

PC斜張橋並列ケーブルの耐風制振対策とその効果

佐藤 弘史*¹・竹田 哲夫*²・向 弘晴*³・及川 孝一*⁴

1. はじめに

近年、わが国におけるPC斜張橋の発展は著しく、その建設数は目を見張るものがある。これらPC斜張橋の特徴の一つとして斜材に複数本のケーブルを用いた並列ケーブルが採用されることが多いことが挙げられる(表-1)。

この理由としては、例えば、青森ベイブリッジ、碓氷橋や十勝大橋などの広幅員の1面吊りPC斜張橋では、一般に、鋼斜張橋に比べ主桁重量が重いため、容量的に不足しないように最大容量級(引張荷重で1600~1800tf程度)のケーブルでも複数本必要であること、呼子大橋、新渡橋や秩父公園橋などの2面吊りのPC斜張橋では、主塔・主桁の施工に必要な揚重設備能力とのバランスや、施工性を考慮して、比較的小容量(引張荷重で300~500tf程度)の工場製作型ケーブルが複数本用いられることが多いこと等が挙げられる。

しかし、このような並列ケーブルを斜材とするPC斜張橋の増大に伴い、ウエイクギャロッピング(以降WGと表す)と呼ばれる比較的低風速から発生する並列ケーブル特有の風による振動が観測されることが多くなって

きた^{1),2)}。特に、ケーブル間隔がケーブル径の2倍~3倍程度の時には、ケーブル径の2倍から3倍にあたる数十cmもの大振幅の振動が風下側ケーブルに発生することもあり、利用者に不安感を与えたり定着部ケーブルに疲労損傷を与える可能性があるため、有効な制振対策が不可欠であるといえる。

これまでのところ、実橋では主に2種類の制振対策が施されている。1つは、本州四国連絡橋の樫石島・岩黒島橋で初めて用いられた方式であり、写真-1に示すように斜張橋を構成するケーブルをワイヤーで連結する制振ワイヤー方式である。もう1つは、写真-2に示すような桁上に設置したダンパーでケーブル端部を掴む方式である。制振ワイヤーは取付けやメンテナンスなどが高所作業になったり、制振ワイヤー取付け位置の間隔が長いとサブスパン振動と呼ばれる制振ワイヤー取付け部を両端とする短いスパンのケーブル振動が発生する等の問題がある。一方、ダンパー方式は、ケーブル間隔がケーブル径の2倍~3倍というWGが顕著に発生するような条件^{3),4)}では、対数減衰率で0.1程度に減衰を付加させた実橋ケーブルにおいてもWGが観測されており⁵⁾、ダンパーの効果が有効な適用範囲、条件等が明確になっ

表-1 並列ケーブルを有するPC斜張橋の例

橋梁名	完成年	所在地	ケーブル	
			本数	長さ(m)
新門司大橋	1987	福岡県	5	18~76
志摩丸山橋	1989	三重県	3	16~112
呼子大橋	1989	佐賀県	2	16~136
青森ベイブリッジ	1992	青森県	2	49~133
碓氷橋	1992	群馬県	2	45~118
秩父公園橋	1994	埼玉県	2	41~207
松川浦橋	1994	福島県	2	18~80
新渡橋	1995	佐賀県	2	15~101
十勝大橋	工事中	北海道	2	13~129
伊唐大橋	工事中	鹿児島県	2	14~140

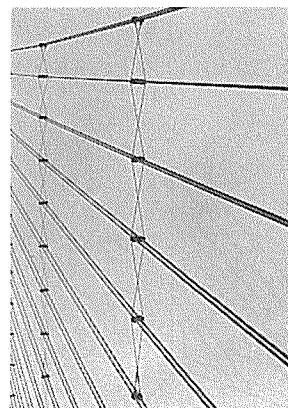


写真-1 制振ワイヤー

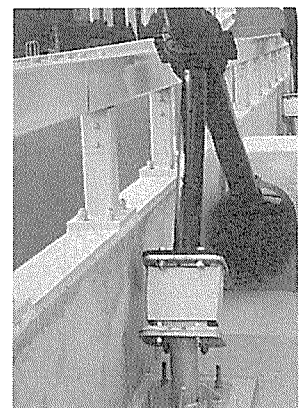


写真-2 ダンパー

*1 Hiroshi SATOH: 建設省 土木研究所構造研究室 室長

*2 Tetsuo TAKEDA: 鹿島建設(株) 鹿島技術研究所第1研究部 次長

*3 Hiroharu MUKAI: 鹿島建設(株) 鹿島技術研究所第1研究部

*4 Kouichi OIKAWA: (株)エスイー 技術開発部 部長

◇論文◇

ていない。また、最近の新しい試みとしてケーブル間隔を近接して配置されることが提案されているが⁶⁾、実橋での効果はまだ十分に確認されていない。このようにWGに対する最善の制振方法はまだ確立されていないのが現状である。

本稿では、制振ワイヤー、ダンパー⁷⁾などの既往の制振対策やケーブル間隔調整⁸⁾、ケーブル振動数調整などの新しい制振対策について、風洞実験によりその有効性を調べた結果を報告する。

