

論文 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拘束効果

福原 実苗^{*1}・渚 豊一^{*2}・和田 勉^{*3}・南 宏一^{*4}

要旨：圧縮・引張の変動軸力を受ける，コアコンクリートを薄肉スパイラル鋼管で補強した RC 柱（以下 CRC 柱と称する）の，せん断破壊にともなう軸力支持能力の喪失メカニズムを 4 体の試験体により実験的に明らかにした。軸力の範囲は $0.3F_c \sim 0.3A_g\sigma_y$ と $0.6F_c \sim 0.6A_g\sigma_y$ の 2 種類とした。高軸力変動時の通常の RC 柱はせん断破壊後に軸力支持能力を失うが，CRC 柱はせん断破壊後も軸力支持能力を保ち，コアコンクリートが軸力支持能力の確保に有効に働き，薄肉スパイラル鋼管の補強の有効性が確認された。

キーワード：薄肉スパイラル鋼管，鉄筋コンクリート柱，軸力支持能力，変動軸力

1. はじめに

1995 年の兵庫県南部地震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した原因を推測すると，設計荷重よりも過大または想定以外の地震力の入力作用した場合と部材の耐力不足が考えられる。

この軸崩壊を防止するには鉄筋コンクリート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軸力支持能力を確保することである。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で拘束することを考案し，せん断破壊に伴う軸力支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ており，その成果を報告してきた¹⁾。

論文 1)では，一定軸力時についてであったが，本稿では，薄肉スパイラル鋼管を挿入することによる効果をより詳細に解明するために，圧縮・引張の変動軸力をうける場合の柱のせん断耐力と軸力保持能力との関係について，実験を

行い挙動および耐力を検討する。

2. 実験概要

2.1 試験体

実験計画を表-1に示す。薄肉スパイラル鋼管を挿入したタイプを CRC 柱，RC 柱を ORC 柱とする。変動因子は，載荷する軸力比および薄肉スパイラル鋼管の有無である。軸力比は，圧縮軸力比 $nc(=N/bD\sigma_B)$ ，引張軸力比 $nt(=N/A_g\sigma_y)$ について，0.3，0.6 の 2 種類とした。試験体は

表-1 実験計画

試験体名	鋼管長さ (mm)	圧縮軸力比 (nc)	引張軸力比 (nt)
ORC3V	—	0.3	-0.3
ORC6V	—	0.6	-0.6
CRC3V	900	0.3	-0.3
CRC6V	900	0.6	-0.6

注 1) 軸力は圧縮軸力を正とする

注 2) ここに，

$$nc=N/bD\sigma_B, nt=N/A_g\sigma_y$$

b, D, σ_B : 柱幅，柱せい，コンクリート強度

A_g, σ_y : 主筋の断面積，降伏強度

*1 福山大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)

*2 大阪工業大学大学院博士課程後期, (株) 和田建築技術研究所 第 1 設計室 (正会員)

*3 (株) 和田建築技術研究所 所長 (正会員)

*4 福山大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

CRC 柱 2 体と薄肉スパイラル鋼管の拘束効果を明確にするための ORC 柱の 2 体の 4 体とする。

試験体の形状および断面構成を図-1 に示す。試験体のせん断補強筋は 2-D6 @50 (pw=0.42%)、主筋 16-D13 とし、薄肉スパイラル鋼管は直径 150mm、厚さ 0.4mm (管径比 $D_{S1}=\phi/D=0.50$) とし柱内法に配置した。コンクリート強度は、薄肉スパイラル鋼管内、被覆部ともに $F_c=30\text{N/mm}^2$ とする。

