

全層型ダブルスキンに作用する設計用風荷重の評価手法

染川 大 輔 諏訪 好 英
土屋 貴 史

Method for Evaluating Wind Loads on Building-High Double-Skin Facades

Daisuke Somekawa Yoshihide Suwa
Takashi Tsuchiya

Abstract

In recent years, many buildings have been designed with double-skin facades in order to utilize natural ventilations. Because building standards or regulations do not specify the wind loads acting on these facades with ventilation openings, wind tunnel tests were conducted to determine the loads. This paper describes the peak wind forces acting on building-high double-skin facades. Because the mean pressure coefficients between the outer and the inner skins differ in the cavity near the openings, the internal pressure in the cavity cannot be estimated only from the wind pressure on the inner skin. Thus, the net peak force across the outer skin should be determined from the difference between the pressure differences on the outside and the inside of the outer skin. The force coefficients remain almost constant over the inner skin in the cavity, whereas strong negative peak wind force coefficients appear on the outer skin near the openings. Many previous experiments were conducted under the assumption that pressure is distributed uniformly within a cavity. However, present results reveal that this may lead to the underestimation of loads.

概 要

近年、ダブルスキンファサードをはじめとする自然換気の利用がしばしば計画されている。こうした自然換気では、設計上の風荷重を建築基準法や建築物荷重指針に基づいて求めることはできず、風洞実験を行う必要がある。しかし多くの場合、風洞実験用の縮尺模型を完全に作成することは困難であり、ほぼ同じ風圧になると判断される部分を利用して、設置しづらい測定点を別の場所の圧力で代用するのが一般的である。本報では、こうした代用によって、アウトースキンに作用する風力が過大あるいは過小評価されることがあることを示した。また、開口部の開閉の組み合わせによるダブルスキンに作用する風荷重の変化を把握し、耐風設計上、有利また不利になる条件を明らかにした。その結果、ダブルスキンではシングルスキンに作用する荷重を、アウトースキンとインナースキンで分担して負担しているという考え方では危険側の設計に成りえることを示した。

1. はじめに

地球温暖化対策、CO₂削減対策に関連して社会的に省エネ技術の重要度が増している。中でも建築分野での省エネ実現技術として、吹抜空間の自然換気、ダブルスキンファサードなどが注目されている。こうした自然換気では、いままで風外力が直接作用すると考えられていなかった部分に荷重が加わることがあり、設計上風荷重を無視できない形状となっていることがある。しかしダブルスキンファサードをはじめとして、これらに作用する風荷重を調べた例は少ない。

ダブルスキンファサードは、Fig. 1に示したようにボイド型、コリドー型、ボックス型に大別される¹⁾が、換気効率の良いボイド型、特に2階から上階の全層のキャビティが繋がっているタイプが計画されることが多い。こうした全層タイプのダブルスキンファサードについて河井ら²⁾は、側端部の開口の開閉によってダブルスキンファサードに作用する風荷重が大きく変化することを示した。

上部の開口が屋根側に開いた例では、吉川ら³⁾がキャビティ内の通気がアウトースキンに作用する荷重に大きな影響を与えることに着目し、通気に対する抵抗要素の影響について明らかにしている。上下開口部が近接しているボックス型のダブルスキンファサードを対象としたものでは、河井ら⁴⁾が実大測定を行った例があるがボイド型で風圧の実大測定を行った例は見られない。

ダブルスキンファサードを対象とした風洞実験では、模型製作の困難さから、ほぼ同じ風圧力が作用すると考えられる少ない数の測定点を用いて風荷重を評価する機会が多い。しかし、実際にそれらの点での値が同等になるかについて検証した例は筆者の知る限りでは見当たらない。そこで本報では、このような測定点を対象に作用する風圧力の比較を行い、測定点の代用が可能であるかどうかを調べ、ダブルスキンファサードに作用する正味の風荷重を求めた。また、今回対象とした全層型ダブルスキンファサードではすべての開口が常に開いているとは限らず、使用時の状況に応じて一部が開鎖されること

がある。このような開口状態の組み合わせによる風荷重の変化について、上部の開口が外側または屋根側にある場合の検討を行った結果を報告する。

2. 風洞実験概要

実験は大林組技術研究所所有の回流式風洞で行った。用いた模型は、B300mm×D160mm×H480mmの長辺側の一面にダブルスキンファサードを有する角柱型建築模型である。Fig. 2に模型の立面図と平面図、測定点と開口の配置の模式図を示す。測定点はアウトースキンの裏表に98点、インナースキンのキャビティ側に49点、インナースキンの屋上立ち上がりの屋根側に7点、屋上の屋根部分に7点、下部の開口の下側の壁面に7点を設けた。アウトースキンとインナースキンの測定点はFig. 2(f)に示したよ

