

斜張橋ケーブルの レインバイブレーションの対策

Countermeasures of "rain-wind induced vibration" of cables in cable-stayed bridges.

木下民法* 中西 宏** 杉井謙一***

by Taminori KINOSHITA, Hiroshi NAKANISHI and Ken-ichi SUGII

Wind-tunnel tests for inclined cable with circular and polygonal cross-section have been conducted to evaluate their characteristics of oscillations due to wind and rain. From an aerodynamic point of view, the stability of polygonal shape has dominated that of circular shape, except only a few case using hexagonal type. Especially, octagonal shows high stability among polygonal shapes. Throughout experimental results and investigation, a countermeasure, using octagonal shape, for rain-wind induced vibration in cable-stayed bridge has been proposed.

1. はじめに

近年、斜張橋が盛んに製作され、ますます大型化する傾向にある。その径間長およびケーブル径が大きくなるにつれ、降雨時の風によりレインバイブレーションと呼ばれる傾斜ケーブル特有の振動が生じることが報告され、問題となっている。

このケーブル振動に対し、樋上¹⁾は実橋の観察および模型実験を行い、振動が生じるケーブルにおいては表面上を流れ落ちる雨水はケーブルの上下両面に水路を形成しており、またケーブルの風に対する傾斜姿勢が振動に重要な影響を及ぼすことを報告している。また、山口²⁾はケーブルの運動と、ケーブル表面上に形成される水路の円周方向の運動の2自由度モデルを提案し、解析的にケーブル運動を解くことによりケーブル上面側の水路の運動が重要であることを指摘している。さらに、松本ら^{3), 4)}は、傾斜ケーブルの背後には軸方向の二次流が発生し、この軸方向流が傾斜ケーブルの空力的不安定性の原因となっていることを示している。しかしながら、ケーブル表面上に形成される水路と、それによるケーブルまわりの流場の変化がケーブル振動に対し、どのように影響をおよぼしているのかは明らかにされていない。

斜張橋ケーブルの振動は、ケーブル付着部の疲労の原因となったり、橋梁使用者に不安感を与えるなど問題があるため、早急な対策が必要である。これまでに補助ケーブルによるメインケーブルの連結やケーブル付着部へのオイルダンパーの設置、ケーブル表面上に平行突起、V形溝あるいはらせん状突起を取り付け空

* (株)神戸製鋼所 機械研究所 (〒651-22 兵庫県神戸市西区高塚台1丁目5-5)

** (株)神戸製鋼所 機械研究所 主任研究員 (〒651-22 兵庫県神戸市西区高塚台1丁目5-5)

*** (株)神戸製鋼所 鉄構橋梁部 主任部員 (〒651 兵庫県神戸市中央区脇浜町1丁目3-18)

力安定性を高める方法が提案され、一部はすでに実施されている^{1), 8), 6)}。

本研究では、まず始めに人工水路を取り付けたケーブルを用いて流れの可視化および風速 - 振動振幅関係の測定を行ない、ケーブル表面上における流れの剥離点、水路の形成される位置および空力応答性の間の基本的な関係を求めた。次に各種多角形断面形状のケーブル模型を取り上げ、空気力係数および振動振幅の測定をすることにより、空力安定性を評価し、さらに傾斜姿勢を持つ模型に水を供給しながら風速 - 振動振幅関係の測定、模型表面上の雨水の状態の観察を行なった。

2. 傾斜ケーブルの空力特性

傾斜ケーブルの振動に対し、表面上に形成される水路がどのように影響しているかを定量的に把握するため、実際の水路を模擬した人工水路を用いて基本的な実験を行なった。

レインバイブレーションは、ケーブル表面上に形成される水路により断面の変形することが振動の原因のひとつであるとされている¹⁾。またその振動振幅は大きく、発振風速が高いことから、ギャロッピング振動と類似の振動機構と考えられ、断面形状による流れの剥離と再付着が振動発生の一因であると思われる。降雨によって形成される水路が流れの剥離を促進するような効果を持っていると仮定するなら、水路の形成される位置に剥離を誘発する様な突起物を取り付ければレインバイブレーションが再現できると考えられる。従って実験においては、突起物として直径1 mmの針金を用い、セロファンテープでケーブル模型表面に貼付することにより人工水路とした。さらに、ケーブル表面上の人工水路は剥離点に重要な影響を及ぼすと考えられるため、この人工水路の取り付け位置を変化させたときの剥離点及び振動振幅の関係を測定した。

