

論文

[1198] 各種FRPロッドの耐久性に関する実験的検討

猪八重由之*¹・武若耕司*²・Myo Khin*³

1. まえがき

近年、コンクリート構造物の補強材として、FRPロッドを利用しようとする試みがなされている。FRPは、鋼材のように錆びることがなく、一般に耐久性の高い材料であると言われている。したがってこの利用は、塩害や中性化による鋼材腐食が深刻な問題となっているコンクリート構造物にとって、その耐久性を確実にする極めて有効な方策であると言える。しかし一方、「土木材料のようにその耐久性が50年、100年あるいはそれ以上の非常に長期的なスケールで論じられる状況において、果してFRPが十分に耐久であると言えるか。」といった疑問に対しては、いまだ十分な解答が得られていないことも事実であろう。例えば、FRPの最適な利用形態の1つと考えられるプレストレストコンクリート用補強材を例にとっても、高応力かつ高アルカリ性環境に長期間さらされる場合の信頼性を十分に勝ち得ているとは言いがたい。

本研究の目的は、種々の環境に建設されるコンクリート構造物においてFRPの耐久性を評価できる具体的資料を作成するとともに、その有効性と適用範囲を明確にするところにある。ここでは、繊維の種類あるいはマトリックスの種類などの異なる8種類のFRPロッドに対し、いくつかの環境条件を設定してそれぞれの環境における耐久性を評価した結果ならびに、炭素繊維補強FRPロッド利用の場合の問題点の1つと考えられるロッドと鋼材の併用による異種金属接触腐食の可能性について検討を試みた結果を取りまとめた。

2. 実験概要

2.1 耐久性評価試験の概要

(1) 検討に用いたFRPロッドの種類

今回耐久性試験を実施したFRPロッドは、4種類の炭素繊維補強ロッド（以下、CFRPと称す）、2種類のアラミド繊維補強ロッド（同AFRP）、ガラス繊維とビニロン繊維で補強されたロッド（同GFRPおよびVFRP）各1種類ずつの計8種類であり、CFRPの1種類を除き、呼び径 $\phi = 5 \sim 6$ mm程度のものを実験対象とした。なお、径の比較的小さなものを対象とした理由は、評価試験結果に劣化の影響が顕著に表れることを期待したことによる。表-1にこれらのロッドの主な概要を示す。表中、同一種類のロッドにおいて引張強度特性値を(a)(b)として2種類表示したものがあがるが、これは、同一メーカーの同一種類のものではあるが、その入荷時期の相違によって性能が若干異なっていたため、両者を併記したことによる。また、引張特性値の結果には、メーカー提示値とともに、各ロッドの入手直後の試験結果についても示したが、これらの値は、各ロッドごとに5~7本の試験の平均値および標準偏差である。なお、ロッドの耐久性評価の基準値としては、これら実測結果を用いることにした。

*1 鹿児島大学大学院 工学研究科海洋土木工学専攻（正会員）

*2 鹿児島大学助教授 工学部海洋土木工学科、工博（正会員）

*3 鹿児島大学助手 工学部海洋土木工学科、工修（正会員）

表一 検討に用いたFRPロッドの種類

ロッドの種類	ロッド番号**	φ (mm)	繊維の種類	マトリックスの種類	繊維量 V _f (%)	ロッドの形状	引張強度(kgf/mm ²)			弾性係数(kgf/mm ²)			実施試験NO.
							実測			実測(x10 ⁴)*			
							メーカー	AVE.	DIV.	メーカー	AVE.	DIV.	
CFRP	KC	(a)	カーボン (PAN)	エポキシ	61.3	丸棒+片巻	196	188	6.43	1.57	1.48	0.028	①, ②, ③
		(b)											186
	LC	5.0			50~60	丸棒+縦巻	180	158	6.52	1.50	1.55	0.038	①
		5.0			64.0	より線	201	218	5.50	1.40	1.39	0.023	①
KCP	8.0	PPS	55.0	丸棒+縦巻	175	163	9.54	1.44	1.28	0.040	①, ②, ③		
	SA		(a)	アミド	ビニル エステル	65.0	丸棒+片巻	193	187	8.82	0.54	0.58	0.041
(b)		190	186										
MA	6.0	65.0	縦巻			130	156	1.91	0.66	0.65	0.035	①	
	KG	(a)	Eガラス			エポキシ	65.0	丸棒+片巻	138	152	4.33	0.48	0.47
(b)		155		126	2.28								
KRV	(a)	ビニロン		69.6	丸棒+縦巻		84	74	2.82	0.27	0.32	0.031	①, ②, ③
	(b)												

