

論文 芯鉄骨を挿入した RC 柱部材の弾塑性挙動に関する実験的研究

堺 純一^{*1}・松井千秋^{*2}・南 宏一^{*3}・平川葉子^{*4}

要旨：RC 柱に芯鉄骨を挿入した柱の耐震性能を把握するために一定軸力と繰返し水平力を受ける部材の載荷実験を行った。柱内法区間にのみ芯鉄骨を挿入することを想定した柱試験体は基礎梁コンクリートの支圧破壊を起こし、RC 柱と同様、最終的に軸力を保持できず崩壊した。柱脚部において内蔵鉄骨の定着を確保した芯鉄骨合成柱は実験終了まで軸力を保持でき、RC 柱の高軸力下における変形能力を大きく改善できることが明らかとなった。このような芯鉄骨を挿入することが RC 柱の耐震補強の一つとして有効なものであることを示した。

キーワード：載荷実験、崩壊、曲げ耐力、変形能力、芯鉄骨の定着、芯鉄骨形状

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、柱部材がせん断破壊し、鉛直荷重を支えきれず、層崩壊をお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せん断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、さらにコンクリートが圧壊し主筋が座屈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。

本論文では内蔵鉄骨を挿入したことにより、RC 柱の耐震性能がどれだけ向上するのかを把握する

ために、RC 柱および芯鉄骨合成柱に地震力に対応する荷重を載荷する実験を行った。経済性の観点から鉄骨加工をできるだけ減らすこと、施工性の観点から RC 梁の主筋が密に交差する柱梁接合部への芯鉄骨の貫通を避けることが望まれる。そこで、エンドプレートを付けない芯鉄骨を柱内法区間のみに挿入する柱が考えられるが、そのような柱の挙動と崩壊性状を調べ、芯鉄骨が完全に定着された柱との挙動の違いについて検討する。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は図 1 に示すような、せん断スパン比 4 の片持柱である。せん断補強筋は 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。芯鉄骨が柱頭および柱脚において完全に定着がとれている柱に対応する試験体を(a)に、柱階高の内法区間のみに芯鉄骨を挿入した柱に対応させることを想定した試験体を(b)に示している。断面せいの 1/3 以下となる鉄骨せいを挿入した断面を芯鉄骨合成柱とし、柱断面積の 3%の芯鉄骨を挿入している。芯鉄骨量を解析変数に合成柱断面の弾塑性解析を行った結果、3%の鉄骨量を挿入させることにより、

