

# 安治川橋梁ケーブル振動に関する実験研究

大阪第三建設部 設計課 宮坂 佳洋  
同部 同課 大志万 和也  
同部 同課 中林 正司

## 要 約

安治川橋梁のケーブルを対象に、風によるケーブル振動の耐風安定性を風洞試験により検討した。検討対象とした振動現象は、①雨滴によるケーブル断面形状の変化に起因する振動 ②近接物体の後流によって生じる振動 ③塔や桁の風による振動の共振現象 の3種類の振動現象であり、①をRain Vibration 試験、②と③をWake Resonance 試験として2種類の風洞試験を実施した。各試験とも実橋での再現精度を高めるため、形状と振動特性を相似させた供試模型とするよう配慮した。

Rain Vibration 試験では、降雨量により風速10 m/s 付近で生じる限定振動の小雨振動と、風速20 m/s 付近から発生するギャロッピング状の多雨振動の2種の異なった振動現象が発現することがわかった。

Wake Resonance 試験では、実橋風速25 m/s 付近で、ピーク値を有する最大応答振幅214 mmの限定振動であるケーブル1次振動と、実橋風速50 m/s 付近にてピークとなる最大応答振幅1,100mmに達する限定振動のケーブル2次振動が発現することがわかった。

いずれの振動現象も累積疲労によるケーブル破壊には至らない振動であるが、発生振幅が大きいため何らかの制振対策が必要と考えられる。

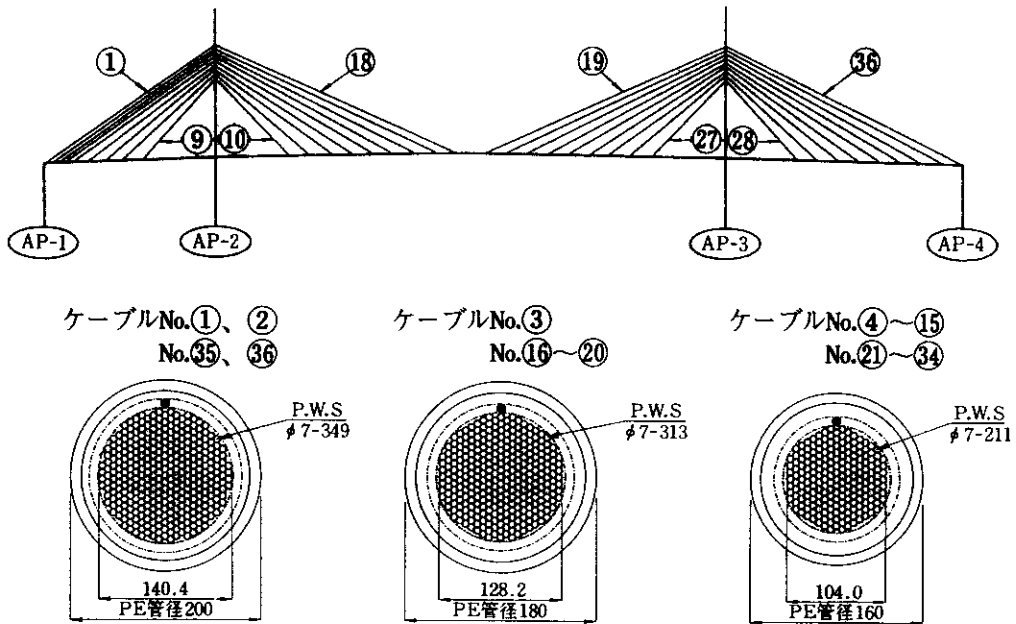
## まえがき

安治川橋梁は、橋長640m (120+350+170) の3径間連続鋼床版斜張橋であり、そのケーブルはファン形マルチケーブルでA型塔の2面に配置されたHiAmアンカーケーブルを採用している。(図-1参照)

一般に、斜張橋ケーブルは振動減衰性能が小さいために微小な外乱で振動が生じ易い特性を有している。このため風的作用に対して様々な振動現象が誘起され、国内では六甲大橋、尾道大橋、か

もめ大橋等のほか近年建設された名港西大橋、岩黒島橋等の斜張橋で、また海外でもBrottonne橋等いくつかの斜張橋で風によるケーブル振動が発生し、各種の制振対策が講じられている事が報告されている。

これら斜張橋ケーブルの風による振動現象には、①渦励振 ②ギャロッピング ③近接物体の後流により生じる振動 (Wake Resonance、Wake Galloping ) ④雨滴によるケーブル断面形状の



図一 ケーブル配置

変化に起因する振動（Rain Vibration） ⑤塔や桁の風による振動に伴うケーブル振動等が考えられる。これらのうち安治川橋梁の場合、そのケーブル断面形状および規模の大きさを考慮すれば、構造上問題となるような渦励振やギャロッピングが発生する心配は無いものと考えられる。

従って、安治川橋梁のケーブルの場合、③④⑤の3種類の振動現象について耐風安定上の検討を行う必要があると考えられる。とりわけ、④のRain Vibration現象は、名港西大橋の架設時に初めて観測された風工学的に新たな振動現象であり、振動発生機構等未解明な部分が多い。安治川橋梁はこの名港西大橋と構造、規模が類似するため、同種のケーブル振動が発生する可能性はきわめて高いと考えられる。

安治川橋梁のケーブルに関する耐風安定上の諸々の問題点を解明し、合理的な制振対策を考えるうえでの基礎資料を得るため、安治川橋梁のケーブルを対象にした風洞試験を実施し、耐風安定性の検討を行ったので以下にその概要を述べる。

## 1. Rain Vibration

### 1-1 概要

Rain Vibration現象は、降雨時に橋軸方向の風が卓越する気象条件が重なった場合に発生するケーブル面内振動と定義される。この現象が初めて確認された名港西大橋では250mm程度の振動を生じた事が報告されている。名港西大橋では、その後の風洞試験で現象の確認等は行われたものの、振動発生機構を解明するまでには至っておらず、まだ未解明な点が残されている。

このため、その発生機構を解明し、振動性状をよりの確に把握して制振対策の基礎資料を得るため、雨・風を再現した風洞試験を実施した。

試験はRain Vibrationの発生確認により、振動と雨・風の相関を明らかにするとともに、この現象がケーブル表面に付着した雨水の流れ（リブレット）によりケーブル断面形状が変化する事が原因であるとする既成の研究成果を確認するため、リブレットモデルによる再現試験も実施した。

## 1-2 試験方法

### 1-2-1 試験装置

図-2に試験装置の概要を、図-3に風洞測定部へのケーブル設置要領を示す。供試体（ケーブル模型）は剛体で、その両端がバネ支持された2次元模型である。雨に相当する水滴は、図-2に示すように補給水装置および降水装置の先端に取り付けたスプレーノズルから噴霧液を使用した。補給水はケーブル上端部から流れ落ちる雨水に対応し、降水はケーブル全面に降り注ぐ雨に対応させたものである。