2. 実験方法

ここでは、長さ 100 m 級の並列ケーブルをプロトタイプとして、以下に示すような実験を建設省土木研究所のフラッター風洞を用いて行った。

2.1 模型の概要

実験はケーブルの振動モードの影響が観測できるように3次元弾性模型(図-1)を用いて行った。模型ケーブルの諸元は以下の条件を満足させるよう密度、無次元風速、構造減衰を相似させて決定した。

- 1) ケーブル径と長さの比を実橋に近づける。
- 2) ケーブル中心間隔はケーブル径の3倍⁴⁾とする。
- 3) 質量パラメータを実橋に合わせる。
- 4) 風は一様流とし、ケーブルに直角に作用するように水平偏角は0°とする。
- 5) レイノルズ数領域が亜臨界領域($10^4 \sim 10^5$)の時、抗力係数が実橋と同じ1.2程度であるため亜臨界領域にする⁹⁾。

表-2に実橋ケーブルおよび模型ケーブルの諸元を示す。また、実橋ではケーブルと桁の角度が30°であるが、風洞が縦長のため模型は60°で設定した。この時、サグ比は、1次と2次のモードの逆転が生じない範囲で設定した¹⁰⁾。模型ケーブルは、剛性を合わせるためのより線ワイヤー($\phi 2$ mm)に、アクリル製の中空の模型セグメント($\phi 20$ mm, 長さ 120 mm)をピン結合さ

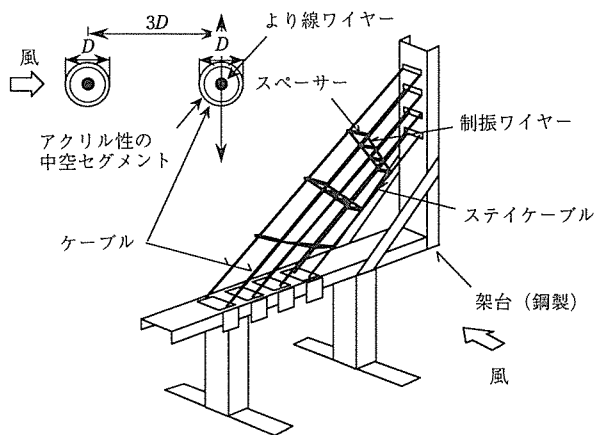


図-1 3次元弾性模型

表-2 ケーブル諸元

	実橋	模型
ケーブル長 (m)	100	4.212
ケーブル径 (mm)	75	20
単位長重量 (kgf/m)	11.05	0.785
密度 (kgf·sec/m ⁴)	200	200
たわみ1次振動数 (Hz)	1.45	3.2
最大風速 (m/sec)	40	22
レイノルズ数 $\times 10^4$	11.4	1.46

せ、重量はセグメント内部に鉛を充填させて調整した。制振ワイヤーによる結合結果を見るためには、複数の模型ケーブルが必要となるが、ここでは模型ケーブルは3段とし、4段目以下のケーブルは、セグメント無しにより線(ステイケーブルと呼ぶ)を用いて、張力を増加させたり、重りを付加することで代用させることとした。

2.2 実験ケース

実験は、無対策時の挙動および3種類の制振対策(ダンパー・制振ワイヤー・ケーブル間隔調整)を施した場合の挙動について調べた。さらに、振動数変化によりWGの発生する風速(発現風速)がどのように変化するかについても調べた。以下にそれぞれの実験ケースにおける調査項目および実験方法を示す。

ただし、制振ワイヤーに関する実験は、3段のケーブルおよびステイケーブルを制振ワイヤーで多段連結した状態で行ったが、制振ワイヤー以外の実験は他段ケーブルの影響を除くために中段ケーブル以外は取り外して実験を行った。

(1) ケース1(無対策)

制振装置に効果を比較するための基本実験で、対策を施していない状態で行った。

(2) ケース2(ダンパー設置)

ダンパーの効果を調べるため、表-3に示すようにケース1も含めて4種類の減衰について調べた。減衰は、気流の乱れ等によってケーブルの振動に影響を及ぼさないようにケーブル下端から49 cmの位置を風洞内に設置した電磁ダンパーとピアノ線で結ぶことによって付加した。

表-3 ケーブルの減衰に関する実験ケース

ケース	対数減衰率	振動数 (Hz)	備考
1-1	0.003	3.3	無対策時
2-1	0.035	3.3	
2-2	0.076	3.3	
2-3	0.018	3.3	

(3) ケース3(制振ワイヤー設置)

制振ワイヤーの有効性を確認し、施工性が向上するような連結方法、制振ワイヤー張力の影響を調べ、さらに

表-4 制振ワイヤーに関する実験ケース

ケース	制振ワイヤー	ステイケーブル		振動数 (Hz)	減衰	備考
		重量	張力			
3-1	クロス	無	30	3.2	-	連結方法
3-2	平行	無	30	3.3	0.054	基本
3-3	平行	無	290	3.3	0.049	付加剛性
3-4	平行	5.3	30	3.2	-	付加重量
3-5	平行	9.8	30	4.5	-	付加重量
3-6	平行	固定	固定	9.6~14.6	0.014	架台固定

