

論文 変動軸力を受けるSRC柱部材の変形性能とエネルギー吸収性能

土井 希祐*¹・片寄 哲務*²・加藤 大介*¹

要旨：十字形鉄骨を内蔵したSRC柱部材が、水平力に比例した軸力変動の下で、断面主軸方向水平力を受ける場合、および断面主軸と45°方向水平力を受ける場合の静加力実験を行い、変形性能とエネルギー吸収性能に及ぼす軸力変動幅の影響について比較検討した。本実験においては、既往の実験より軸力変動幅を大きく取り、最大圧縮力を日本建築学会SRC計算規準の制限軸力を上回る値に設定した。双方とも、履歴ループがより強い逆S字形の傾向を示し、最大耐力以降の耐力低下も大きく、軸力変動幅の増大による変形性能の低下が認められたが、等価粘性減衰定数でみたエネルギー吸収性能はほぼ同等であった。
キーワード：SRC部材, 十字形鉄骨, 変動軸力, 制限軸力, 変形性能, エネルギー吸収性能

1. はじめに

鉄骨鉄筋コンクリート（以下SRCと表記）構造は、耐震性に優れた構造形式として、わが国において中高層建物に広く採用されてきたが、1995年兵庫県南部地震により初めて深刻な被害を受けた¹⁾。一般的に、SRC造建物は高層であり、地震時において下層階の柱は大きな変動軸力を受ける。しかし、既往の実験研究の殆どは一定軸力を受ける場合のものであり、変動軸力を受ける場合の研究は数少ない^{2), 3)}。著者等は、特に実験資料の不足している、十字形鉄骨を用いたSRC柱部材が水平力に比例した軸力変動の下で正負交番繰り返し水平力を受ける場合の変形性能およびエネルギー吸収性能について実験的な検討を行ってきた^{4)~6)}。その結果、軸力が引張から圧縮に転じる際、履歴ループが逆S字形の傾向を示し、エネルギー吸収性能が低下する可能性があることが明らかとなった。そこで、本論文においては、十字形鉄骨を内蔵するSRC柱部材が、より大きな軸力変動を受ける場合の静加力実験を行い、その変形性能およびエネルギー吸収性能についての基礎的データを得るとともに、既往の実験結果との比較検

討を行うことを目的としている。なお、SRC造建物の外柱にはT字形、隅柱にはL字形等の非対称断面鉄骨が用いられることが多い。しかし、本研究においては、変動軸力の影響に焦点を絞り、その影響を明らかにすること、およびピロティの上層階に耐震壁が存在する場合は内柱も大きな変動軸力を受けること等から、十字形鉄骨を用いた対称断面SRC柱部材を研究対象とした。

2. 実験概要

2.1 試験体

表-1に示すように、既往実験に引き続いて、No5, No.6の2体の試験体を計画した。試験体の形状寸法を**図-1**に示す。試験体は高層建築物の下層階の柱を想定し、実構造物の1/4~1/5の縮小モデルとし、柱部には十字形鉄骨(2H-125×60×6×8)を、上下の加力スタブにはH形鋼(H-175×60×7.5×11)を内蔵している。鋼材は、柱鉄骨がSN400、鉄筋がSD295である。コンクリートは、設計基準強度21N/mm²、粗骨材最大粒径15mmの普通コンクリートとした。使用材料の力学的性質を**表-2(a)~(b)**に示す。

*1 新潟大学教授 工学部建設学科 工博 (正会員)

*2 (株)フジタ 工修 (正会員)

表-1 実験計画

試験体	軸力比	水平力方向	文献
No. 1	+0.3~-0.1	主軸方向	2)
No. 2	0.3(一定)	主軸方向	2)
No. 3	+0.3~-0.1	主軸と45° 方向	3)
No. 4	0.3(一定)	主軸と45° 方向	3)
No. 5	+0.5~-0.2	主軸方向	本論文
No. 6	+0.5~-0.2	主軸と45° 方向	本論文

