特集

高さへの挑戦

各種建物形状による超々高層建物の空力特性変化 Aerodynamic Characteristics of Super Tall Buildings with Unconventional Configurations

田中英之^{*1}

田村幸雄^{*2}

金容徹^{*3}

Hideyuki TANAKA, Yukio TAMURA, Yong Chul KIM

1. まえがき

2008年のリーマンショック以降、世界最高高さ828mの超々高層建物であるBurj Khalifaの建設計画が危ぶまれるなどのニュースがあり、世界の超々高層建物の建設ラッシュに陰りが垣間見えたが、近年の超々高層建物の高層化にはやはり目を見張るものがある。高層化が顕著に表れている数値としては、建物高さが300m以上の建物の竣工数が挙げられる。2010年1月時点において、その竣工数は当時40棟程度であったが¹⁾、4年後の2013年1月時点において、その数は80棟以上に倍増している。ちなみに日本で300m以上の超々高層建物は、2014年に竣工予定のあべのハルカスが初となる。このような高層化の一方で、世界の建物高さの上位100棟の建物形状にも注目してみると、正方形角柱や長方形角柱といった整形な建物は、5%に満たず、建物隅角部形状に工夫を加えた建物が25%、その他、建物の水平断面が複雑なものや高さ方向に断面が変化しているものなど、不整形な建物が残りの70%を占めている(2010年1月時点の建物諸元調査結果¹⁾から大まかに分類)。このような不整形な建物形状は、建物高さが高いものほど多い傾向にあり、前述の高層化と相まって、不整形で独創的な形状の超々高層建物が、都市のランドマーク・アイコン(象徴、シンボル)としての役割を担って増加している。そこには、建築意匠的な

面白さや美しさだけではなく、風に対する空気力学的な合理性もある。それは、不整形な建物形状が、その空力特性の優位性によって風荷重を低減できる点にあり、風荷重が支配的となる超々高層建物において、その建物形状による風荷重の低減効果は、安全性や経済性に大きな影響を与える。風荷重を低減するために空力特性を改善する手法の有効性は、これまで多くの文献によって示されてきており、建物隅角部形状の形状パラメーターを変化させるなどした研究事例は多い。しかし、形状の異なる多数の建物形状間でその空力特性が統一的に比較された研究事例はこれまでなく、「どの建物形状が風に対してより有利なのか?」との問いに答えることは難しかった。そこで、国土交通省・建設技術研究開発費(平成20年度、21年度)の補助を受け、東京工芸大学、竹中工務店、鹿島建設、日建設計、日本設計による共同研究として、複数の異なる建物形状間で空力特性が比較され、耐風設計上の優位性が評価された¹⁾。この研究は、その後も科学技術振興機構・戦略的国際科学技術協力推進事業(日中研究交流)(平成22年度~24年度)として、国際的な共同研究に発展している。

本稿では、この共同研究の成果の一部^{2)~4)}を紹介するとともに、建物形状の変化による周囲の気流性状の変化についても簡単に触れる。

*1 株式会社竹中工務店 技術研究所 研究主任

Associate Chief Researcher, Takenaka Research & Development Institute, Takenaka Corporation

*2 東京工芸大学 工学部 建築学科 教授

Professor, Department of Architecture, Tokyo Polytechnic University

*3 ソウル科学技術大学 工学部建築学科(建築学専攻) Lecturer

Lecturer, School of Architecture (Architecture Program), Seoul National University of Science and Technology

2. 建物形状による空力特性の変化

2. 1 風力低減に効果のある建物形状

風力の低減に有効な建物形状としては、多角形やクローバー型^{5),6)}等、隅角部形状の工夫⁷⁾⁻¹¹⁾等といった水平断面を変化させた建物形状の事例の他、尖塔形状¹²⁾⁻¹⁵⁾等やセットバック^{14),15)}等のように高さ方向に断面を絞った先細りの形状、開口の設置^{9),17)}など建物形状を大きく変化した事例まで多岐にわたっている。中でも隅角部形状を工夫した研究事例は多く、実際の建物にも多く見られる隅角部形状の例としては、面取り、切欠き、隅丸などがある。風力の低減に効果のある面取りや切欠きのサイズとしては、建物幅の10%程度で十分な効果が得られている^{7),10),11)}。また、最近では、テーパを設けた形状やセットバックなどの尖塔形状についての研究事例も増えてきており、底面と頂面の幅の差を建物高さで除して算出したテーパ率が5~10%の範囲では、テーパ率が大きいほど空力特性は良い傾向にある¹⁵⁾。開口を有する建物形状の研究事例では、壁面中央部に開口を設ける場合、1方向にだけ設けるよりも、風方向と風直交方向の2方向に設けるほうが空力特性は良い^{9),17)}。

