

超長大吊橋メインケーブルへの CFRP の適用に関する 2,3 の考察

Examination on Application of Carbon Fiber Reinforced Plastic to Main Cable of Ultra Long-Span Suspension Bridge

江口立也*

前田研一**

森園康之***

中村一史****

藤野陽三*****

Tatsuya EGUCHI, Kenichi MAEDA, Yasuyuki MORIZONO, Kazushi NAKAMURA and Yozo FUJINO

ABSTRACT This paper describes examinations for the problems of substituting the CFRP (carbon fiber reinforced plastic) cable for the steel cable in the suspension bridge. The CFRP cable is superior to the steel cable in some physical characteristic, while it is weak in shear strength and inferior to the steel cable economically. The important points are especially the self-weight and the strength in choosing the main cable of the suspension bridge. The CFRP cable has a great appeal in its light weight and high strength in comparison with the steel cables. In addition, the CFRP cable has another remarkable characteristic of self-corrosion proofing, while the steel cable has various problems in the corrosion proofing. We examined how the characteristic to be considered as weak points have effects on the structure of the saddle or band of the bridge, when the CFRP cable is made practicable as a main cable of the ultra long-span suspension bridge.

Keyword: CFRP、吊橋、サドル、ケーブル

carbon fiber reinforced plastic, suspension bridge, saddle, cable

1. はじめに

21 世紀に向けて新たな国土づくりを進めていくためには、新しい国土軸の形成が重要で、さらに既存の国土軸との連携・補完が必要である。国内における吊橋プロジェクトは、1999 年に開通した来島大橋を最後にほぼ一段落し、現在は新たな国土軸を繋ぐ海峡横断プロジェクトに関して様々な技術検討が行われている。紀淡連絡道路、東京湾口道路等の海峡横断プロジェクトでは、明石海峡大橋を凌ぐスパンの超長大吊橋も計画されている。このような超長大吊橋を具現化していく上で、様々な角度から構造・架設等の技術検討や経済性について調査が行われている。

ケーブルにおいて、材料面では明石海峡大橋の実現に向け高強度ワイヤの開発が推進されてきた。しかし、これらの超長大吊橋には、明石海峡大橋において適用された 1800MPa か、あるいはそれ以上の高強度化が要求されている。一方、それに代

わる新たな素材として、強度面から見た場合、炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastic、以下 CFRP と略称) が有力と考えられる。CFRP の最大の特徴は、鋼製ワイヤに比べ軽量でかつ機械的特性に優れた点にある。海外では CFRP を歩道橋ではあるが吊橋の主ケーブル^[1]や今後の技術的發展に寄与する目的で試験的に斜張橋ケーブル^[2]に用いられた実施例もある。国内においても架設部材として CFRP ケーブルが採用されている^[3]。

この CFRP ケーブルは、鋼製ケーブルとその特性が大きく異なり、せん断に対して非常に弱いことや単位重量当たりの単価が高く経済性で劣る等の短所がある反面、物性面において優れた特性がある。吊橋のメインケーブルとしては、特に長径間化するに従いケーブル自重とその強度特性が重要なポイントになり、その軽量で高強度の特性は非常に魅力がある。また、維持管理の点からケーブル防食対策においても様々な課題があり、腐食しないという特性も重要である。

本論文では、CFRP の特性を踏まえ超長大吊橋主ケーブルに CFRP を用いた場合に、その弱点と考えられる特性が、サドル部やバンド部の構造にどのような影響を及ぼすかを中心に検討した。

2. 構造特性

2.1 高張力鋼ワイヤと CFRP ワイヤの特性

CFRP ワイヤの特徴は、従来の高張力鋼ワイヤと比べて様々な特性が大きく異なることである。こ

* 新日本製鐵 (株) 鉄構海洋事業部

(〒100-8071 東京都千代田区大手町 2-6-3)

** 工博 東京都立大学教授 大学院工学研究科 土木工学専攻

*** 工修 (株) 長大 国際事業部 長大橋計画部

**** 工修 東京都立大学助手 大学院工学研究科 土木工学専攻

***** Ph. D 東京大学教授 大学院工学系研究科 社会基盤工学専攻

こで、ワイヤ単体での特性を比較する。

高張力鋼ワイヤと CFRP ワイヤの特性等について比較表の一例を表 2.1 に示す^[4]。また、応力-ひずみ曲線について図 2.1 に示す。鋼と CFRP で強度特性について大きな相違は、降伏伸びの有無と言える。鋼では、0.2%全伸び耐力までほぼ線形に伸び、その後は破断まで延性伸びが存在する。これに対して、CFRP は、破断に至るまで線形状態が続き、明確な降伏点が存在しない。このため、破断時に至るまでの伸びは鋼が 4%以上あるのに対して、CFRP では、1.6%程度と非常に少ない。また、鋼に比べて単位重量は鋼の約 1/5 と非常に軽く、温度変化の影響も受けにくい。

