

CFRP を有する超長大吊橋の主ケーブルの活荷重二次応力に関する研究

川崎重工業株式会社 正会員 ○ 鷲塚 敏之 大阪大学大学院 正会員 三好 崇夫

大阪大学大学院 フェロー 西村 宣男

1. 研究背景と目的

本研究では、世界各地に構想されている超長大吊橋を実現するため、既往のケーブル材料である鋼線に比べて軽量の CFRP を主ケーブルに適用することに着目し、鋼線と CFRP で断面構成された Hybrid cable を考案した¹⁾。これは、従来の鋼線が有する高いせん断強度と CFRP の軽量性という互いの長所を引き出すことにより、ケーブルバンド部で CFRP に作用するせん断応力の低減効果と、主ケーブルの軽量化による経済性の確保に期待したものである。しかしながら、主ケーブルに Hybrid cable を適用した場合の曲げによって生ずる二次応力の問題は未解明である。また、既設吊橋の主ケーブルは主ケーブル径が小さいため一次応力のみが発生する軸力部材として設計安全率が設定されており、二次応力を含めた安全性の照査は曖昧なまま残されている。これに対して、本研究で想定する超長大吊橋では、主ケーブル径が大きくなるため、曲げによる二次応力が増大することが考えられる。本論では、主ケーブルの安全照査の観点から、CFRP を有する超長大吊橋主ケーブルに生ずる活荷重二次応力を解析的に把握することを目的とする。

2. 解析ケースとモデル

超長大吊橋の解析ケースとして、Table 1 に示すように主ケーブルの断面構成を変化させた 5 ケースの単径間吊橋を試設計した¹⁾。なお、本研究ではワイヤラッピングが施された主ケーブルをラップトケーブル、施されていない主ケーブルをアンラップトケーブルと称する。

Table 1 Dimensions of ultra-long span suspension bridge

Analytical case		Type-s	Type-sc	Type-H1	Type-H2	Type-H3
Constitution of the span (m)		600+3000+600				
Sag span ratio		1/10				
Pitch of suspender ropes λ (m)		20				
Main cable	$A_f^* : A_s^{**}$	0:1	1:0	1:1	2:1	3:1
	Elastic modulus E_c (kN/m ²)	2.000E+08	1.500E+08	1.750E+08	1.667E+08	1.625E+08
	Unit volume weight γ_c (kN/m ³)	76.9	15.7	46.3	36.1	31.0
	Coefficient of thermal expansion α_c (1/deg.)	1.10E-05	6.00E-07	6.54E-06	4.76E-06	3.80E-06

* A_f : Cross-sectional area of the CFRP
** A_s : Cross-sectional area of the steel

活荷重二次応力は、Fig.1 に示すように、塔頂サドルから端バンドまでのアンラップトケーブル部材で最大になると一般に考えられている。そこで、塔頂サドル近傍の主ケーブルに対して、Fig.2 に示すようなモデル化を行い、塔頂サドル近傍を対象として、活荷重二次応力を把握する。本研究では、アンラップトケーブルをモデル化するため、内力の評価において、ケーブル全体の曲げによるモーメントと、ケーブル部材端における素線自身の局部曲げによるモーメントに分離して材端力と材端モーメントを算出する UC(Unwrapped Cable)要素を提案する。なお、本研究では端バンドで素線間すべりが完全に拘束されると仮定する。また、荷重条件としては、Fig.3 に示すように、本州四国連絡橋公団・上部構造設計基準²⁾に規定される、等価 L 荷重を 1-0 分配法により、片側吊材構面あたりの等分布荷重および集中荷重に換算して載荷した。さらに、これらの載荷範囲は、既往の実測結果^{3,4)}から活荷重二次応力が最大になると考えられる、主径間に等分布荷重を半載し、主径間の L/4 点に集中荷重を載荷した。このほか、荷重条件として、全部材の死荷重および基準温度 20℃からの温度上昇 30℃を考慮した。

