

論文 高強度アンボンド主筋を用いたRC柱の履歴性状

田中 睦^{*1}・江崎文也^{*2}・小野正行^{*3}・河本裕行^{*4}

要旨: 塑性後の残留変形をできるだけ小さくするため, 付着が生じないように加工した高強度PC鋼棒を主筋に用いるRC柱を提案した。この柱について, 一定軸力下の正負繰返し水平力載荷実験を行い, その履歴性状について検討した。実験結果によれば, 付着のある従来のRC柱に比べて水平耐力は小さいが, ひび割れが柱頭および柱脚に集中し, 部材角が3%程度まで, 水平耐力が徐々に増加するとともに, 除荷後の残留変形もかなり小さくすることができることがわかった。

キーワード: 鉄筋コンクリート柱, アンボンド, PC鋼棒, 残留変形

1. 序

靱性抵抗型のRC建築物を設計する場合, 柱や梁の主筋降伏による曲げ降伏先行の破壊モードとなるように計画する。この場合, 主筋の降伏による履歴吸収エネルギーを利用して地震時のエネルギーを吸収するため, 主筋の付着が十分確保されている必要がある。しかし, このような方法で設計された建物は, 崩壊は免れても震災後には残留変形による建物の傾斜のため, 再利用ができずに取り壊しとなるケースが多く見られる。建築物の性能評価が重要視されてきている現状を考慮すれば, このような問題を解決できる方法が提案されることが望まれる。そこで, 解決法の1つとして, 比較的大きな変形を受けても震災後できるだけ元に復元できるような柱を有する構造を提案する。

残留変形を低下させる目的でアンボンド芯材を挿入したRC橋脚の実験的研究¹⁾やプレキャスト部材の実験的研究²⁾では, アンボンド高強度鉄筋を用いた履歴性状の研究が行われているが, 本研究では, 残留変形ができるだけ生じないようにするため, 著者らが行ったRCブロック柱の実験結果³⁾をヒントに, 鉄筋の弾性挙動とコンクリートのひび割れを柱頭と柱脚の曲げ

ひび割れに限定した非線形型の弾性履歴性状を持つ柱の開発を目指し, 主筋にアンボンド高強度鉄筋を利用したRC柱を提案する。このような柱を有する構造の場合, 柱の水平せん断耐力が小さいことが予測されるので, 梁の破壊が先行する可能性は少ない。そのため, 層崩壊となる恐れが大きく, 柱の履歴エネルギー吸収も小さいことが予測されるので, 水平せん断耐力が大きく, かつ地震時のエネルギーを吸収できるデバイスと併用する必要がある。例えば, せん断破壊を起こさない連層耐震壁を建物の心棒として配置し, 地震時のエネルギー吸収には安定した履歴性状を示すカップリングガーダーやダンパーなどのようなデバイスを組み合わせて用いれば, 本提案の構造も可能と考えられる。

そこで, このような性能を有するRC柱の履歴性状を検討するため, 主筋にアンボンド高強度鉄筋を用いたRC柱の一定軸力下の正負繰返し水平力載荷実験を行った。本論は, これらについて検討した結果を述べるものである。

2. 実験概要

2.1 試験体

表-1に試験体一覧を示す。試験体は, 通常

*1 九州共立大学助手 工学部建築学科 工修 (正会員)

*2 福岡大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

*3 近畿大学教授 産業理工学部建築・デザイン学科教授 博士(工学) (正会員)

*4 九州共立大学大学院 都市システム工学専攻学生

用いられている強度の異形鉄筋を用いたRC柱と主筋にアンボンドPC鋼棒を用いた柱の合計6体である。アンボンド主筋とするため、本実験ではPC鋼棒をビニールチューブで被覆する方法を採用した。せん断スパン比 $M/(QD)$ (M :柱の最大曲げモーメント, Q :柱の最大せん断力, D :柱断面せい)の値は、いずれの試験体とも2である。一定軸力 N による軸応力度 σ_0 ($=N/(bD)$, b :柱断面幅)のコンクリート圧縮強度 σ_B に対する比は0.15である。

2つの実験シリーズを計画した。1つは、柱全高にわたって付着がない場合の履歴性状を検討する中間定着無しシリーズである。もう1つは、柱高中央部で主筋の定着部を設け、履歴性状に及ぼす中間定着の影響を検討する中間定着有シリーズである。これは、アンボンドに起因する水平耐力の低下をできるだけ押さえる目的で計画したものである。中間定着部は、図-1に示すように、柱せいの1/2の長さの被覆鋼管にリブプレートを溶接し、接続用カップラーとナットにより主筋を定着する方法とした。

