

論文 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

亀田 好洋^{*1}・水野 英二^{*2}・伊藤 睦^{*3}・梅原 秀哲^{*4}

要旨：本研究では、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を行った。ここでは、「横拘束筋間隔」ならびに「載荷パターン」を要因とした検証を通じて、これら要因が破壊進展およびエネルギー吸収能に与える影響について考察した。その結果、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異なる破壊形態が生ずるとともに、部材のエネルギー吸収能の低下がより顕著に現れることを実験データから確認した。また、載荷パターンの違いが供試体の変形性能に与える影響についても検証を行った。

キーワード：繰り返し曲げ変形、変形性能、横拘束筋間隔、載荷パターン、破壊進展、エネルギー吸収能

1. はじめに

平成 7 (1995) 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与えることが分かった¹⁾。これ以降、RC 構造物の耐震性能の向上ならびにポストピーク領域での力学的挙動の解明を目的とした実験的ならびに解析的研究が精力的に行われてきている。

筆者らは、既報²⁾において、軸圧縮下で曲げ変形を受ける RC 柱の力学特性を把握するため実験的ならびに解析的な検証を行った。ここでは、「載荷軸力」ならびに「横拘束筋間隔」を要因とした RC 柱供試体に対して、軸圧縮下での一方向載荷実験ならびにファイバーモデルによる二次元有限要素解析を実施した。本実験結果と解析結果との比較・検討を通じて、RC 柱のポストピーク領域での力学特性に与える「載荷軸力」ならびに「横拘束筋間隔」の影響、また、これら要因による RC 柱のコアコンクリートの材料特性 (応力-ひずみ関係) に与える影響について実験的かつ解析的に検証した。

一方、繰り返し曲げ変形を受ける RC 柱に関する各種研究は、数多く実施されている^{3), 4)}。しかし、横拘束筋配筋量の多少が RC 柱の変形性能に大きな影響を与えることが指摘されている中で、既往の研究で用いられる供試体の多くが、横拘束筋体積比が 1.0 %以下という比較的低い水準にある。近年、耐震性能の向上を目的とした RC 構造物の過密配筋が散見されるような状況において、比較的高い横拘束筋体積比 (1.8 %前後) を有する RC 柱部材の変形性能について詳細な検討を行う余地がある。

本研究では、RC 柱モデル供試体 (200×200×1000 mm: 14 体) を用い、軸圧縮下での繰り返し曲げ実験を実施した。実験の要因として「横拘束筋間隔」ならびに「載荷パターン」を採用した。すなわち、横拘束筋間隔については、間隔 $s = 35 \sim 150$ mm の 7 水準を、載荷パターンについては、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、および大変位レベルのみでの繰り返し漸増載荷の 2 水準を設定した。ここでは、載荷実験結果の考察を通じて、それら要因が軸圧縮下で繰り返し曲げを受ける RC 柱の変形性能に与える影響について、エネルギー吸収能および破壊進展の観点から検証した。

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。軸方向筋には D10 (SD295A) を 8 本、横拘束筋には D6 (SD295A) を、間隔 $s = 35, 50, 65, 90, 105, 120$ および 150 mm でそれぞれ配筋した。打設コンクリートには、設計基準強度 $f_{ck} = 20$ N/mm² の普通強度コンクリートを用いた。ここで、本研究に用いた供試体ケースならびにそれら供試体が有する横拘束筋体積比の一覧を表-1 に示す。ちなみに、道路橋示方書で定められるコンクリートモデルを適用できる、横拘束筋体積比の上限は 1.80 %である⁵⁾。本研究では、横拘束筋体積比: 0.56 ~ 2.42 % (面積比にして、0.27 ~ 1.13%) の 7 水準から成る供試体を作製した。

*1: 名古屋工業大学 大学院工学研究科創成シミュレーション工学専攻 博士後期課程 修士 (工学) (正会員)

*2: 中部大学 工学部都市建設工学科 教授 Ph.D. (正会員)

*3: 中部大学 工学部都市建設工学科 准教授 博士 (工学) (正会員)

*4: 名古屋工業大学 大学院工学研究科創成シミュレーション工学専攻 教授 Ph.D. (正会員)

