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)	変動風力を受ける超高層制振建物の弾塑性風応答予測 その 2 弾塑性風応答予測手法の妥当性
Title(English)	Elasto-plastic wind-induced response evaluation of a passively controlled high-rise building to fluctuating wind force Part.2 Validity of elasto-plastic wind induced response evaluation
著者(和文)	平塚紘基, 佐藤大樹, 田中英之
Authors(English)	Koki Hiratsuka, Daiki Sato, Hideyuki Tanaka
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, Ⅰ, , pp. 317-320
Citation(English)	, Ⅰ, , pp. 317-320
発行日 / Pub. date	2021, 3

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

2020年度日本建築学会
関東支部研究報告集Ⅰ
2021年3月

変動風力を受ける超高層制振建物の弾塑性風応答予測

その2　弾塑性風応答予測手法の妥当性

構造ー振動

正会員 ○ 平塚紘基[*1]　　正会員　佐藤大樹[*2]
正会員　　田中英之[*3]

超高層制振建物　弾塑性風応答
多質点系モデル　履歴型ダンパー

1. はじめに

本報その 1 では，検討に用いる風洞実験結果の風力特性などについて建築物荷重指針・同解説 [1]（荷重指針）の値との比較を行い，概ね一致することが確認された。本報その 2 では，多質点系での風応答（最大変形）予測手法を提案し，提案手法の予測精度について検討を行う。なお，本報では構造物の振動により風力特性が変化しないことを前提とし，空力不安定振動の問題は対象外とする。また，変動成分のみの風直交方向を対象とする。

2. 解析対象モデルおよび風外力概要

2.1 解析対象モデル

本報では，超高層制振建物を対象とし，高さ $H=200$ m の 20 質点せん断型モデルを用いる。フレームの 1 次固有周期を ${}_1T_f=5.0$ s，7.0 s，建物密度を $\rho_f=175$ kg / m^3 とし，質量は高さ方向に一様と想定した。辺長比は，本報その 1 と同様に $D/B=1.0$，1.6（以降，それぞれ F1，F16）の 2 種類とする。構造減衰を剛性比例型として，${}_1T_f$ に対して 1 次減衰定数 ${}_1\xi_f=1\%$，2，4%（4%は粘性ダンパーの併用を想定）の 3 種類を用いる。各層のフレームの剛性 k_{fi}（Fig. 1）は建物の 1 次固有モードが直線 [2]となるように設定した。なお，フレームは弾性状態を保つものとする。

本報で用いるダンパーは完全弾塑性としてモデル化し，全層に付加する。1 層目のダンパー降伏せん断力係数（以下，ダンパー量）α_{dy1} は 0.01，0.02，0.04 の 3 種類とし，ダンパーの降伏層間変形角 R_{dy} は 1/600 とする。各層のダンパー降伏層せん断力 Q_{dyi} は，第 1 層目のダンパー降伏層せん断力 Q_{dy1} を基準とし，Ai 分布に基づく設計用地震層せん断力分布をもとに 4 段階とする（Fig. 2）。Q_{dy1} は α_{dy1} を用いて次式で表される。

$$Q_{dy1}=\alpha_{dy1}\cdot W \tag{1}$$

ここで，W : 全重量を表す。ダンパーの降伏変形 δ_{dyi} は R_{dy} および質点間距離 h_i を用いて以下の式で表される。

$$\delta_{dyi}=R_{dy}\cdot h_i \tag{2}$$

よってダンパー剛性 k_{di} は式(3)より求められる。

$$k_{di}=Q_{dyi}/\delta_{dyi} \tag{3}$$

しかし，モデル化したダンパーを，モデル化したフレームバネに並列に配置したせん断型モデルに用いると，ダンパーに有効に働く変形（実効変形）を過大に評価すること

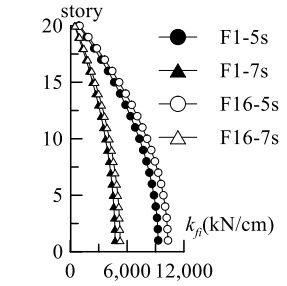


Fig. 1 Stiffness (frame)

