

高性能 RC 柱の開発研究

松尾 英典

1. 序

鉄筋コンクリート部材または構造の耐震性能を論じる際に、一般に靱性能と履歴ループの形状という二つの指標が用いられている。耐震性能が高いことは、「靱性能が高い」または「履歴ループが紡錘状に近い」とことと等価とされてきた。一方、紡錘状に近い履歴ループを示す部材または構造体は、エネルギー吸収能力は高いが、大きな残留変位を伴うことから、地震後に大掛かりな補修・補強作業が必要となり、場合によっては撤去という「強制崩壊」の運命を辿る恐れがある。従って、真の高耐震性能を有する部材または構造には、高い靱性能の確保だけでなく、地震による残留水平変位をできるだけ小さく抑える工夫が要求される。

本研究は、同じ変位振幅から除荷する際に高強度材料の残留ひずみが普通強度材料のそれより遥かに小さいことに着目して、高強度鉄筋と高強度コンクリートを併用した高性能 RC 柱が残留変形を小さく抑えることができるかどうかを検証することを目的としたものである。

2. 試験体

試験体は、高層建築の最下階柱を模擬した 1/3 縮小モデルである内幅 250mm×250mm の正方形断面柱で、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、帯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 種類を用いることにした。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' がシリンダー強度 (MPa)、 N は軸方向圧縮力 (kN)、 η は軸力比、 V_{exp} は最大水平力の実験平均値 (kN)、 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 (kN-m)、 M_{cu} は曲げ耐力の計算値 (kN-m)、Ratio は曲げ耐力の実験値と計算値との比である。曲げ耐力の計算値の求め方については後述する。

帯筋拘束試験体、鋼管拘束試験体ともに、柱の主筋には、12 本の D13 異形鉄筋を断面周辺に均等配置し、主筋比が 2.44% となっている。また、帯筋拘束試験体に用いた横補強筋には、D6 異形鉄筋を用いた。これらの主筋と帯筋には、高強度材料として KSS785 高強度異形鉄筋を用いている。図 2 に示す鋼材の引張試験で得られた応力-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。

