

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

近年、住宅の外壁には金属系または窯業系のサイディングがよく用いられ、通気工法(図1)が普及している。この工法は、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温湿度など環境面での研究は多くなされているが(例えば Rahiminejad et al.¹⁾)、風荷重や構造に関する研究はほとんどない。類似の構造としてダブルスキン工法があり、その風荷重評価に関する研究はこれまで多数なされているが(例えば Xu et al.²⁾)、空気層の厚さが全く異なるため、その

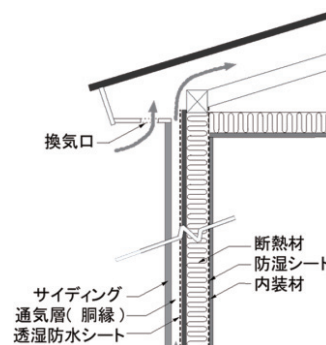


図1 通気工法外壁の例

の結果をそのまま通気工法外壁に適用することはできない。通気工法外壁の実務設計では、建設省告示第1458号等に規定された外圧と内圧がそれぞれサイディングの表面と裏面に作用するとして風荷重を算定する場合が多いと思われる。しかし、通気層の上下端には開口があり外部あるいは小屋裏に通じているため、通気層内の圧力(ここでは「層内圧」と呼ぶ)は建設省告示等に規定された内圧とは大きく異なる。

サイディングに作用する外圧(表面に作用する風圧)は縮尺模型を用いた風洞実験で求めることができるが、裏側にある空気層は厚さが20mm程度と薄く、これを縮尺率1/100程度の模型で再現することはできないため、層内圧を風洞実験で直接測定することはできない。そこで、渡部・植松³⁾は、金属サイディングを対象として、風洞実験による外圧データと非定常ベルヌーイの定理を用いたシミュレーションにより層内圧を推定し、サイディングの設計用風荷重評価方法を提案した。そこでは上下の開口だけでなく嵌合部のわずかな隙間の影響も考慮している。いま、サイディング間に意図的に開口を設けると、「等圧効果」によってサイディングに作用する風荷重の低減が期待される⁴⁾。そこで、本論文では、通気工法外壁システムの風荷重に及ぼす意図的開口の効果について渡部・植松³⁾と同様の手法を用いて検討する。

2. 対象建物

本研究では平面形10m×10m、軒高6m、4寸勾配(約22°)で軒の出0.6mの切妻屋根を有する住宅を対象とする(図2)。外壁は金属サイディング(厚さ15mm、幅400mm)の横張りとし、サイディングを取りつける縦胴縁(幅45mm、厚さ18mm)の中心間距離は455mmとする。下端(高さ500mm)の開口幅は10mm、上端(軒高)の開口幅は屋外開

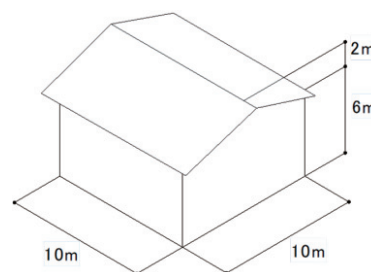


図2 対象建物

* An attempt to reduce wind loads on ventilated exterior wall systems using pressure equalization

by Yasushi Uematsu and Keijiro Hosokawa

放(EX と表記)の場合 10mm, 小屋裏開放の場合 18mm とする。なお, 小屋裏開放の場合, 小屋裏換気条件として図 3 に示す 3 種類(AT-e, AT-g, AT-eg)を想定する。意図的開口は雨仕舞を考慮し, 図 4 のような形状とする。これらの開口の流量係数等のパラメータは, 「実変動風荷重載荷装置」⁵⁾を用いた実験に基づき定められる。また, 意図的開口の設置間隔もサイディング 1~4 枚おきの範囲で変化させ, サイディングの風荷重に及ぼす影響を検討する。

