

論文 制振デバイス付き R C 造骨組の耐震性能に関する研究

和泉 信之^{*1}・竹中 啓之^{*2}・千葉 脩^{*3}・阿世賀 宏^{*4}

要旨：低降伏点鋼（100N/mm²級）を使用した制振デバイスの取り付けいた R C 造間柱が組み込まれた R C 造骨組を対象として，1 層 1 スパンの模型試験体の静的および動的的水平載荷実験を行った。その結果，中小地震時から大地震時に至る想定変形領域において，制振デバイスの付加により，R C 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ことを示した。さらに，制振デバイスの取り付けいた R C 造間柱を対象に提案した解析モデルを用いて，R C 造骨組の復元力特性について，実験結果との比較を行い，そのモデルの妥当性を示した。

キーワード：R C 造骨組，制振デバイス，低降伏点鋼，耐震性能，復元力特性

1. はじめに

著者らは，鉄筋コンクリート造（以下，R C 造と呼ぶ）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 R C 造骨組への適用に関する研究を行ってきた。

本論文で取り扱う制振デバイスは，R C 造骨組を対象とした履歴型ダンパーである。制振デバイスは，低降伏点鋼を用いたせん断降伏型鋼製パネル（以下，制振パネルと呼ぶ）である。この制振パネルを R C 造柱の中央部に設けて，その上下の R C 造部に接合した間柱（以下，制振柱と呼ぶ）とし，R C 造骨組に組み込んでいる（図 - 1）。地震時における制振柱単体の構造性能については，実大試験体の静的水平載荷実験を行い，既に報告した¹⁾。ここでは，制振デバイス付き R C 造骨組を対象とした 1 層 1 スパンの模型試験体の静的および動的載荷実験を行い，制振デバイスの R C 造骨組に対する減衰付加性能および解析モデルの復元力特性の妥当性について述べる。

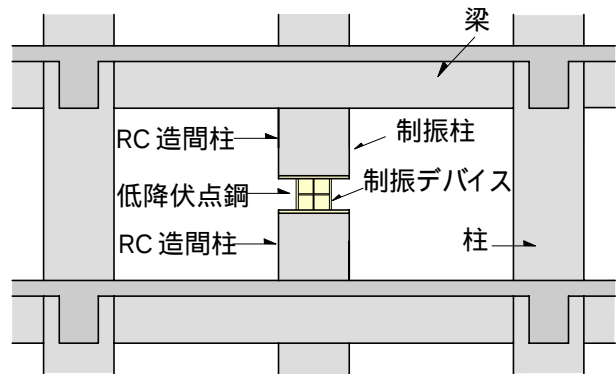


図 - 1 制振デバイス付き R C 造骨組

2. 実験概要

2.1 実験計画

本実験では，制振デバイスの減衰付加性能を検討するため，まず制振デバイスの取付け前に R C 造骨組のみの静的および動的載荷実験（以下，基本実験と呼ぶ）を行う。次に，制振デバイスの取り付け後に R C 造骨組の動的載荷実験（以下，動的実験と呼ぶ）を行い，エネルギー吸収能力を比較する。さらに，比較的大きな水平変形まで静的載荷実験（以下，静的実験と呼ぶ）を行い，得られた復元力特性について解析モデル

