

## 特集 「品質の向上をめざして」

## 外装材の疲労損傷評価のための繰り返し風外力に関する研究

後藤 暁 大塚 清敏

川口 彰久

## A Study on Cyclic Wind Load for Evaluating Wind Induced Fatigue in Claddings

Satoru Goto Kiyotoshi Otsuka

Akihisa Kawaguchi

## Abstract

This paper describes the fatigue damage of claddings by wind load. The majority of the claddings are designed according to the allowable stresses at the design wind speed. However, the fatigue damage estimation is usually ignored in that case. Cyclic wind loads on buildings are important, considering the wind-induced fatigue of claddings. In this paper, cyclic wind loads on a low-rise building were evaluated using the wind pressure distributions measured on a model building via wind tunnel experiments. A level-crossing method was used to calculate the cyclic numbers. The cumulative duration of the wind loads for the service period of the building was evaluated using a typhoon simulation. From these, it was found that the contributions of winds with average strength to fatigue damage are significant. The possibility that the fatigue limit can be reached in a time period less than the return period given by the wind-resisting design has also been demonstrated.

## 概要

耐風設計における品質向上への取り組みとして、風による外装材の疲労損傷問題を取り上げた。従来、外装材の耐風設計は最大風荷重に対する許容応力度設計法に基づいており、疲労損傷についてはほとんど考慮されていない。疲労損傷評価を行うにあたっては、供用期間中の部材応答の繰り返し回数の評価が重要であるが、外装材は固有振動数が高く減衰も大きいいため、応答性状が風外力の変動に依存する。そこで、より強風被害の影響を受けやすいと考えられる生産施設建屋を対象に弾性範囲を対象とした風荷重の繰り返し数（繰り返し風荷重）の評価法について検討した。縮尺模型を用いた風洞実験を行い、壁面での風圧係数の時刻歴にレベルクロッシング法を適用して繰り返し数を評価した。得られた風圧係数の繰り返し数と風の累積作用時間から供用期間中における繰り返し風荷重を算定した。さらに、金属パネルの疲労曲線を用いて疲労損傷評価の一例を示した。その結果、相対的に低風速側での疲労損傷度への寄与が大きいこと、設定した設計風速の再現期間に比べて短い期間で疲労限界に達する可能性があることが示された。

## 1. はじめに

近年、台風や爆弾低気圧などに起因した金属屋根や窓ガラスなどの外装材（非構造部材）の強風災害の報道が目立つようになってきており、地球温暖化という単語と共に強風に対する社会的関心が高まっている。特に工場等の生産施設建屋で外装材破損が発生した場合、被害の大きさによっては長期間事業を中止しなければならない。したがって効果的に、かつ被害を起こさないように建物を設計し、メンテナンスすることが必要であり、品質向上という点からも重要である。しかしながら近接の気象官署等の風観測データに基づくと、強風災害時の風速は建築基準法で性能要求されている風速値（再現期間50年相当）よりも低い場合が多く、外装材の耐荷重が災害時に受けた風荷重より低下していたことによる破損が考えられる。外装材の耐力低下の一要因としては、温度荷重

（日射）や風荷重などの繰り返しによる部材の疲労損傷が考えられる。日本風工学会においても国土交通大臣に対して提言を行い<sup>1)</sup>、疲労の問題や外装材設計についての重要性を説いている。外装材の疲労損傷評価も加味した設計、いわゆる耐風疲労設計に関する報告<sup>2)~4)</sup>はあるものの、その方法はまだ確立されたとはいえない。従来から行われている許容応力度設計では風荷重は最大値（ピーク風力）に対する応力評価であるのに対して、疲労損傷評価では供用期間中における部材応答の繰り返し回数の評価が必要となる。外装材は振動の固有周期が短く減衰が大きいいため、振動応答性状は風外力の変動に依存する<sup>2)</sup>。そこで本論では疲労損傷評価に向けた繰り返し風荷重の評価法について検討を行った。外装材の破損の影響が顕著に表れるのは主に生産施設建屋であると考えられることから、それを対象とした縮尺模型を用いて風洞実験（風圧実験）を行い、得られた風圧係数の結果

