

特集 「自然災害にそなえる」

陸屋根の耐風性能に関する確率的評価

片岡 浩人 染川 大輔 小泉 達也
 後藤 暁 川口 彰久 亀井 功
 (本店建築設計部)

Probabilistic Evaluation of Flat Roof's Wind Resistance Performance

Hiroto Kataoka Daisuke Somekawa Tatsuya Koizumi
 Satoru Goto Akihisa Kawaguchi Isao Kamei

Abstract

There have been frequent reports of roof failures or disengagement of roof cladding caused by strong wind associated with typhoons in recent years. Damage to double-deck panels of factory roofs and public gymnasiums are conspicuous cases. Once roof failure occurs during a typhoon, building contents and facilities are in peril, often causing significant financial loss. For risk management, it is important to assess the reliability of existing roof systems against wind-velocity increase stemming from future climate change and unexpected wind-load increase associated with internal pressure increase through wall failure due to flying debris. This paper examines the reliability of a low-rise building's flat roof against strong wind. Wind pressure distributions acting on the roof are measured by wind-tunnel experiments and their probabilistic distributions are modeled. Then, the probabilistic distributions of a double-deck panel's strength is modeled by tension load testing. Based on this strength model, the relation between a panel's fragility and wind velocity magnitude is presented. Finally, the fragilities of different roof sections under given wind velocity conditions are discussed along with both probabilistic distribution models of wind-loads and panel strength.

概要

近年、台風に伴う強風によって屋根外装材の被害が多く報告されている。特に工場や公共建物での金属製二重折板の剥離が目立つ。台風時にこれらの物件で屋根ふき材が剥離する事は、屋内の生産施設や在庫に重大な損害をもたらすことになる。将来の気候変動に伴う風速の増加や、飛来物による外壁損傷が内圧を増加させた場合に、既存の屋根ふき材の耐風信頼性を調べる事は、リスク管理の面から重要であると考えられる。そこで低層建物を対象として、陸屋根の耐風性能についての検討を行った。はじめに風洞実験により、屋根に作用する風力の超過確率分布の評価を行う。続いて金属二重折板の断熱金具を対象とした耐力の確率的評価を行い、その結果をもとに風速と破壊確率の関係について考察を行う。最後に、風荷重と耐力の両方の確率分布を仮定して、特定の風速条件下における部位別の破壊リスクの評価を行う。

1. はじめに

2004年に過去最多の10個の台風が日本に上陸し、各地に多くの人的および物的被害をもたらした。英国保険業協会の報告¹⁾によると、総損害額は1.7兆円、そのうち保険支払額は約8,000億円で、平年の2,800億円を大幅に上回っている。同報告では地球温暖化が継続した場合、2080年代には台風時の平均風速は6%増加し、最悪の場合には2004年の倍以上である3.8兆円の損害が発生すると予測している。建築物の供用期間を考えると、風速増加の影響は看過出来ない。

今後予想される風速の増大、あるいは接近中の超巨大台風に対して、建築物の耐風性能を事前に評価する事は、リスク評価や事業継続性の観点から有効である。そのため、信頼性設計に基づいた評価手法の導入が必要となる。こうした評価手法は、経験的に求められた安全係数を用いる設計に対比される設計法であり、従来の安全

係数を荷重(応力)、基準強度、社会的影響度などに分離し、合理的な設定を可能とするものである²⁾。耐風工学の分野では、川端³⁾が外装用板ガラスを対象として信頼性設計に基づく耐風設計手法を提案している。

2004年の台風にもなう強風被害で目立ったのは、大規模な金属屋根の損傷である。なかでも公共施設や倉庫を覆う金属製二重折板の剥離が複数報告されている⁴⁾。金属製二重折板は複数の部品から構成されていることにより、特定の製品であっても耐力のばらつきが大きい。従って板ガラスの様に、部材強度の確率分布を一概に定義し難い。しかし強風によりどこか一カ所でも剥離が生じると、浮き上がった外装材内側に正圧が作用する事となり、より大きな風力の発生に伴って、破壊が連鎖的に進行する。また飛散物などによって外壁に開口が生じた場合にも、内圧が急変し、破壊のきっかけとなる。金属製二重折板は、工場や倉庫の大規模な面積の屋根に使われる事が多い。台風時にこれらの物件で屋根ふき材が剥

