芯鉄骨合成柱の耐震性能に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY OF EARTHQUAKE RESISTANT PROPERTIES OF COMPOSITE COLUMNS USING CORE STEEL

堺 純一*, 松井千秋**, 南 宏一***, 平川 葉子****
*Junichi SAKAI, Chiaki MATSUI, Koichi MINAMI
and Yoko HIRAKAWA*

This paper present the results of an experimental work carried out to study the elastic-plastic behavior of composite columns using core steel under constant vertical and varying horizontal loads. Area and shape of cross section of core steel and axial load ratios were selected as test parameters. Composite columns using core steel were able to hold large axial load up to rotation angle equals 5/100 rad. On the other hand reinforced concrete columns were not able to hold axial load at last. From the test results it can be thought the composite columns using core steel can prevent structural buildings under large horizontal and vertical accelerations from story failure.

Keywords: *flexural strength, deformation capacity, collapse, area of core steel, shape of core steel, axial load ratio*
曲げ耐力, 変形能力, 崩壊, 芯鉄骨量, 芯鉄骨形状, 軸力比

1. 序

兵庫県南部地震では、鉄筋コンクリート（以下、RCと略記）建物において、柱が曲げ降伏したのちにせん断破壊を起こし、鉛直荷重を支えきれず、層崩壊を起こした建物が少なくなかった。特に変動軸力を受け高軸力下におかれた隅柱の破壊が層崩壊につながったものと考えられる。

このような層崩壊につながる柱の崩壊を防ぐRC柱の補強方法として、帯筋を密に巻く方法あるいはRC断面を鋼管で覆う方法などがあるが、これらは鉄筋あるいは鋼管によるコンクリートを拘束する働きに期待するものであり、有効な補強方法と考えられる¹⁾。これと異なる考え方から、RC断面の芯に鉄骨を挿入し、コンクリート断面の中心軸の圧縮ひずみの進展を抑制させる方法もあると考えられる。RC柱では主筋の座屈が軸力保持不能の崩壊形に直接つながるため、芯鉄骨を挿入することにより主筋のひずみの進行を抑制できること、さらに主筋が座屈しコンクリートが圧壊した後も内蔵鉄骨が軸力を保持できる程度に挿入されていれば、軸力を支持できることが期待でき、層崩壊を免れるものと考えられる。

小鉄骨を挿入したSRC柱に関する研究は以前にも報告されており、特に高強度帯筋を用いた場合の性状が調べられ、中心圧縮実験により、高強度せん断補強筋を用いた場合、最大耐力を発揮した後、

耐力低下の少ない性状を示すこと、さらに、曲げせん断実験により、せん断および曲げで耐力が決まる柱の挙動が調べられており、それぞれの耐力評価法が示されている^{2), 3)}。しかしながら芯鉄骨合成柱として有効に働く鉄骨の量についての検討はあまりなされていない。このような芯鉄骨合成柱では柱の弾塑性性状および崩壊性状に及ぼす柱の作用軸力と内蔵鉄骨量は重要なパラメータの一つと考えられる。

著者らは芯鉄骨合成柱をRC柱の耐震補強の一つと考え、施工の簡便さおよび耐震性能向上の観点より、密にせん断補強筋を巻かなくともRC柱の中心に軸力に抵抗する芯鉄骨を挿入することにより、高軸力下においてコンクリートおよび主筋のひずみの進行の抑制効果が得られるものと考え、通常RC柱に用いられるものと考えられるせん断補強筋量を配し載荷実験を行った。

本論文では、地震時荷重を受ける柱部材を想定した載荷実験を行い、柱の断面圧縮耐力に対する作用軸力の比と芯鉄骨の量および芯鉄骨の形状が柱の挙動に及ぼす影響を調べ、RC柱に対する耐震補強効果を検討することを主目的とした。さらに、比較実験のために鉄骨鉄筋コンクリート（以下、SRCと略記）柱の載荷実験を行い、鉄骨鉄筋コンクリート構造設計規準⁴⁾に定義してある制限軸力のものと通常のSRC柱と芯鉄骨合成柱の挙動の比較検討を行った。

* 九州大学大学院人間環境学研究所 助手・工修

** 九州大学大学院人間環境学研究所 教授・工博

*** 福山大学工学部建築学科 教授・工博

**** 構造計画研究所構造設計部 工修

Research Assistant, Division of Architecture, Graduate School of Human-Environment Studies, Kyushu University, M. Eng.
Prof., Division of Architecture, Graduate School of Human-Environment Studies, Kyushu University, Dr. Eng.
Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Fukuyama University, Dr. Eng.
Kozo Keikaku Engineering, I.N.C., M. Eng.