*1 戸田建設（株） 構造設計部主管 博（工）（正会員）

*2 戸田建設（株） 技術研究所 工修

*3 戸田建設（株） 技術研究所所長 工修 （正会員）

*4 西松建設（株） 技術研究所部長 博（工）

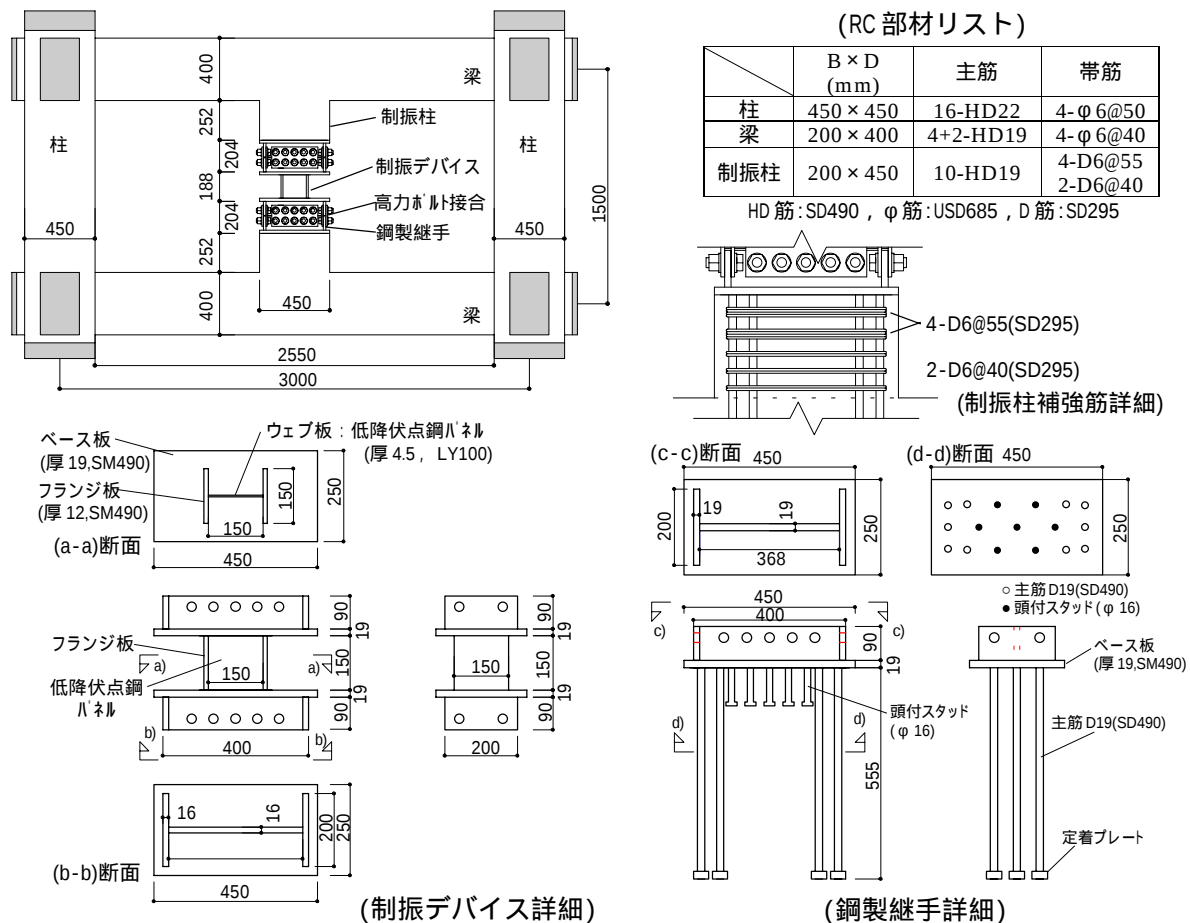


図 - 2 制振デバイス付き R C 造骨組試験体

ルとの比較を行う。

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に、制振柱をスパン中央に組み込んだ約 1/2 縮尺の模型試験体である(図—2)。R C 造骨組試験体は 1 体とし、制振パネルは動的および静的載荷用として 2 体とした。制振パネルは、低降伏点鋼材を用いたウェブ板と S M 材を用いた縦フランジ板、上下の水平板から構成される。低降伏点鋼材には、通常の建築用鋼材に比べて降伏点が低く延性に富んだ 100N/mm²級の鋼材を用いている。試験体の材料特性を表—1 に示す。

制振パネルは、制振柱に組み込まれた鋼製継手と高力ボルトにより接合されている。鋼製継手は、頭付きスタッドと主筋により、R C 造部に接合されている。主筋は、縮尺模型試験体のため、鋼製継手の水平板に溶接している。R C 造骨組は、梁曲げ降伏先行型架構として設計し

