

疲労損傷評価のための暴風の 累積作用時間の簡易評価方法

大熊 武司* 安井 八紀** 吉江 慶祐***

Simple Method for Evaluating Cumulative Time of Wind Speed for Estimating Fatigue Damage

Takeshi OHKUMA* Hachinori YASUI** Keisuke YOSHIE***

1. はじめに

近年、材料の塑性変形によるエネルギー吸収能力を利用した部材を超高層建築物に適用する事例が増加してきている。このような塑性変形を伴う部材の風荷重に対する安全性は、設計風速に対する安全性の他、累積疲労損傷度も重要な照査項目である。この風に対する累積疲労損傷度を評価するためには、対象とする期間に渡る風速の累積作用時間の算定、各風速における応答振幅の算定および疲労曲線が必要となる。また、この算定する期間には、ダンパーのように取換可能な部材を対象とした期間、積層ゴムのように取換が困難な部材を対象とした期間が考えられるが、現状いずれも法的に特定されるものではない。ここでは、照査の対象期間という意味で照査期間と呼ぶこととする。

照査期間における風速の累積作用時間の算定方法としては幾つかの方法が提案²⁾³⁾⁴⁾されているが、近年では、その暴風の発生要因を台風と非台風に区分し、前者については Monte Carlo 法に基づく台風シミュレーション(以降、台風シミュレーションと呼ぶ)、後者については近隣の気象官署の観測データを Weibull 分布に当てはめ、その結果から算定する方法がしばしば用いられている⁵⁾。

しかしながら、台風シミュレーションを用いるためには、台風データの確率統計的な分析とこの結果の運用が必要となる。また、得られる結果が「建築物荷重指針・同解説(2004) 日本建築学会」(以降、荷重指針と呼ぶ)等

における設計風速に対し、どのような位置づけとなるかが解り難いといったこともある。

本報告は、文献 2)~4)の考え方を参考に、荷重指針から暴風の累積作用時間を簡易に評価する方法を提案し、その有効性を示した文献 1)に加筆したものである。

2. 暴風の最大風速の簡易評価方法

2.1 評価方法の概要

荷重指針には、再現期間 100 年と 500 年の平均風速(それぞれ、 U_0 、 U_{500})が風速マップとして示されており、さらに、これら以外の再現期間 r 年に対応する最大風速については、再現期間換算係数 k_{rw} を用いて以下のように算定できるとしている。

$$U_r = U_0 k_{rw} \quad (1)$$

$$k_{rw} = 0.63(\lambda_U - 1) \ln r - 2.9\lambda_U + 3.9 \quad (2)$$

$$\lambda_U = U_{500}/U_0 \quad (3)$$

これらの式から、式(1)は以下のように表わすことができる。 $r_i = 1/P_i$

$$U_r = 0.63(U_{500} - U_0) \ln r - 2.9(U_{500} - U_0) + U_0 \quad (4)$$

式(2)の再現期間換算係数 k_{rw} は、年最大風速の漸近極値分布として下式(5)の Gumbel 分布を仮定し、再現期間 100 年および 500 年の風速がそれぞれ U_0 および U_{500} に一致するように近似したものである。

$$U_i = b - \{\ln(-\ln F_i)\}/a \quad (5)$$

$$F_i = 1 - P_i \quad (6)$$

$$r_i = 1/P_i \quad (7)$$

ここに、 N は観測年数あるいは照査期間、 r_i は i 番目に大きな風速の経験的再現期間、 F_i は経験的非超過確率、 P_i は経験的超過確率である。因みに Hazen プロットによる P_i は次式のように表される。

