コンクリート補強用 FRP ロッドの耐久性に関する基礎的研究

武若 耕司*¹・MYO KHIN*²・猪八重由之*³

概要 FRP ロッドをコンクリート用補強材として使用することによって、適用環境のいかに問わず耐久性の高いコンクリート構造物を造れる可能性がある。その一方で、高アルカリ性のコンクリート環境において、しかもプレストレストコンクリート用の緊張材として使用される場合のような高応力状態でのロッド自身の耐久性については、十分に検討されているとは言いがたい。本研究では、現在実用化が期待されている7種類のFRP ロッド(CFRP 3種類, AFRP 2種類および, GFRP ならびに VFRP 各1種類)について、コンクリート中の細孔溶液を模した高アルカリ性水溶液中への浸漬実験を行い、異なる緊張力および浸漬期間における各ロッドの耐久性を引張特性の変化から検討した。また、劣化の予想されたロッドについては、SEM および EPMA によるロッド断面の微視的観察を行い、劣化原因について考察を加えた。

キーワード: FRP ロッド, 耐久性, プレストレストコンクリート, アルカリ劣化, 応力破壊, 微視的観察

1. ま え が き

ガラス、カーボンあるいはアラミド繊維といったいわゆる新素材繊維が、最近、土木の分野でも利用され始めてきた。中でも、コンクリート用補強材としての利用は特に期待されるところであり、これらの短繊維をコンクリート中に混入した繊維補強コンクリートの開発、研究は、すでに十数年前より行われている。また最近では、これら新素材の連続した繊維を合成樹脂で結合させて作製される繊維強化プラスチックロッド(以下、FRP ロッドと称す)を補強鋼材の代わりとして利用することも検討され始めている。

FRP ロッドの特徴は、軽量かつ高強度で、しかも鋼材のように錆ず、耐久性に優れていることである。特に、FRP ロッドの錆ないという特徴は、コンクリート構造物の耐久性低下の元凶の1つとして社会問題にまで発展したコンクリート中の鋼材腐食問題の解決策として、大いに注目されるところである。一方、軽量、高強度という特徴を生かし、このロッドをプレストレストコンクリート(以下、PC と称す)用の緊張材として利用する試みもさかんである。将来的には、塩害環境のように耐久性上きわめて高い性能が要求される環境に建設される PC 構造物において、FRP ロッドが利用されてい

くものと考えられる。

確かに、素材として FRP が耐久性の高いものであることは、これまで、化学工学の分野で多くの実証がなされている。しかし、土木材料のようにその適用環境が様々な上、その耐久性が50年あるいは100年のオーダーで論じられる状況において、FRP ロッドが果たして本当に耐久的であるといえるか、という疑問が未だ残されていることもまた事実である。さらに、塩害環境下の PC 構造物への利用となると、外部環境が非常に厳しい上に、高応力かつ高アルカリ性の環境に長期間さらされることになる。このような環境下の FRP ロッドの耐久性について十分に検討されているとは言いがたい¹⁾。

本研究は、FRP ロッドの耐久性の観点から、コンクリート構造物におけるその有効性と適用範囲を明確にさせることを目的として実施した。すなわち、ここでは、これまで実用化に関する検討が行われている7種類のFRP ロッドをコンクリート中の細孔溶液の組成を模した高アルカリ性溶液中に浸漬させ、作用応力あるいは浸漬時間の異なる条件におけるこれらロッドの耐久性をその強度ならびに弾性係数の変化の状況から実験的に検討した。また、明らかに劣化の見られるロッドについては、その原因を走査電子顕微鏡あるいは電子線マイクロアナライザーを用いた微視的観察により検討した。

2. 実験の概要

2.1 使用した FRP ロッドの種類

今回の耐アルカリ性試験に使用した FRP ロッドは、

*1 鹿児島大学助教授 工学部海洋土木工学科 工博(正会員)

*2 鹿児島大学助手 工学部海洋土木工学科 工修(正会員)

*3 新構造技術(株)東京本社設計部 工修(正会員)

表-1 実験に使用した FRP ロッドの概要

繊維系	ロッド種	呼び径 (mm)	繊維種*1	マトリックス種*2	繊維含有率 (vol. %)	ロッド成形法	ロッドの形状	
カーボン系	K-C 1	6.0	PAN系 (TR-30)	エポキシ樹脂 (ビスフェノール A)	61.3	引抜き法	丸棒+片巻
	L-C 1	5.0	PAN系 (T-300)	エポキシ樹脂 (ビスフェノール A)	55.0	引抜き法	丸棒+綾巻
	T-C 1	5.5	PAN系 (ベスファイト)	エポキシ樹脂 (ノボラック)	64.0	被覆単線より 合わせ後硬化	より線
アラミド系	S-A 1	6.0	パラ型アラミド (テクノーラ)	ビニルエステル樹脂 (ビスフェノール A)	65.0	引抜き法	丸棒+片巻
	M-A 1	6.0	パラ型アラミド (ケブラー)	エポキシ樹脂 (ビスフェノール A)	65.0	繊維編込み後 樹脂含浸硬化	組紐
ガラス系	K-G 1	6.0	Eガラス	エポキシ樹脂 (ビスフェノール A)	65.0	引抜き法	丸棒+片巻
ビニロン系	KR-V	6.0	高強力ビニロン (7901)	エポキシ樹脂 (ビスフェノール A)	69.6	引抜き法	丸棒+綾巻

