

CFRP wire と鋼線で構成した Hybrid Cable の 超長大吊橋ケーブルバンド部における強度評価

Evaluation of strength for Hybrid Cable which composed CFRP wire & steel wire
at the cable strap of ultra long span suspension bridge

三好 崇夫*

西村 宣男**

武 伸明***

Takao MIYOSHI

Nobuo NISHIMURA

Nobuaki TAKE

ABSTRACT In order to realize the ultra long span suspension bridge, CFRP is applied for its main cable. However, CFRP has weaknesses such as low shear strength, and anisotropic material. Therefore, in application to there, the shear failure at the cable straps becomes a problem. In this study, in order to examine basically about the application of CFRP to there, the cable strap where centre of centre span and the maximum hanger load acted were modeled. Numerical analysis was conducted with a parameter of the sectional area ratio of the steel wire and CFRP by FEM. Firstly, the validity of modeling was confirmed, that is the strength of CFRP was evaluated using the failure criteria of an anisotropic material. Finally, assuming a hybrid, the effectiveness of failure composition was confirmed.

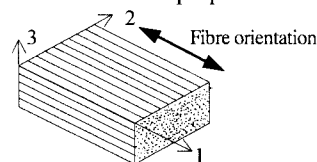
Keywords : CFRP wire, 超長大吊橋, 破損強度則, 直交異方性

1. はじめに

世界各地に構想されている海峡横断プロジェクトでは、耐風安定性を確保し、経済性にも優れた構造形式の超長大吊橋が要求されている。このような超長大吊橋の実現を考えた場合、ケーブル自重の増加による適用限界長の制約は、未だ解決すべき課題として残されている。そこで、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 (Table.1)。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、せん断強度が低い等の特性がある。そのため、ケーブル素線としての適用上、CFRP が直接的にケーブルバンドやサドルに接する箇所での破損が懸念

されている^{1), 2)}。そこで、断面が CFRP のみで構成されるケーブルの外周を、軽量性に影響を及ぼさない範囲で鋼線に置き換えたハイブリッド構造のケーブル (Hybrid Cable) を導入し、せん断強度の低い CFRP を鋼線で補強することを考案した (Fig.1)。

Table.1 Material properties of wire



Material		CFRP wire	Steel wire
Modulus of elasticity (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
Modulus of rigidity (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

*工修 大阪大学大学院工学研究科土木工学専攻

博士後期課程

(〒565-0781 吹田市山田丘 2-1)

**工博 大阪大学大学院工学研究科土木工学専攻 教授

(〒565-0781 吹田市山田丘 2-1)

***工博 建設企画 C(株) 構造設計部 部長

(〒550-0004 大阪市西区靱本町 3-5-25)

本研究では、CFRP と鋼線で構成される Hybrid Cable の超長大吊橋メインケーブルへの適用性に関する基本的な検討を行うため、CFRP 部と鋼線部の断面積比をパラメータとして(Fig.2)，吊橋立体有限変位解析（全体解析）から得た超長大吊橋(Table.2)の諸元をもとに、径間中央部及び最大ハンガー荷重の作用する水平面に対して傾斜したバンド部（傾斜部）に着目したモデル化を行う。この解析モデルを、3次元ソリッド要素を用いて離散化し、CFRP の直交異方性に対応した FEM 解析を行う。まず、モデル化の妥当性について確認し、さらに、異方性材料を対象とした破損強度則による CFRP の強度評価を行い、ハイブリッド構造とした場合の、バンド部での CFRP の破損に対する安全性を確認する。

2. ケーブルのモデル化と解析方法

ケーブルの局所的な応力状態を把握するため、バンド部に着目した局所解析モデルを用いた局所解析を採用した。局所解析モデルは、着目しているバン

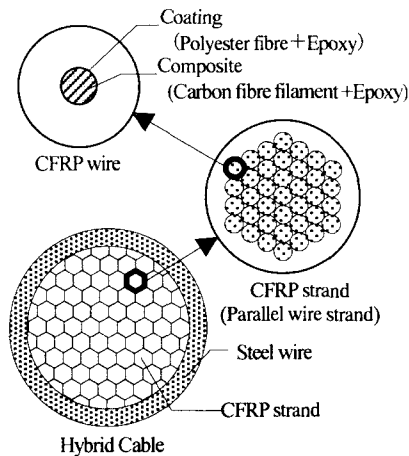


Fig.1 Cross section of hybrid cable

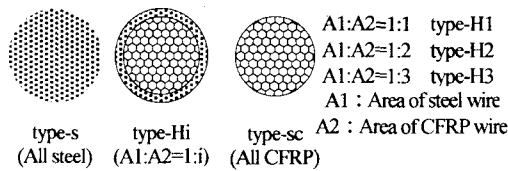


Fig.2 Analytical case & Constitution of cross section of cable

Table.2 Basic dimensions of ultra long span suspension bridge³⁾

Type	Suspension bridge of simple span stiffening box girder
Length of centre span	m 3000
Sag span ratio	1/10
Interval of cable	m 40
Width of girder ³⁾	m 49
Height of girder ³⁾	m 3

ド及びその前後 2 パネルのケーブルを、フリーケーブル状態にある全体系の骨組モデルにおける節点間を直線で結ぶケーブル要素に肉付けし、鞍掛けバンドを想定して、径間中央を対象とした場合は、着目しているバンドのハンガーロープのうち、バンドと接する部分のみを、傾斜部モデルは、ハンガーロープ全てをモデル化する (Fig.3). 局所解析は、全体系の解析結果を用いて、死+活荷重状態における変形状態を再現する。フリーケーブル状態のケーブルを初期状態とするため、荷重状態は、死+活荷重時において局所解析で得られたケーブル張力とフリーケーブル時のケーブル張力を重ね合わせることで再現することとした (Fig.4).

