

ノーマルならびにディンプル付き並列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

米田昌弘¹・宮地真一²・枝元勝哉³・望月秀之⁴・瀬戸内秀規⁵

¹正会員 工博 川田工業(株)技術本部研究室長 (〒114 東京都北区滝野川1-3-11)

²正会員 工修 川田工業(株)技術本部研究室係長 (〒550 大阪市西区北堀江1-22-19)

³正会員 工修 川田工業(株)技術本部研究室 (〒114 東京都北区滝野川1-3-11)

⁴正会員 川田工業(株)技術本部研究室 (〒550 大阪市西区北堀江1-22-19)

⁵正会員 工修 川田工業(株)技術本部研究室 (〒550 大阪市西区北堀江1-22-19)

本文では、斜角を有する風(斜風)が作用した場合のノーマルケーブルとディンプル付きケーブルのウェイクギャロッピング特性ならびに静的空気力特性との関連性を検討している。その結果、ディンプル付きケーブルの有効性に加え、斜角を有する風や乱れた気流によってノーマルケーブルのウェイクギャロッピング特性が大きく変化すること、下流側ケーブルの揚力係数がきわめて特徴あるレイノルズ数(風速)依存性を呈すること、さらに、下流側ケーブルの揚力係数が極小値(最小値)となるレイノルズ数(風速)がウェイクギャロッピング特性を支配する重要なパラメーターになるなど、従来知られていなかったきわめて有用な知見が得られた。

Key Words: cable, wake galloping, aerodynamic countermeasure, 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、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⁾。ウェイクギャロッピング特性はケーブル中心間隔 S とケーブル径 D の比の大きさによって変化するが、通常、その励振力は風雨時に発生するレインバイブレーションと比較して強いことから、並列ケーブル方式を採用した斜張橋を設計・施工するにあたっては、ウェイクギャロッピングの制振がきわめて重要な検討課題となっている。しかしながら、最も一般的な $S=2D\sim 3D$ 程度に並列配置された細径ケーブルではウェイクギャロッピングの励振力がきわめて強く、ケーブル端部付近にダンパーを設置する手法のみでは十分に制振できない場合が多いと考えられている^{2),3)}。一方、ステンレスワイヤによるケーブル相互連結方式はウェイクギャロッピングに対する有効な手段ではあるが、景観上の問題に加え、ワイヤの切断に備えた長期にわたる維持管理が必要となる。それゆえ、ウェイクギャロッピングを確実に制振できる空力的な制振方法についての研究は、近年の斜張橋の建設状況と長径間化傾向を考えた場合、きわめて急務な検討課題となっており、また、発注者や実務技術者か

らの要望も非常に高い。

斜張橋ケーブルのウェイクギャロッピングに対する空力的制振法として、上流側ケーブルに後流抑制板を設置する久保らの研究⁴⁾、上・下流側ケーブルが接した状態($S=D$)で100 D 程度のピッチでよじる吉村らの研究⁵⁾が従来より知られているが、いずれの方法も実橋ケーブルに適用するにあたっては解決すべき施工上の問題が残されていた。これに対し、久保らは、ケーブルの中心間隔 S が $S=1.2D\sim 1.3D$ となるように上・下流側ケーブルを一体化する空力的対策をあらたに提案している⁶⁾。この手法はウェイクギャロッピングに対する有効な空力的対策の一つと考えられ、現在、実在PC斜張橋ケーブルに適用する方向で検討がなされている。しかしながら、この手法では上・下流側ケーブルを近接させて一体化させるための治具を比較的密に配置する必要があり、したがって、ケーブル間隔が比較的大きい場合や100本程度以上の非常に多くのケーブルを有する長径間のPC斜張橋では、一体化用治具の設置作業や供用後の維持点検作業に対して改善の余地が残されているものと思われる。

一方、著者らもウェイクギャロッピングの空力的対策としてケーブル表面にディンプルを設ける方法をすでに考案し、部分模型風洞試験を実施してディンプル付きケーブルのウェイクギャロッピング特性について検討している⁷⁾。その結果、ディンプル付きケーブルでは、ケー

ブル端部付近にダンパーを設置して若干の減衰を付加すれば、 $S=2D\sim 3D$ なる場合のウェイクギャロッピングと言えども確実に制振できる可能性を報告している。すなわち、ディンプル付きケーブルではケーブル製作費用は若干増加するものの、ダンパーはケーブル端部付近に設置できることから、供用後の維持管理がきわめて容易に行えるという利点を有する。しかしながら、著者らの先の研究⁷⁾では、ケーブルの並列配置方向に一樣な風を作用させる最も一般的な場合のみを対象としていたことから、ケーブル軸に対して斜角を有する風(斜風)が作用する場合や乱れた気流が作用する場合などさらに種々の条件下での検証実験が実用化にあたって必要であった。

ところで、斜角を有する風が並列ケーブルに作用した場合の挙動をばね支持模型風洞実験によって把握する場合、上・下流側ケーブルを鉛直方向に相対位置を有するように配置(上・下流側ケーブルに斜角に相当する迎角を与えるように配置)すれば良い。そこで、本研究では、上・下流側ケーブルをケーブル中心間隔が $S=3D$ で鉛直方向相対位置 y_1 が $y_1=0.25D$ ($\beta=4.8^\circ$ なる斜角を有する風が作用する場合に相当)と $y_1=0.37D$ ($\beta=7.0^\circ$ なる斜角を有する風が作用する場合に相当)なる場合を基本配置状態とし、円形断面のノーマルケーブルとディンプル付きケーブルのそれぞれの場合について、ばね支持実験と静的空気力試験を実施することとした。また、ウェイクギャロッピング特性は換算風速で整理できない可能性があるとの報告や乱れた気流中でも特性が大きく変化しない可能性があるなどの最近の指摘⁹⁾を検証するため、ばね支持実験にあたっては、模型の振動数を変化させた場合や格子乱流中でも実施し、ケーブル軸に対して斜角を有する風が作用した場合のノーマルケーブルとディンプル付きケーブルのより詳細なウェイクギャロッピング特性ならびに静的空気力特性との関連性を把握することとした。その結果、ディンプル付きケーブルの有効性に加え、斜角を有する風や乱れた気流によってノーマルケーブルのウェイクギャロッピング特性が大きく変化すること、斜角を有する一樣流がノーマルケーブルに作用する場合には下流側ケーブルの揚力係数や抗力係数がきわめて特徴あるレイノルズ数(風速)依存性を呈すること、さらに、斜角を有する風が作用する場合には下流側ケーブルの揚力係数が極小値(最小値)となるレイノルズ数(風速)がウェイクギャロッピング特性を支配する重要なパラメータになるなど、斜張橋ケーブルのウェイクギャロッピング特性について、従来知られていなかった実務上のきわめて有用な知見が新たに得られたことから、ここにその結果を報告する。

なお、本研究は、先に発表した論文⁷⁾と同様、斜張橋ケーブルのウェイクギャロッピングに関する内容を取り扱ったものであるが、上述したように研究の着眼点は相

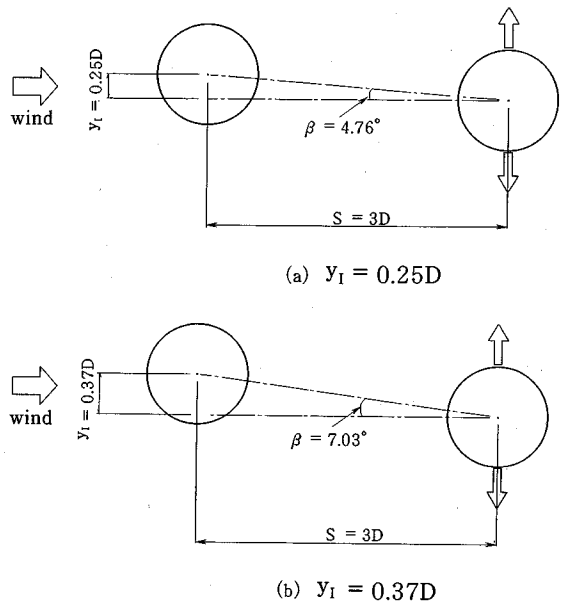


図-1 風洞実験で対象としたケーブル配置

違する。したがって、実施した風洞実験ケースも異なり、得られた知見も新たなものであることを、まずはじめに述べておきたい。

2. 使用風洞と風洞模型

使用風洞は文献⁹⁾に紹介した多目的風洞である。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 2.0 m ×高さ 2.5 m ×全長 15.0 m なる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。

