

傾斜ケーブルのレインバイブレーションに関する実験的研究

松本 勝・白石 成人・辻井 正人
平井 滋登・佐野 祐一

ON "RAIN-WIND INDUCED VIBRATION" OF INCLINED CABLES

By Masaru MATSUMOTO, Naruhito SHIRAIISHI,
Masato TSUJII, Shigeto HIRAI and Yuichi SANO

Synopsis

This study aims the clarification of aerodynamic characteristics of an inclined cable in relation with "rain-wind induced vibration". Inclined cables were cleared to be essentially unstable in wind tunnel test. Axial flow observed in the near wake plays an extremely important role for this aerodynamic instability. In almost cases of prototype cable-stayed bridges, the instability seems to be sensitively stabilized by the turbulence of the natural wind, high Scruton number and so on. When it rains, the hidden instability sometimes appears again by forming water rivulet on cable surface.

1. まえがき

斜張橋は、構造と景観の両面におけるその優れた特性から、今後とも数多く建設されることが予想される。しかしながら、近年、スパン長の長大化に伴い、そのケーブルが大振幅で振動するという事例がいくつか報告されている。これまで橋梁における耐風性の問題としては、桁部あるいは主塔の空力振動が中心となっていたため、ケーブルの空力振動、なかでも降雨時のレインバイブレーション(Rain-Wind Induced Vibration)については、研究事例も比較的少なく、未解明な点も多く残されている。

国内では、これまで名港西大橋¹⁾や荒津大橋²⁾においてレインバイブレーションの発生が報告されている。レインバイブレーションでは比較的低風速で大振幅の振動を発生するため、ケーブル定着部の疲労損傷さらには橋梁利用者に対する使用性の面より、早急に振動を抑えることが要請されている。名港西大橋では制振ワイヤでケーブルを連結することで対処しており¹⁾、荒津大橋ではケーブル定着部付近に Oil Damper を設置することが計画されている²⁾。これらの制振対策は構造的にケーブルを振動しにくいものにしようとする手法である。制振手法としては、この他にケーブル表面部分に何らかの軽微な変更を施すという空力的な手法も有用であると考えられる。

著者らは、ケーブルの空力特性に関する風洞実験を実施し、雨の有無の状態での傾斜したケーブルの振動応答や非定常圧力、流れの可視化等を試み、その応答特性や振動機構について考察を加えた。また、ケーブルに付加物を設けることによる制振対策についても検討を加えた。さらに、水平偏角のみを有する模型を対象とした基礎的な実験も一部行った³⁾。

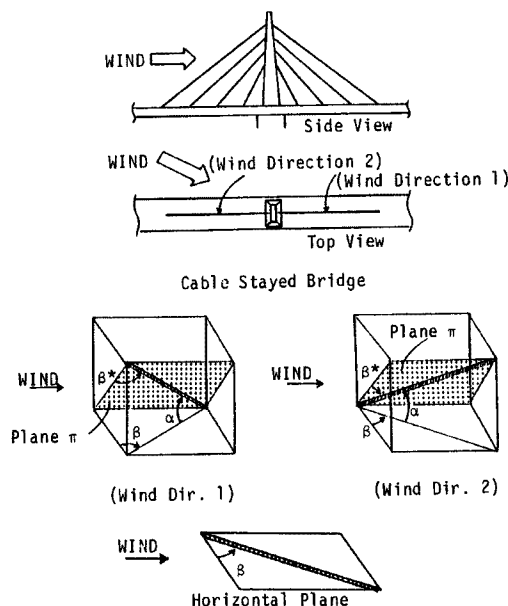


Fig. 1. Attitude of cable.

DP-20A) で読み取った。乱流中では、ピトー管の横に熱線プローブを設置し、熱線風速計（日本科学工業、MODEL 1011, 1013, 1017, 1008）により風速を設定した。

傾斜ケーブルの姿勢 斜張橋ケーブルの風に対する姿勢は Fig. 1 に示すように大きく2種類に分けられる。本研究では、風上側から風下側に向かって下り勾配を持つ姿勢（主塔より下流側のケーブル）を Wind Direction 1, 逆に上り勾配を持つ姿勢（主塔より上流側のケーブル）を Wind Direction 2 と呼ぶ。これらの姿勢の他、水平面内に支持した基本的な姿勢についても実験を行った。このモデルの姿勢は、鉛直面内傾斜角 α （Wind Direction 1 では負, 2 では正, 水平面内では 0° ）と水平面内の偏角 β の2つの角度によって表される。Wind Direction 1 および 2 においては、主流方向線およびケーブル軸を含む平面 π 内の水平偏角 β^* は、 α および β を用いて、次式のように表される。

$$\beta^* = \arcsin(\cos \alpha \sin \beta) \quad (1)$$

ケーブル模型 実際の斜張橋のケーブル表面はポリエチレンで被われ、直径 100 mm を越えるものが多いが、今回の実験では風洞の閉塞率、模型の軽量化および高レイノルズ数域の再現能力を考慮した結果、直径 50 mm の円形アルミニウム管を採用した。なお、この模型の中央部表面 1 ケ所に圧力孔が設けられている。ただし、静的空気力測定については専用の模型を使用した。

このほか、傾斜ケーブル（ $\alpha = 0^\circ$, $\beta = 48^\circ$ ）を流れに平行な鉛直面で切断したときの断面を有する楕円柱模型についても実験を行った。この模型は端板を有しており、通常の2次元実験（ $\alpha = 0^\circ$, $\beta = 0^\circ$ ）として行っている。

静的空気力測定実験 同じ直径 50 mm のアルミニウム管でできたアクティブ模型（長さ 400 mm）に作用する静的空気力を測定した。その両端には同じ円形のダミー模型を設けている。この模型を水平面内に固定支持（ $\alpha = 0^\circ$ ）し、水平偏角を変化させることにより、模型軸回りの抗力係数 C_D 、揚力係数 C_L 、および横力係数 C_S を測定した。

測定にあたっては、ロードセル型 AC 天秤（日章電機、L.M.C.3501）によってアクティブ模型を支持し、動ひずみ計（ミネベア、DSA-602B）を介してデータレコーダ（TEAC、R-280）に記録するとともに、ローパスフィルタ（NF 回路設計ブロック、E3201）を通して、マルチコーダ（渡辺測器製作所、MC6612）に出力し読み取った。

本研究では、これまでの成果をふまえて、レインパイプレーション発生的主要因であると考えられる無雨状態の傾斜ケーブルの基本的空力特性を風洞実験により明らかにすることを目的とする。さらには、後述のように傾斜ケーブル後方に存在する軸方向流に着目し、この流れが振動発生に果たす役割を考察する。また、表面粗度変化や付属物の設置等による制振対策についても検討する。

