

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⁾ 渡部 幸宏²⁾
 清水 隆²⁾ 藤堂 正喜¹⁾
 菊田 繁美¹⁾ 石岡 拓¹⁾

概 要

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載荷実験を行い、骨組の耐震性能を評価した。骨組には、 $F_c 200\text{N/mm}^2$ 級の鋼繊維混入 UFC (反応性粉体コンクリート) を、制振デバイスには、低降伏点鋼およびオイルダンパーを用いた。あわせて、UFC 材料を用いた柱部材、梁部材および単位骨組の載荷実験を行い、UFC 材料を用いた部材単位の性能を評価した。

実験により、UFC 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。

Study on Seismic Performance of Super High Strength Reinforced Concrete Frame with Damage Fuses

Hiroyuki TAKENAKA
 Nobuyuki IZUMI Takahiro WATABE
 Takashi SHIMIZU Masanobu TODO
 Shigemi KIKUTA Taku ISHIOKA

We are aiming at the achievement of a reinforced concrete structure with the damage control system against the earthquake. The loading test of 3 stories 1 span RC large-scale model frame with damage fuses was executed, and seismic performance of the super high strength reinforced concrete test frame with damage fuses is evaluated.

Test frame is composed of UFC (Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete) material and high strength steel bar. The damage fuses are low-yield-stress steel panel and oil damper.

Additionally, the loading test of the column member, the beam member and the column-beam unit frame using UFC material was executed, and the seismic performance of the members using UFC material is evaluated.

For the results of the experiment, the restoring force characteristics of RC frame and members using UFC material is evaluated. It is shown that the energy absorption performance of RC frame improved by built-in the damage fuse.

In addition, the simulation analysis of the super high strength reinforced concrete frame with the damage fuse is executed, and the analytical model is verified.

¹⁾ 技術研究所 ²⁾ 構造設計部

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
 和泉 信之 渡部 幸宏
 清水 隆 藤堂 正喜
 菊田 繁美 石岡 拓

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⁾⁸⁾。

本報告では、圧縮強度が $200\text{N}/\text{mm}^2$ 級の超高強度繊維補強コンクリート (UFC : Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete) を用いた超高強度 RC 造骨組 (以下、UFC 骨組と呼ぶ) に制振デバイスを組み込んだ架構を対象 (図 1) とした耐震性能に関する研究である。UFC は、セメント、珪石質微粉末等の反応性粉体および細骨材、鋼繊維を使用した複合材料である。

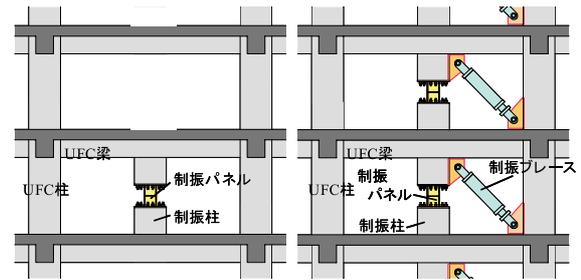
本研究では、鋼繊維を混入した UFC 骨組に高減衰の制振デバイスを組み込むことにより、地震時の損傷制御可能な超高層 RC 造の実現を目指している。しかし、建築分野における UFC を用いた部材の耐震性能に関する研究は着手された段階であり、UFC 骨組を対象とした既往の研究はほとんどみられない。また、損傷制御可能な UFC 骨組の実現には、制振デバイスを組み込んだ UFC 骨組の挙動を評価することが重要である。そのため、第一段階として、本研究では、制振デバイス付き UFC 骨組を対象とした大型模型試験体の静的水平載荷実験を行い、その挙動を評価して、今後の課題を探る。制振デバイスは、間柱とブレースという形式の異なるデバイスを対象とする。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) のオイルダンパーブレース (以下、制振ブレースと呼ぶ) である。

本報告では、UFC 部材・単位骨組の載荷実験および制振デバイスを組み込んだ 3 層 1 スパンの UFC 骨組模型試験体の静的・動的水平載荷実験について述べる。さらに、制振柱付き 3 層 UFC 骨組の解析モデルを構築し、静的実験結果との比較により、その検証を行う。

