高層建築物の外装材を対象とした風力に関する研究 (その1)

平均室内圧の性状について

A STUDY ON WIND FORCES FOR WIND RESISTANT DESIGN
OF HIGH-RISE BUILDING CLADDINGS (PART 1)

Characteristics of mean wind-induced internal pressures

加藤 信男*, 大熊 武司**, 新堀 喜則***, 栗田 剛***

Nobuo KATO, Takeshi OHKUMA, Yoshinori NIIHORI and Tsuyoshi KURITA

The characteristics of wind-induced internal pressures in a high-rise building have been investigated. Full-scale measurements were taken using absolute pressure meters, which allowed high-resolution measurements.

This paper outlines full-scale measurements of wind velocity, wind direction and external and internal pressures on a twenty-nine-story building, commencing in January 1993. It also describes the characteristics of natural wind above the building's penthouse and mean wind-induced internal pressures measured in September 1995 when Typhoon No.12 hit the Kanto area.

The internal pressure coefficients obtained from these measurements were about -0.26, and were constant over the building's height. The influence of internal walls and doors on measured mean internal pressure coefficients was found to be insignificant, and roughly the same values were obtained at different locations on the same floor. The mean internal pressure coefficient estimated from the mean wind pressure coefficient obtained from wind tunnel testing was -0.26, which was the same as that obtained from the full-scale measurement. Therefore, it is inferred that the mean wind pressure coefficient obtained from the wind tunnel testing is sufficient for examining average internal pressures.

Keywords : high-rise building, cladding, wind force, full-scale measurement, wind-induced internal pressure, 高層建築物, 外装材, 風荷重, 実測, 室内圧

1. 序

高層建築物における外装材(カーテンウォール, ガラス等)の設計荷重は風力が支配的となる場合が多くその耐風安全設計が重要である。建築物の外装材に加わる風力は, その外界面に作用する風圧(外圧)と室内の圧力(室内圧)との差圧として評価されるが, これらの風力を正確に評価するためには, 実際の建築物においてその性状を実測し, 実際の現象を十分に把握しなければならない。しかし, 実測には経済的あるいは建築主との関係など多くの問題が存在し, 実測例は極めて少ない^{1), 2)}。特に室内圧は, その圧力が大気圧に比べて微小であるため室内圧の直接計測には高分解能の絶対圧力計が必要である。しかし, 信頼性の高い絶対圧力計が無いため実測の多くは差圧計測であり, 上田・桂等³⁾が指摘しているようにこれが室内圧の実測を妨げる大きな原因となってきた。また, 室内圧が不明確なため, 風圧実験によって風力係数を定める場合に大きな曖昧さを残してきた。

本研究は, 都内に立つ高層建築物について室内圧の計

測に水晶振動子を使用した高分解能の絶対圧力計を用い, 外圧の計測にはひずみゲージ式の差圧計を用いて, 室内圧と外圧をそれぞれ実測し, 併せて, 実測建築物の縮尺模型を用いた風洞実験を実施し, 高層建築物に加わる風力の性状をより詳細に検討しようとするものである。

写真1 実測建築物(北より南を望む)

* 東急建設(株)技術研究所 研究員

** 神奈川大学工学部建築学科 教授・工博

*** 東急建設(株)技術研究所 研究員・工修

Research Engineer, Institute of Technology, Tokyu Construction Prof., Dept. of Architecture and Building Engineering, Faculty of Engineering, Kanagawa University, Dr. Eng.
Research Engineer, Institute of Technology, Tokyu Construction, M. Eng.

図1 実測地周辺の状況

図2 立面および計測点

本報はその第1報で、まず、1993年1月に開始した実測の概要および当該建築物の塔屋上で測定された自然風の性状について紹介し、次いで1995年9月の台風12号通過時に測定した当該建築物の平均室内圧の性状、風洞実験より推定された平均室内圧係数値と実測値との関係について検討する。