(単位: kgf)

有効な制振ワイヤーの最小連結段数を調べるためにケーブル重量・剛性などの影響について調べた。

制振ワイヤーに関する実験ケースを表-4に示す。

(3.1) 制振ワイヤーの連結方法

ケース 3-1 のクロス連結は、図-2 (a) に示すような実橋で用いられている連結方法であり、WG によって生じた風下側のケーブル振動を振幅の小さい風上側で拘束するという考え方に基づいている。

一方、ケース 3-2 以降の図-2 (b) に示す平行連結は制振ワイヤーの取付け、張力管理が容易であり、クロス型のようにスペーサー部で制振ワイヤーを曲げないため、曲げ疲労の点で有利であると考えられる連結方法である(写真-3)。

クロス・平行連結のいずれの場合も、図-2 (c) に示すように制振ワイヤーはケーブルを 4 等分するように 3

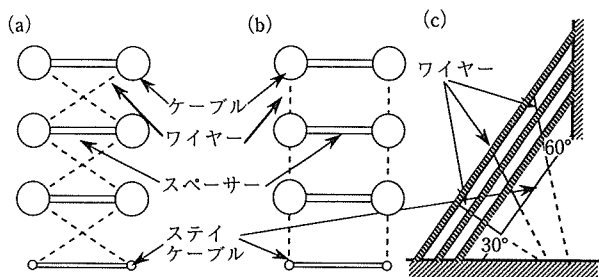


図-2 連結方法

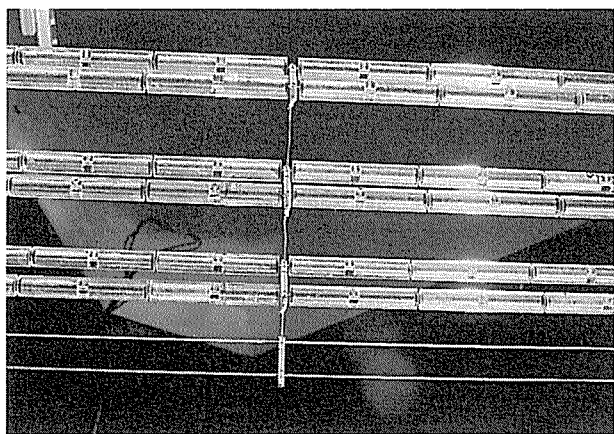


写真-3 平行連結

組、少し張力を導入して配置した。制振ワイヤーの張力は、特に測定していないが振幅 $1D$ の振動に対して張力が作用するように設定した。また、スペーサーにはアルミ製のものを用い、より線ワイヤーに直接取り付けることによりケーブルに曲げや振りが生じないように配慮した。

(3.2) 制振ワイヤー張力の影響

実橋では、ケーブルが振動した場合でも制振ワイヤーの張力がケーブルに作用するように制振ワイヤーに張力を導入している。しかし、すべての制振ワイヤーに設計通りの張力導入することは難しく、張力が不要になれば施工性が改善される。そこでケース 3-2 の状態から制振ワイヤーの張力を取り去ったケース 3-7 も行った。

ただし、制振ワイヤーを緊張する方向の変位に対しては張力が作用するようにした。

(3.3) たわみ剛性の付加方法

たわみ剛性付加の影響を調べるために、3 段の模型ケーブルと 5 段分のたわみ剛性を有するステイケーブルを制振ワイヤーにより連結した。ここで、ステイケーブルは模型ケーブル以外のケーブルのたわみ剛性を表す。

ただし、ケーブルのたわみ剛性が張力の関数であるので、ステイケーブルのたわみ剛性は張力を増加させることで考慮した。ケース 3-4 のステイケーブルの張力 290 kgf は、模型ケーブルの張力の約 5 倍に相当する。また、制振ワイヤーの張力はケース 3-1 と同様に導入した。

(3.4) 重量の付加方法

付加重量の影響について調べるために、3 段の模型ケーブルと 2 段分または 3 段分の重量を付加したステイケーブルを制振ワイヤーにより連結した。ここで、ステイケーブルは模型ケーブル以外のケーブルの重量を表す。

ケース 3-5 の 5.3 kgf およびケース 3-6 の 9.8 kgf の重りは各々模型ケーブル重量の 2 段分および 3 段分に相当する。ただし、ステイケーブルの付加重量は制振ワイヤー取付け部 3 か所に、均等に取り付けた。また、制振ワイヤーの張力はケース 3-1 と同様に導入した。

(4) ケース 4 (ケーブル間隔の調整)

図-3 に示すように $S=3D$ の平行ケーブルの間隔をそれぞれ縮小・拡大した実験を行った。ケーブル間隔の調整に関する実験ケースを表-5 に示す。(a) $S<3D$ ではケーブル端部およびケーブル長の $1/4, 1/2, 3/4$ の箇所を軟鋼線にて拘束し、(b) $S>3D$ では風上側ケーブルを風下側の風洞床からピアノ線で引張りケーブル間隔を拡張した。ただし、(c) $S=5D, 6D$ に対しては、ケーブルの間にスペーサーを設置した実験も行った。

