陸屋根上に発生する円錐渦と非定常圧力特性に関するLES解析

LES ANALYSIS FOR A CONICAL VORTEX AND
UNSTEADY PRESSURE CHARACTERISTICS ON A FLAT ROOF

小野 佳之*, 田村 哲郎**, 片岡 浩人***

Yoshiyuki ONO, Tetsuro TAMURA and Hiroto KATAOKA

The purpose of this paper is to investigate the motion of the conical vortex which lead to the large level of the negative pressure near the leading corner by LES analysis when flow attack oblique to the flat roof. First the present LES model is validated for the prediction of the pressure characteristics on the roof through comparison with the experimental data. Next, we study the pressure characteristics associated with the motion of the conical vortex in uniform and turbulent flows by using the computed results. As a result, it is clarified that the flow structures near the stagnation point rapidly change by the characteristics of uniform and turbulent flows and result in the strong conical vortex associated with large suction on a roof.

Keywords : LES, conical vortex, peake pressure, low-rise building

LES, 円錐渦, ピーク負圧, 低層構造物

1. はじめに

陸屋根に風が斜めから当たる場合、屋根面上に一对の円錐渦が形成され、軒先付近に強い負圧が作用する。この強い負圧は、強風時の屋根被害の一要因となる恐れがあることから、これまで実測や風洞実験によりピーク値や発生領域に関して多くの調査が行われてきた。その結果、実測¹⁾においては風が斜めからの当たる場合に軒先付近に風洞実験と比べて非常に大きな瞬間的な負圧が発生することが明らかとされている。ただし、瞬間的なピーク負圧は、発生が局部的で外装材の受圧面積に比べて十分に小さい場合には、外装材全体に作用する風力には大きくは影響しないことも考えられる。すなわち、瞬間的なピーク負圧に対しては、ピーク値そのもののばかりではなく近接領域における発生の同時性への配慮が求められる。一方、風圧実験において観測される程度の強い負圧は、負圧レベルは実測と比べて小さいものの、相関性の強い領域が下流側に延びていることが示されており²⁾、これにより強い負圧が軒先付近の領域に同時に作用することが推測される。したがって、この同時性をもって作用する強い負圧の特性やそれをもたらす要因を把握しておくことは耐風設計上重要である。

風が斜めから当たる時の屋根面に作用する風圧力特性に関して、河井ら^{3,4,5)}は、多点の風圧実験により詳細に調べている。その結果、

一様流中では、負圧のレベルが時間の経過とともに急変する圧力レベルのスイッチが生じることを見出している。それに対し、境界層乱流中においては、圧力レベルのスイッチは認められず、軒先に瞬間的に大きなピーク負圧が作用することが明らかにされている。

このような接近流の特性に依存した強い負圧をもたらす要因に関しては、Kawai^{6,7)}や谷口・谷池ら^{8,9)}により調べられている。谷口・谷池⁸⁾は長時間の可視化実験により一様流中における円錐渦の挙動について考察し、屋根面上に一对の円錐渦が常に存在するわけではなく、時として片方が消える渦のスイッチング現象が生じることを報告している。さらに、谷池ら⁹⁾は、この渦のスイッチングと圧力レベルのスイッチングの関連性を風圧実験や可視化実験により調べている。ただし、屋根面に認められる渦と強い負圧の関係が一貫しない場合があることから、風圧・可視化を合わせた考察が必要であることを指摘している。

一方、境界層乱流中の瞬間的な強い負圧に関して、谷池ら¹⁰⁾は、野外観測により調べている。その結果、軒先のピーク負圧は風向変化と関連して生じることを示している。Kawai⁷⁾は風洞実験により屋根から離れた風上の参照点の風速と屋根面の風圧の時刻暦を比較している。その結果、ピーク負圧が生じる際には、スケールの大きな乱れが

* (株)大林組技術研究所流体研究室 博士(工学)

** 東京工業大学大学院総合理工学研究科 教授・工博

*** (株)大林組技術研究所流体研究室 グループ長・博士(工学)

Technical Research Institute Obayashi Corp., Dr. Eng.

Prof., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Group Leader, Technical Research Institute Obayashi Corp., Dr. Eng.

