

多目的大型風洞について

伊藤 雅保 川口 彰久 野村 敏雄 山本 博志
木梨 智子 藤原 章博 三原 宏昭

Introduction of Large-scale Multi-purpose Wind Tunnel

Masayasu Ito Akihisa Kawaguchi Toshio Nomura Hiroshi Yamamoto
Satoko Kinashi Akihiro Fujiwara Hiroaki Mihara

Abstract

Obayashi Corp. has a large-scale multi-purpose wind tunnel which has three test sections. This wind tunnel is a closed-circuit type equipped with a 700 kw DC motor and a maximum wind speed of 57 m/s.

Test section No. 1 has a 3 m × 3 m square section and a length of 31.5 m. This is used to study the behavior of super high-rise buildings subject to strong winds, and to carry out wind environment tests around tall buildings. Test section No. 2 is 2 m in width, 3 m in height, and 9 m in length. This is used for studies on aerodynamic stability and the development of new types of long span bridges. Test section No. 3 is 6 m in width, 4 m in height, and 12.5 m in length. It has wind environment assessment test capabilities for new city development projects. This test section also allows whole model studies for long-span bridges. Operations, measurements, and data acquisition are controlled automatically by a computer system.

概 要

多目的大型風洞は、風軸長さが約 120 m、最大風速が 57 m/sec の単回路式密閉型風洞で、大きさの異なる 3 ヶ所の測定洞を使い分けることによって、建築、橋梁、環境の各々の分野で予想される多種多様な研究・技術開発に対応した風洞実験が可能である。第 1 測定洞の大きさは幅 3 m、高さ 3 m、長さ 31.5 m で、主に超々高層建物や大空間構造物を対象に、耐風性の検討、振動制御システムの開発、建物周辺の風環境の調査、煙を用いた流れの可視化等に関する試験を行う。第 2 測定洞の大きさは幅 2 m、高さ 3 m、長さ 9 m で、主に橋梁(斜張橋や吊橋)を対象に、2 次元模型を用いて、橋桁等の空力特性に関する試験を行う。第 3 測定洞の大きさは幅 6 m、高さ 4 m、長さ 12.5 m で、全体模型を用いた長大構造物の耐風性試験、環境保全・省エネルギー対策のための大規模な地域模型を用いた環境調査等を行う。また、風洞の運転・計測・データ収録等をコンピュータ制御することによって、実験の自動化・省力化を図っている。

1. はじめに

国土の狭い我国で、より良い都市環境を確保し、土地の有効活用を図るためには建築物を高層化することが今後一層必要となってくるものと思われる。このような状況のもとに、当社では、超々高層建築物の実現を目指し、かねてより独自に研究を進めてきた。

超々高層建築物を実現するためには、強風時における空力不安定現象を解明すると共に、より合理的な耐風設計法を確立することが必要となる。また、いまだ経験したことのないような高所における居住性の評価、超々高層建築物周辺における風環境の悪化防止等も重要な研究課題である。

これらの諸問題に対処すると共に、本州四国連絡橋にみられるような橋梁の長大化に対応した技術開発、さらには、大都市における温熱環境問題に対処するために、技術研究所内に、多目的大型風洞が建設された。

