高層建築物の風による室内圧の性状

THE CHARACTERISTICS OF WIND-INDUCED INTERNAL PRESSURES IN HIGH-RISE BUILDINGS

上田 宏*, 日比一喜**, 菊池浩利***
Hiroshi UEDA, Kazuki HIBI and Hirotoshi KIKUCHI

This paper describes the characteristics of internal pressure fluctuations induced by the wind in a 14-story building assumed for this research. The internal pressure fluctuations in the building are evaluated using a numerical simulation method that involves use of a leak-flow model and external pressures. The airtightness of external walls considered in the simulation is evaluated on the basis of past research data. It is shown that the mean value of the internal pressure coefficient is almost similar to those of the internal pressure coefficients for high-rise buildings surveyed in the past. The peak values of internal pressure fluctuations in non-Gaussian processes can be estimated by assuming a Gamma distribution for the mapping function. This paper describes also the characteristics of the maximum and minimum values of the peak internal pressure coefficients.

Keywords : High-rise building, Wind pressure, Internal pressure, Air tightness, Probability distribution function
高層建築物, 風圧力, 室内圧, 気密性, 確率分布関数

1. はじめに

強風中の高層建築物において誘発される室内圧の性状は、カーテンウォールや窓ガラス等の耐風安全性を検証する際に把握するべき重要な項目の1つである。

従来、風によって誘発される高層建築物の室内圧に関する研究は、実在する高層建築物を対象にした実測的研究を中心に行われてきた。例えば、Eaton(1972)¹⁾は、ロンドンの18階建ての高層建築物 Royex House において、8階、14階、18階の平均室内圧を絶対圧計を用いて実測している。そして、同じ高さの屋外の静圧よりも、無風時に 10N/m^2 程度、風のある状態では 30N/m^2 程度高くなる事を報告している。また、Kato, et al.(1997)²⁾は、東京世田谷の28階建ての高層建築物 Setagaya Business Square において、7階、13階、18階、24階の平均室内圧を高精度の絶対圧計を用いて実測し、平均室内圧係数が -0.26 である事を報告している。

室内圧を基準に実測した外圧係数と風洞実験で静圧を基準に測定した外圧係数を用いて、実測時の平均室内圧係数を推定する試みも行われてきた。例えば、藤井ら(1982)³⁾は、大手町の朝日東海ビル、浅見ら(1995)⁴⁾は、横浜ランドマークタワーにおいて、それぞれ室内圧を基準に実測した外圧係数と風洞実験で求めた外圧係数とを比較する事によって、藤井らは実測時の平均室内圧係数を -0.2 と -0.3 、浅見らは $-0.03 \sim -0.19$ と推定している。

一般に風によって誘発される建築物の室内圧は、外壁や間仕切り

壁などの隙間の状況で大きく変化する事⁵⁾から、本来、高層建築物の風による室内圧も屋外に面するカーテンウォールやサッシの周囲、或は屋内の間仕切り壁や室内扉、階段室やエレベーターの扉の周囲における隙間の特性を考慮して評価する必要がある。しかし、実際の高層建築物では、外壁や間仕切り壁などの気密性を変えて、風による室内圧を実測する事が極めて困難である。

本研究は、上記の点を踏まえて、既に筆者らが提示した、低層建築物の風による室内圧変動のシミュレーション方法⁶⁾を用いて、軒高 $H=45\text{m}$ 、長辺 $W=40\text{m}$ 、短辺 $D=25\text{m}$ の矩形平面を有する14階建ての高層建築物(以下、想定高層建築物と呼ぶ)の外壁、並びに室内に配置した間仕切り壁、階段室、エレベーターなどの扉の気密性を変えた数値シミュレーションを行い、この結果から風によって誘発される高層建築物の室内圧の性状を把握する事を目的とする。

本論では、まず始めに、想定高層建築物の外壁、間仕切り壁、階段室の扉およびエレベーターの扉における隙間を通過する流れの数値モデルと想定高層建築物の外圧モデルを用いた風洞実験から得られる外圧場の時系列データを併用して、想定高層建築物の風による室内圧変動の数値シミュレーションを行う。次に、実在する高層建築物の通気特性の実測結果を参考にして、想定高層建築物の外壁、間仕切り壁、階段室の扉およびエレベーターの扉の気密性の評価を行う。そして、想定高層建築物の風による室内圧の変動状況、平均室内圧係数や最大・最小ピーク室内圧係数の性状について論述する。

* 千葉工業大学工学部建築都市環境学科 教授・工博

** 清水建設㈱技術研究所 リサーチフェロー・工博

*** 清水建設㈱技術研究所 主任研究員・工博

Prof., Dept. of Architecture and Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chiba Institute of Technology, Dr. Eng.

Research Fellow, Institute of Technology, Shimizu Corporation, Dr. Eng.

Senior Research Engineer, Institute of Technology, Shimizu Corporation, Dr. Eng.

2. 想定高層建築物

想定高層建築物は、図1に示すような軒高 $H=45\text{m}$ 、幅 $W=40\text{m}$ 、奥行き $D=25\text{m}$ の14階建ての矩形平面を有する高層建築物である。エントランス1階の階高は 5.75m 、基準階である2階から13階の階高は 3m 、最上階である14階の階高は 3.25m である。基準階と1階および14階には、図1、(b)と図1、(c)に示すように、階毎に間仕切りされた9つの部屋 (Room1～Room9) および1階から14階までを1つのスペースとする階段室 (ES1, ES2)、更に1階から14階までを1つのサービスゾーンとするエレベーターシャフト (EV1～EV4) を配置した。Room1～Room9 および階段スペース (以下、ES と呼ぶ)、エレベーターシャフト (以下、EV と呼ぶ) の容積を表1に示す。外壁、ES、EV のそれぞれの壁厚は 0.2m 、間仕切り壁の厚さは 0.1m 、床スラブの厚さは 0.2m 、屋根スラブの厚さは 0.25m とした。各部屋の外壁および間仕切り壁、階段室扉、エレベーター扉の面積をそれぞれ表2と表3に示す。

(a) 長辺側立面

(b) 基準階平面 (2階～13階)

(c) エントランス (1階) および最上階 (14階) 平面

図1 想定高層建築物

表1 部屋、ES、EV の容積

Floor's number	Room's number	Volume V (m^3)
FL1	Room 1	5128
FL2 to FL13	Room 1, 3, 4, 6	265
	Room 2, 5	270
	Room 7	644
	Room 8, 9	130
FL14	Room 1	2632

注) ES の容積は 700m^3 、EV の容積は 229m^3

表2 部屋の外壁面積

Floor's number	Room's number	Location	A_e (m^2)
FL1	Room 1	Circumference	748
FL2 to FL13	Room 1, 3, 4, 6	Long side	40
		Short side	23
	Room 7	Circumference	40
		One side	40
FL14	Room 1	Circumference	423

表3 間仕切り壁、階段室扉、エレベーター扉の面積

Floor's number	Room's number	Location	A_p (m^2)
FL2 to FL13	Room 1, 3, 4, 6	Long side	36.5
		Short side	20.3
	Room 2, 5	Long side	37.2
		Short side	20.3
	Room 8, 9	Circumference	26.6

注) 階段室扉 A_{es} : 2m^2 、エレベーター扉 A_{ev} : FL1: 7.3m^2 、FL2～FL13: 7m^2 、FL14: 8.8m^2

3. 室内圧変動のシミュレーション

ここでは、想定した高層建築物の外圧模型を用いた風洞実験で測定した外圧場の時系列データと外壁、間仕切り壁、階段室やエレベーターの扉などの隙間を通過する流れに Poiseuille の法則を適用した数値モデルを併用して、風が誘発する室内圧の変動を数値的にシミュレーションする方法⁶⁾およびその計算の条件について述べる。

