

## — 東神戸大橋ケーブルの レインバイブレーション対策 —

神戸建設部 設計課 北 沢 正 彦  
保全施設部 保全技術課 関 本 宏  
神戸建設部 設計課 金 治 英 貞

### 要 約

ケーブルのレインバイブレーションは、降雨時の風によるケーブルの振動現象であり、既に多くの橋梁で観測されている。しかし、その現象の発生機構についてはまだ未解明の点が多く、制振対策も確立されたものがない。

東神戸大橋のケーブルでもレインバイブレーションの発生が予想されるので、ケーブルの部分模型風洞実験を実施し、現象の発生に関する空力特性を評価するとともに、制振対策の基本的条件について考察することとしたものである。その結果、基本検討で採用した無雨時のケーブルにおいても、ある条件下でこの種の振動が発生することが確認された。この振動現象はレインバイブレーションに特定できるものではなく、傾斜配置されたケーブルのもつ通常的な空力特性であるケーブルの周りの複雑な空気流に起因するものであることが判明した。

また、ケーブルの制振対策として、ケーブル表面の軸方向に平行突起を取り付けて空気流の改善、あるいは水路形成の阻害を図る方式が効果的であることが判ったので、その概要を報告する。

### まえがき

東神戸大橋は、中央径間485mを有する橋長885mの3径間連続斜張橋である。そのケーブルは、橋梁の基本構造特性、施工条件、景観面を配慮して12段2面マルチ型ハープ形式が採用されている。

斜張橋のケーブルは、桁、塔とともに構造系を構成する主要部材であるが、潜在的に風の影響を受け易く、振動減衰性能が小さいため種々の要因により大振幅の振動を生ずる可能性がある。

これまでにもケーブルの風による振動事例はいくつか報告されているが、最近、雨を伴った時の

風による振動現象、すなわち、レインバイブレーション (Rain Vibration) が各種の要因から問題を提起している。この振動現象は、発振風速が低く、振動振幅の大きいことから、通行者への不快感、ケーブルアンカー部の疲労損傷を誘発しかねないため、利用性および構造安定性の面で制振対策が必要となる。

この振動の発生事例は、表-1に示すように我が国においても名港西大橋、荒津大橋、安治川橋梁で見られ、外国においてもプロトン (Brottonne)

橋、ファロー（Faro）橋等で観測されている。その発生状況は以下のようにまとめられる。

表-1 ケーブル振動の発生事例

橋梁形式	振動性状	
名 3径間連続斜張橋 (175m + 405m + 175m) 港 ファンタイプマルチケーブル、PE管被覆HiAmアンカーケーブル (2面吊り) 西 ケーブル径 125mmφ~165mmφ 大 最上段ケーブル角度 θ = 25° 橋		 振 幅 20~30cm 振動数 1~3Hz モード 1~4次 風速 5~17m/s 天候 降雨時 振動が観測された風向 風向方向に下り勾配を持つケーブルに振動が発生する
荒 3径間連続斜張橋 (185m + 115m + 45m) 津 ファンタイプマルチケーブル、PE管被覆HiAmアンカーケーブル (1面吊り) 大 ケーブル径 160mmφ~180mmφ 橋 最上段ケーブル角度 θ = 19.2°		 振 幅 20~60cm 振動数 1~3次 モード 1~3次 風速 10~18m/s 天候 降雨時 振動が観測された風向 風向方向に上り勾配を持つケーブルにも振動が発生している。
安 3径間連続斜張橋 (120m + 330m + 170m) 治 ファンタイプマルチケーブル、PE管被覆HiAmアンカーケーブル (2面吊り) 川 ケーブル径 160mmφ~200mmφ 橋 最上段ケーブル角度 θ = 25°		 振 幅 15~25cm 振動数 1~2Hz モード 2~3次 風速 8~12m/s 天候 降雨時 振動が観測された風向 風向方向に下り勾配を持つケーブルに振動が発生している

- ①風が橋軸方向よりやや斜めに吹く場合に雨滴がケーブルを伝って、落ち易い風下側のケーブルに発生しやすいようである。
- ②発振時の風速は5~20m/sである。
- ③発生振幅は微妙であり、軽微なものから走行性に不快感を与えそうな大振幅のものまで見られる。平均的な値として、片振幅15~60cmであり、数段のケーブルにわたっての発生が観測される。
- ④発生振動数は1~3c/sで、振動モードは1~4次モードが卓越している。

レインバイブレーション現象の発生機構の検討を含め、いくつかの風雨状態を再現した風洞実験がなされている。しかしながら、雨滴による水路がケーブル上面に形成されることが不安定化の原因と推定されている程度で、未だ未解明の点が多い。そのため、この種のケーブル振動に対する制振対策も実橋で振動の発現が見られてからの事後

対策で対処されているものが多い。これらの対策の主なもの、ケーブルの減衰性能の向上に期待して、ケーブル相互のワイヤーによる連結方式やアンカー部付近へのダンパー設置方式が採用されている。

東神戸大橋のケーブルでもその自然風特性からレインバイブレーション現象の発生が予想される。そこで、この現象に関する種々の空力特性について評価し、ケーブル断面形状の変更による空力的な制振対策を図ることを目的としたケーブルの部分模型風洞実験を実施している。以下にその概要を述べる。

## 1 実験目的

レインバイブレーション現象の発生に影響する要因としては、風速・雨量・風向等の自然気象学的要因と、ケーブルの表面粗度・形状・姿勢・質量・固有振動数・構造減衰率等の構造的、振動工学的要因が挙げられる。

これらの諸要因がレインバイブレーション現象の発生にどのように寄与しているかを把握することを目的として、東神戸大橋の実ケーブルを想定した傾斜ケーブル模型を用いて、風雨状態における応答振幅測定実験を行っている。