うに正面から見て表裏で同じ位置になるようにした。開口は5mm×10mmの大きさにキャビティの下部、上部の外側と屋根側に14箇所ずつ設けた。

風洞気流は建築物荷重指針⁴⁾に示された地表面粗度区分Ⅲの境界層乱流（べき指数 $\alpha=0.2$ 、模型高さでの乱れ強さ $I_z=0.175$ ）とし、風速は模型高さで7m/sとした。実験に用いた気流のプロファイルと模型高さでの風速のスペクトルをFig. 3に示す。風速に関しては0.5m高さでの平均風速に対する比で表してある。風速比は1m付近では目標値よりも高くなるが、0.8mより下の範囲では概ね目標とした気流に合う。風速のスペクトルはKarman型のスペクトルによく一致している。風向はダブルスキンファサードに正対する風向を 0° とし、 5° ピッチで 180° まで37風向について計測を行った。サンプリング周波数は1kHz、計測時間は1風向につき120秒間とした。導圧チュ

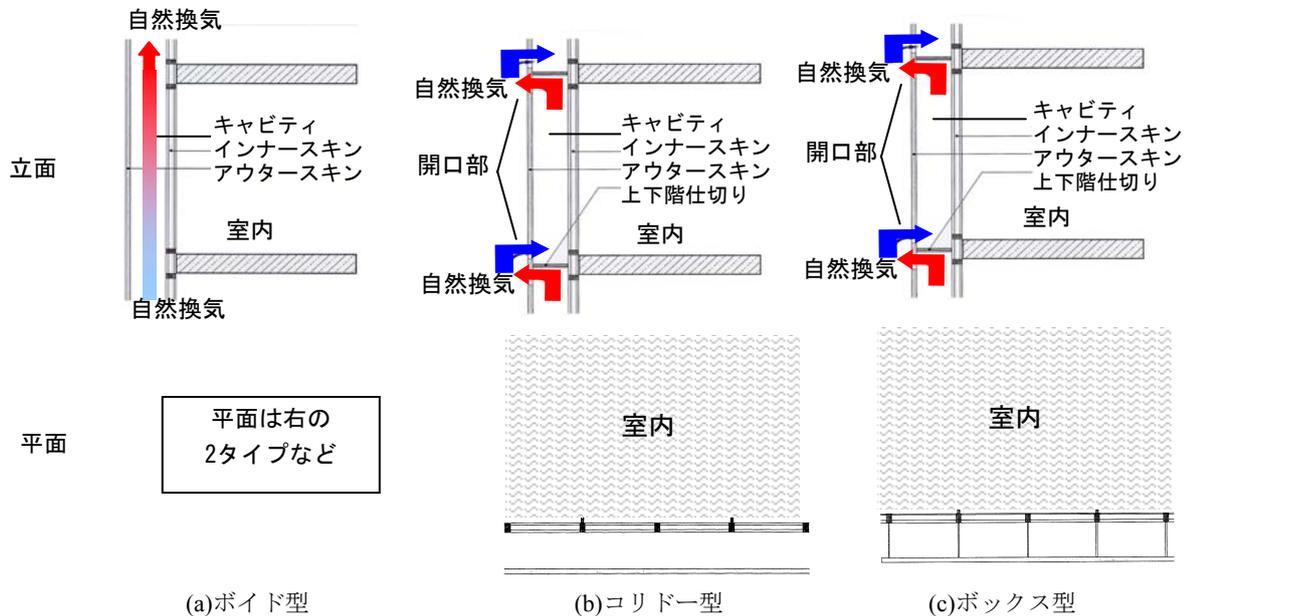


Fig. 1 ダブルスキンの代表形式¹⁾ (アウトースキンに開口がある場合)
Variations of Double-Skin (A Opening on Outer Skin)

