

# 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

米田昌弘\*・宮地真一\*\*・望月秀之\*\*\*・  
枝元勝哉\*\*\*\*

本文では、ケーブル表面にディンプルを設ける空力的な制振方法を考案し、ディンプル付きケーブルのウェイクギャロッピングに対する有効性を部分模型風洞試験によって検証している。その結果、提案したディンプル付きケーブルを採用し、ダンパーによって若干の減衰を付加すれば、ダンパー方式のみでは従来対処が困難であった細径ケーブルのウェイクギャロッピングをも確実に制振できるとの知見が得られた。

**Key Words:** wake galloping, vibration control, 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には目覚ましいものがあり、施工実績も増加の一途をたどっている。しかしながら、斜張橋の長径間化に伴う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および並列ケーブル方式の増加とともに、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と呼ばれる風によるケーブル自身の振動が大きな問題として取り上げられている。

ケーブルの制振が必要となるような比較的規模の大きい鋼斜張橋では、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、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。さらに、直径がたとえば  $150\text{mm}$  のケーブルでは、空気の動粘性係数  $\nu$  を  $\nu=1.46\times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$  ( $15^\circ\text{C}$ , 標準気圧) とすれば  $37\text{m/s}$  以上の風速域においてレイノルズ数  $Re$  が  $Re>3.8\times 10^5$  となり、後流幅が大幅に縮小する超臨界域に達する<sup>1)</sup>。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、実験データの提示はなされていないものの、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思われる。一方、PC斜張橋で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様に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、直径が  $D=40\text{mm}\sim 100\text{mm}$  程度でケ-

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、超臨界域に達する風速が  $56\text{m/s}\sim 139\text{m/s}$  ときわめて高いこと、ケーブルの張力や重量が小さく風による振動に対する抵抗力が弱いこと、また、ケーブル径そのものが小さいことによる影響で発現風速が太径ケーブルに比べ相対的に低下することから、ケーブル端部付近にダンパーを設置する手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と認識されている<sup>2),3)</sup>。したがって、最長ケーブルが約  $200\text{m}$  の秩父公園橋 (PC斜張橋) では、ダンパーによる制振は困難と判断し、ステンレスワイヤによるケーブル相互連結方式が採用されるに至っている。

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PC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。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<sup>4)</sup>、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<sup>5)</sup>が報告されているのみであり、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ると思われる。すなわち、実橋ケーブルにも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。これに対し、レインバイブレーションについてはすでに空力的な制振法に関する研究が精力的に実施されており、東神戸大橋ではレインバイブレーションを制振する目的でケーブル表面に適

\*正会員 工博 川田工業 (株) 技術本部振動研究室長  
(〒550 大阪市西区北堀江 1-22-19)

\*\*正会員 工修 川田工業 (株) 技術本部振動研究室係長

\*\*\*正会員 川田工業 (株) 技術本部振動研究室

\*\*\*\*正会員 工修 川田工業 (株) 技術本部中央研究室

当な間隔で小さな突起を設ける空力的対策が採用されている<sup>6)</sup>。また、実橋ケーブルへの適用はなされていないが、ケーブル表面にV字溝を設ける方法<sup>7)</sup>、離散的な凹型や凸型等の粗度をケーブル表面に付与する方法<sup>8)</sup>などが、レインパイブレーション対策としてすでに開発されている。このように実施例は少ないものの、被覆材のポリエチレン樹脂を熔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、ほぼ確立されるに至っている。

上述した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、著者らは、まずはじめに、未だ十分に解明されていない、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ーション数（質量・減衰パラメーター）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、実務技術者の立場から、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 $D=75$  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（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）を製作し、それぞれ単独状態での静的空気力係数（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ーション数の関係をばね支持模型試験より算出した。その結果、 $S/D=4.0$ なる間隔でノーマルケーブルを並列配置した場合には、ウェイクギャロッピングと言えどもダンパーによる減衰付加のみで制振できること、また、励振力の強い $S/D=2.0\sim 3.0$ に並列配置された細径ケーブルに対してはMODEL-DMで採用したディンプルを表面に付与し、ダンパーによって若干の減衰を付加すれば、確実にウェイクギャロッピングを制振できるとの知見が得られた。本知見は、ウェイクギャロッピングに対する制振技術の現状を考えた場合、実務上のきわめて有用な技術資料を与えていると思われる、ここにその結果を報告する。

