

論文 軸力と側方鉄筋の有無が RC 柱部材の変形性能に及ぼす影響

大塚 久哲*¹・瀧口 将志*²・池永 貴史*³・山崎 智彦*⁴

要旨：RC 柱部材のポストピーク（耐力低下領域）での変形性能は、載荷繰返し回数の影響を大きく受ける。ところで既往の多くの研究では、降伏変位（ l_y ）を交番載荷の基準変位として用いているが、降伏変位は軸力や側方鉄筋の有無により異なるため、同一変位に達するまでの載荷繰返し回数も異なることとなり、繰返し回数が変形性能に及ぼす影響については必ずしも明確ではなかった。そこで本研究では軸力、側方鉄筋の有無をパラメータとした 4 体の試験体を用い、基準変位を統一して交番載荷試験を行うことにより、軸力と側方鉄筋の有無がポストピーク領域における RC 柱部材の変形性能に与える影響を把握した。

キーワード：RC 柱部材, 変形性能, ポストピーク, 鉄筋座屈, 鉄筋破断, 軸力, 基準変位

1. はじめに

RC 橋梁の合理的な耐震性能照査法の確立を目的として、これまでに多くの柱部材の交番載荷実験が実施され、耐力・変形性能に関するモデル化がなされてきた。たとえば、鉄道構造物等設計標準（耐震設計）（以下鉄道耐震標準）¹⁾では、 l_y ごと3回の交番載荷を行った RC 柱部材の荷重・変位曲線の包絡線をテトラリニア型でモデル化して用いている。一方、道路橋においては主要動の繰返し特性に応じてコンクリートの終局ひずみを規定し、これを最大荷重時とするバイリニア型のモデルを用いている²⁾。

ところで RC 柱部材の耐力・変形性能は、基準変位の大きさ、同一変位での繰返し回数、さらには載荷履歴に大きく依存することがわかっている³⁻⁵⁾。しかしながら土木構造物の既往の交番載荷実験においては、載荷基準変位を部材の降伏変位（ $=l_y$ ）として実施したものがほとんどであるため、軸力により基準変位が異なることとなり、軸力が変形性能に与える影響は必ずしも明らかになっていないと考えられる。特に、軸力と繰返し回数の影響を受けると考えられる鉄筋の座屈や、繰返し回数の影響が顕著に見られる耐力低下領域（ポストピーク）において、軸力が耐力・変形性能に与える影響は明確にはなっていない。また、ポストピーク領域における側方鉄筋の有無の影響についても明らかになっていない。

そこで本研究では、軸力と側方鉄筋の有無をパラメータとした 4 体の試験体を用い、載荷基準変位・繰返し回数を統一した交番載荷実験を行うことにより、軸力と側方鉄筋の有無がポストピーク領域における RC 部材の耐力・変形性能に与える影響を定性的に把握することとした。

2. 実験概要

2.1 試験体諸元

実験に用いた試験体は柱部材の縮小モデルで、断面形状は 400mm × 400mm の正方形断面、せん断スパンは 2.56m である。試験体の形状を図 - 1 に、諸元を表 - 1 に示す。また表 - 2 に鉄筋の材料試験結果を示す。実験パラメータは軸力の有無、ならびに側方鉄筋の有無であり、試験体数は計 4 体である。

鉄筋配置は、引張鉄筋は D13-5 本、帯鉄筋は D6 で間隔を 60mm とした。帯鉄筋は、各段に外周筋と中間帯鉄筋（井型）を配置し、フレア溶接を用いて閉合している。引張鉄筋比は 0.426%、帯鉄筋比は 0.528% であり、4 体の試験体とも曲げ破壊型となるよう設計されている。なお側方鉄筋なしの試験体（No.1 および No.2）においても、中間帯鉄筋の有無がコアコンクリートの脱落程度に与える影響を極力抑えるために、側方鉄筋ありの試験体と同様に井型配置とした。

軸力の大きさについては、軸力の有無による違いが明確となるように、載荷装置の性能のほぼ上下限で設定することとし、軸力なし、および軸力あり（960kN / 軸圧縮応力度 6N/mm²）とした。

