

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	風力スペクトルの平滑化が風応答予測に及ぼす影響-建築物荷重指針・同解説を用いた検討-
Title(English)	Effect of wind spectrum smoothing on wind response prediction ~ Examination by using "RECOMMENDATIONS FOR LOADS ON BUILDINGS"~
著者(和文)	小林稜, 佐藤大樹, 田中英之, Alex Shegay
Authors(English)	Ryo Kobayashi, Daiki Sato, Hideyuki Tanaka, Aleksey Vadimovich Shegay
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 321-324
Citation(English)	, , , pp. 321-324
発行日 / Pub. date	2022, 3

風力スペクトルの平滑化が風応答予測に及ぼす影響 ～建築物荷重指針・同解説を用いた検討～

構造—振動

正会員 ○ 小林稜*1

正会員 佐藤大樹*2

正会員 田中英之*3

正会員 Alex Shegay*4

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

一般的に風荷重や応答を評価する際には、「建築物荷重指針・同解説」¹⁾(以下、「荷重指針」)が用いられる。「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⁾。そのため、固有振動数における入力風力のパワースペクトル密度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すと考えられる。このばらつきを小さくする方法、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や移動平均などの方法が用いられる。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。そのため本報では、風力のパワースペクトル密度の平滑化を行うことによる「荷重指針」の風応答予測と、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について検討を行うことを目的とする。

2. 解析モデル概要

2.1 解析モデル

対象建物を図 1(a)に示す。建物密度 $\rho = 175 \text{ kg/m}^3$ 、質量は高さに一様であると、高さ $H = 200 \text{ m}$ 、辺長比 $D/B = 1$ (D, B : 幅, 奥行き, $D = B = 40 \text{ m}$) の 20 質点せん断

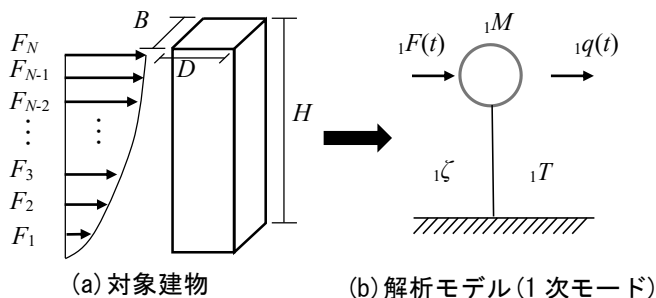


図 1 解析モデル化概要

型モデルとする²⁾。フレームの 1 次固有周期 ${}_1T$ は、 ${}_1T = 3.0 \text{ s}$, ${}_1T = 5.0 \text{ s}$ 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 ${}_1\zeta = 1\%, 2\%, 3\%, 4\%, 5\%$ 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、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 (図 1(b))。1 次の一般化質量 ${}_1M$ は式(1)から求まる。

$${}_1M = \sum_0^N m_i \cdot {}_1\Phi_i^2 \quad (1)$$

ここで、 ${}_1\Phi_i$: i 層目の 1 次固有モード、 m_i : i 層目の質量、 N : 対象建物の層数である。

2.2 入力風力

構造物に作用する風外力は風洞実験結果²⁾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、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 $U_0 = 36 \text{ m/s}$ 、風速は再現期間 500 年相当とし、頂部風速は $U_H = 57.9 \text{ m/s}$ 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 700 s \times 10 組取り出した (wave1~10)。検討用風力入力方向は、平均成分を有さない変動成分のみの風直交方向風力とする。

ここで、解析モデルに入力する 1 次モーダル風力 ${}_1F(t)$ は、 i 層目の時刻歴風外力 $F_i(t)$ と 1 次固有モード ${}_1\Phi_i$ を用いて以下の式(2)のように表される。図 2 に例として作成した 1 次モーダル風力 (wave1) を示す。

$${}_1F(t) = \sum_{i=1}^N {}_1\Phi_i \cdot F_i(t) \quad (2)$$

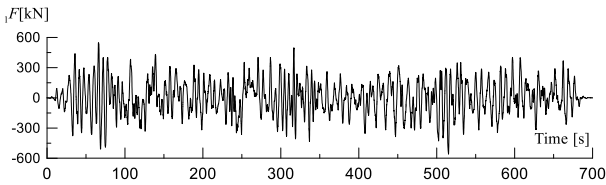


図2 1次モーダル風力 (wave1)

