

長大PC斜張橋の耐風安定性に関する研究

—— 一様流中におけるエッジガーダー形式の空力特性 ——

野村 敏 雄

Aerodynamic Stability Study of a Long-Span Prestressed Concrete Cable-Stayed Bridge —— Aerodynamic Behavior of Edge Box Girder under Uniform Flow ——

Toshio Nomura

Abstract

In recent years, the construction of long-span bridges is on the increase. Prestressed concrete cable-stayed bridges are dynamically very efficient structures of relatively low cost that blend in well with the landscape. Maintenance is also easy. Consequently, the adoption of edge box girders for cable-stayed bridges is increasing worldwide, but problems related to the aerodynamic stability of the structure have emerged.

The aerodynamic stability of edge box girders for a prestressed concrete cable-stayed bridge was investigated under uniform flow conditions by conducting several wind tunnel experiments. As a result, the section of the bridge deck was optimized to prevent torsional flutter within an angle of attack varying from -5 to $+5$ degrees. It is therefore possible to guarantee the aerodynamic stability of long-span prestressed concrete cable-stayed bridges.

概 要

近年、長大スパンを有する橋梁の建設が増加しているが、その中でPC斜張橋は力学的に極めて合理的であるとともに、経済性や美観にも優れており、維持管理が容易なことなどの特徴も有している。世界的にはエッジガーダー形式と呼ばれる二主桁断面を採用する例が増加しているが、他形式と比較して耐風性に劣るという指摘も一方にはある。

本研究はPC斜張橋（橋長：1000m、塔高120m、総桁幅：32.4m、桁高：2.5m）にエッジガーダー形式を採用する際の耐風安定性を一様流中における風洞実験により調査したものである。静的空力特性および動的応答特性に関して調査した結果、迎角が ± 5 度の範囲において全く空力不安低振動が発現しない桁断面が見出され、長大スパンを有するPC斜張橋においても、耐風安定性を確保できることが確認された。

1. はじめに

近年、本州四国連絡橋や横浜航路横断橋などのように長大スパンを有する橋梁の建設が増加しているが、その中でもPC斜張橋^{1)~4)}は力学的に極めて合理的で、経済性や美観にも優れている。また、PC斜張橋は維持管理が容易なこと、桁高を抑えて桁下空間を大きくとれること及び構造形式の選択が広いことなどの特徴を有している。

世界における近年の動向を見ると、長大スパンにはエッジガーダー形式の採用例が増加しているが、一方ではエッジガーダー形式の斜張橋は他の形式の斜張橋と比較して耐風性に劣るという指摘もある。これは、箱桁断面と比較してねじれ剛性が小さくなり、ねじれ振動数が低下する可能性が有ることによると考えられる。

そこで、今後さらに長大スパン化する橋梁（500m以

上）の設計・施工に対応するためには、主桁、主塔およびケーブルに対する空気力学的特性を正確に把握し、耐風安定性を照査することが必要である。

本研究はその中で桁断面の耐風安定性を風洞実験により検討を行ったものである。具体的にはフェアリング形状が桁断面の耐風安定性、特にフラッター発現性状に与える影響を調査することである。ここでは、二次元剛体模型を用いて三分力実験およびパネ支持実験を実施し、種々のフェアリング、センターバリアおよびカバープレートと呼ぶ付加物を取り付けたそれぞれの断面の迎角特性および減衰特性などを評価した。

