

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構造減衰による吸収エネルギーの評価
Title	
著者(和文)	池上昌志, 吉江慶祐, 佐藤大樹, 小川諒, 北村春幸
Authors	daiki sato, Haruyuki Kitamura
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, Vol. 83, , 2031
Citation(English)	, Vol. 83, , 2031
発行日 / Pub. date	2013, 3
rights	日本建築学会
rights	本文データは学協会の許諾に基づきCiNiiから複製したものである
relation	isVersionOf: http://ci.nii.ac.jp/naid/110009769777

変動風力を受ける超高層制振建物の構造減衰による吸収エネルギーの評価

準会員○池上昌志^{*1} 正会員 吉江慶祐^{*2} 同 佐藤大樹^{*1}
同 小川諒^{*1} 同 北村春幸^{*1}

構造—振動

風外力 多質点系 超高層制振建物

構造減衰 弾塑性応答

1. はじめに

構造物の弾塑性域での設計については、耐震設計の分野ではエネルギーの釣合に基づく設計手法¹⁾が既に実用化されている。この方法は、変形や塑性化の度合いと履歴吸収エネルギーを直接関係づけることで、時刻歴応答解析を用いない応答予測を可能にし、構造設計の信頼性を高められていると考えられる。一方、エネルギーの釣合を利用した弾塑性風応答予測に関して、吉江²⁾は、風応答は1次モードが支配的として、1質点系の風応答予測手法を研究しており、その有効性を示している。そこで平井³⁾は、多質点系へ拡張するために、多質点系での風外力に対して、損傷に寄与するエネルギー E_D ¹⁾を配分する手法を示した。 E_D は入力エネルギーから建物の構造減衰による吸収エネルギー $f W_h$ を除いた値である。しかし、風応答時の構造減衰による吸収エネルギーについて行われた研究はほとんどなく、不明点が多い。

そこで本報では、多質点系でのエネルギーの釣合に基づく弾塑性風応答予測手法を構築するための基礎研究として、風外力に対する構造減衰による吸収エネルギーの特性を時刻歴応答解析結果より評価する。続いて、構造減衰による吸収エネルギーの予測に必要な等価振動数をスペクトルモーダル解析より予測し、それを用いて構造減衰による吸収エネルギーを求め、時刻歴応答解析結果と比較することで本手法の有効性を検証する。

2. 解析対象モデルと風外力の概要

2.1 解析対象モデル

検討対象建物の諸元と想定立地条件、解析モデルを図1に示す。解析モデルは超高層制振建物を対象とした10質点せん断型モデルとした。フレームは、1次固有周期 $f T_1 = 5.0$ 秒、地上部総質量は56000 tonとし、質量は高さ方向に一様であると想定した。なお、本報では面積(B(幅)×D(奥行き))を等しく1600m²と設定し、辺長比D/B=1.0, 3.0(図2)としているため、辺長比ごとにそれぞれB, Dが異なる。構造減衰はフレームのみの1次固有周期 $f T_1$ に対して減衰定数 $h_1 = 0.01, 0.02$ の2パターン⁴⁾の剛性比例型とした。各層のフレーム剛性 k_i は、建物の1次固有モードが直線となるように決定した⁴⁾。図3に剛性分布および振動モード形をそれぞれ示す。

本報では、第1層のダンパー降伏せん断力係数 ${}_d \alpha_{y1} = 0, 0.005, 0.01, 0.02$ を解析パラメーターとした。なお、 ${}_d \alpha_{y1} = 0$ とはフレームのみの状態でありダンパー無しを意味する。各層のダンパー剛性 ${}_d k_i$ とフレーム

