

論文 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

加藤 清也^{*1}・倉本 洋^{*2}・笠井 和彦^{*3}・和田 章^{*4}

要旨：既存建築物に対する制震補強工法の開発を目的として、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を実施した。本論では、RC フレームの動的挙動に及ぼす変位振幅、入力速度およびダンパーの有無の影響、ならびに粘弾性ダンパーによる補強効果に関する検討結果を示す。

キーワード：制震補強，制震ダンパー，動的載荷，接着接合

1. はじめに

近年、既存不適格建築物に対する耐震補強・耐震改修に制震工法を採用する事例が増えている。その中でも、間柱型制震補強は開口部を広くとれることができる等、意匠上の問題が少ないため共同住宅等の耐震補強工法として注目されている。しかし制震間柱を用いた補強は従来の制震ブレース補強とは異なり、制震ダンパーの挙動が周辺フレームや間柱の剛性に大きく影響される¹⁾。特にダンパー変位とダンパー力の位相差にその性能が大きく依存する粘弾性ダンパーによる間柱型補強工法の動的特性は、いまだ明らかにされていない点が多い。

そこで粘弾性ダンパー付間柱を配した 1 層 1 スパン鉄筋コンクリート (RC) フレームの動的載荷実験を実施し、当該ダンパーによる制震

補強効果を検討した。本論では動的載荷実験の概要を述べると共に、粘弾性ダンパー付間柱を配した RC フレームの動的挙動に及ぼす変位振幅、入力速度およびダンパーの有無の影響、ならびに粘弾性ダンパーによる補強効果に関する検討結果を示す。

2. 試験体概要

2.1 RC フレーム

図 - 1 に試験体の形状・寸法を、表 - 1 に部材断面詳細および概要を示す。試験体は実大の約 1/3 スケールモデルの 1 層 1 スパンフレームで、間柱型制震ダンパー (以下、ダンパーと略記) をスパン中央に配した 2 体、ダンパーを配さない 1 体の計 3 体である。実験変数には RC フレームの崩壊モード (梁降伏先行型および柱せん断

表 - 1 部材断面詳細および概要

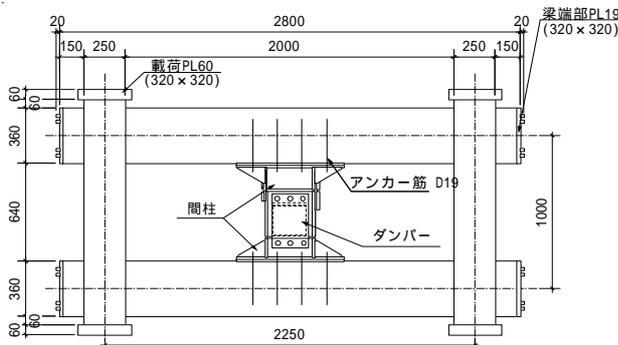


図 - 1 試験体形状

試験体名		No1	No2	No3
柱	B × D (mm)	250 × 250	250 × 250	250 × 250
	主筋	8-D16	8-D16	8-D16
	帯筋	D6-φ150	D6-φ150	D6-φ75
梁	B × D (mm)	200 × 360	200 × 360	200 × 360
	主筋	16-D16	16-D16	12-D13
	帯筋	D6-φ50	D6-φ50	D6-φ50
破壊モード		柱せん断破壊 先行型	柱せん断破壊 先行型	梁曲げ破壊 先行型
ダンパー有無		無	有	有

表 - 2 鉄筋材料特性・コンクリート材料特性

種別	材質	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	試験体	
				B	(N/mm ²)
D16	SD295	340	519	No1	22.8
D13	SD295	333	497	No2	23.3
D6	SD295	449	572	No3	24.2

*1 豊橋技術科学大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 豊橋技術科学大学 工学部建設工学系 助教授 博士 (工学) (正会員)

*3 東京工業大学 建築物理研究センター 教授 Ph.D.