表 2.1 鋼と CFRP の特性比較

	鋼	CFRP
単位重量(tf/m ³)	7.85	1.60
弾性係数(tf/m ²)	2.0×10^7	1.6×10^7
線膨張係数(1/°C)	12×10^{-6}	0.6×10^{-6}
引張強度(kgf/mm ²)	210	250
伸び(%)	4.0	1.6

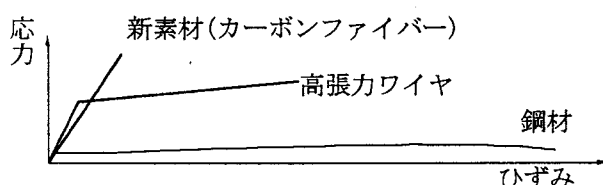


図 2.1 鋼と CFRP の応力-ひずみ曲線

一方、せん断強度が小さい等の欠点もある。こ
こで、せん断応力の試験結果の一例を表 2.2 に示
す。試験は、「二面せん断による連続繊維補強材
のせん断試験方法(案)」(JSCE-E540-1995)に準拠
し、押し込み治具による押し抜き 2 面せん断試験
であり、試験方法を図 2.2 に示す。CFRP より線の
せん断強度は約 2,400kgf/cm² であり、鋼より線の
約 8,100kgf/cm² と比べて、30%程度と非常に小さい。

表 2.2 より線のせん断強度

材質	より本数	外径 (mm)	せん断強度 (kgf/cm ²)
CFRP	7 本より	15.2	2,460
CFRP	7 本より	12.5	2,410
鋼	7 本より	12.4	8,170

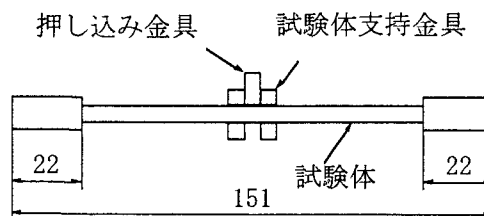


図 2.2 せん断強度試験

2.2 超長大橋主ケーブルの試算

吊橋主ケーブルに CFRP を用いた場合、必要断面
積は自重が小さいことから鋼を用いた場合に比べ
て小さくなる。

2500m 級の超長大吊橋における試算^[4]では、表
2.1 に示した特性において、鋼製及び CFRP 製ケー
ブルで破断に対する安全率をそれぞれ 2.0、2.5 と
考えた場合、鋼が 0.5564m²/cable に対して CFRP
では、0.4520m²/cable となり、断面積比で鋼は、CFRP
の約 1.23 倍の断面積が必要になる。表 2.3 に示す
ように、空隙率を 20%と仮定すると主ケーブルの
直径としては、鋼が 0.941m に対して CFRP は 0.848m
になる。

表 2.3 鋼と CFRP の必要主ケーブル断面積

	鋼	CFRP
主ケーブル断面積(m ²)	0.5564	0.4520
主ケーブル直径(m) (空隙率 20%)	0.941	0.848
ストランド本数 (φ5×127)	223	181

2.3 主ケーブルに適用する際の特性

a) ケーブル構造と架設工法

長大吊橋で一般的に用いられている主ケーブル
は、平行線ケーブルであるが、その架設方式とし
ては AS 工法と PS 工法がある。各工法によってア
ンカレッジ部の定着構造が違ってくる。そして、
架設上も工法によってストランドは様々な影響を
受けるが、サドル部やバンド部の構造には大きな
違いはない。

AS 工法を CFRP で適用しようとする架設時の
ハンドリング特性が大きな課題になる。これは、
CFRP の延性が極端に低いため、大きな曲率でしか
曲げることはできないためである。また、その定
着部となるストランドシュー部において考えた場
合、曲率半径 ρ とひずみ ε の関係は、次式のよう
になる。

$$\varepsilon = d/2\rho$$

ここで、 d :ワイヤ径

したがって、ストランドシュアの曲率半径をワイヤ径の50倍、すなわち

$$\rho=50d$$

とすると、ひずみ ε は1%となる。その結果、縁部では破断の2/3程度のひずみになり、これに軸応力が作用すると構造的にストランドシュアは現状の鋼の設計法では成り立たない。よって、AS工法のように現地でワイヤを一本一本架設していく工法はCFRPでは困難と想定される。

