# (27) 材料試験及び非破壊検査による約20年間暴 露されたGFRP引抜成形材の残存性能評価

辰田 翔太<sup>1</sup>・北根 安雄<sup>2</sup>・日比 英輝<sup>3</sup>・佐藤 顕彦<sup>4</sup> 五井 良直<sup>5</sup>・杉浦 邦征<sup>6</sup>・西崎 到<sup>7</sup>

 <sup>1</sup>学生員 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻(〒615-8540京都市西京区京都大学桂) E-mail:tatsuta.shouta.47e@st.kyoto-u.ac.jp
<sup>2</sup>正会員 京都大学大学院准教授 工学研究科社会基盤工学専攻(〒615-8540京都市西京区京都大学桂) E-mail:kitane.yasuo.2x@kyoto-u.ac.jp
<sup>3</sup>正会員 株式会社ヒビ代表取締役(〒503-1337岐阜県養老郡養老町直江613-1) E-mail:hidekey@hibi-frp.co.jp

4学生員 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂) E-mail:sato.akihiko.45m@st.kyoto-u.ac.jp

<sup>5</sup>正会員 京都大学大学院助教 工学研究科社会基盤工学専攻(〒615-8540京都市西京区京都大学桂) E-mail:goi.yoshinao.2r@kyoto-u.ac.jp

6正会員 京都大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂) E-mail:sugiura.kunitomo.4n@kyoto-u.ac.jp

<sup>7</sup>正会員 (国研)先端材料資源研究センター 材料資源研究グループ長 (〒305-8516 つくば市南原1-6) E-mail:nisizaki@pwri.go.jp

GFRP引抜成形材は土木構造部材として広く用いられているが、長期暴露後のGFRP引抜成形材について 定量的な点検方法やその結果の診断方法が確立されていない。そこで、本研究では長期間暴露された GFRP引抜成形材の残存性能を非破壊検査によって評価することを目的とし、約20年間屋外暴露された GFRP引抜成形材と同期間室内保管されていた同部材を対象に、材料試験により計測された残存性能と非 破壊検査結果との比較検討を実施した.非破壊検査は外観観察及び超音波探傷器を用いた材料内の超音波 伝播速度計測を行った.それらの結果より、繊維方向の強度が著しく低下した際には板厚の減少が確認さ れた.また、繊維方向の引張強度低下に伴い、超音波伝播速度が低下することがわかった.

Key Words : GFRP, Inspection, Non-destructive test, Long-term exposure, Remaining strength

#### 1. はじめに

繊維強化ポリマー(FRP)は樹脂を母材,繊維を強化 材に用いた複合材料であり,軽量かつ耐久性,耐食性に 優れた部材である.このうち,土木構造部材としてFRP が使用される際は,大きな断面を経済的に得られること や,ガラス繊維が他の繊維と比べ安価に入手できること から,GFRP 引抜成形材が広く用いられている.しかし FRP 材料は複合材料であるため,破壊のプロセスが複雑 になりやすく,構成材料や積層構成が材料ごとに異なる こともあり,非破壊試験による点検結果と残存性能との 関係が明らかでない.また,GFRP 引抜成形材の長期間 暴露データが少なく,その耐久性が明確ではないなどの 理由から,国内におけるFRPを用いた土木構造物の普及 が妨げられているのが現状である<sup>10</sup>. GFRP 引抜成形材 を対象とした暴露試験は,西崎ら<sup>3</sup>が塗装を施したもの と無塗装のものを対象に 10 年間暴露したのち材料試験 を実施しているが,一般的な土木構造物の耐用期間にわ たる暴露試験は著者の知る限り存在しない.以上のこと から,今後 FRP 土木構造物が普及していくためには,長 期間における暴露試験データの蓄積と,長期的使用を視 野にいれた定量的な点検方法や結果の診断方法の確立が 必要不可欠である.

そこで、本研究では、土木研究所において長期間屋外 暴露された引抜成形 GFRP 角パイプ(20年間暴露)及び 引抜成形 GFRP 歩道橋床版(23年間暴露)について、力 学試験を通じて暴露後の残存性能を調べた.これらの引 抜成形材には塗装などの表面保護層が設けられていない. また,非破壊検査を行い力学性能と照らし合わせること により,検査結果と残存性能との関係性について検討した.