3. 風洞実験による壁面外圧の測定

層内圧シミュレーションに用いる壁面外圧は, 図 5 に示す 2 種類の模型(縮尺率 $\lambda_L = 1/100$)を用い, 桁行面と妻面に分け, 地表面粗度区分Ⅲに概ね相当する境界層乱流中で測定した。風洞気流の平均風速のプロファイルを表すべき指数は $\alpha \approx 0.21$, 屋根平均高さにおける乱れの強さとスケールは, それぞれ $I_H \approx 0.16$ および $L_x \approx 0.2\text{m}$ である。模型には圧力測定孔が妻面に 72 点, 桁行面に 60 点, ほぼ均等に配置されている。実験では屋根平均高さにおける平均風速 U_H を 9m/s とした。設計風速を $U_H = 27.8\text{m/s}$ と設定すると, 風速の縮尺率は $\lambda_V = 1/3.1$ となり, 時間の縮尺率は $\lambda_T = 1/32.4$ と計算される。実験では, 圧力測定孔に作用する風圧をサンプリング周波数 800Hz で全点同時計測した。1 回の測定時間は 18.5 秒(実スケールでは 10 分)であり, ばらつきを考慮し 10 回連続して測定した。風圧係数等の統計量は 10 回の計測・解析結果のアンサンブル平均で評価する。風向 θ は, 妻面に正対する方向を 0° とし, 桁行面風圧測定の場合には $-90^\circ \sim +90^\circ$, 妻面風圧測定の場合には $0^\circ \sim +180^\circ$ の範囲を 10° ピッチで変化させた。測定された風圧は屋根平均高さにおける平均速度圧 $q_H (=1/2\rho U_H^2, \rho$ は空気密度)で基準化され, 外圧係数 C_{pe} として表される。

図 6 は, 桁行面および妻面に作用する全風向中の最大・最小ピーク外圧係数の分布を示す。最大ピーク外圧係数は正対風向のとき壁面上層部で, 最小ピーク外圧係数の絶対値は壁面に平行な方向から $10^\circ \sim 20^\circ$ ずれた斜め風向のとき壁面風上端下層部で大きくなる。サイディングに作用する風力もこれらの風向および場所で大きくなると予想される。

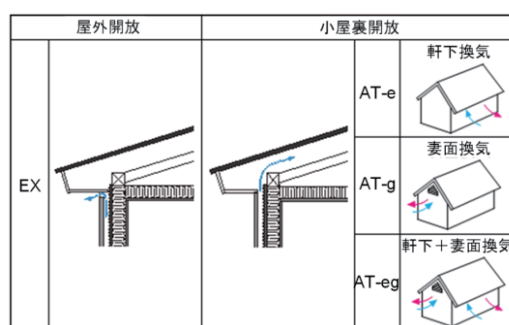
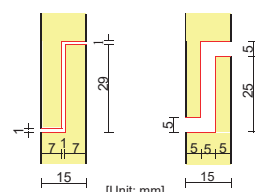
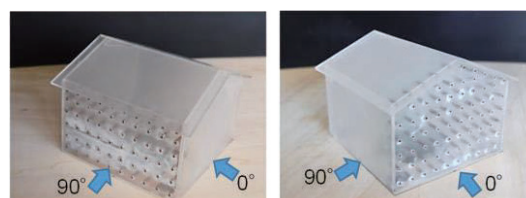