2. 実験概要

風洞実験について項目別にその概要を示す。

風洞 使用した風洞は京都大学工学部土木工学教室に設置された吹き出し式エッフェル型風洞である。風速は 0 m/sec～約 17 m/sec の範囲で連続的に変化させることが可能である。測定部断面は、高さ 1000 mm×幅 700 mm であり、模型設置位置での主流方向乱れの強さが平均風速 4.0 m/sec 付近で 0.5% 以下になることが確認されている。

一様流の風速は、NPL 型ピトー管により動圧および静圧を検出し、その差圧をデジタルマノメータ（岡野製作所、

静的圧力測定実験 固定された傾斜ケーブルを対象とし、4種類の姿勢における中央部の断面回りの定常圧力分布を測定した。平均風速 8 m/sec (レイノルズ数 $Re=2.74 \times 10^4$) の一様流中で測定を行った。さらに、楕円柱模型 (長軸 84 mm, 短軸 56 mm) についても定常圧力分布を測定した。

圧力孔に作用する圧力は、模型端部の導圧管を経てプレッシャーマイク (豊田工機, DD101K) により検出し、直流増幅器 (豊田工機, AA2300) により増幅した後、ローパスフィルタ (前出) を介して、マルチコーダ (前出) に出力した。

風速応答振幅測定実験 たわみ 1 自由度のばね支持における応答を調べた。特に端板は設置しておらず、振動に必要な大きさの窓を風洞側壁に設けて、風洞外部で模型をばね支持した。各ケースの実験模型諸元は風速振幅応答図中にそれぞれ示す。

測定は、ばねに続けて取り付けたコの字型エレメントに歪ゲージを貼付け、ホイットストンブリッジ、動ひずみ計 (前出) により検出し、直流増幅器 (三栄測器, 6L02) で増幅後、ローパスフィルタ (前出) を通して、リニアコーダ (グラフテック, WR3101) に振動波形を出力した。

流れの可視化実験 水平偏角を有するケーブル ($\alpha=0^\circ$, $\beta=45^\circ$) の後流域を可視化するため、Smoke Wire 法と風向指示旗による方法を用いた。Smoke Wire 法では、傾斜ケーブルの後方約 5 mm の位置にニクロム線を鉛直に張り、これに風洞天井部から流動パラフィンとアルミニウム粉末の混合物を流し込み、DC10 V の電圧をかけて煙を発生した。この煙により、傾斜ケーブル後流域に存在する軸方向流を可視化した。

また、風向指示旗による方法では、模型後端下流側 25 mm の位置から主流方向に沿って 50 mm 毎にピアノ線を 8 本鉛直に張り、これに発泡スチロール製の小旗 (長さ 14 mm, 幅 9 mm) を自由に回転できるように設置した。この旗の示す方向より後流域の平均流れ方向を確認した。

模型後流域流速測定実験 流れの可視化により確認された軸方向流の流速を調べるための実験である。水平面内の傾斜ケーブル ($\alpha=0^\circ$) で、模型を固定支持し、模型後端より 2.5 mm 下流側に、I 型熱線プローブを鉛直に設置し、熱線風速計 (前出) に出力するとともに、風速変動成分の R.M.S. 値を R.M.S. 計 (日本科学工業, Model 1015) によって表示した。風洞側壁の窓は開いたケースを基本とした。

3. 傾斜ケーブルの空力特性

3.1 静的空気力特性

空気力測定用の模型を水平面内に設置し ($\alpha=0^\circ$)、水平偏角 β を $0^\circ \sim 47.5^\circ$ の範囲で変化させたときの模型構造軸回りの静的空気力係数 (抗力係数 C_D 、揚力係数 C_L 、横力係数 C_S) を Fig. 2 に示す。風速は 10 m/sec ($Re=3.4 \times 10^4$) である。水平偏角 β が変化すると風速 V の軸方向成分は $V \cos \beta$ となることより、抗力係数に関する計算値、

$$C_D(\beta) = C_D(\beta=0^\circ) \cos^2 \beta \quad (2)$$

が導かれる。この計算値 (破線) と実験値はよく一致する結果となり、抗力係数は水平偏角が大きくなるにつれて、徐々に小さくなっている。このことから、水平偏角を持つ傾斜ケーブルに作用する空気力は構造軸に直角な成分 $V \cos \beta$ が大きく寄与していると考えられる。この結果は、傾斜した円柱の空力特性は風速の軸直角方向の成分 $V \cos \beta$ に支配されるという cos 則^{(4),(5)}に基づいた考えと適合する。

また、揚力係数と横力係数はともに測定範囲でほぼ 0 に近い値をとり、揚力および抗力は傾斜ケーブルに対して空気力としてはあまり貢献していないと考えられる。

3.2 静的圧力分布特性

Fig. 3 に固定支持した傾斜ケーブル周りの静的圧力分布を、Wind Dir. 1 ($\alpha=-30^\circ$, $\beta=45^\circ$)、Wind Dir. 2 ($\alpha=30^\circ$, $\beta=45^\circ$)、水平面内の場合 ($\alpha=0^\circ$, $\beta=45^\circ$) 及び流れに直角な場合 ($\alpha=0^\circ$, $\beta=0^\circ$) の 4 種類の姿勢について示す。傾斜ケーブル ($\alpha=0^\circ$, $\beta=48^\circ$) に対応する 2 次元楕円柱模型 ($\alpha=0^\circ$, $\beta=0^\circ$) の結果もあわせて示している。楕円柱模型の背圧は、水平面内 ($\alpha=0^\circ$) で水平偏角 β が 0° と 45° のケースの中間に位置していることから、($\alpha=0^\circ$, $\beta=48^\circ$) の傾斜ケーブルの圧力分布とはやや異なるものと考えられる。

