

長方形断面橋桁の渦励振に及ぼす

桁高変化，風向角の影響

細見 雅生¹⁾ 小川 路加²⁾

著者らは長方形断面橋桁の渦励振に着目し，桁高変化，風向角の影響を取り上げ，以前から実験的研究を進めてきた。これらの研究の成果として長方形断面橋桁の風向角，桁高変化の影響を考慮した応答の推定がある程度可能になった。しかし，どのような要因が空力応答に影響を及ぼしているのか，そのメカニズムについては不明な点が多い。これらの問題を検討するため，3次元模型を強制加振した時の模型表面圧力の測定と可視化を行った。模型表面の変動圧力の測定結果から，模型の上面と下面で気流方向とは異なる流れの影響が表れていることが考えられ，このことは可視化によっても確認できた。

まえがき

橋梁の風洞試験は，主に橋軸直角方向の気流中で行われている。これは静的，動的な風による効果が橋軸直角方向の風が作用する時に最大もしくはそれに近いものになっているという理由からである。しかし，より合理的に橋桁の耐風性を評価するためには風向を有する風による動的応答現象を定量的に評価することが重要である。また，耐風安定性が問題となる比較的長支間の桁橋では，変断面箱桁が使用される場合が多く，その3次元形状が空力応答に及ぼす影響についても考慮する必要がある。

著者らは長方形断面橋の渦励振に着目し，桁高変化，風向角の影響を取り上げ，以前から実験的研究を進めてきた^{1) 2) 3)}。これらの研究の成果として，長方形断面橋桁の風向角，桁高変化の影響を考慮した応答の推定がある程度可能になった。しかし，3次元流のどのような要因が空力応答に影響を及ぼしているのか，そのメカニズムについては不明な点が多い。今回，これらの問題をさらに検討するため，気流中の3次元模型を強制加振した時の模型表面圧力の測定と可視化を行った。また，弾性模型の外形材のブロック間のスリ

ットが応答に及ぼす影響を調べるための実験も併せて行った。ここでは，これらの結果の一部を報告する。

1. 実験内容

3径間連続梁を取り扱うが，風洞実験では模型の中央径間は弾性模型として，側径間は剛体模型として製作してある。中央径間の弾性模型部分はアルミ製の剛性棒と檜製の外形材で構成している。模型側面を図-1に示す。模型は一様断面と橋軸方向に桁高が変化する変断面の2種類である。両模型とも中央径間中央の断面の幅 B と高さ D の比は $B/D=2$ である。中間支点位置で B/D は変断面では $1/1.5$ にしている。弾性模型のブロック間の隙間は 1mm であり，スリット間のシールは施していない。

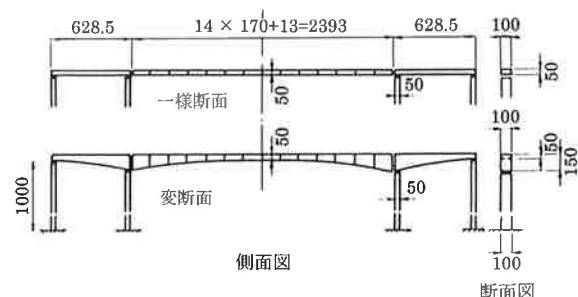


図-1 模型形状

1) 技術開発室次長 2) 橋梁設計部設計二課

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。模型を吹き出し口から14mの位置にあるターンテーブル上に置き、一様流(乱れの強さ0.9%以下)を作用させた。ターンテーブルを回転することにより模型を回転させ風向角を与えた。模型の設置状況を図-2に示す。

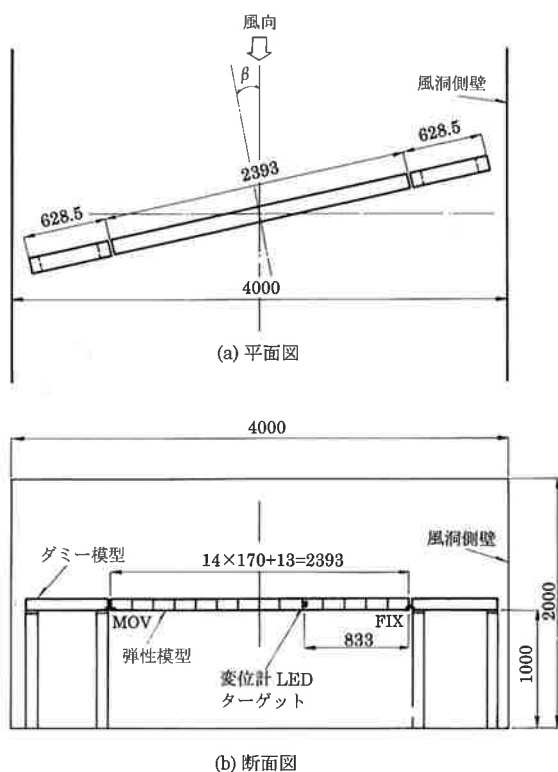


図-2 模型設備状況

実験はたわみ1次モードの渦励振に着目して行った。模型に一様流を作用させると同時に上下方向に一定振幅で強制加振し、その時の表面圧力を測定する。模型の加振振動数は $f=3.475\text{Hz}$ である。実験時の風速と振幅の条件は渦励振の応答振幅が最大となる風速,振幅は $A/B=0.025, 0.050,$

0.075 (A : 中央径間中央位置の加振振幅, B : 模型の幅)の3種類とした。表面圧力測定位置を図-3に示す。中央径間中央付近の断面周り(模型の上流側面, 上面, および後流側面), 橋軸方向に9ヶ所位置を変えて計測する。測定点は全部で41点である。圧力測定には微差圧計(セトラ社モデル239)を使用し, スキャニバルブによって測定圧力孔の切り替えを行っている。変位測定には, ポジションセンサー(浜松フォトニクス社製)を使用する。図-2に示す位置の変位をモードの腹の位置の変位に補正してデータを整理した。片振幅 A の計算には応答波形がほとんどのケースで正弦的であったため, RMS 値の $\sqrt{2}$ 倍を用いている。振幅の無次元化に使用する模型の代表長 B は模型の幅を使用している。また, 模型表面の圧力測定結果と模型周辺の流れの関係を調べるためスモークワイヤー法によって加振時の模型周りの流れの様子を可視化する。また, スリットの影響を調べるため, 一様断面模型を用いてスリットにシールを施したものと施していないものの応答比較を行った。応答試験条件を表-1に示す。構造減衰はできるだけ大きな応答を得るため, ダンパーを用いないでできるだけ小さい値, 対数減衰率 $\delta=0.01$ に設定した。この場合スクルートン数を以下に示す。

$$Sc = \delta m / \{ (1/2) \rho B D \} = 5.57$$

Sc : スクルートン数

表-1 実験条件(中央径間だけについて)

