一様流中における三次元正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

THE EFFECT OF CORNER-CUTTING OF THREE-DIMENSIONAL SQUARE CYLINDERS ON VORTEX-INDUCED OSCILLATION AND GALLOPING IN UNIFORM FLOW

天野 輝久*

Teruhisa AMANO

The effect of two kinds of corner-cuttings on vortex-induced oscillation and galloping of three-dimensional square cylinders is investigated in uniform flow. The cross-wind response and vortex shedding frequency are measured on the models with corner-cutting ratios $e/d = 0/60$ to $20/60$, and the mass-damping parameter $\delta \approx 0.20, 0.50, 0.75$, together with the stationary over-turning moment measurement. As a result, it is found out that although the Strouhal number increases as the increase of corner-cutting ratio resulting in to lower the critical wind speed, the model cutted in right angle with the ratio $e/d = 4/60$ is most stable, because the vortex-shedding frequency is hardly locking-in until the wind speed becomes 30% higher than the critical. The Den-Hartog's criterion also suggests the advantage of this particular type of corner cutting.

Keywords : three-dimensional square cylinder, corner-cutting, mass-damping parameter, vortex-induced oscillation, galloping, frequency locking-in 三次元角柱, 隅欠き・隅切り, 質量減衰パラメータ, 渦励振, ギャロッピング, 周波数ロッキングイン

1. 序論

我が国初の超高層建築である霞ヶ関ビル(高さ147m)が1968年に竣工して以来, 現在までに, MM21 ランドマークタワー(296m, 1993年)を筆頭に, 高さ100m以上の超高層建築は220棟近くを数える。そして最近では, 更に高層の「超々高層建築」のプロジェクトも提案されている¹⁾。このような高層建築物では主要骨組の大部分が風荷重で決定される²⁾。そのため, 風荷重の合理的評価が重要であるばかりでなく, アスペクト比が大きく可撓性に富み軽量で減衰性に乏しい場合には, 渦励振やギャロッピング等の空力不安定振動の検討が必要となる。

しかし, G.V.Parkinson³⁾やM.Novak⁴⁾等によって確立された準定常的手法によるギャロッピング解析は, 共振風速付近ではその適用が困難である。そのため, 建築物荷重指針⁵⁾では, 石崎他^{6), 7)}, 西村他⁸⁾等の研究を参考にして, 地表面粗度区分や辺長比に応じた発振風速の目安を与え, それが設計風速を下回る場合には, 風洞実験により安全性を確認することになっている。

ところで, 構造物の隅角部の形状を変化させて剥離流

を制御することにより空力特性の改善を計る研究が数多く行われている。

まず, 二次元角柱についてはE.Naudascher他⁹⁾は角柱の各面にリブを取り付けたり, ある間隔を隔てて平板を取り付けるのがギャロッピングの抑制に効果的であることを示した。白石他¹⁰⁾は隅角部を長さ e だけ直角に欠き取ったり斜めにカットする(以下, 本論文では前者を「隅欠き」, 後者を「隅切り」と呼ぶ)ことによる空力安定化を試みた。その結果, 隅切りより隅欠きの方が効果的であり, 隅欠きサイズ $e/d = 2/18 \sim 3/18$, 特に, $e/d = 2/18$ が後流幅が小さく空力特性に優れ発振風速が高いことを示した。その後, 類似の実験が系統的に行われ, 空力特性や応答が急変するレイノルズ数(ジャンプレイノルズ数)が存在し, 角柱の辺長を代表長とするレイノルズ数が 10^4 以上になるように実験を行う必要性が指摘された¹¹⁾。畑他¹²⁾は乱れ強さ9%の一様乱流中で, 側面の2点間の風圧差を測定することにより, 文献(10)と同様, $e/d = 5/60 \sim 10/60$ で変動風圧係数が小さくなることを示した。

本研究の概要は日本建築学会大会学術講演会(東海)1994.8および同(北海道)1995.8で発表済みである。

* 琉球大学工学部環境建設工学科 助教授・工修

Assoc. Prof., Dept. of Civil Eng. and Architecture, Fac. of Eng., Univ. of the Ryukyus