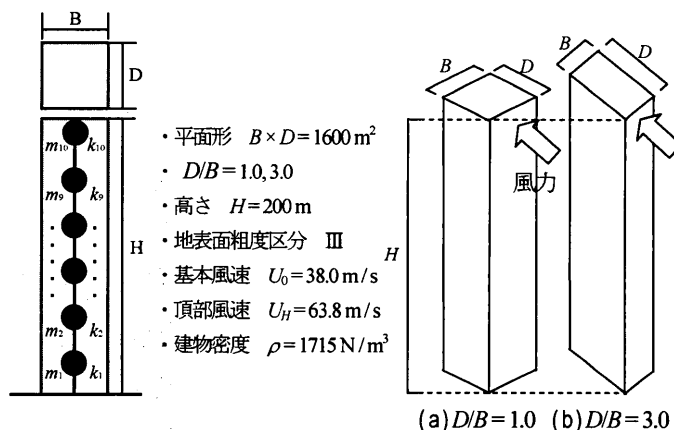


図1 弾塑性解析モデル概要

図2 辺長比D/B

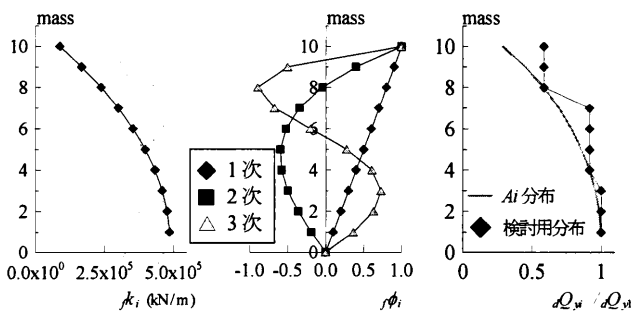


図3 フレームの概要

図4 層せん断力比分布

剛性 k_i の比率を、各層一定で、 ${}_d k_i / k_i = 1.0$ とした。フレームとダンパーを合わせた状態をシステムとすると、システムの固有周期は ${}_s T_1 = 3.58$ 秒となる。表2にフレームおよびシステムの固有周期、固有振動数を示す。ダンパーの層せん断力比分布を既往研究³⁾にならひ、3段階に分割するモデルを用いた(図4)。図4の実線は、 A_i 分布に基づく設計用層せん断力 Q_i の分布に従って決定した。本報での第1層のダンパーの降伏層せん断力 ${}_d Q_{y1}$ は、下式より求めた。

$${}_d Q_{y1} = {}_d \alpha_{y1} \sum_{i=1}^N m_i \cdot g \tag{1}$$

ここに、 ${}_d \alpha_{y1}$:ダンパーの降伏層せん断力係数、 N :全層数、 m_i : i 層の質量、 g :重力加速度である。

表1 固有周期, 固有振動数

	固有周期 T_1 (s)	固有振動数 f_1 (Hz)
フレーム	5.00	0.20
システム	3.58	0.28

2.2 風外力の概要

構造物に作用する風外力は風洞実験結果⁹⁾を用いた。実験気流は「建築物荷重指針・同解説」⁹⁾の地表面粗度区分Ⅲの気流を目標に作成し、層風力は10層分測定した。風速は再現期間500年に相当の頂部風速 $U_H = 63.8$ (m/s) とした。検討用風力波形は1組につき10質点分の変動風力波形を0.05秒刻み13000ステップとし、風洞実験結果から応答の評価時間部分が重ならないように650秒×30組を取り出した。本報では、30組の応答のアンサンブル平均結果により応答を評価した。解析開始時の過渡応答の影響を避けるため、各風力波形の先頭50秒にエンベロープを設けた後、50～650秒の10分間で各応答を評価した。検討用風向は平均成分を含まない変動成分のみの風方向風力、風直交方向風力とし、風方向、風直交方向と表記する。図5に $D/B = 1.0$ における、各風力方向の頂部層風力時刻歴波形例を、図6に風方向と風直交方向のパワースペクトル密度を示し、ここでは、1波と30波のアンサンブル平均結果に移動平均(1ステップ(0.0061 Hz))でsmoothingを施した。横軸は振動数 f を建築物の幅 B と頂部風速 U_H で無次元化した無次元振動数 ($=fB/U_H$) として示し、縦軸は振動数と風力の分散 σ^2 で無次元化 ($=fS(f)/\sigma^2$) した。図5(a), (b)に着目すると、風方向、風直交方向では、風方向は周期が大きく緩やかな成分を含んでいるのに対し、風直交方向は周期が短く、鋭い波形であることがわかる。

