

論文 エネルギー伝達を目的としたセミアクティブ制震による地震応答低減効果

本村 一成^{*1}・塩原 等^{*2}・楠原 文雄^{*3}・田尻 清太郎^{*4}

要旨：地震時の主体構造物の振動エネルギーを付加構造物へ伝達することを目的としたセミアクティブ制震を適用した弾性地震応答解析を行った結果、主体構造物へ入力された地震エネルギーの 8 割が付加系へ伝達されており、そのうち 1 割が付加構造物へ伝達され、結果的に付加構造物内粘性減衰により消費されていた。RC 造建物を想定した弾塑性地震応答解析を行った結果、入力地震動が大きく、主体構造物が塑性化する場合、入力地震エネルギーに対する付加構造物へ伝達されるエネルギーの割合は大きくなった。主体構造物の入力地震エネルギーに対する付加系へ伝達されたエネルギーの割合は応答低減効果と関係があった。

キーワード：セミアクティブ制震、可変ダンパ、模擬地震動、地震応答解析

1. はじめに

鉄筋コンクリート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、セミアクティブ制震に関する研究が盛んに行われており、筆者らは、制御対象である主体構造物の振動エネルギーを異なる別の振動系である付加構造物へエネルギーを伝達させることにより、主体構造物の地震応答を低減させるセミアクティブ制震¹⁾²⁾の研究を行ってきた。

本研究では、弾性 1 質点系モデル及び RC 造建物を想定した弾塑性 1 質点系モデルに本セミアクティブ制震を適用し、模擬地震動による地震応答解析を行う。その際、地震応答低減効果について各部の消費エネルギーに着目した検討を行う。また、弾塑性地震応答解析においては、主体構造物の塑性化、各部の消費エネルギー及び地震応答低減効果の関係について検討を行う。

2. 制御手法概要

本セミアクティブ制震は、図-1 に示すように、制御対象である主体構造物の脇に付加構造

物を設け、双方の頂点を可変ダンパにより連結し、可変ダンパの減衰係数 $C_d(t)$ を最大減衰係数 C_{max} 、最小減衰係数 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へ伝達し、主体構造物の応答を低減させるという制御手法である。解析モデルの運動方程式を式(1)に、文献 3)による可変ダンパ減衰係数 $C_d(t)$ の切替え制御則を式(2)、(3)に示す。式(2)、(3)は、主運動方程式

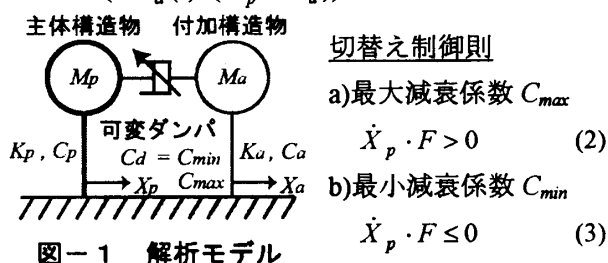
$$\begin{cases} M_p \ddot{X}_p + C_p \dot{X}_p + K_p X_p + F = -M_p \ddot{X}_0 \\ M_a \ddot{X}_a + C_a \dot{X}_a + K_a X_a - F = -M_a \ddot{X}_0 \end{cases} \quad (1)$$

$\ddot{X}_0$: 入力加速度

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

$X_a, \dot{X}_a, \ddot{X}_a$: 付加構造物変位, 速度, 加速度

$F = (C_d(t) \cdot (\dot{X}_p - \dot{X}_a))$: 可変ダンパ荷重



*1 九州電力株式会社 土木部原子力グループ (正会員)

*2 東京大学工学部建築学科 助教授 工博 (正会員)

*3 東京大学工学部建築学科 助手 (正会員)

*4 東京大学大学院 工学系研究科 博士課程 (正会員)

体構造物が最大変形に達した時、可変ダンパの減衰係数 $C_d(t)$ を最大減衰係数 C_{max} から最小減衰係数 C_{min} に、主体構造物と付加構造物の相対速度がゼロになった時、最小減衰係数 C_{min} から最大減衰係数 C_{max} に切替えることを意味する。