離する事は、屋内の生産施設や在庫に重大な損害をもたらすことになる。

そこで低層の陸屋根を対象とした、風荷重に対する信頼性の評価を試みる。まず、風圧実験によって得られた荷重の確率分布の評価方法を検討し、風荷重の確率分布を用いた評価手法を試みる。次に、Fig. 1に示す二重折板のうち、断熱金具のみに着目し、耐力の確率的評価を行う。最後に、荷重と耐力双方の確率的評価をもとに、屋根に用いられる金属製二重折板の耐風性能診断例を示す。

2. 陸屋根に作用する風力の確率的評価

2.1 風洞実験

実験は大林組技術研究所所有の乱流境界層風洞（幅3m×高さ3m×長さ31m）で実施した。流入気流は、指針⁵⁾の粗度区分Ⅲの気流とし、模型頂部高さでの風速 U_H を10m/sとした。実験気流のプロファイルをFig. 2に示す。

対象となる工場建屋の形状を、長辺方向の見付幅150m、長辺：短辺：高さの比が4:2:1の直方体に設定した。これを縮尺1/200でモデル化し、風洞内で陸屋根に作用する風圧を測定した。実験模型の概要をFig. 3に示す。

測定点は屋根面の室外側に130点、室内側に66点。実験風向は、10°ピッチで36風向と、45°、135°、225°、315°の4風向を加えた全40風向で行った。データのサンプリング周波数は500Hz、サンプリング時間は60秒とした。

実験で得られた風圧係数は、屋根面の室内外の測定点（対応する点がない場合は最も近い測定点の値を用いた）での時系列上での差圧を求め、風力係数として評価を行う。8個の移動平均、6組のアンサンブル平均をとり評価時間を実時間で1秒相当とした。得られた風力係数の、全風向中での最小値の分布をFig. 4に示す。

2.2 風力の出現確率のモデル化

変動風力の確率分布に関する既往の研究では、川端³⁾が壁面の剥離領域を対象としてワイブル分布による近似を行っている。同様に植松⁶⁾も屋根面で変動風圧力の確率分布に対して、ワイブル分布近似を行っている。そこで、本研究でもワイブル分布による近似を試みる。

指針⁵⁾では、継続時間10分間中で評価時間が1秒のピーク風力（風圧）の値を求め、風力が作用する部材面積に応じた修正を加える事で、外装材用設計風荷重としている。これは評価時間1秒の時系列データ600個の中から選ばれた1個のピーク値、すなわち超過確率1/600=0.17%という確率の風力係数が、既存のピーク風力係数の基準であるとみなせる。そこで、本研究では既存の評価手法（指針）に基づいた風力係数と比較し、再評価を試みるため、この超過確率0.17%の値に着目することとした。

ワイブル分布の確率密度関数は次の式で定義される。

$$f(x) = \frac{k}{C} \left(\frac{x}{C}\right)^{k-1} \exp\left\{-\left(\frac{x}{C}\right)^k\right\} \quad (1)$$

ただし、 k は形状母数、 C は尺度母数を表し、風力係数

の平均値と標準偏差が求められることが可能である。

風向30°の場合の測定点a, bでの風力係数の超過確率と、ワイブル分布による近似結果をFig. 5に示す。測定点aは、

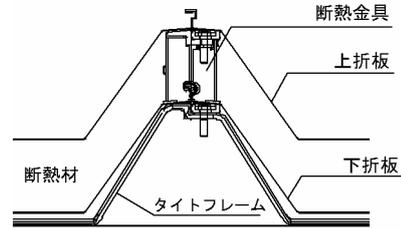


Fig. 1 二重折板の略図
Schematic of Double-Deck Panel

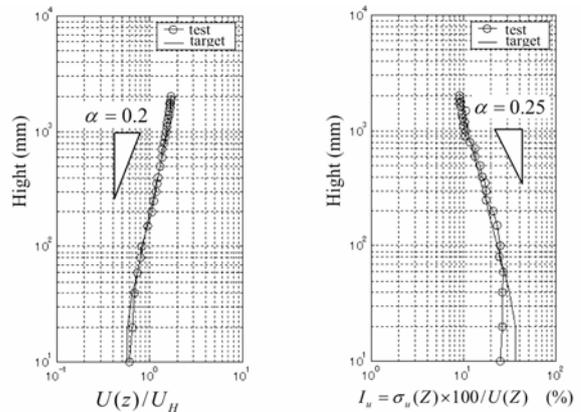


Fig. 2 実験気流の鉛直プロファイル
Vertical Profiles of Experimental Inflows.