斜め 25 度付近から作用し、風上側面の正圧が上昇することを明らかにしている。また、屋根面風上における断面の風速分布から、ピーク負圧の発生時には、剥離速度が増加し、円錐渦の循環が強まることを示している。このように、境界層乱流中のピーク負圧発生時の接近流の特性や屋根面上の円錐渦の特性が報告されている。ただし、風速測定の参照点は屋根から離れており、その数も十分ではない。また、屋根面上の風速測定もある断面に限られており、スケールの大きな乱れが作用した時に、構造物近傍でどのような流れの空間構造が生じ、空間的に同時性をもったピーク負圧が発生するのかに関しては明瞭には示されている訳ではない。特に、円錐渦の特性に関しては、流れの測定位置が必ずしも一致していないこともあり、Marwood ら¹⁰⁾や Kawai⁷⁾によるとピーク負圧発生時には、屋根面上に発生する円錐渦のサイズが大きくなることが明らかにされているが、Banks ら¹²⁾の風圧と可視化の同時測定に基づく考察によると、境界層乱流中においては、負圧のレベルと円錐渦のサイズの相関は得られていない。そのため、ピーク負圧発生時の円錐渦の振る舞いに関しては、さらに詳細な検討が必要と考えられる。

以上のように、接近流により複雑に変化する円錐渦の挙動に関しては、風圧・可視化実験により行われてきた。しかし、風洞実験ではピーク負圧に関連する軒先近傍の流れの空間構造を特性を把握するのは容易ではない。一方、流れと風圧力特性の関連性を検討する有効な手段として、近年急速に発展している流体計算手法が挙げられる。著者らは、非定常計算手法である LES を用いて、高層構造物の空力特性や空力不安定振動やそれに及ぼす接近流の影響の物理機構に関して、流れの可視化を用いて検討してきた^{13),14),15)}。低層構造物まわり流れへの LES 手法の適用により、実測や実験で検討に限界があった軒先近傍の流れの空間構造に基づき、強い負圧をもたらす要因をより明瞭にできるものと期待できる。

本研究では、風が斜め 45 度から陸屋根に当たった時の同時性をもって作用する強い負圧をもたらす円錐渦の挙動を明らかにすることを目的とし、低層構造物まわりの流れの LES 解析を行う。一方、1994年に実施された 1.0:1.0:0.5 (=幅:奥行き:高さ)の角柱の屋根面の風圧特性に関する流体計算と風洞実験の結果の相互比較¹⁶⁾によると、定常解析法が多く適用されていたこともあり、流体計算による屋根面上の風圧特性の予測精度は必ずしも満足の行くものとはなっていない。また、屋根面に斜め 45 度から風が作用した時の円錐渦のゆらぎの挙動および局所負圧の大きさに関しては、非定常解析手法である LES 解析においても十分には捉えられていない。その要因の 1 つとして、円錐渦の挙動をとらえるための格子解像度の不足が挙げられている。そこで、本計算では、一般座標系 LES ならびに、複数の格子を重ね合わせる重合格子を採用し、屋根面付近に合理的に格子解像度を確保する。はじめに、一様流中および境界層乱流中の角柱の屋根面の風圧特性に関して、計算結果と既往の実験結果¹⁶⁾と比較し、本 LES 手法の適用性を検証する。次に、一様流中における屋根面近傍の流れと圧力特性の関係を調べ、既往の研究で観測されてきた圧力レベルのスイッチがどのような円錐渦の挙動によりもたらされるのか示す。最後に、境界層乱流中で同時性をもって作用するピーク負圧が生じる際の構造物近傍の流れに関して考察し、既往の風圧実験結果による知見と比較しながら、ピーク負圧が生じる際の流れの空間構造を示す。

2. 計算手法

流体の支配方程式は一般座標で表された非圧縮性の Navier・Stokes 方程式と連続の式である。計算アルゴリズムは、フラクショナル・ステップ法に基づく。時間積分は、クランク・ニコルソン法を用いる。空間微分は二次精度の中心差分とし、対流項には高次精度の補間法¹⁷⁾を用いる。さらに、剥離点付近の数値不安定性を除去する為に小さな数値粘性 (UTOPIA の 1/5) を加える。乱流モデルはダイナミック SGS モデルを用いる。解析手法の詳細は文献 18) を参照されたい。本研究では、屋根面付近に格子点を集中させることを目的とし、複数の格子を重ね合わせる重合格子を用いる。格子間のデータ (速度、圧力) のやりとりは、線形補間を用いた。境界層乱流の生成には Lund らの方法¹⁹⁾を改良した片岡の方法²⁰⁾を用いた。

