

論文 円形 RC 橋脚縮小試験体の寸法効果の実験的検討

山本 翔吾*1・木下 幸治*2

要旨： これまでに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縮小試験体の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 橋脚の実大と本研究で製作した軸方向鉄筋寸法が相似則に従わない試験体を含む 1/5 縮小試験体との載荷実験の比較を行った。その結果、幾何学的縮尺率に従い軸方向鉄筋を有する 1/5 縮小試験体であっても最大耐力までは実大試験体の履歴挙動を再現できることを示した。

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。これまでに実大規模の試験体を用いた実験データが蓄積され^{1)・2)}、縮小試験体により実大 RC 橋脚の曲げ復元力特性がどの程度評価可能か検討が進められている^{3)・4)・5)・6)}。著者らも既往の実大円形 RC 橋脚²⁾と、使用材料の相似則(表-1)に着目して製作した縮小試験体との実験的検討を行ってきた⁷⁾(表-2)。その結果、コンクリートとモルタルをそれぞれ用いた 1/5 縮小試験体の履歴曲線は最大耐力まで大きな差異は見られないことから、最大耐力までは粗骨材有無の影響は明確でないことを示した。また、相似則に従う D6 異形鉄筋を使用した 1/5 縮小試験体で実大橋脚の履歴曲線の再現性が低かった。これは D6 異形鉄筋の節形状が実大橋脚と異なることに起因しており、異形鉄筋の節形状の重要性を示した。

一方、実大橋脚と同じ節形状を有する市販入手最小径は D10 異形鉄筋であり、これを用いる場合は 1/3 縮小試験体が必要となり、重量は 3 ton を超えるため、我が国の大学の実験施設では実験実施が困難な場合が多い。このため、実験の実施が可能な 1/5 縮小試験体において実大

橋脚と同じ節形状とする特注 D6 異形鉄筋を製作する、または再現性は落ちるが相似則に従わないが節形状と鉄筋比は一致する太径の異形鉄筋を使用することが考えられる。

そこで著者らは、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、実大橋脚と同じ節形状を有した、相似則には従わない太径の D10, D13 異形鉄筋により同じ鉄筋比とした 1/5 縮小試験体の載荷実験により、実大橋脚と 1/5 縮小試験体の履歴特性や損傷状況の比較より寸法効果について検討を進め⁸⁾、太径の D10, D13 異形鉄筋を用いても最大耐力程度までの履歴曲線には大きな差異は見られないことを示した。しかし、RC 橋脚に作用させた軸力が異なっているため、著者らの既往の研究、並びに実大 RC 橋脚と

表-1 各諸元の相似則¹⁾

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

表-2 試験体一覧 (本研究は Type 6, 8 を実施)

試験体	1/10縮小試験体		1/5縮小試験体					
	Type 1 ⁷⁾	Type 2 ⁷⁾	Type 3 ⁷⁾	Type 4 ⁷⁾	Type 5 ⁸⁾	Type 6	Type 7 ⁸⁾	Type 8
材料	モルタル			コンクリート				
主鉄筋	D3	D6		D10		D13		
軸力 (kN)	15		60		150	60	150	60

*1 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 (学生会員)

*2 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 准教授 (正会員)

の比較には至っていない。本研究では、新たな相似則には従わない太径の D10, D13 異形鉄筋により同じ鉄筋比とした 1/5 縮小試験体を追加製作し、それらの荷重実験により、実大橋脚と 1/5 縮小試験体の履歴特性や損傷状況の比較より寸法効果について検討した結果を報告する。