*1:() 内は、品名を示す *2:() 内は、主原料を示す

表-2 各 FRP ロッドの引張特性の初期値

ロッド種		弾性係数 (GPa)		引張強度 (MPa)	
		平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
K-C 1	(a)*	145	2.7	1840	63
	(b)	138	8.5	1510	24
L-C 1		153	3.7	1550	64
T-C 1		135	2.3	2140	54
S-A 1	(a)*	60	4.0	1830	86
	(b)	63	4.1	1820	91
M-A 1		65	3.4	1540	19
K-G 1	(a)*	50	1.0	1490	42
	(b)	48	2.5	1240	22
KR-V	(a)*	32	3.0	730	28
	(b)	32	3.5	700	58

*：無拘束状態で1000時間溶液浸漬を行う条件の実験にのみ使用

表-3 アルカリ性溶液の組成

pH の実測値	溶液 1 ㍓あたりの混入量 (g)			
	Ca(OH) ₂	KOH	NaOH	NaCl
13.27	2.0	14.0	10.0	30.0

表-4 各ロッドの実験条件

緊張力 (初期 強度比)	0%			50%	70%		
浸漬時間	1000 h	2000 h	6000 h	5000 h	1000 h	2000 h	3000 h
K-C 1	○	○	○	○	○	○	○
L-C 1	—	○	○	—	○	—	○
T-C 1	—	○	○	—	○	—	○
S-A 1	○	○	—	○	○	○	○
M-A 1	—	○	○	○	○	—	○
K-G 1*	○	○	○	○	○	○	○
KR-V	○	○	○	○	○	○	○

○：実験を行ったもの —：実験を行わなかったもの

*：K-G 1については、この他に緊張 30% および 60% の場合についても実験を行った。

3種類の炭素繊維補強 FRP ロッド (以下, CFRP と称す), 2種類のアラミド繊維補強 FRP ロッド (同, AFRP), およびガラス繊維ならびにビニロン繊維で補強された FRP ロッド (同, GFRP および VFRP) 1種類ずつの計 7種類である。各ロッドの概要を表-1に示す。これらは、いずれもコンクリート用補強材として適用が検討されているものである。このため、これらロッドには、その表面にコンクリートとの一体性を確保するために加工が施されており、ロッドの表面状態は同一条件とはなっていない。したがって、本検討では、ロッドの素材である FRP そのものを評価の対象とするのではなく、あくまでもコンクリート構造物に適用されるロッドとしての耐久性評価を主目的とした。また、いずれの種類のロッドについても、耐久性についての評価がより明確に表れることを期待し、呼び径が 5~6 mm と小さいものを使用した。

実験にあたっては、各ロッドの入手時にあらかじめ引

張試験を実施し、その結果得られた引張強度および弾性係数を本実験における初期値として使用した。表-2にこの試験結果を示す。なお、初期値としては、各ロッド 5~7本の試料について実施した結果の平均値を使用した。また、一部ロッドについては入手時期によってその材質が異なっていたため、それぞれの入手時の値を初期値とした。

2.2 浸漬溶液および浸漬条件

試験に使用したアルカリ性溶液は、コンクリート中の細孔溶液の組成を模した表-3に示す組成のものである^{2),3)}。なお、この溶液中には 3.0% の NaCl も混入した。これは、FRP ロッドが塩害環境下で使用される状況が多いと予想されることを考慮し、塩化物の影響についてもあわせて検討を試みたことによる。また、試験中の溶液温度は、①繊維やマトリックス樹脂に変性などを

生じさせないこと、②劣化促進効果を発揮することおよび、③実構造物において直射日光などの影響によってその値に達する可能性があること、などを考慮し、50℃一定に保持させた。試験中は、溶液の pH が 13 以下となった時点で、溶液の交換を行った。

各ロッドの溶液浸漬にあたっては、浸漬時間およびロッド緊張力をパラメーターとした。各ロッドごとの浸漬条件を表-4 に示す。各条件におけるロッド試験本数

(b) 拘束状態での浸漬状況

図-1 ロッドの浸漬状況の概要

は、それぞれ3本である。

2.3 浸漬時のロッド拘束方法

図-1にロッドの浸漬概要を示す。この内、ロッドに緊張力を与えた状態（以下、拘束状態と称す）で浸漬を行ったものについて、以下にその拘束方法を示す。

ロッドの拘束にあたっては、あらかじめロッドの端部に静的破砕材を用いた方法により定着用鋼管を設置し、この鋼管を H 型鋼で作製したベンチに定着させて、ロッドに緊張力を与えた。緊張にあたっては、まず、所定の緊張力となるようにロードセルで荷重を測定しながらセンターホールジャッキで緊張を行い、所定量に到達した時点でベンチに定着させた。その後、各ロッドの3本の試料のうち1本については、そのままロードセルでロッドのリラクゼーションなどによる荷重低下を観測し、この低下がある程度落ち着いた時点（初期緊張後2～3週間後）で、3本とも所定の緊張力となるように再緊張を行い、浸漬実験に供した。

