論文

建物頂部における風速特性変動に関する実験的研究 Wind tunnel study on the flow characteristics variation over a building

崔 恒*¹ 神 田 順*²
Hang CHOI Jun KANDA

SUMMARY

One of the difficulties in full scale measurements in urban area exists in the installation of an anemometer at an appropriate position without any influences of the obstacles. In order to determine the appropriate measuring position above the building and to provide a basic reference of influence correction, wind tunnel studies were carried out for several building models which are considered as typical building shapes in urban area. As a result, variations of the mean wind velocity profile and turbulence intensity profile, and of the spectral density distributions are presented and discussed comparing with those of the original flow free from the obstacles.

1. はじめに

近年、軽量構造材の発展と共に建物の高層化が進められ、風荷重の考慮が不可欠なものとなってきている。合理的な風荷重の評価のための自然風観測の重要性が強調され、これまで様々な地形に対する数多くの自然風観測が行われてきた。また、

これらの観測結果は数学的モデルの形で荷重評価規準等に取り入れられているが、それらのほとんどが主に平坦地域で観測された結果に基づいたものであるため実際に、市街地など具体的な特定の地域に適用するにはその地域における観測記録を用いて確かめる必要がある。しかし、建物の頂部

*1 東京大学大学院生

Graduate student, University of Tokyo

*2 東京大学工学部、助教授

Associate Professor, University of Tokyo

(平成元年2月22日受理, 討論期限: 平成元年7月31日)

を利用して観測が行われている市街地の場合、風速計の取り付けられている建物や周辺の障害物の影響を受けないような観測地点の設定が難しいため観測事例が少なく、さらに観測地点の設定が測定する側の経験的判断に大きく依存されているため、取られた記録の信頼性が問われることもしばしばある¹⁾。一方、障害物による流れの特性への影響に関してはいくつかの理論的または実験的研究成果が報告されているものの、それらのほとんどが渦の形成発達等、流体の動適メカニズム²⁾や建物後部での流れの変化³⁾および汚染物の拡散またはいわゆるビル風と言った環境的問題に関するものであって⁴⁾、適切な観測地点の設定や記録への影響等、測定する側の苦情に関わりの大きい建物頂部における流れ特性の変化に関してはあまり検討されておらず、基本的資料の蓄積が要求されているのが現状である。

本論文においては市街地における建物の代表的な形と思われる形状の模型に対する複数の条件での風洞実験結果を基に、観測された特性への建物の影響及びその影響範囲に関して検討し、適切な測定位置の設定に関する基本的な資料の提供を試みる。

2. 実験概要

2. 1 模型の形状および寸法

実験に用いられた模型は正方形と長短比2:1の長方形断面を有するものである。正方形の場合は2つの風向に対して実験を行い、風向の違いによる記録の統計的特性の変化について考察する。一方、長方形に対しては異なる2つの場所に塔屋がある場合とない場合に対して検討を行った。模型の形状および寸法をまとめてTable 1に示す。

2. 2 使用風洞および風洞気流

実験は建設省建築研究所の乱流境界層風洞（測定部の高さ2.5m,幅3.0m,長さ25.0m）で行った。気流の作成に当たっては高さ約1.0mの三角形スプイヤーと50×50×50mmおよび30×30×30mmの粗度ブロックを用いた。作成された乱流境界層の高さは約90cm程度で、平均風速の鉛直分布特性はべき指数0.23のべき指数分布で表わされる。また、境界層高さにおける平均風速は約8.4m/sであり、模型頂部高さでの乱れの強さは約10%である。これらの値は高密度市街地を対象とする場合には若干小さめであるが、中小都市に対しては概ね適していると思われる。Fig. 1と2に作成気流の平均風速と

Table 1. 実験模型の形状と寸法
(Dimensions and shapes of building model)

MODEL	A	B	C	D	E
SIZE	100 X 100 X 200 mm		100 X 200 X 200 mm		
WIND DIR. AND MODEL SHAPE
PENT HOUSE SIZE 50 X 50 X 40 mm

Fig. 1 平均風速と乱れの強さの鉛直分布
(Profiles of mean velocity and turbulence intensity)

Fig. 2 風洞気流のパワースペクトル密度特性
(Power spectral density of simulated flow)

乱れの強さの鉛直分布および模型頂部高さにおける変動風速のパワースペクトル密度分布を示す。

2. 3 測定点と測定データの概要

変動風速の測定に当たっては I 型熱線風速計を用いて行われた。風速計からの電圧信号はパソコンによって制御される A/D 変換器を介して 60 秒単位に測定されており、変換器におけるサンプリング周波数は 100 Hz である。次に、模型頂部における変動風速の測定点の数は CASE A, B の場合それ

ぞれ 15 点と 18 点であり、C, D, E の場合は 9, 12, 18 点ずつである。また、高さ方向の影響範囲を調べるため 6 つの高さでの測定を行った。

