

## 種々の形状を持つ集合住宅に用いられる外装材の

## 設計用風荷重および疲労損傷に関する実験的研究

### Study on the Design Wind Load and the Wind Induced Fatigue Damage to Exterior Materials of Condominium Buildings

建築防災研究室 西水玲未

壁面外圧のバルコニーによる低減効果についての様々な報告がでていますが、その形状比較の種類についてはまだまだ少ないといえる。そこで本研究ではバルコニーを特徴とする集合住宅建物を対象として、風圧および風力に対し建物形状がどのような影響を与えるのかを知るため風洞実験をし、平面形状による諸係数の比較を行った。また外装材に対する疲労についても形状の違いやピーク風力係数による影響を比較し、相対的に疲労損傷の危険性の評価を行った。

There are many reports about effects of decreasing of external pressure of walls by establishing balcony, but still there is very few comparison with various shapes. Therefore in this paper, a wind tunnel test of condominium buildings with balcony rooms is carried out to show how the different building shapes influence on the wind pressure and the wind force, followed by the comparison on the various coefficients in the various corner shapes and the building heights. Also the influence on fatigue damage to exterior materials is compared using different building and corner shapes and the minimum wind force coefficient. And furthermore, the danger of fatigue damage is evaluated relatively.

#### 1 はじめに

近年の超高層集合住宅では、デザイン上や構造上の要因から、様々な平面形状の計画が見られる。一般建築物と異なり、集合住宅の平面形状の特徴として、外周部にバルコニーを有する場合がある事が挙げられる。

過去の研究によると、隅角部付近で発生する壁面の局部負圧は、バルコニー等の凹凸によって平均風圧・ピーク風圧共に低減することが報告されている<sup>1)2)</sup>。また、バルコニー手摺り自体に作用する風圧力に関しては、隅角部付近で極めて大きいピーク風力係数を示すことが報告されている。一方、バルコニーを有する建物の壁面外圧や、建物形状によるバルコニー手摺りに作用する風圧力の変化に関する報告は極めて少ない。

本研究では、最近計画された超高層集合住宅をモデル化し、バルコニーによる壁面風圧力に対する低減効果とバルコニー手摺り自体に作用する風圧力について、風洞実験により調べた。また、バルコニー手摺りについては、疲労荷重強度を定義し、風力係数の時刻歴データを用いて、建物の平面形状と設置位置より疲労損傷に対する危険性の相対的評価を行った。

本梗概では、2節では壁面の外圧について、3節ではバルコニー手摺りの風力係数について実験結果と考察を

示し、4節では疲労損傷に関する相対的評価方法と本研究で得られた実験データを基に解析した結果について報告する。

#### 2 壁面の風圧係数

##### 2.1 実験概要および実験模型

実験気流は、国交省告示 1454号に示されている粗度区分Ⅲを想定した勾配流中において行った。また、実験風速は 8m/sとした。実験風向は 7.5°ピッチで 48 風向とし、サンプリング周波数 200Hz (実時間で 0.25sec) 計測時間は 60sec (実時間で 5000sec) で実験を行った。

実験模型は辺長比が 1:2、1:3、1:4 の板状棟模型と、辺長比 1:1 のタワー棟模型を作成した。板状棟模型の 3 面にバルコニーを配置し、模型の上層と下層で、壁面および手摺りに圧力測定孔を配置した。また、タワー棟模型では、建物隅角部形状が異なる模型を 4 種類作成し、壁面と手摺りの圧力測定孔を上層部から下層部に 4 層設けた。また、板状棟模型、タワー棟模型とも、それぞれに対して 4 種類のアスペクト比(AS=2~5)のもとで実験を行った。実験模型図は実験結果とともに示す。また本論文でのアスペクト比(AS で表示)は、高さ関係を明確にするため、タワー棟模型の見付け幅 B を代表幅とし  $AS = H/B$  で定義している。

## 2.2 壁面の諸風圧係数についての結果と考察

### (i) 圧力分布の特徴とバルコニーによる低減効果

図1に板状棟模型の平面概要と壁面のピーク風圧係数を示す。短辺側の風圧係数の絶対値は、長辺側の値より大きくなる傾向がある。また、図2および図3は、AS=2.0の1:2模型における、短辺側の隅角部測定点W9および中央部の測定点W11のピーク風圧係数の風向変化であり、それぞれ、比較としてバルコニーの無い模型の結果を示している。これらの結果より、バルコニーの存在によって、壁面のピーク風圧係数は約-3.0から-2.0程度に絶対値は小さくなっており、ここには示していないが、長辺側でも同様な傾向が見られた。

