

論文 拘束高強度円形RC柱の耐震性能に関する研究

松尾 英典*1・孫 玉平*2・石原 淳平*3

要旨：高強度スパイラルフープにより拘束された高強度円形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行った結果、高強度鉄筋と高強度コンクリートを用いた円形RC柱を高強度スパイラルフープで横拘束すれば、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、コンクリートと鉄筋の付着すべりの影響および付加拘束の影響を考慮した断面解析を行い、提案した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RC柱，スパイラルフープ，耐震性能

1. はじめに

円形RC柱は、高軸圧縮力やせん断力に対して優れた性能を得られることが既往の研究で確認されている。これは、円形RC柱に多く用いられているスパイラルフープが柱の靱性向上に有効であり、また断面形状に方向性が無いため矩形RC柱に比べて力学上合理的であるからだと考えられる。

このような有用性が実証されている円形RC柱については、高強度材料を用いた場合の力学特性はまだ明らかにされていない部分が多い。このため本論では、高強度コンクリートと高強度主筋および高強度スパイラルフープを併用した円形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、柱の繰り返し履歴特性を明らかにすることで高強度材料が円形RC柱の耐震性能に及ぼす影響を調べた。

本研究の主な検討項目は、拘束高強度円形RC柱の水平力と部材角関係、各変位振幅から除荷した際の残留部材角、部材角0%時の平均軸縮みおよび変形レベルごとのエネルギー吸収能力の4つである。また、耐震性能を評価するために、高強度主筋の付着すべりの影響および部材端部の付加拘束の影響を考慮した断面解析を行

い、提案した解析手法の妥当性を検証した。

2. 試験体

試験体は、高層建築の最下階柱を模擬した1/3縮小モデルとなる直径250mmの円形断面柱である。柱はRD5.1の高強度スパイラルフープにより拘束されており、せん断スパン比は2.5となっている。

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。

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、主筋比が2.07%となっている。スパイラルフープの間隔が30mmと60mmの2種類であり、体積比はそれぞれ

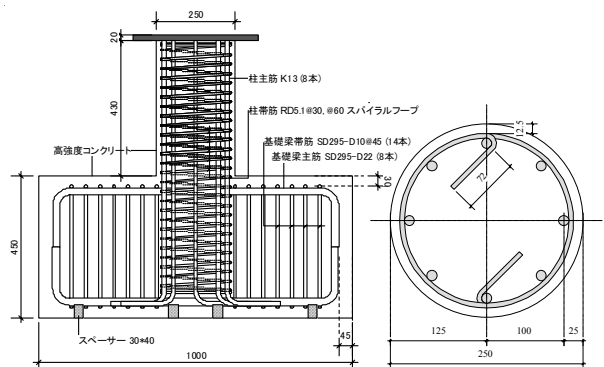


図-1 試験体配筋詳細と寸法

*1 株式会社間組 (正会員)

*2 神戸大学 工学部 教授 工博 (正会員)

*3 九州大学大学院 人間環境学府 都市共生デザイン専攻

表-1 試験体一覧と主な実験結果

Notation	Hoop Spacing (mm)	Volumetric ratio of hoop (%)	f'_c (N/mm ²)	N (kN)	η	V_{exp} (kN)	R_{exp} (%)	M_{exp} (kNm)
CHRC60N20	60	0.56	85.3	837	0.20	165	2.01	113.8
CHRC60N33			85.4	1383	0.33	185	1.26	126.8
CHRC30N33	30	1.11	87.3	1414	0.33	191	-2.00	137.2
CHRC30N50			83.1	2040	0.50	210	-1.54	151.0

注) f'_c : コンクリートのシリンダー強度 N: 载荷軸力 η : 軸力比 V_{exp} : 最大水平力の実験値

R_{exp} : V_{exp} 時の部材角 M_{exp} : 曲げ耐力の実験値 (軸力による付加モーメントを考慮している)

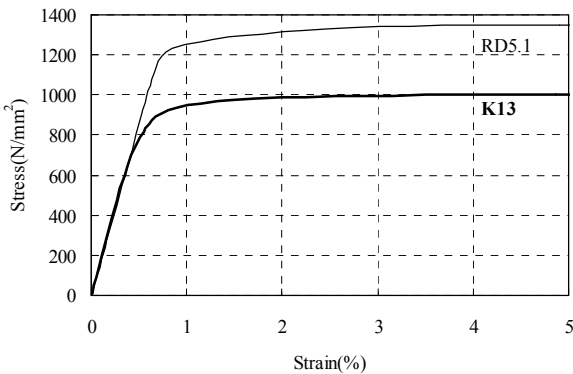


図-2 高強度鉄筋の応力-ひずみ関係

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)	ϵ_{ch} (%)	Q
K13	179.2	894	1022	0.56	0.0025
RD5.1	180.1	1306	1385	0.75	0.0040

