

FRPケーブル材料の暴露試験

西崎 到*1・佐々木 巖*2

1. はじめに

炭素繊維やアラミド繊維などを用いた繊維強化プラスチック (FRP) ケーブルは、軽量かつ高強度で腐食しないなどの性質から、土木への適用が注目されてきた材料である。プレストレストコンクリートの緊張材への適用は、早い段階から検討されてきたが、グラウンドアンカーや鉄筋代替材料としても利用技術開発が進みつつある。

FRPケーブルの土木用途での使用においては、たとえばプレストレストコンクリート緊張材では常時引張応力がかかるなど、厳しい劣化環境に置かれる可能性がある。FRPケーブルはこのような苛酷な環境においても、耐食性をはじめとした優れた耐久性をもっていると期待されているが、FRPケーブルの本格的な適用には、FRPケーブルがどの程度もつかという、耐久性に関するより定量的な評価が必要である。このためには、緊張力、水、アルカリ、日光などのFRPの耐久性に影響を与えると予想される劣化要因について、FRPケーブルの耐久性に関する十分なデータ蓄積をすることが必要である。

筆者らはこのような観点から、FRPケーブルの置かれた環境とその時の変化に関するデータの収集を主目的として暴露試験を実施しており、本報告はその概要と主な成果を報告するものである。

2. FRPケーブルの暴露試験の概要

2.1 暴露試験の概要

建設省土木研究所におけるFRPケーブルの暴露試験は1988年から行われている。当初は、FRPケーブルや定着具も開発途上にあった。これら開発状況の進展、ならびに実験目的や評価項目の変遷により、暴露試験は3つのシリーズに分けられる。なお、本試験はプレストレストコンクリート緊張材としての単なる耐久性のシミュレートではなく、さまざまな環境要因が材料の耐久性に与える影響を調べることを目的としたものである。

(1) シリーズⅠ¹⁾

FRPケーブルの長期耐久性を調べるための暴露試験である。2種の炭素繊維強化プラスチック (CFRP) ケーブルと

2種のアラミド繊維強化プラスチック (AFRP) ケーブルを用い、緊張応力をかけた状態で、海上と内陸の2ヵ所で大気中暴露試験を行った。1988年に開始し、1年7ヵ月で一部試験片を回収試験した。残りの試験片は10年を経過した現在も暴露試験継続中である。

(2) シリーズⅡ²⁾

環境因子がFRPケーブルの耐久性に与える差を調べるために行った調査である。FRPケーブルを、海洋の大気中から海中部にわたって連続的に暴露することにより、劣化環境の差が劣化の度合いに与える影響を調査した。すべてのケーブルは無緊張で、2年間暴露された。FRP材料の劣化度調査手法として、外観調査、引張試験、赤外線分光分析等



図-1 暴露試験場の位置

表-1 使用材料と暴露試験シリーズによる試料名一覧

	繊維	カーボン	カーボン	アラミド	アラミド	アラミド	E-ガラス	ビニロン
	樹脂	エポキシ	エポキシ	エポキシ	ビニルエステル	エポキシ	ビニルエステル	エポキシ
暴露試験シリーズ	Ⅰ	Ⅰ-CFRP1	Ⅰ-CFRP2	Ⅰ-AFRP0	Ⅰ-AFRP1			
	Ⅱ	Ⅱ-CFRP1	Ⅱ-CFRP2		Ⅱ-AFRP1	Ⅱ-AFRP2	Ⅱ-GFRP	Ⅱ-VFRP
	Ⅲ	Ⅲ-CFRP1	Ⅲ-CFRP2		Ⅲ-AFRP1	Ⅲ-AFRP2	Ⅲ-GFRP	Ⅲ-VFRP

*1 Itaru NISHIZAKI: 建設省土木研究所 材料施工部 化学研究室

*2 Iwao SASAKI: 建設省土木研究所 材料施工部 化学研究室

による分析を行った。

(3) シリーズⅢ³⁾

シリーズⅡで得られたFRPケーブルの劣化傾向を確認するために行った暴露試験である。FRPケーブルを、緊張荷重、直射光の有無、水浸状態などの劣化環境条件を変化させ、これらの条件がFRPケーブルの強度変化に与える影響を調べた。暴露試験は海洋環境において、試験条件により2年8ヵ月あるいは3年6ヵ月行った。

2.2 試験材料

一連の試験に用いたFRPケーブルは、7銘柄、延べ16種である。同一銘柄のケーブルであっても、その製造時期によって物性等が多少異なることも考えられる。そのため、本稿では表-1の試料名を用いることとする。各材料の諸元や物性はシリーズごとに各項で示す。

3. 暴露試験場

暴露試験は、図-1に示すように、静岡県駿河湾内海上の海洋技術総合研究施設—マリンステーションするがーと、茨城県つくば市の建設省土木研究所構内の2ヵ所で行った。

3.1 海洋技術総合研究施設(図-2)

海洋技術総合研究施設は静岡県駿河湾内海上に設置されたプラットフォーム型の施設である。海岸からはおよそ250mの海上に位置する、15m四方の施設である。1983年に総合的な海洋技術研究のために設置され、さまざまな材料の海洋環境での耐久性と防食技術の研究が実施されている施設である。気候は温暖であるが、海上に設置されているため、海塩の影響を非常に強く受ける。3つのデッキがあり、一番上の第1デッキは海面から13.9m、中間の第2デッキは8.9m、一番下の第3デッキは1.9mの高さにある。第3デッキは台風来襲などの場合には、高波の影響を受ける。