3.1 計算方法

風が誘発する想定高層建築物の部屋や ES スペース、EV シャフトなどの室内圧係数 C_j ($j = 1, 2, \dots, 116$) は、 j の部屋または ES、EV の各スペースに対して構築した次式を連立させて数値的に解く事により求める。

$$\frac{dC_j}{dt} = \frac{2\gamma P_0}{\rho_e V_j U_{ref}} \sum_{\ell=1}^m \kappa_{j\ell} a_{j\ell} (C_{j\ell} - C_j) (|C_{j\ell} - C_j|)^{-0.5} \quad (1)$$

ただし、

$$\kappa_{j\ell} = \left(\frac{64}{Re_{j\ell}} \frac{L_{j\ell}}{d_{j\ell}} + K_0 \right)^{-0.5} \quad (2)$$

であり

$$Re_{j\ell} = \frac{\rho_e^2 U_{ref}^2 a_{j\ell}^3 |C_{j\ell} - C_j|}{64 \mu_{j\ell}^2 L_{j\ell}} \quad (3)$$

である。

ここに、 dt は微小時間、 γ は定積定圧比熱比、 P_0 は静圧、 ρ_e は屋外の空気密度、 V_j は j の部屋または ES、EV の容積、 U_{ref} は軒高風速、 $\kappa_{j\ell}$ は j の部屋または ES、EV における隙間 ℓ ($\ell = 1, 2, \dots, m$) の流量係数、 $a_{j\ell}$ は j の部屋または ES、EV における隙間 ℓ の断面積、 $C_{j\ell}$ は j の部屋における隙間 ℓ に部屋の外側から作用する外圧係数、或は j の部屋または ES、EV に隣接する部屋の室内圧係数、 C_j は j の部屋または ES、EV の室内圧係数、 $L_{j\ell}$ は j の部屋または ES、EV における隙間 ℓ の管路長さ、 $d_{j\ell}$ は管路の内径、 $Re_{j\ell}$ は j の部屋または ES、EV における隙間 ℓ を通過する流れの Reynolds 数 ($= u_{j\ell} d_{j\ell} / \nu_{j\ell}$) であり、 $u_{j\ell}$ は j の部屋または ES、EV における隙間 ℓ を通過する流れの断面平均流速 ($= q_{j\ell} / a_{j\ell}$)、 $q_{j\ell}$ は j の部屋または ES、EV における隙間 ℓ を通過する流れの流量、 $\nu_{j\ell}$ は j

の部屋または ES、EV における隙間 ℓ を通過する流れの動粘性係数 ($=\mu_{j\ell}/\rho_j$)、 $\mu_{j\ell}$ は j の部屋または ES、EV における隙間 ℓ を通過する流れの粘性係数、 ρ_j は j の部屋または ES、EV の空気密度 (ここでは $\rho_j = \rho_e$ とする)、 K_0 は付加的圧力降下係数である。(1) 式の数値計算はルンゲ・クッタ法で行い、全ての部屋の室内圧係数を 0 にした初期値の影響を取り除くために、同一の外圧データを用いた計算を 2 回連続して行い、2 回目の計算結果を採用した。すなわち、2 回目の計算には、1 回目と同じ外圧を用い、1 回目の計算で最後に得られた室内圧係数の値を連結させて用いた。

3. 2 計算条件

想定高層建築物の外壁、間仕切り壁、各階に設けた ES の出入りの扉や EV の扉における隙間は、壁面または扉の周囲に一樣に分布する極めて小さい円筒形の管路 (内径 $d: 0.25\text{mm}$ 、奥行き長さ $L: 5\text{mm}$) としてモデル化した。外壁に一樣に分布する個々の隙間は、図 1, (b) と図 1, (c) の●印の位置に、また、間仕切り壁、ES の扉や EV の扉に分布する隙間は、○印の位置にそれぞれ集約して計算に用いた。そして、部屋の外壁に一樣に分布する個々の隙間を集約した隙間面積 $\sum a_{ew}$ を部屋の外壁面積 A_e で除した値を外壁の隙間率 $\varphi_{ew}(=\sum a_{ew}/A_e)$ 、部屋の間仕切り壁に一樣に分布する個々の隙間を集約した隙間面積 $\sum a_{pw}$ を間仕切り壁の面積 A_p で除した値を間仕切り壁の隙間率 $\varphi_{pw}(=\sum a_{pw}/A_p)$ 、ES の各階の扉の周囲に分布する隙間を集約した隙間面積 $\sum a_{es}$ を ES の各階の扉の面積 A_{es} で除した値を ES の扉の隙間率 $\varphi_{es}(=\sum a_{es}/A_{es})$ 、EV の各階の扉の周囲や開閉口に分布する隙間を集約した隙間面積 $\sum a_{ev}$ を EV の各階の扉の面積で除した値を EV の扉の隙間率 $\varphi_{ev}(=\sum a_{ev}/A_{ev})$ とした。ここでは、外壁、間仕切り壁、ES の扉や EV の扉に対して 0.05%、0.15%、0.37%、0.68%、1.21% の 5 種類の隙間率を用意した。ES スペースや EV シャフトの壁面の気密性は極めて高いと考えて、空気の漏れは ES および EV の扉からのみとする。また ES スペースや EV シャフトを流れる空気の抵抗は小さいとする。通常、外壁や間仕切り壁などの隙間からの空気の出入りは、風による影響の他に、屋外と室内または部屋と部屋の間が生じる温度差、並びに換気装置による屋内への外気の取り込みや屋外への排気などによっても誘発されるが、これらの影響⁷⁾は考えない。本計算では、 $\gamma = 1.4$ 、 $P_0 = 10^5\text{Pa}$ 、 $\rho_e = 1.2\text{kg/m}^3$ 、 $U_{ref} = 45\text{m/s}$ 、 $\mu_{j\ell} = 18.09 \times 10^{-6}\text{Pa}\cdot\text{s}$ 、 $K_0 = 1.16^{(8)}$ とする。

4. 風洞実験

シミュレーションに用いる外圧場の時系列データを得るために、想定高層建築物の縮尺 1/250 の外圧模型を用いた風洞実験を行った。風洞実験は、幅 3.5m × 高さ 2.5m × 長さ 20m の回流式境界層風洞装置で実施した。実験時の気流は、図 2 に示すように、風速分布のベキ指数が $\alpha=0.17$ 、軒高での乱れの強さが $I_h=17.6\%$ 、粗度長が $Z_0=0.042\text{cm}$ であり、変動風速のパワースペクトル密度分布は Kármán 型に対応した縮尺 1/250 の平坦地域相当の乱流境界層流である。想定した高層建築物の外圧模型は、縮尺率が 1/250 で長辺の長さが $w=16\text{cm}$ 、短辺の長さが $l=10\text{cm}$ 、軒高さが $h=18\text{cm}$ の板厚さ 3mm のアクリル板製である。外圧測定孔は、図 1 (b) と図 1 (c) に●印で示す位置の階高中央に計 504 点を取り付けた。外圧は測定孔に取り付けたアルミニウム製のパイプ (内径 0.8mm、長さ

7mm) からビニール製の導圧チューブ (内径 1mm、長さ 1m) で多点圧力計に導いて、模型の上部に設置したピトー静圧管の静圧との差圧として全点同時に測定した。導圧チューブ系の影響は、チューブ系の圧力伝達関数を求めて補正した。圧力計からのアナログ信号は、遮断周波数 500Hz のアナログローパスフィルタを通してから、サンプリング間隔 $\delta t=1\text{msec}$ 、サンプリング個数 $N_s=32768$ 個でデジタル変換処理をしてから模型の軒高相当の速度圧で除して外圧係数の時系列データとして収録した。風向は模型の長辺に正対する方向を $\alpha=0^\circ$ とし反時計周りに 5° 間隔に 90° まで模型を設置したターンテーブルを回転させて変えた。