3. 応答の標準偏差とパワースペクトル密度について

3.1 アンサンブル数と応答の標準偏差の関係

図3と図4に、アンサンブル数ごとの、時刻歴応答解析による1次モーダル変位 ${}_1q(t)$ (図1(b))の標準偏差 ${}_1\sigma_q$ のアンサンブル平均値の求め方および、時刻歴応答解析による1次モーダル変位 ${}_1q(t)$ の標準偏差 ${}_1\sigma_q$ とアンサンブル数の関係を示す。図4(a),(b)より、10波のアンサンブル平均値と比較すると、減衰定数や固有周期によらず、アンサンブル数が大きいほどばらつきが小さくなる傾向があることが分かる。また減衰定数 ζ が大きくなると、標準偏差の値は小さくなり、ばらつきが小さくなる傾向がある。また、固有周期に注目すると、 ${}_1T=3\text{s}$ の場合は ${}_1T=5\text{s}$ の時に比べばらつきが小さいことが分かる。また、標準偏差の値についても ${}_1T=5\text{s}$ よりも小さい結果となっている。このことより本報では、アンサンブル波が予測の精度に及ぼす影響を検討する。

アンサンブル数	wave 数
1	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
2	2 waves 2 waves
3	3 waves 3 waves
4	4 waves 4 waves
5	5 waves 5 waves
6	6 waves 6 waves
⋮	⋮

図3 各アンサンブル数における1次モーダル変位の標準偏差の平均値の求め方

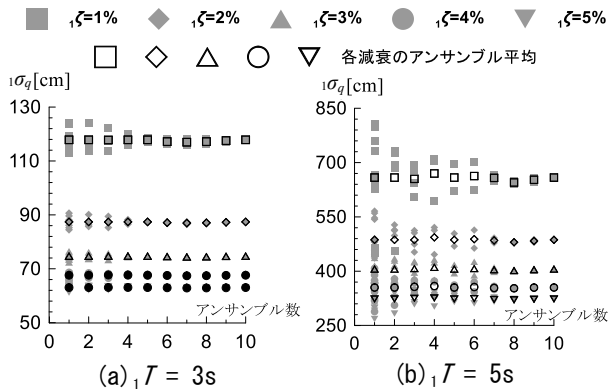


図4 1次モーダル変位の標準偏差とアンサンブル数の関係(時刻歴応答解析)

3.2 予測式の概要

1次モーダル変位の標準偏差 ${}_1\sigma_q$ の予測値は、非共振成分 σ_{qB} と共振成分 σ_{qR} に二乗和平方根として式(3)(以下、予測式)のように表すことができる³⁾。

$$\begin{aligned}
 {}_1\sigma_q &= \sqrt{\sigma_{qB}^2 + \sigma_{qR}^2} \\
 &= \frac{{}_1\sigma_F}{{}_1M(2\pi{}_1f)^2} \sqrt{1 + \frac{\pi}{{}_1\zeta} \frac{{}_1f {}_1S_F({}_1f)}{{}_1\sigma_F^2}} \quad (3)
 \end{aligned}$$

ここで、 ${}_1S_F({}_1f)$:固有振動数 ${}_1f$ における1次モーダル風力のパワースペクトル密度、 σ_{qB} :1次モーダル変位の標準偏差の非共振成分、 σ_{qR} :1次モーダル変位の標準偏差の共振成分である。 ${}_1\sigma_F$:1次モーダル風力の標準偏差である。

3.3 モーダル風力のパワースペクトル密度 ${}_1S_F({}_1f)$

検討を行うアンサンブル数は3波、5波、10波の3種類とする。例として、図5に入力風力のパワースペクトル密度 ${}_1S_F(f)$ (10波)の全体(a)と固有振動数 ${}_1f$ に対して $\pm 5\%$ の範囲の拡大(b)を示す。