*4 東京工業大学 建築物理研究センター 教授 工博

破壊先行型), ダンパーの有無および粘弾性体の温度を選択した。試験体 No1 および No2 の 2 体は同一配筋で柱せん断破壊先行型であり, ダンパーの影響を比較するものである。試験体 No3 は配筋が他の 2 体と異なり梁曲げ破壊型である。また, 試験体 No2 および No3 ではダンパーの粘弾性体の温度が異なる。表 - 2 に鉄筋およびコンクリートの材料特性を示す。

2.2 粘弾性ダンパー

粘弾性体は外力仕事を分子運動により熱エネルギーに変換する材料であり, 様々な分野で振動減衰材として用いられている。図 - 2 のように粘弾性体にせん断変形を生じさせると, せん断歪に伴う変位 u とせん断応力による力 F の位相差から減衰効果が生まれる (図 - 3)。粘弾性体の力学特性が温度や変形速度に依存することは, 分子運動のそれらへの依存性から理解されている。一般に本実験で採用したアクリル系材料によるダンパーの荷重 - 変形曲線は楕円となり (図 - 3), 低温または高振動数になるにつれて楕円の傾きと面積, すなわち剛性とエネルギーが増加することが知られている²⁾。

本実験で用いたダンパーの粘弾性体は, 縦 190mm, 横 200mm, 厚さ 4mm のアクリル系ポリマー (アクリル系粘弾性体) を 8 枚使用し鋼板に挟み込むように接着している。粘弾性体の温度および剛性を表 - 3 に示す。また, ダンパー

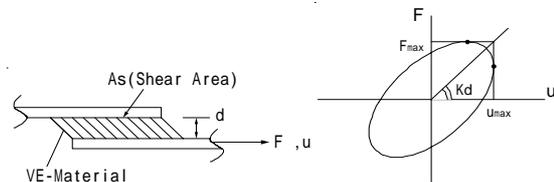


図 - 2 粘弾性体のせん断変形

せん断変形

図 - 3 粘弾性体の履歴線

表 - 3 粘弾性体概要

試験体名	No1	No2	No3
ダンパー有無	無	有	有
粘弾性体温度		19	31
振動数 (Hz)	ダンパー複素剛性 K_d (kN/mm)		
	No1	No2	No3
0.01		4.1	3.4
1		21.0	10.0
0.5		14.9	7.6

と RC フレームの定着はアンカー (D19) による機械的接合とエポキシ樹脂による接着接合を併用した固定方法で行った³⁾。

3. 実験方法

図 - 4 に荷重装置の概略を示す。また, 図 - 5 に試験体 No2 および No3 における梁中央およびダンパーに取り付けた変位測定位置を示す。ダンパー無しの試験体 No1 もこれに準ずるものとした。図 - 6 に試験体 No1 および No2 の各鉄筋に貼り付けた歪ゲージ位置を示す。試験体 No3

