

外装材等の耐風疲労設計について

河井宏允，藤田正則*

* 日鉄鋼板株式会社

要 旨

通常のプロセスによって耐風設計された外装材を含めた建築物等の風による累積疲労損傷を評価する簡単な方法を導き、それに基づいて設計された建築物等の疲労判定を容易に行う判定図を作成した。この判定図を使うことによって、設計応力レベルで基準化した建築物等の疲労曲線（SN 曲線）が分かれば、極めて簡単に累積疲労損傷の判定をすることができる。また、判定図によって累積疲労破壊すると判定された場合に必要、設計上の余裕度即ち安全率も簡単に算出することが可能である。

キーワード：風荷重，累積疲労損傷，超過確率，継続時間，外装材，風向

1. はじめに

昨年、観測史上最多の 10 個の台風が上陸し、日本の各地で多大の強風被害が生じた。それらの被害の中で、特に目立ったのは、体育館の屋根葺材の破損である。特に、屋根葺材として長尺鋼板を用いたものは、その母屋等の緊結部分が揚力によって引き抜かれることによって、葺材が大きくめくれ飛散するという大きな被害に発展している。緊結部分の破損は強風時の風荷重に対するに緊結部分の強度不足によって生じたものであるが、強度不足の原因として、温度変化や変動風荷重などによる繰り返し荷重による強度低下が考えられている。しかし、従来の外装材等の耐風設計では繰り返し風荷重による疲労はほとんど考慮されておらず、その設計方法についても確立されていないのが現状である。

外装材を含めた建築物等の耐疲労安全性の検討のためには、建築物等が供用される期間にどのようなレベルの風荷重がどれだけ繰り返し作用するかを調べ、それらの繰り返し荷重が建築物等の耐疲労限度に納まっているかどうかを確認することが必要である（大熊他（1988）、成岡他（1994）、松井他（1993）、多賀他（1991））。このためには、（１）建築物が建設される地点での風（風速）の特性の調査、特に風速レベルと継続時間の関係

を調べ、（２）風が吹いた時にどのような風荷重が建築物等に作用するかをチェックし、（３）風荷重による建築物等にどのようなレベルの応力が、供用期間内に何回位作用するかを計算し、（４）計算された繰り返し応力に対する累積疲労損傷を評価し疲労損傷が疲労限度内に納まっているかを確認する、ことが必要である。もし、疲労損傷が疲労限度を超えれば、建築物等の耐力を増加し累積疲労損傷を再評価し、疲労限度内に納まるかどうかを検討する。この手順を繰り返すことによって、疲労を起こさない必要耐力を調べる。Fig.1 は、上記の手順のフローを示したものである。なお、この手順における最初のチェックは、疲労を考慮せず通常の手順で求められた風荷重に対して設計された建築物等が疲労破壊しないかどうかを検討することで始められることが多い。もし、この最初の手順で安全であれば、これまでの耐風設計手順の変更をする必要は特にない。

しかし、これらの耐風疲労評価手順は複雑であるとともに多くの資料が必要で、一般の実務で実施することは極めて困難である。そのため、前述したように、外装材を含めて建築物等の耐風疲労安全性の検討は、ほとんど実施されていないのが現状である。

