

変動軸力を受ける S R C 柱部材の変形性能に関する実験的研究

片寄 哲務*1, 土井 希祐*2

要旨：十字形鉄骨を内蔵した S R C 柱部材が、水平力に比例した軸力変動と斜め横力を受ける場合、および一定軸力と斜め横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の影響について比較検討した。本実験においては、変動軸力試験体と一定軸力試験体で、軸変形、鋼材の歪性状等について差異が認められた。しかし、双方とも、部材角 $R=4 \times 10^{-2} \text{rad}$. の繰り返し時においても安定した紡錘形の履歴ループを示し、部材角 $R=10 \times 10^{-2} \text{rad}$. 近い大変形においても最大耐力の約80%の耐力を維持しており、大きな変形性能とエネルギー吸収性能を有することが確認された。

キーワード：S R C 部材, 十字形鉄骨, 変動軸力, 斜め横力, 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 S R C と表記）構造は、耐震性に優れた構造形式として、わが国においては、中高層建物に広く採用されてきている。しかし、1995年兵庫県南部地震により、初めて深刻な被害を受けた。充腹形鉄骨を内蔵した S R C 造建物においては、転倒曲げによる引張に起因した継手部および柱脚部の被害が多く見られたが、一部に母材破断の被害も報告されている¹⁾。一般的に、S R C 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。既往の実験研究により、S R C 柱部材の耐力・変形性能について、その特性が明らかにされてきている。しかし、これら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。特に、十字形鉄骨を内蔵した S R C 柱部材については、浅川等²⁾、および今野等³⁾の研究があるものの、極めて少ないのが現状である。著者等も、十字形鉄骨を内蔵する S R C 柱部材が変動軸力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、基礎的データを得るとともに、一定軸力を受ける場合との

比較検討をおこなった²⁾。本研究においては、既報に引き続いて、十字形鉄骨を内蔵する S R C 部材が、変動軸力と斜め横力を受ける場合の静加力実験を行い、より現実に近い荷重条件における変形性能とエネルギー吸収性能についての基礎的データを得ると共に、一定軸力を受ける場合との比較検討を行うことを目的としている。ところで、十字形鉄骨を内蔵する S R C 柱部材は内柱に使用されることが多く、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、その影響を調べることを目指した。また、ピロティーの上層階に耐震壁が存在する場合は内柱であっても大きな変動軸力を受けることになる。これらのことから、十字形鉄骨を用いた対称断面 S R C 柱部材を実験の対象とした。

2. 実験概要

2.1 試験体

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、同一形状のものを2

*1 新潟大学大学院 自然科学研究科環境システム科学専攻（正会員）

*2 新潟大学助教授 工学部建設学科 工博（正会員）

体製作した。柱部には十字形鉄骨 (2H-125 × 60 × 6 × 8) を内蔵している。また、上下の加力スタブにはH形鋼を内蔵している。鋼材は、鉄骨がSS400、鉄筋がSD295である。コンクリートは、設計基準強度21N/mm²、粗骨材の最大粒径15mmの普通コンクリートとした。(表-1参照)。使用材料の力学的性質を表-2(a)、および(b)に示す。

2. 2 載荷方法

図-2に加力装置を示す。 の980kN圧縮油圧ジャッキにより試験体柱部に圧縮軸力を作用させる。次に、 の294kN圧縮引張油圧ジャッキにより、試験体上部の加力スタブを水平に保持すると共に、試験体柱部に引張軸力を作用させる。さらに、 の490kN圧縮引張油圧ジャッキにより試験体柱部に水平力を作用させる。本実験においては試験体左右の2本の油圧ジャッキ 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 および により試験体柱部に所定軸力を作用させ、 の油圧ジャッキ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に示すように断面の主軸と45° をなす方向に作用させた。

