

並列ケーブルのウェイクギャロッピング特性に及ぼす降雨の影響について

Experimental Investigations on Wake Galloping Appeared in Tandem Cables of Cable-stayed Bridges subjected to Wind and Rain in Skewed Direction

米田昌弘*, 宮地真一**, 畠中真一***

Masahiro YONEDA, Shin-ichi MIYACHI and Shin-ichi HATAKENAKA

* 工博 近畿大学助教授 理工学部土木工学科 (〒577-8502 東大阪市小若江 3-4-1)

** 工修 川田工業(株) 技術開発本部 主幹研究員 (〒550-0014 大阪市西区北堀江 1-22-19)

*** 工修 川田工業(株) 技術開発本部 研究員 (〒114-8562 東京都北区滝野川 1-3-11)

This paper deals with the wake galloping in tandem cables of cable-stayed bridges subjected to wind and rain in skewed wind direction. Wind tunnel experiments have been carried out in both uniform and turbulent flows by using conventional smooth surface circular cables with and without artificial water rivulet. It was ascertained from test results that wake galloping characteristics would be very dependent on the artificial water rivulet formed on the cable surface at lower side. Wind tunnel experiments also demonstrated that the exciting force of wake galloping could be increased due to the effect of artificial water rivulet of the leeward cable in both smooth and turbulent flows.

Key Words : cable, wake galloping, rivulet, cable-stayed bridge, wind tunnel tests

1. まえがき

近年における斜張橋の長径間化や施工実績には目覚ましいものがある。しかしながら、主要構造部材であるケーブルを並列配置した斜張橋では、レインパイプレーションやウェイクギャロッピングと呼ばれるケーブル振動が発現することが一般に知られている¹⁾。斜張橋ケーブルのレインパイプレーションでは、通常、風雨時にケーブル表面に形成されるリブレット(水みち)が重要な役割を果たす。しかしながら、その励振力はケーブル中心間隔 S が $S=2D \sim 3D$ 程度(D はケーブル径)の並列ケーブルに発現するウェイクギャロッピングと比較してかなり小さく、それゆえ、 $S=2D \sim 3D$ 程度の並列ケーブル方式を採用した斜張橋では、レインパイプレーションが発現する可能性があっても、通常はウェイクギャロッピングのみに着目して制振対策を検討する場合が多い。

ウェイクギャロッピングの基本特性や制振法に関する研究は、今までにも宇都宮・鎌倉²⁾、白石・松本・白土³⁾、久保ら⁴⁾、佐藤ら⁵⁾、宮崎ら⁶⁾をはじめとする多くの研究者によって実施され、数多くの有用な知見が報告されている。また、著者らも、一様流中のウェイクギャロッピングは励振力がきわめて強いものの、格子乱流中では励振力が一様流中よりも明らかに低下すること、さらに、ケーブル表面にディンプルを付与すれば、一様流中であってもウェイクギャロッピング

の励振力は高風速域で大幅に低減し、ケーブル端部付近にダンパーを設置すれば十分に制振できることを報告している^{7), 8)}。

しかしながら、降雨時においてはケーブル表面に形成されたリブレットの影響で、並列ケーブルのウェイクギャロッピング特性も変化すると予想されるが、著者らの知る限り、ウェイクギャロッピング特性に及ぼす降雨の影響については今までのところ十分な検討は実施されていない。これには、並列ケーブルでは、観測データも乏しくリブレットの形成について十分なデータが蓄積されていないことも大きく関係していると考えられる。並列ケーブルのリブレットについては、たとえば、上流側ケーブルの影響で下流側ケーブルには非常に乱れた気流が作用することから、並列ケーブルの下流側にはリブレットが形成されにくいという意見もあろう。しかしながら、下流側ケーブル付近の流れは、当然のことながら、ケーブル中心間隔や風向によっても変化し、単独ケーブルと比べリブレットの形成や脈動状況がきわめて複雑になるものの、条件次第では並列ケーブルの下流側と言えどもリブレットが十分に形成されると著者らは考えている。また、実際、第一著者は、ケーブル中心間隔が $S/D=2.56 \sim 3.90$ とケーブル軸方向に幾分変化した並列ケーブルではあったが、雨混じりの $7\text{m/s} \sim 8\text{m/s}$ 程度の風が作用した状況で下流側ケーブルの下面にリブレットが形成され、振動が発現したのを目撃している。

ところで、最近の研究によれば、斜張橋ケーブルのレインバイブレーションでは、風雨時にケーブル表面に形成されるリブレット（水みち）に加え、ケーブルが傾斜したことによって発生するケーブル軸方向流れ（2次流）の寄与も指摘されている⁹⁾。また、カルマン渦の3次元性に起因した間欠的な渦放出の影響はケーブルが傾斜することによってより顕在化し、限定型レインバイブレーションの発生に大きく関与しているとの報告もなされている¹⁰⁾。したがって、ウェイクギャロッピング特性に及ぼす降雨の影響をより詳細に検討する際には、並列ケーブルを傾斜させ、人工的に降雨させた状態で実験すべきと考えられるが、この場合にはケーブルの傾斜角や人工降雨量などきわめて多くの実験パラメーターが存在し、かつ、実験結果の再現性についても詳細な検討が必要となる。

そこで、本研究では、現象を簡略化するため、ケーブルの傾斜に起因したケーブル軸方向流れ（2次流）や顕在化した渦放出の3次元性の影響を無視し、最も寄与の大きいケーブル表面に形成されるリブレットの影響のみに着目してばね支持実験を実施するものとした。実験は、人工リブレットをビニールテープで作製し、下流側ケーブルの特定の位置にリブレットを設置するなど、ある特定の限られた条件下で行われたが、円形のノーマルケーブルでは下流側の下方に設置した人工リブレットの影響でウェイクギャロッピング特性が大きく変化し、人工リブレットのない状態と比較してより強い励振力を示す場合があること、また、ディンプル付きケーブルではウェイクギャロッピングに対する降雨の影響は非常に小さいと考えられることなど、ウェイクギャロッピング特性に及ぼすリブレットの影響について興味ある実験データを収集できたことから、ここにその結果を報告する。

2. 使用風洞と風洞模型

(1) 使用風洞とケーブル模型

使用風洞は文献 11) に紹介した多目的風洞施設である。この風洞施設は開放型と閉鎖型の2つの測定洞を備えた水平回流式ゲッチングン型であるが、本実験では幅 2.0m × 高さ 2.5m × 全長 15.0m の閉鎖型測定洞を使用することとした。なお、閉鎖型測定洞の乱れ強さは 0.3% 以下にある。

主たる実験模型は、直径が $D=76\text{mm}$ のノーマルケーブル模型 (MODEL-N) である。ここに、MODEL-N は、風洞寸法から長さを 1.62m とし、表面は実橋ケーブルと同じくポリエチレン管で被覆（アルミパイプで補強）されている。一方、ノーマルケーブルとの対比を目的として、表面にディンプルを付与したケーブル模型 (MODEL-DM) も製作することとした。ここに、MODEL-DM は 1mm 厚のゴム板から直径 8mm のディンプルを図-1 に示すように型抜きした後、別に製

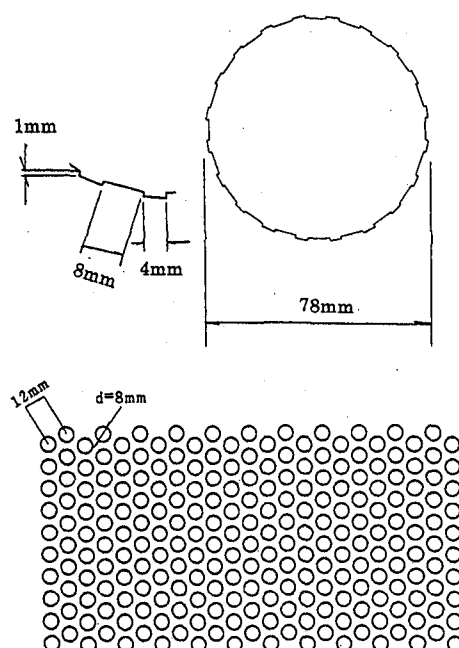


図-1 ディンプル付きケーブル模型 (MODEL-DM)

作したノーマルケーブル模型に貼付して製作したものである。したがって、模型長はノーマルケーブル模型と同じく 1.62m であるが、直径は $D=78\text{mm}$ となっている。

