

# 変動軸力を受ける薄肉スパイラル鋼管で補強した RC 柱の力学的挙動

福原 実苗\* 南 宏一\*\*

## Strengthening Effect of RC Column Using Steel Spiral Thin Tubes under the Varying Axial Loading

Minae FUKUHARA\* and Koichi MINAMI\*\*

### ABSTRACT

This paper describes the ductility of ordinary RC columns and new system RC columns (called CRC columns) with core concrete confined thin steel spiral tube (called WP), reversed cyclic lateral loading under the varying axial load. Four specimens are tested. The applied varying axial loads are two type of  $0.3F_c \sim 0.3A_{gsy}$  and  $0.6F_c \sim 0.6A_{gsy}$ . It is shown that the CRC columns have a higher ductility more than ordinary RC columns, comparing with the restoring force characteristics, axial strain-horizontal deformation relationship, and crack condition from the experimental results.

キーワード：芯コンクリート，薄肉スパイラル鋼管，変動軸力，残存軸方向耐力

keywords：Core concrete, Thin steel spiral tube, The varying axial load,  
Remaining axial strength

### 1. はじめに

1995年の阪神大震災で鉄筋コンクリート建築物は大きな損傷を受けた。建物の層崩壊の多くは柱の軸破壊であった。地震時に建物が崩壊する過程を推測すると、設計荷重よりも過大または想定以外の入力作用した場合と部材の耐力不足が考えられる。

この軸破壊を防止するには鉄筋コンクリート（以下、RCと称する）柱の靱性保持能力を確保することである。すなわち、柱の曲げせん断ひび割れ後においても鉛直支持力を保持することである。著者らは、高せん断力と高軸力を受ける柱の耐力向上と圧壊防止のために、柱断面の中央部のコンクリートを薄肉スパイラル鋼管（以下、WPと称する）で拘束することを考案し、せん断破壊に

伴う軸力保持能力の低下を防止することを目的とする研究を行ってきた。

本稿では、柱のせん断耐力と軸力保持能力との関係を説明するために、正負変動軸力時の挙動を、部材角制御による水平交番荷重を作用させて、柱の履歴性状と軸変位および鉛直ひずみを測定する実験を行った。試験体は“RC柱”と“CRC柱”（芯コンクリートRC柱）の各2体である。この実験では、正負変動軸力の交

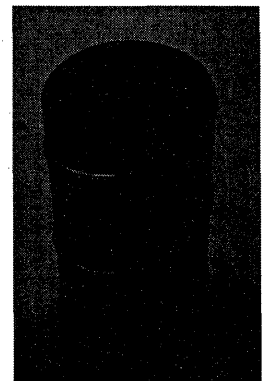


写真-1 WP形状

\*大学院工学研究科建築学専攻 \*\*建築学科教授

番のために正軸力（圧縮力）時の最大せん断耐力直後に“RC 柱”の軸耐力は喪失して崩壊した。また、負軸力（引張力）が作用した場合はせん断耐力と剛性が極端に低下していることが判明した。CRC 柱のコア部分を拘束する WP は写真-1 に示した形状で、中空スラブ及び空調設備のダクトに採用されている製品である。

## 2. 実験

### 2.1 実験計画

表-1に実験計画を示す。変動因子は、载荷する軸力比のみである。軸力比 $n$ （軸方向の圧縮側、引張側の最大耐力に対する作用軸力の比）は、0.3、0.6の2種類とした。試験体はCRC柱2体とWPの拘束効果を明確にするための通常のRC柱2体の計4体とする。コンクリート強度はWP内、被覆部ともに $F_c=30\text{N/mm}^2$ とする。図-1に試験体の形状および断面構成を示す。試験部の柱長さ $L$ は900mmとし、せん断補強筋は2-D6@50 ( $p_w=0.42\%$ )とした。各試験体とも断面寸法を300mm×300mm ( $b$ :断面幅,  $D$ :断面せい)とし、使用したWPは管径比 $\phi/D=0.50$ となるよう $150\phi\times 0.4$ とし、柱内法のみ挿入した。主筋はすべて16-D13とした。使用材料の機械的性質を表-2に示す。それぞれ3体の試験片にて引張試験を行い、その平均値を採用した。コンクリート供試体の圧縮および割裂試験結果を表-3に示す。実験は材令42日から54日の間に行った。

### 2.2 実験方法

载荷装置は、図-2に示す建研式载荷装置を用いた。載

荷方法は図-3に示すように、まず圧縮側に $n=0.3N_c$  ( $N_c=bd\sigma_y$ )となる $a$ 点まで载荷し、圧縮側軸力一定で水平荷重を変位部材角 $0.25\text{rad.}$ となるまで加える ( $b$ 点)。次に、圧縮側の軸力比 $n=0.3N_c$ と引張側の軸力比 $n=-0.3N_t$  ( $N_t=Ag\sigma_y$ )の中間点 ( $c$ 点)まで、軸力および水平荷重とともに除荷する。そして、引張側の軸力比 $n=-0.3N_t$ となる $d$ 点まで载荷し、引張軸力一定で水平荷重を逆方

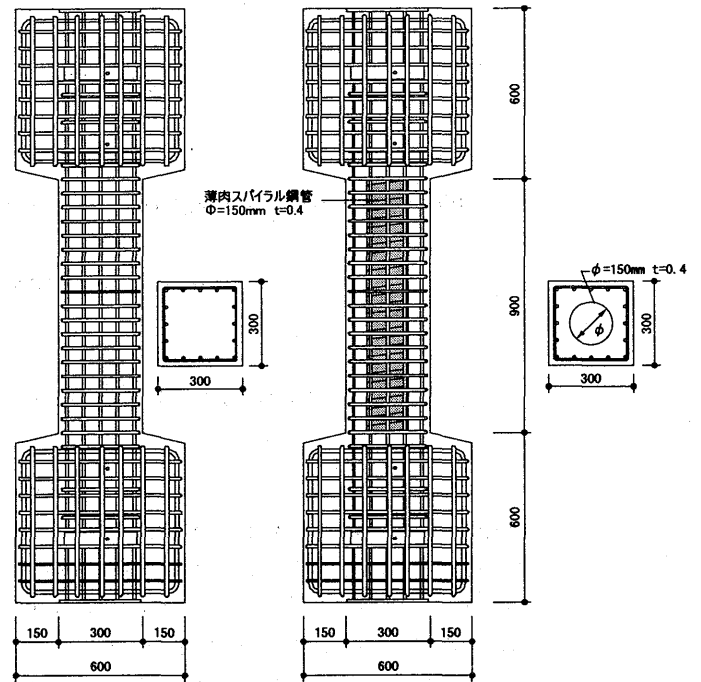


図-1 試験体形状および断面構成

試験体名	柱形状	WP径 (mm)	WP長さ (mm)	圧縮軸力比( $n$ )	引張軸力比( $n$ )
RC±3	RC柱	—	—	0.3	-0.3
RC±6				0.6	-0.6
CRC±3	CRC柱	150	900	0.3	-0.3
CRC±6				0.6	-0.6

