高層建築物の風応答における隅切の空力効果に関する研究

中　川　尚　大*1　　丸　山　勇　祐*1
西　村　宏　昭*2

要　　旨

本研究では，高層建築物を模擬した正方形断面柱を対象として，風上側あるいは風下側に隅切を設けた場合の風力特性を空気力実験により調べた．その結果，風上隅切と風下隅切ではその空力効果に顕著な違いが見られた．

風上隅切では剥離した流れの再付着によって渦放出が抑制されるのに対し，風下隅切では渦の形成が強まり，両者で異なる空力挙動を示すことが確認された．また，四隅に隅切を設けた場合には，風上隅切と同様の挙動を示した．風直交方向の応答を比較すると，風下隅切では高風速域で風応答が非常に大きくなる傾向，風上隅切では比較的低風速域で応答が大きくなる傾向がみられた．建築物設計上の観点からは低風速域における応答の方がより重要であると考えられる．

キーワード　建築構造／風／高層建物／隅切／風直交方向応答

目　　次

１．はじめに
２．実験概要
３．風方向および風直交方向の風力特性
４．転倒モーメントの周波数特性
５．風による建物応答の評価
６．まとめ

AERODYNAMIC EFFECTS ON A HIGH-RISE BUILDING WITH CHAMFERED CORNERS

Naohiro NAKAGAWA　　Yusuke MARUYAMA
Hiroaki NISHIMURA

Synopsis:

The crosswind response of a high-rise square building with chamfered windward and leeward corners was investigated using wind tunnel experiments. The aerodynamic effects of the chamfered windward and leeward corners were markedly different. Windward corner chamfering suppressed vortex shedding by promoting reattachment of the separated shear layer at the front corners. In contrast, leeward corner chamfering increased vorticity owing to the strong swirling flow around the leeward corners. A building with chamfers at all four corners exhibited behavior similar to that of a building with chamfered windward corners. A tall building with chamfered leeward corners exhibited a remarkably large wind-induced response at high wind speeds, whereas a tall building with chamfered windward corners exhibited a reduced response at lower wind speeds. From a design perspective, the response at lower wind speeds is of greater importance.

＊１本店　ICI テクノロジーセンター　再生可能エネルギー・風環境グループ
＊２フリーランス

1. はじめに

建築物の高層化や橋梁の長大化されると空力的に不安定になることはこれまでの研究で知られており，基本形状，隅角部の形状，表面の凹凸の状態，構造特性などをパラメータとした空力効果の変化についての研究は既に多くの実験がなされてきている．例えば隅角部の形状では，隅切や隅欠，隅丸といった形状の違いのほか，これらの形状のサイズによっても空力効果が大きく変化することが知られている．

白石（1986 年）らの研究 [1] では矩形断面のギャロッピング（風との相互作用によって振動時の振幅が急激に増大する現象）を抑制する方策の一つとして，断面隅角部の形状をわずかに変えて，断面周囲の流体パターンを変えることで空力安定性を増す検討が行われた．隅欠の場合では b/B=3/18（0.167）（b：隅切幅，B：建物幅）を境界として空力的に変化することを示し，隅欠が b/B =0.167 より大きくなると低風速で発振しやすく，応答が高くなることが確認された．隅切においても隅欠と同様の傾向を示し，b/B=4/18（0.222）以上になると低風速で発振しやすくなることが確認された．

西村ら（1989 年）の隅欠を設けた場合の高層建物（正方形断面柱）の振動性状についての報告 [2] では，上述の白石らの結果とは逆の結果が報告されており，隅欠の大きさが b/B=3/16（0.188）以下において低風速で発振しやすく，応答が高くなる結果を示している．これは，模型の違い（2 次元模型と 3 次元模型）と気流の違いであることが示唆されている．

