

論文 複数の制振デバイスを組み込んだRC造骨組の耐震性能に関する研究

竹中 啓之*¹・和泉 信之*²・高橋 孝二*³・飯塚 信一*³

要旨：複数の制振デバイスを組み込んだ1層1スパンのRC造骨組模型試験体の静的および動的載荷実験を行い、復元力特性を評価した。制振デバイスには、低降伏点鋼を使用した間柱、オイルダンパブレースおよび低降伏点鋼アンボンドブレースを用いた。さらに、複数の制振デバイスを組み込んだRC造骨組を対象とした解析モデルを提案し、復元力特性について実験結果と比較することにより、その解析モデルの妥当性を示した。

キーワード：RC造骨組，制振デバイス，耐震性能，復元力特性，エネルギー吸収性能

1. はじめに

著者らは、鉄筋コンクリート造（RC造）建築物などの大地震時の損傷制御を目的として、エネルギー吸収型デバイス、いわゆる制振デバイスの適用に関する研究を行ってきた¹⁾。

本研究では、間柱とブレースという異なる形式を持つ複数の制振デバイスを組み込んだRC造骨組（図-1）を対象とする。間柱は、変位依存型（履歴系）の低降伏点鋼パネル（以下、制振パネルと呼ぶ）を組み込んだRC造柱（以下、制振柱と呼ぶ）である。ブレースは、速度依存型（粘性系）のオイルダンパブレースおよび履歴系の低降伏点鋼アンボンドブレース（以下、制振ブレースと呼ぶ）である。

間柱とブレースという形式の異なる複数の制振デバイスは、図-1に示すように建築空間を有効に利用して配置できる。また、履歴系と粘性系という減衰特性が異なる複数の制振デバイスの適用により、地震動の特性が異なる幅広い外乱に対して優れた制振効果を期待できる。

RC造骨組では、鉄骨造とは異なり、ひび割れにより周辺骨組の変形が増大して制振デバイスの効果が低減することが危惧される。そのため、制振デバイスの適用には、制振デバイス付

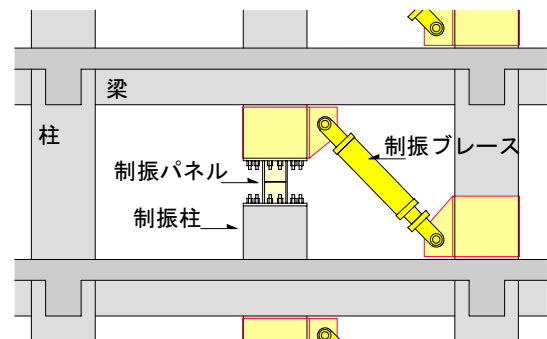


図-1 複数の制振デバイス付きRC造骨組

き骨組を対象とした性能評価および解析モデルの妥当性の検証が必要である。特に、複数の制振デバイスを用いる場合には、その挙動が複雑なため骨組全体の評価が重要である。

本論文では、制振柱と制振ブレースを組み込んだ1層1スパンのRC造骨組模型試験体の静的および動的載荷実験について述べる。これらの実験から、制振デバイスのRC造骨組に対する減衰付加性能を示す。さらに、複数の制振デバイスを組み込んだRC造骨組の解析モデルを提案し、その復元力特性の妥当性を示す。

