

長大、超長大CFRP主ケーブル吊橋の経済性と耐風安定性

Economical Efficiency and Aerodynamic Stability
of Long and Ultra Long Span Suspension Bridges Using CFRP Main Cables

前田研一* 森園康之** 中村一史*** 江口立也**** 藤野陽三*****

Ken-ichi MAEDA, Yasuyuki MORIZONO, Hitoshi NAKAMURA, Tatsuya EGUCHI and Yozo FUJINO

ABSTRACT The progress of the development of fiber reinforced plastics (FRP) in recent years is remarkable, and they are spotlighted as new materials for the civil engineering structures. In this paper, the economical efficiency of long span (center span of 500~1500m) and ultra long span (c.s. of 2500m) suspension bridges using CFRP cables for the main cable will be investigated. Moreover, from analytical results on the aerodynamic stability of the ultra long span suspension bridge, the realizability of CFRP main cable suspension bridges will be confirmed.

Key Words : 吊橋, CFRPケーブル, 経済性, 耐風安定性 *Suspension bridge, CFRP cable, Economical efficiency, Aerodynamic stability*

1. 緒 言

世界最長の明石海峡大橋(中央径間長1,991m)の完成を迎えた1998年4月に、6ルートの海峡横断道路(東京湾口、伊勢湾口、紀淡海峡、豊予海峡、関門海峡、早崎瀬戸・長島海峡)構想を、超伝導浮上式リニアモーターカーによる高速鉄道構想とともに、2010年から2015年を目標年次とする新全国総合開発計画(五全総)に盛り込むことが決められた。

これによって、21世紀の次世代の計画として策定された海峡横断道路プロジェクト構想が具体的な段階に移行し、中央径間長2,000mを大きく超える超長大橋時代の幕開けが間近に迫ってきた¹⁾。

ただし、この計画では、コストの大幅縮減を考慮に入れた技術開発の成果と、自然環境への影響、

および、費用対効果などを十分に見極めたうえで事業化を図ることとされており、海峡横断道路構想の早期実現を目指すためには、特に中央径間長2,500mから3,000mに至る超長大吊橋を対象とした新材料、新素材の適用を含めた画期的な技術開発が不可欠といえる²⁾。

一方、超長大吊橋のみならず、中央径間長500mから1,500m程度までの長大吊橋においても、ライフサイクルコスト(LCC)の観点から、建設時の初期コストだけでなく、維持管理コストを含め、より経済性に優れた新材料、新素材の適用が試みられている。

このような状況下において、近年における新素材の開発の進展は著しく、なかでも、繊維強化プラスチック(FRP)の性能の進歩には目を見張るものがあり、維持管理性に優れ、土木構造物の1次構造材料としても脚光を浴びつつある³⁾。

特に、最近では、その比強度がきわめて高いことから、鋼製ケーブルの代わりに、CFRP製ケーブルを吊橋の主ケーブルに用いることによって、死荷重を大幅に軽減でき、総死荷重に占める主ケーブルの自重の割合が大きくなる長径間になればなる程、その効果も大きくなることが指摘されるようになっている。

本論文は、上述の指摘を受け、まず、既に実用段階にあるCFRP製ケーブルを主ケーブルに用いた中央径間長500m~1,500mの長大吊橋の経済性を、従来の鋼主ケーブル吊橋と比較して概略的に検討したものである。

* 工博 東京都立大学 大学院工学研究科
土木工学専攻 教授

(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

** 工修 (株)長大 国際事業部 長大橋計画部
(〒305-0821 茨城県つくば市春日3-22-6)

*** 工修 東京都立大学 大学院工学研究科
土木工学専攻 助手
(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

**** 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 東京大学 大学院工学系研究科
社会基盤工学専攻 教授
(〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1)

さらに、中央径間長2,500mの流線形箱桁吊橋の試設計を行って、超長大吊橋における経済性を具体的に比較したものである。その際、CFRP製主ケーブルの比較の対象となる鋼製主ケーブルの材料として、現在開発が進められている高強度の新材料を想定したものを適用することとした。

最後に、経済性ととも、超長大吊橋の実現性を大きく左右する耐風安定性についても検討を試み、それを確保するための構造的対策として、塔と主ケーブルを結ぶケーブルステイを取上げ、それにもCFRP製ケーブルを用いて、その効果を確かめたものである。

2. FRPの材料特性

FRPには、補強繊維として、アラミド系繊維、ガラス系繊維、炭素系繊維をそれぞれ使用したAFRP、GFRP、および、CFRPなどがある。鋼製ケーブルと比較したFRP製ケーブルの主な利点を列挙すると、

