

耐力および荷重の確率分布に基づく建築物外装材の耐風設計法に関する研究

～勾配の小さな切妻屋根をもつ建築物について～

建築防災研究室 上田 信

Abstract

現在外装材の耐風設計は、確定論的な荷重に基づいて行われている。また外装材の耐力も確定値として取り扱われている。しかし本来耐風設計には、耐力に関するばらつきや荷重効果に関する風速・風圧係数のばらつきなどを考慮した確率論に基づく設計法が必要である。一方で、外装材への要求事項の性格から構造設計者の関与が小さいという問題を抱えており、確率的な方法を必要とする難解な設計法は受け入れられにくい。そこで本研究では、確率論に基づきながらも比較的簡易な設計法を提案する。また、低層でアスペクト比の小さな大型工場建築物を想定して行った風洞実験結果に基づいて、現行基準の問題点を指摘するとともに超過確率が一律な設計用風圧係数を提案する。また、提案した設計法とこの風圧係数を用いて破壊確率が一律な設計用風圧係数を提案する。

1 はじめに

1.1 研究背景・目的

台風などの強風によって工場・倉庫等の産業施設には、屋根まわりを中心とした破損が生じるとともに、屋根葺き材に被害が生じた結果、雨の吹き込みによる製品や設備等への水漏れによる被害が発生している。

その一方で、現状における耐風性能において、主要構造体と外装材の間の落差が大きい。この背景には、2つの原因が考えられ、建築物外装材の耐風設計への構造設計者の関与が小さいということと、建築物外装材の破壊モードは複雑で耐風性能の評価が難しいということが挙げられる。外装材を耐風設計するにあたって、設計変数として耐力評価に関する材料強度、製作精度のばらつきや、荷重効果に関する風速、風圧係数のばらつきなどが存在する。特に、台風による強風の被害は発生間隔が長く、統計的データの収集が難しいことから、その大きさを確定論的に予測、推定する事は難しい。構造物の安全性を適正に評価するためには、これらのばらつきを適正に評価する必要がある。確率論的に安全性を判断するのに適した設計法として信頼性設計法があげられるが、信頼性設計法は確率の概念を基本としているので、ただでさえ構造設計者の関与が小さい建築物外装材の耐風設計に、このような新しい概念の設計法を現段階で取り入れることは現実的ではないと考えられる。

そこで本研究では、このような背景のもと、建築物外装材の耐風設計について比較的簡易な設計法を提案し、また、確率論に基づく設計用風荷重を提案することを目的とする。

1.2 研究概要

確率・統計の知識をあまり必要とせずに用いられるように、確率論を前提とした材料安全率を用いて構造物の性能を許容値で評価する設計法を提案した。

また、強風による被害が発生する割合の高い屋根外装材を対象とし、低層でアスペクト比の小さな大型工場建築物を想定して風圧実験を行った。現行基準の値が超過する確率を算定し、問題点を指摘するとともに超過確率が一律な設計用風圧係数を提案した。

次に、耐力のばらつきを考慮して提案する設計法を用いて破壊確率が一律な設計用風圧係数を提案した。

2 確率論に基づく許容値による設計法の提案

2.1 提案する設計式

提案する設計式を(2.1)式に示す。

$$R_a \geq S_r \quad (2.1)$$

ここで、 S_r は再現期間 r 年に対応する風速による荷重効果である。許容値 R_a は信頼性指標 β_a に基づいて評価される。許容値は、許容超過確率を設定することで求められる。

2.2 許容値の評価方法

本研究では、対数正規分布に従うと仮定した耐力 R について許容値を求める。耐力の確率分布と許容値との関係を図 2.2 に示す。耐力 R が対数正規分布に従う場合、許容超過確率 p_a に基づく許容値 R_a は次式で算定される。

$$\ln R_a = \mu_{\ln R} - \beta_a \sigma_{\ln R} \quad (2.2)$$

$$\mu_{\ln R} = \ln \frac{\mu_R}{\sqrt{1+V_R^2}} \quad \sigma_{\ln R} = \sqrt{\ln(1+V_R^2)} \quad (2.3)$$

(2.2)(2.3)式を用いて許容値は(2.4)式で示される。

$$R_a = \frac{\mu_R}{\sqrt{1+V_R^2} e^{\beta_a \sqrt{\ln(1+V_R^2)}}} \quad (2.4)$$

