

CFCC を用いた長大斜張橋の試設計と静的構造特性

Trial Design and Structural Characteristics of Long-Span Cable-Stayed Bridges Using CFCC

中村 一史* ○田島 遼** 前田 研一*** 張 治 成**** 謝 旭*****
Hitoshi NAKAMURA Ryo TAJIMA Ken-ichi MAEDA Zhicheng ZHANG Xie XU

ABSTRACT Since a Carbon Fiber Composite Cable (it is hereafter called a CFCC) is lightweight, high strength and high-corrosion resistance, the applicability to the long-span cable-stayed bridge of CFCC is beginning to be considered. In this paper, it was aimed at the long span cable-stayed bridge with the center span length of 1500m, which is equal to the maximum span length in cable-stayed bridges. A trial design was performed varying the elastic modulus of CFCC, and the static structural characteristic of long span cable stayed bridge using CFCC as compared with the case of the conventional steel cables was considered analytically. As results, it was confirmed that it is sufficiently possible to apply CFCC to the stay cable of long span cable-stayed bridge and the cost of major members may be able to be reduced by reduction of cable dead load.

Keywords: 長大斜張橋, CFCC, サグ, 弾性係数, 試設計

Long Span Cable-Stayed Bridge, CFCC, Sag, Elastic Modulus, Trial Design

1. はじめに

近年、斜張橋の長大化は目覚しく、中国では、最大支間長の多々羅大橋を凌ぐ、1,000m 超級の斜張橋が現在、建設中である^{1), 2)}。斜張橋の限界支間長を決める要因の中で支配的なものは、主桁の座屈耐荷力であり、合理的な斜張橋主桁の設計のために様々な検討が行われてきた。

一方、長支間化に伴って、斜ケーブルの自重によるサグも増大することから、ケーブルの軸剛性の低下も無視できないという指摘もある³⁾。

このような課題に対し、従来の鋼製ケーブルに比べて、耐食性に優れ、高強度かつ軽量で、自重を大幅に低減できる Carbon Fiber Composite Cable (以下、CFCC と略称する) の適用も考えられている⁴⁾。従来の鋼製ケーブルと比較した場合、支間長の長大化にともなってCFCCが優位となることが示されているものの、それらの試設計や構造特性など、具体的な検討は行われていない。

最近、比較的小規模な橋梁ではあるが、耐食性

に優れた CFCC の特徴を活かし、塩害に対する防錆対策として、PC 桁橋の外ケーブル⁵⁾や PC 斜張橋の斜ケーブル⁶⁾などへ適用されはじめています。

また、より大規模な構造物への適用を視野に入れて、5,000~12,000kN 級の耐力を有するケーブルの研究開発が国内外で行われている⁷⁾。さらに、ケーブル材料として用いられている炭素繊維の研究開発や、コンポジット化の技術開発も目覚ましく、高強度化、高弾性率化が期待でき、適用範囲の拡大が望まれている⁸⁾。

そこで本研究では、従来の鋼製ケーブルにはない、優れた特徴を有する CFCC の長大斜張橋への適用可能性について検討することを目的とした。ここでは、限界支間といわれている中央径間長 1,500m を有する長大斜張橋を検討対象とし、CFCC の弾性係数に着目して試設計を行うとともに、鋼製ケーブルの場合と比較して長大斜張橋の静的構造特性に及ぼす影響を解析的に検討した。

