

論文 超高強度鉄筋を主筋に用いた RC 柱部材の曲げせん断性状に関する研究

橋高 将義*1・谷 昌典*2・孫 玉平*3・藤永 隆*4

要旨：異形鉄筋と丸鋼の中間的な付着性状を有する超高強度鉄筋を主筋に用いた RC 柱の曲げせん断性状を把握することを目的とし、せん断スパン比を実験変数とした 3 体の縮小試験体に対する載荷実験を行った。全ての試験体で、残留変位の小さい原点指向型の履歴性状を示し、残留ひび割れ幅も小さく抑えることができた。また、主筋とコンクリート間の付着—すべり関係を考慮できる分割要素解析による挙動予測を行い、実験で得られた履歴性状を良好な精度で予測できることを示した。

キーワード：原点指向型、残留変位、残留ひび割れ幅、付着、分割要素解析

1. はじめに

近年に発生した大地震における被害の状況を受けて、建築物の設計においては、地震時の安全性のみならず、地震後の使用性及び修復性、すなわち、建物機能を維持または早期復旧できる性能も重視されるようになってきている。従来の RC 構造では、構造部材が塑性化することで地震エネルギーを吸収することから、地震後の残留変形が大きくなり、地震後の使用性及び修復性に支障をきたす。そこで、高い原点指向性を有する構造体にダンパーなどのエネルギー吸収機構を組み合わせることで、地震後の構造体に残留する変形やひび割れを微小な範囲に抑えて、地震後の建物機能の早期復旧を可能とする構造システムも数多く提案されるようになってきている。

著者らは文献 1)において、丸鋼表面に施されたスパイラル溝加工により、通常異形鉄筋と丸鋼の中間的な付着性状を有し、規格降伏強度が 1275N/mm^2 の超高強度鉄筋を主筋に用いた高強度 RC 柱に関する実験的研究を行い、大変形領域まで残留変位や残留ひび割れ幅を抑制できることを示した。一方、主筋の付着強度が比較的低いことから、その挙動はせん断スパン比の影響を大きく受けると考えられるため、本研究では実験変数にせん断スパン比を設定した試験体に対する載荷実験を行う。また、文献 1)において、平面保持解析が曲げ耐力を過大評価したことから、本研究では、主筋とコンクリート間の付着—すべり関係を考慮できる分割要素解析を用いた挙動予測も行う。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

本実験で用いた試験体の一覧を表-1 に、試験体の寸

法及び配筋詳細を図-1 にそれぞれ示す。試験体は縮尺 1/3 程度の片持ち RC 柱で、柱断面は $250\text{mm} \times 250\text{mm}$ の正方形断面である。せん断スパン比 a/D を実験変数とし、2.0, 2.5, 3.0 の 3 種類を設定した。柱脚危険断面から水平力載荷位置までの距離はそれぞれ 500mm, 625mm, 750mm である。

本実験で使用した鉄筋は、主筋、横補強筋ともに、規格降伏強度が 1275N/mm^2 の超高強度鉄筋 (SBPDN1275/1420) である。主筋として、RB12.6 異形鉄筋 12 本をかぶり厚 30mm の位置に均等に配置した。主筋比は 2.40% である。主筋に用いた鉄筋は、文献 1)同様、丸鋼にスパイラル溝加工した異形鉄筋である。横補強筋には RB5.0 丸鋼を使用し、横補強筋は、図-1 に示すように、副帯筋を併用して 60mm 間隔で配筋した。表-2 に鉄筋の材料試験結果を示す。

コンクリートには設計基準強度 $F_c=45\text{N/mm}^2$ のレディーミクストコンクリートを使用した。粗骨材の最大粒径は 20mm、使用したセメントは普通ポルトランドセメントである。実験時のシリンダー圧縮強度を表-1 に示す。

2.2 載荷方法及び測定方法

図-2 に載荷装置を示す。1000kN 油圧ジャッキで所定の圧縮軸力 (全試験体とも 900kN) を与えた状態で、300kN 油圧ジャッキで水平力を作用させた。図-3 に示す載荷履歴に従い、部材角制御による正負交番繰り返し載荷を行った。なお、部材角 R は、載荷点に設置した変位計によって測定された水平変位を柱のせん断スパンで除することにより算出した。水平変位はスタブに対する載荷点位置の相対水平変位とし、スタブに固定した治具を介して載荷点位置に設置した変位計により計測した値とした。

