

充腹断面橋梁の渦励振応答に及ぼす 斜風の影響に関する考察

EFFECTS OF HORIZONTALLY INCLINED WIND ON VORTEX INDUCED OSCILLATIONS OF RECTANGULAR CYLINDERS

山本裕一*

宇都宮英彦**

長尾文明***

by Yuichi YAMAMOTO, Hidehiko UTSUNOMIYA and Fumiaki NAGAO

The effects of inclined wind in horizontal plane on the response of vortex induced oscillations of rectangular cylinders were discussed by the observations of flow patterns around those sections in wind tunnel tests. As the result, the effect of inclined wind could be represented by the apparent increase of width/depth ratio B/D . The spanwise flow which was observed behind a inclined circular cylinder and had a strong effect on the response occurred also behind the sections at rest, but it disappeared behind the oscillating sections. Accordingly, the spanwise flow had no effect on the dynamic response of these models.

1. まえがき

橋梁の風による振動現象や耐風安定性の検討のために、主として風洞実験が実施されるが、それには現在の橋梁の多様化に伴う様々な状況を設定した実験が要求されるべきである。この様な個々の橋梁の置かれた固有の状況に関係する要因について、いくつかの研究報告^{1)~4)}がなされているが、ここでは、水平面内で橋軸直角方向から傾いた風(斜風)が作用した場合の渦励振応答に及ぼす影響について検討する。

一般に空気力学的影響が最も顕著であるとの考えから、風洞実験は橋軸直交流に対して行なわれるのが現状であり、この斜風は鋭敏な風洞実験結果を緩和し、実橋が揺れにくいことに対する原因の一つとして語られることが多い。しかし、橋梁主桁に斜風が作用した場合、静的空気力の抗力成分を減少させる効果があることは容易に推察できるが、揚力あるいは渦励振の応答振幅についての評価は困難である。直観的には渦励振に対する斜風の影響として、気流が橋軸直角方向から偏るため、見かけの幅員の増加に伴う断面の幾何学的形状の変化による影響が考えられる。また、傾斜円柱の空力不安定振動がその背後に発生する軸方向流れに起因するものであるという報告⁵⁾もなされており、斜風の影響としていくつかの要素が作用するものと思われる。

* 工修 IHI 橋梁事業部 (235 横浜市磯子区新中原町 1)

** 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科 (770 徳島市南常三島町2-1)

*** 工博 徳島大学講師 工学部建設工学科 (770 徳島市南常三島町2-1)

ここでは渦励振応答に対する斜風の影響を検討するために単純モデル（矩形断面）を用いて風洞実験を行ない、特に気流の水平偏角による見かけの桁高比の変化に着目して、渦励振の応答変化ならびに断面周りの流れから渦励振に及ぼす斜風の影響を検討する。

2. 斜風モデルの渦励振応答特性

2-1. 実験の概要

斜風による渦励振応答の変化を調査するために自由振動法にて実験を行なった。モデル断面は、図1に示す桁高比 $B/D=2.0$ 、 2.5 、 6.0 の3タイプを使用し、風洞気流に対して図2のようにモデルを設置することにより斜風（水平偏角 β ）を設定した。風洞は、徳島大学工学部土木設計学研究室の吸込み式風洞（測定部； $0.95\text{m} \times 1.0\text{m} \times 2.0\text{m}$ 、最大風速； 14m/s ）を使用した。なお、本実験では水平偏角を設定する関係からたわみ振動に限定して、一様流（乱れの強さ 1.0% 以内）において検討した。

また、水平偏角の変化に伴うモデルの暴露長の増加に対し、単位長さ当たり質量を一定に保つように各モデルのスクリーン数（ $Sc = 2m\delta / \rho BD$ ）を一致させることにより応答の比較検討を行なう。実験に際しては構造減衰をオイル・ダッシュポットにより一定に調整した。各モデルの構造諸元は表1に示す。

