

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	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
Title	
著者(和文)	平井 宏幸, 吉江慶祐, 佐藤 大樹, 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. 82, No. ,
Citation(English)	, Vol. 82, No. ,
発行日 / Pub. date	2012, 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: <a href="http://ci.nii.ac.jp/naid/110009571497">http://ci.nii.ac.jp/naid/110009571497</a>

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

正会員○平井宏幸\*1 同 吉江慶祐\*2 同 佐藤大樹\*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

最適降伏せん断力係数分布 損傷分布

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いに基づく設計手法<sup>1)</sup>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、エネルギーの釣合いを利用した弾塑性風応答予測に関して、吉江ら<sup>2)</sup>は、風応答は1次モードが支配的として、1質点系を用いた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。しかし、上記の1質点系での弾塑性風応答予測手法を実建物に適用するためには、地震に対する弾塑性応答<sup>1)</sup>で指摘されているように様に、高次モードの影響や変形および履歴吸収エネルギーの特定層への集中を明らかにする必要がある。

本報では、多質点系でのエネルギーの釣合い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、既に耐震設計の分野で提案されている損傷配分則<sup>1)</sup>を風外力入力時においても適用し、その精度を検証する。続いて、スペクトル応答解析により最適降伏せん断力係数分布を予測し、風外力に対するダンパーの損傷分配評価手法を提案し、時刻歴応答解析結果と比較することでその有効性を示す。

2. 解析対象モデルと風外力の概要

検討に用いる解析対象建物の諸元と想定立地条件を図1に示す。解析モデルは図2に示すような、超高層制振建物を対象とした10質点せん断型モデルとする。主架構は、高さ $H=200\text{m}$ 、幅 $B=40\text{m}$ 、奥行き $D=40\text{m}$ で、1次固有周期 $T=5.0$ 秒、地上部総質量は56000tonとし、質量は高さ方向に一樣であると想定した。構造減衰は1次固有周期 $T$ に対して $\gamma_1=2.0\%$ の剛性比例型とした。各層の主架構剛性 $f_k k_i$ は、建物の1次固有モードが直線となるように(1)式より決定した<sup>3)</sup>。図3に主架構の剛性分布、振動モード形および刺激関数をそれぞれ示す。

$$f_k k_i = \frac{s \omega^2 \cdot m_i \cdot s \phi_i + f_k k_{i+1} (s \phi_{i+1} - s \phi_i)}{s \phi_i - s \phi_{i-1}} \quad (i=n-1) \quad (1)$$

ここで、 $s \omega$ :  $s$  次固有円振動数 ( $=2\pi/sT$ )、 $s \phi_i$ :  $i$  層  $s$  次モードベクトル、 $n$ : 層数を表す。ただし、 $f_k k_{n+1}=0$ 、 $s \phi_0=0$  とする。

本報では、ダンパーの剛性分布として、図4に示す2種類を使用する。各層のダンパー剛性 $d_k k_i$ と主架構剛性 $f_k k_i$ の比率 $d_k k_i / f_k k_i = 1.0$ としたダンパーの剛性分布をtype1とし、type1を3つのグループに分割(1~3層, 4~7層, 8~10層)した剛性分布をtype2とする。

構造物に作用する風外力は風洞実験結果<sup>4)</sup>を用いた。実験気流は

「建築物荷重指針・同解説」<sup>5)</sup>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年に相当するレベルとして、頂部風速 $U_H=63.8\text{ (m/s)}$ を想定した。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、各応答は30組の応答のアンサンブル平均により評価している。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する。

- ・平面形  $B \times D = 40\text{m} \times 40\text{m}$
- ・高さ  $H = 200\text{m}$
- ・地表面粗度区分 Ⅲ
- ・基本風速  $U_0 = 38.0\text{m/s}$
- ・頂部風速  $U_H = 63.8\text{m/s}$
- ・建物密度  $\rho = 1715\text{N/m}^3$

