

# 通常型および改良型通気工法外壁システムに求められる耐風圧性能\*

東北大学未来科学技術共同研究センター 植松 康

NTT都市開発㈱ 細川敬士郎

## 1. はじめに

我が国では低層住宅にサイディングを用いた通気工法外壁システムがよく用いられる。これは図1に示すようにサイディングの裏側に通気層を設け、湿気を外気に放出することで壁体内の結露やカビを防止するものである。この工法については、環境面での研究は多く為されているが(例えば Rahiminejad et al.<sup>1)</sup>)、風荷重や耐風性能に関する研究はこれまでほとんど為されていない。そこで、渡部・植松<sup>2)</sup>は金属サイディングを用いた通気工法外壁システムを対象とし、風洞実験による多点風圧同時測定結果と非定常ベルヌーイ式に基づく数値シミュレーションを組み合わせることで通気層内の圧力(「層内圧」と呼ぶ)を推定する手法を提案した。そこでは壁面上下端の開口だけでなく、サイディング嵌合部のわずかな隙間の影響も考慮している。これにより、隙間流れによる等圧効果によってサイディングに作用する風力の低減が示された(詳細については渡部<sup>3)</sup>を参照されたい)。

次に、植松・細川<sup>4)</sup>は外壁に図2に示すような意図的な開口(隙間)を設けることで等圧効果を促し、サイディングの更なる風荷重低減を試みた。検討の結果、隙間幅 $g$ (図2では1mm)が大きいほど、また隙間間隔 $s$ が小さいほどサイディングに作用するピーク風力が低減することが示された。しかし、同時に層内圧の最大・最小ピーク値の大きさが増大することも示された。この層内圧は内壁には外圧として作用するため、内壁の耐風性能を考える上で重要となるが、通気工法システムの内壁に作用する風力やその耐風性能の検討はこれまで全く為されていない。サイディングは通常外側から留め付けられるので、負のピーク風力係数 $\hat{C}_{f,out}$ (外向き)が設計上重要となる。一方、内壁は一般に室内側から留め付けられる上、室内圧係数は一般に負となるので<sup>5)</sup>、内壁にとっては正の層内圧係数 $\hat{C}_{pl}$ (内向き)が設計上重要となる。つまり、外壁に意図的な開口を設けることはサイディングにとっては有利に働くが、内壁にとっては不利に働くことになる。したがって、通気工法外壁システムの耐風性能を向上させるためには、 $\hat{C}_{pl}$ の上昇を抑えつつ $|\hat{C}_{f,out}|$ をできるだけ低減させるような $g$ と $s$ の組合せを見出すことが課題となる。植松・細川<sup>4)</sup>は一連のシミュレーション結果に基づき、検討した範囲内ではあるが、 $g = 1\text{mm}$ ,  $s \approx 0.8\text{m}$ の組合せが最適であるとした(詳細については細川<sup>6)</sup>を参照されたい)。

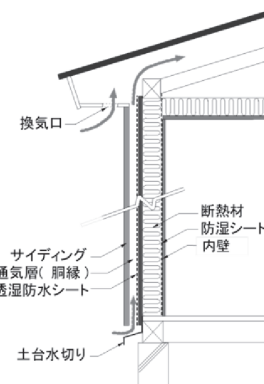


図1 通気工法外壁システム

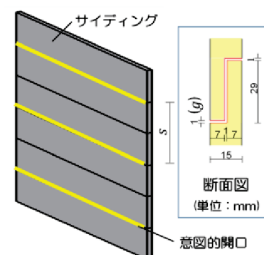


図2 意図的開口

\* Wind resistant performance required for the ordinary and improved ventilated exterior wall systems  
by Yasushi Uematsu and Keijiro Hosokawa

以上の成果を受け、本研究では通常の通気工法外壁システムと上記のような意図的開口を設けた改良型通気工法外壁システムについて、サイディングおよび内壁に求められる耐風圧性能を信頼性理論に基づいて考察する。

## 2. 対象とする建物および外壁システム

本研究では前報<sup>4)</sup>で扱った図3に示すような低層住宅の桁行面を対象とする。外壁は金属サイディング(厚さ15mm, 幅400mm)の横張りとし、サイディングを留め付ける縦胴縁(幅45mm, 厚さ18mm)の中心間距離は455mmとする。壁面下端(地上高さ500mm)の開口幅は10mm, 上端(軒高)は小屋裏に開放されている。小屋裏の換気条件は「軒下+妻面換気」(図4)とする。すなわち、小屋裏換気口が軒下および妻面上部に取り付けられている。この場合、前報<sup>4)</sup>によれば、全風向中絶対値が最大の $\check{C}_{f,out}$ および $\hat{C}_{pl}$ の値は表1のようである。これより、外壁に開口を設けることで $|\check{C}_{f,out}|$ は小さくなるが $\hat{C}_{pl}$ は逆に増大することが分る。

