

メッシュを利用した並列ケーブルのウェークギャロッピングの 空力的制振対策

Aerodynamic vibration control method for wake galloping of stay-cables using gap flow control

新原雄二* 林田宏二*
Yuji Niihara Koji Hayashida

*工修 研究員 鹿島建設㈱技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)

ABSTRACT

A new aerodynamic vibration control method for the wake galloping of parallel stay-cables of cable-supported bridges is proposed in this paper. It is obvious through the past researches that the air flow between the two cables has a large contribution on the mechanism of the wake galloping. But the detail of the mechanism is still unknown, and the vibration control methods which can completely reduce the wake galloping have not been developed.

In this paper, the efficiency of the new vibration control method using a pair of mesh between the cables was studied. From the results of wind tunnel tests, it was shown that the proposed method can reduce the wake galloping of stay-cables effectively. And the mechanism of the method was investigated through the flow-visualization test.

Keywords: parallel stay-cable, wake galloping, aerodynamic vibration control, mesh, gap flow

1. はじめに

P C斜張橋は重量が大きいので、1本ケーブル形式の場合には大容量のケーブルが必要となるが、ケーブル長の長い長大P C斜張橋では、ケーブルの現場への搬入・架設が難しくなり、コスト高につながることもある。これに対し、容量の小さいケーブルを複数本利用する方法は、現場への搬入・架設が容易になり、コスト低減につながるものである。しかしながら、小容量ケーブルを複数本用いた場合、ケーブル間を流れる風の作用によって、下流側ケーブルが激しく振動するウェークギャロッピングが発生する。呼子大橋、秩父公園橋¹⁾、伊唐大橋²⁾など、並列ケーブルを採用したP C斜張橋では、いずれもウェークギャロッピングが発生し、ダンパー、相互連結方式(制振ワイヤー)、束ねケーブル方式などの対策がなされている。

また、近年、スパン長 200m クラスの橋梁では、P C斜張橋に代わる新しい形式としてエクストラードスド橋が相次いで建設されている。エクストラードスド橋は、従来、主桁内部で使用されていた外ケーブルを、支点部において主桁外部へ大きく偏心させることで、力学的な

有利さを実現した橋梁形式であり、基本的には桁橋の延長線上のものと考えられている。エクストラードスド橋は、斜張橋と比較した場合、主塔高さが半分程度になること、また、主塔に大きな曲げ剛性を必要とせず、主塔側のケーブル定着部にサドル構造を用いた場合には、主塔をコンパクトにすることができるなどの特徴がある。特に1面吊り形式の場合、主塔幅の増大は主桁幅員の増大につながるため、主塔を小さくできるエクストラードスド橋の有利さが発揮されると考えられる。このような1面吊り形式の場合、エクストラードスド橋においても並列ケーブル形式となることがある。主桁側でケーブル間隔を広くとれる場合はよいが、そうでない場合には、エクストラードスド橋のケーブルにおいてもウェークギャロッピングの発生が懸念される。斜張橋のケーブルが、その降伏耐力 P_u の 0.4 倍 (すなわち $0.4P_u$) で設計されるのに対して、エクストラードスド橋は 0.6 倍 ($0.6P_u$) で設計されることがあり、その場合には同一規格のケーブルでも、斜張橋に比べて 1.5 倍の張力が導入可能となる。しかしながら、ウェークギャロッピングの発生は振動数に対して鈍感であるという報告もあり³⁾、そのまま発生風速が上昇するとは限らない。

このような並列ケーブルのウェークギャロッピングについては、平成5年～7年にかけて、建設省土木研究所と民間15社とで実施された官民共同研究において、その特性や制振対策について数多くの検討がなされている⁴⁾。ウェークギャロッピングは、ケーブル相互間の風の流れに強く依存する現象であり、その励振力も極めて大きいため、これを効果的に制振するためには、ダンパー等による構造的制振対策よりも、むしろ、流れそのものを制御する空力的制振対策の方が有効であると考えられる。このような方法として、ケーブル表面を加工する方法⁵⁾やケーブルを近接させる束ねケーブル方式⁶⁾などが提案され、その制振効果の有効性が報告されている。しかしながら、ケーブル表面を加工する方法はケーブル製作コストの増大や架設時のハンドリングの悪化などが問題となることがあり、また、束ねケーブル方式はケーブルの曲げに対する検討が必要になること、あるいはねじれ振動が発生するといった問題点がある。

そこで、本研究は、簡易な対策でウェークギャロッピングを効果的に制振する方法として、メッシュを用いてギャップフローを制御・抑制する空力的制振対策を提案し、その制振効果について検討を行ったものである。2次元剛体模型実験の結果、ウェークギャロッピングに対して良好な制振効果が得られたので報告する次第である。まず始めに、本制振対策法の概要について述べる。次に、ケーブル間隔 $3D$ (D : ケーブル径) を対象に、メッシュ形状をパラメーターとした2次元バネ支持実験を行い、最適なメッシュ形状について検討した。さらに、気流迎角の影響、ケーブル間隔の影響についても検討を行った。最後に、制振効果のメカニズムを検討するために実施した可視化実験について報告する。なお、本制振対策工法は、ケーブル架設高さの低いエクストラドーズド橋への適用を想定している。

2. メッシュを利用した空力的制振対策の概要

ウェークギャロッピングの発生メカニズムは必ずしも明らかとはいえない部分も多々あると思われるが、文献⁷⁾では、そのメカニズムに関して、下流側ケーブルの相対位置によって図-1のようなフローパターンで説明している。すなわち、case1, case2 では下流側ケーブルの外側の流れが加速して変位が大きくなるような流体力が作用するのに対して、ギャップが大きくなると、case3, case4 のようにギャップの内側の流れが加速し、下流側ケーブルが内側へ引き戻される。このようなフローパターンは、ウェークギャロッピングが発散振動とはならず、振幅が限定される振動であることから理解される。

このように、ウェークギャロッピングの発生には、ケーブル間のギャップを流れるギャップフローや、ケーブル外側を流れるアウターフローが深くかかわっていることは間違いない。そこで、このようなケーブル近傍の流