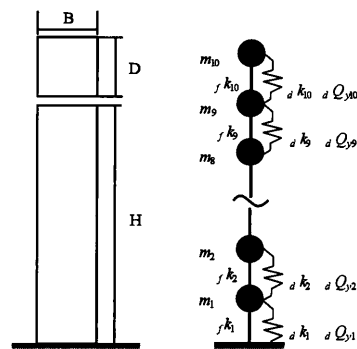


図1 検討建物概要

図2 検討モデル概要

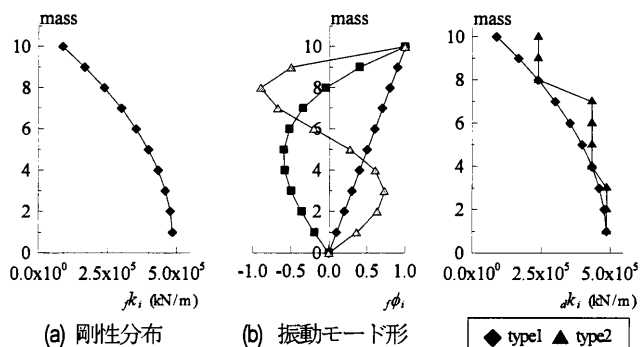


図3 主架構の概要

図4 ダンパーの剛性分布

3. 風外力における損傷配分則の検証

3.1. 損傷配分則

層の復元力特性が完全弾塑性型であるせん断型多質点系モデルでのダンパーの損傷分布係数 $d \gamma_i$ の逆数 $1/d \gamma_i$ は(2)式で評価できる<sup>1)</sup>。

$$\frac{1}{d \gamma_i} = \frac{d W_{pi}}{\sum_{i=1}^N d W_{pi}} = \frac{d S_i \cdot d P_i^{-n_{s,i}}}{\sum_{i=1}^N d S_i \cdot d P_i^{-n_{s,i}}} \quad (2)$$

ここで、 $d W_{p,i}$ :  $i$  層の累積塑性歪みエネルギー、 $d W_p = \sum_{i=1}^N d W_{p,i}$

全層での累積塑性歪みエネルギー、 $N$ ：層数、 $aP_i$ ： $i$ 層の制振部材の強度低下率、 $n_{s,i}$ ： $i$ 層の損傷集中係数を表す。

$${}_d S_i = \left( \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{M} \right)^2 \cdot {}_d \bar{\alpha}_i^2 \cdot \frac{{}_d k_1}{{}_d k_i}$$

ここで、 $m_j$ ： $j$ 層の質量、 $M = \sum_{j=1}^N m_j$ ：総質量、 ${}_d \bar{\alpha}_i$ ： $i$ 層におけるダンパーの最適降伏層せん断力係数分布を表す。

$${}_d P_i = \frac{{}_d \alpha_{y1}}{{}_d \alpha_{y1}} \cdot \frac{1}{{}_d \bar{\alpha}_i}$$

$${}_d \bar{\alpha}_i = \bar{\alpha}_i \cdot \frac{\left( \frac{{}_s k_1}{{}_d k_1} \right)}{\left( \frac{{}_s k_i}{{}_d k_i} \right)} = \bar{\alpha}_i \cdot \frac{\left( \frac{{}_f k_1 + {}_d k_1}{{}_d k_1} \right)}{\left( \frac{{}_f k_i + {}_d k_i}{{}_d k_i} \right)} \quad (3)$$

ここで、 ${}_d \alpha_{y1}$ ： $i$ 層のダンパー降伏せん断力係数、 $\bar{\alpha}_i$ ： $i$ 層の最適降伏層せん断力係数分布、 ${}_s k_i$ ： $i$ 層の全体架構剛性、 ${}_d k_i$ ： $i$ 層のダンパー剛性を表す。

$\bar{\alpha}_i$ は(4)式より算出でき、ダンパー弾性時での全体架構の層せん断力係数分布を示している。耐震設計では、 $\bar{\alpha}_i$ に従って層の降伏耐力を決定すれば、各層の累積塑性変形倍率が一定となることが確認されている。

$$\bar{\alpha}_i = \frac{\alpha_i}{\alpha_1} = \frac{{}_s Q_{i,max}}{\sum_{j=1}^N m_j \cdot g} \bigg/ \frac{{}_s Q_{1,max}}{\sum_{i=1}^N m_i \cdot g} \quad (4)$$

