

論文 ソフトストーリーに同調粘性マスダンパーを設置した RC 建物の地震 応答性状

荒井 達朗*1・油川 健樹*2・五十子 幸樹*3・井上 範夫*4

要旨: RC 造ピロティ建築物の第 1 層に制振デバイスを設置してソフトストーリーとし、第 1 層で積極的にエネルギー吸収を行うシステムの地震応答性状を検討した。制振デバイスとしては、付加質量と柔支持部材で構成される付加振動系を有する粘性ダンパー即ち同調粘性マスダンパーを設置し、主架構の等価剛性から定点理論に基づき算出した最適ダンパーパラメーターを適用した。同調粘性マスダンパーの最適パラメーターは、構造物が弾性範囲外にある場合においても有効であり、同等の減衰係数を持つ粘性ダンパーよりも高い応答最大塑性率低減効果を発揮した。

キーワード: ピロティ被害, ソフトストーリー, 粘性ダンパー, 同調粘性マスダンパー, 定点理論

1. はじめに

1995 年に発生した兵庫県南部地震は六千人を越える死者を出した戦後日本最大の地震被害となり、その大部分は建築物の中での被災であったことから、建築物の安全性に対する要求が一段と高まることとなった。同地震における目立った被害の一つとして、ピロティ建築物の第 1 層が崩壊した被害が挙げられ、それ以降ピロティ建築物は避けるべき構造形式であると判断されてきた。しかしピロティ建築物は第 1 層に広いスペースを設けることが可能であり、店舗や駐車場等を設置できるため、社会的には大きな需要がある。そのため、ピロティ建築物の地震時被害を低減する手法が数多く研究されてきた。

ピロティ建築物の被害を低減する方法の一つとして、第 1 層の剛性及び耐力を大きくする方法が考えられるが、耐震壁を設置する等の補強がピロティとしての機能を妨げるため、困難である場合が多い。

それに対し、変形が第 1 層に集中することを利用して、第 1 層で積極的にエネルギー吸収を行い、上層の被害を低減する方法が提案されている。鈴木ら¹⁾は、変形能力の大きい部材をエネルギー吸収材として第 1 層に用いることで、免震構造のような効果を有する建築物が構造的に可能であることを示唆している。本間ら²⁾は、オイルダンパーと変形抑制機構を併用した制振デバイスを提案し、第 1 層で積極的にエネルギー吸収を行うとともに、変形抑制機構によって巨大地震時においても建築物の安全性を確保することが可能であることを示した。

一方制振デバイスとしては、建築物の層間変形などの直線運動を回転運動に変換し、粘性体のせん断抵抗力と

回転慣性モーメントによる質量効果を持つ、粘性マスダンパーが考案されている。齊藤ら³⁾は、この粘性マスダンパーに柔支持部材を接続し、建築物の周期と同調する付加振動系を構成する応答制御手法を提案した。油川ら⁴⁾は、同調付加振動系を有する粘性ダンパーを同調粘性マスダンパーと称し、同ダンパーを建築物に設置した場合の調和地動に対する応答低減効果を、他のダンパーとの比較を通して検討した。ただし、これらは建築物が弾性である場合に対する検討であり、非線形の復元力特性を持つ RC 構造物に対しての応答低減効果については検討の余地がある。

そこで本論文では、制振デバイスを設置した RC 造ピロティ建築物の第 1 層をソフトストーリーとし、制振デバイスとして同調粘性マスダンパーを用いた場合の応答低減効果について、解析的に検討する。

2. ソフトストーリーモデル

本論文で用いるソフトストーリーモデルの立面図を図-1 に示す。このモデルは 11 層 RC 造の集合住宅であり、第 1 層がピロティとなっている。本論文では、集合住宅によく見られるように短辺方向の第 2 層以上の各スパンに戸境壁があるモデルを考え、短辺方向のみの地震時応答性状を検討する。戸境壁は図-1 の立面図中に斜線で示す。このモデルの検討対象である短辺方向においては、第 2 層より上部の構造に比べて第 1 層の変形が卓越すると考えられる。従ってこのモデルは、第 2 層より上部の構造を剛体とみなした 1 質点系として扱えるものと仮定できる。この場合、この等価 1 質点近似モデルの

*1 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 (正会員)

*2 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 (非会員)

*3 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 准教授 博士(工学) (非会員)

*4 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 教授 工博 (正会員)

復元力特性は 11 層モデルの第 1 層復元力特性とすることが出来る。同様に 1 質点近似モデルの集中質量は $M=388.8 \times 11=4277(\text{ton})$ となる。