*1 神戸大学大学院 工学研究科建築学専攻 大学院生 (正会員)

*2 神戸大学大学院 工学研究科建築学専攻 助教 博士 (工学) (正会員)

*3 神戸大学大学院 工学研究科建築学専攻 教授 工博 (正会員)

*4 神戸大学 都市安全研究センター 准教授 博士 (工学) (正会員)

表-1 試験体一覧

Specimen	f'_c (N/mm ²)	N (kN)	Transverse reinforcement			a/D	Q_{exp} (kN)	R_{exp} (x10 ⁻² rad)
			Detail	p_w (%)	ρ_h (%)			
HHC-S20N22	65.9	900 (0.219)	■-RB5.0@60	0.61	1.53	2.0	275	1.50
HHC-S25N22						2.5	212	1.48
HHC-S30N22						3.0	178	1.41

ここに、 f'_c ：コンクリートシリンダー圧縮強度、 N ：軸力（下段括弧内は軸力比 η ）、 p_w ：横補強筋比、 ρ_h ：横補強筋体積比、 Q_{exp} ：最大水平力実験値（正負平均）、 R_{exp} ： Q_{exp} 時部材材角（正負平均）

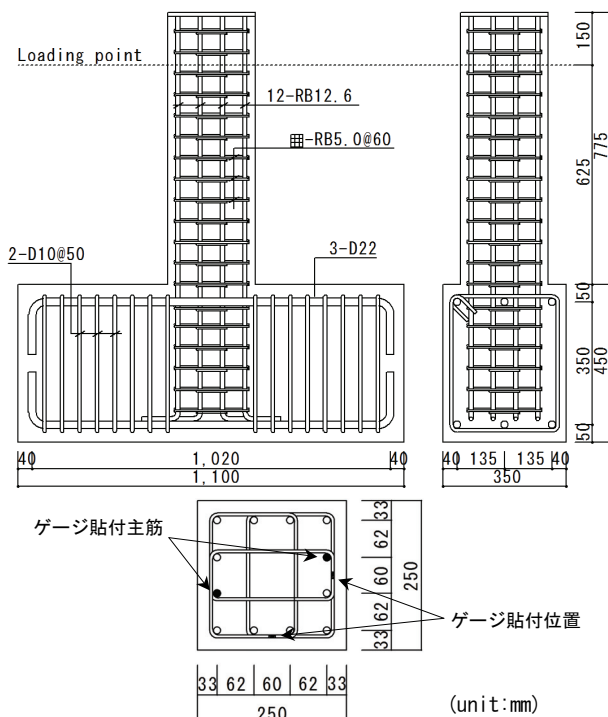


図-1 試験体寸法と配筋 (a/D=2.5)

表-2 鉄筋の材料特性

	f_y (N/mm ²)	ϵ_y (%)	f_u (N/mm ²)	E_s (kN/mm ²)
RB12.6	1447	0.91	1495	202.2
RB5.0	1510	0.92	1594	209.1

ここに、 f_y, ϵ_y ：0.2%オフセット降伏点応力及びひずみ、 f_u ：引張強度、 E_s ：弾性係数

主筋及び横補強筋にはひずみゲージを貼付し、鉄筋のひずみを測定した。主筋については、図-1の断面図に示す2本に対して、柱脚危険断面から-215mm、-95mm、25mm、145mm、265mm、425mm、585mm、745mm（上向き正、HHC-S20N22のみ745mmは省略）の位置に貼付した。横補強筋については、柱脚危険断面から60mm、180mm、300mm（上向き正）に位置する横補強筋に対して、図-1の断面図に示す位置に貼付した。いずれもひずみゲージは1か所につき1枚とし、鉄筋の曲げ変形の影響が小さい位置に貼付した。