3. 入力地震動

地震応答解析で用いる地震動は正弦波合成法により作成した模擬地震動とした。目標加速度応答スペクトルは、建設省告示 1461 号に示された解放工学基盤における稀に発生する地震動の加速度応答スペクトルに、同 1457 号に示された第二種地盤における地盤増幅率 G_s を乗じたものとした。また、位相スペクトルは強震記録をフーリエ変換したものをもとに作成した。強震記録には、El Centro S00E [1941 Imperial Valley, 以下, Elc], 八戸港湾 EW [1968 十勝沖, Hch], 神戸海洋気象台 NS [1995 兵庫県南部, Kjm], Taft S69E [1955 Kern Country, California, Tft], 東北大学 NS [1978 宮城県沖, Thu] を用いた。表-1 に作成した 5 つの模擬地震動の加速度パワーの累積値が地震動終了時の 5%~95% となる経過時間で定義した継続時間を示す。

表-1 模擬地震波特性 [単位: sec 及び cm/sec²]

	Elc	Hch	Kjm	Tft	Thu
継続時間	36.0	37.8	17.0	42.1	37.1
最大加速度	111	108	125	128	101

4. 弾性地震応答解析

各部の消費エネルギーが地震応答低減効果に与える影響を検討するため、1 質点系地震応答解析を行った。

4.1 主体構造物特性及び付加構造物特性

主体構造物特性は固有周期 $T_p=1.0$ [sec], 質量 $M_p=1.0$ [ton], 構造物内粘性減衰定数 $H_p=2$ [%] とした。付加構造物特性は剛性 $K_a=\alpha K_p$, 固有周期 $T_a=T_p/\beta$ より算定するものとし、本研究では、剛性比 $\alpha=0.25$, 振動数比 $\beta=3$ とした。以上より、固有周期 $T_a=0.33$ [sec], 質量 $M_a=0.028$ [ton]

とした。構造物内粘性減衰定数は $H_a=2$ [%] とした。

4.2 可変ダンパ特性

可変ダンパ特性については、最大減衰係数 C_{max} 及び最小減衰係数 C_{min} は、それぞれ最適減衰係数 C_{opt} の 100 倍及び 0.1 倍とした。最適減衰係数 C_{opt} は、Maxwell 型モデルを含む振動系において共振ピークを最小化するものであり、本解析では $M_p \gg M_a$ であることから、Maxwell 型モデルを含む振動系とみなし、文献 4) による式(4)を用いて算出し、13.6[kN sec/m] とした。

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

$$\omega_p (= \sqrt{K_p/M_p}) : \text{主体構造物固有角振動数}$$

式(2), (3)に基づき、制御コンピューターが可変ダンパの減衰係数 $C_d(t)$ の切替え指令を出してから、実際に切替えが完了するまでの時間を時間遅れ $T_d=0.05$ [sec] とし、この時間遅れ T_d 間は、可変ダンパ減衰係数 $C_d(t)$ は、線形に変化するものとした。

4.3 数値解析方法

本解析では数値積分法として Runge-Kutta 法を用い、積分時間刻みは 0.00005 [sec], 入力地震動は前章にて作成した地震動とした。また、地震動入力は、前章に示した模擬地震動の継続時間の後に 10 [sec] 間ゼロを入力した。従って、解析時間は模擬地震動の継続時間+10 [sec] とした。

4.4 解析結果及び検討

無制御時最大応答、セミアクティブ制御時最大応答、セミアクティブ制御時最大応答と無制御時最大応答の差を無制御時最大応答で除した応答低減率を図-2 に示す。また、主体構造物最大応答、付加構造物最大応答、付加構造物最大応答を主体構造物最大応答で除した応答倍率を図-3 に示す。

図-2 の各応答低減率において、加速度応答低減率は変位応答低減率より低く、加速度については変位ほど応答低減効果が得られていない。また、Thu 入力時の応答低減率は高く、応答低減

効果が最も得られているのに対し、Kjm 入力時の応答低減率は低く、最も応答低減効果が得られていない。変位及び加速度の応答低減率の入力地震動の位相特性によるばらつきは最大で30%程度である。