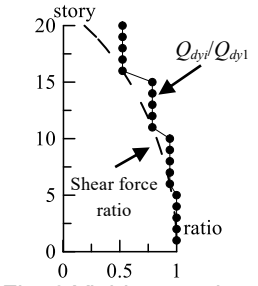


Fig. 2 Yield strength ratio

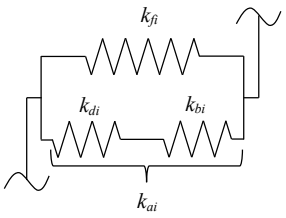


Fig. 3 Model of frame with Additional component

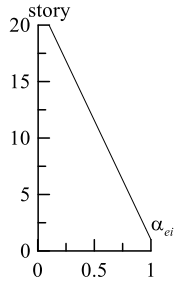
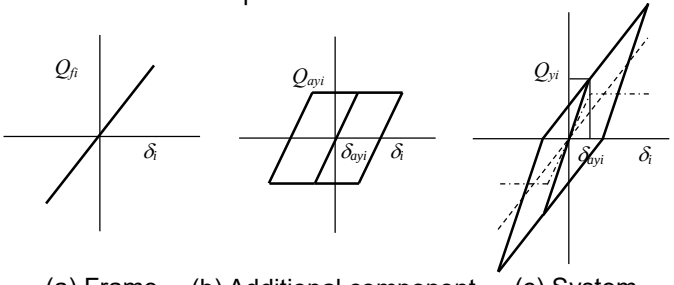


Fig. 4 Effective damper deformation ratio



(a) Frame　(b) Additional component　(c) System
Fig. 5 Restoring force characteristic

Elasto-plastic wind-induced response evaluation of a passively controlled high-rise building to fluctuating wind force
Part.2 Validity of elasto-plastic wind induced response evaluation

Koki HIRATSUKA , Daiki SATO , Hideyuki TANAKA

となり，危険側の評価となる[3]。そこで本報では，文献 4)と同様にダンパー剛性 k_{di} に実効変形を過大評価しないための直列バネ剛性 k_{bi} を挿入したせん断型モデル（Fig. 3）を用いる。以降 k_{di} と k_{bi} の直列系を付加系（Additional component）の剛性 k_{ai} と呼ぶ。k_{ai} を算出する際に用いる実効変形の比（実効変形比）α_{ei} は，文献 5)を参考に，第 1 層目から第 20 層目まで直線となるように仮定し，第 1 層目を 1，第 20 層目を 0.1 とする（Fig. 4）。また，付加系降伏層せん断力 Q_{ayi} は Q_{dyi} と同値である。よって以上の条件から，付加系の剛性 k_{ai} は以下の算出式で表される。

$$k_{ai} = Q_{ayi} / \left(\delta_{dyi} / \alpha_{ei} \right) \tag{4}$$

なお，付加系の降伏変形 δ_{ayi} は以下の式で表される。

$$\delta_{ayi} = \delta_{dyi} / \alpha_{ei} \tag{5}$$

本報では，Fig. 3 に示すようなフレームに付加系を並列に設置したモデルを以後システムと呼ぶ。なお，付加系は粘性減衰を有さないものとする。

Fig. 5 にフレーム，付加系，システムの復元力特性を示す。Fig. 5 中に示す δ_i は i 層の層間変形を表し，Q_{fi} は δ_i 時の i 層のフレーム層せん断力を表す。i 層のシステム降伏層せん断力 Q_{yi} は，Fig. 5 に示した復元力特性より，以下の算定式より算出される。

$$Q_{yi} = k_{fi} \cdot \delta_i + Q_{ayi} \tag{6}$$

2.2 風外力概要

風外力は，本報その 1 で検討を行った風外力を用いる。詳細については本報その 1 を参照されたい。なお，本報では時刻歴応答解析の過渡応答の影響を避けるため，各波形前後に 50 s のエンベロープを設け，中間の 600 s（10 分間）での応答を評価に用いる。また，10 波のアンサンブル平均により応答値を評価する。