2.1 人工水路付傾斜ケーブルの振動応答

実験はエッフェル型風洞(断面寸法1.2m×1.2m)を用い、模型支持方法の都合上風洞吹き出し口に塩化ビニールパイプを用いたケーブル模型を設置して行なった。Fig. 1に実験装置と模型の支持方法を示す。この図に示したようにケーブル模型は鉛直方向の1自由度モデルとするため両端をバネで鉛直に支持し、水平面内の自由度はワイヤーで拘束した。Fig. 2に風に対するケーブルの傾斜姿勢の関係を示し、この実験条件をTable 1に示す。実験におけるRe数が実機のと同等程度となるように、模型直径を実橋ケーブルの直径とほぼ等しくした。また模型の単位長さ当りの重量は実ケーブルの1/20程度とし、空力的に反応しやすいようにした。

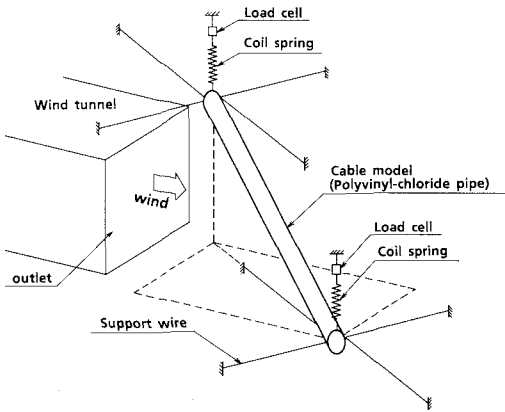


Fig.1 Experimental set-up of inclined cable.

Table 1 Experimental Condition.

Cable model	
Material	Polyvinyl-Chloride Pipe
Length	2.6 m
Diameter	0.165 m
Weight	3.9 kg/m
Natural frequency	$f_y = 1.17$ Hz
Logarithmic decrement	$\delta = 0.005$
Wind velocity	$U = 0 \sim 25$ m/sec
Horizontal angle	$\alpha = 45^\circ$
Vertical angle	$\beta = 45^\circ$
Scruton number	$Sc = 0.64$

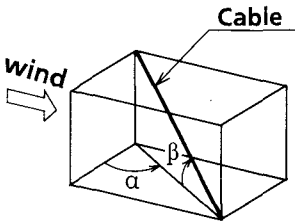


Fig.2 Inclination of cable against wind.

実験に先だって、水路位置が傾斜ケーブルの振動に与える影響を明らかにするために人工水路の取り付け位置をどこにすればよいかを決定する必要がある。松本らによると、傾斜ケーブルの淀み点の水平からの角度は水平及び垂直偏角を用いて次式で与えられることがわかっている⁴⁾。

$$\theta = 90^\circ - \cos^{-1} \left\{ \frac{\sin \alpha \cdot \sin \beta}{(\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha \cdot \cos^2 \beta)^{1/2}} \right\}$$

さらに樋上によると、ケーブル上の水路はケーブルの真上から $20^\circ \sim 60^\circ$ および $140^\circ \sim 160^\circ$ の範囲に存在することが報告されている⁷⁾。従って実際に水路の形成される付近に人工水路を設置するものとして、実験を行うケーブル模型上の人工水路位置を Table 2 のように決めた。ここで ξ は淀み点から人工水路までの角度を表わす。

Table 2 Experimental Cases.

Case	ξ
1.	75°
2.	85°
3.	95°

実験では風速 - 振動振幅関係の測定と、流れの可視化による剥離点の観察を行なった。Fig. 3 に実験によって得られた風速 - 振動振幅関係を示す。図に示されるように $\xi = 85^\circ$ および 95° のとき大振幅の振動が発生するものの、 $\xi = 75^\circ$ の場合は振動振幅はあまり大きくない。

今回の実験においては、風路閉塞率が若干大きい(約19%)が、松本らの行なった同程度の閉塞率における実験結果⁴⁾と比較すると、発振風速及び発散型の振動といった点で類似の結果となった。また以下に示すような樋上の指摘するレインバイブレーションの特徴¹⁾、

- ・ 振動は風向方向に下り勾配をもったケーブルに発生する。
- ・ 固有振動数が $1 \sim 3\text{Hz}$ 内にある次数で発現する。
- ・ 渦励振と比較して振動は高い風速で生じ、その振幅は大きい。

