

尚、図1に示す様に、建物隅角部に近い方から順に手摺側では1~5、妻側では6~9の測定点を各層に設け、例えば上層から数えて2層目、建物隅角部から数えて3番目の妻側壁面の測定点をW28の様に表示している。

2.2 実験結果と考察

(i) バルコニー手摺による手摺側壁面への影響

図3に建物隅角部と手摺端部の離隔が2mの模型の平均風圧係数を示す。手摺隅角部で風が剥離すると考えられる風向角 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ において、手摺隅角部に最も近い測定点W22で負圧が大きくなる。図4に示す可視化実験の結果から、この時に手摺と壁面の入隅部に渦が発生する事を確認した。同様の現象が他の離隔の模型でも見られ、渦心に近い位置で、壁面負圧が大きくなっていることから、渦が負圧を大きくした要因であると考えられる。次に、図5に離隔2mの模型の手摺高さより上部に位置する1層目の測定点(W11~13)と手摺がある高さに位置する2層目の測定点(W21~23)における平均風力係数を示す。1層目においても2層目と同様に、風向角 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ の範囲で負の極値をとる。図6に示す可視化実験から、この時、手摺が無い高さにおいても、手摺隅角部に相当する位置で風が剥離する様に見える事から、手摺の影響があると考えられる。図7に辺長比1:4の模型の建物隅角部と手摺端部の離隔を変えた時のピーク風圧係数を示す。離隔1mの時に壁面と手摺の入隅部となる測定点で、-2程度の負のピーク値が発生した。また、手摺の建物隅角部からの離隔を大きくすると、入隅部のピーク風圧係数の絶対値は小さくなる傾向が見られた。

(ii) 妻側壁面への影響

建物隅角部と手摺端部までの離隔 b を手摺出幅 D で除した b/D を形状比と定義し、図8に概略図を示す。また、図9に各層の妻側測定点における最小ピーク風圧係数と形状比との関係を示す。形状比0.8以上の模型では手摺があることで妻側壁面に作用する風圧力の軽減される時があると考えられるが、形状比0~0.5の建物隅角部に近い部分では、手摺がある模型の方が絶対値の大きなピーク風圧係数を取り、絶対値の最大値は約3.1となった。各図に示す直方体模型の各層で、最大負圧をとった測定点の値との比較から、形状比が0.8以上の時には、設計方針を変える必要は無いが、0.5以下の時には直方体実験結果よりも15%程度設計風力係数を大きくする必要があると考えられる。

