

東京大学 正員 伊藤 学
 同上 正員 田中 宏
 日本鋼管 正員 戸井田 浩

1. まえがき

橋梁の風による振動は、従来行われて来た風洞実験の結果と実橋における観測結果とを総合すると、(1)風速上昇と共に振動が発散し、橋梁構造を崩壊に至らせる振動、(2)ある限定された風速域でのみ発生し、風速の増加に伴って振幅が一旦増大するがやがて減少し消滅する振動、の2種に大別し得ることが知られている。このうち(2)の振動は、橋梁構造にとって致命的でないが、その使用性能上の点から問題となる場合も考えられ、また最近ではトラスアーチの斜材などの部材にも被害例が見られ、橋梁工学上大切な問題となっている。本報告は、H型、 $\square$ 型、 $\square$ 型のような基本的断面形状の橋桁を有する斜張橋・吊橋の風洞実験において認められるこの種の限定振動(restricted oscillation)の性状と励振機構に関する考察である¹⁾。

2. 斜張橋・吊橋の全橋模型風洞実験

(1) 実験概要

模型の一般図を図-1~2、振動特性を表-2~3に示す。主桁断面の縦横比は全て $H/B = 0.20$ である。斜張橋は支間割り 2:5:2 の三径間連続梁、ゲイルは橋軸中央の一面吊り又は両端部の二面吊りとした。主塔基部は一面ゲイルの場合は桁に剛結し、二面ゲイルの場合は鉸になっている。吊橋は単径間で、動特性の検出を容易にするため、横方向曲げ剛性を特に大きくしてある。なお各型式とも、予備実験として揺み、振れ、横方向曲げ等の静的載荷試験を行なったが、一般に変形は計算値とよく一致しているので結果については省略する。送風実験の結果を図-3~5に例示する。

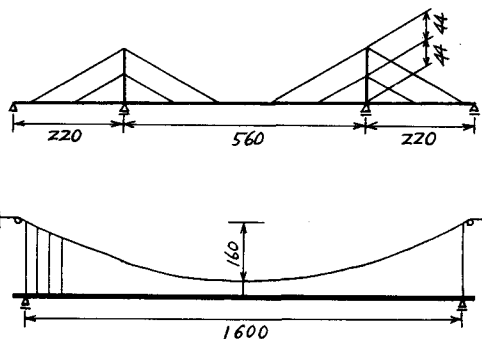


図-1 模型一般図

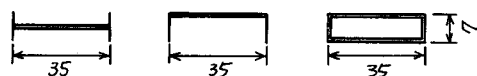


図-2 主桁断面図

表-2 吊橋模型の動特性

振動波形			N (%)		δ
			理論値	実験値	
鉛直 曲げ	対称	1次	1.24	1.26	0.0305
		2次	1.80	1.82	0.0742
		3次	2.48	2.50	0.0300
		4次	3.87	3.77	0.0310
	逆対称	1次	0.89	0.92	0.0746
		2次	1.88	1.89	0.0283
		3次	3.05	3.06	0.0294
		4次	4.46	4.50	0.0339
揺み	対称	1次	2.93	2.94	0.0396
		曲対称1次	3.57	3.61	0.0303
横曲げ	対称	1次	1.47	1.46	0.0315

表-1 斜張橋模型の動特性

模 型			1面ゲイル			2面ゲイル	
			$\square$	$\square$	$\square$	$\square$	$\square$
鉛直 曲げ	対称1次	N	2.33	2.32	2.25	2.85	2.86
		δ	0.049	0.075	0.055	0.061	0.057
	" 2次	N				4.39	4.40
		δ				0.045	0.054
	逆対称1次	N	2.94	2.94	2.98	3.01	2.96
		δ	0.159	0.091	0.149	0.057	0.075
揺み	対称1次	N	4.02	3.95	4.81	5.95	6.06
		δ	0.044	0.047	0.262	0.057	0.075

1) 構造物の耐風性に関する第1回シンポジウム(1970)において一部発表。

(2) 後流渦の測定

主桁後方に熱線風速計を配置し、後流渦の検出も行った。一般に、桁が振動しない風速領域では渦の周波数 N が風速 V と比例する。これから求められる Strouhal 数 $S = NH/V$ は Γ 、 $\square$ 断面で $S = 0.105$ 、 Γ 断面で $S = 0.120$ である。 $\square$ 断面に対する値は他の実験によっても確認された。²⁾ 桁の振動が始まると、渦周波数はほぼ一定となり、桁の振動数に一致する (locked-in 現象)。