河井らの研究（1994 年）では超高層建物（正方形断面柱）の隅欠，隅切，隅丸などの隅角部の形状による渦励振（風で発生する渦と建物の揺れの周期が一致して大きな振動が生じる現象）の違いが報告されている [3]．隅欠では b/B＝3/20（0.15）を境界として空力的に変化しており，b/B＝0.15 以上になると正方形断面柱のときより低風速で発振し，応答が高くなる結果が示された．この実験はアスペクト比 10 の 3 次元模型で行なわれており，上述の西村らの報告（アスペクト比 4 で実験）とは異なる傾向で，2 次元模型で実験した白石らの報告と近い傾向となっている．隅切については隅欠と同様に，隅切が大きくなると低風速で発振しやすくなり，応答が高くなることが報告されている．

天野ら（1995 年）は，一様流中におけるアスペクト比 5 の三次元正四角柱について隅欠・隅切のサイズや質量減衰パラメータが渦励振やギャロッピングに及ぼす影響を空力振動実験で確認した [4]．質量減衰パラメータ（風による振動の発生しやすさを表す指標）により傾向は多少変わるが，隅欠では b/B＝2/60（0.033）以下や b/B＝5/60（0.083）以上，隅切では b/B＝3/60（0.05）以下や b/B＝5/60（0.083）以上で，渦励振やギャロッピングによる応答が大きくなる．また，天野らは定常空気力の計測についても行なっており，風直交方向の変動転倒モーメント係数が b/B=0.033～0.067（隅欠），b/B=0.067～0.083（隅切）で正方形断面柱より 2～3 倍の値になると報告している．

上述した研究はいずれも矩形の四隅に隅欠や隅切などを設けた状態での実験を行なっているが，主として風上側端部での剥離と再付着に注目した考察を行なっている．これらの研究で得られた結果は，隅角部の形状，サイズ，2 次元と 3 次元模型，アスペクト比，実験気流などの違いにより異なる部分もあるが，b/B＝0.05～0.2 付近を境界として空力効果が変化する特徴は共通している．空力効果の変化の原因は，風上側端部から剥離した空気の流れ方の変化によるもので，空気の流れ方の変化は風上側端部の形状によって剥離剪断層（角部から剥がれた流れの層）が側面に近接するかあるいは，剥離した流れが側面の風下側で再付着するか，また再付着しない場合には剥離剪断層が風下側隅角部に最も接近するかが挙げられる．

風上側隅角部で剥離した流れが側面の風下側で再付着するかどうかは風上側端部の形状だけでなく，風下側端部の形状によっても変化する．例えば，正方形断面では時間平均的には剥離状態であるが，瞬間的には剥離剪断層が風下側隅角部で再付着する．再付着した瞬間はその周囲の圧力が正側に変化することで揚力は増大しにくくなる．そこで風下側隅角部を隅切にすることで瞬間的な再付着が起こらなくなると，風下側隅角部での圧力が正側に変化することはなく，剥離剪断層が風下側隅角部に近づくことで負側の圧力が高くなり，揚力が増大すると考えられる．

これに対して風上側の隅切は風上側端部での剥離直後の再付着を促すため，風上側の隅切と風下側の隅切とでは空力効果が異なると考えられる．これまでの既往文献では，風上側と風下側の隅切を分けて，それらの効果を論じることはなかった．そこで本論文では，既往論文で見られる隅切効果に関する知見の相違に着目し，風上側および風下側の隅切が風力特性および風応答に与える影響を個別に評価することで，隅切の空力効果を支配する要因を明らかにする．

2. 実験概要

実験は当社所有のエッフェル型吹き出し式境界層風洞（計測筒：幅 3m×高さ 2m）で行なった．実験対象の建物は辺長比 1，アスペクト比 5 を想定し，実験模型は幅および奥行 100mm，高さ 500mm で 3D プリンタにより造形した．実験模型の概要を**図-1** に示す．実験模型の造形にあたり 3D プリンタでは 500mm の高さを一度に作ることができないため，高さ 100mm の模型を 5 個造形し，接合部を嵌合形状として連結した．隅切は隣り合う二隅を 45°でカットし，その長さ b は b＝0, 5, 10, 20, 30, 40, 50mm の 7 段階とした．模型幅 B に対する隅切幅 b の比として表す

と b/B=0, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 となる．また，b/B=0.1 は四隅に隅切を設けた形状でも実験を行なった．