- ①単位体積重量が鋼に比べ極めて軽く、死荷重を大きく低減でき、運搬や、架設も容易である。
- ②耐食性に優れ、防錆対策などは不要で、メンテナンスも容易である。
- ③引張強度・疲労強度は、鋼と同等以上である。
- ④弾性係数は、鋼にほぼ匹敵する。
- ⑤線膨張係数は極めて小さく、鋼と異なり、温度変化に伴う構造の変形や断面力をほとんど生じず、ケーブル架設時の形状管理も容易である。
- ⑥非磁性体である。

などである。

これに対して、主な欠点を列挙すると、

- ①現状では、かなり高価で、その使用にあたっては、コストへの十分な配慮が不可欠である。
- ②耐候性について、マトリックス樹脂の吸湿や、紫外線による劣化が懸念される。
- ③脆性材料で、降伏伸びがなく、靱性も低いことから、ハンドリングに注意が必要である。
- ④せん断強度が低く、曲げ変形能が劣ることや、側圧に弱く、摩擦係数が小さいことから、サドルや、バンドの構造を工夫する必要がある。
- ⑤耐熱性、耐火性が弱く、使用環境、特に、周辺温度への配慮や、防火対策などが必要である。
- ⑥導電性によって、接触している金属に電食を生じさせたり、落雷で破損する恐れがある。

などである。また、軽量で、死荷重（質量）が大きく低減されることは、動的には必ずしも利点とはいえず、耐風安定性の面では逆に欠点となることも予測される。

3種のFRP、および、高張力鋼の応力-ひずみ関係を模式的に図示すると、図-2.1のようである。吊橋の主ケーブルとして注目されているCFRP（炭素繊維強化プラスチック）が、最も強度が高く、弾性係数も鋼に最も近いことが解る。

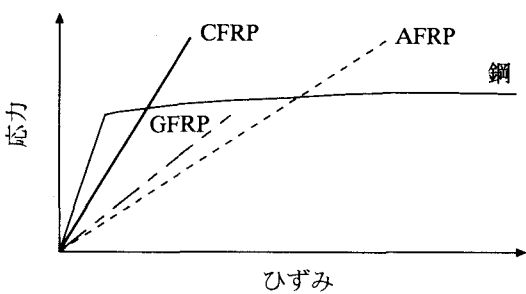


図-2.1 各材料の応力-ひずみ関係

3. 長大吊橋における経済性の概略検討

3.1 検討条件

中央径間長500m～1,500m、サゲ比1/10とし、鋼製、および、CFRP製主ケーブルの材料特性と許容応力度は表-3.1に示すような値とした。

また、主ケーブルの概算工費は、鋼製ケーブルに対するCFRP製ケーブルの単位重量当たりの材料費(/tf)の比率が10倍、あるいは、20倍の両者の場合を考えて、表-3.2に示すような値で与えられるものとした。

表-3.1 主ケーブルの材料特性と許容応力度

	鋼	CFRP
単位重量 (tf/m³)	7.85	1.60
弾性係数 (tf/m²)	2.0×10⁷	1.6×10⁷
線膨張係数 (1/℃)	12×10⁻⁶	0.6×10⁻⁶
引張強度 (kgf/mm²)	180	250
安全率	2.5	2.5
許容引張応力度 (kgf/mm²)	72	100

表-3.2 主ケーブルの概算工費

	材料費 [比率] (千円/tf)	架設費 [比率] (千円/m³)	工 費 [比率] (千円/m³)
鋼	480 [1.0]	5600 [1.0]	9370 [1.00]
CFRP	4800 [10.0]	5600 [1.0]	13280 [1.42]
	9600 [20.0]	5600 [1.0]	20960 [2.23]

表-3.2では、単位重量当たりの材料費(/tf)と単位体積当たりの架設費((設備費+人件費)/m³)とを合わせた工費を、単位体積当たりの費用に換算して示しており、この表から、材料費が10倍の場合には1.42以上、20倍の場合には2.23以上の断面積比であれば、CFRP製主ケーブルの工費の方が経済的ということになる。

3.2 検討結果とその考察

吊構造部の1tf/mの荷重（活荷重を含む）を支えるために必要な主ケーブルの所要断面積を、放物線ケーブルに関する基礎式に基づき、鋼製ケーブルの場合、および、CFRP製ケーブルの場合について試算した結果を図-3.1に示す。

また、両者の場合の所要断面積の比率（断面積比）を図-3.2に示す。この表には、前節の表-3.2において、経済性の分岐点となった断面積比の値についても付記している。