種別	材質	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	破断伸び (%)
D6	SD295A	334	494	11.3
D13	SD296A	349	531	16.9
WP	SGCCR	294	354	10.0

材令 (日)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	割裂強度 (N/mm <sup>2</sup> )
7	27.4	2.6
14	32.6	2.5
28	35.0	2.8
42	38.4	2.4
54	40.9	2.6

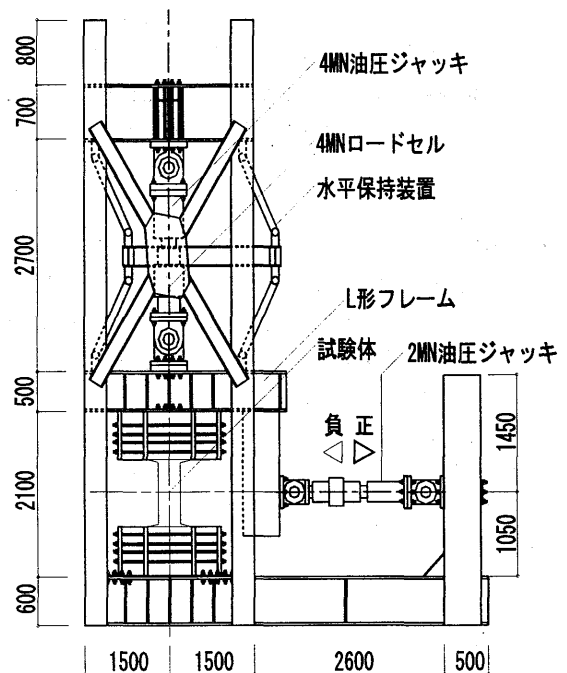


図-2 実験装置 (単位:mm)

向に0.25%rad.となるまで加える (e点). そして, 中間点 (c点) まで軸力および水平力とともに除荷する. これを1サイクルの変動軸力とする. 変位角は, 0.25%rad.を1サイクルした後, 0.5%rad.からは0.5%rad.増加させる毎に各2サイクルずつ繰り返す. 軸方向変位は, 試験体上下端に固定した測定用ボルトに変位計を取付けて測定した. 主筋, WPおよび補強筋のひずみは, 単軸ひずみゲージによって測定した.

### 3. 実験結果

#### 3.1 破壊状況

表-4に実験結果一覧を示す. RC±3, RC±6ともにまず曲げひび割れが発生し, 変位角1.0%rad.から急激にせん断ひび割れが増加し, 1.5%rad.でせん断破壊に至り軸力を保持できなくなった. CRC±3, CRC±6の試験体は曲げひび割れとせん断ひび割れがほぼ同時に発生した. 正荷重と負荷重のせん断ひび割れがほぼ同時に入ることにより, WPの被りコンクリート部分にひび割れが集中して発生し, 中央被りコンクリートの剥離に至った. また, RC±3の試験体は主筋が座屈し, それにより帯筋が破断しているが, CRC±3, CRC±6では主筋は座屈しておらず, 芯コンクリートの効果で圧縮ひずみがRC柱に比べて小さく抑えられていることがわかる.

#### 3.2 履歴性状の比較

図-4に各試験体の荷重と水平変位の関係と, 軸方向ひずみと水平変位の関係を示す. RCシリーズの試験体は, 1.5%rad.までに軸崩壊し載荷不能になったが, CRC±3は最大耐力の70%rad.を下回ったため載荷を打ち切り, CRC±6は3.0%rad.まで軸力を保持した. 鉛直保持能力とは, 健全に軸力を保持できる水平変形角の限界範囲として同図に示している. 最大せん断耐力は, 両軸力比ともRCシリーズの方が大きい, 最大耐力発揮以降のエネルギー吸収能力には明らかな差異が認められる. RCシリーズは1.0%rad.~1.5%rad. (1/100~1/67)で鉛直保持能力を喪失しているのに対し, CRCシリーズは3.0%rad.~4.0%rad. (1/33~1/25)まで鉛直保持能力を維持しており, RCシリーズに比べて性能が高いことが明らかである.

### 4. 考察

この実験は, 各荷重サイクル毎の写真データが鮮明であるため試験体の変化状態を詳細に観察することができた. (付録1にひび割れ状況の比較を示す.) 各試験体は, 圧縮, 引張を交互に作用させたために載荷を繰り返す毎に増大していく“ひび割れ幅”が判明した. 載荷初