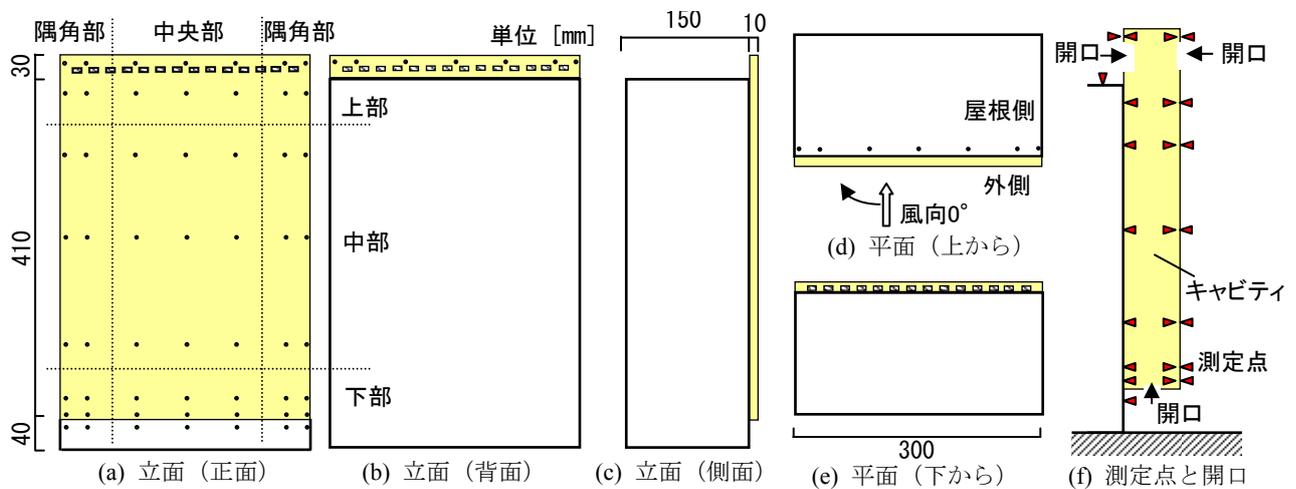


Fig. 2 風洞実験模型
Model and Pressure Holes

ープによる風圧の歪みは周波数領域で補正を行った。開口の組み合わせは、ダブルスキンファサードの使用上想定される開口の組み合わせに従い、Table 1に示した5ケースについて実験を行った。実験で得られた風圧は、模型高さでの平均速度圧によって除し、風圧係数とした。

3. 近接した測定点での風圧力の比較

3.1 キャビティ内に作用する風圧力

キャビティ内に作用する風圧はしばしば、インナースキンのキャビティ側の値によって代表される。しかしその値がアウトースキンのキャビティ側と異なる可能性が考えられる。ここではアウトースキンに作用する正確な風圧を検討するため、キャビティ内のアウトースキン側とインナースキン側の風圧力の比較を行った。以降では、アウトースキンをOS、インナースキンをISと略称する。

OSとISのキャビティ側の対応する測定点における平均風圧係数 C_{pmean} の比較をFig. 4に示す。図中にはTable 1に示したすべてのケースの全風向での値を示してある。また上部は、Fig. 1に示したようにキャビティ部の上側の測定点を表す。

中央部では、OSとISのそれぞれの測定点での C_{pmean} はほぼ同じ値となった。上部および下部においても、多少のばらつきはあるが、屋根側と下部の開口が開いている

ケース (UR-LO) 以外の開口条件では、OSとISの C_{pmean} が概ね同じ値になっている。UR-LOはキャビティの内部を気流が通り抜けると考えられるケースであり、この場合では上部と下部のOSの C_{pmean} が大きくなる。これに対し、上部の開口が外側にあるUW-LOでは、UR-LOに比べキャビティの内部の風速があまり大きくはないと考えられるため、上下の開口部での剥離の影響も小さく、OSとISの C_{pmean} が近い値になったと考えられる。

C_{pmean} がOSとISの測定点で明らかに異なる値となったUR-LOでの風向別平均風力係数をFig. 5に示す。上部では隅角部(a)、中央部(b)共に風向 $90^{\circ} \sim 180^{\circ}$ の間でOSの方がISよりも大きい結果となった。 135° 付近ではOS、IS共に C_{pmean} が0に近づくがOSの方がより正側の値を持つ。これは、屋根側の開口を抜けた気流がOSのキャビティ側の部分に直接当たるためであると考えられる。このとき、OSの外側は一般的な角柱同様、負圧になっていることからISのキャビティ側の風圧を用いてOSに作用する風力の評価を行うと過小評価となる。下部では隅角部(c)においては、風向 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ の間でOSの C_{pmean} がISの C_{pmean} よりも大きくなる傾向が見られたが、中央部(d)では、明確な違いが見られず $45^{\circ} \sim 90^{\circ}$ ではOSとISの C_{pmean} はほぼ同じ値となった。