* 名誉教授、工学研究所客員教授

** Professor Emeritus

*** 泉創建エンジニアリング都市環境技術研究所

**** Izumi Sohken Engineering Co., Ltd.

***** 日建設計

***** Nikken Sekkei Ltd.

$$P_i = (i - 0.5)/N \quad (8)$$

疲労損傷評価においては、年最大の暴風だけでなく、年2位以下の暴風も考慮する必要があると考えられるため、荷重指針の再現期間換算係数の定め方を参考にしつつ、修正 Jansen & Frank 法により経験的超過確率を評価することとし、式(6)~(8)の代わりに以下の式(9)~(12)を用いる。

$$F_i = (1 - P_i)^m \quad (9)$$

$$P_i = (i - 0.5)/mN \quad (10)$$

$$r_i = 1/mP_i \quad (11)$$

$$m = N_S/N \quad (12)$$

ここに、 N_S は観測年数あるいは照査期間の暴風数、 m は年平均の暴風数であり、式(5)に式(9)を代入すれば以下のように表わされる。

$$U_i = b - [\ln\{-m \ln(1 - P_i)\}]/a \quad (13)$$

因みに、荷重指針で採用されている式(5)~(8)は、式(9)~(13)において年平均の暴風数 m を 1 とした場合の式に相当する。

式(13)によって算定される再現期間 100 年および 500 年の風速がそれぞれ U_0 および U_{500} に一致する条件を与え、荷重指針と同様の形式に書き改めると以下のように表わされる。

$$U_i = (U_{500} - U_0)C_i \ln r_i / A - (U_{500} - U_0)B/A + U_0 \quad (14)$$

$$A = \ln\{\ln(1 - 1/500m)/\ln(1 - 1/100m)\} \quad (15)$$

$$B = \ln\{-m \ln(1 - 1/100m)\} \quad (16)$$

$$C_i = \ln\{-m \ln(1 - 1/mr_i)\}/\ln r_i \quad (17)$$

再現期間を 10 年~5000 年、年平均の暴風数 m を 1~10 として、式(14)中の C_i/A および B/A を算定すると以下のような値となり、同式が荷重指針の式(4)と殆ど差異のない式であることがわかる。

$$C_i/A \approx 0.61 \sim 0.62, \quad B/A \approx 2.9$$

したがって、年平均の暴風数 m が自明であれば、照査期間中の i 番目に大きな最大風速 U_i の再現期間 r_i は式(11)で算定でき、その最大風速 U_i は荷重指針による式(4)で得られることになる。

2.2 年平均の台風数 m_T

年平均の暴風数について検討するに当たり、まず、台風に限って検討する。ここでは、台風シミュレーションを用いて年平均の台風数 m_T を算定する。台風シミュレーションは以下のような条件のもとに行っている。

- ① 荷重指針と同質のシミュレーション結果が得られることを確認するため、荷重指針と同様に 5000 年の台風シミュレーション⁶⁾を実施する。ただし、台風シミュレーション結果のばらつき

について検討するため、この 5000 年の台風シミュレーションを 10 組行う。

- ② 概ね日本全国に渡っての情報を得るため、台風シミュレーションの対象地点は、表1および図1に示す気象官署 29 地点とする。なお、本報告においては、伊豆諸島、薩南諸島、大東諸島、先島諸島および小笠原諸島を検討対象外としている。これは、この地域の暴風の風速の時間変化が、ここで対象とする九州以北の地域と異なると考えられるためである。従って、これらの検討対象外の地域については、ここで提案する暴風の累積作用時間の簡易評価方法においても適用範囲外である。
- ③ 再現期間 100 年の風速が基本風速 U_0 と一致するように上空風に対する地上風の風速比を決定する。ただし、基本風速 U_0 、マップからの風速の読み値は 2m/s 刻みとする。
- ④ 10 分平均風速の変動係数を 0.10⁶⁾とする。
- ⑤ 中心気圧が 980hPa 以下で、その中心が検討地点から 500km 以内に位置した台風の数をも台風数 m_T とする。

台風数 m_T と共に、荷重指針における U_{500} と台風シミュレーションによる再現期間 500 年の風速 U_{500S} を比較して表1および図1に示す。