2. 実験概要

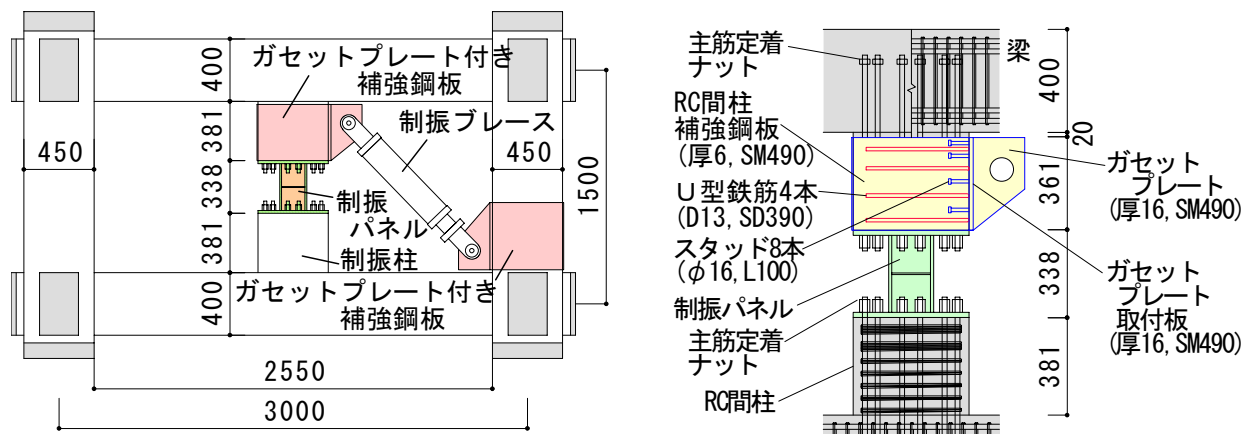
2.1 実験計画

本実験では、制振柱とオイルダンパブレース

*1 戸田建設（株）技術研究所 工修 （正会員）

*2 戸田建設（株）構造設計部主管 博（工）（正会員）

*3 西松建設（株）技術研究所 博（工）（正会員）



図－２ 制振デバイス付き RC 造骨組試験体

スを組み合わせた試験体に対して、動的载荷実験を行う。次に、オイルダンパーブレースをアンボンドブレースに取り替えて静的载荷実験を行う。なお、制振パネル単体の実験結果³⁾から本実験の载荷回数では性能低下が見られないので、制振パネルは交換しないこととする。本実験の RC 造骨組は、文献 2) の試験体と同一寸法のため、骨組のみの特性は、文献 2) の実験結果（以下、骨組基本実験と呼ぶ）を用いる。

2.2 試験体概要

本実験の試験体は、1 層 1 スパンの柱および梁から構成される剛節骨組のスパン中央に制振柱を、開口部に制振ブレースを組み込んだ縮尺約 1/2 の模型試験体 1 体（図－２）である。

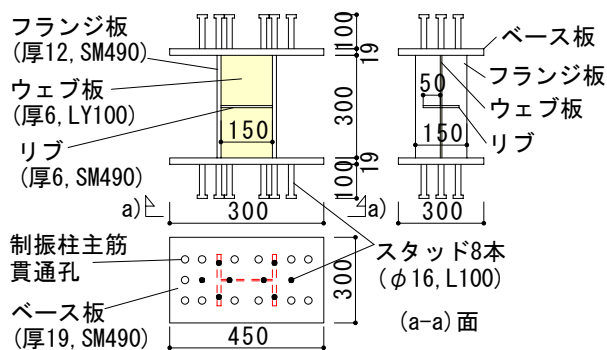
RC 造骨組は、梁曲げ降伏先行型架構として設計する。制振パネルは、100N/mm² 級の低降伏点鋼材を用いたウェブ板、SM490 材を用いた縦フランジ板および上下のベース板で構成されている（図－３）。制振パネルとその上下 RC 部とは、頭付きスタッドと制振柱主筋により一体化を図っている。オイルダンパーブレースの最大減衰力は、アンボンドブレースの最大耐力とほぼ同等である。オイルダンパーブレースの設計特性値（減衰力－速度関係）を図－４に、アンボンドブレースの詳細を図－５に示す。アンボンドブレースの芯材には 100N/mm² 級の低降伏点鋼材（厚 16mm、幅 60mm）を使用する。制振ブレースは、鋼板で補強された間柱上部と片側柱下部の間に設置しており、梁とは直接接合さ

表－１ RC 造骨組試験体諸元

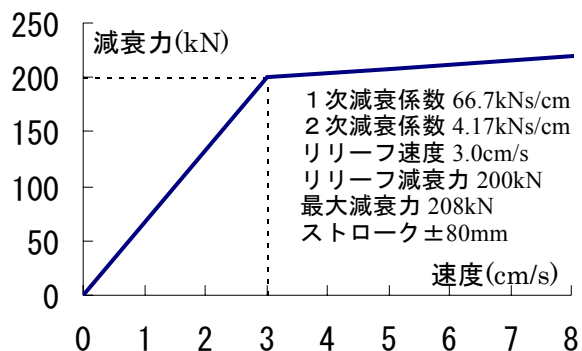
	B×D (mm)	F _c (N/mm ²)	主筋	帯筋
柱	450×450	45	16-D22 ^{*1} (SD490)	4-φ6@50 (USD685)
梁	200×400	35	4+2-D19 (SD490)	4-φ6@40 (USD685)
制振柱	200×450	35	14-D19 (SD490)	4-D6 ^{*2} (SD295A) 2-D6 (SD295A)