2. 2 複数の建物形状間の空力特性の比較

共同研究1)では、既に竣工した建物や計画中の建物の中から不整形な形状を有する建物をピックアップしていくつかの κατηγοリーに形状を分類している。これらの分

類結果と2.1で示した既往の研究事例を参考に選定された30体以上の建物形状が風洞実験の対象とされた。

図1は、基本形状を高さ400m、幅50mの正方形角柱①Square)として、建物の高さと同じという条件下で複数の建物形状の最大変動風力係数(全風向中で最大の変動風力係数(標準偏差))を比較したものである。この変動風力係数は風応答に大きく関係しており、特に風直交方向の変動風力係数が重要である。図中の2本の横線は、①Squareの風直交方向の最大変動風力係数(上)と風方向の最大変動風力係数(下)に相当しており、これらの横線よりも棒グラフが下であれば、正方形角柱より空力特性が優れていることを示す。

図1で比較されている建物形状は、①Squareの他、長方形、三角形、円、楕円といった整形な建物形状(②~⑤)と隅角部を工夫した形状(⑥~⑧)、開口を設けた形状(⑩~⑮)、傾いた形状(⑯、⑰)、尖塔形状を含む錐形状(⑱~⑳)、螺旋形状(㉑~㉒)などである。また、これらの単一の形状要素を複数組み合わせた複合形状(㉓~㉔)についても比較が行われている。ただし、曲面を有する形状(㉕Circularと㉖Elliptic、㉗180° Helical Elliptic)については、実構造物との対応を考える場合、レイノルズ数の影響を考慮する必要があるため、図中の値は参考値としての意味合いが強い。なお、㉕Circularの直径を基準長さとした風洞実験スケールのレイノルズ数は $Re=2.9 \times 10^4$ である。

図1 様々な建物形状の最大変動風力係数の比較

図 1 より、面取り(⑥Corner Chamfered)や切欠き(⑦Corner Cut)といった隅角部のわずかな形状変化が風力の低減に大きな効果をもたらすことがわかるが、4 面にテーパを設けた形状(⑭4-Tapered)やセットバック(⑳Setback)、螺旋形状(㉓~㉖Helical Square)などは、風直交方向に対してさらに優れた特性を示している。ちなみに、各基本断面柱(①~③,⑤)を螺旋状にねじった場合(㉓~㉖)、図 2 の正方形断面と三角形断面の変化を見る限り、ねじれ角度が大きいほど効果は高いが、ねじれ角度を 180° 以上にしても空力特性は大きくは変わらないようである。また、風応答解析を実施した結果¹⁸⁾では、㉔ 180° Helical Square の設計用風荷重は①Square の 7 割以下となる。長方形角柱(②Rectangular)や三角柱(③Triangular)の空力特性は、①Square よりも悪化するが、切欠きを設けた形状(⑧Tri-Corner Cut)や螺旋形状(㉗Helical Rectangular, ㉘~㉚Helical Triangular)とすることで、風直交方向の空力特性は①Square よりもやや良くなる。複合形状(㉛~㉝)では、他の形状よりも値が小さく、単一の形状要素の場合よりも総じて空力特性が良くなることわかる。なお、図 1 の風方向と風直交方向の最大変動風力係数の形状による変化を比較すると、図 3 に示すように、これらは最大値を示す風向が異なっても概ね相関しており、風方向風力が小さい建物形状は、風直交方向風力も小さい

図 2 ねじれ角度による風直交方向変動風力係数の変化

図 3 風方向と風直交方向の変動風力係数の相関

ことが示唆される。また、この最大変動風力係数は最大平均風力係数やパワースペクトル密度のピーク値の最大値とも高い相関を持ち、とても興味深い結果と言える。

3. 建物形状による渦放出性状の変化

4 つの建物形状①Square、⑦Corner Cut、㉔Setback、㉔ 180° Helical Square の風直交方向の層風力係数のパワース

図 4 風直交方向層風力のパワースペクトル密度

図 5 ストローハル数の鉛直分布

ベクトル密度 fS_{CL} の例を図4に示す。また、そのパワースペクトル密度より、渦放出周波数であるストローハル数成分 S_f を算出し、その鉛直分布を図5に示す。

図4(a)の①Squareの各層風力係数のパワースペクトル密度は、各層において狭帯域のピークの高いスペクトルとなり、図5における①Squareのストローハル数の高さ方向の変化の小ささも考慮すると、強く周期的なカルマン渦が高さ方向にほぼ一様に発生していることが伺える。それに対して、他の建物形状のパワースペクトル密度のピーク値は、①Squareに比べると小さく、広帯域に及んでいるため、周期的なカルマン渦の発生は抑制されていると推察される。また、図5より、②Setback や④180° Helical Squareの高さ方向のストローハル数の変化は、①

