Architectural Institute of Japan

【カテゴリーII】

日本建築学会構造系論文集　第606号，97-104，2006年8月
J. Struct. Constr. Eng., AIJ, No. 606, 97-104, Aug., 2006

粘弾性ダンパー付き間柱を設置した鉄骨フレームの動的挙動

DYNAMIC BEHAVIOR OF STEEL FRAME INSTALLING STUD COLUMN WITH VISCOELASTIC DAMPER

倉本　洋*1，小平　渉*2，加藤清也*2，松井智哉*3，中村博志*4
所　健*5，植松　工*6，笠井和彦*7，和田　章*8
Hiroshi KURAMOTO, Wataru KOHIRA, Seiya KATO, Tomoya MATSUI,
Hiroshi NAKAMURA, Ken TOKORO, Koh UEMATSU,
Kazuhiko KASAI and Akira WADA

Dynamic loading tests on one bay-three story steel frames installing a stud column with a viscoelastic damper are conducted to investigate the dynamic behavior of the frames and the effect of response control by the damper. A total of six frames are tested with different damper arrangement and loading speeds. Differences of the stiffness, damping properties and story drifts between stories with and without the damper are discussed. It is found that the rotation at the center of beam where the damper attaches significantly affects the behavior of the whole frame and the damper.

Keywords: *Steel frame, Viscoelastic damper, Dynamic loading test, Stud column with damper, Seismic Retrofitting*
鉄骨フレーム，粘弾性ダンパー，動的載荷実験，ダンパー付き間柱，耐震補強

1．はじめに

2005年2月に「住宅の耐震化達成率を現行の75%から2015年度までに90%に引き上げる」という数値目標が発表され、続いて同年10月には「建築物の耐震改修の促進に関する法律の一部を改正する法律案」が第163回国会（特別会）に提出された。これら国土交通省を中心とした行政サイドの一連の動きにより、木造および非木造を問わず遅々として進んでいなかった一般住宅の耐震化も漸く進展の兆しが見えてきたと言えよう。しかし、これまで一般住宅の耐震化が遅れていた主たる原因は安価かつ短工期の居ながら補強構法が開発されていないことにあり、住宅の耐震補強・耐震改修に適した構法を開発することが耐震化を促進する上で技術者・研究者サイドに求められている喫緊の課題である。

近年、居ながら補強を可能とする外付け架構による耐震補強構法に関しては様々なものが提案されてきており、耐震改修マニュアルも整備されるに至っている[1]。一方、応答制御デバイス（制震デバイス）を用いて地震動による建築物の応答を低減させようとする制震建築構造の研究開発も盛んであり[2),3)]、中でもパッシブ系制震システムは新築建築物のみならず既存建築物の耐震補強にも適用される事例が増えてきている[4),5)]。

筆者等もここ数年、鉄筋コンクリート（以後、RCと略記）造共同住宅の耐震補強への適用を念頭において、粘弾性ダンパー付き間柱を比較的耐震性能が低いベランダ側構面内に挿入する制震補強構法の研究開発に取り組んできている[6)]。

従来の制震補強構法では外付け補強、構面内補強を問わず、ブレース型を採用している事例が多く見受けられる。これは文献7)でも指摘されているように、ブレース型構造では水平剛性が周辺フレームの剛性とダンパー・ブレース直列結合体の剛性の和で与えられ、これに即して減衰定数も簡易に求めることができるため、設計が比較的容易であることが一因と考えられる。しかし、ブレース型は開口部を広くとれないという意匠上の問題を抱えている。その点、間柱型は開口部を生かした補強が可能であり、共同住宅などのベランダ側構面の耐震補強に適している。一方、粘弾性ダンパーは速度依存性および温度依存性があり、極低降伏点鋼材等の金属系材料を用いた履歴ダンパーに比べて構造特性の評価が難しく、採用例も少ないのが現状である。しかし、粘弾性ダンパーは微振動から強振動まで幅広い範囲の振動に対して安定した高い減衰効果を発揮するという利点に加え、静的状態では粘弾性体が比較的小さな力で変形するため施工性に優れ、さらに、間柱補強の場合には連層配置による上層部からの軸力の蓄積を設計上

*1 豊橋技術科学大学工学部建設工学系　助教授・博士(工学)　Assoc. Prof., Dept. of Arch. & Civil Eng., Toyohashi Univ. of Technology, Dr. Eng.
*2 豊橋技術科学大学大学院工学研究科　大学院生　Graduate Student, Toyohashi Univ. of Technology
*3 豊橋技術科学大学工学部建設工学系　助手・博士(工学)　Research Assoc., Dept. of Arch. & Civil Eng., Toyohashi Univ. of Technology, Dr. Eng.
*4 新日本製鐵㈱建築事業部　グループマネージャー・博士(工学)　Group Manager, Building Construction Division, Nippon Steel Corporation, Dr. Eng.
*5 住友スリーエム㈱GC技術サービス部　修士(工学)　Commercial Graph. and Const. Technical Service Dept., Sumitomo 3M Limited, M. Eng.
*6 ショーボンド建設㈱東京建築支店技術課　技術課長　Manager, Tokyo Building Construction Branch Office, Sho-Bond Corporation
*7 東京工業大学建築物理研究センター　教授・Ph. D.　Prof., Struct. Eng. Research Center, Tokyo Institute of Technology, Ph. D.
*8 東京工業大学建築物理研究センター　教授・工博　Prof., Struct. Eng. Research Center, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

NII-Electronic Library Service

無視できるという利点も有している。

筆者等は上記のような理由から粘弾性ダンパー付き間柱補強を選択した。第8著者の研究グループはこれまで粘弾性ダンパーを有する制震構造に関する基礎的研究を実施してきており、粘弾性体の温度・振動数・振幅依存を考慮した構成則を提案すると共に[8),9)]、間柱型粘弾性ダンパーを内蔵した1層1スパン鉄骨フレームの動的特性を実験と解析の両面から検討し、その簡易評価法を提案している[7)]。これらの研究から粘弾性ダンパー付き間柱を組み込んだ架構の変形モードおよび履歴減衰特性等は周辺フレームとダンパー（あるいはダンパーを含む間柱）の剛性の割合に大きく依存することが明らかにされている。

本研究では粘弾性ダンパー付き間柱による既存RC造共同住宅の制震補強構法の開発に資する基礎資料を整備することを目的として、上記基礎研究[7)~9)]では未検討であった連層フレームに粘弾性ダンパー付き間柱を組み込んだ場合の架構全体（システム）および粘弾性ダンパーの変形性能および減衰特性に及ぼすダンパー配置および載荷速度の影響等を動的載荷実験により検討した。本論では、動的載荷実験の概要、並びに間柱型粘弾性ダンパーによって補強された3層1スパン架構の動的特性とダンパー補強効果について述べる。