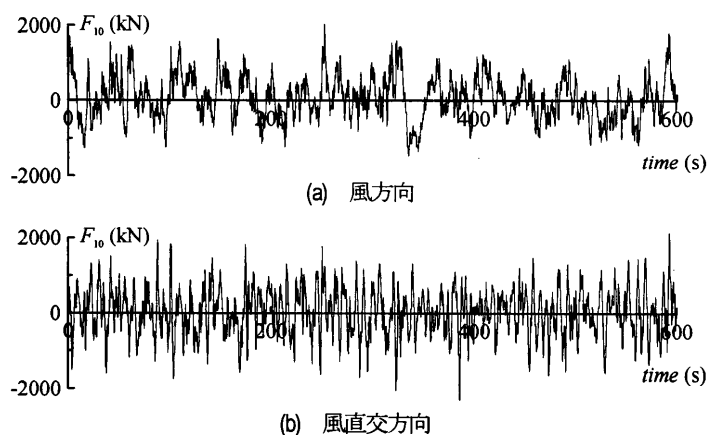


図5 頂部層風力の時刻歴波形例 ($D/B = 1.0$)

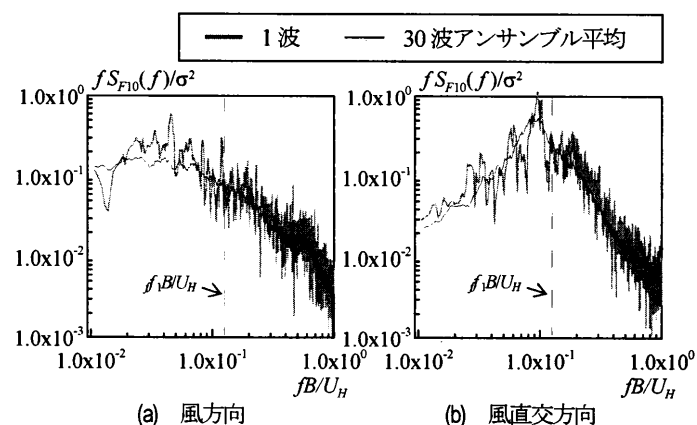


図6 頂部層風力のパワースペクトル密度 ($D/B = 1.0$)

3. 時刻歴解析に基づく構造減衰による吸収エネルギーの評価

表2に示すパラメーターを用いて、時刻歴解析を行い、各層で構造減衰による吸収エネルギー fW_{hi} を評価した。評価には i 層における構造減衰による吸収エネルギーの割合 α_{hi} を用いた。 α_{hi} は次式で表される。

$$\alpha_{hi} = \frac{fW_{hi}}{W_i} = \frac{fW_{hi}}{fW_{hi} + dW_{pi}} \quad (2)$$

ここで、 W_i : i 層におけるエネルギー入力、 dW_{pi} : ダンパーによる吸収エネルギーである。

表2 解析パラメーター

解析パラメーター	
風向	風方向, 風直交方向
ダンパー量 $d\alpha_{vi}$	0.005, 0.01, 0.02
辺長比 D/B	1.0, 3.0
減衰定数 h_1	0.01, 0.02

