

論文 円形鋼管で横拘束された高強度鉄筋コンクリート柱の履歴挙動に関する研究

藤永 隆^{*1}・孫 玉平^{*2}・松尾 英典^{*3}

要旨：円形鋼管で横拘束された高強度鉄筋コンクリート（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行った結果、高強度材料を用いた円形 RC 柱を鋼管で横拘束すれば、高軸力下における柱に十分な変形能力を持たせることができるだけでなく、柱の残留部材角を小さく抑えられることが明らかになった。また、円形鋼管の拘束効果、加力スタブによる付加拘束効果、および鉄筋の付着すべりの影響を考慮に入れた柱の水平挙動に関する解析を行い、実験結果との比較により、解析手法の妥当性を検証した。

キーワード：高強度鉄筋、高強度コンクリート、円形柱、鋼管拘束、拘束効果

1. はじめに

円形断面を有する鉄筋コンクリート柱（以下 RC 柱と略す）は、断面形状に方向性が無いことや柱に用いられるスパイラル筋や鋼板のような横拘束材による拘束効率が低いことなどの利点を有することから、矩形断面柱に比べて力学上合理的であると言える。しかしながら、これまでの RC 柱の履歴性能に関する研究分野では、円形断面 RC 柱、特に 高強度材料を用いた円形断面柱に関する研究が著しく不足していることが著者らの既往の研究によって明らかになっている¹⁾。

このような現状を踏まえ、高強度材料を用いた円形断面 RC 柱の履歴性状を明らかにするために、松尾らは高強度スパイラル筋により横拘束された円形断面柱の繰り返し曲げせん断実験を行い、設計強度 80N/mm^2 の高強度コンクリートを用いた曲げ降伏先行型の円形 RC 柱に体積比 1.11% 程度の高強度スパイラルフープで横拘束すれば、軸力比 0.5 の高軸力下においても柱に十分な変形性能を持たせることができることなどを明らかにしてきた²⁾。本論は、文献 2 の研究の続きとして、円形鋼管により横拘束された高強度円形断面 RC 柱の一定軸力下における

繰り返し曲げせん断実験を行い、鋼管の板厚が柱の繰り返し履歴特性に及ぼす影響を実験的に調べることで、鋼管の拘束効果等を考慮できる拘束 RC 柱の履歴挙動に関して孫らが提案している計算手法²⁾の円形鋼管拘束高強度 RC 柱への適用性を検証することを目的としている。

2. 試験体

試験体は、高層建築の最下階柱を模擬した約 1/3 の縮小モデルとなる直径 250mm の円形断面柱で、内径 250mm の円形鋼管により横拘束さ

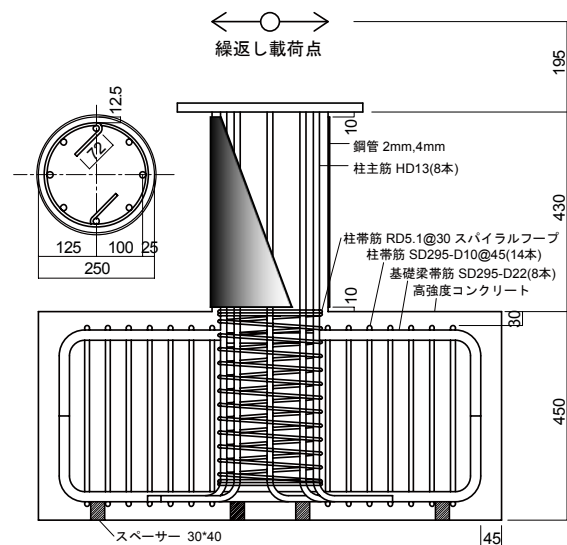


図-1 試験体詳細と寸法(mm)

*1 神戸大学 工学部建設学科助手 博士(工学) (正会員)

*2 神戸大学 工学部建設学科教授 工博 (正会員)

*3 (株)間組 修士(工学)