3. 弾塑性風応答予測手法

Fig. 6 に弾塑性風応答予測手法のフローチャートを示す。弾塑性風応答は，スペクトルモーダル解析を用いた等価線形化により予測する。ただし，収斂回数 $j = 0$ の場合は，等価線形化前のシステム弾性時の値を用いる。

［手順 1］ $Q^{(j)}{}_i$，$\delta^{(j)}{}_i$ の算出

風力データ，構造特性および固有値を用いてスペクトルモーダル解析により，層せん断力 $Q^{(j)}{}_i$ および層間変形 $\delta^{(j)}{}_i$ を算出する。

i 層の風外力時刻歴 $F_i(t)$ とシステム 1 次等価固有モード ${}_1\phi^{(j)}{}_{eq,i}$ を用いて，1 次モーダル風外力時刻歴 ${}_1F^{(j)}(t)$ は式(7)より算出される。

$$ {}_1F^{(j)}(t) = \sum_{i=1}^{N} {}_1\phi^{(j)}{}_{eq,i} \cdot F_i(t) \tag{7}$$

ここで，N : 層数を表す。1 次モーダル風外力のパワースペクトル密度 ${}_1S^{(j)}{}_F(f)$ とシステム 1 次等価モーダル剛性 ${}_1K^{(j)}{}_{eq}$ および 1 次等価減衰定数 ${}_1\xi^{(j)}{}_{eq}$ を用いて，スペクトルモーダル解析により，1 次モーダル応答変位 ${}_1q^{(j)}$ の標準偏差 ${}_1\sigma^{(j)}{}_q$ は式(8)より算出される。

$$ {}_1\sigma^{(j)}{}_q = \left[\int_0^{\infty} \left| {}_1H^{(j)}(f) \right|^2 \cdot {}_1S^{(j)}{}_F(f) df \right]^{0.5} \tag{8}$$

ここで，${}_1H^{(j)}(f)$: 1 次の周波数応答関数を表し，次式で表される。

$$ {}_1H^{(j)}(f) = \frac{1}{1 - \left(\dfrac{f}{{}_1f^{(j)}{}_{eq}} \right)^2 + 2i\,{}_1\xi^{(j)}{}_{eq} \dfrac{f}{{}_1f^{(j)}{}_{eq}}} \cdot \frac{1}{{}_1K^{(j)}{}_{eq}} \tag{9}$$

ここに，f : 振動数，${}_1f^{(j)}{}_{eq}$: システム 1 次等価固有振動数，i : 虚数単位を表す。なお，${}_1\xi^{(0)}{}_{eq}$ は次式で算出される。

$$ {}_1\xi^{(0)}{}_{eq} = {}_1\xi = \left({}_1f_f / {}_1f \right) \cdot {}_1\xi_f \tag{10}$$

ここで，${}_1f$，${}_1\xi$: システムの弾性 1 次固有振動数，減衰定数，${}_1f_f$，${}_1\xi_f$: フレームの 1 次固有振動数，減衰定数を表す。風応答時における多質点系での層間変形の標準偏差 ${}_1\sigma^{(j)}{}_{\delta i}$ は，式(11)で表される。

$$ {}_1\sigma^{(j)}{}_{\delta i} = {}_1\sigma^{(j)}{}_q \cdot \left({}_1\phi^{(j)}{}_{eq,i} - {}_1\phi^{(j)}{}_{eq,i-1} \right) \tag{11}$$

i 層の層間変形 $\delta^{(j)}{}_i$ は，式(11)で求めた ${}_1\sigma^{(j)}{}_{\delta i}$ を用いて式(12)より算出される。

$$ \delta^{(j)}{}_i = {}_1\sigma^{(j)}{}_{\delta i} \cdot g^{(j)}{}_p \tag{12}$$

ここで，$g^{(j)}{}_p$: ピークファクターを表し[1]，次式より算出される。

$$ g^{(j)}{}_p = \sqrt{2\ln\left(600\,{}_1f^{(j)}{}_{eq} \right)} + 1.2 \tag{13}$$