2. 振動特性

本研究で対象とした斜張橋の一般図をFig. 1に示す。本橋は三径間連続PC斜張橋で主径間500m、側径間250m

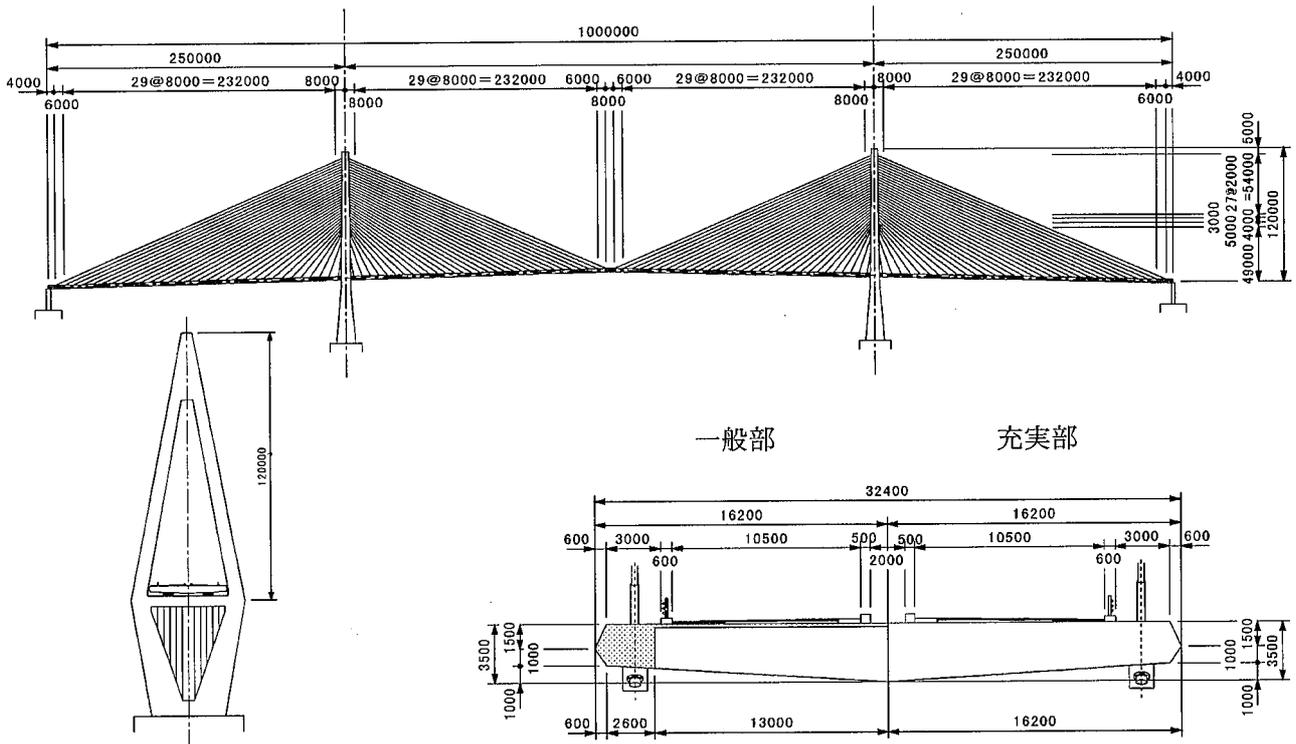


Fig. 1 斜張橋の概略
Outline of the Cable Stayed Bridge

および塔高120mとなっている。また、一般部における総桁幅は32.4m、桁高は2.5mである。

支間割りおよび主径間長と塔高との関係⁵⁾はおおむね従来の三径間の鋼橋の同様である。桁高は従来の鋼橋と比較して小さく、逆にケーブル段数は鋼橋と比較して多くなる傾向にある。

2.1 解析方法

解析は汎用非線形解析プログラムABAQUSにより全橋立体フレームモデルを用いて実施した。各部材は以下のようなモデル化を行った。ここで、各部材の質量は分布質量として与えられている。

主桁：曲げ剛性、ねじれ剛性および軸剛性を有する空間梁要素。

横桁：主桁の曲げおよびねじれをケーブルに伝達する剛梁要素。

主塔：曲げ剛性、ねじれ剛性および軸剛性を有する空間梁要素。頭頂部は二本の部材を一体化する剛梁要素で連結。

ケーブル：軸剛性のみを有するトラス要素。

支承：主塔と主桁はジョイント要素で結合。

高欄：付加質量として定義。

2.2 解析結果

Fig. 2に鉛直1次たわみ振動モードとねじれ1次振動モードを示す。それぞれ1次モードおよび9次モードに対応しており、鉛直1次たわみ振動数は $f_{\parallel}=0.143\text{Hz}$ 、ね



