

斜張橋用近接一体型ケーブルの耐風特性

AERODYNAMIC CHARACTERISTIC OF CLOSELY AND RIGIDLY CONNECTED CABLES FOR CABLE-STAYED BRIDGES

前田 博*, 久保喜延**, 加藤九州男***, 福島誠二****

Hiroshi MAEDA, Yoshinobu KUBO, Kusuo KATO and Seiji FUKUSHIMA

* 九州工業大学 工学部 大学院工学研究科 (〒804 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

** 九州工業大学 工学部 教授 (〒804 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

*** 九州工業大学 工学部 助手 (〒804 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

**** 九州工業大学 工学部 設計生産工学科 (〒804 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

The aerodynamic instability of cable for cable-stayed bridge has become serious problem with extension of span length. From the viewpoint of reduction of cost for construction and maintenance of cables, multiple cables have been adopted for cable-stayed bridges. The multiple cables, however, have aerodynamic instability of wake-galloping. Therefore, it is required to develop the method for suppressing wake-galloping of multiple cables. Then, we proposed the solution for this problem on the basis not of structural method with damper system, but of aerodynamic method based on the mechanism of wake-galloping. The method to connect two cables each other and to place two cables in closely and rigidly arrangement is proposed. As a result, the cables are protected from generation of wake-galloping induced by the wake of upwind cable.

Key Words: wake-galloping, closely and rigidly connected cable, cable-stayed bridge

1. まえがき

近年、我が国の橋梁技術の進歩は著しく、中でも斜張橋はその構造特性における有利性および景観の優美性を併せ持つことから、年々その架設数は増加しており、スパンも長大化してきている。斜張橋の主構造部材であるケーブルは、スパンの長大化により、ケーブルの大型化あるいはケーブルが複数本用いられる場合が多くなってきている。しかしながら、メンテナンス上および架設時の問題、建設費の削減などを考慮すると、複数本ケーブルにて対処される場合が多い。複数本ケーブルを用いる場合には、ウェイクギャロッピングと呼ばれている風による振動問題を内在している。

斜張橋ケーブルのウェイクギャロッピング対策としては、ダンパーや連結ワイヤーを用いる等のケーブルに付加物を取り付ける構造的対策とケーブル配置間隔を変化させることおよび断面形状を変化させることにより対処する空力的対策とがある。

構造的対策の場合、付加物の取り付け上の問題から十分な制振効果が得られないことがあり、空力的対策の必要性が増してきていると考えられる。これまでに著者らは、ケーブルの間隔および配置を変化させて振動を抑制することを検討^{2) - 3)}してきている。

そこで、本研究では、斜張橋ケーブルの中でも比較的採用例の多い2本ケーブルの場合に着目して、ウェイクギャロッピングの制振対策を検討することにした。これまでの検討結果⁴⁾の中から、とりわけ高い制振効果が得られている近接一体型ケーブルを用いて次のような検討を行った。2次元剛体模型を用いて、ケーブル間隔の異なる場合の1自由度振動実験、ある特定間隔での2自由度振動実験を行い、近接一体型ケーブルの自由振動特性を調査した。更に、ケーブル間隔の異なる模型を用いて、近接一体型ケーブルの静的空気力係数の測定を行い、風洞実験による検討を加えた。

2. 近接一体型ケーブルの1自由度振動特性

2.1 実験方法

実験には、九州工業大学の中型空力弾性試験用風洞(測定断面1070mm×1070mm)を用いた。図-1に示すように、2本のコイルバネで2次元剛体模型を鉛直1自由度で支持して、自由振動法により風洞試験を行った。

風洞試験に使用したケーブル模型は、直径D=25mmのアルミニウム製パイプである。模型の両端部を、図-2に示すようなスパーサーおよびクランプを用いることにより、ケーブル間隔を一定に保ち、上下流ケーブルを堅固

に連結し，一体型とした．実験に用いた模型の諸元を表-1に示す．表-2には，風洞試験を行ったケースを示す．模型のケーブル中心間隔は，0.1d刻みで $D=1.0d\sim 1.3d$

の範囲で変化させた．迎角は， $\alpha=0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ まで変化させて風洞試験を行った．

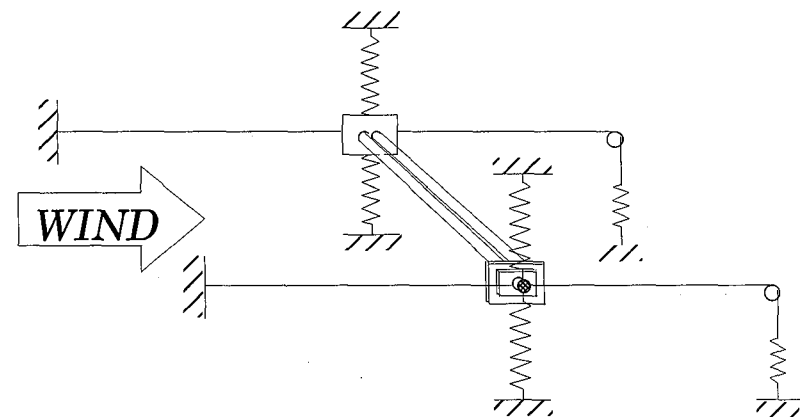


図-1 模型の設置状況

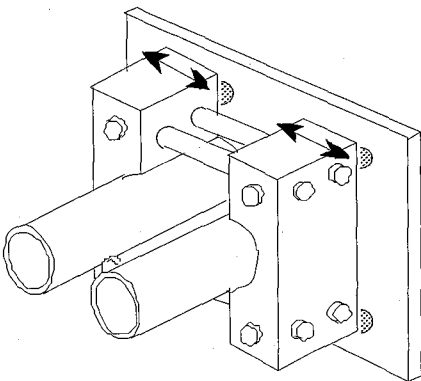


図-2 スパースーおよびクランプ

表-1 模型の諸元

Model length (mm)		900
diameter (mm)		25
weight per unit length (kgf/m)		3.222
natural frequency (Hz)	$D=1.1d$	3.917
	$D=1.2d$	3.962
	$D=1.3d$	3.962
Structural damping	$D=1.1d, 2A/d=0.72$	0.0028
	$D=1.2d, 2A/d=0.72$	0.0032
	$D=1.3d, 2A/d=0.72$	0.0031