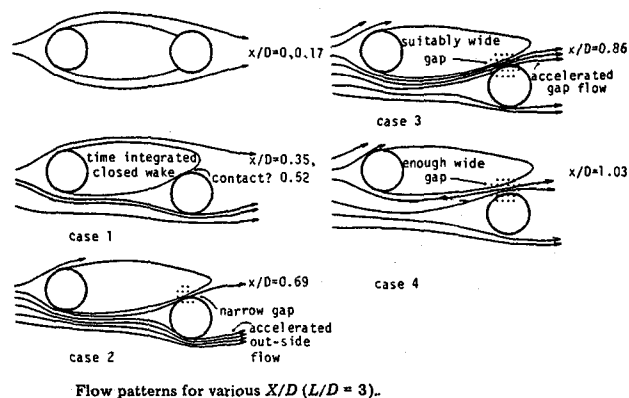


図-1 直列円柱のフローパターン⁷⁾

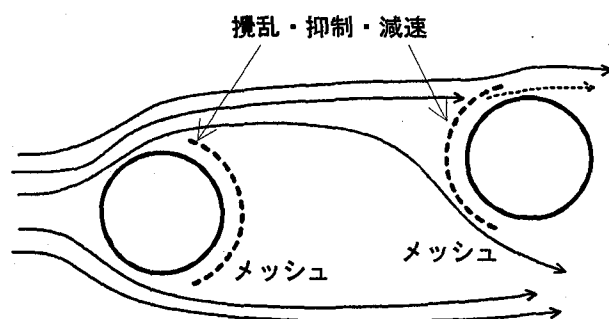


図-2 メッシュによる制振対策法

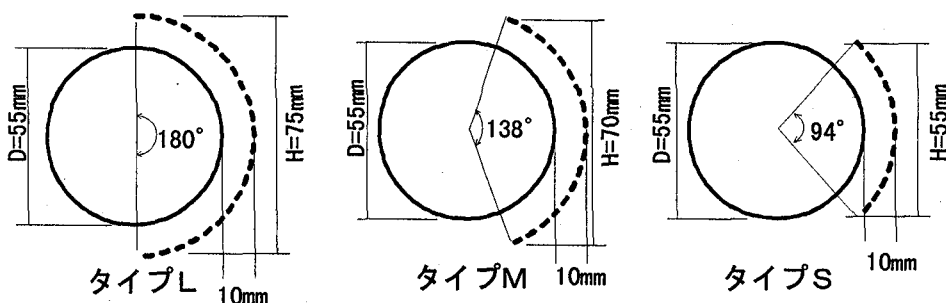
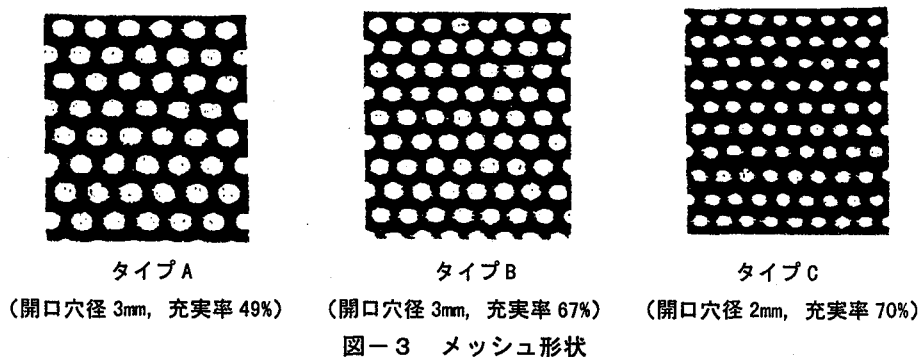
れを何らかの方法で制御することにより、ウェークギャロッピングの発生流体力を抑え、制振できる可能性があると考えた。その方法として、図-2に示すような、並列ケーブルの内側（ギャップ側）にRのついた曲面状の1対のメッシュを挿入する方法を提案した。この意図は、下流側ケーブルの前面にメッシュを付けることにより、ギャップフローを攪乱、抑制、減速させ、ギャップフローが下流側ケーブルに直接的に作用するのを抑えるというものである。実橋では、どちらからも風が吹いてくるため、両方のケーブルにメッシュを付けておく必要がある。この場合、上流側ケーブルのメッシュ高さをケーブル径よりも若干大きくすることで、風が上流側ケーブル近傍を通過する際に攪乱され、ギャップフローを弱める効果も期待できる。

なお、メッシュの形状として、平板型ではなく、曲面型とした理由は、メッシュ自体の剛性を高めることと、ケーブルに隠れるようにすることで景観的に目立たないようにすることである。

3. 2次元部分模型バネ支持実験の概要

3.1 使用した風洞

まず、2次元剛体模型を用いたバネ支持実験の概要について説明する。実験に使用した風洞は、鹿島建設㈱技術研究所所有のゲッチングン型回流式汎用境界層風洞である。この風洞の測定胴（長さ19m）の上流部には



部分模型実験が可能なテストセクションが設けられている。部分模型実験の測定部断面は高さ 2m, 幅 1.6m である。また、一様流中における気流の乱れ強さは 0.2% 以内である。

3.2 実験に使用した模型

ケーブル模径は外径 55mm のアルミパイプを利用したもので、表面の加工は行っていない。

メッシュは既製のアルミ製パンチングメタル(厚さ 1mm)を利用したものである。メッシュの形状を図-3に、メッシュの高さを図-4に示す。メッシュの形状は、開口穴の大きさ、充実率をパラメータとした。メッシュ A とメッシュ B は、開口穴の大きさが同じ 3mm であり、充実率がそれぞれ 49%, 67% である。メッシュ C は開口穴の径が 2mm であるが、充実率はメッシュ B とほぼ同じ 70% である。メッシュの高さについても 3 種類を用意した。S サイズはケーブル径と同じ高さ、L サイズはちょうど半円形になる高さ、M サイズは S と L の中間の高さである。したがって、メッシュの形状 3 種類、高さ 3 種類の合計 9 種類のメッシュを実験に使用した。メッシュとケーブル模型の間には 10mm の隙間があり、スペーサーを介して、メッシュはケーブルに固定されている。

3.3 実験ケース

並列ケーブルの実験では、両方のケーブルに振動自由度を持たせることが望ましいが、上流側ケーブルの振動は下流側ケーブルの振動に対して大きな影響を及ぼさないと報告されていることから⁸⁾、実験の簡略化を図る目的で、本研究では全ての実験ケースにおいて、上流側ケーブルを固定し、下流側ケーブルのみをたわみ 1 自由

度支持することとした。また、気流は全て一様流である。

実験のパラメータとしては、メッシュ形状、メッシュ高さ、気流迎角、ケーブル間隔である。実験ケースを表-1に示す。ケース a-1~a-10 は、ケーブル間隔 3D、迎角 0° の場合に、どのメッシュが最も効果的かを調べるものである。ケース b-1~b-4 は、上流側ケーブルと下流側ケーブルのメッシュのどちらが制振効果を発揮しているかを調べる目的で、メッシュを片側のケーブルにだけ取り付けただけのものである。ケース c-1~c-6 は気流迎角の影響を、ケース d-1~d-3 はケーブル間隔が 4D の場合の制振効果を検討するものである。

円形ケーブル、メッシュともに、レイノルズ数によって空力特性が変化すると考えられる。風洞風速 1m/s ~ 25m/s の範囲では、実験レイノルズ数は $3.8 \times 10^3 \sim 9.5 \times 10^4$ となる。模型の直径が 55mm であるのに対して、実橋の並列ケーブルに用いられるケーブル径は 100mm 前後のものが多いこと、実験風速は実橋でウェークギャロッピングが発生する風速とほぼ対応していることなどから、本実験におけるケーブル断面のレイノルズ数は、実橋と比べて大きくは異なっていないといえる。メッシュについては、実橋では目詰まりなどの維持管理面を考えると、多少、開口穴径を大きくしなければならないと考えられるが、メッシュ形状のレイノルズ数効果については検討できていない。

なお、本実験では、ケーブル模型重量が軽く、全ての実験で構造対数減衰率が 0.003~0.005 程度、スクラートン数 $Sc (=2m\delta/\rho D^2, m: \text{模型単位長さ質量})$ が 7~12 程度となっており、実際の斜張橋ケーブルよりかなり小さく、振動しやすい状態となっている。また、

表-1 実験ケース

ケース 名称	制振対策	メッシュ		ケーブル 間隔	迎角	たわみ振動数 [Hz]	たわみ対数 減衰率 δ	スクルートン数 Sc
		形状	高さ					
a-1	なし	—	—	3D	0°	1.813	0.0030	7.7
a-2	両方のケーブル	A	L	〃	〃	1.806	0.0031	8.0
a-3	〃	〃	M	〃	〃	1.808	0.0032	8.1
a-4	〃	〃	S	〃	〃	1.813	0.0033	8.4
a-5	〃	B	L	〃	〃	1.800	0.0031	8.0
a-6	〃	〃	M	〃	〃	1.800	0.0031	8.1
a-7	〃	〃	S	〃	〃	1.805	0.0033	8.5
a-8	〃	C	L	〃	〃	1.800	0.0031	8.0
a-9	〃	〃	M	〃	〃	1.800	0.0032	8.2
a-10	〃	〃	S	〃	〃	1.806	0.0033	8.6
b-1	上流側ケーブル	B	L	〃	〃	1.810	0.0029	6.9
b-2	〃	〃	M	〃	〃	1.813	0.0029	6.9
b-3	下流側ケーブル	〃	L	〃	〃	1.800	0.0034	8.7
b-4	〃	〃	M	〃	〃	1.800	0.0032	8.3
c-1	なし	—	—	〃	10°	1.812	0.0031	8.0
c-2	両方のケーブル	B	L	〃	〃	1.800	0.0043	11.1
c-3	〃	〃	M	〃	〃	1.800	0.0034	8.7
c-4	なし	—	—	〃	20°	1.800	0.0031	7.9
c-5	両方のケーブル	B	L	〃	〃	1.805	0.0050	12.9
c-6	〃	〃	M	〃	〃	1.800	0.0043	11.4
d-1	なし	—	—	4D	0°	1.810	0.0033	8.5
d-2	両方のケーブル	B	L	〃	〃	1.800	0.0050	12.9
d-3	〃	〃	M	〃	〃	1.800	0.0036	9.4