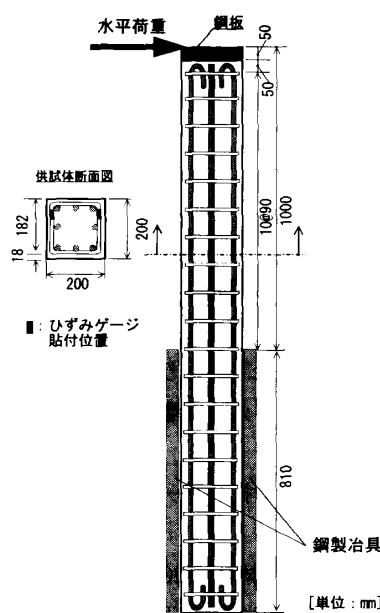


図-1 供試体配筋図（一例）

2.2 供試体の材料定数

載荷実験を実施するにあたり必要となる材料定数を 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。

3. 載荷実験

3.1 載荷方法

本研究では、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、繰り返し載荷実験を実施した。軸力の大きさは、累加軸耐力の 5%（おおよそ 45.5～59.5 kN）とし、軸力載荷後、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。供試体に載荷した軸力値を表-1 に示す。

3.2 載荷パターン

本研究では、図-2 に示すような 2 種類の載荷パターンを設定した。本論文での「 δ_y 」とは、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 $\epsilon_y = 2000 \mu$ ）した際の水平変位 δ をいう。

- 1) 低変位レベルから大变位レベルにかけての繰り返し漸増載荷
変位 0 mm $\rightarrow \pm 1 \delta_y$ (2 サイクル) $\rightarrow \pm 2 \delta_y$ (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
- 2) 大变位レベルのみでの繰り返し漸増載荷
変位 0 mm $\rightarrow \pm 4 \delta_y$ (2 サイクル) $\rightarrow \pm 8 \delta_y$ (2 サイクル) $\rightarrow \pm 12 \delta_y$ (2 サイクル) $\rightarrow$ 変位 0 mm
本実験では、前者 1) を「載荷パターン 1」、後者 2)

表-1 供試体ケース一覧

間隔 (mm)	載荷軸力 (kN)	体積横拘束筋比 (%)
35	48.3	2.42
50	48.3	1.70
65	45.5	1.23
90	48.3	0.94
105	59.5	0.80
120	59.5	0.70
150	48.3	0.56

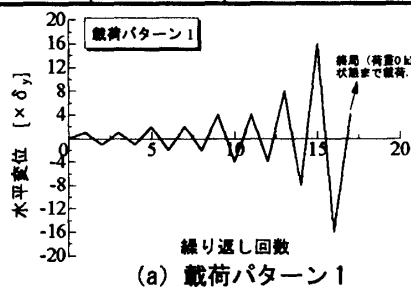


図-2 載荷パターン



写真-1 載荷装置

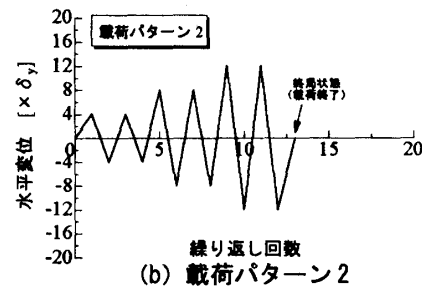


表-2 材料定数一覧

横拘束筋間隔 (mm)		35	50	65	90	105	120	150
コンクリート	圧縮強度 (MPa)	19.5	24.0	18.5	24.0	25.8	19.5	25.8
	ピークひずみ (μ)	2243	2491	2649	2491	2093	2243	2093
	ヤング係数 (GPa)	21.4	24.4	24.7	24.4	29.2	21.4	29.2
軸方向筋	降伏強度 (MPa)	348.4						
	引張強度 (MPa)	502.4						
	ヤング係数 (GPa)	187.3						

を「載荷パターン 2」と記述する。

3.3 計測データ

本実験では、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。水平荷重ならびに水平変位は水平ジャッキから出力された値を計測した。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、載荷実験から得られた実験結果に対する考察を行う。ここで、実験から得た諸数の一例を表-3 に示す。

4.1 水平荷重—水平変位関係

(a) 載荷パターン 1

載荷パターン 1 による載荷実験から得た、供試体全ケースに対する水平荷重—水平変位関係を図-3 に実線で示す。図から分かるように、いずれの供試体においても水平変位 8.4～10.0 mm で RC 部材の引張鉄筋が降伏して