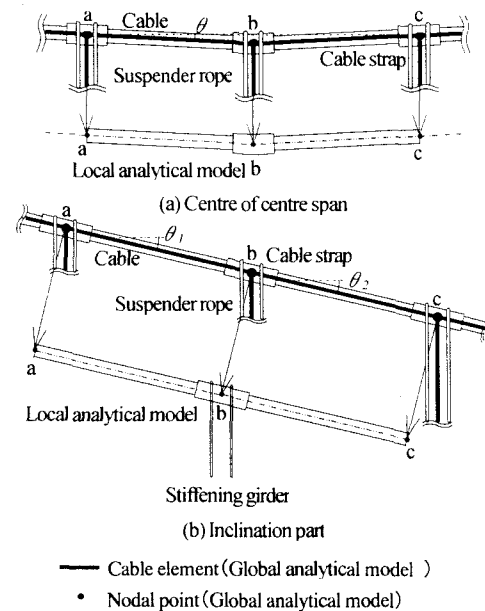


Fig.3 Replacement from global analytical model to local analytical model

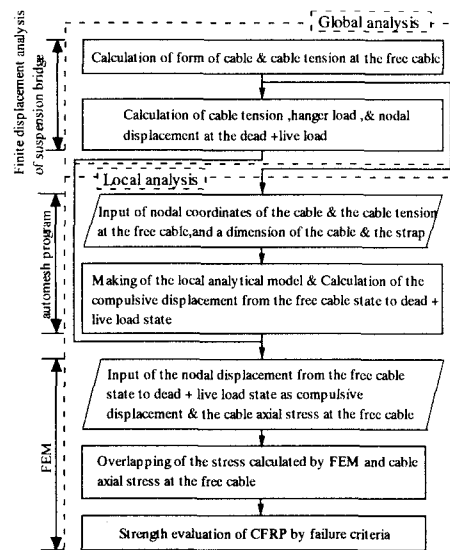


Fig.4 Relationship between local & global analysis

2. 1. 局所解析モデルの荷重及び境界条件

局所解析モデルの境界条件は、径間中央を対象とした場合、全体解析により、ケーブル端断面の回転は十分小さいことから、端断面の回転を拘束した。荷重条件は、フリーケーブル状態から死+活荷重状態までのケーブル節点 a に対する節点 b, c の相対変位である ΔX 及び ΔZ を強制変位として導入することで考慮した。一方、傾斜部を対象とした場合の境界条件は、径間中央と比較して、変位制御によって死+活荷重状態を再現する際の剛体的な回転が卓越することから、全体解析モデルのケーブル節点と一致する局所解析モデルの節点 a 及び c をヒンジ支持することとした。さらに、ケーブルに所定の断面力を導入するため、節点 a 及び c を含むケーブル端の要素を剛要素とした。荷重条件は、フリーケーブル状態から死+活荷重状態までのケーブル節点 a に対する節点 c, d の相対変位である ΔX_c , ΔZ_c , ΔX_d 及び ΔZ_d を強制変位として導入することで考慮した。これら局所解析モデル、及びその寸法及び強制変位量を示す (Fig.5), (Table.3)。

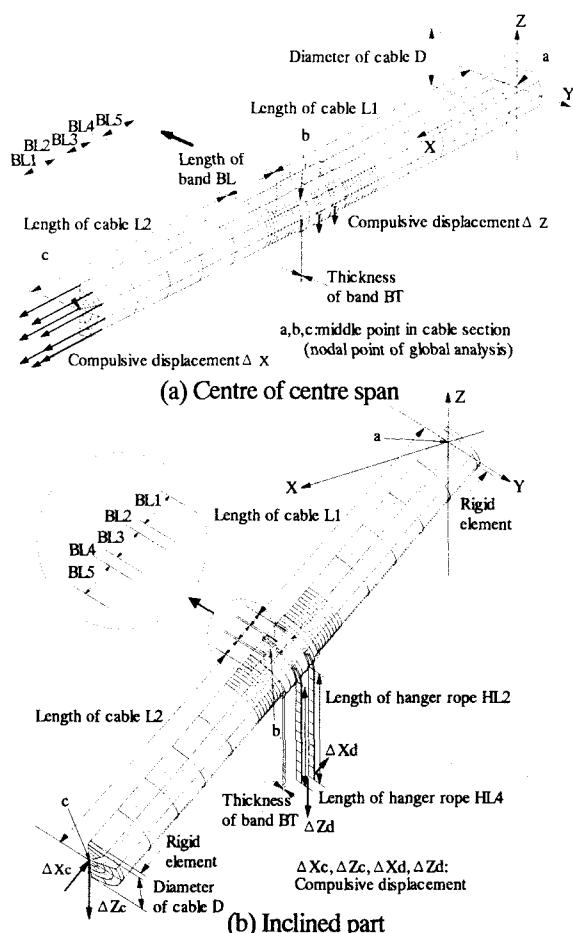


Fig.5 Local analytical model of cable

Table.3 (a) Dimensions & load condition of local analytical model (centre of centre span)

