

自然風中にある屋根瓦に作用する風力

河井宏允, 西村宏昭*

* 日本建築総合試験所

要 旨

屋根瓦の飛散原因を調べるため、自然風中に設置した寄せ棟屋根を持つ実験家屋の瓦に作用する風力の実測を行った。瓦に作用する総風力は、瓦の表面に作用する風力と瓦の裏面から作用する風力の差で与えられる。瓦の表面に作用する風力は、測定屋根面の斜め後ろ側から寄せ棟の稜線を超えて吹く場合に最も低下する。しかし、この時には瓦の裏面に作用する風力も同時に低下するため、瓦に作用する総風力はあまり大きくならない。一方、風が軒に対して直角に吹く風上面では、裏面風力が表面風力より大きく総風力は負となる。また、この風向では、総風力が時折風力係数にして-3程度にまで急激に低下する。この時、瓦の表面圧力のみが低下し瓦の裏面圧力には変化が生じない。このような結果は、強風による災害調査でしばしば見いだされる風上側の瓦が被害を受けやすいという報告とよく一致している。

キーワード：屋根瓦, 自然風, 平均風力係数, ピーク風力係数, 寄せ棟

1. はじめに

強風被害の80パーセント以上は屋根部分に生じることが、過去の強風被害の調査結果から明らかになっている(植松他 2000)。特に、瓦などの屋根葺き材の飛散は2次被害の原因ともなり、その飛散メカニズムの解明と飛散防止方法の開発は、強風被害の低減にとって極めて重要である。

屋根に斜めから風が当たる場合、屋根の風下側の軒、棟、けらば付近に大きな負圧が生じる(河井 1996, Kawai and Nishimura 1996)。この負圧の発生に伴って瓦が飛散するのではないかという推察のもと、建築基準法や建築学会荷重指針などでは、この負圧に基づいて屋根を設計するようになっている(日本建築学会 1993)。しかし、強風による被害調査からは、瓦は大きな負圧の生じる風下側よりも寧ろ正圧が生じる風上側の方が飛散しやすいという結果が得られている(桂 1991)。被害調査結果と過去の風洞実験による屋根の表面風圧測定結果との矛盾の原因は、瓦に作用する正味の風力が、瓦の表面に作用する風力と瓦の裏面から作用する風力の差であり、しかも瓦表面に作用する風圧が屋根全体の

グローバルな流れ場と、個々の瓦の表面のローカルな流れ場との合成によって決まり、これまでの風洞実験のように、屋根全体流れのみを模擬し屋根表面の風圧を測定するといった実験では説明することができないというところから来ている。

従来の風洞実験の問題点を克服し、瓦に作用する正しい風力を評価するために、これまでに多くの試みがなされてきた(Hazelwood 1980, Kramer and Gerhardt 1983)。岡田は、実際の瓦の1/20の縮尺模擬瓦を用いて、風洞の中で瓦の飛散実験を行い飛散風速と飛散箇所を同定した(岡田 1988)。その結果、被害調査結果で示されたように、軒に直角に風が当たる場合の風上側の軒付近において、低い風速から瓦が飛散し始めることが明らかとなった。また、森崎らは大型風洞に実際の瓦の葺いた屋根を設置して瓦に作用する風圧分布を測定し、瓦の表面に作用する風力が瓦の表面上を流れるローカルな流れ場に支配していることを見いだした(森崎他 1994)。

自然風の持つ風向変動や風速変動を風洞中で再現するためには、岡田が試みたように模型の縮尺を小さく

しなければならず、そうすると、瓦の裏面から作用する風力を支配する瓦と瓦の隙間や、野地板と瓦の隙間などは十分に模擬することができない。一方、実際の大きさの瓦を風洞実験に用いた場合には、屋根全体のグローバルな流れ場を精確に再現することができないとともに、自然風の持つ流れの非定常性も十分に再現することは不可能である。

本研究では、自然風中において屋根瓦に作用する風力を精確に評価するため、自然風中に実験用の家屋を設置し、その屋根に葺いた瓦の表面に作用する風圧変動と、野地板上の風圧変動を測定することによって、瓦の飛散原因となる瓦に作用する大きな負の風力がどのような風向でどのような機構のもとで発生するのを調べることを目的とした。

2. 実験概要

実験は和歌山県潮岬にある京都大学附属潮岬風力実験所の実験フィールドで行った。幅 4.1m、奥行き 3.1m、棟高さ 3.5m (Fig.2) の 4.5/10 の勾配をもつ寄棟屋根を持った実験家屋を、実験フィールドの南東端に設置した (Fig.1)。基準となる風速は、Fig.2 に示したように屋根の棟から 1m の高さに設置した 3 次元超音波風速計により測定した。棟は高さ約 50mm の半割りしたパイプで作り、コーキング材で隙間を埋めた。したがって、4 面の屋根の野地板間で圧力は伝播しない。実験家屋はキャスターによって回転できる構造とした。実験家屋の回転時には、超音波風速計も家屋と共に回転するので、検出される風向は家屋に対する相対風向 θ である。測定対象としたのは長辺方向に位置する屋根面である。Fig.4 に示したように、風向は風が測定対象屋根面の軒に直角に吹く場合を $\theta=0$ 度とし時計周りに定義した。

屋根には通常の瓦の約 2/3 の大きさの引掛け棧瓦 (Fig.3) を葺き、対象屋根面のうち 6 枚の瓦の表面にそれぞれ 12 点の圧力孔を設けた。野地板 (Fig.4) には 18 点の圧力孔を設置し、測定対象の瓦に最も近い野地板の圧力を瓦裏面に作用する圧力とほぼ等しいと考えた。瓦に設けた圧力孔は内径 2mm、野地板に設けた圧力孔は内径 4mm とし、家屋内に設置した容量 250mmAq の多点圧力計に導き、1/100 秒で 256 秒間の同時サンプリングを行った。本論文で示す、風力係数の基準風速は評価時間 256 秒間の平均風速に基づくものであり、瞬間風力は平均化時間 1/100 秒に基づくものである。

測定は雨が降らない冬季の季節風に限定して行った。これは、雨が降ると屋根瓦の圧力孔が塞がれて測定ができないからである。測定時の季節風は西風で比較的安定して吹いていた。また、西風では実験家屋の風上側

