

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	変動風力を受ける超高層免震建築物の多質点系モデルを用いた上部構造の応答評価(構造)
Title	
著者(和文)	平井 宏幸, 佐藤 大樹, 吉江慶祐, 鈴木 悠也, 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. 80, , pp. 353-356
Citation(English)	, Vol. 80, , pp. 353-356
発行日 / Pub. date	2010, 2
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/110008729977

変動風力を受ける超高層免震建築物の多質点系モデルを用いた上部構造の応答評価

準会員○平井宏幸^{*1} 正会員 佐藤大樹^{*2} 同 吉江慶祐^{*3}
同 鈴木悠也^{*4} 同 北村春幸^{*5}

構造—振動

風外力 多質点系 エネルギー

超高層免震建物 弾塑性応答

1. はじめに

現在、建物は風荷重に対して弾性範囲で設計が行われている。しかし、一般に風外力のパワーは建築物の固有周期より長周期（低振動数）側で卓越するのに対し、超高層免震建物は、通常の建築物と比較して固有周期が長いと、風荷重が増加し、免震層が塑性化する場合も考えられる。したがって、免震建物の高層化が進んでいる現状を考えると風荷重に対して弾塑性範囲における応答評価が必要となる。また、既往研究では風力に対する建物の応答は1次が卓越するとされているため、1次のみで評価されてきた。しかし、岡本ら¹⁾は、超高層建築物の風応答における高次モードの影響は、1次のみでなく2次または3次まで考慮する必要があると示唆している。そのため、1質点系の風応答予測手法を多質点系に展開する必要があると考える。この点については、安井ら²⁾が基礎免震建物を対象とした多質点系で研究しており、上部構造の弾性応答と免震層の弾塑性応答を足し合わせることで、弾塑性時の建物頂部応答を求めている。しかし、免震層の塑性化と上部構造応答の関係についての検討は十分とはいえない。

本研究は、変動風力を受ける超高層免震建物を想定した多質点系モデルを対象として、免震層の復元力特性を変化させ、塑性率 μ による上部構造の振動性状を明らかにすることを目的とする。併せてエネルギーにも着目して、構造物の弾塑性応答を検討する。

2. 解析モデルの作成

2.1. 上部構造の概要

上部構造を1次モードが直線のモデル（図1）とし、その下に免震層を設定した11質点せん断型モデルを用いた。図2に対象モデルの概要を示す。上部構造の減衰定数は $h=2\%$ の剛性比例とする。

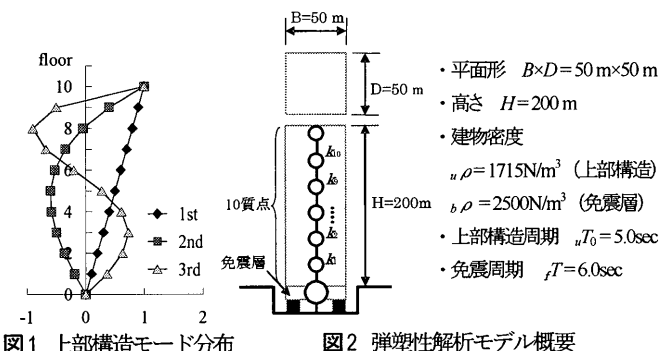


図1 上部構造モード分布

図2 弾塑性解析モデル概要

2.2. 免震層の概要・作成

ダンパー、アイソレーター、免震層の復元力特性を図3に示す。免

震層の諸元は次式を用いて決定される。

$${}_d Q_y = ({}_u W + {}_b W) \cdot {}_s \alpha_y \quad (1)$$

$${}_d K_1 = \gamma \cdot {}_d Q_y \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{{}_d Q_y}{{}_d K_1} = \frac{1}{{}_d \delta_y} \quad (3)$$

$${}_f Q = {}_f K_1 \cdot {}_d \delta_y \quad (4)$$

ここで、 ${}_d Q_y$: ダンパーの降伏耐力、 ${}_u W$: 免震層の重量、 ${}_b W$: 上部構造の重量、 ${}_s \alpha_y$: 降伏せん断力係数、 ${}_d K_1$: ダンパーの初期剛性、 γ : ダンパーの降伏時せん断変形角、 ${}_d \delta_y$: ダンパーの降伏変位、 ${}_f Q$: アイソレーターのせん断力、 ${}_f K_1$: アイソレーターの初期剛性。なお、免震層の減衰はないものとする。