2. 実験概要

2.1 実験計画

本実験では、UFC 部材・単位骨組の載荷実験 (以下、UFC 実験シリーズと呼ぶ) および制振デバイス付き UFC 骨組の載荷実験 (以下、制振実験シリーズと呼ぶ)



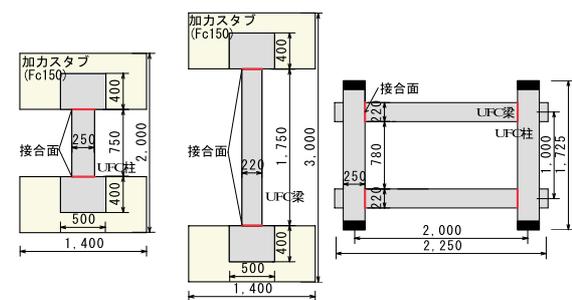
(a)制振柱付き骨組 (b)制振柱・ブレース付き骨組
 図 1 制振デバイス付き UFC 骨組

を計画する。UFC 実験シリーズでは、UFC 骨組を構成する柱、梁という部材単体および 1 層 1 スパンの単位骨組を対象として静的水平載荷実験を行い、UFC 骨組の復元力特性を評価する。

制振実験シリーズでは、制振デバイス付き UFC 骨組を対象として水平載荷実験を行い、制振デバイスの減衰付加効果および UFC 骨組の復元力特性を再評価する。まず、制振デバイスの取り付け前に UFC 骨組のみの載荷実験 (以下、基本実験と呼ぶ) を行い、鉄筋降伏以前の骨組の復元力特性を評価する。次に、制振デバイスを取り付けて UFC 骨組の水平載荷実験を行い、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、縮尺約 1/3 の模型試験体であり、両シリーズとも部材の断面諸元は共通である。試験体の部材長は、超高層住宅を想定して、階高は 1m、スパンは 2m である。UFC 実験シリーズの試験体は、柱 1 体、梁 1 体および 1 層 1 スパンの剛節骨組 1 体である (図 2)。



(a) UFC 柱 (b) UFC 梁 (c) UFC 単位骨組
 図 2 UFC 実験シリーズ試験体

¹⁾ 技術研究所 ²⁾ 構造設計部

制振実験シリーズの試験体は、3層1スパンの柱および梁から構成される剛節骨組1体である。実験目的に応じて、梁スパン中央に制振柱1体を、制振柱と柱との間に斜めに制振ブレース1体を組み込む(図3)。UFC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(図4)。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3)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/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、鋼製継手と高力ボルトにて接合する(図5)。制振ブレースには、オイルダンパーブレースを用いる。オイルダンパーの設計特性値を図6に示す。本試験体に用いたUFC材の諸元を表2に示す。試験体は、UFC打設後に蒸気養生を行う。蒸気養生は、毎時15℃ずつ昇温し、90℃に達した時点でその温度を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 UFC骨組試験体諸元

	B×D (mm)	Fc (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 UFCの割合 (kg/m³)

水*)	UFC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

表3 材料試験結果

鉄筋・鋼材 (材料種別)	ヤング係数 (×10 ⁹ 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

UFC	割線剛性 (×10 ⁹ N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)
梁, 制振柱	0.533	225
柱	0.555	235

