

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	2069 位相差に着目した履歴減衰・粘性減衰型制振部材併用時の動的特性に関する研究(構造)
Title	
著者(和文)	小川 薫, 佐藤 大樹, 北村春幸, 佐々木和彦, 宮崎充, 吉江慶祐, 石井正人, 藤田隆史
Authors	daiki sato, Haruyuki Kitamura, Kazuhiko Sasaki, Mitsuru MIYAZAKI, Takafumi FUJITA
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集 I, , No. 79,
Citation(English)	, , No. 79,
発行日 / Pub. date	2009, 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/110007453922">http://ci.nii.ac.jp/naid/110007453922</a>

位相差に着目した履歴減衰・粘性減衰型制振部材併用時の動的特性に関する研究

発表部門—振動

正会員 ○ 小川薫\*1 同 佐藤大樹\*1 同 北村春幸\*1  
同 佐々木和彦\*2 同 宮崎充\*2 同 吉江慶祐\*3  
同 石井正人\*3 同 藤田隆史\*4

履歴減衰型制振部材 粘性減衰型制振部材 位相差  
複素モーダルアナリシス 複素バネ 等価線形化

1. はじめに

建物に用いられるパッシブ型制振部材は、大きく分けてエネルギー吸収能力が変形に依存する履歴減衰型制振部材と振動数・速度に依存する粘性減衰型制振部材の2種類が存在する。既往の研究<sup>1)</sup>で、主架構の下層部に履歴減衰型制振部材(HD)を、上層部に粘性減衰型制振部材(VD)を併用配置することで、それぞれを個別で用いた場合よりも優れた応答低減効果を発揮することが証明された。応答低減効果を促す要因として、両制振部材の異なる性状(両制振部材が主架構に及ぼす変形—力位相差が異なるなど)から誘発される相乗効果が挙げられるが、不明確な点が多いのが現状である。

そこで、本研究では既往の研究<sup>1)</sup>における加振試験で集積された結果から現象をシミュレートするという意味も含め、同様の解析モデルで両制振部材の位相差が主架構に及ぼす影響を数的に確認することを目的とする。

2. 検証解析モデルおよび入力地震動

解析モデルは図1に示す10層純せん断型モデルを用いる。純せん断型モデルの全重量(=Mg)は39.2kNで各層3.92kNである。主架構剛性は既往の研究<sup>1)</sup>の10層フレーム試験体の諸元に基づき3段階で、制振部材は図2に示す理想分布で配置する。解析モデルに用いるHDの剛性 $k_{d,i}$ (i:階数)は主架構剛性 $k_{f,i}$ の10倍とし、VDは線形Kelvin-Voigtモデルでモデル化をおこなう。制振部材の減衰効果を明白に把握するため主架構のもつ構造減衰は無視する。検証対象モデルは3モデルでHDを全層配置したHHHモデル、全層VDを配置したVVVモデル、高さ方向で下層から6/4の割合で併用配置したHHVモデルとする。

入力地震動はHACHINOHE 1968 EWの位相特性をもつ、告示の速度応答スペクトルと相似形に $S_v=20\text{cm/s}$ になる模擬地震動を用いる。3モデルの速度応答スペクトルが一定範囲になるように告示波の時間軸を1/4に圧縮している(図3)。また最大加速度 $100\text{cm/s}^2$ 、振動数 $f=1.3, 5\text{Hz}$ と異なる正弦波3波でも同時に検証をおこなう。

