

大阪大学大学院 学生員 ○松村 達也 (株)建設企画コンサルタント 正会員 武 伸明
大阪大学大学院 フェロー 西村 宣男

1. まえがき 吊橋が長大化すると、柔構造化による固有振動数の低下を招き、それに伴い鉛直たわみとねじれの連成した連成フラッターが起こってくるため、これに対する検討が耐風設計上最も重要となってくる。他方、超長大吊橋の建設では合理的かつ経済的な構造形式が要求されるため、その実現のためには新形式吊橋の開発が必要不可欠になってくる。そこで本研究では、超長大吊橋の新構造形式として炭素繊維ケーブルを用いたデュアルケーブルシステムを提案し、超長大吊橋を対象にフラッター解析を行い、従来システムとの比較により、デュアルケーブルシステムの耐フラッター特性について考察する。

2. 解析モデル 解析対象は図-1 に示すように、中央径間長 3000m の単径間補剛桁箱吊橋（桁幅 40m, 桁高 8m）とした。解析タイプは表-1, 図-2 に示すように、ケーブル材とケーブルシステムとの組み合わせにより、鋼ケーブルを用いた従来形式吊橋（TYPE-S）、炭素繊維ケーブルを用いた従来形式吊橋（TYPE-SC）およびメイン、サブケーブルともに炭素繊維ケーブルを用いたデュアル形式吊橋（TYPE-DCa と TYPE-DCb）の計 4 ケースを想定した。TYPE-DCa と TYPE-DCb についてはそれぞれ、サブハンガーから導入するプレストレスを $P=147,539\text{kN}$ /片側とした場合に相当する。鋼ケーブルは引張強度 2160kN/mm^2 級のものとし、炭素繊維ケーブルには引張強度 2060kN/mm^2 級の PAN 系の炭素繊維材を用いることとした。また、4 ケースとも、吊橋断面のねじれ剛性等の構造諸元は、フラッター限界風速が同じになるように調整して決定した。

3. 解析手法 風荷重による横たわみ変形を考慮した、直接法による立体骨組みフラッター解析（換算振動数を仮定した複素固有値解析）を適用することとし、中央径間桁平均高度位置における風速を 0 から 90m/s まで 5m/s ピッチで変化させて解析を行った。

吊橋に作用する非定常空気力は、補剛桁の鉛直たわみ振動およびねじれ振動に関しては、非定常空気力係数を用いて定式化を行い、係数値には平板翼理論値あるいは計測値を用いた。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関しては、準定常空気力を作用させた。非定常空気力項を加速度比例項の形の自励空気力として整理すると、式 (1) のようになる。

$$\begin{Bmatrix} L \\ M \\ D \\ L_c \\ M_c \end{Bmatrix} = \rho \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}iH_1^* B^2 & -\frac{1}{2}(H_3^* + iH_2^*)B^3 \\ -\frac{1}{2}iA_1^* B^3 & -\frac{1}{2}(A_3^* + iA_2^*)B^4 \\ & \frac{i}{k}C_D bd \\ & \frac{i}{2k}C_{DC} bd_c \\ & \frac{i}{k}C_{DC} bd_c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{y} \\ \phi \\ \ddot{z} \\ \ddot{y}_c \\ \ddot{z}_c \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここに、 L, M, D ；桁に作用する非定常空気力（揚力、空力モーメント、抗力）、 ρ ；空気密度、 $H_1^*, H_2^*, H_3^*, A_1^*, A_2^*, A_3^*$ ；非定常空気力係数（平板翼理論値あるいは迎角 -6° から $+4^\circ$ まで 1° ずつの測定値）、 B ；桁幅（ $=2b$ ）、 L_c, M_c ；ケーブルに作用する非定常空気力（揚力、抗力）、 y, ϕ, z ；桁の変位（鉛直、ねじれ、水平）、 y_c, z_c ；ケーブルの変位（鉛直、水平）、 C_D ；桁の抗力係数（迎角ごとの測定値）、 C_{DC} ；ケーブルの抗力係数（ $=0.7$ ）、 b ；桁半幅、 d ；桁高、 d_c ；ケーブル径である。

4. 解析結果 代表的な固有振動モードに関する、無風時の固有振動数解析結果について、表-2 に示す。耐風安定性に影響のあるとされるねじれ対称 1 次固有振動数に着目し、TYPE-S と TYPE-SC を比較すると、 0.1606Hz から 0.2096Hz と約 30% 上昇していて、炭素繊維ケーブルを用いることによる影響が大きく現れている。他方、TYPE-SC と TYPE-DCa, TYPE-DCb を比較すると、固有振動数はそれほどは変化しておらず、プレストレス導入による影響は大きくは現れていない。また、各解析タイプともねじれ対称 1 次モードよ

Tatsuya MATSUMURA, Nobuaki TAKE and Nobuo NISHIMURA

りも低次に、ねじれを伴う水平たわみ卓越モードが存在していて、TYPE-S では前者の振動モードが、それ以外の解析タイプはすべて後者の振動モードがフラッター発生分枝となった。

