高層建築物の屋上目隠しパネルに作用する風力

WIND FORCES ON POROUS PANELS PLACED ALONG THE PERIMETER OF
THE ROOFTOP OF HIGH-RISE BUILDING

相原 知子*, 植松 康**

Tomoko AIHARA and Yasushi UEMATSU

Blind panels are often attached to the roof of a building along its perimeter to keep outdoor equipment from sight. Permeable materials are generally used in order to cool the equipment by winds. Furthermore, it is expected that the wind loads on such panels are smaller than those on solid panels. Previous studies of wind loads on blind panels focused on solid panels. Few studies have been made of permeable panels.

The present paper investigates the wind force coefficients on solid and permeable blind panels installed on the roof of a high-rise building based on a wind tunnel experiment and a CFD simulation with LES, in which the porosity is changed from 0 to 80 %. In the wind tunnel experiment, the wind pressure coefficients on the roof near the panel are used for those on the panel's interior surface for calculating the net wind force coefficients. Such a wind tunnel technique is verified by the numerical results. Furthermore, the simulated results indicate that large positive wind forces are induced in the upper part of solid panel, the mechanism of which is discussed based on the visualization of the flow around the panel. The effect of porosity on the wind force coefficients on permeable blind panels is also discussed.

Keywords : CFD, LES, Wind tunnel experiment, Permeable panel, Rooftop, Wind force

CFD, LES, 風洞実験, 通気性パネル, 屋上, 風力

1. はじめに

建築物の屋上外周部には、設備機器等の目隠しのためのパネルが設置されている場合が多い。しかし、屋上目隠しパネル（目隠し壁やパラペット、冠壁とも呼ばれている）の風荷重は、建設省告示第1458号や日本建築学会の建築物荷重指針¹⁾には定められていない。屋上目隠しパネルの風力係数については、日本建築学会の「実務者のための建築物外装材耐風設計マニュアル²⁾」に示されている他、既存の研究報告が参考となる。例えば、Stathopoulosらは、建築物の幅と建築物の高さの比率が1:1と2:1の建築物を対象とし、屋上目隠しパネルの高さをパラメータとした風圧実験によりパネル近傍の屋根面圧とパネルの裏面圧の比較を行っている³⁾。大竹は、大規模工場を想定した高さ30mと45mの建築物を対象として、目隠しパネルの高さをパラメータとした風圧実験を実施しており、目隠しパネルの高さが7.5mの場合、上部と下部で目隠しパネルのピーク風力係数に大きな違いは見られなかったとしている⁴⁾。本田らは、高さ45m、アスペクト比（建築物の高さ／建築物の幅）3の建築物（正方形平面）を対象として、建築物端部から目隠しパネルまでの離隔距離をパラメータとした風圧実験を実施しており、目隠しパネルのピーク風力係数は最大で3.9程度であったとしている⁵⁾。田川らは、

高さ40m～200mの中高層建築物を対象とし、建築物のアスペクト比（建築物の高さ／建築物の短辺側の幅）と辺長比ならびに屋上目隠しパネルの高さをパラメータとした風圧実験を実施しており、アスペクト比が1と2の場合、隅角部ほど大きな風力が作用し、風力係数の絶対値の最大値は、正の風力係数（目隠しパネルを外側から屋根面側に押す方向）で5.5程度であった。一方、アスペクト比3～5の場合における風力係数の最大値および最小値は、隅角部において4程度および-4.5程度であった⁶⁾。伊藤らは、耐風設計に対する数値流体解析の適用性を検討することを目的として、高さ128mの高層建築物を対象とした風圧実験結果を報告しており、目隠しパネルのピーク風力係数の絶対値の最大値は3程度であった⁷⁾。

これらの研究においては、いずれも通気性のない開口率0%のパネルを対象としている。しかし、設備機器の温度上昇を防ぐために、ルーバーやパンチングメタルなど通気性のある材料が用いられる場合も多い。それにもかかわらず、通気性のある屋上目隠しパネルの風力係数に関する資料は少ない。服部らは、通気性のある屋上目隠しパネルが屋根面に作用する風圧に与える影響について報告しているが、パネルに作用する風力については述べられていない⁸⁾。筆者らは、高さ90mの高層建築物の屋上目隠しパネルを対象として、通

* 大成建設技術センター 副主査研究員

** 東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻 教授・工博

Research Engineer, Technology Center, TAISEI CORPORATION

Prof., Dept. Architecture and Building Science, Graduate School of Engineering,
Tohoku University, Dr.Eng.

気性のない開口率 0%の他に、通気性のある開口率 20%, 50%, 80% の金属プレートモデルを模型化材料として使用した風圧実験を実施し、高層建築物の屋上外周部に設置されている通気性のある目隠しパネルに作用する風荷重について報告した⁹⁾。風圧実験で屋上目隠しパネルの表面圧および裏面圧を測定する場合、開口率 0%のパネルであれば、文献 3)～6)のように、風圧測定孔に繋がる金属タップおよびビニールチューブ（導圧管）をパネルの中に内蔵させることでそれらが表に露出することを防ぐことが可能となるが、通気性のある金属プレートを目隠しパネルの模型化材料として用いる場合、導圧管を内蔵させることはできない。文献 9)では、パネルの裏面圧の代わりに測定孔を配置しやすい（導圧管が露出しない）パネル近傍の屋根面圧を測定し、パネルの表面圧との差からパネルの風力係数を求めている。なお、文献 7)においても、パネルの風力係数を、パネルの表面圧とその位置に近い屋根面圧の差から求めている。さらに、筆者らは、パネルの裏面圧の代わりに屋根面圧を用いる風圧実験手法の妥当性を検討することを目的とし、文献 9)の風圧実験と同じモデル（ただし、開口率 0%と 20%のみ）を対象として、Large Eddy Simulation (LES)に基づく数値流体計算(CFD)を実施し、パネル表面圧の風圧測定孔に繋がる導圧管の露出がパネルに作用する風圧に及ぼす影響やパネル裏面圧としてパネル近傍の屋根面圧を代用してパネルに作用する風力を推定する手法の妥当性について報告している¹⁰⁾。文献 10)では、CFD で得られたパネルの外圧係数および風力係数を文献 9)の風洞実験結果と比較することで精度検証を行い、開口率 20%の屋上目隠しパネルの場合、パネルの裏面圧として、パネルの中央高さ（模型寸法で、屋根面から 10mm）における裏面圧を用いても、近傍の屋根面圧（模型寸法で、建築物端部から 5mm）を用いても、得られた風力係数は同程度であることが示された。しかし、開口率 0%の場合、風向によっては、パネルの裏面圧が高さ方向に分布をもち、パネルの風力係数が上層ほど大きくなるため、パネルの裏面圧として屋根面圧を代用すると風荷重を過小評価する可能性を示した。

