

2. 新素材の特性

2. 1 FRPの一般特性

以下に GFRP, CFRP, AFRP の特性概要を示す。

(1) GFRP (ガラス繊維強化プラスチック)

- ・ 繊維強化複合材料の主流。
- ・ 軽量で経済的に有利、高強度構造材料として先新的な用途開拓。
- ・ 生産方法が進歩、少品種多量生産に対応する成形上の実用化。
- ・ 他の FRPには無い透光性があり適用範囲が大きい。
- ・ 下記の表に GFRP の特性と主な用途を示す。

材 料 特 性	要 旨	応 用 例	
機械的特性が優れている (軽くて強い)	透光性がある	積雪や風圧や人間の目方などの外力に耐えしかも外光を透す	波板
	電気絶縁性がある	構造や機構の一部を構成しながら、しかも絶縁の役目を果たす	電気部品
	電波を通す	構造強度が高くかつ電波の透過性がよい	レドームレーダ部品
	耐食性がある	耐油性、耐薬品性、耐海水性に優れている	タンク、パイプ、船舶
	一体成形性	複雑な曲面のものが一体成形でき、しかもデザインが自由である	浴槽、椅子、舟艇、船舶、自動車、車輛
	耐衝撃性	衝突に対する抵抗性は、破壊直前まで吸収する方が適当であり、この点で金属より優れている	保安帽、防弾板、特殊ハウジング
	材料の選択性	ガラス基材とポリエステルを選択により好みの強さのものが作れる	釣りざお、スキー

表 - 2. 1 GFRPの特性と用途

(2) CFRP (炭素繊維強化プラスチック)

- ・ 軽量、高強度、高弾性率材料として宇宙航空分野では広く適用。
- ・ PAN (ポリアクリロニトリル) 系繊維が主流。
- ・ 高性能化が著しい FRP。
- ・ 以下に CFRP の特性と主な用途を示す。

物性的特徴	用 途 例
軽量 高弾性率 高強度	航空宇宙機器、自動車 繊維機械、遠心分離機 フライホイール、スポーツ・レジャー機器 (ゴルフク ラブ、釣りざお、テニスラケット)、補装具
寸法安定性	宇宙機器 (トラス、アンテナなど)、マイクロメータ 、タイミングベルト、定規
振動減衰	オーディオ機器、楽器、自動車ドライブシャフト、リ ーフスプリング、レジャー機器
電気特性 通電発熱 帯電防止	醸造タンク、プラスチック成形樹脂型、帯電防止材料 、モータブラシ、電極
耐腐食性 耐摩耗性	化学プラント、集じん電極 摺動材、軸受
X線透過性	X線乾板カセット、医療用X線ベッド
高温特性	ロケット部品、タービンエンジン部品、航空用ブレー キディスク

表-2. 2 CFRPの特性と用途

(3) AFRP (アラミド繊維強化プラスチック)

- ・ 有機系で高強度、高弾性率繊維。
- ・ 繊維密度が小さく、比強度が高い高じん性複合材料。
- ・ 圧縮強度が低くなる短所。
- ・ 以下に AFRP の主な用と例を示す。

分 野	用 途 例
ゴム補強材	乗用車タイヤ、トラックタイヤ、レーシングタイヤ、 無段変速ベルト、タイミングベルト、Vベルト、コンベ アベルト、高圧ホース、ラジエータホース
プラスチック 補強材	宇宙・航空機部品、船体、スポーツ用品、圧力容器、 タンク、潤滑部材、産業用・事務機部品、プリント基板