なお、本研究では粘弾性ダンパーの挙動が周辺フレームの変形挙動に及ぼす影響をより明確に検討できるように、周辺フレームには一般的な既存RC造フレームの梁降伏時の等価剛性と同程度の剛性を有する弾性鉄骨フレームを用いることとした。

2．実験概要

2.1 試験体

試験体の形状・寸法を図1(a)に示す。試験体は、実大の約1/3スケールモデルであり、鉄骨フレームと間柱型粘弾性ダンパーにより構成されている。

鉄骨フレームは、1層1スパンフレームの上下に半層分の柱を加えたものであり、ピン支承を取り付けることにより上層および下層の曲げモーメントの反曲点を再現している。なお、本研究は既存RC造建築物に対する間柱型粘弾性ダンパーを用いた制震補強構法の開発を念頭に置いたものであるため、平成16年度に筆者らが実施した「粘弾性ダンパー付間柱を配したRCフレームの動的載荷実験[6)]」で用いた試験体No.1（柱せん断破壊型：ダンパー無）の実験結果に基づいて設計されている。すなわち、図2に示すように鉄骨フレームの初期剛性が試験体No.1における梁主筋降伏時（試験体頂部の相対水平変位とした載荷時）の等価剛性と等しくなるように設計されており、柱にはBH-155×155×9×9（SM490）、および梁にはBH-220×155×9×12（SM490）が用いられている。なお、梁に対する柱の剛比は1.2であり、試験体No.1の梁主筋降伏時付近におけるものと同程度となるように考慮されている。

ダンパーは、アクリル系ポリマーを用いた粘弾性体を鋼板に挟み込むように接着したものである。ダンパーの詳細を図3に示す。中間層に設置するダンパーの粘弾性体は、175×290×4mm 厚さのもの6枚から構成され、せん断総面積は3,045cm^{2}である。上層および下層に設置するダンパーの粘弾性体は、260×290×4mm 厚さのもの8枚から構成されており、せん断総面積は6,032cm^{2}である。なお、上層および下層における粘弾性ダンパーのせん断総面積が中間層におけるものの約2倍になっている。この理由は、文献6)で用いたRC試験体において中間層の内法高さが640mmで、上層柱および下層柱の内法高さの1/2（すなわち、柱脚あるいは柱頭からピン支承までの距離）が340mmであるため、上層および下層の粘弾性体のせん断変形量が中間層のものに対して約1/2となることを考慮して、上層、中層および下層のダンパーの負担せん断力を概ね同量とすることを意図したためである。しかし、RC試験体を前述の設計方針で鉄骨フレームに置

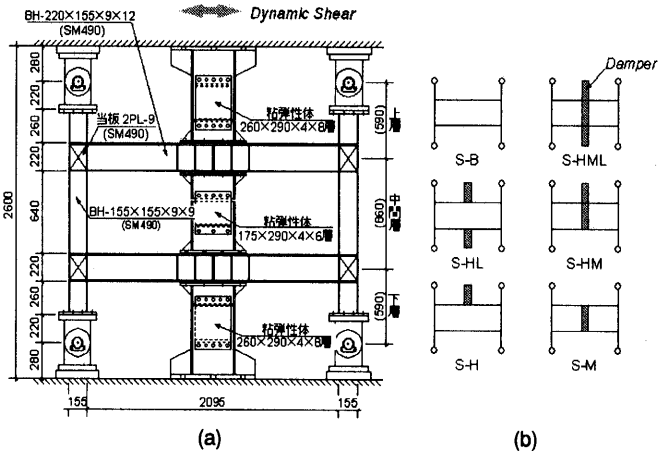

図1 試験体概要

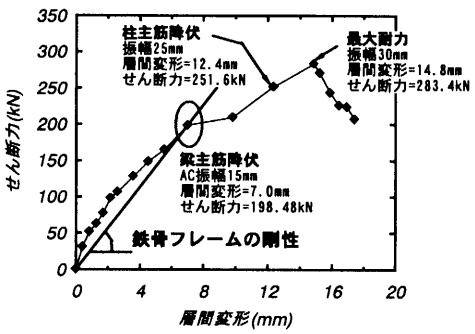

図2 鉄骨フレームの剛性とRCフレームの包絡線

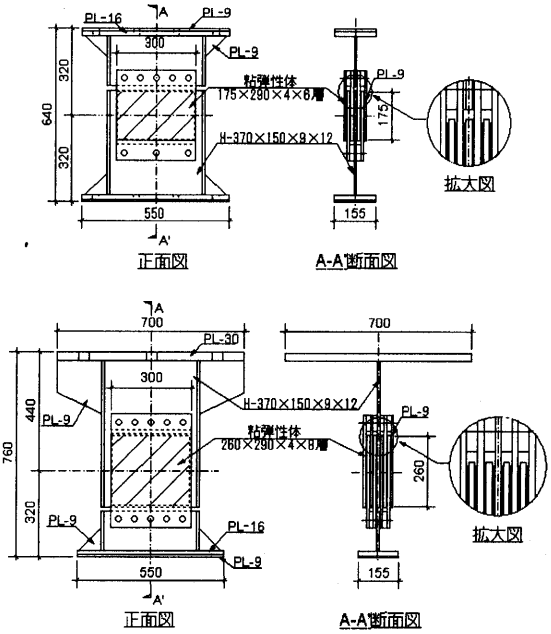

図3 ダンパー形状（上図：中間層、下図：上層および下層）

NII-Electronic Library Service

換した場合、図1に示されるように、上層および下層の柱高さと中間層の柱高さの比率がRC試験体のものと異なったため、鉄骨フレームでは上層および下層におけるダンパーの負担せん断力が中間層におけるものに比して若干大きくなる結果となっている。鉄骨フレームにおいてダンパー量を調整する選択肢も考えられたが、本研究では今後のRC試験体との性状比較を考慮して同一粘弾性体量のダンパーを用いることとした。

試験体の種類はダンパーを設置しないものも含め、図1(b)に示すようにダンパーの配置位置の異なる6種類である。試験体S-Bはダンパーを設置していない鉄骨フレームのみの試験体である。試験体S-HMLはダンパーを各層に1台ずつ用いて全層に設置したものである。試験体S-HLおよびS-HMはダンパー2台を用いて、前者が上層および下層に、後者が上層および中間層にそれぞれ設置したものである。試験体S-MおよびS-Hはダンパー1台用いて、それぞれ前者が中間層のみおよび後者が上層のみに設置したものである。