図 2 実験気流

5. 想定高層建築物の気密性

建築物の外壁や間仕切り壁などの気密性の評価は、風による室内圧の特性を把握するために極めて重要である。ここでは、加圧実験や煙突効果などによって評価された高層建築物の通気特性^{9),10),11)}を参考にして、想定高層建築物の外壁、間仕切り壁、階段室の扉およびエレベーターの扉の気密性を評価する。

5. 1 内外差圧と相当有効面積

一般に任意形状の隙間を有する建築物の屋外と屋内における圧力の差圧が ΔP となるように加圧した際に生じる隙間流れの総流量 Q は次式で表せる⁹⁾。

$$Q = C \cdot A_e \cdot (|\Delta P|)^n \quad (4)$$

ここに、 C は流れ係数、 A_e は外壁面積、 n は流れ指数である。

一方、外壁における隙間を円筒形の管路でモデル化した場合、外壁の隙間を通過する流れの総流量 Q は、単純開口を通過するオリフィスの流れとして次式で表せる⁵⁾。

$$Q = A_l \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot |\Delta P|}{\rho}} \quad (5)$$

ただし、

$$A_l = \sum_{\ell=1}^m \kappa_{ew\ell} \cdot a_{ew\ell} \quad (6)$$

ここに、 A_l は有効面積、 $\kappa_{ew\ell}$ は隙間 ℓ を通過する流れの流量係数、 m は隙間の個数、 $a_{ew\ell}$ は隙間 ℓ の面積、 ρ は空気密度である。

ここで (4) 式または (5) 式で求まる総流量が等しいと仮定すると、外壁の単位面積当りの有効面積 $\tilde{A} (=A_l/A_e)$ は次式で表せる。

$$\tilde{A} = \sqrt{\frac{\rho}{2}} \cdot C \cdot (|\Delta P|)^{n-0.5} \quad (7)$$

ちなみに、 $\bar{A}$ は相当有効面積とも呼ばれ、単位を (cm^2/m^2) で表すことが多い。この相当有効面積 $\bar{A}$ は、隙間流れの特性を支配する流量係数の影響を含むことから、従来の外壁や間仕切り壁などの隙間率 $\varphi_{ew}, \varphi_{pw}$ などと同様に建築物の気密性を特徴づける重要な指標の1つであると言える。

5.2 高層建築物の外壁の相当有効面積

Tamura et al.(1976)⁹⁾が加圧実験により評価したカナダの8棟の高層建築物の外壁の通気特性を用い、(7)式で $n = 0.65$ 、 $\rho = 1.2$ (kg/m^3) として、内外差圧が $\Delta P = 75(\text{Pa})$ の時の相当有効面積 $\bar{A}$ を試算してみると、気密性が低い外壁の相当有効面積は $\bar{A} = 4.9$ (cm^2/m^2)、中程度の外壁では $\bar{A} = 3.1(\text{cm}^2/\text{m}^2)$ 、気密性が高い外壁の場合は $\bar{A} = 1.6(\text{cm}^2/\text{m}^2)$ 程度になる。ただし、ここでの流れ係数 C は、気密性が低い外壁の場合は $C = 3.3 \times 10^{-4}$ 、中程度の外壁では $C = 2.1 \times 10^{-4}$ 、気密性が高い外壁の場合は $C = 1.1 \times 10^{-4}$ であり、単位はいずれも ($\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Pa}^{0.65}$) である。早川ら (1985)¹⁰⁾が煙突効果を利用して評価した高層建築物の外壁の通気特性を用い、(7)式で $n = 1$ 、 $\rho = 1.2$ (kg/m^3) として、内外差圧が $\Delta P = 9.8(\text{Pa})$ の時の相当有効面積 $\bar{A}$ を試算してみると、気密性が低い外壁の場合は $\bar{A} = 2.0(\text{cm}^2/\text{m}^2)$ 、中程度の外壁では $\bar{A} = 1.0(\text{cm}^2/\text{m}^2)$ 、気密性が高い外壁の場合は $\bar{A} = 0.5(\text{cm}^2/\text{m}^2)$ 程度になり、これらは早川らが提示した数値と一致する。ただし、ここでの流れ係数 C は気密性が低い外壁の場合は $C = 8.16 \times 10^{-5}$ 、中程度の外壁では $C = 4.08 \times 10^{-5}$ 、気密性が高い外壁の場合は $C = 2.04 \times 10^{-5}$ であり、単位はいずれも ($\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Pa}$) である。Persily(1998)¹¹⁾が米国とカナダにおける16棟の高層建築物について評価した内外差圧が $\Delta P = 75(\text{Pa})$ の時の各棟の外壁に対する総通風量の平均値 $\bar{Q} = 12.9$ ($\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$)、最大値 $\hat{Q} = 32.9$ ($\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$)、最小値 $\check{Q} = 4.4$ ($\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$) を用い、(7)式で $n = 0.65$ 、 $\rho = 1.2$ (kg/m^3) として相当有効面積 $\bar{A}$ を試算してみると、平均通風量 $\bar{Q}$ の場合は $\bar{A} = 3.21(\text{cm}^2/\text{m}^2)$ 、最大通風量 $\hat{Q}$ の場合は $\bar{A} = 8.18(\text{cm}^2/\text{m}^2)$ 、最小通風量 $\check{Q}$ の場合は $\bar{A} = 1.09(\text{cm}^2/\text{m}^2)$ 程度になる。ただし、平均値の流れ係数は $C = 2.17 \times 10^{-4}$ 、最大値の流れ係数は $C = 5.52 \times 10^{-4}$ 、最小値の流れ係数は $C = 7.39 \times 10^{-5}$ であり、単位はいずれも ($\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Pa}^{0.65}$) である。また、JIS^{12),13)}に規定されている普通サッシ・ドアのA-3等級および防音・断熱仕様のA-4等級のサッシ・ドアセットの通気特性を用いて、(7)式で $n = 1$ 、 $\rho = 1.2$ (kg/m^3) として、内外差圧が $\Delta P = 75(\text{Pa})$ の時の相当有効面積 $\bar{A}$ を試算してみると、A-3等級が $\bar{A} = 13.1(\text{cm}^2/\text{m}^2)$ 、A-4等級が $\bar{A} = 3.4(\text{cm}^2/\text{m}^2)$ 程度になる。ただし、A-3等級の流れ係数は $C = 2.22 \times 10^{-4}$ 、A-4等級の流れ係数は $C = 5.56 \times 10^{-5}$ であり、単位はいずれも ($\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Pa}$) である。これら外壁の相当有効面積 $\bar{A}$ と内外差圧 ΔP の関係を図3に示す。図の縦軸は相当有効面積 $\bar{A}$ 、横軸は内外差圧 ΔP である。Tamura et al.の結果は、高气密の外壁 (Tight) を○印、中気密の外壁 (Average) を□印、低気密の外壁 (Loose) を◇印で、早川らによる結果は、高气密の外壁 (Tight) を●印、中気密の外壁 (Average) を■印、低気密の外壁 (Loose) を◆印で、JISによる結果は、A-4等級を◎印、A-3等級を★印で、Persilyによる結果は、最小値 (Minimum) を△印、平均値 (Mean) を▼印、最大値 (Maximum) を▽印で示す。これらは室内環境の評価が目的であり内外差圧が100 (Pa) 以下である。