また、現象の発生機構および制振対策に対する具体的な性状を把握することを目的として、ケーブル表面の非定常圧力、振動中の対数減衰率の測定およびケーブル表面の水滴の流れ状況を観測している。

## 2 実験概要

この実験には、長さ1,600mm、直径160mmφ、重さ15kgのPE（ポリエチレン）管仕上げのケーブル模型を使用している。この模型は実験装置の関係で実橋の約1/8~1/10に軽量化されており、空力的に反応し易いものとなっている。ケーブル表面のPE管には中央部表面に16個の圧力孔を22.5°間隔で均等に配置している。この実験に用いたケーブルの種類を図-1に示す。

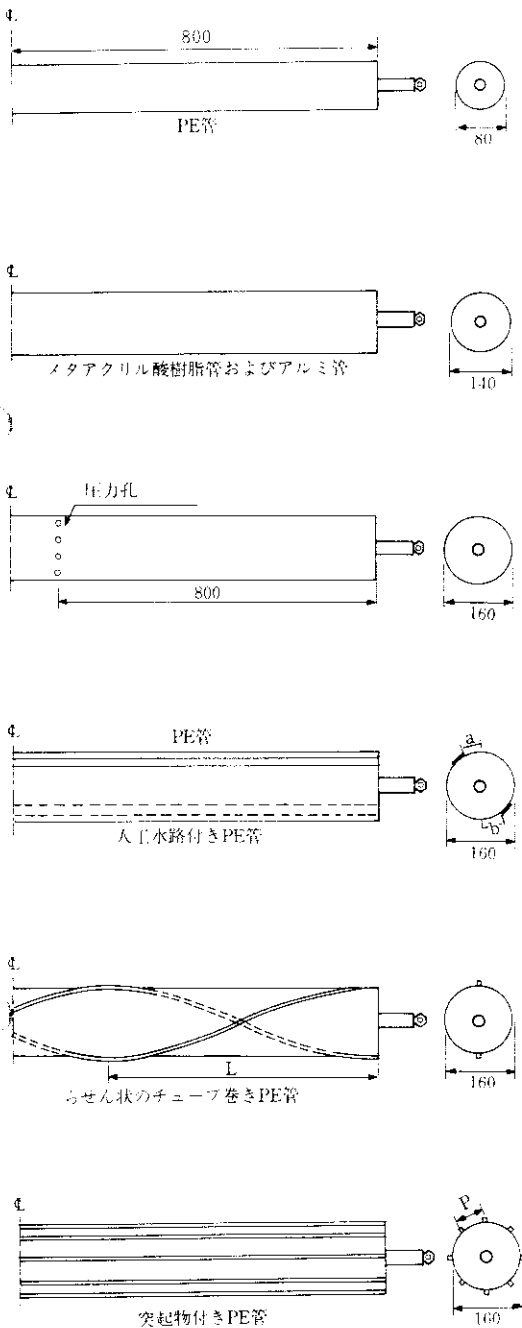


図-1 ケーブル模型の種類 (単位: mm)

80mmφのPE管および表面粗度を変化させるためのメタアクリル酸樹脂管(140mmφ)やアルミニウム管(140mmφ)等に対しても性状の比較を行っている。なお、各ケーブル模型型の固有振動数、対数減衰率を表-2に示す。

模型は、図-2に示すように、模型の端部を2本のバネ(コイルスプリング)で鉛直支持されている。また、模型の運動は、鉛直方向だけの1自由度とするために気流方向および気流直角水平方向の運動はピアノ線により拘束されている。

風に対する模型の姿勢は、図-3に示すように、ケーブルが斜張橋塔部に対して風下側に位置する場合(水平面内風向偏角 $\beta = 45^\circ$ 、鉛直面内傾斜角 $\alpha = 42.5^\circ$ )を正姿勢、風上側に位置する場合( $\beta = -45^\circ$ 、 $\alpha = 42.5^\circ$ )を逆姿勢と定義している。

表-2 各模型の固有振動数および対数減衰率

模型の種類	振動数(Hz)	対数減衰率			
		$\delta : 20$	$\delta : 30$	$\delta : 40$	
PE管 160mmφ	正姿勢	0.96	0.0032	0.0037	
	逆姿勢	1.01	0.0028	0.0031	
PE管 80mmφ	正姿勢	0.98	0.0057	0.0048	
	逆姿勢	0.94	0.0021	0.0025	
メタアクリル酸樹脂管 140mmφ	正姿勢	0.94	0.0021	0.0025	
	逆姿勢	0.97	-	0.0025	
アルミニウム管 140mmφ	正姿勢	0.98	0.0016	0.0016	
	逆姿勢	0.99	0.0018	0.0030	
PE管のビニール巻	正姿勢	0.96	0.0029	0.0040	
PE管のメッシュ巻	正姿勢	0.93	0.0020	0.0038	
正姿勢のPE管 のチューブ巻 ( $\phi = 10mm$ )	1回転×8本 (200mmピッチ)	右巻	0.97	0.0023	0.0025
		左巻	0.96	0.0029	0.0034
	1回転×4本 (400mmピッチ)	右巻	0.94	0.0018	0.0034
		左巻	0.94	0.0021	0.0030
	1回転×2本 (800mmピッチ)	右巻	0.94	0.0018	0.0034
		左巻	0.94	0.0021	0.0030
3回転×1本 (270mmピッチ)	右巻	0.96	0.0024	0.0035	
	左巻	0.95	0.0022	0.0026	
正姿勢のPE管 のチューブ巻 ( $\phi = 5mm$ )	3回転×1本 (530mmピッチ)	右巻	0.97	0.0030	0.0039
		左巻	0.96	0.0021	0.0030
軸方向突起付き ( $5 \times 11mm$ ) (高さ×幅)	正 姿 勢	PE管: 30mmピッチ (16)	0.96	0.0044	0.0047
		PE管: 40mmピッチ (12)	0.98	-	0.0033
		A管: 40mmピッチ (11)	0.93	0.0023	0.0020
		A管: 50mmピッチ (5)	0.94	-	0.0018
A管=アクリル管 ( )内は本数	逆 姿 勢	PE管: 40mmピッチ (12)	0.94	0.0018	0.0020
		PE管: 45mmピッチ (11)	0.94	0.0038	0.0031
		PE管: 45mmピッチ (11)	0.94	0.0038	0.0031
PE管の Mass増し	逆 姿 勢	5kg増し (20kg)	0.89	0.0049	0.0037
		15kg増し (30kg)	1.23	0.0071	0.0115