試験体No.3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210kN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30%の圧縮軸力630kN、引張側の最大耐力時においては、累加圧縮耐力の10%の引張軸力210kNとなるような、水平力に比例した変動軸力を作用させた。

$$N=210 + 2.68 \times H \text{ (kN)} \quad (1)$$

ここに、N：軸力、H：水平力である。

一方、試験体No.4には、軸力比0.3に相当する N=630kNの一定軸力を作用させた。

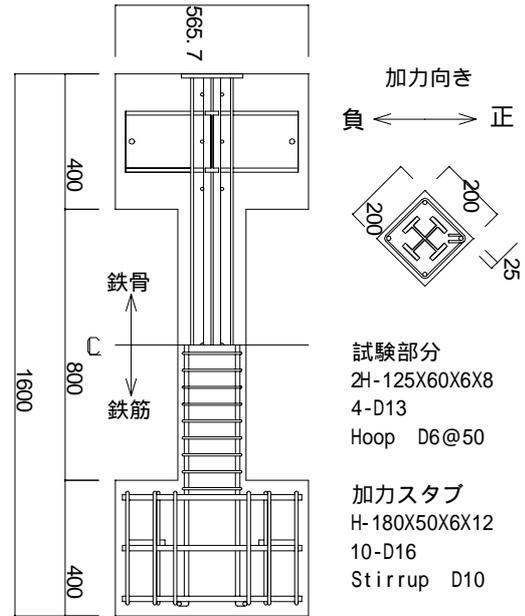


図-1 試験体

表-1 コンクリートの調合表

設計基準強度 (MPa)	スランプ (cm)	粗骨材最大寸法 (mm)	空気量 (%)	単位水量 (kg/m ³)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)
21	18	15	4	179	58.5	51.5

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	309	427	194	ワジ
	PL6	377	463	196	ウブ
鉄筋	D13	364	510	185	主筋
	D6	326	519	161	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.1	26.6	2.53	20.4	33
No.2	26.4	2.59	19.8	44
平均	26.5	2.56	20.1	-

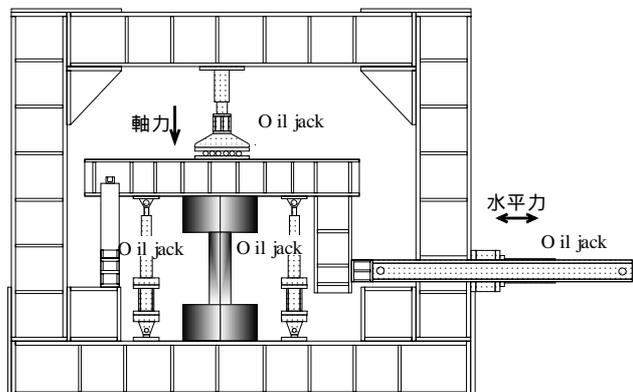


図-2 加力装置

水平力の荷重履歴を表-3に示す。部材角 $R = 5, 10, 15, 20, 40 \times 10^{-3} \text{rad}$ で正負繰り返し荷重を各々2回ずつ行った後、正方向に加力装置の限界まで荷重した。

2.3 測定方法

試験体柱部の変形を、図-4に示す位置に取り付けた電気式変位計により測定した。上下加力スタブに取り付けた測定治具を介して、変位計1, 2により全体水平変形を、変位計3, 4により軸変形を各々測定した。さらに、全体水平変形、および軸変形を柱部の内法高さ(800mm)で除して、部材角および軸歪を各々求めた。また、変位計5~16により測定した柱部各領域の軸方向変形から各領域の曲率を計算し、柱部の曲げ変形を求めた。さらに、鉄骨、および鉄筋に貼付した歪ゲージにより鋼材の歪を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 破壊性状

実験により得られたひび割れ発生荷重、最大耐力等をまとめて表-4に示す。なお、表-4中の荷重にはP-効果を考慮していない。

また、修正加藤称原式^{5), 6)}、および建築学会SRC計算規準⁷⁾による断面の主軸方向の終局耐力の計算値を表-5に示す。試験体No.3は、±1サイクルで曲げひび割れ、およびせん断付着ひび割れが発生し、+9サイクルでコンクリートが圧壊して最大耐力に達した。一方、試験体No.4は、-1サイクルで曲げひび

割れが、±2サイクルでせん断付着ひび割れが発生し、-6~+7サイクルにおいてコンクリートが圧壊し最大耐力に達した。最大耐力時の変形は、試験体No.3の方が試験体No.4より大きく、特に負加力側においては、部材角 $R = 4 \times 10^{-2} \text{rad}$ においても耐力上昇が続いていた。また、両試験体ともに、最大耐力は、修正加藤称原式、および建築学会SRC