## 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型であるが、本実験では幅2.0m×高さ2.5m×全長15.0m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。

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

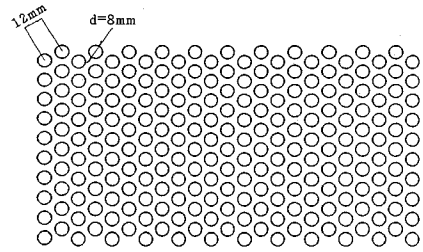


図-1 MODEL-DMのディンプル配置

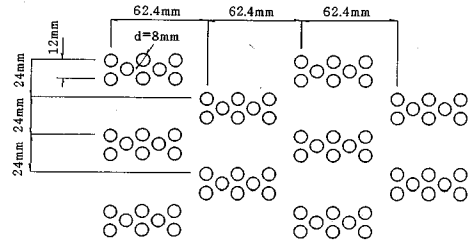


図-2 MODEL-DSのディンプル配置

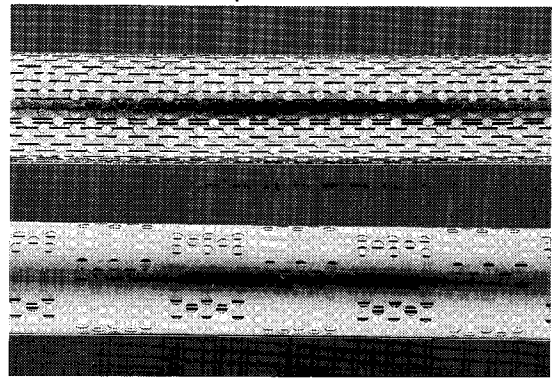


写真-1 MODEL-DM（上）とMODEL-DS（下）の風洞模型

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。

### 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 140mm なるノーマルケーブルの実験結果<sup>9)</sup>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 140mm, V 字溝の深さが 1.4mm) の実験結果<sup>9)</sup>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 140mm, 粗度係数は  $1.1 \times 10^{-2}$ ) の実験結果<sup>8)</sup>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  $D=78\text{mm}$  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  $Re > 2.0 \times 10^4$  (4m/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、 $Re=4.0 \times 10^4$  (8m/s 程度の風速) において  $C_D=0.8$  程度になった後、除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  $Re \approx 3.8 \times 10^5$  (76m/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  $Re \approx 1.6 \times 10^5$  ( $D=78\text{mm}$  なるケーブルに換算すれば、32m/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、抗力係数が低減しはじめる遷移領域は  $Re \approx 9 \times 10^4$  ( $D=78\text{mm}$  なるケーブルに換算すれば、18m/s 程