本研究では、上記の状況を鑑み、実務でも簡単に耐

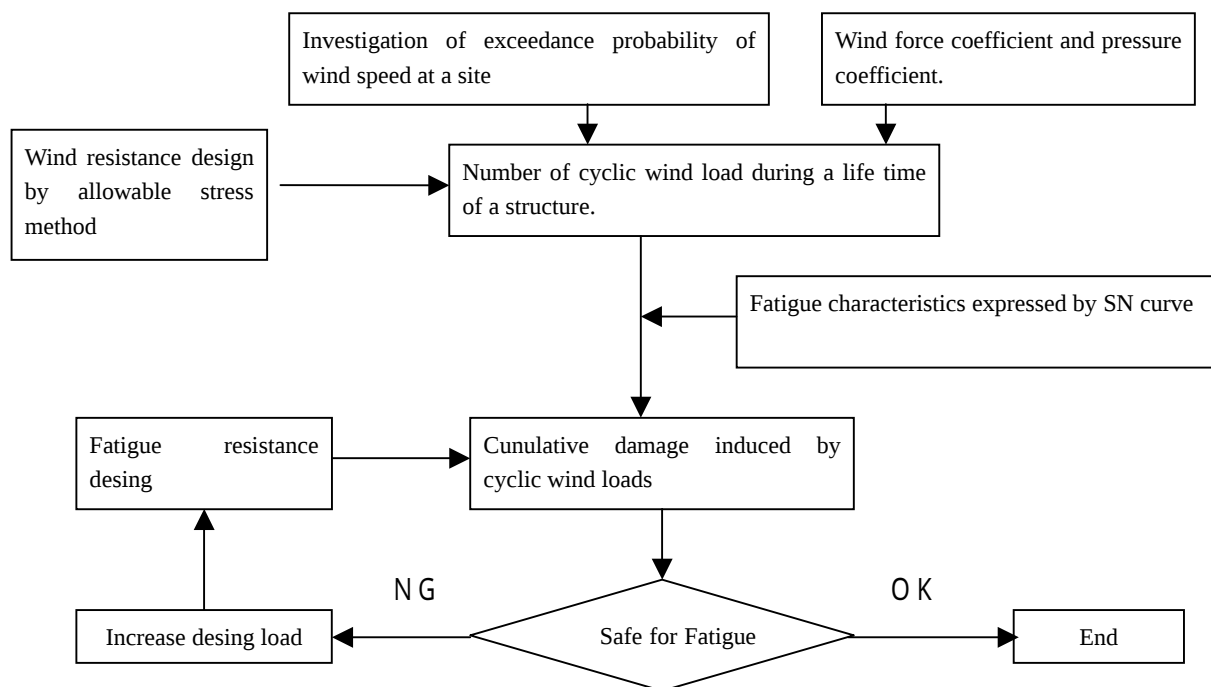


Fig.1 Procedure for a check on wind induced fatigue

風疲労安全性を確認できる簡略化された耐風疲労設計を提案する。本研究で提案する方法は、建築基準法等に基づく耐風設計を基本として、それによって設計された外装材等が繰り返し風荷重によって疲労破壊しないかどうかを、疲労破壊判定図によって簡単に確認できるようにしたものである。設計者は、外装材等の疲労試験結果に基づいて疲労破壊チェックパラメタを計算し、この図にプロットすることによって、設計した外装材等が供用期間内に疲労破壊を起こすかどうかを、一目瞭然で調べることができる。また、この図によって疲労破壊する恐れがあると判定された場合、従来の風荷重をどの程度割り増して設計すれば疲労破壊しないか、即ち疲労破壊しないための安全率についても、この図を利用して簡単に計算することが可能である。なお、本論文では、再現期間50年に対する設計用風荷重に対して供用期間50年で設計する場合に適用される場合を例にとって議論を展開しているが、当然のことながら、提案された方法は再現期間や供用期間に関わりなく適用できる。本論文では、疲労判定に及ぼすこれら諸量の影響とその評価方法についても言及する。

2. 風速の超過確率と継続時間

2004年に改定された荷重指針(日本建築学会(2004))の解説には、居住性評価のために1年間再現期待値のマップを示すとともに、風向ごとに加速度の超過確率を評価できるように、日最大風速にもとづく風速の頻度分布を示してある。しかし、この分布は日最大風速