実験気流はラフネスブロックやスパイヤなどの粗度要素を設置せず，風洞床面上に自然に発生する高さ 300mm までの境界層をもち，上部は乱れの少ない一様な気流とした．平均風速および乱れ強さの鉛直分布を**図-2** に示す．実験は隅切が風下側となる風向を θ =0°，風上側となる風向を θ =180° とし，それぞれを風下隅切，風上隅切と呼ぶ．

空気力実験は実験模型全体に作用する風の力（空気力）を計測するための実験で，**図-3** に示すように模型下部に設置した風洞天秤（6 分力計）を用いて計測する．風洞天秤は風方向（X 軸）・風直交方向（Y 軸）・鉛直方向（Z 軸）の力と各軸周りのモーメントが計測でき，本研究では抗力（風方向の空気力）と揚力（風直交方向の空気力）および X 軸回りのモーメントの計測結果について示す．

基準速度圧は高さ 1500mm に設置したピトー管を用いて計測した．実験風速は模型頂部高さで約 5m/s，サンプリング周波数は 200Hz，サンプリング数は 30720 個とした．実験模型と天秤の固有振動数が 35Hz 付近であったことから，30Hz のローパスフィルターを施した．

3. 風方向および風直交方向の風力特性

空気力実験で得られた風力について，風方向の成分は抗力係数 C_D（式[1]），風直交方向の成分は変動揚力係数 C_L’（式[2]）により評価した．抗力係数 C_D は風方向風力の時間平均値，変動揚力係数 C_L’は風直交方向風力の変動成分の標準偏差を表す．風方向の風力は実験気流の乱れによる変動が比較的小さいことから，平均的な風力によって評価できる．一方，風直交方向の風力はカルマン渦の発生により周期的に変動するため，時間平均値はほぼゼロとなるものの，その変動の大きさが重要となる．このため，風直交方向の風力は標準偏差を用いて評価した．

$$C_D = D/(q_H \cdot A) \quad [1]$$

$$C_L' = \sigma_L/(q_H \cdot A) \quad [2]$$

D：平均抗力（N），σ_L：変動揚力（N）
q_H：模型高さ H での実験速度圧（N/m²）
A：見付面積（m²）

隅切サイズによる抗力係数 C_D の変化を**図-4** に示す．抗力係数 C_D は b/B=0.1 以上では概ね同程度の値を示し，風下隅切では正方形断面柱（b/B=0）より大きくなる．風上隅切では正方形断面柱より小さくなり，四隅に隅切を設けた場合もほぼ同じ値となる．

中口ら [5] は矩形断面における辺長比の違いによる抗力係数の変化を明らかにし，特定の辺長比（≒0.7）のとき，抗力係数が極大値をもつことを示した．風下側の隅切は

