

外装材を対象とした強風リスク評価

Study on Risk Estimation of Wind Disaster for Components and Cladding

作田 美知子 MICHIKO SAKUTA
岩本 毅 TAKESHI IWAMOTO

建物の耐風性能を定量的に把握する方法として、強風により建物が受ける被害を確率的に求める強風リスク評価がある。強風による被害は主に屋根や外壁面などの外装材であるため、建物の外装材を対象とした強風リスク評価を構築した。リスクを損傷確率とそのときの建設（修復）コストで表し、強風の発生確率、部材耐力の確率分布、建設コストに基づいてリスクを算出する。強風リスク評価の評価尺度は、再現期間 475 年（50 年間に 10%の確率で生じる強風）の荷重レベルによる損失期待値を外装材の建設コストで除した値と定義する。本論文では、外装材の部材耐力に基づいた強風リスク評価手法の概要と物流倉庫のリスク評価事例について述べる。

キーワード：強風災害，リスク評価，外装材，物流倉庫

One of the method for comprehending the wind resistant performance in a quantitative way is risk estimation of wind disaster. Most of damages due to strong wind are failure of components and cladding, rather than failure of structural frame. Therefore, risk estimation of wind disaster is considered for components and cladding. In this paper, the wind risk is defined as damage probability multiplied by repair cost against wind load corresponding to return period of 475 years and the risk estimation procedure is proposed taking event probability of strong wind, resistance probability of components and repair cost into account. A calculation example for logistic warehouse using the proposed method is also shown.

Key Words: Wind Disaster, Risk Estimation, Components and Cladding, Logistics Warehouse

1. はじめに

建物の耐風性能を定量的に把握する方法として、強風により建物が受ける被害を確率的に求める強風リスク評価がある。統一された手順と評価指標により強風リスクを評価すれば、対象建物の耐風性能を他の建物と比較し相対的に把握することが出来る。

これまでの強風リスクに関する研究は、例えば近藤ら¹⁾は住戸の被害調査結果に基づいた被害率曲線を用いてリスク評価を行っている。また、川口ら²⁾はオフィスビルを対象としたリスク評価として窓ガラスの破損確率により評価する手法を提案し、喜々津ら³⁾は折板屋根を対象としたリスク評価を試みている。これらのリスク評価は過去の被害調査に基づいたリスク評価であったり、一部の部材に注目したリスク評価である。米国において

は、アメリカ合衆国連邦緊急事態管理庁（FEMA）により自然災害リスク評価システム HAZUS^{4),5)}が構築されているが、これは米国内の広域災害を対象としており、日本における個々の建物を対象とした強風リスクを評価するには適さない。

そこで、筆者らは外装材の部材耐力に基づいて強風リスクを評価する手法を提案する。建物を構成する各外装材の部材耐力に基づいたリスク評価であれば、さまざまな用途の建物のリスクを評価することができる。また、対象とする建物の中で最もリスクが高い部位（外装材）を抽出できるため、強風に対して補強すべき部位の優先順位が把握でき、建物の耐風性能の向上に対して有効である。本報では部材耐力に基づいた強風リスク評価手順と評価の一例として物流倉庫のリスク評価事例について示す。

2. リスク評価手法

近年の強風による被害は、屋根や外壁、窓などの外装材で多く発生している。強風により外装材の一部が破損すると内圧の変化により被害が拡大し、建物内部にも被害が生じることもある。このため、強風による外装材の被害は重大な損害に発展する恐れがある。ここでは、外装材を対象とした強風リスク評価を示す。強風リスク評価のフローチャートを図-1 に示す。リスクを損失の期待値、すなわち損傷確率×建設（修復）コストと表し、強風の発生確率、部材耐力の確率分布、建設コストに基づいてリスクを算出する。

リスク評価の手順は以下の通りである。はじめにリスク評価の対象とする外装材を抽出する。例えば、物流倉庫の場合、外壁、屋根、窓ガラス、シャッター・ドアの4つの部材をリスク評価の対象とする。次に、各部材に加わる最大荷重と部材耐力の確率分布から部材毎の損傷確率を求める。併せて、各部材の建設コストを把握する。最後にイベントツリー解析により損失期待値を算出し、提案するリスクの評価尺度により強風リスクを評価する。以下に、リスク評価の各項目について述べる。なお、図-1 中の「建物（部材）の劣化」、「飛散物による破壊」、「内圧の変化」、「休業による損害」は、現段階では考慮していないが、いずれの項目も強風リスクを評価する上では重要な項目であり、今後検討を行う予定である。