高層建築物における平均室内圧の検討例としては、茅野・岡田等⁴⁾が数種類の風洞実験の外圧係数を用い、建築物の隙間や開口を通して流出入する空気量が等しいとして平均室内圧係数 $C_i=0.0 \sim -0.4$ を導いている。建築物荷重指針・同解説⁵⁾ (以下、荷重指針) に示された平均室内圧係数は、この値を採用し、正圧面を対象として $C_i=-0.4$ 、負圧面を対象として $C_i=0.0$ としている。また、浅見・大熊等⁶⁾は、横浜ランドマークタワーの実測値とその風洞実験値の相関関係から $C_i=-0.03 \sim -0.22$ を得ている。これらはいずれも風洞実験の値を基準としたものであり、直接室内圧を測定した例はない。

図3 平面

2. 周辺状況および建築物概要

実測対象建築物(世田谷ビジネススクエア)は、地上29階建の事務所ビルである(写真1)。周辺は、2階建程度の民家が密集する中に4~8階建の建物が点在する地域であり(図1)、この地域を荷重指針にあてはめると『地表面粗度区分Ⅲ』に相当するものと考えられる。

建物の平面は、西側と東側が11階と26階でセットバックしており、1~10階が $45.9\text{m} \times 45.9\text{m}$ 、11階~25階が $39.5\text{m} \times 45.9\text{m}$ 、26階~29階が $33.1\text{m} \times 45.9\text{m}$ である(図2、図3)。なお、各階ともコーナー部には隅切りがあり、その大きさは、 $3.2\text{m} \times 3.2\text{m}$ である。建物の主体構造は鉄骨造で、軒高は120mであり、屋上には約30mのタワーがある。なお、図2、3中の○印は風圧の計測点を示したものである。

写真2 風速計設置状況

写真3 風圧計測用パイプ

表1 絶対圧力計の主な仕様

センサー	水晶振動素子
圧力レンジ(hPa)	800~1100
分解能(%)	5PPMレンジ幅
応答時間(sec)	0.25
温度補正	内蔵水晶振動素子で、常に補正

図4 絶対圧力計

図5 室内の絶対圧力計の設置位置

3. 実測方法

3.1 風向・風速

風向・風速の計測には、超音波風向風速計（カイジョー製、DA600）を用い、屋上のタワー（地上約140m）に2台設置し風方向（u）、風直角方向（v）、鉛直方向（w）の風速を計測した（写真2）。

3.2 外圧

外圧の測定孔は、建築物の外壁面に51ヶ所設け、外壁面からの圧力をアルミパイプとビニールチューブ（内径10mmφ、全長約3m）により差圧型の圧力計（共和電業製、PDL-40GB）に導き（写真3）、室内圧との差圧を計測した。なお、導圧パイプなどによる圧力の共振周波数は約25Hz（応答倍率は約10倍）で、本実測における圧力の解析対象範囲0~1Hzよりかなり高く、圧力データに影響を及ぼさないものと考えチューピング補正は行っていない。

3.3 室内圧

室内圧の計測には水晶振動子を使用した高精度な絶対圧力計（Paroscientific, Inc. Model 760）を用い、これらを室内5箇所および屋外1箇所の合計6箇所に設置し、それぞれの位置における大気圧を計測した。

本実測に用いた絶対圧力計は応答性によってその分解能が変わるが、今回はその応答周波数を4Hzとしたため分解能はレンジ（800hPa~1100hPa）に対して5/1,000,000まで得られ、約0.15Paまで計測可能である（表1）。また、絶対圧力計の大気への開放口は直径1/8インチであり、大気圧は直径1/16インチ、長さ約300mmのステンレスパイプにより水晶振動子に導かれる（図4）。

室内の絶対圧力計は、7階（地上25m）、13階（地上49m）、18階（地上69m）、24階（地上97m）の西側角部のエレベータホールにそれぞれ設置した。また、13階のエレベータホールと事務室の間は床面から上階の梁下まで達している間仕切り壁（プラスターボード）と扉（スチール）によって仕切られており、この間仕切り壁の影響を検討するため13階にはエレベータホールの他に事務

図6 屋外の絶対圧力計の設置位置

写真4 百葉箱設置状況

室内にも1台の絶対圧力計を設置した（図5）。実測時にこの建物は休館しており数台のエレベータは稼働していたが、4階以上の空調機は稼働していなかった。また、13階事務室（床面積1075㎡）は実測時に空き部屋で室内にはパーティション・机等が全く無かった。屋外の絶対圧力計は、実測建築物の東側面より約20m離れた地上に百葉箱を設置し、その中の地上1.5mの位置に設置した（図6）。なお、百葉箱は高さ2m程度の灌木と生垣に囲まれており、風の通り抜けが比較的小さい場所に設置されている（写真4）。

