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)	多層制振建物を用いた風応答の損傷集中指数の予測手法の提案
Title	
著者(和文)	池上昌志, 佐藤大樹, 吉江慶祐, 佐藤利昭, 北村春幸
Authors	Masashi IKEGAMI, Daiki Sato, Keisuke Yoshie, Toshiaki Sato, Haruyuki Kitamura
出典 / Citation	日本建築学会大会学術講演梗概集, vol. B-2, , pp. 771-772
Citation(English)	, vol. B-2, , pp. 771-772
発行日 / Pub. date	2015, 9
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/110010005234

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

多層制振建物を用いた風応答の損傷集中指数の予測手法の提案

正会員 ○池上昌志*1 同 佐藤大樹*2 同 吉江慶祐*3
同 佐藤利昭*4 同 北村春幸*4

風外力 超高層制振建物 履歴型ダンパー
多質点系 損傷集中指数

1. はじめに

耐震設計の分野において，秋山らは総エネルギー入力が安定した量であることから，エネルギーの釣合に基づくダンパーの損傷評価[1)]を提案しており，既に実用化されている。耐風設計の分野において，平井ら[2)]は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)]が既知である場合における，風応答時のダンパーの損傷評価手法を示している。筆者らは文献 2）を発展させ，スペクトルモーダル解析を用いた風応答時における最適降伏せん断力係数分布$\overline{\alpha}_{Wi}$[1)]の予測手法を示した[3)]。ただし，文献 3）では最適降伏せん断力係数分布の精度検証が目的であったため，風応答時の損傷集中指数n_{Wsi}は時刻歴応答解析結果を用いていた。

そこで本報では，スペクトルモーダル解析を用いた風応答時の損傷集中指数n_{Wsi}の予測手法を提案する。これにより，風応答時のダンパーの累積塑性ひずみエネルギー${}_dW_p$の分布を表すダンパーの損傷分布$1/{}_d\gamma_i$を，膨大な計算量を必要とする時刻歴応答解析を行うことなく簡便に予測できるようになる。予測値と時刻歴応答解析結果を比較することで本手法の妥当性を検証する。

2. 風応答時の損傷集中指数の評価手法

風応答において，ダンパーとフレームの剛性比が各層で異なる場合，ダンパーの累積塑性ひずみエネルギー${}_dW_p$の分布を表すダンパーの損傷分布$1/{}_d\gamma_i$は，式(1)より予測することができる[1,2,5)]。

$$\frac{1}{{}_d\gamma_i}=\frac{{}_dW_{pi}}{\sum_{j=1}^{N}{}_dW_{pj}}=\frac{{}_ds_i\cdot{}_dp_i^{-n_{Wsi}}}{\sum_{j=1}^{N}{}_ds_j\cdot{}_dp_j^{-n_{Wsj}}} \quad (1)$$

ここで，
$${}_ds_i=\left(\sum_{n=i}^{N}\frac{m_n}{M}\right)^2\cdot{}_d\overline{\alpha}_{yi}^{\,2}\cdot\frac{{}_dk_1}{{}_dk_i},\quad {}_dp_i=\frac{{}_d\alpha_{yi}}{{}_d\alpha_{y1}}\cdot\frac{1}{{}_d\overline{\alpha}_{yi}} \quad (2a,b)$$

$${}_d\overline{\alpha}_{yi}=\overline{\alpha}_{Wi}\left(\frac{{}_dk_i}{k_i}\right)\Big/\left(\frac{{}_dk_1}{k_1}\right),\quad \overline{\alpha}_{Wi}=\frac{Q_{i.max}}{\sum_{n=i}^{N}m_n\cdot g}\Big/\frac{Q_{1.max}}{\sum_{n=1}^{N}m_n\cdot g} \quad (2c,d)$$

N：層数，${}_dp_i$：i層の強度低下率，m_i：i層の質量，M：総質量，${}_d\overline{\alpha}_{yi}$，${}_d\alpha_{yi}$：$i$層のダンパーの最適降伏せん断力係数および降伏せん断力係数，${}_dk_i$，k_i：i層のダンパー剛性およびシステム（フレームとダンパーを合わせた状態）剛性，$Q_{i.max}$：システム弾性時のi層の最大応答せん断力，g：重力加速度を表す。式中の風応答時の損傷集中指数n_{Wsi}は，次式が提案されている[2)]。なお，損傷集中指数は，最適せん断力係数分布からの偏りを表す強度低下率${}_dp_i$に乗ずることで，ダンパーの損傷分布$1/{}_d\gamma_i$を補正する指数である。

$$\left.\begin{aligned} n_{Wsi}&=12 & r_{qi}&\le 1.6\\ n_{Wsi}&=25\cdot r_{qi}^{-1.6} & 1.6<r_{qi}&\le 7.5\\ n_{Wsi}&=1 & r_{qi}&>7.5\end{aligned}\right\} \quad (3)$$