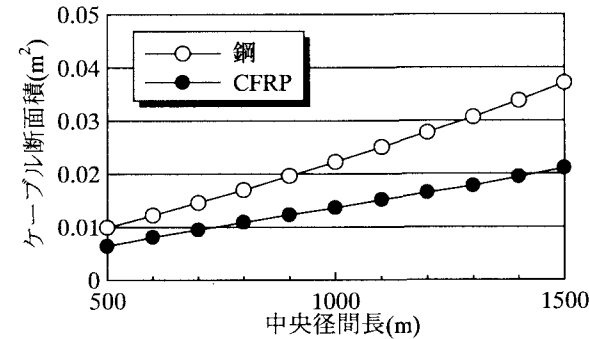


図-3.1 主ケーブルの所要断面積

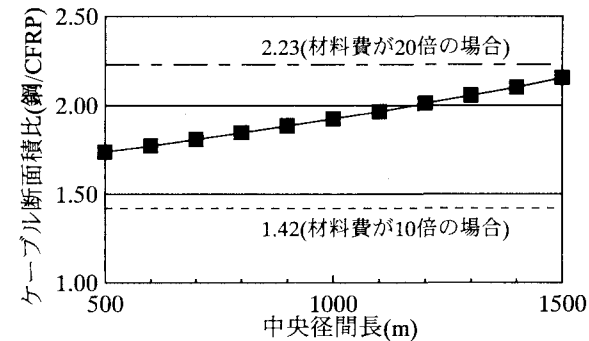


図-3.2 主ケーブルの断面積比

これらの図から、両者の場合の所要断面積、および、それらの断面積比は、中央径間長の伸長に対してほぼ直線的に増加し、長大化すればするほど、CFRP製主ケーブルの経済性がより高くなることが解る。

さらに、鋼製ケーブルに比べ単位重量当たりの材料費が10倍の場合には、中央径間長が500mであっても、CFRP製主ケーブルの方が経済的といえ、中央径間長1,500mの付近では、15倍程度になれば十分に競合できるものと予測できる。

なお、CFRP製主ケーブルの適用は、死荷重を大幅に低減し、主塔や、下部構造の経済性にも寄与することが期待される。特に、主ケーブル張力の激減によるアンカレイジの工費の節減は、コスト縮減に大きく寄与するものと推測される。

4. 超長大吊橋の試設計と経済性

4.1 設計条件と主ケーブル材料

試設計の対象となる超長大吊橋は、中央径間長2,500m、両側の側径間長1,000mで、サグ比1/10の3径間2ヒンジ形式流線形箱桁吊橋とし、主ケーブル材料として、次のような鋼製、あるいは、CFRP製ケーブルを適用することとした。

鋼製ケーブルについては、中央径間長2,000mを大きく超える超長大吊橋の場合、これまで最大の表-3.1の引張強度では、主ケーブル断面の直径が過大になることや、経済性も劣ることなどから、より高強度の新材料の開発が現在進められている。

そこで、その開発状況などを参照して、表-4.1に示すような引張強度、および、許容応力度の鋼製ケーブルを用いることとした。

一方、CFRP製ケーブルについても、より高強度のものの開発が進められているが、長大吊橋の検討に適用した、既に実用化段階の表-3.1に示した引張強度のものをそのまま適用することとし、その他の材料特性や、許容応力度も同一とした。

比較のために、表-4.1には、鋼製ケーブルの引張強度、許容応力度とともに、CFRP製ケーブルのそれらについても再掲したが、両者の許容応力度の値はほぼ等しくなっている。

表-4.1 主ケーブルの引張強度と許容応力度

	鋼	CFRP
引張強度 (kgf/mm ²)	210	250
安全率	2.0	2.5
許容引張応力度 (kgf/mm ²)	105	100

すなわち、ここでは、両者の許容応力度はほぼ等しいにもかかわらず、CFRP製ケーブルが鋼製ケーブルに比べ極めて軽量であることが経済性に及ぼす影響に主眼を置いて検討することとした。

4.2 鋼主ケーブル吊橋の試設計結果

試設計の対象とした超長大吊橋の一般図を、図-4.1に示す。補剛桁は、桁高7mで、両側端にフェアリングを有する流線形箱桁断面とした。ただし、フェアリングについては、非構造材とした。

まず、比較の対象となる鋼主ケーブル吊橋の試設計を先行して行った。その結果、補剛桁断面は、図-4.2に示すような板厚構成となった。

試設計によって得られた主要な構造諸元を、表-4.2に示す。この表には、死荷重に対応する主ケーブル、ハンガーの慣性質量、および、補剛桁の慣性質量と回転慣性の値を付記しているが、主塔の慣性質量の値については省略した。

