

論文 付加構造物の動的特性を利用したセミアクティブ制震によるRC構造物の地震応答低減効果の検討

本村 一成^{*1}・塩原 等^{*2}

要旨 : 付加構造物の動的特性を利用したセミアクティブ制震を弾性及び弾塑性 1 質点系モデルに適用し, 地震応答解析を行った結果, 相対変位応答に関しては応答低減効果があった。RC 建物を想定とした 7 質点系弾塑性モデルにおいて, 可変ダンパの設置階をパラメータとした地震応答解析を行った結果, 可変ダンパ設置階より下の階では応答低減効果があったが, 設置階以上の階では逆に応答が増大する場合が見られた。可変ダンパ設置位置については更なる検討が必要である。

キーワード : セミアクティブ制震, 可変ダンパ, 制御則, 地震応答解析

1. はじめに

鉄筋コンクリート (以下, RC) 造建物にエネルギー吸収機構として, 制震構造を適用する例が増えてきている。近年, 制震構造の中でもセミアクティブ制震に関する研究が盛んに行われている。多岐に渡るセミアクティブ制震の中に, Iwan W.D., 丹羽により提案された付加構造物の動的特性を利用したセミアクティブ制震がある。Iwan は基本的な制御手法の概念を¹⁾, 丹羽は具体的な制御則や制御装置設置方法を²⁾提案した。

本研究では, まず, 付加構造物の動的特性を利用したセミアクティブ制震を弾性及び弾塑性 1 質点系モデルに適用し, 地震応答解析を行う。その際, 付加構造物を(1)連結しない場合, (2)剛連結する場合, (3)最適な減衰係数を有するダンパで連結したパッシブ制震を適用した場合, との相対変位応答及び絶対加速度応答における応

答低減効果の比較・検討を行う。次に, 7 階建 RC 造建物を想定した弾塑性多質点系モデルに拡張し, 可変ダンパの設置位置による地震応答低減効果の違いについて検討を行う。

2. 制御手法概要

付加構造物の動的特性を利用したセミアクティブ制御手法は, 主体構造物の脇に付加構造物を設け, 可変ダンパにより双方を連結し, 可変ダンパの減衰係数 $C_d(t)$ を C_{max} / C_{min} に切替えることにより, 主体構造物の振動エネルギーを付加構造物に伝達し, 主体構造物の応答を低減するという制御手法である。制御手法概要を図-1に示す。可変ダンパ減衰係数 $C_d(t)$ の切替えは, 初期状態 (図-1(a)) では, 最大減衰係数 C_{max} に, 主体構造物が最大変形に達した時 (図-1(b)), 最小減衰係数 C_{min} に, 主体構造物と付加構

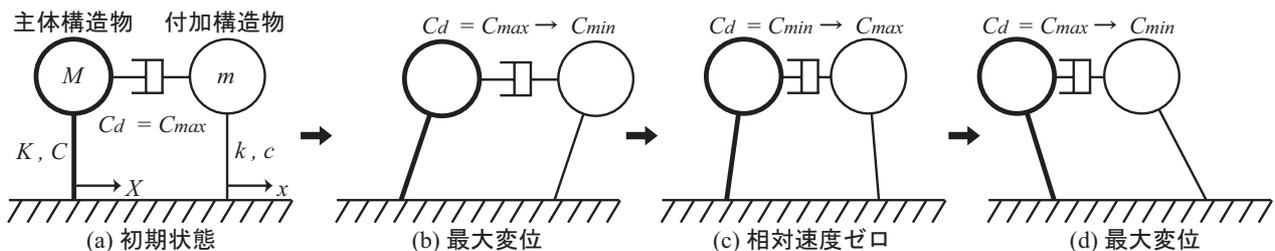


図-1 制御手法概要

*1 九州電力株式会社 修士 (工学) (正会員)

*2 東京大学工学部建築学科 助教授 工博 (正会員)

造物の相対速度がゼロになった時 (図-1(c)), 最大減衰係数 C_{max} に切替えるものである。図-1(a)~(d)を繰り返すことにより, 図-2に示す, 可変ダンパ復元力特性が得られる。運動方程式と可変ダンパ減衰係数 $C_d(t)$ の切替え制御則³⁾を式(1)~(3)に示す。

