

超高層ビル群の耐風性に関する評価

山本博志 川口彰久 三原宏昭 伊藤雅保
藤原康子 諏訪好英 表 佑太郎

Evaluation of the Wind Resistant Properties of Tall Buildings

Hiroshi Yamamoto Akihisa Kawaguchi Hiroaki Mihara Masayasu Ito
Yasuko Fujiwara Yoshihide Suwa Yutaro Omote

Abstract

For the wind resistant design of tall buildings, a flowchart was made to determine the design wind loading for Shinagawa Intercity (tower A, tower B, tower C). After the flowchart was developed, we evaluated wind resistant properties based on wind tunnel tests and numerical analysis.

The following interesting results were obtained: ① In the numerical analysis, it is possible to get reasonable results in the evaluation of the average wind force to some extent. ② Based on the results of the wind tunnel tests, the wind resistant design loading could be suggested for tall buildings. ③ In order to evaluate habitability, the vibration of a building with an elliptical plan will need to be reduced by a control system.

概要

超高層ビル群「品川インターシティ (A棟, B棟, C棟)」の耐風設計に際し、耐風設計における風荷重決定フローに従い、風洞実験および数値解析に基づいて耐風性の評価を行ったので、その結果について報告するものである。超高層ビルの空力特性は、設計方針に沿って、3種類の風洞実験により調査した。その結果、①数値解析では、平均風力の評価にある程度妥当な結果を得られるとの可能性を示した。②風洞実験の結果に基づいて、超高層ビル群に対する合理的な耐風設計用風荷重を提案することができた。③居住性を評価すると、楕円形平面のA棟は比較的風の影響を大きく受けるので、振動を抑制する制振装置等の設置が必要ではないかと判断された。

1. はじめに

近年、超高層ビルは、より高い建物へと発展してきている。また、風は上空になるほど強くなるため、超高層ビルの構造設計は、耐風性についての検討が不可欠となってきた。当社では、こうした超高層ビルの耐風性について、多目的大型風洞を用いて各種風洞実験を行い、評価を行っている。

本件は、平成10年完成予定の超高層ビル群「品川インターシティ (A棟, B棟, C棟)」の耐風設計に際し、図-1に示す耐風設計における風荷重決定フローに従い、風洞実験および数値解析に基づいて耐風性の評価を行ったので、その結果について報告するものである。

なお、超高層ビルの空力特性は、設計方針に沿って、3種類の風洞実験により調査した。

- ① 天秤実験：超高層ビルに作用する空力特性を測定し、スペクトルモーダル法を適用して、荷重と応答を評価
- ② 風圧実験：壁面に作用する風圧力を多点同時測定し、風力係数の鉛直分布を評価
- ③ 振動実験：A棟について建物振動を測定し、空力不安定性について評価

2. 建物の概要

調査対象の超高層ビル群の実験模型を写真-1に示す。開発計画による建物は超高層ビル3棟(A棟：高さ144.15m, B棟：高さ139.9m, C棟：高さ139.9m)とそれらを連絡する低層部から構成されている。建物の平面形状はA棟が楕円形であり、B棟, C棟は隅欠きされた矩形である。超高層ビル群の諸元は表-1に記す。

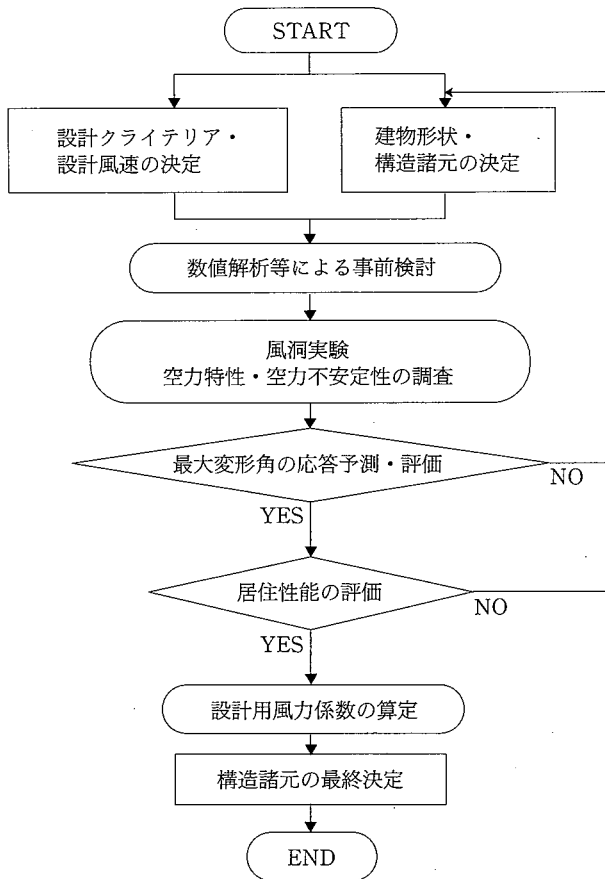


図-1 耐風設計における風荷重の決定フロー



写真-1 風洞に設置した超高層ビル群 (縮尺: 1/400)

