

◆ 長大橋特集 ◆

CFRP 吊橋の経済性に関する研究

明嵐政司* 西崎 到**

1. まえがき

繊維強化プラスチック (Fiber Reinforced Plastic, FRP と略す) は、小型船舶・航空機・自動車に広く使われている。鋼材やコンクリートに比べると、防食性能及び比強度 (強度と単位体積重量の比) が高い。

FRP は、耐候性に優れた樹脂を使用すれば、塗装なしでも高い耐候性を確保することができるが、一般には景観保護の観点から塗装を行っている。塗料の退色が景観に与える影響に配慮して塗装の塗り替えを行うことはあるが、これは FRP 母材の保護の観点からは全く必要ない。また、FRP は比強度が高いために、中央径間長 2,500m (全橋長 4,500m) にも及ぶ超長大吊形式橋梁¹⁾ やヘリコプターによって運搬可能な応急橋梁²⁾ の実現を可能に出来る。また、構造物の軽量化は、施工期間や経費だけでなく、その基礎工や下部工の施工期間及び経費の削減³⁾ ももつながる。しかし、このように優れた特性を有する FRP が土木構造材料として広く利用されるためには、材料価格の低減と構造物の設計手法の確立が必要となる。

本研究では、将来材料価格の低減による FRP 構造物の鋼構造物に対する経済性を確認した。構造物としては、FRP の材料特性上有利に働く吊り形式道路橋とした⁴⁾。そのために、最初に橋長 800 メートルの吊橋の概略設計を行った。800 メートル

以上の橋長の吊橋を設計するには、特殊な風洞実験による桁断面の耐風設計を行う必要がある。しかし、それ以下の橋長では既存の設計技術指針を参考にできることもこのような仕様の吊橋を選択した理由である。FRP には使用する繊維の材質によって様々なものがある。本研究では、鋼材に比べて強度は大きいが、若干弾性率が低い炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP と略す) を選択した。

2. CFRP 吊橋及び鋼製吊橋の概略設計

2.1 基本形状

吊橋の形式 (図-1 参照) は、三径間二ヒンジ吊橋、支間割は 150m+500m+150m=800m である。サグ比 (サグと補鋼桁の最大支間の比、サグとはケーブルなどの線体を張り渡した場合の垂れ下がり量であり、吊橋では塔頂と主ケーブルの最下点の鉛直距離で表される) は、鋼製吊橋の場合に最も経済的となる 1/10 とした。ただし、CFRP 吊橋に限って、サグ比を 1/20 とした場合の検討も行った。桁は箱桁、主塔はラーメン形式、基礎はコンクリート製直接基礎である。道路幅員構成を図-2 に示す。

2.2 地盤諸元

基礎を設置する地盤は CL 級岩盤を想定し、以下の地盤条件を設定した。

岩級 : CL 級岩

粘着力 : 0.13MPa

せん断抵抗角 : 40°

変形係数 : 5.88Pa

せん断弾性波速度 : 1,000m/s

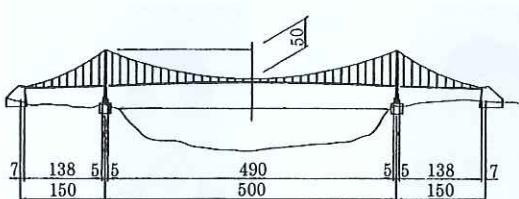


図-1 吊り橋の形式 (単位 : m)

Economical Competitiveness of CFRP Suspension Bridge from Aspect of Life Cycle Cost

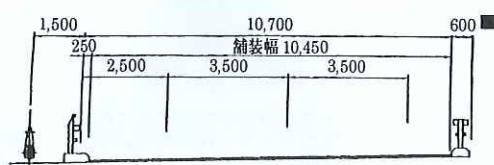


図-2 道路幅員構成 (単位 : mm)

表-1 使用材料の特性

	CFRP	鋼材
補剛桁	T800HB 許容応力度：102MPa 弾性率：64GPa	SS400 許容応力度：137.3MPa SM490Y 許容応力度：205.9MPa 弾性率：205.9GPa
主塔	T300 許容応力度：147MPa 弾性率：122GPa	SS400 SM490Y
ケーブル	T300 許容応力度：147MPa 弾性率：122GPa	メインケーブル 許容応力度：980MPa ハンガー 許容応力度：627.2MPa
単位体積重量	15.7kN/m ³	76.9kN/m ³