2.4 耐久性の評価方法

(1) 引張試験

所定の浸漬期間が経過したロッドは、引張試験に供した。試験にあたっては、まず、初期値強度の80%の応力度となる荷重まで载荷を5回繰返し、その後破断まで载荷させた。この载荷試験によって得られた引張強度および弾性係数を初期値と比較することによって、耐久性

表-5 無拘束ロッドのアルカリ性溶液浸漬後の引張強度および弾性係数

ロッドの種類		溶液浸漬 1000 時間						溶液浸漬 2000 時間						溶液浸漬 6000 時間					
		弾性係数 (GPa)			引張強度 (MPa)			弾性係数 (GPa)			引張強度 (MPa)			弾性係数 (GPa)			引張強度 (MPa)		
		*1	AVE.	DEV.		AVE.	DEV.	*1	AVE.	DEV.		AVE.	DEV.	*1	AVE.	DEV.		AVE.	DEV.
K-C 1	(1)	148			1870			123			1400			127*2			1180*2		
	(2)	150	148	2.19	1900	1900	25	121	127	7.76	1630	1400	230	131	128	2.70	1360	1220	124
	(3)	146			1920			137*2			1170*2			126*3			1130*3		
L-C 1	(1)							155			1490			143			1520		
	(2)							152	158	7.02	1490	1530	68	145	144	1.46	1700	1610	125
	(3)							167			1610								
T-C 1	(1)							125			2240			122			2100		
	(2)							126	124	2.11	2140	2160	63	131	128	4.51	2160	2140	34
	(3)							121			2120			130			2160		
S-A 1	(1)	64			1830			57			1850								
	(2)	60	62	1.92	1970	1950	105	58	58	1.48	1900	1900	49						
	(3)	61			2040			60			1950								
M-A 1	(1)							62			1520			60			1460		
	(2)							52*3	57	3.19	980*3	1300	282	48*3	56	3.93	500*3	1080	510
	(3)							58			1390			65			1280		
K-G 1	(1)	49			1470			45			1190			36			1000		
	(2)	47	48	0.92	1380	1450	57	44	44	0.70	1220	1180	34	38	39	2.35	1000	970	57
	(3)	48			1490			43			1150			43*3			900*3		
KR-V	(1)	31			900			21			480			28			680		
	(2)	32	31	0.88	770	830	69	29	27	3.08	730	650	144	28	28	0.98	650	680	30
	(3)	31			830			30			740			27			710		

*1: 繰返し载荷 2 回目から 5 回目までに得られた弾性係数の平均値

*2: 繰返し载荷 2 回目から 5 回目の間で破断

*3: 処女载荷の時点で破断

図-2 各種FRPロッドの応力度-歪み関係

図-3 溶液浸漬された無拘束ロッドの弾性係数の初期値に対する比

図-4 溶液浸漬された無拘束ロッドの引張強度の初期値に対する比

の評価指標とした。なお、引張強度は、ロッド破断時の荷重をその公称断面積で除した値とした。また、繰返し载荷の途中でロッドが破断した場合には、それが第1回目の载荷の途中で生じた場合にはその時の破断応力度を、また、2回目以降の場合には繰返し载荷時の最大応力度（初期値強度の80%）を引張強度とした。一方、弾性係数については、次のように考えた。すなわち、FRP ロッドの種類によっては応力度-歪み関係が処女载荷と2回目以降の载荷時で大きく異なる場合がある。そこでここでは、繰返し载荷2回目以降の応力度-歪み関係すべてを最小二乗法により直線近似し、この直線の傾きをロッドの弾性係数とした。ただし、繰返し载荷第1回目で破断した場合には、その1回目の応力度-歪み関係を近似した直線の傾きを弾性係数とした。

（2）ロッド断面の微視的観察方法

上記（1）による耐久性評価の結果劣化が予想されたロッドについては、その原因を検討するため、新たにロッドの緊張力を破壊荷重の0、50および70%にそれぞれ設定して3000時間のアルカリ性溶液浸漬実験を行い、ロッド断面を走査型電子顕微鏡（以下、SEMと称す）で観察して、溶液浸漬されていない場合と比較検討した。さらに一部の試料では、試料内のK、Na、CaおよびClの分布状況をX線マイクロアナライザー（以

下、EPMAと称す）により調査した。なお、これらの観察では、ロッドを2mm厚に切断し、その表面を超音波洗浄器で洗浄したものを観察に供した。

3. アルカリ性環境下のFRP ロッドの引張特性

3.1 無拘束状態のロッドの場合

表-5には、無拘束の状態でアルカリ性溶液に浸漬させたロッドの浸漬後の引張強度および弾性係数を取りまとめて示した。また、図-2には、代表的なロッドについて、浸漬前および無拘束浸漬6000時間後の応力度-歪み関係を示した。さらに、図-3および図-4には、溶液浸漬後の各ロッドの弾性係数および引張強度の初期値に対する比率を示した。これらの結果から、アルカリ性溶液中に無拘束状態で浸漬された各繊維系ロッドの引張特性に関して以下のことが確認された。

（1）CFRP ロッドについて

3種類のCFRPロッドとも、アルカリ性溶液への浸漬時間の増加に伴って弾性係数は低下し、また、その低下割合は、いずれのロッドもほぼ同程度であった。しかし、引張強度については、同じ炭素繊維系であっても、ロッドの種類によって強度変化の状況はかなり異なった。すなわち、T-C1種およびL-C1種が、本実験の