3.2 建設省土木研究所

茨城県つくば市にある、土木研究所構内において材料暴露試験を行った。

4. シリーズⅠ暴露試験

4.1 試験材料

2種類のCFRPケーブルと、2種類のAFRPケーブルを用い



図-2 海洋技術総合研究施設の外観

た。試験材料の主な諸元を表-2に示す。

4.2 試験体

FRPケーブルは同種類の3本を一組とし、図-3に示す形状のコンクリート製試験体に3本ずつ取り付けられたものを暴露試験に用いた。FRPケーブルの暴露部分の長さは1.0mとした。定着具はCFRP1には専用設計されたFRP製のものを使用し、そのほかにはくさび形の同種のステンレスを用いた。初期緊張力は1本のケーブルにつき5.0tfを目標に油圧ジャッキとステンレス板を用いて導入した。FRPケーブル設置後、ケーブル破断時の安全性のため、ケーブルの先端部はコンクリートによって埋めた。1種類のFRPケーブルについて4つの試験体を製作し、2体ずつ、2ヵ所の暴露場所に設置した。

表-2 シリーズⅠに用いたFRPケーブルの主要諸元

	FRPの種類				鋼(比較)	
	I-CFRP1	I-CFRP2	I-AFRP0	I-AFRP1	PC鋼線	PCより線
形状	ストランド	ロッド	ロッド	ロッド		
繊維種類	炭素繊維	炭素繊維	アラミド繊維	アラミド繊維		
マトリックス樹脂	エポキシ	エポキシ	エポキシ	ビニルエステル		
繊維含有量(%)	65	65	65	65		
直径(mm)	12.4	8	8	8	7	12.4
単位重量(g/m)	144	76.9	64.5	65.1	302.2	729
密度(g/cm ³)	1.53	1.57	1.35	1.28	7.85	7.85
引張強度(kgf/mm ²)	126	186	159	147	165	175
[MPa]	[1 240]	[1 820]	[1 560]	[1 440]	[1 620]	[1 720]
破断荷重(kgf)	11 800	9 100	7 600	7 400	6 350	16 300
[kN]	[115.6]	[89.2]	[74.5]	[72.5]	[62.2]	[159.7]
弾性係数(kgf/mm ²)	10 700	15 150	8 250	5 570	20 400	19 800
[GPa]	[104.9]	[148.5]	[80.9]	[54.6]	[199.9]	[194.0]
破断歪み(%)	1.1	1.2	1.9	2.6	>4.5	6.5

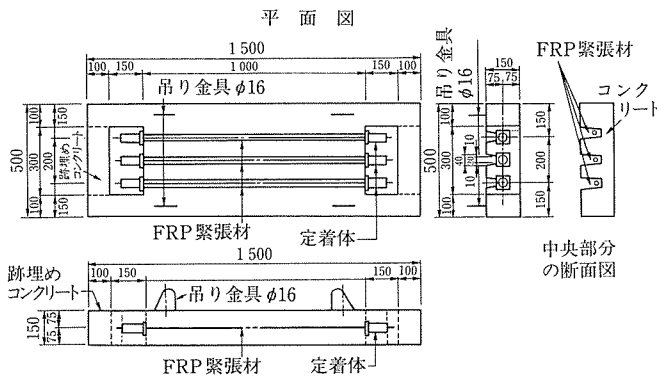


図-3 FRPケーブルの暴露方法(シリーズI)

4.3 試験体の暴露

暴露試験は前述の2カ所で行われた。いずれの暴露環境も大気中と考えられるが、FRPケーブルはコンクリート製の試験体枠の比較的深い溝の中にあるため、直射光はほとんど当たらない。雨や高波の場合には雨水または海水(海洋技術総合研究施設のみ)に濡れる。なお、海洋技術総合研究施設では第2デッキに暴露した。

暴露試験は1987年2月に開始し、半数の試験体は1年7ヵ月後の1989年9月に回収し試験した。残りの半数の試験体は現在も暴露中である。

4.4 測定項目と方法

(1) 残存緊張力

試験体を製作したときには1本のケーブルにつきおよそ5.0tfの緊張力を導入したが、この緊張力の暴露後のリラクゼーションによる低下を測定することとした。回収した試験体の端部のコンクリートを切り取り、定着具に油圧ジャッキを取り付け緊張力を導入し、定着具が離れる時の荷重を測定して残存緊張力とした。

(2) 引張試験

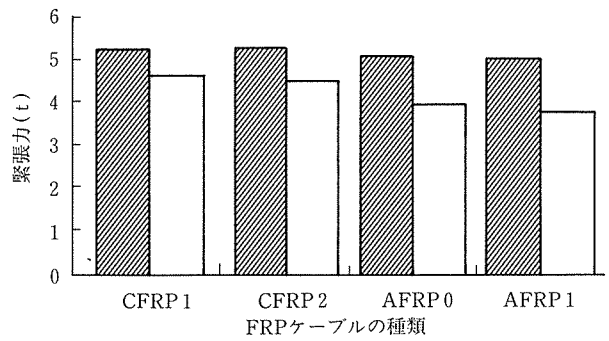
残存緊張力を測定した後、回収したFRPケーブルについて、引張破断強度と引張弾性係数を測定した。引張弾性係数測定にはFRPケーブル表面に張り付けた歪みゲージを用いた。