(3) 曲げ振動

曲げの限定振動は風速の増加に伴って順次そのモードが変化する。各モードにおける振動数がそれぞれの風速における渦の周波数と対応していることから、この振動は渦の周波数との共振による強制振動と考えることができる。各モードにおける最大振幅は共振点近傍で観測されるが、このことは一般の強制振動の応答特性とよく一致する。各モードの共振点、終息点はそのそれぞれ一本の直線によって結ばれ、その勾配は共振点を結ぶ直線勾配の約 1.11 倍及び 0.91 倍となっている。高次モードにおける最大振幅は、一般に低次モードの場合よりも小さい。

(4) 捩れ振動

Γ 、 $\square$ 断面の斜張橋では低風速域で捩れ限定振動が発生した。モードは破壊振動 (自励振動) と同じ対称 1 次波形であって、渦の周波数が固有振動数の半分又は整数倍となる風速で共振している。振幅は急激せず、渦周波数の locking-in 現象は見られない。この振動は $\square$ 型主桁の吊橋・斜張橋では殆んど観測されなかった。

Γ 型や迎角の大きい場合の Γ 型では、自励振動 (失速フラッター) の起る前に比較的大振幅の捩れ限定振動が発現する。この場合には、渦周波数が固有振動数の整数倍となる風速で振幅が最大となり、周波数同調は起らない。この振動は次の自励振動の発現を促しているように見える。これに対して迎角の小さい Γ 型では最後の限定振動が顕著にはあらわれず、振幅が漸増して破壊振動に至り、周波数同調を伴っている (図-6)。 $\square$ 型で捩れ限定振動が発生しにくいのは、

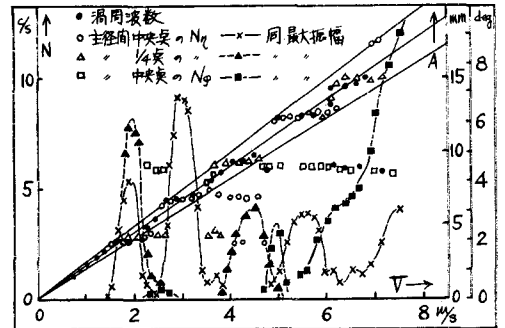


図-3 斜張橋 (2 面ガザ H 型、迎角 0°) の応答

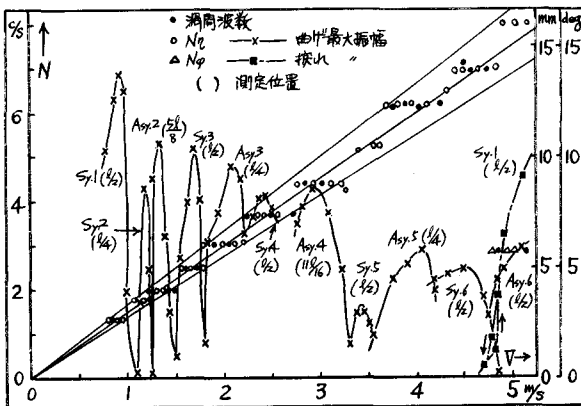


図-5 吊橋 ($\square$ 型、迎角 0°) の応答

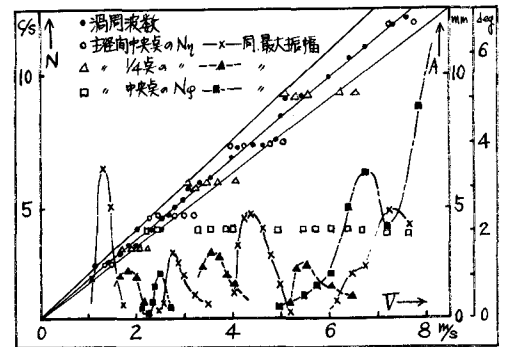


図-4 斜張橋 (1 面ガザ H 型、迎角 0°) の応答

2) 田中・森・根橋, 構造物断面後流中の風速変動, 第 25 回土木学会学術講演会, 1970

H, □ 型の場合のように風上側稜角部で剥離した流体が凹部に入り込むことがないためではないかと思われる (図-7)³⁾

3. □ 型断面に対する二次元風洞実験

前述の実験に用いた □ 型断面模型に対して二次元風洞で自由振動実験を試みた。模型の諸元は全径向実験の吊橋模型に合わせ、固有振動数及び対数減衰率は全径向実験において得られたいくつかのモードに近い値をとった。送風実験の結果得られた振動状況を図-8に示す。これを図-4の全径向実験と比較してみると、最大振幅に対応する風速 (固有振動数と渦振動数との共振点) は非常によく一致している。振動の発生する風速域は一般に自由振動実験における