ている。柱および梁の主筋には高強度鉄筋 SD490 材を、せん断補強筋には高強度補強筋 USD685 材を使用している。柱の上部、あるいは下部には、加力用ピン支承を設けている。

表 - 1 試験体の材料特性

鉄筋・鋼材 (材料種別)	ヤング係数 (× 10 ⁵ 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
φ 6 (USD685)	1.80	701	846
D6 (SD295)	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 (× 10 ⁵ N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)
梁, 制振柱	0.26	31	2.35
柱	0.35	55	4.56

2.3 荷重方法および荷重履歴

荷重は、骨組のみの静的および動的実験を行い、制振パネル取り付け後に動的実験を行う。次に制振パネルを取り替えて静的実験を行う。本試験体の荷重は、左右の柱上部のピン支承に取付けた加力用装置により行う（図-3）。

荷重履歴は、RC造骨組の水平変形角（ R_f rad.）で制御する。荷重履歴を図-4に示す。動的荷重では、超高層住宅を想定して周期は2秒および4秒とした。また、 R_f は1/800の他に、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程度を目標とした。しかし、動的荷重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4.0秒）は基本実験では1/230、動的実験では1/318であった。

3. 実験結果

3.1 動的荷重実験結果

(1) 実験経過

基本実験では、梁端部に曲げひび割れが発生したが、荷重後ひび割れはほぼ閉じていた。梁主筋のひずみ度は最大904 μ であり、鉄筋は弾性範囲であった。

動的実験では、骨組のひび割れはやや進展したが、ひび割れ状況にあまり変化は見られず、残留ひび割れ幅も増大しなかった。制振パネル

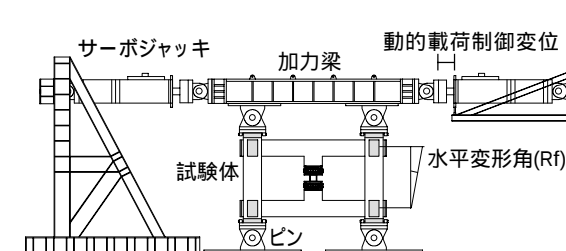
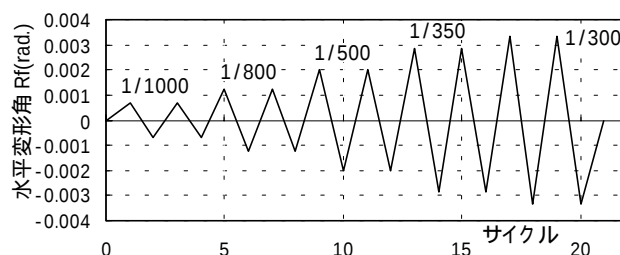
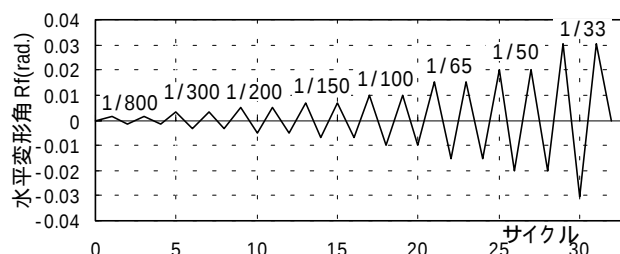