表-2 実験ケース

$D=1.0d=25\text{mm}$	$D=1.1d=27.5\text{mm}$
$\alpha=-6,-4,-2,0,2,4,6,90(\text{deg})$	$\alpha=0,2,4,6,10,20,30,90(\text{deg})$
$D=1.0d=25\text{mm}$ 	$D=27.5\text{mm}$
$D=1.2d=30\text{mm}$	$D=1.3d=32.5\text{mm}$
$\alpha=0,2,4,6,8,10,20,30,90(\text{deg})$	$\alpha=0,2,4,6,8,10,12,14,20,30,90(\text{deg})$
$D=30.0\text{mm}$ 	$D=32.5\text{mm}$

2.2 実験結果

これまでの検討結果⁵⁾から、ウェイクギャロッピングの発生要因は、上流側ケーブルからのウェイクが、下流側ケーブルに作用するためであることが確認されている。この発生要因に着目して、上流側ケーブルと下流側ケーブルを近接させて剛に連結する近接一体型ケーブル模型を用いて、風洞試験を実施した。この近接一体型ケーブル形式は、上流側ケーブルからのウェイクが与える振動励起力が、下流側ケーブルに作用しないことから、ウェイクギャロッピングの発生を抑制できるものと仮定して、検討することにした。

図-3～6は、近接一体型ケーブルの1自由度空力弾性振動の実験結果を示したものである。それぞれのケーブル中心間隔において、迎角が異なる場合の応答振幅をまとめて示す。振動が比較的抑制されている $D=1.1d \sim 1.3d$ については、 $\alpha=10^\circ \sim 90^\circ$ の場合の応答結果も併せて示している。

図-3は、ケーブル中心間隔が $D=1.0d$ の場合を示す。迎角 $\alpha=4^\circ$ の場合は、換算風速 $Vr=80$ 付近から、ギャロッピングが発生している。迎角 $\alpha=6^\circ$ の場合には、 $Vr=60$ 付近からギャロッピングが発生している。これは、上下流ケーブルがケーブル中心間隔 $D=1.0d$ で一体化されているため、剥離流による大きな圧力差が、ケーブル模型の上面と下面で生じたことによるものと考えられる。

図-4は、ケーブル中心間隔が $D=1.1d$ の場合を示す。迎角が $\alpha=0^\circ, 2^\circ, 6^\circ$ の場合は、渦励振振動のみ発生しているが、迎角が $\alpha=4^\circ$ の場合には、 $Vr=160$ 付近からギャロッピングが発生している。 $\alpha=10^\circ \sim 90^\circ$ の場合には、大振幅を有する振動は確認されてない。

図-5は、ケーブル中心間隔が $D=1.2d$ の場合を示す。迎角が $\alpha=0^\circ, 2^\circ, 6^\circ$ では渦励振振動のみ発生してい

る。迎角 $\alpha=4^\circ$ の場合は、 $Vr=50$ 付近および $Vr=100 \sim 160$ 付近で、無次元倍振幅 $(2A/d=0.2)$ 程度の振動が発生している。迎角が $\alpha=30^\circ, 90^\circ$ の場合では渦励振振動のみ発生している。

図-6は、ケーブル中心間隔が $D=1.3d$ の場合を示す。迎角が $0^\circ \leq \alpha \leq 4^\circ$ の範囲で、渦励振振動のみ発生している。迎角が $\alpha=6^\circ$ においては、最大振動振幅 $(2A/d=0.2)$ 程度の振動が発生している。迎角が $\alpha=10^\circ, 30^\circ$ においては、渦励振振動のみ発生している。迎角が $\alpha=30^\circ$ においては、最大振動振幅 $(2A/d=0.2)$ 程度の振動が発生している。

以上の結果から、近接一体型ケーブルの場合、ケーブル中心間隔が、 $D=1.0d$ および $D=1.1d$ のときは、空力的に不安定な断面であると考えられる。ケーブル中心間隔を少し広げて、 $D=1.2d, 1.3d$ とすることにより、小振幅の振動は発生するが、高い迎角においても空力的性能が改善された良好な結果を得ることができた。

このように、今回用いたケーブル模型のように、ケーブル連結間隔が短く、かつ一体型ケーブルとみなすことができる場合は、空力特性が良い断面と考えることができる。

しかしながら、上流側ケーブルを固定し、下流側ケーブルを自由振動状態とした場合の実験結果によると、上流側ケーブルと下流側ケーブルを近接させた場合でも、強制加振をすることにより、空力的に不安定な特性を示すことがわかった。

したがって、実橋にこの近接一体型ケーブル形式を用いる場合には、ケーブル中心間隔を $D=1.2d \sim 1.3d$ にし、2本ケーブルの連結度が高くなるような、適当な連結間隔および堅固に連結できるスペーサーおよびクランプを用いて設置する必要があると考えられる。