5.3 想定高層建築物の外壁の相当有効面積

想定高層建築物の部屋 j における外壁の相当有効面積 $\bar{A}$ は、(2)式および(6)式から求まる外壁の有効面積 A_l を外壁面積 A_e で除して算出した。また、その際の内外差圧 ΔP は次式により求めた。

$$\Delta P = (|\bar{C}_e - \bar{C}_i|) \frac{\rho}{2} U_{ref}^2 \quad (8)$$

ここに、 $\bar{C}_e$ および $\bar{C}_i$ は部屋 j の外壁の隙間に作用する外圧 $\bar{P}_e$ および部屋 j の室内圧 $\bar{P}_i$ を軒高に相当の平均風速 U_{ref} に基づく速度圧 $q (= 0.5\rho U_{ref}^2)$ で除した平均外圧係数および平均室内圧係数である。ちなみに、ここでの平均外圧係数は、外壁における各測定点の平均外圧係数を算術平均した値である。

図3は、風向を $\alpha = 0^\circ$ 、軒高風速 U_{ref} を35 (m/s)、45 (m/s)、55 (m/s)、65 (m/s)、80 (m/s) の5段階に変化させ、外壁の隙間率 φ_{ew} を0.05%、0.15%、0.37%、0.67%、1.21%として、屋内の間仕切り壁、階段室およびエレベーターの扉の隙間率を $\varphi_{pw} = \varphi_{es} = \varphi_{ev}$ として (この理由は後述する)、それぞれ0.05%、0.15%、0.37%、0.67%、1.21%に変化させて実施したシミュレーションの結果から得られた、想定高層建築物の外壁の相当有効面積 $\bar{A}$ と内外差圧 ΔP の関係を外壁の隙間率毎に全てプロットした結果である。図に示す小さい◇印は $\varphi_{ew} = 0.05\%$ 、小さい▽印は $\varphi_{ew} = 0.15\%$ 、小さい△印は $\varphi_{ew} = 0.37\%$ 、小さい□印は $\varphi_{ew} = 0.68\%$ 、小さい○印は $\varphi_{ew} = 1.21\%$ の結果である。この図から相当有効面積 $\bar{A}$ と内外差圧 ΔP の関係は、外壁の隙間率毎に纏まる傾向が認められる。また、内外差圧が等しい場合の相当有効面積 $\bar{A}$ は、隙間率の小さい外壁に比べて隙間率の大きい外壁の方が大きくなる事が分かる。実在する高層建築物の外壁の通気特性から試算した相当有効面積は、ここでの隙間率 $\varphi_{ew} = 0.05\% \sim 1.21\%$ の相当有効面積の範囲に含まれていることが分かる。

これらの結果から外壁の相当有効面積 $\bar{A}$ には、外壁の隙間率 φ_{ew} による影響が支配的であり、間仕切り壁や階段室およびエレベーターの扉の隙間率 $\varphi_{pw}, \varphi_{es}, \varphi_{ev}$ の影響は比較的小さいことが分かる。また内外差圧 ΔP の増加に伴って相当有効面積 $\bar{A}$ も大きくなる傾向が認められる。これは内外差圧の増加に伴って隙間流れの断面平均流速が速くなり、隙間を通過する流れの Reynolds 数が増加して(2)式の流量係数が大きくなるためと考えられる。

図3 相当有効面積 $\bar{A}$ と内外差圧 ΔP の関係

5.4 想定高層建築物の外壁の気密性

想定高層建築物の外壁の気密性を図3の相当有効面積と内外差圧の結果および高層建築物の相当有効面積と内外差圧の評価結果を参考に区分してみると、間仕切り壁や階段室およびエレベーターの扉の気密性にはほぼ関係なく、隙間率 $\varphi_{ew} = 0.05\%$ は高気密、隙間率 $\varphi_{ew} = 0.15\%$ は高気密～中気密、隙間率 $\varphi_{ew} = 0.37\%$ は中気密～低気密、隙間率 $\varphi_{ew} = 0.68\%$ 以下は低気密相当と考えられる。

5.5 間仕切り壁および扉の気密性

早川ら(1985)¹⁰⁾の階段室およびエレベーターの扉の通気特性を参考に(7)式で $n = 1$ 、 $\rho = 1.2 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ として、内外差圧 $\Delta P = 9.8 \text{ (Pa)}$ 時の相当有効面積を試算すると、階段室扉は $\tilde{A} = 63 \text{ (cm}^2\text{/m}^2\text{)}$ 程度、エレベーター扉が $\tilde{A} = 180 \text{ (cm}^2\text{/m}^2\text{)}$ 程度になる。ただし、階段室扉の流れ係数は $C = 8.1 \times 10^{-3}$ 、エレベーター扉の流れ係数は $C = 2.32 \times 10^{-2}$ で、単位はそれぞれ $\text{(m}^3\text{/s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Pa)}$ である。早川らが実測した階段室およびエレベーターの扉の隙間を単純開口として、ここで試算した相当有効面積を流量係数 0.65 で除した隙間率は、階段室扉が 0.97%程度、エレベーター扉は 2.77%程度になる。

JIS^{12),13)}の室内用サッシ・ドアセットの A-1 等級の通気特性から(7)式で $n = 1$ 、 $\rho = 1.2 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ として、内外差圧 $\Delta P = 75 \text{ (Pa)}$ の時の相当有効面積を試算すると $\tilde{A} = 221 \text{ (cm}^2\text{/m}^2\text{)}$ 程度になる。ただし、A-1 等級の流れ係数は $C = 3.3 \times 10^{-3} \text{ (m}^3\text{/s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Pa)}$ である。この A-1 等級の相当有効面積を流量係数 0.65 で除した隙間率は 3.4%程度になる。

これらの結果から階段室およびエレベーターの扉の気密性は、外壁に比べて低く隙間率は 1%～3%程度であると考えられる。一方、間仕切り壁に関する気密性の情報は極めて少なく、間仕切り壁の仕様も多種多様である事を勘案して、ここでは間仕切り壁の気密性は階段室の扉やエレベーターの扉と同じであると考えた。ちなみに、シミュレーションのために用意した 5 種類の隙間率の中で 1.21%が間仕切り壁、階段室およびエレベーターの扉の隙間率 $\varphi_{pw} = \varphi_{es} = \varphi_{ev} = 1\% \sim 3\%$ の範囲にあると言える。

6. 室内圧の変動性状

ここでは、まず始めに想定高層建築物の室内圧のシミュレーションから得られた代表する部屋の室内圧変動の波形状況を見てみる。

図4は、外壁が高気密 $\varphi_{ew} = 0.05\%$ (図4, (a)) と中気密～低気密 $\varphi_{ew} = 0.37\%$ (図4, (b)) の想定高層建築物 9 階の部屋 (図4, (c) 参照) の風向 0° における室内圧の変動状況である。間仕切り壁、階段室の扉、エレベーター扉の隙間率は $\varphi_{pw} = 1.21\%$ である。外壁が中気密～低気密な場合 (図4, (b)) の室内圧の変化は、外壁が高気密な場合 (図4, (a)) に比べて、高周波数成分の変動が顕著である。これは隙間面積が大きくなると外圧変動の高周波数成分が室内圧へ伝達され易くなるためと考えられる¹⁴⁾。

風上側に位置する部屋に相当する Room1 と Room2 の室内圧は、特に、外壁の隙間率が大きい場合 (図4, (b)) は負圧が弱まるが、風下側に位置する部屋に相当する Room5 と Room6 では、逆に負圧が強まる傾向が認められる。これは外壁および間仕切り壁における隙間から流入する空気の流量が影響していると考えられる。

中部屋 Room9 および中廊下 Room7 の室内圧変動は類似しており、この事は間仕切り壁の影響が小さいことを意味している。

(a) 外壁: $\varphi_{ew} = 0.05\%$

(b) 外壁: $\varphi_{ew} = 0.37\%$

(c) 風向に対する部屋の配置状況

図4 外壁の気密性の違いによる各部屋の室内圧波形の変化状況
(風向: $\alpha = 0^\circ$ 、間仕切り壁、階段室扉、エレベーター扉の隙間率: $\varphi_{pw} = \varphi_{es} = \varphi_{ev} = 1.21\%$)