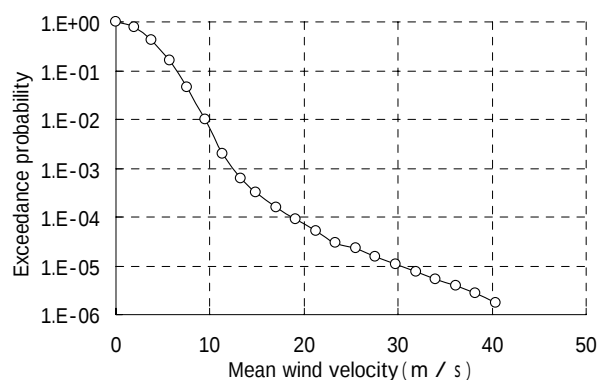


Fig.2 Exceedance probability of wind speed at Osaka city

の頻度分布であり、疲労解析に用いるにあたっては、継続時間の関係などにおいて注意を要する。ここでは、増田他(2002)文献(6)に示された、既存の観測データと台風シミュレーションのデータを用いて得られた風速と継続時間の関係から、日最大風速に基づく風速の推定値とその風速の継続時間との関係を調べる。

Fig.2は、大阪での地上10mにおける地表面粗度に換算した風速の超過確率を示したものである。図の縦軸が超過確率、横軸が風速レベルを表している。

Fig.2より、風速15m/s付近において、超過確率は大きく変化していることが分かる。これは、15m/s以上の風の原因が台風のような稀に襲来する強風に起因するのに対して、15m/s以下の風は、それ以外の日常に我々が体験している風であることによる。

供用期間内に、建築物等に作用する風速の継続時間は、風速の超過確率に建築物等の供用期間を乗じるこ

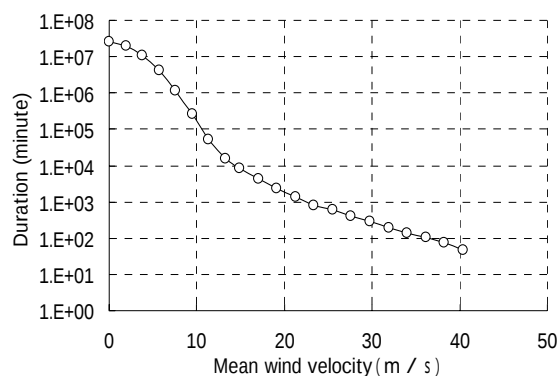


Fig.3 Duration of wind in 50 years

とによって求めることができる。供用期間を 50 年として、風速の継続時間を求めると Fig.3 のように表わされる。

Fig.3 より、風速 30m/s 以上の風は、供用期間 50 年の間に約 280 分程度、風速 40m/s 以上の風は約 47 分程度吹くことが分かる。因みに、大阪での再現期間 50 年に対する風速の期待値は 34m/s であり、この風速の継続時間は約 141 分である。ちなみに、建築物等の供用期間 50 年の間に再現期間 50 年の風速の期待値以上の強風が吹く確率は 63 パーセント強である。

3. 風荷重の超過確率

Fig.1 にしたがって、建築物等が疲労破壊するかどうかの検討を行うには、供用期間内に建築物等に生じる荷重あるいは応力の繰返し回数を計算する必要がある。このためには、風速の超過確率だけでなく、風圧・風力係数、風応答などの情報が必要となる。しかし、風速から風荷重や応力を求める手順は、疲労設計でも通常の許容応力度設計法等に基づいた耐風設計でも同じであるので、ここでは、通常の手順（許容応力度設計等）で建築物等を設計した場合に、建築物等に生じる応力や風荷重を基準とした場合の超過確率を計算する。この場合の基準となる荷重レベルは、再現期間 50 年相当（建築基準法のレベル 1 相当）とする。

