

論文 硬化型復元力特性をもつエネルギー吸収デバイスを設置したRC造建物の地震応答性状

康 在完^{*1}・堀 則男^{*2}・井上 範夫^{*3}・川股 重也^{*4}

要旨：RC造建物にエネルギー吸収デバイス(粘弾性ダンパー)を設置して、地震応答を軽減させると共に、過大な変形を制御するリミッターを併設した硬化型復元力特性をもつ損傷制御型システムの地震応答性状について検討した。その結果、中小地震に対してはダンパーによって建物の応答を低減し、大地震に対しては、リミッターにより変形を制御できることが確認された。

キーワード：粘弾性ダンパー，リミッター，硬化型復元力特性，地震応答性状

1. はじめに

筆者らは、より効率的で普及が容易な制振システムの開発を目指した研究を行っており、これまでに、パッシブな制振装置として粘弾性ダンパー等を建物内に設置してエネルギー吸収を行い、主構造体の損傷を軽減させる研究を行ってきた¹⁾。ここで用いる粘弾性ダンパーは変形の小さいレベルで最大速度が生じ大きな減衰力を期待することが出来るので、剛性の大きな鉄筋コンクリート造建物にも適用可能である。本報では、さらにこれらの装置に変形を制御するリミッターを併設して、硬化型復元力特性をもつシステムを考案し、鉄筋コンクリート造建物に適用した場合の有効性を検討した。

従来の設計法では、部材の降伏による吸収エネルギーで地震からの入力エネルギーを消費する考え方にに基づき、部材の降伏、特に梁降伏型の崩壊機構による設計が一般的に行われている。しかし、巨大な海洋型地震などが到来し、地震動の後半に長周期成分が多く含まれている地震波が入力される場合、建物は共振を避けられず大きな変形が生じ過大な損傷を負うことになると思われる。これに対して、本システムでは、

ある変形を超えればリミッターが作動して剛性が高くなり、損傷の拡大を防ぐことが可能となる。ただし、剛性が高くなると応答加速度、ひいては応答せん断力が大きくなるので、剛性の上昇する程度やその変形レベル、入力地震動の特性との関係を十分検討する必要がある。

本研究では、中小地震に対してはダンパーのエネルギー吸収により応答を低減し、大地震に対しては、エネルギー吸収に加えてリミッターの変形制御により建物の損傷の拡大を防ぐことを目指す本システムの有効性を明らかにすることを目的とする。

2. 解析モデル

2.1 建物モデル

検討対象建物を図-1に示す。これは、純ラーメンとして設計された4層モデル建物²⁾の2階から4階部分は剛体と仮定してピロティ型建物に変更したものである。この建物の全質量と1階部分の復元力特性によって1質点系にモデル化したものを、解析に用いる建物モデルとする。図-2と表-1に1質点系建物モデルの復元力特性を示す。

*1 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 工修 (正会員)

*2 東北大学大学院助手 工学研究科 都市・建築学専攻 工博 (正会員)

*3 東北大学大学院教授 工学研究科 都市・建築学専攻 工博 (正会員)

*4 東北工業大学大学院客員教授 工学研究科 建築学専攻 工博

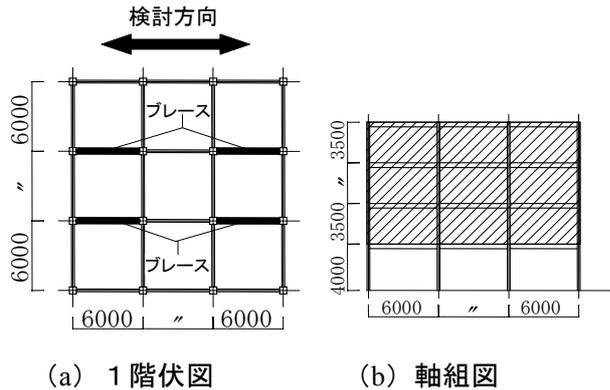


図-1 建物モデル図 (単位: mm)

