

繰り返し曲げを受ける鉄筋コンクリート柱の破壊領域における変形特性に関する実験的研究

水野英二, 鈴木森晶*, 亀田好洋**

An Experimental Study on Deformational Behavior of RC Columns under Cyclic Loading

Eiji Mizuno, Moriaki Suzuki * and Yoshihiro Kameda**

Abstract: The present paper deals with the experimental study on the flexural deformation properties of reinforced concrete (RC) columns subjected to cyclic loading under axial compression. The experiment has been performed on RC column specimens with the different concrete strengths. The experimental results have been examined with respect to the cyclic load-displacement curves and the progress of failure zone near the column base. Furthermore, the effect of the lateral-hoop ratio on the cyclic deformation property in the post-peak region has been discussed in some details. It turns out that the lateral-hoop ratio almost has no influence on the cyclic behavior of RC columns up to a large displacement level, i.e. $8\delta_p$.

Keywords : RC column, Cyclic deformation, Progressive failure behavior

1. はじめに

平成7年に発生した兵庫県南部地震では、多数の鉄筋コンクリート(RC)橋脚が倒壊した。震災後に実施された被害分析から、横拘束筋の配筋量およびその定着状態がRC構造物のポストピーク領域における変形性能に大きな影響を及ぼすことが分かった¹⁾。

一般に、RC柱のポストピーク領域での変形性能を向上させるためには、面積横拘束筋比(以下、面積鉄筋比)および打設コンクリートの圧縮強度(以下、コンクリート強度)を高く設定することにより、柱基部における拘束(コンファインド)効果を十分に確保する手法が有効であると言われている¹⁾。星隈ら²⁾ならびに秋山ら³⁾は、面積鉄筋比およびコンクリート強度をパラメトリックに変化させることにより、矩形および円形断面を有するRC柱への単調一軸圧縮載荷実験を実施して、上述の手法の有効性に対する評価を行い、コンファインドコンクリートの応力-ひずみ関係を提案している。

一方、繰り返し曲げが作用するRC柱の変形挙動を対象とした研究も数多く実施されている⁴⁾。しかし、内部コンクリートへの拘束効果などに代表される材料レベルの力学特性と部材レベルの変形特性との関連性に着目した研究事例に限れば、さほど多くないのが現状である。また、上述のように、横拘束筋配筋量の多少がRC柱の変形特性に大きな影響を及ぼすことが指摘されている中で、既往の研究で用いられた供試体の多くが、面積鉄筋比が0.5%以下という比較的低い水準で設定されており⁵⁾、面積鉄

* : 愛知工業大学 工学部 准教授

** : 名古屋工業大学大学院博士後期課程

筋比の高い RC 柱の変形特性については、未だ解明されていない部分が多い。

これまで、筆者らは、「軸圧縮力」および「横拘束筋間隔」⁶⁾、「横拘束筋間隔」および「載荷パターン」⁷⁾を要因として、一方向曲げまたは繰り返し曲げを受ける RC 柱供試体の載荷実験をそれぞれ実施してきた。

本研究では、文献 7) での成果を基に、新たに RC 柱供試体 (200×200×1000 mm : 28 体) を作製し、軸圧縮下での一方向繰り返し曲げ載荷実験を実施した。本実験では、既往の研究で扱った「横拘束筋間隔」および「載荷パターン」に加え、「コンクリート強度」も要因とした。ここでは、上記の 3 要因のうち、「横拘束筋間隔」ならびに「コンクリート強度」の違いが RC 柱の変形特性に与える影響について、文献 7) の実験結果も含めてエネルギー吸収能および破壊進展の観点から検証した。また、横拘束筋からの内部コンクリートへの拘束効果を考慮したコンクリート構成モデル式⁸⁾において軟化特性を設定するために用いられる「力学的鉄筋パラメータ」を指標として、実験結果の整理および考察も行った。

2. 実験供試体

2.1 供試体の概要

本研究で使用した供試体の形状ならびに配筋の一例を図-1 に示す。実験には、断面 200×200 mm、柱有効高さ 1000 mm、せん断スパン比 5 を有する RC 柱供試体を用いた。供試体は曲げ破壊先行型となるように、軸方向筋には D10 (SD295A) を 8 本、横拘束筋には D6 (SD295A) を 35, 50, 65, 90, 105, 120 および 150 mm 間隔 (s) でそれぞれ配筋した。すなわち、横拘束筋の面積鉄筋比 0.29~1.23 % (体積鉄筋比にして、0.58~2.46 %) の 7 水準から成る供試体を作製した。打設コンクリートには、設計基準強度 $f'_{ck} = 40 \text{ MPa}$ および 60 MPa を有する普通コンクリート (2 水準) を用いた。