応答試験	一様断面	シールなし シールあり	弾性模型部分の全重量: kgf (等価質量 m : $\text{kgf}\cdot\text{sec}^2/\text{m}^2$)	固有振動数 f (Hz)	構造減衰 (対数減衰率: δ)
					4.081 (0.174)
		4.081 (0.174)	3.504	0.01	

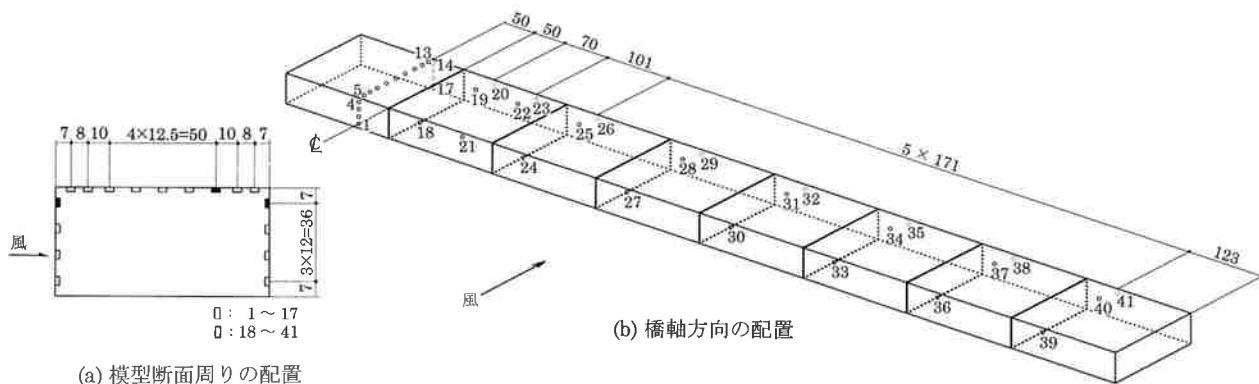


図-3 圧力孔の位置

ρ : 空気密度

m : 等価質量

構造減衰は振幅で若干変化する。上記の δ は $A/B = 0.05$ のときの値である。

2. 実験結果

スリットの影響を調べるための一様断面模型を用いた応答試験の結果を図-4, 5に示す。スリットにシール材を施していない応答試験は以前にも行われており¹⁾、今回の実験と同様な結果が得られている。

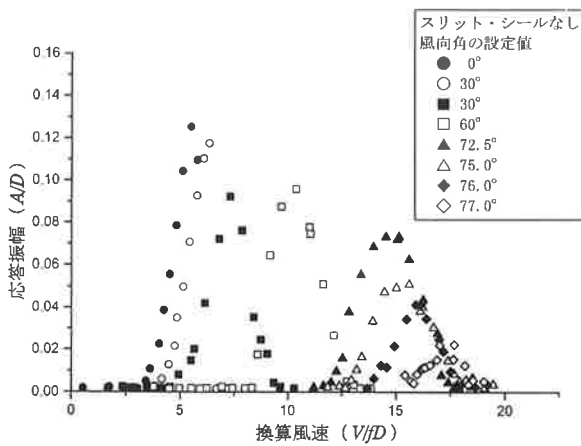


図-4 一様断面図の応答図

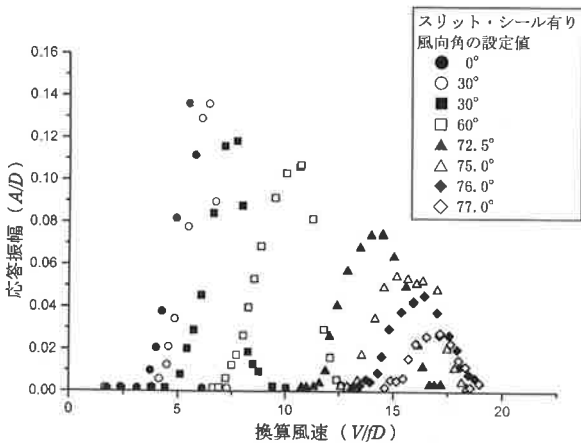


図-5 変断面の応答図

渦励振は風向角が77°まで発生する。スリットにシール材を施した場合、渦励振の発生する風向角の上限、渦励振発生の風速域および応答図の形状は同様であるが、応答振幅が若干大きくなる傾向(2~22%)である。また、風向角によって、応答振幅の差は異なる。このことから、渦励振を生じさせる空気力の発生そのものには影響は与えないものと考えられる。しかし、スリットがある

ことにより、空気力の総和が若干減少しているものと推察される。

次に、変動圧力の測定結果について述べる。渦励振の応答は、模型の固有振動数に近い振動数の調和的な振動であることが知られている¹⁾。渦励振に着目するとき、渦励振を起こす外力となる圧力について、模型と同周期の成分のみについて考えればよい。このことから変動圧力を変位と同周期の変動圧力の振幅と変位に対する位相差で評価することとする。変動圧力係数のうち、変位と同周期の成分の標準偏差 σ_{cp} は変位と圧力の相互相関関数、 $C_{py}(\tau)$ の最大値から、変位に対する位相差 ϕ は $C_{py}(\tau)$ の最大値が生じている時間のずれ量 $\Delta\tau$ から計算する(図-6)。

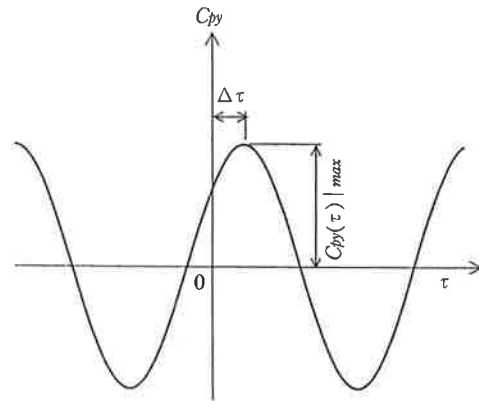


図-6 変動圧力と変位の相関関係

$$\sigma_{cp} = \frac{C_{py}|_{max}}{\sigma_y} / [(1/2)\rho(V \cdot \cos \beta)^2] \quad (1)$$

$$\phi = \frac{\Delta\tau}{T_0} \times 360^\circ \quad (2)$$

ここに、 $C_{py}(\tau)$ は相互相関関数、 σ_y は変位の標準偏差、 ρ は空気密度、 V は風速、 T_0 は模型の振動周期である。渦励振の振幅が最大となる風速が β を変化させるにもなって、 $V \cdot \cos \beta$ だけ変化することを考慮し、変動圧力の振幅の無次元化に使用する風速は $V \cdot \cos \beta$ を使用することにする。 σ_{cp} の $\sqrt{2}$ 倍は変動圧力のうち模型と同じ周期の成分の振幅に相当する。以下では簡単のため標準偏差 σ_{cp} を「変動圧力の振幅」と呼ぶこととする。また、変動圧力の変位に対する位相差 ϕ を「変動圧力の位相差」と呼ぶこととする。