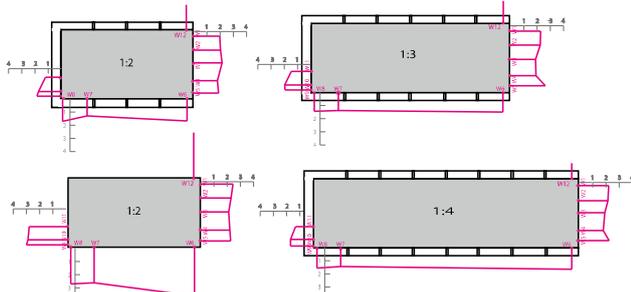


図1 板状棟におけるピーク圧力係数

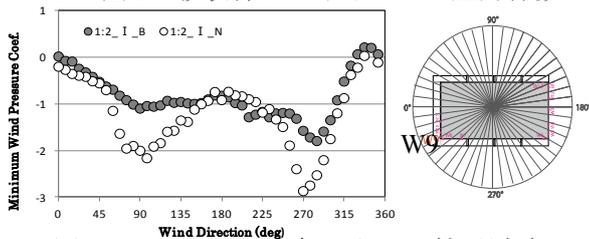


図2 バルコニー有無による比較(隅角部 W9)

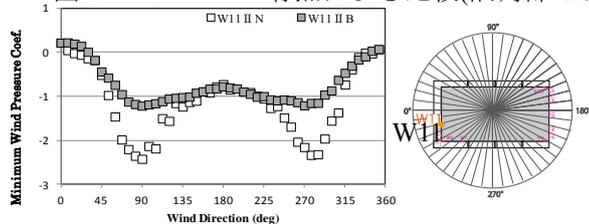


図3 バルコニー有無による比較(中央部 W11)

### (ii) 辺長比の影響

図4はAS=4.0での短辺側壁面の最小ピーク風圧係数(全風向での最小値)の辺長比による比較を示した図であるが、辺長比による顕著な差は見られなかった。

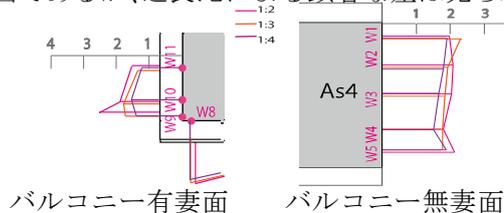


図4 辺長比による平均風圧係数の比較(AS=4)

### (iii) タワー棟の平面形状による風圧分布の比較

タワー棟模型は4タイプの平面形状があり、バルコニーが全周壁面を回るAタイプ、Aタイプの隅角部を隅切りしたBタイプ、壁面中央部にのみバルコニーがあるCタイプ、そして角柱形状にインナーバルコニー

を設けた0タイプの4種類である。図5には各タイプの平面形状と、AS=2.0における壁面の最小ピーク風圧係数の平面分布を示している。図5右下の0タイプの隅角部では、ピーク風圧係数が-3.0程度となっているが、他の形状では、バルコニーによる低減効果が見られ、ピーク風圧係数の絶対値が小さくなっている。

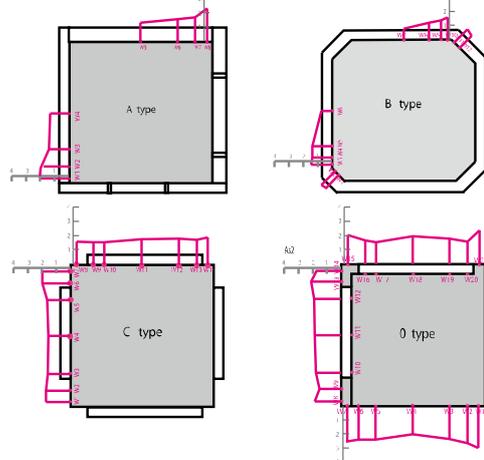


図5 タワー棟模型のピーク風圧係数

### (iv) 隅角部の隅切りによる影響

図6(a)(b)にA,B両タイプの隅角部および中央部についてのピーク風圧係数の比較を示す。(a)隅角部に関してはAタイプのW1、BタイプのW3および隅切り幅がW3より大きなW10を、(b)中央部に関してはAタイプW4とBタイプでは隅切り幅の異なるW6,W7をそれぞれ対象とした。A\_W1とB\_W3の比較により、隅切りする事でピーク値が0.6程度減少している。またB\_W3とB\_W10において後者でピーク値が小さくなっていることより、隅切り幅を大きくすることで低減効果が増加する傾向が見られる。中央部については、隅切りによってピーク値は低減しているが、B\_W6とB\_W7に差はなく中央部に関しては隅切り幅の影響はないといえる。

