

論文 ポストピーク領域における鉄筋コンクリート柱の繰り返し耐荷特性に関する実験的研究

亀田 好洋*1・鈴木 森晶*2・水野 英二*3

要旨: 本研究では、「横拘束筋間隔」、「コンクリートの圧縮強度」および「荷重パターン」を要因とした RC 柱の一方方向繰り返し曲げ実験結果を基に、コンクリートの圧壊および軸方向筋の座屈に代表される繰り返し劣化性状が RC 柱部材の耐荷性能に与える影響について検証した。その結果、軸方向筋の座屈には、荷重パターンの違いによらず、開始時点までに入力された累積吸収エネルギー量と横拘束筋間隔が大きな影響を与えるという知見を得た。

キーワード: 繰り返し曲げ, 横拘束筋間隔, 耐力-変位曲線, 限界曲線, 軸方向筋の座屈, P-δ 効果

1. はじめに

一般に、鉄筋コンクリート (RC) 橋脚を設計する場合、地震動などによる過大な外力に対しても、RC 橋脚が保有する最大耐力に達した後に急激な耐力の低下を生じないような配慮を行うのが望ましい。道路橋示方書¹⁾では、「性能照査型設計」と「仕様規定型設計」とを併用することにより、最大耐力以降の領域 (以下、ポストピーク領域) での急激な耐力低下の抑制を図っている。この理由として、1) 解析技術の進歩に伴い、最大荷重の 8 割の耐力レベルまでのポストピーク挙動は、概ね再現可能なものの、軸方向筋の座屈に起因する急激な耐力低下に至るまでの挙動を精度良く再現可能な解析手法が多くはなく²⁾、高度な解析に関する知識を要求されること、2) 繰り返し力を受ける RC 柱の軸方向筋の座屈性状に関する既往の研究³⁾では、その多くが鉄筋の座屈モードの言及に終始しており、軸方向筋の座屈発生以降の RC 柱の耐力-変位特性について詳細に検討した事例があまり多くないこと、などが挙げられる。しかし、それら異なる設計概念を併用することは、RC 構造物設計に対してより複雑さを増加させる要因となっていると考える。そのため、1) 繰り返し劣化など破壊進展が RC 部材の耐荷特性に影響を及ぼすメカニズムを解明すること、2) 軸方向筋の座屈による耐力低下を含めたポストピーク挙動を再現可能な解析手法を開発すること、は重要な課題である。

本研究では、既往の研究で扱った「横拘束筋間隔」および「コンクリート強度」に加え、「荷重パターン」も要因とした、一定軸力下での繰り返し曲げ荷重実験結果⁴⁾を基に、除荷および再荷重曲線に着目し、除荷開始点および再荷重開始点を基準とした耐力-変位曲線を用いて、コンクリートの繰り返し劣化性状および軸方向筋の座屈性状が RC 柱のポストピーク領域での耐荷性能に与える影響について検証した。

2. 実験供試体および材料定数

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) を柱基部 2D 区間 (D: 柱幅) において間隔 (s) = 35, 50, 65, 90, 105, 120 および 150 mm (7 水準) 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 $f_{ck} = 20, 40$ MPa および 60 MPa を有する普通コンクリート (3 水準) を用いた。実験では、これに荷重パターン (2 水準) を要因に加えた計 42 体の RC 柱供試体を作製した。ここで、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定数を表-1に示す。

3. 荷重実験

3.1 荷重方法

実験⁴⁾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。荷重は、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、一方方向繰り返し曲げ荷重実験を実施した。軸力の大きさは累加軸耐力の 5% (表-1 参照) とし、次節の荷重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。

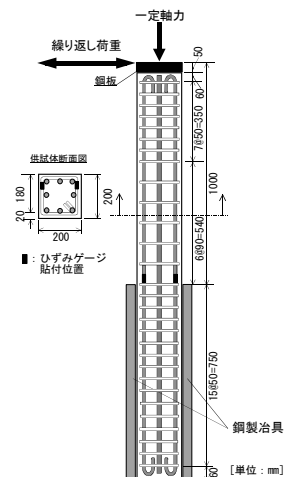


図-1 供試体配筋図

*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 愛知工業大学 工学部都市環境学科土木工学専攻 准教授 博士 (工学) (正会員)
 *3 中部大学 工学部都市建設工学科 教授 Ph.D. (正会員)

3.2 荷重パターン

図-2 に示すような異なる 2 種類の荷重パターンとして、1) 低変位レベルから高変位レベルにかけての漸増荷重、2) 高変位レベルのみでの漸増荷重、をそれぞれ設定し、柱頂部に水平変位を作用させた。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 $\epsilon_y = 2,000 \mu$ ）した際の水平変位 δ を意味する（表-1）。