メッシュを付けることによる付加質量効果を除くため、全ての実験ケースで模型重量がほぼ同一となるよう調整している。

4. 風洞実験結果

4.1 最適メッシュ形状について（ケーブル間隔 3D）

ケーブル間隔 3D、気流迎角 0° におけるメッシュなし（a-1）、メッシュ有り（a-2～a-10）の V-A 図を図-5～8 に示す。なお、いくつかのケースでは、ごく低風速域において、渦励振と思われる振動の発生が見られたが、本研究は高風速域における大振幅のウェークギャロッピングの制振を目的としているため、渦励振領域での詳細な測定は行っていない。

ノーマルケーブル（図-5）では $U/fD=35$ （ U ：平均風速、 f ：たわみ固有振動数、 D ：ケーブル径）付近から不安定なリミットサイクルをもつ振動が発生した。 $U/fD=130$ 付近まで、無次元振幅 $A/D=0.6\sim0.7$ の振動が継続した後、 $U/fD=130$ 付近で大振幅の振動に成長している。特に、 $U/fD=130\sim180$ にかけては、2つの振幅で振動が発生したが、このメカニズムは不明である。

充実率 49% のメッシュ A（図-6）を付けた場合、サイズの小さい AS では $U/fD=80$ 付近からソフト型の微小振幅の振動が、また、 $U/fD=70\sim180$ にかけてハード型の振動が発生した。サイズの大きい AM、AL では $U/fD=50\sim100$ にかけてハード型の振動が発生したが、その振幅はメッシュ高さの高い AL の方が大きかった。

いずれの場合も、ノーマルケーブルで見られたような高風速域での大振幅の振動は発生していない。また、低風速域で見られるハード型の振動の励振力は非常に小さく、今回の実験ではスクルートン数が小さかったために振動が発生したものと考えられ、実ケーブル程度のスクルートン数があれば、このようなハード型の振動も抑えられると推測される。

次に、充実率 67% のメッシュ B（図-7）の場合であるが、メッシュサイズの小さい BS では、AS 同様に $U/fD=70$ 付近からソフト型の微小振幅の振動が発生したが、ハード型の振動は発生しなかった。また、サイズの大きい BM、BL では、ハード型、ソフト型のいずれの振動も発生しなかったが、 $U/fD=50$ 付近で減衰が小さくなる傾向は見られた。

充実率 70% のメッシュ C（図-8）の場合も同様に、メッシュサイズの小さい CS では $U/fD=70$ 付近からソフト型の微小振幅の振動が発生したが、ハード型の振動は発生しなかった。サイズの大きい CM、CL では、 $U/fD=40\sim100$ にかけて励振力の小さいハード型の振動が発生したが、その振幅はメッシュ A の場合と同様に、サイズの大きい CL の方が大きかった。

次に、ノーマルケーブル（a-1）と、比較的制振効果の大きかったメッシュ BL（a-5）、BM（a-6）の空力減衰を風速と振幅に対して表した V-A- δ 図を図-9 に示す。ここで、構造減衰には若干の振幅依存性が見られたが、無次元振幅 $A/D=0.2$ における構造減衰を、測定された減衰から差し引いて空力減衰とした。ノーマルケ

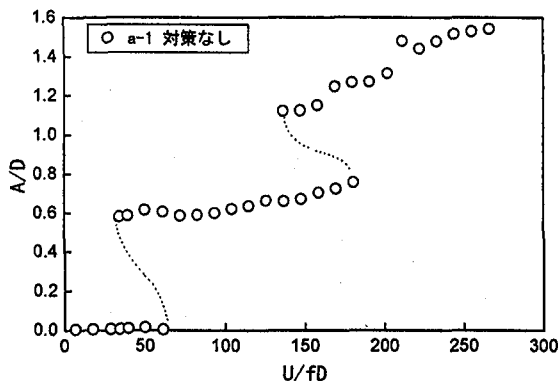


図-5 風速-応答振幅図 (メッシュなし)

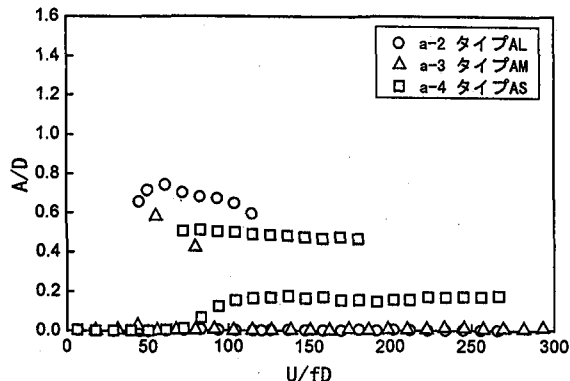


図-6 風速-応答振幅図 (メッシュタイプ A)

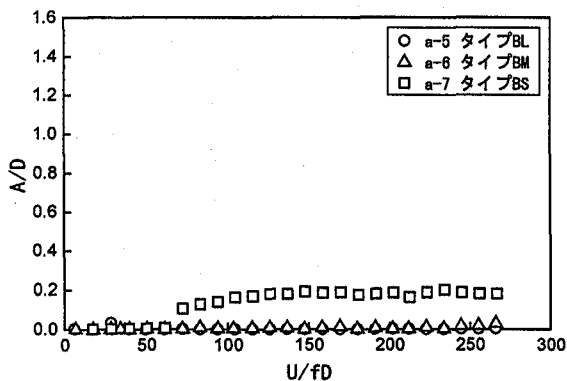


図-7 風速-応答振幅図 (メッシュタイプ B)

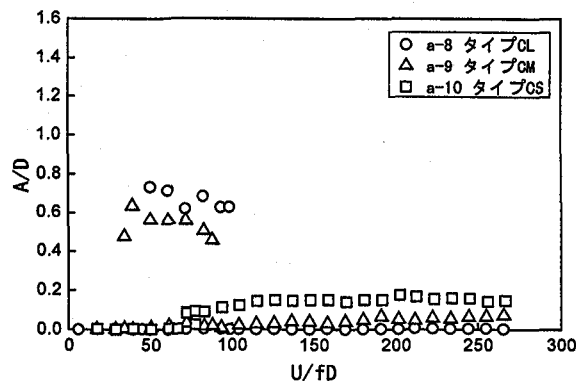
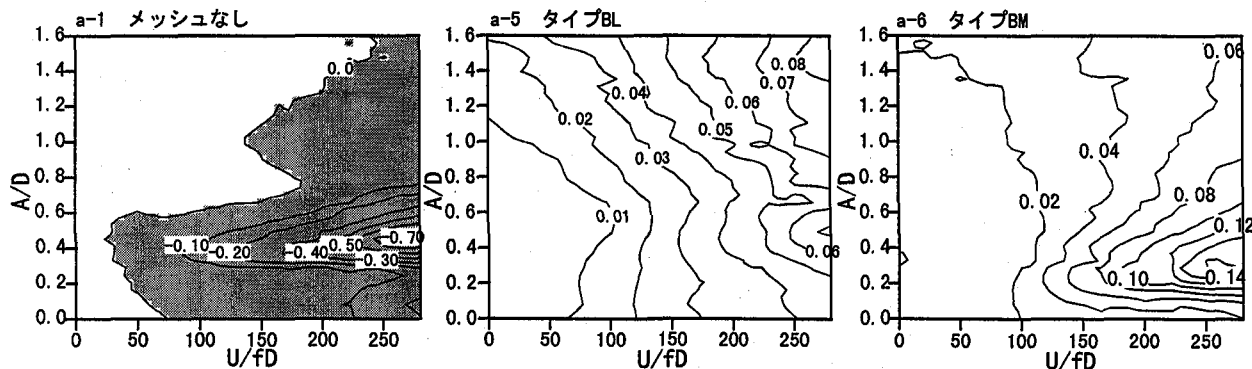


