

論文 荷重基準軸のずれと断面の非対称性が鉄筋コンクリート橋脚の変形性能および履歴特性に与える影響

瀧口 将志*1・池永 貴史*2・大塚 久哲*3・山崎 智彦*4

要旨: 耐震設計において、既往の交番荷重試験は正負対称配筋で正負漸増荷重で行われたものが多い。しかし部材によっては非対称配筋を有する RC 部材も存在し、また地震波によっては応答変位が片側に偏る場合もあるため、変形性能を必ずしも適切に評価できない可能性がある。そこで荷重基準軸をシフトさせた実験、ならびに軸方向鉄筋量が正負で異なる試験体を用いた実験を実施した。その結果、荷重基準軸がシフトすると正負で変形性能が異なること、また非対称配筋では耐力だけでなく履歴特性も異なり、軸方向鉄筋の少ない面の鉄筋座屈・破断が先行することが分かった。

キーワード: RC 柱, 変形性能, 荷重基準軸, 非対称配筋, 鉄筋座屈, 鉄筋破断, 履歴特性

1. はじめに

阪神・淡路大震災以降、鉄筋コンクリート橋脚（以下 RC 橋脚）を対象とした模型荷重試験が数多く実施され、各種基準類に示されるように、その耐力・変形性能の骨格については概ね確立されたといえる。たとえば、道路橋示方書 V 耐震設計編¹⁾では原点-降伏-終局を結ぶバイリニア型、鉄道構造物等設計標準（耐震設計）（以下鉄道耐震標準）²⁾では耐力低下後の負勾配を有するテトラリニア型のスケルトンカーブを用いることとしている。ところで地震力の作用下における構造物の変形性能を精度良く評価するためには、これらの包絡線に加えて除荷・再荷重過程を表現できるルールが必要である。RC 構造物の耐震設計では通常、部材を線材でモデル化し、部材の M- ϕ あるいは M- θ 関係に履歴復元力特性を与える部材モデル、もしくは材料に応力-ひずみ関係を付与するファイバーモデルなどが用いられている。このうち部材モデルでは、履歴復元力特性として Takeda モデル³⁾などの剛性低下型のものが一般的に用いられる。モデルの適用性の確認は交番荷重試験の結果に基づいて行われている⁴⁾⁵⁾が、田所ら⁶⁾が指摘するように、地震波の特性によっては応答変位が片側に寄る可能性もあり、既往の実験で多数採用されている正負漸増型の荷重方法では部材の変形性能を適切に評価できない可能性がある。また、ラーメン構造の梁部材のように非対称配筋を有する RC 部材も存在し、このような場合の変形性能の評価が課題となる。

このような背景から本研究では、荷重の基準軸をシフトさせた荷重実験および軸方向鉄筋量が正負で異なる試験体を用いた荷重実験を実施し、部材の耐力・変形性能

について、特に軸方向鉄筋座屈・破断に着目して検討することとした。

2. 実験方法

2.1 試験体

試験体は一辺が 400mm の正方形断面で、せん断スパンが 2.56m である。軸方向鉄筋として D13、帯鉄筋および中間帯鉄筋に D6 を使用している。試験体の諸元を表-1、材料試験結果を表-2 に、また試験体形状を図-1 に示す。KY07-4 を基準試験体とし、荷重履歴の影響を検討するための KY08-1（KY07-4 と同一配筋）、片側の鉄筋本数が異なる KY08-2 の計 3 体を準備した。KY08-2 の配筋は断面の非対称性が部材の耐力や変形性能に与える影響を検討するため、施工性に問題が無い範囲で片側の鉄筋本数を増加させ、片側 5 本に対し、もう一方を 13 本とした。

2.2 荷重装置および荷重方法

荷重装置の概要を図-2 に示す。基部側フーチングを PC 鋼棒にて固定し、頭部フーチングに油圧ジャッキで一定軸力 (=960kN) を荷重した。軸力荷重用のジャッキはスライド装置により滑らかに移動し、変形前の材軸方向に常に一定の軸力が荷重されるような構造になっている。水平加力は基部から 2.56m の高さに取り付けた油圧ジャッキにより、変位制御にて行った。