には Fig.1 に示したように障害となる地物は少ない。1 記録とる度に実験家屋を回転し、様々な迎え角におけるデータを取得した。

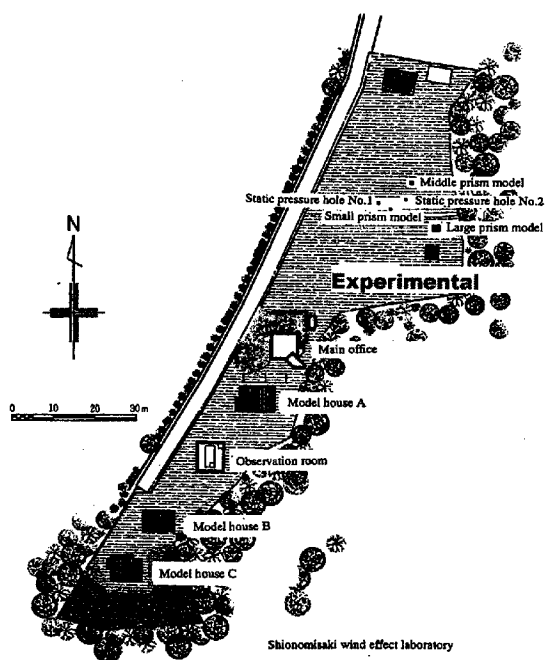


Fig.1 Shionomisaki wind effect laboratory and experimental house

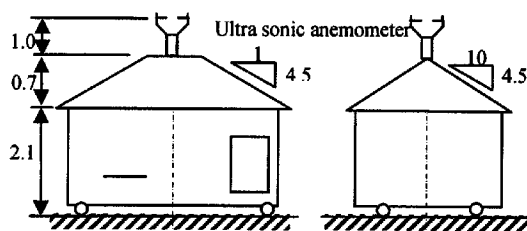


Fig.2 Experimental house

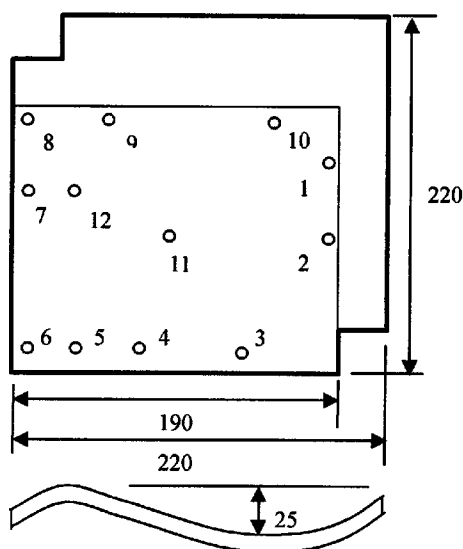


Fig.3 Pressure holes on a roof tile

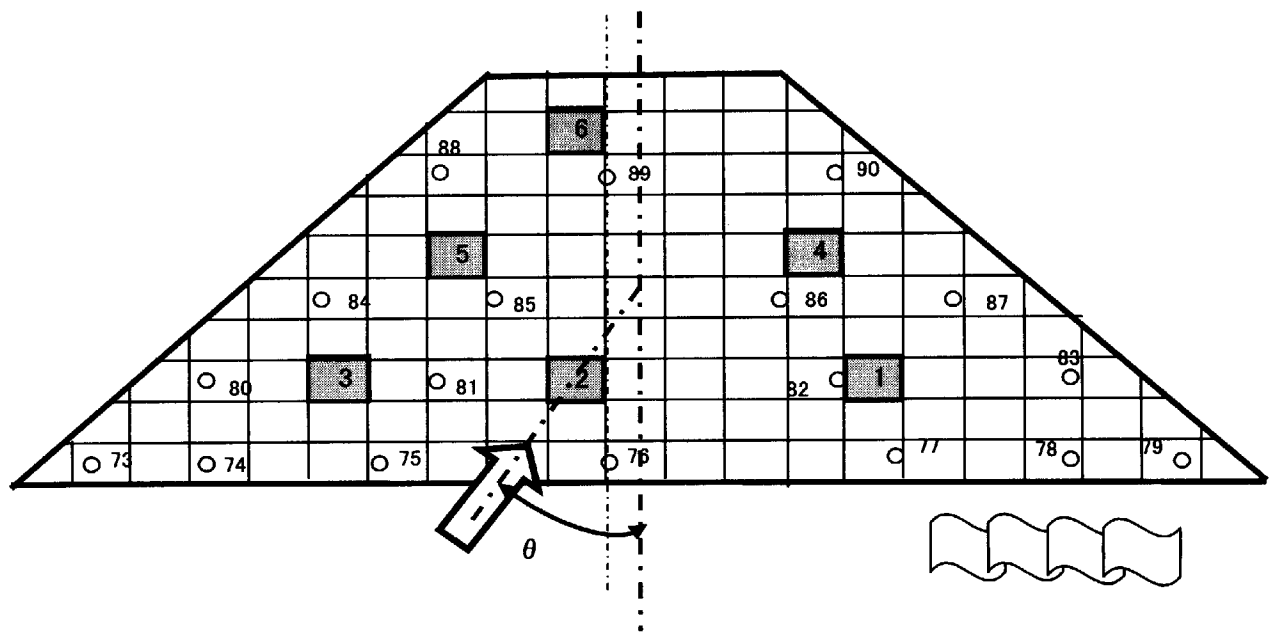


Fig.4 Position of measuring roof tiles, pressure holes in a batten space and definition of wind direction

3. 実験結果と考察

3.1 風向別平均風力係数

平均風力係数は、式(1)～(5)に示したように、測定された風圧力をその時点での瞬間風向ごとに区分し平均速度圧で除して瞬間風圧係数を算出しそれらの集合平均として求めた。このようにして求めた風圧係数は、風向変化が小さい場合には、各記録の平均風力係数とほぼ一致する。

$$C_{ext}(\bar{\theta}) = \sum_{j=1}^{12} A_j C_{p_{e_j}}(\bar{\theta}) \quad (1)$$

$$C_{int}(\bar{\theta}) = C_{p_i}(\bar{\theta}) \quad (2)$$

$$C_{net} = C_{ext} - C_{int} \quad (3)$$

$$C_{p_{e_j}} = E \left[p_{e_j}(\bar{\theta} + \Delta\theta \geq \theta > \bar{\theta} - \Delta\theta) / \frac{1}{2} \rho \bar{U}^2 \right] \quad (4)$$

$$C_{p_i} = E \left[p_i(\bar{\theta} + \Delta\theta \geq \theta > \bar{\theta} - \Delta\theta) / \frac{1}{2} \rho \bar{U}^2 \right] \quad (5)$$