先の実験⁷⁾では、 $y_1=0$ なる状態の並列ケーブル($S=2D, 3D, 4D$)に一樣な風が作用する場合を対象としていた。これに対し、今回、主として実施した風洞試験は、図-1に示すようなケーブル中心間隔が $S=3D$ で鉛直方向相対位置 y_1 が $y_1=0.25D$ と $y_1=0.37D$ なる場合の、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(揚力係数と抗力係数)特性を把握する試験である。ここに、 $y_1=0.25D$ と $y_1=0.37D$ なる場合は、ケーブルに対して $\beta=4.8^\circ$ および $\beta=7.0^\circ$ なる斜角を有する風がそれぞれ作用する場合に対応する。また、以上の実験に加え、 $y_1=0.50D$ ($\beta=9.5^\circ$ なる斜角を有する風が作用する場合に相当)なる場合についても、ばね支持実験を一部実施することとした。なお、林ら¹⁰⁾は、すでに、 $S=3D$ ($D=50\text{ mm}$)なる並列ケーブルの後流側ケーブルに作用する静的な揚力係数を斜角(迎角)を変化させて測定している。林らの風速 $V=$

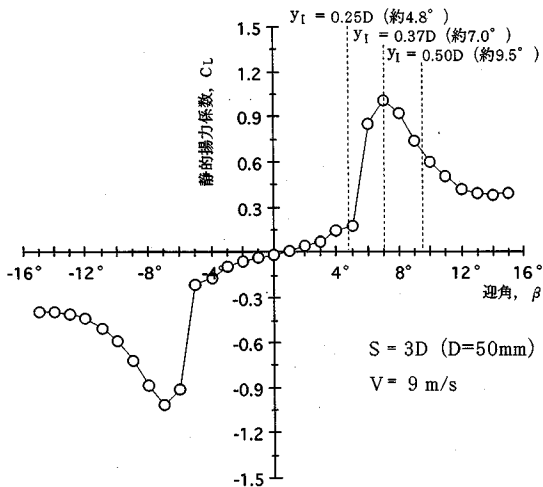


図-2 林らの実験結果¹⁰⁾と本研究で対象とした実験条件の関係

9.0 m/sなる一様流中の実験結果と本研究で対象とした鉛直方向相対位置(斜角)の関係を図-2に示す。図-2より、林らの結果をそのまま適用すれば、 $y_1=0.25D$ は揚力係数が急激に増大しはじめる角度($\beta=4.8^\circ$ なる斜角)に、また、 $y_1=0.37D$ は揚力係数が最大となる角度($\beta=7.0^\circ$ なる斜角)に、さらに、 $y_1=0.50D$ は揚力係数が急激に低下する付近の角度($\beta=9.5^\circ$ なる斜角)に、それぞれほぼ対応していることがわかる。なお、本研究の成果の一つとして、下流側(ノーマル)ケーブルの静的空気力係数はきわめて特徴あるレイノルズ数(風速)依存性を呈するという興味ある結果が得られているが、これについては4章にて詳述する。

実験模型は、円形断面のノーマルケーブル模型(MODEL-N)とディンプル付きケーブル模型(MODEL-DM)である⁷⁾。ここに、ノーマルケーブル模型であるMODEL-Nの直径は76 mmであり、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)されるように製作されている。なお、模型長は風洞寸法から1.62 mとしている。一方、MODEL-DMなるディンプル付きケーブル模型は、1 mm厚のゴム板から直径が8 mmなるディンプルを図-3に示すように型抜きした後、別に作製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1.62 mであるが、直径は78 mmとなっている。

3. ばね支持実験

(1) 実験の概要

今回のばね支持実験にあたっては、文献⁷⁾と同じく、

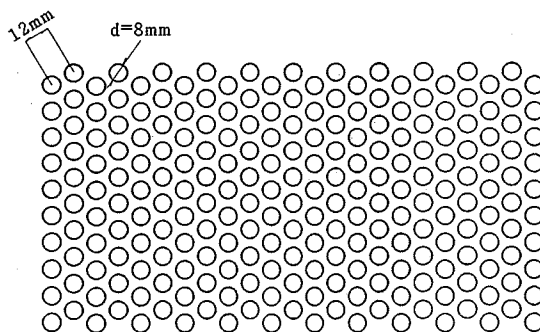


図-3 MODEL-DMのディンプル配置

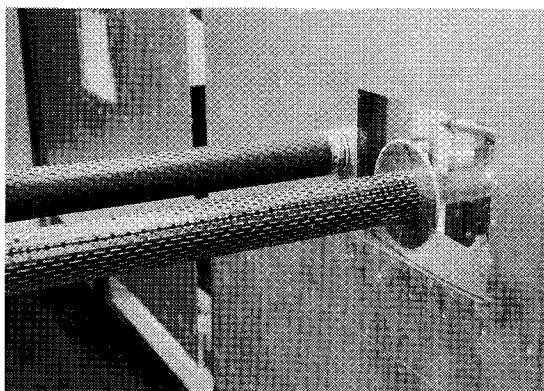


写真-1 風洞内に設置したディンプル付きケーブル模型

上流側ケーブルを風洞内の2次端板に固定し、基本的に下流側ケーブルの振動数 f が $f=1.345\text{ Hz}$ 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ている。ここに、実験で対象とした $f=1.345\text{ Hz}$ なる振動数は、長さが70 m~90 m程度のケーブルが有する基本固有振動数に対応する。また、下流側ケーブルのみを振動可能とした実験結果は、上流側ケーブルと下流側ケーブルをそれぞれ振動可能とした場合の実験結果とほぼ一致することが確認されていることを付記しておく。

ケーブル中心間隔 S としては、励振力がきわめて強い $S=3.0D$ なる場合⁷⁾を選定し、ウェイクギャロッピングの発現風速に及ぼすスクルートン数(質量・減衰パラメーター)の影響を並列ケーブルの鉛直方向相対位置 y_1 を変化(迎角を変化)させて調査することとした。参考までに、ディンプル付きケーブルを風洞内に設置した状況を写真-1に示す。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。

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

ここに、 m は単位長さ当りの質量、 δ は構造対数減衰率、

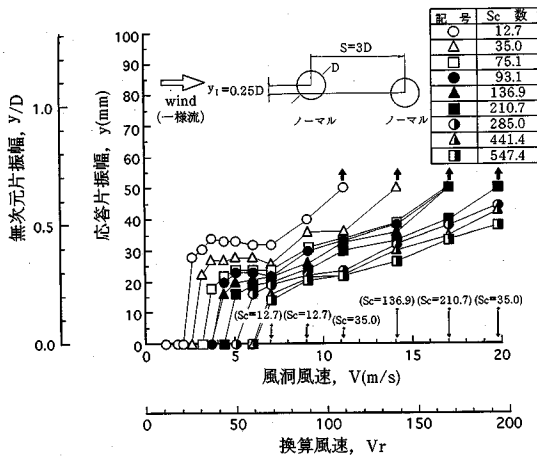


図-4 CASE-NN の V-A 曲線 (一樣流, $y_1=0.25D$)

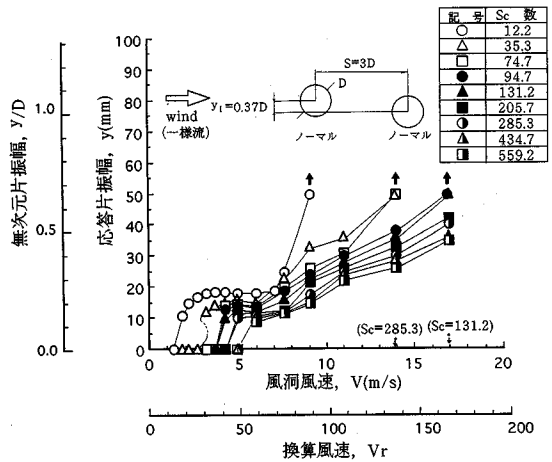


図-5 CASE-NN の V-A 曲線 (一樣流, $y_1=0.37D$)