本論文では、上記過小評価の原因となっている、開口率 0%の屋上目隠しパネルにおいて、風下側のパネル上層部に発生する強い負圧の発生メカニズムについて検討すると共に、新たに開口率 50%のケースについて CFD を実施したので、開口率 20%の屋上目隠しパネルに関する結果との差異について報告する。なお、本検討ではパンチングメタルのようなプレート状の通気性材料を対象とする。

2. 風洞実験概要

2. 1 建物モデル

Fig.1 に実験模型の寸法を示す。幅 $B=100\text{mm}$ 、奥行 $D=100\text{mm}$ 、高さ $H=300\text{mm}$ であり、屋上目隠しパネルの高さ h は 20mm である。風圧実験結果について報告した文献 9)では、屋上目隠しパネルの模型化材料として、開口率 0%および開口部の寸法 W (Table 1 中の図参照)を 1mm , 2mm , 3mm と固定し、線材の幅 d (Table 1 中の図参照)を変化させることで開口率を 20%, 50%, 80%とした合計 9 種類（開口率 80%の $W=1\text{mm}$ は除く）の金属プレートをを用いている。本検討では、開口率 0%, 20%および 50%（いずれも $W=3\text{mm}$ ）の屋上目隠しパネルを対象とする。Table 1 に本検討で対象とする通気性材料の概要を示す。圧力損失係数 ζ は、電動送風機、オリフィス流量

計、圧力損失係数測定部を内径 12.5cm の塩ビ管で連結した圧力損失係数測定装置¹¹⁾を用いて測定した金属プレート前後の差圧を管内平均速度圧で除した値である。なお、通気性材料である金属プレー

Fig. 1 Details of the experimental model and definition of wind direction

Table 1 Parameters of permeable materials

Porosity (%)	20	50
Opening width $W(\text{mm})$	3.0	3.0
Opening pitch $P(\text{mm})$	6.71	4.24
Wire width $d(\text{mm})$	3.71	1.24
Plate thickness $t(\text{mm})$	0.2	0.2
Pressure loss coefficient ζ	44.0	4.0

Fig. 2 Location of measuring points (experiment) and sampling points (CFD)

トは、エッチング加工により孔を設けた厚さ 0.2mm の真鍮板である。

屋上目隠しパネルの表面圧を測定するための風圧測定孔は、A 面 (Fig.1 (b) 参照) にのみ、屋根面から約 10mm の高さ (パネルのほぼ中央高さ) に 7 点配置されている。開口率 0% のパネルの表面圧測定点は Fig.1 (a) に示す通りである。開口率 20% および 50% の場合の表

(b) Diagonal top view
Photo 1 Experimental model (porosity 50 %)

Fig. 3 Vertical profiles of mean velocity and turbulence intensity

面圧測定点位置を通気性材料の開口部の配置図と共に Fig.2 (a), (b) に示す。通気性のあるパネルの表面圧測定点位置は、線材の寸法 d (Table 1 参照) が大きい開口率 20% の通気性材料を用いたケースでは、通気性材料の線材中央に設け、開口率 50% および 80% では d が小さいため、線材中央ではなく開口部中央等に設けた。例として、開口率 50% の実験模型写真を Photo 1 に示す。圧力測定点位置はこの写真に示す通りであり、開口率 0% の場合の測定点位置になるべく近い位置に設けられている。屋上目隠しパネルの表面圧測定用チューブは、屋上面に設けた風圧測定孔から 15mm 程度離れた場所から模型内部へと引き込まれている。

パネルの裏面圧として代用する屋根面圧の測定孔は、表面圧測定孔を配置した A 面の目隠しパネルから 5mm 離れた位置に 7 点配置した (Fig.1 (b) および Photo 1 (a) 参照)。

2. 2 実験条件およびデータ処理方法

風圧実験は大成建設(株)技術センター所有のエッフェル型境界層風洞を用いて行った。実験気流は縮尺率を 1/300 とし、建築物荷重指針¹⁾に定められている地表面粗度区分Ⅲに概ね相当する境界層乱流である (Fig.3 の○)。高さ H (風洞床上 300mm) における乱れの強さ I_H は 15.3%、乱れのスケール L_x は 43.4cm である。

実験風向は、Fig.1 (b) に示す 0° から 180° まで、上から見て反時計回りに 10° ピッチ 19 風向に 45° と 135° を加えた合計 21 風向である。

