

高強度材料を用いた円形横拘束 RC 柱の耐震性能に関する研究

石原 淳平

1. 序

高強度コンクリートは、その高い耐力と耐久性を有することから、近年都市再開発の気運が高まるなか、高層建築構造への利用が増えつつある。一方、地震活動が世界で最も活発な日本で高強度コンクリートの利用をさらに促進していくには、材料固有の脆い破壊性質を改善するための工法の確立が求められる。

高強度コンクリートの脆い破壊性質を改善するには、帯筋や鋼管などを用いた横拘束方法が有効であることが知られている。特に、長方形断面を有する高強度 RC 部材の耐震性能については、NewRC プロジェクトをはじめとして、近年多くの研究がなされており、帯筋や鋼管横拘束法の有効性のみならず、横拘束材による拘束度合いと部材の耐震性能との相関関係を定量的評価するための手法や計算式が多数提案されてきている。

一方、円形断面 RC 部材については、実構造物への適用が数多くあるにもかかわらず、その耐震性能に関する研究はそれほど多くなく、特に高強度コンクリートと高強度鉄筋を用いた円形 RC 柱に関する耐震研究が極めて乏しい。三宅らの研究¹⁾では、60N/mm²以上の高強度コンクリートを用いた円形 RC 部材の耐震性能に関する研究はほとんど報告されていないと指摘されている。

そこで、本研究は高強度材料を用いた円形 RC 柱の耐震挙動に関する基礎データを取得することを主たる目的として、高強度コンクリートと高強度主筋、また横拘束材として鋼管及び高強度スパイラル筋の二種類を用いた、円形 RC 柱について一定軸力下での繰り返し曲げせん断実験を行い、高強度円形 RC 柱の繰り返し履歴特性について調べてみた。

2. 試験体

試験体は、高層建築の最下階柱を模擬した 1/3 縮小モデルである直径 250mm の円形断面柱で、柱のせん断スパン比が 2.5 となっている。

高性能 RC 柱を製作するにあたって、拘束方法の違いによる耐震性能への影響を見るために、柱の拘束法には、スパイラル筋を用いる帯筋横拘束法と鋼管を用いる鋼管横拘束法の 2 種類を用いた。

図 1 には試験体の配筋詳細と寸法を示し、表 1 には試験体一覧を記す。表中の記号の意味は、 f_c' はシリンダー強度、 N は軸方向圧縮力、 η は軸力比、 V_{exp} は最大水平力の平均値、 R_{exp} は V_{exp} 時の部材角 (0.01rad)、 M_{exp} は軸力による付加モーメントを考慮した曲げ耐力の実験値である。

スパイラル筋拘束試験体と鋼管拘束試験体ともに、柱の主筋としては、8 本の K13 高強度異形鉄筋 (KW785) を断面周辺に均等配置し、主筋比は 2.07% となっている。また、スパイラル筋拘束試験体に用いたスパイラル筋には、リバーボン 1275 の異形鉄筋 RD5.1 の高強度鉄筋を用いた。図 2 に示す鋼材の引張応力-ひずみ関係から分かるように、これらの高強度異形鉄筋は、明瞭な降伏棚を有しない。

鋼管拘束試験体に用いた鋼管は、厚さが 2.3mm (径厚比 110.7) と 4.5mm (径厚比 57.6) の 2 種類である。鋼管は平板を折り曲げて溶接することによって製作したものである。

本実験における実験変数は、スパイラル筋拘束試験体ではスパイラル筋の間隔と軸力の大きさ、鋼管拘束試験体では径厚比と軸力の大きさである。スパイラル筋の間隔は 30mm と 60mm の二種類である。