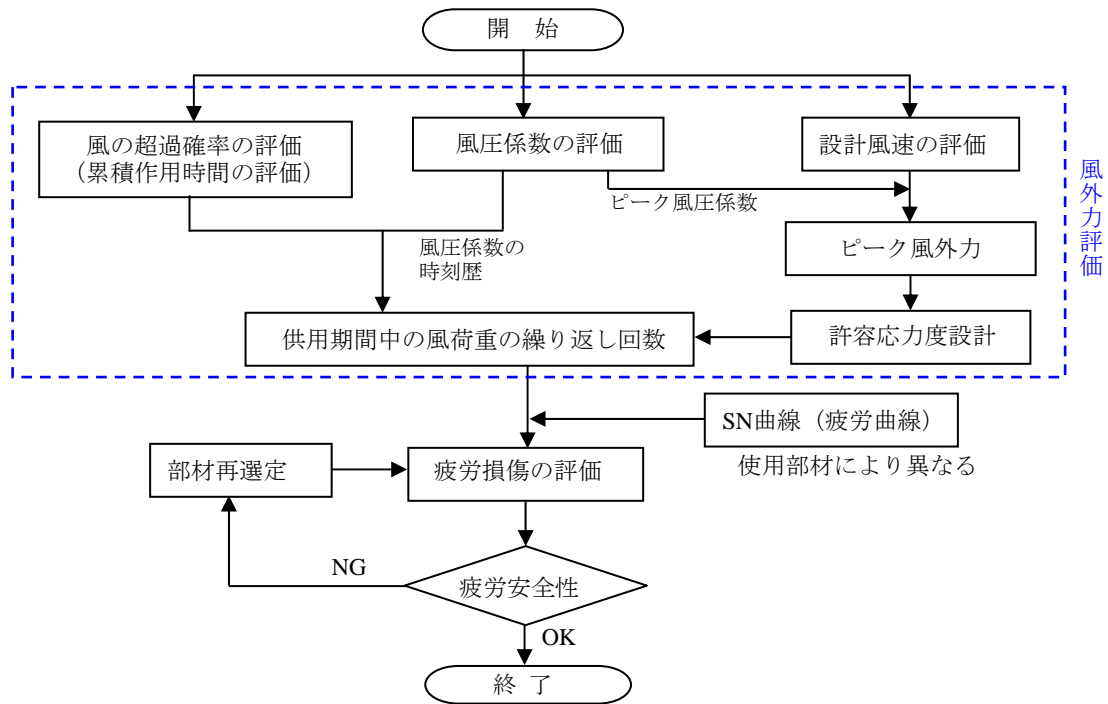


Fig. 1 外装材の耐風疲労設計フローチャート  
Algorithm of Wind Resistant Design of Claddings

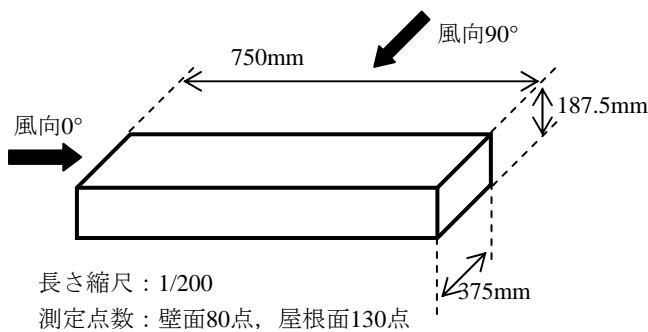


Fig. 2 風洞実験模型の外形  
Outline of Wind-Tunnel Experimental Model

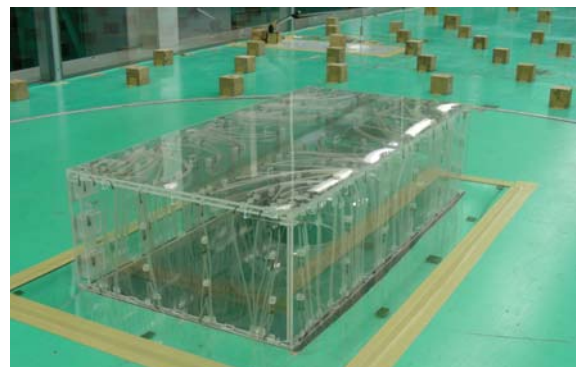


Photo 1 風洞実験模型  
Wind-Tunnel Experimental Model

に基づいて繰り返し風荷重を評価した。また、それらの結果を適用した場合の疲労損傷評価の試算を行った。

## 2. 外装材の耐風疲労設計フロー

外装材の耐風設計全体のフローチャートをFig.1に示す。破線内の範囲が風外力評価に関する部分である。許容応力度設計で設定した風荷重を満足させるのに加えて疲労損傷評価を行うことにより最終的な部材の荷重設定を行う。外装材の応答は風外力に比例して変動するものとした。疲労損傷評価には既往のマイナー則<sup>5)</sup>を適用する。したがって部材の疲労特性 (SN曲線) が与えられれば評価可能であるので、風外力評価の範囲の中では繰り返し風荷重の設定が最も重要な要素となる。