表-1 超高層ビル群の諸元

超 高 層 建 物	A 棟	B 棟	C 棟
用途	オフィス		
短辺の長さ	m 31.5	47.6	47.6
長辺の長さ	m 84.0	74.7	74.7
高さ	m 144.15	139.9	139.9
総重量	tf 48,492	73,680	74,354
X 方向の 1 次振動数	Hz 0.237	0.230	0.223
一般化質量	tf ² /m 1,469	3,639	3,205
Y 方向の 1 次振動数	Hz 0.265	0.249	0.243
一般化質量	tf ² /m 1,851	2,893	3,216
ねじれの 1 次振動数	Hz 0.280	0.238	0.225
質量慣性モーメント	9,616	22,230	24,450
	× 10 ² tfm ² s ² /m		
減衰定数	%	居住性の評価では 1%	風荷重の評価では 2%

3. 設計方針

3.1 設計クライテリア

高層ビルの耐風設計においては、日本建築センターで示された耐風設計指針¹⁾にしたがってクライテリアを設定した。

(耐風設計のクライテリア)

- ① クライテリア-1: レベル-1 (再現期間100年)の風に対して全ての部材が許容応力度以内
- ② クライテリア-2: レベル-2 (再現期間500年)の風に対して弾性的な挙動

3.2 設計風の設定

設計レベルに対応する設計風速は建築学会「建築物荷重指針・同解説」²⁾により、地表面粗度区分Ⅲとして、次式により設定した。

$$U_H = U_0 \cdot 1.7 \left(\frac{Z}{450} \right)^{0.2} \cdot R \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、

- U_H: 建物頂部における設計風速 (m/s)
- U₀: 基本風速 (=38 m/s)
- Z: 地上からの高さ (m)
- R: 再現期間換算係数 (再現期間100年では1.00, 再現期間500年では1.16)

したがって、レベル-1の風速は、A棟高さでは51.3 m/s, B棟, C棟高さでは51.1 m/s, レベル-2の風速は、A棟高さでは59.5 m/s, B棟, C棟高さでは59.3 m/sとなる。

居住性の評価は、建築学会「建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説」³⁾に基づいて再現期間1年の風に対して行った。再現期間1年の風速は、A棟高さでは26.1 m/s, B棟, C棟高さでは25.9 m/sとなる。

4. 風洞実験

4.1 相似則

物体周囲の流れの特性に大きな影響を与える相似則として、レイノルズ数がある。

(レイノルズ数)

$$Re = \frac{UD}{\nu} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで、

- Re: レイノルズ数
- U: 風速 (m/s)
- D: 代表寸法 (m)
- ν: 動粘性係数 (m²/s)

レイノルズ数を一致させるには、模型縮尺の逆数倍の

風速が必要となるので、この条件を満足させることは、現実的に困難である。しかしながら、風の乱れが十分に発達した風洞気流中では流れの三次元性が強くなるので、実大建物周辺の気流状況を再現しているものと判断する。そこで、風洞気流の相似条件としては、自然風特性(平均風速の鉛直分布や乱れ強さの分布、変動風速のパワースペクトル、乱れのスケールの分布)を極力再現することとした。

さらに、風洞実験において風の変動特性やそれに伴う動的作用に関する実験を行う場合には、無次元周波数を一致させることも、重要な相似条件である。

(無次元周波数)

$$n^* = \frac{nD}{U} \dots\dots\dots(3)$$

ここで、

- n* : 無次元周波数
- n : 周波数 (Hz)
- D : 代表寸法 (m)
- U : 風速 (m/s)

また、振動実験では、次の質量減衰パラメータも一致させる必要がある。

(質量減衰パラメータ)

$$\delta^* = \frac{2\eta m}{\rho BDH} \dots\dots\dots(4)$$

ここで、

- δ^* : スクルートン数
- η : 減衰定数
- m : 一般化質量 (tfs²/m)
- ρ : 空気密度 (tfs²/m⁴)
- B : 建物の短辺の寸法 (m)
- D : 建物の長辺の寸法 (m)
- H : 建物の高さ (m)

4.2 実験方法

実験は、技術研究所の多目的大型風洞⁴⁾で行った。

4.2.1 風洞気流 実験では、地域の風を再現した気流(気流-1)と乱れの小さな気流(気流-2)の2種類の気流を用意し、乱れの影響を調査した。ターンテーブル中心における平均風速と乱れ強さの鉛直分布を図-2に、乱れのスケールを図-3、変動風速のパワースペクトル密度を図-4に示す。

4.2.2 天秤実験 超高層ビルに作用する空気力の測定は、風洞第1測定洞のターンテーブル下部に設置した天秤装置(LMC-6511-5, 日章電機社製)によった。建物軸と風力軸の関係は図-5に示す。実験模型は、超高層ビル(A棟, B棟, C棟)が常に風洞の中心に位置するように、半径480mを縮尺1/400で模型化した。風洞風速は建物頂部でおおよそ6m/sとした。

4.2.3 風圧実験 超高層ビル壁面に作用する風圧力の測定は、アクリル製の模型壁面に設けた1mmφの測定孔(各棟:216点)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(ZOC23 B, ±250

