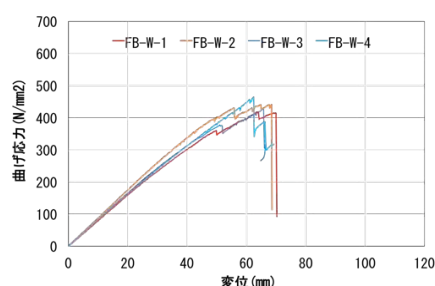
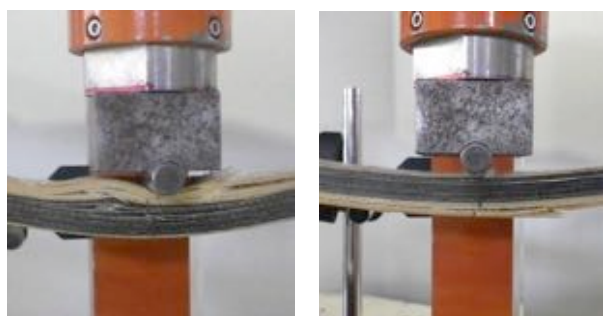


図-3 フランジ部の曲げ試験の応力線図



a)ガラス繊維面が上 b)炭素繊維面が上
写真-3 促進劣化20,000時間後の曲げ試験

圧縮強度が弱くなったことが示唆される。なお、20,000時間まで劣化した場合、試験面によらず両者は同程度の強度となった。

② 層間せん断特性

図-5に促進試験後の層間せん断試験の荷重-変位図を示す。なお、層間せん断試験においてはフランジ部の内側、すなわちガラス繊維面を下側にむけて試験を実施した。促進劣化供試体で、塗装したものの中の1つ(図中、FRT-W XK-2)は試験の途中で固定治具より脱落したものであるが、荷重に若干違いはあるが、4個の供試体のばらつきは小さいものと判断した。同様に、屋外暴露後の荷重-変位図を図-6に示す。これも供試体間のばらつきは小さかった。

層間せん断後の供試体の状況を写真-4に示す。促進劣化供試体は、荷重による破壊が層間で表れており、塗装した場合にはその様子が顕著に確認された。写真のように、明確に層間で破断しているものの他に、積層中で破断が生じたような跡を確認することができた。一方、塗装をしていない供試体については、塗装したもののように明確に層間せん断跡を確認することはできず、表面に曲がった跡が見られた。そのため、層間での破断だけでなく、曲げによる破壊の可能性が示唆された。

表-5 促進耐候性試験のフランジ部の曲げ強度

	ガラス繊維面が上			炭素繊維面が上		
試験時間	①	②	平均値	③	④	平均値
0h	614	621	618	443	407	425
1,000h	600	636	618	407	414	411
2,000h	650	564	607	421	429	425
4,000h	586	571	579	414	493	454
20,000h	427	464	446	418	441	430

(単位：MPa)

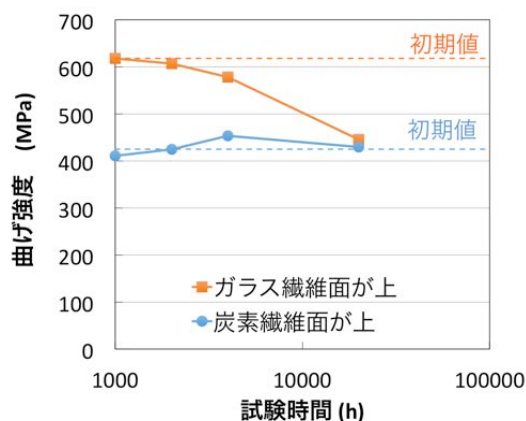


図-4 フランジ部の曲げ強度の経時変化

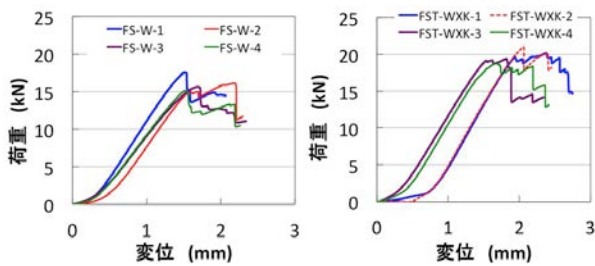


図-5 促進劣化試験(20,000時間)後のフランジ部の層間せん断試験の荷重-変位図
(左：塗装無，右：塗装有)