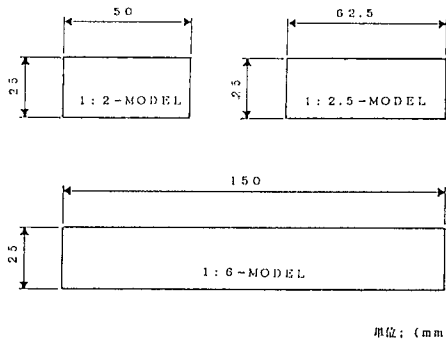


図1 モデル横断面

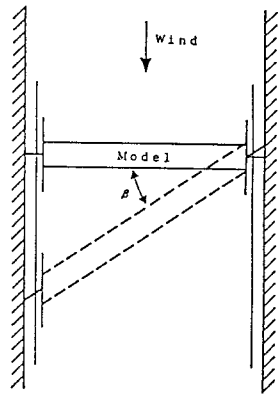


図2 水平偏角 β の設定方法

表1 模型の構造諸元

Case名	B/D	B (mm)	D (mm)	β (deg)	f (Hz)	m (kg·s ² /m)	δ	Sc
1:2.0	2.0	50.0	25.0	0	6.845	0.0679	0.006	9
	2.0	50.0	25.0	30	6.392	0.0784	0.006	9
	2.0	50.0	25.0	40	6.018	0.0886	0.006	9
1:2.5	2.5	62.5	25.0	0	6.762	0.0849	0.006	9
	2.5	62.5	25.0	20	6.537	0.0904	0.006	9
	2.5	62.5	25.0	30	6.277	0.0980	0.006	9
	2.5	62.5	25.0	40	5.892	0.1108	0.006	9
1:6.0	6.0	150.0	25.0	0	6.226	0.2037	0.006	9
	6.0	150.0	25.0	20	6.069	0.2168	0.006	9
	6.0	150.0	25.0	30	5.848	0.2352	0.006	9
	6.0	150.0	25.0	40	5.445	0.2659	0.006	9
1:2.2	2.2	55.0	25.0	0	6.534	0.0747	0.006	9
1:2.4	2.4	60.0	25.0	0	6.263	0.0815	0.006	9
1:2.6	2.6	65.0	25.0	0	6.082	0.0883	0.006	9
1:2.7	2.7	67.5	25.0	0	6.515	0.0917	0.006	9
1:2.9	2.9	72.5	25.0	0	6.272	0.0985	0.006	9
1:3.3	3.3	82.5	25.0	0	5.880	0.1121	0.006	9
1:7.0	7.0	175.0	25.0	0	5.726	0.2378	0.006	9
1:8.0	8.0	200.0	25.0	0	5.378	0.2718	0.006	9

2-2. 実験結果および考察

水平偏角 β における各モデルの $V-A$ 曲線を図3に示す。図中の縦軸は無次元倍振幅 $2\eta/D$ (η ; 応答振幅、 D ; 桁高)、横軸は換算風速 V/fD (V ; 実風速、 f ; 固有振動数) を表わす。各モデル共に水平偏角の増加に従い渦励振の共振風速域が上昇していることがわかる。また、渦励振の最大振幅は若干の変動が見られるものの水平偏角の変化に対し際立った応答の変化は示していない。この共振風速域の上昇は、水平偏角の変化に伴いモデルの形状が見かけ上変化して、断面の桁高比 B/D が見かけの桁高比 $\bar{B}/D$ となるため、断面の形状効果により渦励振の共振風速域が上昇するものと考えることができる。

そこで、渦励振発現風速と見かけの桁高比の関係を図4に示す。図中の実線は、現在一般に用いられている渦励振発現風速の推定式 (ただし、橋軸直交流 $\beta=0^\circ$ における推定式) である。1:2-MODEL と 1:2.5-MODEL は前縁剥離渦型の振動1周期の渦により励振するタイプであり、1:6-MODEL は振動2周期の渦あるいは後縁剥離渦による励振であることがわかる。一般に $B/D \geq 6$ の断面では前縁からの剥離渦よりも、むしろ後縁からの剥離渦によりその振動が支配されやすいため付着型あるいは混在型の励振形態となる⁶⁾。図から実験値が推定値より相対的に低くなっているものの両者が比較的良く一致していることから、特に前縁剥離渦型では水平偏角による影響は見かけの桁高比 $\bar{B}/D$ による形状効果が支配的であると考えられる。ここで見かけの桁高比 $\bar{B}/D$ は次式により定義する。

$$\bar{B}/D = B/D \times 1/\cos \beta \quad (1)$$

ここに、 $\bar{B}$; 見かけの幅員、 B ; 断面の幅員、 D ; 断面の桁高、 β ; 水平偏角。

また、同様の桁高比を有する斜風モデルと橋軸直交流モデルの $V-A$ 曲線の比較によると、渦励振の発現風速ならびに共振域についてはどれも一致しているが、渦励振の最大応答振幅に関しては B/D が大きいケースでは相違があることが見いだされた。