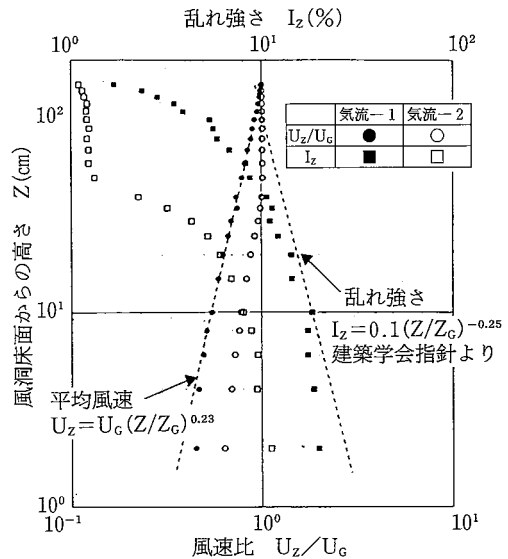


図-2 平均風速と乱れ強さの鉛直分布

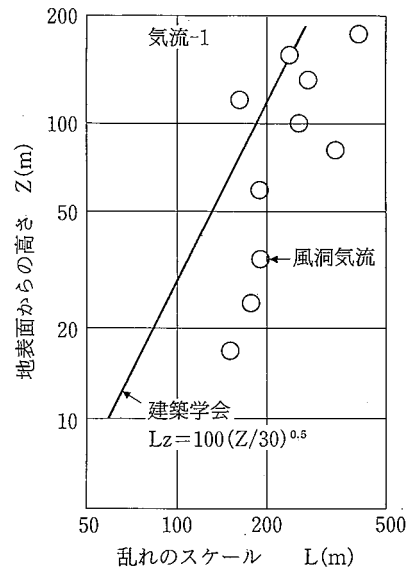


図-3 乱れのスケールの分布

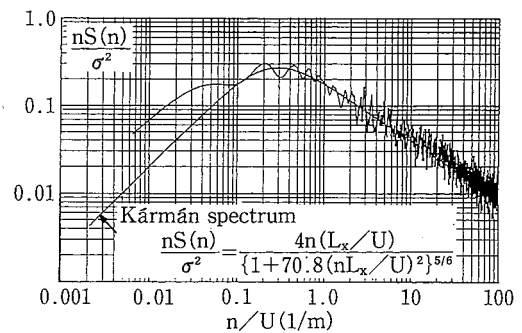


図-4 変動風速のパワースペクトル密度

mmH₂O, 384チャンネル, スキャニャーバルブ社製)に導き、基準点の静圧との差圧から求めている。実験風速はA棟頂部で15m/sとした。

4.2.4 振動実験 振動実験では、A棟単独の場合のX, Y方向のロッキング振動を、風洞風速を0.5m/sピッチで変化させて、レーザー変位計で変位を測定した。振動装置に取り付けた状況を写真-2、振動軸と風向角の関係を図-6に示す。実建物と模型の諸元は相似則にしたがって調整し、表-2とした。なお、模型の減衰は粘性のあるシリコンオイルにより調整した。表示した減衰定数は無風時に自由振動実験で求めた値である。

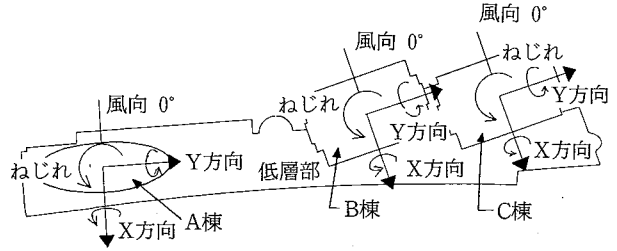


図-5 建物軸と風軸

4.3 空気力係数

天秤実験による空気力係数は、実時間10分間相当（模型時間15秒間）の4組のアンサンブル平均値として算定した。A棟, B棟, C棟複合の場合の建物に作用する空気力係数を、図-7に示す。空気力の変動特性は、スペクトル密度により評価し、応答予測時に周波数特性を反映させた。空気力係数の定義は次の通りである。

(空気力係数)

$$C_{MX} = \frac{M_x}{q_H D H^2}, C_{MY} = \frac{M_y}{q_H D H^2}, C_{MT} = \frac{M_T}{q_H D^2 H} \dots\dots(5)$$

ここで、

- C_{MX} : X軸まわりの転倒モーメント係数
- C_{MY} : Y軸まわりの転倒モーメント係数
- C_{MT} : Z軸まわりのねじれモーメント係数
- M_x : X軸まわりの転倒モーメント (kgfm)
- M_y : Y軸まわりの転倒モーメント (kgfm)
- M_T : Z軸まわりのねじれモーメント (kgfm)
- q_H : 建物模型頂部の速度圧 (= $1/2 \rho U_H^2$) (kgf/m²)
- U_H : 建物模型頂部の平均風速 (m/s)
- ρ : 空気密度 (kgs²/m⁴)
- D : 建物模型の長辺の長さ (m)
- H : 建物模型の高さ (m)

これより、A棟の90°, 270°では3成分ともほとんど0であり、楕円形状であるが故の空力特性と言える。また、B棟の90°, C棟の270°で、3成分がほとんど0となるが、これは、建物が近接しているため、お互い風下になる風向で風荷重が小さくなったためである。