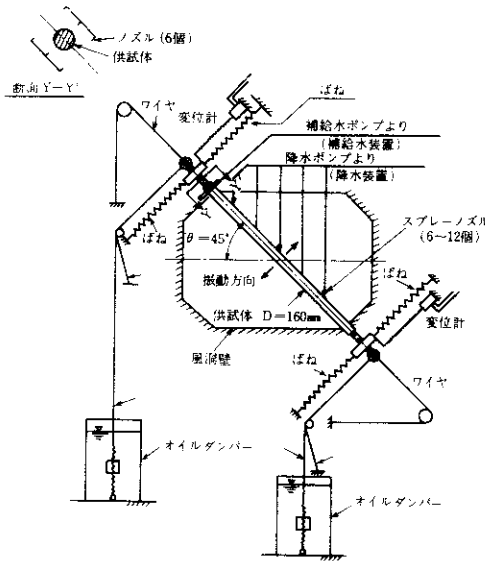


図-2 Rain Vibration 試験装置の概要

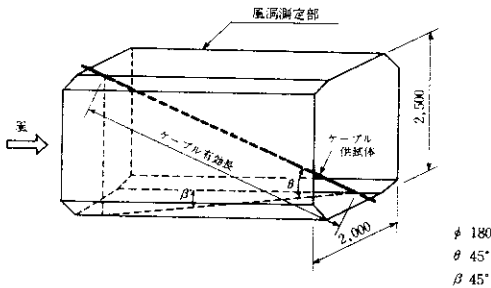


図-3 風洞測定部へのケーブル設置

### 1-2-2 供試模型

供試体ケーブルは、安治川橋梁のケーブルの中で最も本数の多い外径160mmのケーブルを対象とした。実橋のケーブルはケーブルストランドがポリエチレン管（PE管）で被覆されている。ケーブル表面への雨滴の付着は、ケーブル表面特性と密接な関係があると考えられるので、ケーブル模型の製作にあたっては実橋と同じPE管を使用することにした。また、供試体を剛体模型とするため、以下の無次元パラメータを実橋に一致させることとした。

レイノルズ数 (Re) :  $VD/\gamma$

ストローハル数 (St) :  $fD/V$

質量パラメータ :  $m/\rho D^2$

減衰率 :  $\delta$

ここに

V : 風速  $\gamma$  : 空気動粘性係数

D : ケーブル径 f : ケーブル振動数

m : ケーブル質量  $\rho$  : 空気密度

$\delta$  : ケーブルの対数減衰率

模型縮尺は Re 数を一致させた場合、表-1 のようになるが、実物と同じPE管を模型とすると、模型の断面寸法縮尺は  $1/n = 1/1$  となり、模型縮尺は全て1となる。

表-1 模型縮尺

縮尺	1/n
質量	1/n <sup>2</sup>
振動数	n <sup>2</sup>
風速	n
減衰	1

### 1-2-3 試験ケース

#### (1) Rain Vibration 試験

供試体表面は裸PE管のまま使用し、以下の a) ~ c) に示す試験条件での試験ケースを表-2 に示す。また、降雨パターンは表-3 に示すとおりである。

a) 風のみ作用させた場合

b) 風と雨を作用させた場合

c) b)において減衰率を変えた場合

表-2 試験ケース

ケース	ケーブル 振動モード	振動振幅 (Bmm)	振動生起回数 (n回/年)	疲労限界くり返し回数 (N回)	年間累積疲労度 ( $\gamma = n/N$ )	$\Sigma n/N$	寿命 (年)
ケース1	1次	70	0	$2.9 \times 10^9$	0	$0.11 \times 10^{-2}$	909
		200	836	$7.9 \times 10^5$	$0.11 \times 10^{-2}$		
	2次	70	0	$1.1 \times 10^7$	0	$0.11 \times 10^{-4}$	$9.1 \times 10^4$
		200	0.4	$3.5 \times 10^4$	$0.11 \times 10^4$		
ケース2	1次	70	0	$2.9 \times 10^9$	0	$0.24 \times 10^{-1}$	42
		400	836	$3.5 \times 10^4$	$0.24 \times 10^{-1}$		
	2次	70	0	$1.1 \times 10^7$	0	$0.27 \times 10^{-3}$	3700
		400	0.4	$1.5 \times 10^3$	$0.27 \times 10^{-3}$		

- [注] 1) ケース1：多雨振動時の振動振幅を200mmとした場合  
 ケース2：多雨振動時の振動振幅を400mmとした場合  
 2) ケーブルの構造減衰率 $\delta$ は0.01とした  
 3) 疲労限界くり返し回数はM. BirkenmaierのS-N曲線を用いた

表-3 降雨のパターン

	補給水	降水
$R_0$	_____	_____
$R_1$		
$R_2$	_____	
$R_3$	_____	
$R_4$		

(2) リブレットモデル試験

リブレットの概略形状を模擬させてこれをケーブル表面に取り付け、「雨なし」の条件にて Rain Vibration 現象の再現を試みた。リブレットモデ

ルは、幅40mm、厚さ0.5mmのアルミ薄板および厚さ1mmの鉛板の2種類であり、図-4に示す位置でケーブル全長に取り付けた。

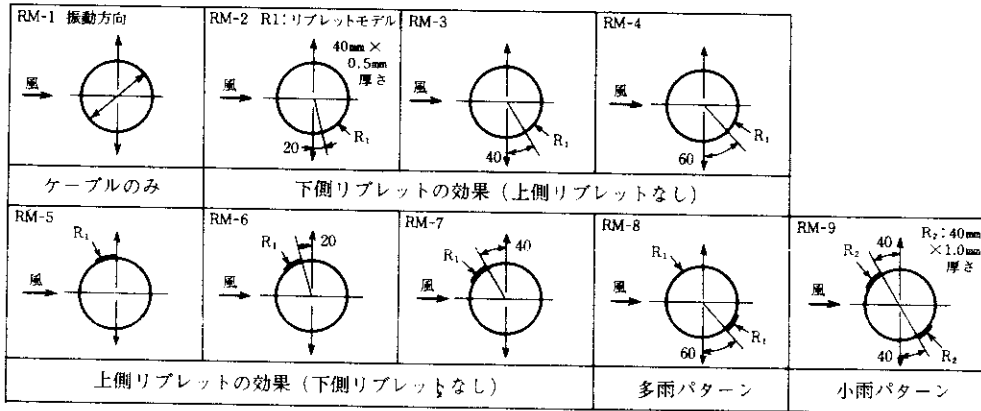


図-4 リブレットモデルのケーブル面への設置状況

1-3 Rain Vibration 試験結果と考察

1-3-1 試験結果

降雨のない条件でのケーブル模型のばね支持試験応答図を図-5(a)に示す。図中のR-1では、風速約1.5m/s付近にて振幅約20mmの渦励振、風速15m/s以上で振幅約40mmのパフェティングによる振動が見られる。