このように比較的堅固な地盤条件は、比強度の大きなFRPにとっては、不利な条件である。このような条件を設定したのは、主に上部工での比較を鋼製吊橋と行うことを本研究の目的としたからである。

2.3 使用材料

吊橋の主要な構造材料は、CFRP とし、地覆や防護柵のような付帯施設の材料には、高強度や高弾性が要求されないので、CFRP よりも安価で所定の材料に対する要求を満足することの出来るガラス繊維強化プラスチック (Glass Fiber Reinforced Plastic, GFRP と略す) を採用した。使用した主要材料の許容応力度及び弾性率を表-1 にまとめた。許容応力度は、材料の安全率を元にして設定した。CFRP は韧性期待できないことから、材料の安全率は鋼材が 3 であるのに対して、CFRP では 10 とした。

2.4 適用基準類

吊橋の設計に当たっては、以下に示す基準類を適用した。

- (1) 上部構造設計基準・同解説：本州四国連絡橋公団 1989 年 4 月⁵⁾
- (2) 海峽横断プロジェクト用耐震設計法(下部工)：本州四国連絡橋公団 平成 11 年 3 月⁶⁾
- (3) 明石海峡大橋耐風設計要領・同解説；本州四国連絡橋公団 平成 2 年 2 月⁷⁾
- (4) 道路橋示方書 共通編・鋼橋編：(社) 日本道路協会 平成 8 年 12 月⁸⁾

2.5 解析モデル

静的な解析に加えて、動的な解析も行い、部材

断面力及び振動特性を算出した。静的な解析は、死荷重・活荷重・風荷重・温度荷重・支点移動・製作架設誤差に対して実施した。振動特性は、地震及び風に対するものを考慮した。地震に対する振動特性は応答スペクトル解析により断面力を算出した。風による振動特性は、耐風安定性に関して固有振動数を算出するとともに、フランジャー発現風速はゼルベルグ式を用いて推定した。

上部工(補剛桁・主塔・ケーブル・ハンガー)及び下部工(アンカレッジ・主塔基礎)の仮想断面を考慮して、断面全体を棒部材に置き換えた立体骨組みモデルを解析のために活用した。常時及び暴風時の解析では、地盤が強固な条件での計算なので、解析結果に及ぼす下部構造物の影響が小さく、基礎を固定とした全体系立体モデルとした。地震時の解析には下部工も含めた全体系立体モデルとした。このとき、地盤はバネに置き換えてモデル化した。ダンパーあるいはスライドを地盤モデルに導入しなかったのは、地盤が比較的強固な岩盤であるので、比較的軟弱な地盤に見られる粘弹性体的な挙動や地盤自身の移動のような複雑な要素を導入せずに、地盤を単なる弾性体として扱ったためである。

3. 結果

3.1 上部工

上部工の概略設計の結果を表-2 に示す。補剛桁の最大曲げモーメント(常時)は、鋼橋に比べると約 40%程度大きい。最大曲げモーメント(暴風時)も 30%程度大きい。水平方向最大変位は鋼製吊橋の約二倍程度であった。

活荷重による鉛直たわみは、6m となって、道路橋示方書が定める許容値 1.4m を大きく上回っている。ただし、「道路構造令の解説と運用」⁹⁾に規定されている縦断曲線半径の望ましい値は、凹型曲線の場合、走行速度 60km/h に対して 1,500m であり、補剛桁の変位による曲率半径の最も短いサグ比 1/10 の CFRP 橋で 1,630m であるので、自動車の走行性に影響を与えるほど大きなものではない。吊り橋では、一般の橋梁設計に規定されるたわみ制限は制約条件にはならない。吊り橋の実際の設計では、ハンガー等を調整することによって補剛桁に上方向の変位を与え、鉛直たわみが最大になった状態で補剛桁が水平になるように