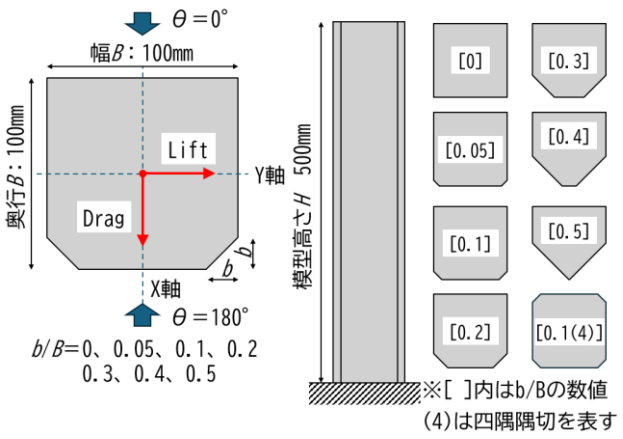


図-1 実験模型

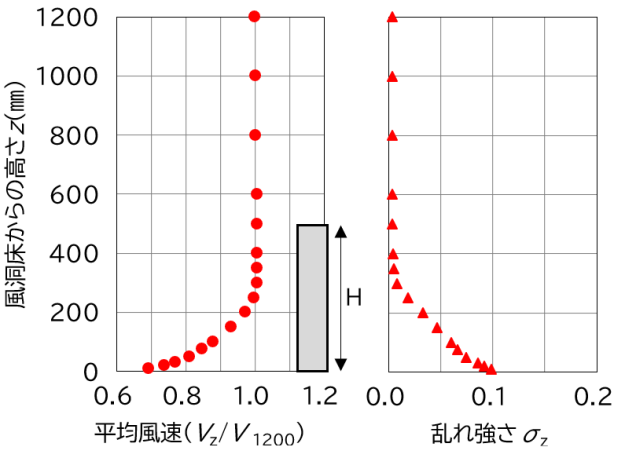


図-2 実験気流

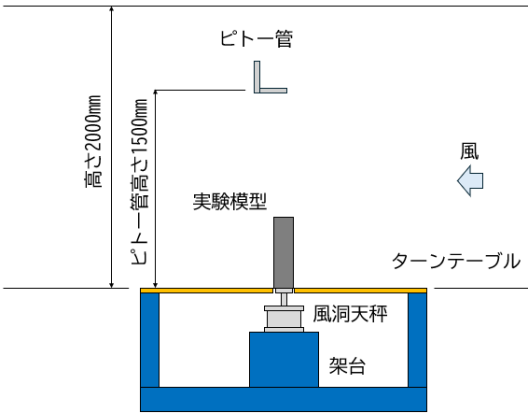


図-3 実験装置概要

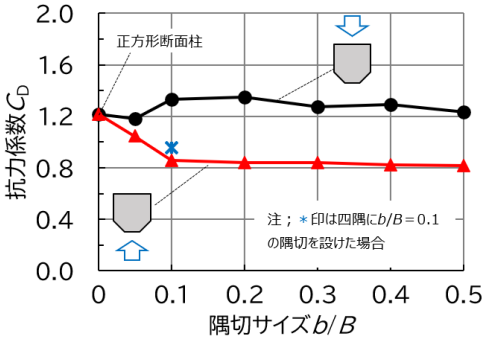


図-4 隅切の大きさによる抗力係数

流れに平行な側面の長さを小さくすることから，辺長比を小さくして抗力係数を増大させるのと似た効果を生んでいると考えられる．

隅切サイズによる変動揚力係数 C_L'の変化を**図-5** に示す．変動揚力係数 C_L'は，風下隅切の b/B＝0.05～0.3 で正方形断面柱の値より大きく，さらに b/B が大きくなると正方形断面柱より小さくなる．一方，風上隅切の C_L'は正方形断面柱より小さくなり，b/B＝0.1 では四隅に隅切を設けた場合とほぼ同じ値となる．

松本ら [6]による二次元角柱の研究では，風下側のみに b/B＝0.25 の隅切を設けることで角柱背後の流れの巻き込みが強まり，より強い渦が形成されるため C_L'が増加すると報告されている（**図-6**）．本実験でも風下隅切では同様の傾向が確認されたが，b/B の増加に伴い C_L'は減少し，b/B＞0.3 では正方形断面柱よりも小さくなった．これは，隅切サイズが大きくなることで剥離剪断層と側面および隅切部との距離が大きくなり，渦形成への寄与が小さくなるためと考えられる．また，隅切部に作用する負圧は，その風直交方向成分のみが揚力変動に寄与することも影響していると考えられる．

