

セットバックした建物の風荷重

染川 大輔 飯田 有未
後藤 暁

Design Wind Loads on Buildings with a Setback

Daisuke Somekawa Yumi Iida
Satoru Goto

Abstract

Wind tunnel testing was conducted to investigate wind loads for buildings with setbacks. The peak pressure coefficients for the design wind loads of the cladding and components occurred at the periphery of the roofs. The peak suction in the case that the height of a low story was lowest proved to be higher than that in the case of a square cylinder. The overturning moment coefficients for the design wind load of the structures were influenced by the height of a low story. The response acceleration at the top of the model in the case that the height of a low story was higher than a half of that of a high story, may show higher than these of a square cylinder. Therefore, it was found that not all of wind loads can be estimated by the results of a square cylinder.

概要

低層部と高層部で平面形状の異なる、セットバック型の建物と矩形建物を対象とした風圧実験を実施し、セットバック建物の設計用風荷重について矩形建物との比較を行った。外装材設計用風荷重の算出に用いる瞬間風圧係数は、入隅部で強い負圧が生じており、今回のケースでは矩形建物の壁面隅角部の負圧より最大約1.75倍となった。構造骨組設計用風荷重の算出に用いる転倒モーメント係数は、単一の矩形建物から予測すると過小評価になることがある。しかし低層部、高層部それぞれの平面形状を仮定した2種類の矩形建物の転倒モーメント係数を低層部の高さに応じて組合せて用いれば適切に推定できる。居住性能評価においては、低層部の高さが建物高さの半分よりも高い場合には頂部の応答加速度が大きくなる場合があり、層風力についても、矩形建物の結果から推測すると過小評価となる可能性がある。これらをどう評価するかは今後の課題である。

1. はじめに

近年、低層部は商業施設、高層部は集合住宅やオフィスなど、建物の上下で用途が異なる建物がしばしば計画される。その際、斜線制限などの法的な制約によって低層部と高層部で平面形状の異なる、いわゆるセットバック型の建物形状となる事が多くなっている。セットバック建物では、平面形状の変わる高さや変化の度合いによって風荷重が変化するものの、必ずしも風洞実験が実施されるわけではなく、建築基準法や建築学会「建築物荷重指針・同解説」¹⁾(以後、荷重指針と呼ぶ)といった規基準に基づいて評価される場合がある。

現在の規基準では矩形形状や隅切りなどの平面形状には対応しているが、セットバック建物に対しては風荷重を算定するための風力係数が示されていない。そこで本研究では、風荷重検討時の参考となるように以下の点で矩形建物とセットバック建物の風外力の比較を行った。

- 1) 瞬間風圧係数は外装材設計用風荷重評価のために必要となるが、入隅部で局部的に非常に大きな風荷重が作用する可能性がある。
- 2) 転倒モーメント係数は、構造骨組用風荷重算定に

用いられる。そのため矩形建物の値との比較を行う。また、居住性能評価のため転倒モーメント係数のパワースペクトルについても示す。

- 3) 中間層免震の設計に用いられる層風力係数について平均値と変動値とをそれぞれ比較する。

2. 風洞実験概要

風洞実験は大林組技術研究所の多目的風洞施設で実施した。実験に使用した模型の外形の例をFig. 1に示す。また、実験を行った建物形状のパターンをTable 1に示す。ケースs1～s4はセットバック型のモデル、c1～c4は矩形建物のモデルである。各ケースとも建物片側がセットバックしており、Fig.2のように低層部の高さhは5段階とした。見付け幅Bとの比(h/B)は0.5, 1, 1.5, 2, 2.5であり、平面形状との組み合わせにより合計20種類の建物形状とした。幅Bと奥行きD、高さHの比が1:1:3の形状(c2)を基本の形状として各ケースの形状を決定した。矩形建物のモデルは、平面形状によって4種類とした。

長さの縮尺率は1/200、流入気流は荷重指針に示されている地表面粗度区分Ⅲを想定した気流を風洞内に作成し、

模型頂部高さでの風速は10.7m/sとした。実験気流の鉛直分布をFig. 3に示す。実験風向はFig. 1の矢印で示すようにセットバックしている面に正対する風向を0°とし、時計回りの方向に0°から180°まで5°間隔で37風向とした。サンプリング周波数は1,000Hz、1風向あたりの計測時間を100秒としてデータを収録した。時間の縮尺率は約1/50、実スケールで10分間に相当する計測時間は約12秒となる。統計量は評価時間を実スケールで10分間とし、5組のアンサンブル平均により評価した。