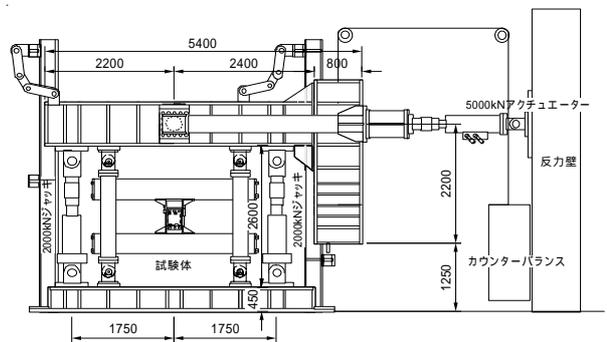


図 - 4 荷重装置概略図

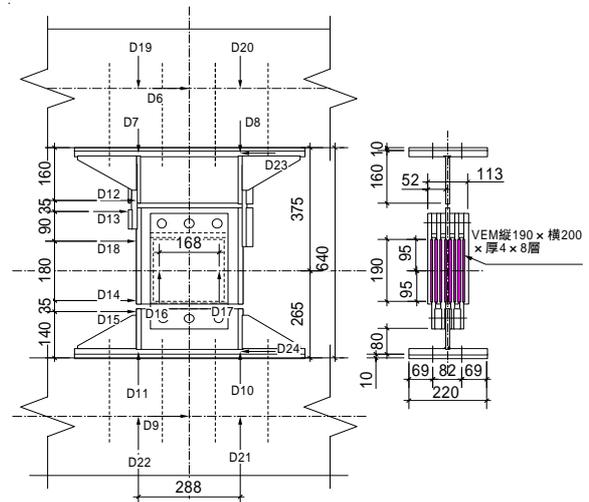


図 - 5 変位測定位置

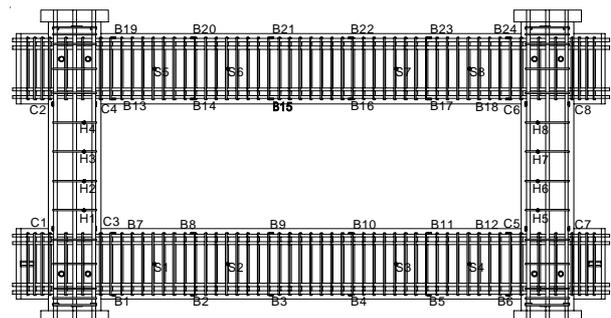


図 - 6 歪ゲージ位置

表 - 4 載荷一覧

試験体	振動数	振幅 (mm)														
		1mm	2mm	3mm	4mm	5mm	6mm	8mm	10mm	12mm	15mm	20mm	25mm	30mm	40mm	
No1	静的 (0.01Hz)															
	動的 (1Hz)															
No2	静的 (0.01Hz)															
	動的 (1Hz)															
No3	静的 (0.01Hz)															
	動的 (1Hz)															

もこれに準ずるものとした。

試験体は柱の上下にピン支承を取り付け載荷装置に固定した(図-4)。実験は、まず鉛直オイルジャッキ2台により軸力比で0.2に相当する一定軸力を両柱に負荷した後、アクチュエーター(以下、ACと略記)を用いて正弦波による動的水平力を7サイクル載荷した。

表-4に載荷一覧を示す。載荷変数は振動数および振幅(AC変位)である。振動数は粘弾性ダンパーの特性である速度依存性の検証のために、1Hzおよび0.01Hzを選択し、0.01Hz載荷は静的載荷とみなした。実験は振幅1mmから順に載荷を行った。各振幅でまず動的載荷を行い、その後静的載荷を行った。

振幅25mm以上はACの能力上の問題より0.5Hzで行った。また試験体No3では振幅25mmおよび30mmでの実験は行っていない。

4. 実験結果

4.1 破壊状況

図-7に1Hz載荷時において、梁・柱端部における主筋の歪測定値より計算した最大応力値を示す。また図-8に各試験体の最終破壊状況を示す。

試験体No1では、梁の曲げ、柱梁接合部、梁のせん断、柱の曲げ、柱のせん断の順でひび割れが発生した。振幅15mmで梁主筋が降伏耐力

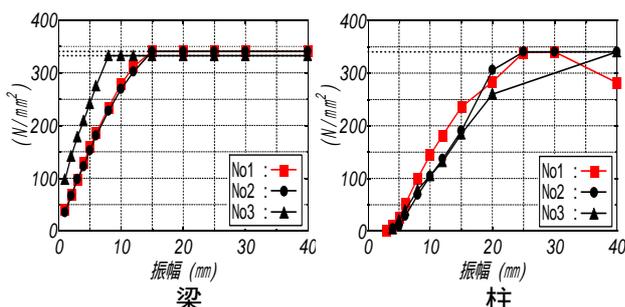


図-7 梁・柱主筋最大応力 - 振幅関係

に達し、振幅25mmで柱の主筋が降伏耐力に達した。振幅30mmで柱中央部に致命的なせん断ひび割れが上下方向に急速に発生し、振幅40mmで載荷直後から柱はせん断破壊を生じた。