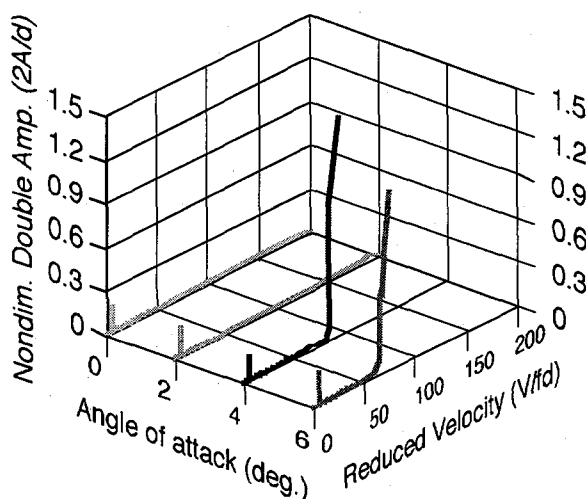


図-3 ケーブル中心間隔が $D=1.0d$ で迎角を変化させたときの応答振幅

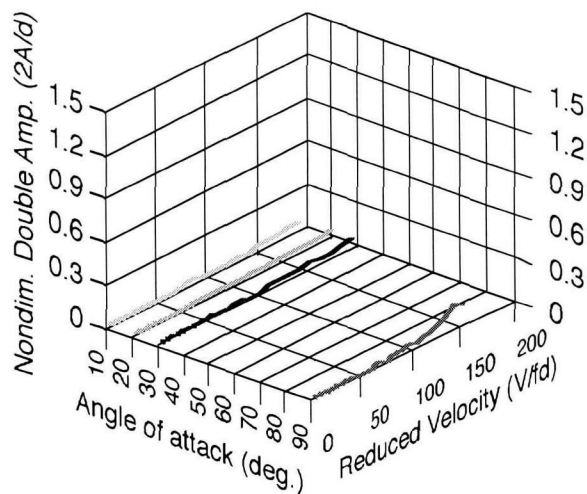
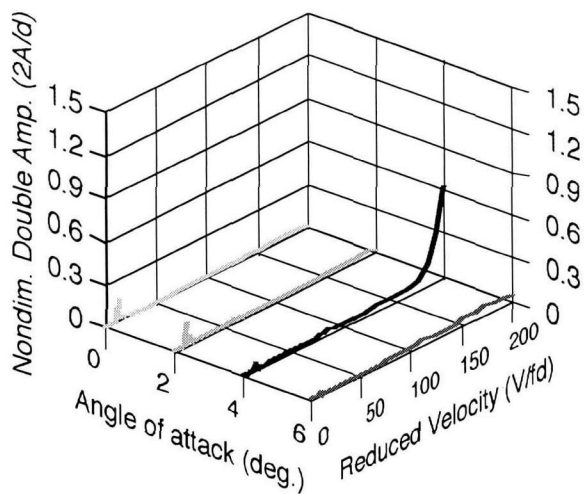


図-4 ケーブル中心間隔が $D=1.1d$ で迎角を変化させたときの応答振幅

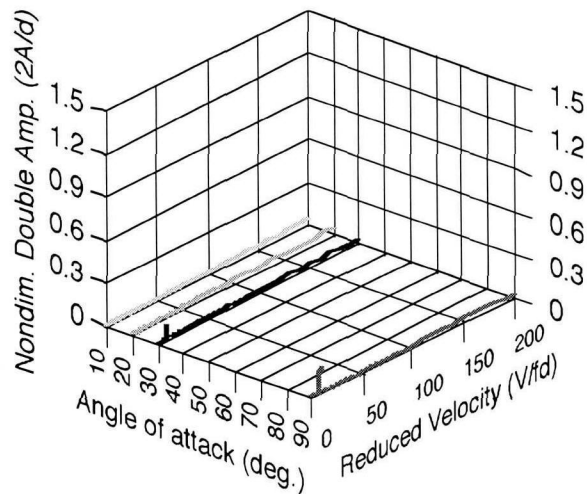
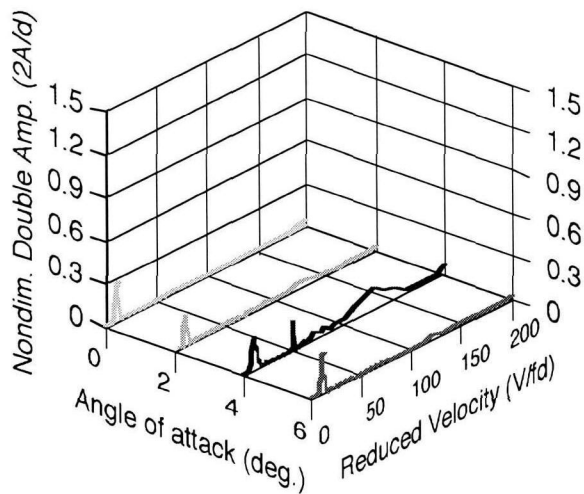


図-5 ケーブル中心間隔が $D=1.2d$ で迎角を変化させたときの応答振幅

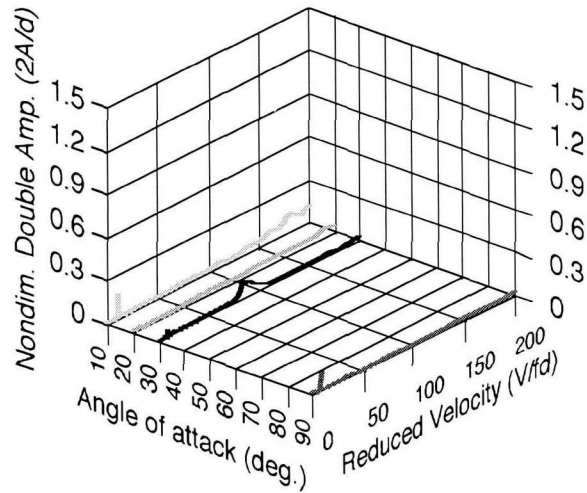
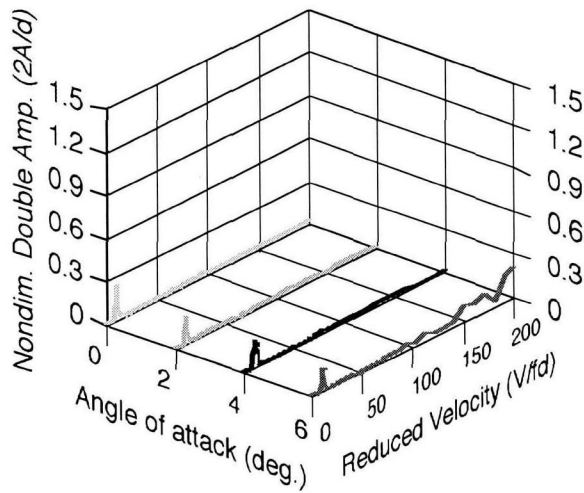


図-6 ケーブル中心間隔が $D=1.3d$ で迎角を変化させたときの応答振幅

3. 近接一体型ケーブルの2自由度振動特性

3.1 実験方法

前章の1自由度系での実験結果から、空力特性の良い断面となるケーブル中心間隔が判明した。しかしながら、実橋のケーブルを考えると2自由度振動特性の把握が必要ことから、風洞実験を実施した。実験概略を図-7に示す。

ケーブル模型としては、前章に示した模型を用いた。ケーブル中心間隔は、ある橋梁に採用されている $D=1.25d$ とし、たわみ振動およびねじれ振動の同時発生、

いわゆる2自由度振動の発生が可能のように、2本のコイルバネにより支持した。表-3に、模型の諸元を示す。アルミアングルを取り付けているケースは、アルミアングルなしの場合に得られた結果を検討した後に、制振対策として考案したものである。これは、ギャロッピングの発生は、下流側隅角部に丸みを有することが、重要な要素となっている⁶⁾ ことからギャロッピングを制振できると仮定し、対処方法とした。なお、アルミアングルは模型全長にわたって取り付けた。