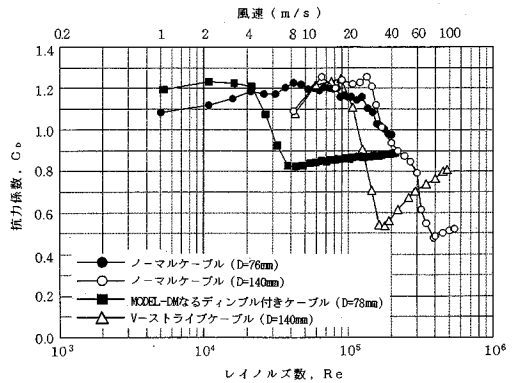


図-3 MODEL-DM とその他のケーブル模型の抗力係数

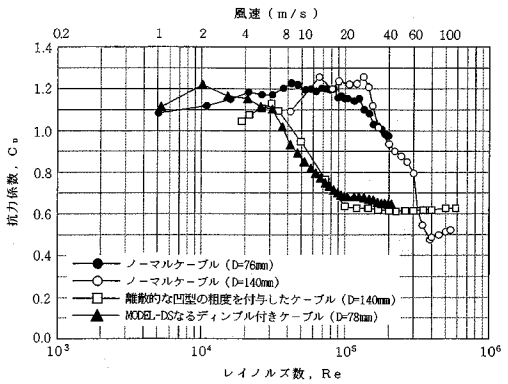


図-4 MODEL-DS とその他のケーブル模型の抗力係数

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 140mm 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  $Re \approx 1.0 \times 10^5$  ( $D=78\text{mm}$  なるケーブルに換算すれば、20m/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  $Re \approx 4.0 \times 10^4$  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  $Re > 2.0 \times 10^4$  (4m/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、 $Re \approx 1.0 \times 10^5$  (20m/s 程度の風速) 付近で抗力係数が最小値に近い  $C_D \approx 0.67$  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 (4m/s 程度) から後流幅が遷移しはじめ、8m/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<sup>10)</sup>、したがって、全表面にディンプルを付与した  $D=78\text{mm}$  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 8m/s 程度以上に高めれば、ウェイクギャロッピングは発現し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せざ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<sup>10)</sup>。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  $f=1.345\text{Hz}$  となるように上下 (鉛直) 1 自由度系にばね支持し、一様流の風を作用させるものとしている。ここに、実験結果は換算風速でも整理するので単独ケーブルの抗力係数特性とレイノルズ数の関係を把握しておれば、振動数の設定値そのものは大きな意味を持つものではない。

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ション数 (質量・減衰パラメ

ター) の影響を調査することとした。なお、スクルーション数とは次式で定義される質量・減衰パラメーターである。

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

ここに、 $m$  は単位長さ当りの質量、 $\delta$  は構造対数減衰率、 $\rho$  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。スクルーショ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ーであり、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 (単位長さ当りの重量  $w$  は  $w=100.7\text{kgf/m}$ ) のスクルーション数  $S_c$  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ショ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したがって風による振動が誘起されやすくなる。

なお、スクルーション数が小さい場合、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  $1\text{m/s}$  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~図-7 に示す。なお、スクルーション数を 10 程度に設定した既往の実験結果<sup>12), 13)</sup> 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 50mm 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 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  $\delta$  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、スクルーション数が  $S_c=13$  ( $\delta \approx 0.003$ ) なる場合には、ウェイクギャ

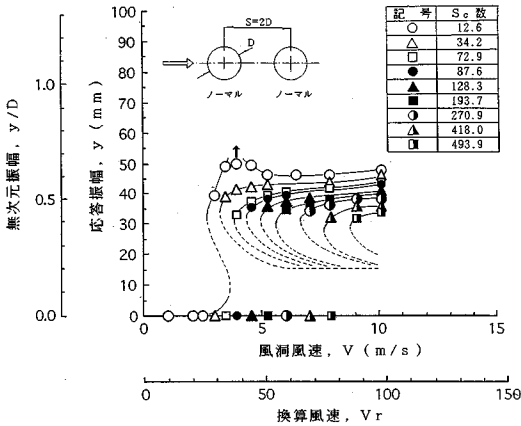


図-5 MODEL-N の V-A 曲線 (S/D=2.0)

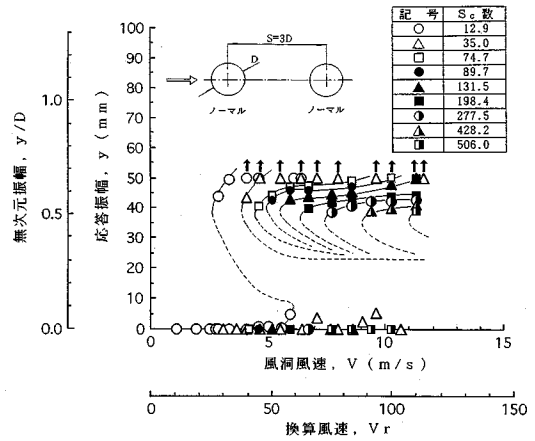


図-6 MODEL-N の V-A 曲線 (S/D=3.0)

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ていった場合、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  $V_q \approx 2.5\text{m/s}$  ( $V_r \approx 23.8$ ) ときわめて低く、既往の実験結果<sup>12),13)</sup>とよく一致している。また、 $Sc_c = 493.9$  ( $\delta = 0.133$ ) 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、スクルトン数  $Sc_c$  が 70 ( $\delta = 0.019$ ) 程度以上の領域においておおよそ  $\sqrt{Sc_c}$  に比例するような傾向になっている。

