

# 論文 円形 RC 橋脚の曲げ復元力特性における寸法効果の実験的検討

山本 翔吾<sup>\*1</sup>・杉森 克成<sup>\*2</sup>・木下 幸治<sup>\*3</sup>・内田 裕市<sup>\*4</sup>

**要旨:** 実橋脚と縮小試験体の耐震性には寸法効果が生じる。近年、実大試験体を用いた振動動台実験や静的載荷実験に基づいて寸法効果が明らかになりつつあるが、いまだ不明な点が多い。本研究では円形 RC 橋脚の曲げ復元力特性における寸法効果を実験的に明らかにすることを目的とし、既往の円形 RC 橋脚の実大と 1/2 縮小試験体と、本研究で新たに製作した 1/5 と 1/10 縮小試験体との載荷実験の比較を行った。その結果、1/10 縮小試験体であっても主鉄筋の縮尺率を考慮することで実大試験体の履歴挙動を再現できること、さらに、軸方向鉄筋径・鉄筋比のみならず節の形状が寸法効果の要因である可能性が示唆された。

**キーワード:** RC 橋脚, 寸法効果, 縮小試験体, 繰返し載荷実験

## 1. はじめに

従来、実橋脚と縮小試験体の地震時の曲げ復元力特性、並びに破壊特性との間に寸法効果が生じることが知られている。これまでも RC 橋脚の寸法効果について、いくつか研究がされてきているものの<sup>1),2),3),4)</sup>、実大試験体に関する実験データがほとんど存在しなかった為、これまでほとんど検討されてこなかった<sup>5)</sup>。しかし、近年、実大の試験体を用いた振動台実験<sup>6)</sup>や静的載荷実験<sup>7)</sup>が可能となり寸法効果が明らかになりつつある。

川島ら<sup>5)</sup>は、縮小模型実験における寸法効果の要因として、縮小模型実験において縮尺率を満足することが困難となる粗骨材寸法と軸方向鉄筋の径を挙げ、それらが及ぼす影響に関する検討を進めた。その結果、実大 RC 橋脚試験体と 6/35 縮小試験体との比較より、コアコンクリートの圧壊が進む、または軸方向鉄筋の座屈や破断が顕著に生じるまでは粗骨材寸法の曲げ復元力に及ぼす影響は明確ではないことが示された。また、軸方向鉄筋の径でなく最小断面積に基づいて曲げ復元力を評価するのが良いことが示された。しかし、6/35 縮小試験体よりも縮尺率が大きい、縮尺率に合う軸方向鉄筋と粗骨材の入手が困難な試験体の検討や軸方向鉄筋の付着に着目した検討には至っておらず、いまだ不明な点が多い。

本研究では、円形 RC 橋脚の繰返し載荷性能における寸法効果の要因を実験的に明らかにすることを目的とし、文献<sup>7)</sup>で行われた円形 RC 橋脚の実大試験体と 1/2 縮小試験体と、本研究で新たに製作した 1/5 縮小試験体と 1/10 縮小試験体との載荷実験の比較を行った。

## 2. 試験体と載荷システム

### 2.1 試験体の概要

図-1 に本研究で製作した 1/5 縮小試験体と 1/10 縮小試験体の形状と寸法を示す。表-1 には文献<sup>7)</sup>の実大試験体と 1/2 縮小試験体と本研究で製作した 1/5 縮小試験体と 1/10 縮小試験体との比較、表-2 に本研究の試験体一覧を示す。

実大 RC 橋脚試験体は円形断面橋脚であり、直径 2000mm、高さ 6900mm である。軸方向鉄筋として D29 異形鉄筋が 42 本配置され、帯鉄筋として φ13 鉄筋が 300mm 間隔で配置されている。1/2 縮小試験体は実大試験体に合わせ、直径、高さ、軸方向鉄筋ならびに帯鉄筋の径が縮尺率を満足するように使用されている。

1/5 縮小試験体は、直径 400mm、高さ 1750mm とし、縮尺率を満足するように軸方向鉄筋として D6 異形鉄筋を 40 本、帯鉄筋として φ3.2 の亜鉛めっき鉄線を