HHH, HHV, VVVに投入する制振部材諸元を表1に示す。HHH 1層の降伏耐力 $F_{d,1}$ は、以下の式で示される。

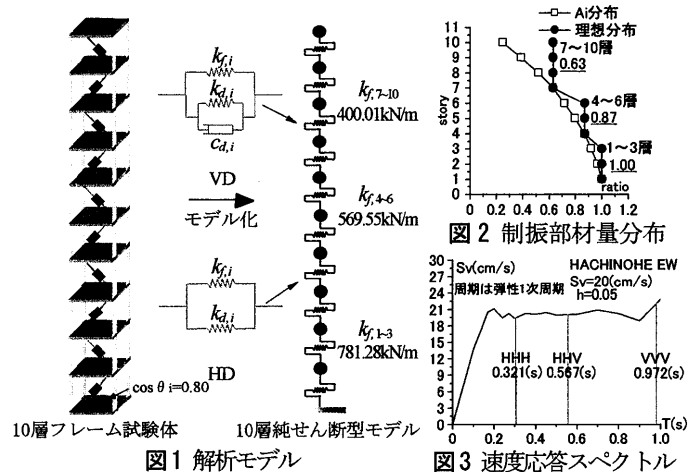


図1 解析モデル

図2 制振部材量分布

図3 速度応答スペクトル

表1 HHH・HHV・VVVモデル解析諸元

story	HHH		HHV		VVV	
	$F_{d,i}$ (kN)	$F_{d,i}$ (kN)	$c_{d,i}$ (kNs/m)	$c_{d,i}$ (kNs/m)	$F_{d,i}$ (kN)	$F_{d,i}$ (kN)
10	0.93				37.80	37.80
9	0.93				37.80	37.80
8	0.93				37.80	37.80
7	0.93				37.80	37.80
6	1.29	1.29			52.20	52.20
5	1.29	1.29			52.20	52.20
4	1.29	1.29			52.20	52.20
3	1.48	1.48			60.00	60.00
2	1.48	1.48			60.00	60.00
1	1.48	1.48			60.00	60.00

(注) HHHの諸元は(1)式の降伏耐力 $F_{d,i}$ で示し各層の耐力 $F_{d,i}$ は、 $F_{d,i}=F_{d,1} \times i$ 層制振部材量分布で決定する。(図2参照) VVVについても1層での制振部材量を基に決定する。

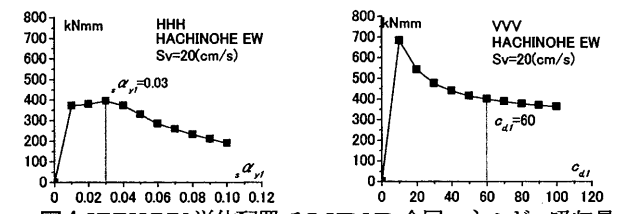


図4 HHH, VVV単体配置でのHD, VD全層エネルギー吸収量

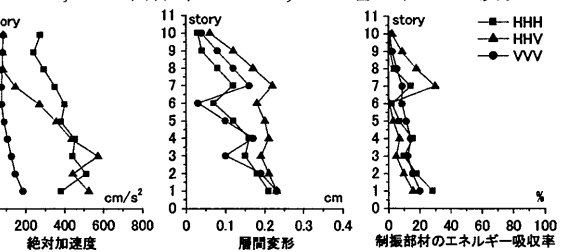


図5 高さ方向の応答比較 (HACHINOHE EW Sv=20cm/s)

$$F_{d,1} = \frac{Mg_s \alpha_{y,1}}{\cos \theta_d} \quad (1)$$

ここで、 $\cos \theta_d (=0.80)$ は10層フレーム試験体に設置される制振部材設置角度を表しており、せん断型モデルでも同様に考慮する。 $\alpha_{y,1}$ は1層の降伏せん断力係数であり、見かけ上のHD制振部材量と定義する。VDは1層の制振部材の粘性定数 $c_{d,1}$ を見かけ上の

制振部材量とする。各層は1層の制振部材量を基に制振部材分布に従い配置する。投入するHD,VDの部材量であるが、図4に示すHHH, VVV単体配置における制振部材全エネルギー吸収量が等しくなる点で評価し、HHHの制振部材全エネルギー吸収量が最も大きくなる1層HD部材量にあわせてVD部材量を決定した。図5は弾塑性応答解析における高さ方向の最大応答値をプロットしたものである。絶対加速度は特に中間層で、層間変形に関しては全層で併用における相乗効果が見られる。また、エネルギー吸収率では、上層部で吸収率の上昇が伺える。この結果を基にHHVは相乗効果が期待できるものと仮定し、以降の動的特性の検討につなげる。

