新素材主ケーブル超長大吊橋のサグ比と経済性

東京都立大学大学院　学生員　宗澤　研郎　　東京都立大学　正会員　前田　研一*
長　大　正会員　森園　康之　　東京都立大学　正会員　中村　一史
新日本製鐵　正会員　江口　立也　　東京大学　フェロー　藤野　陽三

1.まえがき　吊橋の長大化の動きがある中で，ケーブルの更なる高強度化が求められている．軽量で引張強度の高いケーブルを使うことで，ケーブル死荷重を低減できるとともにサグ比を小さくでき，主塔を低くすることも可能である．これを受けて，吊橋の主ケーブル材料である鋼に変わる土木材料として，近年，開発がめざましく，その性能の高さも認められている新素材の１つである CFRP（炭素繊維強化プラスチック）を用いた吊橋の検討が行われている[1), 2)]．本研究では，中央径間 2,500m の超長大流線形箱桁吊橋のサグ比を変えた試設計を行い，CFRP 製ケーブル超長大吊橋の実現性を把握するために，安全性，使用性，経済性を比較，検討した．なお，別項で動的耐風安定性の検討についても報告している[3)]．

2.材料特性と解析モデル　共通構造諸元（サグ比 1/10）を表-１に，鋼製，CFRP 製主ケーブルの主要な材料特性等を表-2 に，応力－ひずみ曲線を図-1 に示す．表-2 に示すように，ともに許容応力度 100kg/mm² に一致するように両者の安全率を設定して検討するものとした．

また，解析対象とする中央径間 2,500m の超長大吊橋の一般図を図-2 に，補剛桁断面図を図-3 に，主ケーブルの断面積と総重量を図-4 に示す．解析モデルは，鋼製主ケーブルモデルと CFRP 製主ケーブルモデル，それぞれサグ比 4 種類，計 8 種類のモデルとした．便宜上，塔の断面諸量は同一とした．よって，各モデルの断面諸量等の相違点は，主ケーブルの断面積と死荷重のみである．

表-1 共通構造諸元

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（鋼製）	サグ比	1 / 10
	中心間隔	32 m (最大)
	断面積	0.5966 m² / cable
	慣性質量	4.575 t / m ÷ g (9.8m/sec²)
ハンガーケーブル スティハンガー	断面積	0.006 m² / 格点
	慣性質量	0.05 t / m÷ g (9.8m/sec²)
	中心間隔	中央径間 24.8 m　側径間 24.5 m
センタースティ	断面積	0.2 m² (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 m²
	鉛直曲げ剛性	11.0 m⁴
	水平曲げ剛性	132 m⁴
	ねじり剛性	23.7 m⁴
	慣性質量	23 t / m÷ g (9.8m/sec²)
	回転慣性	2500 tm² / m ÷ g (9.8m/sec²)
主塔	断面積	2.6～4.2 m²/塔柱
	塔面内剛性	13.5～23.2 m⁴/塔柱
	塔面外剛性	26.0～85.3 m⁴/塔柱
	ねじり剛性	17.6～37.3 m⁴/塔柱

表-2 主ケーブルの材料特性

	鋼	CFRP
単位体積重量（tf/m³）	7.85	1.60
弾性係数（tf/m²）	2.0×10^{7}	1.6×10^{7}
線膨張係数（1/℃）	12×10^{-6}	0.6×10^{-6}
引張強度（kgf/mm²）	200	250
安全率	2.0	2.5
許容引張強度（kgf/mm²）	100	100