図-7~14に模型表面の変動圧力の振幅と変位に対する位相差を整理した結果を示す。模型の変位は鉛直下向きを正とし、圧力は圧縮を正とする。 ϕ は圧力の位相の進みを正とする。各図で(a),

(b)は模型断面周りの変動圧力の振幅と位相差の分布、(c),(d)は橋軸方向の変動圧力の振幅と位相差の分布の結果である。

模型断面周り0mmの位置は上流側面下端、50mmは上流側面上端、150mmは後流側面上端、200mmは後流側面下端にあたる。橋軸方向位置0mmの位置は中央径間の中間支点、1196.5mmの位置が中央径間中央にあたる。各図の実験条件を表-2に示す。

表-2 各図の実験条件

図番	断面	風向角 β (°)	加振振幅 A/B	換算風速 $\bar{V} = \frac{V}{\sqrt{B}}$	備考 (実験番号)
図-7	一樣断面	0	0.024	2.50	928
図-8	一樣断面	0	0.046	2.41	929
図-9	一樣断面	60	0.026	5.40	943
図-10	一樣断面	70	0.025	7.96	940
図-11	変断面	0	0.025	2.47	931
図-12	変断面	60	0.025	5.08	934
図-13	変断面	70	0.024	7.02	937
図-14	$B/D=4$, 一樣断面	0	0.048	2.64	947

図-7, 8は一樣断面、 $\beta = 0^\circ$ の変動圧力の測定結果である。著者らは模型上面については同様な変動圧力の測定を行っており、本報告における測定結果と同様な結果が得られている。本報告では、模型上流側面と後流側面の変動圧力の振幅および位相についても測定を行っている。上流側面、下流側面の変動圧力の振幅は模型上面より小さい。模型側面の(1/2)D位置では特に変動圧力振幅は小さくなっている。また、上流側面の上側と上面の上流側の変動圧力の位相、後流側面の上側と上面の後流側の変動圧力の位相はほぼ同じ値になる。

気流に直角な側面の変動圧力は上面側と下面側で約 180° 位相の差がある。模型の上面と下面では 180° 位相がずれた流れが生じていることから、位相測定の信頼性が確認できる。

図-9, 10は一樣断面で $\beta = 60^\circ, 70^\circ$ の場合の変動圧力の測定結果である。風向角を有する風を作用させた場合、支間中央部の変動圧力は $\beta = 0^\circ$ と比較して、その特性に大きな差はない。しかし、橋軸方向の模型上面の変動圧力の振幅の分布(図-9(c), 図-10(c))が $\beta = 0^\circ$ の場合(図-7(c))と大きく異なっている。

風向角を有する風が作用する場合、模型上面の変動圧力の振幅は支点部に近づいても支間部と同

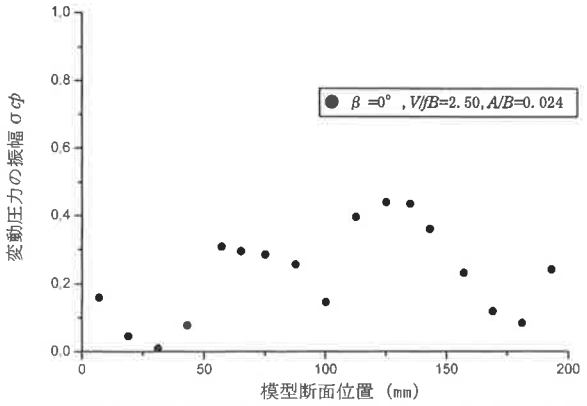
程度か、支間部以上の値である。 $\beta = 60^\circ$ では位相についても模型に励振力($\phi = 180^\circ \sim 360^\circ$ の範囲)として作用する $\phi \approx 270^\circ$ 付近に集中している。このことから模型上側側面部に気流方向とは異なる流れの影響が表れていることが考えられる。 $\beta = 70^\circ$ では変動圧力の振幅の測定結果にバラツキが大きい。 $\beta = 70^\circ$ は渦励振が発生しなくなる $\beta = 78^\circ$ ²⁾に近いことから、渦励振を発生させる空気が徐々に不安定になっているものと推察される。

図-11, 12, 13は変断面で $\beta = 0^\circ, 60^\circ, 70^\circ$ の場合の変動圧力の測定結果である。 $\beta = 0^\circ$ の変動圧力の特性は、以前に著者らが行った結果¹⁾とよく一致している。橋軸方向の模型上面の変動圧力の振幅が支点に近づくに従い、急激に小さくなる点に特徴がある。 $\beta = 60^\circ, 70^\circ$ の場合、変動圧力の振幅は一樣断面と同様に支点部付近においても支間中央部と同程度あるいはそれ以上の値になっている。 $\beta = 70^\circ$ の場合、変動圧力の位相は、支間中央付近でバラツキが大きく、励振力として作用しない表面圧力の測定位置もある。

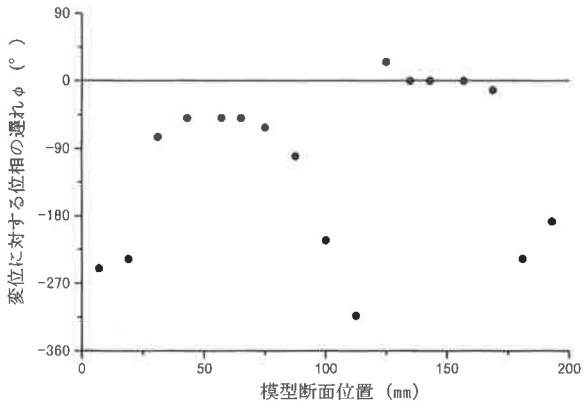
以上の結果より、長方形断面模型に風向角を有する風が作用する場合、気流方向とは異なる流れの影響が表れていることが考えられる。

