

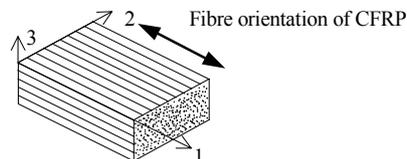
CFRP と鋼線で構成される Hybrid Cable の温度差応力の検討

大阪大学大学院 フェロー 西村 宣男
 大阪大学大学院 学生員 三好 崇夫
 大阪大学大学院 学生員 Nguyen Quoc Thai

1. 研究背景

本研究では、次世代の経済的かつ合理的な構造の超長大吊橋に対応するため、超長大吊橋ケーブルの機械的性質として要求される、高弾性率、高引張強度、及び高耐食性を持ち合わせ、従来の鋼線よりはるかに軽量で、遅れ破壊の問題がない、一方向連続繊維強化補強のロッド材として引抜成型した CFRP wire (以下、CFRP) を超長大吊橋メインケーブル素線に適用することに着目した。しかし、CFRP は従来の鋼線と比較して異方性の高い材料であり、せん断強度が低く、さらに、軸方向の線膨張係数が鋼線の約 1/20 であるといった特性がある (Table.1)^{1),2)}。このため、本研究が提案する、ハイブリッド構造のケーブル (Hybrid Cable) が温度変化を受けた場合、両者間の線膨張係数の相違によって、温度差応力を生ずることが考えられる。

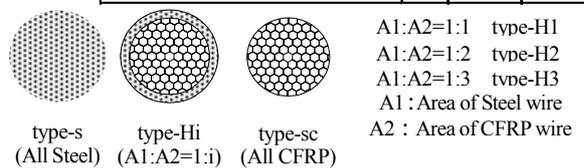
Table.1 Material properties of wire



Material	CFRP wire	Steel wire	
Elastic modulus (GPa)	E_1	150	200
	E_2	8.6	200
	E_3	8.6	200
Poisson's ratio	ν_{12}	0.32	0.3
	ν_{23}	0.02	0.3
	ν_{31}	0.32	0.3
Shearing modulus (GPa)	G_{12}	5.0	77
	G_{23}	4.2	77
	G_{31}	5.0	77
Ultimate tensile strength (N/mm ²)	X^+_1	2290	1770
	X^+_2	80	1770
	X^+_3	80	1770
Ultimate compressive strength (N/mm ²)	X^-_1	1760	1770
	X^-_2	327	1770
	X^-_3	327	1770
Ultimate shearing strength (N/mm ²)	X_{12}	96	1020
	X_{23}	129	1020
	X_{31}	96	1020
Unit volume weight (KN/m ³)	ρ	15.7	76.9
	α_1	0.6	12
Coefficient of thermal expansion ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	α_2	10	12
	α_3	10	12

2. 研究目的

そこで、本研究では、ケーブル断面内の温度分布、Hybrid Cable の CFRP と鋼線の断面積比、及びケーブルの軸方向長をパラメータとし、ケーブル素線間はラッピング或いはケーブルバンド等で十分拘束された、素線間に滑りを生じない安全側の仮定³⁾の下に、ケーブルを有限要素に離散化した数値解析により、CFRP 及び鋼線に生ずる温度差応力を定量的に把握し、Hybrid Cable が温度変化を受けた際の、超長大吊橋メインケーブルへの適用性を明らかとすることを目的とする。



3. 解析ケース

解析ケースは、CFRP 部及び鋼線部の断面積比の違いを基本とし (Fig.1)、ケーブルの長さ l 、及びケーブル断面内の温度分布のパターンを変化させた場合を設定した。また、比較のため、全断面を CFRP 及び鋼線のみで構成したケースも設定した。ケーブルの長さ l は、長さの違いにより、温度差応力に及ぼす影響を把握するため、試行的に 10m、30m、50m 及び 90m としたケースを設定した (Fig.3)。温度分布及びその変化のパターンは、本州四国連絡橋上部構造設計基準⁴⁾に従い、基準温度