荷重ステップを図-3 に示す。KY07-4 および KY08-2 は基準変位 $1\delta y$ の整数倍で正負漸増交番荷重とした。なお本実験では基準変位を $1\delta y=15\text{mm}$ に統一している。これは、例えば軸方向鉄筋量が異なると降伏変位 ($1\delta y$) の大きさが異なるが、それに起因して同一変位までの総

*1 九州旅客鉄道（株） 施設部工事課 工修（正会員）

*2 九州大学 大学院 建設システム工学専攻（正会員）

*3 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）

*4 九州大学 大学院 建設デザイン部門技術職員（非会員）

表-1 試験体諸元

試験体番号	断面 B×D(mm)	せん断スパン La(m)	引張鉄筋	帯鉄筋	軸力 N(kN)	引張鉄筋比 pt(%)	帯鉄筋比 pw(%)	軸力比 η	備考
KY07-4	400×400	2.56	D13-5本	D6@60×2組	960	0.426	0.528	0.123	基準試験体
KY08-1	400×400	2.56	D13-5本	D6@60×2組	960	0.426	0.528	0.110	載荷基準軸シフト
KY08-2	400×400	2.56	D13-5本/13本	D6@60×2組	960	0.426/1.107	0.528	0.120	非対称配筋

表-2 材料試験結果

試験体番号	圧縮強度 f'_c (N/mm ²)	割裂強度 f_t (N/mm ²)	ヤング係数 E_c (N/mm ²)
KY07-4	48.9	3.58	3.31×10^4
KY08-1	54.7	3.89	3.40×10^4
KY08-2	50.0	3.52	3.46×10^4

鉄筋径	降伏強度 f_{ry} (N/mm ²)	破断強度 f_{ru} (N/mm ²)	ヤング係数 E_r (N/mm ²)
D13	325.0	478.0	1.85×10^5
D6	395.0	505.0	1.83×10^5