表 1 円形断面試験体一覧

試験体名	拘束方法	横拘束材体積比 (%)	帯筋間隔 (mm)	管厚 (mm)	径厚比	f_c' (MPa)	N (kN)	η	V_{exp}	R_{exp}	M_{exp}
CHRC30N33	帯筋	1.11	30	—	—	87.3	1414	0.33	191.34	-1.9952	137.2
CHRC30N50						83.1	2040	0.50	210.06	-1.544	151.0
CHRC60N20		0.56	60			85.4	837	0.20	165.23	2.0112	113.8
CHRC60N33						87.0	1383	0.33	185.49	1.2592	126.8
CTHRC23N33	鋼管	3.71	—	2.3	110.7	87.1	1410	0.33	248.6	-2.0032	173.2
CTHRC23N50						87.6	2150	0.50	260.5	-1.4624	190.4
CTHRC45N33		7.33		4.5	57.6	87.1	1410	0.33	268.7	2.4144	190.0
CTHRC45N50						89.5	2196	0.50	308.73	2.4912	227.3

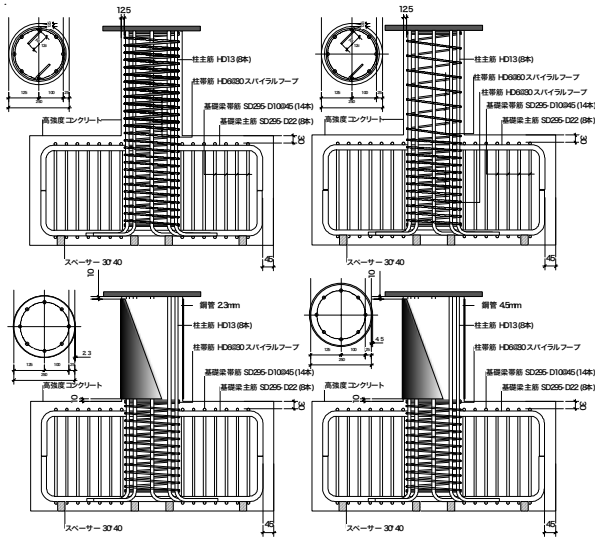


図1 円形断面試験体詳細

また、軸力比で表した軸力の大きさは、0.2、0.33 と 0.5 である。軸力比 0.2 に対応する軸力は、柱断面の初期サイズを見積もる際によく用いられる軸力レベルで、0.33 に対応する軸力は、日本建築学会の RC 構造計算基準で推奨されている、通常 RC 柱の軸力の上限值に対応するものとして取った値である。一方、軸力比 0.50 は高強度 RC 柱が鋼管で拘束されることにより高軸力下において安定した履歴性能と軸支持能力を維持することができるかどうかを検証するために取った値である。

コンクリートは、設計強度が 80N/mm^2 級の生コンを用いた。コンクリートに使用したセメントは普通ポルトランドセメントで、粗骨材には最大粒計 20mm の碎石を用いた。各試験体の実験材齢時のシリンダー強度は表 1 に記されている。

3. 加力および測定方法

一定軸力下における繰り返し曲げせん断実験は、柱の水平部材角 R により制御され、図 3 に示す加力装置を用いて積荷を行った。予定した載荷プログラムは図 3 に示す通りである。

柱の水平部材角 R は、上部の水平変位計で測定した水平加力ピン位置での水平変位を柱のせん断スパン (625mm) で割ることによって求めた。柱の平均的軸方向ひずみは、測定フレームに取り付けられた 4 つの鉛直変位計により測定した。

また、試験体には、柱主筋のひずみ、スパイラル筋のフープ方向ひずみ、鋼管表面のひずみを計測するために、歪みゲージをスパイラル筋拘束試験体に計 28 枚、鋼管拘束試験体には計 36 枚貼付した。

4. 水平力-部材角関係

図 4 には各試験体の繰り返し水平力 V -部材角 R 関係

Notation	A_s (mm^2)	t (mm)	E_s (N/mm^2)	f_{sy} (N/mm^2)	f_{su} (N/mm^2)	Q	ϵ_{ch} (%)
RD55	24	—	180000	1306	1385	0.00404	0.75
K13	127	—	179000	894	1022	0.00246	0.56
PL2.3	—	2.2	200000	233	301	0.00175	0.14
PL4.5	—	4.3	198000	242	317	0.00084	0.15

