

1. まえがき

世界各地に構築されている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が、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、高引張強度、高弾性率、従来の鋼線にはない軽量性を持ち合わせた、CFCC (Carbon Fibre Composite Cable) に着目した (Table.1)。しかし、CFCC は、せん断強度が低い、異方性材料であるなど短所もある。このため、超長大吊橋ケーブルへの適用上、バンド部でのせん断破壊などが問題となる。そこで、CFCC の外周に鋼ケーブルを配置したハイブリッドケーブルを提案した (Fig.1)。本研究では、超長大吊橋の径間中央のバンド部をモデル化して、FEM による数値解析を行い、まず、モデル化の妥当性について確認した。さらに、異方性材料の破損強度則を用いて CFCC の強度評価を行い、ハイブリッドケーブルの破損に対する有効性について確認を行った。

2. CFCC の FEM 解析手法

本研究では、CFCC の直交異方性に対応すべく、20 節点アイソパラメトリック立体要素に対し、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たてた後、全体座標系に座標変換して全体座標系の要素剛性方程式を得る手法によることとした¹⁾。

3. CFCC の破損強度則

本研究では、巨視的強度評価論に従うこととし、破損強度則に関する国際的なアンケート調査²⁾結果等を参考に、CFCC の強度評価を行う破損強度則を決定した。まず、(1)の最大応力説で全ての応力成分が許容応力度以下か否か判定を行うこととした。以下の σ_y は要素座標系の応力、 X_y は直交異方性材料の強度を表すが、本研究では、CFCC の超長大吊橋ケーブルへの適用性を検討することから、強度の代わりに、これに対する安全率を 2.5 とした許容応力度を用いることとした (Table.2)。

$$X_1^- < \sigma_1 < X_1^+, X_2^- < \sigma_2 < X_2^+, X_3^- < \sigma_3 < X_3^+, |\tau_{12}| < X_{12}, |\tau_{23}| < X_{23}, |\tau_{13}| < X_{13} \quad (1)$$

さらに、面内垂直応力 2 成分の相互干渉作用による破損の評価を厳密に行える、以下の Tsai-Wu 則で強度評価を行った。

$$F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{33}\sigma_3^2 + F_{12}\sigma_{12} + F_{23}\sigma_{23} + F_{13}\sigma_{13} + F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_3\sigma_3 + F_{44}\sigma_4^2 + F_{55}\sigma_5^2 + F_{66}\sigma_6^2 = 1 \quad (2)$$

ここに、 F_y は異方性パラメータと呼ばれ、Tsai-Wu 則においては、 F_{12} 、 F_{23} 、及び F_{13} の算出をするための 2 軸試験が困難である場合、種々の考察から、(3)でこれらの値を求めることを提案している^{3,4)}。

$$F_1 = \frac{1}{X_1^+} - \frac{1}{X_1^-}, F_2 = \frac{1}{X_2^+} - \frac{1}{X_2^-}, F_3 = \frac{1}{X_3^+} - \frac{1}{X_3^-}, F_{11} = \frac{1}{X_1^+ X_1^-}, F_{22} = \frac{1}{X_2^+ X_2^-}, F_{33} = \frac{1}{X_3^+ X_3^-}, F_{44} = \frac{1}{X_{12}^2}, F_{55} = \frac{1}{X_{23}^2},$$
$$F_{66} = \frac{1}{X_{13}^2}, F_{12} = -\frac{1}{2\sqrt{X_1^+ X_1^- X_2^+ X_2^-}}, F_{23} = -\frac{1}{2\sqrt{X_2^+ X_2^- X_3^+ X_3^-}}, F_{13} = -\frac{1}{2\sqrt{X_1^+ X_1^- X_3^+ X_3^-}} \quad (3)$$

4. ケーブルのモデル化と解析

本研究では、ズームインにより、吊橋全体系の解析モデルで着目したバンド近傍を対象にモデル化して局所解析を行うこととした。解析ケースは、全断面にそれぞれ鋼線及び CFCC を配置したケース (type-s)、及び (type-sc)、ハイブリッドケーブルで鋼線と CFCC の断面積比を変えたケース (type-H1) ~ (type-H3) を設定した。局所解析では、フリーケーブル時における

Table.1 Material properties of cable

Material	Steel cable		CFCC
	E_c	E_s	
Modulus of elasticity (GPa)	199.1	199.1	8.6
	E_c	199.1	8.6
Poisson's ratio	ν_{cs}	0.300	0.320
	ν_{sc}	0.300	0.320
Modulus of rigidity (GPa)	G_{cs}	76.6	5.0
	G_{sc}	76.6	4.2
Unit volume weight (kN/m ³)	γ_c	76.9	15.7