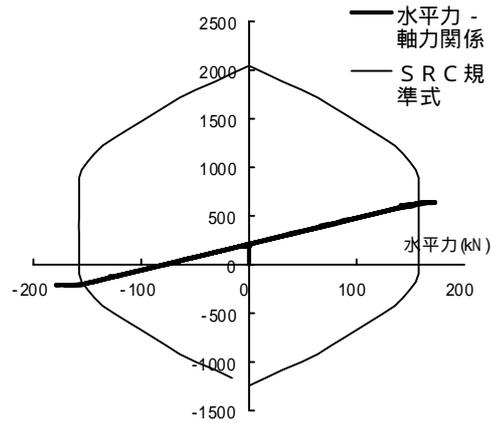


図-3 水平力 - 軸力関係 (試験体No.3)

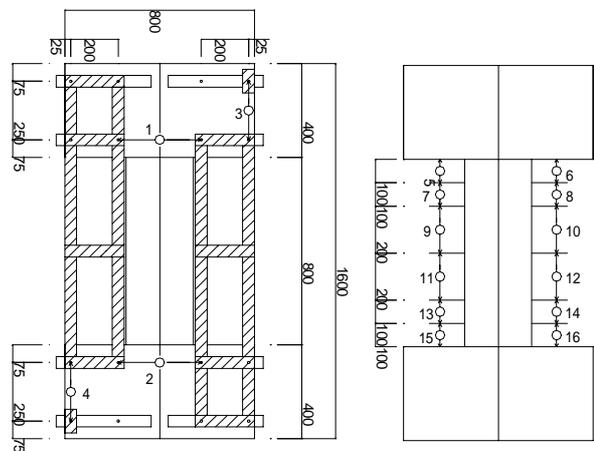


図-4 変形測定方法

表-3 荷重履歴

サイクル(回)	±1	±2	±3	±4	±5
全体変形 v (mm)	4	4	8	8	12
部材角R($\times 10^{-3} \text{rad}$)	5	5	10	10	15
サイクル(回)	±6	±7	±8	±9	±10
全体変形 v (mm)	12	16	16	32	32
部材角R($\times 10^{-3} \text{rad}$)	15	20	20	40	40

表-4 各種荷重・変形等の実験結果

		No.3		No.4	
		荷重 (kN)	変形 ($\times 10^{-2} \text{rad}$)	荷重 (kN)	変形 ($\times 10^{-2} \text{rad}$)
曲げ	正	107	0.50 (+1)	118	0.50 (+2)
	負	-87.2	-0.50 (-1)	-108	-0.50 (-1)
せん断付着	正	107	0.50 (+1)	118	0.50 (+2)
	負	-87.2	-0.50 (-1)	-101	-0.50 (-2)
圧壊	正	176	4.00 (+9)	177	-2.01 (+7)
	負	-	-	-162	-1.50 (-6)
最大耐力	正	181	3.24 (+9)	179	2.26 (+9)
	負	-174	-4.00 (-9)	-175	-2.01 (-7)

計算規準による断面主軸方向の終局耐力の計算耐力を上回っている。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。試験体No.4は、せん断付着ひび割れが支配的である。試験体No.3では、負加力時と比較して正加力時のひび割れが顕著である。一方、試験体No.4では、正加力時と負加力時のひび割れ状況の差異は見られない。また、試験体No.3と比較して、ひび割れ発生数が多く材端部コンクリートの圧壊が顕著であった。これは、試験体No.4が、負加力時において、試験体No.3より厳しい圧縮軸力を受けるからであると考えられる。