表-6 拘束ロッドのアルカリ性溶液浸漬後の引張強度および弾性係数

ロッド の種 類	拘束力50%								拘束力70%																			
	溶液浸漬5000時間								溶液浸漬1000時間				溶液浸漬2000時間				溶液浸漬3000時間											
	弾性係数 (GPa)				引張強度 (MPa)				弾性係数 (GPa)		引張強度 (MPa)		弾性係数 (GPa)		引張強度 (MPa)		弾性係数 (GPa)		引張強度 (MPa)		弾性係数 (GPa)		引張強度 (MPa)					
	*1	AVE.	DEV.		AVE.	DEV.			*1	AVE.	DEV.		AVE.	DEV.	*1	AVE.	DEV.		AVE.	DEV.	*1	AVE.	DEV.		AVE.	DEV.		
K-C 1	(1)	151			1490			128				1430			144				1350			120* ²			1210* ²			
	(2)	130* ²	141	7.90	1180* ²	1360	160	136	133	4.02	1590	1470	108	118* ³	126	18.71	1180* ³	1270	89	106	115	6.61	1270	1210	59			
	(3)	143			1400			136				1380			107			1290			118* ³			1150* ³				
L-C 1	(1)								163			1770										147			1460			
	(2)								156	158	3.41	1580	1660	95									146	146	0.82	1300	1360	139
	(3)								157			1640																
T-C 1	(1)								142			2260										121			2120			
	(2)								136	141	3.58	2280	2270	17									121	121	0.57	2160	2150	30
	(3)								144			2260											121		2180			
S-A 1	(1)	66			1740			70				1900			63				1880			63			1940			
	(2)	71	68	2.15	1900	1870	120	69	68	1.68	1830	1870	35	65	63	1.89	1920	1930	49	64	64	0.95	1870	1940	64			
	(3)	68			1970			66				1880			61				1980			64			2000			
M-A 1	(1)	73			1250			67				1430										61			1460			
	(2)	72	74	2.66	1270	1280	40	66	66	1.96	1420	1430	7										63* ²	63	1.84	1180* ²	1380	180
	(3)	76			1310			*4				*4											65			1510		
K-G 1	(1)	*4							*4				*4				*4											
	(2)																											
	(3)																											
KR-V	(1)	34			630			37				650			33				650			31			660			
	(2)	33	33	0.78	630	630	6	43	39	2.68	630	640	11	36	36	1.94	630	640	11	31	32	0.87	630	670	45			
	(3)	33			640			39				650			38				650			33			720			

*1: 繰返し载荷2回目から5回目までに得られた弾性係数の平均値

*2: 繰返し载荷2回目から5回目の間で破断

*3: 処女载荷の時点で破断

*4: 浸漬中に破断

図-5 拘束70%で溶液浸漬されたロッドの弾性係数の初期値に対する比

図-6 拘束70%で溶液浸漬されたロッドの引張強度の初期値に対する比

浸漬期間中ほとんど強度低下を示さなかったのに対し、K-C 1種には明らかな強度低下が認められ、その低下割合は浸漬6000時間で20%近くに達した。

(2) AFRP ロッドについて

AFRP ロッドにおいても CFRP ロッドの場合と同様に、弾性係数は、アルカリ性溶液浸漬時間の増加に伴って2種類のロッドともほぼ同程度低下し、一方、引張強度の観点から見ると、両者の間には、耐久性上かなりの差が予想される結果となった。すなわち、S-A 1種では、アルカリ性溶液浸漬2000時間の範囲でほとんど

強度低下を示していないのに対し、M-A 1種では、この浸漬範囲で既に15%程度の強度低下を示し、また、浸漬6000時間後には、実験を行った3本の試験体のうち1本の強度が極端に低かったこともあり(表-5)、引張強度の低下は30%に達していた。

(3) VFRP ロッドについて

VFRP ロッドについては、弾性係数には浸漬時間の経過に伴って AFRP ロッドと同程度の低下傾向(アルカリ性溶液浸漬6000時間で12%程度の低下)が認められたものの、引張強度は、今回の実験範囲で5%前後の低下にとどまっていた。

(4) GFRP ロッドについて

GFRP ロッドにおいては、弾性係数および引張強度ともに浸漬時間の経過に伴って明らかに低下し、溶液浸漬6000時間では、実験を行った3本の試料のいずれもが20%程度の低下を示した。

3.2 拘束状態のロッドの場合

表-6 には、拘束状態でアルカリ性溶液に浸漬させたロッドの浸漬後の引張強度および弾性係数を示した。また、前記の図-2 中には、初期引張強度の70%の力で拘束された状態(以下、拘束70%と称する)のロッドの浸漬3000時間後における応力度-歪み関係も示してあ

図-7 アルカリ性溶液浸漬による引張特性変化に及ぼす緊張力の影響

図-8 GFRP ロッドがアルカリ性溶液中で破断するまでの時間

る。さらに、図-5および図-6には、拘束 70% のロッドにおける溶液浸漬後の弾性係数および引張強度の初期値に対する比率を浸漬時間との関係で示した。これらの結果から、アルカリ性溶液中に拘束状態で浸漬された各繊維系ロッドの引張特性に関して次のことが確認された。

