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)	変動風力を受ける弾塑性1 質点系モデルへのエネルギー入力の予測精 度	
Title(English)	Prediction accuracy of energy input to elastic-plastic SDOF models under fluctuating wind force	
著者(和文)		
Authors(English)	Xiaoxin Qian, Daiki Sato	
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 361-364	
Citation(English)	, , , pp. 361-364	
発行日 / Pub. date	2021, 3	

変動風力を受ける弾塑性1質点系モデルへのエネルギー入力の予測精度

構造-振動

正会員 〇 銭暁鑫

```
正会員 佐藤大樹
```

風洞実験 変動風力 弾塑性応答

エネルギー入力 エネルギーの釣合

1 はじめに

現行の耐風設計では、建物は想定される風外力に対し て弾性設計が行われている。しかし,想定以上の風外力に 対して塑性化する恐れがあることから,安全性を確保す るために, 弾塑性応答の評価が必要となる。このような弾 塑性応答の評価では,時刻歴解析を用いることが多いが, 膨大な計算量および時間が必要なため、弾塑性応答の予 測手法の提案が必要となる。既往研究では, 吉江らはエネ ルギー入力の予測式を誘導し1),エネルギーの釣合に基づ く予測手法を通じて,1質点系モデルのエネルギー入力お よび弾塑性応答の予測を行った2)。しかしながら, 文献2) における1 質点系モデルの復元力特性について, 第一・ 第二剛性の比は 0.25, 0.50, 0.75 とするが, エネルギー入 力の予測式がより小さな剛性比を有する免震建物に対す る適用性についての検討はまだ行われていない。そこて, 本報では剛性比 0.10 を追加検討することにより、エネル ギー入力の予測式の適用範囲を検討する。

2 解析・予測用モデルおよび風力 PSD の概要

Fig. 1 に示すように、対象建物は高さ H = 100 m、幅 B = 25 m、奥行 D = 25 m、密度 $\rho = 250$ kg/m³の超高層建物と し、その 1 次固有モードは直線モードと仮定した。上述 の対象建物を 10 質点系せん断型モデルに変換し、その後 Modal Analysis により、Fig. 2 に示すような解析・予測に 用いられる 1 次モードが得られる。Fig. 2 に 1 次モードの 復元力特性 (Normal Bi-Linear 型)を示す。1 次モードの パラメータについて、Table 1 より、弾性時の固有周期 $_1T$

(=0.02*H*, 0.04*H*)は2種,第一・第二剛性の比λ_k(=₁k₂/₁k₁) は2種,降伏変位₁x_yは7種,減衰定数₁ζ(剛性比例)は 1種とし,合計28種類のモデルを用いる。

Fig. 1 の対象建物の頂部平均風速は $U_H = 50.41$ m/s (基本風速 36 m/s,再現期間 500 年,地表面粗度区分III として換算 ³⁾) とする。本研究では,風直交方向の場合のみを検討する。解析に用いられる 1 次モードの風力波形について,風洞実験の結果 ⁴⁾により換算した 1~10 層の 10 分間風力(時間刻み $\Delta t = 0.01$ sec)を 40 波(Wave 1~40)作

Prediction accuracy of energy input to elastic-plastic SDOF models under fluctuating wind force

成し,それぞれを1次モードの一般化風力₁Fに変換した。 Fig. 3 に上述の方法により作成した 1 次モードの一般化 風力波形の1例(Wave1)を示す。Fig. 3 より,解析開始 時に過度応答を避けるために,風力波形の先頭に 50 秒間 のエンベロープを設けた。

Fig. 4(a)に, Fig. 3 の時間領域の風力波形 (50~650 sec) を快速フーリエ変換 (FFT) で振動数領域に変換した風力 PSD (Wave 1) を示す。Fig. 4(b)に, Wave 1~40 の風力 PSD をアンサンブル平均した結果を示す。Fig. 4(b)より,風直 交方向では振動数 *n*=0.16 Hz (即ち固有周期 *T*=6.25 sec) の付近にピークを持っていることがわかる。



Fig. 1 The object building



Fig. 2 The 1st mode and its restoring force characteristics

Table 1 Parameters of the 1st mode

$_{1}T$	2.0, 4.0 sec
λ_k	0.10, 0.25
${}_{1}x_{y}$	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 cm
$_{1}\xi$	0.02

Xiaoxin Qian, Daiki Sato



Fig. 3 Time-history of the 1st mode wind force (Wave 1)