4.5 結果

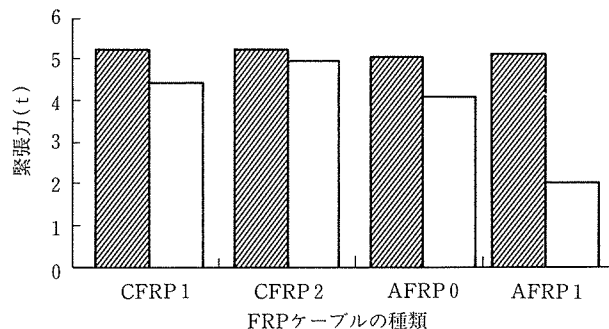
(1) 残存緊張力

残存緊張力の測定結果を図-4に示す。暴露前の緊張力はおおよそ5.0tfであったが、多くのケーブルは1年7ヵ月後に初期値の75%を保持していた。残存緊張力保持率は、CFRPケーブルでは80%~98%の範囲にあったが、AFRPケーブルでは75%~80%程度であり、CFRPの方がAFRPに比べて大きい傾向が認められた。海洋技術総合研究施設に暴露したI-AFRP1では、3本のうち2本のケーブルが部分的に破断し、残存緊張力は初期値の30%に低下した。この破断はケーブルの根元で起きていることから、この破断はクリープ破断ではなく、定着具の問題である可能性がある。繊維やマトリックス樹脂の劣化が起きた可能性も考えられるが、次項で触れるように弾性係数に明確な変化が認められなかった。

本試験では、各ケーブルの耐荷重にかかわらず、一律に5tfに設定したため、初期応力がCFRPにおいては、破断強度



(a) 土木研究所での暴露試験



(b) 海洋技術総合研究施設での暴露試験

初期緊張力/引張破断荷重	凡例
I-CFRP1 0.42	■ 初期緊張力
I-CFRP2 0.55	□ 残存緊張力
I-AFRP0 0.66	
I-AFRP1 0.68	

図-4 試験結果(シリーズI)

の0.42と0.55であったのに比べ、AFRPにおいては、破断強度の0.66と0.68と厳しい条件となっていた。このため、本試験の結果のみで、単純にCFRPがAFRPよりも良いと結論付けるものではない。

(2) 引張試験

I-AFRP1の暴露中に破断したケーブルを除いて、引張強度と弾性係数に大きな変化が認められたものはなかった。

5. シリーズII暴露試験

5.1 試験体および暴露方法

暴露試験は海洋技術総合研究施設のみで行った。試験材料は表-3に示す材料であり、長さ約15mのものを用いた。試験数量は各材料とも2本ずつに、II-AFRP1の表面塗装を施したものを加えた計13本である。暴露環境差と劣化傾向の関係を調べることを目的として、図-5に示すように飛沫部から海中部にわたる各腐食環境に連続的に配置し、線材が揺れない程度の軽い緊張力をもたせて設置した。2年間暴露した後、回収した。

5.2 回収試験体の評価試験方法

回収した試験体は、図-6のようにほぼ2mずつに切断して、それぞれの部分について劣化度評価を行った。評価方法は、目視観察による外観調査の後、図-6のように分割して、引張試験と物性試験を行った。外観調査として、目視により損傷の有無や材料の表面状態などを検査した。

引張試験は、図-7のように切り出した試験片に、各材料

かったが、材料表面部の試料ではC=Oの吸収が見られた。II-AFRP2の例を図-8および9に示す。II-CFRP1、II-GFRPおよびII-VFRPについては、暴露前後の赤外吸光度には特に変化が見られなかった。

熱分析の結果については、II-AFRP2のガラス転移温度が暴露前の試料に対して、ケーブルの表層で18℃、内部で14℃ほど高くなっており、樹脂の硬化が進んでいることが確かめられた。II-GFRPは気中部暴露の試料表面部分において、ガラス転移温度が暴露後にやや高くなる傾向が見られたが、それ以外の部分では変化がなかった。II-AFRP1とII-

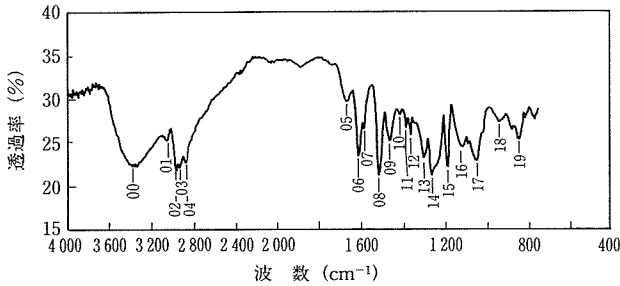


図-8 暴露試験前の表面IRスペクトルの例(II-AFRP2)

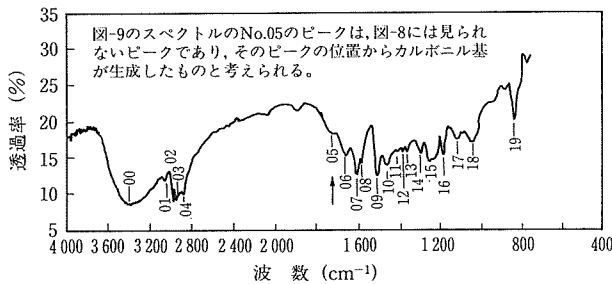


図-9 暴露試験後の表面IRスペクトルの例(II-AFRP2)

