論文

壁面を伝う風による開き窓ストッパー部品に作用する衝撃力の評価

Evaluation of Impact Force Caused by Wind Flowing along Wall in Stopper part of Swing-type Window

西江 学^{*1} 森 孝男^{*2}

Gaku NISHIE, Takao MORI

SUMMARY

It is necessary for improving the safety of a swing-type window to evaluate the impact force caused by the wind flowing along a wall in the stopper part of the window. The strong wind test was performed in order to measure the impact force induced by a wind, and the characteristic of the wind energy and the impact force were clarified. The evaluation method of the impact force based on simple oscillation was proposed, and it is confirmed that the impact force by the proposed method is good agreement with the impact force by the drop weight test. It is considered that the proposed evaluation method is useful for the safety design of the swing-type window.

key words: Impact force, Wind flowing, Stopper part, Swing Type Window, Safety Design,

1. まえがき

開き窓において、突風などにあおられてストッパー部品やガラスの破損、窓の窓扉（以下窓と称す）の脱落などの事故が起きる場合がある。一般に窓の耐風圧性能は窓を閉じた時の外装材を想定した性能評価が求められ、外装材の設計用風荷重は建築基準法施行令や建築物荷重指針¹⁾（日本建築学会）に定められている。しかし、半開きの開き窓が風にあおられた場合、開き窓は任意の位置以上に開かないよ

うにストッパー部品が付いているが、窓が急激にストップした場合の衝撃的な荷重の評価は想定されていない。このあおり風の危険性は経験的に知られており^{2), 3), 4)}、安全性を確認するため暫定的な試験方法が提案されているのが現状である。

室内から室外への風（以下室内風と称す）を対象とした危険性は報告されており⁵⁾、室内風に対する窓の安全性を確認する試験として、(社)日本サッシ協会（以下サッシ協会と称す）は、「外開き窓のあお

*1 YKK AP(株) 開発本部 価値検証センター チーム長／富山県立大学大学院 機械システム工学 大学院生
Research Engineer, YKK AP Inc. / Toyama Prefectural University

*2 富山県立大学 教授
Professor, Toyama Prefectural University
(原稿受理年月日：2011 年 4 月 5 日，採用決定：2012 年 1 月 28 日)

図1 風を受けた時の開き窓
(Swing-type Window)

り衝撃試験方法」を提案している⁶⁾。これは、錘落下により窓に衝撃力を与える試験方法である。

一方、室内風以外に壁面に平行に伝う窓の側面からの風(以下側面風と称す)による危険性も知られており、落下事故の報告もある。図1に一般的な開き窓を示す。ストッパー部品は窓の上下端に取り付けられ、窓と壁面の窓枠を連結している。開き窓では側面風によって窓の運動エネルギーが生じ、ストッパー部品が急激に停止した時の衝撃力となり破壊することが考えられる。また、ガラスも風圧力で割れる前に、ストッパー部近傍で応力集中割れが多いため、ストッパー部品が風から受ける衝撃力を把握することが求められている。しかし、側面風に関する設計法や技術報告書および論文はなく、窓の破損に直結する開き窓ストッパー部品の安全性を評価する必要がある。

本研究の目的は、側面風による開き窓ストッパー部品に作用する衝撃力を評価することである。そのため、まず、第2節ではベルヌイの定理から風の運動エネルギー(以下、本論文では風力エネルギーと称す)を求めた。次に第3節では、大型実風試験装置を用いて実風を再現し、窓周りの風の流れおよび窓に作用する風力に及ぼす風向き角度の影響を明らかにし、第4節で、側面風が窓に与える風力エネルギー

を実験的に導出した。そして、第5節で、窓の回転運動を1自由度系の運動方程式で近似し、側面風の風力エネルギーから窓のストッパー部品に生じる衝撃力を評価することを試みた。

2. ストッパー部品に及ぼす風力エネルギー

ビルの形状や隅角部の風力係数に関する研究や設計法は、種々報告されており^{7) 8)}、窓が閉じている場合には、壁面と同様に風力係数を用いて窓に作用する風圧を評価できると考えられる。本研究では壁面に平行な側面風を対象としており、側面風が開いた窓に作用する風力を直接求め、その風力と窓の重心位置の移動距離の積を風力エネルギーと考える。

