

超々高層建築物「ミレニアムタワー」の耐風性能に関する研究

——風洞実験に基づく空力特性と応答予測——

川口 彰久 三原 宏昭

A Study of Wind Effects on a Super High-rise Structure

——Aerodynamics of “Millenium Tower” and Prediction of Wind-Induced Response——

Akihisa Kawaguchi Hiroaki Mihara

Abstract

The wind effect on “Millenium Tower” proposed by Obayashi Corporation and Foster Associates in looking toward the 21st Century is described in this paper. Wind tunnel tests of a 1 : 500 model of Millenium Tower were carried out at the Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory of the University of Western Ontario. It was made clear that the conical shape of the tower and the protruding exterior structural members would reduce vortex shading force and additional motion-induced force. The wind-induced response of the tower was predicted by means of both the spectrum-modal technique and time-history analysis, assuming construction in the waterfront area of Tokyo. It was then shown that a possibility exists for construction of Millenium Tower as evaluated from the point of view of wind-resistant design.

概 要

本件は、当社とフォスター事務所が、21世紀に向けて提案した超々高層建築物「ミレニアムタワー」の耐風性能について、報告するものである。ミレニアムタワーの基本的な空力特性については、カナダ西オンタリオ大学の協力を受けて、縮尺1/500の模型を用いた風洞実験により調査した。調査の結果、形状が円錐形であることや外部に突出したネット状の構造部材が、上空の強い風の作用による付加的な空気力の発生を抑制していることが明らかとなった。また、東京臨海部を想定して、スペクトルモーダル法や時刻歴応答解析により応答予測を行い、耐風性の観点から超々高層建築物の実現の可能性を示した。

1. はじめに

都市における土地の高度有効利用の要求と構造設計や施工技術の向上は、より高層の建築物の建設を可能にしてきた。そして、アメリカには世界一高い建築物であるシアーズタワー(110階建オフィスビル、高さ443 m、1974年竣工)、カナダには世界一高い建造物であるCNタワー(通信・展望用タワー、高さ553 m、1976年竣工)がある。日本においては、横浜ランドマークタワー(70階建ホテル・オフィスビル、高さ296 m)が、日本一高い建築物として平成5年7月に完成した。

このような社会的環境の中で、当社とフォスター事務所は21世紀に向けて、建物というよりも都市と定義するにふさわしい超々高層建築物「ミレニアムタワー」のプロジェクトを提案した¹⁾。

本報告は、風洞実験による空気力特性の調査結果と、それに基づくミレニアムタワーの耐風性能に関する検討結果を、まとめたものである。

2. 建築物の概要

ミレニアムタワーのコンセプトは、高度なインテリジェント・オフィス施設と住宅・都市施設を併せもち、また複合文化商業施設を完備した立体都市をイメージしたものである。その全体形状は、写真-1に示すような円錐形である。ビル本体の高さは600 mであるが、電波塔を含めると、最高高さは800 mとなる。ミレニアムタワーの特徴を、表-1に記す。

構造上の特徴としては、全体構造はダブルチューブ方式のメガストラクチャー構造である。そして、外周部にはヘリカル部材を採用し、剛強なネット上の構造を形成している。振動特性を、図-1に示す。



写真一 ミレニアムタワーの概観



写真二 風洞内に設置した模型（縮尺1/500）

表一 ミレニアムタワーの特徴

用途	オフィス・住宅・商業施設等
形状	円錐形状
建物高さ	600m 800m（タワー頂部）
階数	150階
構造形式	円形ダブルチューブ構造

3. 空力特性

ミレニアムタワーの空力特性の調査は、カナダ西オンタリオ大学境界層風洞研究所の協力を得て、次の観点から実施した^{2),3)}。

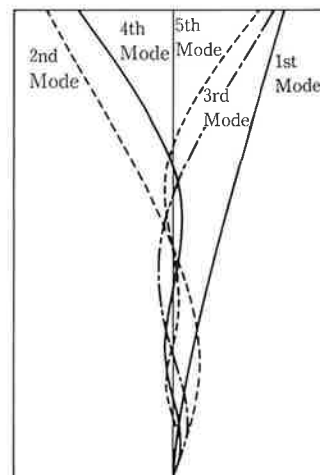
- ① 建物の壁面に作用する風圧力の分布
- ② 建物全体に作用する風力の特徴
- ③ 振動に依存する付加空気力の評価

3.1 風洞実験

風洞実験では、壁面に作用する風圧力と天秤を用いての建物全体に作用する転倒モーメントの測定、および空力不安定振動の発生に関する検討として、模型を強制的に振動させて、振動速度に依存する風力の調査も実施した。実験にあたっての相似条件は、以下の通りである。

