

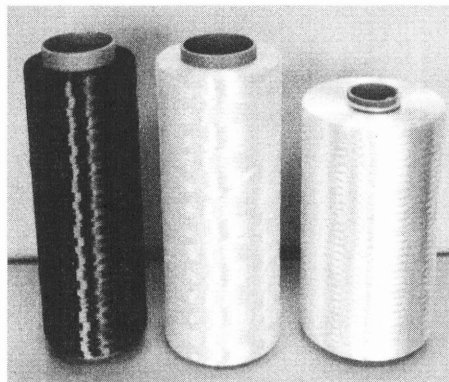
6. 新素材ケーブルの動向

6.1 ケーブル用新素材の材料特性

新素材ケーブルの1つであるFRPケーブルは、長手方向に連続した繊維を樹脂で硬化させてケーブル部材としたものである。これらの繊維に高性能な素材を用いることによって、用途に応じてケーブル部材に様々な特性が付与される。ここでは、繊維の特徴、および、ケーブル部材としての材料特性について述べる。さらに、新素材と鋼、およびアルミニウムと鋼とのハイブリッドケーブルについても紹介する。

6.1.1 繊維の種類と特徴

FRPケーブルの材料特性は、素材となる繊維の機械的性質に大きく依存する。ケーブルの原材料に使用されている繊維の種類は、写真-6.1.1に示すように、炭素繊維、アラミド繊維、ガラス繊維のほか、PBO繊維などが挙げられる。



左から、炭素繊維(黒色)、アラミド繊維(黄色)、ガラス繊維(無色透明)

写真-6.1.1 繊維の外観¹⁾

(1) 炭素繊維

一般に、建設材料として使用される炭素繊維製品は、ポリアクリロニトリル(PAN)を原料とするPAN系と、石炭・石油ピッチを原料とするピッチ系とに大きく分類される。主に、PAN系は高強度、ピッチ系は高弾性率の特徴を有するといわれている。また、図-6.1.1に示すように、炭素繊維そのものの引張強度および引張弾性率は非常に高く、強度および弾性率により5つのタイプに性能が分類され、目的に応じて使い分けられている。ケーブル用の材料としては、主に高弾性率タイプ(HM)のPAN系の炭素繊維製品が使用されている。

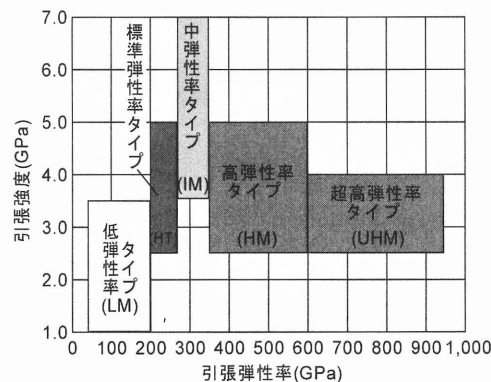


図-6.1.1 炭素繊維製品の機械的性能別分類²⁾

(2) アラミド繊維

アラミド繊維とは、その分子骨格が芳香族(ベンゼン環)からなるポリアミド繊維(aromatic polyamide fiber)である。従来の脂肪族ポリアミド繊維、すなわちナイロンと区別して、芳香族ポリアミド繊維には、アラミド(aramid)という一般名がつけられた。アラミド繊維は、その分子骨格が全体的に直線状のパラ型タイプと、ジグザグ状のメタ型タイプに大別される。一般的には、機械的特性に優れたパラ型アラミド繊維が用いられている。1972年に米国デュポン(Du Pont)がアラミド繊維を商品名「ケブラー(Kevlar)」として製品化したのが始まりといわれている。

(3) ガラス繊維

ガラス繊維は、熔融ガラスを細く引き延ばして固化した繊維であり、他の高性能繊維と比べると早くから開発され、既に断熱材や複合材料用補強材に大量に使用されている。長繊維用ガラス組成には、Eガラス(無アルカリガラス)、Cガラス(含アルカリガラス)、Aガラス(耐アルカリガラス)、Sガラス(Eガラスの引張強さ、弾性率を改善したもの)などがある。特に、製造されている長繊維の90%以上はEガラスである。ガラス繊維は無色透明で色材を自由に選択でき、安価であることもあり、最も汎用的に用いられている。しかし、炭素繊維やアラミド繊維など他の高性能繊維に比べて機械的性質が劣るため、ケーブル部材よりも構造用部材の材料として用いられることが多い。

(4) PBO繊維

PBOはポリパラフェニレンベンゾビスオキサゾールの略である。1980年代初めに米国空軍がアラミド繊維より高性能な素材の開発を目指し、民間に委託して開発された。現在、東洋紡がPBO繊維を商品名「ザイロン」として生産している。機械的性質はパラ型アラミド繊維よりも優れており、その力学的な特性を活かして、緊張材、補強材、防弾製品などへの適用が考えられている。問題点は耐光性に劣ることであるが、原糸製造段階での耐光性の改良が進められている。また、パラ型アラミド繊維に比べ、単位重量当たりで3倍の価格であるが、今後の増産と市場の拡大により、価格の低下が期待されている。

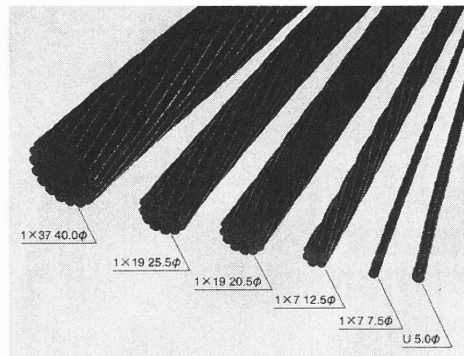
これらの繊維における代表的な機械的性質を表-6.1.1に示す。繊維自身は、その長手方向にのみ卓越した特徴があるため、同表より、メタ型アラミド繊維を除いて、高強度、高弾性率の特性を有していることがわかる。また、従来の鋼材と比べて、軽量であり、破断伸びが小さいことも大きな特徴といえる。機械的性質のうち、炭素繊維が最も優れ、次いで、PBO繊維、パラ型アラミド繊維、およびガラス繊維の順となっている。これらの繊維の種類によって、FRPケーブル部材としたときの基本的な機械的特性が決定される。

表-6.1.1 繊維の機械的性質³⁾

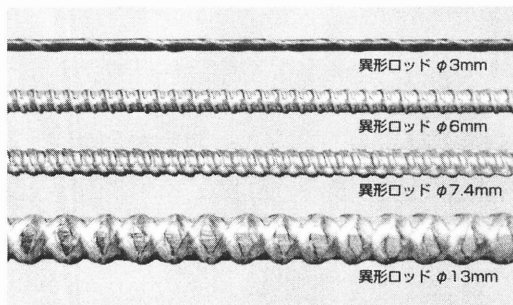
特性	単位	炭素繊維		アラミド繊維		ガラス繊維	PBO繊維
		PAN系	ピッチ系	パラ型	メタ型	E-type	—
密度	g/cm ³	1.74~1.97	1.40~2.18	1.39~1.45	1.38	2.54	1.54~1.56
引張強さ	N/mm ²	1,960~7,060	980~3,430	2,350~3,430	215~375	2,155	5,685
引張弾性率	kN/mm ²	225~685	330~825	55~145	7~18	70	175~265
破断伸び	%	0.5~2.4	0.5~2.0	1.5~4.5	22~38	4.0	2.5~3.5

6.1.2 FRPケーブルの成形方法と製造方法

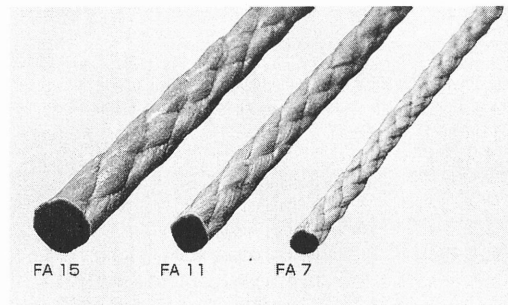
FRPケーブルの成形方法および製造方法は、ケーブル部材の断面形状で大きく分けられる。写真-6.1.2には、FRPケーブル部材の主な形状として、ストランド、ならびに、鉄筋タイプおよび組紐タイプのロッドの外観を示す。ここでは、これらの形状ごとの成型方法および製造方法について述べる。



(a) ストランド



(b) 鉄筋タイプのロッド



(c) 組紐タイプのロッド

写真-6.1.2 FRPケーブル部材の外観^{4),5)}

(1) ストランド(より線)

ストランド状のFRPケーブル部材は、樹脂を含浸させた連続繊維束(ストランドプリプレグ)をより合わせて素線を製造し、その素線をさらにより合わせ、その後樹脂を硬化させて作製する。より合わせる素線の数を増やすことにより、保証耐力の大きなケーブル部材とすることができる。

また、保証耐力をより大きくするためには、これら連続したストランド状のFRPケーブル部材を、複数本平行に束ねるか、あるいは緩やかな撚り角度でより合わせて製造される。

(2) 鉄筋タイプのロッド

断面形状がロッド状の場合、一般的には、構成する各種繊維に樹脂を含浸させながら連続した引き抜き成形方法によって製造される。ただし、ケーブル材は一般に長尺で使用されるため、部材が連続して巻き取れる大きさの断面で製造される。保証耐力の大きなケーブル部材は、ストランドの場合と同様に、これらのロッドの連続した部材を複数本平行に束ねて製造される。

(3) 組紐タイプのロッド

組紐状のFRPケーブル部材は、まず連続繊維を組紐状に編み、それに樹脂を含浸、硬化させ、連続して巻き取りながら製造される。

6.1.3 FRPケーブルの材料特性

FRPケーブルの材料特性は、前述のとおり、使用する繊維の機械的性質により決定される。ただし、繊維自身の引張強度および弾性係数は高いが、連続した繊維を結合するための樹脂の弾性係数がかなり低いことから、FRPケーブル部材としての引張強度および弾性係数は低下する。一般に、ケーブル部材の繊維体積含有率(ボリュームフラクション) V_f は60%程度である。

FRPケーブルの主要な材料特性について、繊維の種類ごとに図-6.1.2~5および表-6.1.2に示す。

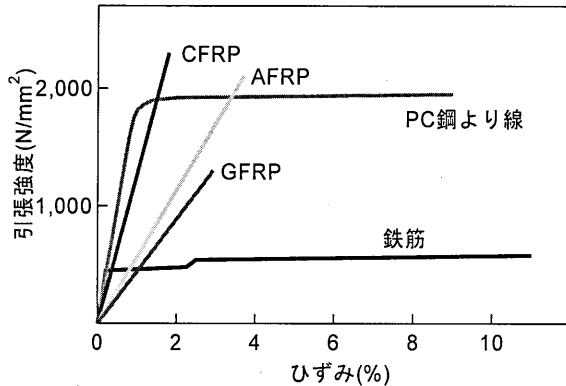


図-6.1.2 応力-ひずみ曲線⁴⁾

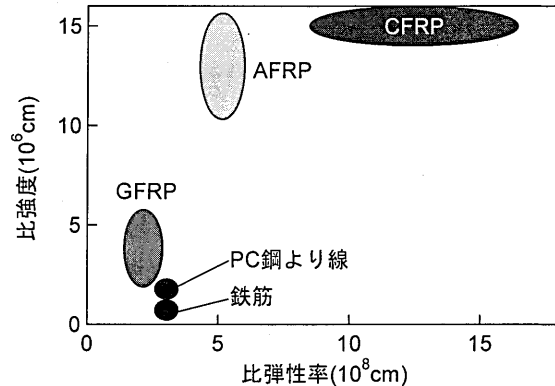


図-6.1.3 比強度-比弾性率⁴⁾

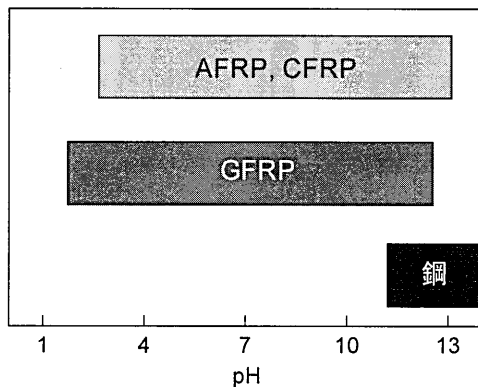


図-6.1.4 使用可能pH領域⁴⁾

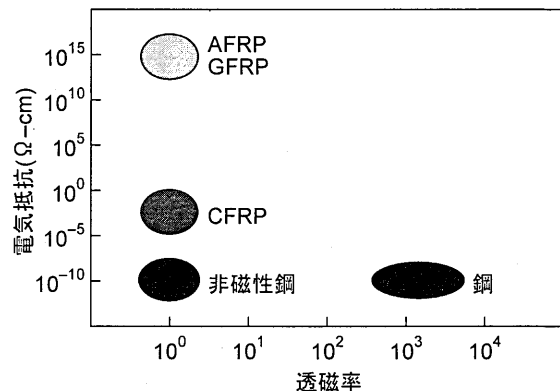


図-6.1.5 電磁気特性⁴⁾

まず、図-6.1.2に示した応力-ひずみ曲線より、FRPケーブル部材は、破断に至るまで弾性的な挙動を示し、従来のPC鋼より線と比べて、破断伸びが小さいことがわかる。また、引張強度は、CFRPが最も高く、AFRPではPC鋼より線と同等、GFRPでは鉄筋よりも強度は高いが、CFRP、AFRPに比べてかなり低い。