2.2 載荷方法

本実験で用いた動的載荷装置を写真1に、概略図を図4にそれぞれ示す。実験は、両柱に鉛直マニュアルジャッキ2台を用いて120kNの一定軸力（軸力比：0.075）を負荷した後、動的アクチュエータを用いて水平変位制御による正弦波を入力した。載荷パラメータは表1に示す振動数と振幅とした。ここで、振幅は動的アクチュエータの内蔵変位計より得られたものである。したがって、制御水平変位には載荷フレーム自体の微小変形が含まれるため、試験体の水平変形（全体水平変形：2.3節参照）は制御水平変形よりも若干小さいものとなっている。振動数は粘弾性体の速度依存性を検証するために0.01Hz、0.5Hzおよび1Hzの3種類とした。粘弾性体の温度は熱電対により計測し、常温（23℃～24℃）での管理とした。また、実験は全ての動的載荷において鉄骨フレームが弾性域で挙動するように計画されており、ダンパーの配置位置に拘わらず同一の鉄骨フレームを使用している。

2.3 計測箇所および変形の定義

試験体の変位計および歪計測箇所を図5に示す。図中のD**は変形測定位置（矢印は変位計の正方向）を示し、■印は歪ゲージ貼付位置を表している。なお、主要な変形を以下のように定義する（図6）。

- 全体水平変形：D 35とD 37の平均とD 36とD 38の平均の相対変形
- 上部層間変形：D 35とD 37の平均とD 2の相対変形
- 中間層間変形：D 2とD 3の相対変形
- 下部層間変形：D 36とD 38の平均とD 3の相対変形
- 上部ダンパー変形：D 25とD 23の相対変形
- 中間ダンパー変形：D 16とD 18の相対変形
- 下部ダンパー変形：D 28とD 30の相対変形

また、鉄骨フレームの両柱の負担せん断力（Q_f）は、柱頭および柱脚に貼付した歪ゲージの測定値に基づいて算出した。ダンパーの負担せん断力（Q_d）は、外力からQ_fを差し引いたものとした。ここで、外力は動的アクチュエータのロードセルにより測定した値（以下、AC荷重と呼称）を用いている。なお、図7に示すように歪ゲージ測定値に基づいて算出したQ_fの時刻歴はダンパーを設置していない層においてAC荷重の時刻歴と概ね一致しており、最大荷重時においても誤差は最大で4%程度であった。したがて、Q_fにより鉄骨フレームにおける柱の負担せん断力を評価できるものと判断した。

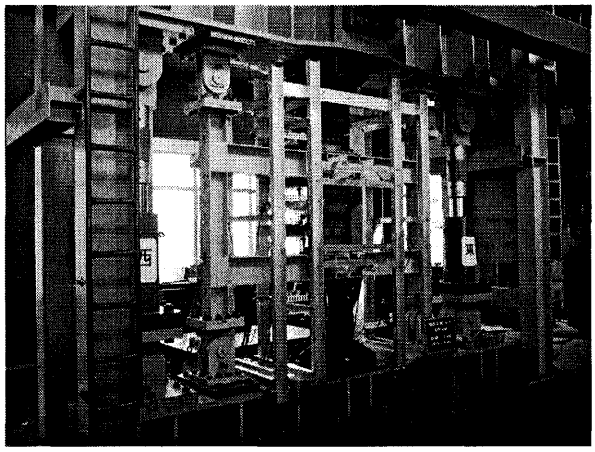

写真1　載荷装置

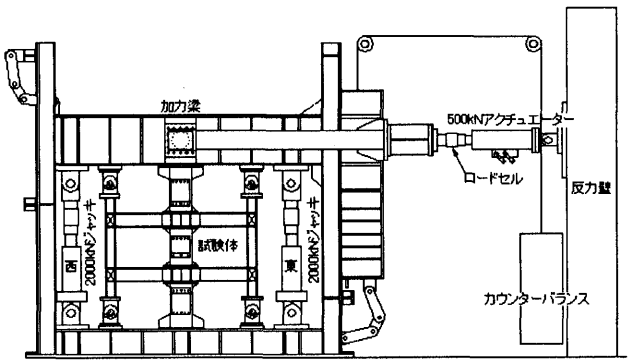

図4　載荷装置概略図

表1　載荷変数

	1mm	2mm	4mm	6mm	8mm	10mm	12mm
0.01Hz	○	○	○	○	○	○	○
0.5Hz		○		○		○	
1Hz	○	○	○	○	○	○	○

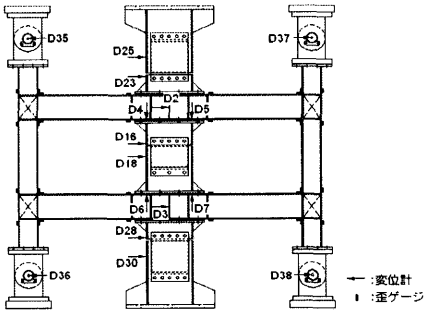

図5　変形および歪計測位置

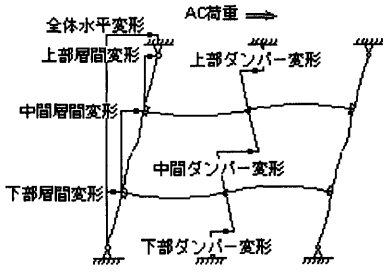

図6　変形の定義

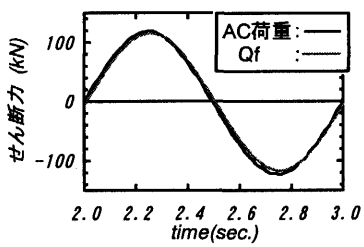

図7　AC荷重とせん断力計算値の比較

NII-Electronic Library Service

3．粘弾性体の温度・振動数・振幅依存性

一般に粘弾性ダンパーに用いられる粘弾性体は、与えられたせん断変形に対して位相差をもつ反力を生じ、仕事を熱へと変換させるものであり、その動的特性は温度・振動数・振幅に依存性があることが知られている。低温または高振動数であるほど粘弾性は硬化して、剛性と減衰定数は大きくなる。また、小振幅の載荷では変形量が増加するに伴って、負担せん断力が比例的に増加する線形的挙動を示す。大振幅では、粘弾性体は軟化し非線形的挙動を示すようになる[9]。本実験においてはこれらの複雑な依存性について以下のように取り扱うこととする。