表-1 既往の試験体<sup>7)</sup>と本研究の試験体の比較

試験体	実大試験体	1/2縮小試験体	1/5縮小試験体	1/10縮小試験体
円形橋脚部の直径(mm)	2000	1000	400	200
円形橋脚部の高さ(mm)	6900	3380	1350	650
主鉄筋最小断面積(mm <sup>2</sup> )	642.4	226.7	29.2	D6 29.2, D3 7.2
主鉄筋(試験部位)	D29 SD295	D16 SD295	D6 SD295	D6 SD295, D3 SD295
帯鉄筋(試験部位)	φ13 SR235	φ6 SR235	φ3.2 鉄線	φ1.2 鉄線
作用軸力(kN)	1565	359	60	15
終局耐力(kN)	1297	333	51	13

\*1 岐阜大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (学生会員)

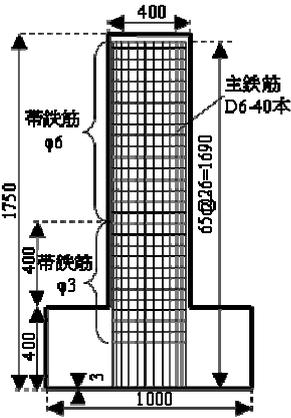
\*2 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 (現, 大成建設)

\*3 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 准教授 (正会員)

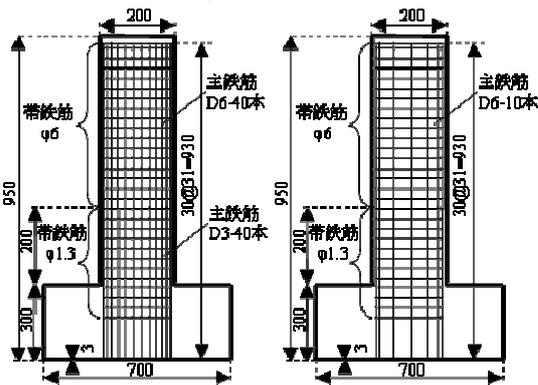
\*4 岐阜大学 総合情報メディアセンター 教授 (正会員)

表-2 本研究の試験体一覧

試験体	1/5縮小試験体		1/10縮小試験体	
	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
材料	コンクリート	モルタル	モルタル	モルタル
主鉄筋	D6	D6	D3	D6



(a) 1/5 縮小試験体



(b) 1/10 縮小試験体

図-1 試験体の寸法

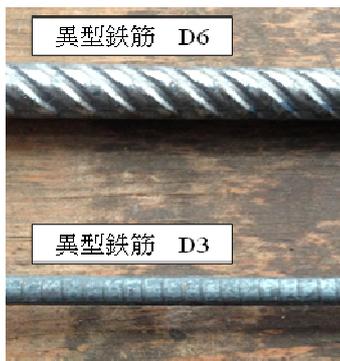
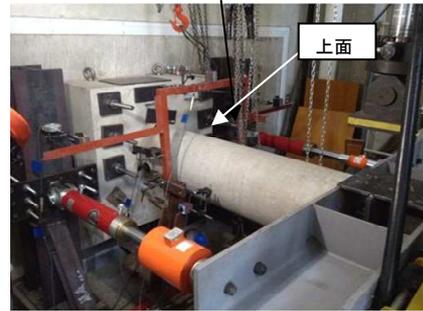
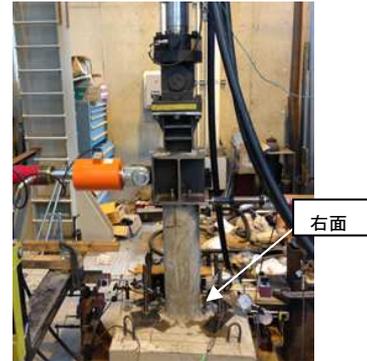


図-2 軸方向鉄筋の節の形状

65mm 間隔で使用した。1/5 縮小試験体は 2 体製作し、粗骨材の影響を検討することを目的に、最大寸法 15mm の粗骨材を使用したコンクリートを用いた試験体 (Type 1) と、モルタルを用いた試験体 (Type 2) を製作した。1/10 縮小試験体は、直径 200mm、高さ 950mm とし、帯鉄筋は縮尺率に合わせ φ1.2 の亜鉛めっき鉄線を 30mm 間