VFRPでは分解開始温度が、それぞれ20℃と40℃低くなり、樹脂の分解が進んでいることが窺える。II-CFRP1については、今回の測定では変化が見られなかった。

(3) 引張強度試験

引張強度と鉛直方向の暴露位置の関係を図-10に示す。なお、長尺試験材両端の暴露された定着具を含む試験区分の一部(上下両端部の約1m分)は試験結果に含めていない。

引張試験における結果は一般にばらつきが大きく、今回の試験においては繰返し数が少ない(n=1)ため定量的な判断は困難であるが、傾向として次のことが分かる。

海中部において一様に引張強度の低下傾向が見られる。この原因としては2つの要因が考えられる。1つは、暴露試験材が長尺物(約15m)の一括設置であったため、特に水中部で集中的に波浪荷重がかかり、下端部に緩やかな曲げ疲労が生じたことである。また、繊維とマトリックス樹脂の界面への水分浸入による付着破壊による材料劣化なども考えられる。

II-AFRP1の表面被覆を施していない材料では、日光の当たる干満部以上で一定の強度低下が確認できた。これは紫外線劣化による可能性が高いと言える。

5.4 考 察

シリーズIIの実海域暴露試験においては、CFRPおよびAFRPケーブルについて、その一部あるいは全数が試験体の破損流失のため評価不能であった。破損せずに回収できた試験体においては、水中部で強度低下の傾向が見られたほか、塗装の有無による残存強度の差異も生じた。

材料の赤外分光分析による評価では、干満部より上の気中部での一部暴露材料において、材料の化学的な変化が見られた。熱分析の結果からは、多くの試料で気中部の表面部分を中心とした材料変化が見られた。このため、高分子

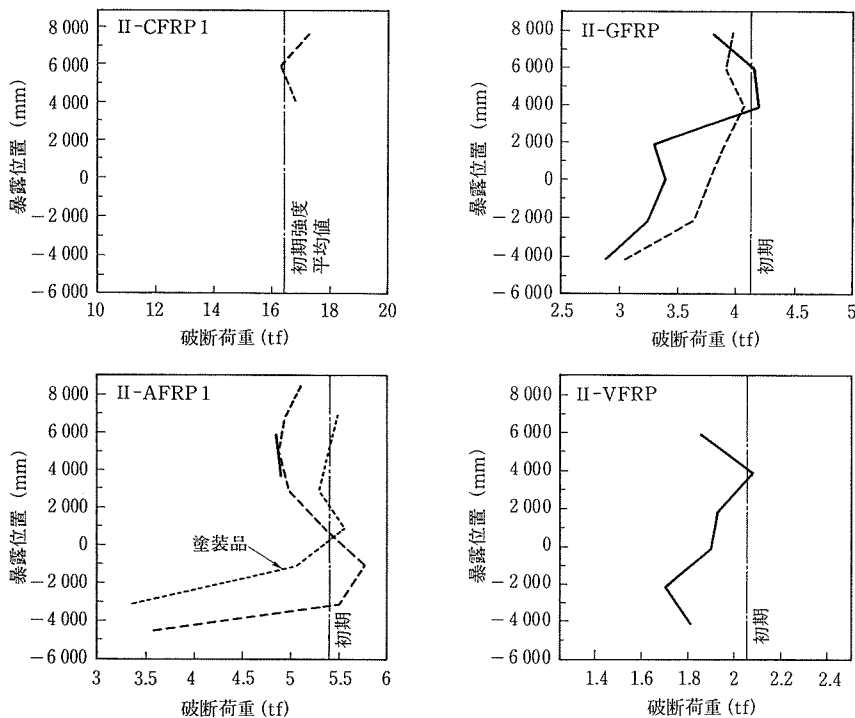


図-10 暴露位置と引張強度の関係

系複合材料であるFRPケーブルについては、被覆状態や材料種類により紫外線劣化が問題となりうる事が分かった。

海中部の強度低下傾向については、その原因は特定できない。しかしながら、繊維系複合材料が曲げ疲労を伴って水中に長期間さらされる場合の耐久性について再確認する必要があることが示唆された。

6. シリーズⅢ暴露試験

6.1 試験材料

試験材料は、CFRP2種、AFRP2種、GFRP1種、VFRP1種の、計6種のケーブル材料を用いた。種類と主な特性を表-4に示す。表中の引張強度および弾性係数は暴露試験開始時に実測したものであり、定着具を含めたケーブルシステムの強度である。定着具は、FRPケーブルの製造者が最適と考えるものを取り付けて評価試験を行った。

6.2 試験体の暴露

暴露試験は、海洋技術総合研究施設で行った。シリーズⅢはこれまでの試験で得られたFRPケーブルの劣化傾向を定量的に評価するための暴露試験である。直射光の有無や水中などの環境の差を生じさせるために、当試験施設の複数の場所を使用して暴露試験を行った。このためシリーズⅢは、その暴露環境により表-5および図-11に示すCASEⅣからCASEⅦに分けられる。なお、以下に述べるのはCASEⅤ以外の試験材料の半数を回収して評価を行った結果である。各試験条件あたりの試験体数は当然ながら多い方が望ましく、土木学会の提案している試験法においては5本と規定されているが、暴露試験実施上の制約から2ないし3本で行った。暴露期間は、緊張供試体で42ヵ月、非緊張供試体では32ヵ月である。

緊張下暴露供試体は、図-12のようにステンレス製のフレームに所定の緊張力を導入して試験材料を固定した。非緊張暴露供試体は2000mmの試験材料6種類1本ずつを1つのフレーム(図-13)に取り付けた。製作した試験材料は表-5の暴露環境に所定の数量を設置した。

表-5 シリーズⅢの暴露試験ケース(環境条件による区分)

環 境	直射光	緊張あり	緊張なし
海上大気部	あり	CASE-Ⅳa	CASE-Ⅵa
	なし	CASE-Ⅳb	CASE-Ⅵb
飛沫部	あり		
	なし	CASE-Ⅴ	
海中部	あり		CASE-Ⅶ