収録したデータは風圧計のチューブに関する周波数応答特性を補正した後に、位相遅れを考慮して正規の風圧の時系列データとした。補正された各測定点の風圧データを模型頂部高さの速度圧により無次元化し、風圧係数とした。

3. 実験結果

3.1 風圧係数の分布

セットバック建物では、セットバック部の入隅部付近において局部負圧が作用することが知られている²⁾。平面形状がs1h1の入隅部での負圧が最小となる風向(10°)の

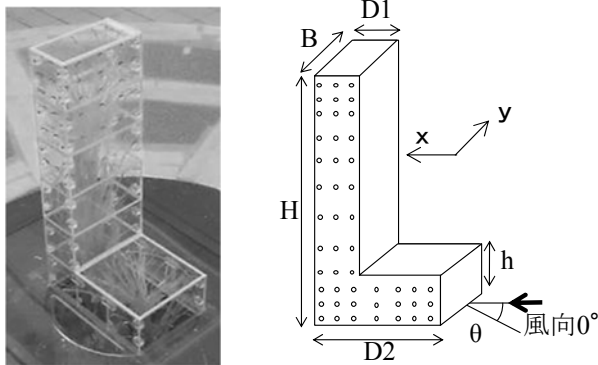


Fig. 1 風洞実験模型の外形
Outline of Wind Tunnel Experimental Model

Table 1 実験ケース
Variation of Wind Tunnel Experimental Model

ケース名	高さ H	幅 B	奥行き (上部) D1	奥行き (下部) D2	低層部高さ h	
セットバック	s1	100.0	33.3	16.6	50.0	h1:16.6
	s2			33.3	50.0	h2:33.3
	s3			33.3	66.6	h3:50.0
	s4			50.0	66.6	h4:66.6
	s5			66.6	66.6	h5:83.3
矩形建物	c1	100.0	33.3	16.6		
	c2			33.3		
	c3			50.0		
	c4			66.6		

単位: m(実スケール)

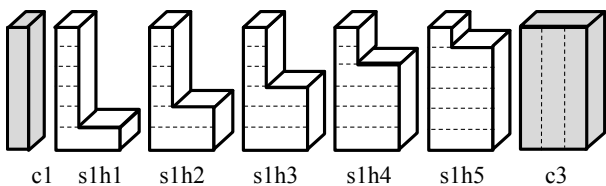


Fig. 2 実験名の例 (ケースs1を対象とした場合)
Example of Experimental Name (case s1)

最小瞬間風圧係数の分布をFig. 4に示す。図中破線で囲む入隅部付近では最小値で-3.5程度の負圧が生じており、上層の隅角部(-2.4)よりも1.5倍程度小さな値(荷重としては1.5倍程度大きな値)となっている。入隅部の風圧係数は規基準では示されておらず、外装材の風荷重設定時には過小評価とならないよう注意が必要となる。

同じケースでの最大瞬間風圧係数の分布をFig. 5に示す。ここでは入隅部の正圧が最大となった風向(5°)での結果を示す。高層部の壁面に生じる正圧は通常の矩形建物と同程度の値であった。一方屋根面において、矩形建物では発生しない正圧が生じている。正圧の大きさは高層部との取り合いに近いほど大きい。最も大きな点での風圧係数は1.6であり、通常の壁面の正圧³⁾と大きくは変わらない。この正圧は高層の壁面に当たった風が高層部の壁面に沿って吹き下ろしてくるために生じるものと考えられる。

低層部の高さで瞬間風圧係数の関係をFig. 6に示す。最小瞬間風圧係数は局部的な負圧が見られた入隅部分、

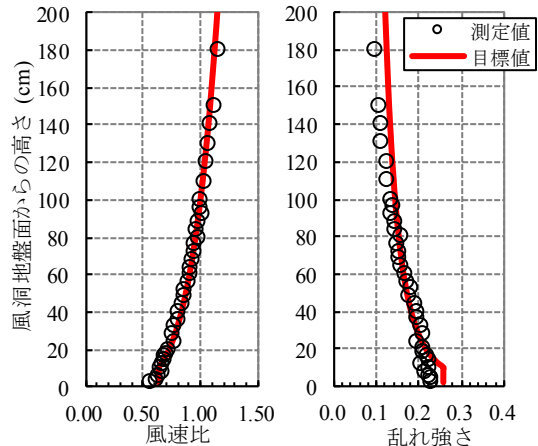


Fig. 3 風洞気流の風速比及び乱れ強さの鉛直分布
Profile of Wind Velocity Ratio and Turbulence Intensity in Wind Tunnel