7. 平均室内圧係数の性状

図5は、間仕切り壁や階段室およびエレベーターの扉の隙間率が $\varphi = 1.21\%$ 、外壁の隙間率が $\varphi_{ew} = 0.05\%$ である場合 (図5, (a)) および外壁の隙間率が $\varphi_{ew} = 0.37\%$ である場合 (図5, (b)) の 2 階、9 階、13 階 (図1, (a) 参照) における Room3 と Room7 (図4, (c) 参照) の平均室内圧係数 $\bar{C}_i$ の風向 α による変化の状況である。各階の平均室内圧係数は、風向の変化に伴って類似した傾向の変化を示す。この例のように室内における間仕切り壁や階段室の扉、エレベーターの扉の隙間率が $\varphi = 1.21\%$ で低気密で、かつ外壁の隙間率が $\varphi_{ew} = 0.05\%$ で高気密である場合の各階の平均室内圧は、図5, (a) や図5, (b) に○印 (2 階)、□印 (9 階)、△印 (13 階) で示すように、等圧に成り易い。しかし、外壁の隙間率が $\varphi_{ew} = 0.37\%$ で中気密～低気密に低下すると、図5, (a) に●印 (2 階)、■印 (9 階)、▲印 (13 階) で示すように、風向 90° 近傍を除いて、各階の Room3 の平均室内圧には差異が認められる。ほぼこれと同様な傾向は他の階の部屋でも認められる。中廊下 (Room7) の平均室内圧係数は、図5, (b) に示すように、外壁の面積が小さいために、外壁

の気密性の違いによる顕著な相違は見られない。これと同様な傾向は、ES や EV における平均室内圧係数でも認められる。

図5 風向による平均室内圧係数の変化

次に、1階～14階における部屋の風向 $0^\circ \sim 90^\circ$ の平均室内圧係数の最大・最小値について見てみると、外壁の隙間率が $\varphi_{ew} = 0.05\%$ で高気密である場合の各階の平均室内圧係数の最大値 $\bar{C}_{max}$ は、図6, (a), i) に示すように、 $\bar{C}_{max} \approx -0.1 \sim -0.2$ の比較的狭い範囲に分布し、外壁の隙間率が $\varphi_{ew} = 0.37\%$ で中気密～低気密である場合は、図6, (a), ii) に示すように、 $\bar{C}_{max} \approx 0.1 \sim -0.3$ の広い範囲に分布している。

図6 平均室内圧係数の最大値と最小値 (間仕切り壁、階段室扉、エレベーター扉： $\varphi_{pw} = \varphi_{es} = \varphi_{ev} = 1.21\%$)

一方、外壁の隙間率が $\varphi_{ew} = 0.05\%$ で高気密である場合の各階の平均室内圧係数の最小値 $\bar{C}_{min}$ は、図6, (b), i) に示すように、1階や最上階を除いて、 $\bar{C}_{min} \approx -0.33$ 付近に集中している。これに対して外壁の隙間率が $\varphi_{ew} = 0.37\%$ で中気密～低気密である場合は、図6, (b), ii) に示すように、エントランスの1階部分を除いて、 $\bar{C}_{min} \approx -0.3 \sim -0.43$ の範囲に分布している。

これらの結果から、中廊下 (Room7) と中部屋 (Room8, Room9) を除く、各階における各部屋の風向 $0^\circ \sim 90^\circ$ の平均室内圧係数の最

大値または最小値の差異は、外壁が中気密～低気密である場合は大きく、高気密である場合は小さくなる事が分かる。中廊下や中部屋の平均室内圧係数の最大値または最小値の差異は極めて小さい。

風向 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ の代表的な3風向における11階のRoom3とRoom6の平均室内圧係数に対する各部屋の間仕切り壁の隙間率 φ_{pw} を外壁の隙間率 φ_{ew} で除した隙間率比 $\bar{\varphi} (= \varphi_{pw} / \varphi_{ew})$ の影響を図7に示す。図の縦軸は平均室内圧係数 $\bar{C}_i$ 、横軸は隙間率比 $\bar{\varphi}$ である。Room3およびRoom6の平均室内圧係数 $\bar{C}_i$ は、隙間率比 $\bar{\varphi}$ の増加に伴って、風向 45° (Room3: □印, Room6: ■印) では $\bar{C}_i = -0.15 \sim -0.2$ 付近に漸近し、風向 0° (Room3: ○印, Room6: ●印) および風向 90° (Room3: △印, Room6: ▲印) では $\bar{C}_i = -0.3 \sim -0.35$ 付近に漸近する傾向が認められる。

図7 平均室内圧係数と隙間率比との関係

以上の結果から、各階における部屋の平均室内圧係数は、風向や外壁と間仕切り壁などの気密性に支配的に影響されるが、Kato et al.²⁾の実測結果と同様、階の違いによる変化は比較的小さいと言える。また、通常の高層建築物のように外壁の気密性が室内の気密性に比べて極めて高い場合の屋内各所の平均室内圧係数の最大値は、 $\bar{C}_{max} \approx -0.15$ 、最小値は、 $\bar{C}_{min} \approx -0.33$ 程度であり、前述の実測結果 (Kato et al.²⁾: -0.26 、藤井ら³⁾: -0.2 と -0.3 、浅見ら⁴⁾: $-0.03 \sim -0.19$) は、ほぼこの範囲内にあることが分かる。

8. 最大・最小ピーク室内圧係数の性状

外装材用の風荷重を算定する際には室内圧変動のピーク値を把握する必要がある。ここでは、想定高層建築物における最大・最小ピーク室内圧変動の性状について述べる。

室内圧変動の確率特性が正規確率過程で取り扱える場合の室内圧変動の最大・最小ピーク値は、構造物の風応答のピーク値を推定する際に良く用いられる正規確率過程に基づく極値理論¹⁵⁾によって推定が可能であると考えられる。従来、筆者ら⁵⁾は、外圧によって引き起こされる室内圧変動の確率分布は正規分布で近似できると考えていた。しかし、詳細に室内圧変動の確率特性を調べてみると、正規確率過程と非正規確率過程の両方が存在する事が分かった。ここでは、まず始めに、室内圧変動の確率密度分布が正規確率密度関数だけでなく、Gamma分布¹⁶⁾にも適合する場合があることを示す。そして、室内圧変動が非正規確率過程に適合する場合の最大・最小ピーク値を正規確率過程を前提とした従来の極値理論¹⁵⁾から得られるピークファクターをGamma分布の累積確率分布を用いて非正規変換して

求める方法について述べる。更に、最大・最小ピーク室内圧係数は外壁と間仕切り壁の隙間率比に支配される事を示す。

8.1 室内圧変動の確率特性

図8、(a) および図8、(b) は、間仕切り壁などの隙間率が $\varphi_{ew} = 1.21\%$ の低気密で外壁の隙間率が $\varphi_{ew} = 0.05\%$ で高気密な場合と隙間率が $\varphi_{ew} = 0.37\%$ で中気密～低気密な場合の風向 $0^\circ \sim 90^\circ$ の9階の Room1～Room9 の室内圧変動の歪度 γ_3 と尖度 γ_4 である。図の横軸は歪度、縦軸は尖度である。この結果から想定高層建築物の風による室内圧変動の多くは非正規過程であり、特に風下に位置する部屋の室内圧変動は非正規性が強くなる傾向が認められる。

