

建設企画コンサルタント 正 員○武 伸明
大阪大学大学院 学生員 松村達也

建設企画コンサルタント 正 員 東野忠雄
大阪大学工学部 フェロー 西村宣男

1. まえがき 本研究は炭素繊維ケーブルおよび鋼ケーブルを用いたデュアル形式吊橋と従来形式吊橋について、平板翼理論による非定常空気を考慮した直接法によるフラッター解析を実施して、フラッター特性を比較検討し、耐風安定性と経済性の考察を行うものである。さらに、ねじれ剛性を高めるためにサブケーブルに導入したプレストレスが、フラッター特性と経済性に与える効果と問題点について検討する。

2. 検討条件

2.1 解析手法 耐風安定性については、吊橋の幾何剛性を含めた有限変位解析により挙動を評価し、静的風荷重による水平たわみを考慮して、立体骨組モデルに非定常空気を作用させて運動方程式を立てる直接フラッター解析法による数値解析（換算振動数を仮定した複素固有値解析）を実施して照査を行った。フラッター解析に用いる非定常空気力は、平板翼理論に従い、桁の非定常揚力、モーメントとして作用させた。また、補剛桁の水平たわみ振動ならびにケーブルの鉛直たわみ振動および水平たわみ振動に対しては準定常的な空気力を与えるものとし、桁およびケーブルの抗力係数として0.72、0.7を考慮した。

2.2 解析モデル 解析の対象とする長大吊橋は単径間補剛箱桁形式とし、構想中の海峡横断道路プロジェクトを考慮して中央径間長3000mとした。吊橋の基本諸元は、サグ比1/10、ケーブル間隔40m、桁幅46m、桁高8mに設定した。比較検討を行う各解析タイプにおけるケーブルシステム、ケーブル種別の組み合わせを図-1、表-1に示す。デュアル形式吊橋はメイン、サブケーブルともに炭素繊維ケーブルを用いた形式とし、プレストレスの効果を調べるため、サブハンガーから導入するプレストレスを $P=14.7$ 、 53.9kN/m の2タイプ（Type-DCa、Type-DCb）とした。主桁断面は、Case 1：最小板厚（デッキ12mm、下フランジ・ウェブ10mm）としたモデルと、Case 2：フラッター照査風速を満足する増厚断面モデルを設定した。鋼ケーブルの許容引張応力度 σ_{ta} は 980kN/mm^2 とし、炭素繊維ケーブルは $\sigma_{ta}=686\text{kN/mm}^2$ 、弾性係数 147kN/mm^2 、単位体積重量 15.7kN/m^3 とした。デュアル形式吊橋の立体骨組モデルを図-2に示す。表-2に示す各解析タイプの基本構造諸元は、本四公団設計要領に準じて試設計により求めたものであり、基本風速46m/s、フラッター照査風速79m/sに設定した²⁾。

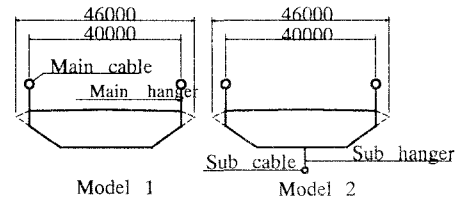


図-1 ケーブルシステム

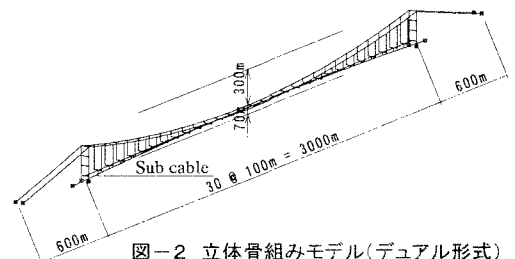


図-2 立体骨組モデル(デュアル形式)

表-1 解析モデル

Analytical model	Cable	Cable system	Pre-stress
Type-S	Steel	Model 1	—
Type-SC	CFRP	Model 1	—
Type-DCa	CFRP	Model 2	14.7kN/m
Type-DCb	CFRP	Model 2	53.9kN/m

表-2 構造諸元

Analytical model			Type-S	Type-SC	Type-DCa	Type-DCb
Case 1						
Unit Dead Load	Cable	kN/m	158	31	33	40
	Girder	kN/m	142	142	142	142
Polar Moment of Inertia	Cable	kN-m ² /m	63200	12400	13400	16000
	Girder	kN-m ² /m	23600	23600	23600	23600
Stiffening Girder	I _{G, in}	m ⁴	16	16	16	16
	I _{G, out}	m ⁴	203	203	203	203
	J _G	m ⁴	43	43	43	43
Case 2						
Unit Dead Load	Cable	kN/m	326	57	59	64
	Girder	kN/m	416	357	353	343
Polar Moment of Inertia	Cable	kN-m ² /m	130200	22800	23700	25700
	Girder	kN-m ² /m	70900	60700	60100	58400
Stiffening Girder	I _{G, in}	m ⁴	49	42	41	40
	I _{G, out}	m ⁴	610	522	516	502
	J _G	m ⁴	143	121	119	115