試験体名は、 - - の3つの識別記号で示した。 は、それぞれ、B:主筋が付着のある異形鉄筋, UB:主筋が付着のない高強度鉄筋, UBT:UB試験体の柱頭・柱脚に柱せいの1/2の長さの鋼管を被覆したもの, BT:B試験体の柱頭・柱脚に柱せいの1/2の長さの鋼管で被覆したもの, UBF:UB試験体の主筋中間部を定

着したもの, UBFT:UBF試験体の柱頭・柱脚に柱せいの1/2の長さの鋼管で被覆したものを示す。柱頭・柱脚を鋼管で被覆した試験体は、鋼管による柱頭および柱脚部分のコンクリートのコンファインド効果を期待して計画したものである。 は、せん断スパン比の値を、また、 は、軸力比 σ_0/σ_B の値をそれぞれ示す。表-2に、使用した材料の力学的性質を示す。

2.2 載荷方法および載荷プログラム

図-2に示す加力装置を用いて、図-3に示

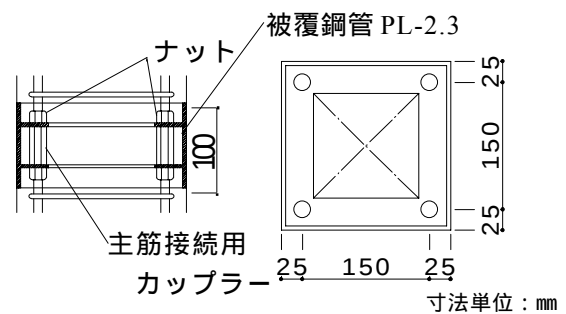


図-1 柱高中央部の定着部詳細

表-2 使用材料の力学的性質

(1) 鉄筋

	$a(\text{cm}^2)$	$\sigma_y(\text{MPa})$	$\sigma_u(\text{MPa})$	ϵ (%)
D6	0.32	429	522	19.9
D13	1.27	360	502	18.9
9.2	0.66	1036	1078	11.8
PL2.3	0.39	281	340	38.4

a :断面積, σ_y :降伏点, σ_u :引張強度, ϵ :伸び

(2) コンクリート

	$\sigma_B(\text{MPa})$	ϵ_B	$E_c(\text{GPa})$
B・UB・UBT	28.4	0.00121	28.1
BT・UBF・UBFT	24.88	0.00158	27.66

σ_B :シリンダー圧縮強度, E_c :ヤング係数,

ϵ_B :強度時のひずみ

表-1 試験体一覧

		寸法単位				
試験体	B-2-0.15	UB-2-0.15	UBT-2-0.15	BT-2-0.15	UBF-2-0.15	UBFT-2-0.15
試験形状						
主筋	6-D13($p_g=1.91\%$)	4-9.2($p_g=0.65\%$)	4-9.2($p_g=0.65\%$)	6-D13($p_g=1.91\%$)	4-9.2($p_g=0.65\%$)	4-9.2($p_g=0.65\%$)
帯筋	D6@40($p_w=0.80\%$)	D6@40($p_w=0.80\%$)	D6@40($p_w=0.80\%$)	D6@40($p_w=0.80\%$)	D6@40($p_w=0.80\%$)	D6@40($p_w=0.80\%$)
被覆鋼			□ 200×200×2.3	□ 200×200×2.3		□ 200×200×2.3

す載荷プログラムにより，一定軸力下の漸増変位振幅正負交番繰り返し載荷とした。

2.3 測定方法

文献3)に示す測定装置を用いて，上下スタブ間の相対水平変形および鉛直変形を測定した。中間定着無シリーズでは，柱頭と柱脚部分およびその間を4等分した5カ所の位置の主筋，および柱頭，柱脚および中央の3カ所の位置の帯筋にゲージを貼付してひずみを測定した。中間定着有シリーズでは，柱頭と柱脚部分，定着部の上下およびその間を2等分した合計， ϕ 所の位置の主筋，および柱頭，柱脚および中央の3カ所の位置の帯筋にゲージを貼付してひずみを測定した。ひび割れおよび破壊状況は，目視によるスケッチにより記録した。

