

三次元弾性体ケーブル模型を用いたウェークギャロッピングに関する検討

A study on wake-galloping of stay cables employing 3-D aeroelastic cable model

水口和之¹, 中須 誠², 春日昭夫³, 所 伸介⁴

Kazuyuki Mizuguchi, Makoto Nakasu, Akio Kasuga and Shinsuke Tokoro

*1 構造技術課長代理, 日本道路公団 名古屋建設局 建設第二部 (〒460-0008 名古屋市中区栄4-1-1)

*2 長島工事長, 日本道路公団 名古屋建設局 四日市工事事務所 (〒510-0832 四日市市伊倉1-2-14)

*3 工博 所長代理, 揖斐川橋 (PC, 鋼複合上部工) 東工事共同企業体 (〒510-0011 四日市市霞1-29)

*4 三菱重工業株式会社 長崎研究所 流体研究室 (〒851-0392 長崎市深堀町5-717-1)

The aerodynamic stability of the twin cables of extradosed bridges was investigated through a series of wind tunnel tests employing full aeroelastic cable model. The cable arrangement employed here is characterized by that W/D varies from 4.3 to 8.7 (where W is spacing of centers of cables, D is diameter of the cable), namely corresponds to the value between the critical condition of 'wake-galloping' and so called 'wake-induced flutter'. Consequently, it was found that the logarithmic damping decrement $\delta=0.03$ was necessary to mitigate the vibration, and that this criteria was not beyond that required for the suppression of 'rain-wind induced vibration'.

Key Words: Wake-galloping, 3-D aeroelastic cable model, Wind tunnel test

キーワード: ウェークギャロッピング, 三次元弾性体ケーブル模型, 風洞試験

1. はじめに

揖斐川橋は, 第二名神高速道路が揖斐川を横過する箇所に現在建設中であり, 完成すれば橋長 1,397m, 最大支間長 271.5m を有する世界初の PC・鋼複合連続エクストラドーズド橋となる。(図1)

本橋には, 総数 114 組の並列ケーブルが採用されており, ケーブルの風による振動, 特に並列ケーブル特有の現象であるウェークギャロッピング¹⁾などには細心の注意を払って検討する必要があるものと考えられる。一般的にウェークギャロప్ప

ッピングは, 渦励振などケーブルに発生する他の空力振動に比較して励振力が強いことが知られており, 総数 114 組の並列ケーブルに対する制振条件の設定は設計上重要な課題となる。

また, 本橋の並列ケーブルは直径 D が 115mm, 塔側での中心間隔 W が 500mm, 桁側での中心間隔 W が 1000mm (図1) で W/D にすると, 約 4.3~8.7 の範囲にあり, ウェークギャロッピングのみならず, W/D が 10~20 の範囲で発生することが報告されているウェークフラッター²⁾³⁾に対しても, その発生の有無の確認が必要となる。