ここで、本実験に用いた供試体の面積鉄筋比および力学的鉄筋パラメータの一覧を表-1 に示す。表中、 ρ_a は面積鉄筋比 (%), m は強度比 (横拘束筋の降伏強度 σ_{ys} をコンクリートの一軸圧縮強度 f'_c で除した値) である。ちなみに、設計基準強度 $f'_{ck} = 20 \text{ MPa}$ の普通コンクリートを用いた供試体 (文献 7)) のパラメータ値も記載してある。なお、道路橋示方書で定められるコンクリート構成モデル式に適用できる横拘束筋量の上限は、体積鉄筋比にして 1.80 % (本論文に用いている面積鉄筋比にして 0.90 %) であることを付記しておく⁸⁾。

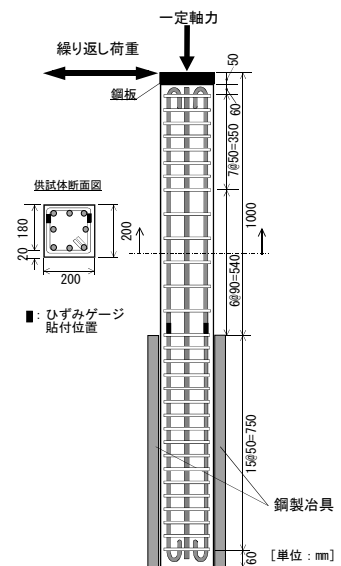


図-1 供試体配筋図 (一例)

2.2 供試体の材料定数

鉄筋およびコンクリートの材料定数を JIS 規格で定められる材料試験法により求めた。材料試験より得られた材料定数を表-2 に示す。

表-1 面積鉄筋比と力学的鉄筋パラメータ

横拘束筋 間隔 s [mm]	面積 鉄筋比 ρ_a [%]	力学的鉄筋パラメータ		
		$\rho_a \cdot m$ [%]		
		設計基準強度 : f'_{ck} [MPa]		
		20	40	60
35	1.23	20.08	7.69	5.15
50	0.86	11.42	5.39	3.60
65	0.66	11.40	4.44	3.18
90	0.48	6.45	3.45	2.30
105	0.41	5.06	3.01	2.06
120	0.36	5.86	2.40	1.79
150	0.29	3.54	2.07	1.43

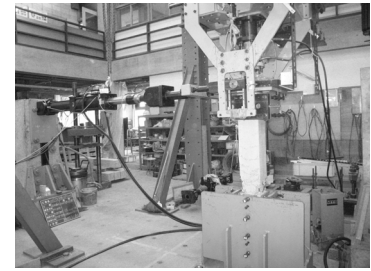
3. 載荷実験

3.1 載荷方法

本実験では、供試体 (図-1 参照) を鋼製治具に挿入し、高力ボルトにより完全固定の条件となるように、供試体を固定した。写真-1 に示すような載荷装置を用い、RC 柱に対して鉛直ジャッキにより軸

表－2 材料定数一覧

横拘束筋 間隔 s [mm]	コンクリート			軸方向筋（平均）		横拘束筋（平均）	
	設計基準・圧縮強度[MPa]			降伏強度 [MPa]	引張強度 [MPa]	降伏強度 [MPa]	引張強度 [MPa]
	20	40	60				
35	19.5	46.7	71.0	351.0	519.0	315.1	512.4
50	24.0	46.7	71.0				
65	18.5	43.6	61.8				
90	24.0	40.5	61.8				
105	25.8	39.8	59.2				
120	19.5	43.6	59.7				
150	25.8	40.5	59.7				



写真－1 載荷実験装置

力を作用させると同時に，水平ジャッキにより水平変位を柱頂部に与え，一方向繰り返し曲げ載荷実験を実施した．軸力の大きさは累加軸耐力の 5 %とし，次節の載荷パターンに基づき変位制御により水平荷重を作用させた．ちなみに，軸力は，設計基準強度 $f_{ck} = 20$ MPa では 51.1 kN，40 MPa では 95.2 kN および 60 MPa では 134.4 kN（いずれも平均値）である．