2.2 載荷方法および計測項目

載荷装置の概要を図 - 2 に示す。試験体は側面が上になるよう横にして設置し、基部側フーチングを PC 鋼棒により載荷フレームに固定し、頭部固定用架台を介して軸力ジャッキにより所定の軸力を入力したのち、水平ジャッキにて交番載荷を行った。軸力ジャッキにはスライド装置を採用しており、変形に追従しながら常に一定の軸力を変形前の材軸方向に作用させた。ねじりジャッキは本実験では使用せず、油圧を開放して載荷した。

*1 九州大学 大学院工学研究院 建設デザイン部門教授 工博（正会員）

*2 九州旅客鉄道(株) 施設部保線課（九州大学 大学院 社会人博士課程）（正会員）

*3 九州大学 大学院建設システム工学専攻（非会員）

*4 九州大学 大学院工学研究院 建設デザイン部門技術職員（非会員）

表 - 1 試験体諸元

	断面 B×D (mm×mm)	引張鉄筋	側方鉄筋 (片側あたり)	帯鉄筋	コンクリート		引張 鉄筋比 pt (%)	帯 鉄筋比 pw (%)	軸力比 η
					圧縮強度 f'c (N/mm ²)	ヤング係数 Ec (kN/mm ²)			
No.1	400×400	D13-5本	なし	D6@60×2組	53.5	35.8	0.426	0.528	0
No.2	〃	〃	なし	〃	47.8	31.7	〃	〃	0.126
No.3	〃	〃	D13-3本	〃	54.5	35.0	〃	〃	0
No.4	〃	〃	D13-3本	〃	48.9	33.1	〃	〃	0.123

注) 引張鉄筋比 : $p_t = A_t / (B \cdot d)$ B : 断面幅 A_t : 最外縁軸方向鉄筋断面積
 帯鉄筋比 : $p_w = A_w / (B \cdot ctc)$ D : 断面高さ A_w : 帯鉄筋断面積
 軸力比 : $\eta = N / (f'_c \cdot B \cdot D)$ d : 有効高さ f'_c : コンクリート圧縮強度
 ctc : 帯鉄筋間隔 N : 軸力

荷重は変位制御にて行い、荷重パターンは 1 y ごとの漸増荷重、同一変位での繰返し回数は 3 回としている。なお荷重基準変位 (1 y) は、軸力等が変形性能に与える影響を明確にする目的で、4 試験体の降伏変位計算値のほぼ平均である 15mm とした。

計測項目は、荷重点での水平変位、水平荷重、頭部フーチング鉛直変位、鉄筋ひずみ、ひび割れ状況である。ひずみゲージは柱基部ならびに基部フーチング内の軸方向鉄筋、基部フーチング天端より 200mm の高さの帯鉄筋 (外周筋) に設置した。

荷重終了は、最外縁の軸方向鉄筋が破断し、片面の残り本数が 0~1 本となった時点を目安とした。

3. 実験結果

3.1 ひび割れ状況

写真 - 1 に各試験体の荷重終了時の損傷状況を示す。側方鉄筋なしの No.1 および No.2 試験体と比較して、側方鉄筋ありの No.3 および No.4 試験体では、側面の部材軸に直交するひび割れ本数が多くなっている。これは側方鉄筋により、ひび割れが分散されたためと考えられる。また、軸力ありの No.2 および No.4 試験体では、塑性ヒンジ付近にひび割れが多数入り、基部付近のコンクリートの損傷程度と脱落の程度も大であった。

3.2 荷重 - 変位曲線

図 - 3 に各試験体の荷重 - 変位曲線を示す。なお図では軸力によって付加的に生じるモーメントの影響 (P-効果) を軸力と軸力作用点水平変位の積で補正している。荷重 - 変位曲線に鉄道耐震標準の基となった実験式⁶⁾による計算値、ならびに軸方向鉄筋の屈服・破断時期を重ねて示す。荷重計算値は実験値をやや過少評価しているが、これは主に軸方向鉄筋のひずみ硬化を考慮していないためと考えられる。また、図中の「26 サイクル目耐力計算値」は鉄筋破断を考慮して算出した曲げ耐力である (3.8 参照)。