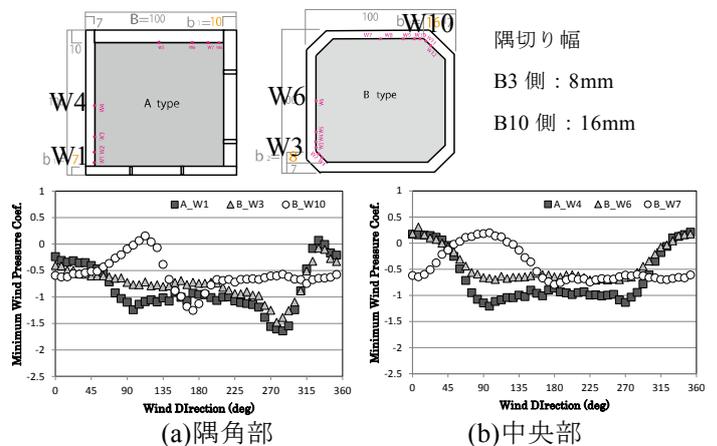
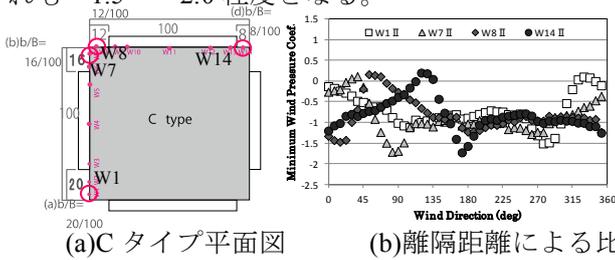


図6 隅切りの有無による比較

### (v) バルコニーの隅角部からの離隔距離による影響

図7(a)にCタイプのバルコニーの離隔距離と離隔比について示し、その値が異なる4測定点W1、W7、

W8、W14 におけるピーク風圧係数の風向変化を(b)に示す。離隔比の違いによる顕著な差は見られず、いずれも  $-1.5 \sim -2.0$  程度となる。



(a)C タイプ平面図 (b)離隔距離による比較  
図7 離隔比の違いによる比較(Cタイプ)

(vi)高さの違いによる影響

バルコニーの有無と高さによる影響を比較する為に0タイプとAタイプについてのピーク風力係数との比較を図8に示す。発生する隅角部付近の局部負圧は、バルコニーが回っている場合には、高さによらず全体的に低減され、アスペクト比に依らないことが確認できる。

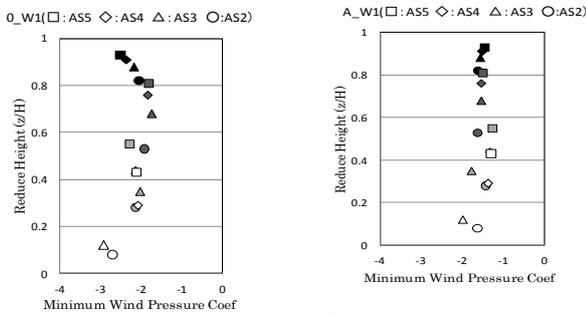


図8 アスペクト比の違いによる影響

3 バルコニー手摺の風力係数

3.1 実験概要

なお、実験模型は2章と同じものを用いた。バルコニー手摺りに作用する風圧力は、内部側、外部側ともに居室外部にある事から、正負の定義が決められているわけではないが、本論文では過去の研究報告に準じて、外部側の圧力から内部側の圧力を減じて、風力を算定している。従って、バルコニー手摺り建物側へ押す力を正、外側に押す力を負として定義する。また、各模型の測定点については考察時に示す。

3.2 バルコニーの風力係数の結果と考察

(i)板状棟における辺長比の影響

図9および図10にピーク風力係数と長辺側および短辺側の隅角部 B6およびB7における辺長比による比較を示す。図より、両者ともに辺長比による影響は極めて少ないといえる。

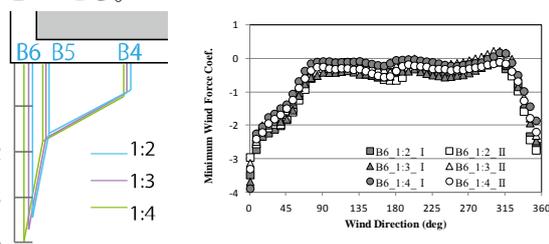


図9 長辺側隅角部のピーク風力係数に対する辺長比別

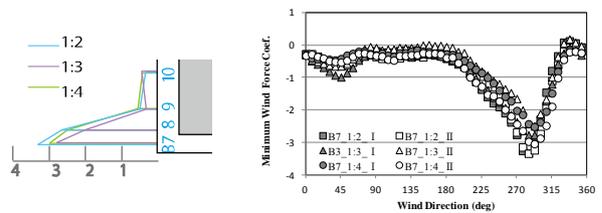


図10 短辺側隅角部のピーク風力係数に対する辺長比の影響

(ii)タワー棟の平面形状による風力係数の比較

図11に隅角部形状およびバルコニー配置の違いによる最小ピーク風力係数の平面分布を示す。図より、バルコニーにおいても建物の隅角部付近の測定点でピーク風力係数の絶対値は大きく、中央部に近づくとき急激に減少する。しかし、0タイプのインナーバルコニーでは、壁面中央部の測定点であっても最小ピーク風力係数は全面で  $-2.0$  程度を示し、位置による変化も見られない。