* 修(工) 首都大学東京 都市環境学部 都市基盤環境コース 助教 (〒192-0397 八王子市南大沢 1-1) 第2種正会員

** 首都大学東京大学院 都市基盤環境工学専攻 博士前期課程 (〒192-0397 八王子市南大沢 1-1)

*** 工博 首都大学東京 都市環境学部 都市基盤環境コース 教授 (〒192-0397 八王子市南大沢 1-1) 第2種正会員

**** 工博 浙江大学 建工学院交通工程研究所 講師 (中国 浙江省杭州市浙大路 38 号)

***** 工博 浙江大学 建工学院交通工程研究所 教授 (中国 浙江省杭州市浙大路 38 号)

本論文の一部は土木学会第 62 回年次学術講演会にて発表。

2. 解析方法と試設計

2.1 解析対象モデルと設計条件

解析対象は、中央径間長 1,500m, 両側径間長 550m の A 形塔を有する長大斜張橋の試設計例 (図-1) とした^{9), 10)}. これは、本州四国連絡橋公団の設計基準類^{11), 12)}を準用して概略設計されたものであり、主桁および主塔の断面形状は図-2, 3 に、

主要な断面諸元は表-1 に示す通りである. 斜ケーブルは、従来の鋼製ケーブル (ST1770) を基に試設計されたものである. ここでは、鋼製ケーブルと CFCC を比較検討するために、主桁、塔の主要部材の断面諸元については変更せず、鋼製ケーブルを CFCC に置き換えることで、所要のケーブル断面の試設計を行った. 試設計にあたっては

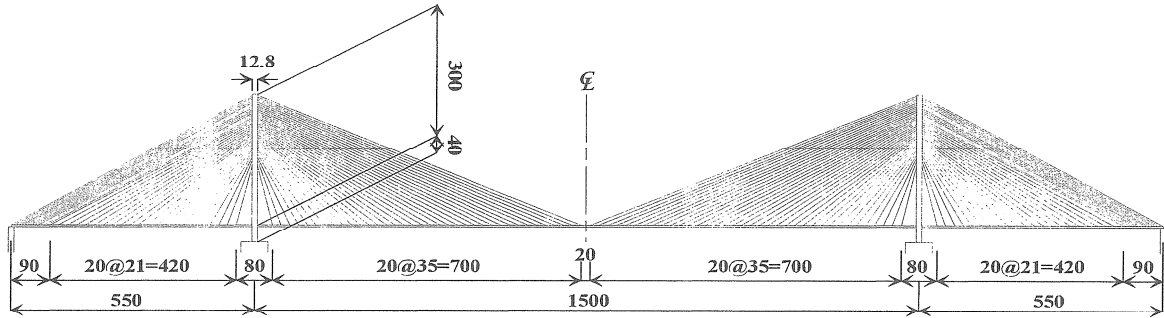


図-1 一般図

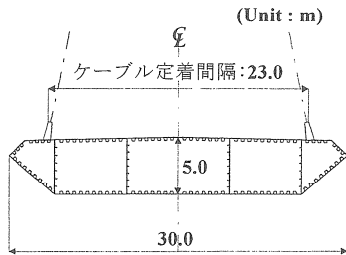


図-2 主桁断面

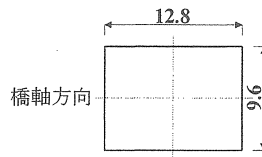


図-3 主塔断面

表-1 断面諸元

断面	主桁 (SM490Y~HT690)				塔 (SM570)	
	①	②	③	④	上部	下部
A(m ²)	1.428	1.815	2.104	2.385	1.792	2.240
I _{in} (m ⁴)	6.090	7.832	9.095	10.30	45.44	56.80
I _{out} (m ⁴)	113.7	144.7	166.7	188.7	29.15	36.86
J(m ⁴)	12.22	16.72	19.15	22.99	40.45	67.41

表-2 ケーブルの設計条件

ケーブルの種類	Steel	CFCC
引張強度 σ_{in} (MPa)	1770	2140
弾性係数 E(GPa)	200	137, 160, 200
比重 ρ	7.8	2.0
安全率 γ	2.5	3.0
線膨張係数 $\alpha(\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	12	0.6