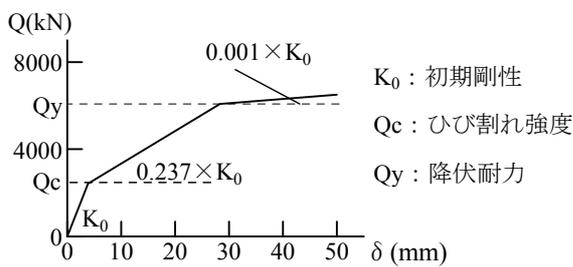


図-2 1質点系建物モデルの復元力

表-1 1質点系建物モデルの復元力

質量 (t)	K_0 (kN/m)	Q_c (kN)	Q_y (kN)	C_y
1525	630140	2420.6	6076.0	0.41

(ここで、 C_y は降伏ベースシア係数)

2.2 支持部材

粘弾性ダンパーを建物に取り付ける方式はさまざまであるが、ここでは鉄骨ブレースを介して設置する方式をとる。

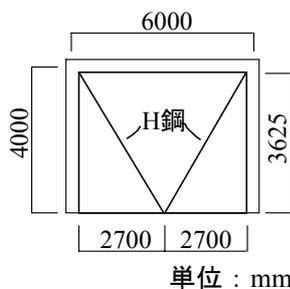


図-3 支持部材取り付け方式

支持部材として用いた鉄骨ブレースを建物に固定して耐震補強材として使う場合の水平剛性

ブレース諸元

- ・断面寸法(mm)
H-250×250×9×14
- ・ヤング係数(N/mm²)
 2.1×10^5
- ・断面積(mm²): 9218

(K_B) および水平力に対するせん断降伏耐力 (Q_Y) は図-3のように部材断面、配置を仮定して H 鋼 2 本を 1set として計算すると、 $K_B=305627\text{kN/m}$, $Q_Y=2643\text{kN}$ である。ただし、ここで用いる支持部材は座屈止めによって座屈はしないものと仮定しており、 Q_Y は H 鋼の圧縮・引張降伏強度で決まっている。

本研究では、このような鉄骨ブレースを図-1 (a)に示すように建物に 4set 設置することにする。また、これらの鉄骨ブレースは、最初から建物に固定して耐震補強材として使う場合と粘弾性ダンパーの支持部材として使う場合に分けてそれぞれの応答を調べることにする。

2.3 粘弾性ダンパー

本報で用いる粘弾性ダンパーは、微小な変形時から機能を発揮すると共に、安定した楕円形の履歴ループを描くアクリル系粘弾性材料を対象とする。図-4に粘弾性ダンパーの基本構造を、図-5に履歴挙動を示す。

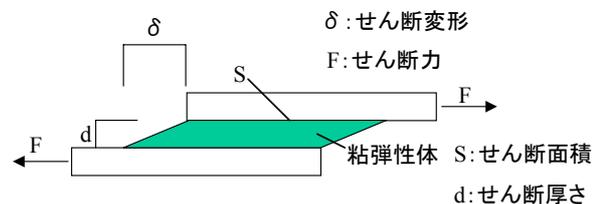


図-4 粘弾性ダンパーの基本構造

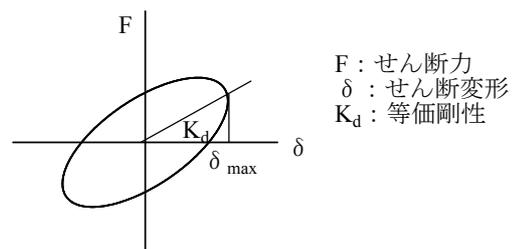


図-5 粘弾性ダンパー履歴挙動(定常応答時)

粘弾性ダンパーは互いに平行な 2 枚の板の相対的な平行移動に伴う粘弾性体のせん断変形により履歴面積を伴う抵抗力を発揮して振動エネルギーを吸収する。粘弾性ダンパーの力学的特性(剛性, 減衰)は振動数に依存して変化する特徴があるため、2 要素のばね-ダッシュポットモデルでは振動数依存性を適切に表現するこ