2.2 載荷方法

図-2に加力装置を示す。①は980kN 圧縮油圧ジャッキ，②は294kN 圧縮引張油圧ジャッキ，③は490kN 圧縮引張油圧ジャッキである。本実験においては，試験体左右の2本の油圧ジャッキ②により試験体上部の加力スタブを水平に保持し，油圧ジャッキ①および②により試験体柱部に所定軸力を作用させ，油圧ジャッキ③により漸増振幅交番繰り返し水平力を作用させた。また，水平力は，図-1に示すように，試験体 No. 5では断面の主軸方向，試験体 No. 6では断面の主軸と45° をなす方向に作用させた。

試験体には，地震時における柱降伏型骨組の下層階柱を想定し，かつ手動式油圧ポンプの制御性能を勘案して，(1)式，および図-3に示すような変動軸力を作用させた。すなわち，累加圧縮耐力の10%の長期軸力に相当する圧縮軸力240kNに加えて，圧縮側の最大耐力時においては，累加圧縮耐力の50%の圧縮軸力1200kN，引張側の最大耐力時においては，累加圧縮耐力の22%の引張軸力520kNとなるような，水平力に比例した変動軸力を作用させた。

$$N=240+5.78 \times H \text{ (kN)} \quad (1)$$

ここに，N：軸力(圧縮を正とする)，H：水平力(正加力を正とする)である。

最大圧縮軸力は，日本建築学会SRC計算規準⁶⁾における制限軸力(付録参照)を上回るものである。なお，最大引張軸力は，実験装置の能力から，520kNを上限とした。

水平力の載荷履歴は，部材角 R=5, 10, 15,

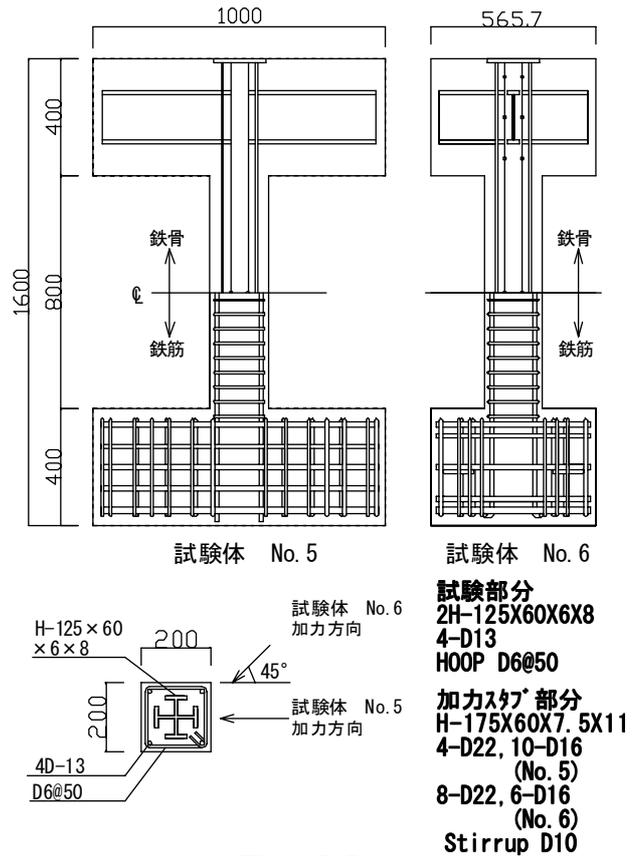


図-1 試験体

表-2(a) 鋼材試験結果

	種類	降伏点 (MPa)	引張強さ (MPa)	ヤング係数 (GPa)	備考
鉄骨	PL8	350	444	210	フランジ
	PL6	387	487	206	ウェブ
鉄筋	D13	367	512	183	主筋
	D6	299	459	146	帯筋

表-2(b) コンクリート試験結果

試験体	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	材齢 (日)
No. 5, No. 6	32.2	2.75	23.1	39