(2.4)式の分母は、材料安全率と考えることができる。図 2.3 に材料安全率と信頼性指標との関係、図 2.4 に材料安全率と許容超過確率との関係を示す。

同じ許容超過確率で設計するためには、耐力のばらつきが大きい部材では、ばらつきが小さい部材よりも大きな材料安全率をとる必要がある。

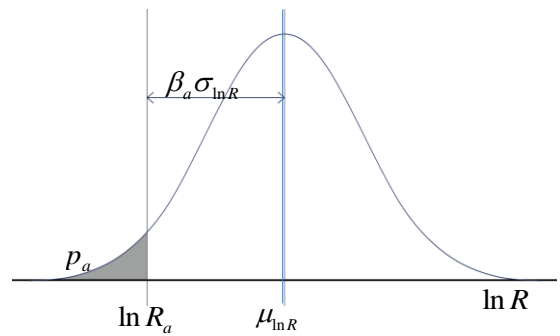


図 2.2 確率分布と許容値との関係

2.3 風速のばらつきによる荷重効果

設計風速は、建築物荷重指針・同解説¹⁾に従い設定する。再現期間からの設計風速算定法は、年最大風速がグンベル分布に従うという仮定に基づいて定められている。

ここで、再現期間 r 年に対応する風速による荷重効果 S_r を、荷重効果の年最大値の平均値 μ_s および年最大風速の変動係数 V_{Ua} を用いて次式のように近似する。

$$S_r = \{1 + (0.78 \ln r - 0.45) V_{Ua}\}^2 \cdot \mu_s \quad (2.5)$$

2.4 信頼性設計レベル 2 との比較

提案した設計法による耐風性能を荷重のばらつきを仮定して信頼性設計法レベル 2 により評価した。

まず、耐力の平均値 μ_R と荷重効果の年最大値の平均値 μ_s との比に関して、提案する設計法で要求する条件式を(2.1)式、(2.4)式、(2.5)式から以下のように求めた。

$$\frac{\mu_R}{\mu_s} \geq \sqrt{1+V_R^2} e^{\beta_a \sqrt{\ln(1+V_R^2)}} \{1 + (0.78 \ln r - 0.45) V_{Ua}\}^2 \quad (2.6)$$

次に、信頼性設計レベル 2 についても同様に耐力の平均値 μ_R と荷重効果の年最大値の平均値 μ_s との比に関する次式の関係を得た。

$$\frac{\mu_R}{\mu_s} \geq \sqrt{\frac{1+V_R^2}{1+V_{S50}^2}} e^{\beta_T \sqrt{\ln(1+V_R^2) + \ln(1+V_{S50}^2)}} e^{\{2(\mu_{\ln(U_{50}/\mu_{Ua})} - \mu_{\ln(Ua/\mu_{Ua})}) + 2(\sigma_{\ln U_{50}}^2 - \sigma_{\ln Ua}^2)\}} \quad (2.7)$$

(2.6)式と(2.7)式の右辺が等しい場合における、再現期間 r 年の風に対する限界状態許容超過確率に対応する信頼性指標 β_a と、基準期間 50 年における限界状態許容超過確率に対応する目標信頼性指標 β_T との関係が次式のように得られる。

$$\beta_a = \sqrt{1 + \left(\frac{V_{S50}}{V_R}\right)^2} \beta_T - \frac{2k(r, V_{Ua}) + V_{S50}^2}{2V_R} \quad (2.8)$$

$$k(r, V_{Ua}) = \ln \left[\frac{\{1 + (0.78 \ln r - 0.45) V_{Ua}\}^2}{e^{\{2(\mu_{\ln(U_{50}/\mu_{Ua})} - \mu_{\ln(Ua/\mu_{Ua})}) + \sigma_{\ln U_{50}}^2 - \sigma_{\ln Ua}^2\}}} \right] \quad (2.9)$$

