

風洞実験設備の紹介（その2）

木場 和義¹⁾ 細見 雅生²⁾

長周期で振動しやすい大型構造物に対しては耐風安定性の検討が重要であることはよく知られている。風洞試験は、構造物の耐風安定性の検討、確認のための有効な方法であり、現在まで多くの風洞試験が実施されてきた。また、今後も風洞試験への要望が多いと考えられる。当社は、この風洞試験による耐風安定性検討の要望に応えるべく風洞を新設した。本風洞設備の概要については既に紹介したが（駒井技報 Vol. 9、1990）、風洞性能については性能試験を実施中であったため部分的なものであった。その後、性能試験を終え、風洞の総合的な性能を確認するための検証試験も完了し、十分な性能を有していることを確認した。本文では、この「性能試験」と「検証試験」の概要について報告する。

ま え が き

駒井鉄工(株)大阪工場に新設された風洞の気流特性を確認するための性能試験と、風洞、試験装置および計測機器などの総合的な性能を確認するための検証試験を1990年8月～10月に実施した。

風洞の気流特性に関する基準として、わが国では本州四国連絡橋公団の風洞試験要領¹⁾が一般的に使用されている。この基準に定められた風洞の具備すべき条件である下記の項目について性能試験を実施した。

- ① 風速分布（風速偏差） : $\pm 1\%$ 以内
- ② 風速の時間変動（風速の乱れ強度） : 1% 以内
- ③ 静圧分布（静圧勾配） : 5% 以内

一方、検証試験では2次元部分模型を用いた静的試験と振動試験を実施した。試験に使用した模型は、既往のデータとの比較を考慮して、高さ(D)と幅(B)の比が1:2の長方形断面模型と、この模型にデッキプレート²⁾の張り出しと地覆を取り付け、実際の橋梁に



写真-1 風洞全景

近い断面形状とした模型の2種類を使用した。

静的試験では3分力試験の他に後流部の風速変動についても併せて計測した。

振動試験では迎角および構造減衰を数種類設定してV-A試験を実施し、計測精度の他に、風速制御、迎角制御、および構造減衰の制御に対する性能の確認を行った。

1. 風洞設備の概要

写真-1に風洞全景を、図-1に全体図を示す。

風洞設備の詳細については、既に前号²⁾で紹介しているので、ここでは概要を説明する。

本風洞は構造物の耐風性検討のための風洞試験を目的とした低速風洞である。この風洞では測定部全長を20mとし、特に今後の研究課題として重視されている境界層乱流を用いた3次元模型試験が行える構造となっている。また、縮流部を追加することにより2次元模型試験に適した測定部にして使用することも可能である。

測定部断面形状は3次元模型試験を想定した断面幅4.0m×高さ2.0m（以下、3次元風洞という）と、2次元模型試験を想定した断面

幅1.5m×高さ2.0m（以下、2次元風洞という）の2種類があり、試験の目的に応じて選定できる。それぞれの断面に対する風洞性能の主要目を表-1に、送風機・電動機の性能を表-2に示す。

風洞設備のうち、主な試験装置・計測機器として、

1) 橋梁技術部技術課 2) 橋梁技術部技術課副課長

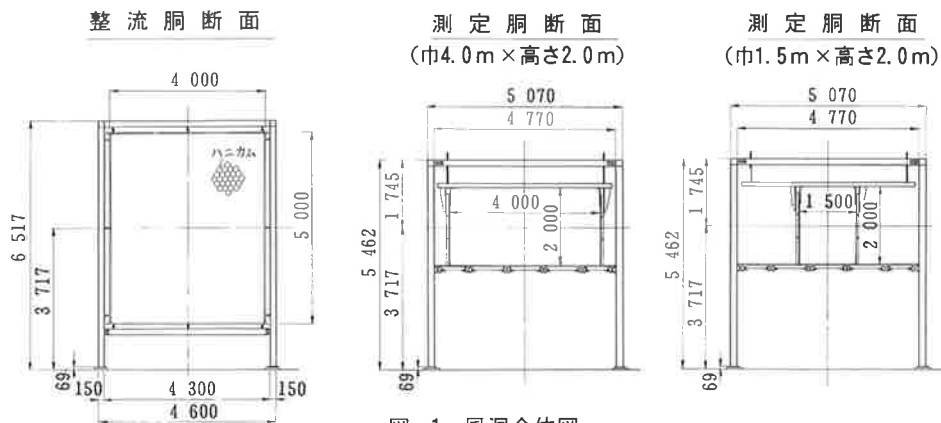
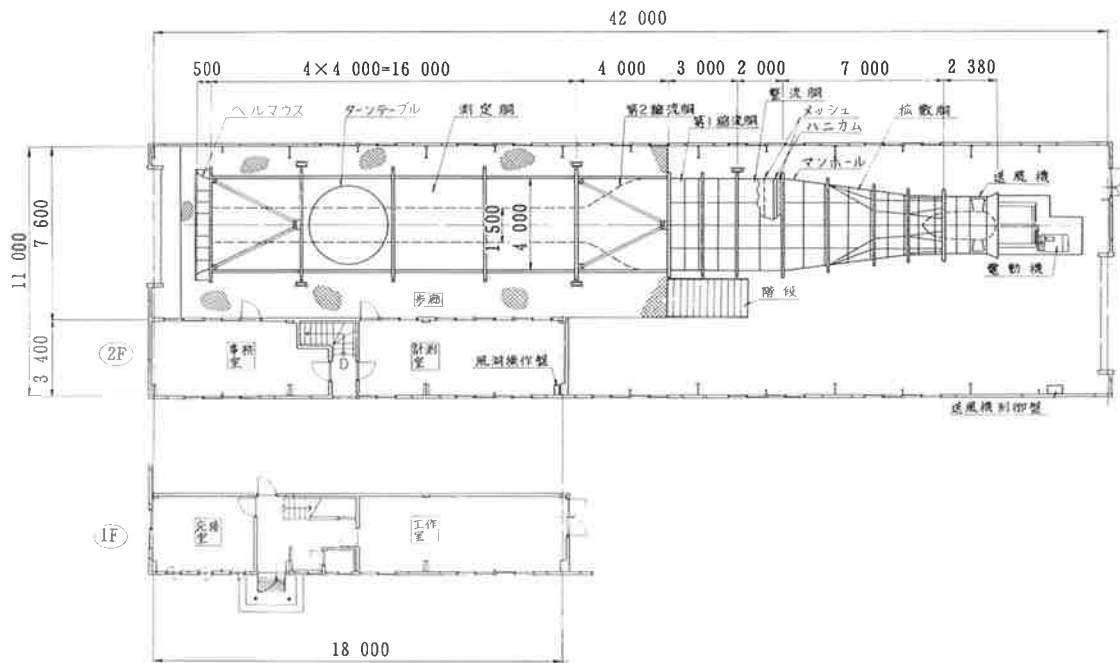