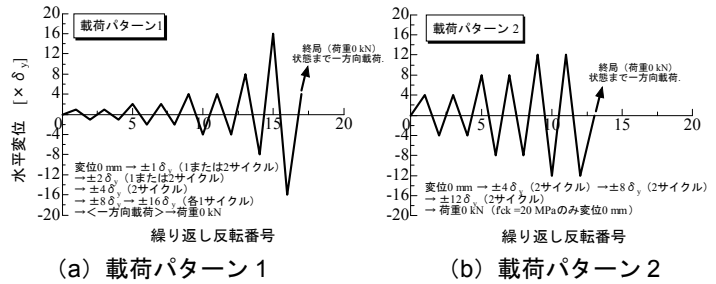


図-2 荷重パターン

4. 実験結果および考察

4.1 水平荷重-水平変位関係

一例として、コンクリート強度 $f_{ck} = 20, 40$ および 60 MPa、横拘束筋間隔 $s = 35$ および 150 mm の荷重実験から得た、水平荷重-水平変位関係を荷重パターン別に、図-3 (a) ~ (d) に示す。コンクリート強度が同一であれば、最大耐力は概ね一致しており、横拘束筋間隔および荷重パターンの違いによる影響はほとんど無い。

荷重パターン 1 による荷重を受ける供試体（図-3 (a) および (b) 参照）では、 $+8 \delta_y$ までの荷重過程において大きな差異は認められない。しかし、 $+8 \delta_y$ から $-8 \delta_y$ までの除荷曲線において、横拘束筋間隔が大きくなるに従い、耐力が低下する傾向を示した。また、 $-8 \delta_y$ から $+16 \delta_y$ までの荷重（すなわち、 $-8 \delta_y$ から $+0 \delta_y$ に向かう荷重）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、ピンチング部（図-3 中にシンボル▼で示す）にて耐力が他のケースに比べて減少するとともに、履歴曲線の湾曲具合が大きくなる傾向にある。さらに、 $+16 \delta_y$ 以降での荷重過程では、横拘束筋間隔が大きくなるに従い、除荷および再荷重の各曲線上での最大耐力以降、図-3 (a) ($f_{ck} = 20$ MPa) で破線に示すように、 $P-\delta$ 効果により一定勾配で耐力が低下する傾向となる。一方、荷重パターン 2（図-3 (c) および (d)）では、横拘束筋間隔が大きく、かつコンクリート強度が低い供試体において、 $-8 \delta_y$ から $+8 \delta_y$ の荷重過程で、ピンチング部における耐力が減少するとともに、それ以降の耐荷性能が著しく低下する傾向を示した。

4.2 累積吸収エネルギー-累積変位関係

一例として、コンクリート強度 $f_{ck} = 20$ および 60 MPa、横拘束筋間隔 $s = 35$ および 150 mm の供試体から得た、累積吸収エネルギー-累積変位関係を図-4 に示す。ここで、累積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、累積変位とは柱頂部の変位変動量（絶対値の総和）である。なお、図中の丸数字は、図-5 で示す繰り返し曲線番号（以下、曲線番号）に対応している。

図から分かるように、いずれの供試体も累積変位 700 mm 前後までの挙動は概ね一致しており、横拘束筋間隔

表-1 材料定数、降伏変位および軸力一覧

間隔 s [mm]	コンクリート [MPa]			鉄筋 (平均)		降伏変位 δ_y [mm]	荷重軸力 [kN]		
	設計基準強度			降伏強度 [MPa]	降伏強度 [MPa]		設計基準強度		
	20	40	60				20	40	60
35	20	47	71	軸方向筋 351	軸方向筋 519	7~9	48	102	148
50	24	47	71			8~10	48	102	148
65	19	44	62	横拘束筋 315	横拘束筋 512	8~9	46	95	131
90	24	41	62			8~9	48	94	131
105	26	40	59			8~10	60	88	130
120	20	44	60			8~9	48	95	127
150	26	41	60			8~9	60	94	127

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。累積変位 750 mm 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。なお、他の供試体 ($s = 35$ および 150 mm 以外の供試体) の累積吸収エネルギーは、いずれも 2 曲線に挟まれる領域に存在することを付記しておく。

