

報告 紫外線促進試験によるFRP ロッドの劣化性状に関する研究

西村 次男*1 加藤 佳孝*2 山口 明伸*3 魚本 健人*4

要旨: 一方向繊維強化プラスチックを構成する各種繊維、マトリックスおよびFRPロッドの紫外線による劣化性状を促進試験により実験的に検討した結果、CFRPロッドは、紫外線による劣化は余り認められなかった。しかし、AFRPロッドおよびGFRPロッドは紫外線照射初期の段階で紫外線の影響を受け強度低下することが明らかとなった。特にAFRPロッドは強度低下が大きく紫外線の影響を最も受けることが明らかとなった。また、破断時の伸び量の減少、ビッカース硬さ試験結果より、マトリックスであるビスベンジルエステル樹脂が紫外線による影響を受けて脆性的な材料に変化していくことが明らかとなった。

キーワード: FRPロッド、繊維、マトリックス、紫外線劣化、

1. はじめに

コンクリート用補強材として用いられる繊維補強プラスチック (FRP) ロッドは高強度、高耐食性、軽量、非磁性体等の特徴を有することから、建設分野における利用の可能性が高く種々の検討が成されている。著者らはこれまでに、各種繊維とそれを用いた各種ロッドの力学的特性、耐アルカリ性、耐候性について実験的に検討し、その結果を報告している [1~3]。

AFRPロッド (アラミド繊維)、GFRPロッド (ガラス繊維)、CFRPロッド (カーボン繊維) で一方向強化されたFRPロッドを自然環境で暴露した場合、特にアラミド繊維を用いたFRPロッドの強度低下が大きく、その原因が紫外線劣化である可能性が高いことを報告した [4]。高分子材料であるアラミド繊維は、分子結合内に結晶部分と非結晶部分が存在するため、紫外線により結合能力の低い非結晶部分が何らかの影響を受け、繊維内に欠陥部分を生じている可能性が高いと考えられる。そこで本研究では、一方向繊維強化プラスチックロッドを構成する各種繊維、マトリックスおよびFRPロッドの紫外線による劣化性状を促進試験により実験的に検討した結果を報告する。

2. 実験概要

2. 1 繊維およびマトリックスの紫外線

促進試験

実験に使用したFRPロッドの繊維とマトリックスの材料特性および配合を表-1~表-3に示す。試験装置は、写真-1に示すようなキセノンランプを用いた紫外線照射促進試験装置を用いた。

FRPロッドのマトリックスにはビニルエステル

表-1 マトリックスの材料特性

マトリックス樹脂	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	破断時伸び率 (%)
R-802 (ビス系)	86	3.3	5.1
H-600 (ノボラック系)	76	4	2.3

表-2 マトリックス樹脂配合表

	品名	配合比		
		AFRP	GFRP	CFRP
樹脂	R-802 (ビス系)	100	100	0
	H-600 (ノボラック系)	0	0	100
硬化剤	ハ-ヘキサ3M	1.5	1.5	1.5
	ハ-ロイヤルMSP	1	1	1
	トリゴノックス22B-75	0.5	0.5	0.5
滑材	ステアリン酸	1.5	3	1.5
	ステアリン酸亜鉛	0.4	0.4	0.4
充填材	炭酸カルシウム	-	10	-

*1 東京大学生産技術研究所 技術官 (正会員)
 *2 東京大学生産技術研究所 助手 (正会員)
 *3 東京大学大学院 (正会員)
 *4 東京大学生産技術研究所 教授 (正会員)

樹脂を使用しており、表中の試験データはメーカーの保証値である。マトリックスの選定には、複合される繊維の伸び量を考慮し、AFRPおよびGFRPロッドのマトリックスにはビス系ビニルエステル (Ripoxy-R802) を、CFRPロッド