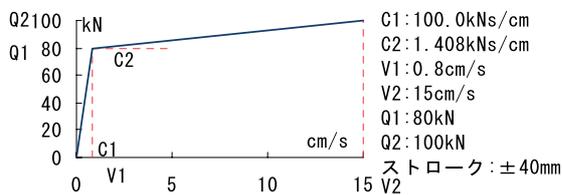


図6 オイルダンパー設計特性値

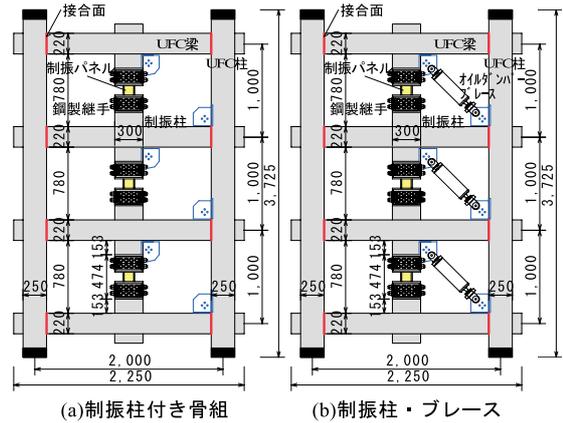


図3 制振実験シリーズ試験体

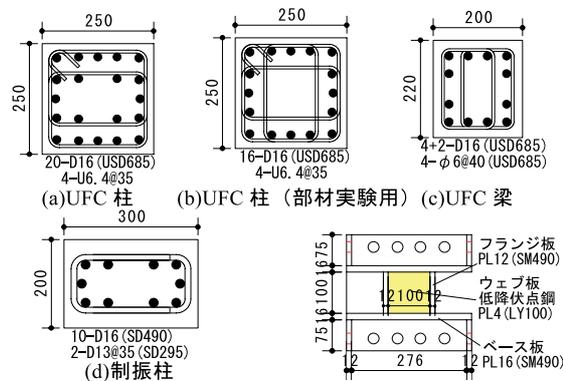


図4 柱・梁・制振柱断面

図5 制振パネル

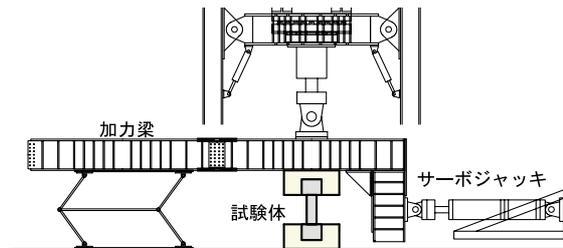


図7 加力装置 (UFC実験シリーズ柱・梁部材)

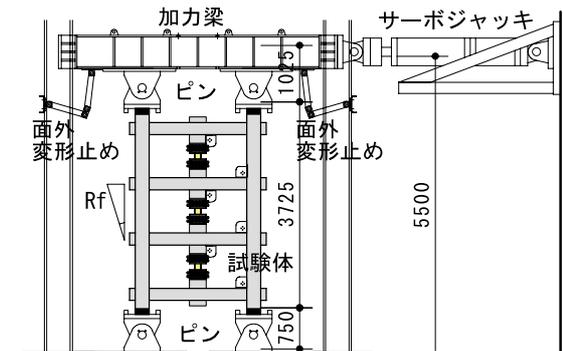


図8 加力装置 (UFC単位骨組・制振実験シリーズ)

2.3 載荷方法

UFC 柱および梁の実験では、試験体の端部を固定して、正負交番繰り返し載荷を行う (図 7)。一方、UFC 骨組の実験および制振実験シリーズでは、柱上部のピン支承に取り付けた加力梁により、正負交番繰り返し載荷を行う (図 8)。

UFC 柱・梁部材および単位骨組実験の加力スケジュールを図 9 に示す。なお、今回の実験は骨組実験との比較を目的とするため、UFC 柱部材実験では軸力を載荷していない。

制振実験シリーズの加力スケジュールを図 10 に示す。動的実験は、第 2 層目の層間変形角 (Rf) が目標とする層間変形角 (tRf) となるような変位をサーボジャッキに与える変位制御加力とする。入力変位は、正弦波とし、前後に増減区間を設け、中間で正負 3 回ずつ tRf に達するものとする。加力の周期は、超高層住宅の 1 次固有周期を想定した 2、4、5 秒とする。また、tRf は幾度か遭遇する地震動を対象とした 1/800rad. と、稀に生じる地震動による変形を上回る大きさを対象とした 1/300rad. の 2 ケースとする。

静的基本実験および静的実験は、正負交番漸増繰り返し載荷とし、制御は第 2 層目の層間変形角 (Rf) により行う。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、柱には軸力を載荷しない。軸力載荷時の UFC 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 UFC 柱部材実験

