

角状構造物の空力特性に関する2, 3の研究

京都大学工学部	正員	工博	小西一郎
京都大学工学部	正員	工博	白石成人
京都大学工学部	正員	工博	松本 勝
三菱重工業 K.K.	正員	工修	○青藤 通
京都大学大学院	学正員		大門孝一

§1. 概説

実際の構造物は、平板や翼型と異なり、角ばったそして複雑な構造を有するものが多く、その空気力学的特性は定量的にはもちろん定性的にも明確には把握されていないのが現状である。またこれらの実際の構造物の空気力学的特性を解明するにあたっては、理論的なアプローチは非常に困難であり、風洞における模型実験に頼るところが大である。今回我々は、角状構造物の一例として、つり橋タワー部（本州四国連絡橋明石ルート）について風洞において模型実験を行ない、実験的にその空気力学的特性を調べ、タワーの耐風安定性について、2, 3の考察をつけ加える。さらに、自然風中における角状構造物の応答推定の一方法を、角状構造物の基本断面である正方形断面について示す。

§2. つり橋タワー部の空気力学的特性

2-1) つり橋タワー部の静的空気力学的特性

つり橋タワー部に作用する静的空気力を調べるために、(図-1)に示すような $1/500$ スケール剛体模型について、一様流中において風洞実験を行ない、各静的空気力係数を求めた。なお迎え角(α)、及び各静的空気力の方向は(図-2)に示した通りである。対象面積として迎え角 $\alpha=0^\circ$ における主流と直角方向の断面の面積を用

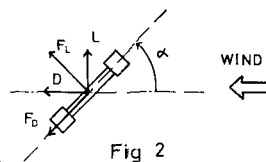


Fig 2

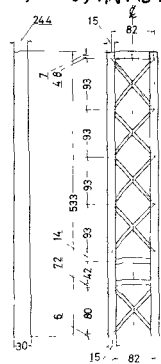


Fig 1

いて算出された各静的空気力係数を横軸に迎え角をとって示したものが(図-3)~(図-6)の一連の図である。抗力係数 C_F 、及び主流方向の空気力係数 C_0 はそれぞれ $\alpha=30^\circ$ 及び $\alpha=60^\circ$ においてピークを示し、主流方向の空気力係数は $\alpha=0^\circ$ 及び $\alpha=90^\circ$ において対象面積として各暴露面積を用いると $C_F=1.4$ なる値を示す。また揚力係数 C_L は迎え角 $\alpha=0^\circ$ 付近においては正の勾配を有し、

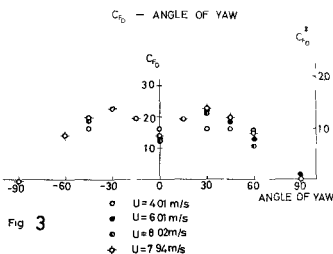


Fig 3

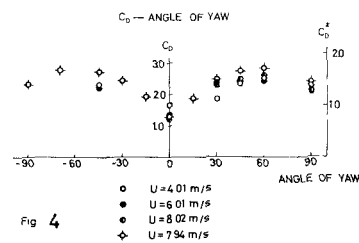


Fig 4

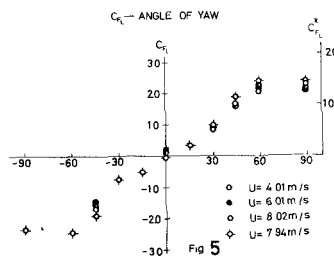


Fig 5

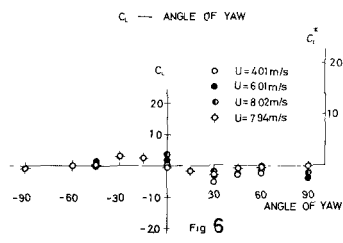


Fig 6

擬定常空気力理論によって説明づけられる Galloping 振動は発生しないものと考えられる。主流に直角方向の空気力係数 C_L については、その絶対量は極めて小さく、非常にゆるやかではあるが迎え角 $\alpha = 0^\circ$ 付近において負の勾配を有する。しかしながら迎え角 $\alpha = 0^\circ$ 付近における主流方向の空気力係数 C_D 値に比べ $dC_L/d\alpha$ が極めて小さく結果として次式で表わされる $dC_F/d\alpha$ は正の値を有するものと考えられる。

$$\{dC_F/d\alpha\}_{\alpha=0} = \{C_D + dC_L/d\alpha\}_{\alpha=0} \quad (2-1)$$

すなわち、このようなタワー模型については Galloping 振動は発生せず、また静的空気力については迎え角に対する変化特性を十分考慮する必要があるように思われる。