ここに C_{ext} 、 C_{int} は表面及び裏面平均風力係数、 C_{net} は総平均風力係数、 $C_{p_{e_j}}$ は瓦の表面の各測定点に加わる平均風圧係数、 C_{p_i} は瓦に最も近い野地板に作用する平均風圧係数、 A_j は瓦の各測定点の風圧負担面積

比、 p_{e_j} は瓦の表面の各測定点に加わる瞬間風圧、 p_i は

瓦に最も近い野地板に作用する瞬間風圧、 $\bar{\theta}$ は平均風向、 θ は瞬間風向、 $\Delta\theta$ は風向範囲（本解析では 2.5 度）、 ρ は空気密度、 $\bar{U}$ は評価時間 256 秒に対する

平均風速、 $E[]$ は集合平均を表している。

なお、風力係数の符号は、表面風力と裏面風力の場合には、瓦の表面あるいは裏面を押す方向が正、引く方向が負である。したがって、一つの瓦に注目した場合には、表面風力と裏面風力の正の方向は逆になっている。また、総風力の場合には、表面風力と同様に瓦を押す場合に正、引く場合に負である。したがって、瓦を飛散させるような力の符号は負となる。

Fig.5 はこのようにして求めた瓦 1,3 の平均風力係数を風向に対してプロットしたものである。Fig.5 から分かるように、瓦の表面及び裏面に作用する風力は、測定面が風上に来る風向が -90 度～90 度の区間では正、測定面が風下に来る風向 -180 度～-90 度、90 度～180 度の区間では負となる。また、瓦の表面に大きな負の風力が作用するのは、風が斜め後ろから吹いて来る風向 -120 度と風向 120 度の場合であり、最小表面風力係数は -0.6 程度である。

しかし、瓦に作用する負の総風力は、風向が 0 度、即ち風が軒に直角に当たる場合に最大でその平均風力係数は -0.3 程度である。この時、瓦の表面風力は正であるが、瓦の裏面風力の圧力が表面風力を大きく上回り、それらの差として定義される総風力は大きく低下

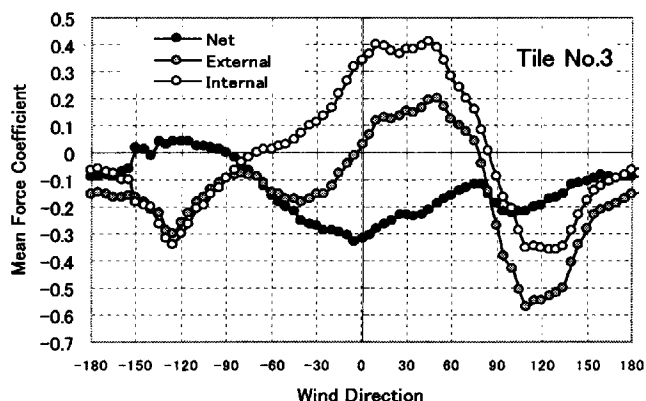
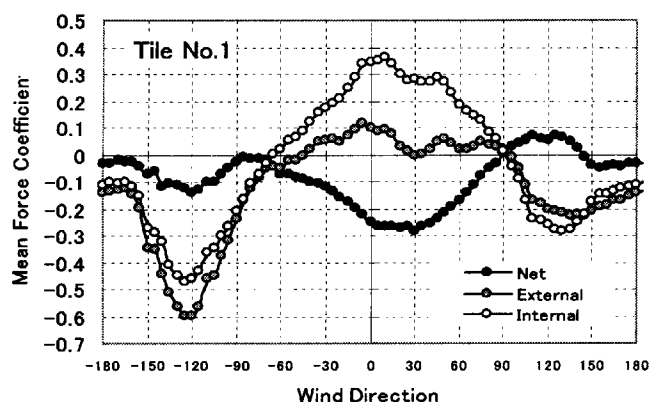


Fig.5 Mean force coefficient of the roof tile No.1 and No.3

する。風向-120度や120度においては裏面風力が表面風力と同様に大きく低下する結果、表面風力と裏面風力の差はあまり大きくなりず、平均総風力係数は-0.1程度に留まる。

3.2 風力係数の相対度数

瓦の飛散に関係するような大きな負の風力がどのような風向でもっとも良く生じるかを調べるため、-1.0以下の風力係数が観察された時の全観測値に対する相対度数を風向ごとに求めFig.6に示した。

表面風力の場合には、風向120度と-120度における相対度数が極めて大きい。例えば、風向-120度の時の瓦1の相対度数は18.5パーセント、風向120度の時の瓦3の相対度数は14.5パーセントに達する。なお、風向0度付近においても、表面風力係数が-1.0以下の風力が観察されるが、その相対度数は2.5パーセント程度と、風向-120度あるいは120度に比較してかなり小さい。

裏面風力の場合にも、風向-120度と120度における相対度数が大きいことが分かる。しかし、相対度数の値は、4～5パーセント程度であり、表面風力の約1/3程度である。また、裏面風力では風向が0度付近では大きな負の風力はほとんど観察されない。

一方、総風力の場合には、風向0度付近のみにおいて、大きな負の風力が生じ、風向-120度や120度においては、ほとんど大きな負の風力が生じていないことが分かる。これは、風向-120度、120度で大きな負の表面風力が観測される場合には、裏面においても風力が低下し、結果として負の総風力が大きくなりえないためである。なお、風向0度の場合の総風力の相対度数は、表面風力の場合よりもかなり大きくなる。このことは、後に述べるように、大きな総風力が生じている時には、裏面風力は多くの場合には正圧となっていることを示している。Fig.7は、総風力係数が-2.0以下になった場合の相対度数を示したものである。この図に

