

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 Columns Using Steel Spiral Thin Tubes

Minae FUKUHARA* and Koichi MINAMI**

ABSTRACT

This paper describes the ductility of ordinary RC columns (called ORC columns) and new system RC columns (called CRC columns) with core concrete confined thin steel spiral tube (called WP), reversed cyclic lateral loading. Axial load is the constant axial load and the varying axial load. Eight specimens are tested. The applied axial loads are four type of $0.3F_c$, $0.6F_c$, $0.3F_c \sim 0.3A_g s_y$ and $0.6F_c \sim 0.6A_g s_y$. 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, 残存軸方向耐力, 鉛直方向ひずみ
keywords : Core concrete, Thin steel spiral tube, Remaining axial strength,
Axial strain

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解明するために, 一定軸力時および正負変動軸力時の挙動

を, 変位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“一般鉄筋コンクリート(以下, ORC と称す)柱”と“WPを挿入した芯コンクリート(以下, CRC と称す)柱”の2種類である。

なお, CRC 柱のコア部分を拘束する WP は厚さ 0.4mm と大変薄いもので, 写真-1 に示す形状の中空スラブおよび空調設備のダクトに採用されている製品である。

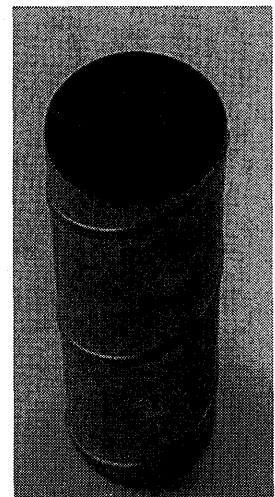


写真-1 WP形状

*大学院工学研究科建築学専攻 **工学部建築学科

2. 実験

2.1 実験計画

表-1に実験計画を示す。変動因子は、载荷する軸力比およびWPの有無のみである。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、一定軸力時(Cシリーズ)は $n=+0.3, +0.6$ 、変動軸力時(Vシリーズ)は $n=\pm 0.3, \pm 0.6$ の各2種類(計4種類)とした。試験体はCRC柱各2体(計4体)とWPの拘束効果を明確にするための通常のORC柱各2体(計4体)の合計8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(柱内法部) 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 $b \times D=300\text{mm} \times 300\text{mm}$ (b :断面幅, D :断面せい)

表-1 実験計画

シリーズ	試験体名	柱形状	鋼管長さ(mm)	圧縮軸力比(nc)	引張軸力比(nt)
C	CRC3C	CRC	900	0.3	—
	CRC6C			0.6	—
	ORC3C	ORC	—	0.3	—
	ORC6C			0.6	—
V	CRC3V	CRC	900	0.3	-0.3
	CRC6V			0.6	-0.6
	ORC3V	ORC	—	0.3	-0.3
	ORC6V			0.6	-0.6

注1) 軸力は圧縮軸力を正とする

注2) ここに、

$$nc = N/bD \sigma_B, nt = N/Ag \cdot s \sigma_y$$

b, D, σ_B : 柱幅, 柱せい, コンクリート強度

$Ag, s \sigma_y$: 主筋の断面積, 降伏強度

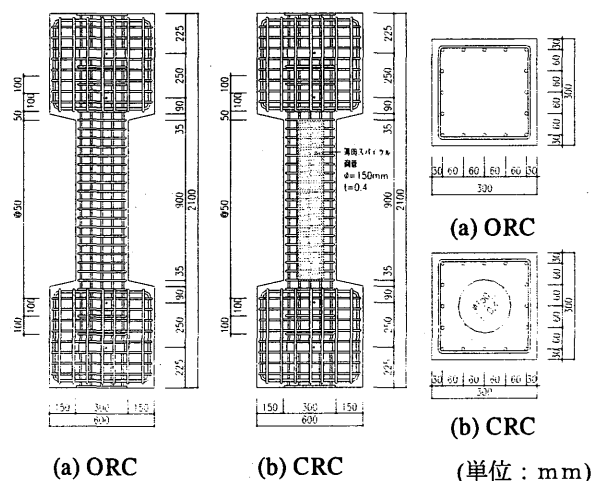


図-1 試験体形状

とし、使用したWPは管径比 $\phi/D=0.50$ となるよう $150\phi \times t0.4$ 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。