## 3. 風洞実験

### 3.1 風洞実験

実験は大林組技術研究所の多目的大型風洞施設で実施した。実験模型は生産施設建屋を想定した直方体模型を用い、縮尺率は1/200とした。各辺の長さは375×750×187.5mm (短辺×長辺×高さ、実寸法換算で75×150×37.5m) である。測定点として、屋根面130点、壁面80点の合計210点を設け、各点に作用する風圧力を測定した。実験模型の外形をFig.2およびPhoto 1に示す。流入気流は、建築学会「建築物荷重指針・同解説(2004)」<sup>6)</sup> (以後、荷重指針とする) で示される地表面粗度区分IIIを想定した気流を風洞内に作成した。実験気流の鉛直分布をFig.3に示す。模型頂部高さでの風洞風速は12m/sに設定した。実験風向はFig.2の矢印で示すように建物小口面に正対する風向を0°、反時計回りを正の回転として、0°から90°まで10°間隔で10風向と45°の合計11風向とした。サンプリング周波数500Hz、サンプリング時間60秒で

データを収録した。この収録データを風圧計のチューブに関する周波数応答特性を補正した後に、位相遅れを考慮して補正して正規の時系列データとした。補正された各測定点の風圧データを模型頂部高さの速度圧により無次元化し、風圧係数とした。

### 3.2 風圧係数の分布

風向0°における各測定点の最大瞬間風圧係数の分布をFig. 4に、最小瞬間風圧係数の分布をFig. 5に示す。赤色が強い部分は正圧（測定点を押す力）が強く、青色が強い部分は負圧（測定点を引く力）が強い事を示している。壁面において、正圧は風に正体する面の地面から約2/3の高さの測定点で強くなっている。一方、負圧が大きいのは側面の風上側隅部の測定点であった。隅の影響で風が剥離するために負圧が大きくなる。

## 4. 繰り返し風荷重の評価法

### 4.1 繰り返し風荷重の算定方法

疲労損傷評価に用いる繰り返し風荷重は、対象となる外装部材の供用年数、その期間に吹く風の累積作用時間および風速別の風荷重の繰り返し回数により決定される。風の累積作用時間は気象記録と台風シミュレーション<sup>9)</sup>を適用して算定した。また荷重繰り返し回数の評価は、風洞実験で得られた風圧係数と設計風速から求めた風荷重の時刻歴波形にレベルクロッシング法を適用して行った。レベルクロッシング法は、風荷重の時系列が、与えられた荷重値を正の勾配で横切る回数を計る方法である。風洞実験結果に基づいて算定した風荷重の時刻歴波形の例をFig. 6に示す。この例では、-500Nにおけるレベルクロッシング数は図中の○の数を、-300Nでは図中の○の数を計測する。

### 4.2 レベルクロッシング数の分布

風向0°のときに負圧が最大となる壁面の測定点を抽出し、風荷重のレベルクロッシング数を求めた。荷重に対するレベルクロッシング数の分布をFig. 7に示す。横軸は風荷重の平均値と荷重変動の標準偏差で規格化した値である。上段の図はレベルクロッシング数を、下段は平均値におけるレベルクロッシング数に対する割合(%)を示したものである。一般的な外装材用設計風荷重を評価するには1秒平均値の変動の最大瞬間値で評価されるが、瞬間値に対する平均化時間は部材負担面積の大きさと設計風速の値に依存する。そこで、風圧係数の時刻歴に移動平均を施し、平均化時間0.14秒～3秒とした場合の瞬間値に対して繰り返し回数の変化を調べた。実時間に対する実験時の時間縮尺率は、模型の長さスケールと風速の倍率から計算できる。ここでは再現期間50年の風を想定して風速の縮尺率を定めた。評価時間が長くなるほど頻度数そのものは減少するが、平均値でのレベルクロッシング数で規格化すると同一線上に重なり、概ね正規