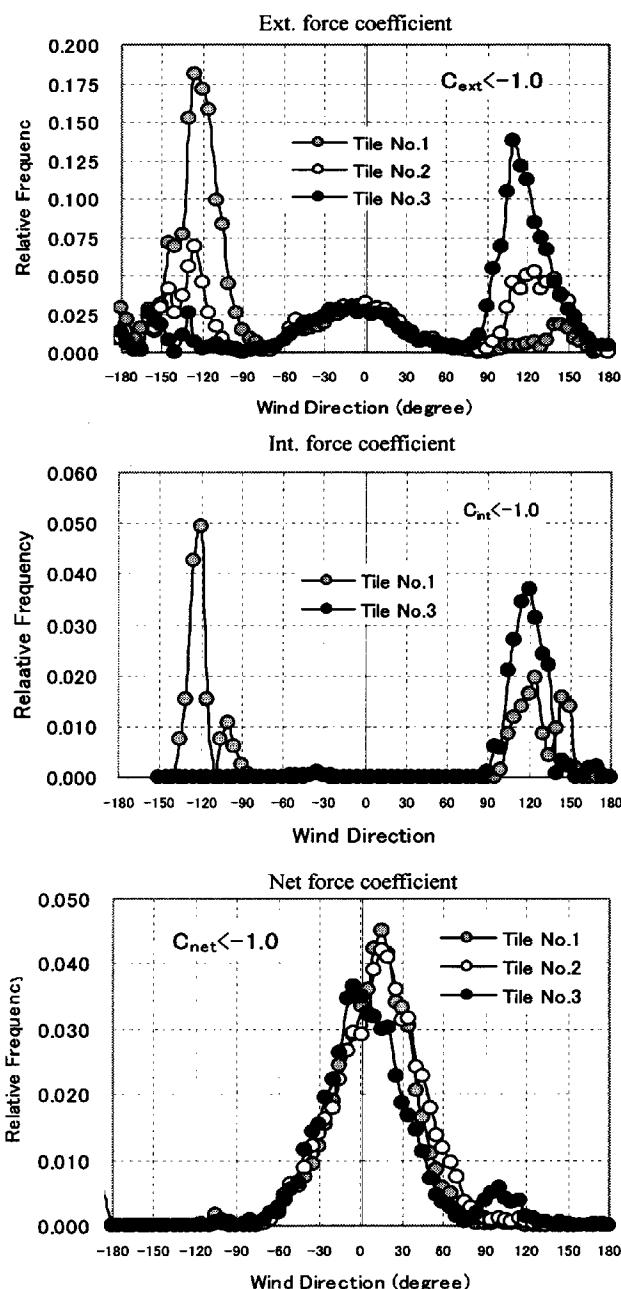


Fig.6 Relative frequency of wind force coefficient against wind direction ($C < -1.0$)

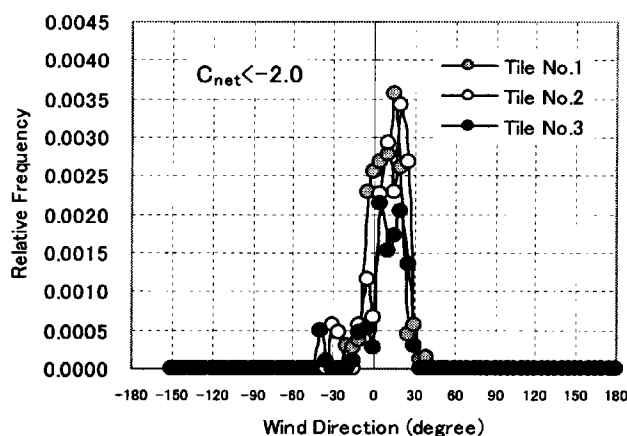


Fig.7 Relative frequency of net force coefficient
($C_{net} < -2.0$)

示されているように、極めて大きな総風力が瓦に作用するのは、0度～30度の非常に限られた範囲の風向であることが分かる。

3.3 最小総風力係数

Fig.8は、各記録について、総風力係数が最小になった時の表面風力係数と裏面風力係数を求め、総風力係数とともにプロットしたものである。なお、図の横軸は各記録の平均風向を示している。図に示されているように、総風力係数が最小になった時には、ほとんどのケースで裏面の風力は正でほぼ平均風力係数と等しい。したがって、総風力の大きな低下は表面風力の低下とともに起こると言える。また、最小総風力係数の値は、-90度のデータを除けば平均風向にあまり大きくは左右されず-2から-3程度である。前節で示したように、大きな負の総風力は風向0度～30度の限られた範囲で生じるので、大きな負の総風力の評価には平均風向よりも瞬間風向の方が適切であることを示している。即ち、どのような平均風向であっても、瞬間的に風向が0度～30度付近に入った時に、大きな負の総風力が生じるのである。

Fig.9は、総風力係数のレベルによって表面及び裏面風力係数がどのように変化するかを調べたものである。風向0度の場合には、表面風力係数は総風力係数に比例して低下する一方、裏面風力係数はほぼ一定となるのに対して、風向45度の場合には、総風力係数が-1.2程度までは裏面風力係数が一定となるが、その後表面風力係数とともに裏面風力係数も低下し、大きな負の総風力は観察されなくなる。このように、大きな負の総風力は、裏面圧力が一定の状態を保ったまま、表面風力のみが大きく低下する時に生じるといえる。

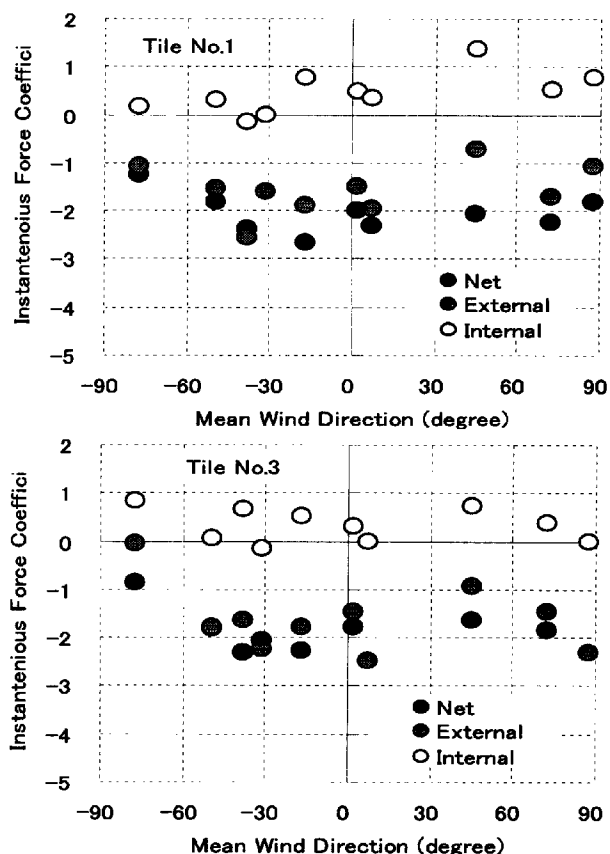


Fig.8 Minimum net force coefficient, and external and internal force coefficients