本報告では、多目的大型風洞施設の概略、基本的な性能、実験例等について紹介する。

2. 風洞実験装置

2.1 基本方針

多目的大型風洞実験装置の建設計画に際して、以下の事項に対応できるように留意した。

① 超々高層建築物を対象とした、各種実験が可能であること。

建築物を対象とする場合には、自然風の特性を風洞内気流でいかに再現するかが問題となるので、風上側に十分な風路を設けて、境界層や乱れを発達させる。

② 橋梁を対象とした、各種実験が可能であること。
本州四国連絡橋風洞試験要領(1980)・同解説に準拠した規格・性能を有するものとする。

③ 広い地域を対象とした、大気環境実験が可能であること。

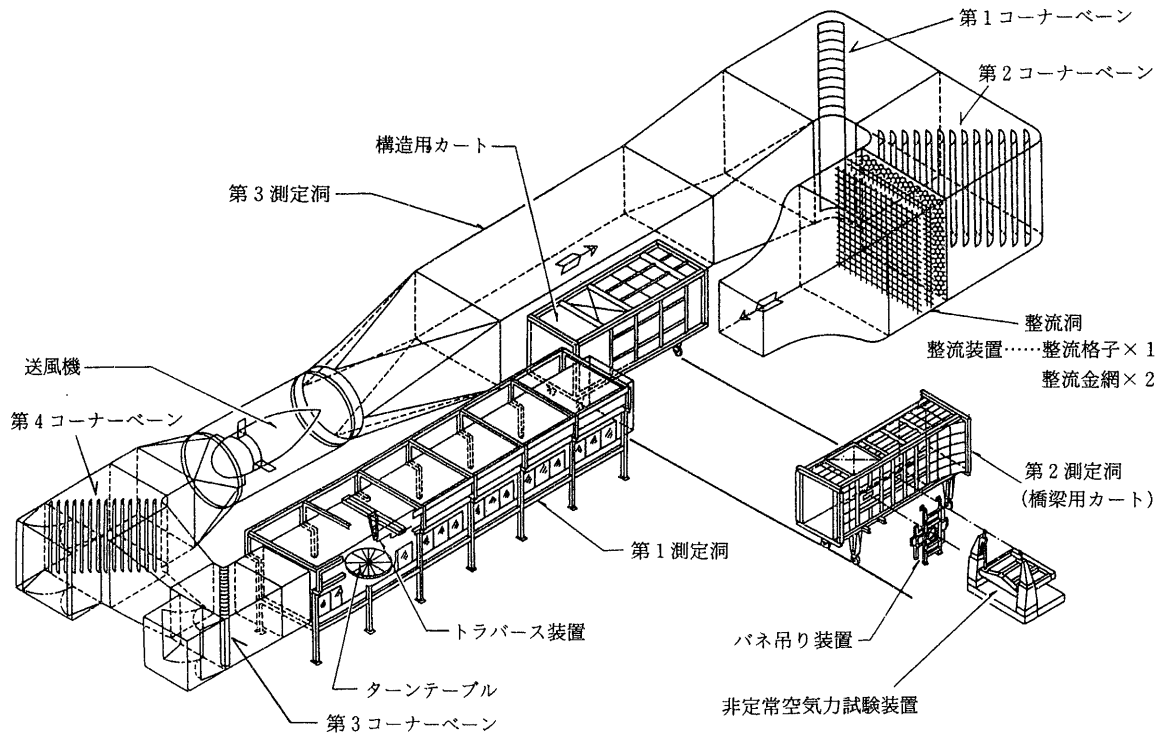


図-1 多目的大型風洞実験装置 (鳥瞰図)

本来、風洞内気流の乱れを消すために設けられている拡散洞部も利用できるような断面積を大きくし、模型の閉塞率が大きくなるようにする。

④ ガスの拡散実験や可視化実験が可能であること。

回流式風洞の場合には、風洞内気流は風路を循環するので、外部の新鮮空気が入り入れられるように、風洞壁面に開閉可能な扉を設ける。

⑤ 実験の自動化・省力化をすすめること。

2.2 風洞本体

多目的大型風洞実験装置の鳥瞰図を図-1、模型写真を写真-1に示した。多目的大型風洞は基本方針に従って、第1測定洞、第2測定洞、第3測定洞と3か所に大きさの異なる測定洞を持っている。

主要な諸元を表-1に示した。第1測定洞は調査対象地域の風特性を再現するための長い風路を有し、天井の勾配を2/1,000としている。第2測定洞ではカートを交換することにより橋梁等の水平2次元模型実験が可能となる。第3測定洞では大断面を活用した大型模型実験を行うことができる。また、本風洞は回流式の密閉型風洞ではあるが、第3コーナーベーンを回転させ、第3、第4コーナーの風洞壁面の開閉扉を開放することによって、外部空気の取り入れと風洞内空気の放出が行われるので、煙やガスを用いた実験も可能となる。

2.3 送風機および電動機

送風機は後置静翼単段軸流送風機であり、直流電動機に直結されている。サイリスタ制御により電動機の回転数を調整して、風洞風速を制御する。

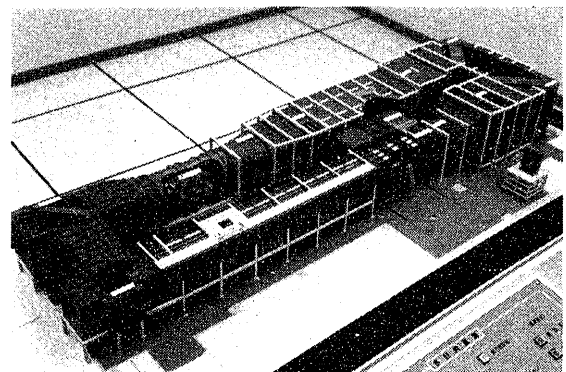


写真-1 多目的大型風洞実験装置 (模型写真)

表-1 性能諸元

■風洞性能諸元				
型 式		単回路回流式密閉型風洞		
測定部断面		第1測定洞	第2測定洞	第3測定洞
	幅	3.0 m	2.0 m	6.0 m
	高さ	3.0 m	3.0 m	4.0 m
長さ	31.5 m	9.0 m	12.5 m	
風 速		0~40 m/s	0~57 m/s	0~15 m/s

■送風機性能諸元		■電動機性能諸元	
型 式	後置静翼単段軸流送風機	型 式	直流電動機
口 径	4,000 mm	出 力	700 kW
風 量	360 m ³ /s	回 転 数	500 rpm
動 圧	150 mmAq	制 御	サイリスタ制御