4.3 除荷および再荷重点を基準とした荷重-変位曲線

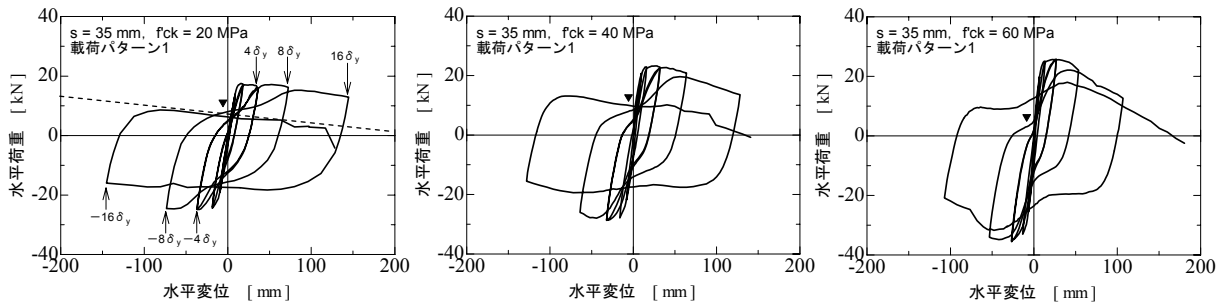
本節では、繰り返し曲げを受ける RC 柱のポストピーク領域での耐荷性能を考察するために、前節で考察した水平荷重-水平変位関係（図-3 参照）を構成する除荷および再荷重点の開始点をそれぞれ原点として第 1 象限に整理した「耐力-変位曲線」を用いる。一例として、コンクリート強度 $f_{ck} = 20$ および 60 MPa、横拘束筋間隔 $s = 35$ および 150 mm を有する供試体の実験結果を整理して得た耐力-変位曲線を荷重パターン別に、図-5 (a) ~ (h) にそれぞれ示す。

全体的な考察

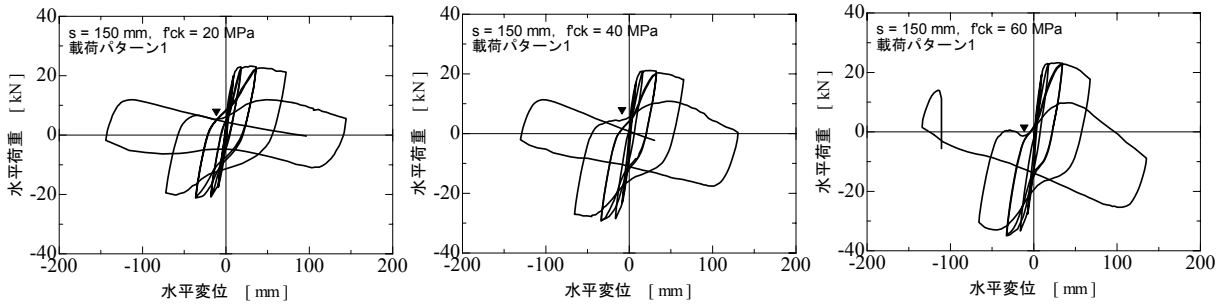
図-5 から分かるように、荷重パターンによらず、 $-8 \delta_y$ までの領域（荷重パターン 1 の場合、曲線番号⑭までの領域）では、図-6（後述）に示す、最外縁の耐力-変位曲線（以下、限界曲線）に漸近するように、耐力が上昇・下降する挙動（曲線 A）を呈するのに対し、 $-8 \delta_y$ から $+16 \delta_y$ までの荷重過程（荷重パターン 1 の場合、曲線番号⑮以降）では、一旦、耐力が減少した後に、再度上昇し、限界曲線と同様な勾配で下降する挙動（曲線 B）を呈する。軸方向筋の座屈は、この荷重過程で生ずると考えられる。ただし、横拘束筋間隔の小さい供試体では、顕著な耐力低下が確認できなかった。以下に、それら 2 つの曲線に対して、それぞれ考察を行う。

