

論文・報告

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関する基礎的研究

Suppression for Wake Galloping by Modified Cables with Dimpled Surface

越 後 滋*
Shigeru ECHIGO

米 田 昌 弘**
Masahiro YONEDA

宮 地 真 一***
Shin-ichi MIYACHI

枝 元 勝 哉****
Katsuya EDAMOTO

望 月 秀 之*****
Hideyuki MOCHIZUKI

畠 中 真 一****
Shin-ichi HATAKENAKA

In this paper, we reports a new type of aerodynamic countermeasure developed for suppressing wake galloping in tandem cables of cable-stayed bridges. We have carried out several wind tunnel tests to obtain characteristics of both the drag coefficients and wake galloping. It was found that the surface dimpled cables have drastic effects of increasing the apparent Reynolds number and decreasing the exciting force of wake galloping compared to the other types of cables by introducing roughness on their surface.

Key words : wake galloping, vibration control, aerodynamic countermeasure, cable-stayed bridge, wind tunnel tests

1. ま え が き

ここ数年来の斜張橋の長径間化に伴い、使用ケーブルの長大化やポリエチレン管被覆ケーブルの一般化が進み、また並列ケーブル方式も増加の傾向にある。このような状況のもと、鋼斜張橋のみならず最近ではPC斜張橋においても、レインバイブレーションやウェイクギャロッピングなど風によるケーブル振動が大きな問題として取り上げられている。

鋼斜張橋において、ケーブルの制振対策が必要とされるような比較的規模の大きい橋梁の場合、一般に直径 D が $D=140\text{ mm}\sim 190\text{ mm}$ 前後の太径ケーブルが採用されることが多く、また並列配置される場合にもケーブル中心間隔 S が $S=4D\sim 5D$ 程度と励振力が比較的弱いと考えられるケーブル配置が採用されることが多い。したがって、中央支間長が $400\text{ m}\sim 500\text{ m}$ 程度以下の鋼斜張橋では、レインバイブレーションのみならずウェイクギャロッピングに対してもケーブル端部付近にダンパーを設置する手法のみで対処できる場合が多いと推察される。一方PC斜張橋においても、鋼斜張橋で使用されるような太径ケーブルを採用した場合には同じくダンパー方式のみで対処できる場合が多いと予想されるが、直径 D が $D=40\text{ mm}\sim 100\text{ mm}$ 程度でケーブル中心間隔 S が $S=2D\sim 3D$

程度に並列配置された細径ケーブルについては、ケーブルの張力や重量が小さいため振動に対する抵抗力が弱く、また太径ケーブルに比べギャロッピングの発現風速が低下することから、ケーブル端部付近にダンパーを設置する方法のみではウェイクギャロッピングを制振できない場合が多いものと認識されている¹⁾。すなわちPC斜張橋の今後の建設と長径間化を考えた場合、ウェイクギャロッピングに対する空力的な制振対策は、きわめて急務な検討課題となっている。

斜張橋ケーブルを対象としたウェイクギャロッピングの空力的制振法に関する研究は、著者らの知る限り、上流側ケーブルに後流抑制板を設置する久保らの研究²⁾、上・下流側ケーブルが接した状態($S=D$)で $100D$ 程度のピッチでよじる吉村らの研究³⁾が報告されているのみであり、いずれも実橋ケーブルに適用するに際しては施工上の問題点が残されていると思われる。すなわち、実橋ケーブルに適用できるウェイクギャロッピングの空力的な制振対策は、未だ確立されるに至っていないのが現状である。一方、レインバイブレーションについてはすでに空力的制振方法に関する研究が精力的に実施されており、ケーブル被覆材のポリエチレン樹脂を溶融状態で押し出した後に空力的対策として表面を加工するケーブル製作技術は、耐久性に関する検討も含め、ほぼ確立さ

*川田工業㈱技術本部中央研究室室長 **川田工業㈱技術本部振動研究室室長 ***川田工業㈱技術本部振動研究室係長

****川田工業㈱技術本部中央研究室 *****川田工業㈱技術本部振動研究室

れるに至っている。

以上のようなケーブル制振技術とケーブル製作技術の現状ならびに動向を踏まえ、本研究ではまずはじめに斜張橋ケーブルのウェイクギャロッピング特性に及ぼすケーブル間隔とスクルトン数との関係を、部分模型風洞試験を実施して検討することとした。次にウェイクギャロッピングの空力的制振対策を見いだすべく、ケーブル表面にディンプルを設ける方法を考案し、ディンプル付きケーブルの有効性を同様に部分模型風洞試験によって検証することとした。具体的には、PC斜張橋で採用されることの多い $D=75\text{mm}$ 前後の細径ケーブルを対象として、円形断面のノーマルケーブル模型と2種類のディンプル付きケーブル模型を製作し、それぞれ単独状態での抗力係数特性を把握した後、ケーブル中心間隔 S とケーブル径 D の比が $S/D=2.0, 3.0, 4.0$ なる状態で、ウェイクギャロッピング特性とスクルトン数との関係をばね支持模型試験より算出した。その結果、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関するきわめて有用な技術資料が得られたことから、ここにその結果を報告する。なお、本論文は文献4)に発表済みである。

2. 使用風洞と風洞模型

使用風洞は川田工業(株)所有の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ェン型であるが、本実験では幅 $2.0\text{m} \times$ 高さ $2.5\text{m} \times$ 全長 15.0m なる閉鎖型測定洞を使用した。なお、閉鎖型測定洞の乱れ強さは 0.3% 以下にある。

