

二方向繰返し力を受ける RC 柱の載荷履歴が変形性状に及ぼす影響に関する研究

A study on the influence of the loading hysteresis upon the deformation properties of RC columns subjected to bi-axial cyclic loading

鈴木森晶*・水野英二**
Moriaki SUZUKI and Eiji MIZUNO

* 正会員 博士 (工学) 愛知工業大学准教授 工学部都市環境学科 (〒470-0392 豊田市八草町八千草1247)

** 正会員 Ph.D. 中部大学教授 工学部都市建設工学科 (〒487-8501 春日井市松本町1200)

In the present paper, the bi-axial cyclic loading test of RC columns with the different intervals of lateral hoop tie has been performed under the different loading histories. By comparing the results obtained from the uniaxial cyclic loading tests which had been so far performed by the authors, the influence of loading direction and interval of lateral hoop tie on the deformational performance, such as the lateral strength and ductility of RC columns, and on the buckling behavior of re-bar has been examined in details. Furthermore, the loading-path dependency has been discussed with the comparison of the buckling behavior of re-bars and damage inside the RC column induced by the different loading paths up to the same displacement level.

Key Words: RC column, bi-axial cyclic loading test, re-bar, lateral hoop, buckling properties, loading hysteresis, deformation properties

キーワード: 鉄筋コンクリート柱, 二方向繰返し載荷, 軸方向筋, 横拘束筋, 座屈特性, 載荷履歴, 変形特性,

1. はじめに

鉄筋コンクリート (RC) 構造物の変形性能に大きな影響を与える要因として、横拘束筋間隔と配筋量が挙げられる。さらに軸方向筋の座屈が RC 構造物のポストピーク域における変形性能などの挙動に大きな影響を与えることが分かっている¹⁾²⁾。しかし、軸方向筋の座屈現象は、横拘束筋間隔や載荷履歴、コンクリート強度で異なるため、そのメカニズムは明確になっていない。また、土木分野での従来の研究では、軸力と一方向水平荷重を受ける条件下での研究が大半を占めており、設計基準も軸力と水平一方向の荷重が載荷された状態を基準としている。兵庫県南部地震以降多くの研究機関において、二方向載荷の検討が行われ、鋼製および RC 柱に対する、軸力と二方向水平荷重が載荷された状態での検討が多く行われるようになった³⁾⁶⁾。その際の載荷履歴としては、地震応答変位をモデル化した直線、円形、矩形およびそれらを組み合わせた載荷履歴が選択されている。また、仮動的計算機オンライン実験や動的応答解析により、地震時応答を検討するなど、実験・解析手法は多岐に亘っているものの、それらの多くは、一方向と二方向の載荷における履歴の違いや荷重-変位の履歴の比較および実験と解析の比較などが中心である⁷⁾。

一方で、筆者らは、これまで横拘束筋間隔の異なる RC 柱を用いて軸力と一方向からの水平載荷条件で、「横拘束

筋間隔」、「載荷パターン」さらには「コンクリート強度」を要因として、軸方向筋の座屈挙動に着目し、一方向繰返し載荷実験を実施してきた^{8)~10)}。しかしながら、前述したように、耐震性能を考える上で、水平二方向繰返し外力を考慮する必要がある。

そこで、本研究では、載荷履歴と横拘束筋間隔をパラメータとし、二方向載荷実験を行い、これまで行ってきた一方向載荷実験と比較することにより、載荷履歴および横拘束筋間隔の違いが、軸方向筋の座屈性状や RC 構造物の変形性能にどのような影響を与えるかを考察する。併せて同一の地点へ到達する場合であっても、どのような経路を辿って到達したかにより、座屈挙動などにどのような影響を与えるかを考察する。なお、本研究はモデル供試体による実験であるが、これら結果を考察することにより、実寸大 RC 柱の繰返し変形性状を解明する基礎データとしたい。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

本実験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、断面寸法 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) を使用し, 間隔 $s = 65, 90, 105, 120$ mm でそれぞれ配筋した. なお, 打設コンクリートには, 設計基準強度 $f_{ck} = 40$ MPa (ただし, 実際の圧縮強度は 50 MPa を超えている.) のコンクリートを使い, 各横拘束筋間隔 s に対して 2 体ずつ, 計 8 体の供試体を作製した. 軸力と材料定数を表-1 に示す.

表-1 軸力と材料定数

横拘束筋間隔 s (mm)	5% 累加軸力 (kN)	コンクリート圧縮強度 40 (設計基準) (MPa)	軸方向筋 D10(SD295A)		横拘束筋 D6(SD295A)	
			降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)
65	114.6	52.68	382.8	550.7	338.4	491.8
90						
105	116.0	55.42				
120	109.8	51.85				

2.2 載荷装置

本実験では, 写真-1 に示す載荷装置を用いて供試体を鋼製治具に挿入し, 高力ボルトにより完全固定の条件になるように供試体を固定した. そして, 軸力 (Z 方向) と水平 2 軸 (X 方向と Y 方向) 方向に繰返し荷重を加力した. 載荷履歴については次節で記述する.

このような 3 方向の載荷を行う場合, 永田ら¹¹⁾のように, 8 本ないし 9 本のジャッキを用いた 3 次元加力装置を用いる必要がある. しかしながら種々の制約により, 3 本のジャッキしか利用できない場合には, 後藤ら⁹⁾の実験装置のように, 3 本のジャッキの載荷点を 1 点に集中させる方法がある. ただし, この方法では実験中常に鉛直に作用させる必要がある軸力を斜めに方向に載荷することになる. 軸力に関しては実験中常に鉛直に作用させ続けることが理想的な実験装置と言える. たとえば, 筆者ら⁹⁾の実験で用いられている軸力載荷装置のように, 反力点と載荷点が常に同一軸上に存在するような機構を有する装置を用いる等である.