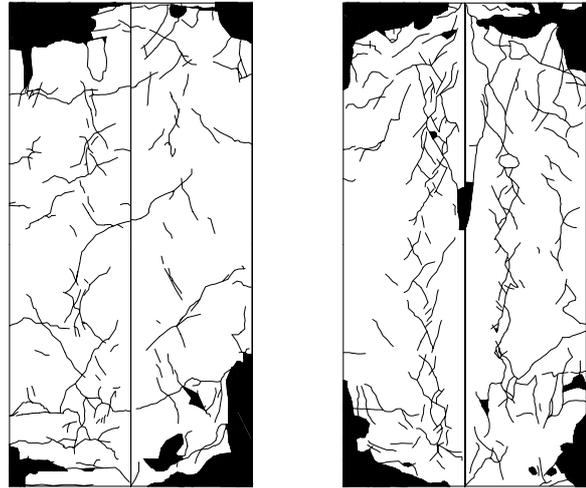
3.2 荷重 - 変形状

図-6に、±1サイクルにおける水平力 - 部材角関係を示す。正加力側における初期剛性には大きな差異は認められない。一方、負加力側における初期剛性は、試験体No.3の方が試験体No.4と比較して小さくなっている。これは、試験体No.3の負加力側における軸力が試験体No.4と比較して大幅に低いことが影響しているものと考えられる。

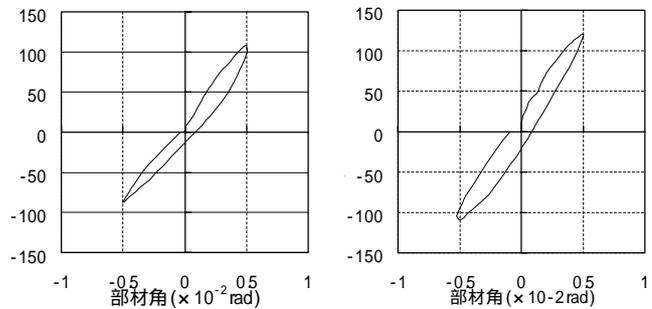
図-7に、水平力 - 部材角関係を示す。試験体No.3は、試験体No.4と比較して、若干逆S字形の履歴ループを示しており、±10サイクル (R = 4 × 10⁻² rad.) までの全ての繰り返し

表-5 終局耐力計算値

		修正加藤称原式 (kN)	S R C 規準式 (kN)
No.3 (変動軸力)	正	159	158
	負	-139	-153
No.4 (一定軸力)		159	158



No.3(変動軸力) No.4(一定軸力)
図-5 ひび割れ状況 (±10サイクル終了時)



(a)No.3(変動軸力) (b)No.4(一定軸力)
図-6 水平力 - 部材角関係(±1サイクル)

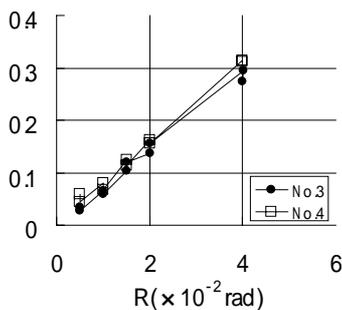
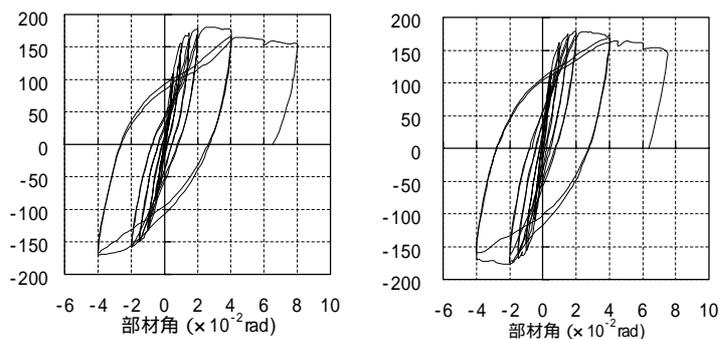


図-8 等価粘性減衰 heq (各変位振幅の2回目
のループに対する値)



(a)No.3(変動軸力) (b)No.4(一定軸力)
図-7 水平力 - 部材角関係

しにおいて、負加力側の履歴ループ面積が正加力側と比較して小さくなっている。これは、試験体No.3では、負加力側の水平力が100kNを越える領域において引張軸力を受けるため(図-3参照)、試験体No.4と比較して、加力スタブからの鋼材の抜け出しの影響が大きいことが影響しているものと考えられる。

最大耐力以後の耐力低下については試験体No.3と試験体No.4に大差はなく最終状態においても最大耐力の約80%の耐力を維持しており、共に大きな変形性能を示した(図-7参照)。これは、試験体No.3, 試験体No.4共に、正加力側の部材角 $R=4 \times 10^{-2}$ rad. を超える範囲において、軸力条件がほぼ同一となっていたためであると考えられる。