図 3 壁面上端開放状態



(a) $g = 1\text{ mm}$ (b) $g = 5\text{ mm}$
図 4 意図的開口の形状



(a) 桁行面風圧測定用 (b) 妻面風圧測定用
図 5 風洞実験模型

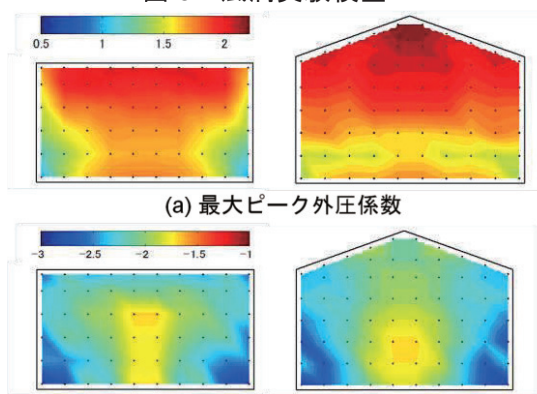


図 6 最大・最小ピーク外圧係数分布

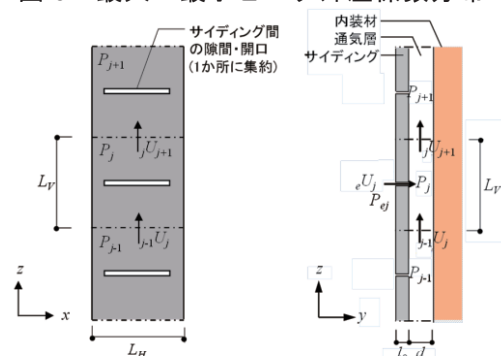


図 7 仮想室へ流出入する流れと圧力

4. 層内圧シミュレーション方法(概要)

サイディング裏側の空間は縦胴縁で区切られており、胴縁とサイディングの間を過ぎる流れはないものとする。したがって、以下では下端開放部(高さ 500mm)から上端開放部(軒先)までの幅 $L_H = 410\text{mm}$, 厚さ $d = 18\text{mm}$ のサイディング裏側空間内の鉛直方向の流れを考える。いま、この空間をいくつかの仮想空間(ここでは「仮想室」と呼ぶ)に分け、仮想室内の圧力は一定と仮定する。ここで、ある仮想室 j に着目したとき、この仮想室に流出入する流れと圧力の様子を模式的に表すと図 7 のようである。サイディング勘合部の隙間や意図的開口および壁面上下端の隙間を流れる「隙間流れ」の駆動力は仮想室 j の層内圧 P_j と開口部・隙間位置での外圧 ${}_eP_j$ との差である。以下、計算を簡単にするため、隙間や開口は中央に集約して考える。この隙間流れ(流速 ${}_eU_j$)に圧力損失を考慮した非定常ベルヌーイの定理を適用すると次式を得る。

$$\rho l_e {}_e\dot{U}_j = P_j - {}_eP_j - \left(\frac{1}{k_e}\right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{\rho}{2}\right)^{\frac{1}{2n}} {}_eU_j |{}_eU_j|^{\frac{1}{n}-1} - \frac{64\nu}{{}_eU_j d_e} \frac{\rho l_e}{2d_e} {}_eU_j |{}_eU_j| \quad (1)$$

ここに、「 $\dot{}$ 」は時間に関する微分を表し、 l_e = 開口部・隙間の有効深さ、 k_e = 開口部・隙間の流量係数、 n = 流れ係数(0.5~1.0)、 ν = 空気の動粘性係数、 d_e = 開口部・隙間の有効幅である。なお、Oh et al.⁶⁾によれば、 l_e は次式で与えられる。

$$l_e = l_0 + 0.89\sqrt{A_e} \quad (2)$$

ここに、 l_0 および A_e はそれぞれ開口部・隙間の実深さおよび実面積を表す。 ${}_eP_j$ は風洞実験で得られた開口部・隙間位置での外圧係数 C_{pej} を用いて次式で与えられる。

$${}_eP_j = \frac{1}{2}\rho U_H^2 \cdot C_{pej} \quad (3)$$

隣り合う仮想室の境界を過ぎる z 方向の「キャビティ流れ」の駆動力は仮想室間の圧力差である。キャビティ流れを平行な平板間の流れとみなし、仮想室 j と $j+1$ の境界を過ぎる流れ(流速 ${}_jU_{j+1}$)に非定常ベルヌーイの定理を適用すると次式を得る。

$$\rho L_V {}_j\dot{U}_{j+1} = P_j - P_{j+1} - C_{Lz} \frac{\rho}{2} {}_jU_{j+1} |{}_jU_{j+1}| - \frac{6\nu}{{}_jU_{j+1} L_H} \frac{\rho L_V}{2L_H} {}_jU_{j+1} |{}_jU_{j+1}| \quad (4)$$