(2) 人工リブレット

ウェイクギャロッピングの発現した並列ケーブルでは、下流側ケーブルがある特定のモードで振動することから、上・下流側ケーブルの相対位置はケーブル軸方向に変化する。したがって、下流側ケーブル周りの流れ状況もケーブル軸方向に沿って変化し、リブレットの大きさや脈動の程度は単独ケーブルよりもさらに複雑に変化すると予想される。このように、並列ケーブルでは、単独ケーブルと比べ、リブレットの形成や脈動状況がきわめて複雑になると考えられるが、2次元の風洞実験ではリブレットの複雑な挙動を再現することができない。そこで、本実験では、現象を簡略化するため、レインバイブレーションに着目した過去の実験¹²⁾を参考にして、厚さが 1.2mm の人工リブレットをビニールテープで作製し、図-2 に示すように下流側ケーブルの下方のみに貼付するものとした。ここに、リブレット位置は厳密に特定できないが、一般的には概ね $\theta=0^\circ$ 付近を中心として脈動する場合が多いと考えられることから、本実験では後述するように $\theta=0^\circ$ を基本ケースに設定した。ただし、リブレット幅 b については、5mm, 10mm, 15mm (円周の約 22.5° に相当する長さ) の3種類を用意し、ウェイクギャロッピング特性に及ぼす人工リブレット幅の影響を把握することとした。



図-2 人工リブレットの設置位置

なお、本研究では、上述したように、上流側ケーブルのリブレットを省略するなど、ある特定の限られた条件下で風洞実験を実施している。しかしながら、ウェイクギャロッピングは下流側ケーブル回りの流れや断面形状に関係した現象であることから、本実験によってもウェイクギャロッピング特性に及ぼすリブレットの影響をある程度把握できるものと考えている。

3. ばね支持実験

(1) 実験の概要

今回、主として実施した風洞実験は、ケーブル中心間隔が $S=3D$ で鉛直方向相対位置 y_I とケーブル径 D の比を $-0.53 \leq y_I/D \leq 0.53$ ($-40\text{mm} \leq y_I \leq 40\text{mm}$) とした、空力応答（ウェイクギャロッピング）特性を把握するためのばね支持実験と静的空気力係数特性（主に揚力係数特性）を把握するための3分力試験である。ここに、 $y_I > 0$ と $y_I < 0$ の状態は、並列ケーブルに対してそれぞれ正の斜角と負の斜角を有する風（斜風）が作用する場合を表すが、風洞実験では図-3に示すように風軸が固定されていることから、実験上は $y_I > 0$ では正の迎角を、 $y_I < 0$ では負の迎角を見かけ上与えることになる。したがって、たとえば、鉛直方向相対位置を $y_I = 0.26D$ 、 $y_I = -0.37D$ に設定した場合は、上・下流側ケーブルにそれぞれ $\beta \approx 5.0^\circ$ 、 $\beta \approx -7.0^\circ$ の迎角を与えて実験することに対応する。

ウェイクギャロッピングの動的な特性をより厳密に把握するためには、下流側ケーブルを上下方向と水平方向の2自由度系にばね支持するのが望ましい。しかしながら、本研究で対象とする $S=3D$ で $-0.53 \leq y_I/D \leq 0.53$ の範囲では上下方向成分の卓越したウェイクギャロッピングが発現することが知られており¹³⁾、下流側ケーブルを支持機構の簡単な上下（鉛直）1自由度系にばね支持しても、得られる結果に本質的な差異は生じないと考えられる。それゆえ、本ばね支持実験にあたっては、上流側ケーブルを風洞内の2次端板に固定し、下流側ケーブルの振動数 f が $f \approx 1.345\text{Hz}$ となるように上下（鉛直）1自由度系にばね支持するものとした。ここに、実験で対象とした $f \approx 1.345\text{Hz}$ の振動数は、長さが70m～90m程度のケーブルが有する基本固有振動数に対応する。

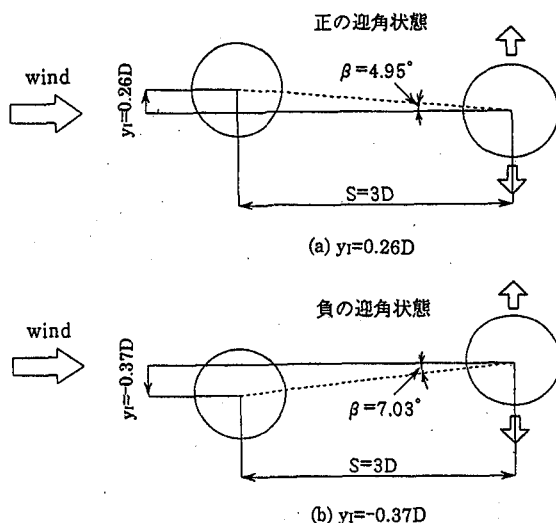


図-3 風洞実験で対象とした並列ケーブルの配置例

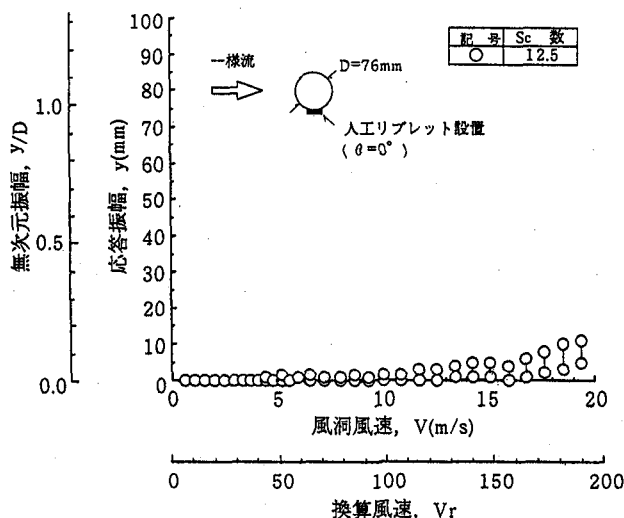


図-4 単独ケーブルのV-A曲線
(一様流, 人工リブレット; $\theta = 0^\circ$, $b=15\text{mm}$)

ケーブル中心間隔 S としては、一様流中での励振力がきわめて強く、かつ、上述したように上下方向成分の卓越したウェイクギャロッピングが発現するとの理由から $S=3D$ を選定し、ウェイクギャロッピングの発現風速と応答振幅に及ぼすスクルートン数（質量・減衰パラメーター）の影響を調査することとした。なお、スクルートン数とは次式で定義される質量・減衰パラメーターであり、その値が大きいほど風によるたわみ振動が発生しにくくなることを表す無次元パラメーターである。

$$S_c = \frac{2m\delta}{\rho D^2} \quad (1)$$

ここに、 m は単位長さ当りの質量、 δ は構造対数減衰率、 ρ は空気密度 ($\approx 0.12\text{kgf}\cdot\text{sec}^2/\text{m}^4$)、 D はケーブル径である。したがって、無対策時における斜張橋ケ

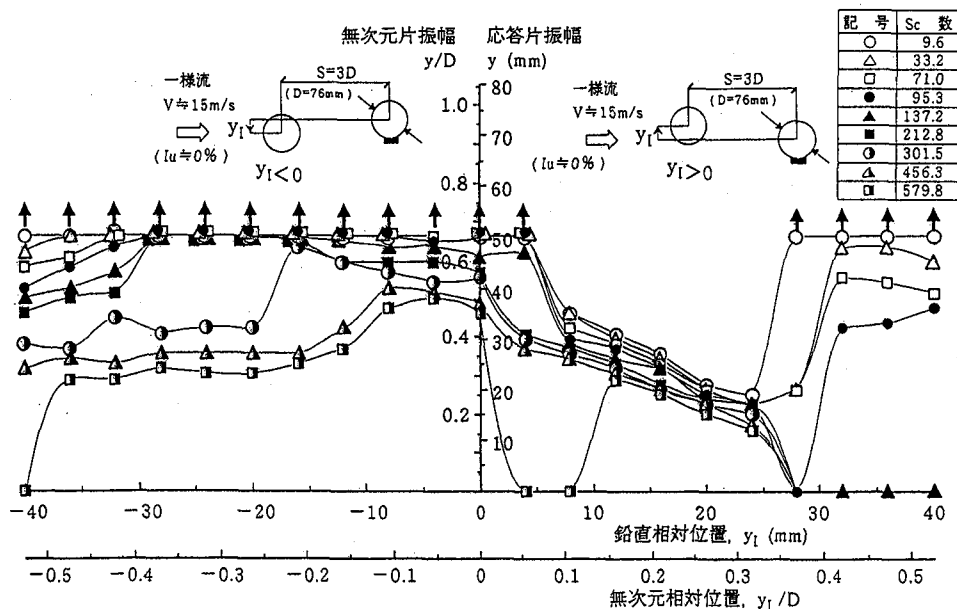


図-5 MODEL-N の応答振幅と鉛直相対位置の関係
(一様流; $V=15\text{m/s}$, 人工リブレット; $\theta=0^\circ$, $b=15\text{mm}$)

ケーブルの構造対数減衰率として過去の実測結果から $\delta=0.003$ を仮定すれば、標準規格品である $D=75.5\text{mm}$ の細径ケーブル (単位長さ当りの重量 w は $w=13.37\text{kgf/m}$) では、スクルートン数 Sc が $Sc=11.97$ となる。

なお、スクルートン数が小さい場合、換算風速 V_r ($V_r=V/fD$) が 5 付近で渦励振が発現するが、本研究ではウェイクギャロッピングのみに着目し、渦励振が発現しない $V_r=10$ 以上 (風洞風速では 1m/s 以上) の風速域で実験することとした。また、上・下流側ケーブルの鉛直方向設定位置を変化させる本実験では、ばね支持した下流側ケーブルが有風時に初期状態から鉛直方向に静的変形することから、実験にあたっては風速ごとに所定の初期状態となるよう調整することとした。

