

論文 低降伏点鋼パネル付きRC造間柱の復元力特性に対する面外方向載荷の影響

和泉信之^{*1}・竹中啓之^{*2}・菊田 繁美^{*2}・清水 隆^{*3}

要旨：低降伏点鋼パネルを柱中央に組み込んだ鉄筋コンクリート造間柱を対象として、静的水平載荷実験を行い、間柱の面内方向の復元力特性に対する面外方向載荷の影響を検討した。実験試験体は、実大規模の試験体2体であり、載荷方向は、低降伏点鋼パネルが制振デバイスとして効果を発揮する面内方向およびそれに直交する面外方向とした。実験結果から、対象とした低降伏点鋼パネル付き間柱は、面外方向に高層建物に大地震時に想定される部材角1/150を経験しても、面内方向の復元力特性には大きな影響を与えないことがわかった。

キーワード：RC造, 制振, 柱, 復元力特性, 水平載荷実験

1. はじめに

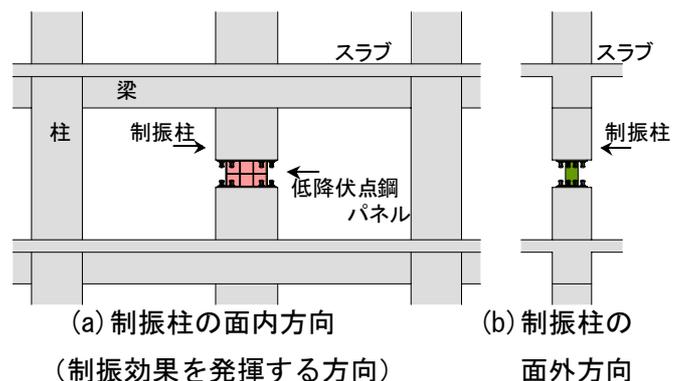
著者らは、鉄筋コンクリート造（以下、RC造と呼ぶ）建物の地震時の損傷制御を目的として、エネルギー吸収型デバイス、いわゆる制振デバイスの適用に関する研究^{1),4)}を行っている。

従来、RC造建物では、制振技術は鉄骨造に比べて利用が少なかったが、最近、超高層RC造住宅では、実用化が進められている。制振デバイスとしては、メンテナンスと経済性の観点から、低降伏点鋼が多く用いられている。また、住戸計画への適応性の観点から、骨組のなかに比較的容易に設置できる間柱方式が採用されている事例が多い。

RC造では、鉄骨造と異なり、ひび割れにより制振デバイスの接合部や周辺部材の剛性低下が生じて、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、著者らは制振デバイス付き部材や骨組の構造実験による性能評価を行ってきた²⁾。このような制振部材は、一方向地震力に対して有効なデバイスとして計画されている。しかし、超高層建物では、建物全体の曲げ変形による強制的な面外変形、あるいは小梁や

厚肉床スラブの拘束による面外方向変形が考えられる。一方、構造実験による性能評価は一方向地震力を対象としており、直交方向の特性に関する研究は報告されていない。このように、制振部材の復元力特性に及ぼす面外方向載荷の影響は検証されていないのが現状である。

そのため、本論文では、RC造建物に適用性の高い低降伏点鋼パネル（以下、制振パネルと呼ぶ）を柱中央に組み込んだRC造間柱（以下、制振柱と呼ぶ）を対象として、静的水平載荷実験を行い、制振柱の面内方向の復元力特性に対する面外方向載荷の影響を検討する（図—1）。