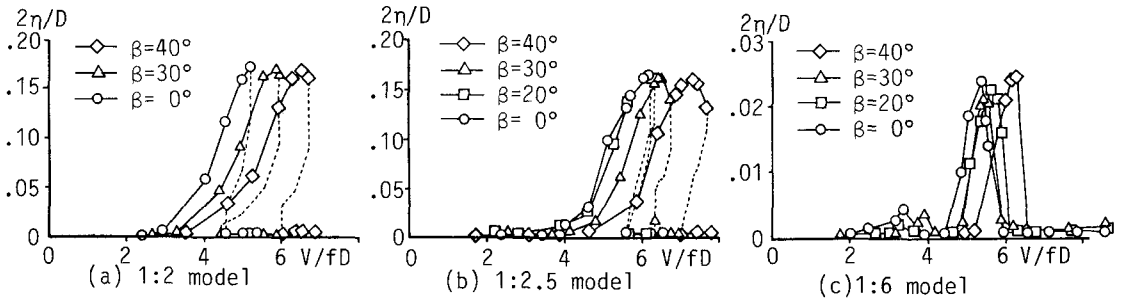


図3 水平偏角に伴う $V-A$ 曲線の変化

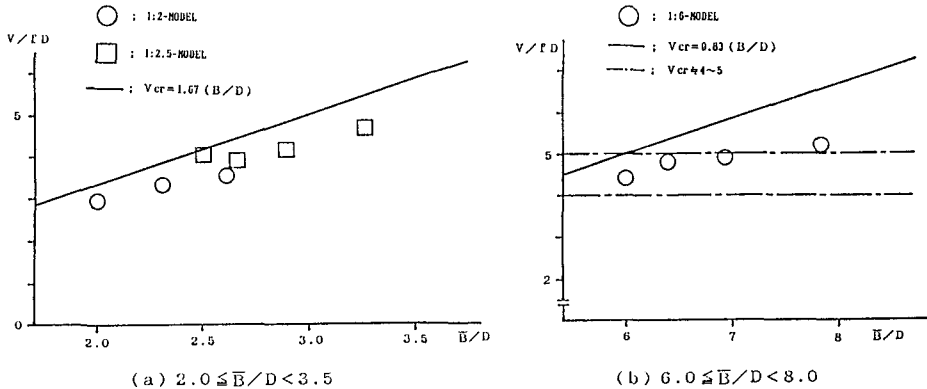


図4 渦励振発現風速と見かけの桁高比 $\bar{B}/D$ の関係

次に、渦励振最大振幅に対する見かけの桁高比の影響を検討するために、斜風の場合と橋軸直交流 ($\beta = 0$) において段階的に桁高比を変化させた場合の渦励振応答の変化を図5に示す。 $\bar{B}/D \geq 6$ の範囲では、振動3周期の渦との励振による応答も発現しており、この応答は図中に小型のマークで表示する。図より橋軸直交流の場合において、(1) $2.0 \leq \bar{B}/D \leq 2.8$ では渦励振最大振幅は一定値となり、(2) $2.8 < \bar{B}/D$ では徐々に減少する傾向にあることがわかる。したがって、(2) の範囲では斜風における応答が橋軸直交流の場合よりも大きな値を示しており、斜風の影響が水平偏角に伴う単純な形状効果だけではないことを示している。

この原因の一つとして、傾斜した円柱において断面背後に発生する軸方向流れによる空力不安定化が報告されており⁵⁾、斜風の作用下でもこれと同様に断面背後に橋軸方向流れが発生し、この流れの作用により斜風モデルと橋軸直交流モデルとの応答に相違が現われた可能性がある。そこで、次に断面周りの流れの可視化実験ならびに風速測定により斜風に伴う断面周りの流れの特性を調査、検討する。