(1) 建物模型 ミレニアムタワーの模型は、縮尺1/500で製作した。風洞内に模型をセットした状態を、写真一・二に示す。

(2) 風洞気流 風洞気流の鉛直分布は、作用する風力に与える乱れの影響を把握するために、図一・二に示す



固有振動数	
1次振動数	0.113Hz
2次振動数	0.286Hz
3次振動数	0.555Hz

図一 振動特性

2種類の気流を準備した。気流一は乱れの小さい気流で、気流二は乱れの激しい気流である。風洞気流の境界層高さは、いずれも実寸換算で750m相当である。

(平均風速の鉛直分布)

$$U_z = U_0 (Z/Z_0)^\alpha$$

ここで、 U_z ：高さZでの平均風速、 U_0 ：基準高さ Z_0 での基準風速、である。地表面の状況による指数 α は、気流一では0.18、気流二では0.25となる。

周波数特性としての変動風速のスペクトルは、図一・三（気流二）に示す。図中の点線は、次式で示されるカルマン型スペクトルである。

(Von Kármán Spectrum)

$$\frac{nS_u(n)}{\sigma_u^2} = \frac{4\tilde{n}}{(1+70.8\tilde{n})^{5/6}} \quad \tilde{n} = \frac{nL}{U}$$

ここで、 $S_u(n)$ ：速度変動のパワースペクトル、 \tilde{n} ：無

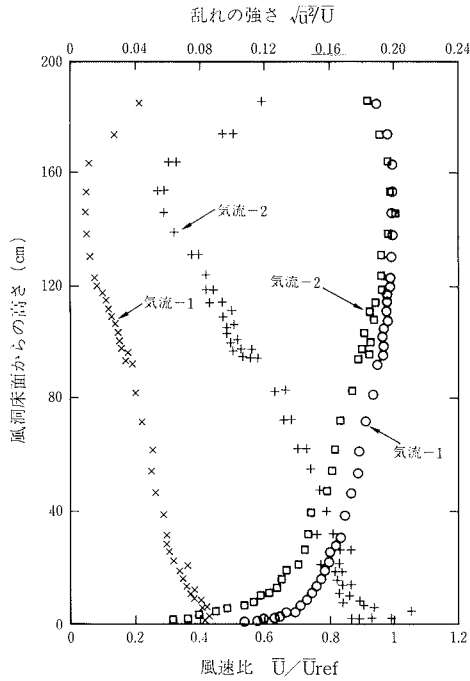


図-2 風洞気流の鉛直分布

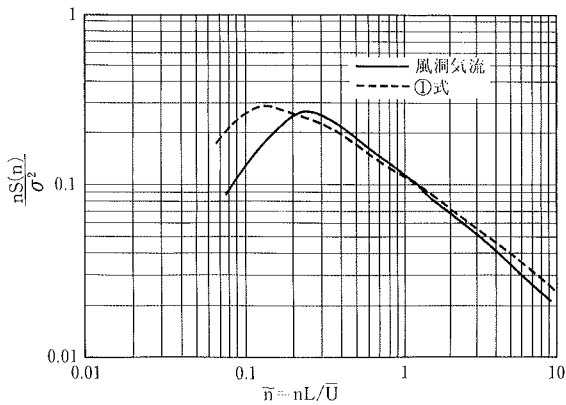


図-3 風洞気流のスペクトル (気流-2)

次元周波数, n : 周波数, σ : 速度変動の標準偏差, L : 乱れのスケール, U : 平均速度, である。

(3) 実験風速 曲面を有する構造物を対象とした風洞実験では、レイノルズ数の影響が表われる場合がある。本件においてもこの点に関しての影響が予測されたが、風洞風速を変化させての風圧係数やスペクトルの比較検討において、安定した実験状況であることを確認している。実験でのレイノルズ数は、 10^5 オーダーである。

