論文

建物周辺，表面の変動圧力場に関する数値解析と風洞実験

Numerical and experimental study on unsteady pressure field around cubes

村上 周三^{*1}， 日比 一喜^{*2}， 持田 灯^{*3}

Shuzo MURAKAMI, Kazuki HIBI, Akashi MOCHIDA

SUMMARY

In this paper, fluctuating pressure fields around cubes are examined using both numerical simulations and wind tunnel tests. 3D, time-dependent numerical simulations based on Large Eddy Simulation were carried out in order to clarify the relation between the structures of unsteady flowfields around cubes and the fluctuating surface pressure fields. Accuracy of the numerical simulation was assessed by comparing the numerical results with the results of wind tunnel tests using the Multi-Channel Simultaneous Pressure Measuring System. It was confirmed that the shapes of the numerically predicted spectra of fluctuating drag and side forces correspond very well to those of experimental data. Furthermore the numerical simulation can reproduce the characteristic pattern of the surface pressure fluctuations rather well.

It was observed from the numerical results that the sharp peak appears in the wave pattern of the side force fluctuation when a large scale vortex occurs in the separated flow region near the side wall.

1. はじめに

立方体ブロックにより構成される均等な街区モデル

本研究では多点圧力同時測定システムを用いて

ル中の建物表面の非定常な圧力分布を測定した。

-
- * 1 東京大学生産技術研究所，教授，工博
Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo, Prof., DR.
  - * 2 清水建設技術研究所
Institute of Technology, SHIMIZU Corp.
  - * 3 東京大学生産技術研究所，助手，工博
Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo, DR.
- (本稿受理：平成元年12月15日)

一方LESに基づく数値解析から流れ場の圧力及び建物表面風圧の分布を求めた。次に両者を関連づけて考察し、建物近傍の圧力に関わる乱流現象を解析することを試みた^{文(1),(2)}。

これらの建物表面や空間の非定常な圧力分布は構造物の振動や建築物の換気に関わる現象を解明するための基礎資料として重要である。これらの問題に関して過去さまざまな研究がなされてきたが十分に定量的な考察がなされるには至っていない。

本報では風洞実験と数値解析の比較検討により、建物前後差圧及び建物側壁面差圧の非定常な時間変動を考察し、この中に見いだされる特徴的なパターンに着目した。又、この時点のデータを抽出し、スペクトル解析等の統計処理だけでは把握することが困難な流れ場の圧力や流速の空間分布と壁面風圧分布のパターンとの関係を詳しく調べた。またこれらの現象に関わって生じる建物角部から発生する剥離領域の中の渦の非定常な時間変化について検討した。

2. 数値解析の概要

2.1 計算対象

Fig. 1に示す隣棟間隔 $3H_b$ の街区を対象としている。この中の1つのユニットを対象にして解析した。この $3H_b$ 街区は、一般的にストリートキャニオンと言われている隣棟間隔 $1H_b$ 程度の街区と、隣棟間隔が非常に大きい独立に近い建物の中間的な性質を有し、風工学的にも興味深い対象と考えられる^{文(3)}。

Fig. 1 : 街区モデル ($3H_b$ 街区)

2.2 基礎方程式

Large Eddy Simulation (以降LES) を用いて3次元乱流の数値解析を行った。以下にLESの基礎式を示す。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\bar{P}}{\rho} + \frac{2}{3} k \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\nu + \nu_{SGS}) \bar{e}_{ij} \quad (2)$$

但し、

$$\nu_{SGS} = (C_s \Delta)^2 \cdot \left(\frac{\bar{e}_{ij}^2}{2} \right)^{1/2}, \quad C_s = 0.1$$

$$e_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}, \quad i, j = 1, 2, 3$$

なお、フィルタリングにはトップハット・フィルターを用いている。詳細は文献^{(4),(5),(6)}を参照されたい。

2.3 メッシュ分割

Fig. 2に示す $52(x) \times 55(y) \times 45(z) = 128,700$ の差分格子を用いている。屋根面、側壁面の風上側角部周辺には、メッシュ幅 $1/40H_b$ の細かい格子を、建物壁面から $0.3H_b$ 離れた距離まで配置している。