図-1 風洞全体図

- ・ 2次元模型支持装置
- ・ 3分力試験装置
- ・ 電磁ダンパー
- ・ 風速計 (ピトー管式風速計、熱線風速計)
- ・ 非接触レーザー式変位計

などを備えている。

また、計測データの処理については、取り込みから分析まで連続して行える専用プログラムを開発し、16ビットパソコンを中心としたシステムで処理を行っている。写真-2にデータ処理システムを示す。



写真-2 データ処理システム

表-1 風洞性能

型式	開回路式風洞 (エッフェル型風洞)	
	2次元風洞	3次元風洞
測定部寸法	(幅)(高さ)(長さ) 1.5m × 2.0m × 16m	(幅)(高さ)(長さ) 4.0m × 2.0m × 20m
風速範囲	0.5~25.0m/s	0.5~10.8m/s
風速偏差	1.0% 以内	1.0% 以内
乱れ強度	0.5% 以内	0.9% 以内
静圧勾配	0.9% /m	0.9% /m

表-2 送風機・電動機性能

送風機		電動機	
型式	軸流単段送風機	型式	直流電動機
口径	2.5m	出力	110 kw
最大風量	75m³/s(2次元風洞時) 87m³/s(3次元風洞時)	電圧	440 V
全圧	80mmAq(770rpm)	回転数	0~1475 rpm
駆動方式	ベルト掛け	制御方式	サイリスタ・レオナード方式

2. 風洞の性能

風洞の基本性能である気流特性を確認するために、各種性能試験を行い、本風洞が十分な性能を有していることを確認した。

性能試験は、2次元風洞、3次元風洞の両方についてそれぞれ行い、各試験項目について本四風洞試験要領に定められた基準を満足していることを確かめた。試験項目は、風速範囲、断面内の風速分布および乱れ強度分布、風洞中心軸線上の静圧分布である。測定断面は、標準的な一樣流試験実施位置とし、2次元風洞では第2縮流洞終端から1.5m下流断面、3次元風洞では第1縮流洞終端から4.0m下流断面とした(図-1参照)。また、平均風速分布および乱れ強度分布を測定したときの測定断面内の測点を図-2に示す。

以下各試験項目と結果の概要を述べる。

(1) 風速範囲と乱れ強度

風速と乱れ強度の関係を図-3に示す。図に示したように各測定断面の中央点と、高さ中央で側壁から10cmの点の2点を測点とし、送風機の回転数を順次設定しながら平均風速と乱れ強度(風速変動の標準偏差と平均風速との比)を調べた。

図より、最高風速は2次元風洞では25.0m/s、3次元風洞では10.8m/sである。また、0.5m/s付近の微風速域でも両風洞で乱れの少ない安定した風が供給されており、風洞試験に使用する風速範囲は十分に確保されている。

(2) 平均風速分布

2次元・3次元両風洞の平均風速分布を図-4、5にそれぞれ示す。

平均風速分布は、試験風速を2種類(2次元風洞では10、20m/s、3次元風洞では5、10m/s)設定し、それぞれの測定断面内の測点(図-2参照)で気流を測定して調べた。図-4および図-5は、断面全体の平均風速に対する各測点の平均風速の偏差(%)を求めて等値線図に表わしたものである。2次元風洞、3次元風洞とも偏差は、断面周辺部のごくわずかな部分を除いて±1%以内であり、基準値を満足している。

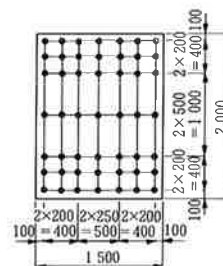
(3) 乱れ強度分布

平均風速分布の測定と同時に、各測点における乱れ強度を調べた。図-6および図-7は、断面内の各測点における乱れ強度を等値線図に表わしたものである。断面周辺部でやや高めになっている部分も見られるが、2次元風洞では0.5%以内、3次元風洞では0.9%以内であり、基準値を十分に満足している。