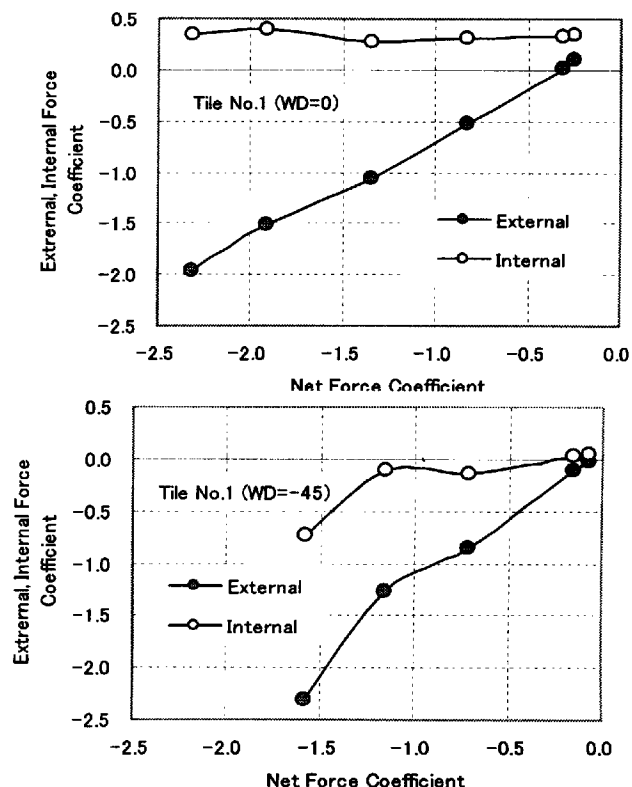


Fig.9 External and Internal force coefficients against net force coefficient

3.4 パワースペクトルと相互相関

瓦に作用する風力変動の性状をより詳しく調べるために、平均風向0度付近のデータのパワースペクトルを求め、瓦2について Fig.10 に示した。周波数 6Hz より低周波数領域では、表面風力変動の方が裏面風力変動より変動エネルギーが大きく、周波数 6Hz より高周波数領域では裏面風力変動の方が変動エネルギーが大きくなる。また、総風力変動のパワースペクトルの形は表面風力変動及び裏面風力変動とは大きく異なり、その変動エネルギーは全周波数領域でほぼ一定となる。このように、総風力変動のパワースペクトルが表面及び裏面風力変動と異なった性状を示すのは、総風力変動が低周波数領域で相関の高い2つの信号の差として定義されるところから生じている。

Fig.11 は、瓦2について、総風力変動、表面風力変動、裏面風力変動の相互相関係数を平均風向ごとに求めて比較したものである。表面風力変動と裏面風力変動との相関は、どの風向においても0.8程度と非常に高く、表面風力変動と裏面風力変動はほぼ同じような変動をしていることが分かる。しかし、それらの差として定義される総風力変動との相関は必ずしも大きくはない。特に、総風力変動と裏面風力変動との相互相関が小さく、風向0度を境にして正から負へと転じていることが注目される。一方、総風力変動は表面風力変動とはかなりの相関を保ち、総風力変動が裏面風力変動よりも表面風力変動に支配されることが分かる。なお、総風力変動と表面風力変動の相関の風向による変化の様子は、総風力変動と裏面風力変動の相関の風向による変化とほぼ等しいことも注目される。

