論文 セミアクティブ制震デバイスによる RC 構造物の応答低減効果の 検討

本村 一成*1・塩原 等*2・楠原 文雄*3

要旨:減衰係数を2段階切替えできるダンパを用いたセミアクティブ制震を鉄筋コンクリート造構造物に適用し,定常応答解析,地震応答解析を行った。無補強・無制御,ブレースによる補強,ダンパによるパッシブ制震の場合との比較・検討を行った結果,相対変位応答における制御効果が得られた。また,地震入力エネルギーに対するダンパにおける吸収エネルギーの割合においても,セミアクティブ制震の優位性が確認された。

キーワード:セミアクティブ制震, Maxwell 型モデル, 定常応答, 地震応答

1. はじめに

鉄筋コンクリート(以下,RC)造構造物にエネ ルギー吸収を目的とし,制震構造を採用する例 が増えている。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お り,特に,減衰係数を2段階切り替え可能なダ ンパ(以下,可変ダンパ)を用いたセミアクテ ィブ制震が注目されている。可変ダンパによる セミアクティブ制震では,ダンパにおけるエネ ルギー吸収の最大化ができ,パッシブダンパを 超える制御効果が得られると報告されている^{1),2)}。 さらに,制御装置自身の特性を変化させるだけ なのでわずかな供給エネルギーで大きな制御力 が得られ,アクティブ制震に比べてメンテナン スに手間がかからない点も利点である。

本論文では,可変ダンパによるセミアクティ ブ制震を RC 造構造物に適用し,定常応答解析, 地震応答解析を行い,無補強・無制御,ブレー スによる補強,ダンパによるパッシブ制震の場 合と比較・検討し,その優位性を検討する。

2. 解析モデル

解析モデルは,図-1(a)~(d)に示す4つの1質 点系モデルとした。(a)無補強・無制御モデルは,



質量 M,粘性減衰係数 C,非線形剛性 K_(x)から構成される一般的な構造物を想定したモデル,(b) ブレース補強モデルは,ブレースにより補強し たモデル,(c)パッシブ制震モデルは,ダンパを ブレースを介して設置した Maxwell 型モデルを 含むモデル,(d)セミアクティブ制震モデルは, パッシブ制震モデルのダンパを可変ダンパに置 き替えたモデルとした。

各モデルの運動方程式は式(1)~(4)となる。ブ レース補強モデルは,無補強・無制御モデルの 運動方程式にブレース剛性 k_b を加えた。パッシ ブ制震モデル,セミアクティブ制震モデルは,

*1 東京大学大学院 工学系研究科 修士課程 (正会員)*2 東京大学 工学部建築学科助教授 博士(工学) (正会員)*3 東京大学 工学部建築学科助手 修士(工学) (正会員)

ダンパ減衰係数 c_d とダンパ速度 \dot{x}_d またはブレース剛性 k_d とブレース変位 x で表される Maxwell型モデル要素の復元力 Pを加えた。

[無補強・無制御モデル]
$$M\ddot{x} + C\dot{x} + K_{(x)}x = -M\ddot{x}_0$$
 (1)

[ブレース補強モデル]
$$M\ddot{x} + C\dot{x} + (K_{(x)} + k_b)x = -M\ddot{x}_0$$
 (2)

[パッシブ制震モデル] $\begin{cases}
M\ddot{x} + C\dot{x} + K_{(x)}x + P = -M\ddot{x}_{0} \\
P = c_{d}\dot{x}_{d} = k_{b}x_{b}
\end{cases}$ (3)

$$\begin{cases}
M\ddot{x} + C\dot{x} + K_{(x)}x + P = -M\ddot{x}_{0} \\
P = c_{d(t)}\dot{x}_{d} = k_{b}x_{b} \\
\ddot{x}_{0} : 入力加速度
\end{cases}$$
(4)