軸方向鉄筋の破断が荷重後半に多数確認されたが、破断はいずれも鉄道耐震標準による N 点計算値より大きな変位で生じている。

表 - 2 鉄筋材料試験結果

鉄筋径	降伏強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
D13	325	185
D6	395	183

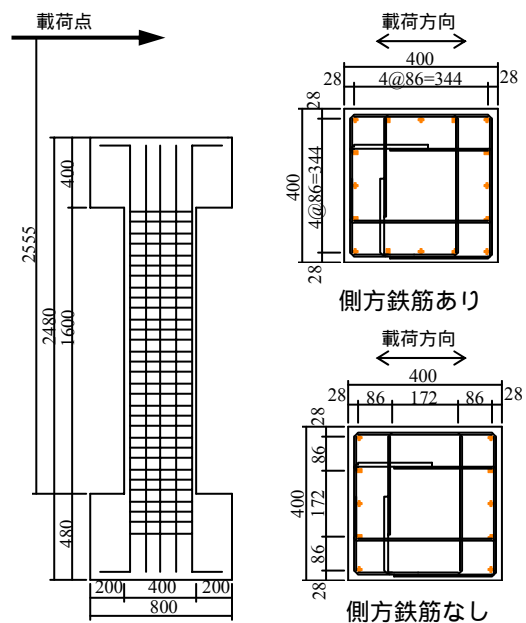


図 - 1 試験体形状 (単位 : mm)

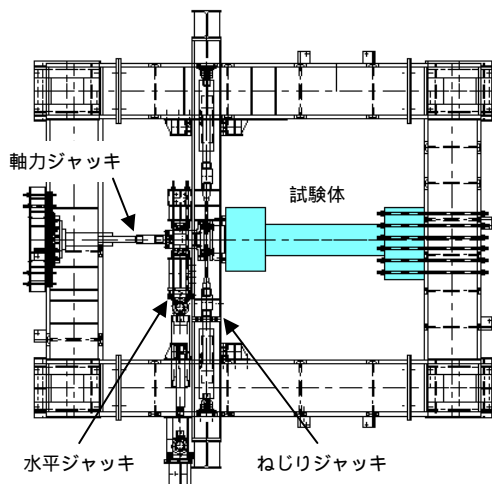


図 - 2 荷重装置 (平面図)