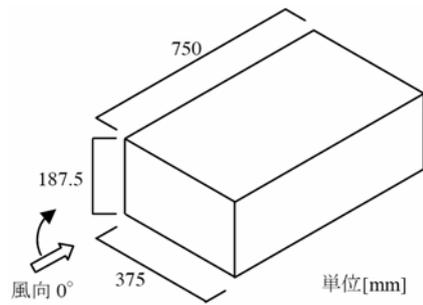


Fig. 3 風洞実験模型の概要
Schematic of Wind-Tunnel Experimental Model.

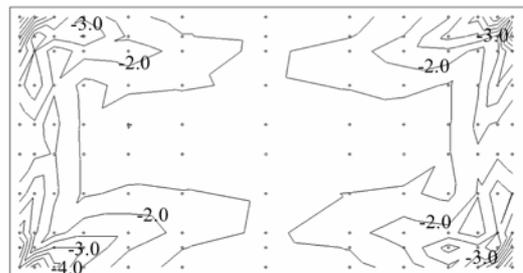


Fig. 4 最小風力係数の分布
Distributions of Minimum Wind-Force Coefficients.

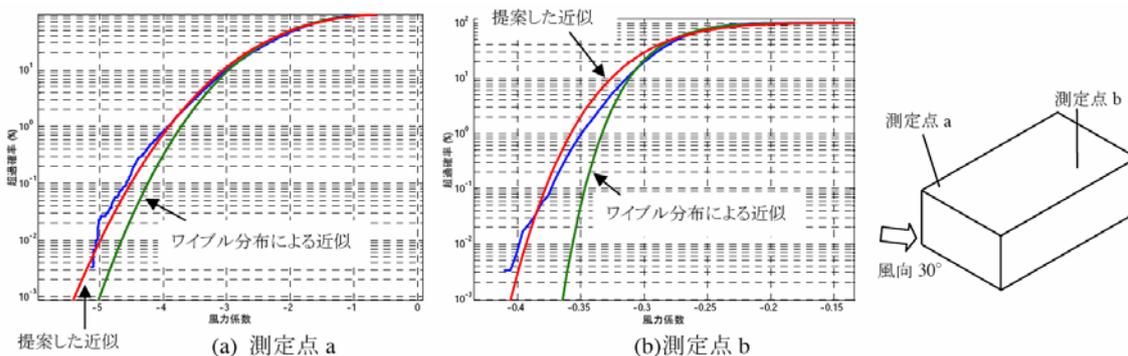


Fig. 5 超過確率の近似

Approximation of Exceedance Probability of Wind Force Coefficients.

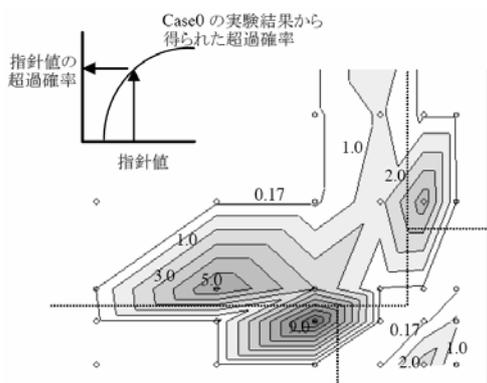


Fig. 6 指針の風力係数の超過確率(%)
Distribution of Exceedance Probability of
the AIJ Standard's Wind-Force Coefficients.

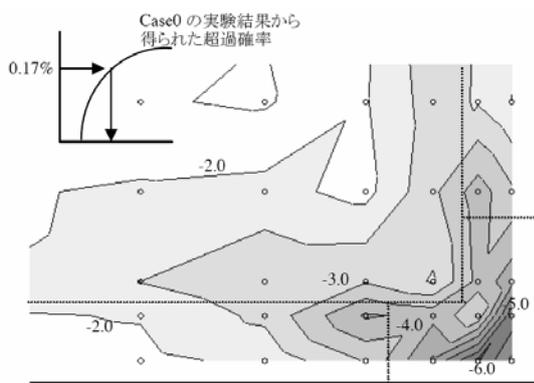


Fig. 7 超過確率が0.17%となる風力係数
Distribution of Wind-Force Coefficients
(Probability of Exceedance = 1/600).

