様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 ３０ 年　 ５ 月 １９ 日現在

機関番号： １１３０１

研究種目： 挑戦的萌芽研究

研究期間： 2016～2017

課題番号： １６Ｋ１４３３７

研究課題名（和文）等圧効果による風力低減と荷重再配分を利用した高耐風圧外壁システムの開発

研究課題名（英文）Development of an external wall system with high wind resistance by utilizing load reduction due to pressure equalization and redistribution of wind loading

研究代表者

植松　康（Uematsu, Yasushi）

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：６０１５１８３３

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　2,800,000円

研究成果の概要（和文）：　本研究では、低層住宅の外壁システムとして広く普及している通気工法外壁を対象とし，建物の縮尺模型を用いた風洞気流中での多点風圧測定実験，並びに，その結果を用いた通気層内風圧のシミュレーションに基づき，外壁および内壁部材に作用する風力（風圧差）の分布性状を把握した。ここでは通気層の上端が外気に解放されている場合と軒裏に解放されている場合の2種類を想定している。従来の設計では全く考慮されていないが，等圧効果によって外壁に作用する風力が低減する一方，内壁にも比較的大きな風力が作用することを示した。また，一連のシミュレーション結果に基づき，外壁および内壁に作用する風力の評価方法を提案した。

研究成果の概要（英文）：Ventilated exterior wall systems are commonly used for low-rise buildings. Because the net wind force on the external wall is the difference between external pressure and vent-layer pressure, the load may be reduced due to the effect of pressure equalization. On the other hand, the vent-layer pressure acts on the internal walls such as drywalls, which is not considered in the conventional design of walls. The present investigation discusses this subject based on a wind tunnel experiment of the external pressures on a low-rise building as well as on a numerical simulation of the vent-layer pressure. Based on both of the experimental and analytical results, wind force on each member is evaluated and a design guide is proposed for the ventilated exterior wall systems.

研究分野： 建築構造学

キーワード： 外壁システム　通気工法　等圧効果　耐風性　風洞実験　シミュレーション

１．研究開始当初の背景

(1) 外壁システムの耐風圧性能の重要性

近年，大型台風や竜巻等による建物の強風被害が頻発しているが，温暖化の影響でそれらが益々大型化すると言われている。近年では構造躯体が破損することはほとんどなく，被害の大半が外装材に発生する。外装材の破損は軽く見られがちであるが，外装材が剥離すると建物内部への風雨の吹き込みによって設備機器や内装に大きな損害がもたらされるほか，破損した外装材が飛散物となって他の建物の損傷や人的被害を引き起こすため，その被害低減は地域の安全性の観点からも非常に重要である。

低層建物の外壁として，最近ではサイディングが広く用いられ，外壁内の結露やカビを防止するため,通気工法が普及している。この工法は環境的観点から開発されたものであり，構造安全性に関する十分な検討がなされずに普及してしまった。風荷重と耐風安全性の適切な評価方法の確立が望まれている。

(2)等圧効果による風力低減と荷重配分

近年，高層建物では光および温熱環境に配慮したダブルスキン工法がよく用いられる。この場合，等圧効果によって外側および内側のガラスに作用する風荷重は半分程度になると言われている。外壁通気工法も原理的には同様である。一般に外装仕上げ材が全荷重を負担するとして設計されるが，実際には等圧効果によって荷重は低減する。しかし，外装仕上材の負担が減った分だけ内側の部材に荷重が作用することになる。その評価に関する検討はこれまで全く為されていない。通気工法外壁システムにおける隙間や工法を考慮して通気層内の風圧(以下,「層内圧」と呼ぶ)を適切に求め，外壁システムを構成する各部材に作用する風力を正しく評価する方法を確立することが求められている。

２．研究の目的

本研究では，強風被害が多発している低層建物の外壁(外装仕上げ材だけでなく下地材等の支持部材を含む構造システムとして捉える)を対象とし，その耐風性を適切に評価できる方法を確立することを目的としている。ここでは特に，構造的検討がほとんど為されないまま普及した外壁通気工法に着目し，その構造安全性や風荷重評価について新しい視座を与える。等圧効果によって外装仕上げ材に作用する風力が低減する一方で，風荷重が他の構成部材(支持部材や内壁材)にも作用するようになるため，外装仕上げ材だけでなく内壁材まで含めた全体としての構造システムとして捉える必要がある。