(1) 強風の発生確率

風速と再現期間の関係は「建築物荷重指針・同解説（以下、荷重指針）」⁶⁾を用いる。最大荷重の確率分布は対数正規分布に従うと仮定する。最大荷重の平均値は、荷重指針の外装材設計用風荷重算定式を用いて、評価風速から求まる速度圧に検討部位の外装材設計用ピーク風力係数を乗じた値とする。評価風速は、建設地の基準風速、粗度区分および評価する荷重レベル（再現期間）から求める。外装材設計用ピーク風力係数は、荷重指針もしくは風洞実験により求めた値を用いる。最大荷重の変動係数は0.2~0.4とする。

(2) 部材耐力の確率分布

部材耐力の確率分布は板ガラスについては対数正規分布で表され、文献⁷⁾によりその妥当性は確認されている。他の外装材については検証データが少ないが、ここでは、部材耐力の確率分布も外力と同様に対数正規分布を仮定する。部材耐力の平均値は設計図書等に基づいて設定する。設計図書などが入手できない場合には、対象

建物設計時の建設省告示に準じて各部材の設計風荷重を算出し、設計荷重に安全率を乗じた値を部材耐力の平均値として用いる。安全率は各部材の業界団体の推奨値を参照し1.5~3.0⁸⁾とする。部材耐力の変動係数は0.2~0.3⁹⁾とする。

(3) 建設コスト

必要となる建設コストは、リスク評価の対象とする各外装材の建設（修復）コストである。建設コストは建設時の見積書等に基づいて設定する。ただし、建設時と評価時の期間が長い場合には、建設工事費デフレーター⁹⁾により、評価時の建設コストに換算する。建設工事費デフレーターの一例を図-2 に示す。見積書等の建設コストに関する資料がない場合には、文献¹⁰⁾などの一般的な建設コストデータに基づいて部材毎のコストを算出する。