座屈発生以前（図-6・曲線 A）の履歴特性

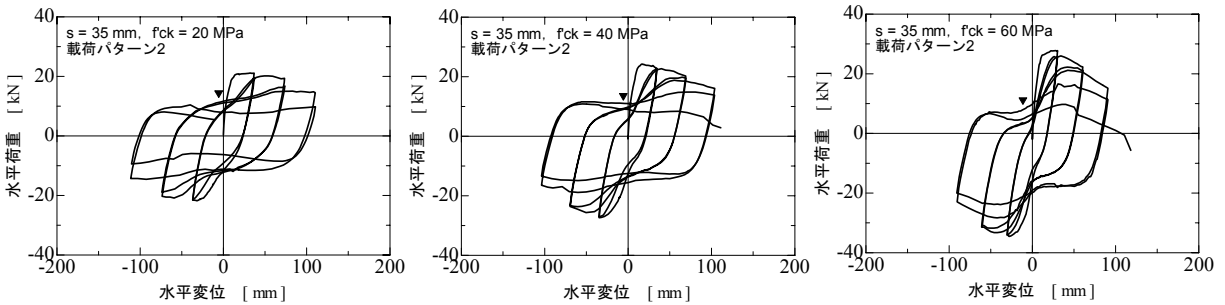
図-5 より分かるように、コンクリート強度が同じで



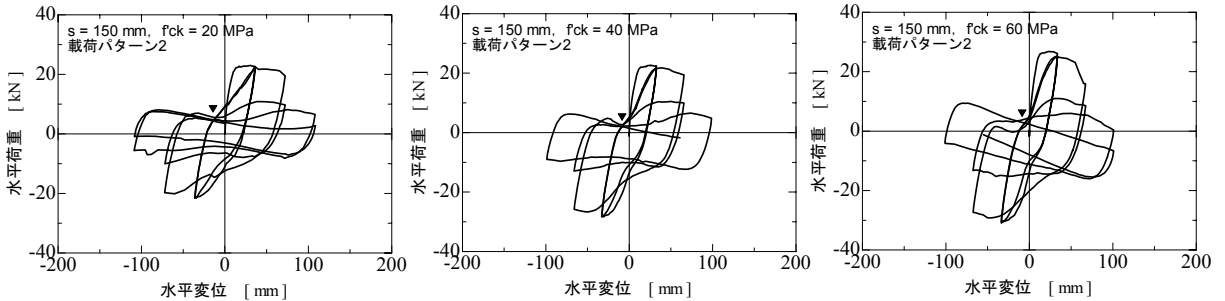
(a) 横拘束筋間隔 $s = 35 \text{ mm}$, 载荷パターン1



(b) 横拘束筋間隔 $s = 150 \text{ mm}$, 载荷パターン1



(c) 横拘束筋間隔 $s = 35 \text{ mm}$, 载荷パターン2



(d) 横拘束筋間隔 $s = 150 \text{ mm}$, 载荷パターン2

図-3 水平荷重-水平変位関係

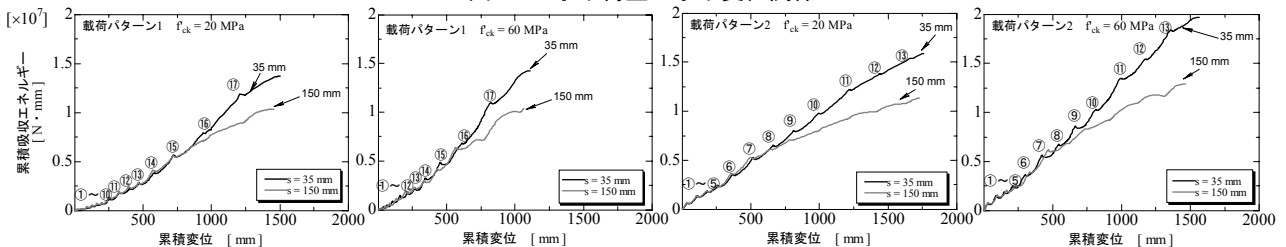


図-4 累積吸収エネルギー-累積変位関係

あれば、横拘束筋間隔および载荷パターンによらず、耐力-変位曲線の最大耐力を含め概ね一致した挙動となる。

载荷途中で一時的に耐力増加が抑制され、変形量のみが増加するような挙動が確認できる(図-5中のシンボル▽)。この理由として、繰り返し曲げを受けることにより、柱基部周辺でのコンクリートでひび割れ幅の拡大な

らびにコンクリートの圧壊が生ずることにより、ヒンジ領域におけるコンクリートの外力に対する抵抗が低下するためと考えられる。また、いずれの曲線も最大耐力に達すると、 $P-\delta$ 効果により耐力が低下する。

図-5に補助線として、有限要素解析プログラム FEAP⁵⁾(ファイバーモデル)によるRC柱部材の解析結

果から得た、耐力-変位関係を太線で示す。ここでは、最大耐力となる水平変位 13 mm 付近での除荷曲線 (図-7 (a)中の太線)を用いて検証を行った。材料構成モデルとして、鋼材に「ひずみ硬化型」、コンクリートに「弾完全塑性型」を採用した解析結果は、実験から得た限界曲線 (図-6 参照) と概ね一致している。