高さ H (風洞床上 300mm) における実験風速 U_H は約 13.5m/s であり、風速の縮尺率は約 1/3 を想定している。Fig.4 には、風速のパワースペクトル密度 $S(f)$ を文献 1) で用いられているカルマン型のパワースペクトルと共に示す。開口部の寸法 W (Table 1 中の図参照) を代表長さ、 U_H を代表速度とし、空気動粘性係数 ν を $1.5 \times 10^{-5} \text{ (m}^2/\text{s)}$ とすると、レイノルズ数 $Re (=U_H W/\nu)$ は 2.7×10^3 である。

模型に作用する風圧は、サンプリング間隔を 0.001 秒とし、実大約 50 分間相当 (データ個数 32,768 個) の測定を行った。導圧管において生じる共振現象 (Helmholtz 共振) 等による風圧の歪みは、導圧管の周波数応答特性をあらかじめ調べ、風圧測定後に補正した。外圧係数と風力係数は、模型を設置していない状態で測定したターンテーブル中心 (模型を設置した状態では模型中心となる位置) の高さ H における速度圧を用いて定義した。外圧係数は面を押す向きが正、風力係数はパネルを表側から屋根側に押す向きが正である。ピーク値は、平均化時間を実大相当 0.5 秒とし、評価時間 10 分間相当で 5 回の結果のアンサンブル平均により評価した。

Fig. 4 Power spectral density of wind velocity

3. 数値流体解析概要

計算対象は、開口率 0%, 20% および 50% の屋上目隠しパネルを有する風洞実験モデルであり、開口部の寸法 W , P , d (Table 1 中の図参照) および Fig.2 に示す開口部の配置を一致させている。解析用モデルを Fig.5 に示す。

支配方程式は非圧縮性の Navier-Stokes 方程式および連続の式である。離散化手法は Finite Volume Method (FVM)、乱流モデルは LES であり、Subgrid-scale (SGS) モデルには標準 Smagorinsky モデルを使用し、モデル定数 C_s は 0.15 とする。計算格子は四面体 (テトラ) 要素を主とする非構造格子である。

風向は、風洞実験において最大および最小のピーク風力係数が発生した風向を参考にして、開口率が 20% と 50% の場合は 0° (壁面に正対する風向) と 45° (対角線方向) の 2 風向、開口率が 0% の場合は 0° , 45° , 70° の 3 風向である。風洞実験では、Fig.1 (b) に示すように A 面にのみ風圧測定孔が設けられていたが、数値流体解析では、パネル 4 面において風洞実験模型の A 面の風圧測定孔と同じ位置の風圧をサンプリングする。ただし、開口率 50% の場合、Fig.2 (b) に●印で示すように、実験模型ではパネルの表面圧測定孔がパネルの開口部に設けられているが、解析用モデルでは導圧管を再現していないため、同じ位置でサンプリングしたデータを用いても風圧実験結果と直接比較することができない。C 面についても A 面と同様である (Fig.2 (b) 参照)。そこで、A 面および C 面については測定孔 (屋根面から模型寸法で 8.8mm の高さ) の上下の横方向に連続する

線材位置 (屋根面から模型寸法で 6.7mm と 10.9mm の高さ) でサンプリングした結果の平均値から求めることとする。一方、B 面と D 面では開口部の配置が異なるため、測定孔と同じ位置でサンプリングしたデータを用いる (Fig.2 (b), (c) 参照)。

さらに、風力係数の鉛直分布を調べるため、Fig.2 に示すように、風洞実験モデルでの測定点 (●印) を通る鉛直線上の数点 (○印) でサンプリングする。ただし、開口率 20% の場合、隅角部に最も近いサンプリング点については、端から 3mm の位置とする。サンプリングはパネルの表面と裏面で行っており、サンプリング点の高さは、開口率 0% と 20% のモデルでは、屋根面から 0.1mm, 5mm, 10mm, 15mm, 19mm, 開口率 50% のモデルでは、屋根面から 2.4mm, 6.7mm, 10.9mm, 15.1mm, 19.4mm である。

計算領域は、幅 $20B$ 、奥行 $30B$ 、高さ $15B$ とし、建物の中心位置は、流入境界から $8B$ の距離にある。境界条件は、計算領域の上面および側面をフリースリップ、流出面は表面圧力 0Pa とする。建物壁面および床面には壁関数 (Werner Wengle 型 3 層モデル) を与え、境界層要素としてプリズム要素を 3 層挿入する。乱流境界層については、別途スパイヤー、ラフネスブロックを再現したモデルを吹走させて作成した変動流入風 (地表面粗度区分Ⅲ相当) を与える。

Fig.3 に、建物中心位置における平均風速比と乱れの強さの鉛直分布を×印で示す。乱れの強さが実験値に比べて若干小さいが、 $z/H < 2.0$ の範囲では平均風速比および乱れの強さ共に実験値 (○印) と計算値 (×印) が概ね一致している。高さ H における I_H は 12.7%, L_x は 36cm である。風速のパワースペクトルを Fig.4 に示す。

開口率 20% のモデルにおいて生成された格子の鉛直断面 (解析領域全体、建物上部と目隠しパネル近傍) を Fig.6 に示す。格子解像度は既往の文献^{12),13)}を参考に設定している。最も解像度の低い領域は上空領域であり、代表寸法は B である。最も解像度の高い領域は目隠しパネル近傍の領域であり、格子の代表寸法は $B/512$ である。これは、 $W/15$ に相当する (Table 1 中の図参照)。計算格子の総要素数は開口率 0% のケースで約 570 万、20% のケースで約 740 万、50% のケースで約 950 万である。