試験体No2では、梁の曲げ、柱梁接合部、梁のせん断、柱の曲げ、柱のせん断の順でひび割れが発生した。振幅15mmで梁主筋が降伏耐力に達し、振幅25mmで柱の主筋が降伏耐力に達した。振幅30mmで柱梁接合部のひび割れが急速に伸展し、振幅40mmで柱梁接合部が破壊し、接合部のコンクリートが剥落した。

試験体No3では、梁の曲げ、梁のせん断、柱梁接合部、柱の曲げ、柱のせん断の順でひび割れが発生した。振幅8mmで梁主筋が降伏耐力に達した。柱主筋は振幅30mmあたりで降伏した

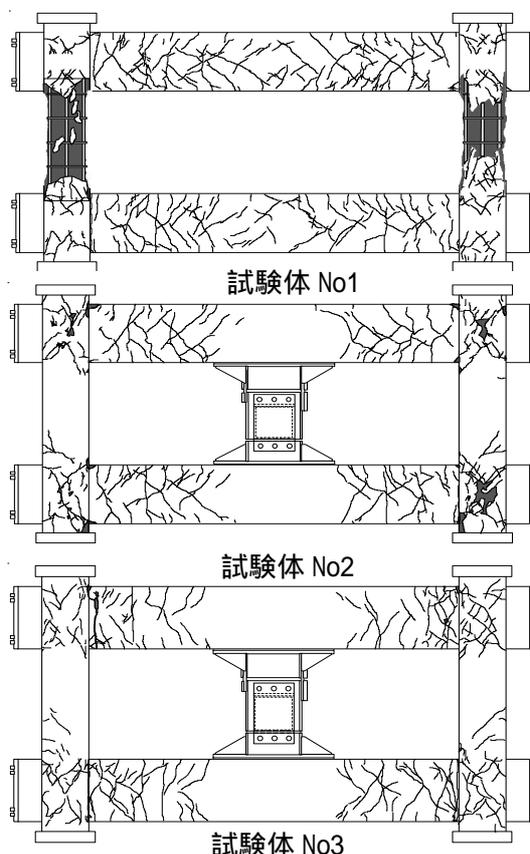


図-8 試験体最終破壊状況

と考えられる。振幅 40mm では梁端部の曲げひび割れが顕著であり、梁端部のコンクリートの一部が剥落した。また柱梁接合部に多くのひび割れが認められた。

以上のように試験体 No1 および No3 は、それぞれ実験計画通りに柱のせん断破壊および梁の曲げ破壊を生じたが、試験体 No2 は柱のせん断破壊ではなく、柱梁接合部破壊を生じた。この原因は、図 - 9 示すような簡単なモデル(間柱と RC 柱の負担力を同じと仮定した場合)で説明できる。すなわちダンパー無し(試験体 No1 は、入力されたせん断力を RC 柱で負担するのに対して、ダンパーを有する試験体 No2 ではせん断力を RC 柱と間柱で負担する。よって試験体 No2 の柱梁接合部は、RC 柱および間柱に流れるせん断力の合力が加わることになる。従って試験体 No2 の接合部に入力されたせん断力が試験体 No1 のものに比して大きかったため、接合部破壊を生じたと考えられる。

4.2 層間変形

図 - 10 および図 - 11 は振幅に対する最大層間変位の比率を各層間変位でプロットしたものであり、制震間柱による層間変形の抑制効果に及ぼす振動数、間柱の有無および周辺フレームの破壊性状の影響を検討したものである。図 - 10 は 1Hz 载荷のものを試験体別に示しており、図 - 11 は試験体 No2 について周波数別に示したものである。層間変位は上・下梁中心間で測定した(変位計 D9 と D6 の差)。図中の梁中心間および柱内法推定ラインは、梁中心間距離(1000mm)および柱内法高さ(640mm)を上下ピン間距離(2040mm)で除したものである(図 - 1 参照)。振幅に対する層間変位の比率は、柱梁接合部が完全な剛域であるとすれば柱内法推