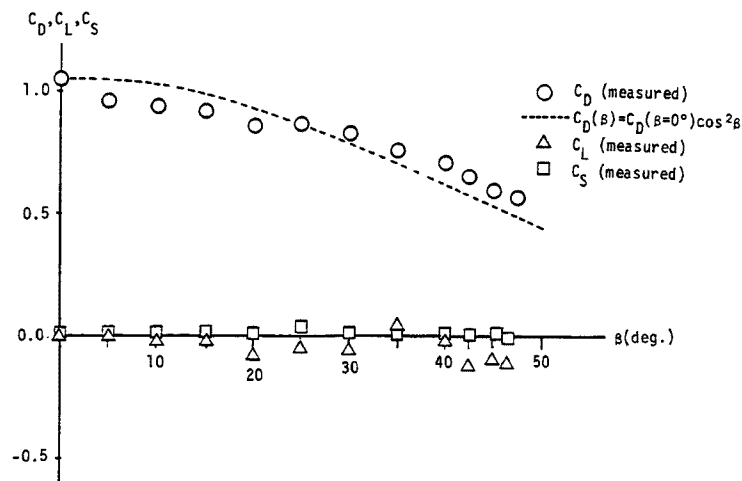
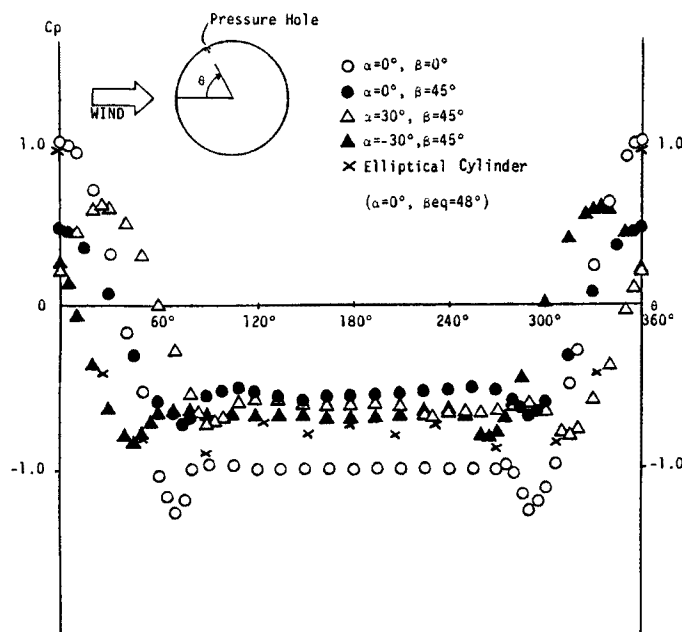
Fig. 2. Aerostatic forces of yawed cable ($\alpha=0^\circ$).

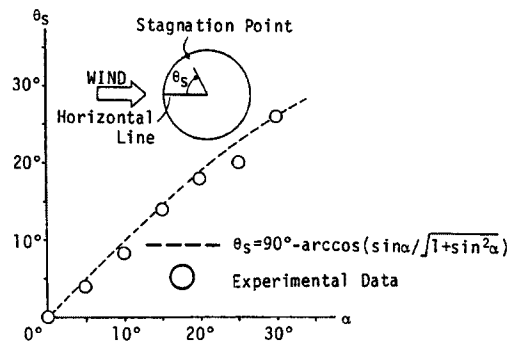
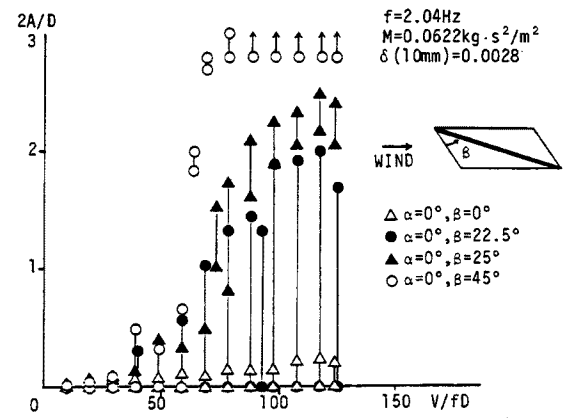
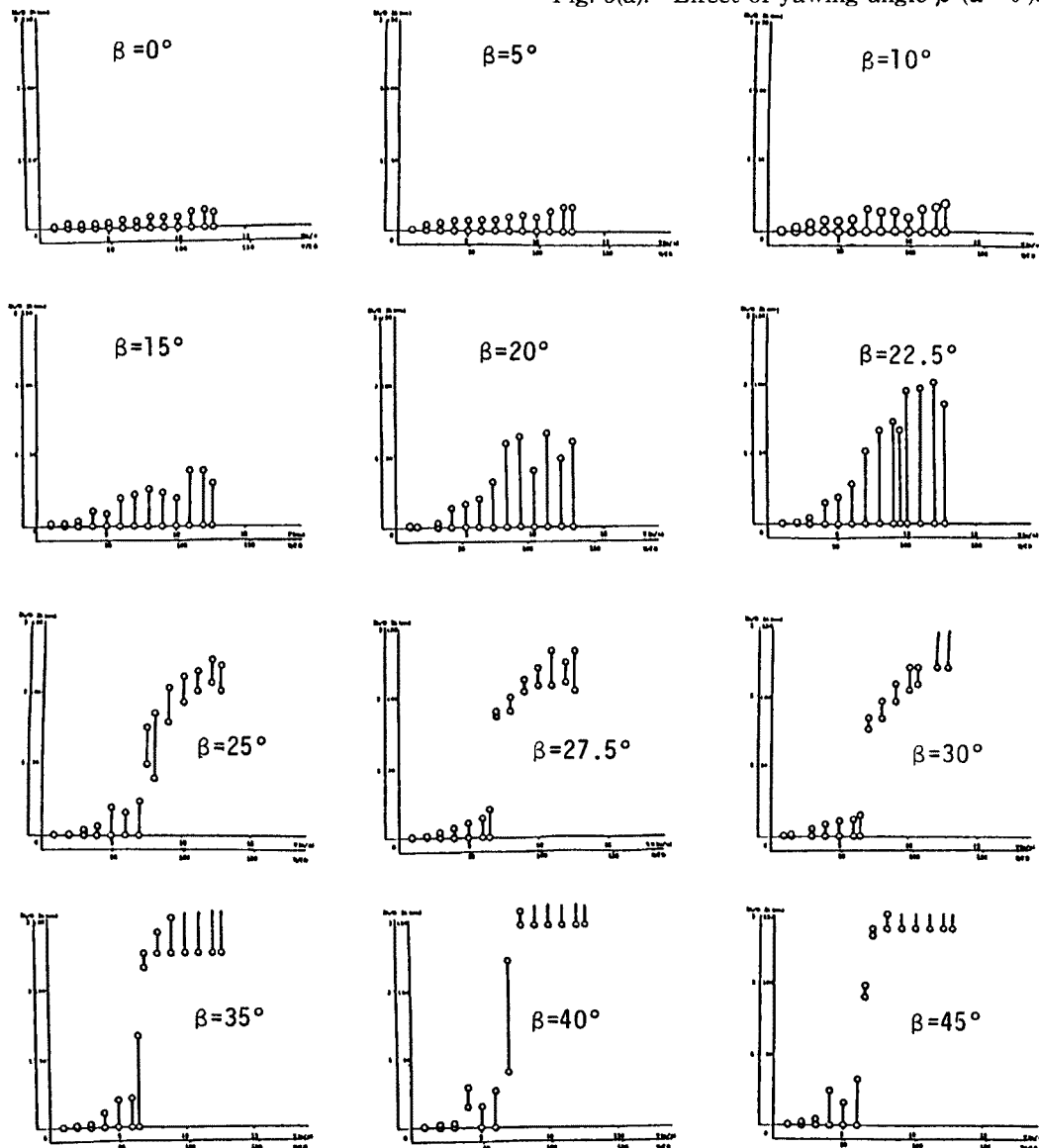
Fig. 3. Static pressure distribution around cable.