サンプリング間隔は 0.00005 秒 (実大約 0.0036 秒相当) とし、実大約 50 分間相当 (約 850000 ステップ) の計算を行う。外圧係数および風力係数を定義するための速度圧は、実験と条件を合わせるため、建物モデルのない状態で気流を吹走させ、建物モデルの中心位置における高さ H の風速をサンプリングして求めた速度圧 q_H である。文献¹⁰⁾では、流入面直後の速度圧を用いて定義しており、若干値が異なっている。開口部の寸法 W (Table 1 中の図参照) を代表長さ、高さ H における風速 U_H を代表速度 (約 10m/s) とし、空気動粘性係数 ν を 1.5×10^{-5} (m²/s) とすると、レイノルズ数 $Re (=U_H W / \nu)$ は 2.0×10^3 である。また、ピーク値は、風圧実験と同様に、平均化時間を実大相当 0.5 秒とし、評価時間 10 分間相当の値 5 個のアンサンブル平均により評価する。外圧係数および風力係数の符号は風洞実験結果と同じである。

4. 実験値と計算値の比較

CFD の精度検証を目的として、Fig.7 と Fig.8 に実験の測定点位置 (Fig.2 参照) であるパネルのほぼ中央高さでのパネル表面 7 点における外圧係数 C_{pe} 、パネル近傍の屋根面 7 点における外圧係数 C_{pr} 、

Fig. 6 Grid system for simulation model (Vertical section)

Fig. 7 External pressure coefficients and wind force coefficients (Porosity 0 %)

Fig. 8 External pressure coefficients and wind force coefficients (Porosity 50 %)

これらパネル表面圧と屋根面圧の差（時刻歴波形）から求めた7点における風力係数 C_f について、風圧実験結果（実験値）とCFDの結果（計算値）の関係を示す。計算値については建物モデルの対称性を考慮して風向を読み換えており、開口率0%の場合は風向 0° , 20° , 45° , 70° , 90° , 110° , 135° , 160° , 180° , 開口率50%の場合は風向 0° , 45° , 90° , 135° , 180° の値が示されている。図中の実線は実験値と計算値が一致するラインであり、破線は実線からの偏差が $\pm 20\%$ となる範囲を示している。

Fig.7は、開口率0%の場合における C_{pe} , C_{pr} , C_f の結果である。平均値(Mean)に関しては実験値と計算値に高い相関がみられ、標準偏差(Standard deviation), 最大ピーク値(Maximum), 最小ピーク値(Minimum)に関しても、概ね $\pm 20\%$ の範囲内となっている。開口率20%の場合についても、開口率0%の場合と同様な傾向がみられた。

Fig.8は、開口率50%の場合における C_{pe} , C_{pr} , C_f の結果である。平均値、標準偏差、最大ピーク値については、開口率0%の場合と同様の傾向を示している。最小ピーク値(Fig.8(d))については、 C_{pr} ($\diamond$)はほぼ実線上にあるが、 C_{pe} ($\bullet$)と C_f ($\times$)については $\pm 20\%$ 程度の範囲内に収まっていない（実験値の方が計算値よりも大きい）ケースが見られる。これらは、風向 135° あるいは 180° の結果であり、実験模型に設置されている導圧管が風上側となる風向であることから、パネルの開口率が50%のケースでは、風向によって導圧管の影響が結果に現れている可能性がある。なお、最大ピーク値(Fig.8(c))にその傾向が見られないのは、風向 135° および 180° の場合、建物の風下側となるパネルの表面に発生する C_{pe} の最大ピーク値が概ね0に近いためである。

5. 計算結果による屋根面圧とパネル裏面圧の関係

上述したように、実験値と計算値が概ね良い対応を示しているこ

Fig. 9 Relation between $\hat{C}_{pi}$ and $\hat{C}_{pr}$ (Porosity 0 %)

Fig. 10 Relation between $\hat{C}_{pi}$ and $\hat{C}_{pr}$ (Porosity 20%)

Fig. 11 Relation between $\hat{C}_{pi}$ and $\hat{C}_{pr}$ (Porosity 50%)

とから、本検討で得られた計算値を用いてパネル裏面圧とパネル近傍の屋根面圧の関係を示し、パネルの風力係数を求める際に、パネルの裏面圧としてパネル近傍の屋根面圧を代用する実験手法の妥当性を検討する。なお、外圧（風力）係数の最大ピーク値と最小ピーク値をピーク外圧（風力）係数とする。

Fig.9, Fig.10, Fig.11 は、開口率がそれぞれ0%, 20%, 50%の場合について、パネル近傍の屋根面におけるピーク外圧係数 $\hat{C}_{pr}$ とパネル裏面のピーク外圧係数 $\hat{C}_{pi}$ の関係である。左の図は各サンプリング点におけるピーク外圧係数の最大値 (Maximum), 右の図は最小値 (Minimum) である。Layer 5 は高さ方向に5層サンプリングしたうちの最上層 (開口率が0%と20%ではモデル寸法で屋根面から19mm, 開口率50%では19.4mm), Layer 3 は中層 (開口率が0%と20%では10mm, 50%では10.9mm), Layer 1 は最下層 (開口率が0%と20%では0.1mm, 開口率50%では2.4mm) を表している。図中の実線は $\hat{C}_{pr}$ と $\hat{C}_{pi}$ が一致するラインを示し、破線は実線からの偏差が±20%となる範囲を示している。

開口率が0%の場合 (Fig.9), 最下層 (Layer 1) における $\hat{C}_{pr}$ と $\hat{C}_{pi}$ の最小値および最大値, ならびに中層 (Layer 3) および最上層 (Layer 5) における $\hat{C}_{pr}$ と $\hat{C}_{pi}$ の最大値には高い相関が見られるが、中層 (Layer 3) および最上層 (Layer 5) における $\hat{C}_{pr}$ と $\hat{C}_{pi}$ の最小値では、風向 90°(×) と 180°(+) において、相関が低くなっている。これは、風向

Fig. 12 Distribution of $\hat{C}_{pi}$ in the vertical direction near the leeward corner