図-3の各応答倍率において、変位応答倍率より加速度応答倍率が高くなっている。応答倍率は応答低減率とほぼ同様の傾向を示しており、付加構造物の応答すなわち付加構造物へ伝達されたエネルギー量が応答低減効果に影響を与えている可能性がある。そこで、振動系各部の消費エネルギー量が本セミアクティブ制震の応答低減効果に与える影響を検討するため、式(1)の両辺に各応答速度を乗じて時間積分し、各部のエネルギー量を算出した。式(1)より求められるエネルギーの釣合い式を式(5)に示す。解析終了時、主体構造物及び付加構造物の振動エネルギー、歪エネルギーがゼロになるので、式(5)は、各構造物粘性減衰力にした仕事 E_{p-d} 、 E_{a-d} 、可変ダンパ荷重が主体構造物にした仕事 E_{p-dmp} 、可変ダンパ荷重が付加構造物にした仕事 E_{a-dmp} 及び地震入力エネルギー E_{p-e} 、 E_{a-e} の項から構成される（以下、 E_{p-d} 、 E_{a-d} 、 E_{p-dmp} 、 E_{a-dmp} 、 E_{p-e} 、 E_{a-e} ）。

$$\begin{cases} E_{p-d} + E_{p-dmp} = E_{p-e} \\ E_{a-d} + E_{a-dmp} = E_{a-e} \end{cases} \quad (5)$$

図-4(上)に E_{p-e} 、 E_{p-dmp} 、 E_{p-dmp}/E_{p-e} を、(下)に E_{a-e} 、 E_{a-d} 、 $|E_{a-dmp}|$ 、 $|E_{a-dmp}|/E_{p-dmp}$ を示す。図-4(上)より、主体構造物へ入力された地震エネルギーの80%以上が、可変ダンパ荷重が主体構造物にした仕事によるもの、すなわち、主体構造物から付加系（可変ダンパ及び付加構造物）へ伝達されたエネルギーである。残りの20%程度が、主体構造物内粘性減衰により消費されていることになる。可変ダンパ荷重が付加構造物にした仕事 E_{a-dmp} は負の値となり、これは、主体構造物から可変ダンパを介して、付加構造物へエネルギーが伝達されたことを意味する。図-4(下)の斜線部 $|E_{a-dmp}|$ は E_{a-d} のうちの主体構

