

# 論文 薄肉スパイラル鋼管で補強した RC 柱の水平繰返し載荷後の軸方向耐力

宇吹哲昌\*1・佐藤立美\*2・南 宏一\*3・和田 勉\*4

**要旨：**RC柱の軸方向崩壊防止を目的に、柱断面中心部に薄肉スパイラル鋼管を埋設したRC柱の繰返し載荷実験と実験後の残存軸方向耐力を確認した。薄肉スパイラル鋼管の埋設によりRC柱の水平耐力は芯コンクリートを除く中空RC部の耐力とほぼ同等となることと、崩壊後の残存軸方向耐力が非常に大きいこと、さらに、スパイラル鋼管内の芯コンクリートは崩壊後もほぼ初期の圧縮耐力を保持していることを確認した。また、薄肉スパイラル鋼管は鋼管外のコンクリートの損傷の芯コンクリートへの伝達を阻止する効果があり、水平耐力低下後も上部構造の鉛直力を維持できることを実証した。

**キーワード：**鉄筋コンクリート柱、芯コンクリート、薄肉スパイラル鋼管、残存軸方向耐力

## 1. はじめに

兵庫県南部地震での鉄筋コンクリート建物の被害の特徴の一つに、中低層建物の一階ピロティ部のRC柱の圧壊がある。これは高軸力下での変形性能不足と軸方向耐力の不足が原因と考えられる。RC柱の変形性能は剪断補強筋量のほか、柱のコンクリートの拘束量により変化する。筆者らは、RC柱の大変形の繰返し載荷後も軸方向崩壊を防止する方法として、図-1に示したように、薄肉スパイラル鋼管で連続的に拘束した芯コンクリートと、その外側の中空RC部との複合部材とする新しいRC柱を考案した。柱中央部の芯コンクリートは、鋼管の拘束効果により軸方向耐力が上昇するとともに、薄肉スパイラル鋼管により鋼管内外のコンクリートが分離されていることにより、中空RC部のコンクリートのひび割れ等の損傷が芯コンクリートに伝達しないため、大変形時にも健全な状態を保つと考えられる。

本論は、RC柱の一定軸力下での繰返し水平載荷実験と、水平載荷実験後の残存軸方向耐力の確認実験結果により、中央に芯コンクリートを持つRC柱の特性について検討したものである。

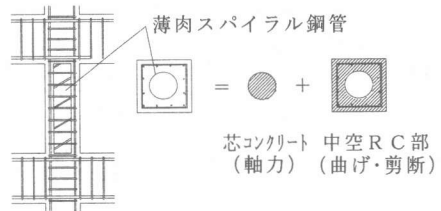


図-1 新RC柱構造システム

なお、薄肉スパイラル鋼管は厚さ0.4~0.6mmで幅150mmの薄い鋼板をコイル状に巻き上げ、鋼板端部を折り曲げハゼ加工したものであり、鋼管自体の軸方向耐力はほとんどないため、SRC充填鋼管構造とは異なる性質を持つと考えている。

## 2. 試験体概要

試験体は下記の4シリーズ計12体製作した。

CMシリーズは曲げ破壊先行型、CSシリーズは剪断破壊先行型として計画し、軸力比 $n=0.3$ で破壊形式の差異による鋼管の有無の影響を比較したものである。CN、CHシリーズは同一配筋のRC柱で、軸力比を $n=0.3$ と $n=0.6$ について軸力比の影響による耐力と変形性能を比較したものである。

\*1 広島工業大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

\*2 広島工業大学教授 工学部建設工学科 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 (株) 和田建築技術研究所所長 (正会員)