90°(×) と 180°(+) では、 $\hat{C}_{pi}$ の最小値の絶対値が、サンプリング高さが高いほど大きくなるような鉛直分布をもつためである。Fig.12(a) に風下側コーナー部における $\hat{C}_{pi}$ の最小値の鉛直分布を近傍における $\hat{C}_{pr}$ の最小値 (図中の破線) と共に示す。これは、Fig.9(a) の右図 (Minimum) において図中の実線から大きく外れた風向 90° と 180° の時の $\hat{C}_{pi}$ に相当する。 z/h (0 が屋根面の高さ, 1 がパネル頂部高さである) が 0 に近い低層部では $\hat{C}_{pr}$ と $\hat{C}_{pi}$ はほぼ同程度の値となっているが、 z/h が 1 に近づくほど、 $\hat{C}_{pi}$ の絶対値が大きくなっており、最上層では最下層の2倍近い値となっている。

Fig. 13 Variation of $\hat{C}_f$ with wind direction (Porosity 0 %)

Fig. 14 Variation of $\hat{C}_f$ with wind direction (Porosity 50 %)

開口率が20%の場合 (Fig.10), 最上層(Layer 5)において, 開口率0%の場合の中層(Layer 3)および最上層(Layer 5)と同じように, 風向90°(×)と180°(+)の時, 負の $\hat{C}_{pr}$ と $\hat{C}_{pi}$ の相関が若干低くなる傾向が見られるが, 中層(Layer 3)ではそのような傾向はほとんど見られない。これは, 開口率が20%程度の場合, 屋根面圧とパネル裏面圧(下層)の相関は, 開口率0%の場合と同様に高く, なおかつ, パネルの表面と裏面の圧力が等圧化することで, 風圧の鉛直分布が一樣に近づくためと考えられる。なお, 開口率が0%および20%の場合において, $\hat{C}_{pr}$ と $\hat{C}_{pi}$ の最小値の相関が低くなるのは, 屋根面の風下側となるコーナー部(風向90°では端部E, 風向180°では端部EとF)であった。

開口率が50%の場合 (Fig.11), 開口率0%や20%の場合と比較して, 全体的に $\hat{C}_{pr}$ と $\hat{C}_{pi}$ の相関が低い傾向が見られるが, 開口率20%の場合と同様に, 最上層(Layer 5)を除いて中層(Layer 3)および最下層(Layer 1)に大きな違いは見られない。これは, 開口率が大きくなったことで, 屋根面圧とパネルの裏面圧の相関はいくらか低くなるが, パネルに通気性があることにより $\hat{C}_{pi}$ の鉛直分布が一樣に近づくためと考えられる。Fig.12(b)に風下側コーナー部における $\hat{C}_{pi}$ の最大値の鉛直分布を近傍における $\hat{C}_{pr}$ の最大値(図中の破線)と共に示す。これは, Fig.11(a)の左図(Maximum)において図中の実線から大きく外れた風向180°の時の $\hat{C}_{pi}$ に相当する。 z/h が0.5を超えたあたりから1に近づくにつれ, $\hat{C}_{pi}$ が大きくなっており, 最下層で0程度であった値が最上層では1程度の値となっている。なお, 屋根面

に最も近い最下層(Layer 1)においても $\hat{C}_{pr}$ と $\hat{C}_{pi}$ の相関が低いのは, 開口率50%の場合, サンプル高さモデル寸法で屋根面から2.4mmであり, 開口率が0%や20%の場合(0.1mm)よりも屋根面から離れていることも原因のひとつと考えられる。

6. 屋上目隠しパネルの風力係数

6. 1 パネル面の各層における最大・最小ピーク風力係数

Fig.13およびFig.14に, 開口率が0%および50%の場合について, 各層で得られたパネルの表面圧と裏面圧の差(時刻歴波形)から求めた7点中最大および最小のピーク風力係数 $\hat{C}_f$ (計算値)の風向による変化を実験値(パネルのほぼ中央高さにおける表面圧とパネル近傍の屋根面圧の差から算出した値)と共に示す。実験結果における風向180°~360°の値は0°~180°の値を風向を読み換えて用いている。これらの結果は, Fig.9およびFig.11に示したパネル近傍の屋根面のピーク外圧係数 $\hat{C}_{pr}$ とパネル裏面のピーク外圧係数 $\hat{C}_{pi}$ の関係と似た傾向を示している。なお, Fig.7とFig.8において計算値として示した C_f のピーク値は, 実験値と同様にパネルのほぼ中央高さにおけるパネル表面圧とパネル近傍の屋根面圧の差(時刻歴波形)から求めた値であり, Fig.13とFig.14に示す $\hat{C}_f$ (計算値)とは異なる。

開口率が0%の場合 (Fig.13), $\hat{C}_f$ の最小値については計算値と実験値に大きな違いは見られず, 全風向中の最小値は-3程度である。 $\hat{C}_f$ の最大値については, 中層(Layer 3)と最上層(Layer 5)の風向90°, 180°, 270°付近において計算値が実験値を上回っており, 全風向中

の最大値は 4 程度である。これは、Fig.12(a)に示したように $\hat{C}_{pi}$ の最小値の絶対値が上層ほど大きくなるためである。なお、開口率が 20% の場合は、最上層(Layer 5)において若干の違いが見られるが、最下層(Layer 1)と中層(Layer 3)においては、 $\hat{C}_f$ の最大値、最小値共に実験値と計算値の違いはほとんどなく、全風向中の最大値は 3.5 程度、全風向中の最小値は -2.5 程度であった。