3. バルコニー手摺の風圧係数

3.1 実験概要および測定点

実験模型は2節と同じものを用いた。バルコニー手摺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

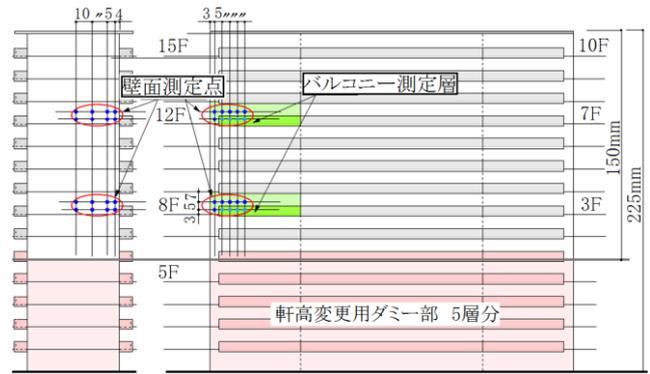


図2 実験模型立面図

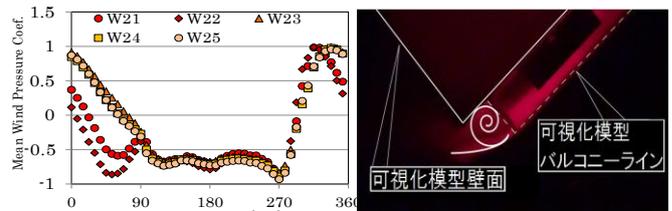


図3 平均風圧係数



図4 可視化実験

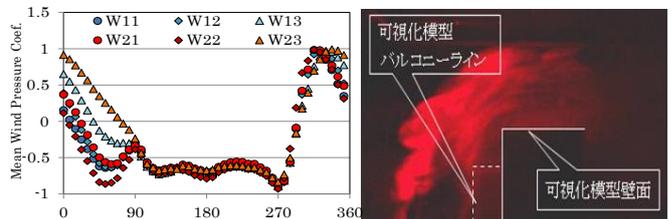


図5 平均風圧係数

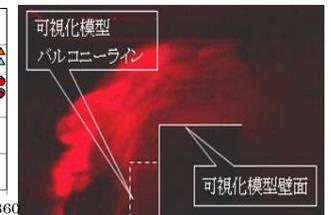


図6 可視化実験

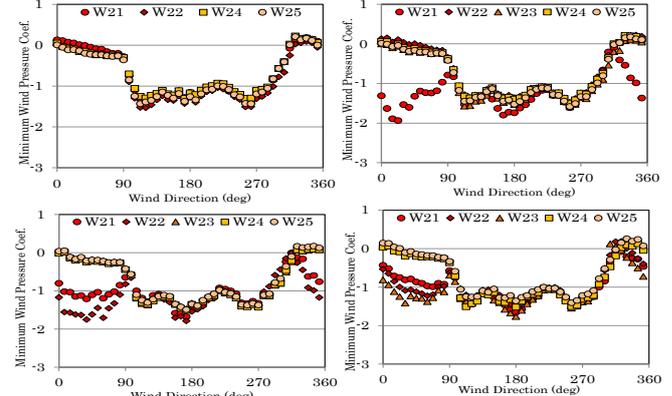


図7 離隔別のピーク風力係数の風向変化

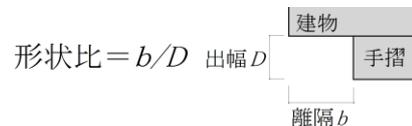


図8 形状比の概略図

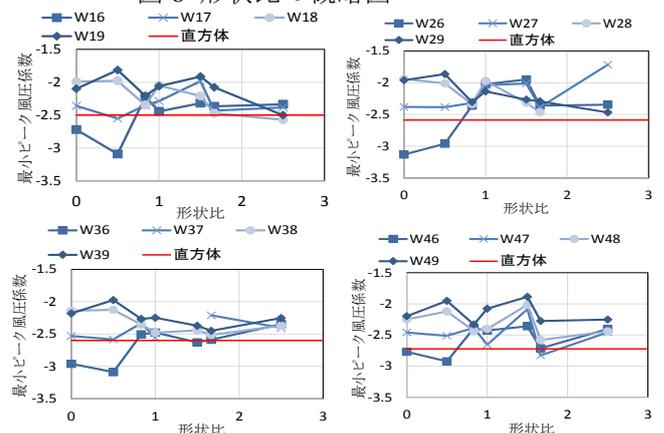


図9 形状比とピーク風圧係数の関係

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。また、図 10 に測定点の位置を表した平面図を示す。B1 および B2 は 12 階部、B3 および B4 は 8 階部での測定点を表す。

3.2 実験結果および考察

ピーク風力係数

図 11 に辺長比 1:2, 辺長比 1:4 の模型における最小ピーク風力係数の形状比による変化を示す。辺長比によらず同様な傾向が見られ、手摺前面の B1, B3 では、いずれの場合も -1.5~-2.0 の値を示し、離隔が大きくなっても荷重の減少は少なく、形状比が 2 を超えると絶対値は極端に減少し 1 以下になる。一方、小口部分の B2, B4 では形状比が小さくなるに従い、最小ピーク風力係数の絶対値は大きくなる傾向があり、形状比 0 の場合の、最小ピーク風力係数の絶対値は 4 以上の値を示している。またこの時の極値の発生する風向角は 345~360° 付近であり、平均風力係数の場合と同じ風向で極値が発生しており、他の離隔のものとは異なった圧力性状となっている事が予測される。

(iv)手摺内外の変動による影響

図 12 に出幅 1.2m, 辺長比 1:2 のピーク風圧係数を離隔別に示した。尚, max は最大風圧係数, min は最小風圧係数, out は手摺外側, in は内側の測定点を表す。離隔が 0m の時は、ピーク風力係数の絶対値が最大値を示した風向角 345~360° 付近において、手摺外側の負のピーク風圧係数が極値を示すと共に、手摺内側の正の絶対値も極値を示しており、最小ピーク風力係数は内外のピーク風圧が同程度に影響している。一方、その他の離隔の時は、ピーク風力係数が極値を示す風向角 45° 前後において、手摺外部のピーク風圧係数が極値をとるのに対し、手摺内側の正圧は減少傾向にあり、外部の風圧力が、大きく影響していると考えられる。図 13 に、形状比 0 と 0.5 の模型の測定点 B2 で、ピーク風圧係数の絶対値が最大となった風向角における 0~10 秒間の時系列を示す。内側と外側の波形が、時間軸に対して線対称の様な関係性が見られ、明らかに負の相関性があることが伺える。また、形状比 0 のものは、0.5~1 のものに比べて手摺外側の風圧変動が大きく、これがピーク風力係数の絶対値を大きくした要因であると考えられる。