設計することが出来る。

塔基部面外最大曲げモーメント(常時)はCFRP 吊橋が14%程度小さく、塔基部面内最大曲げモーメント(暴風時)も6%程度小さい。塔基部最大軸力は、鋼製吊橋の40%程度であった。CFRP 吊橋では死荷重の減少に伴うフランジャー発生風速の低下が懸念されたが、ねじれ振動数が高くなつたために照査風速63m/sを上回るフランジャー限界風速が得られた。

3.2 サグ比の検討

鋼製吊橋のサグ比は、経済性の観点から通常は1/10とする。ところが、橋梁が架設される付近の航空管制上の制約条件や景観上の配慮から、サグ比を低くする場合もある。そこで、CFRP 吊橋に限ってサグ比を変化させ、補剛桁や主塔の発生する応力や撓みを計算した。サグ比は1/20とした。

サグ比が小さくなることによって、ケーブルが分担する張力が大きくなる。したがって、表-2に示すように、ケーブルの断面積・ケーブルの最大張力は大きくなっている。桁の鉛直曲げモーメント(常時及び暴風時)が小さくなったのも、ケーブルが負担する張力が大きくなつたことによるものである。このような変化を除けば、サグ比の変化による大きな影響は出でていない。

サグ比の変化による上部工の数量変化を表-3に示す。サグ比が小さくなることによって、ケーブルの分担する張力が大きくなり、ケーブルの重量は大きくなつたが、主塔の高さが小さくなることによる材料の重量減少の方が大きい。参考文献(10)をもとにして計算したGFRPのケーブル及び引き抜き成形材(補剛桁や塔に使用される材料)の単位重量当たりの単価

は、それぞれ26円/kg及び1,831円/kgとなっている。CFRPのケーブル及び引き抜き成形材の単価は未掲載であるが、GFRPの事例から、CFRPでも引き抜き成形材に比べてケーブルが安価になる可能性がある。もしこの推測が正しければ、吊橋では、サグ比を小さく取ることによって経済的に有利になる。

3.3 下部工

基礎底部の大きさは鋼製吊橋が縦15m×横44mに対して、CFRP 吊橋では、縦17m×横44mとなつた。CFRP 吊橋の方が鋼製吊橋よりも大きくなつたのは、上部工の鉛直反力の低下によって、水平力に生じる荷重の傾斜や偏心の影響が大きくなつたためである。アンカレッジは鋼製吊橋、CFRP 吊橋ともに構造上必要な寸法つまり最小寸法で形状が決定した。ただし、ケーブル張力が小さく、ストランド数が少ないCFRP 吊橋の方(アンカレッジ底部の寸法は縦40m×横38m)が、鋼製吊橋(アンカレッジの底部寸法は縦43m×

表-2 上部工の比較

		単位	鋼製吊橋	CFRP 吊橋
基本 形状	サグ比		1/10	1/10 1/20
	ケーブル断面積	m ²	0.0736	0.0177 0.028
吊構造部 (補剛桁)	死荷重強度(橋面工含む)	kN/Br	154.8	55.9 55.9
ケーブル	最大張力	MN	68.3	27.6 45.3
主塔	断面積	m ²	0.775	0.605 0.605
変位	桁活荷重最大変位	m	1.56	6.04 7.49
	桁最大鉛直変位(常時)	m	2.27	6.44 7.93
断面力	桁最大水平変位(暴風時)	m	4.85	8.82 8.14
	塔頂最大変位	m	4.85	8.82 8.14
断面力	桁撓みによる縦断局率半径	m	4,012	1,630 2,106
	桁鉛直曲げモーメント (常時/暴風時)	MN, m	57.8 63.7	80.0 81.6 62.0 63.8
断面力	桁水平曲げモーメント (暴風時)	MN, m	216.5	208.5 193.6
	主塔基部面外曲げモーメント (常時)	MN, m	70.1	60.3 71.7
振動数	主塔基部軸力(常時)	MN	68.4	26.1 25.6
	主塔基部面内曲げモーメント (暴風時)	MN, m	58.8	55.2 42.7
振動数	主塔基部軸力(暴風時)	MN	52.5	24.0 21.9
	鉛直対称1次振動数	Hz	0.206	0.171 0.153
耐風安定性	ねじれ対称一次振動数	Hz	0.534	0.883 0.864
	振動数比		2.592	5.164 5.647
耐風安定性	フランジャー発現風速	m/s	162	123 121
	フランジャー照査風速	m/s		64