UFC 柱水平変形角 (Rc)=1/800rad. で曲げひび割れ、Rc=1/150rad. でせん断ひび割れが発生した。Rc=1/100rad. で最大ひび割れ幅は 0.15mm、残留ひび割れ幅は 0.04mm 程度であった。Rc= 1/100rad. から 1/50rad. で主筋が引張降伏し、Rc=1/50rad. で柱端部に圧縮破壊が生じた。Rc=1/150rad.、1/100rad. のひび割れ状況および最終状況を図 11 に示す。実験終了時 (Rc=1/20rad.) の最大残留ひび割れ幅は 0.04mm 程度で、顕著なひび割れやかぶりコンクリートの剥離は見られなかった。柱の水平力-水平変形角関係を図 12(a) に示す。図中の柱曲げ降伏時水平力の略算値は通常の RC 部材の計算式⁹⁾によるが、実験値は略算値とほぼ同程度であった。柱は、曲げ降伏型の挙動を示し、Rc=1/25rad. まで耐力が上昇し、Rc=1/20rad. でも安定した復元力特性を示した。

3.2 UFC 梁部材実験

UFC 梁水平変形角 (Rb)=1/800 で曲げひび割れが、Rb=1/50rad. でせん断ひび割れが発生した。Rb=1/50rad. での最大ひび割れ幅は 0.25mm、残留ひび割れ幅は 0.04mm 程度であった。Rb=1/100rad. から 1/50rad. で主筋が降伏し、Rb=1/33rad. で梁端部に圧縮破壊が生じた。Rb=1/150rad.、1/100rad. のひび割れ状況および最終状況を図 13 に示す。実験終了時 (Rc=1/20rad.) の最大残留ひび割れ幅は 0.15mm 程度

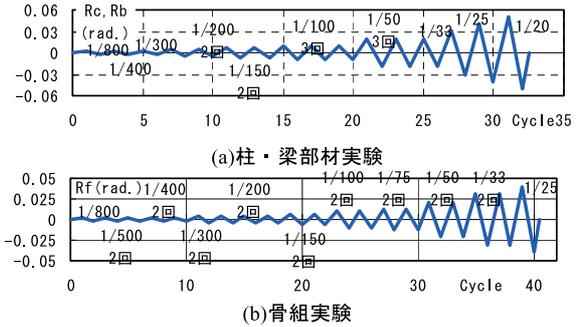


図 9 加力スケジュール (UFC 実験シリーズ)

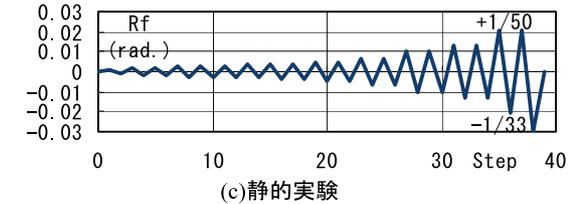
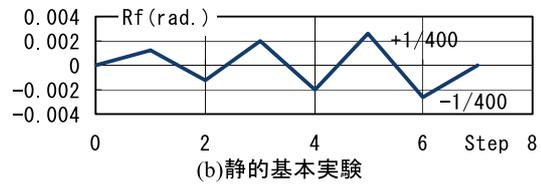
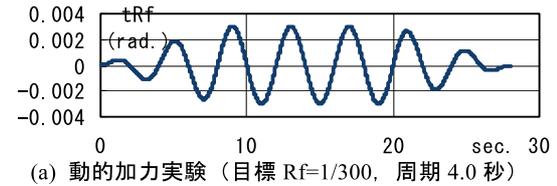
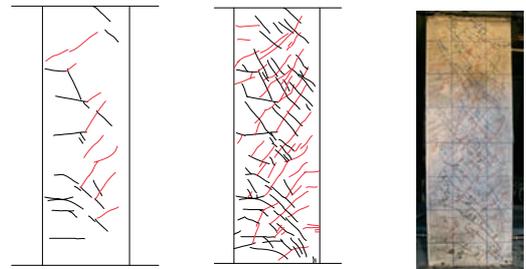
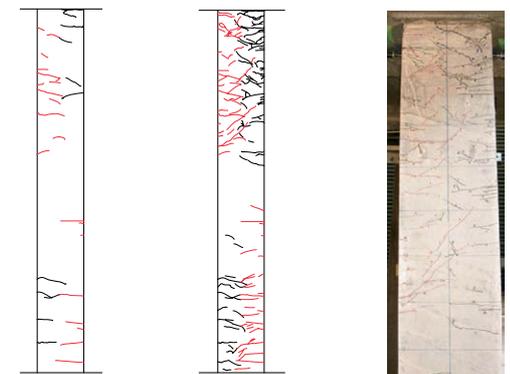