表-3 ケーブルの清算断面積と総重量の比較

ケーブルの種類	CFCC137	CFCC160	CFCC200	Steel
中央径間ケーブルの清算断面積 A_c (m ²)	最上段	0.01115		0.01297
	中段	0.00944		0.00974
	最下段	0.00601		0.00627
ケーブルの総重量 W_c (tf)	3,145	3,147	3,150	11,722

表-4 斜ケーブルに生じるサグ量の比較

ケーブルの種類	CFCC137	CFCC160	CFCC200	Steel
中央径間ケーブルのサグ量 S_g (m)	最上段	3.181		11.318
	中段	1.053		3.554
	最下段	0.144		0.517

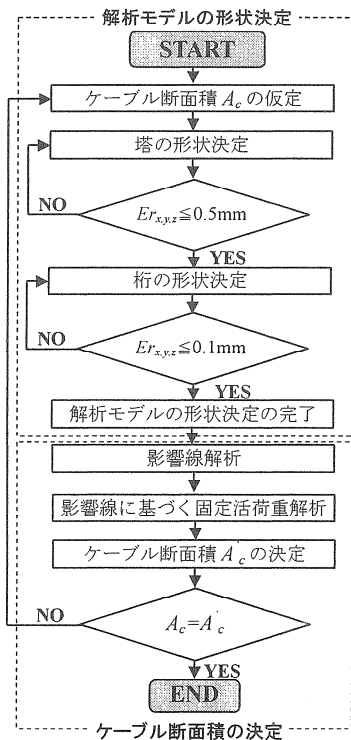


図-4 試設計フロー

CFCCの弾性係数をパラメータとし、137, 160, 200 GPaと変化させて検討を行った。なお、現在、適用実績のある一般的なCFCCの弾性係数は137 GPa程度である。さらに、今後の技術開発などを踏まえて、弾性係数を160 GPaとしたもの、および、鋼製ケーブルとの比較のために200 GPaとしたものを設定した。ケーブルの設計条件を表-1に示す。鋼製ケーブルについては現行の安全率2.5を適用し、CFCCについては安全率を3.0と仮定して、許容応力度設計法により試設計を行った。

形状決定は図-3に示すようにケーブルの断面積を決定するため、繰り返し計算によった。なお、この試設計フローは立体骨組構造解析モデルの作成のために適用したものである¹³⁾。ちなみに、このフローにおける収束回数は2~3回であった。

本研究では、自重によるサグの影響を考慮するために、ケーブルに中間節点(8分割)を設けたリンクケーブルモデルと、サグの影響を無視した一本の軸力部材でモデル化された直線ケーブルモデルを作成した。なお、鋼製ケーブルについては、より詳細な検討を行うため、鋼製プレファブケーブルの既製品を適用した場合について改めて試設計を行って、これを鋼製ケーブルモデルとした。

本州四国連絡橋公団の基準を準用し、作用させた荷重は固定活荷重、温度荷重(基準温度20°C, 温度範囲±30°C)、面外風荷重(設計基準風速37m/s)であり、荷重の組み合わせを考慮して応力度照査を行った。解析モデルと解析方法については、全て立体骨組構造でモデル化し、有限変位解析¹⁴⁾により解析を行った。ここでは、各構造解析モデルについて、ケーブルの種類ごとに、CFCCおよびSteelと呼ぶこととする。また、CFCCの弾性係数を変化させたものを、CFCC137, CFCC160およびCFCC200とそれぞれ略称する。