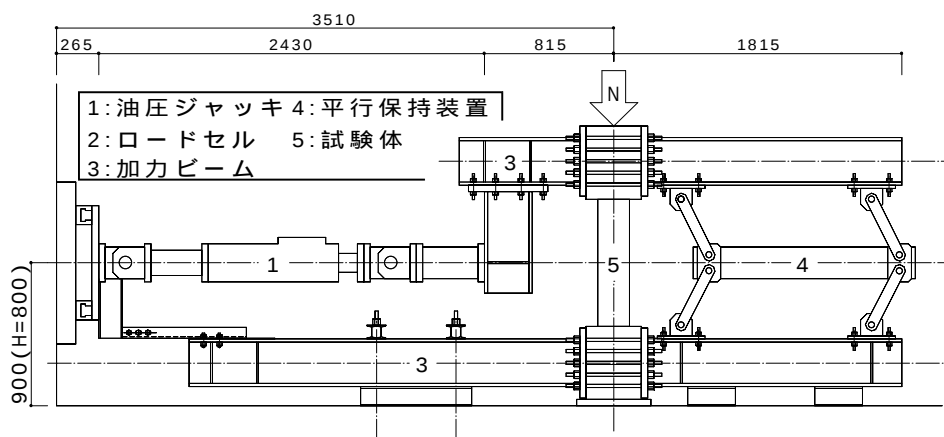


図 - 2 加力装置

ズの場合，アンボンド高強度鉄筋については，スタブと定着部間には付着が生じていないこ

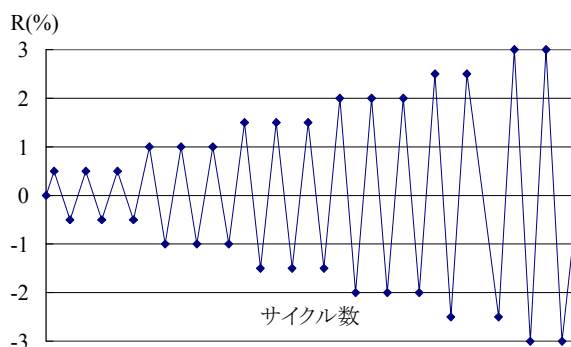


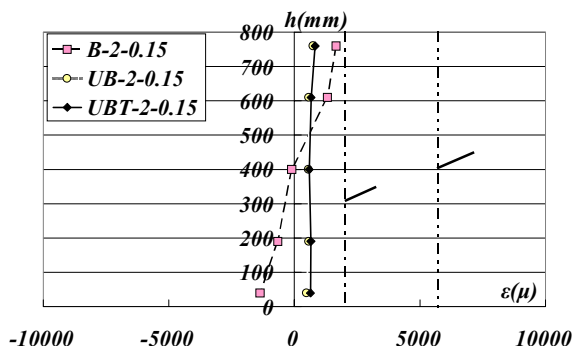
図 - 3 載荷プログラム

3. 実験結果

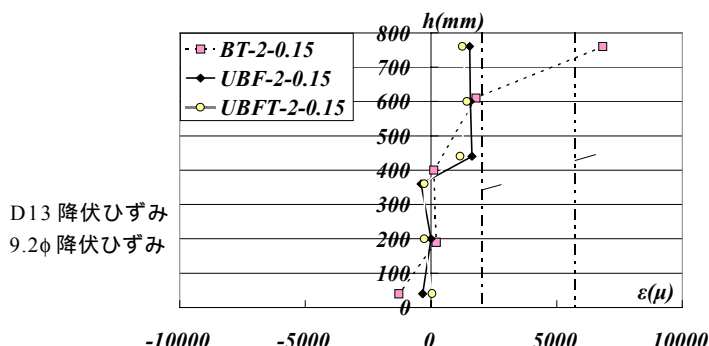
表 - 3 に実験結果の一覧を示す。図 - 4 に，制御変位 $R=1\%$ での主筋のひずみ分布を示す。中間定着無シリーズの場合，アンボンド高強度鉄筋については，主筋全長にわたってほぼ同じ引張応力となっていることから，付着が生じていないことがわかる。一方，中間定着有シリー