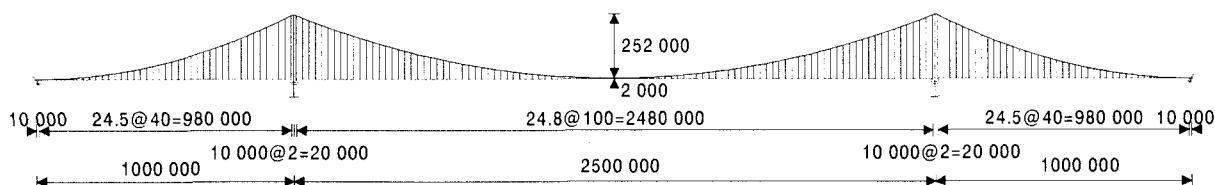


図-4.1 超長大吊橋の試設計例の一般図

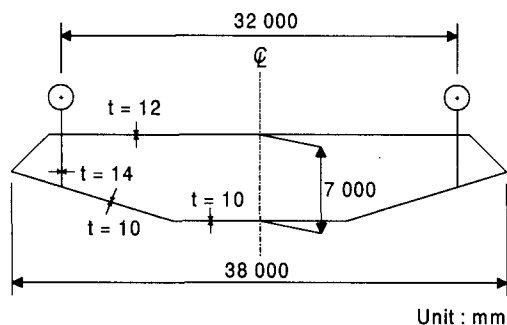


図-4.2 補剛桁の断面図

表-4.2 鋼主ケーブル吊橋の試設計結果

形 式		3 径間 2 ヒンジ吊橋
支間長	主ケーブル	1000 + 2500 + 1000 m
	補剛桁	980 + 2480 + 980 m
主ケーブル	サグ比	1 / 10
	中心間隔	32 m (最大)
	断面積	0.5564 m ² / cable
	慣性質量	4.575 t / m ÷ g (9.8m/sec ²)
ハンガー	断面積	0.006 m ² / 格点
	慣性質量	0.05 t / m ÷ g (9.8m/sec ²)
	中心間隔	中央径間 24.8 m 側径間 24.5 m
センターステイ	断面積	0.2 m ² (中央径間 1山)/cable
補剛桁	形式 (桁高)	鋼箱桁 (桁高 7m)
	断面積	1.3 m ²
	鉛直曲げ剛性	11.0 m ⁴
	水平曲げ剛性	132 m ⁴
	ねじり剛性	23.7 m ⁴
	慣性質量	23 t / m ÷ g (9.8m/sec ²)
	回転慣性	2500 tm ² / m ÷ g (9.8m/sec ²)
主塔	断面積	2.6~4.2 m ² /塔柱
	塔面内剛性	13.5~23.2 m ⁴ /塔柱
	塔面外剛性	26.0~85.3 m ⁴ /塔柱
	ねじり剛性	17.6~37.3 m ⁴ /塔柱

4.3 CFRP主ケーブル吊橋の試設計結果

前節の鋼主ケーブル吊橋の試設計の後、それを基に、主ケーブルをCFRP製ケーブルに代えて、CFRP主ケーブル吊橋の試設計を行った。

その際、補剛桁の断面構成、および、構造諸元については、図-4.2、表-4.2に示した鋼主ケーブル吊橋の試設計結果におけるものと同一とした。

また、主ケーブルの材料特性や、幾何剛性などの相違が及ぼす影響の検討が主たる目的であったことから、主塔についても、便宜上、表-4.2に示した構造諸元と同一とした。

したがって、両者の試設計結果の相違点は、主ケーブルの断面積と死荷重のみであり、これらを補剛桁の死荷重とともに示し比較すると、表-4.3 のようになる。なお、この表において、 w_c 、 w_g は、水平軸に沿って分布する主ケーブル、補剛桁の死荷重をそれぞれ表しているが、ハンガー等に関するものの $\frac{1}{2}$ づつも割振られている。

表-4.3 試設計結果の比較

			鋼	CFRP
主ケーブル断面積 (mm ² /cable)			0.5564	0.4520
死荷重 (tf/mm/cable)	w _c	中央径間	4.825	0.905
		側径間	4.935	0.935
	w _g	中央径間	11.595	11.595
		側径間	11.610	11.610

4.4 静的構造特性の概要

経済性を検討して実現性を問うためには、その前に、鋼主ケーブル吊橋とCFRP主ケーブル吊橋の両者について、静的構造特性を比較し、有害な特性の有無を確かめておく必要がある。

そこで、両者の試設計結果に基づいて、補剛桁を魚骨(fish-bone)モデルに置き換えた立体骨組構造解析モデルを作成した。ウィンドシューについては、図-4.3に示すように、橋軸直角方向成分以外の全ての変位成分が解放された節点を一端に持つ剛部材を塔横梁上に配置してモデル化した。

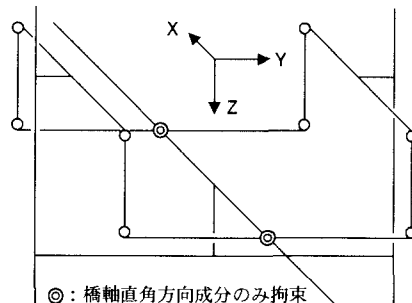


図-4.3 ウィンドショーのモデル化

また、吊橋特有の設計条件を満たすための初期形状決定、すなわち、死荷重時での主ケーブルの

節点座標や、部材の初期張力、無応力長、および、主塔の無応力形状などの算定は、文献4)、5)で誘導した手法を適用した。

図-4.4には、死荷重時の平衡状態におけるCFRP主ケーブル吊橋モデルのスケルトン図を示す。両者の解析モデルの相違点は、初期形状決定によって算定される主ケーブル中間節点の鉛直座標が僅かに異なるのみであり、鋼主ケーブル吊橋モデルについては省略した。