*繰り返し載荷時のデータも含む。 ** (a), (b)の違いは入手時期の違いによる。

(2) 耐久性評価試験

上記のロッドの耐久性を、
①耐アルカリ性試験、②屋外暴露試験、および③高温高湿環境養生試験によって検討した。これらの試験の概要を表

一2に示す。このうち、耐アルカリ性試験における浸漬溶液は、コンクリート中の細孔溶液の組成を考慮して表一3に示す組成とした。この溶液中には、塩分の影響についても同時に検討するため、3%のNaClも混入している。この溶液は、浸漬試験中pHが13以下となった時点で交換することにした。浸漬は、8種類全てのロッドについて、無拘束で行う場合と図一1に示す方法で破断強度の70%の応力で緊張力を加えた場合の2種類の状態で実施した。なお、各条件毎の試験本数は3本である。

屋外暴露試験および高温高湿養生試験は、表一1から代表的な5種類のロッドを選び、1年間実施した。各ロッドの試験本数は4本である。

各試験終了後は、外観観察を行った後、その耐久性を引張試験により評価することにした。引張試験にあたっては、まず、入手時の各ロッドの破断強度の80%となる応力まで繰り返し5回載荷させ、その後破断まで載荷させる方法をとった。

2.2 異種金属接触腐食に関する検討実験の概要

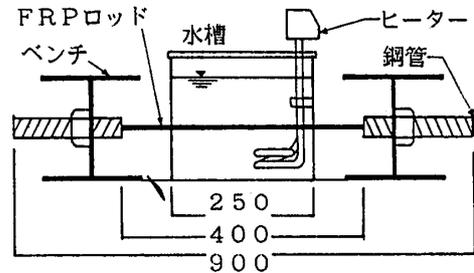
CFRPロッドと鋼材がコンクリート中で併用された場合、両者の電位差によって鋼材の腐食が促進される可能性について検討を試みた。検討は、表一1示されている4種類のCFRPロッド全てについて実施したが、ここでは、呼び径がφ=7.5~8mmのもの

表一2 耐久性試験の概要

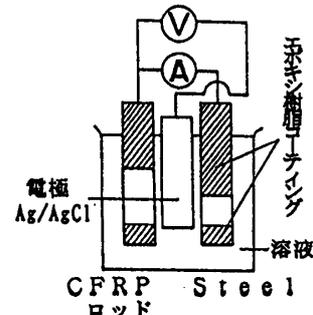
試験No	試験名	試験方法等
①	耐アルカリ性試験	ロッドの緊張力：破断荷重の0、70% 浸漬時間：700~6000時間、温度：50℃
②	屋外暴露試験	暴露場所：鹿児島大学海洋土木工学科棟屋上 暴露期間：1年間
③	高温高湿養生試験	養生条件：温度40℃、湿度50%以上 養生期間：1年間

表一3 アルカリ浸漬溶液の組成

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



図一1 拘束状態における耐アルカリ性試験の概要



図一2 異種金属腐食実験の概要

を使用した。実験は、図-2のように、溶液中にCFRPロッドと#400のサンドペーパーで表面処理を行ったみがき丸鋼(SGD-3)を浸漬させ、両者を短絡させた場合に流れる電流量、電位の経時変化を測定した。また試験終了後は丸鋼の腐食減量も測定した。浸漬は、飽和Ca(OH)₂水溶液、飽和Ca(OH)₂+3%NaClおよび3%NaCl水溶液の3種類の溶液に対して行った。また、ロッドと丸鋼の浸漬面積比は、1:1および1:0.2の2水準とした。

3. 耐久性評価試験結果

3.1 耐アルカリ性試験の結果

これまでに得られた耐アルカリ性試験の結果を取りまとめて表-4および5に示す。また、図-3および4には、入手時のロッドの引張強度および弾性係数(以下、初期値と称す)に対する浸漬後の平均値の比を示した。このうち、無拘束状態で浸漬させたロッドの引張特性について見ると、6000時間までの浸漬において、特に、GFRPロッド(KG種)の強度および弾性係数の低下が顕著であり、いずれも初期値の80%以下の値を示した。CFRPおよびAFRPロッドにおいては、原因を特定するまでには至らなかったが、いずれもロッドの種類によって耐久性に差が生じるようであり、ロッドによっては2000時間程度の浸漬において、平均で10%

