

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 of 予測精度
Title(English)	Prediction accuracy of energy input to elastic-plastic SDOF models under fluctuating wind force
著者(和文)	銭曉鑫, 佐藤大樹
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予測精度

構造—振動

正会員 ○ 銭曉鑫^{*1}正会員 佐藤大樹^{*2}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。そこで、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 ${}_1T$ ($=0.02H, 0.04H$) は 2 種、第一・第二剛性の比 $\lambda_k (={}_1k_2/{}_1k_1)$ は 2 種、降伏変位 ${}_1x_y$ は 7 種、減衰定数 ${}_1\zeta$ (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

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 (Wave 1) 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。

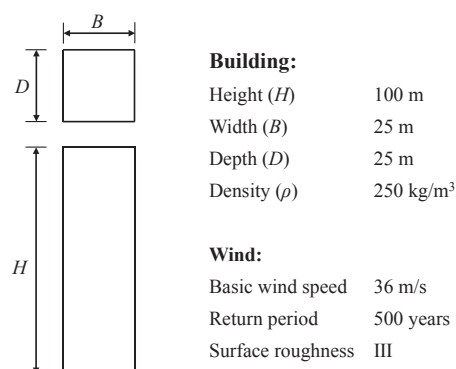
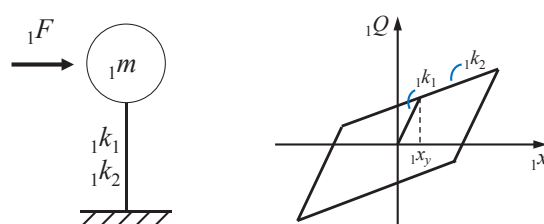


Fig. 1 The object building

Fig. 2 The 1st mode and its restoring force characteristicsTable 1 Parameters of the 1st mode

${}_1T$	2.0, 4.0 sec
λ_k	0.10, 0.25
${}_1x_y$	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 cm
${}_1\zeta$	0.02

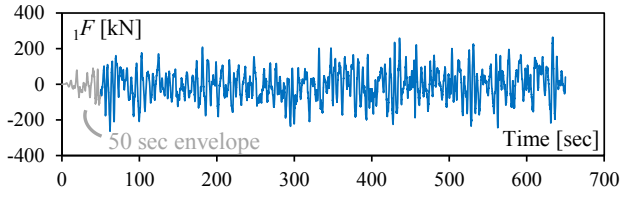


Fig. 3 Time-history of the 1st mode wind force (Wave 1)

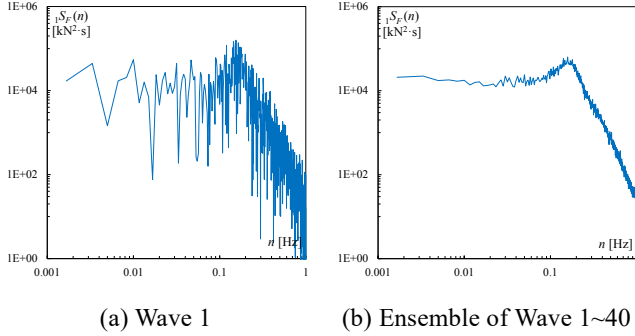


Fig. 4 PSD of the 1st mode wind force

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 ${}_1x_{\max}/{}_1x_y$ 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 ${}_1T=2.0$ sec の場合では、 ${}_1x_y=5\sim30$ cm 時に ${}_1x_{\max}/{}_1x_y > 1$ が見られた。 ${}_1x_y=35$ cm 時に ${}_1x_{\max}/{}_1x_y > 1$ 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 ${}_1T=4.0$ sec の場合では、同様に ${}_1x_y=5\sim35$ cm 時に ${}_1x_{\max}/{}_1x_y > 1$ 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。