円錐渦の影響を受けるような隅角部の測定点であり、測定点bは、屋根面中央付近の一般部として分類される測定点である。両測定点共に、超過確率0.17%付近では実験結果と近似結果は大きく異なっている。

そこで、超過確率0.01~1%の範囲で実験結果との差が最小となるよう、最小二乗法を用いてk値のみ修正を行った。Fig. 5に提案した近似として示した曲線が、新たに求めたkを用いた結果である。いずれの測定点で場合も、対象とする超過確率0.17%付近において、純粋なワイブル分布による近似に比べると良好な近似となった。以後の考察はこの近似方法に基づき行う。

2.3 出現確率に基づく風荷重の提案

はじめに、荷重指針に示されている屋根面の風力係数の超過確率について検討を行う。実験結果の超過確率の曲線を用いて、指針の風力係数の超過確率を求めた。求めた超過確率のうち全風向での最大値をプロットしたものの一部がFig. 6である。図中の破線は指針に示された領域別けのラインで、-5.4 (隅角部), -3.2 (軒部), -2.5 (一般部)が指針に示された風力係数である (局部風圧低減係数は1)。図の様に、各領域の境界付近で超過確率が0.17%を超える。これは実験のピーク風力係数というよりも、指針の風力係数が境界を挟んで値が急変することに起因する。超過確率から判断すると、風力係数 (風

圧係数) 設定時の領域分けには、注意が必要である。

次に、超過確率が0.17%となる風力係数の全風向中の最小値の分布をFig. 7に示す。各領域の境界を示す破線にまたがって、絶対値が大きい風力係数の分布が形成されている。本実験結果に基づいて、屋根面全体で超過確率0.17%以下になるような風力係数を設定するとすれば、指針に示された値を隅角付近で2割程度割り増すことが必要であると言える。

3. 金属折板屋根断熱金具耐力の確率的評価

3.1 断熱金具の破壊確率

2004年の台風による二重折板屋根の被害報告では、断熱金具耐力のばらつきと、鋼板の熱伸縮による固定強度の低下の可能性が指摘されている⁴⁾。そこで、断熱金具耐力のばらつきに着目し、二重折板の試験体に対して行った引張り試験結果⁷⁾に基づいて確率的評価を行う。対象となる試験体は49ケース (4メーカー)。試験体を釣り上げて断熱金具に引張り力を与え、荷重・変位曲線から降伏耐力を求めた。引張り試験の状態をPhoto 1に示す。

耐力のばらつきが正規分布であるとみなした場合、荷重Sに対する破壊確率 $P_f(S)$ は次式となる。



Photo 1 二重折板試験体の引張り試験
Tension Load Testing of Double-Deck Panel

$$P_f(S) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(S-\bar{R})^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (2)$$

\bar{R} : 耐力 R の平均値[N]
 σ : 耐力 R の標準偏差[N]

あるいは対数正規分布とみなせる場合には次式となる。

$$P_f(S) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_L S} \exp\left\{-\frac{(\ln S - \bar{R}_L)^2}{2\sigma_L^2}\right\} \quad (3)$$

\bar{R}_L : 耐力 R の対数平均値
 σ_L : 耐力 R の対数値の標準偏差

得られた降伏耐力を正規分布および対数正規分布で近似した結果をFig. 8とTable 1に示す。

Table 1 断熱金具耐力の試験結果 (サンプル数49)

Results of Tension Load Testing		
正規分布	$\bar{R}=5.085$ [kN]	$\sigma=1.949$ [kN]
対数正規分布	$\bar{R}_L=1.540$	$\sigma_L=0.444$

以下では、この試験結果をもとに強風の再現期間と破壊確率の関係について考察を行う。

3.2 強風の再現期間と破壊確率

検討に際して、以下の仮定を用いて問題を単純化した。

- ・断熱金具の破壊確率分布は対数正規分布で近似
- ・板ガラスの例⁸⁾に倣って、設計耐力と荷重が等しい時

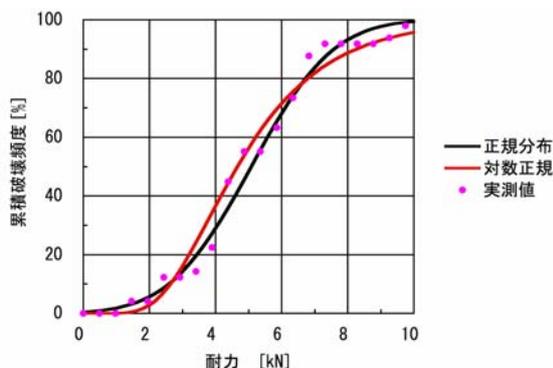


Fig. 8 二重折板断熱金具の累積破壊頻度 (引張り力)
Fragility Curves of Double-Deck Panel Taps (Tension Loading)