下部の開口のすぐ下の壁面の測定点での平均風圧係数をFig. 6に示す。測定点Xは端部に近い点であり、Yは中

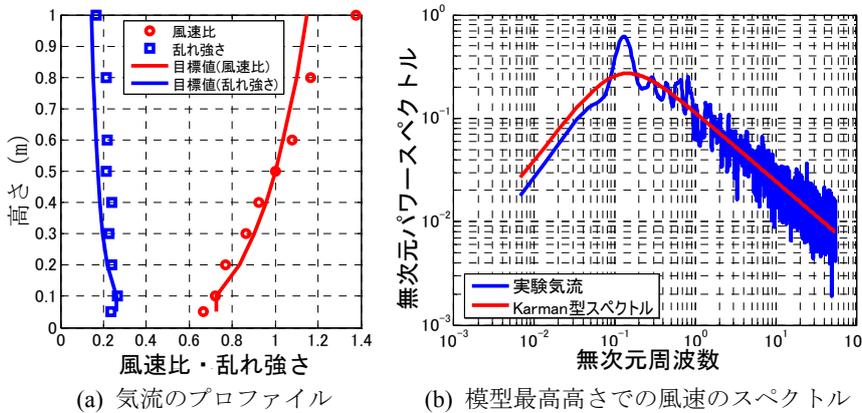


Fig. 3 実験気流 Profiles and Spectrum of Test Wind

Table 1 実験ケース
Test Cases

ケース	開口位置		
	上部		下部
	外壁側	屋根側	
UW-LC	○	○	×
UR-LC	×	×	×
UW-LO	○	×	○
UR-LO	×	○	○
UC-LO	×	×	○

○:open ×:close

実験ケース名は上部の開口Uと下部の開口Lの状況を組み合わせたものとしている

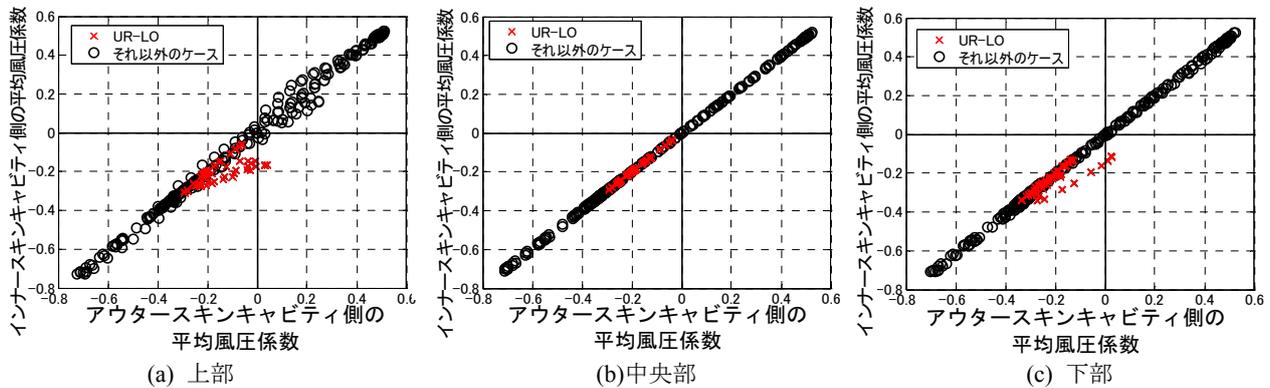


Fig. 4 アウトースキンとインナースキンのキャビティ側の測定点での平均風圧係数の比較
Comparisons between Mean Wind Pressure Coefficients on Inside of the Outer Skin and the Inner Skin