*1 九州大学助手 大学院人間環境学研究科建築構造学専攻 工修（正会員）

*2 九州大学教授 大学院人間環境学研究科建築構造学専攻 工博（正会員）

*3 福山大学教授 工学部建築学科 工博（正会員）

*4 構造計画研究所 構造設計部 工修

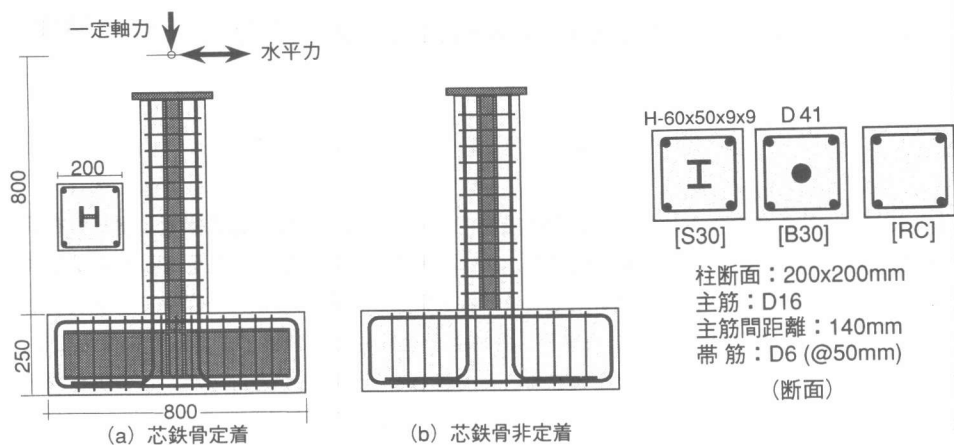


図1 試験体

高軸力下での補強効果が大きくなること²⁾を考慮して本実験では鉄骨量を3%とした。

2.2 実験変数

表1に実験条件を示す。実験変数には、芯鉄骨の柱脚部における定着の有無のほかに、芯鉄骨の形状を選んだ。試験体は5体である。

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。

高軸力下における挙動を調べるため、柱断面の圧縮耐力の30%の軸力とした。

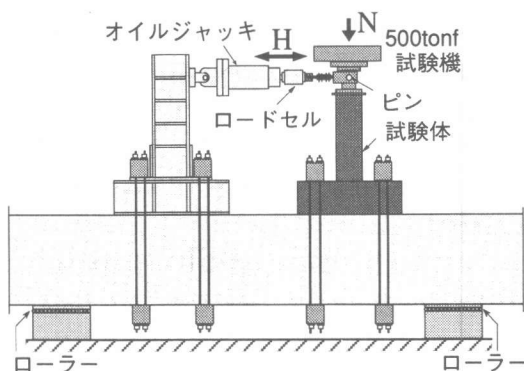


図2 加力装置

表1 実験条件

試験体名	柱構造	内蔵鉄骨	鉄骨の定着の有無	σ_b (Mpa)	載荷軸力 N(kN)	圧縮耐力 (kN)			軸力比		
						Nu	sNu	cNu	N/Nu	N/sNu	N/cNu
S30	芯鉄骨	H-60x50x9x9	定着	33.1	616	2,053	505	1,324	0.30	1.22	0.47
S30-N			定着切り	39.1	685	2,284	505	1,564	0.30	1.36	0.44
B30	合成柱	異形鉄筋 D41	定着	39.0	601	2,003	489	1,560	0.27	1.23	0.39
B30-N			定着切り	38.9	677	2,258	489	1,556	0.30	1.38	0.44
RC-A6	RC柱	無	-	32.4	467	1,557	-	1,296	0.30	-	0.36

$cNu = N / (A \cdot \sigma_b)$, σ_b : コンクリートのシリンダー強度, A: 柱断面積, sNu: 芯鉄骨の圧縮耐力

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	9mm厚鋼板	421	557	0.76	22.9	S30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	全試験体
帯筋	SD295	D6	408	538	0.76	22.9	全試験体

表3 コンクリートの調合

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 (%)	調合 (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

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合を、表 1 に各試験体のシリンダーの圧縮強度 σ_c 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 0.5% 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面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

実験は水平抵抗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（表 4）。

全試験体とも柱脚から断面せい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。

RC 柱は主筋の座屈発生後、軸力を保持できず崩壊した。柱脚部で芯鉄骨の定着を切った 2 体の試験体は基礎梁が支圧破壊し、最終的に軸力の保持ができず、水平耐力が急激に低下している。柱脚で芯鉄骨の定着を確保した合成柱はコンクリートの圧壊および主筋の座屈を生じたが、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。

2.4.2 水平力-部材角関係

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。図中、実線は、転倒モーメントの影響を考慮して、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、次式で算定した。

$$H = M_{pc} / L - N\delta / L \quad (1)$$

ここで、 L は材長（80cm）、 N は柱軸力、 δ は柱頭加力点位置の水平変位である。 M_{pc} 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 M_{pc1} ）。なお、S30-N および B30-N については芯鉄骨の定着を切っているため、圧縮のみ降伏応力度を発揮するものとし、引張り応力は 0 として計算している。同図中、点線は(1)式の M_{pc} を鋼材の実降伏応力度とシリンダー強度を用いて計算した一般化累加強度（表 4 中 M_{pc2} ）として求めたものである。芯鉄骨合成柱は M_{pc1} で、RC 柱は M_{pc2} で安全側に精度よく評価されている。

2.4.3 軸方向縮み-部材角関係

図 4 に材軸方向の変形と柱部材角の関係を示す。RC 柱は軸縮みが 5mm 程度では軸力を支えきれているが、それ以上の変形では、ひずみが急激に発散し、軸力を保持できず崩壊している。この軸

表 4 実験結果

試験体 名	実験曲げ耐力 M_{max} (kN m)		計算曲げ耐力				実験 最終状態	変形能力					
			M_{pc1}	M_{pc2}	M_{max}	M_{max}		$M \geq 0.9M_{max}$			$\delta_c \leq 1/100L$		
	正側	負側	(KN m)	(KN m)	M_{pc1}	M_{pc2}		$Rm90$	$Em90$	$\mu m90$	$Rd1$	$Ed1$	$\mu d1$
S30	59.0	-61.4	57.9	61.6	1.03	0.98	水平力 0	3.5%	677	17.5	5.5%	2,285	58.1
S30-N	57.2	-58.8	54.3 (62.9)	57.8 (68.5)	1.07 (0.92)	1.00 (0.85)	崩壊	3.0%	505	15.9	4.5%	1,326	40.5
B30	51.1	-61.1	50.5	55.5	1.11	1.01	水平力 0	3.0%	422	14.0	6.0%	2,834	91.3
B30-N	54.7	-60.1	52.4 (55.9)	56.7 (61.6)	1.10 (1.03)	1.01 (0.93)	崩壊	2.5%	312	10.5	-5.0%	1,922	62.3
RC	51.2	-53.8	45.2	48.1	1.16	1.10	崩壊	1.5%	171	3.9	-4.0%	1,038	36.8