2. 試験体と荷重システム

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 (Type 6, Type 8) の形状と寸法を示す。1/5 縮小試験体は円形断面であり、実大試験体の相似則に従い、直径 400 mm、高さ 1350 mm とした。軸方向鉄筋径は相似則に従わない D10 異形鉄筋を 16 本 (Type 6)、D13 異形鉄筋を 10 本 (Type 8) 使用し、鉄筋比 (1%) に合わせた試験体を製作した。太径の軸方向鉄筋を使用することで鉄筋間隔が異なる。軸方向鉄筋間隔は Type 6, Type 8 それぞれ 71.5 mm, 114.4 mm とした。また、軸方向鉄筋はフーチング上面から 390 mm (軸方向鉄筋径の 30 倍) の深さまで真っすぐに伸ばし、その端部を 90 度フック (フック長 150 mm) により定着させた。帯鉄筋としては、 $\phi 3.2$ の亜鉛めっき鉄線を巻き、帯鉄筋間隔は実大の相似則に合わせて 65 mm とした。なお、帯鉄筋のフック長は帯鉄筋径の 20 倍とし、70 mm である。フーチングは荷重方向に 1000 mm、荷重直角方向に 600 mm、高さは 400 mm とした。コンクリートは粗骨材最大寸法 15 mm とし、圧縮強度は Type 6, Type 8 それぞれ 35.0 N/mm², 37.3 N/mm² である。D10 異形鉄筋の降伏強度と引張強度は 351 N/mm² と 485 N/mm², D13 異形鉄筋は 320 N/mm² と 456 N/mm² である。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 $\phi 13$ 鉄筋が 300mm 間隔で配置されている。

2.2 荷重システム

図-2 に荷重システムを示す。2 本の油圧ジャッキによりそれぞれ水平力、軸力を荷重した。荷重した軸力は実大橋脚に荷重された軸力 (1565 kN) から相似則 (表-1) に従い、60 kN (0.5 MPa) とした。本研究の繰り返し荷重は、試験体が降伏する時の変位量を δ_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。文献 2) の実大橋脚では軸方向鉄筋が降伏する変位量 δ_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。本研究では塑性ヒンジ区間の引張最外縁の軸方向鉄筋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 δ_y とし、その時の荷重位置での荷重を降伏荷重 P_y とした。貼付したひずみゲージより塑性ヒンジ区間の軸方向鉄筋の降伏を判断した。

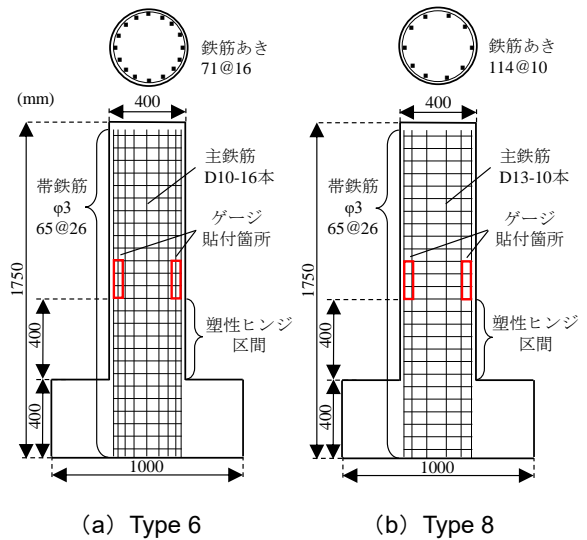


図-1 試験体の形状と寸法

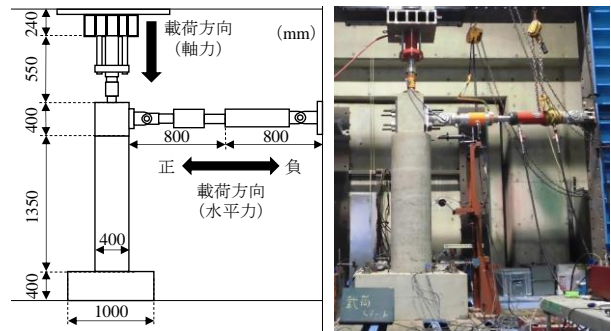
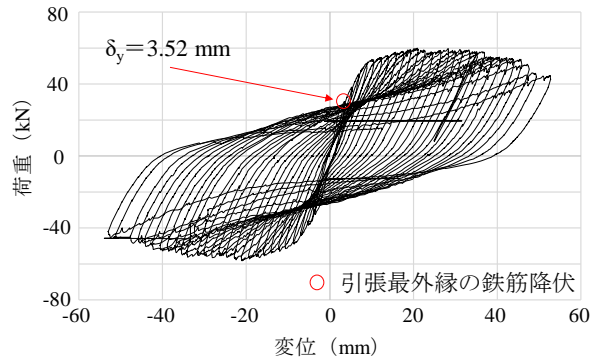
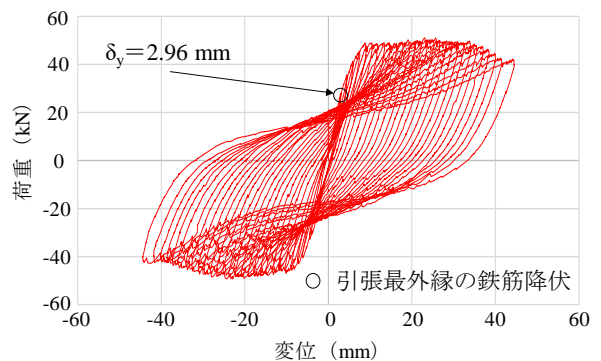