一方、三次元角柱についても数多くの研究が行われている。西村他¹³⁾は一樣流中で、アスペクト比4、建物密度 150 kg/m^3 、減衰定数1%の2自由度ロッキング模型を用いた実験により、隅欠きサイズの小さい $e/d=1/16$ では、一旦生じた渦励振がそのままギャロッピングに移行し応答は不安定であること、 e/d が大きいと顕著な渦励振が低風速で生じることを示した。アスペクト比4~8、べき指数1/4程度の乱流境界層流中での揚力測定^{14)~17)}によれば、隅欠きや隅切りを施すと迎角に対する揚力勾配が小さくなること、変動揚力が小さくなりスペクトルのピークが下ること等が明らかにされている。また、アスペクト比4~10、建物密度 $120\sim 200\text{ kg/m}^3$ の乱流境界層流中での応答実験^{18)~22)}によれば、 e/d が小さい場合には、応答は風速の増加とともに単調に増加し、 $e/d=1/20\sim 1/16$ で最も小さくなること、 e/d が大きいと乱流中でも激しい渦励振が生じること等が明らかにされている。

以上述べたように、渦励振やギャロッピング等の空力不安定振動を抑制する方法の一つとして隅欠きや隅切りはかなり有効である。しかし、二次元角柱では辺長の1/10程度の隅欠きが最適であるのに対し、三次元角柱では最適サイズはそれよりやや小さいものと推測されるが、気流の特性、辺長比、アスペクト比、質量減衰パラメータの影響など未だ不明な点が多い。

そこで本研究では、高層建築物の不安定振動の解析法の確立を最終的な目標におき、隅欠きおよび隅切りを有するアスペクト比5の三次元正四角柱を用いて、一樣流中で応答実験および定常空気力の測定を行い、渦励振やギャロッピングに及ぼす隅欠き・隅切りサイズや質量減衰パラメータの影響を検討した。

2. 実験方法

実験に使用した風洞は琉球大学工学部のエッフェル型風洞である。測定断面は $1.0\text{ m} \times 1.0\text{ m}$ で床面より数cmの範囲を除いて風速分布は一樣で、乱れは0.5%以下と極めて小さい。

て小さい。

模型は辺長 $d=60\text{ mm}$ 、高さ $H=300\text{ mm}$ 、アスペクト比5の三次元正四角柱で、図-1に示すように風直角方向にのみロッキング振動するようにジョイントを介して厚さ 1 mm 、幅 60 mm の板バネで支持した。板バネは図-1に示す有効長さ r がそれぞれ68, 40, 30mmの3種類を使用した。ロッキング振動の不動点は板バネの高さの中央となるので、ジョイント部分を含めた模型の相当高さ H_0 はそれぞれ354, 340, 335mmとなる。

模型の材料にはウレタン、バルサおよび杉を用いた。模型は表-1に示すように基本断面である「正方形」と、隅角部を長さ e だけ直角に欠いた「隅欠き」と、斜めにカットした「隅切り」の3種類である。正方形模型は材料および頂部に貼付けた薄板の重量を変えた10体である。隅欠き模型と隅切り模型はウレタン(軽量)、バルサ(中量)およびバルサ模型の頂部に40g程度の重りを貼付けたもの(重量)の3種類である。隅欠き・隅切りサイズ e/d は0/60~20/60の12種類とした。なお、模型頂部の薄板の重量を微調整することにより各模型の慣性モーメント I を一致させて、固有振動数 f_0 がほぼ一定となるようにした。

本実験では模型の減衰に特別の制御を加えていない。そこで、 $r=68, 40, 30\text{ mm}$ の板バネを軽量、中量、重量の

図-1 模型の支持方法

表-1 模型の種類

Type	e/d	Num. of Models	r (mm)	H_0 (m)	$\tilde{\rho}_m \left\{ = \frac{\tilde{M}}{d^2 H_0} \left(\frac{\text{kg} \cdot \text{s}^2}{\text{m}^4} \right) \right\}$	f_0 (Hz)	h (%)	$\delta \left(= \frac{\tilde{\rho}_a \cdot h}{\tilde{\rho}} \right)$
(正方形)	0/60	10	40	0.340	1.16~14.19	6.02~17.50	1.1	0.14~1.25
(隅欠き)	0/60	12	68	0.354	2.16~2.38	9.61~9.80	1.0	0.17~0.19 (≈ 0.20)
	20/60	12	40	0.340	5.14~5.82	9.52~9.84	1.1	0.45~0.51 (≈ 0.50)
		12	30	0.335	7.47~7.95	8.98~9.69	1.2	0.72~0.76 (≈ 0.75)
(隅切り)	0/60	12	68	0.354	2.28~2.38	9.50~9.80	1.0	0.18~0.19 (≈ 0.20)
	20/60	12	40	0.340	5.39~5.82	9.50~9.88	1.1	0.47~0.51 (≈ 0.50)
		12	30	0.335	7.33~7.79	9.11~9.69	1.2	0.70~0.75 (≈ 0.75)