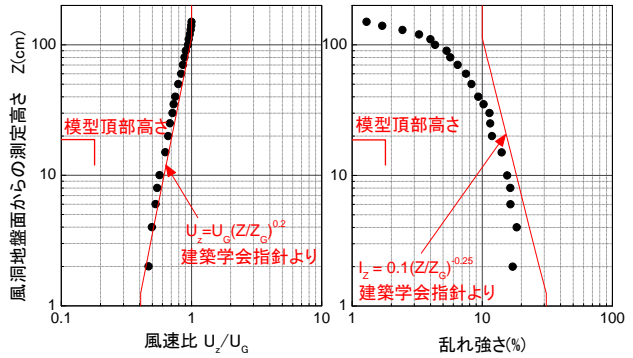


Fig. 3 風洞気流の風速比及び乱れ強さの鉛直分布  
Vertical Profiles of Velocity Ratio and Turbulence Intensity in the Wind Tunnel.

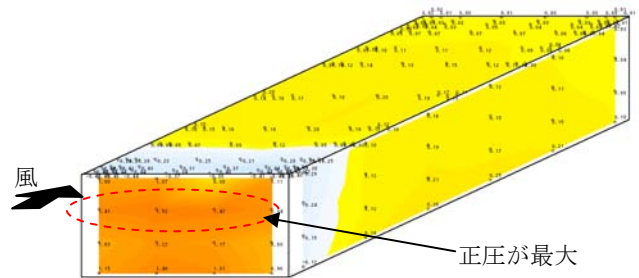


Fig. 4 最大瞬間風圧係数（風向0°）  
Distribution of Maximum Wind Pressure Coefficients

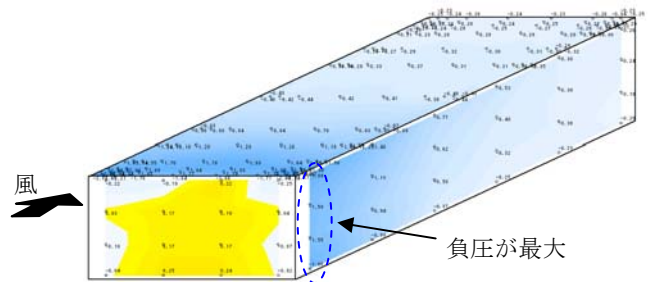


Fig. 5 最小瞬間風圧係数（風向0°）  
Distribution of Minimum Wind Pressure Coefficients

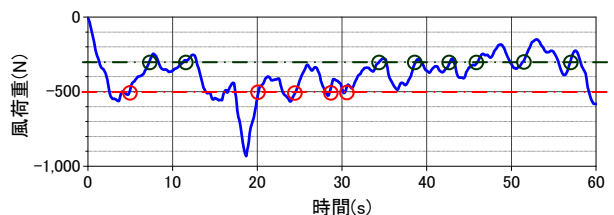


Fig. 6 風荷重の時刻歴波形  
Time Series of Wind Load

分布曲線で近似できる。したがって、平均値でのレベルクロッシング数が算定できれば全ての荷重に対するレベルクロッシング数が求められる。各荷重におけるレベルクロッシング数を、以下の式でモデル化した。

$$v_j = v_0 \cdot \exp\left(-\frac{x_j^2}{2}\right) \quad (1)$$

$$x_j = \frac{(F_j - \bar{F})}{\sigma_F} \quad (2)$$

$$F_j = \frac{1}{2} \rho U^2 C_{pj} A \quad (3)$$

ここで、 $v_j$ ：荷重jでのレベルクロッシング数、 $v_0$ ：平均値でのレベルクロッシング数、 $F_j$ ：荷重レベル、 $\bar{F}$ ：荷重の平均値、 $\sigma_F$ ：荷重の標準偏差、 $\rho$ ：空気密度、 $U$ ：頂部風速、 $C_{pj}$ ：風圧係数、 $A$ ：負担面積