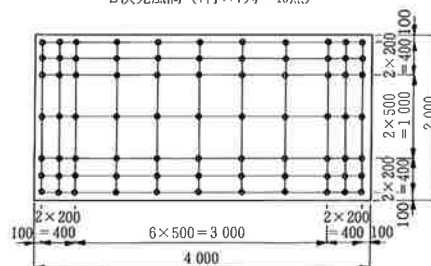
(4) 静圧勾配

風洞中心軸線上の静圧分布を図-8に示す。測定は、

測定部の上流から下流に0.5m間隔(一部1.0m間隔)で測点を設定し、ピトー管とデジタルマンオメータを用いて行った。図-8は、それぞれの風洞で測定された静圧を、基準動圧(q)に対する比(%)として表わしたものである。いずれの場合も平均静圧勾配は約0.9%/mであり、基準値を十分に満足している。

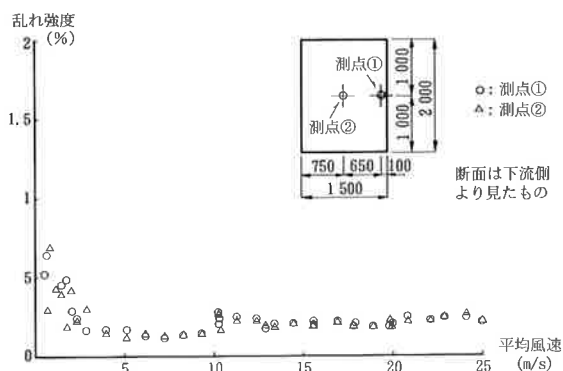


2次元風洞 (7行×7列=49点)

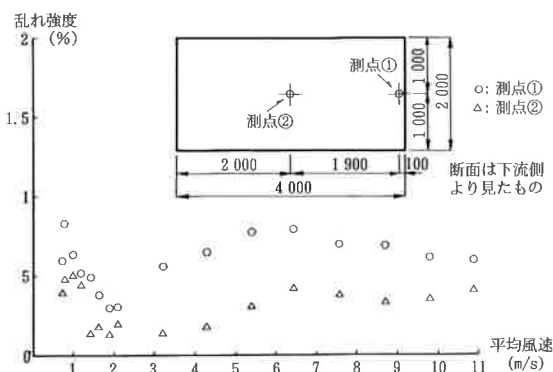


3次元風洞 (7行×11列=77点)

図-2 断面内の測点



(a) 2次元風洞
注) 測定断面は第2縮流洞終端から1.5m下流断面



(b) 3次元風洞
注) 測定断面は第1縮流洞終端から4m下流断面

図-3 平均風速と乱れ強度

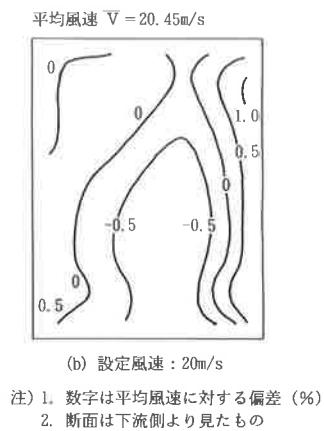
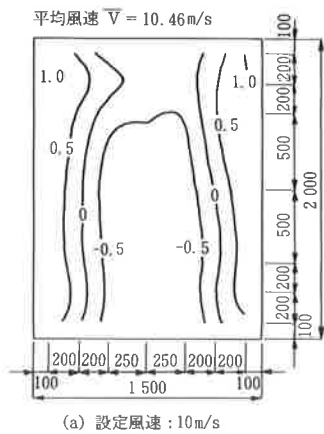


図-4 2次元風洞の風速分布

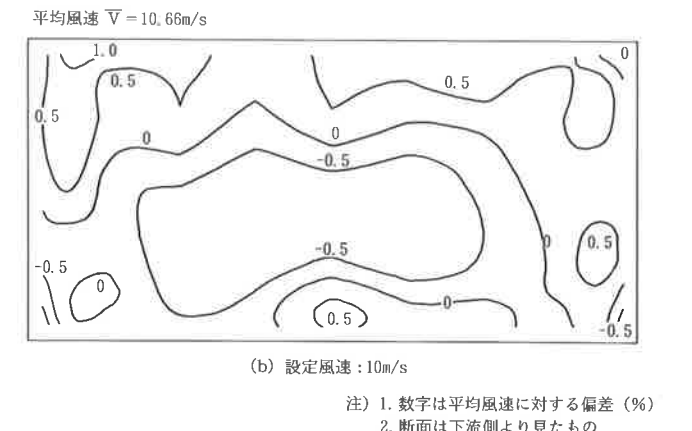
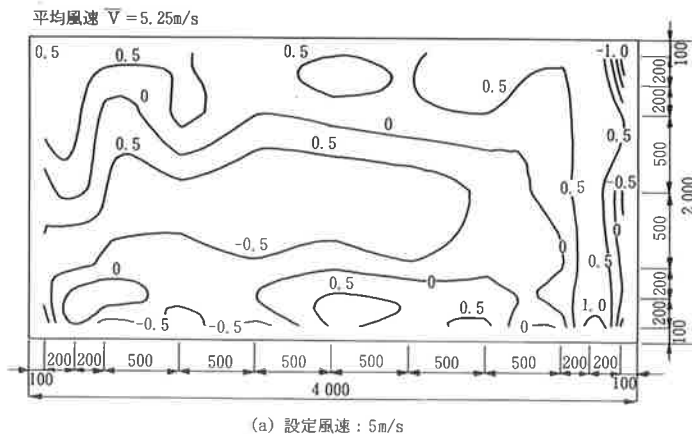