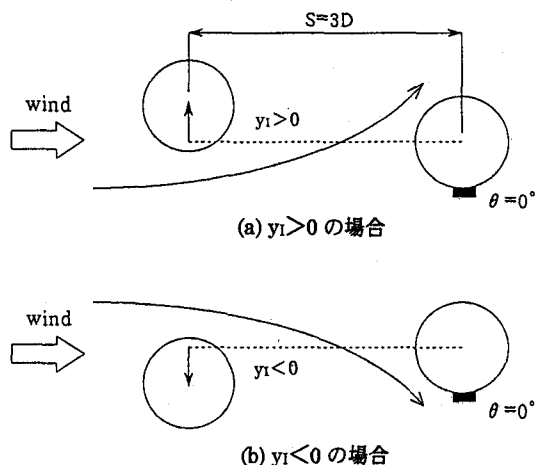


図-6 ギャップフローと人工リブレットの関係
(一様流; $V=15\text{m/s}$)

(2) 一様流中でのウェイクギャロッピング特性

a) 鉛直方向相対位置を変化させた場合

降雨時においては、通常、ケーブルの下方側のみにリブレットが形成される場合が多いが、単独ケーブルでは下方側の $\theta=0^\circ$ の位置に幅が $b=15\text{mm}$ の人工リブレットを設置しても、図-4 に示したように風による有害な振動は発現しない。そこで、まず、ノーマルケーブルについて、下流側ケーブルの $\theta=0^\circ$ の位置に幅が $b=15\text{mm}$ の人工リブレットを設置し、 $-0.53 \leq y_l/D \leq 0.53$ ($-40\text{mm} \leq y_l \leq 40\text{mm}$) の鉛直方向相対位置で一様流中のばね支持実験を実施した。ただし、実験にあたっては、不安定なリミットサイクル (ある以上の振幅を与えると振動は発達するが、これ以下の振幅では減衰するという境界線) が存在することも考慮し、それぞれの設定風速のもとで下流側ケーブルを 35mm 程度の振幅で加振し、時間が十分経過した後の応答振

幅を計測するものとした。

ウェイクギャロッピングは、換算風速で整理できない可能性も指摘されている^{1,4)}。それゆえ、以下では風速を無次元化せず、風洞風速のままで記述する。風洞風速 V を $V=15\text{m/s}$ とした場合の、鉛直相対位置 y_l と応答片振幅 y の関係を図-5 に示す。なお、スクルートン数を 10 程度に設定した既往の実験結果^{2)~4)} によれば、ケーブル中心間隔が $S=3D$ の並列ケーブルでは最大で $y=1.5D \sim 2.0D$ ものウェイクギャロッピングが発現している。本実験でも片振幅が 50mm ($0.66D$) を越えてもなお発達するウェイクギャロッピングが数多く観察されたが、ここでは計測する最大片振幅を 50mm に制限し、 50mm 以上の振動については図中において矢印 (↑) を記すこととした。また、次節も含め、以下においてスクルートン数のあとに括弧書きで

示した構造対数減衰率 δ は、式(1)を適用して標準規格品である $D=75.5\text{mm}$ のケーブル ($w=13.37\text{kgf/m}$) に換算した値である。

図-5から、 $V=15\text{m/s}$ の一様流中では、鉛直相対位置を $y_1>0$ (正の迎角状態) および $y_1<0$ (負の迎角状態) とした両者で、ウェイクギャロッピングの応答特性に明確な差異が生じていることがわかる。すなわち、下流側ケーブルの $\theta=0^\circ$ の位置に人工リブレット ($b=15\text{mm}$) を設置した場合、たとえば、スクルートン数が $Sc=212.8$ ($\delta=0.053$) の結果 (図中の■記号) からわかるように、 $y_1>0$ では y_1 の増加とともに振幅が減少して $y_1/D=0.37$ ($y_1=28\text{mm}$) 程度以上の鉛直相対位置では振動が発現しなくなっている。これに対し、 $y_1<0$ では $-0.53\leq y_1/D\leq 0$ ($-40\text{mm}\leq y_1\leq 0\text{mm}$) の範囲で 35mm 以上もの振動がなお発現する結果となっている。また、スクルートン数を $Sc=579.8$ ($\delta=0.145$) とした場合の結果 (図中の□記号) から、 $y_1>0$ では $0.05\leq y_1/D\leq 0.1$ ($4\text{mm}\leq y_1\leq 8\text{mm}$) および $0.35\leq y_1/D$ ($27\text{mm}\leq y_1$) の範囲では振動が発現していないのに対し、 $y_1<0$ では $0.46\leq y_1/D\leq 0$ ($-35\text{mm}\leq y_1\leq 0\text{mm}$) の範囲で $25\text{mm}\sim 40\text{mm}$ 程度の振動が発現する結果となっている。したがって、ノーマルケーブルでは、下流側ケーブルの $\theta=0^\circ$ の位置 (単独ケーブルでは有害な振動が発現しない位置) に $b=15\text{mm}$ の人工リブレットを設置した場合、風洞風速が 15m/s 程度の一様流中では $y_1<0$ の方が $y_1>0$ よりも応答振幅が大きく、かつ励振力も強いと言える。これは、風洞風速を 15m/s 程度に設定した場合、図-6に示すように $y_1<0$ では並列ケーブル間を流れるギャップフローが人工リブレットに直接作用することとなり、下流側ケーブルの励振力が増加したためと考えられる。

b) 人工リブレット幅の影響

次に、 $y_1=\pm 0.37D$ (文献8)に示したように、人工リブレットのない一様流中で非常に強い励振力を示した鉛直相対位置に着目し、人工リブレット幅をそれぞれ $b=5\text{mm}$, 10mm , 15mm とした場合の応答振幅を、人工リブレットがない場合 (降雨をともなわない場合) の実験結果と比較することとした。風洞風速を $V=15\text{m/s}$ とした場合の比較結果を図-7に示す。なお、人工リブレットを設置しない場合、 $y_1=+0.37D$ と $y_1=-0.37D$ の状態は風軸に対して対称配置となり、実験条件が同一であれば応答振幅はいずれも等しいものとなる。それゆえ、人工リブレットがない場合の実験は $y_1=+0.37D$ の状態について実施し、得られた結果を $y_1=\pm 0.37D$ での応答振幅値として採用することとした。

図-7から、いずれの幅の人工リブレットを設置した場合にも、 $y_1=-0.37D$ でのウェイクギャロッピング (図中の△記号) は、 $Sc\leq 200\sim 300$ ($\delta=0.050\sim 0.076$) 程度のスクルートン数範囲において人工リブレットのない場合 (図中の○記号) よりも明らかに大きな振幅を示し、人工リブレットはウェイクギャロప్ప

ングの励振力を増加させる役割を果たしていることがわかる。これに対し、 $y_1=+0.37D$ でのウェイクギャロッピング (図中の▲記号) は、実験を実施した $Sc\leq 600$ ($\delta=0.151$) のスクルートン数域において、いずれの幅の人工リブレットを設置しても人工リブレットがない場合 (図中の○記号) よりも明らかに小さく、励振力が大きく低下する結果となっている。すなわち、 $V=15\text{m/s}$ の風速では、下流側ケーブルの下方 ($\theta=0^\circ$) に $b=5\text{mm}$, 10mm , 15mm の人工リブレットを設置した場合、ウェイクギャロッピング特性は人工リブレットのない場合と明らかに相違し、励振力 (応答振幅) はいずれも $y_1=-0.37D$ では増加、 $y_1=+0.37D$ では低減すると言える。

