

ケーブルの空力振動現象に関する研究

松本 勝・白石 成人・白土 博通
金 潤石・辻井 正人・大蔵 健

ON CABLE WIND-INDUCED OSCILLATION

By Masaru MATSUMOTO, Naruhito SHIRAISHI, Hiromichi SHIRATO,
Yunsuk KIM, Masato TSUJII, Ken OHKURA

Synopsis

This study purposes the clarification of cable-aerodynamics of a cable-stayed bridge, which is one of recent majoring subjects in bridge aerodynamics. The response characteristics of cable with various materials, rain conditions, various diameters and various attitudes against wind have been measured in wind tunnel.

As a conclusion, a cable shows an aerodynamic instability more or less when wind blows skewly a cable with certain angle, and the role of rain in "cable rain vibration" is merely to actualize the hidden aerodynamic instability characteristics of cable.

1. ま え が き

今春、開通した本州四国連絡橋を例にとるまでもなく、近年の土木構造物は、社会の要請や、技術力の発達とともに、長大化、軽量化されてきている。中でも橋梁部門においては、斜張橋はその構造的合理性、美しさからますます建設される比重が他形式に比べて大きく、その耐風安定性を確保することも設計上の最重要項目の一つといえる。

特に、斜張橋ケーブルは、一般的に構造減衰が小さく、そのため空力振動が問題となる場合がある。これらの振動現象としては渦励振、Galloping、Wake Induced Oscillation、Rain Vibrationなどが挙げられる。その中で近年、降雨時の風による Rain Vibration が注目されてきており、国内では、名港西大橋¹⁾で最大倍振幅 260 mm、安治川橋梁²⁾では約 400 mm (いずれも架設中)、海外では、Faroe 橋³⁾で約 1000 mm もの大幅振動が報告されている。

名港西大橋に関する風洞実験結果によれば、この現象は降雨時にのみ発生し、塔の風下側に位置するケーブルに限定されており、風向が橋梁直角方向と一致した場合には発生しないと報告されている。さらにケーブル表面には上下面に雨水が流れる水路が2本形成され、特に上面側の水路が振動発生の主要因であるとされている。¹⁾ 安治川橋梁に関しても、上面水路の重要性が指摘されており、雨量の影響によって振動特性が変化することも併せて指摘されている。²⁾ この Rain Vibration と類似点が見いだされる現象としては、通信線と吊橋を1本化した8字形架空送電線⁴⁾ や着氷水の状態の長径間送電線⁵⁾ などにおける振動が問題となっている。

以上述べた Rain Vibration をはじめとする種々のタイプのケーブル振動現象の発生機構については依然未解明の点が多く残されており、その解明と有効な制振対策の検討が早急に望まれている。本研究では、このような点を踏まえ、ケーブルの Rain Vibration 現象を主な対象として、風洞実験を実施し、ケーブル

の姿勢、表面粗度による応答への変化、非定常圧力特性、流れの可視化などを調べ、振動応答特性と振動発生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効果についても検討を加えた。

2. 実験概要

前章に挙げた Rain Vibration 現象の発生に影響を及ぼす要因としては、自然的要因（風速、雨量、風向）と工学的要因（ケーブルの表面粗度、径、姿勢、質量、固有振動数、構造減衰率）に大別できると考えられる。本実験では傾斜したケーブル模型において、これらの諸要因を考慮して、諸々の実験を行うとともに、ケーブルにらせん状のチューブや矩形突起を付設する制振対策を検討する。また、追加実験として、さらに空力的に敏感な模型を水平支持して、ケーブル自身の持つ空力特性に関する基礎的な実験を行った。

各実験の概説の前に、使用風洞、傾斜支持ケーブル模型とその支持方法および降雨装置について示す。

風洞 今回のように降雨時の状況を風洞内で再現する実験においては、風洞の損傷及び雨の後処理などを考慮すると、吹き出し式風洞を使用せざるを得ない。また、ケーブル模型の大きさ、重さなども通常の風洞実験よりも大規模であるため、風洞を改造する必要がある。使用した風洞は京都大学工学部土木教室に設置された吹き出し式エッフェル型風洞（風速 2~20 m/s の範囲で連続的に変化させることができる。）で、模型装置のために測定部分を切り離すことにした。切りはずされた測定部分での風速のばらつき、流れの乱れが予想されるが、今回の実験についてはその問題についての補正は行っていない。

模型（傾斜支持） 実験に用いたケーブルの模型は Rain Vibration 現象が観測された斜張橋のケーブルがほとんどポリエチレン管（以下 PE 管と略す）で被覆されており、今回の東神戸大橋も PE 管を採用する予定である点に注意し、長さ、1600 mm、直径 160 mm、重さ 15 kg の PE 管模型を主として使用した。ただし、この模型は実橋の約 1/8 程度に軽量化されており、空力的な反応が顕著なものとなっている。この PE 管には中央部表面に 16 個の圧力孔が 22.5° 間隔で均等に配置されている。また、この他に、直径を変えた 800 mm ϕ の PE 管や、表面粗度を変化させるためのメタクリル酸樹脂管やアルミニウム管（ $\phi=140$ mm）などを使用した。（Fig. 1 参照）なお、各模型の固有振動数、対数減衰率を Table 1 に示す。

模型の傾斜支持方法 模型の支持方法はばね支持を採用した。Fig. 2 で示すように模型の端部を 2 本のコイルばねで支持し、コイルばねはコの字の鋼材によって鉛直に固定されている。この際、模型の固有振動数・構造減衰は上のばねによって左右される。下のばねは、上のばねに比べてばね係数が非常に小さく、変位検出のためのひずみゲージを設置するためのものと言っても差しつかえない。本研究では模型の運動を鉛直方向だけの 1 自由度すなわち鉛直方向の直角面内の運動を拘束するために、模型の片端部に 4 本ずつ計 8 本のピアノ線を、拘束される方向に張った。ねじれ運動に対しては特定の拘束は施しておらず、ばねの弾性力とピアノ線の引張力が釣り合える範囲でのねじれ運動は許されるものと思われる。この状態での風に対する模型の姿勢は、斜張橋塔部に対して風下側に位置する場合を Wind Direction 1、風上側に位置する場合を Wind Direction 2 とする。（Fig. 3 参照）

降雨装置 雨は園芸用のノズルを用いて再現することに

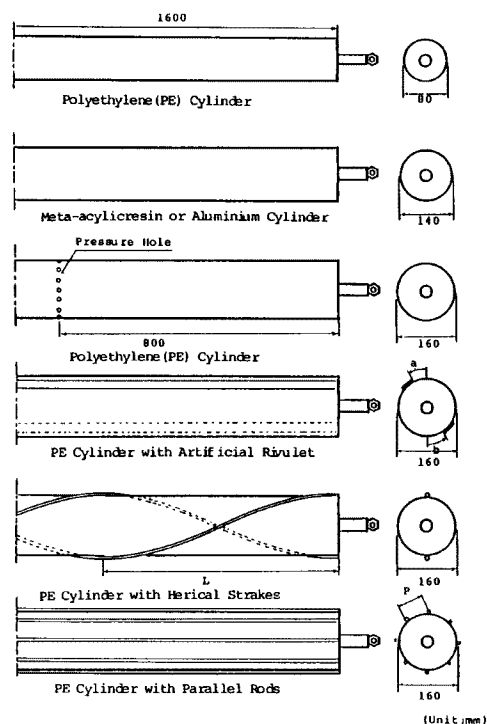
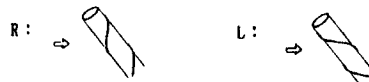


Fig. 1. Cable Models.

Table. 1. Properties of Inclined Cable Modes.