2-2) つり橋タワー部の動的空気力学的特性

振動系	流れ	番号	発生した振動	質量減衰パラメータ
0-1 自由度振動系 (主流に直角方向の面内回転振動)	一様流	A-1	ある風速領域 ($U/bw \approx 2.8$) においてのみ定常振動 (塔頂倍振幅約 3mm) が存在	49.0
		A-2	定常振動が存在せず	43.3
4-1 自由度振動系 (ねじれ振動)	一様流	B-1	ある風速領域 ($U/bw \approx 2.7$) においてのみ定常振動 (先端倍振幅約 0.5mm/deg) が存在	158.2
4-1 自由度振動系 (主流に直角方向のたわみ振動)	一様流	C-1	定常振動は存在せず	448.5
	せん断流れ	C-2	定常振動は存在せず	410.8
0-4 2 自由度振動系	一様流	A-3	連成振動は存在せず 各々の 1 自由度の不安定振動 (θ ; 塔頂倍振幅 10mm, ψ ; 先端倍振幅 0.5mm/deg) が存在	18.9
		B-2		130.2

つり橋タワー部のような角状断面部材を有する構造物について考えられる不安定振動として Aeolian 振動と Galloping 振動の二つが考えられる。またつり橋タワー部のトラスの充実率が非常に大きい場合には、極めて平板に近い長方形断面と考えることができ、これらについてはねじれ 1 自由度振動、ねじれたわみ 2 自由度連成振動が考えられる。今回我々は、これらの考え得るすべての自由度の振動について実験を行ない上表に示すような結果を得た。各振動系の支持概略図を(図-7)に示す。上表より分かるように、不安定振動はたわみねじれの各 1 自由度振動系において、ある風速領域においてのみ存在し、その不安定振動が存在するか否かは、主として質量減衰パラメータ ($2m\delta/\rho D^2$) に起因しているようである。またこの振動は Aeolian 振動と考えられ、Galloping 振動は存在しないことが振動実験においても確認された。

風速の変化に伴う減衰比 δ の変化特性、及び応答の時間一階微分に比例する空気力係数 f_L の変化特性の一例を(図-8)(図-9)に示す。全般的に風速の増加に伴ない減衰比は増大するが、換算風速が 2.65 付近で急激に変化している。これは動的空気力係数が物体背後の Wake に大きく影響されるも、

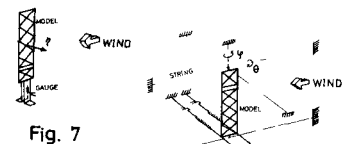
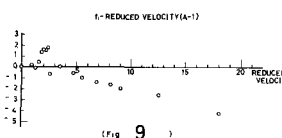
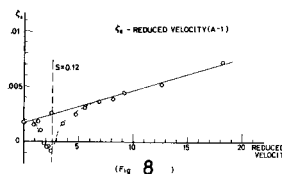


Fig. 7

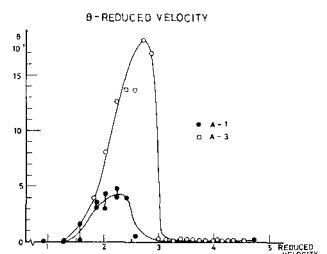


Fig.10

のと考え、換算風速約2.6
付近における急激な変化は、カ
ルマン渦に起因する交ばん揚力
の影響と思われる。これよりス
トロハル数を求めると約0.12な
る値を示し正方形のそれに近い
値となる。(図-10)より分かるよ
うに応答は換算風速2.6付近に
おいてのみ大振幅を示し、風速
を換算風速にして15.0付近まで
増大させたが定常振動は発生し
なかった。また各振動実験にお