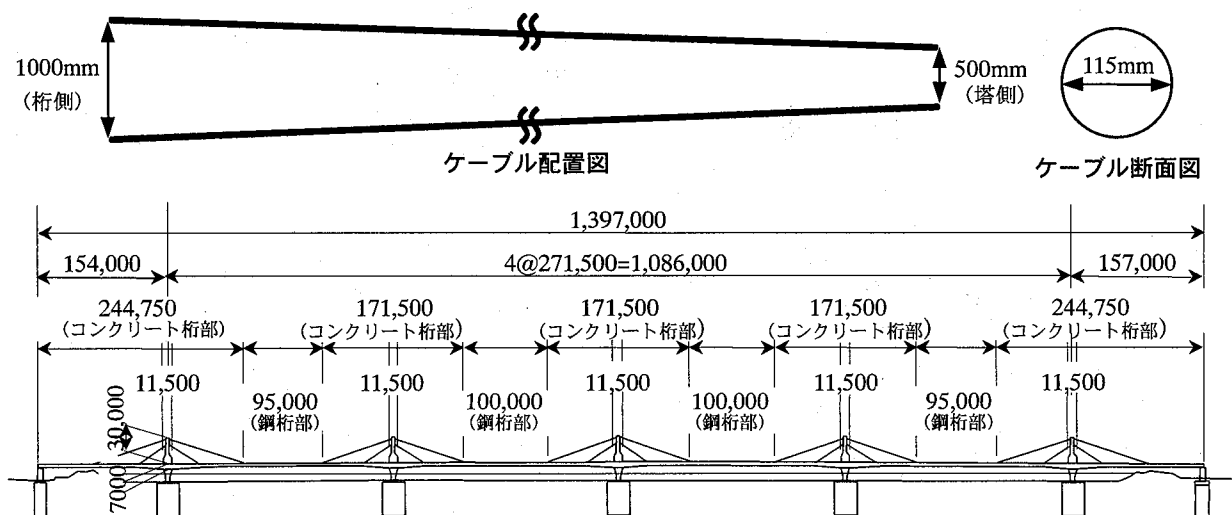


図1 揖斐川橋一般図

本稿は、本橋に採用された並列ケーブルの空力特性に関して、三次元弾性体ケーブル模型を用いた風洞試験による調査結果を報告するとともに、風洞試験を通して得られた並列ケーブルの空力特性について考察を加えるものである。

2. 風洞試験概要

図2に示す実物大三次元弾性体模型を用いて試験を実施した。上記模型は図3に示す断面を有しており、模型内部に挿入された剛性棒によってケーブルの振動特性（振動数、モード形状）を調整している。また、模型表面は、実物と同一の PE 管によって被覆されている。

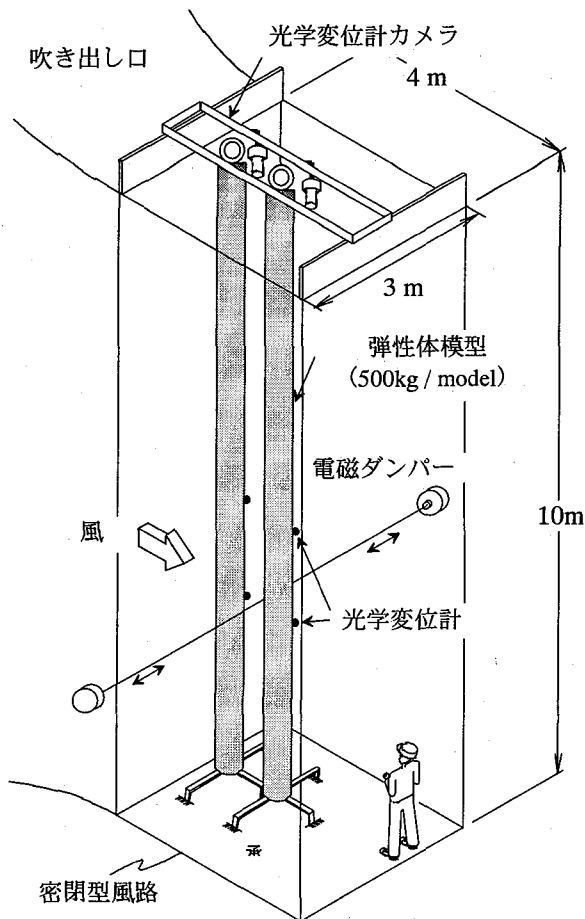


図2 三次元弾性体ケーブル模型

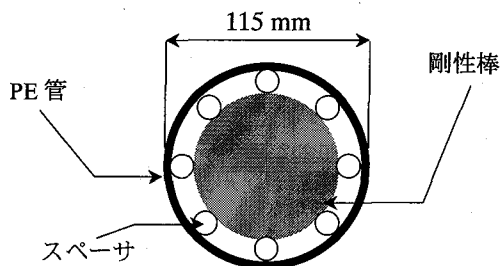


図3 ケーブル模型断面図

表1には、最長ケーブル（長さ約 94m）を対象とした実機及び模型の振動諸元。図4には、試験で設定したパラメータ（ケーブル中心間隔、風の傾斜角 α ）の定義及び試験対象範囲をまとめて示す。