座屈発生以降 (図-6・曲線B) の履歴特性

図-5 (a) ~ (h) から分かるように、 $-8\delta_y$ から $+16\delta_y$ までの領域 (曲線番号 15 ~ 16) において、耐力が一時的に減少する挙動を呈する (図-5 中のシンボル ▼)。この原因は、引張されていた軸方向筋が荷重の反転により圧縮され座屈が生じるため、横拘束筋間隔が大きな供試体ほどその落ち込み程度が大きくなる。その後、圧縮側コンクリートが持ち直すことにより、再び耐力が増加する。さらに、軸方向筋の座屈に加え、内部コンクリートに圧壊が進展する $-16\delta_y$ から荷重 0 kN までの荷重過程 (曲線番号 17) では、当該曲線上での最大耐力を迎えた後、一定の割合で耐力が低下する挙動を呈する。ここでの耐力低下の下降勾配は、限界曲線の下降勾配と概ね一致していることが分かった。また、これらの挙動は、荷重パターンが異なった場合でも確認できる (図-5 (b), (d), (f) および (h) 参照)。しかし、荷重パターン 2 (高変位レベルでの繰り返し荷重) では、荷重パターン 1 と比較して、コンクリートの繰り返し劣化が顕著であることから⁴⁾、横拘束筋間隔の大きい供試体は、 $-8\delta_y$ から $+8\delta_y$ にかけての領域 (曲線番号: ⑥) で軸方向筋の座屈が生じ、一時的に耐力が低下する。さらに、 $\pm 12\delta_y$ (曲線番号 9 以降) の繰り返し荷重過程において、荷重パターン 1 での最終曲線 (曲線番号 17) と同様な挙動を呈することが分かった。

既往の研究⁶⁾より、「軸方向筋の座屈が生ずる領域では、荷重が進展するに従い、柱基部のヒンジ部分におけるコンクリートの抵抗力が低下し、軸方向筋のみが外力を負担する形態へと、供試体が耐力を保持する機構が変

