

# 変断面3次元模型の風による応答および圧力特性

細見 雅生<sup>1)</sup> 木場 和義<sup>2)</sup>

連続桁橋には変断面箱桁がよく用いられる。ここでは、変断面となることの空力応答現象に及ぼす影響を調べる目的で、矩形断面と箱形橋梁断面を有する変断面箱桁の3次元模型による風洞実験を実施し、それぞれの模型の応答比較を行った。また、模型表面の圧力を計測し、その特性を調べた。

## まえがき

最近、100mを超える長支間の連続桁橋の建設が増加しているが、これらの連続桁橋では動的耐風設計の必要性から風洞実験が実施される事例が多くなってきている。長支間の連続桁橋には変断面箱桁がよく用いられる。この変断面箱桁の空力応答現象は、その立体的形状により影響を及ぼされると考えられる。

本研究では、この変断面箱桁の立体的形状が空力応答現象に及ぼす影響を調べる目的で、矩形断面と矩形断面に床版の張り出しを付加した箱形橋梁断面を有する変断面箱桁の3次元模型による風洞実験を実施し、模型の形状の違いによる応答比較を行った。また、模型表面の圧力を測定し、その特性を調べた。

実験としては応答試験（V-A試験）の他に、振動中（渦励振とギャロッピング時）の模型表面の圧力測定を行った。圧力測定孔はスパン方向に16点（模型上側のみ）とスパン $l/4$ 点付近の断面周りに9点（模型上側のみ）設けた。

それぞれの模型の実験条件を表-1に示す。

表-1 実験条件

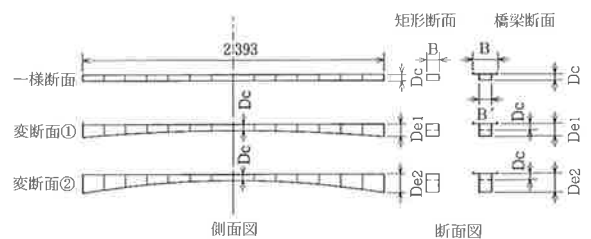
|      |      | 重量<br>kgf | 振動数<br>Hz | 構造減衰 ( $\delta$ )   | スクリーン数<br>( $Sc$ ) |
|------|------|-----------|-----------|---------------------|--------------------|
| 矩形断面 | 一様断面 | 5.64      | 3.33      | 0.011, 0.016        | 8.5, 12.3          |
|      | 変断面① | 5.68      | 3.33      | 0.012, 0.016        | 9.3, 12.4          |
|      | " ②  | 5.73      | 3.32      | 0.010, 0.011, 0.016 | 7.8, 8.6, 11.7     |
| 橋梁断面 | 一様断面 | 6.34      | 3.15      | 0.009, 0.031        | 3.3, 11.2          |
|      | 変断面① | 6.38      | 3.14      | 0.009, 0.031        | 3.3, 11.2          |
|      | " ②  | 6.43      | 3.14      | 0.009, 0.031        | 3.3, 11.2          |

$$Sc = \frac{2m}{\rho B D} \cdot \delta \quad (m: \text{模型の質量})$$

## 1. 実験内容

風洞は当社のエッフェル型風洞（高さ2.0m、幅4.0m、長さ20.0m）を使用した。<sup>1) 2)</sup> 模型はアルミ製の剛性棒と檜製の外形材を用いた3次元弾性模型（ $l = 2.393\text{m}$ 、14ブロック、ブロック長 = 170mm、スリット幅 = 1mm：写真-1）で、模型形状は図-1に示すように、矩形断面と橋梁断面、それぞれ3種類の箱断面を使用した（計6種類）。橋梁断面は鋼床版箱桁を想定し、デッキ裏面にUリブを配置した図-2（写真-2）に示す形状とした（高欄なし）。変断面①は一般的な変断面箱桁に用いられている程度の桁高の変化率であり、変断面②は桁高を大きく変化したものである。変断面①、②は一様断面の模型に発泡スチロール製の外形材を取り付けたものである。

上記模型を吹出し口から3.0m下流の位置に橋軸気流直角方向になるように設置し（図-3、写真-3）、一様流を作用させた。



寸法表

| 記号                  | 単位: mm |      |
|---------------------|--------|------|
|                     | 矩形断面   | 橋梁断面 |
| B : 幅 (上側)          | 100    | 200  |
| B' : 幅 (下側)         | 100    | 100  |
| De : 高さ (スパン中央)     | 50     | 60   |
| De1 : 高さ (端部: 変断面①) | 100    | 110  |
| De2 : 高さ (端部: 変断面②) | 150    | 160  |

