

# 野外実験における建築物バルコニー手摺の風力係数に関する考察

## Consideration about Wind Force Coefficients of Balcony Handrails on Field Measurements

山内 豊英\*

### 要 旨

大型模型を用いた自然風中の野外実験により、建築物のバルコニー手摺における風力について詳細な調査を行った。その結果、建築物のコーナー部に位置するバルコニー手摺の風力は、特定の風向において非常に大きくなり、コーナー部以外のバルコニー手摺の風力は極めて小さいという既報の風洞実験結果と同様の結果が得られた。更に、コーナー部のバルコニー手摺において非常に大きな風力が作用する範囲を調べた結果、コーナー部の出隅からバルコニー出幅の2倍程度までの範囲であることがわかった。

また、従来のピーク風力係数とは異なる「最大瞬間速度圧に対するピーク風力係数（瞬間ピーク風力係数）」を示し、非定常性の強い接近流下での野外実験においては、風力の指標として有効である可能性を示した。

キーワード：野外実験／バルコニー手摺／ピーク風力係数

### 1. はじめに

バルコニー手摺に作用する荷重には、人間の行動による荷重、物の衝突による荷重、風荷重等が想定され、特に、パネル状の部材を用いる場合は風荷重が支配的な可能性がある。建築基準法では、バルコニー手摺の風力係数等が示されておらず、設計荷重を算定する際の基準が殆どない。現状では、設計に際しては各種機関によるバルコニー手摺の設計基準<sup>1)</sup>等を利用する場合があるが、近年のバルコニー手摺の風荷重に関する研究<sup>2), 3)</sup>で、それら設計基準で定められた各種荷重よりも大きな風荷重が作用する場合があることがわかってきた。

そこで、筆者は、バルコニー手摺の風荷重を明らかにすることを目的とし、風洞実験による研究を行ってきた<sup>5), 6), 7)</sup>。その結果、建築物のコーナー部に位置するバルコニー手摺には、特定の風向で、非常に大きな風力が作用することを示し、コーナー部以外のバルコニー手摺では、どの風向においても、風力が極めて小さいことを示した。

ただし、風洞実験では模型縮尺が数百分の一となり、模型のバルコニー手摺に密に風圧測定孔を設けることが困難なため、風力が大きい範囲の特定等、風力の詳細な分布を明確にできなかった。また、風洞実験は、自然風特有の風向・風速の非定常性を再現することが困難であり、レイノルズ数等の相似則の問題もある。したがって、風洞実験で得られた知見に関して、自然風中の野外実験で検証を行なうことは、耐風設計上、意義あることと考えられる。

そこで、本研究では、バルコニーを設けた大型模型を用いて自然風中の野外実験を行い、風洞実験との比較を通して、野外実験において算定されるバルコニー手摺の風力係数に関して考察を行なった。

### 2. 野外実験概要

野外実験は、大阪の舞洲にある大阪市立大学耐風構造実験所において行なった。実験所の配置図を図-1に示す。実験所は、西側および南側が大阪湾に面しており、北北東200mの位置に3階建ての建築物がある以外は周辺に障害となる構造物はない。実験所周辺の地表面粗度区分はⅠ～Ⅱ程度であると考えられる。