$\delta : 20 =$  変位20mmでの減衰率

ケーブル軸方向に4個所のノズルを用いて降雨状態を再現することとし、その降雨量は1.2 l/min、各ノズルの向きはケーブル表面に水路が形成され易いように設定されている。

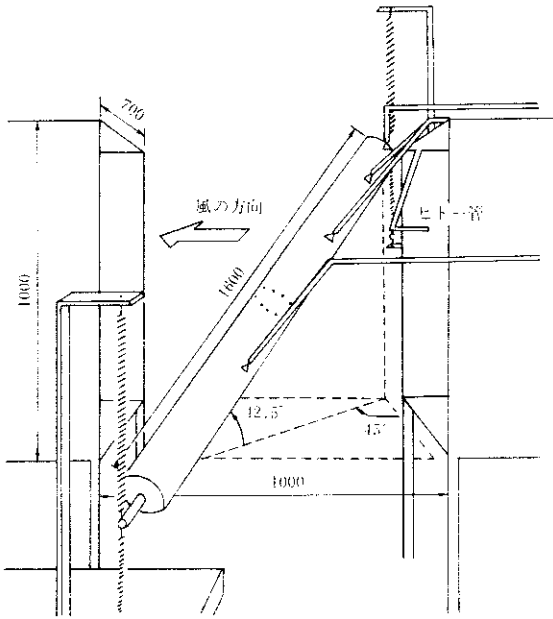


図-2 風洞および模型支持、降雨装置 (単位: mm)

この降雨量 1.2 ℓ/min は、10 mm/hr の降雨時に、ケーブル延長 100m の中央点にケーブル上端から途中損失することなく流下する雨量に相当している。

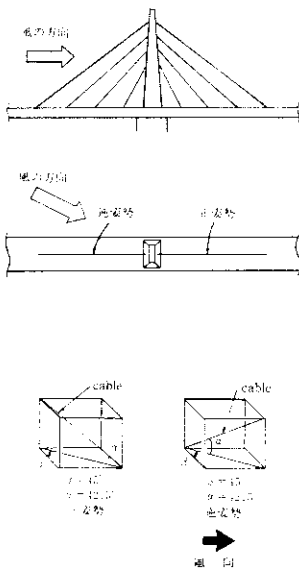


図-3 傾斜模型の姿勢

### 3 実験結果と考察

#### 3-1 振動応答特性

φ 160mm PE 管の正姿勢におけるケーブルの振動応答特性を図-4 (無雨時) および図-5 (1.2 ℓ/min の降雨時) に示す。無雨状態では定常振幅振動は発生しておらず、13m/s (無次元風速  $V/f \cdot D = 85$ ) 以上の高風速域でバフティングが発現している。しかし、降雨時 (他は同条件) においては、風速 9m/s (無次元風速  $V/f \cdot D = 60$ ) 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、レインバイブレーション現象であるといえる。

振動中のケーブル表面の状態は、上下面ともにケーブル軸に沿って太い一本の水路が形成されており、上面側水路の幅がやや広い。ただし、給水ノズルの位置を少し変化させたり、降雨量を変えたりすると、全く違った振動性状を示すので、レインバイブレーション現象は種々の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。

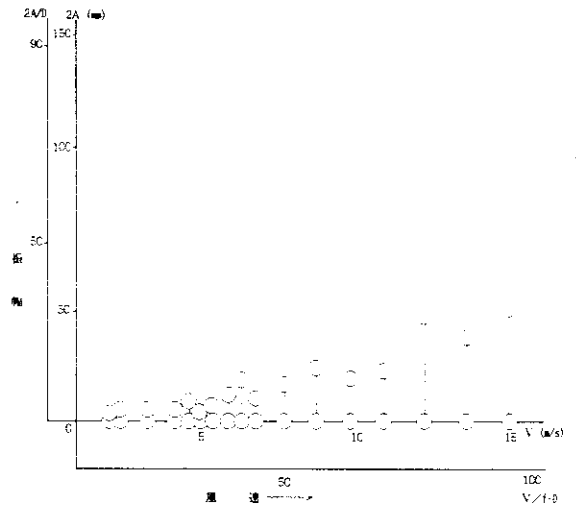


図-4 正姿勢の 160mm φ PE 管: 雨なし

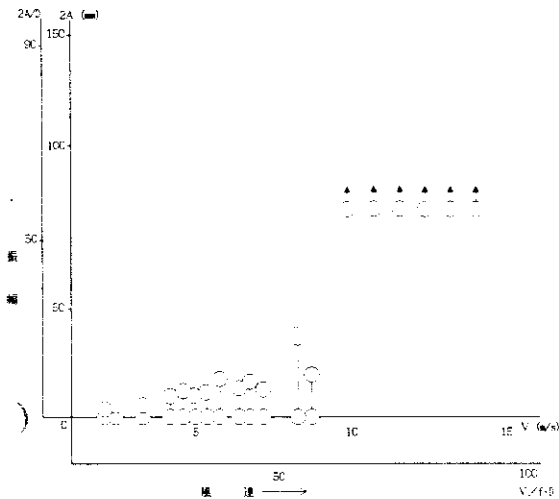


図-5 正姿勢の160mmφ PE管：雨量=1.2 l/min

逆姿勢の応答振幅を図-6（無雨時）および図-7（降雨量1.2 l/min）に示す。ここでは、無雨状態においても発振風速7m/s（無次元風速 $V/f \cdot D = 45$ ）で大振幅振動が発生し、降雨によって発振風速が5m/s（無次元風速 $V/f \cdot D = 30$ ）に低下している。