とが困難である。ここでは、粘弾性ダンパーの抵抗モデルとして図-6に示すような、Maxwell 流体モデルと Kelvin 固体モデルを並列に結合した4要素モデルを用いる¹⁾。本報で用いる建物モデルに組み込んだ場合に、初期剛性に対する建物の粘性減衰定数が5%程度増加するような粘弾性体の量として表-2の値を設定し³⁾、これに対して算定したモデルのパラメータの値を図-6に示している。

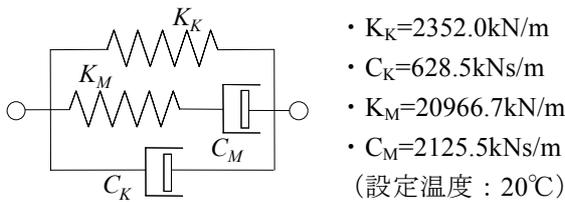


図-6 ダンパーの抵抗モデル (1set)

表-2 粘弾性体の量 (1set)

せん断面積 (mm ²)	せん断厚さ (mm)	層数	許容せん断ひずみ(%)
150000	15	6	300

これらのパラメータを用いた微小変形時の定常応答を図-7に示す。

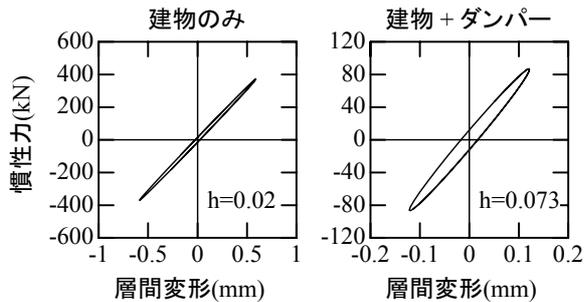


図-7 微小変形時の定常応答

2.4 クッション材

本報で用いる制振システムは、中小地震時のような変形が小さいレベルでは、粘弾性ダンパーによって応答を低減させ、大地震時に降伏するような大きい変形レベルになると、支持部材として用いた鉄骨ブレースがリッターと接触し、最初から建物に固定して耐震補強材として使う場合と同様な働きをする。接触時の衝撃を

緩和するためには写真-1に示すようなゴム製のクッション材を用いる。また、クッション材の圧縮実験結果を図-8に示す。



写真-1 クッション材 (50mm×50mm×8mm)

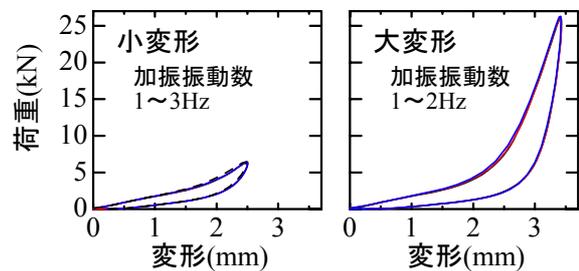


図-8 クッション材単体実験結果

実験結果により、クッション材の荷重履歴には1Hz~3Hzまではそれほど振動数の影響はないことが分かった。解析で用いるためのクッション材の履歴モデルを図-9に示す。

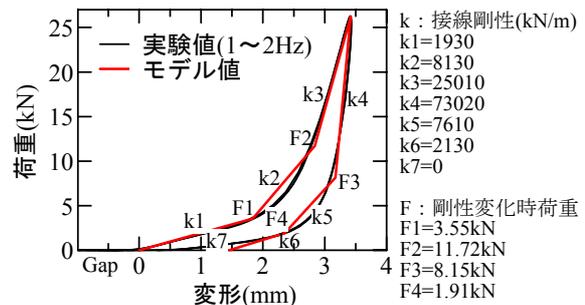


図-9 クッション材履歴モデル

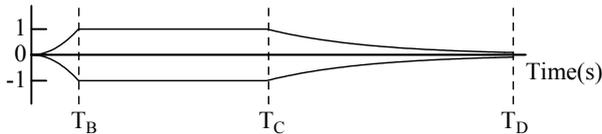
図-9の結果はクッション材の受圧面積が50mm×50mmであるが、以後の検討では、建物に付けることを考慮して受圧面積を5倍と仮定した。