$S/D = 2.0$  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リ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リ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、不安定なリミットサイクルを超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”と見なすこととする。

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

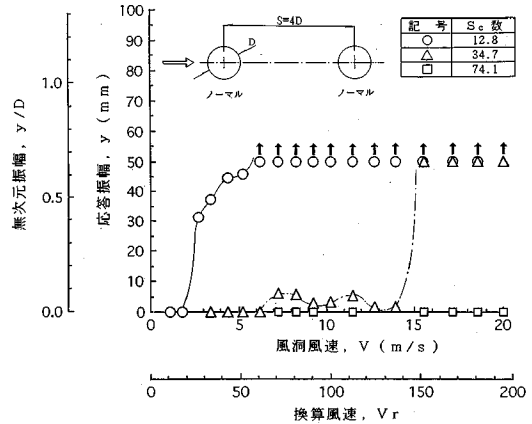


図-7 MODEL-N の V-A 曲線 (S/D=4.0)

ロッピングの発現風速はおおよそ  $\sqrt{Sc_c}$  に比例し、 $\delta = 0.133$  ( $Sc_c = 493.9$ ) 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  $10\text{m/s}$  ( $V_r \approx 95.3$ ) 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、 $Sc_c = 12.8$  ( $\delta = 0.003$ ) なる場合に  $V = 2.7\text{m/s}$  ( $V_r \approx 25.7$ ) 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  $Sc_c = 34.7$  ( $\delta = 0.009$ ) に設定すればウェイクギャロッピングの発現風速は  $V = 15.0\text{m/s}$  ( $V_r \approx 143.0$ ) 程度まで上昇することとなる。また、 $Sc_c = 74.1$  ( $\delta = 0.020$ ) に設定すれば、 $V = 20.0\text{m/s}$  ( $V_r \approx 190.6$ ) 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<sup>10)</sup>。

(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、 $4\text{m/s}$  程度の風速から後流幅が遷移しはじめ、 $8\text{m/s}$  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、 $8\text{m/s}$  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、スクルーション数が  $S_c=12.6$  ( $\delta=0.003$ ) 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  $V_q=2.3\text{m/s}$  ( $V_r=21.9$ ) ときわめて低く、 $2.3\text{m/s}\sim 8.0\text{m/s}$  程度の風速域において片振幅  $a$  が  $a\geq 50\text{mm}$  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ほぼ対応する  $9.0\text{m/s}$  程度を越える風速では、 $a=40\text{mm}$  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、スクルーション数を  $S_c=34.3$  ( $\delta=0.009$ ) と若干大きくした場合、 $4.0\text{m/s}\sim 7.0\text{m/s}$  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、超臨界域にほぼ達する  $7.5\text{m/s}\sim 9.5\text{m/s}$  程度の風速域で発現なくなっている。ただし、この場合には  $9.5\text{m/s}$  程度を越える風速で再び不安定なリミットサイクルを

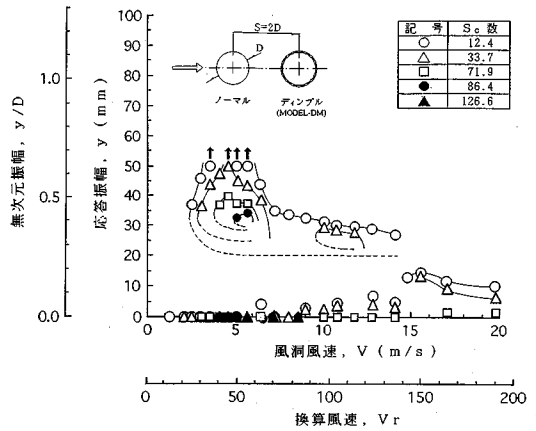


図-8 MODEL-DM の V-A 曲線 ( $S/D=2.0$ )