写真 - 1 最終損傷状況

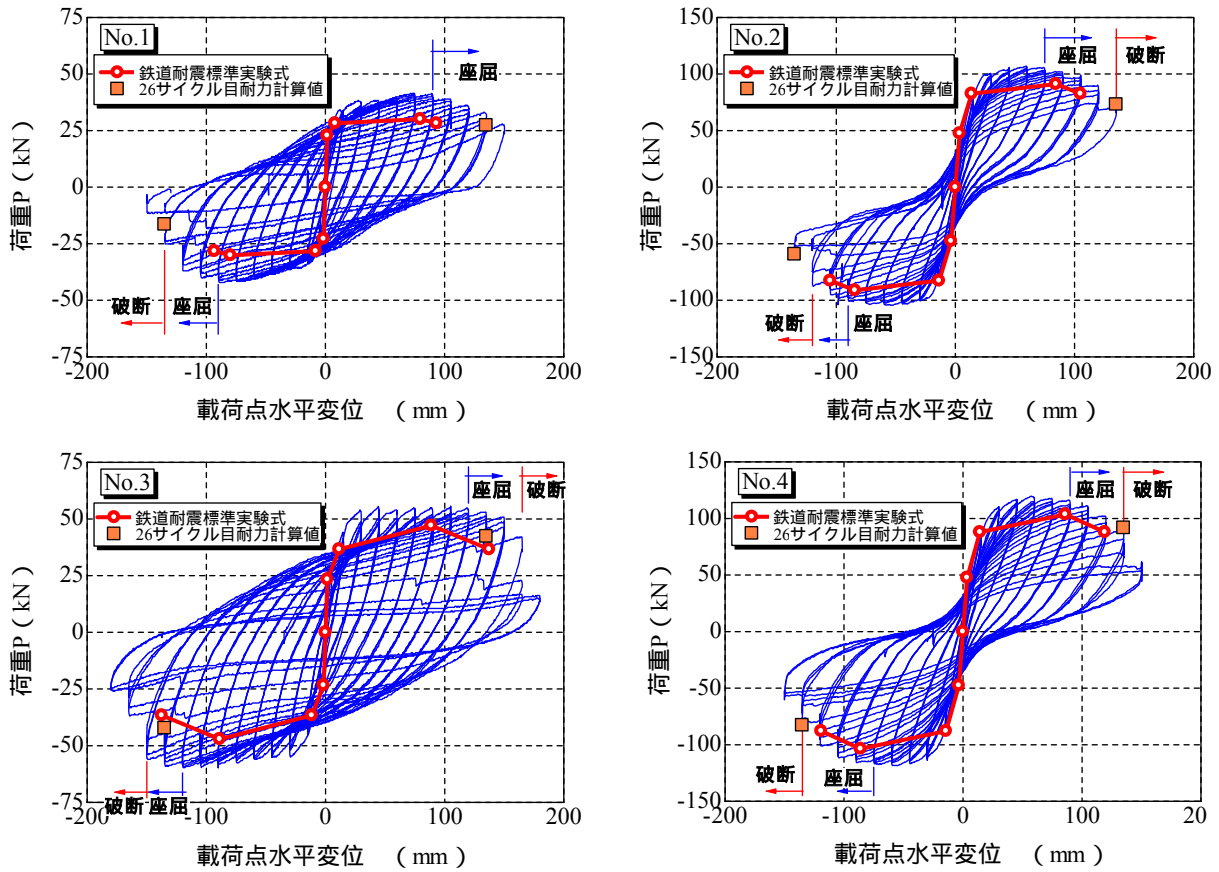


図 - 3 荷重 - 変位曲線

軸方向鉄筋の座屈後、各試験体とも徐々に水平耐力が低下し、その後軸方向鉄筋の破断により水平耐力が急激に低下した。なお軸力ありの No.4 試験体では、P-効果による付加モーメントが水平耐力を上回り、水平力を加えなくとも変形が進行する状態となり、試験体が事実上崩壊（転倒）する状態となった。

履歴曲線の形状は、軸力なしの No.1 および No.3 試験体では紡錘型、軸力ありの No.2 および No.4 試験体ではいわゆる逆 S 字型の履歴曲線となった。また、軸方向鉄

筋の座屈後、さらには破断後の履歴曲線の形状変化に着目すると、軸力・側方鉄筋なしの No.1 試験体では逆 S 字型への変化が多少みられるものの、他の試験体では、耐力は低下するものの履歴曲線の形状は大きくは変化していない。これは、本試験体では引張鉄筋比が 0.426% と低く、コンクリートが分担する圧縮力に比べ鉄筋が分担する圧縮力がかなり小さいために、鉄筋が座屈してもその影響が履歴曲線に大きくは現れなかったためと考えられる。そして軸力が大きくコンクリートが分担する

圧縮力の割合が大きいほど、また側方鉄筋があるために最外縁鉄筋の負担割合が小さいほど、最外縁鉄筋座屈の影響が小さいものと考えられる。

3.3 部材軸方向の長さ変化

図 - 4 に、部材軸方向の長さ変化を示す。部材軸の長さは、頭部フーチング下面に設置した鉛直変位計を用い、伸び方向を正として部材角 0 時点で測定した。

軸力なしの No.1 および No.3 試験体では、載荷に伴い部材の伸びが生じているが、軸力ありの No.2 および No.4 試験体では若干の縮みが生じている。また同一軸力で比較すると、側方鉄筋ありの No.3, No.4 試験体では、側方鉄筋なしの No.1, No.2 試験体と比較して伸び量が小さくなっている。これは側方鉄筋が、部材伸び方向の長さ変化を拘束しているためと考えられる。