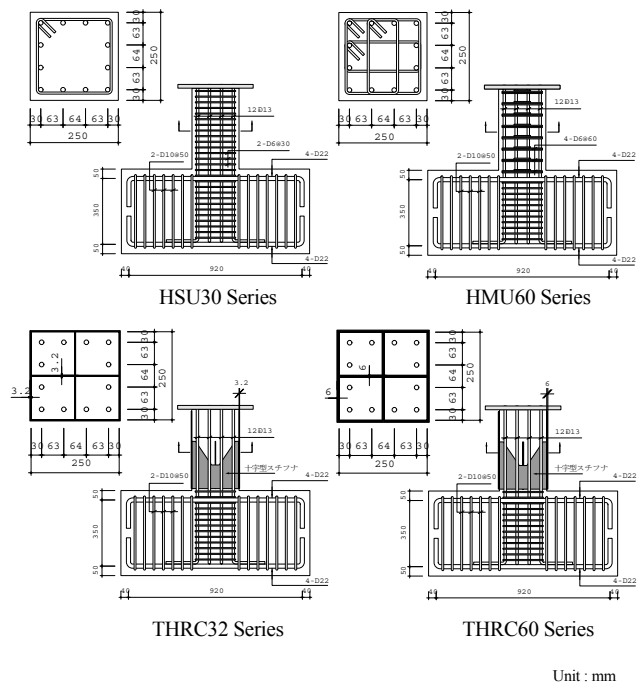


図 1 試験体配筋詳細と寸法

表 1 試験体一覧と主な実験結果

Notation	Configuration type of hoop	Volumetric ratio of hoop (%)	Hoop Spacing (mm)	Thickness of tube (mm)	Volumetric ratio of steel (%)	Width to thickness ratio	f_c' (MPa)	N (kN)	η	V_{exp} (kN)	R_{exp} (0.01rad)	M_{exp} (kN-m)	M_{cu} (kN-m)	Ratio
HSU30N20	Single-type	2.27	30	—	—	—	94.3	1179	0.20	301	2.72	208.0	203.7	1.02
HSU30N33							83.6	1742	0.33	304	1.97	211.8	197.7	1.07
HMU60N33	Multi-type	2.38	60	—	—	—	83.6	1742	0.33	316	2.45	224.0	206.8	1.08
HMU60N45							92.5	2602	0.45	317	1.47	222.4	213.1	1.04
THRC32N33	—	—	—	3.2	7.73	80.1	87.4	1821	0.33	398	2.47	277.1	232.1	1.19
THRC32N50							93.2	2913	0.50	404	1.47	279.2	241.2	1.16
THRC60N33							87.4	1821	0.33	417	2.72	291.4	281.4	1.04
THRC60N50	—	—	—	6	14.6	43.7	92.5	2891	0.50	480	2.22	340.1	307.5	1.11

表 2 鋼材の力学的性質

Items	Notation	D13 (rebar)	D6 (hoop)	PL6.0	PL3.2
Sectional area (mm ²)		127	32	—	—
Thickness (mm)		—	—	6.0	3.2
Yield stress (N/mm ²)		926	1010	290	277
Tensile strength (N/mm ²)		1106	1172	425	437
Young's Modules (N/mm ²)		179000	178000	210000	202000
Yield strain (%)		0.72	0.77	0.41	0.35

鋼管拘束試験体に用いた鋼管は、厚さが 3.2mm（幅厚比 80.1）と 6.0mm（幅厚比 43.7）の 2 種類である。また、角型鋼管の拘束効果を高めるために、鋼管の内部には柱脚から 1.0D（D は柱の断面せい）の範囲に渡って十字型の内スチフナを取り付けている。

本実験における実験変数は、帯筋拘束試験体では横拘束筋の配筋形式と軸力の大きさ、そして鋼管拘束試験体では幅厚比と軸力の大きさである。横拘束筋の配筋形式は、周辺帯筋のみを配置したシングルタイプと周辺帯筋に加え副帯筋を併用したマルチタイプの 2 種類である。純粋に帯筋の配置形式が柱の繰返し曲げせん断性状に及ぼす影響を調べるために、2 種類の配置形式における帯筋の間隔を調整することによって、体積比で表す帯筋量をほぼ同じ値（2.30%前後）にしている。

また、軸力比で表した軸力の大きさは、0.2、0.33 と 0.45 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 0.45 は、本研究で用いたコンクリートの強度が建築学会の靱性設計指針にカバーされている強度の上限值を大きく超えていることと、かぶりコンクリートが剥離した後、拘束コンクリート部分が受ける実際の軸力比が、靱性設計指針にて定められている確り横拘束された RC 柱が受ける軸力比の上限值である 0.67 に近づくことなどを加味して決めたものである。

鋼管拘束試験体に適用した軸力比は 0.33 と 0.50 の 2 種類である。軸力比 0.33 は帯筋拘束試験体の場合と同じ理由で用いたものであり、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/mm² 級の生コンを用

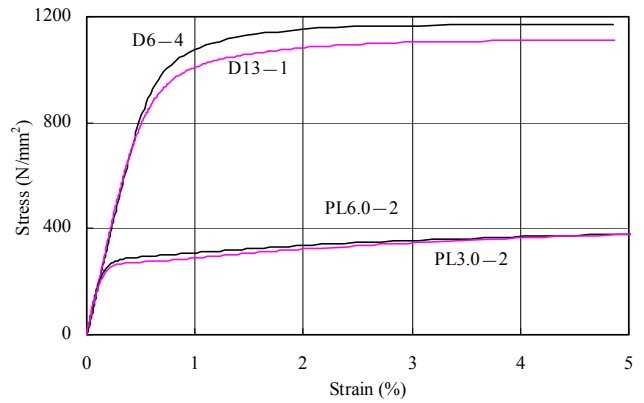


図 2 鋼材の応力-ひずみ関係

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、粗骨材には最大流計 20mm の砕石を用いた。各試験体の実験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返し曲げせん断実験は、柱の水平部材角 R で制御され、図 3 の加力装置を用いて行った。予定した载荷プログラムは図 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、帯筋のフープ方向のひずみ、鋼管表面のひずみを計測するために、1 軸・2 軸ひずみゲージを貼付した。