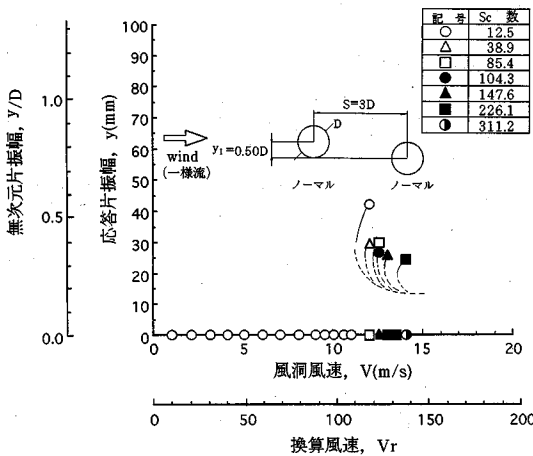


図-6 CASE-NN の V-A 曲線 (一樣流, $y_1=0.50D$)

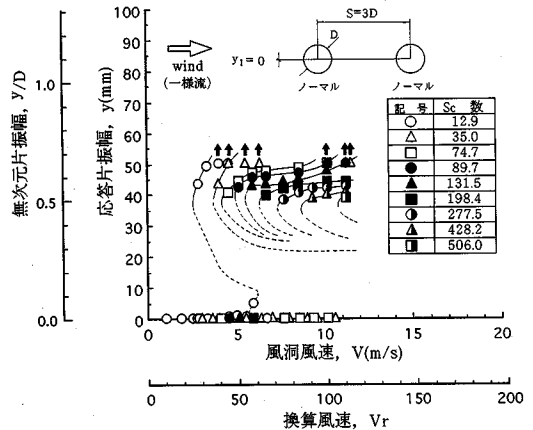


図-7 CASE-NN の V-A 曲線 (一樣流, $y_1=0$)

ρ は空気密度 ($=0.12 \text{ kgf}\cdot\text{sec}^2/\text{m}^4$), 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 $\delta=0.003$ と仮定すれば、標準規格品の $D=75.5 \text{ mm}$ なる細径ケーブル (単位長さ当りの重量 w は $w=13.37 \text{ kgf/m}$) のスクルートン数 S_c は $S_c=11.97$ となる。

なお、スクルートン数が小さい場合、換算風速 V_r ($V_r=V/d$) が 5 なる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 1 m/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。

(2) CASE-NN の実験結果と考察

上流側と下流側をそれぞれノーマルケーブル (MODEL-N) に設定した CASE-NN なる場合について、一樣流状態ではばね支持実験を実施した。鉛直方向の相対位置が $y_1=0.25D, 0.37D, 0.5D$ なる場合の V-A 曲線 (風速と応答片振幅の関係図) をそれぞれ図-4~図-6 に示す。ここに、図-4 や図-5 中に、たとえば $S_c=12.7$ とともに記した矢印 (\downarrow) は、 $S_c=12.7$ なるスクルートン数では矢印の起点に対応する振幅以下でウェイクギャロッピングが発達しなかったことを表す。なお、スクルートン数を 10 程度に設定した $y_1=0$ なる既往の実験結果^{11),12)} によれば、 $S/D=3.0$ なるケーブル間隔では片振幅を y とすれば最大で $y=1.5D\sim 2.0D$ 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 50 mm 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、ここでは文献 7) と同じく計測する最大片振幅を 50 mm に制限し、 50 mm 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、次節以降も含め、以下においてスクルーショ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 $D=75.5\text{ mm}$ なるケーブル($w=13.37\text{ kgf/m}$)に換算した値である。

$y_1=0.5D$ とした場合には、図-6からわかるように $S_c \approx 12$ ($\delta \approx 0.003$)なる非常に小さなスクルーション数でも、不安定なリミットサイクル(図中の破線で示したものであり、これ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)は有するものの、 $V=10\text{ m/s}$ 程度と比較的高風速域からウェイクギャロッピングが発現する結果となっている。これに対し、 $y_1=0.25D$ と $y_1=0.37D$ なる場合には、図-4と図-5からわかるように $V=1\sim 2\text{ m/s}$ 程度のきわめて低風速域からウェイクギャロッピングが発現している。すなわち、 $y_1=0.5D$ なる場合($\beta \approx 9.5^\circ$ なる斜角を有する風が作用する場合)は、 $y_1=0.25D$ なる場合($\beta \approx 4.8^\circ$ なる斜角を有する風が作用する場合)や $y_1=0.37D$ なる場合($\beta \approx 7.0^\circ$ なる斜角を有する風が作用する場合)と比較し、低風速域におけるウェイクギャロッピング特性が大幅に向上するものと言える。

これに対し、 $y_1=0.25D$ と $y_1=0.37D$ なる場合のウェイクギャロッピング特性は比較的類似している。具体的には、いずれのケーブル配置でもウェイクギャロッピングの励振力はきわめて強く、発現風速 V_{cr} は、スクルーション数が $S_c \approx 550$ ($\delta \approx 0.138$)なる場合でも $y_1=0.25D$ で $V_{cr} \approx 7.0\text{ m/s}$ 、 $y_1=0.37D$ で $V_{cr} \approx 6.0\text{ m/s}$ と大幅な上昇効果は認められない。また、図-6および文献7)から引用した図-7からわかるように、 $y_1=0.50D$ や $y_1=0$ なる場合にはハード的なウェイクギャロッピング(不安定なリミットサイクルを有するウェイクギャロッピング)が発現していたのに対し、 $y_1=0.25D$ と $y_1=0.37D$ なるケーブル配置では低風速域においてほぼソフト的なウェイクギャロッピング(不安定なリミットサイクルが存在せず、増速時と減速時で同じV-A曲線をたどるウェイクギャロッピング)と見なせる振動に移行していることも理解できよう。すなわち、主流方向にケーブルが並列配置された場合($y_1=0$)には、何らかの要因で不安定なリミットサイクルを越える初期振幅が与えられない限りウェイクギャロッピングは発現しないのに対し、ケーブルに対して斜角を有する風が作用する場合には初期振幅が与えられなくとも低風速域においてウェイクギャロッピングが十分に発現することとなる。なお、 $y_1=0.37D$ なる場合の 7 m/s 以下で発現したウェイクギャロッピングは、同じスクルーション数の $y_1=0.25D$ なる場合の結果と比較して振幅がおおよそ半分程度に低減している。しかしながら、 $S_c \approx 550$ ($\delta \approx 0.138$)での結果を比較すればわかるように、発現風速は逆に低風速側に移動

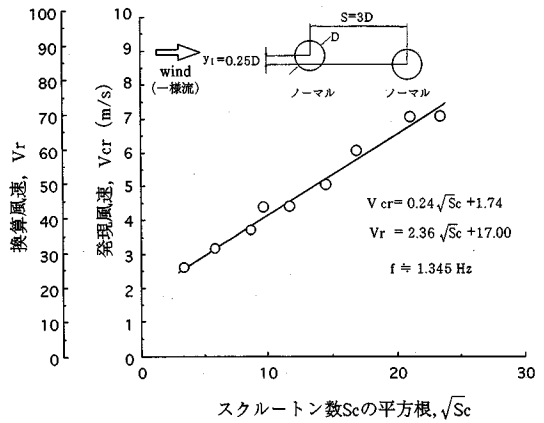


図-8 スクルーション数の平方根と発現風速の関係(一樣流, $y_1=0.25D$)

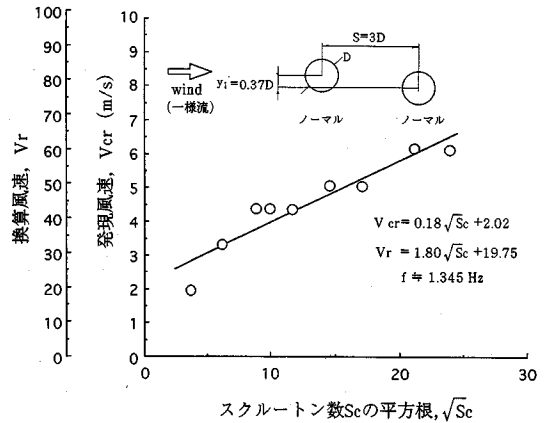


図-9 スクルーション数の平方根と発現風速の関係(一樣流, $y_1=0.37D$)