このことより、傾斜ケーブル回りの流れは、主流方向ではなく、Roshko⁴⁾やVan Atta⁶⁾などが指摘しているように、ケーブル軸直角方向に横切るものと考えられる。

また、水平偏角 β を 45° に固定して鉛直面内傾斜角 α を変化させ、各々の姿勢において静的圧力が最大となる点 (Stagnation Point) を求めた。その結果を Fig. 4 に示す。傾斜ケーブルを軸に垂直な平面で切断した円周において、主流の同時進行面が最初に到達する円周上の点が Stagnation Point になると仮定し求めた計算値も図中に破線で示している。両者はよく一致し、鉛直面内傾斜角 α の存在により Stagnation Point が変化することがわかる。

3.3 水平偏角のみを有する傾斜ケーブルの振動応答特性

昨年度の研究³⁾で明らかになったように、水平面内の傾斜ケーブル ($\alpha=0^\circ$) では、水平偏角 β によりその


 Fig. 4. Position of stagnation point ($\beta = 45^\circ$).

 Fig. 5(a). Effect of yawing angle β ($\alpha = 0^\circ$).

 Fig. 5(b). Effect of yawing angle β ($\alpha = 0^\circ$).

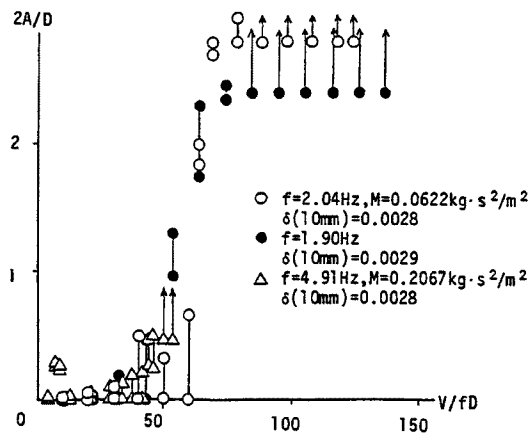


Fig. 6. Effect of natural frequency ($\alpha = 0^\circ$, $\beta = 45^\circ$).

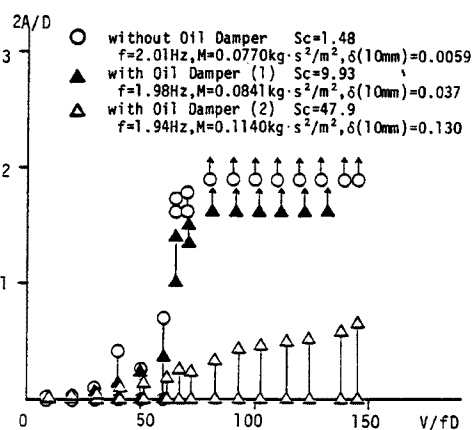


Fig. 7. Effect of Scruton number Sc ($\alpha = 0^\circ$, $\beta = 45^\circ$).

振動応答は大きく異なる (Fig. 5)。すなわち、流れに直角方向の場合 ($\beta = 0^\circ$)、振動はほとんど生じずに安定している。水平偏角を増加させていくと、 22.5° までは、定常振動は生じないものの、ピート状の不規則な振動波形を呈し、ローリングの卓越した状態となる。最大振幅は水平偏角とともに大きくなっていく。 25° を越えると、急に大振幅の発散型定常振動に移行し、 45° に至るまで発散の度合いが激しくなっていく。この振動は全てリミットサイクルを持たないソフトタイプの振動であり、その発現風速は水平偏角によらず、無次元風速 V/fD にして約 $60 \sim 70$ とほぼ一定を保つ。

さらに、($\alpha = 0^\circ$, $\beta = 45^\circ$) の姿勢において、振動系の固有振動数を増減させ、その影響を調べた結果を Fig. 6 に示す。全てのケースにおいて、 $V/fD = 50 \sim 60$ 付近の同様な無次元風速域から発散型の大振幅振動が発生した。この結果より、斜張橋ケーブルの振動現象の発現風速は、無次元風速への依存性が大いと考えられる。このことより、樋上りが指摘したレインバイブレーションが無次元風速に依存しないという特性は、雨による水路形成に関するものであり、無雨状態での基本的な空力不安定性は無次元風速で特徴付けられるものと判断される。

また、同じ姿勢 ($\alpha = 0^\circ$, $\beta = 45^\circ$) において、Oil Damper の設置によりスクルーション数 $Sc (=m\delta/\rho D^2)$ の影響を検討した。この振動応答結果を Fig. 7 に示す。スクルーション数が 7 倍程度になっても振動応答の変化はほとんどみられない。30 倍以上と非常に大きくした場合には定常振動の発生が収まっている。これより、傾斜ケーブルの基本的な空力不安定性は、スクルーション数に対して敏感ではないものと判断される。

以上のことより、水平偏角がある程度以上の傾斜ケーブルは、空力的に不安定であり、大振幅振動を発生する特性を本質的に内在していることが判明した。その特性は、無次元風速 V/fD で特徴付けられ、スクルーション数の影響を受けにくいものである。いわゆるレインバイブレーションはこの傾斜ケーブルの空力不安定性が表れたものと考えられる。

3.4 風の乱れによる影響

風の乱れによる影響を検討するため、($\alpha = 0^\circ$, $\beta = 45^\circ$) の姿勢の傾斜円柱に対し、格子乱流中で振動応答を測定した。2 種類の乱流 (乱れ強さ $I_u = 12.0\%$, 乱れのスケール $L_x^u/D = 1.21$)、($I_u = 4.8\%$, $L_x^u/D = 1.38$) を用いた際の振動応答および振動波形を Fig. 8 に一様流と比較して示す。乱流中においては定常振動が発生せず、その乱れの強さが大きいほど安定となる傾向を示した。生じた振動はパフエッティングおよびローリング状の不規則なものであった。