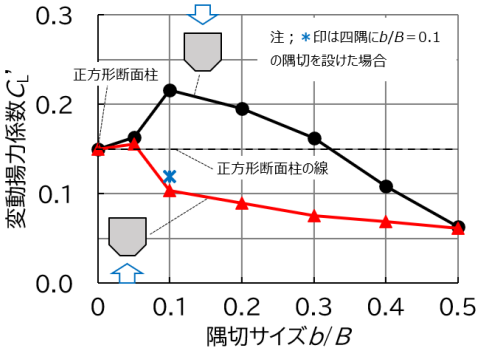


図-5 隅切の大きさによる変動揚力係数

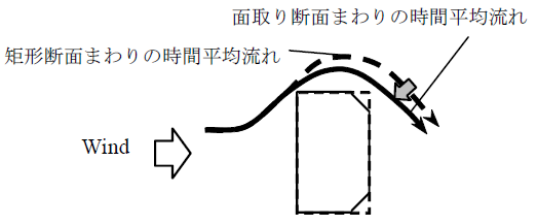
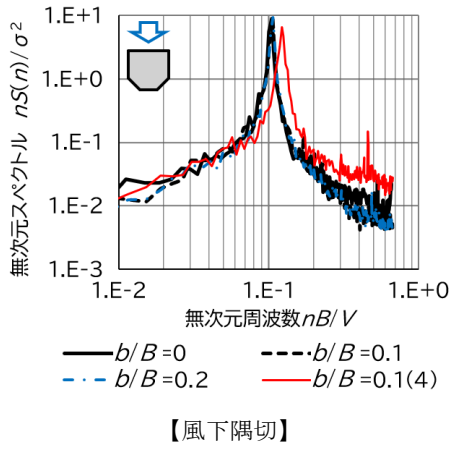


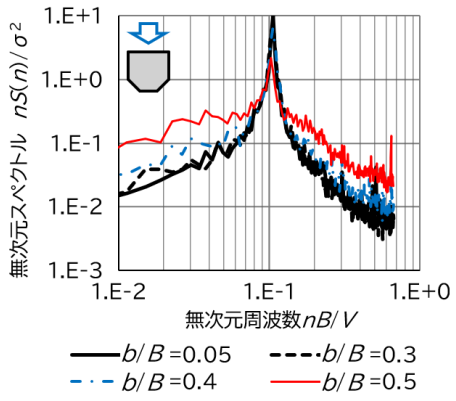
図-6 風下隅切による流れ場の変化
（文献 6 の Fig.7 を引用）

4. 転倒モーメントの周波数特性

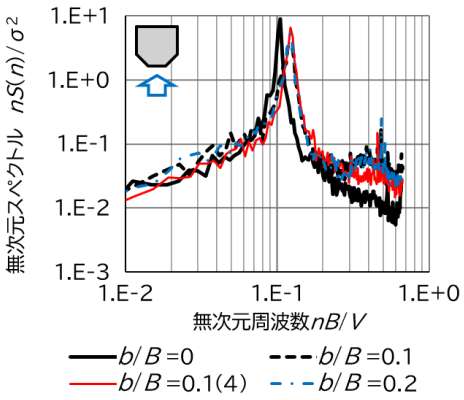
風洞実験で測定した転倒モーメントは，建物を一次モードの 1 質点系として表した場合の一般化変動風力に相当する．そこで，風による建物の励振特性を把握するため，変動転倒モーメント M_x の周波数特性をパワースペクトル密度（30 回平均）により評価した．**図-7** に変動転倒モーメントにおけるパワースペクトル密度の結果を示す．



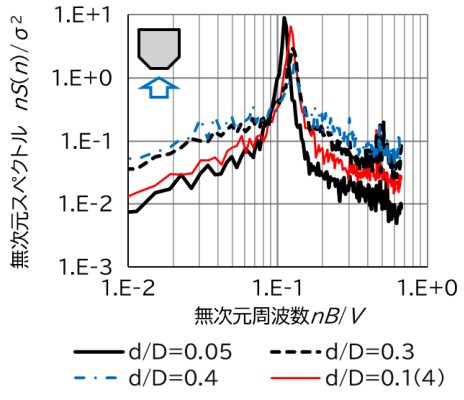
【風下隅切】



【風下隅切】



【風上隅切】



【風上隅切】

図-7 変動転倒モーメントのパワースペクトル密度

正方形断面柱では無次元周波数 nB/V=0.11 付近でピークが出ており，風下側のみに隅切をもつ角柱のピーク周波数もこれとほぼ一致することから，正方形断面と風下側のみに隅切をもつ角柱では流れの剥離と渦の放出の状態は類似していると考えられる．一方，風上側に隅切をもつ角柱では高周波側にピーク位置が移動し，b/B=0.1～0.3 では四隅に隅切を設けた場合と近い位置にピークがあり，b/B=0.4 以上ではさらに高周波側にピーク位置がずれる．以上のことから，正方形断面と風上側に隅切をもつ角柱では，流れの剥離の状態が異なっていることがわかる．なお，風上に隅切をもつ角柱のうち b/B=0.05 では四隅に隅切を設けた場合より低周波側にピーク位置がずれており，正方形断面柱に近いピーク周波数をもつことがわかる．