ここに、 C_{Lz} は圧力損失係数(= $1/\sqrt{k_z}$, k_z : キャビティ流れの流量係数)、 L_H および L_V はそれぞれ仮想室の幅および長さ表す(図 7 参照)。

また、質量保存則より、各仮想室内の圧力(層内圧)の変化は次式のように表される。

$$\dot{P}_j = \frac{\gamma P_0}{V_0} \sum_{m=1}^N k_m A_m U_m \quad (5)$$

ここに、 γ は空気の比熱比(=1.4)、 k_m , A_m , U_m はそれぞれ仮想室 j にある m 番目の開口部・隙間(仮想室間の境界を含む)の流量係数、面積、流速を表し、 N は開口部・隙間の総数である。

(1)~(4)式を用いて開口部・隙間並びに仮想室間の境界を過ぎる流れの流速を求め、(5)式に代入すると層内圧の時間変化が求められる。これを全ての仮想室に適用し、得られる連立方程式を 4 次 Runge-Kutta 法を用いて数値解析的に解けば全仮想室内の圧力の時刻歴が得られる。なお、風洞実験模型での圧力測定孔位置は開口部・隙間位置とは異なるので、開口部・隙間位置での C_{pej} は実験結果から空間補間により求める。また、風洞実験での圧力測定の時間刻みは $\Delta t = 1/800$ 秒であり、これを実時間に換算すると約 1/25 秒となる。シミュレーションでは時間積分に陽解法を用いる。その場合、時間刻みを十分小さくしないと解が発散してしまう。そこで、

本研究では試行錯誤の結果，風洞実験で得られた外圧係数の時刻歴に対して3次スプライン関数を用いて補間を行って得た時間刻み1/4000秒のデータを用いることとした。

上式に含まれる開口部・隙間流れの特性値(流量係数等)は実大試験体と「実変動風荷重装置」⁵⁾を用いた実験に基づき設定した。図8は意図的開口の流量係数測定実験の概要である。実験装置は建具の気密性試験方法を定めたJIS A 1516を参考に決定した。具体的には，図4に示した意図的開口の実大モデルを「実変動風荷重装置」の圧力箱に取り付け，PLA(Pressure Loading Actuator)を用いて圧力箱に負圧を作用させ(ステップ载荷)，圧力箱に流入する空気流量 $Q(=A_1V_1)$ と試験体前後の圧力差 ΔP を風速計と差圧計を用いて測定した。

一般に， Q と ΔP の間には以下の関係がある。

$$Q = k_e A_e \left(\frac{2}{\rho} \Delta P \right)^n \quad (6)$$

ここに， k_e は流量係数， A_e は開口面積であり(前述)， $k_e A_e$ は等価開口面積を表す。図9に測定結果を示す。実線は $n=0.5$ とした近似式であり実験結果(■印)に概ね一致している。これより，以下 $n=0.5$ とする。また，開口部の面積 A_e を与えれば(6)式より流量係数 k_e が定まる。得られた結果は，1mm幅および5mm幅の開口に対してそれぞれ $k_e=0.315$ および 0.366 であった。以下のシミュレーションではこれらの値を用いる。なお，複雑な形状を有する金属サイディングの勘合部については，渡部・植松³⁾により詳細な検討がなされており，図8と同様の実験によって $n=0.65$ を得た。また，風洞実験結果に基づく不規則な変動風圧を作用させた際の実験結果とシミュレーション結果との比較により，勘合部の有効幅を2mmと仮定したとき $k_e \approx 0.035$ を得た。これより，勘合部の隙間が層内圧に及ぼす影響は意図的開口に比べるとかなり小さい。したがって，以下のシミュレーションにおいては嵌合部における空気の流れは無視する。壁面上下端の開口部や通気層内の流れの特性についても，渡部・植松³⁾は図10(a)に示すような実大4室モデルを用いて同様の実験とシミュレーションを行い， z 方向の流れの流量係数として以下の値を得た(詳細については渡部⁷⁾を参照されたい)。