図-5 3次元風洞の風速分布

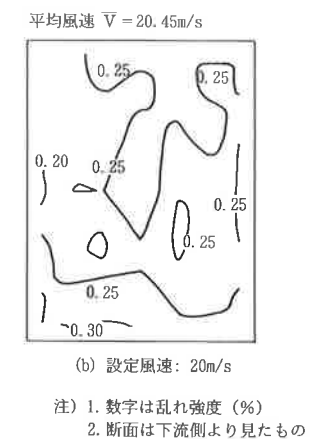
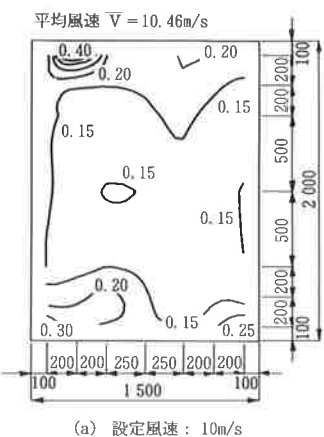


図-6 2次元風洞の乱れ強度

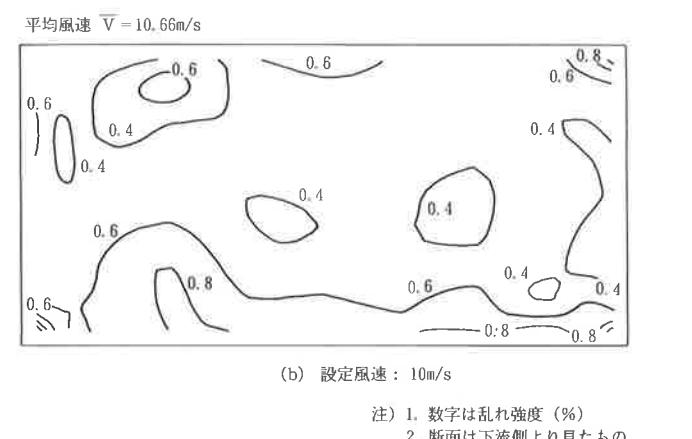
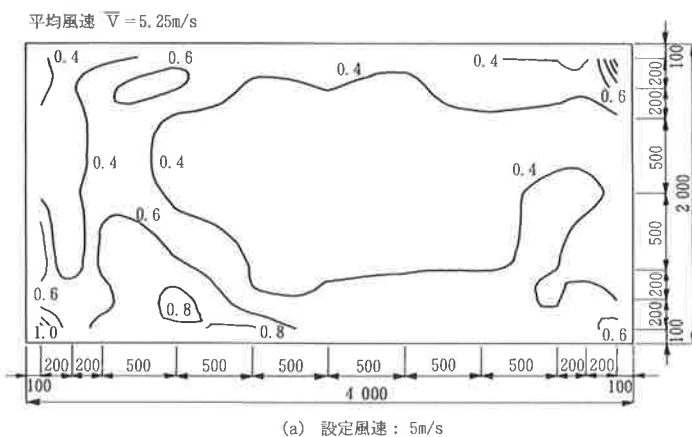


図-7 3次元風洞の乱れ強度

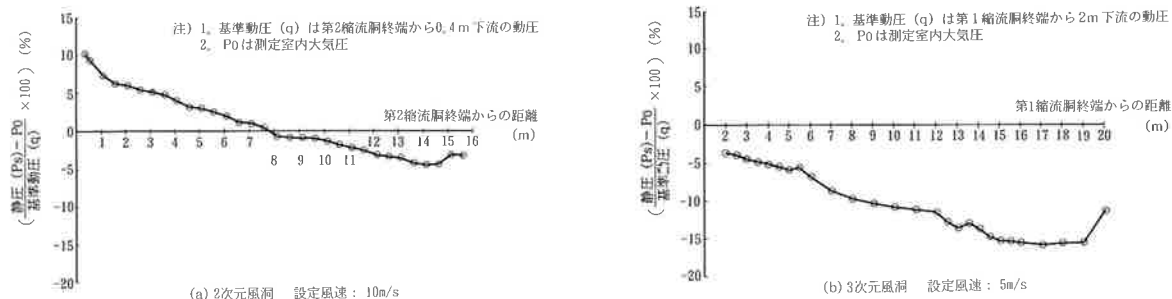


図-8 風洞中心軸線上の静圧分布

3. 検証試験

風洞設備では、風洞気流特性のほかに、風速制御性能、計測システムの計測精度およびデータ処理精度などに試験技術を加えた、総合的な性能および精度の確保が必要である。これらを確認するため、2次元部分模型を使った静的試験（3分力試験）と振動試験（V-A試験）を実施した。試験の結果は、既往の試験結果ともよく一致しており、性能・精度とも良好であることを確認した。

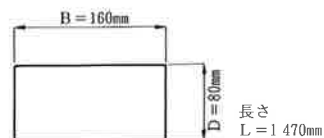
(1) 模型

試験に使用した模型は、種々の研究機関で基礎的研究によく用いられている高さ (D) と幅 (B) の比が1:2の長方形断面模型（以下矩形模型という）と、この模型にデッキプレートの張り出し部と地覆を取り付け実際の橋梁に近い断面形状にした模型（以下橋梁模型という）の2種である。図-9に両模型の概略を、写真-3に橋梁模型を示す。



写真-3 橋梁模型

(1) 1:2長方形断面模型（矩形模型）



(2) 橋梁断面模型（橋梁模型）

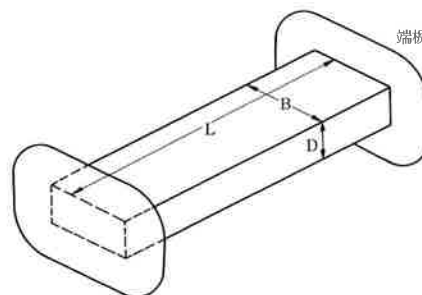
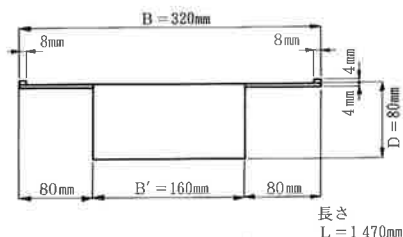