注) E_s : ヤング率 f_{sy} : 0.2%オフセットひずみに対応する降伏点応力 f_{su} : 最大応力 ϵ_{ch} : 特性ひずみ Q: ピーク点での接線勾配とヤング係数の比

れ 0.56%と 1.11%となっている。図-2 に高強度鉄筋の引張試験で得られた応力-ひずみ関係を示し、表-2 にその機械的性質を示す。表-2 中の数値は、高強度鉄筋の応力-ひずみ関係のモデル化に用いられる Menegotto-Pinto 関数に基づく実験値である。詳細については、文献 1 を参照されたい。

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、帯筋の間隔と軸力の大きさの 2 つを取った。軸力比で表した载荷軸力の大きさは、0.20, 0.33 および 0.50 の 3 つである。

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コンクリート強度は表-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行った。柱の水平部材角 R は図-4 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。

加力実験はまず、所定軸力を油圧試験機 (能力 5MN) により加えてから、加力フレームに取り付けられた 1MN 油圧ジャッキを押すまた引くことによって繰り返し曲げせん断力を载荷した。

予定した载荷プログラムは次の通りである。まず、部材角 R=0.25%の変位レベルで正負交番 1 サイクルを载荷する。次に、R=0.5%と 0.75%の変位レベルでは 2 回ずつ繰り返し载荷し、R=1.0%, 1.5%と 2.0%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 2.5%, 3.0%, 3.5%, 4.0%の各変位レベルで 2 回ずつ载荷し、最後に 4.5%, 5.0%の変位レベルで 1 回ずつの正負交番繰り返し载荷を行う。

柱の軸方向ひずみは、図-4 に示す測定フレー

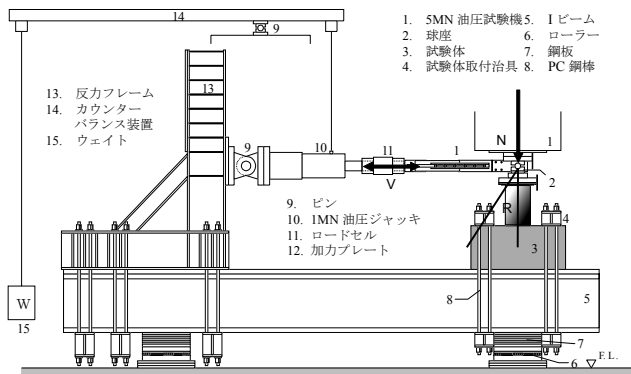


図-3 加力装置

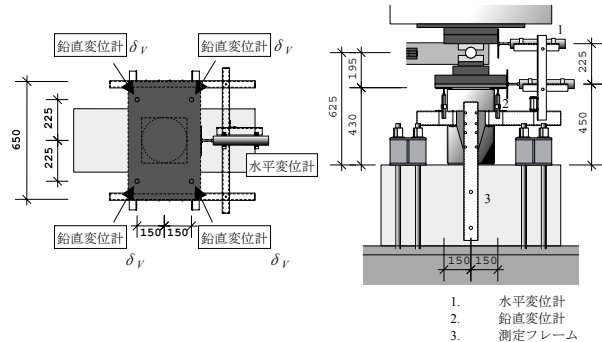


図-4 測定装置

ムに取り付けられた 4 本の鉛直変位計により測定した。また、柱主筋のひずみおよびスパイラルフープのひずみは計 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

4.1 水平力 V-部材角 R 関係

図-5 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。

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 2.0%の時点で最大耐力に達し、部材角が 3.0%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 0.33 の軸力を受ける CHRC60N33 は部材角が 1.5%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 4.0%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 CHRC30N33 は部材角-2.0%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 5.0%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-1.5%で最大耐力に達した後、かぶりコンクリートが剥離し、コアのみで軸力に抵抗していたので、部材角 3.0%の載荷サイクル時に帯筋が破断し、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、スパイラルフープの配筋間隔が軸力比 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、耐力後の抵抗力の低下割合は、部材角 4.0%で 30%近い差が生じた。

