

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	エネルギーの釣合に基づく変動風力を受ける超高層免震建物の応答予測手法(構造)
Title	
著者(和文)	鈴木 悠也, 佐藤 大樹, 吉江慶祐, 平井 宏幸, 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. 265-268
Citation(English)	, Vol. 80, , pp. 265-268
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: <a href="http://ci.nii.ac.jp/naid/110008729950">http://ci.nii.ac.jp/naid/110008729950</a>

エネルギーの釣合に基づく変動風力を受ける超高層免震建物の応答予測手法

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

構造—振動

風外力 弾塑性応答 超高層免震

多質点系 エネルギーの釣合

1. 序論

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振動数が低いため、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。そこで、吉江ら<sup>1)</sup>は耐震設計においてエネルギーの釣合に基づく設計手法が構造設計の信頼性を高めることに貢献しているという事実を踏まえ、構造物の風応答をエネルギー収支の観点から整理・分析することで、1質点系を用いたエネルギーの釣合に基づく応答予測手法を提案している。しかし、岡本<sup>2)</sup>らは、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。特に、超高層免震建物のような塑性化によるモード変化が著しいと考えられる建物に関しては、多質点系を用いたの応答評価が必要になると考える。

本研究では、応答予測に用いる関係式を数学的に導かれており信頼性の高いと考えられる吉江らのエネルギーの釣合に基づく応答予測手法を、超高層免震建物を想定した多質点系に展開することを目的とする。そのため、多質点系超高層免震モデルを用いた応答解析によりその応答性状を分析し、その上で多質点系に展開するための検討をおこなう。

2. 免震構造の多質点系モデルによる弾塑性応答解析

多質点系免震構造モデルの応答解析を行い、超高層免震建物の応答性状の考察をする。

解析モデルは、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とする。図2に対象モデルの概要を示す。上部構造の減衰定数は $\eta=2\%$ の剛性比とする。免震層の復元力特性を次式により求める。

$${}_dQ_y = ({}_uW + {}_bW) \cdot {}_s\alpha_y \quad (1)$$

$${}_dK_1 = \gamma \cdot {}_dQ_y \quad (2)$$

ここで、 ${}_dQ_y$ は免震層ダンパーの降伏耐力、 ${}_uW$ は免震層の重量、 ${}_bW$ は上部構造の重量、 ${}_s\alpha_y$ はダンパーの降伏せん断力係数、 $\gamma$ はダンパーの降伏時せん断変形角（ $\approx 36\text{kN/m/kN}$ ）、 ${}_dK_1$ はダンパーの初期剛性とする。なお、免震層の構造減衰はないものとする。 ${}_s\alpha_y=0.02$

～0.05として、ダンパーの降伏耐力および剛性を変化させて解析を行う。表1には解析パラメータの ${}_s\alpha_y$ と解析結果を用いた免震層の塑性率を示す。ここで、 $\mu_{max}$ 、 $\mu_{rms}$ はそれぞれ免震層の応答変位の最大値、標準偏差の免震層の降伏変位に対する比を示す。

風外力は、「建築物荷重指針・同解説」<sup>3)</sup>による風直交方向の変動風力のパワースペクトル密度をもとに、三角級数モデル<sup>4)</sup>により模擬風力波形をシミュレートした<sup>5)</sup>。風速は再現期間500年に相当するレベルとして文献3の再現期間換算係数を用いて、頂部風速 $U_H=60.8\text{ (m/s)}$ を設定した。模擬風力波形は1組につき上部構造10質点分の変動風力を0.01秒刻み95000ステップで30組作成した。エンベロープを前後50秒ずつ設け、300～900秒の10分間で応答を評価する。なお、3章以降の検討においても、本章で作成した模擬風力波形を用いる。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。