側面風の風力エネルギーが窓のストッパー部品の変形エネルギーに推移することを想定すると⁹⁾、ストッパー部品に生じる衝撃力が分かり、ストッパー部品の安全設計が可能になる¹⁰⁾。

(a) 風洞試験(Blower test)

(b) 風エネルギーモデル(Wind energy model)

図2 風洞試験による開き窓風エネルギーモデル
(Blower test and wind energy model)

図2(a)の矢印方向の風速 V の風が、窓に当たり室内側に風が流入した瞬間に、窓全体に室内圧力 P が加わると考えられる。このときベルヌイの定理は、

$$p_0 + \frac{1}{2} \rho V_0^2 = p_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 \quad (1)$$

となる。ここで、式(1)の下付き添え字は、風が窓に衝突する直前を0、衝突直後を1としている。 p_0 は0であり、風が窓に遮られた時の V_1 を極限の0とすると、窓の受ける圧力 p_1 は、

$$p_1 = \frac{1}{2} \rho V_0^2 \quad (2)$$

となる。ここで、 ρ は空気密度であり、気温15°C、気圧1013hPaでは $\rho = 1.22 \text{ kg/m}^3$ である。

窓に作用する風力エネルギー K を風の運動エネルギーと考え、風速を V 、空気の質量を m 、窓の重心の移動量を L 、窓の面積を A とする。図2(a)の円弧を図2(b)のように直線で表わすと、

$$K = \frac{1}{2} m V^2 = \frac{1}{2} \left(\rho A V \frac{L}{V} \right) V^2 = \frac{1}{2} \rho A L V^2 \quad (3)$$

で求められ、式(3)は、窓に働く力と窓の重心の移動距離の積となっている。図2(a)において L は、窓幅 W の重心位置の移動距離 L になるので、回転中心から重心位置は窓幅 W より $W/2$ になり、窓が0から90°まで開くと、回転中心より重心位置の移動距離 L は、

$$L = \frac{1}{4} \pi W \quad (4)$$

となる。式(3)、(4)より風力エネルギーは

$$K = \frac{1}{2} \rho A L V^2 = \frac{1}{8} \pi \rho A W V^2 \quad (5)$$

で求められる。

3. 窓周りの風の流れおよび作用する風圧力¹¹⁾

3. 1 実験方法

実験装置は図3に示すYKK AP(株)開発本部価値検証センターの実風試験装置(エッフェル型)を使用した。この試験装置は、送風機の吹出し口(φ2500mm)から風下に家モデルが設置されている。試験体を家モデルに取付け、試験体がターンテーブルの中心になるようにし、ターンテーブルを回転することで風向き角度を変化させることができる。

この実風試験装置により、これまで確認することが困難であった建物周りの風の流れを実験的に再現できることとなり、側面風により開き窓に作用する風力を測定できる。そして、窓が側面風から受ける

風力が最も大きくなる風向き角度を求めた。その角度で、風力と窓の移動量の積を風力エネルギーとして次節で求めた。

3. 2 風向き角度と側面風の風速の関係

図3のように、風向き角度 α を30°から90°に変化させ、側面風の風速を熱線風速計を用い、壁からの距離 $L=120, 300, 500\text{mm}$ 離れた3点A、B、Cの位置で測定した。開き窓の一般的なサイズでは、風向き角度が変わっても、図4のように壁面に平行に風が流れると考えられる。そのため、熱線風速計は壁面に平行な風を測定できる角度にした。風圧と窓面積との積が風力になり、最も風速が大きくなる角度 α が開き窓にとって風力が最大となる。そのため、設定風速 V_0 を送風機で一定に保ち、5, 10, 15, 20m/sの風をブロワから壁面に吹かせて、80秒間に2048個の風速データを取り、その平均を側面風の風速とした。風向き角度 $\alpha=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ での側面風の風速 V_w の変化を求めた。その関係を図5に示す。図より、風向き角度60°から75°付近で壁を沿う風速は最大となり V_0 と V_w はほぼ等しくなった。したがって、側面風の風速として、初期の風速 V_0 を用いる。図6に、風向き角度60°と75°の時の、壁面からの距離と側面風の風速の関係を示す。壁面から近い位置の風速が若干速いが、距離の差はほとんどなく、風向き角度60°と75°では、壁面にほぼ平行に風が流れている。

図3 側面風測定図 ($\alpha=75^\circ, \beta=0^\circ$)
(Measure of wind velocity at $\alpha=75^\circ, \beta=0^\circ$)