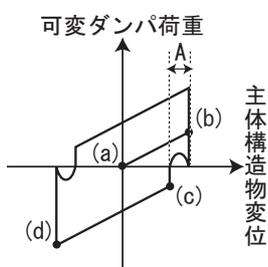
運動方程式

$$\begin{cases} M\ddot{X} + C\dot{X} + KX + F = -M\ddot{y} \\ F = C_d(t)(\dot{X} - \dot{x}) \end{cases} \quad (1)$$

\ddot{y} : 入力加速度

X, \dot{X}, \ddot{X} : 主体構造物変位, 速度, 加速度

x, \dot{x}, \ddot{x} : 付加構造物変位, 速度, 加速度



切替え制御則

a) 最大減衰係数 C_{max}

$$\dot{X} \cdot F > 0 \quad (2)$$

b) 最小減衰係数 C_{min}

$$\dot{X} \cdot F \leq 0 \quad (3)$$

図-2 復元力特性

3. 1 質点系地震応答解析

3.1 解析モデル

解析モデルは図-3に示す, 主体構造物, 付加構造物それぞれ質量 M, m , 剛性 K, k , 構造物内粘性減衰係数 $C (H=2\%), c (h=2\%)$ からなる1質点系モデルとし, 主体構造物と付加構造物を可変ダンパ $C_d(t)$ で連結するものとした。

解析モデルは, (1)連結しない場合(以下, FA: 主体構造物 付加構造物

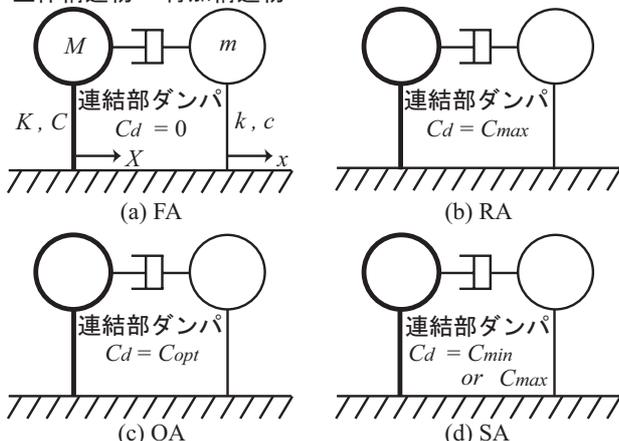


図-3 解析モデル

Free Attachment), (2)剛連結する場合(RA: Rigid Attachment), (3)最適減衰係数 C_{opt} を有するダンパで連結する場合(OA: Optimal Attachment), (4)付加構造物の動的特性を利用したセミアクティブ制震を行う場合(SA: Semi-active Attachment)の計4モデルとする。これらのモデルは, 表-1のように連結部ダンパの減衰係数 $C_d(t)$ を調節することにより, 実現するものとする。RAは, 連結部ダンパ減衰係数 $C_d(t)$ を最大減衰係数 C_{max} と大きくすることにより, 実質的に剛連結の状態となるように設定した。

表-1 連結部ダンパ減衰係数

	FA	RA	OA	SA
$C_d(t)$	0	C_{max}	C_{opt}	C_{max} or C_{min}

3.2 弾性地震応答解析

主体構造物固有周期による応答低減効果を検討するため, 神戸海洋気象台(1995 NS)と八戸港湾(1968 EW)の強震記録を最大速度 25[kine]に基準化し, 地震応答解析を行った。

主体構造物は, 質量 M を 1[ton]とし, 固有周期を 0.5~3.0[sec]まで変化させた。

付加構造物は, 剛性比 α (=付加構造物剛性 k / 主体構造物剛性 K), 振動数比 β (=付加構造物振動数 f / 主体構造物振動数 F)を与えることにより設定する。本解析では, 剛性比 α を 0.125, 0.25, 0.5 と幅を持たせ, 振動数比 β を 3 とした。

可変ダンパについては, 最適減衰係数 C_{opt} は付加構造物質量 m は無視できるもの($M \gg m$)とし, 文献⁴⁾に従い, 式(4)より算出し, 最大減衰係数 C_{max} と最小減衰係数 C_{min} はそれぞれ最適減衰係数 C_{opt} の 100 倍, 0.1 倍とした。また, 制御コンピュータがダンパ減衰係数切替え指令を出してから実際にダンパ減衰係数の切替えが完了するまでの時間遅れ T_d は 0.05[sec]とし, 図-4のよ

$$C_{opt} = \frac{k}{\omega} \sqrt{\frac{2 + \alpha}{2(1 + \alpha)^2}} \quad (4)$$