4.2 柱の残留部材角

高強度鉄筋は、強度の大きさだけではなく、同じ変位振幅から除荷した際に、残留ひずみが普通強度鉄筋のそれより遥かに小さいため、部材の残留変形を小さく抑えられることが期待される。地震を受けた構造物の補修・再利用性を考える場合、残留部材角は構造物の耐震性能の重要な指標だといえる。本実験の残留部材角の結果を図-6 に示す。図中の残留部材角（平均）は、正側ピークから除荷した際の残留部材角と負側ピークから除荷した際の残留部材角を平均したものである。

図-6 より分かるように、高強度スパイラルフープによって拘束された高強度円形 RC 柱の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。同じ軸力比の軸力を載荷した試験体 CHRC60N33 と CHRC30N33 を比較すると、かぶりコンクリートが剥離するまでの変位振幅においては、互いに残留部材角が小さく抑えられているが、変位振幅が部材角で 3.0%のレベルに達した際の除荷時の平均残留部材角は CHRC30N33 が 0.5%程度であるのに対し、CHRC60N33 は 1.0%と約 2 倍の差が生じている。高軸力を受ける試験体 CHRC30N50 は、残留部材角の増加度合いが大きいものの部材角 2.0%の変位振幅までは、ほかの試験体とほぼ同じ残留