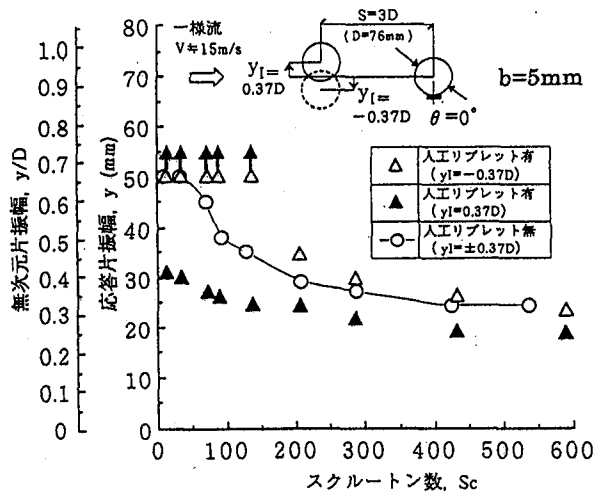
一方、図-8は風洞風速が $V=10\text{m/s}$ の場合について同様に比較した結果である。図-7と図-8を対比すればわかるように、 $V=10\text{m/s}$ で $b=15\text{mm}$ の人工リブレットを設置した場合の応答振幅は、人工リブレットがない場合と比べ、 $y_1=-0.37D$ では増加、 $y_1=+0.37D$ では低減しているが、差異の程度は $V=15\text{m/s}$ よりも明らかに小さくなっている。そして、人工リブレット幅を $b=5\text{mm}$ および $b=10\text{mm}$ とした $y_1=\pm 0.37D$ での応答振幅は、人工リブレットがない場合と概ね一致する結果となっている。すなわち、 $V=10\text{m/s}$ 程度の風速域では、ウェイクギャロッピング特性に及ぼす人工リブレットの影響は比較的小さく、 $V=15\text{m/s}$ 程度以上の高風速域になってはじめて人工リブレットの影響が顕在化すると推察される。

c) ディンプル付きケーブルでの挙動

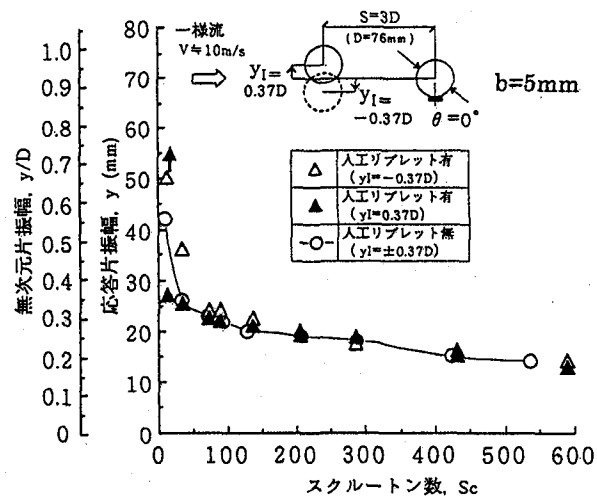
単独ケーブルではディンプルを付与してもリブレットが形成される場合があるとの研究成果¹⁵⁾を考慮し、ここではディンプル付きケーブルに $b=5\text{mm}$, 10mm , 15mm の人工リブレットをそれぞれ設置した場合についても、同様に一様流中でばね支持実験を実施した。鉛直相対位置が $y_1=-0.37D$, $y_1=+0.37D$ で、風速を $V=10\text{m/s}$, 15m/s に設定した場合の実験結果をそれぞれ図-9, 図-10に示す。これらの図からわかるように、ディンプル付きケーブルでは、風洞風速、鉛直相対位置、人工リブレット幅を変化させても、発現したウェイクギャロッピングの振動振幅は人工リブレットがない場合と概ね一致する結果となっている。それゆえ、対象としたディンプル付きケーブルでは、実験を実施した $V=15\text{m/s}$ 以下の風速域において、ウェイクギャロッピング特性に及ぼす人工リブレットの影響は非常に小さいと考えられる。ただし、実際の降雨状態では、ディンプルによる表面粗度効果¹⁶⁾が幾分変化する可能性があるため、今後はこれについても検討を実施する必要がある。

(3) 格子乱流中でのウェイクギャロッピング特性

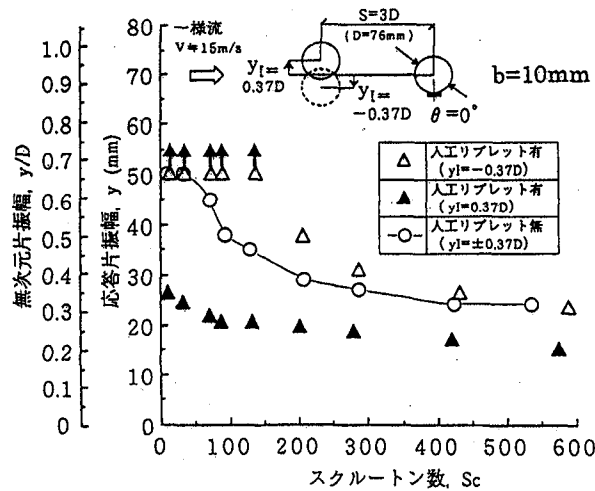
前節までは一様流中での実験結果であるが、ノーマルケーブルに対しては主流方向の乱れ強さ I_u が $I_u=5\sim$



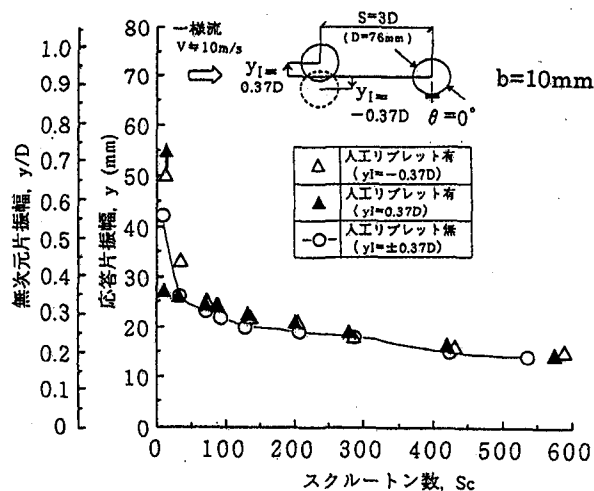
(a) $b=5\text{mm}$



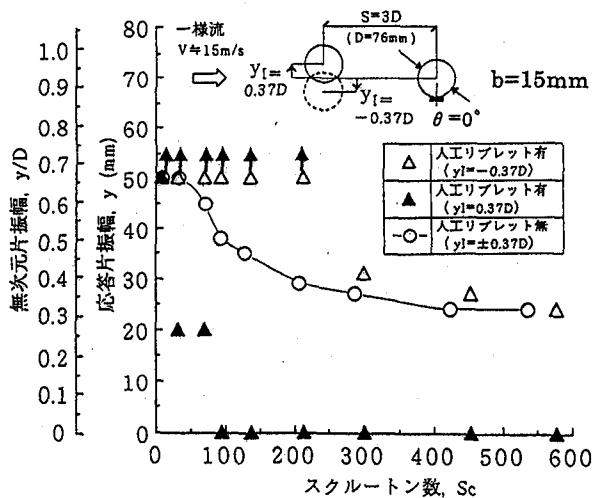
(a) $b=5\text{mm}$



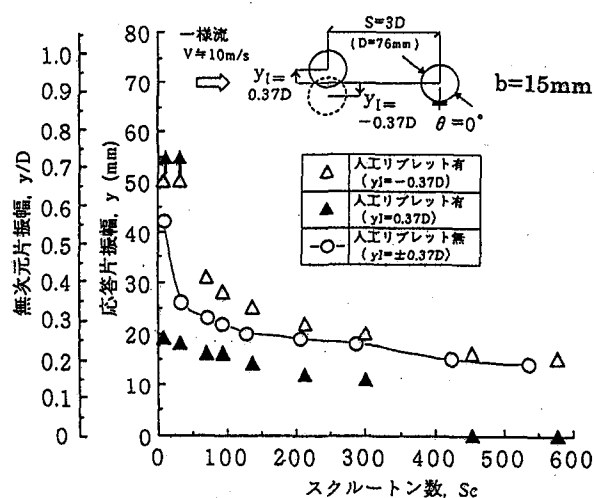
(b) $b=10\text{mm}$



(b) $b=10\text{mm}$



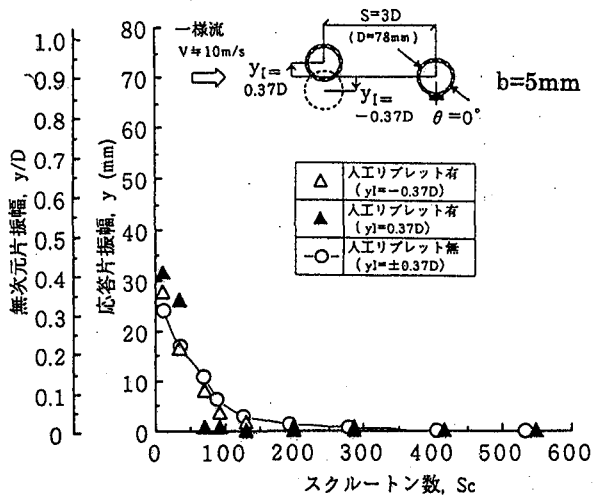
(c) $b=15\text{mm}$



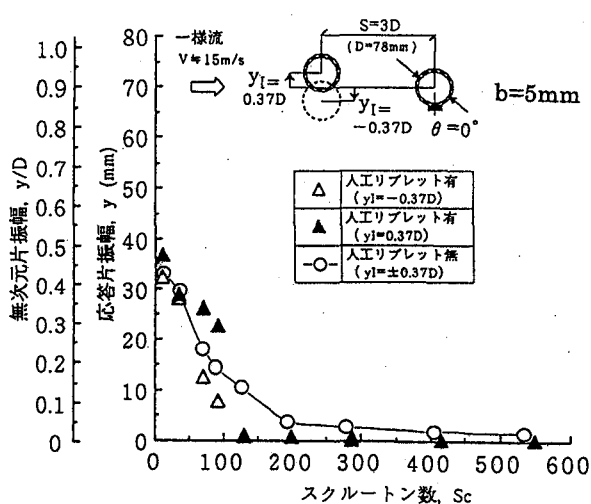
(c) $b=15\text{mm}$

図-7 MODEL-N の応答振幅とスクルーション数の関係
(—様流 ; $V \approx 15\text{m/s}$)