*1 柱補強鋼板巻き部分は 20-D22

*2 制振パネル近傍帯筋は 4-D6



図－３ 制振パネル試験体



図－４ オイルダンパーの設計特性値

れていない。ガセットプレート付き補強鋼板は頭付きスタッドおよびU型鉄筋により柱に接合されている。

2.3 載荷方法

実験では、まず動的載荷を行い、次にオイルダンパーブレースをアンボンドブレースに取り替えて静的載荷実験を行う。試験体の載荷は、柱上部のピン支承に取り付けた加力梁により行う(図-6)。載荷履歴は、骨組の水平変形角(R_f)で制御する(図-7)。動的載荷では、超高層RC造建物を想定して2秒および4秒の周期とする。また、 R_f は1/800のほか、稀に生じる地震動による変形を上回る大きさとして1/300を目標とする。しかし、動的載荷では加力梁の水平変位で制御したため、ひび割れ等の影響により、最大の R_f (周期4秒)は、1/298であった。

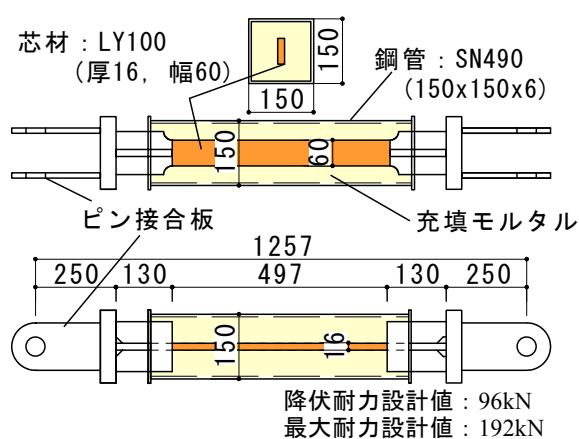


図-5 アンボンドブレース試験体

表-2 材料試験結果

鉄筋・鋼材 (材料種別)	ヤング係数 ($\times 10^5 \text{N/mm}^2$)	降伏強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)
D22(SD490)	1.93	509	685
D19(SD490)	1.92	523	666
$\phi 6$ (USD685)	1.80	701	846
D6(SD295A)	1.71	330	469
PL4.5(LY100)	1.69	97	248
PL6(SM490)	2.06	392	520
PL12(SM490)	2.06	384	530
PL16(SM490)	2.07	378	536
PL19(SM490)	2.11	360	517

コンクリート	ヤング係数 ($\times 10^5 \text{N/mm}^2$)	降伏強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)
梁, 制振柱	0.26	31	2.35
柱	0.35	55	4.56

3. 実験結果

3.1 動的載荷実験結果

実験終了時のひび割れ状況を図-8に示す。柱にはほとんどひび割れは見られず、最大残留ひび割れ幅は梁端部では0.06mm程度、他の部分では0.04mm以下であった。また、梁主筋のひずみ度は最大で920 μ 程度であり、梁および柱の主筋は弾性であった。

動的載荷実験の水平力-水平変形角関係を図-9に示す。図中には、制振デバイスの有無による比較のため、骨組基本実験の結果²⁾(制振デバイス無し)を示す。複数の制振デバイスの付加により、鉄筋降伏以前におけるRC造骨組の減衰性能を大幅に向上できることがわかる。