一般にジャッキの反力は固定壁にヒンジ構造を介して固定されるケースが簡便であり, そのような実験装置は非常に多い. 特に軸力に関しては, 水平力よりも大きな荷重値となる場合が多く, 重要な点である. しかしながら, 実験装置の制約などにより, 理想とは異なる載荷方法で実験をせざるを得ない場合が大変多いのが現状である.

載荷ジャッキは実験中常に鉛直に保つ必要があるが, 上記のように片端を反力壁などに固定すると, ジャッキ軸方向に対して直交方向の成分が生じ供試体に余分な加力をするようになる. また, 実験装置の制約により, 供試体上端の 1 点に加力を集中させられない場合もある. その際には, 3 平方の定理などを用いて, 各ジャッキの軸方向力成分を直交方向に配分する補正操作が必要となる. このように載荷点が異なる場合や軸力が斜め方向に作用する場合は, 早川・川島ら³⁾, 永田ら⁴⁾および筆者ら⁹⁾のように

3 平方の定理などを用いて, それぞれのジャッキによる加力を直交方向に分配する補正を行う必要がある.

今回用いた装置は, 筆者らが上記の点を考慮し製作した写真-2 に示すような, 3 方向載荷装置を用いる. この装置は, 3 方向のジャッキ反力はヒンジ構造を介して固定となっている. また, 柱頂部ではヒンジ構造により加力できるようにになっているものの, 水平方向の載荷点高さが X 方向と Y 方向で 109 mm の差がある. さらに, 軸力ジャッキについても完全な鉛直にはなっていないものの鉛直度をできるだけ確保するため, 軸力載荷用ジャッキの反力点を 1000 mm 程度延長した構造になっている. これらの条件を考慮し, 本実験では, RC 柱の基部固定端から頂部までの 1000 mm の高さでの荷重と変位になるように補正を加えた. 以後本論文中では, この RC 柱の頂部での荷重と変位を用いて考察する.

2.3 載荷履歴

本実験では, 文献 9) で行った一方向載荷に加えて, 図-2 に示すような, 変位制御下での X-Y 面内での載荷パターン (斜め方向載荷, 矩形載荷および三角形載荷) を採用した. すなわち, 一方向載荷では, X 方向に, $\langle 0 \rightarrow +8\delta_y \rightarrow -8\delta_y \rightarrow +8\delta_y \rightarrow -16\delta_y \rightarrow +16\delta_y \rightarrow -16\delta_y \rangle$ の順に繰返し載荷を行った. 斜め方向載荷では, X-Y 方向同時に変位を動かし, $\langle 0 \rightarrow +4\delta_y \rightarrow -4\delta_y \rightarrow +8\delta_y \rightarrow -8\delta_y \rightarrow +8\delta_y \rightarrow -16\delta_y \rightarrow +16\delta_y \rangle$ の順で実験を実施した. 一方向載荷と比較して, 斜め方向載荷は X 方向および Y 方向に対して