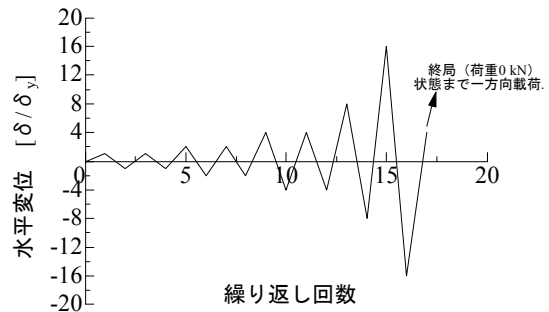
3.2 載荷パターン

図－2 に示すような低変位レベルから大変位レベルにかけての繰り返し漸増載荷パターン⁷⁾を設定した．図中の「 δ_y 」は部材降伏時の変位を示し，供試体内の軸方向筋が降伏（降伏ひずみ $\varepsilon_y = 2,000\mu$ ）した際の水平変位 δ を意味する．以下に，載荷パターンの内容を示す．

載荷パターン

変位 0 mm $\rightarrow \pm 1 \delta_y$ （1 または 2 サイクル） $\rightarrow \pm 2 \delta_y$ （1

または 2 サイクル） $\rightarrow \pm 4 \delta_y$ （2 サイクル） $\rightarrow \pm 8 \delta_y \rightarrow \pm 16 \delta_y \rightarrow$ ＜一方向載荷＞ $\rightarrow$ 荷重 0 kN



図－2 載荷パターン

3.3 計測データ

水平荷重，水平変位，柱基部の軸方向筋および横拘束筋ひずみを計測した．また，軸方向筋ひずみについては，軸方向筋 8 本のうち供試体隅角部に位置する 4 本に，横拘束筋ひずみについては，基部直上に位置する横拘束筋の曲げ加工部近辺（図－1 参照）に対してひずみを計測した．

4. 実験結果および考察

本章では，水平荷重－水平変位関係，吸収エネルギー－累積変位関係および破壊進展状況などの実験結果に対する考察を行う．また，表－1 に示す供試体（21 体）のうち，力学的鉄筋パラメータ $\rho_a \cdot m$ 値がおおよそ 3.5 % および 5.2 %（表中の□と■とで示されている値）を有する供試体（それぞれ 3 体）を対象として，同値の力学的鉄筋パラメータを有する供試体の変形特性の違いについても比較・検討を行う．

なお，以下の考察で必要となる，各供試体の降伏荷重 P_y ，降伏変位 δ_y および降伏時吸収エネルギー E_y を表－3 に示す．ここで，降伏時吸収エネルギー E_y とは部材が降伏するまでに外力が行った仕事である．