長方形断面模型に風向角を有する風が作用する場合の可視化を写真-1(a)~(d)に示す。写真は模型上面前縁部に沿わせて模型軸方向に熱線を配置し、模型上面側より撮影したものである。一樣断面において、熱線配置位置の後流側で模型上面に気流方向とは異なるスモークの流れが見られる。変断面においても明確ではないが一樣断面と同様に模型上面にスモークの流れが見られる。このことから風向角の影響により気流方向とは異なる流れの影響が表れていることが考えられる。

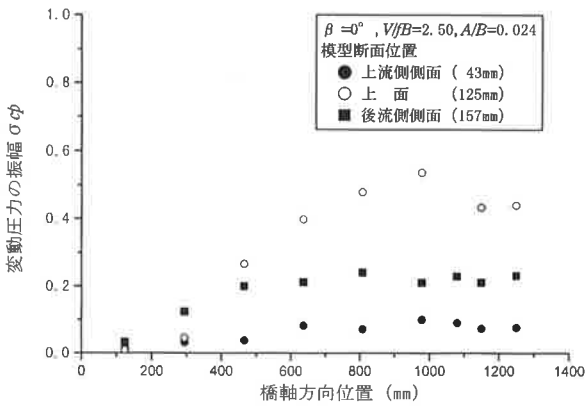
図-14は $B/D=4$ と $B/D=2$ の模型表面の圧力の差を調べるため、 $B/D=2$ の一樣断面の後方に断面形状が $B/D=4$ となるよう発砲スチロールを取り付けて表面圧力を測定したものである(付加した発砲スチロール部では表面圧力を測定していない)。図-8が $B/D=2$ 一樣断面のほぼ同じ実験条件で表面圧力を測定した結果である。模型上面の変動圧力の振幅、位相ともに B/D の差にかかわらず大きな差はない。上面の後流側で若干圧力振幅が低下している程度である。 $B/D=4$ と $B/D=2$ では模型後流域の流れの状態は異なると



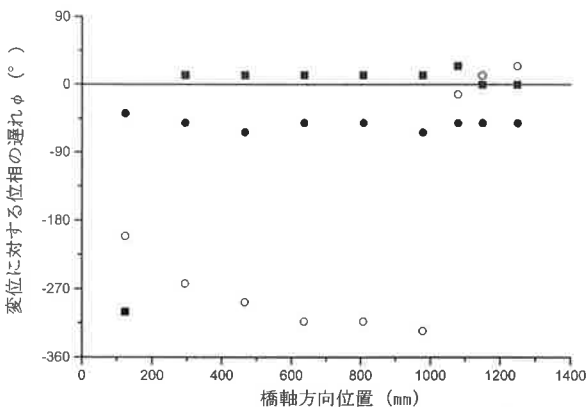
(a) 模型断面周りに配置した圧力孔の変動圧力の振幅



(b) 模型断面周りに配置した圧力孔の変動圧力の位相

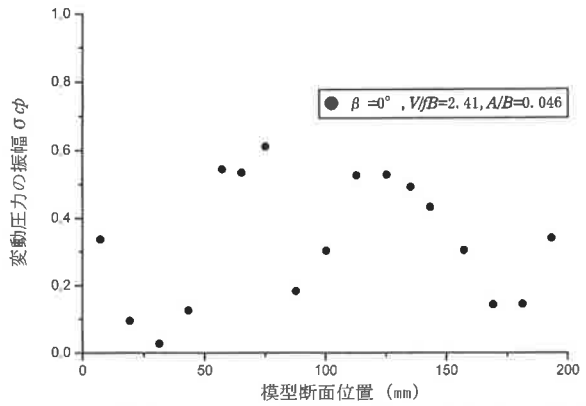


(c) 橋軸方向に配置した圧力孔の変動圧力の振幅

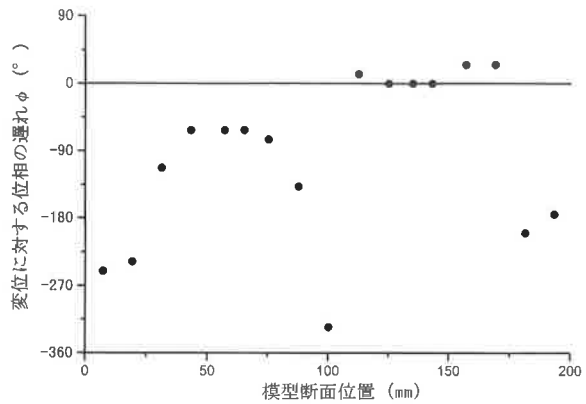


(d) 橋軸方向に配置した圧力孔の変動圧力の位相

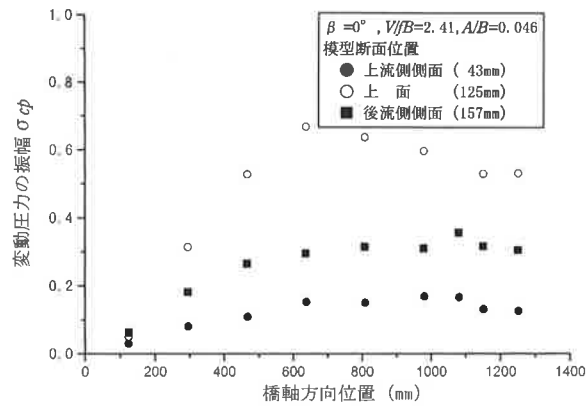
図-7 変動圧力の振幅と位相
(一様断面 $\beta=0^\circ$, $A/B=0.024$)