のマトリックスにはノボラック系ビニルエステル (Ripoxy-H600) を使用している。繊維およびマトリックスの繊維の紫外線照射時間は10、50、100、500、1000時間、マトリックスの紫外線照射時間は1000、2000時間で放射照度 $56\text{W}/\text{m}^2$ で行い、1時間当たりの紫外線照射量は約 $0.2\text{MJ}/\text{m}^2$ (銚子における6月の平均放射照度) となる。

繊維の試料は図-1のように繊維1本ずつのモノフィラメントとして紫外線照射を行い、各照射時間終了後、変位制御型オートグラフ (5kgf) を用いて室温 ($20\pm 3^\circ\text{C}$) で試験を行った。また、測定項目は破断荷重 (gf) と伸び量 (mm) である。試験本数はいずれの条件も20~30本とし、クロスヘッドスピードを $0.5\text{mm}/\text{min}$ とした。

マトリックスの試料はJIS-K-7113に従った1号型試験片を作成し紫外線照射を行い、各照射時間終了後、変位制御型オートグラフ (500kgf) を用いて最大荷重と縦横ひずみを測定した。載荷試験の試験本数はいずれの条件も13本とし、クロスヘッドスピードを $2\text{mm}/\text{min}$ とした。ひずみの測定はいずれの条件もそれぞれ3本行い、普通ワイヤーストレインゲージ (長さ3mm: 以下普通ゲージと略す) で測定した。また、微少硬度計を用いてマトリックス表面のビッカース硬さ試験も行った。なお、試験は室温 ($21\pm 2^\circ\text{C}$) の範囲で行った。

2.2 各種FRPロッドの紫外線促進試験

実験に使用したFRPロッドの繊維は、表-3の材料特性に示すようにアラミド繊維 (AFRPロッド)、ガラス繊維 (GFRPロッド) およびカーボン繊維 (CFRPロッド) の3種類である。なお、表中の繊維直径、繊維の引張強度およびロッドの引張強度は、100本の平均値である [5]。いずれのFRPロッドも直径6mmの丸棒状で、一方向強化されており、繊維混入率 (Vf) は55%である。写真-2に示すような紫外線照射促進試験装置を用いて行った。促進条件として、室温 26°C 、湿度 $52\pm 2\%$ で102分間の乾燥、室温 26°C 、湿度 $90\pm 2\%$ で18分間噴霧を1サイクルとして紫外線を照射

表-3 各種FRPロッドの材料特性

	AFRPロッド	GFRPロッド	CFRPロッド
繊維の種類	アラミド 繊維 HFY6000T-240	ガラス繊維 RST110PA-535	カーボン繊維 T300B6000-508
繊維の直径 (μm)	12.15	12.77	6.68
繊維の含有率 (%)	55	55	55
マトリックスの種類	R-802	R-802	H-600
繊維の引張強度 (MPa)	3580	3210	3480
ロッドの引張強度 (MPa)	169	169	134
破断時の伸量 (%)	4.4	5.5	1.4

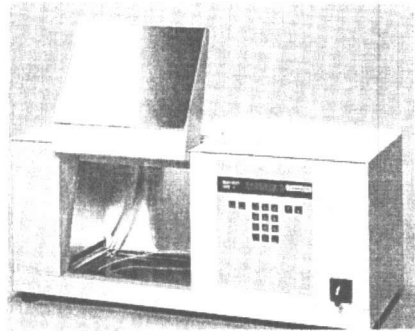


写真-1 紫外線照射促進試験装置

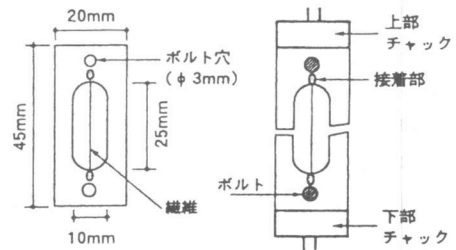


図-1 試験体概要図

した。なお、ランプは繊維およびマトリックスと同様にキセノンランプを用いている。紫外線照射時間は500、1500、2500時間で放射照度 $60\text{W}/\text{m}^2$ で行い、1時間当たりの紫外線照射量は繊維およびマトリックスの促進試験と同様に約 $0.2\text{MJ}/\text{m}^2$ となる。