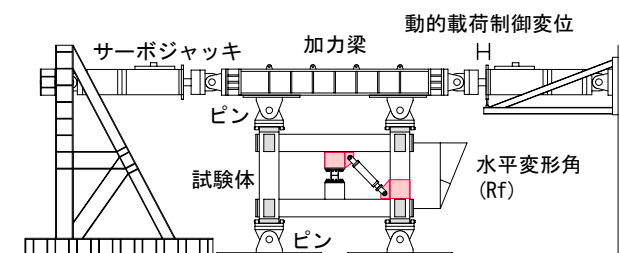
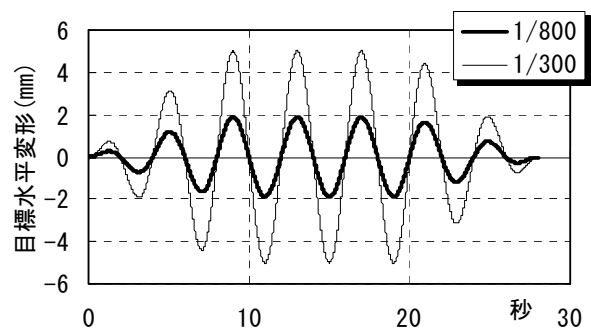
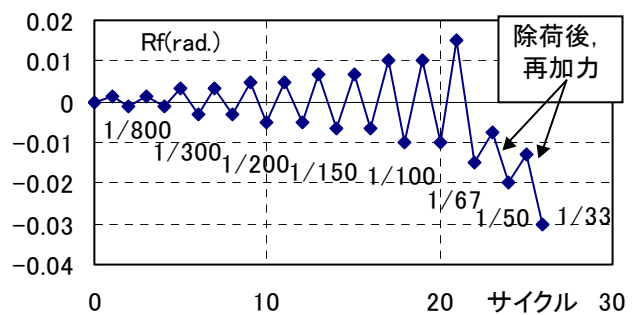


図-6 加力装置

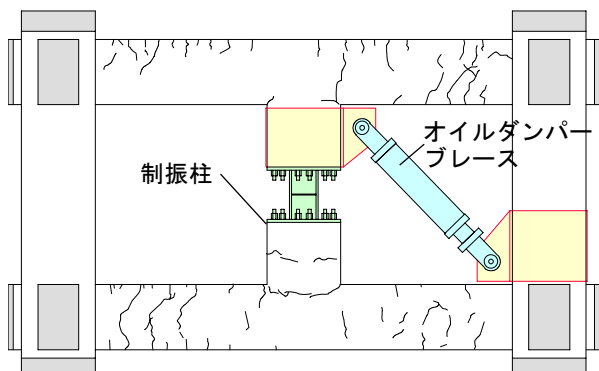


(a) 動的載荷(制振柱+オイルダンパーブレース)



(b) 静的載荷(制振柱+アンボンドブレース)

図-7 載荷履歴



図－8 ひび割れ状況（動的载荷実験終了時）

3.2 静的载荷実験結果

実験終了時のひび割れ状況を図－10に示す。 $R_f=1/150$ では、残留ひび割れ幅は最大0.06mmであった。 $R_f=1/100$ では、梁主筋の一部が降伏し、 $R_f=1/67$ において、梁主筋は全て降伏し、残留ひび割れ幅は最大0.15mm程度であった。一方、柱は $R_f=1/200$ において曲げひび割れが生じ、 R_f の増加と共にひび割れの数は増えたが、残留ひび割れはほぼ閉じた。骨組は梁降伏型の降伏形式を示した。制振パネルは、 $R_f=1/100$ において、ウェブ板が面外に変形し、徐々に面外変形が大きくなったが、 $R_f=1/33$ においても亀裂は見られなかった。

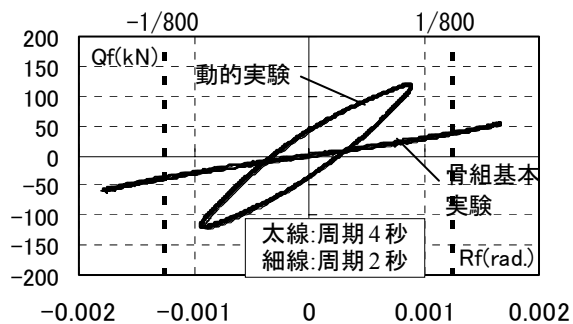
アンボンドブレースは、 $R_f=1/100$ の正側载荷時にブレース端部ピン近傍での面外変形が見られた。 $R_f=1/67$ の正側载荷時には、ブレース端部ピン近傍での面外変形が大きくなったため、以降の加力はアンボンドブレースが引張ブレースになる方向の負側载荷のみとした。