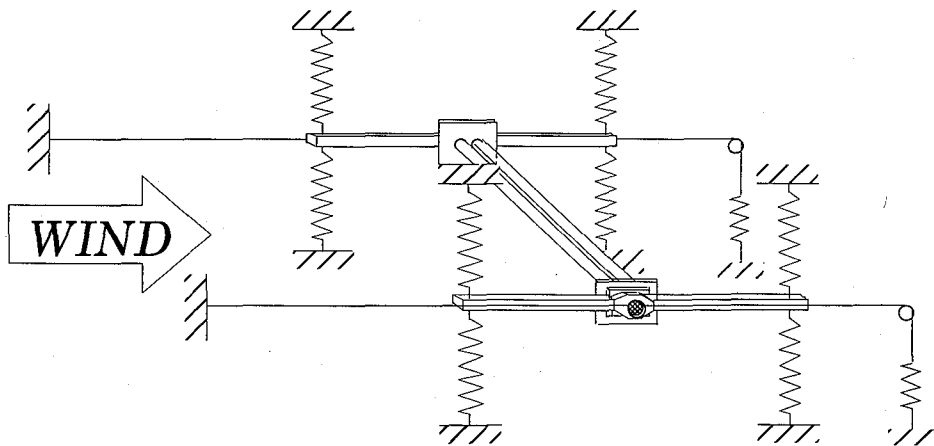
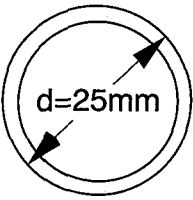
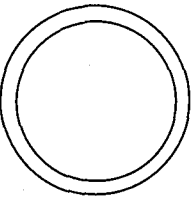
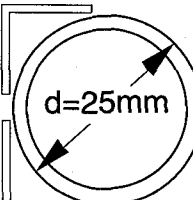
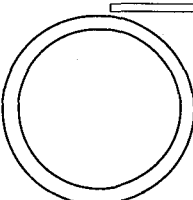


図-7 模型の設置状況

表-3 模型諸元

	No angle		With angle	
Model type				
natural frequency (Hz)	Bending	Torsion	Bending	Torsion
	1.58	1.56	1.53	1.57
Structural damping	0.0013	0.0026	0.0021	0.0014
angle height (mm)	—		12	

3.2 実験結果

(a) アルミアングルを付けていない場合

図-8は、迎角 $\alpha=0^\circ \sim 8^\circ$ の場合の応答結果を示している。換算風速 $V_r > 90$ 付近から、風速限定型と考えられる大振幅を有する振動が発生しており、 $V_r < 160$ 付近までは、風速上昇とともに振幅が増大している。この時の模型の振動は、模型中央部を中心とする Rolling 状態となり、不安定な振動状態を示した。 $160 < V_r < 450$ の範囲では、その振動振幅は風速の上昇とは逆に、振幅が減少する傾向が現れている。この時の振動状態も Rolling 状態であった。 $400 < V_r < 500$ 付近においては、強制加

振することにより、 $2A/d > 2.0$ の大振幅振動が発生している。

迎角 $\alpha=2^\circ$ の場合の応答結果は、迎角 $\alpha=0^\circ$ の場合と比較して、空力不安定性が強くなっている。 $V_r=100$ 付近において、風速限定型の振動が発現している。 $V_r > 140$ においては、発散型振動が発生する。 $100 < V_r < 300$ の範囲では、迎角 $\alpha=0^\circ$ と同様に、Rolling 状態であった。 $300 < V_r$ においては、 $2A/d=2.5$ 程度の大振幅の発散型振動が発生した。

迎角 $\alpha=4^\circ$ の場合の応答結果は、 $V_r > 190$ 付近から、急激な発散型の振動が発生している。この時に発生してい

る大振幅振動は、高風速になるにしたがって、発散エネルギーの増大が確認できた。

迎角 $\alpha = 6^\circ$ の場合の応答結果は、Rolling 状態はほとんどなくなり、 $Vr > 170$ 付近から急激な発散型振動が発現している。さらに、 $Vr > 280$ 付近からの振動は、たわみ振動とねじれ振動が同時に発生する、いわゆる連成フラッター的な振動状態に変化した。定常応答振幅が安定していないのは、この時の振動状態が、空力的にかなり不安定な状態になっていると考えられる。

迎角 $\alpha = 8^\circ$ の場合の応答結果は、 $Vr > 150$ 付近から、連成フラッター的な発散振動が発現している。

以上のことから、ケーブル中心間隔が $D = 1.25d$ における 2 自由度振動特性は、ケーブル中心間隔は異なるが、1 自由度振動特性と比較すると、空力的に不安定な結果が得られた。これは、2 自由度系における対数構造減衰率が、1 自由度系における対数構造減衰率と比較して小さいことから、作用する空気が弱い場合にも空力的に不安定な状態となり、振動が発生したと考えられる。

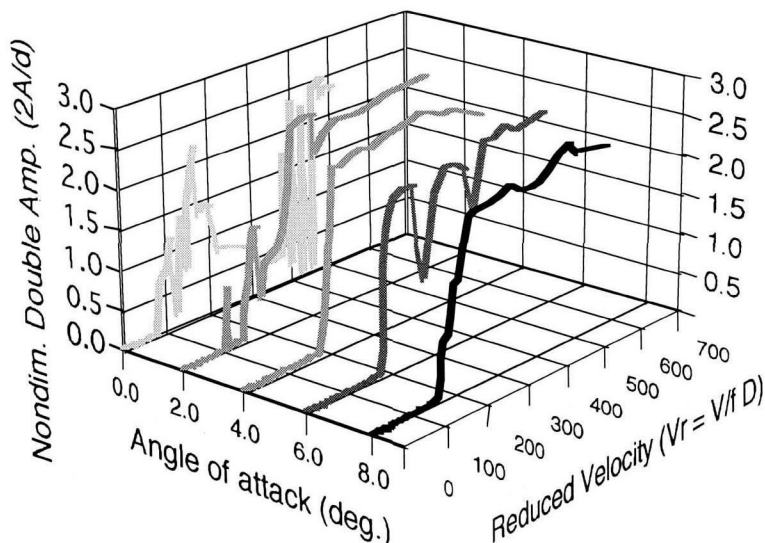


図-8 迎角 $\alpha = 0^\circ \sim 8^\circ$ における応答結果

(b) アルミアングルを付けている場合

図-9 にアングルを付けた場合の応答振幅結果を示す。迎角 $\alpha = 0^\circ \sim 4^\circ$ の範囲では、振動はほとんど発生していない。 $\alpha = 6^\circ$ の場合に、 $Vr > 400$ において、空力的に不安定となり、強制加振することにより連成フラッター的な振動が発生した。 $\alpha = 8^\circ$ の場合にも強制加振することにより、 $Vr > 360$ において連成フラッター的な振動が発生した。