スペクトルピーク位置の無次元周波数はストローハル数 St（=nB/V）として角柱後方で規則的に発生する渦の周波数を表わす．**図-8** は隅切位置によって St 数が 2 つのグループに分けられることを示す．風上側に隅切をもつ角柱（四隅に隅切があるものを含む）は St≒0.125，風下側のみに隅切をもつ角柱は St≒0.105 の値をもち，後者は隅切のない正方形断面柱と同じグループに属する．風上側に隅切をもつ角柱は比較的高い周波数の渦を放出し，揚力変動も比較的小さい（**図-5**）ことから，**図-9 (a)** に示すように剥離剪断層が風上側隅切部で再付着していると考えられる．風下側のみに隅切をもつ角柱のストローハル数は比較的小さく，同時に揚力変動は大きいことから，**図-9 (b) に示すように**剥離剪断層が角柱後方により回り込み十分に成長した渦を放出しているといえる．

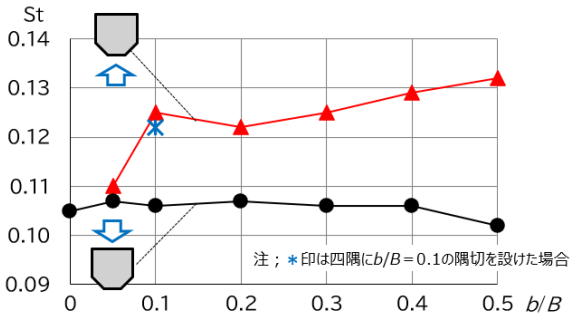
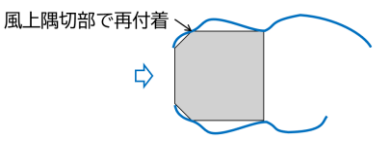
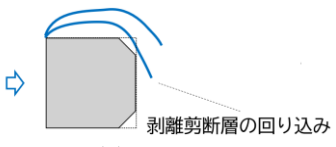


図-8 ストローハル数



(a) 風上隅切



(b) 風下隅切

図-9 隅切と剥離剪断層の関係

5. 風による建物応答の評価

風力係数や転倒モーメントの特性を把握することは重要であるが，実際には建物がどの程度揺れるかが関心事項となる．そこで本章では，鉄骨造の高層建築物を想定し，風洞実験で得られたデータに基づいて建物の応答変位を算出した．応答変位の算定方法および算定条件を以下に示す．

＜計算条件＞
模型縮尺：1/400
実建物の高さ H：200 m
実建物密度：180 kg/m^3（質量は平面形状により変化）
実建物の固有振動数 n_0：0.25 Hz
実建物の減衰定数 η：0.01
評価時間 T：600 s

＜計算式＞

$$y_{max} = \bar{y} + g \cdot \sigma_y \quad [3]$$

$$\bar{y} = \frac{\bar{F}_g}{(2\pi \cdot n_0) \cdot M_g} \quad [4]$$

$$g = \sqrt{2ln(n_0 \cdot T) + 1.2} \quad [5]$$

$$\sigma_y = \frac{\tilde{F}_g}{(2\pi \cdot n_0)^2 \cdot M_g} \sqrt{1 + \frac{\pi}{4\eta} \cdot \frac{n_0 S(n_0)}{\sigma^2}} \quad [6]$$

y_{max}	:	応答変位の最大値 [m]
$\bar{y}$	:	応答変位の平均値 [m]
σ_y	:	応答変位の標準偏差 [m]
$\bar{F}_g$	:	並進振動 1 次モードの一般化平均風力 [N]
$\tilde{F}_g$	:	並進振動 1 次モードの一般化変動風力[N]
g	:	ピークファクター
n_0	:	並進振動 1 次モードの固有振動数 [Hz]
M_g	:	並進振動 1 次モードの一般化質量 [kg]
η	:	並進振動 1 次モードの減衰定数
$\frac{n_0 S(n_0)}{\sigma^2}$	:	一般化変動風力の無次元パワースペクトルの固有振動数 n_0 成分（実験値）