温度依存性については、粘弾性体の温度は全載荷を通して約23℃から24℃に保たれていたことから、載荷毎の温度変化による挙動の違いはないものとする。また、載荷中における粘弾性体の温度上昇も小さいものであったので、それによる粘弾性体の軟化は無視するものとした。そこで、各載荷における最大応答値は、載荷初期時のアクチュエータによる衝撃荷重の影響を受けず、かつ載荷中の温度上昇量が最小である2サイクル目のものを代表値として用いることとした。

振動数依存性については、振動数1Hz、0.5Hzおよび0.01Hzの載荷を行なっているが、本論では顕著な違いが見られた振動数1Hzおよび0.01Hzの結果について記述することとする。

振幅依存性については、粘弾性体が線形的挙動を示す範囲（せん断歪で概ね300%）内で載荷を行なっている。また、鉄骨フレームは弾性域で載荷しているため図8に示すようにダンパー付鉄骨フレームの履歴性状に顕著な差異は認められない。したがって、以下では振幅10mmの場合を対象として議論を進めることとする。

4．ダンパー付フレームの変形特性とダンパーの負担せん断力

4.1 変形特性

図9は振動数1Hz、振幅10mmにおける2サイクル目の層間変形の時刻歴を示したものである。また、同図右側は層間変形がゼロとなる付近の拡大図である。

試験体 S-B において各層の層間変形には位相差がほとんど生じていない。それに対してダンパーを設置した試験体では、ダンパーを設置している層の層間変形は設置していない層のものに対して位相の遅れが生じている。また、試験体S-Hのダンパーを設置していない中間層と下層を比較すると、下層に比べ中間層に若干の位相の遅れが認められる。これは、上層に設置したダンパーが中間層の挙動に影響を及ぼしているためであると考えられる。ちなみに、試験体S-HとS-HLの上層と中間層の位相差を比較すると、試験体S-HLのほうが位相差は小さくなっていることが確認できる。試験体S-HLは上層および下層にダンパーを設置しているため、中間層の層間変形は2台のダンパーの影響を受けており、1台のダンパーの影響しか受けない試験体S-Hの中間層に比べて変形位相の遅れが顕著となるためである。

4.2 層間変形の最大値比較

振幅10mmにおいて全体水平変形（2.3節参照）が最大となった載荷ステップでの層間変形角の分布を、振動数別に比較したものを図10に示す。

振動数1Hzにおいて、ダンパーを設置していない試験体S-Bに比べてダンパーを設置した試験体の層間変形角分布は、ダンパーを設置した層では抑制され、逆にダンパーを設置していない層には変形が集中するため、試験体S-Bよりも層間変形角が大きくなっている。特にダンパーを上層および中間層に設置している試験体S-HMでは、下層のみに変形が集中するため、下層の層間変形角が全試験体の中で最も大きくなる結果となった（図中の■印）。

振動数0.01Hzにおいてもダンパーを配していない層に変形が集中する傾向が見てとれる。しかし、粘弾性体の速度依存性の影響によりダンパーの剛性が振動数1Hzに比べ小さくなっているため、その傾向は顕著ではなく、層間変形角分布はダンパーを設置していない試験体S-Bの形に近いものとなっていることが確認できる。

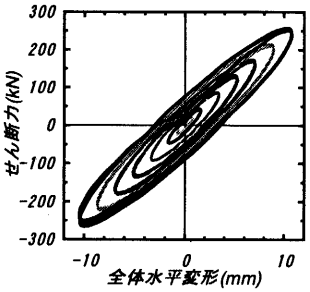

図8　振幅依存性(試験体 S-HML 履歴曲線)

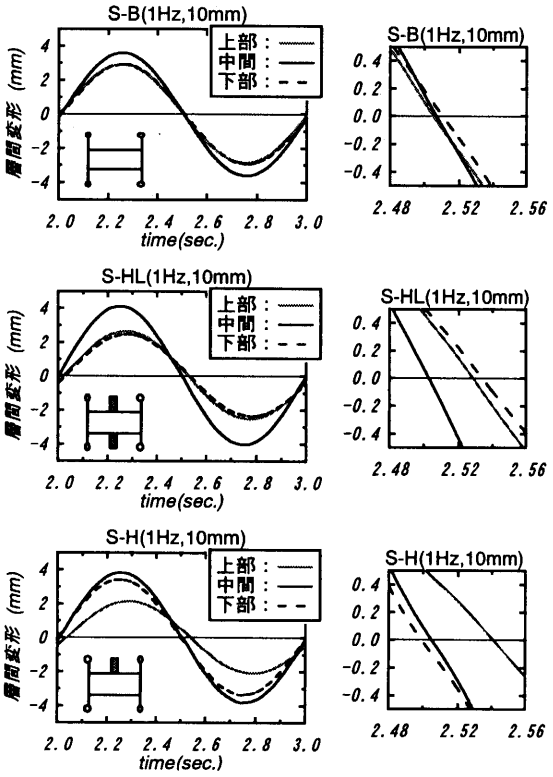

図9　層間変形時刻歴

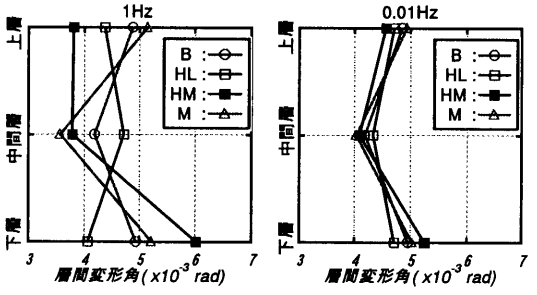

図10　層間変形角分布（左：1Hz,10mm　右：0.01Hz,10mm）

NII-Electronic Library Service

4.3 梁の回転

振幅 10mm における正載荷時の上梁および下梁の中央部での回転角の最大値を振動数別に比較したものを図 11 に示す。梁中央部の回転角は、上梁では変形計 D4 と D5 の測定値の差を、下梁では変形計 D6 と D7 の測定値の差をそれぞれの測定間距離で除して求めたものであり、左回り（反時計回り）を正方向と定義している（変位計番号は図5参照）。ここで、正載荷時に梁が左回りに回転しているということは図12(a)に示すように粘弾性体の変形量が層間変形以上となり、逆に右回りに回転しているということは図 12(b)に示すように粘弾性体の変形量が層間変形以下となることを意味している。

振動数 1Hz の載荷において、試験体 S-HML の上梁および下梁と試験体S-HMの上梁は粘弾性体の変形量を減少させる方向に回転していることが確認できる。これは1つの梁にダンパーが上下連続に設置されたことにより、ダンパーがせん断力を負担するために生じる梁中央部の曲げ戻しモーメントが、梁端部の曲げモーメントを上回ったためである。また、他の試験体においてもダンパーを設置している梁中央部の回転は、上記の曲げ戻しモーメントにより抑制され、試験体 S-B における梁の回転角よりも小さくなっていることが確認できる。