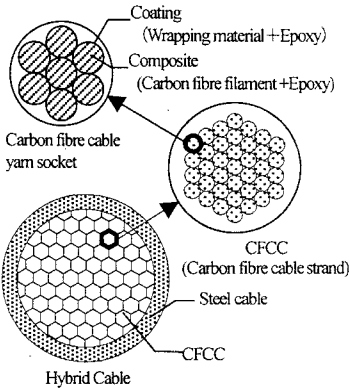


Fig.1 Cross section of hybrid cable & Composition of CFCC

Table.2 Ultimate strength of CFCC (MPa)

Ultimate tensile strength	X_1^+ (Direction of fibre)	2290
	X_1^- (Direction of fibre orthogonalization)	80
Ultimate compressive strength	X_2^+ (Direction of fibre orthogonalization)	80
	X_2^- (Direction of fibre orthogonalization)	1760
Ultimate shearing strength	X_{12} (in plain)	96
	X_{23} (in fibre orthogonalization plane)	129
	X_{13} (in plain)	96

全体解析モデルの2パネルのケーブル節点間を直線で結ぶ軸に肉付けし、ハンガー及び前後のバンドを無視した局所解析モデルを作成する。さらに、全体解析で得られた節点変位を強制変位 ΔX 及び ΔZ として導入して死+活荷重時の変形状態を、また、全体解析で得られたフリーケーブル時のケーブル張力と死+活荷重時のケーブル張力を重ね合わせて荷重状態を再現する(Fig.2)、(Table.3)。

5. 解析結果

局所解析の妥当性を確認するため、死荷重時におけるケーブル張力ベクトルの勾配 θ' とケーブル軸の勾配 θ を精度比較し、それぞれを全体解析と精度比較した(Table.4)。各解析ケースで 98%以上の精度で一致している。さらに、死+活荷重時のケーブル張力を全体解析と精度比較した(Table.5)。各解析ケースで 97%以上の精度で一致している。最大応力説による強度評価は、各解析ケースの応力度の最大値(最小値) $\sigma_{max, min}$ を許容応力度 σ_a で無次元化したパラメータの変化を示す(Fig.4)。type-sc のみで引張応力 σ_x 及びせん断応力 τ_{xy} が許容応力度を超過した。また、せん断応力 τ_{xy} はハイブリッドケーブルとすることで大幅に低減している。さらに、鋼線の断面積が増加するにつれて、 $\sigma_{max, min}/\sigma_a$ は低下している。Tsai-Wu 則を用いた強度評価は、各解析ケースについて破損判定値の最大値 F_{max} の変化を示す(Fig.5)。 F_{max} が 1.0 を上回ったのは type-sc のみであった。また、鋼線の断面積が増加するにつれて、 F_{max} は低下している。

6. まとめ

死荷重時に局所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がほぼ一致し、さらに、これらの勾配をそれぞれ全体解析と比較してほぼ一致したことから、局所解析でケーブルの挙動が再現できることが確認できた。また、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、死+活荷重時においても局所解析と全体解析の整合性がとれていることが確認できた。以上から、局所解析で超長大吊橋ケーブルの破損強度則を用いた強度評価を行った。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CFCCに作用するせん断応力を飛躍的に低減でき、CFCCは許容応力度以下にあることが確認できた。また、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、CFCCは許容応力以下にあり、破損に対して有効であることが確認できた。