層せん断力 $Q^{(j)}{}_i$ は，$\delta^{(j)}{}_i$ およびシステムの等価剛性 $k^{(j)}{}_{eq,i}$

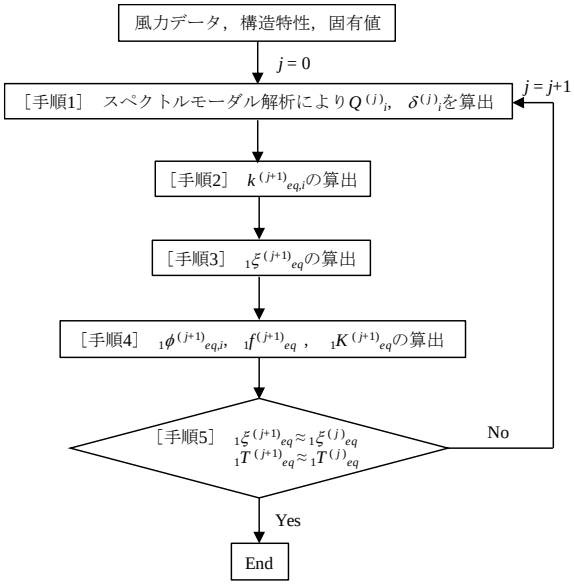


Fig. 6 Flowchart

を用いて次式で算出される。

$$Q^{(j)}{}_i = k^{(j)}{}_{eq,i} \cdot \delta^{(j)}{}_i \tag{14}$$

［手順 2］ $k^{(j+1)}{}_{eq,i}$ の算出

システムの等価剛性 $k^{(j+1)}{}_{eq,i}$ は，次式より算出される。

$$k^{(j+1)}{}_{eq,i} = \begin{cases} k_i & \left(\delta^{*(j+1)}{}_{i,max} < \delta_{ayi}\right) \\ \dfrac{Q_{yi} + k_{fi}\left(\delta^{*(j+1)}{}_i - \delta_{ayi}\right)}{\delta^{*(j+1)}{}_i} & \left(\delta^{*(j+1)}{}_{i,max} \geq \delta_{ayi}\right) \end{cases} \tag{15}$$

ここで，$\delta^{*(j+1)}{}_i$：システムの復元力特性上の $Q^{(j)}{}_i$ における最大変形を表し，次式より算出される。

$$\delta^{*(j+1)}{}_i = \begin{cases} Q^{(j)}{}_i / k_i & \left(Q^{(j)}{}_i < Q_{yi}\right) \\ \left(Q^{(j)}{}_i - Q_{yi} + k_{fi} \cdot \delta_{ayi}\right) / k_{fi} & \left(Q^{(j)}{}_i \geq Q_{yi}\right) \end{cases} \tag{16}$$

［手順 3］ ${}_1\xi^{(j+1)}{}_{eq}$ の算出

システムの 1 次等価減衰定数 ${}_1\xi^{(j+1)}{}_{eq}$ は次式で算出される。

$${}_1\xi^{(j+1)}{}_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^{N} {}_1\xi^{(j+1)}{}_{eq,i} \cdot W^{(j+1)}{}_i}{\sum_{i=1}^{N} W^{(j+1)}{}_i} + {}_1\xi \tag{17}$$

ここで，${}_1\xi^{(j+1)}{}_{eq,i}$：i 層の減衰定数を表し，風応答は多様な振幅を持つランダム応答であることを考慮し，${}_1\xi^{(j+1)}{}_{eq,i}$ は以下の式より算出される [6]。

$${}_1\xi^{(j+1)}{}_{eq,i} = \begin{cases} 0 & \left(\delta^{*(j+1)}{}_i < \delta_{ayi}\right) \\ \dfrac{2(1+\alpha_i)}{\pi\mu^{(j+1)}{}_i} \ln \dfrac{\mu^{(j+1)}{}_i + \alpha_i}{(1+\alpha_i)\left(\mu^{(j+1)}{}_i\right)^{\frac{1}{(1+\alpha_i)}}} & \left(\delta^{*(j+1)}{}_i \geq \delta_{ayi}\right) \end{cases}$$

$$\alpha_i = \frac{k_{ai}}{k_{fi}} \tag{18}$$

ここに，$\mu^{(j+1)}{}_i$：i 層の塑性率を表し，次式で算出される。

$$\mu^{(j+1)}{}_i = \delta^{*(j+1)}{}_i / \delta_{ayi} \tag{19}$$

また，式(17)中の $W^{(j+1)}{}_i$ は i 層のポテンシャルエネルギーを表し次式より算出される。

$$W^{(j+1)}{}_i = \left(Q^{(j)}{}_i\right)^2 / \left(2 \cdot k^{(j+1)}{}_{eq,i}\right) \tag{20}$$