2.4 差分スキーム

時間にはAdams-Bashforthスキーム、空間には2次精度の中心差分を用いている。また、メッシュ系はスタガードメッシュを用いている。

2.5 境界条件

流れ方向(x)、流れと直交方向(y)に周期境界条件を用いている。この周期境界条件を用いることにより計算領域中に建物を1つのみ定義するだけで、近似的に複数の連続した街区と見なすことが可能である。また地上面、建物壁面に指数 $1/2$ のpower lawを用いた境界条件^{文(6)}を使用している。上空面はfree slipではなく、指数 $1/4$ のpower lawで近似される鉛直速度分布が連続しているものとした境界条件を与えている。また、ここでは流れ

Fig. 2 : メッシュ図

方向に圧力損失 $\Delta P / \rho < \overline{u_b} >^2 = 2.2 \times 10^{-5}$ を与えている。

3. 風洞実験の概要

1辺10cmの立方体模型を30cm間隔で横6列、流れ方向に47列配置し、風上側より44列目に圧力測定用の模型を設置した。圧力測定点は模型各面に $8 \times 8 = 64$ 点、模型全面で320点である。非定常圧力測定は1.5msecの時間間隔で行ない、全測定点同時計測を行っている。なお計測システムの詳細は文献⁽⁷⁾、⁽⁸⁾、⁽⁹⁾、⁽¹⁰⁾を参照されたい。ここで模型高さ H_b (10cm)、棟高風速 $< u_b >$ (建物風上 $1H_b$ の位置で11.2m/s) によるレイノルズ数は 8×10^4 となっている。無次元化は建物高さ (H_b) と棟高風速 ($< u_b >$) を用いて行っている。

4. 建物前後差圧、側面差圧の波形、スペクトル

筆者らの既往の研究⁽⁴⁾、⁽⁵⁾、⁽⁶⁾では主として風速変動の性状について、数値解析と風洞実験により調べ、両者がよく対応することを既に確認した。

Fig. 3(1)に風洞実験の建物前後差圧 ΔP_D (風上面-風下面) の変動波形、(2)に数値解析のそれを示す。またFig. 4(1)に風洞実験の建物側面差圧 ΔP_L (ここでは左側壁面-右側壁面) の変動波形、(2)に数値解析のそれを示す。これらの波形を得るための計算量は膨大で、計算ステップで約30万、VP100クラスのスーパーコンピュータで約50~100時間を要するため、今回の計算は無次元時間 $t^* = 125$ で止めた。

ここで風洞実験におけるサンプリングは1.5msecの時間間隔で2048個の波形データを収録している。また数値解析におけるサンプリングは計算時間間隔0.0003 ($< \overline{u_b} >$ と H_b による無次元時間) に対して、100ステップ間隔で波形データを収録しており、フィルタリングは行っていない。従って風洞実験の無次元化されたサンプリング間隔 Δt^* は $0.0015(\text{sec}) \times 11.2(< u_b >, \text{m/s}) / 0.1(H_b, \text{m}) = 0.16$ となる。一方、数値解析の無次元化されたサンプリング間隔 Δt^* は $0.0003 \times 100 = 0.03$ となる。数値解析の最大メッシュ幅0.2及び最小メッシュ幅0.025を棟

(1) 風洞実験

(2) 数値解析

Fig. 3 : 建物前後差圧 ΔP_D の変動波形

(1) 風洞実験

(2) 数値解析

Fig. 4 : 建物側面差圧 ΔP_L の変動波形

高風速 $\langle \bar{u}_b \rangle \approx 0.6$ の流体が通過する無次元時間はそれぞれ 0.3 及び 0.04 となる。従って最小メッシュ幅で決まる最も小スケールの変動を捉えるサンプリング時間間隔として、0.03 前後の値は適当であ

ると考えられるが、むしろもっと粗いサンプリング間隔を採用することも可能である。一方、実験のサンプリングは、中間的なメッシュスケールに対応するものとなっている。

風洞実験における建物前後差圧の波形 (Fig. 3 (1)) を見ると圧力差が他の時点に比べてかなり大きくなる時点が間欠的に出現している。これらの現象は建物側面差圧の波形 (Fig. 4(1)) にも見られる。側面差圧が大きくなる時点は前後差圧が大きくなる時点に同期している。ただし前後差圧が大きくなる全ての時点で側面差圧が大きくなってはいない。