開口率が 50% の場合 (Fig.14), $\hat{C}_{pr}$ と $\hat{C}_{pi}$ の相関は全体的にやや低い (Fig.11), 各層共に $\hat{C}_f$ の最大値、最小値を見ると実験値と計算値の違いはほとんど見られず、全風向中の最大値は 4 程度、最小値は -3.5 程度である。これは、風向 0° の中層(Layer 3)を除いて $\hat{C}_f$ の最大値および最小値の発生部位が概ねコーナー部付近であったことから、コーナー部付近では $\hat{C}_{pr}$ と $\hat{C}_{pi}$ の相関が比較的高いためと考えられる。また、風向 0° および 45° (風向 315° および 360° も同様) の時の $\hat{C}_f$ の最大値は、サンプリング高さによらず、開口率 0% の場合よりも大きな値となっている。これは、Fig.9(c) と Fig.11(c) の右図 (Layer 1 の Minimum) を見ると、 $\hat{C}_{pr}$ 、 $\hat{C}_{pi}$ 共に開口率 50% の方が開口率 0% の場合よりも絶対値で大きな値となっていることによるものと考えられる。なお、Fig.12(b)に示したように $\hat{C}_{pi}$ の最大値が中層(Layer 3)から最上層(Layer 5)にかけて大きくなることから、風向 180° の時の最上層(Layer 5)における $\hat{C}_f$ の最小値の絶対値が他の層 (Layer 1 と Layer 3) よりも大きい、風向 135° (225°) の値と同程度であるため全風向中の最小値に影響を与えるほどではない。

Fig. 15 Time series (Porosity 0 %, Maximum value of $\hat{C}_f$)

6. 2 ピーク風力係数発生時前後の C_{pe} , C_{pi} , C_f の時刻歴波形

Fig.15 に開口率 0% の場合について、パネル最上層(Layer 5)において $\hat{C}_f$ の最大値が発生した平面位置 (実験条件としては Fig.1(b) に示す風向 90° の時の端部 E に相当する) における実時間で 72 秒間相当の C_{pe} , C_{pi} , C_f の時刻歴波形を示す。横軸上部は実時間、下部は計算ステップを示す。なお、この波形は実時間 0.5 秒相当の平均化処理 (移動平均個数 140 個) を行った後の波形である。最下層(Layer 1), 中層(Layer 3), 最上層(Layer 5) と高さが高くなるにつれ、 C_{pe} , C_{pi} , C_f いずれにおいても、振幅が大きくなる傾向が見られる。この平面位置は建物の風下側となることから、各層において、 C_{pe} と C_{pi} は概ね同じような変化をしている。ただし、最上層(Layer 5)の計算ステップ 122,000 付近では、 C_f が 4 程度の値となっている時、 C_{pi} が強く負側に振れているのに対し、 C_{pe} は正側に振れているのがわかる。

Fig. 16 に、開口率 50% の場合について、パネル最上層(Layer 5)において $\hat{C}_f$ の最小値が発生した平面位置 (実験条件としては Fig.1(b) に示す風向 180° の時の端部 F に相当する) における実時間で 72 秒間相当の C_{pe} , C_{pi} , C_f の時刻歴波形を示す。横軸上部は実時間、下部は計算ステップを示す。この平面位置についても、Fig.15 の場合と面は異なるものの、風下側コーナー部という点で一致している。しかし、Fig.15 とは異なり $\hat{C}_f$ が負側に大きく振れている。最上層(Layer 5)の計算ステップ 125,000 付近を過ぎたあたりで、 C_f が -3.5 程度の値となっている時 C_{pi} が正側に振れているのに対し、 C_{pe} は負側に振

Fig. 16 Time series (Porosity 50 %, Minimum value of $\hat{C}_f$)

Fig. 17 External pressure coefficient distribution and wind speed vector of the plumb cut surface (Porosity 0 %)

Fig. 18 External pressure coefficient distribution and wind speed vector in the horizontal cut surface (Porosity 0 %)

れているのがわかる。また、開口率 0% のパネルで見られたサンプリング高さによる違いは明瞭ではなく、最下層 (Layer 1) と中層 (Layer 3) ではほとんど違いが見られない。なお、開口率 20% のパネルについては、開口率 50% のパネルと同様の傾向が見られたが、開口率 50% の場合ほど明瞭な C_{pi} および C_f のピークは見られなかった。

6. 3 ピーク風力係数発生時の流れ場

CFD の結果を用いて、最大・最小ピーク風力係数の発生メカニズムについて検討する。田村らは、文献 7) の実建物を対象とした風洞実験と同じモデルを用いた、大容量・高速度計算システムによる精緻な数値流体解析を実施しており、流れの可視化により、風向角 65° (面に正対する風向が 0°) の時、風上側の屋上目隠しパネルを越えた流れが剥離して風下側の屋根面に再付着することで、パネルの風下側端部において最小ピーク風力係数が絶対値で大きくなることを示している¹⁴⁾。これは、本論文の実験条件における、風向 115° の端部 E に相当する。一方、Fig.13 に示した風向 70° で発生している最小ピーク風力係数の発生位置は端部 F であり、発生位置が異なっている。これは、建物形状や周辺建物の有無などが本モデルとは異なるため、流れ場の状況も異なっているものと考えられる。

本検討では、6.2 節で示した開口率 0% の場合について、 C_f の最大ピーク値発生時、並びに、開口率 50% の場合について、 C_f の最小ピーク値発生時における気流の流れ場について述べる。

Fig.17 に、開口率 0% の屋上目隠しパネルを有する建物の屋上付近における外圧係数分布と、風上側の壁面から模型寸法で 95mm 風下側となるカット面 (風向と直角な面) における流速ベクトルを示す。

Fig. 19 Distribution of external pressure coefficient (Porosity 50 %)

Fig. 20 Wind speed vectors in the vertical plane near the side wall (Porosity 50 %)