図-9 模型概略

(2) 静的試験

静的試験として、3分力試験と模型後流部の風速変動の計測（ストローハル数計測）を行った。

1) 3分力試験

3分力試験では、各模型を6台のロードセルとピアノ線で静的に支持し（図-10、写真-4参照）、

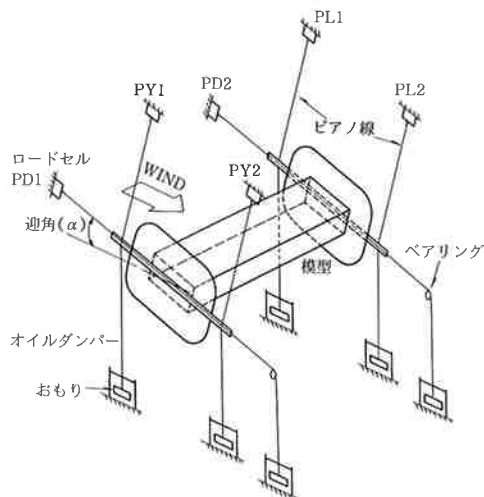


図-10 3分力試験の概要

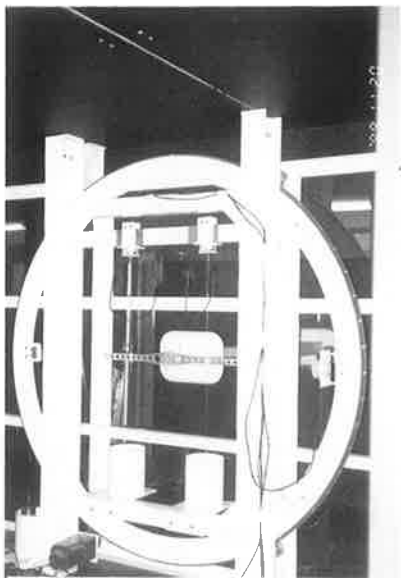


写真-4
3分力試験

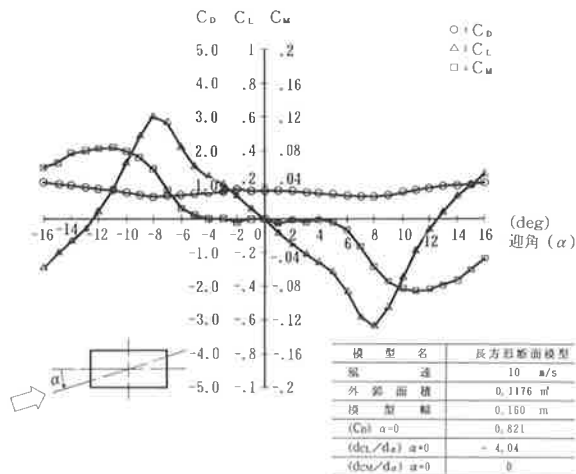


図-11 1:2長方形断面模型の3分力曲線

風速を10m/sに設定して、模型の迎角(α)を-16度から+16度まで1度きざみに設定した。そして、それぞれのロードセルで計測した力から3分力係数C_D、C_L、C_Mを次式により求めた。

$$\text{抗力係数 } C_D = \frac{D}{1/2 \cdot \rho \cdot V^2 B l}$$

$$\text{揚力係数 } C_L = \frac{L}{1/2 \cdot \rho \cdot V^2 B l}$$

$$\text{モーメント係数 } C_M = \frac{M}{1/2 \cdot \rho \cdot V^2 B^2 l}$$

ここで、

- ρ : 空気密度
- V : 風速
- B : 模型の幅 (デッキ幅)
- l : 模型長さ
- D : 抗力
- L : 揚力
- M : 中心軸回りのモーメント

迎角(α)に対する3分力係数を、各模型について図-11、図-12に示す。

矩形模型は、2軸対称断面であり、その揚力係数C_Lとモーメント係数C_Mは座標原点に対して点対称、抗力係数C_Dは迎角0度の軸に対して線対称となる。図-11より明らかなように、揚力係数、モーメント係数、抗力係数ともそれぞれの対称性は良い。また、揚力係数曲線の勾配が変わる角度は、α = ±8度となっている。既往の試験結果³⁾と比較したところ、対称性、係数勾配、絶対値ともよく一致している。

橋梁模型の場合(図-12)は、断面形状が上下非対称であるため矩形模型の場合に見られたような3分力曲線の対称性は認められない。また、既往の試験結果との比較は、断面形状の細かい差異(地覆の有無など)で特性が変わるため難しいが、比較的断面形状の似ている試験結果⁴⁾と比較したところ、全体的な特性はよく一致している。