はじめに、弾性周期 T_0 の違いによるエネルギー入力 E_{input} の変化を確認するため、ダンパー、アイソレーターを弾性とする。解析モデルとして、図4(a)に示す免震層復元力特性（以下、case0と表記する）を用いる。case0は γ をパラメーターとして（表1参照）、(2)式より ${}_d K_1$ を変化させる。このとき、 ${}_d Q_y$ は一定とし、 ${}_s \alpha_y = 0.02$ として(1)式より求める。

次に、ダンパーは完全弾塑性、アイソレーターは弾性とし、 ${}_d Q_y$ の変化が上部構造の風応答に与える影響について考察する。解析モデルとして、図4(b)に示す免震層復元力特性（以下、case1と表記する）を用いる。case1は ${}_d K_1$ を一定にし、 ${}_s \alpha_y$ をパラメーターとして、(1)式より ${}_d Q_y$ を変化させる。その際、 ${}_d K_1$ を一定とするため $\gamma (=1/{}_d \delta_y)$ も変化させる（表1参照）。case1では常に ${}_s \alpha_y = 0.02$ のモデルの ${}_d K_1$ （図4(b): 破線）を用いる。なお、全体の傾向を把握するために弾性時の応答も併せて評価する。

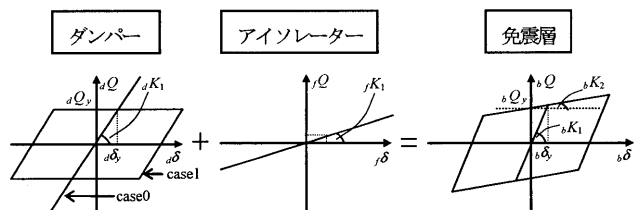


図3 免震層復元力特性の作成

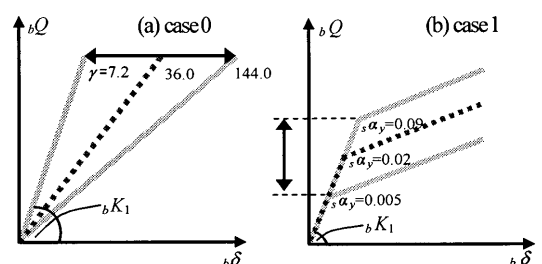


図4 免震層復元力特性概要

表1 解析パラメーター

s_{α_y}	0.005	0.006	0.007	0.008	0.01	0.015	0.02	0.025
γ	144.0	120.0	102.9	90.0	72.0	48.0	36.0	28.8
s_{α_y}	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10
γ	24.0	18.0	14.4	12.0	10.3	9.0	8.0	7.2

3. 風外力の概要

風外力は、「建築物荷重指針・同解説」³⁾による風方向、風直交方向の2種類の変動風力のパワースペクトル密度をもとに、高さ方向の相関を考慮した三角級数モデル⁴⁾により模擬風力波形をシミュレートして用いた⁵⁾。風速は再現期間500年に相当するレベルとして、頂部風速 $U_H=60.8$ (m/s)を設定した。

模擬風力波形は1組につき上部構造10質点分の変動風力波形を0.01秒刻み9500ステップで30組作成した。エンベロープを前後50秒ずつつけ、300~900秒の10分間で応答を評価する。頂部風力のパワースペクトル密度を図5、頂部風力の時刻歴波形例を図6に示す。作成した風外力を上部構造の10質点に入力し、免震層を含めた11質点せん断型モデルの時刻歴応答解析を行い、応答を求める。また、各応答は30組の応答のアンサンブル平均により評価した。

なお、本研究では、平均成分を有さない風方向風力、風直交方向風力(以下それぞれ、「ALONG」、「ACROSS」と表記する)の2種類の風力を用いた。図5、図6より、ALONGは周期が大きく緩やかな成分を含んでいるのに対し、ACROSSは周期が短く、鋭い波形であることが確認される。