この図は、風下側コーナー部においてパネルの裏面に大きな負圧が発生した瞬間 (Fig.15 の計算ステップ 120,800 付近) の外圧係数分布および流速ベクトルである。風下側のコーナー部 (Fig.17 の右奥コーナー部) において、目隠しパネルの外側から内側に風が巻き込んでいるような流れが示されており、パネルの中央高さより高い位置で流速が大きく (色は白く、ベクトルは長く) なっている。このような現象は、左奥のコーナー部にも発生する。

Fig.18 には、Fig.17 と同時刻における開口率 0%の屋上目隠しパネルの最下層(Layer 1)、中層(Layer 3)、最上層(Layer 5)の位置でカットした面における流速ベクトルを示す。最上層(Layer 5)では、風下側コーナー部において流速が大きく、流速ベクトルは下向き(対角のコーナー部方向)となっているが、中層(Layer 3)、最下層(Layer 1)ではそのような流れは見られない。このようなパネルの上層部に発生する渦の影響により、風下側コーナー部の風力係数が鉛直分布をもつと考えられる。

Fig.19 と Fig.20 には、開口率 50%の屋上目隠しパネルを有する建物の屋上付近の外圧係数分布と、風上側から見て左側面から模型寸法で 5.5mm 右のラインでカットした面(風向に平行な面)における流速ベクトルを示す。これらの図は、風下側コーナー部(風上側から見て左奥)においてパネルの風力係数が最小値となる瞬間(Fig.16 の計算ステップ 125,200 付近)の外圧係数分布と流速ベクトルであり、Fig.14(a)において風向 180°の時にパネル最上層(Layer 5)の $\hat{C}_f$ の最小値が他の層よりも絶対値で大きい値を示した瞬間の外圧係数分布と流速ベクトルに相当する。

Fig.19 では、風下側コーナー部(左側)に発生する C_{pi} の最大ピーク値を見やすく表示するため、外圧係数が 0 以下の面は黒、1.4 以上の面は白で表示されている。Fig.19 を見ると、風下側コーナー部(左側)のパネル上層部において C_{pi} が局所的に大きく(色が白く)なっている(外圧係数 1 程度)。この時風下側コーナー部では、風上側のパネル開口部を通過した風やパネルの上端部を超えた風が風下側のパネル裏面上層部に再付着していることが Fig.20 から見てとれる。このため、Fig.14 で示したように風向 180°における $\hat{C}_f$ の最小値が最上層のみ絶対値で大きな値となったと考えられる。

また、Fig.20 を見ると風上側(左側)のパネル付近において、パネルの開口部を通過する流速が大きくなっている(見やすいように Fig.17, Fig.18 とは流速の色を逆にし、色は黒く、ベクトルは長い)。このことから、6.1 節にて述べた風上側における $\hat{C}_{pr}$ および $\hat{C}_{pi}$ が開口率 0%の場合よりも開口率 50%の方が絶対値で大きな値となっている原因は、開口率 50%のパネルの場合、風上側屋根面端部で剥離した強い風が開口部を通過するためであると考えられる。

7. まとめ

筆者らによる既往の風圧実験と同じモデルを対象とし、LES を用いた CFD を実施した結果、以下のことが明らかとなった。

- ①屋上目隠しパネルの開口率が 0%の場合、風下側コーナー部において、パネルの高さ位置が高くなるほどピーク風力係数の絶対値が大きくなる要因と考えられる流れ場を確認した。
- ②屋上目隠しパネルの開口率が 20%の場合、多少の通気性をもつことにより、パネルの裏面圧とパネル近傍の屋根面圧の相関が高い状態を保ったまま、パネルの風力係数の鉛直分布が一様に近づくため、パネルの裏面圧として屋根面圧を用いて風力係数を評価することの妥当性が示された。
- ③屋上目隠しパネルの開口率が 50%の場合、開口率 20%のパネルよりも風を通しやすくなるため、パネルのピーク風力係数の鉛直分布は、風向が建築物の壁面に正対する場合における風下側コーナー部を除いて開口率 20%のパネルよりも一様に近づくが、パネルの裏面圧とパネル近傍の屋根面圧の相関が低くなる。た

だし、パネルの最大・最小ピーク風力係数に関しては、発生する風向(建築物の壁面に対して 45°の斜め方向)および部位(コーナー部)におけるパネルの裏面圧と屋根面圧の相関が高く、上述した風下側コーナー部における風力係数の鉛直方向の変化もさほど大きくないため、パネルの裏面圧として屋根面圧を代用して求めたピーク風力係数を用いることが可能である。

- ④開口率 50%の屋上目隠しパネルの風下側コーナー上層部において、最小ピーク風力係数が発生する瞬間の流れ場を明確にした。
- ⑤屋上目隠しパネルのピーク風力係数は、開口率によらず概ね ± 4 となった。