Models			f(Hz)	Damping Parameter		
				δ_{10}	δ_{20}	δ_{30}
160mm ϕ PE Cylinder	V.D.1		0.96	0.0032	0.0037	
	V.D.2		1.01	0.0028	0.0031	0.0029
80mm ϕ PE Cylinder	V.D.1		0.98	0.0057	0.0048	0.0041
	V.D.2					
140mm ϕ Meta-acrylicresin Cylinder	V.D.1		0.94	0.0021	0.0023	0.0025
	V.D.2		0.97		0.0025	0.0028
140mm ϕ Aluminium Cylinder	V.D.1		0.98	0.0018	0.0016	0.0017
	V.D.2		0.99	0.0018	0.0030	0.0030
160mm ϕ PE Cylinder Lapped By Vinyl Sheet	V.D.1		0.96	0.0029	0.0034	0.0059
180mm ϕ PE Cylinder Lapped By Mesh	V.D.1		0.93	0.0020	0.0038	0.0027
PE Cylinder With Helical Strakes ($\phi=5mm$)	1 Round $\times$ 8 Strakes	R	0.97	0.0023	0.0025	0.0033
		L	0.96	0.0029	0.0034	0.0059
	1 Round $\times$ 4 Strakes	R	0.94	0.0018	0.0034	0.0029
		L	0.94	0.0021	0.0030	0.0036
	1 Round $\times$ 2 Strakes	R	0.94	0.0018	0.0034	0.0029
		L	0.94	0.0021	0.0030	0.0036
	3 Rounds $\times$ 1 Strake	R	0.96	0.0024	0.0035	0.0043
		L	0.95	0.0022	0.0026	0.0039
PE Cylinder With Helical Strakes ($\phi=10mm$)	3 Rounds $\times$ 1 Strake	R	0.97	0.0030	0.0039	0.0034
		L	0.96	0.0021	0.0030	0.0040
Parallel Rods (5 $\times$ 11mm)	V.D.1	PE Cylinder (16 Rods)	0.96	0.0044	0.0047	0.0042
		PE Cylinder (12 Rods)	0.98		0.0033	0.0028
		Meta-acrylicresin Cylinder (11 Rods)	0.93	0.0023	0.0020	0.0022
		Meta-acrylicresin Cylinder (5 Rods)	0.94		0.0018	0.0018
	V.D.2	PE Cylinder (12 Rods)	0.94	0.0018	0.0020	0.0031
		PE Cylinder (11 Rods)	0.94	0.0038	0.0031	0.0042
160mm PE Cylinder + Mass	V.D.2	+ 5 kg	0.89		0.0049	0.0037
		+ 10 kg	1.23	0.0071	0.0115	0.0127



した。ノズル1個の許容雨量は0.6 l/minであり、ノズルから噴出される霧状の雨は約100°の角度をもって模型に当たる。計7個のノズルから噴出される雨量は、0~4.2 l/minの範囲内で変化させることが可能であり、その調節は水道の蛇口からホースでつながれた流量計（東京流機工業製品、許容流量0~10 l/min）のバルブによって行った。雨量1.2 l/minの場合は4個ノズル、2.0 l/minの場合には7個ノズルを使用し、各ノズルの向きは、ケーブル表面に水路が形成され易くするために3次元的に角度をつけた。なお、雨量を1.2 l/min、2.0 l/minに設定した理由は3.1の考察で述べる。

以下に各実験の測定方法、およびデータの処理方法について概説する。

傾斜模型風速応答振幅測定実験 前述の模型の支持方法で紹介したように、ケーブル模型を鉛直方向の1自由度に支持してV-A実験を行った。変位の検出はばね（コイルスプリング）基部に挿入されたコの字型

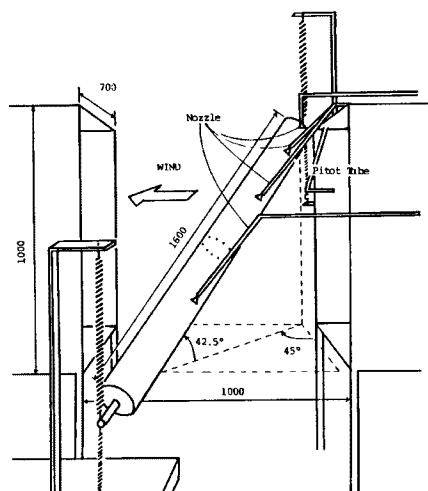


Fig. 2. Experimental Apparatus. (Inclined Cable)

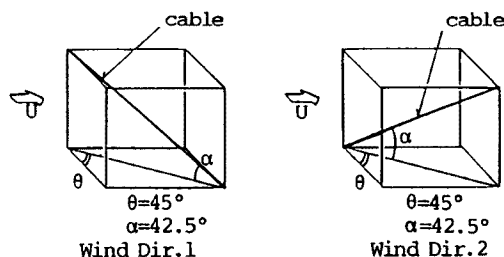


Fig. 3. Inclined Cable Attitude.

ピックアップ部にあるひずみゲージにより電氣的に検出し、ホイストンブリッジ（新興通信事業部）を通じて動歪み計（新興通信事業部製，PSA-602 B）を介し，ローパスフィルター（NE 回路設計ブロック K. K.，E 3201）によって 5 Hz でカットし，リニアコーダー（グラフテック，WR 3101-6 H）に記録した。風速は，NPL 型ピトー管により総圧，静圧を検出し，その差圧をデジタルマノメーター（OKANO WORKS LTD，DP-20 A）で読み取り，実風速に換算した。ピトー管の位置は，風洞の天井下 20 cm，導流管から 30 cm の位置に固定した。

非定常圧力測定実験 ケーブル模型（160 mmφ PE 管）の中央部に設置した圧力孔よりアルミ製の導圧管を用いて模型の上端部まで圧力を導き総圧とし，ビニール製の導圧管（長さ約 150 cm）により差圧計に入力，差圧計の他方の入力ピトー管静圧として両者の差圧でプレッシャーマイク（豊田工機，DD 101 K）により電気信号とし，直流増幅器（豊田工機，AA 2300）を介してデータレコーダ（TEAC，R-280 々）に入力した。このアナログテープに記録されたデータをローパスフィルター（前出）に 20 Hz で通し，AD 変換器（TEAC，DR-2000 β）によってデジタルテープに変換入力し，これを京都大学大型計算機（FACOM M 380/382）に処理させて，圧力と変位のリサージュを求めた。またこのリサージュを用いて振動軌道上の各ポジション（1 周期を 12 等分）での非定常圧力分布についても検討した。

平均圧力測定実験 ケーブル模型表面の平均圧力測定は，非定常圧力測定と同一の方法で行った。データレコーダ（前出）には入力せず，圧力孔・プレッシャーマイク（前出）・直流増幅器（前出）の順で圧力を導き，ローパスフィルター（前出）に 5 Hz で通し，マルチコーダー（渡辺測器制作所 K. K.，MC 6612）に出力して読み取った。

変動圧力測定 変動圧力はデータレコーダ（前出）に記録されたデータを再生させ，ローパスフィルター（前出）で 1 Hz カットし，リニアコーダー（前出）に出力して読み取った。同時に変位に対する位相差も検出した。

流れの可視化 流れの可視化はドライアイスを用いて行った。ドライアイスをガスコンロで熱し，ゴムホースで模型の上流側まで導き，模型中央部分の断面まわりの気流を可視化した。振動が発生する風速域では，気流の流れが速いため，流れの形状の判断が困難であったので，今回の可視化は 2~4 m/s の風速範囲で人工的に振動を加えて行った。流れの様子はカメラ及びビデオテープに録画し，写真及びビデオテープを再生することによって観察した。

制振対策 ケーブル表面の水路形成を妨げて断面回りの空気の流れを変化させることにより，Rain Vibration の制振効果を期待するために行った実験である。ケーブルにらせん状のチューブ（ビニール製，φ=5, 10 mmφ）を巻き付ける方法およびケーブル軸に平行な数本の矩形角材（厚さ 5 mm，幅 11 mm）を付設する方法の 2 種類に大別できる。今回，実験した模型を Table 1 に示す。表中の R は模型上端から下端に向かって右方向に巻きつけたことを意味し，L は左巻きである。

水平支持模型型風速応答振幅測定実験 以上の実験とはやや異なり、Rain Vibration に固執せず、ケーブル本来の持つ空力特性について基礎的な検討を行うための実験である。そのため、すべて無雨状態で実施した。また、160 mm ϕ PE 管よりもさらに空力的に敏感な 50 mm ϕ アルミニウム 模型 ($f = 2.0$ Hz, mass = 0.062 kg s^2/m^2) を採用した。水平面内で模型の角度を変え、風向偏角 β を $0^\circ \sim 45^\circ$ の範囲で変化させることによるケーブルの鉛直方向の応答振幅を測定した。(Fig. 4 参照) 使用風洞および測定方法は先の傾斜支持の場合とはほぼ同様であるが、今回は風洞の測定部は切り離されておらず、側壁に模型運動に必要な最小限だけの穴が開けられている。

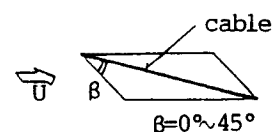


Fig. 4. Horizontal Cable Attitude.