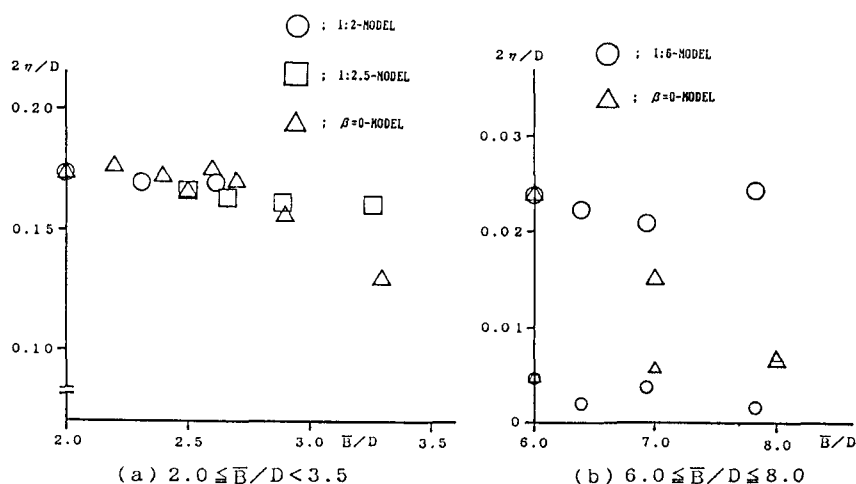


図5 渦励振の最大応答振幅と $\bar{B}/D$ の関係

3. 斜風に伴う断面周りの流れの特性

3-1. 実験の概要

実験では断面周りの流れに注目し次の二つの点、すなわち(1) 断面の桁高比を考慮するため、断面側面上の流れにおいて前縁からの剥離渦ならびに剥離流が主流に対し、どの方向に流れているか、(2) 断面背後における橋軸方向流れの確認およびその性質に関して検討を行なった。これは渦励振動中に対しても検討を行なうため、先の斜風モデルにおける応答実験結果に基づいて、定常応答状態に対応する風洞風速 V_m 、加振振動数 f_m および加振振幅 A_m を決定し、モデルを加振装置により強制的に振動させる強制振動法により流れを観察した。使用モデルと風洞は、先の応答実験で使用したものと同一のものをを用いる。実験条件は表2、図6に示す通りである。また、流れの可視化手法として灯油等の混合オイルの微細な液滴群をトレーサとして用いるミスト法⁷⁾を使用した。

また、同時に橋軸方向流れの性質を検討するために熱線風速計による風速測定を行なった。断面背後に主流方向と橋軸方向とに熱線風速計を設置して橋軸方向流れを観察した。計測にはX型プローブを使用し、その熱線軸方向の成分により風速を評価する。

表2 実験条件

Case名	B/D	β (deg)	f_m (Hz)	V_m (m/s)	V/fD	A_m	Re
CASE.1	2.5	40	2.98	0.54	7.22	0.168	900
CASE.2	2.0	40	2.97	0.54	7.26	0.180	900
CASE.3	4.5	40	2.97	0.54	7.26	0.165	900

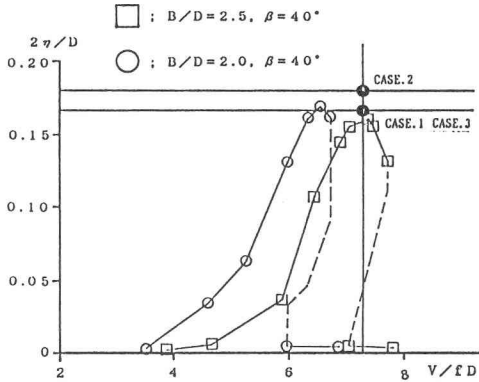


図6 実験条件

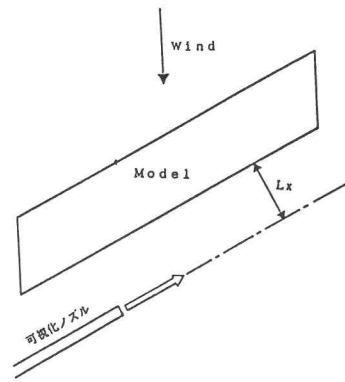
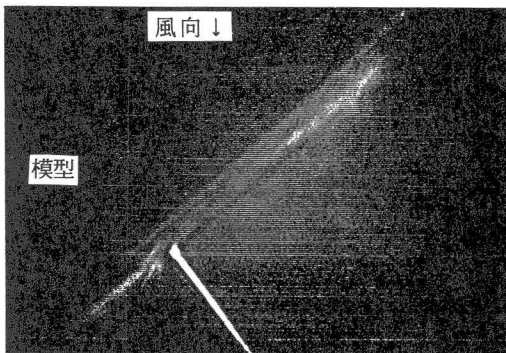