表-2. 3 AFRPの特性と用途

2. 2 旧素材との特性比較

材 料		密 度 ρ (g/cm^3)	引張強度 σ_B (kgf/mm^2)	比強度 σ_B/ρ ($10^4 m$)	張弾性率 ($\times 10^6 kgf/cm^2$)	比弾性率 E/ρ ($10^6 m$)	熱伝導率 ($Kcal/m \cdot h \cdot ^\circ C$)	線膨張率 ($\times 10^{-6}/^\circ C$)	比抵抗 ($\Omega \cdot cm$)	備 考
FRP	GFRP	2.0	120	6.0	0.42	2.1	5	8	10^{15}	ガラス繊維
	CFRP	1.6	180	11.2	1.28	8.0	43	-0.7	10^{-3}	炭素繊維
	AFRP	1.4	150	11.5	0.80	5.7	2.3	4	10^{16}	アラミ繊維
金属	50k鋼	7.8	50	0.6	2.10	2.7	7.6	12	10^{-5}	
	PC鋼	7.8	195	2.5	2.00	2.6	7.6	12	10^{-5}	
	アルミニウム合金	2.8	47	1.7	0.76	2.7	188	23	10^{-6}	
	チタン合金	4.5	96	2.1	1.10	2.5	6.2	8.4	10^{-5}	

注) (1) FRP は一方向強化材とし強度は繊維方向とする。(繊維含有率 60%)

表 - 2. 4 FRP および金属の機械的性質比較表

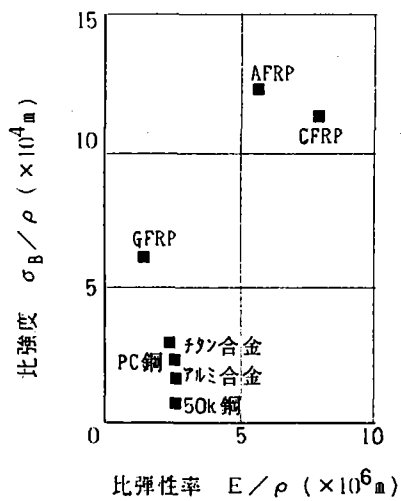


図 - 2. 1 複合素材および金属の
比強度と比弾性率の関係

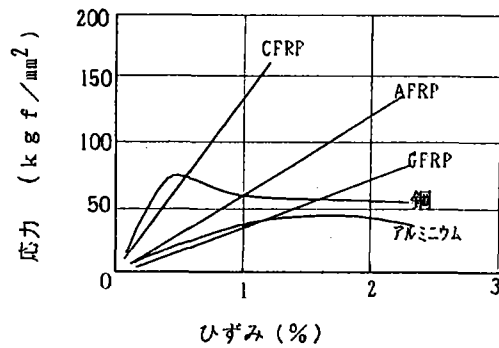


図 - 2. 2 各種材料の応力-ひずみ
曲線比較

	1円/g	10円/g	100円/g	1000円/g	10000円/g
金 属	Al 0.33 Fe 0.07 Mg 0.7 Cu合金 0.85	Ti 2 Ti合金 6 30 Be 4.4		形状記憶合金 150 400	Au 2500
無 機	7Nシ 0.4	高純度7Nシ 5 8 ガラス繊維 2.5 7	炭素繊維 9 50	Siウハ 100 110 256KDRAM 400 500 メモリ繊維 180 300	
有 機	フェノール樹脂 0.17 ポリイソプレ 0.6 ポリフェニル樹脂 0.25	電磁波シールド材 4.5	7Nシ繊維 9 20	64KDRAM 100 150	

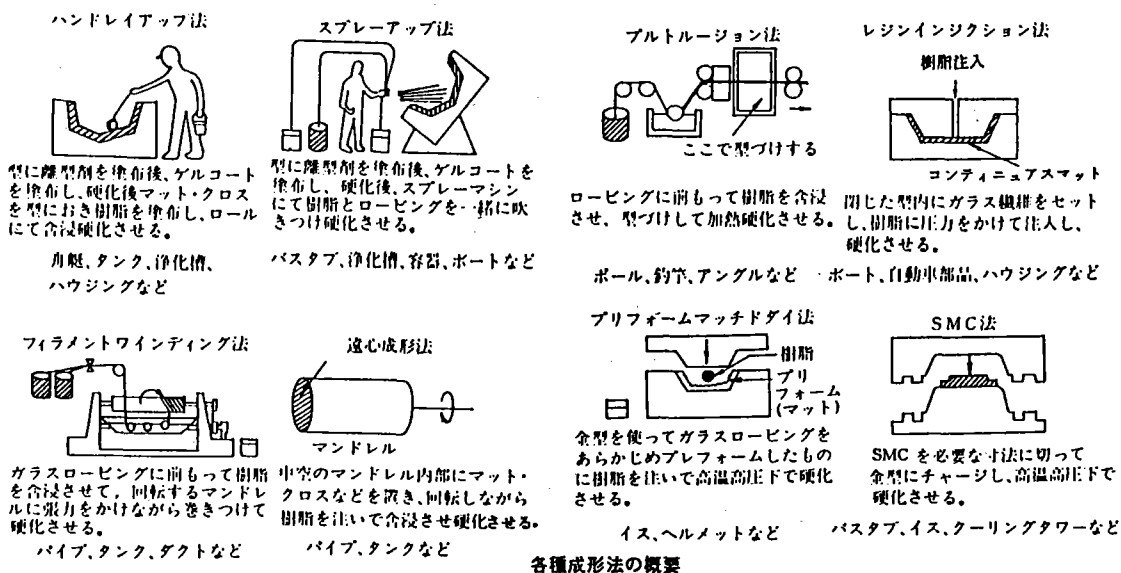
(日本興業銀行資料による)