Fig. 2 振動モード
First Eigenmodes for Vertical Bending and Torsion

じれ1次振動数は $f_{\theta}=0.51\text{Hz}$ である。

鉛直たわみ振動数と最大支間長との関係は推定式⁶⁾では $f_{\parallel}=100/L=0.2\text{Hz}$ となるが、本橋では $f_{\parallel}=0.143\text{Hz}$ となりやや低めの結果となった。たわみとねじれの振動数比の関係は従来の斜張橋と同様の傾向である。

2.2.1 支持条件の影響 連続桁形式とフローティング形式における支持条件の相違による影響はたわみ、ねじれ振動数ともにほとんど見られなかった。

2.2.2 モデル化の影響 回転中心の位置^{7), 8)}は等価質量や等価極慣性モーメントとも関連し風洞実験を行う際には重要な実験条件となる。回転中心を重心位置とした場合にはわずかにねじれ振動数が低下するものの両者にほとんど相違がなかった。

2.2.3 部材剛性の影響 主桁の曲げ剛性およびケーブルの軸剛性を変化させてその影響をみると、曲げ剛性の増加はねじれ振動数の増加に直接寄与せず、ねじれ振動数を増加させるためにはケーブルの剛性を増加させる方が効果的であった。

3. 静的空力特性

3.1 実験内容

Fig. 3に三分力実験に用いた断面形状の一覧を示す。模型の断面形状は基本断面(K1)、基本断面に架設時の高欄を考慮した架設系(KA)、高欄や地覆等を含む完成系(F00)の3種類に分けられる。フェアリング(F01~F12)を取り付けた実験はすべて完成系を対象として行った。また、センターバリア(C1)およびカバープレート(C2)を取り付けた実験は計画断面として採用されたフェアリングF1を取り付けた断面を用いて実施した。

3.2 実験方法

実験に使用した模型は檜製で、縮尺は1/80である。実験は風洞の両側に設置された三分力天秤に2次元剛体模型を取り付けて行った。

模型の回転中心はせん断中心位置とした。各係数は次のように実験結果より求められる。三分力係数は風軸定義である。

$$C_D = P_D / (\frac{1}{2} \rho U^2 A_N) \quad \dots \quad \text{抗力係数}$$

$$C_L = P_L / (\frac{1}{2} \rho U^2 B) \quad \dots \quad \text{揚力係数}$$

$$C_M = M / (\frac{1}{2} \rho U^2 B^2) \quad \dots \quad \text{空力モーメント係数}$$

と表される。

ここに、

- P_D : 単位長さ当たりの抗力
- P_L : 単位長さ当たりの揚力
- M : 単位長さ当たりの空力モーメント
- ρ : 空気密度
- U : 風速
- B : 弦長
- A_N : 単位長さ当たりの投影面積

3.3 実験結果と考察

三分力係数は風速が $U=10\text{m/s}$ および 20m/s において、迎角を $\alpha = \pm 15$ 度の間で変化させて計測した。Table 1に実験結果の一覧を示す。

風速 $U=10\text{m/s}$ および 20m/s における全体的な迎角特性をみると、抗力および揚力はいずれの断面においても風速依存性はほぼ認められず、同一の性状を示している。一方、空力モーメント係数の場合は負勾配となる迎角 $\alpha = +5^\circ$ 近傍において、風速 $U=20\text{m/s}$ の方が負勾配が大きくなっており、レイノルズ数の影響が残る結果⁹⁾となった。