図 2.5 に目標信頼性指標と信頼性指標との関係を示す。

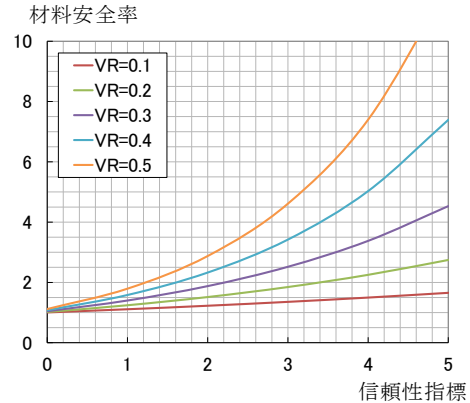


図 2.3 材料安全率と許容超過確率との関係

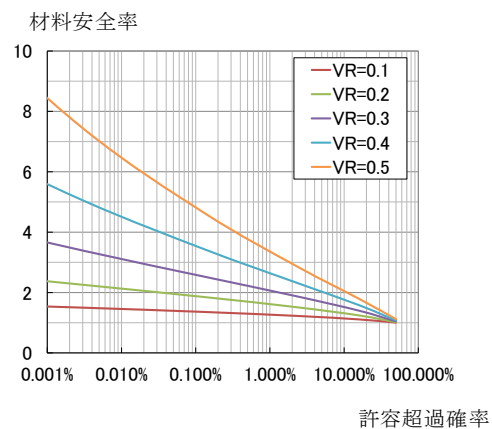


図 2.4 材料安全率と許容超過確率との関係

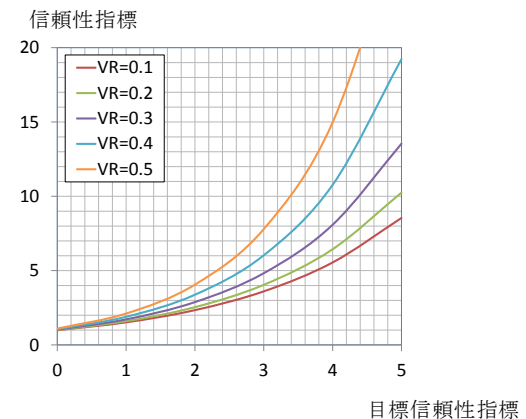


図 2.5 目標信頼性指標と信頼性指標との関係

3 外装材に作用する風圧力に関する風洞実験

3.1 実験概要

実験から得られる設計用風圧係数と現行基準における設計用風圧係数を比較し、設計用風圧係数の問題点を指摘するとともに、ピーク風圧係数のばらつきについて調べるために、勾配の小さな切妻屋根に作用する風圧力に関する風洞実験を行った。

本研究は、日本建築総合試験所所有のエッフェル型吹出風洞で行った。風洞実験に用いた4種類の模型は、縮尺 1:200、高さ $H=50$ mm が一定の低層工場建築物を想定した長方形平面で、長辺 ($W=100, 200, 400, 800$) と短辺 ($D=75, 150, 300, 600$) が 4:3、屋根勾配 5° の切妻屋根である。図 3.1 に模型の概要を示す。風洞気流は、地表面粗度区分 II 相当の境界層乱流(べき指数 $\alpha=0.15$) とし、風速は模型軒高さで 8.5m/s とした。実験は風向角 $\theta=0^\circ \sim 360^\circ$ まで 5° ピッチで時計回りに測定を行った。サンプリング周波数は 400Hz 、計測時間は 1 風向につき 12 秒とし、10 回測定を行った。