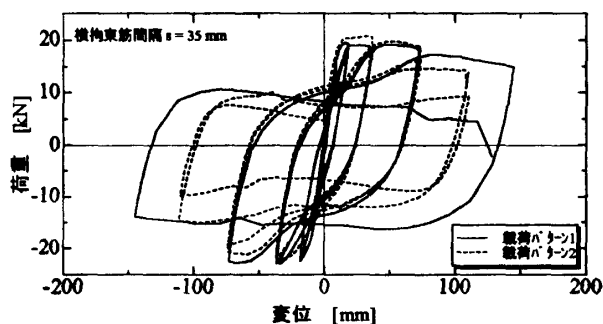
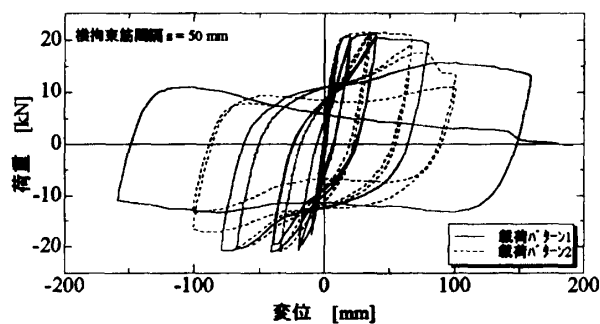
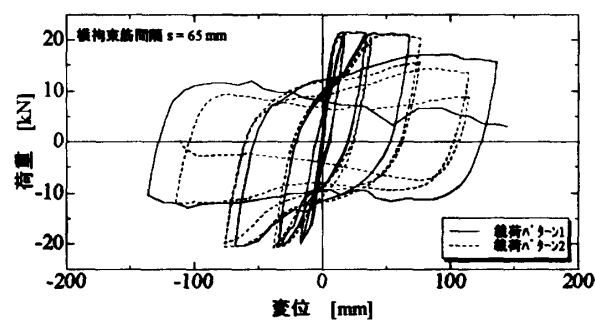
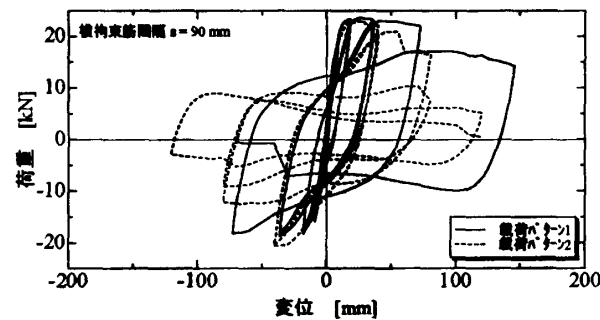
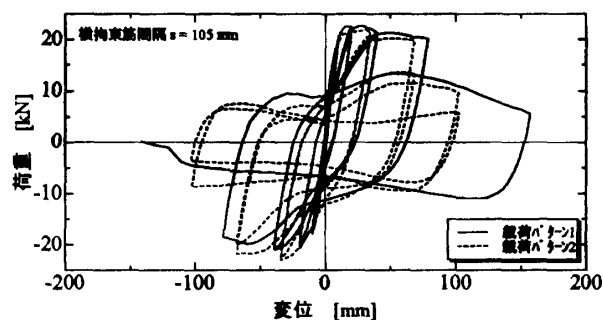
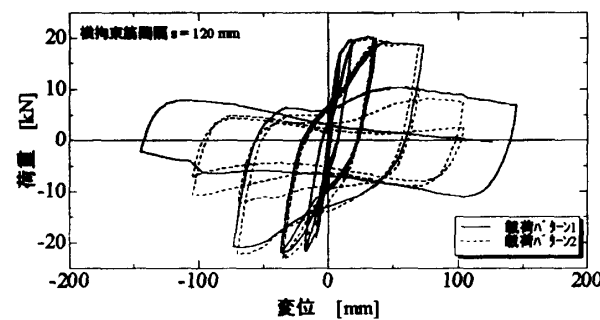
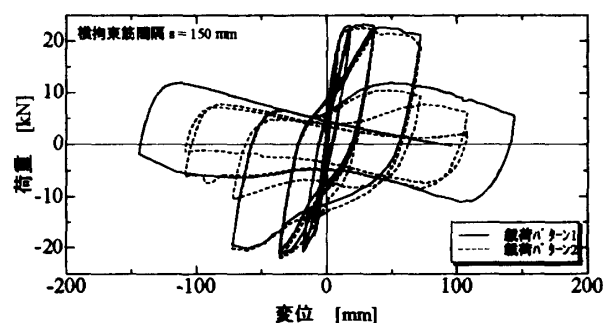
(a) 横拘束筋間隔 $s = 35$ mm(b) 横拘束筋間隔 $s = 50$ mm(c) 横拘束筋間隔 $s = 65$ mm(d) 横拘束筋間隔 $s = 90$ mm(e) 横拘束筋間隔 $s = 105$ mm(f) 横拘束筋間隔 $s = 120$ mm(g) 横拘束筋間隔 $s = 150$ mm