図4 側面風モデル図(風洞試験)
(Blower test and wind direction model)

図5 風速-風向き角度図

(Wind Velocity- Wind angle curve)

図6 風速と壁からの距離の関係図

(Wind Velocity-Distance from Wall curve)

3. 3 風向き角度と窓が受ける風力の関係

本研究の対象とする窓では、ストッパー部品により、窓が 90° 以上に開かないようになっている。窓が 90° 開いた状態で、窓に作用する風力を測定するため、図7のようにストッパー部品にひずみゲージを張り、引張りひずみを測定した。

図7 ストッパー部品ひずみ測定図($\alpha=45^\circ$, $\beta=90^\circ$)
(Measure of stopper part strain at $\alpha=45^\circ$, $\beta=90^\circ$)

図5の窓が閉じた時の側面風の風速実験結果から、本試験は風向き角度 $60^\circ \sim 75^\circ$ の間で最大の力が発生すると考え、窓が開いた状態で、風向き角度 $60^\circ \sim 90^\circ$ において 5° ごとに変化させて、ストッパー部品に生じるひずみを測定した。その結果を図8に示す。ストッパー部品のひずみの最大は風向き角度 $60^\circ \sim 80^\circ$ でほぼ同じ値になった。よって、風力についても図5の壁面風速の測定結果と同様な結果となった。

図8 ストッパー部品ひずみ-風向き角度図
(Stopper part Strain - Wind Angle curve)

3.4 流体解析による検討

窓が閉じた時の側面風の風速と、また、窓を 90° に開いた時の窓に働く力の、風向き角度の影響を検討したが、風向き角度 $60^\circ \sim 80^\circ$ でほとんど変わらなかった。ここでは、窓周辺の風の流れを詳細に確認するため、流体解析（以下 CFD 解析と称す）を行った。CFD 解析には汎用流体解析ソフト「STAR-CD v3.2」を用いて、速度ベクトルと圧力分布で気流の評価を行った。CFD 解析は 3 次元モデルで行い、計測室、吹出し口、家モデルを作成した。境界条件は、計測室、家モデルの壁面は固定壁条件を、空気吹き出し口は一樣流条件、空気出口は自由流出条件を設定した。また、乱流モデルは「標準 $k-\varepsilon$ モデル」を使用し、差分スキームには運動量方程式、乱流エネルギー及び散逸率の輸送方程式（ k 、 ε ）の移流項各々に、風上差分を適用した。空気の物性は、密度 $\rho=1.205\text{kg/m}^3$ 、粘性係数 $\mu=1.81 \times 10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{s}$ 、比熱 $C_v=1006\text{J/kg}\cdot\text{K}$ 、熱伝導率 $\lambda=0.02637\text{W}/(\text{m}\cdot\text{k})$ とした。図 9 は CFD 解析を実施した風向き角度 65° の速度ベクトルを示す。図より、窓に圧力が発生し、それを避けるように、窓より外に空気が流れていることや、室内側にわずかに空気が入ることが確認できた。図 10 は、窓が開いた状態で窓に加わる力の最大値を導出するため、風向き角度 $50^\circ \sim 90^\circ$ において 5° ス

図 9 CFD 解析結果図($\alpha=65^\circ \beta=90^\circ$)
(Result of CFD analysis at $\alpha=65^\circ \beta=90^\circ$)

図 10 風力-風向き角度図(CFD 解析)

(Wind force-Wind angle curve : CFD analysis)

テップで窓に働く力を CFD 解析結果で得られた窓に作用する圧力から計算した結果である。

図 8 に示すストッパー部品のひずみは、風力に比例する。したがって、CFD 解析と実験結果の双方とも、風力が最大となる風向き角度が 60° から 75° となり一致した。よって、CFD 解析による風力の最大値が風向き角度 65° であったので、側面風力エネルギーの測定を風向き角度 65° で行う。

3.5 家モデル内部空間の影響

開き窓の室内側の空間が閉じている場合、時間が経過すれば室内圧力が一定になるが、初期段階では一定ではない。圧力が一定になるまでの時間が短時間であれば、窓には室内圧力がほぼ一定に作用することになる。そのため一定の圧力になるまでの時間について検討する。