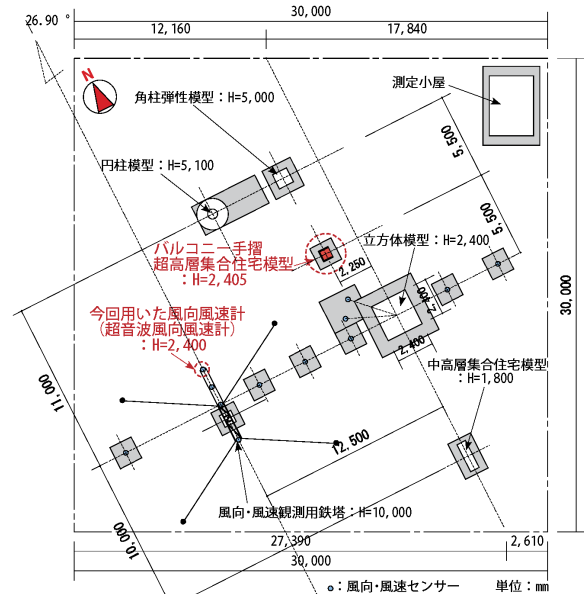


図-1 実験所の配置図

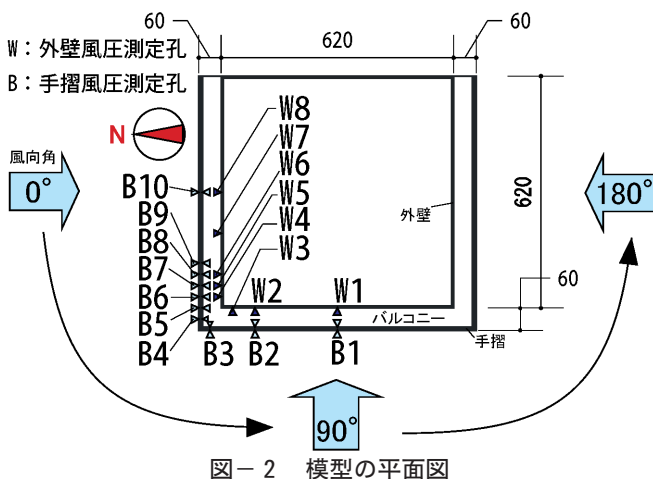
\*技術研究所構造研究グループ

野外実験に用いた大型模型の平面図および立面図をそれぞれ図－2および図－3、模型外観の写真を写真－1、外壁およびバルコニー手摺の断面の概要を図－4に示す。また、図－2の平面図に風圧測定孔の位置および名称、実験風向角の定義を併せて示す。模型縮尺は1/30であり、24階建て超高層集合住宅（高さ72m）を想定した。模型には、出幅60mmのバルコニーを北、西、南の3面に設けている。風圧測定孔は、7階、13階、19階および24階の各階について、外壁面に8点、バルコニー手摺の内・外側に各10点、計112点設けた。風圧測定孔を設けたバルコニー手摺の厚みは、バルコニー手摺の内・外側に風圧測定孔を設けるといふ模型構造上の理由により、必要最低限の厚みとして10mmとした。風圧力は、シリコンチューブを介して風圧センサーに伝達され、模型外部にあるマンホール内の静圧との差圧として測定し、解析時にはチューブの伝達特性を考慮し補正<sup>4)</sup>を施した。

実験では、風圧力および模型頂部高さの風向・風速をサンプリング周波数50Hzで測定した。風向風速計（超音波風向風速計）の設置位置は図－1に示す通りである。任意に設定した風速をトリガーとして測定を開始し、1回の測定時間は約22分（データ数65536個）とした。2008年3月から測定を開始し、これまでに115回分のデータを記録した。



写真－1 模型の外観



図－2 模型の平面図

評価時間は48sec、40sec、30sec、20secおよび10secの5種類とし、それぞれについて検討を行なったが、次章以降に示す実験結果は、特に記載が無い限り、評価時間を48secとした場合の結果である。また、ピーク値を評価する時間間隔はサンプリング間隔とした。なお、評価時間48secを実時間の10分としてサンプリング間隔でピーク値を評価すると、実時間の0.25secのピーク値に相当し、既報<sup>7)</sup>の風洞実験におけるピーク値算出条件と同じとなる。評価時間を48secとした場合の相似則を表－1に示す。また、既報<sup>7)</sup>の風洞実験の相似則も表－1に併せて示す。

風洞実験による研究<sup>5), 6), 7)</sup>から、バルコニー手摺で最も風力が大きくなる部分は、図－2のB3、B4付近のようなコーナー部であり、B4部分に注目した場合、風力が最大となる風向角は90°付近であると推測できる。風向角90°付近では、B4部分の内側が正圧、外側が負圧となり大きな風力が作用する。模型は、主にB4付近に発生する風力の測定を目的とし、実験所の卓越風向である風向角90°付近（西風）の接近流を対象に配置している。したがって、以下の実験結果は風向角90°を中心とした45°～135°の範囲についてのみ示す。