Fig.4 は、前掲した Fig.2 の風速の超過確率にしたがって、風速 15m/s 以上の風荷重の超過確率を、横軸に基準風荷重との比をとって示したものである。Fig.2 より風荷重の超過確率は荷重比が 0.2 以上では荷重比の巾乗に比例し、(1)式で近似できる。

$$F = 5.10 \times 10^{-6} \beta^{-2.50} \quad (1)$$

Fig.4 は、大阪の風速の超過確率に基づいて作成したものであるが、強風の原因として台風が主体となる日本の殆どの地域では、基準風荷重で横軸を基準化した場合、風荷重比の超過確率は、9 章で示すように大きくは変わらない。

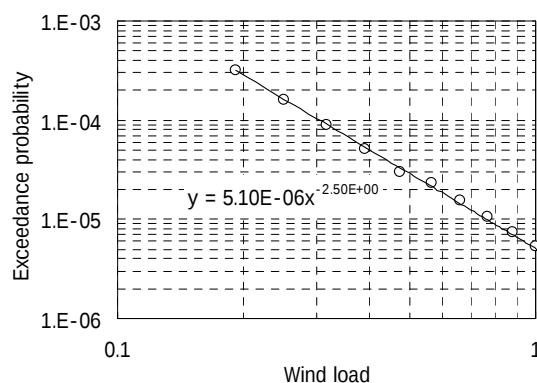


Fig.4 Exceedance probability of wind load

4. 風荷重の繰返し回数

供用期間内に建築物等に作用する荷重レベル β 以上の風荷重の繰返し回数は、前章で示した風荷重の超過確率より、

$$N = F \times T \times \nu = 5.10 \times 10^{-6} \beta^{-2.50} T \nu \quad (2)$$

で表される。ここに T, ν は供用期間及び単位時間あたりのピークの回数を示している。

建築物等の累積疲労損傷を評価する場合には、単位時間あたりの応答のピーク回数の算出することが必要である。このために、風による建築物の応答計算が必要となる。しかし、外装材等のように、風力変動に伴う共振が大きくなり応答が風力変動に追従するものについては、単位時間当たりの応答の繰返し回数は、風力変動のピーク回数、即ち風荷重のピーク回数に等しいと考えてよい。ここでは、外装材等の累積疲労を考え、供用期間を 50 年、単位時間当たりのピークを 1 回 / 秒と仮定した。通常、風の乱れによる風速変動の卓越周期は、風速が大きくなるとともに高周波数領域に移動するので、荷重レベルの増大とともに、単位時間のピーク回数も大きくなると予想されるが、文献(5)に示された計算によればピーク回数の風速による増加はあまり顕著ではなく、このように近似しても、疲労安全性の評価に大きくは影響しないと考えられる。

以上の仮定により、風荷重レベル β と繰返し回数 N との関係を(3)式で表すことができる。

$$N = 8.04 \times 10^3 \beta^{-2.50} \quad (3)$$

なお、風荷重の性質が大阪との大きく異なる場合や、ピーク回数が異なる場合には、(3)式は一般に(4)式で表される。

$$N = a_1 \beta^{-a_2} \quad (4)$$

ここに、 a_1, a_2 は風荷重の繰返し回数を定める係数である。

5. 基準風荷重の再現期間

再現期間が異なる場合の荷重を基準とする場合には、荷重比が再現期間に応じて変化する。荷重指針（日本建築学会(1993)）によれば、任意の再現期間に対する設計風速は、(5)式で示される補正係数（再現期間換算係数）を基準となる設計風速を乗じることによって求めることができる。なお、荷重指針での基準再現期間は100年であり、建築基準法や本解析の基準とした50年とは異なるので、ここでは補正係数に100年再現期待値と50年再現期待値の比を乗じている。

$$R = 1.074 \times (0.54 + 0.1 \ln(r)) \quad (5)$$

ここに、 r は再現期間である。なお、2004年に改訂された荷重指針では、再現期間の換算は500年再現期待値と100年再現期待値に基づいて算定するように変更され、日本の各地で異なる補正方法が取られるようになっている。本研究では、なるべく簡単に計算することができることを目的として、建築基準法に準拠した1993年版の荷重指針の換算係数補正係数を用いることにした。