図 9 の結果より、室内側に入る風の流れがあり、室内に空気が入る量は内外の圧力差より次式で与えられる。

$$Q = CA \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (6)$$

Q : 漏気量 (m^3/s)

C : 流量係数

A : 漏気面積 (m^2)

Δp : 圧力差 (N/m^2)

ρ : 空気密度 $1.22 \text{ (kg/m}^3\text{)}$

図 11 開き窓(全閉 0° ～全開 90°)の軌跡
(Swing type window follow the tracks 0 to 90°)

西沢らの研究によると、「矩形開口の流量係数と流入角度」¹²⁾では、風向き角度 65° では流量係数は 0.35 になる。よって、実験で行った幅 3.3m ×奥行き 1.4m ×高さ 3m (容量 13.86m^3)の家モデルで、室内圧が風速 20m/s 相当の内外圧力差 245N/m^2 になる状態を仮定すると、容積の 0.0024 倍の 0.034m^3 の空気量の侵入が必要であり、窓サイズが $W=800\text{mm}$, $H=1200\text{mm}$ で、流量係数 0.35 として、 0.034m^3 の空気の塊が仮に一気に侵入したとすれば 0.005 秒で風圧相当の圧力になる。

次に窓が開く時間について検討する。図 11 のように窓幅 W の中心に式(6)の圧力差に基づく力 F は、開閉力を 20N とすれば、

$$F = \frac{1}{16} AV_0^2 \times g - 20 \quad (7)$$

となる。質量 m の窓を加速度 a で回転させる力 F は、

$$F = ma \quad (8)$$

である。したがって、加速度 a

$$a = \left(\frac{1}{16} AV_0^2 \times g - 20 \right) / \left(\frac{1}{16} AV_0^2 + m \right) \quad (9)$$

となる。

開き始めの $0 \sim 90^\circ$ までの重心の移動距離 L になり、開く時間を T とすると

$$\frac{1}{2} aT^2 = \frac{1}{4} W\pi$$

$$T = \sqrt{\frac{1}{2} \frac{W\pi}{a}}$$

になる。

式(9), (10)に、質量 $m=20\text{ kg}$, 窓幅 $W=0.8\text{m}$, 障子面積 $A=0.96\text{m}^2$ (窓高さ $H=1.2\text{m}$)を代入すると、窓が開く時間 T は 0.5 秒になる。よって、室内圧が風速相当圧力になる時間が上記より 0.005 秒とすれば非常に時間が短いので家モデル内部空間の影響はない。室内容積が 10 倍に増えたとしても、窓に働く圧力にほとんど影響がなく、本実験で求める風力エネルギーに、閉じた空間の容量の影響は少ないと考える。仮に大空間でも、窓に働く圧力は容積が小さい方が大きく、設計上安全側になるので問題ないとする。

4. 風力エネルギー測定実験¹¹⁾

4.1 風力エネルギーの測定

式(5)に示すように、窓に作用する風のエネルギーは窓寸法の影響を受ける。一般的な窓の寸法は幅 $500\text{mm} \sim 900\text{mm}$ であり、高さ $800\text{mm} \sim 1800\text{mm}$ であることを考慮し、試験を行う窓の寸法を表 1 のようにした。

表1 試験体サイズ表 (Specimen condition)

Specimen (No.)	Width (mm)	Height (mm)
1	900	1800
2		1300
3		800
4	700	
5	500

図 12 風力の測定図 (Measurement of wind force)

図 13 風力-開き角度 β 図($\alpha=65^\circ$, 試験体 No.3)
(Wind Force - Window open β curve : $\alpha=65^\circ$, Specimen No.3: W=900, H=800)

図 13 に風力と窓の開き角度の関係を示す。図 12 のように、風向き角度 α を 65° にして、窓の開き角度 $\beta=5\sim 90^\circ$ ($10\sim 90^\circ$ では 10° ごと) で、窓全体に作用する風力を、戸の中心に設置したワイヤーを介してロードセルで測定した。初期の風速 V_0 は 10m/s から 30m/s まで 5m/s おきに变化させた。

図より、異なる風速でも、開き角度 5° では風力はほとんど発生していないが、開き角度 10° から 20° で風力は大きくなり、 $30^\circ\sim 90^\circ$ にかけてほぼ一定の値となった。本研究では、図 13 の荷重と各角度間での窓の移動距離の積を、 0° から 90° まで積分し、その値を側面風が窓に与える風力エネルギーとした。