表 - 3 実験結果一覧

試験体名	$Q(kN)$		$R(\%)$	
	+	-	+	-
B-2-0.15	87.91	-89.03	0.99	-1.50
UB-2-0.15	49.52	-48.57	1.99	-1.51
UBT-2-0.15	52.64	-54.07	2.92	-3.01
BT-2-0.15	91.57	-85.49	2.99	-2.51
UBF-2-0.15	69.64	-65.08	2.99	-3.01
UBFT-2-0.15	67.29	-74.92	3.00	-3.01



a) 中間定着無シリーズ



b) 中間定着有シリーズ

図 - 4 $R=1\%$ 制御変位時の主筋のひずみ分布

と、および定着部上下で鉄筋の応力が変化していることがわかる。

図 - 5 a, b に、中間定着無、有の各実験シリーズについて、各試験体の水平力 Q と上下スタブ間の相対水平変形を柱の内法高さで除した部材角 R との関係および鉛直方向の平均ひずみ ε_v と部材角 R との関係を、実験終了時のひび

割れ状況とともに示す。図中には、付着のあるB, BTの各試験体では、曲げ破壊による水平せん断耐力⁴⁾、付着のないUB, UBFT, UBFTの各試験体では、アーチ機構による水平せん断耐力⁵⁾を破線で示した。

3.1 破壊状況

(1) 中間定着無シリーズ

付着のある試験体では、 $R=0.5\%$ のときにスタブ境界の曲げひび割れと $0.75D$ 近傍の曲げせん断ひび割れの発生が観察された。 $R=1\%$ でスタブより $1D$ の範囲に曲げせん断ひび割れが数本発生し、 $R=2\%$ を超えると一部カバーコンクリートの剥落が生じた。一方、付着のない試験

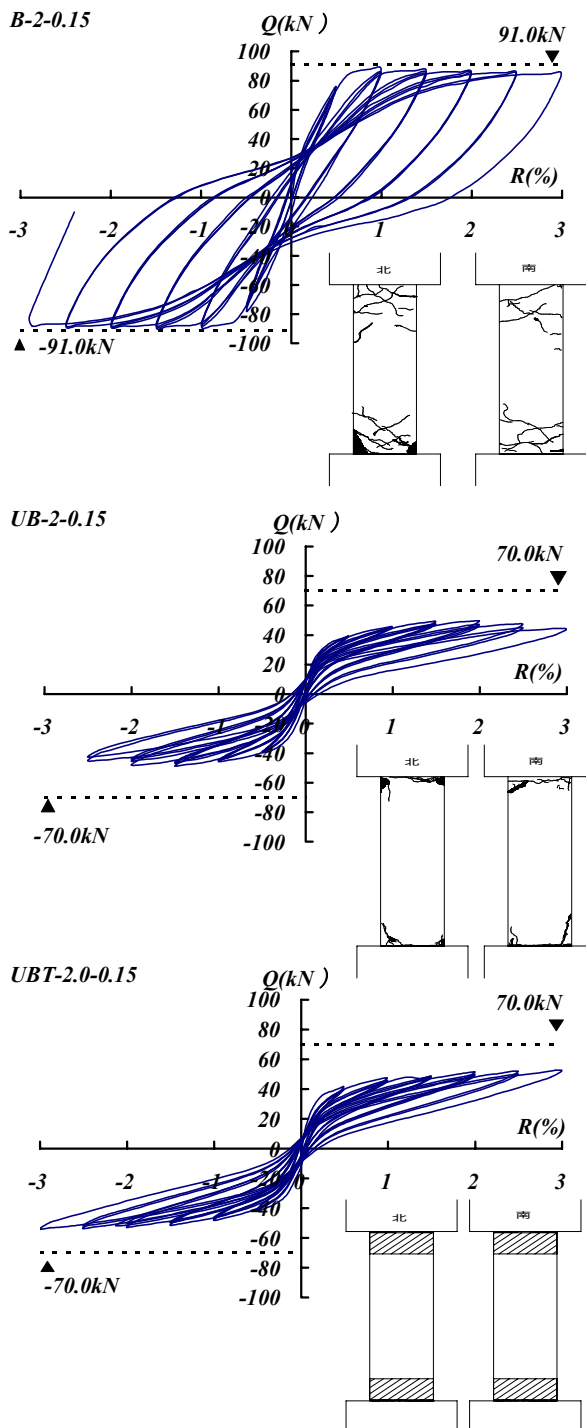


図 - 5a 中間定着無シリーズ各試験体の水平荷重 - 部材角履歴曲線、鉛直平均ひずみ部材角履歴曲線および実験終了時のひび割れ状況

体の場合は、いずれも $R=0.5\%$ のときにスタブ境界に曲げひび割れが発生した。柱頭および柱脚部を鋼管で被覆した場合は、終局時まで境界部の曲げひび割れが拡大するのみで、他の部分にはひび割れの発生は観察されなかったが、被覆されていない試験体では、 $R=2\%$ を超えると一部カバーコンクリートの剥落が生じ、 $R=2.5\%$ を超えると境界部の一部圧壊により、わずかであるが水平荷重の低下が生じ、鉛直方