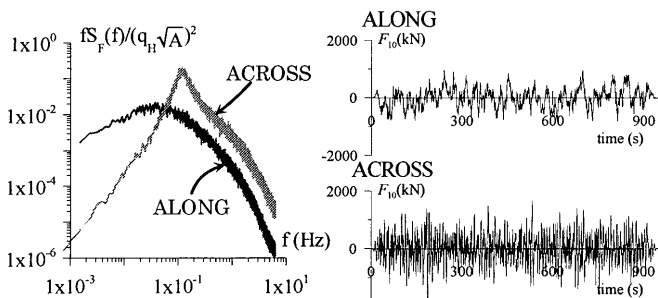


図5 頂部パワースペクトル密度 図6 頂部風外力の時刻歴波形例

4. 弾性周期 T_0 の違いによるエネルギー入力 E_{input} の変化

解析モデルの免震層復元力特性はcase0(図4(b))を用いて時刻歴応答解析を行う。弾性周期 T_0 は11質点系モデルの固有値解析より算出した。図7に弾性周期 T_0 とエネルギー入力 E_{input} の関係を示す。弾性周期 T_0 が長くなる程 E_{input} は大きくなることから分かる。また、図5に示すパワースペクトル密度からも分かるように、振動数が低い程パワーは大きくなる。図8に応答変位の標準偏差(以下、rmsと表記する)を示す。弾性周期 T_0 が長くなり、 E_{input} が増加するにつれて、応答が大きくなることが確認できる。

5. 時刻歴応答解析による弾塑性モデルの応答特性

はじめに、多質点弾塑性振動系のエネルギーの釣合式を示す。多質点弾塑性振動系の運動方程式は次式で表される。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + \{Q\}\{x\} = \{F\} \quad (5)$$

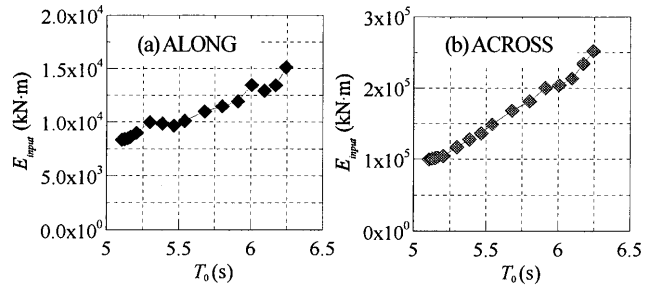
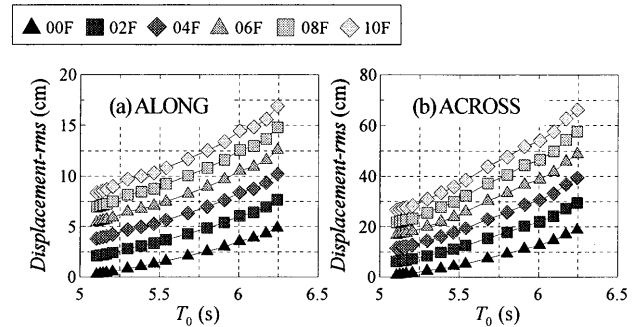
図7 弾性周期 T_0 とエネルギー入力 E_{input} の関係