図 14 風エネルギー-風速図(試験体 No.3)
(Wind energy and wind velocity curve
Specimen No.3: W=900, H=800)

4.2 風力エネルギーの評価

図14は、試験体No.3の風力エネルギーを示す。風力エネルギーは速度の2次式で近似でき、風力エネルギーを E 、風の速度を V_0 とすると、

$$E = 0.27V^2 - 0.46V \quad (11)$$

となる。

図 15 は、高さが同一で幅の異なる試験体 No.3, 4, 5 の風力エネルギーを、試験体 No.3 の風力エネルギーに対する比 R_W とし、 R_W と窓幅 W (mm) の関係を示したものである。

$$R_W = 0.0018W - 0.63$$

となる。

図 15 試験体 No.3~5 風エネルギーと窓幅の関係
(Wind energy ratio to leaf height
Specimen No.3~5: W=900~500)

図 16 試験体 No.1~3 風エネルギーと窓幅の関係
(Wind energy ratio to leaf height
Specimen No.1~3: H=1800~800)

図 16 は、基準となる試験体 No.3 を 1 とした、風力エネルギー比 R_H と窓高さ $H(\text{mm})$ の関係を示し、 R_H は風速により異なり、

$$R_H = aH + b$$

と表し、 a 、 b を風速 V の関数で近似すると

$$a = -3.6 \times 10^{-5} V + 0.0021$$

$$b = 0.033V - 0.7$$

となった。

この結果より風力エネルギー E を、試験体 No.3 の風力エネルギー E_0 を基準とし、風速 V 、窓幅 W 、窓高さ H の関数として実験式を表すと、

$$\begin{aligned} E &= E_0 \times R_W \times R_H \\ &= (0.27V^2 - 0.46V) \\ &\quad \times (0.0018W - 0.63) \\ &\quad \times \{(-3.6 \times 10^{-5} V + 0.0021)H \\ &\quad + (0.033V - 0.7)\} \end{aligned} \quad (12)$$

となる。

4.3 ベルヌイの定理による風力エネルギーの評価

ベルヌイの定理から求めた式(5)で算出される風力エネルギーと、実験で求めた式(12)で算出される風力エネルギーの比較を行い、ベルヌイ式で風力エネルギーを求めることの妥当性を検討した。その結果を図 17 ～ 図 19 に示す図 17 は試験体 No.1 ($W=900\text{mm}$, $H=1800\text{mm}$) の結果である。図 18 は試験体 No.3 ($W=700\text{mm}$, $H=800\text{mm}$) の結果である。図 19 は、試験体 No.5 ($W=500\text{mm}$, $H=800\text{mm}$) の結果である。ベルヌイ理論式による風力エネルギーは、あおり風で最も事故が起こっている風速 20m/s で、試験体 No.1 では実験式の 1.2 倍、試験体 No.3 では 1.4 倍、試験体 No.5 では 1.6 倍となった。何れの試験体でも、ベルヌイ理論式(5)による風力エネルギーは、実験式(12)による風力エネルギーより大きい結果になった。窓サイズが大きい方が、実験式に対するベルヌイ理論式の比が小さくなり、その値が 1 に近付いている。図 9 に示す CFD 解析結果から、風の流れは図中の矢印のようになり、窓の端部では風の流れがあり、窓の中央部より風圧が減少していることが推測できる。窓サイズが大きくなるほど端

図 17 風エネルギー-風速図 (試験体 No.1)
(Wind energy - Wind Velocity curve
Specimen No.1: $W=900$, $H=1800$)

図 18 風エネルギー-風速図(試験体 No.3)
(Wind energy - Wind Velocity curve
Specimen No.3: $W=900$, $H=800$)

図 19 風エネルギー-風速図(試験体 No.5)
(Wind energy - Wind Velocity curve
Specimen No.5: $W=500$, $H=900$)

部の影響は小さくなるので、実験式に対するベルヌイ理論式の比が1に近付くと推測できる。いずれにしても、ベルヌイ理論式は実験式より大きな値となるので、ベルヌイ理論式に基づく風力エネルギーを用いれば、安全側に設計できる。