図-6.1.3は、比強度-比弾性率の関係を示したものである。ここに、比強度および比弾性率は、引張強度および弾性係数を単位体積重量でそれぞれ除したものと定義される。同図より、FRPケーブルの比重はPC鋼より線と比べて、 $1/4 \sim 1/6$ 程度であることから、比強度および比弾性率はPC鋼より線と比較して大きくなる傾向がある。

図-6.1.4~5からは、FRPケーブルについては、使用可能pH領域も鋼に比べて適用範囲が大きく、耐食性に優れていること、また、非磁性の性質であることがわかる。さらに、CFRPには導電性の性質があるが、AFRPおよびGFRPは絶縁体である。

表-6.1.2から、FRPケーブルの弾性係数はCFRPが最も高いが、後述するように現時点での実用レベルでは、CFRPでも140kN/mm²前後であり、PC鋼より線より低下することがわかる。他のAFRPおよびGFRPではさらに低下する。リラクセーションについては、CFRPではPC鋼より線と同程度であるが、AFRPおよびGFRPではそれよりも大きくなる傾向がある。また、線膨張係数については、CFRPはほとんど温度変化の影響を受けないこと、また、AFRPでは他の素材とは正負が逆の特性を示す。

表-6.1.3には、現在、実用化されているFRPケーブルの保有性能を示す。FRPケーブルには、橋梁用ケーブルあるいは構造用ケーブルとしての規格は未だ規定されていない。したがって、各メーカーで開発されたケーブルの性能を確認しながら使用している状況である。同表より、FRPケーブルの保証耐力は、シングルケーブルでは14~1,070kN、マルチケーブルでは186~2,469kN

表-6.1.2 FRPケーブルにおける各種材料別の基本性能⁴⁾

特性	単位	CFRP	AFRP	GFRP	PC鋼より線	鉄筋
比重	g/cm ³	1.5	1.3	1.7~1.9	7.85	7.85
引張強度	N/mm ²	1,900~2,300	1,400~1,800	600~900	1,700~1,900	490
弾性係数	kN/mm ²	130~420	50~70	30	200	210
破断伸び	%	0.6~1.9	2~4	2	6	10
リラクセーション	%	1.5~3	5~15	10	1~2	—
線膨張係数	10 ⁻⁶ /°C	0.6	-2~-5	9	12	12
耐食性	—	○	○	○	×	×
非磁性	—	○	○	○	×	×

表-6.1.3 FRPケーブルの保有性能¹⁾

	①CFCC	②リードライン	③NACCストランド	③テクノーラ	⑤FIBRA	⑥コンポーズ
断面形状	ストランド	ロッド	ストランド	ロッド	組紐	ロッド, 矩形
繊維	PAN系炭素繊維	ビッチ, PAN系炭素繊維	PAN系炭素繊維	パラ系アラミド繊維	パラ系アラミド繊維	パラ系アラミド繊維
素材メーカー	東邦レーヨン(株)	三菱化学産資(株)	東レ(株)	帝人(株)	東レ・デュボン(株)	東レ・デュボン(株)
加工メーカー	東京製綱(株)	三菱化学産資(株)	日鉄コンボジット(株)	帝人(株)	ファイバックス(株)	宇部日東化成(株)
マトリックス樹脂	エポキシ樹脂	エポキシ樹脂	エポキシ樹脂	ビニルエステル樹脂	エポキシ樹脂	ビニルエステル樹脂
引張強さ(N/mm ²)	2140	2550	1275~2022	1760	1450	1147~1470
有効ヤング係数(kN/mm ²)	137	147	118~137	52.9	62.5	66
破断伸び(%)	1.6	1.6	2.0	3.7	2.0	1.9
純リラクセーション(%)	1.3	2~3	3	10	12	11
	(1,000時間後, 0.7Pu, 20°C)	(10,000時間後, 0.5~ 0.8Pu, 20, 40°C)	(1,000時間後, 0.7Pu, 20°C)	(1,000時間後, 0.5~ 0.8Pu, 20, 40°C)	(1,000時間後, 0.4Pu, 20°C)	(1,000時間後, 0.6Pu, 20°C)
線膨張係数(×10 ⁻⁶ /°C)	0.6	0.68	0.6	-3	-5	-8
比重	1.5	1.6	1.74	1.3	1.3	1.17~1.23
シングルケーブル	1×7 φ7.5 57 1×7 φ10.5 104 1×7 φ12.5 142	φ8 111 φ10 170	1×7 φ12.5 196 1×7 φ15 274	D3 14.3 D6 56.9	FA7 58 FA9 88	RTA2.5 24.5 FTA10 98.0
呼称(寸法)保証耐力(kN)	1×7 φ15.2 199 1×7 φ17.8 262 1×19 φ25.5 467 1×37 φ40.0 1,070	D8 104 D10 162	1×19 φ21 412 1×19 φ25 588 1×37 φ30 686 1×37 φ35 980	D7.4 81.4 D13 205.0	FA11 117 FA13 176 FA15 235	FTA18 176.4
マルチケーブル	φ12.5×3 360 φ15.2×3 500 φ12.5×6 710 φ15.2×7 1,160 φ15.2×12 1,980	D8×2 186 D8×4 373 D8×7 654 D8×10 935 D10×2 291 D10×4 582 D10×7 1,009 D10×10 1,450	φ15×3 823 φ15×5 1,372 φ15×7 1,920 φ15×9 2,469	D6×7 350 D6×12 600 D7.4×7 525 D7.4×9 675 D7.4×12 900 D7.4×19 1,300	FA13×6 1,059 FA15×6 1,412	

程度である。

FRPケーブルは、基本的に、繊維を長手方向に配置した一方向強化材であるため、引張部材の性能としては非常に都合がよいが、一方で、側圧強度や面せん断強度が低い。特に、ケーブルの定着部や偏向部ではせん断応力や曲げ応力を受けることから、それらの部位では設計の際に十分留意する必要がある。なお、表-6.1.3に示したケーブルの定着構造については、特に示していないが、既に実用的な定着体が提案されている。

6.1.4 ハイブリッドケーブル^{6),7)}

a) 新素材と鋼とのハイブリッド

新素材ケーブルは、耐食性に優れ、軽量かつ高強度であるが、破断伸びが小さく、脆性的に破壊する性質がある。一方、鋼線は、降伏点以降の塑性変形および破断伸びが大きいという特徴を持ち、既に十分な実績があるが、耐食性に欠点がある。そこで、新素材ケーブルと鋼線の互いの短所をカバーし、両者の利点がともに発揮できるように、鋼線の周りを新素材で覆うハイブリッドケーブルの研究が行われている。

ハイブリッドケーブルには、図-6.1.6に示すような2種類のものがある。図中の(a)は、鋼線または鋼より線のまわりを新素材素線で束ねたものを、また、(b)は、鋼線または鋼より線を新素材と充填材であるエポキシ樹脂などで覆ったハイブリッドケーブル素線を数本に束ねたものを示している。さらに、新素材の応力-ひずみ関係を直線で、また、鋼線および鋼より線の応力-ひずみ関係をひずみ硬化のないバイリニア型でモデル化すると、ハイブリッドケーブル素線の応力-ひずみ関係は、模式的に、図-6.1.7のように描ける。

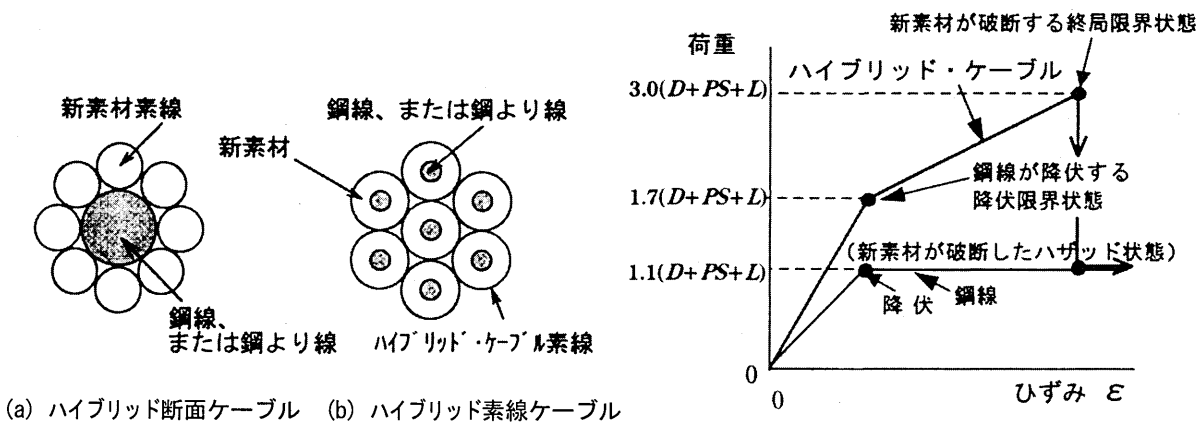


図-6.1.6 ハイブリッドケーブルの種類

図-6.1.7 ハイブリッドケーブル素線に

おける荷重-ひずみ曲線の一例

図中に示した荷重倍率は、安全率の考え方から任意に設定することが可能であり、例えば、新素材は、現時点で十分な実績がなく、品質のばらつきが大きいいため、構造部材として用いる場合には、安全率 γ を大きく取ることなどが考えられる。図-6.1.7は、具体的に、以下の3つの限界状態について想定した例を示したものである。

降伏限界状態：鋼線あるいは鋼より線が降伏する降伏限界状態で、安全率は、鋼主桁と同様に $\nu_Y = 1.7$ とする。

終局限界状態：鋼線あるいは鋼より線はすでに降伏し、新素材が破断する終局限界状態で、安全率は $\nu_U = 3.0$ とする。

ハザード状態：事故などによって、新素材が破断したハザード状態で、その状態でも橋梁が崩壊しないように、安全率は $\nu_R = 1.1$ とする。

このようなコンセプトの下で、ハイブリッドケーブルの新素材と鋼線の断面積比は、各限界状態におけるつり合い条件式に基づいて決定され、その具体的な手順が示されている。さらに、試設計されたハイブリッドケーブルを斜張橋およびニールセン・ローゼ橋へ適用した場合の得失について、弾塑性有限変位解析により、その適用可能性が確かめられている。実用化に向けた課題としては、強度発現率の高いハイブリッドケーブルの製作方法や、炭素繊維を用いたハイブリッドケーブルの場合における電食の問題などが挙げられている。

b) アルミニウムと鋼とのハイブリッド

アルミニウムと鋼とをハイブリッドしたものに、アルミ覆鋼線 (Aluminum-clad steel wire, AC線, 以下, AC線と呼ぶ) がある。これは、送配電線などの電気用導体として使用することを目的に、鋼線のまわりにアルミニウムを厚く被覆して、アルミニウムと鋼線を強固に結合させたものである。日本電線工業会 (JCS) で規格整備⁸⁾され、実用化されている。純アルミに匹敵する耐蝕性能を有し、導電率も高いことから、海岸地帯など、環境の厳しい地域に多く使用されている。

素線の断面形状の一例を図-6.1.8に示す。素線の製造過程の相違により、アルモウエルド線 (AW線) とアルミ被覆線 (AS線) があるが、これらを総称してAC線と呼んでいる。AW線は、鋼線の上に、粉末状のアルミニウムを熱と圧力を加えて焼結させ、圧着被覆した後、それを伸線加工したものである。AS線は、連続押出機によって鋼線のまわりにアルミニウムを均一に押し出し、圧着被覆した後、それを伸線加工したものである。アルミニウムと鋼は完全な原子間結合により接着されており、大きな側圧を受けた場合であっても、アルミニウムは塑性変形するものの剥離することはない。

表-6.1.4 AC線の種類⁸⁾

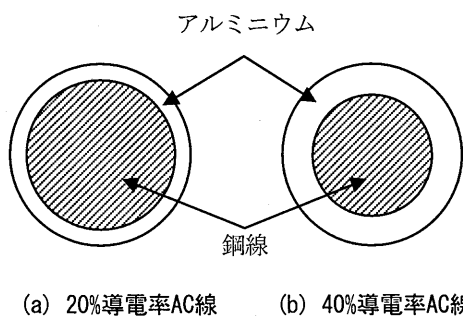


図-6.1.7 断面形状の一例

名称	種類		記号
	特性		
	導電率 (%)	引張強さ (MPa)	
14%導電率アルミ覆線	14以上	1,570以上	14AC
20%導電率アルミ覆線	20.3以上	1,320以上	20AC
23%導電率アルミ覆線	23以上	1,270以上	23AC/1270
		1,230以上	23AC/1230
27%導電率アルミ覆線	27以上	1,080以上	27AC
30%導電率アルミ覆線	30以上	883以上	30AC
35%導電率アルミ覆線	35以上	686以上	35AC
40%導電率アルミ覆線	40以上	686以上	40AC

JCSでは、アルミニウムの被覆厚に応じて、表-6.1.4に示すように、導電率および引張強さが規

定されている。素線径は2.3～4.8mmの範囲（11種類）で規格化されている。製造されているAC線の機械的性質の一例を表-6.1.5に示す。アルミニウムの割合が増えるほど、アルミニウムの特性が強くなるため、引張強さ、弾性係数および密度は小さくなり、線膨張係数は大きくなる。