図5(b)より、 ${}_1f$ 付近においてばらつきがあることから、予測式の ${}_1S_F(f)$ の値として ${}_1S_F({}_1f)$ 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考えられる。そこで本報では、ある一定の振動数範囲(以下、バンド幅 α_{band})を設定し、移動平均後 ${}_1S_F({}_1f)$ を用いる。

バンド幅 α_{band} は ${}_1f$ に対して $\pm\alpha_{\text{band}}=0\% \sim 7.5\%$ の範囲とした。図6,7(a)~(c)に各モデル、各アンサンブル数におけるパワースペクトル密度の全体(i)および、固有振動数 ${}_1f$ それぞれに対して $\pm 5\%$ の範囲を拡大(ii)を示す。拡大(ii)には、バンド幅 $\alpha_{\text{band}}=0.6\%, 3.1\%, 7.5\%$ で移動平均を行った場合の ${}_1S_F(f)$ を示す。

${}_1T=3\text{s}$ (図6)、 ${}_1T=5\text{s}$ (図7)共にアンサンブル数が多くなるほど、ばらつきが小さくなる傾向がある。図6より、 α_{band} の増加と ${}_1S_F({}_1f)$ の値の変化に一定の傾向はないが、アンサンブル数によらず、 α_{band} の値が大きくなると ${}_1S_F({}_1f)$ の値が一定値付近に近づいていることが分かる。一方、図7より、 α_{band} の増加に伴って ${}_1S_F({}_1f)$ の値は大きくなる事が分かる。

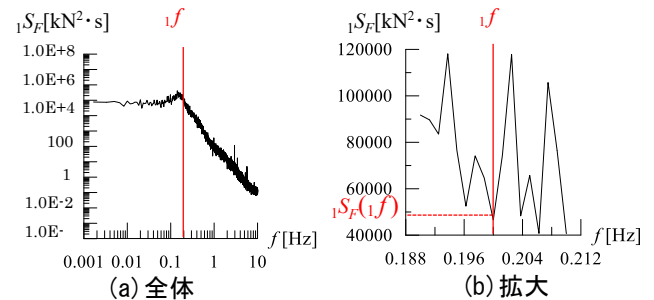
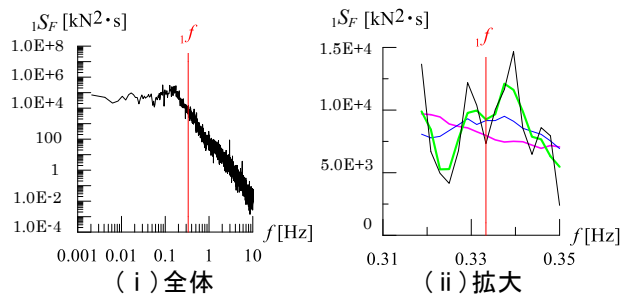


図5 10波アンサンブル平均の ${}_1S_F(f)$

このことより、パワースペクトル密度の平滑化を行うことで、アンサンブル数によらず高い精度で ${}_1S_F({}_1f)$ の値を予測することが出来ると考えられる。

— $\alpha_{\text{band}}=0\%$ — $\alpha_{\text{band}}=0.6\%$ — $\alpha_{\text{band}}=3.1\%$ — $\alpha_{\text{band}}=7.5\%$



(a) 3波

(b) 5波

(c) 10波

図6 各アンサンブル数における ${}_1S_f(f)$ (${}_1T=3\text{s}$)

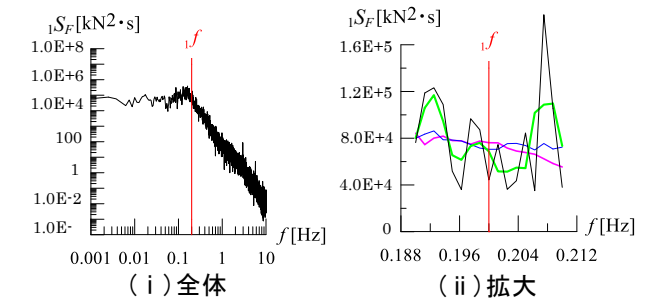
3.4 有効なバンド幅の決定

図8に ${}_1T=3\text{s}$ における、時刻歴応答解析 (THA) により求めた標準偏差の値に対する予測式 (Pre) によって求めた標準偏差の比 Pre/THA を示す。図9には、 ${}_1T=5\text{s}$ における Pre/THA を示す。