(a) 1/5 縮小試験体の載荷システム



(b) 1/10 縮小試験体の載荷システム

図-3 載荷システム

隔で使用した。1/10 縮小試験体試験体では、軸方向鉄筋の影響を検討することを目的とし、縮尺率を満足するように製作された D3 異形鉄筋 40 本を軸方向鉄筋に使用した試験体 (Type 3) と、市販で入手可能な最小径の異形鉄筋として D6 異形鉄筋を使用し、かつ実大試験体の鉄筋比に合わせた試験体 (Type 4) を製作した。なお、軸方向鉄筋の影響を検討することを目的しているために、粗骨材の影響は取り除くこととし、モルタルを使用した。

図-2 に 1/5 縮小試験体と 1/10 縮小試験体に用いた軸方向鉄筋の形状の比較を示す。D3 異形鉄筋は、通常の鉄筋と同様に、鉄筋のふしが鉄筋軸直角方向に再現されるとともに、節の間隔も再現されている。一方、D6 鉄筋の節はらせん状であり節の形状・間隔は直径の大きい鉄筋と異なっている。

コンクリート、ならびにモルタルの圧縮強度は文献 7) に示される  $30\text{N/mm}^2$  程度を目標とした。1/5 縮小試験体の載荷時のコンクリートの圧縮強度 (Type 1) は  $28.0\text{N/mm}^2$  (Type 2), モルタルの圧縮強度は  $33.8\text{N/mm}^2$ , 1/10 縮小試験体のモルタルの圧縮強度は  $40.8\text{N/mm}^2$  (Type 3,4) であった。また、D6 鉄筋の降伏強度と引張強度は  $456.2\text{N/mm}^2$  と  $588.3\text{N/mm}^2$ , D3 鉄筋の降伏強度と引張強度は  $349.0\text{N/mm}^2$  と  $421.6\text{N/mm}^2$  であった。なお、引張試験中に鉄筋のひずみ計測を行っていないため、弾性係数、ならびに降伏棚の計測は行っていない。

表-3 各諸元の縮尺

物理量	次元	相似比から求めた縮尺		
長さ	L	1/2	1/5	1/10
密度	$\rho$	1	1	1
応力	$\sigma$	1	1	1
質量	$M = \rho L^3$	$(1/2)^3$	$(1/5)^3$	$(1/10)^3$
加速度	$a = L/T^2$	2	5	10
力	$f = \sigma L^2$	$(1/2)^2$	$(1/5)^2$	$(1/10)^2$
ひずみ	$\epsilon$	1	1	1

