特集

空飛ぶ凶器－飛散物のインパクト

屋根瓦に作用する風力の測定

Wind Force on Roof Tiles

岡田 創*

Hajime OKADA

1. はじめに

瓦屋根は住宅などの低層建築物において最も代表的に用いられる屋根葺き工法の1つであるが、従来から台風の影響などによる強風被害の発生が都度、飛散などの被害が度々報告されている。図1に示すように瓦屋根は瓦と下地材との間に隙間（以下、内部空間と呼ぶ）を有しており、この内部空間は個々の瓦の隙間を通じて外部と通じている。このため、瓦の内圧の評価は困難なものとなっており、瓦に作用する風力の評価が適切になされていなかったことが依然として強風時の被害が報告される要因の1つとしてあげられる。

瓦の飛散に関する研究としては、縮尺1/20で精密に再現された瓦模型を模型屋根に葺いて行った岡田¹⁾の実験がある。岡田は、風速を段階的に変えて瓦の挙動を観察し、一部の瓦に動揺が生じてから飛散に至り、その後これに連鎖して瓦の飛散する領域が周辺に拡大する様子を明らかにしている。このとき、瓦に作用する風圧あるいは風力は直接測定されておらず、飛散時の風力の推定は飛散の生じた風速より間接的に行っている。

瓦に作用する風圧力を実大の瓦を用いて風洞実験により測定した研究としては、鷲尾ら²⁾、立川³⁾、森崎ら⁴⁾のものがある。これらの研究では、実大の瓦を用いた屋根の一部分を風洞の吹き出し口に設置し、瓦の表面及び裏面の平均風圧の測定を行っている。ただし、いずれも

図1 瓦屋根の構造

瓦に作用する平均風圧の性状に着目しており、内圧や風圧の変動性状については明らかにされていない。また、いずれの研究も実験気流として一様流を用いており、自然風の有する気流の乱れが瓦の風圧力に及ぼす影響は言及されていない。

瓦の内圧に関する研究についてみると、C. Kramer et al.⁵⁾は、瓦の隙間の空隙率を実験的に評価して瓦の内部空間に出入りする気流の流量を一定とした仮定の下に、瓦の隙間の通風量の測定結果より有効面積を評価して平均内圧係数を推定している。またR.A. Hazelwood⁶⁾は瓦屋根に作用する外圧の分布に釣り合うような内部空間内の流れを仮定して瓦に作用する風力を評価している。しかし、これらの検討は外圧と内圧の定常的な釣り合いに関するものであり、内圧の変動性状を明らかにするものではない。なお、R.A. Hazelwood⁷⁾は風洞内で風路を塞いだカーテンを急激に解放することにより瓦屋根に急激な圧力変動を作用させ、内圧は極めて短時間で外圧と等しく

* (株)泉創建エンジニアリング 主任研究員
Chief Research Engineer, Izumisohken Engineering Co., Ltd.

なることを示した。このことは、瓦の内圧は外圧変動に対して準静的に応答するとして扱う可能性を示唆するものであるが、屋根面に外圧変動が作用したときの瓦の内圧変動の評価については明らかにしていない。

以上に述べたように、風洞実験により測定された瓦の風圧力は実瓦を用いて測定されたものがほとんどである。これは、縮尺模型を用いた実験により瓦の内圧を直接測定することは瓦間の隙間の模型化など困難な点が多いことによるものである。しかし、これらの実験は乱れの少ない気流で行われており、自然風の有する気流の乱れが瓦に作用する風圧力、特に瓦の飛散に繋がるような負側ピーク風力に及ぼす影響は明らかになっていなかった。

その後、筆者等が実施した切妻屋根に設置した実大の瓦を用いた実測^{8),9)}や河井等が実施した寄棟屋根に実大に近い寸法の瓦を設置した実測^{10),11)}により、自然風中で瓦に作用する風圧力の性状が明らかなものとなってきた。本項では筆者等が実施した実大建物を用いた屋根瓦の風圧力の測定結果について紹介する。

2. ピーク風力の性状

図2に計測対象の建物の外観を示す。計測対象は切妻屋根の2階建て建物である。建物の平面形状は5.4m×4.8mの長方形平面で棟高さは6.7mである。切妻屋根の片面にF形瓦、もう1面にJ形瓦を設置し、図3に示す位置に風圧測定瓦を設置した。屋根瓦に作用する風圧力の測定は、瓦に浮上りがない状態と瓦の先端に人工的な浮上りを設けた状態について行った。人工的な浮上りは、瓦が飛散する直前に瓦がばたついたり浮き上がったりしている状態を模擬して作用する風力を測定することを目的として設けたものである。瓦の形状の違いによる差異は屋根の部位による差と比較して小さいことから、以下ではF形瓦の測定結果について示す。