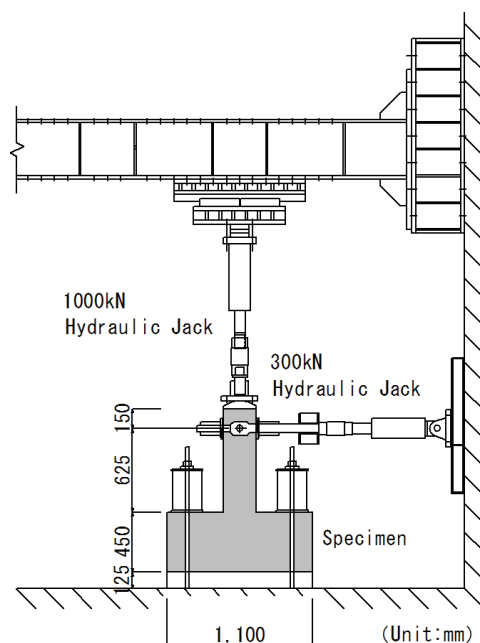


図-2 荷装置 (a/D=2.5)

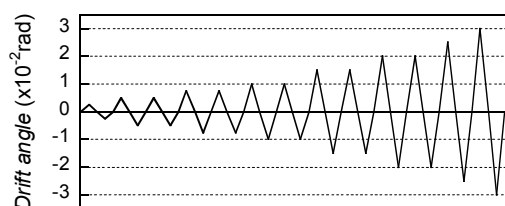


図-3 荷履歴

3. 実験結果

3.1 破壊性状及び実験経過

図-4に $R=0.005rad, 0.01rad, 0.02rad$ の各サイクル終了時における各試験体のひび割れ性状を示す。図中のグリッド間隔は50mmで、左向きが正荷荷方向である。破壊性状については、せん断スパン比の影響が確認された。具体的には、せん断スパンが小さくなるにつれて端部コンクリートの損傷が大きくなった点、HHC-S20N22のみ $R=\pm 0.02rad$ サイクルでせん断ひび割れの発生が確認された点の2点である。いずれも、入力されるせん断

力の大小による影響と考えられる。実験経過には明確な差異が見られなかったため、ここではせん断スパン比 2.5 の HHC-S25N22 の実験経過を一例として示す。 $R=\pm 0.0025\text{rad}$ のサイクルで危険断面から 250mm の範囲に曲げひび割れが発生し、その後、部材角の増加に伴って曲げひび割れ本数が増加した。 $R=\pm 0.0075\text{rad}$ のサイクル以降は、曲げひび割れが斜め方向に進展した。 $R=\pm 0.01\text{rad}$ のサイクルにおいて圧縮側カバーコンクリートが圧壊し始め、以降、部材角の増大とともに、コンクリートの破壊が進行した。

図-5 に実験で得られた各試験体の水平力-部材角関係を示す。図中、△印で曲げひび割れが発生した点を、○印で水平力が最大となった点をそれぞれ示す。また、一点鎖線は軸力による P- Δ 効果の影響を示す。いずれの試験体も残留変位の小さな原点指向型のループを描いた。カバーコンクリートの圧壊が顕著に進行した $R=\pm 0.0015\text{rad}$ サイクルの部材角反転点付近において最大水平力を示した。以降、部材角の増大とともに、コンクリートの破壊が進行したが、耐力はほとんど低下しなかつ

た。最終荷重サイクルまで主筋及び横補強筋の降伏、座屈は発生せず、安定した軸力保持性能を示した。なお、原因は不明であるが、HHC-S20N22 及び HHC-S25N22 で、 $R=\pm 0.03\text{rad}$ サイクルの除荷途中に、一時的に除荷剛性が急激に低下する現象が見られた。

本実験では、コンクリートの破壊によって最大耐力が決定されたにも関わらず、その後、耐力を維持したまま変形が進行した。これは、カバーコンクリートの破壊によって最大耐力に至り、その後、主筋に付着滑りが発生したことにより、主筋の引張力が増加せず、コアコンクリートが負担すべき圧縮力もそれほど増加しなかったことが原因であると考えられる。

3.2 残留部材角及び残留ひび割れ幅

本実験で計測された残留部材角及び残留ひび割れ幅（水平力除荷後における部材角及びひび割れ幅）を用いて、地震後の修復性及び使用性に関する考察を行う。図-6 に各荷重サイクルごとの残留部材角の推移を示す。いずれの試験体も、最大経験部材角が 0.01rad 以下であれば、残留部材角は 0.001rad 以下、最大経験部材角が