図-3 水平荷重-水平変位関係

おり、また、水平荷重 19~23 kN 近傍で最大耐力に至っている。このことから、 $4\delta_y$ (変位: 34~40 mm) までの低変位レベルにおける RC 柱の繰返し変形挙動は、横拘束筋間隔の違いによる影響をあまり受けていないものと考えられる。

しかし、 $8\delta_y$ (変位: 69~80 mm) 以降の大変位レベルでの繰返し載荷では、横拘束筋間隔が大きくなるに従い、 $4\delta_y$ (変位: 34~40 mm) 程度の低変位で当該ループでの最大耐力 (耐力に達した後、耐力が低下するという傾向が顕著となる。これは、横拘束筋間隔が影

表-3 載荷実験から得た諸数 (一例)

横拘束筋間隔	35		105		150	
載荷パターン	1	2	1	2	1	2
降伏荷重 P_y (kN)	15.7	18.2	20.7	18.6	20.0	19.4
降伏変位 δ_y (mm)	9.1	9.2	9.8	8.7	9.2	9.0
降伏時履歴吸収エネルギー E_y (kN·mm)	7.14	12.7	11.6	13.2	10.9	13.3

響した、柱基部の破壊進展領域での破壊形態が異なる繰返し劣化によるものであると考えられる。さらに、 $-8\delta_y \sim 16\delta_y$ にかけてのサイクルにおいて、履歴曲線上に湾曲箇所が見られる。例えば、横拘束筋間隔 $s = 35$ mm の場合には、変位 +20 mm 近傍で、また $s = 150$ mm の場合には、変位 -10 mm 近傍でそれぞれ曲線の湾曲箇所を確認できる。このことから、耐力の低下と同様に、湾曲箇所の出現位置は横拘束筋間隔に依存しているものと考えられる。この要因としては、横拘束筋間隔により異なるが、軸方向筋のはらみ出しおよび異なる破壊形態などによる繰返し劣化が柱基部周辺に集中し、供試体の剛性低下が生じたものと推察される。それゆえ、図より、