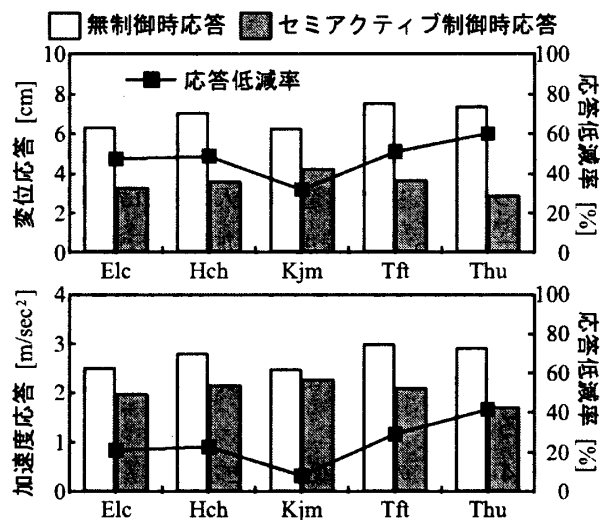


図-2 無制御時とセミアクティブ制御時比較

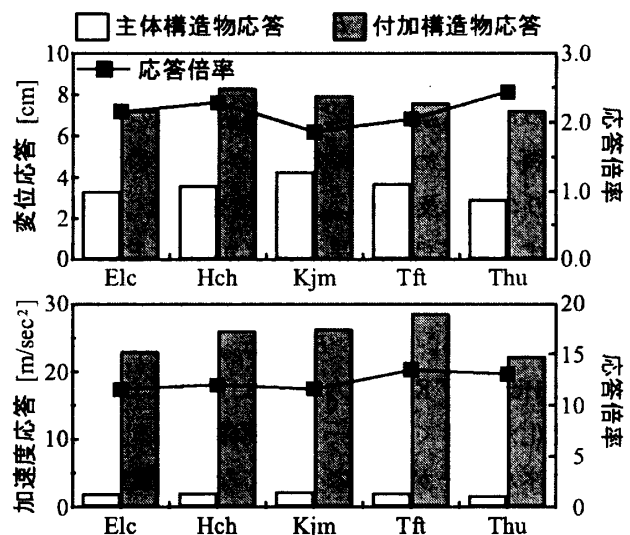


図-3 主体構造物と付加構造物比較

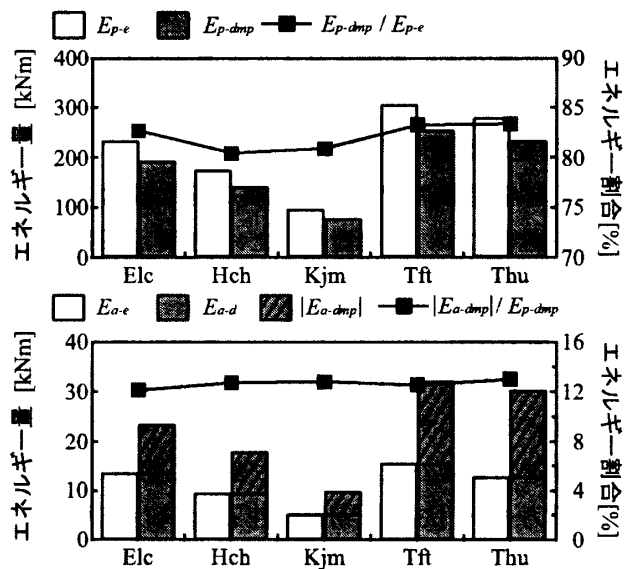


図-4 エネルギー算定結果

造物から可変ダンパを介して付加構造物へ流入し、結果的に付加構造物内粘性減衰により消費されたエネルギーを示しており、主体構造物から付加系に伝達されたエネルギーの12%程度である。つまり、主体構造物へ入力された地震エネルギーのうち8割程度が付加系に伝達され、そのうち9割程度が可変ダンパにより消費され、1割程度が付加構造物へ伝達されて、結果的に付加構造物内粘性減衰により消費されていることが分かる。

図-4(上)の応答低減率と E_{p-dmp} / E_{p-e} はほぼ似た傾向にあるが、応答低減効果が小さかった Kjm 入力時では、 E_{p-dmp} / E_{p-e} が比較的小さく、Hch 入力時のように E_{p-dmp} / E_{p-e} が小さくても応答低減効果が大きいケースも見られる。

さらに、 E_{p-dmp} / E_{p-e} と応答低減効果の関係について調べるために、解析開始から20秒間の時間当たりの E_{p-e} 及び E_{p-dmp} の変化を算出し、図-5に示す。応答低減効果が大きかった Elc, Tft, Thu 入力では、時間当たりの E_{p-e} の変化は小さく、平均的である。また、 E_{p-dmp} / E_{p-e} が比較的小さかった Hch 及び Kjm 入力時では、時間当たりの E_{p-e} の変化が大きく、ピークが明確である。地震入力エネルギーが瞬時に大きくなる地震動に対しては、応答低減効果が得られない場合もある。 E_{p-dmp} については、Hch 入力時は E_{p-e} の半分程度、Kjm 入力時は 1/3 程度であり、この違いが2波の応答低減効果に影響を与えたと考えられる。

5. 弾塑性地震応答解析

主体構造物の塑性化が地震応答低減効果に与える影響について検討するため、1質点系弾塑性地震応答解析を行った。

5.1 解析条件

主体構造物は RC 造建物を想定し、復元力特性は図-6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、初期剛性 K_c は降伏点割線剛性 K_y の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_p は瞬間剛性比例型の2%とした。降伏時の周期 T_p は1.0[sec]とした。付加構造物は鉄骨造を想定し、前章で用いた特性とした。また、塑性化は考慮せず、弾性範囲におさまるものとした。可変ダンパ特性についても前章で用いた特性とした。