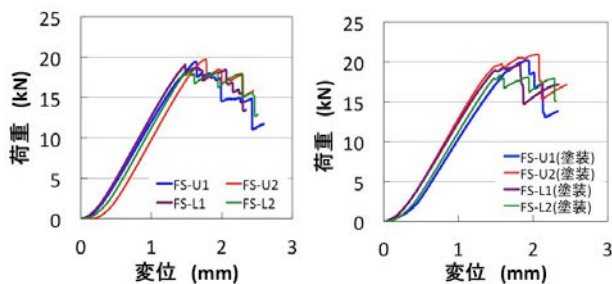


図-6 屋外暴露後のフランジ部の層間せん断試験の荷重-変位図



写真-4 層間せん断試験後のフランジ部の供試体
(上：塗装有，下：塗装無)

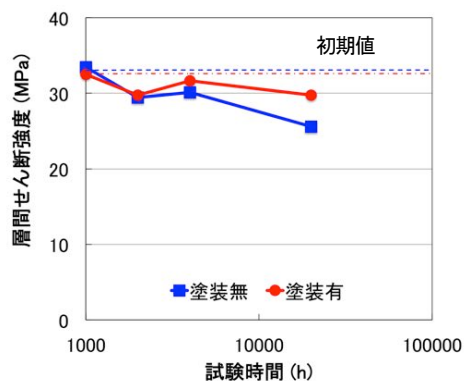


図-7 促進劣化試験後のフランジ部の層間せん断強度

図-7に促進劣化供試体でフランジ部の層間せん断強度の経時変化を示す。塗装をしていない場合、経時変化に伴い層間せん断強度は低下し、20,000時間で初期値の77.3%となった。一方、塗装した供試体でも、20,000時間促進劣化後の強度は初期値より低下しているものの、低下率は91.1%と比較的小さく、2,000時間以降については、検定（t検定、有意水準5%）の結果、有意差は認められず、劣化進行が抑制されていると考えられた。これらのことから、層間せん断強度について、塗装の保護効果がある程度認められたと考えられる。

表-6に屋外暴露試験後の層間せん断強度を示す。比較のため、初期値および20,000時間促進劣化後の層間せん断強度も併せて表記した。屋外暴露後の層間せん断強度は、20,000時間促進劣化と比較して、強度低下の程度は少なかった。また、屋外暴露供試体についても、塗装による保護効果が認められた。

(2) ウェブ部

a) 力学特性

① 曲げ特性

図-8に促進劣化後のウェブ部の曲げ応力線図を示す。ウェブ部は左右対称であるため、試験の繰返し本数を4とした。なお、本試験では照射面を曲げ試験面下側、つまり引張側とした。曲げ応力に若干の違いがあるものの、曲げ応力、変位に極端に低いものではなく、試験のばらつきはないものと判断した。

表-7に促進耐候性試験後のウェブ部の曲げ強度を示す。初期値から4,000時間までの値は既報⁴⁾の通りである。経時変化を明確にするために、曲げ強度の経時変化を図-9に示す。初期値と1,000時間の曲げ強度には検定の結果、有意差が認められた。また、1,000時間以降の曲げ強度は一旦4,000時間で低下するが、20,000時間の

表-6 屋外暴露後のフランジ部の層間せん断強度

劣化条件		塗装無	塗装有
促進劣化	0h	33.1	32.6
	20,000h	25.6	29.7
屋外暴露8年3カ月		29.9	31.2

(単位：MPa)