表1 再現期間 500 年の風速と年平均台風数 m_T

官署	U_0	U_{500}	U_{500S}	m_T
札幌	32	36	36.5	0.53
青森	32	36	36.6	0.75
秋田	36	40	41.1	0.90
宮古	32	36	36.1	0.96
酒田	36	40	40.7	1.06
仙台	32	36	35.7	1.23
新潟	38	42	42.6	1.28
小名浜	34	38	38.1	1.59
釜沢	34	38	37.9	1.51
前橋	32	36	35.9	1.70
水戸	32	36	35.4	1.75
松本	30	34	33.7	1.69
東京	38	42	42.4	1.94
敦賀	34	38	37.9	1.73
鳥取	32	36	35.6	1.61
名古屋	34	38	37.7	1.94
大阪	36	40	39.8	1.96
岡山	30	34	33.3	1.79
広島	30	34	33.0	1.69
和歌山	40	42	44.2	2.05
徳島	40	44	44.0	2.03
福岡	34	38	37.9	1.59
高知	40	44	44.2	2.05
潮岬	40	42	43.6	2.35
大分	32	36	35.3	1.87
熊本	34	36	37.7	1.83
長崎	38	42	42.1	1.71
宮崎	36	40	39.7	2.18
鹿児島	42	46	46.0	2.13

U_{500S} : 台風シミュレーションによる再現期間500年の風速

対する等価継続時間は、風速の9乗に概ね比例する。この考え方に従うと、基本風速に対する再現期間約1年の風速の等価継続時間は13%~1%と小さく、上位N個の最大風速 U_r がある程度精度良く予測できれば、累積疲労損傷評価には十分と考えられる。

3. 暴風の時間変化の算定法

疲労損傷評価においては、暴風の最大風速の予測だけではなく、風速の時間変化の情報も必要となる。この情報については荷重指針では得られないため、先に求めた台風シミュレーションの結果から、風速の時間変化をモデル化する。なお、荷重指針における最大風速は台風に限定されたものではないが、非台風の時間変化も台風と同様であると見なすこととする。

暴風の時間変化のモデル化手順を以下に示す。

- ① 最大風速が再現期間1年~500年の暴風のみを対象とする。これは、照査期間N年においてN番目に大きな最大風速の再現期間が概ね1年に相当すること、建築基準法施行令第81条の2に該当する建築物において安全性の検証が求められる「極めて稀に発生する暴風」の再現期間が概ね500年に相当することを考慮したものである。
- ② 暴風の継続時間は、中心気圧が980hPa以下で、その中心が検討地点から500km以内である時間と24時間の内の短い方とする。
- ③ 各台風の風速を降順に並び替え^{3),4)}、時刻t毎に合計し、時刻t=0の風速に対する比 $r_U(t)$ を求める。
- ④ 風速比 $r_U(t)$ の高い12時間を式(19)で、24時間全体を式(20)によって回帰する。

$$r_U(t) = (1 + C_1 t) / \text{Exp}(C_2 t^{0.70}) \quad (19)$$

$$r_U(t) = (1 + C_3 t^{2.2}) / \text{Exp}(C_4 t^{1.2}) \quad (20)$$

ここに、t:時刻(h)

図1に示した29地点についての算定結果の内、16地点の結果を図3に示す。なお、図中では○印が台風シミュレーション結果、波線が式(19)による回帰曲線、実線が式(20)による回帰曲線である。

同図に示すように、式(19)による回帰曲線は台風シミュレーション結果と風速比の高い0~12時間まででは良く一致しており、12時間以降については安全側に評価されている。また、式(20)による回帰曲線は24時間全体に渡って台風シミュレーション結果と良く一致している。