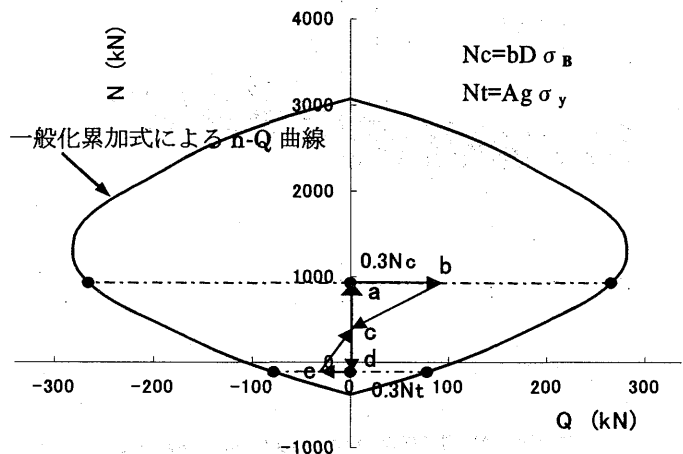


図-3 載荷方法

表-4 実験結果一覧

試験体名	作用軸力		中央斜めひび割れ		最大耐力	
	正	負	正	負	正	負
	N	-N	$Q_p$ ( $R_p$ )	$-Q_p$ ( $-R_p$ )	$Q_{max}$ ( $R_p$ )	$-Q_{max}$ ( $-R_p$ )
RC±3	810	-179	344 1.00	-167 -1.00	351 0.50	-144 -0.50
RC±6	1620	-358	407 1.00	-135 -1.00	410 0.50	-124 -0.50
CRC±3	810	-179	307 0.50	-296 -0.50	307 0.50	-145 -0.50
CRC±6	1620	-358	327 0.50	-105 -0.50	327 0.50	-105 -0.50

期段階の変位角 0.25%rad. (1/400) で, 圧縮力作用時には全試験体に“曲げひび割れ”が発現している. 引張力作用時には柱せいの中央部まで“曲げ引張ひび割れ”が進展している. このひび割れは, すべて帯筋位置に発生している. 次に, 変位角 0.5%rad. (1/200) で RC±3, CRC±3 の試験体に“せん断ひび割れ”が発現し徐々に増加していったが, RC±6 の試験体では“曲げ引張ひび割れ”が進展し, また, CRC±6 の試験体では“せん断ひび割れ”が顕著に現れてきた. 変位角 1.0%rad. (1/100) で, RC±3, RC±6 の試験体で, 圧縮力作用時に“斜め貫通ひび割れ”が発現し, さらに増大進展して鉛直保持能力の限界の様相を呈した. 一方, CRC±3, CRC±6 の試験体では, “せん断ひび割れ”は増大するが, 鉛直ひずみ量から見ると鉛直保持能力は維持できていた. RC±3, RC±6 の試験体ともに変位角が 1.5%rad. (1/67) に至るまでの最大せん断耐力を超えると, “斜め貫通ひび割れ”が進展していくことにより軸崩壊に至った. CRC±3, CRC±6 の試験体では, 変位角が 2.5%rad. (1/40) まで軸崩壊を生じず, 鉛直支持能力を維持していた. (付録2に限界保有水平耐力時のひび割れ状況を示す.)

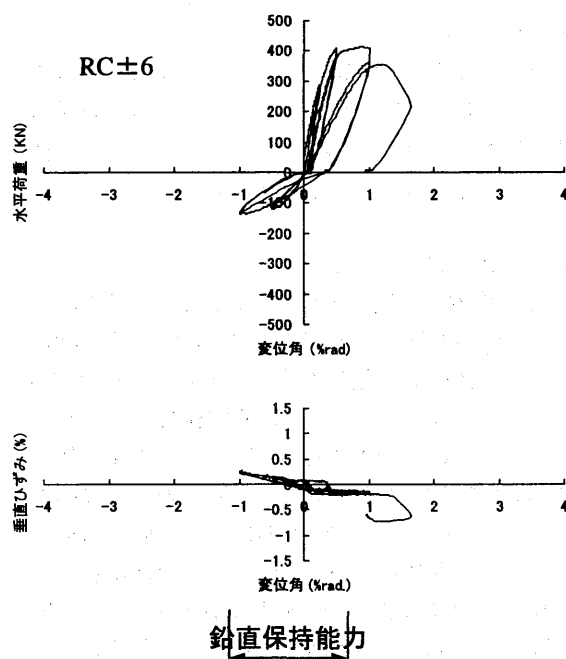
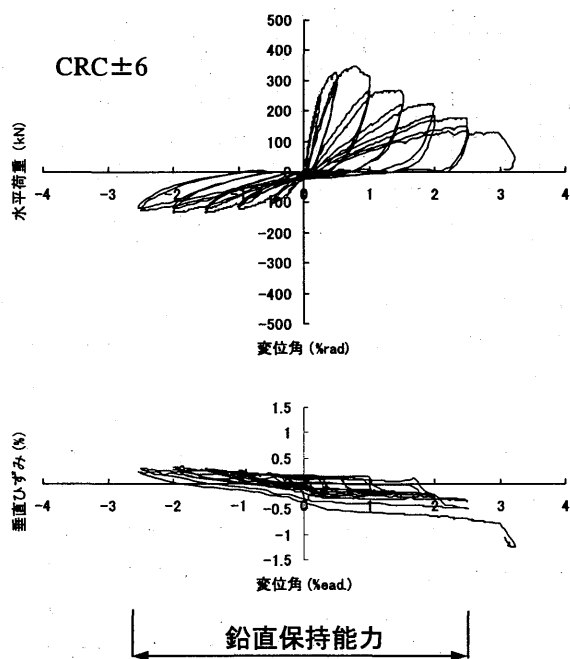
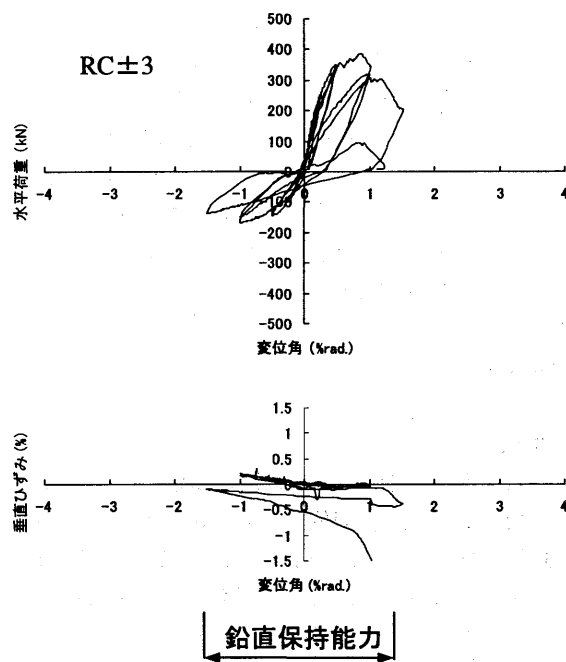
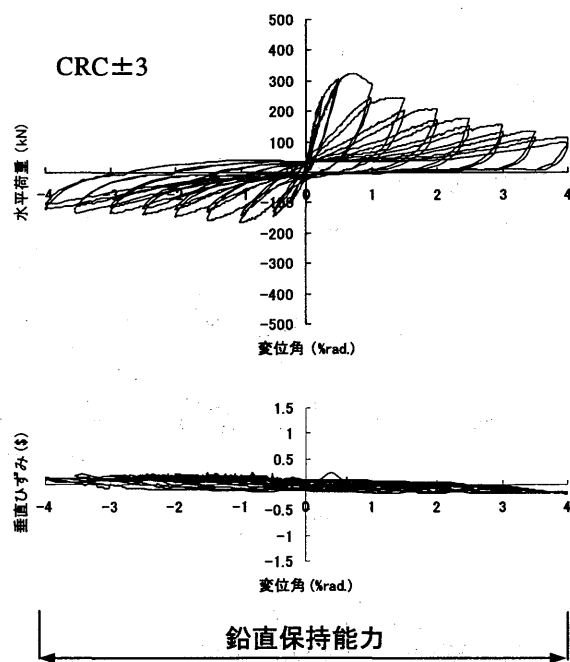