2. 実験概要

地震時における芯鉄骨合成柱の弾塑性挙動を調べるために、柱頭に一定圧縮軸力と繰返し水平力を載荷する柱部材の実験を行った。

芯鉄骨に曲げを期待せず、軸力に抵抗させることを意図して、断面の抵抗モーメントにおける鉄骨の負担の割合が少なくなるよう、せいの小さな内蔵鉄骨を断面の中心に配置することを考え、鉄骨せいが柱断面せいの1/3以下となる断面を、ここでは芯鉄骨合成柱と定義する。

2.1 試験体

試験体は図1に示すような片持柱であり、断面は200mm x 200mmである。固定端から水平力加力点までの試験体材長を800mmとし、せん断スパン比を4とした。主筋はRCおよび芯鉄骨合成柱ではD16を、SRC断面ではD13を用いた。せん断補強筋は全試験体にD6を50mm間隔で配し（せん断補強筋比 $p_w=0.64\%$ ）、135度フックを設け主筋に緊結した。

2.2 実験変数

表1に実験条件を示す。実験変数には、1) 芯鉄骨の量、2) 芯鉄骨の形状および3) 軸力比を選んだ。試験体は全部で12体である。

1) の鉄骨量として、鉄骨比（柱断面積に対する芯鉄骨断面積の

比)をパラメータにとり、3%を標準とし、その他に1.5%および5%となるように選んだ（芯鉄骨がH形鋼のみ）。

2) の芯鉄骨の形状は、芯鉄骨の断面形状が柱の挙動に及ぼす影響を調べるため、H形鋼と、曲げ抵抗がほとんど無いコンパクトな断面である異形鉄筋（D41）の2種類を選んだ。さらに比較実験のためにRC柱および通常SRC柱を選んだ。主に軸力に抵抗させる鉄骨と、曲げモーメントに抵抗させる鉄骨を用いた場合の合成断面の

表1 実験条件

試験体名	柱構造種別	内蔵鉄骨	鉄骨比	載荷軸力 計画	載荷軸力 N (kN)	断面圧縮耐力 (kN)			軸力比		
						Nu	sNu	cNu	n	ns	nc
S15-A6	芯鉄骨 合成柱	H-60x30x6x6	1.62%	n = 0.3	418	1,732	235	1,252	0.24	1.78	0.33
S30-A6		H-60x50x9x9	3.20%		616	2,053	505	1,324	0.30	1.22	0.47
B30-A6		異形鉄筋 D41	3.35%		601	2,003	489	1,560	0.30	1.23	0.39
S50-A6		H-60x50x16x16	5.12%		664	2,212	722	1,296	0.30	0.92	0.51
S15-B6	SRC標準 制限軸力	H-60x30x6x6	1.62%	SRC標準 制限軸力	574	1,749	235	1,268	0.33	2.44	0.45
S30-B6		H-60x50x9x9	3.20%		750	2,007	507	1,276	0.37	1.48	0.59
B30-B6		異形鉄筋 D41	3.35%		747	2,013	491	1,304	0.37	1.52	0.57
S50-B6		H-60x50x16x16	5.12%		891	2,220	719	1,304	0.40	1.24	0.68
RC-A6	RC柱			n = 0.3	467	1,557	-	1,296	0.30	-	0.36
RC-B6				制限軸力	663	1,789	-	1,524	0.37	-	0.44
L30-A6	通常 SRC柱	H-120x50x6x6	3.12%	n = 0.3	640	2,133	471	1,532	0.30	1.36	0.42
L30-B6				制限軸力	807	2,126	472	1,524	0.38	1.71	0.53