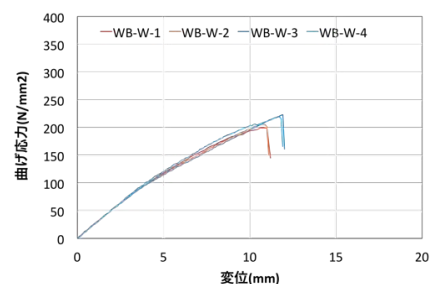


図-8 促進劣化試験後のウェブ部の曲げ応力線図

表-7 促進耐候性試験後のウェブ部の曲げ強度

試験時間	①	②	③	④	平均値
0h	344	311	311	356	331
1,000h	207	229	200	229	216
2,000h	200	207	236	221	216
4,000h	200	193	179	171	186
20,000h	199	206	223	219	212

(単位：MPa)

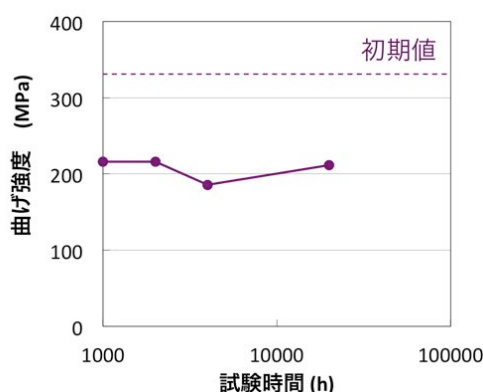


図-9 ウェブ部の曲げ強度の経時変化

強度は 1,000 時間と同程度であった。すなわち、ガラス繊維面は長期的な劣化による圧縮および引張強度に変化はなく、供試体全体としての曲げ強度は 1,000 時間で初期値の 2/3 程度に低下するがそれ以降で曲げ強度の低下が進行しないことが示唆された。

図-10に屋外暴露試験後の曲げ応力線図を示す。塗装の有無に関わらず、曲げ応力に若干の違いがあるものの、曲げ応力、変位に極端に低いものではなく、試験のばらつきはないものと判断した。ウェブ部の曲げ弾性率は、20,000時間促進劣化後で16.0GPaであり、屋外暴露試験後で塗装したものでは16.7であった。フランジ部と比べると弾性率は小さいが、ウェブ部でも劣化試験条件によらず、曲げ弾性率に違いは認められなかった。

表-8に屋外暴露試験後の曲げ強度を示す。塗装した供試体の曲げ強度の方が高かった。無塗装の供試体の曲げ強度は初期値よりもやや低い、塗装した供試体の曲げ強度は初期値より10%程度高い強度となった。これは暴露期間中に樹脂の硬化の進展などが影響していると考えられる。これらの結果より塗装による強度低下に対する保護効果が認められたものと判断できる。

② 層間せん断特性

層間せん断試験後の供試体の様子を写真-5に示す。全ての塗装した供試体は、フランジ部のように明確な層間せん断が認められず、表面と層間にひびが入っているものが見受けられた。無塗装の供試体も層間での破壊は明確ではなかった。これらのことから、ウェブ部について

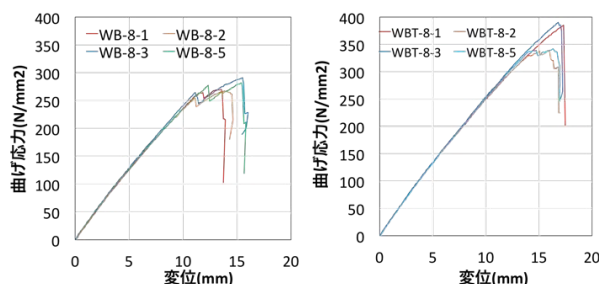


図-10 屋外暴露後のウェブ部の曲げ試験の応力線図(左：無塗装，右塗装有)

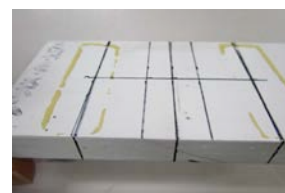
表-8 屋外暴露試験後のウェブ部の曲げ強度

試験時間	①	②	③	④	平均値
0h	344	311	311	356	331
屋外暴露(塗装無)	270	268	291	282	280
屋外暴露(塗装有)	385	338	390	341	366