図-4 履歴性状

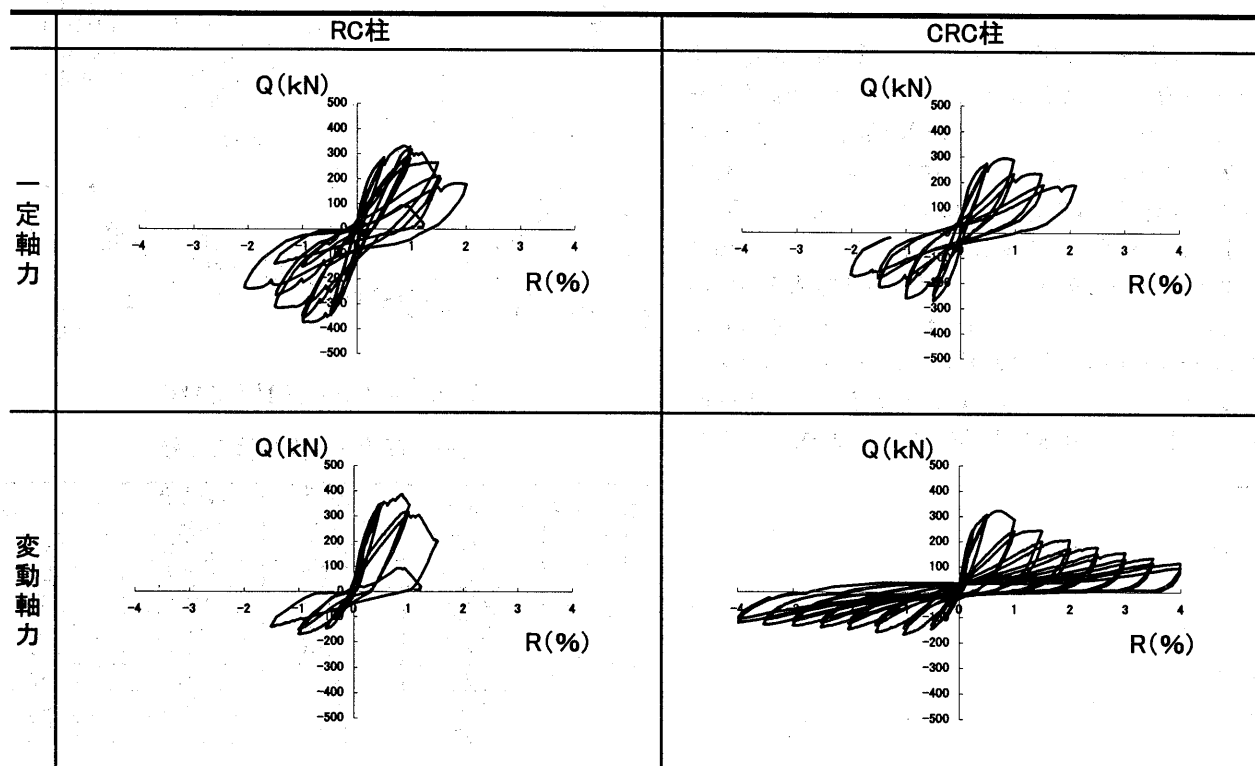
#### 4.1 一定軸力下での実験との比較

今回の試験体と同じ形状寸法、配筋で、一定圧縮軸力（軸力比  $n=0.3N_c, 0.6N_c$ ）のもとでの正負交番繰返し載荷実験を 1998 年に行っている<sup>[3]</sup>。その時の荷重変形曲線と今回のものを比較したのが図-5 である。縦軸はせん断力 (kN)、横軸は変形角 (%rad.) である。

一定軸力のもとでの実験は載荷荷重が最大耐力の 75% になった時点で載荷を中止しているため、どの試験体も

軸崩壊に至っていない。一定軸力のもとでは正加力、負加力時とも同じ履歴ループになっているが、変動軸力のもとでは引張時の剛性、耐力は圧縮時の 40% 程度まで小さくなっている。この比較から、実構造物の中柱と側柱、隅柱の挙動の違いが把握できる。また、地震により 1 スパン連層耐震壁架構の 1 階ピロティ柱が崩壊に至った原因も概ね推測できる。