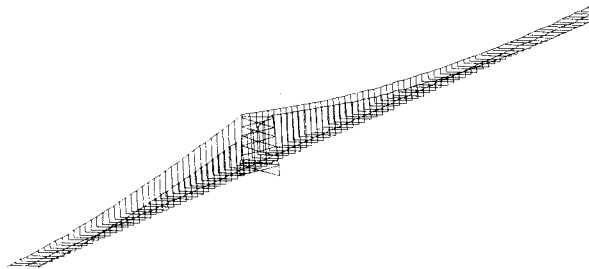


図-4.4 解析モデルのスケルトン図

設計荷重に対する静的構造特性を検討するために、非線形有限変位解析^{4) 5)}を両者の解析モデルを対象に行った結果について概要を述べると、以下のようなことが解った。

まず、CFRP主ケーブル吊橋モデルでは、活荷重載荷時の主ケーブル部材の張力の変動量、および、それに死荷重時張力を加えた総量がともに、鋼主ケーブル吊橋モデルに比べて大きく低減されることとなった。

一方、主ケーブルの伸び剛性、幾何剛性の低下により、CFRP主ケーブル吊橋モデルでは、鋼主ケーブル吊橋モデルに比べ、活荷重載荷時の鉛直たわみが増加したが、本州四国連絡橋公団の上部構造設計基準に規定されたたわみ制限を僅かに超える程度であった。

また、そのような鉛直たわみの増加に伴い、補剛桁の面内曲げモーメントも増加したが、活荷重載荷時の応力で箱桁断面の板厚が決定される程の量にはならなかった。

次に、吊橋の温度変化の影響は主ケーブルの線膨張係数に支配され、その値が極めて小さいことにより、CFRP主ケーブル吊橋モデルでは、温度変化に伴う鉛直たわみがほとんど生じず、鋼主ケーブル吊橋モデルに比べて大きく減少した。

したがって、CFRP主ケーブル吊橋モデルでは、温度変化に伴う補剛桁の面内曲げモーメントもほとんど生じず、鋼主ケーブル吊橋モデルに比べて大きく減少した。

さらに、風荷重に対しては、活荷重に対してと

同様に、主ケーブルの伸び剛性、幾何剛性の低下により、CFRP主ケーブル吊橋モデルでは、鋼主ケーブル吊橋モデルに比べ、補剛桁の水平たわみが増加したが、特に問題となるような量にはならなかった。

同様に、そのような水平たわみの増加に伴って、鋼主ケーブル吊橋モデルのものと同一断面としたCFRP製主ケーブル吊橋モデルの補剛桁の面外曲げモーメントも増加したが、断面構成に大きな影響を及ぼす程の増加量ではなかった。

これらの設計荷重に対する静的構造特性の検討の結果、CFRP主ケーブル吊橋モデルにおいて、特に問題点はみられなかった一方、主ケーブル張力が大きく低減された点は、経済性にも大きく寄与するものといえた。

なお、静的構造特性の解析結果の詳細については、文献6)に記述されているので参照されたい。

4.5 経済性に関する検討

CFRP主ケーブル超長大吊橋の経済性を、鋼主ケーブル超長大吊橋と比較するために、表-4.4に、両者の主ケーブルの総重量とそれらの比率を、前節の解析から得られた最大張力とともに示す。

この表において、D、D+Lは、死荷重時、および、(死荷重+活荷重)時を表しており、D+Lの最大張力は、活荷重の全径間載荷時に得られたものである。

表-4.4 主ケーブルの最大張力と総重量

	最大張力 (tf/cable)		総重量 (tf/br.)
	D	D + L	
鋼	54984.4	60636.3	40513.6 [6.04]
CFRP	41841.5	47336.3	6707.2 [1.00]

表-4.5 主ケーブルの概算工費

	材料費 [比率] (千円/tf)	架設費 [比率] (千円/㎡)	工 費 [比率] (千円/tf)
鋼	480 [1.0]	5600 [1.0]	1200 [1.0]
CFRP	4800 [10.0]	2800 [0.5]	6800 [5.5]
		5600 [1.0]	8600 [7.0]
	9600 [20.0]	2800 [0.5]	11800 [9.5]
		5600 [1.0]	13600 [11.0]

また、長大吊橋における経済性の検討に用いた表-3.2の概算工費を超長大吊橋にも適用することとし、表-4.5に、単位重量当たりの材料費 (/tf) と単位体積当たりの架設費((設備費+人件費)/㎡) とを合わせた工費を、ここでは、単位重量当たりの費用に換算して示す。