3.3.1 フェアリング形状の影響 Fig. 5にフェアリング形状の相違の影響が最も現れた空力モーメントに関する三分力曲線を示す。

フェアリングの縦横比(桁高とフェアリング長さの比, Fig. 3参照)が最も小さい場合には形状の相違に関わらずほぼ同様の性状を示すが、縦横比が大きくなるに

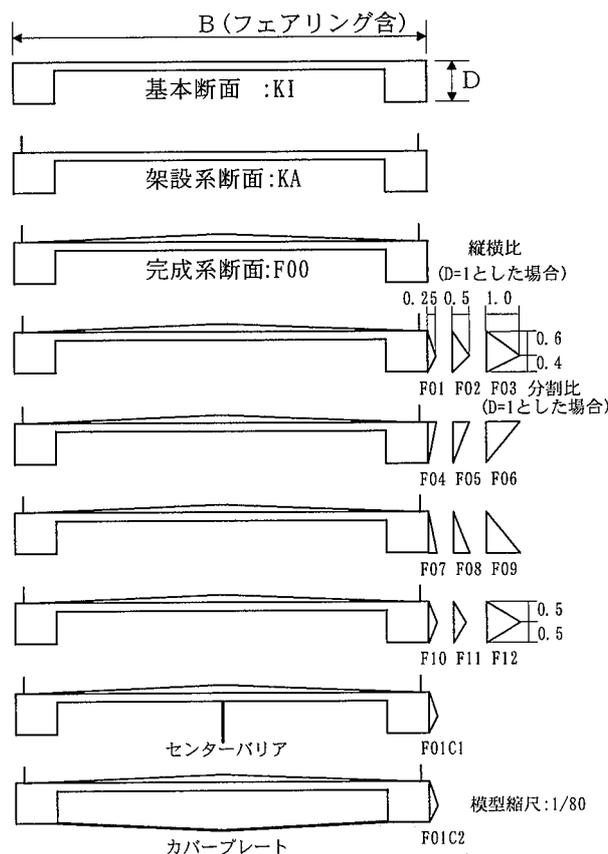


Fig. 3 断面形状一覧
Sections for Stability measurements

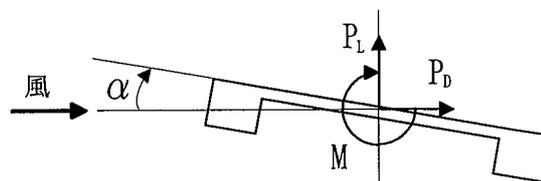


Fig. 4 三分力の定義
Definition of Wind Forces in the Wind Axes

連れて形状の相違による影響が現れる。本橋の場合はフェアリング形状が直角三角形の場合よりも二等辺三角形に近い形状の方が良好な性状を示しており、迎角が ± 5 度の範囲において負勾配が生じなかった。

また、同一の分割比(桁高と三角形の頂点位置の比, Fig. 3参照)ではやはり縦横比が大きくなるに連れて性状が改善される傾向にある。F1~F3における分割比(0.6:0.4)では、F02に見られるように縦横比が0.5程度でも改善効果が大きい結果となっている。

3.3.2 断面形状の影響 Fig. 6は基本断面に高欄等が付加され、断面形状が変化する影響を示している。

抗力係数は基本断面(K1)に高欄等が付加されて架設系(KA)、完成系(F00)へ断面形状が変化するにつれて、負迎角では値が大きくなるが、正迎角では各断面間においてほとんど相違がない。フェアリング(F1)が取り付けられると、全体的にやや低下する。しかし、センターバリアおよびカバープレートを設置した場合は明らかに性状

の変化が見られ、前者では正迎角のみであるが、後者では負迎角も含めて抗力係数が低下している。

揚力係数は抗力係数と同様の傾向が見られ、センターバリアおよびカバープレートの設置により正迎角における値が小さくなる性状を示す。ただし、カバープレートを設置した場合には負勾配の領域も小迎角側にシフトするので必ずしも挙動が良好になるとは言い難い面もある。

空力モーメントは付加物が設置されると正迎角側に全体的な挙動がシフトする傾向を示す。したがって、正迎角での負勾配領域も大迎角側にシフトする。この場合もセンターバリアおよびカバープレートを取り付けた場合の性状の変化が大きく、特にカバープレートを取り付けた場合の負迎角での挙動は他の場合と全く異なっている。カバープレート付きでは $\alpha = \pm 5^\circ$ の領域では直線的な正勾配となり、その外側で負勾配が生じている。

4. 動的応答特性

4.1 実験内容

完成系断面におけるフェアリング、センターバリアおよびカバープレートの有効性を調査するため主に発散振動が生じる可能性の多い風速域を中心として実験を行った。パラメータはフェアリング形状や対数減衰率などであり、三分力実験で不安定振動の発生が予測された迎角が $\alpha = +3^\circ$ より調査を開始してフェアリングの性能調査を行った。