3.4 応答加速度

本実測においては風による建物の応答も計測するため、サーボ型加速度計（東京測振製，SA255）を28階の柱に4台設置している。

3.5 データ収録

風向・風速など合計64chのデータは、パーソナルコンピュータ（PC9801）で同時サンプリング（25Hz）し、毎10分間の平均値、標準偏差値、最大値、最小値を計算し、内部ハードディスクに記録、強風時にはこれらの時系列データを外部ハードディスクに直接記録する（図7）。また、大気圧は、絶対圧力計の設置位置それぞれにノート型のパーソナルコンピュータ（PC9801）を配置し、毎1秒のデータと毎10分間の平均値、標準偏差値、最大値、最小値を計算し、内部ハードディスクに記録する。

4. 実測結果

風向・風速、室内圧等の実測データは全て評価時間を10分間として整理したものである。

4.1 基準風速の検討

本実測における風速計は写真2に示すように塔屋上に2台設置されているが、直径30cmφのポールが近接（風速計との距離50cm）しているためポールが風向・風速に与える影響を確認しておかなければならない。なお、建築物自身の影響がほとんど無いことについては、風洞実験により確認している。

図8に、風速計1（A1）と風速計2（A2）における風向変動の標準偏差を示す。なお、風向は南寄りの風でA2の平均風速が16m/sec以上のものである。風向180°付近（A1，A2がポールを挟んで両対称となる風向）における風向変動の標準偏差はA1，A2とも6°前後とほぼ同じ値であり、ポールの風上となる風速計（A2）はその平均風向が180°～130°まで変化してもその値に大きな変化は見られない。

したがって、本実測における風速は風速計がポールの風上に位置する場合にはポールによる影響は少なく、基準風速として十分使用できるものと考えられる。

図9に、風速計1（A1）と風速計2（A2）の平均風速比（ $U1/U2$ ），乱れの強さ比（ $Iu1/Iu2$ ）を示す。 $U1/U2$ ， $Iu1/Iu2$ とも風向180°付近では1.0前後でありこれらの風向においてはポールの影響をほとんど受けていないものと考えられるが、 $U1/U2$ は風向168°付近から $Iu1/Iu2$ は170°付近からポールの影響を受け値が大きく変化する。

4.2 当該地における風の性状

図10（a），（b）に風向による乱れの強さ（ Iu ）および Su （0）より求めた乱れのスケール（ Lu ）の変化を示す。解析には塔屋上の平均風速（ Uh ）が16m/sec以上の156個

図7 計測ブロックダイアグラム

図8 平均風向による風向変動の変化

図9 平均風向による風速の変化

図10 風向による乱れの強さと乱れのスケールの変化

図11 変動風速のパワースペクトル密度

のデータを用いた。なお、図中の北寄りの風（風向角 $300^{\circ} \sim 350^{\circ}$ ）は風速計 A1，南寄りの風（風向角 $130^{\circ} \sim 180^{\circ}$ ）は風速計 A2 により計測されたものである。

I_u の平均値は 0.137，標準偏差値は 0.023 である。また， L_u の平均値は 143m，標準偏差値は 41m である。これらの値を荷重指針の地表面粗度区分Ⅲより計算した当該観測高さ（ $h=140\text{m}$ ）における値と比べると，乱れの強さは $I_u=0.134$ とほぼ一致するが，乱れのスケールは $L_u=216\text{m}$ よりかなり小さい。

図 11 に北寄りの風（風向角約 310° ）と南寄りの風（風向角約 170° ）における風速変動のパワースペクトル密度を示す。スペクトル密度は乱れのスケール $L_u=143\text{m}$ の Karman 型スペクトルと比較的に良く一致している。しかし，荷重指針による乱れのスケール $L_u=216\text{m}$ のスペクトルとはピーク周波数に差が見られる。