方が広いが、これは部分模型の場合には固有振動数に対応する共振点が一つしか定まらないのに対して、全径向実験においては風速が変化すると直ちに隣接する他のモードの振動が発生しエネルギーを吸収するためと思われる。図-9は同一の固有振動数に対して、電磁式減衰器を用いて減衰率を変化させた場合の振動性状の変化を示す。共振点はわずかに変化するがほぼ同じ風速で与えられ、振幅は著しく変化している。フラッターのような自励振動においては限界風速が減衰率と共に変化するのが一般であるのに対して、図-9はこの種の限定振動が強制振動的な特徴を有することも明示している。

4. 二次元・三次元実験における振幅の差

自由振動実験における観測値は前述のとおり三次元実験における共振風速を確認すると同時にこれが気流剥離に伴う渦形成による強制振動現象であることを示しているが、観測される振動振幅は全径向実験と比べると非常に小さい。この理由を次に考えてみる。

① エネルギーによる比較

二次元模型における振動のエネルギーは振幅 A に対して減衰を無視すると $E_1 = \frac{1}{2} k A^2$ (k = バネ定数) である。

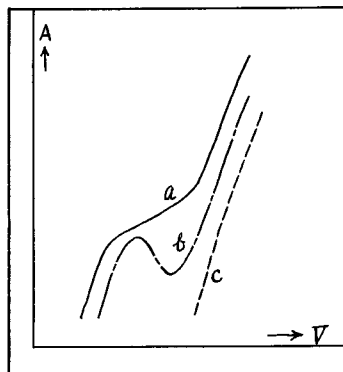


図-6 接点振動の発散状況

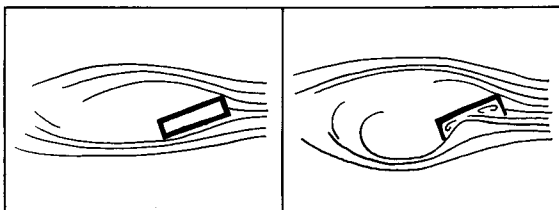


図-7 流線状況の例

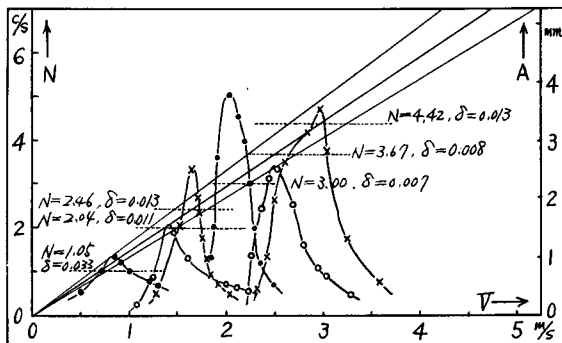


図-8 二次元模型実験での応答

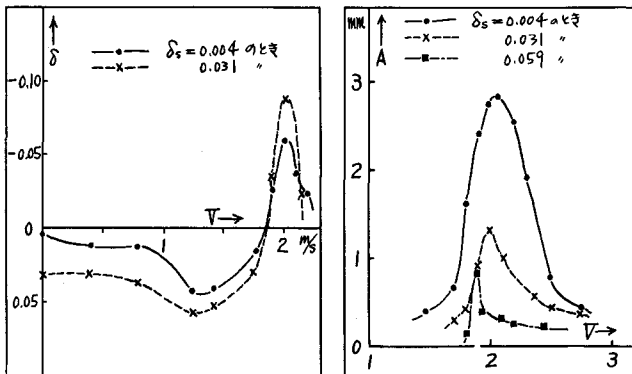


図-9 振動性状の減衰による違い

3) 伊藤・田中・橋口、煙風洞における桁断面まわりの流線の考察、第24回土木学会学術講演会、1969。

これに対して三次元模型の振動エネルギーは振動モード $\phi(x) = A \sin \lambda x$ に対して $E_2 = \frac{w b^2}{2g} \int \dot{\phi}^2 dz$ (w/g = 単位長重量, b = 円振動数) となるので, $E_1: E_2$ が渦によるエネルギー供給量の比に等しいと仮定すれば, 模型の諸元が等しい場合には $A/A_0 = 1/\sqrt{2} \approx 0.71$ となる。ここでは実測された振幅差を説明するのに十分ではない。