Analytical case	type-sc	type-H3	type-H2	type-H1	type-s
Composition of cable	CFRP		Hybrid		Steel
Ratio of Area (steel/CFRP)	0.000	0.333	0.500	1.000	∞
Radius of CFRP part (m)	0.725	0.643	0.610	0.537	—
Thickness of layer of steel wire (m)	—	0.099	0.137	0.223	0.783
Length of cable L1(L2) (m)	19.932	19.938	19.940	19.943	19.951
Length of cable strap BL (m)	4.000				
BL1 (m)	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250
BL2 (m)	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100
BL3 (m)	1.300	1.300	1.300	1.300	1.300
BL4 (m)	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100
BL5 (m)	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250
Thickness of cable strap BT (m)	0.050				
Diameter of cable D (m)	1.450	1.485	1.495	1.520	1.565
Compulsive displacement ΔX (m)	0.144	0.132	0.128	0.122	0.104
Compulsive displacement ΔZ (m)	-0.005	-0.005	-0.004	-0.004	-0.003

Fig.3 (b) Dimensions & load condition of local analytical model (inclined part)

Analytical case	type-sc	type-H3	type-H2	type-H1	type-s
Composition of cable	CFRP		Hybrid		Steel
Area ratio (steel/CFRP)	0.000	0.333	0.500	1.000	∞
Radius of CFRP part (m)	0.725	0.643	0.610	0.537	—
Thickness of layer of steel wire (m)	—	0.099	0.137	0.223	0.783
Length of cable (m)	L1	19.103	19.140	19.141	19.142
	L2	19.068	19.104	19.105	19.144
Length of cable strap (m)	4.000				
BL1	1.212	1.211	1.211	1.212	1.211
BL2	0.105	0.105	0.105	0.105	0.105
BL3	1.364	1.366	1.366	1.366	1.367
BL4	0.105	0.105	0.105	0.105	0.105
BL5	1.214	1.213	1.213	1.213	1.212
Thickness of cable strap BT (m)	0.050				
Diameter of cable D (m)	1.450	1.485	1.495	1.520	1.565
Length of hanger rope (m)	HL2	243.648	251.032	251.000	250.961
	HL4	243.203	250.581	250.549	250.511
Area of hanger rope (m ²)		0.012	0.012	0.012	0.013
Compulsive displacement ΔX_c (m)		-0.193	-0.190	-0.185	-0.179
Compulsive displacement ΔZ_c (m)		-1.083	-1.014	-0.986	-0.942
Compulsive displacement ΔX_d (m)		-0.188	-0.192	-0.188	-0.179
Compulsive displacement ΔZ_d (m)		-1.201	-1.164	-1.141	-1.061

2. 2. 局所解析手法

局所解析は、ケーブルの曲線的な形状に対応できること、局所的な応力を精度良く把握できることから、20 節点アイソパラメトリック立体要素を用いた FEM 解析によることとした。さらに、CFRP の直交異方性に対応すべく、親要素を直交異方性材料の応力-ひずみ関係を定義した要素座標系に写像し、要素座標系の剛性方程式を定式化した後に、全体座標系に変換する手法を用いた⁴⁾。要素座標系 (x-y-z) と全体座標系 (X-Y-Z) は次の局所方向余弦 [L] で関係づけられる (Fig.6)。

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = [L] \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix} \quad (1) \quad \text{ここに,}$$

$$[L] = \begin{bmatrix} \cos(x, X) & \cos(x, Y) & \cos(x, Z) \\ \cos(y, X) & \cos(y, Y) & \cos(y, Z) \\ \cos(z, X) & \cos(z, Y) & \cos(z, Z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{x1} \\ l_{x2} \\ l_{x3} \end{bmatrix} \quad (2)$$

であり、要素座標系での要素剛性マトリックスは、

$$[k^e] = \int_{\omega} [B]^T [D] [B] dv^e \quad (3)$$

で与えられる。ところで、ひずみ-変位関係 $[B]$ 及び応力-ひずみ関係 $[D]$ は要素座標系であり、全体座標系における要素剛性マトリックスは、次の局所方向余弦 $[L]$ を対角成分にもつ座標変換マトリックス $[T]$ で変換することで得られる^{5), 6)}。

$$[K^e] = [T]^T [k^e] [T] \quad (4)$$

$$\text{ここに, } [T] = \begin{bmatrix} [L] & 0 & \dots & 0 \\ 0 & [L] & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & [L] \end{bmatrix} \quad (5)$$