因みに、ここに示した簡易評価方法と成原等³⁾の方法との違いは、以下の通りである。

- ① 本法ではその基となった台風シミュレーション

に10分平均風速の変動係数を考慮していることに対して、成原等³⁾の方法では考慮していない。

この違いは、風速比でみると、前者に比較して後者は高めの値を与えることになる。

本法が式(19)および式(20)に示すように風速比-時間関係をモデル化しているに対して、成原等³⁾の方法では超過継続時間-風速比の関係がモデル化されている。

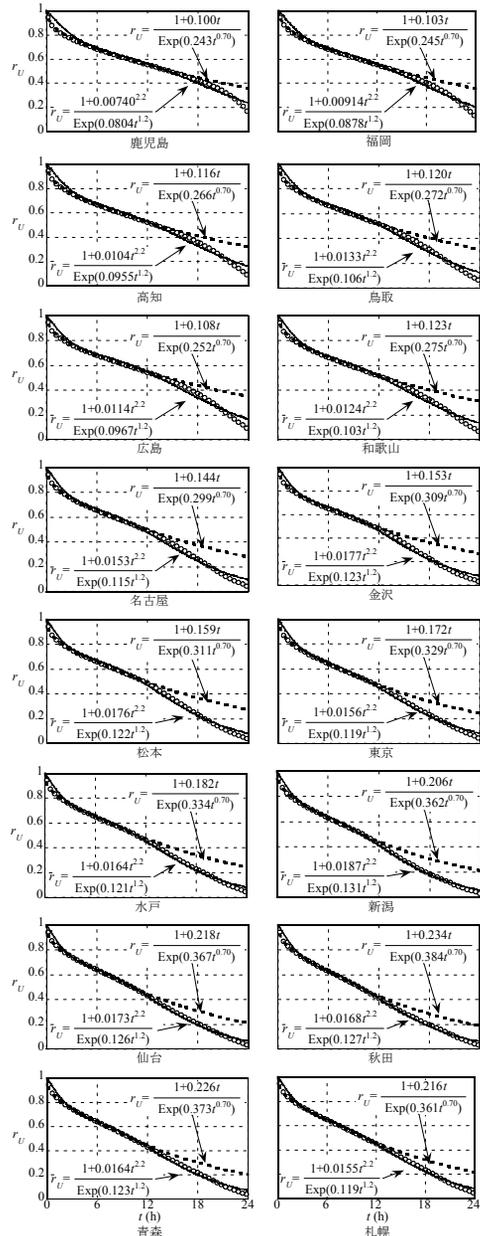


図3 風速比の時間変化

図3に示す風速比-時間の関係を地点別に比較した場合、南西側から北東側になるにつれて時間に対して風速比が大きく低減する傾向にある。また、係数 $C_1 \sim C_4$ は、緯度が高くなると大きくなる傾向がある。これらは、九州以北では、台風の移動方向がこの方向と概ね一致すること、加えて北上するに従って台風の移動速度が速くなる傾向にあることに関連していると考えられる。

この傾向を踏まえ、概ね日本全国に渡っての係数を簡易に評価するため、緯度をパラメータとし、式(21)~(24)によって係数 $C_1 \sim C_4$ を近似する。図4に図1に示した全29地点の結果を用いて近似した結果を示す。

$$C_1 = \min(-0.532 + 0.0192\theta_N, 0.217) \quad (21)$$

$$C_2 = \min(-0.444 + 0.0210\theta_N, 0.375) \quad (22)$$

$$C_3 = \min(-0.0565 + 0.00201\theta_N, 0.0199) \quad (23)$$

$$C_4 = \min(-0.196 + 0.00870\theta_N, 0.135) \quad (24)$$

ここに、 θ_N は緯度(°)である。

図4に示すように式(21)~(24)は、台風シミュレーション結果を式(19)および式(20)で直接近似して得られる $C_1 \sim C_4$ に良く対応している。因みに、風速比の時間変化は、 $C_1 \sim C_4$ および時間に関するべき数に比較的鈍感であり、図4に示される近似の程度で十分精度良く風速比-時間関係を表わせることを確認している。

