

論文 制振デバイス付き超高強度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：地震時の損傷制御可能なRC造の実現を目指して、制振デバイスを組み込んだ超高強度RC造骨組を対象とした3層1スパンの大型模型試験体の静的水平載荷実験を行い、骨組の耐震性能を評価した。骨組には、Fc200級の鋼繊維混入RPC（反応性粉体コンクリート）を、制振デバイスには、低降伏点鋼を用いた。実験により、RPCを用いたRC造骨組の復元力特性を評価するとともに、制振デバイスを組み込むことにより、骨組の損傷を制御し、エネルギー吸収能力を向上できることを実証した。さらに、制振デバイス付き超高強度RC造骨組の解析を行い、その解析モデルを検証するとともに、今後の課題を示した。

キーワード：超高強度RPC、鋼繊維補強、RC造骨組、制振デバイス、耐震性能

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（例えば¹⁾）。

本研究では、圧縮強度 200N/mm^2 級の鋼繊維混入のRPC（Reactive Powder Concrete、反応性粉体コンクリート）を用いた超高強度RC造骨組（以下、RPC骨組と呼ぶ）に制振デバイスを組み込んだ骨組を対象とする（図-1）。RPCは、セメント、珪石質微粉末等の反応性粉体および細骨材を使用した複合材料である。

鋼繊維を混入したRPC骨組に、高減衰の制振デバイスを組み込むことにより、地震時の損傷制御可能な超高層RC造の実現を目指している。しかし、建築分野におけるRPCを用いた部材の耐震性能に関する研究は着手された段階であり、RPC骨組を対象とした既往の研究は見られない。

損傷制御可能なRPC骨組の実現には、制振デバイスを組み込んだRPC骨組の挙動を評価することが重要である。そのため、第一段階として、本研究では、制振デバイス付きRPC骨組

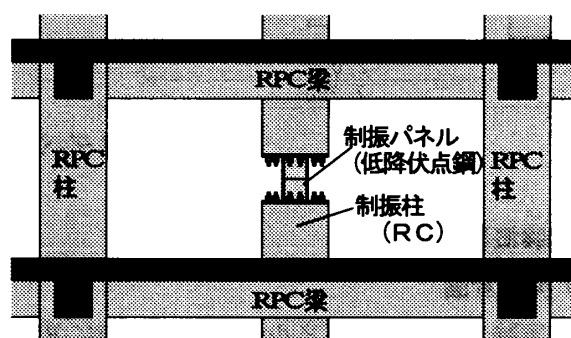


図-1 制振デバイス付きRPC骨組

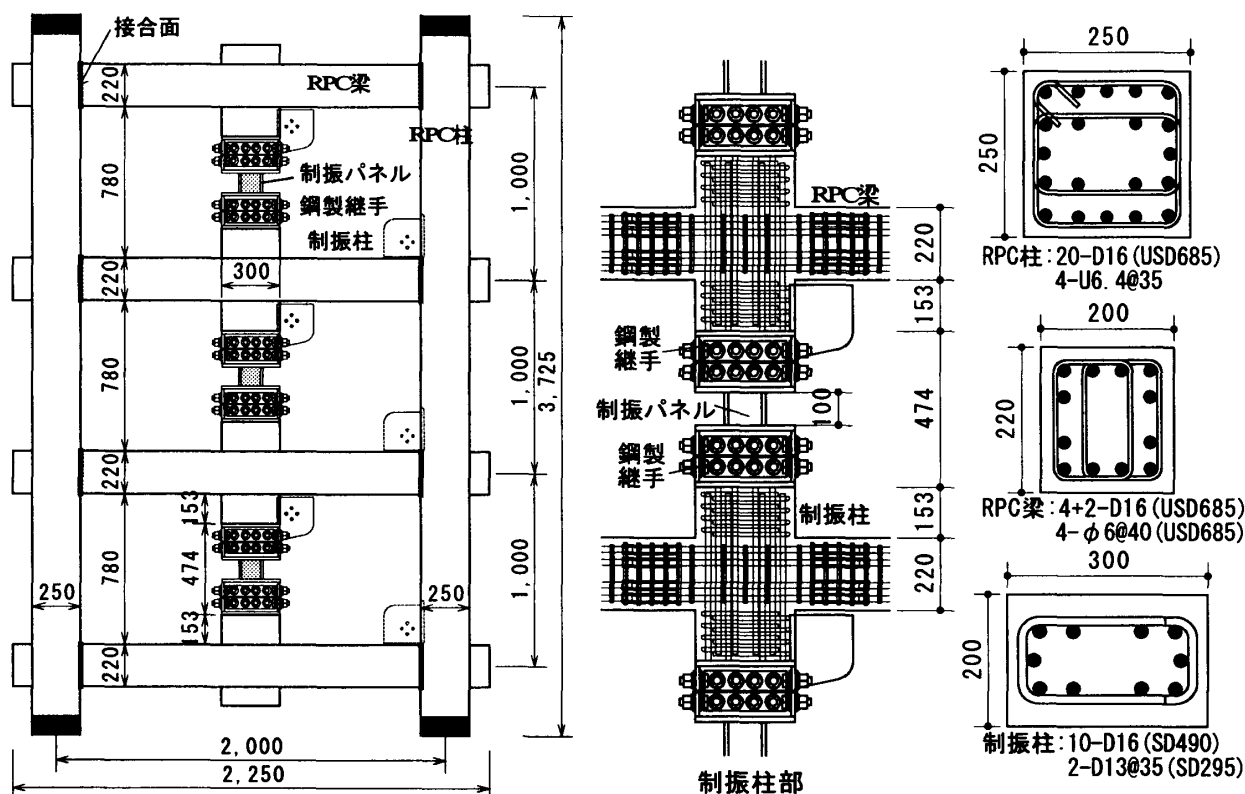
を対象とした大型模型試験体の静的水平載荷実験を行い、その挙動を評価して、今後の課題を探る。制振デバイスには、現在実用化が進んでいる変位依存型（履歴系）の低降伏点鋼パネル（以下、制振パネルと呼ぶ）を組み込んだ間柱（以下、制振柱と呼ぶ）を用いる。