降雨条件下での試験結果は、降雨量により明確な2通りの振動パターンが出現した。

<多雨振動>

補給水と降水の両方を作用させた場合の風洞試験結果を図-5(b)に示す。いずれの結果も風速約15~20 m/sで発振し、構造減衰率の増大とともに発振風速が高くなる傾向がうかがえる。

<小雨振動>

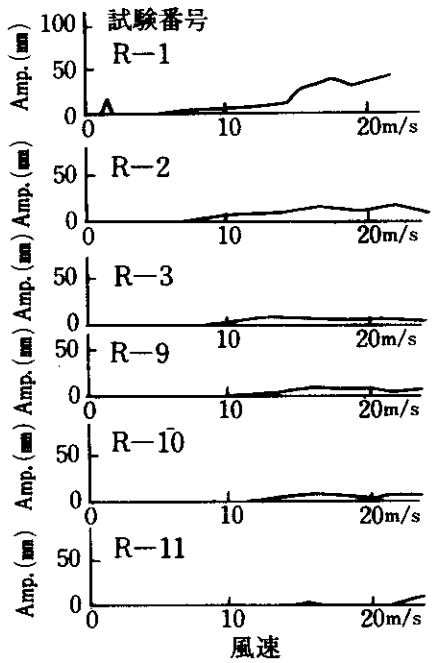
降水のみの条件下での風洞試験結果を図-5(c)に示す。いずれの結果も風速約10m/s付近に限定振動が見られ、構造減衰率を大きくすると振動振幅の現れる範囲が狭くなるとともに振幅も小さくなる傾向がうかがえる。

1-3-2 ケーブル振動とケーブル重量

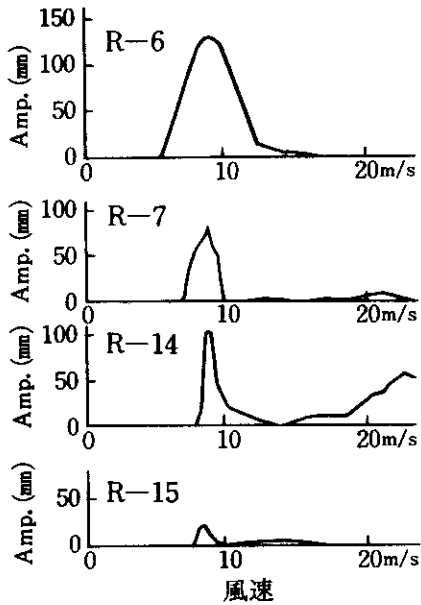
小雨振動については最大応答振幅、また多雨振動については発振風速を対象にして、これらとケーブル重量との関係を図-6に示す。

小雨振動パターンの場合、ケーブル重量を270 kg/モデル、構造減衰率を0.01として小雨パターンR<sub>3</sub>の結果から実物ケーブルの振動振幅を推計すると零になる。しかし、構造減衰率が小さくなるとケーブルの振動振幅は大きくなる。

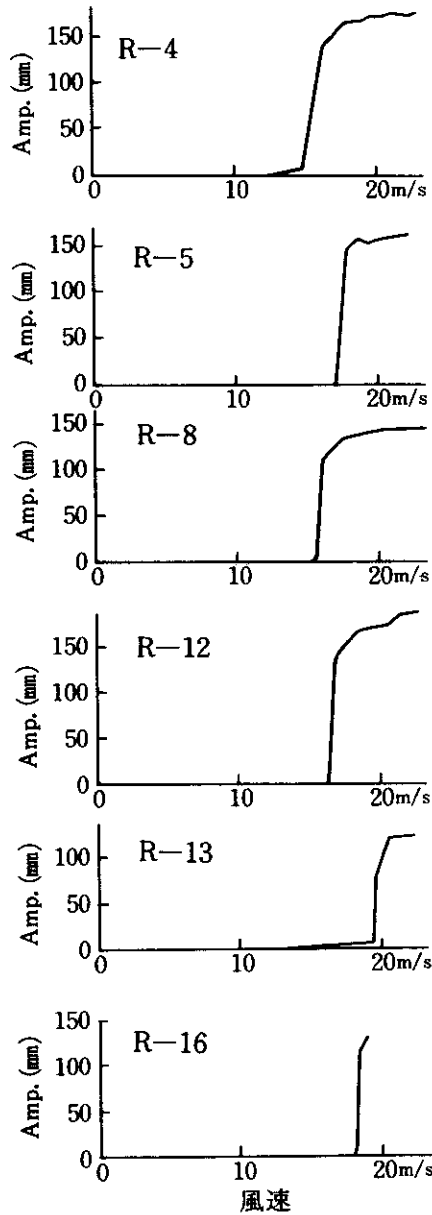
多雨振動パターンの場合、構造減衰率  $\delta = 0.01$  の結果から実物ケーブルの発振風速を考察すると20.6m/sになる。この図から構造減衰率が同じ大きさの場合、雨のパターンR<sub>1</sub>よりもR<sub>4</sub>の発振風速が高くなること、および構造減衰率が小さくなると発振風速が低下することがわかる。



(a) 雨なし (雨のパターン  $R_0$ )



(c) 小雨振動 (雨のパターン  $R_2, R_3$ )



(b) 多雨振動 (雨のパターン  $R_1, R_4$ )

図-5 Rain Vibration 試験結果

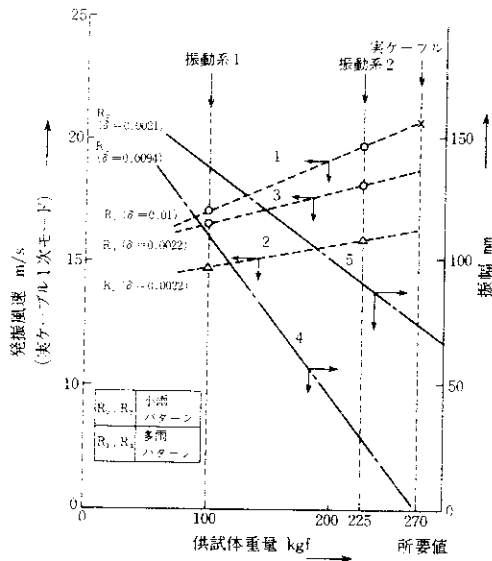


図-6 発振風速及びピーク振幅に与える模型重量と減衰の影響

### 1-3-3 雨量の影響

多雨振動は補給水と降水の両方を作用させた場合に発現する振動であるが、補給水もしくは降水の一方を定量に保ち、他方を変化させて応答を調べた。図-7に降水量を変化させた場合の結果を示す。この図より、降水量が多くなれば多雨振動の発現が低風速側へ移行する傾向がある。

図-8は、補給水を変化させた場合の結果であるが、降水量の場合と同様に、補給水が増えると発振風速は低風速側へ移行する傾向にある。

一方、小雨振動は雨量が少ない場合に生じる現象で、補給水を作用させると振動の発現が抑制される傾向となった。そこで、補給水を止めて降水量を変化させた結果を図-9に示すが、この図より降水量が増加すると小雨振動の応答振幅が小さくなるのがわかる。