表-6.1.5 AC線の機械的性質⁹⁾

種類	導電率 (%)	記号	引張強さ (MPa)	弾性係数 (GPa)	線膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	密度 (g/cm^3)
14%導電率アルミ覆線	14以上	14AC	1,570以上	169.7	12.0	7.14
20%導電率アルミ覆線	20.3以上	20AC	1,320以上	154.9	12.6	6.53
23%導電率アルミ覆線	23以上	23AC/1270	1,270以上	149.1	12.9	6.27
		23AC/1230	1,230以上	149.1	12.0	6.27
27%導電率アルミ覆線	27以上	27AC	1,080以上	140.2	13.4	5.91
30%導電率アルミ覆線	30以上	30AC	883以上	132.4	13.8	5.61
35%導電率アルミ覆線	35以上	35AC	686以上	121.6	14.5	5.15
40%導電率アルミ覆線	40以上	40AC	686以上	108.9	15.5	4.64

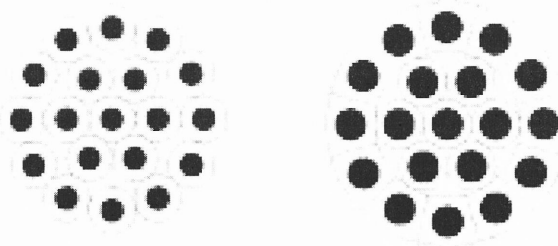
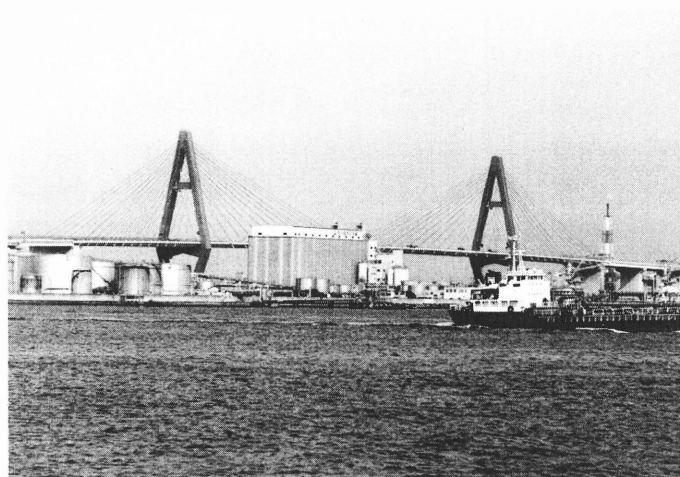


図-6.1.8 ACより線（19本より）の一例⁹⁾

架空送電線等では、これらの素線を複数本より合わせたACより線として使用されている。ACより線の断面形状の一例を図-6.1.8に示す。さらに、延性に富むアルミニウムの性質から、円形断面以外にも任意の形状に加工ができる。ここでは特に示していないが、定着構造も容易である。このように、AC線は優れた特徴を有することから、今後、橋梁分野への適用も十分に期待される。

ケーブル系橋梁の写真館



名港東大橋（名古屋市）

6.2 FRPケーブルの構造特性

FRPを用いたケーブル構造としての引張強度、曲げ強度、疲労強度などに関して実施された各種の試験結果や実験データに基づきケーブルの構造特性を紹介する。ここでは、FRPケーブルの中で適用例の多い炭素繊維ケーブル(CFRP)を中心に、計画設計に必要な基本的な強度特性を述べる。

6.2.1 引張強度特性

(1) ケーブルシステム

FRPケーブルは、ストランドをよって集束したより線ケーブルと平行線ケーブルに分類される。ケーブルとしての構造特性は、ケーブルとその端末の定着構造から成るケーブルシステムとして評価される。現在実用化されているケーブルシステムは、表-6.2.1に示す通りである。これらの5種類のケーブルの引張特性に関する試験結果を、表-6.2.2に示す。

表-6.2.1 試験に用いたケーブル¹⁾

種類(品名)	メーカー	繊維	ケーブル構成	ケーブル径	定着形式
①CFCC	東京製綱	炭素繊維	より線ストランド	φ 17.8mm	付着
②NACC	日鉄コボジツト	炭素繊維	より線ストランド	φ 15mm	付着
③BBR	BBR	炭素繊維	平行線ストランド	φ 15mm	付着
④Technora	帝人	アラミド繊維	より線ストランド	φ 12.4mm	付着
⑤Parafil	VSL/LCL	アラミド繊維	繊維をポリエチレンチューブ被覆	φ 22mm	摩擦

ケーブルの定着形式には、図-6.2.1と図-6.2.2に示すように、付着定着と摩擦定着がある。付着定着は、ケーブルと外装されたスリーブ間に充填された樹脂の付着力により荷重を伝達するものである。ケーブルは局部的な曲げやせん断変形に弱いため、充填する樹脂には弾性係数が比較的小さいエポキシ樹脂等が使用されている。摩擦形式は、従来のPC鋼線の定着に類似した方法で、ケーブルをくさびで機械的に定着するものである。

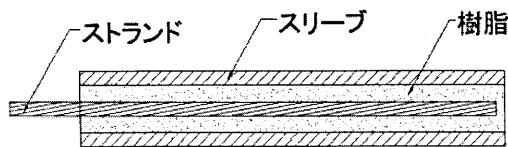


図-6.2.1 付着定着

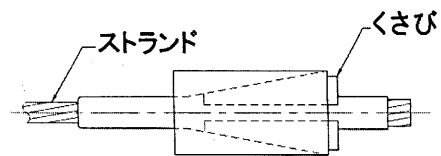


図-6.2.2 くさび定着

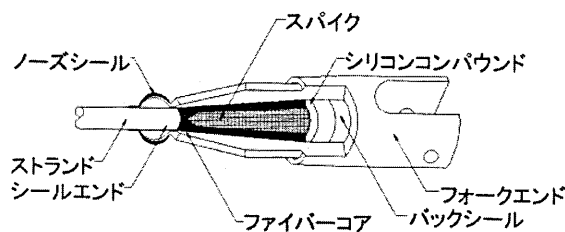


図-6.2.3 円錐スパイクによる定着法²⁾

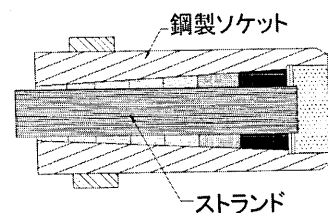


図-6.2.4 多層樹脂による定着法²⁾

この他に、**図-6.2.3**に示すように、円錐状のスパイクで機械的に固定する方法や付着と摩擦を併用した形式もある。また、**図-6.2.4**に示すように、炭素繊維ケーブルの定着法として、樹脂を用いたくさび定着構造²⁾が検討されている。本方法は、異なる弾性係数を持つ充填材料を段階的に設置してケーブルの応力集中の緩和を目指したものである。

(2) 引張強度特性

5種類のケーブルの短期荷重に対する引張強度特性は、PTI³⁾およびFIP⁴⁾の鋼線に関する試験方法に基づいて行なわれた。ケーブル試験体の定着点間長は3.66mである。試験結果を**表-6.2.2**に示す。

表-6.2.2 引張試験結果¹⁾

種類(品名)	公称破断荷重(kN)	平均破断荷重(kN)	伸び(%)	破断形態
①CFCC	280	345	1.5	定着部からの抜け出し
②NACC	275	378	2.0	一般部での素線破断
③BBR	(396)*	315	1.4	抜け出し及び素線破断
④Technora	320	319	3.5	定着部からの抜け出し
⑤Parafil	300	321	1.8	一般部での素線破断

*繊維強度からの計算値

ケーブルシステムの破断荷重は、概ね公称値よりも大きい値を示している。破断時の伸びは、炭素繊維ケーブルは最大でも2%程度となっている。破断形態は、定着部からのケーブルの抜け出しによるものとケーブル部における断線によるものが見られるが、抜け出しによる破断形態の方が断線に比べて破断荷重のばらつきが大きい傾向が見られる。

6.2.2 リラクゼーション特性

リラクゼーションとは、ひずみが一定の条件で引張応力度が低下する現象で、ひずみが一定のもとで生じる引張応力度の減少量を、初期のケーブル引張応力度で除したリラクゼーション率で評価する。**表-6.2.1**に示す炭素繊維ケーブル、アラミド繊維ケーブル、および低リラクゼーションPC鋼線について、公称破断強度の50%を初期引張応力として100万時間試験を行った。試験結果を**図-6.2.5**に示す。

炭素繊維ケーブルのリラクゼーション値は低リラクゼーションPC鋼線以下であり、アラミド繊維ケーブルは炭素繊維ケーブルに比べ数倍大きな値を示した。ここではケーブルのリラクゼーション特性について述べたが、実用に際しては定着構造を含むケーブルシステムとしての特性を把握することが必要となる。

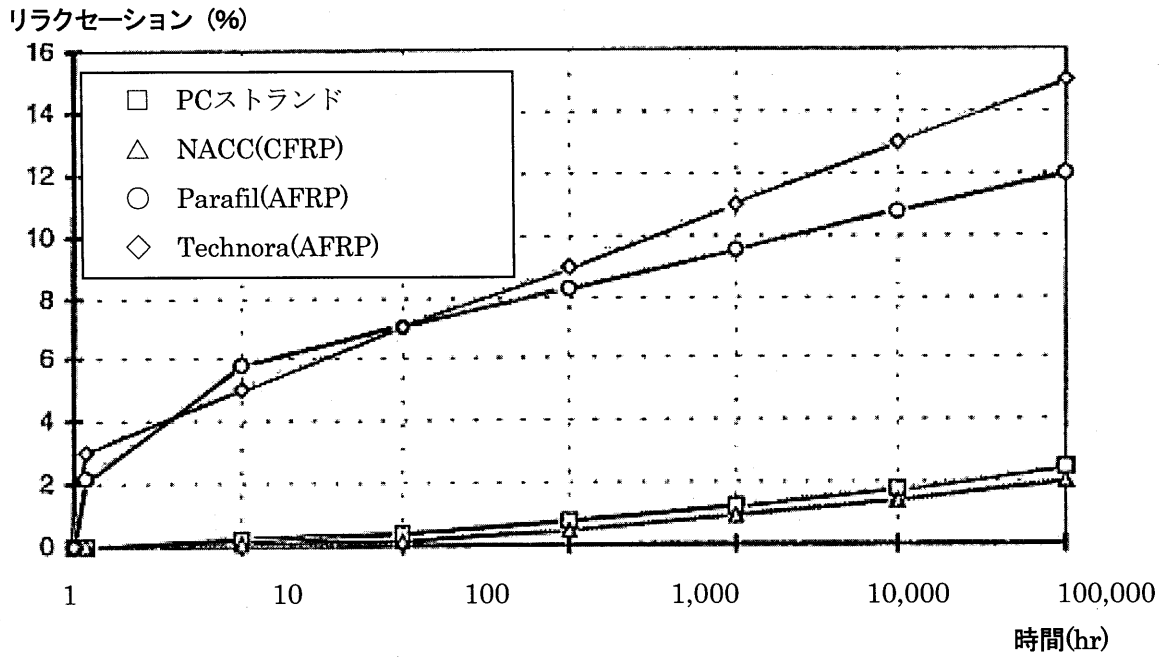


図-6.2.5 FRPケーブルとPC鋼線のリラクゼーション特性¹⁾

6.2.3 疲労特性

図-6.2.6には、FRPケーブルと鋼製ケーブルの疲労試験結果を示す。試験は、公称破断荷重の5%から10%を最小荷重として繰り返し数約500万回の引張疲労試験を行った。なお、試験体は表-6.2.1のケーブルのほか、炭素繊維ロッド（Leadline：三菱化学製）も用いられている。この試験結果から、炭素繊維ケーブルおよびアラミド繊維ケーブルは、PC鋼線に比べ2倍以上高い疲労強度を持つことが示された。

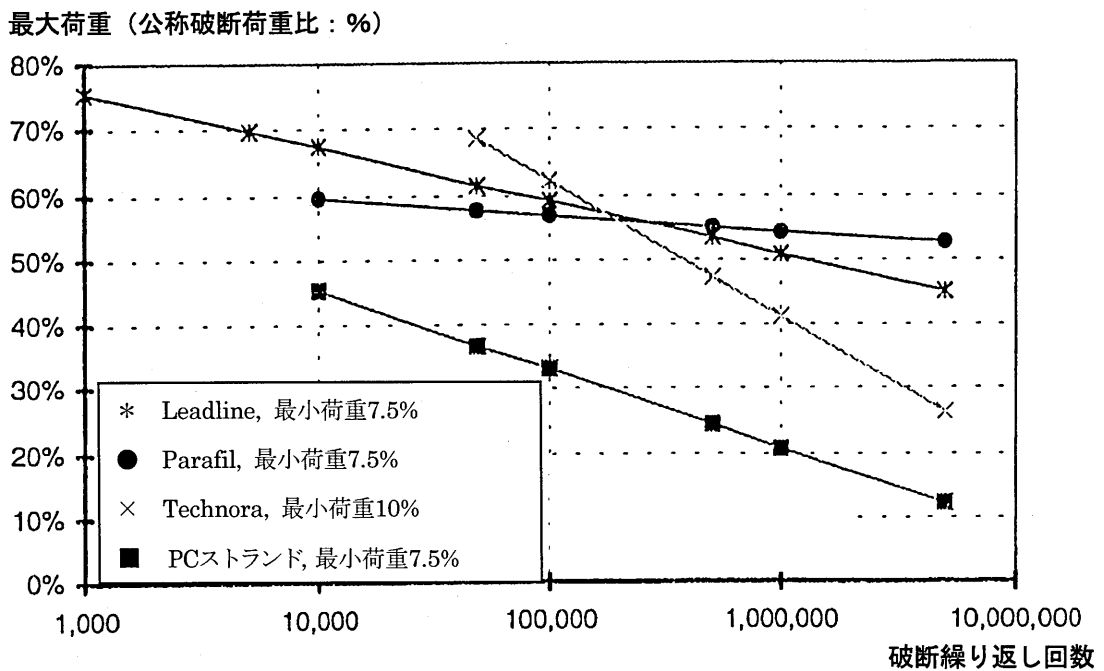


図-6.2.6 FRPケーブルとPC鋼線の疲労特性⁷⁾

また、図-6.2.7には、炭素繊維ケーブル(CFCC)とPC鋼線との疲労試験結果を示す。試験条件は、平均応力500N/mm²から1,500 N/mm²の領域において繰り返し数200万回まで行った。本試験結果において、PC鋼線の疲労限が100 N/mm²前後に対し、炭素繊維ケーブルは300 N/mm²以上あり、炭素繊維ケーブルはPC鋼線の約3倍の疲労強度を示している。