数値積分法は Newmark β 法($\beta=1/4$)とし、入力

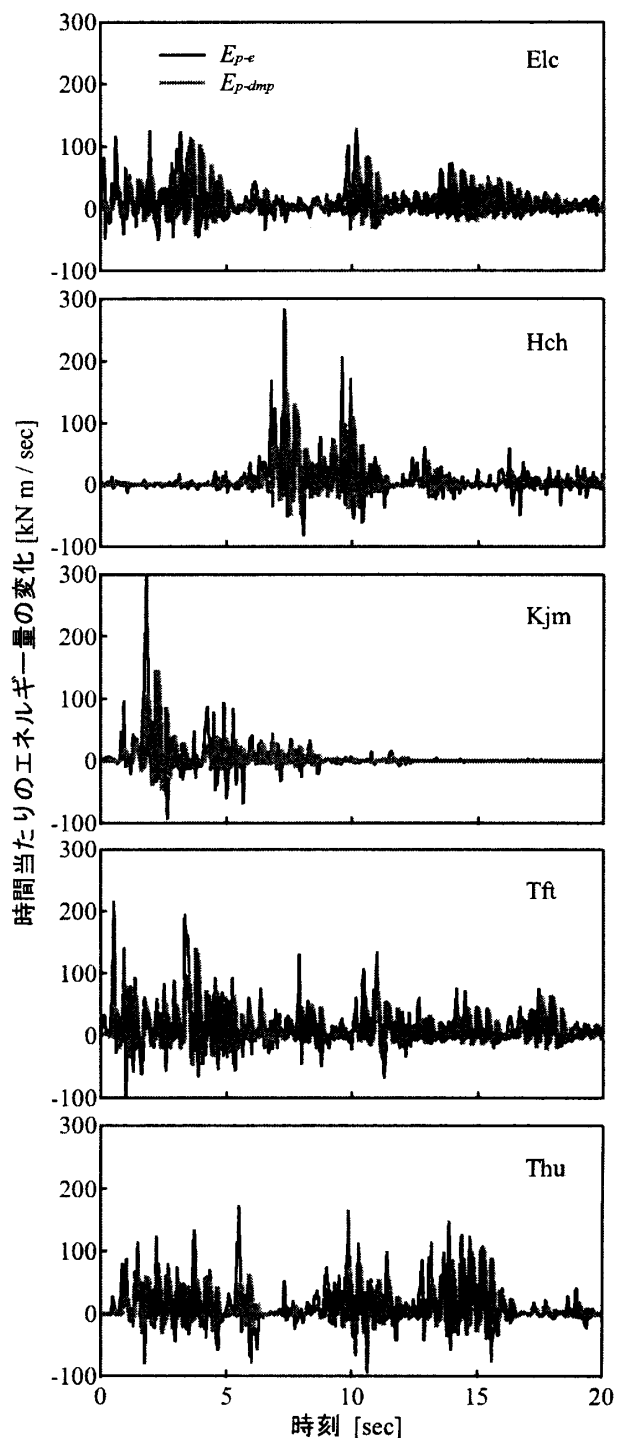


図-5 時間当たりのエネルギー量の変化

地震動は3章にて作成した模擬地震動を1倍(稀に発生する地震動に相当)～5倍(極めて稀に発生する地震動に相当)したものとし、この1倍～5倍を入力倍率とした。その他については、前章と同様の条件とした。

5.2 解析結果及び検討

図-7(左)にセミアクティブ制御時及び無制御時最大塑性率を、(右)に最大加速度を示す。また、各応答低減率も同図に示す。最大塑性率では、応答低減率は5%～50%とばらついているが、応答低減効果はあると言える。弾性地震応答解析時と比較すると、入力倍率が大きくなると、弾性地震応答解析時の応答低減率に近づくケースも見られるが、入力倍率が1においては全体的に低い。最大加速度では、入力倍率が大きくなると応答低減率が-100%を超える、すなわち、無制御時の2倍を超えるケースも見られ、全体的に応答低減効果が得られず、増加の傾向がある。