図7 可視化ノズルの設定

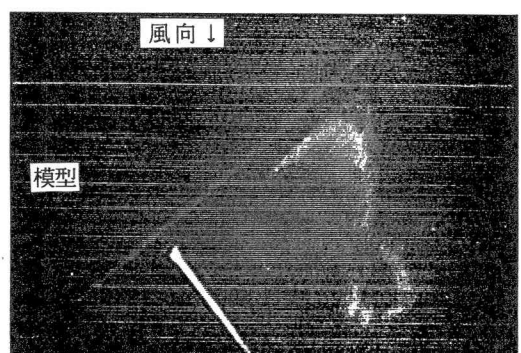
3-2. 断面背後の流れの特性

斜風モデルの断面背後における橋軸方向流れの存在を確認するために図7のように可視化ノズルを設置した。CASE.1における可視化結果を写真1に示す。断面静止時ではノズルから噴出した煙が、断面後面に吸いよせられ橋軸に対し平行に流下していることが確認できるが、振動時には橋軸方向には流れず大部分の煙が主流方向に流れ去っていることがわかる。また、断面前縁からの剥離流ならびに剥離渦を写真2に示す。断面が静止状態では、断面前縁からの剥離流が再付着しないため断面背後に負圧エリアが形成され、このエリア内を空気が橋軸方向に流れていると考えられる。しかし、断面が振動状態では、断面後縁からの後縁二次渦の発生と前縁剥離渦との一体化による安定な渦放出により、断面後面から随時、渦が離脱するため橋軸方向流れが発生するためのエリアが存在しないことになる。したがって、断面静止時には断面背後に橋軸方向流れが発生するが、振動状態へと移行すると橋軸方向流れが存在しえなくなる。

CASE.2においては上述のケースと同様の傾向を示しているが、CASE.3では静止状態においても橋軸方向流れが存在しにくくなっている。これは $B/D=4.5$ が静止時において断面側面に流れが再付着する断面比であるため断面後縁から剥離渦が発生し、橋軸方向流れの形成エリアが狭められるためであると考えられる。

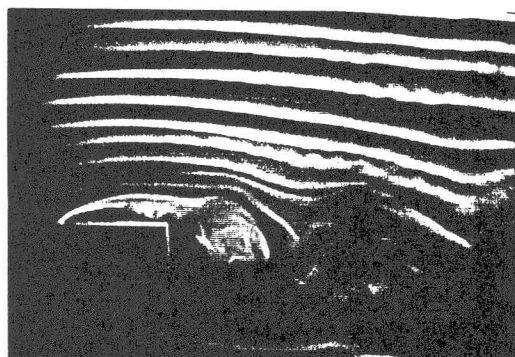


(a) Static, $L_x=25\text{mm}$

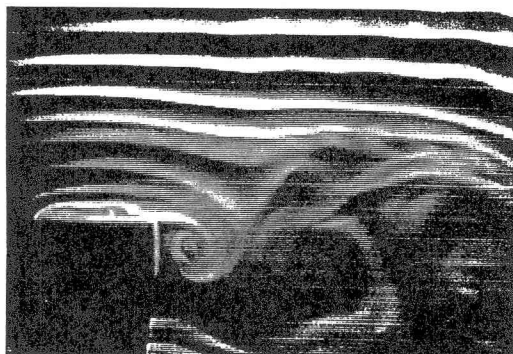


(b) Dynamic, $L_x=25\text{mm}$

写真1 断面背後の流れ (実験条件 ; case 1)