鋼材の材料強度を表-2、コンクリートの材料強度を表-3 にそれぞれ示す。実験は材令 42 日から 54 日の間に行った。

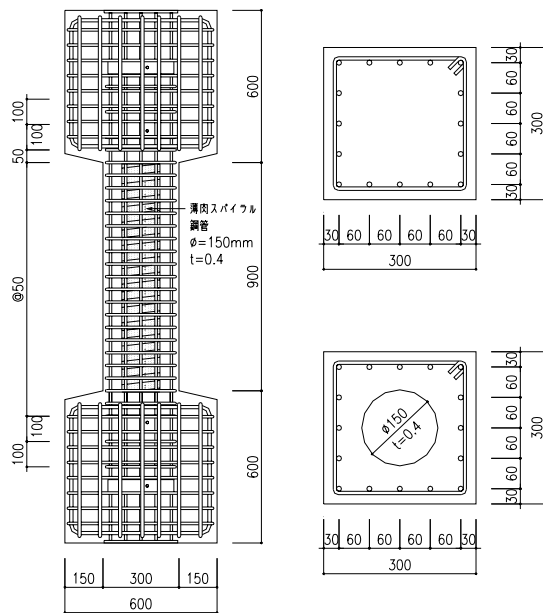


図-1 試験体の形状および断面構成

表-2 鋼材の材料強度

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

表-3 コンクリートの材料強度

材令 (日)	圧縮強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)
42	38.4	2.4
54	40.9	2.6

2.2 実験方法

実験は図-2 に示す建研式荷重装置を用いた。P- δ 効果の影響を図-3 および(1)式に示す。

荷重は、圧縮軸力または引張軸力を与えた状態での柱部材角の変位制御である。変位履歴は柱部材角 R (水平変位 δ /せん断スパン L) $=\pm 0.25$

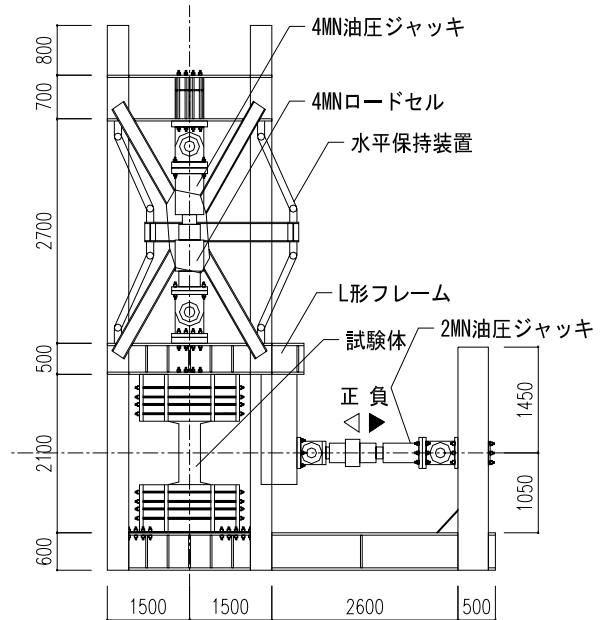


図-2 実験装置 (単位: mm)

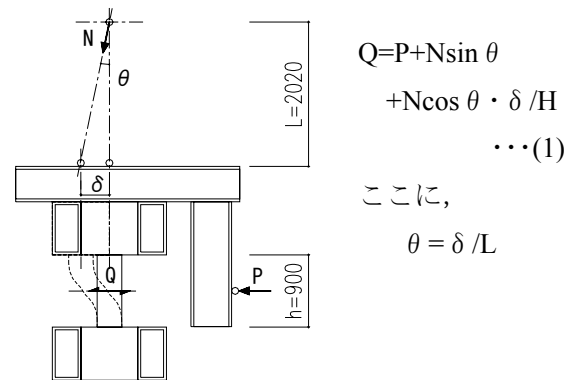


図-3 P- δ 効果の影響

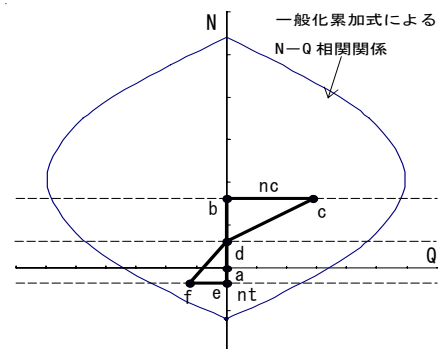


図-4 荷重履歴

%rad.で正負繰返し載荷を1サイクル行った後、 $R=\pm 0.5\%$ rad.を2サイクル繰返し、その後、 $\pm 0.5\%$ rad.増加させる毎に正負繰返し各2サイクルずつ載荷を行った。