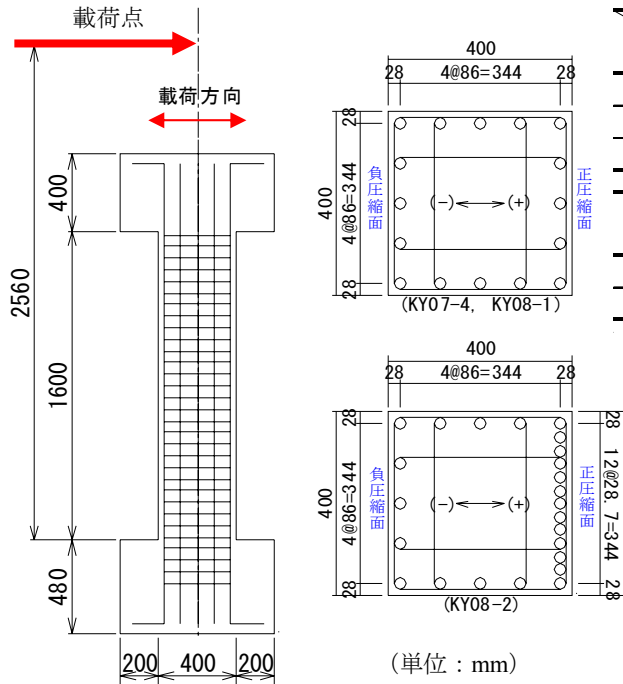


図-1 試験体形状

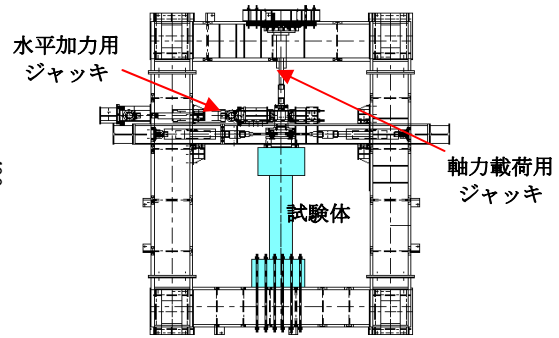


図-2 載荷装置

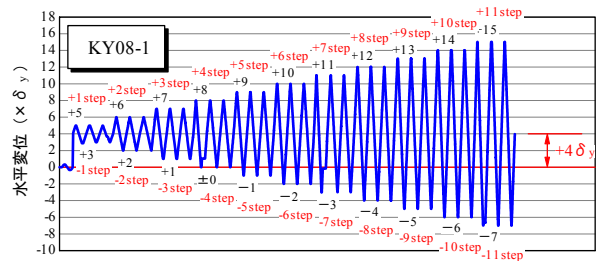
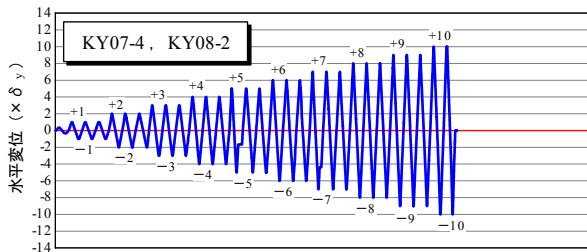


図-3 載荷ステップ

繰返し回数が部材の変形性能に与える影響を可能な限り他のパラメータの影響と分離するためである。KY08-1はまず+5 δy (=+75mm)(+1step)まで片押しし、その後+3 δy (=+45mm)(-1step)まで戻した後、以降は+4 δy を載荷の基準軸として正負に交番載荷した。同一変位での繰返し回数はいずれも3回である。

3. 実験結果

3.1 損傷状況

図-4に各試験体の最終損傷状況を示す。また損傷の進展状況を以下に記す。なお以下では、正載荷時に圧縮側になる面を正圧縮面、負載荷時に圧縮側になる面を負圧縮面と表記する。

(1) KY07-4

$\pm 5\delta y$ でかぶりコンクリートの浮きが観察され、 $\pm 6\delta y$ までには正負両側の軸方向鉄筋が座屈した。またそれに伴って基部付近のかぶりコンクリートが剥落した。 $-9\delta y$ のピークに向かう1回目の載荷途中で軸方向鉄筋が破断した。その後の同一変位での繰返しにより、軸方向鉄筋が次々に破断し、最終的には $\pm 10\delta y$ で全ての最外縁軸方向鉄筋が破断したため載荷を打ち切った。

(2) KY08-1

+5 δy (+1step)への単調載荷時に軸方向鉄筋が降伏ひずみに達し、正圧縮面脚部のコンクリートが圧壊したものの、軸方向鉄筋の座屈は生じなかった。 $-3\delta y$ (-7step)の1回目の載荷時に負圧縮面(先に引張側になった面)の鉄筋が座屈し、続いて+11 δy (+7step)に向かう3回目のサイクルで正圧縮面の中央の鉄筋が座屈した。破断開

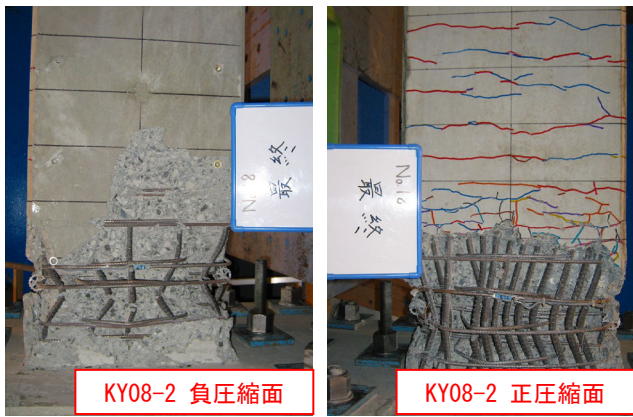
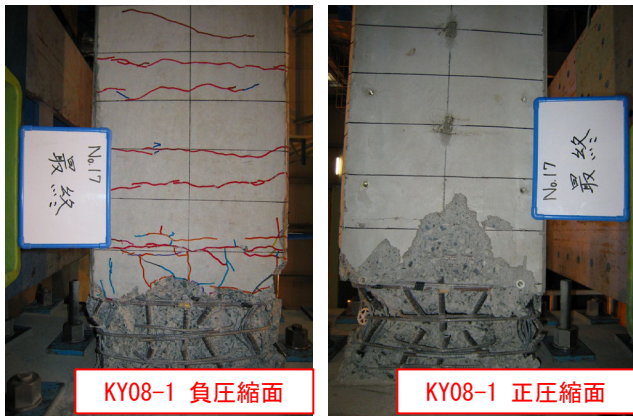
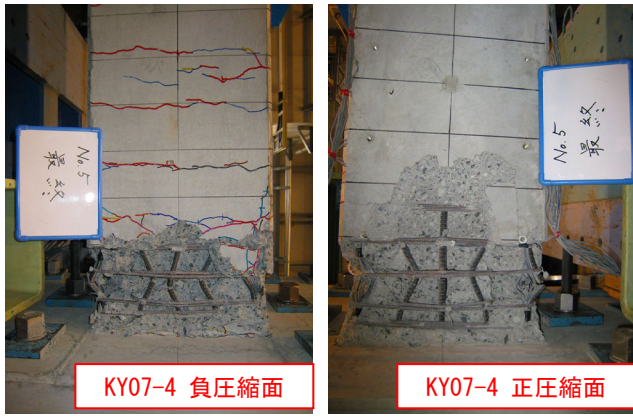