$\omega (= \sqrt{K/M})$: 主体構造物固有角振動数

うに、時間遅れ T_d 内では、ダンパ減衰係数 $C_d(t)$ は線形に変化するものと仮定した。

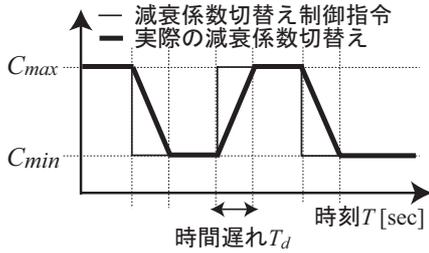


図-4 時間遅れ定義

図-5に、主体構造物固有周期 1.0[sec]、剛性比 $\alpha = 0.25$ 、神戸海洋気象台(1995 NS)入力時の相対変位応答時刻歴を、図-6に、ダンパ復元力特性を示す。また、図-7に相対変位応答スペクトルと絶対加速度応答スペクトルを示す。

相対変位応答時刻歴より、付加構造物相対変位は主体構造物相対変位の約2~3倍となって

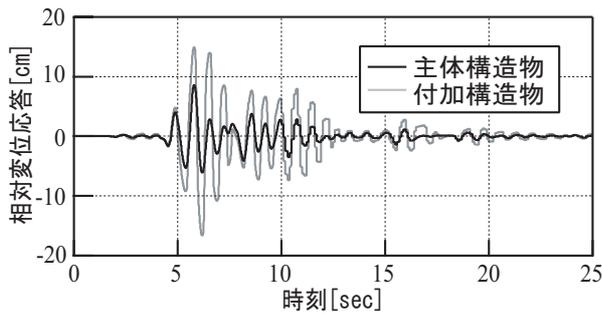


図-5 相対変位応答時刻歴

おり、主体構造物から付加構造物へ振動エネルギーが伝達されているのが分かる。また、ダンパ復元力特性より、設定した制御則通りのダンパ減衰係数 $C_d(t)$ の制御が行われており、想定した復元力特性が得られた。

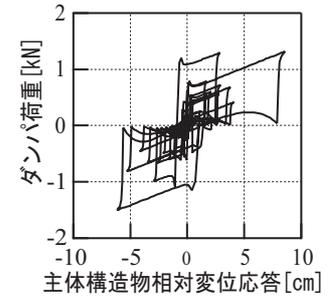


図-6 ダンパ復元力特性

相対変位応答スペクトルについては、RAでは、FAに比べてスペクトルが長周期側にずれており、FAにおいてスペクトルが単調増加する短周期領域では応答低減効果があり、OAでは、FA及びRAと比べてどの周期領域でも応答低減効果が見られた。さらに、SAでは、OAよりも応答低減効果があり、特にFAにおいて応答値が大きくなる周期でその傾向が顕著に見られた。また、剛性比 α が大きくなるにつれ、OA及びSAで応答低減効果が大きくなった。また、絶対加速度応答スペクトルについては、OA、SAはFA、RAに比べて、絶対加速度応答が小さくなる傾向にあり、OAとSAとの比較では、剛性比 α 及び周期領域により、SAよりOAが絶対加速度応答が小さくなる場合が見られた。