1) 計算曲げ耐力： M_{pc1} :鋼材の降伏応力度と 0.85 σ_c を用いて計算した一般化累加強度、 M_{pc2} : 鋼材の降伏応力度と σ_c を用いて計算した一般化累加強度、芯鉄骨の定着を切っている試験体については鋼材の引張応力を 0 として計算している。なお、() 内の値は圧縮、引張ともに降伏応力度で計算している。 2) 変形能力中、 $Rm90$ 、 $Em90$ (単位 kNm)、 $\mu m90$ 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。 $Rd1$ 、 $Ed1$ (単位 kNm)、 $\mu d1$ 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。

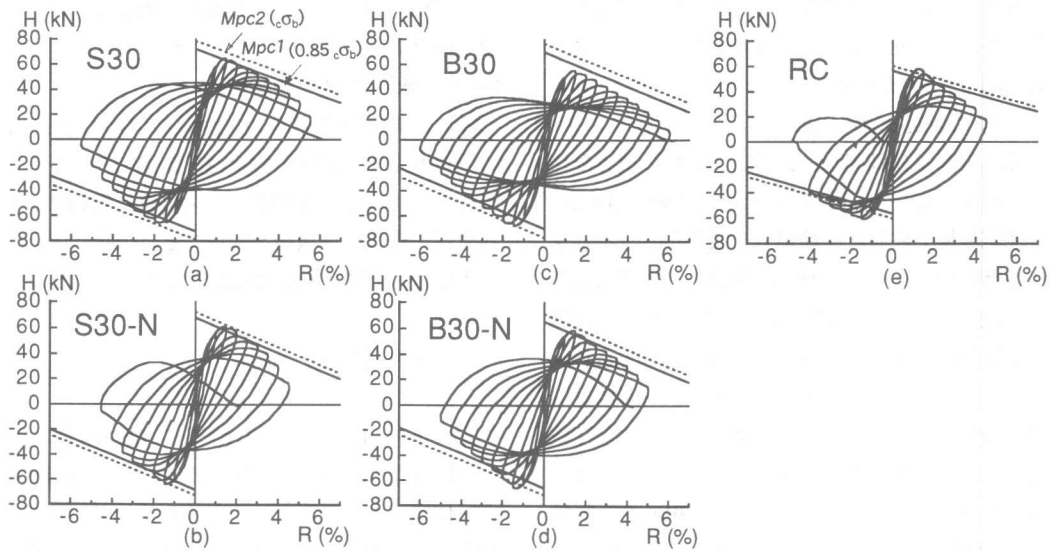


図3 水平力-柱部材角関係

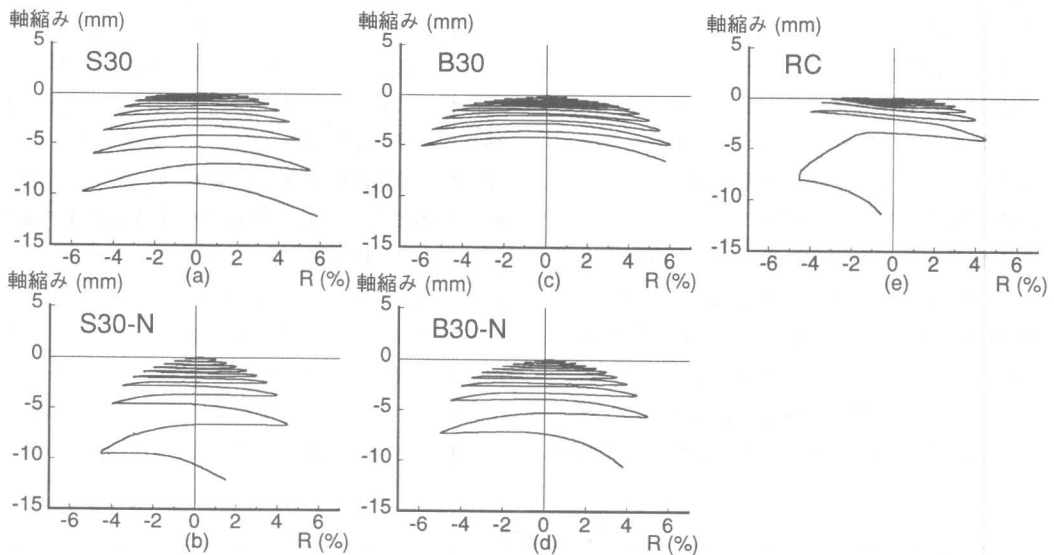


図4 軸縮み-柱部材角関係

縮み量は、材長方向に伸びる塑性域を危険断面から断面せいとし、この区間で軸縮みが生じたとすると、この塑性域でのひずみは 0.25%程度となりコンクリートの圧壊ひずみとほぼ一致する。