一方、PS工法ではCFRPワイヤを工場製作段階で多数本平行に束ねストランド化し、そのストランドを現地でリールから展開し架設される。完全平行線の場合、リールに巻き取った際にストランドを構成するワイヤがずれて、扁平化した状態で巻かれる。このため、ストランドの巻き層数が多くなれば、リール内において互いのワイヤが交差することも十分あり得る。

このため、せん断強度が非常に弱いCFRPでは破損等の問題もあり、完全平行線よりはリールへの巻き取り性を考慮して、伸び剛性をできるだけ損なわない範囲で斜張橋ケーブルで広く用いられている擬似平行線ストランド(緩やかなピッチで撚ったストランド)とし、リールに巻き取れる構造との方が望ましいと考えられる。したがって、現状の長大吊橋の主ケーブルは完全平行線ストランドであるが、CFRPでは現地でのハンドリング性から擬似平行線ストランドが有効と考えられる。

また、擬似平行線ストランドの場合、その定着構造は樹脂鋳込み等によるソケット構造が実用化されており、これをアンカレッジに定着することになる。

b) 側圧、許容曲げ、せん断特性

一方、主ケーブルと塔や桁との接点に着目した場合、次の点が問題になる。

・サドル構造

塔との接合点になるサドル構造部における側方からの圧縮力と曲げ応力の問題

・バンド構造

ハンガーを吊すバンド部の取り付け構造の問題

すなわち、塔頂あるいはスプレーサドル部ではストランドをそのサドル形状に合わせて曲げ、さらに多数のストランドを積み重ねて行く必要がある。このため、下層ストランドほど上層ストランドからの側圧が作用することになる。さらに、側圧によってストランドは変形する。

また、ハンガーと主ケーブルはケーブルバンドを介して取り付くことになるが、主ケーブルはワ

イヤ同士によって形成される空隙がケーブル断面の約20%程度までスクイズする必要があるが、クランプでストランドを締め付けた結果から考えて、材料自身の径方向の弾性変形や塑性変形もあることからストランドを一体化させて、太径化したケーブルとするのは難しいと思われる。

3. 各部位での特性とCFRPの適用性

3.1 サドル構造

サドル部において、ストランドを架設する場合下層のストランドは上層のストランドから圧縮力を受けるが、このような側圧下においてCFRPストランドは大きな強度低下が起こる。その圧縮応力下での引張強度の低下についての試験結果の一例を図3.1に示す^[5]。

実験方法はCFRPと異なるが、鋼製ワイヤ単線における側圧下(線荷重)での引張強度特性を図3.2に示す^[6]。図3.2から分かるように線圧500kgf/cmで強度低下はほとんどなく、また設計的にも線圧はサドル部において500kgf/cm以下に抑えられることから、この値以下になるようサドル長の設計が行われる^[7]。

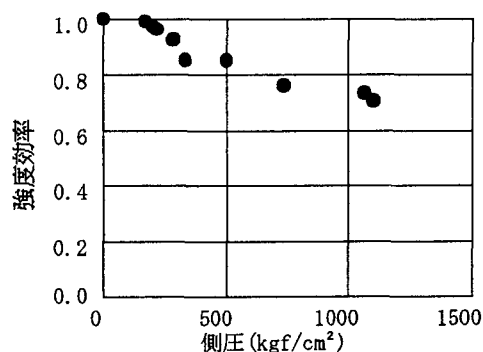


図3.1 CFRPの側圧下での引張強度特性

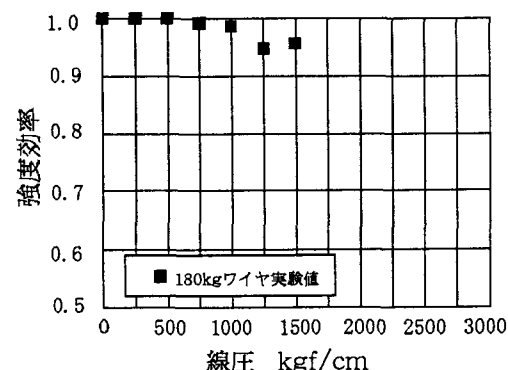


図3.2 高張力ワイヤ側圧下での引張強度特性

しかし、CFRPでは図3.1からみて側圧200kgf/cm²(100kgf/cm/0.5cm)においても破断強度は低下している。したがって、CFRPケーブルをサドルで支持する