Fig.1 Analytical case & Constitution of cross section of cable

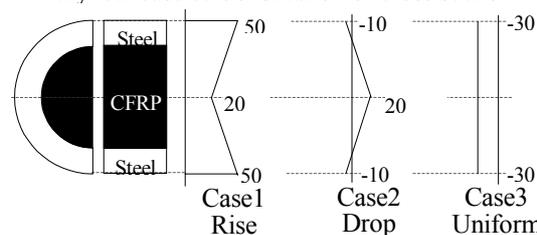


Fig.2 Cases of temperature distribution

Table.2 Dimension of analytical model

Analytical case	type-sc-l-t	type-H3-l-t	type-H2-l-t	type-H1-l-t	type-s-l-t
	All CFRP	Hybrid			All steel
Ratio of sectional area (steel/CFRP)	0.000	0.333	0.500	1.000	∞
Radius of CFRP (m)	0.725	0.643	0.610	0.537	—
Thickness of layer of steel wire (m)	—	0.099	0.137	0.223	0.783
Diameter of cable D (m)	1.450	1.485	1.495	1.520	1.565
Length of cable l (m)	10, 30, 50, 90				
Distribution of temperature t	r (rise)	centre=20°C, surface=50°C (linear distribution)			
	d (drop)	centre=20°C, surface=-10°C (linear distribution)			
	sd (uniform drop)	—	-30°C (uniform distribution)		

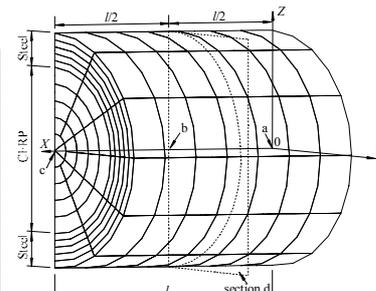


Fig.3 Analytical model

キーワード：超長大吊橋，CFRP，ハイブリッドケーブル，温度差応力

連絡先：〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1 Phone:06-6879-7599 FAX:06-6879-7601

20 に対して ± 30 の温度変化を考慮して与えることとした。断面内の温度分布は線形で仮定し、表面の温度が上昇、及び低下した場合については、表面が最高温である 50、及び最低温である-10 で、それぞれ中心の温度が 20 である 2 ケース、ケーブルの設計で問題となるのは低温時であることから⁵⁾、断面内の温度が一様に-30 に低下する 3 ケースを設定した (Fig.2)。従って、計 156 ケースを設定した (Table.2)。

解析モデルは、ケーブル軸直交方向の軸対象性を利用した 1/2 モデルとした。境界条件は、温度変化に応じて軸方向に伸縮する、吊橋ケーブルの温度変化のみによる応力変化を把握するため、Fig.3 に示す、Z-X 面の Y 軸方向、ケーブル軸方向の対象性を利用して端断面中心節点 a 及び c の Z 軸方向、及び軸方向中央、断面内中心節点 b の X 軸方向変位を拘束した。

4. 解析結果

本解析モデルの境界条件を考慮し、応力に乱れの生じない section d (Fig.3) に着目して応力特性を考察する。ケーブルの設計で問題となるのは低温時であること⁵⁾、また各応力成分の中、 σ_x が最も大きいことから、本文では主として type-d 及び σ_x に関する解析結果を掲げる。材料の強度が異なるため、応力を強度で無次元化したパラメータ $N(\%) = \sigma_x / \text{強度} \times 100$ により評価する。Fig.4 ~ 6 中でマークされている部分は Hybrid cable における鋼線部を示している。

ケーブルの長さを $l=10\text{m}$ とした場合について、断面構成の違いにより CFRP 及び鋼線に発生する温度差応力の強度に占める割合を比較し、さらに、断面構成を type-H1 としたときの温度分布の違いによる影響も把握するため、 σ_x の Z 軸方向分布を、それぞれ Fig.4 及び Fig.5 に示す。Fig.4 より、Hybrid Cable では、CFRP がケーブル全体の断面積に占める割合が増加するほど、鋼線に作用する応力が増加し、CFRP に作用する応力が減少する傾向にあることがわかる。また、Fig.5 より type-d と type-r では、応力の正負が異なるのみで、ともに強度の約 3% に収まっている。実際はケーブルには過大な一次応力が作用しており、これらの応力は無視できると考えられる。