上端開口 $k_{e1}=0.36$ ，仮想室 $k_{e2}=0.90$ ，下端開口 $k_{e3}=0.30$

図11は桁行面について，縦胴縁，サイディング嵌合部，風洞実験模型での外圧測定点の位置を示す。図中の破線はサイディング裏側の仮想室の境界を表す。意図的開口の配置間隔につい

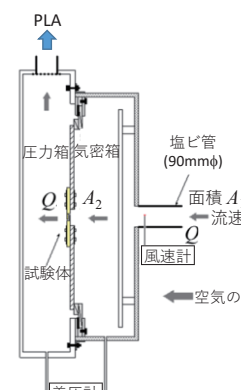


図8 流量係数測定実験概要

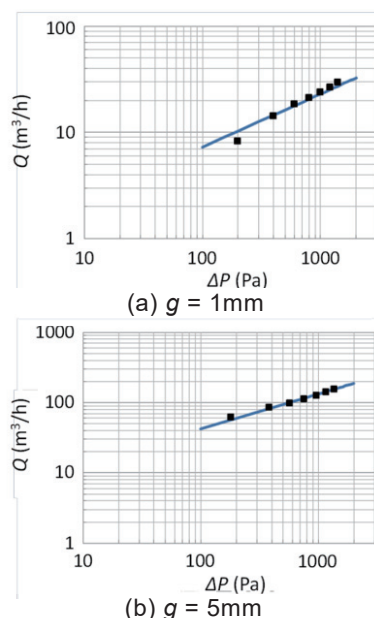


図9 流量測定結果

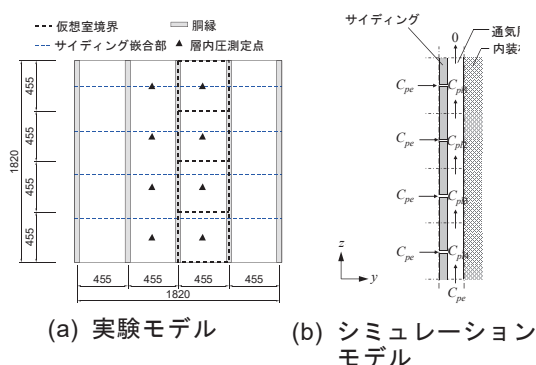


図10 4室モデル⁷⁾

ては以下の 4 通り (①～④) を想定する。

- ①0.8m 間隔(サイディング 2 枚につき 1 か所)
- ②1.2m 間隔(サイディング 3 枚につき 1 か所)
- ③1.6m 間隔(サイディング 4 枚につき 1 か所)
- ④なし(上下の開口のみ)

5. シミュレーション結果と考察

本論文では桁行面を対象に検討する。壁面上端が小屋裏に開放されている場合(図 3 参照), 開口部の圧力は小屋裏空間の圧力 P_{attic} となるが, その値は小屋裏換気口の位置と面積によって決まる。一般に, 小屋裏空間の体積に対して換気口の面積は小さいので, P_{attic} の変動は小さいと考えられる。そこで, 本研究では変動を無視し, 時間平均値 $\bar{P}_{attic}$ のみを考慮する。その場合, $\bar{P}_{attic}$ は換気口面積を重みとした換気口位置における平均外圧の重みつき平均値となる。実際の設計における換気口の面積と設置位置には様々なものがあり, 一概に定めることはできないので, 図 3 に示した 3 ケースに対して以下のように単純化する。