すべての試験体の柱断面は**b**×**D**=300×300mm、柱長は**H**=1050mm (**H/D**=3.5)で共通とした。

なお、本論の試験体は鋼管内外のコンクリート強度は同強度とし、鋼管長は柱長と等しくした。

各試験体の配筋計画と使用した薄肉スパイラル鋼管の径を表-1に、シリーズ毎の柱断面を図-2に、使用鋼材の引張試験結果を表-2に示す。

表-1 試験体配筋計画概要

試験体名称	主筋	帯筋	Pt (%)	Pw (%)	t (mm)	φ (mm)
CM-0	SD295	SD295	---	---	---	---
CM-100	6-D16	2-D10	0.66	0.95	0.4	100
CM-150		@50			0.6	150
CS-0	SD345	SD295	---	---	---	---
CS-100	6-D19	2-D10	0.96	0.47	0.4	100
CS-150		@100			0.6	150
CN-0	SD295	SD295	---	---	---	---
CN-150	16-D13	2-D6	0.71	0.43	0.4	150
CN-175		@50			0.4	175

注：CHシリーズはCNシリーズと同配筋である

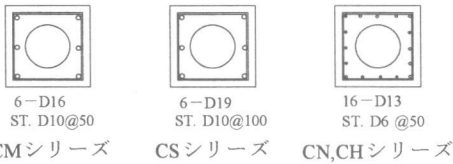


図-2 試験体配筋図

表-2 使用鋼材強度試験結果

	鋼材種類	$\sigma_y$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{max}$ N/mm <sup>2</sup>	伸び率 (%)
主筋	SD345A-D19	421.8	591.9	21.2
	SD295A-D16	398.0	527.9	22.0
	SD295A-D13	374.0	544.0	20.3
帯筋	SD295A-D10	373.6	533.7	18.7
	SD295A-D6	402.3	540.5	11.1
鋼管	SGCC-R PL-0.4	316.8	388.4	22.4
	PL-0.6	297.7	378.5	33.7

### 3. 実験方法

図-3に示す2軸荷重装置を使用し、垂直ジャッキにより試験体に所定の軸力を作用させた後、部材角**R**=0.5%毎の漸増変位でCM,CSシリーズでは正負各1回、CN,CHシリーズでは正負各2回の交番繰り返し荷重により、柱が崩壊するまで水平荷重を載荷した。このとき崩壊の判定は耐力が最大耐力の50%を下回った時としている。

水平荷重実験終了後、柱主筋の座屈が見られなかった試験体については、部材角を**R**=0に戻して垂直方向の加力を行い、崩壊後の柱の残存軸方向耐力を求めた。

なお、軸方向変位は試験装置の垂直ジャッキのストロークのデータであり、試験区間の柱の鉛直変位の計測は行っていない。

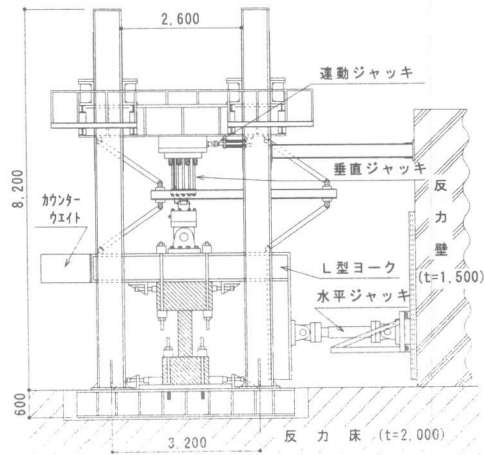


図-3 実験装置の概要

### 4. 水平繰り返し荷重実験結果

各試験体の試験日材令でのコンクリート強度試験結果と水平繰り返し荷重試験結果を表-3に示す。また、図-4に各シリーズの鋼管の有無による水平荷重-部材角の包絡線の比較を示す。

以下に、各シリーズ毎の試験体の崩壊までの挙動を要約しておく。

CMシリーズの3体は主筋の圧縮降伏が先行し、最大耐力に達する直前に主筋の引張降伏が見られた。その後CM-0、CM-100は柱頭の主筋の座屈により崩壊に至ったが、CM-150は主筋の座屈はなく、最大耐力以後に発生した剪断亀裂の拡大伸展により崩壊した。