図 10 加力スケジュール (制振実験シリーズ)



(a)1/150rad. (b)1/100rad. (c)最終状況
図 11 UFC 柱のひび割れ状況



(a)1/150rad. (b)1/100rad. (c)最終状況 (端部)
図 13 UFC 梁のひび割れ状況

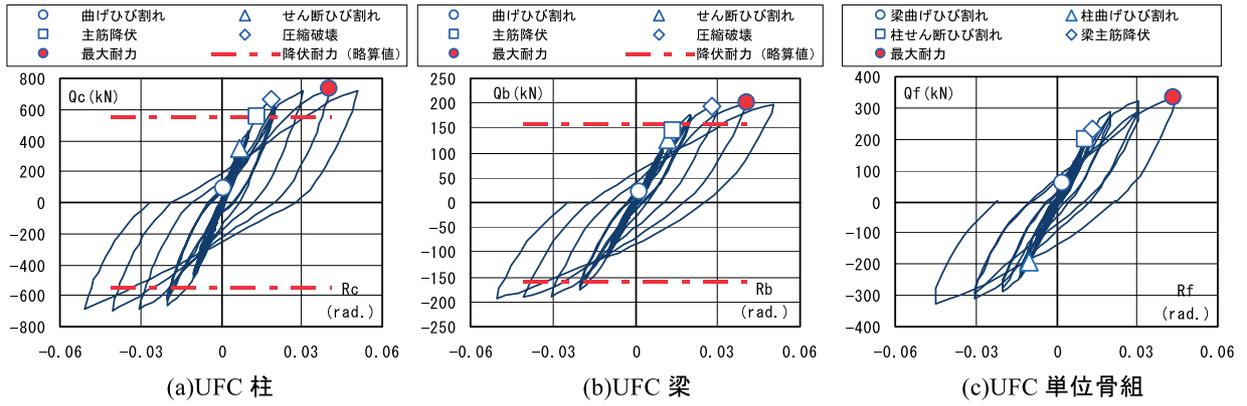


図 12 水平力-水平変形角関係

で、柱試験体と同様に、顕著なひび割れやかぶりコンクリートの剥離はみられなかった。梁の水平力(Qb)-水平変形角関係を図12(b)に示す。図中の梁曲げ降伏時水平力の略算値は、通常のRC部材の計算式9)によるが、実験値は略算値を1割程度下回った。

梁は曲げ降伏型の挙動を示し、主筋降伏後 $R_b=1/25rad.$ まで耐力が上昇し、 $R_b=1/20rad.$ でも安定した履歴を示した。

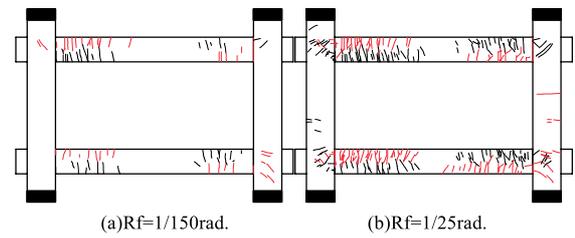


図 14 UFC 骨組のひび割れ状況

3.3 UFC 単位骨組実験

骨組層間変形角(R_f) $=1/800rad.$ で柱梁接合面に目開きが見られ、 $R_f=1/400rad.$ で梁に、 $R_f=1/150rad.$ で柱に、それぞれ、曲げひび割れが発生した。 $R_f=1/100rad.$ で、梁の曲げひび割れ幅が最大0.06mm程度、また、柱梁接合面の目開き量は最大0.35mm程度であった。 $R_f=1/100rad.$ 除荷後の残留変形は、梁、柱のひび割れ面とともに柱梁接合面にもほとんどみられなかった。 $R_f=1/100rad.$ から $1/75rad.$ の変形時に梁にせん断ひび割れが発生し、梁主筋が降伏した。 $R_f=1/25rad.$ まで梁端の圧縮破壊や、かぶりの剥離はみられず、最大残留ひび割れ幅は、梁の曲げひび割れで0.15mm程度、また、柱梁接合面の残留目開き幅は2.5mm程度であり、骨組の変形において柱梁接合面の目開き量が支配的であった。 $R_f=1/150, 1/25rad.$ のひび割れ状況を図14に、骨組の水平力(Q_f)-水平変形角関係を図12(c)に示す。骨組は、梁曲げ降伏型架構の挙動を示し、 $R_f=1/25rad.$ まで耐力が上昇し、顕著なひび割れやかぶりコンクリートの剥離はみられず、安定した復元力特性を示した。

