C203

低層建物に作用する風力成分と流速場

菊池 浩利[○](清水建設(株)), 田村 幸雄(東京工芸大学), 日比 一喜(清水建設(株))

Wind force components on low-rise building models and flow fields

Hiroto Kikuchi, Yukio Tamura and Kazuki Hibi

ABSTRACT

In this paper, fluctuating surface pressure measurements are made for four flat roofed building models with square or rectangular plans in order to examine wind load combinations. The fluctuating pressures are integrated over all their surfaces and results are obtained as along-wind force, crosswind force, vertical force and torsional moment on their frames. The maximum wind force in consideration of the wind direction component and other simultaneously observed wind force components are examined, and some interesting facts regarding the wind force combinations are discussed on the basis of absolute value correlations, phase-plane expressions and so on. This investigation concurrently measured wind pressure applied to a wall surface and the resulting wind flow field around the building using a wind pressure model and DPIV systems. Data obtained through the measurements enabled identification of the wind flow field around the building that results from the maximum and minimum wind force applied to it.

Keywords: Low-rise building, Wind force correlation, DPIV

1. はじめに

建築物の設計では、風方向荷重、風直交方向荷重、振り風荷重などの各方向成分の組合せを考慮する必要があるが、高層建物については、Melbourne¹⁾、Vickery & Basu²⁾と Solari & Pagnini³⁾などによって検討されている。ちなみに、AS1170.2⁴⁾では風荷重の組合せについて考慮しているが、風直交方向の応答が平均値成分を持たず、その変動成分が風方向の応答より小さい場合は、風方向成分のみを考慮すれば良いとしている。ASCE7-98⁵⁾では60フィート以上の建物に作用する風荷重の組合せが考慮されており、75%の風方向荷重に、同じ値の風直交方向荷重を同時に作用させることとしており、振り風荷重についても考慮している。ところで、風方向の変動風力は、主に接近流の乱れによって発生し、風直交方向風力と振りモーメントの変動は渦による影響が支配的である。したがって、風直角方向風力と振りモーメントの間には強い相関があるが、風方向風力と他の2成分(風直角方向風力と振りモーメント)については相関が殆どないことが知られている。そのため、風荷重の組合せを考える場合、風直交方向風力と振りモーメントの相関は考慮されるが、風方向風力との組合せは無視されがちである。しかし、筆者らは、各風荷重成分の組み合わせを考える上

では、それぞれの絶対値同士の相関を考えるべきであり、風方向風力と振りモーメント、風方向風力と風直交方向風力の間にも、絶対値同士にはかなり相関があることを報告している。また、中低層建物に関しても、従来のように風方向荷重のみを考えた場合、柱の最大応力度が3割程度も過小評価されることを報告している^{6,7)}。なお、風方向風力が最大値をとる瞬間の壁面の風圧分布は、左右対称の平均風圧分布とは異なり、非対称な分布を示し、振りモーメントも同時に大きな値を示すことなども明らかにされている。

本報では、低層建物に作用する風力と建物周辺の流れ場の同時計測を行い、最大抗力発生時など、ある特徴的なタイミングでの流れ場の性状について考察を行った。

2. 風洞実験

2.1 風圧実験

図1に示す正方形平面を有する低層建物モデルを用いて、回流式境界層風洞で風圧測定を行った。風洞実験で用いた気流は、図2に示す縮尺1/250、平均風速の鉛直分布べき指数が $\alpha = 1/6$ である。検討対象とした風向は、壁面に正対する風向のみである。また、風圧測定点は、負担面積が等しくなるように壁面に一様に配置し、変動風圧のサンプリング間隔は $\Delta t = 1\text{kHz}$ とした。風圧デ

ータの導圧チューブの影響は、予め求めたゲインおよびフェイズ特性を用いて補正した。

建物に作用する変動風圧を空間積分することによって、風方向風力（抗力） F_D 、風直交方向風力（揚力） F_L 、鉛直方向風力 F_T 、風方向転倒モーメント M_D と風直交方向転倒モーメント M_L 、および振りモーメント M_T の各成分を求め、これらの風力成分を屋根高さの頂部平均速度圧 q_H と図 1 に示すディメンジョンを用いて無次元化した。見付幅を B 、奥行きを D 、建物高さを H として、抗力係数は $C_D=F_D/q_HBH$ 、揚力係数は $C_L=F_L/q_HBH$ 、振りモーメント係数は $C_T=M_T/q_HBHR$ である。ただし、 R は平面の対角線長さの半分、 $(B^2+D^2)^{1/2}/2$ である。

