T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ Tokyo Tech 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		
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	司	佐藤大樹
同	小川諒*1	同	北村春幸*1		

構造一振動

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、吉江ら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について行われた研究はほとんどなく、不明な点が多い。

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_fT₁=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、本報では平面積(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_fT₁に対して減衰定数 h_1 =0.01,0.02 の2パ ターンの剛性比例型とした。各層のフレーム剛性_fk_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



剛性_{ki}の比率を,各層一定で、 $_{aki}/_{ki}$ =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 い、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 $_{a}Q_{i1}$ は、下式より求めた。

$${}_{d}Q_{y1} = {}_{d} \alpha_{y1} \sum_{i=1}^{N} m_{i} g$$
 (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 <i>T</i> 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りを用いた。実験気流は「建 築物荷重指針・同解説」のの地表面粗度区分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UHで無次元化した無次元振 動数 $(=fB/U_{\rm H})$ 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。





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 $_{j}W_{hi}$ 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。

$$\alpha_{h,i} = \frac{{}_{f}W_{h,i}}{W_{i}} = \frac{{}_{f}W_{h,i}}{{}_{f}W_{h,i} + {}_{d}W_{n,i}}$$
(2)

ここで、 W_i : *i* 層におけるエネルギー入力、 $_{d}W_{p,i}$: 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 dαv1	0.005, 0.01, 0.02			
辺長比 <i>D</i> B	1.0, 3.0			
减衰定数 h1	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。

$$_{d}\mu_{i} = \frac{_{d}\delta_{i}}{_{d}\delta_{yi}} \tag{3}$$

ここで、 $_{a}\delta_{i}$: *i* 層におけるダンパーの最大変形、 $_{a}\delta_{yi}$: *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% (Δ 印) の際に、同程度の $_{dH_i}$ 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、 $_{dH_i}$ が増加すると α_{h_i} は減少することがわかった。 α_{h_i} 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。



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_{h_i} 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_{h_i} 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。





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。

$${}_{f}W_{h_{i}} = t_{0f}C_{i}\dot{\delta}_{rms,i}^{2}$$
 (4)

ここで, t_0 :継続時間, ${}_{f}C_i$: i 層粘性定数, $\delta_{rms,i}$: 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。

$${}_{f}W_{hi} = t_{0f}C_{i}(2\pi f_{eq,i}\delta_{rms,i})^{2}$$
(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 $\delta_{rms,j}$ が未知数であるが、 本章では $f_{eq,i}$ に着目するため、 $\delta_{rms,j}$ 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。

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

図9に求めた等価振動数 f_{eq} , 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

-407-

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 ($_{a_{y1}}=0$) における $f_{eq,i}$ (O印)が、建物上 部を除いて、フレームのみの1 次固有振動数 $_{f}f_{1}$ (0.2 Hz)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 $_{f}f_{1}$ 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 $f_{eq,i}$ (O印)のみが $_{f}f_{1}$ 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 $_{f}f_{1}$ 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

 $_{fW_{hi}}$ 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ッシング数(式(7))より等価振動数 f'_{eq} を算出する。

$$f_{eq}' = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{q_{rms}}\right)^2}{\left(\frac{1}{q_{rms}}\right)^2}}$$
(7)

ここで、₁*q*_{ms}:1次モーダル応答速度の標準偏差、₁*q*_{ms}: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.} 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} ,より高振動数側を示しが、それ以外の条件では f'_{eq} が f_{eq} ,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 $_{d}\alpha_{y1}$,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 (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 $_{a}\alpha_{y1} = 0.5\%$ 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まる等価振動数 f'_{cq} 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。

- 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まる等価振動数 f'eg 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、神奈川大学大能武司教授、(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、大能武司教授 (株)泉創建エンジニア リングの丸川比佐夫博士、片桐淳治博士、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, pp21-28,2006.10
- 3) 平井宏幸,吉江慶祐,佐藤大樹,北村春幸:エネルギーの釣合いに基づ 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