構造物は, RC 構造物を想定し, 復元力特性は 図 - 2 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, 弾性剛性 K_e は降伏点と原点を 結ぶ勾配, ひび割れ前の初期剛性 K_c は弾性剛性 K_eの 4 倍, 降伏後の剛性 K_p は初期剛性K_c の 0.01 倍をとした。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 は剛性比例型の 0.02 とした。

ブレース剛性 k_b は,主体構造物とブレースの 剛性比 α ($=k_b/K_e$)を設定することにより与え, 弾性範囲におさまるものとした。剛性比 α は,構 造物特性により変化するため,0.125,0.25,0.5 と 幅を持たせた。また,構造物が非線形化した場 合,剛性比 α ($=k_b/K_p$)が大きくなるため,1.0 の場 合も検討した。

Maxwell 型モデルを含む振動系では,共振ピークを最小にするための最適減衰係数 c_{d-opt} が存在する。最適減衰係数 c_{d-opt} は,文献¹⁾より,構造物とブレースの剛性比 α ,ブレース剛性 k_b ,構造物固有角振動数 $\omega (= \sqrt{K_e/M})$ を用いて次式で表される。

$$c_{d-opt} = \frac{k_b}{\omega} \sqrt{\frac{2+\alpha}{2(1+\alpha)^2}}$$
(5)

ダンパ減衰係数 c_dは,この最適減衰係数 c_{d-opt} を用いるものとした。構造物質量 1ton,構造物 固有周期 1sec のときの剛性比αに対する最適減 衰係数 c_{d-opt}を表 - 1 に示す。

可変ダンパは,最適減衰係数 *c_{d-opt}*の 100 倍の 最大減衰係数 *C_{max}*, 0.01 倍の最小減衰係数 *C_{min}* の2段階切替え可能であるとした。

可変ダンパの *C_{max}/C_{min}* 切替え条件は,文献²⁾ に従った。切り替え条件を式(6)に示す。また, 図 - 3 にダンパ復元力特性・ブレースとダンパの 挙動を示す。

$$c_d(t) = \begin{cases} C_{\max} \left(P \times \dot{x} \ge 0 \right) \\ C_{\min} \left(P \times \dot{x} < 0 \right) \end{cases}$$
(6)

式(6)の切替え条件を適用すると, Maxwell 要

表 - 1 最適減衰係数 cd-opt [単位: kNsec/m]

剛性比α	0.125	0.25	0.5	1.0
C _{d-opt}	7.05	13.06	22.95	37.71



素の復元力 P と構造物速度 \dot{x} が同符号, すなわち, 構造物が最大変形に達するまで, $c_d(t)=C_{max}$ であり, ダンパがロック状態となり, ブレースのみが変形する(AB)。逆符号, すなわち, 構造物が最大変形に達した直後, $c_d(t)=C_{min}$ となり, ダンパ負担荷重が除荷され, ブレース変形が0となる(BC)。除荷直後, 再び $c_d(t)=C_{max}$ に切替えられる。以上の C_{max}/C_{min} の切替えを繰り返すと, 図-3 左のような平行四辺形の履歴を描く。

3. 数值解析方法

全てのモデルにおいて,数値積分法として Newmarkβ法(β=1/4)を用い,積分時間刻み△tを 0.0005[sec]とした。

文献³⁾では,Newmark/法の積分公式を用いて, Maxwell 型モデルを含む振動系の応答解析を行 うために,Maxwell 型モデル部分復元力 *P* が線 形に変化するという仮定のもと,次の略算式 (7),(8)が提案されている。

$$P_{n+1} = A\dot{x}_n + B\dot{x}_{n+1} + CP_n \tag{7}$$

$$A = B = \frac{\Delta t c_d k_b}{2c_d + \Delta t k_b}, C = \frac{2c_d - \Delta t k_b}{2c_d + \Delta t k_b}$$
(8)

 \dot{x}_n :時刻 t_n における応答速度

パッシブ制震モデルとセミアクティブ制震モ デルの応答解析では,この略算式を用いた。

セミアクティブ制震モデルでは,センサーが 応答速度 *x* と Maxwell 要素復元力 *P* の情報を拾 った後,制御コンピューターが切替え条件に基 づき,可変ダンパの最大減衰係数 *C_{max}* と最小減 衰係数 *C_{min}* の切替えを行うものとした。数値計 算上,この一連の流れに時間遅れはなく,瞬時 に行われるものとした。