央部付近の点である。それぞれTable 1に示した全実験ケースの結果を重ねてプロットしてある。いずれの測定点も、開口条件によらず各風向での C_{pmean} の値はほぼ等しい。これはキャビティ内の空気の流れの有無によってダブルスキン周辺の外壁部分に作用する風圧力が変化しないことを意味する。測定点Xでは風向 0° 付近で C_{pmean} が弱い負圧となっており、 45° 付近で最大となった。風向 0° 付近で C_{pmean} が負圧となったのは、ダブルスキンの部分が測定点Xのある外壁面よりも飛び出しているため、ダブルスキンの下端から側面へ通り抜ける流れが生じているためと考えられる。Fig. 5の隅角部(c)において、OSとISの C_{pmean} が大きく異なっている点についても、このような流れによって、開口部から空気が吸い出されることによりキャビティ内で他の部分とは異なる空気の流れが生じたためではないかと考えられる。また、Fig. 5において、 0° よりも 45° 付近でキャビティ内の負圧が強くなっているのは、 45° 付近では下部の開口部分に対しすべての範囲で正圧が作用するためと考えられる。下部の開口部分に対し強い正圧が作用するほど、キャビティ内に空気を送り込む力が強くなり、キャビティ内部の流量が増えると考えられる。その結果、開口部での風速は大きくなるため、開口部での剥離の影響も大きくなりキャビティ内の測定点で強い負圧が作用すると考えられる。また、測定点Yでは 0° 付近で正のピークとなっている。そのため測定点Yに近い下部の中央部付近 (Fig. 5(d))の方が隅角部付近 (Fig. 5(c))よりも 0° 付近での負圧が強くなったと考えら

れる。

このような結果から、下部の開口付近においても上部の開口付近と同様、ISのキャビティ側の風圧を用いてOSに作用する風力を評価するのは難しいと考えられる。ただし、UR-LO以外の開口条件では、いずれもOSとISの値が同程度であるため、ISのキャビティ側の風圧を用いてOSに作用する風力を評価することができる。

3.2 屋上周りに作用する風圧力

キャビティ部分と同じように、代用される可能性のある屋上周りの測定点についても検証を行った。3.1節ではキャビティ内部に作用する圧力が正圧・負圧いずれであるかを分かりやすくするため、平均風圧係数による比較を行ったが、ここでは荷重の大きさを直接比較しやすいようピーク風圧係数による比較を行う。ピーク風圧係数は外壁面のパネルが十分に大きいことを想定し、平均化時間1秒の移動平均をかけ、4組のアンサンブル平均によって求めた。

得られた屋上の屋根面とISの屋上立ち上がり部分 (屋根側)の各風向でのピーク風圧係数をFig. 7に示す。(a),(b)は測定点を隅角部と中央部に分けたときの各風向で絶対値最大となった点の値を示している。また、すべての開口条件の結果を重ねてあるが、(a),(b)いずれも開口条件による明確な違いは見られなかった。隅角部では屋根面と立ち上がり部でのピーク風圧係数の最小値は等しく、負のピークは 45° 付近で生じた。最大値では風向 90° ~