(4) 時間スケール 模型と実大スケールの時間に関する相似則は、無次元振動数の一致を満足させることで対応させた。

$$n_m D_m / U_m = n_r D_r / U_r$$

ここで、 n : 振動数, D : 代表寸法, U : 風速, 添字 m : 模型, f : 実大を意味する。

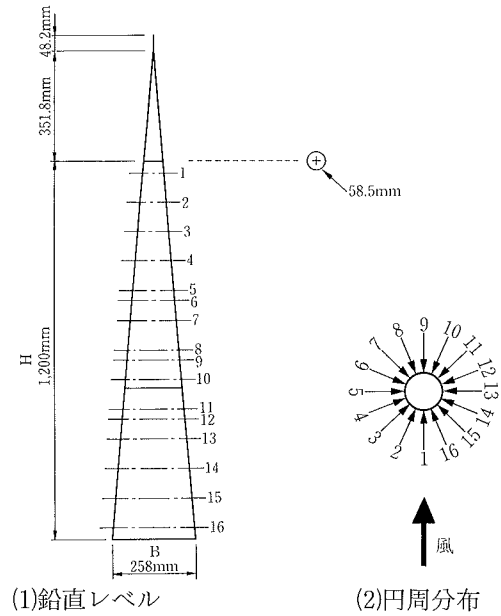


図-4 風圧測定点の分布

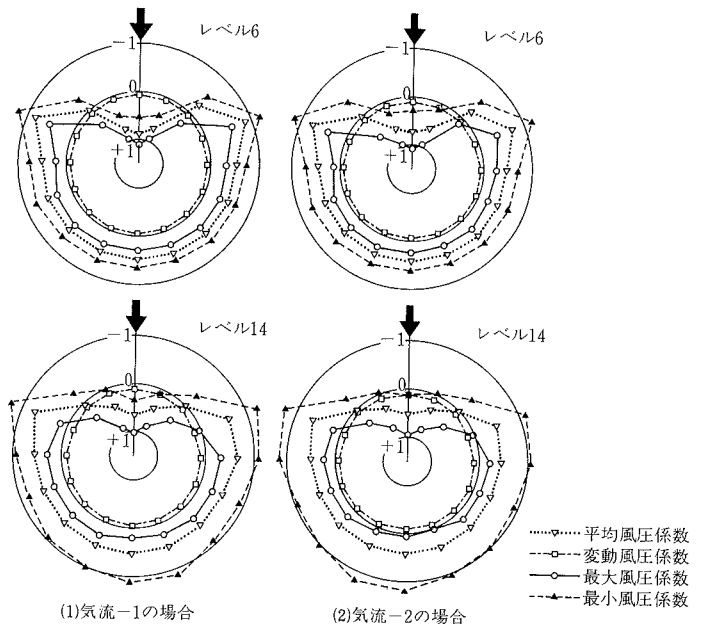


図-5 風圧係数の分布

3.2 風圧分布

建物壁面に作用する風圧力は、図-4 に示す高さレベルで各レベルの円周方向16の測定孔を設けて測定し、建物頂部の基準風速により風圧係数として算出した。

(風圧係数)

$$CP = \frac{P}{1/2 \rho U_0^2}$$

ここで、 CP : 風圧係数, P : 風圧力, ρ : 空気密度, U_0 : 境界層高さの基準風速, である。

代表的な高さレベルの風圧係数の分布は、図-5 となる。ミレニアムタワーに作用する風圧力は、風軸に対して ± 67.5 度で負の極値を示しているが、それぞれの高さ

表一2 風力係数

(1)風圧実験に基づく風力係数

風力係数		気流-1		気流-2	
		風方向	風直交方向	風方向	風直交方向
ベースシアー係数	平均rms	0.480 .0237	.0304	0.410 .0407	— .0352
転倒モーメント係数	平均rms	0.248 .0097	— .0075	0.213 .0202	— .0096

(2)天びん実験に基づく風力係数

風力係数		気流-1		気流-2	
		風方向	風直交方向	風方向	風直交方向
ベースシアー係数	平均rms	0.500 .0226	.0259	0.425 .0405	— .0313
転倒モーメント係数	平均rms	0.219 .0084	— .0068	0.195 .0159	— .0086

の風速で基準化したときに平均風圧係数の絶対値が1.5を超えることは、最下層を除いて認められなかった。これは、鉛直部材やヘリカル部材で構成される柱型がタワー壁面から突出しているために、壁面が滑面の場合に発生する最大負圧の発達を抑制しているためと推定される。

3.3 風力係数

上記の各レベル各測定点の風圧を風方向と風直交方向それぞれの成分で積分して、タワー基礎部に作用する風力を求めると、表一3となる。同表には、5分力天びん実験から算出した風力係数も示すが、両者の結果に大きな差異はなく、良い近似を示している。

また、気流-1と気流-2の結果を比較すると、風方向の平均風力係数は気流-1の場合が大きいが、その他の変動風力係数は気流-2の場合が大きく、風直交方向においても風の乱れの影響による風力の変動成分が大きく寄与していることがわかる。

(ベースシアー係数)

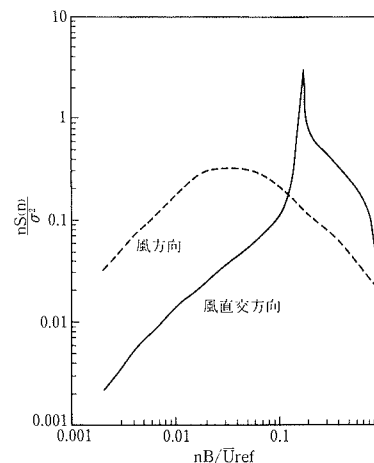
$$C_F = \frac{F}{1/2\rho U_0^2 BH}$$

(転倒モーメント係数)