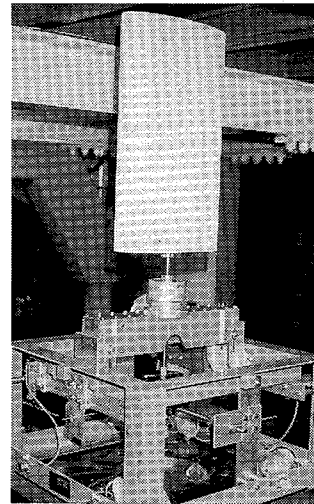


写真-2 振動模型

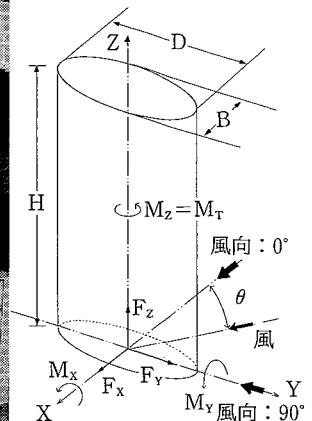


図-6 振動軸と風軸

表-2 実建物と振動模型の諸元

代表寸法		実スケール	模型スケール	縮尺率	
高さ	H	m	144.15	0.360	1/400
幅	D	m	84.0	0.210	1/400
奥行き	B	m	31.5	0.079	1/400
X 一方向		実スケール	模型スケール	縮尺率	
一般化質量	m	kgfs ² /m	$1,469 \times 10^3$	2.57×10^{-2}	$(1/400)^3$
質量慣性モーメント	I	kgfm ²	$3,008 \times 10^7$	3.15×10^{-3}	$(1/400)^5$
回転剛性	K	kgfms ²	$6,671 \times 10^7$	7.88	
1次固有振動数	n_0	Hz	0.237	7.96	(34/1)
減衰定数	η_m	%		0.6, 1.7	
Y 一方向		実スケール	模型スケール	縮尺率	
一般化質量	m	kgfs ² /m	$1,851 \times 10^3$	2.48×10^{-2}	$(1/400)^3$
質量慣性モーメント	I	kgfm ²	$3,790 \times 10^7$	3.25×10^{-3}	$(1/400)^5$
回転剛性	K	kgfms ²	$1,051 \times 10^7$	8.35	
1次固有振動数	n_0	Hz	0.265	8.06	(30/1)
減衰定数	η_m	%		0.7, 2.0	

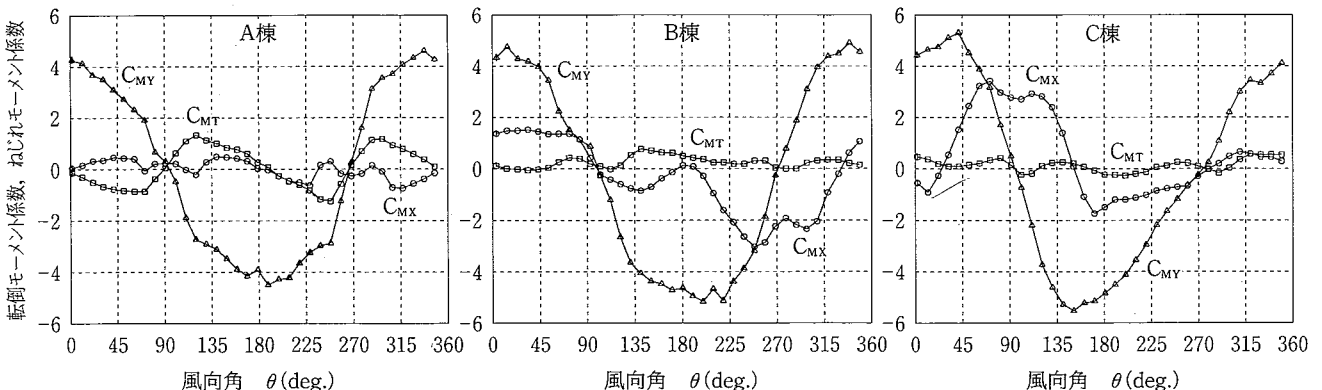


図-7 平均空気力係数

5. 数値解析

数値解析による結果の妥当性を検討するため、超高層ビル群周辺の気流解析を実施し、超高層ビル群に作用する風圧力の予測結果と風圧実験による結果の比較を行った。

5.1 解析モデルと解析手法

解析対象モデルは直交座標系（解析領域：1666.7 m×1558.7 m×405 m，格子数：131×94×48）により作成した。解析領域と計算格子を図-8に示す。計算格子の最小幅は水平方向 2 m，鉛直方向 1 m とした。

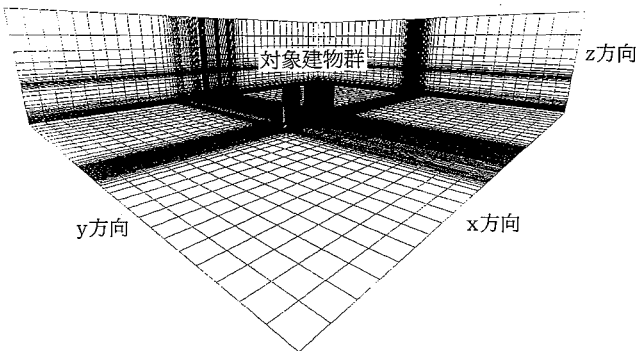


図-8 解析対象領域

気流解析における基礎方程式はコントロールボリューム法により離散化し、SIMPLE法アルゴリズムにより解析した。なお、乱流モデルとしてはk-ε方程式を、移流項は1次精度風上差分を採用した。

解析領域の流入条件は、風洞実験と同じ平均風速の鉛直分布（べき指数 $\alpha=0.25$ ）を想定し、流出側の境界条件は速度と圧力勾配0のNeumann条件を設定した。解析対象の風向は、30°ピッチで12風向である。

5.2 風洞実験結果との比較

解析結果は、基準高さの速度圧で無次元化した風圧係数を求め、風洞実験結果と比較した。

(風圧係数)

$$C_P = \frac{P}{Q_H} \dots\dots\dots(6)$$

ここで、

C_P : 風圧係数

P : 風圧力 (tf/m²)