本論文では、制振柱を組み込んだ3層1スパンのRPC骨組模型試験体の静的水平載荷実験について述べる。まず、RPC骨組の挙動および制振デバイスの減衰付加性能を示す。さらに、制振柱付きRPC骨組の解析モデルを構築し、実験結果との比較により、その検証を行う。

*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 RPC 骨組試験体

2. 実験概要

2.1 実験計画

本実験では、制振パネルの取り付け前に RPC 骨組のみの載荷実験（以下、基本実験と呼ぶ）を行い、鉄筋降伏以前の RPC 骨組の復元力特性を評価する。次に、制振柱に制振パネルを取り付けて RPC 骨組の静的載荷実験を行い、鉄筋降伏以前の減衰付加性能および大変形下の復元力特性を評価する。

2.2 試験体概要

本実験の試験体は、超高層住宅の中間層を想定した 3 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組み込んだ縮尺約 1/3 の模型試験体 1 体である（図—2）。

RPC 骨組の柱および梁主筋には、USD685 材を使用し、梁曲げ降伏先行型架構として設計する。柱の帯筋には、PC 鋼棒 SBPD1275/1420、梁のあばら筋には、USD685 材を用いる。また、柱と梁はプレキャスト部材を想定して、別部材として製作し、接合面（図—2）にシアキーを設けている。試験体断面の諸元を表—1 に示す。

制振パネルは、 100N/mm^2 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（図—3）、鋼製継手と高力ボルト接合する。RC 部とは、鋼製継手に溶接した制振柱主筋により一体化を図っている。

本試験体に用いた RPC 部材の諸元を表—2 に示す。試験体は、RPC 打設後に蒸気養生を行う。蒸気養生は、毎時 15°C ずつ昇温し、 90°C に達して時点でその温度を 48 時間保持し、その後約 24 時間の自然降温を行う。

材料試験結果を表—3 に示す。

表—1 RPC 骨組試験体諸元

	B×D (mm)	F_c (N/mm^2)	主筋	せん断 補強筋
柱	250 × 250	200	20-D16 (USD685)	4-U6.4@35 (SBPD1275/ 1420)
梁	200 × 220	200	4+2-D16 (USD685)	4-φ6@40 (USD685)
制振柱	200 × 300	200	10-D16 (SD490)	2-D13@35 (SD295A)

表-2 RPCの調査 (kg/m³)