図-2 荷重システム



(a) Type 6



(b) Type 8

図-3 荷重-変位曲線

3. 載荷実験結果

3.1 荷重－変位関係

図-3 (a), (b)に Type 6, Type 8 の荷重－変位曲線を示す。D10 異形鉄筋を軸方向鉄筋とした Type 6 ($\delta_y=3.52$ mm, $P_y=29.5$ kN) では、 $2.5 \delta_y$ 時 ($\delta=8.8$ mm) までに柱基部に曲げによる水平ひび割れが発生した。 $6.0 \delta_y$ 時 ($\delta=21.1$ mm) に最大荷重 59.0 kN となった。繰返し載荷実験の変位の増加に伴う軸力増加の確認した (図-4)。最大荷重時 ($6.0 \delta_y$) では、軸力は 120 kN であった。 $10.5 \delta_y$ 時 (37.0 mm) 以降は、軸力を 60 ± 5 kN となるように調整を行った。 $-13.5 \delta_y$ 時 ($\delta=47.5$ mm) に帯鉄筋の破断、 $14.0 \delta_y$ 時 ($\delta=49.3$ mm) に最大荷重 (59.0 kN) の 80% 程度の耐力低下を確認した。 $15.0 \delta_y$ 時 ($\delta=52.8$ mm) に載荷を終了した。

一方、D13 異形鉄筋を軸方向鉄筋とした Type 8 ($\delta_y=2.96$ mm, $P_y=27.8$ kN) では、載荷開始から軸力を 60 ± 5 kN となるように調整をして載荷した (図-4)。 $2.5 \delta_y$ 時 ($\delta=7.5$ mm) までに柱基部に曲げによる水平ひび割れが発生した。 $8.0 \delta_y$ 時 ($\delta=23.8$ mm) に最大荷重 49.8 kN となった。 $\pm 12.5 \delta_y$ 時 ($\delta=37.0$ mm) に引張最外縁の軸方向鉄筋付近のフーチング上面から高さ 65 mm (帯鉄筋 1 段目) の位置に帯鉄筋の破断を確認した。 $14.0 \delta_y$ 時 ($\delta=39.8$ mm) に最大荷重 (49.8 kN) の 80% 程度の耐力低下を確認した。 $15.0 \delta_y$ 時 ($\delta=44.4$ mm) に載荷を終了した。

3.2 損傷状況

図-5, 図-6 に Type 6 と Type 8 の損傷過程を示す。 Type 6 では、 $\pm 13.0 \delta_y$ サイクル時からかぶりコンクリー

トが剥落し始めた。 $\pm 13.0 \delta_y$ 時ではフーチング上面から帯鉄筋の 1 段目の高さまでかぶりコンクリートが剥離した (図-5 (a), (b))。 $\pm 13.5 \delta_y$ 時ではフーチング上面から帯鉄筋の 2 段目の高さまでかぶりコンクリートが剥離した (図-5 (c), (d))。 $\pm 15.0 \delta_y$ 時ではかぶりコンクリートの剥離範囲は $\pm 13.5 \delta_y$ 時と同程度であった (図-5 (e), (f))。一方、 Type 8 では、 $\pm 11.0 \delta_y$ サイクル時からかぶりコンクリートが剥落し始めた。 $\pm 11.0 \delta_y$ 時ではフーチング上面から帯鉄筋の 1 段目の高さまでかぶりコンクリートが剥離した (図-6 (a), (b))。 $\pm 12.5 \delta_y$ 時ではフーチング上面から帯鉄筋の 2 段目の高さまでかぶりコンクリートが剥離した (図-6 (c), (d))。 $\pm 13.5 \delta_y$ 時ではフーチング上面から帯鉄筋の 3 段目の高さまでかぶりコンクリートが剥離した (図-6 (e), (f))。 Type 6, Type 8 の損傷過程の比較より、かぶりコンクリートの