### 1-4 リブレットモデル試験結果と考察

リブレットモデルによる試験結果を図-10に示す。供試体下面の風下側に取り付けたリブレットモデル(RM-2~4)では大きな振動振幅は発

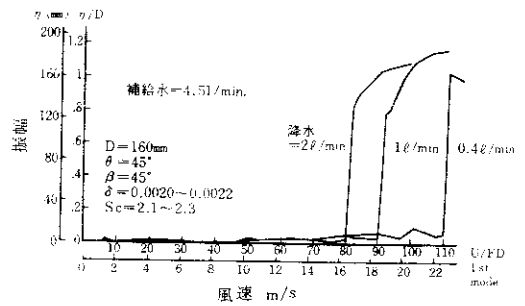


図-7 多雨振動と降水量

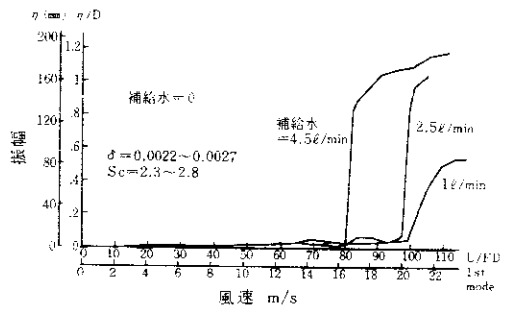


図-8 多雨振動と補給水量

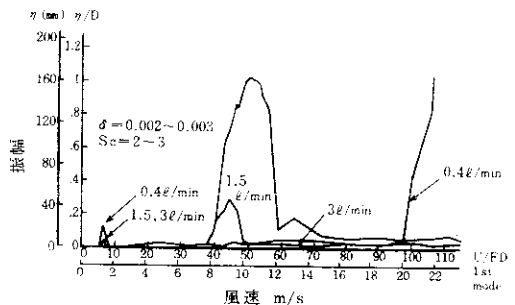


図-9 小雨振動と降水量

現しない。しかし、供試体上面の風上側に取り付けた応答結果（RM-5～7）では、風速約22m/s以上で発振し、多雨振動パターンの振動性状を示す。また、RM-9の場合は小雨振動パターンの振動性状を示す。

以上の結果より、リブレットモデルでは、モデルの諸元により応答パターンが大きく異なることがわかる。しかしながら、降雨装置を用いた実験時に、目視により観察したリブレット形状から推察する応答パターンとは、多くの点で対応しない

結果となった。

この原因は、設定したリブレットモデルの諸元が実物のリブレットを厳密に反映できていないこと、実物には常に動きのあるリブレットが、モデルでは静止していること等、実物と異なる点が多々あることによるものと考えられる。しかし、今回の一連の試験により、ケーブル表面に付着した微かな突起がRain Vibration現象を誘起させる要因となるであろうことは明白である。

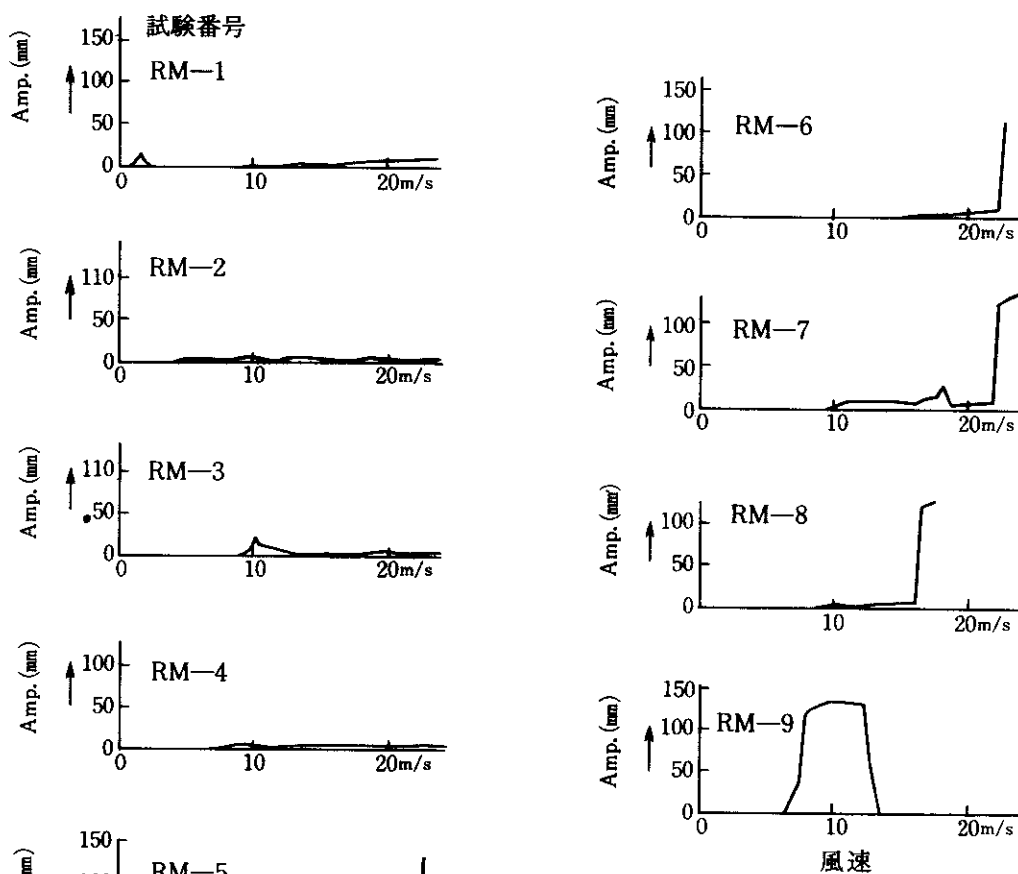


図-10 リブレットモデル試験結果



### 1-5 ケーブルの累積疲労に対する検討

Rain Vibration 試験の結果より、安治川橋梁においては、小雨振動あるいは多雨振動により、かなり大きな振幅のケーブル振動の発現が予測される。今回の試験結果から、実橋ケーブルの振幅量を推計するのは難しい。そこで、構造・規模の類似している名港西大橋で観測された250mmの振幅量を参考にして、安治川橋梁のケーブルに Rain Vibration により70mm、200mm、400mmの振動振幅が生じたとした場合のケーブルの累積疲労に対する検討を行った。検討フローを図-11に示す。対象となる振動が発現する気象条件は以下のように仮定した。

#### (1) 雨の生起確率

過去5年間の大阪管区気象台の降雨記録をもとに、小雨振動および多雨振動を発現させる降雨量別の生起確率を算出した。降雨量は10分間あたりの日最大降雨量を用い、降雨時間は日降雨量を10分間あたりの日最大降雨量で除して算出した。