Squareや⑦Corner Cutに比べると大きく、尖塔形状や螺旋形状のように、高さ方向に断面形状を変化させた建物形状では、渦の発生周波数が高さ方向で異なることが確認できる。

これらの建物形状周りの渦放出の様子を可視化するため、CFD(Computational Fluid Dynamics)により求めた風圧係数の瞬時値を図6～図9に示す。各図の(a)は風圧係数の等値面を示しており、3次元的な渦構造が把握できる。また、各図の(b)と(c)は高さの異なる風圧係数の水平分布を示しており、図中の色の濃い部分ほど負圧が大きい領域である。

図6(b),(c)より、①Squareでは、建物の側方と後方に周期的なカルマン渦の渦列によると考えられる大きな負圧

領域が確認でき、図 6(a)に見られるように、高さ方向でほぼ一様に大きな渦構造が確認できる。このように建物側面の上から下までほぼ同じタイミングでカルマン渦が放出されるため、①Square では、風直交方向に大きな加振力が作用する。隅角部形状を工夫して空力特性を改善した⑦Corner Cut 周りでも、図 7(a)から、①Square と同じように高さ方向に一様な渦構造が確認できるが、放出されている渦は①Square よりも小さく、図 7(b), (c)の風圧係数においても、大きな負圧領域は風上側の隅角部で生じているのみである。これは、図 7(c)に示した切欠き部の循環流が隅角部からの剥離を抑制し、大きな渦放出を阻害しているためである。高さ方向に断面形状を変化させて空力特性を改善した⑳Setback と㉔180° Helical Square の風力係数分布は、図 8(b),(c)や図 9(c)で見られるように、①Square と同じ断面であっても、その分布性状は大きく異なる。また、図 8(a)と図 9(a)に示される建物形状の側方に放出されている渦は小さく、高さ方向にきれいに揃った渦は見られない。この㉔Setback や㉔180° Helical Square の渦構造の特徴は、渦放出のタイミングが高さ方向で異なっていることが要因であり(図 5)、このように高さ方向に断面形状が変化するような建物形状では、側面に同時に作用する風力が小さいため空力特性が改善される。

4. 建物形状によるその他の特性変化

4. 1 風揺れ居住性能の比較

80 階建てで、20 階ごとにトラス階を有するセンターコア形式の超々高層建物の解析モデル¹⁹⁾を用いて、風応答解析を実施し、様々な建物形状の風揺れ居住性を評価した結果を図 10 に示す。図 10 では、1～4 次の振動モードにおける全風向中の最大加速度を比較しており、風の水平振動に関する性能評価曲線²⁰⁾も併せてプロットしている。この性能評価曲線の右に示した数値は揺れを感じる人の割合を示しており、H-30 はその揺れを体験した人の

30%が揺れを知覚するということである。図 10 より、居住性が優れている 90°Helical Square と 180°Helical Square の居住性能は、1 次に対しては他の建物形態と同様に H-90 を超えるが、2 次～4 次では H-50 程度となっている。

4. 2 周辺気流性状の比較

高層建物周辺の風環境が、建物形状の影響を受けることはよく知られており、隅切りなど建物隅角部の形状を変えるなどによってビル風の対策とすることもある。図 11 は CFD による、歩行者レベル(地上 1.5m)の平均風速の増加領域を示した例であり²¹⁾、色の濃い部分が、超高層建物の建設によって平均風速が大きく増加する領域を示している。図 11 より、①Square では、隅角部付近で風速増加率が 1.8 以上の領域を示すが、⑦Corner Cut や㉔180° Helical Square では、1.8 を超える領域は小さくなっている。ただし、㉔180° Helical Square の場合、風速増加率が 1.0 を超える領域は①Square の場合よりも広範囲に及んでいる。また、螺旋形状建物の周りでは、角柱建物の場合に比べて鉛直方向の風の流れが強くなることから²²⁾、都市の換気性状に影響を与える鉛直方向の風の道の効果²³⁾を考慮した場合、建物形状の変化が建物周辺の環境にも良い効果を与えることが期待される。

図 10 様々な建物形状の居住性評価

図 11 歩行者レベルの風速増加率

5. まとめ

建物形状の変化による空力特性の改善が風荷重の大幅な低減につながることから、計画建物の形状検討は制震装置の設置を考えるよりも前に、まず検討すべき価値があると言える。また、建物形状は、超高層建物の安全性だけでなく、建物の風揺れ居住性や周辺環境に対しても大きな影響を及ぼし、建物形状の変化によって、それらは総合的に改善される傾向を持つ。