ここで、 $Q_{i,max}$ ： $i$ 層におけるダンパー弾性時での全体架構の最大層せん断力を表す。

### 3.2 累積塑性変形倍率の検証

本節では、時刻歴応答解析により得られたダンパー弾性時での全体架構の最大層せん断力  $Q_{i,max}$  によるダンパーの最適降伏層せん断力係数分布 (3式) を用いて、風外力によるダンパーの累積塑性変形倍率  ${}_d \eta_i$  (5式) を検証する。

$${}_d \eta_i = \frac{{}_d W_{p1}}{{}_d Q_{y1} \cdot {}_d \delta_{y1}} \quad (5)$$

ここで、 ${}_d \delta_{y1}$ ：ダンパーの降伏層間変形である。なお、 $i$ 層の累積塑性歪みエネルギー  ${}_d W_{p,i}$  は、時刻歴応答解析結果を用いている。

${}_d Q_{y1}$  と第1層のダンパー降伏せん断力係数  ${}_d \alpha_{y1}$  の関係は (6)式で表される。本報でのダンパーの復元力特性は完全弾塑性型としている。

$${}_d Q_{y1} = {}_d \alpha_{y1} \sum_{i=1}^N m_i g \quad (6)$$

ここで、 $m_i$ ： $i$ 層の質量、 $g$ ：重力加速度を表す。

なお、本節でのダンパーの降伏耐力  ${}_d Q_{y1}$  は、ダンパー弾性時での最大層せん断力  $Q_{i,max}$  分布に従って決定し、 ${}_d \alpha_{y1}$  を風方向入力時では  ${}_d \alpha_{y1} = 0.01$ 、風直交方向入力時では  ${}_d \alpha_{y1} = 0.02$  としている。

図5に、type1 および 2 におけるダンパーの累積塑性変形倍率  ${}_d \eta_i$  を示す。図5より、type1 の  ${}_d \eta_i$  (◆印) は、風方向および風直交方向風力入力時ともに建物頂部で若干大きくなるが、各層概ね等しい

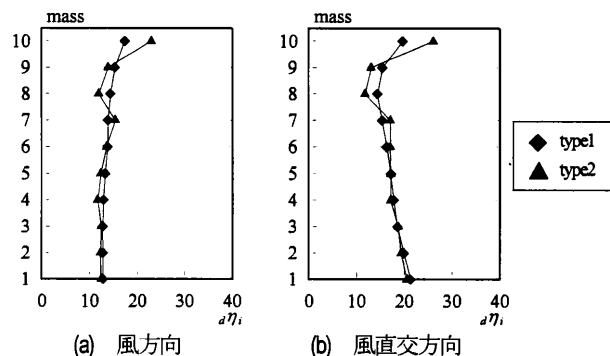


図5 ダンパーの累積塑性変形倍率  ${}_d \eta_i$

損傷を示す。type2 (▲印) に関して、建物下層部の  ${}_d \eta_i$  は概ね一定であるが確認できる。しかし、8,9層の  ${}_d \eta_i$  は下層部と比べて小さくなり、建物頂部の  ${}_d \eta_i$  は下層部より 25% 程度大きくなり、損傷が生じやすくなるという結果となった (図5 (b))。

### 3.3 損傷集中指数の検証

本節では、風方向および風直交方向風力入力時の時刻歴応答解析結果を(7)式に代入して損傷集中指数  $n_{s,i}$  を求める。その際、本報では既往研究<sup>1)9)</sup>と同様に、任意の  $i$  層のダンパー剛性は変化させず、ダンパーの降伏耐力のみを  $p_d$  倍 ( $p_d < 1$ ) した損傷集中階を設けて損傷集中指数  $n_{s,i}$  を評価する。

$$n_{s,i} = - \frac{\ln \frac{b(1-a)}{a(1-b)}}{\ln p_d} \quad (7)$$

ここで、 $a = {}_d W_{p,k} / {}_d W_{p,i}$ 、 $b = {}_d W_{p,k} / {}_d W_{p,i}$ 、 $a$  は任意の降伏せん断力係数の下における  $k$  層の損傷分布を、 $b$  は制振部材の降伏耐力を  $p_d$  倍した  $k$  層の損傷分布を表す。