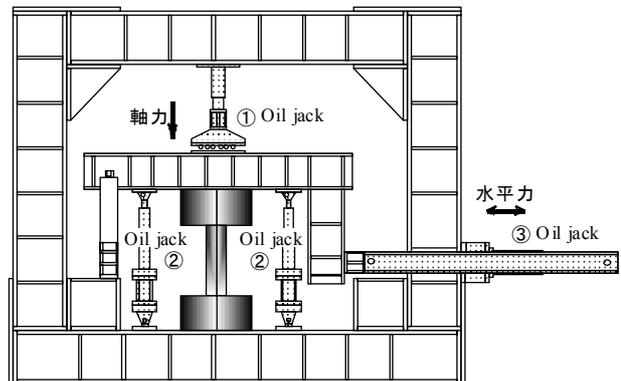


図-2 加力装置

試験体とも、試験体 No. 1および No. 3(軸力比 +0.3~-0.1)と比較して最大耐力は低下した。なお、耐力計算は、危険断面が柱端にあるものとして行っている。

図-5に±10サイクル ($R = 4 \times 10^{-2}$ rad.)終了時におけるひび割れ状況を示す。図-5において、黒く塗りつぶした部分はコンクリート剥落箇所を示している。両試験体とも、正加力時に発生したせん断付着ひび割れ、および材端部コンクリートの圧壊が顕著であった。これは、正加力時において、厳しい圧縮軸力を受けるからであると考えられる。負加力側においては正加力側よりひび割れ数が少なく、引張軸力によるひび割れが支配的であった。

3.2 荷重-変形状

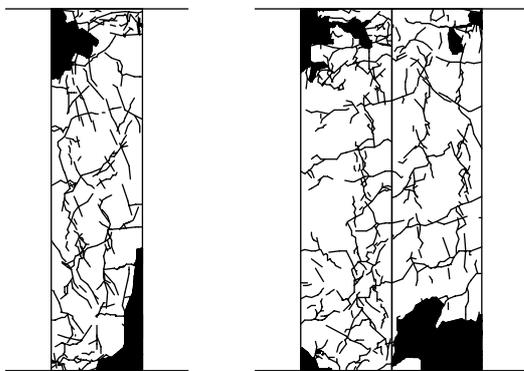
図-6に、±1サイクルにおける水平力-部材角関係を示す。負加力側における初期剛性は、正加力側における初期剛性と比べて小さくなっている。これは、負加力側における軸力が正加力側と比べて大幅に低いことが影響してい

るものと考えられる。

図-7に、水平力-部材角関係を示す。両試験体の履歴ループを見ると、正加力側においては逆S字形の履歴ループを、負加力側においては紡錘形の履歴ループを示しており、±3サイクル ($R = 1 \times 10^{-2}$ rad.)以降の繰り返しのにおいて、負加力側の履歴ループ面積が正加力側と比較して大きくなっている。これは、負加力側において支配的な引張軸力により材端部コンクリート断面に生じる引張ひび割れの開閉の影響によるものと考えられる(図-3参照)。

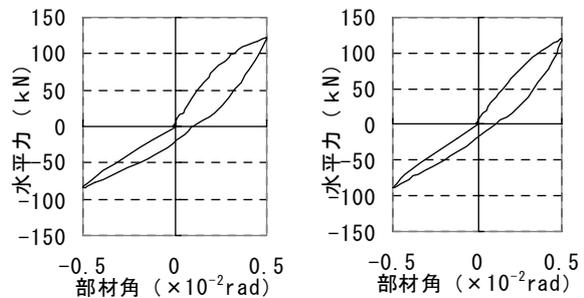
最大耐力以後の耐力低下は両試験体に大差はなく、限界変形角(最大耐力の80%に強度低下した時の部材角で定義) $R_{80} = 6 \sim 6.5 \times 10^{-2}$ rad.であり、試験体 No. 1および No. 3(軸力比 +0.3~-0.1)と比較して変形性能は低下していた^{4)~6)}。しかし、前述のように、P-Δ効果による付加モーメントを考慮すると最終状態においても耐力低下は殆どなく、ともに大きな変形性能を示した(図-7参照)。