### 3. 野外実験結果

#### 3.1 接近流の性質

接近流の変動風速のパワースペクトル密度、平均風速および乱れ強さと平均風向角の関係をそれぞれ図－5および図－6に示す。図－5には、Karman型のパワースペクトル密度も併せて示す。図－6によると、平均風速は2～8m/sec程度、乱れ強さは20～60%程度に分布している。表－1の相似則より、平均風速については、実風速換算で5～19m/sec程度であり、通常の設計風速よりも小さい。また、平均風速が小さいことに起因して乱れ強さも大きく、建築物荷重指針<sup>8)</sup>による実建物高さの乱れ



図－3 模型の立面図

強さが地表面粗度区分Ⅰ～Ⅲで15%程度であることから、想定よりも大きいことがわかる。

### 3.2 バルコニー手摺の風力分布

模型の19階部分におけるバルコニー手摺のB4部分について、内側および外側の平均差圧力および最小ピーク差圧力と、風速から算定した平均速度圧の関係を図-7に示す。バルコニー手摺の差圧力は外側の風圧力から内側の風圧力を差し引いた値とする（内側に押す方向が正、外側に押す方向が負）。図-7の●は、平均風向角が $90^\circ \pm 5^\circ$ のデータである。風洞実験結果<sup>7)</sup>と同様に、風向角 $90^\circ$ 付近で大きな差圧力が生じていることがわかる。

また、図-7に示すように、差圧力と平均速度圧の関係において任意の風向角区間でデータを抽出し、それに対して線形近似を行なった時の直線の傾きは、その風向角区間における風力（差圧）係数に相当する。そこで、風向角を $10^\circ$ 毎に分割し、各風向角区間について風力係数を算出した。風力係数の絶対値が特に大きかった風向角 $80^\circ \pm 5^\circ$ 、 $90^\circ \pm 5^\circ$ 、 $100^\circ \pm 5^\circ$ における平均風力係数および最小ピーク風力係数の分布を図-8に示す。風力が高いのはB4～B6付近の極一部で、平均風力係数は-1.5程度、最小ピーク風力係数は-10前後となった。その他の部分の風力は比較的小さい。

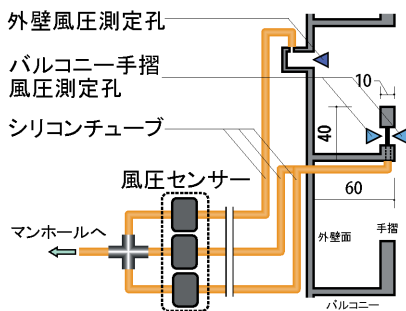


図-4 断面の概要

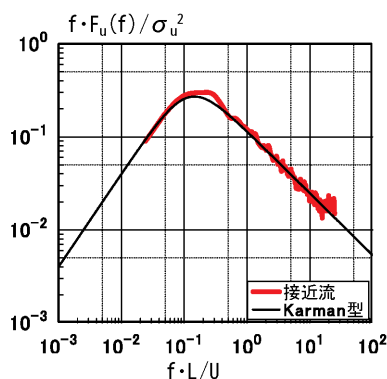


図-5 変動風速のパワースペクトル密度

今回の実験においては、風力が高い範囲は、コーナー部出隅からバルコニー出幅の2倍程度までの範囲であった。なお、コーナー部B4～B6における差圧力と平均速度圧の相関係数は、風向角区間 $80^\circ \pm 5^\circ$ の平均差圧力と平均速度圧においてのみ0.4程度であったが、その他は0.6～0.8程度と比較的高い値を示しており、線形近似で算定した風力係数は概ね有意であると考えられる。

表-1 相似則の関係（評価時間48secの時）

| 相似則対象   |           | 野外実験               | 既報 <sup>7)</sup> の風洞実験 |
|---------|-----------|--------------------|------------------------|
| 風速      | 実現象に対する比率 | 1/2.4              | 1/4                    |
| 時間      |           | 1/12.5             | 1/50                   |
| スケール    |           | 1/30               | 1/200                  |
| レイノルズ数* | 実値        | $2.07 \times 10^5$ | $7.00 \times 10^4$     |