表-2 鋼材の機械的性質

シリーズ	種別	材質	降伏点(N/mm ²)	引張強度(N/mm ²)	破断伸び(%)
C	D6	SD295A	350	506	10.1
	D13	SD295A	346	242	22.4
	WP	SGCCR	294	384	20.5
V	D6	SD295A	334	494	11.3
	D13	SD295A	350	531	16.9
	WP	SGCCR	294	354	10.0

表-3 コンクリート強度

(単位: N/mm²)

シリーズ	設計基準強度	強度	強度推移			平均
			28日	実験開始時	実験終了時	
C	30	圧縮	24.1	29.2	28.9	29.0
		割裂	2.0	2.3	2.5	2.5
V	30	圧縮	35.0	38.4	40.9	39.6
		割裂	2.8	2.4	2.6	2.5

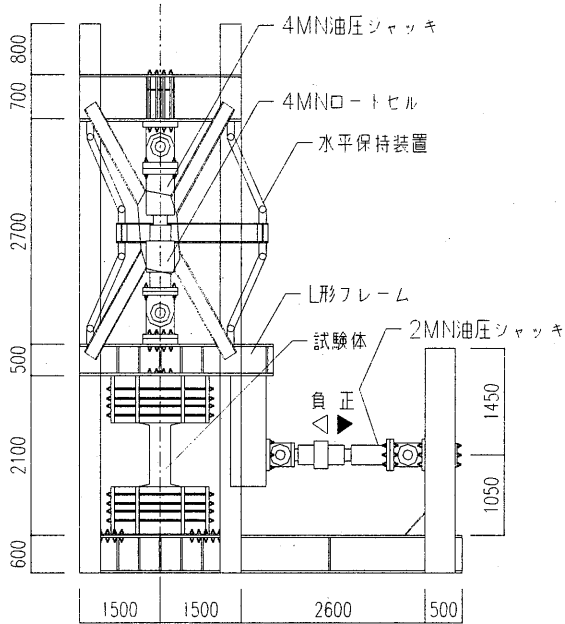
2.2 実験方法

载荷装置は、図-2に示す建研式载荷装置を用いた。载荷方法は一定軸力時は、圧縮軸力の载荷を行い、軸力を一定に保った状態で所定の変位部材角となるまで、水平荷重を加える。変位部材角は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。また、変動軸力時は、図-3に示すように、まず圧縮側に $n=0.3N_c$ ($N_c = bD \sigma_B$)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%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 $n=-0.3N_t$ ($N_t = Ag \cdot s \sigma_y$)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。ジャッキの戻り方向を正荷重、押す方向を負荷重とする。また、軸方向変位および水平方向変位は、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 履歴性状の比較

図-4に各試験体の包絡線を示す。縦軸に水平荷重 Q (kN),



(単位: mm)

図-2 荷重装置

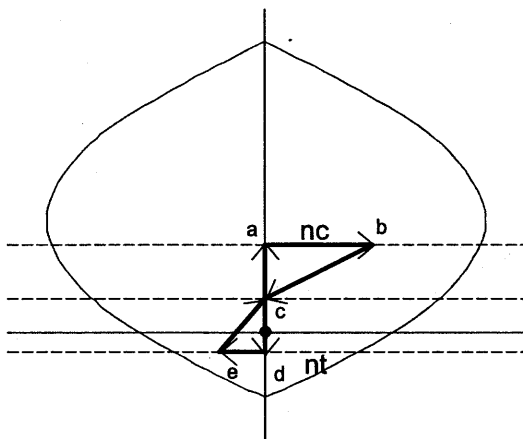
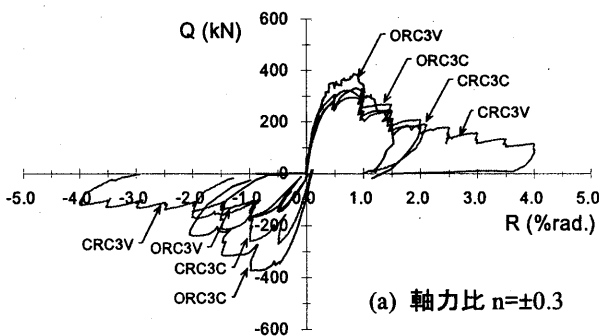
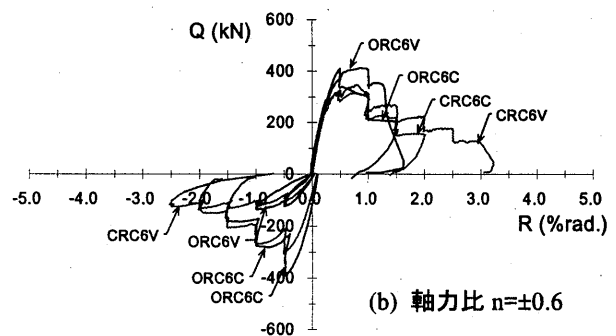