小雨振動雨量  $0.5\text{mm} \leq W < 3.0\text{mm}$

多雨振動雨量  $3.0\text{mm} \leq W$

ここで

W : 10分間あたりの日最大降水量

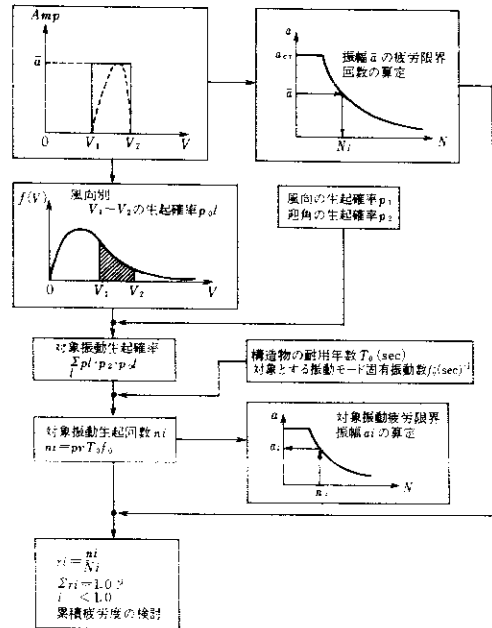


図-11 累積疲労度の算定フロー

表-4 ケーブル振動累積疲労度検討結果

試験番号	雨の パターン	補給水		降水		対数減衰率 $\delta$	スクルトン数 $Sc = \frac{m\delta}{\rho D^2}$	振動系、他
		流量 ( $\ell/\text{min}$ )	ERF* ( $\text{mm Aq}/10\text{min}$ )	流量 ( $\ell/\text{min}$ )	ERF* ( $\text{mm Aq}/10\text{min}$ )			
R-1	R <sub>0</sub> (雨なし)	—	—	—	—	0.0022	2.34	振動系 1 重量 約100kgf 質量 3.41kgf.m.s 振動数 1.62Hz (実橋1次振動数 1.28Hz)
R-2		—	—	—	—	0.0103	10.97	
R-3		—	—	—	—	0.0268	28.55	
R-4	R <sub>1</sub>	18	23	8	67	0.0023	2.45	
R-5		18	23	8	67	0.0102	10.87	
R-6	R <sub>2</sub>	—	—	0.4	3	0.0020	2.13	
R-7	R <sub>3</sub>	—	—	0.4	2	0.0091	9.69	
R-8	R <sub>4</sub>	5	6	2	8	0.0022	2.34	
R-9	R <sub>0</sub> (雨なし)	—	—	—	—	0.0023	5.51	
R-10		—	—	—	—	0.0047	11.25	
R-11		—	—	—	—	0.010	23.94	
R-12	R <sub>1</sub>	18	23	8	67	0.0021	5.03	
R-13		18	23	8	67	0.0097	23.22	
R-14	R <sub>2</sub>	—	—	0.5	4	0.0021	5.03	
R-15	R <sub>3</sub>	—	—	0.4	2	0.0096	22.98	
R-16	R <sub>4</sub>	5	6	2	8	0.0021	5.03	

ERF\* : 等価雨量

## (2) 風の生起確率

風向は橋軸方向の風を基準として、 $\pm 67.5^\circ$  の範囲とする。すなわち、16方位中7方位の風を対象とし、風速生起頻度分布は気象管署別に示されたWeibull分布に近似するものとして生起確率を算出した。

検討結果を表-4に示す。

実橋ケーブルで予測される振動振幅は、ケーブルの構造減衰性能に直接影響を受ける。安治川橋梁のケーブルではこの減衰性能が明確でないため、ここでは構造減衰率を0.01と仮定して検討を行った。その結果、多雨振動時の振動振幅を400mmと仮定した場合の1次振動モードのケースで累積疲労に対するケーブル寿命が42年になった。この結果は、橋梁構造物の寿命としてはきわめて危険度の高い値であると理解されるが、この種の検討を行うにあたっての設定条件にかなりの不確定要素が含まれているので、この寿命に関しても相当に割りきしてもよいと考えられる。そこで今後さらに検討を進めることを前提に、問題点を列挙する。

1) ケーブルの曲げ疲労に関するS-N曲線のデータは皆無に近い。このため本検討では軸力変動に対する実験データであるBirkenmaierのS-N曲線を用いた。この場合、曲げによる全面ケーブルの最大縁応力度がケーブル全断面に有効と考えることになり過大評価(安全側の評価)になること、および適用したS-N曲線は応力範囲40kg/mm<sup>2</sup>程度以下に対するものであるが、この検討では50kg/mm<sup>2</sup>を上回る応力範囲となり、S-N曲線の適用範囲を越えており、これも過大評価の要因になると考えられる。

2) 実橋ケーブルで予測される最大振幅は、ケーブルの構造減衰性能に大きく左右される。したがって、検討精度を高めるにはケーブルの減衰性能を的確に把握する必要がある。

3) この検討では、風と雨を各々独立の事象として扱い、風と雨が同時に生じる確率を各々の単独生起率の積として算出した。風・雨同時の生起確率のデータがない現状ではやむを得ないものと考えられるが、今後現地観測等により生起確率の算出精度を高める必要がある。

## 2. Wake Resonance

### 2-1 概要

風によるケーブル振動を、塔および桁との空力干渉の面から風洞試験により検討したものである。風洞模型は実橋での再現性を高めるため、実橋形状を相似させるとともに、振動特性をも相似させるよう配慮した3次元弾性模型とした。塔AP-2より張られたケーブルに着目して、塔を含む半橋模型とした。模型の大きさは、出来る限り大きくとるよう配慮したが、使用する風洞の規模に制約されて縮尺 $1/n = 1/70$ とした。

模型の振動特性の相似化は、ケーブルに対しても細心の配慮をして、剛性分布だけでなく、質量分布、外部形状およびケーブルの空間的配置に対しても相似させた。したがって、従来の風洞試験では十分な検討がなし得なかった塔の後流渦や、塔および桁との共振現象により生じるケーブル振動を、実橋に近い状態で再現してケーブルの耐風安定性を検討することが出来るものと考えられる。

### 2-2 試験方法

#### 2-2-1 試験装置

図-12に試験装置の概要を示す。風速は、風洞測定部入口上面に設置した標準ピトー管と超音波風速計により計測する。ケーブルの変位計測は、光学式変位計2台を使用して、着目するケーブルの面内振動成分と面外振動成分(水平)を対象とする。また、塔の後流渦および乱流特性の計測は熱線風速計を用いる。

#### 2-2-2 供試模型

供試体は、図-13に示すように縮尺 $1/70$ の塔AP-2を含む半橋分とし、風洞床面を水面とする関係上(現況再現)、塔は基部を水面で切った形状としている。この試験では、実橋の形状と振動特性を類似させた3次元弾性模型とするため、模型製作を以下の要領で行った。