を満たしており、人工水路位置が $\xi = 85^\circ$ および 95° のとき得られた振動はレインバイブレーションの再現であると考えられる。

但し、松本らの述べているように、風路閉塞率を問題にならない程度まで小さくすると、レインバイブレーションの特徴の一つである限定振動となるといえることを考えると、今回の実験においては、閉塞率の影響は無視できない。しかし本研究はレインバイブレーションの対策に注目しており、空力的な安

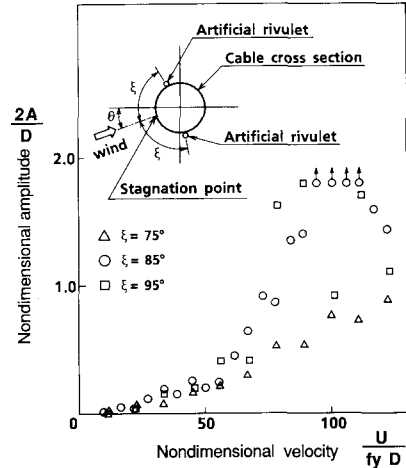


Fig. 3 Relationship between wind velocity and oscillation amplitude of inclined cable with artificial rivulet attached at angle $\xi = 75^\circ$, 85° or 95° from stagnation point.

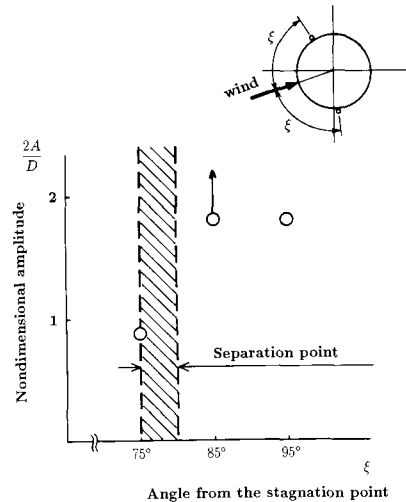


Fig. 4 Relationship between position of artificial rivulet, maximum oscillation amplitude and separation point.

定、不安定を議論する上においては、今回の実験程度の閉塞率は問題にならないと思われる。

Fig. 4 には人工水路の位置(淀み点からの角度)とそのときの最大振幅との関係を示す。さらに、これら3ケースにおける流れの可視化より剥離点は $\xi = 75^\circ \sim 80^\circ$ の範囲に分布することがわかった³⁾。図中に可視化実験より得られた剥離点位置も示す。以上の結果より水路位置が $\xi = 75^\circ$ の場合は剥離点より上流側であるのに対し、 $\xi = 85^\circ$ および 95° のときは剥離点より下流側に位置していることがわかる。いいかえれば、剥離点より下流側に水路がある場合傾斜ケーブルは空力的に不安定であるといえる。

2.2 人工水路付円柱の空気力係数

傾斜ケーブルの場合、流れの剥離点は淀み点から後流側 $75^\circ \sim 80^\circ$ の範囲に存在し、その付近に設置された人工の水路との相対的な位置関係が空力安定性に大きな影響を与えることがわかった。傾斜ケーブルの場合、松本らが指摘しているようにケーブル背後に生じる軸方向流がケーブルの空力安定性に影響を与えると考えられている。ここでは特に人工水路と流れの剥離点の相対的な位置関係が空力特性に及ぼす影響を明らかにするために、軸方向の2次元流れの生じない2次元模型を用いて実験を行なった。ここでは傾斜ケーブルの実験と同様に直径1mmの針金をセロファンテープで模型表面上に貼付して人工水路とした。人工水路付円形断面ケーブルの空力安定性は風に直角方向の空気力係数と迎角の関係を用いて評価した。

模型を軸回りに回転させながら静的抗力(F_D)および揚力(F_L)を三分力計で測定し、静的抗力係数(C_D)、揚力係数(C_L)および迎角 $\eta = 0^\circ$ の風に対し直角方向の空気力係数(C_y)は以下に示す式により求められる。

$$C_D = \frac{F_D}{(1/2) \rho U^2 D}$$

$$C_L = \frac{F_L}{(1/2) \rho U^2 D}$$

$$C_y = (C_L + C_D \tan \eta) \sec \eta$$

ここで ρ は空気密度、 U は平均風速、 D は円直径そして η は迎角を示す。傾斜ケーブルにおける流れの可視化実験より剥離点位置は淀み点より $\xi = 75^\circ \sim 80^\circ$