ここで，
$$r_{qi}=\frac{{}_fQ_{i.max}}{{}_dQ_{yi}}=\frac{{}_fk_i\cdot{}_d\delta_{i.max}}{{}_dk_i\cdot{}_d\delta_{yi}} \quad (4)$$

r_{qi}：i層の負担せん断力比，${}_fQ_{i.max}$：i層のフレームの最大せん断力，${}_dQ_{yi}$：i層のダンパーの降伏せん断力，${}_fk_i$：i層のフレーム剛性，${}_d\delta_{i.max}$：i層のダンパーの最大層間変位，${}_d\delta_{yi}$：i層のダンパーの降伏変位を表す。文献 3）は，ダンパーの損傷分布の予測を行う際，式(3)の妥当性および式(1)による予測値の検証が主目的であったため，式(3)中の負担せん断力比r_{qi}は時刻歴応答解析結果を用いていた。本報では，ダンパーの最大層間変位を時刻歴応答解析なしに算出する方法を示し，その結果をもとに式(3)中のr_{qi}を求め，式(1)により時刻歴応答解析なしにダンパーの損傷分布の予測を行う。

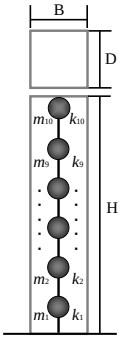
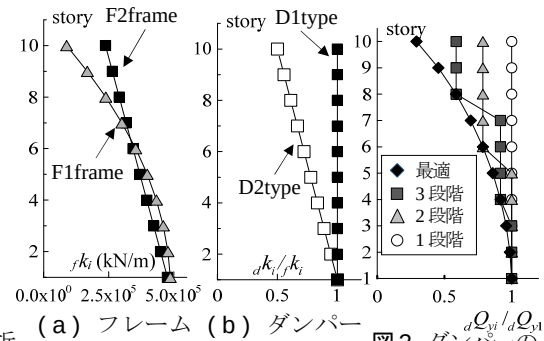


図 1 弾塑性解析モデル概要



（a）フレーム（b）ダンパー

図 2 剛性分布

図 3 ダンパーの降伏せん断力分布

3. 解析対象モデルと風外力の概要

検討対象建物の解析モデルは，文献 3）と同様とし，図 1 に概要を示す。解析モデルは，超高層制振建物を対象とした高さ H = 200 m の 10 質点せん断型モデルとした。フレームは，1 次固有周期${}_fT_1$ = 5.0 s，総重量 548800 kN とし，重量は高さ方向に一様であると想定した。辺長比 D/B は，1.0, 2.0, 3.0 の 3 通りとする。構造減衰は${}_fT_1$に対して，減衰定数h_1 = 0.01, 0.02, 0.05 の剛性比例型の 3 通りとした。各層のフレーム剛性${}_fk_i$は，図 2（a）に示す 2 種類を用いた。本報では弾塑性ダンパーを完全弾塑性としてモデル化し全層で用いた。各層のダンパー剛性${}_dk_i$は，図 2（b）に示す 2 種類を用いた。ダンパーの降伏せん断力は，基準状態[3)]（ダンパーの累積塑性変形倍率${}_d\eta_i$が全層一定）と異なる場合として，$\overline{\alpha}_{Wi}$をもとに 3 種類を用いた（図 3）。なお，$\overline{\alpha}_{Wi}$の予測に関しては文献 4）を参照した。第 1 層の弾塑性ダンパー降伏せん断力係数${}_d\alpha_{y1}$（ = 第 1 層のダンパーの降伏せん断力 / 全重量）は，0.01, 0.02, 0.04 の 3 通りとした。固有値解析よりシステムの弾性 1 次固有周期T_1は，F1D1model および F2D2model ではT_1 = 3.54 s（1 次

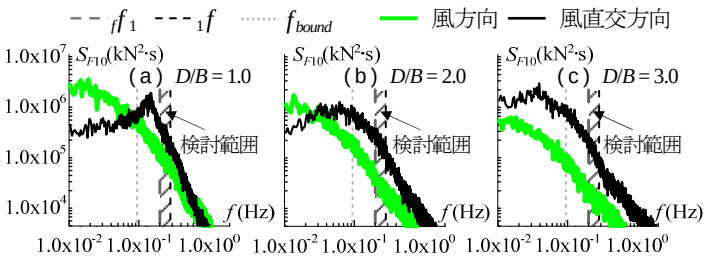


図 4 頂部層風力のパワースペクトル密度

Proposal for Prediction Method of Damage Concentration index using Multi-Degrees of Freedom Model under Fluctuating Wind Force