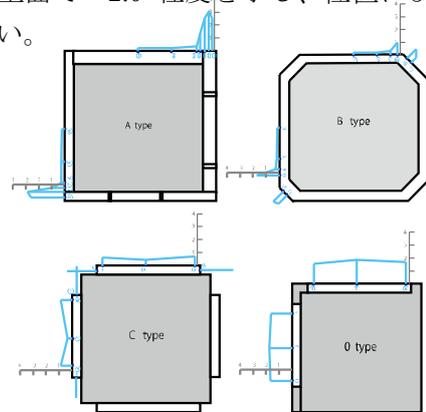


図11 バルコニーのピーク風力係数(タワー棟)

(iii)タワー棟におけるインナーバルコニーについて

図12にインナーバルコニー形式をモデル化した0タイプ模型について端部および中央部のバルコニー測定点 B1とB2の比較を示す。これによると、インナーバルコニーでは、バルコニーの端部と中央部に差は見られず、いずれも最小ピーク風力係数は  $-1.5 \sim -2.0$  の範囲であった。また、図13にバルコニーが建物隅角部を回っているAタイプとの比較を示す。両者とも壁面中央部に位置する測定点であるが、Aタイプが風向によらずほぼ0に近い値を示すのに対し、0タイプでは風向角  $90^\circ$  と  $270^\circ$  で極値を示す。他の形状でも、中央部手摺りのピーク風力係数は極値でも  $-0.5$  以下であり、これはインナーバルコニータイプの持つ特徴といえる。

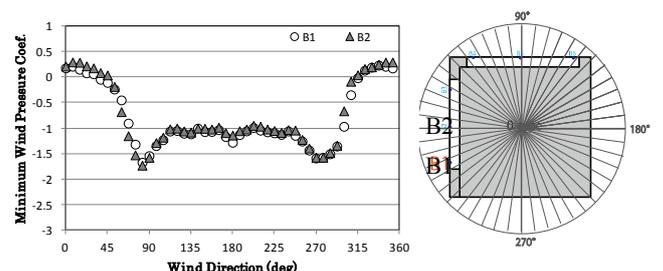


図12 インナーバルコニーのピーク風力係数

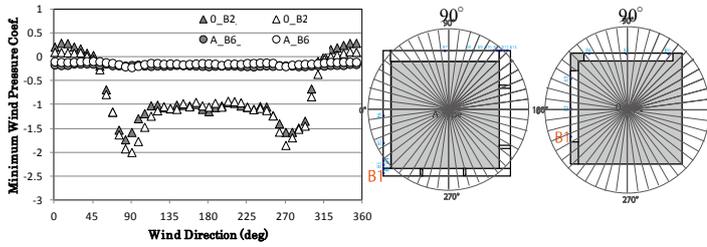


図 13 バルコニー有無による風力係数への影響

(iv) バルコニー出幅による影響

A タイプは出幅の異なる 2 種類のバルコニーがあり、それによる風力係数への影響を調べる。図 14 に、A タイプのバルコニー出幅が狭い側の測定点 B1 および出幅が広い側の測定点 B13 におけるピーク風力係数の風向変化を示す。隅角部、中央部ともに差は見られず、バルコニーの出幅による影響はほとんどみられない。