静的载荷実験時の水平力－水平変形角関係を図－11に示す。梁主筋が全て降伏する $R_f=1/67$ 以前においても、複数の制振デバイスの降伏により、復元力特性がエネルギー吸収能力に優れた紡錘形を示している。負側载荷では $R_f=1/33$ 時まで耐力低下は見られなかった。

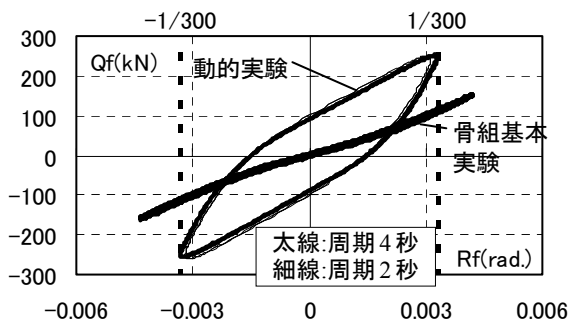
4. 実験結果の考察

4.1 エネルギー吸収量

本実験と骨組基本実験²⁾（制振デバイス無し）におけるエネルギー吸収量の比較を図－12に

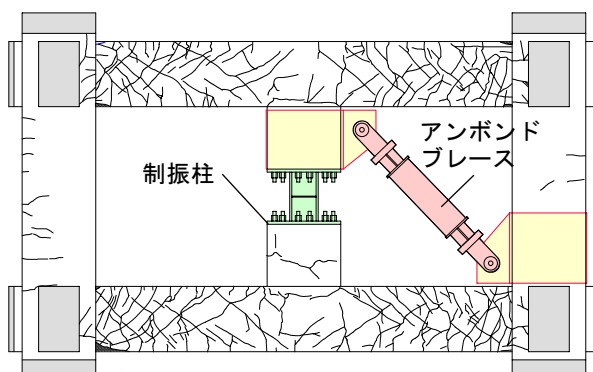


(a) 目標水平変形角 1/800

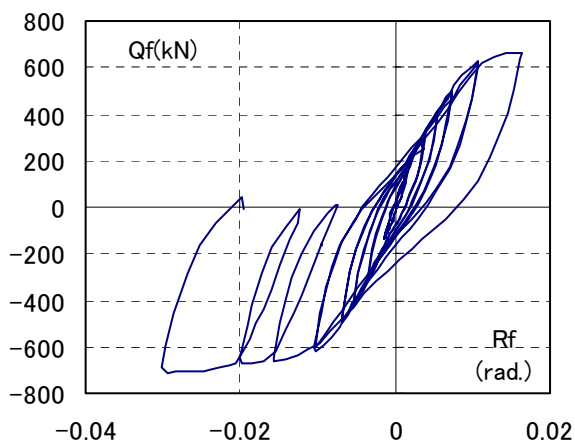


(b) 目標水平変形角 1/300

図－9 水平力－水平変形角関係（動的実験）
（制振柱＋オイルダンパーブレース）



図－10 ひび割れ状況（静的実験終了時）



図－11 水平力－水平変形角関係（静的実験）
（制振柱＋アンボンドブレース）

示す。エネルギー吸収量は、定常 3 ループのエネルギー吸収量を平均した値とする。また、類似の制振柱付き RC 造骨組の実験結果²⁾を参考として示す。複数の制振デバイスを配置することにより、エネルギー吸収量が一段と増大していることがわかる。

等価粘性減衰定数を見ると、骨組のみが 0.02 程度 ($R_f=1/230$)であるのに対して、本実験では 0.16 程度 ($R_f=1/298$)であり、制振デバイスによる減衰増大効果がわかる。

4.2 解析モデル

骨組の解析モデルは、図-13に示すように RC 造部材ごとの弾塑性特性に立脚したフレームモデルとする。柱および梁の部材モデルは曲げ変形の非線形性を考慮し、せん断変形および軸変形は弾性とする。制振柱の部材モデルは文献 1)で提案したマクロ的な解析モデルとして、制振パネルの変形をせん断ばねに、RC 造柱の柱頭および柱脚の変形を曲げばねに置換した曲げせん断ばねモデルとする。オイルダンパーブレースは、軸部の軸ばねを考慮した Maxwell モデル、アンボンドブレースは軸ばねとして、制振柱および柱の補強鋼板巻き部分にピン接合とする。柱梁接合部には剛域を、制振柱と梁との接合部にはせん断パネルを設定する。制振ブレースの接合部には、制振ブレースの柱への偏心を考慮するため、剛域を設定する。