図-4 最終損傷状況

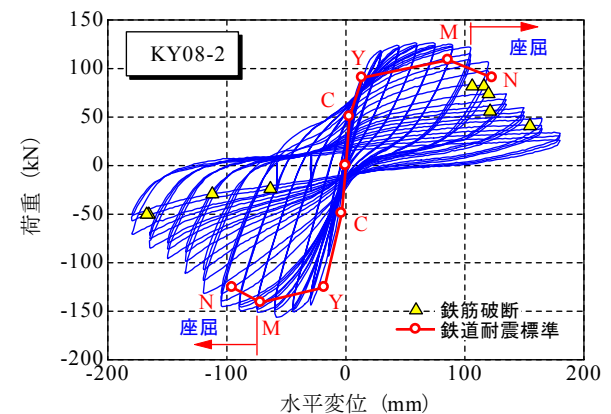
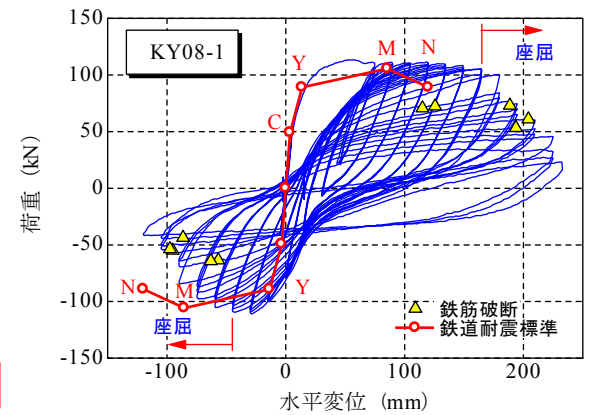
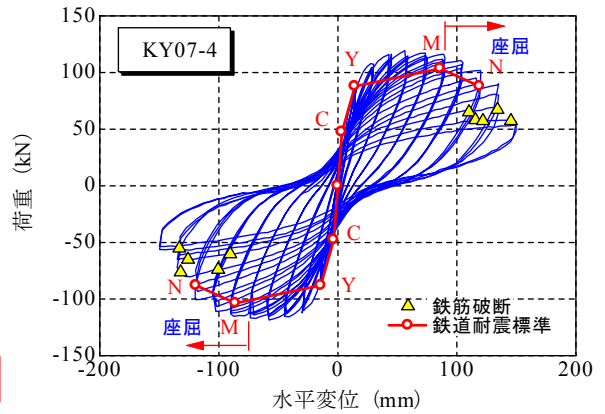


図-5 荷重-変位関係

始は先に引張側になった面（負圧縮面）の軸方向鉄筋で早期に生じ、 $+12\delta y$ (+8step)の2回目のサイクルであった。正圧縮面（先に圧縮側になった面）の鉄筋破断開始は $-6\delta y$ (-10step)の2回目であった。全ての最外縁軸方向鉄筋が破断した時点で載荷を終了した。

(2) KY08-2

$-1\delta y \times 3 \rightarrow +2\delta y \times 1$ および $+2\delta y \times 1 \rightarrow -2\delta y \times 1$ に向かうサイクルで正負の軸方向鉄筋が降伏ひずみに達した。軸方向鉄筋の座屈は鉄筋本数の少ない負圧縮面 (=5本側) で $-5\delta y$ の2回目、鉄筋本数の多い正圧縮面 (=13本側) で $+7\delta y$ の1回目に生じた。座屈後にはかぶりコンクリートの剥落を生じ、耐力が次第に低下した。軸方