向の縮みが他の試験体より大きい結果となった。

(2) 中間定着有シリーズ

付着のある試験体の場合は、柱頭および柱脚部分に鋼管で被覆しているため、スタブとの境界に生じた曲げひび割れ以外のひび割れは微細なものであった。 $R=0.5\%$ のときにスタブ境界部分に曲げひび割れが生じ、その後の水平力の増大とともに、この曲げひび割れが拡大した。実験終了後、被覆鋼管を取り除いてコンクリートのひび割れ状況を観察した結果、圧壊時に見られるひび割れに類似した小さいひび割れが生じており、柱頭および柱脚部のコンクリートの

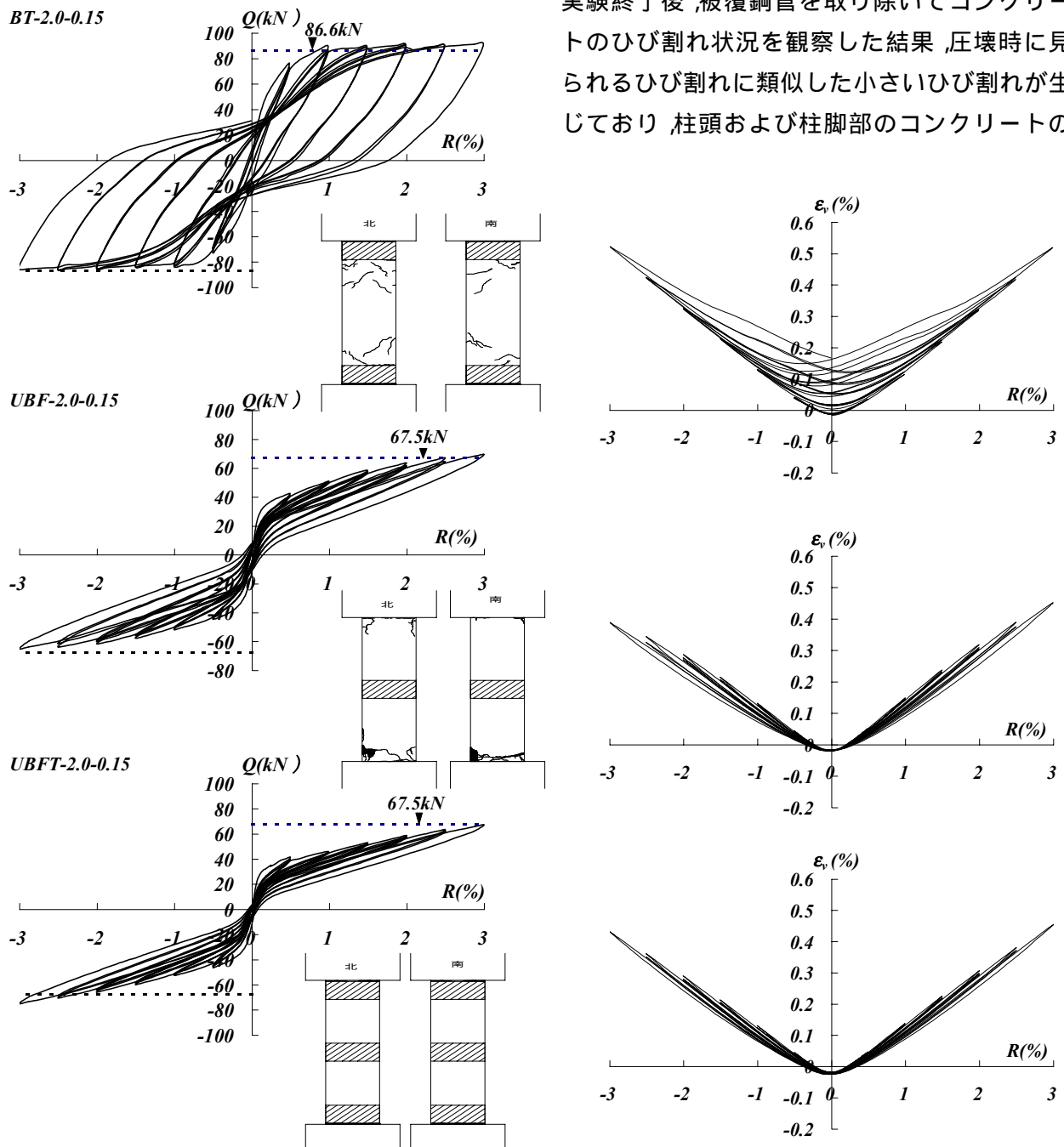


図 - 5b 中間定着無有シリーズ各試験体の水平荷重 - 部材角履歴曲線，鉛直平均ひずみ部材角履歴曲線および実験終了時のひび割れ状況

圧壊を鋼管が有効に拘束していることがわかった。一方、付着のない中間部を定着した試験体では、 $R=0.5\%$ のときにスタブ境界部分に曲げひび割れが生じ、その後の水平力の増大とともに、この曲げひび割れが拡大した。 $R=2.5\%$ を超えると、柱頭および柱脚部分に鋼管で被覆していない場合は、境界部で一部カバーコンクリートが剥落する現象が観察されたが、鋼管で被覆されている試験体では、境界部の曲げひび割れが拡大するのみであった。

3.2 履歴性状

荷重変形履歴曲線によれば、いずれの実験シリーズとも付着のある試験体の場合は、いずれも経験部材角から除荷後の残留変形は、経験部材角が大きくなるほど大きくなっていることがわかる。一方、付着のない試験体の場合は、いずれも原点指向の履歴曲線を示しており、経験部材角が増大しても、除荷後の残留変形はあまり大きくなっていないことがわかる。柱頭および柱脚部を鋼管で被覆すれば、スタブ境界部のカバーコンクリートの剥離や圧壊が防止されるので、水平力の低下もなく、水平変形の増大とともに徐々に水平せん断耐力が上昇する結果となった。実験終了後、被覆鋼管を除去すると、コンクリートの圧壊時に見られるひび割れに相当する小さなひび割れが観察され、鋼管がコンクリートを拘束する効果が発揮されていることがわかった。付着を無くした主筋を用いる場合は、無筋コンクリートの曲げ抵抗による圧縮とアーチ機構による水平力伝達のため、柱頭および柱脚部のコンクリートを確実に拘束できる特殊な補強を行えば、かなり大きな変形時でも安定した履歴性状が期待でき、残留変形も小さくできるものと考えられる。