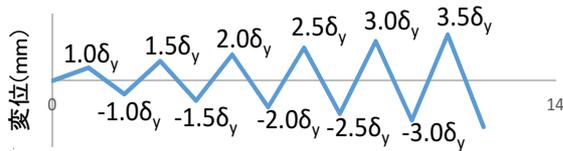


図-4 繰返し荷重方法

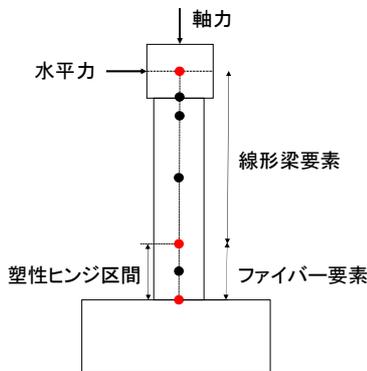


図-5 ファイバー解析モデル

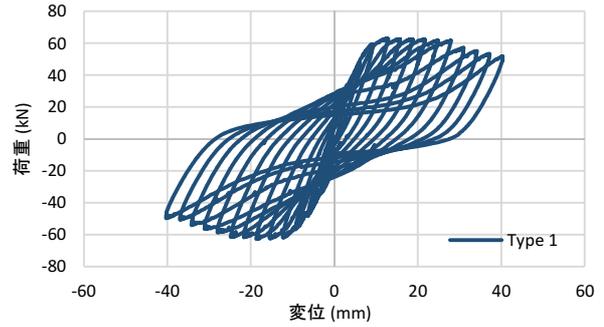
## 2.2 荷重システム

図-3 に荷重システムを示す。1/5 縮小試験体の実験システムは図-3(a)のように試験体を水平に反力壁に設置して鉛直方向に荷重した。軸力を左右に設置した2本の油圧ジャッキにより荷重し、1本の油圧ジャッキにより水平力を荷重した。1/10 縮小試験体の実験システムは、図-3(b)のようにフーチングを反力床にPC鋼棒により固定し、2本の油圧ジャッキを用いて鉛直と水平方向へ荷重した。荷重した軸力は実大試験体に荷重された軸力(1565kN)から相似比(表-3)に従い、表-1のように1/5縮小試験体は60kN、1/10縮小試験体は15kNとした。

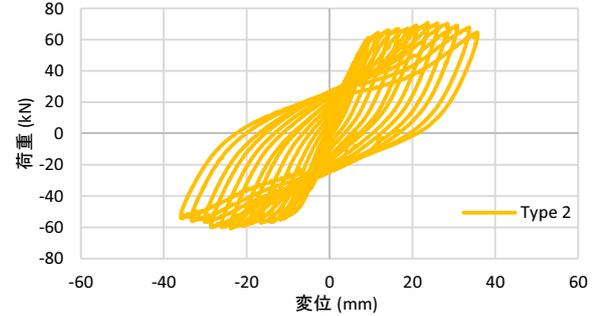
## 2.3 繰返し荷重方法と降伏変位量 $\delta_y$ の算出法

本研究の繰返し荷重は、試験体が降伏する時の変位量を  $\delta_y$  とし、 $\pm 1.0\delta_y$  から始めて  $\pm 0.5\delta_y$  ずつ増加させ各1サイクル荷重した(図-4)。1/5縮小試験体の Type 1 は  $\pm 6.5\delta_y$  まで荷重を行い、Type 2 は  $\pm 7.5\delta_y$  まで荷重を行った。1/10縮小試験体の Type 3 (主鉄筋 D3 使用) は  $\pm 7.5\delta_y$  まで荷重し、Type 4 (主鉄筋 D6 使用) は、 $\pm 11.0\delta_y$  になるまで荷重した。なお、本実験では試験体の橋脚天端位置の変位を計測した。

文献 7) の実大と 1/2 縮小試験体では軸方向鉄筋が降伏する変位量  $\delta_y$  を軸方向鉄筋に貼付したひずみゲージを計測し、降伏ひずみに達した時の変位としている。一



(a) Type 1



(b) Type 2

図-6 1/5 縮小試験体の実験結果

方、本研究では 1/10 縮小試験体に使用する鉄筋径がそれぞれ D3 と D6 と小さいものを使用している為、ひずみゲージによる計測が困難と判断し、ひずみゲージ計測に代わり、実験に先立ちファイバー要素を用いた解析により降伏変位  $\delta_y$  と降伏荷重  $P_y$  を算出した。これを基準にして荷重した。具体的には、ファイバー要素における主鉄筋の要素が降伏応力に達した時の橋脚天端での水平変位を降伏変位とし、その時の荷重位置での荷重を降伏荷重とした。図-5 に解析モデルを示す。1/5 縮小試験体と 1/10 縮小試験体の解析モデルをそれぞれ作成し、塑性ヒンジ区間にはファイバー要素を用い、塑性ヒンジ区間以外の部分には線形梁要素を用いた。

なお、軸力を与える荷重油圧ジャッキによる P- $\Delta$  効果について、P- $\Delta$  効果の考慮の有無を比較した結果、大きな違いは見られなかった。これは荷重ジャッキ長さが試験体長さに比べ十分長いためではないかと考えられる。

## 3. 荷重実験結果

### 3.1 1/5 縮小試験体

図-6 に荷重-変位曲線を示す。なお、1/5 縮小試験体の荷重システムでは試験体を水平に設置していることから、試験体と荷重梁の自重を荷重に考慮することから、実験後にその自重を実験結果の荷重に反映させる補正を行った。さらに、コンクリートで製作した 1/5 縮小試験体の Type 1 ( $\delta_y=6.2\text{mm}$ ) では、15.5mm ( $2.5\delta_y$ ) の時に微細なひび割れが発生した。27.9mm ( $4.5\delta_y$ ) の時