この振動現象は無雨時および降雨時でケーブル

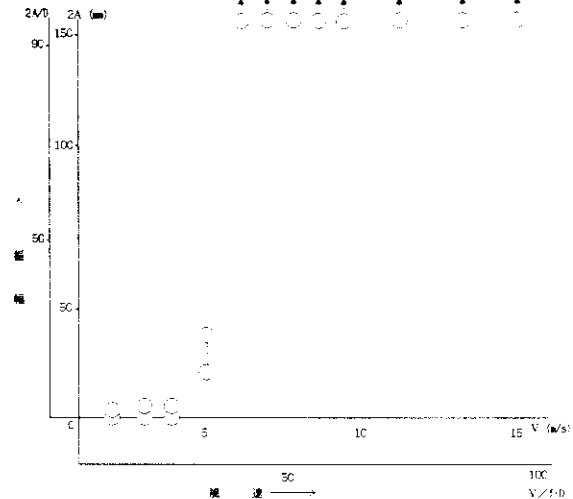


図-7 逆姿勢の160mmφ PE管：雨量=1.2 l/min

上面水路が形成されにくい場合にも発生している。このことは、これまでのレインバイブレーション現象には含まれない異なった振動現象ではないかと考えられる。

### 3-2 表面粗度の影響

ケーブル表面粗度の影響をみるためメタアクリル酸樹脂管、アルミニウム管、ビニール巻PE管、2mmマスマッシュ巻PE管を用いて実験している。その振動応答結果を図-8（メタアクリル酸樹脂管）および図-9（ビニール巻PE管）に示す。

正姿勢の場合において、無雨時では振動の発現はなく、1.2 l/minの降雨時では両者とも限定型振動が比較的低風速域で発生している。

アルミニウム管、メタアクリル酸樹脂管、ビニール巻PE管の順に表面が滑らかになっているため、ケーブル上面に形成される水路（リップレット）はこの順に規模が小さくなる傾向がある。最も滑らかなビニール巻PE管では、上面側水路は細かく、水滴状の雨が放射状に流れ落ちている状況である。また、下面側にはPE管よりはやや小さい水路が形成される。メッシュ巻PE管では、メッシュ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ている状況である。

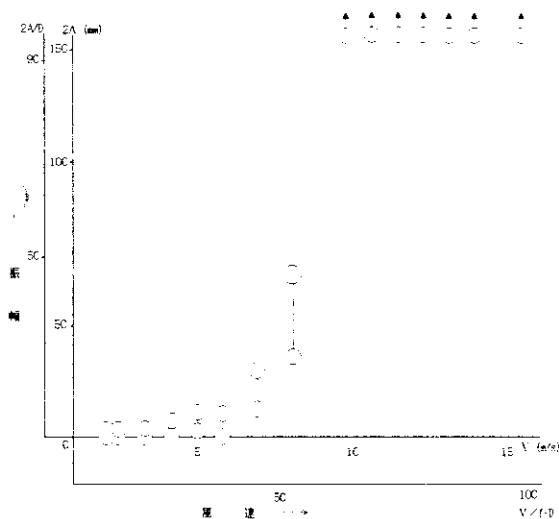


図-6 逆姿勢の160mmφ PE管：雨なし

各管の振動性状は、ケーブル上面の水路の規模が小さいほど、振動振幅がやや小さくなる傾向を示しているが、その発振風速にはほとんど差がない。

このことから、通常材質による表面粗度の変化程度では、ケーブル表面の水路形成を若干抑制できるだけであり、現象発生に根本的な影響を与える臨界レイノルズ数を越えた領域の移行までには至らないものと考えられる。

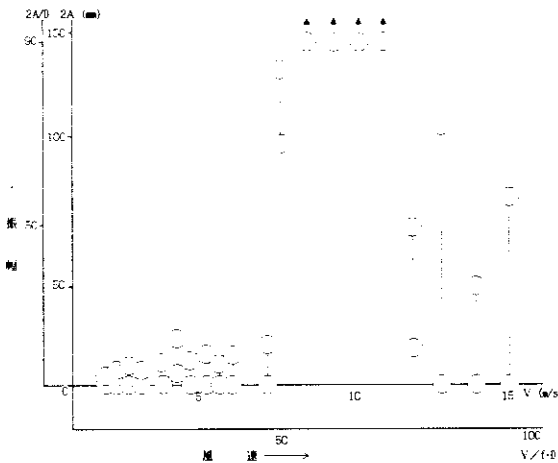


図-8 正姿勢の140mmφメタクリル酸樹脂管  
：雨量=1.2 l/min

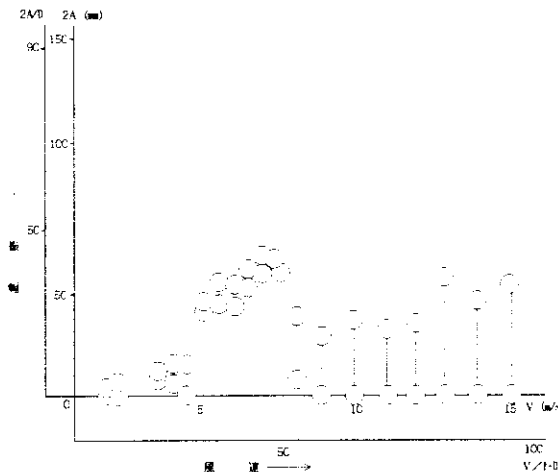


図-9 正姿勢の160mmφPE管のビニール巻  
：雨量=1.2 l/min

### 3-3 径 (Mass) の影響

ケーブルのMassがレインバイブレーション現象の発生に対してどのように関与しているかを把握するため、ケーブルの直径を80mmに変えた場合、ケーブル全重量を5kgあるいは15kgに変えた場合について実験している。