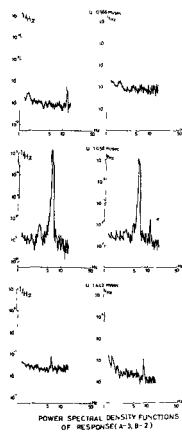


Fig. 11

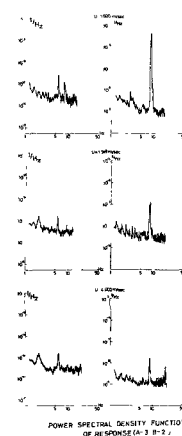
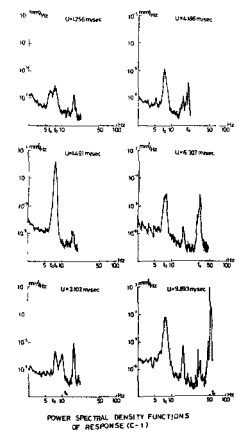


Fig. 12



ける風速の増加に伴う応答のパワースペクトル密度の変化を(図-11)(図-12)の一連の図に示す。
§3. 自然風速における正方形断面弾性体構造物の応答の推定

ここでは、自然風中における構造物の応答を平均流による応答と乱れによる応答の和として考え、平均流による応答は乱れを含まないせん断流れの応答に等しいと仮定する。

3-1) せん断流れにおける正方形断面弾性体構造物のカルマン渦に起因する交ばん揚力による応答；(図-13)に示すような構造物に乱れを含まないせん断流れが作用する場合の構造物に作用する r 次モードのカルマン渦に起因する交ばん揚力は、根本により次式で与えられる。

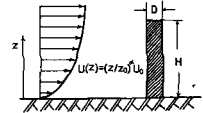


Fig. 13

$$L_r(z, t) = -\frac{2\pi\rho\beta U^3(z)}{m_0} \left\{ \frac{f(\eta)}{\omega_r k} - \frac{g(\eta)}{\omega_r} \{1 - F(k)\} \right\} \cos \omega_r k(z) t \quad (3-1)$$

ここで m_0 ：振動系単位長さ当りの質量、 ρ ：空気密度、 k ：換算振動数、 $f(\eta)$ ：静的渦列関数、 $g(\eta)$ ：動的渦列関数、 $F(k)$ ：Jonesの近似式、 β ：循環強さを表わすパラメータ、 ω_r ：カルマン渦の発生円振動数、 ω_r ：構造物の r 次モードの円振動数、 $U(z)$ ：高さ z における平均風速 $(\frac{z}{z_0})^\alpha U_0$ 、式(3-1)の右辺を $\tilde{L}_r(z) \cos \omega_r k t$ と表わし、式(3-1)の両辺のパワースペクトルを求めると $S_{L_r}(z)(f) = \frac{1}{2} \{ \tilde{L}_r(z) \}^2 \delta(f_k - f)$ (3-2)となる。 $\delta(f_k - f)$ はDiracのデルタ関数であり、バンド幅を $\Delta f = \pi \zeta_r f_k$ と近似するとピーク値は次式のようにになる。

$$S_{L_r}(z)(f_k) = \{ \tilde{L}_r(z) \}^2 / 2\pi \zeta_r f_k \quad (3-3)$$

ゆえに一般化された r 次モードの応答のパワースペクトルは次式のように求まる。

$$S_{y_r}(f) = \frac{1}{N_r^2} \int_0^H \int_0^H \sqrt{S_{L_r}(z_1)(f) S_{L_r}(z_2)(f)} \phi_r(z_1) \phi_r(z_2) dz_1 dz_2 \times |H_r(f)|^2 \frac{1}{K_r} \quad (3-4)$$

上式中、 $\phi_r(z)$ ： r 次モードのモード関数、 $|H_r(f)|$ ：周波数応答関数、 K_r ： r 次モードの剛性であり次式で表わされる。

$$N_r = \int_0^H \{ \phi_r(z) \}^2 dz \quad (3-5)$$

$$K_r = \omega_r^2 \frac{1}{N_r} \int_0^H m(z) \{ \phi_r(z) \}^2 dz \quad (3-6)$$

$$|H_r(f)|^2 = \frac{1}{\left| 1 - \left(\frac{f}{f_r} \right)^2 \right|^2 + \left\{ 2\zeta_r \left(\frac{f}{f_r} \right) - \frac{f_1}{2\pi f_r} \left(\frac{f}{f_r} \right) \right\}^2} \quad (3-7)$$

また高さ z 時刻 t における応答 $\eta(z, t)$ は r 次モードの時刻 t における座標及び r 次モードのモード関数の和として表わすことができる。 $\eta(z, t) = \sum_r y_r(t) \phi_r(z)$ (3-8)