水*)	RPC プレミックス	鋼繊維 φ0.2×15mm (2vol.%)
180	2254	157

*)：高性能減水材を含む

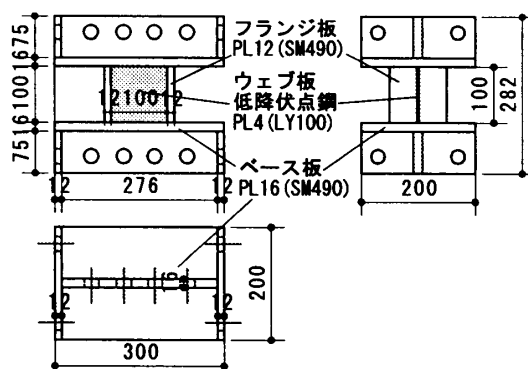


図-3 制振パネル試験体

表-3 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)
D16(USD685)	1.909	750	959
D16(SD490)	1.905	546	752
D16(SD390)	1.877	474	677
U6.4 (SBPD1275/1420)	1.959	1369	1403
φ6(USD685)	1.910	742	933
PL4(LY100)	1.914	116	250
PL12(SM490)	2.067	364	529
PL16(SM490)	2.082	363	539

RPC	割線剛性 ($\times 10^5 \text{N/mm}^2$)	圧縮強度 (N/mm^2)
梁、制振柱	0.533	225
柱	0.555	235

2.3 荷重方法

荷重方法は、柱上部のピン支承に取り付けた加力梁により行う（図-4）。荷重は、加力装置との境界条件の影響が最も小さい第2層目の水平変形角(R_f)で制御する。RPC 骨組のみの基本実験では、 R_f が $\pm 1/800$ から $\pm 1/400$ までの各1回の正負交番繰り返し荷重とする（図-5(a)）。RPC 骨組に制振柱を組み込んだ実験の荷重履歴は、基本実験と同様に第2層目の R_f で制御し、 $\pm 1/800$ を1回行った後、 $\pm 1/75$ までを各2回、 $\pm 1/50$ を1回の後、 $+1/50$ 、 $-1/33$ を1回の正負交番繰り返し荷重とする（図-5(b)）。

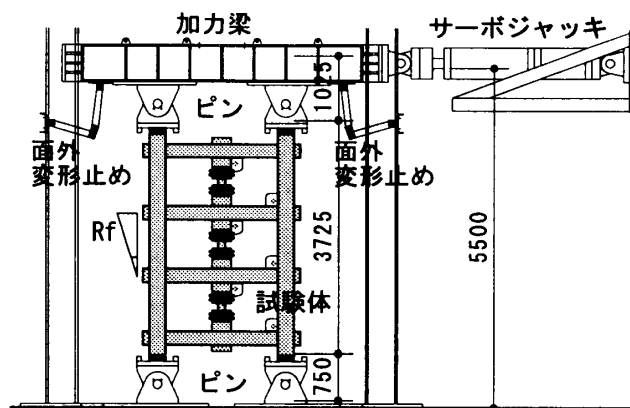
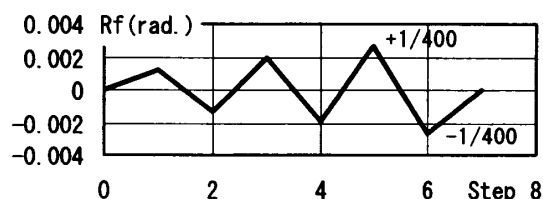
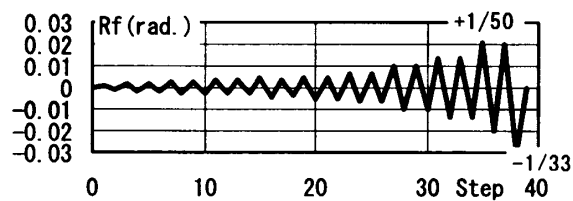


図-4 加力装置



(a) 基本実験静的荷重 (RPC 骨組のみ)



(b) 静的荷重 (RPC 骨組+制振柱)

図-5 荷重履歴

なお、本試験体は中間層の梁曲げ降伏型架構を想定しており、加力装置の制約もあるので、柱には軸力を荷重しない。軸力荷重時の RPC 柱の実験結果については別途報告したい。