表-4 各種繊維の紫外線照射後の特性

種類		0hour	10hour	50hour	100hour	500hour	1000hour
アラミド (MPa)	平均値	3580	3030	2500	2380	1830	1600
	標準偏差	535	373	417	463	447	380
	変動係数	0.15	0.12	0.17	0.19	0.24	0.24
ガラス (MPa)	平均値	3210	2680	3420	2540	2600	2600
	標準偏差	565	659	547	743	742	742
	変動係数	0.18	0.25	0.16	0.29	0.29	0.29
カーボン (MPa)	平均値	3480	3450	3520	3490	3110	4010
	標準偏差	747	1360	815	745	672	691
	変動係数	0.21	0.39	0.23	0.21	0.22	0.17

ロッドの引張試験は、土木学会の「連続繊維補強材の引張試験方法(試案)」に基づいて実施し、定着具は小林らが開発した2つ割りチャック[6]を用い、いずれの条件でも20本(うち3本ひずみ測定)を行った。試験は変位制御型試験機(オートグラフ:10ton)を用い、載荷速度を $5\text{mm}/\text{分}$ とした。試験は室温($21\pm 2^\circ\text{C}$)の範囲で行った。なお、繊維、マトリックスの紫外線促進試験および各種FRPロッドの紫外線促進試験において、試験片両面の照射を同一とするために、それぞれ照射時間の半分の時間で試験片試料を反転させている。

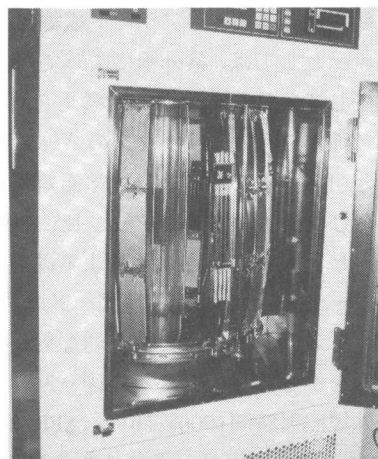


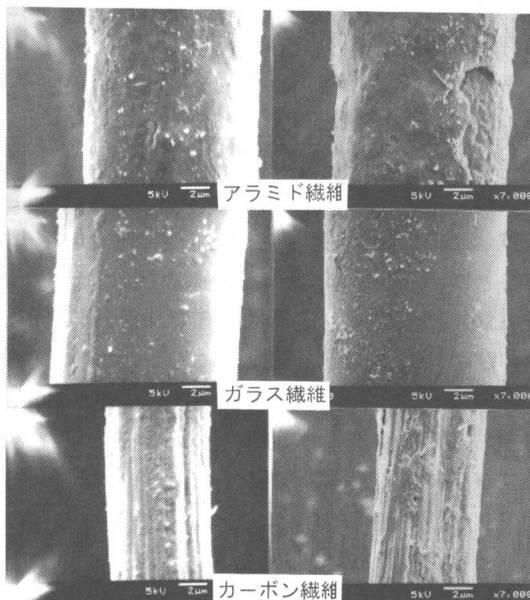
写真-2 紫外線照射装置

3. 実験結果および考察

3.1 繊維およびマトリックスの紫外線促進試験結果および考察

各種FRPロッドを構成する各繊維の紫外線照射時間と引張強度の平均値、標準偏差、変動係数を表-4にまとめて示す。図-2は、各種繊維の引張強度と紫外線照射時間との関係を示したものであり、写真-3は、各種繊維の紫外線照射前と紫外線照射1000時間後の走査型電子顕微鏡写真(以下SEM写真と略記する)である。