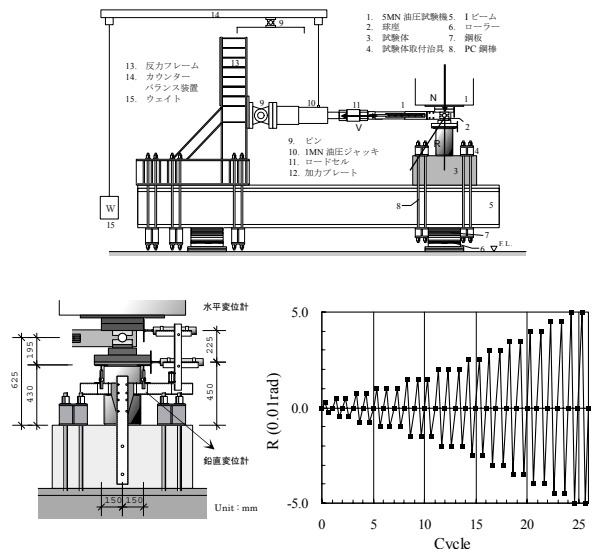


図 3 加力・測定装置図と加力プログラム

4. 水平力一部材角関係

図4には各試験体の繰り返し水平力V-部材角R関係の実験結果を示す。図中の斜線は、各試験体の終局曲げ耐力に基づくメカニズムラインを表す。また、K値は鋼管の拘束度合いを表す指標であり、その意味と求め方については終局曲げ耐力の算定方法とともに後述する。

まず、図4より分かるのは、いずれの試験体においても実験耐力は拘束効果を考慮に入れた曲げ耐力の計算値を上回っていることである。

周辺帯筋だけで拘束された試験体 HSU30 シリーズについて、軸力比0.2の軸力を受ける場合は、高強度鉄筋を用いたことから水平抵抗力は、部材角の増加に伴って大きくなり、部材角が0.03rad前後で最大耐力に達した。その後、かぶりコンクリートの剥離が顕著となり、耐力低下が生じたが、0.035radまで安定した履歴性状を示した。一方、軸力比0.33の軸力を受ける場合は、部材角が0.02radの時点で最大耐力に達し、その後、耐力低下が生じたが、部材角が0.025radとなるまで安定した繰り返し曲げせん断性状を示した。

マルチタイプの帯筋で拘束された試験体 HMU60 シリーズは総じて周辺帯筋だけで拘束された試験体よりも高い変形能力を示した。軸力比0.33の軸力を受けた試験体は、载荷試験が終了する部材角0.04radまで耐力低下が僅かしか生じず、主筋の座屈もなく、非常に安定した履歴性状を示した。また、軸力比が0.45とより高い軸力下においても、部材角が0.03radとなるまで履歴応答は安定しており、十分な耐震性能を示した。

鋼管で拘束された試験体について、幅厚比80の鋼管で拘束された、軸力比0.33の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、その後、部材角が0.03radとなるまで殆ど耐力低下が見られず、非常に安定した履歴性状を示した。部材角が0.035radの時点で鋼管の膨らみが観察され始め、部材角0.045radレベルでの2回目の負側の载荷途中、鋼管溶接箇所が切れたことに起因する耐力の急落が見られたものの、試験体は部材角0.04radの载荷履歴が終了するまで軸方向支持能力を失わなかった。一方、軸力比0.50の高軸力を受ける試験体は、試験体 THRC32N33より高い初期剛性を示し、部材角が0.015radの時点で最大耐力に達した。部材角0.015radでの载荷過程に鋼管の膨らみが観察され、履歴性状も膨らみ始めた。その後、部材角0.02radへの正側载荷途中に鋼管溶接部が切れ、試験体は水平と鉛直抵抗能力を失った。