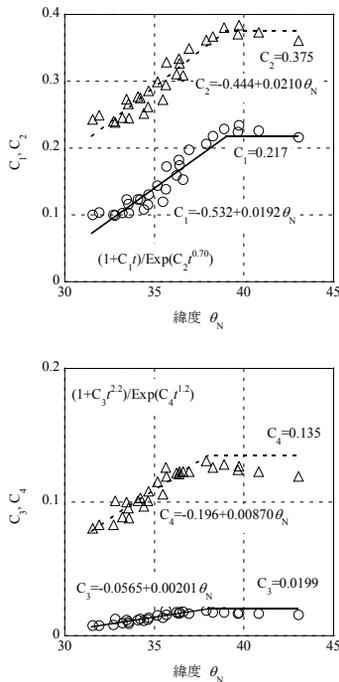


図4 風速比-時間関係を表わす係数

4. 累積作用時間の算定例とその有効性

ここでは、照査期間 N を 100 年および 250 年として、照査期間中の累積作用時間の算定例を示し、台風シミュレーション結果に基づいて算定した累積作用時間と比較することで、その有効性を示す。

4.1 算定条件の概要

最大風速が、照査期間 100 年の場合には再現期間 200 年以下、照査期間 250 年の場合には再現期間 500 年以下である暴風のみを対象とする。簡易評価方法における風速比の時間変化のモデル式には、安全側の評価となる式(19)、式(21)および式(22)を用いる。なお、松井等⁷⁾の提案する等価継続時間の考え方から判断すると、最大風速の 60%以下となる 12 時間以降の評価精度は、累積疲労損傷度の評価精度への影響は小さく、式(19)、式(21)および式(22)を用いても、式(20)、式(23)および式(24)を用いてもその差異は小さい。

台風シミュレーションでは、照査期間 100 年の場合には 500 組、照査期間 250 年の場合には 200 組算定し、それらの平均値に加えて、松井等⁷⁾が提案する疲労損傷評価において等価継続時間が最大となる 1 組、および最小となる 1 組を抽出する。

4.2 累積作用時間の算定結果

鹿児島、名古屋、水戸および仙台を事例に、風速のビンを 1m/s として算定した各風速の累積作用時間を図 5 に示す。

いずれの地点においても、照査期間に関わらず、簡易評価方法による累積作用時間は、台風シミュレーションによる累積作用時間の平均から等価継続時間が最大となる組の累積作用時間の値を取り、妥当な値を示している。照査期間中で最も高い風速における累積作用時間に着目すると、台風シミュレーションによる平均値は 10 分に満たない値となっている。設計との整合性を考えると、照査期間中で最も高い風速の累積作用時間は、台風シミュレーションによる平均値で評価すると危険側に評価される可能性があり、注意が必要である。なお、簡易評価方法においては、算定法の性質上、累積作用時間が 10 分を下回ることはない。