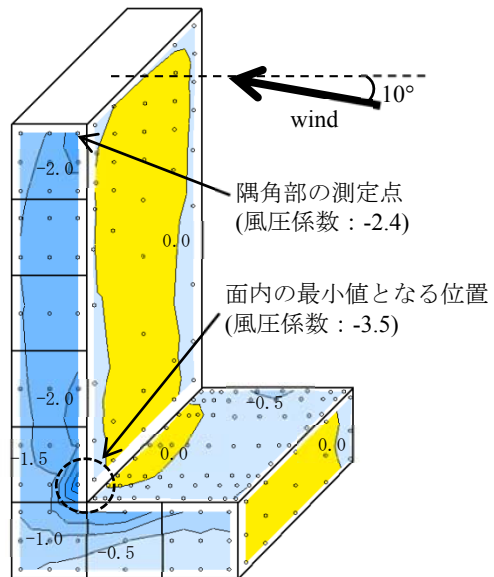


Fig. 4 最小瞬間風圧係数の分布 (ケースs1h1)
Contour of Minimum Peak Wind Pressure Coefficients (s1h1)

最大瞬間風圧係数は屋根面の中でそれぞれ最小または最大となった部分での値をプロットしている。なおh2およびh3については、測定点の配置が他のケースとは異なるため、ここでは省略した。

最小瞬間風圧係数(a)は、低層部の高さが低い場合(h1)ほど絶対値が大きくなる傾向が見られた。逆にh4とh5の間では大きな差は見られず、その絶対値も荷重指針の矩形建物の壁面の隅角部の値(-2.4)に近い値となった。このような入隅部の負圧は、低層部の高さが高層部の高さの半分よりも低いときに絶対値が大きくなる。平面形状の違いでは、s3では他のケースよりも絶対値が大きくなるが、それ以外のケースの間ではあまり差が見られない。s3では風上前縁で剥離した流れの再付着する点が入隅部付近になり、それらが干渉するためと考えられる。

最大瞬間風圧係数(b)では、低層部の高さや建物の平面形状が変わっても、風圧係数の値が変わらない。吹き下ろしの流れは、Fig. 5で述べたような低層部の高さが低いh1の方が厳しくなると考えられる。一方で低層部の高さが高くなると、風上壁面の正圧が最も大きくなるよどみ点に近づくため、吹き下ろしの風があまり生じなくても、正圧が大きくなる。そのため、高さ方向による変化があまり見られなかったと考えられる。

3.2 転倒モーメント係数

風による建物の応答は、建物の1次モードでの振動が支配的であるため、1次のスペクトルモーダル解析によって風応答を評価する方法が一般的に採用される。スペクトルモーダル解析を行う際には、建物基部での空気力係数が用いられる。ここでは並進方向の風応答に寄与する、建物基部での転倒モーメント係数について着目した。

今回の実験では、建物表面に作用する風圧を測定していることから、各測定点での風圧に測定点ごとの負担面積を考慮して足し合わせることで、各測定点の高さでの層ごとの風力(層風力)を得ることが出来る。層風力を各高さレベルでの代表面積で除したものを層風力係数と呼び、式(1)のように定義される。

$$C_{FXj} = \frac{1}{A_j} \sum_i C_{pi} \times A_i \times \cos\theta$$

$$C_{FYj} = \frac{1}{A_j} \sum_i C_{pi} \times A_i \times \sin\theta$$

(1)

- C_{FXj}, C_{FYj} : 高さレベルjのX, Y方向の層風力係数
- C_{pi} : 測定点iの風圧係数
- A_i, A_j : 測定点iと高さレベルjの負担面積
- θ : 面の法線ベクトルがX軸方向に対する角度

この層風力係数を用いて、建物基部でのX, Y方向の転倒モーメント係数 C_{MX}, C_{MY} は式(2)のように求められる。

$$C_{MX} = \frac{\sum_j C_{FYj} \times A_j}{BH^2}$$

$$C_{MY} = \frac{\sum_j C_{FXj} \times A_j}{BH^2}$$

(2)