n=0.3



n=0.6

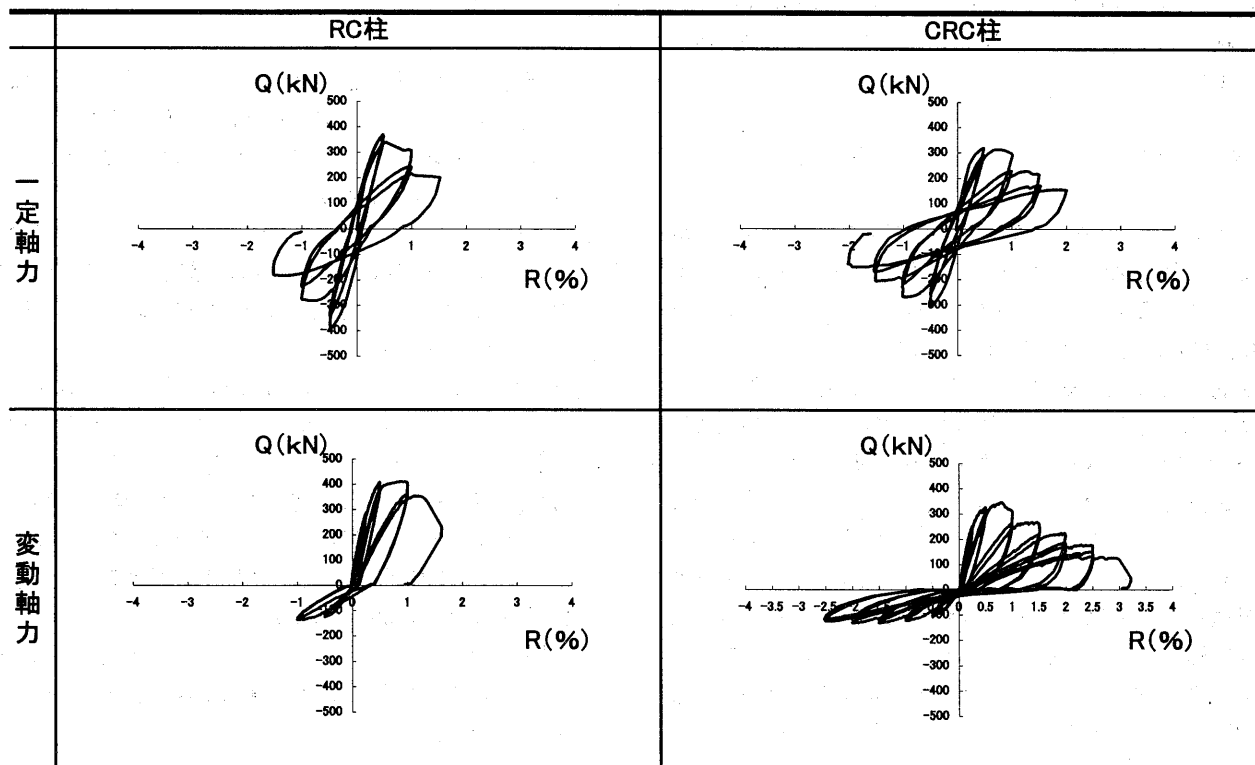


図-5 履歴性状の比較

## 4.2 最大せん断力の評価

各試験体の最大せん断耐力を、トラス機構による強度とアーチ機構による強度に対して一般化累加強度理論を適用して評価する。一般化累加強度理論による圧縮力  $N$ -せん断力  $Q$  相関曲線上に実験値をプロットしたものを図-6に、実験値と理論値を比較したものを表-5示す。CRC 柱のせん断耐力の計算には、芯コンクリート部は非常にスレンダーな形状であること、曲げ補強筋がないこと、定着されていないこと等の理由により、せん断に対してほとんど抵抗しないと考えられるため、芯コンクリート部を控除した中空 RC 断面を等価な長方形断面に置換し、下式により求めた等価柱幅  $b'$  と柱せい  $D$  を用いた。

$$b' = (b \cdot D - A_p) / D$$

ここで、

$b$  : 柱幅

$D$  : 柱せい

$A_p$  : 芯コンクリート断面積

等価柱幅を採用したことで、高軸力時の CRC 柱のせん断耐力は精度よく評価できている。また、低軸力 ( $N \leq 0.3N_c$ ) の範囲では等価柱幅を用いなくても CRC 柱の最大せん断耐力を評価できている。引張軸力作用時は、トラス機構のみの耐力となるが、実験結果は余裕のある値となっている。

## 5. 結語

既往の研究<sup>[1]~[5]</sup>では、RC 柱に有利である一定軸圧縮力下による履歴特性を評価してきた。今回の実験で、コンクリートの弱点である引張力を作用させたことにより RC 柱、CRC 柱の崩壊過程に以下に示すような明らかな違いが認められた。RC 柱は、柱せいの中央部あたりまでの“曲げ引張りひび割れ”が原因で“斜め貫通ひび割れ”を誘発し、軸力を保持できず軸崩壊を起こした。

- 1) CRC 柱は、柱せいの中央部あたりまでの“曲げ引張りひび割れ”と“せん断ひび割れ”が増大しても鉛直保持能力があり、芯コンクリートの有効性が証明できた。
- 2) 履歴特性からは、引張軸力時のせん断耐力および剛性が圧縮軸力時の 5 割以下になっており、応答解析時の復元力特性のモデル化に反映する必要性が判明した。
- 3) RC 柱が地震動により崩壊する過程は、“斜め引張りひび割れ”が主原因であると考えられる。

今回の実験での成果は、ひび割れ状況を追跡していくことで“斜め貫通ひび割れ”を把握できたことである。この“斜め貫通ひび割れ”を防止するために帯筋比を増やすこ

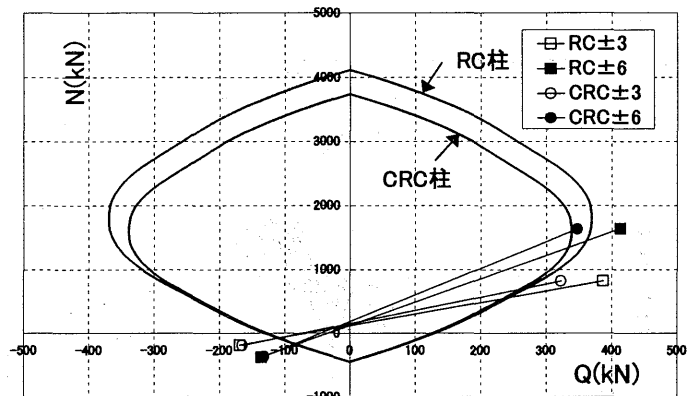


図-6 最大せん断耐力の評価

表-5 理論値と実験値の比較

試験体名	作用軸力比	実験値 $Q_{exp}(kN)$	理論値 $Q_{su}(kN)$	$Q_{exp}/Q_{su}$
RC±3	+0.3Nc	387.0	288.0	1.344
	-0.3Nt	-169.0	-79.7	2.120
RC±6	+0.6Nc	413.0	368.0	1.122
	-0.6Nt	-136.0	-25.7	5.292
CRC±3	+0.3Nc	323.0	280.0	1.154
	-0.3Nt	-165.0	-78.7	2.097
CRC±6	+0.6Nc	347.0	338.0	1.027
	-0.6Nt	-132.0	-25.0	5.280