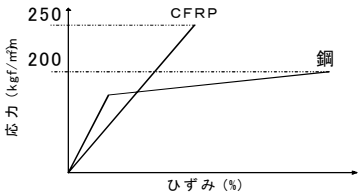

図-1 応力－ひずみ曲線

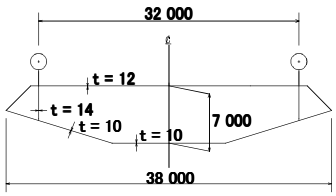

図-3 補剛桁断面図

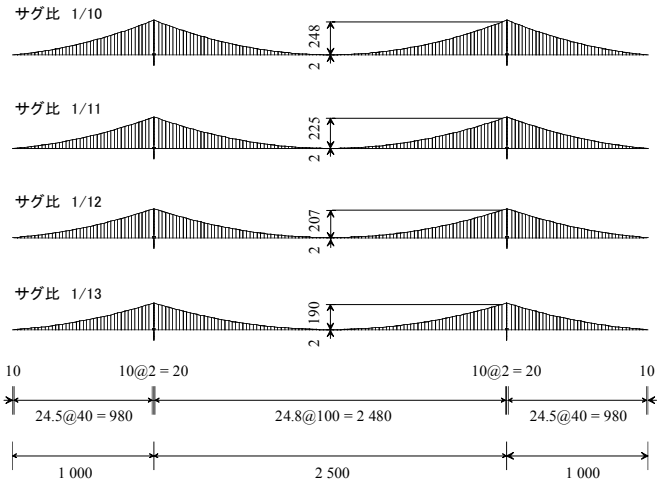

図-2 一般図

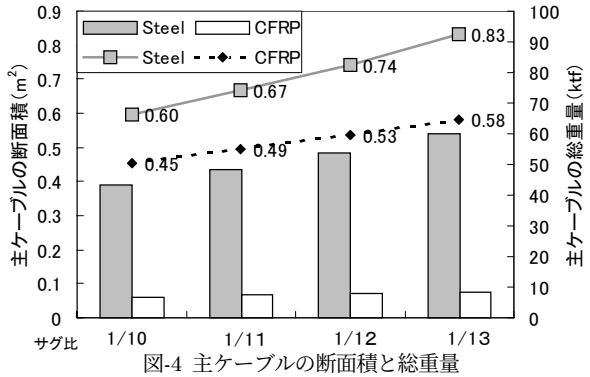

図-4 主ケーブルの断面積と総重量

3.安全性，使用性の検討　活荷重（全径間全載）載荷時のケーブル張力を比べると，例えばサグ比 1/10 の場合，塔頂部で鋼製ケーブルが約 61000tf の値が生じるのに対し，CFRP 製ケ

Key Words：超長大橋，吊橋，CFRP，サグ比，経済性
連絡先* ：〒192-0397　東京都八王子市南大沢 1-1　TEL 0426-77-1111　FAX 0426-77-2772

ーブルは約 46000tf と約 25%軽減されることがわかった.（図-5） この事から塔やアンカレジの規模を小規模にできると予想される. また, サグ比の低下に伴うケーブル張力増加の割合が, 鋼製に比べ CFRP 製ケーブルの方が小さい為, 塔を低くすることが求められる場合には, CFRP 製ケーブルを用いた方が有利になることが期待できる.

活荷重（中央径間全載）載荷時の主桁の面内変位においては, CFRP 製ケーブルが鋼製ケーブルより剛性が低い為, 中央径間中央部でたわみ許容量である L/350=7.14m を若干上回る結果を生じた.（図-6）

温度変化による影響では, 20℃を基準とし 30℃温度を上昇させた時の主桁の面内変位において, CFRP 製ケーブルの膨張係数が鋼製ケーブルの 1/20 である為, 鋼製ケーブルでは, 中央径間中央部で約 2.3～2.7m のたわみを生じたのに対して, CFRP ではほとんど変化が現れなかった。この事から, 活荷重（中央径間全載）載荷時にたわみ許容量を超えた分を補えるものと考えられる.

3.経済性の検討　鋼製ケーブルの単位重量当たりの材料費を 480 千円／tf, 単位体積当たりの架設費を 5600 千円／m^3（単位重量当たり 720 千円／tf）とし, それらを加え単位重量当たりの工費を算定した. また, CFRP 製ケーブルの材料費を鋼製ケーブルの 10 倍, 架設費を 0.5 倍とし（表-3）, 同様に工費を算定した. これらに主ケーブル総重量を掛け合わせたものを総工費とし, 鋼製ケーブルのサグ比 1/10 の場合を 1 としたときの各主ケーブル総工費の比率を図-7 に示す.