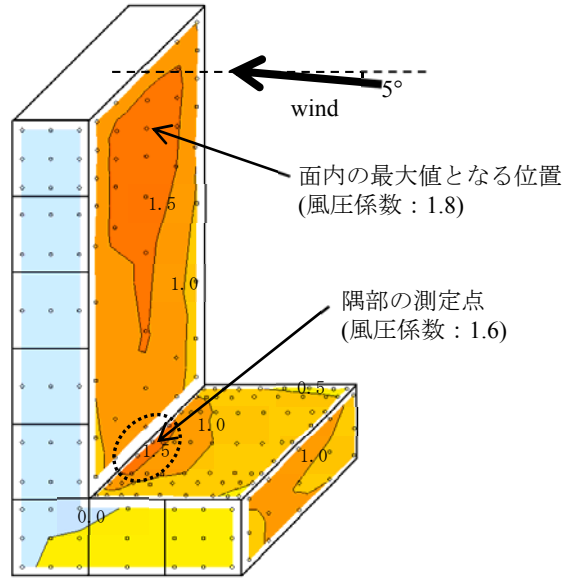
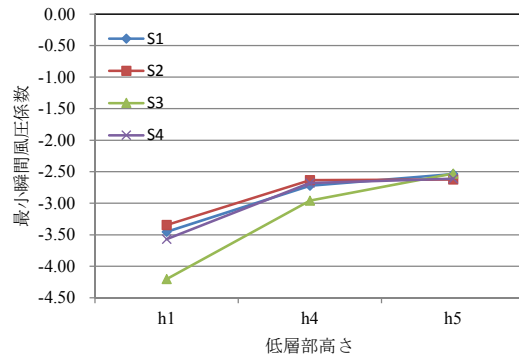
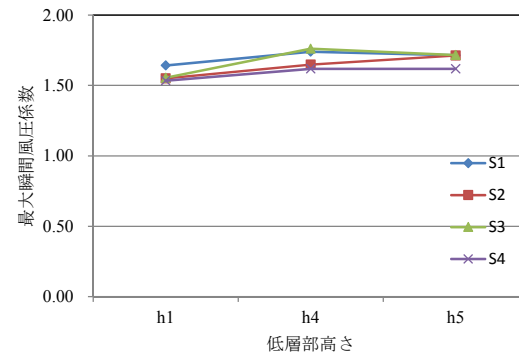


Fig. 5 最大瞬間風圧係数の分布 (ケースs1h1)
Contour of Maximum Peak Wind Pressure Coefficients (s1h1)



(a) 最小瞬間風圧係数 (入隅部・全風向中の最小値)



(b) 最大瞬間風圧係数 (屋根面・全風向中の最大値)

Fig. 6 低層部高さによる瞬間風圧係数の変化
Peak Wind Pressure Coefficients on the Various
Height of Lower Part

なお、 C_{MX} はX軸回りの転倒モーメントを表すのでY方向の層風力を用いる点に注意されたい。

実スケール10分間の平均値である平均転倒モーメント係数の風向ごとの値をFig. 7に示す。Fig. 7(a)と(b)は平面形状がs1のh1~h5ケースと矩形建物c1およびc3の比較である。s1の低層部が全くない状態がc1に、低層部が上ま

で上がった状態がc3に相当する。(c)と(d)における平面形状s4と矩形建物c3とc4も同様である。X方向への転倒に対応するY軸まわりの転倒モーメント係数(a), (c)では、セットバック部分の影響はほぼ見られずすべてのケースで同じような結果となった。c3やc4では風向80°や100°で一度正負が入れかわるが、c1ではそのような傾向は見られない。s1では低層部の高さが低いh1やh2の場合では、c1と同様に正負が入れかわることはないが、低層部の高さが高くなるにしたがって、c3に近い傾向になっていく。ところがs4では、低層部の高さによらずほぼ一定の値となった。これはc3とc4の間に大きな差が無いためであり、ここでは示していないがs2やs3でも同様の結果となった。