(v)手摺の設計用ピーク風力係数

以上より、手摺の離隔および建物隅角部と手摺の離隔からなる形状比は、手摺の風力係数に影響するため、設計用風力係数に反映させる必要があると考えられる。図 14 は図 11 の辺長比 1:2 のグラフにおいて、比較的值が大きかった妻側壁面の最小ピーク風力係数に近似曲線を引いたものであり、本研究ではこの多項式近似から、設計用ピーク風力係数を式(1)で提案する。

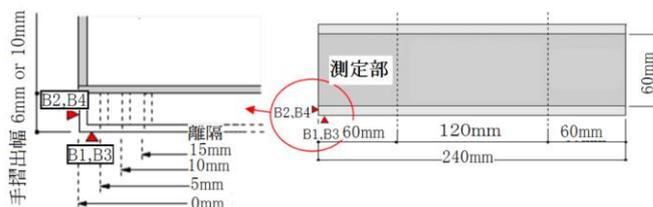


図 10 手摺測定点 平面図

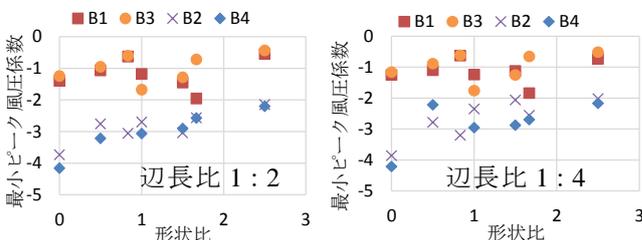


図 11 形状比による変化

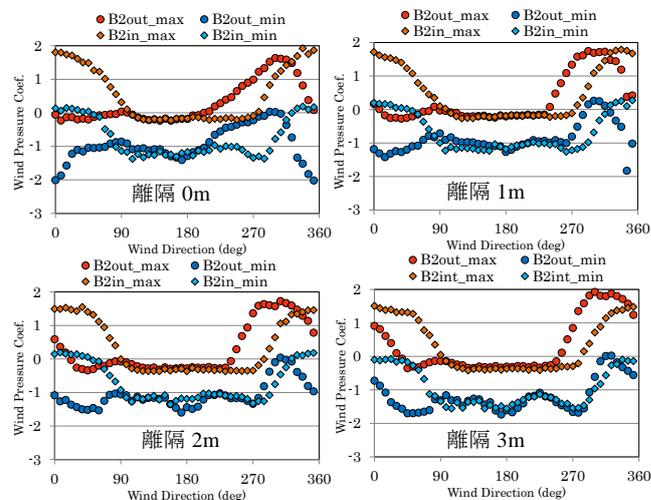


図 12 離隔別の手摺内外のピーク風圧係数

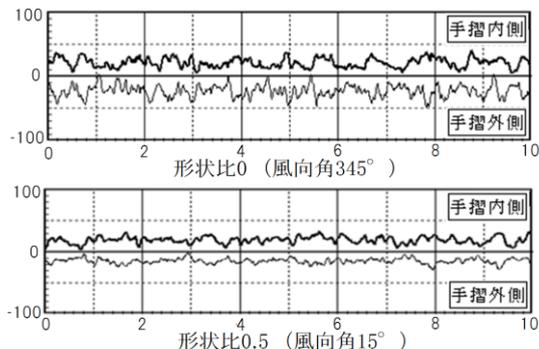


図 13 形状比による時系列波形への影響

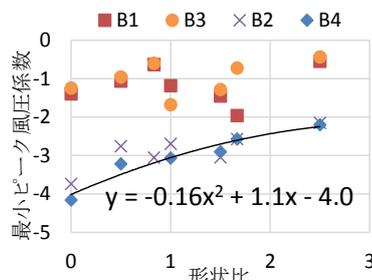


図 14 最小ピーク風力係数の近似曲線

$$C_f = -0.16 \left(\frac{b}{D} \right)^2 + 1.1 \left(\frac{b}{D} \right) - 4.0 \quad \dots \text{式(1)}$$