参考文献

- 1) Architectural Institute of Japan: Recommendations for Loads on Buildings, Maruzen, 2015.2 (in Japanese)
- 2) Architectural Institute of Japan: Manual of Cladding Wind Resistance Evaluation for Designers and Engineers, Maruzen, pp.105-106, 2013.2 (in Japanese)
- 3) Stathopoulos, T., Saathoff, P. and Du, X.: Wind loads on parapets, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.90, pp.503-514, 2002.5
- 4) Ohtake, K.: Peak wind pressure coefficients for cladding of a large roof, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan, Structures I, pp.217-218, 2008.9 (in Japanese)
- 5) Honda, H., Kurita, T., Katou, N. and Komi, T.: A study of peak wind force coefficients for screen standing on rooftop, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan, Structures I, pp.185-186, 2015.9 (in Japanese)
- 6) Tagawa, Y., Kikuchi, H. and Tamura Y.: Characteristics of peak wind force coefficients acting on rooftop, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan, Structures I, pp.215-216, 2016.8 (in Japanese)
- 7) Itoh, Y., Kondo, K., Kikuchi, H., Nozu, T., Ohtake, K., Tanaka, H., Kawai, H. and Tamura, T.: Application of CFD technique to wind-resistant design of buildings Part 2 Wind tunnel experiment for office and residential type tall buildings, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan, Structures I, pp.235-236, 2016.8 (in Japanese)
- 8) Hattori, A., Tokui, M., Minowa, K., Ogawa, T., Masuda, K. and Sasaki, Y.: CHARACTERISTICS OF WIND PRESSURE ON ROOFS OF LARGE-SCALE BUILDINGS WITH WALLS ON THE ROOFTOP, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.81, No.728, pp.1627-1634, 2016.10 (in Japanese)
- 9) Aihara, T. and Uematsu, Y.: A STUDY OF WIND LOADS ON PERMEABLE PANELS PLACED ALONG THE PERIMETER OF THE ROOFTOP OF A HIGH-RISE BUILDING, Proceedings of the 23rd National Symposium on Wind Engineering, pp.391-396, 2014.12 (in Japanese)
- 10) Aihara, T. and Uematsu, Y.: WIND FORCES ON PERMEABLE PANELS PLACED ALONG THE PERIMETER OF THE ROOFTOP OF A HIGH-RISE BUILDING -Discussion of Wind Tunnel Technique Based on a Comparison with Large Eddy Simulation-, Proceedings of the 24th National Symposium on Wind Engineering, pp.229-234, 2016.12 (in Japanese)
- 11) Aihara, T. and Asami, Y.: Drag coefficient of permeable cladding for wind tunnel test, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan, Structures I, pp.119-120 2009.8 (in Japanese)
- 12) Yoshikawa, M. and Tamura, T.: EVALUATION OF FLUCTUATING WIND PRESSURES ON 3D SQUARE CYLINDER BY UNSTRUCTURED-GRID LES - Formulation of LES using unstructured grid system for wind-resistant design of buildings (Part 1) -, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.78, No.687, pp.913-921, 2013.5 (in Japanese)
- 13) Yoshikawa, M. and Tamura, T.: WIND LOAD ESTIMATION OF VERTICAL FINS ON WALLS OF HIGH-RISE BUILDING - Formulation of LES using unstructured grid system for wind-resistant design of buildings (Part 3) -, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.81, No.722, pp.665-674, 2016.4 (in Japanese)
- 14) Tamura, T., Kondo, K., Kataoka, H. and Kawai, H.: ESTIMATION OF WIND LOADS ON ACTUAL BUILDING BY COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS, Proceedings of the 24th National Symposium on Wind Engineering, pp.253-258, 2016.12 (in Japanese)

WIND FORCES ON POROUS PANELS PLACED ALONG THE PERIMETER OF THE ROOFTOP OF HIGH-RISE BUILDING

Tomoko AIHARA and Yasushi UEMATSU***

* Research Engineer, Technology Center, TAISEI CORPORATION

** Prof., Dept. Architecture and Building Science, Graduate School of Engineering, Tohoku University, Dr.Eng.

Blind panels are often attached to the rooftop of a building along its perimeter to keep outdoor equipment from sight. Permeable materials are generally used in order to cool the equipment by winds. Furthermore, it is expected that the wind loads on such panels are smaller than those on solid panels. Previous studies of wind loads on blind panels mainly focused on solid panels. Few studies have been made of permeable panels.

The present paper investigates the wind force coefficients on solid and permeable blind panels installed on the rooftop of a high-rise building based on a wind tunnel experiment and a CFD simulation with LES, in which the porosity is changed from 0 to 80 %.

In Chapter 1, the background and objective of the present study are first described. Then, the previous studies of wind loads on blind panels are reviewed.

Chapter 2 briefly explains the wind tunnel experiment on the wind loads on blind panels attached to the rooftop of a high-rise building. In the experiment, perforated thin panels with porosity of 0, 20, 50 and 80 % are used for the blind panels. Considering the difficulties in model making and pressure measurements on permeable panels, the wind pressure coefficients on the rooftop near the panel are used for those on the panel's interior surface for evaluating the net wind force coefficients on the blind panel.

Chapter 3 describes the CFD simulation technique with LES applied to the wind tunnel experiments, in which the wind loads on and the flow field around the blind panels with porosity of 0, 20 and 50 % are investigated.

In Chapter 4, the CFD simulation technique is first verified by comparing the results with those of the wind tunnel experiment. A relatively good agreement between CFD and wind tunnel experiment is obtained.

In Chapter 5, the relation between the wind pressure coefficient on the rooftop near the blind panel and the panel's interior surface is investigated based on the CFD. Regarding the solid panels, large negative pressure coefficients are induced on the upper part of the corner. In such a case, the above-mentioned wind tunnel experiment may underestimate the design wind loads on the blind panels. On the other hand, the vertical distribution of wind pressure coefficients on the panel's interior surface is almost uniform in the permeable panel case, which validates the wind tunnel technique.

In Chapter 6, the wind force coefficients on the blind panels are investigated in more detail. The peak wind force coefficients on the panel ranges approximately +4 to -4 regardless the porosity. The results indicate that the wind pressure coefficients on the rooftop near the blind panel can be used for estimating the net wind forces on the panel except for the solid panel case. In addition, the mechanism producing large positive pressure coefficients on the interior surface of solid blind panel is discussed based on the visualization of the local flow around the blind panel.

Chapter 7 summarizes the main conclusions obtained from the present study.

(2017 年 5 月 10 日原稿受理, 2017 年 8 月 28 日採用決定)