3. 解析条件

3.1 入力地震動

入力地震動は告示で規定された設計用応答ス

ペクトルに対応して作成した模擬地震動を用いた。入力レベルは極めて稀におこる地震動とし、地盤は第二種地盤と仮定し、告示に示す地盤増幅を考慮した。位相特性は一様乱数とし、時刻歴包絡関数は、図-10に示すような Jennings 型を用いた。ここで、主要動が 8 秒の模擬地震動を長波、3 秒のものを短波と呼ぶことにする。



長波(主要動8秒): $T_B=2s, T_C=10s, T_D=20s$
 短波(主要動3秒): $T_B=2s, T_C=5s, T_D=10s$

図-10 時刻歴包絡関数 (Jennings 型)

これらの設定によって得られた模擬地震動の時刻歴波形を図-11に、加速度応答スペクトルを図-12に示す。

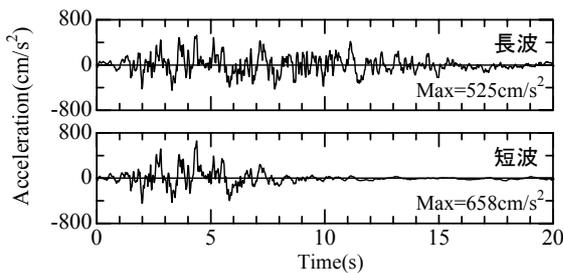


図-11 模擬地震動の加速度時刻歴

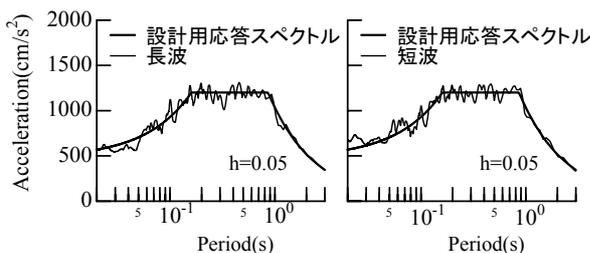


図-12 模擬地震動の加速度応答スペクトル

3.2 解析用建物モデル

解析用の建物モデルは、

- (A) 建物のみ (弾性周期: 0.31s)
- (B) 建物に支持部材を固定 (弾性周期: 0.18s)
- (C) 建物に支持部材を介してダンパー設置
- (D) C-Type にさらにリミッターを設置

の 4 種類を対象とする。建物モデルの一例として、図-13に(D)モデルを示す。

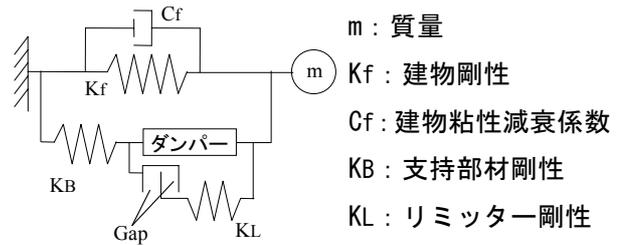


図-13 解析用建物モデル

ここで、運動方程式は次のようになる。

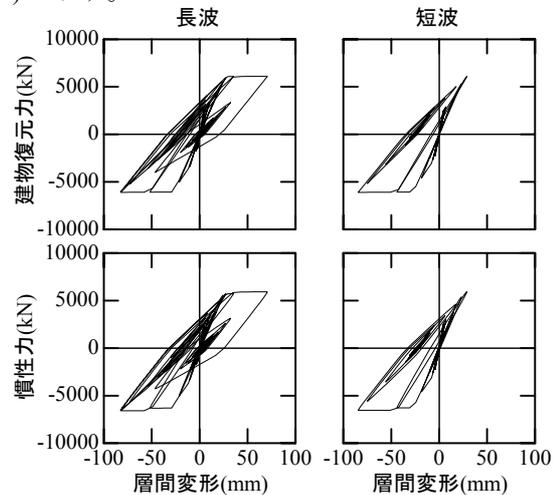
$$m\ddot{x} + c_f\dot{x} + k_f x = -m\ddot{x}_0 - P \quad (1)$$