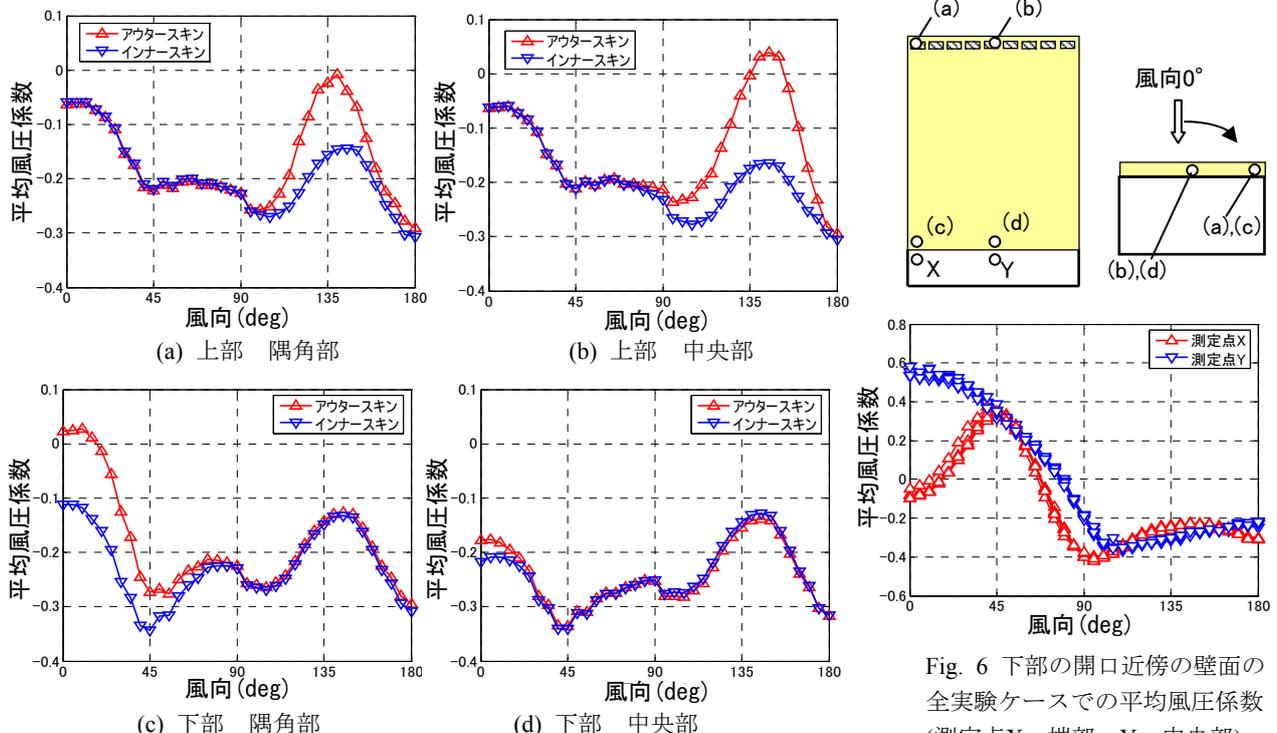


Fig. 5 アウタースキンとインナースキンのキャビティ側の測定点での風向別平均風圧係数 (ケース: UR-LO)

Mean Wind Pressure Coefficients on Inside of the Outer Skin and the Inner Skin

Fig. 6 下部の開口近傍の壁面の全実験ケースでの平均風圧係数 (測定点X: 端部 Y: 中央部) Mean Wind Pressure Coefficients on the Outer Wall near the Lower Opening

180°の場合に屋根面よりも立ち上がり部の方が大きくなる傾向が見られた。一方、中央部では最大値は屋根面と立ち上がり部で近い値となるが、最小値は大きく異なる。屋根面ではあまり強い負圧は生じていないが、立ち上がり部では50°付近で、差が大きくなる。これらのことから、ISの立ち上がり部分の風圧を屋根面の風圧から推定すると過小評価になると考えられる。

4. ダブルスキンに作用する風力

OSとISに作用する各高さレベルでの全風向中最大・最小のピーク風力係数 C_{fmax} 、 C_{fmin} をFig. 8に示す。OSの風力係数は、外側の測定点とそれに対応するOSのキャビティ側の測定点の風圧係数の時系列上の差として求めた。

ISの立ち上がり部分についてはOSと同様、対応する測定点の風圧係数から求めた。ISの立ち上がり部以外のキャビティ内の点については、ピーク風圧係数を求めたあと、建築物荷重指針に基づき、正のピーク風圧係数に関しては内圧変動の効果を表す値として-0.5を、負の場合には0を引いて求めた。各高さレベルの測定点をFig. 2(b)に示したように隅角部と中央部に分け、それぞれの測定点の中の最大・最小値をその高さレベルでの値とした。また、図中には建築物荷重指針での長方形平面を持つ建築物の壁面でのピーク風力係数を合わせて示してある。

OSに作用するピーク風力係数のうち正側（キャビティ側に押す方向）では、隅角部と中央部による違いは小さい。ただし、開口が屋上側にのみある場合（UR-LC）ではピーク値が3を越える箇所も現れ、指針の値を上回る。これはキャビティ内の圧力がほとんどの風向で負圧になるためである。一方外壁に開口がある場合（UW-LCとUW-LO）は、いずれもピーク風力係数は1程度で、かつ高さ方向の変化もあまり見られない。これはOSの外側が正圧となる風向でキャビティ側も正圧になるためである。

OSに作用する負側（外部側に引く方向）のピーク風力係数では、開口条件による大きな違いは見られない。隅角部では中央部よりも絶対値が大きく、特に上下の開口部付近では指針の値に相当する大きな荷重が生じている。

上部の開口付近での絶対値の大きい C_{fmin} は、3.1節で示したOSのキャビティ側の圧力が、外側と異なる符号になっていたためだと考えられる。下部でも同様に開口付近で絶対値の大きい C_{fmin} が見られるが、これはFig. 6でも見られたような80°～90°付近で生じる外側の強い負圧が原因である。このとき、キャビティ内部はFig. 5に示したように負圧になっているが、45°付近に比べるとあまり強くはなっていない。このような負圧は、開口条件によらず見られており、そのためいずれのケースにおいても同様の分布形状になっている。この下部でOSに作用する負圧が強くなる傾向は吉川ら³⁾も指摘しており、設計の際にはその少し上の部分よりも荷重が大きくなることに注意が必要であるといえる。