向鉄筋の破断開始は $+8\delta y$ の3回目に負圧縮面（先に座屈した面）で生じた。最終的には負圧縮面で5本全てが、正圧縮面で13本のうち4本の軸方向鉄筋が破断して大きく耐力が低下した。なお鉄筋量の多い正圧縮面での破断鉄筋4本は帯鉄筋または中間帯鉄筋で囲まれる隅角部であった。

3.2 荷重-変位関係

図-5に各試験体の載荷点における水平変位-水平荷重の関係を示す。図-6に荷重-変位関係の包絡線を示す。荷重は軸力によって生じる二次的なモーメントの影響を補正したものである。また図-5中には軸方向鉄筋の座屈時期と破断時期、鉄道耐震標準による骨格計算値（C点、

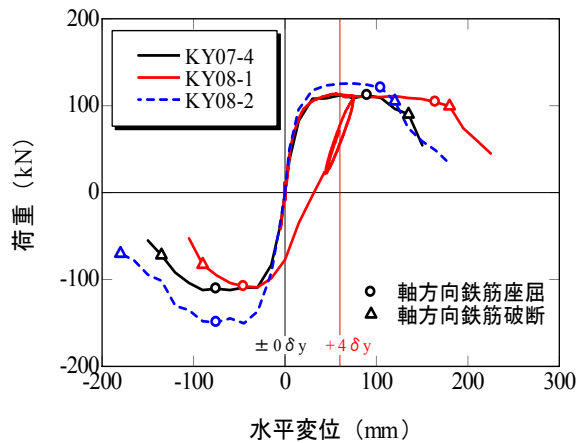


図-6 包絡線

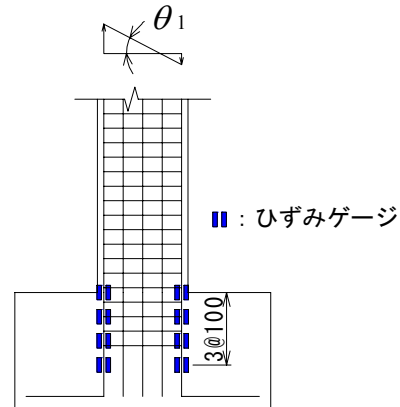


図-7 軸方向鉄筋伸出し回転角の計測方法

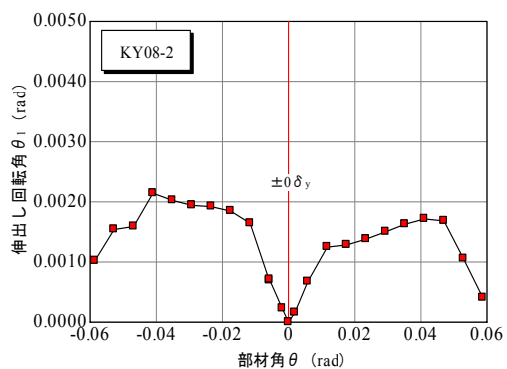
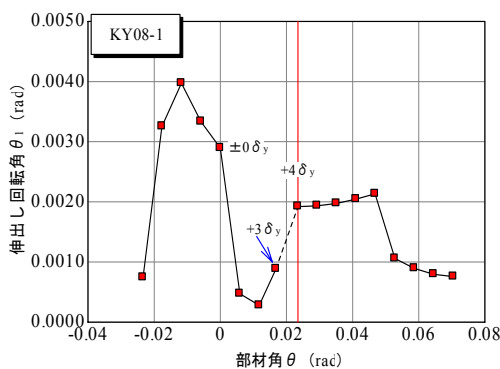


図-8 軸方向鉄筋伸出しによる回転角

表-3 軸方向鉄筋の座屈・破断時期と鉄道耐震標準計算値の比較

	座屈時水平変位 (mm)		破断時水平変位 (mm)		鉄道耐震標準計算値 (mm)	
	正圧縮面	負圧縮面	正圧縮面	負圧縮面	M点	N点
KY07-4	+90	-75	-135	+135	86.0(±)	119.2(±)
KY08-1	+165	-45	-90	+180	85.5(±)	119.9(±)
KY08-2	+105	-75	-180	+120	86.1(+)/71.5(-)	123.2(+)/95.4(-)