(a) Type 1 (左:正側, 右:負側)



(b) Type 2 (左:正側, 右:負側)

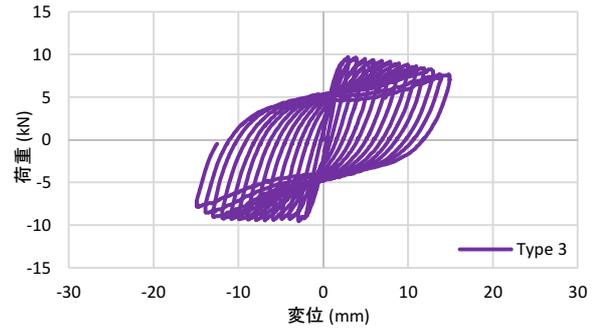
図-7 1/5 縮小試験体の試験終了時の損傷状況

に最大荷重 62.9kN となり, またかぶりコンクリートの剥離を確認した。31.0 mm ( $5.0\delta_y$ ) の時に荷重が低下し始め, 40.3 mm ( $6.5\delta_y$ ) の時に荷重を終了した。モルタルで製作した 1/5 縮小試験体の Type 2 ( $\delta_y=4.76\text{mm}$ ) では, 23.8mm ( $5.0\delta_y$ ) の時に最大荷重 68.8kN となり, その後荷重に伴い荷重は徐々に低下し, 30.9 mm ( $6.5\delta_y$ ) の時にかぶりコンクリートが広範囲に剥離し, 荷重が大きく減少した。33.3mm ( $7.0\delta_y$ ) の時に軸方向鉄筋の座屈を確認し, 35.7mm ( $7.5\delta_y$ ) の時に荷重を終了した。

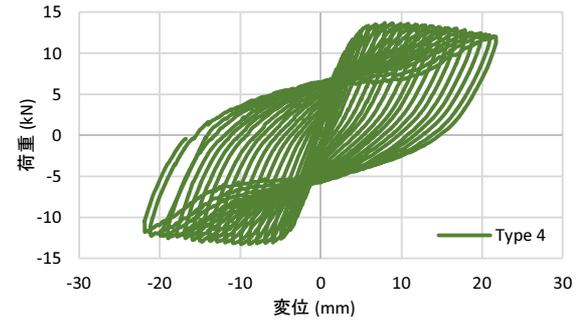
図-7 に 1/5 縮小試験体の荷重終了時の荷重方向の橋脚正側と負側の損傷状況を示す。Type 1 の上面では, かぶりコンクリートがフーチング上部から最大高さ 150mm, 幅 300mm 程度が広範囲に渡り剥落した。一方, 下面では, かぶりコンクリートがフーチング上部から最大高さ 170mm, 幅 350mm 程度が広範囲に渡り剥落を確認した。Type 2 の上面では, フーチング上部から最大高さ 70mm, 幅 250mm 程度広い範囲に渡ってかぶりコンクリートの剥落を確認した。一方, 下面ではフーチング上部から最大高さ 140mm, 幅 300mm 程度の広範囲に渡ってかぶりコンクリートの剥落を確認した。

### 3.2 1/10 縮小試験体

図-8 に荷重-変位曲線を示す。1/10 縮小試験体 (主鉄筋 D3 使用) の Type 3 では  $1.5\delta_y$  時に最大荷重 10.15kN となり,  $3.0\delta_y$  荷重終了時にフーチング上部から高さ 15mm 程度の位置にひび割れの発生を確認した。また,  $5.5\delta_y$  荷重時にかぶりコンクリートの剥落が生じ軸方向鉄筋の座屈を確認した。その後, 荷重に伴い荷重は徐々に減少し,



(a) Type 3

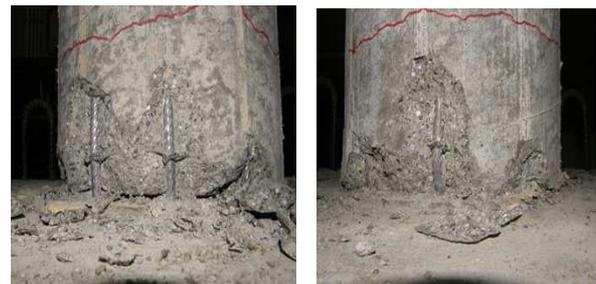


(b) Type 4

図-8 1/10 縮小試験体の実験結果



(a) Type 3 (左:正側, 右:負側)