# 2. 供試体

本研究で用いる供試体は、土木研究所つくば屋外暴露 場で、約20年間屋外暴露された引抜成形 GFRP 角パイプ 及び23年間暴露した引抜成形 GFRP 歩道橋床版(以下暴 露試験片)、また角パイプ・歩道橋床版共に暴露期間と 同期間室内に保管されていたもの(以下健全試験片)であ る.角パイプ供試体の外観写真を図-1に、床版供試体の 外観写真を図-2~図4に示す.各供試体の母材・強化 材・積層構成・繊維体積含有率は表-1に示す通りである. ここで、繊維体積含有率は各供試体の健全試験片を対象 に、JIS K7052<sup>4</sup>に従い焼成試験を行い求められたもので ある.

## 3. 検討方法

# (1) 供試体および材料試験方法

# a)角パイプ供試体

角パイプ供試体から図-5 に示す各面よりクーポン試験 片を切り出し,A面(暴露面),B面(下面),側面の 試験片をそれぞれ作成した.各試験片数及び寸法につい ては表-2 に示す.クーポン試験片の寸法は JIS K71645)を 参考にしたが,側面においては切り出し元の角パイプ寸 法の関係から,幅方向の長さを 25mm から 15mm に変更 した.

材料試験として、角パイプに対しては引抜方向(0°方 向)に対しての一軸引張試験を行った.載荷試験には、 精密万能試験機(島津製作所:AG-Xplus,最大荷重 50kN)及びMTS材料試験機(最大荷重500kN)を用い、 JISK 71645)に従い載荷速度 lmm/minにて試験片が破壊し 荷重が急激に低下するまで載荷した.引張強度は最大荷 重を断面積で除して算出した.また、試験片には両面の 中央部に二軸ひずみゲージを貼り付け、載荷中の縦ひず みと横ひずみを記録し、応力-ひずみ関係から、弾性率 とポアソン比を算出した.

#### b) 床版供試体

図-2~図-4 に示す健全供試体及び暴露供試体(暴露 面・下面)からクーポン試験片を切り出した.各種材料 試験における試験片数及び寸法については表-3 に示す. 床版に対しては,引抜方向に対して 0°・45°・90°一軸引 張試験及び 0°・90°一軸圧縮試験を行った.ここで,0° と 90°引張試験の寸法は JIS K7164<sup>5</sup>を,45°引張試験の寸 法は JIS K7019<sup>®</sup>参考にしているが、45<sup>®</sup>及び 90<sup>®</sup>の試験片 については切り出し元の床版寸法の関係により、幅方向 の長さ 25mm から 20mm に変更している.また圧縮試験 の寸法は JIS K7018<sup>®</sup>を参考にした.

引張試験には精密万能試験機(島津製作所:AG-Xplus, 最大荷重 50kN) 及び MTS 材料試験機(最大荷重 500kN) を用い、圧縮試験には万能試験機(東京衡機製、最大荷 重 1000kN) を用いた. 載荷速度は JIS 規格 かっに従い 1mm/min とし、試験片が破壊し荷重が低下するまで載荷 した. 引張・圧縮強度は最大荷重を断面積で除して算出 し、面内せん断強度は 45°引張試験にて得られた最大荷 重を、断面積の2倍で除して算出した. また、試験片に は、中央部の両面に二軸ひずみゲージを貼り付け、載荷 中の縦ひずみと横ひずみを記録し、応力-ひずみ関係か ら引張・圧縮弾性率とポアソン比を算出し、面内せん断 弾性率は 45°引張試験によって得られた荷重とひずみよ りせん断応力・せん断ひずみを算出し、せん断応力ーせ ん断ひずみ関係から算出した.ここで、0°試験の弾性率 及び強度は、試験片ごとの板厚にバラつきがあったこと と、繊維の配合量が板厚によらず同量であると予想され ること、一般的に0°方向の弾性率及び強度は樹脂よりも 繊維が支配的であることから、全ての試験片の板厚を公 称板厚 6mm と仮定して算出している.