Q_H : 基準高さの速度圧 (=1/2ρU_H²) (tf/m²)

ρ : 空気密度 (tfs²/m⁴)

U_H : 基準高さ 144.15 m の風速 (m/s)

5.2.1 風力係数の鉛直分布 壁面に作用する風圧力を高さレベルごとに作用する風力として算定し、実験で定義した建物軸に合わせて、平均風力係数の鉛直分布と

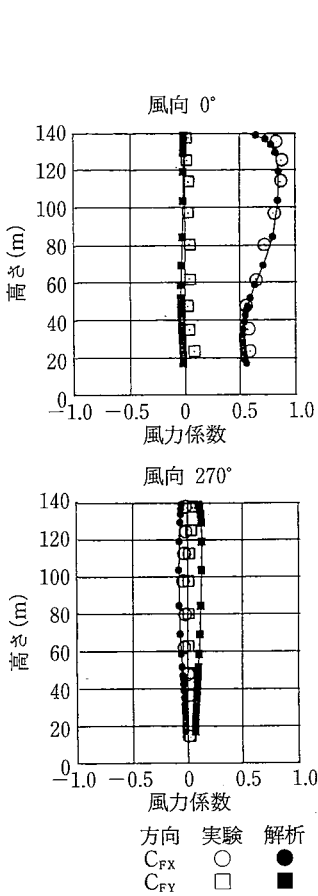
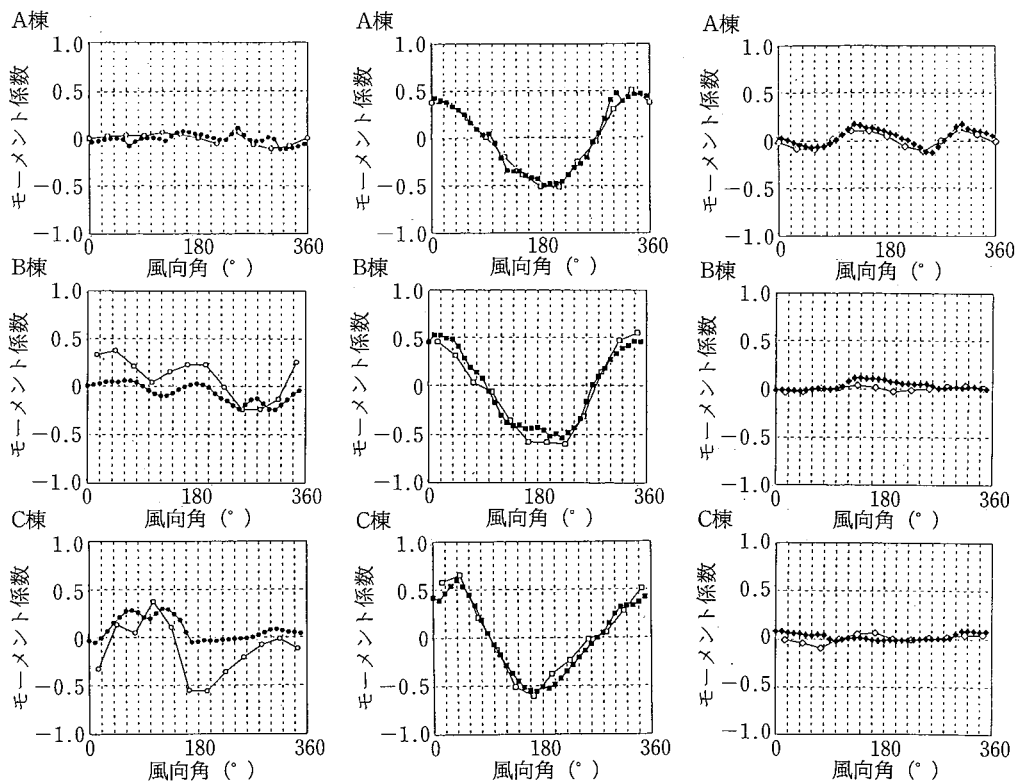


図-9 風力係数の鉛直分布の比較 (A棟)



(1)X軸回りの転倒モーメント係数 C_{MX} (2)Y軸回りの転倒モーメント係数 C_{MY} (3)ねじれモーメント係数 C_{MT}

実験解析 ● ○ ■ □ ◆ ◇

図-10 1階レベルに作用する空気力係数の比較

して示すと、A棟に関しては図-9となる。図中には、風圧実験で算定した結果との比較を示すが、両者はかなり良い一致を示している。

5.2.2 転倒モーメント係数、ねじれモーメント係数

ビル全体に作用する空気力を比較するために、1階レベルに作用する平均空気力係数を算定した。天秤実験結果と比較すると、図-10となる。この比較によると、B棟、C棟のX軸回りの転倒モーメント係数 C_{MX} は実験と解析で差が生じている。この違いは、両ビルが非常に接近していることによるものと推測され、隣接した物体回りの気流解析の難しさを象徴するものである。しかし、A棟の空気力係数やB棟、C棟のY軸回りの転倒モーメント係数 C_{MY} 、ねじれモーメント係数 C_{MT} は定量的にも良い対応にある。

今後さらに検討を重ねることで、複雑な都市域に建つビルに作用する平均風圧力に関して、気流解析である程度妥当な結果を得られると判断される。

6. 応答予測

6.1 応答の算定法

天秤実験結果にスペクトルモーダル法を適用して、設計風速に対する応答を予測した。

(1) 転倒モーメント、ねじれモーメント

$$M = M_{ave} \pm g \sqrt{\sigma_{M1}^2 + \sigma_{M2}^2} \Phi \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここで、