b : 手摺の離隔 D : 手摺の出幅

4. 手摺の疲労損傷に対する検討

4.1 レインフロー解析

風洞実験で計測した手摺の風力係数の時刻歴データを用い、レインフロー解析により等価風力係数範囲および繰り返し回数の解析を行った。

(i) 等価風力係数範囲

一定時間内に変動する任意の応力振幅が繰り返し作用する時に、その繰り返し回数と同じ回数で等価な疲労損傷度 D を与える応力範囲を等価応力範囲といい、式(2)で定義される。本研究ではこれを定数 α 、速度圧 q で除した値を等価風力係数範囲と定義し、それを式(3)に示す。 n_i は応力範囲の繰り返し回数、 m は設計疲労曲線の勾配を表し、本解析では $m=5$ とした。尚、 α は手摺の受圧面積、固定方法および各部材の断面性能等によって決まる定数である。

(ii) 疲労荷重強度

疲労荷重強度とは、等価風力係数範囲の m 乗に繰り返し回数に乗じて算出した値であり、定義式を式(4)に示す。これは疲労損傷度と比例関係にあるパラメータであり、疲労荷重強度が最大となる時に疲労損傷度も最大となると考えられる。この疲労荷重強度が最大となった手摺出幅 1.2m、離隔 0m、辺長比 1:4 の建物の模型について、疲労荷重強度を図 15 に、その時の 10 分間の繰り返し回数を図 16、等価風力係数範囲を図 17 に示す。図 15 から、繰り返し回数は小口面測定点 B2、B4 よりも前面測定点 B1、B3 での回数が多くなった。また、図 16 と図 17 を比較すると、等価風力係数範囲が大きくなる風向では、繰り返し回数は少なくなる傾向があり、ゆっくりとした大きな圧力変動が作用していることになる。また、風向角 330° 、測定点 B4 で等価風力係数範囲および疲労荷重強度は最大値を示した。

4.2 荷重履歴を考慮した累積疲労損傷度

(i) 繰り返し荷重実験

強風時に手摺に作用する繰り返し荷重の影響を検討する為に、実部材を用いて加力試験を行った。加力試験では、等分布荷重を集中荷重で置き換える為に、図 18 に示すように支柱足下の曲げモーメント M と芯材上端の曲げモーメント m_2 が、等分布荷重と同じ値になる載荷高さ h で加力する事とした。尚、本研究で用いた供試体は、芯材長さ $L=500$ 、手摺高さ $H=1200$ であるので、載荷高さ $h=758$ 、等分布荷重 250Pa に対する集中荷重 F' は 285N となる。また、図 19 に応力比 $R=-1$ で行った加力試験の結果を示しており、実験結果からの近似による疲労曲線の勾配は $m=4.27$ となった。

(ii) 二段階荷重試験の概要と結果

二段階荷重試験は、荷重振幅を前半と後半で変化させ、前半で一定の損傷度を与えた後、後半の振幅で破壊に至る迄の回数の確認を行った。表 1 に実験で行っ

$$\Delta\sigma_e = \sqrt[m]{\frac{\sum \Delta\sigma_i^m \cdot n_i}{\sum n_i}} \quad \dots \text{式(2)}$$

n_i : 繰り返し回数 m : 疲労曲線の勾配

$$\Delta Cf_e = \sqrt[m]{\frac{\sum \Delta Cf_i^m \cdot n_i}{\sum n_i}} \quad \dots \text{式(3)}$$