とが解決策になりえるかは、今後の更なる研究を必要とする。

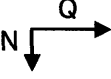
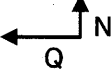
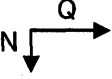
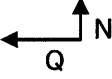
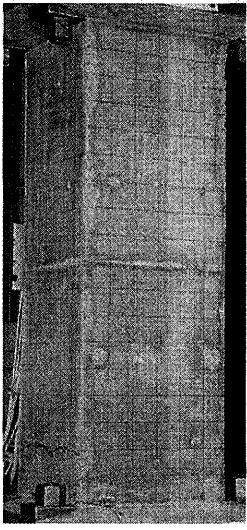
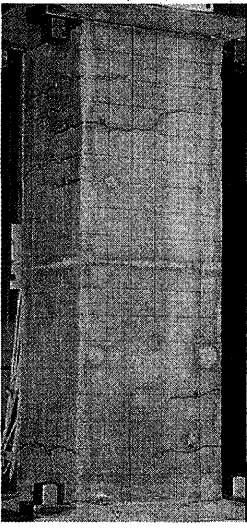
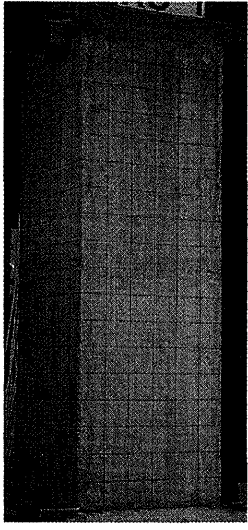
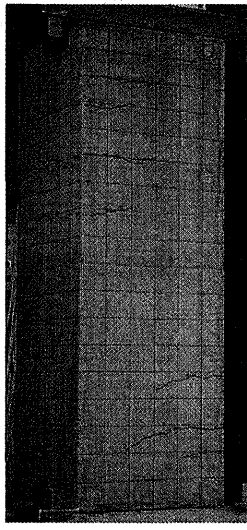
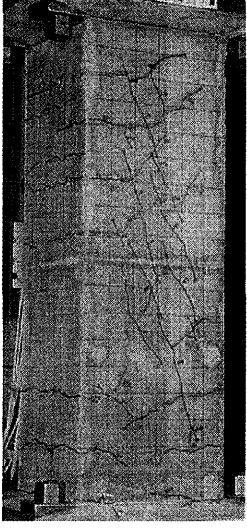
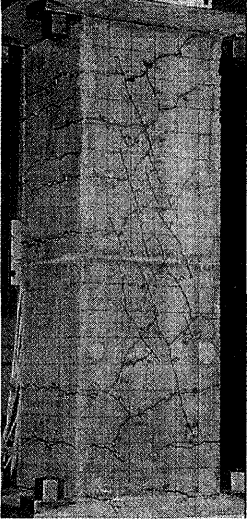
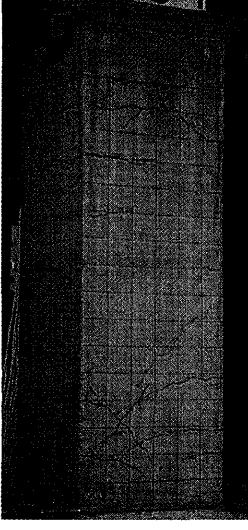
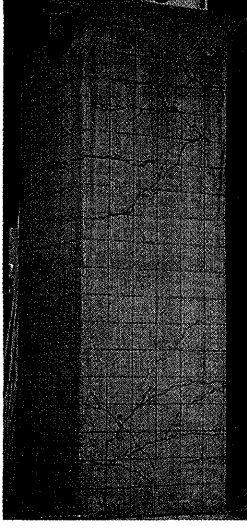
## 6. 参考文献

- [1] 佐藤, 和田, 南, 他: 薄肉スパイラル鋼管で補強した柱の力学的挙動に関する基礎的研究(その1~その4), 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-2, 構造IV, pp1103-1110, 1998. 9
- [2] 佐藤, 和田, 南, 他: 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5~その8), 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-2, 構造IV, pp1291-1298, 1999. 9
- [3] 佐藤, 和田, 南, 他: RC柱のじん性に対する薄肉スパイラル鋼管の補強効果, コンクリート工学年次論文集 Vol. 21, No. 1, pp301-306, 1999. 7
- [4] 佐藤, 和田, 南, 他: 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9~その11), 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-2, 構造IV, pp1101-1106, 2000. 9
- [5] 佐藤, 和田, 南, 他: 芯コンクリートを有するRC柱の力学的特性と設計法, 構造工学論文集 Vol. 46B, pp229-240, 2000. 3