#### (2) 外観観察

外観観察は角パイプ,床版共に,一部を水により表面 の汚れを洗い流した後,デジタルカメラ (RICHO 防水 コンパクトデジタルカメラ WG-60)の顕微鏡モードを 用い撮影した接写写真を健全供試体と暴露供試体で比較 した.



図-1 角パイプ供試体



図-2 床版健全供試体



図-3 床版暴露供試体(暴露面側)



図4 床版暴露供試体(下面側)

供試体	母材	強化材	積層構成	繊維体積 含有率(%)
A面・B面	ビニエス			45.9
角パイプ 側面	テル樹脂 不飽和ポ リエステ ル樹脂	ガラス 繊維	表層 :CSM	49.6
歩道橋床版			その他:ROV	48.4

#### 表-1 供試体構成情報

※ CSM:コンティニュアス・ストランド・マット ROV:ロービング層 (一方向層)



図-5 角パイプ試験片切り出し位置

表-2 角パイプ試験片数及び寸法

		A面	B面	個委
		暴露面	下面	則則
試験体数	健全	2	2	4
	暴露	2	2	4
寸法(mm)	長さ*幅*厚さ	250*	200*25*6	

#### 表-3 床版試験片数及び寸法

試験種			引張	圧縮			
		0°	45°	90°	0°	90°	
試験体数	健全	5	5	10	5	8	
	暴露面	5	5	5	5	5	
	下面	5	5	5	5	5	
寸法(mm)	長さ*幅*厚さ	250*25*6	200*25*6		125*25*6		



図-6 角パイプ超音波測定点(単位:mm)

#### (3) 超音波伝播速度の計測

健全及び暴露供試体において,超音波探傷器 (OLYMPUS EPOCH 650)を用いて,超音波伝播速度を 計測した.超音波が板厚方向を伝播する時間を測定し, 板厚を測定時間で除することにより伝播速度を算出した. 測定精度を確保するために角パイプ・床版共に複数の計 測点を設定し,各計測点において9回ずつ超音波伝播時 間を測定し,9回の測定値を平均した値をその計測点の 伝播時間とした.つづいて,全計測点における伝播時間 の平均を供試体の伝播時間とし,その値を用いて供試体 の超音波伝播速度を算出した.以下に,角パイプと床版 における測定対象面及び計測点を示す.

#### a) 角パイプ

健全供試体の測定面は図-5 における「A 面」と「B 面」,暴露供試体の測定面は図-5 における「暴露面」と「下面」に設定した. 側面の測定は使用した探触子の直径が側面の幅より大きかったため行わなかった. また計測点は各面において図-6 に示す5 点に設定した.

## b) 床版

測定面は「健全供試体」,「暴露供試体暴露面」と「暴露供試体下面」の3面とし,測定点はそれぞれにおいて図-7と図-8に示す4点ずつ設定した.



図-8 床版暴露供試体超音波測定点(単位:mm)

#### 4. 実験結果及び考察

#### (1) 角パイプ

材料試験結果及び超音波探傷器で得られた伝播速度を 表4に示す. ここで、各種試験の暴露試験片における算 出値を、健全試験片の算出値で除したものを保持率と称 す. 引抜方向(0°方向)における引張弾性率の保持率は, 暴露面において 0.88、側面において 0.92、下面において 0.94 であった. 次に、0°方向における引張ポアソン比の 保持率は、暴露面において 084、側面において 0.96、下 面において 0.97 であった. 最後に, 0°方向における引張 強度の保持率は、暴露面において 0.49、側面において 0.62, 下面において 0.66 であった. ここで, 有意水準 10%で両側 t 検定を行ったところ, 側面の弾性率, 暴露 面のポアソン比、暴露面・側面・下面の強度において有 意差が認められた.以上から、暴露試験片の強度は暴露 面,側面,下面の順に保持率が小さいことがわかり,0° 方向の引張強度は繊維の強度の影響を強く受けることか ら,引張強度の低下は繊維破断,繊維の劣化,繊維/樹 脂間の付着の劣化など、何らかの繊維に関係する劣化に