3 解析における弾塑性挙動の確認

Fig. 5 に時刻歴解析における 1 次モードの最大変位と降 伏変位の比 $_{1}x_{max}/_{1}x_{y}$ を示す。なお、Fig. 5 中に示すプロット は、Wave 1~40 の結果の中から最小値のみとしている。Fig. 5(a)の $_{1}T = 2.0 \sec$ の場合では、 $_{1}x_{y} = 5~30 \text{ cm}$ 時に $_{1}x_{max}/_{1}x_{y} >$ 1 が見られた。 $_{1}x_{y} = 35 \text{ cm}$ 時に $_{1}x_{max}/_{1}x_{y} > 1$ となるが、1 に 近いことから、概ね弾性挙動であることが考えられる。Fig. 5(b)の $_{1}T = 4.0 \sec$ の場合では、同様に $_{1}x_{y} = 5~35 \text{ cm}$ 時に $_{1}x_{max}/_{1}x_{y} > 1$ により、すべての1次モードが塑性化したこと が確認できた。



Fig. 5 Ratio of maximum and yield displacement

4 エネルギーの予測精度についての検討

4.1 エネルギー入力の予測精度

吉江らが提案した予測式により,減衰弾性振動系の場合, 単位時間当たりのエネルギー入力を \dot{E}_{input} で表すと,その 予測値 $E[\dot{E}_{input}]$ は次式で表される¹⁾。

$$\mathbf{E}[\dot{E}_{input}] = \int_0^\infty \operatorname{Re}[\dot{H}(n)] \cdot {}_1S_F(n)dn \qquad (1)$$

ここで、 $_{1}S_{F}(n):1$ 次モードの一般化風力 PSD(40 波ア ンサンブル平均した結果を用いる)、n: 振動数を表す。Re[]:[]内の複素数の実数部分を取ることを示す。 $\dot{H}(n):$ 減衰弾性系の速度に関する伝達関数を表し、次式で得られる¹⁾。

$$\dot{H}(n) = \frac{2\pi n}{{}_{1}k_{eq}} \cdot \frac{2 {}_{1}\xi_{eq} \left(\frac{n}{{}_{1}n_{eq}}\right) + i \left[1 - \left(\frac{n}{{}_{1}n_{eq}}\right)^{2}\right]}{\left[1 - \left(\frac{n}{{}_{1}n_{eq}}\right)^{2}\right]^{2} + \left[2 {}_{1}\xi_{eq} \left(\frac{n}{{}_{1}n_{eq}}\right)\right]^{2}}$$
(2)

ここで、 $_1k_{eq}$ 、 $_1n_{eq}$ 、 $_1\xi_{eq}$: それぞれ 1 次モードの等価剛 性、等価固有振動数、等価減衰定数を表す。

一方,単位時間当たりエネルギー入力の解析値は,時刻 歴解析の結果により,次式で求められる。

$$\dot{E}_{input} = \int_{50}^{650} {}_{1}F(t) \cdot {}_{1}\dot{x}(t)dt/600$$
(3)

ここで、 $_{1}F(t):1$ 次モードの一般化風力、 $_{1}\dot{x}(t):1$ 次モードの応答速度を表す。

Fig. 6 に単位時間当たりエネルギー入力 Éinput の予測値 および解析値(40波アンサンブル平均した結果)を示す。 Fig. 7 にその予測値と解析値の比を示す。Fig. 6(a)₁T = 2.0 sec の場合では、降伏変位₁x_vの増大に伴う塑性化程度の減 少により、予測値も解析値も小さくなる傾向が見られた。 エネルギー入力の予測精度について、Fig. 7(a)より、予測 値と解析値の比は 0.52~1.72 となり, 全体的にエネルギー 入力は予測値と解析値が概ね対応している。また,剛性比 の変化が予測精度に与える影響は小さい(1xy=10 cm の場 合を除く)のに対して降伏変位の変化による影響は大きい。 一方, Fig. 6(b) $\mathcal{O}_1 T = 4.0$ sec の場合では, $\lambda_k = 0.10$ 時に, 降伏変位_{1xy}の増大に伴い,予測値も解析値も大きくなる 傾向が見られた。Fig. 7(b)より,予測値と解析値の比は 0.87~1.19となり、予測値と解析値はよく対応している。特 に、 $\lambda_k = 0.25$, $\lambda_k = 20$ cm 時の予測精度は 1.00 となってい る。また, Fig. 7(a)と異なり, 剛性比の変化が予測精度に与 える影響は小さいだけではなく,降伏変位の変化による影 響も小さい。以上より、剛性比の減少に伴う予測精度の低 下が見られないことから, エネルギー入力の予測式も小さ な剛性比を有する免震建物に対して適用できると考えら れる。また、短周期₁T = 2.0 sec より長周期₁T = 4.0 sec の 予測精度が良いことがわかる。