定着を確保した芯鉄骨合成柱 S30,B30 は軸縮みが 5mm となるまで縮みの発散が抑えられており、また、10mm 程度の軸縮みを生じて軸力を保持できており崩壊していない。定着を切った試験体 S30-N,B30-N は基礎梁の支圧破壊のため RC 柱と同様な履歴性状となった。

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。横軸は载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したものである。図 6 は軸縮みを示している。

3.1.1 芯鉄骨による RC 柱の補強効果

芯鉄骨の定着を確保した合成柱は最大耐力発揮

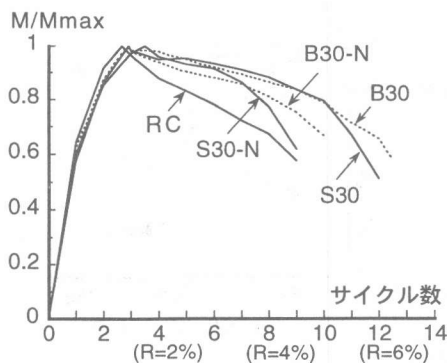


図5 除荷点における柱脚抵抗モーメントの挙動

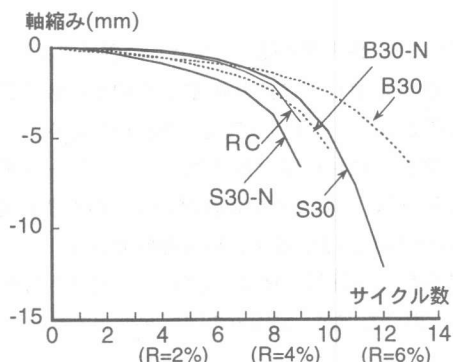


図6 除荷点における軸縮み量の挙動

後、急激な抵抗モーメントの低下にはつながりながら、RC 柱の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。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ること、また図 6 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。

非定着の芯鉄骨合成柱は基礎梁が支圧破壊したため耐力が急激に低下した。この支圧破壊を防げば芯鉄骨の効果が発揮されるものと考えられる。文献 3 では同様な柱の実験を行い、支圧破壊せず安定した挙動を示す実験結果が報告されている。

文献 4 に鋼ぐいのコンクリート基礎底面における支圧強度に関する実験資料があり、これによれば支圧強度がコンクリート強度の 10 倍程度となり得ることが実験により示され、(2) 式に示す支圧強度の設計式が提案されている。

$$\alpha = \frac{F_b}{F_c} = \sqrt{\frac{A}{A_1}} \quad (2)$$

ここで、 F_b : 支圧強度、 F_c : コンクリートシリンダー強度、 A : 支圧面積、 A_1 : 支圧面積、である。

本実験では支圧面積 A を基礎梁 (幅: 250mm, 長さ 800mm) の幅を一辺とする正方形の断面積とし、支圧面積 A_1 を芯鉄骨断面とすると、(2) 式の α の値は約 7 に留まる。文献 3 (試験体部分の上下に設けたスタブ部分の幅および長さはそれぞれ 400mm, 600mm) では同様に支圧面積をとって算定すると α は約 8.5 となり、さらにスタブ部分の全断面積を取った場合 α は約 10.5 となる。本実験および文献 3 とともにコンクリート強度に対する芯鉄骨の降伏応力度の比は 10 程度であるため、本実験では芯鉄骨の下のコンクリートの支圧耐力の不足により芯鉄骨の効果が発揮できなかったものと考えられる。

実際の建物では支圧面積が柱断面となり、鉄骨の降伏応力度がコンクリート強度の 10 倍程度のものであれば、柱断面積の 1% 程度のものであれば定着を切った芯鉄骨を用いても支圧破壊は生じないと考えられる。しかしながら定着を確保した芯鉄骨を柱断面積の 1.5% 挿入し、断面圧縮耐力の 33% の軸力を載荷した実験では、補強効果は充分とは云えない結果となっている⁵⁾。これらのことから芯鉄骨の定着法と挿入量および支圧破壊防止に関してはさらに検討する必要がある。