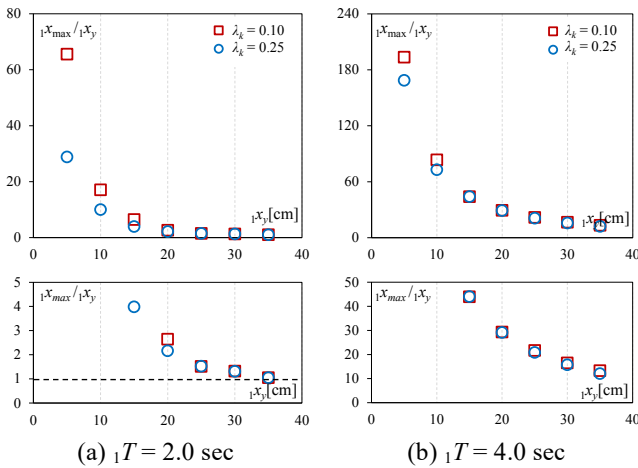


Fig. 5 Ratio of maximum and yield displacement

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 $E[\dot{E}_{input}]_t$ は次式で表される¹⁾。

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

ここで、 ${}_1S_F(n)$: 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。 $\text{Re}[\cdot]$: $[\cdot]$ 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⁾。

$$\dot{H}(n) = \frac{2\pi n}{{}_1k_{eq}} \cdot \frac{2 {}_1\xi_{eq} \left(\frac{n}{{}_1n_{eq}} \right) + i \left[1 - \left(\frac{n}{{}_1n_{eq}} \right)^2 \right]}{\left[1 - \left(\frac{n}{{}_1n_{eq}} \right)^2 \right]^2 + \left[2 {}_1\xi_{eq} \left(\frac{n}{{}_1n_{eq}} \right) \right]^2} \quad (2)$$

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。

$$\dot{E}_{input} = \int_{50}^{650} {}_1F(t) \cdot {}_1\dot{x}(t) dt / 600 \quad (3)$$

ここで、 ${}_1F(t)$: 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 $\dot{E}_{input}$ 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 ${}_1x_y$ 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 (${}_1x_y=10$ 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) の ${}_1T=4.0$ sec の場合では、 $\lambda_k=0.10$ 時に、降伏変位 ${}_1x_y$ 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、 $\lambda_k=0.25$ 、 ${}_1x_y=20$ 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⁾。

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

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⁾。

$$\dot{W}_d(\sigma'_x) = {}_1c \cdot (2\pi v' \cdot \sigma'_x)^2 \quad (5)$$

$$\dot{W}_p(\sigma'_x) = v' \cdot {}_1Q'_0 \cdot [\bar{\mu}'(\sigma'_x) - 1] {}_1x_y \quad (6)$$

ここで、 ${}_1c$ ：1次モードが弾性時の減衰定数、 v' ：ゼロクロス数の予測値²⁾、 σ'_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。 ${}_1Q'_0$ ：応答変位が0の時の復元力の予測値、 $\bar{\mu}'(\sigma'_x)$ ：平均塑性率の予測値を表し、それぞれ次式で得られる²⁾。

$${}_1Q'_0 = (1 - \lambda_k) {}_1k_1 \cdot {}_1x_y \quad (7)$$

$$\bar{\mu}'(\sigma'_x) = \frac{x'_p(\sigma'_x)}{2 {}_1x_y} + 1 \quad (8)$$

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⁾。

$$x'_p(\sigma'_x) = (1 + \beta) \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma'_x \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{{}_1x'_y}{\sqrt{2} \sigma'_x} \right) \right\} \quad (9)$$

ここで、 β ：ゼロクロスピーク変位から求めたパラメータ、 ${}_1x'_y$ ：降伏変位 ${}_1x_y$ 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。

$$\dot{W}_d = \int_{50}^{650} {}_1F_c(t) \cdot {}_1\dot{x}(t) dt / 600 \quad (10)$$

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

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 $\dot{W}_d$ 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、 $\lambda_k = 0.10$ 、 ${}_1x_y = 10$ cm 時に予測値と解析値の比は2.49と精度が低い、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(${}_1T = 2.0$ sec、 ${}_1x_y = 10$ 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 $\dot{W}_d$ 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。