ただし、表-3.2において、単位体積当たりの架設費については、超長大化による効率性を考慮して、鋼製ケーブルに対するCFRP製ケーブルの比率が0.5倍の場合も想定した。

したがって、表-4.4から、両者の主ケーブルの総重量の比率は約6倍であり、表-4.5から、CFRP製ケーブルの超軽量の特質を生かして単位体積当たりの架設費を0.5倍近くまで下げることができ、単位重量当たりの材料費の比率を10倍程度までに抑えることができれば、CFRP製主ケーブル吊橋の経済性が満たされるということになる。

しかしながら、これは、主ケーブルの工費のみによる比較であり、表-4.4から、CFRP主ケーブル吊橋における主ケーブルの最大張力は、鋼主ケーブル吊橋のその約80%に低減されていることから、アンカレイジや、塔、および、それを支える橋脚、基礎などの工費もかなり低減され、経済性を大きく高めることを十分に予測できる。

5. フラッター解析による耐風安定性の検討

経済性の検討の後、鋼主ケーブル吊橋とCFRP主ケーブル吊橋の両者について、連成フラッター解析による耐風安定性の検討を試みた。超長大吊橋では、耐風安定性は、経済性ととともに、その実現性を大きく左右するからである。

連成フラッター解析に適用する固有振動数、振動モードを求めるための固有振動解析は、前章における静的構造特性の検討に適用した、非線形有限変位解析法^{4) 5)}によって得られる死荷重時の平衡状態での接線剛性行列と集中質量行列を用いた固有振動解析法^{5) 7)}によった。

連成フラッター解析は、モード解析によるマルチモード連成フラッター解析プログラム^{8) 9)}を用い、上述の無風時での1～40次の固有振動解析結果を適用して行った。

非定常空気力としては、補剛桁に、平板翼理論による揚力、および、ピッチングモーメントを作用させ、空気力の定式化は文献10)によるものとした。さらに、補剛桁（抗力係数0.80）には、抗力として、準定常理論に基づく空気力も作用させた。なお、構造減衰は対数減衰率 $\delta = 0.02$ とした。

連成フラッター解析からは、作用空気力成分を加えた運動方程式の複素固有値解析によって、適用したモード次数と同じ数の有風時振動モード分枝が得られるが、ここでは、最も低い風速で負減衰の領域に遷移するフラッターモード分枝に着目し、 U （風速）- δ_w （空力減衰：対数減衰率）を描いて、限界風速の推定値を算定した。

解析モデルは、前章における静的構造特性の検討に適用した鋼主ケーブル吊橋モデルと、CFRP主ケーブル吊橋モデルを、それぞれの基本モデルとし、これらに加えて、CFRP主ケーブル吊橋モデルについては、図-5.1に示す3ケースのケーブルステイモデルも対象とした。

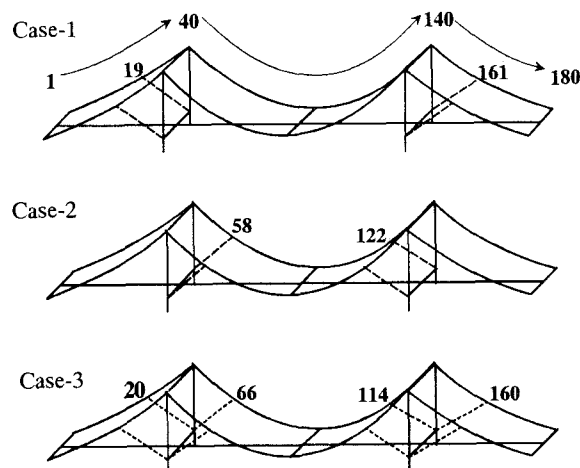


図-5.1 ケーブルステイモデル

このケーブルステイは、主ケーブルの軽量化によって耐風安定性の低下が予想されたことから、構造的対策として設置されたものであり、ハンガーと同断面積のCFRP製ケーブルを用いるものとした。経済性への影響は最小限であり、軽量で垂れ下がらず、この程度の直径であれば、構造景観を損なうこともないと思われる。

また、図-5.1の3ケースのモデルにおけるケーブルステイの設置位置（図中の番号は下流側の主ケーブルの節点番号を表している）は、塔側定着点を補剛桁高さ付近に固定し、主ケーブル側定着点を橋軸方向に移動させて、連成フラッター限界風速の推定値が最高の値となる箇所を探索した結果から得られた最適位置を示している。

解析結果の一部として、図-5.2に、鋼主ケーブル吊橋モデルとCFRP主ケーブル吊橋モデルの両基本モデルについて、フラッターモード分枝の $U-\delta_w$ 曲線を示す。図-5.3には、CFRP主ケーブル吊橋の3ケースのケーブルステイモデルについて、同様に、フラッターモード分枝の $U-\delta_w$ 曲線を示す。