表-4 無拘束状態のロッドの耐アルカリ性試験結果

ロッド NO.	1000h浸漬後(kgf/mm ²)				2000h浸漬後(kgf/mm ²)				6000h浸漬後(kgf/mm ²)			
	弾性係数x10 ⁴		引張強度		弾性係数x10 ⁴		引張強度		弾性係数x10 ⁴		引張強度	
	AVE	DIV.	AVE	DIV.	AVE	DIV.	AVE	DIV.	AVE	DIV.	AVE	DIV.
KC	1.50	0.030	194	2.52	1.26	0.099	143	23.5	1.30	0.054	137	33.3
LC	—	—	—	—	1.60	0.083	156	6.93	—	—	—	—
TC	—	—	—	—	1.26	0.032	221	6.43	—	—	—	—
KCP	1.27	0.042	172	4.62	—	—	—	—	—	—	—	—
SA	0.60	0.052	199	10.7	0.57	0.046	194	5.00	—	—	—	—
MA	—	—	—	—	0.59	0.044	137	21.5	—	—	—	—
KG	0.49	0.010	148	5.86	0.44	0.024	121	3.51	0.38	0.026	99	5.77
KRV	0.31	0.029	85	7.00	0.28	0.038	66	14.7	0.27	0.034	69	3.00

* 3本のうち1本が繰り返し緊張の5回目で破断 ** 3本のうち1本が繰り返し緊張の1回目で破断
*** 3本のうち2本が繰り返し緊張の1回目と2回目で破断

表-5 拘束状態のロッドの耐アルカリ性試験結果

ロッド NO.	700h浸漬後(kgf/mm ²)				1000h浸漬後(kgf/mm ²)				2000h浸漬後(kgf/mm ²)			
	弾性係数x10 ⁴		引張強度		弾性係数x10 ⁴		引張強度		弾性係数x10 ⁴		引張強度	
	AVE	DIV.	AVE	DIV.	AVE	DIV.	AVE	DIV.	AVE	DIV.	AVE	DIV.
KC	1.42	0.033	197	1.73	1.37	0.055	150	11.0	1.27	0.188	130	9.07
LC	—	—	—	—	1.61	0.042	169	9.71	—	—	—	—
TC	—	—	—	—	1.44	0.037	231	1.73	—	—	—	—
KCP	1.38	0.147	160	11.6	—	—	—	—	—	—	—	—
SA	0.68	0.043	205	3.46	0.62	0.046	197	5.03	0.63	0.043	198	6.51
MA	—	—	—	—	0.67	0.025	146	0.71	—	—	—	—
KRV	0.37	0.036	75	3.61	0.39	0.040	65	1.15	0.36	0.022	65	1.15

* SA種については2000h浸漬および3000h浸漬である ** MA種については2本の平均値
*** 3本のうち1本が繰り返し緊張の1回目で破断

程度、試験体1本ずつでは20~30%の強度低下を示すもの(KCおよびMA種)も見られた。またVFRPロッド(KRV種)については、強度的には顕著な低下は認められなかったが、弾性係数の比較的大きな低下が確認された。

一方、破断強度の70%の応力で拘束させた状態で浸漬させたロッドに関する試験結果について見ると、まず、GFRPロッド(KG種)は、この応力レベルでは、緊張後溶液浸漬を開始するまでの1週間にいずれのロッドも破断し、検討を行うことができなかった。したがって、このロッドについては緊張力を60%あるいは50%に下げて、改めて浸漬実験を実施したが、60%緊張の場合には浸漬後わずか150時間前後で、また、50%緊張の場合でも2500時間前後で全てのロッドが破断した。

CFRPおよびAFRPロッドの耐久性については、無拘束の場合に強度低下の見られなかったものでは、拘束状態においても概ね大きな強度低下は見られなかった。一方、無拘束の場合に強度低下を起こしたロッド(KCおよびMA種)については、拘束によってその強度低下はより顕著となる傾向にあった。特にMA種において、1000時間の浸漬で、3本のうち1本が浸漬途中で破断したことは注目される。