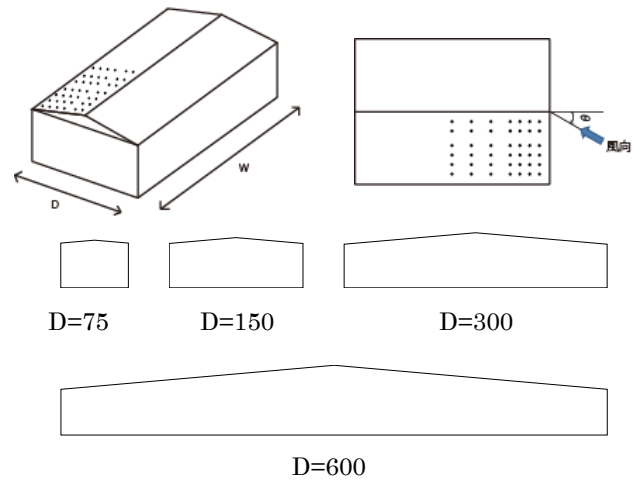


図 3.1 実験模型

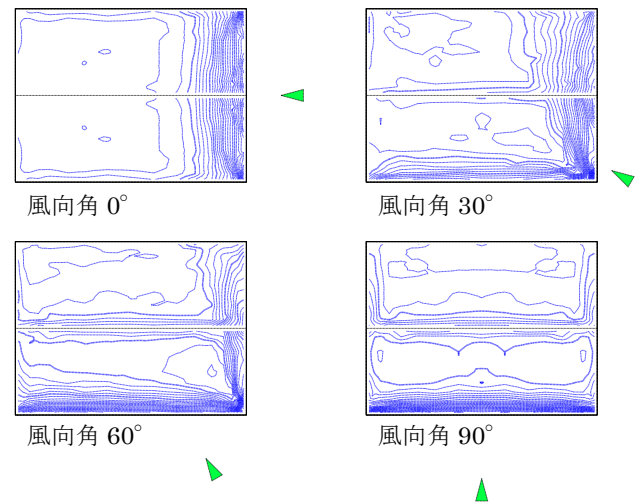


図 3.2 風向別ピーク風圧係数分布図

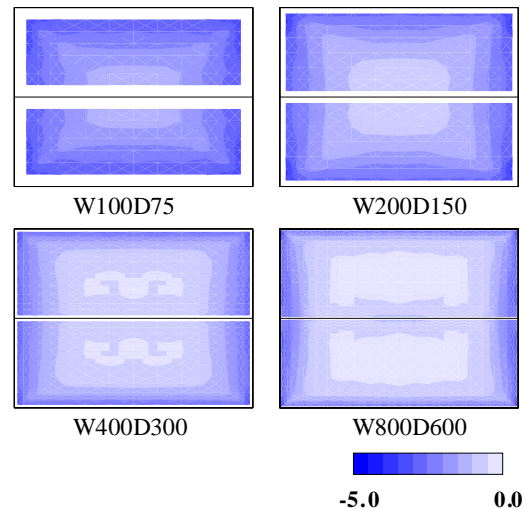


図 3.3 設計用風圧係数分布図

3.2 実験結果

図 3.2 に $W400D300$ の模型における風向角の違いによるピーク風圧係数の平均値の分布を示す。この図から、風向角 30° において、隅角部付近で円錐渦の影響がみられ、ピーク風圧係数が大きくなる傾向がある。また、棟付近でピーク風圧係数が大きくなる傾向がある。このことから、勾配が同じでも規模が大きくなると棟の高さが高くなり、棟周辺の風圧力に影響が出ていると考えられる。一方で、渦の再付着の影響により、屋根面中央部で、ピーク風圧係数は小さくなる傾向にある。

各点において 0° から 90° までのピーク風圧係数から最小の圧力をとったものを設計用風圧係数とし、図 3.3 にそれらの分布を示す。この図から、模型の規模が大きくなると、棟周辺の風圧力が大きくなる傾向がある。また、ピーク風圧係数の最小値をとる測定点は規模によらず隅角部から等距離にあった。

また、図 3.4 に、建築基準法による陸屋根の設計用風圧係数を示す。

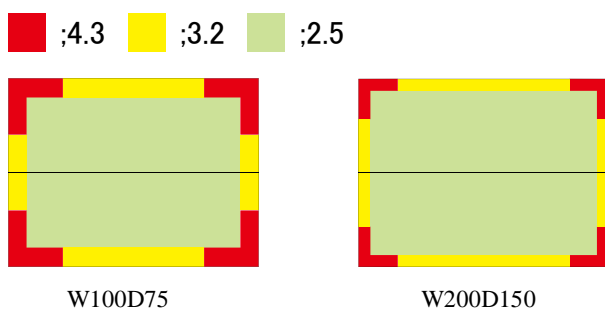


図 3.4 基準法による設計用風圧係数

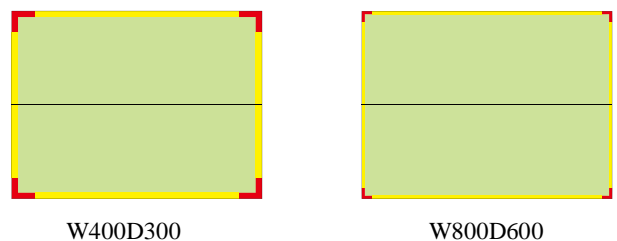


図 3.5 に W100D75 における風圧係数の変動係数について示す。この図から、ピーク風圧係数の変動係数は平均風圧係数の 2 倍程度大きい。また、ピーク風圧係数の平均値を使って外装材設計をする場合、ピーク風圧係数のばらつきは無視できるレベルにないと考えられる。

図 3.6 にピーク風圧係数の従う確率分布について、正規分布およびグンベル分布を用いて検討したものを示す。これらの図から、ピーク風圧係数の平均値のとする確率分布は、グンベル分布も正規分布も近く、近似できるレベルにあるが、本研究では確率分布を特定することはできなかった。

3.3 現行基準における超過確率

風洞実験によって、各点、各風向において測定されたピーク風圧係数を用いて、その平均値および標準偏差を求めた。それらの平均値と標準偏差を用いて、基準法による設計用風圧係数からの超過確率を求めた。図 3.7 に模式図を示す。図 3.8 に両確率分布に従った際の基準法の値を超える確率を示す。

超過確率を求めるにあたって、ピーク風圧係数が正規分布もしくはグンベル分布に近似できるかを検討した。以下に、実験により得られた知見を示す。

ピーク風圧係数がグンベル分布に従うと仮定した場合の方が正規分布に従うと仮定した場合よりも比較的大きな超過確率を示すものの、大きな差のないことがわかった。また、全体的に、現行基準による設計用風圧係数の境目付近で、超過確率が高くなる傾向があった。超過確率が 50%以上のエリアの屋根面の面積に対する割合は、形状が大きくなるにつれて、小さくなる傾向にある。一方で、屋根面の中央部付近で超過確率がほぼ 0%のエリアがあり、過剰設計になっている傾向にある。また、超過確率がほぼ 0%のエリアは形状の規模が大きくなるにつれて広がるという傾向にある。