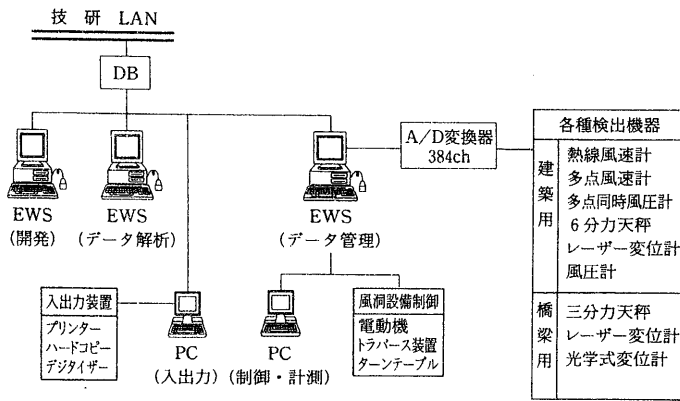


図-2 計測・制御システムの概略

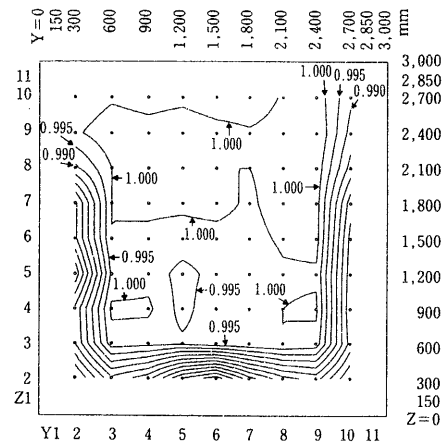


図-3 風速分布

2.4 制御・計測システム

風洞実験の制御・計測システムの概略系統図を図-2に示した。風洞実験用機器類はそれぞれの操作盤からの指令で手動運転も可能であるが、風洞の運転・計測・データ収録等をコンピュータ制御することによって、実験の自動化が可能となり、全体システムとして一元化されている。

A/D変換器は384チャンネルのデータを最高サンプリング周波数1,000 kHzでデジタル量に同時変換できる性能があり、制御用コンピュータからの指令で各種検出器からの信号を設定した条件でデジタル量に変換する。変換したデータをEWSの磁気ディスクに転送すると共に、1次統計処理を行い平均値や標準偏差値、最大値、最小値等をモニター画面に表示する。

3. 風洞の基本性能

3.1 風洞気流

3.1.1 第1測定洞

(1) 風速分布 第1測定洞のターンテーブル中央断面における風速分布の測定は、ピトー管を用い、風速2.5, 5, 10, 20 m/sについて行った。図-3に風速10 m/sの時の風速分布を示した。図中の数値は測定断面における平均風速に対する風速比であり、0.5%刻みのコンター図である。これによれば、床面、壁面および天井面で形成される境界層部分を除けば、風速のばらつきは±1%以下である。

(2) 乱れ強さの分布 第1測定洞のターンテーブル中央断面における乱れ強さの分布を、I型熱線風速計を用いて測定し、図-4に風速10 m/sの時の乱れ強さの分布を示した。図-4によれば、床面、壁面および天井面から600 mm以内の境界層領域を除けば、乱れ強さは1.0%以下である。

(3) 床面および壁面からの境界層厚さ 図-5に、第1測定洞のターンテーブル中央断面における風速の鉛直分布と乱れ強さの分布を示した。床面の影響により、 $\alpha = 0.16$ ($n = 6.4$) 勾配の境界層が発達しており、境界層厚さは350~400 mmである。

