T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	風応答予測に用いる風力スペクトルの平滑化指標の検討～固有周期が異なる超高層建物への適用～
Title(English)	Smoothing Index of Wind Force Spectrum for Wind Response Prediction ～Application to High-Rise Buildings with Different Natural Periods～
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(和文)	日本建築学会大会学術講演梗概集, , , pp. 117-118
Citation(English)	, , , pp. 117-118
発行日 / Pub. date	2023, 9
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

風応答予測に用いる風力スペクトルの平滑化指標の検討
～固有周期が異なる超高層建物への適用～

風応答予測　　風力スペクトル
平滑化指標　　固有周期

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

1. はじめに

風応答を評価する場合，「建築物荷重指針・同解説」[1),2)]（以下，荷重指針）を用いることが多い。この荷重指針における応答変位の標準偏差の算出式（以下，予測式）の精度を向上させるために，文献 3)において風力のパワースペクトル密度（以降，PSD）をアンサンブル平均と移動平均を用いた検証を行い，平滑化度合いを数値で表すことのできる平滑化指標 Γ_s の提案を行った。ただし，この平滑化指標 Γ_s は固有周期 5 s のみでしか検証が行われていない。そこで本報では，固有周期が異なる超高層建物を用いて平滑化指標 Γ_s の適用性を検討する。

2. 解析モデル概要

2.1 解析モデル

対象建物は，建物密度 ρ = 175 kg/m^3，質量は高さに一様であるとし，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 ${}_1\zeta$ = 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，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力は風洞実験による結果[4)]と CFD 解析による結果[5)]を用いた。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，D/B = 1.0 の角柱模型とし，風洞実験は高さ 300 mm，CFD 解析は高さ 400 mm，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 500 年相当の U_H = 57.9 m/s を想定した。検討用風力は，1 組につき 20 質点分の風力波形を 0.05 s 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 で検討を行った。風洞実験風力は 10 波，CFD 風力は 5 波用いる。検討用風力入力方向は，風直交方向とする。

3. 予測式の概要

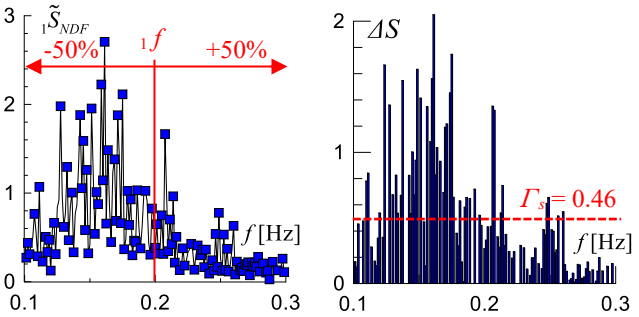
荷重指針における 1 次モーダル変位の標準偏差 ${}_1\tilde{\sigma}_q$ の予測式は次のように表すことが出来る[2)]。

$$ {}_1\tilde{\sigma}_q = \frac{{}_1\tilde{\sigma}_F}{{}_1M\left(2\pi {}_1f\right)^2}\sqrt{1+\frac{\pi}{4\,{}_1\zeta}\frac{{}_1f\,{}_1\tilde{S}_F\left({}_1f\right)}{{}_1\tilde{\sigma}_F^2}} \qquad (1) $$

ここで，${}_1\tilde{S}_F({}_1f)$：固有振動数 ${}_1f$ におけるアンサンブル平均後の 1 次モーダル風力の PSD，${}_1\tilde{\sigma}_F$：アンサンブル平均後の 1 次モーダル風力の標準偏差である。

4. 平滑化指標の概要

本報で用いる平滑化指標 Γ_s の算出方法を示す。図 1(a)のように無次元化 PSD ${}_1\tilde{S}_{NDF}$ の極値に注目し，固有振動数 ${}_1f$ に対して±50%の範囲[3)]における差の絶対値（以下，振幅 ΔS）を抽出する。