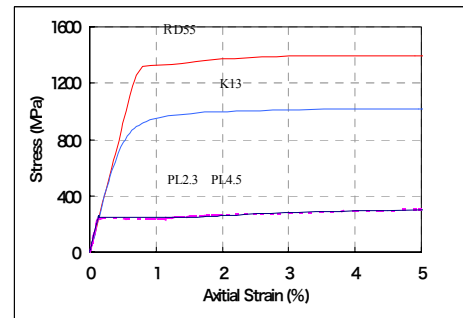


図2 鋼材の力学的性質

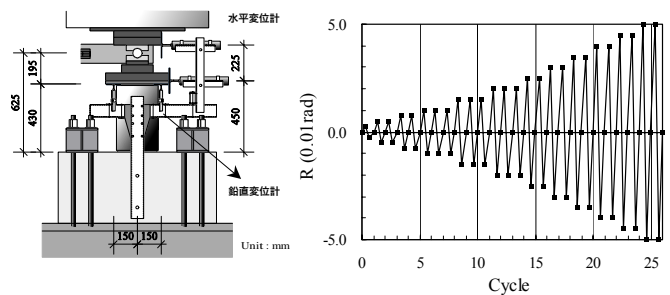
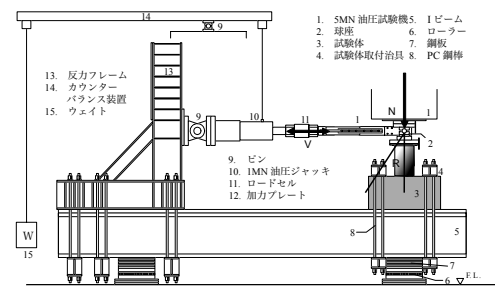


図3 加力・測定装置と加力プログラム

の実験結果を示す。

軸力比 0.20 の軸力を受ける配筋間隔 60mm の試験体 CHRC60N20 は部材角が 0.02rad の時点で最大耐力に達し部材角が 0.03rad に達するまで安定した履歴性状を示した。同じ配筋間隔で軸力比 0.30 の軸力を受ける CHRC60N33 は部材角が 0.015rad の載荷サイクルで最大耐力に達し、その後一定の割合で耐力が低下したが、部材角 0.04rad においても軸方向支持能力を失わなかった。

配筋間隔 30mm で軸力比 0.33 の軸力を受ける試験体 CHRC30N33 は部材角 0.015rad で最大耐力に達した。その後の繰り返し載荷を経ても耐力低下は緩やかで、部材角 0.05rad においても最大耐力の 7 割程度を維持した。一方、軸力比 0.50 の高軸力を受ける試験体 CHRC30N50 は、部材角が 0.010rad で最大耐力に達した後、かぶりコンクリートが剥離しコアのみで軸力を抵抗していたので、部材角 0.03rad の載荷サイクル時に帯筋が破断し、