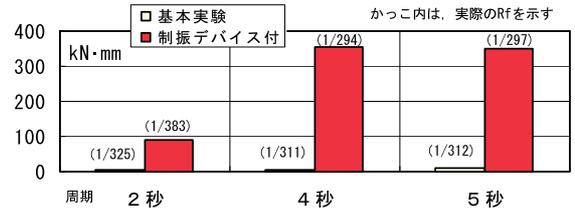


図 15 エネルギー吸収量の比較 (動的実験 $tR_f=1/300$)

3.4 制振実験シリーズ基本実験結果

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

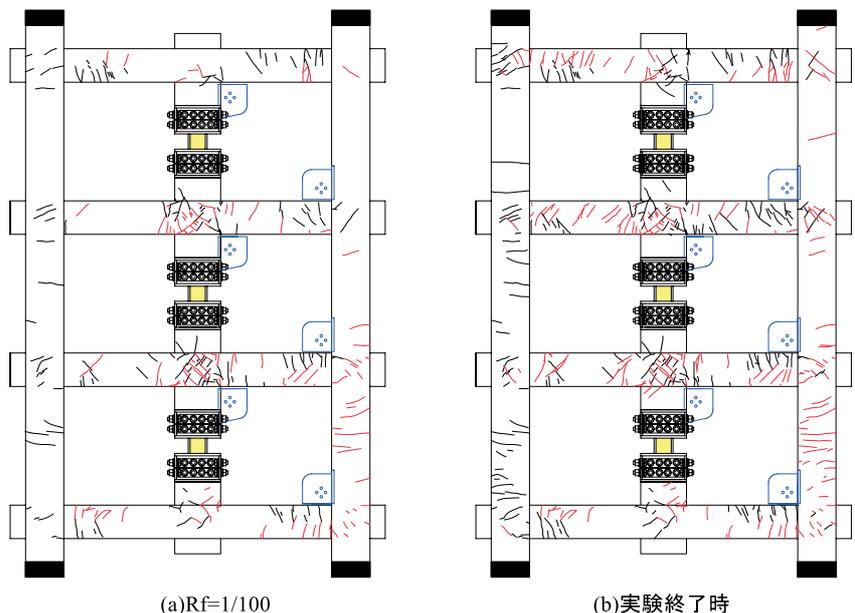


図 16 ひび割れ状況

はみられなかった。また、梁および柱の鉄筋は弾性範囲であった。

3.5 制振実験シリーズ動的実験結果

動的実験と動的基本実験における履歴吸収エネルギー量の比較を図 15 に示す。ここでの履歴吸収エネルギー量は、荷重と 3 層分の水平変形の履歴より求め、 t_{Rf} 到達時の 3 ループの平均値とした。制振デバイスの付加により、UFC 骨組のエネルギー吸収能力が顕著に増大していることが明瞭である。動的加力実験終了時において、梁主筋は弾性範囲であり、柱および梁にはひび割れは発生しなかった。柱梁接合部との接合面（以下、柱梁接合面と呼ぶ）には目開き変形が生じたが、除荷時には閉じ、骨組にはほとんど損傷がみられなかった。

3.6 静的載荷実験結果

(1) 実験経過

実験終了時の第 2 層目のひび割れ状況を図 16 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。また、 $R_f=1/100$ では、梁主筋の降伏はみられなかった。 $R_f=1/75$ 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、梁主筋の降伏がみられたが、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、顕著な圧壊はみられなかった。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、顕著な耐力低下はみられなかった。

(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 17 に示す。図中には、UFC 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、UFC 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、UFC 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みられなかった。