【謝意】本実験は、平成15年度建築学科卒業生 田中秀行氏(現まるなか建設)の卒業研究の一部として実施されたものである。ここに記して深甚の謝意を表します。

付録1 ひび割れ状況の比較

(1) 軸力比  $n=0.3N_c \sim 0.3N_t$

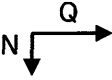
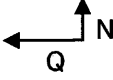
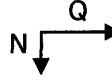
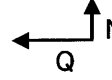
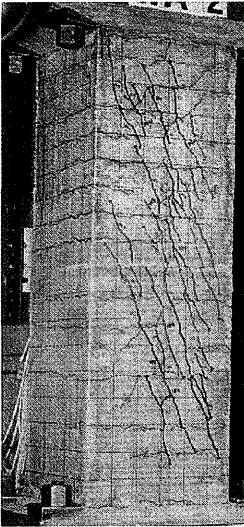
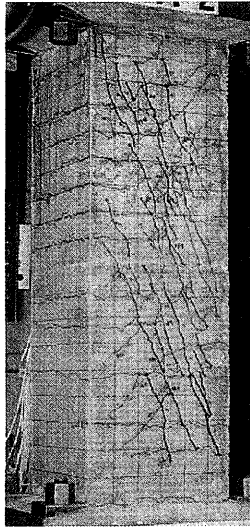
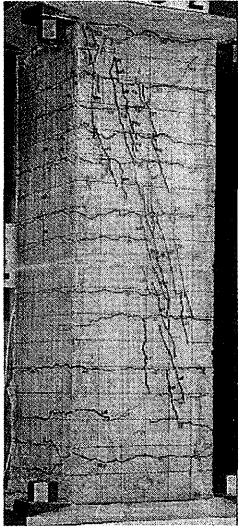
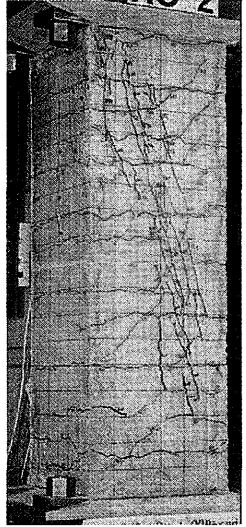
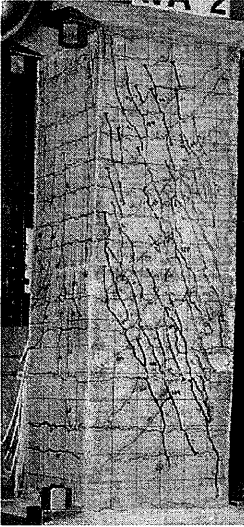
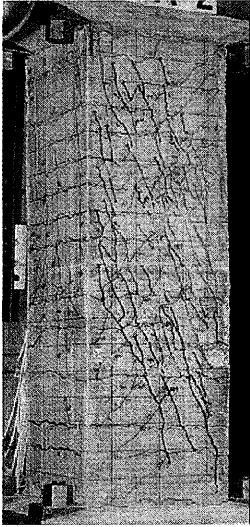
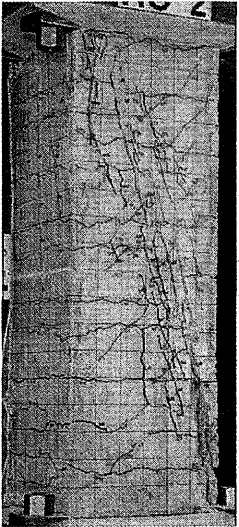
変位角 (rad)	CRC±3		RC±3	
				
	圧縮(810kN)	引張(-185kN)	圧縮(810kN)	引張(-185kN)
1/400 (0.25%rad.)	 <p>Q=247kN</p>	 <p>Q=-101kN</p>	 <p>Q=250kN</p>	 <p>Q=-100kN</p>
<p>RC±3, CRC±3ともに载荷開始時から1/400radまでは圧縮, 引張の両軸力時とも“曲げ引張ひび割れ”性状に大きな差異は認められないが, RC±3の方が曲げ引張ひび割れが柱中央部まで進展している。せん断剛性は, 圧縮側で109kN/mm, 引張側で44kN/mmである。</p>				
1/200 (0.50%rad.)	 <p>Q=307kN(最大耐力)</p>	 <p>Q=-145kN</p>	 <p>Q=343kN</p>	 <p>Q=-139kN</p>
<p>1/200rad.では, 両試験体ともに“せん断ひび割れ”のみが発現し増加している。その数はCRC±3の方が多い。RC±3のひび割れは輪切り貫通型の様相を呈している。せん断剛性は, 圧縮側で78(RC),70(CRC)kN/mm, 引張側で32kN/mmである。RC±3は主筋が降伏し, CRC±3は帯筋が降伏した。</p>				

変位角 (rad)	CRC±3		RC±3	
	圧縮(810kN)	引張(-185kN)	圧縮(810kN)	引張(-185kN)
1/100 (1.00rad.)				
	Q=288kN	Q=-165kN	Q=350kN(最大耐力)	Q=-144kN
RC±3は“斜め貫通ひび割れ”が発現し、崩壊の様相を呈した。CRC±3はせん断ひび割れが全面に発現した状態であるが、芯コンクリートで“斜め貫通ひび割れ”の発生を阻止し鉛直保持能力を維持した。引張時は、両試験体ともせん断ひび割れが増加したが現状を維持した。CRC±3は主筋が圧縮降伏、RC±3は帯筋が引張降伏している。				
1/67 (1.50rad.)				
	Q=244kN	Q=-156kN	Q=202kN	Q=-139kN
RC±3は1/100rad.を超えると鉛直保持能力が低下し軸崩壊に至った。CRC±3はせん断ひび割れがさらに増加し、同時にひび割れ幅も拡大していったが、1/25rad.まで鉛直保持能力を維持し続けた。				