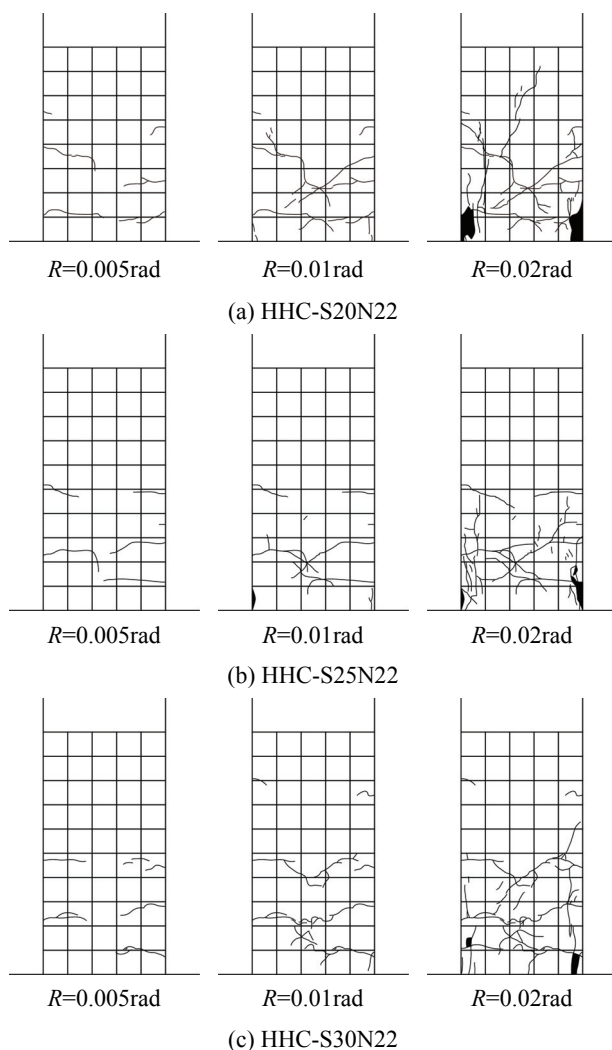


図-4 ひび割れ性状

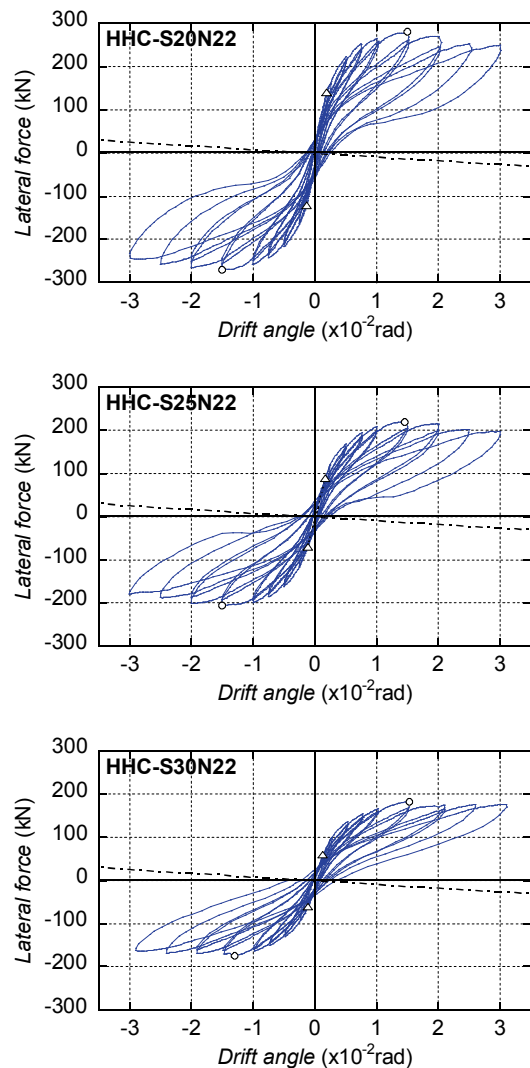


図-5 水平力-部材角関係

0.02rad 以下であれば、残留部材角はおおむね 0.002rad 以下に抑えられており、せん断スパン比による差異はほとんど見られない。なお、HHC-S20N22 及び HHC-S25 N22 では、最大経験部材角 0.025rad を超えると、HHC-S30N22 に比べて残留部材角が小さくなったが、これは先述の除荷時における急激な剛性低下によるものである。