図-8 風速-応答振幅図 (メッシュタイプ C)



ケース a-1 (対策なし)

ケース a-5 (タイプ BL)

ケース a-6 (タイプ BM)

図-9 風速-振幅-空力減衰 (ケーブル間隔 3D, 迎角 0°)

ケーブルでは、 $A/D=0.4\sim0.5$ 付近に非常に大きな励振力が作用する領域があることがわかる。ウェークギャロッピングが小振幅から発生していく振動波形を見ても、この領域でジャンプするように急激に振幅が大きくなった。これに対して、BL、BM ともに、高風速になるに従い、大きな正の空力減衰が付加されている。BL では風速の増大にほぼ比例して空力減衰が付加され、振幅依存性が比較的少ないのに対して、BM では、高風速域において、 $A/D=0.2\sim0.3$ 付近で大きな正の減衰が付加されている。同じ形状のメッシュを用いても、メッシュ高さによって、その付加空力減衰効果が異なることがわかる。

以上の結果から判断して、メッシュを付けた場合に

は、いずれのケースにおいても、高風速における大振幅のウェークギャロッピングを制振することが可能であることが明らかとなった。サイズの小さい S を用いた場合には $U/fD=70$ 付近からソフト型の振動が発生し、そのメカニズムは不明であるが、振幅は $A/D=0.2$ 程度と小さいものである。サイズの大きい M や L を用いた場合には、 $U/fD=50\sim100$ にかけて不安定な領域があるものの、その励振力は非常に小さく、実ケーブル程度のスクルトン数があればこの領域での振動の発生はないと考えられ、全ての風速域でウェークギャロッピングを抑えることができると考えられる。メッシュの充実率については、メッシュ形状が同じ A (49%) よりも B (67%)

の方が制振効果が高かったが、同じ充実率でもメッシュ形状が異なる B (67%) と C (70%) では、応答に若干の差が見られた。

4.2 メッシュの効果に関する検討

このように、並列ケーブルのギャップの内側に 1 対のメッシュを挿入することで、ウエークギャロッピングに対して高い制振効果が得られることが明らかとなった。ここでは、上流側、下流側のそれぞれのケーブルに取り付けたメッシュが、どのような効果を発揮しているのかを調べる目的で、メッシュを単独に付けた場合の実験を行った。使用したメッシュは、大きな制振効果の得られたメッシュ形状 B (充実率 67%)、サイズ L と M のものである。得られた V-A 図を図-10 に示す。

まず、上流側ケーブルにのみメッシュを付けた場合には、メッシュ BL, BM とともに $U/fD=40$ 付近からハード型の振動が発生したが、ノーマルケーブルで見られた高風速域での大振幅の振動は発生せず、全風速域にわたって振幅はほぼ一定である。その振幅は、メッシュサイズの大きい BL で $A/D=0.8\sim 1.0$ 、小さい BM で $A/D=0.6\sim 0.8$ となっており、BL の方が大きいことがわかる。特に、 U/fD が $50\sim 100$ にかけては、ノーマルケーブルでの振幅が $A/D=0.6$ 程度であったことを考えると、メッシュを付けたことによって、振幅が増大しているといえる。振幅はケーブル径 D で無次元化しているが、メッシュ取付時におけるメッシュを含めた見かけの断面高さが BL の場合で $1.36D$ 、BM の場合で $1.27D$ であることを考慮すると、下流側ケーブルの振幅はメッシュを含めた上流側ケーブルの断面高さの影響を受けていると考えられる。以上の結果から、上流側ケーブルにのみメッシュ BL, BM を付けた場合には、高風速域での大振幅のウエークギャロッピングを抑制する効果はあるものの、完全に制振することはできず、サイズの大きいメッシュの方が、振幅が大きくなる可能性があるといえる。

次に、下流側ケーブルにのみメッシュを付けた場合であるが、BM の場合には $U/fD=60\sim 100$ にかけて振幅 $A/D=0.2$ 程度の微小な振動が発生したものの、それ以

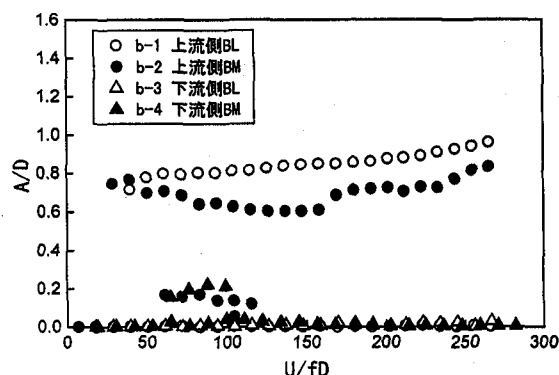


図-10 片方のケーブルにメッシュを付けた場合の風速-応答振幅図 (ケース b-1~b-4)

外の風速域では振動の発生はなかった。また、BL を付けた場合には、下流側ケーブルの振動は見られなかった。したがって、メッシュによるウエークギャロッピングの制振効果は、主として下流側ケーブルのメッシュによるものであり、その効果はメッシュ高さの高い方が大きいと考えられる。

上流側ケーブルのメッシュは、メッシュ高さが大きいほど振幅が大きくなるのに対して、下流側ケーブルのメッシュは、メッシュ高さが大きいほど制振効果が大きい。したがって、今回実験に使用したメッシュの中では、中間的なサイズ M の場合に、比較的良好な制振効果が得られたものと考えられる。

4.3 気流迎角の影響に関する検討

次に、ケーブル間隔 $3D$ において、気流迎角が 10° 、 20° の場合について実験を行った。使用したメッシュ

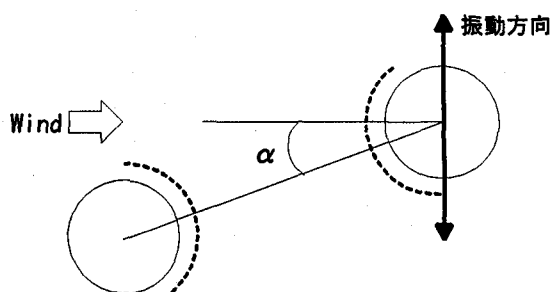


図-11 迎角の与え方

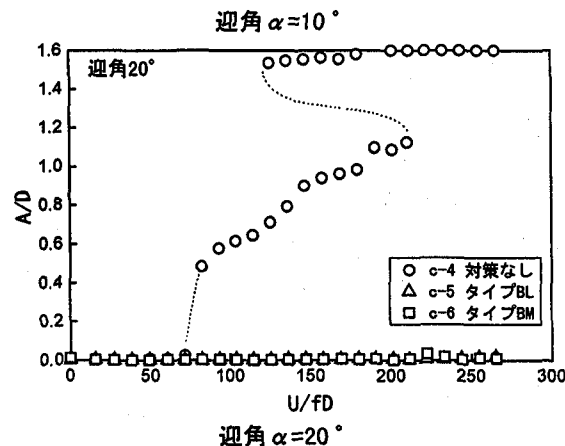
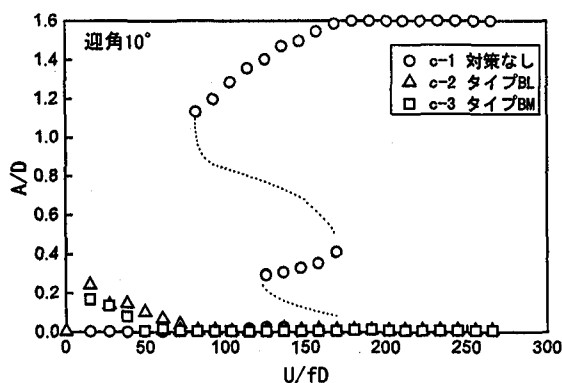


