T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報 Article / Book Information

論題(和文)	建築物荷重指針・同解説を用いて風応答予測を行う際の風力スペクト ルの平滑化指標の提案					
Title(English)	Proposal of a Smoothing Index for Wind Force Spectra in Predicting Wind Response using RECOMMENDATIONS FOR LOADS ON BUILDINDS					
著者(和文)	小林稜, 佐藤大樹, 田中英之, 曽根孝行, 渡井一樹					
Authors(English)	Ryo Kobayashi, Daiki Sato, Hideyuki Tanaka, Takayuki Sone, Kazuki Watai					
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 477-480					
Citation(English)	, , , pp. 477-480					
発行日 / Pub. date	2023, 2					

建築物荷重指針・同解説を用いて風応答予測を行う際の

風力スペクトルの平滑化指標の提案

構造-振動

超高層建物 建築物荷重指針・同解説 風応答解析 パワースペクトル密度

1. はじめに

「建築物荷重指針・同解説」1)(以下,荷重指針)を用 いることで風荷重や応答を評価することが出来る。「荷重 指針」において風応答の標準偏差を求める際,解析モデル の固有振動数における入力風力のパワースペクトル密度 /Power Spectrum Density (以下, PSD) の値をホワイトノ イズと仮定することで、数値積分を行うことなく解析的 に求めることができる²⁾。しかし,固有振動数における入 力風力の PSD の値にばらつきがある場合、応答の標準偏 差の値に影響を及ぼし、精度が悪くなる。そのため本研究 では、荷重指針の予測式による風応答評価の高精度化を 目的としている。このばらつきを小さくする, つまりパワ ースペクトル密度を平滑化する方法として, 複数波によ るアンサンブル平均が用いられる。しかし、時間や費用の 面から風力データのサンプル数を確保することが難しい 場合も少なくない。加えて,風力の平滑化度合いを数値で 評価する方法が確立されておらず、異なる風力の平滑化 度合いを比較することが困難である。そこで,筆者らはア ンサンブル平均と移動平均を併用して入力風力の PSD の 平滑化を行った場合の、荷重指針による風応答予測と時 刻歴応答解析による風応答予測を比較することで、平滑 化が風応答予測に及ぼす影響の検証を行ってきた。文献 3)において,解析モデルの1次固有振動数1fに対する移 動平均の振動数幅の比(バンド比)を用いて風応答予測と 平滑化の関係を検証した。しかし、バンド比と予測精度の 間に明確な関係は見いだせなかった。そこで本報では,パ ワースペクトル密度を無次元化し、その極値に注目する 新たな平滑化の指標を提案し、その予測精度を検証する ことを目的とする。

2. 解析モデル概要

2.1 解析モデル

解析対象建物は、建物密度 ρ=175 kg/m³、質量は高さに

正会員 〇	小林稜*1	正会員	佐藤大樹*2
正会員	田中英之*3	正会員	曽根孝行*3
正会員	渡井一樹*3		

ー様であるとし,高さ H=200 m,辺長比 D/B=1 (D, B:幅,奥行き,D = B=40 m)の20 質点せん断型モデルと する⁴⁾。フレームの1次固有周期₁Tは,₁T=3.0 s, 5.0 s の2種類とし,建物の1次固有モードは直線の正規化モ ードとした。構造減衰は剛性比例型として,₁T それぞれ に対して1次減衰定数₁ ζ =1%,2%,3%,4%,5%の5種 類を用いる。

本報では、1次モードの風応答のみに注目し、1次モー ダル質量₁Mと1次モーダル風力₁Fとして与える水平1 自由度の1質点系モデルで解析・検討を行う。

2.2 入力風力

構造物に作用する風外力は風洞実験結果 $4 \circ$ 用いた。実 験気流は「荷重指針」の地表面粗度区分 III の気流を目標に 作成された。対象建物を想定した実験模型は、高さ 300 mm, D/B = 1.0 の角柱模型とし、層風力は高さ方向に 9 層 分測定した。基本風速は $U_0 = 36$ m/s,風速は再現期間 100 年の時に頂部風速 $U_H = 52.0$ m/s,再現期間 500 年の時 頂部風速は $U_H = 57.9$ m/sを想定した。検討用風外力は、 1 組につき 20 質点分の風力波形を 0.05 s 秒刻み 14000 ス テップとした。各風力波形前後に 50 s のエンベロープを 設け、中間の 600 s が重ならないように 10 組(wave1~10) 取り出した。その後、応答の減衰時間を考慮し、加力を行 わない 100 s のデータを最後に加えた 800 s×10 組で検討 を行った。検討用風力入力方向は、風直交方向とする。