${}_1T=3\text{s}$ において、バンド幅 α_{band} の値が大きくなると Pre/THA の値は一度大きくなるが、減少することがわかる。また、減衰定数 ζ が大きいほど、Pre/THA の値は小さくなることわかる。そして、アンサンブル数が大きくなるほど Pre/THA のばらつきが小さくなり、1より小さくなることわかる。

${}_1T=5\text{s}$ の場合、 α_{band} の値が大きくなるほど Pre/THA の値が大きくなることわかる。また、減衰定数 ζ が大きいほど、Pre/THA の値は小さくなることわかる。そして、アンサンブル数が増えるほど Pre/THA の値のばらつきが小さくなり、1よりも大きくなり、増加に近い形となる

— $\alpha_{\text{band}}=0\%$ — $\alpha_{\text{band}}=0.6\%$ — $\alpha_{\text{band}}=3.1\%$ — $\alpha_{\text{band}}=7.5\%$



(a) 3波

(b) 5波

(c) 10波

図7 各アンサンブル数における ${}_1S_f(f)$ (${}_1T=5\text{s}$)

ことがわかった。これらのばらつきを考慮した評価を行うためには、アンサンブル数、減衰定数ごとにバンド幅を設定する必要がある。

Pre/THA の値が初めて $\pm 3\%$ 以内となるような α_{band} を有効なバンド幅と定義すると、表2のようになる。 ${}_1T=3\text{s}$ においては、Pre/THA の値のばらつきが小さく、有効なバンド幅も狭い。そのため、アンサンブル数が10の場合においては、全ての減衰定数において有効なバンド幅は0%となった。一方で ${}_1T=5\text{s}$ においては、アンサンブル数と有効なバンド幅の間に一定の傾向は見られなかった。

表2 有効なバンド幅

ζ	${}_1T=3\text{s}$			${}_1T=5\text{s}$		
	3波(%)	5波(%)	10波(%)	3波(%)	5波(%)	10波(%)
0.01	0.63	0.63	0.00	0.63	1.25	1.88
0.02	0.63	0.63	0.00	0.63	3.75	1.25
0.03	0.63	0.63	0.00	0.63	3.75	1.25
0.04	0.63	0.63	0.00	0.63	3.75	1.25
0.05	0.63	0.63	0.00	0.63	3.75	1.25

しかし、 ${}_1T = 3 \text{ s}$ と ${}_1T = 5 \text{ s}$ および各減衰定数において有効なバンド幅が設定できたことから、本ケースにおいてアンサンブル数が少ない場合においてもバンド幅の値を適切に設定することで、標準偏差の値を適切に評価することができると思う。

4. まとめ

本報では、風力のパワースペクトル密度の平滑化を行うことによる「荷重指針」の風応答予測に及ぼす影響を検討することを目的として、時刻歴応答解析による風応答予測比較し、パラメータごとに有効なバンド幅の検討を行った。以下に得られた知見を示す。

- (1) 減衰定数や固有周期によらず、アンサンブル数が大きいほど 1 次モーダル変位の標準偏差の値のばらつきが小さい。
- (2) パワースペクトル密度の値 ${}_1S_F(f)$ にはばらつきがあり、アンサンブル数によって固有振動数 ${}_1f$ の値における ${}_1S_F({}_1f)$ が異なる。
- (3) アンサンブル数、減衰定数ごとに有効なバンド

幅を設定する必要がある。

ただし、本報で得られた知見は限られたケースであることに留意する必要がある。

謝辞

本研究は、株式会社竹中工務店、東京工業大学佐藤研究室との共同研究であり、本研究の一部は JST 産学競争プラットフォーム共同研究推進プログラム (JPMJOP1723) によるものです。ここに記して感謝の意を示します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，2015
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 大熊武司，神田順，田村幸雄：建築物の耐風設計，鹿島出版会，2004.6