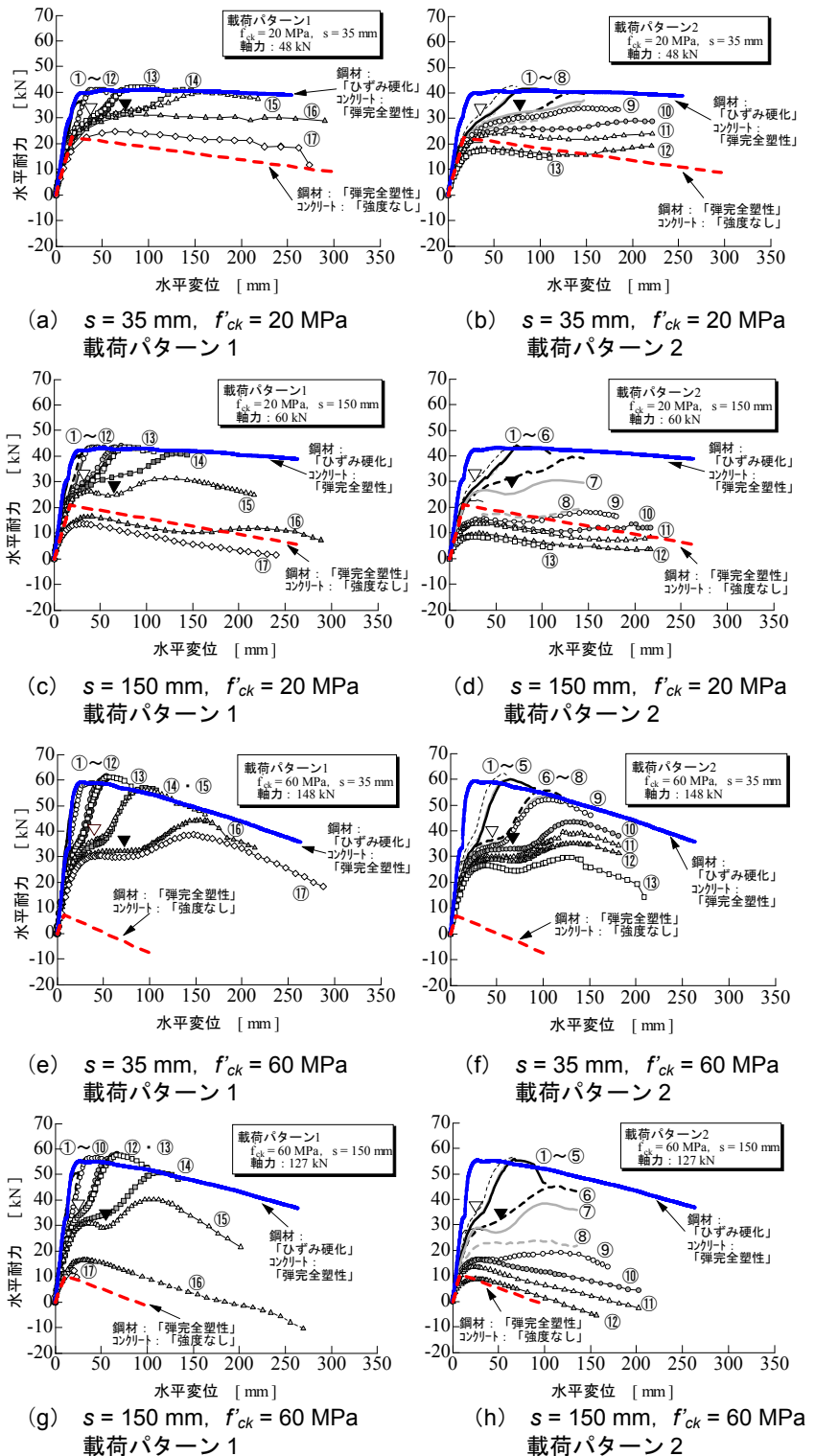


図-5 耐力-変位曲線

化する」という知見を得ている。それゆえ、軸方向筋のみが外力を負担する状態を再現するため、鋼材の構成関係を「弾完全塑性」、柱基部周辺の全コンクリート要素の圧縮強度をゼロ強度とした FEM 解析から得た、耐力-変位曲線 (図-7 (b)の太線: 除荷曲線) を図-5 に破線で示す。図より、荷重パターンによらず、横拘束筋間隔 35 mm の供試体の実験結果 (図-5 中のシンボル □) は、いずれも解析結果 (荷重パターン 2 の $f'_{ck} = 20\text{MPa}$

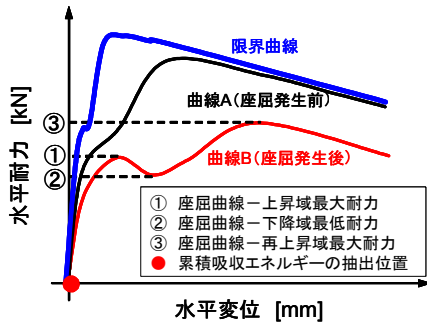


図-6 耐力-変位曲線の概略図

の場合を除く)を上回る傾向を示す。これは、最終の耐力曲線では、柱基部周辺のコンクリートの外力に対する抵抗力が残存していることを示唆している。それに対し、横拘束筋間隔 150 mm (図-5 中のシンボル□)の供試体の実験結果は、解析結果を下回っていることから、軸方向筋の座屈により耐荷性能が著しく低下することが分かる。

4.4 限界曲線の下降勾配-横拘束筋間隔関係

本節では、限界曲線の最大耐力以降の下降勾配について考察する。実験結果から得た、限界曲線の下降勾配と横拘束筋間隔 s との関係を図-8 に示す。供試体の違いにより、若干の差異はあるものの、荷重パターンおよび横拘束筋間隔によらず、限界曲線の下降勾配は概ね一致した値を示す。なお、コンクリート強度が高くなるに従い、下降勾配が大きくなる傾向を呈する。ここで、 $P-\delta$ 効果によって生ずる下降勾配(荷重軸力を柱有効高さで除した理論値)を図-8 中に破線で示す。供試体で軸圧縮力および柱有効高さの違いにより、若干の差異はあるものの、実験値および理論値ともに概ね一致した傾向を示す。

限界曲線の下降勾配と同様に、最終的な耐力曲線の下降勾配も、横拘束筋間隔に関わらず、コンクリート強度が高くなるに従い、大きくなる傾向を示している(図-9)。

4.5 座屈発生後の耐力-累積吸収エネルギー関係

図-5 の特色を概念的にまとめたものを図-6 に示す。図-6 中に示すような異なる3点の座屈発生後の耐力(図中の耐力①~③)のうち、上昇域での耐力(以下、耐力①)と当該ループの開始点での累積吸収エネルギーとの

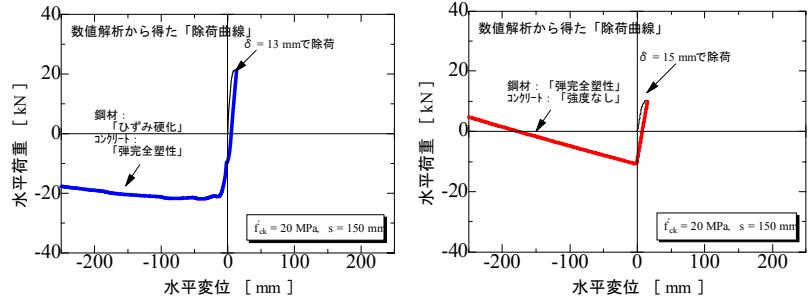


図-7 解析から得た荷重-変位関係(一例)