載荷履歴を図-4に示し、軸力Nと水平荷重Qの載荷手順を以下に説明する。

- 1) 圧縮軸力(nc)を載荷する。(a→b)
- 2) 圧縮軸力を一定に保ち、所定のRに達するまで水平力Q(正荷重)を加力する。(b→c)
- 3) 圧縮軸力と引張軸力の中間値まで、水平力Q(正荷重)とともに除荷する。(c→d)
- 4) 引張軸力(nt)を載荷する。(d→e)
- 5) 引張軸力を一定に保ち、所定のRに達するまで水平力Q(負荷重)を加力する。(e→f)
- 6) 圧縮軸力と引張軸力の中間値まで、水平力Q(負荷重)とともに除荷する。(f→d)
- 7) 以後、同様とする。

軸方向の変位は、試験体上下端に固定した測定用ボルトに変位計を取り付け、柱内法のひずみを測定した。せん断補強筋のひずみは端軸ひずみゲージにより測定した。

3. 実験結果

3.1 破壊状況

表-4に実験結果一覧、図-5に終局時のひび割れ状況を示す。各試験体とも、圧縮軸力作用時に $R=0.25\%$ rad.(1/400)で曲げひび割れが発現した。引張軸力作用時には、柱せいの中央部まで曲げひび割れが進展した。次に、 $R=0.5\%$ rad.(1/200)で、CRC3V、ORC3Vはせん断ひび割れが

表-4 実験結果一覧(単位:kN(%rad.))

試験体名	せん断ひび割れ		最大耐力	
	正	負	正	負
	Q_D	$-Q_D$	Q_{max}	$-Q_{max}$
CRC3V	214	133	332	162
	0.5	0.5	0.5	0.5
CRC6V	324	92	366	124
	0.5	0.5	0.5	0.5
ORC3V	356	164	397	166
	1.0	1.0	0.5	0.5
ORC6V	431	130	434	131
	1.0	1.0	0.5	0.5





CRC3V	CRC6V	ORC3V	ORC6V
			
$R_u=4.0\%$ rad.(1/25)	$R_u=2.5\%$ rad.(1/40)	$R_u=1.5\%$ rad.(1/67)	$R_u=1.0\%$ rad.(1/100)
圧 $Q_{max} = 143\text{kN}$ 引 $Q_{max} = 93\text{kN}$	圧 $Q_{max} = 208\text{kN}$ 引 $Q_{max} = 105\text{kN}$	圧 $Q_{max} = 220\text{kN}$ 引 $Q_{max} = 134\text{kN}$	圧 $Q_{max} = 318\text{kN}$ 引 $Q_{max} = 124\text{kN}$

図-5 終局時のひび割れ状況

発現し徐々に増加していったが、ORC6Vでは曲げ引張ひび割れが進展し、CRC6Vではせん断ひび割れが顕著に現れた。R=1.0%rad.(1/100)で、ORC3V, ORC6Vは圧縮軸力作用時にせん断ひび割れが貫通し、ひび割れ幅が増大し軸力支持能力の限界となった。一方、CRC3V, CRC6V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軸力支持能力は維持できていた。ORC3V, ORC6Vの試験体ともに最大耐力を超えると、せん断ひび割れが貫通し、進展することにより軸力保持ができなくなり、軸崩壊に至った。CRC3VはR=4.0%rad.(1/25), CRC6VはR=2.5%rad.(1/40)まで軸崩壊を生じず、軸力支持能力を維持し続けた。

3.2 実験結果および履歴性状の比較

図-6に履歴性状を示す。履歴性状は、水平荷重Q(kN)と部材角R(%rad.)の関係と、軸方向ひずみε(%)と部材角R(%rad.)の関係を示す。また、○印は主筋引張降伏、●印は主筋圧縮降伏、□印は帯筋降伏、△印は薄肉スパイラル鋼管の水平方向における引張降伏、▲印は薄肉スパイラル鋼管の鉛直方向における引張降伏を示している。CRCは、最大耐力以降の耐力低下性状が、せん断破壊を生じる通常の充填被覆形円形鋼管コンクリート柱の履歴特性に類似し