ケーブルの重量変化については、模型重量が実橋の1/8~1/10程度の軽量であり、実験模型は実橋の場合に比較して、より空力的に敏感な状態であると考えられる。

Mass効果の実験結果に注目すると、径、Massの影響は、振動振幅の発達に若干の変化がみられるが、レインバイブレーション現象発生有無には大きく関与することはないようである。ただし、ケーブルの重量増といっても実橋の1/4~1/5であるので、Mass効果の正確な把握までには至らないものと考えられる。そこで、さらに実橋に相似なケーブルでの大型風洞実験を現在実施している。

この大型風洞実験では実橋ケーブルと同じ重量にした円形のPE管を用い、ケーブルの支持方法、姿勢、風向等を変化させて行っている。その結果によるとケーブルの振動現象は、降雨の有無、姿勢の相違に関係なく発生し、その発振風速はケーブル重量あるいは対数減衰率を増加させても変化しないことが確認されている。

このことから、本実験で発現している振動現象は、実橋ケーブルにおいても実際に起こりうる風速域で発生する可能性があるといえる。

### 3-4 風速-対数減衰率変化特性

風速-対数減衰率の変化に対する応答特性を図-10 (正姿勢における無雨時)、図-11 (降雨時)、および図-12 (逆姿勢における無雨時の風速) に示す。

正姿勢では、降雨時の場合に負の対数減衰率が現われ、レインバイブレーション現象の発生傾向が見られる。ただし、両者ともに風速10m/s (無次元風速 $V/f \cdot D = 60$ ) 付近で大きな負の勾配が記録されており、この付近でケーブル模型自体が空力的に不安定となる傾向があると考えられる。

逆姿勢の無雨時においては、急激な負の対数減衰率が現われ、高風速域ではその傾向が助長され、風速が高まるにつれて負の方向に対数減衰率が大きくなる傾向にある。

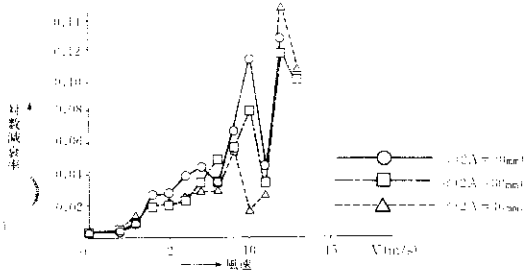


図-10 風速-対数減衰率応答図  
(正姿勢、160mmφ PE管：雨なし)

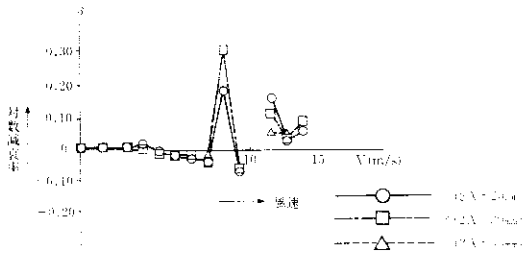


図-11 風速-対数減衰率応答図  
(正姿勢、160mmφ PE管：雨量 = 1.2 l/min)

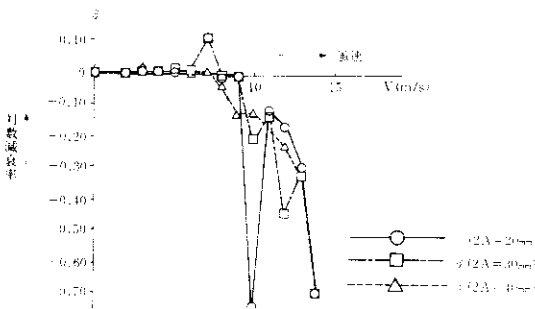


図-12 風速-対数減衰率応答図  
(逆姿勢、160mmφ PE管：雨なし)

### 3-5 振動発生機構

#### 3-5-1 正姿勢における特性

正姿勢における静止中の160mmφ PE管の断面回り16ポイントの平均圧力分布をCp値として図-13に示す。

また、PE管の上下面に人工水路(突起)を設けた場合の定常振幅振動中の断面回りの平均圧力を図-14に示す。両者の場合ともよどみ点(Stagnation Point)が軸直角水平線の上面側あるいは下面側の約30°付近に発現しており、上面水路付近で負圧が大きい傾向が見られる。

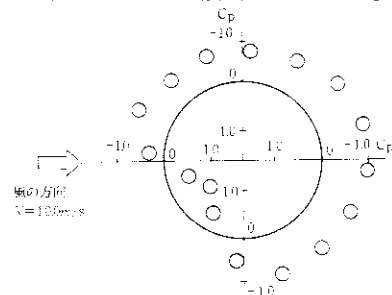


図-13 断面回りの平均圧力分布  
(正姿勢、160mmφ PE管)

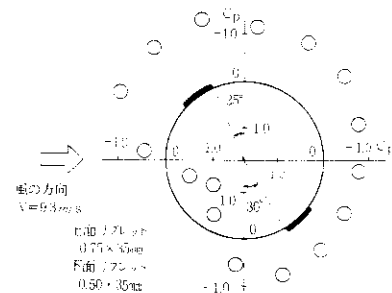


図-14 断面回りの平均圧力分布  
(正姿勢、人工水路付き160mmφ PE管)