### 3. モデル検証法およびHD,VDの等価線形化手法

#### 3.1 複素モーダルアナリシスによる検証

各モデルのカー変位相差が主架構に及ぼす影響を把握するのが今回の目的であるが、一般的に建造物の減衰は非比例であるので弾塑性応答解析では特性を把握できない。また、HDの動的特性の定式化が困難とされる。そこでHDを複素バネによる等価線形化をおこない、位相差が及ぼす影響について複素モーダルアナリシスにより検討していくこととする。

#### 3.2 HD,VDの等価線形化手法

HDの複素バネにおける等価線形化手法は、既往の研究<sup>2)</sup>から石丸らによって提案されている。図6-aに示す、定常履歴振動している場合の*i*層の挙動は、バイリニア係数 $p_i$ と塑性率 $\mu_i$ の大きさにより、(2-2),(2-3)式から係数 $C_i$ と $S_i$ が決定する。主架構と制振部材を含めたシステムの剛性 $k_{sys,i}(=k_{f,i}+k_{d,i})$ に $C_i$ と $S_i$ を乗じることにより、(2-4)式で示される等価剛性 $k_{eq,i}$ が複素数として表現できる。

$$\theta'_i = \cos^{-1} \left( 1 - \frac{2}{\mu_i} \right) \quad (2-1)$$

$$C_i = \frac{1}{\pi} (1 - p_i) \left( \theta'_i - \frac{1}{2} \sin 2\theta'_i \right) + p_i \quad (2-2)$$

$$S_i = -\frac{1}{\pi} (1 - p_i) \sin^2 \theta'_i \quad (2-3)$$

$$k_{eq,i} = k_{sys,i} (C_i - iS_i) \quad (2-4)$$

定常振動時の*i*層複素バネに生じる層せん断力 $Q_{ys,i}$ は、Fourier級数の第1項近似をおこなうことで以下のように求められる。

$$Q_{ys,i} = k_{sys,i} x_{max,i} \sqrt{C_i^2 + S_i^2} \cos(\omega_{eq} t - \phi_i) \quad (3)$$

$$\cos \phi_i = \frac{C_i}{\sqrt{C_i^2 + S_i^2}} \quad \sin \phi_i = \frac{S_i}{\sqrt{C_i^2 + S_i^2}} \quad \phi_i = \tan^{-1} \frac{S_i}{C_i}$$

$\omega_{eq}$ : 等価固有振動である。この $\phi_i$ がシステムにおける力と変形の位相差であり、 $\mu_i$ と $p_i$ に依存するものとなる。

次にVD付与の場合、*i*層の層せん断力 $Q_{ys,i}$ は、制振部材弾性部と主架構剛性によるシステムの剛性 $k'_{sys,i}$ と制振部材粘性部の粘性係数 $c_{d,i}$ を用いて(5)式で表すことができる。(図6-b)

$$Q_{ys,i} = k'_{sys,i} x_{max,i} \sqrt{(k'_{sys,i})^2 + (c_{d,i} \omega_{eq})^2} \cos(\omega_{eq} t - \phi_i) \quad (4)$$

$$\phi_i = \tan^{-1} \frac{c_{d,i} \omega_{eq}}{k'_{sys,i}}$$

(3)式、(4)式の兼ね合いからVD付与時におけるシステムの力と変形位相差は、 $c_{d,i}$ 、 $k'_{sys,i}$ および $\omega_{eq}$ に依存するものとなる。

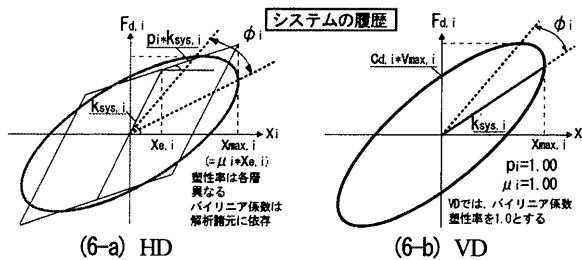


図6 HD,VDの位相と履歴

### 4. 複素モーダルアナリシスによる応答検証

#### 4.1 検証フロー作成

3節でHD,VD付与時の位相差の算出法を述べたが、算出された位相差が正しいかどうかの検証をおこなう必要がある。そこで、弾塑性応答解析上で求められた時刻歴と、1次から3次まで重ね合わせた複素モーダルアナリシスと比較・考察をおこなう。検証までの流れを表2に示す。