(a) Static

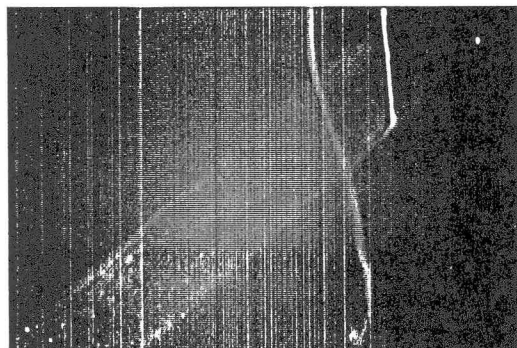


(b) Dynamic

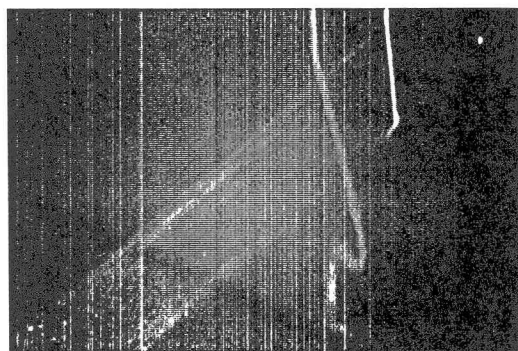
写真2 断面周りの流れ

3-3. 断面側面上の流れの特性

2-2節において、渦励振応答に対する斜風の影響として水平偏角に伴う見かけの桁高比 $\bar{B}/D$ の形状効果について述べたが、この $\bar{B}/D$ は断面側面上の流れが主流方向に流れていると仮定した場合の桁高比であり、実際の斜風モデルにおける流れの確認が必要である。そこで斜風モデル (CASE.1) の断面側面上の流れを写真3、図8に示す。ただし、ここでは可視化ノズルを模型上流側に移動している。図より主流方向の流れが断面前縁において橋軸直角方向に歪められ、断面後縁近傍で再び主流方向へと変化しているのが確認



(a) Static



(b) Dynamic

写真3 断面側面上の流れ

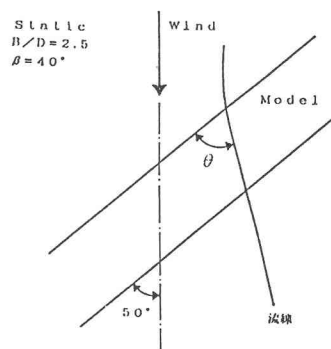


図8 流れのスケッチ

できる。この傾向は断面静止時および振動時において共に認められる。また、断面側面上の流れ方向と橋軸方向との成す角 θ が約 60° 付近の値となることから、断面側面上の流れは主流方向と橋軸直角方向との中間の方向に流れていることになる。これは矩形断面における流れの剥離が、基本的には剥離縁と直交方向に生じようとする性質のあることを示している。

B/D の異なる他の2ケース($B/D=2.0$ および $B/D=4.5$)における断面側面上の流れを観察した結果も、共に上述のモデルと同様の傾向になるが、その偏りは B が大になるにつれ若干小さくなるようである。この3つのモデルにおける断面側面上の流れ方向と橋軸方向との成す角 θ および実際の流れによる桁高比 $\overline{B'}/D$ は表3のようになる。つまり水平偏角から決まる見かけの $\overline{B'}/D$ に対して、斜風モデルにおける実際の流れでは $\overline{B'}/D > \overline{B'}/D$ となっている。したがって、この事実から渦励振応答に対する断面の形状効果、すなわち斜風の影響は図9のように修正される。

表3 流れの可視化結果

Case名	B/D	β (deg)	B/D	θ (deg)	$\overline{B'}/D$	V_r (V/fD)	S_x/V_r
CASE.1	Static	2.5	40	3.26	63.5	2.79	7.29
	Dynamic				64.0	2.78	
CASE.2	Static	2.0	40	2.61	60.5	2.30	7.26
	Dynamic				62.0	2.27	
CASE.3	Static	4.5	40	5.87	59.0	5.79	7.26
	Dynamic				62.0	5.48	
Average					61.8		0.44