3. 結果および考察

3.1 雨量の検討

Rain Vibration の特性を調べる前に今回、ノズルによる給水量と実際の雨量との関係について検討した。斜張橋ケーブルの長さ (L) を 100 m, 直径 (D) を 160 mm とし、1 時間当り 10 mm の雨量 (r) が降ると仮定すれば、このケーブル中央部にケーブル上端から損失することなく流れてくる供給雨量 (w) は次式により求められる。

$$\begin{aligned} w &= D \cdot L / 2 \cdot r \\ &= 0.16 \times 50 \times 0.01 = 0.08 (\text{m}^3/\text{hr}) = 1.3 (\ell/\text{min}) \dots \dots \dots (1) \end{aligned}$$

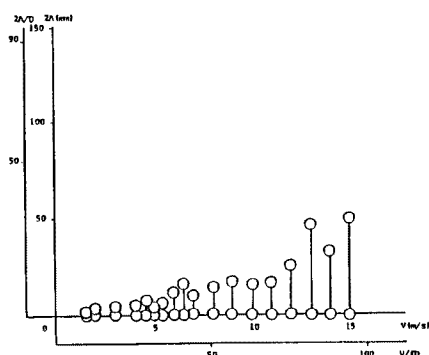
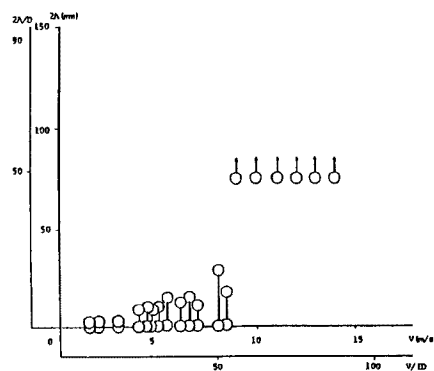
次にケーブルの 1.6 m (模型長) 当りに直接降る降雨量は、

$$\begin{aligned} R &= D \cdot 1.6 \cdot r \\ &= 0.16 \times 1.6 \times 0.01 = 0.0026 (\text{m}^3/\text{hr}) = 0.043 (\ell/\text{min}) \dots \dots \dots (2) \end{aligned}$$

よって、今回実験したケーブル模型が、実橋のケーブル中央部であると考えれば、給水ノズルで与えた 1.2 ℓ/min は、補給水量 w と最大降雨量 R の和、すなわち、1.343 ℓ/min に近い値であり、 w の若干の損失を考慮すると一時間当り 10 mm の雨量に相当する。また、 R の w に対する割合は約 3 % と小さく、ケーブル表面を流れる水路のほとんどが上端部から流れ落ちる雨水であると考えられる。

3.2 ケーブルの振動応答特性 (160 mm ϕ PE 管)

160 mm ϕ PE 管の Wind Direction 1 におけるケーブルの振動応答特性を無雨時は Fig. 5, 1.2 ℓ/min の降雨時は Fig. 6 に示す。無雨状態では定常振幅振動は発生しておらず、13 m/s 以上の高風速域で応答振幅が

Fig. 5. Velocity-Amplitude Diagram.
(Wind Dir. 1, 160 mm ϕ PE
Cylinder, without rain)Fig. 6. Velocity-Amplitude Diagram.
(Wind Dir. 1, 160 mm ϕ PE
Cylinder, with rain, 1.2 ℓ/min)

ビート状のいわゆる Buffeting 現象が現れる程度である。しかし降雨時（他は同条件）においては風速 8 m/s 以上で発散型振動が発生している。これは明らかに風と雨によって引き起こされる励振現象すなわち Rain Vibration であると言える。

振動中のケーブル表面を観察すると、上下面ともにケーブル軸に沿った水路が形成されており、上面側の水路の方が下面側のそれよりもやや幅が広いものと思われる。(Fig. 7 参照)

また給水ノズルの位置が少し変化した降雨状態の結果 (Fig. 8) では、限定型の振動が発生しており、12 m/s 以上の高風速域では安定化している。これより、Rain Vibration 現象は様々な諸要因が絡んで成立するきわめて微妙な現象であると考えられる。さらに雨量が 2.0 l/min (Fig. 9) になると、限定型振動と発散型振動と思われる 2つの振動状態の様相を呈しており、発振風速は 1.2 l/min の場合 (Fig. 5) よりもやや低くなっている。

Wind Direction 2 の応答振幅を Fig. 10 (無雨), および Fig. 11 (雨量 1.2 l/min) に示す。ここでは無雨状態においても大振幅振動が発生し、降雨によって、発振風速が低下している。降雨時の水路は上面側には現れなく、表面の水滴はほとんど下面側に流れ込んでいた。これらの特徴により、Wind Direction 2 においては、単に Rain Vibration であるとは判断しがたい。

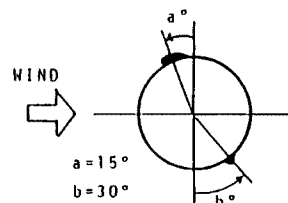


Fig. 7. Rivulets on Cable Surface.

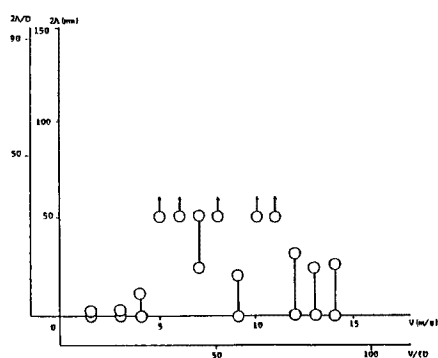


Fig. 8. Velocity-Amplitude Diagram. (Wind Dir. 1, 160 mm ϕ PE Cylinder, with rain, 1.2 l/min, different Response)

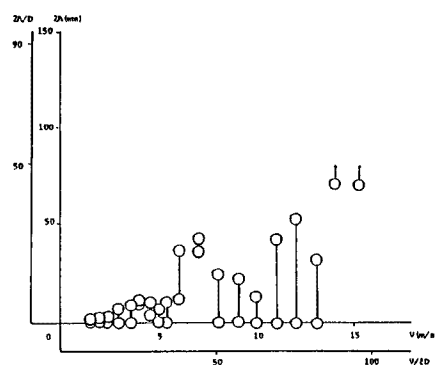


Fig. 9. Velocity-Amplitude Diagram. (Wind Dir. 1, 160 mm ϕ PE Cylinder, with rain, 2.0 l/min)

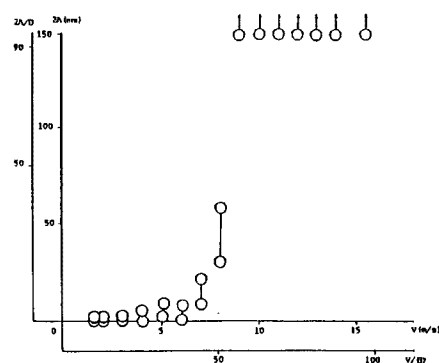


Fig. 10. Velocity-Amplitude Diagram. (Wind Dir. 2, 160 mm ϕ PE Cylinder, without rain)