図—1 高層RC造骨組と制振柱

*1 戸田建設（株）構造設計部グループ長 博（工）（正会員）

*2 戸田建設（株）技術研究所 工修 （正会員）

*3 戸田建設（株）構造設計部

2. 実験概要

2.1 実験計画

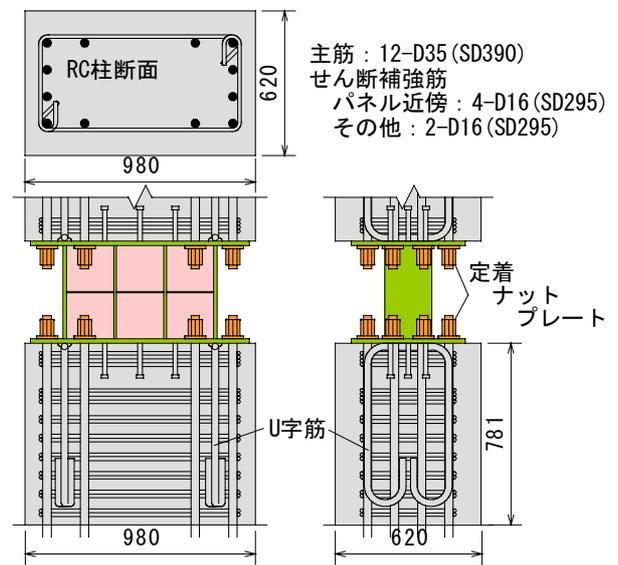
本実験では、制振パネルとして用いた低降伏点鋼ウェブ板をせん断降伏させる方向（以下、面内方向と呼ぶ）およびその直交方向（以下、面外方向と呼ぶ）に载荷して、制振柱の復元力特性を評価する。制振柱の復元力特性に対する面外方向载荷の影響を検討するため、同一の制振柱の試験体を準備して、面内と面外の载荷方向を変えた実験を計画する。

2.2 試験体概要

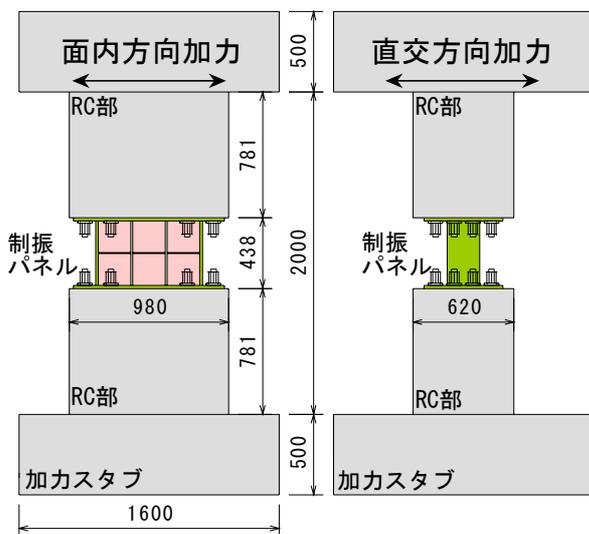
本実験の試験体は、同一断面を持つ実大規模の制振柱 2 体である。試験体の形状および配筋を図—2 に、試験体の材料特性を表—1 に示す。制振パネルは、低降伏点鋼（降伏強度 225N/mm² 級）を用いたウェブ板、縦フランジ板（SM490）、ベース板（SM490）および横リブ板（SM490）から構成されている。また、制振パネルは、ベース板の頭付きスタッド、RC 造間柱の主筋の定着ナットおよび U 字筋により、上下の RC 造間柱に接合されている。制振パネルより下部の RC 造間柱は、プレキャスト部材を想定して試験体下部スタブ部材とはコンクリートを打ち分け、柱脚の接合面にはシアキーを設けている。

表—1 試験体の材料特性

鉄筋・鋼材 (材料種別)	ヤング係数 ($\times 10^5$ N/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
D35 (SD390)	1.81	459	687
D29 (SD390)	1.79	448	663
D16 (SD295)	1.87	366	539
PL6 (LY225)	1.97	216	322
PL6 (SM490)	2.14	407	576
PL12 (SM490)	2.04	374	534
PL16 (SM490)	2.05	371	539
PL19 (SM490)	2.07	346	538
コンクリート	割線剛性 ($\times 10^9$ N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)
制振柱	0.295	35.1	2.98