1) 断面圧縮耐力：Nu:全断面圧縮耐力，sNu:鉄骨断面圧縮耐力，cNu:コンクリート断面圧縮耐力

2) 軸力比：n=N/Nu，ns=N/sNu，nc=N/cNu

表2 鋼材の機械的性質

	規格	種類	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	降伏比	破断伸び (%)	備考
内蔵鉄骨	SM490	6mm厚鋼板	392	539	0.73	25.7	S15試験体のフランジとウェブ
	SM490	9mm厚鋼板	421	557	0.76	22.9	S30試験体のフランジとウェブ
	SM490	16mm厚鋼板	359	527	0.68	21.5	S50試験体のフランジとウェブ
	SD295	D41	366	554	0.66	16.5	B30試験体の芯鉄骨
主筋	SD295	D16	330	487	0.68	22.4	L30試験体以外
	SD295	D13	343	510	0.67	23.0	L30試験体
帯筋	SD295	D6	408	538	0.76	22.9	全試験体

表3 コンクリートの調査

コンクリート 種類	設計強度 (N/mm ²)	スランブ (cm)	水セメント比 (%)	細骨材比 (%)	調査 (kg/m ³)				
					水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
普通セメント	26.5	18	49	44.1	190	388	724	1020	0.97

挙動の違いを検討するためにSRC柱を実験変数に加えており、鉄骨比3%の芯鉄骨合成柱 (S30, B30 シリーズ) の挙動と比較するためにSRC柱の鉄骨比を3%としている。なお、全試験体とも内蔵鉄骨は強軸曲げとなるように配している。

3) 高軸力下における挙動を調べるため、断面圧縮耐力に対する作用軸力の比 (軸力比 n) として0.3を選んだ。さらに高軸力となる、SRC 規準⁴⁾ に従う制限軸力 (コンクリート断面の圧縮耐力の1/3と鋼材の圧縮耐力の2/3の和) を実験変数に選んだ。SRC 規準に従う制限軸力を載荷した試験体の軸力比 n は鉄骨量により異なり、0.33から0.40の値となっている。芯鉄骨量が柱断面の1.5%の試験体S15-B6ではSRC 規準の制限軸力が断面圧縮耐力の0.33倍であるため、試験体S15-A6は軸力比 n を0.3とせず、S15-B6との違いを大きくするため、0.24とした。

芯鉄骨の圧縮耐力に対する作用軸力の比 n_s が柱の挙動に及ぼす影響が大きいと考えられるため、鉄骨比および軸力比を変化させることにより n_s の値も変化させている。

表2に鋼材の機械的性質を示す。表3にコンクリートの調査を、表4に各試験体のシリンダーの圧縮強度 $c\sigma_b$ を示す。

2.3 加力装置と測定方法

加力装置は柱脚固定、柱頭ピン支持の境界条件となるようにした (図2参照)。載荷は500tonf 万能試験機で柱頭に圧縮軸力を載荷し、一定に保持した状態で、水平力をオイルジャッキで部材角5/1000 rad. を単位とし各変位振幅で1回繰り返す漸増変位振幅で準静的に載荷した。軸力は500tonf 試験機の計測装置で、水平力はオイルジャッキ先端に取り付けたロードセルで測定した。変位は柱頭水平変位と軸方向変形を測定した。ただし、軸方向変形は、載荷実験中、柱頭ピンの中心から試験体の固定端までの鉛直方向距離を測定した。

2.4 実験結果

2.4.1 崩壊性状

実験は水平耐力が無くなる時点あるいは軸力を保持できない時点で終了した。図3に実験の結果得られた水平力 H と部材角 R の関係を示す。実験結果を表4に示す。

全試験体とも柱脚から断面せい上がった範囲内でのコンクリートの圧壊、剥落が激しく、この範囲内で主筋の座屈が起こった。目視により確認した主筋の座屈発生時期を図3中に示している。かぶりコンクリートの圧壊は全ての試験体で部材角 R が1/100 ~ 1.5/100 rad. に生じ始め、最大耐力を発揮した前後でかぶりコンクリートの