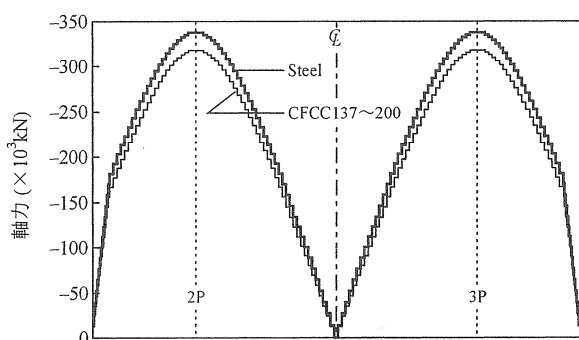


図-6 死荷重時における主桁軸力

2.2 ケーブルの試設計結果

試設計の結果の一部として、代表的な中央径間斜ケーブルの清算断面積とケーブルの総重量を表-3に、また、中央径間において、斜ケーブルに生じるサグ量を比較して表-4に示す。まず、表-3より、CFCCでは弾性係数にかかわらずケーブルの断面積がほぼ等しくなること、また、CFCCの断面積は鋼製ケーブルに比べて平均で7%程度小さくなること解る。これはCFCCの自重が鋼製ケーブルよりも小さくなり、表-4に示したサグ量の比較からも解るように、サグが大幅に低減し、張力が減少したことによるものである。また、表-3に示したようにCFCCの総重量は鋼製ケーブルと比較して約73%減少した。

また、中央径間最上段のリンクケーブルに着目した影響線解析結果を図-5に示す。これは、橋軸方向にわたり、主桁の各節点に980kNの集中荷重を作用させた際のケーブル張力の変化を示したものである。図より、ケーブル定着点近傍と側径間端部付近において、ケーブルの張力変化に差異が見られ、CFCCでは弾性係数が低くなるほど張力の変化が小さくなること解る。また、鋼製ケーブル(Steel)の場合、CFCC200より僅かではある

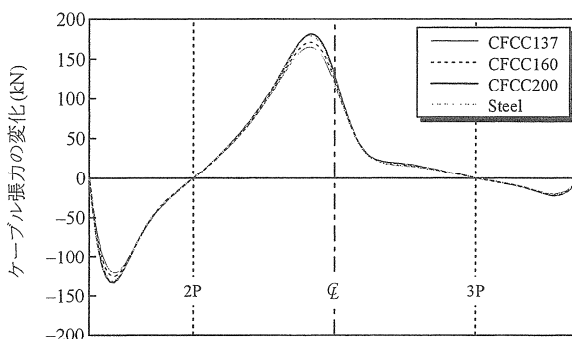


図-5 中央径間最上段ケーブルの影響線解析結果

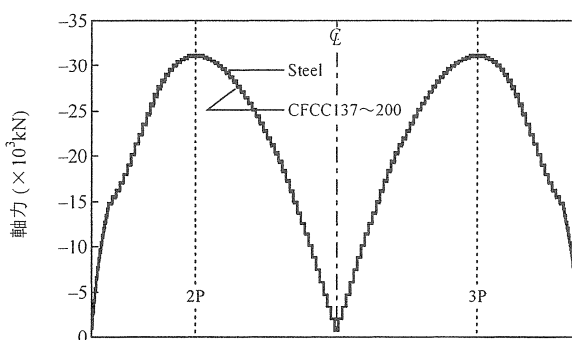


図-7 活荷重全径間全載時の主桁の増分軸力

が、張力の変化が小さくなることを解る。これは、前述した通り、自重によるサグ量の相違によるものと考えられる。これらのことから、サグの影響が顕著な最上段ケーブルに着目した場合であっても、サグによるケーブルの軸剛性の低下よりも、CFCC の弾性係数の低下の方がケーブル張力の変化に及ぼす影響は大きいといえた。なお、CFCC では全てのケースでサグの影響がほとんどないことから、以下の解析結果については、より精緻にモデル化されたリンクケーブルモデルの解析結果に基づくこととした。

図-6 には、死荷重時の主桁軸力を示す。CFCC では弾性係数にかかわらず、主桁軸力はほぼ同程度であり、鋼製ケーブルに対して主桁軸力が小さくなることを解る。塔位置の主桁軸力で 6%程度低くなった。