ISでは、屋上立ち上がり部分に相当する一番上の高さレベルを除いて、高さ方向でほぼ一定の値となった。隅角部・中央部を比べても C_{fmax} と C_{fmin} は共にほぼ同じ値であり、風力がISにほぼ均一に作用すると考えられる。正側（キャビティ側から押す方向）では、上部の開口が屋根側となる（UR-LO）を除いてほぼ2程度の値となっており、開口条件によるばらつきは小さい。負側（キャビティ側に引く方向）では-0.8～-1.6となっており、最も不利なケースは、アウトースキンの正側と同じUR-LCであった。立ち上がり部分に関しては、Fig. 6に示したようにISの屋根側での強い負圧の影響で、中央部よりも隅角部で絶対値の大きい C_{fmin} が作用する。

ダブルスキンにトータルで作用する風力として、OSとISのピーク風力係数と、指針の値との比 R_f を次式のように求めた。

$$R_{fmax} = (C_{fmaxouter} + C_{fmaxinner}) / C_{fstmax} \quad (1)$$

$$R_{fmin} = (C_{fminouter} + C_{fmininner}) / C_{fstmin} \quad (2)$$

- C_{fouter} : 実験で得られたある風向でのOSに作用するピーク風力係数の最大または最小値
- C_{finner} : 実験で得られたある風向でのISに作用するピーク風力係数の最大または最小値
- C_{fst} : 建築物荷重指針に基づき求められた正または負のピーク風力係数

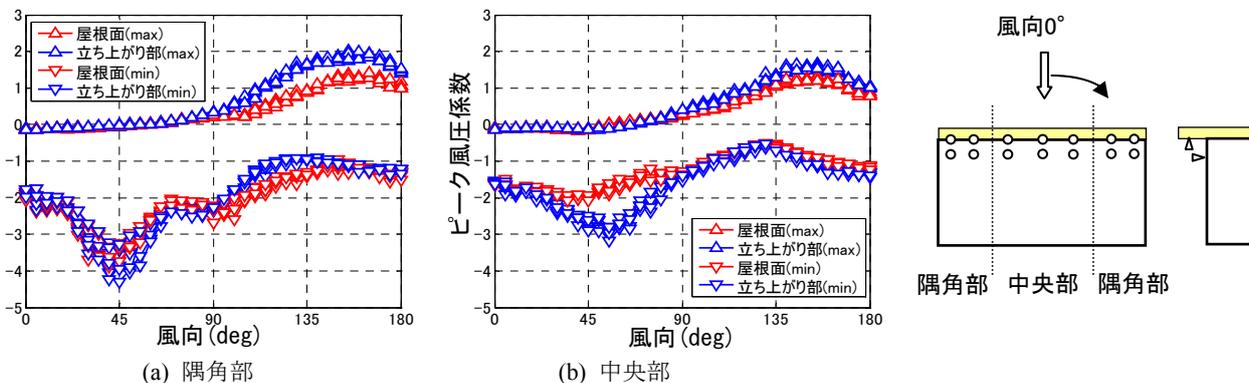


Fig. 7 屋根面とインナースキン屋上立ち上がり部分（屋根側）のピーク風圧係数の比較
Comparisons between Peak Wind Pressure Coefficients on the Roof and the Outside of Inner Skin