AT-e: 桁行面の軒直下にある圧力測定点(片面 10 点, 両面では 20 点)における平均外圧の平均値

AT-g: 妻面の頂点に近い 2 点(両面では 4 点, 図は省略)における平均外圧の平均値

AT-eg: AT-e および AT-g で考慮した計 24 点における平均外圧の平均値

$\bar{P}_{attic}$ を q_H で基準化した「平均小屋裏圧係数」 $\bar{C}_{p,attic}$ の風向による変化を図 12 に示す⁷⁾。平均外圧係数の変化に伴い, $\bar{C}_{p,attic}$ も風向 θ によって大きく変化する様子が見て取れる。

一般にサイディングの種類や施工方法(縦胴縁の間隔, 留め付けるビスの種類など)を壁面の場所によって変えることはないと考えられる。すなわち, それらは面全体における風力係数の最大(正)および最小(負)ピーク値で決定され则认为られる。そこで, 以下においては, 主としてサイディングの風力係数や層内圧係数の壁面全体における最大・最小ピーク値に着目する。

図 13 および図 14 は, 意図的開口幅 $g = 1\text{mm}$, 設置パターン①の場合について, 図 3 に示した 4 種類の上端開放状態に対する最大および最小風圧・風力係数の風向による変化を示す。比較のため意図的開口がない場合の結果も示した。図中, C_{pe} は外圧係数, $C_{pl,0}$ および $C_{pl,1}$ は意図

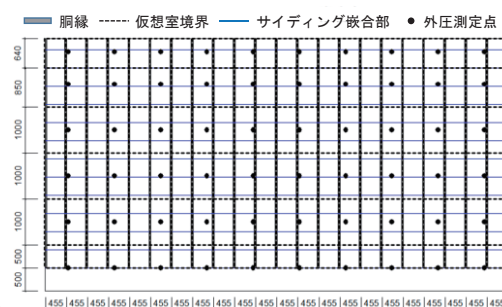


図 11 仮想室分割(桁行面)