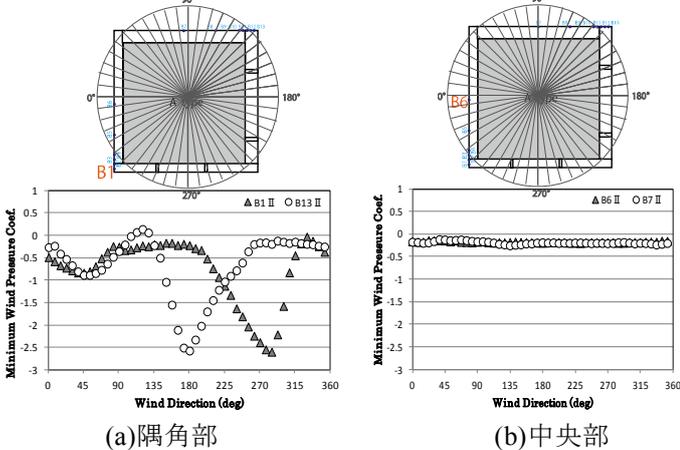


図 14 バルコニー出幅のピーク風力係数への影響

(v) バルコニーの離隔距離による影響について

図 15 および図 16 に C タイプにおけるバルコニー小口部および前面端部でのピーク風力係数の比較を示す。離隔距離が最大の 20mm の測定点 B1 で -1.5 強、16mm の B5 および 12mm の B6 で -2.0 ~ -2.5、8mm の B10 で -2.5 強であった。B5、B6 に大きな差はないが、わずかながら B6 の方がピーク風圧係数の絶対値は大きい。これによると、バルコニーの離隔距離が大きくなるにつれ、バルコニー隅角部に作用する風力係数は小さくなる傾向があるといえる。一方図 16 より、前面端部の測定点に関しては各点のピーク値に多少の差はあるが、全体的に最小ピーク風力係数は -1.0 以内におさまっており、離隔比によるピーク風力係数に対する影響はほとんどみられない。

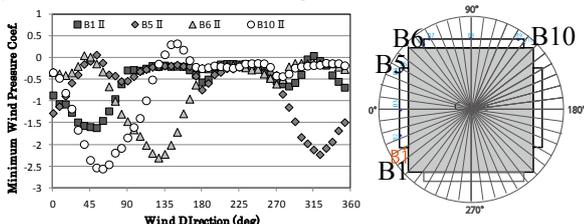


図 15 バルコニー小口部のピーク風力係数

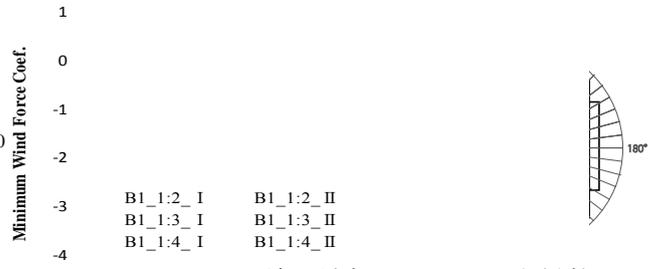


図 16 バルコニー前面端部のピーク風力係数

(vi) 隅切りによる影響

図 17 に AS=4 での A, B 両タイプにおける隅角部のピーク風力係数の比較を示す。A\_B1\_II で -2.5 超、B\_B3\_II で -1.5 ~ -2 程度であり、隅切りによっておよそ 3 割程度の低減効果が見られる。さらに図 18 より、隅切り幅を大きくすることでバルコニー手摺に作用するピーク風力係数は 55% 程度に低減された。

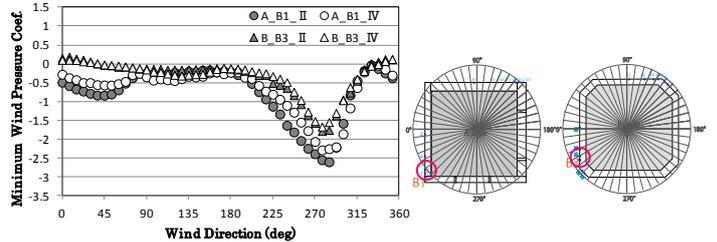


図 17 隅角部の隅切りによるピーク風力係数の低減

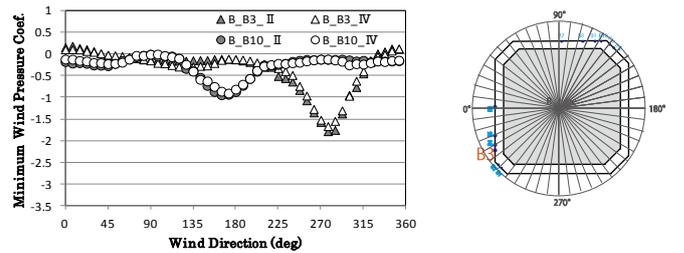
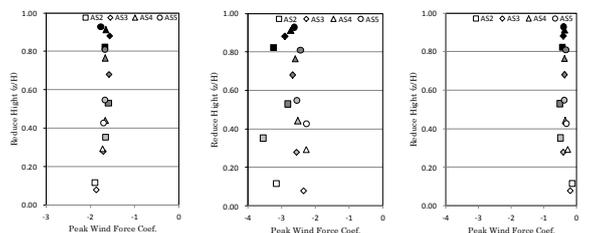