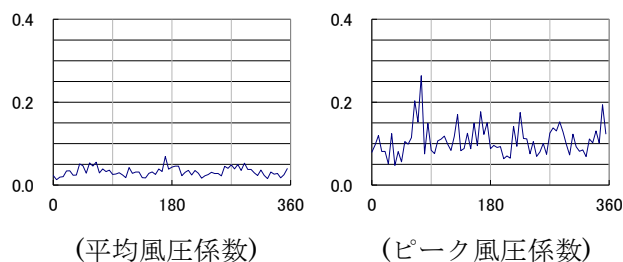


図 3.5 風圧係数の変動係数

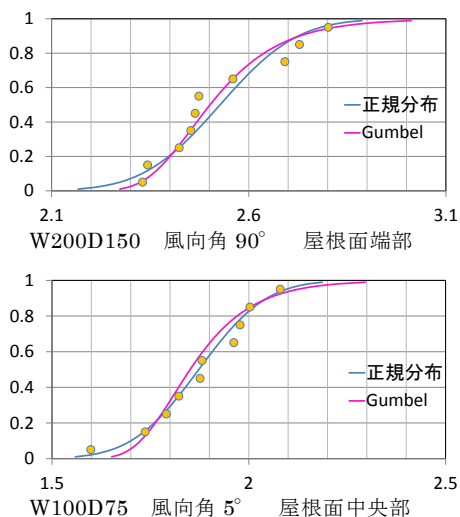


図 3.6 ピーク風圧係数の従う確率分布の検討

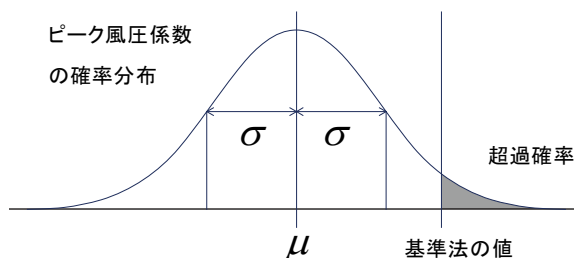


図 3.7 超過確率を求める際の模式図

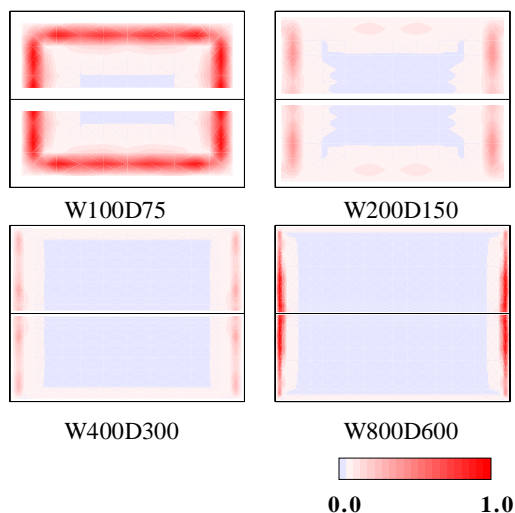


図 3.8 グンベル分布に仮定する場合

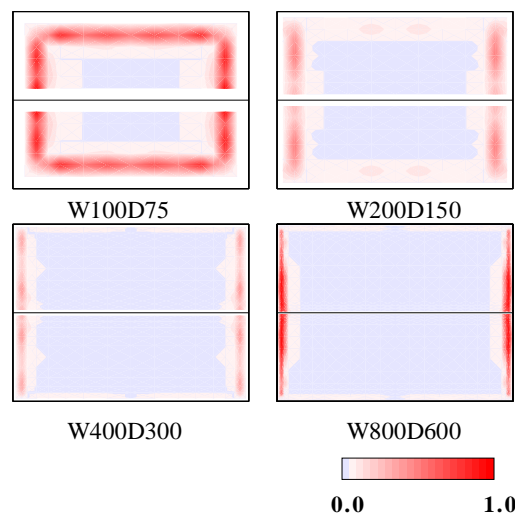


図 3.8 正規分布に仮定する場合

4 超過確率を考慮した設計用風荷重の提案

4.1 超過確率が一樣な設計用風圧係数の提案

屋根面において各点ごとに基準法からの超過確率が大きく異なるということは、ある点では危険であり、またある点では過剰設計になるということである。これでは、合理的な設計はできない。そこで、屋根面全体が一樣な超過確率になるような設計用風圧係数を提案した。超過確率を効果的に反映させるために、ピーク値の平均値と標準偏差の定数倍で表す。(4.1)式に、提案する設計用風圧係数の算定式を示し、図 4.1 に模式図を示す。

$$\hat{C}_{pe} = \mu_{\text{ピーク風圧係数}} + \alpha \cdot \sigma_{\text{ピーク風圧係数}} \quad (4.1)$$