図 - 2. 3 新素材と旧素材の価格マップ

2. 3 FRPの成形法

各種成形法の特徴

成形法	原 料											成 形								
	強 化 材						樹 脂					硬化	成形温度 (°C)	成形圧力 kgf/cm ²	成形時間					
	リ ー フ エ ー シ ン グ マ ツ ト	チ ョ ッ プ ド ス ト ラ ン ド マ ツ ト	ク ロ ス	ロ ー ビ ン グ ク ロ ス	ロ ー ビ ン グ (連 続)	ロ ー ビ ン グ (カ ツ ト)	コ ン テ イ ニ ヨ ア ス マ ツ ト	不 飽 和 ポ リ エ ス テ ル	ビ ニ ル エ ス テ ル	エ ポ キ シ 他	金 属					F R P	木	開 放 (片 面 型)	密 閉 (両 面 型)	常 温
HLU法	○	○	○	○			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	10~60	0~接触圧	30分~1日
SPU法						○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	10~60	0~接触圧	30分~1日
FW法			○	○			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	10~100	巻付け張力	5~200kg/hr
遠心成形法				○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	10~100	遠心力	5~200kg/hr
ブルルージョン法	○	○		○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	80~120	0~2	0.3~5m/分
連続積層成形法	○	○		○			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	80~120	0~2	1~18m/分
レジンインジェクション法	○	○	○			○ フォーム	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	20~60	1~7	5~90分
コールドプレス法	○	○				○ フォーム	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	20~50	0.2~5	5~20分
バッグ法	○	○	○	○		○ フォーム	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	20~170	0.8~7	30分~1日
金 型 成 形 法	プリフォーム	○				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	100~130	7~50	1~10分
	マット	○				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	100~130	7~50	1~10分
	プリレグ	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	100~180	7~200	1~30分
	SMC		○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	120~160	40~150	1~10分
	BMC					○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	120~160	30~100	0.5~5分



(最新複合材料技術総覧より抜粋)

図 - 2. 4 FRPの成形法

2. 4 製品紹介

(1) CFRP

(東京製綱㈱ CFRP技術資料より抜粋)

供試材をCFCC 1×7 12.5φとし、PC 1×7 12.4φ (JISG-3536-1981相当品)と比較した結果を表2-2に示します。当社では、相当量のデータが蓄積されており、ばらつきを考慮した品質保証体制が構築されています。