実施した風洞試験は、単独ケーブルとしての静的空気力係数(抗力係数)特性を把握する試験と並列ケーブルの空力応答(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である。実験模型として、円形断面のノーマルケーブル模型(MODEL-N)と2種類のディンプル付きケーブル模型(MODEL-DMとMODEL-DS)をそれぞれ製作した。ここに、ノーマルケーブル模型であるMODEL-Nは、細径ケーブルを並列配置して使用したPC斜張橋の実績を調査したところ 75mm 前後のケーブル径が多く使用されていたことを考慮し、直径は材料入手の関係から 76mm に、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)されるように製作した。なお、模型長は風洞寸法から 1.62m としている。また、2種類のディンプル付きケーブル模型のうち、MODEL-DMは、 1mm 厚のゴム板から直径が 8mm なるディンプルを図-1に示すように型抜きした後、別に作成したノーマルケーブル模型に塗布して製作することとした。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 78mm となっている。これに対し、もう一方のディンプル付きケーブル模型である

MODEL-DSは、同様に 1mm 厚のゴム板から直径が 8mm なるディンプルを型抜きした後、MODEL-DMと同じくノーマルケーブル模型に塗布して製作することとしたが、ディンプル個数は図-2からわかるように $1/3$ 程度となっている。参考までに、MODEL-DMとMODEL-DSにおけるディンプルの状態を写真-1に示す。なお、ケーブルに付与したディンプルの直径(8mm)は、ゴルフボールでのディンプルと直径の比率を参考に決定したものである。

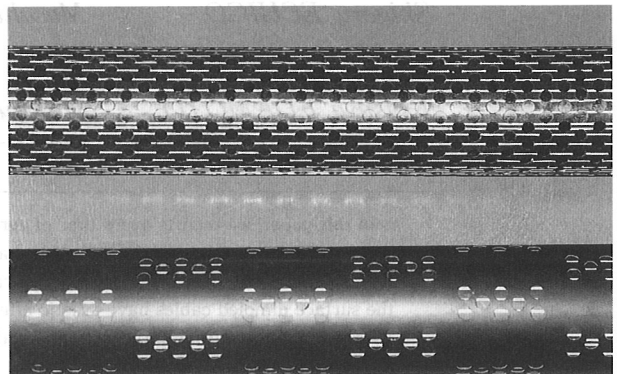


写真-1 MODEL-DM(上)とMODEL-DS(下)の風洞模型

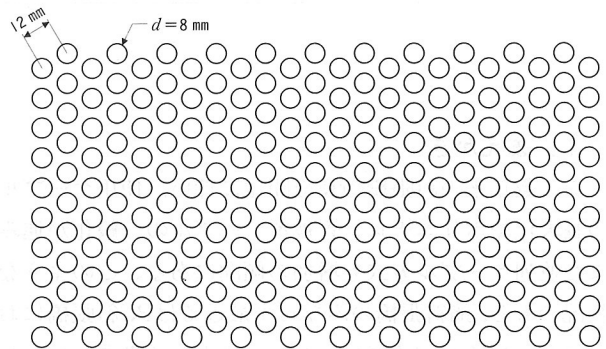


図-1 MODEL-DMのディンプル配置

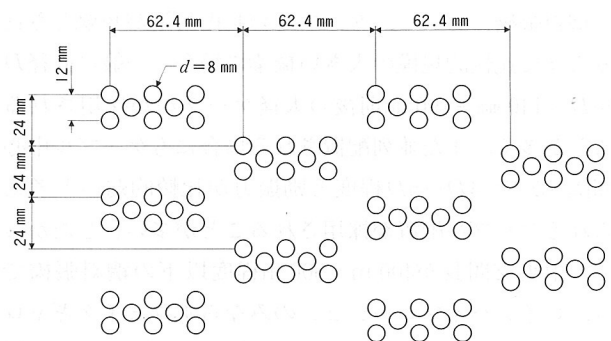


図-2 MODEL-DSのディンプル配置

3. 静的空気力試験

製作した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とMODEL-DS)の単独状態における静的空気力係数特性を把握するため、模型の両端にそれぞれ直径が 17.6cm なる端板を取り付

け、一様流中状態でレイノルズ数 Re （風速）を変化させて抗力係数を測定した。その結果を図-3, 4に示す。なお、これらの図には、参考までに直径が140 mmなるノーマルケーブルの実験結果⁵⁾に加え、レインバイブレーション対策として開発された表面にV字溝を施したV-ストライプケーブル（模型外径が140 mm, V字溝の深さが1.4 mm）の実験結果⁵⁾ならびに表面に離散的な凹型の粗度を付与したケーブル（模型外径が140 mm, 粗度係数は 1.1×10^{-2} ）の実験結果⁶⁾も併記してある。また、図-3と図-4には、理解が容易となるように、文献から引用した実験結果も含め、実験レイノルズ数 Re から直径が $D=78$ mmなるケーブルに換算した場合の風速も記している。

図-3より、ケーブルの全表面にディンプルを付与したMODEL-DMでは表面粗度の影響で $Re > 2.0 \times 10^4$ (4 m/s程度の風速) なるレイノルズ数域から $C_D=1.2$ 程度であった抗力係数が低減しはじめ、 $Re=4.0 \times 10^4$ (8 m/s程度の風速) において $C_D=0.8$ 程度になった後、徐々に漸増する特性を有することがわかる。すなわち、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 $Re \approx 3.8 \times 10^5$ (76 m/s程度の風速) であるのに対し、ディンプル付きケーブル (MODEL-DM) では $Re > 2.0 \times 10^4$ なるレイノルズ数域から後流幅が遷移しはじめ、 $Re \geq 4.0 \times 10^4$ なるレイノルズ数域においては後流幅が大幅に縮小する特性を有するものと推察される。なお、V-ストライプケーブルでは $Re \approx 1.6 \times 10^5$ ($D=78$ mmなるケーブルに換算すれば、32 m/s程度の風速に相当) 付近で $C_D=0.53$ 程度とディンプル付きケーブルよりもさらに小さな抗力係数を示しているが、抗力係数が低減し始める遷移領域は $Re \approx 9 \times 10^4$ ($D=78$ mmなるケーブルに換算すれば、18 m/s程度の風速に相当) であり、MODEL-DMの遷移領域である $Re=2.0 \times 10^4$ より4～5倍程度も大きくなっている。また、図-4に示したように、直径が140 mmなるケーブル表面に離散的な凹型の粗度を付与したレインバイブレーション対策用ケーブルでは、限界レイノルズ数として $Re \approx 1.0 \times 10^5$ ($D=78$ mmなるケーブルに換算すれば20 m/s程度の風速に相当) なる値が測定されており、ディンプル付きケーブルの限界レイノルズ数である $Re=4.0 \times 10^4$ と比較し、約2.5倍も大きくなっている。