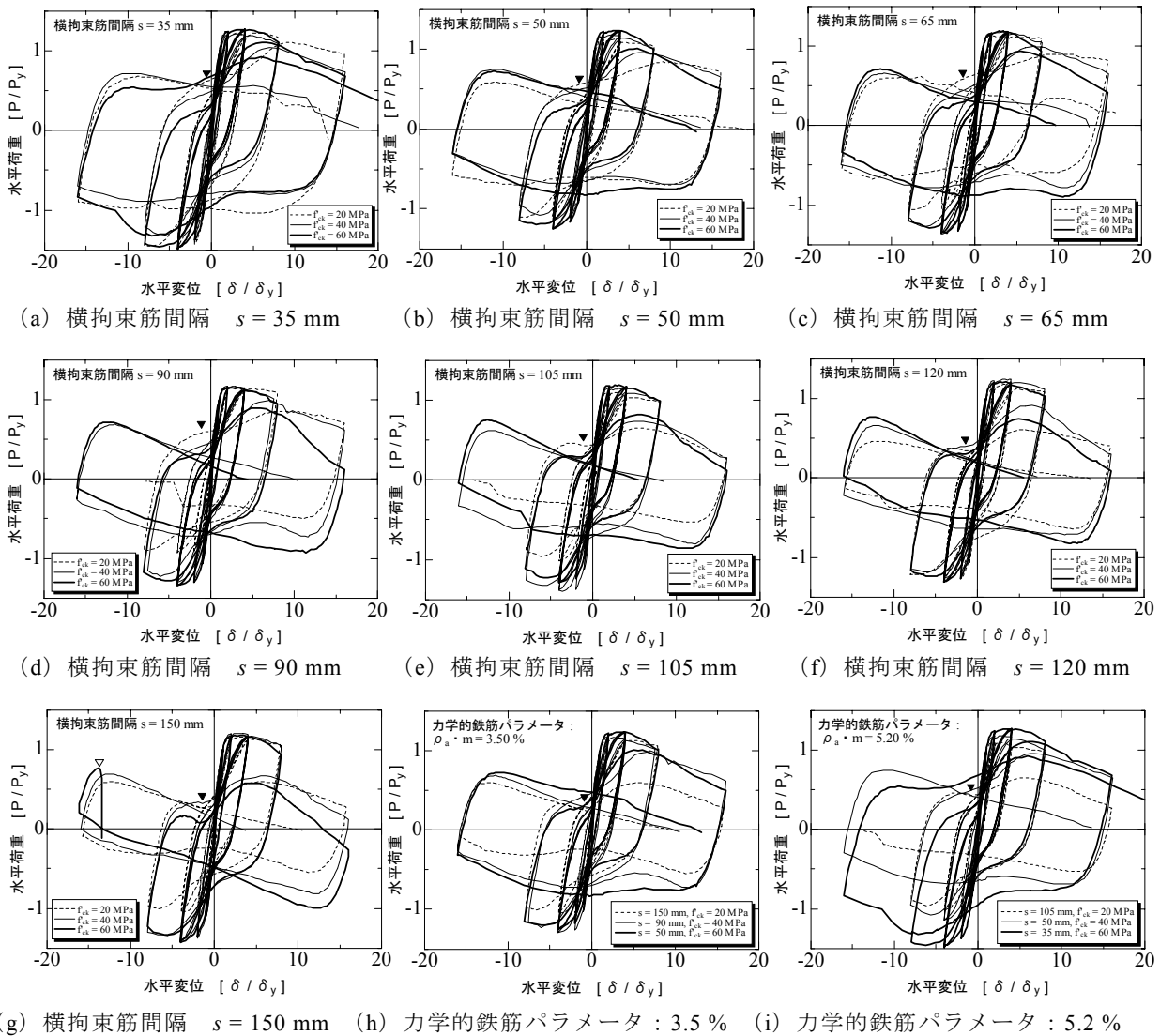
4.1 水平荷重－水平変位関係

全体的な考察

横拘束筋間隔ごとにまとめた，全供試体の水平荷重－水平変位関係を図－3 (a) ～ (g) に示す．なお，図中の数値は，水平荷重および水平変位ともに，降伏荷重 P_y および降伏変位 δ_y （表－3 参照）によりそ

表－3 部材降伏時の水平荷重，水平変位およびエネルギー吸収量の一覧

横拘束筋 間隔 s [mm]	降伏荷重 P_y [kN]			降伏変位 δ_y [mm]			降伏時吸収エネルギー E_y [kN・mm]		
	設計基準強度： f'_{ck} [MPa]			設計基準強度： f'_{ck} [MPa]			設計基準強度： f'_{ck} [MPa]		
	20	40	60	20	40	60	20	40	60
35	15.7	20.3	22.2	9.11	8.02	6.68	80.3	104.6	92.6
50	18.8	22.1	24.4	9.89	8.85	7.66	118.0	129.1	118.5
65	19.1	20.1	23.0	8.55	8.27	8.31	115.7	107.1	119.5
90	20.2	20.4	23.3	9.12	8.68	8.35	119.9	114.5	122.1
105	20.7	19.1	23.2	9.83	8.23	8.28	133.4	100.9	121.1
120	17.1	20.3	22.6	9.12	7.84	8.21	99.6	103.5	119.4
150	20.0	19.2	22.4	9.17	8.18	8.35	120.8	100.6	114.7



図－3 水平荷重－水平変位関係

れぞれ無次元化してある．表－3 から分かるように，コンクリート強度が高くなるに従い，降伏荷重 P_y が大きくなる（20 MPa：18.8 kN → 60 MPa：23.0 kN < いずれも平均値 >）のに対し，降伏変位 δ_y は小さくなる（20 MPa：9.25 mm → 60 MPa：7.98 mm < いずれも平均値 >）傾向を示す．

－8 δ_y までの履歴特性：

－8 δ_y までの履歴特性を比較すると，全体的に大きな差異は認められないが，コンクリート強度が 20

MPa，かつ横拘束筋間隔が 65 mm 以上の場合（ただし，120 mm の場合は除く．）には，除荷側（unloading 側）での耐力が他のケースと比べて低くなっており，横拘束筋間隔およびコンクリート強度の違いによる影響が生じている．

−8 δ_y から +16 δ_y までの履歴特性：

−8 δ_y から +16 δ_y にかけての載荷（すなわち，−8 δ_y から +0 δ_y に向かう載荷）では，横拘束筋間隔が大きく，かつコンクリート強度が高くなるに従い，ピンチング（pinching）部（図中にシンボル▼で示す．）にて耐力が他のケースに比べて低下するとともに，履歴曲線の湾曲具合が大きくなる傾向にある．さらに，当該サイクルにおけるピーク耐力（最大耐力）の低下およびピーク耐力以降の荷重－変位関係の軟化勾配が大きくなる．この理由としては，横拘束筋間隔の大きい供試体ほど軸方向筋のはらみ出しが早期に生じ，かぶりコンクリートのみならず，内部コンクリートに多数のひび割れが発生するとともに，圧壊が進展し，柱基部周辺のコンクリートが有する耐荷性能が低下するためと考えられる．また，コンクリートの軟化挙動は圧縮強度が高いものほどより脆性的な挙動を示すことから，コンクリート強度が高い供試体ほどピンチング部での耐力が低下する傾向があると考えられる．