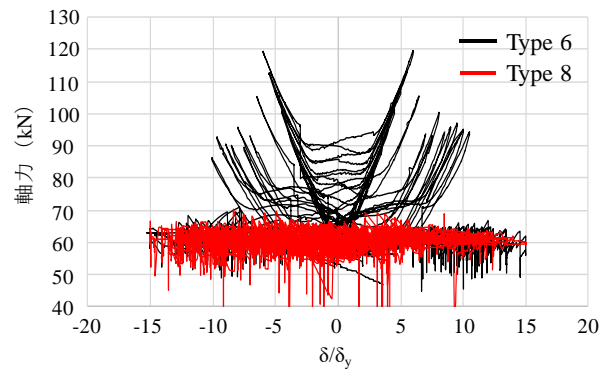


図-4 軸力の変動

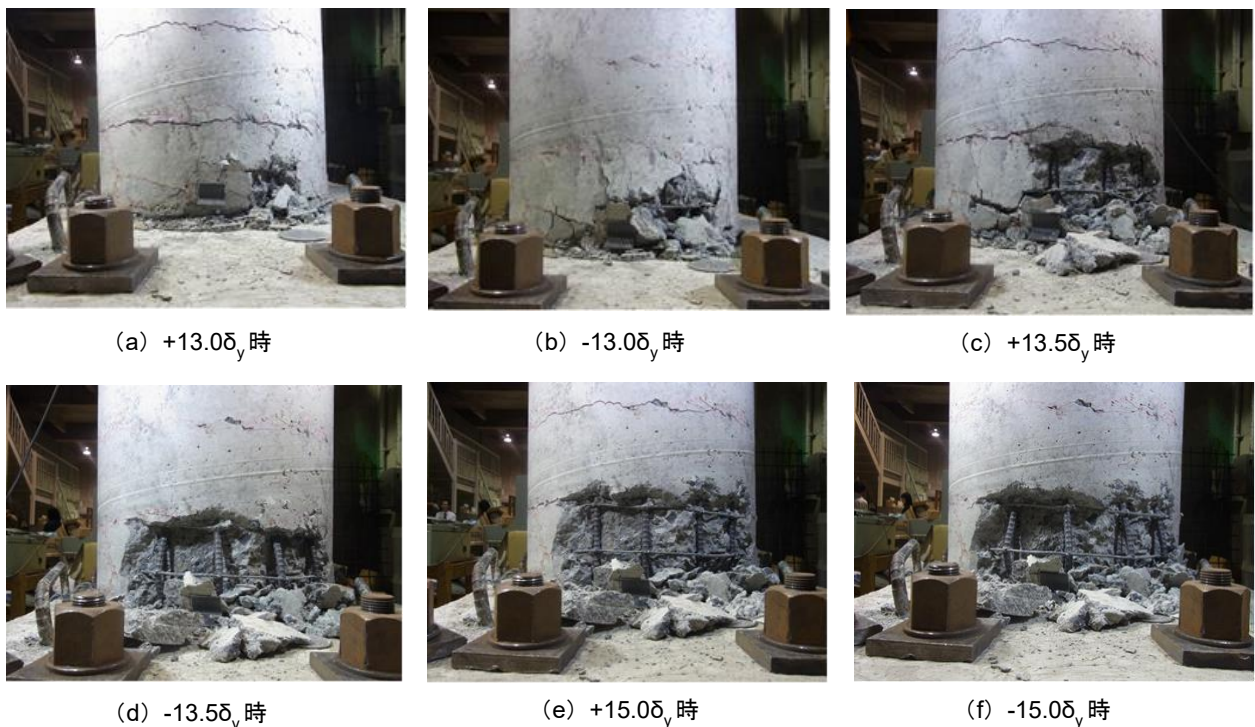


図-5 Type 6 の損傷過程

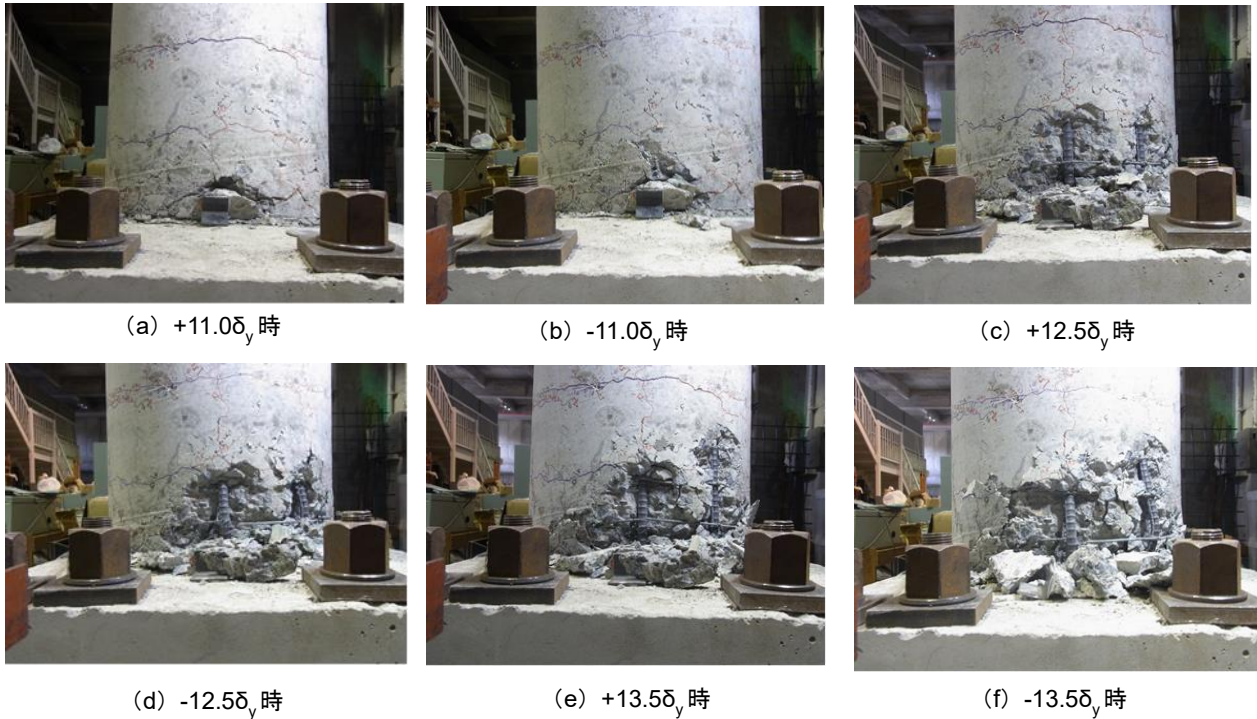


図-6 Type 8 の損傷過程

剥離形態が異なることを確認した。Type 6 は、軸方向鉄筋と帯鉄筋で囲まれた大きさのかぶりコンクリートの塊が剥離した。一方、Type 8 は、軸方向鉄筋の位置のかぶりコンクリートが徐々に剥離していた。この剥離形態の違いは軸方向鉄筋比を合わせたことで軸方向鉄筋間隔が異なることに起因していると考えられ、著者らの既往の研究²⁾と同様の傾向であった。

図-7 に Type 6 と Type 8 の載荷終了時の損傷状況を示す。Type 6 はフーチング上面から高さ 130 mm、直径方向で幅 300 mm の範囲でかぶりコンクリートが剥離した。Type 8 はフーチング上面から高さ 200 mm、直径方向で幅 250 mm の範囲でかぶりコンクリートが剥離した。また、Type 6 と Type 8 で軸方向鉄筋の座屈位置が異なった。Type 6 は帯鉄筋 1 段目に鉄筋の座屈の腹が位置していた。Type 8 は帯鉄筋の 1 段目と 2 段目の中央に鉄筋の腹が位置していた。これは、Type 6 と Type 8 でかぶりコンクリートの損傷が異なることに起因していると考えられた。具体的には、Type 8 は帯鉄筋の 3 段目までのかぶりコンクリートの剥離により部材長が長くなっており、軸方向鉄筋の座屈位置が Type 6 より高い位置にあることがわかる。既往の実大円形 RC 橋脚²⁾の損傷状況はフーチング上面から 800~1000 mm、直径方向に 1500 mm の範囲でかぶりコンクリートが剥離しており、軸方向鉄筋の座屈の腹の位置は 500~600 mm (帯鉄筋の 1 段目と 2 段目の中央) であった。以上より、かぶりコンクリートの剥離範囲について直径方向は Type 6、高さ方向は Type 8、座屈の腹の位置については Type 8 が実大の損傷状況と良く似ていた。