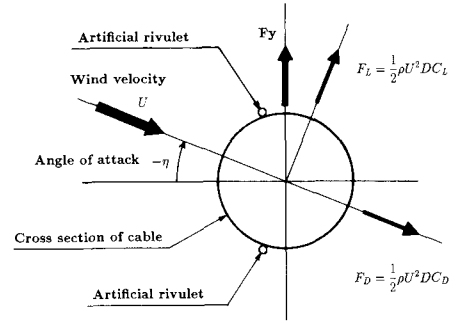
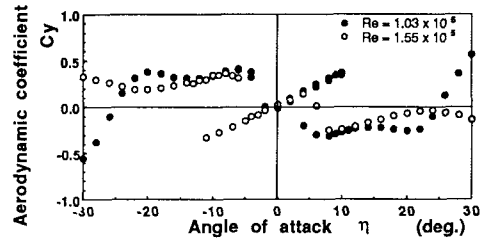
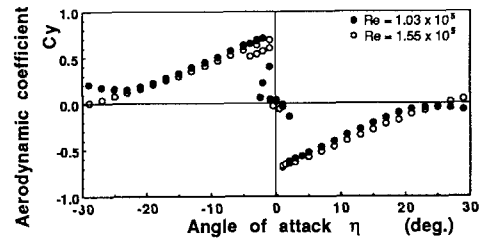


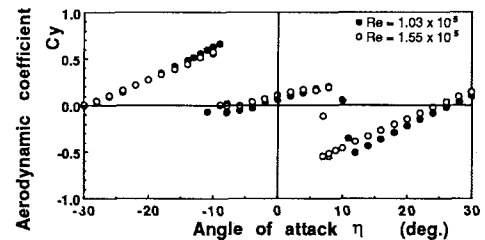
Fig. 5 Definition of angle of attack and various aerodynamic force on cross section with artificial rivulets.



a. Artificial rivulet is located at $\xi = 70^\circ$.



b. Artificial rivulet is located at $\xi = 80^\circ$.



c. Artificial rivulet is located at $\xi = 90^\circ$.

Fig. 6 Relationship between angle of attack and vertical aerodynamic force.

であることがわかっており、2次元円柱についても同様の位置より剥離が生じていると仮定して、人工水路の設置位置は剥離点位置とその上下流側に変化させるとしてTable 3のように決めた。但し、迎角 $\eta=0^\circ$ の風に対して水路位置が左右対称となるように取り付けた。このときの2次元断面内における風の迎角と各空気の関係をFig. 5に示す。

Table 3 Position of artificial rivulets.

Case	ξ
1.	70°
2.	80°
3.	90°

Fig. 6 に測定した各ケースの迎角 - 空気力係数関係を示す。計測した範囲内ではRe数による差異は無いようである。 $\xi=70^\circ, 90^\circ$ の場合、 $\eta=\pm 10^\circ$ 付近では不連続に C_y が変化しており、 $\partial C_y/\partial \eta < 0$ となっているものの、 $\eta=0^\circ$ においては $\partial C_y/\partial \eta > 0$ となっており、迎角の小さな範囲では空力的に安定であるように見られる。 $\xi=80^\circ$ の場合は $\eta=0^\circ$ の点のみで C_y の値が不連続に変化しておりこの点で $\partial C_y/\partial \eta < 0$ となっているようである。さらに測定した迎角の範囲内($-30^\circ < \eta < 30^\circ$)において、 $\eta < 0^\circ$ では $C_y > 0$ 、 $\eta > 0^\circ$ では $C_y < 0$ となり、ケーブルの振動を増幅させるような力が作用し、空力的に不安定であることを示している。