次に、振動中の人工水路付きPE管の1周期軌道上に位置する16地点の非定常圧力分布を図-15に示す。この図によるとケーブルが上向きに移動する時は、上面水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時は、下面の水路付近の圧力がケーブルの張力とともに励振力として作用する傾向がうかがえる。

さらに、この圧力が振動1周期中にケーブル模型に果たす単位面積当たりの無次元仕事量を、振動変位に対する圧力の位相差(模型変位が最上点に

達する正圧のピークの遅れ)を用いて算出し、その結果を図-16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している。この図から、圧力がケーブルに対して果す仕事量は上下面ともに正となり、人工水路付近に正の仕事量のピークが集中していることが判る。仕事量の正負の面積を差し引きすると、上面側がやや大きくなる。つまり、ケーブル上下面の水路付近で発生した負圧が、ケーブルの運動に対して正の仕事量を与えていることが判る。

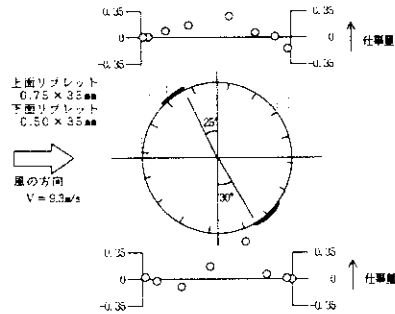


図-16 振動1周期における各圧力孔の単位面積当り無次元仕事量

この負圧の発生、振動励起のメカニズムは松本<sup>2)</sup>の研究によって、傾斜円柱の空力振動の基本特性として、降雨の有無とは無関係に次のように指摘されている。

- ① ケーブル上下面の流れの性状観察、圧力分布、空力特性から、傾斜円柱周りの風の流れ状況は図-17のように表わせる。
- ② この流れは、円柱前・背面の軸方向2次流と円柱軸を直角に横切る主流とによって構成される。特に円柱断面背面には、円柱軸に沿うかなり強い2次流が認められる。

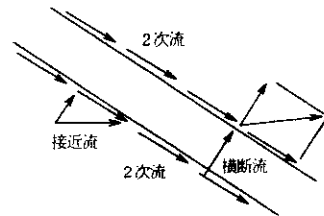


図-17 傾斜円柱の風の流れメカニズム

- ③ 一方、円柱や楕円柱では、断面背後の後流(ウェイク)中に遮風板を挿入すれば、ギャロッピングが生ずることが認められる。
- ④ これは、遮風板が円や楕円上の主流と2次流の剥離せん断流れを相互に流力的干渉することにより、剥離流れが内部循環流を形成する。それにより著しい圧力低下をもたらし、振動を励起すると判断される。
- ⑤ 傾斜円柱では、図-18に示すように円柱背面の2次流がこの遮風板と同様の働きをし、円

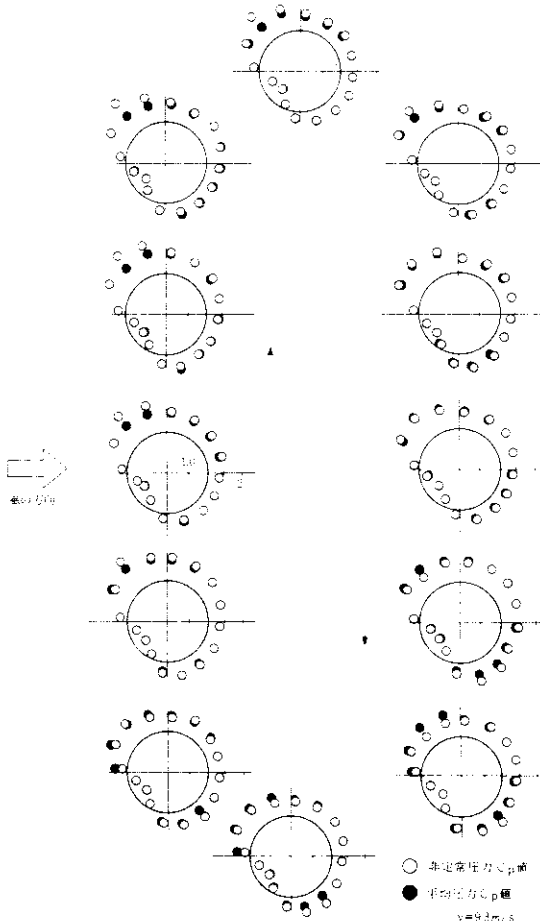


図-15 非定常圧力分布 (正姿勢、人工水路付き 160mmφ PE管)



柱に④と同じ流力的効果を与えているといえる。

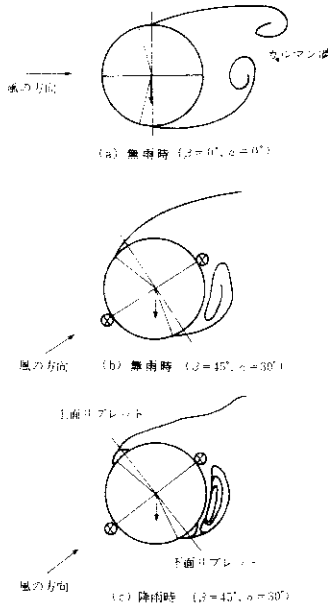


図-18 想定される傾斜円柱回りの流れ (円柱振動時)

⑥ 降雨によって形成されるケーブル表面の水路は、剥離流の勢力を強め、その結果、二次的な内部循環流れを強める。これにより、本質的に傾斜円柱が有している空力不安定性を増幅するものと考えられる。

つまり、レインバイブレーション現象は、傾斜円柱の断面背面の軸方向2次流による空力不安定性に起因するもので、降雨は剥離点付近に水路を形成して剥離流の勢いを増強または増幅させる効果を果すものである。