$$D_{C10} = \Delta Cf^m \times N_{10} \quad \dots \text{式(4)}$$

N_{10} : 実時間 10 分相当の繰り返し回数

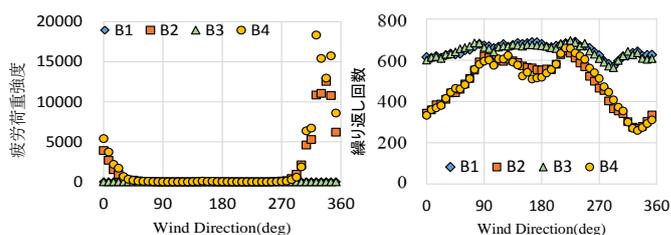


図 15 疲労荷重強度

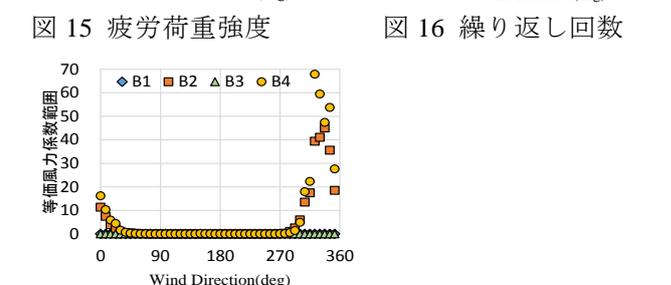


図 16 繰り返し回数

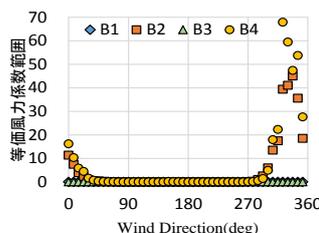


図 17 等価風力係数範囲

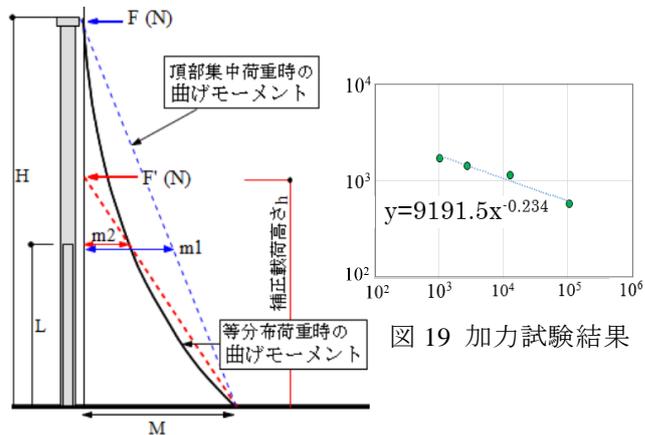


図 18 曲げモーメント分布比較

図 19 加力試験結果

表 1 二段階加力試験結果と算出された損傷度

供試体 No	前半			後半			合計 損傷度
	荷重振幅	載荷回数	損傷度	荷重振幅	載荷回数	損傷度	
1	1140	3250	0.437	1710	791	0.601	1.038
2	1140	4875	0.655	1710	697	0.529	1.184
3	1140	6500	0.873	1710	248	0.188	1.062
4	1710	250	0.19	1140	6092	0.775	0.965
5	1710	375	0.285	1140	6776	0.862	1.147
6	1710	500	0.38	1140	3278	0.417	0.797
7	1710	750	0.569	1140	3446	0.438	1.008
8	855	10229	0.4	1710	995	0.756	1.156
9	855	12787	0.5	1710	797	0.605	1.151

た前半の荷重振幅、 載荷回数および後半の荷重振幅と破壊に至った回数を示す。 ここでの損傷度は荷重振幅と載荷回数からマイナー則に従って算出した。

(iii) 実験結果からの考察

表 1 より、 小さい荷重振幅を載荷した後に大きい荷重振幅を載荷すると、 前半と後半の損傷度の和である累積損傷度は 1 を超える傾向があった。 そこで、 後半振幅での回数から損傷度を算出し、 前半の損傷度を逆算すると、 表 2 の様になった。 この結果を、 図 20 の様に回数と損傷度の関係をプロットすると、 荷重振幅が小さい時は、 線形ではなく指数的に損傷度が増加する傾向があった。 また、 荷重振幅が小さい時は、 損傷度の進行が遅い傾向も確認された。 従って、 損傷度が加速度的に進行する傾向があることから、 一定振幅の損傷度は、 破壊回数 に対する繰り返し回数 の比に対して、 式(5)のように累乗近似できると仮定した。 尚、 $k=1$ の時が従来の損傷度の算定方法に相当する。 また、 この k の値は荷重振幅によって変化する事から、 振幅比の関数と考えられ、 荷重振幅 ΔP が破壊荷重 ΔP_{max} の時に $k=1$ となる事、 荷重振幅が破壊荷重以下の場合には $k > 1$ となることから、 式(6)の様に累乗近似の関数で表せると仮定した。 尚、 図 20 の結果より荷重振幅 ΔP が 855N および 1140N の時、 k は 1.49 および 1.13 となった。 また、 別途行った静的加力試験から $\Delta P_{max} = 2200N$ として図 21 に示すような累乗近似すると、 $b=0.38$ となった。