したがって式(3-8)の両辺のパワースペクトルを求めるとカルマン渦に起因する変はん揚力による応答は最終的に次式で求まる。 $S_{\eta z}(f) = \sum_r S_{y_r}(f) \{\phi_r(z)\}^2$ (3-9)

3-2) 変動風中における正方形断面弾性体構造物の風速の変動成分による応答

ここでは鉛直方向に速度勾配を有する(乱れを含む)流れを対象に、正方形断面特有の Aeolian 振動及び Galloping 振動のような不安定振動が起らないと仮定し、風速の乱れの成分のみに起因する応答のパワースペクトル密度を求める。まず自然風のある高さ z における主流に直角、水平方向の変動風速のパワースペクトルは二次元等方性を仮定すると、Panofsky 及び McCormick の式⁽²⁾を用いて次式のように表わすことができる。

$$S_u(f) = 6 \mu_r z U^3 / (\bar{U} + 4 f z)^2 \quad (3-10)$$

ここで μ_r : 表面摩擦係数, $\bar{U}$: 高さ z における平均風速 ($= (z/z_0)^{0.16} \bar{U}_0$) を表わす。

ゆえにある高さ z における風速の変動成分による揚力のパワースペクトル密度と変動風速のパワースペクトル密度の関係は擬定常空気力理論を用いて次式のように、乱れの空間分布特性及び空気力への換算関数の積として与えられる。

$$S_L(f) = \left[\frac{1}{2} \rho \bar{U} \left\{ \frac{dC_L}{d\alpha} + C_D \right\}_{s, \alpha=0} \xi(k) \right]^2 S_{u_0}(f) \int_0^b \int_0^b R(x, x', f) dx dx' \quad (3-11)$$

上式において $\xi(k)$: 動的効果を表わす係数 ($= (f_1 m b l \rho U) / \{ \frac{dC_L}{d\alpha} + C_D \}_{s, \alpha=0}$), $S_{u_0}(f)$: 基準点の変動風速のパワースペクトル, $R(x, x', f)$: コーレンスであり Davenport は次式のように与えている。 $R(x, x', f) = \exp(-\eta f |x - x'| / \bar{U})$ (3-12)

また r 次モードの一般化された揚力のパワースペクトル密度は次式のように構造物のモード、乱れの高さ方向の空間相関、各高さにおける揚力のパワースペクトルと関係づけられる。

$$S_{Lr}^*(f) = \frac{1}{N_z} \int_0^H \int_0^H \sqrt{S_{Lz}(f) S_{Lz_2}(f)} R(z_1, z_2, f) \phi_r(z_1) \phi_r(z_2) dz_1 dz_2 \quad (3-13)$$

ここで $R(z_1, z_2, f)$ は高さ方向についての主流に直角水平方向の変動風速のコーレンスであるが塩谷等の報告によれば $R(z_1, z_2, f)$ 値は高さによっても変化しており次式のように仮定し k^* 値を実験的に求めている。 $R(z_1, z_2, f) = \exp(-k^* f |z_1 - z_2| / \bar{U}_0)$ (3-14)

実験結果より k^* は次式のように z の関数として近似される。 $k^* = k_0^* - 0.4 z$ (3-15)

ゆえに r 次モードの応答のパワースペクトル密度は外力(空気力)のパワースペクトルと周波数応答関数の二乗の積として次式のように求めることができる。

$$S_{y_r}(f) = S_{Lr}^*(f) \cdot |H_r(f)|^2 / K r^2 \quad (3-16)$$

したがって式(3-9)と同様にして、ある高さ z にかける乱れの成分に起因する応答のパワースペクトル密度は最終的に次式で求まる。 $S_{\eta z}(f) = \sum_r S_{y_r}(f) \{\phi_r(z)\}^2$ (3-17)

【参考文献】(1) 松本勝, 箱型断面を有する土木構造物の耐風性に関する基礎的研究, 1972年10月 (2) 土木学会 本州四国連絡橋技術調査委員会, 本州四国連絡橋技術調査第1次報告書, 付属資料, 耐風設計指針および解説, 40年5月 (3) A.G. Davenport, A Statistical Approach to the Treatment of Wind Loading on Tall Masts and Suspension Bridges, March, 1961 (4) M. Shiotani, Y. Iwatani, Correlations of Wind Velocities in Relation to the Gust Loadings, Int. Conf. Wind Effects on Buildings and Structures, Tokyo, Sept. 1971