する結果となっている。ウェイクギャロッピングの励振力は振動振幅に依存することから、発現風速が低風速側に移動した場合には小振幅域における励振力が増加したと言える。すなわち、 $y_1=0.37D$ なる場合($\beta \approx 7.0^\circ$ なる斜角を有する風が作用する場合)のウェイクギャロッピングは、 $y_1=0.25D$ なる場合($\beta \approx 4.8^\circ$ なる斜角を有する風が作用する場合)と比較し、振動振幅の最大値は小さいものの、発達過程の小振幅域における励振力は幾分強いと考えられる。

なお、図-8と図-9は、 $y_1=0.25D$ と $y_1=0.37D$ なる場合について、ウェイクギャロッピングの発現風速と $\sqrt{S_c}$ (スクルーション数の平方根)の関係をそれぞれ示したものである。これらの図から、 $y_1=0.25D$ と $y_1=0.37D$ の、一樣流中におけるウェイクギャロッピングの発現風速 V_{cr} はおおよそ次式で表示されることがわかる。

$$V_{cr} = 0.24 \times \sqrt{S_c} + 1.74 \quad (y_1 = 0.25D) \quad (2)$$

$$V_{cr} = 0.18 \times \sqrt{S_c} + 2.02 \quad (y_1 = 0.37D) \quad (3)$$

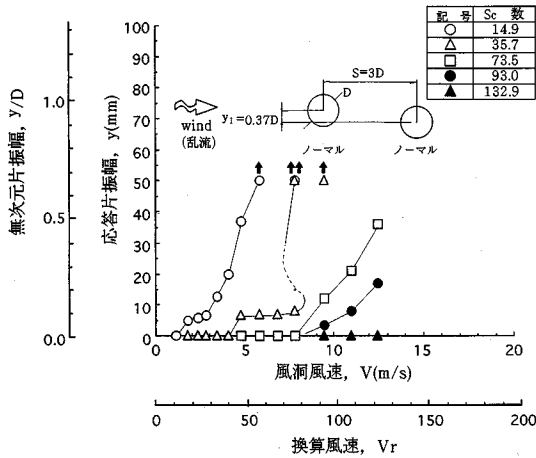


図-10 CASE-NN の V-A 曲線 ($I_u = 5 \sim 7\%$ なる格子乱流, $y_1 = 0.37D$)

すなわち、ノーマルケーブルの一樣流中におけるウェイクギャロッピングの発現風速は、概略、 \sqrt{Sc} に比例して増加する程度であると言える。なお、最近の研究⁸⁾によれば、ウェイクギャロッピングの発現風速は換算風速 V_r ($=V/fD$) で整理できない可能性も指摘されているが、現時点では最終的な結論が得られるには至っていない。そこで、参考までに、式(2)と式(3)を換算風速に変換した場合の評価式をそれぞれ以下に付記しておく。

$$V_r = 2.36 \times \sqrt{Sc} + 17.00 \quad (y_1 = 0.25D) \quad (4)$$

$$V_r = 1.80 \times \sqrt{Sc} + 19.75 \quad (y_1 = 0.37D) \quad (5)$$

以上は一樣流中での実験結果であるが、ウェイクギャロッピング特性に及ぼす(格子)乱流の影響を把握するため、 $y_1 = 0.37D$ で主流方向の乱れ強さ I_u が $I_u = 5 \sim 7\%$ なる場合および $y_1 = 0.25D$ で $I_u = 10 \sim 12\%$ なる場合のそれぞれについてばね支持実験を実施した。それぞれの結果を図-10、図-11に示す。図-11と図-4を比較すればわかるように、 $S/D = 3.0$ で $y_1 = 0.25D$ なる円形のノーマルケーブルに発現するウェイクギャロッピングは、 $Sc = 15$ ($\delta = 0.004$) なるスクルートン数において12%程度の乱れが存在しても振動振幅が低減されず、逆に風速の増加に対して急激に立ち上がる傾向を呈していることがわかる。この知見は $S/D = 2.0$ でスクルートン数が $Sc = 7.5$ なるタウトストリップ模型(ケーブル径 $D = 35$ mm)を用いた藤澤⁹⁾の実験結果ともほぼ対応するものである。しかしながら、スクルートン数を幾分か大きくした場合には、一樣流中でのウェイクギャロッピング特性と明らかに相違する。すなわち、図-10と図-11からわかるように、格子乱流中におけるウェイクギャロッピングの発現風速は乱れ強さが大きくなるにしたがって上昇し、 $y_1 = 0.37D$ で $I_u = 5 \sim 7\%$ の格子乱流中では $Sc = 132.9$ ($\delta = 0.033$) なるスクルートン数で、 $y_1 = 0.25$

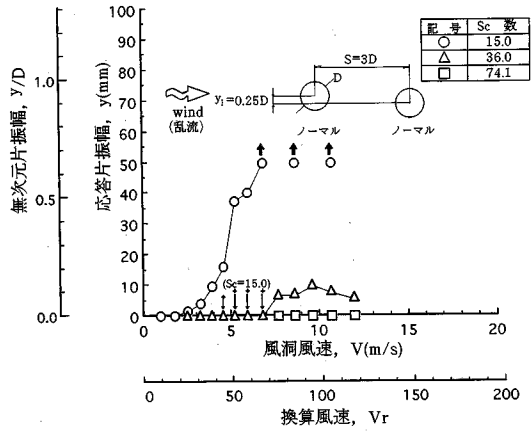


図-11 CASE-NN の V-A 曲線 ($I_u = 10 \sim 12\%$ なる格子乱流, $y_1 = 0.25D$)

D で $I_u = 10 \sim 12\%$ の格子乱流中では $Sc = 74.1$ ($\delta = 0.019$) なるスクルートン数で、それぞれウェイクギャロッピングは実験風速域 (12~13 m/s) で発現していない。しかしながら、一方で、 $S/D = 2.6$ なる実橋の並列ケーブルではダンパーによってケーブルの構造減衰を $\delta = 0.1$ 程度に増加させても 4 m/s 程度以上の風速域からウェイクギャロッピングが発現し、ダンパーの設置のみではウェイクギャロッピングを十分に制振できなかったとの報告もなされている³⁾。現地での自然風特性や振動が発生した実橋ケーブルの構造諸元などの諸条件が不明であることから、この報告と今回の実験結果を単純に比較できないが、差異の要因としてはケーブル中心間隔とケーブル径の比 S/D が異なっており乱流中の励振力特性が相違している可能性があること、あるいは、振動が観測された実橋ケーブルではケーブル高さ方向の平均乱れ強さが5%程度以下と一樣に近い風が作用する風環境にあったことなどが考えられる。ただ、ウェイクギャロッピングについては乱れのスケール効果なども含めなお不明な点も多く、実橋ケーブルと風洞実験での挙動の対比について、今後とも継続的な研究が必要であると言えよう。

(3) CASE-DN の実験結果と考察

ウェイクギャロッピングは、風上側ケーブルのウェイク(後流)の作用によって風下側ケーブルに発生する振動であると一般に認識されている。そこで、風上側ケーブルからのウェイクを変化させた場合の影響を調べるため、 $y_1 = 0.25D$ なる条件のもと、上流側をディンプル付きケーブルに、下流側をノーマルケーブル(固有振動数は $f = 1.345$ Hz)に設定した CASE-DN なる場合についても一樣流中状態ではばね支持実験を実施することとした。得られた実験結果を図-12に示す。