2.2 流れ場の計測

建物周辺の流れ場の計測は図 3,4 および表 1 に示す可視化画像流速計測 DPIV(Dynamic Particle Image Velocimetry)システムを用いて行った。DPIV 計測範囲は図 5 に示す模型周辺(40×50cm)の領域を 30×22.5cm の 4 分割して、サンプリング周波数 1 kHz、1 サンプル 3000 コマで各 10 サンプル（合計 30 秒）の、風圧力との流れ場の同時計測を行った。基本風速 36m/s として 30 秒を実時間に換算するとほぼ 50 分間に相当する。圧力と流れ場の同時測定は図 4 に示す圧力計測システムからトリガー信号を DPIV 用デジタルビデオカメラに送信して同期を制御している。計測に必要なトレーサ粒子は模型風下から放出し風洞内を回流させ均一に充満させた。測定された画像の検査領域単位は 32×32pixels として隣接する検査領域のオーバーラップは 50%として算定した。

3. 解析結果

3.1 壁面に作用する風力、風圧係数

図 6 に実時間 10 分のサンプルにおける抗力方向、揚力方向および振り方向の風力波形の一例を示す。この風力波形から最大荷重効果（例えば最大抗力係数 C_{Dmax} ）と、それが発生した瞬間に同時に発生している他の荷重効果（例えば揚力係数 $C_L(C_{Dmax})$ 、振りモーメント係数 $C_T(C_{Dmax})$ ）の組合せを選出して、○と●で示した。例えば、図 6 の最大抗力係数 C_{Dmax} が発生した時間 t_D におい

Table1 System configuration of DPIV

Equipment name	System configuration
High-speed Digital video camera	Name : PhantomV7
	Sensor type : SR-CMOS
	Framurat : 4800frame/s
	Number of pixels : 800×600 pixels
Double pulse laser	Name : Lee Laser
	Laser type : Nd:YAG Laser
	Wavelength : 532nm
	Repetition rate : 1000Hz
Particle generator	Name : PivPart40
	Particle diameter : 1 μ m

Fig.1 Wind pressure model Fig.2 Approaching flow

Fig.3 PIV set-up in wind tunnel

Fig.4 Configuration of PIV system

Fig.5 Measurement area of PIV system

て、ある程度の大きさの揚力係数 C_L (C_{Dmax}) が同時に発生している。最大振りモーメント係数 C_{Tmax} が発生した時刻 t_T では、振りモーメントと一般に高い相関を持つ揚力係数 C_L (C_{Tmax}) は比較的小さな値となっている。一方、振りモーメントとの相関が小さい筈の抗力係数 C_D (C_{Tmax}) は、その最大値と同程度の高い値が発生している。これらの事実は、風力の各成分の最大値同士の相関は、必ずしも一般の相関係数では説明できず、正負を無視した絶対値の相関の重要性を示唆している。

図 7 に風力の組合せの位相平面表示の一例を示した。図 7(a), (c) は C_D-C_L , C_L-C_T の組合せであり、(a) は傾きの無い楕円形になっており、無相関に近い状態を示し、(c) はやや菱形に近い軸の傾いた楕円形である。一方、図 7(b) の C_D-C_T は、原点を頂点とする楔形をしており、振り最大時に抗力が最大に近い値をとる傾向が確認できる。抗力最大時には、振りモーメントは最大から最小のどのような値でもとり得ることが分かる。

図 8 に各風力成分の最大および最小風力が発生した瞬間の風圧分布の例を示す。図 8(a) は、最大抗力 C_{Dmax} が発生した瞬間の風圧分布であり、図 7(a) の C_D-C_L の図中に示した○の位置での瞬間風圧分布である。図 8(a) の矢印は、この瞬間に同時に発生している振りモーメントの回転方向である。ちなみに、図 8 の結果は実時間換算 10 分間毎の最大値を対象として得られたものであるが、