外壁内および室内への雨水の侵入を防止するため，「外壁は気密にすべき」というのが常識である。しかし，壁面に意図的に開口(隙間)を設けることで，外壁システムを構成する各部材に作用する風荷重の配分を調整し，全体として耐風性に優れた外壁システムを提案することも可能であると考えられる。本研究の成果はそのような構法の開発を可能とするものである。

３．研究の方法

本研究は以下に示す 3 ステップよりなる。検討対象は，現在利用頻度が高い金属サイディングを用いた通気工法(横張りおよび縦張り)である。縦張りの場合，通常の胴縁に加えて切り欠き胴縁も使用する。

ステップ 1：現在一般的な外壁通気工法のディテールを調査するとともに，代表的なものに対して嵌合部の通気性(等価な隙間幅や流量係数)を圧力箱試験によって把握する。

ステップ 2：切妻屋根を有する低層建物モデルを用い，妻面および桁行面に作用する風圧分布を縮尺率 1/100 の縮尺模型を用いた風洞実験によって求める。このデータは外圧分布の特性を把握するとともに，層内圧のシミュレーションに利用される。

ステップ 3：風洞実験で得られた外圧データから層内圧をシミュレーションするモデルを確立する。モデルの妥当性は，アセンブリ試験体と実変動風圧載荷装置を用いた実験により検証する。その上で，壁面全体に拡大したシミュレーションを行い，サイディングおよび内壁材に作用する風力の特性を把握する。最後に，その結果に基づき，様々な条件に対し，外壁システムの耐風設計における風荷重評価方法の考え方を提示する。

４．研究成果

(1) 壁面外圧測定実験

低層住宅を模した模型(図 1)を用いて風洞実験を行い，壁面に作用する外圧を測定する。この外圧時刻歴を，実変動風圧載荷実験の入力荷重の作成に用いるとともに，壁面全体の層内圧をシミュレーションする際の入力値とする。圧力測定孔は，桁行壁面に 60 点，妻面に 72 点設けられており，風洞実験では風圧を全点同時測定する。

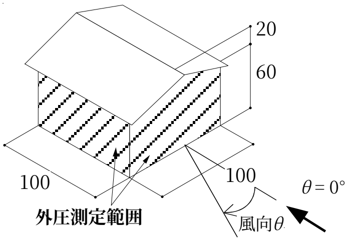


図１　本研究で対象とする低層建築物

実験気流は，日本建築学会・建築物荷重指針に示される地表面粗度区分□に概ね相当する境界層乱流である。風向θは，図 1 のように定義し，桁行面については–90°～90°，妻面については 0°～180°の範囲を 10°ピッチで変

化させる。風圧測定のサンプリング周波数は 800Hz とし，実時間で 10 分間相当のデータを各ケース 10 組取得する。統計量はこれら 10 組のアンサンブル平均で評価する。

(2) 実物大動風圧載荷実験

実物大の通気層の一部を模した試験体に風洞実験結果に基づき再現された変動外圧を作用させて層内圧を測定し，(3)に示す数値シミュレーションモデルに与える適切な隙間の特性値を決定する。

通気層内で流れが生じる箇所は，①サイディング嵌合部の隙間，②胴縁間の開口，③上下端の開口の 3 箇所である。本実験では，それぞれの流れの挙動を表すパラメータ値を適切に定めるため，嵌合部の隙間流れのみが生じる単室試験体，嵌合部と通気層の上下端および胴縁間に流れが生じるアセンブリ試験体の 2 種類の試験体を用いる。また，本実験で用いる変動外圧は，風洞実験で負の最大ピーク風圧が発生した風向 θ=0°のとき，正または負のピーク外圧の発生した外圧測定点での風圧の時刻歴を，設計風速 15m/s，模型の幾何学的縮尺率 1/100 を用いて実スケールに換算したものである。変動風圧の載荷には，Pressure Loading Actuator(PLA)を利用した圧力箱方式の動風圧載荷装置を用いる。

(3) 層内圧シミュレーションモデル

層内圧の計算には，非定常ベルヌーイ方程式に圧力損失を考慮した Oh et al.の方法を用いる。通気層内をいくつかの仮想室に分割し，各仮想室の圧力は一様であると仮定する。通気層上下端の隙間，勘合部の隙間，並びに，仮想室間の隙間の流量特性(相当隙間幅や流量係数)は(2)の実験結果に基づいて設定する。図 2 は 4 室モデル(図 3)の層内圧に関するシミュレーション結果と実験結果を比較したものである。パラメータを適当に設定することで，両者がよく一致することが分る。