図-1 模型形状

1) 橋梁技術部技術課課長

2) 橋梁技術部技術課

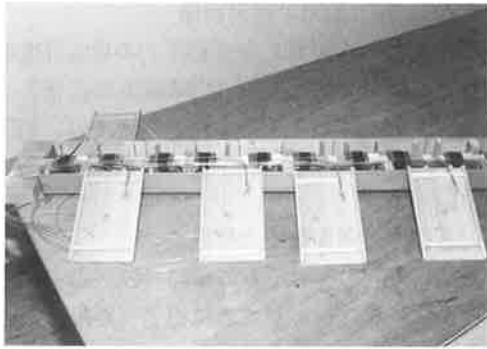


写真-1 3次元弾性模型（組立時）

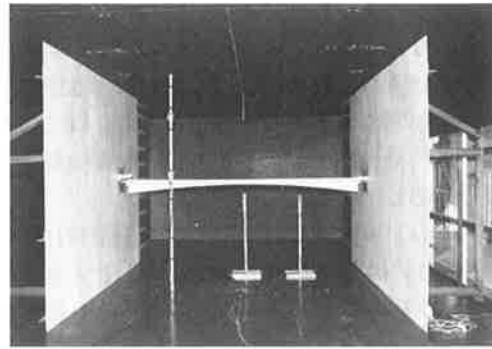


写真-3 模型設置状況

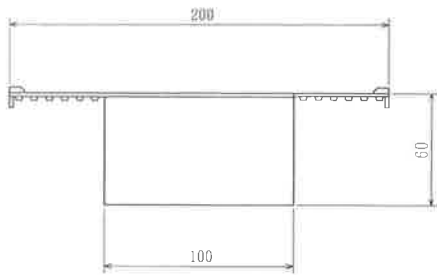


図-2 橋梁断面（スパン中央の断面）



写真-2 橋梁断面模型

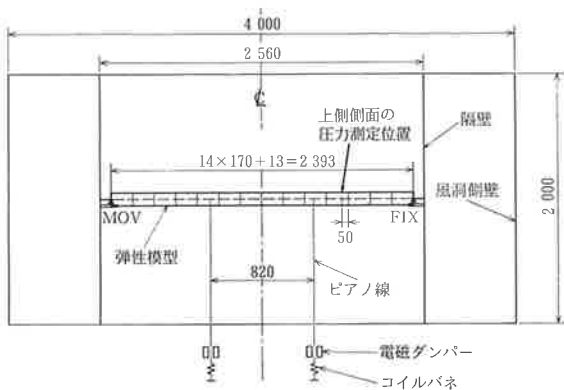


図-3 模型設置状況

## 2. 実験結果と考察

### (1) 矩形断面の応答比較

図-4に構造減衰( $\delta$ )が約0.011のときの矩形断面の模型形状の違いによる応答(たわみ1次モード)の比較図を示す。図の中でAはスパン中央における応答振幅rms. 値の $\sqrt{2}$ 倍、Dはスパン中央の模型断面高さ(50mm)である。以下の図中でも同じ記号を使用する。この図より、

- ① 渦励振、ギャロッピングの発現する風速は模型形状の差によらずほぼ一致している。
- ② 渦励振の最大振幅も模型形状の差による大きな差は見られない。

という特性のあることがわかる。

渦励振の振幅が最大となる風速推定式<sup>3)</sup>として下の式が提案されている。

$$\frac{V_{cr}}{N \cdot D} = 2.5 \cdot \frac{B}{D} \quad (1)$$

- ここに
- $V_{cr}$  : 風速(推定値)
  - $N$  : 模型の振動数
  - $D$  : 模型の高さ
  - $B$  : 模型の幅

上式より、渦励振の振幅が最大となる風速は断面の高さに関係なく

$V_{cr} = 2.5 \cdot B \cdot N = 2.5 \times 0.1 \times 3.33 = 0.83\text{m/s}$ と推定され、この結果は実験結果とよく一致している。

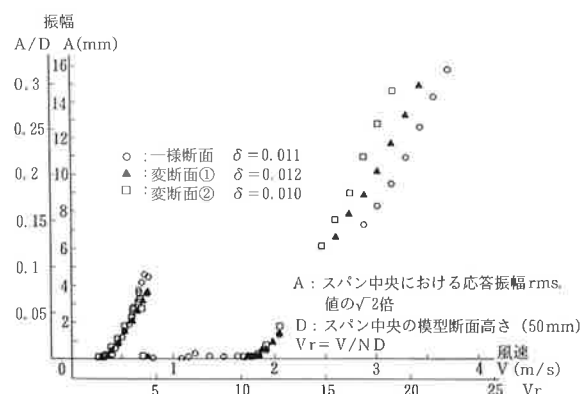


図-4 形状の違いによる応答の比較  
(矩形断面:  $\alpha = 0^\circ$ )

ギャロッピングについては、断面の高さの変化率が大きくなるに従って同一風速における振動振幅が増加している。これは辺長比の違いによる空気力特性の差の影響によるものと推定される。既往の実験結果<sup>4) 5) 6)</sup>と比較した所、辺長比と振動振幅の関係はよく対応している。

図-5 (a) ~ (c) にそれぞれの模型形状について構造減衰が小さいもの ( $\delta = 0.011$ ) と大きいもの ( $\delta = 0.016$ ) の比較図を示す。変断面①、変断面②の  $\delta$  が大きいケースでは渦励振の振幅が一様断面に比べ小さくなっている。

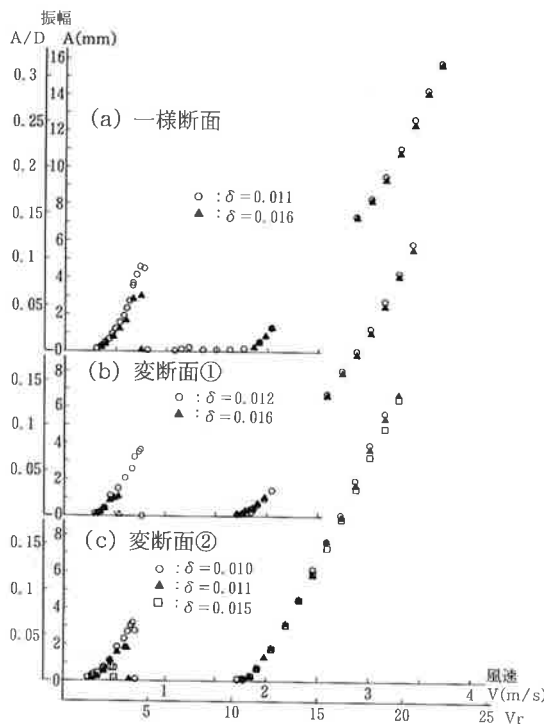


図-5 構造減衰の違いによる応答の比較  
(矩形断面:  $\alpha = 0^\circ$ )