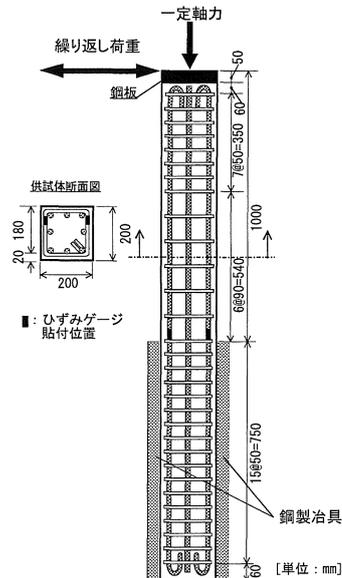


図-1 供試体概要

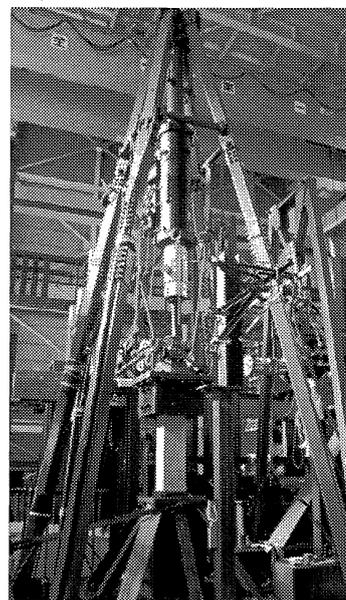


写真-1 試験装置

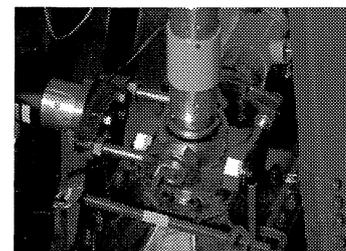


写真-2 3方向載荷装置

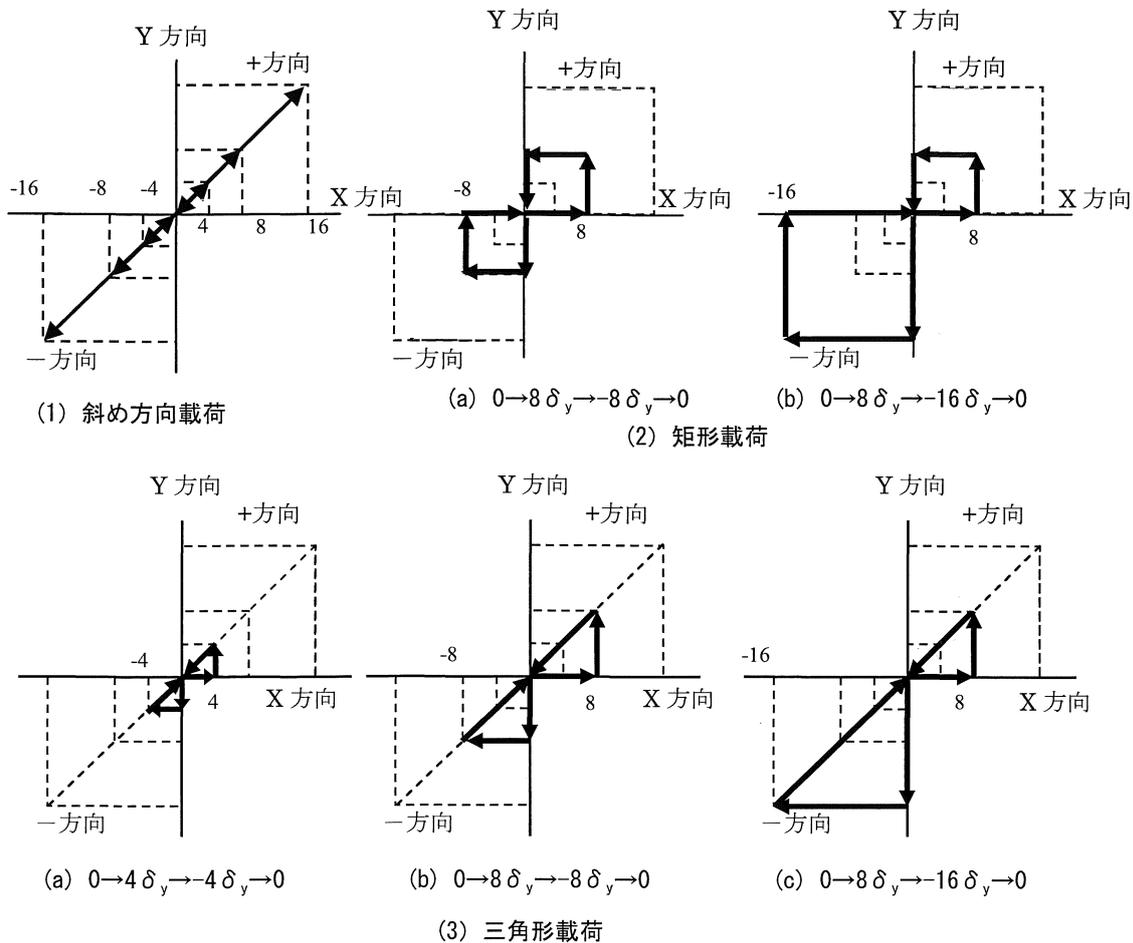


図-2 載荷履歴

同時に載荷するため、柱基部の損傷進展が速く、 $+8\delta_y$ 以前で大きな損傷が生じることが予測された。そのため、 $+4\delta_y$ での繰返し載荷も加えた。ただし、 $s=105\text{ mm}$ では $+4\delta_y \rightarrow -4\delta_y$ の載荷を行っていない。また、 $s=90\text{ mm}$ では $\rightarrow +16\delta_y$ の載荷を行っていない。矩形載荷では、図-2(2) (a) \rightarrow (b) の順に、三角形載荷では、図-2(3) (a) \rightarrow (b) \rightarrow (c) の順に実験を実施した。

ここで、 δ_y は一方方向載荷での引張側軸方向筋の初期降伏時における柱頭での水平変位（すなわち、軸方向筋のひずみが $2,000\mu$ に達した時の降伏水平変位）である。

以上のように、斜め載荷は $s=65, 90, 105, 120\text{ mm}$ 、矩形繰返し載荷は $s=90, 105\text{ mm}$ 、三角形繰返し載荷は $s=65, 120\text{ mm}$ で実施した。特に、一方方向載荷と斜め方向載荷を比較することにより、載荷方向の違いによる履歴と軸方向筋の挙動を比較する。また、斜め方向載荷、矩形載荷および三角形載荷を比較することにより、同一の最大変形を受けているにも関わらず、載荷履歴の違いにより、耐荷力、変形性能および軸方向筋の挙動の違いについて考察する。

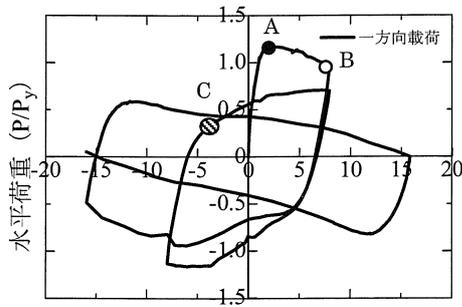
3. 載荷方向の影響

3.1 荷重-変位曲線の比較

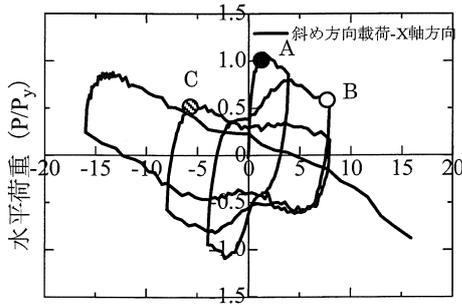
一方方向載荷と斜め方向載荷による変形挙動を比較する

ため、一例として、横拘束筋間隔 $s=65\text{ mm}$ と $s=120\text{ mm}$ の場合の一方方向載荷⁹⁾および斜め方向載荷の水平荷重-水平変位関係を図-3 および図-4 に示す。縦軸は降伏水平荷重 P_y 、横軸は降伏水平変位 δ_y でそれぞれ無次元化して示してある(表-2 参照)。最大耐力点をA、除荷開始点をB、再載荷後の鉄筋の座屈開始点をCとする。この図で、 $\langle -8\delta_y \rightarrow +8\delta_y \rangle$ の履歴を例に取り、除荷開始点、再載荷後の鉄筋の座屈開始点、そして $+8\delta_y$ の点に着目し、一方方向載荷と斜め方向載荷の違いについて検討する。なお、軸方向筋の座屈が顕著に表れる $8\delta_y$ 以降の大変位レベルでの領域では、 $P-\delta$ 効果による幾何学的非線形性による耐力の低下が生じる。しかしながら、本研究では、材料非線形性と同時に幾何学的非線形性が現れる領域でのポストピーク耐力の低下挙動（すなわち、靱性）も考察するため、 $P-\delta$ 効果を敢えて含めて考察する。