塔および主桁の形状は、檜製の外枠により相似させ、曲げ剛性およびネジリ剛性を鋼製の剛性棒により相似させた。また、ケーブルは断面寸法を

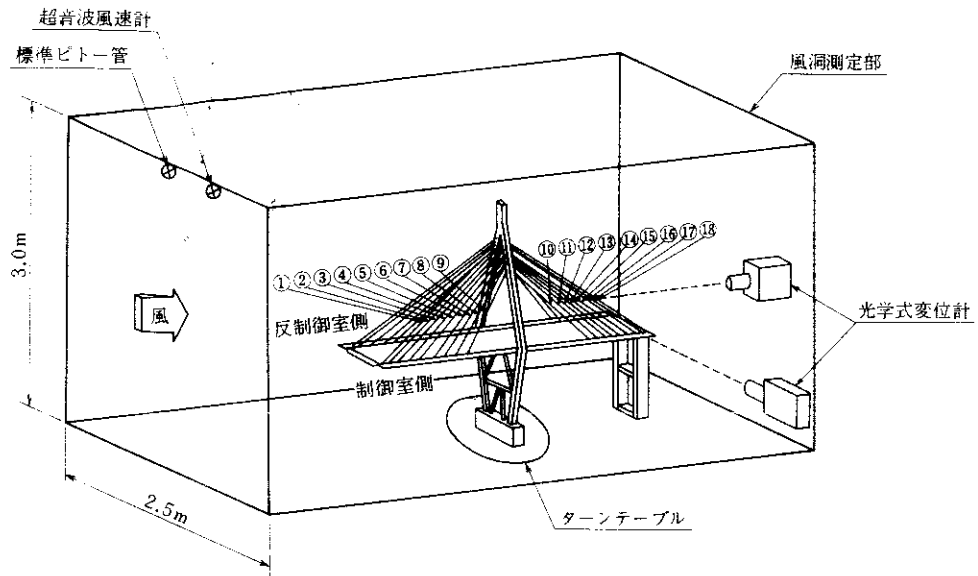


図-12 試験装置の概要

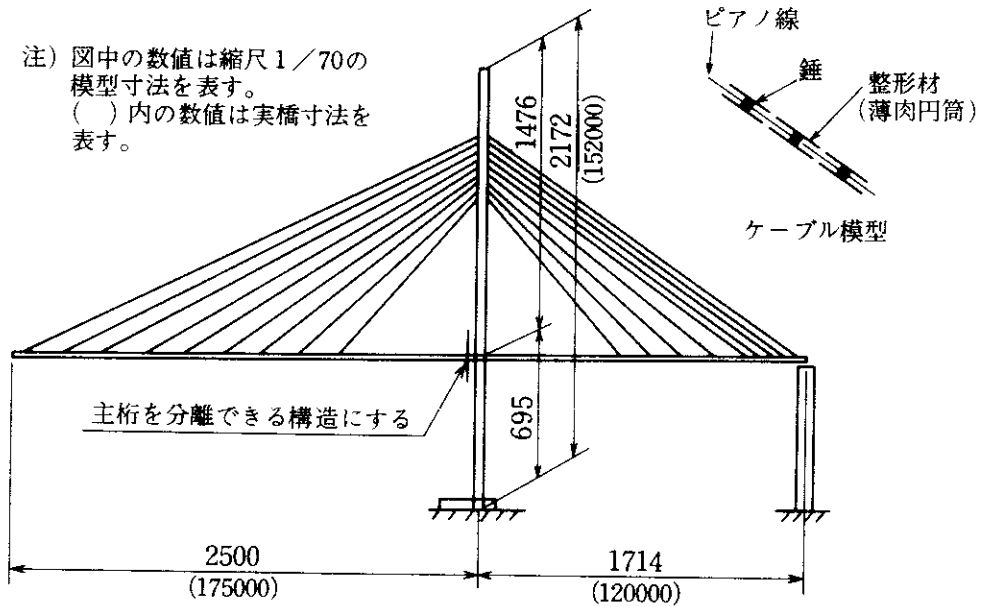


図-13 模型概要図

薄肉円筒の整形材を用いて、伸び剛性をピアノ線により相似させるとともに、質量分布は、付加重錘をとりつけて実橋に相似させた。なお、桁端部には、流れが剥離しケーブルの耐風応答特性に影響を与えないよう、フェアリングを取り付けた。

実橋に合わせた無次元量を以下に示す。

- 慣性パラメータ： $\sigma / \rho$
- 弾性パラメータ： $E / \rho V^2$
- 重力パラメータ： $gB / V^2$
- 減衰率： $\delta$

ここで

- $\sigma$ ：構造物の密度       $E$ ：ヤング率
- $B$ ：構造物の代表寸法       $g$ ：重力加速度

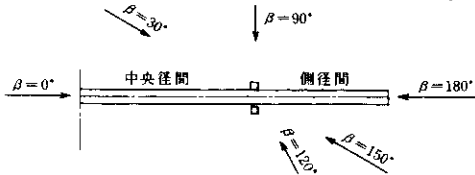
### 2-2-3 試験ケース

試験は風洞気流一様流を基本に風向きを種々変えて8ケースについて実施した。さらに気流を乱流とした場合およびケーブルの表面粗度を変えたケースについても実施した。試験ケースをとりまとめて表-5に示す。

表-5 試験ケース

風洞気流	模 型	風 向 <sup>(注)</sup>	ケーブル模型の表面粗度	備 考
一様流	全体模型①	$\beta = 0^\circ$	滑面	
		$10^\circ$		
		$20^\circ$		
		$30^\circ$		
		$150^\circ$		
		$160^\circ$		
		$170^\circ$		
		$180^\circ$		
乱流	全体模型①	$170^\circ$	滑面	主桁中央径間先端部を肉化したケース ケーブル間を相互に結合したケース ケーブルに減衰を付加したケース
		$150^\circ$		
		$150^\circ$		
		$150^\circ$		
一様流	全体模型② (側径間だけ残した構造系)	$45^\circ$	滑面	ケーブルの耐風応答特性に及ぼすRe数の影響について検討
		$60^\circ$		
		$90^\circ$		
		$120^\circ$		
		$135^\circ$		
		$0^\circ$	粗面① 粗面②	
		$0^\circ$		
		$0^\circ$		
		$0^\circ$		
		$0^\circ$		

注) 風が橋軸に沿って、中央径間側から側径間側に向かって吹く場合を $\beta=0^\circ$ とし、下図に示すように風向を定義する。これは、塔の後流域に入って振動が起こりやすいと思われるケーブルが、常に光学式変位計の設置側に来ることを意図したものである。



## 2-3 試験結果と考察

### 2-3-1 耐風応答特性

主に塔下流側のケーブルにおいて、実橋風速22~32m/sでピーク値を示す限定振動が発生した(図-14参照)。

この振動はケーブルの $l/2$ 点が腹となる1次振動で、塔下流側ケーブル群のうち $l/2$ 点が塔に近い下段ケーブルで顕著に認められた。最大応答振幅は、実橋平均倍振幅(2a)で36~214mmであり、ケーブル面外(水平)振動成分が卓越していることがわかる。