3.1 風力およびダンパー量による影響

図7に辺長比 $D/B = 1.0$ 、減衰定数 $h_1 = 0.02$ における、風力およびダンパー量の違いによる α_{hi} を示す。横軸を各層ダンパーの塑性率 $d\mu_i$ 、縦軸に各層構造減衰による吸収エネルギーの割合 α_{hi} とする。なお、 $d\mu_i$ は次式で表される。

$$d\mu_i = \frac{d\delta_i}{d\delta_{yi}} \quad (3)$$

ここで、 $d\delta_i$: i 層におけるダンパーの最大変形、 $d\delta_{yi}$: i 層におけるダンパーの降伏変形である。

図7に着目すると、風方向のダンパー量0.5% (◆印) と風直交方向のダンパー量1% (□印)、また、風方向のダンパー量1% (■印) と風直交方向のダンパー量2% (△印) の際に、同程度の $d\mu_i$ を示した。これは風直交方向の方が風方向より風外力が大きいためである。また、 $d\mu_i$ が増加すると α_{hi} は減少することがわかった。 α_{hi} は風力およびダンパー量の違いによらず、ダンパーの塑性率により影響を受けることを確認した。

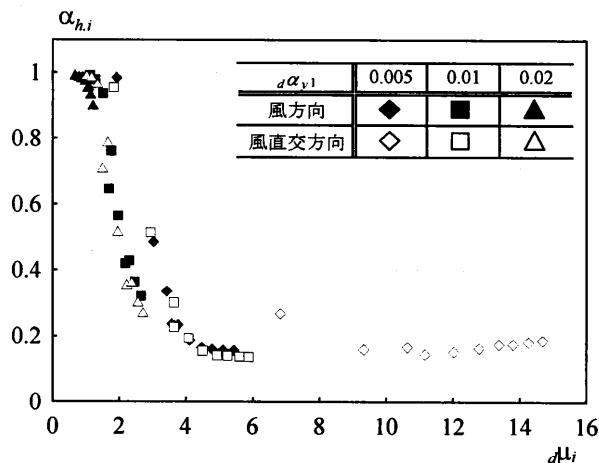


図7 α_{hi} の風向とダンパー量による影響 ($D/B = 1.0, h_1 = 0.02$)

3.2. 辺長比による影響

図8に辺長比および減衰定数の違いによる、各層の構造減衰による吸収エネルギーの割合 α_{hi} を示す。

図8において $h_1 = 0.02$ に着目すると、辺長比の違いによらず、同程度の $d\mu_i$ ならば α_{hi} は等しくなることがわかった。 $D/B=3.0$ (■印)は $D/B=1.0$ (▲印)と同様の傾向を示し、 $d\mu_i$ が増加すると α_{hi} は減少した。これは $h_1=0.01$ としても同様の傾向を示した。