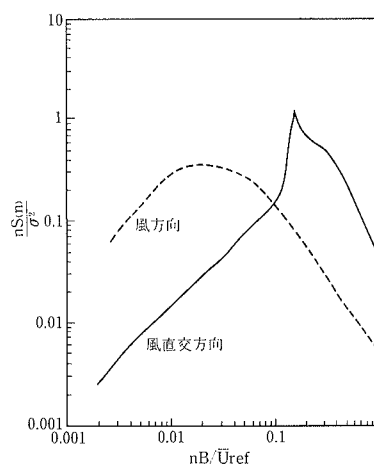
$$C_M = \frac{M}{1/2\rho U_0^2 BH^2}$$

ここで、 C_F ：ベースシアー係数、 C_M ：転倒モーメント係数、 F ：ベースシアー、 M ：転倒モーメント、 B ：基部の直径、 H ：建物高さ、である。

天びん実験から算出した転倒モーメント係数の周波数特性は、図一6となる。風方向では、風のスペクトルに類似であるが、風直交方向の転倒モーメント係数は無次元振動数 $S_t = f_0 B / U_0 = 0.178$ (気流-1)、 $S_t = 0.156$ (気流-2) で卓越しており、建物の背後で発生する渦の影響を受けていると推測される。ただし、代表寸法 B は基部の直径、基準風速 U_0 は境界層高さの平均風速、気流-1) である。

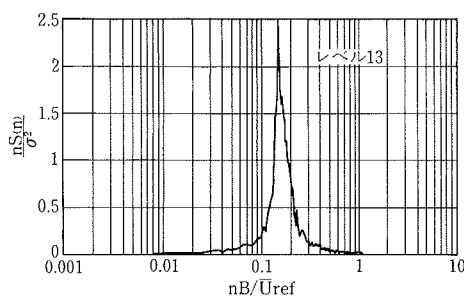
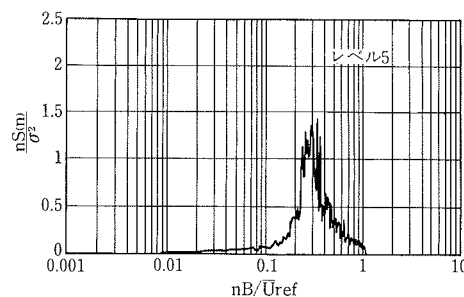


(1)気流-1の場合



(2)気流-2の場合

図一6 転倒モーメント係数のパワースペクトル



図一7 各高さレベルの風直交方向の風力スペクトル

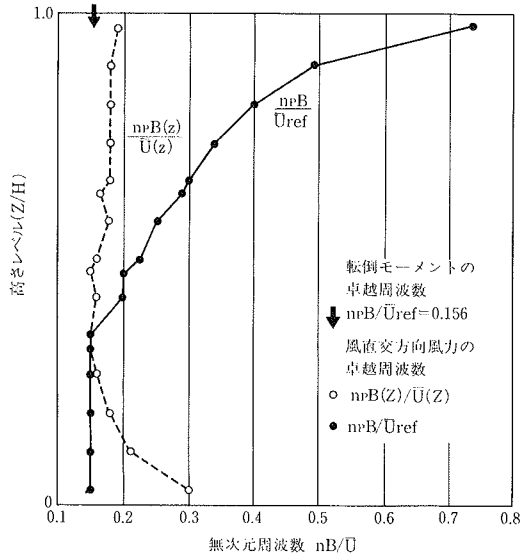


図-8 各高さレベルの卓越周波数

気流-1と気流-2で卓越する無次元振動数が異なるのは、風洞気流の平均風速の鉛直分布の影響によるものと推測される。

3.4 渦の発生

上述した転倒モーメントの周波数特性から、タワー背後で発生する周期性の高い渦が、風直交方向の風力に大きく影響していることが明らかである。そこで、次に転倒モーメントに大きな影響を与える高さレベルがいずれであるかについて調査した。

図-7は、各高さレベルの風直交方向の風力のスペクトルを示す。これによると、レベル5では周波数の卓越バンド幅が広く、下層レベルでは卓越バンド幅が狭くなっている。それぞれのレベルでの卓越周波数をプロットすると図-8となる。各高さレベルでの無次元振動数を代表直径と基準風速から換算すると、レベル11以下で0.15となり、転倒モーメントが卓越した無次元周波数に近似し、渦の影響は下層部の寄与が大きいことになる。

上層部での渦の発生は、卓越する周波数帯の変化から一体的な渦が形成されているのではなく、それぞれのレベルでのストローハル数により制御されていると推察される。ただし、上層部ほど構造体のリブの影響を大きく受けるので、卓越する周波数帯の幅は広くなり明確でなくなるのである。