これに対し、付与するディンプル数を少なくしたMODEL-DSでは、図-4からわかるように、MODEL-DMと同じく $Re > 2.0 \times 10^4$ (4 m/s程度の風速) なるレイノルズ数域から後流幅が遷移しはじめるものの、 $Re \approx 1.0 \times 10^5$ (20 m/s程度の風速) 付近で抗力係数の最小値に近い $C_D \approx 0.67$ に達した後、それ以上のレイノルズ数では抗力係数がゆるやかに低減する特性を有する。すなわち、若干の差異はあるものの、MODEL-DSは表面に離散的

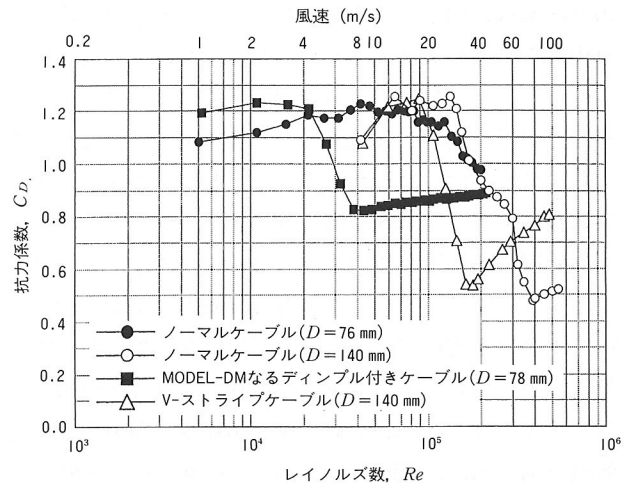


図-3 MODEL-DMとその他のケーブル模型の抗力係数

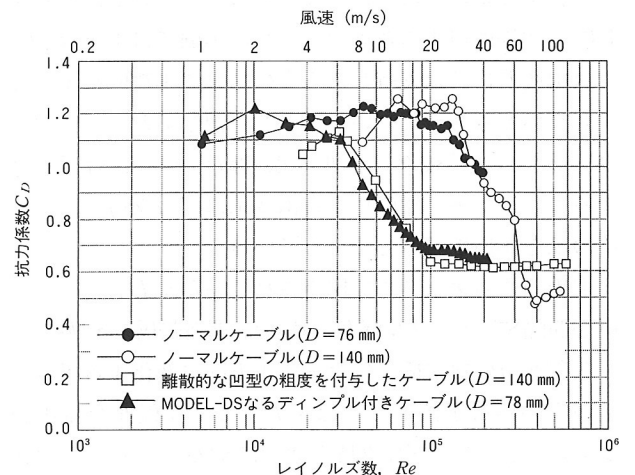


図-4 MODEL-DSとその他のケーブル模型の抗力係数

な凹型の粗度を付与するレインバイブレーション対策用ケーブルと類似した抗力係数特性を有するものである。

以上の静的空気力係数(抗力係数)特性から、MODEL-DMなるディンプル付きケーブル ($D=78$ mm) は、MODEL-DSやレインバイブレーション対策として開発されたV-ストライプケーブルならびに表面に離散的な凹型の粗度を与える方式などの各種ケーブルと比較し、より低風速域 (4 m/s程度) から後流幅が遷移しはじめ、8 m/s程度以上の風速域からは後流幅が大幅に縮小するという特性を有する。後流幅が大幅に縮小する超臨界域において、ウェイクギャロッピングの励振力は非常に小さくなると言われており、したがって、全表面にディンプルを付与した $D=78$ mmなるケーブルでは、無対策時におけるウェイクギャロッピングの発現風速をダンパーの設置によって8 m/s程度以上に高めれば、ウェイクギャロッピングは発現なくなると推察された。

4. ばね支持実験

(1) 実験の概要

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、下流側ケーブルを上下(鉛直)1自由度系にばね支持するものとした。なお、並列ケーブルのばね支持実験にあたっては、下流側ケーブルを上下(鉛直)方向と水平(主流)方向の2自由度系にばね支持する場合もしばしば行われている。しかしながら、本実験は後述するように S/D が4.0以下で、かつケーブルの並列配置方向に風を作用させる最も一般的なケースを対象とするものであり、この場合には過去の風洞実験において水平(主流)方向の応答は不規則性が強くかつ応答量も微小で鉛直方向に卓越する振動であることが報告されている⁷⁾。すなわち、 $S/D=10\sim 20$ 程度で発現する楕円軌道を描くwake-induced flutterを対象とした実験では、下流側ケーブルを上下(鉛直)方向と水平(主流)方向の2自由度系にばね支持しなければならないが、 S/D が4.0~5.0程度以下の並列ケーブルの実験では上下(鉛直)1自由度系にばね支持しても実験結果に本質的な差異は生じないと考えられていることを付記しておく。なお、本実験では後流側ケーブルの振動数 f が $f=1.345$ Hzとなるように上下(鉛直)1自由度系にばね支持し、一樣流の風を作用させるものとしている。