図8 室内圧変動の歪度と尖度の関係

8.2 最大・最小ピーク室内圧係数の算定方法

i) 正規確率過程に適合する場合

室内圧係数の時系列 $C_i(t)$ が正規確率過程に適合する場合の T 時間内において変動する室内圧係数 $C_i(t)$ の最大ピーク室内圧係数 C_{max} および最小ピーク室内圧係数 C_{min} は、それぞれ次式で推定可能と考える。

$$C_{max} = \bar{C}_i + g_i \cdot C'_i \quad (9)$$

$$C_{min} = \bar{C}_i - g_i \cdot C'_i \quad (10)$$

ただし、

$$g_i = \sqrt{2 \ln \nu_i T} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln \nu_i T}} \quad (11)$$

$$\nu_i = \sqrt{\frac{\int_0^\infty f^2 S_i(f) df}{\int_0^\infty S_i(f) df}} \quad (12)$$

ここに、 $\bar{C}_i$ は室内圧係数時系列 $C_i(t)$ の平均値、 C'_i は標準偏差 (RMS 値)、 g_i はピークファクター、 T は継続時間、 ν_i は平均値を正の勾配で横切る単位時間当りの回数、 f は周波数、 $S_i(f)$ は室内圧変動のパワースペクトル密度関数である。

ii) 非正規確率過程に適合する場合

室内圧変動が非正規確率過程に適合する場合の T 時間内における室内圧係数時系列 $C_i(t)$ の最大ピーク室内圧係数 C_{max} および最小ピーク室内圧係数 C_{min} を推定するために、ここでは、規準化した室内圧係数時系列 $\tilde{C}_i(t) = [C_i(t) - \bar{C}_i]/C'_i$ の確率分布を Gamma 分布¹⁶⁾で近似する。

Gamma 分布の確率密度関数 $f(\tilde{x})$ と確率分布関数 $F(\tilde{x})$ は、それぞれ次の式で表される。

$$f(\tilde{x}) = \frac{\left(\frac{\tilde{x}-\mu}{\beta}\right)^{\eta-1} \exp\left(-\frac{\tilde{x}-\mu}{\beta}\right)}{\beta \Gamma(\eta)} \quad \tilde{x} \geq \mu; \eta, \beta > 0 \quad (13)$$

$$F(\tilde{x}) = \frac{\Gamma_{\tilde{x}}(\eta)}{\Gamma(\eta)} \quad \tilde{x} \geq 0; \eta > 0 \quad (14)$$

ここに、 $\tilde{x}$ は規準化した室内圧係数時系列の時刻 t の値 ($= \tilde{C}_i(t)$)、 η は形状パラメーター、 μ は位置パラメーター、 β はスケールパラメーター、 $\Gamma_{\tilde{x}}(\cdot)$ は不完全 Gamma 関数、 $\Gamma(\cdot)$ は Gamma 関数である。3つのパラメーター η, μ, β の最適値は、最尤法 (MLE)¹⁶⁾や確率プロット相関係数法 (PPCC)¹⁷⁾でも推定できるが、ここではモーメント法¹⁸⁾とも呼ばれる次式を用いる方法で推定する。

$$\text{形状パラメーター} : \eta = \left(\frac{2}{\gamma_3}\right)^2 \quad (15)$$

$$\text{位置パラメーター} : \mu = \bar{C}_i - \frac{2\sqrt{C'_i}}{\gamma_3} \quad (16)$$

$$\text{スケールパラメーター} : \beta = \frac{\sqrt{C'_i} \gamma_3}{2} \quad (17)$$

ここに、 γ_3 は室内圧係数時系列の歪度である。

(13) 式は $\tilde{x} \geq \mu$ 、(14) 式は $\tilde{x} \geq 0$ の範囲で成立する式であり、最頻値を境に短い裾側については適用に限界がある。このため歪度 γ_3 が負になる場合、すなわち、確率密度分布の長い裾が負側に広がる場合は、 $\tilde{C}_i(t)$ に -1 を乗じて符号を反転させてから処理する必要がある。図9は室内圧変動の確率密度分布 (○印) と (15) 式、(16) 式、(17) 式で推定したパラメーターを用いた Gamma 分布の確

(a) 正規過程に適合する例

(b) 非正規過程に適合する例

図9 室内圧変動の確率密度分布と Gamma 分布の確率密度関数、並びに標準正規確率密度関数との比較

率密度関数 $f(\tilde{x})$ (実線) を比較した結果の一例である。図中の破線は正規確率密度関数 $N(0,1)$ であり、横軸 $\tilde{x}$ は規準化変数である。室内圧変動の確率特性が正規に近い場合の確率密度分布は、図9、(a) に示すように、標準正規確率密度関数 $N(0,1)$ (破線) に適合し、Gamma 分布の確率密度関数 $f(\tilde{x})$ (実線) との差異も小さい。しかし、室内圧変動の確率特性が非正規である場合の確率密度分布は、図9、(b) に示すように、Gamma 分布の確率密度関数 $f(\tilde{x})$ (実線)

に適合することが分かる。このように非正規性を有する室内圧変動の確率分布は Gamma 分布で近似することが可能であるが、室内圧変動の確率特性が正規確率過程に極めて近い場合は、(15) 式における歪度が $\gamma_3 \rightarrow 0$ となり、形状パラメーター η が $\eta \rightarrow \infty$ となるため (13) 式および (14) 式の分布が定まらない。よって、ここでは、Tieleman et al.(2008)¹⁹⁾に倣い、歪度が $\gamma_3 \leq |0.35|$ を正規確率過程と考えた。

非正規性を有する室内圧変動の最頻値より長い裾側で T 時間に発生するであろう最大ピーク室内圧係数 C_{max} 、または最小ピーク室内圧係数 C_{min} を Gamma 分布を適合させて推定するためには、(12) 式の正規過程のパワースペクトル密度関数 $S_i(f)$ を非正規過程のパワースペクトル密度関数 $S_{i,x}(f)$ で置き換える必要がある²⁰⁾。

$$\nu_i = \nu_{i,x} \quad (18)$$

ここに、 $\nu_{i,x}$ は $S_i(f) = S_{i,x}(f)$ として (12) 式で計算した値である。この (18) 式を (12) 式に代入して g_i を求め、標準正規確率分布 $\Phi(y)$ より、 $y = g_i$ の非超過確率 $\Phi(g_i)$ を求めて、次式で Gamma 分布の非正規過程の空間に写像することで非正規性を有する室内圧変動の最大ピーク値を推定するためのピークファクター g_{max} を求める。

$$g_{max} = F^{-1}[\Phi(g_i)] \quad (19)$$

ここに、 $F^{-1}[\cdot]$ は Gamma 分布の累積分布関数 ((14) 式) の逆関数である。

歪度が $\gamma_3 > 0.35$ で最頻値より正側に裾が長く伸びた側で T 時間内に発生するであろう最大ピーク室内圧係数 C_{max} は、(19) 式で変換したピークファクター g_{max} を (20) 式に代入して求める。また、歪度が $\gamma_3 < -0.35$ で最頻値より負側に裾が長く伸びた側で T 時間内に発生するであろう最小ピーク室内圧係数 C_{min} は、(19) 式で変換したピークファクター g_{max} を $g_{min} = -g_{max}$ に置き換えて (21) 式に代入して求める。

$$C_{max} = \bar{C}_i + g_{max} \cdot C'_i \quad (20)$$

$$C_{min} = \bar{C}_i + g_{min} \cdot C'_i \quad (21)$$

一方、歪度が $\gamma_3 > 0.35$ で最頻値より負側の短い裾側で T 時間に発生する最小ピーク室内圧係数 C_{min} と $\gamma_3 < -0.35$ で最頻値より正側の短い裾側で T 時間に発生する最大ピーク室内圧係数 C_{max} を推定するには、(14) 式の Gamma 分布における適用条件 ($\hat{x} \geq 0$) の制約から、Gamma 分布以外の分布関数を定める必要がある。よって、ここでは、Sadek et al.(2002)²¹⁾に倣い、この場合の確率密度分布を正規分布と考えて、歪度が $\gamma_3 > 0.35$ で短い裾側で T 時間に発生するであろう最小ピーク室内圧係数 C_{min} は、(11) 式で求められる正規過程に基づくピークファクター g_i より $g_{min} = -g_i$ として (21) 式に代入し、歪度が $\gamma_3 < -0.35$ で短い裾側で T 時間に発生する最大ピーク室内圧係数 C_{max} は、 $g_{max} = g_i$ として (20) 式に代入して求める。