内壁に作用する風力は層内圧(外圧に相当する)と室内圧の差である。建設省告示第1458号によれば、ピーク内圧係数は外圧が正の場合-0.5, 負の場合0と規定されている。そこで、ここでは内壁の最大ピーク風力係数 $\hat{C}_{f,in}$ を $\hat{C}_{f,in} = \hat{C}_{pl} + 0.5$ で与える。

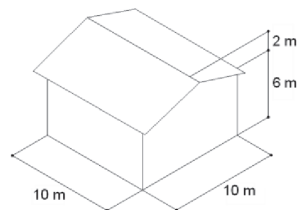


図3 対象建物

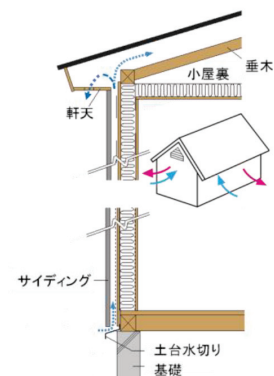


図4 小屋裏換気条件(AT-cg)

表1 サイディングに作用する最小ピーク風力係数 $\check{C}_{f,out}$ と最大ピーク層内圧係数 $\hat{C}_{pl}$

意図的開口	$\check{C}_{f,out}$	$\hat{C}_{pl}$	$\hat{C}_{f,in}$
なし	-2.36	1.03	1.53
あり	-2.00	1.44	1.94

## 3. サイディングおよび内壁の耐力

ガヴァンスキラ<sup>7)</sup>は低層住宅によく用いられる金属サイディングを対象とし、実変動風荷重装置<sup>8)</sup>を用いた載荷試験を実施した(図5)。載荷形式は風洞実験結果に基づく不規則な実変動風荷重と多段階荷重の2種類である。試験結果によれば、多段階荷重による載荷は実変動風荷重に対するサイディングの耐力を過小評価(設計上安全側に評価)することが示された。また、破壊モードには「ビス抜け」、「サイディングの頭抜け」、「嵌合部外れ」の3種類が見られたが(図6)、ビス径および頭径が比較的大きい場合(実験ではそれぞれ3.8mmと7.5mm)「嵌合部外れ」が主であった。



図5 金属サイディングの載荷試験



(a)ビス抜け (b)頭抜け (c)嵌合部外れ

図6 金属サイディングの破壊モード

しかし、「サイディングの頭抜け」が「嵌合部外れ」のトリガーとなった可能性も考えられる。破壊荷重の平均値と変動係数はそれぞれ 3.52kPa および 0.11 であった。実験の詳細については高橋<sup>9)</sup>を参照されたい。

内壁(石膏ボード)の耐力試験は本研究において独自に行った。試験方法は上記サイディングの場合と同様である。試験体の寸法を図 7 に示す。厚さは 9.5mm であり、留め付け用ビスの径、長さ、頭径はそれぞれ 3.8mm, 25mm, 8.2mm である。ビス間隔は、石膏ボード工業会の石膏ボード施工マニュアル<sup>9)</sup>では周辺部 200mm 以下、中央部 300mm 以下と規定されているが、ここでは実務でよく用いられる値として、周辺部 150mm, 中央部 200mm とした。試験体は 6 体である。载荷(負圧)は図 8 に示すような多段階荷重である。6 体の試験体の破壊荷重の平均値は 2.95kPa, 変動係数は 0.15 であった。破壊モードは図 9 に示す「中央部の割れ」(4 体)と「頭抜け」(2 体)の 2 種類であった。ビス留めの施工精度が悪い場合には「頭抜け」が発生し、破壊荷重が「中央部の割れ」の場合に比べて小さい傾向にあった。実験の詳細については細川<sup>9)</sup>を参照されたい。