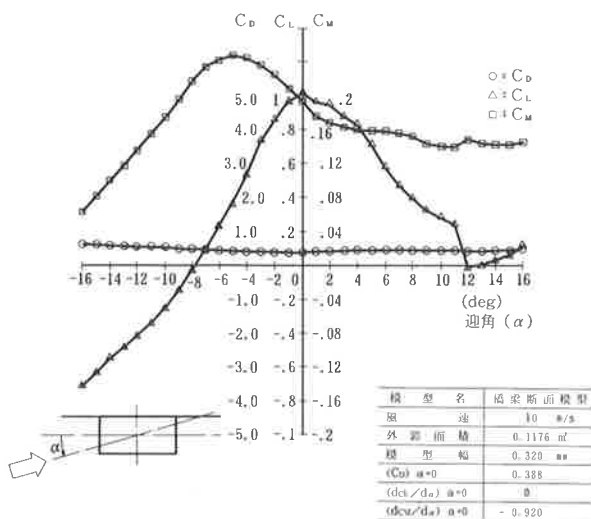


図-12 橋梁断面模型の3分力曲線

2) ストローハル数計測

矩形模型については、3分力試験の他に模型の迎角(α)および風速を数種設定して後流の変動風速を測定し、ストローハル数(St)の変化を調べた。なお、ストローハル数(St)は、次式によって求めた。

$$St = f_w \cdot D / U$$

f_w : 後流の変動周波数

D : 模型の高さ

U : 風速

迎角(α)およびレイノルズ数(Re)に対するストローハル数(St)の変化を図-13、図-14にそれぞれ示す。Stのαに対する変化(図-13)は、0度を中心にα = -4度~+4度の範囲では、ほぼSt = 0.088である。この範囲外では、迎角によってStは変化し±10度付近で最大値(約0.135)となり、α = 0度の軸に対してほぼ対称性を示している。

また、 Re に対する変化(図-14)は、今回測定を行った風速域($Re = 1.45 \times 10^4 \sim 8.31 \times 10^4$)では、 St の変化はほとんど認められずほぼ一定値($St = 0.087$)となっている。既往の試験結果⁹⁾と比較したところ、 $Re = 1 \times 10^4$ 付近で $St \approx 0.085$ であり、今回得られた試験結果とよく一致している。

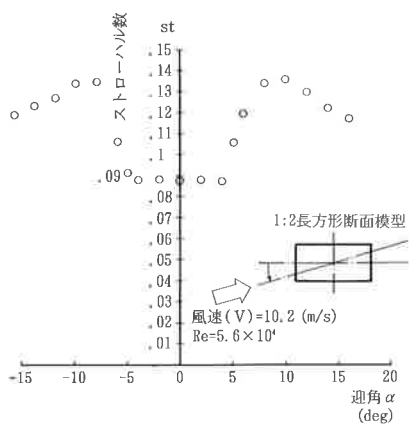


図-13 迎角 (α) によるストローハル数 (St) の変化

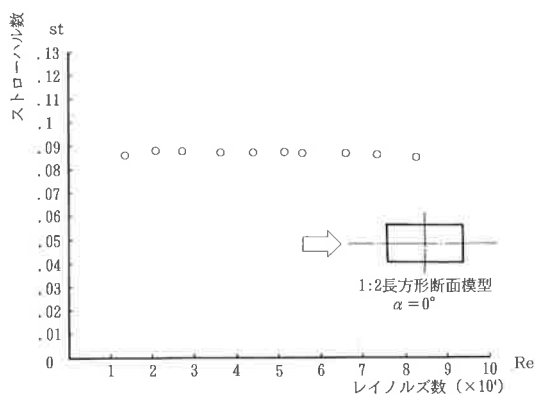


図-14 レイノルズ数 (Re) によるストローハル数 (St) の変化

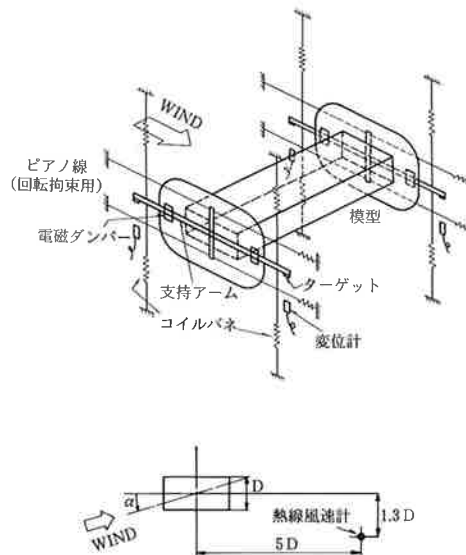


図-15 振動試験の概要

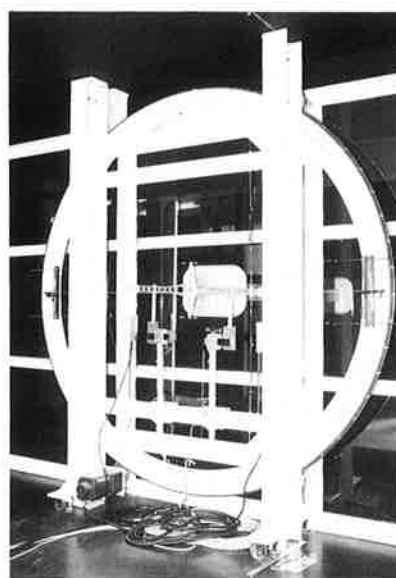


写真-5 振動試験

(3) 振動試験

振動試験では、模型を8本のコイルバネで2次元模型支持装置にセットした。(図-15、写真-5参照)

模型の迎角 (α) は、この支持装置によって任意に設定でき、また、模型の構造減衰 (δ) は、支持部の電磁ダンパーによって調整可能である。模型の応答振幅 (A) は4台の非接触レーザー変位計で測定し、風速 (V) はピトー管式風速計で測定した。また、模型後流の変動風速を熱線風速計で測定した。

矩形模型のたわみ振動の固有振動数は、 $N_B = 4.53$ Hzである。橋梁模型の固有振動数は、たわみ振動が $N_B = 4.22$ Hz、ねじり振動は $N_T = 9.72$ Hzであり、振動数比 (N_T/N_B) は2.30である。