等価 1 質点近似モデルの復元力特性、即ち第 1 層の復元力特性は骨格曲線を Tri-Linear 型、履歴則を Takeda モデルとし、次のようにして定める。即ち、第 1 層の降伏せん断力係数を $C_B=0.3$ と仮定し、第 1 層の降伏せん断力時の第 1 層変形 δ_y が層間変形角で 1/100 となるという仮定の下に、降伏時割線剛性 K_y を決定する。第 1 折れ点は初期剛性 $K_0=K_y/0.3$ 、ひび割れ耐力 $Q_c=1/3Q_y$ から決定し、第 3 分枝剛性は初期剛性の 1/100 とする。等価 1 質点近似モデルの復元力特性を図-2 に示す。

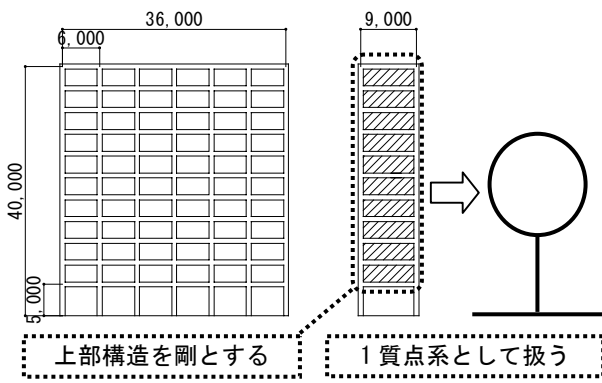


図-1 ソフトストーリーモデル

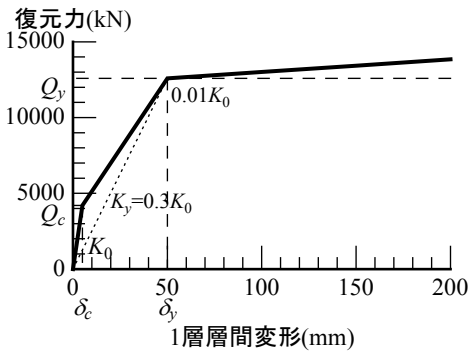


図-2 復元力特性

3. 同調粘性マスダンパーの応答低減効果

3.1 粘性マスダンパーの概要

図-3 に、粘性マスダンパーの機構模式図を示す。ボールねじは、構造物に生じる層間変形等の直線運動を回転運動に変換し、運動を増幅させる。このときボールねじに接続された内筒に回転運動が伝わり、運動が増幅されることで封入された粘性体が大きなせん断抵抗力を発揮する。回転運動により回転慣性モーメントが発生するため、粘性マスダンパーは見かけの質量である回転慣性等価質量 m_i を持つことになる。この機構により、回転慣性等価質量 m_i を実質量の 1000 倍以上に増幅することも可能である。

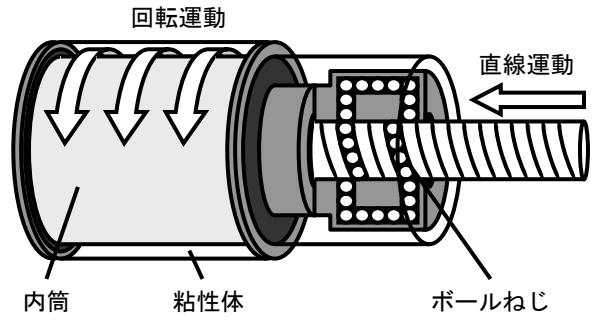


図-3 粘性マスダンパー機構模式図

粘性マスダンパーには、粘性体のせん断抵抗力による粘性減衰力 Q_v 、回転慣性モーメントによる慣性力 Q_i が働き、その和がダンパー抵抗力 P となる。ダンパー抵抗力 P を式(1)に示す。

$$P = Q_v + Q_i \quad (1)$$

従って粘性マスダンパーは、粘性減衰力 Q_v を発揮する減衰係数 c_d のダッシュポットと、慣性力 Q_i を発揮する回転慣性等価質量 m_i によって、図-4 に示すようにモデル化される。