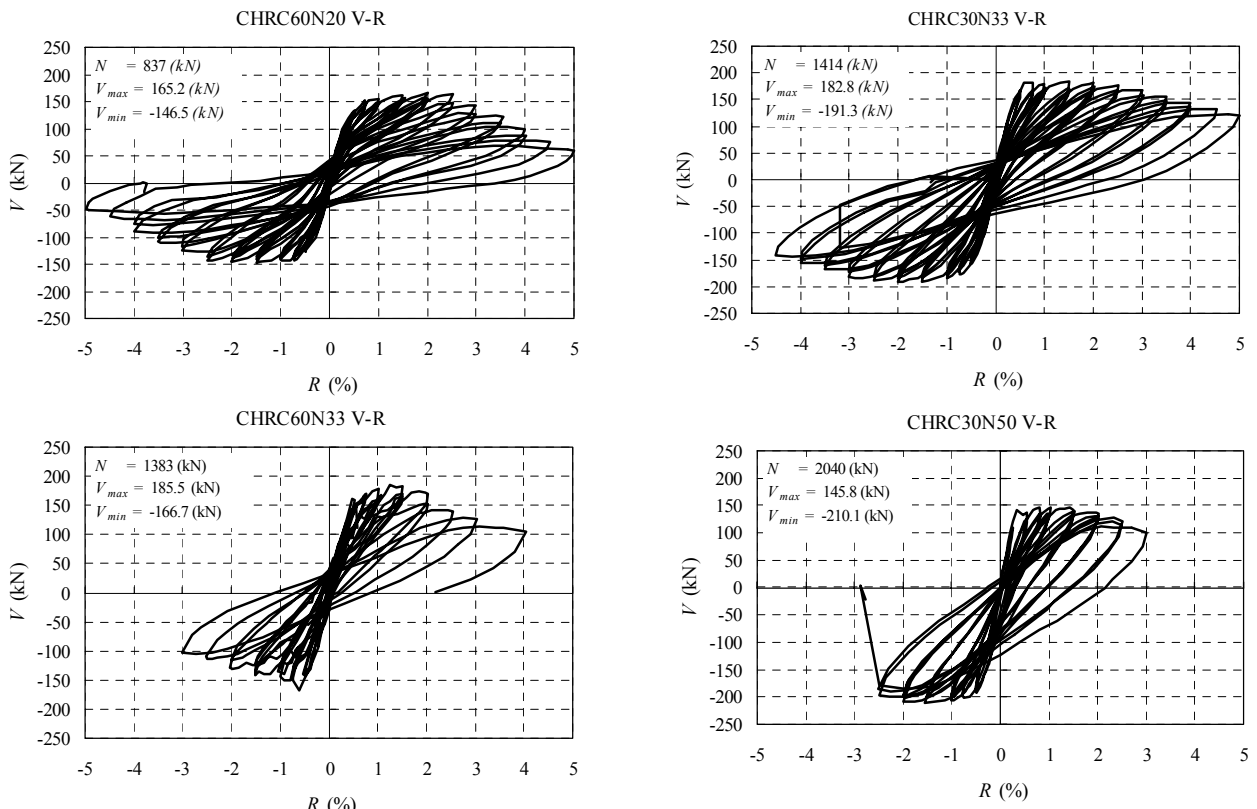


図-5 水平力V-部材角Rの実験結果

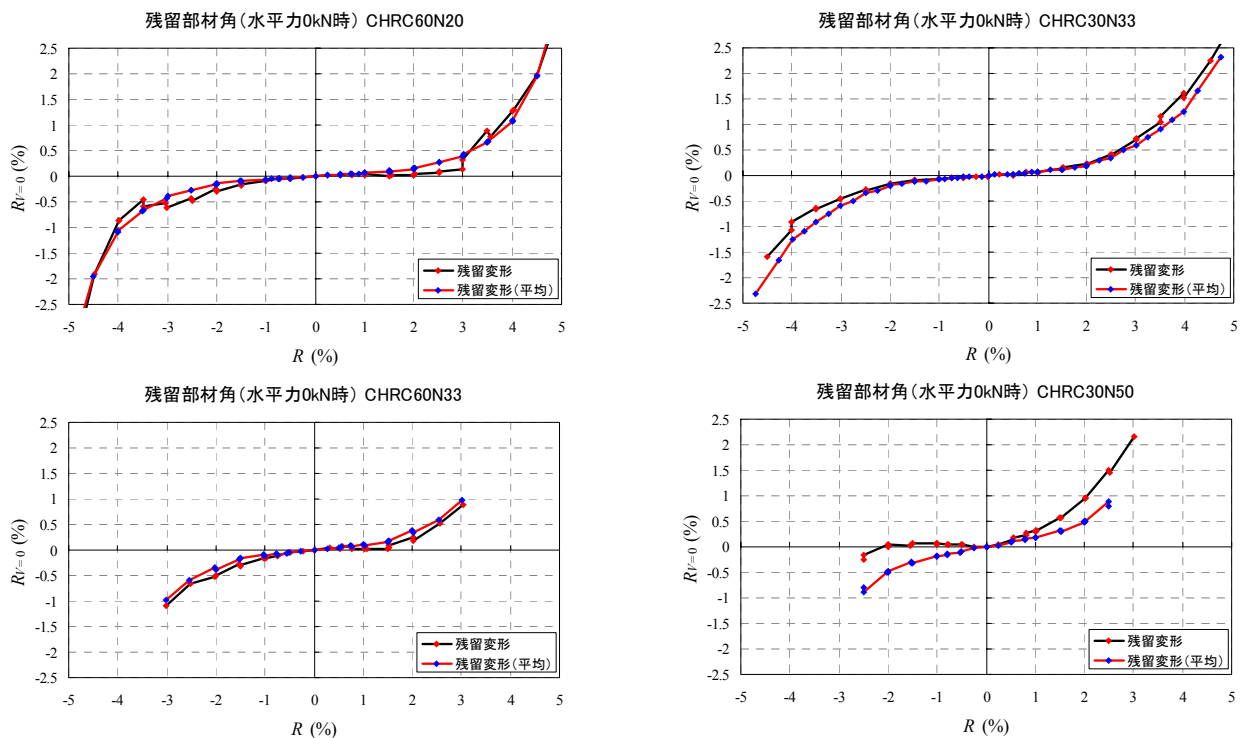


図-6 残留部材角の実験結果

部材角に収まっていることが分かる。孫らの既往の研究²⁾と比較して、高強度材料を使った円形RC柱は、部材角2.0%の変位振幅までは、残留部

材角を小さく抑えられることが明らかである。また、軸力が小さいほど、またスパイラル筋による拘束度合いが高いほど、柱の残留部材角が

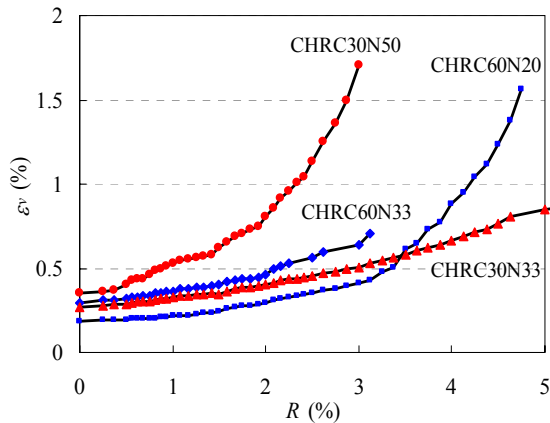


図-7 平均軸縮みの実験結果の比較

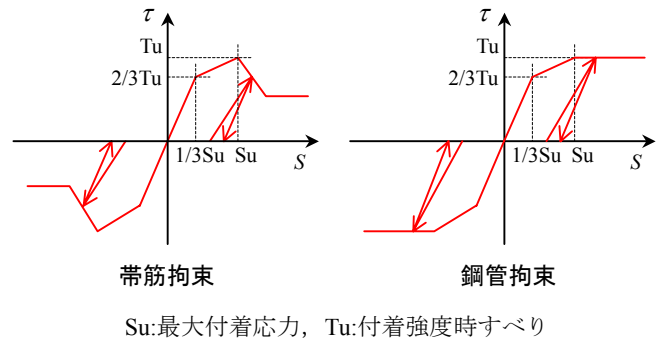


図-8 付着応力-すべり関係

小さく抑えられる傾向にあることは図-6 より伺える。

4.3 柱の平均軸縮み

図-7 には各試験体の部材角を 0%に戻した時点での平均軸縮み（圧縮を正とする）をプロットしている。平均軸縮みは、図-4 に示された 4 本の鉛直変位計で測定した軸方向ひずみの平均値を塑性ヒンジ領域長さ（250mm）で除した値である。

図-7 より明らかなように、軸力比 0.33 の軸力下では部材角が 2.0%時の平均軸縮みは約 0.4%前後であり、スパイラルフープの配筋間隔の影響は、部材角が 2.0%以上の大変形域に入ってから顕著に現れた。

5. 繰り返し履歴性状の解析

高強度 RC 部材断面の繰り返し履歴性状の解析は断面分割法で行った。解析にあたって設けた基本仮定は以下のとおりである。

- 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 L_p は $1 \cdot D$ とする