表4 角パイプ実験結果

		試験片				但共家				
試験種	算出値	健全供	健全供試体		暴露供試体			<b>冰</b> 河 <del>千</del>		
		A面・B面	側面	暴露面	下面	側面	暴露面	下面	側面	
0° 引張	弾性率 (GPa)	37.5	37.2	33.1	35.4	34.4	0.88	0.94	0.92	
	ポアソン比	0.313	0.305	0.263	0.304	0.293	0.84	0.97	0.96	
	強度(MPa)	726.4	744.1	358.5	480.6	458.2	0.49	0.66	0.62	
超音波	伝播速度(m/s)	2912		2648	2792		0.91	0.96		

よるものと考えられる.また,ポアソン比は暴露面においてのみ有意差が認められたことから,紫外線による劣化がポアソン比の低下に影響を及ぼしていると推定される.また,弾性率は側面においてのみ有意差が認められたが、P値は暴露面において13.9%、側面において9.5%、下面において42.3%であり、側面と暴露面の試験片数の違いを考慮すると,暴露面のP値は比較的低い(棄却域に近い)と考えられ,暴露試験片の弾性率も強度同様暴露面,側面,下面の順に保持率が小さいことがわかる. 0°方向の弾性率も強度同様,繊維の弾性率の影響を強く受けることから,繊維破断,繊維の劣化,繊維/樹脂間の付着の劣化などの要因によって低下していると考えられる.

図-9と図-10に外観観察で撮影した写真を示す.図-9よ り、健全供試体では繊維の露出が見られない.一方、図 -10 より、暴露供試体では、下面では顕著でない繊維の 露出が、側面と暴露面にかけて顕著になっている. 試験 片の板厚を確認したところ、健全試験片の板厚は A・B 面で 3.08mm, 側面で 3.14mm であるのに対し, 暴露試験 片では、下面で 3.04mm, 暴露面で 2.63mm, 側面で 3.06mm であった. 暴露試験片の板厚を健全試験片の板 厚で除した値を算出すると、側面で 0.97、下面で 0.99 で あるのに対し、暴露面では0.85であった. このことから 暴露面において板厚の減少が顕著であり、樹脂と共に表 層の繊維が脱落していると考えられる.これは、0°方 向の強度低下が暴露面で特に著しいことや、ポアソン比 が暴露面においてのみ有意差が認められたことを考える と、繊維の脱落がポアソン比や強度の低下に影響してい ると考えられる.

超音波伝播速度の保持率は、暴露面で 0.91,下面では 0.96 であり、0°方向の引張弾性率及び引張強度が、下 面よりも暴露面において低下する傾向と一致することが 明らかとなった.0°方向の弾性率及び強度が何らかの 繊維に関する関係する劣化により低下していると考えら れることから、超音波伝播速度の低下も繊維に関する劣 化により低下していると推測する.



図-9 角パイプ健全供試体外観写真



(a)設置面



(b) 側面



(c)暴露面

図-10 角パイプ暴露供試体外観写真

表-5 床版実験結果

计除待	答山店		試験片	保持率		
武帜俚	- 异田恒	健全	暴露面	下面	暴露面	下面
	弾性率 (GPa)	35.4	35.1	34.8	0.99	0.98
0°引張	ポアソン比	0.286	0.283	0.290	0.99	1.01
	強度(MPa)	528	488	445	0.92	0.84
	弾性率 (GPa)	34.9	35.1	33.1	1.01	0.95
0° 圧縮	ポアソン比	0.323	0.326	0.300	1.01	0.93
	強度(MPa)	476	461	433	0.97	0.91
	弾性率 (GPa)	11.4	10.8	12.1	0.94	1.06
90 <sup>°</sup> 引張	ポアソン比	0.101	0.102	0.113	1.01	1.13
	強度(MPa)	34.7	22.1	28.3	0.64	0.82
90° 圧縮	弾性率 (GPa)	11.7	12.5	13.3	1.06	1.13
	ポアソン比	0.106	0.105	0.111	0.99	1.04
	強度(MPa)	111	110	118	0.99	1.06
45 <sup>°</sup> 引張	せん断弾性率 (GPa)	4.09	4.06	3.84	0.99	0.94
	せん断強度(MPa)	27.0	19.6	21.5	0.73	0.80
超音波 伝播速度(m/s)		5509	5085	5001	0.92	0.91

#### (2) 床版

床版試験片の材料試験結果及び超音波探傷器で得られ た伝播速度を表-5に示す.角パイプ同様に,各種試験の 暴露試験片における算出値を,健全試験片の算出値で除 したものを保持率と称した.