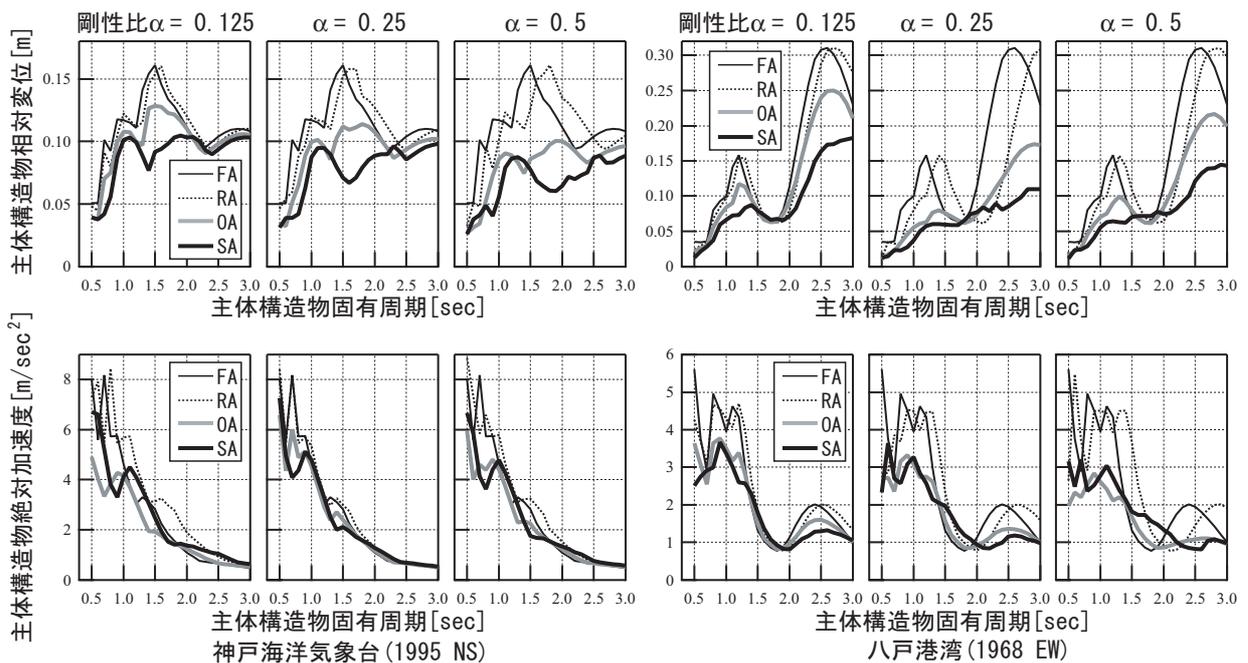


図-7 応答スペクトル

3.3 弾塑性地震応答解析

構造物の塑性化による制御効果の変化を検討するため、前記の 2 つの入力地震波の基準速度を 1~50[kine]と変化させて弾塑性地震応答解析を行った。

主体構造物は RC 造建物を想定し、復元力特性は図-8 に示す Tri-linear 型とした。降伏耐力 F_y は構造物重量の 0.3 倍、ひび割れ点耐力 F_c は降伏耐力 F_y の 1/3 倍、降伏点と原点を結ぶ剛性 K_e は初期剛性 K_c の 1/4 倍、降伏後の剛性 K_p は初期剛性 K_c の 0.01 倍とした。履歴モデルには Takeda モデルを用い、構造物内粘性減衰定数 H は瞬間剛性比例型の 2% とした。初期固有周期 T_c は 0.5[sec] とした。