#### 4. 信頼性理論に基づく通気工法外壁システムの耐風圧性能評価

サイディングおよび内壁に作用する風力( $S$ で表す)とそれらの耐力( $R$ で表す)はいずれもばらつきを有する確率変数であり、破壊は  $S > R$  となった場合に発生する。いま、 $S$  および  $R$  の確率分布がいずれも対数正規分布で表されるとすると、信頼性理論より破壊確率  $P_f$  は次式で与えられる。

$$P_f = \Phi \left( \frac{\ln \left( \frac{\mu_S / \mu_R \sqrt{(V_R^2 + 1) / (V_S^2 + 1)}}{\sqrt{\ln((V_R^2 + 1)(V_S^2 + 1))}} \right)}{\sqrt{\ln((V_R^2 + 1)(V_S^2 + 1))}} \right) \quad (1)$$

ここに、 $\mu_S$  および  $\mu_R$  は  $S$  および  $R$  の平均値、 $V_S$  および  $V_R$  はそれらの変動係数を、 $\Phi$  は標準正規確率分布関数を表す。単位面積あたりの荷重  $S$  は風力係数を  $C_f$  で表すと、次式で与えられる。

$$S = q_H \cdot C_f, \quad q_H = \frac{1}{2} \rho U_H^2 \quad (2)$$

ここに、 $U_H$ 、 $q_H$  は屋根平均高さ  $H$  における平均風速、平均速度圧であり、 $\rho$  は空気密度を表す。 $C_f$  はサイディングの荷重を計算する場合には  $|\hat{C}_{f,out}|$ 、内壁の荷重を計算する場合には  $\hat{C}_{f,in}$  とする。風荷重の変動係数  $V_S$  は Davenport<sup>11)</sup>を参考に 0.3 とする。サイディングおよび内壁の耐力の

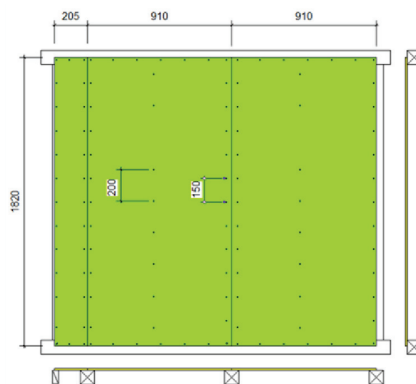


図 7 石膏ボード载荷試験体寸法

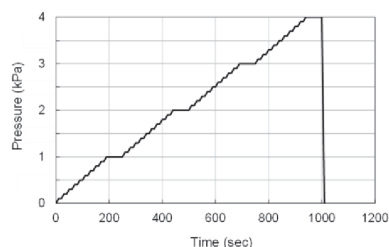


図 8 载荷プログラム



(a) 中央部での割れ

(b) 頭抜け

図 9 石膏ボードの破壊モード

変動係数 $V_R$ は前述の耐力試験結果に基づき、0.11 および 0.15 とする。したがって、(1)式より $P_f$ は $\mu_R/\mu_S$ ( $\beta$ と表す)のみの関数となる(図9)。外装材の耐風設計では、载荷試験で得た平均破壊荷重の1/2~1/1.5(1/ $\xi$ )倍の荷重を許容耐力とし、設計荷重との比較で安全性を検討することが多い<sup>12)</sup>。 $\xi$ は安全率を表す。(1)式を用いて許容荷重(=許容耐力)に対する破壊確率を求めると表2のようなのである。逆に、 $P_f=0.05$ および0.01に対する $\beta$ を求めると表3となる。これより、 $\xi=2$ として許容耐力を与え、設計荷重をこれ以下とすれば、破壊確率を概ね0.01以下となる。

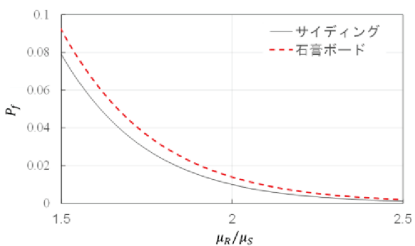


図9 破壊確率 $P_f$ と $\mu_R/\mu_S$ の関係

破壊確率を $P_f=0.05$ あるいは0.01とするには、耐力の平均値 $\mu_R$ を(2)式で与えられる風荷重の平均値 $\mu_S$ の $\beta$ 倍とする必要がある。そこで、サイディングおよび内壁に対して $P_f=0.05$ および0.01を与える必要耐力の平均値 $\mu_R$ を求め、 $q_H$ に対してプロットすると図10および11のようである。ここに、 $q_H=250\text{Pa}$ および $1000\text{Pa}$ は $U_H=20\text{m/s}$ および $40\text{m/s}$ に概ね相当する。図には3.で述べたサイディングおよび石膏ボードの耐力も併せて示した。次に、 $P_f=0.05$ および0.01を与える荷重が耐力に一致する速度圧 $q_{Hf}$ および風速 $U_{Hf}$ を求めると表4のようである。