なお部材軸方向の長さは、軸圧縮力の存在下においても、軸方向鉄筋の降伏後伸びることが知られているが⁷⁾、本実験においてはそのような傾向は見られない。これは、本実験では、(1) 軸方向鉄筋量が少ないこと、(2) 軸圧縮力が比較的大きいこと、のためと考えられる。

3.4 軸方向鉄筋の座屈

軸方向鉄筋の座屈は、載荷中のかぶりコンクリートはらみ出し目視によって確認を行った。図 - 5 に各試験体の荷重 - 変位曲線の包絡線と座屈・破断時期を示す。ここで縦軸の水平荷重については、各試験体の正載荷側の最大荷重で除して無次元化を行った。

図 - 3 および図 - 5 より、軸方向鉄筋の座屈は、軸力ありの場合には、軸力なしよりもわずかではあるが早期に生じている。また軸力なしの場合には、側方鉄筋ありの No.3 試験体は、側方鉄筋なしの No.1 試験体と比較して、座屈開始時期が大きく遅れる結果となった。これは図 - 4 に示すように、No.3 試験体は No.1 試験体と比較して、部材軸方向の伸び、すなわち軸方向鉄筋の伸びが遅いために、座屈時期も遅くなったためと考えられる。

3.5 軸方向鉄筋の破断

すべての試験体で軸方向鉄筋の破断を確認した。図 - 6 に各試験体における軸方向鉄筋の破断位置および破断時期を示す。軸方向鉄筋の破断は、圧縮側で座屈した鉄筋が引張側となり伸びる際に生じた。破断箇所は帯鉄筋で拘束される位置もしくは柱基部であった。また側方鉄筋なしの No.1 および No.2 試験体では、1 箇所破断が生じると、それに隣接する軸方向鉄筋が連鎖的に破断する現象が確認された。

図 - 5 より、本実験においては、軸方向鉄筋の破断は座屈開始後の 2~3 y 後に生じていることがわかる。また座屈開始時期が遅かった No.3 試験体では、軸方向鉄筋の破断開始時期も遅れる結果となっている。