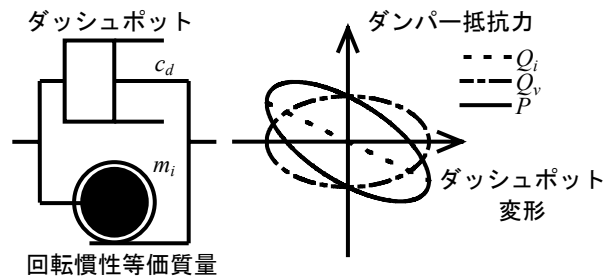


図-4 粘性マスダンパーの力学的モデル

3.2 同調粘性マスダンパーの概念

図-5 に、同調粘性マスダンパーと粘性ダンパーのエネルギー吸収模式図を示す。通常の粘性ダンパーは、主架構の層間変形によって変形し、それに応じた粘性抵抗力を発揮する。一方同調粘性マスダンパーは、主架構と周期を同調させた付加振動系が主架構の層間変形を上回る変形をダッシュポットにさせることで、効率よくエネルギーを吸収することができる。

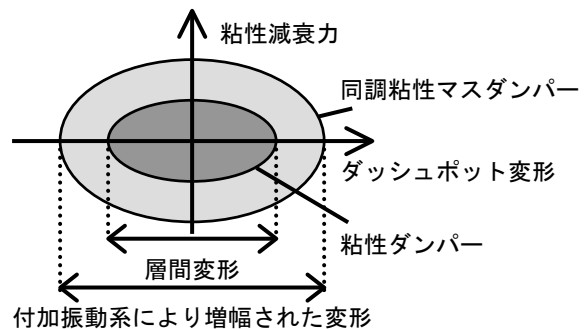
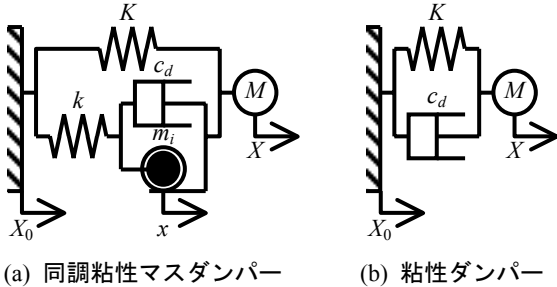


図-5 エネルギー吸収模式図

3.3 同調粘性マスダンパーの最適同調条件

同調粘性マスダンパーは、粘性マスダンパーと柔支持部材によって構成される。図-6 に、主架構に同調粘性マスダンパーあるいは粘性ダンパーを設置した1質点系モデルを示す。



X : 層間変形 x : ダッシュポット変形 X_0 : 地動変位
 K : 主架構剛性 k : 柔支持部材剛性
 M : 主架構質量 m_i : 等価質量
 c_d : ダンパー減衰係数

図-6 1質点系モデル

式(2)に、(a)の同調粘性マスダンパーを設置したモデルの運動方程式を示す。

$$\begin{cases} M\ddot{X} + KX + P = -M\ddot{X}_0 \\ P = m_i\ddot{x} + c_d\dot{x} = k(X - x) \end{cases} \quad (2)$$

このモデルに調和地動 $X_0 = X_0 e^{i\omega t}$ を入力した場合の層間変形が $X = X e^{i\omega t}$ 、ダッシュポット変形が $x = x e^{i\omega t}$ で与えられるものとし、式(3)に示すように、 γ を主架構固有角振動数 Ω と調和地動角振動数 ω との比、 h をダンパー減衰定数と定義する。

$$\Omega = \sqrt{\frac{K}{M}}, \gamma = \frac{\omega}{\Omega}, h = \frac{c_d}{2\sqrt{KM}} \quad (3)$$

同調粘性マスダンパーの設計パラメーターは定點理論^{3), 4), 5)}に基づいて決定する。同調粘性マスダンパーモデルの変位応答倍率曲線 $|X/X_0|$ には、ダンパー減衰定数 h に依存しない定點が2つ存在しており、図-7のように $h=0$, $h=\infty$, h 任意の場合の変位応答倍率曲線を描くと、2つの定點 P, Q の存在が確認できる。

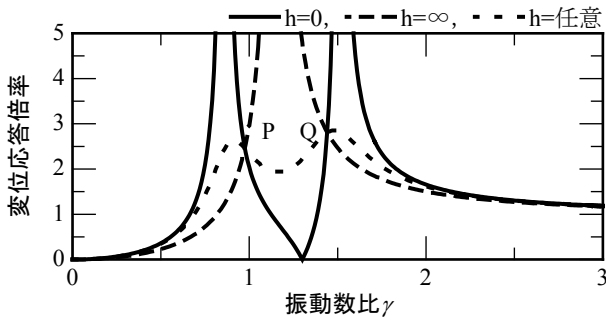


図-7 変位応答倍率曲線

そこで「i: 定點 P, Q の高さが等しい」、かつ「ii: 変位応答倍率が定點 P, Q で最大値をとる」、という2つの条件を満たすことを変位応答倍率最適条件とし、そのような条件を満足する m_i, k, h の組み合わせを用いて検討を行う。図-8 に、変位応答倍率最適条件下における質量比 $\mu = m_i/M$ 及び剛性比 $\eta = k/K$ と h との関係を示す。