(4) 部材の損傷確率と損失期待値の算出

最大荷重と部材耐力の関係は図-3 のように表され、

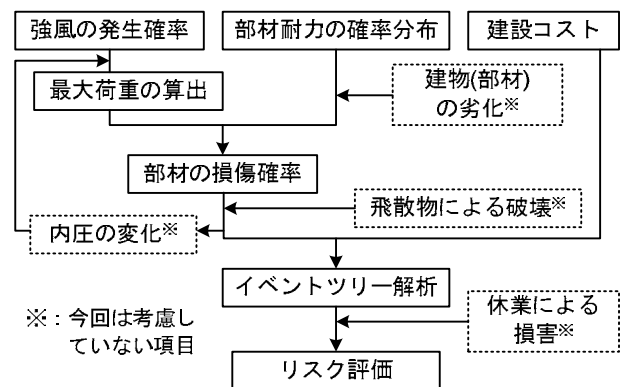


図-1 外装材を対象とした強風リスクの評価フロー

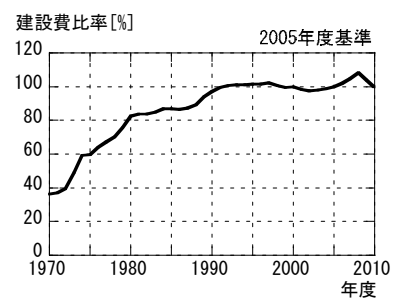


図-2 建設工事費デフレーター（S造、非住宅）

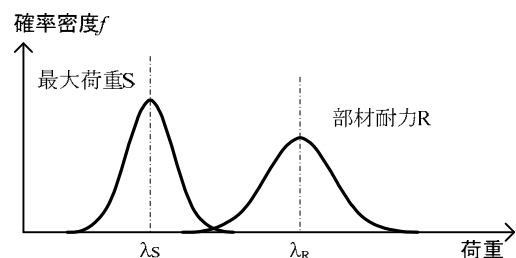


図-3 部材耐力と最大荷重の関係

最大荷重ならびに部材耐力の確率分布を対数正規分布と仮定すると部材の損傷確率は式(1)で算出できる。

$$p_f = \int_0^1 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta_z z} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln z - \lambda_z}{\zeta_z}\right)^2\right\} dz \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \ln z &= \ln R - \ln S, \lambda_z = \lambda_R - \lambda_S, \zeta_z^2 = \zeta_R^2 + \zeta_S^2 \\ \lambda_R &= \ln \mu_R - \frac{1}{2}\zeta_R^2, \lambda_S = \ln \mu_S - \frac{1}{2}\zeta_S^2 \\ \zeta_R^2 &= \ln(v_R^2 + 1), \zeta_S^2 = \ln(v_S^2 + 1) \end{aligned}$$

ここで、 p_f :部材の損傷確率、R、S:それぞれ、部材耐力と最大荷重の確率変数、 μ_R 、 μ_S :それぞれ、RとSの平均値、 v_R 、 v_S :それぞれRとSの変動係数

なお、ある部材が複数箇所にある場合、その部材全体の損傷確率は、それぞれの損傷確率に部材構成比を乗じて総和する。例えば、開口部に3種類のシャッター・ドアが用いられ、それぞれの損傷確率が異なる場合、シャッター・ドア全体の損傷確率は以下ようになる。

$$p_s(\mu_S) = r_1 \cdot p_{s1}(\mu_S) + r_2 \cdot p_{s2}(\mu_S) + r_3 \cdot p_{s3}(\mu_S) \quad (2)$$

ここで、 $p_{s1}(\mu_S)$ 、 $p_{s2}(\mu_S)$ 、 $p_{s3}(\mu_S)$:それぞれ、荷重レベル μ_S でのシャッター・ドア1,2,3の損傷確率、 r_1 、 r_2 、 r_3 :それぞれ、シャッター・ドア1,2,3の構成比 ($r_1 + r_2 + r_3 = 1$)

各部材の損傷確率および建設コストが求まると、イベントツリー解析により対象建物の損失期待値が算出できる。通常、イベントツリー解析は従属事象がある場合に用いられる。しかし、従属事象がなくても被害発生状況を整理しやすいこと、また今後内圧の変化や休業による災害等の従属被害の追加することを考慮し、今回はイベントツリー解析を用いた。

従属被害は考慮せず、各部材の損傷レベルを「損傷なし」と「損傷」の2レベルとすれば、外壁、屋根、窓ガラス、シャッター・ドアの4部材をリスク評価の対象とした場合には、図-4に示す様に16通りの損傷ケース(Event)となる。例えば、外壁と窓ガラスは「損傷なし」、屋根とシャッター・ドアが「損傷」の場合の損失期待値は以下ようになる。

$$\begin{aligned} \left\{ \prod_i f_i(\mu_S) \right\} \cdot C &= \{1 - p_w(\mu_S)\} \cdot \{1 - p_g(\mu_S)\} \\ &\cdot p_r(\mu_S) \cdot p_s(\mu_S) \cdot \{C_r + C_s\} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $f_i(\mu_S)$:荷重レベル μ_S での部材の損傷確率 $p_i(\mu_S)$ あるいは未損傷確率($1 - p_i(\mu_S)$)、 $p_w(\mu_S)$ 、 $p_g(\mu_S)$ 、 $p_r(\mu_S)$ 、 $p_s(\mu_S)$:それぞれ、荷重レベル μ_S での外壁、窓ガラス、屋根、シャッター・ドアの損傷確率、 C_r 、 C_s :それ

ぞれ屋根、シャッター・ドアの修復コスト

ある荷重レベルでの損失期待値は、16通りの損失期待値を合計することにより求まる。

$$D_S = \sum_{j=1}^{16} \left[\left\{ \prod_i f_{j,i}(\mu_S) \right\} \cdot C_j \right] \quad (4)$$