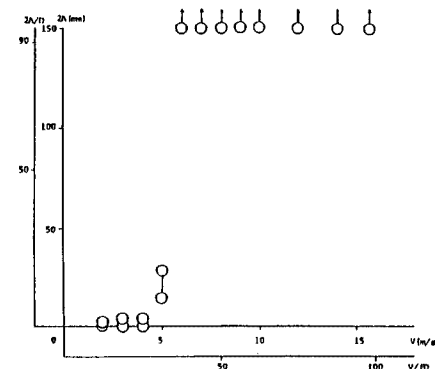


Fig. 11. Velocity-Amplitude Diagram. (Wind Dir. 2, 160 mm ϕ PE Cylinder, with rain, 1.2 l/min)

3.3 表面粗度の影響

メタアクリル酸樹脂管、アルミニウム管、ビニール巻PE管、メッシュ巻PE管の振動応答を調べた結果、Wind Dir. 1において、無雨時では全模型とも振動は発生せず、1.2 l/minの降雨時（Fig. 12～Fig. 15）では全て限定振動が比較的低風速で発生した。水路の状態は、メタアクリル酸樹脂管、アルミニウム管、ビニール巻PE管の順に表面が滑らかになっているため、上面水路はこの順に規模が小さくなり、最も滑らかなビニール巻PE管では上面側の水路形式は非常に細かく、表面に付着した水滴状の雨が重力によってケーブル下端に向かって放射状に流れ落ちる。また、表面から吹き飛ばされる雨量も多く、下面側にはPE管よりはやや少ない程度の水路が形成される。2 mm マスメッシュ巻PE管では、メッシュと模型の隙間の中に上下面ともかなり小規模な水路が形成されるように見える。

以上の事を考慮すると、上面の水路の規模が小さいほど現象は消極的となり、発振風速も下がる傾向があると考えられる。しかし、振動現象の有無だけを対象とすれば、表面粗度の Rain Vibration に与える影響は小さいものと判断できる。

また、Wind Dir. 2においては、メタアクリル酸樹脂管、アルミニウム管ともに雨の有無に関わらず、裸のPE管と同様な振動が発生した。ここにおいても表面粗度と振動特性との関連度は薄いものと考えられる。

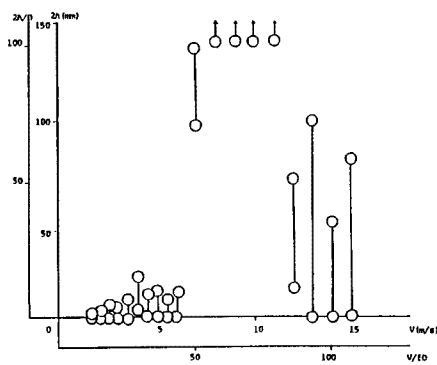


Fig. 12. Velocity-Amplitude Diagram.
(Wind Dir. 1, 140 mm ϕ Meta-acrylic resin Cylinder, with rain, 1.2 l/min)

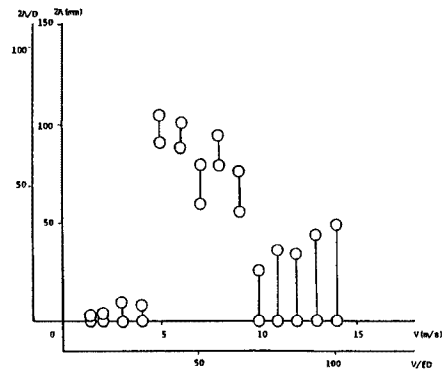


Fig. 13. Velocity-Amplitude Diagram.
(Wind Dir. 1, 140 mm ϕ Aluminium Cylinder, with rain, 1.2 l/min)

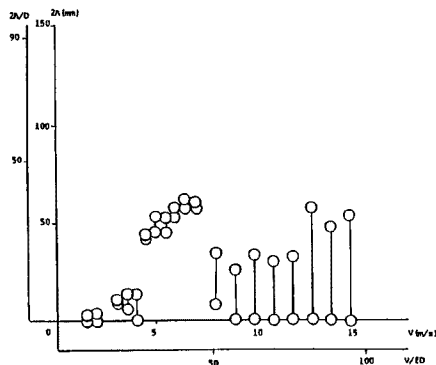


Fig. 14. Velocity-Amplitude Diagram.
(Wind Dir. 1, 160 mm ϕ PE Cylinder lapped by Vinyl Sheet, with rain, 1.2 l/min)

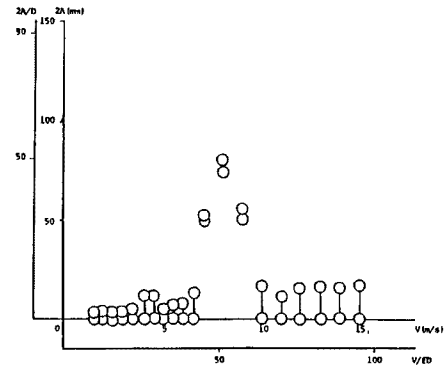


Fig. 15. Velocity-Amplitude Diagram.
(Wind Dir. 1, 160 mm ϕ PE Cylinder lapped by Mesh, with rain, 1.2 l/min)

3.4 径の影響

Fig. 16 に従来より径が半分になった 80 mm ϕ PE 管の Wind Dir. 1 における雨量 1.2 l/min での応答振幅図を示す。ここでは 7~12 m/s の風速域で振動が発生しており、上下水路同規模の水路が生成された。ケーブルの径が小さくなったため、模型が被る水量は半減するが、両方の PE 管の結果 (Fig. 6, Fig. 16) と雨量が 2.0 l/min に増えた状態 (Fig. 9) とを 3 者比較すると、Rain Vibration と雨量は、比例的関係を持たず、無次元風速もこの振動現象を特徴づける因子であるとは考えられない。

3.5 風速-対数減衰率変化特性

Fig. 17, Fig. 18, Fig. 19 に各々 Wind Dir. 1 における無雨時、降雨時 (1.2 l/min), Wind Dir. 2 における無雨時の風速-対数減衰率変化図を示す。

Wind Dir. 1 ではやはり降雨時のみ負の減衰が現れ、Rain Vibration 現象の特性を示している。ただし両者ともに風速 10 m/s 付近で大きな負の勾配が記録されており、この付近で有効的な水路が形成されやすいだけではなく、ケーブル模型自体が持つ特性が関係していると思われる。

Wind Dir. 2 では、無雨時において風速 10 m/s から急激な負減衰が現れ、高風速域でその傾向がさらに助長されることから Wind Dir. 1 の Rain Vibration 現象とは性質がやや異なることを示唆しているようである。

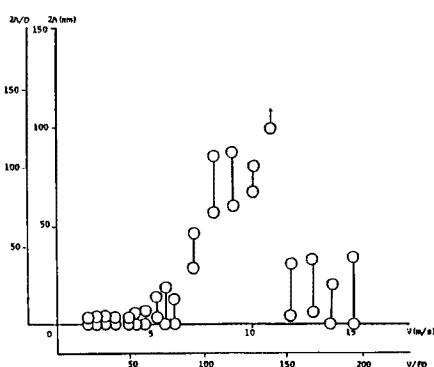


Fig. 16. Velocity-Amplitude Diagram. (Wind Dir. 1, 80 mm ϕ PE Cylinder, with rain, 1.2 l/min)

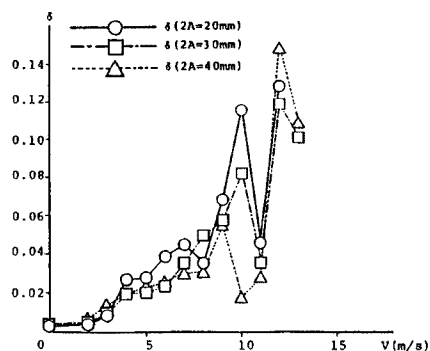


Fig. 17. Velocity-Damping Parameter Diagram. (Wind Dir. 1, 160 mm ϕ PE Cylinder, without rain)