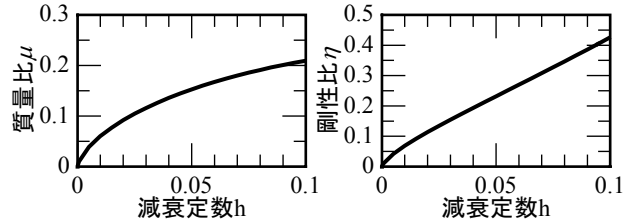


図-8 質量比, 剛性比, 減衰定数の関係

図-9 に、変位応答倍率最適条件下における、調和地動入力時の同調粘性マスダンパーモデル及び粘性ダンパーモデルの変位・加速度応答倍率曲線を示す。 $h=0.01$ として変位応答倍率最適条件より m_i, k を決めた場合、粘性ダンパーモデルでは変位・加速度応答倍率の最大値がともに50程度となるが、同調粘性マスダンパーモデルでは7程度であり、共振時に高い応答低減能力を発揮することがわかる。同調粘性マスダンパーモデルの応答倍率最大値は h の値によらずほぼ一定であるが、粘性ダンパーモデルの応答倍率最大値は h を大きくすると急激に小さくなり、両ダンパーの差は小さくなる。

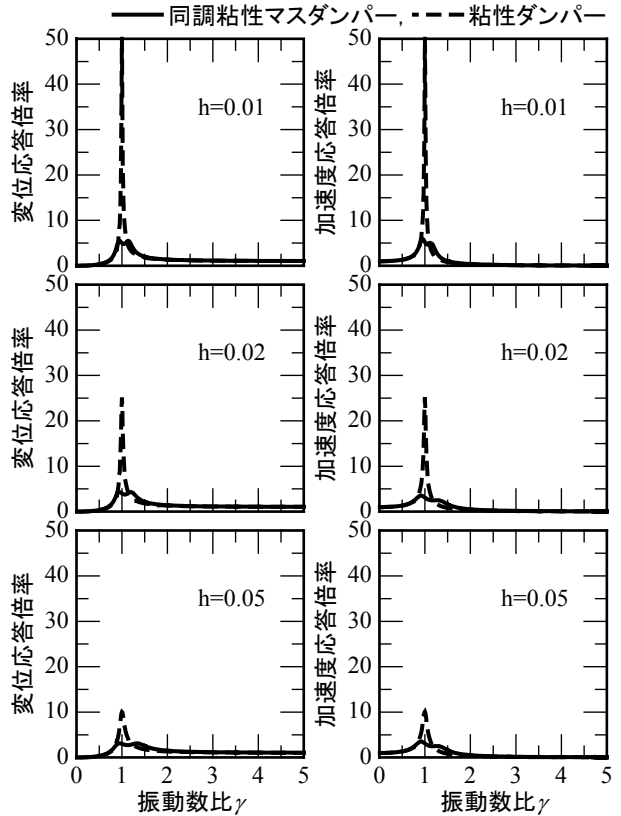


図-9 応答低減効果の比較

図-10に、 h を変化させた場合の両ダンパーモデルの応答倍率最大値を示す。粘性ダンパーモデルは h が大きくなるにつれて応答倍率最大値が小さくなる。一方同調粘性マスダンパーモデルは、 h が0.01以上の範囲での応答倍率最大値がほぼ一定となっており、 $h=0.01$ で粘性ダンパーの $h=0.1$ に相当する応答低減能力を発揮する。

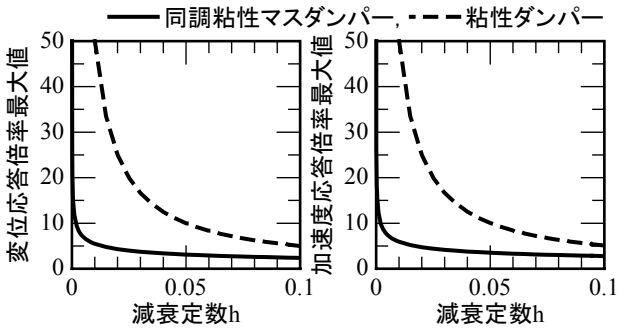


図-10 最大応答の比較

図-11に、同調粘性マスダンパーモデルの層間変形に対するダッシュポット・支持部材変形応答倍率曲線を示す。両変形応答倍率曲線はともに共振点で最大となっており、 h が小さいほど共振点における変位応答倍率が大きくなっている。このことから、同調粘性マスダンパーは h が小さい場合でもダッシュポットが大振幅で変形することによってエネルギーを吸収し、高い応答低減能力を発揮することがわかる。