図8 応答変位の標準偏差

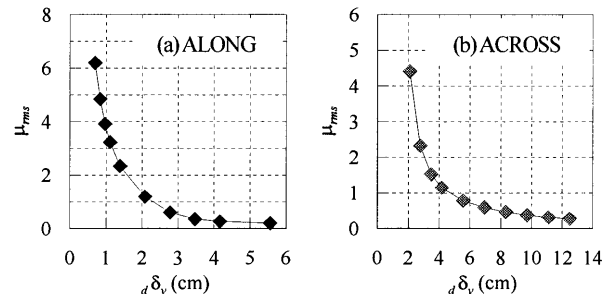
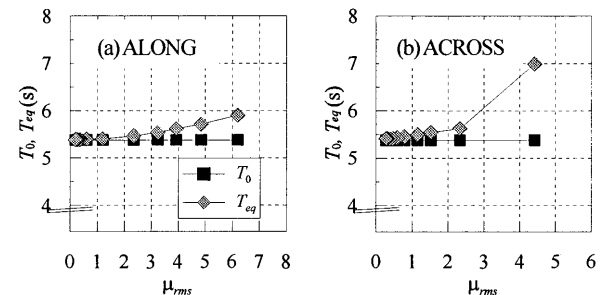
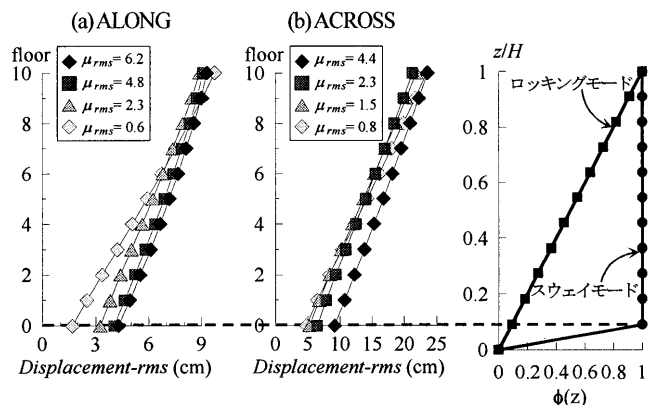
図9 塑性率 μ_{rms} とダンパーの降伏変位 $d\delta_y$ の関係図10 弾性周期 T_0 と等価周期 T_{eq} 比較

図11 応答変位の標準偏差

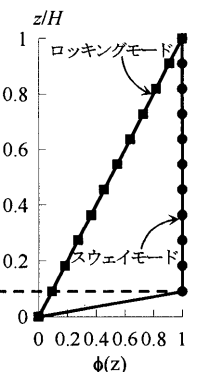


図12 モード形概要

ここで $[M]$, $[C]$: 質量, 減衰マトリクス, $\{Q\}$: 復元力特性, $\{\dot{x}\}$: 変位ベクトル, $\{F\}$: 外力ベクトル。

(5) 式の両辺に前から $\{\dot{x}\}^T$ を乗じて、時刻 t_0 まで積分し、次式のエネルギーの釣合式を得る。

$$\int_{t_0}^{t_1} \{\dot{x}\}^T [M] \{\ddot{x}\} dt + \int_{t_0}^{t_1} \{\dot{x}\}^T [C] \{\dot{x}\} dt + \int_{t_0}^{t_1} \{\dot{x}\}^T \{Q\} \{x\} dt = \int_{t_0}^{t_1} \{\dot{x}\}^T \{F\} dt \quad (6)$$

ここで、左辺の第1項、第2項、第3項をそれぞれ、時刻 t_0 における運動エネルギー W_K 、減衰により吸収されるエネルギー W_D 、弾性ひずみエネルギー W_E と累積塑性ひずみエネルギー W_P の和、右辺を外力によるエネルギー入力 E_{input} とおくと次式のように書ける。

$$W_K + W_D + W_E + W_P = E_{input} \quad (7)$$

本研究では、免震層の層間粘性減衰をゼロ、上部構造は線形としているので上部構造のみの粘性減衰により吸収されるエネルギー ${}_uW_D$ が W_D と、免震層の累積塑性ひずみエネルギー ${}_bW_P$ が W_P とそれぞれ等しくなる。解析モデルの免震層復元力特性は case1 (図4(a)) を用いて、時刻歴応答解析を行う。図9に case1 の塑性率 μ_{rms} ($= {}_b\sigma_D$ (免震層の応答変位の rms 値) / $d\delta_y$) と $d\delta_y$ の関係を示す。図10に頂部加速度波形を用いて FDD 法⁹⁾より求めた等価周期 T_{eq} と弾性周期 T_0 の比較を示す。ALONG では $d\delta_y = 2.8\text{cm}$, ACROSS では $d\delta_y = 5.5\text{cm}$ 以上になると塑性率 μ_{rms} が1以下となり、塑性化が進んでいないことが分かる (図9)。