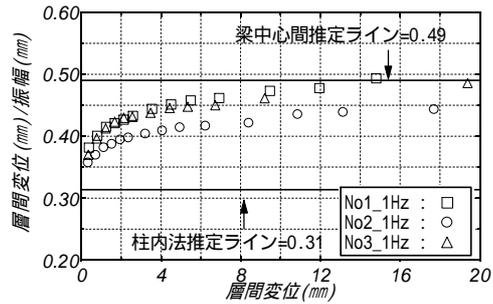
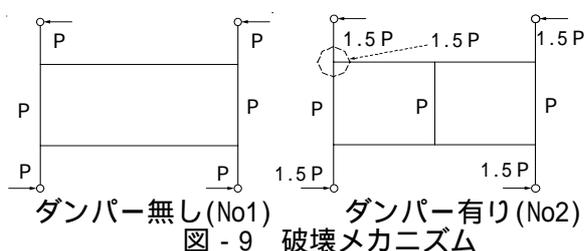


図 - 10 層間変位比率 (1Hz 試験体別)

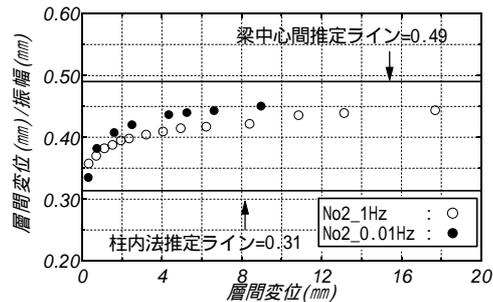


図 - 11 層間変位比率 (No2 試験体 周波数別)

定ラインとなり、剛域がないものとするときと梁中心間推定ラインで表される。

全実験において層間変位が比較的小さい場合には柱内法推定ラインに比率に近いのに対して、層間変位が増加するにつれて梁中心間推定ラインに比率が漸近する傾向が認められた。これは载荷振幅の増加に伴ってパネルゾーンの破壊が進行し、剛域が減少したために層間変位が増加したものと考えられる。

図 - 10 より、各層間変位において試験体 No1 の比率の方が試験体 No2 より大きい値となった。これはダンパーの有無により試験体の剛性が異なるためである。また図 - 11 より振動数の相違では、振動数の高い方(1Hz)が低いもの(0.01Hz)より値が小さくなった。これより粘弾性体の振動数による剛性の違いを確認した。試験体 No3 においても同様な傾向が認められた。

4.3 ダンパー間変形

図 - 12 および図 - 13 は最大ダンパー間変位に対する最大ダンパー間変位の比率を各層間変位でプロットしたものである。ダンパー間変位は、粘弾性体の中心とダンパー下部材の相対変位とした(変位計(D18+D14)/2 と D15 の差)。図 - 12 は 1Hz 载荷において試験体 No2 および No3 を示

しており、図 - 13 は試験体 No2 について周波数別に示したものである。全実験において、ダンパー間変位は層間変位より大きくなった。これは上下梁が逆対称曲げを受けることにより、間柱との接合位置である当該梁中央部で回転角が生じるためである。

図 - 12 より 1Hz 載加で層間変位が小さい時のダンパー間変位は、層間変位の 1.1 倍～1.2 倍程度である。試験体 No2 の比率が試験体 No3 よりも小さくなっているのは、試験体 No2 の方が粘弾性体の温度が低くダンパー剛性が大きいためである。

また図 - 13 より 1Hz 載荷より 0.01Hz 載荷の値が高いことから、振動数が高い程粘弾性体の剛性は増加し、ダンパー間変形は小さくなることを確認した。No3 試験体においても同様な傾向が認められた。

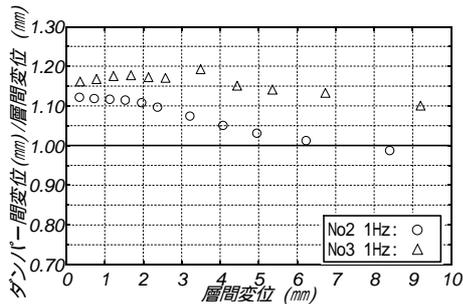


図 - 12 ダンパー間変位 (1Hz 試験体別)