### 4.3 風荷重平均値でのレベルクロッシング数

風荷重の変動が風速に依存するものとして、風速変動のパワースペクトル密度から平均値でのレベルクロッシング数を算出した。時刻歴中の極大値の発生がポアソン過程に従うとすると、単位時間中の平均値を正の勾配で横切るレベルクロッシング数  $v_0$  は変動風速のパワースペクトル密度を用いて、以下の式で求められる<sup>7)</sup>。

$$v_0 = \sqrt{\frac{\int_0^\infty n^2 S(n) dn}{\int_0^\infty S(n) dn}} \quad (4)$$

ここで、 $n$ ：周波数(Hz)、 $S(n)$ ：変動風速のパワースペクトル密度 ( $(m/s)^2/s$ )

風速とレベルクロッシング数の関係をFig. 8に示す。風速変動のパワースペクトル密度は荷重指針<sup>6)</sup>で採用されているカルマン型のパワースペクトル密度を用いた。風速が大きくなるに従いレベルクロッシング数は大きくなるが、徐々に変化の割合は小さくなり、設計風速付近では単位時間（1秒）あたり約1.2回となる。

### 4.4 供用期間での繰り返し風荷重

以上の結果から、建物の供用期間における繰り返し風荷重は、(5)式により算定出来る。

$$n(F_j) = \int_0^\infty v_0 \cdot T(U) \cdot \exp\left(-\frac{x_j^2}{2}\right) dU \quad (5)$$

ここで、 $n(F_j)$ ：荷重 $F_j$ での荷重繰り返し数、 $T(U)$ ：風速 $U$ の累積作用時間

## 5. 風荷重による疲労損傷の計算例

### 5.1 計算対象

風洞実験で想定した生産施設が東京都23区内に立地する場合の疲労損傷評価の例を示す。想定した計算条件をTable 1に示す。設計風速の設定は建築基準法（平成12年建設省告示第1454号）に基づいた。

### 5.2 繰り返し風荷重

供用期間中の風の累積作用時間は、東京管区気象台の観測値<sup>8)</sup>および台風シミュレーション<sup>9)</sup>に基づき評価した。結果をFig. 9に示す。風速1m/s毎の各風速レベル（階級）での累積作用時間である。

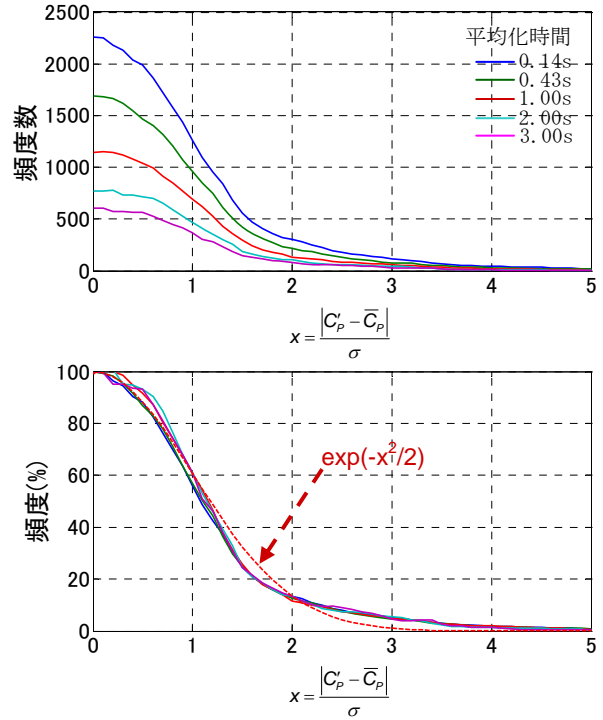


Fig. 7 レベルクロッシング数の分布（風向0°）  
Distribution of Level Crossing Number

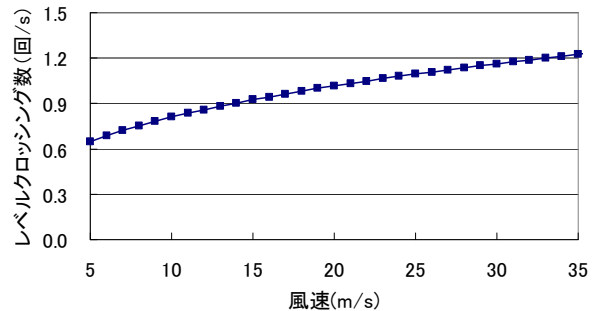


Fig. 8 平均風速とレベルクロッシング数の関係  
Relationship between the Level Crossing Number and the Mean Wind Speed