\*野外実験のレイノルズ数は風速5 m/sec時の値

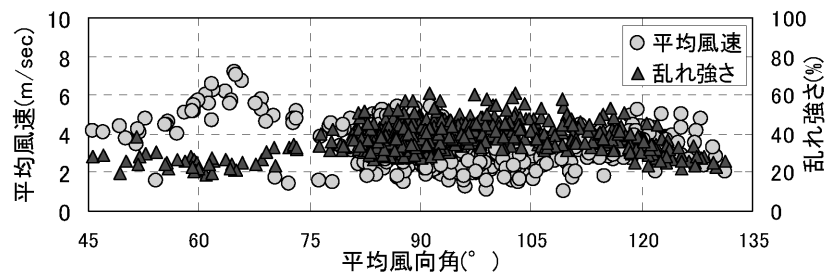


図-6 接近流の平均風速と乱れ強さ

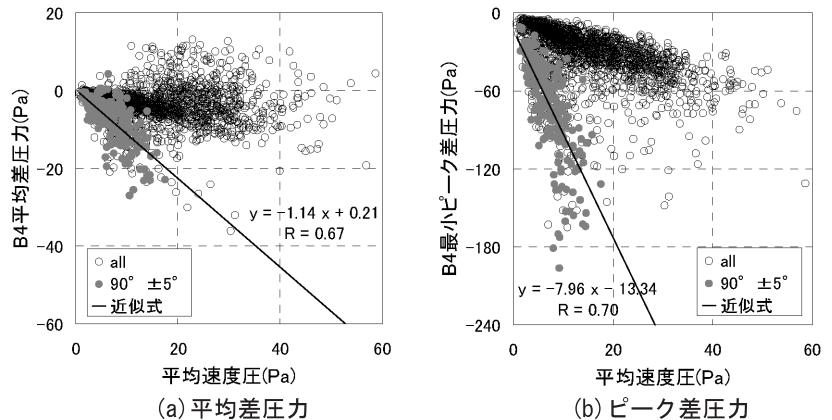


図-7 差圧力と平均速度圧

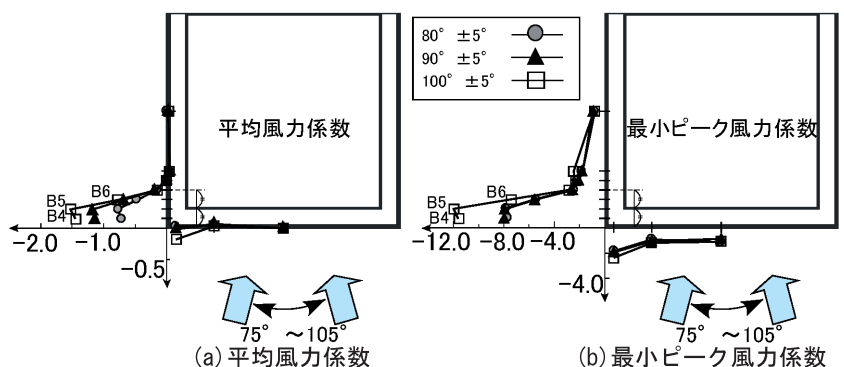


図-8 評価時間48secの風力係数

#### 4. バルコニー手摺の風力係数に関する考察

##### 4.1 野外実験におけるピーク風力係数について

前章の図-8によると、平均風力係数の値はこれまでの風洞実験結果<sup>5), 6), 7)</sup>と概ね一致するが、最小ピーク風力係数の値がコーナー部では-10前後を示しており、風洞実験における値が-3~-3.5程度であったのと比較して絶対値が大きい。これは、前述のように、本野外実験における接近流の乱れが強いことや風向・風速の非定常性の影響等が原因として考えられる。図-9は野外実験における風速の時系列データの一例であるが、乱れ強さが45.2%、ガストファクターが2.6となり、想定する接近流とは大きく異なる。また、評価時間内で大きく変動しており、強い非定常性を有していることがわかる。