迎角 α が増加するにしたがって、空力不安定性が高くなっている傾向を示しているが、模型にアルミアングルを付けていない場合と比較すると、大幅に振動特性が改善されたことがわかる。さらに、ギャロッピングの発生には、下流隅角部が丸みを有することが重要な要素となっている⁶⁾ ことから、アルミアングルを付けることにより、構造物の下流側に隅角部を有することになり、ギャロッピングの発生を抑制できた。

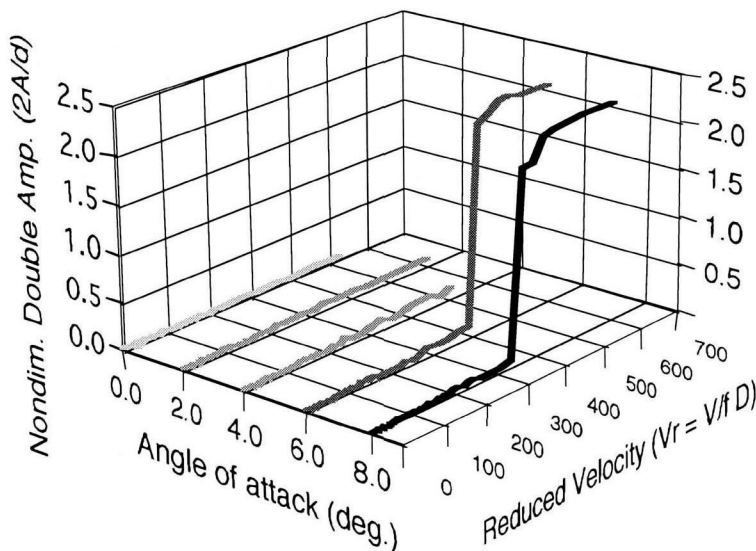


図-9 迎角 $\alpha = 0^\circ \sim 8^\circ$ における応答結果

4. 近接一体型ケーブルの静的空気力特性

4.1 実験方法

実験は、自由振動実験で使用したものと同一模型を使用した。また、空気力の正の向きおよび迎角の定義を図-10に示す。実験ケースはケーブル中心間隔 D を $D=1.0d$ ～ $1.5d$ に変化させ、風向とケーブル姿勢を考慮して迎角を $\alpha=0^\circ \sim 90^\circ$ に変化させた。

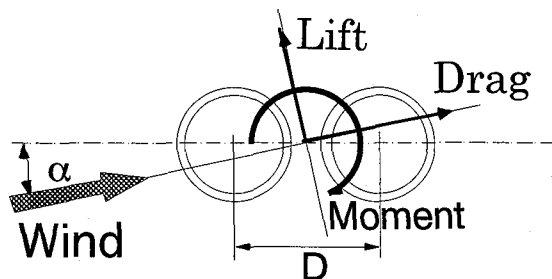


図-10 静的空気力の定義

4.2 実験結果

三分力天秤により得られた抗力係数、揚力係数、空力モーメント係数は、単独ケーブルの係数との比較を簡便化するために、単独ケーブルと同一の諸元を用いて整理した。実験結果としては、レイノルズ数 $Re=36500$ となる亜臨界域の領域におけるケーブル中心間隔毎の迎角と各係数についてまとめたものを、図11～図16に示す。なお、静的空気力の各係数は、次式によって定義している。

$$\text{抗力係数} : C_D = \frac{2F_{C_D}}{\rho V^2 S}$$

$$\text{揚力係数} : C_L = \frac{2F_{C_L}}{\rho V^2 S}$$

$$\text{空力モーメント係数} : C_M = \frac{2F_{C_M}}{\rho V^2 S d}$$

F_{C_D} : 抗力, F_{C_L} : 揚力, F_{C_M} : 空力モーメント

ρ : 空気密度, $S = d\ell$, d : 模型の直径, ℓ : 模型の長さ, V : 風速

(a) 抗力係数について

静的空気力の測定結果のうち、抗力係数について考察する。抗力係数 C_D は、迎角 $\alpha=0^\circ$ で、ケーブル中心間隔 $D=1.0d$ の場合に $C_D=0.5$ である。ケーブル中心間隔が広がるにつれて C_D の値は大きくなり、 $D=1.5d$ の場合で $C_D=0.8$ 程度になっており、単独ケーブルの場合 ($C_D=1.2$) より C_D が小さくなっている。岡島⁷⁾ は $D<3.8d$ で亜臨界レイノルズ数域の場合、下流側円柱にスラストが作用するため、抗力が小さくなると報告しており、これに対応するものであると考えられる。

迎角 α が大きくなると C_D も大きくなり、 $\alpha=90^\circ$ の場

合には、 $D=1.1d$ の場合について $C_D=2.7$ 程度となるが、その他のケーブル間隔では $C_D=2.5$ 程度であり、単独円柱のほぼ2本分となっている。

(b) 揚力係数について

揚力係数 C_L については、 $D=1.0d \sim 1.3d$ の場合には α が小さい場合に負の値を示すが、 α が大きくなるにつれて C_L は正の値に変化している。 $D=1.4d, 1.5d$ の場合は、 C_L の変化する傾向は $D \leq 1.3d$ とは異なる。 $\alpha=0^\circ \sim 8^\circ$ では $C_L=0$ を示しており、空力的に安定していると考えられる。 $\alpha > 8^\circ$ での C_L は、極端に大きくなっている。これは、上流側ケーブルからの剥離流が下流側ケーブルに作用するかどうかの境界であり、上下流ケーブル間の流れのパターンが変化しているためと考えられる。