(b) Type 4 (左:正側, 右:負側)

図-9 1/10 縮小試験体の試験終了時の損傷状況

$\pm 7.5\delta_y$  で荷重を終了した。Type 4 では,  $1.5\delta_y$  荷重終了時にフーチング上部から高さ 20mm 程度の位置にひび割れ発生を確認した。 $-2.5\delta_y$  荷重終了時にフーチング上部から高さ 85mm 程度の位置にひび割れ発生を確認し, さらに  $4.0\delta_y$  荷重終了時にはフーチング上部から高さ 200mm 程度の位置にもひび割れ発生を確認した。その後, Type 3 とは異なり, 各軸方向鉄筋間隔にかぶりコンクリートの

剥落が生じた後、広範囲になるといったものであった。また、最大荷重は  $4.5\delta_y$  時に  $14.30\text{kN}$  となり、Type 3 に比べ終局耐力に近くなった。その後、荷重は徐々に減少し、 $\pm 11.0\delta_y$  で載荷を終了した。

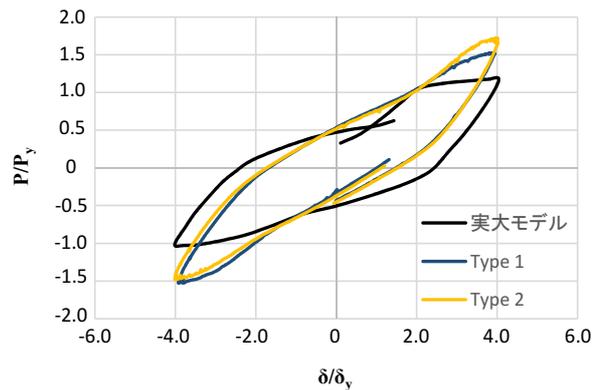
図-9 に各 1/10 縮小試験体の載荷終了時の損傷状況を示す。Type 3 はフーチング上部から、高さ  $15\sim 20\text{mm}$  程度の範囲に渡って円形橋脚部を 1 周取り巻くように、ひび割れが発生したことが確認できる。また、図-9(a) のように左面では、フーチング上部から最大高さ  $30\text{mm}$  程度広範囲にかぶりコンクリートの剥落が生じているのに対し、右面では、フーチング上部から高さ  $20\text{mm}$  程度の範囲にかぶりコンクリートの剥落が確認できた。一方、Type 4 では Type 3 と異なりフーチング上部から高さ  $100\text{mm}$  程度の比較的高い位置に円形橋脚部を 1 周取り巻くひび割れ発生が確認できた。左右面のいずれにおいても高さ  $60\text{mm}$  程度の範囲で軸方向筋を中心としたかぶりコンクリートの剥落が確認でき、Type 3 よりも広範囲にかぶりコンクリートの剥落が生じたといえる。

### 3.3 実大試験体と縮小試験体の履歴曲線の比較

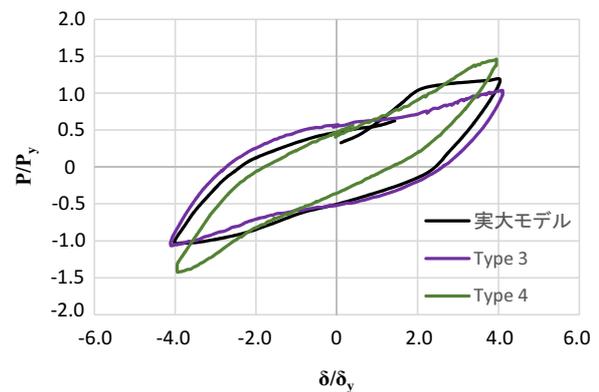
ここでは、軸方向鉄筋の降伏強度、コンクリートとモルタル材料の圧縮強度が各試験体で異なることから、図-10 には荷重-変位曲線の両軸を降伏変位  $\delta_y$ 、降伏荷重  $P_y$  にて除した履歴曲線の内、 $\pm 4\delta_y$  サイクル時の曲線を抜き出して示した。