- M : 最大・最小転倒およびねじれモーメント (tfm)
- M_{ave} : 平均転倒およびねじれモーメント (tfm)
- g : ピークファクター
- σ_{M1} : モーメントの非共振成分
- σ_{M2} : モーメントの共振成分
- Φ : モード補正係数 (表-3)

なお、ピークファクターgは、正規定常確率過程に基づいてつぎの式から計算した(表-4)

$$g = \sqrt{2 \ln(\nu_r T)} + \frac{0.577}{\sqrt{2 \ln(\nu_r T)}} \quad \dots\dots\dots(8)$$

ここで、

- g : ピークファクター
- ν_r : レベルクロッシング数 (近似的に固有振動数とした)
- T : 評価時間 (600秒)

(2) 転倒角、ねじれ角

$$\theta = \frac{M}{(2\pi n_0)^2 I} \quad \dots\dots\dots(9)$$

ここで、

- θ : 転倒角 (X/H, Y/H) とねじれ角 (θ_z) (rad)
- M : 転倒モーメントまたはねじれモーメント (tfm)
- n_0 : 1次固有振動数 (Hz)
- I : 質量慣性モーメント (tfs²/m)

6.2 風向と応答の関係

A棟、B棟、C棟の複合の場合の設計風速に対する風向別の転倒角とねじれ角を、図-11に示す。また、各応

表-3 振動モード補正係数(Φ)

	X方向	Y方向	ねじれ
A棟	1.03	0.94	0.57
B棟	0.89	0.95	0.53
C棟	0.96	0.96	0.54

表-4 ピークファクター(g)

	X方向	Y方向	ねじれ
A棟	3.33	3.37	3.38
B棟	3.32	3.35	3.33
C棟	3.31	3.34	3.32

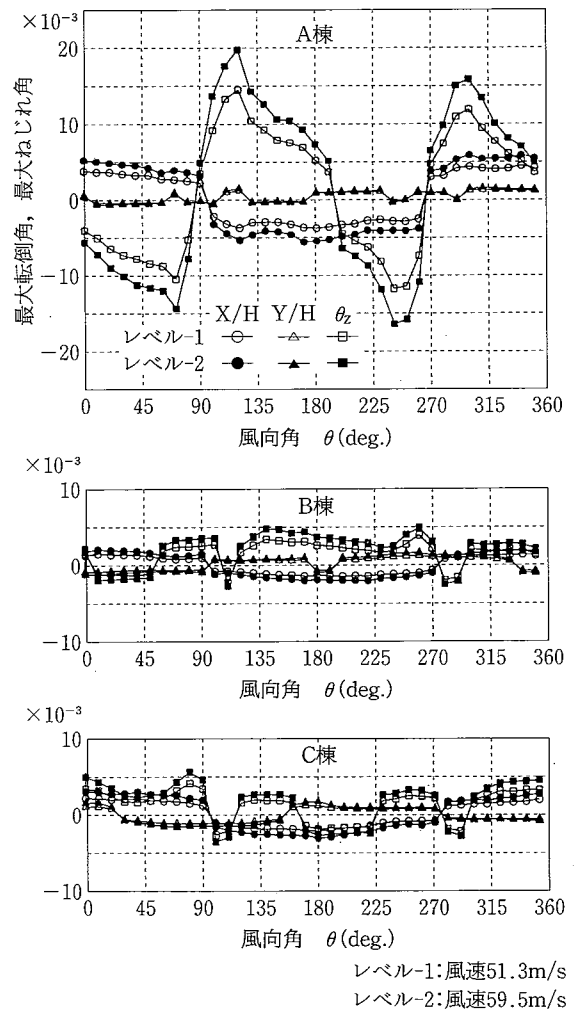


図-11 風向と応答

表-5 最大変形角とその風向 (unit: 1/1,000 rad)

レベル	レベル-1 (再現期間100年)			レベル-2 (再現期間500年)			
	振動方向	X方向 (X/H)	Y方向 (Y/H)	ねじれ	X方向 (X/H)	Y方向 (Y/H)	ねじれ
A棟		-4.06 (180°)	0.88 (120°)	14.43 (120°)	-5.83 (170°)	1.19 (120°)	19.89 (120°)
B棟		-1.49 (200°)	1.18 (260°)	3.82 (260°)	-2.11 (170°)	1.60 (260°)	4.80 (260°)
C棟		-2.20 (180°)	-1.23 (70°)	3.98 (80°)	-3.11 (180°)	-1.69 (70°)	5.43 (80°)

答の絶対値が36風向の中で最大を示した風向と最大変形角は、表-5となる。なお、耐風設計用の応答解析時には、建物の減衰定数を2%と想定した。A棟のX方向転倒角とねじれ角はB棟、C棟に比べて大きく、特にねじれ角は3~4倍程度大きい結果となっている。

7. 考察

7.1 天秤実験と振動実験の比較

A棟単独の場合の風向角0°, 90°における建物頂部の無次元風速(U/n₀D)と転倒角(X/H, Y/H)の関係を示すと、図-12となる。図中、記号は振動実験で計測した最大変形角、線は天秤実験に基づく予測値である。