CS,CNシリーズの鋼管補強のない試験体CS-0、CN-0は最大耐力時に主筋の引張降伏と最大耐力以後の圧縮降伏が見られたが、鋼管補強した柱では実験終了時まで主筋の降伏は見られなかった。

CHシリーズは高軸力であり、主筋の引張降伏はなく最大耐力時以後に圧縮降伏が生じている。

表-3 実験結果一覧表

試験体名	Fc N/mm <sup>2</sup>	cQmy kN	cQu kN	最大耐力時		降伏時部材角 R (%)				最終部 材角R	破壊 形式
				kN	R (%)	主筋+	主筋-	帯筋	鋼管		
CM-0	24.2	260.6	332.9	266.2	1.00	0.88	0.45	3.94	2.00	3.5	M
CM-100		248.0	319.6	273.5	1.44	1.21	0.67	1.35			
CM-150		232.3	302.9	252.8	1.00	0.83	0.71	1.00			
CS-0	23.4	318.2	236.8	278.0	0.86	0.82	2.37	0.96	-	2.5	MS
CS-100		305.9	223.8	255.0	0.83	-	-	0.67			
CS-150		290.3	207.8	247.6	0.76	-	-	0.56			
CN-0	26.9	281.0	256.4	321.5	0.69	0.38	0.73	0.54	1.79	2.0	SB
CN-150	29.9	248.6	223.0	244.6	0.70	-	-	0.42			
CN-175	27.1	237.4	211.4	224.1	0.50	-	-	0.31			
CH-0	26.5	337.6	253.2	318.7	0.49	-	0.49	0.79	0.96	1.5	SB
CH-150	25.4	293.0	215.1	278.5	0.50	-	0.95	0.37			
CH-175	25.7	280.8	205.1	239.3	0.50	-	-	0.36			

注1)材端曲げ降伏時剪断力cQmyはAIJ式に軸力の影響による曲げ強度拡大係数<sup>1)</sup>を乗じて求めた。剪断耐力cQuは修正B法<sup>1)</sup>による。但し鋼管補強柱については中空RC部を有効断面として計算した。

2)最終部材角Rは水平載荷実験終了時の載荷部材角を示す。

3)破壊形式 M：最大耐力時に主筋降伏があり柱頭柱脚の破壊が先行する曲げ破壊

MS：最大耐力時に主筋降伏があるが、剪断亀裂の拡大により破壊する曲げ剪断破壊

S：主筋降伏がなく終局状態では剪断亀裂の拡大により破壊する剪断破壊

SB：主筋降伏がなく主筋に沿う付着亀裂の拡大が剪断亀裂の拡大に先行する剪断付着破壊

SC：剪断亀裂の拡大とともに所定の軸力が保持できなくなる剪断圧縮破壊

また、帯筋量の差異に関わらず、すべての試験体で帯筋の降伏が見られたが、CS,CNシリーズでは最大耐力前後で降伏しているのに対し、CM,CHシリーズでは最大耐力時以降となっている。

鋼管の円周方向の引張降伏もCSシリーズを除き確認できたが、いずれも最大耐力時部材角の2倍以上の部材角で降伏しており、鋼管の拘束効果が最大耐力に与える影響は少ないといえる。

実験値の最大耐力を見ると、CMシリーズでは軸力による曲げ強度拡大係数<sup>1)</sup>を乗じた材端降伏時剪断力cQmyを、その他の試験体では修正B法<sup>1)</sup>によるcQuを上回っているが、いずれのシリーズとも鋼管径が大きくなるとともに、最大耐力は減少する傾向が見られている。これは図-1に示したように、芯コンクリートは主として軸力のみ抵抗し、芯コンクリートを除く中空RC部のみが剪断力に抵抗するためと考えている。

しかし、図-5に示すように、最大耐力実験値は、いずれも芯コンクリートを除いた中空RC部を等価な長方形断面に置換し、修正B法により求めた剪断耐力計算値cQuを十分上回っていることが確認できるとともに、普通コンクリートの実験値と計算値の比にさほど顕著な差異はない。