これらの要因により、野外実験において従来の方法で算出したピーク風力係数は、一般には、風洞実験値と単純に比較することが難しく、建築物荷重指針<sup>8)</sup>等、現行基準で定められる設計風荷重の算定に用いることも難しい。

##### 4.2 最大瞬間速度圧と最小ピーク差圧力の相関

ここで、模型の19階部分について、風向角 $90^\circ \pm 5^\circ$ における評価時間内の最大瞬間速度圧とバルコニー手摺B4部分の最小ピーク差圧力の関係を図-10に示す。図-10によると、両者の相関が極めて高いことがわかる。図-10の最大瞬間速度圧と最小ピーク差圧力は、それぞれ個別に抽出した値であり、必ずしも同時刻の値ではない。更に、図-1に示すように風向風速計と実験模型の距離も10m程度離れている。したがって、図-10は、実験所の代表的な風の速度圧とバルコニー手摺B4の差圧力そ

れぞれの極値をプロットしたものであり、風速に対する風力の準定常仮定を主張しようとするものではない。このように極値の対応を示しただけのものにもかかわらず、相関が高いのは興味深い。

そこで、3章と同様に、線形近似の傾きにより各風向角区間の「最大瞬間速度圧に対する最小ピーク風力係数（以降、「瞬間ピーク風力係数」と表す）」を算出した。風向角 $80^\circ \pm 5^\circ$ 、 $90^\circ \pm 5^\circ$ 、 $100^\circ \pm 5^\circ$ における瞬間ピーク風力係数の分布を図-13(a)に示す。3章で示した平均および最小ピーク風力係数と同様に、B4~B6のコーナー部で大きな負の値をとり、それ以外は比較的小さく、風力の分布形状は図-8に示す従来の風力係数と似通っている。

また、風向角区間 $80^\circ \pm 5^\circ$ 、 $90^\circ \pm 5^\circ$ 、 $100^\circ \pm 5^\circ$ の瞬間ピーク風力係数と評価時間との関係を図-11に示す。いずれの風向角においても、評価時間の減少に応じて絶対値が僅かに減少していく傾向はあるものの、瞬間ピーク風力係数の値は評価時間がある程度長ければほぼ一定とみなせる。一方、従来の方法で算定された最小ピーク風力係数と評価時間との関係を示した図-12によると、容易に予測できることではあるが、評価時間の減少に伴いピーク風力係数の値も大幅に変化する。したがって、非定常性の強い接近流下で測定される野外実験においては、この瞬間ピーク風力係数が風力に関する有効な指標となる可能性がある。

次に、瞬間ピーク風力係数の量的な意味を検証するため、下記の(1)式に示す換算により得られたピーク風力係数 $_{bal}C_{peak}$ を風洞実験結果<sup>7)</sup>と比較する。

$$_{bal}C_{peak} = G^2 \cdot _{bal}C_{inst} \left( \because _{bal}C_{inst} = \frac{_{bal}P_{min}}{1/2 \cdot \rho \cdot v_{max}^2} = \frac{_{bal}P_{min}}{1/2 \cdot \rho \cdot (\bar{v} \cdot G)^2} \right) \quad (1)$$

$G$  : ガストファクター       $_{bal}C_{inst}$  : 瞬間ピーク風力係数       $\rho$  : 空気密度  
 $_{bal}P_{min}$  : 最小ピーク差圧力       $v_{max}$  : 最大瞬間風速       $\bar{v}$  : 平均風速