上述した各2次元模型について四塩化チタンを用いた流れの可視化を行い2次元面内での円柱回

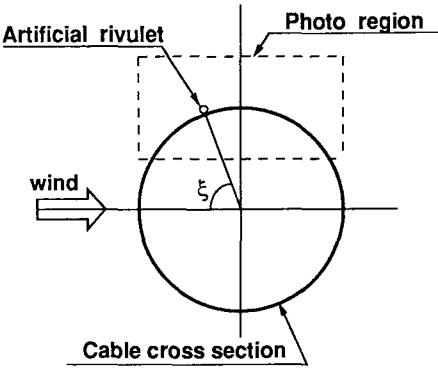
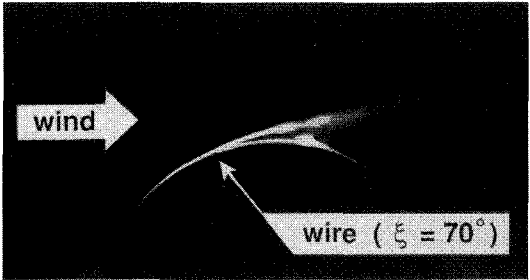
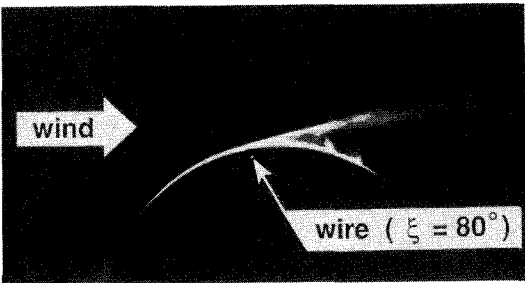


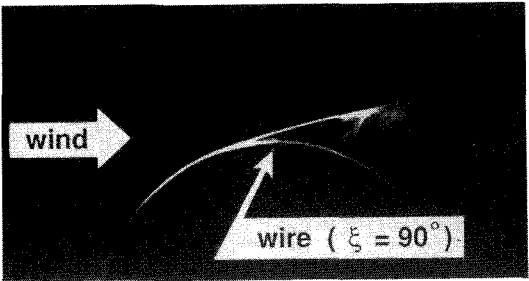
Fig. 7 Region of flow visualization photograph.



a. Flow around surface ($\xi=70^\circ$, $U=3.0$ m/sec)



b. Flow around surface ($\xi=80^\circ$, $U=3.0$ m/sec)



c. Flow around surface ($\xi=90^\circ$, $U=3.0$ m/sec)

Photo 1 Flow visualization around 2-dimensional circular cylinder with artificial rivulet.
(Mist method using $TiCl_4$.)

りの流れを観察した。観察結果をPhoto 1に示す。写真はFig. 7に示すように、人工水路設置位置付近のみ撮影しており、それぞれ淀み点から水路までの角度は $\xi=70^\circ, 80^\circ, 90^\circ$ である。この結果より $\xi=70^\circ, 80^\circ$ のときは水路上から流れが剥離しているのに対し、 $\xi=90^\circ$ の場合は水路より上流側から剥離が起きていることがわかる。またここには示していないが円柱を軸回りにわずかに回転させ $\xi=82^\circ$ としたときには水路の上流側から剥離している様子が観察された。以上のことより、静止している円柱では人工水路が剥離点より上流側にある場合、水路上に剥離点が固定されるものの、水路が剥離点よりわずかでも下流側へ移動すると、剥離位置は人工水路から離れ、 $\xi=80^\circ$ 付近に位置することがわかった。以上の結果より、人工水路位置が $\xi=80^\circ$ の場合ケーブルのわずかな振動による迎角の変化により剥離点が水路上に固定されたり水路からはなれたりする臨界的な状態にあることが考えられる。これが図に示されたような $\xi=80^\circ$ の位置に人工水路を取り付けたときの迎角 $\eta=0^\circ$ におけるCyの不連続な変化の原因とも考えられる。振動ケーブルに関しては上述した静的な観察結果を単純には適用できないものの、基本的には水路と剥離点の相対的な位置関係により空力安定性が大きく変化するメカニズムのひとつと考えられる。

3. レインバイブレーションの対策

前節までに述べたように、二次元模型を用いた実験において、人工水路を本来の位置より上流側に取り付け、剥離位置を強制的に上流側へ移動させると、空気力係数の測定結果より、空力的に安定となることが明らかになった。また人工水路を取り付けた傾斜ケーブル模型に関する実験においても、人工水路を剥離点の上流側へ固定すると、振動振幅が他の場合に比較して小さく、空力安定性の増加することが示された。

従ってこのような人工水路は雨と風が原因となる傾斜ケーブルの振動に対して制振効果があると考えられる。さらにこの考え方をあらゆる方向からの風に対して適用しようとするれば、斜張橋のケーブルとして多角形断面を持ったケーブルを提案できる。

3.1 多角形ケーブル模型に作用する空気力係数

多角形断面ケーブルが傾斜ケーブルのみならず、あらゆる方向からの風に対して空力的に安定であることを確認するため、多角形ケーブル模型に作用する空気力係数を二次元模型を用いて測定した。模型は木製で表面はペンキ塗装してある。Table 4に実験条件及び実験における迎角の定義を示す。多角形断面の場合、いずれかの迎角で空力係数の負勾配が発生する可能性があるため、断面の対称性を考慮し、全ての迎角についての空力係数を得るために、測定する迎角の範囲を $-30^\circ \sim 30^\circ$ とした。

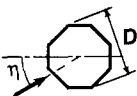
Table 4 Experimental Condition.