弾塑性解析時のエネルギー釣合い式は、式(5)に主体構造物の履歴減衰によるエネルギー E_{p-hyst} (以下、 E_{p-hyst})の項を加えた式(6)で表される。

$$\begin{cases} E_{p-d} + E_{p-hyst} + E_{p-dmp} = E_{p-e} \\ E_{a-d} + E_{a-dmp} = E_{a-e} \end{cases} \quad (6)$$

E_{p-dmp}/E_{p-e} 、 $|E_{a-dmp}|/E_{p-dmp}$ 、 E_{p-d}/E_{p-e} 及び E_{p-hyst}/E_{p-e} を図-8に示す。 E_{p-dmp}/E_{p-e} は入力倍率1～3までは増加傾向にあり、それを超えると変化はなく、入力倍率5では50～60%程度である。入力倍率1～3、すなわち、塑性率1付近までの増

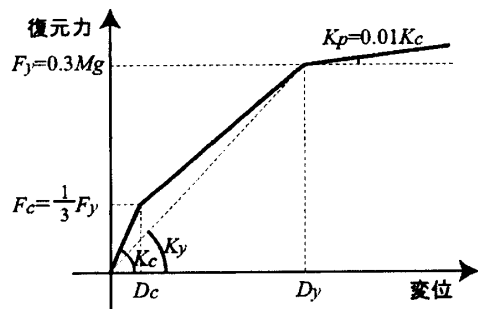


図-6 主体構造物復元力特性

加傾向は、入力地震動と剛性比 α が異なるが、筆者らの研究⁹⁾における、主体構造物の非線形化に

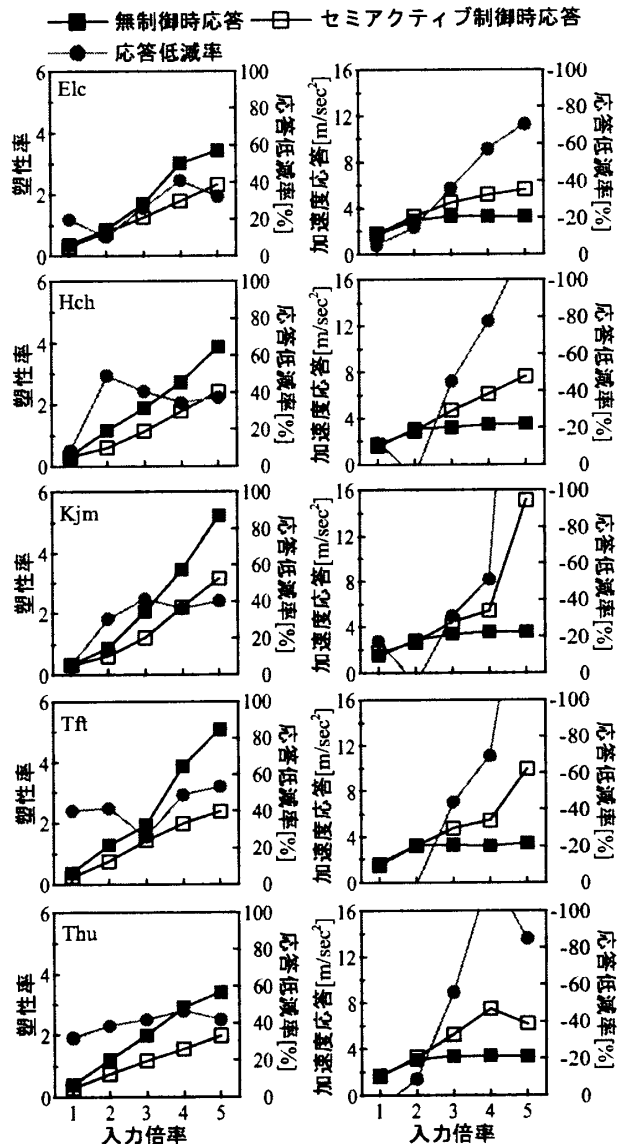


図-7 応答解析結果

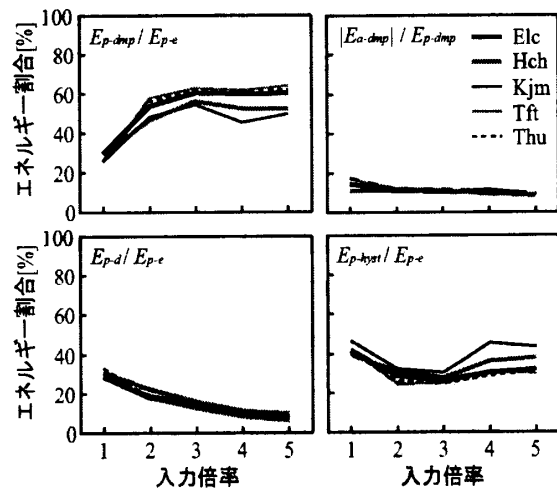


図-8 エネルギー算定結果

伴う主体構造物変位—可変ダンパ荷重関係の履歴形状の変化により説明できる。文献 5)では、入力地震動が大きくなると、主体構造物が非線形化による剛性低下のため、見かけの周期が長くなり、可変ダンパの減衰係数 $C_d(t)$ が最小減衰係数 C_{min} 状態の時間が短くなり、主体構造物変位—可変ダンパ荷重関係の履歴形状が変化し、結果的に履歴面積（本研究における E_{p-dmp} ）が増加すると報告している。この影響で E_{p-dmp}/E_{p-e} が増加していると考えられる。 E_{p-hyst}/E_{p-e} は、入力倍率 1~3 までは減少傾向にあり、それを超えると入力地震動による違いは見られるが、若干増加し、入力倍率 5 では 30~40%程度である。 E_{p-d}/E_{p-e} は、入力倍率 1 では、30%と大きい、それを超えると減少傾向にあり、入力倍率 5 では 10%程度である。 E_{a-dmp}/E_{p-e} は、入力倍率によらず、10%と小さい。