図-10(a) より、1/5 縮小試験体の Type 1, Type 2 の載荷履歴を比較すると履歴曲線に大きな差異は見られなかった。この結果より、粗骨材の有無の影響は少ないといえる。一方、実大試験体と 1/5 縮小試験体を比較すると、実大試験体に比べ 1/5 縮小試験体の履歴曲線の形状の幅が細いことがわかる。また、1/5 縮小試験体の方が実大試験体よりも  $P/P_y$  の最大が大ききことも確認できた。図-10(b) より、1/10 縮小試験体の Type 3, Type 4 では、履歴曲線の形状が細いことがわかるとともに、最大耐力が大きくなっていることがわかる。これは、使用した異形鉄筋の違いによる差異が生じたためと考えられる。さらに、実大試験体と 1/10 縮小試験体の比較より、実大試験体と Type 3 の履歴曲線がよく一致することが確認できた。

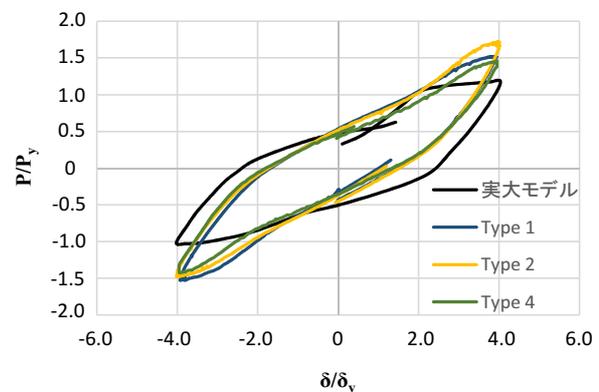
以上より、実大試験体との履歴曲線の比較から、1/10 縮小試験体であっても、鉄筋比のみならず軸方向鉄筋の縮尺率を満足することにより、実大試験体の履歴曲線をほぼ再現できることがわかった。一方、1/5 縮小試験体は、縮尺率を満足しているにも関わらず、1/10 縮小試験体の Type 3 よりも履歴曲線の再現性が劣ることが明らかとなった。この差異の理由について、図-2 で示した軸方向鉄筋の節の形状の違いが要因の一つと考え、節の形状に着目して考察することとした。図-10(c) に軸方向鉄筋にふしの形状がらせん状である D6 異形鉄筋を使用した



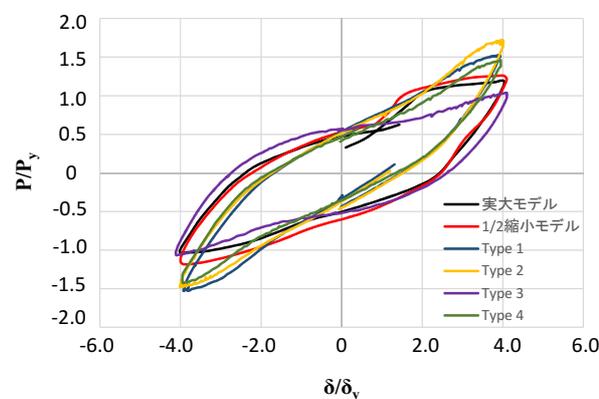
(a) 実大試験体と 1/5 縮小試験体との比較



(b) 実大試験体と 1/10 縮小試験体との比較



(c) 異形鉄筋 D6 を用いた試験体の載荷履歴



(d) 実大試験体と縮小試験体の載荷履歴

図-10 実大試験体と縮小試験体の載荷履歴

Type 1, Type 2, Type 4 の載荷履歴の比較を示す。図より、Type 1, Type 2, Type 4 の履歴曲線の形状は良く一致しており、いずれも実大試験体と比べ幅が狭いことで一致している。次に、図-10(d)に全実験試験体の比較の結果を示す。図より、使用した鉄筋の形状の違いにより、幅の広い膨らみのある履歴曲線の形状と、幅の狭い細長い履歴曲線の形状の2つに分類できることがわかる。前者は実大試験体、1/2 縮小試験体であり、鉄筋の節の形状についても縮尺率を概ね満足している Type 3 の履歴曲線である。後者はふしの形状がらせん状の D6 異形鉄筋を使用した Type 1, Type 2, Type 4 の履歴曲線である。よって、縮小試験体による実大試験体の再現性向上のためには、鉄筋比・鉄筋径の縮尺率のみならず、鉄筋とコンクリートとの鉄筋の付着性状に大きな影響を与えられと考えられる節の形状も縮尺率を満足する必要があると考えられる。ただし、本研究では、各鉄筋の付着性状を要素実験等に基づいて明らかとはしていないことから、今後の課題としたい。