4.3 1995 年 9 月 17 日の観測結果

今回解析に用いたデータは，1995 年 9 月 17 日の台風 12 号の通過時に観測されたものである。

a) 風向・風速

図 12 (a) ～ (d) に 0:00～13:00 における各 10 分間の平均風速，乱れの強さ，平均風向および風向変動の標準偏差の変化を示す。平均風速は午前 4 時頃から強くなり，最も風が強かったのは午前 8:50 分頃の 23.6m/sec である。また，風速の乱れの強さ（ I_u ）は多少のバラツキがあるものの $I_u=0.14$ 前後である。風向は，風が強くなり始めた午前 4 時頃に約 345° の風向であったものが午後 1 時には約 315° の風向となり北側面から西側面に徐々に変化しており，この間における風向変動の標準偏差は 6° 前後である。

b) 室内圧の性状

図 13 に，1995 年 9 月 17 日 0:00～14:00 の各計測点における平均気圧の変化を示す。地上レベルにおける大気圧は，午前 11:30 分頃が最も低くその値は約 984hPa である。各計測点の気圧は地上レベルと同様な変化をしており午前 11:30 頃の気圧が最も低く，24 階（地上 97m ）における平均気圧は約 973hPa である。

図 14 に，塔屋上の平均速度圧（ q_{ref} ）と (1) 式により定義した気圧差（ P_{diff} ）との相関を示す。気圧差は塔屋上の平均速度圧が大きくなるほど小さくなる傾向にある。また，13 階の事務室内とエレベータホールでは間仕切壁と扉が有るにもかかわらずほぼ同じ値である。

図 15 に，塔屋上の平均速度圧（ q_{ref} ）と (2) 式により定義した室内圧（ P_i ）との相関を示す。また，表 2 にこれらの値を最小二乗法により直線回帰（ $y=ax$ ）させた場合の勾配（ a ）を示す。室内圧は，塔屋上の風速が大きくなるとともに小さくなり，その勾配（ a ）は，高さによる変化がほとんどなく全ての計測点において約 -0.26 である。この勾配は平均室内圧係数（ C_{pi} ）に相当するため，

図 12 風向・風速の変化（1995 年 9 月 17 日）

図 13 各計測点の平均気圧の変化（1995 年 9 月 17 日）

本実測建築物における C_{pi} は約-0.26であると言える^{注)}。
また、13階の事務室内とエレベータホールの平均室内
圧係数は-0.26程度とほぼ同じ値であり、間仕切壁等
による影響はほとんどなかった。

$$P_{diff}=P_{zi}-P_g \quad (1)$$

$$P_i=P_{zi}-P_{zref} \quad (2)$$

ここで、 P_{zi} :各計測点における気圧 (hPa)

P_g :地上1.5mで計測された大気圧 (hPa)

P_{zref} : (3) 式の測高公式より計算した各計測点
高さにおける基準大気圧 (hPa)

$$P_{zref} = \frac{1}{10^{\kappa}} P_0 \quad (3)$$

$$\kappa = \frac{z}{18400(1 + \frac{t}{273})}$$

ここで、 z :測定高さ (m)

t :気温 (°C)

P_0 :大気圧 (hPa)

5. 風洞実験値と実測値による室内圧の検討

風洞実験による平均風圧係数を用いて室内圧を推定する
方法として、(1)実測値と風洞実験値の相関より室内
圧を推定する⁶⁾ (2) 風洞実験の風圧係数により室内圧を
推定する⁴⁾ 方法がある。しかし、室内圧を直接実測した
例がないためこれらの推定方法の整合性について検証さ
れていないのが現状である。本章では上記 (1) と (2) の
方法により本実測建築物の平均室内圧係数値を求め、4
章に示した実測値と比較しこれらの室内圧の推定方法の
有効性を確認する。

5. 1 風洞実験概要

風洞実験は、東急建設 (株) 技術研究所の回流式乱流
境界層風洞を用いて実施した。風洞の断面は、幅3.0m、
高さ2.3m、境界層長さ17.2mである。模型は半径375m
以内を1/300に縮尺した周辺模型を用い (写真5)、対象
建築物の外壁面に風圧孔を344点設置した。風洞気流は
ラフネスブロックとスパイヤーにより作成し、平均風速
の鉛直分布指数 $1/n=1/5$ 、建物頂部の乱れの強さ $I_u=0.14$
である。実験風向は5°ピッチに合計72風向を行った。