図-7 に各载荷サイクル 1 回目における残留ひび割れ幅の推移を示す。図-7 に示す値は、曲げひび割れ及び曲げひび割れから進展したせん断ひび割れの残留ひび割れ幅の最大値で、クラックスケールによる計測値である。図より最大経験部材角が 0.015rad でも残留ひび割れ幅は 0.2mm 以下で、これは日本建築学会「鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針(案)」²⁾ (以下、性能評価指針) の使用限界状態(補修不要)に相当する。なお、最大経験部材角が 0.02rad より大きな範囲では、カバーコンクリートの圧壊が著しく、測定値の信頼性に疑問はあるが、最大経験部材角が 0.03rad でも、性能評価指針の修復限界 I に相当する残留ひび割れ幅 1.0mm には達していない。このように、残留部材角及び残留ひび割れ幅ともに大幅に小さく抑えられた実験結果が得られた。

3.3 エネルギー吸収性能

各载荷サイクルの 2 回目ループにおける等価粘性減衰定数 h_{eq} を図-8 に示す。R=0.01rad サイクルまでは、 h_{eq} は 0.05 程度ではば一定値であった。ただし、カバーコンクリート圧壊により最大耐力を示した R=0.015rad の载荷サイクルでは h_{eq} が 0.06~0.07 に増加し、その後も部材角の増大に伴って h_{eq} が増加する傾向が見られた。実験時に主筋及び横補強筋は未降伏であったことから、エネルギー吸収の大半はコンクリートの破壊によると推測される。なお、図-8 に示す通り、R=0.015rad サイクル以降、HHC-S30N22 のみ、他の 2 体 に比べて h_{eq} が小さくなる傾向が見られており、HHC-S30N22 のコンクリー