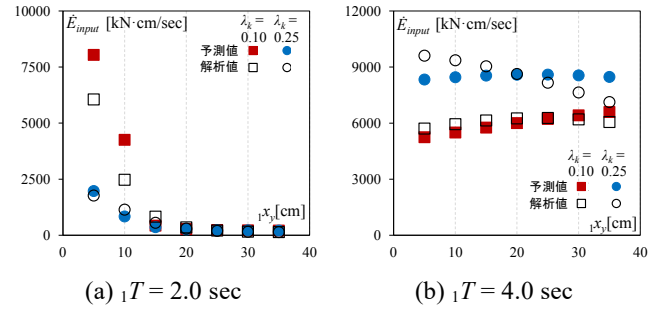


Fig. 6 Predicted and analytical $\dot{E}_{input}$

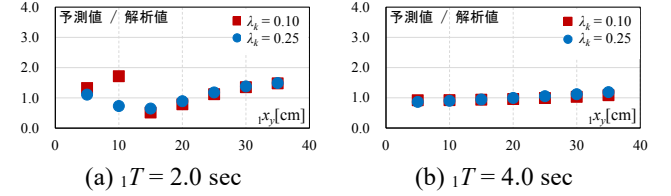


Fig. 7 Ratio of predicted and analytical $\dot{E}_{input}$

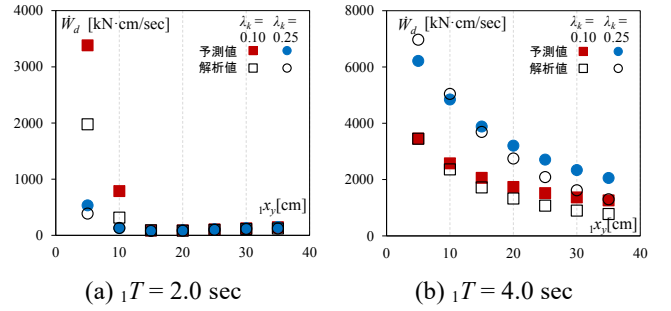


Fig. 8 Predicted and analytical $\dot{W}_d$

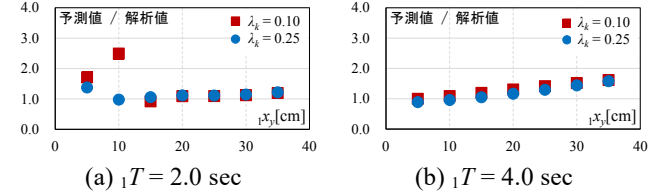


Fig. 9 Ratio of predicted and analytical $\dot{W}_d$

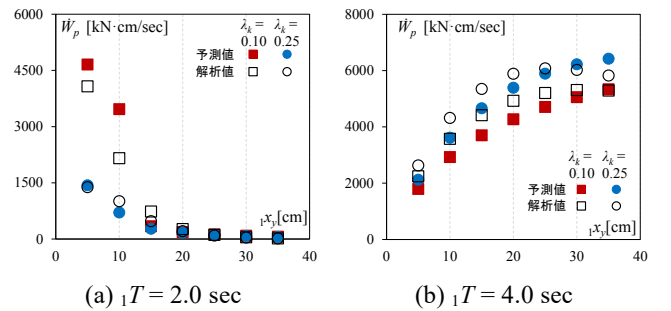


Fig. 10 Predicted and analytical $\dot{W}_p$

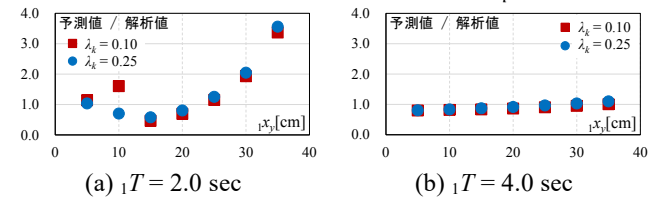


Fig. 11 Ratio of predicted and analytical $\dot{W}_p$

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、 $\text{Re}[\dot{H}(n)]$ 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、 $\text{Re}[\dot{H}(n)]$ 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。