これより、水平偏角を持つケーブルの無雨状態での大振幅振動では、風の乱れが重要な因子の一つになっていると考えられる。レインバイブレーションが生じたとされる斜張橋は、自然風の乱れが比較的小さいと

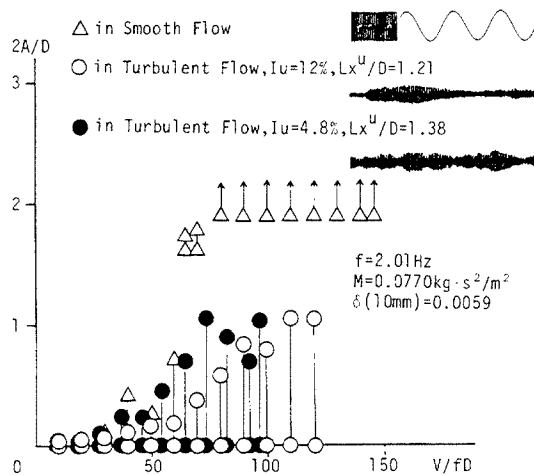


Fig. 8. Effect of turbulent flow ($\alpha=0^\circ$, $\beta=45^\circ$).

において最も空力的に不安定となり、振動が発生しやすいと判断できる。すなわち、斜張橋ケーブルはケーブル面内方向だけでなく、面外方向にも振動できる可能性をもっていると考えられ、実橋での2方向の連成した楕円軌道を描く振動の発生報告²⁾の実験的裏付けがなされた。

3.6 人工水路の影響

ケーブル表面に形成される水路の影響を調べるため、アルミニウム製の模型の上部表面に両面テープを貼付した場合 (With Double-Faced Tape)、およびこのテープ上に直径1~2 mm程度のアルミニウム粒をさらに付けた場合 (With Small Grain Roughness) について振動応答を調べた。その結果を Fig. 10 に示す。模型の姿勢は、Wind Dir. 1 ($\alpha=-30^\circ$, $\beta=45^\circ$) であり、振動方向は先の3.5と同様に鉛直方向から -25° 傾けた方向である。アルミニウム管そのままの場合では無次元風速 V/fD が40~80付近で振幅の小さい限定型振動が発生していたが、両面テープを貼付すると最大振幅値が増加している。さらにアルミニウム粒も付けると発散型の大振幅振動に移行した。これより、降雨によってケーブル表面に形成される水路は、傾斜ケーブルの空力的不安定性を強めるものと思われる。これは、ケーブル表面における流れの剥離が水路形成の影響を受け、ケーブル振動を励振する結果となったものと考えられる。

3.7 スプリッター板設置による効果

主流直角方向に支持された門柱では、その下流側にスプリッター板を設置することにより、発散型振動を引き起こすことが知られている⁷⁾。この振動の発生原因としては、スプリッター板の存在によって剥離剪断層

思われる海岸や平野部などに位置しており、今回の実験結果と対応がつけられる。

3.5 振動方向の影響

Wind Dir. 2 ($\alpha=30^\circ$, $\beta=45^\circ$) において、鉛直方向の支持のほか、各々 25° だけばねを傾斜させて支持した。つまり、主流方向線およびケーブル中心軸線を含む π 平面に対して、ほぼ垂直方向に振動の自由度を与えたことになる。この振動応答の変化の様子を Fig. 9 に示す。鉛直支持で発散型振動が発生しているが、傾斜させることによりさらに急激な発散型振動に変化し、発振風速も無次元風速 V/fD において80から40へと低下し、より不安定化した。

よって、3.2の結果とあわせて考えると、傾斜ケーブルは、Stagnation Point とケーブル中心点を結ぶ線およびケーブル中心軸線を含む平面 π に垂直な方向に

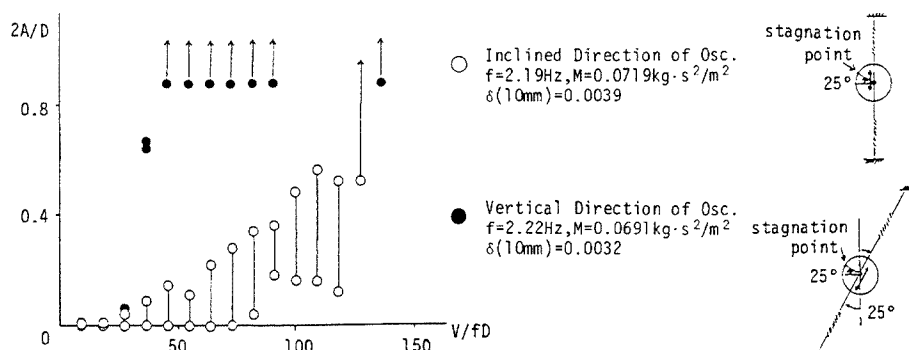
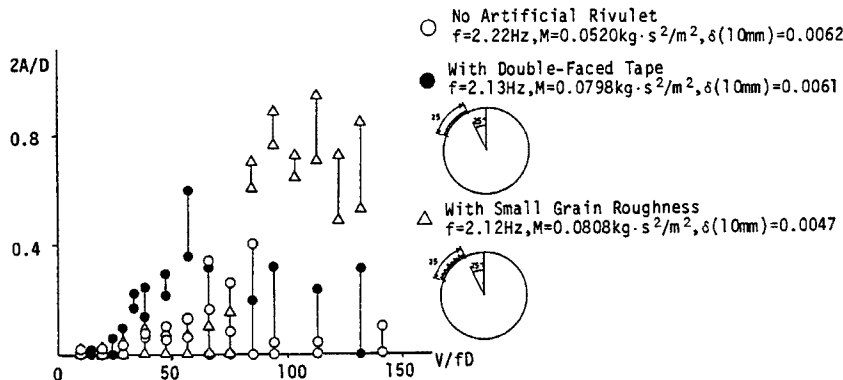
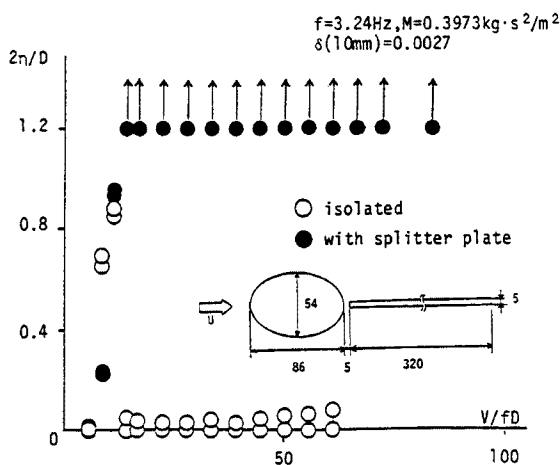


Fig. 9. Effect of oscillation direction ($\alpha=30^\circ$, $\beta=45^\circ$).