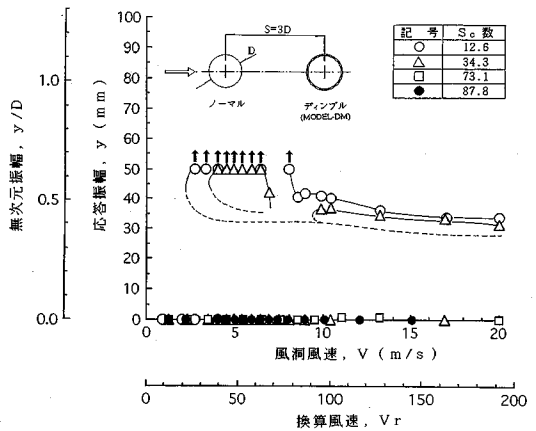


図-9 MODEL-DM の V-A 曲線 ( $S/D=3.0$ )

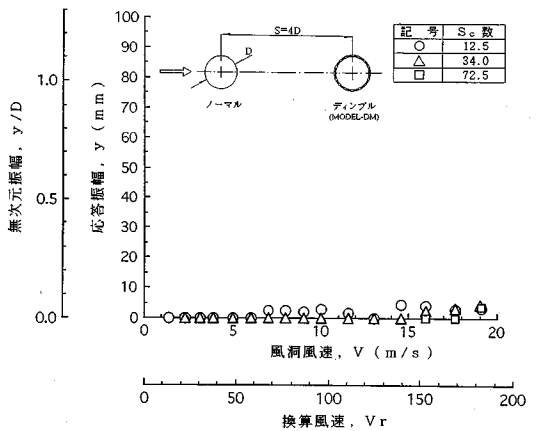


図-10 MODEL-DM の V-A 曲線 ( $S/D=4.0$ )

有するウェイクギャロッピングの発現が認められるが、これは図-1 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越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

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、スクルーション数が  $S_c=73.1$  ( $\delta=0.019$ ) なる場合には  $20\text{m/s}$  ( $V_r=190.6$ ) 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、 $S_c=71.9$  ( $\delta=0.019$ ) なるスクルーション数でも  $4\text{m/s}\sim 6\text{m/s}$  の風速域で、また、 $S_c=86.4$  ( $\delta=0.023$ ) なるスクルーション数でも  $5\text{m/s}\sim 6\text{m/s}$  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  $S_c=126.6$  ( $\delta=0.033$ ) 程度のスクルーショ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  $7.5\text{m/s}$  程度以上の風速域においては  $S_c=12.4$  ( $\delta=0.003$ ) でも片振幅が  $0.45D$  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  $20\text{m/s}$  ( $V_r=190.6$ ) 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-1から理解できるように、超臨界域に対応する  $8\text{m/s}$  程度から  $40\text{m/s}$  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越える範囲 ( $V>20\text{m/s}$ ;  $V_r>190$ ) 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  $S_c=125$  ( $75.5\text{mm}$  なるケーブルでは  $\delta=0.033$ )、 $S/D=3.0$  では  $S_c=75$  ( $75.5\text{mm}$  なるケーブルでは  $\delta=0.020$ ) 程度のスクルーショ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言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  $Re=2.0\times 10^4$  ( $4\text{m/s}$  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、 $Re=1.0\times 10^5$  ( $20\text{m/s}$  程度の風速) なるレイノルズ数で抗力係数が最

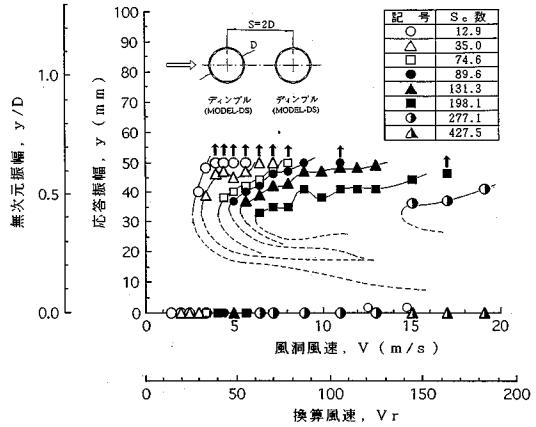


図-11 MODEL-DS の V-A 曲線 ( $S/D=2.0$ )