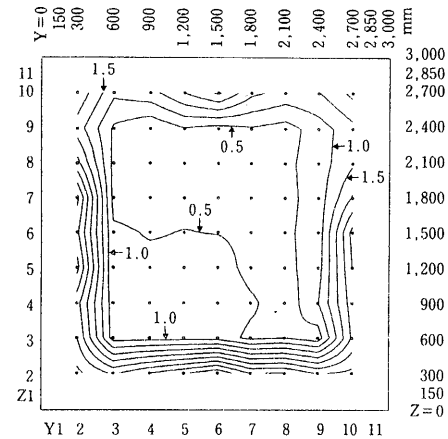


図-4 乱れ強さ分布

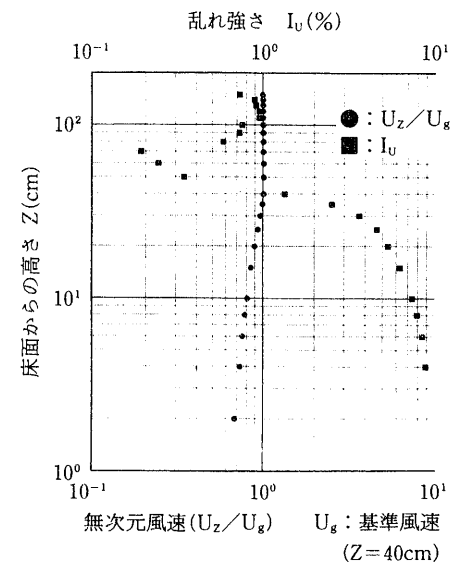


図-5 風速および乱れ強さの鉛直分布

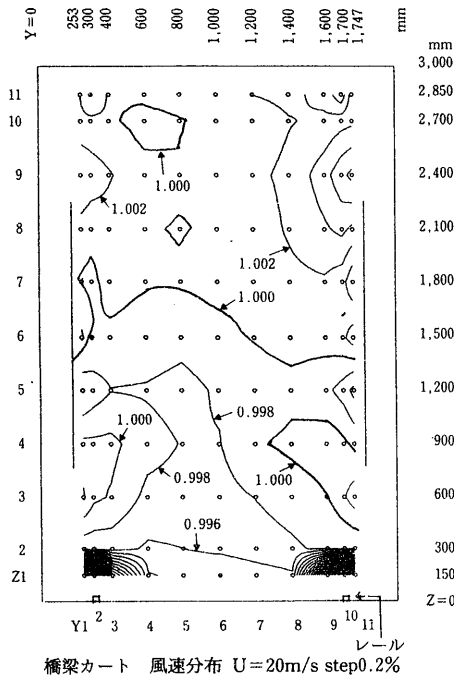


図-6 風速分布 (第2測定洞)

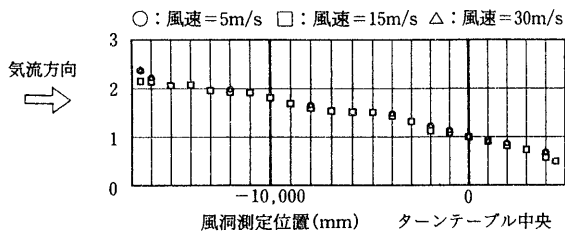


図-7 静圧分布 (第1測定洞)

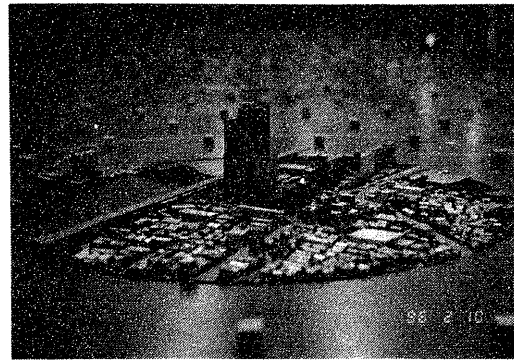


写真-2 ビル風実験状況

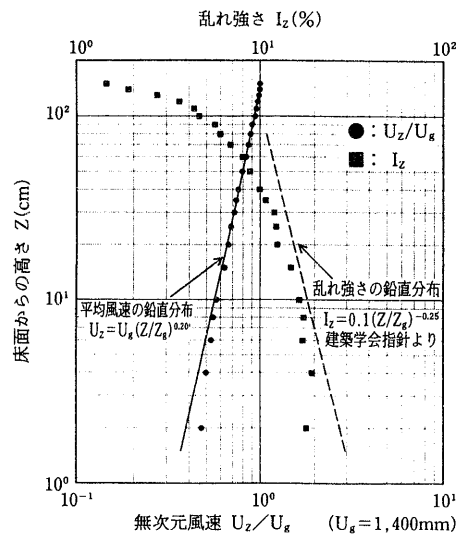


図-8 風洞気流性状 (第1測定洞)

3.1.2 第2測定洞 第1測定洞と同様に、第2測定洞における平均風速が2.5, 5, 10, 20 m/sの時の風速分布を、ピトー管を用いて計測した。このうち、図-6に平均風速20 m/sの時の結果を示した。図-6によれば、風速分布は床面から300 mm以上の部分でバラツキが0.5%以下と良好な風速分布になっており、本州四国連絡橋風洞試験要領(1980)・同解説に定められている風洞性能基準を十分に満たしている。

3.2 静圧分布

図-7に、第1測定洞における風軸方向の静圧分布を示した。なお、静圧の測定は風路の断面中央において、基準圧力を大気開放として行った。また、図-7の縦軸はターンテーブル中央における静圧値との比率とした。吹き出し口からターンテーブル後方までの静圧の低下は、風速の変化に係わらず同様な傾向を示し、ターンテーブル中央の静圧は、吹き出し口での静圧に比べて約1/2の値となっている。

4. 実験例

4.1 ビル風実験

ビル風実験は、新たに高層建築物等を建設する場合、周辺地域の風環境への影響を無視できない場合が多く、風環境の変化を予測・評価し、また防風対策の効果を確認するために行う。

(1) 地域模型 調査・検討する範囲の市街地を、計画建物を中心としてターンテーブル上(直径2,400 mm)に幾何学的相似条件に基づいて模型化する。写真-2にビル風実験状況の1例を示した。