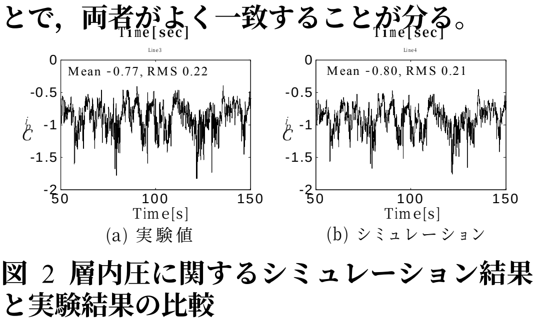


図 2 層内圧に関するシミュレーション結果と実験結果の比較

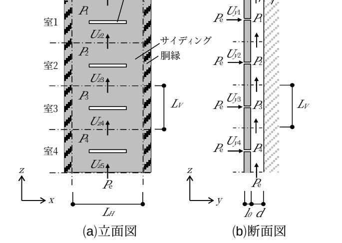


図 3 4 室モデルの概念図

なお，通気層の隙間と開口の流量係数は表 1 に示す通りである。

表 1 通気層の隙間と開口の流量係数

ケース	通気層の仕様	x 方向	y 方向	z 方向		
		k_x	k_y	k_{z1}	k_{z2}	k_{z3}
V-C30	縦張り/C=30mm	1.0	0.035	0.25	0.9	0.4
V-C60	縦張り/C=60mm			0.25	0.9	0.4
V-AH	縦張り/切欠き胴縁			0.18	0.65	0.7
H	横張り	-		0.36	0.9	0.3

(4) 壁面モデルを用いた層内圧シミュレーション

風洞実験で対象とした建物の壁面全体に縦張りまたは横張りの胴縁およびサイディングを割り付け，(3)と同様の方法で仮想室分割を行った壁面モデルを作成する。各仮想室に近傍の測定点の外圧値を入力値として与え，風洞実験で測定した全風向について層内圧のシミュレーションを行う。解析ケースは通気層の仕様(8 ケース)と図 4 に示す上端圧力状態(2 ケース)を組み合わせた 16 ケースである。

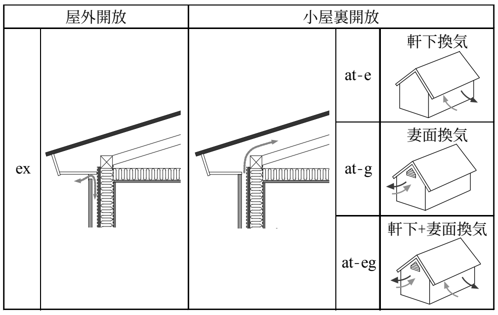


図 4 通気層の上端圧力状態のパラメータ

「屋外開放」の場合には，壁面上端部の外圧を上端に作用させる。また，小屋裏内圧は換気口に作用する圧力によって決まるが，小屋裏空間の体積は換気口からの空気の流入量に比べてかなり大きいため，時間的変動はわずかであり，通気口付近の圧力と釣り合っているとみなせる。よって，「小屋裏開放」の場合には小屋裏内圧の変動を無視し，軒下換気，妻面換気，軒下妻面併用換気の 3 ケースの換気方式について壁面の換気口位置(軒下換気の場合は桁行面の軒下，妻面換気の場合は屋根上端部付近)に近い測定点の外圧を時間平均した値を風向ごとに求める。それを時間変動のない一定値として通気層上端の圧力値として与えて計算を行う。

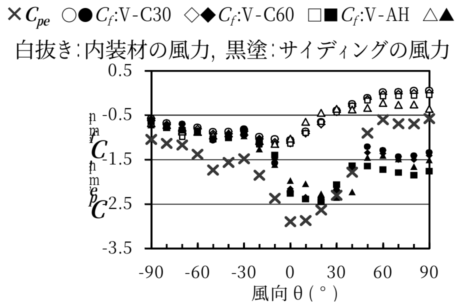
(5) シミュレーション結果

外装材の設計においては評価時間内での風力の最大(正)および最小(負)ピーク値が重要となるため，各部材が負担するピーク風力の性状について検討する。ここでは，外圧と層内圧の差をサイディングに作用する風