注 1) 水平変位は、載荷サイクルのピーク変位を示す。
 注 2) 鉄道耐震標準計算値の±は、載荷方向を示す。

Y 点、M 点、N 点) を併せて示す。

正負に同一振幅で載荷した KY07-4 では、耐力低下の開始時期および耐力低下域の負勾配とも実験値は計算値と調和的な結果を示している。これに対し、載荷基準軸を正側へ $4\delta y$ シフトさせた KY08-1 では、正載荷時で M 点計算値の 2 倍程度、負載荷時で M 点計算値の 1/2 程度の変位で軸方向鉄筋の座屈を生じ、耐力低下に至っている。

片側の軸方向鉄筋本数が多い KY08-2 では鉄筋が 5 本と少ない負圧縮面に $5\delta y$ で先に座屈を生じた。また同一変位での繰り返しによる耐力低下が比較的大きくなるのは、正載荷時が $+7\delta y$ であるのに対し負載荷時が $-6\delta y$ であり、座屈した鉄筋が圧縮側になるときにまず耐力低下が生じることが確認された。鉄筋破断は N 点計算

値以降の変位で生じており、先に座屈した負圧縮面が $8\delta y$ で破断が生じたのに対し、座屈が $7\delta y$ と遅れた正圧縮面は $12\delta y$ で破断しており、座屈が遅い場合には破断も遅い結果となった。また KY08-2 のような非対称配筋であっても、鉄道耐震標準による骨格は概ね実験値を妥当に評価しているといえる。

履歴特性に関しては比較的高軸力での実験であるため、基本的には逆 S 字型である。KY08-1 では履歴曲線が全体的に正側へシフトした結果、正側で残留変位が大きく負側で小さくなった。KY08-2 では正側ピークから負側ピークへ至る経路（鉄筋 5 本側が引張→圧縮）では載荷初期から逆 S 字型であるが、負側ピークから正側ピーク（鉄筋 13 本側が引張→圧縮）へ至る経路では小変形で紡錘型、軸方向鉄筋座屈後に逆 S 字型へと移行する