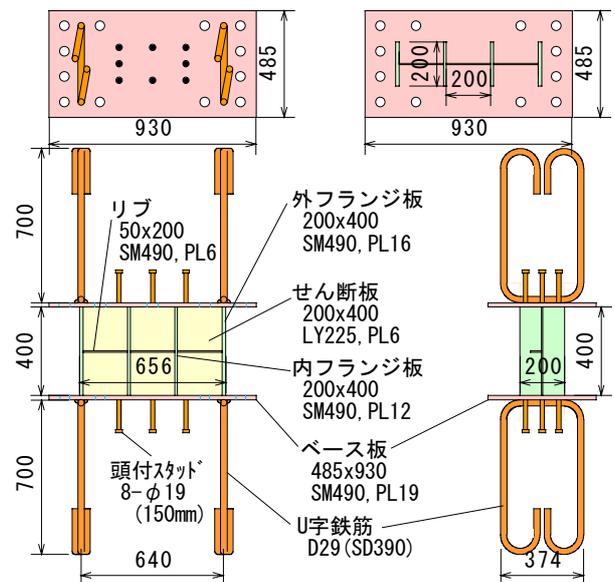


(c) 制振柱詳細



(a) 試験体 (面内)

(b) 試験体 (面外)



(d) 制振パネル

図—2 制振柱の試験体

2.3 荷重方法および荷重履歴

制振柱試験体は、柱脚を固定して、逆対称水平加力を行う。試験体の加力装置を図—3に示す。試験体の荷重は、水平変形を制振柱の高さで除した水平変形角 (R_c) で制御する。面内荷重における水平変形角の最大値は、大地震時(建築基準法告示における極めて稀に発生する地震動で、超高層建築物の耐震設計で対象とされるレベル2地震動に相当)に設計目標とされる層間変形角 $1/100$ を想定した制振柱単体の部材角 $1/150$ とする。加力スケジュールは、既往の面内荷重実験¹⁾と同様に、最大水平変形角の前後に小振幅の水平変形を加えた正負交番漸増荷重とする。面内および面外方向の加力スケジュールを図—4に示す。なお、試験体は間柱を想定しているため、軸方向力は荷重しない。

DHC3 試験体では、面内荷重のみとする。一方、DHC4 試験体では、面外荷重を最初に行い、その後試験体を 90 度回転させて面内荷重を行う。

制振柱は、面内荷重では仮想の大変形 $1/33$ まで耐力低下がなく、エネルギー吸収能力に富む復元力特性を示し、主筋は降伏しない¹⁾。また、制振柱は一方向柱であり、設計時に面外方向の地震力負担は期待していない。そのため、面外荷重によるひび割れや制振パネルの面外変形の経験が及ぼす影響に着目して、最大の面外変形の経験後に面内荷重を行うこととする。面外方向の変形は建物の最大変形を設定することとし、本実験では、面外荷重における水平変形角の最大値は、面内荷重と同じ値を用いる。

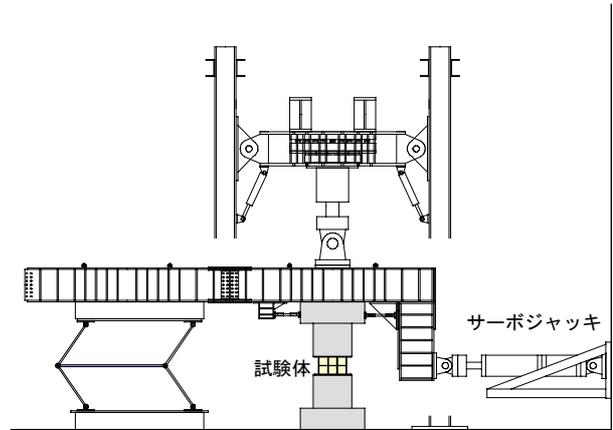
3. 実験結果

3.1 実験経過

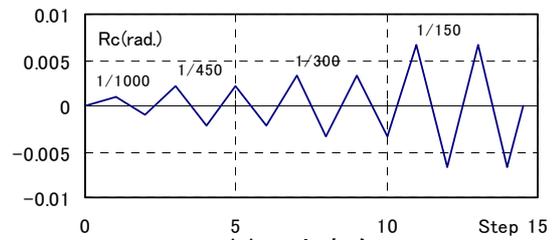
(1) 面内荷重実験

制振柱の面内方向ひび割れ状況について、面外荷重前の状況として DHC3 試験体を、面外荷重後の状況として DHC4 試験体を図—5に示す。両試験体には、曲げひび割れが見られるが、面外荷重の経験により水平方向のひび割れがやや目立つ。DHC3 試験体では、 $R_c=1/450$ 時点で、