一方で、Y方向への転倒を表すX軸まわりの転倒モーメント係数(b), (d)では、低層部の高さに応じてs1, s4共に違いが見られた。矩形建物も含めたすべてのケースにおいて、代表幅Bを一定としていることから、矩形建物の見付面積の大きい方が転倒モーメント係数も大きくなっている。セットバック建物では、低層部分が高くなるにつれてより大きい方の矩形建物の値に近づく。s4h5では風向95°程度でc4の最大値とほぼ同じとなるが、それ以外のケースでは大きい方の矩形建物よりは転倒モーメント係数の最大値は小さく、小さい方の矩形建物よりは大きい値になる。この値だけで一概には決まらないが、低層部の高さが小さい場合でも、小さい方の角柱の係数を用いて風荷重を類推した場合は、Y方向の風荷重を過小評価する可能性がある。

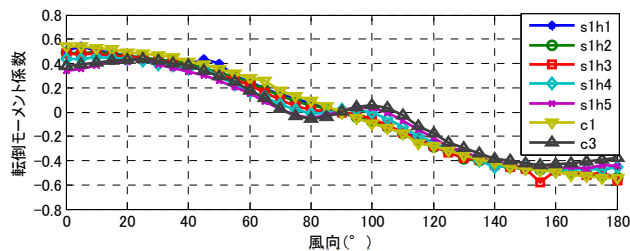
3.3 転倒モーメント係数のパワースペクトル

スペクトルモーダル解析で用いる転倒モーメント係数の無次元パワースペクトル密度をFig. 8に示す。横軸は周波数 n を幅Bと頂部高さの風速Uで無次元化した無次元周波数、縦軸はパワースペクトル密度 $S(n)$ を周波数 n と標準偏差 σ で無次元化した無次元パワースペクトル密度である。風向0°のY軸まわりのパワースペクトル密度(a),(d),

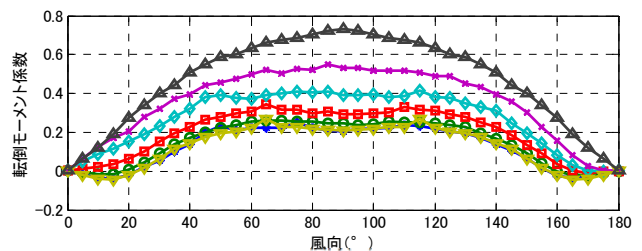
(g)を比較すると、低層部の高さが最も高いs1h5やs3h5では無次元周波数が0.2(Fig. 8(a)のA)でピークが見られ、1~2付近(Fig. 8(a)のB)でも他のケースに比べてパワースペクトル密度の値が大きい。s4h5では0.2付近のピークはなくなっているが、1~2付近の値は大きい。無次元周波数が1~2付近のパワースペクトル密度の値は、風揺れ居住性評価するための応答加速度を算出するのに用いられる事が多い。よってこれらの低層部分が比較的高い形状では、矩形建物の場合よりも風方向の応答加速度が大きくなり、居住性能に良くない影響を与える可能性がある。

同じ風向0°のX軸まわりのパワースペクトル密度(b), (e),(h)では、s1h5やs3h5のピークが矩形建物や他のケースに比べて低周波側にシフトしている。構造骨組用風荷重の算定に用いられる無次元周波数0.1~0.3付近では、大きい方の矩形建物のパワースペクトル密度の値と同程度になるため、Fig. 7(b), (d)の結果と合わせて、構造骨組用風荷重は大きい方の矩形建物よりも小さくなる事が多いと考えられる。しかし居住性能評価として用いるより高い周波数帯ではY軸まわりと同様に、矩形建物よりも不利な値となっている。このX軸まわりの結果では、無次元周波数1付近で最もパワースペクトル密度の値が大きいのは2番目に低層部分が高いh4のケースであり、h3でも大きい方の矩形建物よりもパワースペクトル密度の値が大きい。低層部が低い場合では高層部からの吹き下ろしによって、風上前縁からの剥離流の影響が小さくなるのに対し、低層部が高い場合には低層部の屋根面で生じた円錐渦と側面の剥離渦の影響を共に受けるためと考えられる。よって、低層部分の高さが建物高さの半分以上を超える場合は、この方向でも矩形建物よりも居住性能評価が悪くなる傾向にある。

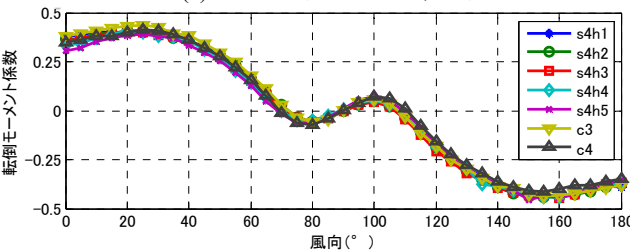
風向90°の場合(c),(f),(i)では、セットバック建物の平面形状によって傾向が異なっている。s1の場合では、低層部の高さの高いh4やh5では大きい方の矩形建物c3のパワースペクトル密度に近く、それ以外では小さい方の矩形