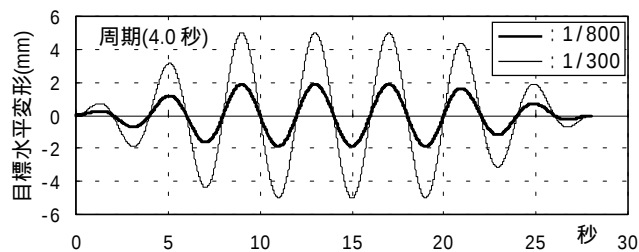
図-3 加力装置



(1) 静的荷重（基本実験）

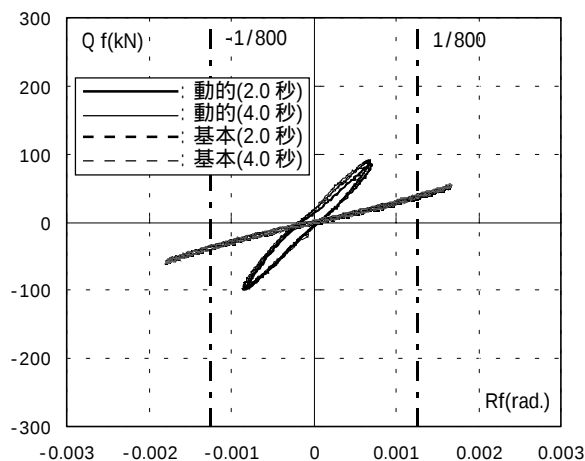


(2) 静的荷重（静的実験）

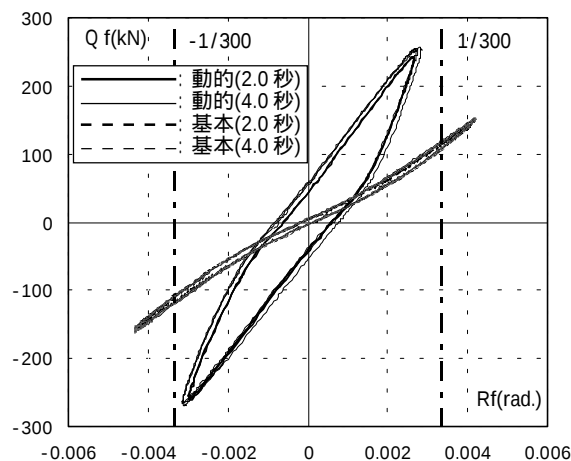


(3) 動的荷重（基本実験，動的実験）

図-4 荷重スケジュール



(1) 目標水平変形角 1/800



(2) 目標水平変形角 1/300

図-5 水平力 - 水平変形角関係（動的荷重）

のウェブ板のひずみ度は、降伏点を越えていたが、座屈変形などは見られなかった。

(2) 水平力—水平変形角関係

基本実験と動的実験における水平力—水平変形角関係の比較を図—5に示す。

動的実験の水平力—水平変形角関係は、骨組のみの基本実験結果に比べて紡錘形を示している。制振パネルによる履歴減衰の増大が明瞭であり、ひび割れが生じても鉄筋降伏以前におけるRC造骨組の減衰性能の向上が可能なことがわかる。

3.2 静的載荷実験結果

(1) 実験経過

骨組の水平変形角 ($R_f \text{ rad.}$) が $1/33$ における実験終了時のひび割れ状況を図—6に示す。 R_f が増大するにつれて、梁の曲げひび割れが進展した。 $R_f=1/300$ の時点では最大ひび割れ幅が 0.02mm であったが、載荷後ひび割れ幅はほぼ閉じていた。 $R_f=1/100$ の時点では、梁主筋が降伏して、最大ひび割れ幅が 0.2mm 程度、残留ひび割れ幅は 0.1mm 程度であった。骨組の降伏形式は、梁曲げ降伏先行型であり、柱の損傷はほとんど見られなかった。 $R_f=1/300$ の時点以降、制振柱と梁との接合部にせん断ひび割れが見られたが、残留ひび割れ幅は最大 0.04mm 程度であった。

制振パネルでは、 $R_f=1/150$ の時点でウェブ板の面外変形が見られ、 R_f の増大に伴い、ウェブ板の座屈波形とともに縦フランジ板の面外曲げ変形が顕著となった。 $R_f=1/33$ の時点で、縦フランジ板の溶接部境界に割れが発生して、耐力低下が生じた。