3. 実験結果

3.1 基本実験結果

基本実験では、柱および梁の接合面にわずかなひび割れが生じたが、骨組の他の部分にはひび割れは見られなかった。また、梁および柱の鉄筋は弾性範囲であった。

3.2 静的荷重実験結果

(1) 実験経過

実験終了時の第2層目のひび割れ状況を図-6に示す。 $R_f=1/300$ で、制振柱と梁の接合部にひび割れが生じた。 $R_f=1/250$ で、梁に曲げひび

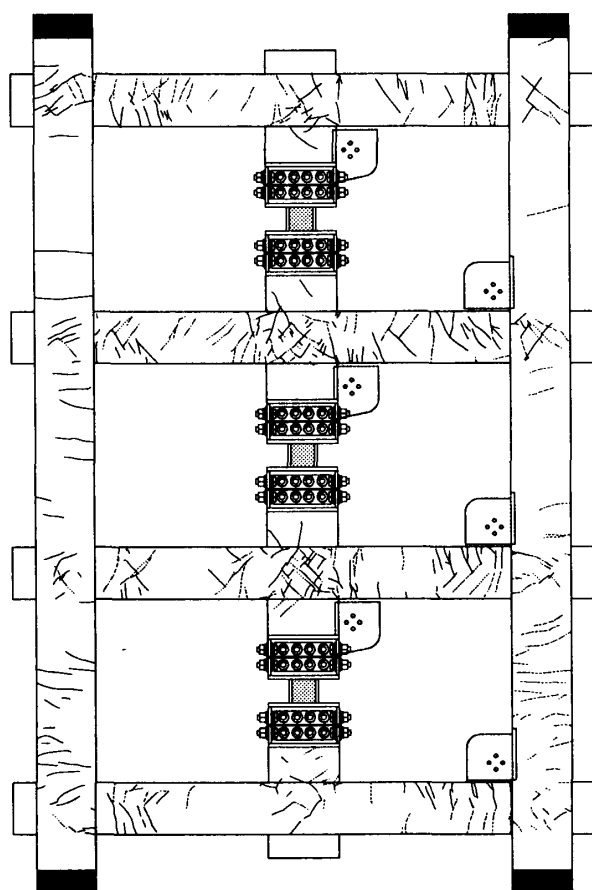


図-6 ひび割れ状況 (実験終了時)

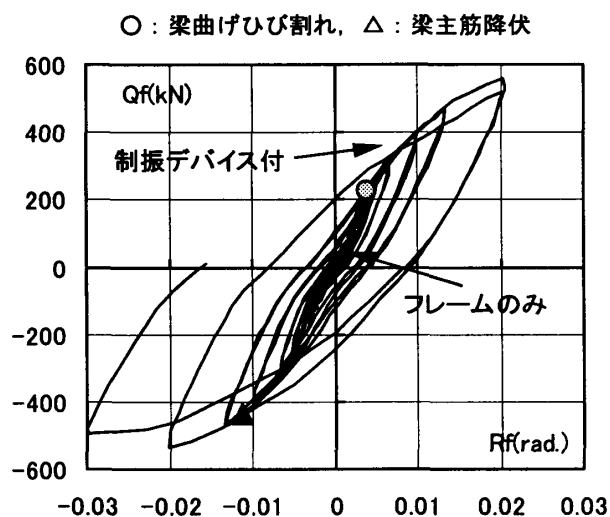


図-7 水平力-水平変形角関係 (第2層目)

割れが生じた。 $R_f=1/150$ まで、残留ひび割れ幅は 0.04mm 以下であった。 $R_f=1/100$ で、梁端に曲げせん断ひび割れが、柱に曲げひび割れが生じた。 $R_f=1/100$ 終了時の残留ひび割れ幅は、梁下の曲げひび割れで 0.04mm であり、その他の部分の残留ひび割れ幅は 0.04mm 以下であった。

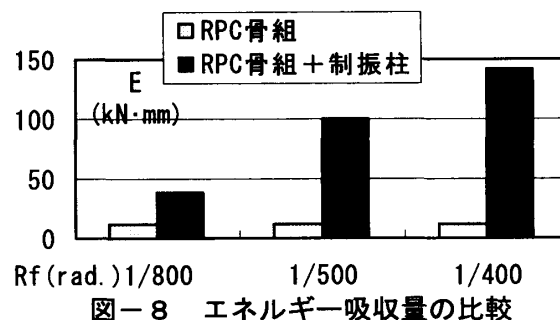


図-8 エネルギー吸収量の比較

また、 $R_f=1/100$ では、梁主筋の降伏は見られなかった。 $R_f=1/75$ で梁にせん断ひび割れが生じ、主筋の一部が降伏した。 $R_f=1/50$ 以降 $1/33$ まで、ひび割れの数が増え、梁主筋の降伏が見られたが、実験終了時の残留ひび割れ幅は小さく、ほとんど 0.04mm 以下であった。梁端部の変形は、柱梁接合部との接合面（以下、柱梁接合面と呼ぶ）の目開きが支配的であった。柱梁接合面の残留目開き幅は、 0.7mm 程度で、顕著な圧壊は見られなかった。骨組は最終的に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り、 $R_f=1/50$ の負側の2サイクル目で縦フランジが破断し、耐力が下がったが、顕著な耐力低下は見られなかった。