+16 δ_y から終局状態までの履歴特性：

+16 δ_y → −16 δ_y に至る軟化勾配，さらには −16 δ_y → 終局状態に至る軟化勾配は，横拘束筋間隔が大きくなるに従い，大きくなる傾向を示した．この理由としては，上述したように基部周辺の内部コンクリートの耐荷性能が低下するに伴い，軸方向筋が繰り返し力を負担する割合が大きくなる耐荷機構に移行し，軸方向筋のはらみ出し量がより大きくなることにより，供試体全体の耐荷性能が著しく低下したためと考えられる．なお，横拘束筋間隔 $s = 150$ mm， $f'_{ck} = 60$ MPa を有する供試体では，繰り返し劣化によって横拘束筋が破断し，耐力が急激に低下する挙動を呈した（図−3（g）に示すシンボル▽）．

同値の力学的鉄筋パラメータを有する実験結果の考察

力学的鉄筋パラメータ $\rho_a \cdot m = 3.5$ % および 5.2 % を有する供試体（それぞれ 3 体）の水平荷重－水平変位関係を図−3（h）および(i)に示す．

変位レベル−8 δ_y までの履歴特性を考察すると，力学的鉄筋パラメータ $\rho_a \cdot m = 3.5$ % の場合には，コンクリート強度 20 MPa を有する供試体の unloading 側での耐力が他の 2 ケースと比較して低い．一方，力学的鉄筋パラメータ $\rho_a \cdot m = 5.2$ % の場合には，コンクリート強度 60 MPa を有する供試体の unloading 側での耐力が他の 2 ケースと比較して高いことが分かる．

−8 δ_y から終局状態までの領域では，力学的鉄筋パラメータに関係なく，低いコンクリート強度（この場合には，大きい横拘束筋間隔）を有する供試体では，ピーク耐力の低下および履歴曲線の軟化勾配が大きくなる傾向が確認できる．とくに，+16 δ_y から終局変位にかけての領域では，コンクリート強度の低い供試体の耐荷性能が大きく低下し，水平変位軸に偏平な挙動を呈する．このことから，コンクリート強度および横拘束筋間隔が大変位領域での変形特性に影響を及ぼすと考えられる．

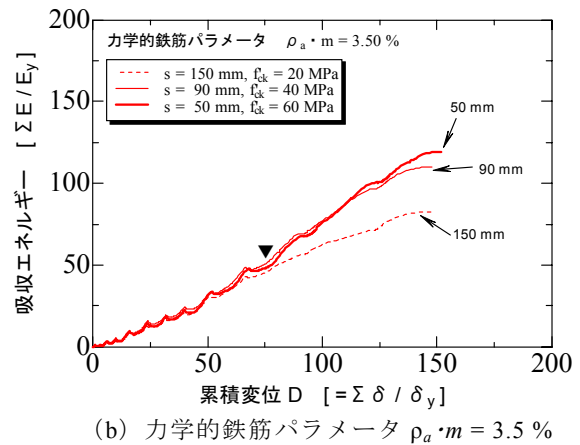
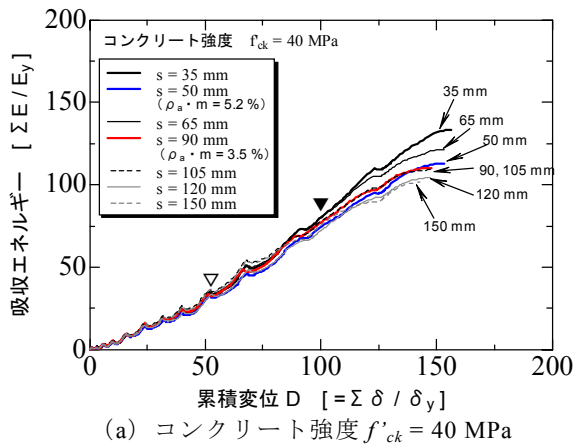
4.2 吸収エネルギー－累積変位関係

全体的な考察

一例として，水平荷重－水平変位関係から得た，コンクリート強度 $f'_{ck} = 40$ MPa を有する供試体の吸収エネルギー－累積変位関係を図−4（a）に示す．ここで，吸収エネルギーとは柱頂部に作用する荷重により柱に入力される外力エネルギーの総和であり，一方，累積変位 D とは柱頂部の変位量の軌跡である．なお，それぞれの値は部材降伏時の外力エネルギー量 E_y および降伏変位 δ_y により無次元化してある．