予測式の概要

1次モーダル変位の標準偏差₁σ_qの予測値は式(1)(以下, 予測式)のように表すことが出来る²⁾。

$${}_{1}\sigma_{q} = \frac{{}_{1}\sigma_{F}}{{}_{1}M\left(2\pi_{1}f\right)^{2}} \sqrt{1 + \frac{\pi}{4_{1}\zeta} \frac{{}_{1}f_{1}S_{F}\left({}_{1}f\right)}{{}_{1}\sigma_{F}^{2}}}$$
(1)

ここで,₁*S_F*(1*f*):1次固有振動数₁*f*における1次モーダル 風力のパワースペクトル密度, 1*σ_F*:1次モーダル風力の標

Proposal of a Smoothing Index for Wind Force Spectra in Predicting Wind Response using"RECOMMENDATIONS FOR LOADS ON BUILDINDS"

Ryo KOBAYASHI , Daiki SATO , Hideyuki TANAKA, Takayuki SONE , Kazuki WATAI 準偏差である。 $_{1}f$ 付近における入力風力の PSD は振動数 の変化量に対するパワースペクトル密度の変化量(以降, ばらつき)が大きく、予測式の $_{1}S_{F(1f)}$ の値として PSD の 値を用いると、1 次モーダル変位の標準偏差 $_{1}\sigma_{q}$ にもばら つきを生じることが確認されている³⁾。そこで本報では、 入力風力のパワースペクトル密度をアンサンブル平均や 移動平均による平滑化を行い、 $_{1}S_{F(1f)}$ を算出したのち、予 測式(式(1))を用いて得られる $_{1}\sigma_{q}$ (以降, RLB)と時刻 歴応答解析による $_{1}\sigma_{q}$ (以降, THA)を比較し、平滑化度 合いと時刻歴応答解析に対する予測式の精度の関係を把 握し、平滑化指標を提案する。

4. 平滑化の評価

4.1 平滑化指標の概要

本節では、無次元化パワースペクトル密度₁ \widehat{S}_{NDF} を用いて、平滑化の指標を提案する。図1(a)、(b)のように無次元パワースペクトル密度の極値に注目し、固有振動数₁f に対して±50%の範囲³における極値同士の差の絶対値 (以下、振幅 ΔS)を抽出する。その後、図1(c)、(d)のように振幅 ΔS を並べ、 ΔS の標準偏差 Γ_{s} を式(2)から算出 し、 Γ_{s} と THA に対する RLB の比 RLB/THA との関係について検証を行う。

$$\Gamma_{s} = \sqrt{\frac{1}{j_{2} - j_{1} + 1} \sum_{j=j_{1}}^{j_{2}} \left(\Delta S^{(j)} - \Delta \overline{S} \right)^{2}}$$
(2)

ここで、 $j_1: \Gamma_s$ の計算を開始する点、 $j_2: \Gamma_s$ の計算を終了 する点、 $\Delta \overline{S}: \Delta S^{(j)}(j = j_1 \sim j_2)$ の平均値である。図1より、 $_{1}T = 3 \text{ s} \text{ ki}_{1}T = 5 \text{ s}$ の時に比べ Γ_{s} を計算する際の $j_{1} - j_{2}$ の範囲が広いことが分かる。また、 $_{1}T = 3 \text{ s}$ の時は $\Gamma_{s} = 0.30$ 、 $_{1}T = 5 \text{ s}$ の時は $\Gamma_{s} = 0.46$ となり $_{1}T = 3 \text{ s}$ の場合の方が Γ_{s} の値は小さくなる。これは、 $_{1}T = 5 \text{ s}$ における $j_{1} - j_{2}$ の範囲内にPSDのピークが存在したことでばらつきが大きくなったと考えられる。

4.2 平滑化指標を用いた評価

本報で検討に用いる平滑化の方法は、アンサンブル平 均と移動平均と2つとする。アンサンブル数は3波、5波、 10 波の3種類とし、移動平均はパワースペクトル密度の 振動数刻み Δf (=0.00125 Hz)を用いて、2 $n_s \Delta f$ (n_s =0~16) の17種類で検討を行う。

図2にアンサンブル数が3波(wave1~3),5波(wave1~5), 10波(wave1~10)の入力風力のパワースペクトル密度(有 次元)を $n_s=0$, 1, 8, 16で移動平均したもの,表2にそ の時の無次元化したパワースペクトル密度の振幅の標準 偏差 Γ_s の値を示す。図2,表1より, $n_s=0$ (移動平均前) の場合,アンサンブル数が大きくなると、 Γ_s の値も小 さくなっている。また、同じアンサンブル数で比較した場 合、 n_s の値が大きくなるとグラフも滑らかになり Γ_s の値 も小さくなっているが、 $n_s=16$ における Γ_s の値が $n_s=8$ に おける値より大きいことから、 n_s に限界がある可能性が ある。そこで次に、図3に n_s を増やした $n_s \ge \Gamma_s$ の関係を 示す。