ダンパーを設置している試験体の中で唯一ダンパーが取り付いていない梁を持つ試験体 S-H では、下梁の回転角が全試験体の中で最も大きく、ダンパーを設置していない試験体 S-B よりも大きくなっており、水平変形が最下層に集中していることが見てとれる。

振動数 0.01Hz の載荷では、全ての試験体において粘弾性体の変形量が層間変形よりも大きくなる方向に回転していることが確認できる。これは、低振動数によりダンパー剛性が小さかったためである。

以上の結果より、ダンパーを連層で設置する場合や粘弾性体の剛性が高い場合には、梁中央部の回転を抑制する曲げ戻しモーメントが大きくなり、粘弾性体の変形量が小さくなる傾向があるといえる。

4.4 ダンパー変形

図 13 は振幅 10mm における 2 サイクル目の中間層の層間変形とダンパー変形の時刻歴を示したものである。ここで、ダンパー変形とは 2.3 節で定義したものであり、粘弾性体の水平変形である。

振動数 1Hz の載荷において、試験体 S-HML はダンパー変形の最大値が層間変形の最大値に比べて約 10%小さくなっていることが確認できる。これは 4.3 節で述べたように、ダンパーを連層配置することによって上梁および下梁の回転が抑制され、結果として粘弾性体の最大水平変形量も減少しているためである。試験体 S-HM においても上梁は粘弾性体の変形量を小さくする方向に変形していたが、下梁はその逆に回転していたため、中間層のダンパー変形の最大値は層間変形の最大値とほぼ同程度となっている。また、試験体 S-M では上梁および下梁の回転が粘弾性体の変形量を大きくする方向に回転しているため、ダンパー間変形の最大値は層間変形の最大値より大きくなっている。

一方、振動数 0.01Hz においては、いずれの試験体もダンパー変形の最大値が層間変形の最大値よりも大きくなっている。これは図 12 に示したように、載荷速度を遅くすることにより梁が粘弾性体の変形を大きくする方向に回転していたためである。また、振動数 0.01Hz では位相差は極めて小さいことが見てとれる。

また、ダンパー変形と層間変形の位相差に着目すると、振動数 1Hz において位相差が生じていることが確認できる。位相差は試験体 S-M →S-HM→S-HML の順に大きくなっている。すなわち、ダンパーの設

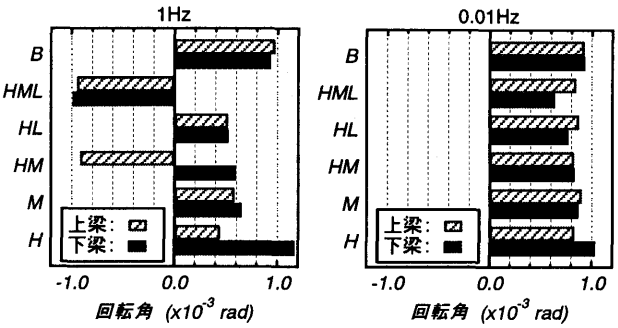

図 11 梁の回転角（左：1Hz,10mm 右：0.01Hz,10mm）

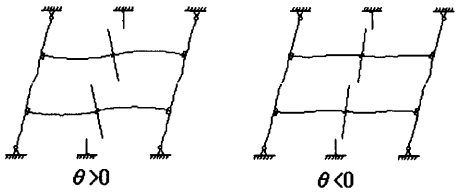

図 12 梁回転模式図

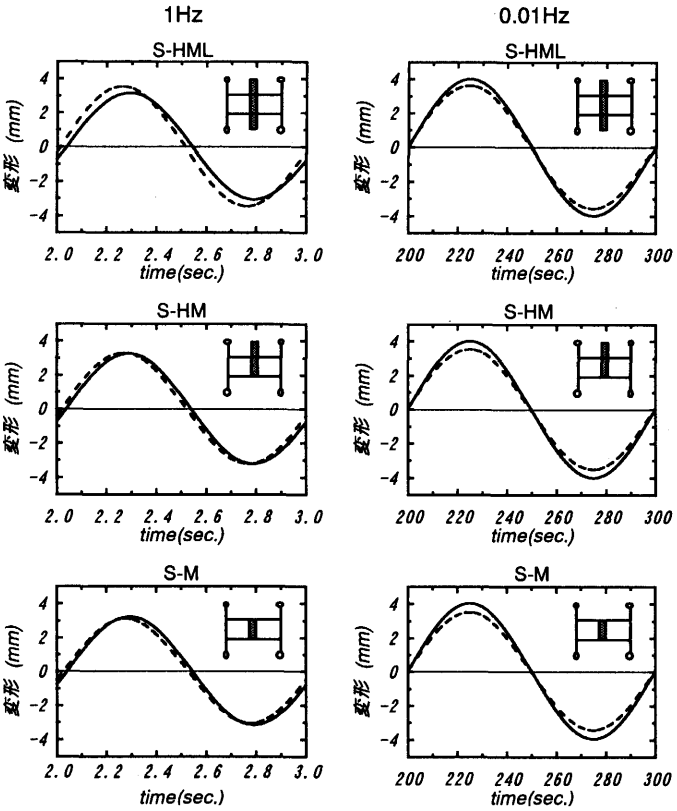

図 13 振幅 10mm におけるダンパー変形

表 2 ダンパーのせん断力負担率

試験体	1Hz ダンパーのせん断力負担率 Qd/AC荷重 上	中	下	0.01Hz ダンパーのせん断力負担率 Qd/AC荷重 上	中	下
B	-	-	-	-	-	-
HML	▼ 0.507	▼ 0.384	▼ 0.532	▼ 0.246	▼ 0.183	▼ 0.224
HL	0.596	-	△ 0.623	0.260	-	△ 0.238
HM	0.508	0.464	-	0.251	0.192	-
H	△ 0.617	-	-	△ 0.267	-	-
M	-	△ 0.556	-	-	△ 0.209	-

注）試験体S-Bを除く試験体のうち、各層の最大値は△、最小値は▼で示している。
塗りつぶされたセルは、ダンパーを設置している層を示す。

NII-Electronic Library Service

置台数が多いほど位相差が大きくなっているといえる。また、これらの結果からダンパー間変形と層間変形の位相差は隣接している層のダンパーの影響を受けていると推察される。

4.5 ダンパーのせん断力負担率

表2に振幅10mmにおけるダンパーのせん断力負担率を示す。ここで、ダンパーのせん断力負担率とはダンパーの負担せん断力 Q_d の最大値（$Q_{d\max}$）をAC荷重の最大値（$Q_{AC\max}$）で除したものである（ただし、$Q_{d\max}$ と $Q_{AC\max}$ の発生時刻は位相差により若干異なる）。