図-2の結果より紫外線照射後のカーボン繊維の強度はほとんど変化がみられない。また、ガラス繊維の強度は紫外線照射10時間で約13%(530MPa)の強度低下がみられるが、その後長期材令でも一定となり、強度低下があまり



照射前 照射1000時間後
写真-3 各種繊維のSEM写真

り認められない。一方、アラミド繊維の場合は紫外線照射10時間で約16% (550MPa)、1000時間では約55% (1980MPa) となり、照射時間が増加するに従い確実に強度が低下している。また、SEM写真よりガラス繊維およびカーボン繊維は、紫外線照射1000時間後でいずれの繊維も繊維表面にはあまり変化がみられないが、アラミド繊維は繊維表面に剥離のような現象が認められる。SEM写真でも明らかなように、アラミド繊維の強度低下の原因としては、紫外線によって繊維の劣化が生じているためであると考えられる。

各種FRP用マトリックスの紫外線照射時間と引張強度の平均値、標準偏差、変動係数、ならびに弾性係数、ポアソン比、破断時の伸び、ピッカース硬さ試験による硬度 (HV) を表-5にまとめて示す。図-3は、各種マトリックスの引張強度と紫外線照射時間との関係を示したものである。図-3の結果より紫外線照射時間1000時間で、AFRPおよびGF RPロッドのマトリックスであるビス系ビニルエステル樹脂 (Ripoxy-R802) は、約9%~18% (5.8~13Mpa) の強度低下、CFRPロッドのマトリックスであるノボラック系ビニルエステル樹脂 (Ripoxy-H600) は、約3% (2.62Mpa) 強度低下することが明らかとなった。しかし、紫外線照射時間2000時間ではいずれのマトリックスでも、紫外線照射前の強度と比較すると同等もしくは若干上まわることが明らかとなった。この原因としては、表-5の結果からも明らかなように、破断時の伸び量の減少、微小硬度計のマトリックス表面のピッカース硬さ試験での硬度 (HV) 増加および弾性係数の増大により、マトリックスが長時間の紫外線照射によって強度は低下しないが脆性的な材料になったためであると考えられる。

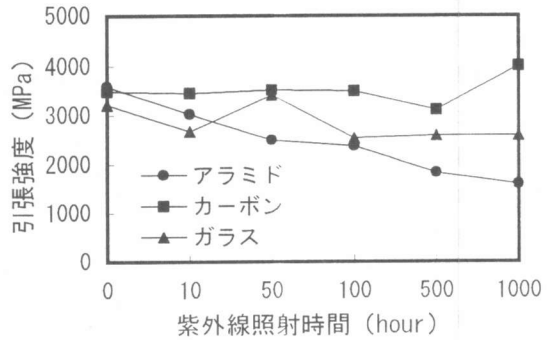


図-2 紫外線照射時間と繊維の引張強度の関係

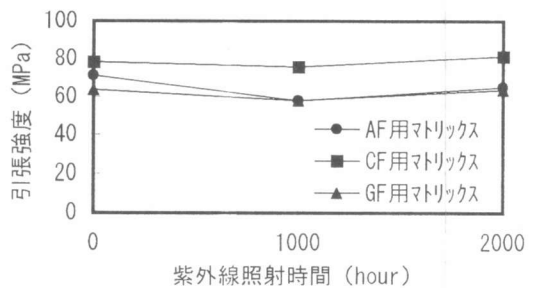


図-3 紫外線照射時間とマトリックス引張強度の関係

表-5 各種マトリックスの紫外線照射後の特性

AFRPロッド用

	種類	0hour	1000hour	2000hour
引張強度 (MPa)	平均値	71	58	65
	標準偏差	3.0	11.0	4.4
	変動係数	0.04	0.19	0.07
弾性係数 (GPa)	平均値	2.88	3.70	3.27
ポアソン比 (ν)	平均値	0.323	0.343	0.341
破断時伸び (%)	平均値	3.25	1.47	1.95
硬度 (HV)	平均値	18	21.4	21.1