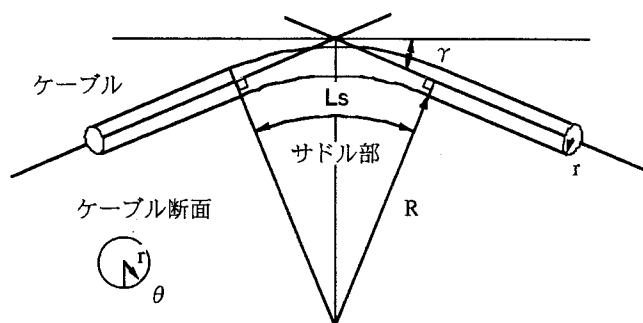


図3.3 サドル部の形状

構造としては、側圧を 100kgf/cm² 以下に抑える必要があると考えられる。これをもとに、サドル部の構造について次に検討する。

3.2 サドル部で作用する圧縮力

塔頂サドル部やスプレーサドル部では、下層ストランドは上層ストランドから圧縮力を受ける。特に最下層ストランドでは非常に大きな値になる。また、一般的に、サドル部の曲率半径はケーブル径の8倍以上を確保するようにしている。

図 3.3 にサドル部の形状を示し、簡易的に最下層ストランドに作用する圧縮力を次式で算出する。

$$p = \frac{2\sigma r \cos \theta \sin \gamma}{\gamma R} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 p : 最下層ストランドに作用する圧縮応力
 γ : 主ケーブルの角度
 (中央径間、側径間同じ)
 σ : 主ケーブルの張力による引張応力
 (中央径間、側径間同じ)
 r : 主ケーブルの半径
 R : サドルの曲率半径
 θ : 主ケーブル断面内角度

主ケーブルの直径 D に対するサドルの曲率半径 R の比 R/D を 8、つまり、 $R=8D=16r$ とすると、最大圧縮応力 p は $\theta=0$ の時になることより、

$$p = \frac{\sigma \sin \gamma}{8 \gamma} \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。さらに、主ケーブル形状を放物線と仮定し、中央径間長を L 、サグ量を f とすれば塔頂部における主ケーブルの角度は、次式であらわせる。

$$\gamma = \frac{4f}{L} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、サグ比を $f/L=1/10$ とすると $\gamma=22.9\text{deg}$

になる。この時、主ケーブルの引張応力 $\sigma=10,000(\text{kgf/cm}^2)$ では、 $p=1,216(\text{kgf/cm}^2)$ となる最大圧縮応力を受けることになる。

さらに、ワイヤ径を 5mm とすると接触線圧は 608kgf/cm となり、主ケーブル設計引張応力 10,000kgf/cm² の条件では、設計条件である線圧 500kgf/cm を大きく超える。したがって、鋼製ケーブルにおいても R/D は 10 程度まで引き上げる必要がある。

一方、側圧を受ける CFRP 製ケーブルの強度低下は著しく、実際に設計するためには、さらにデータを蓄積し、分析する必要があるが、ここでは側圧 100kgf/cm² 程度 (CFRP のワイヤ径を 5mm とした場合、線圧 50kgf/cm) までに抑えるものとする。

圧縮応力 $p=100(\text{kgf/cm}^2)$ とし、(1) 式から R/D を求めると

$$\frac{R}{D} = \frac{\sigma \sin \gamma}{p \gamma} \quad \dots\dots\dots (4)$$

より、 $R/D=97.4$ となって、鋼の設計値である 8 に対して約 12 倍となる。

また、曲率半径 R とサドル長 L_s の関係は、

$$L_s = 2 \gamma R \quad \dots\dots\dots (5)$$

で与えられる。ここに、 $\gamma=0.4$ 、 $R/D=97.4$ とし、表 2.3 より $D=0.848(\text{m})$ とすれば、サドル長 L_s は 66m となり、物理的に成り立たない。したがって、主ケーブル径を小さくする必要がある。

すなわち、サドル構造を考えた場合、一本の主ケーブルの状態ではサドルが長くなりすぎるため、多数のストランドに分離した状態にする必要がある。

そこで、前出の条件、 $p=100(\text{kgf/cm}^2)$ 、 $\sigma=10,000(\text{kgf/cm}^2)$ 、 $\gamma=0.4$ で、(1) 式より、主ケーブルの半径を各ストランドの半径とし、(5) 式を用