この図より、いずれの供試体においても斜め方向載荷では次のような特徴が見られた。1) 各履歴ループ(X方向変位またはY方向変位と耐力との関係)において、最大耐力後(A点以後)の耐力の低下が大きい。これは、一方方向載荷とは違い、斜め方向載荷では損傷領域の大きさ、中立軸位置の移動などが複雑であり、さらに断面剛性が異なるためである。2) 載荷方向が反転した後にB点から $-8\delta_y$ より載荷方向が反転した後に生ずるピンチング挙動(およそ変位が0付近でみられる)がより顕著にみられる(詳細



水平変位 (δ/δ_y)
(a) 一方向載荷⁹⁾



水平変位 (δ/δ_y)
(b) 斜め方向載荷

図-3 s=65mm 水平荷重-水平変位関係

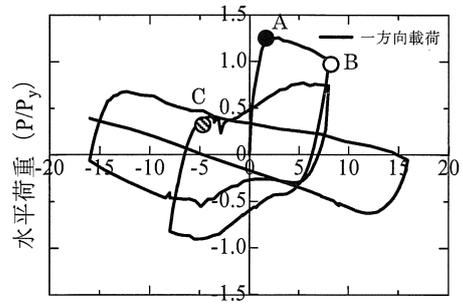
は後述). 3) 載荷方向が反転した後の除荷曲線と再載荷曲線において,例えば, $-8\delta_y$ から C 点より載荷方向が反転した後の除荷曲線と再載荷曲線において,耐力の増加幅に違いがみられる. これは負荷を受け持つ軸方向筋が, 一方向載荷では 3 本が受け持つが, 斜め方向載荷では主に 1 本であるためと考えられる. これは, 図-3 の $16\delta_y$ における履歴を比較すると, この履歴では内部のコアコンクリートの多くが破壊しており, 鋼材の P- δ カーブに相当し, 斜め方向載荷の方が耐力の低下が大きいことから判断できる. なお, 横拘束筋間隔 s によらず同様な傾向がみられた.

表-2 降伏水平荷重, 降伏水平変位および最大荷重

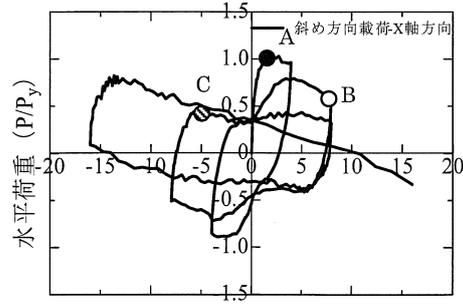
横拘束筋間隔 s (mm)	降伏水平荷重 P_y (kN)	降伏水平変位 δ_y (mm)	最大水平荷重 P_{max} (kN)		
			一方向載荷	斜め方向載荷	矩形載荷
65	25.53	7.3	23.91	31.11	28.35
90	27.25	8.6	23.71	32.26	30.16
105	28.19	8.6	24.72	34.60	32.04
120	25.49	6.45	27.59	32.85	27.53

3.2 コンクリートの破壊領域の比較

載荷 $\langle +8\delta_y \rightarrow -16\delta_y \rangle$ 中の $-8\delta_y$ 時におけるコンクリートの破壊状況を写真-3 および写真-4 に示す. 写真-3(a) および(b)を比較すると, コンクリートの剥落した基部からの高さはどちらも 130 mm 程度であった. 同様の傾向が $s = 120$ mm にも認められた. また, $s = 90, 105$ mm では, 3.3 節で述べるが, 座屈頂部の違いによる影響のため, 一



水平変位 (δ/δ_y)
(a) 一方向載荷⁹⁾



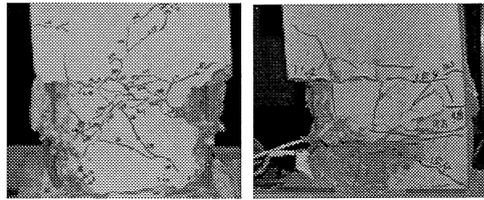
水平変位 (δ/δ_y)
(b) 斜め方向載荷

図-4 s=120mm 水平荷重-水平変位関係

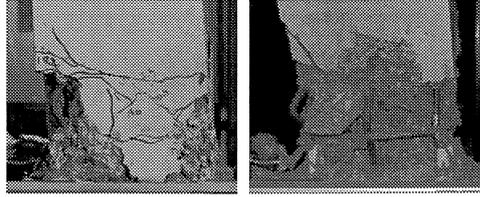
部のかぶりコンクリートのひび割れが基部から 2 段目の横拘束筋の位置である, 200mm 近くに達していた場合もあったが, 軸方向筋のはらみ出しが顕著ではなかったため, 剥落には至っていなかった. 最終的にはこれらのかぶりコンクリートは剥落に至っていた.

上記の結果より, 筆者らの過去の研究^{9),10)}と同様に, 一方向載荷でも斜め方向載荷でも損傷が載荷方向に集中し, コンクリートの破壊領域に対しては, 載荷履歴や横拘束筋間隔 s の長さの影響は少ないと考える. 一方で, 写真-3 および写真-4 からわかるように, 載荷履歴の違いにより, かぶりコンクリートのひび割れや剥落している位置は異なるものの, コアコンクリートの破壊に対しては横拘束筋間隔 $s = 65$ mm から 120 mm まで増えるのに従い, 内部まで破壊領域が広がっていく傾向があった.

このことから, 過去の実験と同様に^{9),10)}, コンクリートの破壊領域は載荷方向に集中し, 載荷履歴や横拘束筋間隔 s の長さの影響は少ないと考えられる. 一方で写真-3 および写真-4 からわかるように, コアコンクリートの破壊領域に対しては横拘束筋間隔 $s = 65$ mm の方が $s = 120$ mm と比べて小さく, 横拘束筋間隔の違いがコアコンクリートへの破壊進展に関係があると考えられる. 今回の実験では, 実造物における, 横拘束筋体積比の違いによる影響を, 横拘束筋の間隔に置換して評価している. 従って, 今後, 横拘束筋間隔 (体積比), コアコンクリートの破壊および載荷履歴の関係について, 詳細に検討する必要があると考えられる.