したがって、任意の再現期間に対する荷重比は、

$$\beta_r = R^2 \beta \quad (6)$$

となる。(3)式の β に(6)式を代入すれば、任意の再現期間を基準とした風荷重に対する荷重比と供用期間内の繰り返し回数 N との関係は(7)式で表される。

$$N = F \times T \times \nu = 5.10 \times 10^{-6} \beta_r^{-2.50} T \nu \quad (7)$$

6. 建築物等の累積疲労損傷

建築物等の疲労試験によれば、多くの場合、応力レベルと疲労に至る繰り返し荷重回数の関係、即ちSN曲線は、Fig.5に一例を示したように、(8)式によって近似することができる。

$$N' = c_1 \gamma^{-c_2} \quad (8)$$

ここに N' は繰り返し荷重回数、 γ は載荷応力レベルを設計許容応力によって基準化したもの、即ち設計許容応力に対する載荷応力の比、 c_1, c_2 は建築物等の疲労限度を定める係数（ c_1 は載荷応力レベルが設計荷重の場合の疲労に至る繰り返し回数、 c_2 は曲線の傾き疲労を表している）。

疲労損傷の度合いは、(8)式で表される疲労限度に達する載荷回数と、実際に建築物等に作用する風荷重の繰り返し回数の比で表され、その累積和、即ち累積疲労損傷が1を超える時に疲労破壊が生じる。即ち、

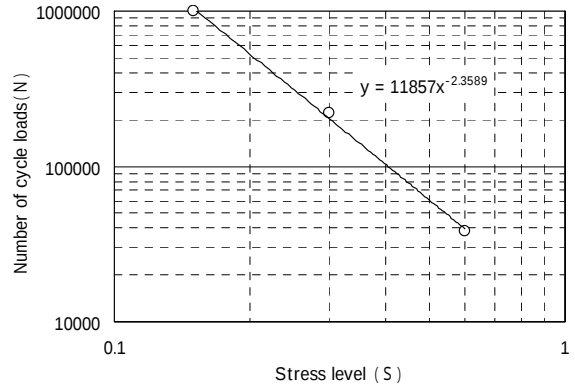


Fig.5 SN curve for a metal panel

$$\sum \frac{n(\beta_i)}{N'(\beta_i)} = \int_{P_U}^{P_L} \frac{dN(\beta)}{N'(\beta)} > 1 \quad (9)$$

が成立すれば建築物等は疲労破壊すると仮定する。ここに $n(\beta_i)$ は β_i レベル風荷重の繰り返し回数、 P_L, P_U は風荷重の下限および上限である。(4)式より、

$$dN(\beta) = \frac{dN}{d\beta} d\beta = -a_1 a_2 \beta^{-a_2-1} d\beta \quad (10)$$

となるから、(6)式は

$$\int_{P_U}^{P_L} \frac{dN(\beta)}{N'(\beta)} = \frac{-a_1 a_2}{c_1 (c_2 - a_2)} \left(P_L^{(c_2 - a_2)} - P_U^{(c_2 - a_2)} \right) \quad (11)$$

となる。疲労破壊しない、即ち累積疲労損傷が1より小さいという条件より、 c_1 と他の係数との関係を求めると、

$$\frac{-a_1 a_2}{(c_2 - a_2)} \left(P_L^{(c_2 - a_2)} - P_U^{(c_2 - a_2)} \right) < c_1 \quad (12)$$

となる。したがって、 a_1, a_2, c_1, c_2 が(12)式の条件を満たせば疲労損傷は生じない。

Fig.6は、前述の大阪の場合より作成した荷重の繰り返し回数(3)式より $a_1 = 8.04 \times 10^3$ 、 $a_2 = 2.50$ として、(12)式の関係を図に表したものである。図の曲線が疲労限度を表す。この曲線より上側が疲労破壊しない領域、下側が疲労破壊する領域である。