(c) 空力モーメント係数について

空力モーメント係数 C_M は、 $D=1.0d$ の場合は $C_M < 0$ となる迎角の範囲は $\alpha > 50^\circ$ の場合となっているが、 $1.1d \leq D \leq 1.5d$ の場合は $0^\circ < \alpha < (20^\circ \sim 40^\circ)$ において $C_M < 0$ となっている。 C_M も C_L の場合と同様に、 $D \geq 1.2d$ で $C_M=0$ となる α の範囲が存在し、ケーブル中心間隔の増加につれて $C_M=0$ となる α の範囲も広がっている。

次に、 C_L と C_M の関係に着目すると、 $D=1.2d, 1.3d$ の場合に C_L の符号と C_M の符号が一致している。これは、 C_L および C_M が負の場合に、大きな負の揚力が上流側ケーブルに働くので、負の揚力が作用すると共に負の空力モーメントが発生するためと考えられる。 $D=1.4d, 1.5d$ の場合は、 C_L の符号と C_M の符号は逆になっている。原因として、大きな正の揚力が、下流側ケーブルに作用するためと考えられる。

(d) アングル付きケーブルの静的空気力特性

ケーブル中心間隔が $D=1.25d$ の場合を図-17に示し、図-18にアングルを付けた場合を示す。

◇抗力係数について。迎角 $\alpha=0^\circ$ においては、アングルが付いていない場合が $C_D=0.7$ 程度であるのに対して、アングルを付けることにより $C_D=1.9$ 程度となっている。これを、正方形角柱の面積を用いて抗力係数を求めると、 $C_D=1.7$ 程度となる。アングルを付けていない場合に比べて、かなり抗力係数が増大していることがわかる。また、 $\alpha=12^\circ$ 付近および $\alpha=70^\circ$ 付近において、減少する傾向を示すのは興味あるところである。

◇揚力係数について。アングルを付けない場合は、揚力係数が $C_L=0$ 付近ではほぼ一定値となる迎角 α の範囲は、 $0^\circ < \alpha < 4^\circ$ であるのに対して、アングルを付けることで、 $0^\circ < \alpha < 10^\circ$ となり一定値となる範囲が広がっているのがわかる。これは、空力的に安定する迎角の範囲が広がっていることを示すと考えられる。このことから、ギャロッピングを抑制する効果が高くなっていることが、揚力特性からも確認ができる。