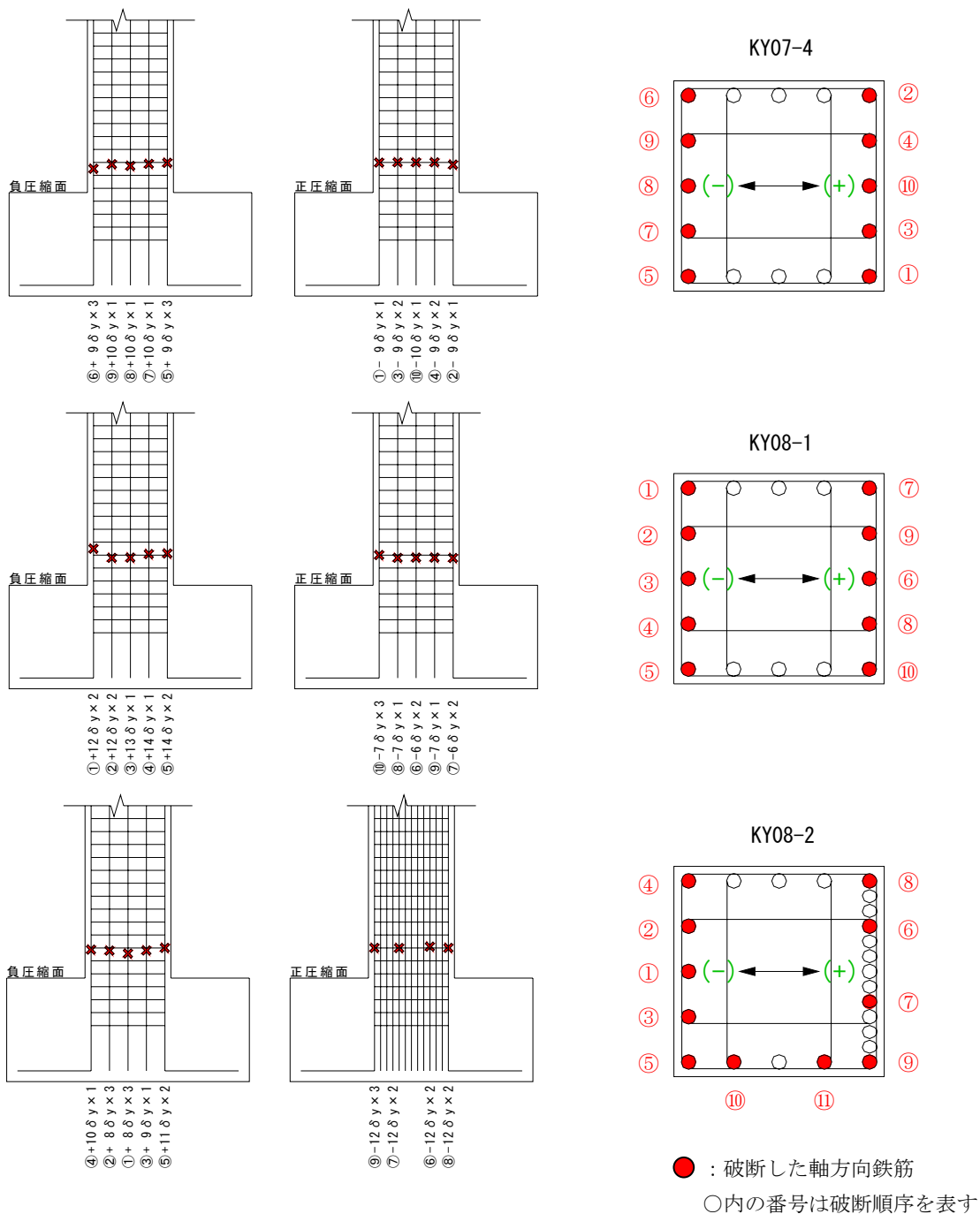


図-9 軸方向鉄筋の破断箇所および破断順序

傾向がみられる。このことは、履歴特性が紡錘型か逆 S 字型かということと、圧縮鉄筋がどの程度圧縮力を負担可能かということの関連を示していると考えられる。

3.3 変形性能に関する考察

KY08-1, KY08-2 では軸方向鉄筋の座屈および破断時期に正負で明確な違いが認められる。表-3 に各試験体の軸方向鉄筋の座屈および破断時期、ならびに鉄道耐震標準による終局変位計算値 (M 点, N 点) を示す。ここで M 点は耐力低下が顕著にならない最大変位, N 点は荷重-変位関係の包絡線が降伏変位を下回らない最大変位である。KY08-1 において負圧縮面の座屈が早く、正圧縮面の座屈が遅れた原因として、载荷初期に正側に大変位

を与えた後に交番载荷を行った結果、負圧縮面の軸方向鉄筋の残留引張ひずみが大きい状態で鉄筋の伸縮を繰り返したことが挙げられる。正側で変形性能が増加したのは、正圧縮面の軸方向鉄筋の伸びがそもそも小さく、座屈が遅れたためと考えられる。

フーチング内からの軸方向鉄筋伸出し回転角の各サイクルごとのピーク値を図-8 に示す。ここで伸出し回転角は、基部フーチング内の軸方向鉄筋に図-7 に示すように貼付したひずみゲージの値を、引張鉄筋・圧縮鉄筋それぞれについて鉄筋軸方向に積分して算出したものである。KY08-1 において、+5δy (+1step) でのひずみ積分による伸出し量を部材角に換算すると 0.002 rad 程度で

ある。交番載荷により変位を戻すと一旦鉄筋がフーチング内に押し込まれ、その後反対側の鉄筋が伸び出す、 $+2\delta y$ (-2step) での伸出量は部材角換算で高々0.0005 rad 程度である。このことから、負圧縮面の軸方向鉄筋（正載荷時の引張鉄筋）は正圧縮面の軸方向鉄筋（負載荷時の引張鉄筋）に比べてより大きな引張りずみ履歴を経験し、そのため座屈および破断を早期に生じたものと推察される。KY08-2では鉄筋13本の正圧縮面に先立って鉄筋5本の負圧縮面の軸方向鉄筋が座屈した。これは正圧縮面は軸方向鉄筋が13本と多いものの、圧縮力を受ける際には反対側の5本分の引張鉄筋反力しか受けることができないため、鉄筋に作用する圧縮力が相対的に小さく座屈しにくいと考えると考えられる。なお鉄道耐震標準では、正負対象配筋の交番載荷試験結果より、終局変形を帯鉄筋比／引張鉄筋比と比例関係があるものとしている。本実験結果は、非対称配筋においても、帯鉄筋比／圧縮鉄筋比ではなく帯鉄筋比／引張鉄筋比と関連づけることの妥当性を示しているものと考えられる。