3. 設計荷重載荷による静的構造特性

3.1 固定活荷重解析結果

固定活荷重解析結果の一部として、図-7 に活荷重全径間全載時における主桁の増分軸力を、図-8 に活荷重中央径間全載時の主桁鉛直変位を、図-9 に活荷重中央径間全載時の主桁曲げモーメントを

それぞれ示す。

まず、図-7 より、主桁軸力の絶対値がほぼ最大となる載荷条件であるが、全てのケースで同程度の軸力変化であることが解る。したがって、主桁軸力については、前述したように、ケーブル死荷重の軽減が主桁軸力の低下に大きく寄与することが解った。

図-8 より、CFCC では弾性係数の低下に伴って鉛直変位が増加するものの、全てのケースでたわみ制限 (L/400) を満足すること、また、鋼製ケーブルでは、サグの影響により鉛直変位が増大していることが解る。これらのことから、最も弾性係数の低い CFCC であっても適用可能であることが確かめられた。なお、鋼製ケーブルと CFCC200 を比較した場合、サグが小さい CFCC200 の方が僅かに鉛直変位が小さいが、弾性係数が同じであれば構造系全体の剛性は、サグやケーブル自重によらず同程度であることも解った。

図-9 より、主桁の曲げモーメントについては、全ケースで側径間端部に大きな曲げモーメントが発生し、CFCC137 では鋼製ケーブルに対し 10%ほど大きくなった。ここで、リンクケーブルモデルと直線ケーブルモデルを比較した場合、CFCC

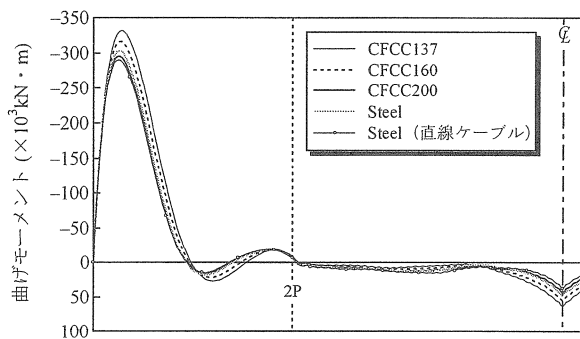
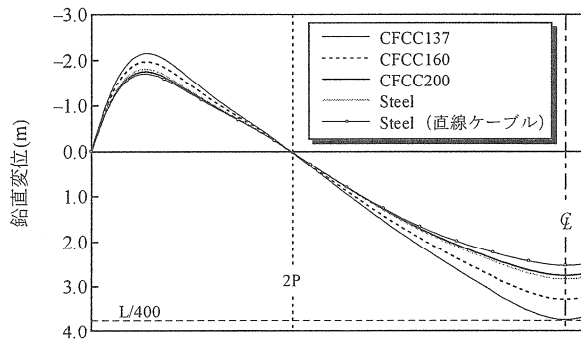


図-8 活荷重中央径間全載時の主桁鉛直変位

図-9 活荷重中央径間全載時の主桁曲げモーメント

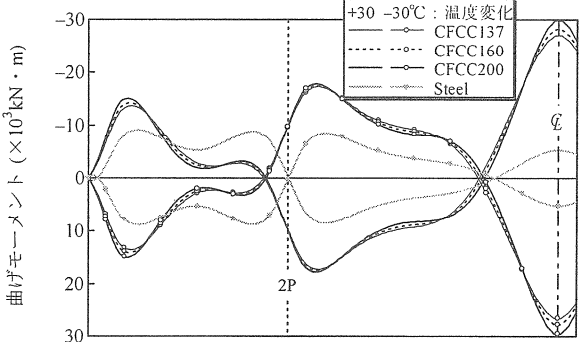
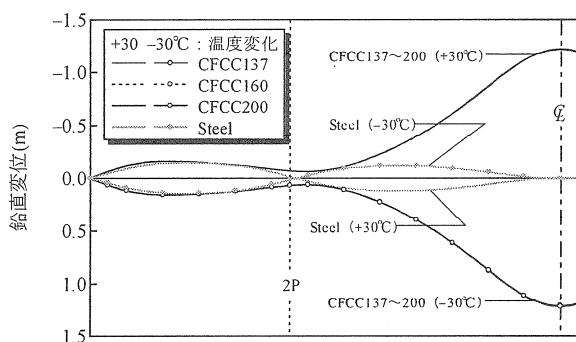