3.1.2 内蔵鉄骨の形状の影響

H 形鋼を用いた場合と、曲げに効かず軸方向力のみ抵抗できるコンパクトな断面の異形鉄筋棒を用いた場合で比較すると、部材角が 4/100rad. 程度までは両者の履歴性状は殆ど変わらないが、それ以降の大変形域ではコンパクトな断面を用いた方が抵抗力の低下率が緩やかとなり (図 5 参照)、軸縮み量も抑制されている (図 6)。芯鉄骨を挿入する意義を軸縮みを抑制させ、軸力保持不能となる崩壊形を防ぐことにあると考え、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くなるものと考えられる。

3.2 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 7(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としたときの塑性変形倍率

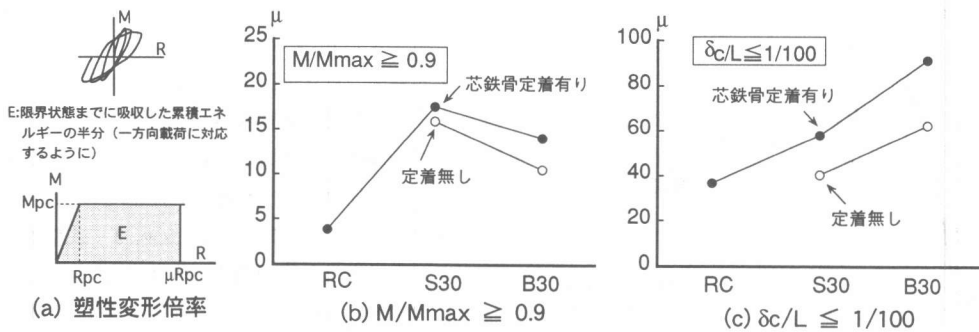


図7 変形能力

μ を塑性変形能力とした。ただし、 M_{pc} として芯鉄骨合成部材については表4に示す M_{pc1} を、RC柱には M_{pc2} を用いている。弾性限界部材角 R_{pc} は、柱脚が M_{pc} に達したときの部材角である。

曲げ抵抗力および軸縮み量に関する二つの限界状態を考え、それらに対する変形能力を算定した。

曲げ抵抗力の限界状態として実験最大曲げ耐力の90%まで曲げ耐力が低下した段階とした。

本限界状態に対する変形能力を図7(b)に示す。芯鉄骨の定着の有無に関わらず合成柱部材の変形能力はRC柱の3倍から4倍あることがわかる。

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、軸縮み δc が材長 L の1/100まで縮んだ段階を限界状態として変形能力を算定した。RC柱および芯鉄骨の定着の無い試験体ではこの程度の軸縮みに耐えられないが、芯鉄骨を定着させた柱ではこの程度の軸縮みに対しても軸力を保持できており、崩壊ではないが材長方向の変形の限界値と考え、このような評価を行った。本限界状態に対する変形能力を図7(c)に示す。合成柱の変形能力はRC柱の1.5倍から2倍程度となる。このような限界状態に対する変形能力で評価すると、内蔵鉄骨としてコンパクトな断面を挿入する方がH形鋼を挿入するよりも優れている結果となっている。

4. 結論

一定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い、以下のことが明らかとなった。

- 1) 柱脚部において芯鉄骨の定着を確保した合成

柱はRC柱の変形能力を大きく改善できる。

- 2) 柱脚部において芯鉄骨の定着を切った合成柱は基礎梁の支圧破壊を考慮する必要がある。
- 3) 芯鉄骨合成柱の曲げ耐力は、コンクリート強度を0.85倍したものと鋼材の降伏応力度を用いた一般化累加強度で、ほぼ評価できる。
- 4) 芯鉄骨の断面は、H形鋼よりコンパクトな断面を用いた方が、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)、代表者：堺 純一）およびS.P.RC柱研究会（委員長：南 宏一）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 晃氏、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) 堺 純一、松井千秋、南 宏一、河野昭彦、平川葉子：芯鉄骨合成柱の耐震性能、第3回日中建築構造技術交流会論文集、pp.413-422、1997年。
- 3) 藤本浩一、平田貞男、八木大児、中西貞夫、南 宏一：芯鉄骨で補強したRC柱の耐震性能に関する基礎的研究（その1、その2）、日本建築学会学術講演梗概集、構造III、pp.1111-1114、1998年9月。
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料、pp.98-100、1987年9月。
- 5) 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。