図4に浮上りがない瓦に作用する正側ピーク風力係数 $\hat{C}_{F,max}$ 、負側ピーク風力係数 $\hat{C}_{F,min}$ 及び平均風力係数 $\bar{C}_F$ の風向 θ による変化の例として、妻側端部のF2瓦と屋根中央の一般のF8瓦の測定結果を示す。

いずれの瓦もピーク風力係数と比較して平均風力係数の値は小さく、F2瓦の $\theta=75^\circ$ 付近で-1程度の値を示す他はほぼゼロと見なすことができる。妻側端部のF2瓦の負側ピーク風力係数 $\hat{C}_{F,min}$ の値は、正側ピーク風力係数 $\hat{C}_{F,max}$ と比較して大きく $\theta=60\sim90^\circ$ で-3~-5の値を示す。屋根中央のF8瓦では、 $\hat{C}_{F,min}$ の値の風向による変化はF2瓦と比較して小さく、各風向で $\hat{C}_{F,max}$ と同程度の値を示す。F8瓦では、 $\hat{C}_{F,min}$ の値は妻面に正対する

図2 計測対象建物¹²⁾

図3 風圧測定瓦の設置位置と風向の関係¹²⁾

(a) F2 瓦

(b) F8 瓦

図4 正側ピーク風力係数 $\hat{C}_{F,max}$ 、負側ピーク風力係数 $\hat{C}_{F,min}$ 及び平均風力係数 $\bar{C}_F$ の風向 θ による変化¹²⁾
(浮上りが無い場合)

図5 浮上り量 δ を0, 5mm, 15mm, 25mmとした時の負側ピーク風力係数 $\hat{C}_{F,min}$ と風向 θ の関係¹²⁾

風向 $\theta=90^\circ$ と 270° 付近で極小を示しその値は $-1 \sim -2$ 程度である。

図5に浮上り量 δ を0, 5mm, 15mm, 25mmとした時の負側ピーク風力係数 $\hat{C}_{F,min}$ と風向 θ の関係の浮上り量の関係を示す。ここで、図中のプロットは風向 15° 毎の測定結果のアンサンブル値である。また、F4, F5, F10～F12瓦は $\delta=0$ については測定を行っていない。

屋根中央の軒先側に位置するF4瓦とF7瓦を除き、いずれの瓦についても浮上り量 δ の増加に伴って負側ピーク風力係数の値が極小値を示す風向で大きくなる。また、J形瓦には見られないがF形瓦では、屋根の中段より上側の瓦では風向 $\theta=0^\circ$ 付近でも浮上り量 δ の増加に伴って負側ピーク風力係数の値が大きくなる。

文献9では負側ピーク風力が生じる時の外圧係数と内圧係数の瞬間値について検討している。浮上りに伴って、屋根から剥離した気流の場にあるF2瓦などの妻面側にある瓦では外圧係数の瞬間値は δ が生じることにより負側に变化する。また、F8瓦のように気流の再付着点より風下側にある瓦では再付着した気流の一部が吹き込むことにより内圧係数の瞬間値が正側に变化し、負側ピーク

風力係数が大きくなっている。屋根中央の軒先側に位置する瓦では浮上りによる負側ピーク風力係数の変化が小さいが、これらの瓦では浮上りに伴って外圧係数と内圧係数のいずれも同程度変化し、その結果負側ピーク風力係数の値の変化は小さくなっている。

3. 屋根面風圧測定結果に基づく内圧の推定

以上では、実大建物を用いた自然風中における瓦に作用する風力の性状について述べた。しかし、多様な形状の屋根における瓦に作用する風力を評価するためには、縮尺模型を用いた風洞実験に基づき風力を推定する手法が必要となる。変動内圧に関する研究としては室内圧を対象とした研究が多数行われており¹³⁾、瓦の内圧の推定する上でこれらが参考になる。瓦における外圧の主な伝播経路は多数の瓦と瓦の間の隙間である。これらは複雑な形状をしており、隙間における圧力損失の評価が内圧を推定する上で課題となる。また、隙間の面積は瓦1枚あたりの内部空間の容積と比較すれば比較的大きく、必ずしもHelmholtz共鳴を無視しようとはいえない。筆者等は、実瓦を用いた風洞実験より瓦の隙間における圧力