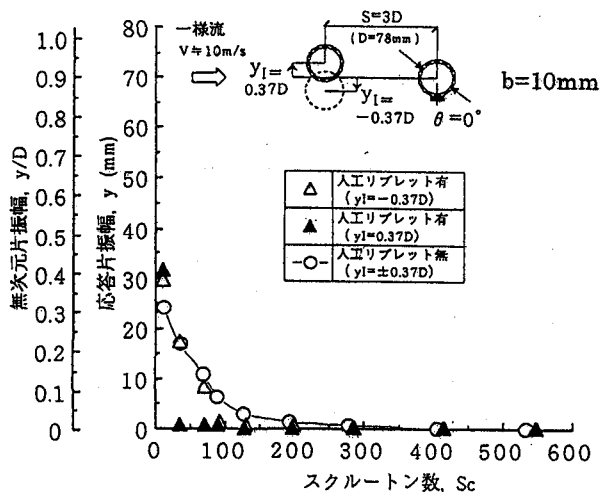
図-8 MODEL-N の応答振幅とスクルーション数の関係
(—様流 ; $V \approx 10\text{m/s}$)



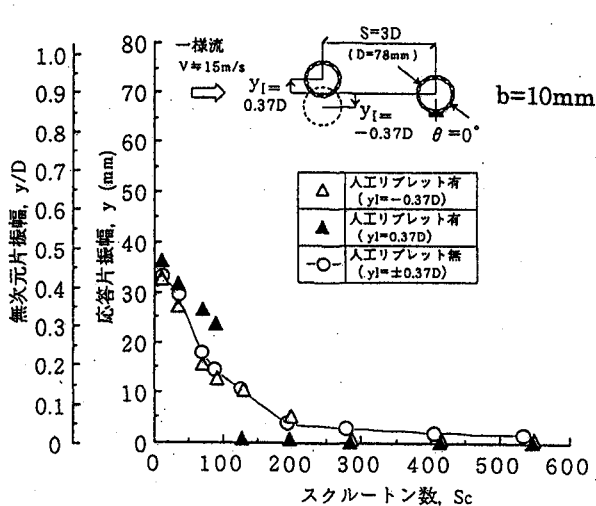
(a) $b=5\text{mm}$



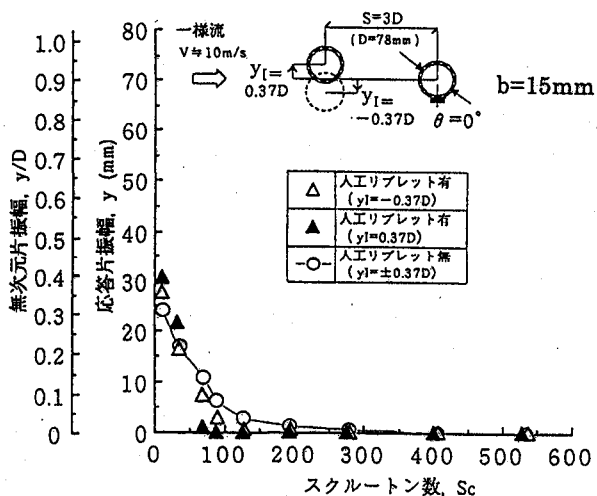
(a) $b=5\text{mm}$



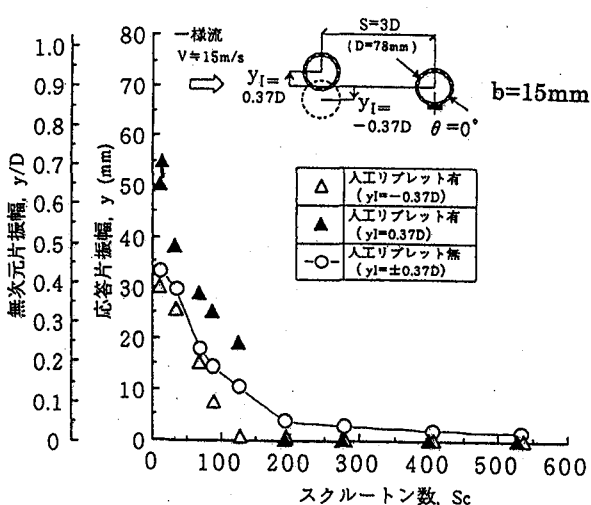
(b) $b=10\text{mm}$



(b) $b=10\text{mm}$



(c) $b=15\text{mm}$



(c) $b=15\text{mm}$

図-9 MODEL-DM の応答振幅とスクレートン数の関係
(一様流; $V \approx 10\text{m/s}$)

図-10 MODEL-DM の応答振幅とスクレートン数の関係
(一様流; $V \approx 15\text{m/s}$)

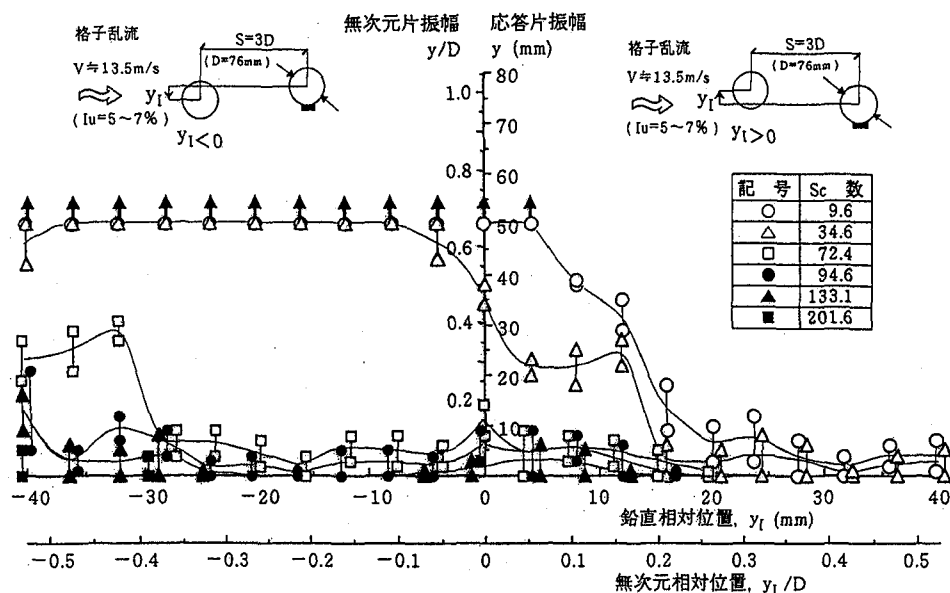


図-11 MODEL-N の応答振幅と鉛直相対位置の関係
(格子乱流; $V \approx 13.5 \text{ m/s}$, 人工リブレット; $\theta = 0^\circ$, $b = 15 \text{ mm}$)

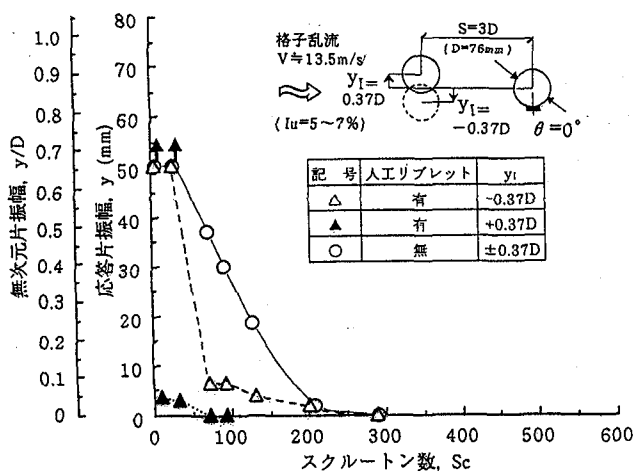


図-12 MODEL-N の応答振幅とスクルートン数の関係
(格子乱流; $V \approx 13.5 \text{ m/s}$, 人工リブレット; $\theta = 0^\circ$, $b = 15 \text{ mm}$)

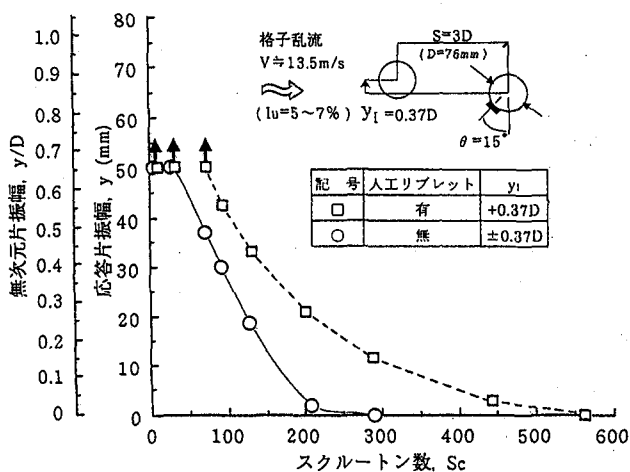


図-13 MODEL-N の応答振幅とスクルートン数の関係
(格子乱流; $V \approx 13.5 \text{ m/s}$, 人工リブレット; $\theta = 15^\circ$, $b = 15 \text{ mm}$)