Cable model	
Material	Wood
Shape of cross section	Hexagon, Octagon, Decagon
Length	$L = 1.0 \text{ m}$
Diameter	$D = 0.165 \text{ m}$
Angle of attack	$\eta = -30^\circ \sim 30^\circ$
Wind velocity	$U = 5, 10, 15 \text{ m/sec}$

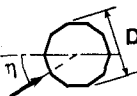
Definition of attack angle and Diameter



Hexagon



Octagon



Decagon

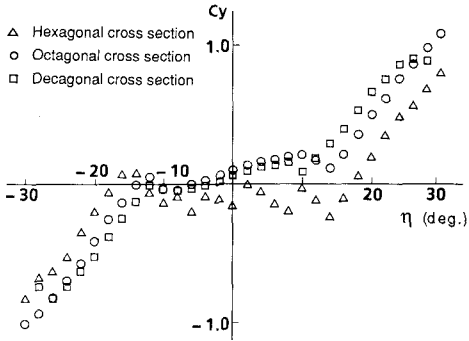


Fig. 8 Aerodynamic coefficient functioned by attack angle on hexagonal, octagonal and decagonal cross section.

各空気力係数の測定方法は人工水路付直立円柱の空気力係数の場合と同様である。Fig. 8に実験より得られた結果、即ち風の迎角と空気力係数(C_y)の関係を示す。実験を行なった風速の範囲では空気力係数はレイノルズ数には依存しないようであり、図には $Re=1.03 \times 10^5$ の場合の結果を示した。六角形断面は従来より $\eta=0^\circ$ において $\partial C_y / \partial \eta < 0$ となるため空力的に不安定となることが知られており本実験においてもデータのばらつきは大きいものの同様の傾向が示された。しかし、八角形および10角形については迎角の範囲が $-10^\circ < \eta < 10^\circ$ において $C_y(\eta)$ の増加率が減少しているものの $-30^\circ < \eta < 30^\circ$ の範囲内で $C_y(\eta)$ は一様に増加し、空力的に安定であることが示された。

3.2 多角形断面ケーブルの振動応答

各種多角形断面ケーブルについて振動応答を測定するために動的実験を行なった。風に対するあらゆる姿勢について応答特性を調べるために水平偏角を $\alpha=0^\circ, 20^\circ, 40^\circ$ および 45° に変化させ、さらにケーブル模型の釣りかたも面をつる場合と角をつる場合の2通りを考慮した。実験条件をTable 5に示す。模型は木製で表面をペンキ塗装してあり、その外接円、長さおよび重さは円形断面ケーブルと同じである。模型支持方法はFig. 1に示された傾斜円柱ケーブルの場合と同様とし、実験は鉛直方向の1自由度モデルで行なった。またこのとき模型の固有振動数は $f_y=1.17\text{Hz}$ である。

Table 5 Experimental Condition.

Cable model	Wood
Material	Wood
Shape of cross section	Hexagon, Octagon, Decagon
Length	$L = 2.6 \text{ m}$
Diameter	$D = 0.165 \text{ m}$
Weight	$w = 3.9 \text{ kg/m}$
Natural frequency	$f_y = 1.17 \text{ Hz}$
Logarithmic decrement	$\delta = 0.005$
Wind velocity	$W = 0 \sim 25 \text{ m/sec}$
Horizontal angle	$\alpha = 0^\circ \sim 45^\circ$
Vertical angle	$\beta = 45^\circ$
Scruton number	$Sc = 0.64$

Method of hanging (e.g. octagon)