の破壊確率が0.1%になるよう、安全率 (荷重の対数平均耐力に対する比) は3.94に設定

- ・強度は断熱金具の取り付け間隔に依存するが、ここでは間隔が設計風荷重と完全に一致する理想状態を仮定最後の仮定により、屋根高さや取り付け位置に関わり無く、二重折板の破壊確率を評価できる。

建設場所が東京で、設計用風荷重を再現期間50年、100年、200年の各風速で与えた場合、強風による破壊確率がどのように変化するか求めた結果をFig. 9に示す。再現期間と風速の関係は指針に従い次式で求めた。

$$U_r = 0.63 \left(\frac{U_{500}}{U_0} - 1 \right) \ln r - 2.9 \frac{U_{500}}{U_0} + 3.9 \quad (4)$$

r : 風速の再現期間 (年)
 U_r : 再現期間 r 年の風速
 U_0 : 基本風速 (再現期間100年)
 U_{500} : 再現期間500年の風速

仮定により、各曲線が破壊確率0.001の横軸と交差する時の再現期間は、それぞれ設計用再現期間に一致する。

3.3 上空の風速と破壊確率

次に横軸を再現期間のかわりに風速を用いて、破壊確率との関係を示す。設計風速は建物高さや周辺の状況によって変化するため、ここでは上空風速で代表させる。

風速と二重折板の破壊確率をFig. 10に示す。図中、 P_e は上空の風速に基づいた風力に対する破壊確率を示す。風速値が大きくなると、作用する風力が増大するので、二重折板の破壊確率は一様に増加する。一方 P_l は、風速の年間の出現確率を加味した破壊確率である。強風になるに従って出現確率が減少する。従って、ある風速をピークに、当該風速における年間の破壊確率は減少する。 P_{100} は、同様に供用期間を100年に設定した際に、供用期間中の強風の出現確率を考慮した破壊確率である。

Fig. 10に示した破壊確率から累積頻度を算出すると、Fig. 11となる。累積頻度は高風速側で一定値に漸近する。この漸近値が年間あるいは100年間における真の破壊確率である。例えば、再現期間50年の風速で設計された二

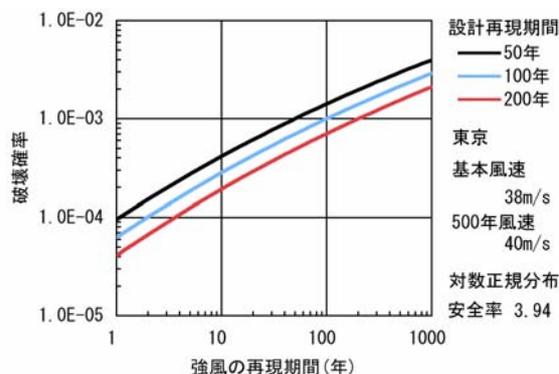


Fig. 9 強風の再現期間と破壊確率
Return Period of Wind Velocity vs. Fragility

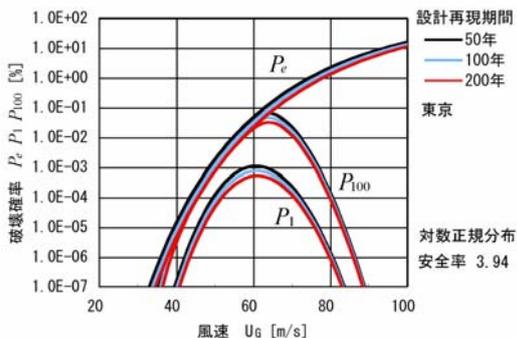


Fig. 10 上空の風速と二重折板の破壊確率
Wind Velocity in the Above Air vs. Fragility

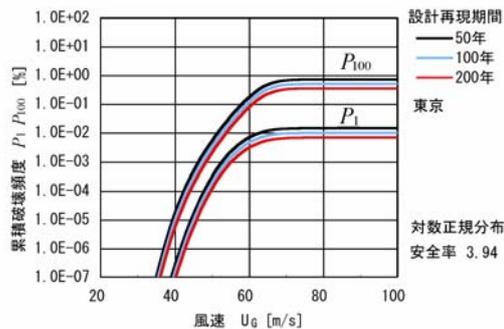


Fig. 11 上空風と二重折板累積破壊頻度
Wind Velocity in the Above Air vs. Accumulated Fragility

重折板は、1年間で約0.01%の割合で、あるいは100年間使い続けると約1%、すなわち100ヶ所の断熱金具のうち1カ所の割合で、風荷重により降伏に至ることとなる。