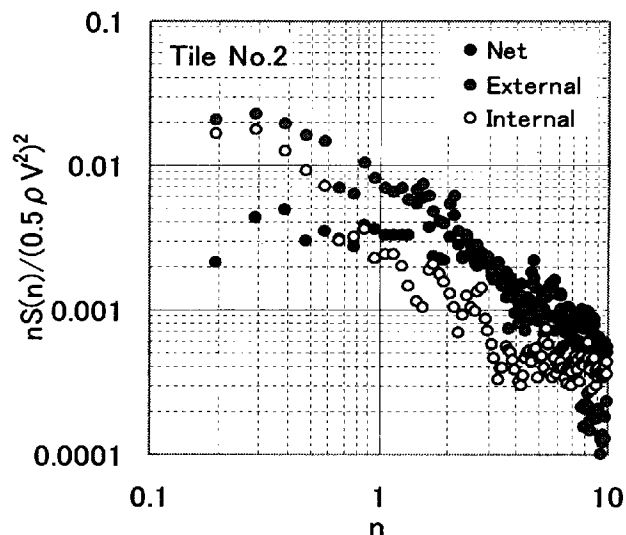


Fig.10 Power spectra of fluctuating forces

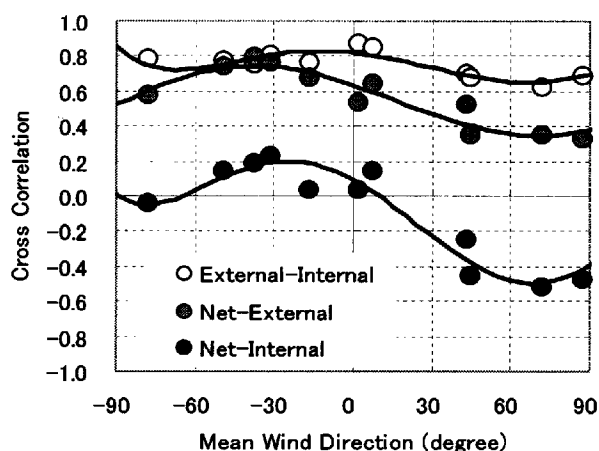


Fig.11 Cross correlation of fluctuating forces

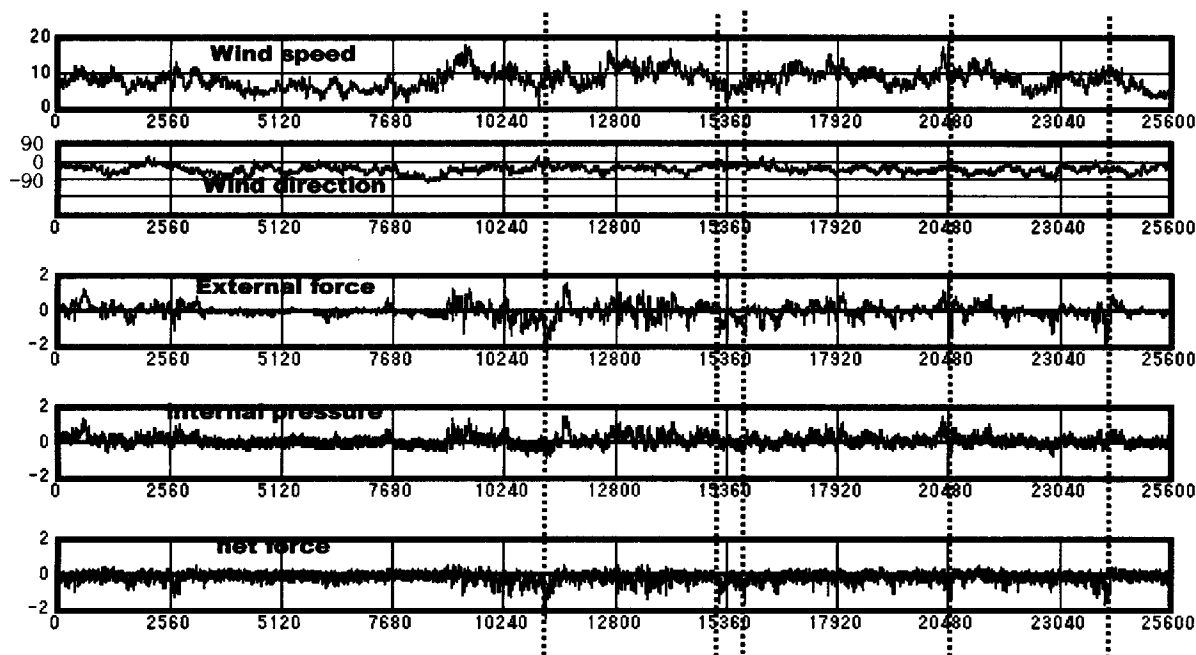


Fig.12 Record of wind speed, wind direction and forces on the roof tile No.1

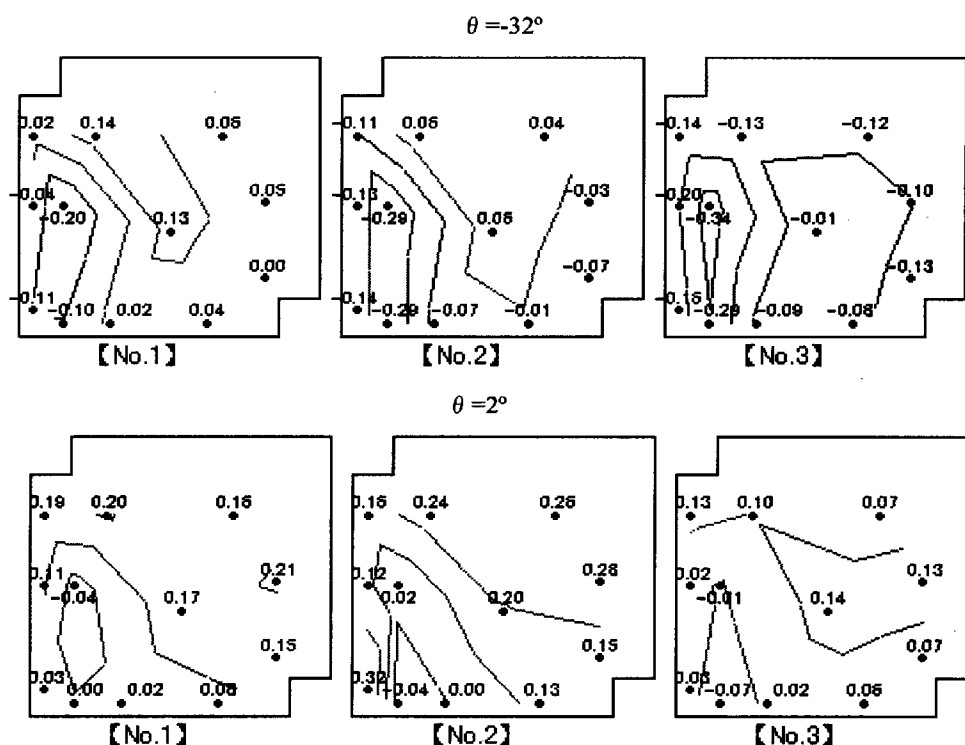


Fig.13 Mean external pressure coefficient on the surface of the roof tiles No.1, No.2 and No.3

上述したパワースペクトルや相互相関の状態は、観測記録によっても確認することができる。Fig.12 は、風向、風速、表面風力、裏面風力、総風力の記録を示したものである。図中の縦点線は総風力が大きな負のピークを示した箇所である。この図から、総風力が大きな負のピークを示すのは、表面風力が瞬間的に大きく低下する場合であることが分かる。この時、裏面風力は低下しない。また、表面風力の正のピークと裏面風力の正のピークは良く対応しているが、表面風力の負のピークと裏面風力の負のピークはあまり対応しない。また、総風力が大きな負のピークを示した時には、風向はほぼ 0 度であることも分かる。なお、総風力変動と風速変動の相関は小さく、特に総風力が大きな負のピークを示した時に必ずしも風速がピークを示すことはないという結果となっている。

3.5 風圧係数分布

Fig.13 は平均風向が-32 度と 2 度の時の、瓦 1～3 の表面の平均風圧係数を示したものである。なお、この図に示した平均風圧係数は、先に定義した風向別に区分けした平均風圧係数ではなく、特定の記録の風圧に関する平均風圧係数（時間平均値）を示している。風向-38 度の時には、瓦では瓦の尾根を超える辺りで風圧係数が著しく低下し、瓦に作用する風圧が瓦の表面の流れに大きく支配されることが分かる。また、風向 2 度の解析結果でも同様の傾向が認められるが、尾根付