歪度が $\gamma_3 \leq |0.35|$ である正規性の強い室内圧係数時系列の最大・最小ピーク室内圧係数 C_{max} 、 C_{min} は、正規確率過程として、(11) 式で求められる正規過程に基づくピークファクター g_i より $g_{max} = g_i$ 、 $g_{min} = -g_i$ として (20) 式、(21) 式で求める。

この最大・最小ピーク室内圧係数算定の流れを図 10 に示す。

図 10 最大・最小ピーク室内圧係数の算定方法の流れ図

図 11 は、(10) 式で求めた最小ピーク室内圧係数 (ここでは $C_{g,min}$ と記す) と図 10 に示す流れに沿って非正規変換処理した最小ピー

図 11 非正規変換前後の最小ピーク室内圧係数 ($\varphi_{pw} = \varphi_{es} = \varphi_{ev} = 1.21\%$)

ク室内圧係数 C_{min} を時系列から直接求めた最小ピーク室内圧係数 $\tilde{C}_{min}$ と比較した結果である。ここには一例として風向が $\alpha = 0^\circ \sim 90^\circ$ の 9 階の Room1~Room9 の結果を示す。時系列から得られた最小ピーク室内圧係数 $\tilde{C}_{min}$ は、時間スケールを $1/71$ として換算した継続時間が $T \approx 10$ 分に相当する 4 つの時系列データからそれぞれ最小ピーク室内圧係数を抽出してそれらを算術平均した値である。ちなみに、ここでのピーク値のサンプリング時間は実時間に換算した場合に約 0.07 秒に相当する。変換を行わない場合の最小ピーク室内圧係数 $C_{g,min}$ および変換後の最小ピーク室内圧係数 C_{min} と時系列から求めた最小ピーク室内圧係数 $\tilde{C}_{min}$ との差異は、高気密な外壁 (図 11, (a)) よりも中気密~低気密な外壁 (図 11, (b)) の方が顕著である。そして、 $\tilde{C}_{min}$ との相関は、単に正規確率過程に基づく (10) 式で推定した最小ピーク室内圧係数 $C_{g,min}$ よりも、図 10 に示す流れに沿って推定した最小ピーク室内圧係数 C_{min} の方が良好である。ここには示さないが最大ピーク室内圧係数も同様の様相が認められた。

以上の結果から、図 10 に示す Gamma 分布の累積分布関数を写像関数とする最大・最小ピーク室内圧係数の推定法は有効と考える。

8.3 最大・最小ピーク室内圧係数と気密特性

ここで図 10 に示す方法で求めた風向 $\alpha = 0^\circ \sim 90^\circ$ の最大・最小ピーク室内圧係数に対する間仕切り壁および外壁の気密性の影響を 11 階の Room3 と Room6 について見てみると、図 12 に示すように、風向 $\alpha = 0^\circ \sim 90^\circ$ で常に風上側に位置する Room3 の最大ピーク室内圧係数 C_{max} (○印) は、隙間率比 $\tilde{\varphi} (= \varphi_{pw}/\varphi_{ew})$ が $\tilde{\varphi} < 5$ では正側に増加している。最小ピーク室内圧係数 C_{min} (●印) は、隙間率比 $\tilde{\varphi}$ が $\tilde{\varphi} > 5$ で $C_{min} \approx -0.55$ 程度であり、 $\tilde{\varphi} \leq 5$ では負圧がやや強まる傾向が認められる。また、風向 $\alpha = 0^\circ \sim 90^\circ$ で常に剥離域側に位置する Room6 の最大ピーク室内圧係数 C_{max} (□印) は、隙間率比 $\tilde{\varphi}$ の変化にほとんど影響されず $C_{max} \approx -0.1 \sim -0.2$ 程度である。最小ピーク室内圧係数 C_{min} (■印) は、隙間率比が $\tilde{\varphi} > 5$ では $C_{min} \approx -0.6$ 程度であるが、 $\tilde{\varphi} \leq 5$ では負圧が強まる傾向が認められる。

これらの結果から、外壁と間仕切り壁等の気密性の違いは、先述の平均室内圧係数 $\bar{C}_i$ と同様、最大ピーク室内圧係数 C_{max} や最小ピーク室内圧係数 C_{min} に影響する事が分かる。そして、この影響は隙間率比が $\tilde{\varphi} < 5$ で顕著である。

一般の高層建築物の隙間率比 $\tilde{\varphi}$ は、間仕切り壁や階段室およびエ

図 12 最大・最小ピーク室内圧係数に対する隙間率比の影響

レベーターの扉などの気密性が低気密 ($\varphi_{pw} = \varphi_{es} = \varphi_{ev} = 1.21\%$) であると考え、外壁の気密性が中気密~低気密 ($\varphi_{ew} = 0.37\%$) である場合は、 $\tilde{\varphi} \approx 3$ 程度、外壁の気密性が高気密~中気密 ($\varphi_{ew} = 0.15\%$) である場合は、 $\tilde{\varphi} \approx 8$ 程度、外壁の気密性が高気密 ($\varphi_{ew} = 0.05\%$) である場合は、 $\tilde{\varphi} \approx 24$ 程度である。よって、 $\tilde{\varphi} \approx 3$ の場合 (外壁の気密性が中気密~低気密) の最大ピーク室内圧係数 C_{max} および最小ピーク室内圧係数 C_{min} は、図 12 に見られるように、 $\tilde{\varphi} \approx 8$ (外壁の気密性が高気密~中気密) や $\tilde{\varphi} \approx 24$ (外壁の気密性が高気密) よりそれぞれ増加または減少する事が予想される。

図 13 は、隙間率比 $\tilde{\varphi} \approx 3.27$ (図 13, (a)), $\tilde{\varphi} \approx 8.07$ (図 13, (b)), $\tilde{\varphi} \approx 24.2$ (図 13, (c)) の各部屋において推定される風向 $\alpha = 0^\circ \sim 90^\circ$ の最大ピーク室内圧係数 (○印) と最小ピーク室内圧係数 (●印) を示す。図の縦軸は、最大・最小ピーク室内圧係数 C_{max} , C_{min} であり、横軸は階毎の部屋番号を 1 階から順番に 14 階まで累積した Room No. である。各部屋の最大ピーク室内圧係数 C_{max} および最小ピーク室内圧係数 C_{min} の差異は、隙間率比の増加に伴って小さくなる。最大ピーク室内圧係数 C_{max} は、隙間率比が $\tilde{\varphi} \approx 3.27$ である中気密~低気密の外壁の場合には、 $C_{max} \approx 0.4 \sim -0.15$ 、 $\tilde{\varphi} \approx 8.07$ である高気密~中気密な外壁の場合には、 $C_{max} \approx 0.3 \sim -0.1$ 、 $\tilde{\varphi} \approx 24.2$ である高気密な外壁の場合には $C_{max} \approx 0 \sim -0.1$ 程度である。一方、最小ピーク室内圧係数 C_{min} は、外壁の気密性が中気密~低気密 (図 13, (a)) である場合は $C_{min} \approx -0.6 \sim -1$ 、外壁の気密性が高気密~中気密 (図 13, (b)) である場合には $C_{min} \approx -0.55 \sim -0.7$ 、外壁の気密性が高気

(a) $\varphi_{ew} = 0.37\%$ ($\tilde{\varphi} = 3.27$)