(2) 水平力—水平変形角関係

骨組の水平力—水平変形角関係を図—7に、実験結果一覧を表—2に示す。梁主筋が降伏した $R_f=1/100$ の時点以前において、制振パネルのウェブ板の降伏により、復元力特性が骨組の場合に比べてエネルギー吸収能力に優れた紡錘形を示している。 $R_f=1/100$ の時点以降では、梁曲げ降伏型の安定した復元力特性を示してい

る。梁主筋の降伏後は、梁の曲げ降伏による履歴減衰に加え、制振パネルによる履歴減衰の向上が見られる。制振パネルによる履歴減衰の付与効果は、制振パネルの縦フランジ材が破断した $R_f=1/33$ の時点以降における履歴ループと比較すれば明瞭である。

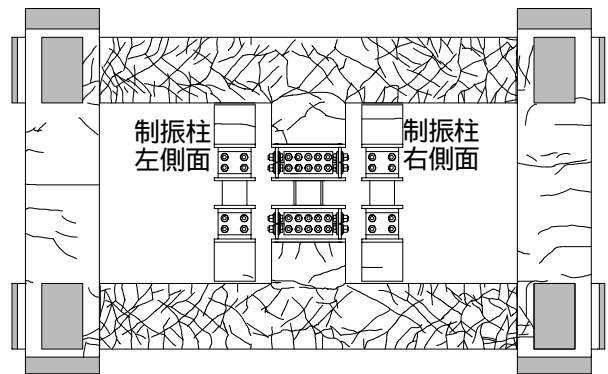


図 - 6 ひび割れ状況(実験終了時)

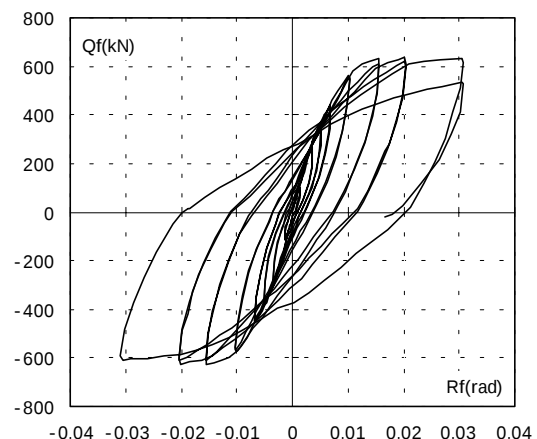


図 - 7 水平力 - 水平変形角関係 (静的載荷)

表 - 2 実験結果一覧

水平変形角 rad.	荷重 kN	状 況
1/1000 1/500 1/300 (基本実験)	56 114 176	梁曲げひび割れ 梁曲げせん断ひび割れ 梁せん断ひび割れ
1/200	363	柱曲げひび割れ
1/150	440	柱曲げせん断ひび割れ 制振パネルウェブ面外変形 制振柱主筋に沿った縦ひび割れ
1/100	561	梁端部コンクリート圧縮破壊 制振パネルウェブ面外変形進展 梁主筋の降伏
1/65	630	梁端部コンクリート圧縮破壊顕著
1/33	632	制振パネルフランジ上端に亀裂 → 2 サイクル目に破断(527kN)

4. 実験結果の考察

4.1 エネルギー吸収量

基本実験と動的実験における骨組のエネルギー吸収量の比較を図—8に示す。制振柱の配置により、骨組のエネルギー吸収量が增大していることがわかる。また、静的実験における骨組のエネルギー吸収量の推移を図—9に示す。水平変形角 (R_f) の増加に伴い、骨組のエネルギー吸収量が增大している。制振パネルの破断の前後における骨組の半サイクルエネルギー吸収量を比較することにより $R_f=1/33$ 時点における制振柱のエネルギー吸収量は、骨組全体の20%程度を占めていることがわかる。

4.2 解析モデル

骨組の解析モデルは、図—10に示すようにRC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、柱頭部および柱脚部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。