特性	項目	CFCC 1×7 12.5φ				PC 1×7 12.4φ				
		平均値	標準偏差	変動係数	n数	平均値	標準偏差	変動係数	n数	
一般機械的特性	引張強度(kgf/mm ²)	334(213)	14(9)	4.30	51	195	1.2	0.60	15	
	切断荷重(kgf)	16,200	698	4.30	51	18,170	110	0.60	15	
	切断時伸び(%)	1.60	0.046	2.84	14	6.40	0.53	8.2	15	
	弾性係数(kgf/mm ²)	21,900 (14,000)	136 (91.6)	0.654	14	20,140	152	0.75	5	
	単位重量(g/m)	164	2.38	1.45	17	729				
	計算断面積(mm ²)	49(76)				93				
静的特性	リラクゼーション(%)	20℃×0.8Pu×10Hr	0.66	0.04	6.1	3	1.40	0.09	6.4	3
		60℃×0.8Pu×16Hr	2.46	0.32	7.7	3	5.80	0.20	3.4	3
	クリープ(%) 130℃×60%×1,000Hr	0.04				0.07				
	線膨張係数(1/℃)	0.6×10 ⁻⁶				12×10 ⁻⁶				
	比抵抗(μΩcm)	3,000				12				
動的特性	引張疲労(S-N CURVE)	別紙参照				実施予定				
	衝撃切断効率(%)	88				90				
	曲げ剛性 EI(kgf·cm ²)	5,800				21,000				
	曲げ引張効率	別紙参照				—				
保持力	耐熱特性	別紙参照				—				
	コンクリート付着力 (150埋込み: kgf/cm ²)	73.7				29.1				

括弧内は、炭素繊維+樹脂の断面積にて算出したものです。

図-2.6 CFRPとPCの特性比較(その1)

各種の特性比較

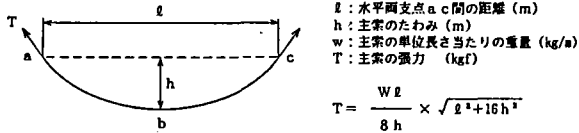
資料CFCC-3 CFCCの静的特性

3-1 軽量特性

スチールの約1/5の重量しかありませんので、この軽量特性を活かした様々な使い方が考えられます。ここでは、サグの計算例及び水中に於ける重量を示します。

①サグの計算例

吊橋の主索等は、一般的にカタナリー曲線を描いて使用されていることが知られています。カタナリー曲線として、算出した場合の張力とたわみ等の関係式は、下式となります。



カタナリー曲線

CFCC 1×19 25.0φについて、及びスチール製垂釣めつき鋼より線 1×19 25.0φについて最大支点間距離を求めた結果を表3-1に示します。ここで、主索の安全率は3とし、 $l/h=10$ として算出しました。

最大支点間距離 (m)

区分	直径 (mm)	切断荷重 (kgf)	単位重量 (kg/m)	最大支点間距離 (m)
CFCC 1×19	25.0	45,500	0.58	19,400
垂釣めつき 1×19	25.0	52,700	3.09	4,220

また、上記ケーブルに閉し、種々、支点間距離を変えた場合の張力の変化を表3-2に示します。この場合も $l/h=10$ としています。

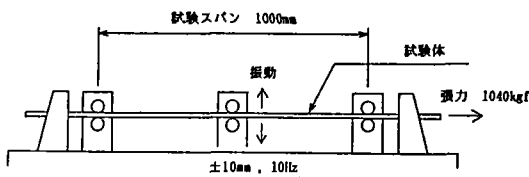
支点間距離と張力との関係

区分	支点間距離 (m)							
	100	500	1,000	1,500	2,000	3,000	4,000	
張力 (kgf)	CFCC 1×19	78	390	780	1,170	1,560	2,340	3,120
	垂釣めつき 1×19	420	2,050	4,100	6,240	8,320	12,480	16,640

資料CFCC-4 CFCCの動的特性

4-2 振動疲労特性

現在、ヨット用主索として、ステンレス製ロープが多用されています。激しい環境下にさらされる為、耐食性に優れていること、また、最近のニーズとして、ヨットの軽量化が強く要望されています。CFCCがそのような要望に応えられることは言うまでもありませんが、さらに、ヨット用ロープは、風圧等により、著しい振動疲労を受けます。このような観点から、下記、振動試験機を使用してステンレス製ロープとの対比を実施しました。