3. 実験結果

3. 1 解析方法

障害物の影響による流れ特性の変化は一般的に (1) 平均風速の増減, (2) 乱れの強さの増減, および (3) 変動風速のパワースペクトル密度分布の変化によって特徴付けられよう。それゆえ、実験結果の解析において、平均風速と乱れの強さの場合には式 (1) と (2) で表わされる模型のない場合の特性に対する相対的变化をもって検討した。また、式における添字 0 は Fig. 3 に示すように模型のない場合の特性を表す。

$$\Delta_u = \frac{U(z) - U_0(z)}{U_0(z)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\Delta_i = \frac{\sigma(z)}{U(z)} - \frac{\sigma_0(z)}{U_0(z)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

一方、スペクトル特性の変化に関してはパワースペクトル密度関数が単位面積を有する場合、即ち分散で除して基準化してある場合は一般的な確率密度関数として取り扱えるので式 (3), (4), (5) で

Fig. 3 座標系および記号
(Coordinate system and nomenclature)

定義される周波数の中央値、平均値、および標準偏差を用いることが有効であり⁵⁾、平均値と標準偏差の相対的変化を調べるには式(7)、(8)を用いた。

$$f_m = F_s^{-1}(0.5) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、

$$F_s(f_1) = \int_0^{f_1} \tilde{s}_u(f) df$$

$\tilde{s}_u(f)$: 規準化パワースペクトル

$$\Omega_1 = \frac{\int_0^{f_c} f \cdot s_u(f) df}{\int_0^{f_c} s_u(f) df} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\Omega_3 = \sqrt{\Omega_2^2 - \Omega_1^2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 f_c はローパスフィルターにおける遮断周波数であり、 Ω_2 は次式で定義される。

$$\Omega_2 = \left(\frac{\int_0^{f_c} f^2 \cdot s_u(f) df}{\int_0^{f_c} s_u(f) df} \right)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\Delta_{\Omega_1} = \frac{\Omega_1 - \Omega_1^0}{\Omega_1^0} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\Delta_{\Omega_3} = \frac{\Omega_3 - \Omega_3^0}{\Omega_3^0} \quad \dots\dots\dots (8)$$

3. 1 平均風速の変化

模型頂部におけるY、Z方向の平均風速の変化に関する代表例をFig. 4に示す。図における○は式(1)で定義される模型のないときの平均風速に対する相対的増減を表す。Z方向の変化に関しては風向が模型面に対して直角であるCASE Aの場合、模型による影響範囲が最も高く、相対的増減が10%以下になるまでにはかなりの高さが必要とされる。一方、風向が模型面に対して45°であるCASE

Bの場合は影響範囲がCASE Aと比較してかなり低く、ほとんどの測定点で10%以下の相対的増減を示している。また、CASE Aにおいて、最も大きい平均風速の加速はスパン中心上の約スパン半分の高さを通る放物線上に認められ、その大きさは20%前後である。このような傾向はCASE C,D,Eにおいても同様である。次に、Y方向の変化については模型中心から離れて行くほど相対的変化が小さくなり、平均風速の最大加速値が現れる高さも低くなる。

3. 2 乱れの強さの変化

乱れの強さに対するY、Z方向の変化の一例をFig. 4に示す。図における●は式(2)で定義される相対的増減を表す。模型によるZ方向の影響範囲の変化に対する一般的傾向は平均風速に対するものと同様であるが、平均風速の最大加速が現れる高さ以上での変化はほとんど認められず、CASE A,C,D,Eにおける剝離領域では乱れの強さの増加が40%に達している。しかし、CASE Bの場合すべての観測点での変化は5%以下であり、平均風速の場合と同じく模型による影響は少ない。一方、Y方向に対する変化の一般的傾向は平均風速の場合と同様である。

3. 3 スペクトルの統計的特性値の変化

模型による変動風速のパワースペクトル密度分布および周波数の中央値に関する変化の一例をスペクトルの累積分布関数を用いてFig. 5に示す。図において、波線は模型のないときのスペクトルの累積分布関数と周波数の中央値を表す。結果において、低い測定点では模型の影響のない場合と比較して中央値がかなり大きくなっており、高さが高くなるにつれてその違いは小さくなる。また、平均風速の増加が10%以下の高さにおいては中央値の違いが若干見られるものの、累積分布関数の形状はほぼ一致する。参考としてFig. 6に異なる

Fig. 4 平均風速と乱れの強さの変化
(Mean velocity and turbulence intensity variations)

Fig.5 スペクトルの累積分布関数および周波数の中央値の変化
(Variations of spectral cumulative distribution functions and median frequencies)

Fig.6 異なる周波数の中央値に対するパワースペクトル密度関数
(Comparison between power spectral density distributions with different median frequencies)