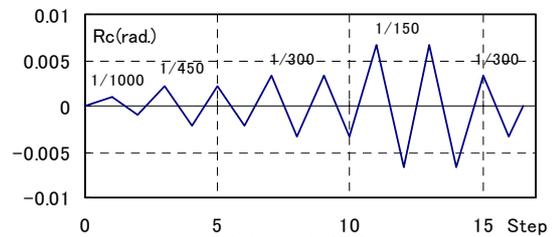
RC 造間柱の曲げひび割れが発生し、 $R_c=1/150$ 時点のひび割れ幅は、最大 0.15mm 程度であり、残留ひび割れ幅は 0.04mm 以下である。



図—3 制振柱の加力装置

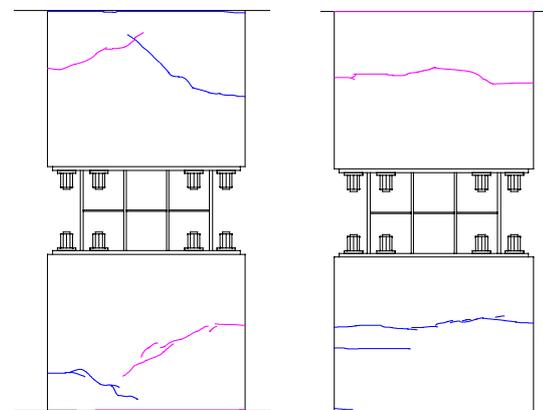


(a) 面内方向



(b) 面外方向

図—4 制振柱の加力スケジュール



(a) 面内荷重のみ

(b) 面外荷重後

(DHC3 試験体) (面内荷重前 DHC4 試験体)

図—5 制振柱の面内方向ひび割れ状況

DHC4 試験体の面内方向のひび割れは、面外載荷時に生じた曲げひび割れが進展するが、面内載荷時に新しい顕著なひび割れは生じていない。

制振パネルのウェブ板には、両試験体とも面外方向の座屈変形など残留変形は見られない。

(2) 面外載荷実験

面外方向ひび割れ状況について、図—6に示す。DHC4 試験体では、 $R_c=1/450$ 時点で、RC 造間柱に曲げひび割れが発生し、 $R_c=1/150$ 時点のひび割れ幅は、最大 0.25mm 程度であり、水平荷重除荷時の残留ひび割れ幅は 0.06mm 以下である。また、RC 造間柱脚部の水平接合部におけるずれはほとんど生じていない。制振パネルと RC 造間柱との水平ずれも見られない。一方、制振パネルでは、ウェブ板は降伏していないが、 $R_c=1/300$ 時点で内フランジ板端部が、 $R_c=1/150$ 時点で外フランジ板端部が降伏している。