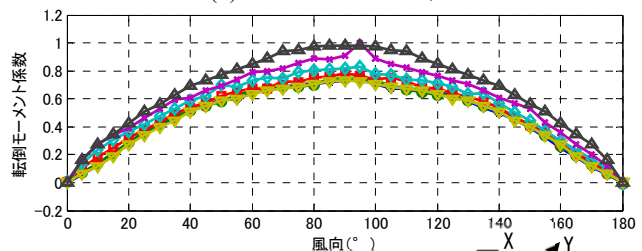
(a) $-C_{MY}$ (Y軸まわり, s1)



(b) C_{MX} (X軸まわり, s1)

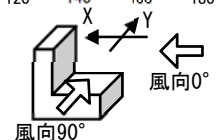


(c) $-C_{MY}$ (Y軸まわり, s4)



(d) C_{MX} (X軸まわり, s4)

Fig. 7 平均転倒モーメント係数
Mean Over Turning Moment Coefficients



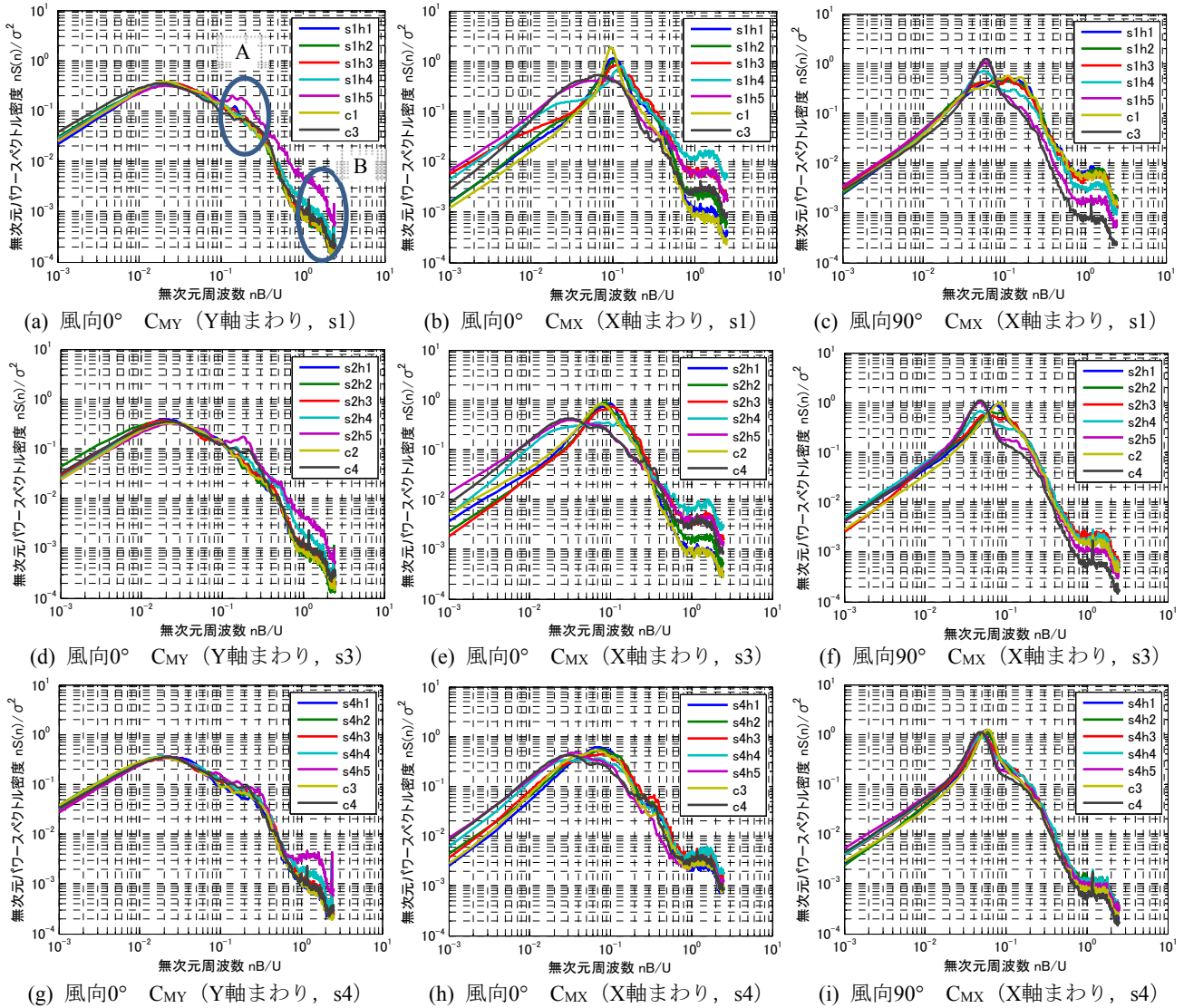


Fig. 8 転倒モーメント係数の無次元パワースペクトル

Non-Dimensional Power Spectrum Density of Over Turning Moment

建物c1の値に近い。ところがs4では低層部の高さにかかわらず、大きい方の矩形建物c4のパワースペクトル密度と同じような形状となっている。また、この風向では0°のときに見られたような無次元周波数が1~2のところでの特定のケースでパワースペクトル密度の値が大きくなる傾向は見られなかった。

ここまでの結果をまとめると、構造骨組用風荷重は以下のように推定できると考えられる。