4. 定常応答解析

各モデルの基本特性を調べるために正弦波入 力による定常応答解析を行い,相対変位応答倍 率と絶対加速度応答倍率を求めた。ここで,相 対変位応答倍率,絶対加速度応答倍率とは,相 対変位応答 *x*,絶対加速度応答(*x*+*x*₀)を入力変位 *x*₀,入力加速度 *x*₀で除したものとした。

各モデルの応答倍率を図 - 4 に示す。横軸は角 振動数比ω/ω。であり,入力角振動数ωを構造物 固有角振動数ω。で除したものである。

ブレース補強モデル,パッシブ制震モデル, セミアクティブ制震モデルの共振時の角振動数 比ω/ω,は,それぞれ付加系の影響で無補強・無 制御モデルより大きくなっている。また,剛性 比αが大きくなると,共振時の角振動数比ω/ω, はさらに大きくなる。

ブレース補強モデルでは,無補強・無制御モ



デルと共振時の応答倍率に変化はなく,剛性比α によらず,共振時の応答倍率は一定である。

パッシブ制震モデルでは,共振時の応答倍率 が無補強・無制御モデルとブレース補強モデル の応答倍率曲線の交点より小さくなっており, Mxwell 型モデルにおいて,共振ピークを最小化 している。また,剛性比αが大きくなるにつれ, 共振時の応答倍率も小さくなる。

セミアクティブ制震モデルでは,共振時の相 対変位応答倍率はパッシブ制震モデルよりさら に小さくなるが,剛性比 α が大きくなると,角振 動数比 ω/ω_0 によっては加速度応答倍率がパッシ ブ制震より大きくなる場合がある。

5. 地震応答解析

より現実的な制御効果を検討するため,神戸 海洋気象台 1995(NS),八戸港湾 1968(EW)の強震 記録を用いて,地震応答解析を行った。

5.1 弾性地震応答解析

構造物固有周期による応答低減効果を調べる ため,構造物固有周期 3.0sec までの応答スペク



図-5 応答スペクトル

トルを描いた。入力地震波は前述の2波を25kine に基準化して用いた。応答スペクトルを図-5に, 構造物固有周期1.0sec,剛性比α=0.5,神戸海洋 気象台(1995)入力時のダンパ,可変ダンパ復元力 特性を図-6に示す。また,ダンパ吸収エネルギ ーを地震入力エネルギーで除した,ダンパエネ ルギー吸収率を図-7に示す。

図-5に示す,応答スペクトルを見ると,ブレ ース補強モデルでは,無補強・無制御モデルに 比べ,相対変位応答スペクトルが右に移動して おり,無補強・無制御モデルの相対変位応答が 単調増加する短周期領域では,相対変位の応答 低減効果が見られるが,絶対加速度応答は全体 的に増加している。パッシブ制震モデルでは, 無制御・無補強モデル,ブレース補強モデルと



図-7 ダンパエネルギー吸収率

比べ,ほとんどすべての構造物固有周期におい て応答低減効果が見られた。特に,無補強・無 制御モデルで相対変位応答が大きくなる周期で、 大きな応答低減効果が見られる。また,剛性比 α が大きくなるほど,応答低減効果が見られる。 セミアクティブ制震モデルでは,図-6のように 平行四辺形の履歴を描いており,設定した減衰 係数切替え条件通りに制御されていることがわ かる。図-5の相対変位応答は,解析モデルの中 で最も制御効果が得られ,パッシブ制震モデル と同様に剛性比αが大きいほど制御効果が得ら れている。しかし,図-5の絶対加速度応答は, 無補強・無制御モデル,ブレース補強モデルよ り制御効果は見られるが 剛性比αが大きくなる につれ,パッシブ制震モデルより制御効果が得 られなくなる。これは,図-6からもわかるよう に,ダンパの等価剛性がパッシブ制震に比べて 高くなるためと考えられる。以上より,構造物 のひび割れ・降伏による構造物剛性の低下のた め 構造物とブレースの剛性比αが大きくなる影 響で,相対変位応答の低減は期待できるが,絶 対加速度応答は逆に大きくなる可能性がある。