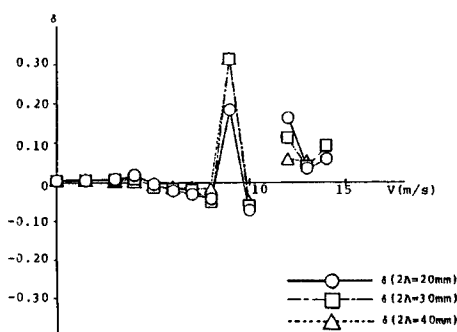


Fig. 18. Velocity-Damping Parameter Diagram. (Wind Dir. 1, 160 mm ϕ PE Cylinder, with rain, 1.2 l/min)

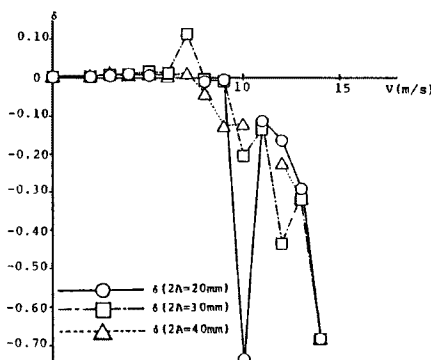


Fig. 19. Velocity-Damping Parameter Diagram. (Wind Dir. 2, 160 mm ϕ PE Cylinder, without rain)

3.6 mass 効果

mass 効果については Wind Dir. 2 についてのみ実験を行った。160 mm ϕ PE 管 (15 kg) に 5 kg または 15 kg 鋼棒材を模型内に内蔵させることによってケーブル挙動の変化を検討した。一例として、15 kg 増し模型の無雨時の応答振幅を Fig. 20 に示す。裸の PE 管 (Fig. 6) と比較すると、15 kg 増し模型でも振動発生はみられ、無次元発振風速が若干低くなっているものの、その後の振幅の発達度合は鈍くなっている。この振幅発達の特徴は 5 kg 増し模型の場合にもわずかではあるが、検出することが出来た。これは mass 効果による非定常空気力係数の変化が起因しているものと考えられる。

3.7 振動発生機構 (圧力特性と断面回りの空気の流れ)

Wind Dir. 1 Wind Dir. 1 における 160 mm ϕ PE 管の断面回り 16 ポイントの平均圧力分布を C_p 値として Fig. 21 に、これに上下面の人工水路を付着した場合の平均圧力を Fig. 22 に示す。両者とも Stagnation Point が模型表面の軸直角水平線上流側点から下面側約 30° 付近に位置して

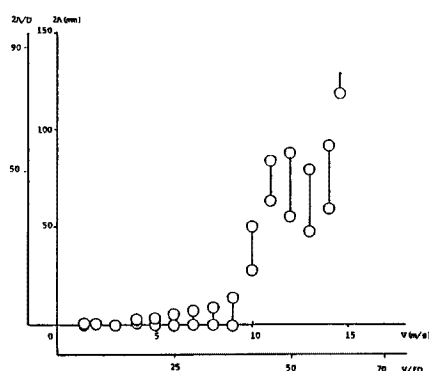


Fig. 20. Velocity-Amplitude Diagram. (Wind Dir. 2, 160 mm ϕ PE Cylinder + 15 kg, without rain)

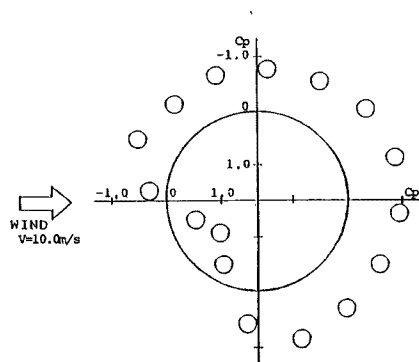


Fig. 21. Average Pressure Distribution around Cylinder. (Wind Dir. 1, 160 mm ϕ PE Cylinder, without rain)

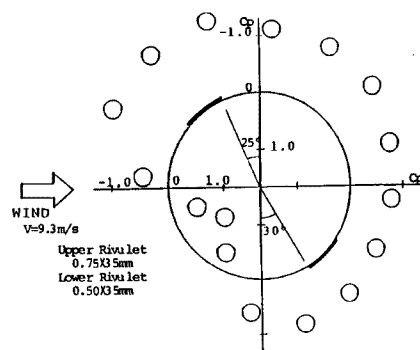


Fig. 22. Average Pressure Distribution around Cylinder. (Wind Dir. 1, 160 mm ϕ PE Cylinder, with Artificial Rivulets)

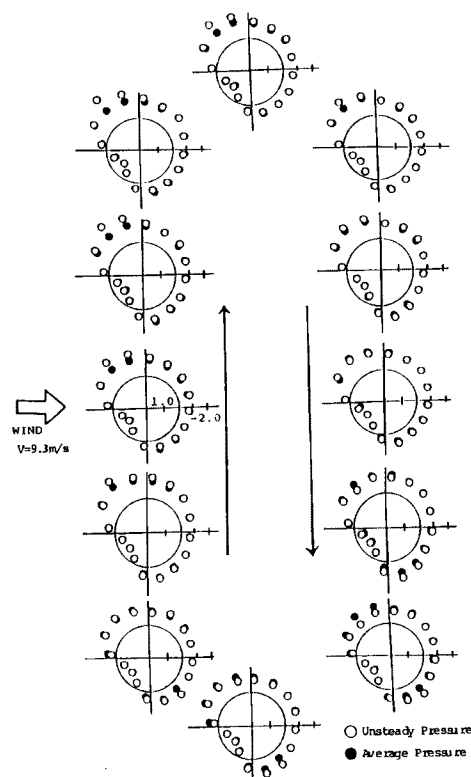


Fig. 23. Unsteady Pressure Distribution around Cylinder. (Wind Dir. 1, 160 mm ϕ PE Cylinder, with Artificial Rivulets)

いる。上面水路付近で特に負圧が大きくなっている。

次に、人工水路付き PE 管の振動中における 1 周期軌道上 12 ポジションの非定常圧力分布を Fig. 23 に示す。○点が非定常圧力、●点が平均圧力である。これによると、ケーブルが上向きに移動するとき、上面水