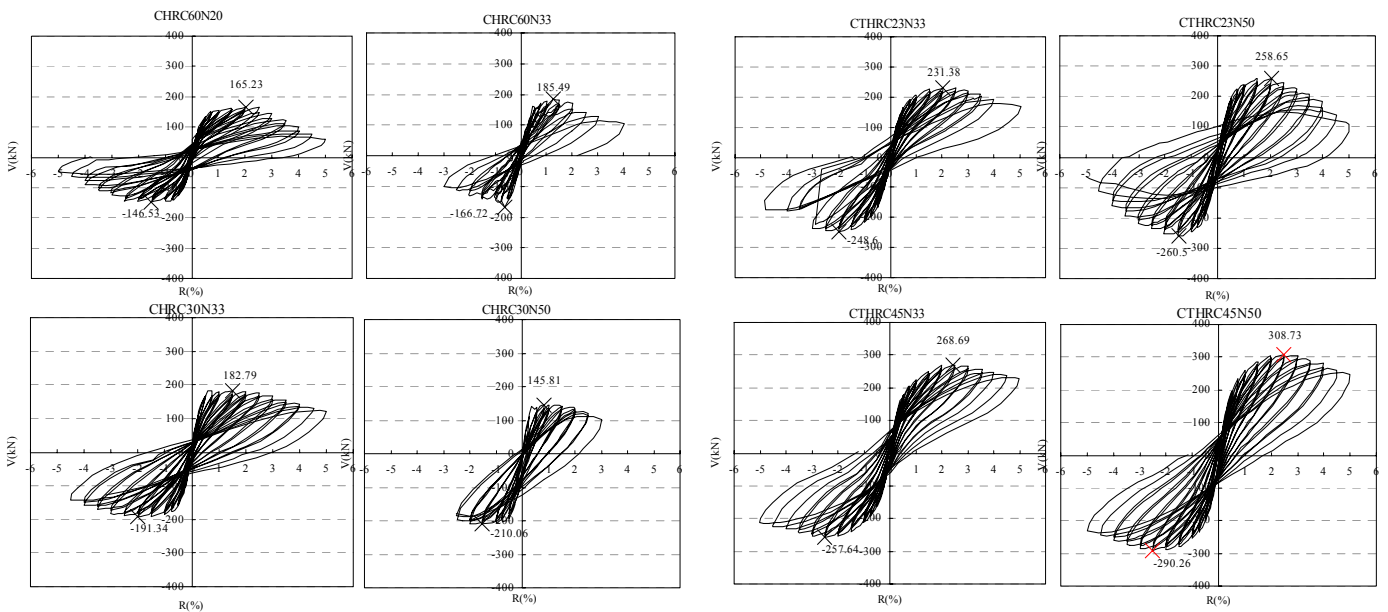


図4 水平力V-部材角R関係

軸方向支持能力を失った。水平力-部材角関係の実験結果から分かるように、スパイラル筋の間隔が軸力比 0.33 の試験体の最大耐力に与える影響は顕著ではなかったが最大耐力発揮後の耐力の低下割合は、部材角 0.04rad で 30%近い差が生じた。

径厚比 110.7 の鋼管で拘束された、軸力比 0.33 の軸力を受ける CTHRC23N33 試験体は非常に安定した履歴性状を示している。部材角が 0.02rad の時点で最大耐力に達し、その後も耐力低下はゆるやかで、部材角 0.05rad で载荷試験を終了するまで安定した繰り返し曲げせん断性状を示した。

一方、軸力比 0.50 の高軸力を受ける試験体は、部材角が 0.02rad の時点で最大耐力に達し、履歴曲線も膨らみ始めた。その後、徐々に耐力を落としつつも、安定した挙動を示し、0.03rad では最大耐力の 95%を維持していた。

径厚比 57.6 の鋼管で拘束され、軸力比 0.33 の軸力を受ける試験体 CTHRC45N33 は、0.025rad の時点で最大耐力に達してから、部材角が 0.04rad 時での耐力低下は僅か 6%程度で、非常に靱性に富んだ繰り返し履歴性状を示した。また、試験体 CTHRC45N50 は、軸力比 0.5 の高い軸力を受けていたにもかかわらず、部材角が 0.025rad 前後で最大耐力を発揮してから 0.04rad での耐力低下は 10%程度しかなく、極めて高い耐震性能が示された。

5. 平均軸方向ひずみ

図5に柱の平均的軸方向ひずみの計測結果を示す。柱の平均軸方向ひずみは4つの鉛直変位計の計測軸縮みの平均を試験体長さ 430mm で割ることによって算定されたものである。

まずスパイラル筋間隔が異なる、試験体 CHRC30N33 と試験体 CHRC60N33 を比較してみると、部材角 0.015rad 時点では目立った差は観察できないが、部材角 0.03rad 時点ではその差は約 20%になっている。このことから、横拘束筋を密に配筋することは、柱の軸方向変形を抑制するのに有効であることがわかる。