$n_{s,i}$  値を求めるに当たり、制振部材の第1層の降伏せん断力係数  ${}_d \alpha_{y1}$ 、 $k$  層の制振部材の降伏耐力の低減係数  $p_d$  および損傷集中階である  $k$  層を解析パラメーターとして検証していく (表1)。

表1 解析パラメーター

${}_d \alpha_{y1}$	0.003, 0.004, 0.005, 0.006, 0.007, 0.008, 0.009, 0.01, 0.0015, 0.002, 0.0025, 0.03, 0.0035, 0.04, 0.05, 0.06,
$p_d$	0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9
$k$ 層	1層, 5層

地震入力時の損傷集中指数  $n_{s,i}$  は、主架構と制振部材の負担せん断力比  $r_q$  (8式) の関数として評価されており<sup>1)9)</sup>、本報でもそれに従うこととする。なお、本節でのダンパーの剛性分布は type1 とし、ダンパーの降伏耐力  ${}_d Q_{y1}$  の設定方法は前節と同様である。

$$r_q = \frac{{}_f Q_{i,max}}{{}_d Q_{y1}} = \frac{{}_f k_i \cdot \delta'_{i,max}}{{}_d Q_{y1}} \quad (8)$$

ここで、 $\delta'_{i,max}$ ：弾塑性系での最大層間変形を表す。

図6に風方向および風直交方向風力入力時の損傷集中指数  $n_{s,i}$  と主架構と制振部材の負担せん断力比  $r_q$  との関係を示す。なお、図中の点線は地震力入力時の既往研究結果<sup>7)</sup>である。図6より、風外力入力時の  $n_{s,i}$  値は、 $1.0 < r_q < 6.0$  において耐震設計で提案されている上限値 (点線) を上回っていることが確認できる。地震応答の場合、

高次振動モードの影響により、弱層以外の層にも損傷エネルギーが散けると考えられるが、風応答に関しては、1次振動モードが支配的となるため<sup>8)</sup>、特定層への損傷集中が地震応答よりも大きくなったと考えられる。そこで、既往研究<sup>9)</sup>より、 $p_d=0.8$ に対する損傷集中係数  $n_{s,i}$  の上限値を採り、耐震設計での提案式を修正し、耐風設計用として、(9)式を提案する。なお、(9)式に関して、安全側の評価となる様に損傷集中指数  $n_{s,i}$  が風方向風力入力時よりも大きい風直交方向風力入力時を対象とし、 $p_d=0.8$  のときの  $n_{s,i}$  値が最大となるプロットを用いて、最小二乗法により(9)式を決定した。

$$\left. \begin{aligned} n_{s,i} &= 12 & r_q &\leq 1.6 \\ n_{s,i} &= -25 \cdot r_q^{-1.6} & 1.6 < r_q &\leq 7.5 \\ n_{s,i} &= 1 & r_q &> 7.5 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$p_d$	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
$k=1$	◇	△	○	□	▽
$k=5$	◆	▲	●	■	▼

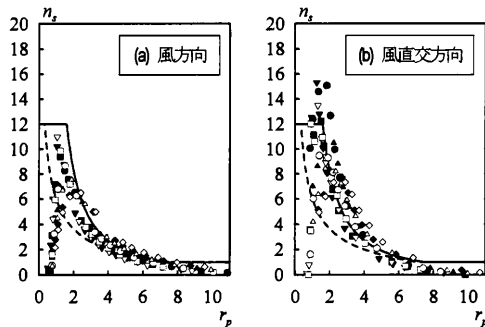


図6  $n_{s,i} - r_q$  関係 (ダンパーの剛性分布: type1)

#### 4. 耐風設計における層の最適降伏層せん断力係数分布予測

前章では最適降伏層せん断力係数分布  $\bar{\alpha}_i$  を時刻歴応答解析により求めていた。本章では、スペクトル応答解析を用いて時刻歴応答解析なしに  $\bar{\alpha}_i$  を算出する手法を提案する。