さらに、表-5.1には、基本モデル、および、ケーブルステイモデルの全てのモデルについて、 $U-\delta_w$ 曲線から算定された連成フラッター限界風速の推定値を、たわみ、および、ねじりの対称一次固有振動数とともに示す。

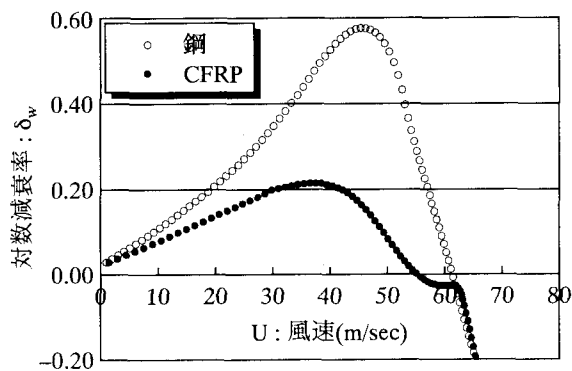


図-5.2 U- δ_w 曲線（基本モデル）

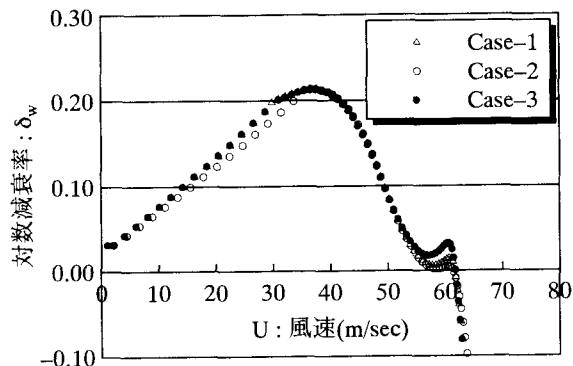


図-5.3 U- δ_w 曲線（ケーブルステイモデル）

表-5.1 各モデルの固有振動数と限界風速

	基本モデル		ケーブルステイモデル		
	鋼	CFRP	Case-1	Case-2	Case-3
たわみ振動数	0.064	0.064	0.064	0.065	0.065
ねじり振動数	0.170	0.203	0.203	0.203	0.203
限界風速(m/s)	61.5	55.8	61.9	61.6	62.1

図-5.2から、鋼主ケーブル吊橋モデルとは異なって、CFRP主ケーブル吊橋モデルの基本モデルのU- δ_w 曲線は屈曲し、それに伴って、算定される連成フラッター限界風速の推定値が低下することが解る。

また、図-5.3からは、CFRP主ケーブル吊橋モデルの側径間または中央径間にケーブルステイを設置することにより、U- δ_w 曲線の屈曲部が部分的に引き上げられて、算定される連成フラッター限界風速の推定値が高くなることが解る。

さらに、表-5.1から、CFRP主ケーブル吊橋モデルの連成フラッター限界風速の推定値は、鋼主ケーブル吊橋モデルのそれと比較して10%程度低下することが解る。

しかしながら、全径間に、あるいは、中央径間または側径間のみにでも、ケーブルステイを最適位置に設置することによって、鋼主ケーブル吊橋モデルのそれを上回るまでに耐風安定性を回復できることが解る。

なお、この表-5.1において、CFRP主ケーブル吊橋モデルの連成フラッター限界風速の推定値の低下は、当然、主ケーブルの軽量化と伸び剛性、幾何剛性の低下によるものであるが、固有振動特性は、ねじり対称一次固有振動数が大きく変化しているのに対して、たわみ対称一次固有振動数には大きな変化がみられない。

また、ケーブルステイの設置は、主ケーブルの振動を抑えることによる効果を期待したものであったが、たわみ、および、ねじりの対称一次固有振動数には、ともに大きな変化はみられない。

これらのように、対称一次固有振動数がたわみについては変化せず、ねじりのみ一方的に高くなったにもかかわらず、連成フラッター限界風速の推定値が低下したことや、たわみ、ねじりの対称一次固有振動数の変化には関係なく、ケーブルステイの設置が効果を及ぼしたことの要因は、文献6)に詳細に記述されているので参照されたい。

6. 結 言

前章までの長大、超長大吊橋における検討結果からは、既に実用化段階にあるCFRP製ケーブルを主ケーブルに用いたCFRP主ケーブル吊橋の経済性と耐風安定性について、次のようなことがいえた。

(1)中央径間長500m~1,500mの長大吊橋における経済性を、これまでの最大強度の鋼製ケーブルを主ケーブルに用いた鋼主ケーブル吊橋と概略的に比較した結果、長大化すればするほど、CFRP主ケーブル吊橋の経済性がより高くなった。