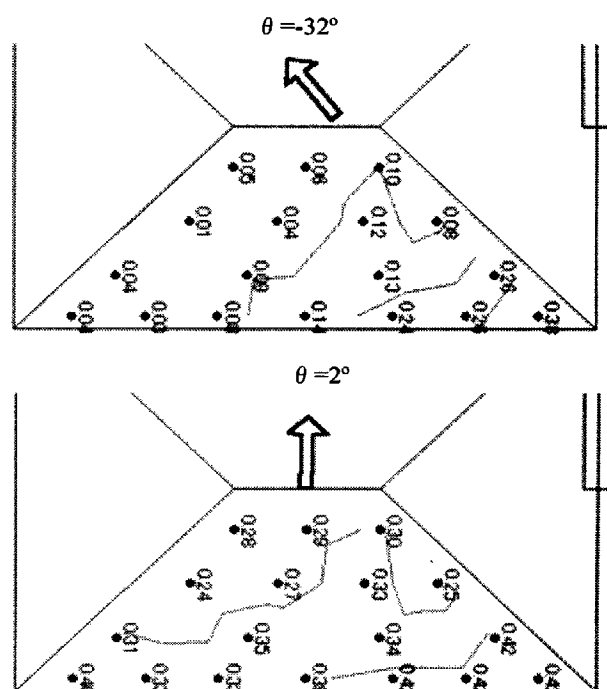


Fig.14 Mean pressure in a batten space

近での風圧の低下はかなり弱まり、風下から風上に行くにしたがって風圧が徐々に上昇する。

Fig.14 は野地板の平均風圧係数分布（瓦裏面の平均風圧係数）を示したものである。風向-38 度の場合には、屋根の風上側の角での風圧が大きく、風下に行くにしたがって徐々に風圧は低下する。一方、風向 2 度の場

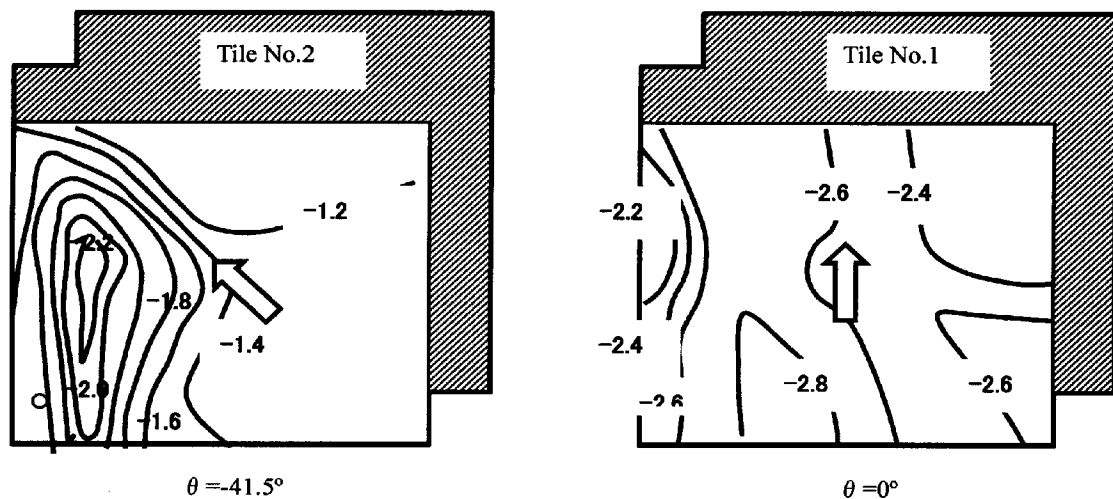


Fig.15 Instantaneous external pressure on roof tiles at the negative peak net force

合にも、軒付近の風圧が高く棟に近づくにしたがって風圧が低下するが、風向-38度と比べれば圧力勾配は小さい。

Fig.15 は総風力が大きな負のピークを示した時の瓦の瞬間風圧係数分布を示したものである。平均風圧分布と同様に、瞬間風圧においても、瓦に風が斜めから当たる場合には、瓦の尾根付近の風圧が非常に大きく低下する。一方、軒の方から瓦に直角に風が吹く場合には、瓦表面の圧力はほぼ一定となる。

3.6 風圧の相互相関

Fig.16 は野地板の風圧変動の相互相関を調べたものである。風向-32度の場合には、風上側の角の測定点の風圧変動を基準とした相互相関は、風下側に向かうに連れて小さくなる。一方、風向2度の場合には、軒先中央点の風圧変動を基準とした風圧変動の相互相関はどの測定点でも非常に大きく、風が軒に直角に当たる場合、野地板に作用する風圧はほぼ同じように変動することが分かる。

Fig.17 は瓦の表面に作用する風圧変動の相互相関を示したものである。瓦のサイズは高々20cm程度であるに関わらず、瓦の各測定点に作用する風圧は同じように変動しないことが分かる。特に、瓦に斜めから風が当たる場合には、瓦の尾根上の測定点と瓦の隅の測定点との相関はかなり低下する。瓦の各点に作用する風圧の相関が大きくないのは、瓦の各測定点に作用する風圧が、瓦の表面の局所的な流れの影響を大きく受けていることが原因だと考えられる。