ていることが観察される。最大耐力時の部材角はR=0.50%rad.であり、最終変位部材角までの履歴過程では保有強度は部材角の増加にともない減少し、部材角が大きくなるにしたがい耐力低下の割合は低下し平行四辺形の履歴曲線に近づいていく傾向がある。また、主筋と帯筋は最大耐力までに降伏しているのに対し、薄肉スパイラル鋼管はCRC3Vでは部材角R=2.0%rad., CRC6Vでは部材角R=1.0%rad., まで降伏していない。

薄肉スパイラル鋼管の有無により履歴曲線を比較すると、作用軸力の大きさに関わらず、薄肉スパイラル鋼管を挿入したCRC3V, CRC6Vは、最大耐力は小さいが、初期剛性はほとんど変わらず、最大耐力後の耐力低下の割合は低いことがわかる。

次に、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。ORC3V, ORC6Vは、部材角R=0.25%rad.の軸方向ひずみに対しほぼ比例的に増加し、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、CRC3Vは他の試験体に比べ軸方向ひずみは小さく、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。CRC6VはCRC3Vよりも軸方

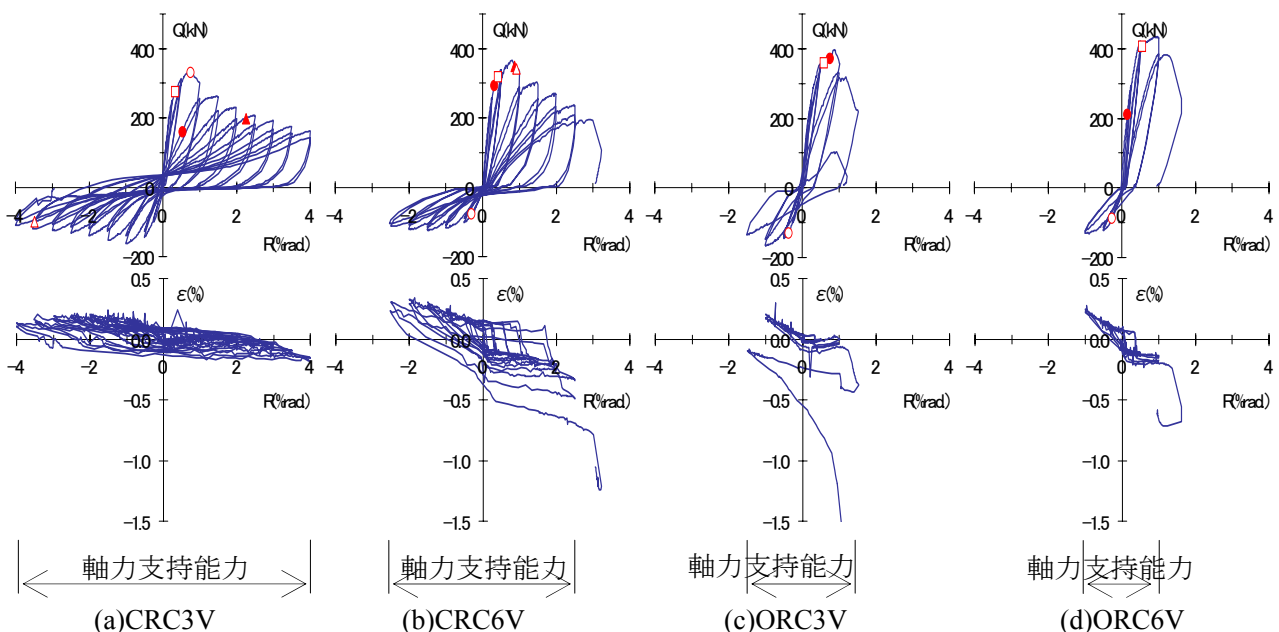


図-6 履歴性状

向ひずみの増加は大きいものの ORC3V, ORC6V に比べ軸方向ひずみは小さく、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。