図−4（a）から分かるように，いずれの供試体も累積変位 $D = 50 \delta_y$ （変位レベル +8 δ_y ，図中のシンボル▽）から累積変位 $D = 100 \delta_y$ （変位レベル +16 δ_y ，図中のシンボル▼）までの挙動は概ね一致しており，横拘束筋間隔およびコンクリート強度の違いによる影響は少ないと考えられる．

一方，累積変位 $D = 100 \delta_y$ 以降の大変位レベルにおいて，横拘束筋間隔の違いにより徐々に吸収エネ



ルギーに差異が生じ始める．すなわち，横拘束筋間隔が大きいものほどエネルギー吸収能がより低下することが分かる．これは，横拘束筋間隔が大きくなるに従い，軸方向筋のはらみ出しおよびコンクリートの圧壊などの繰り返し劣化が柱基部周辺に大きく進展するためと考えられる．

図には示さないが，コンクリート強度 20 MPa および 60 MPa の場合にも，エネルギー吸収能は横拘束筋間隔に関係なく，それぞれ累積変位 $D = 75 \delta_y$ および $110 \delta_y$ 程度までは概ね同じ傾向を示した．例外として，コンクリート強度 20 MPa かつ横拘束筋間隔 35 mm 有する供試体の場合は，全供試体の中で最も大きなエネルギー吸収能を示した．