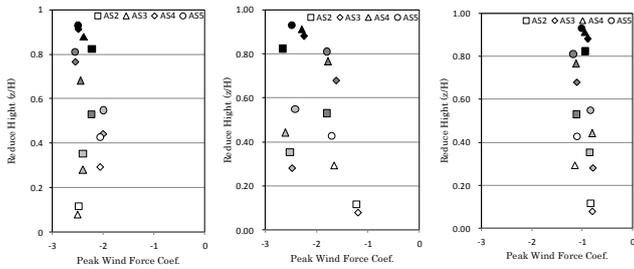
図 18 隅切り幅の違いによるピーク風力係数の低減

(vii) 高さ方向分布

図 19 に、各模型におけるピーク風力係数の高さ方向分布を示す。0 タイプのインナーバルコニーでは高さ方向にほぼ様な分布をしており、その値は -2.0 程度であった。A タイプでは隅角部では高さによってばらつきが生じているが、絶対値の最大値は 3.5 程度であり、中央部では一様で極めて小さい値を示していた。また、B タイプの隅切りした長手側でも、ばらつきが見られるが、絶対値は 2.5 以下であり A タイプよりも小さな値をとっている。一方、C タイプでは小口面のピーク風力係数は低層部で減少する傾向が見られるが、これは手摺り内側に作用する正圧の影響が大きく、低層部ではこの正圧の風圧力が小さくなるためである。



0 タイプ A タイプ隅角部および中央部



C タイプ B タイプ隅角部および斜め部

図 19 ピーク風力係数の高さ方向分布

### 3.2 バルコニー手摺りの設計用ピーク風力係数の提案

3.1 に基づいて各模型形状に対する箇所毎のバルコニー手摺りの設計用ピーク風力係数の提案値を表 1 に示す。図 20 に隅角部の領域を示す。板状棟における短辺側の背後に壁面が無い部分を I、有る部分および長辺側の隅角部を II とした。A タイプにおいても同様である。また、隅切り幅の違いにより B タイプも  $b1/B < 0.08$  を I、 $b1/B > 0.08$  を III、 $b1/B > 0.15$  を IV として領域を分けた。C タイプにおいては離隔距離の違いにより、 $b2/B < 0.15$  を II、 $b2/B > 0.15$  を IV とした。インナーバルコニーは一律に領域 IV とした。

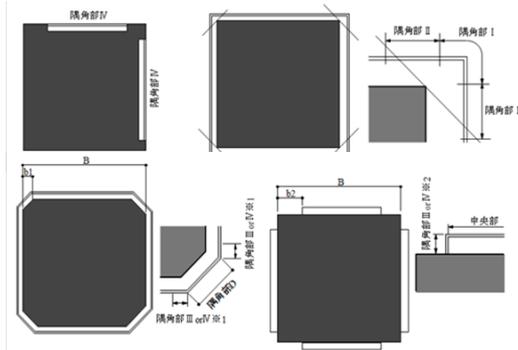


図 20 各模型の隅角部の領域わけについて

表 1 バルコニー手摺りの設計用ピーク風力係数の提案値

領域	I	II	III	IV	中央部
ピーク風力	-3.5	-3	-2.5	-2	1

## 4 疲労損傷について

### 4.1 等価応力範囲と等価風力係数範囲

変動振幅応力による繰り返し回数の総数  $N = \sum n_i$  で等価な疲労損傷度を与えるものを等価応力範囲といい、

$$\Delta\sigma_e = \sqrt[m]{\frac{\sum \Delta\sigma_i^m \cdot n_i}{\sum n_i}}$$

で定義される。 $n_i$  は応力範囲の繰り返し回数、 $m$  はマイナー則での応力範囲と回数の対数軸状の傾きを表す指数であり、本研究では 3 および 5 を用いる。

さらに、本研究では等価応力範囲を定数  $\alpha$ 、速度圧  $q$  で除した値である等価風力係数範囲

$$\Delta C_{fe} = \sqrt[m]{\frac{\sum \Delta C_{fi}^m \cdot n_i}{\sum n_i}}$$

なお、 $\alpha$  は疲労荷重と耐力の関係を表す係数であるが、本研究では未定である。

また本来累積疲労損傷度  $D$  は  $D = \sum \Delta\sigma_i^m \cdot n_i$  で定義されるが、これを等価風力係数範囲での式に変換すると、 $D = \frac{\Delta\sigma_e^m \cdot N}{C_0} = \frac{q^m \cdot \alpha^m}{C_0} \cdot \Delta C_{fe}^m \cdot N$  となる。

ここで  $\frac{q^m \cdot \alpha^m}{C_0}$  を本論文では考慮せず、疲労荷重強度  $D'$  を用いて相対的な考察をする。

$$D' = \Delta C_{fe}^m \cdot N$$

図 21 に、A、B 両タイプの疲労荷重強度を示すが、疲労荷重強度は隅角部で著しく大きな値を示していたので、これらを対象として考察する。隅角部と中央部の疲労荷重強度の差は一目瞭然である。