3.3 せん断補強筋のひずみ状況

薄肉スパイラル鋼管の水平方向における影響をみるために、図-7にせん断補強筋のひずみ状況を示す。縦軸には、下部スタブ面からのひずみゲージ貼り付け高さを示す。

部材角 $R=0.5\%rad$, $1.0\%rad$ に着目する。全試験体とも、部材角 $R=1.0\%rad$ までにせん断補強筋は降伏している。CRC シリーズは ORC シリーズに比べ、初期段階よりひずみが大きい、これは、薄肉スパイラル鋼管を挿入することにより、被覆コンクリートのかぶり厚が小さくなり、また、薄肉スパイラル鋼管の付着がないためと考えられる。これは、薄肉スパイラル鋼管を挿入したことにより、最大耐力が低下した原因と考えられる。

3.4 最大せん断耐力の評価

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-8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みる

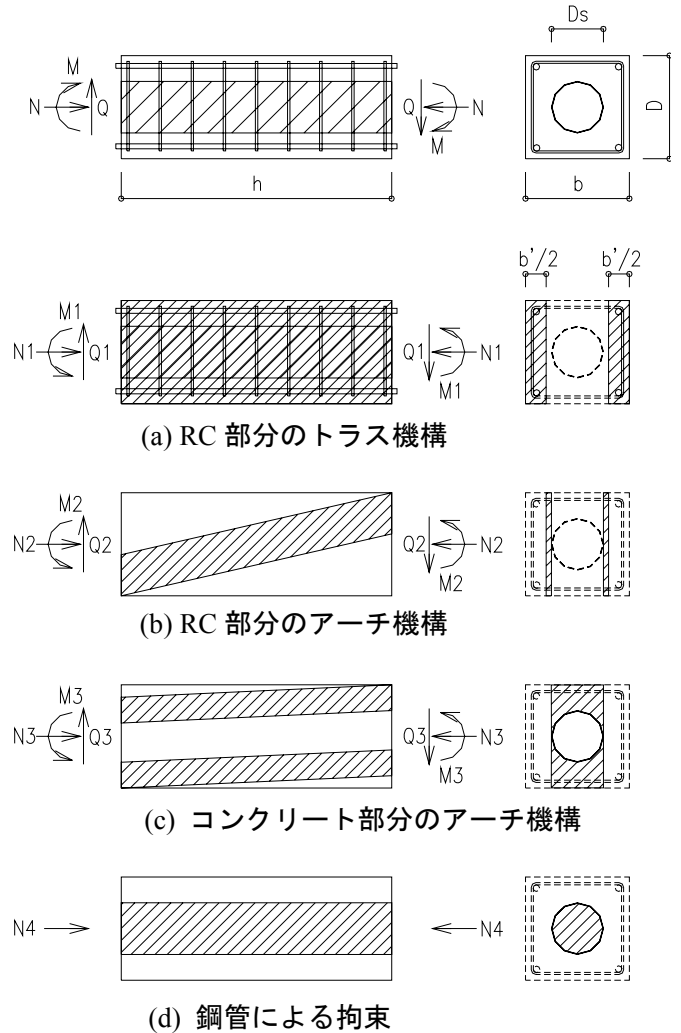


図-8 CRC 柱のせん断抵抗機構

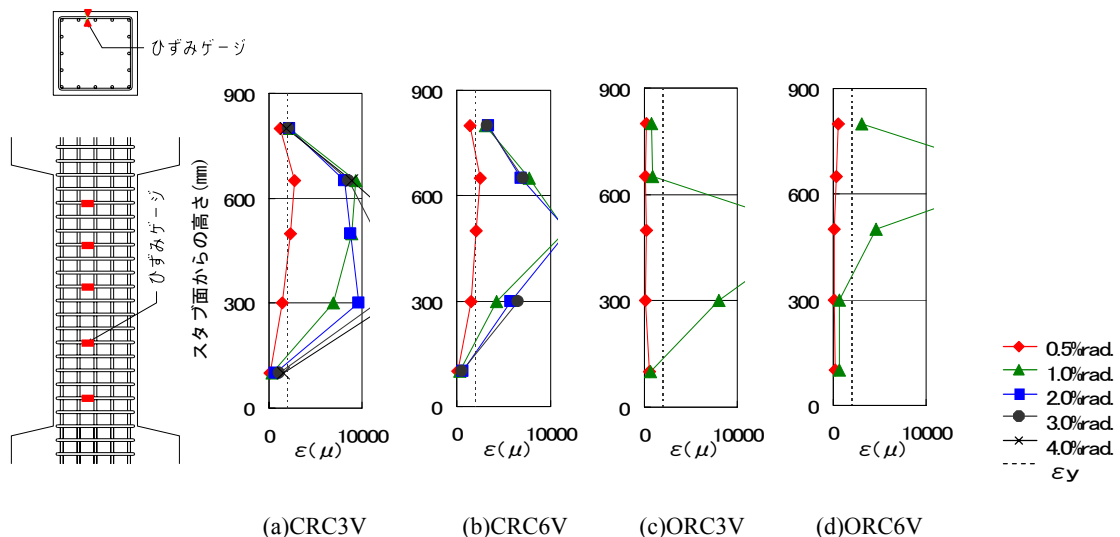


図-7 せん断補強筋のひずみの推移

と小さいので、圧縮力のみ抵抗すると考える(d)。これは、コアコンクリート部がスレンダーで曲げ補強筋がないこと、定着されてい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。

一般化累加強度理論による圧縮力 N (kN) とせん断力 Q (kN) の相関曲線上に実験値をプロットしたものを図-9に、実験値と理論値を比較したものを表-7に示す。CRC柱のせん断耐力は、高軸力時は精度よく評価できた。また、低軸力の範囲では等価断面に置換を行わなくても最大せん断耐力の評価が行えている。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。

4. まとめ

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、薄肉スパイラル鋼管を挿入することによる以下の違いが明らかになった。