(2) 水平力-水平変形角関係

静的載荷実験時の第2層目の水平力-水平変形角関係を図-7に示す。図中には、RPC骨組のみの基本実験結果をあわせて示す。小変形領域では、RPC骨組のみの場合には弾性的な挙動が支配的である。制振柱の付加により、RPC骨組の水平剛性 ($R_f=1/500$ 時の割線剛性) は、概ね 60% 程度増大した。梁主筋の降伏が生じる $R_f=1/75$ 以前においても、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。負側載荷では $R_f=1/33$ 時まで顕著な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

$R_f=1/400$ までの RPC 骨組基本実験と制振柱付き静的載荷実験におけるエネルギー吸収量の

比較を図-8に示す。制振柱を配置することにより、鉄筋降伏以前において、骨組のエネルギー吸収量が增大していることがわかる。

$R_f=1/400$ 時点の等価粘性減衰定数を見ると、骨組のみが 0.03 程度であるのに対して、制振柱付き RPC 骨組では 0.36 程度であり、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-9に示すように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、制振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。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。

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²⁾とする ($\gamma=0.4$)。RPC 梁は残留ひび割れ幅が小さく、RPC 梁の端部変形は柱梁接合面の目開きが支配的であるので、一般の RC 造と同様に非線形剛性を評価することは難しいと考えられる。そこで、梁のひびわれ点、第2剛性は骨組のみの基本実験結果を参考に設定する。また、梁の降伏強度および柱の復元力特性の各特性点は従来の RC 造の評価式³⁾を準用する。

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-4に示すように制振パネル単体の実験結果⁴⁾を参考に設定する。諸元の設定は、 $R_f=1/100$ 時点における制振パネルの変形を基準とする。そのため、 $R_f=1/100$ 時点以降では、制振パネルのエネルギー吸収量は小さく評価されることになる。

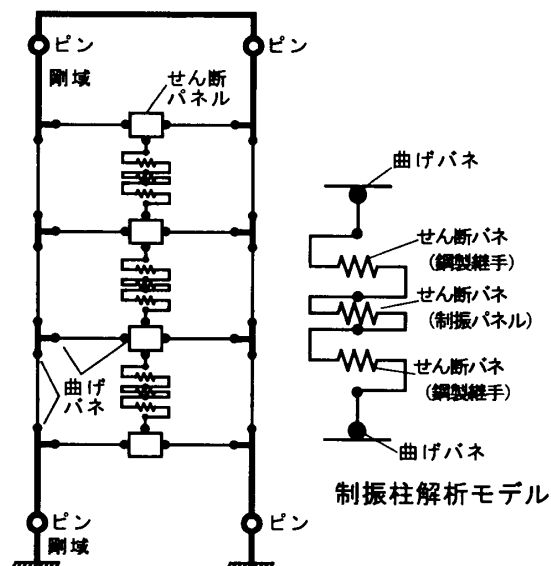


図-9 制振デバイス付き RPC 骨組の解析モデル

表-4 制振パネルの復元力特性諸元

	制振パネル
初期剛性(kN/mm)	198.0
第1折点荷重(kN)	56.03
第2折点荷重(kN)	147.1
第2勾配比	0.0525
第3勾配比	0.01

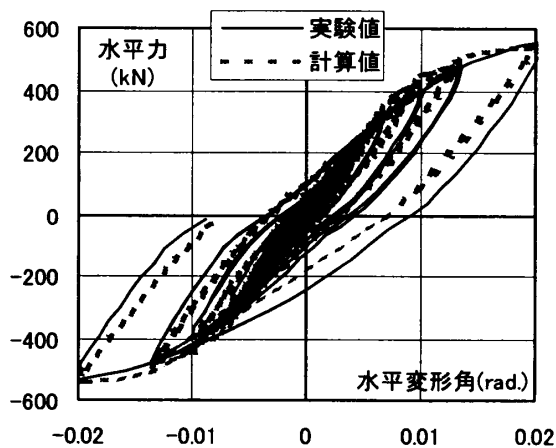


図-10 骨組の復元力特性の比較 (第2層目)