(2)また、鋼製ケーブルに比べ単位重量当たりの材料費が10倍の場合には、中央径間長が500mであっても、CFRP製ケーブルの方が主ケーブル工費のみで経済的であり、中央径間長1,500mの付近では、15倍程度にできれば、同様に主ケーブル工費のみで経済的になり得るものと予測できた。

(3)次に、中央径間長2,500mの流線形箱桁吊橋の試設計を行って、経済性を検討する前に、CFRP主ケーブル吊橋の各種設計荷重に対する静的構造特性を、現在開発中の高強度の新材料を想定した鋼製ケーブルを主ケーブルに用いた鋼主ケーブル吊橋と比較した結果、静的設計上の問題点は特にみられなかった。

(4)上述の試設計結果から、超長大吊橋における経済性を比較した結果、超軽量の特性を生かして鋼製ケーブルに対する単位体積当たりの架設費を0.5倍近くまで下げられ、単位重量当たりの材料費を10倍程度にできれば、CFRP製ケーブルの方

が主ケーブルの工費のみで経済的になり得るものと予測できた。

(5)さらに、CFRP主ケーブル吊橋の主ケーブルの最大張力は、鋼主ケーブル吊橋のその約80%に低減され、アンカレイジや、塔、および、それを支える橋脚、基礎などの工費もかなり低減され、経済性がより高められる可能性のあることが確かめられた。このような可能性は、超長大吊橋のみならず、長大吊橋においても同様であることは明らかであった。

(6)最後に、経済性ととも、超長大吊橋の実現性を大きく左右する耐風安定性についても比較を連成フラッター解析により試みた結果、CFRP主ケーブル吊橋の連成フラッター限界風速の推定値は、鋼主ケーブル吊橋のそれと比較して10%程度低下し、主ケーブルの軽量化が耐風安定性には悪影響をもたらすこととなった。

(7)そこで、CFRP主ケーブル吊橋の構造的耐風安定化策を検討した結果、全径間に、あるいは、中央径間または側径間のみにでも、細径のCFRP製のケーブルステイを最適位置に設置することによって、その耐風安定性を、鋼製主ケーブルの場合のそれを上回るまでに回復できた。

ゆえに、限定された条件下における検討結果であるとともに、数多くの解明すべき問題点が未だ残されているが、本研究によって、CFRP主ケーブル長大、超長大吊橋の実現性に関する一資料を得ることができたといえる。

なお、今や、本研究で設定したCFRP製ケーブルの引張強度 $250\text{kgf}/\text{mm}^2$ を大きく上回る $290\text{kgf}/\text{mm}^2$ のものも実用化段階に移行しつつある。

それに対して、鋼製ケーブルの引張強度は、 $180\text{kgf}/\text{mm}^2$ に到達したのさえ最近のことで、 $220\text{kgf}/\text{mm}^2$ まで開発可能とはいわれているものの、現状において量産化が可能なのは $200\text{kgf}/\text{mm}^2$ とされており、設定した値 $210\text{kgf}/\text{mm}^2$ を下回っている。

したがって、今後の材料開発の推移や、安全率または安全係数の取り方によっては、CFRP主

ケーブル超長大吊橋の経済性がさらに高まることも十分に予想される。

最後に、本論文が、鋼橋技術研究会技術情報部会（部会長：藤野陽三）における成果の一部であることを付記するとともに、委員各位の常に適切な助言とご助力に対し、心より謝意を表したい。

参考文献

- 1) 成田信之編：鋼橋の未来，技報堂出版，1998.
- 2) 明石海峡大橋開通記念特集：長大橋技術の展開と展望，橋梁と基礎，建設図書，Vol. 32，No. 8，1998.
- 3) 建設省土木研究所材料施工部化学研究室：繊維強化プラスチックの土木構造材料への適用に関する共同研究報告書(I)－1次構造材料としてのFRPの適用事例調査－，共同研究報告書No. 210，1998.
- 4) 林 正・前田研一・増井由春・内海 靖・山野長弘：長径間吊橋の立体有限変位解析，構造工学論文集，Vol. 37A，1991.
- 5) 土木学会：構造工学における計算力学の基礎と応用－応用編，構造工学シリーズ7，1996.
- 6) 前田研一・森園康之・中村一史・江口立也・藤野陽三：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.
- 7) 橋梁振動研究会：橋梁振動の計測と解析，技報堂出版，1993.
- 8) 岩本政巳・藤野陽三・長井正嗣：三次元モデルによる長大斜張橋のフラッター解析，土木学会第48回年次学術講演会講演概要集，1993.
- 9) 岩本政巳：吊形式橋梁に関するフラッターを中心とした空力振動予測，東京大学博士学位論文，1997.
- 10) 宮田利雄・山田 均・太田博文：立体骨組解析法における横たわみしたトラス補剛吊橋の曲げねじれフラッター解析，土木学会論文集，No. 404/I-11，1989.