表2 検証フロー

建物のモデル化…解析諸元作成 $k_{sys,i} \cdot p_i$ を決定する
弾塑性応答解析…各層塑性率 $\mu_i$ の算出
得られた $\mu_i \cdot p_i$ から $C_i, S_i$ を決定 同時に各層位相差 $\phi_i$ を算出
建物モデルに $p_i$ と $\mu_i$ を考慮した複素固有値解析 相対変形・相対速度刺激関数を算出
算出結果を用いて次~3次までの 複素モーダルアナリシスにより応答値を推定
弾塑性応答解析、複素モーダルアナリシス により算出された各応答値の比較 →精度の検証
OK
複素モーダルアナリシスによる応答値を精解とし モード分離をおこない併用効果の検証

#### 4.2 相対変形および相対速度の算出法

各層の粘性定数 $c_{d,i}$ および複素バネによる影響から、一般的に変形および速度の刺激関数は複素数で表される。*i*層*j*次の相対速度を $v_j$ および相対変形を $x_j$ とすると、

$$j v_j = (a_j + i b_j) q_j^v + (c_j + i d_j) q_j^x \quad (5-1)$$

$$j x_j = (e_j + i f_j) q_j^v + (g_j + i h_j) q_j^x \quad (5-2)$$

で各次の相対速度および変位の算出が可能となる。なお、 $q_j^v, q_j^x$ は*j*次の相対速度・相対変形の基準座標である。また、ここで

$$q_j^v = i_j \omega_{eq} \cdot q_j^x, \quad q_j^x = \frac{q_j^v}{i_j \omega_{eq}} \quad (6)$$

の関係から、 $q_j^v$  または  $q_j^x$  を消去すると、(5-1)、(5-2)式は、

$${}_j v_i = \left\{ \left( {}_j a_i + \frac{{}_j d_i}{{}_j \omega_{eq}} \right) + i \left( {}_j b_i - \frac{{}_j c_i}{{}_j \omega_{eq}} \right) \right\} q_j^v \quad (7-1)$$

$${}_j x_i = \left\{ ({}_j g_i - {}_j \omega_{eq} \cdot {}_j f_i) + i ({}_j \omega_{eq} \cdot e_i + {}_j h_i) \right\} q_j^x \quad (7-2)$$

( ${}_j \omega_{eq}$ :  $j$  次の等価固有振動数)と虚部を含む形となり、 $j$  次での位相差を求めることができる。

#### 4.2 層せん断力の算出法

各層に生じる  $j$  次のシステム層せん断力  ${}_j Q_{sys,i}$  は(2-4)式を用いて、

$${}_j Q_{sys,i} = k_{eq,i} ({}_j x_i - {}_j x_{i-1}) + c_{d,i} ({}_j v_i - {}_j v_{i-1}) \quad (8-1)$$

で表され、(5-1)、(5-2)式を代入すると、

$${}_j Q_{sys,i} = \left\{ (c_{d,i} \cdot {}_j \beta_i + k_{sys,i} \cdot {}_j \beta_i) + i {}_j \omega_{eq} (c_{d,i} \cdot {}_j \alpha_i + k_{sys,i} \cdot {}_j \alpha_i) \right\} q_j^x \quad (8-2)$$

$${}_j \alpha_i = {}_j A_i + \frac{{}_j D_i'}{{}_j \omega_{eq}}, \quad {}_j \beta_i = {}_j C_i' - {}_j \omega_{eq} \cdot {}_j B_i'$$

$${}_j \alpha_i' = C_i \cdot E_i' + \frac{C_i \cdot H_i'}{{}_j \omega_{eq}} + S_i \cdot F_i' - \frac{S_i \cdot G_i'}{{}_j \omega_{eq}}$$

$${}_j \beta_i' = -{}_j \omega_{eq} \cdot C_i \cdot F_i' + C_i \cdot G_i' + {}_j \omega_{eq} \cdot S_i \cdot E_i' + S_i \cdot H_i'$$