ここで、 D_S :荷重レベル μ_S での損失期待値

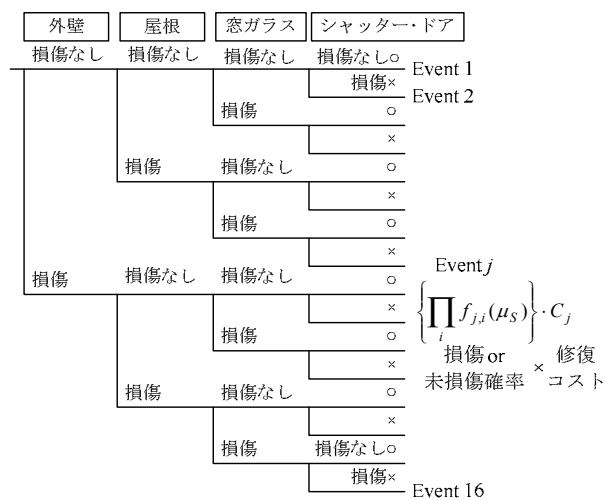
(5) リスク評価指標

強風リスクは、式(5)のように外装材の損失期待値と建設コストを用いて定義する。荷重レベルは地震リスク評価を参考に再現期間475年(50年間に10%の確率で生じる強風)の荷重レベルとした。なお、リスクを詳細に評価するには様々な荷重レベルでのリスクの評価が必要と考えられるが、ここでは一つの荷重レベルでのリスクを評価指標とした。

$$\text{強風リスク} = \frac{\text{再現期間475年の荷重レベルにおける損失期待値}}{\text{対象とした外装材の建設コスト}} \quad (5)$$

3. リスク評価事例

物流倉庫のリスク評価を行う。評価の対象は、外壁、屋根、窓ガラス、シャッターの4つの部材とした。本報での評価は、部材耐力および建設コストは設計図書や見積書を用いずに設定した簡易評価である。評価結果を相対的に把握しやすいように、対象建物の設計荷重は平成12年建設省告示改正前(旧告示)と改正後(現行告示)



$$\text{荷重レベル}\mu_S\text{での損失期待値} = D_S = \sum_{j=1}^{16} \left[\left\{ \prod_i f_{j,i}(\mu_S) \right\} \cdot C_j \right]$$

図-4 イベントツリーによる損失期待値の算出

示)の2通りとした。

(1) 対象建物

検討の対象建物は平面が70m×70m、高さ20mの4階建ての物流倉庫であり、1階部分には大型シャッター、すべての階に窓ガラスがある。外壁の仕様は角波鋼板、屋根は折半鋼板である。建設地は埼玉県を想定している。検討建物の建物概要と建物平面をそれぞれ表-1、図-5に示す。

(2) 設定条件

a) 部材耐力の設定

部材耐力の平均値は、部材ごとに算出した設計風荷重に安全率を掛けた値とし、前述の通り、設計風荷重は旧告示での設計と現行告示での設計の2通りとした。帳壁および屋根面の設計風荷重を図-6、表-2に示す。対象とした建物では、帳壁、屋根面ともに旧告示の設計風荷重は現行告示よりも大きい。なお、外壁等は各階で部材の仕様を変えずに、風荷重が最も大きくなる最上階の風荷重を用いて各階の部材耐力を決めることが多いため、部材耐力は実状に合わせて以下のように設定した。

旧告示で設計した場合、外壁および窓ガラスは一般部と端部(端から7mの範囲および4階部分)に、屋根は一般部と端部(屋根面外周3mの範囲)に分け耐力を設定した。なお、外壁および窓ガラスの一般部は高さ15m、シャッターは高さ5mの風荷重を用いた。

現行告示で設計した場合、帳壁面の風荷重は正圧で決まるため一般部と端部ともに同じ荷重となる。そこで外壁および窓ガラスは耐力の区分は行わず、すべて最上階の設計風荷重を用いて部材耐力を設定する。シャッターは高さ5mの風荷重を用いて耐力を設定した。屋根は一般部と端部(屋根面外周3mの範囲、ピーク風力係数は4.3とする。)に分け耐力を設定した。現行告示での荷重レベルは再現期間50年とした。