IKEGAMI Masashi, SATO Daiki, YOSHIE Keisuke, SATO Toshiaki , KITAMURA Haruyuki

NII-Electronic Library Service

固有振動数 $f_1 = 0.283$ Hz），F1D2model では $T_1 = 3.76$ s（$f_1 = 0.266$ Hz），F2D2model では $T_1 = 3.65$ s（$f_1 = 0.274$ Hz）となる。

構造物に作用する風外力は風洞実験結果 [6] を用いた。実験気流は「建築物荷重指針・同解説」[7] の地表面粗度区分Ⅲの気流を目標に作成し，建物を 10 層に分割して層風力を測定した。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。検討用風力は，平均成分を含まない変動成分のみの風方向風力と風直交方向風力とする。図 4 に風方向，風直交方向の頂部層風力 F_{10} のパワースペクトル密度 S_{F10} を D/B ごとに示す。

4. 風応答時の損傷集中指数の予測手法の検証

本章では，スペクトルモーダル解析を用いて，時刻歴応答解析なしに風応答時の損傷集中指数 n_{Wsi} を予測する手法を提案する。予測する手法については文献 8）を準用する。風応答は 1 次モードが支配的であり，多質点系でのシステム弾性時の最大層間変位 $\delta_{i.max}$ は，1 次共振成分と準静的成分で近似できる [8] ことから，式(5)のように表すことができる。

$$\delta_{i.max} = \left[\left\{{}_1\sigma_{Rq}\cdot({}_1\phi_i - {}_1\phi_{i-1})\right\}^2 + \sigma^2_{B\delta_i}\right]^{1/2}\cdot g_p \qquad (5)$$

ここで，${}_1\sigma_{Rq}$：1 次モーダル応答変位の共振成分の標準偏差，${}_1\phi_i$：システム弾性時における i 層の 1 次振動モード形，$\sigma_{B\delta_i}$：層間変位の準静的成分の標準偏差，g_p：ピークファクターを表し，次式から算出した [6]。

$$g_p = \sqrt{2\ln(600 f_1) + 1.2} \qquad (6)$$

まず，式(4)中の ${}_d\delta_{i.max}$ を，式(5)より予測した $\delta_{i.max}$ で近似することで，時刻歴応答解析なしに n_{Wsi} を予測する。図 5 に，上記のように予測した n_{Wsi} を用いて，式(1)より算出した $1/{}_d\gamma_i$ の予測値と時刻歴応答解析結果の比較を示す。なお，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。図 5 には 648 通りの解析結果の一部を示す。ダンパーの吸収分担率を α_p（式 (7)）および後述する相関係数を $R_{1/{}_d\gamma_i}$ と定義し，合わせて図示する。

$$\alpha_p = {}_dW_p / E \qquad (7)$$

ここで，E：入力エネルギーを表す。

図 5 より，本報の解析パラメータによらず，時刻歴応答解析なしの n_{Wsi} の予測値を用い式(1)より算出した $1/{}_d\gamma_i$ の予測値は，α_p が大きいほど時刻歴応答解析結果に全層よく一致していることが確認できる。一方，$\alpha_p < 0.02$ において，予測値は時刻歴応答解析結果と大きく異なるが，この範囲はダンパーの損傷（${}_dW_p$）が小さく，建物の構造減衰によって入力エネルギーを吸収している弾性応答である [3]。つまり，ダンパーの塑性率や累積損傷の絶対値は小さく，損傷分布 $1/{}_d\gamma_i$ の予測誤差が，ダンパーの損傷を評価する上で問題となることはない。

次に，基準状態と異なる場合のダンパーの損傷分布 $1/{}_d\gamma_i$ の予測値と時刻歴応答解析結果より求まる $1/{}_d\gamma_i$ との相関係数 $R_{1/{}_d\gamma_i}$ を検討する。図 6 に，縦軸を $R_{1/{}_d\gamma_i}$，横軸を α_p とし，基準状態と異なる場合におけるパラメータの差異による計 648 通りの解析結果を示す。図 6 より，α_p が増加するほど $R_{1/{}_d\gamma_i}$ は 1 に漸近していくことから，α_p が増加するほど予測値は，時刻歴応答解析結果と良く一致していることがわかる。ダンパーのエネルギー吸収分担率 α_p が 2%以下（$\alpha_p < 0.02$）では，$R_{1/{}_d\gamma_i}$ が急激に 1 より小さくなることを確認した。これは前述したように，各層概ね弾性応答であり，ダンパーの損傷も無く，本手法の検討範囲外である。パラメータの差異による相関係数 $R_{1/{}_d\gamma_i}$ に与える影響は小さいことがわかった。以上より，n_{Wsi} をスペクトルモーダル解析より予測することで，$1/{}_d\gamma_i$ をダンパーのエネルギー分担率 $\alpha_p > 0.02$ の範囲で表現できることがわかり，かつ α_p が増加するほど $1/{}_d\gamma_i$ の予測値は，時刻歴応答解析結果と良く一致していることがわかった。この傾向はパラメータの差異による影響は小さいことが確認された。