Fig. 10. Effect of artificial rivulet ($\alpha = -30^\circ, \beta = 45^\circ$).Fig. 11. Effect of splitter plate (Elliptical cylinder, $\alpha = 0^\circ, \beta = 0^\circ$).

内に内部循環流が形成されるためであるとされている。

3.3に述べたように、水平偏角のみを有する傾斜ケーブル ($\alpha = 0^\circ, \beta = 45^\circ$) は発散型の大振幅振動を発生する。この傾斜ケーブルの振動応答はスプリッター板挿入による応答と類似している。この点に着目して、今回、3.2と同一の楕円柱模型(長径 84 mm, 短径 54 mm)を用いてスプリッター板の有無による影響を調べた。この模型を主流直角方向 ($\alpha = 0^\circ, \beta = 0^\circ$) にたわみ 1 自由度のばね支持を行い、下流側にスプリッター板を設置して風速応答振幅を測定した。その結果を Fig. 11 に示す。スプリッター板の無い場合には、無次元風速 8 前後に渦励振と考えられる限定型振動がみられる以外はほとんど振動を生じていない。これに対して、スプリッター板を設置すると、先の渦励振状態から直接に発散型の大振幅振動に推移している。

これは、傾斜ケーブルの大振幅振動の発生特性を考察する上で重要な示唆を与えるものであり、スプリッター板の設置に類似した効果によって傾斜ケーブルが不安定となっていることが考えられる。

3.8 流れの可視化

Photo. 1 は、水平面内の傾斜ケーブル ($\alpha = 0^\circ, \beta = 45^\circ$) の下流側の流れを Smoke Wire 法により可視化し、上方から撮影した写真である。傾斜ケーブルのすぐ下流側においてその軸に沿った流れが存在することが確認される。Shirakashi ら⁸⁾ もこの軸方向流の存在を指摘している。

Photo. 2 は、風向指示旗により可視化し、同様に上方から撮影した写真を示す。傾斜ケーブルの下流側において傾斜ケーブルに最も近い位置で、ほぼ軸方向に沿った流れが存在している。模型から離れるほど、流れの方向は次第に主流方向へと変化している。

3.9 軸方向流の風速測定

水平面内の傾斜ケーブル ($\alpha = 0^\circ$) において、水平偏角を変化させたときの軸方向流流速の様子を Fig. 12 に示す。上が軸方向流の平均流速 (V_a) で、下がその変動成分 R.M.S. 値の軸方向流流速に対する割合である。水平偏角が 45° の場合は軸方向流流速が主流流速の 90% 近くもあるのに対して、 0° へと近づくにつれて減少している。また、変動成分 R.M.S. 値は逆に水平偏角が小さくなるにつれて大きくなっている。つまり、軸方向流が水平偏角の減少とともに弱まっており、その特性は水平偏角に大きく依存していると判断できる。弾性支持時に振動発生の有無を隔てる境界を図中に破線として示した。これより、軸方向流は振動発生に大

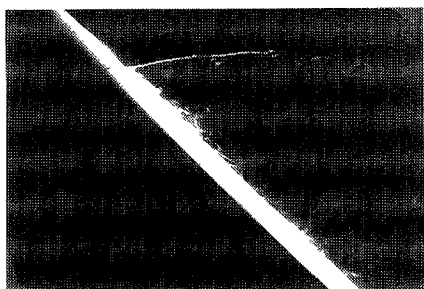


Photo. 1. Flow visualization by smoke wire method ($\alpha=0^\circ$, $\beta=45^\circ$).

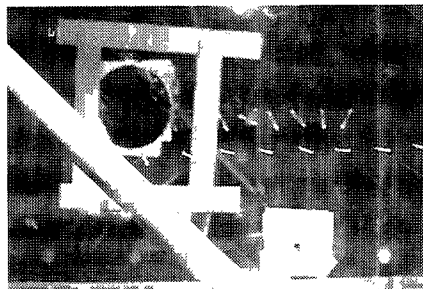


Photo. 2. Flow visualization by small flags ($\alpha=0^\circ$, $\beta=45^\circ$).

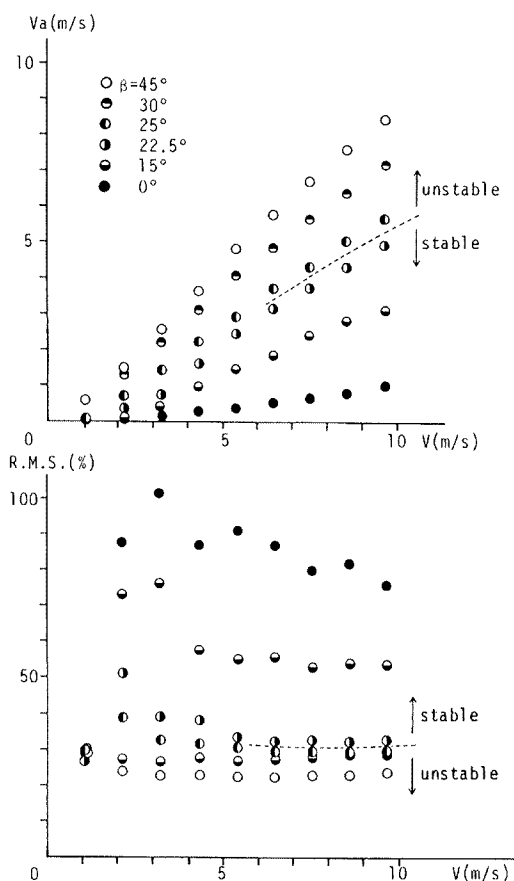


Fig. 12. Velocity characteristics of axial flow ($\alpha=0^\circ$, $\beta=0^\circ\sim45^\circ$).

