# 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)	高減衰超高層建物の風応答ピークファクターの検討		
Title(English)	Evaluation on the peak factor of the wind-induced response of high-rise building of the AIJ recommendation for loading		
著者(和文)	張庭維, 佐藤大樹		
Authors(English)	Ting-Wei Chang, Daiki Sato		
出典 / Citation			
Citation(English)	, , , pp. 357-360		
 発行日 / Pub. date	2022, 3		

### 高減衰超高層建物の風応答ピークファクターの検討

構造-振動

正会員 〇 張庭維 \*1 正会員

佐藤大樹\*\*

ピークファクター 風応答 風洞実験

パワースペクトル密度 高減衰 極値分布

#### 1.はじめに

日本の高層建築物は、風による荷重を考慮した構造設計 が必要である<sup>[1]</sup>。風工学として、ピークファクターは、最 大値に対する標準偏差の比を表し、風応答の特性を評価す るための重大的な指標の1つである<sup>[2]</sup>。

しかし、Davenport<sup>[2]</sup>の提案したピークファクターの近似 式は低い減衰の建築物を対象とした、狭帯域の振動応答を 適用しており、高減衰建築物に十分に検討されていない。 本報では、高減衰の超高層建物モデルを用いて風方向およ び風直交方向風力に対する応答解析を行い、Davenport の ピークファクターを検証する。

#### 2.建築物モデルと風力の概要

本研究で想定した建築物は、高さH = 200 m、幅B、奥 行Dが等しくB = D = 50 mの超高層建築物である(Fig.1(a))。 1 次の固有周期が、 $_1T = 0.01H = 2$  秒とした H1 フレーム、  $_1T = 0.02H = 4$  秒とした H2 フレーム、 $_1T = 0.03H = 6$  秒とし た H3 フレームの 3 種類設定する。さらに、3 種類のフレ ームに対し、6 種類の 1 次の減衰定数( $_1\xi = 1\%$ , 2%, 4%, 10%, 20%, 30%)を設定する、本報では一次モードに着目 し、1 質点モデルを用いて解析を行う(Fig.1(b))。1 次のモ デルの振動数 $_1f$ 、減衰定数 $_1\xi$ 、バネ要素 $_1K$ や、モデルのダ ッシュポット要数 $_1C$ を、Table.1 に示す。



Fig. 1. Target building and wind

建物頂部最大平均風速は  $U_{H}$ =57.9m/s である。(地表面粗 度区分 III、基準風速  $U_{0}$ =36m/s、再現期間 500 年として換 算した)<sup>[1]</sup>。風洞実験<sup>[3]</sup>を使用して 10 波(Wavel~Wavel0 とする)の風外力時刻歴波形を作成し(風方向(along-wind) と風直交方向(across-wind))。なお、波形前後に 50s のエン ベロープを設け、中間の 600 秒(10 分)でピークファクタ ーを評価に用いる(Fig.2)。Fig.3 で Wave 1~10 の風力パ ワースペクトル密度(PSD)をアンサンブル平均した結果 を示す。

Evaluation on the peak factor of the wind-induced response of high-rise building of the AIJ recommendation for loading

Table. 1. Parameter for Analytical models					
Model	$_{1}f$	$_1\xi$	1 <i>K</i>	1 <i>C</i>	
	[s]		[kN/m]	[kN·s/m]	
H1-01	0.500	0.010	9.870	0.063	
H1-02		0.020		0.126	
H1-04		0.040		0.251	
H1-10	0.300	0.100		0.628	
H1-20		0.200		1.257	
H1-30		0.300		2.513	
H2-01		0.010	2.467	0.031	
H2-02		0.020		0.063	
H2-04	0.250	0.040		0.126	
H2-10	0.230	0.100		0.314	
H2-20		0.200		0.628	
H2-30		0.300		1.257	
H3-01		0.010	1.097	0.021	
H3-02		0.020		0.042	
H3-04	0 167	0.040		0.084	
H3-10	0.10/	0.100		0.209	
H3-20		0.200		0.419	
H3-30		0.300		0.838	



#### 3.ピークファクターの予測手法

建築物荷重指針<sup>[1]</sup>において変位のピークファクターの 予測  $g_p$  は式(1)で表される。

$$g_D = \sqrt{2ln(\nu_D T)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2ln(\nu_D T)}}$$
(1)

$$\nu_D = \sqrt{\sigma_V^2 / \sigma_D^2} \tag{2}$$

同様に、速度、加速度のピークファクター( $g_V \ge g_A$ )はそれ ぞれ式(3 a, b)より算出する。

Ting-Wei CHANG, Daiki SATO

$$g_A = \sqrt{2ln(v_A T)} + \frac{1}{\sqrt{2ln(v_A T)}}$$
(3b)