各模型に取付け、減衰定数 h を調べた。図-2に平均値(○)および標準偏差(ト)と模型頂部の振幅 y との関係を示す。各模型でそれぞれ $y \approx 5, 4, 3\text{mm}$ 以下で振幅依存性が認められるが、それ以上の振幅では $h \approx 1.0, 1.1, 1.2\%$ と一定である。従って、表-1に示すように、各模型の質量減衰パラメータ $\delta \{=(\bar{\rho}_m/\rho)h\}$ は0.20, 0.50, 0.75の三種類となる。ここに $\bar{\rho}_m \{=\tilde{M}/d^2H_0; \tilde{M}=I/H_0^2\}$ は一般化密度であり、 ρ は空気密度である。因に、 $\delta \approx 0.50$ は建物密度 180kg/m^3 、減衰定数1%程度の一般的な高層建築物²³⁾に相当する。

角柱頂部の振幅 y を板バネに貼付した歪ゲージにより測定し、シグナルプロセッサ(7T08S, 日本電気三栄)により標準偏差 σ_y を求めた。平均風速 U はピトー管により測定し、渦発生周波数 f_v は角柱の中心から風方向に $2d$ 、風直角方向に $1.5d$ の位置で熱線風速計(8100, KANOMAX)で測定した変動風速のパワースペクトルのピーク周波数から求めた。

一方、定常空気力の測定は図-3に示すように模型を5分力計(LMC-5510-5, 日章電機)に固定し、図-4に示した角柱底面での建物軸方向の転倒モーメント M_x, M_y 、 Y 方向の変動転倒モーメント $M_{y\text{rms}}$ を風向角 α を変えて測定した。各空気力係数の定義を図中に示す。

図-2 各模型の減衰定数

図-3 定常空気力の測定方法

$$C_{Mx} = \frac{M_x}{\frac{1}{2} \rho U^2 d H^2}$$

$$C_{My} = \frac{M_y}{\frac{1}{2} \rho U^2 d H^2}$$

$$C_{My\text{rms}} = \frac{M_{y\text{rms}}}{\frac{1}{2} \rho U^2 d H^2}$$

図-4 空気力の定義

3. 角柱の応答

3.1 正四角柱の応答

正四角柱の応答と渦発生周波数 f_v の一例($\delta \approx 0.70$)を図-5に示す。横軸は無次元風速 $V (=U/f_0 d)$ であり、応答は標準偏差 σ_y を角柱の相当高さ H_0 で除した無次元振幅 σ_y/H_0 で表わした。風速を上げた場合(○印), 応答は $V \approx 8$ から大きくなり、共振風速 $V^* = 9.1 (=1/S, S$: ストロークハル数)を越えても増大し続け、 $V \approx 13$ で急激に小さくなる。逆に、風速を下げた場合(●印)は、 $V \approx 13$ になっても小さいままで $V \approx 11$ で急激に増大し、それ以降は風速を上げた場合と同じ経路をたどる。このように角柱の応答にはヒステリシスが認められ自励的渦励振の様相を呈する。 f_v は風速が小さい範囲では風速に比例するが、 $V \approx 0.8V^*$ から固有振動数成分が現われ、周波数ロッキングが応答の顕著な $V \approx 13$ まで続く。

図-6は σ_y/H_0 が $5/1000$ および $1/100$ を越える風速(以下、限界風速と呼ぶ)の範囲を示す。 $\delta \approx 0.5$ 以下では限界風速を越えると渦励振がそのままギャロッピングに移行

図-5 正四角柱の応答と渦発生周波数($\delta \approx 0.70$)

図-6 空気不安定領域(正四角柱)

図-7 無次元風速と応答振幅の関係

するが、 $\delta \approx 0.5$ 以上では自励的渦励振のみが生じる。このように三次元角柱では、スクルートン数 $S_c = \{(\rho_m/\rho) \cdot 2\pi h\}$ が10以上の二次元角柱²⁴⁾で見られるギャロッピングに起因する不安定領域は認められない。