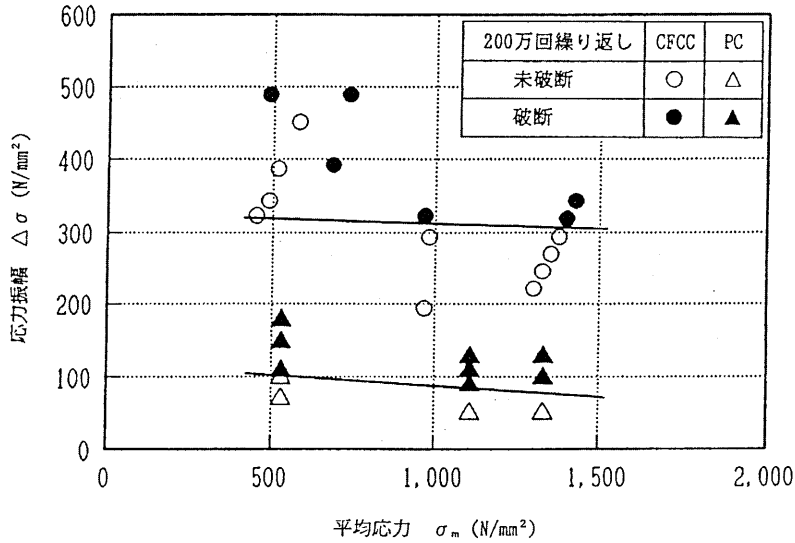


図-6.2.7 炭素繊維ケーブルとPC鋼線の疲労特性⁵⁾

6.2.4 曲げ特性

ケーブルは引張部材として用いるのが基本であるが、曲線配置して使用する場合もあるため、曲げによる引張強度への影響、および曲げ疲労強度に関する試験が行われている。試験体は、φ15mm炭素繊維ケーブル(NACC)である。

曲げ引張試験では、曲げ径の比(D/d: 曲げ直径/ストランド径)を変化させて载荷し、その後引張強度の低減状況を調べている。試験結果を図-6.2.8に示す。曲げ半径が600mm(D/d=80)以上では強度低下は生じていないことがわかる。

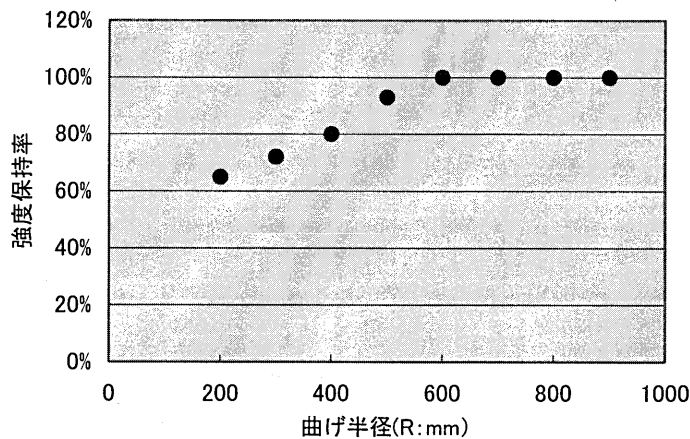


図-6.2.8 曲げが引張強度に与える影響⁶⁾

また、**図-6.2.9**に示すような装置を用いてケーブルに曲げ引張荷重を与えた状態での疲労試験を行い、試験後のケーブルの残存引張強度を確認している。曲げ疲労試験は、上限応力度を破断荷重の0.45倍および6倍の2種類として応力振幅 160N/mm^2 で繰り返し数200万回まで実施されている。この試験条件では引張強度の低下は見られなかった。本試験結果を**表-6.2.3**に示す。

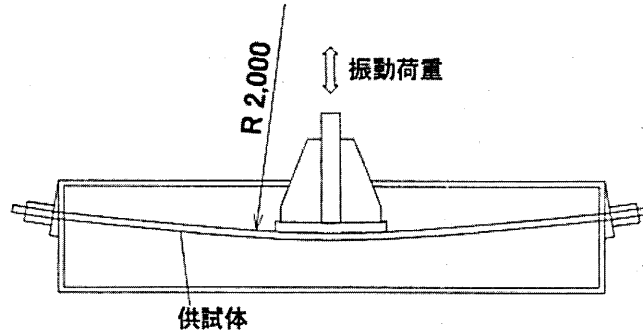


図-6.2.9 曲げ疲労試験装置

表-6.2.3 曲げ疲労試験結果⁷⁾

ケース	载荷条件			強度保持率
	上限応力度	全振幅	繰返し数	
1	900 N/mm^2	160 N/mm^2	200万回	100%
2	1200 N/mm^2	160 N/mm^2	200万回	100%

6.2.5 せん断特性

FRPケーブルは異方性を持つ材料であり、ケーブルの軸方向には高い強度を示す。しかし、軸直角方向のせん断に対しては鋼製ケーブルに比較して大きく低下する。**図-6.2.10**に示す方法により、炭素繊維ケーブル(CFCC)とPC鋼線のせん断強度が測定して比較されている。**表-6.2.4**にせん断強度に関する試験結果を示す。

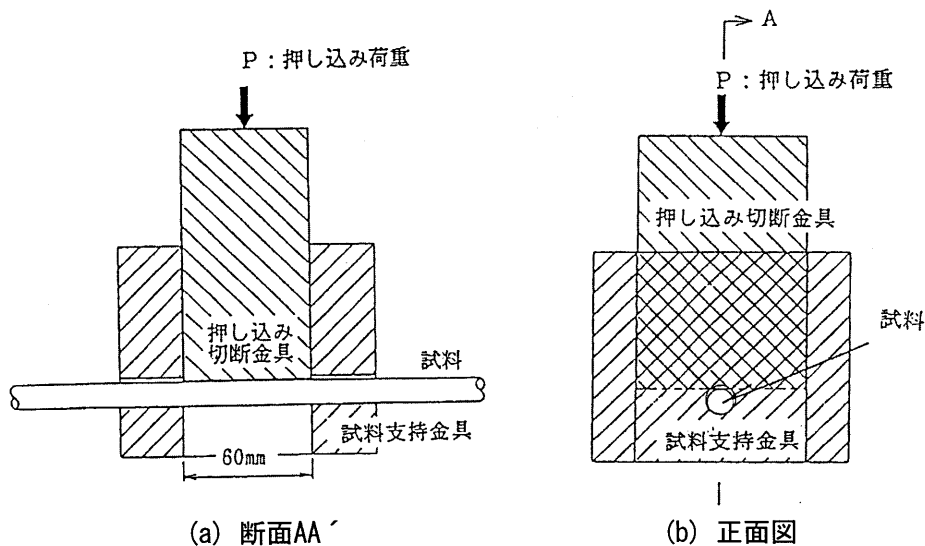


図-6.2.10 せん断強度の測定方法⁵⁾

炭素繊維ケーブル(CFCC)のせん断強度は、同程度の鋼線と比較すると1/3以下となり、CFCCを用いる場合には、極力せん断力を避けるよう配慮することが望ましい。

表-6.2.4せん断強度の測定結果⁵⁾

ケーブル種類	公称破断荷重	せん断強度
CFCC 1×7 φ12.5mm	142 kN	236 N/mm ²
PC鋼線 1×7 φ12.4mm	160 kN	801 N/mm ²

6.2.6 側圧の影響と摩擦特性

ケーブルをバンドやクランプ等で把持した場合、側圧の程度によりケーブルの引張強度に影響を及ぼすため、ケーブル部材の設計では側圧の検討が必要となる。炭素繊維ケーブルに側圧を付加した状態で引張強度を測定し、側圧の引張特性に与える影響が求められている。試験体は、φ36mm炭素繊維ケーブル(NACC)である。図-6.2.11に試験装置を示す。図-6.2.12に示すように、炭素繊維ケーブルは、側圧が20 N/mm²程度以下の範囲では影響を受けないが、20 N/mm²以上の側圧を受けるとその大きさに応じて引張強度が低下する。

側圧20 N/mm²を与えた状態で、鋼製クランプと炭素繊維ケーブルとの摩擦係数を測定した結果、表面状態の乾燥・湿潤状態に関わらず摩擦係数は約0.1程度であった。鋼製ケーブルの場合は、ケーブルとバンド間の摩擦係数は0.15を標準としているため、炭素繊維ケーブルの附属構造物の設計には、これらの特性に留意する必要がある。

また、FRPケーブルを実構造物に適用するにあたっては、構造物の設計的な対応⁷⁾とともに使用状態を想定して耐環境性・耐候性などの特性についても十分な検討が必要となる。

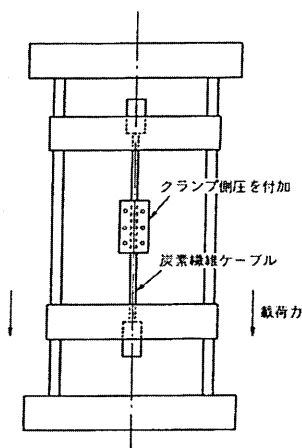


図-6.2.11側圧付加載荷試験⁶⁾

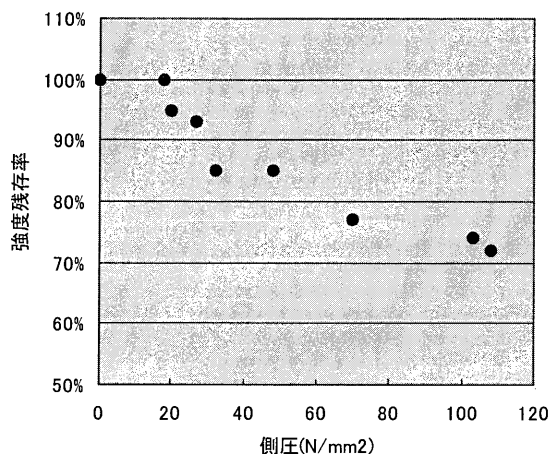


図-6.2.12 側圧が引張強度に与える影響⁶⁾

6.3 新素材ケーブルの力学特性

6.3.1 設計における安全性の考え方

ケーブルは、一方向連続繊維強化複合材料による構造部材と考えられるので、一般的に複合則によって、その基本的力学特性を評価することができる。

(1) 新素材の弾性係数と強度のばらつき¹⁾

複合材料による部材の設計に際しては、一般に以下の式(6.3.1)および式(6.3.2)に示すように、複合則の適用とこの評価における物性値のばらつきを考慮して、基準弾性係数、および基準強度が設定される。

$$E_L = K_E [E_f V_f + E_m (1 - V_f)] \quad (6.3.1)$$

$$F_L = K_F [F_f V_f + F_m (1 - V_f)] \quad (6.3.2)$$

ここで、 E_L 、 E_f 、 E_m 、および V_f は、それぞれ複合材料の強化繊維方向の弾性係数、強化繊維の弾性係数、母材の弾性係数、および強化繊維の体積含有率であり、補正係数 K_E が、経験則として物性値のばらつきを考慮する係数となる。なお、 F は、引張強度を表す(下添字の定義は、弾性係数のそれと同じ)。

一般に、ガラス繊維強化プラスチック材(GFRP)の弾性係数は、図-6.3.1(a)に示すように、 $K_E=0.8\sim 1.1$ の範囲で実測値が変動し、複合則による弾性係数の評価精度は、比較的高いと考えられる。一方で、引張強度に関しては、図-6.3.1(b)に示すように、 K_F は、 $0.5\sim 1.0$ と大きく低減するとともに変動する。これは、①各強化繊維が均一に配向されていない、②各強化繊維の応力分担が均一でない、③強化繊維自体の強度のばらつきなどにより限界状態に近い強化繊維から順次破断するためと考えられている。なお、大型構造物への適用に際しては、寸法効果が原因とも考えられ、構造寸法の増大とともに強度が減少することが報告されており²⁾、既存の材料データベースの検証とともに、製作精度、および製造方法とも関連付ける検討を行い、大型構造体としての品質保証の