実橋の並列ケーブルで採用されている S/D (ケーブル中心間隔 S とケーブル径 D の比)は、鋼斜張橋で $S/D=4\sim 5$ 程度、PC斜張橋ではケーブル方向に変化する場合が多いものの最小値としては $S/D=2\sim 3$ 程度なる場合が多い。そこで、ばね支持実験では $S/D=2.0, 3.0, 4.0$ なるケーブル間隔を選定し、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)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・減衰パラメータである。

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

ここに、 m は単位長さ当たりの質量、 δ は構造対数減衰率、 ρ は空気密度($\approx 0.12 \text{ kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^{-4}$)、 D はケーブル径である。スクルートン数は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であり、無対策時の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を参考に $\delta=0.003$ 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(単位長さ当たりの重量 w は $w=13.37 \text{ kgf/m}$)と $D=155 \text{ mm}$ なる太径ケーブル(単位長さ当たりの重量 w は $w=100.7 \text{ kgf/m}$)のスクルートン数 S_c はそれぞれ $S_c=11.97$ 、 $S_c=21.4$ となる。すなわち、ケーブル径が小さいほどスクルートン数は小さく算出され、断面形状が同じ場合にも細径のケーブルになるに従って風による振動が誘起されやすくなる。

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

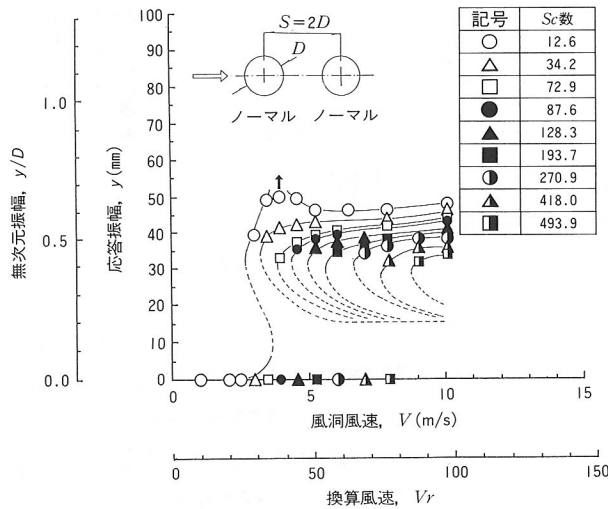
ウェイクギャロッピングのみに着目し、渦励振の発現しない $V_r=10$ 以上(風洞風速では 1 m/s 以上)の風速域で実験することとした。

(2) MODEL-N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)に設定した状態で得られた、 $S/D=2.0, 3.0, 4.0$ なる場合の V - A 曲線(風速と応答振幅の関係図)をそれぞれ図-5~7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^{8),9)}によれば、 $S/D=2.0$ と $S/D=3.0$ 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 を超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 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($\uparrow$)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トン数のあとに括弧書きで示した構造対数減衰率 δ は、標準規格品である $D=75.5 \text{ mm}$ なるケーブルに換算した値である。

図-5と図-6を比較すればわかるように、 $S/D=2.0$ と $S/D=3.0$ なるケーブル配置における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、応答曲線には不安定なりミットサイクル(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、スクルートン数が $S_c \approx 13$ ($\delta \approx 0.003$)なる場合では、ウェイクギャロッピングのquench点を与える風速 V_q (高風速側から風速を下げた場合、ウェイクギャロッピングが完全に消滅する時の風速)はいずれも $V_q \approx 2.5 \text{ m/s}$ ($V_r \approx 23.8$)と比べて低く、既往の実験結果^{8),9)}とよく一致している。また、 $S_c=493.9$ ($\delta \approx 0.133$)なる場合でも $S/D=2.0$ で $V_q \approx 8.8 \text{ m/s}$ ($V_r \approx 83.9$)、 $S/D=3.0$ で $V_q \approx 10.5 \text{ m/s}$ ($V_r \approx 100.0$)と発現風速の大幅な上昇効果は認められない。すなわち、ノーマルケーブルでは、ウェイクギャロッピングのquench点を与える風速 V_q は、スクルートン数 S_c が70($\delta \approx 0.019$)程度以上の領域においておおよそ S_c に比例するような傾向となっている。