4.3. 台風シミュレーション

(i) 解析方法

先に示した、 疲労損傷に対する考え方を実際の建物の耐風設計への適用を試みる。 まず、 想定建物の軒高を 45m、 基準風速 34m/sec、 再現期間 100 年とすると設計風速は 39.2m/sec となる。 最大風速がこの風速となる場合の、 台風シミュレーションを吉田ら⁴⁾の方法により 10 分間毎の風向と風速を算出した。 台風シミュレーションでは、 最大風速が発生する風向は、 北を 0° とした場合に 177.1° となった。 一方、 解析対象とする風洞実験データは、 疲労荷重強度が最大となった手摺出幅 1.2m、 離隔 0m、 辺長比 1 : 4 の模型、 B4 測定点とした。 疲労荷重強度が最大値を示す風向角 330° と台風シミュレーションで最大風速となる角度 177.1° を一致させ、 この時刻を 0 として、 前後 ± 300 分間の疲労損傷解析を行った。 また、 前節に示した損傷度の進行速度に対する仮定を取り入れ、 10 分間毎の逐次解析を行った。 図 22 に解析のイメージを示す。 任意の区間の損傷度を算定する際には、 前区間までの損傷度を、 当該区間の振幅による繰り返し回数に置き換え、 これに当該区間の繰り返し回数を加算し、 損傷度を算定している。

表 2 後半損傷度から逆算された前半損傷度

供試体 No	前半			後半			合計 損傷度
	荷重振幅	載荷回数	損傷度	荷重振幅	載荷回数	損傷度	
1	1140	3250	0.399	1710	791	0.601	1
2	1140	4875	0.471	1710	697	0.529	1
3	1140	6500	0.812	1710	248	0.188	1
4	855	10229	0.244	1710	995	0.756	1
5	855	12787	0.395	1710	797	0.605	1