風直交方向の転倒モーメントのスペクトルが高周波数側で減衰していない点は、上層部で発生する渦の影響によるものと推察される。

3.5 空力減衰

風の流れの中に構造物があるときに、その構造物は風外力の作用により振動する。さらに、構造物自身の振動が付加的な風力を励起させて、振動をより一層激しくする状況が生ずる場合がある。この状況は、空力的な不安定振動として分類されるもので、構造物の設計にあたっては、発生させてはならない現象である。そこで、ミレニアムタワーの模型を風洞内で強制的にロッキング振動

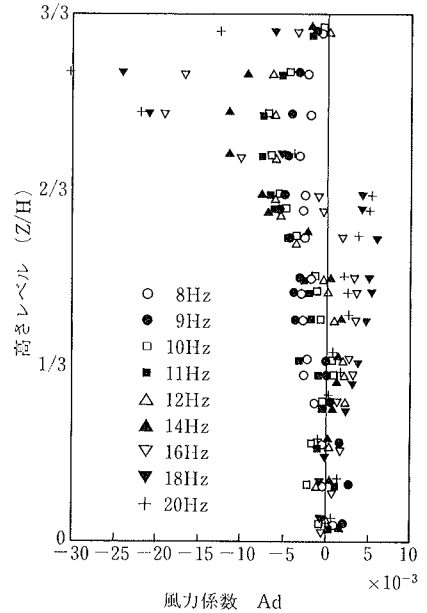


図-9 速度依存風力係数

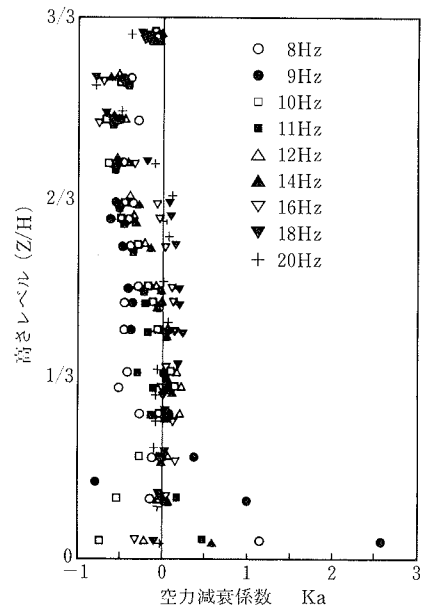


図-10 無次元空力減衰係数

させて、各レベルの風圧変動から空力減衰係数の評価を試みた。このとき、速度に依存する風力は下式で評価することができる⁴⁾。

$$F_v(t) = A_v B(z) q \{ \dot{y}(t) / \dot{y}_{max} \}$$

$$A_v = 1 / \{ q B(z) \} (2/T) \int F_o(t) \{ \dot{y}(t) / \dot{y}_{max} \} dt$$

ここで、 $F_v(t)$: 速度依存風力

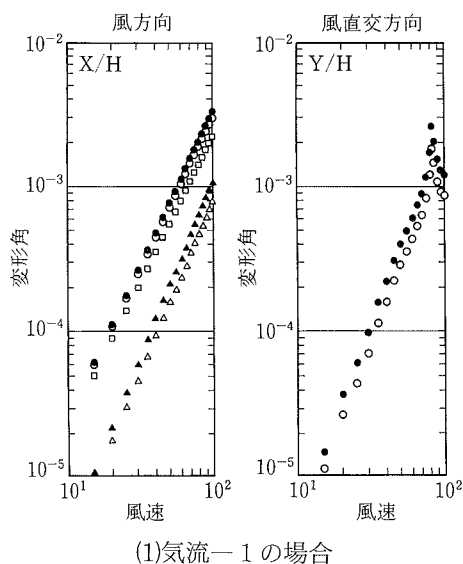
A_v : 速度依存風力係数

$F_o(t)$: 測定された風力

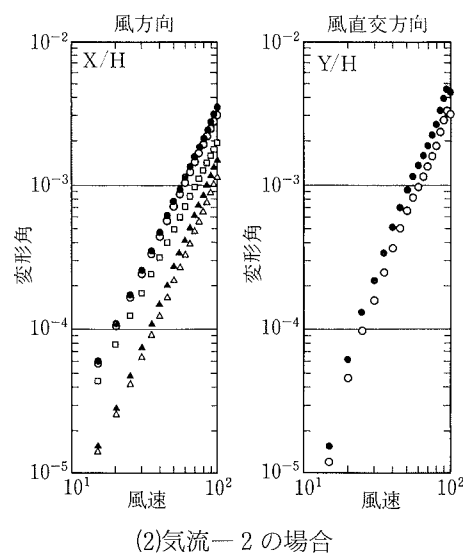
$\dot{y}(t)$: 加振速度

\dot{y}_{max} : 加振速度の最大振幅

加振振動数8~20 Hzの範囲で模型を変位振幅(Z/1,000, Zは高さ)で振動させて得た風直交方向の速度依存風力係数を、図-9に示す。



(1)気流-1の場合



(2)気流-2の場合

図-11 応答変形角の最大値の予測

この図で、速度依存風力係数が正の値であるときには、構造物が振動する時に付加的な風力が励起されたことを意味する。そこで、速度依存風力を一般化させて表現することにする。すなわち、速度依存風力を下式で表して、無次元空力減衰係数を求めると、図-10となる。