いて、サドル長とストランド径の関係を算出する。その結果を、ストランド構成とストランド本数を併記して、表 3.1 に示す。

表 3.1 ストランド径とサドル長の関係

サドル長(m)	ストランド径(cm)	ストランド構成	ストランド本数
5.1	6.5	φ5×127	181
6.0	7.7	φ7×91	127
7.1	9.1	φ7×127	92
8.2	10.5	φ7×169	69

ストランドサイズとしては、小径の方が望ましいが、ストランド本数が多くなり架設工期の長期化にもつながることから、太径ストランドを用い、サドル構造をできるだけシンプルにする必要がある。

さらに、ストランド構成が大きくなると 1 ストランド単位の重量が増え、一本当たりの引き込み荷重も考慮して選定する必要がある。

また、CFRP ストランドの場合、面圧で受ける必要があることから、サドルとストランドにおいて局所的な線接触を避けるために、ストランドとサドル間を間詰材や樹脂充填等によって面接触状態にし、圧縮面圧の低減を図る工夫が必要である。

ところで、ケーブルには活荷重変動等により中央径間と側径間で張力のアンバランスが発生する。このアンバランス力は、サドル部での摩擦力によって抵抗し、ストランドが滑動しないように締め付け力等を設計する。

サドル部の滑動は次式で表せる^[7]。

$$\nu = \frac{\mu \alpha}{\log(T_s/T_c)} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 ν : 安全率
 μ : 摩擦係数
 α : 円周角
 T_s : 側径間側のケーブル張力
 T_c : 中央径間側のケーブル張力

いま、安全率 ν を 2.0、摩擦係数 μ を 0.1、円周角 α を 0.8 (=2 γ) とすれば、張力比 T_s/T_c は 1.04 となり、張力差 4%において滑ることになる。参考までに、レインボーブリッジでは、表 3.2 のような値であった^[8]。

表 3.2 ケーブル張力(レインボーブリッジ)

設計張力	中央径間 T_c (tf)	側径間 T_s (tf)	T_s/T_c
常時	21, 050	23, 335	1. 11
地震時	19, 923	22, 631	1. 14

表 3.2 から分かるようにストランドの状態のみでは、滑動に対して安全ではない。したがって、各ストランドの滑動に対する安全性を確保するためには、それぞれに締め付ける設備や構造が必要になる。そこで、張力の 10%の滑動力に耐えるために必要なサドル長を求める。

滑動力は次式で与えられる。

$$F = \frac{\mu}{\nu} m d L_s p \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 F : 滑動力
 m : 形状係数
 d : ストランド径
 L_s : 締め付け長さ(サドル長)

締め付け面圧 p を 100 (kgf/cm²)、 $m=3$ とすると必要なサドル長は表 3.3 のようになる。なお、表中には表 3.1 に示した設計張力から算出されるサドル必要長も併記した。

表 3.3 必要サドル長

ストランド構成	ストランド径 (cm)	滑動力 (tf)	サドル必要長(m)		
			張力	滑動	合計
φ5×127	6.5	24.5	5.1	2.6	7.7
φ7×91	7.7	35.0	6.0	3.0	9.0
φ7×127	9.1	48.9	7.1	3.6	10.7
φ7×169	10.5	62.7	8.2	3.9	12.1

表から分かるように一本のストランドを固定するために非常に長いサドル構造が必要になる。

したがって、滑動に対してはバンドで締め付ける構造よりストランドをパイプに通しそのパイプ内を樹脂で充填し、パイプとストランドを一体化させ、パイプをサドルに固定するか図 3.4 に示すようにサドルを個々のストランドに対してセル構造とし、ストランド架設後セル内の空間を樹脂で充填する方法等が考えられる。

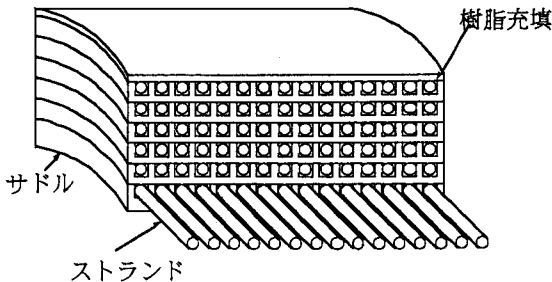


図 3.4 塔頂サドル案

3.3 バンド構造

施工性を考えて擬似平行線ストランドを現地で束ねる。この場合、ストランド間の空隙をできるだけ少なくすることが考えられるが、前述したようにバンド部ではストランドに分割する構造が必要になることや、材料自身が圧縮力に対して大きく変形するため、バンドで直接把持する構造は困難と想定される。