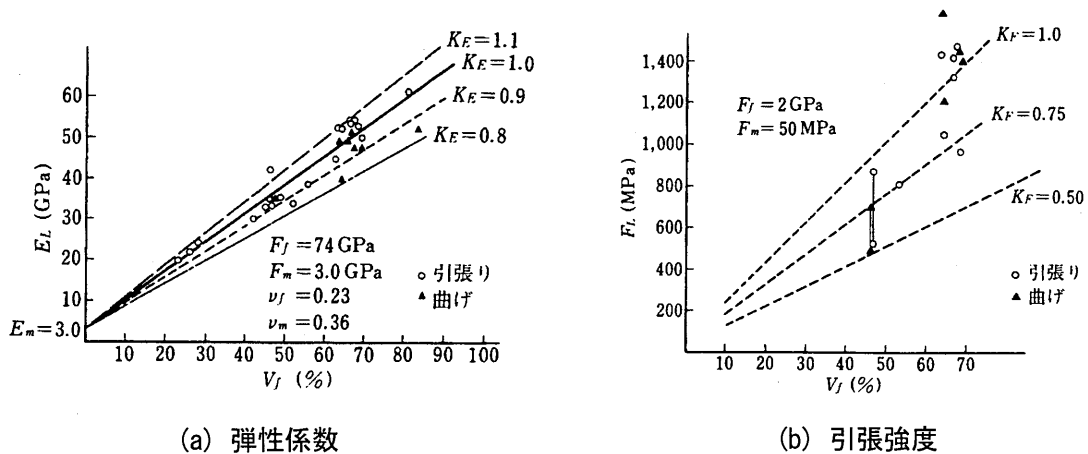


図-6.3.1 一方向ガラス繊維強化プラスチック材料の弾性物性¹⁾

ための試験法等を別途JIS規格として設定する必要があると考えられる。

一方、炭素繊維強化複合材料（CFRP）では、繊維の物性と母材の特性が大きく隔たるため（繊維の物性値が、母材のそれに比べて極めて大きい）、繊維方向の引張特性は、概ね母材の貢献を取り除いた複合則が適用される。例えば、強度に関しては、以下の式(6.3.3)のとおりである。

$$F_L = K_F [F_f V_f] \quad (6.3.3)$$

(2) ケーブルの材料特性のばらつきに影響する因子

実構造物に適用される新素材ケーブルとして、炭素繊維複合材ケーブル（以下、CFCCと呼ぶ）³⁾を例に取り上げる。CFCCを製造するには、7 μ のフィラメントを束ねて樹脂を含浸させ、直径1.5mm～40.0mmの単線を形成し、それらを複数本よりあわせてケーブルとしている。したがって、CFCCの材料特性に影響を及ぼす構造的な要因としては、①樹脂含浸量によって炭素繊維自身の一体性がどれほど保証されるか、それにともない各フィラメントに均等な応力配分が行われるか、また、②単線をよりあわせることでケーブルとしての構造特性がどの程度影響を受けるかである。

ここでは、CFCC1 \times 7（ ϕ 12.5）の基本特性を鋼より線1 \times 7（ ϕ 12.4）のそれと比較した結果を以下に示す。炭素繊維の体積含有率60%から判断すると、ほぼ複合則にしたがい基本的特性が発現していることが伺える。一方で、この比較結果から、鋼より線と比較して、破断強度のばらつきは約6倍程度、弾性係数のばらつきは約2倍程度と大きな値となっていることがわかる。ケーブル構造は、構成材料が比較的簡単な規格・標準にしたがい、また成形法も標準化されており、製作は、環境が十分管理された工場内で行われるのが、一般的である。FRP材料全体からするとばらつきは小さいと考えられる。しかし、これらのばらつきを踏まえると、実構造物への適用には十分な安全率を設定する必要があることが伺える。

表-6.3.1 CFCCの基本的特性³⁾

項目	CFCC1 \times 7（ ϕ 12.5）				鋼より線1 \times 7（ ϕ 12.4）			
	平均値	標準偏差	変動係数	標本数	平均値	標準偏差	変動係数	標本数
引張強度(kN/mm ²)	2.12	0.078	3.7	127	1.91	0.012	0.6	15
破断荷重(kN)	161	5.86	3.7	127	178	1.08	0.6	15
引張時伸び(%)	1.57	0.054	3.5	81	6.40	0.53	8.2	15
弾性係数(kN/mm ²)	137	2.65	1.9	90	198	1.49	0.8	5
単位重量(g/m)	153	3.75	2.4	90	729	-	-	-
計算断面積(mm ²)	76	-	-	-	93	-	-	-

注)炭素繊維の基本物性：引張強度 3.63(kN/mm²)、弾性係数 235(kN/mm²)、切断時伸び率 1.5%

6.3.2 構造設計における安全率について

(1) FRP構造設計における安全率

FRP設計便覧¹⁾では、FRP構造の強度に影響する要因を分類し、式(6.3.4)に示すようにFRPに特有な要因による各係数の相乗によって安全率 F を求めることとしている。

$$F = F_0 \times L_1 \times L_2 \cdots \times L_n \quad (6.3.4)$$

ここに、 F_0 ：基本安全率（破壊強さ基準=1.3，剛性基準=1.2）

L_1 ：材料特性値の信頼度係数

（材料試験で確認=1.0，静的試験と低下率は既存データ参照=1.1，
低下率を既存データでのみ参照=1.2）

L_2 ：用途・重要度係数（多人数を殺傷する恐れのある時=1.2，公共性のある時=1.1，
一般の場合=1.0）

L_3 ：外力荷重不確かさ係数（外力基準による=1.0，不明確な場合>1.0）

L_4 ：構造計算での精度係数（FEM解析の場合=1.0，
等方性材料力学モデル化=1.15～1.30，
取付部で計算が困難な時>1.0）

L_5 ：材料特性のバラツキ係数（成型方法，経験年数，成型環境による）

L_6 ：衝撃的負荷による係数（延性に乏しいために層間剥離を考慮=1.2）

参考としてFRP水槽を設計した場合の安全率の一例を「FRP水槽構造設計計算法」（1996）に基づき以下に示す⁴⁾。

$$F = F_0 \times L_1 \times L_2 \times L_3 \times L_4 \times L_5 \quad (6.3.5)$$

ここに、 F_0 ：基本の安全率(強度を基準とする場合)=1.3

L_1 ：材料の信頼度係数=1.1(静的短期試験のみ実施)

L_2 ：重要度係数(雪，風，地震)=1.0(外力基準)

L_3 ：外力荷重の不確実性係数=1.0(外力基準を準用)

L_4 ：構造計算の精度=(1.0：FEM解析，1.2：等方性，材料力学)

L_5 ：材料特性のバラツキ係数(= $1/\{1 \cdot k_p(\sigma/x_m)\}$)

なお、 σ ：標準偏差， x_m ：平均値， k_p は信頼度から設定され，信頼度99.9%で $k_p=3.09$ である。したがって，信頼度99.9%で，材料試験結果から変動係数0.05が得られたとすると，概ね， $F=1.7\sim 2.0$ 程度となっている。

(2) 新素材ケーブル部材の安全率の設定事例

複合材ケーブルとして、炭素繊維複合材ケーブル(CFCC)が、その高強度のため、コンクリート構造物の緊張材および補強筋、プレストレストコンクリート構造物の外ケーブル、斜張橋のステイクケーブル、吊橋の主ケーブル、グラウンドアンカーなど多方面に使用されている。特長としては、①強くて軽い、②塩害に強く、非磁性である、③柔軟性に優れ、コンクリートとの付着特性が極めて良好である、などが挙げられる。内・外ケーブルの全ての緊張材にCFCCが採用された「つくでCC・飛翔橋」の設計・施工においては、7本より線が用いられ、その特性は、公称径12.5mm、断面積76mm²、保証破壊荷重145kN、引張強度1.908kN/mm²、弾性係数140kN/mm²、破断時伸び1.6%、線膨張係数0.6×10⁻⁶/°C、およびリラクゼーション率3.0%であった^{3),5)}。CFCCの引張強度は、1本の線材を直線上に配置した状態での強度試験を基本に決められている。内ケーブルのようにマルチタイプで使用した場合、あるいは曲げ上げ配置した場合には、線材相互間および線材とシース管の摩擦、トランベットシースの絞り部での線材の擦れ、線材がねじれた状態での緊張等により、強度の低下が予想される。また、外ケーブルとして使用した場合には、橋梁との固有振動周期が近似するときケーブルが共振して応力が定着部付近に集中し、強度低下の恐れがある。そのため、許容応力度については、静的引張り試験、曲げ配置した静的引張試験、および引張疲労試験から下表のとおりとされている。

表-6.3.2 各ケーブルの許容応力度³⁾

応力度照査の状態	内ケーブル	外ケーブル
プレストレッシング中	0.65 σ_{pu}	0.60 σ_{pu}
プレストレッシング直後	0.60 σ_{pu}	0.55 σ_{pu}
設計荷重作用時	0.55 σ_{pu}	0.50 σ_{pu}

σ_{pu} : ケーブル引張強度 (1.908kN/mm²)

一方で、アラミド繊維、炭素繊維、ガラス繊維等の高機能繊維を組紐状に編み、樹脂を含浸、硬化させた連続繊維補強材として、アラミド繊維製ロッド・ケーブルがコンクリート構造物の補強材料としてよく用いられる^{6),7)}。このケーブルは、組紐状であるため、コンクリートとの付着に優れている。特長としては、①比重が1.3で、ケーブル重量はPC鋼より線の1/5と軽い、②引張強度は14N/mm²と高強度であることが挙げられる。応力度の制限値として、以下のように決められている。

1) 補強筋として使用する場合

補強筋として使用する場合の使用限界状態における引張応力度の制限値は、表-6.3.3のとおりである。ここで、表中の f_u は規格引張強度である。

表-6.3.3 補強筋の使用限界状態に対する引張り応力度の制限値⁹⁾

部材の種類	応力度の制限値
一般の部材	$0.4f_u$
床版および支間10m以下の床版橋	$0.3f_u$

一般の部材に適用される補強材の引張応力度の制限値は、クリープ破壊強度を考慮して $0.4 f_u$ と設定されている。床版および支間10m以下の床版橋は、活荷重による応力変動幅が大きく、しかも繰返し載荷される非常に過酷な荷重状態下であり、有害なひび割れが発生する可能性が高い。したがって、この場合の引張応力度の制限値はさらに小さく、一般の部材における値の75%程度となっている。安全率は、一般の部材の場合2.5、床版および支間10m以下の床版橋の場合3.33となっている。

2) 緊張材として使用する場合

緊張材として使用する場合の応力度の制限値は、表-6.3.4のとおりである。設計荷重作用時の条件で安全率は2.0となっている。

表-6.3.4 使用限界状態に対する引張り応力度の制限値

応力度の状態	応力度の制限値
プレストレスング中	$0.65 f_u$
プレストレスング直後	$0.60 f_u$
設計荷重作用時	$0.50 f_u$

6.3.3 その他の構造特性

(1) 振動および減衰特性

軽量でかつ施工性の優れた材料は、ややもすると遮音性および振動性に大きな欠点を有する。従来から、音の遮蔽および構造体の制振は、密度の大きな材料で、例えば、比重の大きな金属系材料、無機系材料の使用により実現されることが多かった。しかし、構造物の大型化、および車両の高速運用の観点から、軽量材料による実現が求められている。

複合材料では、特性の異なった様々な材料によって構成が可能であるため、エネルギー吸収能に優れた材料を組み合わせたり、界面や剛性の制御などを行うことによって、構造物の共振点をずらして全体の振動レベルを下げることも可能である。一般に、振動エネルギーのサイクルあたりの損失は、使用される物質の性状に加え、負荷応力の振幅や周波数によって変化するとされている。しかし、表-6.3.5に示すように、各種複合材料の損失係数を鉄鋼材料と比較すると、数倍から数十倍の減衰性能を有することがわかる⁹⁾。表中の測定周波数は、土木構造物で想定される周波数より高めであるが、FRP材料による実橋梁・モデル橋梁での振動計測においても、このような高減衰性能が確認されている^{9),10)}。軽量性に加えて、このような制振性・減衰性も、コンクリートや鋼

といった既存の構造材料に比べてFRPの優位な点と考えられる。一般に、FRPの損失係数は、マトリックス樹脂単体の損失係数より小さくなり、いずれの繊維を用いても、負荷応力が大きいと、損失係数も増大する傾向がある。この中で、アラミド繊維は、ガラス繊維や炭素繊維などに比べて、界面での許容せん断変形が大きいことためエネルギー損失が大きいことがわかっている。これは、弾性係数が小さく、伸び性能が高いことによると考えられている。また、一方向強化材に比べて、クロス積層板や45°積層板といった積層板では、強化材がマトリックス中で複雑に交差している基材形態によってエネルギー損失は、大きくなる傾向にある。ただし、振動減衰能は、材料の弾性係数にも依存するため、高い弾性係数の高剛性の部材設計では、詳細な検討が必要となる。

表-6.3.5 各種繊維強化複合材料の振動エネルギー損失係数（周波数50～300Hz，応力6～34MPa）⁸⁾

繊維	マトリックス	損失係数			
		単体	一方向強化材	クロス材	±45°積層材
	エポキシ	0.026			
	ポリエステル	0.045	—	—	—
	ビニルエステル	0.045			
アラミド	エポキシ		0.018	0.020	—
	ポリエステル	0.018	—	0.019	0.023
	ビニルエステル		—	0.021	0.024
ガラス (Eガラス)	エポキシ		—	0.0065	—
	ポリエステル	0.0015	—	—	—
	ビニルエステル		0.029	—	—
カーボン	エポキシ	0.0015	0.0017	0.0046	—
ハイブリッド材 (アラミド:カーボン=1:1)	エポキシ	—	—	0.013	—
ステンレス鋼		0.0006	—	—	—
構造用鋼材		0.002	—	—	—