この図に基づいて設計された建築物等が疲労するかどうかを簡単に判定することができる。例えば、疲労試験の結果、建築物等の疲労特性がFig.5に示すSN曲線で表される場合、 $c_1 = 1.19 \times 10^4$ 、 $c_2 = 2.36$ となる。これをFig.6にプロットしたのが白丸である。白丸は、疲労限界曲線より左下にあるので、この場合、通常の手順で設計されたこの建築物等は疲労破壊を起こすと考えられる。

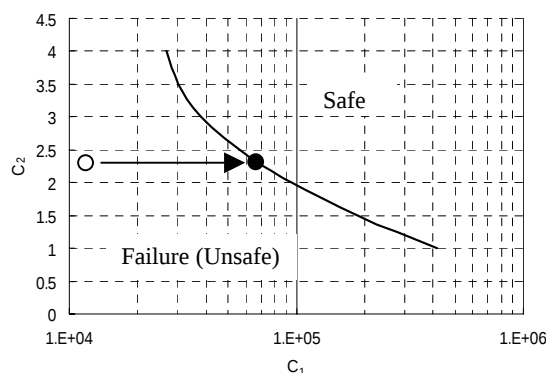


Fig.6 Criteria for fatigue

7. 安全率と累積疲労損傷

Fig.6の疲労限度曲線に照らして、建築物等が疲労破壊すると判定される場合には、設計用許容応力を下げ、設計に余裕を持たせなければならない。本章では、どの程度の余裕が必要となるかを算定する。安全率即ち許容応力の余裕度を c とした場合、(8)式は(13)式のように変更される。

$$N' = c_1 \left(\frac{\gamma}{c} \right)^{-c_2} \quad (13)$$

したがって、累積疲労損傷は、

$$\int_{P_U}^{P_L} \frac{dN(\beta)}{N'(\beta)} = \frac{-a_1 a_2 c^{-c_2}}{c_1 (c_2 - a_2)} \left(P_L^{(c_2 - a_2)} - P_U^{(c_2 - a_2)} \right) \quad (14)$$

で表される。したがって、必要な余裕度は、

$$c = \left\{ \frac{-a_1 a_2}{c_1 (c_2 - a_2)} \left(P_L^{(c_2 - a_2)} - P_U^{(c_2 - a_2)} \right) \right\}^{\frac{1}{c_2}} \quad (15)$$

となる。

疲労判定によって疲労すると判定される場合に、安全率をどの程度にすれば良いか、Fig.6を用いて算出することが可能である。Fig.6中の白丸は、前述したように、疲労判定の結果、疲労を起こすと判定された外装材のパネルの c_1 、 c_2 をプロットしたものである。疲労破壊を起こさないためには、Fig.6に示したように、白丸を黒丸の位置にまで高める、即ち、当初の設計用荷重が作用した時の疲労限繰り返し回数が $c_1 = 6.5 \times 10^4$ になるまで、設計用荷重を高めれば良い。そのための安全率は、白丸を黒丸の位置に移すための比 5.36 の $1/c_2 = 1/2.36$ 乗の 2.04 となる。

当初の設計用風荷重の再現期間が50年ではない場合には、5章で述べたように累積疲労損傷が再現期間に応じて、 R^{-2a_2} 倍変化する。Fig.7は、再現期間50年から500年に対応する疲労限界曲線を示したものである。