4.3 復元力特性

柱および梁の曲げに関する復元力特性は、ひび割れ点および降伏点を考慮した Takeda モデル⁴⁾とする。補強鋼板を巻いた柱部分は、降伏点のみを考慮する。制振パネルのせん断変形に関する復元力特性は、Normal Tri-Linear 型とする。せん断に関するスケルトンカーブの設定では、低降伏点鋼材が 100N/mm^2 級の鋼材であり、せん断降伏点が明瞭でないため、第 1 折れ点および第 2 折れ点に関する諸元は、表-3に示すように制振パネル単体の実験結果³⁾を参考に設定する。実験結果の詳細は、文献 3)によられたい。設定に関しては、 $R_f=1/100$ 時点における制

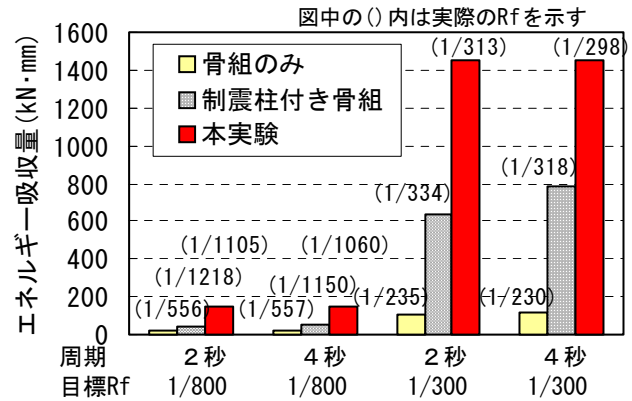


図-12 エネルギー吸収量の比較

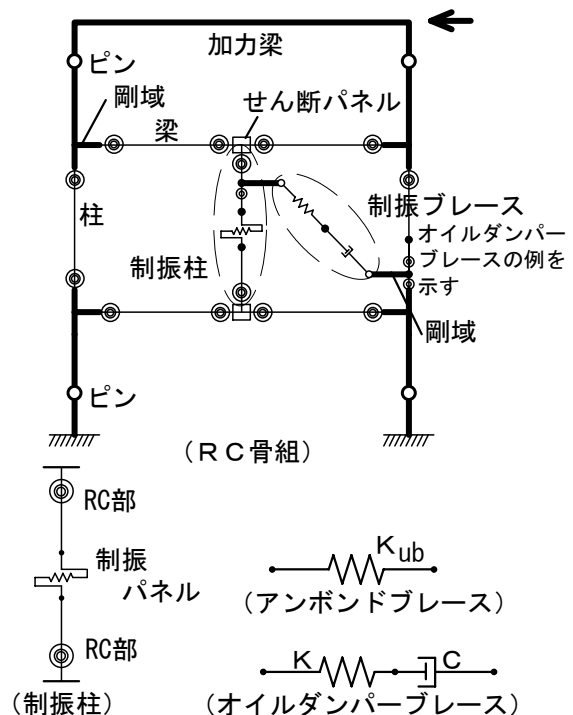


図-13 RC 造骨組および制振デバイスの解析モデル

表-3 復元力特性諸元

(a)制振パネル・アンボンドブレース

	制振パネル	アンボンドブレース
初期剛性(kN/mm)	99.0	397.8
第 1 折点荷重(kN)	59.4	96.0
第 2 折点荷重(kN)	153.2	192.0
第 2 勾配比	0.0625	0.2
第 3 勾配比	0.0195	0.001

(b)オイルダンパーブレース

ばね値(kN/mm)	137
1 次減衰係数(kN·s/mm)	667
2 次減衰係数(kN·s/mm)	41.7
第 1 折れ点速度(mm/s)	30
第 1 折れ点減衰力(kN)	200