表1 実機及び模型の振動諸元

項目	実機	模型
縮尺	—	1/1
ケーブル径 D	115 mm	115 mm
質量 m	53 kgf/m	53 kgf/m
振動数 (1次) f^*	1.7 Hz	1.8 Hz
対数減衰率 δ	—	0.006
Sc 数($=2m\delta/\rho D^2$)	—	40

*実機では張力振動であるが、模型上は曲げ振動で置換している。（模型の2次の振動数は実機の4次振動に対応）

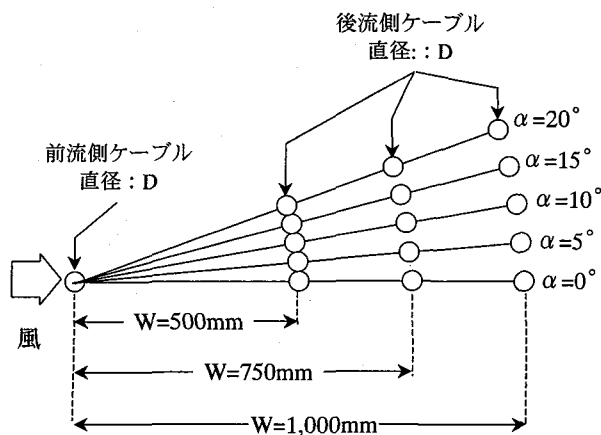


図4 試験対象パラメータの定義及び対象範囲

尚、三次元弾性体ケーブル模型を採用することによって、風洞試験実施の際には、従来の二次元剛体模型を用いた検討とは異なる下記の特徴があると考えられる。

- ・風洞試験で測定される振幅を直接実機で発生する推定振幅として評価できる。
- ・鉛直支持のため、模型のサグの影響による主流・主流直角方向の振動数比の影響を考慮する必要がない。
- ・高次モードの振動発生に対しても、同時に振動振幅を計測することが可能である。

（本橋では特殊な八の字型のケーブル配置をしているため、今回の風洞試験結果を用いたストリップ解析による検討を別途実施している。）

また、下式で定義されるレイノルズ数の試験範囲は、大凡 $3.0 \times 10^4 \sim 2.0 \times 10^5$ であった。

$$Re = \frac{UD}{\nu}$$

Re: レイノルズ数, U: 風速 (m/s), D: ケーブル直径 (m), ν : 動粘性係数 (s/m^2)