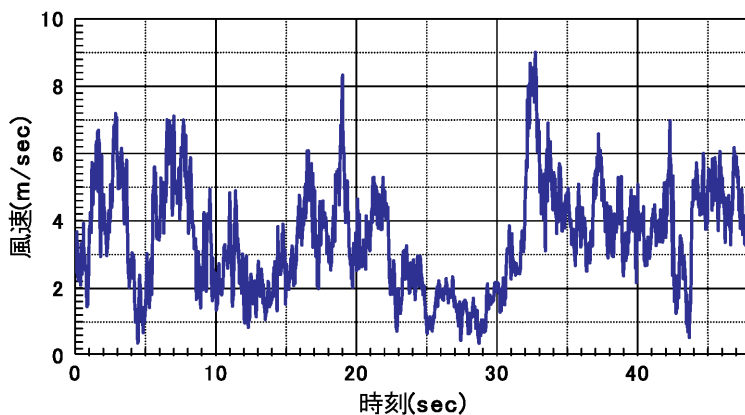


図-9 風速の時系列データ例

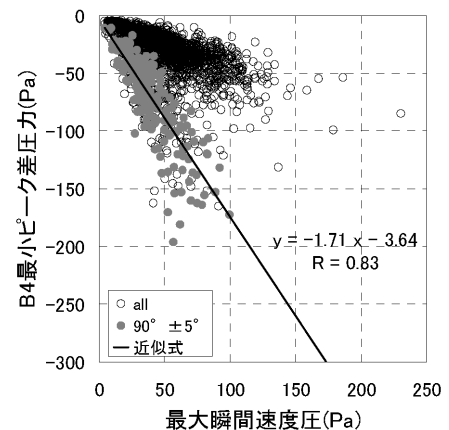


図-10 ピーク差圧力と最大瞬間速度圧

図-13(a)の結果を用いて、現行基準における接近流のガストファクターを1.5として換算した結果を図-13(b)に示す。図-13(b)によると、換算した設計用ピーク風力係数はB4、B5部分で-4程度、コーナー部以外ではおよそ1.0未満となり、これまでの風洞実験結果と概ね一致した。また、図-8(b)の最小ピーク風力係数において見受けられた風向角毎のばらつきも殆どなくなった。なお、48sec以外の評価時間についても、B4、B5部分の換算ピーク風力係数が-4程度となることを確認している。

## 5. まとめ

本研究により以下の知見を得た。

- 1) 建築物のコーナー部に位置するバルコニー手摺の風力は、特定の風向（本実験では風向角 $90^\circ$  付近）に

おいて非常に大きな値を示し、コーナー部以外のバルコニー手摺の風力は非常に小さくなることを野外実験により確認した。

- 2) 建築物のコーナー部に位置するバルコニー手摺において風力が大きくなる範囲を調べた結果、本実験では、コーナー部出隅からバルコニー出幅の2倍程度までの範囲であった。

- 3) 非定常性の強い接近流下で測定される野外実験において、「最大瞬間速度圧に対するピーク風力係数（瞬間ピーク風力係数）」が風力指標として有効である可能性を示した。また、その瞬間ピーク風力係数と接近流のガストファクターを用いて設計用ピーク風力係数に換算する方法を示した。