表－1 試験体一覧と主な実験結果

Notation	Thickness of tube t (mm)	Volumetric ratio of tube (%)	$\frac{D_c}{t}$	f'_c (N/mm ²)	N (kN)	η	V_{exp} (kN)	R_{exp} (%)
CTHRC23N33	2.3	3.78	109	87.0	1407	0.33	240	2.00
CTHRC23N50				87.6	2143	0.50	259.6	2.00
CTHRC45N33	4.5	7.61	56	87.6	1405	0.33	263.2	2.40
CTHRC45N50				89.5	2185	0.50	299.5	2.50

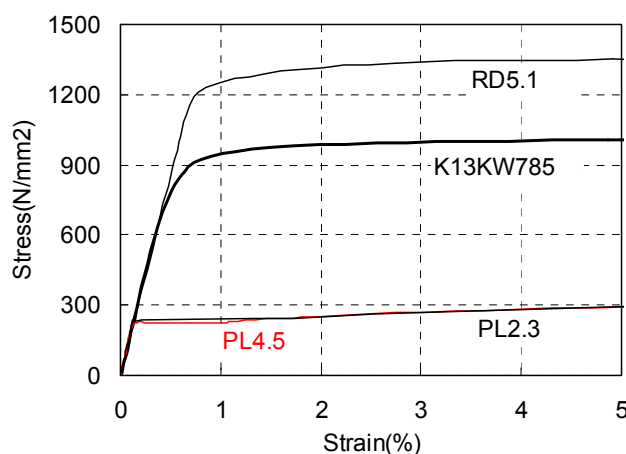
注) D_c : RC 断面外径, η : 軸力比, V_{exp} : 最大水平力の実験値 (正負加力側平均値), R_{exp} : V_{exp} 時の部材

れており, せん断スパン比は2.5となっている。

図－1 に試験体の配筋詳細と寸法を, 表－1 に試験体一覧を示す。柱の主筋として 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, 高強度鉄筋の加力スタブからの抜け出しを低減するため, 加力スタブ内では高強度異形鉄筋 RD5.1 のスパイラル筋 (ピッチ 30mm) を用いて主筋を拘束している。円形鋼管は, 所要の肉厚を有するものは市販されていないことから, 平鋼板 (SS400) を円筒状に折り曲げてから, 継ぎ目を溶接して製作した。図－2 に鋼管製作に用いた平鋼板および高強度鉄筋の引張試験で得られた応力－ひずみ関係を, 表－2 にその機械的性質を示す。表－2 中の記号の意味は E_s がヤング率, f_{sy} が 0.2% オフセットひずみに対応する降伏点応力, f_{su} が最大応力, Q がピーク点近傍での接線勾配とヤング係数の比である。

本実験における実験変数は, 著者らが行った既往の研究結果を踏まえて, 円形鋼管の肉厚と載加軸力の大きさの二つとした。軸力比で表した載荷軸力の大きさは 0.33 および 0.50 で, 鋼管の径厚比は 109 と 56 である。なお, 鋼管はコンクリートの横拘束材としてのみ作用することを確実にするために, 柱脚と柱頭に 10mm のクリアランスを設けた。

コンクリートは設計強度が 80N/mm² 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, 粗骨材には最大粒径 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 に記している。



図－2 鋼材の引張応力－ひずみ関係

表－2 鋼材の機械的性質

Test Coupon	E_s (kN/mm ²)	f_{sy} (N/mm ²)	f_{su} (N/mm ²)	Q
K13	179.2	894	1022	0.0025
RD5.1	180.1	1306	1385	0.0040
PL2.3	197.5	233	318	-
PL4.5	193.3	242	322	-