ここで、 P は粘弾性ダンパーの抵抗力を表わしており、現ステップの減衰項および前ステップの応答値より計算される残りの項を補正力として考慮することが特徴である^{4),5)}。

なお、支持部材、ダンパー、およびリミッターのパラメータはそれぞれの 4set 分を設定値として使う。リミッターが作動する変形の大きさ (Gap) は、建物の塑性率が 1 (層間変形: 28.3mm) の時にリミッターが作動するような変形 (23.4mm) を用いた。また、支持部材は過大な応答となっても降伏させず弾性のままと仮定した。

4. 応答結果の検討

作成した模擬地震動 2 種類を入力波として時刻歴応答解析を行った。まず、中地震として入力波を 50% として行った結果を図-14 の(a)~(c)に示す。



(a) 建物のみ

図-14 地震応答結果 (50%入力)

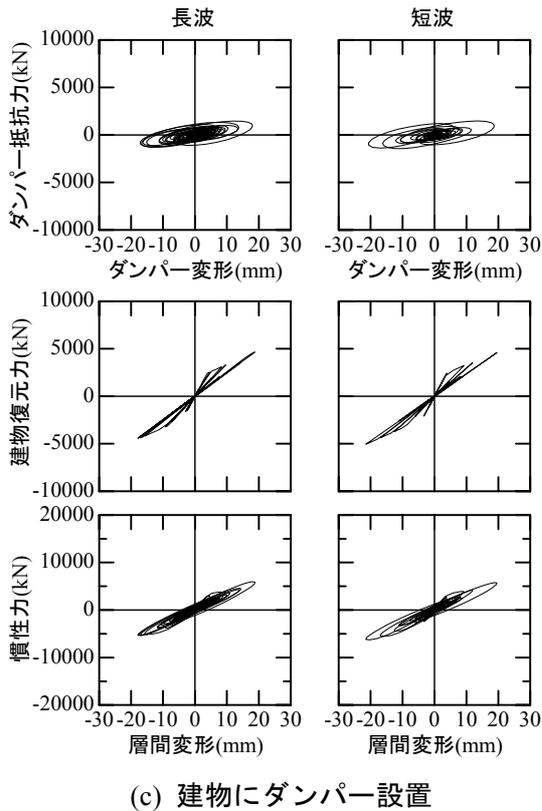
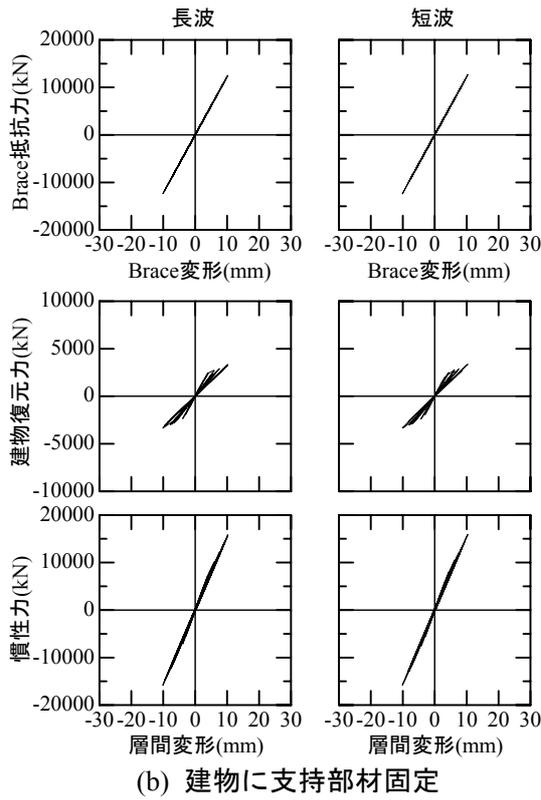