次に、高軸力を载荷した試験体 CTHRC23N50 と CTHRC45N50、CHRC30N50 を比較してみる。部材角 0.01rad 時点までは、軸歪みに目立った差異は確認できないが、0.01rad を過ぎたときから、スパイラル筋拘束試験体の軸方向歪みは急激に増加し始め、0.025rad の時点では、スパイラル筋で拘束した試験体と、鋼管で拘束した試験体2体の軸縮みの間に約2倍の差が確認された。このことは高強度円形 RC 柱への鋼管横拘束の優位性を示している。部材角がさらに進行するにつれて、径厚比の大きい試験体 CTHRC23N50 の軸歪みが大きく進行し、0.035rad の時点で CTHRC45N50 との差は約2倍になった。

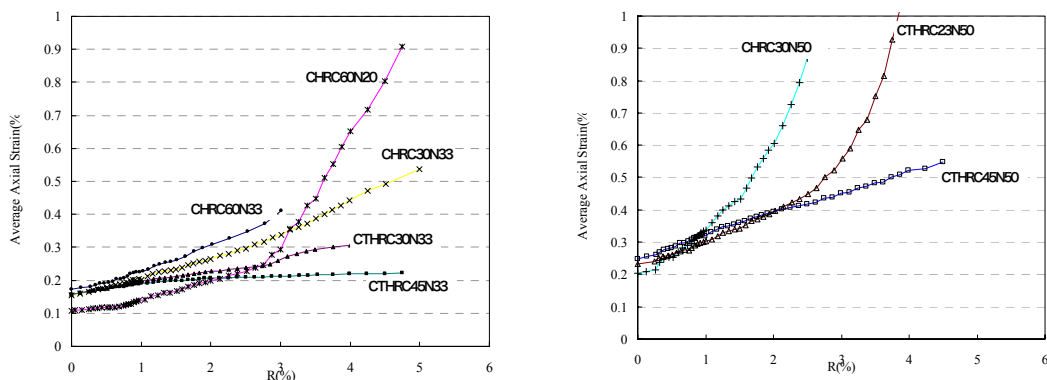


図5 平均軸方向ひずみ-部材角関係

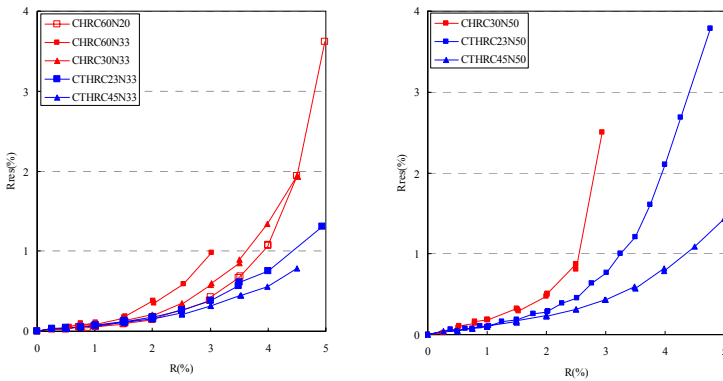


図6 残留部材角一部材角関係

6. 柱の残留変形

柱の残留部材角を図6に示す。図6より分かるように、全試験体ともに残留部材角が非常に小さい。部材角0.02radまでの各载荷サイクルのピークから除荷した時の残留部材角は0.004rad（層間変位角1/250）以下であり、これは10階建て、階高4mの建物に換算すると、屋上変位で16cmの残留変位になる。これは、同じ変位振幅から除荷する際に高強度鉄筋の残留ひずみが普通強度鉄筋のそれより遙かに小さいことが起因していると考えられる。

帯筋拘束試験体では、軸方向圧縮力が低い試験体ほど、そしてスパイラル筋の配筋間隔が小さい試験体ほど残留ひずみが小さい。鋼管拘束試験体は、部材角が小さい領域では板厚の違いによる残留変形への影響はそれほど顕著には見られなかった。しかしながら、大変形領域になると径厚比や载荷軸力の影響が現れてきて、径厚比が小さく低载荷軸力の試験体ほど残留部材角が小さかった。帯筋拘束試験体では部材角が0.02radを越えたあたりから、鋼管拘束試験体では0.025radを越えたあたりからその影響は顕著になった。