4.2 粘性減衰・履歴吸収エネルギーの予測精度

弾塑性 1 質点系モデルのエネルギー釣合式は次式で表 される²⁾。

$$\dot{E}_{input} = \dot{W}_d(\sigma'_x) + \dot{W}_p(\sigma'_x) \tag{4}$$

ここで,単位時間当たりの粘性減衰エネルギー
$$\dot{W_d}(\sigma'_x)$$
と

履歴吸収エネルギー $\dot{W}_{p}(\sigma'_{x})$ の予測式はそれぞれ次式で表 される²⁾。

$$\dot{W}_d(\sigma'_x) = {}_1 c \cdot (2\pi \nu' \cdot \sigma'_x)^2 \tag{5}$$

$$\dot{W}_{p}(\sigma'_{x}) = v' \cdot 4 {}_{1}Q'_{0} \cdot \left[\bar{\mu}'(\sigma'_{x}) - 1\right] {}_{1}x_{y}$$
(6)

ここで、 $_{1}c:1$ 次モードが弾性時の減衰定数、v': ゼロクロッシング数の予測値²⁾、 $\sigma'_{x}: 応答変位の予測値(エネル$ $ギーの釣合式から求める)を表す。<math>_{1}Q'_{0}: 応答変位が 0 の$ 時の復元力の予測値、 $\mu'(\sigma'_{x}): 平均塑性率の予測値を表し、$ それぞれ次式で得られる²⁾。

$${}_{1}Q'_{0} = (1 - \lambda_{k}) {}_{1}k_{1} \cdot {}_{1}x_{y}$$
⁽⁷⁾

$$\bar{\mu}(\sigma'_{x}) = \frac{x'_{p}(\sigma'_{x})}{2_{1}x_{y}} + 1$$
(8)

ここで、 $x_p(\sigma'_x)$: 1/2 サイクル当たり塑性変形量の予測値 を表し、次式で得られる²⁾。

$$x'_{p}(\sigma'_{x}) = (1+\beta)\sqrt{\frac{\pi}{2}}\sigma'_{x}\left\{1 - \operatorname{erf}\left(\frac{{}_{1}x'_{y}}{\sqrt{2}\sigma'_{x}}\right)\right\}$$
(9)

ここで, β :ゼロクロスピーク変位から求めたパラメータ, $_{1}x'_{y}$:降伏変位 $_{1}x_{y}$ から求めたパラメータを表す²⁾。

一方,単位時間当たりの粘性減衰エネルギーと履歴吸収 エネルギーの解析値は時刻歴解析の結果により,それぞれ 次式で求められる。

$$\dot{W}_{d} = \int_{50}^{650} {}_{1}F_{c} (t) \cdot {}_{1}\dot{x}(t)dt/600$$
(10)

$$\dot{W}_p = \int_{50}^{650} {}_1Q(t) \cdot {}_1\dot{x}(t)dt/600 \tag{11}$$

ここで、 $_1F(t): 1$ 次モードの減衰力、 $_1Q(t): 1$ 次モードの復元力を表す。

Fig. 8に単位時間当たり粘性減衰エネルギー W_a の予測値 および解析値 (40 波アンサンブル平均した結果)を示す。 Fig. 9 にその予測値と解析値の比を示す。粘性減衰エネル ギーの予測精度について, Fig. 9(a)の₁T= 2.0 sec の場合で は、 $\lambda_k = 0.10$, $_{1}x_y = 10$ cm 時に予測値と解析値の比は 2.49 と精度が低いが、それ以外ではその比は 0.92~1.71 となり、 全体的に予測値と解析値は概ね対応している。一方、Fig. 9(b)の₁T = 4.0 sec の場合では、予測値と解析値の比は 0.89~1.62 となり、全体的に予測値と解析値は概ね対応し ている。また、Fig. 8、9 より全体的に見ると、剛性比の変 化が予測精度に与える影響は小さい ($_{1}T$ = 2.0 sec $_{1}x_y = 10$ cm の場合を除く)のに対して、降伏変位と固有周期の変 化による影響は大きい。

Fig. 10 に単位時間当たり履歴吸収エネルギー \dot{W}_p の予測 値および解析値(40波アンサンブル平均した結果)を示す。 Fig. 11 にその予測値と解析値の比を示す。Fig. 11 より,粘 性減衰エネルギー \dot{W}_a の結論と同様に、降伏変位と固有周 期の変化が予測精度に与える影響は大きい。特に、Fig. 11(a)より、降伏変位の変化に伴い、予測精度が大幅に変化 している。したがって、これはFig. 7(a)のエネルギー入力 予測精度の大幅な変化に繋がったと考えられる。