図-14 地震応答結果 (50%入力)

建物のみの場合には長波、短波共に塑性率約3まで変形が進んでいる。これに対して、建物にダンパーを設置した場合には、減衰が付加され

るため建物の層間変形は20mm程度で降伏せず、支持部材も降伏しない。一方、建物に支持部材を固定した場合は減衰が小さく剛性が高いため、建物の層間変形は10mmと小さくなっているものの慣性力がダンパーを組み込んだ時より2倍以上増加しており、実際は支持部材が降伏してしまう。

次に、大地震として入力波を100%にした結果を図-15の(a)~(c)に示す。

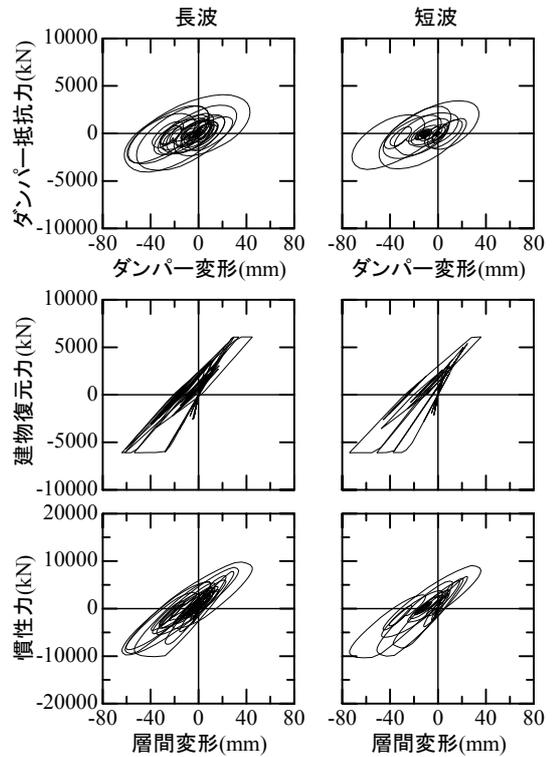
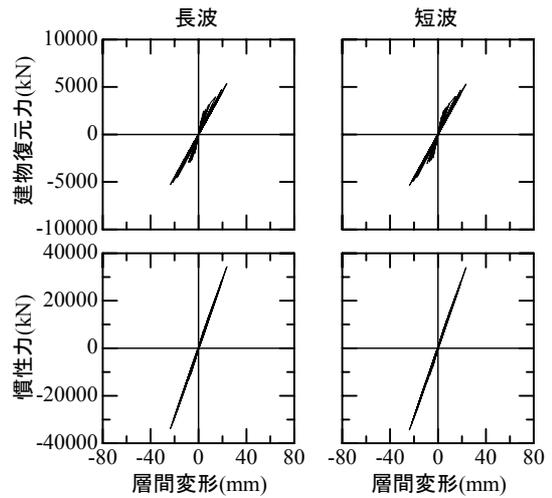
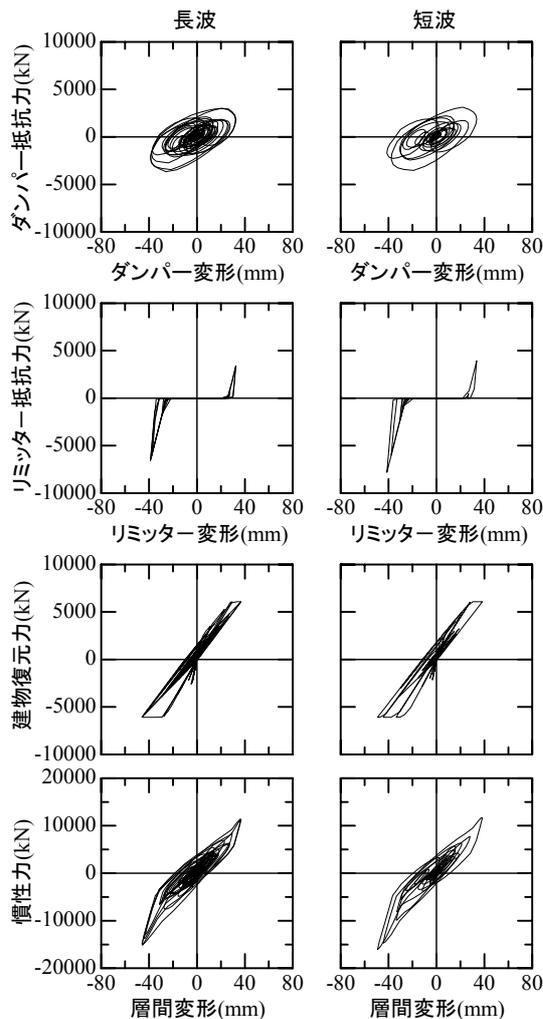