3 解析モデルおよび境界条件

解析モデルは、正方形断面で高さが見附幅の半分の角柱とする。風向は、屋根に斜めから作用する場合であり、角柱に正対する風向を 0 度とすると 45 度である。計算格子は図 1 (分割数は表 1) に示すように 3 つの格子を重ね合わせた重合格子とした。角柱の一边の幅 B と頂部高さの風速 U_H を用いて算出したレイノルズ数は、一様流の場合は 100,000、境界層乱流中のケースでは 20,000 とした。境界条件は格子 1 の側面および上面は Free-slip 条件、出口は流出境界条件で、格子 2 および格子 3 の角柱表面では No-slip 条件である。格子 1 の流入部では、一様流中の解析では $u=1.0$ 、 $v=w=0.0$ (u : 風方向風速、 v : 風直交方向風速、 w : 鉛直方向風速)、境界層乱流中の解析では 1/4 勾配流をターゲットとし 2.2 で示した方法で作成した境界層乱流を与える。

図 1 計算格子と座標軸

表 1 格子分割数

格子 1	風方向 115	風直交方向 115	鉛直方向 75
格子 2	周方向 201	半径方向 50	鉛直方向 65
格子 3	屋根上方の面を 45X45		鉛直方向 50

平均風速

変動風速

図2 本計算で用いる変動流入風

境界層乱流の生成においては、風方向に 32B、風直交方向に 16B、鉛直方向に 20B の解析領域を、それぞれ 160、80、75 分割し、風上から 16B の位置に片岡の方法で用いる抽出断面を設けた。一方、片岡の方法では、解析領域で摩擦速度が変化しないことを仮定しており、実験結果と比べると風速が回復するなど、床面付近の予測精度に限界がある。そこで、文献 21) で示した方法により、16B より風下にはラフネスブロックを設置し、風上から 31B 位置の断面の風速を変動流入風とした。ラフネスブロックの配置に関しては、文献 21) を参照されたい。本計算で用いる変動流入風を図 2 に示す。上部で乱れの強さが小さくなっているものの、角柱の高さまでは実験結果のばらつきの範囲にあることが確認できる。

4. 本 LES 手法の屋根面風圧予測に対する適用性

本計算で得られた一様流中および境界層乱流中の屋根面上の風圧特性を実験結果¹⁶⁾と比較する。図 3-1、図 3-2 に平均風圧係数および変動風圧係数のコンター図の本計算結果と実験結果¹⁶⁾の比較を示す。まず一様流中の結果を見てみると、軒先風上で平均風圧係数の最小値が -2.0 程度、変動風圧係数が 0.25 程度となっており、実験結果¹⁶⁾とほぼ一致している。また、風下に向かって平均風圧係数の負圧のレベルや変動風圧係数が小さくなる変化の性状に関して計算結果は実験結果¹⁶⁾と対応している。境界層乱流中の結果に関しても、平均風圧係数の最小値が -1.7、変動の最大が 0.5 程度など本計算結果は実験結果¹⁶⁾と対応していることが確認できる。一様流中と乱流中の結果を比較すると、平均風圧係数は、一様流中のほうが負圧のレベルが高く、変動風圧係数は境界層乱流中のほうが大きい。図 4 に、軒から 0.05B 内側のライン上の平均風圧係数の分布の既往の計算結果¹⁶⁾、実験結果¹⁶⁾と本計算結果の比較を示す。既往の計算結果¹⁶⁾では円錐渦によるライン上で負圧レベルがほとんど変化していないが、格子解像度を確保した本 LES 解析から、ほぼ実験結果と対応した分布が得られることが確認できる。