また、直交異方性材料の応力-ひずみ関係 $[D]$ は、次式で示される。

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon\} \quad (6)$$

$$\text{ここに, } [D] = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & E_{13} & & & \\ & E_{22} & E_{23} & & & \\ & & E_{33} & & & \\ & & & E_{44} & & \\ & & & & E_{55} & \\ sym & & & & & E_{66} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$E_{11} = \frac{1}{E_2} \left(\frac{1}{E_3} - \frac{v_{23}^2}{E_2} \right) / A, \quad E_{22} = \frac{1}{E_3} \left(\frac{1}{E_1} - \frac{v_{31}^2}{E_3} \right) / A$$

$$E_{33} = \frac{1}{E_1} \left(\frac{1}{E_2} - \frac{v_{12}^2}{E_1} \right) / A, \quad E_{12} = \frac{1}{E_3} \left(\frac{v_{23} v_{31}}{E_2} + \frac{v_{12}^2}{E_1} \right) / A$$

$$E_{23} = \frac{1}{E_2} \left(\frac{v_{12} v_{23}}{E_1} + \frac{v_{31}^2}{E_3} \right) / A, \quad E_{31} = \frac{1}{E_1} \left(\frac{v_{23} v_{31}}{E_2} + \frac{v_{12}^2}{E_1} \right) / A$$

$$E_{44} = G_{12} \quad E_{55} = G_{23} \quad E_{66} = G_{31}$$

$$A = \frac{1}{E_1 E_2 E_3} \left(1 - 2v_{12} v_{23} v_{31} - \frac{E_2 v_{12}^2}{E_1} - \frac{E_3 v_{23}^2}{E_2} - \frac{E_1 v_{31}^2}{E_3} \right) \quad (8)$$

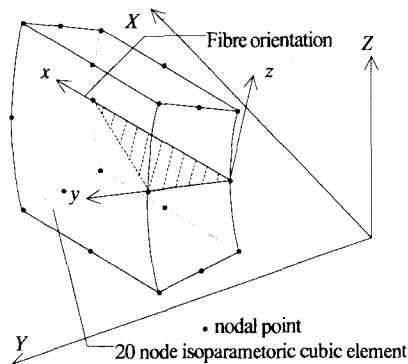


Fig.6 Global & local coordinate system

3. 解析結果

3. 1. モデル化の妥当性の検証

(1) 死荷重時の径間中央

死荷重時において、ケーブル構造は力の釣り合いに関する平衡多角形を形成することから、Fig.3 (a) に示す 3 つの節点間では、全体解析モデルの節点 a 及び c で得られたケーブル張力 T の水平成分 T_h と、ハンガー荷重 P で形成される、ケーブル張力ベクトルの勾配 θ_g は、死荷重時のケーブル軸と水平面との交角 θ_s と一致する。即ち、Fig.7 より、次式が成立する。

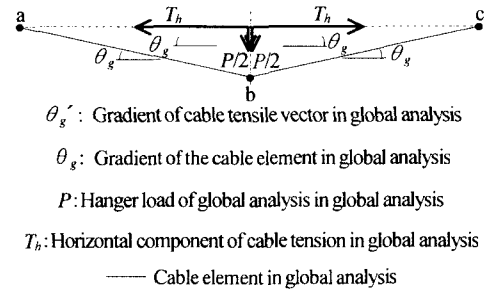
$$\theta_g = \tan^{-1} \left(\frac{P}{2T_h} \right) \quad (9)$$

さらに、局所解析においても、死荷重時のケーブル中心軸の勾配 θ_l と、局所解析モデルの節点 a、及び c で得られる節点反力 R_{ax} , R_{cx} , R_{az} 及び R_{cz} から求まるケーブル張力ベクトルの勾配 θ_l は一致する。即ち、Fig.8 より、次式が成立する。

$$\theta_l = \tan^{-1} \left(\frac{R_{az}}{R_{ax}} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{R_{cz}}{R_{cx}} \right) \quad (10)$$

(2) 死荷重時の傾斜部

一方、Fig.3 (b) に示す 3 つの節点間では、全体解析モデルの死荷重時の主塔側、及び径間中央側それぞれのケーブル張力を T_1 及び T_2 、及び節点 b でのハ



θ_g : Gradient of cable tensile vector in global analysis

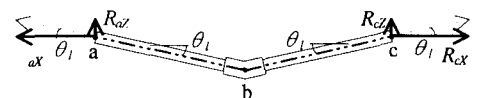
θ_s : Gradient of the cable element in global analysis

P : Hanger load of global analysis in global analysis

T_h : Horizontal component of cable tension in global analysis

— Cable element in global analysis

Fig.7 The gradient of cable tensile vector & the axis of cable (centre of centre span)



θ_l : Gradient of cable tensile vector in local analysis

θ_l : Gradient of middle axis of cable in local analysis

$R_{ax}, R_{cx}, R_{az}, R_{cz}$: Nodal force of local analysis in local analysis

--- Middle axis of cable of local analysis in local analysis

Fig.8 Reaction of local analysis & the gradient of the middle axis of the cable (centre of centre span)

ンガー荷重 P_b とすると、ケーブル要素の勾配 θ_g^{ab} 及び θ_g^{bc} は、b 点における力の釣り合いを考慮して得られる、ケーブル張力ベクトルの勾配と一致する。即ち、Fig.9 より次式が成立する。

$$\theta_g^{ab} = \tan^{-1} \left(\frac{P_b + T_{2v}}{T_{1h}} \right) \quad (11)$$

$$\theta_g^{bc} = \tan^{-1} \left(\frac{-P_b + T_{1v}}{T_{2h}} \right) \quad (12)$$