6.3 試験体の回収と評価試験方法

暴露試験によるFRPの性状変化の評価として、外観調査、残存緊張力、引張強度および引張弾性率の測定を実施した。

回収した試験材料は、試験材料の色や表面の状態、ひび割れや傷の有無等について外観調査を行い、緊張下暴露供試体については、センターホールジャッキにより緊張解放を行って残存プレストレス量の測定を行った。そして回収試験材の全数について静的引張破断試験を行って、引張強度と引張弾性係数を測定した。なお、緊張試験体は暴露試験に使用された定着具を利用し、非緊張試験体は暴露回収後に定着具を取り付けて試験した。

引張試験は土木学会の「連続繊維補強材の試験方法(案)」⁵⁾を参考に行った。試験材の定着間有効試験長は、各材料とも1000mmである。

6.4 試験結果

(1) 無緊張暴露試験体

FRPケーブルの耐久性における直射光の影響を評価する

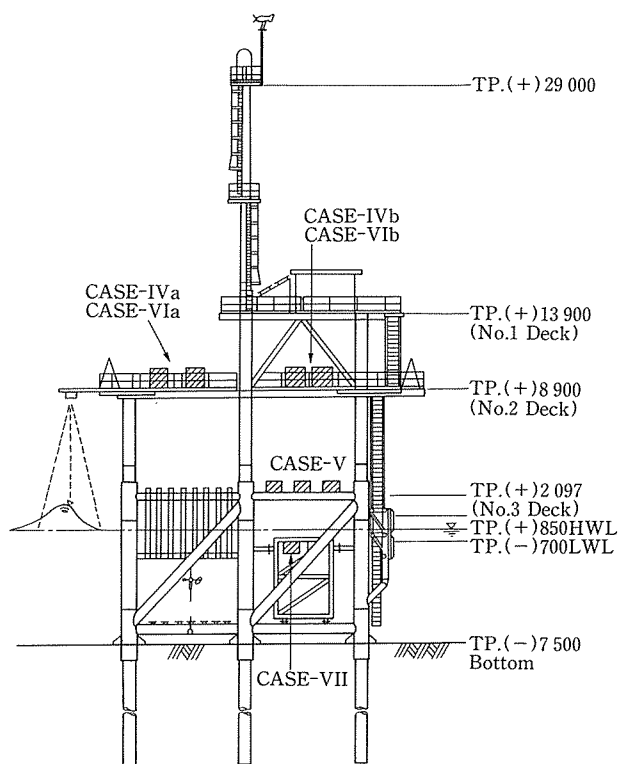


図-11 シリーズⅢの環境区分に応じた暴露設置場所

表-4 シリーズⅢに用いたFRPケーブルの主要諸元

	Ⅲ-CFRP1	Ⅲ-CFRP2	Ⅲ-AFRP1	Ⅲ-AFRP2	Ⅲ-GFRP	Ⅲ-VERP
形 状	ストランド	ロッド	ロッド	組み紐	ロッド	ロッド
繊維種類	炭素繊維	炭素繊維	アラミド繊維	アラミド繊維	E-ガラス	ビニロン
マトリックス樹脂	エポキシ	エポキシ	ビニルエステル	エポキシ	ビニルエステル	エポキシ
繊維含有量(%)	64	65	66	65	65	72
直径(mm)	12.5	8.0	6.0	8.0	6.0	6.0
破断荷重(kN)	141	70.6	52.4	65.7	36.3	19.6
弾性係数(GPa)	145	168	55.6	62.1	52.9	28.6
定着方式	付着	くさび	付着	付着	付着	付着

ための暴露試験ケースである，CASEⅥaおよびCASEⅥbの試験結果を図-14に示す。Ⅲ-AFRP2とⅢ-GFRP以外の試験材料では初期強度に対する有意差は認められず，直射光の有無にかかわらず，いずれも初期強度を保持していることが分かる。Ⅲ-AFRP2は，回収試験体の引張試験時に4本中