図-15 地震応答結果 (100%入力)



(c) 建物にダンパーおよび
リミッター設置 (Gap=23.4mm)
図-15 地震応答結果 (100%入力)

建物にダンパーのみを設置した場合は、ダンパーによる減衰増加で応答は低減されたが、長波、短波共に変形が進み、特に、短波の場合は変形が片側に流れ建物に塑性率3ぐらいの大変形が生じ、残留変形が8mmである。また、粘弾性体のひずみは最大479%となり、許容値を越えている。一方、建物にダンパーおよびリミッターを設置した場合は慣性力の絶対値は増えたものの塑性率が長波、短波共に約2までに低減され、片流れがなくなり粘弾性体のひずみは276%で許容値以内であり、支持部材も降伏しないことが確認された。これに対して、建物に支持部材を固定し、さらに、支持部材が弾性範囲として仮定した場合は、リミッターを設置した場合に比べると2倍以上の非常に大きい慣性力

が生じ、実際には支持部材が早期に降伏して大きな変形が生じると思われる。

5. まとめ

本報では、新たな制振システムとして提案した硬化型復元力特性をもつエネルギー吸収デバイスを設置したRC造建物の地震応答性状を明らかにするため、模擬地震動を用いた時刻歴応答解析を行い、その特性や有効性の検討を行った。以下に、結論を述べる。

(1) 中地震に対する応答

RC造建物に粘弾性ダンパーを組み込むことにより、減衰が増大して建物の応答が低減された。それに対して、最初から支持部材を固定した一般的な耐震補強では減衰が小さく剛性が高いため、非常に大きい慣性力が生じ、また、支持部材が降伏してしまうことが確認された。

(2) 大地震に対する応答

RC造建物に粘弾性ダンパーのみを設置した場合は、建物が塑性率3ぐらいの大変形が生じ、残留変形も大きかった。また、粘弾性ダンパーは許容ひずみをこえる大変形が生じた。それに対して、リミッターを設置した場合は慣性力の絶対値は増えるものの塑性率が約2までに低減され、粘弾性体のひずみは許容範囲で収まり、また、支持部材も降伏しないことが確認された。

参考文献

- 1) 康在完, 船木尚己, 川股重也: 乱流ダンパーを用いた実大制振試験建屋の振動応答解析, 構造工学論文集, Vol. 48B, pp. 531~536, 2002. 3
- 2) 国土交通省建築研究所, (財)日本建築センター: 日米共同構造実験研究「高知能建築構造システムの開発」平成12年報告書, 2001. 3
- 3) 笠井和彦, 寺本道彦, 大熊潔, 所健: 粘弾性体の温度・振動数・振幅依存を考慮した構成則(その1)線形領域における温度・振動数依存のモデル化, 日本建築学会構造系論文集, No.543, pp.77~86, 2001.5
- 4) 高橋雄司, 曾田五月也: 一般化マックスウェルモデルにより模擬される粘弾性ダンパーを有する構造物の応答解析方法, 日本建築学会構造系論文集, No.511, pp.85~91, 1998.9
- 5) 畑田朋彦, 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, 日本建築学会大会学術講演梗概集B, pp. 645~646, 1994. 9