3.2 隅欠き・隅切りを有する正四角柱の応答

隅欠きおよび隅切りを有する正四角柱の無次元風速 V と無次元振幅 σ_y/H_0 の関係を図-7に示す。

まず、(a)の隅欠きの場合、 $\delta \approx 0.20$ の $e/d = 0/60 \sim 8/60$ 、 $\delta \approx 0.50$ の $e/d = 0/60 \sim 5/60$ のように、 δ が小さいか e/d が小さい場合には、 $V = 6 \sim 7$ から応答が急激に増加するギャロッピングが生じる。応答の大きさは $e/d = 4/60$ までは e/d が大きい程小さく、逆に、 $e/d = 4/60$ 以上では e/d が増えると増大する。 $e/d = 3/60$ と $4/60$ は他と異なっ

て、渦励振がやや収まりかけた後にギャロッピングに移行する複合型となっている。 $e/d = 4/60$ は応答が大きくなり始める風速(発振風速)が最も高く、1/10が最適である二次元角柱^{10),12)}と違って、三次元角柱では4/60、すなわち1/15が最適であることを示している。一方、 $\delta \approx 0.20$ の $e/d \geq 10/60$ 、 $\delta \approx 0.50$ の $e/d \geq 6/60$ では、特定の風速で応答が大きくなる自励的渦励振が生じている。そして、 e/d が大きいほど発振風速が低い。

一方、(b)の隅切りは $\delta \approx 0.20$ の $e/d = 0/60 \sim 7/60$ でギャロッピングが生じており、それ以外は渦励振型である。隅欠きで見られた複合型の応答は認められない。最適な隅切りサイズは隅欠きと同じく、発振風速が最も高い $e/d = 4/60$ である。

図-8 応答と渦発生周波数 ($e/d = 4/60$, $\delta \approx 0.50$)

応答抑制に最適であった隅欠き・隅切りサイズ $e/d = 4/60$ について、後流中の渦発生周波数 f_v (○印) および角柱の応答周波数 f_y (×印) と V との関係を図-8に示す。図中には応答結果も示しており、隅欠きと隅切りとを比べると隅欠きの方が応答がかなり小さい。隅切りの場合、正四角柱 (図-5) と同じように、 $V^* (=7.9)$ の8割程度の風速から渦励振の収まる $V \approx 17$ まで、 f_v が角柱の運動に引き込まれる周波数ロッキングインが続く。これに対して、隅欠きでは低風速で V に比例して増加する f_v が、 V^* の7割程度の $V \approx 5$ から比例関係を下まわりながら f_0 に漸近する特異な形をとり、 V^* の約1.3倍の $V \approx 10$ になって始めて f_0 に一致する。そして、角柱の応答周波数にも f_v と同じ成分が認められる。このように、隅欠きの $e/d = 4/60$ が空力的に最も安定しているのは、共振風速を越えるかなりの高風速まで渦発生周波数が角柱の固有振動数に一致しないためである。

図-9にその他の隅欠きおよび隅切りサイズについて f_v と V の関係を示した。斜線部は f_v が f_0 に一致する領域を示し、一点鎖線は共振風速を示す。隅欠き・隅切りとも $e/d = 4/60$ までは、 e/d の増加とともに共振風速が低下するにも拘わらず $f_v \approx f_0$ となる風速は高くなり、それ以上では逆に低くなっている。そして、隅欠きの $e/d = 4/60$ だけが共振風速を大きく越えた風速まで f_v が f_0 に一致しない。

図-10に σ_y/H_0 が $1/100$ を越える空力不安定領域を示す。隅欠き・隅切りとも、 $e/d = 0/60 \sim 4/60$ では e/d の増加

図-9 周波数ロッキングイン領域

図-10 空力不安定領域 ($\sigma_y/H_0 \geq 1/100$)

とともに限界風速は徐々に高くなる。それ以上では e/d の増加とともに低くなり、隅欠き・隅切りサイズの大きいものでは正方形断面よりも低くなっている。いずれの δ においても $e/d = 4/60$ の限界風速が最も高く、特に、隅欠きの $\delta \approx 0.75$ は $V \approx 18$ と極めて高くなっている。不安定領

図-11 定常空気力に及ぼす e/d の影響 ($\alpha = 0^\circ$)

域にはギャロッピングと渦励振とにそれぞれ起因する領域があり、その境界が例えば偶欠きの $\delta \approx 0.50$ では $e/d = 6/60 \sim 7/60$ となっている。このような不安定領域 ($V-e/d$ 図) は、図-6 に示した正方形断面の不安定領域 ($V-\delta$ 図) と似ており、 e/d があまり大きくない限り、 e/d を増すことと δ を増すことは同じ効果があることが判る。