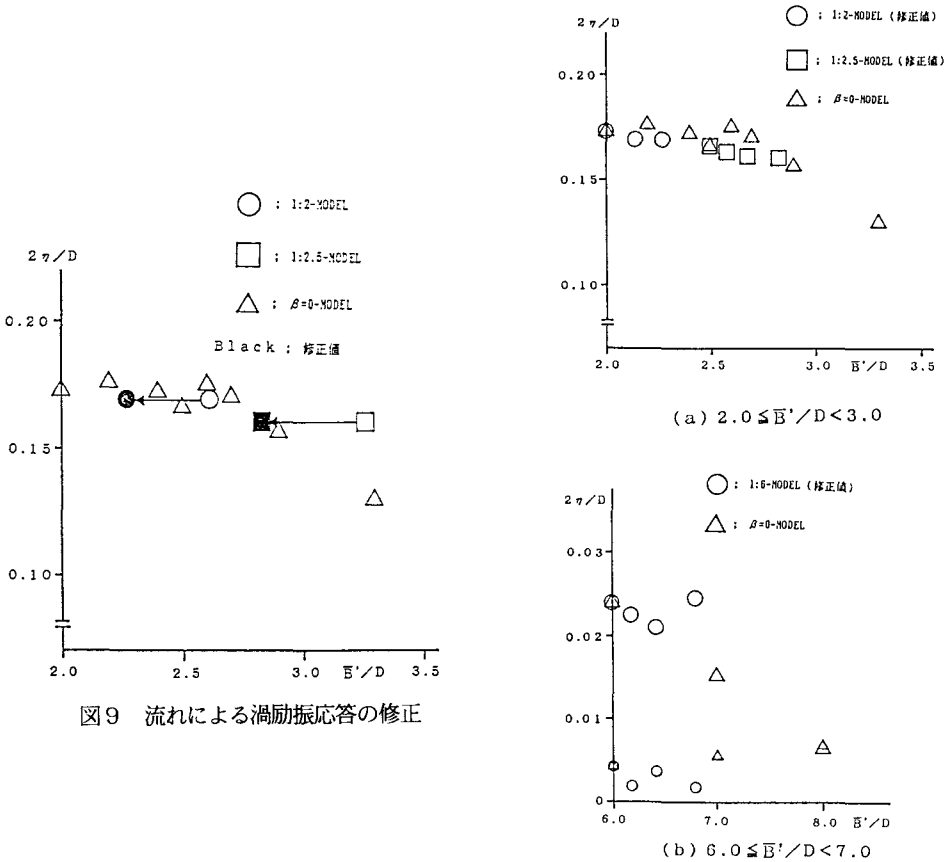


図9 流れによる渦励振応答の修正

図10 実際の流れによる渦励振応答の評価

このように流れの偏りを考慮して修正断面に対する桁高比を用いて全ケースについて渦励振応答変化を表すと図10のようになる。これより断面の桁高比による応答変化は、橋軸直交流の場合と同様に $2.0 \leq \bar{B}'/D \leq 2.8$ の範囲において一定値となる。

同様に修正した1:6-MODEL と $\beta=0$ -MODELとの関係においても $\bar{B}'/D < 6.8$ の範囲では、応答値はほぼ一致している。また、渦励振発現風速に対しても $\bar{B}'/D$ により図11のように表わされるため、上述の斜風モデルに対する $\bar{B}'/D$ による検討が有効であると考えられる。しかし、図10に示された斜風モデルの応答変化には、 $\bar{B}'/D > 2.8$ 、つまり $\beta > 40^\circ$ のデータが不足しており、 $\bar{B}'/D > 2.8$ の範囲において $\beta=0$ -MODELと同様に応答が減少するか否かの検証が必要である。しかも、 $\bar{B}'/D \geq 6.8$ の領域では、斜風モデルと橋軸直交流モデルの応答量は余り良い一致を示しておらず、斜風の影響としてさらに異なる要素が作用している可能性を示すものである。これは桁高比が増加するに従い渦励振の励振形態が、完全剥離型、前縁剥離渦型、付着型へと変化するため、断面側面上の流れや断面背後の橋軸方向流れ等の影響が異なってくる可能性も挙げられる。