ケーブル1次振動の収束後、風向により、実橋風速40~57m/sでピーク値を示す限定振動が発生した(図-15参照)。この振動はケーブルの $l/4$ 点が腹となる2次振動(逆対象1次モード)であり、ケーブルの2次振動数が塔面内逆位相振動数に近いケーブル(具体的には中央径間の上から5、6段目、および側径間の上から4~6段目のケーブル)に限定されて出現した。また、この振動は塔の下流側だけでなく上流側にも発生した。

ケーブル2次振動が収束した後の高風速域では、パフティングの振幅が風速とともに増大する傾向にあり、同じケーブルでも一様流中より乱流中の方がパフティング振幅が大きくなる傾向にある。

### 2-3-2 ケーブル1次振動に対する検討

試験で得られたケーブル1次振動の最大応答風速を計算より得た推定値と比較すると、ごく一部のケースを除いて、両値は4%以内の誤差におさまっている。ここで用いた推計式は、塔の換算振動数 $k$ とケーブル1次振動数の関数である。このことよりケーブル1次振動は、①塔の後流に発生する交番渦(カルマン渦)によってケーブルが励振される振動(Wake Resonance)か、あるいは、②塔の後流に発生する交番渦によって塔自体が振動し、塔の振動とケーブルとが共振現象を起こした振動と考えられる。

また、塔応答加速度のパワースペクトル解析の結果、塔の後流の交番渦によって励起されたと考えられる塔の振動ピーク値の出現は実橋風速30

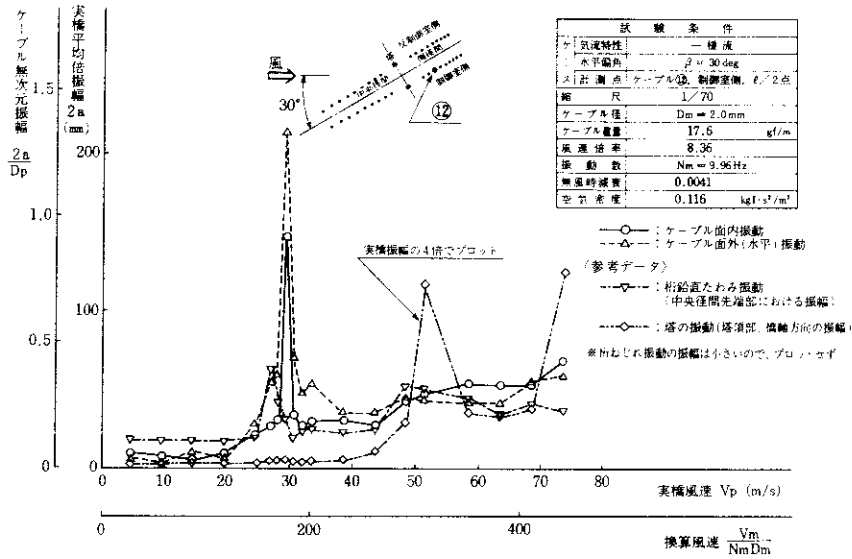


図-14 V-A図 (一様流,  $\beta=30^\circ$ , ケーブル⑫, 制御室側,  $\ell/2$ 点)

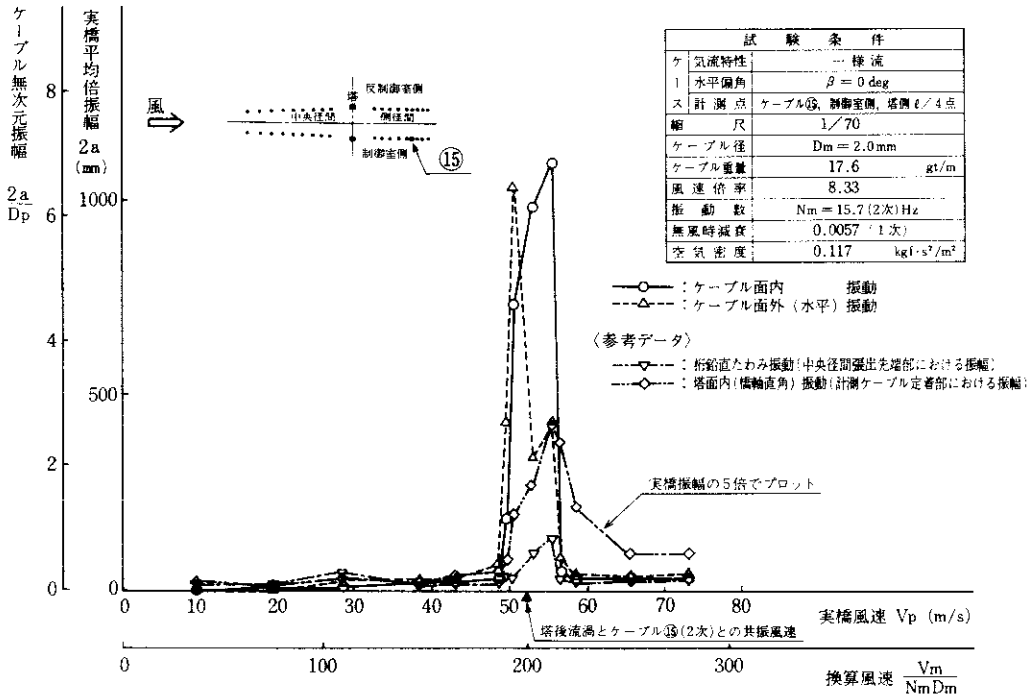


図-15 V-A図 (一様流,  $\beta=0^\circ$ , ケーブル⑬, 制御室側, 塔側  $\ell/4$ 点)

m/s以上で顕著に認められる。

以上のことより、ケーブル1次振動の発生原因としては、前述の①と②の2つの要因が考えられ、応答風速が30 m/s以下では①が卓越し、30m/s以上では①と②が共合するものと考えられる。

### 2-3-3 ケーブル2次振動に対する検討

ケーブル2次振動と塔の振動の対応関係を分析したところ、その対応関係は次の2種類に分類できる。

④ ケーブル2次振動の最大応答風速 ( $V_{cr}$ )<sub>c</sub>と塔振動の最大応答風速 ( $V_{cr}$ )<sub>t</sub>がほぼ一致している場合。

⑤ 塔振動の最大応答風速 ( $V_{cr}$ )<sub>t</sub>がケーブル2次振動の最大応答風速 ( $V_{cr}$ )<sub>c</sub>より10%程度高くなっている場合。