図3より,移動平均幅 n_s が大きくなるにつれて Γ_s の値 が小さくなる傾向があるが, $n_s=8$ 付近を超えると n_s を大 きくしてもあまり Γ_s の値は変わらない結果となった。周



期に注目すると、 $_1T = 5 \text{ s}$ よりも $_1T = 3 \text{ s}$ の場合の方が Γ_s の値が大きく、図 1(a)、(b)から得られた結果と同様となった。また、アンサンブル数に注目すると、 $n_s = 0$ の場合はアンサンブル数が多いほど Γ_s の値は小さくなるものの、 n_s を大きくするとアンサンブル数によらないことも分かった。

以上のことより、*Γ*_sを小さくするためには *n*_sを大きく することが最も効果的で、次に₁*T*を短くすることである。 一方で、アンサンブル数を大きくしても移動平均ほどの 平滑化効果は期待できない。



表1 移動平均後の 厂。



5. 有効平滑化指標の決定

5.1 Г。と RLB/THA の関係

表 2 に本章で用いるパラメータを示す。また、THA に 対する RLB の比である RLB/THA と、その時の Γ_s の関係 を図 4 に示す。図 4 より、多くのケースが $\Gamma_s = 0~0.3$ 付近に集中しているように見受けられる。そこで次節に おいて、RLB/THA の誤差が±10%となるデータが多く含 まれる範囲について検証を行い、その Γ_s の範囲を決定し、 これを有効平滑化指標と呼ぶこととする。

表2 検討パラメータ



5.2 有効 / の決定

本節では、RLB/THA が±10%となるデータが多く含ま れる Γ_s の範囲を決定するために、式(3)のように、*j*番目 のビンにおけるサンプル数に対する *j*番目のビンにおい て誤差が±10%となるサンプル数の比 $\lambda_{s10}^{(j)}$ (以降,成功率) を定義する。

$$\lambda_{s10}^{(j)} = \frac{N_s^{(j)}}{N_{smp}^{(j)}}$$
(3)

ここで、 $N_s^{(j)}$: *j*番目のビンにおいて、誤差が±10%となる サンプル数、 $N_{smp}^{(j)}$: *j*番目のビンにおけるサンプル数であ る。図 5 に、 Γ_s が 0 から 0.6 まで 0.01 刻みで λ_{s10} を算出 したものとそれぞれの N_{smp} を示す。

図5より、データ数 N_{smp} には偏りがあり、 N_{smp} の値が 小さすぎる場合に λ_{s10} の評価に偏りが生じることが考え られる。よって本報では、 N_{smp} が最大となる $0.04 \leq \Gamma_S \leq$ 0.05の325個の1/10である33個未満のデータは無視す ることとする。以上の条件より、 $0.03 \leq \Gamma_S \leq 0.16$ の範囲 であれば、概ね λ_{s10} の値が80%以上となることが分かる。 これより、本報では、 $0.03 \leq \Gamma_S \leq 0.16$ を有効な Γ_S の範囲 と定め、この範囲を有効平滑化指標(有効 Γ_S)とする。



6. CFD 解析の風力を用いた有効 *「*_sの検証

本章では、5章で設定した有効*Γ*。の検証を行うために、 2章で示した入力風力とは別の風力⁵⁾を用いて作成した風 力のパワースペクトル密度を有効*Γ*。の範囲に収まるよう に平滑化を行い、予測精度を確認する。

本章では、CFD 解析によって作成された風力 ⁵を用いた。風速は再現期間 500 年相当とし、各風力波形前後に50 s のエンベロープを設け、中間の 600 s が重ならないように 5 組取り出したものである。その後、応答の減衰時間を考慮し、加力を行わない 100 s のデータを最後に加えた 800 s×5 組で検討を行った(wavel~5)。なお、風力入力方向は、風直交方向のみとする。また、検証を行った解析モデルの 1 次固有周期は $_1T = 5$ s とする。

図 6(a)~(c)にアンサンブルの組み合わせが異なる3つの 風力のパワースペクトル密度と、それぞれを5章におけ る有効 Γ_s の範囲内となる $\Gamma_s = 0.10$ を目標に移動平均を行 ったパワースペクトル密度を示す。また表に $\Gamma_s = 0.10$ を 目標に移動平均を行ったパワースペクトル密度を用いて RLB/THA の算出を行った結果を示す。なお、THA の値は アンサンブル5波の平均値を用いている。