また、詳細は後述するが、 $S=1D$ とスペーサーで $S=$

◇論文◇

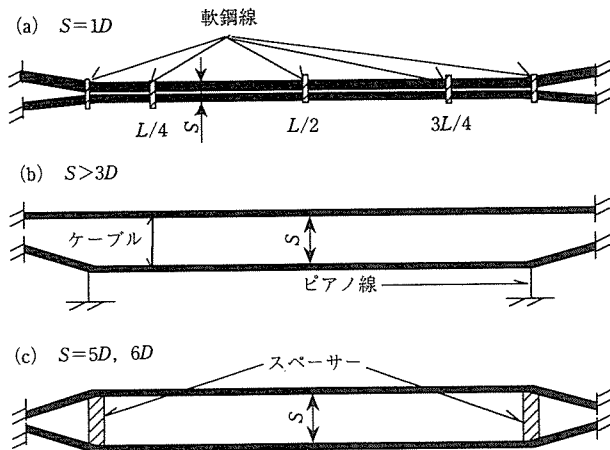


図-3 ケーブル間隔調整方法

表-5 ケーブル間隔調整に関する実験ケース

ケース	S/D	振動数 (Hz)	減衰	備考
1-1	3	3.4	0.003	無対策時
4-1	1	3.4	0.002	軟鋼線で拘束
4-2	1	3.4	0.065	軟鋼線で拘束
4-3	1.1	3.4	0.002	軟鋼線で拘束
4-4	1.5	3.4		軟鋼線で拘束
4-5	2	3.4		軟鋼線で拘束
4-6	4	3.2	0.002	ピアノ線で拡張
4-7	5	3.2	0.002	ピアノ線で拡張
4-8	5	3.2	0.003	スペーサーで拡張
4-9	6	3.2	0.002	ピアノ線で拡張
4-10	6	3.2	0.002	スペーサーで拡張
4-11	6	3.2	0.052	スペーサーで拡張

5 D, 6 D に拡張した場合は、 $S=2 D \sim 3 D$ よりは高風速であるが、振動が発生した。そこで、さらに $S=1 D$ とスペーサーで $S=6 D$ に拡張した場合については、ダンパーを設置した実験（ケース 4-2, 4-11）も行った。

(5) ケース 5 (振動数変化)

一般に、実験で測定された発現風速は、無次元風速 $V_r = V/fD$ (V ; 風速, f ; 振動数, D ; ケーブル径) が一定という仮定のもとに実橋での発現風速に換算される。したがって、無次元風速が一定であれば、ケーブルの張力を調整し、振動数を上げることにより発現風速を上げることができると考えられる。

以上のような観点から、ケーブルの張力を調整し、表-6 のように振動数を変化させた時の発現風速と振動数の関係について調べた。

表-6 ケーブル振動数とケーブル張力

ケース	張力 (kgf)	振動数 (Hz)	減衰	備考
1-1	58	3.4	0.004	無対策時
5-1	113	4.5	0.0017	
5-2	150	5.5	計測せず	
5-3	199	6.3	0.0014	

2.3 振動変位の測定方法

ケーブルの振動変位は、各々のケーブルごとにケーブル下端から 60 cm の位置に取り付けたカンチレバー状の鋼製版にひずみゲージを取り付けたカンチレバー式変位計で測定した。ケーブル中央の変位への換算は、振動形状が正弦波であると仮定して行った。また、ケーブルの振動モードはビデオ観察並びに振動変位波形から求めた卓越振動数から判断した。

3. 実験結果

3.1 無対策時の挙動およびダンパーの効果

無対策時および減衰を付加した場合の風上側および風下側ケーブルの風速と応答の関係を各々図-4 および図-5 に示す。

風上側、風下側とも振動発生以降は振動モードが 1 次であることから、各図の縦軸はケーブル中央における片振幅をケーブル径で除した無次元振幅で表わした。

風上側ケーブルの振幅は風速の増加に伴い、徐々に増加したが、鉛直・水平の方向ともに小さく顕著な振動はみられなかった。一方、風下側ケーブルは、風速 4.0 m/s の時、鉛直方向が卓越した振幅 $0.4 D$ (D ; ケーブル径) 程度の振動が急激に発生し、その後風速の増加に伴い振幅も緩やかに増加した。振動発生時の水平方向の振幅は、鉛直方向の約 $1/3$ の $0.1 D$ 程度で、その後鉛直方向と同様に緩やかに増加し、その後鉛直方向振動振幅よりも大きくなり風上側ケーブルに衝突しそうなほど大きくなった。