7%の格子乱流中でもばね支持実験を実施し、乱れた気流中でのウェイクギャロッピング特性に及ぼす人工リブレット ($b = 15 \text{ mm}$) の影響を把握することとした。

まず、一様流中での実験と同じく、人工リブレットを下流側ケーブルの $\theta = 0^\circ$ に設置した場合の応答振幅を $-0.53 \leq y_l/D \leq 0.53$ ($-40 \text{ mm} \leq y_l \leq 40 \text{ mm}$) の鉛直方向相対位置で測定した。風洞風速 V を $V \approx 13.5 \text{ m/s}$ に設定した場合の、鉛直相対位置 y_l と応答片振幅 y の関係を図-11に示す。図-11から、 $V \approx 13.5 \text{ m/s}$ の格子乱流中では、一様流中と比較して励振力が大きく低下するものの、 $y_l > 0$ (正の迎角状態) と $y_l < 0$ (負の迎角状態) の状態でウェイクギャロッピングの応答特性に明確な差異が生じていることがわかる。すなわち、

下流側ケーブルの $\theta = 0^\circ$ に人工リブレットを設置した場合、たとえば、スクルートン数を $Sc \approx 34.6$ ($\delta \approx 0.009$) とした場合の結果 (図中の△記号) から、 $y_l > 0$ では $0 < y_l/D \leq 0.20$ ($0 \text{ mm} < y_l \leq 15 \text{ mm}$) の限定された領域で 25 mm 程度の振動が発現しているのに対して、 $y_l < 0$ では $-0.53 \leq y_l/D < 0$ ($-40 \text{ mm} \leq y_l < 0 \text{ mm}$) の範囲で $40 \text{ mm} \sim 50 \text{ mm}$ 程度以上の振動が発現する結果となっている。それゆえ、格子乱流中においても下流側ケーブルの $\theta = 0^\circ$ に人工リブレットを設置した場合には、 $y_l < 0$ の場合の方が $y_l > 0$ の場合よりも応答振幅が大きく、かつ励振力も強いと言える。

次に、一様流中と同じく、人工リブレット ($b = 15 \text{ mm}$) を設置した $y_l = \pm 0.37D$ での応答振幅に着

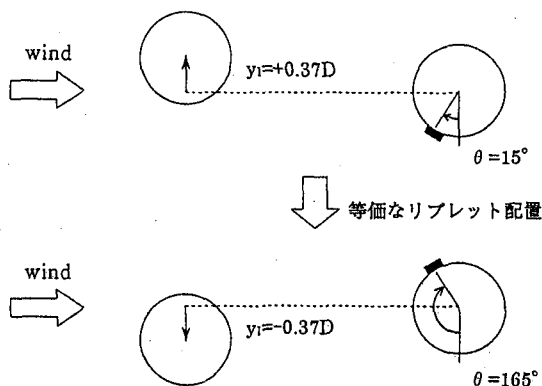


図-1 4 等価なリブレット配置

目し、人工リブレットがない場合の実験結果と比較することとした。その結果を図-1 2 に示す。図-1 2 から、人工リブレットを設置した $y_1 = -0.37D$ や $y_1 = +0.37D$ でのウェイクギャロッピングは、格子乱流中において人工リブレットがない場合（降雨をとみなさない場合）よりも応答振幅が小さく、励振力が低下する結果となっている。すなわち、下流側ケーブルの $\theta = 0^\circ$ に $b = 15\text{mm}$ の人工リブレットを設置した場合、 $y_1 < 0$ と $y_1 > 0$ で発現したウェイクギャロッピングは、いずれも人工リブレットがない場合よりも励振力が低下すると考えられる。

そこで、補足的に、 $\theta = 15^\circ$ の位置に人工リブレットを設置した場合についても $y_1 = +0.37D$ とした状態で同様の実験を実施し、人工リブレットがない場合の結果と比較することとした。その結果を図-1 3 に示す。図-1 3 からわかるように、 $\theta = 15^\circ$ の位置に人工リブレットを設置した場合の格子乱流中における応答は、人工リブレットがない場合よりも明らかに増加する結果となっている。実在の並列ケーブルに降雨が作用した場合、下流側ケーブルの $\theta = 15^\circ$ 付近にリブレットが作成されるかどうかは今後の観測データを待たなければならない。しかしながら、この状態は、図-1 4 に示すように、上流側ケーブルの鉛直方向相対位置が $y_1 = -0.37D$ で、下流側ケーブルの $\theta = 165^\circ$ の位置（下流側ケーブルの上方側）にリブレットが形成された場合と同等となる。単独ケーブルに対する過去の観測結果によれば、頻度はさほど多くないものの、 $\theta = 165^\circ$ の位置にリブレットが形成されることは十分あり得ると考えられ、それゆえ、乱れた気流中においてもリブレットの存在でウェイクギャロッピングの励振力が増加する場合もあると推察される。

4. 静的空気力試験

(1) 実験概要

前章に示したように、ノーマルケーブルで下流側ケ

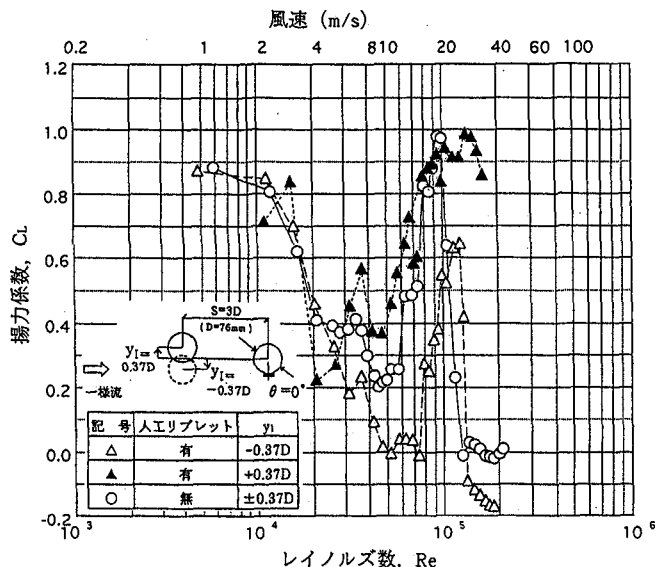


図-1 5 一様流中における MODEL-N の揚力係数
(人工リブレット; $\theta = 0^\circ$, $b = 15\text{mm}$)

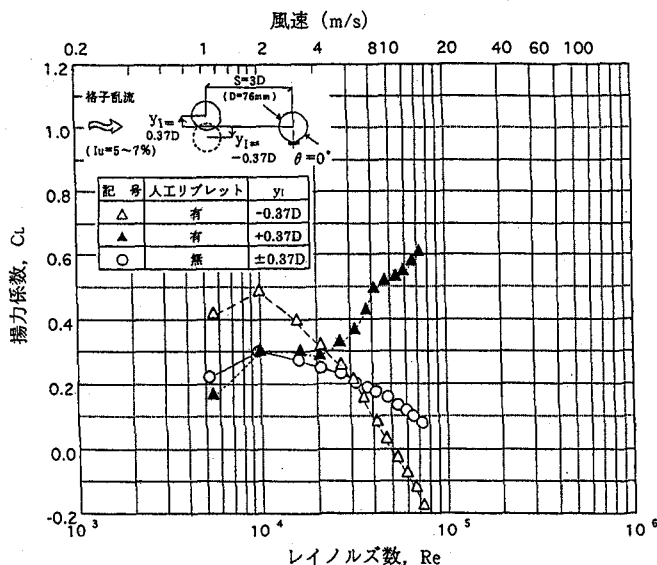


図-1 6 格子乱流中 ($I_u = 5 \sim 7\%$) における MODEL-N の揚力係数
(人工リブレット; $\theta = 0^\circ$, $b = 15\text{mm}$)

ーブルの $\theta = 0^\circ$ に人工リブレットを設置した場合、一様流中では $V = 15\text{m/s}$ 程度以上の高風速域においてウェイクギャロッピング特性が大きく変化し、人工リブレットがない場合と比較して $y_1 = -0.37D$ の方が $y_1 = +0.37D$ よりも応答振幅が大きくなることがわかった。また、乱れ強さが $I_u = 5 \sim 7\%$ の格子乱流中 ($V = 13.5\text{m/s}$) では $y_1 = -0.37D$ と $y_1 = +0.37D$ のいずれの場合も人工リブレットがない場合よりも応答振幅が減少していたのに対し、 $y_1 = +0.37D$ で $\theta = 15^\circ$ に人工リブレットを設置した場合の格子乱流中 ($I_u = 5 \sim 7\%$) における応答は、人工リブレットがない場合よりも明らかに増加するという知見が得られた。