(2) 矩形断面の渦励振時の変動圧力特性

ここでは、変動圧力が振動系になす仕事に関する量に着目して圧力特性をとらえることとする。したがって変動圧力の振幅と変位に対する位相を変位と変動圧力との相互相関関数  $C_{py}(\tau)$  から求める。変動圧力の振幅  $P_0$  は相関関数の最大値から、変位に対する位相差  $\phi$  は最大値が生じている時間のずれ量  $\Delta \tau$  から計算する。

$$P_0 = \frac{C_{py}(\tau) | \max}{\sigma_y} \quad (2)$$

$$\phi = \frac{\Delta \tau}{T_0} \cdot 360^\circ \quad (3)$$

ここに  $T_0$ : 模型の振動周期

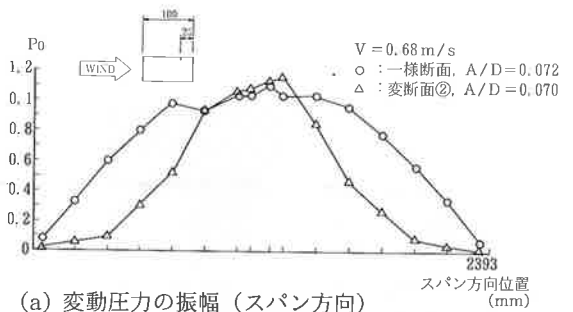
相関関数から計算した変動圧力の振幅は変動圧力から直接計算した振幅 (標準偏差の  $\sqrt{2}$  倍) より約 5~10% 小さい値であった。以下では、相関関数より計算した圧力の振幅を「変動圧力の振幅」と呼ぶ。

1) スパン方向変動圧力特性

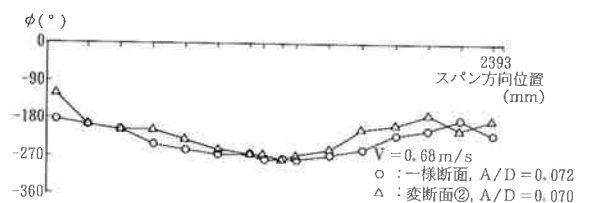
スパン方向の変動圧力の振幅 ( $(1/2) \rho V^2$  で無次元化) と変位に対する位相差 (変動圧力の位相の進みを正とする。) を図-6 (a), (b) に示す。この図は一様断面と変断面②の振動振幅を同じにした時の比較図である。風速は渦励振が最大となる風速である。横軸はスパン方向の位置を示す。

変動圧力の振幅はスパン中央から支点部に近づくに従い減少している。変断面では減少の傾向が強く現れている。

変位に対する位相もスパン中央から支点部に近づくに従い減少しているが、模型形状による差は小さい。



(a) 変動圧力の振幅 (スパン方向)



(b) 変動圧力の変位に対する位相差 (スパン方向)

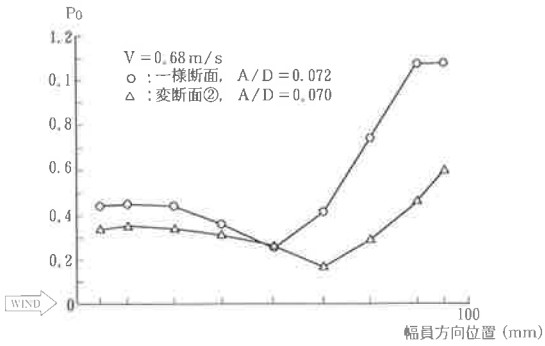
図-6 スパン方向変動圧力

2) 断面周りの変動圧力特性

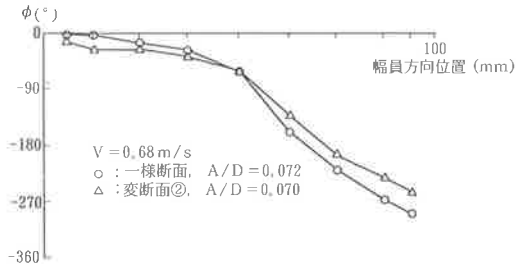
スパン  $l/4$  点の模型上側面の変動圧力の振幅と変位に対する位相差を図-7 (a), (b) に示す。振動振幅と風速の条件は図-6と同じである。

模型上側面の変動圧力の振幅は剥離渦励振時の圧力分布としてよく知られている分布形状<sup>7)</sup> になっているが、変断面では模型後部で減少傾向が強い。

位相差についてはスパン方向の変動圧力特性と同様で差は小さい。



(a) 変動圧力の振幅 (幅員方向, スパン  $l/4$  点)



(b) 変動圧力の変位に対する位相差 (幅員方向, スパン  $l/4$  点)

図-7 断面周りの変動圧力特性

(3) 一様断面の渦励振時変動圧力の特性

スパン方向の圧力測定孔の変動圧力の振幅と最大相対迎角 ( $\dot{y}/V$ : 最大相対迎角,  $\dot{y} = \omega \cdot y_0$ ,  $y_0$ : 振動振幅,  $\omega$ : 角振動数,  $V$ : 風速) の関係を図-8に示す。ここで、振幅  $y_0$  は模型のスパン中央点の振動振幅とモード形状から圧力測定点の振動振幅を算出した値である。

図-8 (a) はある一定風速のもとで振動振幅を変えた時のスパン  $l/2$  点の変動圧力の特性を調べたものである。図-8 (b) はある一定風速のもとでスパン方向の各測点の圧力振幅をその測点の振動振幅をもとにプロットしたものである。図-8 (c) は各風速における模型の振動振幅をもとにスパン  $l/2$  とスパン  $l/4$  点の変動圧力の振幅をプロットしたものである。風速の違い、スパン方向の位置の違いにかかわらず、変動圧力の振幅と相対迎角の関係はほぼ一致している。