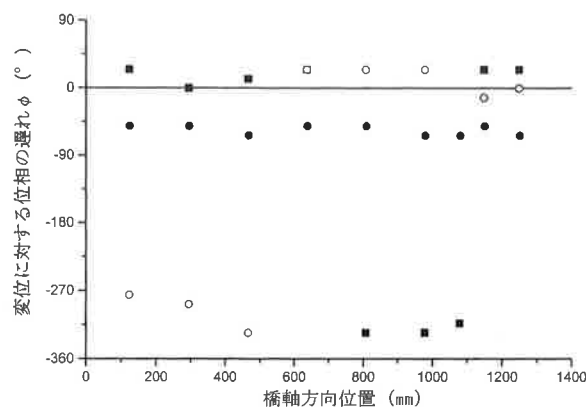
(a) 模型断面周りに配置した圧力孔の変動圧力の振幅



(b) 模型断面周りに配置した圧力孔の変動圧力の位相

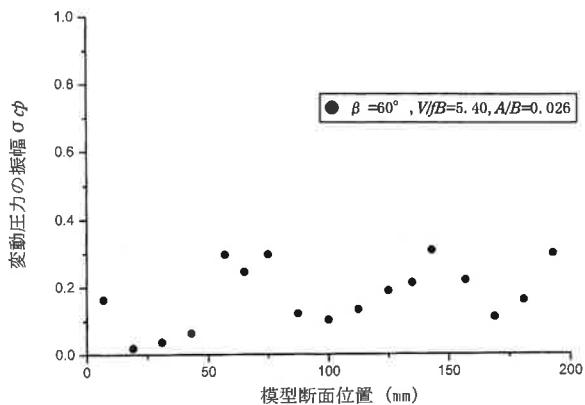


(c) 橋軸方向に配置した圧力孔の変動圧力の振幅

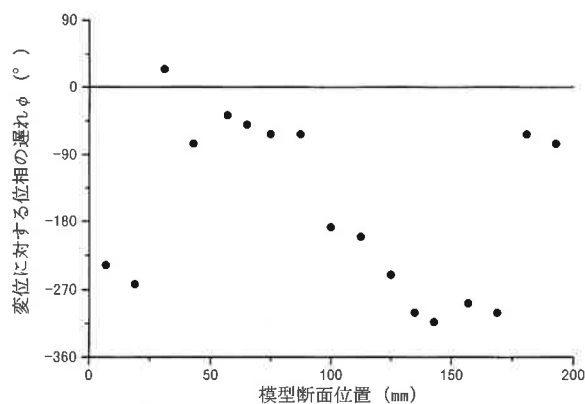


(d) 橋軸方向に配置した圧力孔の変動圧力の位相

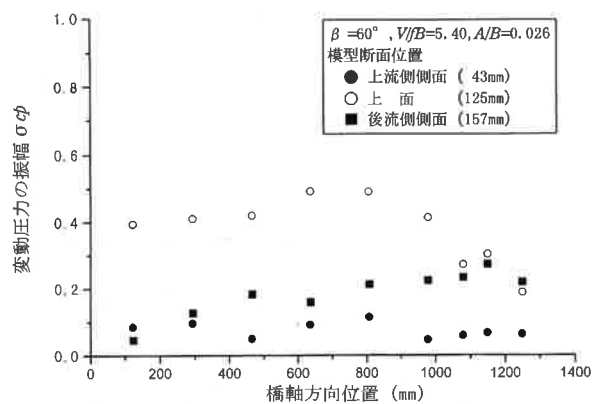
図-8 変動圧力の振幅と位相
(一様断面 $\beta=0^\circ$, $A/B=0.046$)



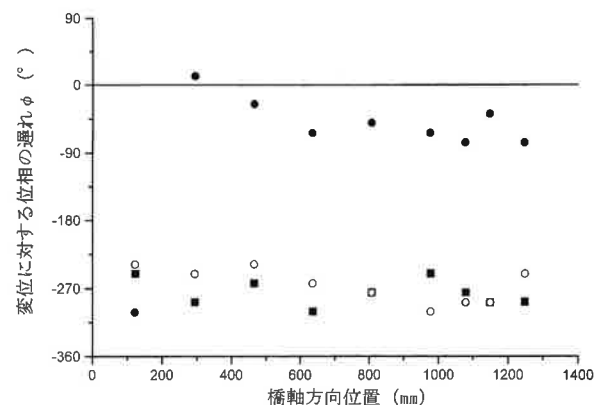
(a) 模型断面周りに配置した圧力孔の変動圧力の振幅



(b) 模型断面周りに配置した圧力孔の変動圧力の位相

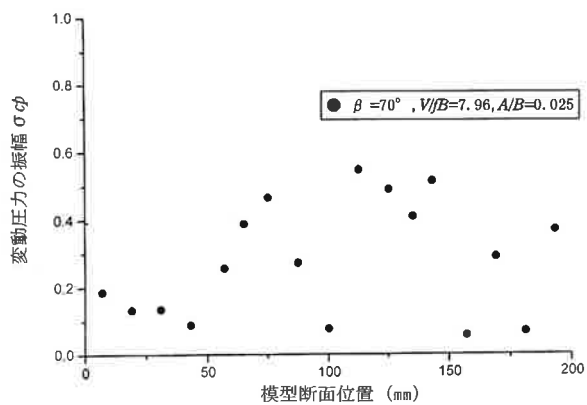


(c) 橋軸方向に配置した圧力孔の変動圧力の振幅

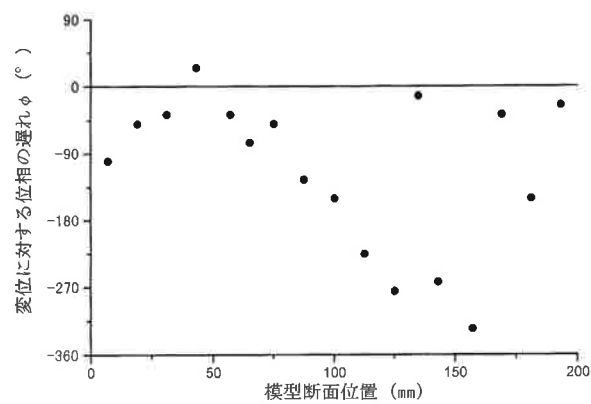


(d) 橋軸方向に配置した圧力孔の変動圧力の位相

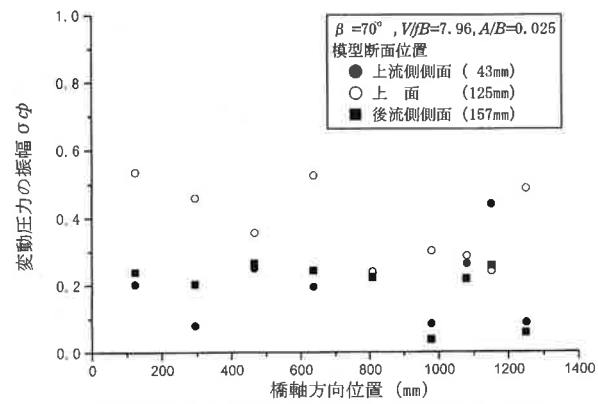
図-9 変動圧力の振幅と位相
(一様断面 $\beta = 60^\circ$, $A/B = 0.026$)



