

京都大学 正員 白石成人 正員 松本勝 学生員 〇北川貴一

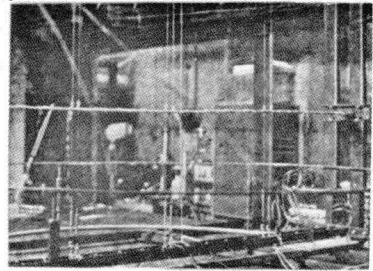
1. 概説

長大吊橋の耐風応答に関しては、従来より数多くの実験・研究が報告されており、風の乱れによる影響が無視できないのは明らかになっているが、その多くは部分模型を用いた風洞実験によるものであるために、三次元的な特性に関する報告は数少ないのが現状である。そこで風洞内に自然風をシミュレートした境界層を発生させ、その中に平板三次元模型を置いてその動的応答を調べ、フラッター限界風速に対する風の乱れ、水平迎え角、振動数比、振動モード等の影響について若干の考察を加えると共に、微小振動状態における風の乱れに起因する模型の応答に対するスペクトル解析結果と、数値計算によって推定される模型の応答との比較・検討を行なうものである。

[文献1; 小西一郎, 白石成人, 酒井基一郎, 竹居重男 "風洞内におけるせん断流れに関する模倣実験", 構造物の耐風性に関する第2回シンポジウム, 1972年12月]

2. 風洞実験

乱流境界層を発生させる装置(文献1)としては、円錐を配列したもの(境界層A)と曲線平板を配列したもの(境界層B)の2種類を用いた。模型は振動数比を任意に設定できるようにするために、鋼製のラーメン型フレームに張力を調節できるようにした3本の平行なワイヤーを水平に張り、それに幅5cm, 長さ10cm, 厚さ2.5mmの木製の平板を18枚金具で取付け、また応答の測定のためにスパンの1/2点付, 1/4点, 3/4点の計3カ所にコイルスプリングを取付けた。この模型を用いて、水平迎え角の影響を考慮して一様流と乱流境界層中での模型の振動性状を調べ、また1/4点と1/2点付近での応答のスペクトル解析を行なった。図1は乱流境界層の、図2~7は模型の応答の実験結果である。



3. 数値計算

[文献2; 白石成人 "変動風をうける平板状構造物の耐風応答特性に関する2,3の基礎的研究" 土木学会論文集 40.195, 1971-11.]

模型の振動は次式に示されるように、たわみ  $\eta(x, t)$  とねじれ  $\varphi(x, t)$  の連成振動を考えた。(文献2)

$$\begin{cases} \ddot{\eta} + 2Z_1\omega_1\dot{\eta} + \omega_1^2\eta = H_1\ddot{\eta} + H_2\dot{\varphi} + H_3\varphi - \Delta L/m & H_1 = -2\pi b^2 U |C(k)|/m, H_2 = -\pi P b^2 U (1 + iC^*(k))/m, H_3 = -2\pi P b^2 U |C(k)|/m \\ \ddot{\varphi} + 2Z_2\omega_2\dot{\varphi} + \omega_2^2\varphi = A_1\ddot{\eta} + A_2\dot{\varphi} + A_3\varphi - \Delta M/I & A_1 = \pi P b^2 U |C(k)|/I, A_2 = -\pi P b^2 U (1 - iC^*(k))/2I, A_3 = \pi P b^2 U |C(k)|/I \end{cases}$$

ここで、 $C(k)$  は Theodorsen 関数で、 $C(k) = F(k) + iG(k)$ ,  $C^*(k) = F(k) + G(k)/k$ ,  $k$ : 換算振動数

振動モードは、たわみ・ねじれ共に対称1次 ( $\sin \pi x/l$ )

と逆対称1次 ( $\sin 2\pi x/l$ ) のみを考慮し、たわみ・ねじれ連成振動については同次モードの連成だけを考え、対称1次と逆対称1次のモードの連成はないとした。また空間相関係数は  $\lambda$  をパラメータとして、

$$R(x, x'; n) = \exp(-n\lambda|x-x'|/U) \dots (1)$$

で表わされるとすると、Aerodynamic Admittance は次のようになる。

$$|\chi_A|^2 = |C(k)|^2 \frac{8\pi^2}{\lambda^2 k^2} \left\{ -1 + \frac{\lambda k}{2\pi} + \exp\left(-\frac{\lambda k}{2\pi}\right) \right\}$$

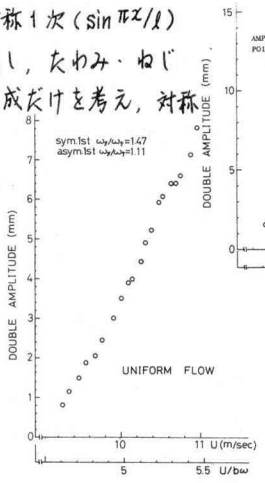


図2 AMPLITUDE-VELOCITY RELATION AT THE QUARTER POINT OF THE SPAN (DEFLECTION)