表-3 サグ比の変化による上部工の数量変化

	単位	サグ比	
		1/10	1/20
ケーブル関係	MN	0.608	0.862
補剛桁	MN	40.1	40.1
主塔	MN	9.90	7.98
舗装	MN	2.94	2.94
合計	MN	53.5	51.9

横 45m) よりも小さいアンカレッジとなつた。ただし、主塔基礎及びアンカレッジの高さは等しく、それぞれ 17m 及び 39m となつた。

このように、CFRP 吊橋の下部工が鋼製吊橋の下部工とほとんど変わらない結果になつたのは、基礎部分の地盤を CL 級岩とし、比較的堅固な地盤条件を与えたためである。CFRP 吊橋の死荷重強度は鋼製吊橋の 1/3 程度なので、地盤条件が劣悪になるほど基礎工も含めた橋梁下部工は有利になると推察される。

参考文献(3) では N 値 10 以下のゆるい細砂層を想定して、上部工の死荷重の低減が下部工のコスト低減に与える影響を試算している。それによれば、上部工の死荷重が 1/2 に低減すると下部工の断面形状は 25% 減、主鉄筋量は 18% 減になりコストは 77.6% に低減する。死荷重が 1/4 になると同様にしてコストは 55.2% まで低減するとしている。この結果を用いて按分すると、死荷重が 1/3 になった場合には、軟弱地盤上の下部工コストは約 62% まで低減することになる。

4. コスト比較

ライフサイクルコストを用いて、CFRP 吊橋と鋼製吊橋のライフサイクルコストを比較した。ただし、コストとして計上するものは、初期コストとしては材料費、維持管理コストとしては鋼製吊橋の塗装の塗り替え費用のみを考慮した。

先にも示したように、景観上の観点からの塗り替え要因とな

る塗膜の退色を無視すれば、CFRP の塗り替えは必要ない。鋼材のように塗膜と母材の間に腐食が生じて、塗膜が母材から脱落することが FRP では起きないためである。

4.1 CFRP の将来材料コストの推定¹¹⁾

CFRP 引抜材の見積書を材料製造会社より入手し、その材料単価の内訳から将来材料単価の低減可能性を検討した。見積書による CFRP 引抜材単価内訳を表-4 の A 欄に示す。B 欄は見積もりに比べて材料の生産量を大幅に増加させた場合の材料価格を推計したものである。単価内訳からわかるように、CFRP では炭素繊維原料価格の材料価格に占める割合が最も大きい。さらに、炭素繊維製造会社から炭素繊維の実態価格をヒアリングして、表-5 を得た。

通常の引抜成形材はトウ (tow, 一方向層 (UD 層) に使われる) を上下二層のクロス (cloth) で挟んだ三層構造になっている。製造上の制約によって、高価なクロス層を省くことは出来ない。しかし、強度の大部分は UD 層が分担しているので、クロス層を安価なガラス繊維に置き換えることが可能である。その場合の材料単価を表の

表-4 CFRP 引抜材の材料単価内訳 (420mm×3mm 平板、約 2.0kg/m)

項目	A	B	C
	60m 製作する際の単価 (円/m)	60km(120t) 製作する 際の単価(円/m)	将来価格 (円/m)
炭素繊維	17,355	17,355	4,000
不飽和ポリエ スチル樹脂	1,166	1,166	1,166
副資材	325	325	325
設備償却費	2,912	825	825
型替人件費	326	0	0
型替費用	10,230	10	10
管理人件費	2,800	810	810
合計	35,114 (17,557円/kg)	20,491 (10,246円/kg)	7,136 (3,568円/kg)

表-5 炭素繊維の価格

炭素繊維 の種類	規格	単位面積当たりの 価格 (円/m ²)	単位重量当たりの 価格 (円/kg)
トウ	汎用 PAN 系		5,000
クロス	汎用 PAN 系 200g/m ²	6,500	32,500
クロス	汎用 PAN 系 300g/m ²	9,500	31,700
クロス	高弾性型ピッチ系	15,000	50,000