振動数 1Hz および 0.01Hz の結果より、全ての層において試験体S-HML のダンパーのせん断力負担率が全試験体の中で最も小さいことがわかる（表中▼印）。また、ダンパーのせん断力負担率が各層で最も大きくなっているのは、上層で試験体S-H、中間層で試験体S-M、下層で試験体S-HLとなっていることが認められる。つまり、ダンパーの負担せん断力のみに着目すると、ダンパーを連層配置するよりも不連続に配置したほうが、ダンパーの効率は良い結果となっている。

5．荷重変形曲線

5.1 荷重－全体水平変形関係

図14に振幅10mmにおけるAC荷重と上下のピン支承間の相対変形（全体水平変形：2.3節参照）の関係を示す。また、AC荷重－全体水平変形関係から求めた等価剛性（複素剛性）、等価粘性減衰定数、1サイクルあたりのエネルギー吸収量、粘弾性体の単位面積あたりのエネルギー吸収量、および式(1)で定義した粘弾性体のせん断歪の総和 γ をそれぞれ表3に示す。

$$\gamma = \sum_{i=1}^{3} n_i \cdot u_i / t \qquad (1)$$

ここに、n_i ：i 層における粘弾性体の枚数

u_i ：i 層における粘弾性体のせん断変形量（同一層ではすべて同じ変形量と仮定）

t ： 粘弾性体の厚さ

振動数1Hzの載荷において、試験体S-HMLは全試験体の中で剛性、等価粘性減衰定数およびエネルギー吸収量が最大であり、制震補強効果が最も高い試験体であるといえる。これは、使用した粘弾性体の総量が最も多い試験体であることから妥当な結果である。また、4.4節で示したように、ダンパーを連層配置したことによりダンパー変形とダンパー荷重に大きな位相差が生じたことが高減衰性能に繋がったものと考えられる。一方、ダンパーを2台設置している試験体S-HLとS-HMを比較すると、粘弾性体の総量は試験体S-HLのほうが1.3倍多く使用しているにも拘わらず、剛性、等価粘性減衰定数およびエネルギー吸収量に大差はなく、試験体S-HLがS-HMよりも若干上回っているにすぎない。また、ダンパーを1台設置している試験体S-Mと試験体S-Hでは、試験体S-Hのほうが2倍の粘弾性体量を使用しているが、剛性、等価粘性減衰定数およびエネルギー吸収量の何れも試験体S-Mのほうが大きい結果となっている。これらは、上層および下層に設置したダンパーの変形量に比べ、中間層に設置したダンパーの変形量が大きかったことに加え、4.2節で述べたように、試験体S-Mが中間層にダンパーを配していることで、ダンパーによる減衰効果が上下2層にも影響を及ぼしたためと推察される。粘弾性体の単位面積あたりのエネルギー吸収量に着目すると、試験体S-Mが全試験体の中で最も大きい結果となった。これは、ダンパーのせん断力の負担率が高いこと（4.5節参照）に加え、ダンパーの変形量が大きかったためと推察される。

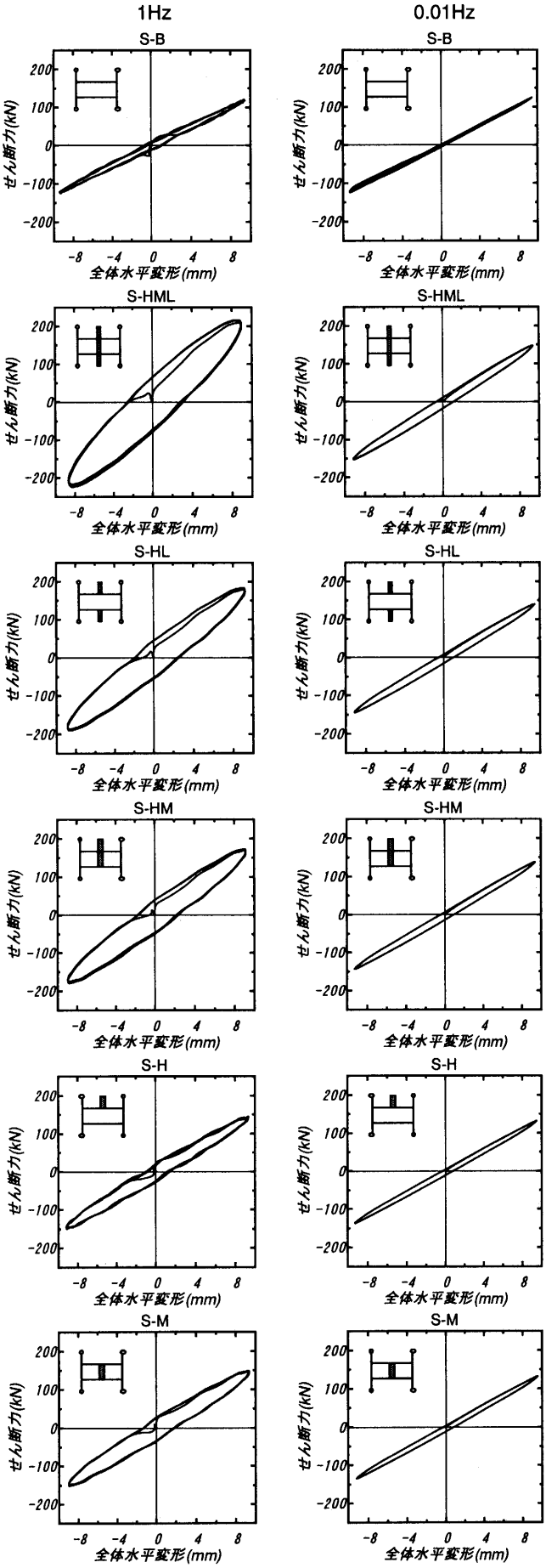

図14 振幅10mmにおける荷重－変形曲線

NII-Electronic Library Service

また、エネルギー吸収量は式(1)で求めたγが大きいほど、大きくなっていることが確認できる。以上の結果より、粘弾性体の総量を増加させるだけでなく、粘弾性体の変形量を大きくするようにダンパーを適所へ配置することによっても十分な制震補強効果を得ることができるといえる。なお、振動数0.01Hz載荷においても振動数1Hzの場合と同様に、ダンパーを設置した試験体はダンパーを配していない試験体S-Bに比べて剛性、等価粘性減衰定数およびエネルギー吸収量が大きくなる傾向が認められるが、その度合いはわずかであり、ダンパーの設置台数による差異も顕著には認められない。