図-12 気流迎角がある場合の風速-応答振幅図

は 4.2 と同様に BL と BM である。迎角の与え方は、図-11 に示すように、下流側ケーブルの振動方向を気流に対して直角方向に保ったまま、固定した上流側ケーブルの相対位置を変えることにより与えた。並列ケーブルに対して斜めから風が吹く場合には、ケーブルは鉛直振動のみならず水平振動を伴った楕円軌道を描くこともあり、このような支持条件は実際のケーブルを反映していないため、3次元模型による実験が望ましいと考えられるが、本研究では、図-11 のような2次元バネ支持実験とした。実験から得られたV-A図を図-12 に示す。変位測定制限から、振幅は無次元振幅 1.6 までしか測定できず、図中で振幅が 1.6 に達しているものは、それ以上の振幅になっていることを示している。

迎角 10° の場合、ノーマルケーブルでは $U/fD=80$ 付近から不安定なリミットサイクルをもつ複雑な振動が発生した。メッシュを付けた場合、BL、BM の両方とも、 $U/fD=50$ 以下の低風速域で微小振動が発生したものの、それより高風速域での振動の発生は見られなかった。迎角 20° の場合、ノーマルケーブルでは $U/fD=80$ 付近からソフト型の振動が発生した後、 $U/fD=120$ 付近で不安定なリミットサイクルをもつ大振幅の振動に移行した。メッシュを付けた場合には、両方のケースとも振動は発生しなかった。

以上の結果から、2次元剛体模型実験で振動方向を限定しているという問題点はあるものの、メッシュによる制振対策は、気流迎角がある場合にも有効であると考えられる。

4.4 ケーブル間隔の影響に関する検討（ケーブル間隔 4D の場合）

次に、ケーブル間隔 4D、気流迎角 0° の場合の実験結果について述べる。使用したメッシュはタイプ BL とタイプ BM である。得られたV-A図を図-13 に、V-A- δ 図を図-14 に示す。ノーマルケーブルでは、 $U/fD=40$ 付近からウェークギャロッピングが発生し、その振幅は風速とともに急激に大きくなり、ケーブル間隔 3D の場合よりも振幅は大きかった。これに対し、メッシュを付けた場合には全風速域で振動は発生せず、ケーブル間隔 3D の場合よりも制振効果が大きいといえる。

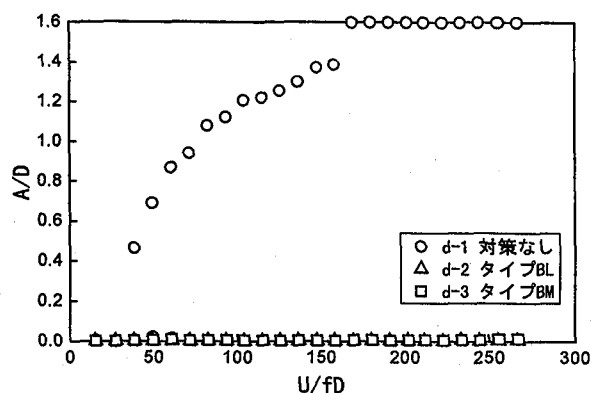


図-13 風速-応答振幅図（ケーブル間隔 4D、迎角 0° ）

V-A- δ 図を見てもわかるように、メッシュを付けた場合には、風速の増加とともに正の空力減衰が付加されており、高い制振効果が得られていることがわかる。

5. 流れの可視化実験

前章で述べたように、並列ケーブルのギャップ側に1対のメッシュを挿入することにより、ウェークギャロッピングに対して高い制振効果が得られることが明らかとなった。ここでは、その制振効果のメカニズムを調査する目的で実施した、下流側ケーブル静止中および振動中の流れの可視化実験について述べる。

5.1 可視化実験の概要

(1) 使用した風洞および可視化装置

実験に用いた風洞は、鹿島建設機技術研究所所有の垂直密閉回流型風洞（測定部断面、幅 2m、高さ 1.2m）である。この測定洞内に、隔壁を設置して幅 50cm の測定部を設け、その中に模型を設置している。流れの可視化にはスモークワイヤー法を用いており、風洞天井に設置されたレーザーライトから、シート状のレーザー光線を照射し、模型周りの風の流れを可視化した。また、測定部には強制加振装置が設置されており、模型を2次元（たわみとねじれ）に加振することができる。

画像の収録には、デジタルビデオカメラを用いている。このビデオカメラは1秒間に30コマの撮影が可能で、

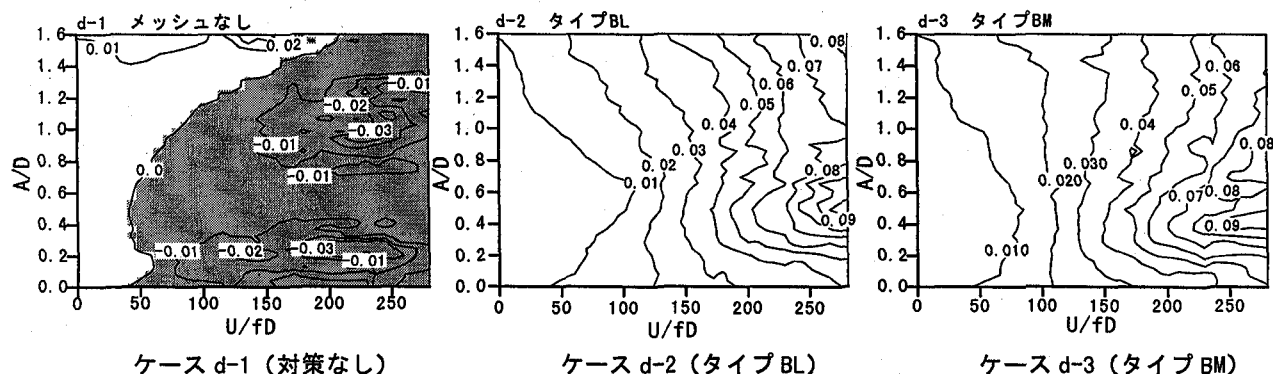


図-14 風速-振幅-空力減衰（ケーブル間隔 4D、迎角 0° ）

シャッタースピードを 1/60 秒とした。収録した画像は、画像ファイルとしてパソコンに取り込んだ。

(2) 使用した模型

実験に使用したケーブル模型は、直径 $D=40\text{mm}$ の円柱で、ケーブル間隔 $3D$ である。メッシュは充実率 70% (バネ支持実験におけるタイプ B, C に相当) で、開口穴の径は 2mm である。また、メッシュの高さは、バネ支持実験におけるサイズ M と L である。

下流側のケーブル模型を強制加振装置に取付け、鉛直方向の加振を行った。バネ支持実験と同様に、上流側ケーブル模型は固定してある。また、風洞閉塞率は、1 本ケーブルで 3.3%，下流側ケーブル最大変位時で 5.3% である。

(3) 実験ケース

可視化実験は、ノーマルケーブルのバネ支持実験において (図-5)， $U/fD=50$ 付近で、下流側ケーブルが振幅 $0.6D$ で振動している状態を再現することとした。この時の風洞風速は 5m/s ，レイノルズ数は 18800 であった。このような無次元風速は、 U と f の組合せでいくらかでも再現可能であるが、流れの様子を可視化しやすくするためには低風速の方が望ましい。しかしながら、ウェークギャロッピングでは、無次元風速による整理が必ずしも成り立たないことが指摘されていること、また、レイノルズ数の影響も少なからずあると考えられることなどから、できる限りバネ支持実験と同程度の風速で行うことがよいとも考えられる。そこで、 $U/fD=50$ を再