面内および面外載荷の実験経過を表—2に示す。鉄筋は、全て弾性範囲である。

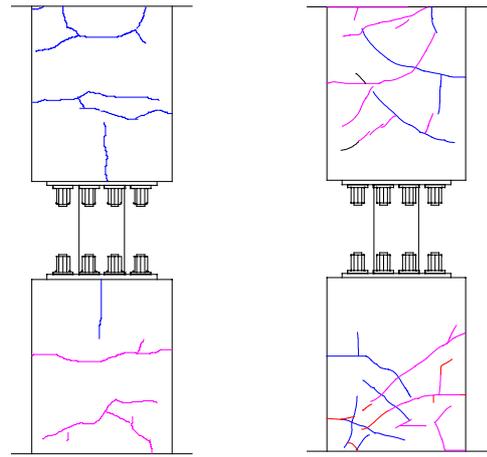
3.2 水平力—水平変形角関係

(1) 面内載荷実験

DHC3 試験体の面内方向の荷重変形関係を図—7に示す。制振パネルの降伏により、紡錘形の履歴性状を示している。

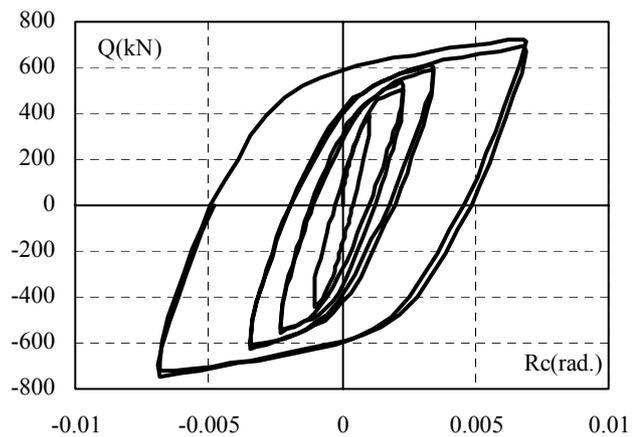
(2) 面外載荷実験

DHC4 試験体の面外方向の荷重変形関係を図—8に示す。制振パネルの外および内フランジ板端部が降伏しているが、同じ変形範囲にお

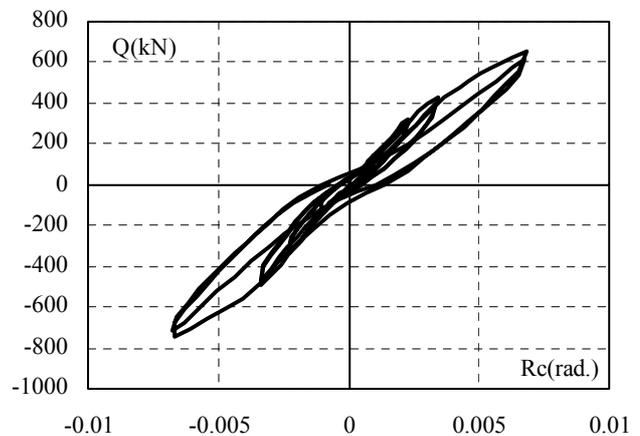


(a) 面内載荷のみ (b) 面外載荷後
(DHC3 試験体) (面内載荷前 DHC4 試験体)

図—6 制振柱の面外方向ひび割れ状況



図—7 制振柱の面内方向荷重変形関係 (DHC3 試験体)



図—8 制振柱の面内載荷前における面外方向荷重変形関係 (DHC4 試験体)

表—2 実験結果

加力方向	R_c	DHC3	DHC4
面外	1/450	/	曲げひび割れ
	1/300		内フランジ降伏
	1/150		せん断ひび割れ 外フランジ降伏
面内	1/1000	ウェブ降伏	ウェブ降伏
	1/450	曲げひび割れ	—
	1/150	外・内フランジ降伏	—

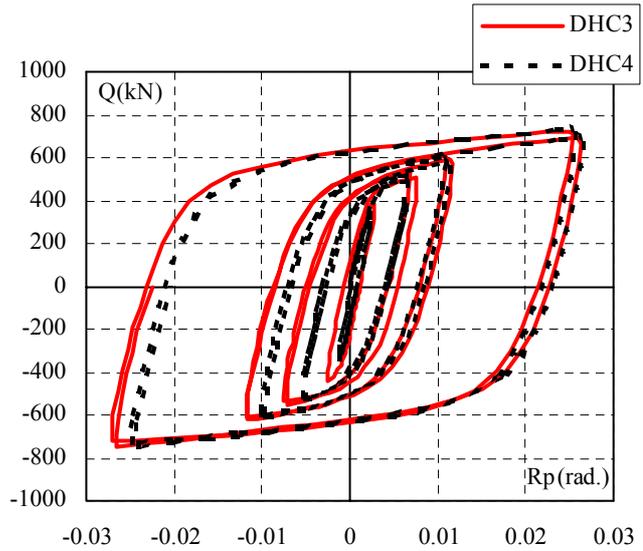
る面内方向の荷重変形関係に比べて、全体的には RC 造部材の挙動が支配的である。