まず0°方向の引張・圧縮試験の結果について述べる. 弾性率の保持率は、圧縮試験の下面においては0.95であ るが、その他の引張試験の暴露面及び下面、圧縮試験の 暴露面では 0.98~1.01 に留まる. ポアソン比の保持率に も同様の傾向が見られ、圧縮試験の下面においては 0.93 であるが、引張試験の暴露面及び下面、圧縮試験の暴露 面では 0.99~1.01 であった. 強度の保持率に関しては, 引張試験の暴露面で 0.92, 下面で 0.84, 圧縮試験の暴露 面においては 0.97,下面で 0.91 となり,圧縮・引張共に 下面の強度が暴露面よりも低下している. 有意水準10% で両側 t 検定を行ったところ、有意差が認められたのは、 暴露面及び下面の引張強度、下面の圧縮弾性率、下面の 圧縮ポアソン比のみであった.以上から、0°方向の物性 値では、いずれも下面の劣化が顕著である、もしくは下 面でのみ有意差が見られることから、暴露面の主要な環 境因子である紫外線以外の要因が、各物性値の低下の主 因となっていると考えられる. 紫外線以外の要因の一つ として、水分の影響が考えられる.

続いて、90°方向の引張・圧縮試験の結果について述べる.弾性率の保持率は、引張試験の暴露面において 0.94、下面において1.06、圧縮試験の暴露面において1.06、 下面において1.13となり、引張試験の暴露面以外は増加 しており、特に下面の増加率が暴露面より大きい.また、 ポアソン比の保持率は、引張、圧縮共に暴露面において は0.99~1.01である一方で、下面においては圧縮試験で 1.04、引張試験で1.13と増加している.強度の保持率は、 引張試験においては下面、暴露面共に0.64~0.82である が、圧縮試験においては暴露面で0.99、下面においては

1.06 であった. 0°試験同様, 有意水準10% で両側 t 検定を 行ったところ、暴露面及び下面の引張強度、下面の圧縮 弾性率で有意差が認められた.また、下面の圧縮強度に 関しては P 値が 10.5%であることから, 棄却域に近い. 以上のことから、弾性率は圧縮試験の下面において増加 しているが、圧縮試験の暴露面、引張試験の暴露面及び 下面では、健全試験片との有意な差がみられない. また、 ポアソン比は圧縮及び引張の暴露面,下面共に有意な差 は見られなかった.強度に関しては、引張強度が暴露面、 下面共に大幅に低下しているのに対し、圧縮強度は暴露 面においてほとんど変化せず、下面において増加してい る.これは、樹脂と繊維の付着が劣化したことにより引 張強度は低下したが、圧縮強度に樹脂と繊維の付着が影 響するとは考えにくいため、低下しなかった可能性があ 今後デジタル実体顕微鏡などで樹脂と繊維の付着に 劣化が起こっているかを確認する必要がある.また、ポ アソン比がほとんど変化しなかった理由については外観 観察の結果で述べる.