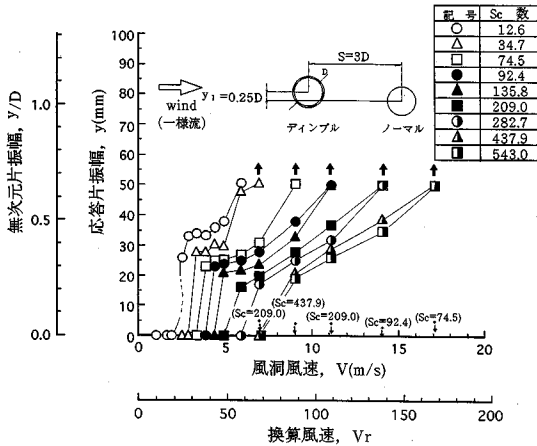


図-12 CASE-DN の V-A 曲線 (一樣流, $y_1=0.25 D$)

上流側に配置した MODEL-DM なるディンプル付きケーブルは単独時において $Re \approx 4.0 \times 10^4$ なるレイノルズ数 ($D=78 \text{ mm}$ なるディンプル付きケーブルでは 8 m/s 程度の風速に相当) で超臨界域に達して後流幅が縮小する。これに対し、円形断面のノーマルケーブルでは抗力係数が最小値を示す限界レイノルズ数が $Re \approx 3.8 \times 10^5$ ($D=76 \text{ mm}$ なるノーマルケーブルでは 73 m/s 程度の風速に相当) である。したがって、従来の知見に基づけば CASE-DN では CASE-NN と比較して 8 m/s 程度以上の風速域においてウェイクギャロッピングの振動振幅が低減するものと予想される。しかしながら、図-4 と図-12 を比較すればわかるように、同一のスクリーン数では CASE-DN の方が CASE-NN と比較してウェイクギャロッピングの発現風速が若干高風速側に移動する傾向は認められるものの、振動振幅は逆に増大する結果となっている。それゆえ、下流側ケーブルに発現するウェイクギャロッピングは、上流側ケーブルにおける後流幅の縮小には単純に依存せず、下流側ケーブル回りの流れや断面形状 (空力特性) にも複雑に関係した現象であると推察される。

(4) CASE-DD の実験結果と考察

ケーブルの並列配置方向に一樣な風を作用させた先の実験 ($y_1=0$ なる場合の実験)⁷⁾ では、設計にとって安全側の結果が与えられるように考えて、上流側をノーマルケーブル (MODEL-N) に、下流側をディンプル付きケーブル (MODEL-DM) に設定したばね支持実験を実施している。しかしながら、前節の知見より、上流側をノーマルケーブルとした実験は必ずしも設計にとって安全側の結果を与えないことから、本実験では通常の使用状態と同じく上流側と下流側をそれぞれ MODEL-DM なるディンプル付きケーブルに設定した CASE-DD なる場

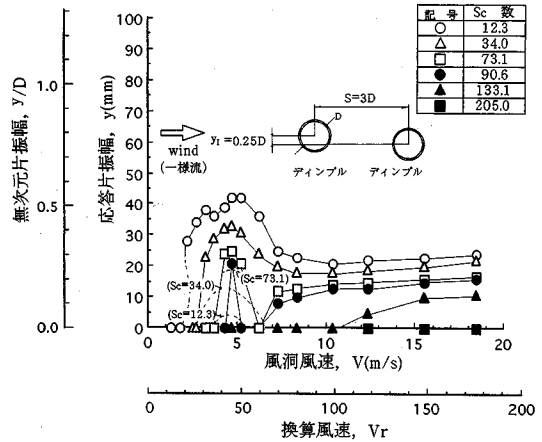


図-13 CASE-DD の V-A 曲線 (一樣流, $y_1=0.25 D$)

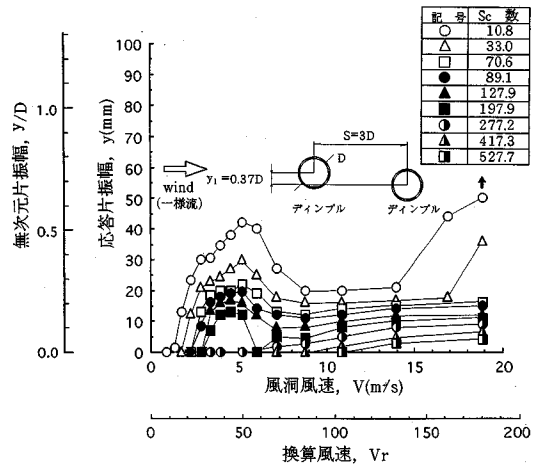


図-14 CASE-DD の V-A 曲線 (一樣流, $y_1=0.37 D$)

合について、ばね支持実験を実施することとした。

一樣流状態で得られた、 $y_1=0.25 D$ と $y_1=0.37 D$ なる場合の V-A 曲線 (風速と応答片振幅の関係図) をそれぞれ図-13、図-14 に示す。図-13 と図-14 を比較すればわかるように、 $y_1=0.25 D$ と $y_1=0.37 D$ なる場合の応答特性は比較的類似していることから、ここでは、まず、 $y_1=0.25 D$ なる場合の実験結果を中心に考察する。鉛直方向相対位置が $y_1=0.25 D$ なるケーブル配置 ($\beta \approx 4.8^\circ$ なる斜角を有する風が作用する場合) では、図-13 からわかるように、応答曲線には一般に不安定なリミットサイクルが存在する。スクリーン数が $Sc=12.3$ ($\delta \approx 0.003$) なる場合、ウェイクギャロッピングの発現風速 V_{cr} は $V_{cr} \approx 2.3 \text{ m/s}$ ときわめて低く、また、 $3.0 \text{ m/s} \sim 6.0 \text{ m/s}$ 程度の風速域におけるウェイクギャロッピングの振動片振幅は 40 mm 程度と図-4 に示した CASE-NN と比較して若干大きくなっている。しかしながら、 6.0 m/s 程度を越える風速から応答振幅が低減しはじ

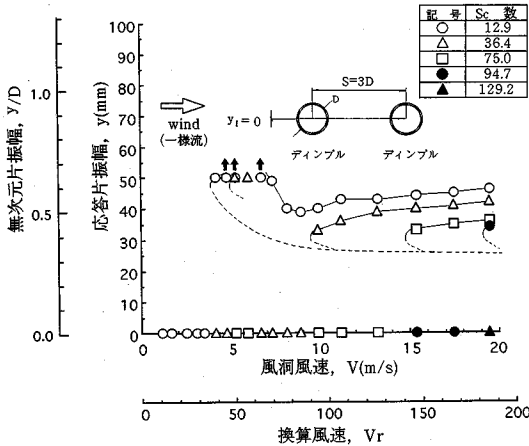


図-15 CASE-DDのV-A曲線（一樣流， $y_1=0$ ）

め、10 m/s 程度以上では 25 mm 程度まで減少しており、ウェイクギャロッピングに対するディンブル付きケーブルの制振効果は $y_1=0$ なる先の実験結果と同じく風速の大きさによって明らかに変化していることがわかる。また、スクルートン数を $S_c=73.1$ ($\delta=0.019$) と若干大きくした場合、5.0 m/s 程度付近の風速域で発現していたウェイクギャロッピングは、6.0 m/s 程度の風速域で発現しなくなっている。この場合、7.0 m/s 程度を越える風速域では振動片振幅が 10 mm~20 mm 程度と非常に振幅の小さいウェイクギャロッピングが再び発現しているが、いずれにしても $y_1=0.25D$ なるケーブル配置では 6 m/s 程度の風速付近から下流側ケーブル回りの流れが急変し、ウェイクギャロッピング特性が変化しているものと推察される。したがって、静的空気力特性も 6 m/s 程度なる風速付近から特徴的な結果を与えるものと思われるが、これについては次章で議論することとする。

次に、 $y_1=0.37D$ なる場合 ($\beta=7.0^\circ$ なる斜角を有する風が作用する場合) のウェイクギャロッピングについて考察する。 $y_1=0.37D$ なる場合のウェイクギャロッピング特性は $y_1=0.25D$ なる場合と比較的類似しているものの、図-13 と図-14 を比較すればわかるように、 $y_1=0.37D$ では $S_c=527.7$ ($\delta=0.132$) なるスクルートン数でも最大で 5 mm 程度と振幅はきわめて小さいものの、実験風速域内においてウェイクギャロッピングが発現している。すなわち、 $y_1=0.37D$ なる場合のウェイクギャロッピングは、 $y_1=0.25D$ なる場合の振動に比べ、励振力がかなり強くなっていると言える。なお、図-15 は補足的に実施した $y_1=0$ (CASE-DD) なる場合の実験結果である。図-13 と図-15 を比較すればわかるように、 $y_1=0$ なる場合のウェイクギャロッピングは、 $y_1=0.25D$ なる場合と比較し、その励振力はさらに小さくなっていることが理解されよう。