$${}_j A_i' = {}_j a_i - {}_j a_{i-1}, \quad {}_j B_i' = {}_j b_i - {}_j b_{i-1}, \quad {}_j C_i' = {}_j c_i - {}_j c_{i-1}$$

$${}_j D_i' = {}_j d_i - {}_j d_{i-1}, \quad {}_j E_i' = {}_j e_i - {}_j e_{i-1}, \quad {}_j F_i' = {}_j f_i - {}_j f_{i-1}$$

$${}_j G_i' = {}_j g_i - {}_j g_{i-1}, \quad {}_j H_i' = {}_j h_i - {}_j h_{i-1}$$

と、算出することができる。

各層に生じる  $j$  次の主架構層せん断力  ${}_j Q_{f,i}$  は(7-2)式を用いて、

$${}_j Q_{f,i} = k_{f,i} ({}_j x_i - {}_j x_{i-1}) q_j^x$$

$${}_j Q_{f,i} = k_{f,i} \left\{ ({}_j G_i' - {}_j \omega_{eq} \cdot {}_j F_i') + i ({}_j \omega_{eq} \cdot E_i' + {}_j H_i') \right\} q_j^x \quad (8-3)$$

よって制振部材が負担する層せん断力  ${}_j Q_{d,i}$  は(8-2)、(8-3)式から

$${}_j Q_{d,i} = {}_j Q_{sys,i} - {}_j Q_{f,i} \quad (8-4)$$

と算定が可能であり、同時にそれぞれの位相差も算出できる。

#### 4.3 弾塑性応答解析と複素モーダルアナリシスの精度

図7に  $f=3.0\text{Hz}$  の正弦波加振時の弾塑性応答解析と複素モーダルアナリシスによる相対変形および層せん断力時刻歴波形を記載する。各波形で最大値に若干の誤差が生じるものの、ゼロクロス点で一致しており、複素モーダルアナリシスによって評価できると考えられる。一例として HHV の波形のみ挙げているが HHH, VVV でも時刻歴波形は概ね精度の良い一致を示した。次に、両解析手法の最大応答値のプロットを図8に示す。応答値では少なからず誤差が見受けられるものの全体の傾向は捉えられていると思われる。以上の結果から複素モーダルアナリシスを精解と仮定し、以後の検証につなげる。

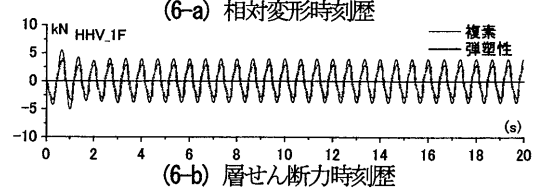
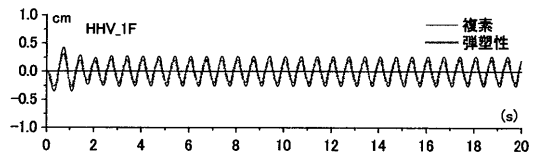


図7 弾塑性応答解析と複素モーダルアナリシスの精度 ( $f=3\text{Hz}$ )

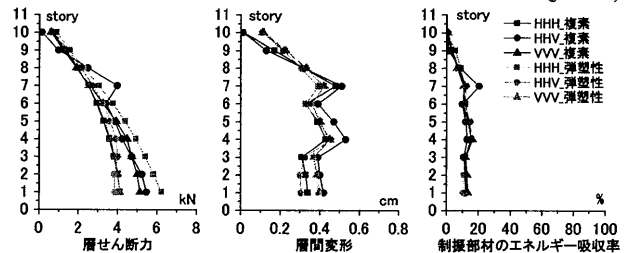


図8 高さ方向の応答値および精度の検証 ( $f=3\text{Hz}$ )