図-3 変動軸力時の荷重方法



(a) 軸力比 $n=\pm 0.3$



(b) 軸力比 $n=\pm 0.6$

図-4 包絡線

横軸に変位部材角 R (%rad.)を示す。Cシリーズ, Vシリーズともに最大耐力については, CRC柱はORC柱に比べ小さくなっているが, 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。CRC柱の最大耐力は, ORC柱の最大耐力の正荷重時では85%程度, Cシリーズ負荷重では75%程度となっているが, Vシリーズ負荷重時では, 97%とほぼ同等の耐力となっている。これは, WPを挿入して形成される芯コンクリートにより, WPの被りコンクリート部分が小さくなり, ひび割れが集中して発生し, 最大耐力が低下していると考えられる。また, Vシリーズ負荷重時(引張軸力時)においては, コンクリートは耐力にほとんど関与しないためORC柱とCRC柱の耐力はほぼ同等となっている。

一定軸力のもとでの実験は荷重荷重が最大耐力の75%になった時点で荷重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。

3.2 鉛直方向のひずみの推移

図-5 鉛直方向のピーク時のひずみの推移を示す。縦軸に鉛直方向のひずみ ϵ_n (%), 横軸に変位部材角に R (%rad.)を示す。(a), (b)に CRC 柱, ORC 柱を(c), (d)に軸力比 $n=0.3, 0.6$ を示す。軸方向ひずみの推移状況により, 薄肉スパイラル鋼管の影響をみる。ORC 柱は, 変位部材角 $R=1.0\%$ rad.で急激に軸方向ひずみが増加し軸力が保持できなくなっている。一方, CRC3C, CRC3V は他の試験体に比べ軸方向ひずみは小さく, 変位部材角 $R=4.0\%$ rad.まで軸方向ひずみの増加も小さく軸方向ひずみの急激な増加もなかった。CRC6C, CRC6V は CRC3C, CRC3V よりも軸方向ひずみの増加は大きいものの ORC 柱に比べ軸方向ひずみは小さく, 変位部材角 $R=2.0\%$ rad.まで急激な軸方向ひずみの増加はなく軸力支持能力は高い。また, CRC 柱の急激な軸方向ひずみの増加は, WP の有無違いのみが違う ORC 柱に比べ軸力が保持不可能になった変位部材角以降である。