次に、屋根風上先端付近の a~d の点 (図 5) における圧力の時刻歴波形の一様流中と乱流中の比較を図 6 に示す。一様流中のケースを見てみると、無次元時間 $tUD=205$ 付近において圧力特性が急激に変化している。すなわち、点 a と点 d、点 b と点 c の圧力は位相がほぼ 180 度ずれており、屋根面の対角線を中心として両サイドの負圧レベルが大きく異なっている。さらに、ある瞬間を境に両サイドでの大きさが入れ替わっていることが判る。また、同じサイドでも軒傍側の点 a (点 d) と内側の点 b (点 c) では位相が 180 度ずれている。このよ

図 3-1 角柱屋根面上の平均および変動風圧係数のコンター図 (一様流中)

図 3-2 角柱屋根面上の平均および変動風圧係数のコンター図 (境界層乱流中)

一様流中

境界層乱流中

図4 軒から0.05B内側のライン上の平均風圧係数の分布
(ただし、図中縦軸は平均風圧係数に-1を掛けた値)

風上先端近傍

図5 圧力の参照点

一様流中

境界層乱流中

図6 風上先端近傍の点a~dの風圧係数の時刻歴波形

実験結果⁷⁾

本計算

(1) 参照点

(2) 実験結果⁷⁾

(3) 本計算結果

図7 圧力の時刻歴波形

うな圧力レベルのスイッチは河井らの実験結果⁹⁾において観測されている。一方、境界層乱流中では、既往の実験結果と同様に、圧力レベルのスイッチ認められず、瞬間的で強い負圧のピークが生じている。

図7(1)に示す軒から約0.05B内側のラインの点e~hにおける圧力の時刻歴波形を図7(2)(3)に示す。風上の点eでは、平均的な負圧のレベルは小さく、そして頻度は少ないものの負圧のピークが認められる。風下に若干離れるに従い点f, gではピークが頻発し、点gでは平均的な負圧のレベルも大きくなる傾向にある。そして、さらに風下の点hでは大きな負圧のピークはほとんど認められなくなっている。これらの傾向に関して、本計算結果とKawai⁷⁾の実験結果は対応している。

図8に負圧のレベルが大きく、ピークが頻発した軒先近傍の点aと角柱表面の圧力変動の相互相関係数を示す。一様流中においては、点aと同じサイドのA-C側の軒先近傍の広い領域で相関が高くなっている。一方、境界層乱流中では軒先A-Cに対してやや傾いた領域で高い相関が認められる。いずれにせよ、大きな負圧が同時性をもって作用することが確認できる。

図8 点aと角柱表面の風圧変動の相互相関係数

5. 円錐渦と風圧特性の関連性

4. での本計算結果と実験結果との比較により、本 LES 手法により斜めから風が当たった場合の陸屋根まわりの流れへの適用性を検証した。その際、一様流中においては、軒先の風上領域において負圧のレベルが屋根面の対角線を挟んで異なり、そしてある瞬間で圧力レベルが入れ替わるスイッチングが確認された。一方、境界層乱流中では、スイッチング現象は認められず、軒先の風上領域に強い負圧のピークが同時に作用する現象が認められた。

ここでは、LES 解析結果を用いて、まず、一様流中における圧力レベルのスイッチングと円錐渦の挙動との関連性について考察する。次に、境界層乱流中での円錐渦の挙動を考察し、強いピーク負圧が軒先に同時に作用する際の流れ特性を検討する。

5. 1 一様流中の圧力レベルのスイッチング

図9に角柱上部の領域における瞬間渦度 (ω_x) のコンター図を示す。ただし、 ω_x は渦度の x 方向(風方向)成分を示す。本計算により得られた渦度分布からは、谷口ら⁹⁾ が報告する円錐渦の入れ替わりは見られず、いずれのサイドでも円錐渦が認められる。

図10に(1)～(3)に軒先の風上領域の圧力のコンター図と瞬間渦度のコンター図を示す。両サイドで円錐渦が確認されるが、詳しく見ると A-C 側では円錐渦の上側で渦度が乱れ、負圧のレベルが回復しているのに対し、A-B 側では、円錐渦の乱れは少なく、軒先の風上の広い領域で負圧のレベルは増加している(1)。その後、両サイドで円錐渦上部が乱れ(2)、そして、A-B 側の円錐渦の上側のみ乱れ始めた(3)。それに伴い、A-C 側の軒先の風上近傍の広い範囲で負圧のレベルが上昇し、A-B 側は回復している。すなわち、風圧の強弱が両サイドで入れ替わる現象が認められた。負圧レベルが上昇しているサイドの円錐渦の大きさは小さくなっており、これは Banks らの実験結果¹²⁾ と対応する。