### 5. 位相差が主架構に及ぼす影響

#### 5.1 主架構と制振部材に生じる位相差

主架構と制振部材に生じる各階の変形一力位相差を図9に、制振部材の負担率を図10に示す。主架構と制振部材に位相差が生じており同時に最大応答が生じないことが伺える。制振部材の負担率とは、せん断力全体に占める制振部材が負担するせん断力の割合を表したものであるが、VVVでは全層で負担率がほぼ一定、HHH, HHVでは制振部材の位相差が低減するに従い、負担率が上昇する傾向にある。また、VVVの下層部では位相差の上昇で制振部材負担率が減少する傾向も見受けられる。これより、位相差の変化が制振部材の低減効果に影響を及ぼすことが推測される。

#### 5.2 ガウス平面上での刺激関数の特性

図11は位相差による刺激関数の変化を視覚化するため、ガウス平面上で表現したものである。Re軸は実部を、Im軸は虚部を示しており、傾きが位相差を示している。図中の線分は刺激関数の大きさを表現しており、(8-2)式のシステム層せん断力の刺激関数の影響を絶対値を半径とする円で表した。今回、反時計回りに時間の推移を表しており、+方向に位相角が生じるほど先に最大値を迎える事を意味する。HHHでは、主架構に生じる刺激関数がRe軸上に存在しており制振部材は主架構に比べて位相が進んでいる事が分かる。システムの刺激関数は主架構と制振部材の実部と虚部のベクトルの和で表現できる。よってシステム全体ではRe軸上での刺激関数が増大し、制振部材に生じるIm軸上での刺激関数が付与される形となる。VVVも同様に主架構の刺激関数はRe軸上に存在し、VDに粘弾性型の部材を配置しているため、VD弾性部の刺激関数が位相差をもって生じていることもわかる。また粘性部の刺激関数が主架

構に対し、約  $\pi/2$  の位相差をもって Im 軸上に生じている。したがって粘性部の影響で位相差が上昇し、Im 軸に刺激関数が増減する傾向に向かう。

### 5.3 1次と2次の刺激関数の変化が主架構に及ぼす効果検証

図12は、主架構の変位項 ( $kx$ )、制振部材の変位項 ( $kx$ )、制振部材の速度項 ( $cv$ ) に作用する刺激関数をそれぞれ Re 軸と Im 軸上に図示したものである。主架構のせん断力は変位項のみに依存するので、刺激関数は Re 軸上に存在する。制振部材の変位項は Im 軸上で刺激関数が大きく生じており HHV の下層部での刺激関数の向上が読み取れる。Re 軸では HHH が10層で若干増加しているが、刺激関数の大きさはどのモデルとも概ね等しい。最後に制振部材速度項の刺激関数は Re 軸には存在せず、Im 軸上のみ存在している。

(8-2)式および(6)式から、変位の基準座標にかかる Im 軸の刺激関数は速度の基準座標の刺激関数に変換することにより、速度の基準座標に対する刺激関数となるので、Im 軸の刺激関数は見かけ上の粘性定数に近いものと考えられる。よって  $f=3\text{Hz}$  正弦波加振時の場合、制振部材における Im 軸上の刺激関数が全体的に大きい VVV がシステム全体のせん断力に対し制振部材が有効に作用するモデルになっており、HHV7~10層で VD を併用した際、主架構と制振部材の位相差が低減し、粘性体が速度に対して有効に作用するため制振部材の負担率が増大したと思われる。HHH では7~10層で位相差の低減ともなう、制振部材 Re 軸の変位項の上昇が、制振部材負担率の上昇につながると予測される。

最後に2次モードの影響であるが、特に制振部材速度項の Im 軸の刺激関数の影響が他と項目と比べて、顕著に生じている。HHV の7層における刺激関数が HHH, VVV よりも大きく制振部材のエネルギー吸収量の増加を促している可能性が示唆される。図7でも制振部材のエネルギー吸収率が HHV 7層でもっとも吸収率が高まっているのがわかる。HD と VD を併用させることにより1~6層で HHH より1.18倍、7~10層で VVV よりも1.15倍のエネルギー吸収能力の増加が見込まれた。