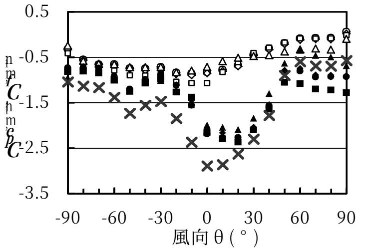
力と定義する。内装材の風力は層内圧と室内圧の差と定義するが, 室内圧を 0 と仮定する。

まず, サイディングにとってクリティカルな荷重となる負のピーク風力に着目する。図 5 に桁行面に作用する負のピーク外圧係数 $C_{pe,\min}$ およびピーク風力係数 $C_{f,\min}$ の風向による変化を示す。全風向中最大となるピーク値の発生風向は, 外圧では 0°であるのに対し, 風力では 20°である。0°および 20°のときの負のピーク外圧係数の分布を図 6 に, 平均外圧係数分布を図 7 に示すが, 最大のピーク外圧の発生位置はいずれの風向でもほぼ同じであるが, 0°の方が平均的に大きな負圧が広範囲に分布している。これは角部での剥離の影響であると考えられる。一方, 図 8 のシミュレーションによる平均層内圧係数の分布(V-C30-ex の場合)を見ると, 層内圧は外圧分布を空間平均したような値となっており, 0°の方が 20°のときよりも絶対値が大きい。層内圧は外圧を相殺するように作用するので, 0°の方が風力の低減効果が大きくなる。

以上より, ピーク外圧とサイディングのピーク風力は必ずしも同じ風向で発生しないため, 等圧効果を考慮したピーク風力の外圧に対する低減係数を決定するためには, 全風向中のピーク外圧とピーク風力の差を求める必要があるといえる。

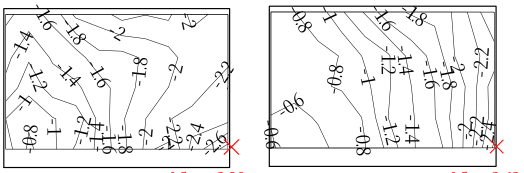


(a) 屋外解放(ex)の場合



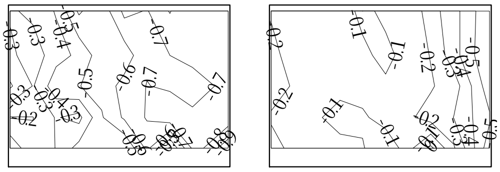
(b) 小屋裏解放・軒下換気(at-e)の場合

図 5 負のピーク外圧係数・風力係数の風向変化(桁行面の場合)



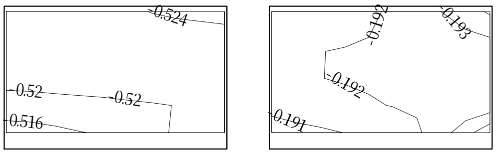
(a)?=0° Min -2.90　(b)?=20° Min -2.63

図 6 負のピーク外圧係数分布(桁行面)



(a)?=0°　(b)?=20°

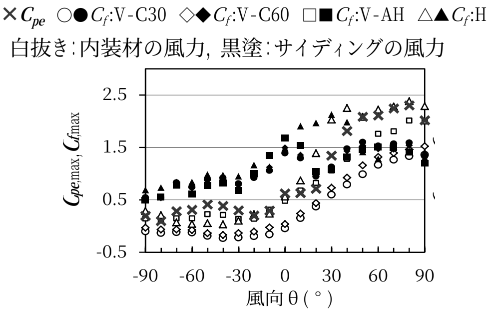
図 7 平均外圧係数分布(桁行面)



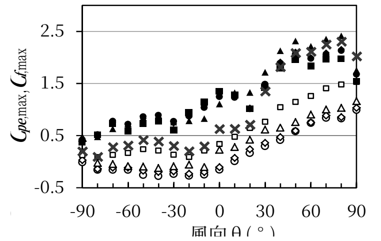
(a)?=0°　(b)?=20°

図 8 シミュレーションによる平均層内圧係数分布(解析ケース:V-C30-ex/桁行面)

次に, 正のピーク風力に着目する。内壁材としてよく用いられる石膏ボードは室内側から柱に留付けられるため, 正圧は内装材にとってクリティカルな荷重となる。図 9 に層内圧係数, 外圧係数および風力係数の正のピーク値と風向の関係を示す。屋外開放の場合(図 9(a))を見ると, 外圧に比べてサイディングに作用する風力が低減されている一方で, 外圧の 60～100%の風力が内装材に作用している。また, 通気層仕様によっても有意差がみられ, 通気層内の開口率が大きい条件ほど内装材に大きなピーク風力が作用する。なお, 横張り仕様では層内圧が外圧を超えているが, 内圧のスペクトルを見てみると外圧には見られない大きなピークがあることから, これは通気層内の空気の共鳴が発生し, 層内圧の変動の振幅が増大することが原因であると推測される。また, 小屋裏開放の場合には換気方式に依らずほぼ同じ傾向を示したため, 図 9(b)には軒下換気の場合を示すが, ピ