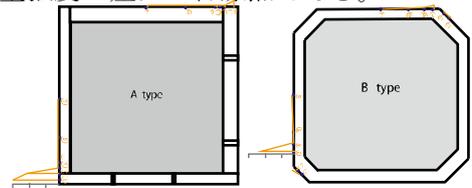


図 21 A タイプ B タイプの疲労荷重強度

### 4.2 ピーク風力係数と疲労損傷傾向との関係

#### (i) 疲労荷重強度

図 22 に、A および B タイプの隅角部および中央部における疲労荷重強度と最小ピーク風力係数との関係を示す。隅角部の疲労荷重強度は最大で両タイプ共に 1000 近くであるが、中央部では 0.01 程度である。これらの数値に絶対値としての意味は不明瞭だが、相対的危険度を表しており、隅角部の疲労荷重強度は中央部の  $10^6$  倍程度であるといえる。また、隅角部では、ピーク風力係数が 0 に近い箇所でも疲労荷重強度に幅があることより、風向角によって疲労の危険性が変わることがいえる。さらに、A タイプと B タイプの比較では、同じ程度のピーク風力係数の場合、疲労荷重強度は B タイプの方が大きくなっていることから、隅切りしたことでピーク風力係数が低減されているが、隅角部での疲労損傷に対する危険性は、A の方が若干大きいとほぼ同等と考えられる。

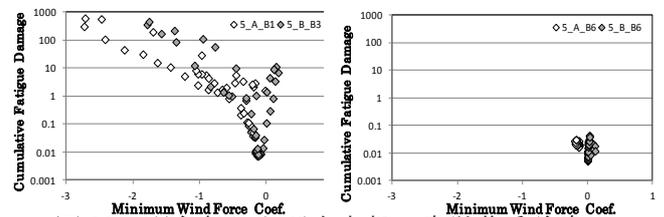


図 22 隅角部および中央部の疲労荷重強度

#### (ii) 振動回数について

図 23(a)(b) に A\_B1 および B\_B3 の振動回数の風向変化を示す。図 23(a)(b) の形状に顕著な差はなく、 $270^\circ$  付近で回数が最少となっており、図 18 と比べると、振動回数とピーク風力係数の動向の形状と一致している。このことより作用する風力が強くなる場合には振動回数が減少する。

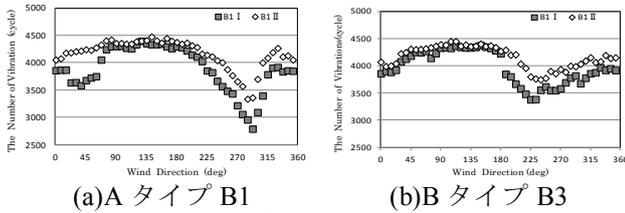


図 23 振動回数の風向変化

また、図 24 に A\_B1 のピーク風力係数と振動回数の関係を示すが、ピーク風力係数が同程度であっても振動回数が異なる点がある。図中に記した 2 点の風向角は 270° および 292.5° である。図 25 に風向角と測定点位置の関係、表 2 に風向角 262.5° ~ 300.0° の範囲の手摺り外部側および内部側の平均風圧係数値を示す。これより風向角 285° を境に、手摺りに作用する風圧力で外部側の負圧の寄与率が低くなり、正圧側の寄与率が高くなっていることが解りこれが原因であると考えられる。

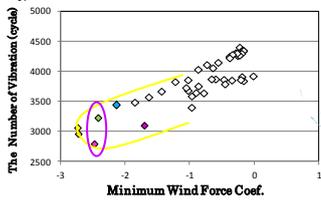


図 24 ピーク風力係数と振動回数の関係

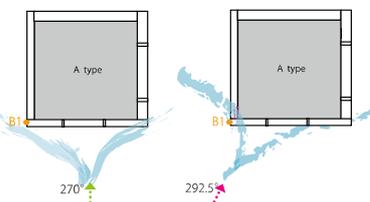


図 25 各風向角における風の流れ

表 2 各風向角における負圧の寄与率

風向角		262.5	270	277.5	285	292.5	300
外部側	平均	-0.908	-1.074	-1.368	-1.32	-0.745	-0.047
内部側	平均	0.512	0.532	0.503	0.517	0.588	0.65
外部負圧の寄与率		0.639	0.669	0.731	0.719	0.559	0.067

図 26 に隅角部における振動回数と疲労荷重強度 D' の関係を示す。これより、疲労荷重強度が小さい方が振動回数減少し、疲労損傷に関する危険性も低減するといえる。

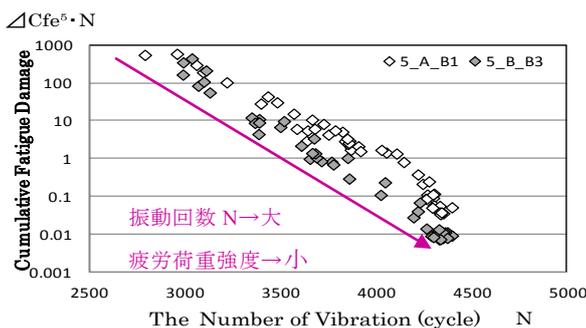
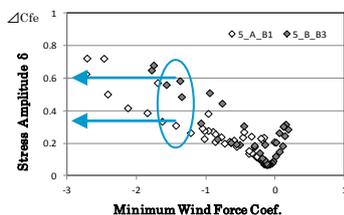