ところで、ノーマルケーブルを並列配置した場合に発

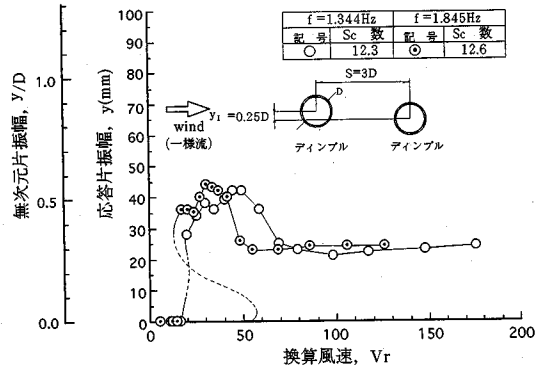


図-16 CASE-DDの V_r -A 曲線（振動数変化， $S_c=12$ ，一樣流， $y_1=0.25D$ ）

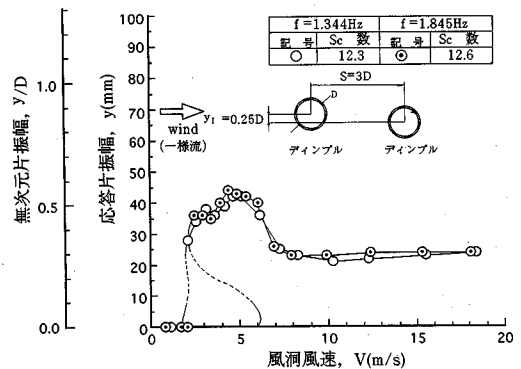
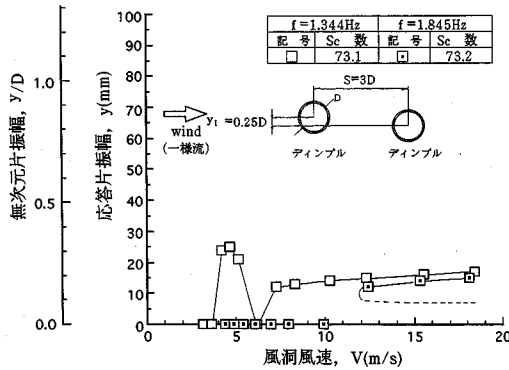


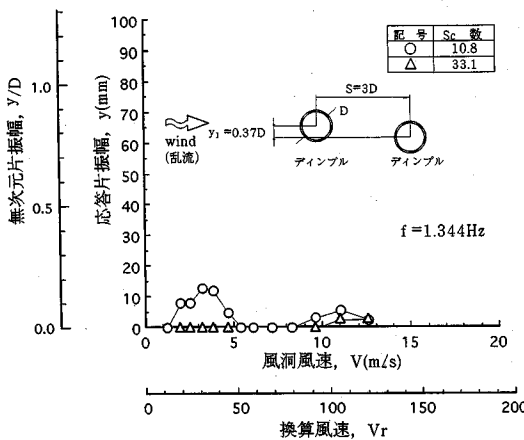
図-17 CASE-DDのV-A曲線（振動数変化， $S_c=12$ ，一樣流， $y_1=0.25D$ ）

現する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。そこで、 $y_1=0.25D$ なる場合の CASE-DD について、下流側ディンブル付きケーブルの固有振動数を $f=1.345$ Hz から $f=1.840$ Hz と変化させた場合についても一樣流中ではね支持実験を実施した。 $S_c=12$ ($\delta=0.003$) なる場合の結果を対比して図-16 に示す。図-16 より、振動数を変化させた場合の V_r -A 曲線（換算風速と応答片振幅の関係）は完全に一致せず、ディンブル付きケーブルにおいても換算風速での整理が困難である可能性が示唆できる。すなわち、 $S_c=12$ ($\delta=0.003$) なる小さなスクルートン数の範囲では、図-17 に示すように風洞風速で整理すべきものと言えよう。ただし、図-18 から、スクルートン数を若干大きくして $S_c=73$ ($\delta=0.018$) とした場合には、振動数を変化させた両者の応答結果に大きな差異が認められ、小振幅域におけるウェイクギャロッピングの励振力は振動数の増加とともに減少しているものと推察される。

以上は一樣流中での実験結果であるが、ディンブル付きケーブルのウェイクギャロッピング特性に及ぼす乱流の影響を把握するため、主流方向の乱れ強さ I_u が $I_u=5\sim7\%$ なる格子乱流中においてもばね支持実験を実施し



図一18 CASE-DDのV-A曲線(振動数変化, $S_c=73$, 一様流, $y_1=0.25D$)



図一19 CASE-DDのV-A曲線($L_u=5\sim7\%$ なる格子乱流, $y_1=0.37D$)

た。一例として、鉛直方向の初期設定位置が $y_1=0.37D$ なる場合の結果を図一19に示す。図一19からわかるように、非常に小さな $S_c=10.8$ ($\delta=0.003$) なるスクルトン数に設定した場合には $1.0\sim5.0\text{ m/s}$ と 8.0 m/s を越える風速域で振幅のきわめて小さなウェイクギャロッピングが発現しているものの、 $S_c=33.1$ ($\delta=0.008$) なるスクルトン数では 10 m/s を越える風速域でも片振幅が 3 mm 程度のウェイクギャロッピングしか発現していない。すなわち、ディンプル付きケーブルでは、ノーマルケーブルと比較し、ウェイクギャロッピング特性に及ぼす乱れの影響はさらに大きいと言える。したがって、実橋においてディンプル付きケーブルを採用した場合にも乱れの影響を期待でき、ダンパーによって若干の減衰を付加すれば、 $y_1=0.37D$ ($\beta=7.0^\circ$ なる迎角に相当) なるきわめて励振力の強いウェイクギャロッピングとも言えども十分に制振できると考えられる。

4. 静的空気力試験

前章に示したように、 $y_1=0.25D$ と $y_1=0.37D$ なる配置のノーマルケーブルに一樣流を作用させた場合、発現したウェイクギャロッピングは風速とともに励振力が増大する傾向を示していたのに対し、ディンプル付きケーブルを並列配置した場合には、 6 m/s 付近の風速を境としてウェイクギャロッピング特性が大きく変化する結果が得られた。また、格子乱流中のばね支持実験から、ディンプル付きケーブルのウェイクギャロッピング特性は乱れによってノーマルケーブルよりもさらに有意な影響を受け、乱れ強さはウェイクギャロッピングの発現を支配するきわめて重要なパラメーターの一つであることがわかった。そこで、ばね支持実験結果と静的空気力係数との関連性について検討するため、ノーマルケーブルとディンプル付きケーブルをそれぞれ並列に設置した状態(ケーブル中心間隔が $S=3D$ で、 $y_1=0.25D$ および $0.37D$ なる場合)で、模型の両端にそれぞれ直径が 17.6 cm なる端板を取り付け、風速(レイノルズ数 Re)を変化させて下流側ケーブルの静的空気力係数(揚力係数と抗力係数)を測定することとした。

(1) 一様流中での実験結果と考察

まず、CASE-NN と CASE-DD の $y_1=0.25D$ なる場合について、下流側ケーブルの揚力係数と抗力係数を一様流中で測定した。その結果をそれぞれ図一20、図一21に示す。ここに、揚力係数と抗力係数はそれぞれ、投影面積 A_n を $A_n=D \times \ell$ (D ; ケーブル径, ℓ ; 模型長) として算出したものである。