◇空力モーメント係数について。アングルを付けない場合と比較すると、アングルを付けた場合の方が、 $C_M < 0$ となる範囲が広がっている。

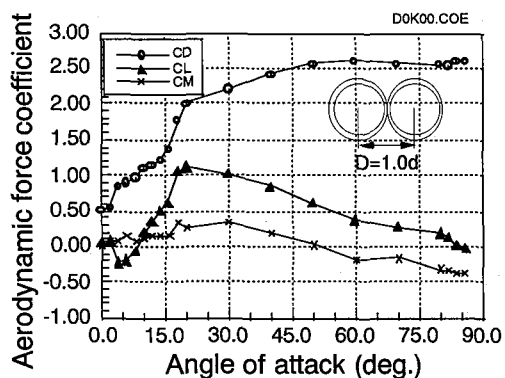


図-1 1 D=1.0d の静的空気力特性

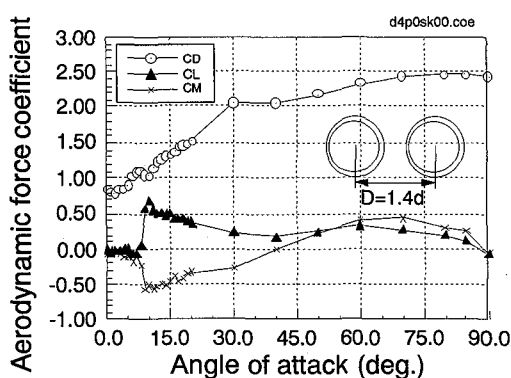


図-1 5 D=1.4d の静的空気力特性

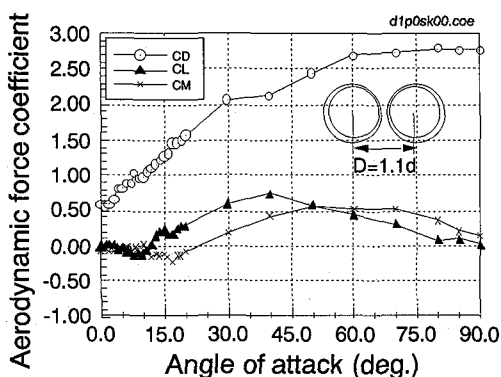


図-1 2 D=1.1d の静的空気力特性

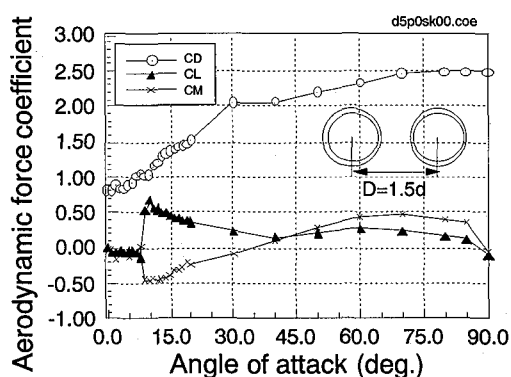


図-1 6 D=1.5d の静的空気力特性

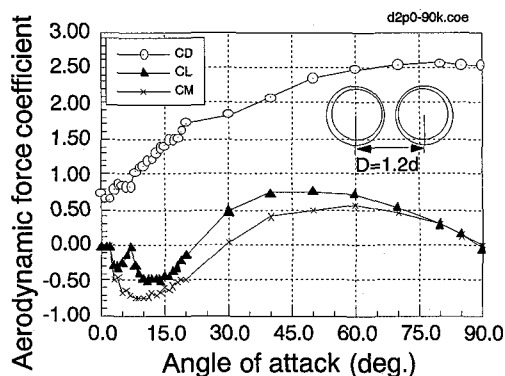


図-1 3 D=1.2d の静的空気力特性

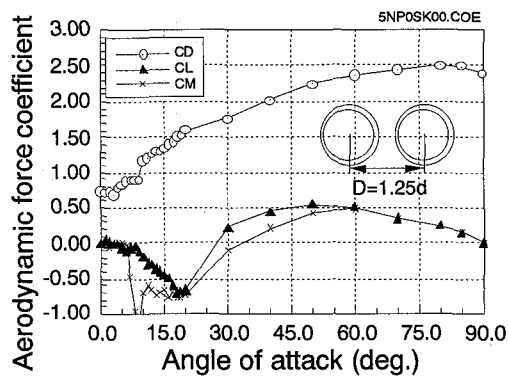


図-1 7 D=1.25d の静的空気力特性

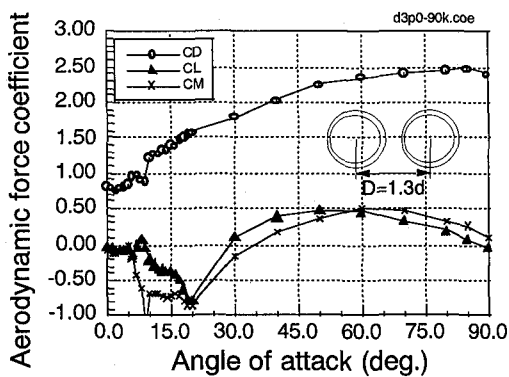


図-1 4 D=1.3d の静的空気力特性

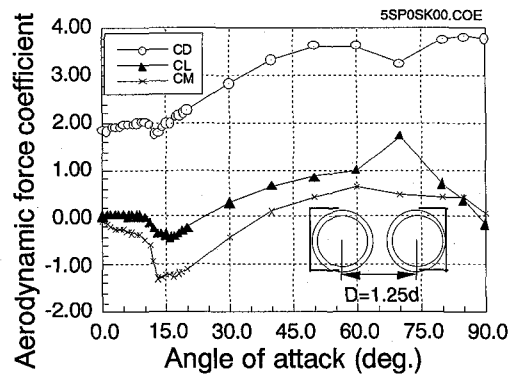


図-1 8 D=1.25d でアングル付きの静的空気力特性

5. 近接一体型ケーブルの周辺流れの可視化実験

5.1 実験方法

自由振動実験および静的空気力実験から、ケーブル中心間隔を変化させた場合とアングルを付けた場合の応答特性および静的空気力特性は、それぞれ特徴あるものであることがわかった。そこで、ケーブル模型の周辺流れを視覚的に確認して、検討を加えるためにケーブル周辺流れの可視化実験を行った。

実験には、九州工業大学所有の小型可視化用風洞（測定断面 400mm×400mm）を用いた。模型は、閉塞率などを考慮して、ケーブル径 $d=20\text{mm}$ とし、自由振動用模

型と同様にケーブル中心間隔を変えることができる。可視化の方法として、スモークワイヤー法を用いた。行った実験ケースは、ケーブル中心間隔が $D=1.0d\sim 1.5d$ で刻み間隔は $0.1d$ とした。このときのレイノルズ数は、 $Re=1240$ である。応答実験の Re 数と異なることから、 Re 数の影響が懸念されるが、近接一体型ケーブル周りの基本的な流れを把握することに着目したので、 Re 数効果については特に考慮していない。また、 $D=1.25d$ およびアングルを付けた場合の可視化も行った。図-19に可視化実験設置図を示す。

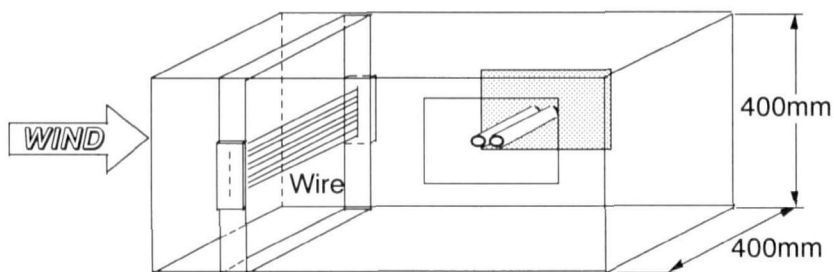


図-19 可視化実験設置図

5.2 実験結果

写真-1～6に、模型静止時の可視化実験結果を示す。写真-1、2は、 $D=1.0d$ の場合でアングルを付けていない場合と付けた場合の結果である。アングルを付けていない場合は、剥離境界層が薄く、模型後流側にカルマン渦が発生しているのが確認できる。アングルを付けた場合は、模型後流側は、かなり乱れた様子になっているが、アングルなしの場合と比較すると小さな後流渦が発生している。

写真-3、4は、 $D=1.25d$ の場合を示している。アングルを付けていない場合には、剥離境界層厚は薄く模型の後流にカルマン渦が発生している。しかしながら、後流渦の形状は、乱れたものとなっている。アングルを取り付けた場合は、前縁側に隅角部を持つことから、剥離

渦が明確に現れている。後流の乱れも $D=1.0d$ の場合と比較して、小さなものとなっている。

写真-5、6は、 $D=1.5d$ の場合を示している。アングルを付けていない場合には、 $D\leq 1.4d$ の場合と同様に、剥離境界層は薄い。後流に発生しているカルマン渦は、乱れの中に埋もれている。アングルを付けた場合は、模型の後流側に発生している渦は、明確に現れている。

以上のことから、ケーブルの間隔を広げると、アングルを付けていない場合には、模型後流の乱れが大きくなることが写真から確認できた。アングルを付けた場合には、模型前縁および後縁に隅角部を有することから、完全剥離型断面に近い形状となり、前縁からの剥離渦がはっきりと確認できた。ケーブル中心間隔を広げることで、模型後流の乱れが小さくなることも確認できた。

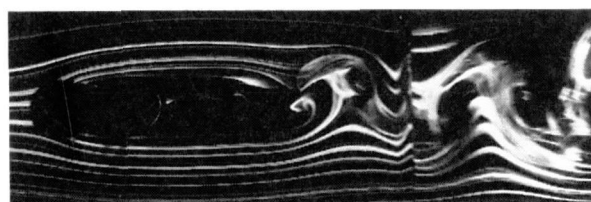


写真-1 ケーブル中心間隔 $D=1.0d$ （アングルなし）、写真-2 ケーブル中心間隔 $D=1.0d$ （アングル有り）

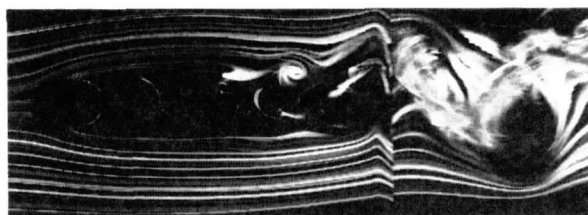
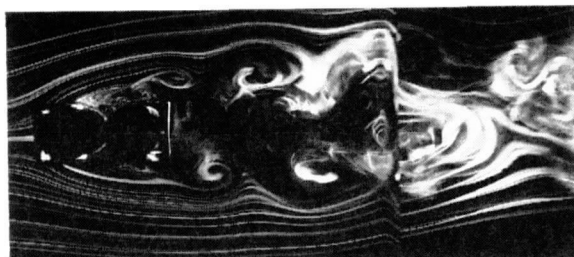