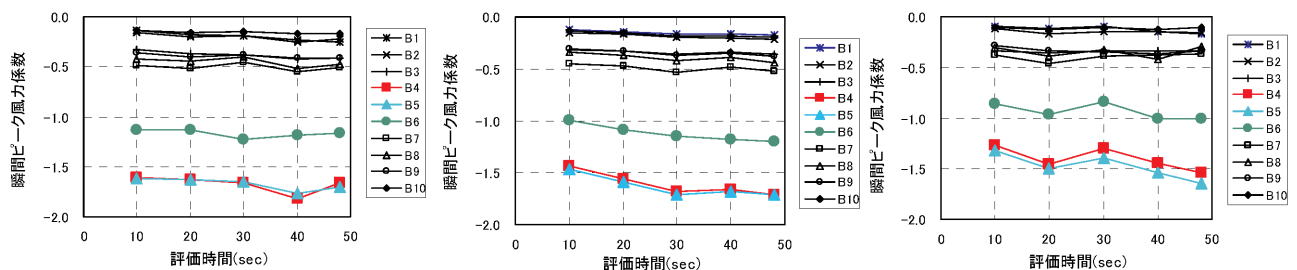


図-11 瞬間ピーク風力係数と評価時間

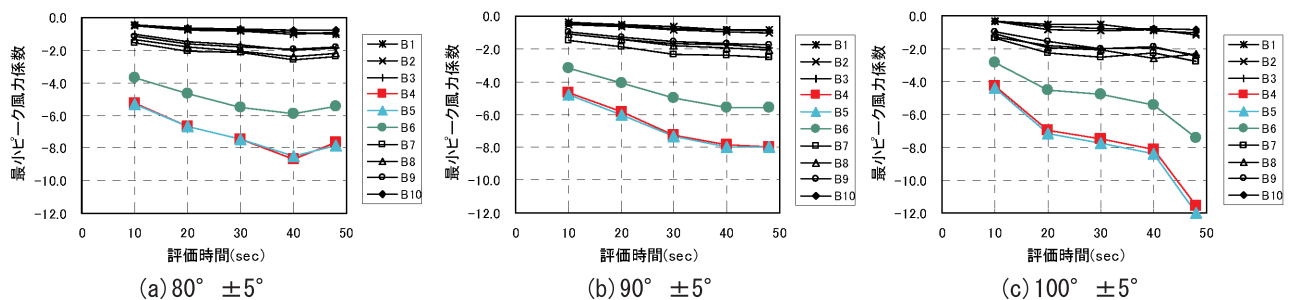


図-12 最小ピーク風力係数と評価時間

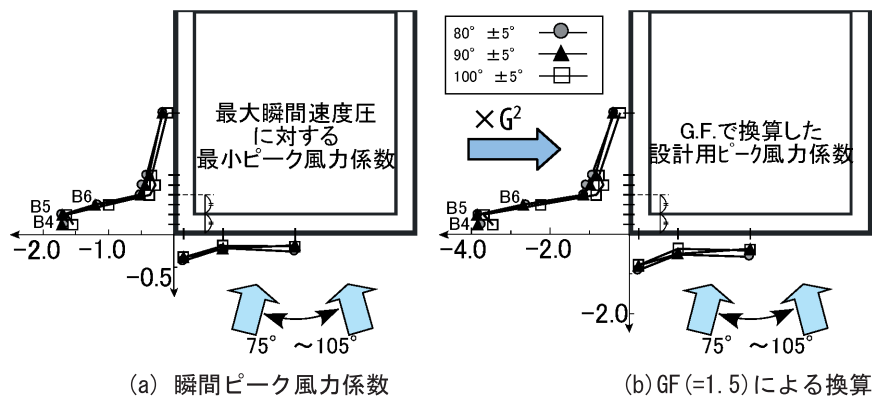


図-13 瞬間ピーク風力係数とG Fによる換算

最後に、本研究を行うにあたり、御指導を頂いた大阪市立大学建築防災研究室・谷池義人教授・工博および谷口徹郎准教授・博士（工学）、（株）長谷工コーポレーション・岡崎充隆氏、野外実験において御尽力を頂いた大阪市立大学工学部・中井重行講師（非常勤）に深く感謝いたします。

[参考文献]

- 1) 例えば、財団法人ベターリビング：優良住宅部品認定基準－墜落防止手すり－
- 2) 魏然、義江龍一郎、丸山勇祐：高層建物のパネル型手すりに作用するピーク風圧、日本建築学会大会学術講演梗概集B-1構造 I、pp.201-202、2000
- 3) 森脇一樹、岡崎充隆、谷池義人、谷口徹郎：集合住宅の手摺りに加わる風圧力の性状、日本建築学会大会学術講演梗概集B-1構造 I、pp.179-180、2003
- 4) Holmes,J.D.,Lewis,R.E.: Optimization of Dynamic - Pressure - Measurement Systems. I.Single Point Measurements, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 25, pp.249-273, 1987
- 5) 山内豊英、谷池義人、谷口徹郎：バルコニーを有する建築物の風荷重に関する研究 その1 風洞実験および結果の概要、日本建築学会大会学術講演梗概集B-1構造 I、pp.93-94、2004
- 6) 山内豊英、谷池義人、谷口徹郎：バルコニーを有する建築物の風荷重に関する研究 その2 バルコニー手摺に作用する風荷重の評価、日本建築学会大会学術講演梗概集B-1構造 I、pp.191-192、2005
- 7) 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に作用する風荷重、第19回風工学会シンポジウム論文集、pp.383-388、2006
- 8) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説2004、2004