さらに、これらの現象の詳細を考察するために、A-B 側の負圧のレベルが大きい場合の、屋根風上先端領域および屋根面近傍の速度ベクトル図を図11、図12に示す。また、軒先から発生させたパーティクル流線図を図13に示す。屋根の風上先端では A-B 側において主流方向に軸を持つより強い循環渦が認められる。一方、上方から見ると、A-C 側の軒先風上領域に z 方向(鉛直方向)に軸をもつ反時計回りの渦(以下 ω_z 成分を持った渦)が生じている。そして、この渦は上昇しながら下流に流れ、A-C 側で剥離した流れと干渉している。すなわち、一対の円錐渦の間に ω_z 成分を持った渦が存在し、それが片

側の円錐渦と干渉していることが判る。この ω_z 成分を持った渦は、谷口ら⁹⁾ によって観測された対角線付近の円錐渦と関連しているものと思われる。谷口ら⁹⁾ が報告するように、A-C 側では軒からやや風下側の点 P で流れが分岐し、下流でのみで流線が認められる(図13)。谷池ら⁹⁾ は、対角線付近の円錐渦の発生要因として、一様流中における風上稜線上の淀み点の不安定性を挙げている。本計算においても、淀み点が A-C 側に僅かにずれたときに、屋根面で反時計回りの渦が発生し、A-C 側の円錐渦と干渉している。その結果、A-C 側の負圧レベルは小さくなっている。これらの渦の形成のパターンが A-B と A-C とで入れ替わることにより風圧レベルのスイッチが生じている。一様流中では、この圧力レベルのスイッチに伴い、両サイドで入れ替わりながら軒先近傍の広い範囲に強い負圧が同時に作用する。

図9 屋根面上の ω_x のコンター図(一様流中)

図10 軒先近傍の圧力特性と円錐渦の挙動

図 1-1 軒先近傍の流れ
(yz 方向速度ベクトル図) なお、軒先が $x = -\sqrt{2}/2B$

図 1-2 xy 方向速度ベクトル図
(z/B=0.51)

図 1-3 パーティクル流線図

5. 2 境界層乱流中のピーク負圧

図 6 に示したように、風圧係数の時刻歴波形において、境界層乱流中では圧力レベルのスイッチは認められない。一様流中で認められた圧力レベルのスイッチは淀み点の位置が風上稜線から片側に僅かにシフトした状態が続き、ある瞬間に逆サイドにスイッチすることが要因となっていた。一方、境界層乱流中では、接近乱流の影響を受け、淀み点の位置が頻繁に、一様流中と比べると大きくシフトした (図 1-4)。その結果 ω_z 成分を持つ渦は安定して存在せず、一様流中で認められたような圧力レベルのスイッチが生じなかつたものと考えられる。

図 6、図 7 に示したように、境界層乱流中では大きな負圧のピークが認められた。ここで、本計算により得られた風速、圧力の空間分布の時刻歴データにおいて、図 5 に示す点 a の圧力が -3.5 以下のピークを示す瞬間 (23 回) の風速および圧力を平均し、条件付き流れ場を求めた。図 1-5(1) に条件付き平均圧力の等値面図 (-2.0) を示す。軒先の風上近傍領域では円錐渦の中心付近ならびに剥離領域において強い負圧が認められる。また、図 1-5(2) に示すように軒先風上近傍において Kawai⁷⁾ が報告するように、ピーク負圧が生じるサイドで剥離速度が増加し、円錐渦のサイズが大きくなっていることが確認できる。

続いて、どのような風が作用したときにピーク負圧が生じるのかを考察する。図 1-6 に $z/B=0.51$ および $z/B=0.46$ における条件付き平均速度ベクトル図を示す。ただし、黒矢印は 45 度より小さな風向 (図中下向き)、白が 45 度より大きな風向 (図中上向き) を示している。負圧レベルが大きくなっている A-C 側の軒先風上領域を見てみると、速度ベクトルは黒色を示している。すなわち、点 a に大きな負圧が作用するときには、A-C 側の軒先の風上の広い領域に 45 度以下 (図中下向き) の風向をもつ風が作用していることが判る。