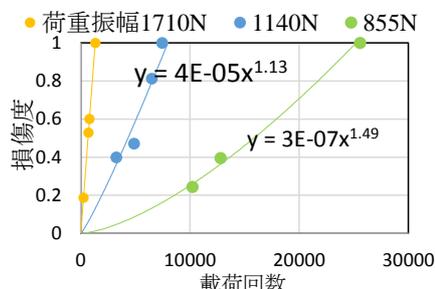


図 20 回数と損傷度の関係

$$D = \left(\frac{N}{N_\sigma} \right)^k \quad \dots \text{式(5)}$$

N : 繰り返し回数 N_σ : 荷重振幅 σ での破壊回数

$$k = \left(\frac{\Delta P_{max}}{\Delta P} \right)^b \quad \dots \text{式(6)}$$

ΔP_{max} : 破壊荷重 ΔP : 荷重振幅

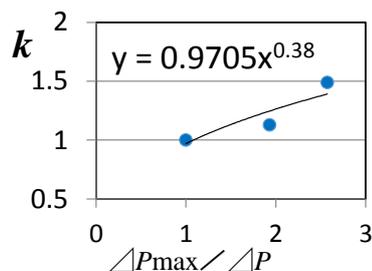


図 21 振幅比 k との関係

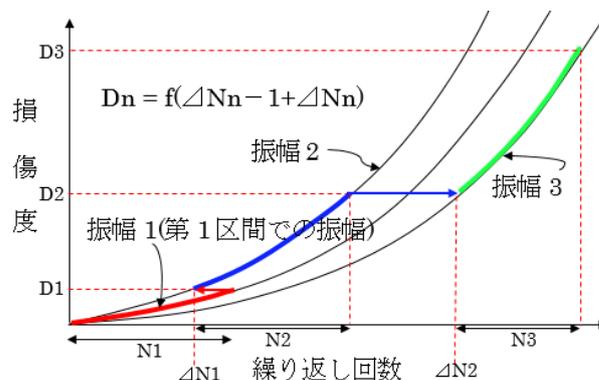


図 22 逐次解析のイメージ

(ii)解析結果

図 23 に荷重振幅の時間変化, 図 24 に従来の算定法による損傷度 D_j と荷重履歴を考慮した算定法による損傷度 D_k の比較を示す. 荷重振幅が 1000N 超える-30分~+50分付近で D_j , D_k 共に大きく増加し, そこからは徐々に増加している. また, 図 25 に D_j と D_k の差を示す. 荷重振幅が 700N を超える-40分付近から差は大きくなり, 荷重振幅が最大となる+10分付近で最大となるがそれ以降は時間経過と共に徐々に縮まる. ここで, 台風通過後に比較的緩やかな風の風圧力が手摺に作用した際の疲労損傷に与える影響を検討するため, 図 26 に台風通過後に風速 20m/s の風が風向角 330 度から作用した場合の損傷度の時間変化を示す. 約 11 時間後に D_k が D_j を超え, 17 時間後に累積損傷度が 1 になり D_j よりも 4 時間早く疲労破壊を起こす結果となった. 従って, 荷重履歴を考慮した際には, 考慮しない場合よりも早く疲労破壊に至る危険性がある為, 荷重履歴を考慮した算定法で疲労損傷度を評価する必要があると考えられる.

5. 結論

本研究では, バルコニー手摺およびその周辺壁面の風圧性状および手摺の疲労損傷について検証した. 周辺壁面では, 建物の妻面側壁面で比較的大きな風圧係数を示し, 形状比が 0.8 以上の時には, 設計方針を変える必要は無いが, 0.5 以下の時には直方体実験結果よりも 15%程度設計風力係数を大きくする必要があると考えられた. 手摺においては外部の風圧変動により, 離隔 0m の模型の小口部でピーク風圧係数の絶対値が大きくなる事が確認された. 共に形状比による影響が確認された為, 形状比を考慮した設計用ピーク風圧係数をそれぞれ提案した. また, 手摺の疲労損傷に関して, 荷重履歴を考慮した損傷度算定法を提案し, 台風シミュレーションにより従来の算定法との比較を行った結果, 荷重履歴を考慮した場合には考慮しなかった場合よりも早く疲労破壊に至る危険性を示した.

参考文献

- 1)森脇一樹 岡崎充隆 谷口徹郎 谷池義人,「中高層集合住宅の手摺りに加わる風圧力の性状」,日本建築学会大会梗概集 構造 I, P179-180,2003
- 2)高森浩次 西村宏昭,「凹凸のある建物の風圧分布」,日本建築学会大会学術講演梗概集 p1062-1063,1993
- 3)山内豊英 岡崎充隆 谷口徹郎 谷池義人,「建築物のバルコニー手摺りに作用する風荷重」,第 19 回 風工学シンポジウム, P383-388,2006
- 4)吉田正邦 本郷剛 堀越清視 津川恒久,「台風時の風向・風速と累積作用時間に関する解析」,鹿島技術研究所年報 第 40 号, P129-P136,1992