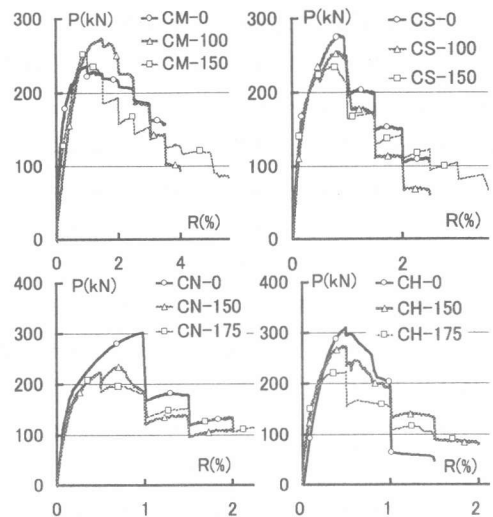


図-4 水平荷重-部材角関係の比較

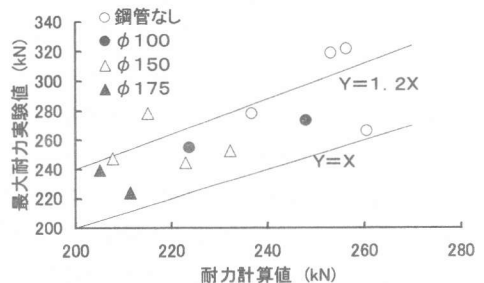


図-5 最大耐力と計算値の比較

図-6, 7は、水平加力繰り返し回数と試験体の累積軸方向変位の関係であるが、CMシリーズの場合、CM-0では15回目（部材角3.5%）で急激な軸方向変位の増大が見られたほかは鋼管の有無の差異は少ない。しかし、CS, CNシリーズの場合、鋼管補強した柱の累積軸方向変位は、鋼管のない場合に比べ累積軸方向変位は明らかに小さく、また、鋼管径が150mm以上の場合水平繰り返し実験終了時まで繰り返し回数にほぼ比例した線形的累積軸方向変位になっていることがわかる。

高軸力のCHシリーズの場合、主筋の座屈により軸力の低下が生じた時点で、累積軸方向歪の急増が見られるが、鋼管補強した柱では繰り返し回数12回（部材角1.5%終了時）までの累積軸方向変位はCNシリーズの場合と同様に直線的であり、安定した軸方向挙動となることが判る。

### 5. 崩壊後の残存軸方向耐力実験結果

図-8, 9は、各試験体の荷重軸力と軸方向変位の関係を図示したものである。これらの図より、試験体の配筋の差異や鋼管補強の有無による水平荷重中の軸方向変位の蓄積と崩壊後のRC柱の荷重軸力-軸方向変位の関係が明らかである。

CS, CNシリーズの試験体およびCM-150では、水平荷重による崩壊まで一定の軸力を保持していること、崩壊後の柱の圧縮剛性が初期剛性とさほど変わらないこと、残存軸方向耐力が初期荷重軸力の1.5~2倍となっており、水平荷重による崩壊後の軸力保持能力が非常に大きいことが判る。

また、残存軸方向耐力は鋼管径が大きいほど大きくなる傾向が明らかである。

CHシリーズの3体およびCM-0, CM-100は、水平荷重荷重中に所定の荷重軸力の低下が見られている。特に、CHシリーズでは水平荷重荷重中に主筋の座屈が生じ急速な軸力低下が見られたが、CH-0は部材角 $R=1.0\%$ 付近で主筋の座屈が生じたのに対し、CH-150では1.43%、CH-175では2.0%となっており、高軸力の場合も鋼管径の大きいものほど大変形までの軸力保持能力の保持が可能であることがわかる。