CFRPロッド用

	種類	0hour	1000hour	2000hour
引張強度 (MPa)	平均値	78.26	75.64	81.33
	標準偏差	8.378	17.811	10.195
	変動係数	0.11	0.24	0.13
弾性係数 (GPa)	平均値	3.65	4.26	3.90
ポアソン比 (ν)	平均値	0.328	0.334	0.355
破断時伸び (%)	平均値	2.47	1.50	2.20
硬度 (HV)	平均値	26.5	26.0	25.6

GF RPロッド用

	種類	0hour	1000hour	2000hour
引張強度 (MPa)	平均値	63.6	57.8	63.5
	標準偏差	1.492	8.550	3.643
	変動係数	0.023	0.148	0.057
弾性係数 (GPa)	平均値	3.35	3.78	3.73
ポアソン比 (ν)	平均値	0.332	0.320	0.332
破断時伸び (%)	平均値	2.53	1.70	1.80
硬度 (HV)	平均値	18.3	23.3	23

3.2 各種FRPロッドの紫外線促進試験結果および考察

各種FRPロッドの紫外線照射時間と引張強度の平均値、標準偏差、変動係数および弾性係数を表-6にまとめて示す。図-4、図-5は、各種FRPロッドの引張強度と紫外線照射時間の関係および弾性係数と紫外線照射時間の関係を示したものである。図-4の結果より、紫外線照射後のCFRPロッドは、紫外線照射時間が増大してもカーボン繊維同様に引張強度低下はほとんど変化がみられないことが分かる。GFRPロッドは、紫外線照射500時間で約8% (131MPa) 強度低下するが、その後照射時間を増加させても強度低下せず逆に若干ではあるが強度が増加する傾向となった。一方、AFRPロッドは、紫外線照射500時間で約11% (180MPa) 強度低下、2500時間では約13% (216MPa) となり、CFRPロッドおよびGFRPロッドとは異なり強度低下が大きく、紫外線による影響を最も受けやすいことが明らかとなった。表-6より、いずれのロッドも引張強度の標準偏差は減少する傾向である。特にAFRPロッドは、紫外線照射前の標準偏差148MPaに対して、紫外線照射2500時間では標準偏差が30MPaとなり大きく減少していることが分かる。これは、長時間紫外線照射されるとロッドが脆性的な材料に変化するために引張強度のばらつきが小さくなっているためであると考えられる。この傾向は、マトリックス試験結果と同様な傾向にある。

表-6 紫外線照射後のFRPロッドの強度と弾性係数

種類	照射時間	0hour	500hour	1500hour	2500hour	
		AFRP	1689	1507	1449	1473
引張強度 (MPa)	AFRP	標準偏差	148.4	13.0	36.4	30.1
		変動係数	0.09	0.01	0.03	0.02
		GFRP	1690	1559	1662	1648
GFRP	標準偏差	85.3	67.4	79.7	72.6	
	変動係数	0.05	0.04	0.05	0.04	
	CFRP	1335	1343	1360	1342	
CFRP	標準偏差	112.0	71.1	122.9	89.0	
	変動係数	0.08	0.05	0.09	0.07	
	弾性係数 (GPa)	AFRP	46	46	43	44
GFRP			52	52	52	52
CFRP			135	138	141	138