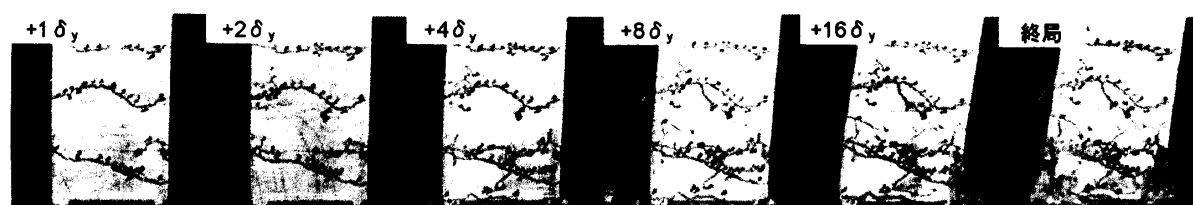
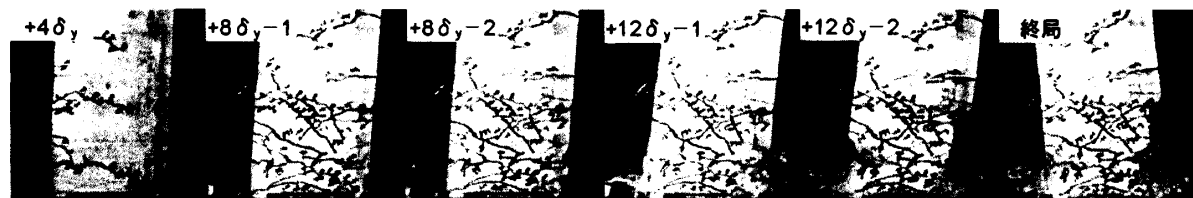
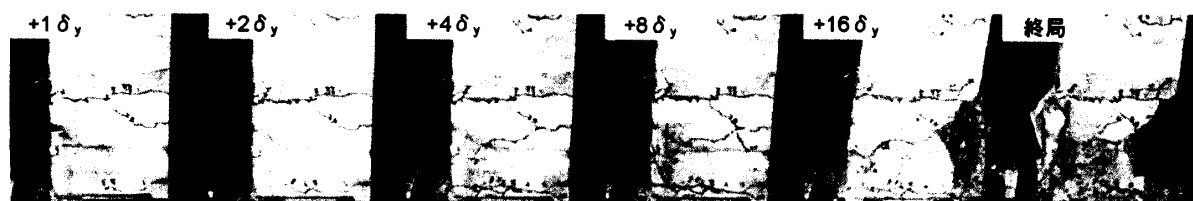
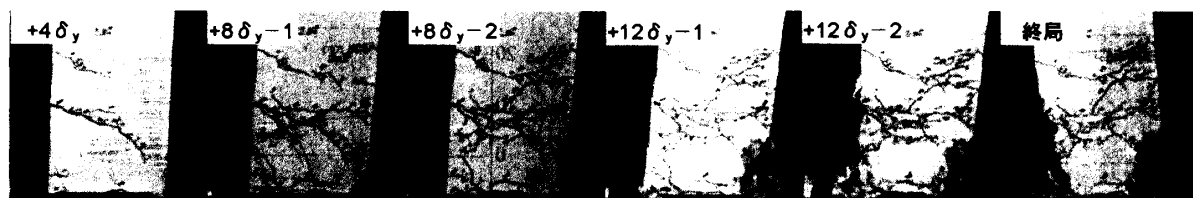
(a) 横拘束筋間隔 $s = 35 \text{ mm}$ 破壊進展状況 (載荷パターン 1)(b) 横拘束筋間隔 $s = 35 \text{ mm}$ 破壊進展状況 (載荷パターン 2)(c) 横拘束筋間隔 $s = 150 \text{ mm}$ 破壊進展状況 (載荷パターン 1)(d) 横拘束筋間隔 $s = 150 \text{ mm}$ 破壊進展状況 (載荷パターン 2)

写真-2 供試体の破壊進展状況

横拘束筋間隔が大きくなるに従い、湾曲部分の出現以降、耐力が著しく低下していることが分かる。

(b) 載荷パターン 2

載荷パターン 2 による載荷実験から得た、供試体全ケースに対する水平荷重-水平変位関係を図-3 に破線で示す。載荷パターン 1 と同様、RC 部材の降伏変位および最大耐力に有意な差は認められないことから、 $4\delta_y$ (変位: $34 \sim 40 \text{ mm}$) までの挙動に対して、横拘束筋間隔の違いが与える影響はあまりないものと考えられる。しかし、大変位レベル、とくに $8\delta_y$ (変位: $69 \sim 80 \text{ mm}$) および $12\delta_y$ (変位: $102 \sim 114 \text{ mm}$) の 2 サイクル目において、横拘束筋間隔が大きくなるに従い、耐力が低下する傾向が見られる。履歴曲線における湾曲部分が出現する $8\delta_y$ 区間の 2 サイクル目以降では、載荷パターン 1 と比較して、著しく耐荷力が低下することから、載荷パターンの違いが RC 柱の変形性能に影響を与えていることが確認できる。

4.2 部材の破壊進展状況

横拘束筋間隔 $s = 35 \text{ mm}$ および 150 mm を有する供試体の載荷パターン 1 および 2 における、柱基部から高さ 1.5D 区間 (D: 柱幅) での破壊進展状況の一例を写真-2

(a) ~ (d) に示す。載荷パターン 1 の場合 (写真-2

(a) および (c) 参照), 横拘束筋間隔に関係なく、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。

また、 $\pm 4\delta_y$ 区間での繰返し載荷により、横拘束筋間隔が小さい $s = 35 \sim 90 \text{ mm}$ の供試体では、水平ひび割れが基部に向かう、曲げひび割れが進展しているのに対し、横拘束筋間隔が大きい $s = 105 \sim 150 \text{ mm}$ の供試体では、斜め方向に卓越する斜めひび割れが進展していることが確認でき、横拘束筋間隔の違いによる影響が認められた。さらに、大変位レベル $\pm 8\delta_y \sim \pm 16\delta_y$ 間での繰返し載荷では、ひび割れの細分化およびかぶりコンクリートの剥落が確認できた。とくに、 $-8\delta_y$ 以降の繰返し載荷過程では、柱基部周辺における軸方向筋のはらみ出しならびにコアコンクリートの圧壊が確認できた。また、 $\pm 16\delta_y$ 区間での繰返し載荷においては、繰返し劣化による軸方向筋の座屈、さらにその破断が生じ、いずれの部材も終局に至った。