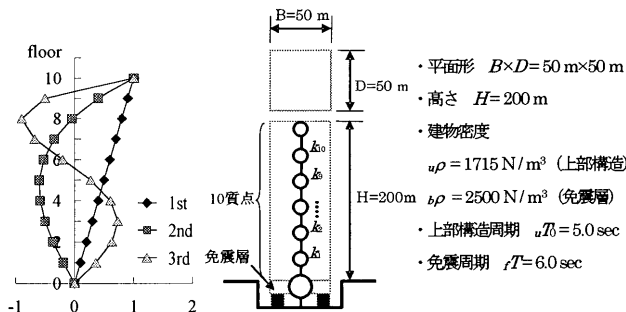


図1 上部構造モード分布

図2 弾塑性解析モデル概要

表1 解析モデルの塑性率

${}_s\alpha_y$	0.02	0.025	0.03	0.035	0.04	0.045	0.05
$\mu_{max}$	10.8	8.6	7.4	6.4	5.5	4.9	4.2
$\mu_{rms}$	2.2	1.7	1.5	1.3	1.1	1.0	0.9

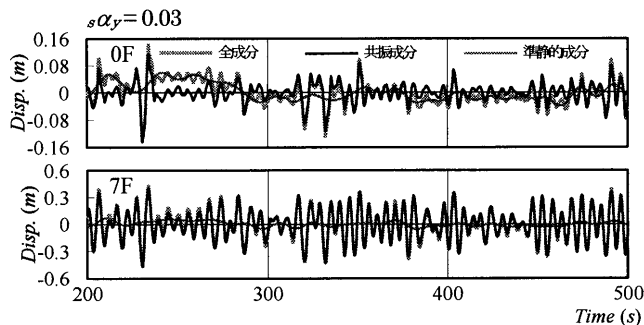


図3 応答変位時刻歴例

さらに、応答変位時刻歴波形  $x(t)$  を低振動数成分と共振成分に分離して以下の検討を進める<sup>1)</sup>。

図3に、 $\alpha_v=0.03$  の場合の応答変位の時刻歴波形と準静的成分と共振成分の分離波形の例を示す。図は免震層 (0F) と上部構造 7F の応答を示している。上部構造 7F の応答変位では準静的成分の応答は小さく、全成分の応答は共振成分の応答が支配的である。それに対して、免震層の応答変位では、準静的成分の振動を中心として、共振成分の応答が振動しており広帯域性の応答となっている。

### 3. モード変化によるエネルギー入力性状への影響

1 質点系の弾塑性系を含めた構造物への風外力によるエネルギー入力は次式により評価できる<sup>1)</sup>。

$$E[\dot{E}_{input}] = \int_0^{\infty} \text{Re}[H_v(f)] \cdot S_F(f) df \quad (3)$$

ただし、 $f$  は振動数、 $\dot{E}_{input}$  は単位時間当たりのエネルギー入力、 $S_F(f)$  は変動風力のパワースペクトル密度 (片側スペクトル)、 $E[\ ]$  は期待値を、 $\text{Re}[\ ]$  は複素の実部を示す。

(3) 式は 1 質点系へのエネルギー入力を示したものであるため、構造物が 1 次モードで振動することを前提としている。しかし、2 章で示したように、超高層免震建物においては塑性化によるモード変化が著しいため、(3) 式を用いて弾塑性系への風外力によるエネルギー入力を評価するには、モードが変化した場合のエネルギー入力性状について検討する必要がある。そこで本章では、図 2 に示す多質点系モデルの 1 次の振動モードを仮定し、1 次モードの 1 質点系に置き換えることで 1 質点系を用いた時刻歴応答解析をおこない、風外力によるエネルギー入力量を考察する。

想定建物概要を図 1 に示す。検討するモード形は、超高層建物の 1 次モードに代表される直線のロッキングモード ( $\phi(z)=z/H$ ) と免震建物の 1 次モードに代表されるスウェイモード ( $\phi(z)=1$ ) の 2 ケース (以後、前者を case1、後者を case2 と記す。) を用いる。また、解析パラメータは、固有周期  $T_0=3\sim 10$  (s) および減衰定数  $h=0.5, 2, 5, 10, 15, 20$  (%) とする。風外力は 0.01 秒刻みで、風方向、風直交方向の 2 種類を用意する。応答値は、300 秒~900 秒までの 600 秒間で算出し、30 波のアンサンブル平均で検討する。