このピーク負圧発生時の風向特性や軒先の広い領域に安定した風が作用する現象は、Kawai⁷⁾ が示している風上の参照点の流れ特性、

すなわちスケールが大きい乱れが斜め 25 度付近から作用する特性と対応している。

次に、本計算結果に基づきピーク負圧発生時の屋根近傍における流れ場を見てみる。図 1-7 に点 a の圧力変動 p' と風直交方向の風速変動 v' および鉛直方向の風速変動 w' の相互相関係数が 0.5 の等値面図を示す。稜線 A-D および A-C 側の軒先の風上の広い領域で風直交方向の風速変動と点 a の圧力変動が高い相関を示している。鉛直方向の風速変動に関しては、A-C 側の軒先の剥離領域での相関が高くなっている。図 8 に示したように点 a と同じサイド (A-C 側) の側面の圧力変動の相関は負の相関となっている。すなわち、ピーク負圧発生時に側面の正圧が上昇し、屋根面との圧力差が大きくなり、剥離領域での速度が増加している現象が確認できる。このように Kawai⁷⁾ が報告している、ピーク負圧発生時に大きなスケールの乱れが軒先に対して、より正対する風向から当たり、側面の正圧が上昇し、屋根面上への剥離速度が増加する現象が、本計算結果から確認できる。また、本計算結果による空間構造 (図 1-7) から、ピーク負圧発生時には軒先のかかなり広い範囲で剥離速度の増加が認められる。そのため、図 1-5(1) を見てみるとピーク負圧発生時には円錐渦の中心の負圧レベルの増加が軒先風上付近ばかりではなく後方まで生じている。この円錐渦の影響を受け風上軒先から下流に向けて、ピーク負圧が同時に作用するものと考えられる。

一方、図 7 の点 e、点 f の時刻歴波形において負圧のピークがより間欠的となっている。点 e の時刻歴波形においてピークが -2 以下を示した瞬間の平均速度ベクトル図を図 1-8 に示す。点 e でピーク負圧が発生する場合には、点 a のケース (図 1-5(2)) と比べると円錐渦のサイズがかなり大きくなっている。すなわち、風上の軒先近傍でピーク負圧が発生する際には円錐渦のサイズが増加する傾向があるが、その都度大きさは異なっており、大きな円錐渦が発生した場合に負圧の発生領域が広がり、軒先から離れた平均的に負圧レベルが小さい領域でも瞬間的に負圧レベルが大きくなり、間欠的なピーク負圧が発生するものと考えられる。

したがって、本計算により得られた境界層乱流中の円錐渦のサイズと風圧特性の関係は、Kawai⁷⁾ と同様に、ピーク負圧発生時には円錐渦のサイズは大きくなる傾向がある。ただし、その都度サイズは異なり、円錐渦のサイズと圧力レベルの相関は得られなかった。これは Banks¹²⁾ の報告と同様である。

以上、一様流中と境界層乱流中において、それぞれの強い負圧をもたらす現象について考察した結果、いずれのケースも淀み点の移動により、円錐渦の特性が変化することが確認された。ただし、現象は一様流中と乱流中で大きく異なり、淀み点の位置と負圧が生じるサイドの関係が逆になる。図 8 に示した点 a と表面の圧力変動の相互相関係数を見てみると、境界層乱流中では、正圧が大きくなったサイドと同じサイドの屋根面に強い円錐渦が形成され、負圧レベルが大きくなる (負の相関)。一方、一様流中で生じたスイッチングにおける強い負圧発生時には、淀み点がシフトし正圧が大きくなったサイドと中心線を挟んで逆側の屋根面の負圧レベルが増加する。淀み点と同じサイドでは負圧は回復するため、点 a と同じサイドの側面の圧力変動の相関は高い。

図14 境界層乱流中での軒先付近流れ場
角柱側面の風圧係数の分布
および $B=0.51$ における速度ベクトル図

(1) 圧力の等値面図 (-2.0) (2) yz 方向速度ベクトル ($x/B=0.65$)
なお、軒先が $x=-\sqrt{2}/2B$

図15 条件付き流れ場
(点aの圧力が -3.5 以下のピーク時の平均)