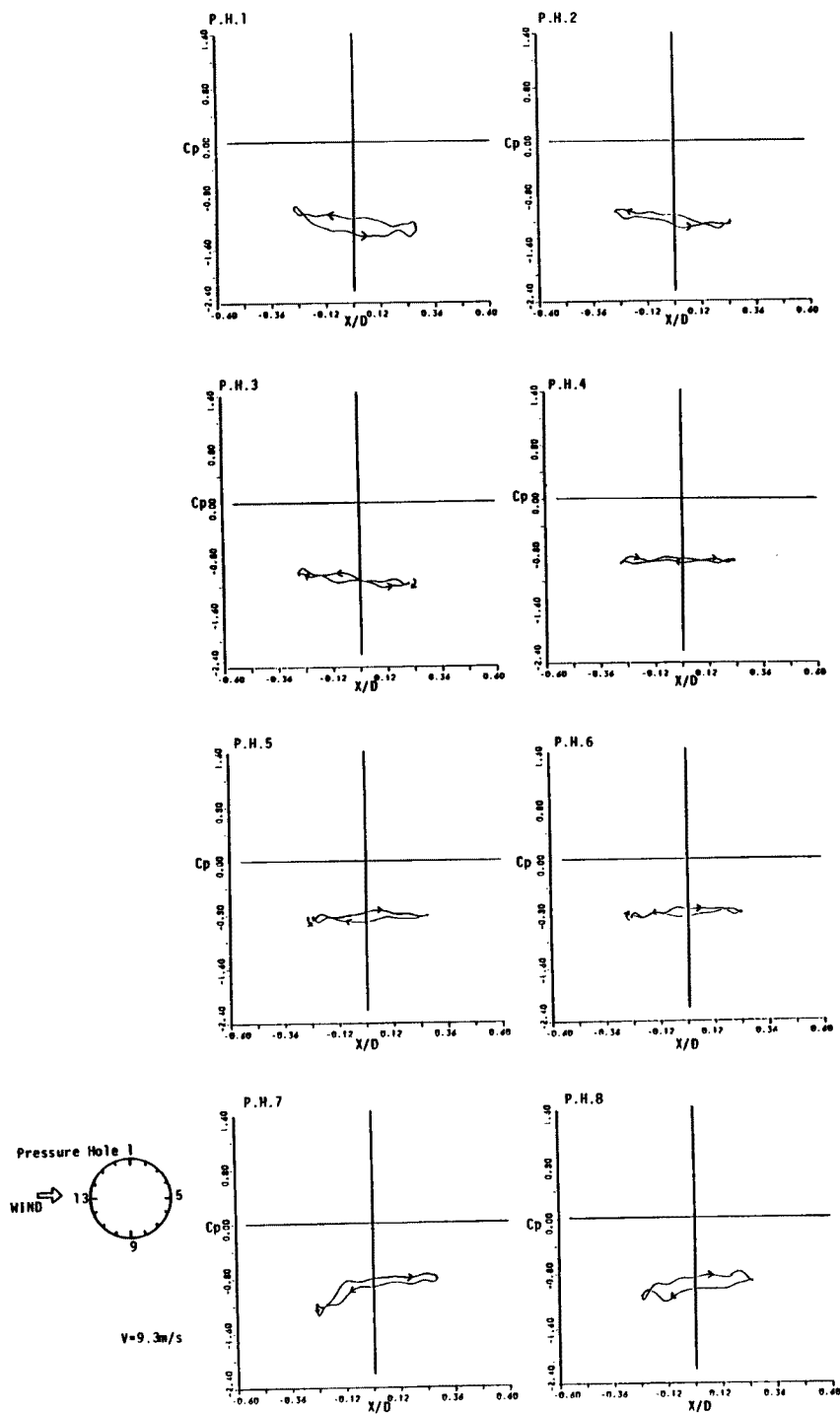


Fig. 24-1. Lissajous of Unsteady Pressure-Displacement of Cylinder. (Wind Dir. 1, 160 mm ϕ PE Cylinder, with Artificial Rivulets)

路付近で負圧が大きく発達しており、逆に下向きに移動するときは上下両面の水路付近の圧力が励振力として働いていると判断できる。

この非定常圧力係数 C_p を振動 1 周期当りのリサージュとして各圧力孔について描いたものが、Fig.

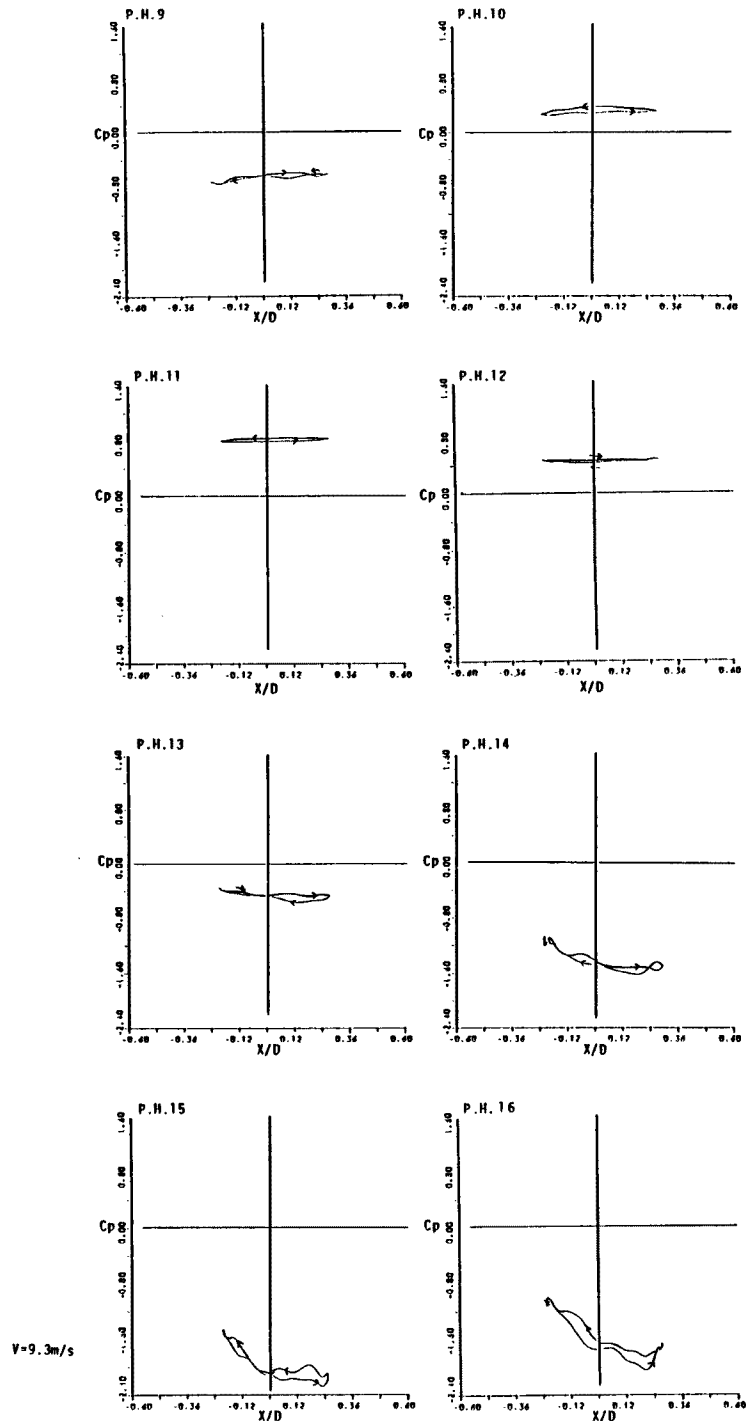


Fig. 24-2. Lissajous of Unsteady Pressure-Displacement of Cylinder. (Wind Dir. 1, 160 mm ϕ PE Cylinder, with Artificial Rivulets)

24-1 および Fig. 24-2 である。横軸は模型の無次元化された変位で、上向き変位が正である。リサージュ図においても上面水路近辺の圧力孔 (P. H. 15, 16) では、ケーブルが上向きに変位するとき、大きく負圧側に落込み、ケーブルが原点に向かって戻るときには圧力回復がみられる。この左回りのループ面積分が励振エネルギーとして作用しているものと思われる。また、Stagnation Point 近辺 (P. H. 7, 8) では正圧領域で、円柱後背域 (P. H. 2~6) では負圧領域では、ほぼ水平のリサージュ曲線を描き、振動機構に関与していない。下面水路付近 (P. H. 7, 8) では、ケーブルが下向きに変位するときに上面水路ほど顕著ではないが負圧が発達し、この付近の気流も振動発生要因の一助となっていることを示している。

以上の上下面水路の Rain Vibration 発生機構に対する役割をさらに明確に判断するため、気流がケーブル模型に果たす単位面積当りの無次元仕事量 W_r を振動変位が最上点に達したときの正圧のピークの位相差 ϕ を用いて以下のように算出した。

振動変位 η_0 をケーブルの径で無次元化すると、

$$\eta_r(t) = (\eta_0/D) \cos 2\pi f t \dots\dots\dots (3)$$

ケーブル表面の各圧力孔での非定常圧力は、動圧 $(1/2) \rho v^2$ によって無次元化され、平均圧力項と変動圧力項の和で次のように表される。

$$C_p(t) = \overline{C_p} + \widetilde{C_p} \cos(2\pi f t + \phi) \dots\dots\dots (4)$$

各点での圧力が振動 1 周期中にケーブルになす単位面積当りの無次元仕事量は、

$$W_r = \oint_0^T \widetilde{C_p} \cos(2\pi f t + \phi) \eta_r dt \dots\dots\dots (5)$$

$$= \pi \widetilde{C_p} (\eta_0/D) \sin \phi \dots\dots\dots (6)$$

この計算によって得られた結果を Fig. 25 に示す。なお、この仕事量はケーブル振動方向成分のみに補正されている。この図をみると、圧力のケーブルになす仕事は上下面ともに正となっており、水路付近に正の仕事のピークが集中している。仕事の正負の面積を差し引きすると、上面側がやや大きくなっており、この付近の気流が Rain Vibration 現象発生に有効に働いており、リサージュ曲線から得られた結果とよく一致する。