注) 鉄筋のデータは公称値を使用して算定
鋼板引張方向は試験体鋼管の周方向と同一

3. 載荷および測定方法

一定軸力下における繰り返し曲げせん断実験を, 柱の水平部材角 R により制御し, 文献 2 の研究で使用した載荷装置を用いて行った。載荷実験は片持ち梁形式で, 所定の軸力を油圧試験機 (能力 5 MN) により加えてから, 載荷フレームに取り付けられた 1MN 油圧ジャッキを押すまたは引くことにより繰り返し曲げせん断力を載荷した。予定した載荷プログラムは次の通りである。まず, 部材角 $R=0.0025\text{rad}$ の変位レベ

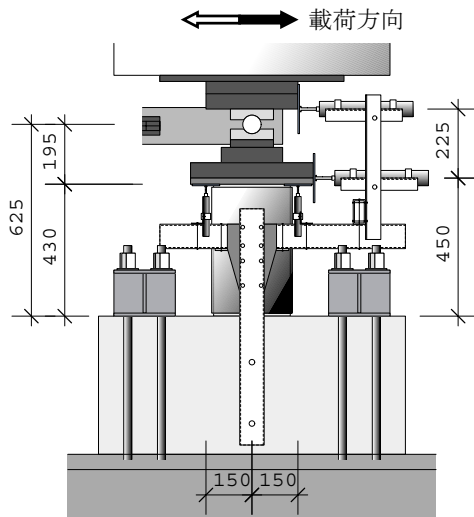


図-3 測定装置概要

ルで正負交番で 1 サイクルを载荷。次に、 $R=0.005\text{rad}$ と 0.0075rad の変位レベルで 2 回ずつ繰り返し载荷し、 0.01rad 、 0.015rad と 0.02rad の変位レベルではそれぞれ 3 回ずつの繰り返し载荷を行う。さらに、部材角が 0.025rad 、 0.03rad 、 0.035rad と 0.04rad の各変位レベルで 2 回ずつの正負交番繰り返し载荷を行い、実験を終了した。

柱の部材角 R は図-3 に示すように、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。図-3 より分かるように 4 つの鉛直変位計の計測値から、柱先端の回転角を求めることができる。

また、柱主筋および鋼管表面のひずみを計 28 枚のひずみゲージを貼付して計測した。

4. 主な実験結果と考察

4.1 終局破壊状況

いずれの試験体も部材角 0.04rad の大変形まで軸支持能力を失うことなく終局（実験終了）を迎えた。写真-1 に柱の終局状況例を示す。鋼管表面の横膨らみの最大位置が、柱脚から約 $100\sim 120\text{mm}$ 程度離れた箇所が生じていることがわかる。これは加力スタブによる付加拘束で危険断面が材端からシフトしていたことを示唆



写真-1 試験体の終局状況例

している。

4.2 水平力 V —部材角 R 関係

図-4 に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。

軸力比 0.33 の軸力を受ける径厚比 109 の薄肉鋼管で拘束された試験体 CTHRC23N33 は部材角が 0.02rad の時点で最大耐力に達し、部材角が 0.03rad に達するまで非常に安定した履歴性状を示した。部材角 0.03rad での 2 回目負側载荷のピーク近傍で耐力の急減が見られるが、これは実験制御水平変位を測る変位計の不調によるもので、 0.03rad を超えた大変位域における正側の荷履歴曲線形状からも分かるように、当該試験体は部材角 0.04rad の実験終了まで水平耐力の 9 割前後を維持していた。

同じ径厚比の鋼管で拘束された軸力比 0.50 の高軸力を受ける試験体 CTHRC23N50 は部材角が 0.015rad と 0.02rad の間で最大耐力に達し、