載荷パターン 2 の場合 (写真-2 (b) および (d) 参照), $\pm 4\delta_y$ 区間においては、横拘束筋間隔が大きくなるのに

従い、水平ひび割れから斜めひび割れへと進展する傾向が見られる。また、 $\pm 8 \delta_y \sim \pm 12 \delta_y$ 区間の大変位レベルでは、いずれの供試体でも斜めひび割れが確認できる。しかし、横拘束筋間隔が小さい場合には、斜めひび割れが一方向に卓越するのに対し、横拘束筋間隔が大きい場合には、引張ならびに圧縮両面からの斜めひび割れにより、基部中央でX字型にひび割れが結合することが確認できた。また、横拘束筋間隔が大きくなるのに従い、コンクリートの圧壊が広範に及ぶことも確認できた。さらに、載荷パターン1と比較して、載荷パターン2の方が斜めひび割れおよびコアコンクリートの圧壊がより顕著にかつ早期の段階で生じた。

4.3 履歴吸収エネルギー

本節では、履歴吸収エネルギーに関する考察を行う。ここで用いる、履歴吸収エネルギー (E) とは、水平荷重および軸力により柱基部に生じるモーメントの総和である。なお、本章の履歴吸収エネルギー (E) は、載荷開始から部材降伏時までの履歴吸収エネルギー (E_y) により無次元化している。

水平荷重-水平変位関係から得た、耐力力-履歴吸収エネルギー関係を図-4に示す。本節で用いる「耐力力」とは、各繰返し下での載荷状態における最大荷重 P の

ことをいう。なお、図中では、耐力力は供試体の最大耐力力: P_{max} で除して無次元化してある。

載荷パターンに関係なく、 $E/E_y = 40$ 前後まではいずれの供試体も概ね一致した傾向を示す。しかし、 $E/E_y = 40$ 以降は、横拘束筋間隔 $s = 90$ mm を除き、横拘束筋間隔が大きいものほど、耐力力、すなわちエネルギー吸収能が低下する傾向を呈していることが分かる。

一例として、横拘束筋間隔 $s = 35$ mm および 150 mm を有する供試体の $E/E_y = 30$ および $E/E_y = 75$ 前後における、柱基部 $1.5D$ 区間での破壊進展状況を写真-3に示す。 $E/E_y = 30$ における損傷状況を比較すると、同量のエネルギーを吸収しているものの、載荷パターン1と比較して、載荷パターン2の場合、ひび割れが多く形成されると同時に、先端が圧縮側基部へと集中する傾向がある。

また、 $E/E_y = 75$ における損傷状況を比較すると、横拘束筋間隔 $s = 35$ mm の場合、載荷パターン1ではほとんどコンクリートの圧壊が見られないのに対し、載荷パターン2ではそれが確認できる。横拘束筋間隔 $s = 150$ mm の場合、いずれの載荷パターンにおいても、コンクリートの圧壊および鉄筋のはらみ出しは確認できるが、載荷パターン2の方がひび割れの本数、および圧壊領域で載荷パターン1よりも上廻っていることが分かる。