図 7 は、実時間換算 50 分間のデータをまとめて示している。風上側の壁面に作用する正圧は一樣に大きくなっている。側面の風圧分布は、振りモーメントの向きに応じて風上前縁で局所的に大きな負圧が現れている。図 8(b) は最小抗力 C_{Dmin} が発生した瞬間の風圧分布（壁面の風圧分布は、図 8(a) の 2 倍のスケールで表示している）を示した。これらの分布は図 7(a) の C_D-C_L の図中に示した□の位置での瞬間風圧分布である。抗力に寄与する風上面、風下面での正圧および負圧はともに非常に小さな値であり、両側面の負圧も小さく、左右ほぼ同程度の値となっている。図 8(c) は、最大振りモーメント C_{Tmax}

Fig.6. Maximum wind force component (○) and accompanying other wind force components (●)

(a) $C_D - C_L$

(b) $C_D - C_T$

(c) $C_L - C_T$

(a) Instances when the maximum along-wind force was observed

(b) Instances when the minimum along-wind force was observed.

(c) Instances when the maximum torsional moment was observed

Fig.7 Phase-plane expression of wind force combination Fig.8 Instantaneous wind pressure distributions causing maximum/minimum wind force components (5/8)H

が発生した瞬間の風圧分布の例であり、図 7(b)の C_D-C_T の図中に示した△の位置での瞬間風圧分布である。風上側壁面の風圧分布は一方に傾き、側面でも振りモーメントの向きに応じて風上前縁で局所的に大きな負圧が発生し、図 8(a)の最大抗力発生時の分布と類似している。

3.2 建物周辺の流れ場

図 9 に DPIV システムで測定した流れ場を示しており、図 5 で示した各領域別に同時測定された流れ場と壁面風圧を用いて各風力成分の最大あるいは最小の値が発生した瞬間の流れ場を振りモーメントの符号を適合させてアンサンブル平均 (実時間 10 分間相当 5 サンプル) した。図 9(a) は最大抗力が発生した瞬間の流れ場である。壁面の風圧分布は図 8(a) に示した瞬間風圧分布を全データに関してアンサンブル平均 (実時間 10 分間相当 20 サンプル) したものである。流れは前縁の隅角部から剥離しており、左側 (上) では風上側前方で再付着し、負圧も大きくなっている。右側 (下) では、側面後方まで渦が移流した影響で負圧の領域が後方まで広がっている。図 9(b) は最小抗力が発生した瞬間の流れ場である。建物周辺の流れ場は概ね左右対称となっており、図 9(a) と比較して風上側の風速が全体的に小さな値となっている。図 9(c) に最大振りモーメントが発生した瞬間の流れ場を示す。風上側の流れ場はやや左側 (上) に傾いているおり、隅角部から流れが剥離する様子が明確で、壁面でも大きな負圧が発生している。また、流れ場が再付着する付近で圧力が回復している様子が観察できる。

4. まとめ

低層建物に作用する風圧力と流速場の同時計測を行った。その結果、最大/最小風力発生時の風圧分布と流れ場の性状、特に風力が非常に減少する建物まわりの流れ場の性状を確認することができた。また、壁面風圧係数分布や DPIV を用いた流速場の測定結果の比較がなされ、両者の対応が確認された。

参考文献

- 1) Melbourne, W.H. (1975), Probability distributions of response of BHP house to wind action and model comparisons. *J. of Industrial Aerodynamics* 1:2, 167-175
- 2) Vickery, B.J. and Basu, R.I. (1984), The response of reinforced concrete chimneys to vortex shedding. *Engineering Structures*, 6, 324-333.
- 3) Solari, G. and Pagnini, L.C. (1999). Gust buffeting and aeroelastic behaviour of poles and monotubular towers. *J. of Fluid and Structures* 13, 877-905.
- 4) AS 1170.2-1989. (1989). The Australian Wind Loading Standard. SAA
- 5) ASCE 7-98. (2000). Minimum Design Loads for

Buildings and Other Structures. ASCE

- 6) Tamura, Y., Kikuchi, H. and Hibi, K. : "Wind load combinations and extreme pressure distributions on low-rise buildings", *Wind and Structures, An International Journal*, 3:4, 279-289, 2000
- 7) 菊池浩利, 田村幸雄, 日比一喜: "低層建物の風荷重の組合せに関する研究", 日本建築学会構造系論文集, 第 551 号, pp.13-20, 2002 年

(a) Instance when maximum along-wind force was observed

(b) Instance when minimum along-wind force was observed

(c) Instance when maximum torsional moment was observed

Fig.9 Ensemble-averaged instantaneous wind pressure distributions and flow fields causing maximum/minimum wind force components