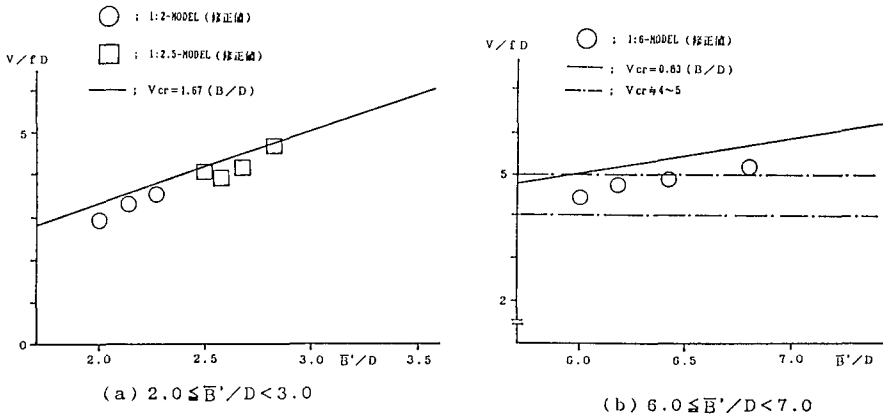


図11 渦励振発現風速と $\bar{B}'/D$ の関係

4 . 結論

充腹断面橋梁の渦励振応答に対する斜風の影響を検討するために、水平偏角に伴う見かけの桁高比の変化に着目し、形状効果による応答変化について調査を行なった。そして、断面周辺の流れの特性、特に断面側面上の流れおよび断面背後の橋軸方向流れに関する可視化実験、風速測定の実施により、斜風の影響についての基本的な情報を得た。本研究で得られた結果を要約すると以下のようである。

- (1) $B/D = 2.0, 2.5, 6.0$ のモデルに対して水平偏角を設定した場合、渦励振の共振風速域は水平偏角の増加に伴い高風速側へ移動する。また、最大振幅は水平偏角の変化に無関係にほぼ一定値となる。
- (2) 渦励振応答に対する斜風の影響は見かけの桁高比による幾何学的な形状効果であると考えられる。そして、断面側面上の実際の流れに基づく桁高比により渦励振応答を評価すると、その応答変化は橋軸直交流での結果に帰着することができる。

(3) 斜風に伴う断面背後の橋軸方向流れを観察した結果、断面が静止状態の場合、橋軸方向流れが発生するが、断面が振動状態の場合では、断面からの安定した渦放出により、橋軸方向流れの発生が抑制される。したがって、本実験に関しては、渦励振の応答振幅に対して橋軸方向流れの及ぼす影響は基本的に存在していない。

以上のことから、本実験では斜風により渦励振応答は低下しておらず、風洞実験において発現した振動が実橋ではあまり揺れなかったことに対する説明として、この斜風の影響を用いることは適切ではないと言える。また斜風の影響について、本実験で用いた断面および水平偏角以外では、渦励振の励振形態も変化するために橋軸方向流れ等の作用が異なる可能性があり、またBの大きいケースではアスペクト比が6程度となるため、端部の影響が現れている可能性もある。今回の実験では端板は十分大きなものを採用しているものの、三次元性も含めた実橋との対応については明確な関係が得られておらず、端部の影響、アスペクト比の影響等を含めてさらに実験条件を拡大して検討する必要がある。

参考文献

- 1) Miyazaki, M and Ito, I : Effect of Under-Girder Clearance on Aerodynamic Response of Box Girder Bridges , J. of Wind Engineering, No37, 1988.
- 2) 酒井洋典・小川一志・坂井藤一：橋桁と地面（水面）の空力干渉に関する研究，土木学会第41回年次学術講演会概要集，1986.
- 3) 宇都宮英彦・長尾文明・山本裕一：逆台形断面の渦励振応答に関する一考察，土木学会第44回年次学術講演会概要集，1989.
- 4) 宇都宮英彦・長尾文明・山本裕一：渦励振に及ぼす橋梁桁下空間の影響，日本風工学会誌，第41号，1989.
- 5) 白石成人・松本勝：傾斜円柱の空力特性およびRain Vibration発生機構，土木学会第44回年次学術講演会概要集，1989.
- 6) 白石成人・松本勝：充腹構造断面の渦励振応答特性に関する研究，土木学会論文報告集，第322号，1982.
- 7) 流れの可視化学会編集：新版 流れの可視化ハンドブック，朝倉書店.

(1991年9月30日受付)