

東京大学工学部 正員 伊藤 学
 同 大学院 学生員 ○ 田中 宏
 川崎重工業 K.K. 正員 山本辰一
 東京大学大学院 学生員 森光康夫

1. まえがき

橋梁として用いられる充腹断面けたの典型として、BOX型、H型、 π 型の各断面を考え、振動中のけたに作用する動的な非定常空気力を実測して、これらの断面形状の特性、けた高の影響などを考察すると共に、橋けたの自励振動現象との対応などを検討した。

2. 動的空気力の測定

二次元剛体が円振動数 ω で、上下・回転の連成振動をするとき、風速 V のもとで作用する揚力 L 及び空力モーメント M は

$$\uparrow L = -\pi \rho b^3 \omega^2 \left[L_q \left(\frac{y}{b} \right) + L_\varphi \varphi \right] \quad \curvearrowright M = \pi \rho b^3 \omega^2 \left[M_q \left(\frac{y}{b} \right) + M_\varphi \varphi \right] \quad (1)$$

であらわされる。ここで y : 上下変位, φ : 回転変位, ρ : 空気密度, b : 物体幅の半分である。

各空気力係数は、いずれも換算振動数 $k = \omega b / V$ の関数であって、

変位との間に位相差をもつので $L_q = L_{qr} + i L_{qi}$, ... のように複素表示する。図1, 表1のような各模型について、強制振動法により実測した空気力の例を図2に示す。強制振動振幅は、

上下方向で $y_0 = 5 \text{ mm}, 10 \text{ mm}, 20 \text{ mm}$ (回転方向で $\varphi_0 = 2^\circ, 4^\circ, 7.5^\circ$) としたが、図2は最小振幅による測定結果である。振幅による空気力の差は一般に小さいが、特に顕著な相違が現われる例を図3に示す。これらを簡単に考察すると、

1) 空気力の絶対値は、一般にけた高が大きくなるに従って L では増大し、 M では減少する。

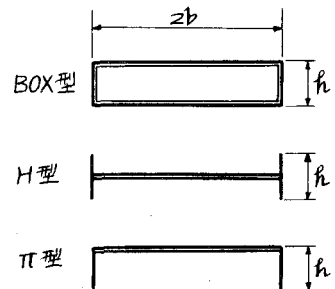
2) M の位相遅れは、ほぼ $k/2b$ に比例して増大する。

3) M_{qi} についてみると、B05, B10, H05, π 05では平板と同傾向を示すが、けた高がこれを越えると、 $M_{qi} > 0$ の領域ができる。これは失速フラッター型(回転1自由度)振動の不安定を示している。更にBOX型、H型については中間のけた高についても実験したところ、

B14及H07以上が不安定になることがわかった。

4) H30では、 $L_{qi} > 0$ の領域ができる。これはギャロッピング型(上下1自由度)振動の不安定であって、H20, π 20以下ではあらわれないが、H25及 π 30ではすでにこの傾向が見られる¹⁾。

5) 前二項より、前縁部における空気流の剥離に対するけた高の影響は、H型ではBOX型に比して約2倍の効果を及ぼすと考えられる。 π 型はH型に近いが、両者の中間的性格をもっているように思われる。



図・1

$k/2b$	0.05	0.10	0.20	0.30
BOX型	B05	B10	B20	B30
H型	H05	H10	H20	H30
π 型	π 05	π 10	π 20	π 30