図 4 に風直交方向それぞれの風力が入力された場合の 1 質点系へのエネルギー入力を示す。エネルギー入力は固有周期  $T_0$  の変化によって大きく変化するが、減衰  $h$  の変化はさほど影響しないことがわかる。また、図 5 に風直交方向それぞれの風力が入力された場合の case1, 2 のエネルギー入力の比を示す。case1 に比べ、case2 の方がエネルギー入力大きい、その差はほとんどの場合で 15%以内であり、振動モードが著しく変化した場合であってもエネルギー入力に大きな差はないといえる。そこで、(3) 式を用いて 1 質点系のエネルギー入力を評価する場合には、 $S_F(f)$  に case2 のようなスウェイモード振動時のパワースペクトル密度を考えることにより、エネルギー入力を過小評価することなく、かつ過度な評価をしてしまうこともないと考えられる。

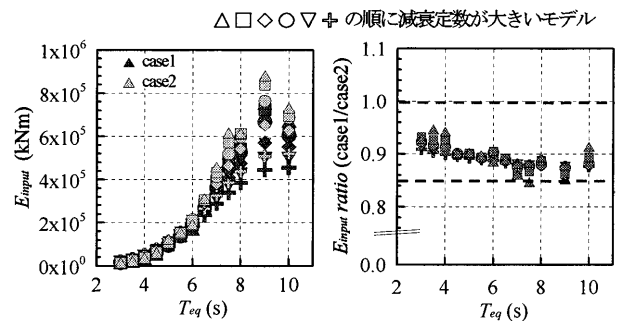


図 4 1 質点系へのエネルギー入力 図 5 case1 と case2 の比

### 4. 等価 2 質点系を用いた上部構造応答の評価

免震建物を多質点系で考えた場合、免震層における粘性減衰を無視すれば、 $E_{input}$  は上部構造の粘性減衰エネルギー  ${}_u W_D$  と履歴減衰エネルギー  ${}_b W_P$  の和で評価でき、免震層を 1 質点、上部構造を 1 質点とした 2 質点系に置き換えれば、エネルギーの釣合式は次式のように表せる。

$$E_{input} = {}_u W_D({}_u \sigma_x) + {}_b W_P({}_b \sigma_x) \quad (4)$$

ここで、 ${}_u \sigma_x$  は上部構造応答変位の標準偏差、 ${}_b \sigma_x$  は免震層応答変位の標準偏差とする。

(4) 式において  ${}_u W_D$  と  ${}_b W_P$  が 1 つの応答の関数で表されることで 1 質点系の応答予測法の多質点系への展開が可能となる。そのため本章では、弾塑性 2 質点系を用いて、 ${}_u \sigma_x$  を  ${}_b \sigma_x$  から予測する方法を検討する。

図 6 に示す 2 質点系を想定し、 ${}_b \sigma_x$  が既知とすれば、弾塑性系と等価線形の免震層の 1 サイクルあたりの履歴吸収エネルギーが等価になるような免震層の等価剛性等価剛性  ${}_b k_{eq}({}_b \sigma_x)$  が求まり<sup>1)</sup>、上部構造と免震層の振動モードの比  ${}_u u / {}_b u({}_b \sigma_x)$  は、次式により表せる。

$${}_u u / {}_b u = \frac{(\alpha + \alpha\beta - \beta) + \sqrt{(\alpha + \alpha\beta - \beta)^2 - 4\alpha\beta}}{2\alpha\beta} \quad (5)$$

このとき、 $\alpha = \frac{{}_u m}{{}_b m}$ 、 $\beta = \frac{{}_u k_1}{{}_b k_{eq}}$  とする。

(5) 式の 2 質点系の振動モードの比を用い、 ${}_b \sigma_x$  から上部構造の応答変位の標準偏差  ${}_u \sigma_x({}_b \sigma_x)$  は次式により評価できる。