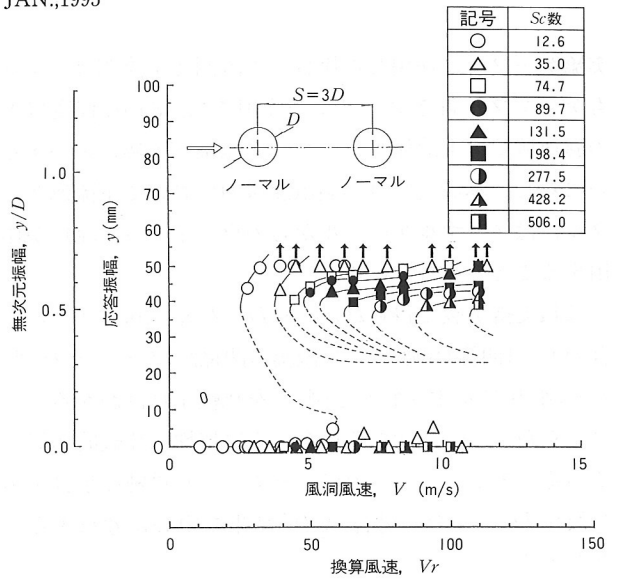
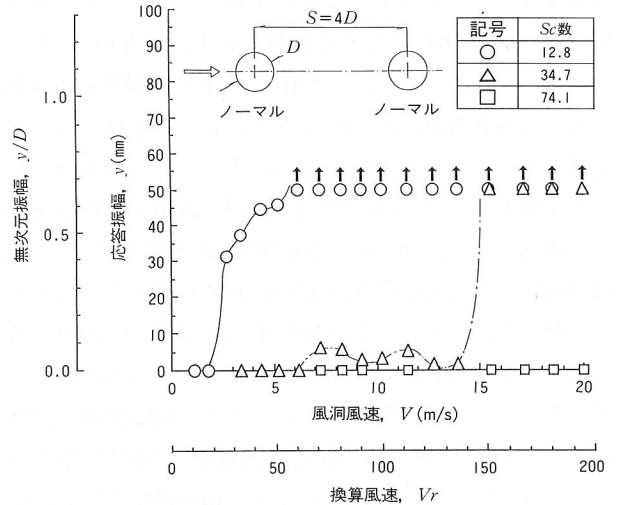
$S/D=2.0$ と $S/D=3.0$ なるケーブル配置におけるウェイクギャロッピングには不安定なりミットサイクルが存在し、実験で対象としたような主流方向にケーブルが並列配置された場合には、何らかの要因で不安定なりミットサイクルを超える初期振幅が与えられない限り、ウェイクギャロッピングは発現しない。しかしながら、自然風のもとでは、ケーブルに対して斜めに風(水平偏角を有する風)が作用することも予想され、この場合には主流と直角方向に対して相対的な変位を有するケーブル配置となる。すなわち、不安定なりミットサイクルを超

図-5 MODEL-NのV-A曲線 ($S/D=2.0$)

える初期振幅が与えられない場合にも、ケーブルに対し水平偏角を有する風が作用すれば、迎角が付加されたような効果によってウェイクギャロッピングが発現する場合が生じることとなる。したがって、ここでは、設計にとって安全側の評価を与えるように考えて、ウェイクギャロッピングのquench点を与える風速 V_q を「ウェイクギャロッピングの発現風速」とみなすこととする。

景観上から、自動車防護柵と同程度の高さにダンパーを設置するとした場合、ケーブルに付加される構造対数減衰率の最大値は $\delta=0.1$ 程度である。上述したように、 $S/D=2.0 \sim 3.0$ なるケーブル配置では、ウェイクギャロッピングの発現風速はおおよそ $\sqrt{Sc}$ に比例し、 $\delta=0.133$ ($Sc=493.9$) なる減衰をケーブルに与えてもウェイクギャロッピングの発現風速は高々 10 m/s ($V_r=95.3$) 程度である。ゆえに、太径ケーブルを採用した場合も含め、 $S/D=2.0$ と $S/D=3.0$ なるケーブル配置では、ケーブルにダンパーを設置して構造減衰を付加する手法は、強風が作用するのは橋軸方向にはほぼ限定されるなどの特殊な風環境条件を除けば、得策でない場合が多いものと言えよう。

これに対し、 $S/D=4.0$ なるケーブル配置では、図-7からわかるように、 $Sc=12.8$ ($\delta=0.003$) なる場合に $V=2.7 \text{ m/s}$ ($V_r=25.7$) 程度の風速でウェイクギャロッピングは発現するものの、若干の減衰を付加して $Sc=34.7$ ($\delta=0.009$) に設定すればウェイクギャロッピングの発現風速は $V=15.0 \text{ m/s}$ ($V_r=143.0$) 程度まで上昇することとなる。また、 $Sc=74.1$ ($\delta=0.020$) に設定すれば、 $V=20.0 \text{ m/s}$ ($V_r=190.6$) 以下ではウェイクギャロッピングは発現していない。すなわち、 $S/D=4.0$ なるケーブル配置で発現するウェイクギャロッピングの励振力は比較的弱く、ダンパーを設置して構造減衰を付加する手法も有効な制振対策になり得る場合が多いものと言え

図-6 MODEL-NのV-A曲線 ($S/D=3.0$)図-7 MODEL-NのV-A曲線 ($S/D=4.0$)

る。また、実際、ケーブル間隔が $S/D=4.29 \sim 4.84$ (ケーブル径は $D=140 \text{ mm} \sim 175 \text{ mm}$) なる幸魂大橋では、架設時からしばしばウェイクギャロッピングが発現していたが、ケーブル端部付近にダンパーを設置して減衰を付加した後はウェイクギャロッピングは発現していない。