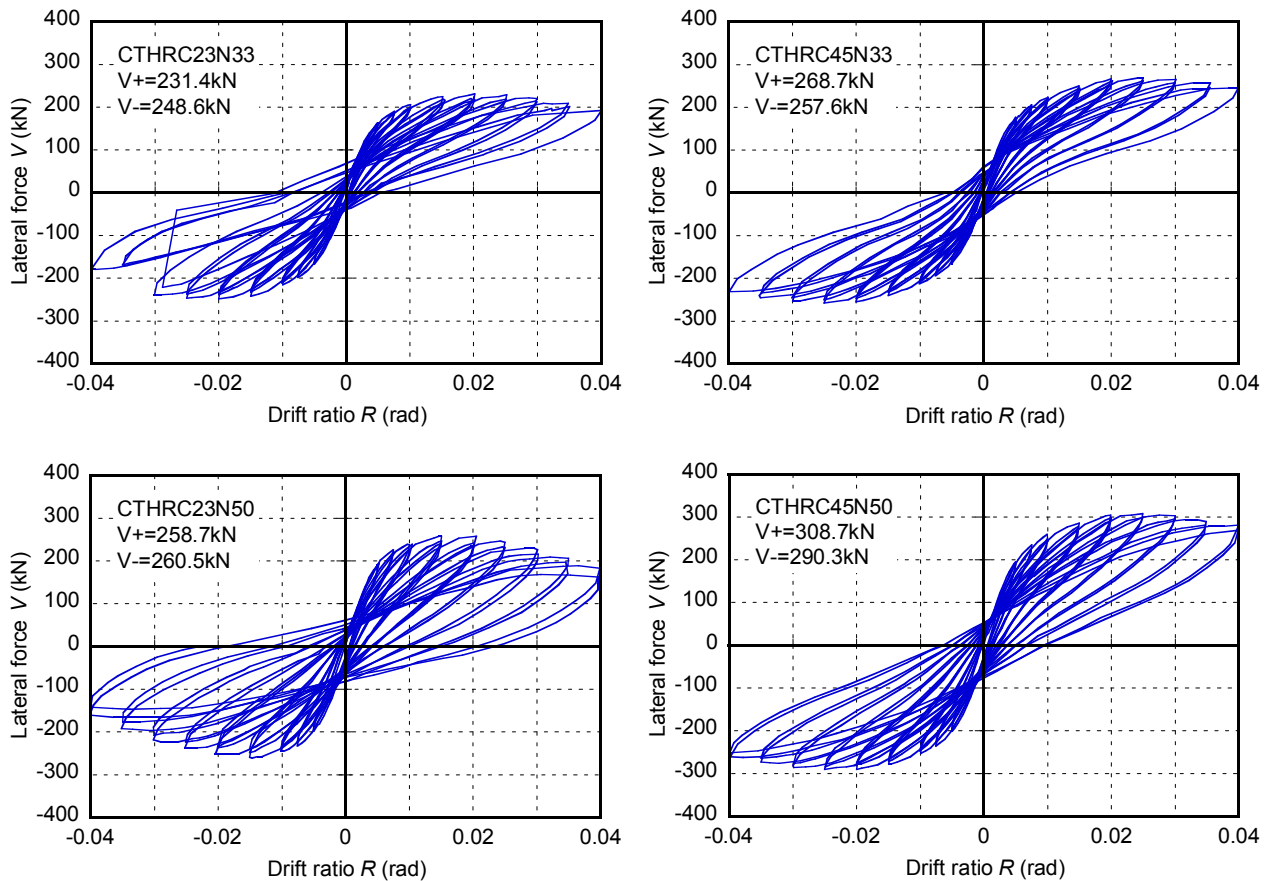


図-4 水平力 V —部材角 R 関係曲線

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うことなく、最大水平耐力の約 8 割を保持していた。

径厚比 56 の鋼管で軸力比 0.33 の軸力を受ける試験体 CTHRC45N33 は部材角 0.025rad で最大耐力に達し、その後の繰り返し载荷を経ても耐力低下が緩やかで、部材角 0.04rad においても最大耐力の 9 割を維持した。また、最大耐力は薄肉鋼管で拘束された試験体 CTHRC23N33 より約 10%前後高くなった。軸力比 0.50 の高軸力を受ける試験体 CTHRC45N50 は、部材角が 0.025rad で最大耐力に達した後も、厚肉鋼管による強い拘束効果を受けて、耐力低下が非常に小さく、部材角 0.04rad の終局時点まで軸方向支持能力を失わず、最大耐力の約 9 割程度を保持した。また、試験体 CTHRC23N50 と比較して、最大耐力は約 15%前後高く最大耐力以降の耐力低下も小さい。鋼管の肉厚が柱の最大耐力に及ぼす影響は低軸力の場合より顕著に現れた。