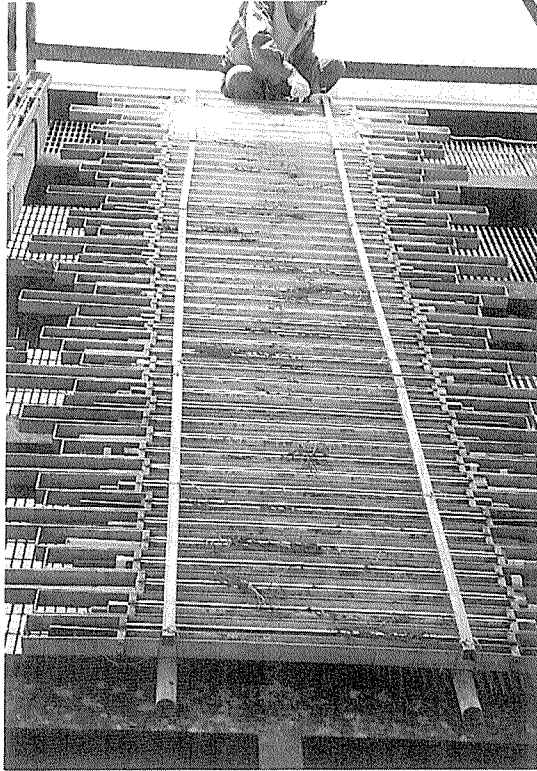


図-12 緊張試験体の暴露試験状況

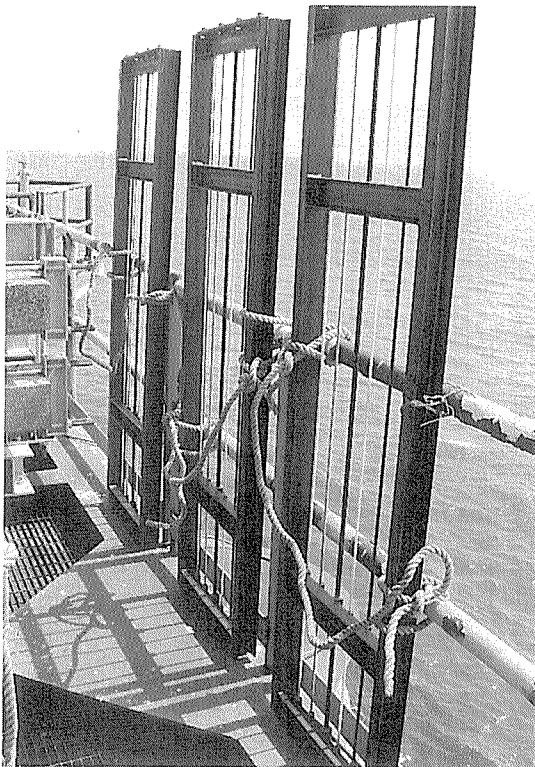


図-13 非緊張試験のフレームへの取付け状態

3本が定着具抜けしたため，新たな定着具を再度取り付けて測定した。Ⅲ-GFRPの強度低下については，日光の影響があまり見られないことを考慮すると，素材の特性，特に海面からの蒸気や降雨によるものであると推測される。

海中に設置した試験材料CASEⅦの残存引張強度を図-15に示す。CFRPケーブルについてはいずれも初期強度を保持していたが，Ⅲ-AFRP1は全数が暴露中に破損したため評価不能，Ⅲ-AFRP2，Ⅲ-GFRP，Ⅲ-VFRPについてはそれぞれ初期強度の49%，65%，71%に低下した。この理由としては，FRP内部での繊維と樹脂の微細な剥離などによる複合材料の強度低下を生じた可能性が高いことがまず考えられる。しかし，海中に設置した試験材料には貝類などの生物付着が起これるとともに，波浪による緩やかな曲げ疲労を受けるため，これらの影響もいくらかあると考えている。繰返し曲げの作用により，繊維と樹脂の界面剥離が促進される効果もあると言える。なお，試験体の固定については，2000mmのケーブル材料を，その直径にかかわらず400mmおよび1000mmの間隔で図-12の取付けフレームに4点保持した。

特にAFRPの場合には，海中ではないものの，アルカリや水中での浸せき試験による文献として，宮川⁶⁾，Nanni⁷⁾，Uomoto⁸⁾らは，引張強度の変化が見られなかったと報告している。ところが，Takewaka⁹⁾が50℃のアルカリ溶液中で6000時間で初期の0.7になったデータを示し，また，建設省土木研究所橋梁研究室ほか¹⁰⁾はアルカリ溶液中にて2年間で初期の0.8になったデータを示している。ただしこれらの報告においても，材料によっては強度低下のないAFRPもあることを報告している。いずれにしても，FRPは繊維および樹脂ならびにその組合せによって耐久性が異なるものであり，AFRPということだけでひとくくりの材料として論じられるものではない。今後，室内促進試験や暴露の再試験を通して想定した強度低下要因を確認することが必要である。

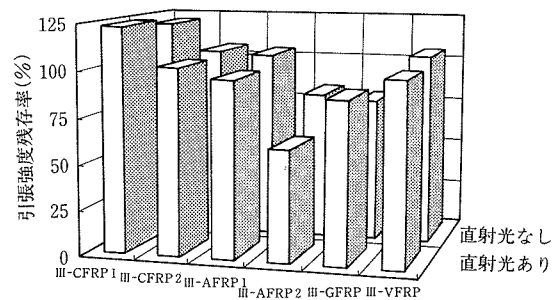


図-14 CASEⅥa・Ⅵbの非緊張暴露試験体の残存引張強度

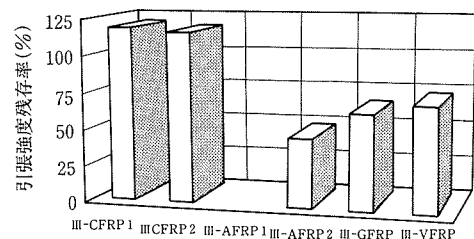


図-15 CASEⅦの水中における非緊張暴露試験後の残存引張強度

(2) 緊張試験体

緊張下暴露試験供試体について、初期導入荷重と42ヵ月後の残存緊張荷重の比で求めた実暴露後のリラクゼーション率を、直射光の有無に応じてそれぞれ図-16、17に示す。CFRPおよびAFRPのケーブル計4種については、Ⅲ-CFRP1の直射光なしを除いて、リラクゼーション率がおおむね80%程度である。Ⅲ-CFRP1については、直射光の有無により、リラクゼーション率に10%程度の差が生じていることが分かる。この要因としては、日射による試験体の温度履歴と、紫外線による材料劣化の2つが考えられる。今後の、環境因子を単純化した室内促進試験の評価によるメカニズムの解明が望まれる。Ⅲ-VFRPについては、残存緊張力が初期の半分以下となっており、繊維の特性から緊張力保持性能があまり良くないことが分かる。