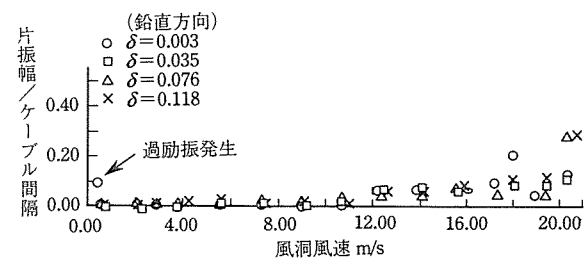


図-4 風上側ケーブル風速と応答の関係

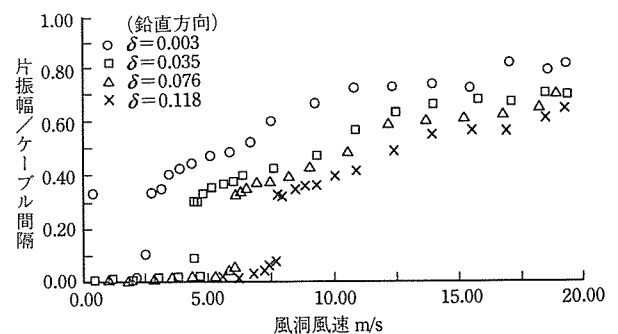


図-5 風下側ケーブル風速と応答の関係

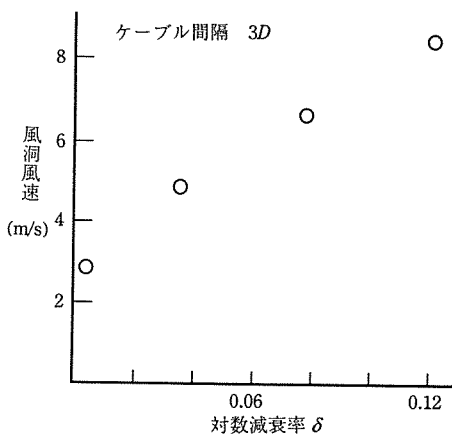


図-6 発現風速と構造減衰の関係

次に、この振幅が急激に大きくなったときの風速を発現風速として、付加減衰との関係を調べた。図-6にWGの発現風速と構造減衰の関係を示す。今回の実験では、構造減衰を大きくすると、WG発現風速は大きくなる傾向があるが、0.12程度の構造減衰では、WGの発生は止まらないことが分かった。したがって、設計風速内で、WGの発生を止めるには、かなり大きな減衰を付加する必要があると思われる。

3.2 制振ワイヤーの効果

(1) 制振ワイヤーの有効性

実橋では、クロス連結の制振ワイヤーが用いられているので、制振ワイヤーの有効性を確認するために、ここではクロス連結の結果(ケース3-1)を用いた。

クロス連結した場合、風速4 m/sですべてのケーブルに振動が発生し、その形状は、上中下段とも、また風上・風下側とも、全体1次モードであった。その時の振幅は、いずれのケーブルも水平方向の振幅が鉛直方向の振幅の2倍程度であった。

図-7にその時の中段ケーブル風下側の風速と応答の関係を無対策時と重ねて示す。振動発生時は、無対策時のような急な振幅の発生はなく、風速の増加とともに徐々に振幅が大きくなるが、風速18 m/s程度までは、振幅は無対策時よりも小さい。したがって、制振ワイヤーは、風速18 m/s程度までは振幅を低減し、有効で

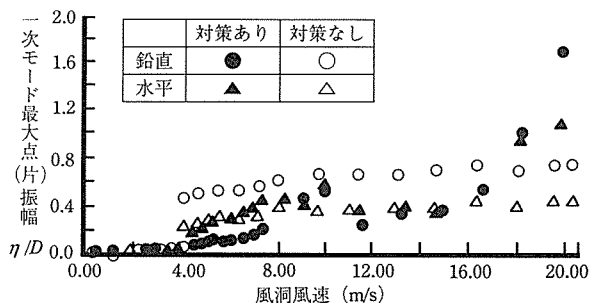


図-7 制振ワイヤーの有効性

あることが確認できた。

(2) 連結パターンの影響

制振ワイヤーのクロス連結(ケース3-1)と平行連結(ケース3-2)の比較を行った。平行連結の場合は、風上側ケーブルはクロス連結時のような大きな振動は生じなかった。一方、風下側ケーブルは上中下段が、それぞれ全体一次モードで鉛直方向に同位相で振動した。

図-8に、その時の中段ケーブル風下側の風速と応答の関係をクロス連結の場合と重ねて示す。

発現風速については平行連結、クロス連結ともに4 m/s程度で同じであった。また、振動発生後の振幅については、平行連結は鉛直方向の振動が大きくなっているのに対して、クロス連結は水平方向の振動が大きくなっているが、振幅はほぼ同程度の大きさとなっている。