すなわち、ストランドを多数本架設した後に主ケーブルを円形にするために空隙率 20%位までスクイズ作業を行い、概略円形状態にし、その上に側圧 100kgf/cm^2 を条件に設計されたバンドが取り付けことになる。しかし、側圧は、 100kgf/cm^2 より小さな値としなければならない点、摩擦係数においても、実験によると $\mu=0.1$ 程度と鋼の $\mu=0.15$ より小さい点から、現状よりバンドが大きくなりボルトで締め付け摩擦係数だけで支持させる構造は、困難と想定される。したがって、バンド部においても個々のストランドを矩形上に配列し、独立した状態でバンドで支持する構造が考えられる。

個々のストランドに対し、独立してハンガーによる滑り力に抵抗させるとすれば、バンド部の受圧面積が大きくなり、バンド長は短くできる。ここで、ハンガー張力 1000tf により滑動力が作用した場合のバンド必要長を式(7)より求めると表 3.4 のようになる。なお、ケーブル角度は 22.9deg 、安全率は 2 とした。

表 3.4 バンド必要長(ハンガー張力 1000t)

ストランド構成	ストランド径 (cm)	ストランド本数	滑動力 (tf)	バンド必要長 (cm)
$\phi 5 \times 127$	6.5	181	2.1	22
$\phi 7 \times 91$	7.9	127	3.0	26
$\phi 7 \times 127$	9.1	92	4.2	31
$\phi 7 \times 169$	10.5	69	5.5	35

バンド必要長は、表からわかるように滑りに対してクリティカルにはならないが、均等にハンガー荷重を各ストランドに分担させる必要がある。

構造的には、海外の鋼橋主ケーブル吊橋で実施例のある図 3.5 のような構造が考えられる^[5]。

一方、せん断応力については、ケーブル断面積が 0.452m^2 であることから、表 2.2 からせん断強度 $2,400\text{kgf/cm}^2$ とすると、せん断耐力としては、 $10,800\text{tf}$ 以上となり問題はない。しかし、中小の吊橋ではケーブル断面が小さくなり、当然のことながらせん断耐力は小さくなっていくため、せん断力がクリティカルになる可能性もある。

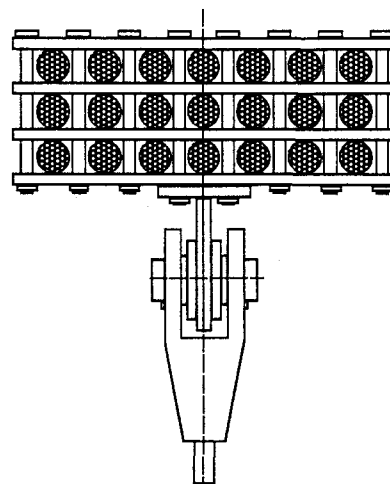


図 3.5 バンド構造

4. おわりに

CFRP を吊橋の主ケーブルに用いた場合の特にサドル部とバンド部について既存の鋼製ケーブルの条件を基本に検討したが、現状の鋼製ケーブルの構造をそのまま CFRP のケーブルに適用することは困難と考えられる。これは材料特性が大きく異なるためであり、これらの構造詳細について検討を進めるためには、側圧力に対する特性や摩擦係数等の物理的な特性を実験等によって把握することが今後必要と考えられる。

[参考文献]

- [1] Des fibres de carbone entre les deux rives de la Sarine, Journal de la Construction, pp17-20, No1-15 janvier 1999
- [2] 森下泰光：ヨーロッパにおける新素材の橋梁への適用と高機能橋梁の調査，高田機工技報，No. 15, pp138-141, 1999
- [3] 平野信一他：来島大橋キャットウォークの設計・施工，橋梁と基礎，pp13-19, 1997. 6
- [4] 前田研一他：新素材(FRP)ケーブルを用いた超長大吊橋の構造特性と経済性，構造工学論文集，vol. 46A, 2000. 3
- [5] 今野信一他：炭素繊維ケーブルの強度特性，橋梁と基礎，pp29-32, 1999. 9
- [6] 今野信一：超長大吊橋ケーブルに関する検討，本州・北海道架橋シンポジウム，pp167-184, 1996. 6
- [7] 平井 敦他：鋼橋Ⅲ，pp722-728, 1967
- [8] 首都高速道路公団：レインボーブリッジケーブル工事記録写真集，pp16-18, 1994