### 3-5-2 逆姿勢における特性

逆姿勢においては、無雨状態振動中の流れをビデオ観察し、流れの形状について検討している。その結果、気流はケーブル上面側に移動したよどみ点で上下面方向に分かれる。2つの流れは複雑な形状を示し、特にケーブルの下面側では3次元の方向性を示す。これは、前述のケーブル背面の軸方向2次流の存在によるものと考えられる。

### 3-6 制振対策

制振対策として、レインバイブレーション現象の発生要因となるケーブル周りの複雑な空気流の改善あるいは水路形成の阻害を図ることにする。ここでは、ケーブル断面形状により空力的にレインバイブレーションの発生を抑制する方向で検討することとしている。ケーブル表面にらせん状チューブ(5mmφ、10mmφ)を巻き付けた場合(チューブ巻き)と、ケーブル軸に平行な矩形突起(高さ5mm×幅11mm)を設置した場合(平行矩形突起付き)についてその制振効果を確認している。

ここで検討した全ケースの制振対策効果の確認状況を表-3に示す。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表わしている。

表-3 制振対策効果の確認状況

各 模 型 の 種 類		雨 量 な し		西 風: 1.2 t/min
PE管のらせん状チューブ巻(φ=5mm)	1回転×8本(200mmピッチ)	右巻	×	×
		左巻	×	×
	1回転×4本(400mmピッチ)	右巻	×	◎(16)
		左巻	◎(13)	○(10)
1回転×2本(800mmピッチ)	右巻	×	○(6)	
	左巻	×	○(9)	
3回転×2本(270mmピッチ)	右巻	◎(15)	○(13)	
	左巻	×	×	
PE管のらせん状チューブ巻(φ=10mm)	3回転×1本(530mmピッチ)	右巻	○(14)	○(6)
		左巻	○(9)	○(9)
平行矩形突起付き(5×11mm)(高さ×幅)	正姿勢	PE管: 30mmピッチ(16)	×	○(4)
		PE管: 40mmピッチ(12)	×	×
	逆姿勢	A管: 40mmピッチ(11)	×	×
		A管: 88mmピッチ(5)	×	○(7)
A管=1/4径(管内は本数)	逆姿勢	PE管: 40mmピッチ(12)	×	-
		PE管: 45mmピッチ(11)	×	×

正姿勢: 風方向に対して下りの勾配を持つ姿勢 右巻: 模型の上端から右方向に巻降ろす  
逆姿勢: 風方向に対して上りの勾配を持つ姿勢 左巻: 模型の上端から左方向に巻降ろす  
( ): 発振風速 (m/sec)

#### 3-6-1 らせん状チューブ巻き

らせん状チューブ巻きは、正姿勢でのみ実験している。ここで、右巻と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をいう。また、左巻きとは左方向に巻降ろした場合を意味する。また、チューブの回転数はケーブル模型の長さ1600mmを基準としているため、このスパン長の範囲でのチューブの本数と巻き方によってチューブ間隔(ピッチ)が異なっている。また、チューブ間隔に応じて風向きやケーブル軸に対する傾斜角が異なっ

ている。したがって、らせん状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つの重要因子によりその性状が異なっている。この実験の結果によると次のことが確認される。

- ① 5mmφチューブの1回転×8本の場合の振動性状を図-19（右巻）および図-20（左巻）に示す。この場合には、降雨の有無および巻き方に関係なく振動の発生を抑制しうる。
- ② 5mmφチューブの1回転×4本左巻と3回転×2本右巻および10mmφチューブの3回

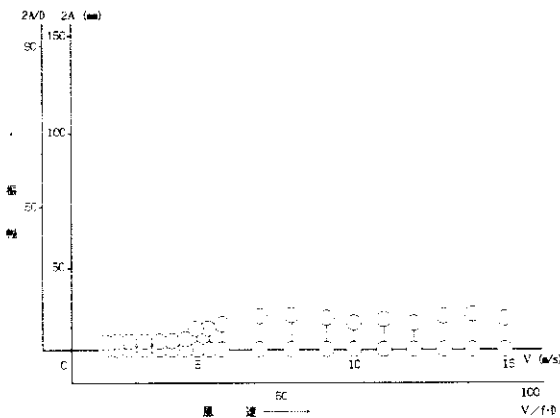


図-19 正姿勢のPE管のチューブ右巻  
:雨量=1.2 l/min  
(1回転×8本:200mmピッチ:径=5mm)

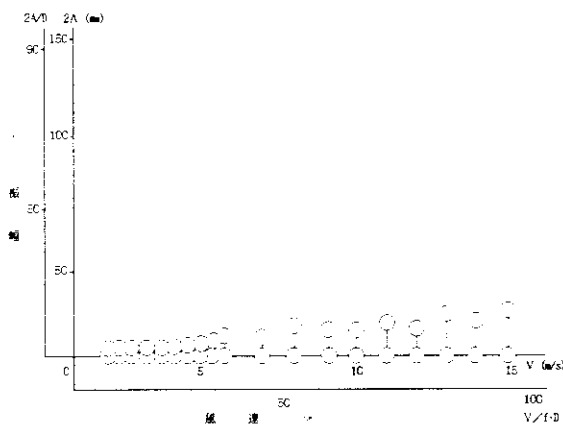


図-20 正姿勢のPE管のチューブ左巻  
:雨量=1.2 l/min  
(1回転×8本:200mmピッチ:径=5mm)

転×1本右巻の3ケースにおいては、無雨時にも振動が発生し、かえって、ケーブルの耐風安定性を低下させる。

この結果から、らせん状チューブをケーブルに巻き付ける制振方法は、チューブの巻き方により振動挙動が微妙に変化する。また、実験の成果を再現する実ケーブルの製作が難しいので実橋への採用には疑問があると考えられる。