Table 1 計算条件  
Conditions of Calculation

対象地点	東京都23区内
基準風速 ( $V_0$ )	34m/s
建物頂部高さ	37.5m
地表面粗度区分	III
設計用再現期間	50年
設計風速	35.0m/s $=34 \cdot 1.7(37.5/450)^{0.2}$
供用期間	50年

得られた累積作用時間を(5)式に代入し、荷重レベル毎に風荷重の繰り返し数を算出した結果をFig. 10に示す。相対的に荷重レベルが小さい方が繰り返し回数が多くなる。また、建物頂部風速と対応する風荷重の繰り返し回数の関係をFig. 11に示す。日常で起こりやすい風速10m/s

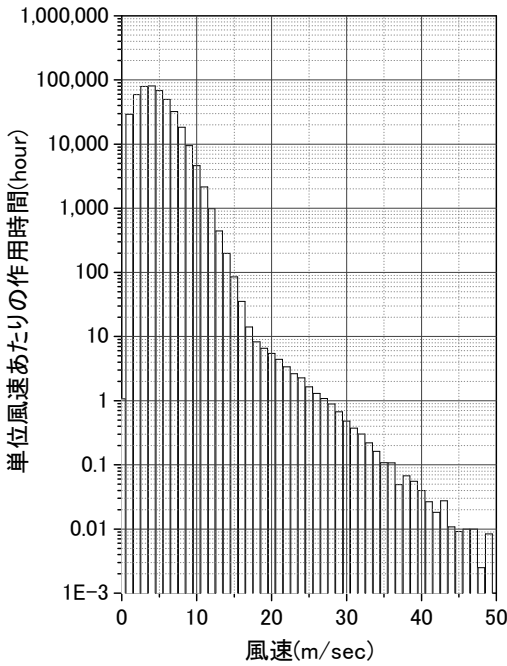


Fig. 9 供用期間50年での累積作用時間  
Cumulative Duration Time during Fifty Years

～15m/sの風による繰り返し回数が卓越している。

### 5.3 疲労損傷評価

得られた風荷重の繰り返し回数の結果に基づき疲労損傷評価を行った。損傷の評価にはマイナー則<sup>5)</sup>を適用した。(6)式で求められる累積損傷度DがD>1となると疲労破壊が起こるとされている。

$$D = \sum (n_i / N_i) \quad (6)$$

ここで、D:累積損傷値、 $n_i$ :レベルiの荷重振幅での繰り返し回数、 $N_i$ :疲労曲線より求められるレベルiの荷重での疲労寿命

必要となる外装材の疲労曲線(S-N曲線)は、河井ら<sup>3)</sup>が用いた鋼製パネルのものを使用した。使用した疲労曲線の式を(7)式に示す。この式では任意の基準風荷重に対する荷重比に対する繰り返し回数の限界が与えられている。基準風荷重は設計風荷重とした。また、(7)式を図示するとFig. 12のようになる。

$$N_i = 1.19 \times 10^4 \cdot \gamma_i^{-2.36} \quad (7)$$

$$\gamma_i = F_i / F_0 \quad (8)$$

ここで、 $\gamma_i$ :レベルiの荷重比、 $F_i$ :レベルiでの荷重値、 $F_0$ :基準風荷重(設計用風荷重)、ただし $\gamma_i < 0.14$ の範囲については示されていない。

荷重レベルと損傷度の関係をFig. 13に示す。荷重毎の損傷度を青色(■)で、それらを荷重の大きい方から累積した損傷度を黒色(●)で示す。供用期間50年に対して設計用再現期間を50年で設定した場合と100年で設定した場合について検討を行った。風荷重は再現期間50年では

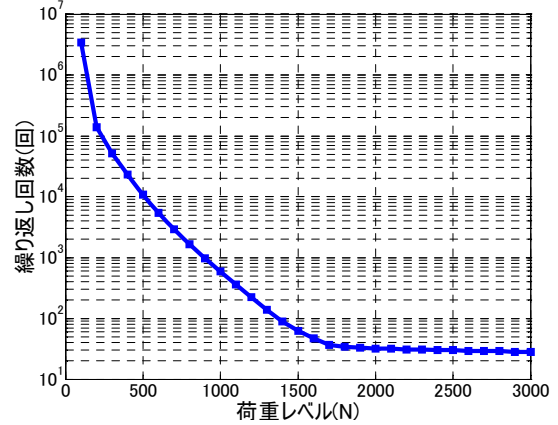


Fig. 10 荷重レベルと荷重繰り返し回数の関係  
Variations of the Number of Cycles with the Wind Load