側方鉄筋ありの No.3 および No.4 試験体では、最外縁

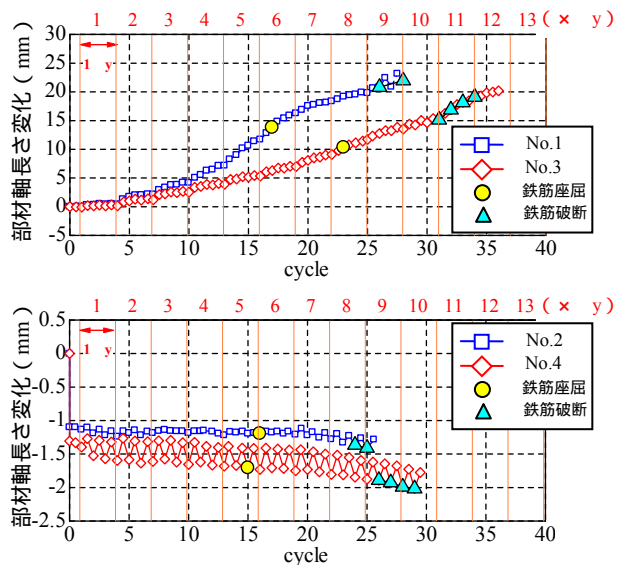


図 - 4 部材軸長さ変化

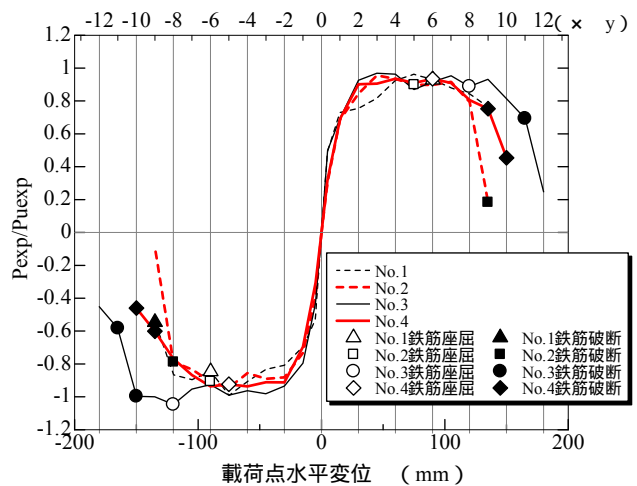


図 - 5 荷重 - 変位曲線の包絡線

の軸方向鉄筋が破断した後も 1 つ内側の側方鉄筋が引張鉄筋として機能するために、載荷終了時も最大耐力の 2~4 割程度の耐力を有していた。側方鉄筋なしの No.1 および No.2 試験体においても載荷終了時にある程度の耐力を残していたが、これは正負いずれかの軸方向鉄筋の破断が 4~5 本確認された時点で安全性を考慮して載荷を中止したことによる。また No.1 試験体では、負載荷時と比較して正載荷時の耐力低下が最終までなだらかであるが、これは正載荷時の圧縮鉄筋のみが破断し、引張鉄筋が破断していないためと考えられる。

3.6 履歴吸収エネルギー

図 - 7 に、各試験体の 1 サイクルあたりの履歴吸収エネルギーの変化を示す。なおこの値は、各 y の第 1 サイクルにおいて算定したものである。図には、軸方向鉄筋の座屈および破断の発生時期を併せて示した。これによると、同一軸力で比較すると、側方鉄筋がない場合には、側方鉄筋がある場合に比べて履歴吸収エネルギーが小さいことがわかる。

さらに、ポストピーク領域でエネルギー吸収能が低下する傾向はいずれの試験体も一致しているが、低下の開始時期は座屈時期よりも遅れていることがわかる。1 サイクルあたりの履歴吸収エネルギーは、本実験の条件下においては、鉄筋座屈が始まり耐力が低下しても変位の増加にともない増加し、最終的に軸方向鉄筋破断を契機に低下する傾向が見られる。

3.7 等価粘性減衰定数

図-8に、各試験体の等価粘性減衰定数の変化を示す。軸力なしのNo.1およびNo.3試験体では紡錘型の履歴曲線となるため、等価粘性減衰定数も大きくなっている。

側方鉄筋有無による違いに着目する。軸力ありのNo.2およびNo.4試験体では双方の差が小さいが、軸力なしのNo.1およびNo.3試験体では側方鉄筋なしのNo.1試験体が大きくなっている。これは、側方鉄筋があると耐力が上がるものの側方鉄筋が弾性的挙動をするためにエネルギー吸収能はそれほど増加しないこと、また軸力が小さいとコンクリートが吸収するエネルギーと比較して鉄筋が吸収するエネルギーが相対的に大きくなることにより、軸力なしの場合に側方鉄筋有無の差が顕著になったものと考えられる。

4 試験体とも、ポストピーク領域において等価減衰定数は横這いしないわずかに低下する傾向を示している。したがって、軸方向鉄筋の破断が等価粘性減衰定数に与える影響は本実験においては顕著ではないが、これはそもそも軸方向鉄筋量が少ないためと考えられる。

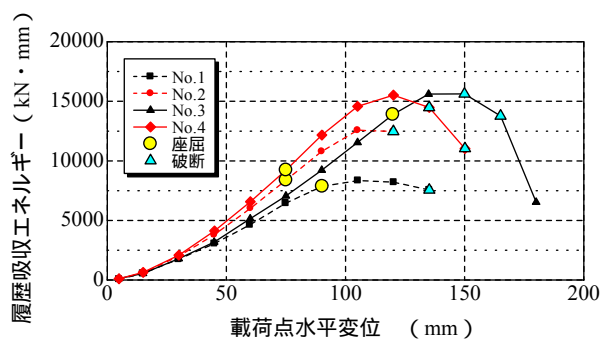


図-7 各試験体の履歴吸収エネルギー(1サイクル)