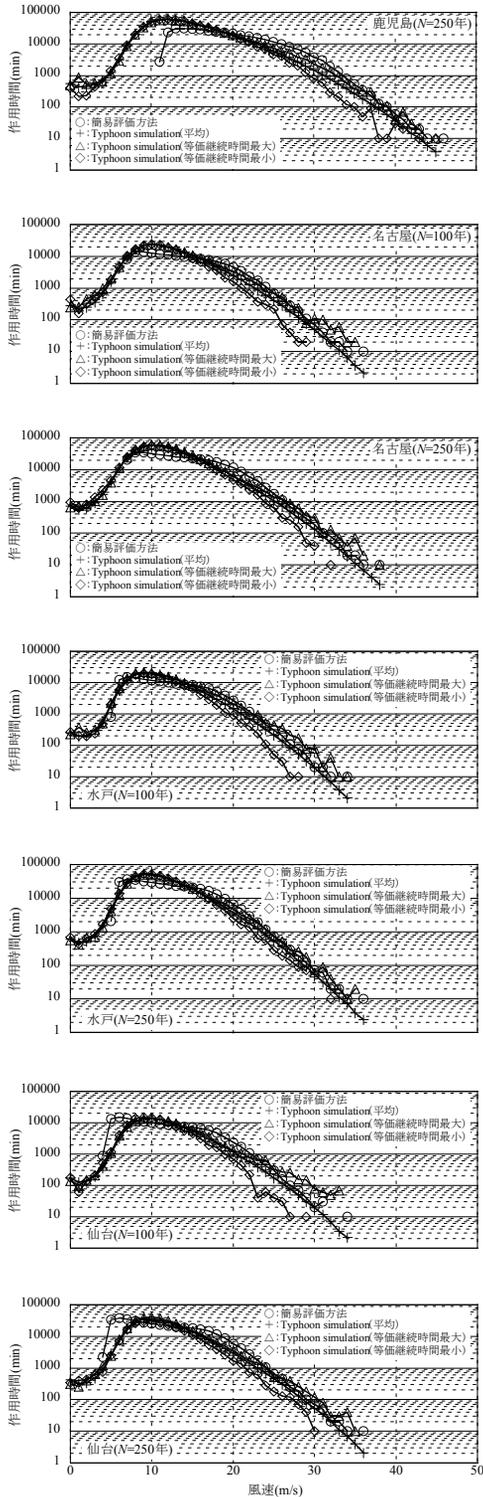


図5 風速の累積作用時間の算定例

4.3 等価継続時間

算定地点を鹿兒島, 福岡, 高知, 鳥取, 名古屋, 金沢, 新潟, 東京, 水戸, 仙台, 秋田, 青森および札幌の計13地点について, 累積疲労損傷を対象として, 最大風速を U_{500} とする暴風1つの等価継続時間を図6に示す. 同図に示すように, 最大風速を U_{500} とする暴風の等価継続時間は, 簡易評価方法では50分~70分, 台風シミュレーションでは30分~45分であり, 簡易評価方法の方が安全側の評価となっている. また, 東京における等価継続時間が, 簡易評価方法では59分, 台風シミュレーションでは36分であることと, 松井等⁷⁾が試算した「観測記録より合成した風速記録(羽田, 最大風速:42.0m/s)」の等価継続時間49分とを比較すると, 簡易評価方法による等価継続時間はやや長めで, 安全側の評価となっている.

図7に照査期間100年および250年の場合の等価継続時間を示す. 同図に示すように, 簡易評価方法による等価継続時間は, 台風シミュレーションによって得られる最大の等価継続時間と概ね等しいか, 大きめの値である. さらに, 図7b)の照査期間が図7a)の2.5倍であることに着目して, 図7a)に対する図7b)の等価継続時間の倍率を比較すると, 簡易評価方法による等価継続時間は2.5倍よりやや大きめであるに対し, 台風シミュレーションによる最大の等価継続時間は2.5倍より小さめの傾向にある. 照査期間が250年を超えるような場合には, 簡易評価方法による累積作用時間は過大となることが予想される.

図8に図6に示した各照査期間における暴風の等価継続時間を図7の最大風速を U_{500} とする暴風の等価継続時間で除した値(以降, U_{500} 暴風への換算個数と呼ぶ)を示す. 同図に示すように換算個数は, 照査期間100年の場合で3~12個, 照査期間250年で7~22個で, 南側程大きい傾向にある.