現するにあたり、 $U=1\text{m/s}$ ， $f=0.5\text{Hz}$ ($Re=2700$) と、 $U=3\text{m/s}$ ， $f=1.5\text{Hz}$ ($Re=8200$) の 2 種類の実験条件で可視化を行った。可視化実験時のレイノルズ数はバネ支持実験時よりも小さいが、いずれも亜臨界領域である。

5.2 可視化実験結果

(1) 静止時 (メッシュなし) における流れの可視化

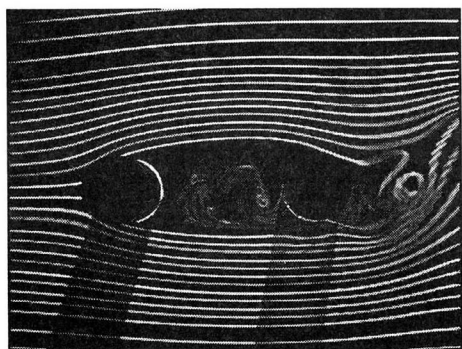
まず始めに、下流側ケーブル静止時における流れを、下流側ケーブル変位 $0D$ の場合と変位 $0.6D$ の場合について、風速 1m/s と 3m/s で比較したものを図-14 に示す。風速 1m/s ，下流側ケーブル変位 $0D$ の場合、上流側ケーブルから剥離した流れは間欠的に下流側ケーブルに再付着し、下流側ケーブル後方に渦が発生している。一方、下流側ケーブル変位 $0.6D$ では、下流側ケーブルにぶつかった流れは、ケーブル外側への流れと、ケーブル内側 (ギャップ側) への流れに分かれている。ギャップ側へ曲げられた流れは、ケーブル後方へ強く噴き出し、反対側のケーブルからの流れと混ざり合い、大きな渦が発生し、下流へと流れていく。

風速 3m/s の場合も、風速 1m/s とほぼ同じ流れになっているといえる。ただ、流れが速いため、下流側ケーブル後方の流れが明瞭にはなっていない。

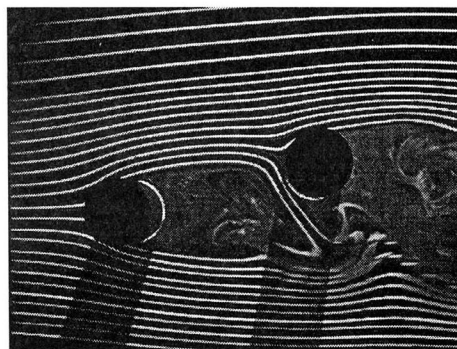
風速 1m/s と 3m/s でほぼ同じ流れのパターンとなっていることから、これ以降では、流れが明瞭に見やすい風速 1m/s での実験結果を示すこととする。

(2) 静止時 (メッシュあり) における流れの可視化

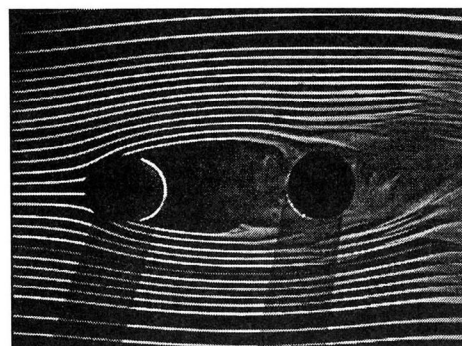
メッシュサイズ M と L を取り付けた下流側ケーブル



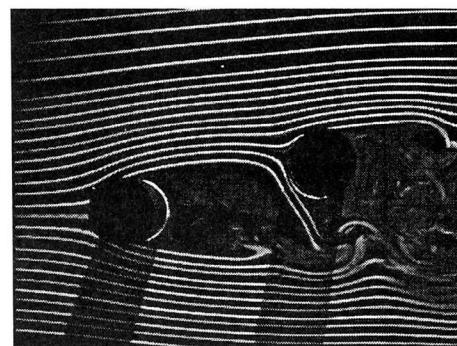
風速 1m/s ($Re=2700$)，下流側ケーブル変位 $0D$



風速 1m/s ($Re=2700$)，下流側ケーブル変位 $0.6D$

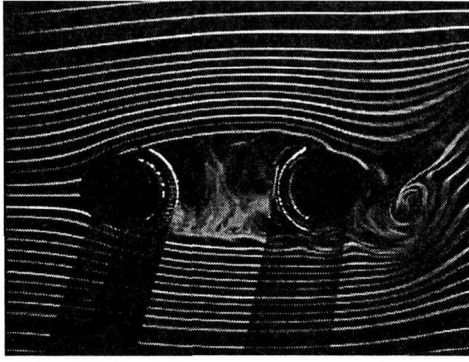


風速 3m/s ($Re=8200$)，下流側ケーブル変位 $0D$

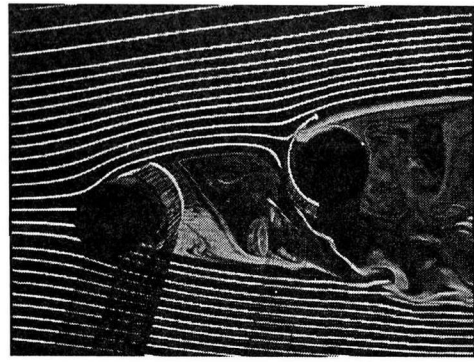


風速 3m/s ($Re=8200$)，下流側ケーブル変位 $0.6D$

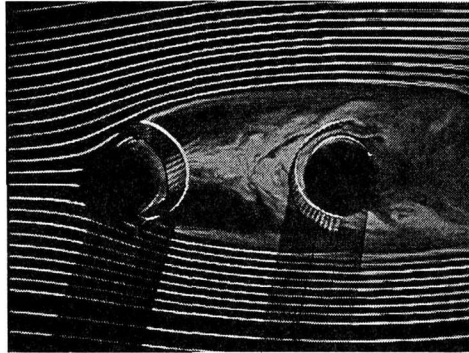
図-14 下流側ケーブル静止時 (メッシュなし) における流れの可視化



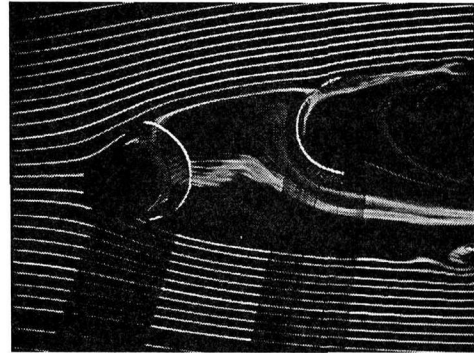
メッシュ M, 下流側ケーブル変位 0D



メッシュ M, 下流側ケーブル変位 0.6D



メッシュ L, 下流側ケーブル変位 0D



メッシュ L, 下流側ケーブル変位 0.6D

図-15 静止時におけるメッシュありの場合の流れの可視化 (風速 1m/s, $Re=2700$)