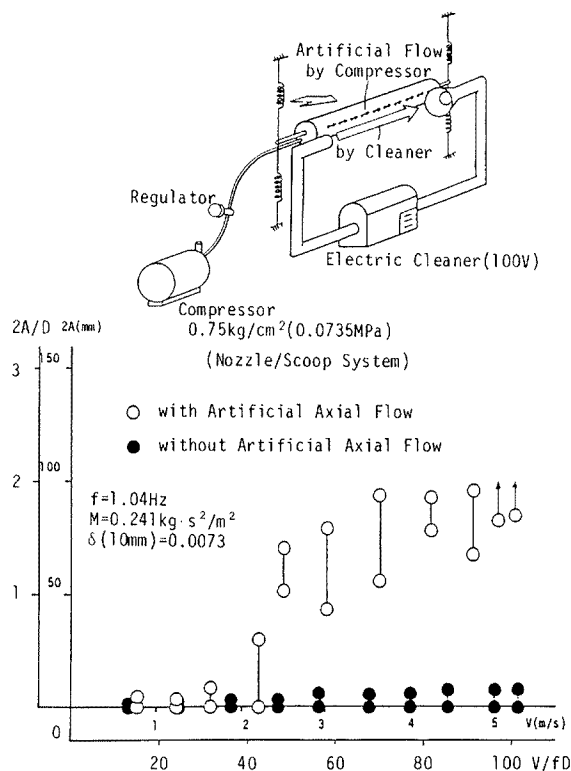


Fig. 13. Effect of artificial axial flow ($\alpha=0^\circ$, $\beta=0^\circ$).

きく関与し、その強さが振動発生の有無を定めていることが示唆された。

3.10 人工的軸方向流による応答変化

3.8で確認された軸方向流の及ぼす効果について検討するために、流れに直角方向の円柱 ($\alpha=0^\circ$, $\beta=0^\circ$) に対し、模型のすぐ下流側に人工的に軸方向流を発生させて振動応答を測定した。ケーブル模型内部にコンプレッサーから空気を送り、ケーブル後流側面に設けられた斜め方向の穴から空気を軸方向に吹き出した。これに加え、吹き出し口と吸い込み口を有する電気クリーナーにより軸方向の循環流を円柱のすぐ下流側に発生させた。Fig. 13にその結果を示す。軸方向流を与えない場合にはほとんど振動が生じないが、人工的軸

方向流を発生させると無次元風速 $V/fD=45$ 付近から発散型の振動が発生した。よって、傾斜ケーブルでは、軸方向流の存在が振動発生 of 直接的要因であると考えられる。このような傾斜円柱後流域の2次的な流れについては、Wong⁹⁾ が円柱傾斜後部から Base Bleed と呼ばれる流れを上下2方向に与え、水槽および風洞実験を行った結果、2つの Base Bleed の放出角度が大きいほど流れの剥離が促進され、後流の強い渦形成により振動応答が不安定化することを指摘している。また、Wood¹⁰⁾ は薄い翼型断面後部から後流域に Base Bleed を主流方向に補給した場合、Base Bleed の流速によって後流域の渦の相互干渉が影響を受け、抗力や表面圧力などの空力特性が大きく変化することを報告している。これらより、軸方向流はケーブル後流域において Base Bleed あるいは前述のスプリッター板と同様の空力的効果を有しているものと考えられる。

4. 制振対策

4.1 付属物設置による効果

傾斜ケーブルの大振幅振動の制振対策を検討するため、ケーブル模型表面に軸に平行な矩形突起（高さ1.5 mm, 幅3 mm）を12本設置した。これは、昨年度の研究³⁾ において制振効果が認められた方法である。この模型を用い、Stagnation Point が矩形突起の位置にある場合（Case 1）と突起の中間にある場合（Case 2）について検討した。（ $\alpha=0^\circ$, $\beta=45^\circ$ ）の姿勢におけるこの矩形突起の効果を Fig. 14 に示す。また、3.10 で考察した通り、軸方向流が傾斜ケーブルの空力不安定性の主要因であると考えられるため、半円形状のフィンを模型下流側に軸に垂直に4枚設置し、軸方向流を直接遮る方法についても調べた。このフィンによる振動応答への影響を調べた結果を Fig. 15 に示す。矩形突起では、Case 1, Case 2 ともに発散型大振幅振動が収まった。ただし、振動はバフティングとローリングに入れ替わる不規則な特性を示した。一方、半円形状のフィンを設置した場合にもバフティングは生じるが、制振効果は大きく現れた。

4.2 表面粗度変化による効果

アルミニウム製のケーブル模型に荒い麻布(Roughed Hemp Cloth)、疣状の包装用シート(Warted Sheet)あるいはサンドペーパー(60番)を巻き付けて、ケーブル表面粗度を変化させることによる制振効果を検討した。表面粗度によって、断面回りの流れに大きく影響する因子としてはレイノルズ数 Re が考えられる。各模型のストロハル数 St の測定結果を用いて、Chen¹¹⁾ による円柱断面における $Re-St$ の実験結果より、およそその Re 数を読み取った。これより得られたレイノルズ数は、アルミニウム管が $Re \leq 5 \times 10^4$ 、Roughed Hemp Cloth の場合が $Re \leq 1.5 \times 10^5$ 、Warted Sheet が $Re \leq 1 \times 10^5$ 、サンドペーパーが $Re \leq 6.5 \times 10^4$ であり、全て亜臨界域に入る。（ $\alpha=0^\circ$, $\beta=45^\circ$ ）の姿勢において、これらの状態で振動応答を調べた結果を Fig. 16 に示す。3種類のケースとも大振幅振動は起こらず、その粗度が大きいほど振動応答が小さくなった。これは、ケーブル表面の粗度の変化が流れの剥離に影響し、軸方向流を弱めたものと考えられる。このように、表面粗度を変化させる制振方法については、今後さらに詳細な検討が望まれる。

5. 結 論

本研究では、傾斜ケーブルのレインバイブレーションに関して、無雨状態における風洞実験を行った。レインバイブレーションが傾斜ケーブル自体の空力不安定性によるものであるという観点から、傾斜ケーブルの静的空気力や圧力分布、振動応答を測定し、その空力特性を調べた。さらに、ケーブル後方に存在する軸方向流に着目して、無雨時の大振幅振動現象の発生機構を考察した。また、その制振対策として付加物の設置や表面粗度を変化させる手法の効果を検討した。

以下に本研究で得られた主な成果を述べる。

1) 風に対して水平偏角 β を持つ傾斜ケーブルの静的空気力特性は、ケーブル軸直角方向の流速成分 $V \cos \beta$ で特徴付けられる。これは、圧力分布よりも裏付けられる通り、傾斜ケーブルでは流れがケーブルの軸を直角方向に横切ろうとするためであると考えられる。

2) 傾斜ケーブルの空力不安定性は、Stagnation Point とケーブル中心点を結ぶ線およびケーブル中心軸

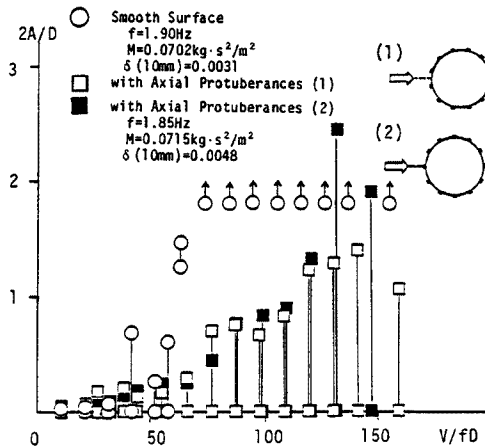


Fig. 14. Effect of axial protuberances ($\alpha=0^\circ$, $\beta=45^\circ$).