(2) サグ

橋の主ケーブルの断面積を決定する際、以下の式(6.3.6)のような放物線ケーブルに関する基礎式を前提とするが、鋼ケーブルとCFRPケーブルのそれぞれの必要断面積の比較結果を紹介する。

$$\frac{(w_c + w_s)L^2}{8f} \sqrt{1 + 16\left(\frac{f}{L}\right)^2} \leq A_c \sigma_a \quad (6.3.6)$$

ここで、 L ：中央支間長、 f ：中央径間のサグ量、 A_c ：ケーブル断面積、 w_s ：吊構造部の死荷重と活荷重、 w_c ：主ケーブルの自重である。結果的に、中央径間長の増大に対してほぼ直線的に面積が増えることとなり、CFRPケーブルの経済性が長大化により高まる結果となっている。なお、単位重

量あたりの材料費を鋼ケーブルの10倍程度に抑えられるならば、サグ比1/10で中央径間長1,300m以上、サグ比1/20で中央径間長700m以上の吊形式橋梁であれば、CFRPケーブルの方が経済的となる結果が示されている。

また、CFCCを例として、最大支点間距離の比較結果、支点間距離を変えた場合の張力の変化を表-6.3.6に示す³⁾。新素材ケーブルの質量が鋼ケーブルの約1/5であると言った軽量特性から、ケーブル支点間距離を大幅に改善できることがわかる。また、表-6.3.7より、CFCCケーブルの場合、鋼ケーブルに比べて、ケーブルの直線性を保証する張力を大幅に軽減できるといった利点も伺える。しかし、ケーブルの軽量化は、耐風安定性の観点から必ずしも利点とはならず、軽量化・耐風安定性のバランスを勘案した設計が必要である。

表-6.3.6 破断時のサグ量と同じとする最大支点間距離³⁾

ケーブル種別 (φ25)	直径(mm)	切断荷重(kN)	単位質量(kg/m)	最大支点間距離(m)
CFCC 1×9	25.0	446	0.58	19,400
亜鉛めっき鋼線 1×9	25.0	517	3.09	4,220

注)安全率3, $L/f = 1/10$ を仮定

表-6.3.7 同じサグ量に対する支点間距離と張力の関係³⁾

張力 (kN)	ケーブル種別	支点間距離(m)						
		100	500	1,000	1,500	2,000	3,000	4,000
	CFCC	0.76	3.82	7.65	11.5	15.3	29.4	30.6
	亜鉛めっき鋼線	4.12	20.1	40.8	61.2	81.6	122	163

6.3.4 FRPケーブルを使用した海外の橋梁の事例紹介^{11), 12)}

(1) アバフェルディー(Aberfeldy)歩道橋¹³⁾

イギリス(スコットランド)のアバフェルディー(Aberfeldy)町のゴルフコース内のテイ(Tay)川に架かるアバフェルディー歩道橋(3径間連続斜張橋, 25+63+25=113m)は、写真-6.3.1に示すように強化プラスチック構造を採用した斜張橋形式であり、1992年2月に完成した。A型塔および桁には、引抜成形のガラス繊維強化プラスチック材(GFRP)が用いられ、スティ・ケーブルには、アラミド繊維線束のケブラー(Kevlar)が使用されている。40本のスティ・ケーブルの末端は、ピン結合タイプのアルミニウム鋳造製ソケット構造となっており、160mm×160mmの正方形断面の横梁にフランジ板を介して結合されている。塔側では、ケーブルが塔壁を貫き、直径200mmの亜鉛メッキ鋼管上のプレートに固定されている。本橋の側面図および断面図を、図-6.3.2に示す。

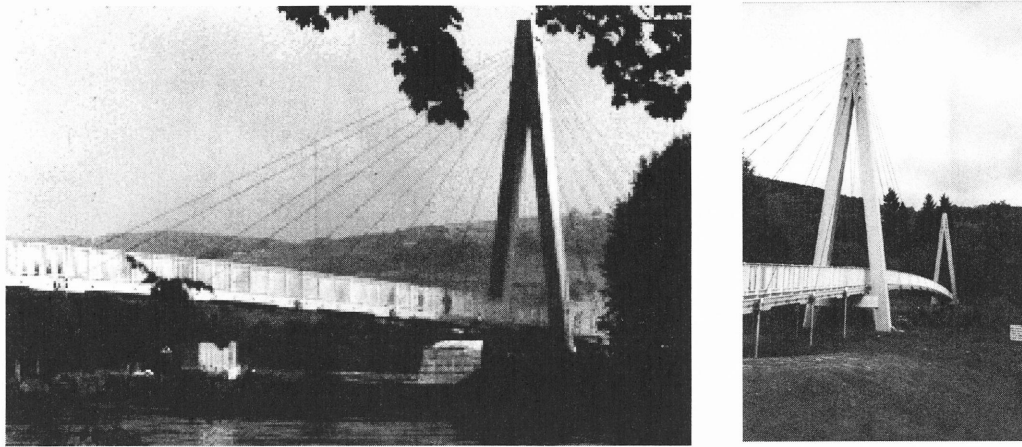


写真-6.3.1 アバフェルディー(Aberfeldy)歩道橋の全景

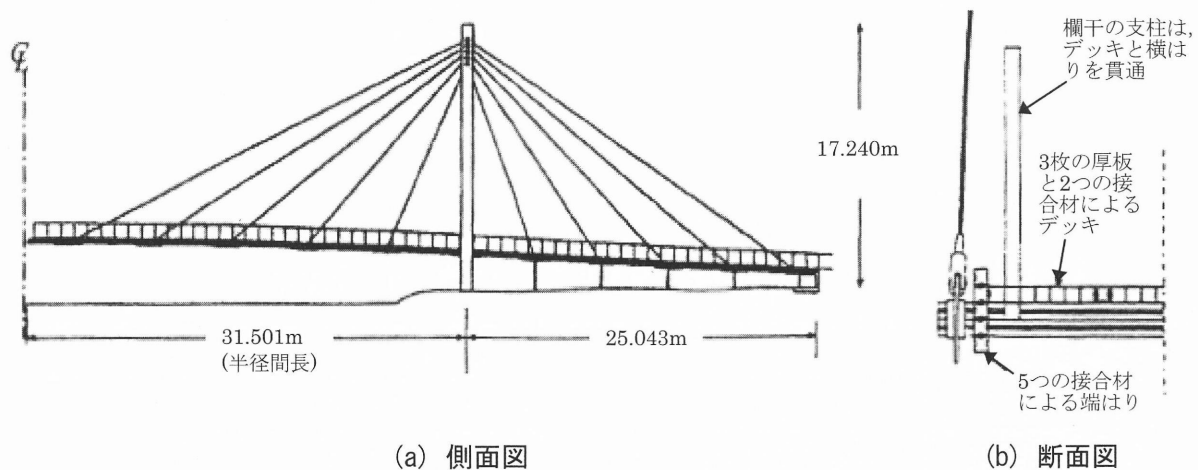


図-6.3.2 アバフェルディー歩道橋の一般図

(2) ヘルニング(Herning)歩道橋¹⁴⁾

デンマークのユトランド半島のほぼ中央に位置するヘルニング(Herning)市に、鉄道を跨いで建設されたヘルニング歩道橋(2径間連続PC斜張橋; 橋長2@40=80m, 幅員5.2m)は、1999年9月に供用を開始された。ここでは、スティケーブル、コンクリート桁中の補強筋、およびポストテンション緊張材に新素材である炭素繊維複合材ケーブル(CFCC)が使用された。スティケーブルは、37本のストランドからなる40φのケーブルで、ポリエチレン管で被覆され、合計16本用いられた。最外ケーブルは、基礎に直接固定されている。その耐力は、1,070kNである。橋梁の全景を写真-6.3.2、スティケーブルの概形を図-6.3.3および写真-6.3.3、ならび

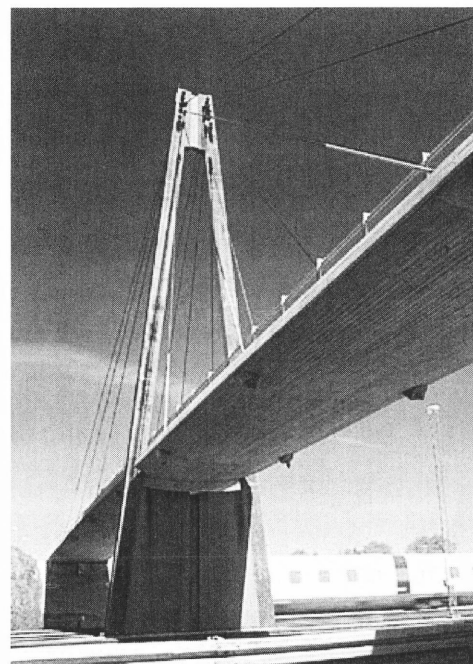


写真-6.3.2 ヘルニング(Herning)歩道橋の全景

にコンクリート桁断面を図-6.3.4に示す。

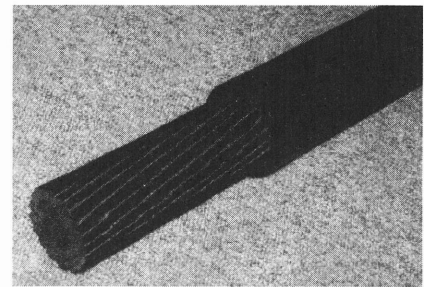
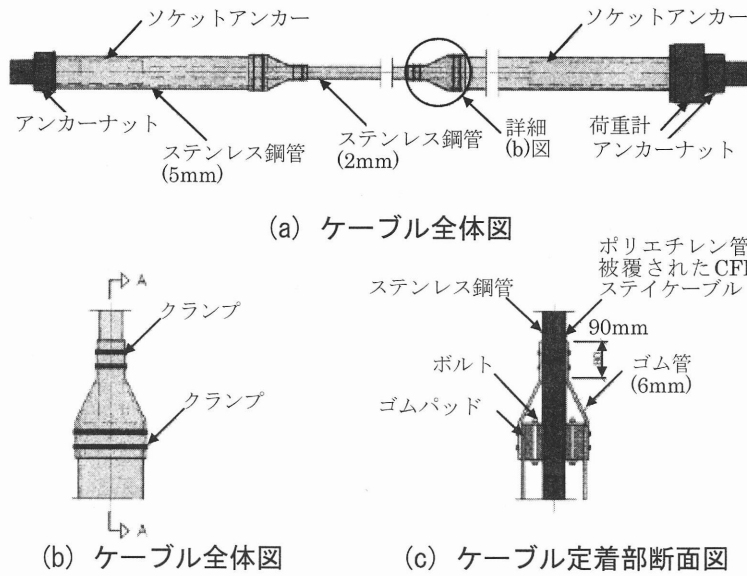


写真-6.3.3 ヘルニング歩道橋のケーブル

図-6.3.3 ヘルニング歩道橋のケーブル構造

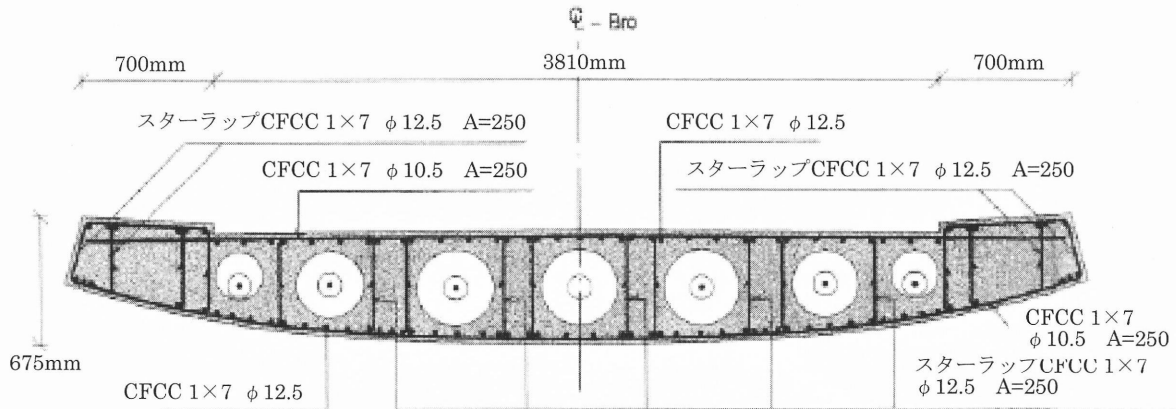


図-6.3.4 ヘルニング歩道橋の主桁断面

(3) コルディング (Kolding) 橋^{15), 16)}

1997年6月、デンマークのコルディング (Kolding) 町に歩行者と自転車のための跨線橋として、写真-6.3.4に示すコルディング橋 (2径間連続斜張橋、橋長27+13=40m、幅員3.2m、全重量12ton) が建設された。L形、C形、I形などの標準的断面の引抜成形GFRP材により、塔および桁断面が構成され、鋼ボルトで結合されている。また、スティケーブルは、100×100mmGFRPケーブルで構成されている。本橋は、群集



写真-6.3.4 コルディング橋の全景

荷重 5.0kN/m^2 ならびに車両荷重 50kN に対して設計されており、許容たわみは $L/200=13\text{cm}$ となっている。同等の鋼橋の重量に対して約半分の総重量であり、エネルギー使用量では約 $1/4$ 、50年以上の間は、整形メンテナンスのみが行われることとなっている。