(1) CFRP ロッドについて

拘束状態の CFRP ロッドにおける全般的な傾向として、浸漬時間の経過に伴う弾性係数および引張強度の低下は、上述した同一浸漬時間の無拘束状態の場合に比べて大きくなる傾向にあった。特に、K-C 1 種でその傾向は顕著であり、浸漬 3000 時間での弾性係数および引張強度は、ともに初期値に対して 20% 近く低下していた。また、無拘束状態で浸漬 6000 時間まで強度低下を示していなかった L-C 1 種においても、拘束状態では 3000 時間の浸漬で 10% 程度強度が低下した。しかし、T-C 1 種のように、今回の実験中引張強度の点からは顕著な変化が認められないものもあり、無拘束状態における試験結果と同様に、ロッドの種類によって耐久性は大きく異なるようであった。

(2) AFRP ロッドについて

図-5の結果をみる限り、拘束状態の AFRP ロッドにおいては、今回の実験の範囲では、弾性係数の顕著な低下は認められない。ただし、この図では、便宜上初期値（全く拘束を受けていない状態で測定した値）との比で弾性係数を評価したが、AFRP ロッドの場合には、拘束の継続によって弾性係数が徐々に大きくなることも指摘されており⁵⁾、初期値との比較が必ずしも性能変化を正当に評価しているとはいえない可能性がある。この点を考慮して、浸漬 1000 時間以上の拘束を受けたロッドのみにについて比較すると、この場合には、浸漬時間の増加に伴って 2 種類のロッドとも弾性係数は低下する傾向にあり、また、その浸漬時間に対する低下割合は、上述した無拘束状態のロッドの場合にほぼ匹敵するものであった。

一方、引張強度については、2 種類のロッド間でその傾向に明らかな差が生じ、上記 CFRP ロッドの結果と同様、同一繊維系であってもロッドの種類によって耐久性に差が生じるようであった。特に強度低下の顕著な M-A 1 種においては、アルカリ性溶液への浸漬途中に破断するものや、浸漬後の繰返し载荷の第 1 回目の载荷途中で破断するものもあり（表-6 参照）、アルカリ性溶液の浸漬によって引張特性のばらつきが極めて大きくなった。

ただし、今回の実験の範囲では、CFRP ロッドに見られたような拘束されたことによる強度のさらなる低下は、この M-A 1 種においては明確には認められなかつ

た。図-7は、初期引張強度の 50% で拘束した状態（以下、拘束 50% と称す）での浸漬実験結果も含めて、拘束力の違いによる強度特性変化の相違を検討したものである。各拘束状態で浸漬時間に相違があるため定性的な評価ではあるが、この図からも、アルカリ性溶液中における AFRP ロッドの強度低下に対して、拘束力の影響が顕著には現れていないことを確認できる。

(3) VFRP ロッドについて

VFRP ロッドにおいても、AFRP ロッドの場合と同様に、ロッドの弾性係数は拘束の継続によって変化すると予想された。したがって、この点を考慮して、浸漬 1000 時間を基準としてその弾性係数の変化の状況を見ると、これは、無拘束の場合の弾性係数の低下傾向とほぼ一致するものであった。また、引張強度においてもアルカリ性溶液浸漬によって幾分その低下が認められたが、AFRP ロッドの場合と同様、その低下量は無拘束の場合と大差なく、拘束の影響は現れていない（図-7 参照）。

(4) GFRP ロッドについて

GFRP ロッドについては、拘束 70% の場合には、ロッドを拘束して浸漬を開始するまでの間にすべてのロッドが破断してしまい、実験ができなかった。このため、このロッドについては、残る拘束 50% の場合のほか初期引張強度の 60% および 30% で拘束した場合についても浸漬実験を実施したが、いずれの場合も、浸漬期間中にロッドの破断が生じた。図-8には、この破断までの浸漬時間を拘束力との関係で示したが、この結果は、今回使用した GFRP ロッドが、アルカリ性溶液浸漬期間の増大に伴って急激に耐力低下の生じることを如実に示している。

4. ロッド断面の微視的観察結果

(1) CFRP ロッドについて

写真-1には、K-C 1 種および T-C 1 種について、拘束 70% でアルカリ性溶液に浸漬されたロッド断面の端から約 1 mm 程度内部に入った個所の SEM 画像を試験前と比較して示した。この内、K-C 1 種については、アルカリ性溶液浸漬ロッドの表面に近い部分で、炭素繊維を取り囲むマトリックス樹脂がいたる所で変質している状況が確認された。また、このようなマトリックス樹脂の変質個所では、繊維と樹脂の境界面に隙間が生じて両者は一体となっていなかった。この状況は、ロッドの緊張力が大きくなるにしたがってより断面の内部に進行するようであった。

写真-2は、K-C 1 種ロッド断面内の Ca, Na, K および C 1 の分布を EPMA により調査した結果の一例である。アルカリ性溶液に浸漬したロッドの表層部には、

Na および K の濃縮が確認できる。一方、浸漬溶液中にはこれらよりも高い濃度で存在する塩素がロッド中では濃縮していなかったことから、これらアルカリの濃縮は、上述したマトリックス樹脂の変質がアルカリ劣化であることを予想させる。