図一20からわかるように、ノーマルケーブルを並列配置した場合の揚力係数 C_L (図中の○記号)は、 3.2 m/s 程度の風速 ($Re=1.7 \times 10^4$ なるレイノルズ数)で最大値 ($C_L=0.34$)を示した後、徐々に減少して 24 m/s 程度の風速 ($Re=1.3 \times 10^5$)で $C_L=-0.07$ なる極小値(最小値)を示し、その後は徐々に増加するという特性を有している。これに対し、ディンプル付きケーブルを並列配置した場合の揚力係数 C_L (図中の●記号)は、 1.0 m/s 程度の風速 ($Re=5.1 \times 10^3$)で $C_L=0.35$ だった値が風速の増加とともに徐々に減少し、 6.0 m/s 程度の風速 ($Re=3.2 \times 10^4$)で $C_L=0.12$ 程度の極小値(最小値)を示している。また、 6.0 m/s 程度以上の風速 ($Re>3.2 \times 10^4$)における揚力係数は若干増加するものの $C_L=0.15$ 程度のほぼ一定値となっていることがわかる。これに対し、図一21からわかるように $y_1=0.25D$ に配置したCASE-DDの抗力係数 C_D (図中の●記号)は、 6.0 m/s なる風速で極小値(最小値)とならず、逆に $6.0\text{ m/s}\sim 8.0\text{ m/s}$ なる風速付近 ($Re=3.2 \times 10^4\sim Re=4.3 \times 10^4$)で急激に増大するという特性を呈している。 $y_1=0$ なるケーブル

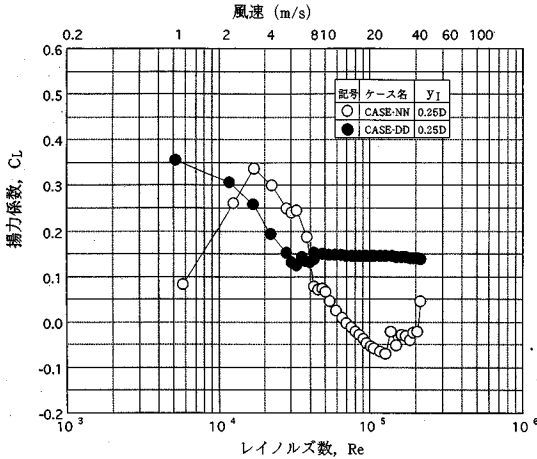


図-20 CASE-NN と CASE-DD の揚力係数 (一樣流, $y_1 = 0.25D$)

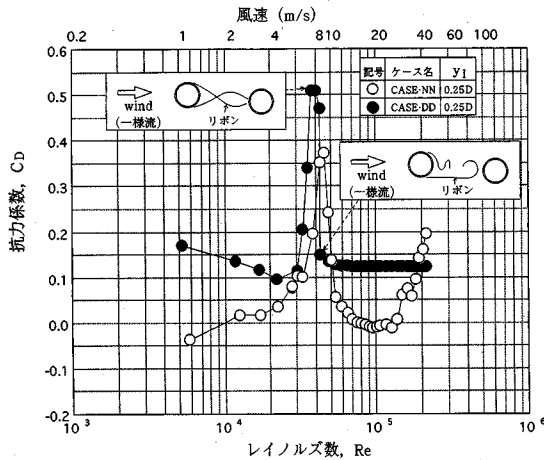


図-21 CASE-NN と CASE-DD の抗力係数 (一樣流, $y_1 = 0.25D$)

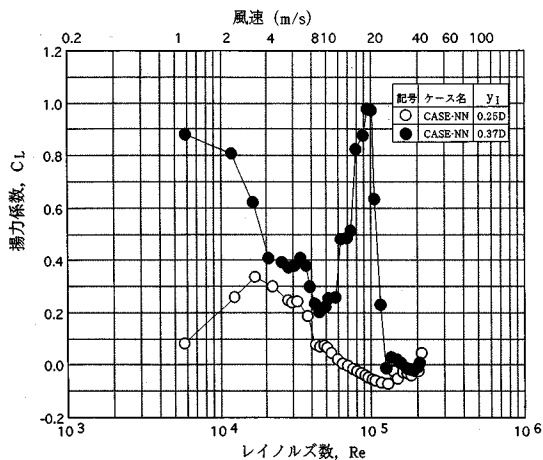


図-22 CASE-NN の揚力係数 (一樣流, $y_1 = 0.25D$, $y_1 = 0.37D$)

配置では、ケーブル単独時における抗力係数 C_D が極小値 (最小値) となるレイノルズ数 (風速) がウェイクギャロッピング特性を判断するパラメーターであったが⁷⁾、以上のことより、ケーブルに対して斜角を有する風が作用する場合には下流側ケーブルの揚力係数が最小値となるレイノルズ数 (風速) がウェイクギャロッピング特性を支配する重要なパラメーターになると言える。なお、図-21 には CASE-DD について上流側ケーブルの上下に細長いリボンを設置し、静的抗力係数が $C_D = 0.51$ なる最大値を呈した 7.5 m/s 程度の風速域 ($Re = 4.0 \times 10^4$) および抗力係数が $C_D = 0.13$ となった 9 m/s 程度の風速域 ($Re = 4.8 \times 10^4$) における流れ状況を観察した結果も示している。この図からわかるように、 7.5 m/s なる風速域では上下のリボンが激しく羽ばたいており、複雑な流れが交互に発生して下流側ケーブルの静的抗力係数が増大したものと推察される。

次に、CASE-NN の $y_1 = 0.25D$ と $0.37D$ なる状態について、一樣流中における下流側ケーブルの揚力係数をそれぞれ比較することとした。その結果を図-22 に示す。図-22 より、 $y_1 = 0.37D$ なるケーブル配置では、 $y_1 = 0.25D$ なる場合と比較し、きわめて特徴ある揚力係数特性を呈していることがわかる。すなわち、 $y_1 = 0.37D$ なる場合の揚力係数 (図中の●記号) は、多少の変動はあるものの、 $1 \text{ m/s} \sim 9 \text{ m/s}$ なる風速範囲 ($Re = 0.5 \times 10^4 \sim Re = 4.7 \times 10^4$) において風速の増加とともに低下するが、 12 m/s 程度の風速域 ($Re = 6.2 \times 10^4$) からは急激に増加して 19 m/s なる風速域 ($Re = 9.9 \times 10^4$) で $C_L = 1.0$ に達した後、 26 m/s 程度 ($Re = 1.4 \times 10^5$) の風速では $C_L = 0$ まで急激に低下する結果となっている。ばね支持実験では、 $y_1 = 0.37D$ なるケーブル配置のウェイクギャロッピングは $y_1 = 0.25D$ なる場合と比較して励振力が強いという結果が得られているが、これは $12 \text{ m/s} \sim 19 \text{ m/s}$ なる風速範囲で揚力係数が増大するという特異性にも起因すると推察される。ただし、 $y_1 = 0.37D$ なるケーブル配置でも 26 m/s 程度の風速 ($Re = 1.4 \times 10^5$) で揚力係数は極小値 (最小値) を示しており、 $y_1 = 0.25D$ なる場合と同様にウェイクギャロッピングは安定化される傾向にあるものと考えられる。

なお、並列ケーブルに発現する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が指摘されているが、このことは本節で述べたような揚力係数の著しいレイノルズ数 (風速) 依存性からも十分に予想され得ることを付記しておきたい。

(2) 格子乱流中での実験結果と考察

ディンプル付きケーブルを励振力が最も大きい $y_1 = 0.37D$ なる状態に設置し、下流側ケーブルの静的揚力係数を $I_u = 5 \sim 7\%$ と $I_u = 10 \sim 12\%$ なる格子乱流中で測定

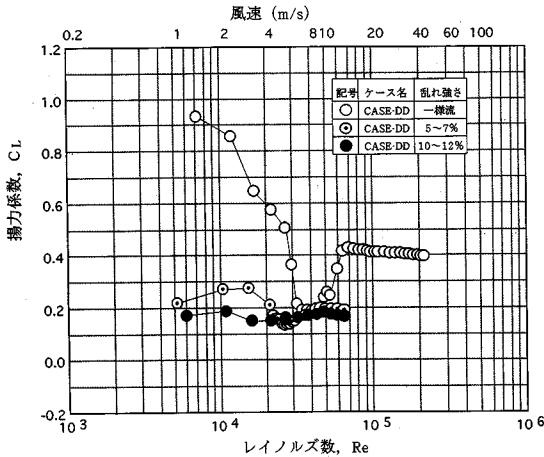


図-23 CASE-DDの揚力係数(一樣流と格子乱流, $y_1=0.37D$)