4. 定常空気力

図-11 に偶欠き・偶切りを有する三次元角柱の風向角 $\alpha = 0^\circ$ における風方向の転倒モーメント係数 C_{MX} 、風直角方向の変動転倒モーメント係数 C_{MYrms} およびストローハル数 S と e/d との関係を示す。偶欠きと偶切りとで C_{MX} は概ね同様の傾向を示す。正四角柱では C_{MX} は 0.8 程度であるが、偶欠き、偶切りを施すと、 $e/d = 6/60$ でその約 7 割に低下する。しかし、 $e/d = 6/60$ 以上では e/d を増しても C_{MX} は殆ど変化せず、再び増加する二次元角柱¹⁰⁾とは異なっている。ストローハル数 S も偶欠きと偶切りはほぼ同様の傾向を示し、 $e/d = 6/60$ までは e/d が増えると増加し、 C_{MX} の変化とは逆になっている。

次に、偶欠き・偶切りのない場合の C_{MYrms} は 0.02 で、二次元角柱の変動揚力係数¹²⁾に比べて極めて小さい。そして、偶欠きで $e/d = 2/60 \sim 4/60$ 、偶切りで $e/d = 4/60 \sim 5/60$ でその 2~3 倍と大きくなるが、 e/d の増加とともに再び小さくなる。 C_{MYrms} が $e/d \approx 4/60$ で大きくなるのは、図-12 に示すパワースペクトル密度から分かるように、低周波領域に大きなパワーがあり、渦発生がかなり不安定であるためである。

図-13 は風直角方向の転倒モーメント係数 C_{MY} と α との関係を表わしたものである。偶欠きを施すと剥離せん断層が角柱側面に近づくために、 C_{MY} が最小となる風向角は偶欠きのない場合に比べて小さくなる。最も小さいのは $e/d = 3/60 \sim 4/60$ で約 10° である。 e/d を増すとこの風向

図-12 変動転倒モーメントのパワースペクトル密度

図-13 C_{MY} と風向角 α の関係

角は再び大きくなる。そして、 $e/d = 10/60$ 以上では C_{MY} は α によらず正の値をとるようになり、始めから再付着型となっている。なお、偶切りの C_{MY} も全体的にほぼ同様の傾向を示す。

図-13 の各曲線は $\alpha \approx 0^\circ$ 付近が最も適合するように、 C_{MY} と α の関係を一次と三次の係数を持つ多項式で近似したものである。この近似式の $\alpha = 0^\circ$ における係数である Den Hartog の判別式²⁴⁾を表わしたのが図-14 である。偶欠きでは $e/d = 7/60$ 以下で負となり不安定となるが、 $e/d = 4/60$ は不安定度がやや小さい。偶切りでは $e/d = 5/60$ 以下で負となる。

図-14 Den Hartog の判別式と e/d の関係

5. 結論

本研究は三次元角柱の渦励振やギャロッピング等の空力不安定振動に及ぼす隅欠き・隅切りの効果を明らかにするために、3種類の質量減衰パラメータを有する模型を用いて、一様流中で応答実験および定常空気力の測定を行った。本研究により明らかになった事項を列記すれば以下の通りである。

- 隅切りより隅欠きの方が空力安定効果は大きい。
- 空力不安定振動を抑制するための最適な隅欠きサイズ e/d は、周波数ロッキングインが特異な形をとり、渦発生周波数が共振風速の約 1.3 倍の風速まで固有振動数に一致しない $4/60$ 、すなわち $1/15$ である。
- e/d が大きすぎると低風速から発振する渦励振が生じるので不適切である。
- 応答パターンを特徴づける正四角柱の空力不安定領域 ($V-\delta$ 図) と、隅欠き・隅切りを有する四角柱の不安定領域 ($V-e/d$ 図) は形状が似ており、 e/d があまり大きくない限り、 e/d を増すことは質量減衰パラメータを増すことと類似の効果をもたらす。
- 風直角方向の変動転倒モーメント係数は、正四角柱では 0.02 程度だが、 $e/d \approx 3/60 \sim 5/60$ では低周波領域での不安定な変動に起因してその 2~3 倍となる。
- Den Hartog の判別式によれば、隅欠きで $e/d \approx 7/60$ 、隅切りで $e/d = 5/60$ 以下で負となる。