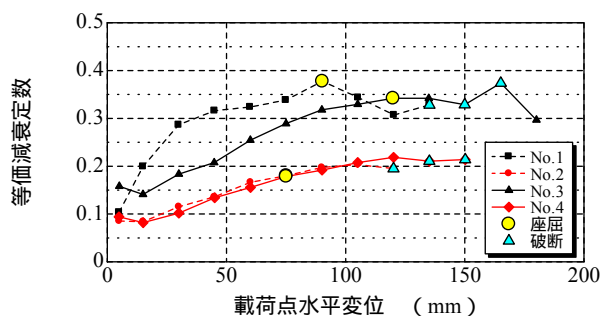


図-8 各試験体の等価粘性減衰定数

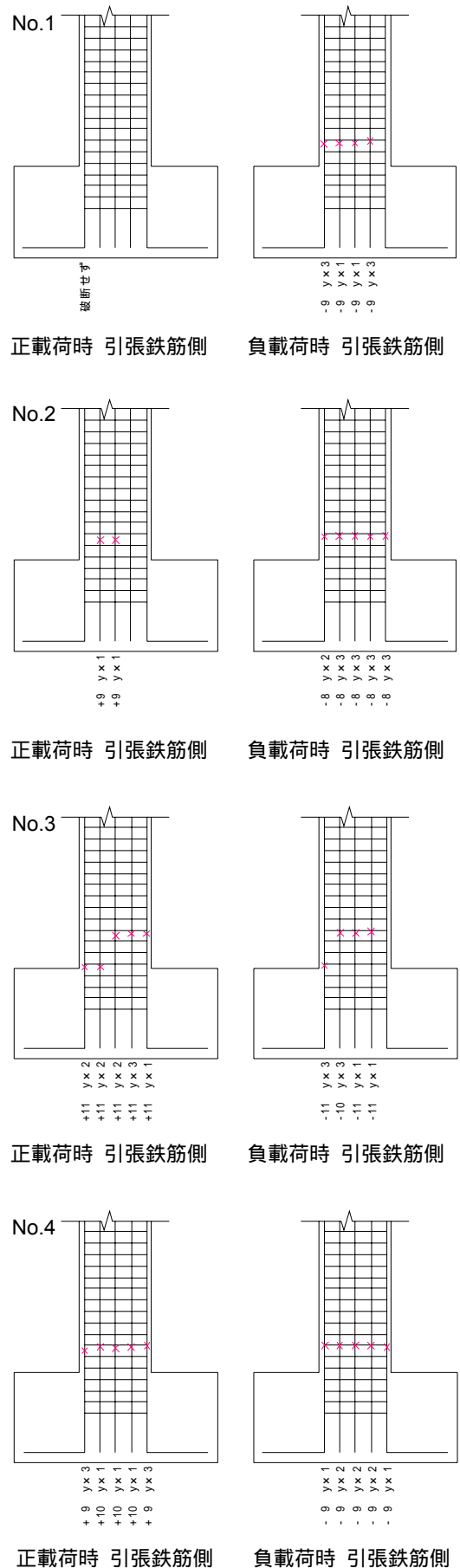


図-6 軸方向鉄筋の破断状況

表 - 3 損傷状況と残存耐力計算値

正載荷時						
	コンクリート	引張鉄筋	圧縮鉄筋	Pexp (kN)	Pcal (kN)	Pexp/Pcal
No.1	かぶり無視	5本	0本	31.661	27.293	1.160
No.2	"	3本	"	69.987	73.070	0.958
No.3	"	5本	"	51.906	42.286	1.228
No.4	"	5本	"	90.140	91.573	0.984

負載荷時						
	コンクリート	引張鉄筋	圧縮鉄筋	Pexp (kN)	Pcal (kN)	Pexp/Pcal
No.1	かぶり無視	3本	0本	-22.659	16.476	1.375
No.2	"	0本	"	-52.833	59.327	0.891
No.3	"	5本	"	-55.698	42.286	1.317
No.4	"	3本	"	-71.961	82.892	0.868