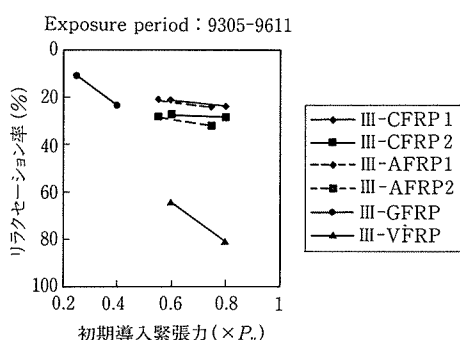


図-16 実暴露試験後のリラクゼーション率と緊張レベルの関係 (直射光あり)

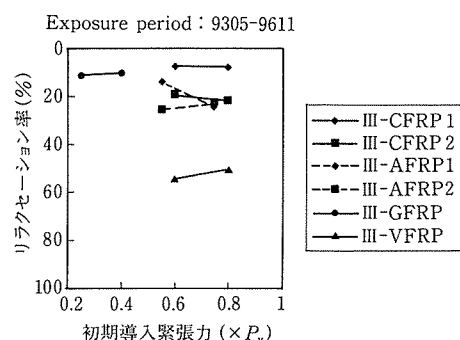


図-17 実暴露試験後のリラクゼーション率と緊張レベルの関係 (直射光なし)

暴露試験後の引張破断強度を図示したものが図-18、19である。残存引張強度はⅢ-GFRPの0.4 P_u を除いて、暴露前の引張強度を満足に保持していた。GFRPは、常時緊張力が作用する状態で使用するの難しいことが一般的に言われており、この結果からも、初期導入緊張力は破断強度のおよそ30%程度が限界であると推測できる。

Ⅲ-AFRP2については、非緊張暴露において強度低下が確認されているにもかかわらず、緊張下暴露においては強度の変化が見られない。Ⅲ-AFRP2は組み紐状のFRPケーブルであるが、宮川⁶⁾らは、同様の組み紐状AFRPケーブルの浸せき試験で、プレテンション荷重の高い場合の方が劣化が少ない傾向になることを報告している。これらの理由としては、組み紐構造であるために棒材が絞られ、繊維間の距

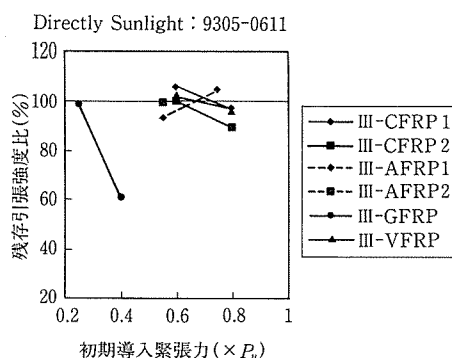


図-18 実暴露試験後の残存引張強度比と緊張レベルの関係 (直射光あり)

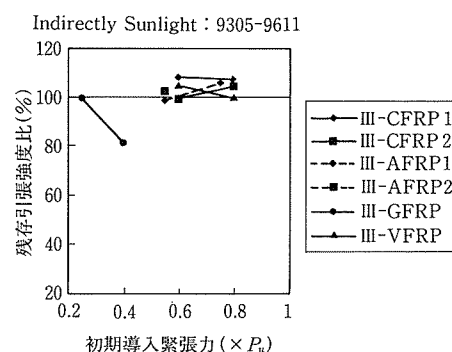


図-19 実暴露試験後の残存引張強度比と緊張レベルの関係 (直射光なし)

離が縮まったためと説明されており、本実験結果においても同様に説明できるものと考えている。

6.5 考 察

(1) 無緊張試験体

海中でのAFRPの暴露試験においては、その1つの材料では残存強度が初期の約半分になり、他のものは全数破損のため評価不能であった。同様に、GFRPケーブルおよびVFRPケーブルについても大きな強度低下が確認された。今回の試験における強度低下のメカニズムについて、断定はできないが、水浸による材料劣化が示唆された。しかし、波浪による曲げ疲労も強度低下の要因として考えられる。このため、動水中での実暴露におけるFRPケーブルの長期耐久性に関しては、CFRPを除き、曲げ疲労の要因を含めて再度確認する必要性が指摘されたと言える。

(2) 緊張試験体

CFRPおよびAFRPのケーブルは、今回試験に用いた材料では、42ヵ月暴露におけるリラクゼーション率が30%以内であり、引張強度も初期状態を保持していた。

GFRPの1つでは、直射光の有無により、リラクゼーション率に10%程度の差が生じることが認められた。残存引張強度への直射光有無の影響は、導入緊張力にかかわらず観察されなかった。

GFRPケーブルは緊張レベルが高い場合の強度低下が大きく、緊張用材料としての問題点を確認できた。またVFRPケーブルは大きなリラクゼーションが見られ、引張弾性係数が鋼材に比べて非常に小さいことと併せて、特殊な使用法に限られるであろう。

7. ま と め

GFRPケーブルのリラクゼーション率(定着部も含む見かけのリラクゼーション率)は、シリーズIで2%~20%(1年7ヵ月)、シリーズIIIで8%~30%(3年6ヵ月)であった。リラクゼーション率は材料による差が大きく認められ、同種のCFRPでもシリーズIとIIIでは、製造時期による差が認められた。環境条件の影響については、シリーズIIIで直射光を受ける環境の方が直射光を受けない場合よりもリラクゼーション率が大きくなる傾向が認められた。本試験におけるリラクゼーション率の最大値は、実用上比較的大きな値と考えられるため、材料と定着方法の良好な設計が望まれる。緊張荷重レベルに関しては、シリーズIIIでGFRPを除き初期緊張力を $0.6P_u$ と $0.8P_u$ の2段階に設定したが、リラクゼーション率への影響はほとんど見られなかった。