付加構造物は鉄骨造を想定し、剛性 k は主体構造物降伏点と原点を結ぶ剛性 K_e に対して剛性比 $\alpha=0.5$ 、固有周期 t は主体構造物固有周期

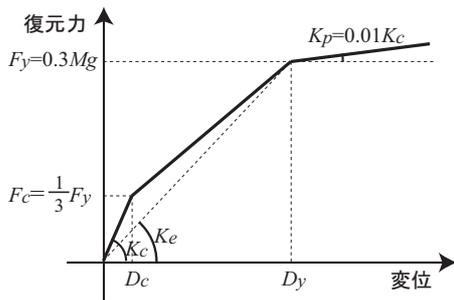


図-8 主体構造物復元力特性

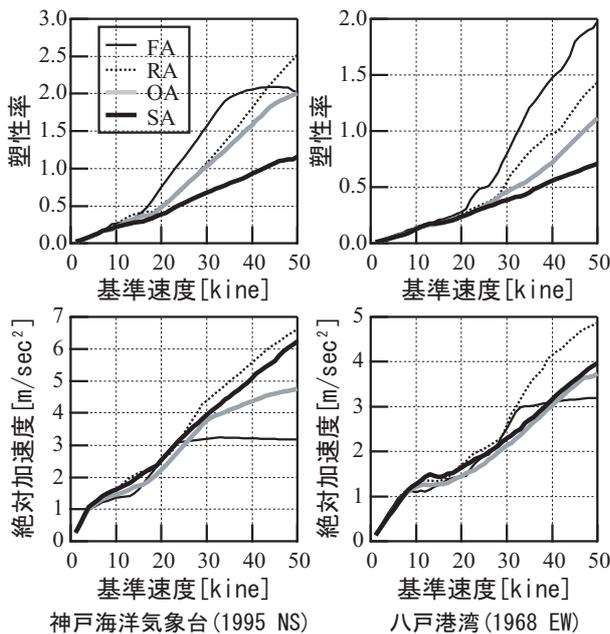


図-9 塑性率と絶対加速度の変化

$T_c(2\pi\sqrt{M/K_e})$ に対して、振動数比 $\beta=3$ として与え、弾性範囲におさまるものとした。

連結部ダンパ最適減衰係数 C_{opt} は、主体構造物降伏点と原点を結ぶ剛性 K_e に対して算定し、最大及び最小減衰係数 C_{max} , C_{min} は前節同様に設定した。

基準速度による塑性率と絶対加速度応答の変化を図-9 に示す。塑性率については、基準速度が 15[kine]より小さい場合はあまり違いが見られないが、基準速度の増加に伴い、FA, RA, OA, SA の順で小さくなっており、SA は 50[kine] 入力時でも塑性率 1 程度であった。OA は主体構造物降伏点と原点を結ぶ剛性 K_e に対して最適な減衰係数 C_{opt} を設定したため、基準速度が 15[kine]以下では応答低減効果が見られなかったと考えられる。SA は図-10 のダンパ復元力特性

を見るとわかるように、基準速度が増加するにつれ、等価剛性が高くなり、また履歴面積が増加していることが分かる。これは、主体構造物の剛性 K が低下するにつれ、付加構造物振動数 f に対して主体構造物振動数 F が小さくなったため、図-2 に記す記号 A が小さくなり、ダンパのエネルギー吸収量が増加したためと考えられる。よって、OA 同様基準速度が 15[kine]以下では応答低減効果が見られなかったと考えられる。絶対加速度応答では、RA, SA, OA, FA の

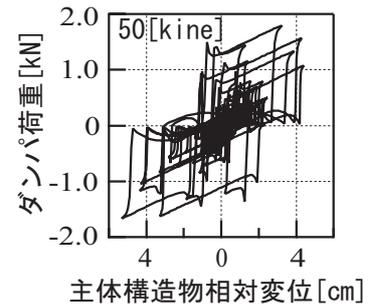
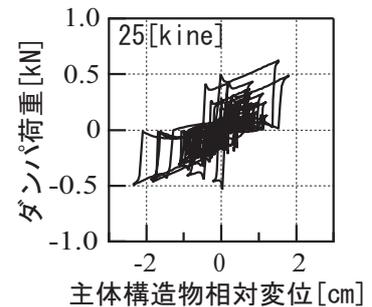
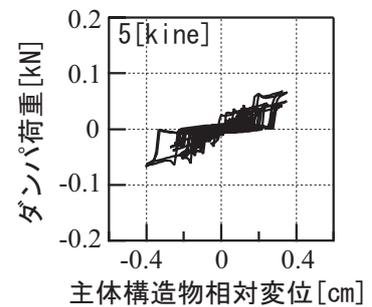


図-10 ダンパ復元力特性

順で小さくなった。これは、付加系の等価剛性が RA, SA, OA の順で低くなっているためと考えられる。

4. 多質点系地震応答解析

より現実的な地震応答低減効果を検討するため、7層 RC 造建物を想定した弾塑性多質点系地震応答解析を行った。RC 造主体構造物は、各層床面積 256[m²]、単位質量 1.2[ton/m²]とし、各層質量は等質量の 307.2[ton]とした。各層降伏荷重は、ベースシア係数 0.2 の Ai 分布作用時の層せん断力とし、各層降伏変形角は 1/200 (階高:4m)とした。各層の復元力特性は 3.3 節と同様に定めた。各層の設定値を表-2に示す。なお、弾性1次固有周期 T_c は 0.64[sec]となった。