5. ストッパー部品に作用する衝撃力の評価

第4節において、窓に働く風力エネルギーを、風速に応じて導出できた。一方、ストッパー部品を設計するには、ストッパー部品に働く衝撃力を、風速に応じて求める必要がある。ここでは、開き窓の運動をばね-マスモデル(1 自由度振動系)で近似し、ストッパー部品に作用する衝撃力の評価する。そして、風力エネルギーと同一のエネルギーを与える錘落下試験を行い、ストッパー部品に生じる衝撃力を測定し、その妥当性を検討する。

5.1 ばね-マスモデルによる衝撃力の評価^{13), 14)}

質量 M の窓がストッパー部品で停止するとき、弾性限度内で窓とストッパー部品を1 質量系単振動の運動方程式で近似すると、運動方程式は次式で与えられる。

$$M \frac{d^2 X}{dt^2} + kX = 0 \quad (13)$$

ここで、 k はストッパー部品をばねと考えたときのばね定数である。ばねの伸びが X_0 であるとき、ストッパー部品が有するエネルギー E は、

$$E = \frac{1}{2} k X_0^2 \quad (14)$$

となる。

したがって、静止距離 X_0 は、

$$X_0 = \sqrt{2E/k} \quad (15)$$

となる。よって、ストッパー部品に生じる荷重 F は、

$$F = kX_0 = \sqrt{2kE} \quad (16)$$

となる。以上により、式(16)に、風力エネルギー実験式(12)を代入することにより、種々の窓の寸法や風速に対するストッパー部品の衝撃力が求まる。

5.2 衝撃力の評価方法の妥当性の検討

前節で述べた1 質量系単振動の運動方程式による衝撃力の評価式の妥当性を確認するため、図 20(a)

に示す錘落下試験を行った。このとき、錘の位置エネルギーを風力エネルギーと同一と成るようにした。本試験は、窓が閉じた状態から、錘落下エネルギーにより窓が開き、そして窓が開ききったときストッパー部品に衝撃力を与える。窓が受けるエネルギー E は、錘の質量を M 、ストッパー部品の摩擦力を f 、落下距離を H とすると、

$$E = (Mg - f) \times H \quad (17)$$

となり、式(16)より、荷重 F は、

$$F = \sqrt{2k (Mg - f) \times H} \quad (18)$$

となる。式(18)で荷重 F を求めるには、ストッパー部品のばね定数 k と摩擦力 f を求める必要がある。

図 20 ひずみエネルギー解析モデル
(Analytical strain energy model)

図 20(b)に示すストッパー部品は、Base parts と Arm parts で構成され、Base parts にスライド部品があり、風速 3m/s 以下では摩擦力で動かない構造となっており、摩擦力を超えると窓があおられる。開閉する力は静摩擦力と動摩擦力で異なり、本研究では窓が開く時の動摩擦力を測定した。開き角度 0 から 10° まで 0.5rad/s のスピードを加え窓を開き、窓の先端に錘荷重を 1N ステップで加え、窓が開き角度 90° まで移動した荷重を動摩擦力とした。その結果、動摩擦力は 16N であった。

ストッパー部品は複数の部材で構成されており、Arm parts は 4 本のバーがピンで連結されたリンク構造になっている。このストッパー部品のばね定数を求めるため、図 20(b)に示すようにストッパー部品の先端に荷重を付加した。この際に得られた荷重と荷重点変位の関係を図 21 に示す。4 本のバーがリ

図 21 ストッパー部品荷重-変位図
(Stopper part load-deflection curve)

図 22 衝撃力-錘質量図
(Dynamic load-Mass of weight curve)

ンク構造になっているため、ピン等のガタつきによるずれが見られるが、直線近似し、図の直線の傾きから、ストッパー部品のばね定数 k を求めた。

また、同じストッパー部品の平板部にひずみゲージを貼り付け、ひずみと荷重の関係を求めた。これにより、錘落下試験において、ストッパー部品に生じるひずみから、ストッパー部品に作用する衝撃力を測定できるようにした。

図 22 に、式(18)で算出したストッパー部品に作用する衝撃力と、錘落下試験により測定したストッパー部品に生じた衝撃力の比較を示す。両者は、よい一致を示した。これにより、1 質量系単振動の運動方程式の近似によって、エネルギーから衝撃力を評価する方法の妥当性が確認され、ストッパー部品の構造設計に必要な設計荷重が求められる。FEM 解析等でこの衝撃力を荷重としてストッパー部品に作用させることで、その強度計算ができる。