図 - 7 に示す,ダンパエネルギー吸収率は,パ ッシブ制震モデルに比べ,セミアクティブ制震 モデルの優位性は明らかであり,セミアクティ ブ制震では,剛性比αによっては地震入力エネル ギーの95%以上を負担できる場合がある。 5.2 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,基準速度を1~50kineと変化させて弾 塑性地震応答解析を行った。構造物-ブレースの 剛性比αは0.5とした。基準速度による塑性率の 変化を図-8に,神戸海洋気象台(1995 NS)入力 時の基準速度による絶対加速度の変化とダンパ エネルギー吸収率の変化を図-9に,50kine入力 時の可変ダンパ復元力特性を図-10に示す。

図 - 8 の塑性率では,セミアクティブ制震が最 も小さくなっている。セミアクティブ制震を適 用した場合,神戸海洋気象台(1995 NS)の 30kine 入力で構造物は降伏変位に達しているが,八戸 港湾(1968 EW)50kine 入力でも降伏変位に達して いない。絶対加速度は、ブレース補強モデル、 セミアクティブ制震モデル、パッシブ制震モデ ル、無補強・無制御モデルの順に小さく、付加 系の等価剛性の大きい順となっている。

ダンパのエネルギー吸収率は,パッシブ制震 モデル,セミアクティブ制震モデルともに,ひ び割れ発生直後,構造物履歴によるエネルギー 吸収量が増加するため低下するが,構造物の降 伏前に増加し,降伏後,再び低下する傾向が見 られた。構造物降伏後,パッシブ制震モデルで は,60%前後であるのに対し,セミアクティブ制 震モデルでは 80%前後であった。また,構造物 が非線形化した場合でも,図-10のように平行四







図 - 10 50[kine]入力時ダンパ復元力特性

辺形の履歴を描いており,想定した切替え条件 通りに制御が行われていることがわかる。50kine 入力時,ダンパの最大負担荷重は降伏後でもベ ースシア係数にして 0.3 相当である。

5. 結論

減衰係数を 2 段階切替え可能なダンパを用い たセミアクティブ制震を鉄筋コンクリート構造 物に適用し,定常応答解析,地震応答解析を行 った結果,以下の知見を得た。

- 相対変位応答は、最適な減衰係数を設定したパッシブ制震を適用した場合より、大きな応答低減効果が見られた。
- 絶対加速度応答は、ブレース剛性が構造物 剛性の 50%以上になると、最適な減衰係数 を設定したパッシブ制震を適用した場合よ り、応答低減効果が見られなかった。
- 構造物が降伏した場合,構造物の剛性に比べて,ブレースの剛性が高くなるため,相対変位応答は低減されたが,絶対加速度応答は上昇した。
- 構造物が降伏した場合でも、入力地震エネ ルギーの 80%程度をダンパが吸収していた。

謝辞

本論文の作成にあたり, 鹿島建設(株) 小堀研 究室 倉田成人氏に研究全般において御助言を戴 きました。ここに, 深く感謝の意を表します。 参考文献

- (1) 栗野治彦: Maxwell 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.
- 2) 栗野治彦: ON/OFF 型セミアクティブダンパの 分散型制御手法に関する研究,日本建築学会構 造系論文集,第 571 号, pp79-86, 2003.9.
- 3) 畑田智彦,小堀鐸二,石田雅利,丹羽直幹: Maxwell 型モデルを含む振動系の応答解析法 (その1)定式化と数値シミュレーション(そ の2)数値安定性と精度の検討,日本建築学会 大会学術講演梗概集,pp645-646,1994.9.