- (1) ORC柱は、柱せいの中央部あたりまでの曲げ引張ひび割れによりせん断ひび割れが増大、貫通して、軸力支持能力を失い軸崩壊をおこした。
- (2) CRC柱は、柱せいの中央部あたりまでの曲げ引張ひび割れとせん断ひび割れが増大しても軸力支持能力があり、薄肉スパイラル鋼管を挿入することの有効性が明らかになった。
- (3) せん断補強筋のひずみの推移より、ORC柱は最大耐力以降のひずみの増加が小さく、薄肉スパイラル鋼管が有効に働いていると考えられる。
- (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。今後、低軸力時および引張軸力時の詳細な検討が必要である。

表-7 実験値と理論値の比較

試験体名	作用軸力	実験値	理論値	Qexp/Qsu
	N (kN)	Qexp (kN)	Qsu (kN)	
CRC3V	810	332	280	1.186
	-179	-162	-79	2.051
CRC6V	1620	366	338	1.083
	-358	-124	-25	4.960
ORC3V	810	397	288	1.378
	-179	-166	-78	2.128
ORC6V	1620	434	368	1.179
	-358	-131	-26	5.038

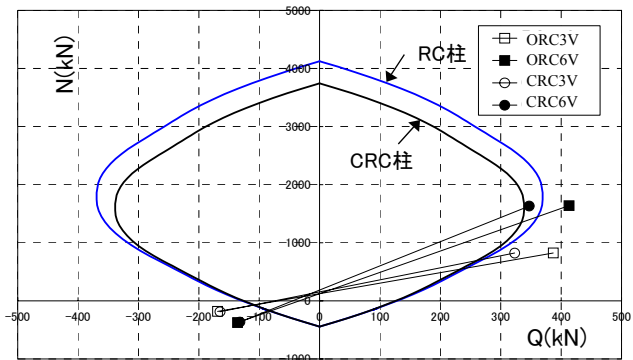


図-9 最大せん断耐力の評価

参考文献

- 1) 福原実苗, 和田勉, 佐藤立美, 南宏一: RC柱の耐力と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報告集, Vol.21, No.1, pp.301-306, 1999.5
- 2) 南宏一他: 薄肉スパイラル鋼管で補強効果したRC柱の力学的挙動に関する基礎的研究(その14~16), 日本建築学会学術講演梗概集, pp.1077-1082, 2004.9

謝辞

この研究を行うにあたって、広島工業大学 佐藤立美先生にご指導いただきました。ここに記して深甚の謝意の意を表します。