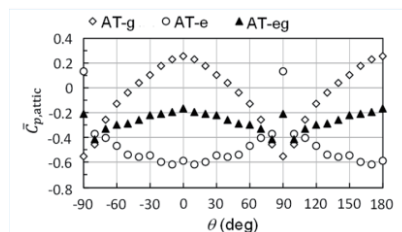


図 12 平均小屋裏圧係数⁷⁾

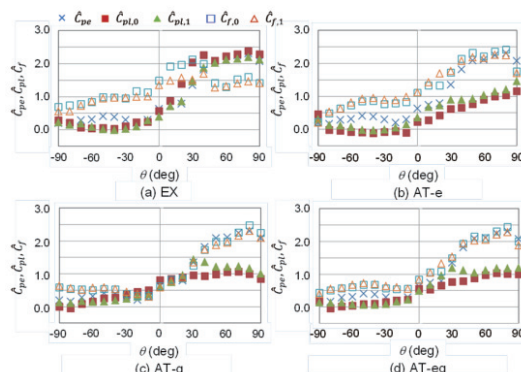


図 13 最大ピーク風圧・風力係数

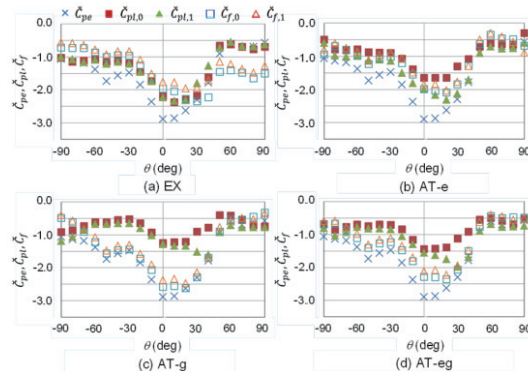


図 14 最小ピーク風圧・風力係数

図的開口のない場合およびある場合の層内圧係数, $C_{f,0}$ および $C_{f,1}$ は意図的開口のない場合およびある場合のサイディングの風力係数を表す。また, 記号「 $\wedge$ 」および「 $\sim$ 」は最大ピーク値および最小ピーク値を示す。正のピーク風圧・風力係数は $\theta \approx 90^\circ$ で最大となり, 負のピーク風圧・風力係数は $\theta = 10^\circ \sim 20^\circ$ で絶対値が最大となっている。これらの風向における最大・最小ピーク層内圧係数の大きさは最大・最小ピーク外圧係数よりかなり小さい。また, 最大・最小ピーク風力係数 ($\hat{C}_f$, $\check{C}_f$) の大きさは意図的開口を設けることで小さくなっている。標準的な工法では, サイディングは外側から打ち付けられるので, それを引き剥がす方向に作用する負のピーク風力係数 $\check{C}_f$ が設計上重要になる。一方, 通常の設計では考慮されていないが, 石膏ボード等の内装部材には外側

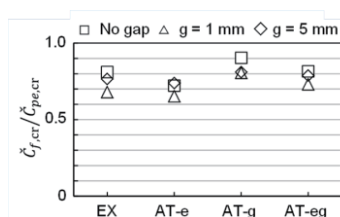


図 15 最小ピーク風力係数

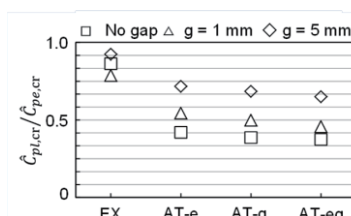


図 16 最大ピーク層内圧係数

から層内圧が作用することになる。内装部材は通常室内側から打ち付けられるので最大ピーク層内圧係数 $\hat{C}_{pl}$ が設計上重要になる。そこで, サイディングの最小ピーク風力係数 $\check{C}_{f,cr}$ と最小ピーク外圧係数 $\check{C}_{pe,cr}$ (層内圧係数を 0 と仮定すればサイディングの最小ピーク風力係数に対応する) に対する比を図 15 に示す。また, 最大ピーク層内圧係数 $\hat{C}_{pl,cr}$ と最大ピーク外圧係数 $\hat{C}_{pe,cr}$ との比を図 16 に示す。なお, ここに示した結果はいずれも全サイディング・全風向中の最大値あるいは最小値であり, $g = 1\text{mm}$ の場合は設置パターン①, $g = 5\text{mm}$ の場合は設置パターン③とした。これより意図的開口によってサイディングに作用する風荷重が低減することが分る。また, 内装部材に作用する風力も外圧に比べて小さくなっている。ただし, それらの低減効果は開口の幅および設置パターンによって異なる。層内圧係数は, 屋外開放以外の場合には外圧係数に対して最大 20%~35%低減するが, 開放状態によっては外圧と同程度になることもあるので注意が必要である。最大ピーク層内圧係数をそれほど上昇させることなくサイディングの最小ピーク風力係数の絶対値が低減するような開口の幅と設置位置を選択することが重要となる。

6. 結 論

本論文では横張り金属サイディングを用いた通気工法外壁を対象とし, 勘合位置に意図的開口を設けることでサイディングに作用する風力を低減できることを確認した。

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. Xu, H., Yu, S., Chen, Y.: Experimental and theoretical modelling of fluctuating internal wind pressures on a ventilated double skin facade of a building, *Energy and Buildings*, 323, 114795, 2024.
3. 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.
4. Uematsu, Y., Yambe, T., Yamamoto, A.: Wind loading of photovoltaic panels installed on hip roofs of rectangular and L-shaped low-rise buildings, *Wind*, 2, 288-304, 2022.
5. ガヴァンスキ江梨, 高橋麻衣, 植松 康, モリソンマリー: 実変動風荷重載荷装置の性能評価, *日本建築学会技術報告集*, 21(49), 1075-1080, 2015.
6. Oh et al. : The UWO contribution to the NIST aerodynamic database for wind loads on low buildings: Part3.Internal pressures, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 93, 31-59, 2007.
7. 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.