(a)一方向(+8 δ_y →-16 δ_y) (b)斜め(+8 δ_y →-16 δ_y)

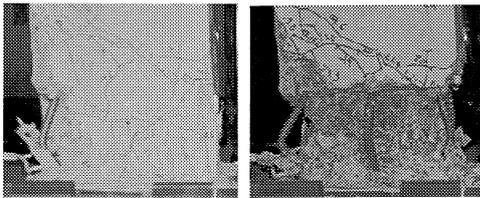


(c)三角形(0→-8 δ_y) (d)三角形(0→-16 δ_y)

写真-3 各載荷履歴における-8 δ_y 時の損傷状況 $s=65\text{mm}$



(a)一方向(+8 δ_y →-16 δ_y) (b)斜め(+8 δ_y →-16 δ_y)



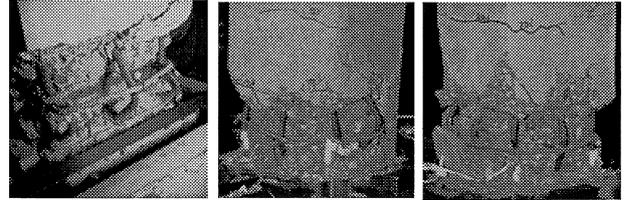
(c)三角形(0→-8 δ_y) (d)三角形(0→-16 δ_y)

写真-4 各載荷履歴における-8 δ_y 時の損傷状況 $s=120\text{mm}$

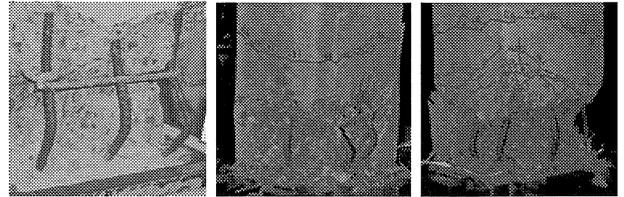
3.3 座屈形状の比較

16 δ_y 時の軸方向筋の座屈状況(側面)を写真-5および写真-6に示す。一方向載荷では、載荷面の3本とも同じ方向に同じ程度はらみ出している。座屈が生じている範囲は $s=65\text{mm}$ では、約130mm、 $s=120\text{mm}$ では約120mmである。斜め方向載荷では、載荷方向に沿った隅角部の軸方向筋とその隣りの2本の軸方向筋に座屈が生じているが、その方向およびはらみ出しの程度は均一ではない。ただし、座屈が生じた範囲は一方向載荷と同程度であった。これは、一方向載荷では3本の軸方向筋に同程度の負荷が作用し、ほぼ同時に座屈が開始するが、斜め方向載荷では隅角部の1本の軸方向筋に極端に大きな負荷が作用するため、座屈の開始に差が生じる。結果として、ピンチング挙動がより顕著に現れたと考えられる。載荷方向は異なっても横拘束筋間隔が同じならば座屈が生じた長さLは同程度であった。

横拘束筋間隔 $s=90\text{mm}$ および $s=105\text{mm}$ においては、座屈の生じている範囲および本数などは同様の傾向が見



(a)一方向 +16 δ_y (b)斜め +16 δ_y (c)三角形 -16 δ_y
写真-5 +16 δ_y (-16 δ_y)時の軸方向筋座屈状況(側面) $s=65\text{mm}$



(a)一方向 +16 δ_y (b)斜め +16 δ_y (c)三角形 -16 δ_y
写真-6 +16 δ_y (-16 δ_y)時の軸方向筋座屈状況(側面) $s=120\text{mm}$

られたが、座屈頂部の位置が写真-5(c)のように、基部から1番目の横拘束筋の上に生じていた場合があった。

4. 載荷履歴における経路依存の影響

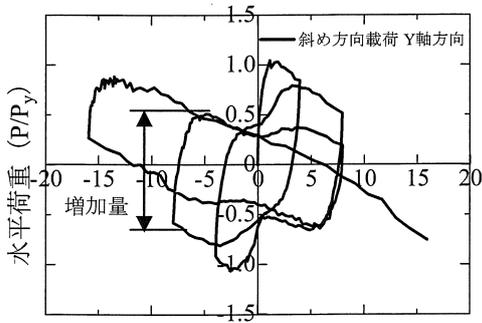
ここでは、載荷履歴の影響について考察する。これは目標とする到達点を、例えばX方向およびY方向ともに8 δ_y とする。このとき、X方向とY方向に同時に載荷する場合とX方向とY方向に交互に載荷する場合では、異なる履歴を辿ることになる。そこで目標に至る過程での載荷パスの依存性について着目し考察する。

4.1 水平荷重-水平変位曲線の比較

斜め方向載荷と三角形載荷下でのX方向およびY方向の水平荷重-水平変位関係を図-5~8に示す。そして、斜め方向載荷と三角形載荷での水平荷重-水平変位関係で三角形載荷の詳細と比較を行う。

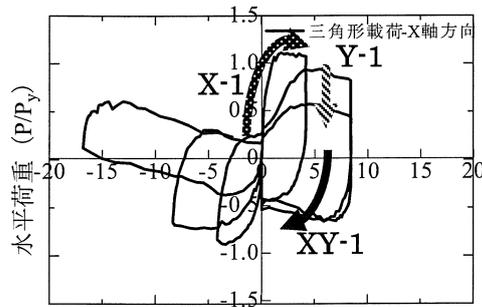
図-6は、それぞれ三角形載荷のX方向とY方向の成分を示している。三角形載荷では、X方向に載荷した後に、X方向の変位を保ったままY方向に載荷し、X、Y方向とも同時に除荷を行うパスを有する。そのため図中の矢印で示すようにX-1→Y-1→XY-1の順で移動をする。