表2 安全率と破壊確率の関係

部材	$\xi = 1.5$	$\xi = 2.0$
サイディング	0.079	0.0099
石膏ボード	0.092	0.014

表3 破壊確率と $\beta$ の関係

部材	$P_f = 0.05$	$P_f = 0.01$
サイディング	1.61	2.00
石膏ボード	1.67	2.08

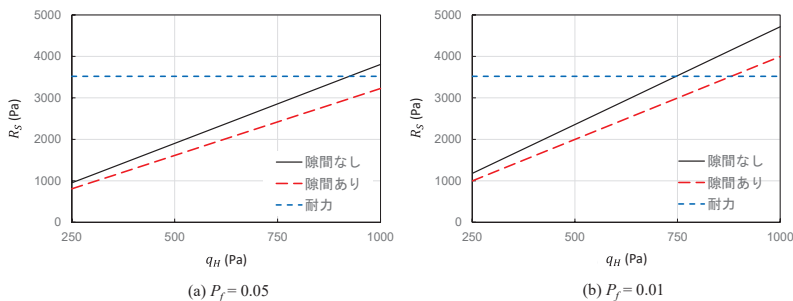


図10 サイディングの必要耐力の平均値

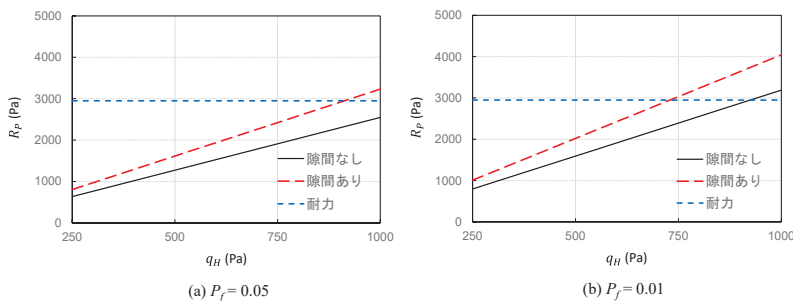


図11 内壁(石膏ボード)の必要耐力の平均値

表 4 破壊確率 $P_f=0.05$  および  $0.01$  を与える荷重が破壊荷重に一致する速度圧 $q_{Hf}$ および風速 $U_{Hf}$ 

部材	破壊確率 $P_f$	意図的開口	$q_{Hf}$ (Pa)	$U_{Hf}$ (m/s)
サイディング	0.05	なし	925	39.3
		あり	1091	42.6
	0.01	なし	747	35.3
		あり	881	38.3
内壁 (石膏ボード)	0.05	なし	1158	43.9
		あり	913	39.0
	0.01	なし	925	39.3
		あり	730	34.9

建設省告示第 1454 号には設計風速 $U_H$ (屋根平均高さ  $H$  での値)を計算するための基準風速 $V_0$ が規定されている。この $V_0$ は地表面粗度区分Ⅱの平坦な地形における地上高さ 10m での再現期間 50 年の 10 分間平均風速である。沖縄県や諸島部を除く地域における最大値は 40m/s である。いま、地表面粗度区分を低層住宅が一般に建てられるⅢとして、 $V_0 = 40\text{m/s}$  のときの対象建物 ( $H = 7\text{m}$ ) の設計風速を計算すると  $U_H = 29.6\text{m/s}$  となる。この時の速度圧は  $q_H = 526\text{Pa}$  であり、これによって与えられる風荷重は建築基準法が規定する限界耐力計算における「損傷限界荷重」に対応する。表 1 に示したピーク風力係数を用いて設計荷重を計算し、3. に示した部材の破壊荷重に対して安全率を  $\xi = 2.0$  としたときの許容耐力と比較したものが表 5 である。いずれも許容耐力が設計荷重を 1.5 倍程度上回っており、本研究で対象とした仕様では 3.0 程度の安全率が確保されていると考えられる。次に、「安全限界」を与える速度圧は「損傷限界」の 1.6 倍であり、 $q_H = 841\text{Pa}$  ( $U_H = 37.5\text{m/s}$ ) と計算される。これを表 4 に示した  $P_f = 0.01$  に対する  $q_{Hf}$  と比較すると、意図的開口のない場合のサイディングと意図的開口のある場合の石膏ボードの値は 1 割程度下回っている。設計において破壊確率をいくりに設定するかについては、明確な指針はなく議論の余地はあるが、いま、「安全限界荷重に対して破壊確率  $P_f = 0.01$  以下とする」を設計条件とした場合、それを満たす方法として以下の 2 つが考えられる。