4. 実験結果の考察

4.1 面外方向載荷の影響

(1) 制振パネルの荷重変形関係

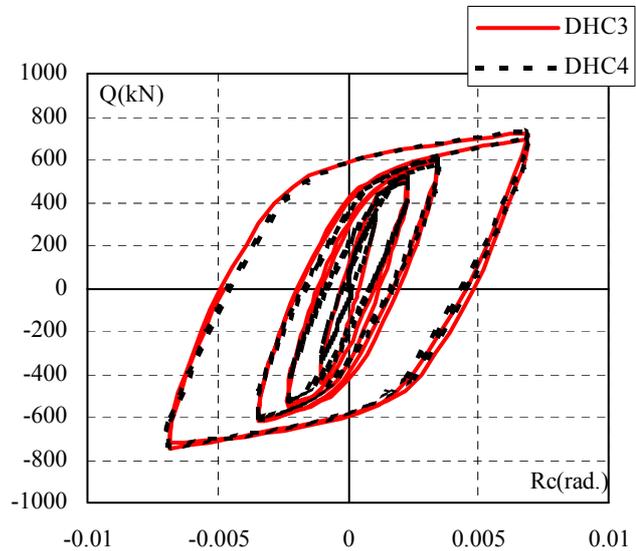
DHC3 試験体および面外載荷後の DHC4 試験体について、制振パネルの面内方向の水平力と水平変形角 (Rp) の関係を図—9 に示す。DHC4 試験体では、面外載荷時において縦フランジ材が降伏しているが、DHC3 試験体と比較して制振パネルの面内方向の荷重変形関係にはほとんど差異が見られない。



図—9 制振パネルの荷重変形関係の比較

(2) 制振柱の荷重変形関係

DHC3 試験体および面外載荷後の DHC4 試験体について、制振柱の面内方向の荷重変形関係の比較を図—10 に示す。DHC3 試験体と DHC4 試験体の荷重変形関係は、面外載荷を経験した DHC4 試験体の除荷時剛性が若干小さいが、大きな差異はなく、制振柱の面内方向の復元力特性には、本実験の範囲内では面外載荷の経験による影響は見られない。



図—10 制振柱の荷重変形関係の比較

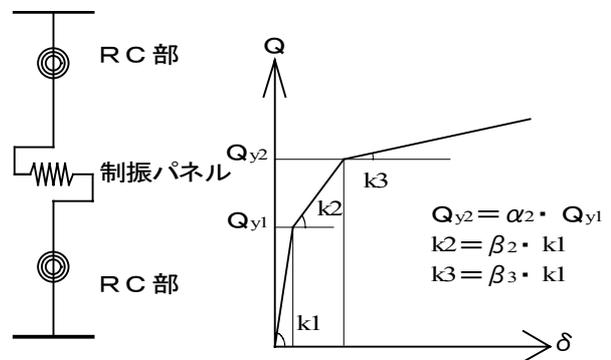
4.2 制振柱面内方向解析モデルの検証

(1) 解析モデル概要

著者らは、制振柱の解析モデルとして、図—11 に示すような曲げせん断ばねモデル¹⁾を提案している。この解析モデルでは、制振パネルの挙動を標準 Tri-Linear モデルの復元力特性を持つせん断ばねに、RC 造間柱の挙動を TAKEDA モデル³⁾の復元力特性を持つ曲げばねに置換している。制振パネルのスケルトンカーブは、低降伏点鋼ウェブ板のせん断変形を基準として設定しており、縦フランジ板の剛性および耐力への寄与は考慮していない。スケルトンカーブの諸定数を図—11 に示す。第 1 折れ点はウェブ板のせん断降伏点、第 2 折れ点は実験結果から設定している。詳しくは、文献 1) を参照されたい。