$$F_v(t) = k_a \dot{y}(t)$$

ここで、 $F_v(t)$: 速度依存風力

k_a : 空力減衰係数

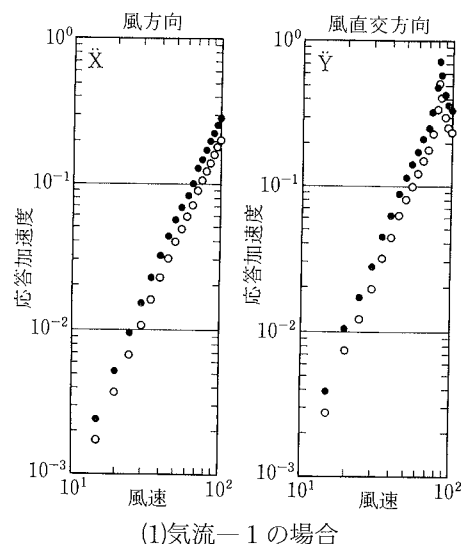
$$\{ = 4q(\omega B/U)^2(1/\omega)Ka \}$$

$\dot{y}(t)$: 構造物の振動速度

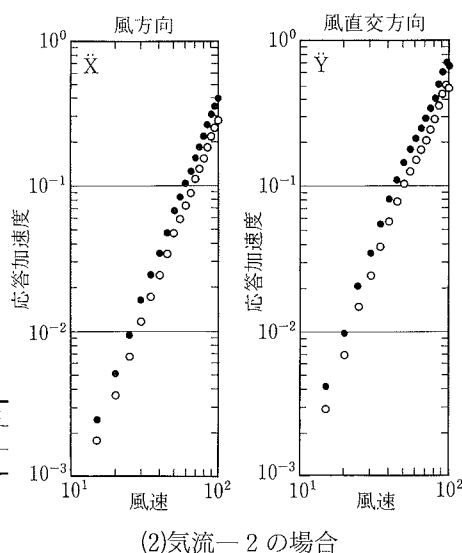
ω : 円振動数

Ka : 無次元空力減衰定数

また、さらに自励振動の可能性を検討するために、構造物の構造減衰定数に対応した空力減衰定数を換算すると、 $\beta_a = -0.0064Ka$ となり、最下層を除くレベルでは、一般的な構造物の構造減衰と比較して、負の空力減衰は非常に小さいことは明らかである。最下層の空力減衰 Ka は相対的に大きな値を示すが、最下層の風力は、構造物全体に作用する全体風力に対する寄与は小さいので、



(1)気流-1の場合



(2)気流-2の場合

図-12 応答加速度の最大値の予測

現実的にはなんら問題にならない。

4. 応答予測

ミレニアムタワーの風励起振動を予測する方法としては、天秤実験で求めた転倒モーメントに基づく方法と各高さレベルで測定した時刻歴風力から予測する2通りの方法がある。

そこで、天秤実験に基づく応答解析では、スペクトルモーダル法を適用して、風速と応答の関係を把握した。ただし、天秤実験で得られる風力は、構造物の振動モードが高さに比例する振動の広義の一般化風力に相当するので、本件ではミレニアムタワーの一次振動だけの応答を予測したことになる。高次振動の影響については、16の高さレベルで得た時刻歴風圧力から直接応答解析して、評価することとした。

4.1 スペクトルモーダル法による応答予測

ランダムな風外力による建物の応答は、平均成分と変動成分に分けて考えることができ、応答変位の最大値は次式で与えられる。

$$X_{\max} = X_{\text{mean}} + g\sigma_x$$

ここで、 X_{\max} ：応答変位の最大値、 X_{mean} ：応答変位の平均値、 g ：ピークファクター(=3.5と仮定)、 σ_x ：応答変位の標準偏差である。