風速による応答変位（最大値）の変化を**図-10** に示す．風下側のみに隅切をもつ角柱では，**図-8** に示したようにストローハル数が正方形断面柱とほぼ同じ値であったことから，隅切サイズが変わっても応答変位が最大となる風速は概ね一致する．一方，風上側に隅切をもつ角柱では，ストローハル数が正方形断面柱より高くなることから，応答変位が最大となる風速は正方形断面柱より低くなる．しかし，全風速域を通じた最大応答変位は風下側のみに隅切をもつ角柱で確認されたが，風速レベルによっては風上側に隅切をもつ角柱の方が大きい変位になる場合もある．そこで代表的な三つの風速レベル（60m/s,

80m/s，95m/s）での応答変位を図-11 に示した．各風速段階において傾向が異なっており，風速 60m/s では正方形断面柱，風下側のみに隅切をもつ角柱，風上側に隅切をもつ角柱（四隅に隅切をもつ場合を含む）は概ね同じ値をもつ．風速 80m/s では風上側に隅切をもつ角柱（四隅に隅切をもつ場合を含む）の応答変位が大きいが，風速 95m/s では風下側に隅切をもつ角柱で応答変位が大きくなる結果となった．

応答変位の変動成分は，変動揚力係数，一般化変動風力の無次元パワースペクトル（周波数特性），メカニカルアドミッタンス（建物の振動特性）の関係で決まる．変動揚力係数は，風下側のみに隅切をもつ角柱で大きくなる傾向にあり，b/B＝0.1～0.3 では風上側に隅切をもつ角柱より 2 倍以上の値を示した（図-5）．一方，一般化変動風力の無次元パワースペクトルは，風下側のみに隅切をもつ隅切の角柱で鋭いピークを示したが，風上側に隅切をもつ角柱はより高周波側でピークをもつ（図-7）．これらを応答変位で評価すると，図-11 で示すように，風下側のみより風上側に隅切をもつ角柱の方が大きくなる風速域もある．したがって，高層建築物の隅切について言えば，隅切の形状・寸法だけで空力効果を論じることができず，先行研究で報告されている隅切効果の違いは当然の結果であったと考えられる．

6. まとめ

隅切による風力や風応答の変化についてはこれまで多くの研究が行われているが，応答が増大する場合と低減する場合が報告されており，その要因は十分整理されていなかった．本研究では風上側隅切と風下側隅切を分離し風洞実験によりその空力効果の違いを検証し，以下の知見が得られた．

1）風上隅切と風下隅切では空力挙動が大きく異なり，風上隅切では変動揚力が低減し，風下隅切では増大する傾向を示した．
2）風上隅切では剥離せん断層の再付着が促進され，渦放出が抑制されると考えられた．
3）風下隅切では角柱後流の渦形成が強まり，変動揚力が増加することが確認された．
4）隅切は変動風力の大きさだけでなく，渦放出周波数にも影響を与えることが確認された．
5）建物応答は風力特性と振動特性との組合せによって決まり，隅切形状のみから評価することはできないことを示した．

本研究は隅切の設計手法を提案するものではないが，風上隅切と風下隅切の空力効果が本質的に異なることを示し，従来報告されてきた隅切効果に関する知見の相違を理解するための一つの説明を与えたものと考えられる．今後はアスペクト比，構造特性，実験気流等の影響について検討を進め，設計への適用条件を整理していく必要がある．