- 3) ヒンジ領域での各主筋のひずみ分布は一定
- 4) コンクリートは断面保持の仮定が成り立つ
- 5) 材料の応力ひずみ関係は文献 3 で提案されたモデルを用いる

また、コンクリートと高強度鉄筋の付着すべりの影響の評価には、文献 4 で提案された付着応力-すべり関係モデル（図-8）を用いた。

著者らが文献 4 で提案した解析法は、図-8 に示す鉄筋の付着応力-すべり関係を用いて、部材を剛なる基礎域、曲げ回転が集中する材端塑性ヒンジ領域、剛なる部材弾性域に分けたうえで、塑性ヒンジ領域両側の剛なる域に付着バネモデルを組み合わせて解析を行う方法である。

図-9 には上述した方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を示す。図-9 より分かるように、付着すべりを考慮した場合（青線）、円形 RC 柱の最大耐力のみならず、残留部材角、エネルギー吸収能力（履歴ループの面積）などすべての面において実験結果と比較的精度よく対応している。

一方、付着すべりを無視した場合は、履歴ループの性状が膨らみ、部材のエネルギー吸収能力および残留部材角を過大に評価していることが分かる（図-10 を参照されたい）。

6. まとめ

高強度鉄筋と高強度コンクリートを併用した拘束高強度円形 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った結果、以下のことが分かった。

- 1) 円形 RC 柱を体積比 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 の高い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。
- 2) 高強度主筋と高強度スパイラルフープを併用すれば柱の残留変形を小さく抑えること