T-C 1 種はより線形状で、その各ストランド表面がポリエステル繊維とエポキシ樹脂によって比較的厚めに巻きたてられている。したがって、この被覆が CFRP 本体を保護して、K-C 1 種で見られたような顕著な劣化は認められなかったものと予想された。それでも、拘束力 70% で浸漬を行ったロッドにおいては、この被覆層との境界部において、わずかではあるが、CFRP 本体のマトリックス樹脂の変質とそれに伴う空隙の存在する個所も確認された（写真-1 (b) 右側）。

(2) AFRP ロッドについて

写真-3 には、AFRP のうち M-A 1 種ロッド断面の SEM 画像の一例を示した。AFRP ロッドの断面内には、ロッド種、浸漬の有無および拘束力の違いにかかわらず、ロッド断面のほぼ全面にわたって、アラミド単繊維に添った極めて細い亀甲状ひび割れが生じていた。このひび割れは、拘束がなくアルカリ性溶液にも浸漬されていないものではその幅は $1\mu\text{m}$ にも満たないものであった。しかし、拘束を受けたロッドでは、その拘束力が大きくなるに従ってこのひび割れ幅は大きくなり、さらに、M-A 1 種では、アルカリ性溶液に浸漬されたロッドの表層部におけるひび割れ幅が、同一拘束力の無浸漬ロッドの場合よりも大きくなる状況も見られた。

さらに、M-A 1 種のアルカリ性溶液浸漬ロッドにお

いては、写真-3 (右側) に見られるようなアラミド繊維自体に縦に裂けるような割れの発生が確認された。このようなアラミド繊維中に発生する割れは、アルカリ性溶液に浸漬されていないロッド中では認められなかったことから、このような割れは、アラミド繊維自体がアルカリ性溶液の影響によって何らかの劣化を起こした結果として生じた可能性が高い。ただし、EPMA による観察結果からは、今回の実験の範囲では、上述した CFRP ロッドに見られたようなロッド中のアルカリの顕著な濃縮現象は認められなかった。

S-A 1 種については、異形加工に伴って、その表面が厚さ $0.2\sim 0.5\text{ mm}$ 程度の樹脂層で覆われていることもあり、今回の観察結果では、M-A 1 種のような顕著なアルカリ性溶液の影響は認められなかった。

(3) VFRP ロッドについて

写真-4 には、VFRP ロッドの断面の SEM 画像の一例を示した。このロッドの場合には、AFRP ロッドのような単繊維の形状に規則性が認められなかったが、やはり単繊維同士の境界面に数 μm 程度の幅を有するひび割れの発生が確認され、また、このひび割れは、拘束力が大きくなるにしたがって幅も大きくなり、数も多くなる傾向にあった。一方、アルカリ性溶液浸漬ロッドでは、拘束力のいかににかかわらずロッド表層付近で、写真-4 (b) に見られるような無浸漬の場合の状況とは明らかに異なるマトリックス樹脂および繊維の変質が観察された。

(4) GFRP ロッドについて

写真-5 は、GFRP ロッドの SEM 画像の一例であ

写真-1 CFRP ロッド断面の SEM 画像

写真-2 K-C 1 種ロッド断面における各種元素の分布の例 (拘束 70%、溶液浸漬 3 000 時間の場合)

写真-3 M-A 1種ロッド断面のSEM画像（表面から1 mm 内部）

る。拘束力 50% でアルカリ性溶液に浸漬したロッドについては、前章で示した強度特性検討の場合と同様、浸漬 2500 時間程度で破断を起こした。その破断面には数本の裂け目が存在したが、その裂け目に添った領域で、繊維の明らかな劣化、あるいは繊維が完全に無くなっている状況も観察された。また、これら繊維を取り囲むようにして、白色の結晶質物質の存在も確認された。また、繊維周辺のマトリックス樹脂にも劣化が認められた。

無拘束状態で浸漬されたロッドにおいても、断面端部から約 0.5~1 mm の範囲に繊維の劣化および結晶質生成物の存在が確認され、ロッド表面から内部に向かって、確実に劣化が進行している状況にあった。写真-6 は、この無拘束状態でアルカリ性溶液浸漬を行ったロッドについて実施した EPMA 面分析結果である。特に、K および Na に特徴的な分布状況が観察されたが、これらアルカリの存在個所は、SEM 観察により明らかなガラス繊維の劣化が認められた個所と完全に一致した。

今回実験で用いた GFRP ロッドは E-ガラス繊維を用いたものであり、繊維に対して耐アルカリ性の観点から特別に配慮したものではない。したがって、上述のような顕著なガラス繊維の劣化が生じたものと思われるが、少なくとも今回の結果は、GFRP ロッドのコンクリート中での耐久性について極めて慎重な対応が必要となることをあらためて明確にした。

写真-4 KR-V 種ロッド断面のSEM画像（表面から1 mm 内部）

5. FRP ロッドのアルカリ劣化に関する一考察

今回の実験結果によると、これまでもアルカリ性環境下での耐久性低下が指摘されていた GFRP ロッド以外の各種繊維補強ロッドにおいても、耐久性低下の傾向が認められた。ただし、その状況は、同一繊維系であってもロッドの種類によってその程度が異なり、また、CFRP ロッドの場合と、AFRP あるいは VFRP のような有機系繊維補強ロッドの場合とでも劣化状況には違いが見られた。ここでは、上述したアルカリ性環境下におけるロッドの引張強度特性およびロッド断面の微視的観察結果をもとに、FRP ロッドの劣化過程について若干の考察を加える。