(a) 屋外解放(ex)の場合



(b) 小屋裏解放・軒下換気(at-e)の場合

図 9 正のピーク内外圧係数・風力係数の風向変化(桁行面の場合)

ーク外圧と同程度の荷重がサイディングに風力として作用する。一方，内装材のピーク値は外圧の35〜50%程度であり，屋外開放の場合よりも内装材の負担がかなり低減されている。

(6) 等圧効果を考慮した風荷重評価方法に関する提案

(5)ではシミュレーション結果より，ピーク外圧とサイディング並びに内装材のそれぞれに作用するピーク風力の関係から，風力低減に影響の大きい因子について考察した。通気層の仕様によっては荷重を負担する部材や負担する風力の大きさが外圧に対して低減されたり，従来風荷重を想定していない部材にも大きな風力が作用したりする場合もある。そのため，通気層の仕様に応じて風力を負担する部材が異なることを考慮して風荷重評価を行い，適切に設計を行う必要がある。

以上のような検討結果を踏まえ，通気工法による等圧効果を考慮した外壁システムの風荷重評価方法と耐風設計の考え方を表2に示すように提案する。負のピーク風力は，サイディングが負担しているが，等圧効果によって荷重の大きさは外圧よりも低減される。一方，正のピーク風力については，通気層上端の開放状態によって大きなピーク風圧を負担する部材が異なるため，屋外解放と小屋裏解放の場合に場合分けしている。屋外開放とする場合には，内装材の負担するピーク風力が大きく，さらに通気層内の開口率が大きくなるほど，すなわち胴縁間隔が大きくなるほど増加するため，通気層の仕様に応じて内装材に求められる耐力の大きさが変わることに配慮した設計が必要である。

表 2 通気工法を用いた外壁システムの風荷重評価方法と耐風設計の考え方

(a)負のピーク風力に対する設計	
外圧ピークを低減したピーク風力をサイディングが負担する。 内装材には大きな風力は作用しない。 ただし，外圧とサイディング風力のピークは必ずしも同じ風向で発生しないため，外圧ピークの発生風向以外の風力についても検討を行い，ピークの低減係数を算出する必要がある。	
(b) 正のピーク風力に対する設計	
屋外開放の場合	サイディングのピーク風力は，ピーク外圧の風向発生で求めた低減率を用いて低減することができる。 ただし，内装材のピーク風力は通気層内の開口率が大きくなるほど増加するため，通気層の仕様と使用する内装材の組み合わせへの配慮が必要。
小屋裏開放の場合	ピーク外圧と同等の風力をサイディングが負担する。 内装材に作用する風力はピーク外圧より軽減されるものの，通気層内の開口率によっては荷重が大きくなる場合もある。 ピーク風力係数は，ピーク外圧係数の値をそのまま用いる。

5．主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 1件）

①渡部 慶，植松 康：通気工法外壁システムにおける通気層内圧のシミュレーションによる予測，東北地域災害科学研究，第53巻，2017，pp.181-186.（査読無）
http://nds-tohoku.in.arena.ne.jp/

〔学会発表〕（計 3件）

①渡部 慶，ガヴァンスキ江梨，植松 康：通気工法外壁システムの等圧効果を考慮した風荷重評価方法の検討，日本建築学会2017年度大会(中国)，2017年8月31日〜9月3日，広島工業大学（広島県・広島市）
②渡部 慶，植松 康：通気工法外壁システムにおける通気層内圧のシミュレーションによる予測，2016年12月23日〜24日，陸前高田市コミュニティホール(岩手県・陸前高田市)
③渡部 慶，植松 康：通気工法を用いたサイディング外壁に作用する風力に関する実変動風圧実験，日本建築学会 2016 年度大会，2016年8月24日〜26日，福岡大学(福岡県・福岡市)

6．研究組織

(1)研究代表者
植松 康（UEMATSU, Yasushi）
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：60151833

(2)研究分担者
ガヴァンスキ 江梨（GAVANSKI, Eri）
大阪市立大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号： 00608797