したがって、クロス連結と平行連結では、制振効果という点では、有意な差は無い。

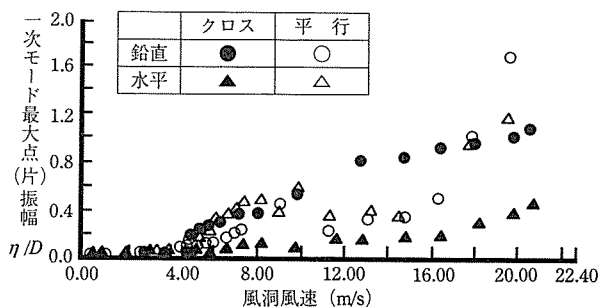


図-8 連結パターンの影響

(3) 制振ワイヤー張力の影響

平行連結で張力がある場合(ケース3-2)と無い場合(ケース3-3)の比較を図-9に示す。

制振ワイヤーの張力が無い場合、風上側ケーブルは、張力がある場合と同様、ほとんど振動しない。

しかし、風下側ケーブルの発現風速は10 m/sに上がるが、振動発生後の振幅は張力がある場合と同様である。発現風速が上がるのは、張力無しの場合、ケーブルの振動に伴いワイヤーのたるみが発生し、そこでエネルギー

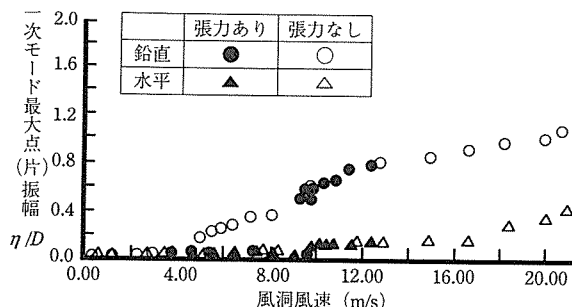


図-9 ケーブル張力の影響

◇論文◇

ギー吸収が生じるためと推察される。

このことから、張力がない方が発生頻度の高い低風速域でのケーブルの振動発生回数を低減できることが分かる。しかし、ワイヤーには弛緩と緊張が繰り返し発生することによって著しい損傷が生じる可能性が大きいので、その点の解決策が必要である。

(4) 多段連結によるケーブルたわみ剛性付加の影響

ステイケーブルの張力を5倍にして4段目以降のケーブル5段分に相当するたわみ剛性を付加(ケース3-3)させても、振動モードはほとんど変わらず、全体的な1次振動モードは収まらなかった。また、発現風速もほとんど変わらなかった。よって、たわみ剛性付加の影響は少ないことが分かった。

(5) 多段連結によるケーブル重量付加の影響

ステイケーブルの付加重量が無い場合(ケース3-2)は、風下側の上中下3段のケーブルがケーブル全体で鉛直方向に振動するモードが卓越した1次モードであった。

ステイケーブルへの付加重量とこれらの発現風速との関係を図-10に示す。ステイケーブルに、ケーブル2段分の重量(5.34 kgf)を付加させた場合(ケース3-4)は、風上・風下側とも、同時に水平方向に振動するモードが現れた。

また、3段分の重量を付加(ケース3-5)すると、全体的な振動は発生せず、サブスパン振動が発生した。

以上のことから、ケーブルの重量が振動モードや発現風速に大きな影響を及ぼすことがわかる。

また、今回のケースの場合、ケーブルを6段以上制振ワイヤーで連結すれば、振幅の大きい全体的な振動モードを抑制できることがわかる。

(6) 制振ワイヤーを固定した場合の影響

制振ワイヤーを伸ばして、先端を架台に直接固定するとケーブル全体の振動は抑えられるが、サブスパン振動

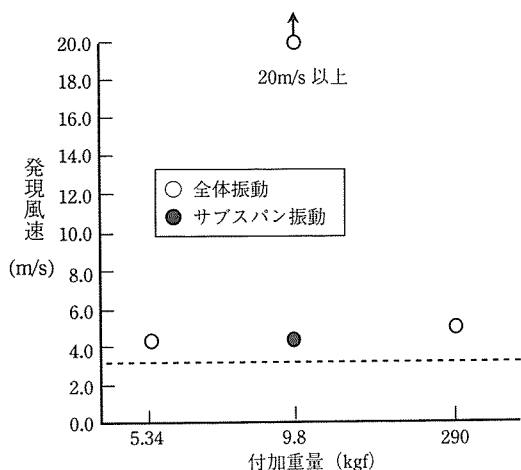


図-10 付加重量の影響

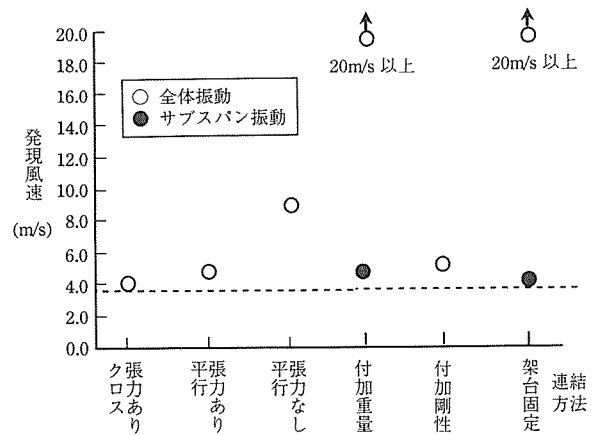


図-11 発現風速に及ぼす影響

が発生した(ケース3-6)。図-11に示すように、発現風速は4 m/sであり、振動モード、発現風速ともステイケーブルにケーブル3段分の重量を付加した場合(ケース3-5)とよく類似しており、架台に直接固定することは、多段連結によるケーブル重量付加と同じ効果を示すといえる。したがって、実橋で多段連結が難しいような場合には、制振ワイヤーを主桁に固定するのも有効な方法であると考えられる。