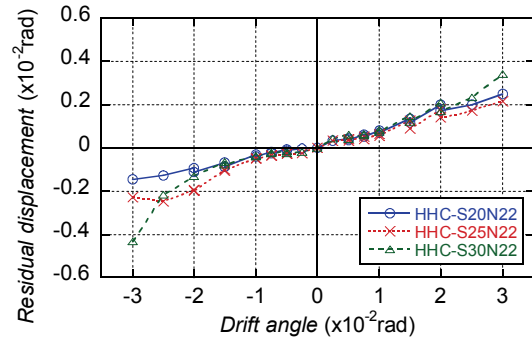


図-6 残留部材角

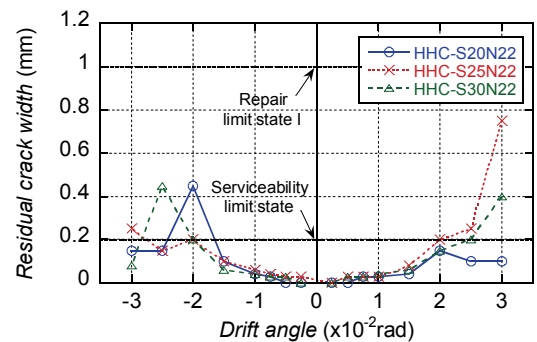


図-7 残留ひび割れ幅

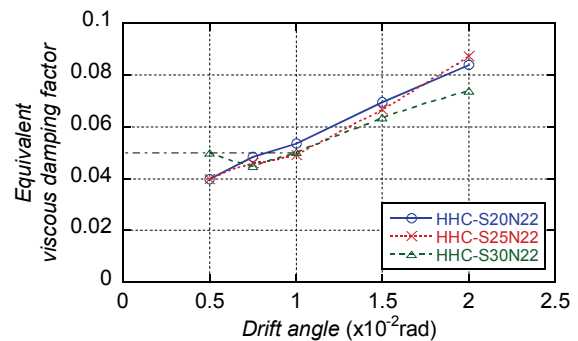


図-8 等価粘性減衰定数

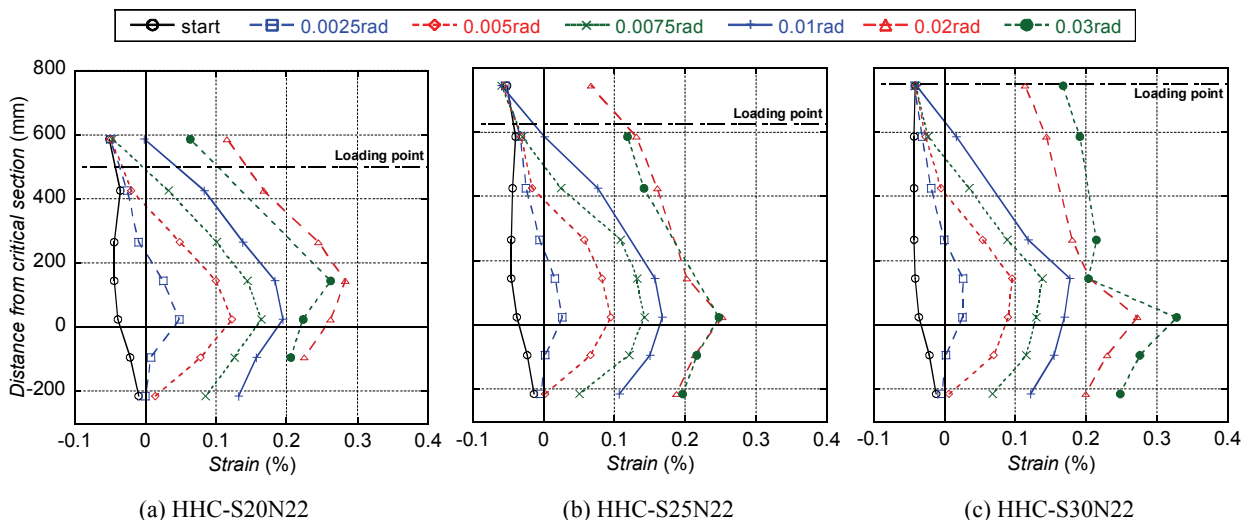


図-9 各サイクルの部材角反転点における引張側主筋ひずみ分布

ト損傷が比較的少なかった実験結果と一致する。

3.4 主筋ひずみ分布

図-9に各載荷サイクル1回目の部材角反転点における引張側主筋のひずみ分布を示す。主筋ひずみは最大でも0.3%程度で、いずれの試験体の主筋も弾性範囲で挙動していたことが分かる。危険断面近傍(25mmから145mmの範囲)では、 $R=0.0025\text{rad}$, 0.005rad といった早い段階で、他の範囲に比べて傾きが小さくなっており、付着応力の減少が確認された。また、 $R=0.02\text{rad}$ サイクル以降は、入力されるせん断力が頭打ちになったことにより、主筋ひずみが減少に転じた試験体も見られた。

なお、主筋の上端は、載荷点の150mm上部に設置した耐圧板に溶接して固定されており、図より、いずれの試験体でも、 $R=0.02\text{rad}$ では耐圧板に主筋の引張力が伝達されていたと推測される。したがって、これ以降の挙動に何らかの影響を及ぼした可能性がある。

4. 分割要素解析を用いた挙動予測

4.1 解析概要

著者らが文献1)で指摘した通り、本実験のような付着強度の低い鉄筋を主筋に用いた場合には、平面保持解析では曲げ耐力を危険側に評価する可能性が高い。そこで、本論文では、鉄筋とコンクリート間の付着-すべり関係を考慮できる分割要素解析³⁾を用いて、実験結果の予測を行う。

図-10に要素分割の概要を示す。部材をせい方向及び材軸方向にそれぞれ分割して剛性マトリクスを誘導する分割要素法に基づいている。解析手法の詳細は文献3)を参照されたい。なお、本解析で用いる仮定は以下の通りである。

- ・ 個々の分割要素内での応力及びひずみは一定
- ・ コンクリートには平面保持の仮定が成立
- ・ せん断による変形は考慮しない
- ・ 載荷点上部及びスタブのコンクリートは剛体