- ① 意図的開口を設けない場合は、サイディングの耐力がクリティカルとなる。3. で述べたように、サイディングの主たる破壊モードは「嵌合部のはずれ」であるが、これはサイディングの頭抜けがトリガーになっていると考えられる。このような破壊を防止するためには、頭径の大きなビスを用いることが有効であろう。
- ② 意図的開口を設ける場合は、石膏ボードの耐力がクリティカルとなる。本研究において行った耐力試験では、厚さ 9.5mm の石膏ボードを用い、留め付けビスの間隔を周辺部で 150mm、中央部で 200mm としたが、耐力を高めるためには、より厚い石膏ボード(例えば、12.5mm)を使うか、ビス間隔を狭くする(例えば、周辺部 100mm、中央部 150mm)ことが有効であろう。

表 5 設計荷重と許容耐力(安全率  $\xi = 2.0$ ) の比較

部材	許容耐力 (Pa)	意図的開口	ピーク風力係数	設計荷重 (Pa)
サイディング	1760	なし	-2.36	1241
		あり	-2.00	1052
石膏ボード	1475	なし	1.53	805
		あり	1.94	1020

## 6. おわりに

通常の通気工法外壁システムと筆者らが既報<sup>4)</sup>で提案した意図的開口を有する改良型通気工法外壁システムについて、サイディングと内壁(石膏ボード)に求められる耐風圧性能について信頼性理論に基づき検討した。具体的には、破壊確率 $P_f = 0.01$  および  $0.05$  に対してサイディングおよび内壁に求められる耐力を示した。また、一般に用いられるサイディングと内壁を対象に、現在一般的な耐風設計を行った場合、どの程度の安全性が確保されているのか具体的に検討した。損傷限界荷重については、3 程度の安全率が確保されている。安全限界荷重については、破壊確率が  $0.01$  程度となることが示された。最後に、意図的開口のない通常のシステムと意図的開口を有する改良型システムについて、耐風圧性能の更なる改善を図る方法を提案した。

## 参考文献

1. Rahiminejad, M., Paris, A.L.M., Ge, H., Khovalyg, D.: Performance of lightweight and heavyweight building walls with naturally ventilated passive and active facades, *Energy and Buildings*, 256, 111751, 2022.
2. 渡部 慶, 植松 康: 通気工法を用いた外壁システムの風荷重評価に関する研究, *日本風工学会論文集*, 44 (2), 23-32, 2019.
3. 渡部 慶: 等圧効果による風力低減と荷重再配分を考慮した通気工法外壁システムの風荷重評価に関する研究, *東北大学修士学位論文*, 2017.
4. 植松 康, 細川敬士郎: 等圧効果を利用した通気工法外壁の風荷重低減の試み, *東北地域災害科学研究*, 61, 2025.
5. 日本建築学会: 動的外乱に対する設計—現状と展望—, 1999.
6. 細川敬士郎: 低層住宅の通気工法外壁システムに作用する風荷重に及ぼす開口の影響に関する研究, *東北大学修士論文*, 2019.
7. ガヴァンスキ江梨, 高橋麻衣, 植松 康: 複合金属サイディングを対象とした耐風性能評価法の妥当性検討, *日本建築学会構造系論文集*, 81 (720), 377-383, 2016.
8. ガヴァンスキ江梨, 高橋麻衣, 植松 康, モリソンマリー: 実変動風荷重装置の性能評価, *日本建築学会技術報告集*, 21(49), 1075-1080, 2015.
9. 高橋麻衣: 金属サイディングを用いた外壁システムの実変動風圧下における挙動と耐風性能評価法に関する研究, *東北大学修士論文*, 2015.
10. 一般社団法人 石膏ボード工業会: 石膏ボード施工マニュアル 平成 25 年版, 2013.
11. Davenport, A.G.: On the assessment of the reliability of wind loading on low buildings, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 11, 21-37, 1983.
12. 日本建築学会: 実務者のための建築物外装材耐風設計マニュアル, 2013.