図-8に各変位振幅における2回目の繰り返しループに対する等価粘性減衰定数 h_{eq} を示す。試験体No.3, No.4共に等価粘性減衰定数は部材角Rに比例して直線的に増加している。しかし、試験体No.3は、試験体No.4と比較して等価粘性減衰定数が若干小さくなっている。これは、前述のように、試験体No.3においては、軸力が引張となる負加力側の履歴ループ面積が、試験体No.4と比較して小さいことに対応している。

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。試験体No.3, No.4共に、曲げ変形は全体変形の約60%を占めており、特に差異は認められない(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小さくなっている。

図-10に軸歪 - 部材角関係を示す。試験体 No.3においては、 ± 8 サイクル ($R = 2 \times 10^{-2}$ rad) までは、軸変形の累積は認められないが、 $\pm 9 \sim 10$ サイクル ($R = 4 \times 10^{-2}$ rad.)の部材角 $R = -2 \times 10^{-2} \sim 3 \times 10^{-2}$ rad. において軸変形が引張

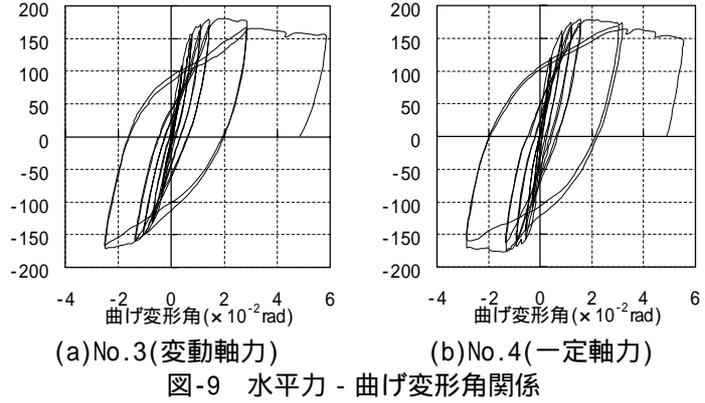


図-9 水平力 - 曲げ変形角関係

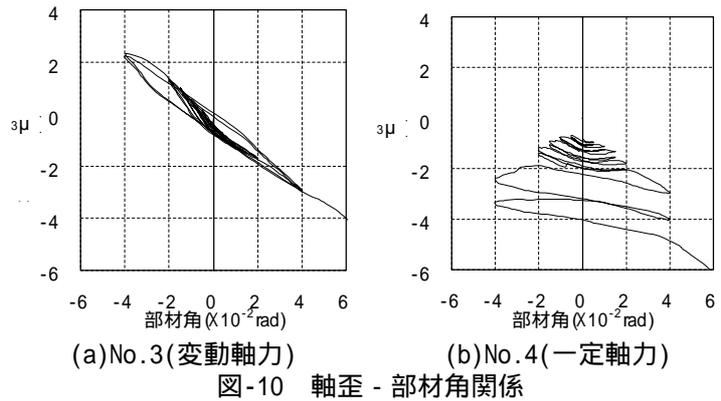
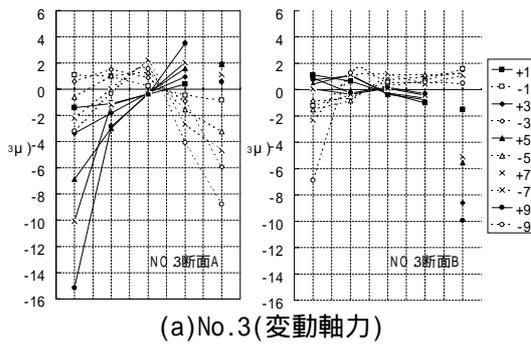


図-10 軸歪 - 部材角関係

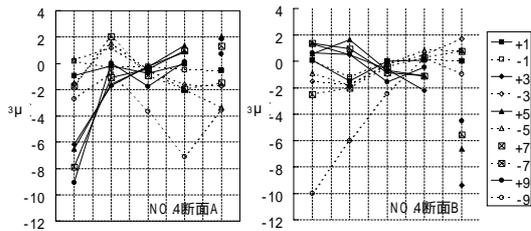
側へと変化しているのが認められる。一方、試験体No.4においては、 ± 8 サイクル ($R = 2 \times 10^{-2}$ rad.)までの段階においても若干の圧縮変形の累積が認められ、 ± 9 サイクル以降、その傾向が顕著となっている。これは、試験体No.4において材端部コンクリートの圧壊が顕著であったことに対応している。