ここで、速度と加速度のゼロクロッシング数 $v_V$ と $v_A$ はそれ ぞれ式(4a, b)となる。

$$v_V = \sqrt{\sigma_A^2/\sigma_V^2}$$
,  $v_A = \sqrt{\sigma_{A'}^2/\sigma_A^2}$  (4a,b)

ここに、 $\sigma_D^2$ ,  $\sigma_v^2$ ,  $\sigma_A^2$ ,  $\sigma_{A'}^2$ はそれぞれ変位、速度、加速度の微分値(加加速度)の分散を表し、それぞれの変動応答のパワースペクトル密度 $S_D(\omega)$ ,  $S_v(\omega)$ ,  $S_A(\omega)$ ,  $S_{A'}(\omega)$ を積分することにより算出できる(式(5 a-d))。

$$\sigma_D^2 = \int_0^\infty S_D(\omega) d\omega \qquad , \qquad \sigma_v^2 = \int_0^\infty S_v(\omega) d\omega \qquad (5a,b)$$

$$\sigma_A^2 = \int_0^\infty S_A(\omega) d\omega \qquad , \qquad \sigma_{A'}^2 = \int_0^\infty S_{A'}(\omega) d\omega \qquad (5c,d)$$

ここで、変動応答のパワースペクトル密度 $S_D(\omega)$  $S_v(\omega), S_A(\omega), S_{A'}(\omega)$ は、それぞれ式(6 a-d)で表される。

$$S_{D}(\omega) = S_{v}(\omega)$$
  

$$|H(i\omega)|^{2}S_{F,1}(\omega) , = |\dot{H}(i\omega)|^{2}S_{F,1}(\omega)$$
(6a,b)  

$$S_{A}(\omega) = S_{A'}(\omega)$$

 $|\ddot{H}(i\omega)|^2 S_{F,1}(\omega)$ ,  $= |\ddot{H}(i\omega)|^2 S_{F,1}(\omega)$  (6c,d) ここに、 $H(i\omega)$ は周波数応答関数であり、式(7 a-d)で表される。

$$H(i\omega) = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{1\omega}\right)^2 + i\left(2_1\xi\frac{\omega}{1\omega}\right) \cdot \frac{1}{1K}}$$
(7a)

$$\dot{H}(i\omega) = i2\pi\omega H(i\omega), \qquad \ddot{H}(i\omega) = -(2\pi\omega)^2 H(i\omega) \qquad (7b,c)$$

$$\ddot{H}(i\omega) = -(i2\pi\omega)^3 H(i\omega). \tag{7d}$$

ここで、 $_1\omega$ は一次の固有円振動数(=  $2\pi_1 f$ )。

Fig.4(a-c) に変位、速度および加速度の風方向と風直交 方向のピークファクターの予測(Prediction)と解析結果 (THA)の比較を示す。Fig.4(a)より、変位のピークファクタ ーの解析結果は 2.5 から 4.0 の範囲であり、変位のピーク ファクターの予測は 3.0 に近いことが分かる。Fig.4(b, c)よ り、速度と加速度のピークファクターの場合、解析結果は 2.5 から 4.5 の範囲であり、その予測は 3.5 に近いことが分 かる。

#### 4. Cartwright の極値分布

**Davenport** の近似式(式(1))は Cartwright<sup>[4]</sup>の極値分布から 導出されたものである。ピークファクターの予測の精度を 検証するため、風応答の極値分布を検討する。Cartwright の 極値分布は式(8)で表される<sup>[4]</sup>。

$$p(\eta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left[ \varepsilon \cdot \exp\left(-\frac{\eta^2}{2\varepsilon^2}\right) + \eta\sqrt{1-\varepsilon^2} \exp\left(-\frac{\eta^2}{2}\right) \int_{-\infty}^{\frac{\eta\sqrt{1-\varepsilon^2}}{\varepsilon}} \exp(-\frac{x^2}{2}) dx \right]$$
(8)



Cartwright の累積極値分布は式(9)で表される<sup>[4]</sup>。

$$q(\eta) = \int_{\eta} p(\eta) d\eta$$
  
=  $\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left[ \int_{\frac{\eta}{\varepsilon}}^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx + \sqrt{1-\varepsilon^2} \exp\left(-\frac{\eta^2}{2}\right) \int_{-\infty}^{\frac{\eta\sqrt{1-\varepsilon^2}}{\varepsilon}} \exp(-\frac{x^2}{2}) dx \right]$   
(9)

