

三井造船

平島清美

正会員

池の内昌弘

〃

〃 〇佐藤哲也

1. まえがき

最近の構造物はますます長大化、高層化の傾向を示す一方、解析技術の進歩により大膽な軽量化がはかられている。このような構造物については、架設作業上あるいは構造強度上、風に対する振動の問題は特に重要である。ここで扱う長大吊橋の主塔もこの種構造物に属し、架設中の振動が問題になった例もあり、これまでにいくつかの報告がある。

このような風による動的応答の問題は多くの場合、構造物後流に生ずるカルマン渦を周期的強制力とする強制振動の問題として実用的には扱われてきた。しかし振動現象の本質はもとより複雑であって、必ずしもカルマン渦による強制振動だけでは説明しきれないことも知られている。特に最近にみられるようなフレキシビリティの高い長大構造物における耐風安定性の問題は、空気力と構造弾性との相互作用にもとづく自励的共振機構を有し、同時に非線形性を示すことが学問的に広く知られるようになってきた。従って、いまここで扱う長大な吊橋主塔の耐風安定性についても、強制振動として便宜的に扱うだけでは実際に起こり得べき動的不安定性を適確に予測できない可能性がある。

以上の観点から、本研究は吊橋主塔模形の風洞実験を行ない、広範な風速領域において発生する主塔の振動性状を、その自励的特徴や非線形性を含めて、詳細に調べることに重点をおいた。

2. 実験内容

風洞実験としては、一様定常流中の3次元空力弾性模形に対して、自由振動法を採用した。風洞は $4m \times 2m$ の断面を有するゲッチェン型を使用し、主塔は高さ $184m$ のトラス形式を対象に、縮尺 $1/100$ の自立状態の完成系模形(図-1)および架設系模形と、別に特殊な架設機器の模形をアクリル樹脂で製作した。主塔模形は芯材に鋼を用いその周囲を発泡スチロールで成形しさらに全体をケント紙にて覆い外形を仕上げています。相似則は、質量パラメータ $2M/\rho D^3$ 、風速パラメータ V/\sqrt{ND} を考慮し、レイノルズ数は無視した。また減衰率 δ_s は風洞実験に先立って行なった構造特性試験より、剛性(EI, GJ)、固有振動数(N)とともに表-1(完成系のみ表示)に示す特性値となった。

実験は表-2に示す14ケースについて行ない、このうち減衰率 δ_s を付加したA-7, A-8はグリセリン水溶液と振動板により実現をはかった。

流れの計測は主流の平均風速、後流の変動風速をピトー管、熱線風速計により調べ、模形の振動計測は振動の定常状態だけでなく、過渡状態にも調べるために、各設定風速に対し次の3つの状態をなす(α)定常振動 (b)振動の発散過程 (c)振動の減衰過程について、塔頂振幅、振動数、振動の発散、減衰の強

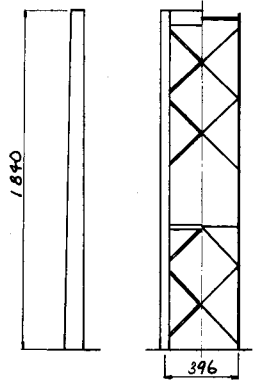
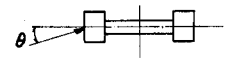


図-1 模形構造 (Model A)

表-1 模形特性値 (Model A)

		架設機番付
EI (kg-cm ²)	3.88×10^6	-
GJ (-)	1.12×10^6	-
曲げ N (Hz)	4.61	3.76
1次 δ_s	0.0290	0.0317
横り N	13.8	10.2
1次 δ_s	0.0689	0.0657
曲げ N	26.5	24.8
2次 δ_s	0.0258	0.0331

表-2 実験ケース



状態	模形	完成系	架設系
$\theta = 0^\circ$		Model A-1	Model B-1
	10°	A-2	B-2
	90°	A-3	B-3
架設機器	0°	A-4	B-4
	10°	A-5	B-5
	90°	A-6	B-6
$\theta = 10^\circ$	$\delta_s = 0.07$	A-7	
	0.15	A-8	

さを塔頂の加速度計、中間部および基部の歪ゲージによって調べた。以上の方法で採取したデータはすべてデータ集録装置に記憶させ、電算機を使用して解析した。

3. 実験結果と考察

この小文では結果の一部として Model A-1 にとりあげた。図-2 は風速に対する塔頂振幅の変化を示す応答曲線である。模形は、風速 $V = 3.9 \text{ m/s}$ (実風速 19 m/s) 付近で大振幅振動を起し、これは片振幅 1.8 cm (原形 1.8 m) の曲げ1次振動である。さらに風速 12 m/s 付近で換り1次の振動が生じており、いづれもカルマン渦による共振現象と考えられる。換り振動は、 $V = 15 \text{ m/s}$ でも減衰せず、模形崩壊の恐れからこれ以上の高風速域では確認していない。この他 $V = 2 \text{ m/s}$ 、 $V = 6 \sim 8.5 \text{ m/s}$ でそれぞれ曲げ1次および換り1次の高調波的振動が認められた。さらに(A)(B)(C)で示す位置で跳躍現象や振動履歴現象などの非線形振動現象もみられ、構造物は複雑な振動性状を呈している。またこれに対応する後流渦の周波数変化を示したのが図-3であり、これより後流渦は曲げおよび換りの共振域で模形の振動に引き込まれていることを示している。

以上から模形は基本的には後流渦の振動数と模形の固有振動数とが一致する風速付近で振動するが、この渦励振振動的空気力の立場から考えてみる。いまこれを変位と速度に同相な成分から成るとして次式で表わす。

$$F(t) = -(K_a X + C_a \dot{X})$$

これを無次元化、複素表示して、質量比 $\rho D^2/2M$ の小さいことから剛性の空力成分を無視すれば、無次元化した減衰率が次式で示される。

$$C = C_a + C_s = \frac{2M}{\rho D^2} \delta$$

ただし $\delta = \delta_a + \delta_s$

ここで $\delta = 0$ は定常振動を示し、 δ_a が負で $-\delta_a > \delta_s$ の場合には、振動が成長しリミットサイクルに至る。この δ_a を実験によって求め、曲げ1次共振域における振幅との関係を示したのが図-4である。これは測定した範囲で双曲線近似ができることと、任意の δ_s による構造物の渦励振による振幅が推定できることも示している。

一方図-5は、一定振幅に対する δ_a の風速変化を示したもので、共振域で空気力が負の減衰力をもつことが確認され、渦励振の自励的特徴をよく示している。

4. あとがき

この他のケースについても同様に解析し、完成系架設系列、架設残荷の有無、風向別について各々組合せ、比較し考察した。ここでは割愛した。最後に本風洞実験を行なうに当たり、懇切な御指導を頂いた九州大学応用力学研究所中村教授、溝田助平さんに実験に御協力頂いた関係各位に対し、心から感謝の意を表します。

参考文献 1. 中村：構造物のフラッグ，日本航空宇宙学会誌，Vol. 21 No. 235，1973-8
2. Wootton, L.R. and Scruton, C. : Aerodynamic Stability, Proc. Seminar 1971