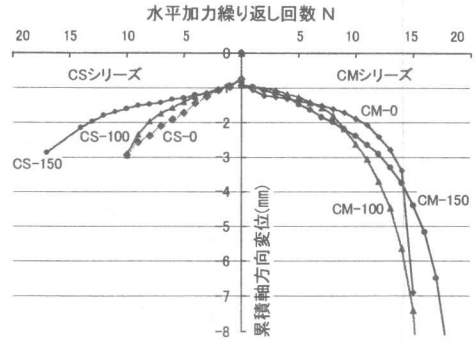


図-6 CM,CSシリーズの累積軸方向変位

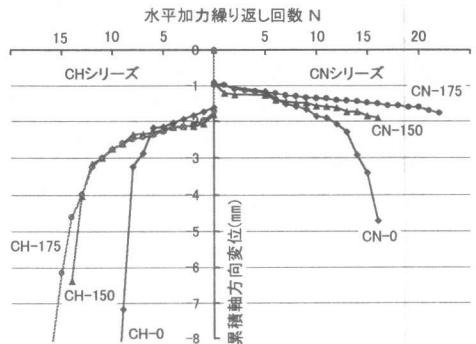


図-7 CN,CHシリーズの累積軸方向変位

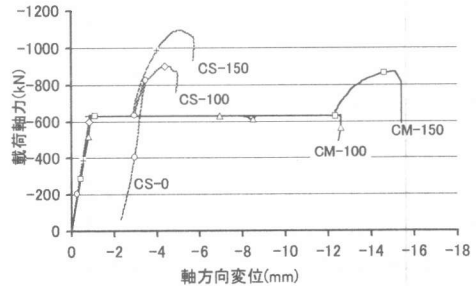


図-8 CM,CSシリーズの軸力-軸変位関係

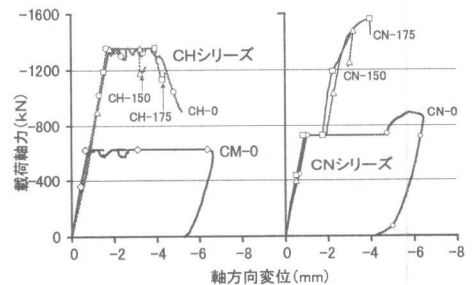


図-9 CN,CHシリーズの軸力-軸変位関係

しかし、曲げ破壊先行型のCMシリーズでは崩壊時の残存軸方向耐力は初期載荷軸力に等しいかまたはCM-150でも若干の上昇を見るのみである。

水平加力実験終了後の残存軸方向耐力  $N_{ru}$  の実験結果を表-4に示す。この時水平荷重載荷中に主筋の座屈が生じた試験体では、主筋座屈時の軸力を採用した。また、表-4中の  $Nu'$  は、各試験体の最大圧縮耐力計算値であるが、芯コンクリートについては鋼管の拘束係数を  $k=4.1$  として計算している。

なお、水平荷重により崩壊した試験体の観察によると、 $\phi=150\text{mm}$ 以上の鋼管補強の場合、帯筋外部のカバーコンクリートの剥離のほか、帯筋と鋼管の間のコンクリートの損傷程度も大きく、軸力はほぼ主筋と芯コンクリートのみで支持されていると考えられる状態であった。また、鋼管のない試験体もカバーコンクリートは剥離し、主筋・帯筋とも露出していた。そのため、鋼管のない場合には、崩壊後のコンクリート有効断面積  $A_e$  を主筋中心間距離で囲まれた  $b \times d_e = 21 \times 21\text{cm}$  部分と仮定し、鋼管補強した場合には芯コンクリート断面積のみで抵抗していると仮定し、コンクリートの残存圧縮強度  $c\sigma_b$  を下式で計算した。

$$c\sigma_b = (N_{ru} - A_g \cdot \sigma_y) / A_e$$

但し  $A_g$ ,  $\sigma_y$  は主筋の全断面積および降伏応力度

図-10は、最大圧縮耐力  $Nu'$  と残存軸方向耐力  $N_{ru}$  の関係である。すべての試験体は破壊形式の差異や載荷軸力・崩壊時部材角および繰り返し載荷回数等に差異があるにも関わらず、ほぼ直線関係を示している。最大軸力時にはいずれも主筋の座屈が生じており、水平載荷中に座屈する試験体と同一直線上にあることから、残存圧縮耐力は芯コンクリートのみの耐力と見ることができる。