振動試験方法

振動試験結果

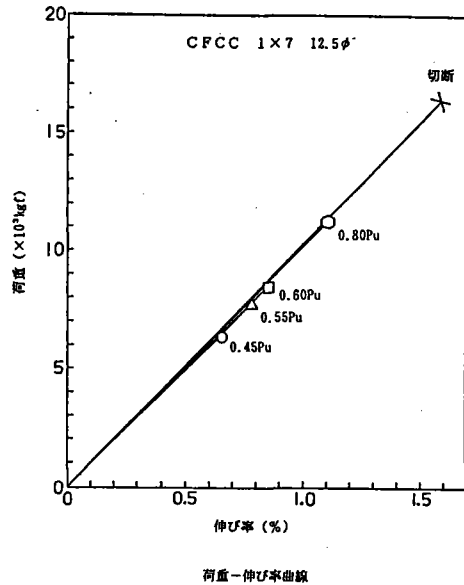
供試体	保証切断荷重 (kgf)	試験結果
CFCC 1×7 5.0φ	1,800	200万回繰り返し後も全く異常なし。
ステンレス製ロープ 1×19 5.0φ SUS 316	1,810	24万回にて切断

資料CFCC-3 CFCCの静的特性

3-3 静的引張特性

切断荷重の平均値は、使用炭素繊維の集合切断荷重の約90%程度です。ばらつきを考慮して、保証切断荷重は集合切断荷重の80%で設定しています。

荷重-伸び率曲線の一例を図3-4に示します。切断に至るまで、降伏点のないほぼ弾性体の変形を示します。繰返し荷重を負荷させても残留歪みが、ほとんど発生しないのが特徴です。切断時伸びは塑性域がないので低くなります。図中の曲線は、荷重の履歴を『0→0.45Pu(保証切断荷重の45%)→0→0.55Pu→0→0.66Pu→0→0.80Pu→切断』と負荷させた場合のもので、

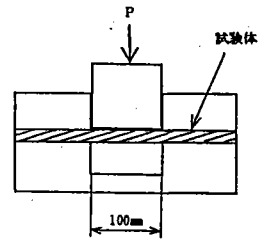


資料CFCC-4 CFCCの動的特性

4-4 セン断特性

CFCCは、異方向性を持った材料であり、引張り方向には高い特性値を示しますが、横方向のせん断には低い特性値しか持っていません。図4-4のような方法でせん断強度を測定した結果を表4-2に示します。

御使用の際は、僅力せん断力がかからないよう配慮ください。



せん断強度の測定方法

せん断強度

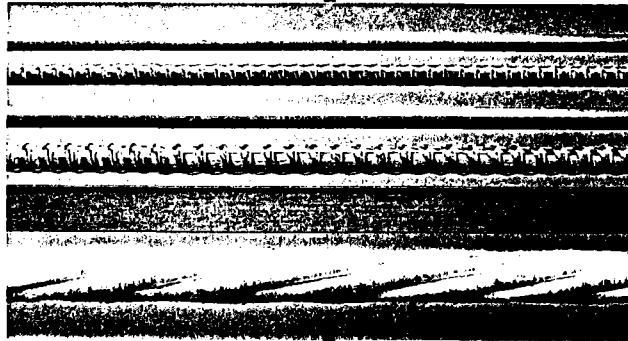
種類	せん断強度 (kgf/mm ²)	状況
CFCC 1×7 12.5φ	18.5	切断
PC 1×7 12.7φ	>24.2	未切断

図-2.7 CFRPとPCの特性比較(その2)

積み重ねた 実証研究の中で 誕生

アラミドPCは

- 1 緊張材としてのAFRP
ロッドの開発
 - 2 定着工法の開発
 - 3 設計・施工法の確立
- の3つの大きな要素技術を確立することによって初めて実用化が可能になりました。



φ6mm 丸径ロッド

φ6mm 異形ロッド

φ8mm 丸径ロッド

φ8mm 異形ロッド

平板ロッド

φ12.5mm ストランド

1 緊張材としての AFRPロッドの開発

AFRPロッドをPC緊張材として用いる場合、安定した高い引張強度が要求されます。住友建設(株)は、緊張材として用いるAFRPロッドの径や形状についての研究を積み重ね、クサビ定着用に表面を被覆した丸径ロッド、コンクリートとの付着特性を高めた異形ロッドや7本よりストランドを開発しました。

2 定着工法の開発

アラミドPCでは、AFRPロッド用にクサビ定着法と付着定着法の二つの新しい定着方法を開発しました。定着体の種類も一本留めから大容量の19本留めまで各種類のものを準備しています。