3.3 ケーブル間隔調整の効果

(1) ケーブル間隔の影響

ケーブル間隔と発現風速の関係を図-12に示す。 $S=1.1D$ (S ; ケーブル間隔, D ; ケーブル径)の時(ケース4-1)、風上側と風下側のケーブルが一体となって上下に振動するギャロッピングが発生した。 $S=1.1D, 1.5$

ケーブル間隔	WG発生	G発生
縮小	○	●
変化せず	△	
スパーサーによる拡大	□	
ピアノ線による拡大	◇	

WG; ウェイクギャロッピング
G; ギャロッピング

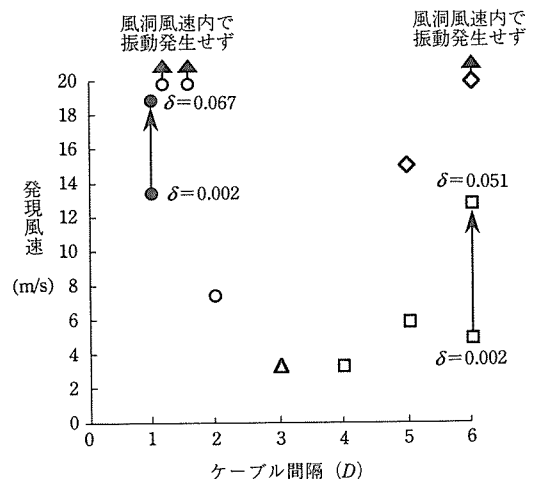


図-12 ケーブル間隔と発現風速の関係

D (ケース 4-3, 4-4), $6D$ (ケース 4-10) の時, 風洞風速内では WG は発生しなかった。 $S=2D \sim 5D$ (ケース 4-5 \sim 4-7) の時は, WG が発生した。一方, スペーサーをケーブル間にいれた場合 (ケース 4-8, 4-10) は, 風上側と風下側のケーブルが互いに逆位相で上下に振動する WG が発生した。これは, スペーサーで間隔を広げた並列ケーブルがねじれに対して不安定な振動系を形成したためと考えられる。

(2) ケーブル間隔を変化させ, さらに減衰を付加させた場合の影響

$S=1D$ では減衰 δ を 0.065 に付加することによって発現風速が減衰付加前の約 1.5 倍の 19 m/s まで上昇した。スペーサーで $S=6D$ に拡張し $\delta=0.052$ に減衰を付加させた場合, 発現風速は減衰付加前の 2.6 倍の 13 m/s に上昇した。以上 (1), (2) の結果から次のことがいえる。

- 1) ケーブル間隔が $1.1D \sim 1.5D$ の場合および, ピアノ線で $6D$ に拡張した場合は, WG は発生しない。
- 2) スペーサーで $6D$ に拡張するとねじれ振動が発生し, ダンパーで減衰 δ を 0.05 まで付加しても発現風速は上がるものの振動は収まらない。
- 3) ピアノ線で $6D$ に拡張した場合には風洞風速内で振動が発生しなかったことを考えると, スペーサーで拡張する場合には両端のスペーサーは橋体にしっかりと固定し, 2本のケーブルが連成しないようにする等の改良が必要である。
- 4) ケーブル両端で間隔を縮小あるいは拡大すると, その部分のケーブルには曲げ応力が発生するので, これに対する設計的配慮が必要である。

3.4 ケーブル振動数変化の影響

無対策の状態, ケーブルの張力を変えて, 振動数を変化させた時の風洞実験の結果から, ケーブルの振動数と WG 発現風速の関係を求めた。その結果を図-13 に示す。縦軸の発現風速は, 無次元風速と風洞風速で示し

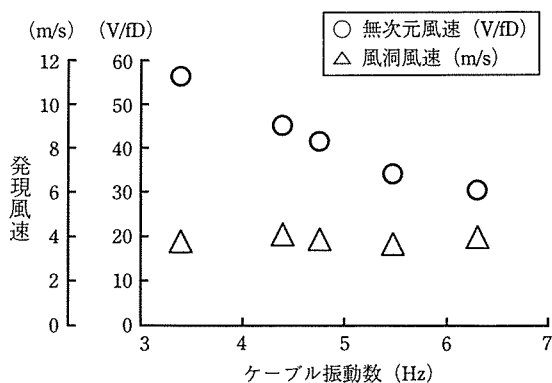


図-13 ケーブル振動数変化の影響

た。ただし, 振動数の変化を変化させたとき振動モードは変化しなかった。また, 構造減衰も表-6 に示すように $\delta=0.0014 \sim 0.0021$ であった。

無対策時の発現風速は振動数を変化させると, 無次元風速で表わしても一定とはならず, 風洞風速で表わすと 4 m/s 前後で一定となっている。このことから次のようなことがいえる。