［手順 4］ ${}_1\boldsymbol{\phi}^{(j+1)}{}_{eq,i}$，${}_1\boldsymbol{f}^{(j+1)}{}_{eq}$，${}_1\boldsymbol{K}^{(j+1)}{}_{eq}$ の算出

システム 1 次等価固有モード ${}_1\boldsymbol{\phi}^{(j+1)}{}_{eq,i}$，等価固有振動数 ${}_1\boldsymbol{f}^{(j+1)}{}_{eq}$ および等価モーダル剛性 ${}_1\boldsymbol{K}^{(j+1)}{}_{eq}$ は，システムの等価剛性 $k^{(j+1)}{}_{eq,i}$ および対象モデルの各層の質量 m_i を用いて固有値解析により算出する。

［手順 5］ ${}_1\boldsymbol{\xi}^{(j+1)}{}_{eq}$ および ${}_1\boldsymbol{T}^{(j+1)}{}_{eq}$ の判定

${}_1\xi^{(j+1)}{}_{eq}$ と ${}_1\xi^{(j)}{}_{eq}$ および ${}_1T^{(j+1)}{}_{eq}$ と ${}_1T^{(j)}{}_{eq}$（${}_1T_{eq} = 1 / {}_1f_{eq}$）概ね一致すれば（本報では 1%以内），システム弾塑性時の減衰と固有周期を評価したことになるので終了となる。なお，層間変形は，手順 1 の式(12)より算出した値を用いる。もし一致しなければ，$j = j+1$ とし手順 1 へ戻る。

4. 提案手法の予測精度

Fig. 7 に解析結果の層間変形角（R_i）と提案手法の層間変形角（$R^*{}_i$）を比較した図を，Fig. 8 に解析結果の標準偏差（$\sigma_{\delta i}$）と提案手法の標準偏差（${}_1\sigma_{\delta i}$）を比較した図を示す。Fig. 7 より，層間変形角において，F1 モデル，${}_1T_f = 5.0$ s の場合で，どのパラメータにおいても誤差が概ね 20%以内となっており，精度よく一致していることが確認できる。一方，F1 モデル，${}_1T_f = 7.0$ s の場合では，${}_1T_f = 5.0$ s の場合に比べ誤差が大きくなっていることが確認でき，概ね誤差 30%以内となっていることが確認できる。F16 モデルにおいても同様の傾向が見られ，${}_1T_f = 5.0$ s で概ね誤差 20%以内，${}_1T_f = 7.0$ s で概ね誤差 30%以内となっている。Fig. 8 より，標準偏差においても Fig. 8 の層間変形角と同様の誤差の傾向があることが確認できる。なお，モデル頂部における層間変形のパワースペクトル密度 $S_{\delta 20}$ は附録 A を参照されたい。

Fig. 9 に F1 モデル，${}_1T_f = 5.0$ s，7.0 s の解析結果より算出した各層の減衰定数 ${}_1\xi_{eq,i}$ とピークファクター g_{pi} の関係を示す。なお，${}_1\xi_{eq,i}$ は式(18)に解析結果の最大塑性率を代入することにより算出した。また，Fig. 9 中に，提案手法により算出した g_p の範囲も併記する。Fig. 9 より，${}_1\xi_{eq,i}$ が大きくなる（長周期化する）とともに，g_{pi} が増加する傾向が確認できる。特に，${}_1T_f = 7.0$ s の場合でその傾向が顕著になっている。一方，提案手法により算出する g_p は長周期（低振動数）側で小さくなる値（式(13)）であり，解析結果と相反する関係となる。よって，付加系の塑性化により長周期化（減衰が増加）することで，ピークファクターの誤差が大きくなり，その誤差を収斂課程で補正するため必然的に標準偏差の誤差も大きくなる。その結果，最終的に層間変形角の誤差が大きくなると考えられる。