安全率はガラスでは2.5⁷⁾、それ以外は2.0とし、部材耐力の変動係数は全て0.3とした。

b) 部材コストの設定

旧告示で設計した建物を想定して、文献¹⁰⁾などを参考に4つの部材の建設コストを設定した。部材コストの設定を表-3に示す。

c) 最大荷重の設定

荷重指針の外装材用風荷重算定式を用いて、壁面および屋根面に加わる最大荷重の平均値を算出した。最大荷重は高さや部位ごとに細かく設定する必要があるが、荷重指針では高さ45m以下の建物では壁面ピーク風力係数は高さ方向に一定のため、壁面は一般部と端部の2

表-1 検討建物概要

建物用途	物流倉庫	建設地	埼玉県(V ₀ =30m/s)
建物高さ	20m(4階建)	粗度区分	III
延床面積	16,000m ²	評価風速 ^{*1}	32.8m/s

*1:再現期間475年の軒高風速

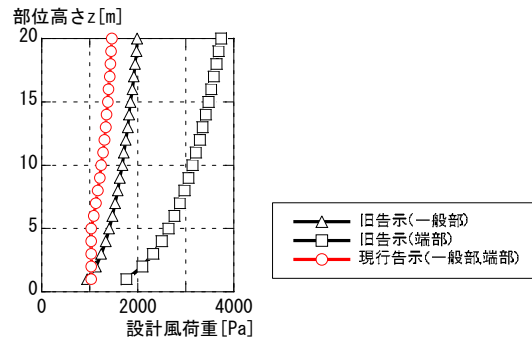
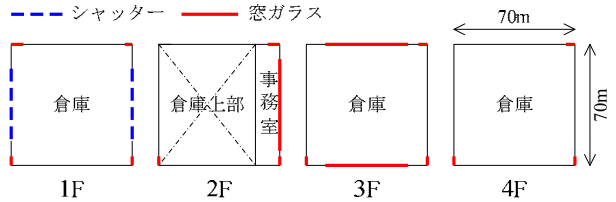


図-6 帳壁の設計風荷重 (高さ20m, V₀=30m/s, III)

表-2 屋根の設計風荷重 (高さ20m, V₀=30m/s, III)

	部位	設計風荷重[Pa]
旧告示	一般部	1245
	端部	3734
現行告示	一般部	1123
	端部	1931

表-3 部材のコスト比

部材	外壁	窓ガラス	シャッター	屋根
コスト比 ^{10)*2}	32%	6%	12%	50%

*2:全コスト=約9千万円

表-4 部材耐力と最大荷重の組合せによる部材構成比

(a)旧告示設計

部位	部材耐力	最大荷重	構成比	
			外壁	窓ガラス
一般部1~3F	一般部	一般部	0.6	0.75
一般部4F	端部	一般部	0.2	0.0
端部 ^{*3} 1~4F	端部	端部	0.2	0.25

(b)現行告示設計

部位	部材耐力	最大荷重	構成比	
			外壁	窓ガラス
一般部1~4F	一般部	一般部	0.8	0.75
端部 ^{*3} 1~4F	(=端部) ^{*4}	端部	0.2	0.25

*3:端から7mの範囲

*4:一般部,端部ともに正圧で決まるため同じ

つに分けて荷重を設定した。また、屋根面は荷重指針の区分に応じて3つの荷重に分けて荷重を設定した。なお、屋根面端部の局部風圧低減係数 k_c は1とし、ピーク風圧係数は5.4とした。最大荷重の変動係数は0.3とした。

d) 損傷確率の算出

各部材の損傷確率は、部材耐力と最大荷重の組合せごとに損傷確率を求め、それぞれの損傷確率に部材構成比（部材を構成する面積比）を乗じてその部材の損傷確率とした。外壁と窓ガラスの部材耐力と最大荷重の組合せによる部材構成比を表-4に示す。例えば、外壁は旧告示で設計した場合には3つ、現行告示の場合は2つの部位に分け、それぞれの部位ごとに損傷確率を求め、表-4に示した部材構成比を乗じて外壁全体の損傷確率を求めた。

(3) 部材の損傷確率

部材の損傷確率と風速の関係を図-7に示す。旧告示、現行告示で設計した場合とも、シャッター、屋根、外壁、窓ガラスの順で損傷確率が高い。シャッターは外壁や窓ガラスと外力（最大荷重）は同じであるが、外壁や窓ガラスと比較して損傷確率が高くなる。窓ガラスと外壁の損傷確率の違いは部材の安全率の差が大きい。また、屋根は旧告示で設計した場合は一般部での耐力が小さいこと、現行告示で設計した場合は最大荷重が大きい端部の耐力が小さいこと等により、損傷確率が高くなる。