- 1) ケーブルの張力増加によってたわみ剛性を増加させても WG の発現風速を高くすることはできない。このことは, 制振ワイヤーを取り付けたステイケーブルの張力増加によって間接的にケーブルのたわみ剛性を上げて発現風速が変わらなかったケース 3-3 の結果と対応している。
- 2) 今回の実験の範囲内においては, WG の発現風速を無次元風速を用いて風洞風速から実橋風速に換算することができない可能性があると思われる。

4. ま と め

本研究では, ケーブルの制振対策として, ①ダンパー, ②制振ワイヤー, ③ケーブル間隔調整, ④ケーブル振動数調整, の 4 種類の制振対策について 3 次元弾性モデルを用いた風洞実験により調べた。各制振対策について明らかになった事項をまとめると以下のとおりである。

(1) ダンパーの効果

- 1) WG が顕著に発生する条件では, 構造減衰を 0.12 程度に付加しても, WG の発生は止まらない。
- 2) 設計風速内で, WG の発生を止めるには, かなり大きな減衰を付加する必要がある。

(2) 制振ワイヤーの効果

- 1) 制振ワイヤー方式は, 振幅を低減するという点で有効である。
- 2) 制振ワイヤーのクロス連結と平行連結では, 制振効果に有意な差はない。
- 3) 制振ワイヤーの張力を無くすと発現風速を高めることができるが, 制振ワイヤーに著しい損傷をもたらす危険性がある。
- 4) ケーブルを制振ワイヤーで多段連結 (本実験では 6 段以上) すれば, 振幅の大きい全体振動 (1 次モード) を抑制できる。
- 5) 多段連結の効果としては, ケーブルのたわみ剛性付加よりも重量付加の方が影響が大きい。
- 6) 制振ワイヤー先端を固定すると, 多段連結と同じ制振効果が得られる。

(3) ケーブル間隔調整の効果

- 1) ケーブル間隔をケーブル径の 1.5 倍以下に縮小あるいは 6 倍以上に拡大すると WG は発生しなくな

◇論文◇

る。

2) スペースで拡張すると風上・風下の両ケーブルが連成してねじれ振動が発生しやすくなるため、実橋へ適用する場合には主塔側および桁側のスペースを橋体にしっかり固定するなどの工夫が必要である。

(4) ケーブル振動数調整の効果

1) ケーブルの振動数を張力増加によって増加させてもWGの発現風速を高めることはできない。

5. おわりに

今回、本風洞実験の範囲においては制振ワイヤーとケーブル間隔調整が制振対策として比較的有効であることがわかった。しかし、制振ワイヤーは実橋に適用されてからまだ日が浅いため、効果の定量的評価法、許容振幅の設定法など解決しなければならない問題がいくつか残っていると思われる。また、ケーブル間隔調整は実橋で適用され始めた段階であり、ケーブル間隔をケーブル径の25%の間隔で束ねた場合の制振効果が長さ80m程度までのケーブルについては風観測により確認されている¹¹⁾が、さらに長いケーブルの場合の効果等、今後確認すべき事項がいくつか残っていると思われる。

今後、PC斜張橋は、さらに発展し長大化することが予想されるが、そのために並列ケーブルについてこれらの課題を解決し、最善の制振方法を確立する必要があると思われる。本研究がその一助となれば幸いである。

なお、本研究は建設省と民間15社の共同研究「斜張橋並列ケーブル耐風制振に関する共同研究^{12),13)}」の一環として、建設省土木研究所と鹿島建設(株)、(株)エスイーが担当したものである。

参 考 文 献

- 1) 国土開発技術研究センター：斜張橋ケーブルシステムの耐風性に関する検討報告書，昭和63年
- 2) 土木研究センター：斜張橋ケーブルの耐風性検討報告書，平成5年
- 3) 宇都宮英彦，鎌倉米康：近接する並列円柱系の空気力学的挙動，土木学会論文報告集，第366号，1983年
- 4) 白土博道：複数構造物の空気力学的挙動に関する研究，京都大学博士論文，昭和63年
- 5) 竹田哲夫他：実橋観測に基づいたウエイクギャロッピングの振動特性について，第49回土木学会年講，1994年
- 6) 久保喜延，前田他：斜張橋用複数本ケーブルの耐風挙動，第13回風工学シンポジウム，1994年
- 7) 佐藤弘史他：ウエイクギャロッピングに対する減衰付加の制振効果，第48回土木学会年講，1993年
- 8) 佐藤弘史他：ケーブル間隔拡張によるウエイクギャロッピングの制振効果，第49回土木学会年講，1994年
- 9) 岡内 功，伊藤 学，宮田利雄：耐風構造，昭和52年
- 10) 土木学会：土木技術者のための振動便覧，昭和60年
- 11) 星野清治他：伊唐島大橋（仮称）束ねケーブル風応答観測，第50回土木学会年講，1995年
- 12) 建設省土木研究所他：斜張橋並列ケーブル耐風制振に関する共同研究報告書（その1），平成5年
- 13) 建設省土木研究所他：斜張橋並列ケーブル耐風制振に関する共同研究報告書（その2），平成6年

【1995年7月26日受付】