(2) 風洞気流 対象地域における自然風を、相似条件に基づいて、風洞気流として再現する。ビル風実験に用いた風洞気流とその乱れ強さの鉛直分布を図-8に、パワースペクトルを図-9に示した。

(3) 計測装置 風洞気流の鉛直分布はI型熱線風速計(DANTEC社製)を、計画建物周辺の測定点毎の風速

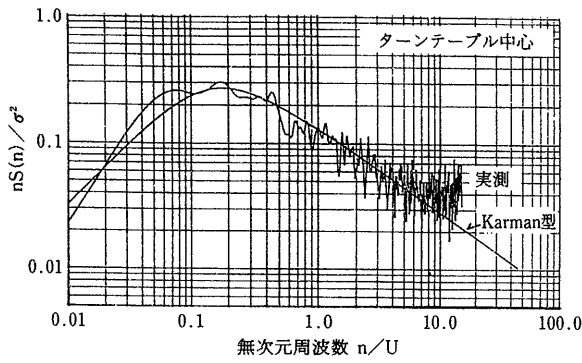


図-9 風洞気流のパワースペクトル

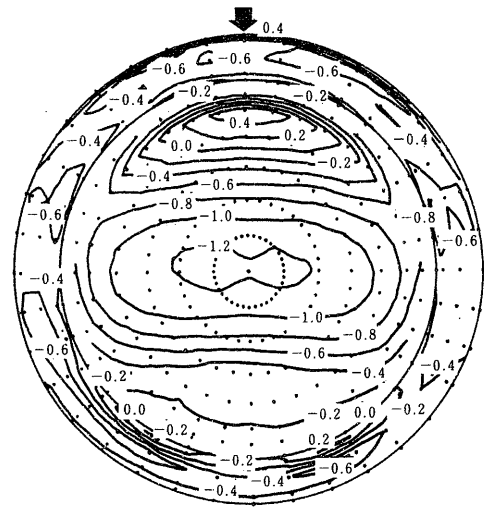


図-11 平均風圧係数分布

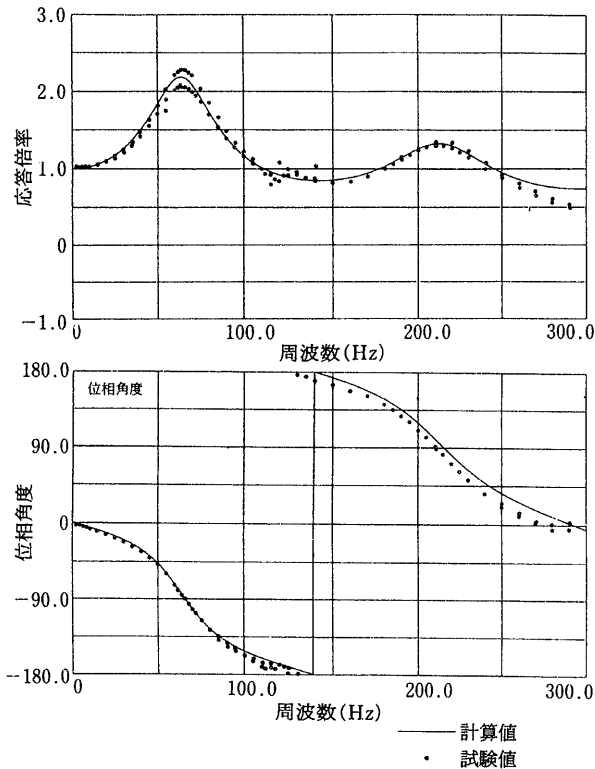


図-10 ビニールチューブの圧力伝達特性

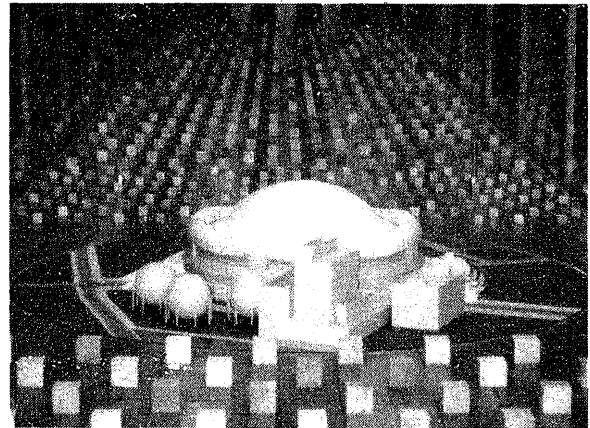


写真-3 風圧実験状況

はサーミスタ風速計(128CH, 芝浦電子工業製)を設置して、同時計測を行う。また、風向の変化は、風速測定点毎に発泡スチロールで作成した小旗を設置し、風向センサーを用いて同時計測する。

(4) 実験結果 実験で測定した風速は、最寄りの気象台における風速データを基に、風速比および超過確率を計算する。さらに、計算された超過確率、風向データ、気象台データ等により、現況と計画建物建設後の風環境の変化を検討し、必要があれば対策案を提示する。