ところで、建物振動は風外力に対して線形応答の関係にあると仮定すると、風外力の転倒モーメントのパワースペクトル($S_M(n)$)に建物のメカニカルアドミッタンス($|X(n)|^2$)を乗ずると、応答変位のパワースペクトル($S_X(n)$)を算出することができる。すなわち、下式の関係が成り立つことになる。

$$S_X(n) = S_M(n) \cdot |X(n)|^2$$

ただし、

$$|X(n)|^2 = [1 - (n/n_0)^2]^2 + 4\beta^2(n/n_0)^2]^{-1} (K \cdot H)^{-2}$$

ここで、 β ：減衰定数(= $\beta_m + \beta_a$ 、 β_m ：構造減衰定数、 β_a ：空力減衰定数)、 n_0 ：固有振動数、 K ：剛性(= $(2\pi n_0)^2 m$)、 m ：質量、 H ：建物高さ、である。そして、応答変位のパワースペクトルを積分すると、分散が求まる。

$$\sigma_x^2 = \int S_X(n) dn = \int S_M(n) |X(n)|^2 dn$$

この式は、簡略化することにより、風外力の変動成分と建物の共振成分に分離することができる。

$$\sigma_x^2 = \sigma_M^2 [1 + \pi/4\beta \cdot n_0 S_M(n_0) / \sigma_M^2 (K \cdot H)^{-2}]$$

ここで、 $\sigma_M = \sigma_{CM} \cdot (1/2\rho V_0^2 B H^2)$ である。

以上から、応答変位の標準偏差は、以下となる。

$$\sigma_x = \sigma_M [1 + \pi/4\beta \cdot n_0 S_M(n_0) / \sigma_M^2]^{1/2} / (K \cdot H)$$

平均変位も同様に算出できる。

$$X_{\text{mean}} = M_{\text{mean}} / (K \cdot H)$$

応答加速度は、一次振動の共振成分の応答変位から次式により算定される。

$$\ddot{X}_{\max} = g\sigma_{\ddot{x}} = g\sigma_x \cdot (2\pi n_0)^2$$

ここで、 $\sigma_{\ddot{x}}$ ：応答変位の共振成分である。

以上の手順に基づいて、ミレニアムタワーの応答変形角(X/H , Y/H)と応答加速度(\ddot{X} , \ddot{Y})の最大値を予測し、図-11, 12の結果を得た。減衰定数の仮定では、振動速度に依存する負の空力減衰力は小さいとの結論を得ているので、建物の構造減衰と空力減衰を含めたものとして、 $\beta = 1\%$ の場合と 2% の場合を想定した。

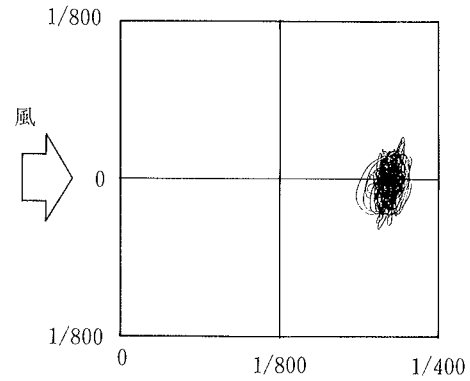
4.2 時刻歴応答解析

時刻歴応答解析では高次振動の影響を把握するため、モーダルアナリシスを適用して1次から3次振動までを対象とした解析を行った。すなわち、下式で表示される r 次振動の運動方程式において、一般化風力を各高さごとの風力の和として算定した。

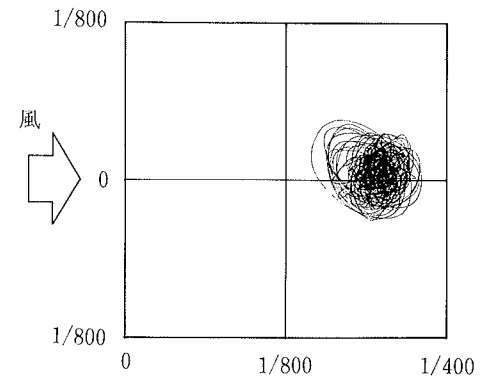
$$m_r(\ddot{x}_r + 2\beta_r \omega_r \dot{x}_r + \omega_r^2 x_r) = F_r$$

$$F_r = \sum P_i \phi_{ir}$$

ここで、 x_r ：一般化変位、 β_r ：減衰定数(構造減衰定数+空力減衰定数)、 ω_r ：固有振動数、 F_r ：一般化風力、 P_i ：風力(= $qC_i A_i$)、 q ：速度圧(= $1/2\rho U_0^2$)、 U_0 ：基準風速、 ϕ_{ir} ：固有振動モード、 m_r ：一般化質量(= $\sum m_i \phi_{ir}^2$)、添字 r ：振動次数、 i ：質点番号である。従って、 i 質点の変位は $X_i = \sum X_r \phi_{ir}$ から算出される。なお、各高さの風外力は、風洞実験で測定した風力係数($C_i(t)$)



(1)気流-1の場合



(2)気流-2の場合

図-13 地上600m位置の変形角の軌跡

を、時間スケールと風速の縮尺スケールの相似則に基づいて補正して換算した。

再現期間500年を想定して応答を予測すると、地上600m位置の変形角の軌跡は図-13となる。この解析にあたっては、減衰定数を一律1%と非常に小さな値を仮定したにもかかわらず、高次振動の影響はわずかで、オオバリング振動をしている。ただし、乱れの小さな気流-1の風力に対する振動は、風方向よりも風直交方向の振動が激しくなっている。