(2) 復元力特性

Rc=1/150 時点における DHC3 試験体および面外載荷後の DHC4 試験体と上記の提案モデルを



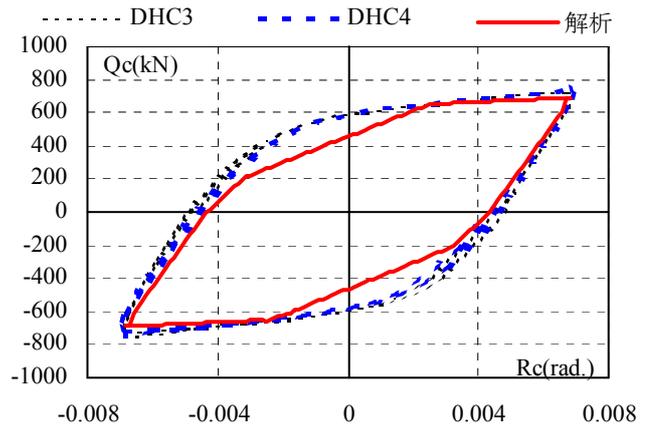
Qy1 (kN)	$\alpha 2$	k1 (kN/mm)	$\beta 2$	$\beta 3$
448	1.5	715	0.1	0.0075

図—11 制振柱の解析モデルと諸定数

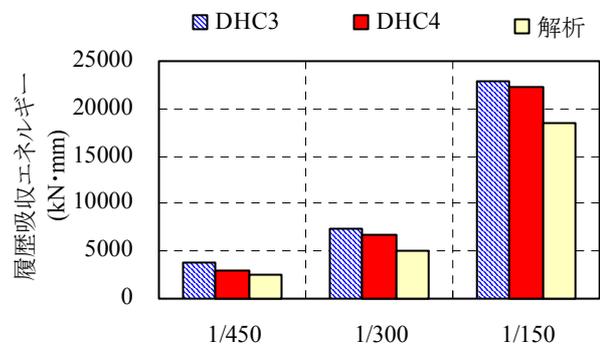
用いた非線形解析から得られる制振柱の面内方向の荷重変形関係を図—12 に示す。提案モデルによる解析結果は、両試験体の耐力をやや小さく評価しており、面外载荷を経験している DHC4 試験体に対しても設計的な観点では安全側の評価となっている。

(3) 履歴エネルギー吸収量

DHC3 試験体および面外载荷後の DHC4 試験体と上記の提案モデルによる非線形解析から得られる制振柱の面内方向の履歴エネルギー吸収量を図—13 に示す。実験では、各サイクル 2 回目の履歴曲線から得られる値を用いる。DHC3 試験体に比べて、面外载荷を経験している DHC4 試験体の履歴エネルギー吸収量は、76~97%程度であり、面外载荷の影響は小さい。また、提案モデルによる履歴エネルギー吸収量は、DHC3 試験体に比べて 67~80%程度、面外载荷を経験している DHC4 試験体に比べて 75~90%程度である。上記の結果から、提案モデルは、面外载荷の経験に関わらず、実験結果との比較から見て、実用的な妥当性があるものと考えられる。



図—12 制振柱の復元力特性の比較



図—13 制振柱のエネルギー吸収量

5. まとめ

これまでの低降伏点鋼制振柱の面内方向および面外方向静的载荷実験から得られた知見を以下に示す。

(1) 面外载荷において、大地震時の想定変形である部材角 1/150 の範囲内では、縦フランジ板端部が降伏するが、制振柱の面外方向の荷重変形関係は、RC 造部材の挙動が支配的である。

(2) 制振柱の面内方向の復元力特性には、部材角 1/150 の範囲内では、面外载荷の経験はほとんど影響を与えない。

(3) 制振柱の面内方向におけるエネルギー吸収量は、本実験の範囲では、面外载荷の経験によりやや小さくなるが、大きな差異はない。

(4) 著者が提案している制振柱の面内方向復元力特性に関する曲げせん断モデルは、面外载荷の経験に関わらず、実験結果との比較から見て、実用的な妥当性がある。

参考文献

- 1) 和泉信之ほか：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集，Vol.22，No.3，pp.1099-1104，2000.6
- 2) 和泉信之ほか：制振デバイス付き RC 造骨組の耐震性能に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.2，pp.1057-1062，2002.6
- 3) Takeda, Sozen and Nielsen: Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, Journal, Structural Division, ASCE, Vol.96, No.ST12, pp.2557-2573, 1970
- 4) Nobuyuki Izumi, Takahiro Watabe and Hiroyuki Takenaka: Damage Control of High-Rise RC Building with Energy Dissipation Device, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.3, No.2, pp.187~206, 2005