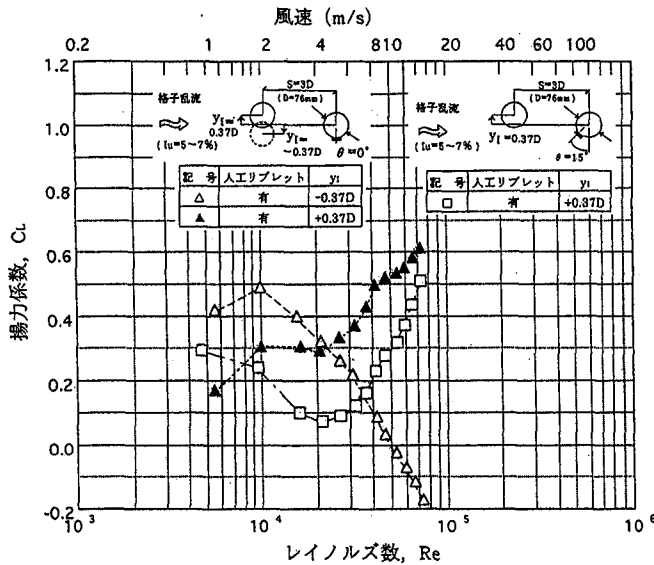


図-17 格子乱流中 ($I_u=5\sim7\%$) における MODEL-N の揚力係数 (人工リブレット; $\theta=0^\circ$, $\theta=15^\circ$, $b=15\text{mm}$)

これらのばね支持実験結果は人工リブレットがある場合とない場合で下流側ケーブル回りの流れ状況が微妙に変化したことに起因するものである。したがって、人工リブレットを設置した場合の静的空気力係数特性を計測しておくことも、人工リブレットの影響を把握する上で意義のあることと考えられる。そこで、本章では、ケーブル中心間隔が $S=3D$ で $y_l=\pm 0.37D$ の場合について、人工リブレット ($b=15\text{mm}$) を設置した状態と設置しない状態における下流側ケーブルの静的空気力係数 (主に揚力係数) を、風速を変化させて測定し両者の結果を対比することとした。

(2) 実験結果と考察

下流側ケーブルの $\theta=0^\circ$ に人工リブレット ($b=15\text{mm}$) を設置した $y_l=+0.37D$ と $y_l=-0.37D$ の場合について、下流側ケーブルの揚力係数 C_L を一様流中で測定した。それぞれの y_l に対応する揚力係数を人工リブレットがない場合と比較して図-15に示す。なお、図中や以降に示す揚力係数は並列ケーブルの鉛直方向間隔が狭くなる方向の力を正 ($y_l>0$ では上向きの力、 $y_l<0$ では下向きの力が作用する場合を正) とし、投影面積 A_n を $A_n=D\times l$ (D : ケーブル径、 l : 模型長) として算出したものである。図-15から、一様流中ではいずれの場合も、 2m/s 程度以下の微風状態で $C_L=0.8\sim0.9$ 程度であった揚力係数は風速の増加とともに減少するものの、その後は増加に転じ、 $25\text{m/s}\sim30\text{m/s}$ 程度の風速域で極大値 (最大値) を呈するというきわめて特徴的なレイノルズ数 (風速) 依存性を示していることがわかる。しかしながら、各風速にお

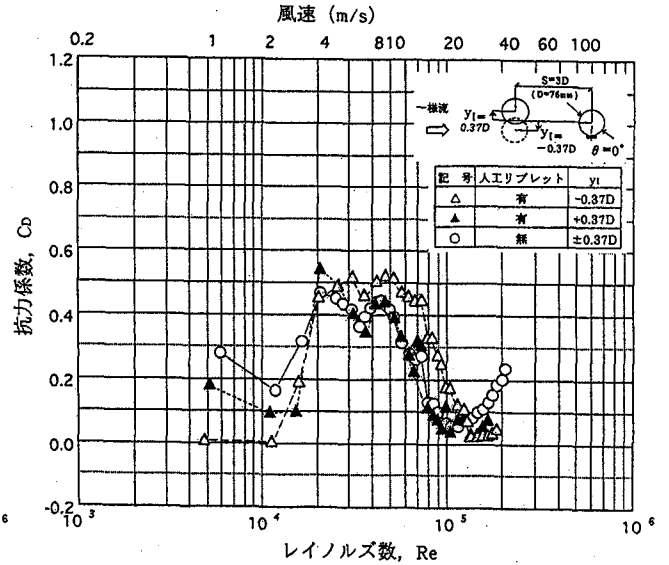


図-18 一様流中における MODEL-N の抗力係数 (人工リブレット; $\theta=0^\circ$, $b=15\text{mm}$)

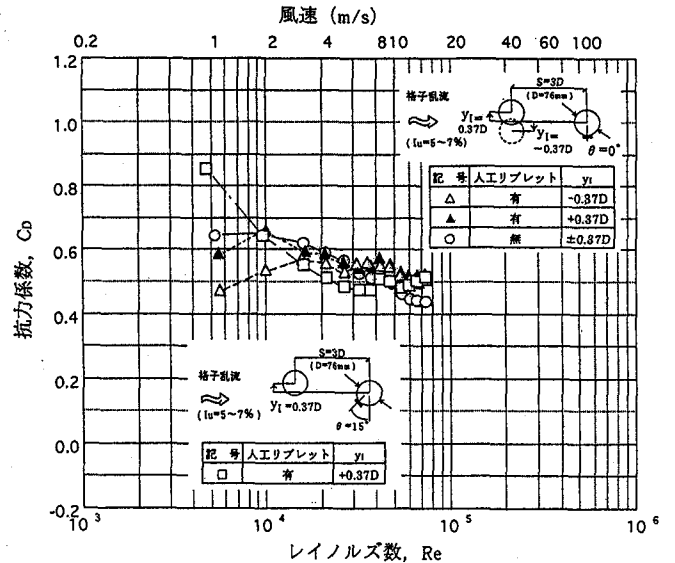


図-19 格子乱流中 ($I_u=5\sim7\%$) における MODEL-N の抗力係数 (人工リブレット; $\theta=0^\circ$, $\theta=15^\circ$, $b=15\text{mm}$)

ける揚力係数の大きさを比較すれば、 $\theta=0^\circ$ に人工リブレットを設置した $y_l=+0.37D$ の揚力係数 (図中の▲記号) の方が、 $y_l=-0.37D$ (図中の△記号) よりも、人工リブレットがない状態の揚力係数 (図中の○記号) により近い傾向を示していることがわかる。これは、一様流中の $y_l>0$ とした状態では、ギャップフローが図-6に示したように人工リブレットの影響を受けない方向に作用しているためと考えられる。

次に、格子乱流中 ($I_u=5\sim7\%$) についても、 $\theta=0^\circ$ に人工リブレット ($b=15\text{mm}$) を設置した $y_l=+0.37D$ と $y_l=-0.37D$ のそれぞれの場合について、下流側ケー

ブルの揚力係数を測定した。それぞれの y_1 に対応する揚力係数を人工リブレットがない場合と比較して図-16に示す。図-16と図-15を比較すればわかるように、格子乱流中における揚力係数特性は、一様流中と明らかに相違している。すなわち、人工リブレットを設置した $y_1 = -0.37D$ の揚力係数（図中の△記号）は、人工リブレットがない場合（図中の○記号）と同じく 2m/s 程度以上の風速域から減少しているのに対し、 $y_1 = +0.37D$ における揚力係数（図中の▲記号）は $2\text{m/s} \sim 4\text{m/s}$ で $C_L \approx 0.3$ とほぼ一定であった値が風速とともに増加する結果となっている。したがって、格子乱流中におけるギャップフローの方向は一様流中と相違している可能性があるかと推察される。

一方、図-17は $\theta = 15^\circ$ に人工リブレット ($b=15\text{mm}$) を設置した $y_1 = +0.37D$ の格子乱流中における揚力係数を、人工リブレット位置が $\theta = 0^\circ$ で $y_1 = \pm 0.37D$ の状態における値と比較したものである。図-17から、 $\theta = 15^\circ$ の位置に人工リブレットを設置した場合の揚力係数（図中の□記号）は、 $V=2\text{m/s}$ 以上で $C_L=0.25 \sim 0.3$ 程度であった値が $V=4\text{m/s}$ 以上では $C_L=0.1$ 程度まで低下するものの、それ以上の風速域では $\theta = 0^\circ$ に人工リブレットを設置した $y_1 = +0.37D$ の場合と同じく増加していることがわかる。人工リブレット位置が $\theta = 0^\circ$ で $y_1 = +0.37D$ とした場合の格子乱流中における応答振幅は人工リブレットがない場合よりも減少していたのに対し、 $\theta = 15^\circ$ に人工リブレットを設置した場合には人工リブレットがない状態よりも明らかに応答振幅が増加していた。それゆえ、ウェイクギャロッピング特性に及ぼす降雨（人工リブレット）の影響はきわめて複雑で、静的な揚力係数特性との相関性に関する議論はきわめて難しいと考えられる。