次に、45°方向引張試験の結果について述べる. せん 断弾性率の保持率は、暴露面で 0.99、下面で 0.94 であっ た. また、せん断強度の保持率は、暴露面において 0.73、 下面において 0.80と暴露面の方が低下していた. 有意水 準 10%で両側 t 検定を行ったところ、せん断強度の暴露 面及び下面でのみ有意差が認められた. せん断強度が低 下した要因としては、90°引張強度が低下した要因と同 じく、樹脂と繊維の付着の劣化が要因だと考えられる. 図-11~図-13 に、角パイプ供試体及び床版供試体の引張 強度(引抜方向に対して 0°),引張強度(引抜方向に 対して 90°), せん断強度の結果をまとめる. 横軸は 暴露年数、縦軸は健全試験片の強度に対する保持率で示 している. また, 西崎ら <sup>3</sup>が無塗装の GFRP 引抜成形材 を対象に 10 年間暴露した後, 材料試験を行うことによ り得られた保持率も、無塗装 R43 として、併せて示して いる. 無塗装 R43 はビスフェノール A型ビニエステル樹 脂を母材に、CSM、Cloth(織布), ROV 形態のガラス 繊維を強化材として用いており、繊維体積含有率は43% である.よって、表-1にも示した通り、角パイプ供試体 及び床版供試体のいずれとも構成情報が異なることを付 記しておく.図-11より、無塗装R43の10年間暴露では、 保持率が1.07と強度低下は認められなかったが、角パイ プ及び床版では 20 年以上の暴露により保持率が 0.49~ 0.92 と強度低下が認められる.よって、0°方向の引張 強度は繊維の強度の影響を強く受けることから、暴露期 間がある程度長期間になると、何らかの繊維に関係す る劣化が起こると考えられる. 図-12 と図-13 から, 引張 強度(90°)及びせん断強度の保持率は、無塗装 R43の 10年間暴露時点でいずれも0.77と強度低下が認められる. また、床版下面の保持率は引張強度で 0.82、せん断



図-13 せん断強度保持率

強度で0.80と、R43の保持率より大きく、反対に床版暴 露面の保持率は引張強度で0.64、せん断強度で0.73と、 R43の保持率より小さい.90°方向及び45°方向には一方 向繊維がないことから、樹脂の強度や、樹脂と繊維の付 着特性の影響を受けやすく、樹脂の紫外線劣化や、樹脂 と繊維の付着の劣化が要因となり強度が低下していると 考えられる.

図-14と図-15に外観観察で撮影した写真を示す.図-15 より,暴露供試体下面・暴露面の両方で繊維の露出が確



図-14 床版健全供試体外観写真



(a)下面



(b)暴露面 図-15 床版暴露供試体外観写真

認できるが,程度は暴露面においての方が明らかに大き い.各試験片の板厚を確認したところ,健全試験片は 5.97mm,暴露試験片下面は5.85mm,暴露試験片暴露面 では 6.10mm となっており,暴露面で板厚が増加し下面 で減少している.これは,暴露面と下面が向かい合う面 であり,板厚の合計が健全試験片の板厚の約2倍になっ ていることから,引抜成形時に金型が下面の方に寄って いたことによる板厚の差であり,暴露によって板厚が変 化したものではないと判断した.したがって,外観観察 からも,板厚計測結果からも,繊維の脱落は生じていな いと判断した.角パイプでは繊維の脱落に伴い,暴露面 の0°引張ポアソン比が低下していたが,今回繊維の脱 落は認められず,ポアソン比も下面の0°圧縮ポアソン 比以外は有意差が認められない。角パイプでは暴露面の 板厚の減少と共に、ポアソン比が低下していたことも考 えると、ポアソン比の低下と繊維の脱落には関係がある と考えられる。しかし、0°圧縮ポアソン比が低下した 原因については不明であるため、今後更に検討が必要で ある。

暴露供試体の超音波伝播速度を,健全供試体の超音波 伝播速度で除した値は,暴露面では 0.92,下面では 0.91 であり,0°方向の引張強度が暴露面より下面の方が低 下している傾向と一致していた.角パイプ同様,0°方 向の引張強度が何らかの繊維に関する関係する劣化によ り低下していると考えられることから,超音波伝播速度 の低下も繊維に関する劣化により低下していると考えら れる.

#### 5. まとめ

本研究では、約20年間暴露されたGFRP 引抜成形材 と、同期間室内に保管されていた同部材を対象に材料試 験を行い、暴露による力学性能の変化を調べた.また、 外観観察・超音波探傷試験・打音検査などの非破壊検査 も実施し、その結果を材料試験の結果と照らし合わせる ことにより、検査結果と残存性能との関係を検討した. 以下に、本研究で得られた結果をまとめる.