 $\varepsilon$ はパワースペクトル密度の特性を表すパラメータであり、式(10)より得られる<sup>[4]</sup>。 $\varepsilon$ は無次元量であり、 $0 \le \varepsilon \le 1$ の値となる。 $\varepsilon$ が大きい場合、スペクトルは広帯域のものとなり、確率過程も広帯域確率過程となる。逆に $\varepsilon$ が小さく、0に近いときは狭帯域のスペクトルとなり、確率過程も狭帯域確率過程となる。

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{\sigma_V^4}{\sigma_D^2 \sigma_A^2}} \tag{10}$$

ここで、式(1)は式(9)の近似式(式(11)<sup>[4]</sup>)を用いることを算 出される。

$$q(\eta) \approx \sqrt{1 - \varepsilon^2} \exp\left(-\frac{\eta^2}{2}\right)$$
 (11)

Fig.5, 6 に風方向および風直交方向における,時刻歴と 式(8)の極値分布の比較を示す。それぞれの図において(a) 変位,(b)速度,(c)加速度である。Fig.5(a-c)より、風方向の 変位、速度および加速度の確率密度分布を見ると、 $\epsilon$ が大 きい場合は $\eta$ の増加に伴い、極値がベキ乗的に減少し、 Cartwright の極値分布とのばらつきが大きいことが分かる。 Fig.6(a-c)の風直交方向での変位、速度および加速度の極値 分布は同じモデルであっても、風方向での結果に比べ、εが 小さい値を示している。また、変位、速度および加速度の



Fig.5. Peaks' distribution (Along-wind)

確率密度分布においても Cartwright の極値分布に近いこと が分かる。これは、風直交方向の風力が狭帯域のものであ るため、減衰の大きなモデルであっても、応答が狭帯域と なるためである。



Fig.6. Peaks' distribution (Across-wind)

Fig.7(a-c)に、変位,速度および加速度のピークファクターの予測精度を示す。風方向の場合(変位、速度および加速度)には、 $\varepsilon$ は1.0 近く、予測誤差のばらつきが大きいことが分かる。一方、風直交方向の場合には、 $\varepsilon$ は0.1~0.9 であり、0.5 を越えると、予測誤差が大きいことが分かる。



Fig.8 に、Cartwright の累積極値分布の一般式 (式(9)) と 近似式 (式(11))の比較を示す。 $\varepsilon$ は大きくなると、誤差が おおきくことが分かる。このことが Fig.7 において  $\varepsilon$ が大 きい場合に式(1)による予測精度が低下した原因の一つで ある。

#### 5.おわりに

本報では、高減衰超高層建物の風応答ピークファクター を検証した。風方向のピークの解析結果と Cartwright の極 値分布は差異が大きく、風直交方向のピークの極値分布の 予測精度は良い。更に、 $\epsilon(式(10))$ は風方向の場合には 1.0 近 く、風直交方向の場合には、0.1~0.9 であり、 $\epsilon$ は 0.5 を越 える場合、予測誤差が大きいことが分かった。予測誤差が 大きい原因は Cartwright の累積極値分布の近似式(式(11)) の誤差であり、 $\epsilon$ は大きくなると、誤差も大きくためであ る。

\*1 東京工業大学 大学院生

今後の課題は高減衰超高層建物のピークファクターに 予測手法の提案である。



Fig.8. Accuracy of simplified equation of the cumulative probability distribution

#### 謝辞

本研究は、JST 産学共創プラットフォーム共同研究推進 プログラム (JPMJOP1723)、綿貫国際奨学財団の支援を受 けました。

#### 参考文献

- [1] 日本建築学会:建築物荷重指針·同解説, 2015
- [2] Davenport, A. G. (1964). Note on the distribution of the largest value of a random function with application to gust loading. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 28(2), 187-196.
- [3] 丸川比佐夫,大熊武司,北村春幸,吉江慶祐,鶴見俊 雄,佐藤大樹.風洞実験に基づく高層建物の多層層風 力によるエネルギー入力性状(その2)矩形高層建築 物に作用する層風力特性,日本建築学会大会学術講 演梗概集,Vol. B-1, pp. 193-194, Sept. 2010.
- [4] Cartwright, D.E. and Longuet-Higgins, M.S.: The Statistical Distribution of the Maxima of a Random Function, Proceedings of the Royal Society of London, Series A. Vol.237, pp.212-232, 1956.4.

Graduate Student, Tokyo Institute of Technology Assoc. Prof., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

<sup>\*2</sup> 東京工業大学 准教授・博士 (工学)