以下、各模型の試験結果について述べる。

1) 矩形模型

矩形模型の振幅-風速図を図-16に示す。

矩形模型の試験では、模型を曲げ1自由度に支持し、迎角 (α) = 0度、構造減衰 (δ_B) = 0.02を基本条件として、迎角を $\alpha = 5$ 度に変えた場合および構造減衰を $\delta_B = 0.04$ とした場合について試験を行った。そして、迎角・構造減衰それぞれの変化による、応答挙動の変化を調べた。

図-16より明らかなように、2つの応答発生域が見られる。低風速側の山形をなしている第1の応答発生域は、渦励振振動と呼ばれているものである。その応答振動波形は、定常な振幅を示す。(図-17 (a) 参照) この応答は、迎角が5度に変化すると最大振幅を示す風速が低風速側にわずかに移

動し、その振幅は小さくなる。また、構造減衰が大きくなると、発生風速域の変化はないが応答振幅は小さくなる。

第2の応答発生域は、風速の増加と共に応答振幅を大きく発達させている。これは、ギャロッピングと呼ばれているもので、応答振動波形はビートを含み激しく変化する。(図-17 (b) 参照) この応答は、迎角が大きくなると応答振幅は小さくなるが、構造減衰が $\delta_B = 0.04$ となっても応答挙動に変化はみられない。

既往の試験結果⁹⁾と比較したところ、2つの応答発生域共に、その発生風速域、迎角および構造減衰の変化に対する応答挙動特性などよく一致している。

2) 橋梁模型

橋梁模型の振幅-風速図を図-18に示す。

橋梁模型の試験では、迎角、たわみ振動の構造減衰はそれぞれ $\alpha = 5$ 度、 $\delta_B = 0.05$ とし、支持条件を曲げ1自由度と曲げ・ねじり2自由度に変えて試験を行い、支持条件による応答挙動の違いを調

べた。なお、2自由度の時のねじり振動の構造減衰は $\delta_T = 0.065$ である。

1自由度に支持したときの応答挙動(図-18 (a))は矩形模型と同様な特性を示すが、2自由度にすると、ギャロッピングが抑えられねじりの固有振動数成分が卓越したねじりフラッターが発現する。(図-18 (b)) 1自由度に支持した試験について、既往の試験結果⁷⁾⁸⁾と比較したところ、形状の差異によると思われる細かい差はあるものの、応答振動の発生風速域などの応答特性は一致している。

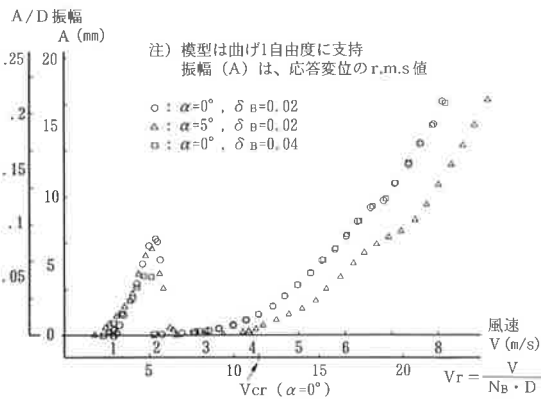


図-16 1:2長方形断面模型の振幅-風速図

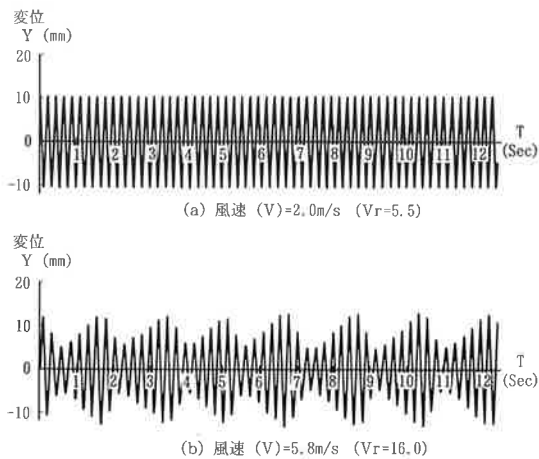
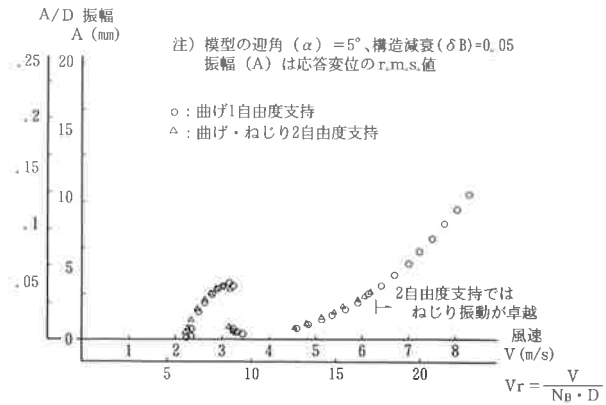
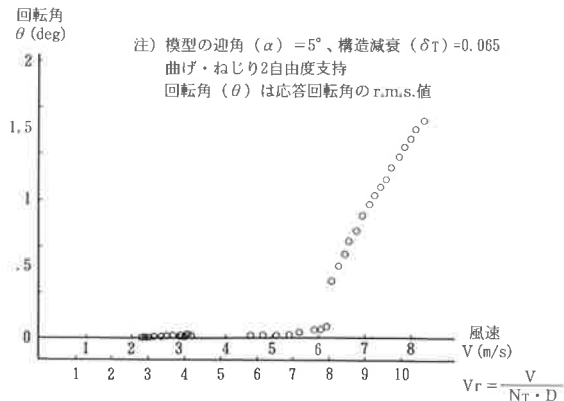