アンボンド高強度鉄筋を主筋に用いる場合、中間定着をすると、定着をしていない場合に比べて水平耐力が多少増大するとともに、水平変形の増大とともに徐々に水平耐力が増大する履歴性状を示し、定着部の効果が観察された。

4. 結論

主筋にアンボンド高強度鉄筋を利用したRC柱について、一定軸力下の正負繰返し水平力載荷実験を行った結果、以下のことがわかった。

- 1) アンボンド高強度鉄筋を主筋として用いた場合、 $R=3\%$ 程度まで主筋が弾性挙動を示し、除荷後の残留変形をかなり小さくすることができた。
- 2) アンボンド高強度鉄筋を主筋として用いた場合、柱頭および柱脚部を鋼管で補強すると水平変形の増大と共に水平せん断耐力が徐々に上昇した。
- 3) 中間部で主筋を定着すると、定着のない場合に比べて水平耐力が多少増加し、大変形時まで水平耐力が徐々に増加した。

謝辞

本実験は、平成15年度文部科学省科学研究費補助金(基盤研究(C)(2)、課題番号15560509、研究代表者:江碕文也)の援助を受けた。試験体製作および実験の実施にあたっては、平成15年度江崎研究室の卒論生の協力を得た。加力装置の組立および試験体製作にあたって、九州共立大学工学部建築学科技師の高田一俊、米原義則および永岡忠光の各氏に御世話になった。ここに、関係各位に感謝します。

参考文献

- 1) 家村浩和、ほか: アンボンド高強度芯材入りRC橋脚のハイブリッド地震応答実験、第2回構造物の破壊過程に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集、pp.189-194、2001.3
- 2) 西山峰広、ほか: アンボンド圧着接合柱の力学性状に関する研究、日本建築学会学術講演梗概集、C-2、2003、pp.1015-1018
- 3) 江碕文也: リサイクル可能なRC柱の弾塑性性状、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.20、No.3、1998、pp.655-660
- 4) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準。同解説 付20(1991一部改定)、pp.615、1991.4
- 5) 加藤 勉、称原良一: 鉄骨鉄筋コンクリート部材の耐力、日本建築学会論文報告集、第266号、pp.19-29、1978.4