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。主筋は ± 5 サイクル ($R = 1.5 \times 10^{-2}$ rad.)において、ほぼ降伏している。また、鉄骨フランジは ± 7 サイクル ($R = 2 \times 10^{-2}$ rad)において、降伏が始まっている。このことと、材端部の圧縮側コンクリートの圧壊から、試験体No.3, No.4ともに曲げ降伏していると考えられる。試験体No.4においては $+ 9$ サイクル ($R = 4 \times 10^{-2}$ rad.)以降、鋼材の軸方向圧縮歪の累積が顕著であり、軸方向縮みの累積傾向と対応している。試験体No.3においても、 $- 9$ サイクルにおいて同様の傾向が認められる。

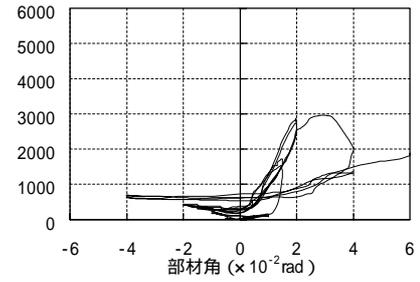
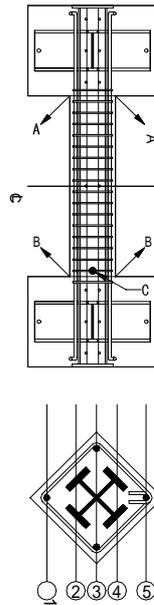


(a)No.3(変動軸力)

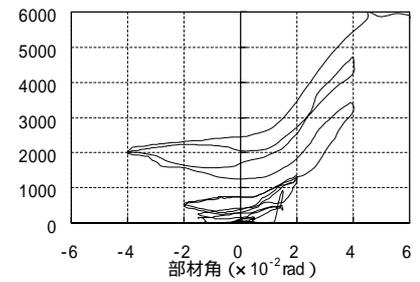


(b)No.4(一定軸力)

図-11 鉄骨および主筋の歪



(a)No.3(変動軸力)



(b)No.4(一定軸力)
図-12 帯筋の歪(C)

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.3, No.4ともに、 ± 9 サイクル ($R = 4 \times 10^{-2}$ rad.) 以降引張歪の増大と累積傾向が認められる。引張歪の大きさは、試験体No.4の方が大きく、 -9 サイクルにおいて引張降伏が認められた。このことは、試験体No.4の方が試験体No.3よりせん断付着ひび割れが顕著であったことと対応している。

4. 結論

地震時における高層建物の下層階柱を想定した、変動軸力および一定軸力の下で斜め横力を受ける、十字形鉄骨を内蔵したSRC柱部材の静加力実験を行った。本実験において、変動軸力を受ける場合は、一定軸力を受ける場合と比較して、荷重 - 変形関係の履歴ループ面積が、負加力側において小さくなっているが、等価粘性減衰定数はほぼ同じ値となった。また、軸変形、鋼材の歪性状についても差異が認められた。しかし、双方とも、部材角 $R=4 \times 10^{-2}$ rad.の繰り返し時においても安定した紡錘形の履歴ループを示し、部材角 $R=10 \times 10^{-2}$ rad. に近い大変形においても最大耐力の約80%の耐力を維持しており、大きなエネルギー吸収性能と変形性能を有することが確認された。

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年8月
- 2) 浅川敏雄他：ピロティー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，pp.479~480，1994年9月
- 3) 今野修他：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1~2，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造，pp.1029~1032，1998年9月
- 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年
- 5) 土井希祐他：SRC部材の終局耐力式に関する研究，その1~2，日本建築学会学術講演梗概集，pp1653~pp1656，1993年9月
- 6) 土井希祐，称原良一：塑性理論に基づいたSRC部材のせん断設計式の検討，日本建築学会構造系論文集，第516号，pp.151~158，1999年2月
- 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，1987年6月