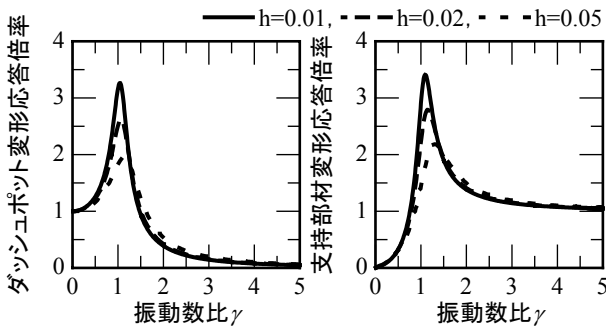


図-11 ダッシュポット・支持部材変形応答倍率曲線

4. RC 構造物への同調粘性マスダンパーの適用

次に、非線形の復元力特性を持つ RC 構造物に同調粘性マスダンパーを設置する場合のパラメーター決定方法を述べる。

復元力特性が非線形の場合には、等価剛性に対して同調させるものとする。同調させる応答塑性率を同調塑性率 μ_{eq} とし、それに対応する等価剛性 K_{eq} と上部構造の質量 M から、変位応答倍率最適条件に基づいてダンパーパラメーターを決定する。図-12に、等価剛性 K_{eq} と同調塑性率 μ_{eq} の関係、及び等価剛性 K_{eq} から決定したダンパー減衰係数 c_d と同調塑性率 μ_{eq} の関係を示す。

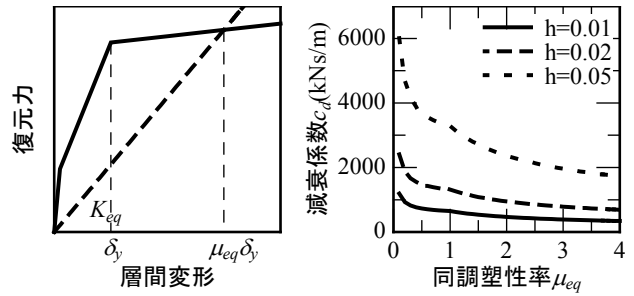


図-12 等価剛性、同調塑性率、減衰係数の関係

5. 振動応答解析

5.1 解析ケース

入力波は 1978 年宮城県沖地震 東北大学建設系 1 階 NS 記録(以下東北大波)及び 1995 年兵庫県南部地震 神戸海洋気象台 NS 記録(以下神戸波)とし、PGV を 25kine 及び 50kine に基準化した。図-13に、振動応答解析で入力した地震波の加速度時刻歴(50kine 基準化時)を示す。

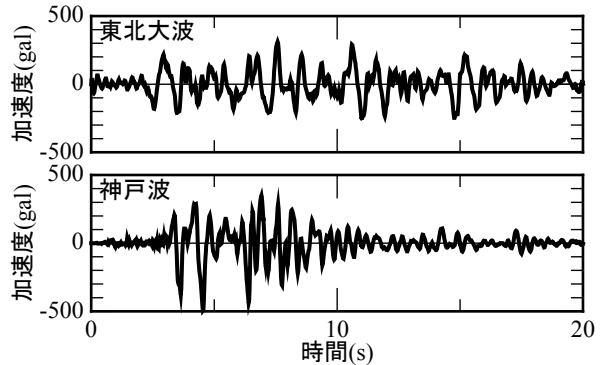


図-13 入力波加速度時刻歴 50kine 基準化時

5.2 解析結果

等価剛性に対する減衰定数 h を0.01, 0.02, 0.05とした解析結果から、横軸に同調塑性率、縦軸に応答最大塑性率と最大加速度をとったものを図-14から図-19に示す。同調粘性マスダンパーは粘性ダンパーと比較して最大加速度が僅かに増加するものの、応答最大塑性率を低減させる効果が高いことが確認できる。また 50kine 入力時よりも 25kine 入力時の方が粘性ダンパーと比較しての応答最大塑性率の低減能力が高い。東北大波 25kine では、 $h=0.01$ の場合でも応答最大塑性率を 1 程度に抑えることができる。神戸波 50kine では、 $h=0.01$ の応答最大塑性率の最大値が 2.5 程度となるが、層間変形角 1/40 まで軸力を保持する柱であれば、構造物の崩壊を防ぐことが可能である。同調塑性率を大きくしていくと、図-12からわかるように減衰係数が小さくなり、粘性ダンパーでは応答最大塑性率が大きくなってしまふ。一方同調粘性マスダンパーで同調塑性率を大きくしていくと、応答最大塑性率が小さくなる点がある。この点は解析ケースによって異なるが、概ね同調塑性率 1 の点である。