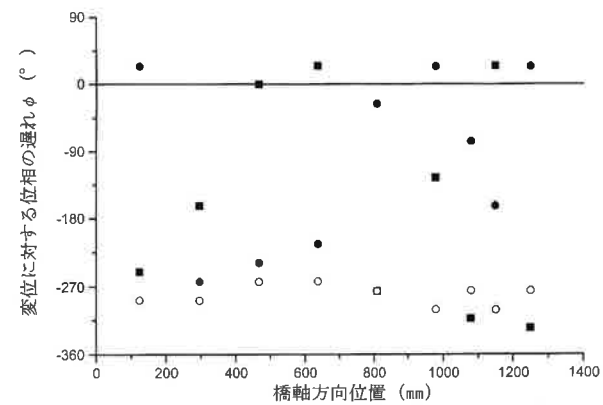
(a) 模型断面周りに配置した圧力孔の変動圧力の振幅



(b) 模型断面周りに配置した圧力孔の変動圧力の位相

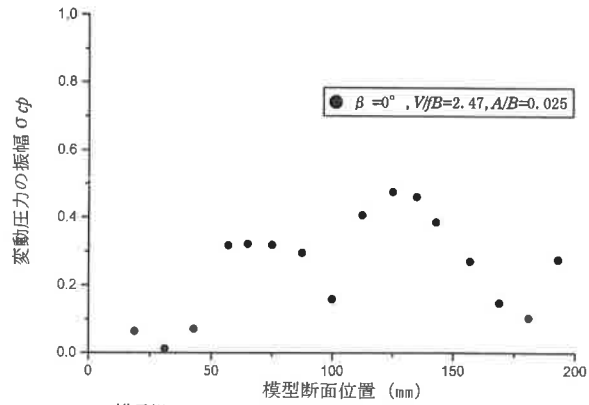


(c) 橋軸方向に配置した圧力孔の変動圧力の振幅

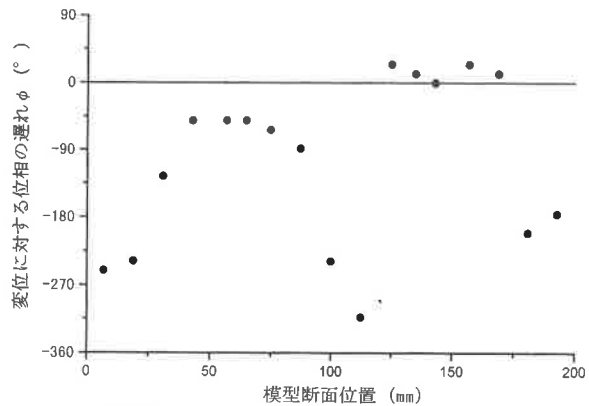


(d) 橋軸方向に配置した圧力孔の変動圧力の位相

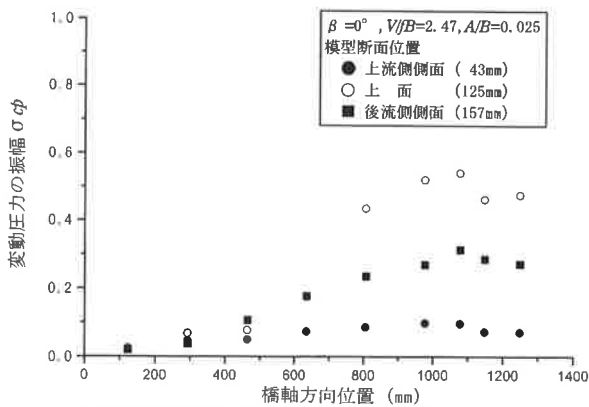
図-10 変動圧力の振幅と位相
(一様断面 $\beta = 70^\circ$, $A/B = 0.026$)



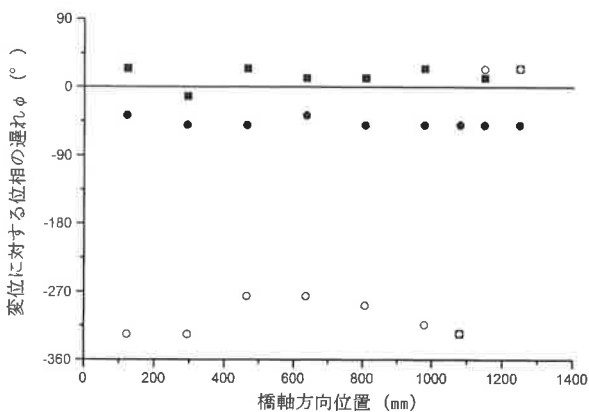
(a) 模型断面周りに配置した圧力孔の変動圧力の振幅



(b) 模型断面周りに配置した圧力孔の変動圧力の位相

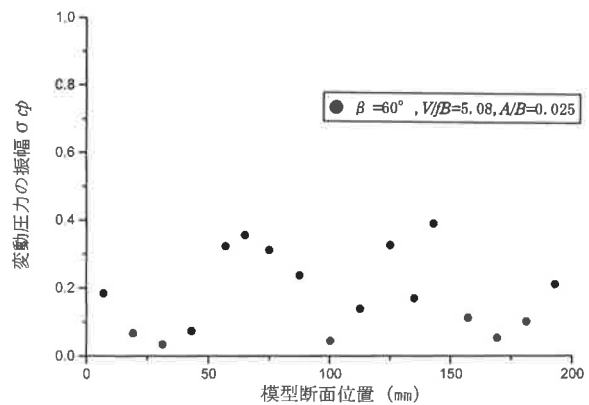


(c) 橋軸方向に配置した圧力孔の変動圧力の振幅

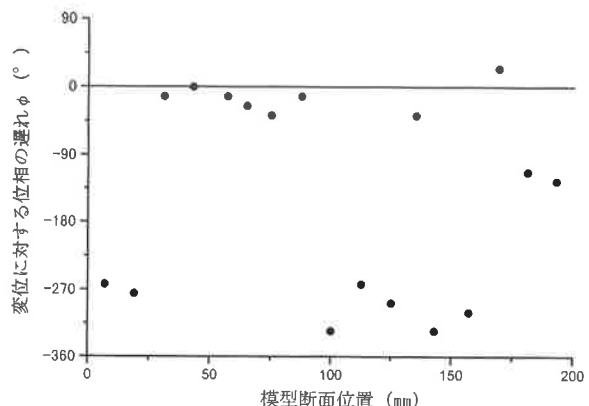


(d) 橋軸方向に配置した圧力孔の変動圧力の位相

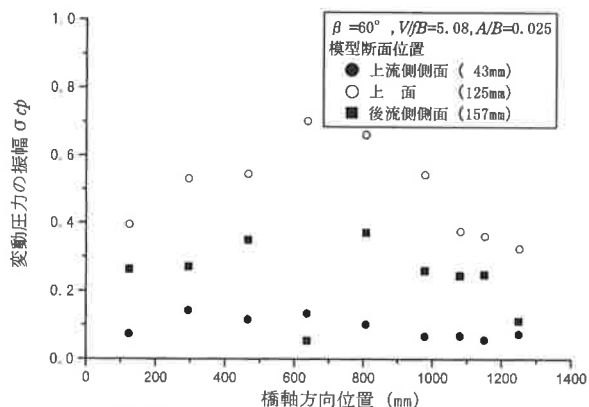
図-11 変動圧力の振幅と位相
(変断面 $\beta = 0^\circ$, $A/B = 0.025$)