② クーロン摩擦の影響

二次元系においてはクーロン摩擦力 F が作用しているものと考えると, 運動方程式は

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f \sin \omega t \pm F \quad (1)$$

$F=0$ の場合は普通の強制振動系であって, 共振時振幅は $A_0 = f/c\omega$ で与えられる。 F が存在するときにはこれを等価粘性減衰でおき換えて解けば共振振幅は

$$A = f/c\omega - 4F/\pi c\omega$$

従って振幅比は

$$\frac{A}{A_0} = 1 - \frac{4F}{\pi f} \quad (2)$$

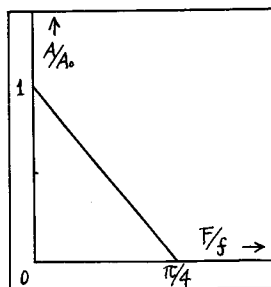


図-10 A/A_0 と F/f の関係

で減少する (図-10)。いま渦力の絶対値 f に対して仮に $F = f/3$ の乾性摩擦があれば $A/A_0 = 0.58$, $F = 2f/3$ なら $A/A_0 = 0.15$ まで減少することになる。この点に關しては更に検討中である。

5. 渦励振における空力負減衰効果

振動系に作用する外力として線型非定常の空気を考えると, 運動方程式は次のようになる。

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = L_R y + L_I \dot{y} \quad (3)$$

これを解いて

$$y = A e^{pt} \cos \omega t \sqrt{p^2 - \beta^2} x \quad (4)$$

$$\text{ここに } \beta = (c - L_I)/2m, \quad p = \sqrt{(k - L_R)/m}$$

系全体の対数減衰率 δ を考えると

$$\delta = \pi(c - L_I)/m p$$

従って, 非定常空力減衰を $L_{RI} = L_I/\pi p b^2 \omega$ で無次元化し⁴⁾、構造減衰を δ_0 とあらわせば

$$L_{RI} = \omega(\delta_0 - \delta)/\pi^2 p b^2 g \quad (5)$$

となる。 ω = 桁の単位長重量, b = 半幅である。同様にして空力モーメントにおける減衰項は

$$M_{RI} = \theta(\delta_0 - \delta)/\pi^2 p b^4 \quad (6)$$

二次元風洞実験から得られた典型的な測定値 (図-11) を用いて, L_{RI}, M_{RI} を計算したものが図-12 である。換算振動数 k の小さい領域における強制振動法による測定値⁴⁾ もよく連続している。前述のような後流渦の周波数と桁の共振による強制振動現象は, このような空力負減衰効果による限定的な自励振動現象とも見得るわけで, 両者の関連性については更に検討中である。

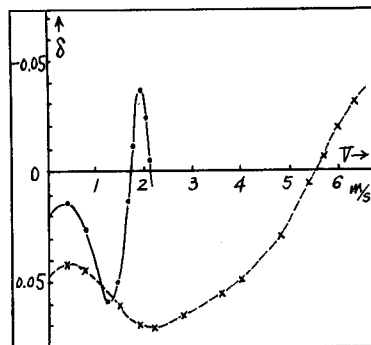


図-11 二次元風洞での実験値

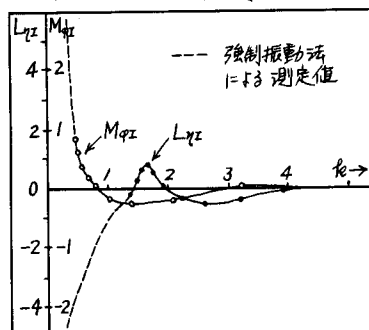


図-12 非定常空気力成分

4) 田中・伊藤, 充腹構造物の自励振動における空気力の特性, 土木学会論文報告集 No. 168, 1969.