図-11は、本論のすべての試験体について、実験条件および破壊形式に関係なく、崩壊または主筋座屈時部材角  $R_{max}$  と  $c\sigma_b / F_c$  の関係を示したものであるが、鋼管補強のないRC柱と載荷軸力比の差異により、残存コンクリート強度比は全く異なる特性を持つことがわかる。

表-4 残存軸方向耐力

試験体名称	No (kN)	$N_{ru}$ (kN)	$Nu'$ (kN)	$c\sigma_b$ (N/mm <sup>2</sup> )	$R_{max}$ (%)
CM-0		577.2	2653.2	2.27	3.5
CM-100	631.2	631.2	2734.8	19.87	4.0
CM-150		871.2	2825.7	22.42	5.0
CS-0		828.6	2814.3	2.32	2.5
CS-100	631.2	901.2	2895.9	22.28	2.5
CS-150		1095.0	2986.8	20.87	3.5
CN-0		891.3	3185.5	2.98	2.0
CN-150	726.9	1487.4	3575.1	41.19	2.0
CN-175		1559.0	3339.9	33.24	3.0
CH-0		852.8	3145.0	2.11	1.0
CH-150	1354.2	1181.4	3164.7	23.86	1.5
CH-175		1254.0	3216.6	20.55	1.5

注) No : 初期載荷軸力  $N_{ru}$  : 残存軸方向耐力  
 $Nu'$  : 鋼管の拘束係数を考慮した最大圧縮耐力  
 $Nu' = F_c \cdot (A_c - A_p) + (F_c + k \cdot 2t \cdot \sigma_y / \phi p) \cdot A_p$   
 但し  $A_p$ ,  $\phi p$  は芯コンクリート断面積および径  
 $R_{max}$  : 崩壊時または軸力低下時の水平部材角

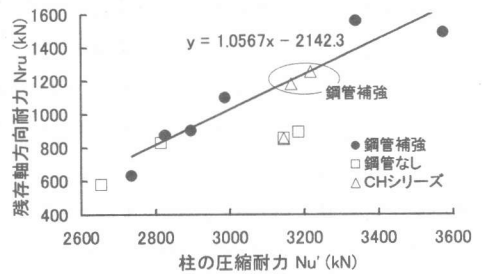


図-10 終局圧縮耐力  $Nu'$  と残存軸方向耐力

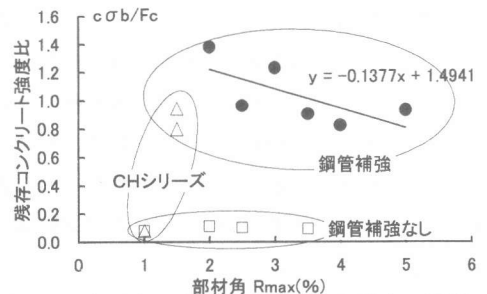


図-11 部材角と残存コンクリート強度の関係

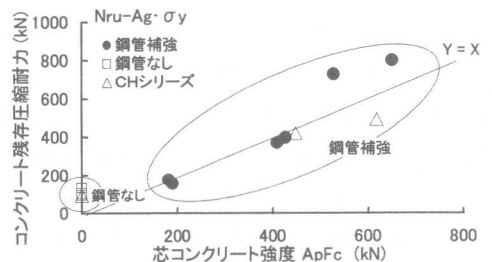


図-12 実験前後の芯コンクリート強度

鋼管補強のないRC柱では、崩壊時部材角に関わらず残存コンクリート強度 $c\sigma b$ はコンクリート強度 $F_c$ の10%以下となるが、鋼管補強した芯コンクリートの残存強度 $c\sigma b$ はほぼ $F_c$ と等しくなっていることがわかる。しかし、芯コンクリートの残存強度も崩壊時部材角が大きくなるとともに直線的に減少する傾向があるが、崩壊時部材角が $R=2.0\%$ 以下であれば、ほぼ初期の芯コンクリートの圧縮耐力を保持しているといえる。