4. 制振実験結果の考察

4.1 エネルギー吸収量

$R_f=1/400$ までの UFC 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 18 に

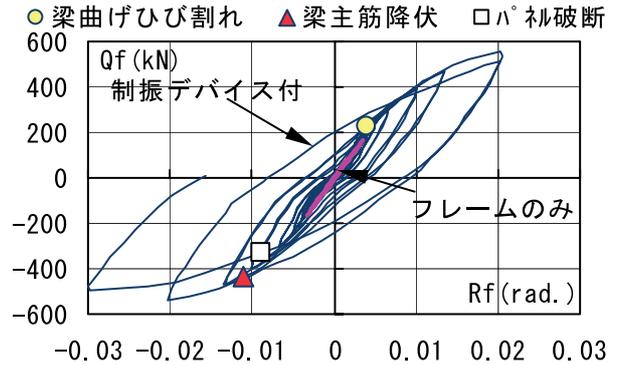


図 17 水平力-水平変形角関係 (第 2 層目)

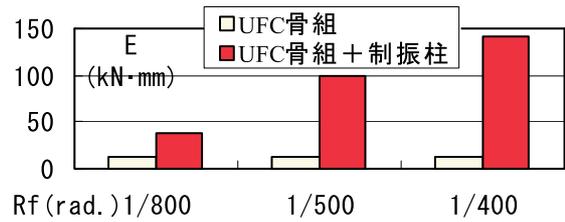


図 18 エネルギー吸収量の比較

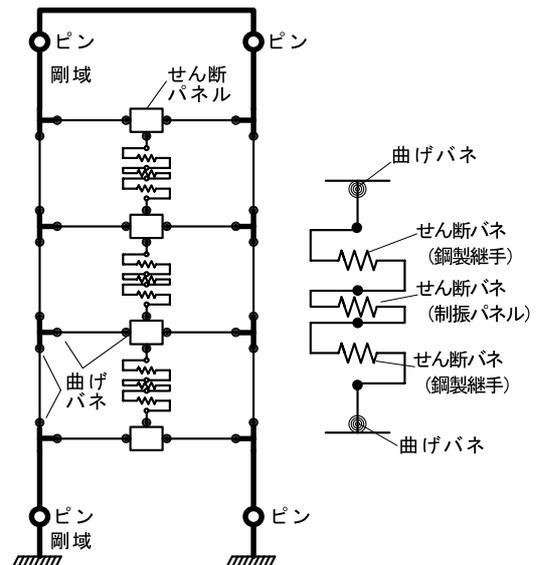


図 19 制振デバイス付き UFC 骨組の解析モデル

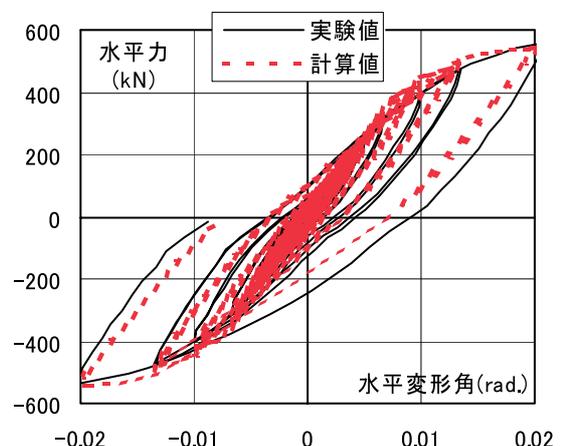


図 20 骨組の復元力特性の比較 (第 2 層目)