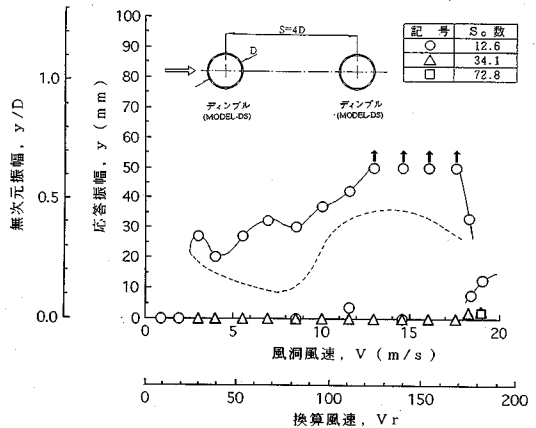


図-12 MODEL-DS の V-A 曲線 ( $S/D=4.0$ )

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は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、 $4\text{m/s}$  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、スクルーション数を  $S_c=198.1$  ( $\delta=0.051$ ) に設定した場合にも、6m/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。7m/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、 $S_c=277.1$  ( $\delta=0.071$ ) なるスクルーション数ではウェイクギャロッピングの発現風速が 15m/s ( $V_f=143.0$ ) まで上昇し、 $S_c=448.9$  なるスクルーション数では 20m/s ( $V_f=190.6$ ) 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、 $S_c=448.9$  なるスクルーション数に対応する  $\delta=0.116$  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、 $S_c=448.9$  なるスクルーショ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ものと思われる。

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、 $S_c=12.6$  ( $\delta=0.003$ ) なるスクルーショ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  $S_c=34.6$  ( $\delta=0.009$ ) なるスクルーション数に設定すれば、20m/s ( $V_f=190.6$ ) 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。

## 5. ダンパー方式との併用に関する検討

前章で検討したように、 $S/D=2\sim 3$  程度に並列配置された細径ケーブルに対しても、MODEL-DM で採用されたディンプルを表面に付与し、ダンパーによってスクルーション数を  $S/D=2.0$  では  $S_c=125$ 、 $S/D=3.0$  では  $S_c=75$  程度以上に設定できれば、ウェイクギャロッピングを十分に制振できることが判明した。そこで、ここではケーブル径が  $D=96\text{mm}$ 、ケーブル張力が  $T=350\text{ton}$ 、重量が  $w=0.0246t \cdot f/m$  なる構造諸元を有する 200m の細径ケーブルが  $S/D=3.0$  なる間隔で並列配置されている場合を想定し、ディンプル付きケーブルによる空力的対策とダンパー方式との併用について具体的な検討事例を提示することとする。ただし、ケーブルに付与するディンプルの直径は、対象としたケーブルの径が 96mm であることから、 $8\text{mm} \times 96/78 \approx 10\text{mm}$  なるものとする。

ケーブル制振用ダンパーとしては粘性せん断型ダン

パー方式、オイルダンパー方式、高減衰ゴム方式などが開発されているが、本検討では最も使用実績の多い粘性せん断型ダンパー方式とオイルダンパー方式に着目することとする。なお、ここでは、ケーブル定着部の 2 次応力を緩和するための緩衝装置は極力ケーブル定着部に移動させて設置しているものとしている。また、緩衝装置が設置された位置をケーブル端部と見なし、いずれの方式でもダンパーは  $x/l$  (ケーブル端部からダンパーまでの距離 / ケーブル長) = 0.015 なる位置のケーブル法線方向に取り付けられるものと仮定した。

### (1) 粘性せん断型ダンパー方式

対象としたケーブルの直径は  $D=96.0\text{mm}$  であり、空気の動粘性係数  $\nu$  を  $\nu=1.46 \times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$  (15°C, 標準気圧) と仮定すれば、ディンプル付きケーブルの限界レイノルズ数  $Re=4.0 \times 10^4$  に対応する風速は  $V=6.1\text{m/s}$  と計算される。