ここで、 α は、ピーク風圧係数の余裕度であり、本論文において余裕度指標と定義した。表 3.1 に α を変化させた場合の非超過確率を示す。現在、外装材設計用風荷重で使われているピーク外圧係数は、風洞実験からえられたピーク風圧係数の平均値を使っており、これは $\alpha = 0$ を意味する。平均値であることから、ピーク風圧係数が正規分布に従うと仮定すると、平均値を超える確率は 50%、グンベル分布では約 43% となる。

図 4.2 に W200D150 の α を変化させた場合における超過確率が一樣な分布を示し、図 4.3 に α が変化した際の平均値からの増加量を示し、図 4.4 に基準法の値からの増加量を示す。 α の増加による風圧係数の増加傾向を調べ、考察した。以下に得られた知見を示す。

α の増加に従い、屋根面の端部上で妻側・平側共に隅角部から少し離れた場所で増加量が大きくなる傾向がある。現行基準と比較すると、 α の増加に従い、現行基準による設計用風圧係数の境目付近で、妻側・平側共に現行基準を超える値が大きくなる。一方で、屋根面の中央部付近では、 α の増加によらず現行基準を超えず、そのエリアは殆ど変わらない。

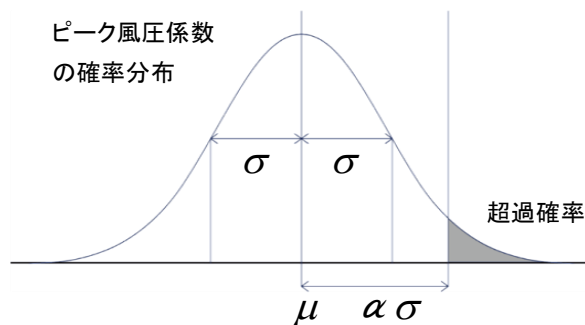


図 4.1 提案する設計用風圧係数と確率分布の関係

表 4.1 α と非超過確率

α	非超過確率	
	グンベル分布	正規分布
0	57.0%	50.0%
0.5	74.4%	69.1%
1	85.6%	84.1%
1.5	92.1%	93.3%
2	95.8%	97.7%
2.5	97.8%	99.4%
3	98.8%	99.9%

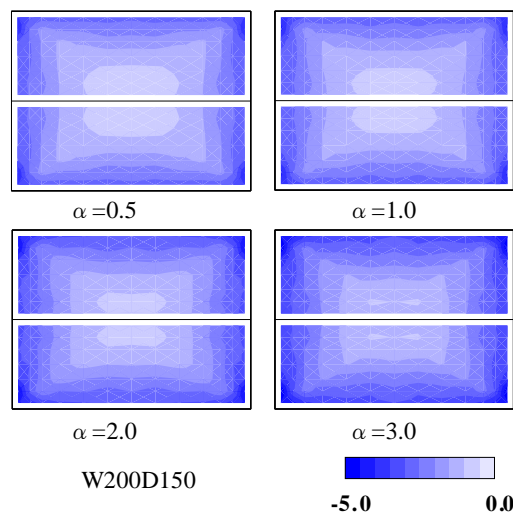


図 4.2 超過確率が一樣な風圧係数の分布

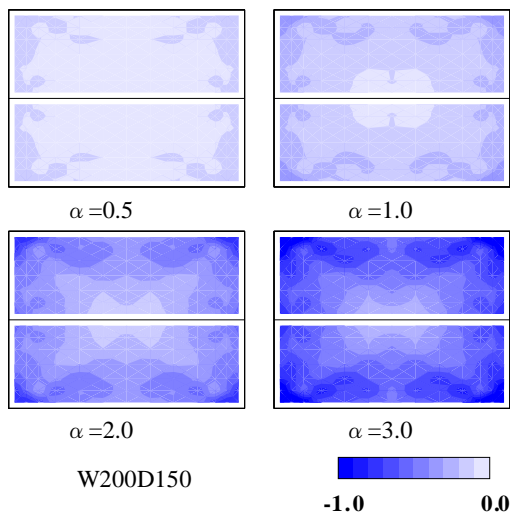


図 4.3 平均値からの増加量

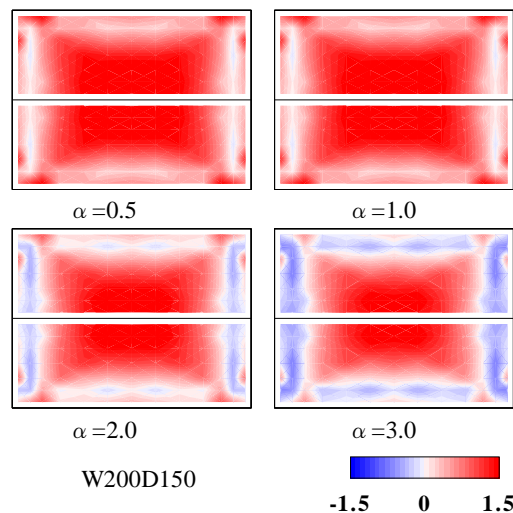


図 4.4 基準法の値からの増加量

5 破壊確率を考慮した設計用風荷重の提案

5.1 ピーク風圧のばらつきを考慮した設計式

設計用風圧係数を(5.1)式に表す。

$$\mu + \alpha\sigma = \mu \left(1 + \alpha \frac{\sigma}{\mu} \right) = \mu (1 + \alpha V_{s50}^*) \quad (5.1)$$