### 3-6-2 平行矩形突起付き

実験結果では、平行矩形突起付きは、らせん状チューブ巻きに比べて全体的に制振性能が高いように考えられる。矩形突起を11本または12本設置した場合の振動性状を図-21および図-22に示す。この両者の場合の制振効果はきわめて高いものである。しかしながら、平行突起の本数が5本や16本のように極端に少なくなったり、多くなったりすると、降雨によってレインバイブレーション現象の発生が見られる。

この突起式の制振効果は、傾斜円柱の空力不安定性からすると、ケーブル背面の軸方向2次流への空気流供給の障害、数個の強制的な剥離点設置により内部循環流が縮小される等により、レインバイブレーションの発生が抑制されるものと考えられる。

大型ケーブル模型風洞実験でも、この制振効果の確認を行っている。この平行矩形突起付きの場合の振動性状を図-23に示す。制振対策を施さない場合に比較して平行突起付きは、降雨の有無にかかわらず、制振効果を発揮することが確認される。この方式は、ケーブルのレインバイブレーションの発生を抑制する方法として、実橋に適用可能なものと考えられる。

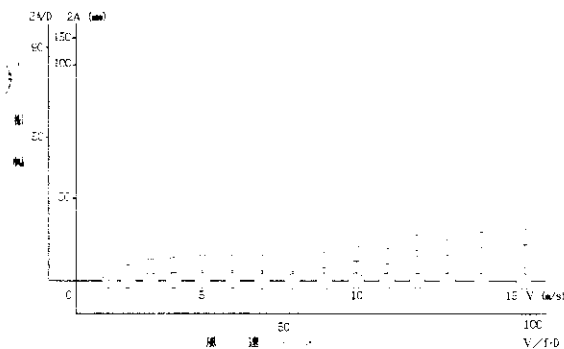


図-21 正姿勢のPE管の突起付き  
:雨量=1.2 ℓ/min  
(5×10mm:12本:40mmピッチ)

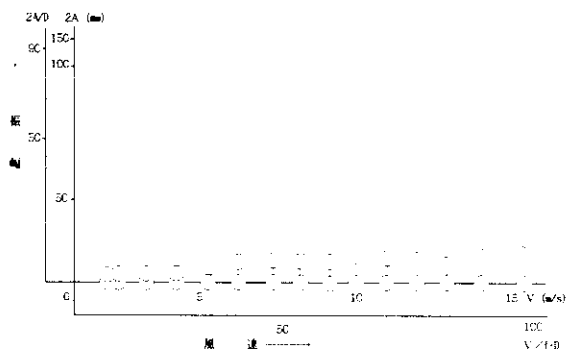
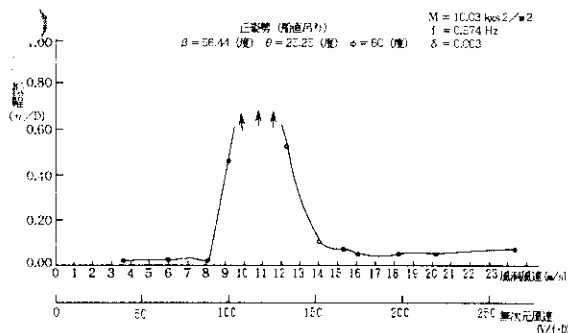
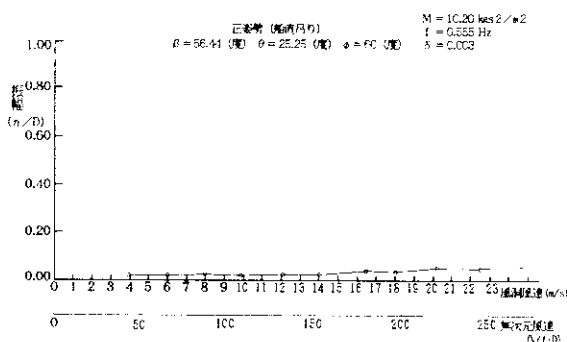


図-22 正姿勢の亚克力管の突起付き  
:雨量=1.2 ℓ/min  
(5×10mm:11本:40mmピッチ)



(1) 円形ケーブル(制振対策なし)



(2) 平行矩形突起付きケーブル

図-23 平行矩形突起ケーブルの制振効果(雨量:約20mm/h相当)  
-大型ケーブル模型風洞実験-

## あとがき

本報告は、東神戸大橋ケーブルのレインバイブレーション対策の基礎実験として行った小型ケーブル模型による風洞実験の成果について述べたものである。その結果では、無雨時のケーブルにも顕著な振動が発生する場合があることが判明した。この事象は、単にレインバイブレーション現象に特定できない、傾斜配置されたケーブルの有する一般的な空力特性であることが確認され、その性状がある程度把握された。また、ケーブルの制振対策としては、ケーブル表面の軸方面に平行突起を取り付ける方式が効果的であることが判明した。

現在実施中の大型ケーブル模型風洞実験では、さらに風向の変化あるいは風の乱れの影響等によるケーブル振動の応答特性を詳しく調査する予定で

ある。これらの実験成果の吟味を通じて、レインバイブレーション現象の発生機構を解明し、平行突起方式の制振効果の確認と実橋への適用性の検討を進めることとしている。

最後に、この研究に熱意ある御指導を賜った京都大学白石成人教授、松本勝助教授をはじめ尽力を賜った関係者に深く感謝の意を表する次第である。

## 参考文献

- 1) 京都大学工学部土木工学教室橋梁工学研究室、(財)防災研究協会:東神戸大橋ケーブルの耐風安定性に関する調査研究 昭和63年3月
- 2) 松本勝・白石成人他:傾斜円柱の空力振動特性—ケーブルRain Vibrationとの関連性—