Wind Dir. 2 今回のように風に対して傾斜したケーブルでは流れの剥離の一樣性が悪化していることが予想され、圧力測定の結果から Stagnation Point がずれていることなどを考慮し、Wind Dir. 2 において無雨状態振動中の流れの可視化実験を行った。ビデオ観察によって流れの形状について検討した。

その結果、気流は Stagnation Point の位置するケーブル表面最上流点のやや上面側付近で上下面方向に 2 分される。ケーブルの上面側を通る流れは、そのまま一様気流方向に従ってほぼ直線的に流れるのに対して、下面側を通る流れは、一旦、ケーブル軸に沿って上昇し、次に軸に直角に大きく回り込みながら乱れをつくり、やがて一様気流に合流している。また、整った渦形成はみられなかった。このような複雑な流れが無雨時においても発生する振動機構に関係しているものと思われる。

また、3.2 でも触れたように、振動実験において給水ノズルがケーブル模型に非常に接近していたため、それによる気流の影響がケーブル挙動に関与している可能性は十分考えられる。この影響に関する検討を今後進めていく方針である。

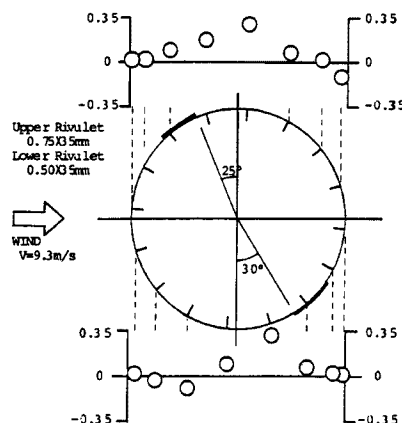


Fig. 25. Reduced Work Load at each Pressure Hole per unit Area for a Periodic Time. (Wind Dir. 1, 160 mm ϕ PE Cylinder, with Artificial Rivulets)

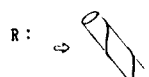
3.8 制 振 対 策

らせん状のチューブと、平行矩形突起（厚さ 5 mm×幅 11 mm）をケーブル制振効果を **Table 2** に一括して示す。表中の×印は、振動が発生しなかったことを意味し、○印は限定型振動、◎印は発散型振動が発生したことを示す。

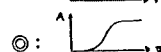
らせん状チューブについて らせん状のチューブは今回、Wind Dir. 1 でのみ実験した。表中の R は模型の上端から下端に向かって右方向に巻降ろした場合で、L は左巻を意味する。また回転数はケーブル模型の長さ 1600 mm を基準としており、この回転数とチューブの本数および巻き方によってチューブの間隔および、風向きやケーブル軸に対する傾斜角が異なる。よって、らせん状のチューブによる制振性能は、チューブの径、本数、回転数、巻く方向の 4 パラメータが重要因子であることが考えられる。表の結果より 1 回転×8 本の場合だけが右巻左巻ともに振動を停止させることが分かった。また、5 mmφ チューブの 1 回転×

Table 2. Aerodynamic Stabilization of Cables with some Attachment.

Models			Without Rain	With Rain(1.2l/mm)
160mmφ PE Cylinder With Helical Strakes (φ=5mm)	1 Round×8 Strakes (200mm Pitch)	R	×	×
		L	×	×
	1 Round×4 Strakes (400mm Pitch)	R	×	◎ (15)
		L	◎ (13)	○ (10)
	1 Round×2 Strakes (800mm Pitch)	R	×	○ (6)
		L	×	○ (9)
	3 Rounds×2 Strakes (270mm Pitch)	R	◎ (15)	○ (13)
		L	×	×
160mmφ PE Cylinder With Helical Strakes (φ=10mm)	3 Rounds×1 Strake (530mm Pitch)	R	○ (14)	2l/min. ○ (6)
		L		2l/min. ○ (9)
Parallel Rods (5×11mm)	Wind Dir. 1	PE Cylinder (16 Rods)	×	○ (4)
		PE Cylinder (12 Rods)	×	×
		Meta-acylicresin Cylinder(11 Rods)	×	×
		Meta-acylicresin Cylinder(5 Rods)	×	○ (7)
	Wind Dir. 2	PE Cylinder (12 Rods)	×	
		PE Cylinder (11 Rods)	×	×



× : No Vibration



(): Onset Velocity(m/sec)

4本左巻と3回転×2本右巻および10mmφチューブの3回転×1本右巻の3ケースにおいては、無雨時においても振動発生がみられ、かえって耐風安定性を低下させる結果となった。このようにらせん状のチューブをケーブルに巻き付ける方法は、巻き型によって様々な振動挙動を示し、採用下に向けては、慎重な設置を要する。また、今回は全ケースともWind Dir. 1でのみ実験したので、今後Wind Dir. 2を含んだ姿勢による検討を進めていく必要がある。

平行矩形突起について ケーブル軸に平行な矩形突起 (5×11 mm) についてはその本数によって、突起間の間隔が変わるため、円柱断面に適当な粗度をつけるのと同様になると考えられる。円柱断面に適切な粗さを与えると、剝離点の後退による抗力係数の低下や最小風圧の低下が起こり、レイノルズ数の超臨界域における性状が知れることが知られている。⁶⁾ 今回の実験ではこのようなレイノズル数との関連は詳細に検討していないが、風速は限界レイノルズ数近辺であり、表の結果をみると、らせん状のチューブに比べて全体的に制振性が高いように思われる。Table 2 を具体的にみると矩形突起を11本または12本設置した場合が制振効果が高く、5本や16本のように本数が少なくなったり、多くなったりすると、雨が降ることによって Rain Vibration が発生する。この矩形突起については今後、突起のサイズに関して検討を行えば、さらに空力的に安定な対策を発見できるものと思われる。

3.9 水平支持模型振動応答特性 (50 mm ϕ アルミニウム管)

水平支持した 50 mm ϕ アルミニウム管の風向偏角 β の変化に対する風速振動振幅図の例を Fig. 26～Fig. 28 に示す。Fig. 26 は $\beta=0^\circ$ 、Fig. 27 は $\beta=22.5^\circ$ 、Fig. 28 は $\beta=45^\circ$ である。実験は全ケースとも雨を降らせていない。 $\beta=0^\circ$ では、振動は全く発生せず、非常に安定しているのに対し、 $\beta=22.5^\circ$ では振動は発生しないものの、振動波形は不規則であり、大きな Rolling Motion を現し非常に乱雑な挙動を示した。一方 $\beta=45^\circ$ では、風速 6.5 m/s (無次元風速 65) から急激な発散振動が発生している。

Fig. 29に全ケースの振動発生の有無と、その発振無次元風速を示す。これによれば、風向偏角 β が 25° 以上で振動が発生しており、 25° 以上の無次元発振風速は、 β が大きくなるにつれて、75から65と少し低くなるだけで、大きな変化があるとは言えない。

これらの現象を風向偏角 β に関して追跡すると次のようになる。

- ・ $\beta = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ の場合

振動は全く発生せず、模型はきわめて安定している。

- ・ $\beta = 15^\circ, 20^\circ, 22.5^\circ$ の場合

定常振動は発生しないが，ビート状の不規則な振動波形を示し，模型中央部を中心とした Rolling 状態となる。この傾向は，風向速度 β が大きいほど強くなる。

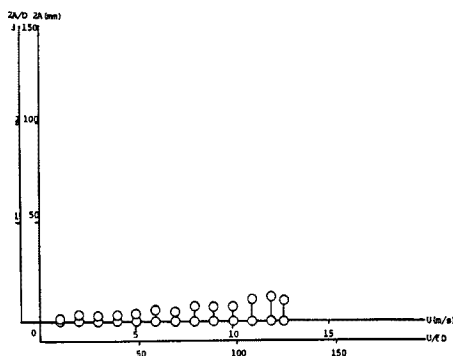


Fig. 26. Velocity-Amplitude Diagram.
(Horizontal Cable, 50 mm ϕ
Aluminium Cylinder, $\beta=0^\circ$)