4.2 実験方法

バネ支持実験は当社保有の単回路回流式密閉型風洞

(高さ:3.0m, 幅:2.0m)を用い、たわみ1自由度およびねじれ1自由度でそれぞれ実施した。

また、極慣性モーメントを所定値に設定することが実験上困難であったので質量減衰パラメータを一致させて実験を行った。したがって、ねじれ振動の減衰率は $\delta = 0.02$ 以下となる。使用した実験条件をTable 2に示す。

4.3 実験結果と考察

たわみ1自由度の実験ではすべてのケースにおいて有意な振動現象が発現しなかった。したがって、以下における考察はねじれ1自由度実験に関するものである。なお、実験時の対数減衰率は $\delta = 0.02$ より小さい値である

Table 1 実験結果一覧
Summary of Experimental Results

断面形状	U=10m/s			U=20m/s		
	CD	$dC_d/d\alpha$	$dC_y/d\alpha$	CD	$dC_d/d\alpha$	$dC_y/d\alpha$
F00	1.57	10.6	0.90	1.61	10.3	1.04
F01	1.53	11.3	0.87	1.57	11.2	0.89
F02	1.57	14.7	1.11	1.56	16.2	1.04
F03	1.38	10.0	1.23	1.36	8.66	1.26
F04	1.58	10.1	0.98	1.57	10.4	1.05
F05	1.58	9.51	1.04	1.59	9.8	1.10
F06	1.54	9.24	1.16	1.55	9.5	1.19
F07	1.57	11.6	0.83	1.59	11.8	0.90
F08	1.56	12.5	0.78	1.57	12.5	0.83
F09	1.58	15.0	0.83	1.59	15.8	1.02
F10	1.53	10.8	0.80	1.57	10.9	0.81
F11	1.57	12.0	0.80	1.58	11.6	0.81
F12	1.47	8.3	1.22	1.45	8.18	1.23
F01C1	1.48	11.0	1.16	1.51	11.0	1.23
F01C2	1.18	6.3	1.72	1.19	6.3	1.74
K1	1.33	12.0	0.71	1.38	11.3	0.84
KA	1.61	12.0	0.78	1.60	11.6	0.89
備考	CD, $dC_d/d\alpha$, $dC_y/d\alpha$: 迎角 $\alpha = 0$ における値					

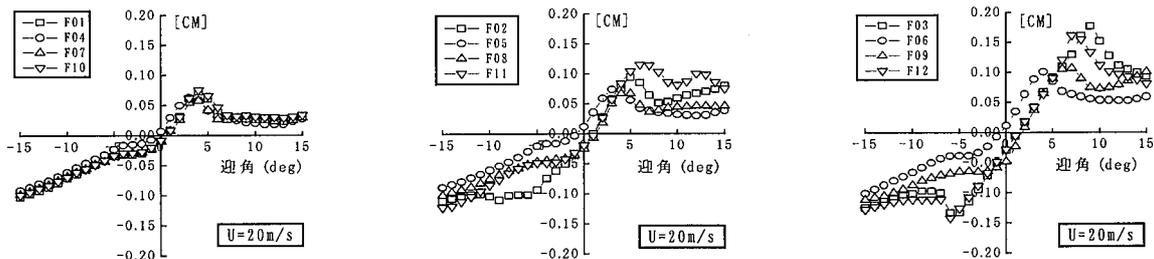


Fig. 5 空力モーメント係数
Moment Coefficient

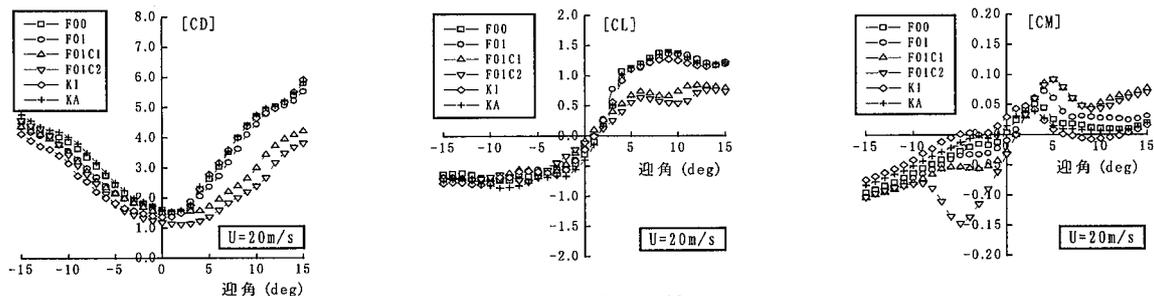


Fig. 6 三分力特性
Steady Coefficients

が、ここでは $\delta=0.02$ に相当する実験という意味で図表等では $\delta=0.02$ と表記した。また、減衰率を変化させた場合の表記も同様である。