3.4 強風被害リスクの低減

Table 2は、上記の検討をふまえた、設計再現期間を長くする事による、断熱金具の破壊リスクが低減する効果を示している。値は、再現期間50年を設計風速とした時の確率を基準とし、再現期間を100年または200年に変更した場合の比を示している。この場合、設計再現期間の変更による風力の増加は高々10%以内であるのに対して、リスクは半分程度にまで抑える事が可能になる。

Table 2 東京における断熱金具破壊リスクの低減効果
Effect of Design Wind-Loads on Fragility at Tokyo

設計再現期間	50年	100年	200年
設計風力の比	1.00	1.05	1.07
年間の累積破壊確率の比	1.00	0.69	0.47
100年の累積破壊確率の比	1.00	0.70	0.49

4. 金属折板葺き陸屋根の耐風性能評価

4.1 評価対象となる建物の条件

3では、仮定条件のもと理想状態で評価を行った。ここでは、東京湾岸に建つ倉庫を想定し、屋根に用いられる二重折板の耐風性能診断例を示す。風速と外壁の開口条件を変え、風力係数と耐力の確率分布を用いて断熱金

Table 3 検討対象とした建物条件
Conditions of the Examined Building

建物形状	200m×100m×45m ^H
設置場所条件	東京湾岸 粗度区分II
基本(再現期間100年)風速	38m/s
再現期間500年風速	42m/s
屋根外装材用風力係数	一般部 2.5
	軒先 3.2
	隅角部 5.4
断熱金具負担面積	一般部 0.75m ²
	軒先 0.75m ²
	隅角部 0.45m ²

具の耐風性能評価を行う。

想定した格納庫の緒元をTable 3に示す。設計風荷重は、指針の再現期間100年の風速をもとに設定されているものとする。二重折板断熱金具の耐力は、Table 1に示した正規分布を仮定した。

断熱金具の負担面積は、軒先および隅角部では、指針で示される風荷重に対する断熱金具の平均耐力の比、すなわち安全率が、それぞれの部位で約2となる値とした。また屋根一般部では、軒先と同じ負担面積とした。

4.2 風荷重の確率分布のモデル化

2で述べた風洞実験で、外壁に開口が無い場合と、シャッターが飛来物によつた開いた場合の2ケースを対象として、屋根の風力係数の確率分布をモデル化した。モデル化に際し、指針に従って屋根の領域分けを行い、各領域で風力係数が最小となる測定点での頻度分布を、以下に示すワイブル分布で近似した。

$$f(x) = \frac{k}{C} \left(\frac{|x| - S}{C} \right)^{k-1} \exp \left(- \left(\frac{|x| - S}{C} \right)^k \right) \quad (5)$$

x : 風力係数
 C, k, S : 実験結果の近似結果から求める

各ケース、部位別の係数をTable 4に示す。

4.3 断熱金具耐力と風荷重の確率分布

以上の条件を用いて、風速が再現期間100年、200年、500年の場合の、断熱金具耐力と風荷重の確率的評価を部位別に行った。Fig. 12には検討結果の中から、軒先と隅角で風速を再現期間100年または500年に設定した場合と、

Table 4 開口ケース、屋根部位別のワイブル係数
Weibull Parameters for Roof Sections
with or without Openings on the Wall

	部位	一般部	軒先	隅角
開口無し	C	1.24	1.41	2.73
	k	4.24	2.39	2.98
	S	0.29	0.00	1.33
開口有り	C	1.29	1.86	2.99
	k	3.36	3.77	3.23
	S	0.60	0.57	1.63