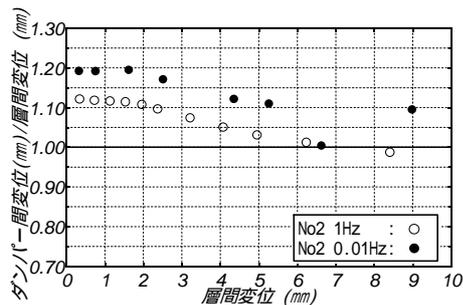
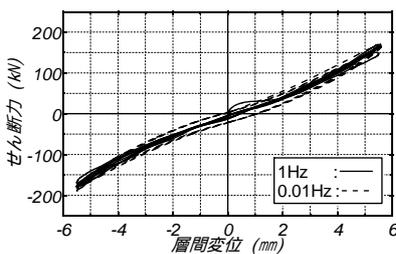
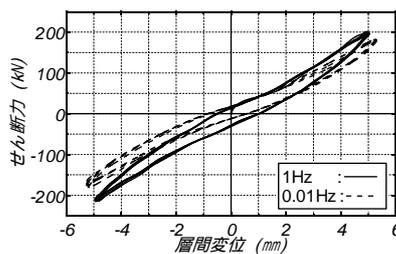


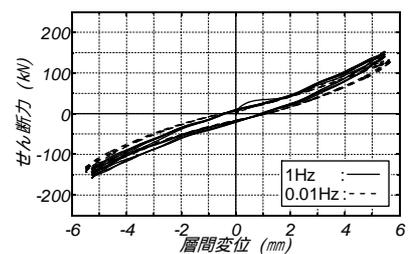
図 - 13 ダンパー間変位 (No2 試験体 周波数別)



試験体 No1



試験体 No2



試験体 No3

図 - 14 振動数 1Hz および 0.01Hz 振幅 12mm 履歴曲線

4.4 履歴曲線および等価粘性減衰定数

図 - 14 に各試験体の振幅 12mm、振動数 1Hz および 0.01Hz 時のせん断力 層間変位関係を示す。試験体 No1 は異なる振動数において、同様な最大せん断力および履歴の膨らみを示した。試験体 No2 および No3 では、振動数が高い 1Hz の方がせん断力は高く履歴の膨らみも大きくなる。

図 - 15 および図 - 16 に等価粘性減衰定数を各層間変位でプロットしたものを試験体別に示す。図 - 15 は振動数 1Hz のものを試験体別に示しており、図 - 16 は試験体 No2 について周波数別に示したものである。層間変位は 20mm まで示してある。等価粘性減衰定数は 2 サイクル時のせん断力 振幅関係から算出した。

図 - 15 より、試験体 No1 の等価粘性減衰定数は約 3.5%～4.5%であるのに対して、ダンパーを有する試験体 No2 および No3 では約 7.0%～8.0%であった。ダンパーを有する No2 試験体はダンパー無しの試験体 No1 に比して約 1.8～2.0 倍の高い減衰性能を示している。

一方、図 - 16 より 0.01Hz 載荷における等価粘性減衰定数は約 4.0～5.0%であり、動的載荷 (1Hz) の場合の約 0.6 倍程度となることから、粘弾性体の速度依存性が認められる。

4.5 剛性評価

図 - 17 および図 - 18 に試験体 No1 および No2 の全体剛性 (以下 K_a) および RC フレーム剛性 (以下 K_f) を各層間変位でプロットしたものを示す。図 - 17 は 1Hz 載荷のものであり、図 - 18 は 0.01Hz 載荷のものである。ここで RC フレームの剛性は、全体剛性からダンパー剛性を差し

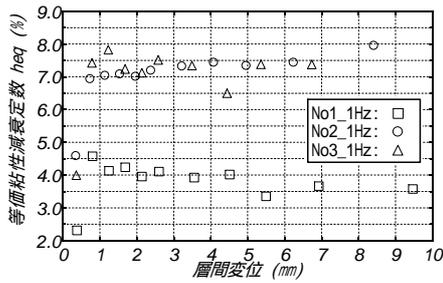


図 - 15 等価粘性減衰定数 (試験体別)