図11に応答変位の rms 値を示す。免震層の塑性化が進むと ALONG, ACROSS とともに振動モードはロッキングモードからスウェイモードに移行するが、上部構造は直線モードを保ちながら振動していることが分かる。ここで、ロッキングモードとは超高層建物の1次モードに代表される直線モード ($\phi(z)=z/H$)、スウェイモードとは免震建物の1次モードに代表される振動モード ($\phi(z)=1$) を意味している。(図12)。図13に塑性率 μ_{rms} の違いによるエネルギーの変化を示す。また、図14, 15に、 E_{input} に占める ${}_bW_P$, ${}_uW_D$ の割合を示す。塑性化が進むと等価周期 T_{eq} が長くなり (図10)、4章で示した弾性周期 T_0 の傾向と同様にエネルギー入力は大きくなる (図13)。塑性化が大きくなると ${}_bW_P$ が大きくなり (図13)、 ${}_bW_P$ に比べて W_K , W_E は無視できるので、(7) 式のエネルギーの釣合式から E_{input} は ${}_bW_P$ と ${}_uW_D$ の和にほぼ等しくなる。これより、塑性化が進むと E_{input} に占める ${}_bW_P$ の割合は増加し (図14)、それに伴い、 E_{input} に占める ${}_uW_D$ の割合は減少する (図15)。図16に層間変形、応答速度、応答加速度の rms 値を示す。塑性化が進むと上部構造の層間変形、応答速度は小さくなる (図16) ので、 ${}_uW_D$ も減少する (図13) と考えられる。また、ALONG で $\mu_{rms}=3.2$, ACROSS で $\mu_{rms}=1.5$ 以上になると ${}_uW_D$ は E_{input} の約20%に収束する (図15)。 ${}_uW_D$ が一定になると上部構造の応答も収束する (図16)。

以上の結果から、変動風力を受ける超高層免震建物の応答を評価する場合、1 質点系だけでは塑性化による振動モード形状の変化を予測することはできず、多質点系による評価が必要であると考えられる。

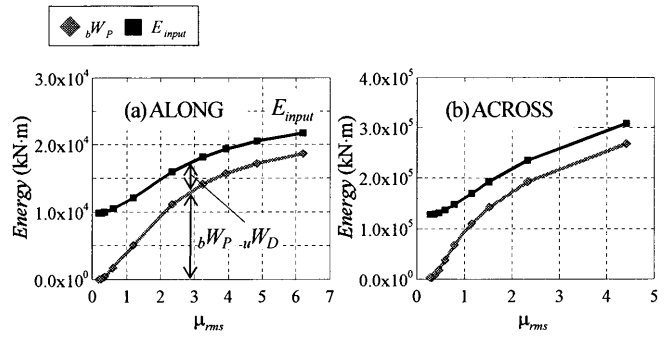


図13 塑性率 μ_{rms} の違いによるエネルギーの変化

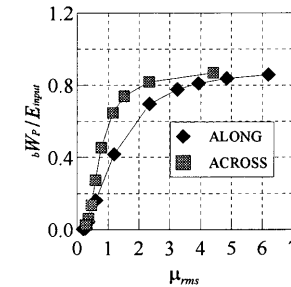


図14 E_{input} に占める ${}_bW_P$ の割合

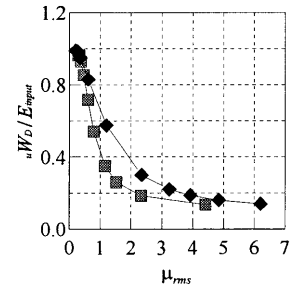
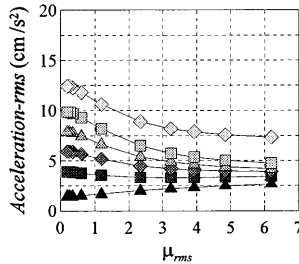