注) PAN はポリアクリロニトリル (Polyacrylonitrile の略) を意味する。

C 欄に示す。

したがって、各欄の合計は、A 欄が CFRP の現在の材料価格、B 欄が量産効果を期待した CFRP の将来価格、C 欄が量産効果と CFRP と GFRP の組み合わせによるハイブリッド化を期待した場合の将来材料価格である。ここに示すように、量産による価格低減は約 4 割であり、さらに量産とハイブリッド化による価格の低減は約 8 割となる。したがって、ハイブリッド化単独の価格低減効果は約 4 割となり、量産の効果とほぼ等しい。

4.2 ライフサイクルコストの比較

前節で設計した吊橋の結果をもとに、吊橋の上部工及び下部工の建設コストを推定する。設計計算結果と単価の推定結果を用いて、鋼製吊橋及び CFRP 吊橋の上部工の試算を行った。結果を表-6 に示す。同様にして、下部工の試算も行った(表-7)。

最初に、CFRP の単価は、前節で算出した最も低い将来コスト(現在コストの約 2 割)である 3,568 円/kg を元にして、これに加工・組立費として 40% 割り増した単価である 4,995 円/kg を採用した。表-6 に示すように、鋼製吊橋の上部工 161 億円に対して CFRP 吊橋の上部工は、219 億円

表-6 上部工のコスト試算

	鋼製吊橋			CFRP 吊橋		
	数量 (tf)	単価 (千円)	金額 (百万円)	数量 (tf)	単価 (千円)	金額 (百万円)
ケーブル関係	1,199	1,600	1,918	65	4,995	310
補剛桁	9,214	850	7,832	3,119	4,995	15,579
公共添架物	958	850	814	958	850	814
主塔	5,925	900	5,332	1,010	4,995	5,045
舗装	16,009m ²	10	160	16,009m ²	10	160
合計			16,056			21,908

表-7 下部工のコスト試算

		鋼製吊橋			CFRP 吊橋		
		数量 (m ³)	単価 (千円)	工費 (百万円)	数量 (m ³)	単価 (千円)	工費 (百万円)
アンカレッジ基礎 (2 個分)	軸体コンクリート	91,200	85	7,752	70,000	85	5,950
	気中岩掘削	51,600	9	464	44,800	9	403
	小計			8,216			6,353
主塔基礎 (2 個分)	軸体コンクリート	22,400	85	1,904	25,400	85	2,159
	気中岩掘削	31,000	9	279	32,400	9	292
	小計			2,183			2,451
	合計			10,399			8,804

となった。下部工では、鋼製吊橋が 104 億円に対して、CFRP 吊橋は 88 億円となった。したがって、橋梁の総工費は、鋼製吊橋は 265 億円、CFRP 吊橋は 307 億円となった。この規模の鋼製吊橋の塗り替え塗装費用は約 12 億円となる。1 回の塗装の塗り替え期間を 10 年とすると、4 回 40 年の期間で鋼製吊橋のコストが CFRP 吊橋のコストを上回ることがわかった。

ただし、現在の材料コスト及び量産効果のみを期待した場合の材料コストを用いて CFRP 吊橋のコストを計算すると、それぞれ 1,190 億円及び 731 億円となる。上記と同じようにライフサイクルコストを計算すると、それぞれ約 760 年及び約 380 年となって、CFRP 吊橋の経済性は鋼製吊橋に比べて著しく低くなる。本設計事例は、強固な岩盤を基礎の条件としており、さらに吊橋の中間スパンは 500m と比較的短いので、高強度かつ軽量を特徴とする CFRP 吊橋にとっては比較的不利な条件下での試算である。