風速 — 応答対数減衰率図より求めるフラッター限界風速を、各解析タイプごとに平板空気力と観測空気力を作用させた場合に分けて、表-3 に示す。これより、平板空気力を作用させた場合は各解析タイプとも 76m/s 付近になり、観測空気力を作用させた場合は 64m/s 付近となった。作用させる空気力の違いによってフラッター限界風速に大きな差が生じたのは、図-3 に示すように、ねじれ振動の空力減衰を示す非定常空気力係数である A_2^* において、高風速領域で両者に大きな開きが見られるためである。

フラッター発生時の応答振動数を、各解析タイプごとに平板空気力と観測空気力を作用させた場合に分けて、表-4 に示す。ここで、TYPE-S と TYPE-SC、TYPE-Dca、TYPE-DCb を比較すると、平板空気力、観測空気力を作用させた場合とも、応答振動数は大きく上昇していて、炭素繊維ケーブルの使用による影響も、プレストレスの導入による影響も大きく現れている。

5. 結論 従来システムと炭素繊維ケーブルを用いたデュアルケーブルシステムの耐フラッター特性を比較すると、炭素繊維ケーブルの使用、プレストレスの導入によってフラッター発生時の応答振動数は上昇する。また、平板空気力と観測空気力を作用させた場合のフラッター限界風速において、両者に大きな差異が見られたため、平板空気力の適用に当たっては留意が必要である。

デュアルケーブルシステムの耐フラッター特性の向上を議論するには、経済性比較も行う必要がある¹⁾。

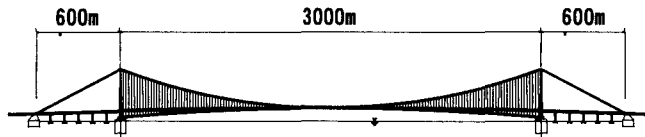


図-1 デュアル形式吊橋

表-1 解析タイプとケーブル種別

解析タイプ	ケーブル材	ケーブルシステム	プレストレス
TYPE-S	鋼 線	CASE 1	—
TYPE-SC	炭素繊維	CASE 1	—
TYPE-Dca	炭素繊維	CASE 2	147kN/片側
TYPE-DCb	炭素繊維	CASE 2	539kN/片側

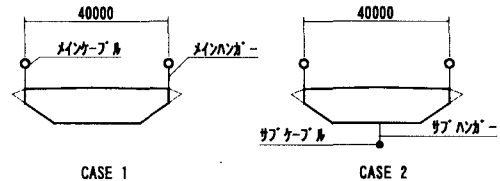


図-2 ケーブルシステム

表-2 無風時固有振動数解析結果一覧表

固有振動モード		固有振動数 [Hz] (振動次数)			
		TYPE-S	TYPE-SC	TYPE-Dca	TYPE-DCb
鉛直 たわみ	対称1次	0.0820 (4)	0.0846 (4)	0.0890 (4)	0.0985 (4)
	対称2次	0.1091 (6)	0.1124 (6)	0.1183 (6)	0.1335 (6)
	対称3次	0.1648 (15)	0.1683 (10)	0.1809 (10)	0.2089 (12)
水平 たわみ	対称1次	0.0298 (1)	0.0300 (1)	0.0325 (1)	0.0382 (1)
	対称2次	0.0876 (5)	0.0896 (5)	0.0933 (5)	0.1029 (5)
ねじれ	対称1次	0.1606 (14)	0.2096 (14)	0.2107 (13)	0.2124 (13)
	卓越モード	0.1242 (8)	0.2032 (12)	0.2038 (11)	0.2039 (10)

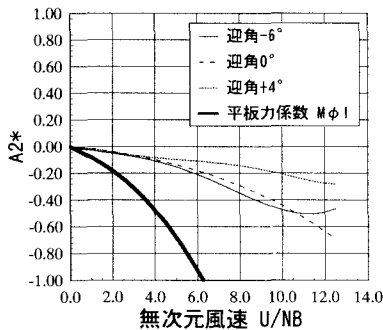


図-3 非定常空気力係数 A_2^*

表-3 フラッター限界風速 (m/s)

TYPE-S		TYPE-SC	
平板空気力	観測空気力	平板空気力	観測空気力
75.5	63.4	75.3	63.8
TYPE-Dca		TYPE-DCb	
平板空気力	観測空気力	平板空気力	観測空気力
75.6	64.2	75.7	63.9

表-4 フラッター発生時の応答振動数 (Hz)

TYPE-S		TYPE-SC	
平板空気力	観測空気力	平板空気力	観測空気力
0.1301	0.1422	0.1568	0.1753
TYPE-Dca		TYPE-DCb	
平板空気力	観測空気力	平板空気力	観測空気力
0.1579	0.1759	0.1610	0.1785

【参考文献】 1) 武、東野、松村、西村、土木学会関西支部年次学術講演会概要集，1999.5