表4 実験結果

試験体 名	cob (Mpa)	N Nu	N sNu	実験曲げ耐力		計算曲げ耐力				実験 最終状態	変形能力 M≥0.9Mmax			変形能力 δc≤1/100h		
						Mmax (kN m)	Mpc1	Mpc2	Mmax Mpc1		Mmax Mpc2	Rm90	Em90	μm90	Rd1	Ed1
				正側	負側	(KN m)	(KN m)				(kN m)			(kN m)		
S15-A6	31.3	0.24	1.78	54.5	-59.2	49.0	53.0	1.16	1.07	水平力0	4.00%	863	29.7	7.00%	3,716	122.9
S30-A6	33.1	0.30	1.22	59.0	-61.4	57.9	61.6	1.03	0.98	水平力0	3.50%	677	17.5	5.50%	2,285	58.1
B30-A6	39.0	0.27	1.23	51.1	-61.1	50.5	55.5	1.11	1.01	水平力0	3.00%	422	14.0	6.00%	2,834	91.3
S50-A6	32.4	0.30	0.92	58.3	-67.2	59.8	64.6	1.05	0.97	水平力0	4.00%	971	23.4	-6.00%	3,168	75.3
S15-B6	31.7	0.33	2.44	60.3	-51.0	51.3	55.2	1.08	1.01	軸力保持不能	2.50%	324	10.6	-4.00%	1,216	38.3
S30-B6	31.9	0.37	1.48	61.2	-56.3	54.9	61.1	1.07	0.96	水平力0	3.00%	490	14.0	4.50%	1,471	41.1
B30-B6	32.6	0.37	1.52	50.9	-60.2	51.0	55.2	1.10	1.01	水平力0	2.50%	294	9.8	-5.00%	1,961	62.3
S50-B6	32.6	0.40	1.24	61.7	-60.0	57.9	62.9	1.05	0.97	水平力0	2.50%	392	10.4	-	-	-
RC-A6	32.4	0.30	-	51.2	-53.8	45.2	48.1	1.16	1.10	軸力保持不能	1.50%	171	3.9	-4.00%	1,038	36.8
RC-B6	38.1	0.37	-	55.3	-59.2	50.8	55.9	1.13	1.02	軸力保持不能	1.50%	108	3.5	3.00%	549	15.9
L30-A6	38.3	0.30	1.36	70.1	-78.6	65.1	70.2	1.14	1.06	水平力0	3.00%	565	11.0	-5.00%	2,068	48.8
L30-B6	38.1	0.38	1.71	66.1	-78.1	63.8	70.6	1.13	1.03	水平力0	2.00%	216	4.5	-3.50%	1,216	22.8

1) $c\sigma_b$: コンクリートのシリンダー強度, 2) 計算曲げ耐力: Mpc1: 鋼材の降伏応力度と0.85 $c\sigma_b$ を用いて計算した一般化累加強度, Mpc2: 鋼材の降伏応力度と $c\sigma_b$ を用いて計算した一般化累加強度, 3) 変形能力中, Rm90, Em90, $\mu m90$ はそれぞれ, 最大曲げ耐力の90%まで耐力が低下した時点での部材角, その部材角までに吸収した累積エネルギー, 図8(a)に示す塑性変形倍率, Rd1, Ed1, $\mu d1$ は軸縮みが柱材長の1/100に達した時点の部材角, 累積エネルギー, 塑性変形倍率である。

剥落がおこった。RC柱は2体とも主筋の座屈発生後、軸力を保持できず崩壊した。S15-B6を除く芯鉄骨合成柱および通常SRC柱はコンクリートの圧壊および主筋の座屈が起こったが、実験終了まで軸力を保持でき、急激な耐力低下を伴う崩壊現象は見られなかった。S15-B6は内蔵鉄骨の圧縮耐力に対する作用軸力の比 ns が2.4であり、内蔵鉄骨の軸力に対する支持能力が少ないために、最終段階で軸力を保持できなかった。

2.4.2 水平力-部材角関係

図3中、実線は柱脚フェイス位置に塑性ヒンジが生じ塑性崩壊機構を形成すると仮定したときの水平耐力であり、転倒モーメントの

影響を考慮して、次式で算定した。

$$H = Mpc / L - N\delta / L \quad (1)$$

ここで、 Mpc は鋼材の実降伏応力度とコンクリートのシリンダー強度を0.85倍して計算した一般化累加強度である(表4中の $Mpc1$)。 L は材長(80cm)、 N は柱軸力、 δ は水平力加力点の水平変位である。