3. ハイブリッドケーブルに生ずる二次応力の評価方法

文献 2)では、平行線ケーブル用亜鉛めっき鋼線（160 キロ級）を用いた主ケーブルの許容応力を設定するにあたり、引張強度に対して少なくとも 2.5 の安全率を有する吊橋主ケーブルに関しては、二次応力を含めた主ケーブルに生ずる最大応力は安全率の 8 割である約 2.0 を確保するものとしている。これに対して、本研究で対象とする超長大吊橋主ケーブルのうち、鋼線は安全率 2.2 で設計されている。そこで、鋼製ケーブルに対しても文献 2) と同じく、二次応力を含めた主ケーブルに生ずる最大応力に対する安全率の 8 割に相当する $S_f=1.76$ 以上を確保すれば安全であると判断する。また、CFRP ケーブルに対しても二次応力を含めた安全率は、鋼線と同様に安全率 3.0 の

8割である $S_f=2.4$ 以上を確保すれば安全性に問題が無いものとして, Hybrid cable を主ケーブルに適用した超長大吊橋の活荷重二次応力を考察する.

4. 活荷重二次応力の解析結果と考察

活荷重二次応力を考察するためのパラメータとして, 主ケーブルを構成する CFRP あるいは鋼線の引張強度 σ_B を二次応力を含めた全応力 σ_T で除した σ_B/σ_T を定義する. 解析結果として各解析ケースに対する σ_B/σ_T , および比較として明石海峡大橋の σ_B/σ_T , および上に定義した安全率 S_f を Fig.4 に示す. なお, 解析結果ではワイヤラッピングされない区間の長さを 3000mm と仮定した場合の結果を示している. Fig.4 より, いずれの解析ケースにおいても鋼線の σ_B/σ_T は明石海峡大橋を上回ることがわかる. また, 鋼線および CFRP ともに S_f を確保できることがわかる. したがって, 本研究で対象とする CFRP を主ケーブルに適用した超長大吊橋は二次応力を含めた全応力に対しても安全性に問題はないものと考えられる. また, Hybrid cable は CFRP のみで主ケーブル断面を構成した場合に比べて鋼線の自重により幾何剛性が増大すること, および CFRP の線膨張係数が小さいことから二次応力に対しては安全側になると考えられる.

次に, 自由に素線間すべりを生ずるアンラップト区間長の相違による全応力 σ_T に及ぼす影響を比較するためアンラップト区間長を変化させて解析を行った. Fig.5 と 6 に解析ケース Type-H3 に対してアンラップト区間長を 2m, 3m および 4m と変化させた場合の偏差軸応力 σ_θ , サドル側部材端での局部曲げ応力 σ_{wa} , および σ_B/σ_T の推移をそれぞれ Fig.5 と 6 に示す. Fig.5 と 6 よりアンラップト区間が長くなれば偏差軸応力は若干低下するが二次応力の合計はアンラップト区間を長くしても殆ど変化しない. このことから, アンラップト区間長の相違が二次応力に及ぼす影響は極めて小さいと考えられる.

5. まとめ

本論で得られた知見を以下に示す.

- ・ 本研究で考案した Hybrid cable は二次応力を含めた全応力に対しても安全性に問題はない.
- ・ アンラップト区間長の相違が二次応力に及ぼす影響は極めて小さい.

【参考文献】

- 1) Miyoshi, T., Nishimura, N., Take, N. and Hwang, W.-S.: Evaluation of Strength for Hybrid Cable Which Composed CFRP Wire & Steel Wire at the Cable Strap of Ultra Long Span Suspension Bridge, Proc. of The First Int. Conf. on Steel & Comp. Struct., Vol.2, pp1277-1284, 2001.
- 2) 本州四国連絡橋公団: 上部構造設計基準・同解説, 1989.
- 3) 北川 信: 東大維橋におけるケーブル応力の測定調査, 本四技報, No.1, pp.10-18, 1977.
- 4) 北川 信: 吊橋ケーブルの二次応力測定(平戸大橋), 本四技報, No.3, pp.8-13, 1978.