(単位：MPa)



a) 塗装有①



b) 塗装有②



c) 塗装無

写真-5 層間せん断試験後のウェブ部供試体の外観

は層間せん断強度が適切に求められていない可能性があるが、ここでは、層間せん断強度が得られていると仮定して検討を進める。

図-11および図-12に促進耐候性試験後および屋外暴露後のウェブ部の荷重-変位図を示す。供試体間のばらつきが小さいことを確認した。また、図-13にウェブ部の層間せん断強度の経時変化を示す。無塗装の供試体は、徐々に強度が低下し、20,000時間で急激な強度低下が見られた。一方、塗装をした場合でも同様の傾向が認められたが、無塗装のものとは比べると強度低下が緩やかであ

り、20,000時間後の強度は無塗装のものより高かった。

表-9に屋外暴露後のウェブ部の層間せん断強度を示す。無塗装の場合には、20,000時間促進劣化後よりも強度が保たれていたが、塗装した場合もほぼ同程度の強度となり、塗装による保護効果は、この条件では認められなかった。

b) 透水性

表-10に、試験開始から7日後まで透水量の結果を示す。吸水試験は試験数2個として実施し、表には平均値を示す。ただし、屋外暴露後の供試体で塗装したもののについては、ひとつは接着不良により水漏れしたため、試験数1として結果を示す。

暴露前の供試体に比べて、暴露後には、無塗装供試体でおおよそ1桁、塗装供試体ではその半分程度の透水量が確認された。ただし、透水量の程度は、保護材を塗布したコンクリート供試体の24時間の透水量程度であり、7日後の透水量で1mLにも満たない本試験の透水量は、大きなものではないと判断できる。

暴露前後の透水量の変化から、無塗装および塗装供試体ともに、劣化により表面から内部にかけて何らかの構造変化が生じている可能性が示唆された。前節の層間せん断試験後の供試体の表面にはひび割れが発生しており、層間以外での破壊が劣化に伴う表面の変化と関係しているものと推察される。ただし、これらについては、今後より詳細な検討が必要である。

4. 考察

(1) 表面の劣化状態と強度の相関

20,000時間促進劣化後の無塗装供試体の外観は、部位に関わらず、屋外暴露供試体よりも表面繊維の状態や繊維の脱落等、劣化が進行していた。20,000時間の促進劣化は、紫外線積算量では屋外(つくば)暴露61年分に相当するため、8年3ヶ月間分の屋外暴露供試体よりも劣化が著しいと考えられる。そのため、促進劣化後よりも屋外暴露供試体の方が、曲げ強度や層間せん断強度が高いことが多く、表面の劣化状態と強度に相関があることが示唆された。

透水量試験は、非破壊で表面の劣化状態を評価できる可能性が示された。この方法は、現場での実施が可能であるため、FRP供試体に対する適用性が確立すれば、現場での劣化診断に活用できる可能性がある。

(2) HFRPの長期耐久性

劣化試験後の供試体の外観観察や力学特性、透水性の結果に基づき、GFRP(ウェブ部)と比較しながらHFRP(フランジ部)の長期耐久性について考察する。

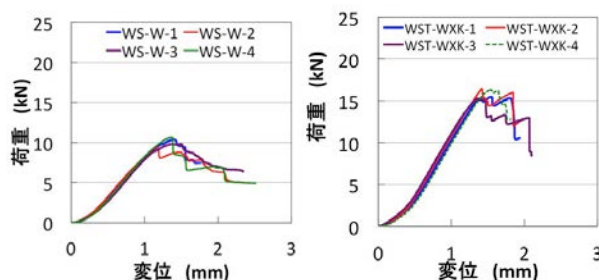


図-11 促進耐候性試験後のウェブ部の層間せん断試験の荷重-変位図
(左：塗装無し，右：塗装有り)

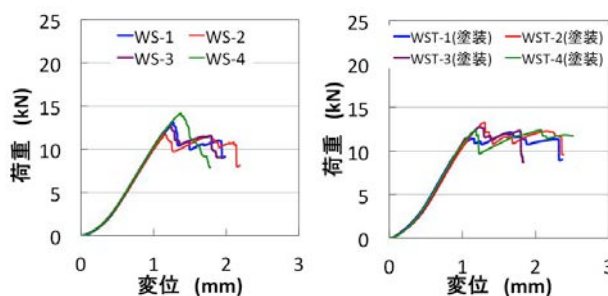


図-12 屋外暴露後のウェブ部の層間せん断試験の荷重-変位図
(左：塗装無し，右：塗装有り)