4.2 風圧実験

風圧実験は、計画された建築物の壁面や屋根面に作用する風圧力を実験的に求め、構造骨組用風荷重、外装材用風荷重、振動特性等を評価するために行う。

(1) 風圧模型 写真-3に示した風圧実験用模型は、ドームおよび周辺地域を縮尺1/200でモデル化したものである。模型による風洞の閉塞率は最大で4.3%であり、風圧力の測定点は全体で581点設けている。

(2) 風圧力測定装置 模型壁面または屋根面に作用する風圧力は、模型壁面または屋根面に設けた内径1mmの測定孔の圧力をビニールチューブ(長さ1m, 内径1.6mm)を介して圧力変換器(384チャンネル, ZOC23B, ±250mm H₂O, スキャニバルブ社製)に導き、基準点の静圧との差から求める。

圧力変換器で検出された計測値は、ビニールチューブを介したことにより歪められたものとなっており、真の値とはいえない。そこで、図-10に示した、Holmes¹⁾他の理論的な方法に基づいて求めたビニールチューブの圧力伝達特性を用いて、周波数成分毎に計測値を補正したのち、逆フーリエ変換を行って得られたものを実験値としている。参考までに、図-10に周波数ごとに求めた圧力伝達特性試験結果についても示したが、Holmes 他の理論値と良く一致している。

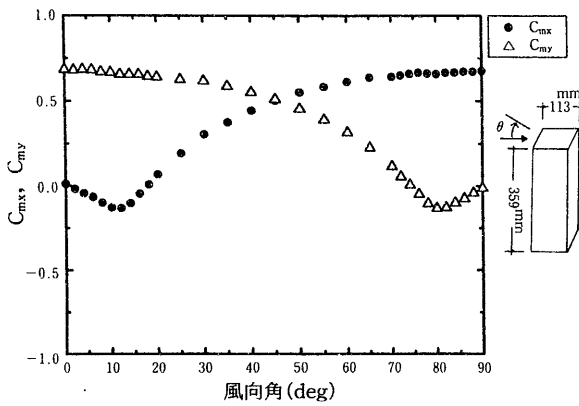


図-12 平均転倒モーメント係数の変化

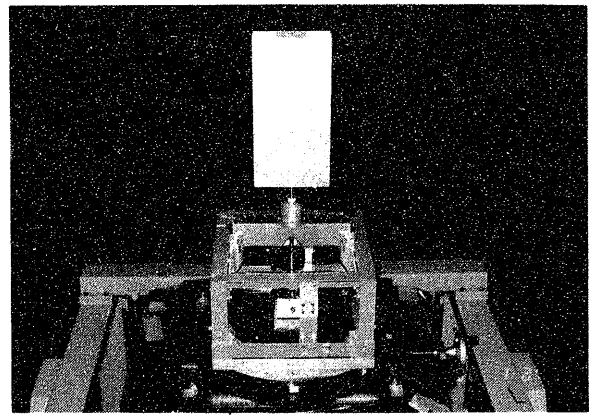


写真-4 空力振動実験状況

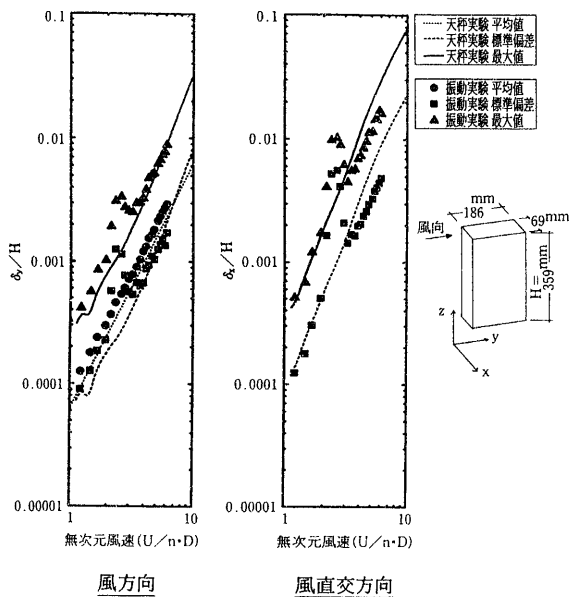


図-13(a) 長方形断面角柱の風応答 ($\beta = 0.6\%$ の場合)