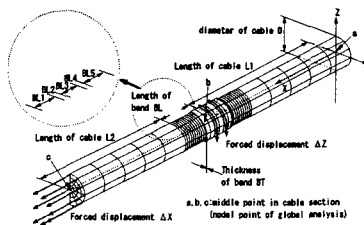


Fig.2 Local analytical model of cable

Table.3 Local analytical model & Load condition

Analytical case	type-sc	type-H3	type-H2	type-H1	type-s
Composition of cable	CFCC	Hybrid	Hybrid	Hybrid	Steel
Ratio of Area (steel/CFCC)	0.000	0.333	0.500	1.000	∞
Radius of CFCC (m)	0.725	0.643	0.610	0.537	—
Thickness of steel cable (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 band BL (m)	—	—	4.000	—	—
BL1 (m)	1.24999772	1.24999768	1.24999767	1.24999765	1.24999760
BL2 (m)	0.10000030	0.10000031	0.10000031	0.10000031	0.10000032
BL3 (m)	1.30000396	1.30000402	1.30000404	1.30000407	1.30000416
BL4 (m)	0.10000030	0.10000031	0.10000031	0.10000031	0.10000032
BL5 (m)	1.24999772	1.24999768	1.24999767	1.24999765	1.24999760
Thickness of band BT (m)	—	—	0.050	—	—
Diameter of cable D (m)	1.450	1.485	1.495	1.520	1.565
Forced displacement ΔX (m)	0.144436	0.132160	0.128142	0.121528	0.103954
Forced displacement ΔZ (m)	-0.005234	-0.004573	-0.004381	-0.003993	-0.003131

Table.4 Accuracy of slope (dead load state)

Analytical case		type-sc	type-H3	type-H2	type-H1	type-s	
Slope of cable axis at dead load (deg)	Global analysis θ_s	section a-b	0.1522	0.1518	0.1517	0.1514	0.1509
		section b-c	0.1522	0.1518	0.1517	0.1514	0.1509
	Local analysis θ_l	section a-b	0.1517	0.1514	0.1513	0.1511	0.1508
		section b-c	0.1517	0.1514	0.1513	0.1511	0.1508
Slope of load vector at dead load (deg)	Global analysis θ'_s	section a-b	0.1522	0.1518	0.1517	0.1514	0.1509
		section b-c	0.1522	0.1518	0.1517	0.1514	0.1509
	Local analysis θ'_l	section a-b	0.1525	0.1542	0.1545	0.1546	0.1539
		section b-c	0.1525	0.1542	0.1545	0.1546	0.1538
Accuracy of θ_l and θ'_l	section a-b	0.994	0.982	0.980	0.977	0.980	
	section b-c	0.994	0.982	0.979	0.977	0.980	
Accuracy of θ_s and θ_l	section a-b	0.996	0.984	0.982	0.979	0.999	
	section b-c	0.996	0.984	0.982	0.979	0.999	
Accuracy of θ'_s and θ'_l	section a-b	0.998	0.998	0.998	0.998	0.981	
	section b-c	0.998	0.998	0.998	0.998	0.981	

Table.5 Accuracy of cable tension (dead + live load state)

Analytical case		type-sc	type-H3	type-H2	type-H1	type-s	
Cable tension at dead+live load (kN)	Global analysis	section a-b	991911.2	1148030.4	1196891.9	1313315.1	1620501.7
		section b-c	991911.2	1148030.4	1196891.9	1313315.1	1620501.7
	Local analysis	section a-b	1020112.5	1178459.8	1227699.4	1345265.6	1654103.3
		section b-c	1020103.3	1178456.3	1227697.3	1345266.4	1654092.3
Accuracy of cable tension at dead + live load	section a-b	0.972	0.974	0.975	0.976	0.980	
	section b-c	0.972	0.974	0.975	0.976	0.980	

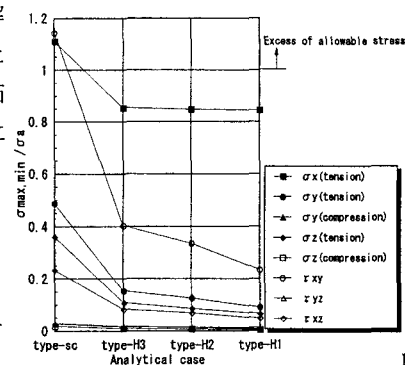


Fig.4 Evaluation of strength by maximum stress theory

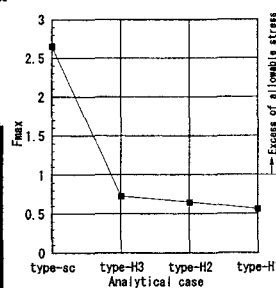


Fig.5 Evaluation of strength by Tsai-Wu's law

- 【参考文献】 1) Hui-Yu Sun & Xin Qiao: PREDICTION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF THREE-DIMENSIONALLY BRAIDED COMPOSITES, Composites Science and Technology 57, pp.623-629, 1997. 2) R.C. Burck: Astronautics & Aeronautics, 21, 6, pp.58-62, 1970. 3) S.W. Tsai & E. M. Wu: A General Theory of Strength for Anisotropic Materials, Journal of Composite Materials, Vol.5, pp.58-80, 1970. 4) Sanjib Goswami: 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.