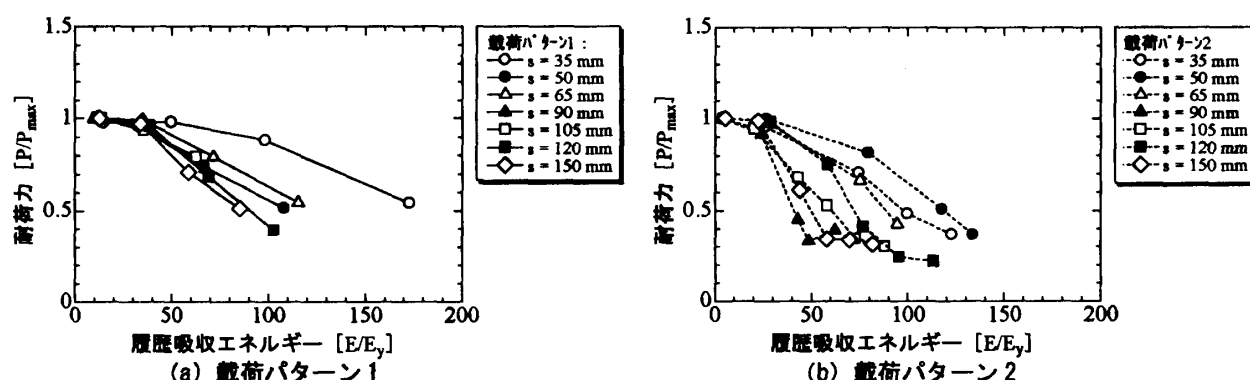


図-4 耐力力-履歴吸収エネルギー関係

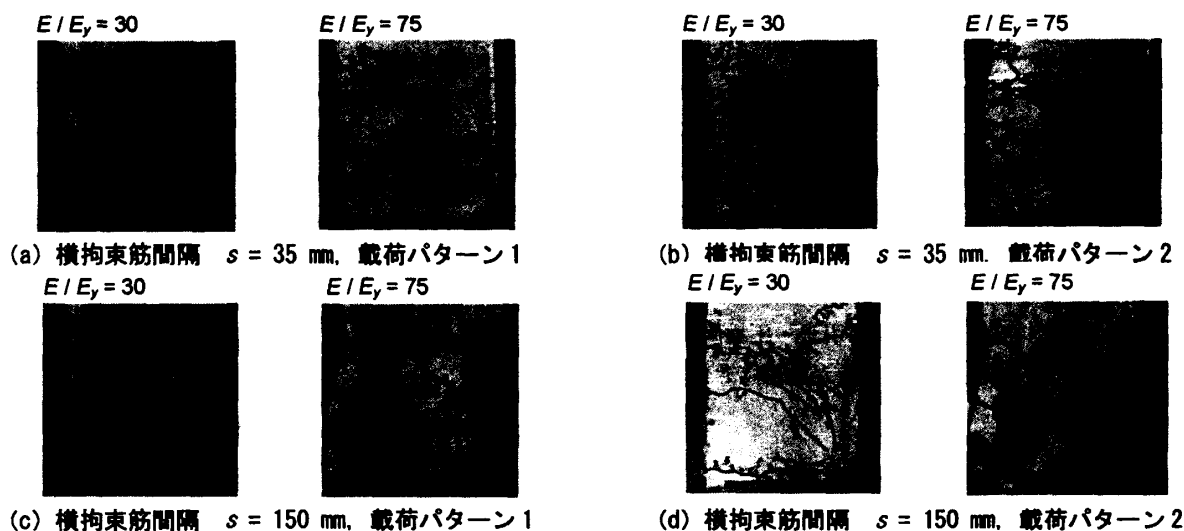
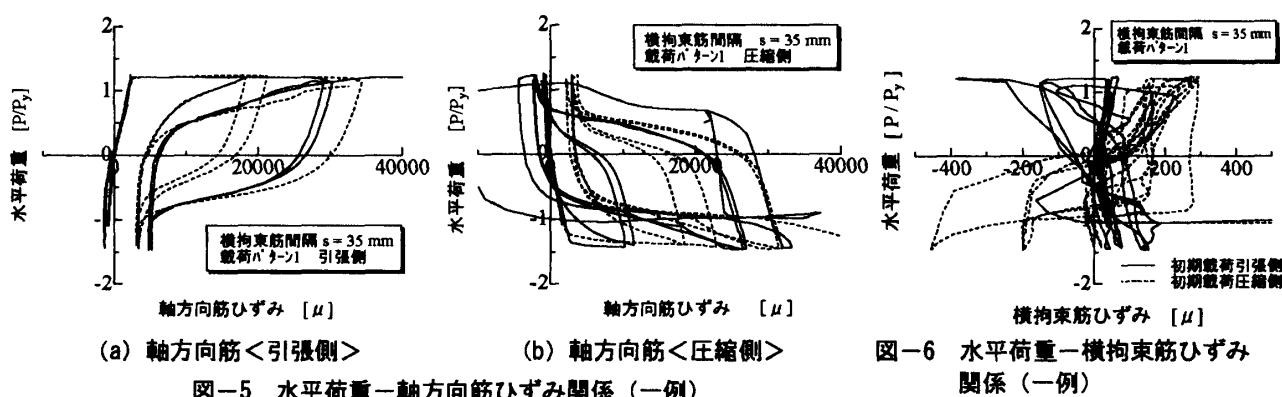