同図中、点線は(1)式の Mpc に鋼材の実降伏応力度とシリンダー強度で計算した一般化累加強度を用いたものである(表4中の $Mpc2$)。

S15-B6を除く芯鉄骨合成柱およびSRC柱は最大耐力発揮以後、か

図4 柱の材軸方向縮みと柱部材角関係

ぶりコンクリートの圧壊および主筋の座屈により耐力が徐々に低下しているが大変形域まで軸力を保持できており、水平力が無くなるまで紡錘形の履歴挙動を示している。S15-B6は部材角 R が $4.5/100$ rad.時に軸力を保持できず崩壊した。

一方、RC柱は最大耐力発揮以降、かぶりコンクリートの圧壊により耐力が低下し、主筋の座屈の発生とともに軸力を保持できず崩壊し、急激に耐力が低下している。

2.4.3 軸方向変形状

図4に材軸方向の縮みと柱部材角の関係を示す(S50-B6試験体の実験データはとれなかった)。RC柱は軸縮みが5mm程度では軸力

を支えているが、それ以上の変形では、ひずみが急激に発散し、柱材長の $1/100$ の8mm縮んだ段階で軸力を保持できず崩壊している。一方、芯鉄骨合成柱およびSRC柱は軸縮みが10mm以上となっても、内蔵鉄骨が作用軸力に対して、3.1.2項で述べる適切な量が挿入されていれば軸力を保持できている(同図(a),(b),(d),(e),(h),(k))。さらに、芯鉄骨としてコンパクトな断面である異形鉄筋を用いたB30-A6、B30-B6は部材角が $5/100$ rad.程度の大変形に至っても軸縮みの発散は抑制されており、10mmまで縮んでいない(同図(c),(i))。軸力に対して内蔵鉄骨が少ないS15-B6試験体は部材角 R が $5.5/100$ rad.で軸縮みが発散し、軸力の保持が不能となっている(同図(g))。

図5 除荷点における柱脚抵抗モーメントの挙動

図6 除荷点における柱軸縮み

3. 考察

3.1 弾塑性挙動

図5に各除荷点における柱脚フェイス位置での抵抗モーメントとサイクル数を示す。縦軸は柱脚での抵抗モーメントを各試験体の最大抵抗モーメントで除し無次元化している。横軸は載荷サイクルを示しており、各変位振幅における除荷点に対応させたものである。図6は軸縮みとサイクル数を示している。

3.1.1 内蔵鉄骨の有無の影響

図5(a), (b)にRC柱と芯鉄骨合成柱の曲げモーメントの挙動を示す。RC柱は、主筋が座屈することにより、軸力を保持できず不安定となり、急激な抵抗力の低下が見られる。一方、S15-B6を除く芯鉄骨合成柱および通常SRC柱は大変形域で主筋が座屈しても軸力を保持できている。急激な抵抗モーメントの低下にはつながらなかった。これは、コンクリートの圧壊および主筋の座屈時の柱部材角がRC柱に比べ大きな変形域で起こっていること、さらに図6(a), (b)に示すように芯鉄骨が軸方向力に効いているため、軸縮みに対する剛性および変形能力がRC柱に比べ大きいことによる。芯鉄骨合成柱は軸力に対し適切な量が挿入されていれば、軸方向力を最終段階まで支持できたことより、RC柱の軸力保持不能となる崩壊を防ぐ補強法の一つとして有効であると考えられる。

3.1.2 内蔵鉄骨量の影響

S15-B6試験体はSRC標準の制限軸力を受けているがその軸力が断面圧縮耐力の0.33であるため、軸力比0.3の他の試験体とも比較できる。この試験体は鉄骨の圧縮耐力に対する作用軸力の比 ns が2.4程度であり、最終段階で軸力を保持できず、軸力比0.3のRC柱と同様な挙動を示す結果となっている(図5(a))。さらに軸縮み性状もRC-A6よりも剛性が小さいことおよび崩壊時の縮み量もRC柱に対しあまり改善されていない(図6(a))ことから、 ns がこの程度であると芯鉄骨の効果はあまりないものと考えられる。

ns が1.5程度であれば大変形域においても軸力保持不能となる崩壊とはならない(図5(a)のS15-A6, S30-A6および図5(b)のS30-B6)ため、この程度の芯鉄骨量を挿入すれば効果があらわれるものと考えられる。