$${}_u \sigma_x = {}_b \sigma_x \cdot {}_u u / {}_b u({}_b \sigma_x) \quad (6)$$

(5)、(6) 式より上部構造の応答変位の標準偏差を、免震層の応

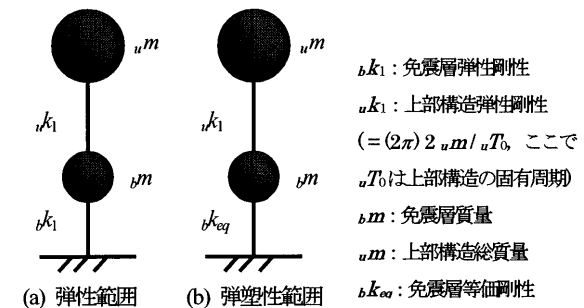


図 6 2 質点モデル概要

答変位の標準偏差の関数で評価することができる。図7に3章の多質点系時刻歴応答解析による応答変位の標準偏差における免震層応答に対する上部構造応答の比と、3章の多質点時刻歴応答解析による免震層の応答変位を用いて(5)式から求めた ${}_u u/b_u$ を示す。多質点系時刻歴応答解析において、上部構造は弾性範囲であり、1次モード(図1)で振動していることから、等価高さは上部構造7F周辺の高さ(=2/3H)に相当すると考えられる。 ${}_u u/b_u$ が多質点系の上部構造7F周辺高さの応答比を概ね示していることから、本章で示した手法により、上部構造の応答変位の標準偏差を免震層の応答変位の標準偏差の関数として評価できることが確認できた。

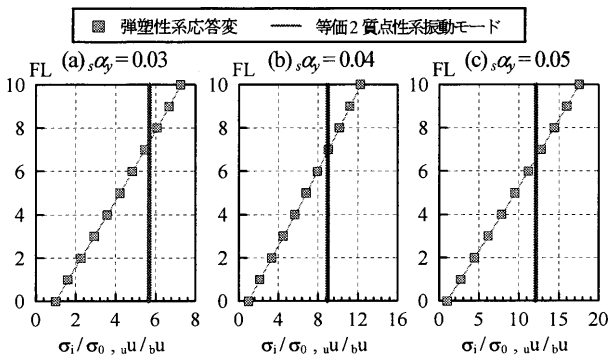


図7 等価2質点振動モード

5. エネルギーの釣合に基づく多質点系弾塑性応答変位の予測手法

2章の検討により、超高層免震建物の場合、風直交風力のような狭帯域性変動風力による弾塑性応答であっても、免震層の応答変位に関しては、準静的成分と共振成分に分離して評価する必要があることを確認した。そこで本章では、吉江らの提案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において、共振成分の応答変位の標準偏差の予測部分を2質点系に展開する手法を示し、提案手法による予測結果と2章の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討する。図9に多質点系弾塑性応答予測のフローを示す。塑性化による等価周期の変動が生じるため収れん計算を取り入れている。

予測法の準備として、多質点系の対象モデルの構造特性から1次モードを代表させた1質点系の構造特性を求めておく必要がある。本検討では、図2に示す11質点系多質点モデルを図6(a)に示す弾性2質点系に置き換え、さらに固有値解析により、1次の一般化質量、減衰係数、剛性、固有周期(それぞれ $m, c, k, T_0$ と記す)を求める。

ステップ0. 弾性時 $\nu_0$ の計算

変動風力のパワースペクトル密度 $S_F(f)$ に対して、構造特性の初期剛性と構造減衰から1質点系を用いたスペクトルモーダル解析により、共振成分の弾性時ゼロクロッシング数 $\nu_0$ を求める。<sup>1)</sup>

ステップ1. エネルギー入力の計算

以下、等価周期 $T_{eq}$ を仮定して、エネルギーの釣合をもとに弾塑性系の応答を求める。

与えられた $S_F(f)$ に対して、(3)式に等価線形系の速度の伝達関

数 $\dot{H}(f)$ を用いてエネルギー入力 $E_{input}$ を求める。

ステップ2. エネルギーの釣合から免震層の応答変位の標準偏差を求める

2質点系の入力エネルギーの釣合は(4)式で表せる。ここで、 ${}_u W_D$ は上部構造の共振成分の応答速度の標準偏差 ${}_u \sigma_x$ の関数であるから次式により評価できる。

$${}_u W_D = c_0 \cdot (2\pi\nu' \cdot {}_u \sigma_x ({}_b \sigma_x))^2 \tag{7}$$