応答のパワースペクトル密度は境界振動数  $f_{Bound}$  を境に準静的成分 (添字  $B$  で表す) と共振成分 (添字  $R$  で表す) に分離することができる<sup>10),11)</sup>。本論文では文献10) にならい、境界振動数  $f_{Bound}$  を固有振動数の1/3の振動数 (固有周期の3倍の周期) としている。

まず、1次モーダル風力のパワースペクトル密度  ${}_1S_F(f)$  に対して、構造特性の初期剛性と構造減衰からスペクトルモーダル解析により、共振成分の応答変位の標準偏差  ${}_1\sigma_x$  を次式より求める。

$${}_1\sigma_{R^x} = \left[ \int_{f_{Bound}}^{\infty} |\chi(f; f_1, h)|^2 {}_1S_F(f) df \right]^{1/2} \quad (10)$$

ここで、 $f$ : 固有振動数、 $h$ : 減衰定数、 $|\chi(f; f_1, h)|$ : 固有振動数  $f$ 、減衰定数  $h$  での力学的アドミッタンスを表す。

風方向風力入力時のような広帯域応答では、層間変形に占める準静的成分の割合が大きく、層間変形の準静的成分は、減衰定数による影響が小さいので、外乱との静的な力の釣合から応答値を直接評価できることが確認されている<sup>8)</sup>。従って、(11)式より、層せん断力の準静的成分  $\sigma_{B\Omega_i}$  を求め、(12)式から層間変形の準静的成分の標準偏差  $\sigma_{B\delta_i}$  を評価する。

$$\sigma_{B\Omega_i} = \sum_{j=1}^n \sigma_{BF_j} = \sum_{j=1}^n \left[ \int_0^{f_{Bound}} S_{F,j}(f) df \right]^{1/2} \quad (n=1 \sim 10) \quad (11)$$

$$\sigma_{B\delta_i} = \frac{\sigma_{B\Omega_i}}{s k_i} = \frac{\sigma_{B\Omega_i}}{f k_i + d k} \quad (i=1 \sim 10) \quad (12)$$

多質点系での弾性時の最大層間変形は、1次共振成分と準静的成分で近似できることから<sup>8)</sup>、弾性時の最大層間変形  $\delta_{i,max}$  は(13)式のように求めることができる。

$$\delta_{i,max} = \left[ ({}_1\sigma_{R^x} \phi_i)^2 + \sigma_{B\delta_i}^2 \right]^{1/2} \cdot g \quad (13)$$

ここで、ピークファクター  $g$  は次式から算出した<sup>4)</sup>。

$$g = \sqrt{2 \ln(600 f) + 1.2} \quad (14)$$

(13)式による弾性時の最大層間変形  $\delta_{i,max}$  に全体架構剛性  $s k_i$  を乗じて算出した最大層せん断力を(4)式に代入し、層の最適降伏層せん断力係数分布  $\bar{\alpha}_i$  を算出する。

図7に風方向、風直交方向風力入力時の時刻歴解析結果 (実線) と(10)式による最適降伏層せん断力係数分布 (◆印) の比較を示す。図7より、予測値 (◆印) は、風方向、風直交方向入力時ともに、時刻歴応答解析による最適降伏層せん断力係数分布を精度良く再現できていることが確認できる。