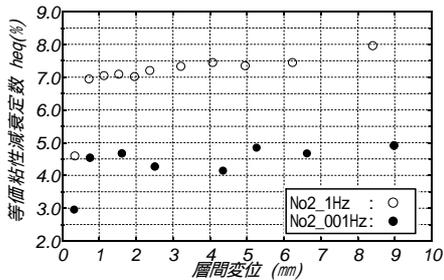


図 - 16 等価粘性減衰定数 (周波数別)

引いたものとした。全体剛性は最大層間変位と最大せん断力から求まるものを用い、ダンパー剛性は表 - 3 に示す粘弾性体の剛性を用いた。なお、試験体 No1 はダンパー無しなので $K_a=K_f$ となる。

図 - 17 よりダンパーを有する試験体 No2 の剛性 K_a は、ダンパー無しの試験体 No1 の剛性 $K_f (=K_a)$ より高くなるが、剛性 K_f は試験体 No2 の方が低くなっている。これはダンパーの有無により変形モードが異なるためである。間柱型ダンパーを配することで上下梁の端部の回転が抑制されたために、柱に入力される力が小さくなったと考えられる。そのため試験体 No1 の剛性 K_f より試験体 No2 の剛性 K_f の方が低くなったと推察される。よってダンパーを配することは全体の剛性を上昇させることに繋がり、さらに RC フレームに入力されるせん断力を低減させることができると考えられる。

図 - 18 は 0.01Hz 載荷であり静的載荷を想定しているため、試験体 No2 の剛性 K_a と剛性 K_f の間にあまり大きな差は無い。また、試験体 No1 の剛性 K_f と同様な値となった。

5. まとめ

粘弾性ダンパー付間柱を配した RC フレームの

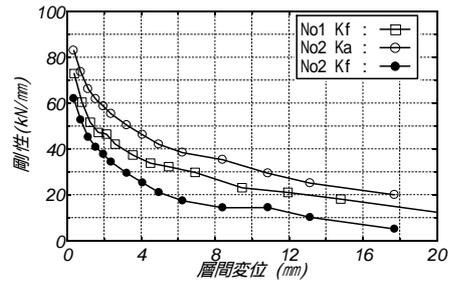


図 - 17 剛性比較 (振動数 1Hz)

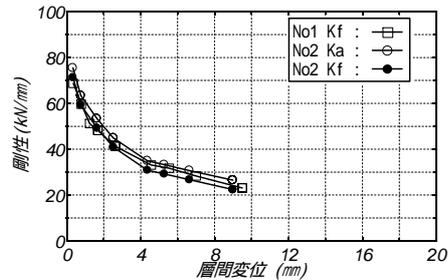


図 - 18 剛性比較 (振動数 0.01Hz)

動的載荷実験で得られた結論を以下に要約する。

- ・ 間柱型ダンパーを配することはシステム全体の剛性を上昇させ、さらには上下梁の回転を抑制することになるので、柱に入力されるせん断力を低減することができる。よって RC フレームの剛性および破壊形式は、ダンパーの有無による上下梁の変形モードの違いに大きく依存する。
- ・ 本実験で対象としたような単層に間柱型ダンパーを配したフレームでは、柱・梁接合部に柱とダンパーに流れる力の合力が作用するため、接合部の設計には注意を要する。

謝辞

本研究はショーボンド建設株式会社、新日本製鐵株式会社および住友 3M 株式会社で共同実施したものであり、多岐にわたりご助言・ご指導頂きました。ここに記して感謝の意を示します。

参考文献

- 1) 笠井和彦, 城台顕: 間柱型粘弾性ダンパーをもつ制震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
- 2) 笠井和彦, 寺元道彦, 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
- 3) 植松工, 倉本洋, 中村博志, 所健: 制震ダンパー付き鋼製間柱 - RC 梁接合部の剛性性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No2, pp.1333-1338, 2004.7