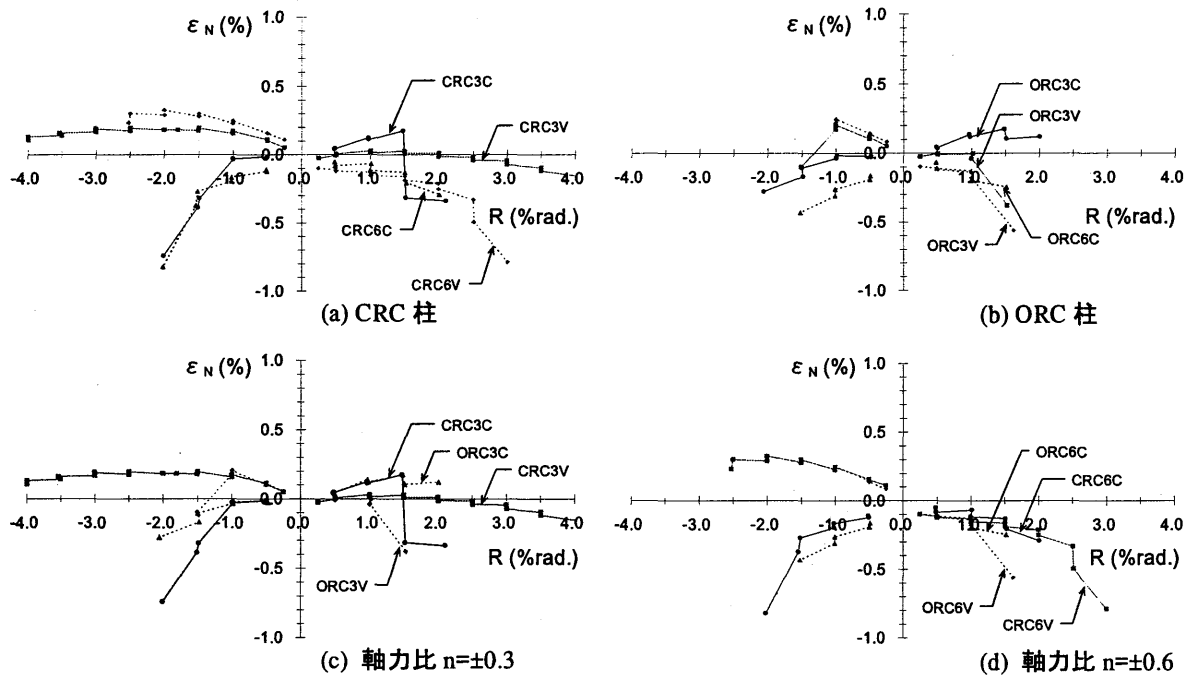


図-5 鉛直方向のひずみの推移

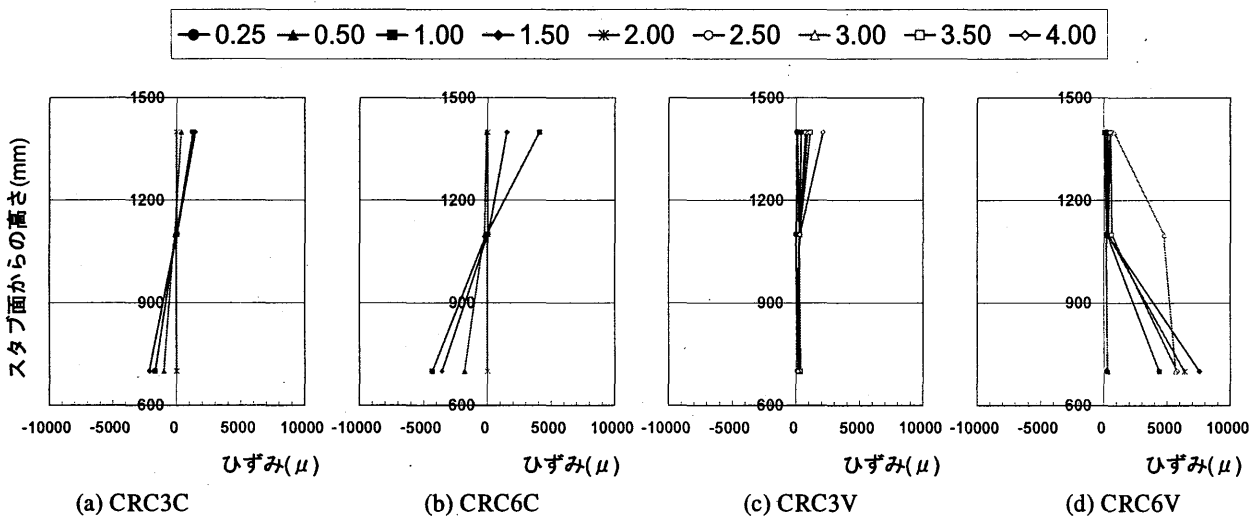


図-6 WPの円周方向のひずみの推移

3.3 WPのひずみの推移

図-6にWPの円周方向のひずみの推移を示す。縦軸に柱スタブ面からの高さ(mm)、横軸にひずみ(μ)を示す。CRC3C, CRC3Vにおいては最大ひずみが2000 μ 程度とWP自体の応力は小さく、あまりWPの効果が発揮されていない。一方、CRC6C, CRC6Vにおいては、変位部材角 $R=1.0\sim 1.5\%$ 付近より柱頭または柱脚においてひずみが大きくなり、WPが有効に働いていることがわかる。

4. 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を適用して評

価する。CRC試験体に対するせん断抵抗機構の概要を図-7に示す。RC部分のトラス機構(a)とアーチ機構(b)の抵抗機構をまず考え、薄肉スパイラル鋼管によって分断された上下のコンクリート部分によって構成されるアーチ機構(c)を考える。そして、薄肉スパイラル鋼管で拘束されたコンクリートについては、アーチ機構としての抵抗機構を示すが、本論ではこの機構による抵抗力は全体から見ると小さいので、圧縮力のみで抵抗すると考える(d)。これは、芯コンクリート部がスレンダーで曲げ補強筋がないこと、定着されてないことなどの理由により、せん断耐力の算定には、せん断に対してほとんど抵抗しないと考えられるためである。また、(d)の芯コンクリートはWPによる拘束の考慮を行っている。コンクリートの拘束効果は(1)式に示すRichardの