図-5および図-6より、-8 δ_y での載荷方向反転後の除荷曲線と再載荷曲線での耐力の増加量に大きな違いがみられた。これは斜め方向載荷では、載荷方向に位置する隅角部のコンクリートと軸方向筋1本に損傷が集中し、最大荷重後の損傷の進展が早くなったためである。すなわち繰り返し載荷における圧縮側と引張側で抵抗するコンクリートと軸方向筋が三角形載荷よりも少ないため、耐力の増加量が減少したと考えられる。三角形載荷は斜め方向載荷と到達点は同じであるが迂回した経路を辿る。そのため、X方向またはY方向に載荷した場合それぞれの載荷方向に対応する軸方向筋3本が有効に抵抗する。従って損傷が分散



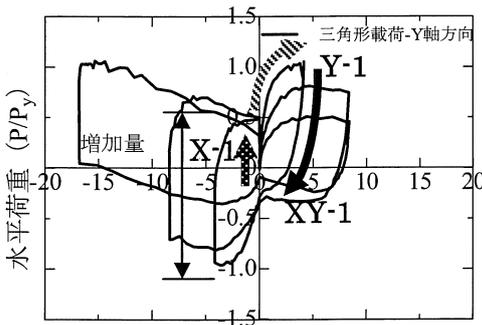
水平変位 (δ/δ_y)

図-5 斜め方向載荷 $s=65\text{mm}$ 水平荷重-Y 方向変位曲線



水平変位 (δ/δ_y)

(a) 水平荷重-X 方向変位曲線



水平変位 (δ/δ_y)

(b) 水平荷重-Y 方向変位曲線

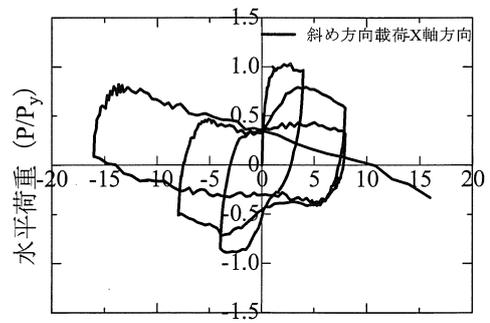
図-6 三角形載荷 $s=65\text{mm}$ 水平荷重-水平変位曲線

し、隅角部のコンクリートと軸方向筋の損傷が軽微となった。その結果、耐力の増加量が大きくなったと考えられる。

図-7 および図-8 に $s=120\text{mm}$ の場合を示す。紙面の都合により $s=90\text{mm}$ および $s=105\text{mm}$ の履歴曲線は省略するが、横拘束筋間隔よりも水平荷重-水平変位関係は載荷経路によるところが大きく、 $s=65\text{mm}$ と同様の傾向が見られた。

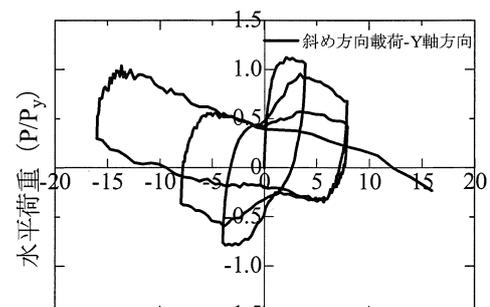
4.2 最終破壊形状の比較

斜め方向載荷、三角形載荷および矩形載荷の最終破壊状況での写真を写真-7~9 に示す。写真中の数字は軸方向筋の位置を表している。 $s=65\text{mm}$ の斜め方向載荷(写真-7)、 $s=65\text{mm}$ の三角形載荷(写真-8)ではコアコンクリートの剥落した高さは基部から 130mm 程度、 $s=105\text{mm}$ (写真-9) ではかぶりコンクリートの剥落は基部から 200mm 程度で起こった。 $s=65\text{mm}$ の斜め方向載荷、三角形載荷



水平変位 (δ/δ_y)

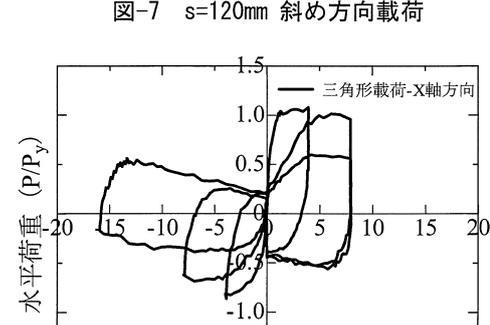
(a) 水平荷重-X 方向変位曲線



水平変位 (δ/δ_y)

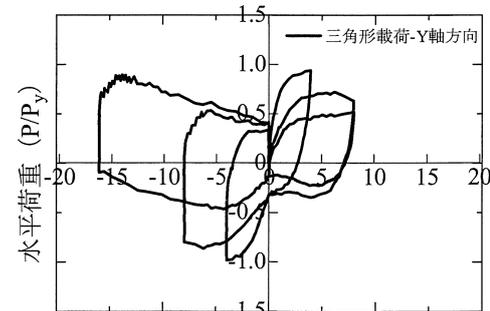
(b) 水平荷重-Y 方向変位曲線

図-7 $s=120\text{mm}$ 斜め方向載荷



水平変位 (δ/δ_y)

(a) 水平荷重-X 方向変位曲線



水平変位 (δ/δ_y)

(b) 水平荷重-Y 方向変位曲線

図-8 $s=120\text{mm}$ 三角形載荷

は③と⑦の軸方向筋を中心とした隅角部の損傷が激しく、軸方向筋の座屈の向きは載荷方向に沿うように、外側に向かい座屈が起こった。斜め方向載荷ではコアコンクリートの損傷、横拘束筋の変形が大きく見られた。