- (1)約20年間暴露されていたGFRP引抜成形角パイプの 0°方向引張強度は、健全試験片の強度に対して、暴 露面、下面、側面共に、0.49~0.66であり、大幅な強 度低下が認められた.また、暴露試験片の板厚を、 健全試験片で除した値を算出すると、側面及び下面 では0.97~0.99である一方、特に強度低下が著しい暴 露面では、0.85と板厚の減少が顕著であった.
- (2) 23 年間暴露されていた GFRP 引抜成形歩道橋床板では、暴露試験片の健全試験片に対する0°方向引張・圧縮強度がいずれも0.84~0.97であり、角パイプほどの強度低下は認められなかった.また、暴露による板厚の減少はほとんど確認されなかった.また、90°方向引張強度やせん断強度は、健全試験片の強度に対して、暴露面及び下面共に0.64~0.82と大幅な強度低下が認められたが、90°圧縮強度は、健全試験片の強度に対して、暴露面及び下面共に0.99~1.06であることから、樹脂と繊維の付着の劣化の影響が示唆された.超音波伝播速度の低下傾向は、角パイプ・床版共に0°方向強度の低下傾向と一致していた.
- (3) 超音波伝播速度の低下傾向は、角パイプ・床版共に 0°方向の引張強度の低下傾向と一致しており、0° 方向の引張強度は繊維の影響を強く受けることから、

繊維破断,繊維の劣化,繊維/樹脂間の付着の劣化な ど,何らかの繊維に関する劣化により超音波伝播速 度が低下する可能性があることがわかった.

以上のことから,約 20 年間の暴露により,塗装等の 表面保護層のない GFRP 引抜成形材は,0°方向の強度に 大幅な低下が見られることがわかった.また,超音波伝 播速度と0°方向の強度低下には関連性があると推測され る.しかし,どのような相関性があるかは不明であるた め,今後更に検討が必要である.

#### 参考文献

1) 土木学会:FRP 道橋設計・施工指針(案),土木学会,2011.

- 2) 土木学会: 複合構造レポート 08 巨大地震に対する複合構造 物の課題と可能性, 2013.
- 西崎到, 櫻庭浩樹, 冨山禎仁: GFRP 引抜成形材の屋外環 境における劣化と表面保 護層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 (構造・地震工学). Vol.71, No.5, II 13-II 21, 2015.
- 4) 日本規格協会: JIS K7052 ガラス長繊維強化プラスチックー プリプレグ,成形材料及び成形品ーガラス長繊維及び無機 充てん材含有率の求め方一焼成法,1999.
- 5) 日本規格協会: JIS K7164 プラスチックー引張特性の試験方 法一第4部:等方性及び直交異方性繊維強化プラスチック の試験条件,2005.
- 6) 日本規格協会: JIS K7019 繊維強化プラスチックー±45°引張 試験による面内せん断特性の求め方, 1999.
- 7) 日本規格協会: JIS K7018 繊維強化プラスチックー積層板の 面内圧縮特性の求め方, 2019.

(Received September 10, 2021)

# STUDY ON EVALUATION OF RESIDUAL PERFORMANCE OF GFRP PULTRUSION MOLDED MATERIALS EXPOSED FOR ABOUT 20 YEARS BY MATERIAL TESTING AND NON-DESTRUCTIVE INSPECTION

# Shota TATSUTA, Yasuo KITANE, Hideki HIBI, Akihiko SATO, Yoshinao GOI, Kunimoto SUGIURA, and Itaru NISHIZAKI

GFRP pultrusion molded materials are widely used as civil engineering structural components, but quantitative inspection methods and diagnostic methods for GFRP pultrusion molded materials after long-term exposure have not been established. Therefore, the purpose of this study was to evaluate the residual performance of GFRP pultrusion molded materials exposed for a long period of time by nondestructive testing. The comparison between the residual performance measured by material testing and the results of nondestructive testing was conducted for GFRP pultrusion molded materials exposed outdoors for about 20 years and the same materials stored indoors for the same period of time. The results were compared with those obtained by nondestructive testing. For the nondestructive inspection, the appearance observation and the ultrasonic wave propagation velocity measurement in the material were carried out using an ultrasonic flaw detector. The results showed that when the strength in the fiber direction decreased significantly, the thickness of the plate decreased. It was also found that the ultrasonic propagation velocity decreased with the decrease in tensile strength in the fiber direction.