V_{s50}^* は、ピーク風圧係数の変動係数であり、信頼性設計レベル 2 においても、この項は存在する。

風圧係数のばらつきを考慮した設計式を以下に示す。

$$R_a \geq S_r (1 + \alpha V_{s50}^*) \quad (5.2)$$

(2.6)式と同様に、耐力の平均値 μ_R と荷重効果の年最大値の平均値 μ_S との比に関して以下の関係式を得た。

$$\frac{\mu_R}{\mu_S} \geq \sqrt{1 + V_R^2} e^{\beta_a \sqrt{\ln(1 + V_R^2)}} \{ 1 + (0.78 \ln r - 0.45) V_{Ua} \}^2 \cdot (1 + \alpha V_{s50}^*) \quad (5.3)$$

(2.8)式と同様に、(5.4)式が得られた。

$$\beta_a = \sqrt{1 + \left(\frac{V_{s50}}{V_R} \right)^2} \beta_T - \frac{2k(r, V_{Ua}) + \ln(1 + \alpha V_{s50}^*) + V_{s50}^2}{2V_R} \quad (5.4)$$

5.2 破壊確率が一樣な設計用風圧係数の提案

風洞実験により、屋根面の各点において、ピーク風圧係数の変動係数が異なることがわかった。そこで、この結果を用いて屋根面全体において破壊確率が一樣な設計用風圧係数を提案する。(5.4)式をピーク風圧係数の変動係数と余裕度指標の式に変形させる。

$$\frac{e^{-k} - 1}{V_{s50}^*} = \alpha \quad (5.5)$$

$$k = \left(\beta_a - \sqrt{1 + \left(\frac{V_{s50}}{V_R} \right)^2} \beta_T + \frac{2k(r, V_{Ua}) + V_{s50}^2}{2V_R} \right) \cdot 2V_R$$

(5.5)式から余裕度指標はピーク風圧係数の変動係数に依存することがわかる。目標信頼性指標、信頼性指標、耐力の変動係数を屋根面全体で一樣に設定し、風洞実験から得られたピーク風圧係数の変動係数を用いて、各点における α を求めた。求められた α を用いて、風圧係数を求めた。それは、屋根面全体において破壊確率が一樣な設計用風圧係数を意味する。破壊確率の異なる設計用風圧係数を示し、考察すると共に、提案した設計法の合理性を検証した。一例ではあるが図 5.1 に破壊確率が 2%、図 5.2 に破壊確率が 0.15% の設計用風圧係数を示す。以下に得られた知見を示す。目標信頼性指標、信頼性指標および再現期間の設定によって設計用風圧係数の分布は変化する。偶然ではあるが、実験によって得られたピーク風圧係数の平均値の分布と図 5.1 の条件下における屋根面全体の破壊確率が 2% の分布は殆ど変らなかつた。

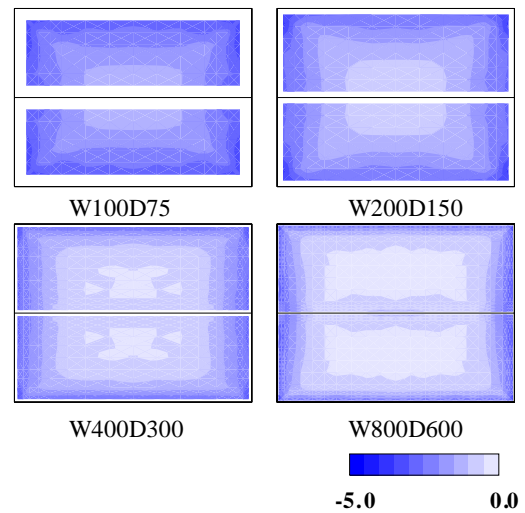


図 5.1 超過確率約 2% の風圧係数の分布 ($\beta_a=3$ $\beta_T=2$ $r=50$ $V_{Ua}=0.2$ $V_R=0.3$)