風洞実験の側面差圧の波形 (Fig. 4(1)) を見ると前後差圧のような長周期の変動は顕著ではないが、やや周期性を持った変動 (無次元時間5程度の周期) が顕著に認められる。数値解析における側面差圧の変動 (Fig. 4(2)) にも風洞実験と同様の大きなピーク値を持つ差圧変動が間欠的に現れている。また、風洞実験と同様に、やや周期性をもった無次元時間5, 程度の周期の変動が見られる。

Fig. 5 : 建物前後差圧 ΔP_D 変動のスペクトル

Fig. 6 : 建物側面差圧 ΔP_L 変動のスペクトル

Fig. 5に建物前後差圧の変動スペクトル, Fig. 6に建物側面差圧の変動スペクトルを示す。側面差圧の変動スペクトルは前後差圧の変動スペクトルに比べて狭帯域であり、スペクトルピークもやや高周波側に偏っており、この傾向は風洞実験と数値解析でよく一致している。このように風洞実験と数値解析の変動スペクトルの一致は概ね良い。

5. 風洞実験における壁面の変動風圧係数分布の解析

Fig. 7(1), (2), (3)にFig. 4(1)の ΔP_L の変動波形に示した(a)~(c)の3時点における風洞実験の建物表面の風圧係数 C_p の瞬時分布を示す。Fig. 4(1)の(c)時点は他の時点に比べて正の差圧のピーク値が大きくなっている時点で、Fig. 7(3)にその時点における建物表面の風圧分布を示す。(b)時点は(c)時点とは逆に、負の差圧のピーク値の大きな時点を抽出した。(a)時点は(b)時点に隣接した正の差圧のピーク値を示す時点が抽出されている。負圧の値が-1.0を示す領域に着目して各時刻を比較すると、(c)時点と(a)時点では全壁面で大変よく似ており、特に風上側から見て右側の側壁面で-1.0の負圧が大きな領域を占めていることが特徴である。(b)時点の圧力のパターンは(a)時点とは反対の左側側壁面で-1.0の負圧が大きな領域を占めている。

風上面の風圧分布は(a)と(c)が似ているが(b)は異なっている。屋根面の風圧分布についても(a)と(c)は大変よく似ている。

6. 数値解析による流れ場の圧力分布と建物表面の圧力分布の解析

Fig. 8~10に、Fig. 4(2)の建物側面差圧 ΔP_L の変動波形に示した(d)~(f)の3時点における数値解析の建物表面と流れ場の圧力の瞬時分布を示す。またFig. 11に(d)時点、すなわち右側で剝離渦の大きく出ている時点における風速ベクトル図を示

(1) 図 4(1) の (a) 時点 (壁面の左右は風上から見た方向)

(2) 図 4(1) の (b) 時点

(3) 図 4(1) の (c) 時点

Fig. 7 : 建物表面風圧係数 C_p の分布 (風洞実験における瞬時値)

(1) 建物表面圧 $\bar{P}_w$ と流れ場の圧力 $\bar{P}$ の3次元表示

(2) 流れ場の圧力 $\bar{P}$ の水平面 ($Z = Hb/2$)

Fig. 8 : 建物表面圧 $\bar{P}_w$ と流れ場の圧力 $\bar{P}$ の分布
(数値解析による瞬時値, Fig. 4(2)の(d)時点)

(1) 建物表面圧 $\bar{P}_w$ と流れ場の圧力 $\bar{P}$ の3次元表示

(2) 流れ場の圧力 $\bar{P}$ の水平面 ($Z = Hb/2$)

Fig. 10 : 建物表面圧 $\bar{P}_w$ と流れ場の圧力 $\bar{P}$ の分布
(数値解析による瞬時値, Fig. 4(2)の(f)時点)

(1) 建物表面圧 $\bar{P}_w$ と流れ場の圧力 $\bar{P}$ の3次元表示

(2) 流れ場の圧力 $\bar{P}$ の水平面 ($Z = Hb/2$)

Fig. 9 : 建物表面圧 $\bar{P}_w$ と流れ場の圧力 $\bar{P}$ の分布
(数値解析による瞬時値, Fig. 4(2)の(e)時点)