変位 0D 及び 0.6D における流れを図-15 に示す。実験風速は 1m/s である。

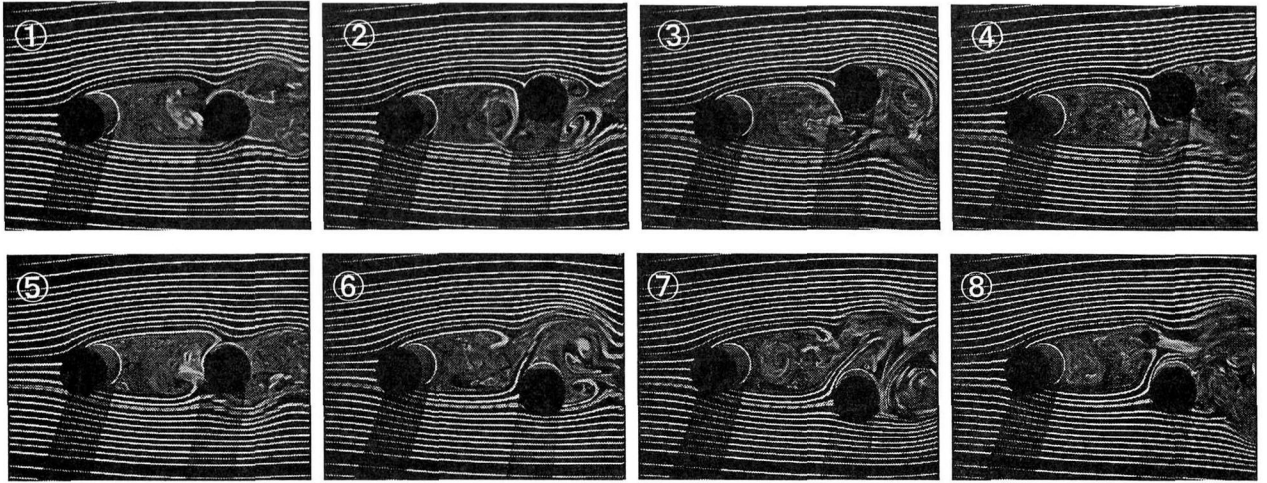
まず、メッシュ M サイズの場合であるが、下流側ケーブル変位 0D では、ノーマルケーブルの場合と同様に、上流側ケーブルからの剥離流れの中に下流側ケーブルが入っており、下流側ケーブルの後方に 2 本ケーブル 1 体となった渦が発生している。上流側ケーブルの後方（ギャップ内部）によどんだ煙が見られるが、これは、上流側ケーブルのメッシュを通過してきた流れで、メッシュを通過する際に拡散され、減速していることがわかる。下流側ケーブル変位 0.6D では、下流側ケーブルにぶつかった流れが、外側に曲げられるものと、メッシュを通過するもの、内側（ギャップ側）に曲げられるものの 3 つに分かれている。ギャップを通過した流れは、煙の幅が広がり、かつ、薄れていることから、メッシュ通過時に減速、攪乱されていることがわかる。また、ギャップ側に曲げられた流れは、メッシュの表面に沿って流れ、反対側の流れと混ざり合うが、ノーマルケーブルの場合のように強く噴き出してはおらず、抑制されているといえる。以上の結果から、M サイズのメッシュでは、主として下流側ケーブルに取り付けたメッシュにより、下流側ケーブルに作用する流れが減速、攪乱、抑制されることが、ウエークギャロッピングの制振につながっていると考えられる。

次に、メッシュサイズ L の場合であるが、メッシュを取り付けることにより、上流側ケーブルの見かけの断

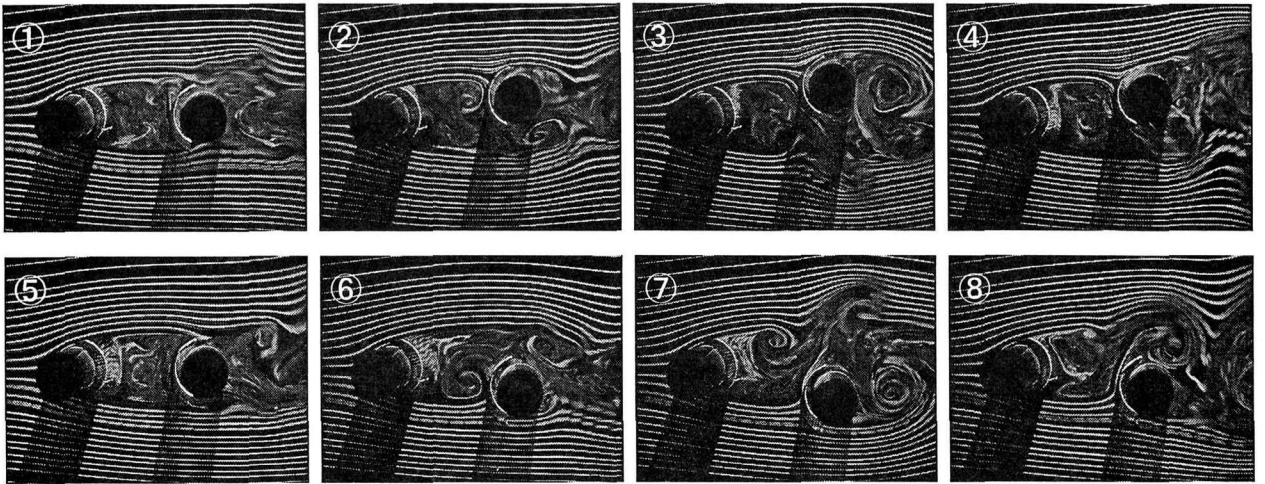
面高さが高くなるため、上流側ケーブルの後流の幅が広がっている。したがって、下流側ケーブル変位 0D では、下流側ケーブルが完全に上流側ケーブルの後流に入っており、ノーマルケーブルやメッシュサイズ M で見られたような、下流側ケーブル後方での渦の発生は見られない。また、上流側ケーブルの後方（ギャップ内部）には、上流側ケーブルに取り付けられたメッシュを通過する際に、減速された流れを見ることができる。下流側ケーブル変位 0.6D では、下流側ケーブルのメッシュを流れが通過して減速しているのが確認されるが、全体としては、上流側ケーブルの後流内に下流側ケーブルが入っており、下流側ケーブルには流速の高い流れは作用していない。バネ支持実験で、上流側ケーブルにのみメッシュを付けた場合 (b-1, b-2), $U/\bar{f}D=40$ 付近からハード型の振動が発生したが、その際、メッシュ高さの高い L サイズの方が振幅が大きかった。可視化実験の結果から、このようなハード型の振動の振幅は、上流側ケーブルからの後流幅の影響を受けていると考えられる。また、L サイズにおいても、下流側ケーブルにメッシュを付けることで、上流側ケーブルからの流れを減速、抑制させることができ、制振効果をもたらしていると考えられる。

(3) 振動時における流れの可視化

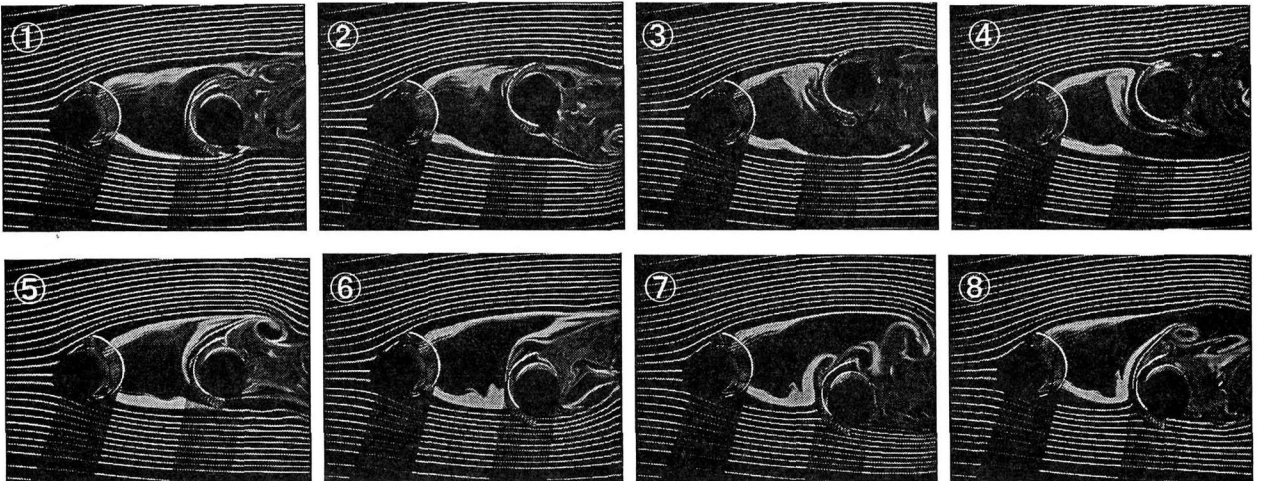
次に、下流側ケーブルをたわみ 1 自由度で強制加振した場合の、ノーマルケーブルおよびメッシュ M, L 取付時の流れを図-16(a)~(c)に示す。ここでは、位相角 45° ピッチで、1 周期分の流れを示している。また、