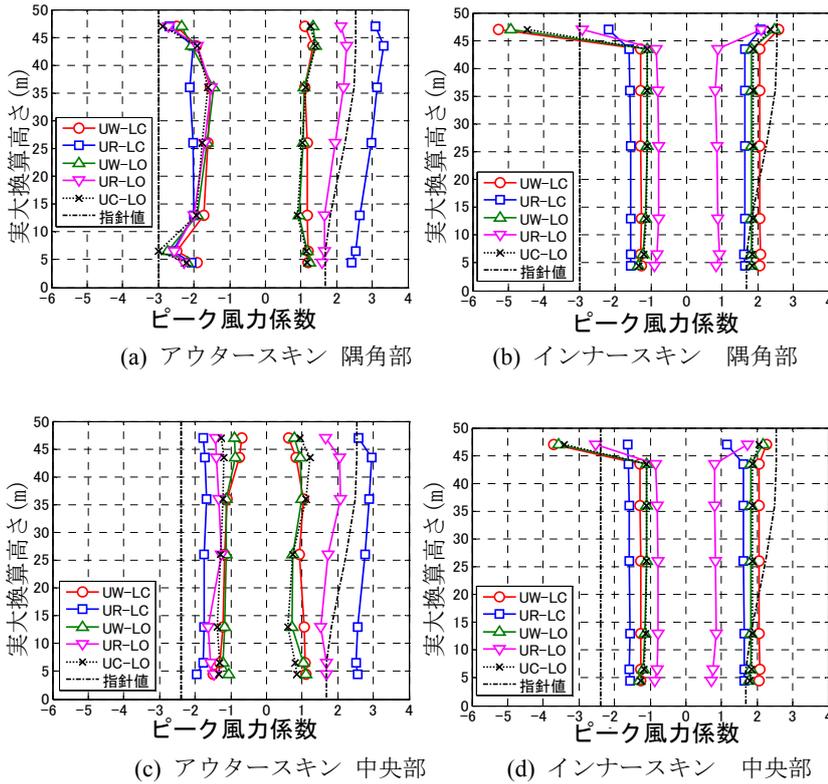


Fig. 8 全風向中最大・最小のピーク風力係数

Worst Wind Force Coefficients on the Outer Skin and the Inner Skin

それぞれの係数のmaxとminの添字は最大または最小値であることを表す。すなわち、OSとISに作用する風荷重を足したものが、一般的な長方形平面の壁面に作用する荷重と同じであれば R_t は1となる。得られた各風向での R_{max} と R_{min} のうち、各実験ケースの中で値が最も大きくなったものをFig. 9に示す。隅角部(a)ではUR-LOが1を下回る部分が見られるが、それ以外の開口条件では全ての高さレベルにおいて R_t が1を上回る。中央部(b)では、下部では1を下回るケースもあるが、建物高さの1/3より高い範囲では全てのケースで R_t が1を超える。つまり、ダブルスキンはシングルスキンに作用するのと同等の風荷重をOSとISで分担して受けるのではなく、トータルで考えるとシングルスキンよりも大きな荷重を受けると考える必要がある。また、下部の開口が閉じているケースのUW-LCとUR-LCでは他のケースに比べて大きく、特にUR-LCではダブルスキンに作用する風力はシングルスキンの約2倍になる。このことから、ダブルスキンの使用にあたっては下部の開口を閉じないようにすることが望ましい。

5. まとめ

全層型ダブルスキンファサードを対象に風洞実験を行い、ダブルスキンに作用する風荷重の評価について検討

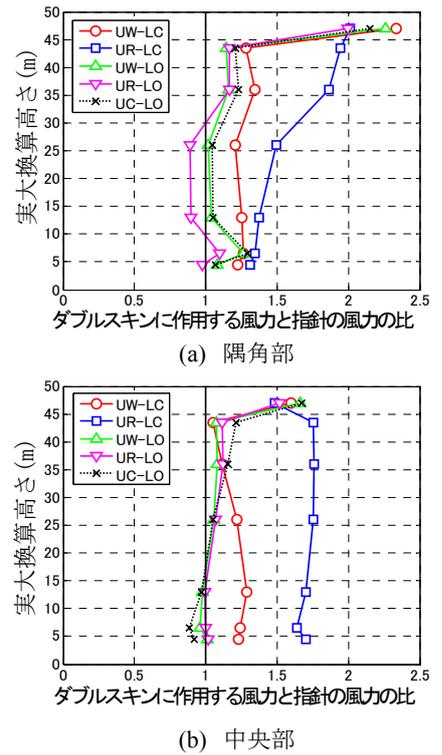


Fig. 9 ダブルスキンに作用する風力と指針の風力の比

Ratio of Wind Force by the Wind Tunnel Test Results to AIJ Standard

を行った。その結果、従来行われてきた風圧の測定点の設置の仕方によっては、アウトースキンに作用する風力を正しく評価できない可能性を示した。また、開口部の開閉の組み合わせによって、アウトースキンとインナースキンに作用する風力の和がシングルスキンの約2倍に成りえることを示した。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築物の耐風設計資料 建築物外装材の耐風設計と耐風性能評価，建築物外装材の耐風性能と耐風性能評価に関するシンポジウム，pp. 32-37，(2008)
- 2) 河井宏允，他：全層換気ダブルスキンファサードに作用する風力について，第18回風工学シンポジウム，pp. 335-340，(2004)
- 3) 吉川優，他：全層型ダブルスキンファサードの風圧力に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 143-144，(2009)
- 4) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，(2004)
- 5) 河井宏允，他：ダブルスキンファサードに作用する風圧力に関する実大測定について，第20回風工学シンポジウム，pp. 403-408，(2008)