5.2 各層の荷重－変形曲線

図15に試験体S-HML、S-HL、S-HMおよびS-Hの振動数1Hz、振幅10mmにおける各層の荷重変形曲線を示す。図中の太実線、破線および細実線はそれぞれAC荷重－層間変形関係（システム）、Q_d－ダンパー変形関係（ダンパー）およびQ_f－層間変形関係（フレーム）を

表３　AC 荷重－全体水平変形関係における履歴特性（振幅 10mm）

粘弾性体のせん断総面積 (cm^2)	試験体	1Hz 剛性 (kN/mm)	1Hz 等価粘性減衰定数	1Hz エネルギー吸収量 (kNmm)	1Hz 単位面積あたりのエネルギー (Nmm/mm^2)	1Hz せん断歪の総和γ	0.01Hz 剛性 (kN/mm)	0.01Hz 等価粘性減衰定数	0.01Hz エネルギー吸収量 (kNmm)	0.01Hz 単位面積あたりのエネルギー (Nmm/mm^2)	0.01Hz せん断歪の総和γ
0	B	13.0	0.032	228	-	-	13.1	0.019	139	-	-
15109	HML	△ 24.9	△ 0.160	△ 1938	1.282	△ 14.32	△ 16.2	△ 0.050	△ 440	▼ 0.291	△ 18.18
12064	HL	20.6	0.128	1357	1.125	9.52	15.3	0.044	369	0.306	12.13
9077	HM	19.2	0.118	1165	1.284	8.92	15.1	0.039	321	0.353	11.71
6032	H	▼ 15.9	▼ 0.072	▼ 614	▼ 1.019	▼ 4.02	14.3	▼ 0.031	▼ 247	0.409	5.99
3045	M	16.3	0.095	822	△ 2.698	4.78	▼ 14.3	0.032	248	△ 0.814	▼ 5.69

注）試験体S-Bを除く試験体のうち、最大値は△、最小値は▼で示している。

表４　各層の剛性・等価粘性減衰定数・エネルギー吸収量（振幅 10mm）

振動数	試験体	システムの剛性 Ks (kN/mm) 上	中	下	システムの等価粘性減衰定数 heq 上	中	下	システムのエネルギー吸収量 (kNmm) 上	中	下
1Hz	B	42.3	33.8	41.8	0.024	0.032	0.040	52	87	88
	HML	△ 79.7	△ 62.7	△ 86.0	0.162	△ 0.148	△ 0.175	△ 613	△ 711	△ 614
	HL	72.2	45.7	77.4	0.157	0.083	0.174	473	394	490
	HM	76.8	53.3	48.5	△ 0.165	0.140	0.067	405	498	262
	H	69.6	▼ 38.5	▼ 43.4	0.154	▼ 0.054	▼ 0.041	299	▼ 190	▼ 127
	M	▼ 49.2	48.6	48.5	▼ 0.076	0.135	0.073	▼ 217	392	213