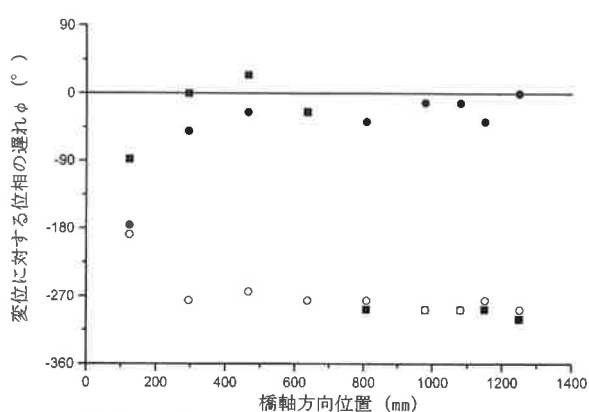
(a) 模型断面周りに配置した圧力孔の変動圧力の振幅



(b) 模型断面周りに配置した圧力孔の変動圧力の位相

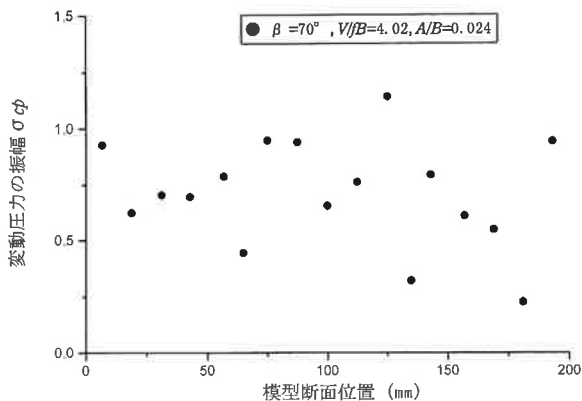


(c) 橋軸方向に配置した圧力孔の変動圧力の振幅

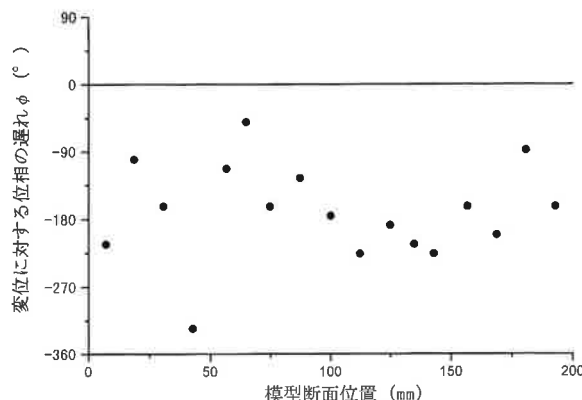


(d) 橋軸方向に配置した圧力孔の変動圧力の位相

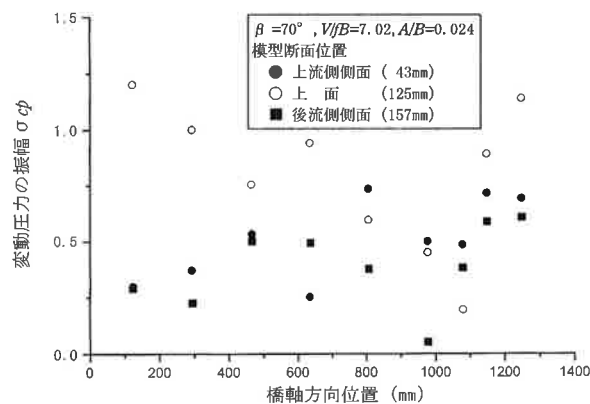
図-12 変動圧力の振幅と位相
(変断面 $\beta = 60^\circ$, $A/B = 0.025$)