4.3 応答評価

構造物の耐風安全性を検査する場合には、設計風速の設定が重要なファクターになり、その建築物をどこに建設するかが、大きく影響する。そこで、仮にミレニアムタワーを東京臨海地域に建設することを想定して、再現期間と風速、応答の関係について検討する。

建築学会荷重指針⁹⁾に基づいて設計風速を算定する、再現期間と境界層高さでの平均風速の関係は、表-3となる。表中には、スペクトルモーダル法で求めた最大応答変形を示したが、減衰定数1%でも変形角はわずであり、構造設計上耐風安全性は十分に確保されているものと判断される。

渦励振に対する共振風速は、気流-1の場合82 m/s、

表一3 再現期間と最大変形角の予測

(1)気流-1の場合 (×10⁻³)

再現期間 年		100	200	500
平均風速m/s		64.6	69.1	74.9
風方向	減衰 1%	1.32	1.56	1.81
	定数 2%	1.22	1.44	1.66
風直交方向	減衰 1%	0.75	0.89	1.15
	定数 2%	0.53	0.63	0.82

(2)気流-2の場合 (×10⁻³)

再現期間 年		100	200	500
平均風速m/s		64.6	69.1	74.9
風方向	減衰 1%	1.33	1.58	1.83
	定数 2%	1.23	1.44	1.67
風直交方向	減衰 1%	1.60	1.86	2.20
	定数 2%	1.14	1.33	1.57

乱れの大きな気流-2の場合に風速 91 m/s となるが、この風速レベルは再現期間1,000年以上に相当する風環境であり、耐風設計上特に問題にはならないと考える。

次に、居住性の観点から地上 600 m 位置の床面の水平応答加速度を評価する。そこで、建築学会指針⁶⁾の評価尺度を適用すると、再現期間1年の風速は、境界層高さで平均風速 24.6 m/s となり、時刻歴応答解析から各振動次数での最大加速度を算出すると、表一4となる。最大加速度にたいして評価尺度を適用すると、一次振動に対して住居系の建築物の場合にはランクIIの評価であるが、事務所系の建築物ではランクIの評価に対応しており、十分な居住性が確保されていると判断される。

5. まとめ

風洞実験に基づいて、ミレニアムタワーの耐風性能について検討した結果、以下の結論を得ることができた。

① ミレニアムタワーの円錐形状は、ネット状に張り出した構造部材の存在と共に、局部的および全体的に作用する風圧力や周期的に発生する渦力の作用を抑制するのに役立っている。

② 強制加振実験に基づくと、空力負減衰が下層部で観測されたが、その影響はわずかであり、不安定振動を予測するものでない。

③ 東京臨海地域を想定して、風外力に対する応答評

表一4 再現期間1年における応答加速度の予測 (gal)

振動次数		1次	2次	3次
気流-1	風方向	2.82	0.42	0.08
	風直交方向	3.78	0.47	0.09
気流-2	風方向	4.92	0.29	0.10
	風直交方向	5.40	0.32	0.12

価を行い、構造設計において十分な耐風安全性と居住性能を有していることを確認した。

④ 耐風設計の観点から、過去に類を見ない高さの超々高層建築物「ミレニアムタワー」の実現に向けての可能性を示すことができた。

謝辞

本論文は著者等によりまとめたが、ミレニアムタワーのプロジェクトは、Foster 事務所と超々高層建築物研究開発グループ（1988年12月～1990年9月、リーダー：武田寿一技術研究所長）により提案されたものである。

また、ミレニアムタワーの空力的特性を調査するための風洞実験は、カナダ・オンタリオ州西オンタリオ大学境界層風洞研究所（Dr. A. G. Davenport 教授, Dr. B. J. Vickery 教授, R. T. Edey 研究員, R. G. J. Flay 技術者）の助言と協力を得て実施した。

ここに、関係者一同に、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) K. Shimizu: Millennium Tower, Structural Engineering International, (1992)
- 2) B. J. Vickery, R. G. J. Flay, R. T. Edey: A wind Tunnel Investigation of Loads and Pressures on a 1:500 Model of the Millennium Tower, BLWT-SS20-1992, (1992)
- 3) The Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory: Wind Tunnel Testing: A General Outline, (1992)
- 4) B. J. Vicker, R. I. Basu: Across-wind vibration of structures of circular cross-section Part. 1 Development of a mathematical model for two-dimensional conditions, Journal of WEIA, 12, p. 49~73, (1983)
- 5) 日本建築学会編: 建築物荷重指針・同解説, (1993)
- 6) 日本建築学会編: 建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説, (1991)