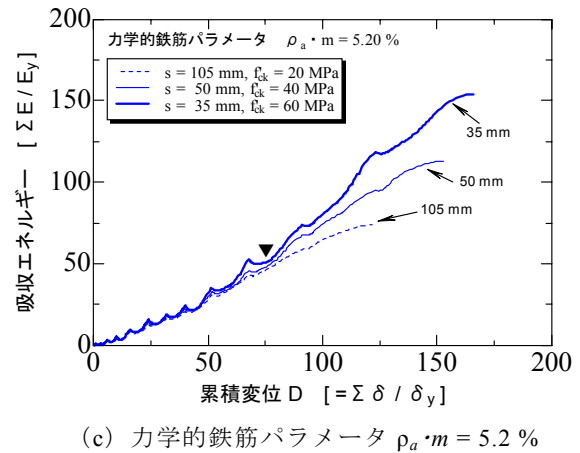


図-4 吸収エネルギー—累積変位関係

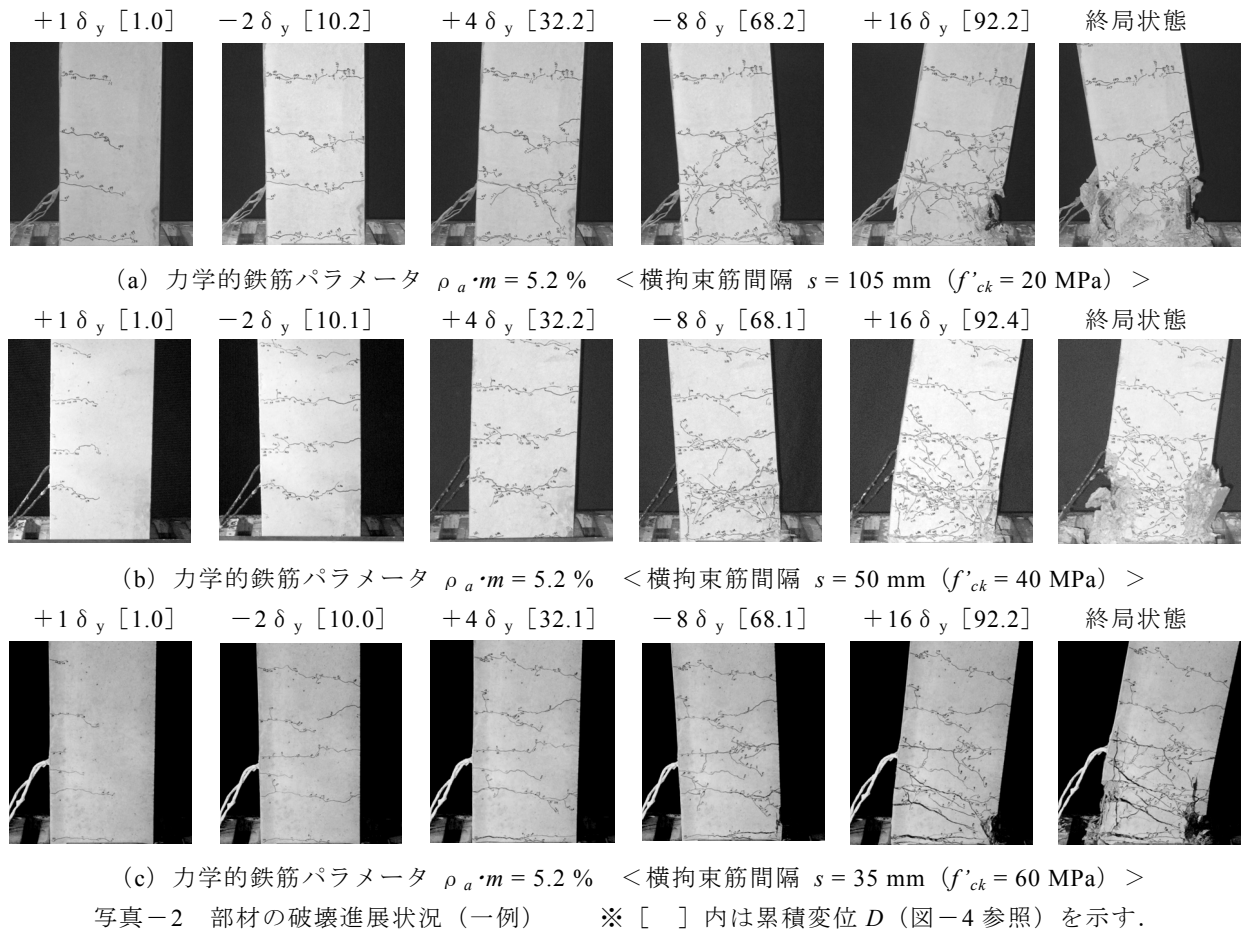
同値の力学的鉄筋パラメータを有する実験結果の考察

力学的鉄筋パラメータ $\rho_a \cdot m = 3.5 \%$ および 5.2% を有する供試体（それぞれ 3 体）の吸収エネルギー—累積変位関係を図-4 (b) および (c) に示す．図から分かるように，力学的鉄筋パラメータ $\rho_a \cdot m = 3.5 \%$ の場合には，3 供試体とも累積変位 $D = 75 \delta_y$ （変位レベル— $8 \delta_y$ ，図中のシンボル▼）程度まで概ね一致した傾向を示す．ただし，横拘束筋間隔が小さい（ 50 mm および 90 mm ）供試体のエネルギー吸収能は終局状態までほぼ同じ傾向にある．一方，横拘束筋間隔が 150 mm と大きい供試体では，累積変位 $D = 75 \delta_y$ 以降から低いエネルギー吸収能を示す．

また，力学的鉄筋パラメータ $\rho_a \cdot m = 5.2 \%$ の場合についても，3 供試体のエネルギー吸収能は累積変位 $D = 75 \delta_y$ （変位レベル— $8 \delta_y$ ，図中のシンボル▼）程度までは同じ傾向を示すが，ピンチング現象に差異が生じ始める累積変位 $D = 75 \delta_y$ 以降では，横拘束筋間隔が小さくかつコンクリート強度が高い供試体の方が，エネルギー吸収能が大きくなる．この理由としては，1) 横拘束筋間隔が小さくなるに従い，軸方向筋のはらみ出しが遅れることにより内部コンクリートへの拘束効果が持続すること，2) 拘束効果によりコンクリートの応力—ひずみ関係が延性的になりエネルギー吸収能が高まること，などが考えられる．

以上のことより，力学的鉄筋パラメータまたはコンクリート強度などの指標によっては多少のばらつきが見られるが，本実験で行った载荷パターンの下では，RC 柱のエネルギー吸収特性は少なくとも累積変位 $D = 75 \delta_y$ （変位レベル— $8 \delta_y$ ）までの範囲ではそれら指標に関係なく同様の傾向を示すことを確認した．

4.3 同値の力学的鉄筋パラメータを有する供試体の破壊進展状況



一例として，力学的鉄筋パラメータ $\rho_a \cdot m = 5.2\%$ を有する供試体（3 体）の柱基部から高さ $2D$ 区間（ D ：柱幅）での破壊進展状況を写真-2 に示す．いずれの供試体も破壊域の大きさは $1D$ 以内であった．

写真としては掲載していないが，いずれの供試体も横拘束筋に沿った水平ひび割れが変位 $+1.5 \text{ mm}$ 前後より進展し， $\pm 1\delta_y$ 区間の載荷終了時には，左右両面からの水平ひび割れが貫通した．また， $\pm 2\delta_y$ 区間の繰り返し載荷では，既存ひび割れの開口幅の拡大のみで，水平ひび割れの進展はほとんど確認できなかった（写真参照）．