4.3.1 フェアリング特性 Fig. 7は迎角が $\alpha=-3^\circ \sim +3^\circ$ における風速-振幅関係を示したものである。迎角 $\alpha=+3^\circ, 0^\circ, -3^\circ$ の順に実験を実施し、有効なフェアリングの絞り込みを行った。

上段は迎角 $\alpha=+3^\circ$ の結果である。フェアリングのないF00と同様にF04, F05, F06でもフラッターが発現した。これらは側面の上部に三角形の頂点を有するフェアリングであり、このタイプは三分力実験においても正の迎角で最も早く負勾配が現れるものである。

中段は迎角 $\alpha=0^\circ$ の結果である。フェアリングが側面の下部に三角形の頂点を有するタイプのF07, F08, F09はすべてフラッターが発現した。このタイプは側面の上部に頂点がある場合について正迎角での負勾配が早く現れるものである。

分割比が0.6:0.4の場合、計画断面のF01ではフラッターが発現した。縦横比が最も大きいF03では限定振動が発現したが、中間のF02では振動が発現しなかった。

また、分割比が0.5:0.5の場合は縦横比の最も大きいF12のみ振動が発現せず、F10, F11ではフラッターが発現した。

下段は迎角 $\alpha=-3^\circ$ の結果である。フラッターの発現はなく、限定振動がF03とF12で発現した。この限定振動の発現風速域はフラッターの発現風速域と異なり、渦励振と考えられる。

以上より、F02のみが $\alpha=\pm 3^\circ$ および $\alpha=0^\circ$ では有害な振動が発現せず、最も良好な断面と考えられた。また、概ね三分力試験結果を反映していると考えられる。しかし、 $\alpha=-5^\circ \sim +5^\circ$ として詳細な調査を実施すると、 $\alpha=-3^\circ$ 以外の負迎角で渦励振が発現し、複雑な空力特性を有していることが判明した。

そこで、構造減衰を変化させ、その影響を調査した結果、比較的容易に振動を抑制することが可能であった。Fig. 9に対数減衰率と発現振幅の関係を示すが、発現振幅は減衰率の増加にほぼ比例して小さくなっている。また、Fig. 10に対数減衰率と発現風速の関係を示すが、発現風速は減衰率の変化に関わらず、一定となっている。

4.3.2 センターバリアの性能 Fig. 8はセンターバリアを設置した場合の風速-振幅関係を示したものである。センターバリアを設置した場合、渦振動および発散振動が発現したのは負迎角の場合のみであった。これはフェアリングのみの場合に正迎角においてほとんどの断面において振動が発現したのとは全く逆の傾向となっており、センターバリアの設置による桁下面における気流特性の変化が伺える。振動が発現しなかったフェアリングはF02, F03およびF09, F11, F12であり、センターバリアを設置した場合も二等辺三角形タイプが制振対策として有効である結果となった。

Fig. 6に示されるようにF01C1断面の空力モーメント係数は、負迎角においてわずかではあるが負勾配の領域が

Table 2 実験条件
Experimental Conditions

縮尺		実橋	模型
縮尺		-	1/50
等価質量		$8.57 \times 10^3 \text{ kgf} \cdot \text{s}^2 / \text{m}^2$	$2.13 \times 10^3 \text{ kgf} / \text{model}$
慣性モーメント		$1.37 \text{ kgf} \cdot \text{s}^2$	-
風速倍率	たわみ	-	8.0
	ねじれ	-	10.0
振動数	たわみ	0.143 Hz	2.40 Hz
	ねじれ	0.510 Hz	4.03 Hz
振動数比		3.56	-
構造減衰	たわみ	0.020	0.020
	ねじれ	0.020	0.012