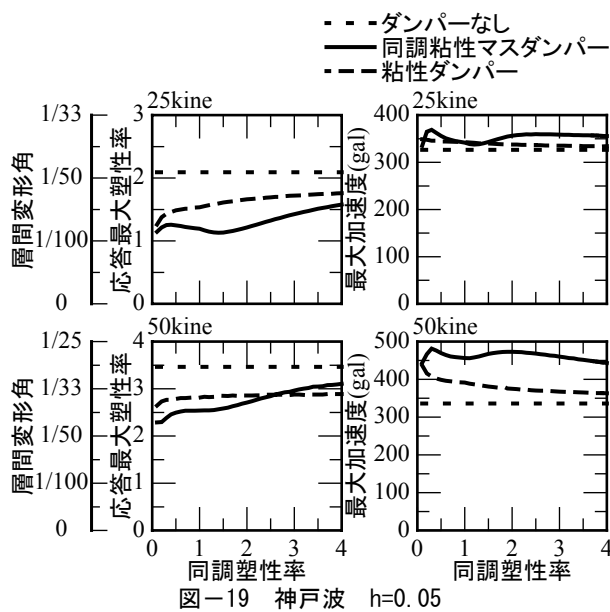
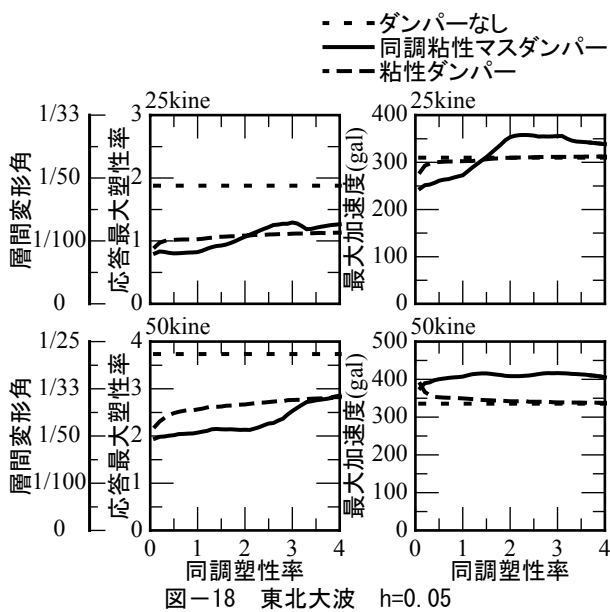
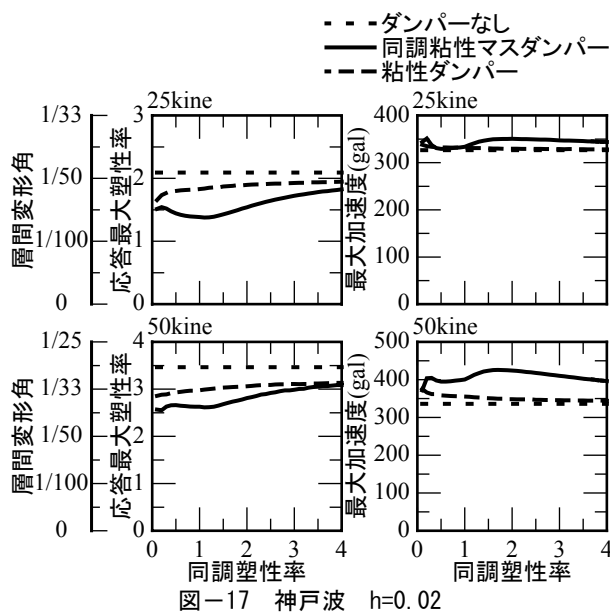
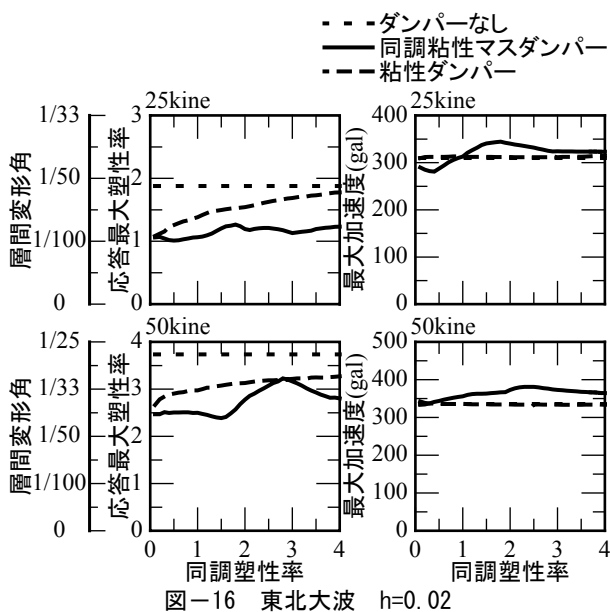
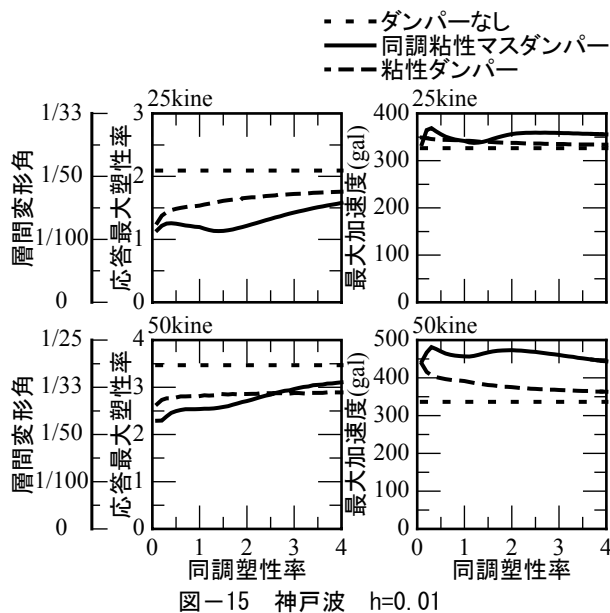
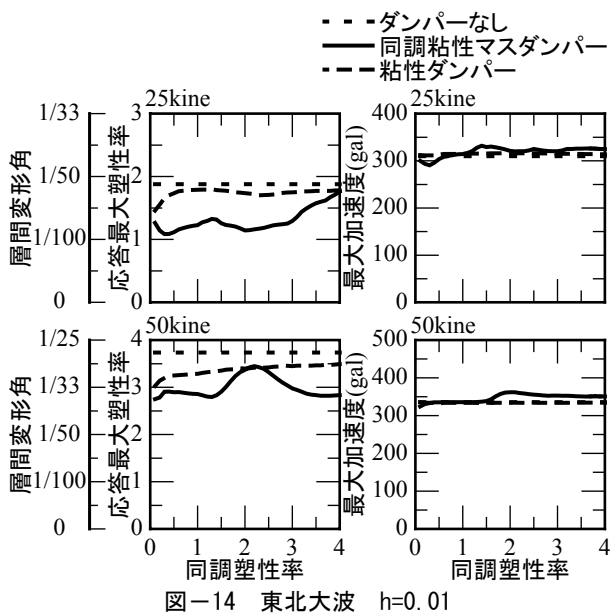