5. おわりに

本報その 2 では，多質点系での風応答（最大変形）予測手法を提案し，提案手法の予測精度について検討を行った。その結果，辺長比 D/B の変化に関わらず，層間変形角，標準偏差ともにフレームの固有周期 ${}_1T_f = 5.0$ s の場合で誤差が概ね 20%以内，${}_1T_f = 7.0$ s の場合で誤差が概ね 30%以内となることが確認され，固有周期の増大により誤差が大きくなることがわかった。これは，解析結果が各層の減衰が増大する（長周期化）に伴いピークファクターが大きくなる傾向に対して，提案手法のピークファクター

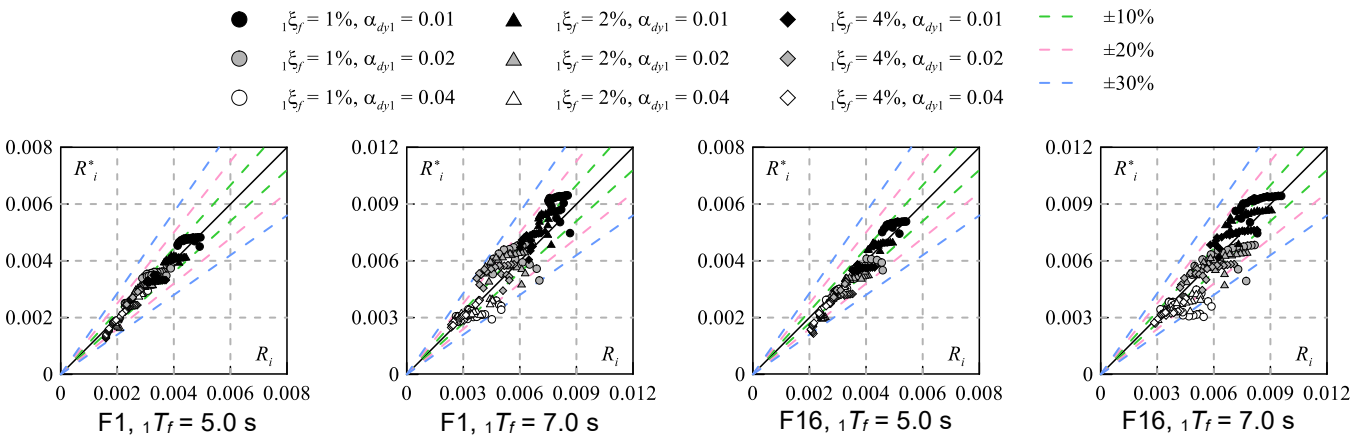


Fig. 7 Comparison of proposed method and time-history analysis (R^*_i, R_i)

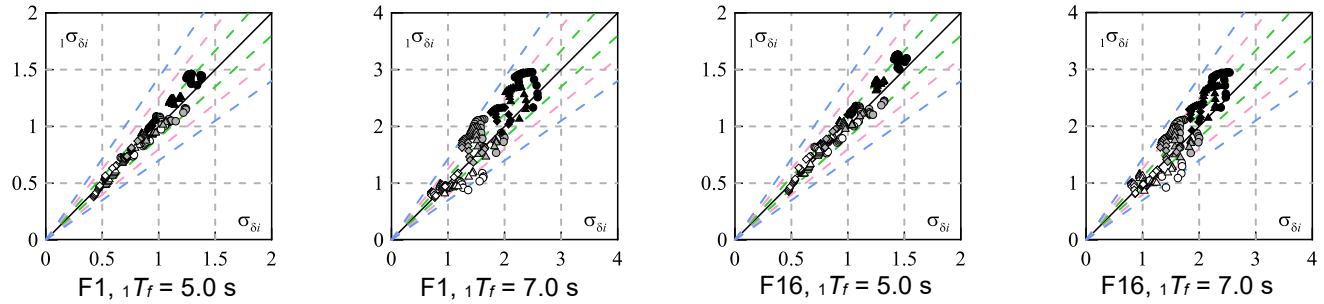


Fig. 8 Comparison of proposed method and time-history analysis (R^*_i, R_i)