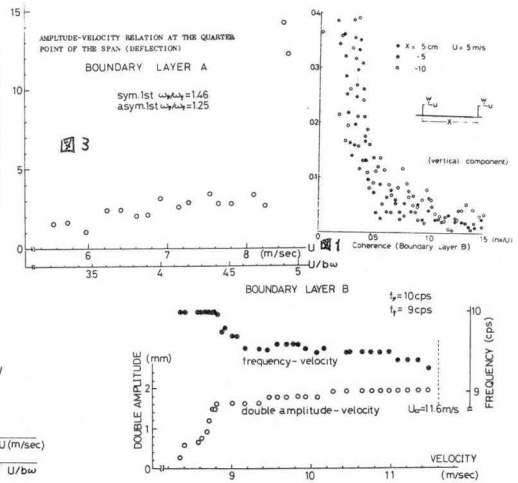


図3 AMPLITUDE-VELOCITY AND FREQUENCY-VELOCITY RELATION AT THE QUARTER POINT OF THE SPAN (DEFLECTION)

#### 4. 考察

##### ○乱流境界層中のコヒーレンス(図1)

図1は風の鉛直変動成分のコヒーレンスで、少し指数関数近似とずれるが、大体の傾向として、  
 $\sqrt{\text{Coherence}} = \exp(-\lambda n \Delta x / U)$  のように近似してよいように思われる。また、 $\lambda$  の値は設定風速の増加に伴って大きくなる傾向が見受けられた。

##### ○一様流中と境界層中における振動性状の相違(図2~4)

一様流中においては比較的高風速にならないと応答は生じないが、一旦応答が生じるとその後は風速の増大と共に振幅は直線的に増大していく。一方境界層中では比較的低風速から応答が生じ始め、図4からわかるように風速が増大してもあまり振幅が増大しない領域が存在し、その後急激に振幅が増大する傾向がある。また振幅が発散する時の風速を比較すると、一様流中では10.66 m/sec、境界層Bでは12.30 m/secという結果が得られ、風の乱れによって、構造物の不安定な大振幅振動に対しては安定化効果を与えているものと思われる。しかし、乱れのスケールの観点から見ると、構造物と乱れのスケールの比率がどのような時に風の乱れが構造物に最大の効果を与えるのかという問題が残されていると思われる。

##### ○水平迎え角(図5, 6), 迎え角の影響

橋軸が主流に直交な方向をなす場合を $0^\circ$ とする水平迎え角 $\beta$ を $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 30^\circ, 57.5^\circ$ と変化させてその振動性状の変化を調べたのが図5, 6で、この図からわかるように $\beta$ の増加と共に限界風速は増加する傾向があり、従って $\beta=0^\circ$ の場合が最も危険であると思われる。また迎え角に関しては定量的に把握していないが、迎え角の存在によって限界風速が増大したことが実験で見受けられた。

##### ○模型の振動モード

模型がたわみ・ねじれ連成振動を行なう場合に、振動モードとしては、たわみ及びねじれの対称1次モード同志が卓越する場合と、逆対称1次モード同志が卓越する場合の2通りが観測された。これら両方の場合における固有振動数は下表に示される通りであり、それぞれの組合せによって限界風速の低い方のモードで連成振動をするものと思われる。また逆対称1次モードで振動状態にあったものが、風速の上昇と共に突然対称1次モードの連成振動に移行し、そのまま対称1次モード同志の連成振動を継続し、ある風速に達すると発散するといった現象が観測された。

		固有振動数	固有振動数比	Selberg式による限界風速
対称1次モード同志で連成振動をした場合	対称1次	たわみ 9.0 $\phi^2$	1.44	11.66 m/sec
		ねじれ 13.0		
	逆対称1次	たわみ 12.5	1.42	
		ねじれ 17.7		
逆対称1次モード同志で連成振動をした場合	対称1次	たわみ 8.1	1.46	10.68
		ねじれ 11.8		
	逆対称1次	たわみ 11.0	1.25	
		ねじれ 13.8		

##### ○応答のパワースペクトル密度(図7)

式(1)の $\lambda$ の値は実験で定量的に十分把握できなかったため、数値計算では主流方向については7、橋軸方向については20を用いて実験値と比較したのが図7で、ピークのところについては実験値とほぼ一致している。ピークを持たない低振動数領域においては計算値は実験値の5~10倍も大きい値となっており、この誤差の原因としては、Aerodynamic Admittanceをこの振動数領域で大きく評価しすぎているためだと考えられる。