図-9は変動圧力の変位に対する位相差について調べた。図-9 (a)、(b)、(c) の違いは図-8 (a)、(b)、(c) の違いと同じである。縦軸は変動圧力の変位に対する位相差  $\phi$  を模型前縁から剥離した流れが平均流速  $V$  で流下するとしたときの圧力測定孔位置での位相差  $\phi_0$  で除した値である。

$\phi_0$  の計算は次式による。

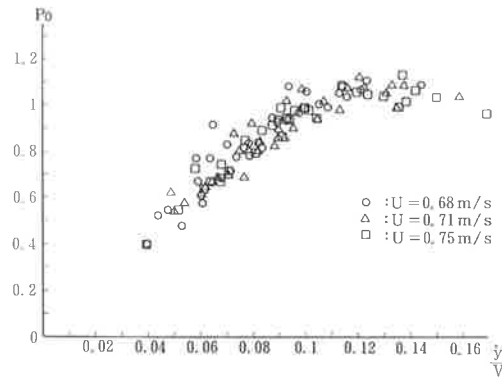
$$\phi_0 = \frac{e/V}{T_0} \cdot 360^\circ \quad (4)$$

ここに

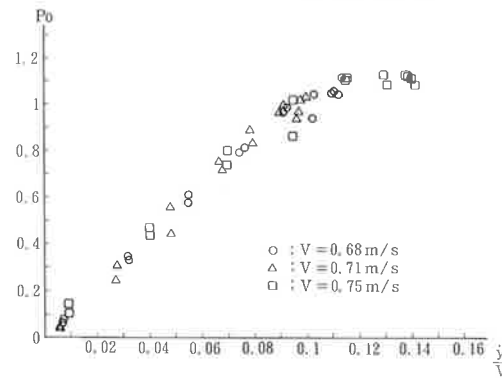
$e$ : 模型前縁から圧力測定孔までの距離 (75mm)

$V$ : 風速

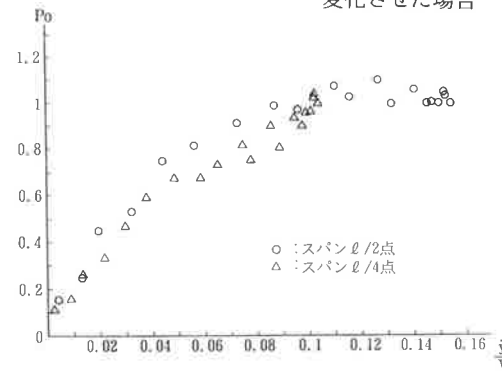
位相差についても、風速の違い、スパン方向の位置の違いにかかわらず、 $\phi/\phi_0$  と相対迎角の関係はほぼ一致している。 $\dot{y}/V$  が0に近づくとき、 $\phi/\phi_0$  はほぼ1.3となり、 $\dot{y}/V$  が大きい場合  $\phi/\phi_0$  はほぼ一定値2.2に近づく。



(a) 構造減衰を変えて振動振幅を变化させた場合

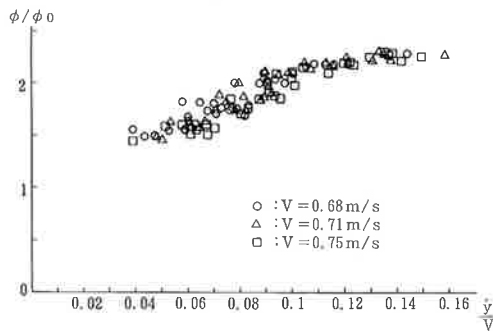


(b) スパン方向の位置を変えて振動振幅を变化させた場合

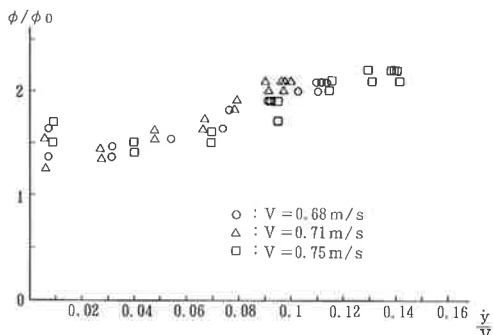


(c) 風速を変えて振動振幅を变化させた場合

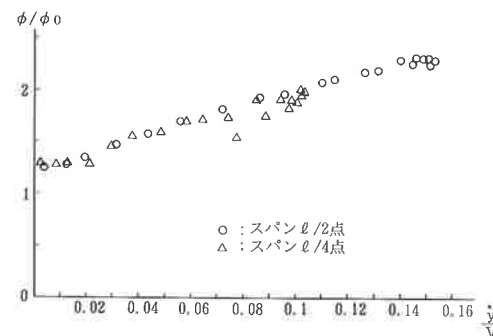
図-8 圧力振幅と相対迎角の関係 (一様断面)



(a) 構造減衰を変えて振動振幅を  
変化させた場合



(b) スパン方向の位置を変えて振動振幅を  
変化させた場合



(c) 風速を変えて振動振幅を変化させた場合

図-9 変動圧力の位相と相対迎角の関係  
(一様断面)

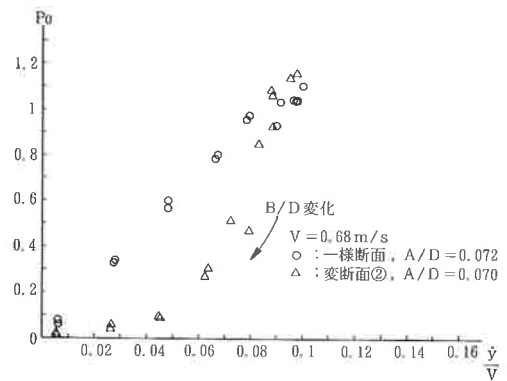
(4) 一様断面と変断面の渦励振時圧力特性の比較

変動圧力の振幅、位相と相対迎角の関係を一様断面と変断面②について比較したものを図-10に示す。この図はスパン方向それぞれの圧力測定点の振動振幅をもとに  $\dot{y}/V$  を求めて、圧力の振幅 (a) および位相差 (b) を整理したものである。図-10 (a) より変動圧力の振幅は変断面の  $\dot{y}/V$  が小さい所で大きく低下しており、変断面であることの影響が大きい。図-10 (b) より、位相差はばらつきはあるもの一様断面と変断面ではほぼ一致しており、変断面であることの影響は小さいものと考えられる。