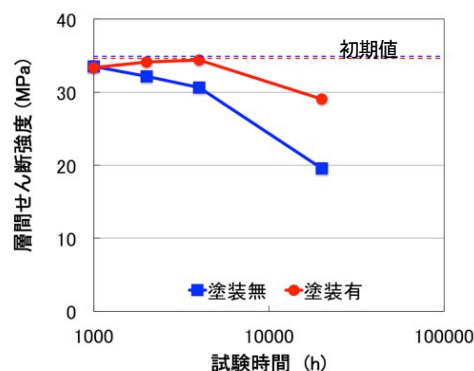


図-13 ウェブ部の層間せん断強度

表-9 ウェブ部の層間せん断強度

劣化条件		塗装無し	塗装有
促進劣化	0h	34.9	34.6
	20,000h	19.6	29.0
屋外暴露8年3ヵ月		24.4	23.7

(単位：MPa)

表-10 ウェブ部の透水量

	暴露前	暴露後	
		塗装無し	塗装有
吸水量(mL)	0.07	0.64	0.32

図-14および図-15に曲げ強度および層間せん断強度の経時変化を示す。なお、フランジ部の曲げ試験の結果は、試験面に関わらず試験数4本分の平均値を表している。

曲げ強度でも層間せん断強度でも、強度比の経時変化について似た傾向が得られた。ウェブ部と比較して、フランジ部の方が20,000時間の促進劣化後でも、8割程度かそれ以上の強度を保持していることが明らかとなった。

図-4で示した通り、フランジ部はガラス繊維面を試験面上にした時は曲げ強度が低下したが、試験面によらず供試体全体の曲げ強度として捉えると、著しい強度低下は認められなかった。20,000時間促進劣化後の供試体の曲げ強度は試験面によらず同程度となったが、ウェブ部よりも強度保持率が高かった。また、層間せん断強度でもウェブ部よりもフランジ部の方が高い強度保持率が得られた。寸法等の違いから、強度を直接比較することはできないが、HFRPはCFRPが積層されたことで、GFRP単体よりも長期使用後の強度が保たれていることが示唆された。実験における曲げ試験後の状態から、CFRP自体の破壊はあまり見られず、CFRPとGFRPの積層間の破断、あるいはHFRP中のGFRPの圧縮強度の低下や破壊がHFRPの強度に影響を及ぼすことが示唆されている。そのため、HFRPは、劣化に伴うGFRPの強度低下に注意して使用するのが良いと考えられる。

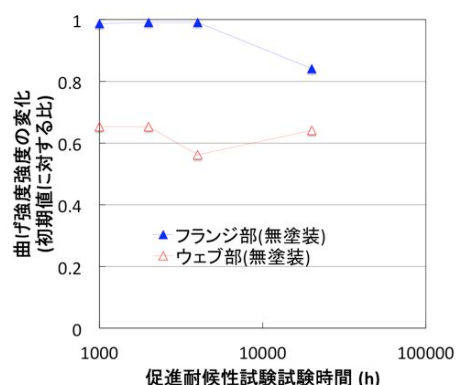


図-14 初期値に対する曲げ強度の比

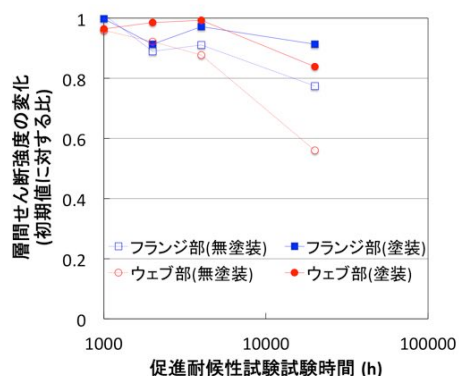


図-15 初期値に対する層間せん断強度の比

(3) HFRPに対する塗装の保護効果

これまでの研究で、GFRPでは塗膜による保護効果がある⁵⁾が、CFRPでは明確ではない⁶⁾と報告されている。これらを併せ持つHFRPに対する塗装の保護効果を力学特性や透水性から考察する。