図-20 に、 $h=0.01$ とした場合の地震動による入力エネルギーに対するダンパーが消費したエネルギーの割合を示す。同調粘性マスダンパーは粘性ダンパーと比較してエネルギー消費率が大きく、高いエネルギー吸収能力が発揮されている。また概ね同調塑性率1の付近にエネルギー消費率のピークがあるため、応答最大塑性率が小さくなる点が現れたと考えられる。

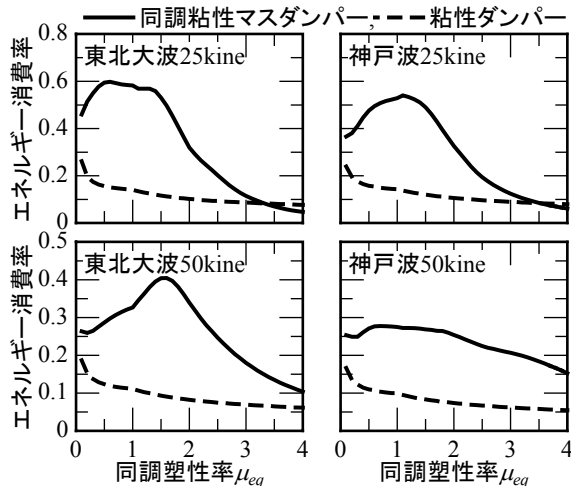


図-20 エネルギー消費率(ダンパー/入力) $h=0.01$

図-21、図-22 に $h=0.01$ 、同調塑性率1とした場合の履歴ループを示す。25kine 入力時では東北大波・神戸波ともに塑性変形が小さく、弾性に近い性状となっている。このときダッシュポット変形は層間変形の2、3倍程度となっているため、ダンパーが消費するエネルギーが大きくなるのがわかる。50kine 入力時では塑性変形が大きくなるものの、ダッシュポットの変形が層間変形に対して2倍程度に拡大されており、同調粘性マスダンパーは高いエネルギー吸収能力を発揮している。