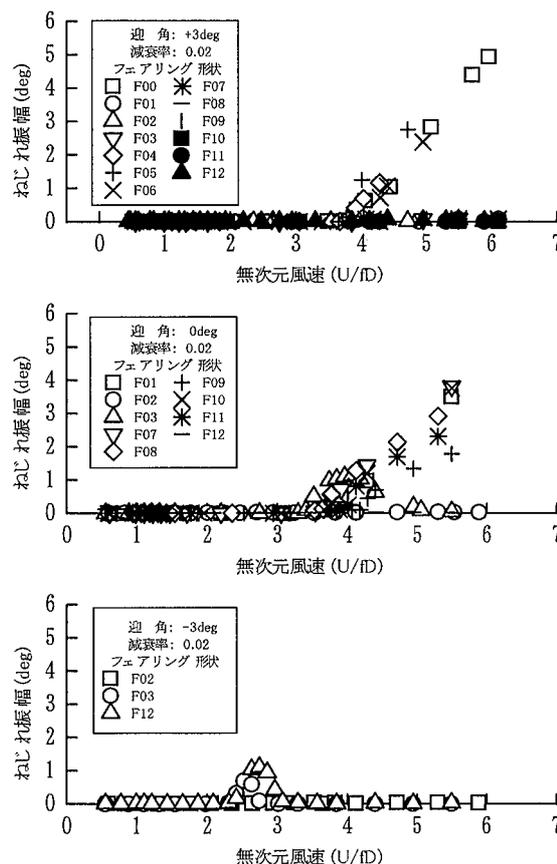


Fig. 7 フェアリング特性
Effect of Fairings on Aerodynamic Stability

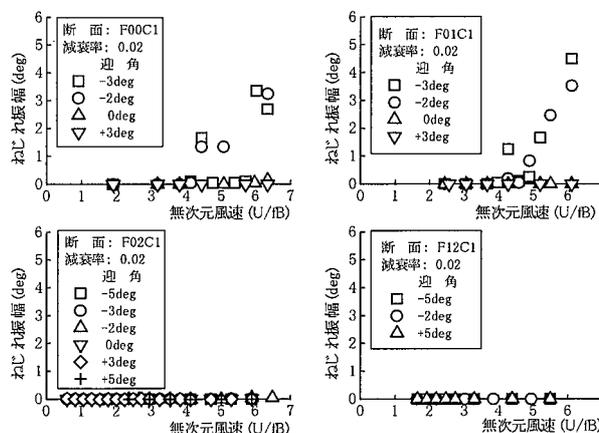


Fig. 8 迎角特性
Effect of Angle of Attack on Aerodynamic Stability

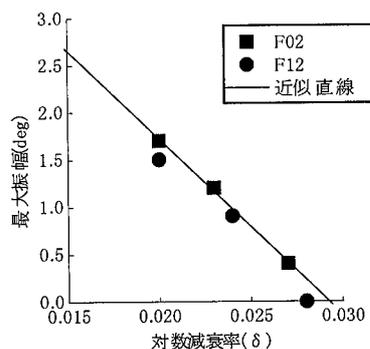


Fig. 9 渦励振の最大振幅
Maximum Displacement for
Limited Amplitude

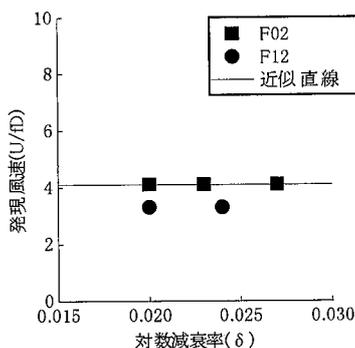


Fig. 10 渦励振の発現風速
Onset Velocity of Vortex-
Induced Oscillation

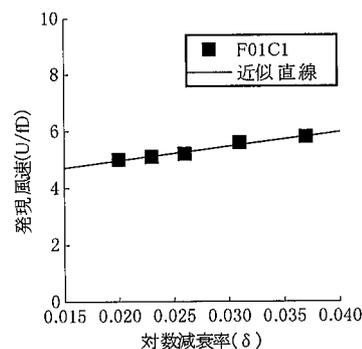


Fig. 11 フラッター発現風速
Critical Flutter Wind Speed

生じており、これがセンターバリアを設置した場合に負迎角で振動が発現する原因の一つと考えられる。また、カバープレートを設置するとF01C2断面のように負迎角での空力モーメント特性が大きく変わり、フェアリングなしの断面も含めてフラッターは全く発現しなくなり、良好な耐風安定性を示した。