す。数値解析でもFig. 7の風洞実験同様、他の時点と比較して差圧のピーク値が大きくなっている時点に着目して抽出した。(e)時点の前後では差圧のピーク値はそれほど大きくないが変動にやや周期性が認められる(周期は無次元時間で5程度)。また(f)時点の前後の変動は(e)時点前後の変動と類似しているがその周期は多少長くなっている。Fig. 8に示す数値解析の建物表面の圧力分布を見ると風洞実験のFig. 7(1)に見られるような大きな負圧領域が建物右側の側壁面に現れている。これはFig. 11に示す数値解析の風速ベクトル図に見られる建物右側角部近傍の非常に大きな剝離渦に対応しているものと思われる。Fig. 9の時点では建物角部の剝離渦は小さく両側面の剝離渦の規模の差もあまり大きくないため差圧は小さくなっている。Fig. 10の時点も剝離渦の規模はそれほど大きくないが他の時点と異なるのは角部から下流にかけて小規模の剝離渦が連続して生じていることである。

Fig. 11：風速ベクトル図

($Z = H_b/2$ の水平断面における瞬時値，Fig. 4の(d)時点，Fig. 8に対応)

このような手法で数値解析と風洞実験の表面圧力のパターンを比較すれば，例えば大きな差圧のピーク値を示す時点に着目すると，(1)片側の側壁面に大きな負圧の占める領域が広くなること，(2)風上面の正圧の大きな値を占める領域が大きな負圧の生じる壁面とは反対側の側壁面の角部に偏って発生する点など，両者の圧力分布の特徴がよく一致していることがわかる。

7. 数値解析による剝離渦の非定常変動

Fig. 12にFig. 4(2)に示した(d)時点の前後6時点の連続的な剝離渦の挙動を表示する。Fig. 12(4)が(d)時点に対応している。風上からみて左側面の負の圧力領域(Fig. 12(1))が時刻の経過と共に弱まり，反対側の負の圧力領域が逆に強まって行く(Fig. 12(4))状況がよく観察される。渦の発生から消滅までは無次元時間 t^* で約10~20程度である。側面差圧の最も大きくなる(d)の時点で右側の負圧の領域が最も大きくなり，その後徐々に減衰して行き最後は非常に小さな渦に分解される。このような圧力場の空間分布の解析は，数値解析によりはじめて可能となったものである。

8. 結 論

数値解析と多点圧力測定システムを併用することにより街区周辺の圧力を中心とした乱流場の変動性状について以下に示す多くの知見を得た。

1. 多点同時圧力測定システムにより街区モデルの建物表面の非定常変動圧パターンを実験により初めて測定した。また数値解析により建物表面のみでなく空間の圧力場の変動性状を明らかにした。
2. 建物前後差圧，建物側面差圧の変動波形は風洞実験と数値解析との間で定性的に似た傾向を示す。また壁面風圧分布の変動の性状も，実験と数値解析でよく似たパターンを示す。
3. 実験における側面差圧のスペクトルは前後差圧のスペクトルに比較して狭帯域であり，やや高周波側に偏っている。これらの特徴は数値解析でよく再現されている。
4. 風洞実験により建物表面圧力，数値解析により建物表面圧力及び流れ場全体の圧力場を解析し，建物側面差圧が大きくなる時点では建物角部に大きなスケールの剝離渦が存在することが確認された。

Fig. 12 : 剥離域における渦の非定常変動 (数値解析)

5. 建物側面差圧が大きなピーク値を示す前後の建物角部の剝離渦の発生から消滅の過程を、数値解析に基づく流れ場の圧力の分析により明らかにした。発生から消滅までは無次元時間 t^* で10~20程度の長さであった。
6. 建物側面差圧の値がそれほど大きくない状態において、差圧が小さなピーク値を示す時の流れ場の圧力場を観察すると、小規模の剝離渦が建物角部から下部にかけて連続して存在している状況が観察された。

なお、本報で紹介した変動圧パターンは膨大なデータのごく一部であり、今後これらの計算値、実験値の連続画像を観察することにより、さらに多面的な考察を行いたいと考えている。