$\pm 4\delta_y \sim \pm 8\delta_y$ にかけての繰り返し載荷過程では，力学的鉄筋パラメータが同値であっても，横拘束筋間隔が小さい供試体では，水平ひび割れが卓越する傾向を示すのに対し，横拘束筋間隔が大きくなるに従い，斜めひび割れが卓越する傾向を示している．コンクリート強度 40 MPa かつ横拘束筋間隔 50 mm の供試体では，柱基部付近でのひび割れが細部にまで進展する傾向が確認できる．さらに， $-8\delta_y$ 以降の繰り返し載荷過程において，力学的鉄筋パラメータが同値であっても，横拘束筋間隔が大きく（コンクリート強度が小さく）なるに従い，終局時には軸方向筋のはらみ出しならびにコンクリートの圧壊などの繰り返し劣化が生ずる傾向が確認できた．

5. まとめ

本研究では，以下の知見を得た．

- 1) コンクリート強度が 20 MPa かつ横拘束筋間隔が 65 mm 以上の供試体を除いては，変位レベル $-8\delta_y$ までの繰り返し変形特性は同じ傾向を示すことを確認した．しかし， $-8\delta_y$ 以降の変位レベルでは，ピンチング部での耐力，その後のピーク耐力に対して横拘束筋間隔およびコンクリート強度の違いが

影響していることを確認した（第4章1節）。

- 2) コンクリート強度 20 MPa, 40 MPa および 60 MPa の場合、エネルギー吸収能は、横拘束筋間隔に関係なく、それぞれ累積変位 $D = 75 \delta_y$, $100\delta_y$ および $110 \delta_y$ 程度までは概ね同じ傾向を示した（第4章2節）。
- 3) 上記 2) ならびに同値の力学的鉄筋パラメータを有する供試体の実験結果より、少なくとも累積変位 $D = 75 \delta_y$ （変位レベル $8 \delta_y$ ）までの RC 柱のエネルギー吸収特性については、力学的鉄筋パラメータに関係なく同様な傾向を示した（第4章2節）。
- 4) 力学的鉄筋パラメータが同値であっても、「横拘束筋間隔」および「コンクリート強度」の違いにより、累積変位 $D = 75 \delta_y$ （変位レベル $8 \delta_y$ ）以降では、履歴特性、吸収エネルギーおよび破壊進展などの変形特性に差異が生じることを確認した。コンクリート強度に関係するが、面積鉄筋比が大きな供試体は高いエネルギー吸収能を示した（第4章）。
- 5) 供試体の破壊進展状況については、力学的鉄筋パラメータが同値であっても、横拘束筋間隔およびコンクリート強度に関連して異なったひび割れ進展および破壊形態を示した（第4章3節：写真-2）。

謝辞

本研究は中部大学総合工学研究所 平成 21 年度～22 年度の第 5 部門ならびに愛知工業大学耐震実験センターの援助を受け遂行されたものであり、ここに謝意を表します。また、実験を遂行する際には、中部大学および愛知工業大学の学生諸君から助力を受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会編：阪神淡路大震災被害分析と靱性率評価式〔阪神大震災調査研究特別委員会 WG 報告〕, コンクリート技術シリーズ 12, 土木学会, pp.4-10, 1996.
- 2) 星隈順一ら：鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査に用いるコンクリートの応力-ひずみ関係, 土木学会論文集, No.520 / V-28, pp.1-11, 1995.8.
- 3) 秋山充良ら：普通強度から高強度までの構成材料を用いた RC 柱の一軸圧縮試験と圧縮破壊エネルギーを介したコンファインドコンクリートの平均化応力-ひずみ関係, 土木学会論文集, No.768 / V-67, pp.81-98, 2005.5.
- 4) 塑性域の繰り返し耐力劣化と耐震性能研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, JCI - C62, 2004.9.
- 5) 衣笠秀行・野村設郎：正負繰り返し履歴による曲げ降伏ヒンジの破壊性状, コンクリート工学論文集, 第 5 巻第 2 号, pp.21-32, 1994.7.
- 6) 亀田好洋ら：軸圧縮下で曲げを受ける RC 柱の力学特性に関する実験的ならびに解析的研究, 土木学会応用力学論文集, Vol.10, pp.457-466, 2007.8.
- 7) 亀田好洋・水野英二ら：圧縮下で繰り返し曲げを受ける鉄筋コンクリート柱の変形特性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.145-150, 2008.7.
- 8) 日本道路協会編：道路橋示方書・同解説（V：耐震設計編）2002 年度版, pp.160-163, 2002.