CFRPロッドのうちKCP種に関しては、現在ロッドの生産が中止されており、参考データでしかないが、拘束状態においては、浸漬700時間で試験体3本のうち1本に、強度が初期値を20%近くも下回り、弾性係数が逆に30%近くも高くなる状況が確認された。拘束浸漬ロッドの場合は、全般的な傾向として、浸漬後のロッドの弾性係数は初期値と同等かこれを上回る傾向にあったが、このKCP種あるいはVFRPロッド(KRV種)のように、強度は低下し弾性係数は大幅に増加するケースでは、アルカリ環境で拘束を受けることによってロッドの脆化が進行していることも予想される。

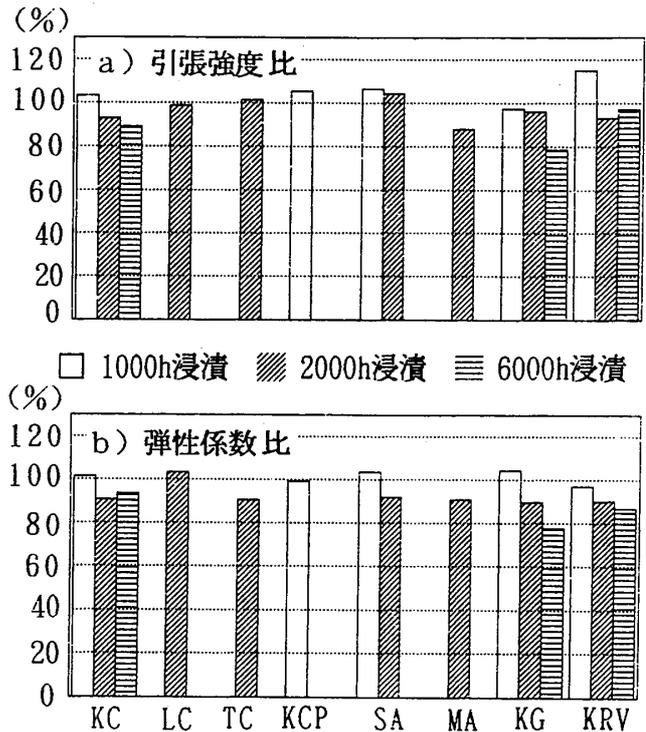


図-3 無拘束状態で溶液浸漬後のロッド強度の初期値に対する比率

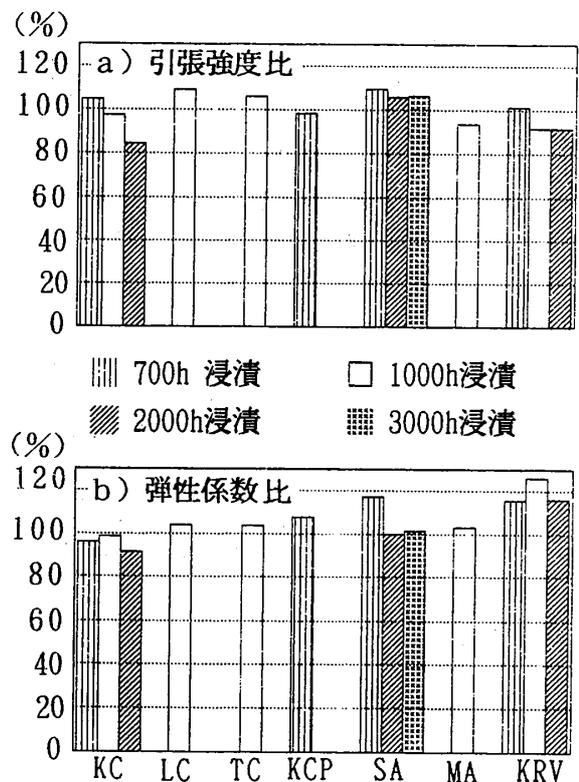


図-4 拘束状態で溶液浸漬後のロッド強度の初期値に対する比率

3. 2 屋外暴露及び高温高湿養生試験の結果

図-5には、それぞれ、屋外暴露および高温高湿養生を1年間行ったロッドの引張試験結果の平均値を初期値との比で示した。このうち、屋外暴露試験の結果については、いずれのロッドにおいても顕著な品質変化は確認されなかった。ただし、CFRPロッドのうちのKC種とVFRPロッド(KRV種)については、平均値では初期値と大差ないと見なせるものの、いずれにも試験体4本のうち1本に弾性係数が初期値より1σ以上低下するものがあった。