まず、CFRP および AFRP においては、異なるロッド種について耐アルカリ性を検討したが、いずれも、ロッド種ごとの耐久性に差が生じた。特に、CFRP については、3 種類とも基本的には、繊維種（PAN 系）、マトリックス種（エポキシ系）ともに同系統のものであ

写真-5 K-G 1種ロッド断面のSEM画像（断面中央付近）

写真-6 K-G 1種ロッド断面における各種元素の分布の例（拘束 0%、溶液浸漬 3 000 時間の場合）

ることから、その差の最大の原因は、ロッド表面の処理方法の違いによるものと予想された。すなわち、アルカリ性環境下において引張特性の低下が比較的少なかった T-C 1 種ロッド表面は、ポリエステル繊維とエポキシ樹脂とからなる層で、また、L-C 1 種ロッド表面には、綾巻の炭素繊維を固定するためのエポキシ樹脂層で、それぞれ比較的厚く覆われているのが確認された。一方、大きな劣化を示した K-C 1 種ロッド表面の片巻き繊維は、ロッドマトリックス樹脂の硬化前に巻立てられたもので、本体との接着はその後のマトリックスの硬化によってなされ、特に表面が新たな樹脂層で覆われている形跡は見られなかった。これらの差が、ロッド本体へのアルカリ侵入程度の差となったものと考えられた。

また、AFRP については、検討を行った 2 種類の表面処理状況が異なるだけではなく、繊維種およびマトリックス種も違うため、両者の耐久性相違の原因を完全に特定することはできない。しかし、特にロッド表面に特別なコーティングの施されていない M-A 1 種において劣化傾向が顕著であり、一方、ロッド表面を螺旋糸巻加工する際に比較的厚手のエポキシ樹脂層が形成された S-A 1 種において、劣化程度が小さかったことは、AFRP においてもロッド表面のコーティングの程度がロッドの耐アルカリ性に影響を及ぼしていることを示唆できる。

一方、各繊維系ごとの劣化過程の相違について見ると、CFRP ロッドの場合には、カーボン繊維自体にアルカリ性溶液浸漬による顕著な変状は認められず、ロッドの劣化は、マトリックス樹脂の劣化に起因していると思なされた。FRP ロッドの強度は、一般に、各単繊維に作用する応力の不均一性によって生ずる最弱個所に支配されると考えられる。したがって、アルカリによってマトリックスが局部的に劣化すると、その個所と健全な個所で繊維に作用する応力の差が特に大きくなり、より低い荷重レベルでロッドが破壊することになる。さらに、ロッドが拘束状態にあると、マトリックスと繊維の界面に微細なひび割れが発生し、これがよりロッド内部へのアルカリの侵入を助長し、また、局部的な欠陥を作りやすくしてさらなる強度低下を引き起こすものと思われる。

これに対して、AFRP ロッドで劣化が予想された M-A 1 種については、アルカリ性溶液の浸漬によって、マトリックス樹脂の劣化に起因すると考えられる各単繊維間のひび割れの増大および拡大が確認された一方で、アラミド繊維自体の劣化を予想させる状況も認められた。また、このアラミド繊維の劣化は、拘束力の大小に拘わらずロッドの表面付近に生じていたことから、ある程度安定的に継続してアルカリが供給される状況にお

いて生じることを予想できる。今回、アルカリ性溶液浸漬による AFRP ロッドの強度低下に及ぼす拘束力の影響が CFRP ロッド程顕著に生じなかった背景には、このことがあるものと思われる。

VFRP ロッドの劣化も AFRP ロッドの場合と同様に、マトリックス樹脂と繊維との複合した劣化となることが予想された。ただし、このロッドの場合には、著者らが別に実施した温度 40℃、湿度 95% 以上の高温高湿環境に 1 年間暴露した結果においても今回と同程度の引張特性の低下を示しており¹²⁾、今回の実験環境温度の影響も含め、さらに検討を行う必要がある。

なお、今回用いた浸漬溶液中には塩化物も混入されており、その影響についても検討を行うことにしていたが、EPMA による観察結果を見る限り、FRP ロッドの劣化に及ぼす塩化物の影響は、いずれのロッドにおいても表れていなかった。

6. 結 論

本研究は、コンクリート用補強材として最近注目を集めている各種 FRP ロッドのコンクリート中における耐久性について、コンクリート環境を模擬した高アルカリ性溶液へのロッドの浸漬とその際のロッドの引張特性の変化ならびに、ロッド断面内の微視的観察結果を基に検討を試みたものである。今回得られた結果を取りまとめると、以下ようになる。

(1) 従来から高アルカリ性環境での劣化が指摘されていた GFRP ロッドだけではなく、CFRP あるいは AFRP においてもアルカリ性水溶液への浸漬によって引張強度の低下を示す場合がある。

(2) CFRP ロッドのアルカリ環境下における強度低下は、同一繊維種、同一マトリックス種であってもロッドの種類によってその程度は異なり、本実験の範囲内で全く強度低下を示さないロッド種がある一方で、最大で 20% 近い強度低下を示すロッド種も見られた。強度低下を示すロッド種については、その低下は、浸漬時間が長くなるに伴い、また、緊張力が大きくなるに従って大きくなる傾向にあった。