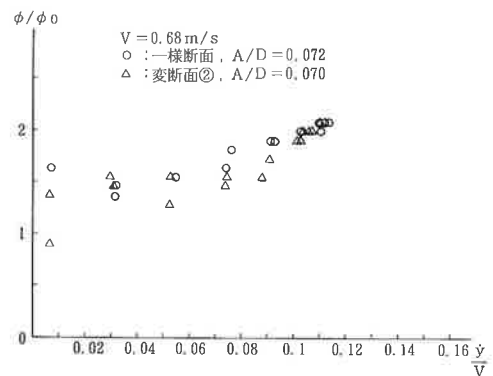
図-10の結果をもとに変断面と一様断面の変動圧力振幅の比と  $B/D$  の関係をプロットしたものを図-11に示す。 $B/D$  が2から1に変化すると変動圧

力振幅は20%程度に低下している。この特性は変断面①、変断面②とも同様である。

上記特性からスパン方向の位置より  $B/D$  の影響が大きいと考えられる。このことから、変動圧力振幅に差が生じた原因は主に辺長比の影響によるものと考えられる。しかし、変動圧力の振幅、位相にばらつきもあり、3次元的な流れによる影響など他の要因も含まれていると考えられる。



(a) 圧力振幅と相対迎角の関係  
(スパン方向の位置を変えて振動振幅を  
変化させた場合)



(b) 変動圧力の位相と相対迎角の関係  
(スパン方向の位置を変えて振動振幅を  
変化させた場合)

図-10 一様断面と変断面②の圧力特性比較

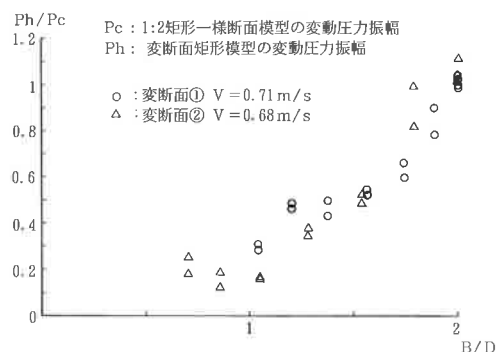


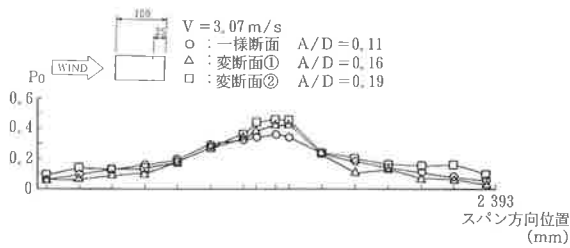
図-11 変動圧力の振幅と  $B/D$  の関係

(5) 矩形断面のギャロッピング時の変動圧力特性

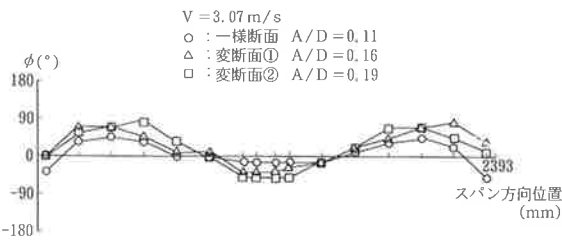
1) スパン方向変動圧力特性

ギャロッピング時のスパン方向の変動圧力の振幅と変位に対する位相差を図-12、図-13に示す。ギャロッピングの振幅は構造減衰を変化させて調整しにくいいため、風速を同じ（振動振幅は異なる）にして各模型の圧力を測定したもの（図-12）と、風速を変化させ各模型の振動振幅を同じにして圧力を測定したもの（図-13）について一様断面と変断面の比較を行った。

変動圧力の振幅と位相差の分布形状は渦励振時のものとは異なっていることがわかる。このギャロッピング時の変動圧力の特性は模型形状により多少の差はあるものの、風速、振動振幅の違いにかかわらず同様な傾向を示している。変動圧力の

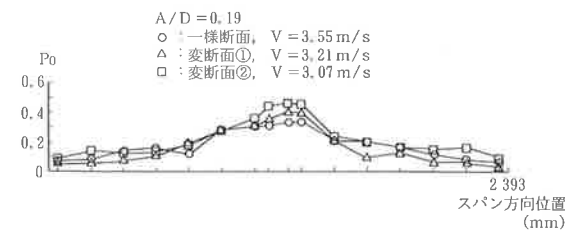


(a) 変動圧力の振幅

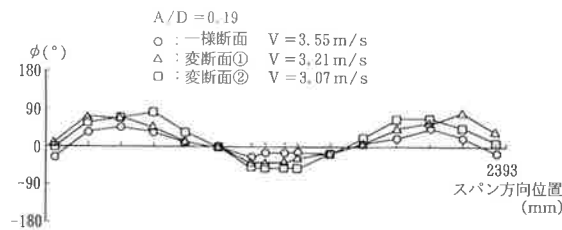


(b) 変動圧力の変位に対する位相差（スパン方向）

図-12 スパン方向変動圧力（同風速の場合）



(a) 変動圧力の振幅



(b) 変動圧力の変位に対する位相差

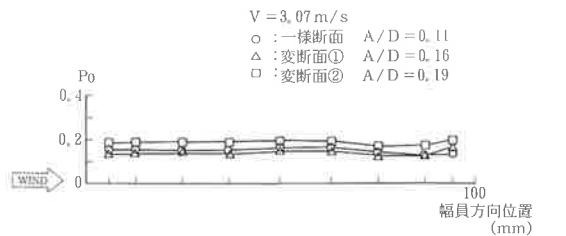
図-13 スパン方向変動圧力（同振動振幅の場合）

振幅については、スパン中央部でやや大きくなっている。他の部分での変化は少ない。位相差については、模型形状にかかわらずスパン中央部に負になる領域があり（振動を減衰させる圧力）、その区間幅も各模型ではほぼ一致している。この領域は変動圧力の振幅が大きくなっている所にある。