高温高湿養生の場合については、GFRPロッド(KG種)において20%の強度低下が見られ、明かな劣化が確認された。ただし、このロッドにおける弾性係数の顕著な変化は認められなかった。また、VFRPロッド(KRV種)においても、4本の試験体のうち2本が引張強度比で約20%の低下を示し、4本の平均値からもロッドの品質低下が示唆された。なお、このロッドでは弾性係数も最大で30%近くの低下が確認されたが、この傾向はGFRPロッドの場合とは異なることから、両者の劣化メカニズムの相違が考えられる。その他のロッドには、今回の実験範囲での顕著な品質変化は認められない。ただし、CFRPロッドのKC種において、屋外暴露と同様に、試験体4本のうち1本の弾性係数に初期値のばらつきの範囲を越える低下が認められ、平均値にも低下の傾向が現れていることから、屋外暴露の結果とあわせこの種のロッドの耐候性については今後、検討の余地が残される。

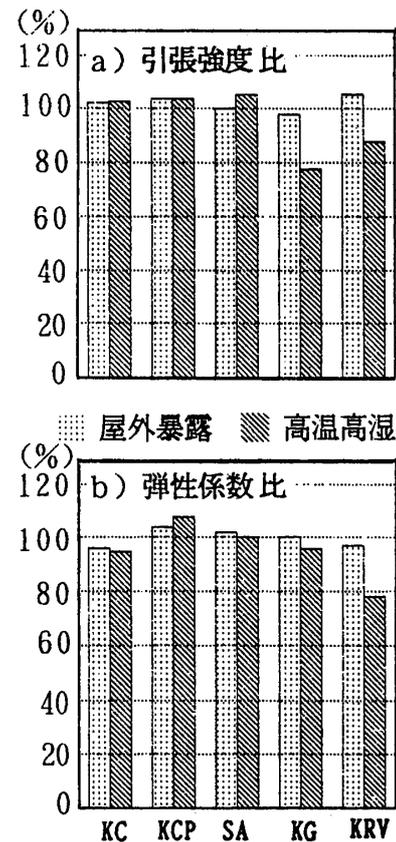


図-5 屋外暴露および高温高湿養生後のロッド強度の初期値に対する比率

4. CFRPによる異種金属接触腐食の可能性

CFRPロッドとみがき丸鋼の面積比が1:0.2の場合について、各溶液中で両者を短絡した場合にロッドから鋼材へ流れるアノード電流量の経時変化を図-6に示した。この結果、飽和Ca(OH)₂水溶液中の場合については、いずれのロッドにおいてもロッド-鋼材間に電流は発生せず、コンクリート中が塩分の含まれない健全な状態である限りは、CFRPロッドと鋼材の併用による異種金属接触腐食の可能性はないものと予想された。

一方、食塩水中あるいは飽和Ca(OH)₂+塩分水溶液中においては、鋼材に流入する電流発生の有無およびその量が、CFRPロッドの種類によって異なるようであった。すなわち、TC種については、溶液の如何にかかわらずロッド-鋼材間に電流は流れず、ロッドの絶縁性が極めて高い状態であると予想された。これに対してLC、KCおよびKCP種については、ロッドの種類によって発生電流量は幾分異なったが、いずれの溶液中でも電流が発生し、これらのロッドの電気絶縁性は確保されていないと見なせた。また、この場合の電流量は、食塩水中の場合が飽和Ca(OH)₂+塩分水溶液中の場合に比べ大きな値を示したが、これは、両溶液中における鋼材自身の自然電位の相違によりロッド-鋼材間の起電力に差が生じたことによるものと思われる。表-6には、測定された電流量から換算した鋼材腐食速度を腐食量の実測結果から求めた値と比較して示した。腐食量の測定結果にばらつきが生じたため詳細な検討はできなかったが、今回の結果から、CFRPロッドと接触した鋼材が塩分環境下に置かれると、この接触によって鋼材に生じる腐食電流