3. 風洞試験結果

3.1 ケーブル中心間隔及び傾斜角の変化に対する応答特性

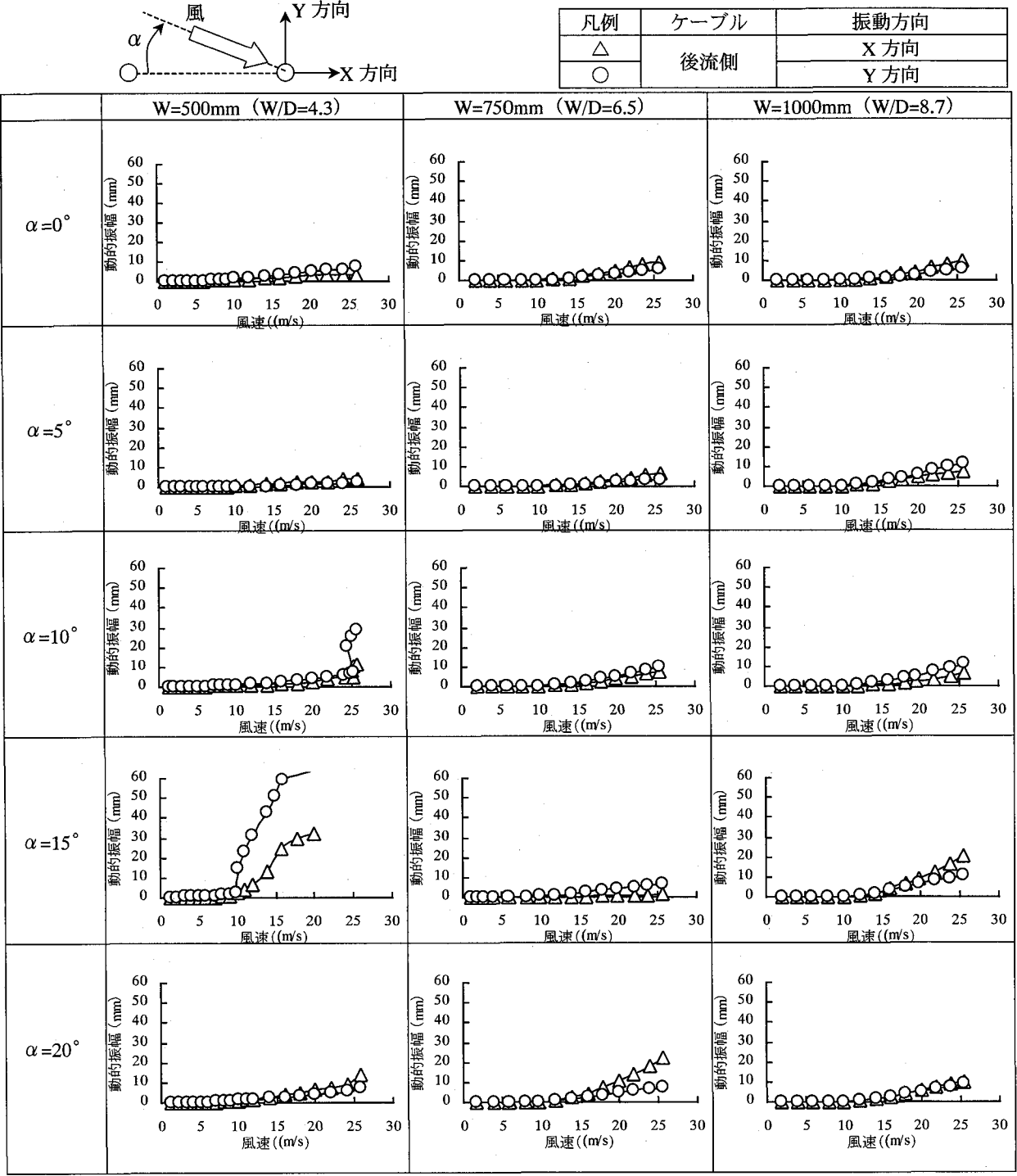
ケーブル中心間隔 (W) , 及び傾斜角 (α) を変化させた場合の後流側ケーブルの応答特性を応答図にして、表2にまとめて示す。(前流側ケーブルでは顕著な振動発生は確認されなかった。)

表2より、 $W=500\text{mm}$ 、 $\alpha=15^\circ$ の場合に後流側ケーブルに顕著なウェークギャロッピング振動が発生していることが認められる。上記振動は1次モードが支配的となって発生しており、模型における2次振動(実機では4次振動に対応)は発生しない

ことが確認されている。

また、当初発生が懸念されたウェークフラッターについては、 $W=750\text{mm}$ 、 1000mm 何れのケースにおいても顕著な振動の発生は認められず、さらに、図には示していないが、 α を 2.5° 間隔で変化させた試験においても同様に振動発生が認められなかったことから、今回採用した試験条件の範囲においては、ウェークフラッターは発生しないことが確認され、従来報告されているウェークフラッターの発生条件^{3),4)}($W=10D\sim 20D$ 、鉛直・水平方向の振動数が異なること)を裏付ける結果となっている。

表2 ケーブル中心間隔・傾斜角の変化による応答特性



また、図5には最も顕著な振動が発生した状態における振動変位のリサージュ図を示すが、これより振動主軸は風軸直角よりもむしろ風方向に傾いた方向を示すことが判る。

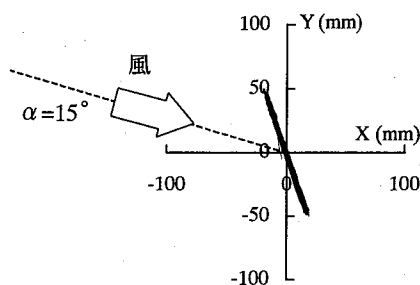


図5 振動主軸 ($W=500\text{mm}$, $\alpha=15^\circ$, $U=16\text{m/s}$)