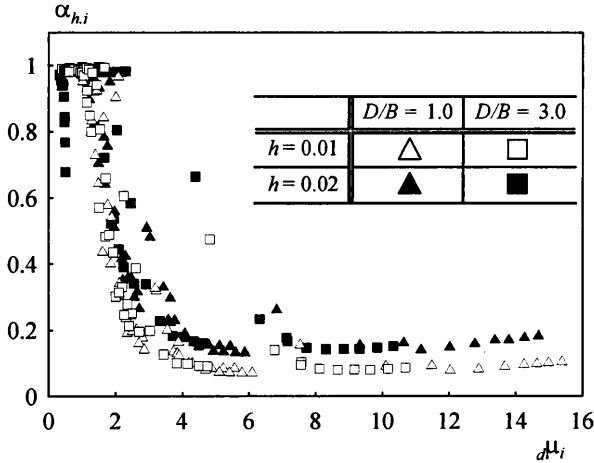


図8 α_{hi} の減衰定数と辺長比による影響

4. 風応答時の等価振動数の予測手法

本章では、変動風力を受ける多質点弾塑性系における構造減衰による吸収エネルギーの予測手法を提案し、時刻歴応答解析結果と比較することで、その有効性について検証する。

4.1 構造減衰による吸収エネルギーの予測式

多質点弾塑性系における各層構造減衰による吸収エネルギー ${}_f W_{hi}$ は式(4)で表すことができる。

$${}_f W_{hi} = t_0 {}_f C_i \dot{\delta}_{rms,i}^2 \quad (4)$$

ここで、 t_0 : 継続時間、 ${}_f C_i$: i 層粘性定数、 $\dot{\delta}_{rms,i}$: i 層層間速度の標準偏差である。

上式を等価振動数 $f_{eq,i}$ を用いて変位で表すと次式のように表すことができる。

$${}_f W_{hi} = t_0 {}_f C_i (2\pi f_{eq,i} \delta_{rms,i})^2 \quad (5)$$

ここで、 $f_{eq,i}$: i 層の等価振動数、 $\delta_{rms,i}$: i 層層間変位の標準偏差である。なお、式(5)において、 $f_{eq,i}$ および $\delta_{rms,i}$ が未知数であるが、本章では $f_{eq,i}$ に着目するため、 $\delta_{rms,i}$ は時刻歴応答解析結果を用いることとした。

4.2 時刻歴応答解析より求まる等価振動数の評価

表2に示すパラメーターを用いて、等価振動数を検証する。本節では時刻歴応答解析結果を用いて、等価振動数 $f_{eq,i}$ を式(6)より算出した。

$$f_{eq,i} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\dot{\delta}_{rms,i}}{\delta_{rms,i}} \quad (6)$$