芯鉄骨量を増やし ns の値を1.5以下となるようにしても、最大耐力発揮以降の耐力の低下率及び部材角 $4/100\text{rad}$ までの軸縮み量に関してその効果はあまり上がらない(図5(a)および図6(a)のS30-A6とS50-A6および図5(b)のS30-B6とS50-B6の比較)。

以上のことから芯鉄骨として有効に働く適切な量が存在すると考えられ、コンクリート強度、芯鉄骨の降伏応力度および芯鉄骨の圧縮耐力に対する作用軸力が因子であると推測される。本実験の条件下では、芯鉄骨の圧縮耐力に対する作用軸力の比 ns が1.5程度となるように挿入すれば芯鉄骨は有効に働くものと考えられる。なお、この適切な量については柱の弾塑性解析を行った上で検討し、統報で報告する予定である。

3.1.3 内蔵鉄骨の形状の影響

H形鋼を挿入した場合とコンパクトな断面である異形鉄筋棒を用いた場合と比較すると、曲げ性状は両者殆ど変わらないが(図5(c)のS30-A6とB30-A6および同図(d)のS30-B6とB30-B6の比較)、コンパクトな断面を用いた方が大変形域において軸縮み量が抑制されている(図6(c)のS30-A6とB30-A6および同図(d)のS30-B6とB30-B6の比較)。芯鉄骨を挿入する意義を軸縮みを抑制させコンクリートの応力およびひずみの発散を低減し、軸力保持不能となる崩壊を防ぐことにあると考え、曲げに殆ど寄与せず圧縮材として抵抗できる、コンパクトな断面を用いた方が芯鉄骨の効果としては大きいものと考えられる。本実験のような小さなせいのH形鋼を挿入しても、曲げに抵抗している(固定端からコンクリート断面せいの1/4上がったところで芯鉄骨フランジ表面に貼付した歪みゲージで引張り側フランジの降伏を確認)ため、異形鉄筋に比べ圧縮軸力の

負担が少なくなることがその理由である。なお、H形鋼フランジに挟まれたコンクリートはわずかな量であり、H形鋼を挿入した場合と異形鉄筋を用いた場合で芯鉄骨近傍のコンクリートの拘束効果は殆ど同程度であると考えられる。

SRC柱と芯鉄骨合成柱を比較すると、軸力比が0.3程度であれば、両者の曲げ性状、軸縮み性状は殆ど変わらないが（図5(c)および図6(c)のS30-A6とL30-A6の比較）、SRC規準に定める制限軸力のもとでは芯鉄骨合成柱の方がSRC柱に比べ、曲げ抵抗力の低下率および軸縮み性状とも優れている（図5(d)および図6(d)のS30-B6とL30-B6の比較）。芯鉄骨合成柱が有利になる理由としては、せいの小さな芯鉄骨よりも、引張り側フランジが断面中心より離れたSRC断面の方が内蔵鉄骨の負担する引張り力が大きくなるため、コンクリートに作用する圧縮力が大きくなることによるものと考えられる。

3.2 曲げ耐力

表4に実験による正側と負側の最大曲げ耐力を記している。表中、計算曲げ耐力は、鋼材の実降伏応力度およびコンクリートのシリンダー強度を0.85倍して計算した一般化累加強度（表4中Mpc1）と鋼材の実降伏応力度とシリンダー強度をそのまま用いて計算した一般化累加強度（表4中Mpc2）を計算している。また、表中、実験値と計算値の比較に用いた実験耐力は正負曲げ耐力の平均値を用いている。芯鉄骨合成柱はMpc1で、RCおよびSRC柱についてはMpc2で安全側に精度よく評価されていると考えられる。

芯鉄骨合成柱の耐力を累加強度で算定することおよびコンクリート強度を0.85倍した理由は以下のことによる。

図7に断面の軸力-曲げモーメント相関曲線を示す。図中○は実験の正負曲げ耐力をプロットしたもので、●はそれらを平均したものである。芯鉄骨の耐力を無視しRC断面の耐力で合成断面の耐力