ここで、 $\nu'$ はステップ0で求めた $\nu_0$ に対して、塑性化の影響を加味し、次式のように修正したゼロクロッシング数。

$$\nu' = \nu_0 \cdot \sqrt{{}_1 k_{eq} / {}_1 k} \tag{8}$$

ただし、 ${}_1 k_{eq}$ は ${}_b \sigma_x$ を用いて(6)式により求めた等価2質点系(図6(b))の1次一般化剛性とする。

(6)式を用いて、 ${}_u \sigma_x$ は免震層の共振成分の応答速度の標準偏差 ${}_b \sigma_x$ の関数として評価できるので、(7)式の ${}_u W_D$ は ${}_b \sigma_x$ の関数となり、(4)式は次式で表せる。

$$E_{input} = {}_u W_D ({}_b \sigma_x) + {}_b W_P ({}_b \sigma_x) \tag{9}$$

${}_u W_D$ は(7)式により評価し、 ${}_b W_P$ は免震層の共振成分の応答変位の標準偏差を用いて評価する<sup>1)</sup>。

(9)式のエネルギー入力の釣合式を ${}_u W_D, {}_b W_P$ の条件式について解き、単位時間あたりについて、エネルギー入力 $E_{input}$ と上部構造の粘性減衰エネルギー ${}_u W_D$ 、免震層の履歴吸収エネルギー ${}_b W_P$ の和が釣り合う免震層の共振成分の応答変位の標準偏差 ${}_b \sigma_x$ を求める

ステップ3. 応答変位に対応する等価周期の計算

2質点系の等価固有円振動数 $\omega_{eq}$ を次式より評価し、求めた ${}_b \sigma_x$ に対応する等価周期 $T'_{eq} = \omega_{eq} / 2\pi$ を求める。

$$\omega_{eq}^2 = \frac{(\alpha + \alpha\beta + \beta) - \sqrt{(\alpha + \alpha\beta + \beta)^2 - 4\alpha\beta}}{2\alpha} \cdot \frac{{}_b k_{eq}}{{}_b m} \tag{10}$$

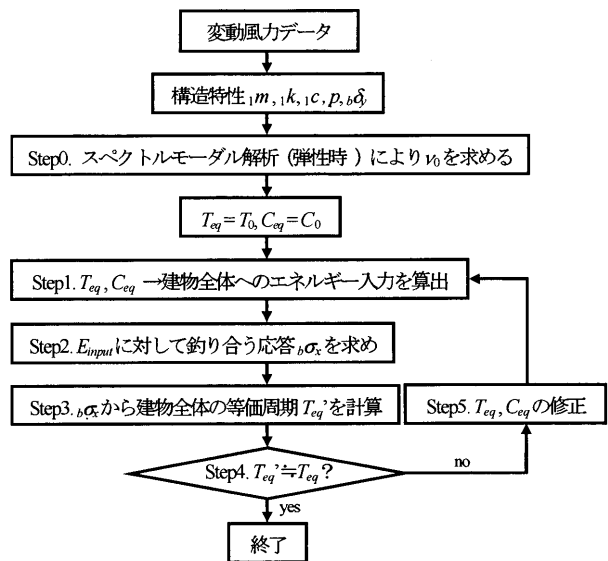


図9 変動風力に対する多質点系弾塑性応答予測フロー

ステップ4. 応答変位に対応する等価周期の計算

ステップ1で仮定した $T_{eq}$ とステップ3で求めた $T'_{eq}$ がほぼ等しければ、仮定したエネルギー入力 $E$ が妥当であることになり、塑性化に伴う固有周期の変化を考慮した上で、エネルギー入力と弾塑性系の吸収エネルギーが釣り合ったと判断できるので、取れんは終了となる。そうでなければ、次のステップへ進む。

ステップ5. 等価線形系の修正

ステップ3で求めた $T'_{eq}$ と次式で修正した等価減衰定数 $C_{eq}$ を用いて、等価線形系を修正して、ステップ1に戻る。

以下では、予測手法による提案手法と2章に示した時刻歴応答解析結果の比較を行う。

図11に単位時間当たりの免震層の共振成分の履歴吸収エネルギー ${}_bW_p$ と上部構造の共振成分の粘性減衰エネルギー ${}_uW_D$ の比較を、図12に免震層および上部構造等価高さ付近(5章の考察と同様に、本章でも7Fとする)の共振成分の応答変位の標準偏差 $\sigma_x$ 、免震層および上部構造等価高さ付近の共振成分の応答速度の標準偏差 $\sigma_{\dot{x}}$ の比較を示す。塑性量が大きい $\alpha_y=0.02$ (表1)を除いては予測値はどのケースも概ね時刻歴応答解析結果とよく対応している。 $\alpha_y=0.02$ は ${}_bW_p$ および ${}_uW_D$ の予測精度が低いために、 $\sigma_x$ や $\sigma_{\dot{x}}$ も予測値に若干の誤差が出ている。