図-10 温度荷重載荷時の主桁鉛直変位

図-11 温度荷重載荷時の主桁曲げモーメント

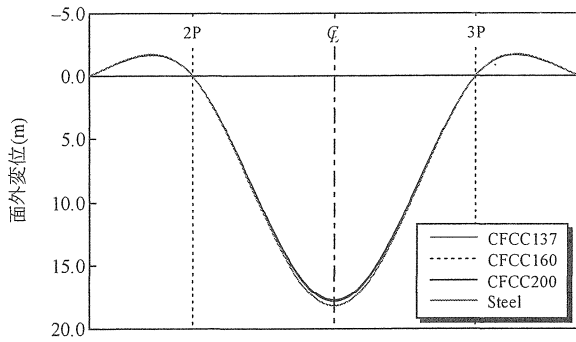


図-12 風荷重載荷時の主桁面外変位

の直線ケーブルモデルの結果を略しているが、CFCC では主桁の曲げモーメントとともに同程度であった。これに対し、表-4 に示したようにサグの大きい鋼製ケーブルでは、サグによる見かけの弾性係数の低下が無視できないため、図-9 からその差異が大きくなることが解る。

3.2 温度荷重解析結果

温度荷重解析結果の一部として、図-10 に主桁鉛直変位を、図-11 に主桁曲げモーメントをそれ

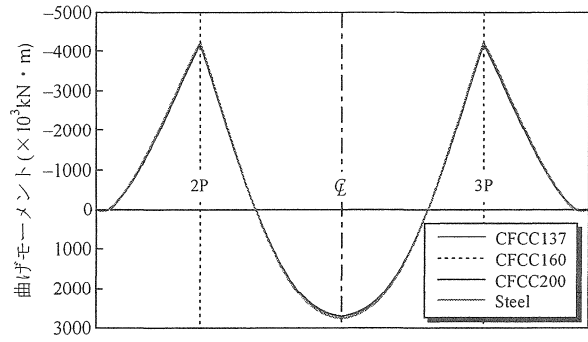


図-13 風荷重載荷時の主桁面外曲げモーメント

ぞれ示す。図-10 より、鋼製ケーブルでは±30℃の温度変化に対して鉛直変位は小さいが、CFCC では弾性係数にかかわらず大きくなるのが解る。これは両者の線膨張係数の相違によるものであり、ケーブルの張力変化に中央径間では温度変化に伴う鉛直変位の方向が鋼とは逆になることも解る。これは、線膨張係数の不均一さにより、一様な温度変化が作用した際、各部位にひずみ差が生じたためと考えられる。また、図-11 に示した主桁曲げモーメントからも同様のことがいえるが、固定活荷重によるものに比べて十分に小さいため、温度変化が設計上、大きな問題にはならないことが確かめられた。