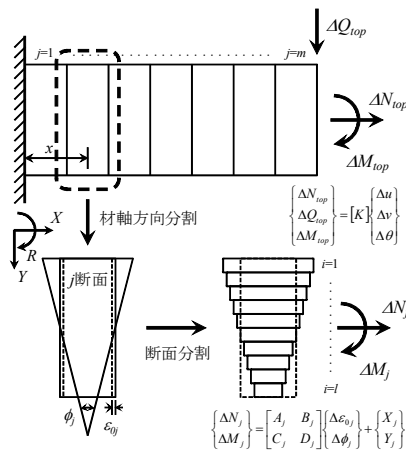


図-10 要素分割概要³⁾

図-11に本解析で使用するモデル形状及び材軸方向の要素分割方法を示す。試験区間における材軸方向の分割幅は、柱脚の1ブロックのみ250mm、その他は125mmとし、断面せい方向の分割数は100とした。コンクリートの応力-ひずみ関係は、崎野・孫式⁴⁾によりその包絡線を定め、繰返しルールはWatanabeらによって提案されたモデル⁵⁾を用いた。主筋の応力-ひずみ関係には、Menegotto-Pinto式に基づく履歴モデル⁶⁾を用いた。主筋とコンクリート間の付着-すべり関係には、森田・角モデル⁷⁾を用い、付着強度には文献8)に示される丸鋼とコンクリート間の付着強度 ($\tau_f=2.91\text{N/mm}^2$)を用いた。なお、主筋の定着に関しては、両端とも固定端と仮定した。

4.2 解析結果と実験結果の比較

図-12に各試験体の水平力-部材角関係の実験結果と解析結果を示す。図中、実線で解析結果を、点線で実験結果を、一点鎖線で軸力によるP-Δ効果の影響をそれぞれ示す。

図に示すように、いずれの試験体についても、実験で確認された残留変形の小さな原点指向型の履歴性状を、本解析によって適切に予測できた。また、カバーコンクリートの圧壊を伴って最大耐力を示した実験結果と同様に、本解析でもカバーコンクリート部の耐力低下を伴って最大耐力を示す結果が得られた。ただし、最大耐力時の部材角に関しては、解析結果が実験結果よりかなり小さな値となっており、初期剛性も含めて、最大耐力に至るまでの剛性を大きく評価する傾向が見られた。また、特にせん断スパン比の小さな試験体に対して、耐力を全体的に過大に評価した。主筋とコンクリート間の付着性状のモデル化や、要素分割方法、すなわち、塑性ヒンジ長さの設定が解析結果に大きく影響を及ぼすことから、これらの適切な設定は本解析の今後の課題である。これらの項目に関する詳細な検討については稿を改めて行うものとする。

また、図-13に付着を考慮した場合の解析結果(実線)

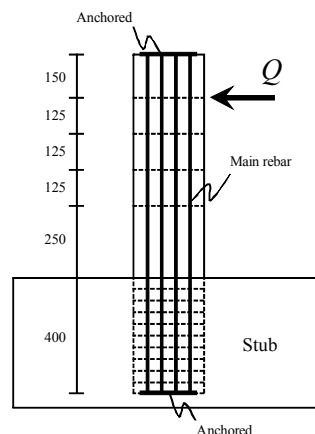


図-11 解析モデル ($a/d=2.5$)