4.3 柱の残留部材角と平均軸ひずみ

地震を受けた後の構造部材の補修・再利用を考える場合、残留部材角は柱の軸縮みとともに構造部材の耐震性能を測るうえで重要な指標となることは言うまでもない。鋼管拘束柱の残留部材角と平均軸ひずみの実験結果をそれぞれ図-5 と図-6 に示す。残留部材角は各変位レベルの正側ピークから水平力がゼロまで除荷された時点での部材角で、平均軸ひずみは 4 本の鉛直変位計で計測した平均軸縮みを塑性ヒンジ領域長さ (250mm として) で除した値である。

図-5 より分かるように、薄肉鋼管で高軸力下における試験体においても、性能設計で限界変形とされている部材角 0.02rad に対応する残留部材角は 0.004rad 以下に抑えられており、高強度鉄筋を用いることによる残留部材角の抑制効果が伺える。平均軸ひずみに関しては、鋼管の肉厚が厚いほど軸ひずみが小さく抑制されるが、肉厚の影響は部材角 0.02rad を越えるとよ

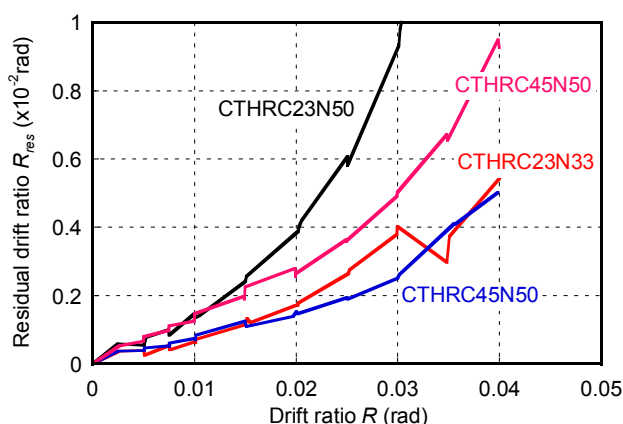


図-5 残留部材角の実験結果

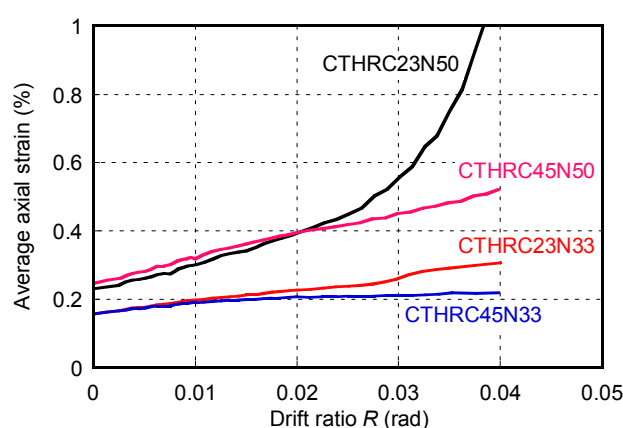


図-6 平均軸ひずみの実験結果

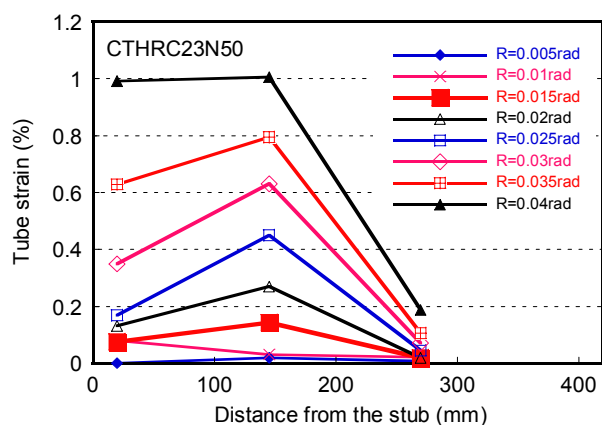


図-7 鋼管表面ひずみの実測例

り顕著に現れる（図-6 参照）。

4.4 鋼管表面のひずみ分布

図-7 は鋼管表面の初期圧縮側での周方向ひずみの材軸方向に沿う分布の実測例を示す。図-7 より明かなように、部材角 0.015rad を越えた時点から、材端から 170mm 離れたところの周方向ひずみは材端でのひずみより大きくな

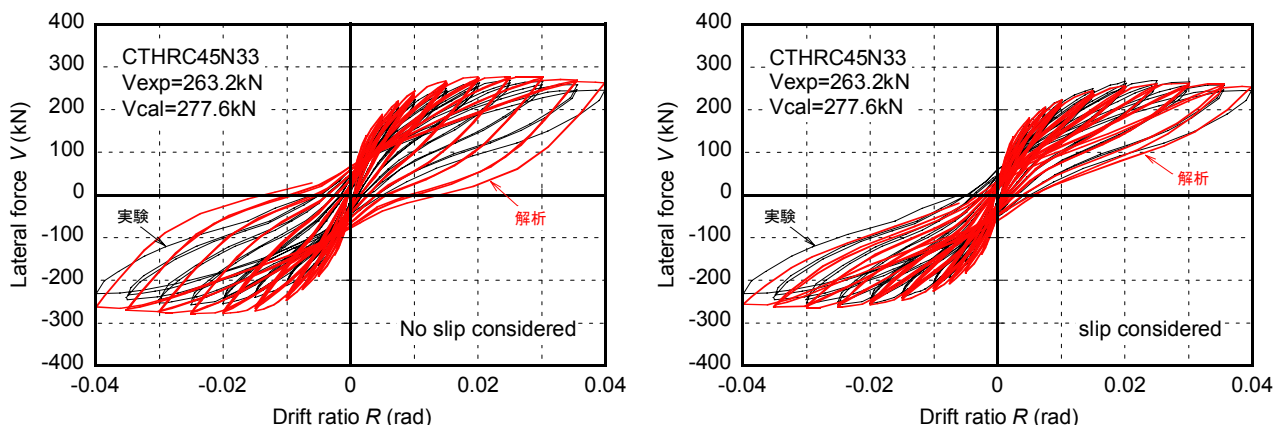
った。これは柱端部の剛な加力スタブによる付加拘束で危険断面が材端からシフトし始めたことを示唆しており、分布状況全体は写真-1 に示した終局状況とほぼ一致している。