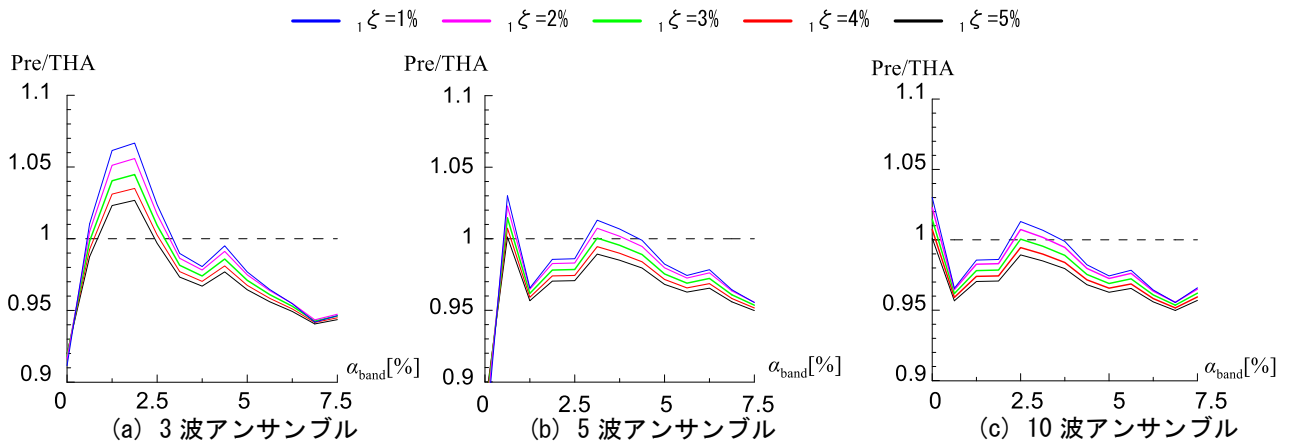


図 8 α_{band} と Pre/THA の関係 (${}_1T = 3\text{s}$)

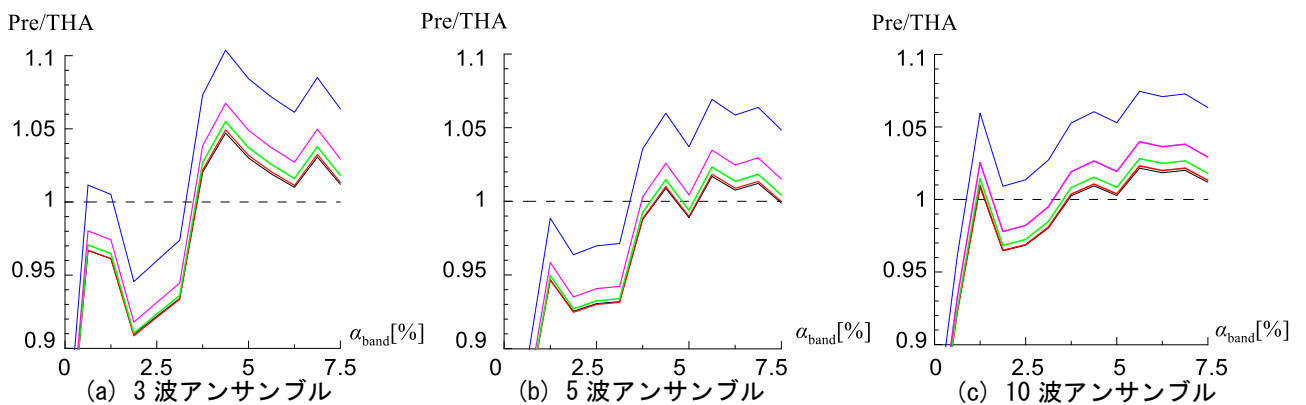


図 9 α_{band} と Pre/THA の関係 (${}_1T = 5\text{s}$)

*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 主任研究員・博士 (工学)

*4 東京工業大学未来産業技術研究所 助教・Ph.D.

Graduate Student, School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology

Associate Prof., FIRST, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Chief Researcher, Research & Development Institute, Takenaka Corporation, Dr. Eng.

Assistant Prof., FIRST, Tokyo Institute of Technology, Ph.D.