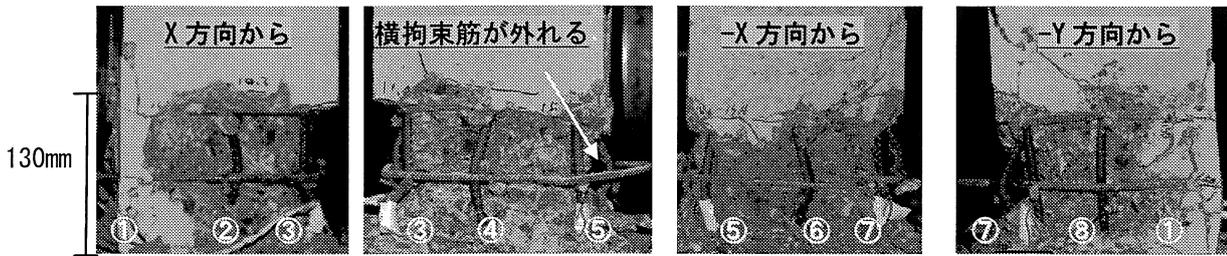


写真-7 破壊状況 (s=65mm 斜め方向載荷)

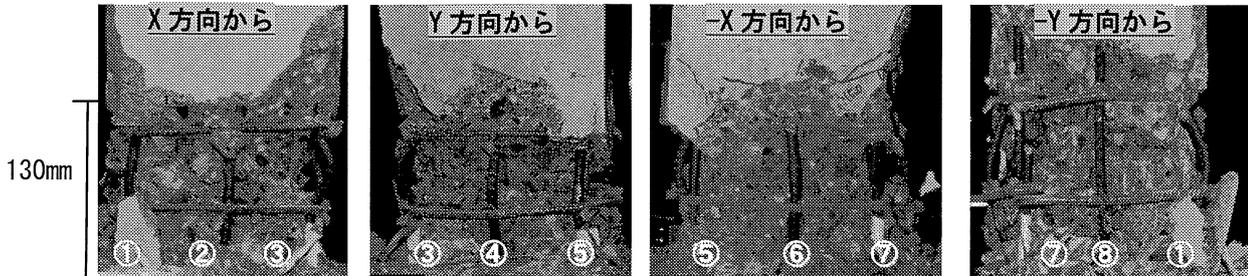


写真-8 破壊状況 (s=65mm 三角形載荷)

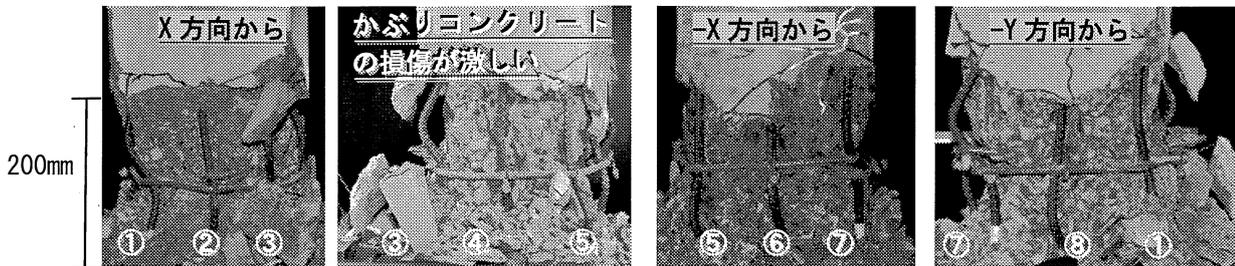


写真-9 破壊状況 (s=105mm 矩形載荷)

s = 105 mm の矩形載荷では全面に対して荷重をするため全面的にかぶりコンクリートに損傷が入り、軸方向筋の座屈は面に対して垂直な向きで座屈が生じた。コアコンクリートの損傷は斜め載荷、三角形載荷よりも損傷は少なく、s = 65 mm と比べ横拘束筋の間隔が広いので、かぶりコンクリートの損傷の範囲が広いと考える。

すなわち、3.2 節でも述べたように、 $8\delta_y$ の履歴で発生したひび割れの領域において、最終的にかぶりコンクリートの破壊が生じ、その範囲は載荷履歴によるところが大きかった。また、横拘束筋が破断した場合もあり、横拘束筋間隔 s の違いによる有意な差異は見られなかった。しかしながら、コアコンクリートの損傷については、基部から 130mm 程度の箇所に集中していたが、内部への破壊の進展状況は横拘束筋間隔 s の大きさおよび載荷履歴の影響を強く受けていた。

以上のように、破壊形態の違いおよび座屈性状の違いより、今回実施した載荷経路では、斜め方向載荷で実施した場合が耐力低下の点で最も損傷を与える載荷経路であると考えられる。

4.3 累積エネルギー曲線

s = 65 mm の斜め載荷、三角形載荷と s = 105 mm の矩形載荷の実験で得た、X-Y 方向の荷重-変位曲線から供試体

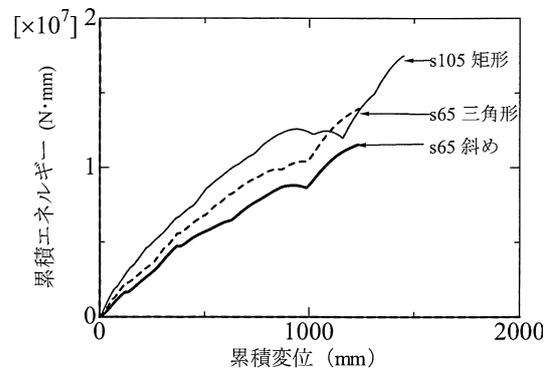


図-9 エネルギー曲線 比較図

が両方向で吸収したエネルギーの総和を図-9 に示す。ここで、エネルギーとは、荷重により柱に与えられたエネルギーの総和、累積変位は変位量の軌跡（絶対量の総和）であり¹²⁾、本実験ではそれぞれの載荷方法によって $+4\delta_y$ の繰り返し載荷を行っていない載荷方法がある、そこで、エネルギーを求める際に比較し易くするために、 $\langle 0 \rightarrow +8\delta_y \rightarrow -8\delta_y \rightarrow +8\delta_y \rightarrow -16\delta_y \rangle$ の範囲でエネルギーを求めた。図-9 からわかるように s = 65 mm の斜め載荷、s = 65 mm の三角形載荷、s = 105 mm の矩形載荷の順に供試体が吸収したエネルギーが多くなっていく、面に対して荷重を与えた矩形載荷と角に対して荷重を与えた斜め載荷で大きな差があることがわかる。このことから、同じ座標点に載荷をしても、違う載荷経路では供試体にかかる負担