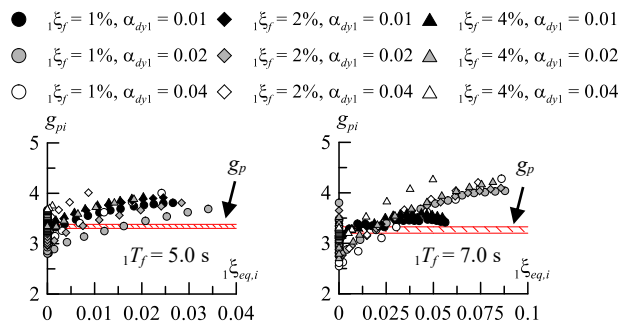


Fig. 9 Relation of $_1\xi_{eq,i}$ and g_{pi} (F1)

は長周期側で小さくなる値であり，長周期化によるピークファクターの誤差の増大が，標準偏差の誤差に繋がり，最終的に層間変形の誤差の増大に繋がったと考えられる。

謝辞

本報告は，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 産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラムによるものです。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) 佐藤大樹，笠井和彦，田村哲郎：粘弾性ダンパーの振動数依存性が風応答に与える影響，日本建築学会構造系論文集，第 74 巻，第 635 号，pp.75-82，2009.1
3) 栗林晃司，佐藤大樹，北村春幸，山口路夫，西本晃治：実効変形を考慮した履歴減衰型制振部材を有する鋼構造建物のエネルギーの釣合に基づく応答予測法，日本建築学会構造系論文集，第 76 巻，第 661 号，pp.543-552
4) 石井正人，笠井和彦：多層制振構造の時刻歴解析に用いるせん断棒モデルの提案，日本建築学会構造系論文集，第 75 巻，第 647 号，pp.103-112，2010.1
5) 中島隆裕，添田幸平：制振ダンパーのエネルギー吸収メカニズムの比較，建築技術，pp. 130-133，2016.5
6) 竹内徹，市川康，中島秀雄，笠井和彦：ダンパーが不均等配置された多層パッシブ制振構造の応答予測，日本建築学会構造系論文集，第 583 号，pp.115-122，2004.9

附録 A　層間変形のパワースペクトル密度

Fig. A に解析結果および提案手法のモデル頂部における $S_{\delta 20}$ を比較した図を示す。なお，代表例として F1 モデルの $_1\xi_f$ = 1%，α_{dy1} = 0.02 の結果を示している。Fig. A より，$_1T_f$ = 5.0 s の場合，高振動数領域において高次モードの影響から誤差が生じているものの，1 次固有振動数周辺までは，精度よく一致していることが確認できる。一方で，$_1T_f$ = 7.0 s の場合は，高振動数領域における誤差が大きく，また，1 次固有振動数周辺においてもわずかに誤差が生じていることが確認できる。

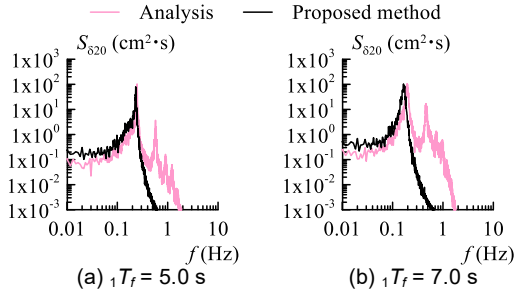


Fig. A Comparison of δ_i of PSD (F1, $_1\xi_f$ = 1%, α_{dy1} = 0.02)

*1 東京工業大学環境・社会理工学院　大学院生　Graduate Student, School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology
*2 東京工業大学未来産業技術研究所　准教授・博士（工学）　Associate Prof. , FIRST, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
*3 株式会社竹中工務店　技術研究所　主任研究員・博士（工学）　Chief Researcher, Research & Development Institute, Takenaka Corporation, Dr. Eng.