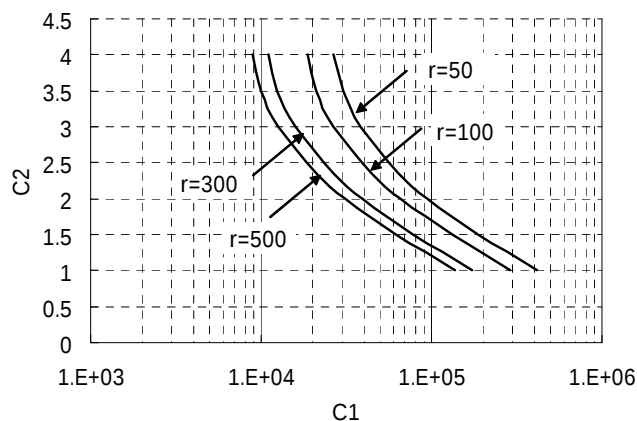


Fig.7 Design return period and criteria for fatigue

8. 風向の影響

建築基準法あるいは荷重指針に定められている外装材用の風力係数は、全ての風向から風が当たる場合の中で最も絶対値の大きい風圧係数の値である。しかし、累積疲労損傷のように、ある程度の期間にわたる繰り返し風荷重を対象としている場合には、この仮定はかなり安全側の評価を与える。本章では、建物の外壁に作用する最大風圧の風向による変化を考慮した場合の外装材の累積疲労損傷に及ぼす風向の影響について考察する。累積疲労損傷を計算するにあたって、ここでは、どの風向からも同じ性質の風が吹くという仮定をおき、風洞実験結果を元に風向の影響を考察した。

Table 1は、都市内に建設される事務所建築における風洞実験結果を基に、8風向に対する頂部隅角部付近における風荷重を、全風向の最大風荷重で基準化して示したものである。

Table 1に与えられた風向係数を考慮した場合の疲労損傷度は(16)式によって表される。

Table 1 Wind load for wind direction

WD	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Ci	0.3	1	0.3	0.2	0.4	0.3	0.7	0.2

$$\int_0^P \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 \frac{dN(\beta / c_i)}{N'(\beta)} \quad (16)$$

建築物等のSN曲線がFig.5で表される場合には、

$$\begin{aligned} \int_0^P \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 \frac{dN(\beta / c_i)}{N'(\beta)} &= \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 \int_{P_L}^{P_U} 1.69 c_i^{2.5} \beta^{-1.14} d\beta \\ &= 0.67 \sum_{i=1}^8 c_i^{2.5} = 1.13 \end{aligned} \quad (17)$$

となる。したがって、風向の影響を考慮した場合には、Fig.5で表される建築物等の累積疲労損傷は1.13となる。これは、風向の影響を考慮しない場合に(11)式から計算される累積疲労損傷5.37よりかなり小さいが、累積疲労損傷は1を超えており設計には余裕が必要であ

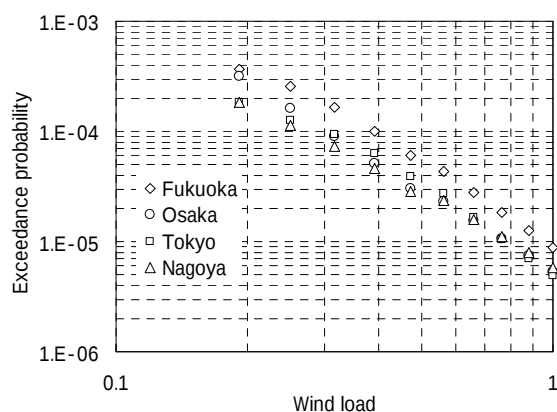


Fig.8 Exceedance probability of wind speed in cities

る。その場合の必要な余裕度は，

$$c = 1.13^{1/2.36} = 1.06 \quad (18)$$

である。

本章で示した解析では，どの風向からでも等しい確率で風が吹くと考えているが，実際には風向によって風速の超過確率は大きく異なる。したがって，個々の建物等の累積疲労損傷を精確に評価するために，風速風圧係数に関するより詳しい資料が必要となる。

9. 日本各都市の風荷重の超過確率

これまでの議論では大阪の基準風荷重の超過確率に基づいて，建築物等の耐風疲労設計について論じた。これは，風速そのものの超過確率と異なり，基準風速に基づいて算出した基準風荷重の超過確率には地域差が少ないと推測したことによる。本章では，東京，大阪，名古屋，福岡の各都市の風速の超過確率について調べた基準風荷重の超過確率について検討する。使用したデータは増田他(2002)に基づいている。