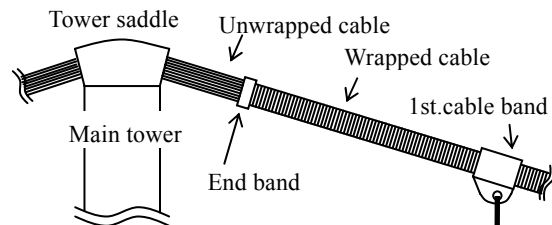


Fig.1 Main cable located at vicinity of tower saddle

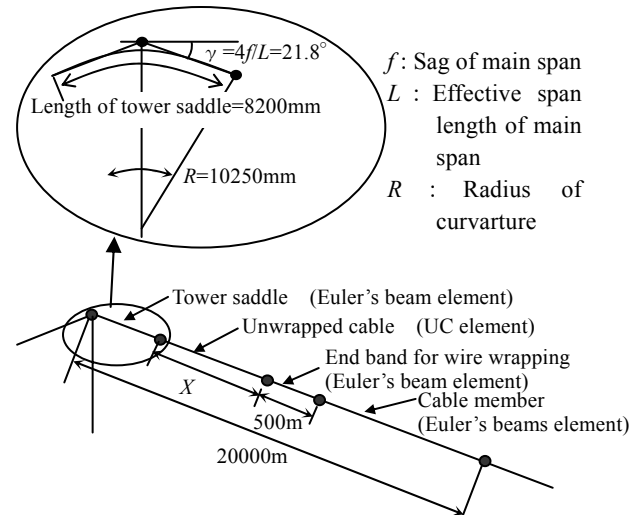


Fig.2 Analytical model for main cable located at vicinity of tower saddle

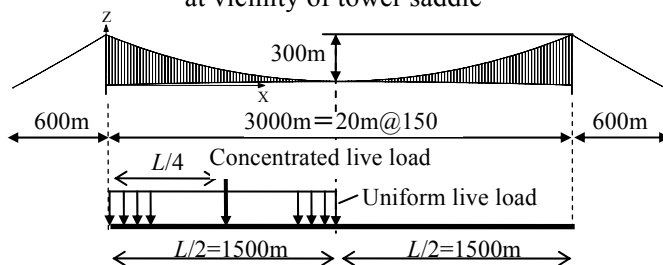


Fig.3 Side view of analytical model and load condition

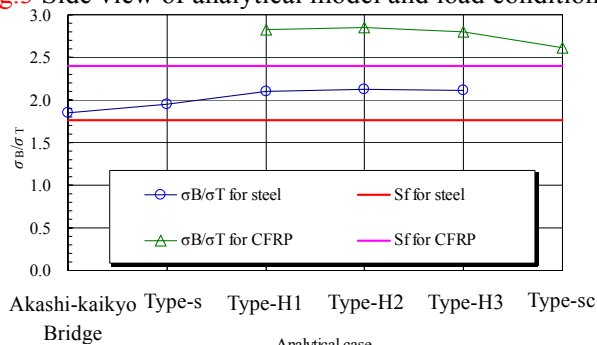


Fig.4 σ_B/σ_T for CFRP and steel of all analytical cases

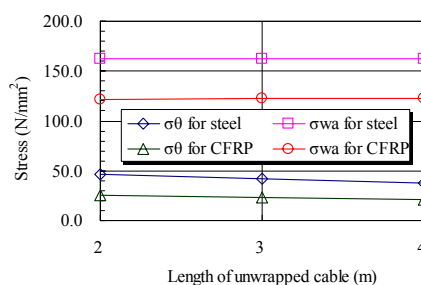


Fig.5 σ_θ and σ_{wa} for Type-H3

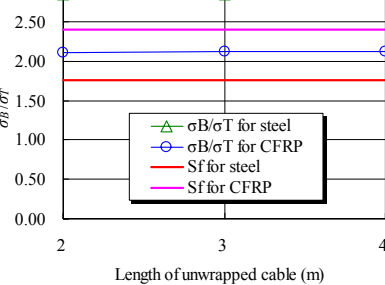


Fig.6 σ_B/σ_T for Type-H3