4.4 骨組の復元力特性

制振デバイスを組み込んだ RPC 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。制振柱付き RPC 骨組における第2層の復元力特性と解析値との比較を図-10に示す。また、一般に超高層建物の大地震時許容変形とされる水

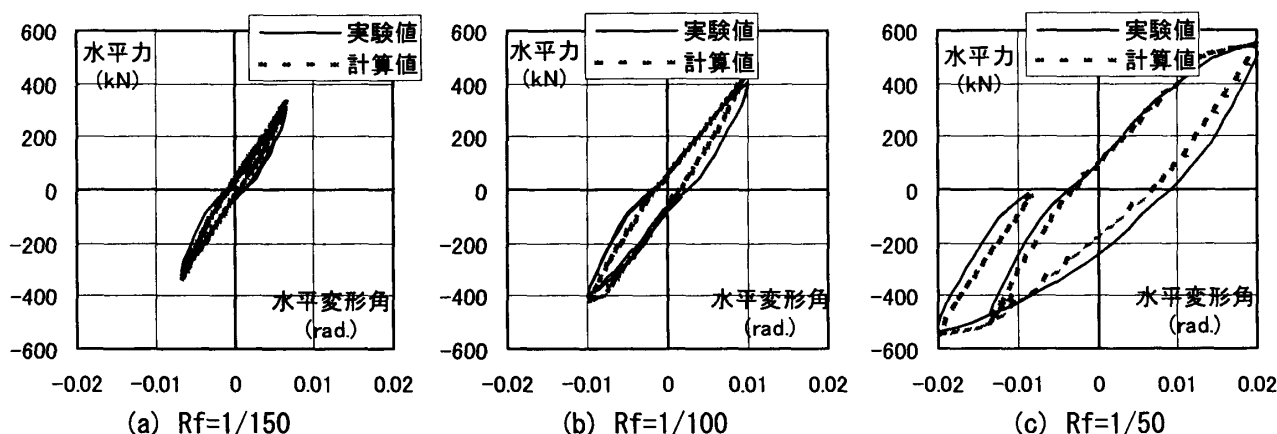


図-11 骨組の履歴ループの比較（第2層目， $R_f=1/150 \sim 1/50$ 時）

平変形角 $1/100$ 付近の R_f における履歴ループの比較を図-11に示す。解析値は、実験値のスケルトンカーブを概ね表現できている。骨組のエネルギー吸収量の解析値は、実験値に対して、 $R_f=1/50$ では80%程度であり、大変形領域では、解析値はエネルギー吸収量をやや小さく評価する傾向がある。また、解析では、柱梁接合面の変形など、RPC骨組の非線形挙動を十分に表現できていない点がある。RPC骨組の復元力特性の定量的な評価には、RPC部材および部材接合面を含む骨組の構造実験が必要であり、今後の研究課題としたい。

5. 結論

制振デバイス付きRPC骨組大型試験体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までの変形領域において、制振デバイスをRPC骨組に組み込むことにより、骨組の損傷を制御し、エネルギー吸収能力を向上させることができる。
- (2) 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、RPC骨組にエネルギー吸収能力を付加することができる。
- (3) 基本実験結果に基づき骨格曲線の諸数値を設定した制振柱付きRPC骨組の解析モデルは、大地震時の変形領域における復元力特性を概ね表現できるが、エネルギー吸収量をやや小さく評価する。

- (4) RPC梁は残留ひび割れ幅が小さく、その変形は柱梁接合面の目開きが支配的であるので、RPC骨組の復元力特性の評価には、RPC部材の復元力特性とともに、接合面の変形を適切に考慮する必要がある。

大型模型試験体を用いた本研究により、損傷制御型RPC造の実現の可能性を示した。今後は、RPC骨組の復元力特性について報告したい。

【謝辞】太平洋セメント株式会社中央研究所の皆様のご協力に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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
- 2) Takeda, T., M.A. Sozen and N.M. Nielsen: Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, Journal of Structural Division, ASCE, Vol.96, No.ST12, pp.2557-2573, Dec.1970
- 3) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, pp.52-58, 1999
- 4) 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