3.3 設計風荷重解析結果

設計風荷重解析結果の一部として、図-12 に主桁面外変位を、図-13 に主桁面外曲げモーメントをそれぞれ示す。

これらの図より、主桁の面外変位および面外曲げモーメントについては、鋼製ケーブルで僅か

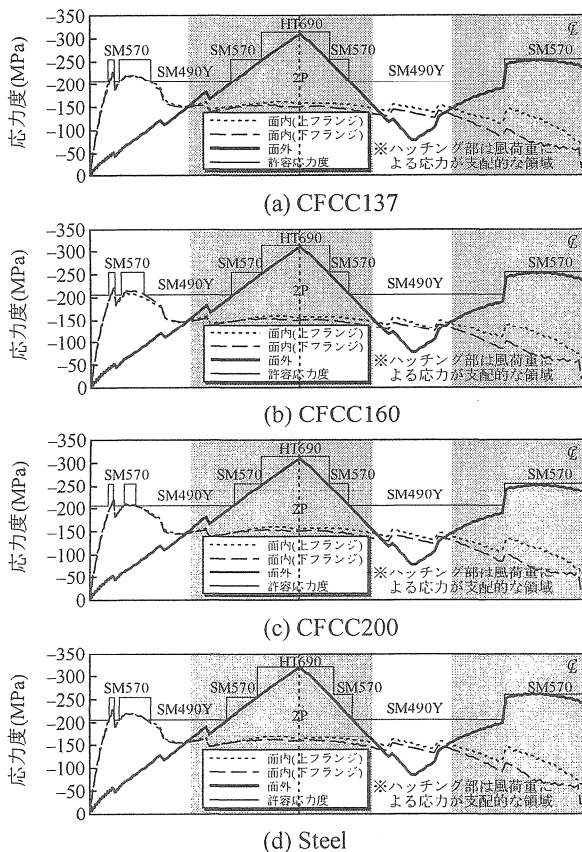


図-14 主桁の応力度照査結果

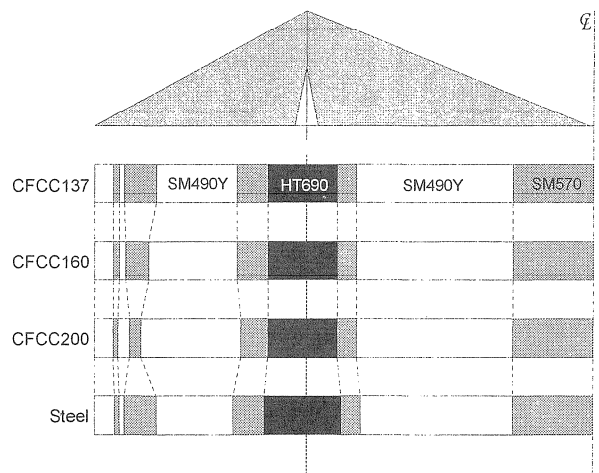


図-15 応力度照査に基づく鋼種配置の比較

はあるが大きくなる傾向にあるものの、ケーブルの種類、弾性係数にかかわらず、ほぼ同程度であることが解る。

3.4 主桁の応力度照査結果

最後に、主桁の応力度照査結果について、鋼製ケーブルと弾性係数を変化させたCFCCについて比較して、図-14にそれぞれ示す。図中には応力度照査結果に基づき、鋼種の変更で精査した結果も併記したが、これらの応力度照査に基づく鋼種配置を比較して図-15にまとめて示す。

図-14からは、CFCCと鋼製ケーブルを比較した場合、ケーブルの軽量化により主桁軸力が低下するため、僅かではあるが全体的に軸圧縮応力が低下した。しかしながら、弾性係数の低いCFCC137では、側径間端部の曲げモーメントが増大するため、応力度は鋼製ケーブルより若干高くなることが解る。また、面内の応力度は、側径間端部と中央径間の一部分で支配的となるが、側径間端部以外は十分に余裕のあることも解る。

さらに、図-14より、CFCC137では前述したように側径間端部の主桁曲げモーメントが増大して部分的に鋼種を上げる必要があるものの、全体的には鋼製ケーブルに比べて鋼種を若干下げることができ、特に、弾性係数の高いCFCC160、CFCC200では、側径間端部においてその低減効果が顕著であることが確かめられた。

4. まとめ

本研究では、CFCCの長大斜張橋への適用可能性を明らかにすることを目的として、限界支間といわれている中央径間長1,500mを有する長大斜張橋を対象に、CFCCの弾性係数に着目して試設計を行うとともに、従来の鋼製ケーブルの場合と比較して、長大斜張橋の静的構造特性に及ぼす影響を解析的に検討した。