(a)　無次元化 PSD と極値　　(b)　振幅の値

図 1　無次元化 PSD と極値
（${}_1T$ = 5 s，wave1～3，再現期間 500 年，平滑化なし，風洞）

その後，図 1(b)のように振幅 ΔS を並べ，式(2)を用いることで ΔS の標準偏差 Γ_S を算出する[3)]。この Γ_S が平滑化指標 Γ_S である。

$$ \Gamma_s = \sqrt{\frac{1}{j_2-j_1+1}\sum_{j=j_1}^{j_2}\left(\Delta S^{(j)}-\overline{\Delta S}\right)^2} \qquad (2) $$

ここで，j_1：Γ_s の計算を開始する点，j_2：Γ_s の計算を終了する点，$\overline{\Delta S}$：$\Delta S^{(j)}$(j = j_1～ j_2)の平均値である。文献 3)において，予測式を用いて得られる ${}_1\tilde{\sigma}_q$（以降，RLB）に対する時刻歴応答解析による ${}_1\tilde{\sigma}_q$（以降，THA）の比 RLB/THA （誤差）との関係から，誤差が±10%以内となる確率が 80%以上となる Γ_S の範囲を 0.03≦ Γ_S≦0.16（有効 Γ_S，有効平滑化指標）と定めた。

5. 有効平滑化指標の有用性の検証

本章では，有効 Γ_s の適用性の検討を行うために，CFD 風力と風洞実験風力を用いて作成した PSD を有効 Γ_s の範

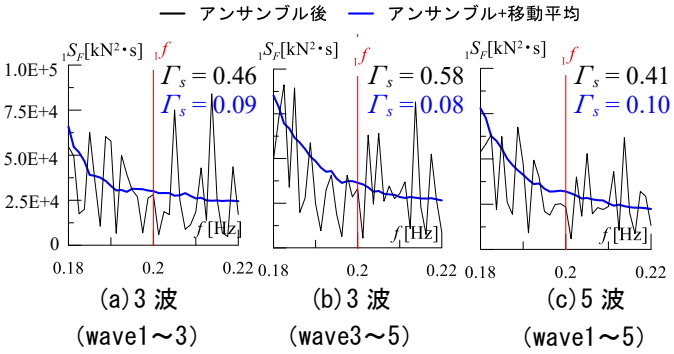
Smoothing Index of Wind Force Spectrum for Wind Response Prediction ～Application to High-Rise Buildings with Different Natural Periods～

Ryo KOBAYASHI , Daiki SATO , Hideyuki TANAKA, Takayuki SONE, Kazuki WATAI

囲に収まるように平滑化を行い，$_1T$ = 5 s および 3 s で予測精度の比較検討を行う。本報で用いる平滑化方法は，アンサンブル平均と移動平均の 2 種類とする。アンサンブル数は 3，5，10 波の 3 種類，移動平均は PSD の振動数刻み Δf = 0.0125 Hz を用いて，移動平均幅を $2n_s\Delta f$（n_s = 0～16）で検討を行う。

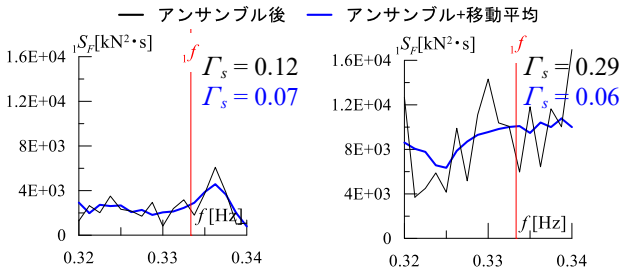
図 2(a)~(c)に CFD 解析風力，$_1T$ = 5 s の時の PSD を有効 Γ_s（0.03≦ Γ_s≦0.16）に収まるように平滑化したものを示す。図 2 より，アンサンブル平均後の場合，(a)，(b)よりアンサンブル数の大きい(c)のほうがばらつきは小さく，Γ_sの値も小さくなっている。また，アンサンブル平均と移動平均の場合，(a)～(c)すべてにおいてアンサンブル平均後の場合より滑らかになっておりΓ_sの値も小さくなることが分かる。このように，Γ_sの値と滑らかさが対応していることが分かる。