図 26 振動回数と疲労荷重強度の関係

(iii)等価風力係数範囲

図 27 にはピーク風力係数との関係を示す。両タイプとも等価風力係数範囲とピーク風力係数との間には比例関係があり、A、B 両タイプでピーク風力係数が同程度の値の時には等価風力係数範囲の値は B タイプの方が大きくなっていることがわかりピーク風力係数の大小だけでは等価風力係数



範囲の大小は決まらないといえる。

5 結論

バルコニーがあることによる壁面の風圧係数の低減効果について建物形状が与える影響を調べた。建物中央部では低減率は低測定層で特に大きく 5 割程度、妻面隅角部ではピーク風圧係数の絶対値は 7 割程度に低減する。辺長比の違いの影響はなく、形状の比較としては隅切りをする事によってさらなる低減効果があることがわかった。またバルコニーの隅角部からの離隔距離の違いで風圧係数の低減効果に対する影響は見られず、インナーバルコニーを有する場合には建物中央部においても風圧係数の低減は見られなかったことより、バルコニーが隅角部を回っている時に最も低減効果が期待できるといえる。

バルコニーのピーク風力係数に関しても辺長比やバルコニーの出幅による影響は見られなかった。一方、隅切りをすることによってバルコニー手摺の風力係数は低減され、隅切り幅を大きくするとさらに低減効果は上がる。また、インナーバルコニータイプでは通常バルコニー形状と比べ、バルコニー中央部でのピーク風力係数が大きいことが特徴的であった。また、離隔距離の影響としては、若干ではあるが、離隔が大きい方が風力係数は低減される。

疲労に関しては、振動回数の風向変化のグラフとピーク風力係数の風向変化は同じような形状となることより、ピーク風力係数の絶対値が大きい時に振動回数は少なくなり、振動回数が大きい程疲労荷重強度の値は小さくなることも明らかになった。また、隅角部を隅切りすることで疲労荷重強度そのものは低減されることがわかった。しかしピーク風力係数が同程度であった場合には隅切りのされていない模型の方が隅切りのものより疲労荷重強度が小さい事が判明したため、ピーク風力係数の大きさだけでは疲労の危険性を評価する事はできない。

参考文献

- 丸田栄蔵, 神田亮: 高層建物に作用する風圧力の表面粗度による影響
- 鶴見俊雄, 須田健一: バルコニーを有する建築物の壁面風圧性状について

○【質問者:谷口与史也教授】

Cタイプについて、0タイプの説明と食い違っているがバルコニーの離隔距離は関係あったのか。相対的に見ているのか具体的に見ているのかどちらか。

【回答】

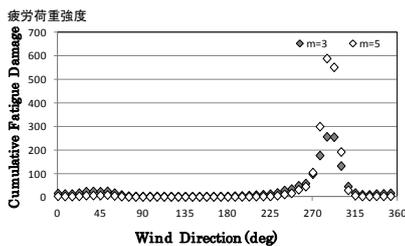
相対的に見えています。インナーバルコニーでは中央部での低減がされておらず、むしろ隅角部よりも大きくなっています。Cタイプでも前面でそこまで低減はされていませんが、バルコニーの小口面においては離隔距離が大きくなることで、ピーク風力係数は低減されることが明らかになりました。

○【質問者:山口隆司教授】

疲労に関して、数値の上限はあるのか。タイプによって数値は変わるか。また、 $m=3,5$ があるが、5の方が安全側なのか。

【回答】

今回の評価は相対的な物であるため数値自体に意味はありませんが、隅角部でのピーク風力および疲労荷重強度が最大となっていたAタイプで検証を行っており、値が1000に収まっていた為、この実験に関する上限は1000であると考えられます。そしてその範囲内でタイプによって数値は変わると考えられます。また、下図より5の方が等価風力係数範囲の値が大きく出ている事より、同じ振動回数において疲労荷重強度も大きくなるため、安全側の評価となっています。



○【質問者:鬼頭宏明教授】

どこがこわれるのか。繰り返し回数の違いで壊れ方は変わるのか。

【回答】

振動回数が多い疲労の場合はバルコニーを固定しているリベット等の腐食が起り固定具が飛んでいくことで破壊に至り、振動回数が少ないかわりに一度に大きな力が加わる場合には、バルコニーの支柱の下の方が破壊されると考えられます。

○【質問者:角掛久雄講師】

バルコニーの奥行きや幅の影響はあるのか。

【回答】

それらについては、Aタイプで比較検討を行いました。したが、下図の通り影響は出ていませんでした。