試設計の結果、CFCCの適用により、従来の鋼製ケーブルに比べて斜ケーブルの死荷重と自重によるサグが大幅に低減されることが解った。また、CFCCの弾性係数の低下により、活荷重による鉛直たわみや、側径間端部の主桁曲げモーメントが若干増加したものの、たわみ制限を満足し、現行のCFCCの弾性係数であっても十分に設計可能であることが確かめられた。

加えて、種々の荷重条件において静的構造特性

について解析的な検討を行った範囲では、鋼製ケーブルの場合と比較して、設計上、大きな問題点はみられなかった。さらに、ケーブル死荷重の激減により各部位のコストを低減できる可能性もあることが確かめられた。

以上のことから、試設計結果や静的構造特性の観点からは、長大斜張橋の斜ケーブルにCFCCの適用性は十分にあるといえた。今後は、ケーブル振動を含む動的な問題について検討を行う予定である。さらに、CFCCの適用に向けて、ケーブルの大断面化や合理的な定着方式の開発が望まれる。

参考文献

- 1) N. Hussain, L. Hauge, K. Falbe-Hansen and A. S. K. Kong: Design of the Stonecutters Cable-Stayed Bridge in Hong Kong, IABSE Symposium, Vol.86, 2002.
- 2) 井上学, 越後滋, 斉藤豪, 宋華文, 藤井義法, 森園康之: 最近の中国における長大橋梁, 橋梁と基礎, Vol.39, No.9, pp.34-41, 2005.9
- 3) Niels J. Gimsing, 大塚久哲: 超長大支間の斜張橋, 橋梁と基礎, Vol.23, No.6, pp.34-40, 1989.6
- 4) 大久保浩弥, 大塚久哲, 押尾祐三, 榎本剛: 新素材斜張橋ケーブルの力学挙動に関する基礎的考察, 土木学会, 第45回年次学術講演会講演概要集, VI, pp.88-89, 1990.9
- 5) Grace, N. F., Navarre, F. C., Nacey, R. B., Bonus, W., and Collavino, L.: Design-Construction of Bridge Street Bridge - First CFRP Bridge in the United States, PCI Journal, Vol.47, No.5, pp. 20-35, 2002.
- 6) Christoffersen, J., Hauge, L., Bjerrum, J.: Footbridge with Carbon-Reinforced Polymers, Denmark, Structural Engineering International, Vol.9, No.4, 1999.
- 7) 前田研一編: FRP橋梁一技術とその展望一, 土木学会, 構造工学シリーズ14, pp.24-29, 2004.1
- 8) 北田俊行編: ケーブルを使った合理化橋梁技術へのノウハウ, 土木学会, 鋼構造シリーズ16, pp.231-255, 2007.3
- 9) 野村國勝, 中崎俊三, 成田信之, 前田研一, 中村一史, 長大吊形式橋梁の構造特性と経済性, 構造工学論文集, Vol.41A, 1995.3
- 10) 中村一史, 前田研一: 長大斜張橋主桁の塔位置支持条件および面外耐荷力に関する2, 3の考察, 構造工学論文集, pp.873-881, Vol.50A, 2004.3
- 11) 海洋架橋調査会: 上部構造設計基準, 本州四国連絡橋公団, 1989.
- 12) 海洋架橋調査会: 本州四国連絡橋耐風設計基準(2001)・同解説, 本州四国連絡橋公団, 2001.
- 13) 前田研一, 林 正, 瀬戸内秀規, 中村一史, 成田信之: 長大斜張橋の立体有限変位解析, 構造工学論文集, Vol.44A, 1998.3
- 14) 前田幸雄, 林 正: 立体骨組構造物の有限変位解析, 土木学会論文報告集, No.253, 1976.