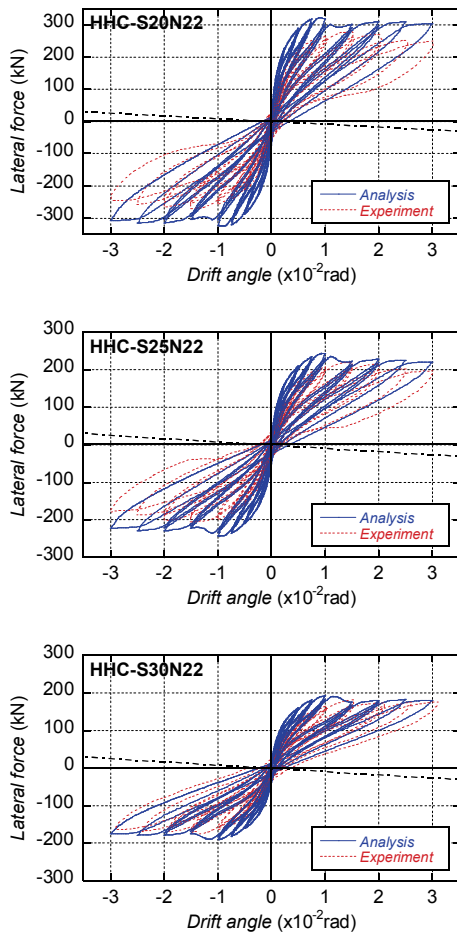


図-12 実験結果と解析結果の比較

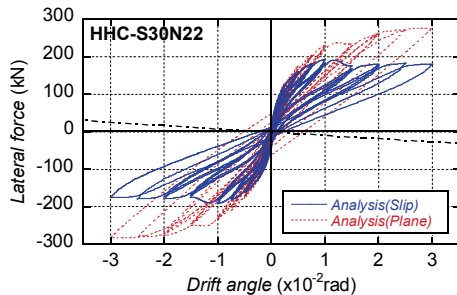


図-13 付着考慮の有無による解析結果の比較

と完全付着を仮定した場合の解析結果（点線）を示す。両者を比較すると、完全付着を仮定した場合、カバーコンクリートの圧壊後も耐力が上昇し続け、除荷時の残留変形もかなり大きな値となっており、本部材の挙動予測において付着を考慮する必要性が示された。

5.まとめ

本研究では、せん断スパン比を実験変数とし、超高強度鉄筋を主筋に用いた RC 柱試験体 3 体に対する載荷実験を実施し、その力学性状の検証を行った。また、主筋とコンクリート間の付着-すべり関係を考慮した分割要素解析を用いた挙動予測を行った。得られた知見を以下にまとめる。

- いずれの試験体も、残留変位の少ない原点指向型の履歴性状を示した。ただし、せん断スパン比が小さくなるに伴って、入力せん断力が大きくなることから、端部コンクリートの損傷が大きくなる傾向が見られた。
- 全体的にエネルギー吸収性能の小さい履歴性状を示した。 $R=0.01\text{rad}$ までは、 h_{eq} は0.05程度で一定値を示し、以降、変形の進行に伴って、カバーコンクリートの圧壊により h_{eq} が増加する傾向が確認された。
- 分割要素解析を用いた挙動予測では、残留変形の小さな原点指向型の履歴性状を予測することができたが、水平耐力や最大耐力に至るまでの剛性を過大評価する傾向が見られた。ヒンジ長さ（要素分割の方法）、主筋とコンクリート間の付着性状の適切な評価に課題が残されている。

謝辞

本研究を進めるにあたり、神戸大学技術職員・金尾優氏、同学部生・仲井士門氏の多大な協力を得た。本実験の試験体に使用した高強度鉄筋は JFE テクノワイヤ株式会社より御提供頂いた。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 谷昌典ら：高復元性を有する高強度 RC 柱部材に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31, No.2, pp.565-570, 2009.7
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート建造物の耐震性能評価指針（案）・同解説，pp.169-194, 2004
- 3) 前田博司ら：PC 鋼材の付着すべりを考慮したプレキャスト PC 部材の履歴挙動解析法，コンクリート工学年次論文集，Vol.26, No.2, pp.709-714, 2004.7
- 4) 崎野健治ら：直線型横補強材により拘束されたコンクリートの応力-ひずみ関係，日本建築学会構造系論文集，第 461 号，pp.95-104, 1994.7
- 5) Watanabe, F., et al.: Structural Performance of Reinforced Concrete Columns with Different Grade Longitudinal Bars, ACI Structural Journal, Vol.92, No.4, pp.412-418, Jul./Aug.1995
- 6) 三隅哲志ら：PC 鋼棒の応力度-ひずみ度関係のモデル化，日本建築学会学術講演梗概集，C-2, pp.885-886, 1997.9
- 7) 森田司郎ら：繰返し荷重下における鉄筋とコンクリート間の付着特性に関する研究，日本建築学会論文報告集，第 229 号，1975.3
- 8) 森田司郎：鉄筋コンクリートにおける付着とひびわれに関する研究，京都大学学位請求論文，pp.55, 1968