は鋼材全腐食速度の数10%程度の影響を持つ状況も見られ、腐食環境下では、異種金属接触腐食の影響は無視できないものとなることを示している。

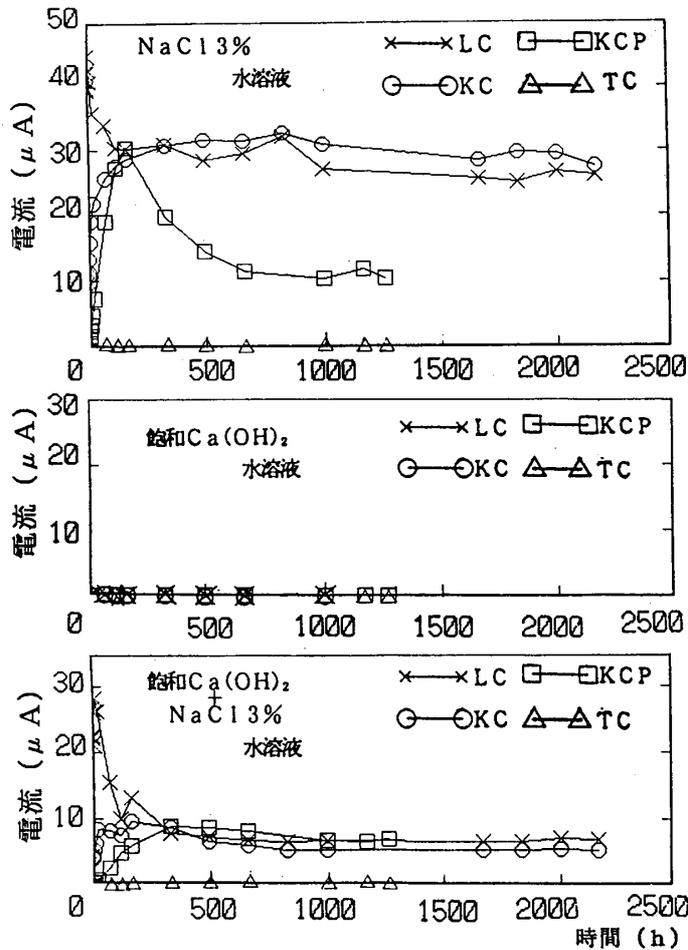


図-6 CFRPロッドから鋼材へ供給される電流量の経時変化(CFRP:鋼材面積比=1:0.2)

表-6 鋼材の腐食速度の推定結果

溶液の種類	ロッドの種類	面積比 (CFRP: steel)	実測腐食速度 # (mdd)	算出腐食速度 # (mdd)
NaCl 3% 水溶液	LC	1:1	19.6	5.4
		1:0.2	64.4	23.9
	KC	1:1	20.0	3.6
		1:0.2	60.2	25.4
	KCP	1:1	8.3	3.0
		1:0.2	5.7	11.5
TC	1:1	20.9	0	
	1:0.2	0	0.2	
飽和Ca(OH) ₂ 水溶液	LC	1:1	0	0
		1:0.2	0	0
	KC	1:1	0	0
		1:0.2	0	0
	KCP	1:1	0	0
		1:0.2	0	0
TC	1:1	0	0	
	1:0.2	0	0	
飽和Ca(OH) ₂ NaCl 3% 水溶液	LC	1:1	1.9	1.6
		1:0.2	22.2	6.7
	KC	1:1	1.9	0.8
		1:0.2	26.0	5.2
	KCP	1:1	6.0	0.8
		1:0.2	22.3	5.7
TC	1:1	1.5	0	
	1:0.2	12.3	0	

*腐食量より求めた腐食速度
#算出電流量から算出した腐食速度

5. まとめ

繊維あるいはマトリックス種の異なる8種類FRPロッドの耐久性について実験的な検討を行った。限られた実験の範囲ではあるが、この結果から以下の点が確認された。

- (1) 炭素繊維補強及びアラミド繊維補強FRPロッドについては、ロッドの種類によって耐久性に差が生じた。特に、コンクリート中で高張力を受けるプレテンション材などとしての利用では、種類によっては耐久性について慎重な検査も必要である。
- (2) ガラス繊維補強FRPロッドは、コンクリート中のアルカリ性や高温高湿環境条件下で大きな強度低下を生じる危険性を有している。
- (3) ビニロン繊維補強FRPロッドは、高温高湿環境における品質低下に配慮する必要がある。
- (4) ロッドの表面の電氣的絶縁性が不十分な炭素繊維補強FRPロッドが腐食環境中で鋼材と接触している場合には、両者の電位差によって鋼材に電流が供給され、その電流量は、状況によっては鋼材の腐食速度に対し無視できない。

[参考文献]

- 1) ミヨキ、武若、松本：FRPロッドの耐久性に関する基礎的研究、土木学会第47回年次学術講演会講演概要集、Vol.5、pp.366-367、1992.9
- 2) 猪八重、武若、ミヨキ：種々のFRPロッドの耐久性について、土木学会西部支部研究発表会講演概要集、pp.766-767、1993.3