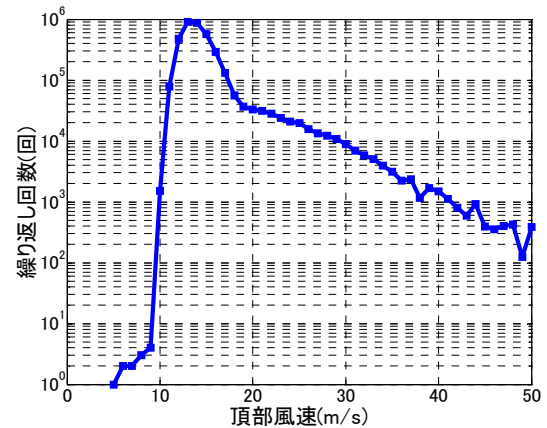


Fig. 11 頂部風速と荷重繰り返し回数の関係  
Dependence of Cycles on the Building-top Wind Speed

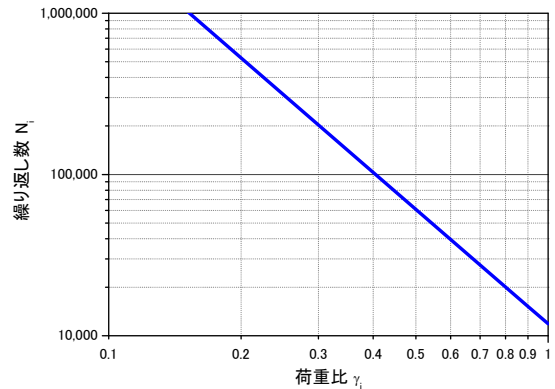
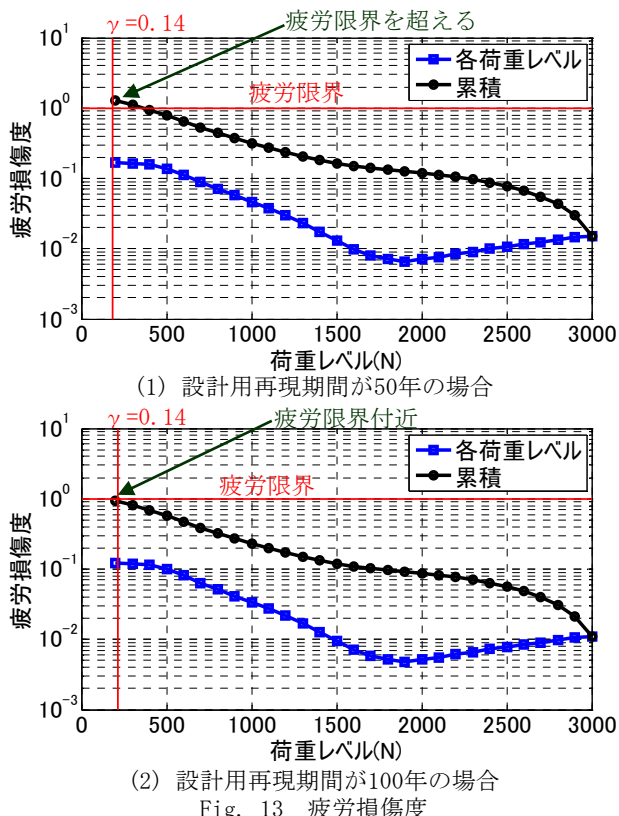


Fig. 12 疲労曲線(SN曲線)<sup>3)</sup>  
Feature Curve of Fatigue (SN Curve)

1, 323N, 再現期間100年では1, 515Nとなる。なお、部材の負担面積は1m<sup>2</sup>とした。

各荷重毎(■)で見ると、全体の損傷度に対して1,000N以下の荷重が低い範囲での損傷度が大きい。繰り返し風荷重(Fig. 11)でも示されたように、日常で頻繁に起こりうる風速による疲労損傷への寄与が大きいことが考えられる。建設サイトでの常時風の把握については、地域や周辺状況をふまえて気象モデルを組み合わせるなどして、さらに高精度化していく必要がある。