3.2 構造減衰の変化による応答特性

最も顕著な振動の発生が確認されたケース ($W=500\text{mm}$, $\alpha=15^\circ$) における、構造減衰の変化による応答特性の変化を表3にまとめて示す。

表3 構造減衰の変化による応答特性

$\delta=0.006$ ($Sc=40$)	
$\delta=0.017$ ($Sc=115$)	
$\delta=0.026$ ($Sc=175$)	
$\delta=0.040$ ($Sc=269$)	

表3より、構造減衰の増大に伴ってウェークギャロッピングの振動発生開始風速は上昇し、対数減衰率にして $\delta=0.03$ 程度の構造減衰が確保されれば、ほぼ上記振動は抑制されることが確認された。尚、ここで求められた制振条件は通常のレインパイブレーションに対する要求値を上回るものではなく、レインパイブレーションに対する制振を考慮しておけばウェークギャロッピングに対する安全性は確保されることが判る。

3.3 振動数の変化による応答特性

前節同様に、最も顕著な振動の発生が確認されたケース ($W=500\text{mm}$, $\alpha=15^\circ$) における、振動数の変化による応答特性の変化を図6にまとめて示す。尚、ここで想定した振動数の上限値は最長ケーブルの2次振動に相当する。

(図中、振幅は $\sqrt{X^2 + Y^2}$ の絶対値で表現している)

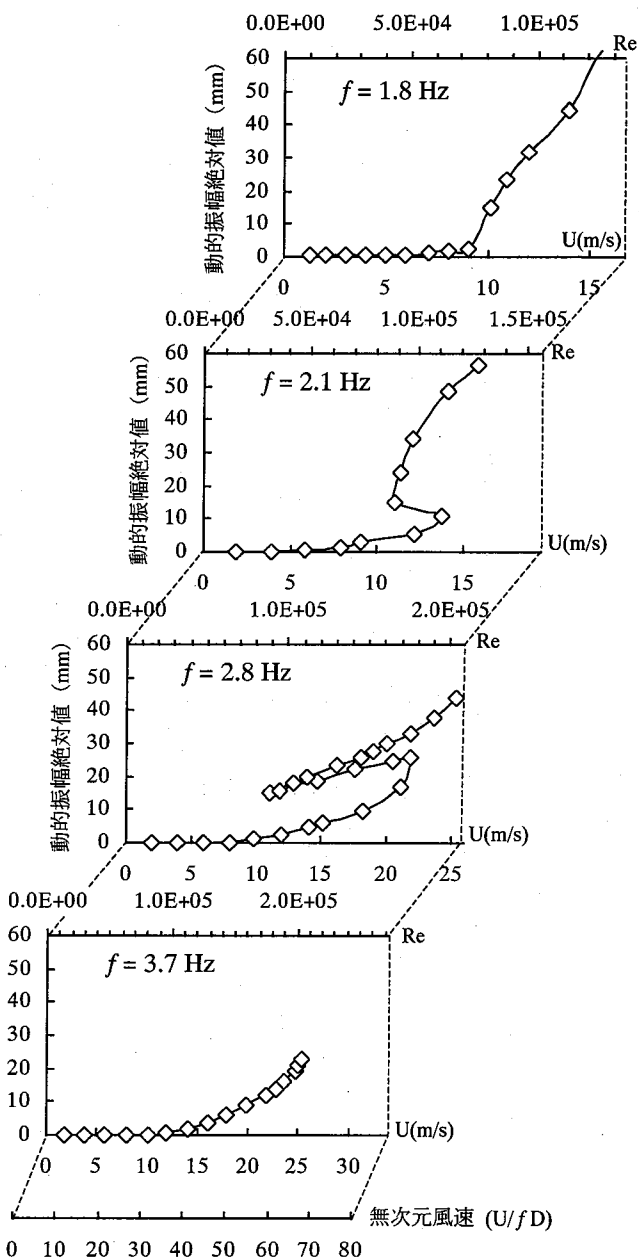


図6 振動数の変化による応答特性

($W=500\text{mm}$, $\alpha=15^\circ$)