図-8に各変位振幅における2回目の繰り返

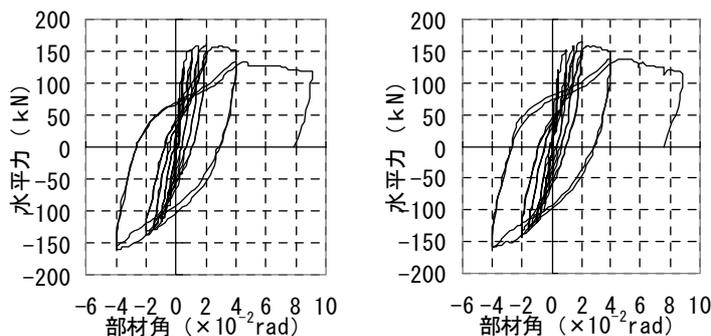


試験体No.5 ±10サイクル終了時 試験体No.6 ±10サイクル終了時

図-5 ひび割れ状況



(a) No. 5(主軸方向加力) (b) No. 6(45° 方向加力)
図-6 水平力-部材角関係(±1サイクル)



(a) No. 5(主軸方向加力) (b) No. 6(45° 方向加力)

図-7 水平力-部材角関係

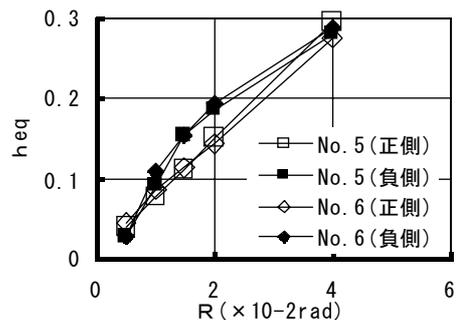


図-8 等価粘性減衰定数 h_{eq} (各変位振幅の2回目のループに対する値)

しループに対する等価粘性減衰定数 h_{eq} を示す。両試験体とも、 h_{eq} は部材角 R が大きくなるに従い増加しており、 $R=1\sim 2\times 10^{-2}$ rad. においては負加力側の方が正加力側より大きかった。これは、正加力側の履歴ループが逆S字形であることに対応している。 h_{eq} でみたエネルギー吸収性能は、試験体 No. 1 および No. 3 (軸力比+0.3 ~ -0.1) と比較して、正加力側でほぼ同等、負加力側でやや大きかった^{4)~6)}。

図-9に、水平力-曲げ変形角関係を示す。曲げ変形角とは、試験体柱部の曲げ変形により生じる部材角のことである。両試験体ともに、曲げ変形は全体変形の約60%を占めており、負加力側と比較して正加力側の方がやや大きくなっている(図-7および9参照)。また、図-7に示した水平力-部材角関係と同様に、負加力側の履歴ループ面積が正加力側と比較してやや大きくなっている。

図-10に軸歪-部材角関係を示す。両試験体とも、±8サイクル ($R=2\times 10^{-2}$ rad) までは、ほぼ弾性的な挙動を示しているが、±9~10サイクル ($R=4\times 10^{-2}$ rad.) において負加力側からの除荷時に引張の残留軸変形が認められる。しかし、正加力側における最大軸力比+0.5に伴うコンクリートの顕著な圧壊にもかかわらず、一定軸力試験体 No. 2 および No. 4 (軸力比0.3) において見られたような圧縮方向への軸変形の累積は認められなかった^{4)~6)}。

3.3 歪性状

図-11に上下柱端のAおよびB断面における歪分布を示す。試験体 No. 5 においては、正加力側において最大耐力となる+7サイクル ($R=2\times 10^{-2}$ rad.) までに、主筋と鉄骨フランジは降伏している。一方、試験体 No. 6 においては、±3サイクル ($R=1.5\times 10^{-2}$ rad.) において主筋の降伏が始まり、正加力側で最大耐力となる+7サイクルにおいて鉄骨フランジも降伏歪に