$z/B=0.46$

$z/B=0.51$

図16 条件付き平均速度ベクトル図
(点aの圧力が -3.5 以下のピーク時の平均)

図17 点aの圧力変動と周辺の風速変動の
相互相関係数の等値面図 (相互相関係数が 0.5)

図18 ピーク負圧時の流れ
アンサンブル平均 (表面風圧係数のコンター図および速度ベクトル図)

6. 結論

本研究では、風が斜め 45 度から陸屋根に当たった時に生じる強い負圧と円錐渦の挙動との関連性を明らかにすることを目的とし、低層構造物まわりの流れのLES解析を行った。まず、一様流中および境界層乱流中の $1:1:0.5$ の角柱の屋根面の風圧特性に関して、計算結果と実験結果と比較し、本LES手法の適用性を検証した。次に、既往の研究で観測されている一様流中において屋根面の対角線を挟んだ両サイドで圧力レベルが入れ替わる現象や境界層乱流中で強い負圧が生じる現象について円錐渦の挙動に基づき検討した。

得られた知見を以下に示す。

1. 一様流中および境界層乱流中における $1:1:0.5$ の角柱屋根面の風圧係数に関して、本計算結果と既往の実験結果¹⁶⁾と比較を行ったところ、平均風圧係数、変動風圧係数ともに対応することを確認した。
2. 本計算で得られた軒先近傍の点の時刻歴波形から、一様流中では屋根面对角線を挟む両サイドで圧力レベルが異なり、ある瞬間それが入れ替わる圧力レベルのスイッチングを確認した。境界層乱流中では圧力レベルのスイッチは生じず強い負圧が生じた。
3. 屋根面の相互相関係数の分布から、一様流中においては、軒先の広い領域で強い負圧が同時に作用することが確認された。ま

た、境界層乱流中では軒先風上の軒に対してやや傾いた領域でピーク負圧が同時に作用することを確認した。

4. 一樣流中において、圧力レベルのスイッチング現象について考察した。その結果、一樣流中で風上稜線上の淀み点が僅かにサイドにシフトした状態が続く際に、屋根面上に鉛直方向に軸をもつ渦が形成され、片側の円錐渦と干渉する現象が認められた。この渦と干渉するサイドの円錐渦は乱され圧力レベルは回復するのに対し、逆サイドの円錐渦はサイズが小さく軒先の広い領域で負圧レベルが大きくなった。この現象が両サイドで入れ替わることにより圧力レベルのスイッチが生じるものと考えられる。一樣流中における円錐渦のサイズと圧力レベルの関係は Banks ら¹⁰⁾の報告と同様である。
5. 乱流中においては、接近乱流の影響を受け淀み点が頻繁に左右に大きくシフトした。そのため、屋根面に鉛直方向に軸を持つ渦が安定して形成されず、圧力レベルのスイッチは生じないものと考えられる。
6. 境界層乱流中で軒先に強い負圧のピークが生じる現象について考察した。この結果、Kawai⁷⁾が報告している、ピーク負圧発生時には、大きなスケールの乱れが軒に、より正対する風向から当たり、側面の正圧が上昇し屋根面への剥離速度が増加する現象が、本計算で得られた流れ場からも確認された。
7. 本計算結果による流れの空間構造から、ピーク負圧発生時には軒のかかなり広い範囲で剥離速度の増加し、円錐渦の中心の負圧レベルの増加が軒先風上付近ばかりではなく後方まで生じた。この円錐渦の影響を受け風上軒先から下流に向けて、ピーク負圧が同時に作用するものと考えられる。
8. 軒から離れた位置で認められた間欠的なピーク負圧の発生に要因について考察を行った。その結果、軒先近傍でピーク負圧が発生する際には円錐渦のサイズが増加する傾向があるが、その都度大きさは異なっており、大きな円錐渦が発生した場合に負圧の発生領域が広がり、軒先から離れた平均的に負圧レベルが小さい領域において、瞬間的に負圧レベルが大きくなり、間欠的なピーク負圧が発生するものと考えられる。
9. 一樣流中で生じたスイッチングにおける強い負圧発生時には、淀み点がシフトし正圧が大きくなったサイドと中心線を挟んで逆側の屋根面の負圧レベルが増加する。一方、境界層乱流中の強い負圧の発生時には、風向変化により淀み点が移動し正圧が大きくなったサイドと同じサイドの屋根面の負圧レベルが大きくなる。