図9に求めた等価振動数 $f_{eq,i}$ を示す。なお、実線は次節でスペクトルモーダル解析を用いて算出する等価振動数 f'_{eq} である(後述)。

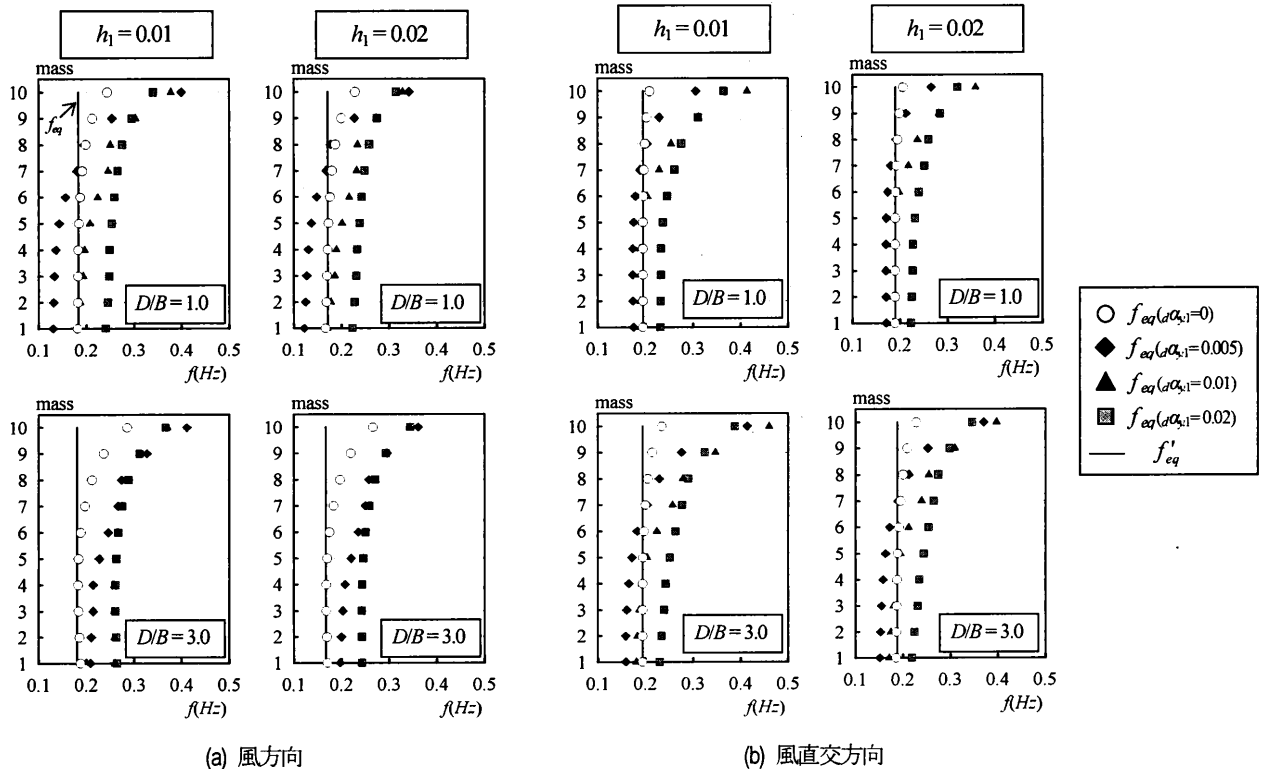


図9 等価振動数

図9(a)に着目すると、風方向では、 $D/B=1.0$ において減衰定数によらず、フレームのみの状態 ($\alpha_{y1}=0$) における $f_{eq,i}$ (○印) が、建物上部を除いて、フレームのみの1次固有振動数 f_1 (0.2Hz) よりも低振動数側を示した。ダンパー量0.5% (◆印) についても f_1 よりも低振動数側となることがわかった。これは風外力のピークが建物の振動数よりも低振動数側にあることによる影響だと思われる (図6)。 $D/B=3.0$ においては、フレームのみの状態における $f_{eq,i}$ (○印) のみが f_1 よりも低振動数側を示した。ダンパー設置時はダンパー量が少ないほど低振動数側になった。また、図9(b)に着目すると、風直交方向でも風方向と同様な結果が見られた。風方向と異なる点として、辺長比によらずダンパー量0.5% (◆印) が f_1 よりも低振動数側になった。

4.3 スペクトルモーダル解析を用いた等価振動数の評価

$f W_{hi}$ を安全側に評価するためには、式(5)の $f_{eq,i}$ を低く予測する必要がある。ここでは、最も簡便な方法として、フレームのみの状態における弾性時ゼロクロスング数 (式(7)) より等価振動数 f'_{eq} を算出する。

$$f'_{eq} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(\dot{q}_{rms})^2}{(q_{rms})^2}} \quad (7)$$

ここで、 \dot{q}_{rms} : 1次モーダル応答速度の標準偏差、 q_{rms} : 1次モーダル応答変位の標準偏差である。

式(7)で用いる応答速度の標準偏差、応答変位の標準偏差は、1次のモーダル風力の30波のアンサンブル平均結果を用いて、スペクトルモーダル解析より算出した。なお、前節において $f_{eq,i}$ は上層と下層で異なることがわかっているが、本報では、 f'_{eq} を各層一定値とした。

図9(a),(b)より、風力方向によらず、ダンパー量0.5% (◆印) において、 f'_{eq} が $f_{eq,i}$ より高振動数側を示すが、それ以外の条件では f'_{eq} が $f_{eq,i}$ よりも低振動数側を示していることを確認した。

4.4 構造減衰による吸収エネルギーの予測手法の評価

スペクトルモーダル解析 (式(7)) より求められる等価振動数 f'_{eq} を用いて、式(5)より各層構造減衰による吸収エネルギー $f W_{hi}$ を算出し、全層における構造減衰による吸収エネルギーの割合 α_h を求める。図10に、横軸はダンパー量 α_{y1} 、縦軸は全層における構造減衰による吸収エネルギーの割合 α_h として予測結果を示す。なお、ダンパー量ごとに示す点線の左側は $h_1=0.01$ 、右側は $h_1=0.02$ とする。