図-12は、芯コンクリートの圧縮耐力 $A_p \cdot F_c$ と、残存圧縮耐力 ( $N_{ru} - A_g \cdot \sigma_y$ )の関係を示したものである。鋼管補強した柱は主筋の座屈を生じなければ、 $R=2.0\%$ 以上の水平部材角を経験した後も、ほぼ初期の芯コンクリート圧縮耐力を保持していることがわかる。言い換えれば、芯コンクリートは柱の崩壊後も損傷の少ない健全な状態を保持していると考えられる。しかし、崩壊後の芯コンクリートの残存耐力の評価時に、鋼管の拘束係数の影響があると考えられたのは、最大載荷部材角が $R=2.0\%$ のCNシリーズの2体のみであり、水平載荷最大部材角と残存軸方向耐力の関係は、今後さらに検討すべき要件として残っている。

また、すべてのシリーズとも鋼管補強のないRC柱では、水平繰り返し載荷によるコンクリートのひび割れ等の損傷・劣化がコンクリート全断面にわたり生じていると考えるのが妥当である。

したがって、水平荷重により崩壊した時点でのコンクリートの残存強度はほとんどなく、軸力は主として主筋の圧縮耐力により支持されている状態となるため、上部荷重の軸力による圧縮崩壊の危険性が高いといえる。

## 6. 結論

以上の実験結果から、薄肉スパイラル鋼管で補強したRC柱について以下のように要約する。

1. 薄肉スパイラル鋼管で補強したRC柱は、軸力に抵抗する芯コンクリート部と、曲げ・剪断力に抵抗する中空RC部の複合部材となる。

そのため、同断面同配筋の普通RC柱に比べ剪断耐力は低下するが、中空RC部を断面積の等し

い長方形断面に置換し修正B法により求めた剪断耐力値を十分上回る耐力を保持する。

2. 剪断破壊する柱の場合、芯コンクリートを持つことにより最大耐力以後の耐力低下率は緩やかになり変形性能は改良される。また、累積軸方向歪は減少し、崩壊後の残存軸方向耐力が大きくなるため軸力による崩壊が防止できる。この場合、鋼管径は大きい方が効果的であり、本実験結果からも鋼管径は柱径の1/2以上が適当と言える。

3. 柱の配筋・破壊形式等に関係なく、水平繰り返し載荷により崩壊したRC柱は、外部コンクリートの損傷度は大きいにもかかわらず、鋼管補強した芯コンクリート部の損傷は少なく、残存強度は初期のコンクリート強度とほぼ等しい。

特に、水平荷重による変形部材角が $R=2.0\%$ 以下の場合、芯コンクリートの軸方向耐力は変化しないと考えることができる。

しかし、水平荷重による崩壊時変形部材角が大きくなると、芯コンクリートの残存耐力比は減少することと、鋼管径が大きい場合にも、芯コンクリートの残存耐力は減少する傾向がある。

したがって、芯コンクリートの柱断面に対する比、およびスパイラル鋼管の径と板厚の適切な関係については今後の課題となる。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針(案)・同解説 1997
- 2) 村上利憲，南 宏一：二軸対称断面の鉄筋コンクリート部材の終局剪断耐力，日本建築学会構造系論文報告集，pp.31~42，1990.9
- 3) 宇吹哲昌，佐藤立美：薄肉鋼管で補強した鉄筋コンクリート柱の2軸載荷試験，日本建築学会中国支部研究報告集 1998.3
- 4) 宇吹哲昌，渡辺，和田，佐藤，南：薄肉スパイラル鋼管で補強したRC柱の力学的挙動に関する基礎的研究(その3~その4)，日本建築学会大会学術講演梗概集 1998.9

[謝辞] 本実験は、平成8年度文部省私立大学ハイテクリサーチセンター整備事業により導入された装置を使用して行ったものである。

ここに記し、謝意を表します。