④の場合、塔は塔柱面内逆位相振動モードで振動し、この振動とケーブル2次振動が共振し、大振幅のケーブル2次振動が発生するものと考えられる。

一方、⑤の場合、各々の最大応答風速に僅かな差はあるが、ケーブルの最大応答風速における塔の振動数は、ケーブル2次振動数にほぼ近い値となっている。すなわち、⑤の場合は、塔の後流渦による塔振動では塔柱同位相振動モードが卓越し、この振動モードの最大応答風速より少し低い風速で塔の振動数がケーブル2次振動数に近づき、塔

の振動とケーブル2次振動とが共振したものと考えられる。

以上のことより、ケーブル2次振動は、④、⑤いずれの場合も塔の後流渦による塔振動との共振現象であると考えられる。

### 2-3-4 レイノルズ数の影響

ケーブルの耐風応答特性におよぼすレイノルズ数の影響を調査するため、ケーブルの表面粗度を3種類変えて試験を行った。その結果、ケーブル1次振動の面内振動成分は表面粗度の影響をほとんど受けないのに対し、ケーブル1次振動の面外成分は表面粗度を粗くすることによって、最大応答振幅が小さくなる傾向が認められた。また、ケーブル2次振動では、面内、面外両振動成分とも表面粗度を粗くすることによって、最大応答振幅が大きくなる傾向が認められた。

### 2-4 ケーブルの累積疲労に対する検討

風洞試験結果にもとづいて、ケーブル1次振動の応答振幅200mm、2次振動の応答振幅1,100mmの振動振幅が生じた場合の累積疲労に対するケーブル耐力の検討を行った。

対象とする振動振幅が生じる風向は、ケーブル1次振動の場合、ケーブルが塔の下流に位置するものとして、橋軸方向の風を基準に16方位中3方位 ( $\pm 33.75^\circ$ )、2次振動の場合、ケーブルが

表-6 Wake Resonanceの累積疲労度の検討結果

ケーブル振動モード (振幅)	方位	風向発生頻度 $P_{\ell}$	風向別風速発生頻度 $P_{o\ell}^{*1)}$	$P_{vi} = P_{\ell} \times P_{o\ell}$	$P_v = \sum_c P_{vi}$	ケーブル振動 $f$ (Hz)	振動生起回数(1年間) $n^{*2)}$ (回)	疲労限界くり返し回数 $N$ (回)	年間累積疲労度 $\gamma = n/N$	寿命 $\frac{1}{\gamma}$ (年)
1次 (200mm)	NNW	0.0543	$2.57 \times 10^{-3}$	$1.40 \times 10^{-4}$	$3.27 \times 10^{-4}$	0.73	7526	$1.68 \times 10^8$	$4.48 \times 10^{-5}$	$2.23 \times 10^4$
	NW	0.0408	$8.17 \times 10^{-4}$	$3.33 \times 10^{-5}$						
	WNW	0.0375	$4.11 \times 10^{-3}$	$1.54 \times 10^{-4}$						
2次 (1100mm)	NNW	0.0543	$7.20 \times 10^{-17}$	$3.91 \times 10^{-18}$	$5.76 \times 10^{-10}$	1.46	0.026	370	$7.16 \times 10^{-5}$	$1.40 \times 10^4$
	NW	0.0408	$7.65 \times 10^{-20}$	$3.12 \times 10^{-21}$						
	WNW	0.0375	$1.94 \times 10^{-13}$	$7.26 \times 10^{-15}$						
	ESE	0.0201	$2.86 \times 10^{-8}$	$5.76 \times 10^{-10}$						
	SE	0.0254	$1.92 \times 10^{-20}$	$4.87 \times 10^{-22}$						
	SSE	0.0222	$1.09 \times 10^{-25}$	$2.43 \times 10^{-27}$						
計									$1.16 \times 10^{-4}$	$8.59 \times 10^3$

注記 \*1)  $P_{o\ell} = \exp\left\{-\left(\frac{V_1}{C}\right)^R\right\} - \exp\left\{-\left(\frac{V_2}{C}\right)^R\right\}$

\*2)  $n = T_{of} P_v$ ,  $T_{of} = 3.15 \times 10^7$  S (1年間の秒数)

塔の上流、下流のいずれの位置においても発現するとして、橋軸方向の2方位を基準にそれぞれ3方位ずつの風向とした。検討の手順は図-11に同じである。

検討結果を表-6に示す。Wake Resonanceによって発生するケーブル1次振動の年間振動生起回数は7,500回程度となるが、応答振幅が小さいため、疲労限界くり返し回数は、 $1.68 \times 10^9$ 回ときわめて大きく、ケーブル寿命は $2.23 \times 10^4$ 年となり問題にならない。

塔との共振によって発生するケーブル2次振動については、応答振幅が1,100mmと大きいため、疲労限界くり返し回数は370回ときわめて小さくなる。しかし、発現風速が高いため年間振動生起回数は0.026回と小さく、したがって、ケーブル寿命は $1.40 \times 10^4$ 年となり、ケーブル耐力に対しては問題とならない。

## あとがき

近年、我国の橋梁界では、一種のブームと思えるほどに大規模斜張橋が各所で建設されている。しかしながら、そのケーブルの振動問題に関する研究事例はきわめて少なく種々の未解明事例が残されたまま建設に至っている現状にある。

今回実施した実験研究事例では、事例の乏しい分野でのデータ提供としての位置付けはできるが、ケーブルの空力干渉面からの検討は十分に解明出来るだけの成果は得られていない。とりわけRain Vibrationに関する検討は、現象の再現に大半の労力を費したのが実情であり、当初目的とした原因究明の域にはおよそ到達することができなかった。この種の研究が今後さらに関係諸氏により進展されることを期待したい。

基礎資料が乏しいなかでこれだけの成果を収めることができたのは、本研究の当初から有効な助言をいただいた京都大学 白石成人教授の御指導の賜物と深く感謝の意を表します。加えて、実験を担当された日立造船(株)および川崎重工業(株)の関係諸氏に厚く御礼を申し述べる次第です。

## 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 No27, March 1986
- 2) 白石成人, 松本勝；日本の風向別風速発生頻度分布特性 - Weibull パラメータの固定 -, 日本風工学会誌 第22号, 昭和59年12月
- 3) M. Birkenmaier, R. Narayanan ; Fatigue Resistance of Large High Tensile Steel Stay Tendous IABSE Colloquium Lausanne 1982
- 4) 松川, 亀井, 福井, 佐々木；極値統計論に基づいた平行線ケーブルの疲労強度解析, 構造工学論文集, Vol.32A, 1986年3月
- 5) 師, 伊藤；後流中における1:2長方形断面柱の空力弾性振動, 土木学会第41回年次学術講演会講演概要集
- 6) K.R. Cooper, R.L. Wordlaw ; Aeroelastic Instabilities in Wakes, Proceedings of Wind Effects on Buildings and Structures, Tokyo 1971
- 7) N. Shiraishi, M. Matsumoto, H. Shirato ; On Aerodynamic Instabilities of Tandem Structures Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 23 (1986) 437-447, Elsevier Science Publishers B.U.