(3) MODEL-DMの実験結果と考察

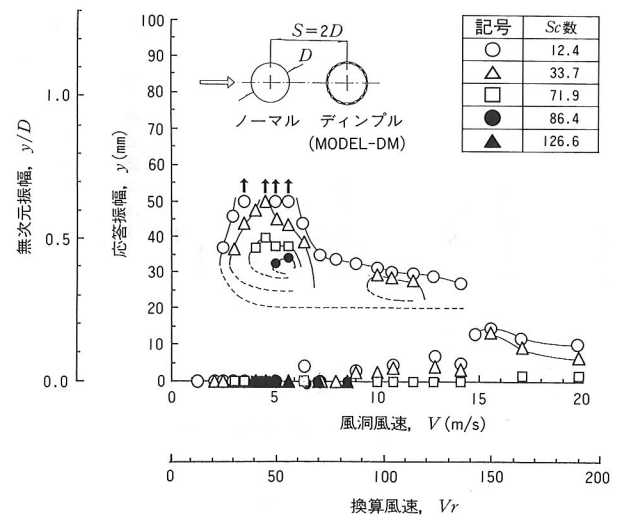
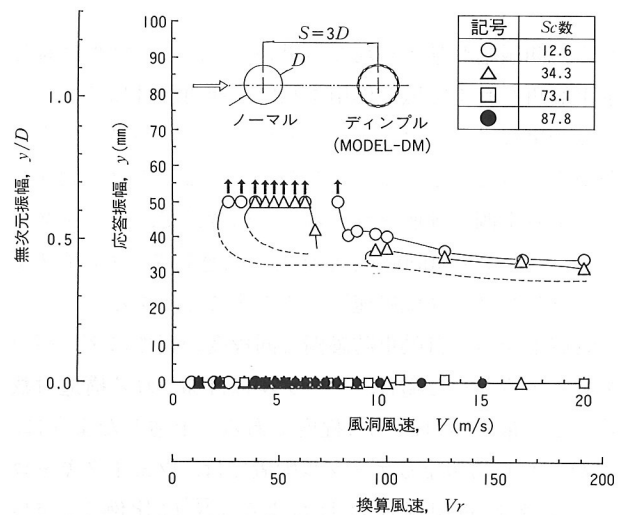
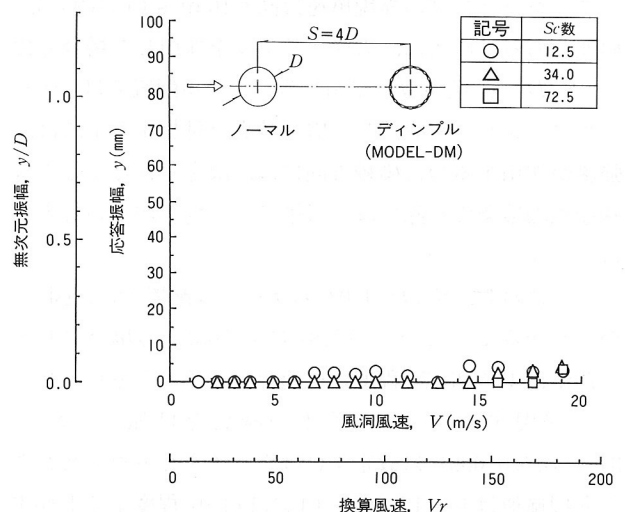
MODEL-DMなるディンプル付きケーブル ($D=78 \text{ mm}$) は、 4 m/s 程度の風速から後流幅が遷移しはじめ、 8 m/s 程度以上の風速域からは後流幅が大幅に縮小する(超臨界域に達する)という特性を有する。したがって、 $S/D=2.0, 3.0$ でのウェイクギャロッピングに対しても制振効果が十分に認められると予想された空力的制振対策である。本実験では、ノーマルケーブルの実験結果との対比が容易となるように、また、設計にとって安全側の結果が与えられるように考えて、上流側をノーマルケーブル (MODEL-N) に、下流側をディンプル付きケーブル (MODEL-DM) に設定することとした。すなわち、

実橋ケーブルに適用した場合、上流側と下流側はいずれもディンプル付きケーブルが採用され、8 m/s程度以上の風速域では上流側ケーブルの後流幅が大幅に縮小するのに対し、本設定では実験風速域内において下流側ケーブルにはノーマルケーブルからのウェイク（後流）が作用することとなっている。

ばね支持実験で得られた、 $S/D=2.0, 3.0, 4.0$ なる場合のV-A曲線（風速と応答振幅の関係図）をそれぞれ図-8～図-10に示す。図-8と図-9を比較すればわかるように、 $S/D=2.0$ と 3.0 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、より単純な挙動を示した $S/D=3.0$ なる場合の実験結果を中心に考察することとする。

$S/D=3.0$ では、図-9からわかるように、スクルートン数が $S_c=12.6$ ($\delta=0.003$) なる場合、応答曲線には不安定なリミットサイクルが存在する。ウェイクギャロッピングのquench点を与える風速 V_q は $V_q=2.3$ m/s ($V_r=21.9$) ときわめて低く、2.3 m/s～8.0 m/s程度の風速域において片振幅 a が $a \geq 50$ mmのウェイクギャロッピングが発現している。しかしながら、ディンプル付きケーブルの限界レイノルズ数にはほぼ対応する9.0 m/s程度を超える風速では、 $a=40$ mmまで応答振幅が低減しており、超臨界域における制振効果が認められる結果となっている。したがって、スクルートン数を $S_c=34.3$ ($\delta=0.009$) と若干大きくした場合、4.0 m/s～7.0 m/s程度の風速域で発現していたウェイクギャロッピングは、超臨界域にはほぼ達する7.5 m/s～9.5 m/s程度の風速域で発現しなくなっている。ただし、この場合には9.5 m/s程度を超える風速で再び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が認められるが、これは図-3に示した抗力係数特性から推察されるように、限界レイノルズ数を超える風速域から下流側ケーブルにおける後流の周期性がきわめて徐々にではあるが回復していることに起因するものと思われる。しかしながら、限界レイノルズ数を超える風速域での励振力は小さく、スクルートン数が $S_c=73.1$ ($\delta=0.019$) なる場合には20 m/s ($V_r=190.6$) 以下でウェイクギャロッピングは発現していない。

本節のはじめに述べたように、 $S/D=2.0$ なる場合のウェイクギャロッピング特性は $S/D=3.0$ なる場合と比較的類似する結果となっている。しかしながら、図-8と図-9を比較すればわかるように、 $S/D=2.0$ なる場合のウェイクギャロッピングは、 $S/D=3.0$ なる場合に比べ低風速域における励振力が幾分強くなっていると言える。すなわち、 $S/D=2.0$ では、 $S_c=71.9$ ($\delta=0.019$) なるスクルートン数でも4 m/s～6 m/sの風速域で、また、 $S_c=86.4$ ($\delta=0.023$) なるスクルートン数でも5 m/s～6 m/sの風速域で、不安定なリミットサイクルを有するウェイク