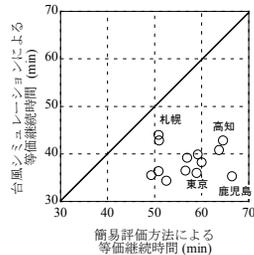


図6 最大風速を U_{500} とする暴風の等価継続時間

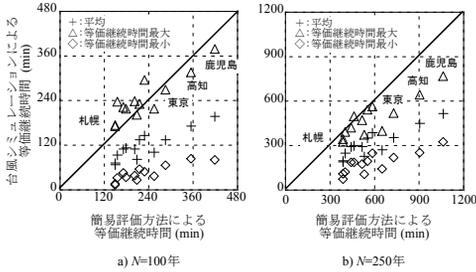


図7 照査期間と等価継続時間

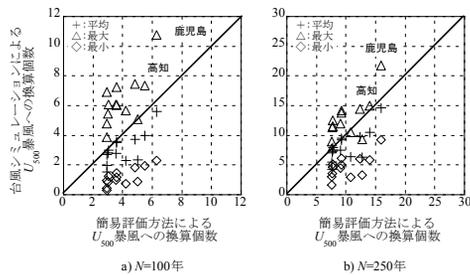


図8 照査期間と U_{500} 暴風への換算個数

5. まとめ

ここでの検討と提案を事例に適用することで解ったことをまとめると次のようになる。

- ① 九州以北においての年平均の台風数は 0.5~2.3 程度の値で、台風以外の暴風を含めると年平均の暴風数は 1 を超えると考えられる。
- ② 修正 Jansen & Frank 法によって算定した経験的再現期間を荷重指針に代入して照査期間 N 年における暴風の最大風速を求める方法を示した。この方法によって算定される上位 N 個の暴風の経験的再現期間および最大風速は、年平均の暴風数が 1 以上であれば、年平均の暴風数に依存しない。
- ③ 松井等⁷⁾の提案する等価継続時間の考え方から、照査期間 N が 250 年以内の場合は、上位 N 個の最大風速がある程度の精度で予測できれば、累積疲労損傷評価には十分と考えられる。
- ④ 提案する暴風の時間変化のモデル式(19)~式(24)は、伊豆諸島、薩南諸島、大東諸島、先島諸島および小笠原諸島を除く日本全土に渡って適用でき、簡易評価方法として有効である。

- ⑤ 簡易評価方法で算定される暴風の累積作用時間は、台風シミュレーションの平均値から最大値程度の値となり、安全側の結果を与え、有効である。
- ⑥ 台風シミュレーションによる累積作用時間の平均値は、高風速域でやや危険側の値となる場合がある。
- ⑦ 照査期間が 250 年を超える場合には、簡易評価手法による累積作用時間は過大となる可能性がある。

6. おわりに

文献 1) は、この 9 月に日本免震構造協会から刊行された「免震建築物の耐風設計指針」(耐風設計部会:委員長 大熊武司)の付録整備の一環として作成されたもので、ご議論いただいた関係各位に改めて謝意を表します。

参考文献

- 1) 安井八紀, 大熊武司, 吉江慶祐, 鶴見俊雄: 供用期間における暴風の累積作用時間の簡易評価方法 その 1, その 2, 日本建築学会関東支部研究報告集 I, pp.421~428, 2012
- 2) 大熊武司, 中込忠男, 丸川比佐夫: 強風による鋼構造骨組の累積疲労損傷 その 1, その 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.75~78, 1988
- 3) 成原弘之, 泉満, 浅見豊: 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, 1994.11
- 4) 安井八紀, 大熊武司, 廣川雅一, 吉江慶祐, 丸川比佐夫: 高層建築物の疲労損傷評価に与える強風特性のモデル化の影響に関する研究, その 1 強風特性のモデル化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.185~186, 2001.9
- 5) 日本建築学会: 風と地震による繰返し荷重効果と疲労損傷, シンポジウム資料, 2003
- 6) 安井八紀, 大熊武司, 吉江慶祐, 片桐純治, 廣川雅一: モンテカルロ法を用いた台風シミュレーションに関する研究, 第 16 回風工学シンポジウム, pp. 441~446, 2000
- 7) 松井正宏, 大熊武司, 田村幸雄, 飯場正紀, 竹中康雄, 吉江慶祐: 耐風設計で累積的荷重効果を評価するための強風イベントの等価継続時間, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B, pp.85~86, 2011.8