Fig. 11にF01C1断面における対数減衰率とフラッター発現風速との関係を示す。発現風速は減衰率にほぼ比例して高くなり、 $\delta=0.05$ 以上とすると実験風速域でフラッターは発現しなくなった。

5. おわりに

3径間連続PC斜張橋（主径間：500m、側径間：250mで橋長1000m、塔高120m、一般部の総桁幅：32.4m、桁高：2.5m）の振動特性を求め、風洞実験を実施し耐風安定性を調査した。その結果、エッジガーダー形式のPC斜張橋においても十分耐風安定性を確保することが可能であることが分かった。

カバープレートの設置は主桁の保守通路等としても利用できるものであるが、やはり経済性を考えると不利となる。しかし、構造部材とは異なるので、箱形断面の簡略化と考えれば必ずしも不利な要因ではなく、他の制振対策等も含め全体としての経済性を考える必要がある。

今後、さらに非定常空力実験による動的空気力特性の把握、乱流中における挙動の把握などが望まれるが、今回得られた知見をまとめると以下ようになる。

- 1) たわみ固有振動数は $f_{H1}=0.143\text{Hz}$ 、ねじれ固有振動数は $f_{\theta}=0.51\text{Hz}$ であり、たわみ振動数は推定式と比較してやや低い、振動数比は従来の斜張橋と同様であった。
- 3) 本橋では二等辺三角形タイプのフェアリングの空力特性が良好であった。
- 4) 基本断面およびフェアリングなし断面では無次元風速 $U/fB=4$ 程度でフラッターが発現した。本橋の場合、無次元風速 $U/fB=4$ は実風速では $U=66\text{m/s}$ 程度となる。
- 5) 正迎角ではフェアリングにより振動の発現を抑制することが可能であったが、負迎角ではできない場合が

あった。

6) 構造減衰を付加すれば比較的容易に渦励振の発現を抑制できると考えられる。また、発現振幅は減衰率の増加にほぼ比例して小さくなる。

7) センターバリアとフェアリングの設置により負迎角で発現していた発散振動や限定振動が抑制され、迎角が $\alpha=-5^{\circ}\sim+5^{\circ}$ において全く空力不安低振動が発現しない耐風安定性に優れた断面を見いだすことできた。

謝 辞

本研究を実施するに当たりご指導を頂いた東京大学大学院工学系研究科の藤野陽三教授に深謝いたします。

参考文献

- 1) 建設コンサルタンツ協会近畿支部：コンクリート斜張橋の設計の手引き、「コンクリート斜張橋研究委員会」第1次報告書、(1984. 8)
- 2) 土木学会関西支部：複合斜張橋の設計法、昭和62年度講習会テキスト、(1987. 11)
- 3) 京都大学工学部土木工学教室橋梁工学研究室：PC(複合)斜張橋に関する調査研究報告書、(株)大林組受託研究成果報告書、(1991. 3)
- 4) SCEE協会：PC斜張橋の動的耐風安定性に関する研究、技術資料、(1991. 3)
- 5) 建設省土木研究所：二主桁合成床版を有する斜張橋の設計に関する調査報告書、土木研究所資料第2961号、(1991. 3)
- 6) 日本道路協会：耐風設計便覧、(1991. 7)
- 7) 山村信道、田中洋：橋梁の二次元風洞実験に適用する換算マスの計算法、日立造船技法第41巻3号、(1980. 09)
- 8) 山田均：耐風工学アプローチ、建設図書、(1995. 9)
- 9) 白土、他：長大斜張橋エッジガーダーのフラッター特性に関する基礎的研究、土木学会第52回年次学術講演会I B、(1997. 9)