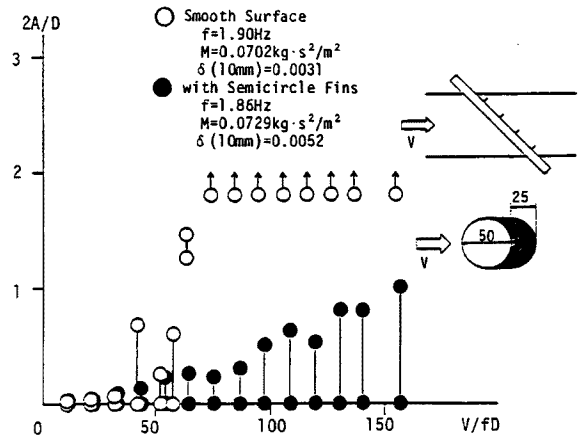


Fig. 15. Effect of semicircle fins ($\alpha=0^\circ$, $\beta=45^\circ$).

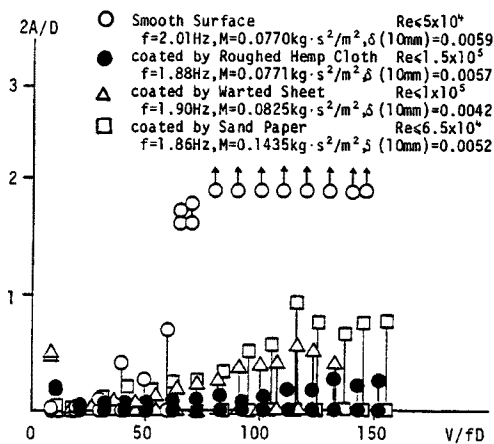


Fig. 16. Effect of surface roughness ($\alpha=0^\circ$, $\beta=45^\circ$).

線を含む平面に直交する方向に最大となる。よって、実橋においては面内のみならず、面内と面外が連成したモードでも振動し得ると考えられる。

3) 水平偏角が大きくなると、傾斜ケーブルは無雨の状態でも不安定化し、大振幅振動を生じる。これが、レインパイブレーションが生じる根本的な原因であると考えられる。この振動の発現風速は無次元風速 V/fD に支配される。この空力不安定性にスクルートン数が及ぼす影響力は小さいと考えられる。一方、風の乱れはこの大振幅振動を安定化する効果を持つ。雨水によってケーブル表面に水路が形成された場合、この水路により流れの剥離が促進され、振動は励振される。

4) 可視化実験より傾斜ケーブル後方には軸方向の流れが存在することが確認された。軸方向流の流速を測定した結果、軸方向流の強さが振動発生に深く関連

しているものと判明した。一方、流れに直角方向の円柱において人工的に軸方向流を発生させたところ、スプリッター板の設置と類似した効果が現れ、大振幅振動が発生した。これより、軸方向流が傾斜ケーブルの空力不安定性の主たる原因であると考えられる。

5) 実橋においては、スクルートン数はこの実験より大きいことや自然風の持つ乱れなどから、無雨時において振動発現例がほとんどみられないものと考えられる。降雨時の振動は、雨水の表面張力、重力および風力が均衡した位置で安定した水路が形成されることにより、いったん安定化したものが再び不安定に移行したものである。レインパイブレーションが限定型振動であるという報告は、高風速になると表面の雨水が拡散して水路形成が不完全になり、ケーブル表面粗度が増大するためと考えられる。

6) 傾斜ケーブルの表面に軸に平行な矩形突起を12本設置した結果、定常振幅のみられないビート状の応答特性へと安定化した。また、半円形状のフィンを傾斜ケーブル下流側に軸に垂直に設置した結果、大きな制振効果が認められた。ケーブルの表面粗度を変えれば、粗度が大きくなるほど振動応答が小さくなった。

今後は、空気力学的な制振手法に関してさらに検討を加え、実際の橋梁に容易に適用可能な手法を確立することが望まれる。

参 考 文 献

- 1) 樋上琇一：斜張橋ケーブルの Rain Vibration, 日本風工学会誌第27号, 1986.
- 2) Yoshimura, T., T. Tanaka, N. Sasaki, S. Nakatani, S. Higa : Rain-Wind Induced Vibration of the Cables of the Aratsu Bridge, 第10回風工学シンポジウム論文集, 1988.
- 3) 松本勝・白石成人・白土博通・金潤石・辻井正人・大蔵健：ケーブルの空力振動現象に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第31号 B-1, 1988.
- 4) Roshko, A.: On the Development of Turbulent Wakes from Vortex Streets, NACA Report 1191, 1954.
- 5) Hanson, A. R.: Vortex Shedding from Yawed Cylinders, Technical notes of AIAA Journal, Vol. 4, No. 4, 1966.
- 6) Van Atta, C. W.: Experiments on Vortex Shedding from Yawed Circular Cylinders, Technical notes of AIAA Journal, Vol. 6, No. 5, 1968.
- 7) Shiraishi, N., M. Matsumoto, H. Shirato : On Aerodynamic Instability of Tandem Structures, Proceeding of 6th Colloquium on Industrial Aerodynamics, 1985.
- 8) Shirakashi, N., A. Hasegawa, S. Wakiya : Effect of the Secondary Flow on Karman Vortex Shedding, Bulltin of JSME, Vol. 29, No. 250, 1986.
- 9) Wong, H. Y.: Wake Flow Stabilization by the Action of Base Bleed, Transactions of the ASME, Journal of Fluids Engineering, Vol. 107, 1985.
- 10) Wood, C. J.: The Effect of Base Bleed on a Periodic Wake, Journal of the Royal Aeronautical Society, Technical notes, Vol. 68, 1964.
- 11) Chen, S-S.: Flow-induced Vibration of Circular Cylindrical Structures, Hemispheve Publishing Corp., 1985.