3.8 軸方向鉄筋座屈・破断後の耐力の検討

軸方向鉄筋の座屈・破断後の残存耐力評価を試みる。鉄筋破断が数本生じている程度の変位として、26 サイクル目 (±9 y×1) について検討することとし、各試験体の軸方向鉄筋の破断本数に応じて引張鉄筋断面積を減じ、曲げ耐力の算定を行った。なおその際、座屈した圧縮鉄筋がどの程度の応力を負担するかは不明であるが、本試験体では鉄筋比が小さく圧縮鉄筋の有無による曲げ耐力の差が小さいため、圧縮鉄筋は無視して計算を行った。また鉄筋座屈によりかぶりコンクリートがほぼ剥落しているため、圧縮面のかぶりも無視している。表 - 3 に各試験体の損傷状況と残存耐力計算値を、図 - 9 に実験値と計算値の関係を示す。また、図 - 3 の荷重 - 変位曲線に計算値を重ねて示した。

図より、軸力なしの No.1 および No.3 試験体で計算値は過小評価、軸力ありの No.2 および No.4 試験体ではやや過大評価となっている。この原因として、軸力なしの場合には軸方向鉄筋のひずみ硬化の影響が大きいこと、軸力ありの場合にはコアコンクリートの損傷が軸力のない場合に比べて大きいことが考えられる。

まとめ

曲げ破壊先行型の RC 柱部材の縮小試験体を用いた交番載荷実験を行い、軸力と側方鉄筋が耐力低下領域における RC 柱部材の耐力・変形性能に与える影響を定性的に明らかにした。得られた知見を以下に示す。

- (1) 本実験の範囲では、軸方向鉄筋の破断は、鉄筋座屈が発生してから 2~3 y 後に生じた。また座屈発生が遅いときには破断時期も遅くなった。
- (2) 軸力なしの場合、側方鉄筋があれば軸方向伸びが抑制されるため、鉄筋座屈時期が遅くなる傾向がみられた。
- (3) 同一軸力の場合、部材の軸方向長さ変化 (軸方向鉄筋の伸び) と鉄筋座屈時期には関連がみられた。
- (4) 本実験の範囲では、軸方向鉄筋座屈後の耐力低下は、鉄筋が破断するまでは、なだらかに低下する。

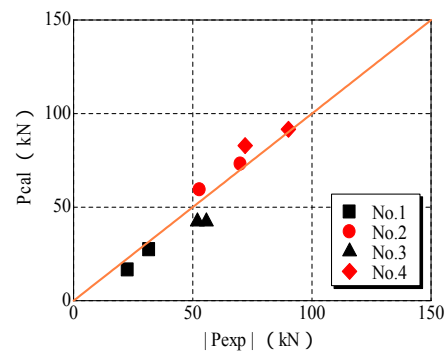


図 - 9 残存耐力の実験値と計算値比較

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 (耐震設計), 丸善, 1999.10
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書 耐震設計編 (平成 14 年版), 丸善, 2002.3
- 3) 瀧口将志, 渡邊忠朋, 谷村幸裕：RC 部材の繰返し載荷による曲げ耐力低下に関する実験的研究, 土木学会第 56 回年次学術講演会, V-371, pp.742-743, 2001.10
- 4) 仁平達也, 谷村幸裕, 岡本大, 田所敏弥：RC 高架橋柱における載荷履歴が変形性能に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.943-948, 2005
- 5) 瀧口将志, 谷村幸裕, 仁平達也, 大塚久哲：RC 高架橋柱部材の交番載荷による曲げ耐力低下領域での変形性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp.979-984, 2007
- 6) 渡邊忠朋, 谷村幸裕, 瀧口将志, 佐藤勉：鉄筋コンクリート部材の損傷状況を考慮した変形性能算定手法, 土木学会論文集, No.683/V-52, pp.31-45, 2001.8
- 7) 衣笠秀行, 高柳美佐子：低軸力を受ける RC 柱部材の大変形繰返し載荷下の破壊性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.3, pp.223-228, 2000