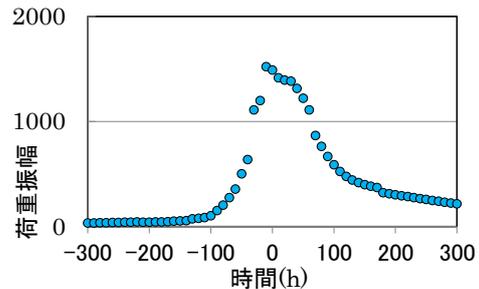


図 23 荷重振幅の時間変化

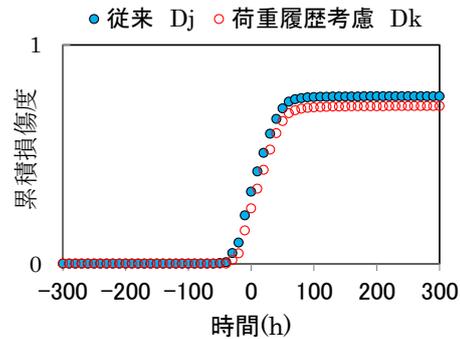


図 24 D_j と D_k の比較

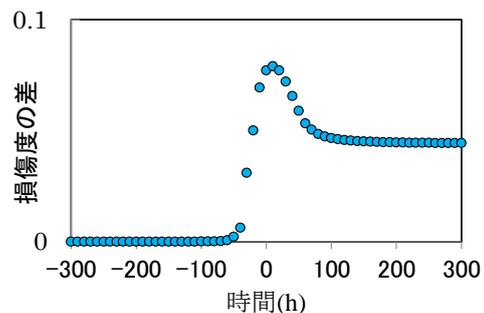


図 25 D_j と D_k の差

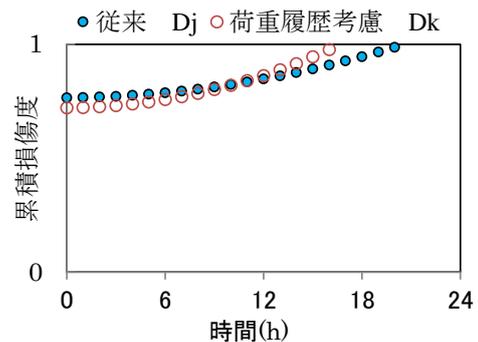


図 26 台風通過後の損傷度

討議文

①【質問者：谷口与史也教授】

17 時間で疲労破壊に至ると言っているが、建物の用途を考慮した時、再現期間はどれぐらいになるのか。どのぐらいの確率で 17 時間後に破壊に至るのか。

【回答】

設計風速は、建物の再現期間が 100 年となる風速 39.2m/s とし、それを台風の最大風速となるように設定しています。

また、本研究では、最も疲労損傷度が大きくなる手摺に対して、疲労損傷度が最大となる風向角から、設計風速が吹く様に条件を設定しています。さらにその後に風速 20m/s の風が吹いた時の場合を想定していますので、少なくとも再現期間は 100 年以上だと考えられます。従って、100 年以上に 1 回の確率で破壊すると考えられます。

②【質問者：鬼頭宏明教授】

バルコニー手摺には風が水平部材、鉛直部材があり、様々な方向に力が作用する様に思うが、今回はどのような方向の力を考えているのか。

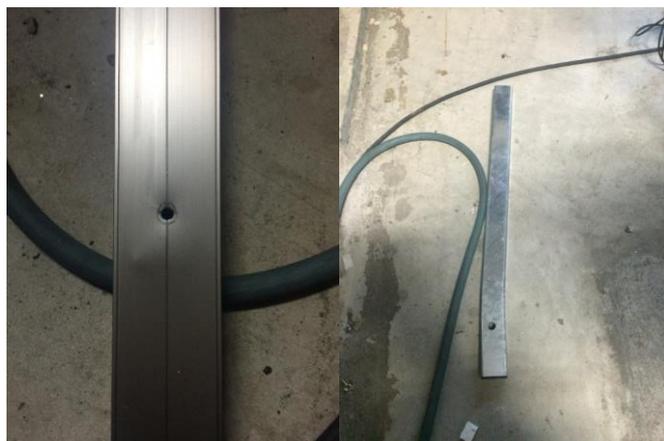
【回答】

本研究では、パネル状の手摺を想定しているので、パネルに対する等分布荷重が水平方向に作用することを想定して、それを集中荷重に換算して算定しています。

③【質問者：山口隆司教授】

疲労破壊は具体的にどのような破壊になるのか。写真等はないのか。

【回答】



上図の様な、リベット等の破壊が考えられます。加力試験により、左図はリベット、右図は芯材が破断した後の写真です。

④【質問者：吉中進准教授】

実際に手摺が破壊しても落下しなければいいのではないか。

【回答】

本研究では、手摺支柱が疲労破壊するのが、従来の算定法で解析した結果よりも早くなる危険性を示したのみですので、実際に手摺が破壊した後の落下等の災害については考慮していません。

⑤【質問者：山口隆司教授】

17 時間で疲労破壊に至るまでの繰り返し回数はいくらか？

【回答】

計算上では、約 15×10^{10} 回となりました。

⑥【質問者：重松孝昌教授】

風圧係数の定義は何か。高さ方向の影響が無いのか。

【回答】

建物が風力を受ける度合いを表す係数で、構造計算上の数字です。風圧力は風圧係数に速度圧を乗して求めます。

また、本研究では風圧係数に対して、高さ方向の影響はほとんど無かった事を確認しました。

⑦【質問者：谷口徹郎准教授】

形状比 0 の時に建物妻面で負圧が大きくなった原因は何か？

【回答】

可視化実験等で確認はできていませんが、負圧が大きくなった風向角は 0° 付近でしたので、手摺隅角部で剥離した風がさらに建物隅角部で剥離する様な現象が起きたからではないかと考えております。