参考文献

- (1) 村上, 日比, 持田, LESによる街区周辺の流れ場の数値解析と風洞実験 (その7) 建物表面, 周辺の圧力分布の検討 日本建築学会大会学術講演稿概集, 1989. 10
- (2) 村上, 日比, 持田, LESによる街区周辺の流れ場の解析と風洞実験建物周辺および表面の圧力場の検討 日本風工学会誌, 第41号, 1989. 10
- (3) 村上, 持田, 日比, LESによる街区周辺の流れ場の数値解析と風洞実験 (その3) 隣棟間隔の変化が流れ場に及ぼす影響 日本建築学会大会学術講演稿概集, 1988. 10
- (4) 村上, 持田, 日比, Large Eddy Simulationによる建物周辺気流の3次元数値解析 (その1) 日本建築学会計画系論文報告集, Vol. 2, pp1-11, 1986
- (5) Murakami, S., Mochida, A., Hibi, K., Numerical Prediction of Velocity and Pressure Field around Building Models, 7th Int. Conference on Wind Eng., 1987. 7
- (6) Murakami, S., Mochida, A., Hibi, K., Three-Dimensional Numerical Simulation of Air Flow around a Cubic Model by Means of Large Eddy Simulation, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol. 25, 1987, pp291-305
- (7) 藤井, 日比, 上田, 非定常風圧力の多点同時測定方法と建物模型への応用について, 風工学シンポジウム, 1986. 12
- (8) 藤井, 日比, 上田, 多点圧力同時測定システムを用いた角柱表面の変動圧の可視化, 流れの可視化, Vol. 7, No. 26, 1987. 7
- (9) 藤井, 日比, 上田, 多点圧力同時測定システムを用いた角柱表面の変動圧の可視化 (その2) 角柱のアスペクト比と変動圧パターンの関係について, 流れの可視化, Vol. 8, No. 30, 1988
- (10) Fuji, K., Hibi, K., Ueda, H., Shimada, K., Visualization of Fluctuating Surface Pressure Distribution on Bluff Body using Electronically Scanning Pressure Sensors, 5th Int. Symposium on Flow Visualization, 1989. 8

記号

$\langle f \rangle$: 変数 f の時間平均 (又はアンサンブル平均)

f : 変数 f の格子平均 (ここではfilteringによる空間平均)

f'' , f' : 平均からのずれ

$f'' = f - \bar{f}$, $f' = f - \langle \bar{f} \rangle$,
(実験では $f' = f - \langle f \rangle$)

u_i : 風速の3成分, i (又は x, u) : 主流方向,

j (又は y, v) : 横方向, k (又は z, w) : 鉛直方向

P : 圧力 (P_o 基準), P_w : 壁面圧力

P_o : 基準圧力 (上空静圧, LESでは $Z=6H_b$, 実験では $Z=17H_b$ における静圧。但し, 上空では高さの差による静圧変化はほとんどない)

k : 乱流エネルギー, $k = \frac{1}{2} \langle u_i' u_i' + u_i'' u_i'' \rangle$

k^* : subgrid scaleの乱流エネルギー

$$k^* = \frac{1}{2} \overline{u_i'' u_i''}$$

ν : 分子粘性

ν_{SGS} : 格子スケール (subgrid scale) の渦粘性

Δ : 格子スケール ($\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$) ,

Δi はメッシュ幅

C_s : Smagorinsky定数

H_b : 建物高さ

u_b : 建物上流, 建物高さ ($1H_b$) における風速

C_P : 風圧係数 (壁面各点の瞬時値),

$$C_P = (P - P_0) / (\rho \langle u_b \rangle^2 / 2)$$

ΔP_D : 建物前後差圧 (瞬時の面内平均値,

風上壁面 - 風下壁面,

基準動圧 $\frac{1}{2} \rho \langle u_b \rangle^2$ で無次元化)

ΔP_L : 建物側面差圧 (瞬時の面内平均値,

ここでは左側壁面 - 右側壁面,

$\frac{1}{2} \rho \langle u_b \rangle^2$ で無次元化)

t^* : 無次元時間 $t^* = t \cdot \langle u_b \rangle / H_b$

諸量の無次元化は建物高さ H_b と棟高風速

$\langle u_b \rangle$ で行っている。