表・1

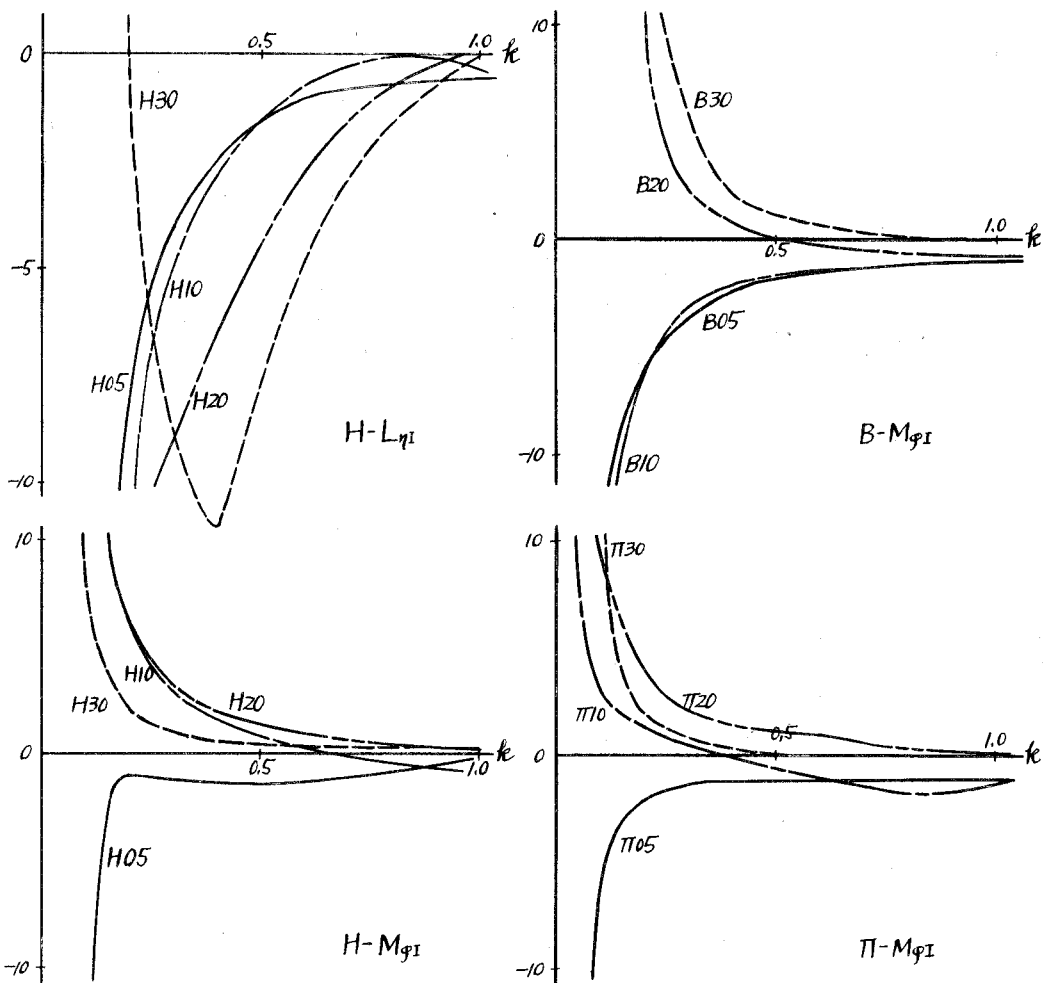


Fig. 2

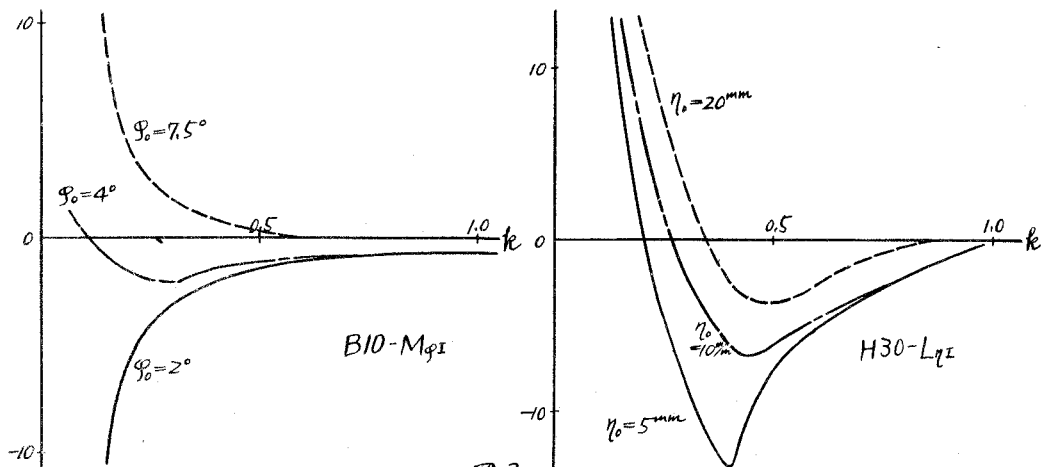


Fig. 3

6) 無次元空気力係数に対する強制振動振幅の影響は、模型周辺の空気流がポテンシャル流に保たれている限り現われないうであり、実測値でも無視できるが、最大振幅時に剥離がはいると、空気流もその様相を異にする。(図3)。 $M_{q1} > 0$ となる振幅と、同じ断面で $dC_m/d\varphi < 0$ となる迎角 φ_m との向くには対応が見られる(表2)。