風力	$n_s = 0 \mathcal{O}\Gamma_s$	$\Gamma_{\rm s}$	n _s	RLB/IHA				
				$_1\zeta$ =0.01	$_1\zeta$ =0.02	$_1\zeta$ =0.03	$_1\zeta$ =0.04	$_1\zeta$ =0.05
wave1-3	0.46	0.10	12	1.08	1.00	0.96	0.93	0.91
wave3-5	0.58	0.10	9	1.06	0.99	0.95	0.92	0.90
wave1-5	0.41	0.10	4	1.09	1.01	0.97	0.94	0.92

表1(風洞実験)と表3(CFD解析)を比較すると, n_s =0(移動平均前)において,表1(風洞)はアンサンブル 3波で Γ_s = 0.46, アンサンブル5波で Γ_s = 0.37, アンサン ブル10波で Γ_s = 0.25となっており,表3(CFD)はアン サンブル3波である wavel~3は Γ_s = 0.46, wave3~5は Γ_s = 0.58, アンサンブル5波の Γ_s = 0.41であることから,いず れの場合においても,アンサンブル数が大きくなると Γ_s の値も小さくなる。このことから,アンサンブル数を大き くすると PSD が平滑化され,その平滑化度合いが Γ_s に反 映されていることが分かる。また,同じアンサンブル数同 士で比較を行うと,アンサンブル3波の場合,表1(風洞)

の wave1~3 $\[\] \Gamma_s = 0.46 \[\] と 表 3 \]$ (CFD) の wave1~3 $\[\] \Gamma_s = 0.46 \[\] \nu_s = 0.46 \[\] \nu_s$ 0.46 と同じ値を取っているが、wave3~5 の場合は $\Gamma_s = 0.58$ と大きな値を取っている。このことから、アンサンブル数 が同じ場合でも平滑が度合いが異なることが分かる。ま た,表1と表3のwave1~3より,表3のwave3~5の方が 平滑化されていないと言える。さらに、アンサンブル5波 同士で比較を行うと,表1の wave1~5 は Γ_s =0.37 であり, 表 3 の wave1~5 は $\Gamma_s = 0.41$ であることから,アンサンブ ル5波において、同じ条件でも CFD 解析による風力の方 が平滑化がされていないということが言える。このよう に、*Γ*。を用いることで異なる風力であっても平滑化度合 いを比較することが可能である。一方で、表3の wavel~3 と wave3~5 のように、スペクトルの形状によって元の*Γ*。 の値が大きくても必要な ns が小さい値を取ることもあり, 同じ ns でも同様に平滑化されるわけではないことにも注 意する必要がある。また、表3より、全てのケースにおい て RLB/THA が誤差±10%以内となり,成功率 λ_{10} が 80% 以上となることが分かった。このことから,本報で決定し た有効 Γ_s の範囲, $0.03 \leq \Gamma_s \leq 0.16$ は有効であると考えら れる。

7. まとめ

本報では荷重指針を用いて風応答予測を行う際に有効 な,入力風力のパワースペクトル密度(PSD)の平滑化指 標 *Γ*。を提案した。以下に知見を示す

・PSD の振幅の標準偏差 Γ_sを用いることで風力の PSD の
平滑化の程度を評価することができる。

・ $\pm 10\%$ の誤差で予測できる Γ_s の範囲 $0.03 \leq \Gamma_s \leq 0.16$ (有 効平滑化指標,有効 Γ_s)を提案し,風洞実験および CDF 解析の風力を用いて検証を行った。

なお,本検証は限られた範囲であるため今後はさらに広 い条件での検証を行い,本手法の有用性を確認する予定 である。

参考文献

- 1) 日本建築学会:建築物荷重指針·同解説, 2015
- 2) 日本建築学会:建築物荷重指針を活かす設計資料 2-建築物の風 応答・風荷重評価/CFD 適用ガイド, 2017.2, 2004.6
- 小林稜, 佐藤大樹, 田中英之, Alex Shegay: 風力のパワースペクトル密度の平滑化が風応答予測に及ぼす影響, 鋼構造年次論 文報告集, 第 30 巻, pp585-596, 2022.11
- 平塚紘基,佐藤大樹,田中英之:履歴型ダンパーを有する超高層 制振建物の弾塑性風応答予測,日本建築学会技術報告集,第27 巻,第66号,pp.662-667,2021.6
- 5) 沖村将大,佐藤大樹,田中英之,曽根孝行,渡井一樹,畔上泰彦: 風洞実験および CFD より得られた風力を用いた超高層建物の時 刻歴応答解析 その1 気流特性および風力特性の比較,日本 建築学会関東支部研究報告集,2023.3

- *1東京工業大学環境・社会理工学院 大学院生
- *2東京工業大学未来産業技術研究所 准教授・博士 (工学)
- *3株式会社竹中工務店 技術研究所

Graduate Student, School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology Associate Prof., FIRST, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng. Research & Development Institute, Takenaka Corporation