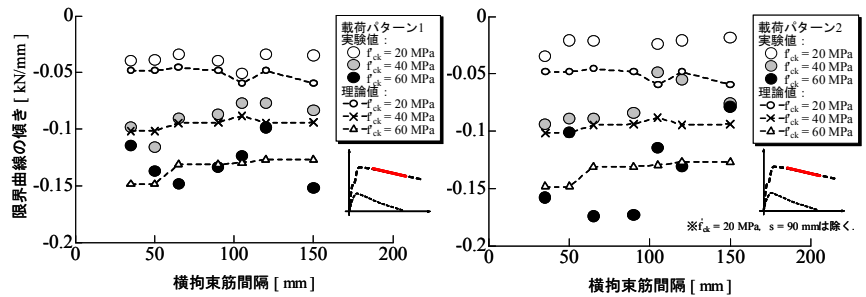


図-8 限界曲線の下降勾配-横拘束筋間隔関係

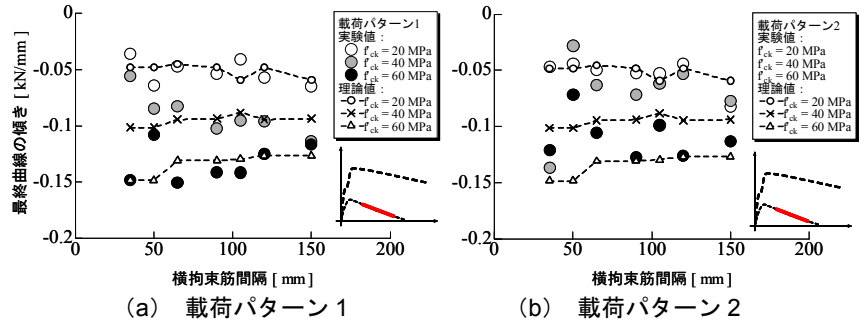


図-9 最終耐力曲線の下降勾配-横拘束筋間隔関係

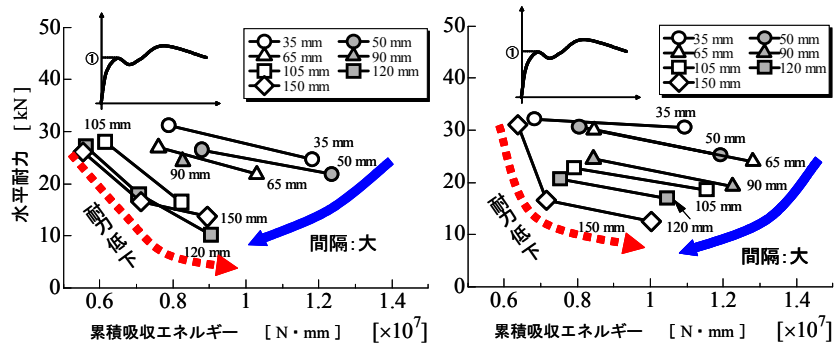


図-10 座屈開始後の耐力-吸収エネルギー(上昇域最大耐力①)

関係について考察する。

コンクリート強度および横拘束筋間隔の違いによる影響

一例として、荷重パターン1、コンクリート強度 $f'_{ck} = 20$ および 60 MPa の供試体に対する座屈発生後の耐力-変位関係から得た、耐力①と累積吸収エネルギーとの関係を図-10 (a) および (b) に示す。ここで、「累積吸収エネルギー」とは図-4 の丸数字位置のエネルギーである。