3. 静的空気力との対応

BOX型、H型に対する三分力を求めると表2のようになる。ここに $A = (dC_x/d\varphi)_{\varphi=0}$, $A_t = (dC_m/d\varphi)_{\varphi=0}$ 。また φ_c, φ_m はそれぞれ C_x 及び C_m の勾配が0又は負になり始める迎角である。一般に、1自由度振動の発振条件は、動的空気力の場合と定性的に一致する。

位置 φ に対する動的空気力

$$\uparrow L = -\pi \rho b^2 \omega^2 L_q \varphi, \quad \uparrow M = \pi \rho b^2 \omega^2 M_q \varphi$$

において、 $L_q = k^2 L_g, \quad M_q = k^2 M_g$ (2)

とみると、 $L = -\frac{1}{2} \rho V^2 (2b) \pi L_g \varphi$

$$M = \frac{1}{2} \rho V^2 (2b) \pi M_g \varphi$$

これを、静的空気力

$$\uparrow L = \frac{1}{2} \rho V^2 (2b) C_x, \quad \uparrow M = \frac{1}{2} \rho V^2 (2b) C_m$$

と比較すれば $C'_x = -\pi L_g \varphi, \quad C'_m = \frac{\pi}{2} M_g \varphi$ (3)

がそれぞれ、動的な揚力係数及び空力モーメント係数に相当する。定常状態すなわち $k=0$ では、

$$L_g = -\frac{A}{\pi}, \quad M_g = \frac{2A_t}{\pi}$$

となるので、この方法を用いれば、動的及び静的空気力を同時に表示し、比較検討できる。BOX型について図4に例示する。

4. 自由振動法との対応

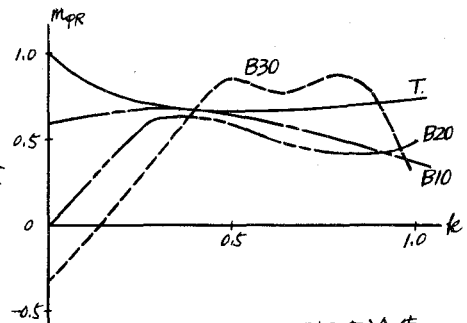
測定された動的空気力による発振風速の計算値を実験的に確認し、同時に空気力の一部を検算するために、自由振動実験を行なった。実験結果から次のようなことが考察される。

1) 平板に類似した空気力を示す模型では、迎角が増加すると発振風速 V_h は急激に減少する(曲げ換れフラッター型特性)が、 $M_{q1} > 0$ となる断面では、 V_h はほぼ一定又はむしろ増加する傾向がある(失速フラッター型特性)。

2) 2自由度実験の結果、曲げ換れ型断面では連成振動がみられ、失速型断面では回転振動が卓越し発散した。但し H30 では一旦回転振動が定常振幅に達した後、上下振動が発振した。

模型	A	A_t	φ_c	φ_m
B05	5.73	1.06	10°	6°
10	6.30	0.97	6°	6°
20	5.73	-0.34	6°	0°
30	10.0	-0.54	2°	0°
H05	11.4	1.84	12°	6°
10	7.17	0	8°	0°
20	5.73	-0.34	—	0°
30	-4.01	-0.49	0°	0°

表2



T: 平板理論値

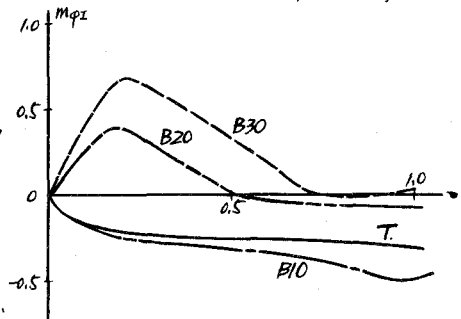


図4

3) 回転1自由度実験を行なうと、曲げ捩れ断面では発振しないか又は V_c がかなり高くなるが、失速型断面では2自由度の場合とほぼ同じ V_c を与える。

4) 捩れ1自由度振動における減衰率から動的空気力 M_q を近似的に求め²⁾、強制振動の結果と比較すると、かなり良く一致した。

5. 自励振動現象の解析

1) 失速フラッター型振動

構造減衰の影響を無視すれば、変位 $\varphi = \varphi_0 e^{i\omega t}$ の1サイクル毎に空気力 M のなす仕事は

$$\oint M d\varphi = \pi^2 \rho b^4 \omega^2 g^2 M_{qr}$$

となるので $M_{qr} > 0$ のとき振動は増幅し、不安定となる³⁾。このとき限界風速 V_c 及び円振動数 ω_c は次式から求められる。

$$\left. \begin{aligned} 1 + \frac{1}{b} M_{qr} &= \left(\frac{\omega_g}{\omega} \right)^2 \\ M_{qr} &= \nu g_g \left(\frac{\omega_g}{\omega} \right)^2 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここに、 ω_g : 捩れ固有円振動数、 g_g : 捩れ構造減衰係数、 $\nu = \mu (\gamma/b)^2$ 、 γ : 断面の回転半径である。