図-8 MODEL-DMのV-A曲線($S/D=2.0$)図-9 MODEL-DMのV-A曲線($S/D=3.0$)図-10 MODEL-DMのV-A曲線($S/D=4.0$)

ギャロッピングが存在し、完全に制振するためには $S_c=126.6$ ($\delta=0.033$) 程度のスクルートン数が必要な結果となっている。しかしながら、超臨界域を超える7.5 m/s程度以上の風速域においては $S_c=12.4$ ($\delta=0.003$) で

も片振幅で $0.45D$ 程度以下のウェイクギャロッピングしか発現せず、また、 $S_c=71.9$ ($\delta=0.019$) では $6\text{ m/s}\sim 17\text{ m/s}$ なる風速域でウェイクギャロッピングは発現しない結果となっている。加えて、図-10からわかるように、 $S/D=4.0$ なるケーブル間隔では、 $S_c=12.6$ ($\delta=0.003$) なる場合にも 20 m/s ($V_r=190.6$) 以下でウェイクギャロッピングは発現しない結果となっている。

MODEL-DMなるディンプル付きケーブルの抗力係数特性は、すでに示した図-3から理解できるように、超臨界域に対応する 8 m/s 程度から 40 m/s 程度までの風速域においてわずかに増加するのみである。したがって、本ばね支持試験で対象とした風速域を超える範囲 ($V>20\text{ m/s}$; $V_r>190$) においても、ウェイクギャロッピング特性は本質的に変化することはないと推察される。したがって、 $S/D=2.0\sim 3.0$ なる並列配置で細径ケーブルを採用せざるを得ない場合にも、表面にMODEL-DMと同じディンプルを付与する空力的制振対策を採用するとともに、ダンパーによって $S/D=2.0$ では $S_c=125$ (75.5 mm なるケーブルでは $\delta=0.033$)、 $S/D=3.0$ では $S_c=75$ (75.5 mm なるケーブルでは $\delta=0.020$) 程度のスクルートン数となるように構造減衰を付加すれば、ウェイクギャロッピングといえども十分に制振できるものと言えよう。

(4) MODEL-DSの実験結果と考察

ケーブル表面のディンプル数を少なくしたMODEL-DSは、全表面にディンプルを付与したMODEL-DMと同じく $Re=2.0\times 10^4$ (4 m/s 程度の風速) なるレイノルズ数から後流幅が遷移しはじめるものの、 $Re=1.0\times 10^5$ (20 m/s 程度の風速) なるレイノルズ数で抗力係数が最小値に近い $C_D=0.67$ となり、それ以上のレイノルズ数では抗力係数がゆるやかに低減するという特性を有する。すなわち、MODEL-DSの抗力係数特性は、レインバイブレーション対策として開発された表面に離散的な凹型の粗度を付与するケーブルとほぼ同じものとなっている。MODEL-DSでは、このように遷移領域の風速幅がMODEL-DMに比べ広いこともあり、本実験では実橋ケーブルに適用する場合と同じく上流側も下流側もMODEL-DSなるケーブルを設置することとした。すなわち 4 m/s 程度以上の実験風速域内において、MODEL-DMでの実験とは相違し、下流側ケーブルには遷移領域内のウェイク (後流) が作用することとなっている。

$S/D=2.0$ なる場合のばね支持実験結果 (V - A 曲線) を図-11に示す。図-11から、MODEL-DSなるディンプル付きケーブルを $S/D=2.0$ なる間隔で並列配置した場合のウェイクギャロッピング特性は、後流幅が遷移しはじめる $4\text{ m/s}\sim 6\text{ m/s}$ 程度までの風速域において、 $S/D=2.0$ なる場合のノーマルケーブルにおける特性ときわめて類似する結果となっている。すなわち、スクルートン

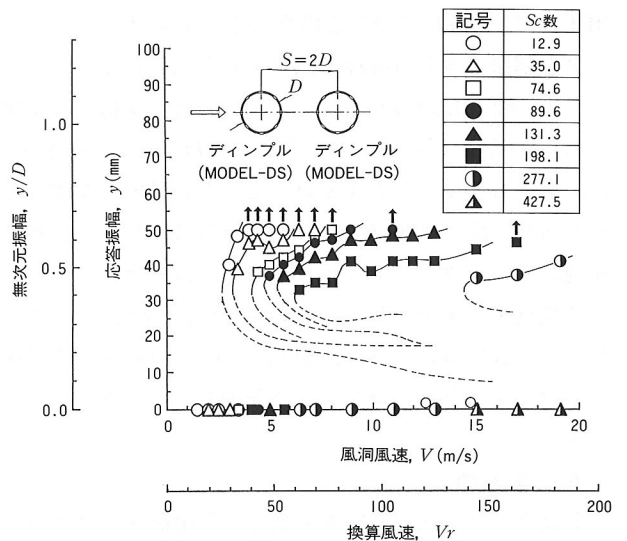


図-11 MODEL-DSのV-A曲線 ($S/D=2.0$)

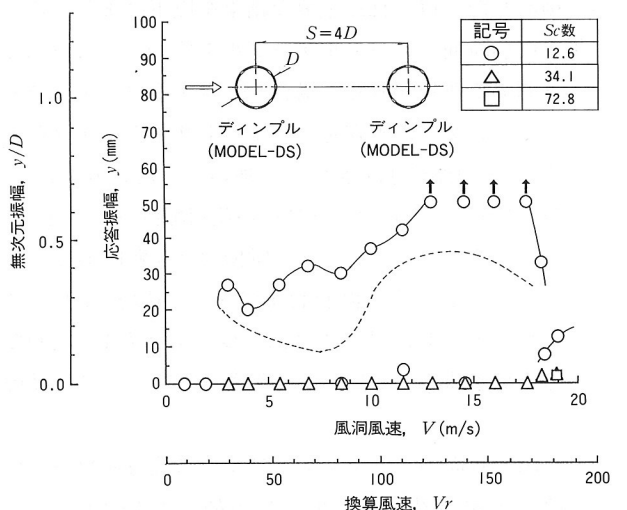


図-12 MODEL-DSのV-A曲線 ($S/D=4.0$)