今後、乱流中での隅欠き・隅切りの効果を明らかにするとともに、空力不安定振動を含む風直角方向応答の解析手法の開発が必要と思われる。

〈謝 辞〉

本研究を行うに当たり御指導頂いた神奈川大学教授大熊武司先生、東京工業大学教授和田章先生に深く感謝申し上げます。また、実験を行うに際し、琉球大学卒論生、花城克尚君、宮城哲矢君、酒瀬川政友君、福島弘志君、加藤英五君および修論生、水田和宏君に多大の協力を頂いた。

〈参考文献〉

- 1) 近藤宏二, “風と超高層”, 建築技術, pp.123-125, 1994.7
- 2) 大熊武司, “風と建築—室戸台風から横浜ランドマークタワーまで”, 建築技術, pp.60-67, 1994.7
- 3) Parkinson, G.V., “Aeroelastic Galloping in one Degree of Freedom”, Proc. Int. Conf. on Wind Effects on Buildings and Structure (Teddington), Her Majesty's Stationary Office, pp. 582-609, 1963
- 4) Novak, M., “Galloping Oscillation of Prismatic Structures”, Proc. ASCE, Vol. 98, EM1, pp.27-46, 1972.2
- 5) 日本建築学会, “建築物荷重指針・同解説”, pp.273-279, 1993.6
- 6) 石崎澁雄, 谷池義人, “風向直角方向に振動する角柱の空力不安定性について”, 日本建築学会論文報告集, 第 306 号, pp.11-19, 1981.8
- 7) 石崎澁雄, 谷池義人, “同上—続報—”, 日本建築学会論文報告集, 第 307 号, pp.24-33, 1981.9
- 8) 西村宏昭, 谷池義人, “境界層流中における高層建物の空力不安定振動, 正方形断面をもつ高層建物の場合”, 日本建築学会構造系論文集, 第 456 号, pp.31-37, 1994.2
- 9) Naudascher, E., Weske, J.R. and Fey, B., “Exploratory Study on Damping of Galloping Vibrations”, J. Wind Eng. and Ind. Aero, Vol. 8, pp.211-222, 1981
- 10) 白石成人, 松本 勝他, “隅切りによる矩形断面の空力安定効果”, 風工学シンポジウム, pp.193-198, 1986
- 11) 白土博通, 松本 勝, “隅切り断面の空力諸特性に及ぼすレイノルズ数効果”, 日本風工学会誌, 第 59 号, pp.5-9, 1994.5
- 12) 畑健太郎, 神田 順他, “風圧の諸特性に対する隅切りの効果”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 I, pp.1065-1066, 1993.9
- 13) 西村宏昭, 谷池義人, “高層建物の隅角部形状が振動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, pp.123-124, 1989.10
- 14) 林田英俊, 岩佐義輝, 又木義浩, “超々高層建物の渦励振に関する空力的形状効果”, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp.141-142, 1988.10
- 15) 上森康幹, 崔 恒, 神田 順, “風直角方向における変動風力の統計的特性”, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), pp.117-118, 1989.10
- 16) 浅見 豊, “高層建物の風振動に関する風洞実験 その 1 矩型建物の隅切り効果について”, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), pp.125-126, 1989.10
- 17) 山本浩二, 中山昌尚他, “超高層建物の風応答に及ぼす隅切り効果”, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), pp.113-114, 1990.10
- 18) Kwok, K.S.C. and Bailey, P.A., “Aerodynamic Devices for Tall Buildings and Structures”, J. Eng. Mech., ASCE, Vol. 113, pp.349-365, 1987
- 19) 西村宏昭, 谷池義人, “高層建物の隅角部形状が振動に及ぼす影響について, その 2: 境界層乱流中の応答特性”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.115-116, 1990.10
- 20) 大熊武司, 丸川比佐夫他, “隅欠きとバルコニーを有する超高層建物の風洞実験, その 2-振動性状”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1097-1098, 1993.9
- 21) 松井正宏, 日比一喜他, “基本角柱の空力低減方法に関する実験的研究”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.175-176, 1994.9
- 22) 高口 真, 河井宏允, “超高層建築物の風による振動の低減”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.181-182, 1994.9
- 23) Scruton, C. and Flint, A.R., “Wind-excited Oscillations of Structures”, Proc. of the Institution of Civil Engineers, Vol.27, pp.673-702, April, 1964
- 24) 日本建築学会, “建築物荷重指針・同解説”, pp.254-255, 1970

(1995年5月10日原稿受理, 1995年8月23日採用決定)