を評価すると、特に低軸力下では断面曲げ耐力は安全側すぎるの評価となり、芯鉄骨とRCの累加で評価すべきであると判断した。固定端からコンクリート断面せいの1/4上がったところでの芯鉄骨に貼付した歪みゲージの計測結果では、最大耐力発揮時には全試験体ともフランジ、ウェブ共に降伏していることが確認できた。このことより実験の最大耐力はコンクリートの圧壊および内蔵鉄骨の降伏で決まっていることがわかる。累加強度を求める上で断面におけるコンクリート応力を矩形分布としていることから、実験耐力を評価するにはコンクリート強度を低減する必要があることによる。本実験の範囲内では、鉄骨比が小さい程、低減係数の値を大きくとれるものの、鉄骨比が大きくなると小さくすべきことから、実験曲げ耐力の下限値を与える低減係数0.85で評価すべきものと判断した。

3.3 変形能力

柱部材がある限界状態までに吸収した累積エネルギーを図8(a)に示すような理想弾塑性型のエネルギーと等価になるようにしたときの塑性変形倍率 μ を算定した。ただし、Mpcは3.2項で算定した累加強度とし、芯鉄骨合成柱部材についてはMpc1で、SRCおよびRC部材についてはMpc2で計算している。弾性限部材角Rpcは、片持ち柱の断面の弾性曲げ剛性を計算し、部材端がMpcに達したときの部材角である。断面の弾性曲げ剛性はコンクリートの剛性と鋼材の剛性の和として求めた。

3.3.1 曲げ抵抗力の限界状態に対する変形能力 Rm90

曲げ抵抗力の限界状態として実験最大曲げ耐力Mmaxの90%まで曲げ耐力Mが低下した段階（(2)式）とした。

$$M/M_{\max} \geq 0.9 \quad (2)$$

図7 芯鉄骨合成柱の実験耐力と一般化累加強度

E: 限界状態までに吸収した累積エネルギーの半分（一方向荷重に対応するように）

(a) 塑性変形倍率

(b) 最大耐力の90%まで低下した段階での塑性変形倍率

(c) 軸縮みが材長の1/100まで縮んだ段階での塑性変形倍率

図8 変形能力

この条件を満たす芯鉄骨合成柱の最大部材角は、軸力比0.3程度の軸力を受ける試験体では3/100～4/100rad, SRC規準に定める制限軸力を受ける試験体では2/100～3/100rad.であった。

本限界状態に対する変形能力を図8(b)に示す。但し, S15-B6をS15シリーズのSRC制限軸力下および軸力比0.3の実験値として考察する。軸力比が0.3の場合には芯鉄骨合成柱部材はRC柱の変形能力の3倍から4倍, SRC規準に定める制限軸力のもとでは2倍から3倍あることがわかる。SRC規準に定める制限軸力のもとではSRCとRCの変形能力は殆ど同じであることから, このような高軸力のもとでの芯鉄骨の効果は大きいものと捉えることができる。さらに, このような高軸力のもとではS30-A6がS50-B6よりも変形能力に優れていることから, 芯鉄骨の最適量の存在があることがわかる。

3.3.2 軸縮み量の限界状態に対する変形能力 R_{d1}

RC柱が崩壊するまでに吸収したエネルギーに対して芯鉄骨合成柱部材が吸収したエネルギーがどの程度あるのかを評価するため, RC柱試験体が軸力を保持できなくなる, 軸縮み δ_c が材長 L の1/100まで縮んだ段階を限界状態((3)式)として変形能力を検討した。

$$\delta_c / L \leq 0.01 \quad (3)$$

芯鉄骨合成柱およびSRC柱がこの限界状態に達した段階では, 柱脚での抵抗モーメントは最大抵抗モーメントの6割から7割程度まで低下している段階である。しかしながらこのような段階でも, 芯鉄骨合成柱およびSRC柱は軸力を保持できることから落階に至らしめる崩壊現象は免れるものと考えられる。この限界状態は, 階高4m, スパン8m程度の骨組で, 中柱が殆ど縮まないものと考えると, 変動軸力を受ける側柱が材長の1/100縮んだ段階では, 梁および床スラブは部材角で1/200程度変形することに対応している。