3. 解析結果

3.1 耐風特性 直接法によるフラッター解析結果を図-3、表-3に示す。フラッター限界風速は構造減衰を無視して求めた。Case 1の解析により、ケーブル材質とケーブルシステムによるフラッター限界風速の変化を検討した。Type-SとType-SCを比較すると、炭素繊維ケーブルを使用することによりフラッター限界風速は約11%上昇する。同じケーブル材を用いたType-SCとType-DCbを比較するとケーブルシステムの変更とプレストレス導入により、フラッター限界風速は約7%上昇する。プレストレス10.0kN/mの導入効果は、フラッター限界風速で示すと約0.7m/sの上昇となる。

3.2 経済性 Case 2について、ケーブル材料、ケーブルシステム、プレストレスの影響を調べた。図-4は、各解析タイプの補剛桁、ケーブル、主塔の鋼重を示しており、炭素繊維ケーブルの重量は、鋼ケーブルとの単位体積重量比で換算した。中央径間長3000mの超長大吊橋ではケーブルの鋼材換算重量は上部構造全体重量の40%以上を占めることから、当然上部構造全体工費もケーブル単価の設定により大きく変化する。図-5は、架設費も含めた鋼ケーブルと炭素繊維ケーブルの重量当たりの単価比を、将来の量産化によるコストダウンを考慮して1:5~1:8に設定して、Type-Sを基準に上部工工費の比較をしたものである。図-5に示すように、現状のコスト水準(Case 1)ではType-Sが経済性で最も有利となるが、炭素繊維材の価格がCase 3, 4の水準まで低下すると、炭素繊維材を使用した形式に経済的なメリットが出てくることが判る。その場合、ケーブルシステムで比較すると、補剛桁重量はType-DCbが最も低くなるが、全体ではケーブル重量が最も低くなるType-SCの方が、経済性で有利となる。ただし、Type-SCは、ケーブルの軽量性から全体剛性が低下して風荷重による水平たわみも増加することから、経済性の評価にはさらに精度を上げた照査が必要である。

4. まとめ

- (1)フラッター限界風速は、炭素繊維ケーブルを用いることにより約11%上昇し、プレストレスの導入によっても約7%上昇する。プレストレス10kN/mを導入するとフラッター限界風速は約0.7m/sの上昇率となる。
- (2)本研究で設定したデュアル形式は、プレストレス導入量39.2kN/mに対して桁重量の軽減が10kN/mと低くなるため、経済面でType-SCを上回る有利性は確認できなかった。デュアル形式の選択には、炭素繊維ケーブルの軽量性を補い、全体剛性はType-SCより高いという特性を効果的に引き出すことが必要となる。

【参考文献】

- 1) 武伸明, 松村達也, 西村宣男, 新素材を用いたデュアルケーブル形式吊橋のフラッター特性に関する考察, 鋼構造年次論文報告集 Vol.6, 1998
- 2) 本州四国連絡橋公団, 明石海峡大橋耐風設計要領・同解説, 1990

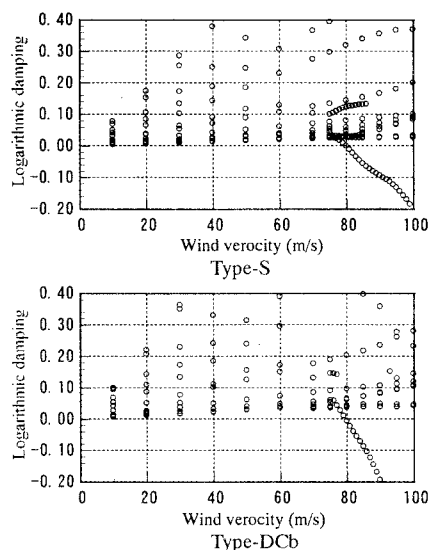


図-3 対数減衰率・風速図

表-3 フラッター解析結果

Analytical model	Flutter response	
	Wind velocity(m/s)	Frequency(Hz)
Type-S	46.7	0.123
Type-SC	51.9	0.147
Type-DCa	52.6	0.147
Type-DCb	55.3	0.154

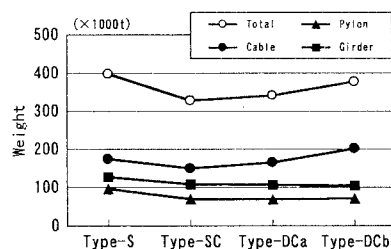


図-4 鋼重比較

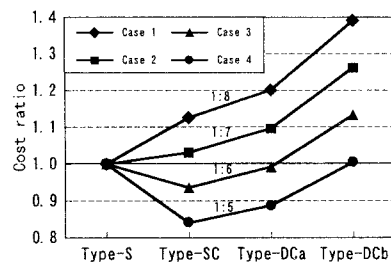


図-5 経済比較