幅厚比44の鋼管で拘束され、軸力比0.33の軸力を受ける試験体は、0.03radの時点で最大耐力に達してから、部

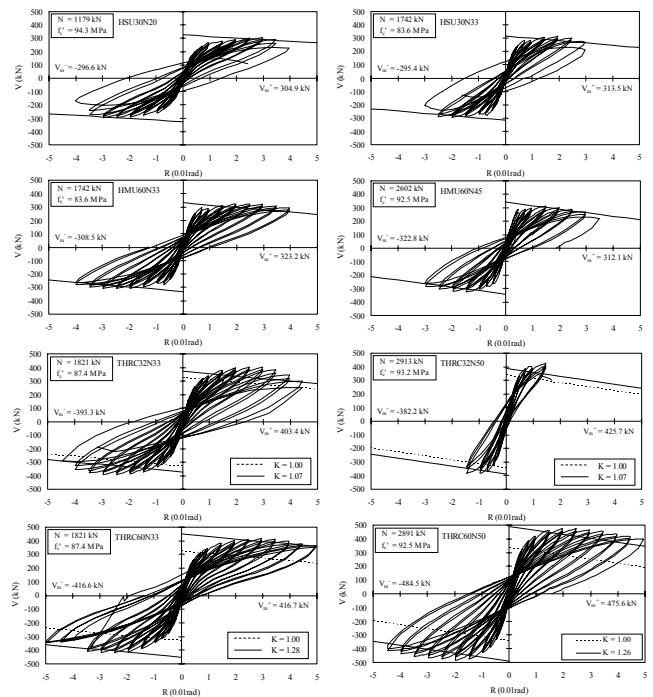


図4 水平力一部材角関係

材角が0.04radと0.05rad時の耐力低下はそれぞれ6%と10%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 THRC60N50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0.02rad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、極めて安定した履歴応答を示した。

5. 柱の軸方向変形

図5に柱の平均的軸方向ひずみの計測結果を示す。軸力比が高いほど、柱の軸方向ひずみが圧縮側へ大きくなることは明らかである。試験体 HSU30N33と試験体 HMU60N33の計測結果を比較して明らかのように、後者の帯筋間隔が前者の帯筋間隔の倍であるにもかかわらず、後者の軸方向ひずみは前者の軸方向ひずみより小さく抑

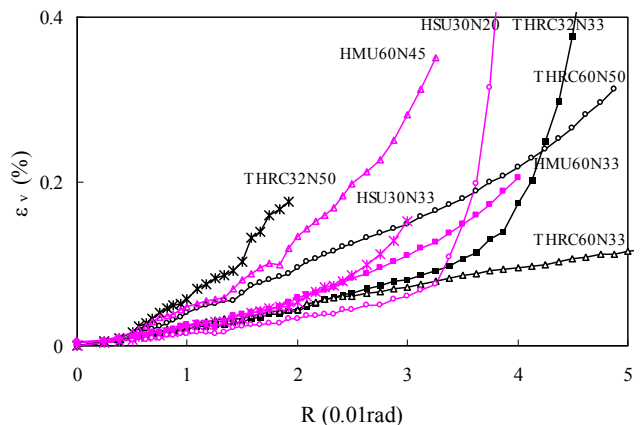


図5 平均的軸方向ひずみ

えられている。このような副帯筋の併用による拘束効率の上昇は、特に部材角が 0.02rad となる時点から顕著になっている。

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、高強度材料、特に高強度鉄筋を用いることによって、繰り返し履歴挙動が安定している領域においては、柱の残留部材角が非常に小さく抑えられている。柱端部が塑性化し始める部材角 0.01rad を過ぎたところから、各試験体の残留部材角が大きくなり始めているが、帯筋拘束試験体では、試験体によって差はあるが、部材角 0.03rad においても、僅か 0.005rad 前後であり、鋼管拘束試験体においては僅か 0.002rad 程度しかなかった。横拘束筋の配筋形式や幅厚比、軸力の大きさなどの除荷時残留部材角に対する影響は、部材角が 0.03rad を越えたあたりから顕著となっているが、建物が安全限界内にある場合（一例として層間変位角 1/50 ” 0.02rad ” 以下）には、高強度材料を使う限り問題にはならないレベルであるといえる。