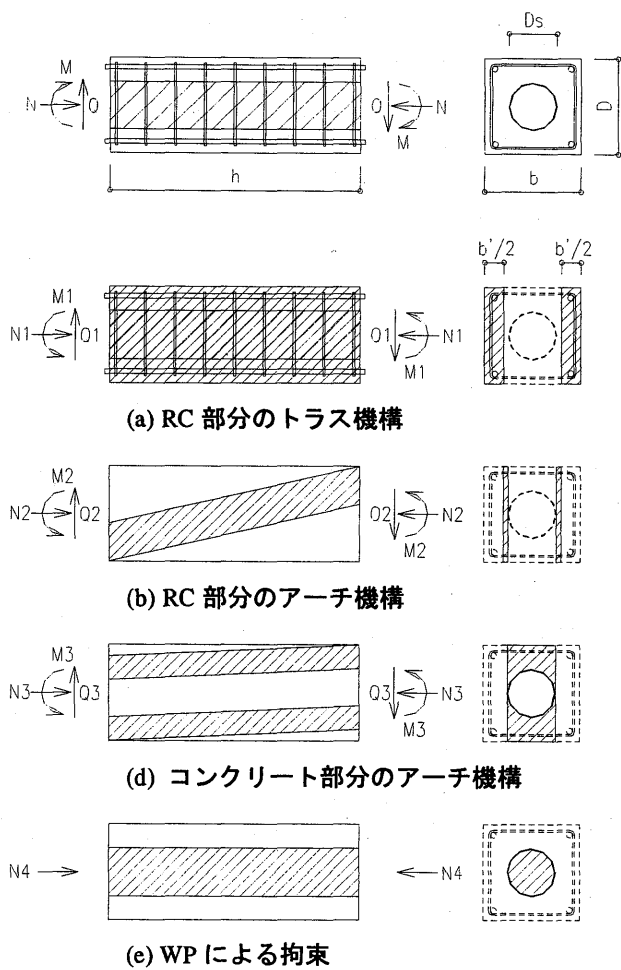


図-7 CRC 柱のせん断抵抗機構

式を用いた。

$$fcc' = \frac{2}{3} \cdot (c \cdot s_B + 4.1 \cdot c \cdot s_r) \quad (1)$$

$$c \cdot s_r = \frac{2 \cdot ts \cdot s_y}{Ds - 2 \cdot ts}$$

ここで、拘束効果考慮後のコンクリート強度: fcc'

コンクリートのシリンダー強度: $c \cdot s_B$

拘束している鋼管(WP)の降伏耐力: s_y

鋼管の厚み: ts

鋼管の直径: Ds

一般化累加強度理論による圧縮力 N (kN) とせん断力 Q (kN) の相関曲線に実験値をプロットしたものを図-8 に示す。縦軸に水平荷重 Q (kN), 横軸に変位部材角 R (%rad.) を示す。実験値は塗りつぶし印は正加力時の実験値, 白抜き印は負加力時の実験値を示している。実験結果一覧を表-4 に示す。CRC 柱と ORC 柱の耐力特性を比較すると, CRC 柱は WP を挿入することによって, RC 断面が分断化されるため, RC 部材としての断面積が小さくなり, せん断耐力は ORC 柱に対して小さくなる。しかし, 軸方向の圧縮耐力については, CRC 柱では, WP によって芯コンクリート部分の拘束により, 軸方向の抵抗力が増加する。CRC 柱の圧縮

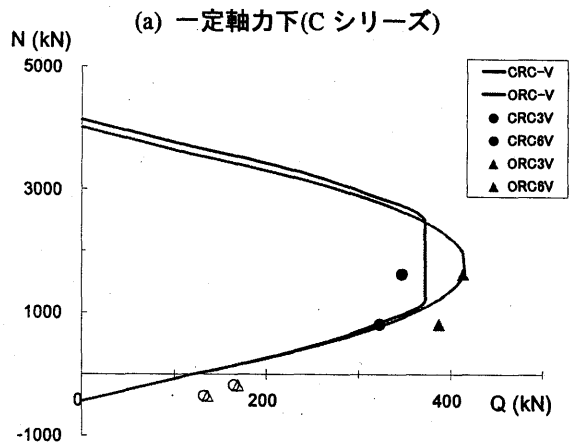
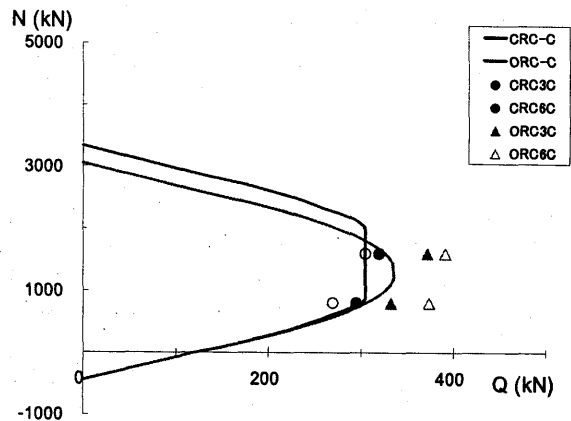