5. 繰り返し履歴性状の解析

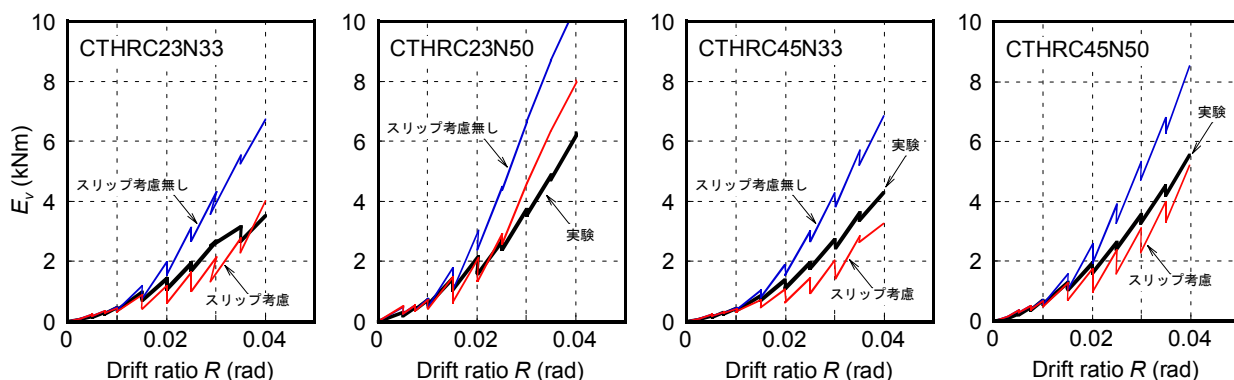
著者の一人は文献 3 で高強度材料を用いた RC 部材の繰り返し履歴性状の解析方法を提案している。提案手法の特徴は、帯筋や鋼管のような横拘束材による拘束効果、曲げ破壊が先行する RC 部材への端部加力スタブの付加拘束効果、および高強度鉄筋の付着すべりの影響などを適切に考慮できるところにある。松尾らは文献 2 で孫らの提案手法のスパイラル筋横拘束高強度 RC 柱への適用性を検証したが、本論はその研究の続きとして、提案手法の円形鋼管により拘束された RC 柱の履歴性状評価への適用性を検証する。拘束コンクリート強度は Richart の式で評価しており、強度増加分はそれぞれ $17.6(D_o/t=109)$, $35.7(D_o/t=56)$ N/mm² であった。紙面制限の関係で、孫らが提案した解析手法の詳細については文献 3 を参照されたい。ここでは、提案手法で拘束高強度 RC 部材の履歴挙動解析にあたって設けた基本仮定のみを以下に記す。

- 1) 部材の変形は材端のヒンジ領域に集中する。
- 2) ヒンジ領域の長さは $1.0D$ とする。
- 3) ヒンジ領域での各主筋のひずみ分布は一定。
- 4) コンクリートは平面保持の仮定が成り立つ。
- 5) 材料の応力-ひずみ関係と鉄筋の付着応力-すべり関係は文献 3 で提案されたモデルを用いる。

図-8 に提案手法で求めた繰り返し履歴曲線の解析結果と実験結果との比較例を、図-9 に履歴吸収エネルギーの比較を示す。図-8 より分かるように、鉄筋の付着すべりの影響までを考慮に入れば、提案手法によって得られた解析結果は、柱の最大耐力のみならず、耐力時変形、履歴曲線の包絡線形状、残留部材角、および履歴ループ面積などすべての面において実験



図－8 V-R 関係の計算結果と実験値の比較例



図－9 履歴エネルギー吸収能力の比較

結果と精度よく対応している。一方、拘束効果のみを考慮した解析結果は、柱の最大耐力、履歴ループの形状、部材のエネルギー吸収能力、および残留部材角などをやや過大に評価する傾向にあることが図－9 より明らかである。

6. まとめ

- 1) 円形鋼管による拘束は、高強度材料を用いた RC 柱の変形能力の向上、耐力の上昇、および残留変形の抑制に極めて有効である。
- 2) 柱の終局耐力と変形能は鋼管の肉厚の増加に伴い上昇するが、径厚比 109 の非常に薄肉の円形鋼管による拘束でも、軸力比 0.5 の高軸力を受ける柱に十分安定した履歴性状を持たせられる。
- 3) 孫らが文献 3 で提案した鉄筋の付着すべりの影響まで考慮できる解析方法を用いれば円形鋼管で横拘束高強度 RC 部材の履歴性

状を精度よく評価できる。

謝辞

本実験に用いた高強度鉄筋は(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) 孫玉平ほか：RC 円形断面柱の終局せん断耐力の算定式の提案，コンクリート工学年次論文集，Vol. 27, No.2, pp.229-234, 2005.6
- 2) 松尾英典ほか：拘束高強度円形 RC 柱の耐震性能に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 28, No.2, pp.133-138, 2006.6
- 3) Sun, Y., et al.: Analytical Study of Cyclic Response of Concrete Members made of High-Strength Materials, Procs. of the 8-th NCEE, USA, CD-ROM, Paper No. 1581, April 2006