参考文献

- 1) H.W.Tieleman: Problem associated with flow modeling precured for low-rise structures, *J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol.41-44, pp923-934, 1992.
- 2) 河井宏允, 西村元吾, 草柳拓人, 陸屋根上の円錐渦と風圧変動について, 第13回風工学シンポジウム, 149-154, 1994.
- 3) H. Kawai, G. Nishimura, Characteristics of fluctuating suction and conical vortices on a flat roof in oblique flow, *J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol.60, pp211-225, 1996.
- 4) Kawai, Structure of conical vortices related with suction fluctuation on a flat roof in oblique smooth and turbulent flows, *J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol.69-71, pp579-588, 1997.
- 5) 河井宏允, 陸屋根に作用する風圧変動特性について-風圧変動の同時測定結果-, 第14回風工学シンポジウム, 557-562, 1996.
- 6) H.Kawai, F.Ohnuma, Peak suction and conical vortex on a flat roof, *Proceeding of the 10th International Conference on Wind Engineering*, pp1807-1812, 1999.
- 7) H.Kawai, Local peak pressure and conical vortex on building, *J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol.90, pp251-263, 2002.
- 8) 谷口徹郎, 谷池義人, 陸屋根面上の円錐渦に関する可視化風洞実験, 日本建築学会構造系論文集, 第488号, pp31-37, 1996.
- 9) 谷池義人, 谷口徹郎, 両角達郎, 種々の陸屋根面上に形成される円錐渦のスイッチング現象解析, 第15回風工学シンポジウム, 305-310, 1998.
- 10) 谷池義人, 谷口徹郎, 武平俊秀, 奥田上総, 自然風中における立方体建物に作用する風圧特性, 第16回風工学シンポジウム, pp321-326, 2000.
- 11) R.Marwood, C.J.Wood, Conical vortex movement and its effect on roof pressure, *J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol.69-71, pp589-588, 1997.
- 12) D. Banks, R. N. Meroney, P. P. Sarkar, Z. Zhao, F. Wu, Flow visualization of conical vortices on flat roofs with simultaneous surface pressure measurement, *Journal of Wind Eng. and Industrial Aerodynamics*, 84, pp65-85, 2000.
- 13) 小野 佳之, 田村哲郎: 角柱の空力不安定振動に及ぼす乱流効果に関するLES解析, 日本建築学会構造系論文集, No563, pp67-74, 2003-1.
- 14) 小野 佳之, 田村哲郎: 三次元円柱の渦励振現象に関するLES解析, 日本建築学会構造系論文集, 581, pp7-14, 2004-7.
- 15) 小野 佳之, 田村哲郎: 高層タワーの渦励振問題へのLESの適用と展開, 日本建築学会構造系論文集, 592, pp35-42, 2005-6.
- 16) 日本建築学会耐風設計資料小委員会, 流体計算と風荷重評価, 1994.11.
- 17) 梶島 岳夫, 対流項の差分形式とその保存性, 日本機械学会論文集 (B編), 60-574, B, pp.186-191, 1994.
- 18) Y. Ono, T. Tamura, Large eddy simulation using a curvilinear coordinate system for the flow around a square cylinder, *Wind & Structure*, Vol5, No2, pp369-378, 2002.
- 19) T. S. Lund, X. Wu, and K. D. Squires, Generation of turbulent inflow data for spatially-developing boundary layer simulations, *J. Comp. Phys.*, 140, pp233-258, 1998.
- 20) 片岡 浩人, 水野 稔, 流入変動風を用いた三次元角柱周り流れの計算—平均速度分布を与条件とした流入変動風の作成方法について—, 第12回 数値流体力学シンポジウム, pp.173-174, 1998.
- 21) 小野佳之, 田村哲郎, 粗面を有する三次元丘陵地まわりの強風乱流へのLESの適用, 日本建築学会構造系論文集, 第606号, pp873-880, 2006-8.

(2007年6月8日原稿受理, 2007年8月3日採用決定)