(4) I-5/ギルマン(Gilman)橋^{17), 18)}

図-6.3.5に示すI-5/ギルマン・アドバンスドテクノロジー(Gilman Advanced Technology)橋は、最先端の技術を活用した、高さ 58m のA型タワーを用いた2面吊の斜張橋(橋長 137m 、幅員 $3.7\times 2+1.8\times 2+1.5\times 2=14\text{m}$)である。主桁および塔構造には、炭素繊維で製造された円筒シェルに軽量コンクリートを充填した構造が採用され、横桁には、ガラス繊維・炭素繊維・ビニルエステルを複合して用いた中空箱形断面部材が使用されている。なお、これらの桁構造は、キングス暴風雨海峡(Kings Stormwater Channel)橋に実際に用いられている。

さらに、床板には、ポリプロピレン繊維補強コンクリートのアーチ形床版である。一方、コストに配慮してスティケーブルには、主に鋼ケーブルが用いられているが、CFRPケーブルおよびアラミドケーブルが、数を限定して、短スパン側に設置予定されている。なお、ケーブルは、平面回転可能なアンカープレートに設置することにより床版に固定される予定である。完成予想図を図-6.3.6に示す。

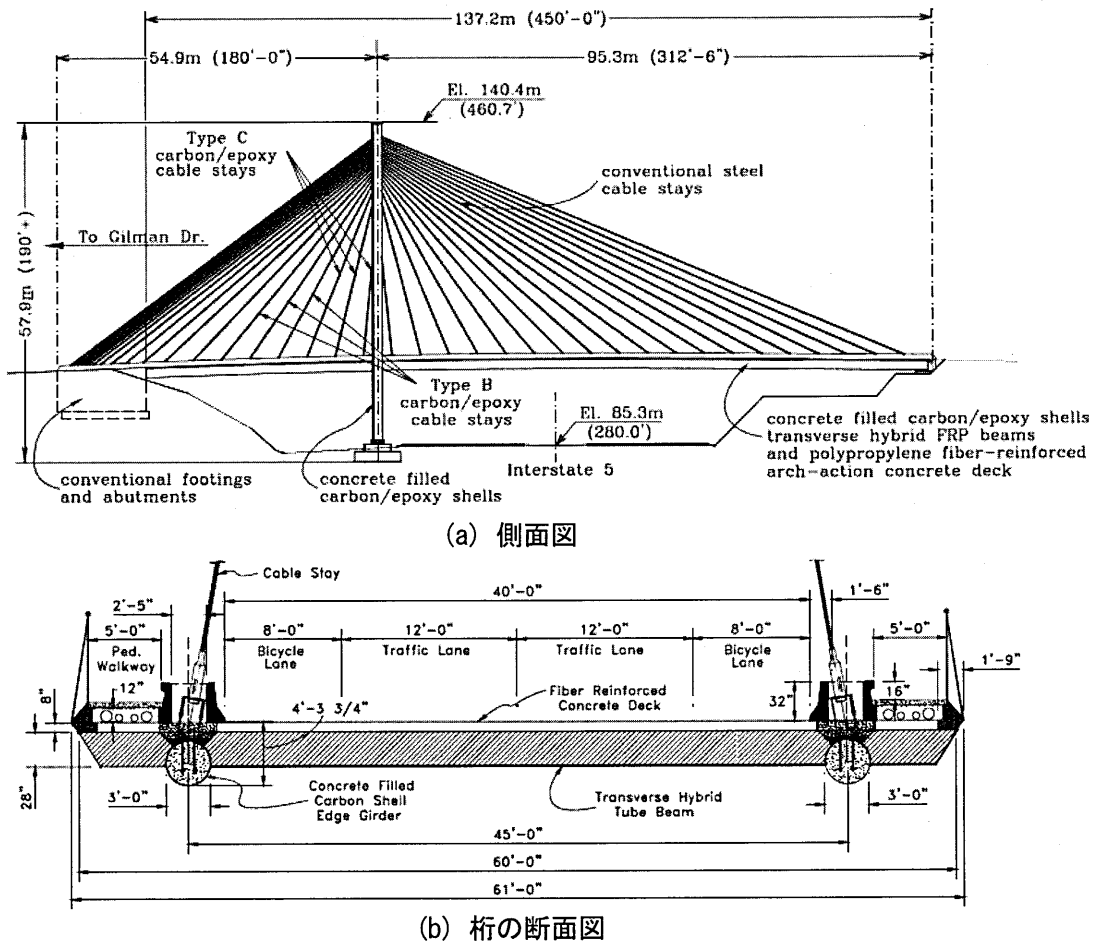
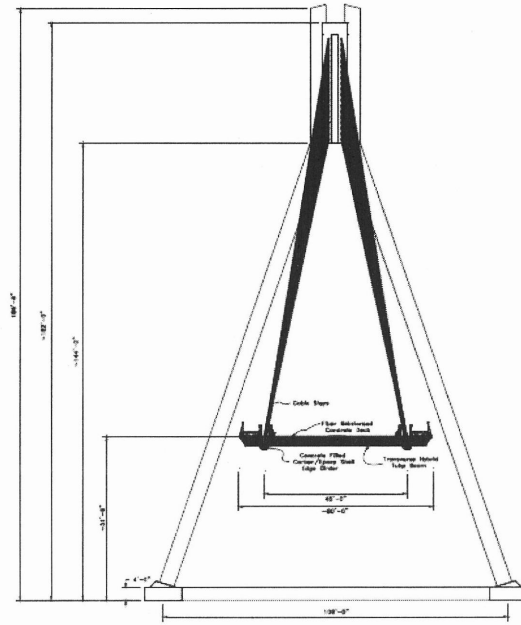


図-6.3.5 I-5/ギルマン・アドバンスドテクノロジー(Gilman Advanced Technology)橋の概要



(c) 断面図

図-6.3.5 1-5/ギルマン・アドバンスドテクノロジー(Gilman Advanced Technology)橋の概要
(続き)

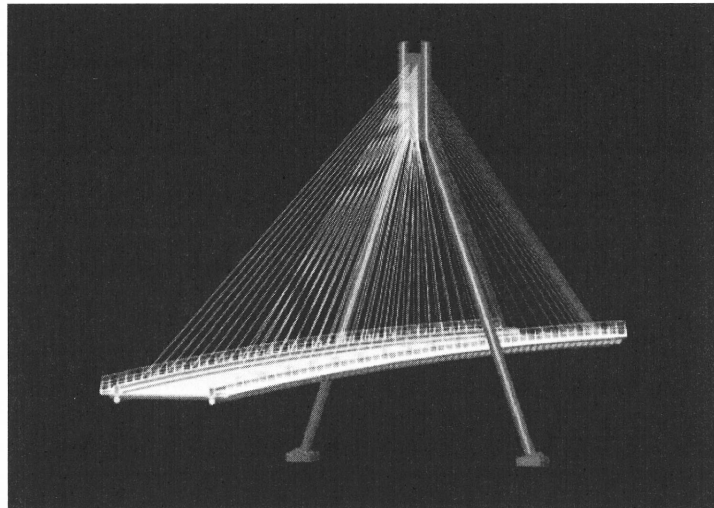


図-6.3.6 完成予想図

6.4 カーボンプレートの諸特性

6.4.1 カーボンプレートの種類と特徴

カーボンプレートとは、CFRP(Carbon Fiber Reinforced Porimer 炭素繊維強化ポリマー)を帯板状にした連続繊維補強材をいう。

先に述べられているとおり、炭素繊維は、高強度で耐腐食抵抗性を有する優れた材料で、鋼材と比較すると軽量かつ柔軟な材料である。板厚3mm程度までであれば、弾性変形内でロール状に巻き取ることが可能である。

最近、カーボンプレートは、高強度な材料特性を有効に活用する目的から、写真-6.4.1に示す炭素繊維プレートを直接緊張し定着することにより、既設のコンクリート部材にプレストレスを導入する補強方法に用いられている¹⁾。

さらに、カーボンプレートが帯板状であることから、緊張後にコンクリート面に対してエポキシ樹脂等で接着することも可能である。

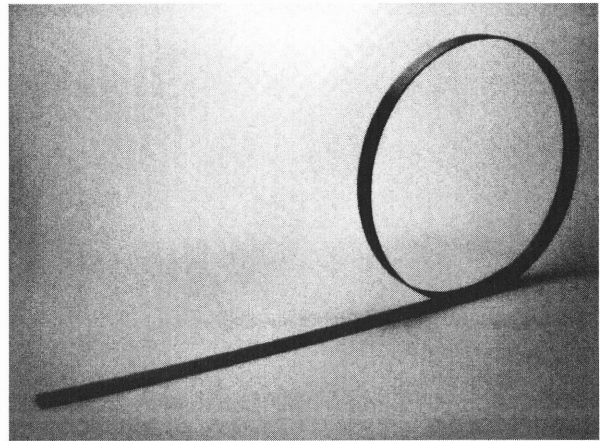


写真-6.4.1 炭素繊維プレート

6.4.2 カーボンプレートの製造方法

カーボンプレートの製造方法は、工場でプルトルージョンと呼ばれる引き抜き成形装置を用いて、装置内で炭素繊維に樹脂を浸透させ、金型内で加熱硬化させて、矩形断面の長尺の板材を連続成形して生産する。樹脂の含有量が一定で気泡の少ない品質の安定した連続繊維補強材が得られる。

表-6.4.1に炭素繊維と結合樹脂の構成を示す。

表-6.4.1 構成材料の特性

炭素繊維	弾性係数	(kN/mm ²)	235
	引張強度	(N/mm ²)	4,850
結合樹脂材	弾性係数	(kN/mm ²)	2.94
	引張強度	(N/mm ²)	75
カーボンプレート (理論値)	幅	(mm)	50
	厚み	(mm)	2
	繊維体積含有率	(%)	66
	弾性係数	(kN/mm ²)	156
	引張強度	(N/mm ²)	3,200

6.4.3 カーボンプレートの力学特性

表-6.4.2にカーボンプレートの材料特性を示す。なお、引張強度は、平均値-3σの保証強度である。カーボンプレートの応力とひずみの関係は、図-6.4.1に示すとおり、ほぼ直線関係にあり、降伏することなく破断に至る。破断ひずみは、15,000μ以上であり、鋼材の降伏ひずみと比較すると相当に大きい。引抜き成形により、炭素繊維の素線が材軸方向に直線的に配置されているので、

表-6.4.2 カーボンプレートの性質

公称断面積 (mm ²)	幅 (mm)	厚さ (mm)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	引張耐力 (kN)
50	50	1.0	2,400	156,000	120
75	50	1.5	2,400	156,000	180
100	50	2.0	2,400	156,000	240

軸方向の引張強度および弾性係数の発現率が高いといった特長を有している。また、炭素繊維は紫外線遮蔽性を有するので、**図-6.4.2**に示す促進暴露試験の結果によれば、ほとんど引張強度が劣化しないことが報告されている¹⁾。

6.4.4 カーボンプレートの構造特性

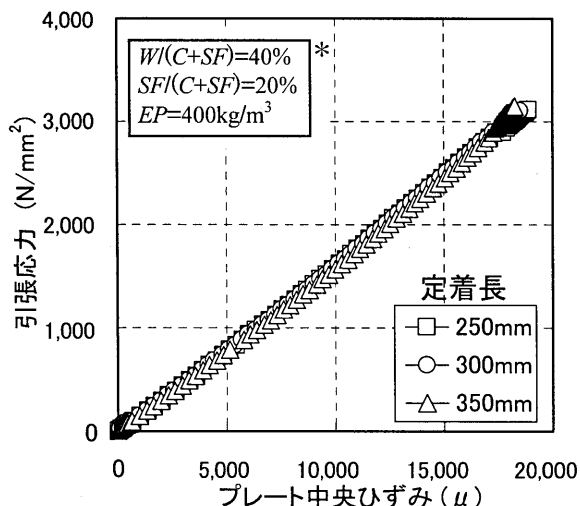
(1) 引張強度と定着長

カーボンプレートの両端には、定着具が設けられており、軽量であるカーボンプレートの特徴を十分に発揮させるためには、定着具も軽量化する必要がある。

実施工では、この両端の定着具を緊張ジャッキで緊張しプレストレスを導入している。

図-6.4.3に示す定着具を用い、円形断面の長さを変化させ、その定着長が定着性能に及ぼす影響について検討された。なお、定着具には、規格膨張圧 $30\text{N}/\text{mm}^2$ の定着用膨張材を充填し、定着具とカーボンプレートとを一体化している。

図-6.4.4に、各供試体の定着長と最大荷重との関係を示す。定着膨張材を用いた定着具において抜きし破壊が生じる場合、最大荷重と定着長との関係は、ほぼ直線で近似できることが報告されている¹⁾。図には、抜きし破壊した定着長 100mm 、 150mm 、 200mm の供試体の最大荷重の平均値から最小二乗法で算定した回帰曲線を定着長 250mm の範囲まで示している。定着長 250mm の供試体の最大荷重は、破壊形式が異なるため、回帰曲線より外挿した最大荷重より全て小さくなるが、最大荷重のばらつきは比較的小さいことがわかる。定着長 250mm 供試体以上の定着具を使用した場合、カーボンプレートの破壊形式は、炭素プレートの破断となり、カーボン