- 1) セットバック建物の転倒モーメント係数は、平均値の風向に対する変化や低い周波数領域では、矩形建物と同じような傾向を示す。
- 2) 風向 0° の Y 方向や風向 90° の X 方向では、低層部分の高さに応じて小さい矩形建物から大きい矩形建物の転倒モーメント係数の値が段階的に変化する。そのため構造骨組用風荷重は2種類の矩形建物の値から類推することが出来る。
- 3) 低層部の高さが高い場合には、固有振動数によっ

ては居住性能評価のための応答加速度が大小いずれの矩形建物より大きくなる可能性が高い。

3.4 層風力係数

3.2で述べたように通常の建物であれば1次の振動モードが支配的であるが、セットバック建物では低層部と高層部の間でモード形状が大きく変化したり、中間層免震が計画されたりする場合がある。そのような場合、多質点の解析を行うことが多く、式(1)で示した各質点での風外力が必要となる。実験で得られた各レベルでの層風力係数をFig. 9に示す。ここではs1の層風力が最大となる風向0°と90°についてのみ示す。図中の水平方向の実線はセットバックしている高さ、すなわち低層部の高さを表す。

風向0°のX方向(a),(b)では、平均・変動ともに高さ方向の分布形状は矩形建物の場合と大きな違いは見られない。しかし低層部の高さが最も高いs1h5だけは、高層部分の平均が小さく、変動が大きくなっている。これがFig. 8で