無対策時における  $S_c=13$  程度のスクルーション数では、 $f_n$  を  $n$  次モードの固有振動数とすれば、 $V/f_n D=22$  程度の換算風速からウェイクギャロッピングが発現する。本ケーブルにおける  $n$  次モードの固有振動数は  $f_n=0.933n$  であり、ウェイクギャロッピングの発現風速を計算すれば、1 次モードが 1.96m/s、2 次モードが 3.92m/s、3 次モードが 5.88m/s となる。すなわち、4 次モード以上のウェイクギャロッピングについては、発現風速が 6.1m/s 以上となり、たとえダンパーによって減衰が付加されない場合にも振動振幅が 0.4D 程度以下の非常に励振力の弱いウェイクギャロッピングしか発現しない。それゆえ、実務上の検討にあたっては、1 次～3 次モードに対し、 $S_c=75$  から逆算される  $\delta=0.016$  以上の構造減衰 (ダンパー設置前の構造対数減衰率として  $\delta=0.003$  なる値を採用するとすれば、 $\delta=0.013$  以上の構造減衰) を付加すれば良いと考えられる。

粘性せん断型ダンパーの設計にあたり、基準振幅を  $a=0.3\text{cm}$ 、温度範囲を  $t=-5^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$  とすれば、文献 15) の例題を参考にして描いた図-13 から、 $t=40^\circ\text{C}$  における所要粘性減衰係数  $C_{req}$  は  $C_{req}=4.8\text{tf} \cdot \text{s}/\text{m}$  (粘性せん断を期待する断面積は  $S=630\text{cm}^2$ ) と計算される。したがって、粘性せん断型ダンパーによってケーブルに付加される構造対数減衰率を計算すれば、表-1 に示す結果が得られる。表-1 から、着目した 1 次～3 次モードには所要の構造減衰が、また、参考までに併記した 4 次～6 次モードにもほぼ十分な減衰が付加されていることがわかる。それゆえ、長さが 200m なるケーブルに対しても、ディンプルによる空力的対策と粘性せん断型ダンパー方式とをそれぞれ併用すれば、 $S/D=3.0$  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可能であると言える。



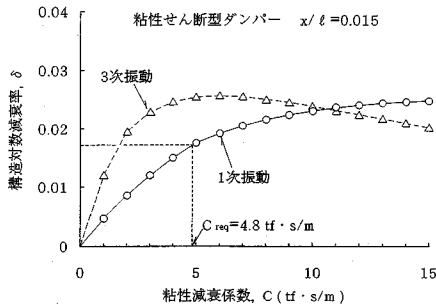


図-13 粘性減衰係数と構造対数減衰率の関係 (粘性せん断型ダンパー)

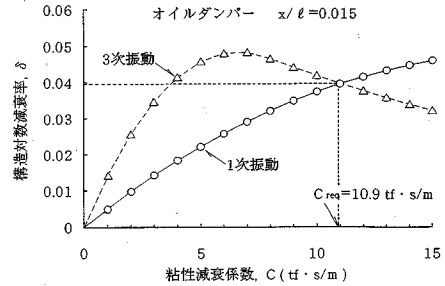


図-14 粘性減衰係数と構造対数減衰率の関係 (オイルダンパー)

表-1 粘性せん断型ダンパーによって付加される構造減衰

温度	付加される構造対数減衰率					
	振動次数					
	1次	2次	3次	4次	5次	6次
40.0 °C	0.017	0.021	0.022	0.023	0.024	0.025
20.0 °C	0.024	0.025	0.026	0.025	0.025	0.025
0.0 °C	0.024	0.022	0.020	0.018	0.017	0.016
-5.0 °C	0.022	0.020	0.017	0.016	0.015	0.014

表-2 オイルダンパーによって付加される構造減衰

粘性減衰係数 (tf·s/m)	付加される構造対数減衰率					
	振動次数					
	1次	2次	3次	4次	5次	6次
10.9	0.020	0.024	0.020	0.017	0.014	0.012

(2) オイルダンパー方式

前節と同じく、対象とする振動は1次~3次モードであり、オイルダンパーによって $\delta=0.016$ 以上の構造減衰(ダンパー設置前の構造対数減衰率として $\delta=0.003$ なる値を採用するとすれば、 $\delta=0.013$ 以上の構造減衰)を付加すれば良い。