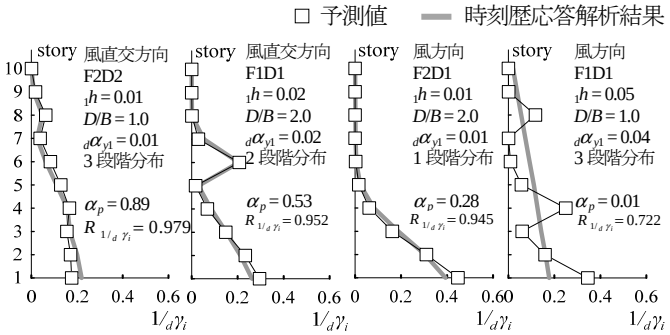


図 5 風応答時における損傷集中指数の予測値の検証

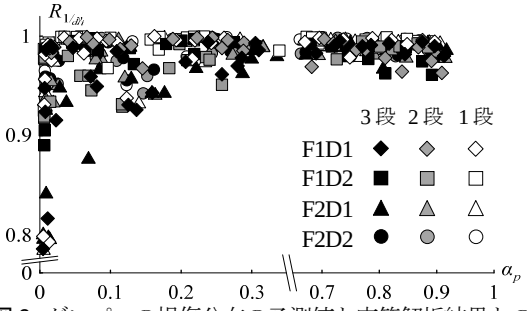


図 6 ダンパーの損傷分布の予測値と応答解析結果との相関係数

5. まとめ

本報では，スペクトルモーダル解析により風応答時の損傷集中指数 n_{Wsi} の予測手法を提案した。さらに，上記の n_{Wsi} 予測値および風応答時の最適せん断力係数分布 $\overline{\alpha}_{Wi}$ の予測値 [4] を用いて，ダンパーの累積塑性ひずみエネルギー ${}_dW_p$ の分布を表すダンパーの損傷分布 $1/{}_d\gamma_i$ を時刻歴応答解析なしに算出し，弾塑性時刻歴風応答解析結果と比較することで本手法の妥当性を検証した。n_{Wsi} をスペクトルモーダル解析より予測することで，$1/{}_d\gamma_i$ をダンパーのエネルギー分担率が，ダンパーの損傷を評価する上で重要となる $\alpha_p > 0.02$ の範囲で表現できることがわかり，かつ α_p が増加するほど $1/{}_d\gamma_i$ の予測値は，時刻歴応答解析結果と良く一致していることがわかった。

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，東京工業大学佐藤研究室，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) 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 年度日本建築学会関東支部研究報告，2011，2012.3
3) 池上昌志，佐藤大樹，吉江慶祐，佐藤利昭，北村春幸：エネルギーの釣合に基づく多層制振建物の弾塑性風応答における損傷評価 その 2 スペクトルモーダル解析による最適せん断力係数分布予測と損傷予測，2014 年度日本建築学会関東支部研究報告，2015.3
4) 池上昌志，佐藤大樹，吉江慶祐，佐藤利昭，北村春幸：エネルギーの釣合に基づく多層制振建物の弾塑性風応答における損傷評価 その 1 風応答時における最適せん断力係数分布の検証，2014 年度日本建築学会関東支部研究報告，2015.3
5) 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 661 号，pp.543-552，2011.3
6) 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，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，pp.193-194，2010.9
7) 日本建築学会：建物荷重指針・同解説，2004
8) 吉江慶祐，大熊武司，北村春幸，和田章：広帯域性の変動風力を受ける弾塑性構造物の応答変位振幅の確率分布，日本建築学会構造系論文集第 604 号，pp.37-46，2006. 6

*1 前田建設工業（元東京理科大学）
*2 東京工業大学
*3 株式会社 日建設計
*4 東京理科大学

*1 MAEDA Corporation
*2 Tokyo Institute of Technology
*3 Nikken Sekkei Ltd.
*4 Tokyo University of Science.

NII-Electronic Library Service