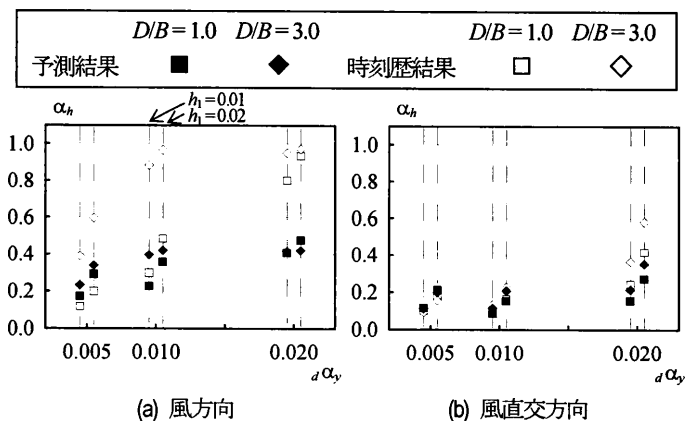


図10 構造減衰による吸収エネルギーの比較 (点線は左から $h_1=0.01, 0.02$)

図10(a),(b)より、 $D/B=1.0$ において減衰定数によらず、ダンパー量の最も小さい $\alpha_{y1}=0.5\%$ で、 α_h の予測結果 (■印) が風力方向によらず、時刻歴結果 (□印) より大きい予測となった。しかし、それ以外の α_h の予測結果 (◆, ◇印) は時刻歴結果 (□, ◇印) より小さく予測しているため安全側の予測となった。辺長比に着目すると、 $D/B=3.0$ の方が $D/B=1.0$ より α_h が大きいことがわかった。以上より、スペクトルモーダル解析より求める等価振動数 f'_{eq} を用いて構造減衰による吸収エネルギーを算出することで、ダンパーの累積損傷評価に用いる損傷に寄与するエネルギーを安全側に評価することができることがわかった。ただし、最も小さなダンパー量では危険側への予測となったため、修正する必要があると思われる。

5. まとめ

多質点系でのエネルギーの釣合に基づく弾塑性風応答予測手法を構築するための基礎研究として、風外力に対する構造減衰による吸収エネルギーの特性を時刻歴応答解析結果より評価した。加えて、構造減衰による吸収エネルギーの予測に必要となる等価振動数をスペクトルモーダル解析より予測し、それを用いて構造減衰による吸収エネルギーを求め、時刻歴応答解析結果と比較することでその有効性を検証し、以下の結論を得た。

- (1) ダンパーの塑性率が増加すると、 α_{hi} が減少することを確認した。また、 α_{hi} は風力、ダンパー量、辺長比の違いによらず、ダンパーの塑性率により影響を受けることがわかった。
- (2) 等価振動数 $f_{eq,i}$ は弾性時やダンパー量が小さい場合、フレーム1次振動数よりも低振動数となることを確認した。
- (3) 構造減衰による吸収エネルギーの予測手法において、スペクトルモーダル解析より求める等価振動数 f'_{eq} を用いることで、ダンパーの損傷を安全側に評価できることがわかった。ただし、最も小さなダンパー量では危険側への予測となってしまったため、修正する必要があると思われる。

謝辞

本研究は、神奈川大学大熊武司教授、(株) 泉創建エンジニアリング、(株) 日建設計、東京理科大学北村研究室による新耐風設計法研究会の成果の一部です。特に、本研究を進めるにあたり、大熊武司教授、(株) 泉創建エンジニアリングの丸川比佐夫博士、片桐純治博士、鶴見俊雄氏からご指導を賜りました。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 秋山宏: エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計, 技報堂出版, 1997
- 2) 吉江慶祐, 北村春幸, 大熊武司, 和田章: エネルギーの釣合に基づく平均成分を有する広帯域性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第608号, pp.21-28, 2006.10
- 3) 平井宏幸, 吉江慶祐, 佐藤大樹, 北村春幸: エネルギーの釣合に基づく変動風力を受ける超高層制振建物の損傷分配評価, 2011.3,
- 4) 佐藤大樹, 笠井和彦, 田村哲朗: 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635号, pp.75-82, 2009.1
- 5) 片桐純治, 大熊武司, 鶴見俊雄: 高層免震建築物の一般化風力特性, 日本建築学会学術講演梗概, B-2, pp.139-140, 2010.9
- 6) 日本建築学会: 建物荷重指針・同解説, 2004

*1 東京理科大学
*2 株式会社 日建設計