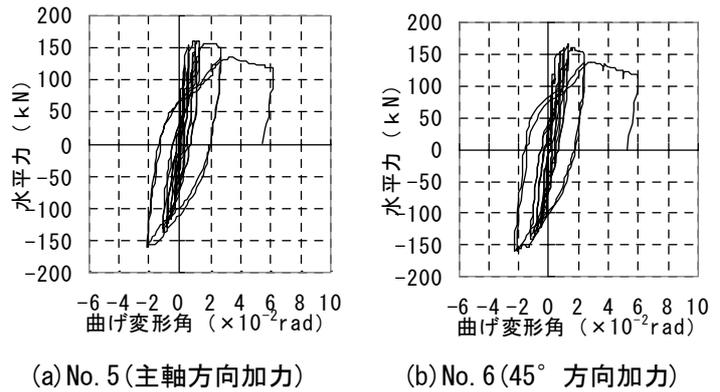


図-9 水平力-曲げ変形角関係

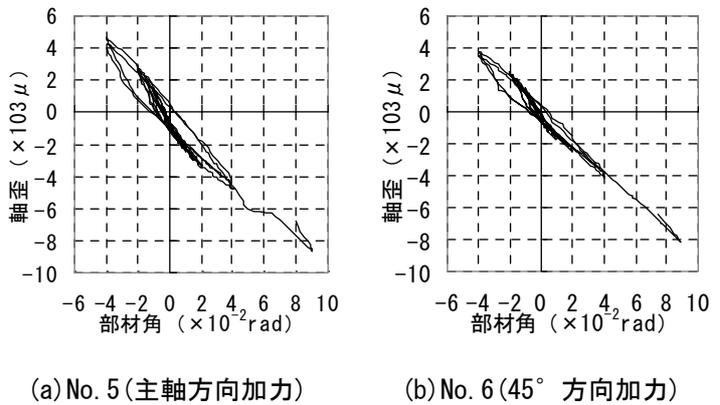


図-10 軸歪-部材角関係

達している。また、試験体 No. 5 においては平面保持が早い段階で崩れているが、試験体 No. 6 においては、特に、正加力側において最大耐力に達するまで、平面保持に近い歪分布が認められる。

図-12に、試験体下部C点における帯筋の歪-部材角関係を示す。試験体 No. 5, No. 6 ともに、±10サイクル ($R=4\times 10^{-2}$ rad.) まで、ほぼ弾性状態に留まっており、鉄骨、および主筋の歪性状と併せて、両試験体とも曲げ降伏したと考えられる。

4. 結論

地震時における高層建物の下層階柱を想定し、変動軸力(軸力比+0.5~-0.2)の下で、断面の主軸方向および主軸と45°方向の水平を受ける、十字形鉄骨を内蔵したSRC柱部材の静加力実験を行った。両試験体とも、歪性状からみて曲げ破壊したと考えられる。軸力変動幅が小さい場合(軸力比+0.3~-0.1)と比較して、正加力側