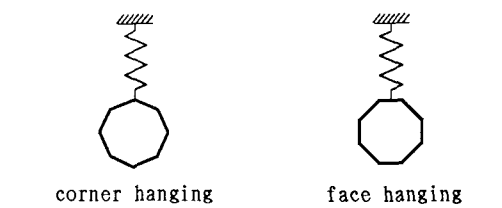
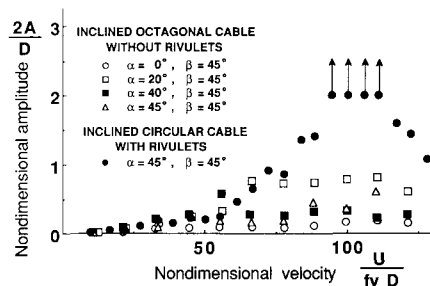
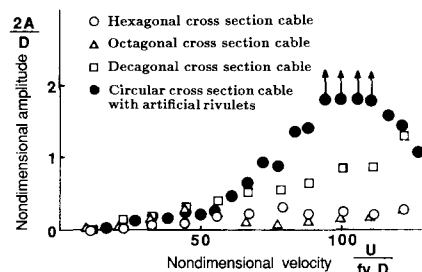


Fig. 9 に傾斜多角形断面ケーブルに関する代表的な実験結果を示す。Fig. 9 a. に角をつった八角形断面ケーブルにおいて、垂直偏角を $\beta=45^\circ$ としたまま水平偏角を $\alpha=0^\circ, 20^\circ, 40^\circ$ および 45° と変化させたときの風速 - 振動振幅関係を示し、Fig. 9 b. に $\alpha=\beta=45^\circ$ のときの6, 8, 10角形の測定結果を示す。さらに人工水路を $\xi=85^\circ$ の位置に取り付けた円形断面ケーブル ($\alpha=\beta=45^\circ$) の測定結果も各図中に示した。これらの図に示されるように多角形断面のケーブルの振動振幅は円形断面の振幅に比べて常に小さいことがわか



a. Velocity and amplitude diagram of octagonal cable on various horizontal angle β . ($\alpha=45^\circ$, corner hanging)



b. Velocity and amplitude diagram of various polygonal cable with the same inclination as circular cable. ($\alpha=45^\circ, \beta=45^\circ$, face hanging)

Fig. 9 Relationship between wind velocity and oscillation amplitude about inclined polygonal cable.

った。さらにFig. 10に今回の実験によって得られた各断面形状における最大振幅の比較を示す。同じ断面形状でも多角形の場合、角を真上にしてつりさげる場合と、面を真上にしてつり下げの場合の2通りについて測定したため、それぞれの場合の最大振幅を示している。この結果より8角形断面ケーブルの振動振幅が常に最小となり、空力的に最も安定であるといえる。

3.3 多角形断面ケーブルにおける降雨の影響

多角形断面ケーブルが降雨中の風によって引き起こされる挙動を調べるために、実際の雨の代わりに模型上端から水道水を供給しながら風速 - 振動振幅関係を測定し、模型表面上を流れ落ちる水路の状態を観察した。模型の支持方法は前述した人工水路付傾斜円柱の動の実験と同

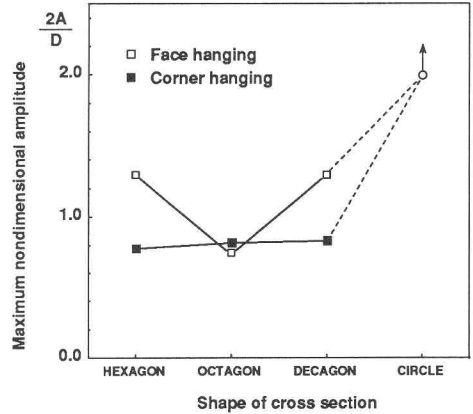
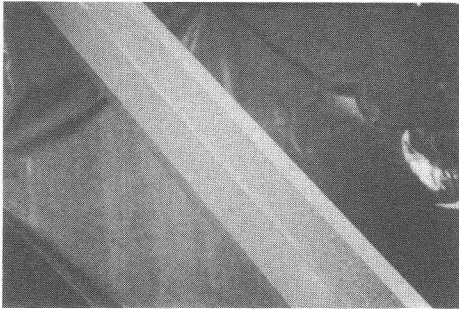
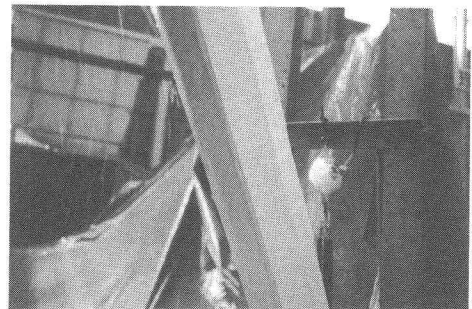


Fig. 10 Comparison among maximum amplitude of each cross sectional cable.



a. Upper surface of inclined octagonal cable. Wind blows from left hand side.



b. Lower surface of inclined octagonal cable. Wind blows from right hand side.