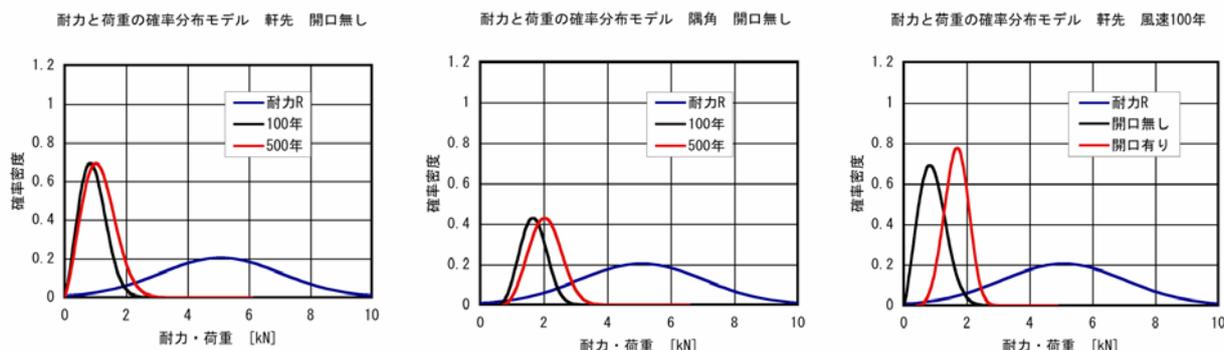


Fig. 12 各部位における速度別または開口条件別の断熱金具耐力と風荷重の確率分布

Probability Distributions of Wind-Loads and Panel Tap's Strength at Roof Sections with Different Velocity or Opening Conditions

軒先で再現期間100年の風速時に開口が無い場合と開いた場合の、各確率分布の比較を示す。また、各ケースの破壊確率をTable 5にまとめて示す。

各部位、各風速条件共に外壁に開口が開いた場合には、破壊確率が大きく上昇する。特に隅角における影響が大きい。断熱金具の数は一般部だけで80m×180m÷0.75m²=19200ヶ所である。従って設計風速時（再現期間100年）には、外壁に開口が生じると少なくとも123ヶ所、再現期間500年に相当する風速の場合には、359ヶ所で断熱金具が降伏に至るといった評価になる。

- ・二重折板屋根の断熱金具の耐力を、引張り試験結果からモデル化し、風速の再現期間と破壊確率の関係を求めた。設計耐力を10%程度増す事で、供用期間内の破壊確率が半分程度に抑えられる。
- ・東京湾岸の倉庫を想定し、風速条件下での耐風性能診断を行った。外壁に開口が開くと、隅角で降伏に至る確率が高い。軒先や隅角などの屋根端部の破損は、最終的には屋根全体への破壊につながる。設計荷重を僅かに増すだけで供用期間内の破壊確率が大きく低下することを念頭に、これらの部位の設計にあたってほしい。

Table 5 開口ケース、屋根部位別の破壊確率
Failure Probabilities of Each Roof Sections
with or without Openings on the Wall

風速の 再現期間	部位別破壊確率[%]			
	開口	一般部	軒先	隅角
100年	無し	0.07	2.25	2.10
	有り	0.64	4.95	8.59
200年	無し	0.11	3.01	2.96
	有り	1.04	5.94	10.6
500年	無し	0.22	4.22	4.50
	有り	1.87	7.53	13.8

5. まとめ

陸屋根に作用する風荷重と、二重折板屋根の断熱金具耐力の確率分布をモデル化し、破壊確率の評価を行った。得られた知見を以下に示す。

- ・風圧実験結果によると、10分間中のピーク値に相当する超過確率を持つ風力係数は、指針で示されている風力係数に対して隅角付近で2割程度の割増しが必要である。

参考文献

- 1) Association of British Insurers, Financial Risks of Climate Change: Technical Annexes, (2005)
- 2) 市川昌弘: 構造信頼性工学-強度設計と寿命予測のための信頼性手法-, 海文堂出版, (1996)
- 3) 川端三朗: 外装用板ガラスの耐風設計に関する研究, 東北大学博士論文, (1996)
- 4) 日本風工学会風災害研究会: 2004年の強風災害に関する調査報告書, (2005)
- 5) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, (2004)
- 6) 植松康, ニコラス・イシモフ: 低層建築物に作用する局部風圧力に関する研究 その2 変動風圧力の確率・統計的性質について, 風工学会誌第72号, pp. 11-19, (1997)
- 7) 時野谷浩良, 鈴木康正, 浅井英克: 折板葺屋根の負圧耐力性能に関する検討 その1-3, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp. 849-854, (2006)
- 8) 板硝子協会: 板硝子協会推奨基準, (2001)