Dependences of the Degree of Fatigue Damages on the Wind Loads

一方累積損傷度D(●)は、荷重比 $\gamma$ が0.14以下で疲労損傷は生じないとすると、設計の再現期間を50年で設定した場合 $\gamma_i=0.14$  (荷重レベル185N)で $D=1.28$ となり疲労限界を超える。再現期間100年だと $\gamma_i=0.14$  (荷重レベル212N)での累積損傷度は $D=0.93$ となり疲労限界は超えないものの、かなり限界に近い値となる。

供用期間と累積疲労損傷度の関係をFig. 14に示す。設計用再現期間は50, 100, 200年の3種類に設定した。設計用再現期間を50年で設定すると、供用期間30年程度で累積損傷度Dが1.0となり疲労限界となる。また、設計用再現期間100年を設定した場合でも供用期間50年で疲労限界に達する。設計用再現期間200年では供用期間85年程度で疲労限界となる。

この検討はあくまで一例にすぎないが、設定した設計用再現期間に比べて短い期間で部材が疲労限界に達する可能性を示している。また、あくまで風の累積作用のみによる疲労損傷の検討であり、温度荷重の繰り返しによる疲労が加わった場合にはさらに短期間での耐力低下が考えられる。

また、50年間で再現期間50年の風速を超過する確率は65%、再現期間100年では40%である<sup>7)</sup>。したがって、50年程度の期間にわたって大きな損傷がないようにするためには、外装材設計用の再現期間を最低でも100年程度に設定することが望まれる。

## 6. まとめ

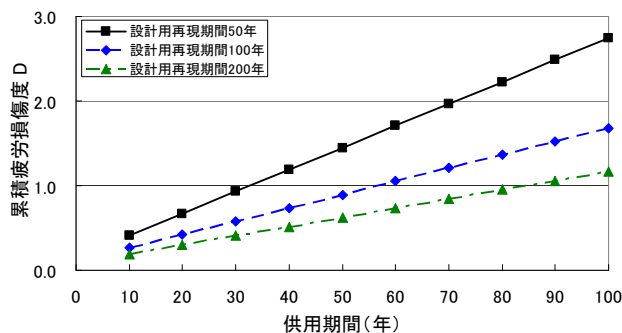


Fig. 14 供用期間と疲労損傷度の関係  
Relations between the Service Terms and the Fatigue Damage

風洞実験結果に基づいて外装材の繰り返し風荷重の評価を行い、疲労損傷評価の一例を示した。結果を以下に示す。

- 1) 実験で得られた風圧力の繰り返し数をレベルクロッシング法によって求め、それが正規分布で近似できる事が分かった。
- 2) 風の発生頻度を考慮して供用期間50年での風荷重繰り返し数を評価した。日常で頻繁に起こりうる風速域での風荷重の繰り返し数が相対的に多く、建設サイトでの常時風の推定に関してはその精度を上げてゆく必要がある。
- 3) 既往の鋼製パネルの疲労曲線を用いて疲労損傷評価を行った結果、日常的に頻度の高い風速での疲労損傷への寄与が大きいことが示唆された。
- 4) 設計用再現期間を100年とした場合でも、供用期間50年程度で疲労限界に達する。設計用再現期間を設定する際には留意が必要である。

## 参考文献

- 1) 日本風工学会「強風災害の防止に関する提言」, 2005年8月,  
(<http://www.soc.nii.ac.jp/jawe/documents/pdf/proposal2005.pdf>)
- 2) 多賀, 他: 風力によるアルミサッシ窓枠接合部の累積損傷, 日本風工学会誌, 第50号, pp. 3-18, (1992)
- 3) 河井, 他: 外装材等の耐風疲労設計について, 京都大学防災研究所年報, 第48号B, (2005)
- 4) Nag-Ho Ko, Young-Moon Kim: Investigation of closed-form solutions to estimate fatigue damage on a building, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 95, pp. 3-18, (2007)
- 5) 日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 技報堂出版, (1993)
- 6) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, (2004)
- 7) 大熊, 他: 建築物の耐風設計, 鹿島出版会, (1996)
- 8) 気象庁: 気象観測年報, 2001年版~2005年版
- 9) 後藤, 他: 地形効果を考慮した台風シミュレーション手法の開発, 大林組技術研究所報, No. 70, (2006)