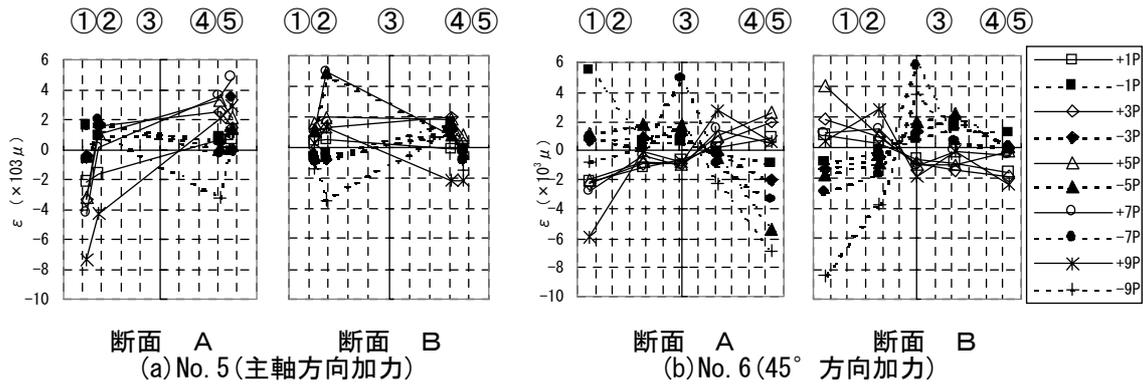


図-11 鉄骨および主筋の歪

における最大耐力以降の耐力低下は大きく、変形性能の低下が認められた。ただし、 $P-\Delta$ 効果を考慮した断面耐力では耐力低下は殆ど見られなかった。また、軸力変動幅が小さい場合と比較して、正加力側の履歴ループの逆S字形がより明瞭となったが、等価粘性減衰定数でみたエネルギー吸収性能は、正加力側でほぼ同等、負加力側ではやや大きかった。

付録

SRC柱の制限軸力 N_1 は以下のよう
に与えられる。

$$N_1 \leq b \cdot D \cdot F_c / 3 + 2 \cdot sA \cdot sfc / 3$$

ここに、 b ：断面幅、 D ：断面高、 F_c ：コンクリート設計基準強度、 sA ：鉄骨断面積、 sfc ：鉄骨許容圧縮応力度

参考文献

- 1) 日本建築学会阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告建築編—2，丸善，1998.8
- 2) 浅川敏雄ほか：ピロティを有する壁式プレキャスト構造の水平加力実験(その5：変動軸力を受けるSRC柱の部材実験)，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造II，pp.479～480，1994.9
- 3) 今野修ほか：超高層建物における下層階へのSRC構造適用に関する実験的研究 その1

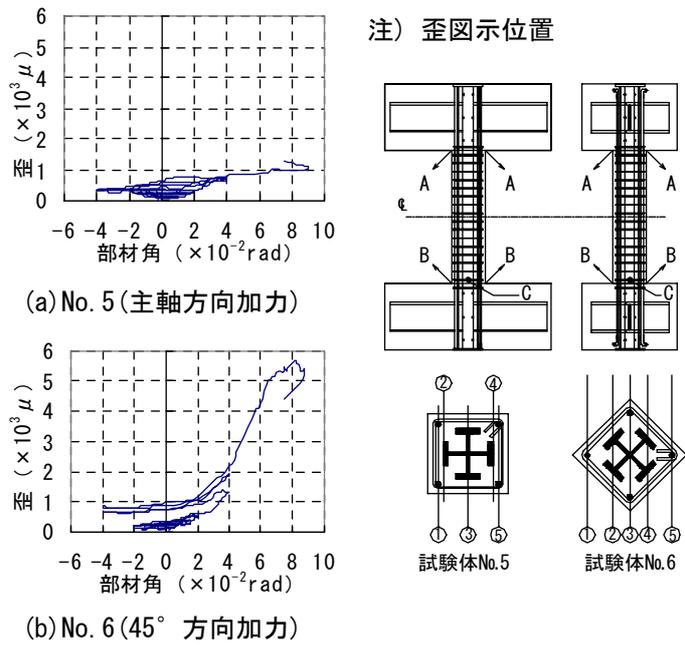


図-12 帯筋の歪(C)

～2，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造III，pp.1029～1032，1998.9

- 4) 土井希祐，片寄哲務，今泉晶宏：変動軸力を受けるSRC柱部材の静加力実験，鋼構造年次論文報告集，第8巻，pp517-524，2000.11
- 5) 片寄哲務，土井希祐：変動軸力を受けるSRC柱部材の変形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.23の1，pp661-666，2001.6
- 6) 片寄哲務，土井希祐：変動軸力と斜め横力を受けるSRC柱部材の静加力実験，鋼構造年次論文報告集，第9巻，pp199-206，2000.11
- 7) 日本建築学会：鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，2001.1