中央値に対するパワースペクトル密度分布関数の一例を示す。一方、式(4)、(5)で定義される周波数の平均値および標準偏差の変化を調べ、それらの結果をFig. 7に示す。結果から、式(7)、(8)で定義される Ω_1 と Ω_3 の変化傾向は互いに似ており、特に周波数の標準偏差に関する変化傾向は乱れの強さに対するものとはほぼ一致する。また、CASE Bに対する統計的特性値それぞれの変化についてはFig. 4に示した平均風速、乱れの強さの場合と同じく大きな変化は認められない。

4. まとめ

実験結果のまとめとして次の5つの値による境界線を示すことができる。

Fig. 7 周波数の平均値と標準偏差の変化
(Variations of the mean and standard deviation frequency)

- (1) 平均風速の増加と減少との境界線 ($\Delta u = 0$)
- (2) 平均風速に対する相対的変化の絶対値が10%以下になる境界線 ($\Delta u = \pm 10\%$)
- (3) 乱れの強さに対する相対的変化が5%以下になる境界線 ($\Delta i = 5\%$)
- (4) 周波数の平均値に対する相対的変化が20%以下になる境界線 ($\Delta \Omega_1 = 20\%$)
- (5) 周波数の標準偏差に対する相対的変化が20%以下になる境界線 ($\Delta \Omega_3 = 20\%$)

5つの実験モデルに対するこれらの境界線それぞれをFig. 8~12に示す。Fig. 8における境界線はFig. 11, 12から予想できるような広帯域スペクトル特性をもつ高周波変動成分によって乱れの強さがかなり増加する剝離領域との境界を表していると思われる。一方、平均風速はFig. 9で示した境

界線の上部領域において加速されることがあるが、その時Fig. 8で示した境界線の上部領域における乱流特性の変化は少ない。更に、Fig. 8とFig. 9を比較するに当たって後者における境界線の高さが前者のそのものより低い場合、Fig. 9における境界線は-10%を指すことに注意されたい。

これらの考察結果に基づいて次のような3つの領域が考えられる。

- (Ⅰ) 剝離領域-この領域における観測記録の信頼性は保証し難い。
- (Ⅱ) 加速領域-この領域は信頼性のある記録を得るには適していないが、今回の風洞実験結果を参考にしての修正は可能である。
- (Ⅲ) 推奨領域-この領域における平均風速の増減は10%以下であり、変動風速のスペクトル特性の

Fig. 8 各模型に対する平均風速増減の境界
(Boundary between mean velocity increasing and decreasing zone)

Fig. 9 平均風速の $\pm 10\%$ 変動に対する境界
($\pm 10\%$ variation boundary of mean velocity)

Fig. 10 乱れの強さの5%増加に対する境界
(Boundary for 5% increase of turbulence intensity)

Fig. 11 周波数の平均値の20%増加に対する境界
(Boundary for 20% increase of mean frequency)

Fig. 12 周波数の標準偏差の20%増加に対する境界
(Boundary for 20% increase of standard deviation frequency)

変化はほとんどない。

領域ⅠとⅡとの概略的な境界はFig.8に示した境界線に相当し、領域ⅡとⅢとの境界はFig.9に示したものに相当すると思われる。また、風速計を設置するに当たっては塔屋を十分活用することが望ましいが、塔屋が屋上の中央に位置している場合はFig.9から予測されるように平均風速が大きく変動することがあり、平均風速の評価のためには何らかの修正を行わなければならない。

今回の風洞実験による結果は限られた状況で得られたものではあるが、市街地での観測を行う際、

適切な測定位置の設定および測定記録の修正に基本的な資料として活用できると思われる。

謝 辞

本研究を実施するに当たり、建設省建築研究所の岡田恒博士より多大なる御協力を頂いた。また、実験の実行に際しては東京大学大学院生小林創氏に御協力を頂いた。ここに記して深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 崔 恒, 神田順『高密度市街地における平均風速鉛直分布に関する予備的検討』日本建築学会学術講演梗概集, 昭和61年, pp65~66
- 2) J. C. R. Hunt, C. J. Abell, J. A. Peterka, H. G. C. Woo "Kinematical studies of the flow around or surface-mounted obstacles : applying topology to flow visualization" Journal of Fluid Mechanics, 86, 1978, pp179~200
- 3) J. A. Peterka, R. N. Meroney, K. M. Kothari " Wind flow patterns about buildings " Journal of Wind Eng. and Industrial Aerody. , 21, 1985, pp 21~38
- 4) N. Isyumov, A. G. Davenport " The ground level wind environment in built-up areas " Proc. 4th ICWE, Cambridge University Press, 1977, pp 403~421
- 5) E. Vanmarcke " Random Fields - Analysis and Synthesis " MIT Press, 1984, pp138~183