振動実験の結果より、乱れの少ない気流-2での挙動をみると、風向角90°の場合に風直交方向(X方向)だけでなく風方向(Y方向)でも、特定の風速で振動応答が卓越する傾向があり、減衰が小さい減衰-1のケースで特に著しい。また、地域の風を模擬した気流-1での挙動を

みると、風向90°・減衰-1のX方向の無次元風速4.01およびY方向の無次元風速3.43での応答を除くと、気流-2の場合よりも大きくなっている。すなわち、自然風中においては、A棟の風振動は風の乱れによるパフエッティング振動が卓越するものと推測できる。

天秤実験に基づく応答予測との比較では、風方向振動の風速に対する変化の勾配が緩やかである。この点は、風速や振動に伴う付加的な空力効果が推測される場所である。また、気流-2の場合の全風向のY方向振動と風向角90°のX方向振動が、予測値より大きいが、それ以外では、振動実験の結果と風力実験結果は比較的一致している。特に、気流-1・減衰-2の状況においては、十分に良い対応を示していると判断できる。

7.2 振動実験による減衰定数の評価

天秤実験結果との比較で、風速に対する応答の増加傾向に違いがあったことから、振動時には空力的な正あるいは負の減衰が働いたのではないかと推測し、振動時の減衰の評価を試みた。

評価の方法としてはRD法⁵⁾を採用し、次の減衰式を適用して減衰定数ηを推定した(図-13)。

$$X(t) = A_0 e^{-2\pi n_0 \eta_T t} \dots\dots\dots(10)$$

ここで、

- X(t) : 経過時間t秒におけるピーク値
- A₀ : 初期値
- n₀ : 固有振動数 (Hz)
- η_T : 減衰定数 (= η_m + η_a)
- η_m : 構造減衰の減衰定数
- η_a : 空力減衰の減衰定数
- t : 時間 (sec)

算定した減衰定数(η_T)を、図-14に示す。これより、Y方向振動が減衰-1の風向0°と90°のとき、X方向振動では減衰-1の風向90°のときで風直交方向に振動した場合に、気流-1、気流-2ともに負の空力減衰が作用して、振動が激しくなったことが明らかである。

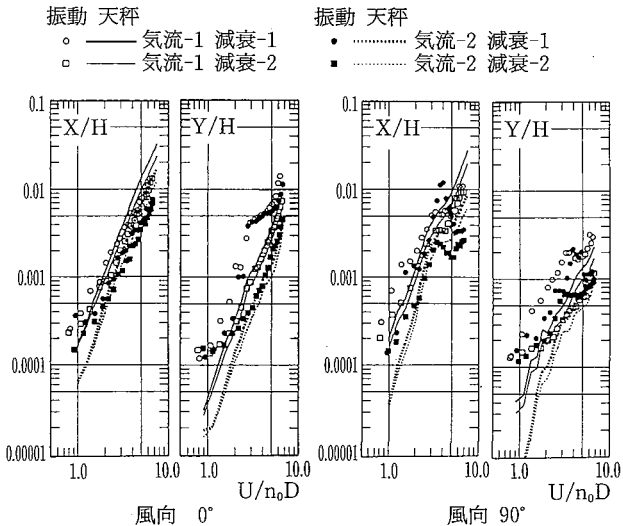


図-12 風速と応答

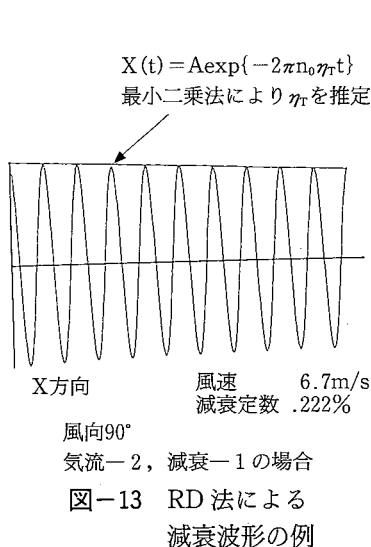


図-13 RD法による減衰波形の例

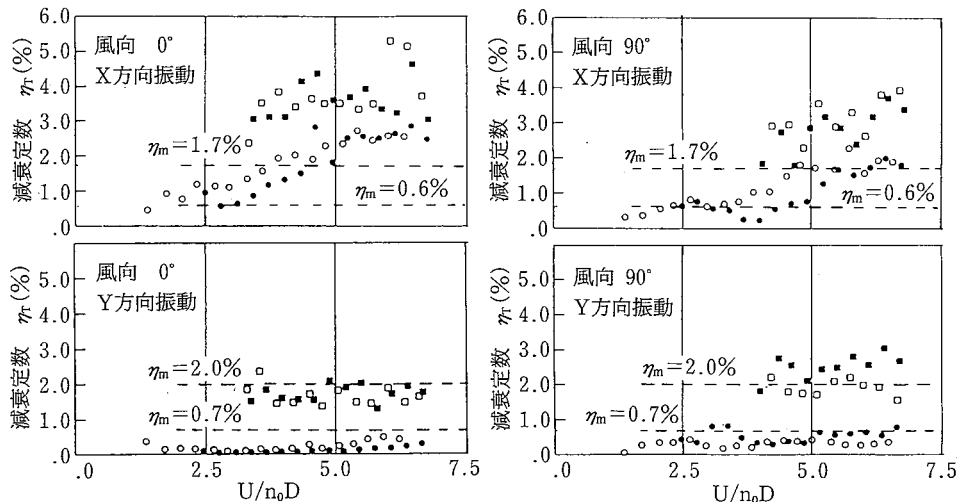


図-14 減衰定数

7.3 居住性の評価

居住性については、建築学会指針を適用して評価した。すなわち、再現期間1年の風速に対する最大加速度（減衰定数を1%として予測した最高質点高さの最大応答加速度）で評価した。結果を図-15に示す。また、評価区分を表-6に示す。C棟は事務所ビルとしてランクIIIの評価であるが、A棟、B棟はランクIIIを超えている。