ここに、 $T_{1h}=T_1 \cos \theta^{ab}$ 、 $T_{1v}=T_1 \sin \theta^{ab}$ 、 $T_{2h}=T_2 \cos \theta^{bc}$ 、及び $T_{2v}=T_2 \sin \theta^{bc}$ である。

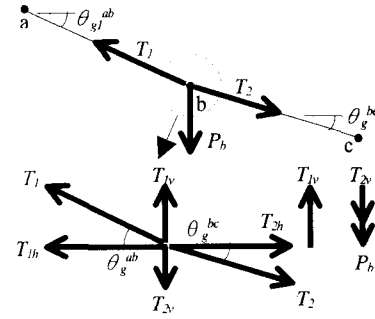
また、局所解析モデルにおける、ケーブル中心軸の勾配 θ_l^{ab} 、及び θ_l^{bc} と、局所解析で得られる、節点 a、c 及び d の節点反力 R_{ax} 、 R_{cx} 、 R_{dx} 、 R_{az} 、 R_{cz} 、及び R_{dz} が形成するケーブル張力ベクトルの勾配は一致する。即ち、Fig.10 より次式が成立する。

$$\theta_l^{ab} = \tan^{-1} \left(\frac{R_{cx} + R_{dx}}{R_{ax}} \right) \quad (13)$$

$$\theta_l^{bc} = \tan^{-1} \left(\frac{R_{dz} + R_{cz}}{R_{cx} + R_{dx}} \right) \quad (14)$$

径間中央及び傾斜部を対象として、式 (9)、(10)、(11)、(12)、(13) 及び (14) を用いて求めた死荷重時の全体解析及び局所解析それぞれの水平面に対するケーブル要素の勾配、ケーブル中心軸の勾配、及びケーブル張力ベクトルの勾配をそれぞれ精度比較した結果を示す (Table.4)。

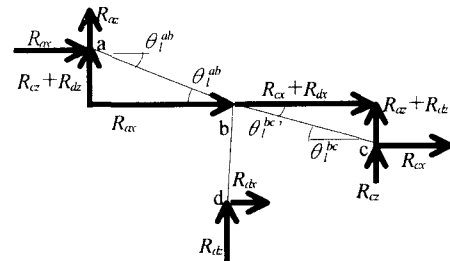
Table.4 より、局所解析のケーブル張力ベクトルの勾配 θ_l' とケーブル中心軸の勾配 θ_l は、径間中央では、各解析ケースで 98% 以上、傾斜部では、94% 以上の精度で一致し、局所解析において、力の釣り合いに関する平衡多角形が形成されることがわかる。また、局所解析及び全体解析のケーブル要素の勾配 θ_l 及び θ_g は、径間中央では、各解析ケースで 98% 以上、傾斜部では、99% 以上の精度で一致することから、局所解析において、死荷重時のケーブルの変形状態が再現できることがわかる。さらに、局所解析及び全体解析のケーブル張力ベクトルの勾配 θ_l' 及び θ_g' は、径間中央では、各解析ケースで 98% 以上、傾斜部では、94% 以上の精度で一致していることから、局所解析モデルにおいて、ケーブルの荷重状態が再現できるものとみなせる。



$\theta_g^{ab}, \theta_g^{bc}$: The gradient of cable element in global analysis

$\theta_g^{ab}, \theta_g^{bc}$: The gradient of the tensile vector in global analysis

Fig.9 The gradient of the tensile vector of cable & the axis of cable (inclined part)



$\theta_l^{ab}, \theta_l^{bc}$: The gradient of the middle axis in local analysis

$\theta_l^{ab}, \theta_l^{bc}$: The gradient of the tensile vector in local analysis

Fig.10 Reaction & the gradient of the tensile vector of cable (inclined part)

Table.4 Accuracy of local analysis at dead load

Analytical case		type-sc	type-H3	type-H2	type-H1	type-s
Centre of centre span	Accuracy of θ_l & θ_l'	section a-b	0.994	0.982	0.98	0.977
		section b-c	0.994	0.982	0.979	0.977
	Accuracy of θ_g & θ_l	section a-b	0.996	0.984	0.982	0.979
		section b-c	0.996	0.984	0.982	0.979
	Accuracy of θ_g' & θ_l'	section a-b	0.998	0.998	0.998	0.998
		section b-c	0.998	0.998	0.998	0.998
Inclined part	Accuracy of θ_l & θ_l'	section a-b	0.938	0.949	0.952	0.957
		section b-c	0.947	0.956	0.959	0.964
	Accuracy of θ_g & θ_l	section a-b	0.998	0.999	0.999	0.999
		section b-c	0.998	0.999	0.999	0.999
	Accuracy of θ_g' & θ_l'	section a-b	0.940	0.951	0.954	0.959
		section b-c	0.945	0.955	0.958	0.962

Table.5 Accuracy of local analysis at dead + live load

Analytical case		type-sc	type-H3	type-H2	type-H1	type-s
Accuracy of cable tension at the dead + live load	Centre of centre span	section a-b	0.972	0.974	0.975	0.976
		section b-c	0.972	0.974	0.975	0.976
	Inclined part	section a-b	0.988	0.988	0.987	0.988
		section b-c	0.988	0.987	0.986	0.987