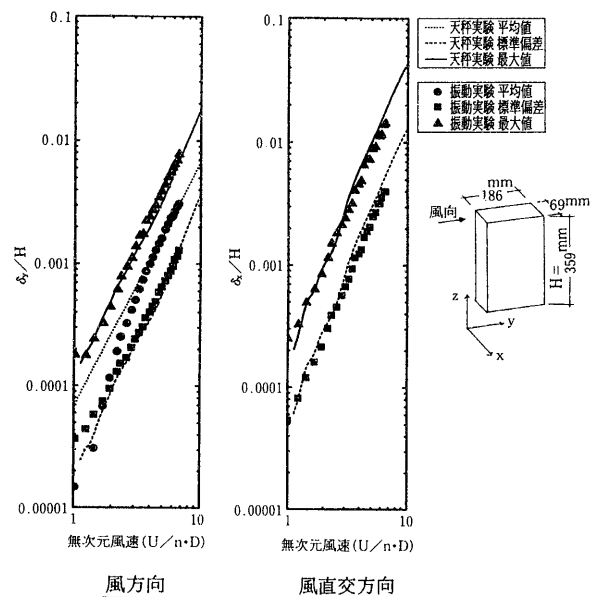


図-13(b) 長方形断面角柱の風応答 ($\beta = 2\%$ の場合)

(3) 実験結果の例 図-11に平均風圧係数分布の1例を示した。図中には、測定ポイント(・)、平均風圧係数とコンターラインを示した。

4.3 風力実験

風力実験は、剛模型を用いて建物脚部に作用する定常的な空気力(X-, Y-, Z-軸方向の力と各々の軸まわりのモーメント)を6分力天秤を用いて測定し、構造骨組用風荷重や居住性を評価するために行う。

(1) 実験模型 風力実験用の模型は、模型-天秤系の固有振動数を高くすると共に、有害な局所的な振動を除くために、できるだけ軽く、かつ剛性の高いものとする。

(2) 実験方法 X-, Y-, Z-軸方向の力と各々の軸まわりのモーメントが測定可能な6分力天秤に剛模型を設置し、風向を変化させながら、空気力を測定する。

なお、6分力天秤は剛な架台上に固定する。

(3) 実験結果 図-12は正方形断面角柱の平均転倒モーメント係数の風向角による変化を示している。X-, Y-方向の平均転倒モーメント係数分布の対称性は良好である。

4.4 空力振動実験

空力振動実験は、振動特性を相似させた剛模型を用いて建築物の挙動を再現するための実験であり、建築物の動的応答性状の評価ならびに不安定振動の有無を検討するために行う。

(1) 実験方法 X-, Y-軸の2軸まわりにロッキング振動が可能な振動装置上に模型を取り付け、逐次風速を増加させながら模型の振動を測定する。

(2) 実験結果 図-13は、長方形断面角柱の変位応答を示したものである。比較のため、風力実験より得ら

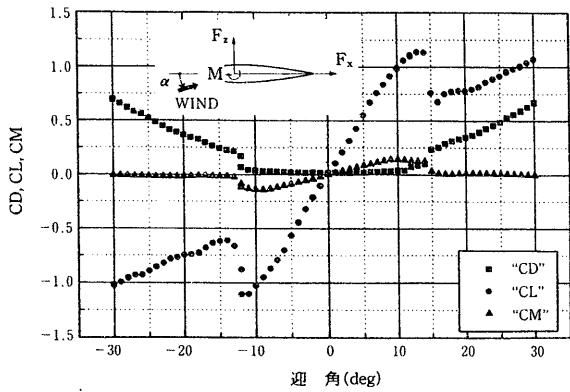


図-14 翼模型を用いた三分力試験結果

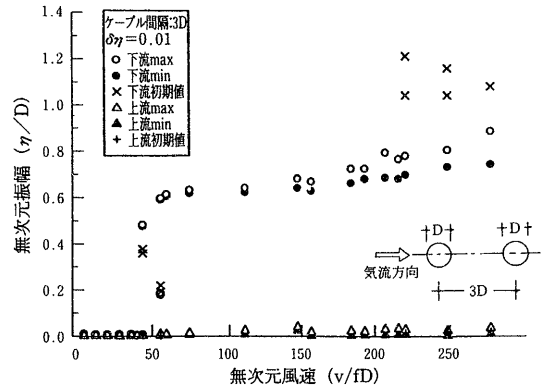


図-15 並列ケーブルの対風応答



写真-5 バネ支持試験装置

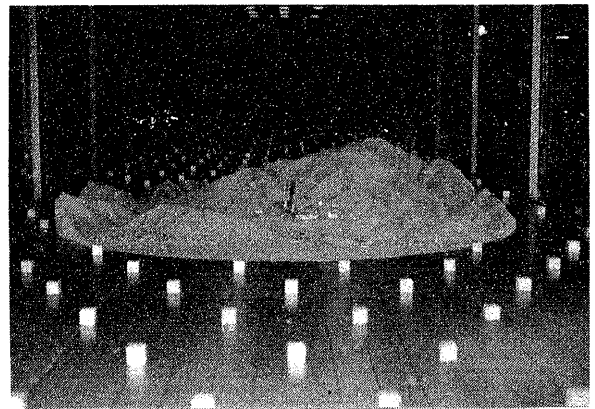


写真-6 地域模型を用いた環境実験状況

れた結果も同じ図中に示した。なお、図-13の横軸は、換算風速 U/n_0D (n_0 :固有振動数 (Hz), D :長辺の長さ (m)) を示し、縦軸は振動変位を模型高さで除した転倒角である。