は大きく違うことがわかる。各供試体で得た最大変位、最大エネルギーを表-3に示す。(注：s = 105 mm の斜め載荷の最大エネルギーが他の斜め載荷より大きいのは、+4 δ_y の繰り返しを行わず直接+8 δ_y の繰り返しを行っているため値が大きい。)本研究の結果では、累積エネルギーおよび累積変位が変形性状の評価指標となると考える。

表-3 最大変位・最大エネルギー

横拘束筋間隔 s (mm)	最大変位 (mm)	最大エネルギー $\times 10^7$ (N \cdot mm)	最大変位 (mm)	最大エネルギー $\times 10^7$ (N \cdot mm)
	三角形		斜め	
65	1237	1.4	1233	1.2
120	1056	1.1	1029	0.9
	矩形		斜め	
90	1403	1.8	1379	1.2
105	1450	1.7	1412	1.4

5. まとめ

- 1) 斜め方向載荷では、主に隅角部の軸方向筋およびコンクリートで荷重を受け持つために損傷が集中する。また、抵抗する軸方向筋およびコンクリートが少ないため、早期に座屈が生ずるとともに、損傷の進展が速い。
- 2) コンクリートの破壊領域は載荷方向に集中し、載荷履歴や横拘束筋間隔 s の大きさによる影響は少ないことが確認できた。
- 3) 軸方向筋の座屈範囲は、載荷方向によらずほぼ同じ長さであったが、個々の鉄筋のはらみ出し量やはらみ出す方向には違いがみられた。
- 4) 載荷経路の違いにより、見かけ上、履歴曲線は異なる挙動を示している。しかし、X 方向、Y 方向それぞれの方向の挙動を個別に取り出して比較すると、例えば、斜め方向載荷の荷重-変位曲線と三角形載荷における、損傷を受けた後の荷重-変位曲線は同じような挙動を示していることが分かった。
- 5) 載荷経路により RC 柱の8本の軸方向筋が荷重をどのように分担するかが決まり、同様の場所に到達している場合であっても、RC 柱の吸収エネルギー量・変形特性が異なり、経路の違いによる影響がみられた。
- 6) 破壊形態の違いおよび座屈性状の違いより、今回実施した載荷経路では、斜め方向載荷で実施した場合が耐力低下の点で最も損傷を与える載荷経路であると考えられる。
- 7) コアコンクリートの損傷は横拘束筋間隔および載荷履歴の影響を大きく受けることが分かった。

以上より、柱断面形状によっては、載荷方向が柱基部の破壊性状に大きく影響することが確認できたため、それら結果を基に、シビアな載荷方向ならびに繰り返しパターンなどを特定することが出来た。今後は、柱基部断面の補強対策にこれら情報を活用

することが出来ると考える。

謝辞

本研究は科学研究費(基盤研究(C)22560488 代表：水野英二)ならびに愛知工業大学耐震実験センターの研究助成により行った。また、実験に際しては、中部大学および愛知工業大学の学生諸君(特に水野憲司君)の助力を受けた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 島弘, 伊藤圭一, 水口裕之: 曲げ破壊型 RC 橋脚における鉄筋座屈モデルによる靱性解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.2, pp.741-746, 1990.
- 2) 中村光, 二羽淳一郎, 田辺忠顕: 鉄筋の座屈が RC 構造のポストピーク挙動に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.2, pp.337-342, 1992.
- 3) 早川涼二, 川島一彦, 渡邊学歩: 水平 2 方向地震力を受ける単柱式 RC 橋脚の耐震性, 土木学会論文集, No.759/I-67, pp.79-98, 2004.4.
- 4) 永田聖二, 渡邊学歩, 川島一彦: 3 次元ハイブリッド載荷実験におけるアクチュエータによる P- Δ 効果の補正法, 土木学会論文集, No.801/I-73, pp.197-212, 2005.10.
- 5) 後藤芳顕, 江坤生, 小畑誠: 2 方向繰り返し荷重を受ける矩形断面鋼製橋脚柱の履歴特性, 土木学会論文集 A, Vol.63, No.1, pp.122-141, 2007.2.
- 6) 青木徹彦, 大西哲広, 鈴木森晶: 水平 2 方向荷重を受ける正方形断面鋼製橋脚の耐震性能に関する実験的研究, 土木学会論文集 A, Vol.63, No.4, pp.716-726, 2007.10.
- 7) 青戸広起, 吉川弘道: 水平 2 方向地震動の強度評価と偏心 RC 橋脚の動的非線形応答特性, 構造工学論文集 Vol.55A, pp.691-698, 2009.3.
- 8) 亀田好洋, 水野英二, 伊藤陸, 梅原秀哲: 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.
- 9) 亀田好洋, 水野英二, 鈴木森晶, 梅原秀哲: 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性能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.
- 10) 鈴木森晶, 水野英二: 繰り返し曲げを受ける RC 柱の鉄筋座屈特性に関する実験的ならびに解析的研究, 応用力学論文集, Vol.13, pp.331-342, 2010.8.
- 11) 永田和寿, 渡邊英一, 杉浦邦征: 水平 2 方向に地震力を受ける角形鋼製橋脚の弾塑性応答性状に関する研究, 構造工学論文集, Vol.50A, pp.1427-1436, 2004.3.
- 12) 武井啓晃, 亀田好洋, 鈴木森晶, 水野英二: 繰り返し力を受ける RC 柱の破壊領域での変形特性に関する実験的研究, 平成 21 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, V-1, pp.469-470, 2010.3.

(2011 年 3 月 8 日 受付)