(3) 死+活荷重時

局所解析で得られたケーブル張力を全体解析と精度比較し、死+活荷重時の妥当性について確認を行った (Table.5)。Table.5 より、径間中央モデルでは、ほぼ 97% で、傾斜部モデルでは、99% 以上の精度で両者は一致していることから、死+活荷重時においても、局所解析と全体解析が互いに整合性の取れているものであると判断した。

3. 2. CFRP の強度評価

等方性材料では、強度と破壊機構を知るためには最大引張応力、最大圧縮応力、及び最大せん断応力の決定のみが必要であるのに対し、長繊維強化複合材料のような異方性材料では、剛性と強度に対し繊維方向の弾性係数や引張強度など、ただ一つの定数を求めるだけでは十分ではない。従って、いかなる負荷状態においても破壊を判定する前に応力成分全てを調べなくてはならない。そのため、これら組み合わせ応力の効果を系統的に決定する必要がある⁷⁾。このような組み合わせ応力下における破損強度則には種々の理論が提案されており、破損強度則に関する国際的なアンケート調査⁸⁾によれば、最大ひずみ説、あるいはTsai-Wu則などがよく用いられている。

このような実状を踏まえて、本研究では、CFRPを均質連続な異方性体とみなし、材料内の応力が一定の値以上になったときに破損が生じるとする巨視的強度評価論に従うこととし、全ての応力成分が許容応力度以下か否かの判定には、最大応力説を、組み合わせ応力の効果を考慮できる破損強度則としてTsai-Wu則を用いた強度評価を行った。また、これまでは、CFRPの繊維方向引張強度に対する安全率を3.0と提案したが⁹⁾、式(16)のせん断に関する項が他の項より卓越することから、これを低減させ、CFRPの強度に対する安全率を2.5に低減した。

(1) 最大応力説を用いた強度評価

最大応力説 (M.S.T) は、式(15)で示される。

$$\begin{aligned} X_1^- < \sigma_1 < X_1^+, \quad X_2^- < \sigma_2 < X_2^+, \quad X_3^- < \sigma_3 < X_3^+ \\ |\tau_{12}| < X_{12}, \quad |\tau_{23}| < X_{23}, \quad |\tau_{13}| < X_{13} \end{aligned} \quad (15)$$

ここに、 σ_1 は繊維方向、 σ_2 、及び σ_3 は繊維直交方向直応力、 τ_{12} 及び τ_{13} は繊維平行面内、 τ_{23} は繊維直交面内せん断応力、 X_1^+ 及び X_1^- は各々繊維方向の引張及び圧縮強度、 X_2^+ 、 X_3^+ 、及び X_2^- 、 X_3^- は各々繊維直交方向の引張及び圧縮強度、 X_{12} 及び X_{13} は繊維平行面内、また、 X_{23} は繊維直交面内のせん断強度である。

最大応力説による強度評価は、各解析ケースの応力の最大値(最小値) $\sigma_{\max, \min}$ を許容応力 σ_a で無次元化したパラメータ $\sigma_{\max, \min}/\sigma_a$ の変化として示す(Fig.11),(Fig.12)。若干、傾斜部モデルで作用する応力が大きいものの、径間中央及び傾斜部モデルで、殆ど $\sigma_{\max, \min}/\sigma_a$ の変化に違いは見られず、両者とも、type-scのみで引張応力 σ_x 及びせん断応力 τ_{xy} が許容応力を超過し、せん断応力 τ_{xy} はハイブリッド構造とすることで大幅に低減している。

(2) Tsai-Wu 則を用いた強度評価

垂直応力 2 成分の相互干渉効果を考慮できるTsai-Wu 則 (T.W.L) は、式(16)及び(17)で示される。作用応力と強度パラメータ積の総和が1以上となったときに、破損が発生するとした二次相関基準は、応力テンソル σ_{ij} を用いると、式(16)で示される。

$$F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{33}\sigma_3^2 + F_{12}\sigma_1\sigma_2 + F_{23}\sigma_2\sigma_3 + F_{13}\sigma_1\sigma_3 + F_2\sigma_2 + F_3\sigma_3 + F_{44}\sigma_4^2 + F_{55}\sigma_5^2 + F_{66}\sigma_6^2 = 1 \quad (16)$$

ここに、 F_{ij} は異方性パラメータと呼ばれ、繊維方向軸を基準とする方向各々に関する単軸引張及び圧縮試験、及び3つの面内に関する純せん断試験により、以下に示す9つまでは容易に求め得る。

$$\begin{aligned} F_1 &= \frac{1}{X_1^+} - \frac{1}{X_1^-}, \quad F_2 = \frac{1}{X_2^+} - \frac{1}{X_2^-}, \quad F_3 = \frac{1}{X_3^+} - \frac{1}{X_3^-}, \\ F_{11} &= \frac{1}{X_1^+ X_1^-}, \quad F_{22} = \frac{1}{X_2^+ X_2^-}, \quad F_{33} = \frac{1}{X_3^+ X_3^-}, \\ F_{44} &= \frac{1}{X_{12}^2}, \quad F_{55} = \frac{1}{X_{23}^2}, \quad F_{66} = \frac{1}{X_{13}^2} \end{aligned} \quad (17)$$