減衰定数が比較的大きな場合 (β =約2%) には、振動による動的な空気力による影響が少ないため、風力実験と空力振動実験の結果は、ほぼ一致した性状を示している。また、減衰定数が比較的小さな場合 (β =約0.6%) では、空力振動実験結果には換算風速が2~3付近で、非定常空気力による影響で変位応答にピークが生じている。それ以外の風速域では、風力実験と空力振動実験の結果はよく一致している。

4.5 静的三分力実験

静的三分力実験は、2次元剛体模型に作用する平均的空気力として抗力、揚力、およびモーメントの三分力を求めるための試験であり、主に橋桁に作用する風荷重を評価するために行う。

(1) 試験方法 ひずみゲージを応用した三分力検出器を用いて、第2測定洞の両側面から模型を支持させて、迎角を変化させながら模型に作用する静的三分力を測定する。なお、三分力検出器の許容荷重は、抗力および揚

力成分に対して ± 30 kgf、モーメント成分に対して ± 3 kgf・mである。また、迎角の設定範囲は $\pm 90^\circ$ である。

(2) 実験結果 図-14に風洞の気流特性および実験装置の性能を検証する目的で実施した2次元翼型模型(NACA0012、弦長:400 mm、実験風速:10 m/sおよび20 m/s)を用いた三分力試験結果を示す。

気流の2次元性を確保するために模型端部に直径800 mmの端板を取り付けて実験を実施した後、端板に作用する流体力を差し引いて模型に作用する三分力を評価した。

図-14は、風速20 m/sの場合を示しているが、流れが付着状態から剥離状態へと遷移する、迎角が $0^\circ \sim +30^\circ$ の範囲では、揚力係数は迎角が $+13^\circ$ で最大となり、その後、前縁失速により急減して迎角が $+16^\circ$ で最小となる。逆に、剥離状態から付着状態へと変化する迎角が $-30^\circ \sim 0^\circ$ の範囲では、迎角が 12° で最小となる。

なお、図-14に示した迎角が $-30^\circ \sim +30^\circ$ の間では、既往のデータ²⁾とよく一致したことを確認している。

4.6 バネ支持試験

バネ支持試験は、橋桁部分を模擬した2次元剛体模型を実橋の振動系を反映するようなバネ系に支持させ、風速の変化による橋桁模型の振動特性をとらえるために行われる。

(1) 試験方法 2次元剛体模型を実橋の振動系を反映するようなバネ系に支持させ、風速を段階的に大きくしてゆき、各ステップ毎に模型の変位を測定する。写真-5にバネ支持試験装置を示した。

なお、バネの強さを変化させることにより振動数を、模型の支持方法を変化させることにより振動自由度を、さらに電磁式加振減衰装置により構造減衰を、それぞれ自由に調整することが可能である。

電磁式加振減衰装置は2台1組でたわみとねじれの加振および減衰付加が可能であり、最大加振力が3 kgf/台、周波数範囲が：0.1~50 Hz、振動ストロークが125 mm (peak-peak)となっている。そして、模型を傾けること(模型を支持するバネ系も一緒に傾ける)により、風の迎角に対する影響を観測することもできる。迎角の設定範囲は $\pm 30^\circ$ 以内である。

(2) 実験結果 実験例として、並列ケーブルの制振実験における上、下流ケーブルの対風応答特性(風速-振幅関係)を図-15に示した。

4.7 地域模型を用いた環境実験

大規模な地域模型を用いた環境実験は、環境保全・省エネルギー対策のための環境調査並びに大気拡散状況の調査等のために行われる。

写真-6に、山岳地に計画されたスポーツ施設について、建設前後の風況の変化を調査するために行った、実験状況を示した。

5. おわりに

超高層建築物の耐風設計や風揺れによる居住者への影響、吊橋や斜張橋の耐風安定性、都市の開発に伴う環境の評価など、風工学分野での調査研究課題は、日増しに増えている。今後とも日々進歩する先端技術を取り込みながら、多目的風洞実験施設を効率的に活用する所存である。

最後に、本風洞の建設に携わった(株)荏原製作所、日章電機(株)、和泉測器(株)および計測制御システムの開発に協力いただいた構造計測(株)、(株)CSK、(株)アイ・アール・ディーの関係各位に、感謝いたします。

参考文献

- 1) J. D. Holmes and R. E. Lewis: Optimization of Dynamic - pressure - measurement systems. I. Single point measurement, J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 25, (1987)
- 2) 川口彰久, 諏訪好英, 本間義教, 伊藤雅保: 大阪ドームの風圧特性と内部環境に関する研究(その1) - 建物に作用する風圧力特性 -, 大林組技術研究所報, No. 51, p. 123 ~128, (1995)
- 3) 本州四国連絡橋公団: 本州四国連絡橋風洞試験要領(1980)・同解説, (1980)