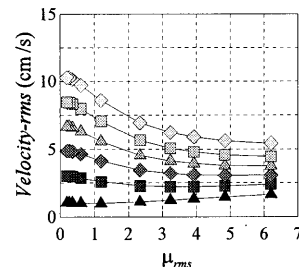
図15 E_{input} に占める ${}_uW_D$ の割合



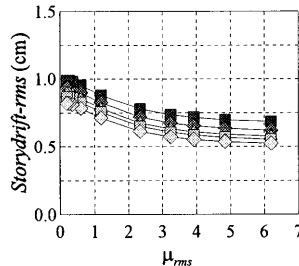
(a) 層間変形



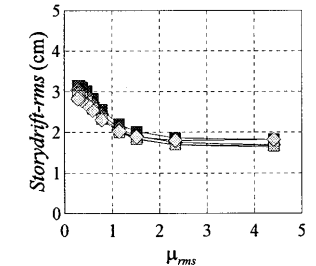
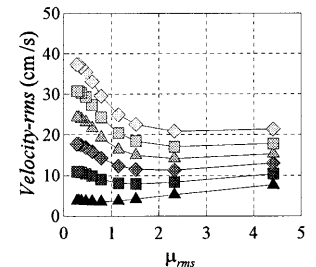
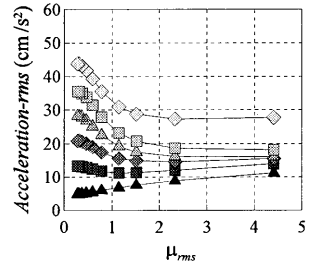
(b) 応答速度



(c) 応答加速度



(A) ALONG



(B) ACROSS

図16 塑性率 μ_{rms} の違いによる応答の変化

しかし、免震層の塑性化が進んでも、上部構造は直線モードを保ちながら振動することから(図11)、2質点系で多質点系の応答を予測することができると考えられる。

6. 弾塑性応答とエネルギーの関係

5章では、弾塑性範囲であっても変動風力を受ける超高層免震建物を想定した多質点系モデルの振動モード形状は、2質点系で近似できることを示した。その妥当性を示すために、エネルギーの観点からも検討する。1質点系での粘性減衰による吸収エネルギー ${}_uW_D$ と応答速度の関係は(8)式となる。

$${}_uW_D = \int_0^{t_0} c \cdot \dot{x}^2(t) dt = t_0 \cdot c \cdot \sigma_v^2 \quad (8)$$

よって、次式の関係が成立する。

$$\sqrt{{}_uW_D} \propto \sigma_v \quad (9)$$

ここで、 c : 粘性係数、 x : 変位、 σ_v : 応答速度のrms値。

${}_uW_D$ の変化率 R_{uWD} の平方根と i 層の応答速度のrms値の応答変化率 $R_{v,i}$ および i 層の層間変形のrms値(以下 σ_{SD} と表記する)の応答変化率 $R_{SD,i}$ を用いて(9)式の評価を評価する。ここで R_{uWD} と $R_{v,i}$ および $R_{SD,i}$ は下式となる。

$$R_{v,i} = (\text{弾塑性時の速度 rms 値}) / (\text{弾性時の速度 rms 値})$$

$$R_{SD,i} = (\text{弾塑性時の層間変形 rms 値}) / (\text{弾性時の層間変形 rms 値})$$

$$R_{uWD} = (\text{弾塑性時の } {}_uW_D) / (\text{弾性時の } {}_uW_D)$$

図17に $\sqrt{R_{uWD}}$ と $R_{v,i}$ 、図18に $\sqrt{R_{uWD}}$ と $R_{SD,i}$ の比較をALONG, ACROSSそれぞれ示す。 $R_{v,i}$ において、塑性化が大きい場合は、2, 4層の応答が上層に比べて免震層の応答の影響を受けて大きくなっているが、6, 8, 10層の $R_{v,i}$ と R_{uWD} の平方根は同値に一致していることが分かる(図17)。これより、上部構造の応答速度と