部材耐力の割増しと部材の損傷確率の関係を図-8に示す。荷重レベルは再現期間475年（風速32.8m/s）と再現期間50年（風速27.6m/s）とした。現行告示で設計した場合、部材耐力を約1.1倍、1.2倍することは設計荷重の再現期間をそれぞれ100年、150年にするに相当する。再現期間475年の荷重レベルでは、部材耐力の割増しを1.1とした場合、シャッターおよび屋根の損傷確率は約2割減、耐力の割増しを1.2とした場合は約4割減となり、設計時の再現期間を長くすることで部材の損傷確率を大きく低減できることがわかる。

(4) 強風リスク評価

さまざまな荷重レベルでのリスクの比較として、最大荷重（風速）の再現期間と損失率（=外装材の損失期待値/対象とした外装材の建設コスト）の関係を図-9に示す。また、損失率と部材耐力の割増しの関係を図-10に示す。強風リスク（再現期間475年の荷重レベルにおける損失率）は、旧告示で設計した場合には15.1%、現行告示で設計した場合は23.5%となった。図-6、表-2に示した通り、検討対象とした建物では旧告示の設計風荷重

のほうが現行告示よりも屋根、帳壁ともに大きいため現行告示で設計した場合のほうが強風リスクは高い結果となった。部材耐力の割増しを1.1、1.2とした場合には、強風リスクはそれぞれ約2割減、約4割減となる。

建設地域による強風リスクを検討した結果を表-5に示す。建設地の基準風速は東京では $V_0=34m/s$ 、千葉は $V_0=38m/s$ とし、評価風速および現行告示での部材耐力は建設地の基準風速および粗度区分に応じて算出した。