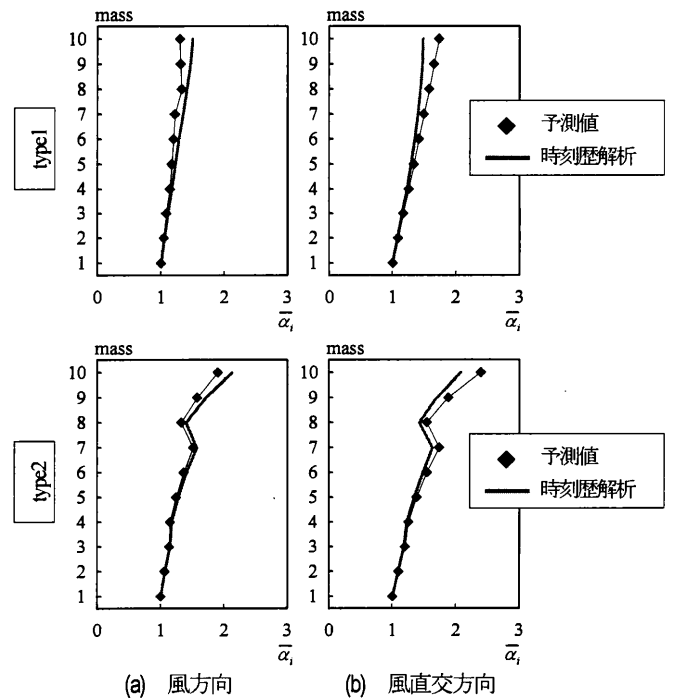


図7  $\bar{\alpha}_i$  の時刻歴解析結果と予測値の比較

#### 5. 耐風設計における損傷分配予測手法

4章より、層の最適降伏層せん断力係数分布  $\bar{\alpha}_i$  はスペクトル応答解析に基づいて算出できることを確認した。これを(3)式に代入し、ダンパーの最適降伏層せん断力係数分布  ${}_d\bar{\alpha}_i$  を求めることができる。

本章では、耐風設計におけるダンパーの損傷分配手法を提案し、

時刻歴応答解析結果を比較することで、その有効性について検証する。ただし、各層の損傷集中係数  $n_{si}$  を算出する上で弾塑性系での最大層間変形を用いる必要があるが、本報では、(13)式による最大層間変形  $\delta'_{i, max}$  を弾塑性系での最大層間変形と仮定している。本報では、時刻歴応答解析に基づいて最適降伏層せん断力係数分布を求め、弾塑性系での最大層間変形により損傷集中指数  $n_{si}$  を評価する手法を手法1と呼ぶ。スペクトル解析に基づいて最適降伏層せん断力係数分布(4章)を求め、(13)式による弾性系での最大層間変形により損傷集中指数  $n_{si}$  を評価する手法を手法2と呼ぶ。

ダンパーの剛性分布は type2 とし、ダンパーの降伏耐力  $dQ_{yi}$  は、手法1および2による最適降伏層せん断力係数分布に従って算出した耐力分布を3つのグループに分割(1~3層, 4~7層, 8~10層)した制振部材の耐力比分布としている。図8には、手法1による風方向風力入力時の第1層のダンパーの降伏耐力  $dQ_{y1}$  に対する比率 ( $dQ_{y1} / dQ_{y1}$ ) を代表して示す。なお、本章で用いる第1層のダンパー降伏せん断力係数は、 $d\alpha_{y1} = 0.007, 0.01, 0.015$  としている。

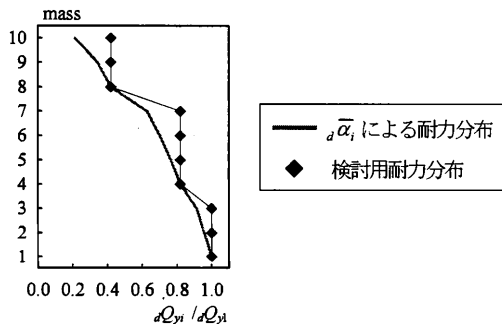


図8 高さ方向におけるダンパーの耐力比分布 (風方向風力入力時, 手法1)

図9(a), (b)に風方向, 風直交方向風力入力時の  $1/d\alpha_{yi}$  ((2)式)の時刻歴解析結果(実線)と手法1(◇印)および手法2(◆印)による予測値をそれぞれ示す。ここでは、(2)式の精度を確認することが目的であるため、全層でのダンパーの累積塑性歪みエネルギーの総和  $\sum_{i=1}^N dW_{pi}$  は時刻歴応答解析結果を用いている。図9より、風力方向および  $d\alpha_{yi}$  に関係なく、全層で手法1(◇印)が時刻歴解析結果(直線)の傾向を良く捉えていることが確認できる。これより、耐震設計の分野で用いられている損傷配分則は風応答外力入力時においても、損傷集中指数  $n_{si}$  を(9)式の値に修正することで適用することができることを確認した。また、本報で提案した手法2(◆印)を用いることで、時刻歴解析による  $1/d\alpha_{yi}$  分布を概ね予測できていることが確認でき、本手法の有効性を示すことができた。