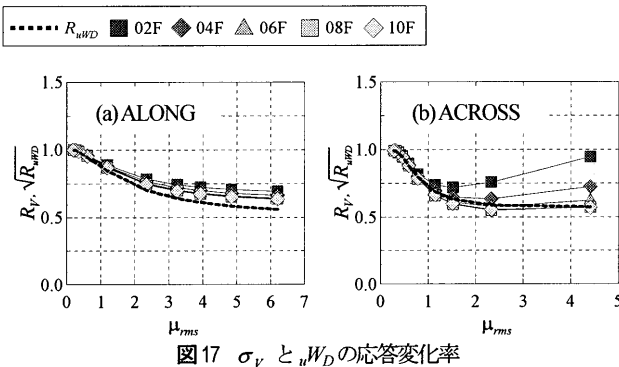


図17 σ_v と ${}_uW_D$ の応答変化率

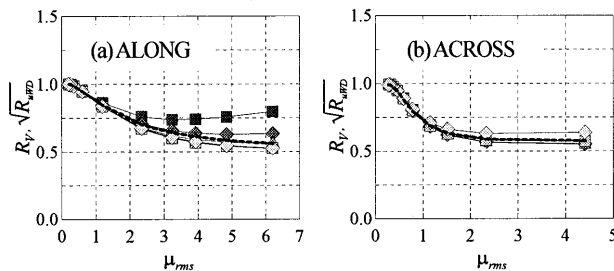


図18 σ_{SD} と ${}_uW_D$ の応答変化率

上部構造の粘性減衰により吸収されるエネルギー ${}_uW_D$ が一定の関係であることを確認した。また、応答速度と応答変位は比例関係にあるので、 $R_{SD,i}$ も R_{uWD} の平方根と一致している(図18)。これは、ALONG, ACROSSともに同じ傾向である。これより、変動風力を受ける超高層免震建物を想定した弾塑性多質点系モデルの上部構造の応答は、エネルギーの観点からも1次モードが卓越しているため、上部構造は1質点系に置き換えることができると考える。

7. まとめ

変動風力を受ける超高層免震建物を想定した多質点系モデルを対象として、免震層の復元力特性を変化させ、塑性率 μ による上部構造の振動性状を明らかにし、併せてエネルギーにも着目して弾塑性応答の関係を検討し、以下の結論を得た。

- 1) 弾性周期 T_0 が長くなるとエネルギー入力 E_{input} は増加し、応答は大きくなることを確認した。
- 2) 塑性化が進むと構造物の振動モード形状がロッキングモードからスウェイモードに移行することを確認した。これより、弾塑性範囲であっても超高層免震建物の応答を評価するためには、1質点系から多質点系に拡張する必要がある。しかし、上部構造は直線モードを保ちながら振動するので、2質点系で多質点系の応答を予測することが可能であることを示した。
- 3) 塑性化が進むと上部構造の応答が小さくなり、それに伴って上部構造の粘性減衰により吸収されるエネルギー ${}_uW_D$ も減少することを確認できた。さらに、塑性化による応答低減の割合は、 ${}_uW_D$ と一定の関係を示すことが確認できた。また、エネルギーの観点からも多質点系の上部構造の応答は1次モードが卓越しているため、1質点系に置き換えて予測することが可能であることを示した。

謝辞

本研究を行うにあたり、東京工業大学並井研究室の解析プログラム PC-ANSR を使用しました。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 岡本有里子, 鈴木悠也, 佐藤大樹, 吉江慶祐, 北村春幸: 変動風力を受ける超高層建築物の多質点系モデルを用いた応答評価(その1), 2008年度日本建築学会関東支部研究報告
- 2) 安井八紀, 大熊武司, 丸川比左夫: クリープ変形を伴う免震建物の風応答性状に関する研究, 日本建築学会構造系論文集第619号, pp.41-48, 2007.9
- 3) 日本建築学会: 建物加重指針・同解説(2004), 2004
- 4) 星谷 勝: 確率論手法による構造解析, 鹿島出版会, 1973年
- 5) 大熊武司, 丸川比左夫, 丹羽秀聡, 寺本隆幸, 北村春幸, 吉江慶祐: 動的天秤データを利用した高層建物の風時刻歴応答解析, 第12回風工学シンポジウム論文集, pp.207-212, 1992年12月
- 6) 鈴木悠也, 岡本有里子, 佐藤大樹, 吉江慶祐, 北村春幸: 変動風力を受ける超高層建築物の多質点系モデルを用いた応答評価(その2), 2008年度日本建築学会関東支部研究報告

*1 東京理科大学理工学部建築学科

*2 東京理科大学理工学部建築学科 助教・博士(工学)

*3 株式会社日建設計 構造設計室 主管・博士(工学)

*4 東京理科大学大学院理工学研究科建築学専攻

*5 東京理科大学理工学部建築学科 教授・博士(工学)