#### 4. まとめ

本研究では円形 RC 橋脚の曲げ復元力特性における寸法効果を実験的に明らかにすることを目的とし、既往の円形 RC 橋脚の実大と 1/2 縮小試験体と、新たに製作した 1/5 と 1/10 縮小試験体との載荷実験の比較を行った。

本研究により得た成果を以下にまとめる。

1. 1/5 縮小試験体の載荷実験より、コンクリートとモルタルを用いた 1/5 縮小試験体の履歴曲線に差異が見られなかったことから、粗骨材の有無による影響は小さいといえる。一方、実大試験体との比較より、縮尺率を満足する軸方向鉄筋を使用したにも関わらず、履歴曲線の形状の幅が実大試験体に比べ狭くなった。
2. 1/10 縮小試験体の載荷実験より、縮尺率に従い制作した D3 異形鉄筋を使用した 1/10 縮小試験体と、鉄筋比のみ合わせた D6 異形鉄筋を使用した 1/10 縮小試験体の降伏強度から最大荷重までの荷重増加の割合、損傷状況、履歴曲線には違いが生じた。
3. 軸方向鉄筋の節の形状に着目して実験結果を整理した結果、使用した鉄筋の節の形状により、履歴曲線の形状が 2 つに分類できることがわかった。実大試験体の鉄筋径のみならず節形状をも縮尺率を概ね満足する 1/10 縮小試験体 (Type 3) が実大試験体の履歴曲線の再現性が最も高いことがわかった。

4. 以上より、縮小試験体による実大試験体の再現性向上のためには鉄筋比・鉄筋径のみならず、節の形状も縮尺率を満足する必要があると考えられる。

#### 謝辞

本研究は平成 25 年度「岐阜大学・大学活性化経費」、並びに平成 26 年度「岐阜大学インフラマネジメント技術研究センター・防災・減災に資する研究開発および社会実装に関する研究開発助成」を受けて実施された。ここに記して感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) Stone, W. and Cheok, G. S. : Inelastic behavior of full-scale bridge columns subjected to cyclic loading, NIST Building Science Series 166, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA, 1989.
- 2) 幸左賢二, 小林和夫, 村山八洲雄, 吉澤義男 : 大型 RC 橋脚模型試験体による塑性変形挙動に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 538/V-31, pp. 47-56, 1996.
- 3) 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に関する研究, 土木学会論文集, No. 669/V-50, pp. 215-232, 2001.
- 4) 独立行政法人土木研究所 : 橋の耐震性能の評価に活用する実験に関するガイドライン(案), 土木研究所資料, 第 4023 号, 2006.
- 5) 川島一彦, 太田啓介, 大矢智之, 佐々木智大, 松崎裕 : RC 橋脚の曲げ塑性変形に及ぼす粗骨材寸法及び鉄筋断面積の評価法の影響, 土木学会論文集 AI(構造・地震工学), Vol.68, No.4, pp.543-pp.555, 2012.
- 6) 川島一彦, 佐々木智大, 右近大道, 梶原浩一, 運上茂樹, 堺淳一, 幸左賢二, 高橋良知, 矢部正明, 松崎裕 : 現在の技術基準で設計した RC 橋脚の耐震性に関する実大震動台実験及びその解析, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.2, pp.324-343, 2010.
- 7) 岩田秀治, 関雅樹, 上月隆史, 阿知波秀彦 : 載荷実験による RC 円形橋脚の実大モデルと 1/2 縮小モデルの損傷度比較, 土木学会第 66 会年次学術講演概要集, 第 I 部門, pp.765-766, 2011.