振パネルの変形を基準とする。また、アンボンドブレースは Normal Tri-Linear 型の復元力を持つ軸ばねとする（表－3）。

4.4 骨組の復元力特性

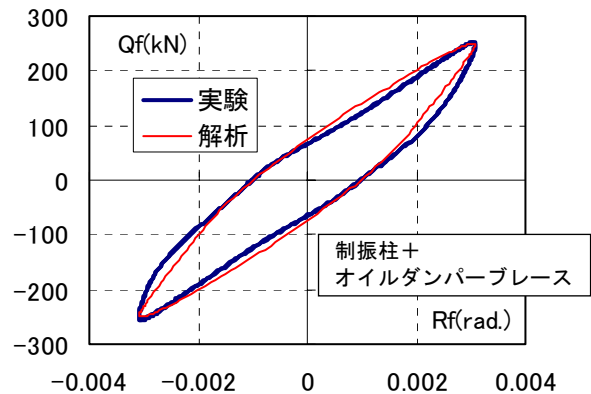
複数の制振デバイスを組み込んだ RC 造骨組の復元力特性について解析値と実験値の比較を行う。まず、制振柱とオイルダンパーブレースを用いた動的載荷実験結果について解析値との比較（周期 4 秒, $R_f=1/298$ ）を図－14 に示す。解析値は実験値に対して、骨組のエネルギー吸収量では 95% 程度、等価粘性減衰定数では 93% 程度である。次に、制振柱とアンボンドブレースを用いた静的載荷実験結果について解析値との比較を図－15 に示す。骨組のエネルギー吸収量の解析値は、実験値に対して、 $R_f=1/300$ から $1/200$ までの変形では 101～131% 程度とやや大きい、 $R_f=1/150$ から $1/100$ までの変形では 92～109% 程度であり、比較的良く対応している。また、等価粘性減衰定数を見ると、解析値は実験値に対して、骨組のエネルギー吸収量とほぼ同等の評価精度である。

これらの結果から、解析モデルは実験結果を概ね表現できることがわかる。

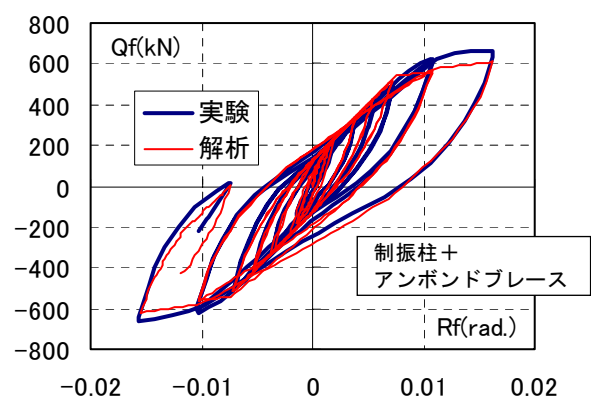
5. 結論

これまでの実験および解析で得られた知見を以下に示す。

- (1) 中小地震から大地震に至る想定変形領域において、制振柱および制振ブレースの付加により、RC 造骨組のエネルギー吸収能力を向上させることができる。
- (2) 複数の制振デバイスの付加により、梁主筋の降伏以前においても、RC 造骨組の復元力特性をエネルギー吸収能力に優れた紡錘形のループとすることができる。
- (3) 骨格曲線の諸数値を適切に設定した制振柱および制振ブレースの解析モデルを用いた骨組モデルは、実験から得られた複数の制振デバイス付き RC 造骨組の復元力特性を概ね表現できる。



図－14 骨組の復元力特性の比較（動的実験）



図－15 骨組の復元力特性の比較（静的実験）

参考文献

- 1) 和泉信之、竹中啓之、大井貴之、千葉 脩：低降伏点鋼パネルを組み込んだ RC 柱の耐震性能に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.3, pp.1099-1104, 2000.6
- 2) 和泉信之、竹中啓之、千葉 脩、阿世賀宏：制振デバイス付き RC 造骨組の耐震性能に関する研究、コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.1057-1062, 2002.6
- 3) 和泉信之、竹中啓之、千葉 脩ほか：低降伏点鋼を用いた制震部材に関する実験研究、日本 建築学会大会（九州）学術講演梗概集 C-1 分冊, pp.785-790, 1998.9
- 4) Takeda, Sozen and Nielsen: Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, Journal, Structural Division, ASCE, Vol.96, No.ST12 pp.2557- 2573, 1970