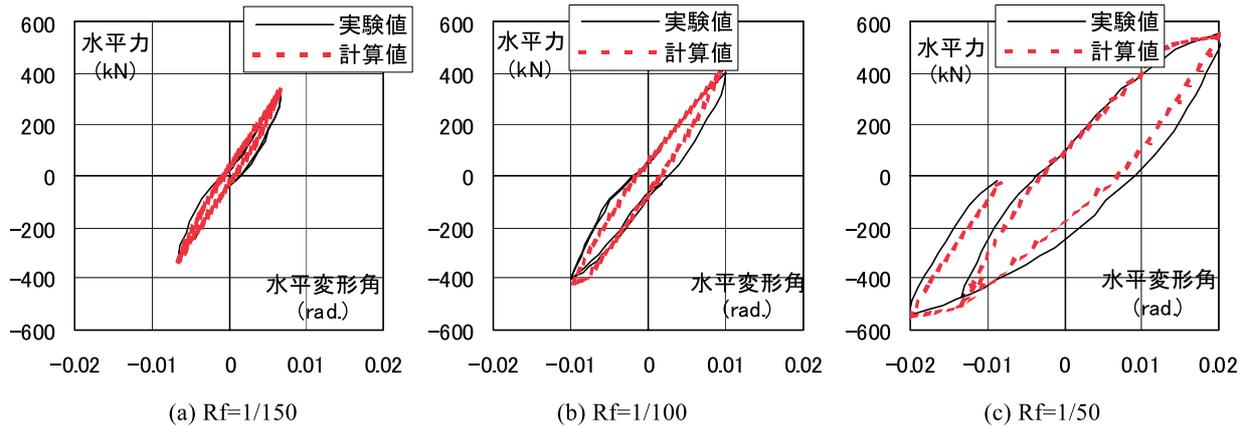


図 17 水平力-水平変形角関係 (第2層目)

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増大していることがわかる。Rf=1/400 時点の等価粘性減衰定数をみると、骨組のみが 0.03 程度であるのに対して、制振柱付き UFC 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 19 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¹⁰⁾とする ($\gamma=0.4$)。UFC 梁は残留ひび割れ幅が小さく、UFC 梁の端部変形は柱梁接合部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¹¹⁾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/mm² 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¹²⁾を参考に設定する。諸元の設定は、Rf=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、Rf=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。

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

4.4 骨組の復元力特性

制振デバイスを組み込んだ UFC 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 UFC 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 20 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平変形角 1/100 付近の Rf における履歴ループの比較を図 21 に示す。解析値は、実験値のスケルトンカーブをおおむね表現できている。骨組のエネルギー吸収量の解析値は、実験値に対して、Rf=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、UFC 骨組の非線形挙動を十分に表現できていない点がある。UFC 骨組の復元力特性の定量的な評価には、UFC 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 UFC 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) UFC 柱・梁は曲げ降伏型、UFC 骨組は梁曲げ降伏型架構の挙動を示し、大変形時でも顕著なひび割れやかぶりコンクリートの剥離などがみられなかった。
- (2) 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 UFC 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。
- (3) 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、UFC 骨組にエネルギー吸収能力を付加することができる。

- (4) 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 UFC 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おおむね表現できるが、エネルギー吸収量をやや小さく評価する。
- (5) UFC 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、UFC 骨組の復元力特性の評価には、UFC 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。
- (6) UFC 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、UFC 骨組の復元力特性の評価には、UFC 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 UFC 造の実現の可能性を示した。今後は、UFC 骨組の復元力特性について報告したい。

【謝辞】本研究は、戸田建設（株）と西松建設（株）の技術提携の一環として実施された共同研究である。また、UFC 試験体の製作にご協力頂きました太平洋セメント株式会社中央研究所の皆様には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) 和泉信之、竹中啓之、千葉脩、阿世賀宏：粘弾性制振デバイス付き 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.25、No.2、pp.1363-1368、2003.7
- 3) 竹中啓之、和泉信之、高橋孝二、飯塚信一：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、コンクリート工学年次論文集、Vol.25、No.2、pp.1369-1374、2003.7
- 4) 竹中啓之、和泉信之、高橋孝二、飯塚信一：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、コンクリート工学年次論文集、Vol.26、No.2、pp.1111-1116、2004.7
- 5) 和泉信之、竹中啓之、清水隆、多田公平：低降伏点鋼デバイスを組み込んだ高層 RC 造建物の地震応答解析、コンクリート工学年次論文集、Vol.27、No.2、pp.889-894、2005.6
- 6) 羽鳥敏明ほか：制振デバイス付き RC 造骨組の耐震性能に関する研究、日本 建築学会大会（北陸）学術講演梗概集 C-1 分冊、pp.751-758、2002.8
- 7) 和泉信之ほか：制振デバイス付き RC 造骨組の解析モデルに関する研究、日本 建築学会大会（東海）学術講演梗概集 C-1 分冊、pp.883-888、2003.9
- 8) 和泉信之、ほか：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、日本 建築学会大会（北海道）学術講演梗概集 C-1 分冊、pp.877-882、2004.8
- 9) 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、pp.155、日本建築学会、1999 年
- 10) 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
- 11) 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、pp.52-58、日本建

築学会、1999 年

- 12) 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