Tsai-Wu 則においては、3つの面内垂直応力2成分の相互作用を示すパラメータの算出をするための2

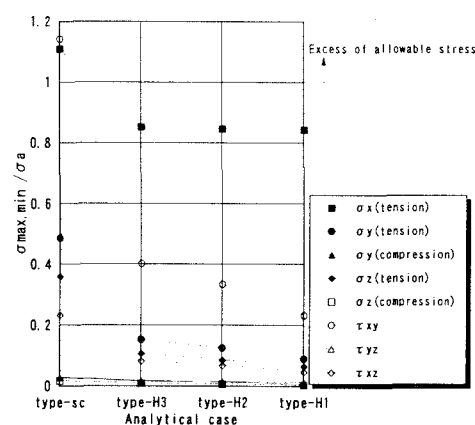


Fig.11 Evaluation of strength by M.S.T. (centre of centre span)

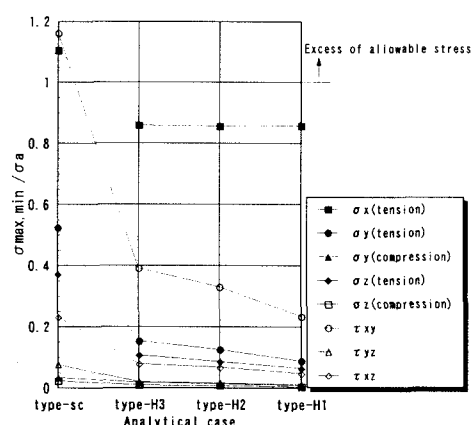


Fig.12 Evaluation of strength by M.S.T. (inclined part)

軸試験が困難である場合、種々の考察から、式(18)でこれらの値を求めることを提案している^{10), 11), 12)}。

$$F_{12} = -\frac{1}{2\sqrt{X_1'X_1'X_2'X_2'}}, F_{23} = -\frac{1}{2\sqrt{X_2'X_2'X_3'X_3'}},$$

$$F_{13} = -\frac{1}{2\sqrt{X_1'X_1'X_3'X_3'}} \quad (18)$$

Tsai-Wu 則を用いた強度評価は、各解析ケースについて、式(16)左辺で表される、破損判定値の最大値 F_{max} の変化を示す(Fig.13),(Fig.14)。径間中央及び傾斜部モデルの両者とも、 F_{max} の変化に殆ど違いは見られず、 F_{max} が 1.0 を上回ったのは type-sc のみであった。

4. まとめ

径間中央及び最大ハンガー荷重の作用する傾斜部のバンド近傍のケーブルを対象に、吊橋全体系の解析結果を利用した局所解析を考案し、CFRP の直交異方性に対応した FEM 解析を行った。まず、モデル化の妥当性の検証を行い、局所解析及び全体解析で形成されるケーブル張力ベクトルの勾配とケーブル軸の勾配、及び、死+活荷重時における、全体解析と局所解析のケーブル張力がほぼ一致したことから、局所解析によるケーブル挙動の再現性を確認した。これを踏まえて、局所解析により、破損強度則を用いた CFRP の強度評価を行った。最大応力説による強度評価から、ハイブリッド構造とすることで CFRP に作用するせん断応力を飛躍的に低減でき、CFRP に作用する全ての応力成分は許容応力度以下であることが確認できた。さらに、Tsai-Wu 則を用いた強度評価からも、ハイブリッド構造とした場合には、CFRP に作用する応力は許容応力度以下であり、破損に対して安全であることが確認できた。従って、CFRP を Hybrid Cable として超長大吊橋メインケーブルに適用することは、バンド部においては、強度的に問題ないものと考えられる。

5. その他問題点と今後の課題

CFRP を Hybrid Cable として超長大吊橋メインケーブルに適用する場合、以上で議論した力学的な問題の他に、Hybrid Cable 内の CFRP wire と鋼線が直接接触する箇所での鋼線の電池腐食が問題となることが考えられる。これは、高密度で炭素繊維を含有した CFRP は、導電体である炭素繊維と絶縁体である樹脂層が分離しているのではなく、CFRP として一

つの導電体となっており¹³⁾、これが、雨水、海水等の電解質の存在下で異なる電位を持った鋼線と接触すると、そのイオン化傾向の差によって起電力が発生、即ち、局部電池を形成し、陽極側である鋼線に電池腐食を発生する(Fig.15)^{14), 15)}。そのため、CFRP wire と鋼線が接触する箇所では、何らかの防食対策を施す必要がある。同種の問題と考えられる、CFRP と低品位金属のアルミ合金シートで積層されたスーパーハイブリッド複合材料(CFRP/Al)を水中で使用する場合の防食対策では、両者間に KFRP 等の絶縁層を介在させる方法¹⁶⁾、及び電触質との接触を防ぐためのコーティングシーラントが採用されている。これを参考に Hybrid Cable の電池腐食を回避するための対策として以下を考案した。

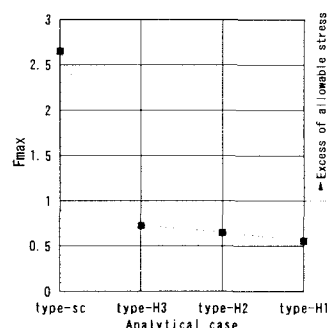


Fig.13 Evaluation of strength by T.W.L. (centre of centre span)