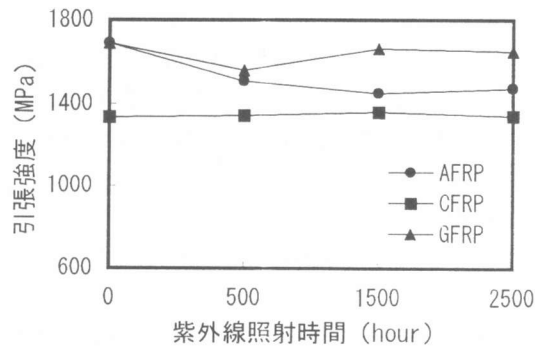


図-4 紫外線照射時間とFRPロッドの引張強度

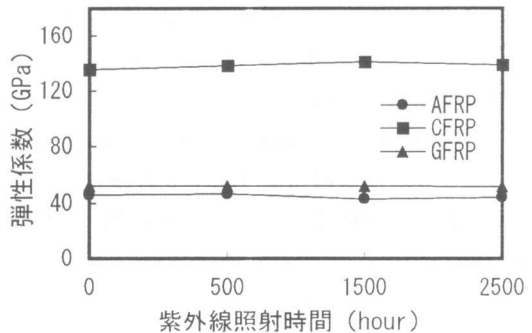


図-5 紫外線照射時間とFRPロッドの弾性係数

4. まとめ

一方向繊維強化プラスチックロッドを構成する各種繊維、マトリックスおよびFRPロッドの紫外線による劣化性状を促進試験により実験的に検討した結果をまとめると以下ようになる。

- (1)カーボン繊維は紫外線による劣化は余り認められないが、ガラス繊維、アラミド繊維は紫外線による影響を受け劣化することが明らかとなった。特にアラミド繊維の強度は、紫外線照射1000時間で最大約55% (1980MPa) 低下することが明らかとなった。
- (2)マトリックスの紫外線照射試験では、照射1000時間でいずれのマトリックスも強度低下するが、照射2000時間では紫外線照射前の強度と比較すると同等もしくは若干上まわることが明らかとな

った。また、長時間紫外線照射すると、強度は余り低下しないが、破断時の伸び量の減少、マトリックス表面のビッカース硬さ試験での硬度 (HV) 結果より、特にビス系ビニルエステル樹脂 (Ripoxy-R802) が紫外線による影響を受けて、マトリックスが脆性的な材料に変化していくことが明らかとなった。

(3)CFRPロッドは、紫外線による劣化は余り認められなかった。

(4)GFRPロッドは、CFRPロッドとは異なり紫外線照射初期の段階において紫外線の影響を受け強度低下するがその後の強度はほぼ一定となることが明らかとなった。

(5)AFRPロッドはGFRPロッドと同様な傾向を示す。しかし、GFRPロッドに比べ強度低下が大きく紫外線の影響を最も受けることが明らかとなった。

(6)AFRPロッド、GFRPロッドは紫外線による影響を受けてロッドが脆性的な材料に変化していくことが明らかとなった。

謝辞：本研究費の一部は平成8年度科学研究費一般研究A (課題番号 07405022、代表研究者：魚本健人) によるものであることを付記する。また、本研究をまとめるにあたり、実験に協力して頂いた芝浦工業大学福島孝亮君に感謝の意を表します。

[参考文献]

[1] 魚本、西村：FRPロッドの静的強度と弾性係数、土木学会論文集、No.472/V-20、pp77-86、1993.8

[2] 勝木、魚本：アラミド繊維の耐アルカリ性および耐酸性の評価方法に関する一試案、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17、No.1、1995.6.

[3] 魚本、西村：プレストレストコンクリート用FRP緊張材の特性(11)紫外線によるアラミド繊維劣化のモデル化、生産研究、第48巻、第5号、1996.5

[4] 山口、西村、魚本：プレストレストコンクリート用FRP緊張材の特性(10)内陸および海洋環境下に暴露した各種FRPロッドの引張特性、生産研究、第48巻、第3号、1996.3

[5] H.HODHOD-T.UOMOTO：Experimental Model for Ideal Tensile Failure of FRP Rods,コンクリート工学年次論文報告集,第13巻1号(1991.6)

[6] 小林一輔：FRP製プレストレストコンクリート緊張材用定着装置、生研リーフレット、No.158、1987