* $W/(C+SF)$: 水結合材比,
 $SF/(C+SF)$: シリカフェーム置換率
 EP : 単位膨張材量

図-6.4.1 引張応力とプレート中央ひずみ

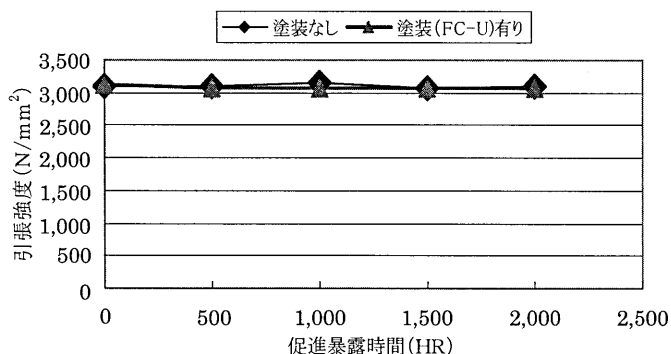


図-6.4.2 カーボンプレートの促進暴露後の引張強度

図-6.4.4に、各供試体の定着長と最大荷重との関係を示す。定着膨張材を用いた定着具において抜きし破壊が生じる場合、最大荷重と定着長との関係は、ほぼ直線で近似できることが報告されている¹⁾。図には、抜きし破壊した定着長 100mm 、 150mm 、 200mm の供試体の最大荷重の平均値から最小二乗法で算定した回帰曲線を定着長 250mm の範囲まで示している。定着長 250mm の供試体の最大荷重は、破壊形式が異なるため、回帰曲線より外挿した最大荷重より全て小さくなるが、最大荷重のばらつきは比較的小さいことがわかる。定着長 250mm 供試体以上の定着具を使用した場合、カーボンプレートの破壊形式は、炭素プレートの破断となり、カーボン

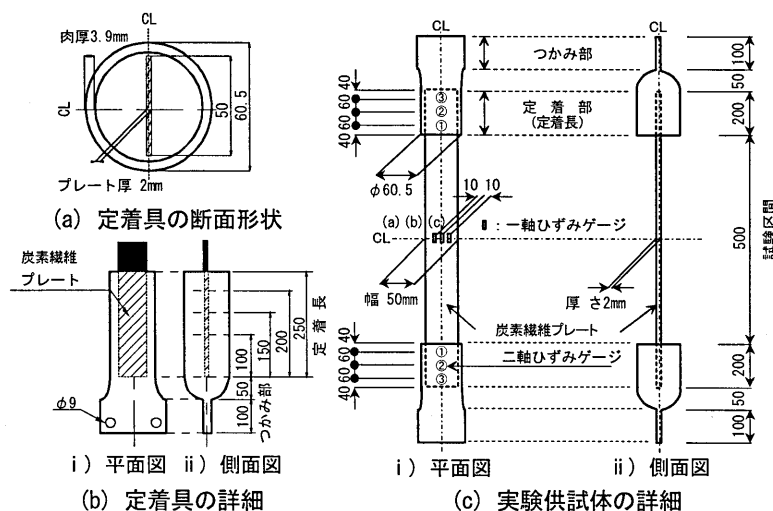


図-6.4.3 実験供試体とカーボンプレート定着具 (寸法単位:mm)

レートの高強度を有効に活用できることがわかる。定着長250mm供試体では、最大荷重の平均値は257kNとなり、最大荷重の変動係数が3.07%であることから、保証耐力(平均値マイナス3倍の標準偏差)は234kNとなる。

(2) カーボンプレートの緊張システム

実施工で使用しているカーボンプレートの緊張システムを図-6.4.5に示す²⁾。コンクリート部材には、この緊張システムを用いてカーボンプレートを機械的に定着し、プレストレスを導入する。現在、定着具は、保証耐力を向上させるとともに安全を考慮して定着長を350mmとしている。定着装置は、定着具、固定プレート、固定アンカー、ならびに定着ボルト・ナットで構成され、定着装置にカーボンプレートの保証耐力が作用しても有害な変形は生じないように設計されている。カーボンプレートの緊張材の各状態における応力度の制限値は、引張強度に対して表-6.4.3に示す値が考慮されている。

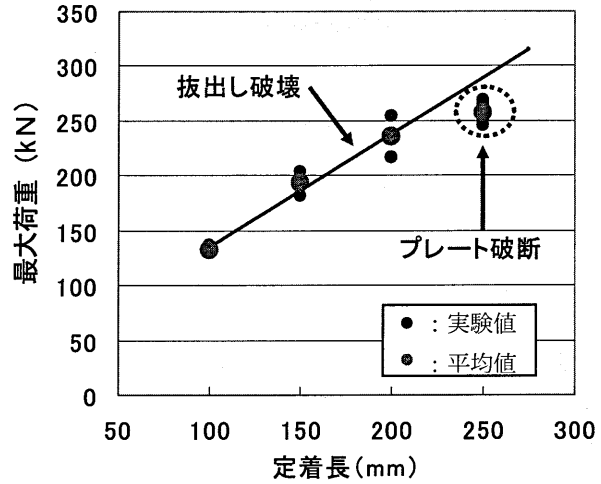


図-6.4.4 引張耐力と定着長との関係

表-6.4.3 応力度の制限値

応力度の状態	応力度の制限値
プレストレス中	0.80fu
プレストレス直後	0.70fu
設計荷重作用時	0.60fu

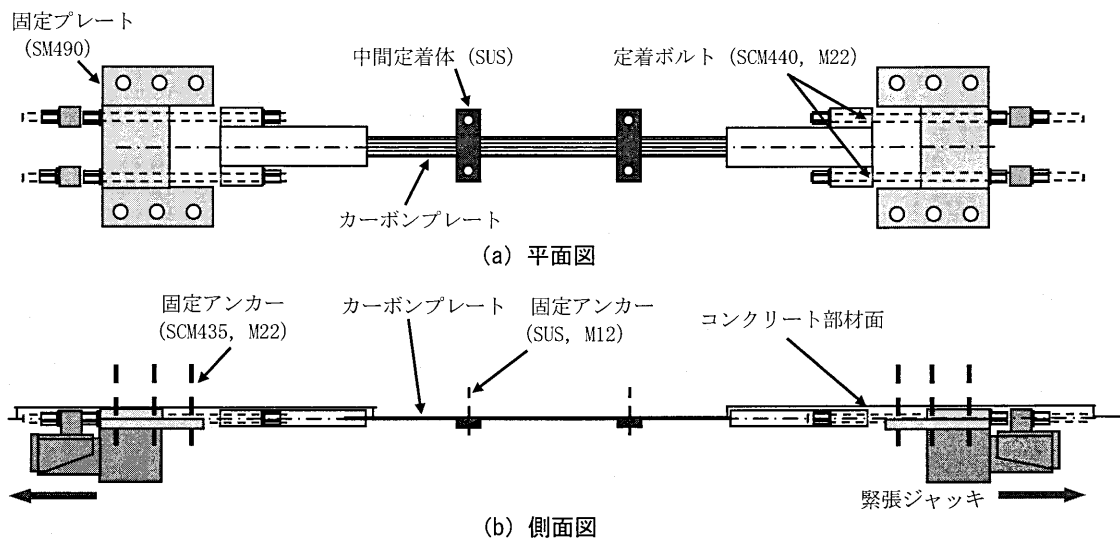


図-6.4.5 緊張システムの概要 (両引き緊張の場合)

参考文献

(6.1)

- 1) FRP橋梁研究小委員会編：FRP橋梁—技術とその展望—，構造工学シリーズ14，土木学会，2004.1.
- 2) 炭素繊維協会：http://www.carbonfiber.gr.jp/

- 3) 日本化学繊維協会監修：繊維素材のデータベース，(社)化学繊維技術改善研究委員会ホームページ，
http://www.kaizenken.jp/db/db_index.html
- 4) ACC倶楽部：Advanced Composite Cables，2002.9.
- 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，
No.88，1996.
- 6) 中井 博，北田俊行，穂山正幸，三田村 武，小林 剛，島本 明：新素材と鋼線で構成されるハイブリッド・ケーブル素線の特徴，材料，Vol.48，No.6，pp.623-628，1999.6.
- 7) 中井 博，北田俊行，内田 諭，江藤徹郎，田中克弘，穂山正幸：新素材と鋼線からなるハイブリッド・ケーブルを用いた斜張橋，およびニールセン・ローゼ橋の耐荷力特性について，構造工学論文集，
Vol.44A，土木学会，pp.237-246，1998.3.
- 8) 日本電線工業規格：アルミ覆鋼線，JCS1389，2003.
- 9) 日立電線㈱：日立アルミ覆鋼線・AS線（AC線）CAT.NO.A-301，2001.10.

(6.2)

- 1) Wernli, M. and Seible, F. : Assessment of Advanced Composite Stay Cable Systems, *Proceedings of Second International Conference on Composites in Infrastructures*, 1998.
- 2) Keller, T. : Use of Fiber Reinforced Polymers in Bridge Construction, *IABSE Structural Engineering Documents*, 2003.
- 3) Recommendation for Stay Cable Design, Testing and Installation, *Post-Tensioning Institute*, 1993.
- 4) Recommendation for the Acceptance of Post-Tensioning Systems, *FIP Commission on Prestressing Materials and Systems*, 1993.
- 5) 東京製綱㈱：CFCC技術資料，1996.
- 6) 今野信一，山崎伸介，野呂直以，毎熊宏則：炭素繊維ケーブルの強度特性，橋梁と基礎，Vol.33，No.9，
pp.29-32，1999.
- 7) Hojo, T. and Noro, T. : Application of Carbon-fiber Cables for Cable-supported Structures, *Proceedings of IABSE Symposium on Towards a Better Built Environment - Innovation, Sustainability, Information Technology*，2002.

(6.3)

- 1) 強化プラスチック協会：FRP構造設計便覧，技報堂，1994.
- 2) 小野紘一，杉浦邦征，大島義信，三木亮二，小牧秀之：角形断面を有する炭素繊維強化プラスチック管部材の強度特性に関する実験的研究，土木学会論文集，No.710/I-60，pp.449-459，2002.
- 3) CFCC技術資料，東京製綱株式会社，2003.12.
- 4) 強化プラスチック協会：FRP水槽構造設計計算法，技報堂，1996.
- 5) 関文夫，細谷学，田中茂義，濱田武人：炭素繊維線材を適用した飛翔橋の設計・施工，橋梁と基礎，
Vol.27，No.10，pp.15-20，1993.
- 6) FiBRA ROD & CABLEカタログ，ファイベックス株式会社，2002.
- 7) 森下昭吾，甲斐一夫，手塚正道：新素材を用いたPC浮橋の設計と施工，プレストレストコンクリート，
pp.34-40，1993.
- 8) 宮入裕夫：材料の機能設計(2)，機械の研究，第54巻，第7号，pp.18-26，2002.

- 9) 張惟敦, 鎌田敬治, 佐伯彰一, 山城和男: FRP製歩道橋主桁剛性および固有振動数に関する実験的評価, 石川島播磨技報・橋梁特集号, pp.77-81, 2001.
- 10) 大野一昭, 佐々木巖, 深田宰史, 張惟敦, 徳光卓: 朝霧暴露試験場におけるGFRPモデル車道橋の力学特性, 第1回FRP橋梁に関するシンポジウム, pp.117-124, 2001.
- 11) 土木学会: FRP橋梁—技術とその展望—, 2004.1.
- 12) Keller, T.: Overview of Fibre-Reinforced Polymers in Bridge Construction, Structural Engineering International, Vol.12, No.2, pp.66-70, 2002.
- 13) Harvey, W. J.: A Reinforced Plastic Footbridge, Aberfeldy, UK, Structural Engineering International, Vol.3, No.4, 1993.
- 14) Christoffersen, J., Hauge, L., Bjerrum, J.: Footbridge with Carbon-Reinforced Polymers, Denmark, Structural Engineering International, Vol.9, No.4, 1999.
- 15) Braestrup, M.W.: Footbridges Constructed from Glass-Fiber-Reinforced Profiles, Denmark, Structural Engineering International, Vol.9, No.4, 1999.
- 16) Weaver, A.: Kolding Bridge - A Technical Landmark Reinforced Plastics, pp.30-33, 1997.
- 17) Zhao, L., Burgueno, R., Rovere, H.L., Seible, F., Karbhari, V., Preliminary Evaluation of The Hybrid Tube Bridge System, Final Test Report Submitted to California Department of Transportation under Contract No. 59AO032, UCSD, 2000.
- 18) Seible, F., Karbhari, V.M., Burgueno, R.: Fibre-Reinforced Polymer Composites for Civil Infrastructure in the USA, Structural Engineering International, Vol.9, No.4, 1999.

(6.4.1)

- 1) 児島孝之, 高木宣章, 濱田 譲, 東野幸史, 山田 浩二: 連続繊維プレートの引張強度特性について, 平成10年度 土木学会関西支部年次学術講演概要, V-3-1~2, 1998.

(6.4.3)

- 1) 日鉄コンポジット(株): CFRP プレートの促進暴露試験結果, トウプレート工法技術資料 (耐 16-01), 2004.4.

(6.4.4)

- 1) 濱田 譲, 井上真澄, 小林 朗, 高木宣章, 児島孝之: 緊張した炭素繊維プレートによる既設コンクリート部材の補強に関する研究, 土木学会論文集, No.711/V-56, pp.27-44, 2002.8.
- 2) 藤田真実, 松田義則, 高橋輝光, 井村正和, 駒田憲司: 調布高架橋のアウトプレート工法による補強工事と実橋載荷試験, 橋梁と基礎, 第38巻, 第10号, pp.15-19, 2004.10.