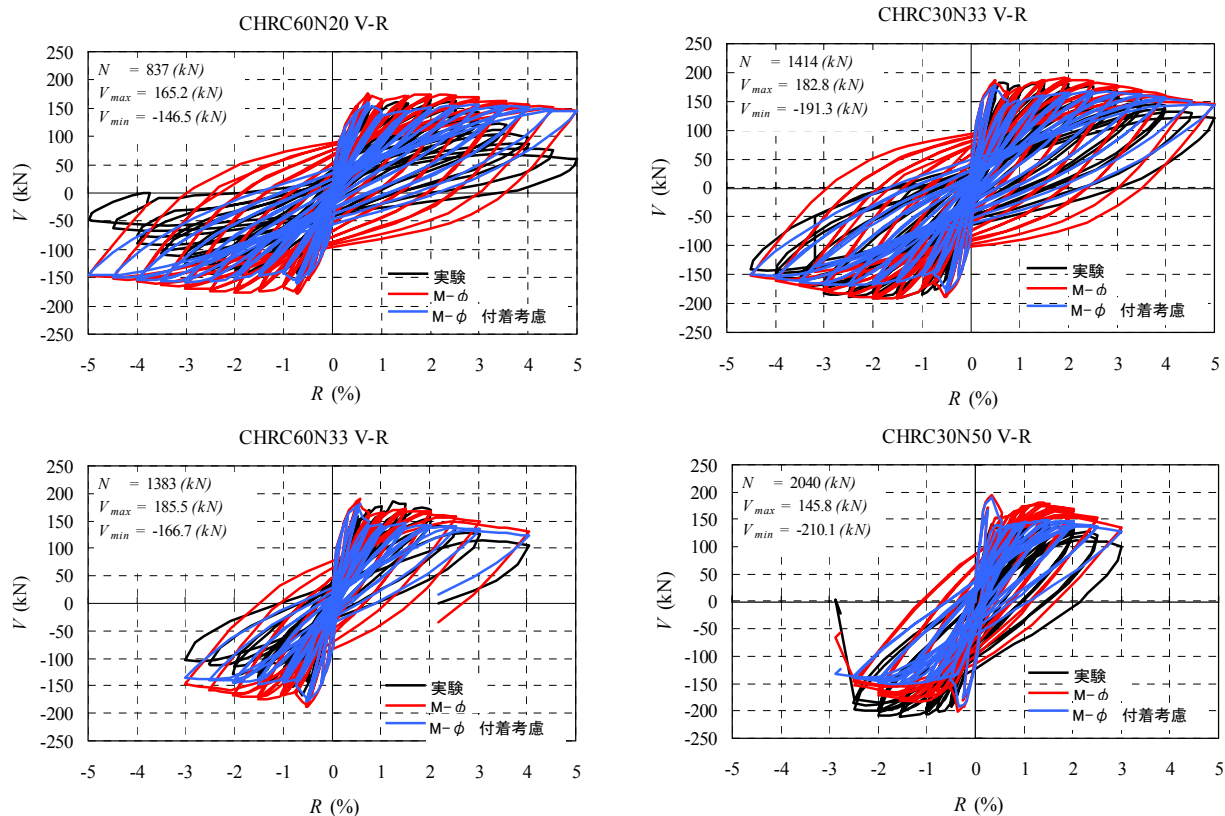


図-9 V-R関係の実験値と断面解析値の比較

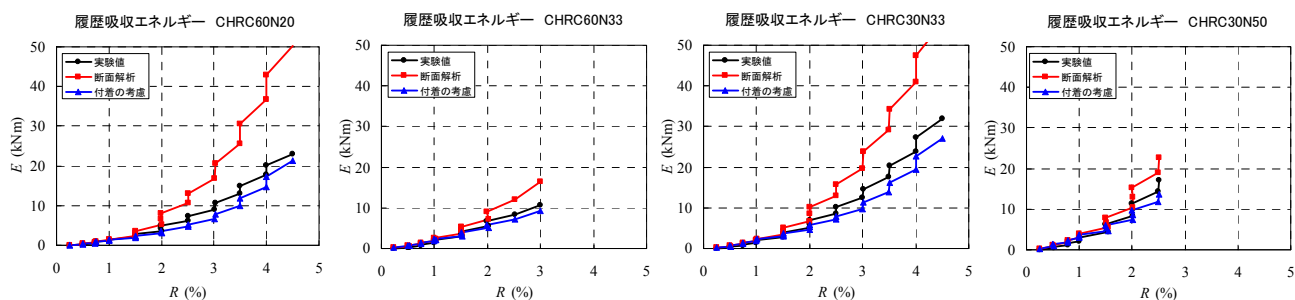


図-10 履歴エネルギー吸収能力の実験値と断面解析値の比較

ができる。

- 3) 著者らが文献 4 で提案した付着すべりの影響を考慮した解析方法は部材の履歴性状を比較的精度よく評価することができる。

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) 孫玉平ほか：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, pp.301-304, 1998.11

- 2) Y. Sun, et al. : Concrete Columns confined by High-Strength Hoops, Procs. of EASEC-5, pp.951-956, 1995
- 3) 北島英樹ほか：高強度 RC 部材の耐震性能評価法の提案 その 1, 日本建築学会九州支部研究報告 第 44 号, pp.349-352, 2005.3
- 4) 北島英樹ほか：高強度鉄筋を用いた高強度 RC 部材および骨組みの耐震性能評価法の提案 その 1-その 3, 日本建築学会学術講演梗概集 C-2 構造 IV, pp.193-198, 2005.9