3.4 軸方向鉄筋の破断時期および破断箇所に関する考察

軸方向鉄筋の破断時期は、変形性能算定式の適用限界を考える上で重要な指標となる。図-9に各試験体における軸方向鉄筋の破断箇所および破断時期を示す。

断面内での破断順序には明確な傾向は見られなかったものの、材軸方向の破断箇所をみると、破断はいずれも座屈区間で生じており、とりわけ帯鉄筋に拘束された位置に破断箇所が集中する傾向がある。破断時期については、表-3に示すように、座屈が遅れると破断開始時期も遅れる結果となった。

軸方向鉄筋の破断開始時期を鉄道耐震標準による終局変位計算値と比較すると、基準試験体であるKY07-4ではN点計算値以降の変位で破断を生じているのに対し、載荷基準軸をシフトさせたKY08-1では、負載荷時の引張鉄筋（正圧縮面の軸方向鉄筋）においてN点計算値より小さな変位で破断を生じている。鉄道耐震標準の変形性能算定式は $1\delta y$ ごと3回繰り返しの実験結果⁷⁾に基づき作成されており、載荷繰り返し回数に関しては比較的厳しい条件であると考えられるが、応答変位が片側に片寄る場合で繰り返し回数が多い地震動の場合には終局変形時（N点）で軸方向鉄筋が破断しないことを担保できない可能性があると考えられる。

ところで表-3および図-9に示す通り、破断時期や断面内の破断位置にはばらつきが見られる。これは軸方向鉄筋の破断がコアコンクリート脱落による帯鉄筋の緩み、隣接の軸方向鉄筋の座屈の影響、あるいは帯鉄筋のフレア溶接位置等の影響を受けるためと考えられるが、この点については今後の検討課題となった。

結論

載荷基準軸をシフトさせた交番載荷実験、非対称断面を有する試験体を用いた交番載荷実験を実施し、変形性能や履歴特性について検討した。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 載荷基準軸がシフトすると、シフトした方向への載荷では変形性能が向上し、その反対方向への載荷では変形性能が低下する。これは初期に大変形を受けると引張側で軸方向鉄筋が大きく伸び、引張残留ひずみとなり座屈しやすくなるためと考えられる。
- (2) 非対称配筋では正負で耐力の差を生じるとともに、除荷剛性も正負で異なる。また圧縮鉄筋量によっては、正負で履歴特性が大きく異なる場合もある。
- (3) 終局変形を帯鉄筋比／引張鉄筋比と関連付ける現行の鉄道耐震標準の変形性能算定式は非対称配筋を有するRC部材の場合にも妥当である。
- (4) 正負交番載荷試験の結果に基づいた変形性能算定式は、応答変位が片側に片寄る場合には、軸方向鉄筋の破断といった観点からは危険側の評価となる可能性がある。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2002.
- 2) 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.
- 3) Toshikazu Takeda, Mete A. Sozen, N.Norby Nielsen : Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.96, ST12, pp.2557-2573, 1970.12.
- 4) 堤英康, 谷村幸裕, 佐藤勉, 玉井真一：RCラーメン構造物の変形性能に関する一考察, 土木学会第55回年次学術講演会, V-474, 2000.9.
- 5) 仁平達也, 谷村幸裕, 岡本大, 田所敏弥：軸方向鉄筋座屈後の載荷履歴がRC柱の損傷に与える影響について, 土木学会第62回年次学術講演会, V-157, pp.313-314, 2007.9.
- 6) 田所敏弥, 田中浩一, 谷村幸裕, 黒川浩嗣, 服部尚道, 室野剛隆：鉄筋コンクリート柱の崩壊に関する限界の評価法, 土木学会論文集 E Vol.64 No.2, 298-313, 2008.4.
- 7) 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