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³⁾とする。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。そのスケルトンカーブの設定では、文献1では低降伏点鋼材を用いたウェブ板のせん断降伏点を基準とした。しかし、本試験体を用いた低降伏点鋼材は100N/mm²級の鋼材であり、そのせん断降伏点は明瞭でないため、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²⁾を参考に設定した。実験結果の詳細は、文献2によらるたい。設定に関しては、 $R_f=1/100$ 時点における制振パネルの変形を基準とした。なお、制振パネルの鋼製継手部の変形は、継手部ウェブ板の弾性せん断変形を別途考慮した。

4.4 骨組の復元力特性

解析モデルを用いた骨組の復元力特性の比較を図—11に示す。解析値は実験値に比べてやや小さめの評価であるが、静的実験における

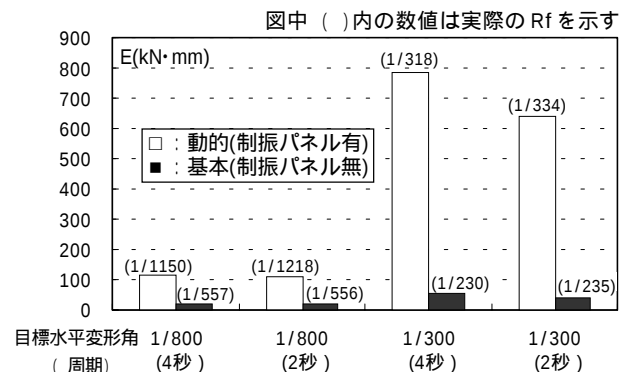


図 - 8 エネルギー吸収量の比較 (動的載荷)

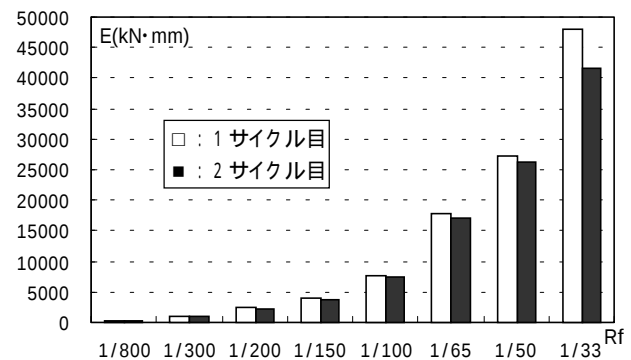


図 - 9 骨組のエネルギー吸収量推移 (静的載荷)

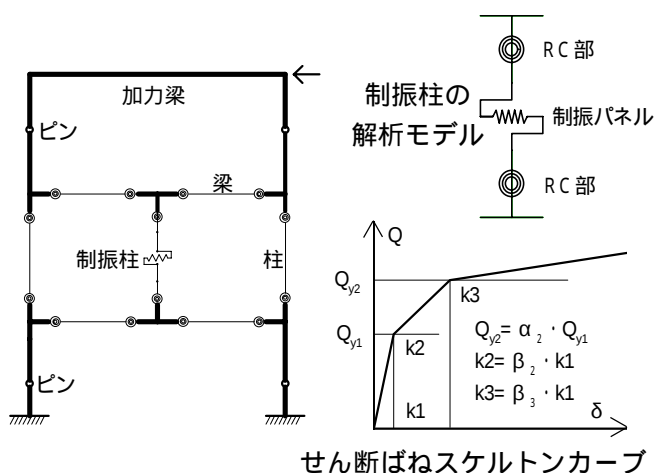
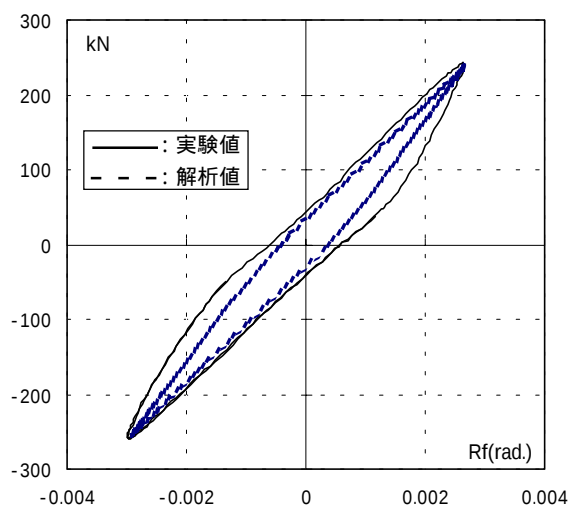