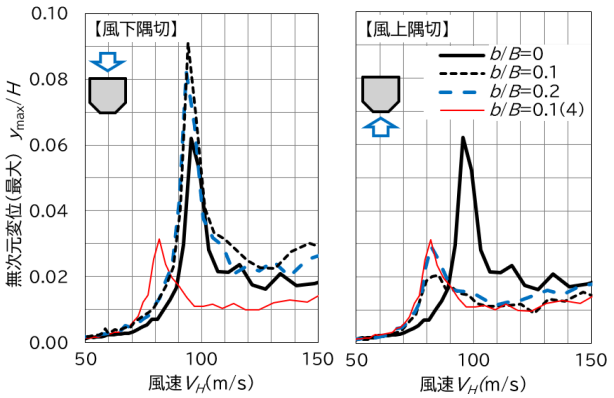
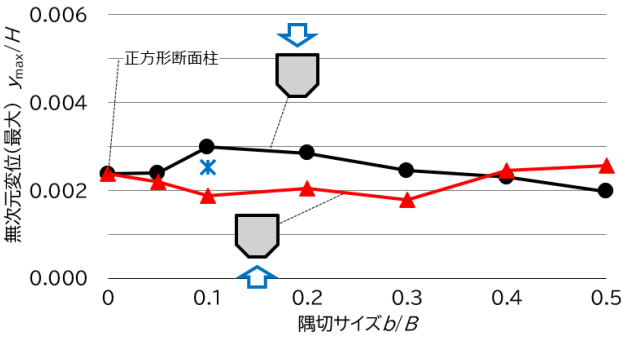
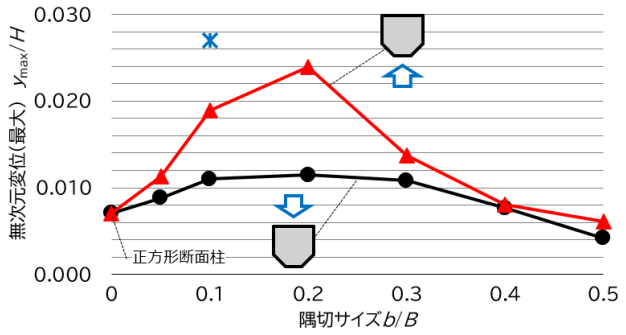


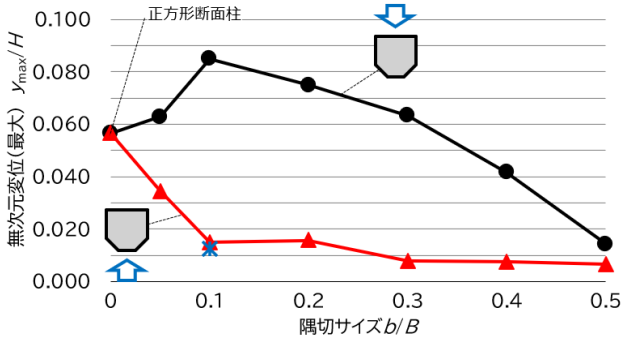
図-10 風速による応答変位の変化



【60m/s】



【80m/s】



【95m/s】

注；＊印は四隅に b/B=0.1 の隅切を設けた場合

図-11 三風速レベルにおける応答変位

参考文献

1) 白石成人，松本勝，白土博通，石崎浩，長田信，松井俊彦：隅切りによる矩形断面の空力安定化効果，第 9 回風工学シンポジウム，pp.193-198，1986 年
2) 西村宏昭，谷池義人：高層建物の隅角部形状が振動性状に及ぼす影響について，日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），pp.123-124，1989 年 10 月
3) 河井宏允，高口真，中村孝行：超高層建築物の渦励振に及ぼす隅の形状の効果，第 13 回風工学シンポジウム，pp.281-286，1994 年
4) 天野輝久：一様流中における三次元四角柱の渦励振およびギャロッピングに及ぼす隅欠き・隅切りの効果，日本建築学会構造系論文集，第 478 号，pp.63-69，1995 年 12 月
5) 中口博，橋本貴久裕，武藤真理：矩形断面の柱の抗力に関する一実験，航空学会誌　第 16 巻，第 168 号，pp.1-5，1968 年 1 月
6) 松本勝，八木知己，李再炯，堀高太郎，川島由紀，橋本三智雄：矩形断面の空力特性に及ぼすカルマン渦の枠割に関する基礎的研究，第 19 回 風工学シンポジウム，pp.313-318，2006 年