$$\text{Re}[\dot{H}(n)] = \text{Re}[\dot{x}_{FFT}(n) / F_{FFT}(n)] \quad (12)$$

ここで、 $\dot{x}_{FFT}(n)$: 1 次モードの応答速度を FFT したフーリエスペクトル、 $F_{FFT}(n)$: 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、 $\lambda_k = 0.10$ 、 $1x_y = 5 \sim 20$ 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 $\text{Re}[\dot{H}(n)]$ の予測値と解析値を比較して分析する。Fig. 12 に $\text{Re}[\dot{H}(n)]$ 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、 $\lambda_k = 0.10$ 、 $1x_y = 5$ cm 時に $\dot{W}_d$ が 1.71 と精度が低い。Fig. 12(b)の $1x_y = 10$ 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、 $\lambda_k = 0.10$ 、 $1x_y = 10$ cm 時に精度が低い $\dot{W}_d$ と $\dot{W}_p$ に対応している。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、 $\lambda_k = 0.10$ 、 $1x_y = 15 \sim 20$ cm 時に、精度が低い $\dot{W}_p$ が見られる。一方、Fig. 13 の $1T = 4.0$ sec、 $\lambda_k = 0.25$ 、 $1x_y = 20 \sim 25$ 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、

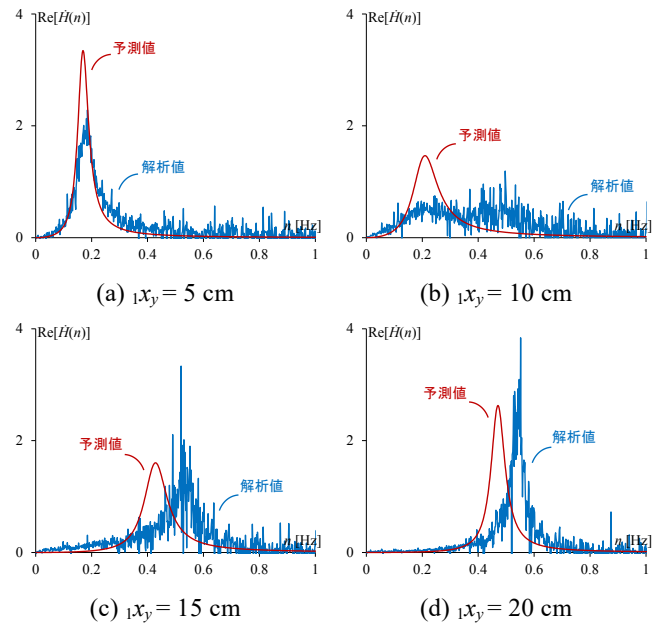


Fig. 12 Predicted and analytical $\text{Re}[\dot{H}(n)]$

($1T = 2.0$ sec, $\lambda_k = 0.10$)

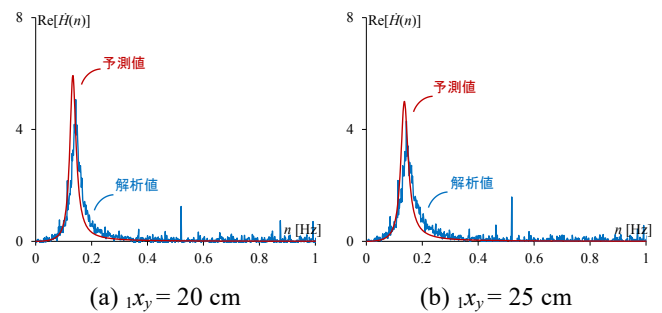


Fig. 13 Predicted and analytical $\text{Re}[\dot{H}(n)]$

($1T = 4.0$ 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 (JPMJP1723) によるものです。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 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, 吉江慶佑, 鶴見俊雄, 佐藤大樹: 風洞実験に基づく高層建物の多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

*1 東京工業大学建築学系

*2 東京工業大学未来産業技術研究所

*Tokyo Institute of Technology *1

*Tokyo Institute of Technology *2