図6より、振動数の変化によってケーブルの応答特性は複雑に変化し、無次元風速では整理できない空力振動現象が発生していることが確認できる。これは、後述するように風速と振動数の変化によって振動主軸が変化することからも、同一の無次元風速で異なる空力振動現象が発生していることが判る。

一方で、 $f=3.7\text{Hz}$ の場合に着目すると（最長ケーブルの2次振動に相当）、ほぼ振動振幅が抑制されていることから、本検討で発生が確認されたウェークギャロッピング振動では、1次振動が支配的であることが改めて確認された。

また、振動数の変化による振動主軸の変化特性に着目して、横軸に無次元風速、縦軸にレイノルズ数をとって、各試験状況で得られた振動主軸のリサージュ図をプロットしたものを図7に示す。図7より、振動主軸は無次元風速及びレイノルズ数の両方の影響によって変化していることが判る。

数値流動解析結果から、無次元風速の変化による振動主軸の変化が報告された例があり⁹⁾、さらには今回の試験レイノルズ数の範囲は抗力が急激に変化する領域に位置している⁷⁾ことから、本検討で明らかとなった振動主軸の変化特性は無次元風速及びレイノルズ数両方の変化の組み合わせの影響によって発生しているものと考えられる。

図7から振動主軸と構造水平軸（X軸）とがなす角度を θ と定義し、コンター図を描いたものを図8に示す。

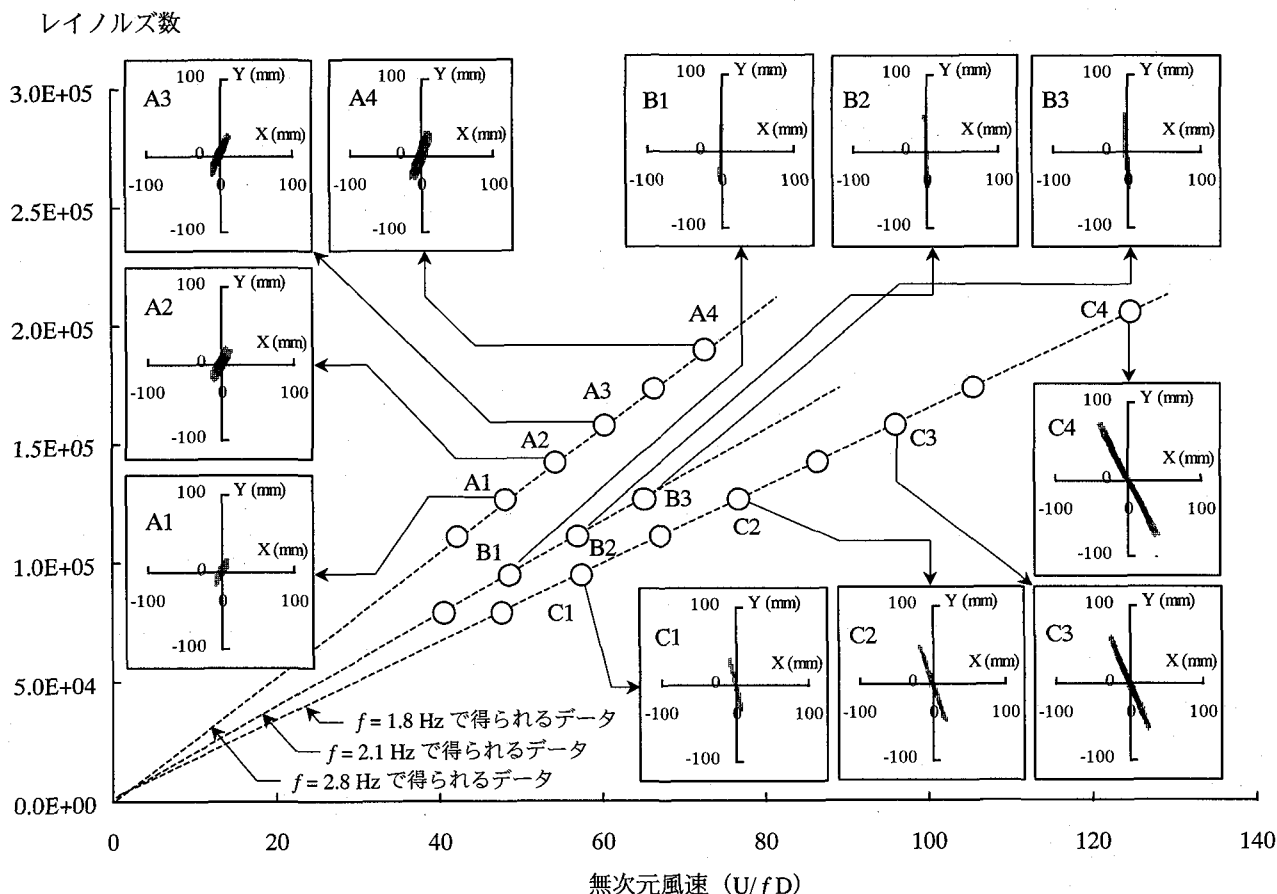


図7 振動主軸と無次元風速、レイノルズ数との関係（ $W=500\text{mm}$ ， $\alpha=15^\circ$ ）

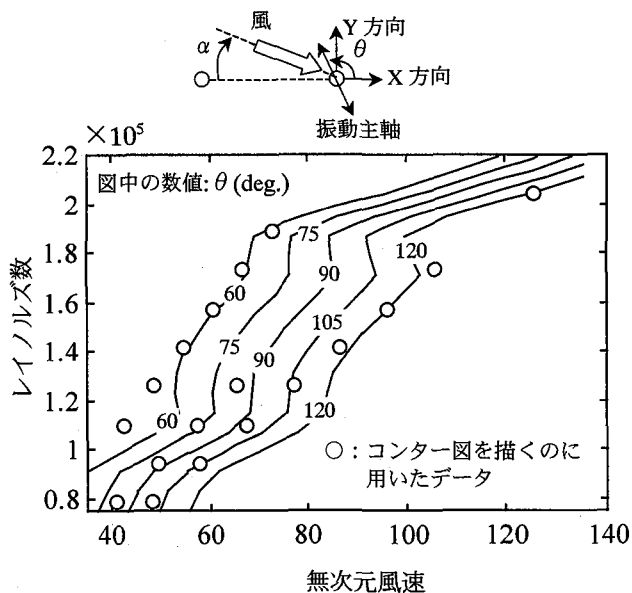


図8 θ と無次元風速、レイノルズ数の関係

図8より、本検討で採用された試験パラメータの範囲においては、無次元風速が大きくなるほど、またレイノルズ数が小さくなるほど、振動主軸とX軸とのなす角度 θ は大きくなり、振動主軸は反時計回りに移行する傾向にあることが判る。

前述の傾向をケーブルに作用する励振力の変化として簡易に図示すると、図9のようになる。

すなわち、 $\theta=90^\circ$ の状態を境として、無次元風速、レイノルズ数の変化の組み合わせによって、X軸、Y軸方向の励振力の位相差が逆転しているものと推定されるが、その過程のメカニズムについてはより詳細な検討が必要であろう。