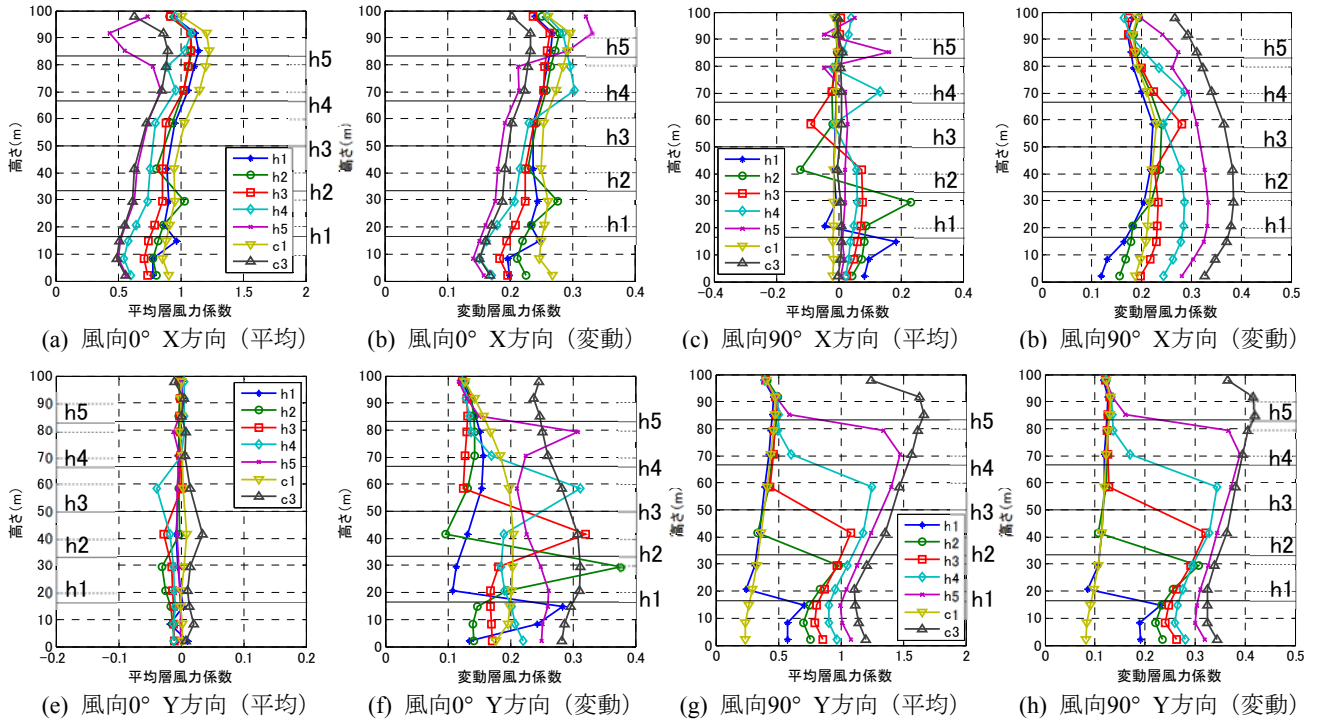
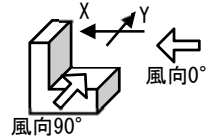


Fig. 9 層風力係数 (ケースs1)
Layer Wind Force Coefficients (Case s1)



見られたスペクトルの大きくなっている要因であると考えられる。風向90°のX方向(c),(d)では、矩形建物の平均値はほぼ0となっているにもかかわらず、セットバック建物ではいずれのケースでもセットバックしている高さを中心に平均値が大きくなっており、その部分で符号が反転している。結果として低層部分と高層部の間で風直交方向での層間変形が大きくなると考えられる。変動はセットバックしている部分で少し大きくなる傾向があるが、概ね矩形建物と同じような分布形状となっている。

Y方向では、風向0°の平均(e)はすべてのケースでほぼ0に近い値となっているが、変動(f)はセットバックしている部分のやや下の高さで非常に大きな値となっている。その値は大きい方の矩形建物c3よりも大きいため、風直交方向の層風力を矩形建物から類推することは難しい。このような大きな変動はFig. 4に示した入隅部の強い負圧が原因であると考えられる。風向90°では平均(g)・変動(h)ともに、低層部では大きい方の矩形建物c3に、高層部では小さい方の矩形建物c1に近い値となる。こうした傾向は他の形状でも同様であった。

これらの結果をまとめると次のようになる。層風力では風方向(風向0°のときのX方向や風向90°のY方向)については矩形建物の実験結果から風外力を推定することは可能である。風直交方向では、セットバック部分の周りで矩形建物の値を上回る風外力となるため、矩形建物の値を用いることは過小評価につながると考えられる。

4. まとめ

風洞実験結果に基づきセットバック建物の風荷重算定に用いる風圧係数や建物基部での空気力係数の特性について考察した。矩形建物との比較を行った結果、外装材用風荷重では、通常の矩形建物では見られないような局部負圧や正圧の発生についての知見を得た。また、構造骨組用風荷重や風揺れ居住性能については、矩形建物の結果から予測可能である項目と過小評価になってしまう項目を明らかにした。通常、セットバック建物の場合でも規基準に示されている矩形建物の値を用いることが多いが、すべての風荷重を単一の角柱だけで予測すること過小評価となる可能性がある。しかし本研究の結果では、2種類の角柱の値を用いることで、風洞実験を行わない場合でも、構造骨組用風荷重の適切な風荷重の推定を行うことが可能となる。ただし、居住性能評価や層風力については過小評価となることがあるため、これらをどう評価するかについては今後の課題である。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説(2015), pp. 12-73, 2015.2
- 2) 菊池, 他：セットバックした建築物の局部風圧, 第21回風工学シンポジウム, pp. 317-320, 2010
- 3) 日本鋼構造協会：構造物の耐風工学, pp. 73, 1997.11