(3) AFRP ロッドの耐アルカリ性についても、CFRP ロッドと同様に、ロッドの種類によってその性能は異なった。また、耐久性低下が予想されるロッド種においては、アルカリ性溶液浸漬時間の増加に伴って強度低下も大きくなり、浸漬 6 000 時間（ただし、溶液温度 50℃）で最大で 30% 程度の強度低下を示す状況も見られた。

(4) ロッド断面の SEM および EPMA による観察から、アルカリ性溶液浸漬による CFRP ロッドの強度低下の原因は、マトリックス樹脂のアルカリ劣化による

と予想された。また、AFRP ロッドにおいては、マトリックス樹脂の劣化の他、アラミド繊維自身の劣化も一因となっている可能性がある。

(5) 一方、同一繊維系のロッドであってもロッド種によってその耐久性に差が見られた最大の原因は、ロッド表面の被覆厚さの違いによるものと考えられた。

(6) 今回検討した GFRP ロッドは、緊張力を与えた状態でアルカリ性溶液に浸漬した場合、緊張力の違いにより時間的な差はあるものの、いずれも浸漬途中で破断した。これは、今回、耐アルカリ性の劣る E-ガラス繊維を繊維として使用していたことにも原因があるが、また、緊張力を与えた状態では、マトリックス樹脂の割れから浸入したアルカリ性溶液がより内部の繊維まで侵食することなど、このロッドのコンクリート構造物への利用にあたっては、極めて慎重な対応が必要であることを改めて確認した。

(7) VFRP ロッドにおいても、長期的な耐久性の低下を示唆する結果が得られた。

以上を要するに、本実験により得られた結果はあくまで FRP ロッドの耐久性に関する定性的な評価に過ぎないが、少なくともこの結果から、FRP ロッドをコンクリート構造物へ積極的に利用していくためには、ロッド自身の耐久性評価が不可欠であることを明確にすることができた。

〔謝 辞〕 本研究を実施するにあたり、CCC 研究会を通じて各社より FRP ロッドを御提供戴いた。ここに記して深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 土木学会編：コンクリートライブラリー 72, 連続繊維補

強材のコンクリート構造物への適用, 1992

- 2) 小林一輔：コンクリート構造物の早期劣化と耐久性診断, 森北出版, 1991
- 3) 市川順一・藤井健太郎ほか：無応力状態でのアルカリ促進実験による各種 FRP ロッドの耐久性, 土木学会第 46 回年次学術講演会, pp. 222~223, 1991. 1
- 4) 渡辺敬一・藤井健太郎ほか：緊張状態でのアルカリ促進実験による各種 FRP ロッドの耐久性, 土木学会第 46 回年次学術講演会, pp. 224~225, 1991. 1
- 5) 例えば, 西村次男・魚本健人：FRP 緊張材の引張強度と応力-ひずみ曲線, 連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用に関するシンポジウム講演論文集, pp. 65~68, 1992
- 6) 魚本健人・勝木 太：各種繊維の耐アルカリ性の評価法に関する基礎研究, 土木学会論文集, No. 490, V-23, pp. 167~174, 1994. 5
- 7) 木村 浩・榎本 剛ほか：炭素繊維複合材ケーブルのアルカリ耐久性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 17, No. 1, pp. 525~530, 1995. 6
- 8) 蓮尾孝一・田村富雄ほか：組紐状アラミド連続繊維筋の材料特性および耐久性について, 連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用に関するシンポジウム講演論文集, pp. 306~314, 1992
- 9) 勝木 太・魚本健人：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, pp. 519~524, 1995. 6
- 10) Scheibe, M. and Rostasy, F.S. : Stress-Rupture of AFRP subjected to Alkaline Solutions and Elevated Temperature-Experiments, Proceedings of the Second International RILEM Symposium (FR-PRCS-2), pp. 67-73, 1995. 8
- 11) 岡崎正樹・馬屋原光郎ほか：ビニロン FRP ロッドの諸性質, 連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用に関するシンポジウム講演論文集, pp. 87~92, 1992
- 12) 猪八重由之・武若耕司ほか：各種 FRP ロッドの耐久性に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 16, No. 1, 1994. 6

(原稿受理年月日：1995 年 10 月 16 日)

Fundamental Study on Durability of FRP Rods in Concrete Environment

By Koji Takewaka, Myo Khin and Yoshiyuki Inoyae

Concrete Research and Technology, Vol. 7, No. 2, July 1996

Synopsis : In general, it is expected that concrete structures using FRP rod as reinforcement could have high durability regardless of severity of service environment. However, for more reliable application is performed, there are some aspects that must be resolved about long term behavior of FRP rod under high alkaline environment like as in concrete. In this study, 7 different kinds of FRP rod, which include 3 types of CFRP, 2 types of AFRP, a single type of GFRP and VFRP, are examined for durability in the high alkaline solution simulating the pore water of concrete under different pre-stress conditions and different exposing periods. Through this examination, it is concluded that there is a fair possibility of deterioration to occur by alkali attack not only on GFRP rod but also on the other kinds of FRP rod, such as CFRP and AFRP rods. Additionally, from the observation results by using SEM and EP-MA, main reasons of the deterioration on each FRP rod can be clarified.

Keywords : FRP rod, durability, prestressed-concrete structures, stress rupture, alkaline attack, maicrograph observation