## 6. 結論

本研究により得られた知見を以下に示す。

- 1) HD・VDを複素バネによる等価線形化から、1-3次までの複素モーダルアナリシスによって弾塑性応答解析上での応答をシミュレートすることが可能である。
- 2) 主架構と制振部材の位相差が小さくなるほど変位項に対して、制振部材が有効に作用し、速度項に負担する割合が増大する程エネルギー吸収率は大きくなると考えられる。

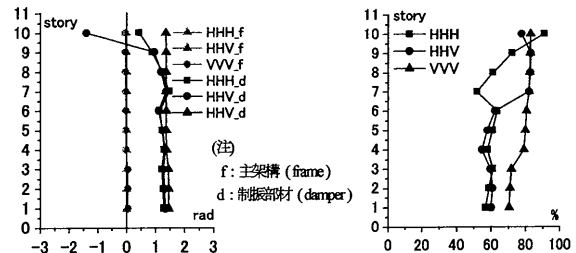


図9 変形力位相差 ( $f=3\text{Hz}$ )

図10 制振部材の負担率 ( $f=3\text{Hz}$ )

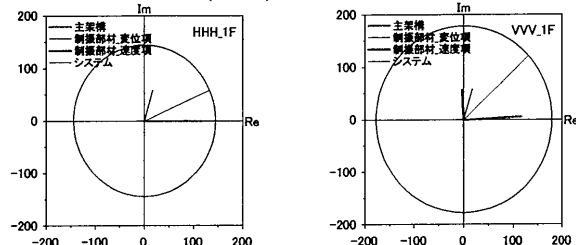


図11 ガウス平面上での刺激関数 (HHH, VVV)

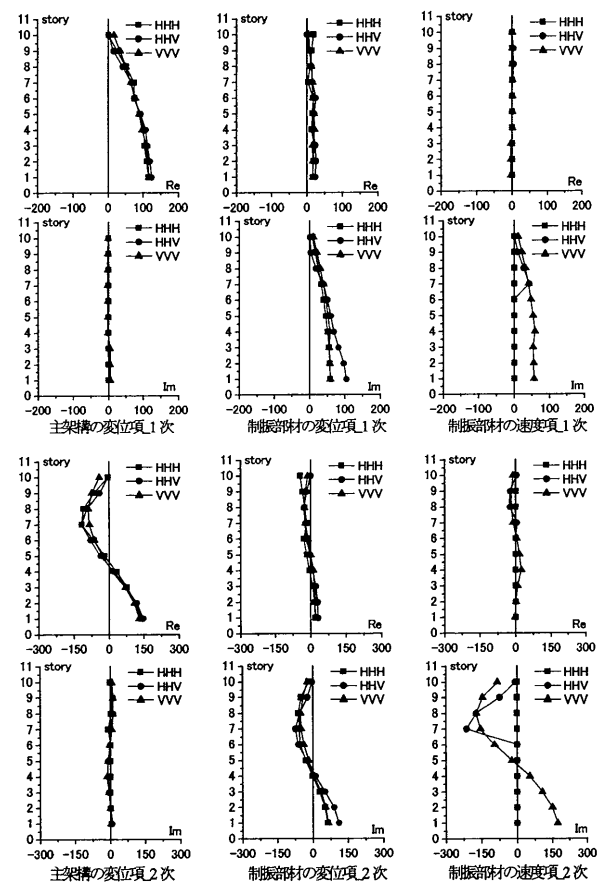


図12 1次および2次のせん断力刺激関数 (Re 軸・Im 軸)

## 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および株式会社 i2S2、日本大学理工学部地震研究室作成の複素モーダル\_i2S2 を使用いたしました。ここに記して感謝の意を示します。

## 参考文献

- 1) 石田琢志他：履歴減衰型・粘性減衰型制振部材を併用配置した10層フレームの応答特性(その1~その3) 日本建築学会大会学術講演梗概集 pp.545-550, 2008.9
- 2) 石丸辰治他：パッシブ型制振構造物の等価線形化による応答解析法 日本建築学会構造系論文集 第542号 91-98, 2001年4月
- 3) 石丸辰治：応答性能に基づく「対震設計」入門、彰国社、2004

- \*1 東京理科大学      \*2 オイレス工業(株)  
\*3 (株)日建設      \*4 東京大学生産技術研究所