様とし、風に対する傾斜姿勢を $\alpha = \beta = 45^\circ$ とする8角形断面ケーブルを用いて実験を行なった。

Photo. 2 a, b. に模型表面上に形成される水路の状況を示す。観察結果によると、表面上を流れ落ちる水路の数や幅は供給水の量や風速によって変化するものの、各水路は必ず角の背後に形成されていることがわかった。さらにケーブルの下面では各コーナー部から水の飛沫がおりやすいこともわかった。また多角形断面ケーブルの場合、流れの剥離が必ず多角形のコーナー部から生じることは明かであり、角の直後に形成される水路は剥離位置に影響を与えず、水路の形成を原因とする振動の発生はないといえる。

Fig. 11に降雨のある場合と無い場合の8角形断面ケーブルの風速 - 振動振幅関係を示す。図に示されるように模型表面上を流れ落ちる水路にケーブル振動を増加させるような効果は見られず、むしろ制振効果があるかのようすら見える。

Photo 2 Surface of inclined octagonal cable under rainfall condition.

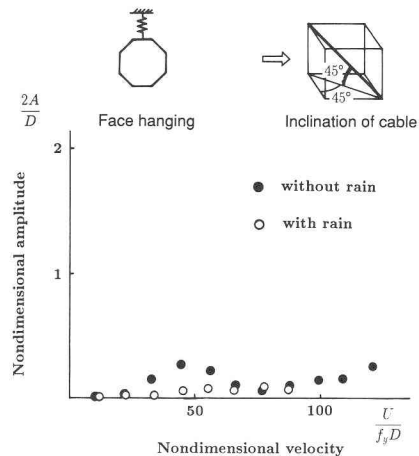


Fig. 11 Effect of raindrop about inclined octagonal cable.

4. まとめ

傾斜ケーブルの空力安定性に関する風洞実験によって得られた結果を以下に示す。

- 1) 剥離点の下流側に人工的な水路を取り付けた傾斜ケーブル模型は激しい振動を生じた。
- 2) 人工的な水路を剥離点の上流側に取り付けると傾斜ケーブルの振動振幅は他の場合に比べて小さくなる。すなわち、剥離点を本来の位置より上流側に強制的に移動させられたケーブルは制振効果を持っているといえる。
- 3) 人工水路付直立円柱に関する空気力係数および流れの可視化により、水路が本来の剥離点上にある場合ケーブルは特に空力的に不安定となることが示された。
- 4) 8角形および10角形断面のケーブルは空力的に安定であることが明かとなった。
- 5) 多角形断面ケーブルの場合、降雨により空力的安定性に影響をおよぼさないことがわかった。
- 6) 多角形断面を持つ傾斜ケーブルが空力的に安定であり、特に8角形断面の場合、6角形や10角形に比べて、より安定であることがわかった。さらに8角形断面の場合形状が単純であるので製作が容易であり、故に8角形断面のケーブルがレインバイブレーションの制振対策として有効であることがわかった。

最後に、本研究を進めるにあたり、風洞実験等につき有意義なご指導をいただいた京都大学工学部 白石成人教授および松本勝助教授に深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 樋上:斜張橋のRain Vibration, 日本風工学会誌, No. 27, 1986
- 2) 山口:Analytical Study on Growth Mechanism of Rain Vibration of Cables , 日本風工学会誌, No. 37, 1988
- 3) 松本ら:Aerodynamic Behavior of Inclined Circular Cylinders-Cable Aerodynamics , 日本風工学会誌, No. 37, 1988
- 4) 松本ら: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, No. 416, 1990
- 5) 宮崎ら:斜張橋ケーブルの耐風制振に関する実験的研究, 土木学会第43回年次学術講演会概要集, 1988
- 6) 宮崎ら:V-ストライプ方式斜張橋ケーブルの制振効果に関する実験的研究, 土木学会第44回年次学術講演会概要集, 1989
- 7) 樋上:斜張橋のレインバイブレーション, 石川島播磨技報, 第28巻, 第6号, 1988
- 8) 西村ら:レインバイブレーションにおける流れの剥離位置について, 日本風工学会誌, Vol. 30, 1989

(1990年10月12日受付)