した。一樣流中での結果と比較して図-23に示す。図-23より、一樣流中と格子乱流中では揚力係数に明確な差異が認められることが理解されよう。すなわち、 $y_1=0.37D$ なる場合の一樣流中における揚力係数(図中の○記号)は、前節の $y_1=0.25D$ と同様にレイノルズ数(風速)によって変化し、8 m/s程度の風速($Re \approx 4.3 \times 10^4$)で $C_L=0.19$ 程度の極小値(最小値)を示している。一方、 $I_u=5\sim7\%$ なる乱れ強さでは揚力係数のレイノルズ数(風速)依存性なお幾分認められているものの、乱れ強さが $I_u=10\sim12\%$ の格子乱流中では、3 m/s程度以上の測定精度の良い風速域において一樣流中での最小値よりもさらに小さなほぼ一定の値($C_L \approx 0.13$)となっており、明確なレイノルズ数(風速)依存性を呈していない。

ディンプル付きケーブルでは乱れ強さが大きくなるにしたがってウェイクギャロッピング特性が安定化するというばね支持実験結果の知見を考え合わせれば、下流側ケーブルの揚力係数が小さく、かつ、レイノルズ数(風速)依存性の程度が小さくなるにしたがって、ウェイクギャロッピング特性は向上するものと言えよう。

5. まとめ

本論文は、風洞試験を実施して $S/D=3.0$ なる円形のノーマルならびにディンプル付き並列ケーブルに、斜角を有する一樣流と格子乱流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) ノーマルケーブルを並列配置したCASE-NNの一樣流中におけるばね支持実験結果から、ウェイクギャロッピングの小振幅域における励振力は、 $y_1=0.37D$ ($\beta \approx 7.0^\circ$ なる斜角を有する風が作用する場合に相当)、

$y_1=0.25D$ ($\beta \approx 4.8^\circ$ なる斜角を有する風が作用する場合に相当)、 $y_1=0.5D$ ($\beta \approx 9.5^\circ$ なる斜角を有する風が作用する場合に相当)なる順に強いことがわかった。また、ディンプル付きケーブルを並列配置したCASE-DDの一樣流中におけるばね支持実験結果からも、 $y_1=0.37D$ なる場合のウェイクギャロッピングが最も強い励振力を有することがわかった。

(2) 一樣流中におけるウェイクギャロッピングの発現風速とスクルートン数 S_c の関係をCASE-NNなる場合について提示した。この関係式より、ノーマルケーブルの一樣流中におけるウェイクギャロッピングの発現風速は、概略、 $\sqrt{S_c}$ に比例して増加する程度であることがわかった。

(3) 直径が78 mmなるディンプル付きケーブルを並列配置したCASE-DDでは、 $y_1=0.37D$ と $y_1=0.25D$ のいずれの場合にも6 m/s程度の一樣流中において下流側ケーブル回りの流れが急変し、ウェイクギャロッピング特性が変化する。この6 m/sなる風速値($Re \approx 3.2 \times 10^4$)は下流側のディンプル付きケーブルにおいて揚力係数が最小値となる風速に対応する。それゆえ、並列ケーブルに斜角を有する風が作用する場合、下流側の揚力係数が最小値となるレイノルズ数(風速)がウェイクギャロッピング特性を支配する重要なパラメーターであると言える。

(4) 振動数を変化させた一樣流中のばね支持実験結果より、ディンプル付きケーブルに発現するウェイクギャロッピングはノーマルケーブルと同じく換算風速での整理が困難であると考えられる。このことは、下流側ディンプル付きケーブルの揚力係数 C_L が一樣流中で明確なレイノルズ数依存性を呈していたことから推察できる。

(5) $S_c \approx 15$ ($\delta \approx 0.004$)なるスクルートン数に設定したCASE-NNの実験では、 $I_u=10\sim12\%$ 程度の乱れが存在してもウェイクギャロッピングの振動振幅は低減されない。しかしながら、スクルートン数を幾分大きくした場合、格子乱流中におけるウェイクギャロッピング特性は一樣流中における特性と明らかに相違し、乱れ強さが大きくなるにしたがって発現風速は耐風設計上有意と考えられる程度まで上昇する。それゆえ、架橋地点の風環境によってはノーマルケーブルのウェイクギャロッピングと言えどもダンパー方式で制振できる可能性があると考えられる。

(6) ディンプル付きケーブルのウェイクギャロッピング特性に及ぼす乱れの影響は、ノーマルケーブルの場合と比較してさらに大きい。したがって、実橋においてディンプル付きケーブルを採用した場合、 $I_u=5\sim7\%$ 程度以上の自然風下では乱れの影響を期待でき、ダンパーによって若干の減衰を付加すれば、 $y_1=0.37D$ なる場合の

ウェイクギャロッピングと言えども十分に制振できると考えられる。

(7) ディンプル付きケーブルでは、気流の乱れ強さが大きくなるにしたがって、揚力係数とそのレイノルズ数(風速)依存性は一樣流中と比較して大幅に低減する。したがって、静的空気力試験から算出した揚力係数が小さく、かつ、レイノルズ数(風速)依存性の程度が小さくなるにしたがって、下流側ケーブルのウェイクギャロッピング特性は向上するものと言える。

(8) 同一のスクリーン数のもとで実施したCASE-DNとCASE-NNのばね支持実験結果より、下流側ケーブルに発現するウェイクギャロッピングは、上流側ケーブルの差異による後流幅の縮小には単純に依存せず、下流側ケーブル回りの流れや断面形状(空力特性)にも複雑に関係した現象であると言える。

本研究により、ディンプル付きケーブルの有効性に加え、ノーマルケーブルのウェイクギャロッピング特性に関しても、従来知られていなかった実務上の有用な知見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、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、斜張橋ケーブルのウェイクギャロッピング対策を検討す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、国土開発技術センター：斜張橋ケーブルの耐風性に関する検討報告書，pp.55-64，1989年2月。
- 2) 米田昌弘：PC斜張橋ケーブルの風による振動とその対

策，コンクリート工学，Vol.32，No.5，pp.23-30，1994年5月。

- 3) 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，土木学会第48回年次学術講演会講演概要集，I-363，pp.874-875，1993年9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—斜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) Yoshimura, T., Savage, M.G., Wakasa, T., Urano, D. and T.Osaki: A DEVICE FOR SUPPRESSING WAKE GALLOPING OF STAY-CABLES FOR CABLE-STAYED BRIDGES, 第12回風工学シンポジウム論文集，pp.297-302，1992年12月。
- 6) 久保喜延，前田 博，加藤九州男，佐々木 誠：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，pp.251-256，1994年12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の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) 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。
- 9) 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。
- 10) 林 健一，赤瀬雅之，井上浩男：並列ケーブル振動時における振幅依存特性について，第13回風工学シンポジウム論文集，pp.245-250，1994年12月。
- 11) 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。
- 12) 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。

(1995.3.27 受付)

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON WAKE GALLOPING APPEARED IN TANDEM CABLES OF CABLE-STAYED BRIDGES SUBJECTED TO WIND IN SKEWED DIRECTION

Masahiro YONEDA, Shin-ichi MIYACHI, Katsuya EDAMOTO,
Hideyuki MOCHIZUKI and Hideki SETOUCHI

This paper deals with the wake galloping in tandem cables of cable-stayed bridges under skewed wind direction. Wind tunnel experiments by using conventional smooth surface circular cables and dimpled surface circular cables have been carried out in both uniform and turbulent flows. It was ascertained from test results that the exciting force of wake galloping decreases with the increase of turbulence intensity in the turbulent flow. It can also be seen that lift and drag coefficients are strongly dependent on Reynolds number and that Reynolds number corresponding to the minimum lift coefficient is one of the most significant parameters for wake galloping when wind direction is skewed.