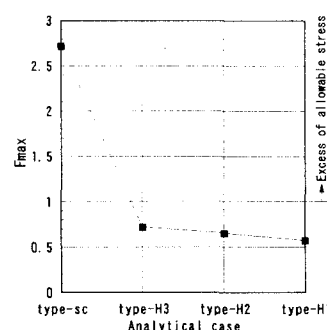


Fig.14 Evaluation of strength by T.W.L. (inclined part)

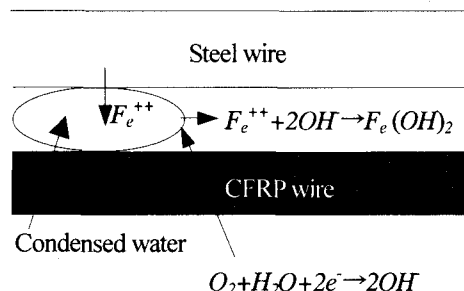


Fig.15 System for galvanic erosion of hybrid cable

①ケーブル内の換気を十分に行い、ケーブル内に水分が凝集しないようにする。

②鋼線の表面にエポキシをコーティングし、CFRP wire と電氣的に絶縁する (Fig.16)。

③CFRP 及び鋼線が直接的に接しないように両者間に KFRP 或いは AFRP wire でなる絶縁ストランド配置して両者を電氣的に絶縁する (Fig.17)。

これらの対策の有効性については、今後、確性実験等を通して明らかにしていく予定である。

さらに、二次応力や局部応力をより厳密に把握すべく、本研究では無視した素線を束ねた不連続体としてのケーブル挙動の再現手法を考案する予定である。また、Hybrid Cable に側圧が作用するサドル部での適用性や、Hybrid Cable の定着構造の検討も行っていく予定である。さらに、CFRP の強化材である炭素繊維よりさらに高強度・高弾性率であり、電池腐食の問題のない PBO 繊維を強化材とする新素材ケーブル素線の適用性についての検討も行っていく予定である。

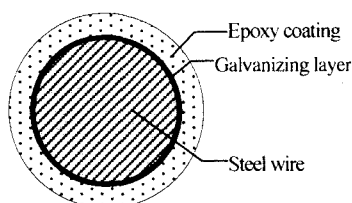


Fig.15 Cross section & composition of insulated steel wire

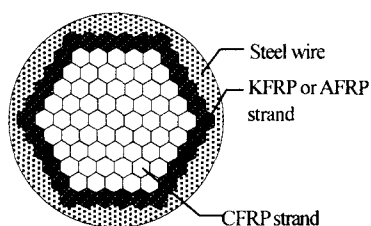


Fig.16 Cross section & composition of insulated hybrid cable

【参考文献】

- [1] 今野信一,山崎伸介,野呂直以,毎熊宏則:炭素繊維ケーブルの強度特性—橋梁構造物への適用性の検討—,橋梁と基礎 99-9,pp.29-32,1999.
- [2] 福井幸夫:新素材をケーブルに使用した超長大吊橋の構造検討,海峡横断,Vol.14,pp.19-22, 1998.
- [3] 笹田剛史:都市デザインとCG,
<http://www.senri-i.or.jp/plism/9712/9712b.htm>
- [4] Hui-Yu Sun & Xin Qiao:Prediction of the mechanical properties of three-dimensionally braided composites,Composites Science and Technology 57,pp. 623-629,1997.
- [5] V.Giavotto.et.al:Anisotropic beam theory & applications,Computers & Structures Vol.16,No.1-4, pp.403-413,1983.
- [6] 座古勝,辻上哲也,上辻靖智:複合材料の三次元熱応力解析,材料,Vol.43,No.487,pp.402-407, 1994.
- [7] 座古勝,倉敷哲生:複合材料力学入門 第10章 複合材料の強度則,日本複合材料学会誌,23,4,144-150,pp.24-30,1997.
- [8] R.C. Burk:Astronautics & Aeronautics,21,6,pp.58-62, 1970.
- [9] 武伸明, 木谷紋太, 小西英明, 西村宣男: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.
- [10] S.W. Tsai & E. M. Wu:A General Theory of Strength for Anisotropic Materials,Journal of Composite Materials,Vol.5,pp.58-80,1970.
- [11] Sanjib Goswani : Failure Analysis of Polymer Composite Stiffened Laminates Using the Finite Element Method ,Journal of Reinforced Plastics and Composites,Vol.18,No.01,pp.2-14,1999.
- [12] 三木光範, 福田武人, 元木信哉, 北条正樹:複合材料(機械システム入門シリーズ),pp.90,共立出版, 1997.
- [13] 中井博, 北田俊行, 穂山正幸, 三田村武, 小林剛, 島本明:新素材と鋼線とで構成されるハイブリッド・ケーブル素線の特性, 材料,Vol.48, No.6, pp.623-628,1999.
- [14] 中村実:炭素繊維強化複合材料の接合技術,工業材料, 第35巻, 第10号, pp.142-148, 1987.
- [15] 島内勝則:CFRP と接着, ジョイテック, Vol.5, No.10, pp.25-31, 1989.
- [16] Osamu Haga , Hideo Koyama and Katumi Kawada : Mechanical properties of a new type super hybrid material, Adv. Composite Mater. ,VOL.5, No.2, pp.139-149, 1996.