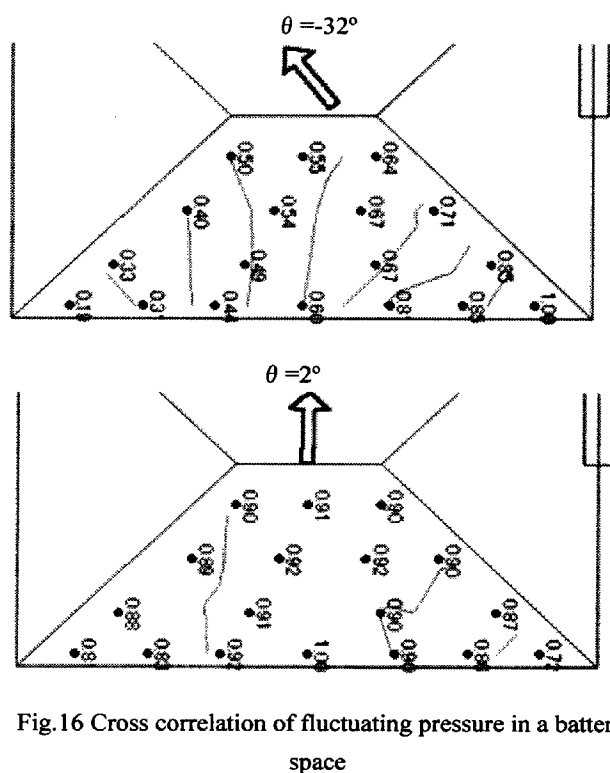


Fig.16 Cross correlation of fluctuating pressure in a batten space

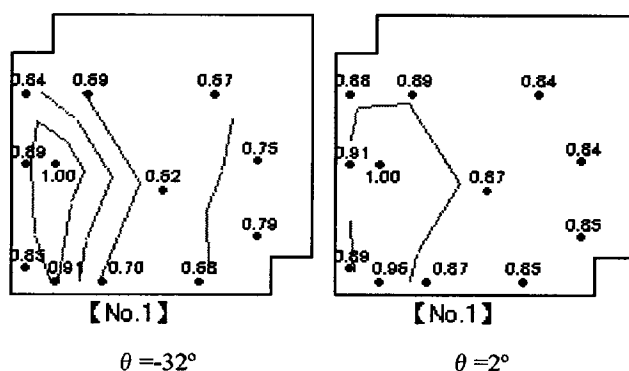


Fig.17 Cross correlation of fluctuating external pressure on the roof tile No.1

4. 結論

自然風中に設置した実験家屋の屋根瓦と野地板に作用する風圧測定の結果、以下の結果が得られた。

- (1) 瓦の平均表面風力係数、裏面風力係数は、風上側の屋根面では正、風下側の屋根面では負となる。
- (2) 瓦の表面風力係数が最小となるのは、風が屋根面の斜め後ろから当たる風向 ± 120 度の場合で、その値は-0.6程度である。
- (3) 瓦飛散の原因となる大きな負の総風力は、表面風力係数が最小値を示す風向 ± 120 度ではなく、風上側の屋根面に対して風が直角に当たる風向0度の場合に生じる。風向 ± 120 度では、表面風力と同時に裏面風力も低下するため、その差である総風力があまり低下しないのに対して、風向0度付近では、表面風力は正であるが裏面での圧力上昇が表面風力を大きく上回り、瓦には大きな負の総風力が作用する。この時の平均総風力係数は-0.3程度である。
- (4) 負の大きな表面風力が観察される相対度数は風向 ± 120 度の場合が最も大きく、瞬間的に表面風力係数が-1.0を下回る度数は全体の18.5%近くに達する。
- (5) しかし、瓦の総風力が瞬間的に大きく低下する度数は、平均風圧の場合と同様に、風が軒に直角にあたる風向0度 ~ 30 度付近で最大となる。これは、表面風力が大きく低下する時、風向 ± 120 度付近では裏面風力も低下する結果、その差の総風力はあまり低下しないのに対して、風向0度 ~ 30 度付近では、表面風力が低下しても、裏面風力は低下せず正圧を保つため、総風力が大きな負のピークを示すようになるためである。
- (6) 瓦の飛散原因となる総風力係数の最小値は、平均風向が ± 90 度以内ではあまり大きく変わらず、-2 $\sim$ -3程度となる。
- (7) 瓦の表面の平均風圧の分布は瓦の表面の流れ場に大きく左右される。特に、瓦に対して風が斜めから当たる場合には、瓦の尾根の部分で流れが加速され、尾根の部分の風圧が大きく低下する。また、瓦に直角に流れが当たる場合においても、瓦の風上側での圧力が低下し、風下に行くにしたがって圧力は徐々に上昇する。また、軒付近の瓦では、瓦に風が斜めから当たる場合と同様に、尾根部分で圧力が低下する。
- (8) 総風力が負のピークを示す場合においても、瓦表面の風圧分布は、その時の瞬間風向に對

応する平均風向に関する平均風圧分布とほぼ同じ形状となる。

- (9) 野地板に作用する平均風圧は、風上側で小さく風上に行くにしたがって上昇する。風圧勾配は、風が軒に斜めから当たる場合の方が、軒に直角に当たる場合よりも大きい。
- (10) 風上側の測定点を基準とした野地板の風圧変動の相互相関は、平均風圧分布とほぼ同様な形状となり、風が斜めに当たる場合には、風下へ向かって相関が大きく減少し、風が軒に直に当たる場合には、屋根全体で相関が非常に大きく、野地板上ではどの位置でも風圧は同じように変動する。

参考文献

- 岡田恒 (1988): 強風による屋根瓦の飛散に関する風洞実験, 日本風工学会誌, 第35号
- 桂順治, 谷池義人, 丸山敬 (1992): 台風9119号による柳川市の被害, 平成3年度文部省科学研究費突発災害研究成果報告書(1991年台風9号による強風災害の研究), pp117-128.
- 日本建築学会 (1993): 建築物荷重指針・同解説, 第6章 風荷重.
- 森崎禎璋, 齊藤通, 本田明弘, 佐藤勝彦 (1994): 屋根瓦に作用する風力に関する研究, 日本風工学会誌, pp.19-31.
- 河井宏允 (1996): 陸屋根に作用する風圧変動の特性について—風圧変動の同時測定結果—, 第14回風工学会シンポジウム論文集, pp557-562.
- 植松康, 佐々木和彦, 野澤壽一 (2000): 自治体および消防署における住宅の強風被害調査の実態と建築工学的観点からの提案, 日本風工学会誌, No.83, pp57-64.
- Hazelwood, R.A. (1980): Principles of wind loading on tiled roofs and their application in the British standard BS5534, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.6, 113-124.
- Kramer, C. and H.J. Gerhardt (1983): Wind loads on permeable roofing systems, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.13, 347-358.
- Kawai, H and G. Nishimura.(1996): Characteristics of fluctuating suction and conical vortices on a flat roof in oblique flow, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, No.60, pp.211-225

Wind force on a roof tile in natural wind

Hiromasa Kawai, Hiroaki Nishimura

Synopsis

Wind force on a roof tile of an experimental house with a hipped roof was measured in natural wind. The net force on the tile is given by a difference between wind force on a surface of the tile and pressure in the batten space. The suction force on the surface takes its maximum in the leeward roof when wind attacks the roof diagonally, but the pressure in the batten space of the roof becomes negative in the wind direction, then the net suction force on the roof tile is not so large in the wind direction. When wind attacks normal to the roof, the net suction on the roof tile of the windward roof takes the maximum in the mean and the peak force. The mean force on the surface is positive in the wind direction, but the pressure in the batten space is much larger than the pressure on the surface, then the mean net force is negative. The peak net suction occurs when the surface force decrease rapidly to become a large negative peak value while the pressure remains positive in the batten space. The pressure on the surface of the tile is influenced greatly by local surface flow. Particularly, the pressure at the ridge of the convex surface drops greatly when the wind blow diagonally on the surface.

Keywords: wind force, roof tile, batten space, surface flow, natural wind