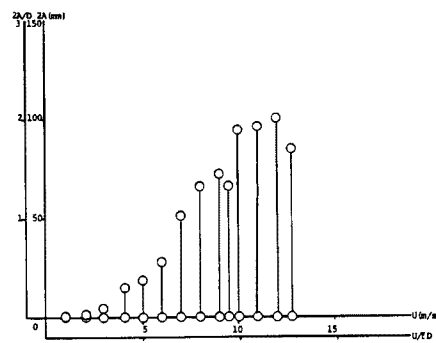


Fig. 27. Velocity-Amplitude Diagram.
(Horizontal Cable, 50 mm ϕ
Aluminium Cylinder, $\beta =$
22.5°)

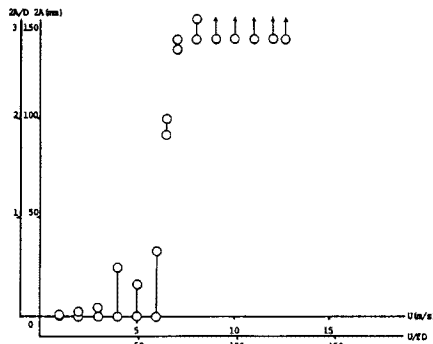


Fig. 28. Velocity-Amplitude Diagram.
(Horizontal Cable, 50 mm ϕ
Aluminium Cylinder, $\beta=45^\circ$)

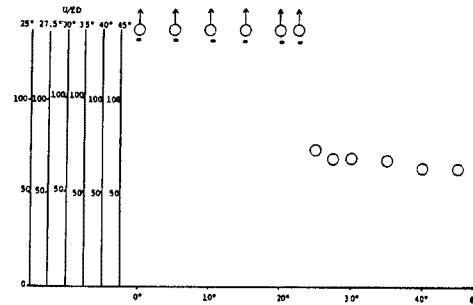


Fig. 29. Onset Reduced Velocity. (Horizontal Cable, 50 mm ϕ Aluminium Cylinder, $\beta=0^\circ\sim 45^\circ$)

・ $\beta=25^\circ, 27.5^\circ, 30^\circ$ の場合

振動波形の安定した定常振動が発生する。無次元発振風速は70～75付近であり、高風速になるにつれて徐々に振幅が大きくなる。

・ $\beta=35^\circ, 40^\circ, 45^\circ$ の場合

無次元風速65～70付近で振動が発生する。風速を高めると急激に振幅が増大し、発散していく。ただし $\beta=40^\circ$ の場合、無次元風速40付近で両振幅 25 mm 程度の小さな限定型振動が発現した。

以上のように、ケーブルは風向偏角がある程度つけば急激な発散型振動をおこし、本来、空力的に不安定な状態に陥りやすいことが判明した。

4. 結 論

本研究では、ケーブルの Rain Vibration を中心としたケーブルの空力特性に関して、雨の有無の状態での傾斜したケーブルの振動応答の把握、非定常圧力や流れの可視化による振動発生機構の考察、ケーブルに付加物を装着することによる制振対策の検討を行った。一方、水平支持されたケーブルの挙動と風向偏角の関係についても併せて検討を加えた。

以上の研究を通して得られた主な結論を以下に列挙する。

(1) 傾斜した 160 mm ϕ PE 管を用いてケーブル鉛直振動応答を調べた結果、Fig. 30 に示した場合、橋軸に偏角のついた風において塔に対して風下側に位置するケーブル (Wind Dir. 1) では、降雨時においてのみ Rain Vibration が発生した。また、風上側に位置する姿勢 (Wind Dir. 2) では、無雨時においても流れと直角方向の大振幅振動が発生し、さらに降雨によって空力不安定性が増した。

(2) メタアクリル酸樹脂管、アルミニウム管、ビニール巻 PE 管およびメッシュ (2×2 mm) 巻 PE 管を用いてケーブルの表面粗度を変えたところ、表面が滑らかになるほど、ケーブル上面にできる水路が不明確なものになり、振動振幅がやや安定化傾向を示すものの、Rain Vibration は依然として発生し、その発振風速も高くなっているわけではない。このことからケーブルの表面粗度すなわち材質は Rain Vibration の発生に根本的な影響を与えないものと判断される。

(3) ケーブルの直径を 80 mm に小さくした場合や、ケーブル重量を 5 kg あるいは 15 kg 重くして実験した結果、Rain

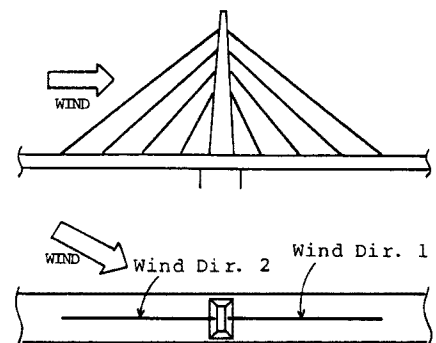


Fig. 30. Wind Direction 1 and 2 on Cable-Stayed Bridge.

Vibration は発生した。このことにより、Rain Vibration は、ケーブルの径、重量によらず発生しうると考えられるが、振動振幅の発達は緩和される傾向にあり、これらの影響は、安定化に多少の貢献をするものと認められる。

(4) Wind Dir. 1 において傾斜したケーブルに人工水路を設置して非定常圧力を測定した結果、ケーブル上下面の水路（特に上面水路）付近で絶対値の大きな負圧が発生し、その付近の圧力がケーブルの運動に対して正の仕事を与えていることが判明した。つまり、雨水がケーブル表面に水路を形成することにより、ケーブル断面が空力的に不安定化することが Rain Vibration の原因であると判断できる。しかし、(2)で考察したように、水路の形状そのものは Rain Vibration 発生の有無に対してあまり重要ではない。

(5) Wind Dir. 2 のケーブル姿勢における流れの可視化による観察の結果、ケーブル上面では一様流に沿った流れが、下面ではケーブル軸に平行に流れた後、軸に垂直に回り込み、やがて一様流に収束する流れが確認された。無雨状態における振動機構は、この複雑な断面回りの流れが関係しているものと思われる。

(6) 160 mm ϕ PE 管にらせん状のチューブ ($\phi=5,100$ mm) を巻き付ける方法および、ケーブル軸に平行な矩形突起を装着する方法による制振対策を試験した。その結果、ケーブルスパン長 1600 mm で 1 回転させたらせん状のチューブを巻きつける場合または、矩形突起（厚さ 5 mm $\times$ 幅 11 mm）を 11~12 本軸に平行に装着した場合が、Rain Vibration を抑制し、有効的であった。

(7) 水平支持された 50 mm ϕ アルミニウム管を用いて、ケーブル軸に対する風向偏角を $0^{\circ}\sim 45^{\circ}$ の範囲で変化させ、鉛直振動応答を測定した。その結果、偏角が 25° 以上で発散型の振動現象が発生し、風がケーブル軸とある角度で作用した場合に、ケーブル自身が本質的に内在していると考えられる空力不安定性を露呈することが確認された。この現象はケーブルの種々の振動特性に示唆を与えるものであり、今後の研究が期待される。

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，1987.
- 2) Oshima, K. and M. Nanjo, Aerodynamic Stability of The Cable Stayed Bridge Subject to Rain (A Case Study of The Ajikawa Bridge), Proc. The US-Japan Natural Resource, 1987.
- 3) Langsoe, H. E. and O. D. Larsen, Generating Mechanics for Cable Stay Oscillations at The Faroe Bridge, Proc. International Conference on Cable-Stayed Bridges, 1987.
- 4) 藤野陽三・伊藤 学・鶴田郁雄・山口宏樹・平田雅人：架空通信ケーブルのギャロッピング振動について，日本風工学会年次研究発表会，梗概集，1983.
- 5) 中村泰治・坂本雄吉：ケーブルの風による振動，日本風工学会誌，第27号，1984.
- 6) 丸川比佐夫・田村幸雄・真田早敏：大型 RC 煙突に作用する揚力と振動応答，日本風工学会誌，第19号，1984.