なお、抗力係数 C_D （気流方向に抗力が作用する場合を正）については、図-18と図-19に示すように一様流中と格子乱流中での差異は認められるものの、測定誤差の少ない 2m/s 程度以上の風速域においては人工リブレットの影響はきわめて小さいものであったことを付記しておく。

5. まとめ

本論文は、部分模型風洞実験を実施して並列ケーブル ($S=3D$) のウェイクギャロッピング特性に及ぼす降雨（人工リブレット）の影響を検討したものである。得られた主要な結果を以下にまとめる。

(1) 幅が 15mm （円周の約 22.5° に相当する長さ）、厚さが 1.2mm の人工リブレットをビニールテープで作製し、ノーマルケーブルの下流側下方 ($\theta = 0^\circ$ の位置) に貼付した状態で一様流中のばね支持実験を $-0.53 \leq y_1/D \leq 0.53$ ($-40\text{mm} \leq y_1 \leq 40\text{mm}$) の鉛直方向相対位置で実施した。その結果、人工リブレットを設置した場合、風速が 15m/s 程度の一様流中では、 $y_1 < 0$ の

方が $y_1 > 0$ よりもウェイクギャロッピングの応答振幅が大きく、かつ励振力も強くなることがわかった。

(2) $y_1 = \pm 0.37D$ の鉛直方向相対位置について、人工リブレット幅をそれぞれ $b=5\text{mm}$, 10mm , 15mm とした場合のノーマルケーブルにおける応答振幅を、人工リブレットがない場合（降雨をとみなさない場合）の実験結果と比較した。その結果、いずれの人工リブレットを設置しても、 $V=10\text{m/s}$ 程度の風速域ではウェイクギャロッピング特性に及ぼす人工リブレットの影響は比較的小さく、 $V=15\text{m/s}$ 程度以上の高風速域になってはじめて人工リブレットの影響が顕在化するという結果が得られた。

(3) ディンプル付きケーブルについても、同様に一様流中でばね支持実験を実施した。その結果、ディンプル付きケーブルでは、風洞風速、鉛直相対位置、人工リブレット幅を変化させても、発現したウェイクギャロッピングの振動振幅は人工リブレットがない場合と概ね一致する結果となった。それゆえ、対象としたディンプル付きケーブルでは、ウェイクギャロッピングに対する人工リブレットの影響は非常に小さいと考えられる。

(4) ノーマルケーブルについては乱れ強さ I_u が $I_u=5 \sim 7\%$ の格子乱流中でもばね支持実験を実施した。その結果、格子乱流中においても下流側ケーブルの $\theta = 0^\circ$ に人工リブレット ($b=15\text{mm}$) を設置した場合には、 $y_1 < 0$ の方が $y_1 > 0$ よりも応答振幅が大きく、かつ励振力も強くなる結果が得られた。また、一様流中と同じく、人工リブレットを設置した $y_1 = \pm 0.37D$ の応答振幅に着目したところ、下流側ケーブルの $\theta = 0^\circ$ に人工リブレットを設置した場合のウェイクギャロッピングは、 $y_1 < 0$ と $y_1 > 0$ のいずれの場合も格子乱流中においては人工リブレットがない場合よりも励振力が低下した。

(5) 格子乱流中 ($I_u=5 \sim 7\%$) については、 $\theta = 15^\circ$ の位置に人工リブレット ($b=15\text{mm}$) を設置した場合についても $y_1 = +0.37D$ の状態で同様のばね支持実験を実施した。その結果、 $\theta = 15^\circ$ に人工リブレットを設置したノーマルケーブルの応答は、人工リブレットがない場合よりも明らかに増加する結果が得られた。 $\theta = 15^\circ$ の状態は、上流側ケーブルの鉛直方向相対位置が $y_1 = -0.37D$ で、下流側ケーブルの $\theta = 165^\circ$ （下流側ケーブルの上方側）にリブレットが形成された場合と同等となる。単独ケーブルに対する過去の観測結果によれば、頻度はさほど多くないものの、上方側 ($\theta = 165^\circ$ の位置) にリブレットが形成されることは十分あり得ると考えられ、それゆえ、乱れた気流中においてもリブレットの存在でウェイクギャロッピングの励振力が増加する場合もあると推察される。

(6) 人工リブレットを設置した状態と設置しない状態について、下流側ケーブルの静的揚力係数を測定した。その結果、 $\theta = 0^\circ$ に $b=15\text{mm}$ の人工リブレットを設置した場合、一様流中では $y_1 = +0.37D$ の方が、 $y_1 = -0.37D$

よりも人工リブレットがない状態に近い揚力係数特性を示した。これに対し、格子乱流中における揚力係数特性は一樣流中と明らかに相違し、 $y_1 = -0.37D$ の場合の方が $y_1 = +0.37D$ よりも人工リブレットがない状態に近い特性を示す結果が得られた。この相違は、ギャップフローの方向が一樣流中と格子乱流中で変化したことに起因すると考えられる。

本研究はある特定の限られた実験条件下で実施されたものであるが、並列ケーブルのウェイクギャロッピング特性に及ぼす降雨の影響について、従来知られていなかった興味ある実験データを提示できたと考えている。しかしながら、斜張橋ケーブルのウェイクギャロッピングについては、リブレットの形成に加え、乱れのスケール効果など解明すべき点も未だ多い。それゆえ、ウェイクギャロッピングに関しては実橋ケーブルでの観測結果と風洞実験結果を対比するなど今後とも継続的な研究を実施し、実務設計者にとって有用なデータを提示していくことが重要であろう。最後に、本論文が、斜張橋の設計やケーブルの制振に携わる実務技術者にとって有用な技術資料になることを心より願う次第である。

参考文献

- 1) たとえば、横山功一、日下部毅明：斜張橋ケーブルの風による振動と対策、橋梁と基礎、Vol.23, No.8, pp.75~84, 1989年8月。
- 2) 宇都宮英彦、鎌倉米康：近接する並列円柱の空気力学的挙動、土木学会論文報告集、第336号, pp.1~8, 1983年8月。
- 3) 白石成人、松本 勝、白土博通：2本直列柱の空力応答特性とその発生機構に関する基礎的研究、第8回風工学シンポジウム論文集, pp.277~284, 1984年12月。
- 4) 久保喜延、加藤九州男、金尾 稔：直列二本円柱の空力弾性挙動と振動抑制に関する一考察—張橋複ケーブルの振動を対象として—、土木構造・材料論文集、第4号, pp.49~54, 1989年1月。
- 5) 佐藤弘史、鳥海隆一、及川孝一、竹田哲夫、向 弘晴、佐野演秀：ウェイクギャロッピングに対する減衰付加の制振効果、第48回年次学術講演会講演概要集、I-363, pp.874~875, 1993年9月。
- 6) 鹿島主央、宮崎正男、平田鋼三、大野喜久雄：斜張橋並列ケーブルの空力制振対策、第49回年次学術講演会講演概要集、I-537, pp.1072~1073, 1994年9月。
- 7) 米田昌弘、宮地真一、望月秀之、枝元勝哉：ウェイ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、第504号/VI-25, pp.127~136, 1994年12月。
- 8) 米田昌弘、宮地真一、枝元勝哉、望月秀之、瀬戸内秀規：ノーマルならびにディンプル付きケーブルに斜風が作用した場合のウェイクギャロッピング特性について、土木学会論文集、第534号/VI-30, pp.97~108, 1996年3月。
- 9) 松本 勝、白石成人、辻井正人、平井滋登：斜張橋ケーブルの空力振動に関する研究、土木学会論文集、第416号/I-13, pp.225~234, 1990年4月。
- 10) 松本 勝、西崎孝之、青木 淳、北沢正彦、白土博通：斜張橋ケーブルの限定型振動としてのレインバイブレーションに関する研究、構造工学論文集、Vol.40A, pp.1059~1064, 1994年3月。
- 11) 米田昌弘、宮地真一、望月秀之：多目的風洞施設の紹介、日本風工学会誌、No.57, pp.28~35, 1993年10月。
- 12) たとえば、松本 勝、白石成人、白土博通、平井滋登、佐野祐一、桂 一詞：斜張橋ケーブルの Rain Vibration 発生機構における二つの要因についての考察、第11回風工学シンポジウム論文集, pp.263~268, 1990年12月。
- 13) 白土博通：複数構造物の空気力学的挙動に関する研究、京都大学学位論文, pp.38~61, 1988年8月。
- 14) 藤澤伸光：並列ケーブルのウェイ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12月。
- 15) 小林紘士、鈴木宜人：斜張橋ケーブルの空力特性、平成8年度関西支部年次学術講演会講演概要集, pp.I-85-1~I-85-2, 1996年5月。
- 16) 宮田利雄、山田 均、北條哲男：表面粗度を持つケーブルの空力特性に関する実験的研究、橋梁と基礎、Vol.27, No.9, pp.30~36, 1993年9月。

(1998年9月18日受付)