本限界状態に対する変形能力を図8(c)に示す。軸力比が0.3程度では芯鉄骨合成柱の変形能力はRC柱の1.5倍から2倍程度あること, SRC規準の制限軸力下では2倍から3倍程度であることがわかる。軸力比が約0.3のS15-B6は殆どRC柱(RC-A6)と同様な変形能力に留まっていることから, 芯鉄骨の圧縮耐力に対する作用軸力の比 n_s が2.5程度となる芯鉄骨を挿入しても殆ど効果は期待できない。

このような限界状態に対する変形能力で評価すると, 同じ鉄骨量を挿入していても, 内蔵鉄骨として, 曲げに殆ど効かず, 軸力のみ抵抗できるコンパクトな断面である異形鉄筋鋼棒を挿入する方がH形鋼を挿入するより変形能力の点で優れている。

4. 結論

一定圧縮軸力と繰返し水平力を受ける芯鉄骨合成柱の載荷実験を行った結果, 以下のことが明らかとなった。

- 1) 芯鉄骨をRC柱に挿入することにより, 高軸力下でのRC柱の変形能力を大きく改善できる。

- 2) 内蔵鉄骨の圧縮耐力に対する柱の作用軸力の割合が芯鉄骨合成柱の挙動に及ぼす影響は大きく, この値が1.5程度であれば安定した性状を示し, 大変形域においてRC柱に見られるような軸力保持不能となる崩壊現象は見られない。
- 3) 芯鉄骨合成柱の曲げ耐力は, コンクリート強度としてシリンダー強度を0.85倍したものと鋼材の降伏応力度を用いて計算した一般化累加強度で, ほぼ評価できる。
- 4) 芯鉄骨を有効に効かせる鉄骨量が存在し, それ以上鉄骨量を増やしても鉄骨量の増加分に対する効果は少ない。本実験の条件下では, 内蔵鉄骨の圧縮耐力に対する柱の作用軸力の割合 n_s を1.5となるように芯鉄骨を挿入することが最も効率的であると云える。
- 5) 芯鉄骨の断面形状は, H形鋼よりも, 曲げに殆ど抵抗できず軸力に抵抗できる, コンパクトな断面である異形鉄筋鋼棒を用いた方が, 軸縮みの進行が抑制できる。

謝辞

本研究は平成9年度文部省科学研究費(奨励研究(A)課題番号(09750664)研究代表者: 堺 純一)およびS.P.RC柱研究会(委員長: 福山大学 南 宏一教授)の助成を受けて行った。実験および討議に際し, 児玉憲助氏(九州大学大学院), 中村信彦氏(九州大学卒業, 現住友金属)の協力を得ました。さらに実験に際し, 九州大学技官, 有働文久氏, 川口 見氏, 久島昭久氏, 津賀山健次氏のご協力を受けました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 日本建築学会・鉄筋コンクリート構造運営委員会・靱性設計小委員会, 靱性設計小委員会報告書(終局強度型耐震設計法に関連する最新の研究成果), 線材WG報告書, pp.12-46, 1992年8月。
- 2) 滝口克己, 長嶋俊雄: 高強度材料を用いた小鉄骨SRC柱の耐力と変形性能の評価, 日本建築学会構造系論文集, 第490号, pp.229-235, 1996年12月。
- 3) 滝口克己, 長嶋俊雄, 伊礼朋次: 高強度材料を用いた小鉄骨SRC柱の繰返し荷重下における耐力, 日本建築学会構造系論文集, 第466号, pp.155-163, 1994年12月。
- 4) 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。
- 5) 村田耕司, 東端泰夫, 長嶋俊雄: 鉄骨鉄筋コンクリート柱の曲げ性状に関する研究, 第13回コンクリート工学年次論文報告集, pp.351-356, 1991年。
- 6) 児玉憲助, 松井千秋, 堺 純一, 平川葉子, 中村信彦: 芯鉄骨合成柱の耐震性能に関する実験的研究, 日本建築学会九州支部研究報告, 第37号, pp.509-512, 1998年3月

(1999年2月10日原稿受理, 1999年7月13日採用決定)