注）試験体S-Bを除く試験体のうち、各層の最大値は△、最小値は▼で示している。
塗りつぶされたセルは、ダンパーを設置している層を示す。

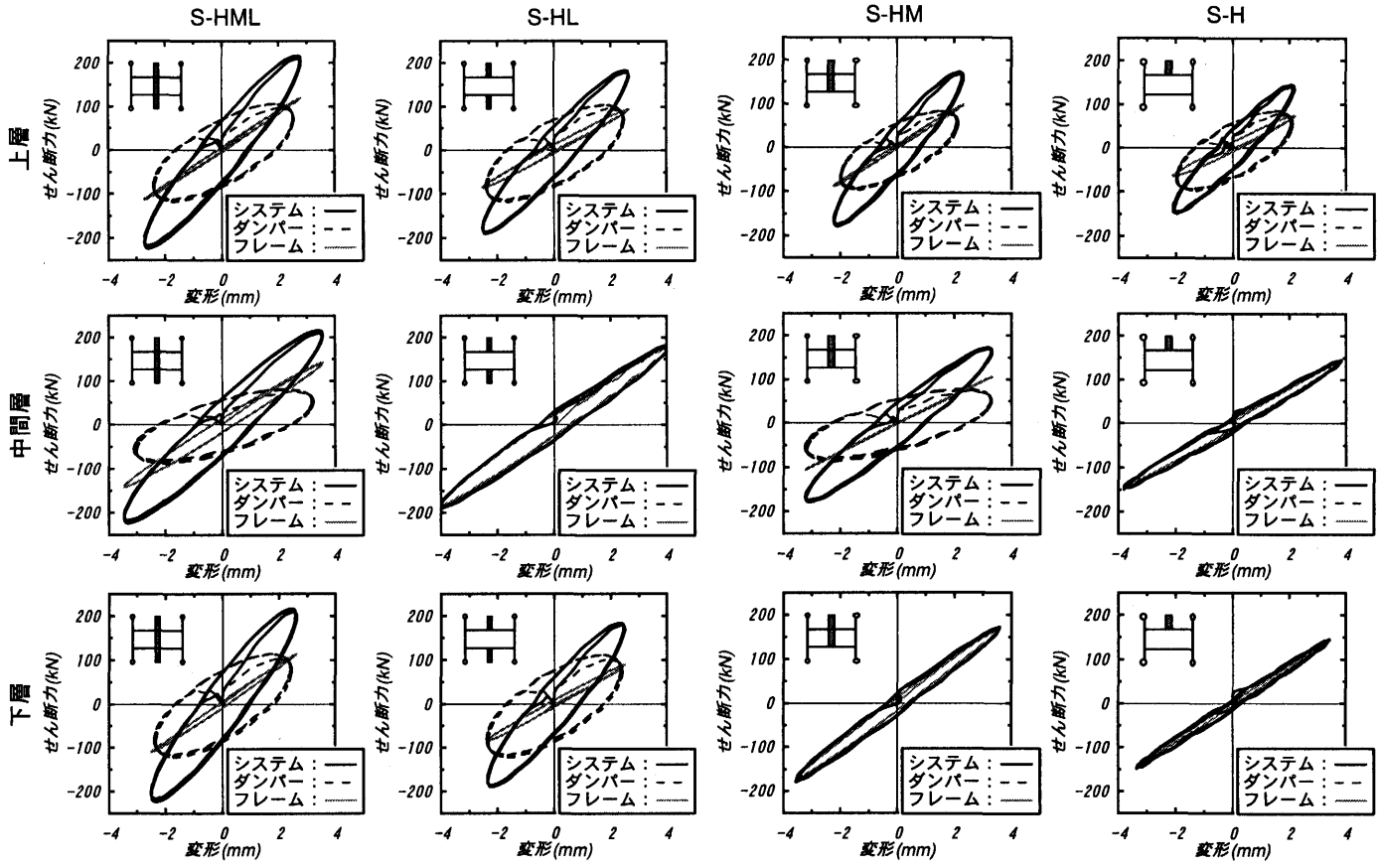

図 15　振動数 1Hz、振幅 10mm における各層の荷重－変形曲線

NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan

示している。また、表4にはシステムの荷重変形曲線から求めた各層の剛性、等価粘性減衰定数およびエネルギー吸収量を示している。

(a) システムの剛性

表4より、ダンパーを設置している層の剛性は、試験体 S-B の剛性に比べて格段に大きくなっていることが確認できる。特に試験体 S-HML の剛性が全試験体の中で最も大きく、試験体 S-B の剛性に比べて全ての層で約2倍となっている。上層にダンパーを設置している試験体の上層の剛性を比較すると、試験体 S-HML→S-HM→S-HL→S-H の順で剛性が大きいことが確認できる。この結果からダンパーを設置している層の剛性は、ダンパーを不連続に配置するよりも連続で配置するほうが大きくなるといえる。この傾向は、中間層および下層においても確認できる。また、ダンパーを設置している層に隣接するダンパーを設置していない層の剛性に着目すると、試験体 S-B の剛性に比べ若干大きくなっていることが認められる。これは、梁にダンパーを設置することで、梁の剛性が増加したためである。ちなみに、試験体 S-HL の中間層ではダンパーを設置している層に挟まれているため、剛性は試験体 S-B の約 1.35 倍となっている。

(b) システムの減衰特性

ダンパーを設置している層に隣接しているダンパーを設置していない層に着目すると、ダンパーを設置していないのにも拘わらず履歴減衰が生じていることが認められる（試験体 S-HL の中間層、試験体 S-HM の下層および試験体 S-H の中間層）。これは、4.1 節で述べたようにダンパーを設置した層の影響により、ダンパーを設置していない層の層間変形に若干の位相の遅れが生じているためである。したがって、ダンパーを設置している層に挟まれてダンパーの配していない層が存在する試験体 S-HL においては、ダンパーを配していない層の中で最も大きい履歴減衰が生じている。また、試験体 S-H に着目すると、中間層において履歴減衰が生じているものの、下層ではほとんど認められない。

試験体 S-HML、S-HL および S-HM における上層のシステムの履歴減衰を比較すると、等価粘性減衰定数には大差がないものの、エネルギー吸収量では試験体 S-HML が飛び抜けて大きいことがわかる。これは、試験体 S-HL や S-HM ではダンパーを配していない柔な層に変形が集中するため、ダンパーを配している層の変形が小さくなるためである。

6．まとめ

粘弾性ダンパー付き間柱による既存 RC 造共同住宅の制震補強構法の開発に資する基礎資料を整備することを目的として、既往の研究では未検討であった連層フレームに粘弾性ダンパー付き間柱を組み込んだ場合の架構全体（システム）および粘弾性ダンパーの変形性能と減衰性能等に関する基本特性を把握するために、鉄骨フレームを用いた動的載荷実験を実施した。

本研究で得た知見は以下のように要約できる。

(1) ダンパーを設置した層の層間変形は、設置していない層の層間変形に比べて位相の遅れを生じる。また、ダンパーを設置した層に隣接したダンパーを設置しない層の層間変形もダンパー設置層の影響を受け若干の位相の遅れを生じる。

(2) ダンパーを設置した層では層間変形が抑制され、逆にダンパーを設置していない層に変形が集中する傾向がある。

(3) ダンパーを連層で設置する場合や粘弾性体の剛性が高い場合には、梁中央部（ダンパー取り付け部）の回転を抑制する曲げ戻しモーメントが大きくなり、粘弾性体の変形量が小さくなる傾向がある。

(4) 動的載荷では、ダンパーを取り付けた中間層のダンパー変形と層間変形に位相差が生じる。その大きさは、当該層の上下層のダンパー配置状況に影響を受ける。これは梁中央部での回転が抑制されることに起因するものであり、隣接層にダンパーが設置されている場合には位相差が大きくなる傾向がある。

(5) ダンパーを不連続に配置した場合には、連層で配置した場合に比べてダンパーの取り付く梁中央部の回転が大きくなり、粘弾性体の変形量が大きくなるため、ダンパーの1台のせん断力負担率やエネルギー吸収量は大きくなる。したがって、粘弾性体の総量を増加させるだけでなく、粘弾性体の変形量を大きくするようにダンパーを適所へ配置することによって制震補強効果を向上させることができる場合もある。

(6) ダンパー付き間柱を設置することにより、当該層の剛性およびエネルギー吸収量が増加することはもとより、ダンパーを設置した層に隣接するダンパーを設置しない層の剛性およびエネルギー吸収量も若干増加する。これは、ダンパーを設置することにより隣接する層と共有する梁の剛性が増加すると共に、その影響で隣接層の層間変形に若干の位相の遅れが生じるためである。

謝　辞

本研究の一部は、平成17年度日本鉄鋼連盟研究助成（研究代表者：倉本洋）によって行われた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

1) 日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の外側耐震改修マニュアル－枠付き鉄骨ブレースによる補強－、134pp.、2002.7
2) 東京工業大学建築物理研究センター：パッシブ制震構造シンポジウム 2000 論文集、367pp.、2000.3、同 2001 論文集、297pp.、2001.12、同 2002 論文集、357pp.、2002.12、同 2004 論文集、354pp.、2004.11
3) 日本建築構造技術者協会編：応答制御構造設計法、彰国社、445pp.、2000.12
4) 日本コンクリート工学協会：耐震補強の評価に関する研究委員会報告書・論文集、592pp.、2000.6
5) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の応答制御技術研究委員会報告書・論文集、2002.6
6) 加藤清也、倉本洋、笠井和彦、和田章：粘弾性ダンパー付間柱を配した RC フレームの動的載荷実験、コンクリート工学年次論文集、Vol.27、No.2、2005.6
7) 笠井和彦、城台顕：間柱型粘弾性ダンパーをもつ制振構造の動的特性と挙動およびそれらの簡易評価法に関する研究、日本建築学会構造系論文集第 558 号、pp.125-132、2002.8
8) 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、 第 543 号、pp.77-86、2001.5
9) 笠井和彦、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2：温度上昇および歪・歪速度がもたらす非線形性を考慮した構成則）、日本建築学会構造系論文集、 第 561 号、pp.55-63、2002.11

（2006年1月10日原稿受理，2006年4月24日採用決定）

NII-Electronic Library Service