Fig.8 に基準風荷重の超過確率を示したが，福岡を除いては各都市によってそれ程変わらないことが分かる。台風の襲来ひん度が多い福岡では，強風が吹く確率が他の都市に比べて大きく，強風における風速の頻度が大きくなったと考えられる。なお，福岡の場合，基準風速を 37m/s にすると，超過確率はほぼ他の都市と同程度になる。したがって，本データから，建築基準法に示されている福岡の基準風速が若干低めではないかと推定される。

各都市での基準風荷重の超過確率を決める a_1, a_2 を Table 2 に示した。これによって分かるように，超過確率の形を左右する a_2 にはあまり大きな差がなく，予想されたように，超過確率の差は基準風速の差に基づいていると言える。

各都市での基準風荷重の超過確率を決める a_1, a_2 を

Table 2 に示した。これによって分かるように，超過確率の形を左右する a_2 にはあまり大きな差がなく，予想されたように，超過確率の差は基準風速の差に基づいていると言える。

Table 2 Parameter of reference wind load in cities

	$a_1(\times 10^3)$	a_2
Tokyo	8.29	2.39
Osaka	8.04	2.5
Nagoya	8.75	2.22
Fukuoka	14.0	2.45

10. 結論

通常のプロセスによって耐風設計された建築物等の風による累積疲労損傷を評価する簡単な方法を導き，それに基づいて疲労判定図を作成した。この判定図を使うことによって，設計応力レベルで基準化した疲労曲線（S-N曲線）が分かれば，極めて簡単に疲労損傷の判定をすることができる。また，判定図によって疲労すると判定された時に必要な，設計余裕度即ち安全率も算出することが可能である。

参考文献

- 大熊武司・中込忠男・丸川比佐夫(1988)：強風による鋼構造骨組の累積疲労損傷（その1 強風の発生頻度の推定），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.76-77
- 大熊武司・中込忠男・丸川比佐夫(1988)：強風による鋼構造骨組の累積疲労損傷（その2 疲労損傷の推定），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.77-78
- 成岡弘之・泉満・浅見豊(1994)：風荷重に対する高層鋼構造骨組の疲労設計，日本建築学会構造系論文集，第465号，pp.129-137
- 松井正宏・矢部喜堂・日比一喜，堀江竜巳(1993)：風応答による鋼構造部材の疲労評価，鋼構造年次論文報告集，第1巻，pp.481-488
- 多賀直恒・岡田恒・河瑛徹(1991)：風力によるアルミサッシ窓枠接合部の累積疲労損傷，日本風工学会誌，第50号，pp.3-18
- 増田誠・大竹和夫・東野雅彦・濱口弘樹(2002)：高層免震建物の風応答に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.465-466
- 日本建築学会（1993）：建築物荷重指針・同解説，第6章 風荷重.
- 日本建築学会（2004）：建築物荷重指針・同解説，第6章 風荷重.

Wind induced fatigue resistance design for structures and claddings

Hiromasa Kawai, Masanori Fujita*

*Nittetsu Steel Sheet Co. Ltd.

Synopsis

Wind induced cumulative fatigue is one of cause of damage of structures and claddings in strong wind. The simple procedure for cumulative fatigue damage is proposed in the paper. A checking diagram is given for structures and claddings which are designed under allowable stress analysis for wind loads. If fatigue characteristics expressed by a SN curve are known for structures or claddings, it can be easily checked by the diagram whether they are safe or not for wind induced fatigue failure. The safety factor for the design wind loads can be also estimated by a simple procedure when the fatigue failure is expected by the diagram. The diagram may be used for any design wind loads for various types of structures and claddings.

Keywords: wind load, cumulative fatigue damage, exceedance probability, wind blowing duration, cladding