5. 結論

1) CFRP 吊橋の補剛桁の最大曲げモーメント及び変位は鋼製橋より大きい。ただし、その大きな変位は自動車の走行性に影響を与えるほど大きなものではない。

2) CFRP 吊橋の最大張力は、鋼製吊橋よりも小さく、ケーブルの断面積も小さい。

3) CFRP 吊橋の塔基部に生じる最大曲げモーメント及び最大軸力は、鋼製吊橋よりも小さい。

- 4) CFRP 吊橋では死荷重の減少に伴うフランジャー発生風速の低下が懸念されたが、ねじれ振動数が高くなつたために照査風速 63m/s を上回るフランジャー限界風速が得られた。
- 5) CFRP 吊橋では鋼製吊橋のサグ比 1/10 より小さなサグ比（例えば 1/20）とすることにより、経済的に有利になる可能性がある。
- 6) 地盤条件を比較的良好に設定したことと、CFRP 吊橋の上部工の死荷重が非常に小さくなつたために、CFRP 吊橋の主塔基礎は、鋼製吊橋の主塔基礎に比べて若干大きくなつた。
- 7) アンカレッジは CFRP 吊橋の方が、鋼製吊橋よりも小さくなつた。
- 8) CFRP 吊橋の死荷重強度は鋼橋の 1/33 程度なので、地盤条件が劣悪になるほど基礎工も含めた橋梁下部工は有利になるものと推察される。
- 9) 現行の CFRP の材料価格に対して、量産の効果及びハイブリッド化の効果によってそれぞれ 4 割の価格低減が期待できる。したがって、両方の効果で材料価格を現行の 1/5 程度とすることが可能である。
- 10) 現行の材料価格及び量産効果のみによって低減した将来の材料価格では、CFRP 吊橋は鋼製吊橋に対して、ライフサイクルコストから見ても経済性は著しく低い。量産効果に加えて、ハイブリット化のような工夫によって、現行の材料価格の 1/5 程度まで材料価格を低減させることによって、CFRP 吊橋に現実的な経済性がもたらされる。
- 11) 低いサグ比を用いた吊橋の設計や CFRP 材料のより的確な安全率の設定等の設計に関する将来の技術的進歩や非常に軟弱な基礎地盤条件のもとでは、現在価格を 1/5 まで低減せなくとも、CFRP 吊橋の鋼製吊橋に対して経済的となる可能性がある。

あとがき

これまでの経済性の前提となる吊橋の設計計算では、CFRP の安全率を 10 として計算した。その後の調査研究結果によればその安全率は 3 程度まで低減出来る可能性のあることも示されている

12) 吊橋の詳細設計のためには、ここに示した材料の安全率に加えて、継ぎ手構造部分の部材の安

全率を別途設定する必要がある。したがって、材料及び継ぎ手部材の安全率に関する将来の研究成果によつては、初期コストにおいても CFRP 吊橋の方が鋼製吊橋より有利になる可能性がある。

参考文献

- 1) 前川研一、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、土木学会構造工学論文集, Vol.46A, 平成 12 年 3 月
- 2) 德光卓、篠原貴、岩本久信、佐々木巖、小山達雄：大規模災害における人命救助を目的とした FRP 応急人道橋の適用性検討、土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集第 1 部 (A), pp.16-17, 平成 11 年 9 月
- 3) 大野一昭、中島秀夫、西崎到、小山達雄：橋梁上部工に FRP を適用した下部工の試設計、土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集第 1 部 (A), pp.10-11, 平成 11 年 9 月
- 4) 片脇清、坂本浩行、西崎到、佐々木巖：繊維強化構造材料の歩道橋への利用可能性の検討、土木研究所資料, 第 3291 号, 平成 6 年 11 月
- 5) 上部構造設計基準・同解説：本州四国連絡橋公団, 1989 年 4 月
- 6) 海峡横断プロジェクト用耐震設計法（下部工）：本州四国連絡橋公団 平成
- 7) 明石海峡大橋耐風設計要領・同解説：本州四国連絡橋公団, 平成 2 年 2 月
- 8) 道路橋示方書 共通編・鋼橋編：(社) 日本道路協会, 平成 8 年 12 月
- 9) 日本道路協会：道路構造令の運用と解説、昭和 58 年 2 月
- 10) 建設物価調査会：建設物価 (1998 年 12 月)
- 11) 明嵐政司、西崎 到：超高耐久材料の開発、平成 10 年度土木研究所年度報告書第一分冊、平成 11 年 3 月
- 12) 西崎到、明嵐政司、木嶋健、佐々木巖：繊維強化プラスチック引抜成形材の橋梁構造材料としての安全率に関する考察、土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集第 1 部 (A), pp.20-21, 平成 11 年 9 月

明嵐政司*



建設省土木研究所材料施工部化学研究室長、工博
Dr.Seishi MEIARASHI

西崎 到**



同 化学研究室主任研究員
Itaru NISHIZAKI