図より、いずれの供試体も軸方向筋の座屈が進展するに従い、耐力が低下する傾向が確認できる。また、耐力

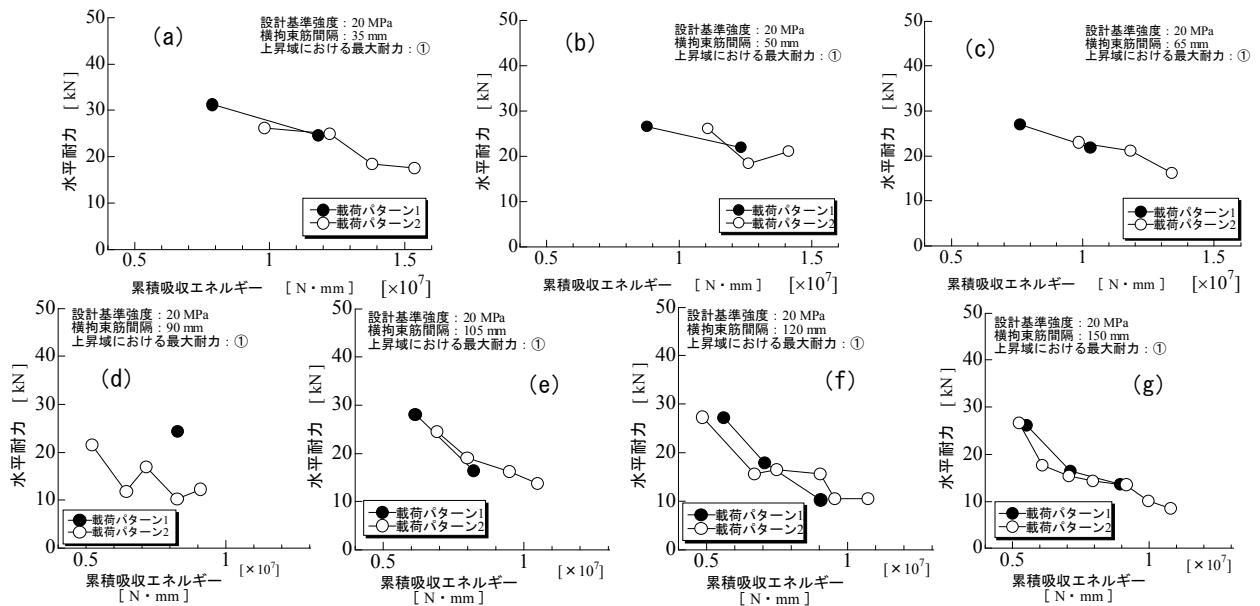


図-11 座屈開始後の耐力-吸収エネルギー（上昇域最大耐力①）
 载荷パターンの違いによる影響（ f_{ck} : 20 MPa, 全供試体：14 体）

低下は右下に凸の放物線状に生じている。それゆえ、座屈発生後の耐力およびその低下性状にコンクリート強度の違いが与える影響はさほど大きくはないものと考えられる。しかし、横拘束筋間隔が小さなものほど、座屈発生時の累積吸収エネルギーおよび耐力が延性的に低下しており、軸方向筋の座屈発生後の挙動に横拘束筋間隔の違いによる影響があると推察される。

载荷パターンの違いによる影響

コンクリート強度 $f_{ck} = 20$ MPa, 载荷パターン 1 (シンボル: ●) および 2 (シンボル: ○) の载荷実験から得た各供試体の耐力①と累積吸収エネルギーとの関係を図-11 に示す。図より、横拘束筋間隔が同一であれば、耐力およびその低下性状は概ね一致した傾向を呈することから、载荷パターンの違いが座屈性状に与える影響は、本実験から得られた結果を考察する限りにおいては殆ど無いと考えられる。

5. まとめ

- 1) 実験結果を整理して得た「耐力-変位曲線」は、 $-8\delta_y$ を境界として、異なる挙動を呈する (図-6)。座屈開始前の耐力-変位関係に対する考察から、座屈が生じない領域では、コンクリート強度の違いが大きな影響を与えることが分かった (第4章3節および4節)。
- 2) 軸方向筋の座屈により生ずる耐荷力の低下に、コンクリート強度および横拘束筋間隔の影響があることを確認した。また、耐力の低下傾向には、 $P-\delta$ 効果が影響することを確認した (第4章3節および4節)。
- 3) 本実験結果では、 $\pm 8\delta_y$ での繰り返しを通して、かぶりコンクリートが十分な損傷を得た場合、軸方向筋の座屈を生ずることが分かった (第4章3節および4節)。

4) 軸方向筋の座屈による耐力の低下は、横拘束筋間隔による影響があることを確認した。この要因として、横拘束筋間隔が小さい供試体ほど、軸方向筋の座屈長が短くなるため⁶⁾、耐力が延性的に低下するものと推察される (第4章3節および5節)。

5) 解析結果は、RC 部材の限界曲線を精度良く再現することができた。また、横拘束筋間隔の小さい供試体では、繰り返し曲げに対してコンクリートが持続的に抵抗することが分かった (第4章3節)。

謝辞: 本研究を遂行するにあたり、平成 22-24 年度科学研究費補助金 (基盤研究 (C)) 22560488 代表: 水野英二, 中部大学特別研究費 A (研究代表者: 水野英二) および愛知工業大学耐震実験センターの研究助成を得た。

参考文献:

- 1) 日本道路協会編: 道路橋示方書・同解説 (V 耐震設計編), 平成 14 年 3 月。
- 2) 日本コンクリート工学協会編: コンクリート構造物のポストピーク挙動評価と設計への応用, 2003。
- 3) 例えば, 須田久美子ら: 交番繰り返し荷重下における柱筋の座屈挙動, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.2, pp.467-472, 1994。
- 4) 亀田好洋ら: 一方向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.31, No.2, pp.139-144, 2009.7。
- 5) Zienkiewicz, O.C.: The Finite Element Method, Third Ed., (吉識雅夫, 山田嘉昭監訳「マトリックス有限要素法」), 培風館, pp.672-796, 1984。
- 6) 鈴木森晶・水野英二: 繰り返し力を受ける RC 柱の破壊領域での主鉄筋座屈性状に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.151-156, 2010.7。