5. 2 実測と風洞実験の相関による室内圧係数の推定

図16に、24階の北側面、西側面、東側面のほぼ中央
部における平均風圧係数の風向変化を示す。実測値は台
風を含んだ塔屋上の平均風速が12m/sec以上のものでは
ある。なお、実測と風洞実験による平均風圧係数 (C_{pe}) は
(4) 式により定義されたものである。

$$C_{pe} = (P_e - P_{ref}) / q_{ref} \quad (4)$$

ここで、 P_e :各計測点における風圧 (mmAq)

P_{ref} :基準圧 (mmAq)

ただし、風洞実験においては風洞静圧、
実測においては室内圧

q_{ref} :高さ140mにおける平均速度圧 (mmAq)

図14 塔屋上の速度圧と気圧差 (各計測点における気圧—地上気圧) との相関

図15 塔屋上の速度圧と室内圧との相関

表2 塔屋上の平均速度圧と室内圧の回帰結果

	勾配 (a)	標準誤差
7 階	-0.255	0.948
13 階 (事務室内)	-0.256	0.947
13 階	-0.257	0.948
18 階	-0.261	0.943
24 階	-0.258	0.94

写真5 風洞実験の状況

図16 平均風圧係数の風向変化

実測値は風洞実験値に比べて室内圧の分だけ大きい
が、風洞実験の風向変化とほぼ同様に变化する。

図17に、平均風圧係数の実測値と風洞実験値の相関
およびこれらの値を最小二乗法により直線回帰($y=x+b$)
した場合の回帰線を示す。実測値は、1994年9月30日
と1995年9月17日の台風時に観測されたものであり、
塔屋上の平均風速が16m/sec以上のものである。風洞実
験と実測の相関はバラツキが大きいものの回帰にかなり
一致し、切片は $b=-0.26$ である。

切片の値は、平均室内圧係数に相当し⁶⁾、室内圧は
-0.26程度であると言える。この値は絶対圧力計で計測
した平均室内圧係数 -0.26 と良く一致している。

5.3 風洞実験の風圧係数による室内圧の推定

建築物内の空気量は変化しないとすると、建築物の隙
間あるいは開口などを通過する空気量は、建築物全体
でみるとその流入量と流出量が等しい。この関係から風
洞実験の平均風圧係数を用いて平均室内圧係数を(5)
式により計算することが出来る⁴⁾。なお、本研究で(5)
式の連立方程式はNewton-Raphson法により解析した。

$$\sum_{k=1}^{N_e} \text{sign}(C_{ek} - C_i) \cdot \phi_k \cdot A_k \cdot |C_{ek} - C_i|^n = 0 \quad (5)$$

ここで、 $\text{sign}()$: () 内の値の正負を表す符号関数

k : 面素の番号

N_e : 面素の数

C_{ek} : 面素 k の外圧係数

ϕ_k : 面素 k の開口率

A_k : 面素 k の面積

n : 隙間の中の空気の流れの状態を表す定数
($0.5 \leq n \leq 1.0$)

隙間の流れの状態を表す定数 (n) は N. J. Cook⁷⁾ が数
種類の実測例等を参考にして $0.5 \leq n \leq 0.7$ であるとし
ており、本報ではその中間値 $n=0.6$ として計算した。

図18に隙間の流れの状態を表す定数 (n) による平均
風圧係数の変化を示す。 $n=0.5$ と $n=1.0$ における C_{pi} の差
は約0.1であり、茅野・岡田⁴⁾と同様であった。

図19に風洞実験で得られた平均風圧係数の分布例を

図17 平均風圧係数の実測と風洞実験の相関

図18 隙間の流れの状態による室内圧の変化 (風向 345°)

図19 風洞実験による平均風圧係数の分布 (風向 345°)