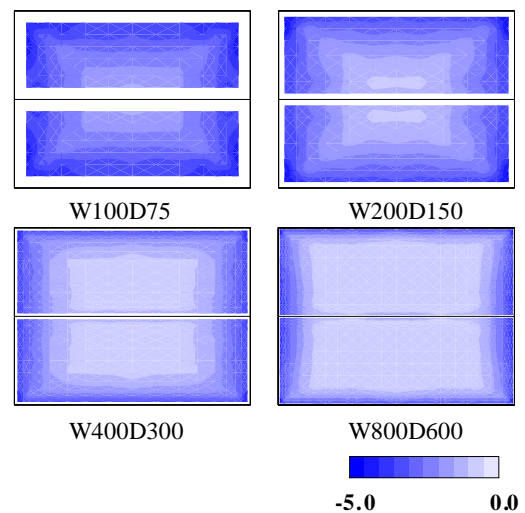


図 5.2 超過確率約 0.15% の風圧係数の分布 ($\beta_a=4$ $\beta_T=3$ $r=50$ $V_{Ua}=0.2$ $V_R=0.3$)

6 結論

提案する設計法では、耐力の変動係数と許容超過確率および再現期間を設定し、荷重効果が耐力の許容値以下であることを満たせば、性能は保証される。

ピーク風圧係数の変動係数の値は大きく、現在のアンサンブル平均値を用いて設計することは問題である。

建築基準法の設計用風圧係数の数値の境目で超過確率が大きくなり、一方で中央部では過剰設計になる傾向にある。また、再現期間 r 年の風が吹いたときに、屋根面全体で一樣な超過確率となる設計用風圧係数を示すことができる。提案する設計法を用いて、屋根面全体で基準期間 50 年内の破壊確率が一樣となる設計用風圧係数を示すことができる。

参考文献

- 1) 日本建築学会; 建築物荷重指針・同解説

◆討議 [谷口 与史也教授]

なぜ、実験模型を屋根勾配 5 度にしたか。

◆回答：建築基準法の設計用風圧係数は、屋根の勾配角によって分類され、設計用風圧係数を求める際の陸屋根の定義では、勾配角が 0 度から 10 度までとされています。勾配角が 10 度以上であれば、切妻屋根ないしは片流れ屋根となります。そこで、本研究では、勾配角 0 度と 10 度の間をとって屋根勾を 5 度としました。

◆討議 [谷口 与史也教授]

超過確率を一様となる設計用風圧係数を提案することで、現行基準から建物の性能はどう変化するのか、また、その設計趣旨について。

◆回答：建築基準法にある設計用風圧係数で設計した場合、屋根面全体において現行基準を超える確率が各点によって違うことが風洞実験の結果によりわかりました。それは、ある点では危険側にあり、またある点では過剰設計になっていることを示しています。そのような設計方法では合理的でないことに着目し、超過確率が一様となる設計用風圧係数を提案しました。提案した設計用風圧係数では、各自で性能水準を設定することができ、各エリアにおいて最適な設計用風圧係数が求められ、危険な設計および過剰設計が解消されます。

◆討議 [大島 昭彦教授]

屋根の設計は、複雑なのか

◆回答：台風被害の殆どが、構造体ではなく外装材に集中しています。また、外装材が壊れると雨水の浸入を許し、建物内部に損害を与えるだけでなく、構造体の破壊確率も上がると考えられます。これらから、外装材の耐風設計を構造体と同等に設計すべきであり、不用意に簡易な設計をすべきでないと考えます。

◆討議 [大島 昭彦教授]

なぜ、提案する設計法に、信頼性理論および確率の概念を持ち込む必要性があるのか。現在の設計法において合理的でない部分はどこか。

◆回答：現在の設計法では、決定論的に過去の経験から得られた安全率によって設計されています。そのため、安全性を定性的に評価できても定量的に評価することはできません。また、建築基準法の設計用風圧係数では、ある特定の形状や規模を対象としているため、それらの対象から外れると、建築基準法の風圧係数の値およびエリアでは対応できなくなる可能性があります。そのため、設計用風圧係数の境目付近では合理的な設計をすることができない可能性があります。これらの問題点を解決し、安全性を定量的に評価するためには、確率の概念を持ち込む必要があると考えられます。

◆討議 [山口 隆司教授]

構造技術者の関与が小さい外装材の耐風設計において、合理性を追求することは逆効果ではないのか。

◆回答：提案した設計法では、安全なエリアでは安全率は小さくし、危険なエリアでは安全率を大きくし、それらのエリアの荷重に見合った荷重を設定することができます。提案した設計法によって合理性を追求したからといって、必ずしも安全率を小さくするだけものではありません。故に、確率・統計の知識のない人が、不用意に安全率を小さく見込み設計するのではないかという懸念は、ほぼないと言えます。

もちろん、構造技術者の関与が小さい現状に、確率の概念を持ち込み、設計を難しくすることに少なからず抵抗があると考えます。だからこそ、提案した設計法のような確率論に基づきながらも、取扱いが易しい設計法が必要だと考えます。