GFRPケーブルの残存引張強度は、シリーズI、II、IIIを通して、回収および試験したものについては、緊張力の有無にかかわらず強度低下は認められなかった。シリーズIIで実施した赤外吸光等の化学分析においても、マトリックス樹脂等の材料変化は見られなかった。最も厳しい条件は、 $0.8P_u$ の緊張条件において直射光下で3年6ヵ月暴露したものであり、CFRPケーブルの耐久性の高さが認識できる。

AFRPケーブルのリラクゼーション率はシリーズIで20%~25%(1年7ヵ月)、シリーズIIIで10%~30%(3年6ヵ月)であった。AFRPケーブルのリラクゼーション特性は、CFRPケーブルとはほぼ同様であり、材料による差違や、直射光を受ける環境の方が直射光を受けない場合よりもリラクゼーション率が大きくなる傾向も認められた。また、最大値も同程度であり、初期緊張力の差がリラクゼーション率へ与える影響もほとんど見られなかった。

一方、AFRPケーブルは、シリーズIIIで緊張力のないもので残存引張強度が低下している事例があるほか、シリーズIでの暴露中の破断($0.66P_u$)事例、シリーズIIの水中での強度低下事例や赤外分光分析による樹脂表面の劣化事例などが観測されている。シリーズIの暴露中破断は定着具の不適合の可能性が高く、シリーズIIの海中部での強度低下も、比較データがないためCFRPと比較して性能が劣るとは判断できないものの、シリーズIIIの非緊張暴露試験の結果は、AFRPケーブルは苛酷な環境では残存引張強度が低下する可能性があることを示している。シリーズIIIの暴露環境は、プレストレストコンクリートの緊張材料として用いるうえではかけ離れた特殊な環境であるが、AFRPケーブルの適用にあたっては適切な材料および定着具の選定と安全率の設定が望ましいと考えられる。

CFRPケーブルおよびVFRPケーブルについては、シリーズIIIの海中部における非緊張暴露試験では、大きな強度低下が見られた。また緊張状態における暴露試験では、CFRPケーブルは緊張レベルが高い場合の強度低下が大きく、緊張用材料としての問題点が確認できた。また、VFRPケー

ブルでは大きなリラクゼーションが見られ、引張弾性係数が鋼材に比べて非常に小さいことと併せて、特殊な使用方法に限られるであろう。

8. お わ り に

本研究におけるFRPケーブルの耐久性試験は、残りの試験材料の暴露が継続中であり、今後の回収試験を継続し、最終的な評価を行う予定である。

複合材料の耐久性を判断する際には、その損傷形態や補修面から材料の寿命を劣化早期に短時間で判断することが必要である。材料劣化の環境因子に着目して、暴露試験や促進試験を組み合わせた耐久性評価を行い、寿命予測を可能にすることが重要である。このためには、早期の劣化度判定も必要であり、複合材の弾性率等の微小な物理性状変化の測定、赤外分光分析等の化学分析による評価法適用が必要である。繊維とマトリックス樹脂の界面への水分浸入による付着破壊の評価として、たとえば顕微鏡等による検討が必要である。

本研究の実施にあたり貴重な助言および試験材料の提供をいただいた、各FRP材料メーカーの皆さま、ならびに暴露試験の実施にご協力いただいた建設省静岡河川工事事務所にて深甚なる謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) K.Katawaki, I.Nishizaki, I. Sasaki: Evaluation of the Durability of Advanced Composites for Applications to Prestressed Concrete Bridges, Proceedings of the First Advanced Composite Materials in Bridges and Structures (ACMBS-1), pp.119~127, 1992
- 2) 片脇, 佐々木: 暴露試験によるFRPの環境劣化, 第20回日本道路会議論文集, pp.1104~1105, 1993.10
- 3) I.Sasaki, I.Nishizaki, H.Sakamoto, K.Katawaki, Y.Kawamoto: Durability Evaluation of FRP Cables by Exposure Tests, Proceedings of the third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, pp.131~137, 1997.10
- 4) 土木学会: 連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用, コンクリートライブラリー第72号, 1992.4
- 5) 土木学会: 連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針(案), コンクリートライブラリー第88号, 1996.9
- 6) 宮川豊章, 吉田真樹, 服部篤史, 岩本 勲: 連続繊維補強材のアルカリ耐久性, 土木学会論文集, No.520/V-28, pp.171~181, 1995.8
- 7) A.Nanni, S.Matsubara, K.Hasuo: Durability of Braided Epoxy-Imregnated Aramid FRP Rods, Proceedings of the First Advanced Composite Materials in Bridges and Structures (ACMBS-1), pp.101~109, 1992
- 8) T.Uomoto, H.Ohga: Performance of Fiber Reinforced Plastics for Concrete Reinforcement, Proceedings of the Second Advanced Composite Materials in Bridges and Structures (ACMBS-2), pp.125~132, 1996
- 9) K.Takewaka, Myo Khin: Deterioration and Stress-Rupture of FRP Rods in Alkaline Solution Simulating as Concrete Environment, Proceedings of the Second Advanced Composite Materials in Bridges and Structures (ACMBS-2), pp.649~656, 1996
- 10) 建設省土木研究所橋梁研究室ほか: PC橋の緊張材への新素材の利用に関する共同研究報告書(総括編), 共同研究報告書第107号, p.20, 1996.9
- 11) 高島, 西崎, 佐々木, 川本: 各種連続繊維補強材の海洋環境下における暴露試験, プレストレストコンクリート技術協会第7回シンポジウム論文集, pp.549~554, 1997

[1998年3月10日受付]