損失などのパラメーターを定め、同時測定された屋根面風圧の測定結果に基づき瓦の内圧を推定する手法について検討している¹⁴⁾。屋根面全体を対象とした場合、内部空間を区画する桟木などの影響は小さく、内圧変動は屋根面全体でほぼ一様であり、パワースペクトル密度には Helmholtz 共鳴に対応するピークは見られない。このため、同時測定された屋根面風圧を空間平均した値と個々の瓦の隙間を評価して推定した内圧変動はほぼ一致する。図 6 に浮上りがない場合の風力係数について、内圧を同時測定した外圧の空間平均値として推定した値と実測結果の比較を示すが、両者は良い一致を示す。ただし、浮上りが生じた場合、浮上りによる局所的な外圧及び内圧の変化の評価が課題として残る⁹⁾。

4. まとめ

本項では実測より得られた屋根瓦に作用する風力の性状及び風洞実験で得られた屋根面風圧の測定結果から瓦の内圧を推定する手法について述べた。2001 年に瓦屋根標準設計・施工ガイドライン¹⁵⁾が制定され、ガイドラインに基づき施工された瓦屋根の耐風性能が向上していることが期待される。しかし、瓦に浮上りが生じることを考慮すると浮上りによる負側ピーク風力の変化を評価する必要がある。筆者等は、実測結果に基づき浮上に伴う負側ピーク風力と浮上り量の関係を線形に仮定し、瓦屋根の耐風性能を評価する手法を提案している¹⁶⁾。

参考文献

- 1) 岡田 恒, 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, pp.1-15, 1988.4
- 2) 鷲尾健三, 鳥海 勲, 台風による瓦屋根の飛散防止に関する研究, 建築学会研究報告, 第 12 号, pp.37-39, 1951
- 3) 立川正夫, 屋根瓦の飛散について, 日本建築学会大会梗概集, pp.921-922, 1971
- 4) 森崎禎璋, 齊藤通, 本田明弘, 佐藤勝彦, 屋根瓦に作用する風力に関する研究, 日本風工学会誌, 第 58 号, pp.19-31, 1994.1
- 5) C. Kramer and H. Gerhaldt, Wind loads on permeable roofing systems, Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, Vol. 13, pp.347-358, 1983
- 6) R.A. Hazelwood, The interaction of the two principal wind forces on rood tiles, Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, Vol.8, pp.39-48, 1981
- 7) R.A. Hazelwood, Principles of wind loading on tiled roofs and their application in the British Standard BS5534, Journal of

図 6 浮上りがない瓦の風力係数推定値と実測結果の比較⁸⁾

wind engineering and industrial aerodynamics, Vol.6, pp.113-124, 1980

- 8) 岡田創, 大熊武司, 片桐純治, 浮上りが生じていない瓦に作用する風圧力の性状 実大建物による屋根瓦に作用する風力に関する研究 その 1, 日本建築学会構造系論文集, 第 588 号, pp.49-56, 2002.2
- 9) 岡田創, 大熊武司, 片桐純治, 浮上りが生じた瓦に作用する風圧力の性状 実大建物による屋根瓦に作用する風力に関する研究 その 2, 日本建築学会構造系論文集, 第 622 号, pp.57-64, 2007.12
- 10) 河井宏允, 西村宏昭, 自然風中における屋根瓦に作用する風力の特性について, 第 17 回風工学シンポジウム, pp.327-332, 2002
- 11) 西村宏昭, 河井宏允, 屋根瓦の耐風設計用風力係数, 第 18 回風工学シンポジウム, pp.473-478, 2004
- 12) 岡田創, 瓦屋根の耐風性能評価方法に関する研究, 神奈川大学学位論文, 2009.3
- 13) 例えば, J.D. Holmes, Mean and fluctuating internal pressures induced by wind, Proc. of the 5th International conference on Wind Eng., Fort Collins, Colorado, Vol.1, pp.IV-8-1 - IV-8-16, 1979
- 14) 岡田創, 大熊武司, 片桐純治, 屋根瓦の裏面に作用する風圧予測に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 633 号, pp.1943-1950, 2008.11
- 15) 瓦屋根標準設計・施工ガイドライン: 社団法人全日本瓦工事業連盟, 全国陶器瓦工業組合連合会, 全国厚形スレート組合連合会, 2001
- 16) H. Okada, J. Katagiri and T. Ohkuma, Study on method for evaluating wind performance of tiled roof, APCWE 7, Taipei, 2009