(a) ノーマルケーブル



(b) メッシュ M 付ケーブル



(c) メッシュ L 付ケーブル

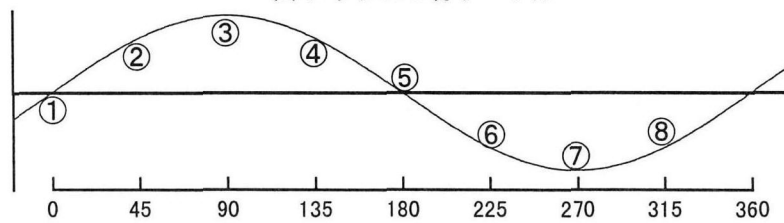


図-16 下流側ケーブル振動時の流れの可視化

実験風速は 1m/s である。

まずノーマルケーブルの場合であるが、位相 $45^\circ \sim 90^\circ$ にかけて強いギャップフローが生じ、下流側ケーブルの後方に渦を生成している。下流側ケーブルが中立位置に近づくとギャップフローは弱まるが、位相 225° 、 270° では再びギャップフローが生じている。このような流れのパターンは、図-1 の流れと符合していると考えられ、ギャップフローの噴き出しが、ウェークギャロッピングの一因となっていることをうかがうことができる。

メッシュサイズ M を付けた場合には、位相 $45^\circ \sim 90^\circ$ にかけて、下流側ケーブルにぶつかった流れが、メッシュを通過するもの、メッシュに沿って外側に曲げられるもの、逆にギャップ側に曲げられるものの3つに分かれており、メッシュを通過した流れは攪乱されている。このようなメッシュによる流れの制御がウェークギャロッピングの制振に寄与していると考えられる。

メッシュサイズ L を付けた場合には、上流側ケーブルに付けられたメッシュにより、後流の幅が広がっている。上流側ケーブルのメッシュを通過した流れが下流側ケーブルにあたるようになるが、流速が遅いため下流側メッシュを通過できず、下流側ケーブルの前面に煙が溜まるようになる。下流側ケーブル最大変位時（振幅 0.6D）には、アウターフローにメッシュが接するようになるが、メッシュにより流れが乱されている様子が見られ、励振力を弱めていると考えられる。この程度の振幅であれば、下流側ケーブルには流速の速い流れは、直接的には作用しておらず、ウェークギャロッピングは発生しないと考えられる。

これらの結果から、メッシュを付けた場合には、下流側ケーブルに直接あたる流れが弱められていることがわかり、このメッシュの作用がウェークギャロッピングの制振に寄与していると考えられる。

6. まとめと今後の課題

本研究によって得られた知見を以下にまとめる。

- ・並列ケーブルのウェークギャロッピングの制振対策として、メッシュをギャップの内側に付ける方法は、良好な制振効果が得られることが明らかとなった。
- ・実験に使用した全てのメッシュで制振効果が確認されたが、ケーブル間隔 3D を対象とした実験では、メッシュの充実率としては 70%程度、大きさとしてはケーブル径より若干大きいものが有効であると考えられる。
- ・メッシュによる制振効果は、主として、下流側ケーブルに取付けられたメッシュによるものである。
- ・気流迎角がある場合にも、ウェークギャロッピングを制振できると考えられる。
- ・ケーブル間隔が 4D の場合もウェークギャロッピング

を制振でき、ケーブル間隔 3D の場合よりも制振効果が高かった。

- ・流れの可視化実験の結果から、メッシュによりウェークギャロッピングが制振されるのは、下流側ケーブルに作用する流れが弱められることによるものと考えられる。

風洞実験結果からは、メッシュによる制振対策の有効性が示されたが、実橋への適用に際しては、多くの課題を抱えている。

まずは、施工性である。長大斜張橋ではケーブル架設高さが高くなるため、後施工でメッシュを取り付けることが極めて難しくなる。また、メッシュを付けることによりケーブルが受ける風荷重が大きくなる可能性があることから、ケーブル長の長い長大斜張橋への適用には課題が多い。これに対して、エクストラドーズド橋では主塔高さが低いため、施工法が困難だとしても、斜張橋ほどではないと考えられる。その場合、メッシュを数m単位に分割して、後施工で取付けることになると考えられる。

また、今回の風洞実験は、全て上流側ケーブル固定、下流側ケーブルたわみ 1 自由度という条件下のものである。実橋のウェークギャロッピングは、水平振動も伴うこと、また、上流側ケーブルも振動自由度を持つことなどから、これらを考慮した実験が必要と考えている。さらに、今回の実験では高い制振効果が得られたことから、メッシュはケーブル全長に対してではなく、作用流体力の大きいケーブル中央付近に付ければよいとも考えられ、メッシュの取付長に関する検討も必要である。

その他の課題として、風切り音やメッシュの目詰まりなどが挙げられる。今回の実験では、開口穴が同一径の円形のものをを用いたが、このような場合、ケーブル軸方向の風により音が発生することがあるため、実橋適用時には検討を要する。また、維持管理の面から、メッシュの目詰まりが予想されるため、実橋では、今回実験で用いた開口穴径よりも大きな穴を有するメッシュを使う必要があると考えられる。また、寒冷地では雪氷の付着の影響も検討する必要がある。

最後に、本制振対策法のメリットについて、以下のように考える。ウェークギャロッピングの空力的制振対策としては、ケーブル表面を加工する方法の有効性が示されているが、例えばケーブル間隔が 3D 程度で、ウェークギャロッピングの発生が確実視される場合には、設計段階でこのような表面加工ケーブルを採用することも考えられる。これに対して、ケーブル間隔が 4D~5D 程度の場合や、軸方向にケーブル間隔が変化する場合には、振動発生の有無を事前に予測するのは必ずしも容易ではない。そのような場合には、施工時の動態観測の結果により、本制振対策法を用いるかどうかの判断が可能となり、コスト低減につながると考えられる。

参考文献

- 1) 佐野演秀, 竹田哲夫, 和田信秀, 向 弘晴: 実橋観測に基づいたウエークギャロッピングの振動特性について, 土木学会第 49 回年次学術講演会概要集, I-541, pp.1080-1081, 平成 6 年 9 月.
- 2) 上野健治, 折田秀三, 前田 勉: 伊唐大橋束ねケーブルの耐風特性と制振対策, 土木学会第 52 回年次学術講演会概要集, I-B168, pp.336-337, 平成 9 年 9 月.
- 3) 藤沢伸光: 並列ケーブルのウエークギャロッピングに関する一実験, 第 13 回風工学シンポジウム論文集, pp.239-244, 1994 年.
- 4) 建設省土木研究所: 斜張橋並列ケーブル耐風制振に関する共同研究報告書 (その 1, その 2, その 3), 平成 5 年 3 月, 平成 6 年 9 月, 平成 7 年 3 月.
- 5) 米田昌弘, 宮地真一, 望月秀之, 枝本勝哉: ウエークギャロッピングの空力的制振法に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.504/VI-25, pp.127-136, 1994 年 12 月.
- 6) 前田 博, 久保喜延, 加藤九州男, 福島誠二: 斜張橋用近接一体型ケーブルの耐風特性, 構造工学論文集, Vol.42A, pp.775-784, 1996 年 3 月.
- 7) Shiraishi N., Matsumoto M., Shirato H. : On Aerodynamic Instabilities of Tandem Structures, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 23, pp.437-447, 1986.
- 8) 建設省土木研究所: 斜張橋並列ケーブルのウエークギャロッピング制振対策検討マニュアル (案), 平成 7 年 9 月.

(1998 年 9 月 18 日受付)