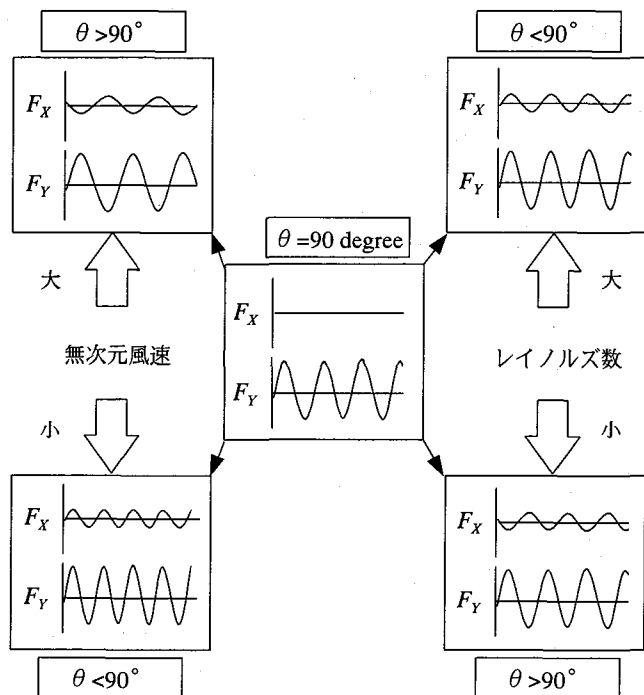


図9 励振力の変化特性の図示

4. まとめ

本橋の並列ケーブルの空力特性に関して、三次元弾性体ケーブル模型を用いた一連の風洞試験によって調査を実施した結果、以下の知見を得た。

- ・ 実機に即して、ケーブル間隔、風の傾斜角を変化させて応答試験を実施した結果、ケーブル間隔 500mm (ケーブル中心間隔/ケーブル直径=4.3)、傾斜角 15° のときに最も顕著なウェークギャロッピング振動が発生することが明らかとなった。
- ・ 上記振動は 1 次振動が支配的であり、高次振動の連成は極めて小さい。
- ・ ウェークギャロッピング及びウェークフラッターの発生領域の中間に位置すると考えられるケーブル間隔 750mm、1000mm の場合には、上記振動は何れも発生せず、レイノルズ数が $3.0 \times 10^4 \sim 2.0 \times 10^5$ の範囲においては、双方の振動に対して十分に安全であることが確認された。
- ・ 最も顕著な振動が発生したケースにおいては、対数減衰率にして $\delta=0.03$ 程度の構造減衰があればウェークギャロッピング振動はほぼ抑制され、結果的にはレインパイブレーションの制振条件を上回るものではないことが明らかとなった。

た。

- ・ 上記の制振条件に関しては、八の字型のケーブル配置形状に対して今回の風洞試験結果を用いたストリップ解析を実施したところ、ケーブル間隔が大きくなると振動が安定化される傾向が反映され、「 $\delta=0.03$ 以上」が制振条件として十分であることを別途確認した。
- ・ 振動数の変化に対して、応答特性は複雑な変化性状を示し、同一の無次元風速でも、振動主軸が変化することから、無次元風速では整理できない空力振動が発生しているものと考えられる。
- ・ 上記の振動主軸の変化特性は、無次元風速及びレイノルズ数の変化の組み合わせの効果によって説明できる可能性がある。

参考文献

- 1) 例えば, Shiraishi, N., Matsumoto, M., and Shirato, H., On aerodynamic instabilities of tandem structures. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 23: 437-447, 1986.
- 2) Simpson, A. On the flutter of smooth circular cylinders in a wake. *The Aeronautical Quarterly*.: 25-41, 1971.
- 3) Cooper, K.R. & Wardlaw, R.L., Aeroelastic instabilities in wakes. *Proc. 3rd Int. Conf. Wind Effects on Buildings and Structures*.: 647-655, 1971.
- 4) 建設省土木研究所, “斜張橋並列ケーブルのウェークギャロッピング 制振対策検討マニュアル (案)”, 平成7年9月.
- 5) Honda, A., Yamanaka, T., Fujiwara, T., and Saito, T., Wind tunnel test on Rain-induced vibration of the stay-cable. *Proceedings of International Symposium on Cable Dynamics, Liege, Belgium*.: 255-262, 1995.
- 6) Sockel, H. & Watzinger, J., Vibrations of two circular cylinders due to wind excited interference effects. *Proceedings of 2nd European and African Conference on Wind Engineering, Genova, Italy*.: 1807-1813, 1997.
- 7) Cheung, J.C.K. & Melbourne, W.H., Turbulence effects on some aerodynamic parameters of a circular cylinder at supercritical Reynolds numbers. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 14: 399-410, 1983.

(1999 年 9 月 17 日 受付)