6. まとめ

1 自由度近似した RC 造ピロティ建築物のソフトストーリーに同調粘性マスダンパーを設置し、等価剛性に基づき同調粘性マスダンパーのパラメーターを決定して振動応答解析を行った。その結果、構造物が弾性範囲外である場合にも同調粘性マスダンパーは高い応答低減効果を発揮することを確認した。また解析ケース毎の差はあるものの、同調塑性率1即ち等価剛性を降伏時の割線剛性にあわせてパラメーターを決めた場合に応答最大塑性率が良く低減されており[図-14~図-19]、同調粘性マスダンパーのエネルギー吸収率も概ね大きくなっている[図-20]。以上より、RC 構造物に同調粘性マスダンパーを適用する場合、主架構が塑性率1の時の割線剛性に対する最適同調条件を用いることが最も適切であると言える。

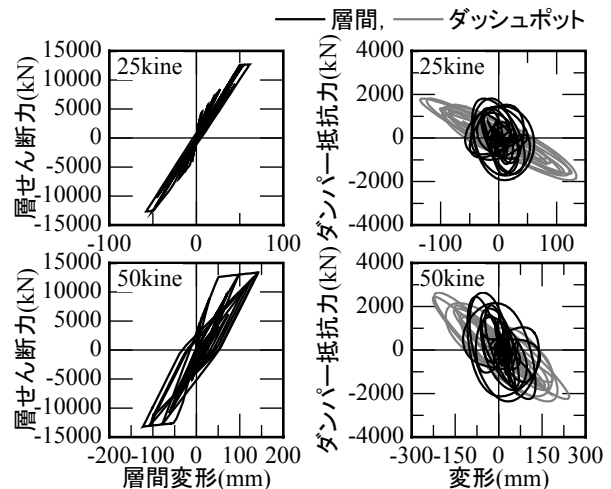


図-21 東北大波 $h=0.01$ 同調塑性率1

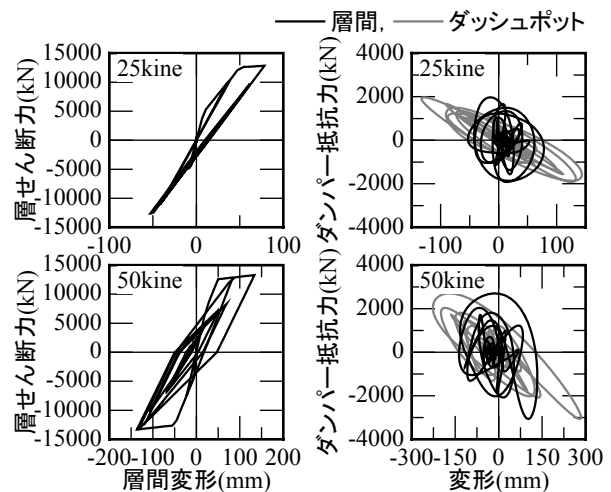


図-22 神戸波 $h=0.01$ 同調塑性率1

参考文献

- 1) 馬華, 鈴木計夫, 文雪峰: 下層部にソフト・ストーリーを有する多層建築物の必要エネルギー吸収能力, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.2, pp.257-262, 1996.7
- 2) 本間誠, 堀則男, 井上範夫: ソフトストーリーを活用して地震時損傷を制御する RC 建物の設計手法, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.1087-1092, 2008.7
- 3) 斉藤賢二, 杉村義文, 井上範夫: 慣性接続要素を利用した粘性ダンパーによる制振構造の応答制御に関する一考察, 構造工学論文集, Vol.54B, pp.635-648, 2008.3
- 4) 油川健樹, 堀則男, 五十子幸樹, 井上範夫: 同調粘性マスダンパーの調和振動応答低減効果に関する比較検討, 日本地震工学会大会 - 2008 梗概集, pp.116-117, 2008.11
- 5) 背戸一登: 産業制御シリーズ 11 構造物の振動制御, コロナ社, 2006.4