付加構造物特性は、固有周期 t は 0.2[sec]、質量 m は 200[ton]の鉄骨造建物を想定し、弾性範囲に収まるものとした。

可変ダンパ特性は、既往の実験結果^{5),6)}に基づき、最大減衰係数 C_{max} が 500[kNsec/mm]、最小減衰係数 C_{min} が 1[kNsec/mm]の可変ダンパを2台設置するものとした。設置位置については、図-11に示す、Type1:最上層、Type2:中間層、Type3:最下層、の3タイプの設置方法で解析を行った。付加構造物の高さが変化すると、周期・剛性・質量も変化するが、本研究では、解析パラメータを減らすため、付加構造物特性は、Type 1~3 まで固定とした。入力地震波は、前記の2波を用いた。

図-12に、Type1~3の各層塑性率を示す。ま

表-2 各層設定値

層	K_c [kN/m]	F_c [kN]	F_y [kN]
7	246382.5	410.6	1231.9
6	400389.0	667.3	2001.9
5	527184.3	878.6	2635.9
4	632958.2	1054.9	3164.8
3	720108.4	1200.2	3600.5
2	789864.4	1316.4	3949.3
1	842956.8	1404.9	4214.8

た、ダンパ減衰係数 $C_d(t)=0$ の場合(FA)も示す。

Type1 では、5[kine]に基準化した八戸港湾入力以外において、最上層の塑性率が FA よりも大きくなっており、基準速度が増加するにつれ、最下層の塑性率も FA より大きくなったが、その他の層では応答低減効果が見られた。Type2 では、可変ダンパを設置した層以下の層では、塑性率が FA よりも小さくなっており、応答低減効果が見られた。Type3 では、可変ダンパを設置した最下層のみ、FA より塑性率が小さくなる傾向が見られ、応答低減効果が見られた。

Type2, 3 では、可変ダンパ及び付加構造物からなる付加系の影響で設置層に大きな応答加速度が生じるため、設置層より上層が大きく揺れたと考えられる。言い換えると、設置層以下の層の振動エネルギーが付加構造物だけでなく、上層にも伝達されたと考えられる。Type 1 では、Type2, 3 のように上層に設置層以下の振動エネルギーを伝達できないため、最も層剛性の低い最上層に損傷が集まったと考えられる。さらに、基準速度が大きくなると、下層へとエネルギーが伝達され、辿り着く先の最下層に損傷が集ま