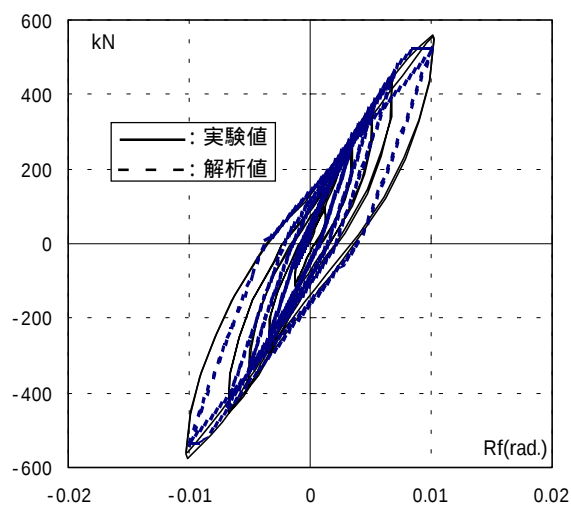
図 - 10 制振デバイス付きRC造骨組の復元力特性

表 - 3 制振デバイス復元力特性諸元

Q_{y1} (kN)	α_2	k_1 (kN/mm)	β_2	β_3
57.4	2.5	267.5	0.4	0.04



(1) 動の実験 (Rf=1/300 時)



(2) 静的実験 (Rf=1/100 時)

図 - 11 骨組の復元力特性の比較

Rf=1/100 時点では、比較的良く実験値を表現している。また、骨組のエネルギー吸収量を比較すると(図—12), Rf=1/300以降において解析値は実験値に対して概ね70～90%程度であり、解析モデルは実験値を安全側に評価している。

5. 結論

これまでの実験および解析から得られた知見を以下に示す。

(1) 中小地震時から大地震時に至る想定変形領域において、低降伏点鋼材を用いた履歴型ダンパーの付加により、RC造骨組のエネルギー吸収能力が向上することを静的および動的載荷実験により示した。

(2) 履歴型ダンパーの付加により、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に改善できることを動的載荷実験により示した。

(3) スケルトンカーブの諸数値を適切に設定した制振柱の提案モデルを用いた骨組の解析モデルは、履歴型ダンパーが付加されたRC造骨組の復元力特性を比較的良く表現できることを実験結果との比較により示した。

謝辞

本実験にあたり、羽鳥TM、飯塚博士をはじめ、多大な協力を戴きました戸田建設・西松建

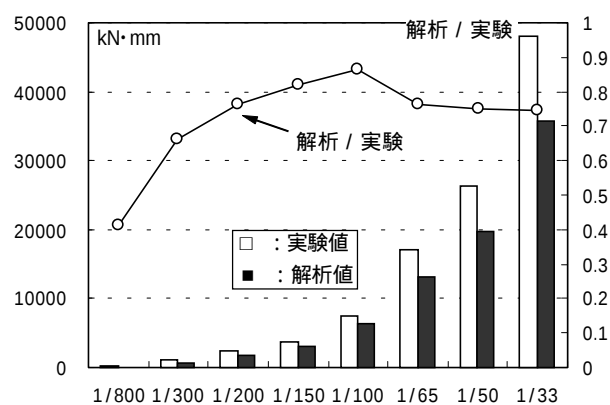


図 - 12 骨組のエネルギー吸収量比較 (静的載荷)

設共同研究プロジェクトの関係者には、深甚なる謝意を表します。

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，pp.785-790，1998.9
- 3)Takeda, Sozen and Nielsen: Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, Journal, Structural Division, ASCE, Vol.96, No. ST12, pp.2557-2573, 1970