参考文献

- 1) 田村 幸雄, 中井 政義, 大竹 和夫, 小鹿 紀英, 山脇 克彦, 人見 泰義, 「新しい形態を有する超々高層建築物の耐風設計手法に関する研究」, 国土交通省平成 20・21 年度建設技術研究開発費補助金総合研究報告書, <<http://www.mlit.go.jp/tec/gijyutu/kaihatu/josei/067houkoku.pdf>>, accessed 2012.10, (2010)
- 2) Tanaka, H., Tamura, Y., Ohtake, K., Nakai, M., Kim, Y. C., “Experimental investigation of aerodynamic forces and wind pressures acting on tall buildings with various unconventional configurations”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 107-108, pp. 179-191, (2012)
- 3) 田中 英之, 田村 幸雄, 大竹 和夫, 中井 政義, 金 容徹, 「新しい形態を有する超々高層建築物の空力特性」, 日本建築学会構造系論文集, 第 77 巻, 第 678 号, pp. 1211-1218, (2012)
- 4) Kumar, B. E., Tamura, Y., Yoshida, A., Kim, Y. C., Yang, Q., “Local and total wind force characteristics of triangular-section tall buildings”, *Proceedings of The 22nd National Symposium on Wind Engineering*, pp. 179-184, (2012)
- 5) Hayashida, H., and Iwasa, Y., “Aerodynamic shape effects on tall building for vortex induced vibration”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 33(1-2), pp. 237-242, (1990)
- 6) Hayashida, H., Mataka, Y. and Iwasa, Y., “Aerodynamic damping effects of tall building for a vortex induced vibration”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 43(3), pp. 1973-1983, (1992)
- 7) 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論文集, pp. 193-198, (1986)
- 8) Kwok, K.C.S., Wilhelm, P.A. and Wilkie, B.G., “Effect of Edge Configuration on Wind-induced Response of Tall Buildings”, *Engineering Structures*, Vol. 10, pp. 135-140, (1988)
- 9) Miyashita, K., Katagiri, J., Nakamura, O., Ohkuma, T., Tamura, Y., Itoh, M. and Mimachi, T., “Wind-induced Response of High-rise Buildings”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 50, pp. 319-328, (1993)
- 10) 天野 輝久, 「一様流中における三次元正四角柱の渦励振及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. 63-39, (1995)
- 11) Kawai, H., “Effect of corner modifications on aeroelastic instabilities of tall buildings”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 74-76, pp. 719-729, (1998)
- 12) Cooper, K. R., Nakayama, M., Sasaki, Y., Fediw, A. A., Resende-Ide, S., Zan, S. J., “Unsteady aerodynamic force measurements on a super-tall building with a tapered cross section”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 72, pp. 199-212, (1997)
- 13) Kim, Y. M., and You, K. P., “Dynamic responses of a tapered tall building to wind load”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 90, pp. 1771-1782, (2002)
- 14) Kim, Y. M., and You, K. P., Ko, N. H., “Across-wind Response of an Aeroelastic Tapered Tall Building”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 96, pp. 1307-1319, (2008)
- 15) Kim, Y. C., Kanda, J., “Characteristics of aerodynamic forces and pressures on square plan buildings with height variations”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 98, pp. 449-465, (2010)
- 16) Kim, Y. C., Kanda, J., “Effects of taper and set-back on wind force and wind-induced response of tall buildings”, *Wind and Structures*, Vol. 13, No. 6, pp. 499-517, (2010)
- 17) Dutton, R., Isyumou, N., “Reduction of tall building motion by aerodynamic treatments”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 36, pp. 739-747, (1990)
- 18) 大竹 和夫, 田村 幸雄, 田中 英之, 中井 政義, 小鹿 紀英, 鈴木 芳隆, 「新しい形態を有する超々高層建築物の風外力に関する研究 (その 3) 螺旋形状建築物の風応答特性」, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D1, pp. 143-144, (2010)
- 19) 阿部 雅史, 小鹿 紀英, 鈴木 芳隆, 山脇 克彦, 人見 泰義, 五十嵐 信哉, 「新しい形態を有する超々高層建築物の振動性状に関する研究」, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B1, pp. 905-906, (2010)
- 20) 日本建築学会, 「建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説」, (2004)
- 21) 田中 英之, 大竹 和夫, 土屋 直也, 「螺旋形状高層建物周辺の風環境」, 日本風工学会誌, 第 38 巻, 第 2 号, pp. 123-124, (2013)
- 22) 田中 英之, 大竹 和夫, 土屋 直也, 「超高層建築物周辺の流れ特性」, 第 25 回数値流体力学シンポジウム講演予稿集, (2011)
- 23) 義江 龍一郎, 田中 英之, 白澤 多一, 小林 剛, 「高層密集市街地における建物群の形態が歩行者レベルの風速・気温分布に与える影響」, 日本建築学会環境系論文集, 第 73 巻, 第 627 号, pp. 661-667, (2008)