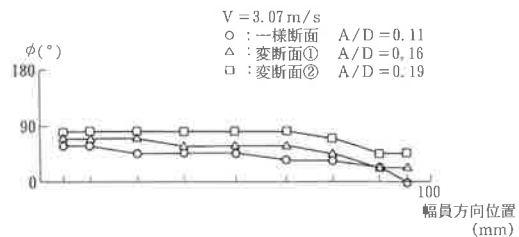
2) 断面周りの変動圧力特性

ギャロッピング時の断面周りの模型上側面の変動圧力の振幅と変位に対する位相差を図-14 (a)、(b)に示す。計測位置はスパン  $l/4$  点、風速と振動振幅の条件は、図-12の条件と同じである。

模型上側面の変動圧力の振幅と変位に対する位相差はほぼ一定であり、既往の試験結果<sup>7)</sup>ともよく対応している。



(a) 変動圧力の振幅（幅員方向、スパン  $l/4$  点）



(b) 変動圧力の変位に対する位相差

（幅員方向、スパン  $l/4$  点）

図-14 断面周りの変動圧力（同風速の場合）

3) ギャロッピング時変動圧力の特性

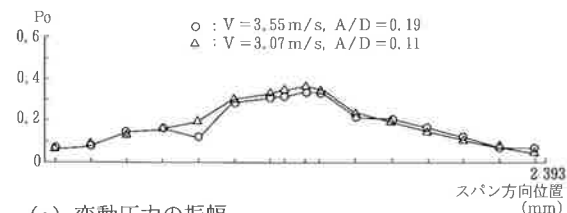
図-12、図-13より同風速の場合（振動振幅が異なる）、同振幅の場合（風速が異なる）も模型形状が同じものについては、風速、振動振幅が異なってもスパン方向に同じ分布形状になっている。一様断面について風速、振動振幅が異なるケースを比較したものを図-15 (a)、(b)に示す。風速と振動振幅が異なるにもかかわらず変動圧力の振幅と位相差はよく一致している。

振動振幅、風速にかかわらず変動圧力の振幅と変位に対する位相差が同じこと、また、ある振動振幅を超えると変動圧力の変位に対する位相差は正から負に変化し、変動圧力の振幅も増加の傾向が強くなることから、ギャロッピング時にはある  $B/D$  と風速の条件に対して基準となる振動振幅が存在し、着目位置の振動振幅とこの基準振動振幅の比により変動圧力の特性が変化するものと推察

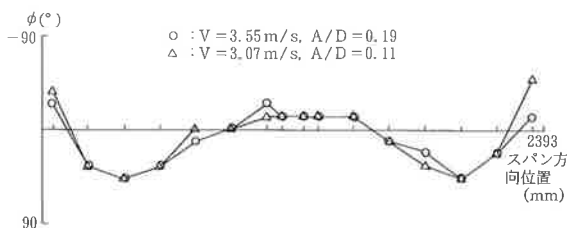
される。この考え方をもとに図-12のデータを使用して振動振幅と変動圧力の振幅、位相差の関係を調べたものを図-16に示す。

図-16 (a)、(b)の横軸は圧力測定点における振動振幅 ( $y'$ ) をその時の変動圧力の変位に対する位相差が $0^\circ$ となるスパン方向位置の振動振幅 ( $y_0$ : 基準振動振幅とする) で除した値とした。