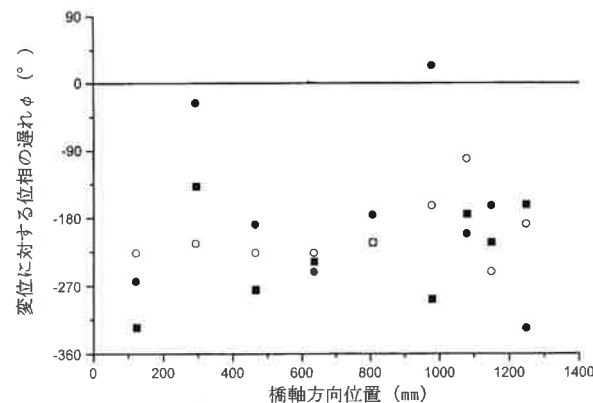
(a) 模型断面周りに配置した圧力孔の変動圧力の振幅



(b) 模型断面周りに配置した圧力孔の変動圧力の位相

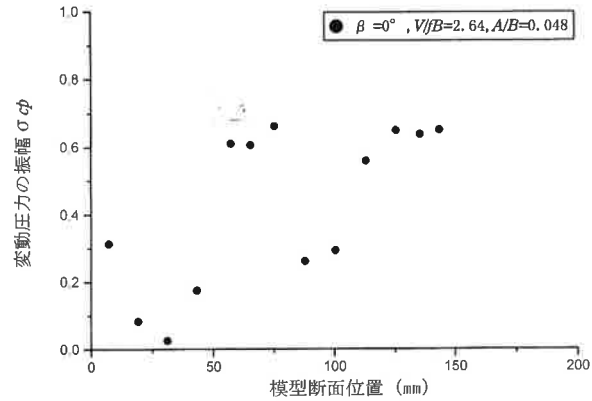


(c) 橋軸方向に配置した圧力孔の変動圧力の振幅

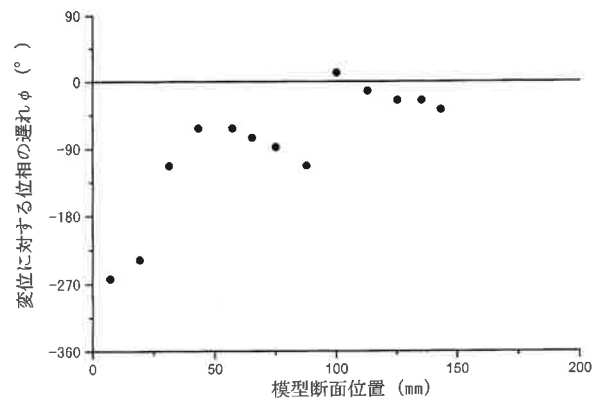


(d) 橋軸方向に配置した圧力孔の変動圧力の位相

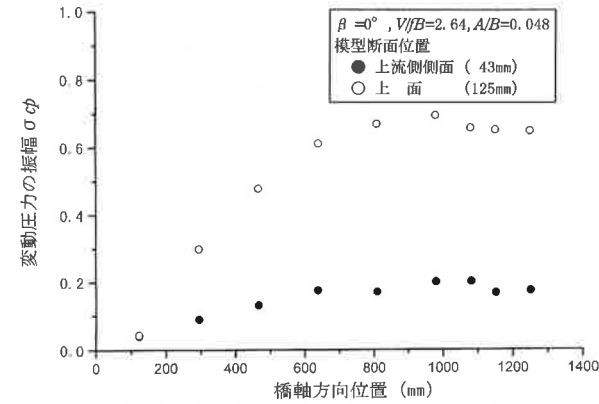
図-13 変動圧力の振幅と位相
(変断面 $\beta = 70^\circ$, $A/B = 0.024$)



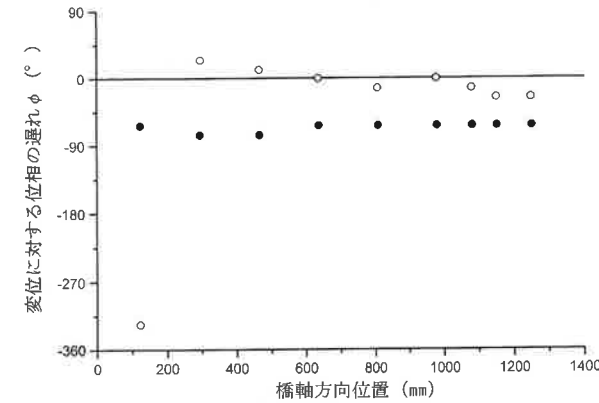
(a) 模型断面周りに配置した圧力孔の変動圧力の振幅



(b) 模型断面周りに配置した圧力孔の変動圧力の位相



(c) 橋軸方向に配置した圧力孔の変動圧力の振幅

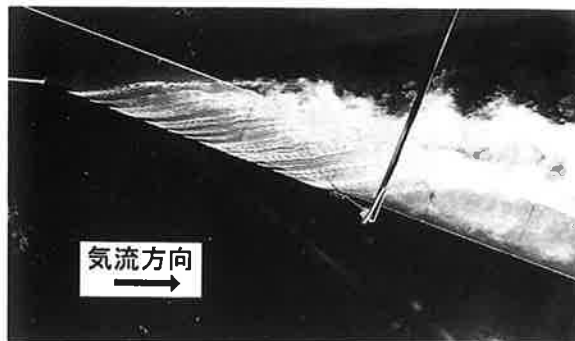


(d) 橋軸方向に配置した圧力孔の変動圧力の位相

図-14 変動圧力の振幅と位相
($B/D = 4$, 一様断面 $\beta = 0^\circ$, $A/B = 0.048$)



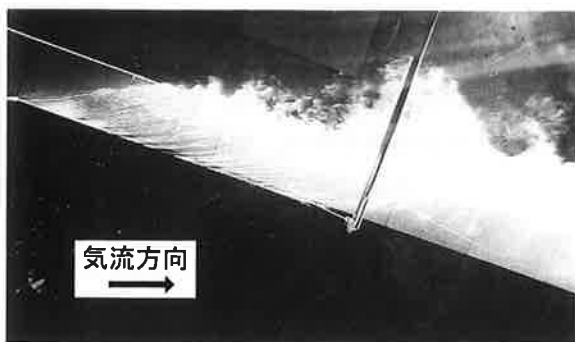
(a) 一様断面, $\beta = 60^\circ$, $V/fB=5.4$, $A/B=0.025$



(b) 一様断面, $\beta = 70^\circ$, $V/fB=8.0$, $A/B=0.025$



(c) 変断面, $\beta = 60^\circ$, $V/fB=5.1$, $A/B=0.025$



(d) 変断面, $\beta = 70^\circ$, $V/fB=7.0$, $A/B=0.025$

写真-1 模型上側側面の可視化

考えられ、上記の測定結果から、模型後流域の流れが模型上面あるいは、下面の変動圧力の振幅と位相に与える影響は小さいものと考えられる。

まとめ

長方形断面橋桁の渦励振に及ぼす桁高変化風向角の影響について、模型表面の変動圧力の面から検討を中心に行った。以下にその結果をまとめて列記する。

- ①長方形断面橋桁の渦励振の振幅が最大になる風速において、風向角を有する風が作用する場合の模型上面の変動圧力の他に上流側面、後流側面の変動圧力の振幅および位相の特性が明らかになった。
- ②変動圧力の測定の結果、長方形断面模型に風向角を有する風が作用する場合、模型上面あるいは下面で気流方向とは異なる流れの影響が表れていることが考えられる。このことは可視化によっても確認できた。
- ③弾性模型の外形材間のスリットの影響を応答試験により確認した。その結果、渦励振を生じさせる空気力の発生そのものには影響は与

えないものと考えられる。スリットがあることにより、空気力の総和が若干減少しているものと推察される。

本報告では主に定性的な面から考察を行った。今後さらに変動圧力に及ぼす応答振幅の影響など、定量的な検討を行っていくことを考えており、次の機会に報告を行いたい。

最後に本研究を進めるにあたり、立命館大学小林紘士教授の御指導を頂いた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 細見雅生・木場和義：変断面3次元模型の風による応答および圧力特性，駒井技報，Vol.11，1992。
- 2) 細見雅生・木場和義：長方形断面橋桁の渦励振，ギャロッピングに対する風向角の影響，駒井技報，Vol.13，1994。
- 3) 新田吉伸・細見雅生：2次元長方形断面模型の表面圧力と応答振幅の推定，駒井技報，Vol.15，1996。