しかし、B棟は風向260°でH-4を上回るだけで、それ以外の風向ではランクIIIないしランクIIの評価となる。また、東京管区気象台のデータに基づいて風向別に再現期間1年の風速を予測し、その風速に対する応答加速度を算定すると、おおむねランクIIとなるので、現実的には居住性は確保されると判断される。

A棟はX方向とねじれによる加速度がほとんど全ての風向でランクIIIを超え、Y方向の加速度はランクIIの評価である。風向別の再現期間1年の風速に対しても、風向210~250°の範囲ではX方向の加速度がランクIIIと予測されており、何らかの風振動を抑制する装置の設置が必要と判断される。

8. まとめ

今回「品川インターシティ (A棟、B棟、C棟)」の耐風設計を天秤実験、振動実験、風圧実験および数値解析に基づいて実施した。その結果、以下の様な結論を得ることができた。

- ① 数値解析では、平均風力の評価にある程度妥当な結果を得られるとの可能性を示した。
- ② 風洞実験の結果に基づいて、超高層ビル群に対する合理的な耐風設計用風荷重を提案することができた。
- ③ 居住性を評価すると、A棟は比較的風の影響を大きく受けるので、振動を抑制する制振装置等の設置が必要ではないかと判断された。

謝 辞

本調査の機会を提供いただいた興和不動産(株)品川東口開発室(鎌田廣美室長)および設計JV(日本設計・和田肇允部長、小林秀雄主任技師、人見泰義主任技師、土屋博訓技師)の関係者の方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 高層建築物構造評定委員会：高層建築物の構造評定用風荷重について、日本建築センタービルディングレター、p.47~49、(1991)
- 2) 日本建築学会編：建築物荷重指針・同解説、(1993)
- 3) 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)
- 4) 伊藤、川口、野村、山本、木梨、藤原、三原：多目的大型風洞について、大林組技術研究所報、No.51、p.139~146、(1995)
- 5) 田村幸雄、他：RD法による構造物のランダム振動時の減衰評価、日本建築学会構造系論文報告集、vol.454、p.29

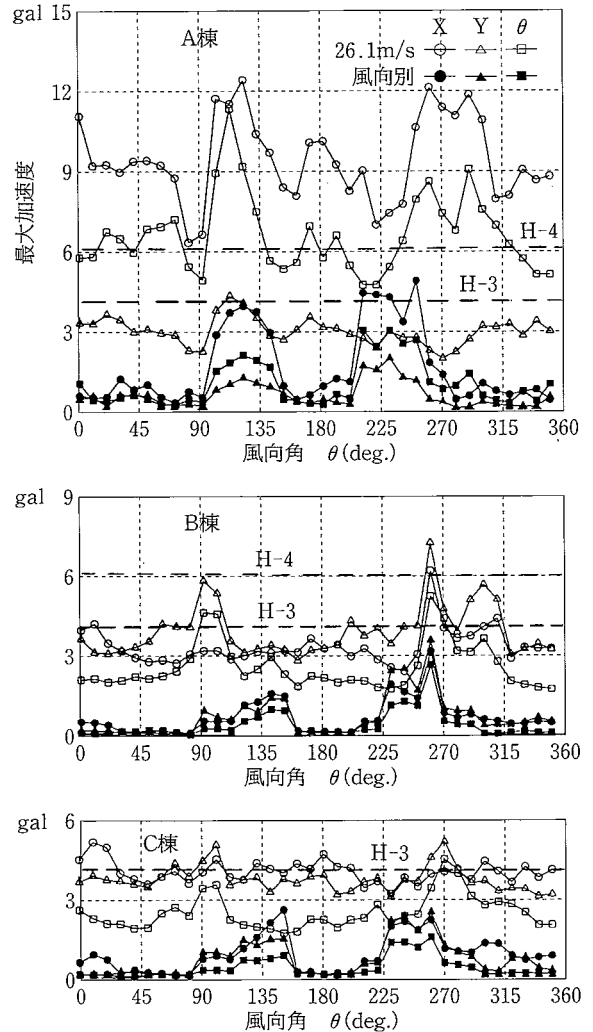


図-15 居住性の評価 (再現期間1年)

表-6 建築物の用途別性能評価区分

建築物用途	ランク I	ランク II	ランク III
住 居	H-1	H-2	H-3
事 務 所	H-2	H-3	H-4

- 6) 風洞実験法ガイドライン研究委員会編：実務者のための建築物風洞実験ガイドブック、日本建築センター、(1994)
- 7) 川口、諏訪、本間、伊藤：大阪ドームの風圧特性と内部環境に関する研究(その1)、大林組技術研究所報、No.51、p.123~128、(1995)
- 8) 川口、三原：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、大林組技術研究所報、No.48、p.1~8、(1994)
- 9) Leonard, B.P.: The Quick Algorithm: A Uniformly Third-Order Finite-Difference Method for Highly Convective Flows, Computer Methods in Fluids, Pentech Press, p.159~195、(1980)
- 10) Patankar, S.V.: Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill, New York、(1980)