(4)式は、オ-式でオ-近似として $\omega = \omega_g$ と置いて k を定め、更にオ-式から ω を求める操作を繰返すことで容易に解ける。

2) ギャロップ型振動

1)と同様にして $g=0$ なら $L_{qr} > 0$ で不安定となる。 V_c 、 ω_c を求める式も同様で

$$\left. \begin{aligned} 1 + \frac{1}{b} L_{qr} &= \left(\frac{\omega_g}{\omega} \right)^2 \\ L_{qr} &= \mu g_l \left(\frac{\omega_g}{\omega} \right)^2 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここに、 ω_g : 曲げ固有円振動数、 g_l : 曲げ構造減衰係数、 $\mu = m/\rho b^2$: 密度比である。

3) 曲げ捩れフラッター型振動

L_{qr} は回転振動中に上下振動を、また M_{qr} は上下振動中に回転振動を、それぞれひき起す可能性を示している。従って $L_{qr} > 0$ 、 $M_{qr} > 0$ なる断面は連成振動を惹起する傾向をもつ。 V_c 及び ω_c は、

$$\left. \begin{aligned} \ddot{\eta} + (1 + i g_l) \omega_g^2 \eta &= \frac{1}{b} L \left(\frac{\gamma}{b}, \varphi \right) \\ \ddot{\varphi} + (1 + i g_r) \omega_g^2 \varphi &= \frac{1}{b} M \left(\frac{\gamma}{b}, \varphi \right) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

の右辺に(1)式を代入して求める。各振動形に対する V_c と V_c を比較例示すると表3のようになる。

図5には、けた高の変化に伴うBOX型及びH型の限界風速

の変化を図示する(ただし $\mu=30$ 、 $\gamma/b=0.56$ 、 $g=0.032$ 、 $\omega_g/\omega_c=2.0$ の場合)。一般にBOX型の V_c は $h/2b=0.3$ まで単調減少するのに対し、H型では $0.1 \sim 0.2$ 附近で V_c が最大となる。

文献

- 1) 伊藤, 下瀬, 三浦, 田中「橋桁断面に作用する動的空気力について」, オ-11回講演会(1966)。
- 2) 東大橋梁研究室「吊り橋の耐風安定性に関する実験的研究」(1960)。
- 3) 葛津久一郎「空力弾性学」共立応用力学講座(1957)。

模型	N_{ω_g}	g	V_d	V_c	V_c/V_d	振動特性
B05	2.0	0.012	12.2	10.3	0.84	曲げ捩れフラッター
	2.5	0.009	18.7	15.4	0.83	
B10	2.0	0.010	10.0	8.5	0.85	"
	2.5	0.009	16.9	12.1	0.72	
B20	2.0	0.019	4.9	4.9	1.00	失速フラッター
	2.5	0.011	6.6	6.1	0.92	
B30	2.0	0.012	4.4	4.0	0.91	"
	2.5	0.008	5.2	4.5	0.87	
H05	2.0	0.013	8.6	9.1	1.05	曲げ捩れフラッター
	2.5	0.009	10.4	11.7	1.12	
H10	2.0	0.014	3.4	3.3	0.97	失速フラッター
	2.5	0.012	4.0	4.0	1.00	
H20	2.0	0.012	3.3	3.1	0.93	"
	2.5	0.006	3.4	3.5	1.04	
H30	2.0	0.012	3.0	4.5	1.48	ギャロップ型"
	2.5	0.010	4.1	4.0	1.00	

表3

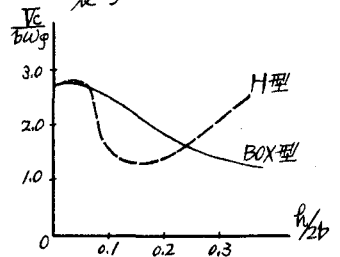


図5