丸径ロッド・異形ロッド

種類	引張強度 (tf)	断面積 (cm ²)
φ6	5.1	0.283
φ8	10.4	0.503
3φ6	15.3	0.848
7φ6	35.7	1.979
12φ6	61.2	3.393
19φ6	96.9	5.372

7本よりストランド

種類	引張強度 (tf)	断面積 (cm ²)
φ12.5	17.5	0.970
12φ12.5	210.0	11.634

(開発中)

ロッド形状	—	φ6mm(丸断面)
マトリックス樹脂	—	ビニルエステル
繊維含有率(Vf)	%	65
引張強度	Kgf/mm ²	190
引張弾性率	Kgf/mm ²	5,400
破断時伸び	%	3.7
純リラクセーション率	%	7~14

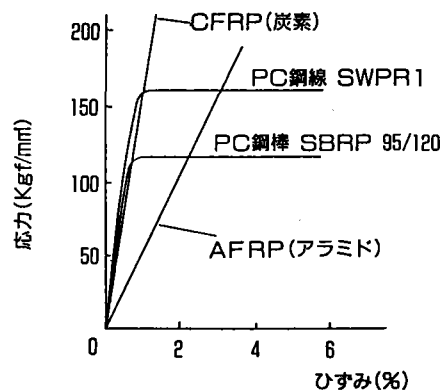


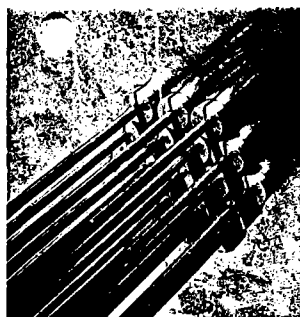
図-2.8 AFRPの製品紹介(その1)

3 設計・施工法の確立

住友建設㈱ではアラミドPCを実用化するにあたり、各種の材料試験や室内試験によりAFRPロッドの物理的・力学的な特性を把握しアラミドPCの設計・施工法を確立いたしました。さらに、これらの技術の実証のために、実橋規模のプレテン橋(橋長12.5m)およびポステン橋(橋長25.0m)を建設しています。

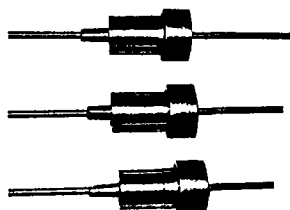
■クサビ定着体

AFRPロッド用のクサビ定着体として、母材のアラミド繊維を



多数本留めクサビ定着体

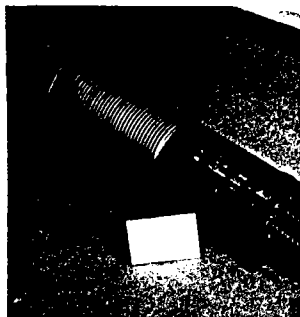
傷つけないように工夫した特殊形状の1本留め定着体を開発しました。この1本留めの定着体は錆びる心配のないアルミ合金製で、これを支圧板に多数本配置することによって任意の容量の定着体にすることができます。



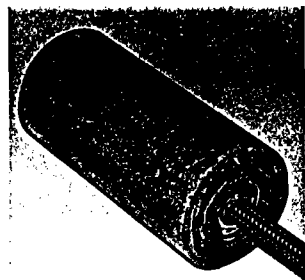
1本留めクサビ定着体

■付着定着体

AFRP異形ロッドをモルタルまたは樹脂の中に埋込み、その付着力でロッドを定着させる付着定着体を開発しました。付着定着体は、小型で大容量のものが可能で、現在、1本、3本、7本、12本、19本留めのものが用意されています。



19本留め付着定着体



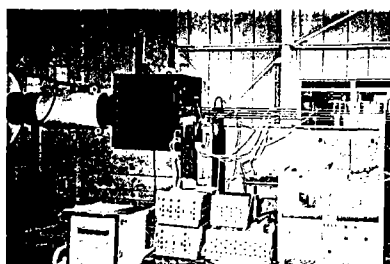
FRP製7本留め付着定着体



L=10.0m

ポステンション
大型桁供試体

疲労試験



AFRPロッド

疲労試験



L=2.0m

プレテンション桁供試体

載荷試験

図-2.9 AFRPの製品紹介(その2)