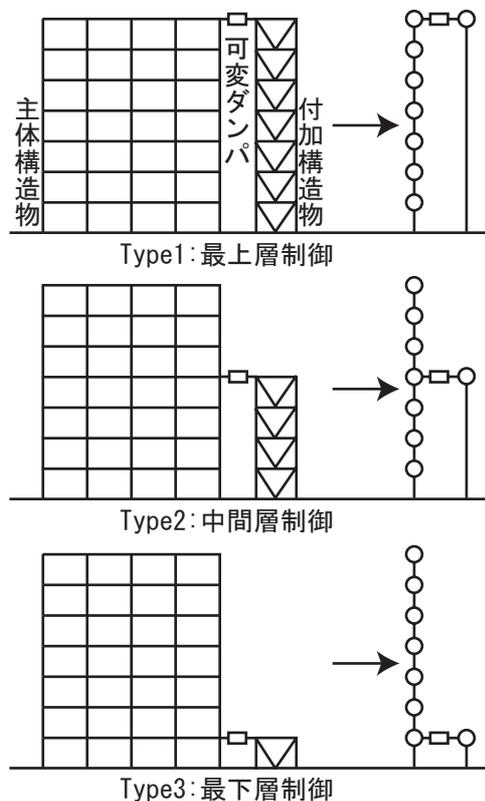


図-11 多質点系解析モデル

ったと考えられる。

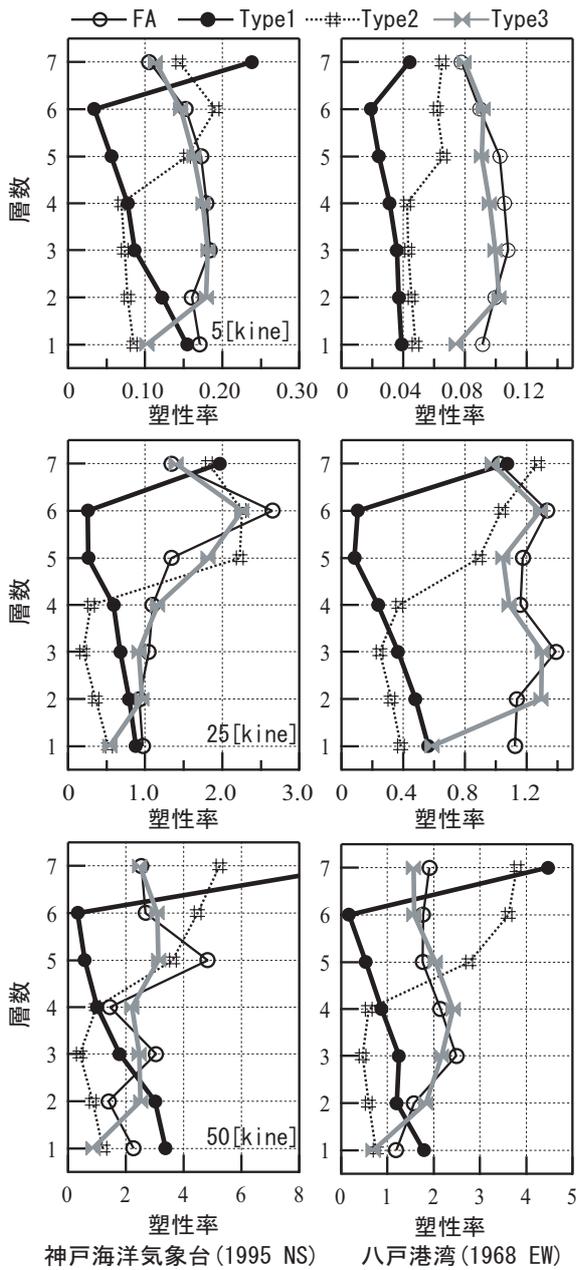


図-12 各層塑性率

5. 結論

弾性及び弾塑性 1 質点系モデルに付加構造物の動的特性を利用したセミアクティブ制震を適用し、地震応答解析を行い、付加構造物を(a)連結しない場合、(b)剛連結する場合、(c)最適な減衰係数を有するダンパで連結したパッシブ制震を適用した場合と比較した結果、

(1) 弾性 1 質点系地震応答解析において、相対変位応答は(a)~(c)に比べて、優位性が確認されたが、絶対加速度応答は(c)より大きくなる

場合が見られた。

(2) 弾塑性 1 質点系地震応答解析において、塑性率は基準速度が小さい場合、(a)~(c)との違いは見られなかったが、基準速度が大きくなるにつれ、優位性が確認された。絶対加速度応答は(c)より大きくなる傾向が見られた。

7層 RC 造建物を対象として、可変ダンパの設置位置を最上層、中間層、最下層と変えて、弾塑性多質点系地震応答解析を行った結果、中間層及び最下層に設置した場合は、設置層以下の階で応答低減効果が見られたが、最上層に設置した場合は、入力地震波の基準速度が大きくなるにつれ、最上層及び最下層で逆に応答が増大した。可変ダンパの設置位置について、更なる検討が必要である。

謝辞

本論文の作成にあたり、鹿島建設(株)倉田成人氏、東京大学楠原文雄氏、高橋典之氏、田尻清太郎氏に研究全般において御助言を戴きました。感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Iwan W.D. and L.J.Wang : A Comparison of Control Algorithms for Active Interaction Control of Civil Structures, Proc , 2WCSC , vol.1 , pp.1559-1566 , 1998.
- 2) 丹羽直幹: エネルギーを極大化するセミアクティブ制震, 日本建築学会構造系論文集第 555 号, pp61-68, 2002.5.
- 3) 本村一成, 塩原等, 楠原文雄: 付加構造物の動的特性を利用したセミアクティブ制震の地震応答低減効果, 日本地震工学会大会-2004 梗概集, pp280-281, 2004.1
- 4) 栗野治彦: ON/OFF 型セミアクティブダンパの振動制御能力に関する基礎的考察, 日本建築学会構造系論文集, 第 564 号, PP63-7, 2003.2
- 5) 丹羽 直幹 他: セミアクティブダンパシステムの実建物への適用 (その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 21364, 1998.9.
- 6) 水野 孝之 他: 200tf 可変オイルダンパの開発と性能確認実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 21367, 1998.9.