次に表 1 に，風洞実験風力と CFD 風力，$_1T$= 5 s と 3 s，アンサンブル数 3，5，10 波において，PSD を有効Γ_s に収まるように移動平均を行った際のΓ_s と RLB/THA（誤差）の値を示す。なお，THA の値として風洞実験風力はアンサンブル 10 波，CFD 風力はアンサンブル 5 波の値を用いる。表 1 より，CFD 風力の n_s = 0 に注目すると，5 s の場合よりも3 s の方がΓ_s の値が小さくなるということが分かる。また，風洞実験風力と CFD 風力を比較すると， 5 s の場合はどちらもほとんど同じ値を取っているが，必要となる n_s の値は CFD 風力の方が大きく，スペクトルによって必要な n_s の値が違うことが分かる。また，3 s の場合は CFD 風力のΓ_sのほうが小さくなっている。これは，図 3 のように風洞実験風力より CFD 風力の PSD の値が固有振動数 $_1f$ = 0.33 Hz（$_1T$ = 3 s）付近で小さくなったためと考えられる。また，RLB/THA に注目すると，有効Γ_s を定めた際に使用した風力である風洞実験風力においては，当然 30 ケース 中 27 ケース（90.0%）が誤差±10%以内となっている。CFD 風力についてみると，30 ケース中 25 ケース（83.3%）が誤差±10%以内となっていることから，有効平滑化指標（有効Γ_s）0.03≦Γ_s≦0.16 は異なる周期に適用した場合でも問題ないことが確認できた。



(a) 3 波 (wave1～3)　(b) 3 波 (wave3～5)　(c) 5 波 (wave1～5)

図 2 移動平均後の入力風力の PSD
（有次元，CFD，$_1T$ = 5 s）



(a) CFD 風力　(b) 風洞実験風力

図 3 異なる風力の PSD と平滑化度合の比較
（有次元，アンサンブル 3 波 wave1～3，$_1T$ = 3 s）

6. まとめ

本報では，固有周期 3 s においても文献 3)において提案した平滑化指標 Γ_s を適用することが出来ることを確認した。

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
3) 小林稜：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，日本建築学会関東支部研究報告集，2023.2
4) 平塚紘基：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：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

表 1 Γ_sと誤差(RLB/THA)の関係

風力	$_1T$	アンサンブル数	n_s = 0 のΓ_s	Γ_s	n_s	RLB/THA（誤差）				
						$_1\zeta$=0.01	$_1\zeta$=0.02	$_1\zeta$=0.03	$_1\zeta$=0.04	$_1\zeta$=0.05
CFD 解析	5 s	3波(wave1-3)	0.46	0.09	15	1.06	0.98	0.94	0.91	0.89
		3波(wave3-5)	0.58	0.08	16	1.16	1.07	1.02	0.99	0.97
		5波(wave1-5)	0.41	0.10	16	1.09	1.01	0.97	0.94	0.92
	3 s	3波(wave1-3)	0.12	0.07	1	0.98	0.94	0.92	0.91	0.90
		3波(wave3-5)	0.13	0.06	6	0.91	0.90	0.89	0.88	0.88
		5波(wave1-5)	0.11	0.05	4	0.95	0.92	0.91	0.90	0.90
風洞実験	5 s	3波(wave1-3)	0.46	0.07	8	1.08	1.05	1.03	1.02	1.02
		5波(wave1-5)	0.37	0.07	8	1.03	1.00	0.99	0.98	0.98
		10波(wave1-10)	0.25	0.08	8	1.05	1.02	1.00	1.00	1.00
	3 s	3波(wave1-3)	0.29	0.06	2	1.04	1.03	1.01	1.00	0.99
		5波(wave1-5)	0.26	0.08	1	0.90	0.90	0.89	0.89	0.89
		10波(wave1-10)	0.17	0.06	2	1.05	1.02	1.00	1.00	1.00

*1 元東京工業大学環境・社会理工学院　大学院生　Former Graduate Student, School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology
*2 東京工業大学科学技術創成研究院　准教授・博士（工学）　Associate Prof., IIR, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
*3 株式会社竹中工務店 技術研究所　Research & Development Institute, Takenaka Corporation