Fig. 11 Ratio of predicted and analytical \dot{W}_p

4.3 速度に関する伝達関数の比較

4.1, 4.2 節では、粘性減衰エネルギーおよび履歴吸収エ ネルギーの予測精度がエネルギー入力の予測精度に与え る影響があることが分かった。また、式(1)より、エネルギ ー入力の予測精度は速度に関する伝達関数に依存してい ることがわかる。さらに、式(2)より、Re[H(n)]の予測値は 予測した等価剛性(または等価固有振動数)と等価減衰定 数に依存している。一方、Re[H(n)]の解析値については、 一般化風力および応答速度を用いて次式で求められる。

Re[$\dot{H}(n)$] = Re[$_1\dot{x}_{FFT}(n)/_1F_{FFT}(n)$] (12) ここで、 $_1\dot{x}_{FFT}(n)$:1次モードの応答速度をFFTしたフー リエスペクトル、 $_1F_{FFT}(n)$:1次モードの一般化風力をFFT したフーリエスペクトルを表す。

Fig. 7(a)より, $\lambda_k = 0.10$, $\lambda_k = 5 \sim 20$ cm 時に予測値と解析 値の比は,降伏変位に伴い大きく変化している。そこで, 本節ではこの4種類のケースを、速度に関する伝達関数 Re[H(n)]の予測値と解析値を比較して分析する。Fig. 12 に Re[H(n)]の予測値および解析値(40 波アンサンブル平均し た結果)を示す。Fig. 12(a) の₁x_y=5 cm の場合では,予測 値も解析値も鋭いピークが見られ、かつこの二つのピーク の横座標は概ね対応しているのに対して縦座標は対応し ていない。なお、Fig. 9(a)より、 $\lambda_k = 0.10$ 、 $\lambda_v = 5$ cm 時に \dot{W}_d が 1.71 と精度が低い。Fig. 12(b)の₁x_v=10 cm の場合では, 解析値のみに鋭いピークが見られず,かつ予測値と解析値 は明らかに対応していない。なお, Fig. 9(a)と Fig. 11(a)よ り、 $\lambda_k = 0.10$, $\lambda_k = 10$ cm 時に精度が低い \dot{W}_d と \dot{W}_n と対応し ている。Fig. 12(c)(d)では、Fig. 12(a)と異なり、予測値と解 析値のピークの縦座標は概ね対応しているのに対して横 座標は対応していない。Fig. 11(a)より, $\lambda_k = 0.10$, $\lambda_y = 15 \sim 20$ cm時に,精度が低いWpが見られる。一方,Fig. 13の₁T= 4.0 sec, $\lambda_k = 0.25$, $\lambda_k = 20 - 25$ cm の場合では,予測値と解 析値のピークは対応しているため, Fig. 7(b)における予測 値と解析値の比はそれぞれ 1.00 と 1.05 と精度が高い。以 上より,等価減衰と等価剛性の予測精度の低下は,それぞ れピークの縦座標と横座標の大きな差異を引き起こすと 考えられる。

5 まとめ

本報では,弾塑性1質点系モデルを対象とし,エネルギ ー入力の予測式の適用範囲を検討した。得られた結論を以 下にまとめる。

- (1) 剛性比の減少に伴い,予測精度は大幅に低下しないこ とから,エネルギー入力の予測式も小さな剛性比 0.1 に対して適用できると考えられる。
- (2) 予測精度が低下する場合、伝達関数の比較を通じて、 予測値と解析値のピークが対応していないことから、



*2 東京工業大学未来産業技術研究所



 $(_1T = 4.0 \text{ sec}, \lambda_k = 0.25)$

等価減衰と等価剛性の予測精度が低下することが分かった。

謝辞

本研究の一部は,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) によるものです。ここに記して感謝いたし ます。

参考文献

- 吉江慶佑,北村春幸,大熊武司:変動風力による弾塑性構造物 への総エネルギー入力に関する研究,日本建築学会構造系論文 集, Vol. 68, No. 572, pp. 31-38, 2003.10
- 2) 吉江慶佑,北村春幸,大熊武司:エネルギーの釣合に基づく変 動風力を受ける弾塑性構造物の応答予測手法,日本建築学会構 造系論文集, Vol. 70, No. 589, pp. 59-66, 2005.10
- 3) 日本建築学会:建築物荷重指針·同解説, 2015
- 4) 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, 日本建築学会学術講演梗概集, Vol. B-1, pp. 193-194, 2010.7

*Tokyo Institute of Technology *1 *Tokyo Institute of Technology *2