(b) $\varphi_{ew} = 0.15\%$ ($\tilde{\varphi} = 8.07$)

(c) $\varphi_{ew} = 0.05\%$ ($\tilde{\varphi} = 24.2$)

図 13 最大・最小ピーク室内圧係数 ($\varphi_{pw} = \varphi_{es} = \varphi_{ev} = 1.21\%$)

密 (図 13, (c)) である場合には $C_{min} \approx -0.5 \sim -0.6$ の範囲に分布している。

これらの結果から、外壁の気密性が高気密で屋内の間仕切り壁などの気密性が低気密である場合の高層建築物においては、風が誘発する部屋毎の最大ピーク室内圧係数並びに最小ピーク室内圧係数の差異は小さく、最大ピーク室内圧係数は $C_{max} \approx 0 \sim -0.1$ 、最小ピーク室内圧係数は $C_{min} \approx -0.5 \sim -0.6$ 程度である事が分かる。

ちなみに、日本建築学会の建築物荷重指針²²⁾に示されている内圧変動の効果を表す係数である 0 または -0.5 は、最大・最小ピーク室内圧係数ではないが、ここでの $C_{max} \approx 0$ および $C_{min} \approx -0.6$ と似通った値である。

9. まとめ

本論では、高層建築物の外壁、間仕切り壁、階段室の扉、エレベーターの扉などの気密性を既往の実測結果を参考にして評価した矩形平面を有する 14 階建ての想定高層建築物を対象にして、風洞実験から得られた外圧場の時系列データと隙間流れの数値モデルを用いて、風が誘発する室内圧変動の数値シミュレーションを行い、このシミュレーション結果に基づいて、風によって誘発される高層建築物の室内圧の性状について考察し、以下の知見を得た。

1. 想定高層建築物の外壁の気密性は、隙間率が $\varphi_{ew} = 0.05\%$ の場合は高気密、 $\varphi_{ew} = 0.15\%$ の場合は高気密～中気密、 $\varphi_{ew} = 0.37\%$ の場合は中気密～低気密に相当する。
2. 平均室内圧係数は、外壁と間仕切り壁の隙間率比に大きく影響されが、階毎の差異は既往の実測結果と同様に小さい。
3. 通常の高層建築物のように外壁の気密性が高く、間仕切り壁などの気密性が低い場合の平均室内圧係数の最大値は $\bar{C}_{max} \approx 0.1 \sim 0.2$ 程度、最小値は $\bar{C}_{min} \approx -0.33$ 程度であり、既往の実測値もほぼこの範囲内である。
4. 非正規性を有する室内圧変動の最大ピーク値または最小ピーク値は、正規確率過程の極値理論から求まるピークファクターを Gamma 分布の確率分布関数を写像関数として非正規変換する事により推定可能である。
5. 最大・最小ピーク室内圧係数は、平均室内圧係数と同様に、隙間率比に影響されるが、階毎の差異は小さい。
6. 通常の高層建築物のように外壁の気密性が高く、間仕切り壁などの気密性が低い場合のピーク室内圧係数の最大値は $C_{max} \approx 0$ 、最小値は $C_{min} \approx -0.6$ であり、日本建築学会の建築物荷重指針²²⁾に示されている内圧変動の効果を表す係数である 0 または -0.5 と似通った値になる。

風によって誘発される室内圧によって高層建築物の外壁や窓ガラス、屋内の間仕切り壁や階段室の扉、エレベーターの閉開扉などに作用する風力の把握は今後の課題である。

謝辞

本研究を進めるに当り、現在、羽田コンクリート工業 (株) 勤務の山口正博君 (元千葉工業大学大学院生) と千葉県庁勤務の中村泰章君 (元千葉工業大学大学院生) の協力を得ました。ここに謹んで感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Eaton, K.J. : Wind loading on tall buildings. A thesis submitted for the Degree of Doctor of Philosophy in the University of London, pp.66-70, 1972.4.
- 2) Kato, N., Niihori, Y., Kurita, T. and Ohkuma, T. : Full-scale measurement of wind-induced internal pressures in a high-rise building. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 69-71, pp.619-630, 1997.
- 3) 藤井邦雄, 上田宏, 金子俊幸 : 高層建築物に作用する風圧力の性状について. 第 7 回風工学シンポジウム論文集, pp.99-105, 1982.
- 4) 浅見豊, 大熊武司, 山崎真司, 溜正俊, 中村修 : 横浜ラ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, B-1, 構造 I, pp.287-289, 1995.8.
- 5) 上田宏, 日比一喜, 菊池浩利 : 風によって誘発された低層建築物の室内圧のシミュレーション. 日本建築学会構造系論文集, 第 622 号, pp.65-72, 2007.12.
- 6) 上田宏, 日比一喜, 菊池浩利 : 隙間流れに Poiseuille の法則を適用した低層建築物の風による室内圧のシミュレーション. 日本建築学会構造系論文集, 第 658 号, pp.2115-2124, 2010.12.
- 7) Lee, Y., Tanaka, H. and Shaw, C.Y. : Distribution of wind- and temperature-induced pressure differences across the walls of a twenty-storey compartmentalized building. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 10, pp.287-301, 1982.
- 8) Schiller, I. : Untersuchung über laminare und turbulente strömung. Z. ang. Math. Mech. 2, S.96 1922.
- 9) Tamura, G.T. and Shaw, C.Y. : Study on External Wall Air Tightness and Air Infiltration of Tall Buildings. ASHRAE Transactions, Vol.83, Part 1, pp.122-133, 1976.
- 10) 早川真, 戸河里敏 : 高層建築物における煙突効果による隙間風の予測方法と防止対策, 一隙間風負荷の正しい評価のために-, 第 4 章 新しい隙間風推定法 (外壁面積法). 日本建築学会環境工学委員会 (主査: 村上周三, 他) 建築設備分科会シンポジウム, pp.11-36, 1985.2.
- 11) Persily, A.K. : Airtightness of Commercial and Institutional Buildings: Blowing Holes in the Myth of Tight Buildings. Thermal Envelopes VII conference, 6-10, 1998.11, Clearwater, FL.
- 12) JIS A 4706-2000, サッシ.
- 13) JIS A 4702-2000, ドアセット.
- 14) 上田宏, 日比一喜, 菊池浩利 : 風によって誘発される低層建築物の室内圧の性状. 日本風工学会誌, 第 33 巻, 第 3 号 (通号 116 号), pp.99-113, 2008.7.
- 15) Rice, S.O. : Mathematical analysis of random noise. Bell System Technical Journal, Vols.23 and 24 1945. Reprinted in N. Wax, Select Papers on Noise and Stochastic Processes, pp.133-294, Dover, New York, 1954.
- 16) Gamma distribution : [http://en.wikipedia.org/wiki/Gamma distribution](http://en.wikipedia.org/wiki/Gamma_distribution), 2011.6.7 参照.
- 17) Simiu, E. and Scanlan, R. H. : Wind Effects on Structures. 3rd Edition, John Wiley & Sons., pp.614-615, 1996.
- 18) Method of moments (statistics) : [http://en.wikipedia.org/wiki/Method_of_moments_\(statistics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Method_of_moments_(statistics)), 2011.6.7 参照.
- 19) Teleman, H.W., Ge, Z. and Haji, M.R. : Theoretically estimated peak wind loads. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 95, pp.113-132, 2007.
- 20) Grigoriu, M. : Applied non-Gaussian processes. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1995.
- 21) Sadek, F. and Simiu, E. : Peak Non-Gaussian Wind Effects for Database-Assisted Low-Rise Building Design. Journal of Engineering Mechanics, pp.530-539, 2002.5.
- 22) 建築物荷重指針・解説 (2004), 日本建築学会編.

(2011年10月8日原稿受理, 2012年3月2日採用決定)