図-16 (a) は変動圧力の振幅と  $y'/y_0$  の関係を示す。変動圧力の振幅は  $y'/y_0$  が1.0までは徐々に

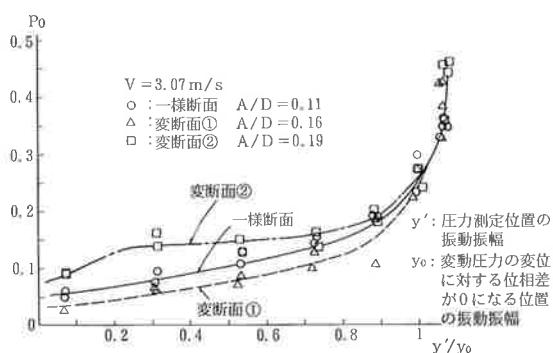


(a) 変動圧力の振幅

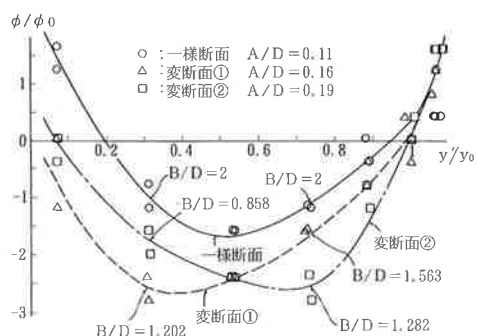


(b) 変動圧力の変位に対する位相差

図-15 一様断面スパン方向変動圧力



(a) 変動圧力の振幅と振動振幅の関係



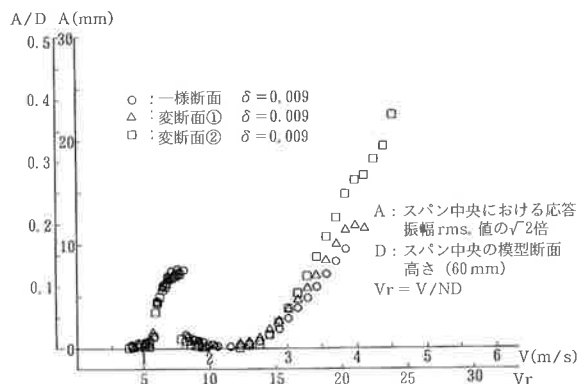
(b) 変動圧力の変位に対する位相差と振動振幅の関係

図-16 変動圧力と振動振幅の関係

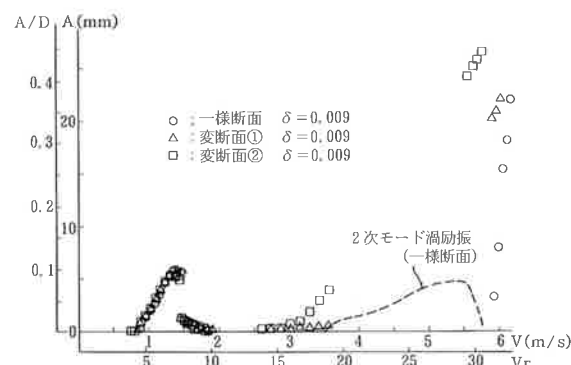
に増加しているが、1.0を超えると増加の傾向が強くなる。図-16 (b)において、縦軸は変位に対する変動圧力の位相差を図-9と同様  $\phi/\phi_0$  として表している。この図では  $y'/y_0$  が1.0より大きい位置で  $\phi/\phi_0$  は正 ( $\phi$  は負、 $\phi_0$  は常に負: 圧力の位相の進みを正としている) になっている。また一様断面と変断面を比較すると変動圧力の振幅と位相差の両方とも差が生じている。位相差については変断面では  $B/D = 1.2$  付近で  $\phi/\phi_0$  が最小となっている。渦励振時の  $\phi/\phi_0$  は一様断面と変断面では差が小さいという特性を示していたが (図-10 (b)), それに対してギャロッピング時の変動圧力はその振幅だけではなく、変位に対する位相差も変断面となることの影響のあることがわかる。

(6) 橋梁断面の応答比較、圧力特性

図-17に構造減衰 ( $\delta$ ) が0.009のときの橋梁断面の模型形状の違いによる応答 (たわみ1次モード) の比較図を示す。図-17 (a) は迎角  $\alpha = 5^\circ$ 、図-17 (b) は  $\alpha = 0^\circ$  の場合の応答図である。図-18は一様断面、変断面②について構造減衰を変えた場合の比較図である。これらの図から、橋梁断面の応答特性は矩形断面の特性とほぼ共通しているが、下記の点について異なった特性を有している。



(a) 橋梁断面:  $\alpha = 5^\circ$

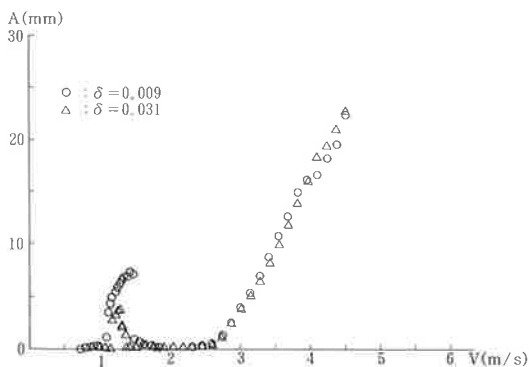


(b) 橋梁断面:  $\alpha = 0^\circ$

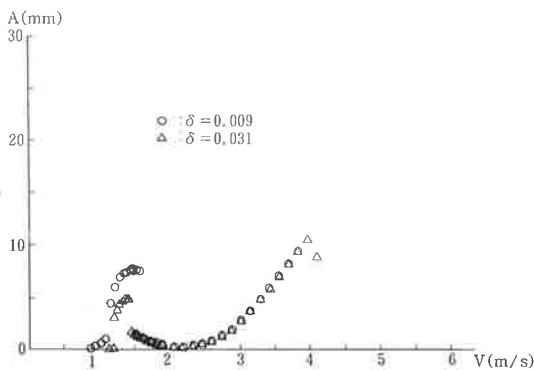
図-17 形状の違いによる応答の比較

- ① 渦励振時の振動振幅は模型形状による差はほとんど見られない。また、構造減衰を大きくした場合も矩形断面の場合とは異なり、模型形状による差は小さいのが特徴である。
- ② 迎角 $\alpha = 0^\circ$ の場合、1次モードのギャロッピングを抑えて2次モードの渦励振が発生した。矩形断面においても同じであったが、橋梁一様断面 $\alpha = 0^\circ$ の場合にはその影響が大きく現れている。ギャロッピングが渦励振によって抑えられるという既往の報告がないことから、今後さらに検討する必要があると考えられる。

図-19にスパン $l/4$ 点における橋梁デッキ面の渦励振時の変動圧力を示す。図-19(a)より変動圧力の振幅については、模型形状の違いにより分布形状は多少変化しているが大きな差はなく、矩形断面の場合(図-7(a))と異なっている。図-19(b)より、変動圧力の変位に対する位相差は矩形断面と同様、模型形状による差は小さい。変動圧力の振幅に大きな差がないことから、渦励振時の応答振幅に差がないことが推察される。