示す。なお、風向角は実測で平均室内圧係数の得られ
た風向角 345° である。風上面の正圧の最大値は0.9程
度、背面の負圧は -0.3~-0.5 前後である。

図20 風向角による平均室内圧係数の変化

図20に風向角による平均室内圧係数(Cpi)の変化を示す。風洞実験によるCpiはいずれの風向においても負圧であり、風向変化によるCpiの変化は-0.3~-0.2程度である。風向345°における計算値と実測値を比較するとその差は約0.02~0.04であり両者はほぼ一致する。なお、風向角5°と風向角110°でCpiの負圧が大きいが、これは局部負圧の影響でこの風向では負圧の値が他の風向に比べて大きくなるためである。

図21に、計測された各レベル毎の平均室内圧係数(Cpi)を示す。なお、風洞実験によるCpiは階段、エレベータ室など床の開口による空気の流れがわからないため、それらを考慮に入れないで(5)式を準用して計算したものである。風洞実験と実測による平均室内圧係数の値は同程度であるが、その分布形には違いが見られる。ただし、これがレベル間の空気の流れ等を見逃した理由によるものかどうか現段階では判らない。

6. まとめ

都内に建設された高さ120mの高層建築物において塔屋上の風向・風速、壁面の風圧、大気圧および室内圧を実測し、併せて、1/300の縮尺模型による風洞実験も実施し以下の知見を得た。

- 1) 本実測における風速は、風速計がボールの風上に位置する場合その影響は少なく基準風速として十分使用できる。
- 2) 当該地における風速の乱れの強さは約0.14、乱れのスケールは143m程度であった。
- 3) 絶対圧力計により実測した平均室内圧係数(Cpi)は、高さによる変化がほとんどなく約-0.26であった。
- 4) 実測した平均室内圧係数は、間仕切壁等による影響は少なく、同一階においてほぼ同じ値であった。
- 5) 実測による平均風圧係数と風洞実験による平均風圧係数の相関から求めた平均室内圧係数は約-0.26であり実測値と一致した。
- 6) 質量保存の原理に基づいて風洞実験の平均風圧係数より算定した平均室内圧係数は、約-0.26であり実測

図21 各レベル毎の平均室内圧係数

値とほぼ一致した。

したがって、実証例に限られているが、風洞実験による平均風圧係数より平均室内圧係数を推定することは妥当のように思われる。

注) 一般に、室内圧係数を含めて風圧係数は建築物頂部高さ($h=120\text{m}$)の速度圧(q_H)が基準とされる。しかし、本実測の q_H が判らないため q_H と風速計設置高さ($h=140\text{m}$)の速度圧(q_{ref})との比 q_{ref}/q_H を荷重指針(当該地を $\alpha=0.2$ の粗度区分Ⅲと見做す)より求めると $q_{ref}/q_H = \{(140/120)^{0.2}\}^2 \approx 1.064$ となる。この速度勾配が成り立つと仮定すると、 q_H を基準とした平均室内圧係数値は実測値(-0.26)を約1.064倍することになり、-0.28程度である。

謝辞

本実測は、建築主の東京急行電鉄株式会社、東急不動産株式会社と設計の株式会社東急設計コンサルタントの多大なる御理解と御協力によるものであり、ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 藤井邦雄, 田村幸雄, 大熊武司: 風に対する実測からみた建築構造分野の課題, 日本風工学会誌, No.59, PP.61~66, 平成6年5月
- (2) J.Kanda, T.Ohkuma: Recent Developments in Full-Scale Wind Pressure Measurements in Japan, JWE, No.37, PP.163~172, 1988
- (3) 上田 宏, 桂 順治, 藤澤一善, 藤井邦雄: 強風中における低層建築物の室内圧に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第434号, PP.51~58, 1992年4月
- (4) 茅野紀子, 岡田 恒: 耐風設計における建築物の室内圧に関する研究(その1) 平均室内圧係数, 日本風工学会誌, No.56, PP.11~20, 平成5年7月
- (5) 日本建築学会: 「建築物荷重指針・同解説」, 1993年
- (6) 浅見 豊, 大熊武司, 山崎真司, 溜 正俊, 中村 修: 横浜ラウンドマークタワーの風・地震観測—その4 風圧の観測結果—, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (北海道) PP.287~288, 1995年8月
- (7) N. J. Cook: The designer's guide to wind loading of building structure Part 2 Static structures, 1990

(1995年12月10日原稿受理, 1996年7月17日採用決定)