7. 拘束度合いと変形能力の関係

高強度コンクリートを用いたRC柱を設計する際、その脆性的な破壊性状を横拘束材の使用とその拘束度合いによってどのように改善されるかを明確に示す必要がある。そこで、図7に文献²⁾で提案されている横拘束材の拘束度合いを示すパラメーターである強度上昇率Kを横軸に、最大耐力を発揮時の部材角(R_{max})、また耐力が、最大耐力の90%と低下したときの部材角(R_u)を縦軸にしたグラフを描くことで強度上昇率と変形能力の関係を調べてみた。

図7より分かるように、軸力が大きくなるにつれて R_{max} と R_u の実験結果が小さくなるが、横拘束材による拘束度合い(Kの値)が高くなるにつれて、 R_{max} と R_u ともに上昇していく。また、同じKの値では、鋼管拘束試験体の変形能力がスパイラル筋拘束試験体のそれより大きいことがうかがえる。それは、スパイラル筋拘束試験体は大変形域でかぶりコンクリートが剥離し、残りのコアコンクリート断面

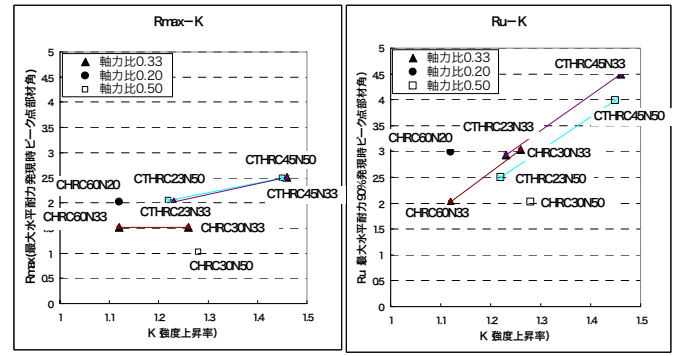


図7 ピーク点部材角(最大耐力発現時、90%耐力発現時) - 強度上昇率関係

に作用する軸力が当初設定値より著しく高くなったためであると思われる。

8. まとめ

靱性能が高く、且つ残留変位が小さい高性能鉄筋コンクリート構造を開発するために、スパイラル筋横拘束や鋼管横拘束された高強度鉄筋と高強度コンクリートを併用した円形RC柱について一定軸力下における繰り返し曲げせん断実験を計画・実施した。その結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 80MPa級の高強度コンクリートを用いた円形RC柱は体積比0.56%程度の高強度スパイラル筋または径厚比110程度の薄肉鋼管で補強すれば、軸力比0.33の軸力下では十分な変形能力を有する。
- 2) 軸力比0.5の高軸力を受ける柱に十分な耐震性能を持たせるには、径厚比57.6程度の円形鋼管を用いればよい。
- 3) 円形RC柱の終局変形能力は、スパイラル筋や鋼管による拘束度合いに従い、大きくなる。また、同じ程度の拘束度合い(Kの値)の場合、鋼管による変形能力への拘束効果はスパイラル筋によるそれより高い。これは鋼管拘束は柱全断面に及び、かぶりコンクリートをつくらないためである。このことは鋼管拘束法の優位性を示唆している。

「謝辞」本実験の実施にあたって、九州大学技術職員の川口晃氏、窪寺弘顕氏、有働文久氏から多大なる協力を頂きました。また、実験に用いた高強度鉄筋はすべて(株)JFEテクノワイヤから提供していただき、記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 三宅良和：円形RC柱の終局耐力に関する研究,九州大学大学院人間環境学府修士論文2005
- 2) Sun, Y, Sakino, K. and Yoshioka, T.: Flexural Behavior of High-Strength Concrete Columns Confined by Rectilinear Reinforcement, 日本建築学会構造系論文集, No. 486, p. 95-, Aug. 1996