図13に図11,12で示した応答値の予測値と時刻歴応答解析結果の比を示す。 ${}_bW_p$ と ${}_uW_D$ に関しては、塑性量が大きいモデルになるほど誤差が大きくなるが、応答値に関しては $\mu_{max}$ が7程度以下であれば、応答誤差は10%以内であり、概ね良く対応している。

以上のように提案した予測手法により変動風力を受ける弾塑性系の共振成分の応答予測が可能であることを示した。とくに、塑性率が7程度以下(表1)の範囲ではエネルギー、応答について十分な予測精度を有していることを確認した。

6. 結論

本研究では、吉江らのエネルギーの釣合に基づく応答予測手法を、超高層免震建物を想定した多質点系に展開することを目的とし、多質点系超高層免震モデルを用いた応答解析によりその応答性状を分析した上で多質点系に展開するための検討をおこない、以下の結論を得た。

1. 多質点系免震構造モデルの応答解析により、免震層の応答変位に関しては、準静的成分と共振成分に分離して評価する必要があることを確認した。
2. 異なる振動モード形をもつ1質点系を用いた時刻歴応答解析により、免震建物のように著しくモード形が変化する建物であっても、風外力によるエネルギー入力にさほど大きな影響はないことを確認した。
3. 1質点系の応答予測法の多質点系への展開するため、上部構造の応答変位の標準偏差を、免震層の応答変位の標準偏差から予測する方法を提案し、その有効性を示した。
4. エネルギーの釣合に基づく多質点系弾塑性応答変位の予測手法を提案し、予測値を多質点系時刻歴応答解析結果と比較するこ

とにより、時刻歴応答解析を用いず超高層免震建物の弾塑性応答を評価することが可能であることを示した。さらに、実用的な応答予測手法を提案するため、今後は免震層の準静的成分の応答変位および免震層の応答変位の最大値の予測法に関して検討する必要があると考える。

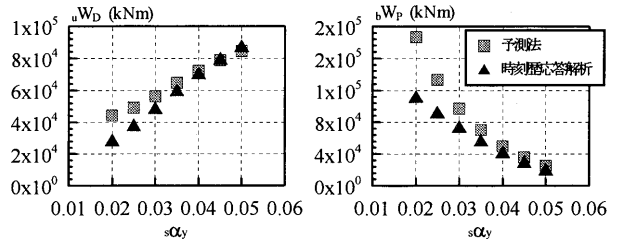


図11 エネルギーの予測値と時刻歴応答解析結果の比較

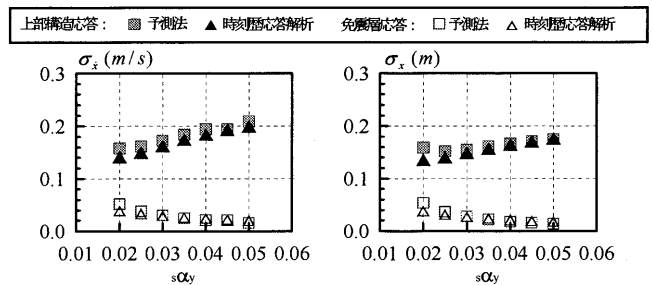


図12 応答の予測値と時刻歴応答解析結果の比較

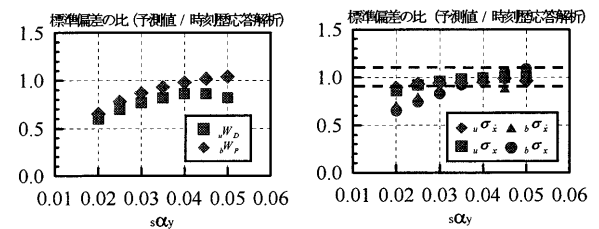


図13 予測値と時刻歴応答解析結果の比

謝辞

本研究を行うにあたり、東京工業大学笠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) 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
- 2) 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
- 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, 丸川比佐夫, 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

\*1 東京理科大学大学院理工学研究科建築学専攻  
 \*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 東京理科大学理工学部建築学科  
 \*5 東京理科大学理工学部建築学科 教授・博士(工学)