6. 結 言

開き窓の安全性を確保するため、側面風のエネルギーを測定し、ベルヌイ式に基づいた風力エネルギー式の妥当性を確認し、エネルギーに関する考察から開き窓のストッパー部品の弾性限度内での強度設計に必要な衝撃力の評価について検討した。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 側面風に対して、ベルヌイの定理から風力エネルギーを導出し、窓の開き角度が 60° から 75° で作用する風力エネルギーが最大となることを実験および CFD 解析で明らかにした。実験で得られた風力エネルギーを風速 V 、窓幅 W 、窓高さ H の関数とする実験式として示し、風力エネルギーを簡単に評価できるようにした。
- (2) 前述した実験式に基づく風力エネルギーとベルヌイ理論式に基づいた風力エネルギーを比較し、ベルヌイ理論式による風力エネルギーは実験値による風力エネルギーより、高目の評価となることを示した。実験式が得られていない場合は、ベルヌイ式で風力エネルギーを評価することで安全側の評価が行える。
- (3) 窓の運動を 1 質量系単振動の運動方程式で近

似し、風力エネルギーとストッパー部品のばね定数から、ストッパー部品に作用する衝撃力を評価する方法を示した。ストッパー部品のばね定数が既知であれば、風力エネルギーから種々の風速、窓寸法に対して、ストッパー部品に作用する衝撃力を算出できる。この衝撃力を用いることにより、FEM 解析等でのストッパー部品の設計を可能にした。

謝 辞

試験実施にあたりサッシ協会の研究協力及び情報提供していただいた(社)サッシ協会試験企画部会長の山崎 健一氏、(財)建材試験センター和田 暢治氏、また論文投稿に対して多大なデータ提供をしていただいた YKK AP(株)谷 芳郎氏、井上 浩文氏をはじめ本研究を実施にあたり、多くの方にご協力をいただいた。ここに、心より感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 日本建築学会, 「建築物荷重指針・同解説」, 日本建築学会(丸善), pp.321-434, (2004)
- 2) 荒川 治徳, 松本 洋一, 末松 茂正, 「縦軸回転窓の耐衝撃性能に関する考察」, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), pp.195-196, (1988)
- 3) 南 知宏, 黒木 勝一, 和田 暢治, 山崎 健一, 「外開き窓の煽り(衝撃)試験方法の実験的研究 その1 おもりを使用したあおり試験方法の実験及び検討」, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), pp.855-856, (2004)
- 4) 友清 衣利子, 竹内 崇, 前田 潤滋, 「風速の立ち上がり時間に着目した突風の性状」, 風工学会誌 vol.35, No.2(No.123), pp.118-123, (2010)
- 5) 桂 順治(代表), 「1990年12月11日千葉県に発生した暴風災害の調査研究」, 文部省科学研究費 (No.02306029) 突発災害調査研究成果報告, (1991)
- 6) 和田 暢治, 「外開き窓の煽り(衝撃)試験方法の実験的研究」, 建材試験情報, 2008.5, pp.14-19, (2008)
- 7) 風工学研究所, 「ビル風の基礎知識」, 鹿島出版会, pp.73-86, (2005)
- 8) 風工学会, 「風工学ハンドブック」, 風工学会, pp.254-286, (2007)
- 9) 西江 学, 森 孝男, 「突風によりスイング窓に生じる衝撃力の評価」, M&M2008 材料力学カンファレンス, <OS 0917>, (2008)
- 10) 西江 学, 「突風による衝撃力を受けるスイング窓ストッパー部品の構造設計」, 日本機械学会2009年度年次大会講演論文集, <S0404-1-2>, (2009)
- 11) 西江 学, 森 孝男, 「開き窓の突風による衝撃特性評価」, 日本学術会議 第60回理論応用力学講演会講演論文集, <OS16-08>, (2011)
- 12) 西沢 繁毅, 「評価・設計手法構築のための通風環境の定量的な把握」, 平成16年度国土交通省国土技術研究会自由課題一般部門, (2005)
- 13) 西江 学, 森 孝男, 「突風を考慮した開き窓ストッパー部品の衝撃特性評価」, 日本機械学会2010年度年次大会講演論文集, <G0400-3-3>, (2010)
- 14) 茶谷 明義, 「衝撃強度設計」, 日本材料学会2004年衝撃部門委員会講演資料集, pp.119-123, (2004)