次に、ケーブル軸方向長さ l による温度差応力の変化を把握するため、ケーブル表面の温度が-10 に降下した場合の type-H1, section d に着目し、各長さ l に対する σ_x の Z 軸方向分布を Fig.6 に示す。応力は長さ l に関わらずほぼ一定となる。

5. まとめ

ケーブルを均質・連続体と仮定して、有限要素に離散化し、ケーブル断面内の温度分布、ケーブルの断面内構成、及びその長さをパラメータとした数値解析を行い、CFRP 及び鋼線に生ずる温度差応力を定量的に把握した。その結果、CFRP の断面積比が大きいほど、CFRP に作用する応力が低下し、CFRP の破損に対して有利に働くことが確認できた。さらに、Hybrid cable の温度差応力は、ケーブル表面の温度が降下したときが危険側であることが確認できた。

【参考文献】

- 1) 土木学会：コンクリートライブラリー-88 連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針 (案), pp.135-137, 1996.
- 2) 宮入裕夫他編：複合材料の事典, pp.278-279, 朝倉書店, 1991.
- 3) 原田康夫, 長谷川 一：吊橋ケーブルの温度応答に関する研究, 土木学会論文報告集, 第 125 号, pp.17-27, 1976.
- 4) 本州四国連絡橋公団：上部構造設計基準・同解説, pp.60, 1980.
- 5) 佐伯彰一：長大吊橋主ケーブル材料及び防錆に関する研究, pp.4-25, 東京大学博士論文, 2000.4.
- 6) 武伸明他：新素材を適用したデュアル形式吊橋に関する考察, 鋼構造年次論文報告集, 第 5 巻, pp.1-8, 1997.

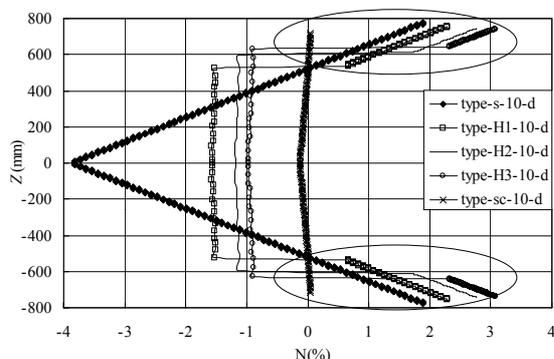


Fig.4 Stress distribution on Z-axis

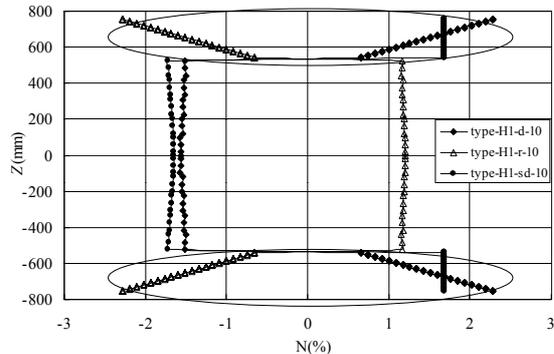


Fig.5 Stress distribution on Z-axis

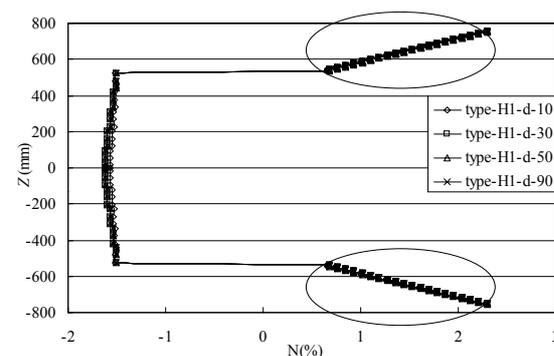


Fig.6 Stress distribution on Z-axis