数を $S_c=198.1$ ($\delta=0.051$) に設定した場合にも、 6 m/s 程度の風速で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する結果となっている。 7 m/s 程度以上の風速域ではノーマルケーブルにおける特性と相違し、 $S_c=277.1$ ($\delta=0.071$) なるスクルートン数ではウェイクギャロッピングの発現風速が 15 m/s ($V_r=143.0$) まで上昇し、 $S_c=448.9$ なるスクルートン数では 20 m/s ($V_r=190.6$) なる風速でもウェイクギャロッピングは発現していない。しかしながら、 $S_c=448.9$ なるスクルートン数に対応する $\delta=0.116$ なる構造減衰をケーブルに与えることは一般にはかなり難しく、それゆえ、レインバイブレーション対策として開発された従来のケーブルも含め、MODEL-DSで採用したディンプル配置では細径ケーブルのウェイクギャロッピングを制振するのは困難な場合が多いと考えられる。ただし、たとえば、 $D=155\text{ mm}$ なる太径ケーブルでは、 $S_c=448.9$ なるスクルートン数に対応する構造対数減衰率は $\delta=0.063$ となり、自動車防護柵と同程度の高さにダンパーを設置する手法を併

用すれば、 $S/D=2.0$ なる場合にもウェイクギャロッピングを制振できる可能性は高いと思われる。

一方、図-12は $S/D=4.0$ なる場合のばね支持実験結果である。図-12からわかるように、 $S/D=4.0$ なる場合には、もともとウェイクギャロッピングの励振力が弱いこともあり、 $S_c=12.6$ ($\delta \approx 0.003$) なるスクルートン数で発現していたウェイクギャロッピングは、ダンパーによって減衰を若干付加して $S_c=34.6$ ($\delta \approx 0.009$) なるスクルートン数に設定すれば、 20 m/s ($V_r \approx 190.6$) なる風速でもウェイクギャロッピングは発現しないと考えられる。

5. まとめ

本論文では、風洞試験を実施して斜張橋ケーブルのウェイクギャロッピング特性とその空力的制振対策法について検討した。得られた主要な結果を以下にまとめる。

- ① 円形断面のノーマルケーブルを $S/D=2.0, 3.0$ なる間隔で並列配置した場合、発現するウェイクギャロッピングには不安定なリミットサイクルが存在するものの励振力はきわめて強い。これに対し、 $S/D=4.0$ なる間隔でケーブルが並列配置された場合、ウェイクギャロッピングの励振力は比較的弱く、ダンパーなどによる減衰付加で $S_c=75$ 程度以上のスクルートン数に設定すれば、少なくとも $V_r=190$ なる換算風速以下ではウェイクギャロッピングは発現しない。
- ② 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 $Re \approx 3.8 \times 10^5$ であるのに対し、MODEL-DMなるディンプル付きケーブルでは $Re=4.0 \times 10^4$ なるレイノルズ数で超臨界域に達する。すなわち、レインバイブレーション対策として開発されたその他の空力対策ケーブルと比較して、本ディンプル付きケーブルはきわめて低い風速域から後流幅が大幅に縮小し、ウェイクギャロッピングの励振力が低下する超臨界域に達する。
- ③ MODEL-DMなるディンプル付きケーブルでは、 $S/D=2.0, 3.0$ なるケーブル間隔で並列配置された場合にも、ウェイクギャロッピングの励振力は非常に弱く、ダンパーによって $S/D=2.0$ では $S_c=125$ 、 $S/D=3.0$ では $S_c=75$ 程度のスクルートン数となるように構造減衰を付加すれば、ウェイクギャロッピングといえども十分に制振できる。
- ④ MODEL-DSなるディンプル付きケーブルは、表面に離散的な凹型の粗度を付与するレインバイブレーション対策用ケーブルとほぼ同じ静的空気力特性を有する。しかしながら、 $S/D=2.0$ なるケーブル配置では、ダンパーを使用して $\delta \approx 0.12$ 程度の構造減衰を付加しない限り、細径ケーブルのウェイクギャ

ロッピングを完全に制振するのは困難である。

本研究では、主としてPC斜張橋で採用されることの多い細径ケーブルに着目してウェイクギャロッピングに対するディンプル付きケーブルの有効性を検証したが、今後はディンプル付きケーブルによる有効性のメカニズムやより効果的なディンプル形状について研究するとともに、斜張橋ケーブルのレインバイブレーションならびにポリエチレン管被覆された吊橋のハンガーロープの風による振動に対し、本ディンプル付きケーブルによる制振効果を検討していく予定である。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に関し有用な技術資料になることを心から願う次第である。

参考文献

- 1) 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。
- 2) 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。
- 3) 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。
- 4) 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-25，1994年12月（掲載予定）。
- 5) 宮崎正男・斉藤善昭・鈴木義光：斜張橋ケーブルの空力制振対策，土木学会第48回年次学術講演会講演概要集，I-318，pp.784～785，1993年9月。
- 6) 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。
- 7) 宇都宮英彦・鎌倉米康：並列円柱の空気力学的挙動に関する基礎的考察，第5回構造物の耐風性に関するシンポジウム論文集，pp.207～211，1978年12月。
- 8) 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。
- 9) 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。