写真-3 ケーブル中心間隔 $D=1.25d$ （アングルなし）、写真-4 ケーブル中心間隔 $D=1.25d$ （アングル有り）



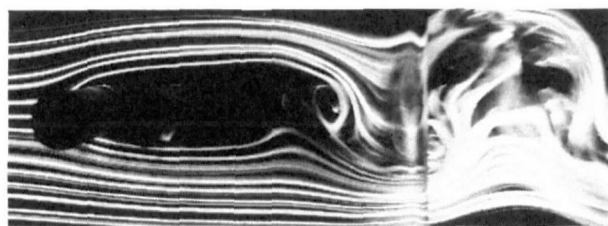


写真-5 ケーブル中心間隔 $D=1.5d$ (アングルなし), 写真-6 ケーブル中心間隔 $D=1.5d$ (アングル有り)

6. アングルがギャロッピングの発現に関与する理由

いずれの実験ケースの場合においても、ケーブル模型を矩形断面に置き換えた場合の断面比は、 $1.9 < b/d < 2.4$ となっており、完全剥離型断面と見なすことができる。

完全剥離型の断面の場合には、構造物後縁側の形状が空力不安定振動の発現の可能性を決定する。円形断面にアングルを取り付けることにより、前縁側および後縁側ともに隅角部を有する完全剥離型の断面となり、可視化写真によると、模型後流側が乱されている。その結果、空力の不安定性は消えないが、定常振動を励起する大きな力（圧力）が作用しなくなり、ギャロッピングの発生が抑制できると考えられる。

静的空気力測定の結果から、アングルを付けることにより、揚力係数 $C_L \approx 0$ となる範囲が広がる。このため、初期振動を与える原因である静的空気力が安定しており、振動時の振動励起力の供与が妨げられると考えられる。

今回は、アングル付きの振動実験をケーブル中心間隔が $D=1.25d$ の場合について、風洞実験による検討を加えたが、その他のケーブル間隔についても検討を予定している。さらに、解析的手法による検討を加え、近接一体型ケーブルの実用性をより一層高めることを考えている。

7. まとめ

本研究は、斜張橋用ケーブルに発現しやすいウエイクギャロッピング対策を検討することを目的としている。そこで、これまでの研究成果から得られた近接一体型ケーブル形式の耐風性能を、風洞実験を行うことにより検討し、以下のような結果を得ることができた。

- ① 近接一体型ケーブルの1自由度振動特性は、ケーブル中心間隔が、 $D=1.0d$ で迎角 $\alpha=4^\circ$ 、 6° の場合に、ギャロッピングが発生している。 $D=1.1d$ においては、迎角 $\alpha=4^\circ$ の場合にギャロッピングが発生している。
- ② ケーブル中心間隔が $D=1.2d \sim 1.3d$ のときに、ギャロッピングの発生は認められず、制振効果の高い手法となっている。
- ③ 近接一体型ケーブルの2自由度振動特性は、ケーブル中心間隔が $D=1.25d$ の場合については、高換算風速時における空力安定性が好ましくない結果が得られた。しかしながら、構造減衰率が非常に小さいことから、減衰を付加することにより、対処できると考えられる。
- ④ 近接一体型ケーブルの静的空気力特性についてみると、ケーブル中心間隔の変化は、抗力係数にほとんど

影響を与えない傾向が現れている。揚力係数および空力モーメント係数は、ケーブル中心間隔のわずかな違いによる影響を強く受けている。

- ⑤ ケーブル中心間隔が $1.0d \leq D \leq 1.3d$ の場合には、揚力係数曲線および空力モーメントは、迎角 α に対して、同様な傾向を示す。 $D=1.4d, 1.5d$ の場合で $\alpha < 45^\circ$ においては、符号が逆になる傾向を示している。
- ⑥ 空力的に安定性が高いと考えられる $CL, CM \approx 0$ となる迎角の範囲は、ケーブル中心間隔が大きくなるにつれて広がっている。
- ⑦ 流れの可視化実験から、ケーブル中心間隔が広がると、模型後流での流れに乱れが発生することが確認できた。
- ⑧ アングルを取り付けることにより、完全剥離型断面となり、模型後流の流れが乱されることがわかった。

参考文献

- 1) M. Matsumoto, N. Shiraishi and H. Shirato, "Aerodynamic Instabilities of Twin Circular Cylinders" in Proceedings of International Colloquium on BBAA, (Kyoto), (1988), pp.131-140.
- 2) 久保, 中原, 加藤, 金尾: 斜張橋ケーブルを対象にした複数円柱の空力弾性振動, 第11回風工学シンポジウム論文集, 1990, pp275-280
- 3) Y. Kubo, T. Nakahara and K. Kato, "Aerodynamic behavior of multiple elastic circular cylinders with vicinity arrangement", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 54/55 (1995), pp.227-237
- 4) Y. Kubo, H. Maeda, K. Kato, K. Oikawa, T. Takeda, "NEW CONCEPT ON MECHANISM AND SUPPRESSION OF WAKE-GALLOPING OF CABLE-STAYED BRIDGES", in Proceedings of International Conference on Cable-stayed and Suspension bridges, 1994, pp.491-498
- 5) 久保, 前田, 加藤, 佐々木: 斜張橋用複数本ケーブルの耐風挙動, 第13回風工学シンポジウム論文集, 1994, pp251-256
- 6) 久保, V.J. Modi, 小坪, 加藤, 山口: 動く表面を用いた境界層制御による塔状構造物の空力弾性振動に対する制振, 構造工学論文集 Vol.41A (1995年3月)
- 7) 岡島 厚: 高レイノルズ数における直列2本円柱まわりの流れ, 日本機械学会論文集(第2部), 1978, 44巻, 384号 pp2663-2671

(1995年9月18日受付)