(a) 一様断面



(b) 変断面②

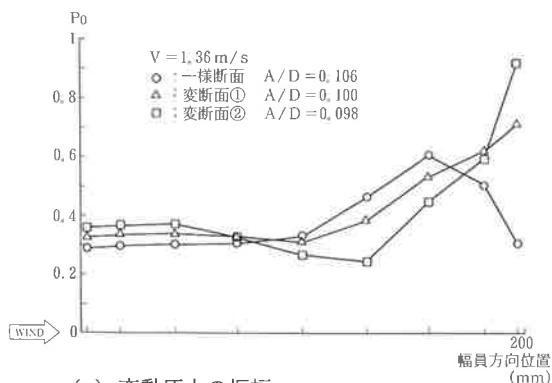
図-18 構造減衰の違いによる応答の比較  
(橋梁断面,  $\alpha = 5^\circ$ )

### 3. ま と め

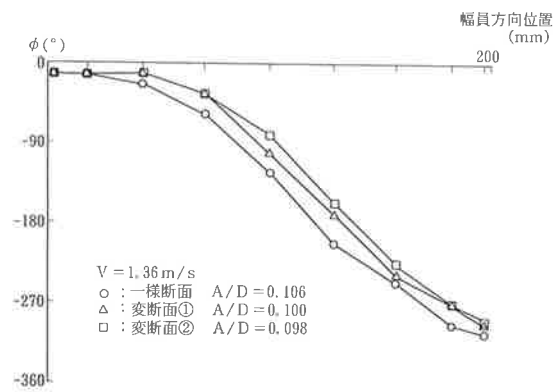
矩形断面と橋梁断面を有する変断面箱桁の応答比較と圧力測定を行った。その結果より得られた主な特性を以下に列記する。

#### 1) 応答比較

- ① 渦励振、ギャロッピングの発現する風速は一様断面、変断面の違いにかかわらず、ほぼ一致している。渦励振の振幅が最大となる風速の推定式<sup>3)</sup>によれば、幅員が同じ場合には桁高が変化しても同風速になると推定され、推定値は今回の実験結果とよく一致している。
- ② 渦励振時の最大振幅は、矩形断面では構造減衰による影響が大きく、橋梁断面では構造減衰による影響が小さい。構造減衰が渦励振時の最大振幅に与える影響は断面形状により一定ではない。
- ③ ギャロッピングについては、断面の高さ方向の変化率が大きくなるに従って同一風速における振動振幅が増加している。これは辺長比の違いによる。



(a) 変動圧力の振幅  
(幅員方向, スパン $l/4$ 点,  $\alpha = 5^\circ$ )



(b) 変動圧力の変位に対する位相差  
(幅員方向, スパン $l/4$ 点,  $\alpha = 5^\circ$ )

図-19 断面周りの変動圧力



いによる空気力特性の差の影響が大きいものと推察される。

- ④ 今回の実験のいくつかのケースで、1次モードのギャロッピングを抑えて2次モードの渦励振が発生するという現象が見られた。橋梁断面  $\alpha = 0^\circ$  においてその傾向が顕著であった。このことは既往の実験での報告がなく、今後検討する必要があると考えられる。

## 2) 渦励振時の変動圧力の特性

矩形一様断面では、変動圧力の振幅と変位に対する位相差は、相対迎角の関数として表現できるという結果が得られた。この結果は風速の違い、スパン方向の位置の違いにかかわらずほぼ同様であった。変断面では  $B/D$  大きくなることにより変動圧力の振幅は低下するが位相差への影響は小さい。

## 3) ギャロッピング時の変動圧力の特性

模型形状が同じ時、振動振幅、風速にかかわらず変動圧力の無次元化振幅と変位に対する位相差が同じこと。また、ある振動振幅を超えると変動圧力の位位に対する位相差は正から負に変化し、変動圧力の振幅も増加の傾向が強くなることから、ギャロッピング時には、ある  $B/D$  と風速の条件に対して基準となる振動振幅が存在し、この基準の振動振幅からの差により変動圧力の特性が変化するものと考えられる。また  $B/D$  の違いにより、変動圧力の振幅と変位に対する位相差の両方が影響を受けるものと推察される。

## あ と が き

変断面となることの空気応答現象に及ぼす影響とその時の圧力特性に関して検討を行い、これらが変断面という模型形状だけでなく、断面形状（矩形や橋梁断面）や振動現象の違いにより影響のしかたが

異なることがわかった。

圧力測定の結果により、変断面となることの影響は辺長比による影響が大きいものと推察される。3次元構造物では橋軸方向流れなどの3次元的な流れが存在するといわれており、これらが応答や圧力に及ぼす影響についても調査が必要であると考え。今後、2次元模型による応答試験などによりこれらの点について検討して行く予定である。

最後に、本研究を進めるにあたり、終始懇切な御助言、御指導を頂いた立命館大学小林紘士教授に感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 細見雅生, 木場和義: 風洞実験設備の紹介, 駒井技報 Vol.9, 1990
- 2) 木場和義, 細見雅生: 風洞実験設備の紹介 (その2), 駒井技報 Vol.10, 1991
- 3) KOMATU S., KOBAYASHI H. : Vortex - Induced Oscillation of Bluff Cylinders, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, PP335 - 362 1980. 6.
- 4) 宮崎正男: 箱桁断面の空力不安定振動の制振対策と非定常圧力特性, 第7回風工学シンポジウム, 1982.
- 5) 宮崎正男, 宮田利雄: 格子乱流中の角柱の応答特性に関する二、三の考察, 第33回土木学会年次学術講演会概要集, 1978
- 6) 武田勝昭, 藤澤伸光, 園部好洋: 基本矩形断面の鉛直たわみ応答振幅 - 2、3次元風洞実験結果の相互比較, 第38回土木学会年次学術講演会概要集, 1983
- 7) 小林紘士: 風による長大橋の限定振動に関する研究, 大阪大学博士学位論文, 1978