文献15)の例題を参考にして描いた図-14から、オイルダンパーの所要粘性減衰係数 $C_{req}$ は $C_{req}=10.9\text{tf}\cdot\text{s}/\text{m}$ と算出できる。オイルダンパーを採用した場合、一般にはケーブルに付加される解析値と実測値には差異が生じ、通常は0.5なる減衰付加効率が採用されている。それゆえ、ここでも0.5なる減衰付加効率を採用するとすれば、オイルダンパーによってケーブルに付加される構造対数減衰率は表-2に示す結果となる。表-2から、着目した1次~3次モードには所要の構造減衰が、また、参考までに併記した4次~6次モードにもほぼ十分な減衰が付加されていることがわかる。それゆえ、長さが200mなるケーブルに対しても、ディンプルによる空力的対策とオイルダンパー方式とをそれぞれ併用すれば、 $S/D=3.0$ 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可能であると言える。

6. まとめ

本論文は、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ものである。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く、ダンパーを自動車防護柵と同程度の高さに設置する手法では、ウェイクギャロッピングを完全に制振することは困難である。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、ダンパーによる減衰付加で $S_c=75$ 程度以上のスクルーン数に設定すれば、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 $Re=3.8\times 10^5$ 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( $D=78\text{mm}$ なるケーブルに換算した場合、8m/s程度の風速に相当)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言えども十分に制振できる。また、ダンパー方式との併用に関する検討結果から、長さ200mのケーブルが並列配置された場合にも、既往のダンパーによって所定のスクルーン数にまで高めることが可能であると言えた。

(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、ダンパーを自動車防護柵と同じ程度の高さに設置する手法と併用しても、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。ただし、150mm 前後以上の太径ケーブルを使用する場合には、細径ケーブルに比べてスクルトン数が大きいことから、その他のレインバイブレーション対策用ケーブルも含め、ダンパー方式との併用が適用できる可能性がある。

本研究では、主として PC 斜張橋で採用されることのできる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から願う次第である。

#### 参 考 文 献

- 1) たとえば、岡内 功・伊藤 学・宮田利雄：耐風工学，丸善，pp. 101~149，1977年5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：直列二本円柱の空気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) 松本 勝・北沢正彦・石崎 浩・小川一志・斎藤 通・下土居秀樹：東神戸大橋の耐風設計，橋梁と基礎，Vol. 25，No. 5，pp. 35~43，1991年5月。
  - 7) 宮崎正男：斜張橋ケーブルの空気不安定振動と制振対策，第10回風工学シンポジウム論文集，pp. 145~150，1988年12月。
  - 8) 宮田利雄・山田 均・北條哲男：表面粗度を持つケーブルの空気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。
  - 9) 宮崎正男・斎藤善昭・鈴木義光：斜張橋ケーブルの空気制振対策，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。
  - 10) 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。
  - 11) 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。
  - 12) 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。
  - 13) 白石成人・松本 勝・白土博通：2本直列柱の空気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。
  - 14) 米田昌弘・前田研一・伊関治郎・下田郁夫：ケーブル制振用粘性せん断型ダンパーの開発と実橋ケーブルへの適用，鋼構造年次論文報告集，Vol. 1，pp. 369~376，1993年7月。
  - 15) 米田昌弘：斜張橋ケーブルの風による振動とその制御，土木学会・第2回振動制御コロキウム (PART A, 構造物の振動制御 (2))，pp. 21~41，1993年8月。

(1994.4.12 受付)

## AERODYNAMIC COUNTERMEASURES FOR SUPPRESSING WAKE GALLOPING APPEARED IN TANDEM CABLES OF CABLE-STAYED BRIDGES

Masahiro YONEDA, Shin-ichi MIYACHI,

Hideyuki MOCHIZUKI and Katuya EDAMOTO

This paper deals with a new type of aerodynamic countermeasure developed for suppressing wake galloping in tandem cables of cable-stayed bridges. Wind tunnel experiments have been carried out to obtain the drag coefficients and control wake galloping. It was ascertained that surface patterned cables by dimples have drastic effect of raising 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.