図-4 より主ケーブルの総重量の比率は約 6.5～7 倍であるので, 図-7 より, CFRP 製ケーブルの軽量の特性をいかして, 単位体積当たりの架設費を約 0.5 倍まで下げることができ, 単位重量当たりの材料費を 10 倍程度まで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ことになる. ただし, これは主ケーブルの工費のみによる比較であり, 図-6 より CFRP 製ケーブルの最大張力が鋼製ケーブルに比べて大幅に低減されることから, アンカレジや塔, それを支える橋脚, 基礎を小規模にできると考えられる為, 更に経済性は高められるはずである.

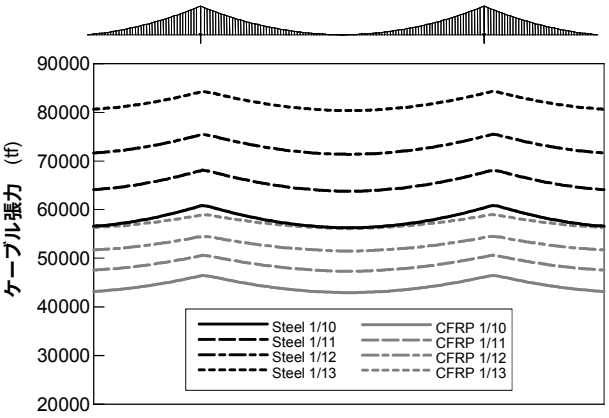

図-5 活荷重（全径間全載）載荷時のケーブル張力図

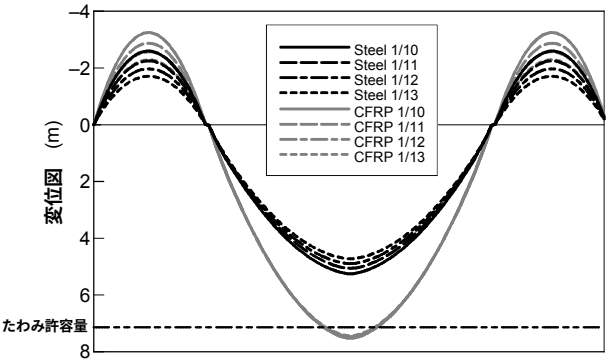

図-6 活荷重（中央径間全載）載荷時の主桁の面内変位図

表-3 主ケーブル材料の概算工費

	材料費（千円/tf）	比率	架設費（千円/m3）	比率	工費（千円/tf）	比率
Steel	480	1.0	5600	1.0	1200	1.0
CFRP	4800	10.0	2800	0.5	6800	5.5

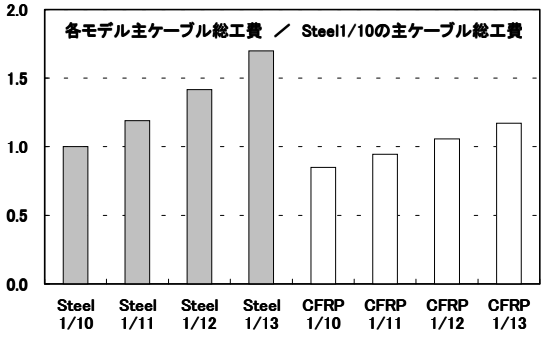

図-7 主ケーブル総工費の比較

次に, サグ比の変化による経済性を考える. サグ比が小さくなればケーブル断面積も必然的に大きくなり, 主ケーブルの総重量も大きくなる.（図-4） 従って, 架設費もケーブル体積の増大に伴って大きくなる. しかしながら, 塔を低くすることが要求される場合には, 鋼製ケーブルに比べ CFRP 製ケーブルは, 重量増加量, 張力増加量が共に小さく, 鋼製ケーブルほど大きく経済性を損なうことはないといえる.

5.あとがき　以上の事から, サグ比 1/10 を小さくした場合, 最適サグ比をみいだせる程の顕著な差異はみられなかったが, 低塔化が求められる際には新素材（CFRP）を適用することで, 経済性の面でより優位を保てる可能性が十分にあるといえた.

【参考文献】1) 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. 2)前田・森園・中村・江口・藤野：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)栗原・前田・中村・森園・江口・藤野：新素材主ケーブル超長大吊橋のサグ比と動的耐風安定性：第 55 回年次学術講演会講演概要集(Ⅰ),2000