図-8 耐力の評価

表-4 実験結果一覧

(単位: kN(%rad.))

シリーズ	試験体名	作用軸力		最大耐力	
		nc	nt	Q_{max} (R_D)	$-Q_{max}$ ($-R_D$)
C	CRC3C	0.3Nc	-	295	270
				(1.0)	(0.5)
	CRC6C	0.6Nc	-	320	305
				(0.5)	(0.5)
ORC3C	0.3Nc	-	322	373	
			(1.0)	(1.0)	
ORC6C	0.6Nc	-	371	391	
			(0.5)	(0.5)	
V	CRC3V	0.3Nc	0.3Nt	323	165
				(1.0)	(1.0)
	CRC6V	0.6Nc	0.6Nt	347	132
				(1.0)	(1.5)
ORC3V	0.3Nc	0.3Nt	387	169	
			(1.0)	(1.0)	
ORC6V	0.6Nc	0.6Nt	413	136	
			(1.0)	(1.0)	

耐力は ORC 柱と比較して大きな特性が示されている。引張軸力時は、トラス機構のみの耐力となるが、余裕のある結果となっている。

5. 結語

一定軸力と変動軸力とを比較した場合、作用軸力が小さい場合は ORC 柱と CRC 柱の相違はほとんどなかったが、作用軸力が大きくなると、一定軸力の場合の変位履歴による軸方向の鉛直ひずみの累積が大きくなり RC 柱としての圧壊が生じやすくなるが、変動軸力の場合は鉛直ひずみの蓄積は小さく、特に芯コンクリート部分の累積が小さくなるのが特徴の一つとして考えられる。ORC 柱、CRC 柱は以下に示すような明らかな違いが認められた。

- 1) CRC 柱は、ORC 柱に比べ最大耐力は、一定軸力下では正加力時 10%、負加力時 20%、変動軸力時では、40%低下しているが、エネルギー吸収能力は高い。
- 2) CRC 柱は、WP を挿入することにより被覆コンクリートのひび割れが芯コンクリートに伝達しないため軸方向ひずみが急激に進まず、鉛直支持能力が高い。
- 3) CRC 柱に挿入している WP は、高軸力時に有効に働いている。
- 4) CRC 柱のせん断耐力は一般化累加強度理論を用いることにより、高軸力時において精度よく評価できている。

引張軸力側のせん断耐力の評価および挿入する WP 径(管径比)の影響は、今後の更なる研究を必要とする。

参考文献

- [1] 福原実苗, 宇吹哲昌, 渡辺誠司, 渚豊一, 和田勉, 佐藤立美, 南宏一: 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] 福原実苗, 宇吹哲昌, 渚豊一, 和田勉, 竹田浩三, 土居健二, 佐藤立美, 南宏一: 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] 福原実苗, 和田勉, 佐藤立美, 南宏一: 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] 福原実苗, 宇吹哲昌, 渚豊一, 和田勉, 土居健二, 佐藤立美, 南宏一: 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] 佐藤立美, 宇吹哲昌, 和田勉, 南宏一: 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

- [6] 西本憲治, 佐藤立美, 和田勉, 南宏一: 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 12), 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-2, 構造IV, pp483-484, 2001.9
- [7] 福原実苗, 岡本昌泰, 渚豊一, 和田弁, 佐藤立美, 南宏一: 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 14~その 16), 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-2, 構造IV, pp1077-1082, 2004.9
- [8] 福原実苗, 渚豊一, 和田勉, 南宏一: 変動軸力を受ける RC 柱の耐力と変形性能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.27, No.2, pp1255-1260, 2005.7

[謝意] V シリーズの実験は、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。