図-17 1:2長方形断面模型($\alpha = 0^\circ$, $\delta_B = 0.02$)の応答波形



(a) たわみ振動



(b) ねじり振動

図-18 橋梁断面模型の振幅-風速図

3) 振動変位と後流変動のスペクトル解析

矩形模型の、迎角 (α) = 0 度、構造減衰 (δ_B) = 0.02 の時の $V - A$ 試験結果について、模型の振動変位、模型振動時の後流の変動および模型静止時の後流の変動(カルマン渦の離脱)の卓越周波数をスペクトル解析によって調べ、それぞれのピーク周波数を調べた。図-19に無次元化風速 (V_r) に対するそれぞれの卓越周波数を示し、図-20に代表的な後流のスペクトルを示す。なお、スペクトルの計算はFFT法で行った。(サンプリング周波数 = 100 Hz、データ個数 = 4096) また、ハニングの式による平滑化を1回行っている。

無次元化風速 (V_r) が3~6付近の渦励振の発生域では、模型は固有振動周期にきわめて近い周期

で振動し、後流も同周期で変動している。Vr = 6 ~ 10 付近では、模型静止時の後流変動の周波数と模型の振動周波数はほぼ一致しており、カルマン渦による強制振動の領域であることがわかる。また、Vr > 10 の第2の応答発生域では、後流変動のスペクトルに、模型の振動周波数の整数倍の周波数で複数のピークが現れる。このことから、この風速域ではギャロッピングや剥離渦の影響などが混在する複雑な振動現象が発生していると考えられる。

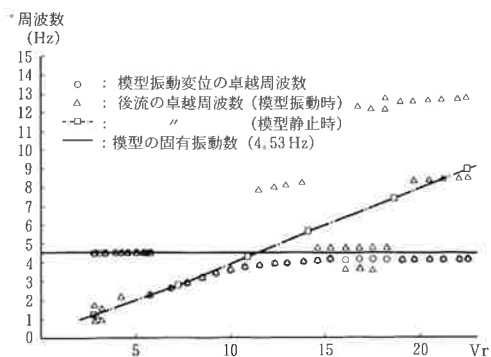


図-19 1:2長方形断面模型 ($\alpha=0^\circ, \delta_B=0.02$) の振動変位と後流変動の卓越周波数

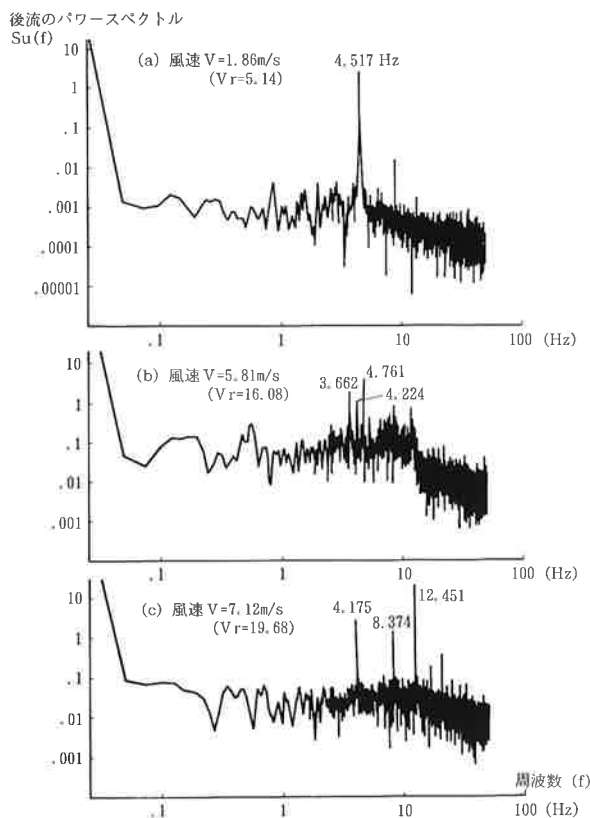


図-20 後流のパワースペクトル

あ と が き

駒井鉄工大阪工場に新設された風洞実験設備の性能試験と検証試験についてその概要を述べた。両試験の結果は良好であり、気流特性をはじめ、風速制御性能、模型の迎角や構造減衰の制御性能、計測システムの精度など、本風洞実験設備が十分な性能を有していることが確認された。また、本試験の実施に伴う計測・試験機器などの整備により、基本的な風洞試験に対する準備が整った。現在、3次元試験や乱流を用いた試験など多様な要望に応えられるよう、継続して試験設備の整備、拡充を行っている。

最後に、性能、検証試験の実施にあたり、終始懇切な御助言、御指導を頂いた小林紘士 立命館大学教授に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 本州四国連絡橋公団：風洞試験要領（1980）同解説、1980. 6
- 2) 細見雅生、木場和義：風洞実験設備の紹介 駒井技報 Vol. 9、1990
- 3) 中村泰治、溝田武人：矩形断面のねじりフラックについて 第2回風工学シンポジウム論文集、1972. 12
- 4) 小川一志：充腹断面に作用する定常空気力について 第27回土木学会年次学術講演会概要集、1972. 10
- 5) 岡島厚、溝田武人：構造基本断面の空力特性（その2）、風工学会誌No.38、1989. 1
- 6) 山田均：扁平な鈍い物体の渦励振振動の同定と応答評価、東京大学博士論文、1983. 10
- 7) 尾上義博、白石成人：箱桁断面のギャロッピング特性と防振装置の効果について 第38回土木学会年次学術講演会概要集、1983. 10
- 8) 風間浩二、宮田利雄：耐風安定化対策をもつ箱桁橋の非定常圧力特性 第39回土木学会年次学術講演会概要集、1984. 10