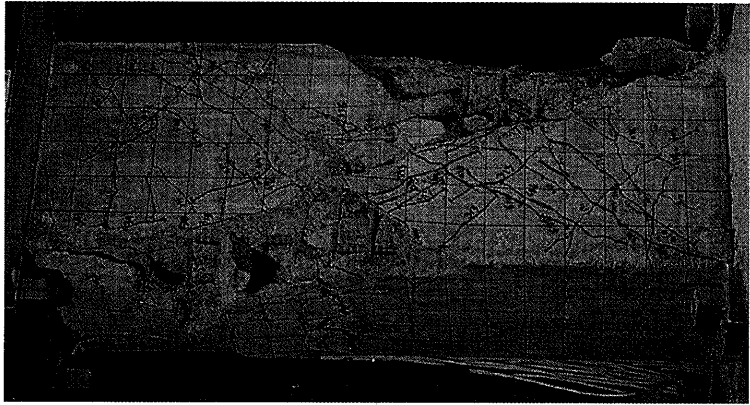
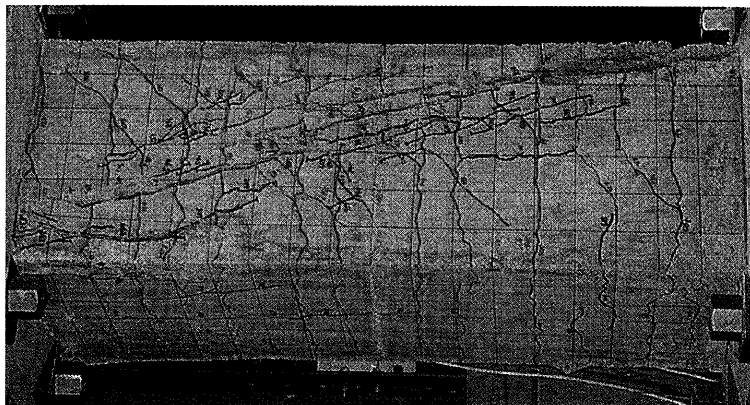
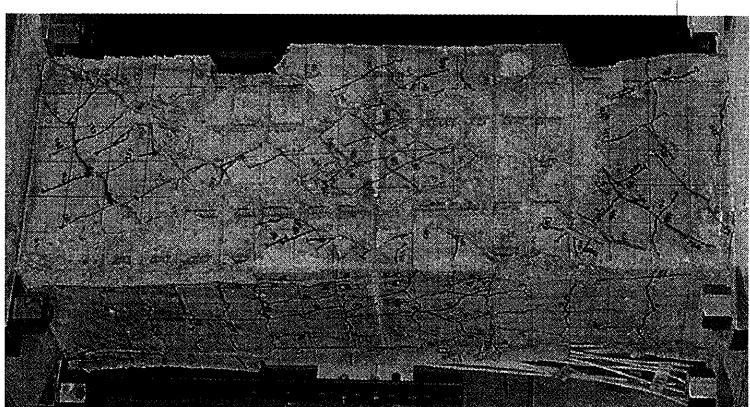
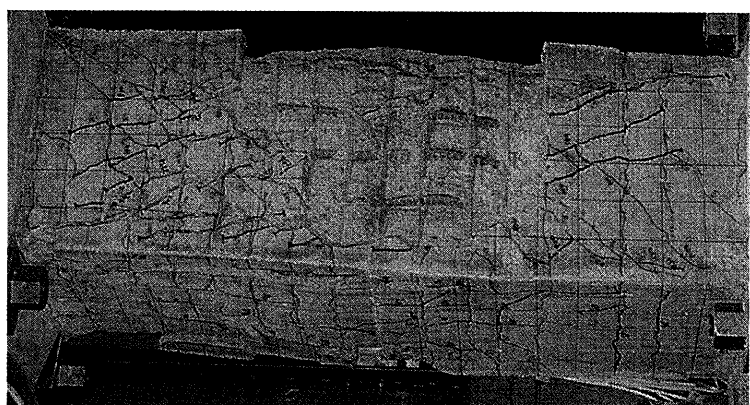


(2) 軸力比  $n=0.6N_c \sim 0.6N_t$

変位角 (rad)	CRC±6		RC±6	
	圧縮(1620kN)	引張(-365kN)	圧縮(1620kN)	引張(-365kN)
1/400 (0.25%rad)				
	Q=252kN	Q=-77kN	Q=288kN	Q=-87kN
両試験体ともに荷重開始時から1/400rad.までは圧縮、引張の両軸力時とも“曲げ引張ひび割れ”性状に大きな差異は認められないが、RC±6の方が曲げ引張ひび割れが柱中央部まで進展している。帯筋位置に集中しているのが特徴的である。せん断剛性は、圧縮側で128kN/mm, 引張側で40kN/mmである。				
1/200 (0.50%rad)				
	Q=302kN	Q=-93kN	Q=378kN	Q=-116kN
1/200rad.では、CRC±6に“せん断ひび割れ”が発現し増加している。RC±6の方は数箇所である。RC±6のひび割れは輪切り貫通型の様相を呈している。せん断剛性は、圧縮側で84(RC),70(CRC)kN/mm, 引張側で26kN/mmである。両試験体とも主筋が降伏し、CRC±6は帯筋も降伏した。				

変位角 (rad)	CRC±6		RC±6	
				
	圧縮(1620kN)	引張(-365kN)	圧縮(1620kN)	引張(-365kN)
1/100 (1.00%rad)	 Q=311kN(最大耐力)	 Q=-121kN	 Q=407kN(最大耐力)	 Q=-135kN
RC±6は“斜め貫通ひび割れ”が発現し、崩壊の様相を呈した。CRC±6はせん断ひび割れが全面に発現した状態であるが、芯コンクリートで“斜め貫通ひび割れ”の発生を阻止し鉛直保持能力を維持した。引張時は、両試験体ともせん断ひび割れが増加したが現状を維持した。RC±6は帯筋が降伏した。				
1/67 (1.50%rad)	 Q=262kN	 Q=-131kN	 Q=233kN	
RC±6は1/100radを超えると鉛直保持能力が低下し軸崩壊に至った。CRC±6はせん断ひび割れがさらに増加し、同時にひび割れ幅も拡大していったが、1/40radまで鉛直保持能力を維持し続けた。				

付録 2 限界保有水平耐力時のひび割れ状況

RC±3	RC±6	CRC±3	CRC±6
			
$R_{max} = 4.0\%rad.(1/25)$ $\text{圧} Q = 120kN$ $\text{引} Q = 120kN$	$R_{max} = 1.5\%rad.(1/67)$ $\text{圧} Q = 200kN$ $\text{引} Q = 130kN$	$R_{max} = 2.5\%rad.(1/40)$ $\text{圧} Q = 150kN$ $\text{引} Q = 120kN$	$R_{max} = 1.0\%rad.(1/100)$ $\text{圧} Q = 350kN$ $\text{引} Q = 130kN$
<ul style="list-style-type: none"> <li>・鉛直保持能力保持</li> <li>・被りコンクリート剥離</li> <li>・WPは柱頭部で引張降伏</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・鉛直保持能力喪失</li> <li>・主筋座屈</li> <li>・帯筋破断</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・鉛直保持能力保持</li> <li>・被りコンクリート剥離</li> <li>・WPは柱頭部で引張降伏</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・鉛直保持能力喪失</li> <li>・主筋のひずみはRC±3より大きい</li> </ul>