写真-3 履歴吸収エネルギーを指標とした供試体の破壊進展状況



4.4 水平荷重-軸方向筋ひずみ関係

一例として、載荷パターン1の場合における横拘束筋間隔 $s = 35 \text{ mm}$ を有する供試体の水平荷重-軸方向筋ひずみ関係を図-5 に示す。ここでは、初期載荷時に引張側となる隅角部の軸方向筋の鉄筋ひずみ（2種類）を実線と破線で示してある。なお、水平荷重は、部材降伏時の水平荷重で除し無次元化してある。

引張側の軸方向筋（図-5 (a) 参照）は、初期載荷にて変位 $1 \delta_y$ で降伏したのち、 $\pm 1 \delta_y$ および $\pm 2 \delta_y$ 区間の低変位レベルでは、概ね一致した挙動を示す。 $+2 \delta_y \rightarrow +4 \delta_y$ に移行するループでは、鉄筋ひずみが急激に増加する傾向が見られる。これは降伏側に位置した鉄筋ひずみが初期硬化塑性ひずみ付近まで急激に増加したためであると推察される⁹⁾。

図から分かるように、終局状態に至るまで、引張側に軸ひずみが累積される傾向を示す。これは、繰り返し載荷に伴い、中立軸が両側の軸方向筋近辺まで交互に移動を繰り返すことによるものであるが、圧縮側では中立軸が圧縮筋の近辺に位置するため圧縮ひずみが蓄積されないためであると考えられる。なお、図-5 (b) に示すように、圧縮側についても半サイクル分だけ遅れた同様の傾向を示す。なお、載荷パターン2の場合においても、ほぼ同様の挙動を呈することが確認できた。

4.5 水平荷重-横拘束筋ひずみ関係

一例として、載荷パターン1の場合における横拘束筋間隔 $s = 35 \text{ mm}$ を有する供試体の水平荷重-横拘束筋ひずみ関係を図-6 に示す。いずれの供試体においても、水平荷重の増減に伴い、横拘束筋ひずみが引張ひずみ： $\pm 0 \sim +400 \mu$ の範囲で変動している。また、大変位レベルでは、圧縮ひずみ： -400μ 程度まで進展していることが分かる。さらに、図には示さないが、載荷パターン2の場合、変位レベルによらず、引張・圧縮両ひずみ（ $\pm 400 \mu$ 程度）が進展していることが確認できた。

5. まとめ

本研究を通じて、以下の知見を得た。

1) $\pm 4 \delta_y$ までの低変位レベルでの繰り返し載荷では、供

試体の降伏変位、降伏耐力および最大耐力などに顕著な差が認められないことから、横拘束筋間隔ならびに載荷パターンが与える影響は少ない（第4章1節）。

- 2) $\pm 8 \delta_y$ 以降の大変位レベルでの供試体の耐力低下および劣化には、横拘束筋間隔が大きい場合における軸方向筋のはらみ出しおよび載荷パターンが影響している（第4章1~2節）。
- 3) 履歴吸収エネルギー： $E/E_y = 40$ 付近までは、横拘束筋間隔の違いが耐力に与える影響は少ない。しかし、 $E/E_y = 40$ 以降では、横拘束筋間隔が大きくなるに従い、耐力および履歴吸収エネルギーはともに低下する傾向にあることを確認した（第4章3節）。
- 4) 履歴吸収エネルギー量が同量であっても、横拘束筋間隔および載荷パターンの違いにより、ひび割れ進展および破壊形態にその差異が認められた（第4章3節）。

謝辞：本研究を実施するにあたり、平成19年度中部大学総合工学研究所研究補助金（第V部門）の助成を得た。また、名古屋工業大学研究生（当時）：韓 慧星氏には、実験でお力添えを頂いた。ここに記して謝意を表す。

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) 亀田好洋・伊藤 睦・梅原秀哲・水野英二：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。
- 3) 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。
- 4) 星隈順一・運上茂樹・長屋和宏：鉄筋コンクリート橋脚の変形性能に及ぼす断面寸法の影響、土木学会論文集、No.699/V-50、pp.215-232、2001.2。
- 5) 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。
- 6) 岡村甫・前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則、技報堂出版、pp.171-172、1991.5。