図-15から、ウェブ部(GFRP)は無塗装の場合で6割程度まで強度が低下するが、塗装することで強度低下が抑制されていることが明らかである。また、透水試験の結果から塗膜がある方が透水量が少なかったことから、表面劣化が抑制されていたものと考えられる。フランジ部(HFRP)では無塗装であっても8割程度強度が保たれているが、塗装を施すことでさらに強度低下が抑制されていた。屋外暴露後の場合でも、塗装をしたもののほうがフランジ部の曲げ強度および層間せん断強度は高かった。なお、ウェブ部の屋外暴露後の供試体で、層間せん断強度では無塗装の方が若干強度が高かったが、塗装した供試体の層間せん断強度と有意差は認められなかった。以上の結果から、HFRPの長期耐久性に対して、塗装の保護効果はあると言える。

5. 結論

本研究ではHFRPの長期耐久性を評価するため、8年3ヶ月間の屋外暴露や促進劣化試験後の力学特性の変化を曲げ試験及び層間せん断試験により調べた。屋外暴露後のHFRPについて、明確な強度低下は認められなかった。また、屋内の促進劣化試験でもGFRPほどの強度低下はなく、HFRPに長期耐久性あることが明らかとなった。また、HFRPにも塗装による保護効果があることが明らかとなった。

補遺：既報⁴⁾の「表-2 促進耐候性試験後のフランジ部曲げ強度」および「表-3 水中浸せき試験後のフランジ部曲げ強度」における、“フランジ外面が上側”および、“フランジ内面が上側”は、それぞれ“フランジ内面が上側”および、“フランジ外面が上側”が正しいのでここに訂正する。それぞれ前者は本論文中的“ガラス繊維面が上”，後者は本論文中的“炭素繊維面が上”に相当する。既報⁴⁾の正しい表-2および表-3を、以下に示す。

表-2 促進耐候性試験後のフランジ部曲げ強度

試験時間	フランジ内面(ガラス繊維面)が上側		フランジ外面(炭素繊維の多い側)が上側		平均値
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)

表-3 水中浸せき試験後のフランジ部曲げ強度

試験時間	フランジ内面(ガラス繊維面)が上側		フランジ外面(炭素繊維の多い側)が上側		平均値
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)

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書, 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：床版橋形式 GFRP 歩道橋および線路上空自由通路のためのハイブリッド FRP 桁斜張橋の開発, 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.

- 4) 西崎到, 下村匠, 栗田守朗, 竹田, 睦好宏史：ハイブリッド FRP 桁の環境耐久性に関する試験, 第 9 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム, pp.273-279, 2011.
- 5) 西崎到, 櫻庭浩樹, 富山禎仁：GFRP 引抜成形材の屋外環境における劣化と表面保護塗膜による劣化抑制効果に関する研究, 土木学会論文集 A1, vol.71, No.5, pp.II-13-21, 2015.
- 6) 富山禎仁, 西崎到：コンクリート補強用連続繊維シート(CFRP)の長期耐久性評価, 第 9 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム, pp.290-295, 2011.
- 7) 土木研究所資料：コンクリート表面保護工の施工環境と耐久性に関する研究, 土木研究所資料第 4186 号, 2011.

LONG-TERM DURABILITY OF HYBRID FIBER REINFORCED POLYMER GIRDER

Yoko KAWASHIMA, Itaru NISHIZAKI and Takumi SHIMOMURA

In the hybrid FRP (HFRP), carbon fiber is laminated on the flange portion contributing to bending rigidity of the girder portion and the other portion is made of GFRP. In this study, we investigated the change of mechanical properties of HFRP after exposure test for 8 years and 3 months and accelerated deterioration test as long-term durability evaluation by bending test and interlaminar shear test. After the exposure test, both initial bending and interlaminar shear strength of the flange part did not show a clear decrease. Although a slight decrease in strength was observed after the accelerated deterioration test, it was confirmed that the coating on the HFRP has protective effect. On the other hand, a significant decrease in strength was observed in the web part. It was occurred due to the breakdown occurring in other than the interlayer.