7. まとめ

本報では、変動風力を受ける超高層制振建物を対象としたダンパーの累積損傷評価を行い、以下の結論を得た。

- (1). (3)式によるダンパーの最適降伏層せん断力係数分布  $d\alpha_{yi}$  を用いることで、風外力入力時においてもダンパーの累積塑性変

形倍率  $d\eta_i$  は全層で概ね一定となることを確認した。

- (2). スペクトル応答解析に基づく層の最適降伏せん断力係数分布  $\alpha_{yi}$  の予測手法は、時刻歴解析と同等な評価ができることを確認した。
- (3). 耐震設計で提案されている損傷分布則を基に、風応答時の損傷集中指数の評価式(9)式を提案し、その有効性を確認した。

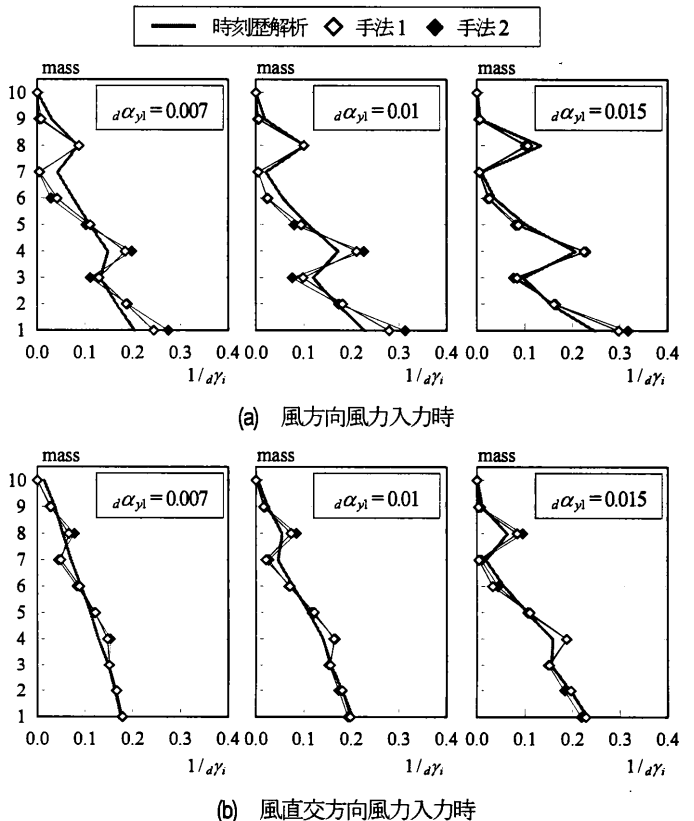


図9  $1/d\alpha_{yi}$ の予測値と時刻歴解析の比較 (ダンパーの剛性分布: type2)

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) 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
- 4) 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
- 5) 日本建築学会: 建物荷重指針-同解説, 2004
- 6) 高橋誠, 秋山宏: 地震時における柔剛混合せん断型多層骨組の損傷集中特性, 日本建築学会構造系論文集, 第536号, pp.63-70, 2000.10
- 7) 北村春幸, 財津和彦, 馬谷原伴忠: 主架構の塑性化を考慮した制振構造物のエネルギーの釣合に基づく応答評価法, 日本建築学会構造系論文集, 第599号, pp.71-78, 2006.1
- 8) 平井宏幸, 吉江慶祐, 佐藤大樹, 鈴木悠也, 北村春幸: 変動風力を受ける超高層建築物の高次モード応答特性, 日本建築学会技術報告集, 第38号, pp.79-84, 2012.2
- 9) 加藤勉, 秋山宏: 地震時における鋼構造せん断型多層骨組の損傷分布則
- 10) 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
- 11) 辻田修, 早部弘弘, 大熊武司, 和田章: 弾塑性構造物の風応答性状ならびにその予測手法に関する研究その2 風方向振動の場合, 日本建築学会構造系論文集, 第485号, pp.25-34, 1996.7

\*1 東京理科大学  
\*2 株式会社 日建設計