以上より、入力倍率が小さい場合、主体構造物へ入力された地震エネルギーの 30%が付加系へ伝達され、主体構造物内粘性減衰により 30%が、履歴減衰により 40%が消費されている。入力倍率が大きい場合、上記の割合が 50~60%, 10%, 30~40%と変化する。付加構造物へ伝達され、付加構造物内粘性減衰により消費されたエネルギーは入力倍率によらず付加系に伝達されたエネルギーの 10%程度である。入力倍率が大きく、主体構造物が塑性化した場合、入力地震エネルギーに対する付加構造物へ伝達されるエネルギーの割合は大きくなると言える。また、地震応答低減効果と E_{p-dmp}/E_{p-e} との関係については、同様の傾向が見られる場合もある。

6. 結論

本セミアクティブ制震を適用し、地震応答解析を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) 弾性 1 質点系地震応答解析では、
 - (a) 主体構造物へ入力された地震エネルギーの 8 割が付加系へ伝達されており、そのうち 9 割が可変ダンパで吸収され、1 割が付加構造物へ伝達され、結果的に構造物内粘性減

衰により消費されている。

- (b) 主体構造物の入力地震エネルギーに対する付加系へ伝達されたエネルギーの割合は応答低減効果と同様の傾向を示す場合がある。
 - (c) 瞬時に大きな地震エネルギーが入力される地震動に対しては、時間当たりの付加系へ伝達されるエネルギーの変化の違いにより応答低減効果が異なる。
- (2) 弾塑性 1 質点系地震応答解析では、
 - (a) 入力地震動が大きく、主体構造物が塑性化する場合、入力地震エネルギーに対する付加構造物へ伝達されるエネルギーの割合は大きくなる。
 - (b) 主体構造物の入力地震エネルギーに対する付加系へ伝達されたエネルギーの割合は応答低減効果と同様の傾向を示す場合がある。
 - (3) (1), (2)の知見における各部のエネルギー消費の傾向は、主体構造物特性と付加構造物特性の影響を大きく受けると考えられ、今後、両者の特性が各部のエネルギー消費の傾向に与える影響について検討が必要である。

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, PP63-70, 2003.2
- 5) 本村一成, 塩原等 : 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, コンクリート工学, Vol.26, No.2, pp.1231-1236, 2005.7