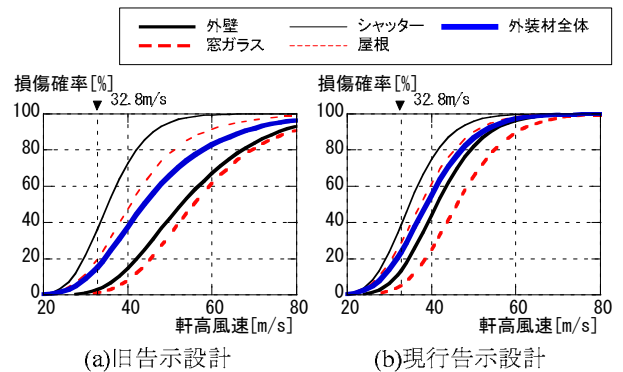


図-7 部材の損傷確率と風速の関係

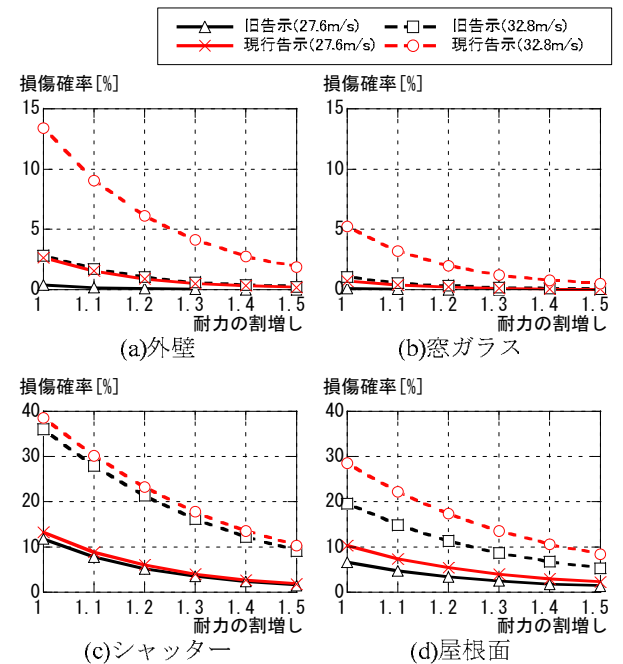


図-8 部材の損傷確率と耐力の割増しの関係

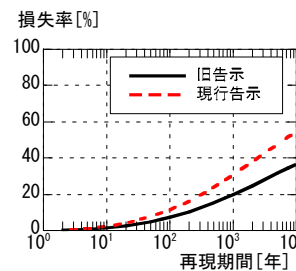


図-9 損失率と最大荷重の再現期間の関係

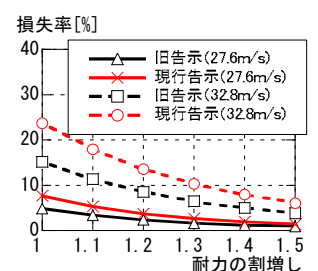


図-10 損失率と耐力の割増しの関係

旧告示の設計風荷重は建設地域によらず一定のため、旧告示で設計した場合は、評価風速が高い地域に建設されるほど、強風リスクは大きくなる。現行告示の場合は、建設地による強風リスクの差異は小さい。検討した5つの建設地域では、埼玉以外の地域では旧告示で設計した建物のほうが強風リスクは大きくなる。

表-5 建設地域による強風リスクの比較

建設地域	評価風速*5	旧告示	現行告示
埼玉(30m/s,III)	32.8m/s	15.1%	23.5%
東京(34m/s,III)	36.4m/s	25.9%	21.1%
東京(34m/s,II)	44.2m/s	48.3%	21.2%
千葉(38m/s,III)	40.1m/s	37.9%	19.2%
千葉(38m/s,II)	48.6m/s	60.3%	19.4%

*5:再現期間475年の軒高風速

4. おわりに

本報では、外装材の部材耐力に基づいた強風リスク評価の方法および物流倉庫の評価事例について述べた。得られた知見は以下の通りである。

- ① リスクを損失の期待値（＝損傷確率×建設コスト）と考え、建物を構成する各外装材の部材耐力に基づいた強風リスク評価手順を提案した。なお、部材の劣化や内圧の変化については強風リスク評価時には重要であり、今後評価に加える予定である。
- ② 物流倉庫の評価事例では、4つの外装材をリスク評価の対象とし、部材毎の損傷確率はシャッターや屋根が外壁や窓ガラスと比べて損傷確率は高くなる。
- ③ 強風リスクは旧告示で設計した場合では15.1%、現行告示で設計した場合は23.5%であった。現行告示で設計した場合には建設地域による強風リスクの差異は小さいが、旧告示で設計した場合は、基準風速が高い地域や海沿いの地域で強風リスクが高くなる。

謝辞：本研究は JSPS 科研費<基盤研究(C)25420599>の助成を受けたものです。ご指導いただいた近畿大学野田博教授、金沢工業大学山岸邦彰准教授ならびに株式会社風工学研究所佐々木亮治氏にはここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 近藤宏二ほか、建築物の強風危険度の評価法に関する研究、第17回風工学シンポジウム論文集、pp.191-196,2002
- 2) 川口彰久ほか、オフィスビルを対象とした強風災害リスク簡易評価法、第19回風工学シンポジウム論文集、pp.229-234,2006
- 3) 喜々津仁密ほか、降雨を伴う強風時における折板屋根のフラジリティ評価、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.219-220,2012
- 4) P.J.Vikery et.al., HAZUS-MH Hurricane model methodology I: Hurricane Hazard, Terrain and Wind Load Modeling, Natural hazard review ASCE, pp.82-93,2006
- 5) P.J.Vikery et.al., HAZUS-MH Hurricane model methodology II: Damage and Loss Estimation, Natural hazard review ASCE, pp.94-103,2006
- 6) 日本建築学会編、建築物荷重指針・同解説、2004
- 7) 板硝子協会、板硝子協会推奨基準、2001
- 8) 風工学研究所、日本住宅木材技術センター、建築基準整備促進補助金事業「風圧力、耐風設計法に関する基準の合理化に関する検討報告書」、2010
- 9) 国土交通省総合政策局、建設工事デフレーター、<http://www.mlit.go.jp/toukeijouhou/chojou/def.htm>
- 10) 例えば、建設物価調査会総合研究所、JBCI2011、2011