7. 終局曲げ耐力の算定

高性能 RC 柱の終局曲げ耐力は、崎野・孫らが文献 2 で提案した等価応力ブロックによる算定法を用いた。詳細は、文献 2 を参照されたい。

図 7 に曲げ耐力の実験結果と計算値との比較を示す。図 7 に示す比較結果から明らかなように、本論で用いた簡便な算定法を用いれば、高性能 RC 柱の終局曲げ耐力を精度よく評価することができる。

曲げ耐力の実験値は軸力の増加に伴い計算値を上回る現象を考慮した（図中の実線で示すもの）場合、曲げ耐力の実験値と計算値との比は、平均値が 1.09 で標準偏差が 0.058 となっている。なお、図中の実線は、崎野・孫らが文献 2 で大量の帯筋拘束 RC 柱の実験結果に基づいて得た実験式である式 (1) により与えられる。

$$\frac{M_{ca}}{M_{CAL}} = \begin{cases} 1.1, & n \leq 0.3 \\ 1.1 + 0.8(n - 0.3)^2, & n > 0.3 \end{cases} \quad (1)$$

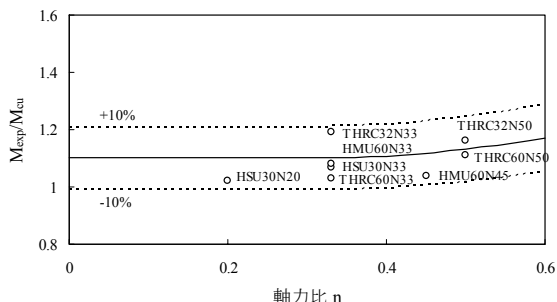


図 7 終局曲げ耐力の比較

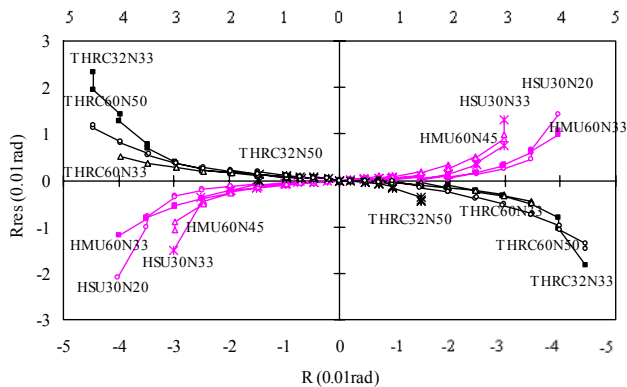


図 6 各試験体の残留部材角

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、帯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 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) 帯筋で柱を拘束する場合、同じ帯筋量でも副帯筋を併用したほうが変形能力、耐力ともに向上する。
- 2) 柱の塑性ヒンジ領域内で内スチフナで補強した幅厚比 80 程度の薄肉鋼管で拘束すれば、80MPa 級の高強度コンクリートを用いた RC 柱は軸力比 0.33 の軸力下では十分な変形能力を有する。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、幅厚比 44 程度の角型鋼管を用いればよい。
- 3) 高強度鉄筋と高強度コンクリートを併用すれば、RC 柱の残留水平変位を小さく抑えられる。
- 4) 崎野・孫らによる等価応力ブロックを用いた算定法を用いれば、高性能 RC 柱の終局曲げ耐力を精度よく評価できる。

「謝辞」本実験の実施にあたり、九州大学文部科学技官川口晃氏、松岡直人氏、川口勝氏のほか、久島昭久氏、藤原文夫氏学部生池尾拓氏、石原淳平氏、院生福原武史氏、田中慎吾氏から多大な協力を得ました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 孫玉平, 他: 明瞭な降伏棚を持たない高強度鉄筋の応力-ひずみ関係, 日本建築学会九州支部研究報告, 第 37 号, p. 301-304, 1998. 11
- 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