(a) Type 6



(b) Type 8

図-7 載荷終了時の損傷状況

3.3 実大橋脚と縮小試験体の履歴曲線の比較

図-8、図-9に1/5縮小試験体（Type 4, Type 6, Type 8）の $\pm 4.0 \delta_y$, $\pm 8.0 \delta_y$ サイクル時の履歴曲線を示す。ここでは軸方向鉄筋の降伏強度、コンクリート材料の圧縮強度が異なることから、荷重-変位曲線の両軸を実験での降伏変位 δ_y 、降伏荷重 P_y にてそれぞれ除した履歴曲線の内、 $\pm 4.0 \delta_y$, $\pm 8.0 \delta_y$ サイクルを抜きだした。なお、Type 6では、橋脚の変形が大きくなった $\pm 4.0 \delta_y$ 以降に顕著な軸力の増加が確認された後に軸力の調整を行ったことから、軸力の増加に伴い耐力増加に関する補正を行う必要がある。このため、ファイバー要素解析⁹⁾と実験結果が一致していることを確認した上で、 $\pm 4.0 \delta_y$, $\pm 8.0 \delta_y$ サイクルごとの最大軸力（120 kN）時と60 kN時の解析より、算出した差分を実験値から差し引くことで補正を行った。なお、ファイバー要素解析の詳細については文献⁹⁾を参照いただきたい。図-8より、 $\pm 4.0 \delta_y$ サイクルはType 4の最大耐力時であるため、Type 6, Type 8と比べて耐力が大きい。図-9より、 $\pm 8.0 \delta_y$ サイクルはType 6, Type 8の最大耐力時であり、履歴曲線は概ね一致している。Type 4はType 6, Type 8に比べて耐力低下が早いといえる。

図-10に実大橋脚と1/5縮小試験体のType 4, Type 6, Type 8の履歴曲線を示す。実大橋脚とType 6, Type 8の履歴曲線の比較より、最大耐力に大きな差異は見られなかったが、履歴曲線の形状には少し差異が見られた。実大橋脚の最大耐力付近で履歴曲線は縮小試験体よりも膨らんでいる点については、さらなる考察が必要である。Type 4の $\pm 8.0 \delta_y$ サイクル時では耐力低下域であるため、最大耐力は実大橋脚とType 6, Type 8と比較して低い。

以上より、実大橋脚と同じ節形状を有した、相似則には従わない太径のD10, D13異形鉄筋により同じ鉄筋比とした1/5縮小試験体のType 6, Type 8であっても、最大耐力までは実大橋脚の履歴曲線を概ね再現できるといえる。

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1/5縮小試験体との载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。

- 1/5縮小試験体（Type 6, Type 8）の载荷実験より、軸方向鉄筋間隔が異なることでかぶりコンクリートの損傷形態と軸方向鉄筋の座屈位置に差異が生じた。
- しかし、実大橋脚と1/5縮小試験体（Type 6, Type 8）の履歴曲線の比較から、 $\pm 8.0 \delta_y$ サイクルまでは最大耐力、履歴曲線に大きな差異は見られなかった。

以上のように、著者らの既往の研究（Type 4）と、本研

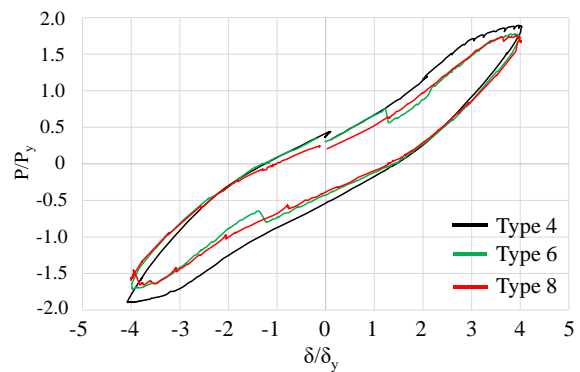


図-8 $\pm 4.0 \delta_y$ サイクル

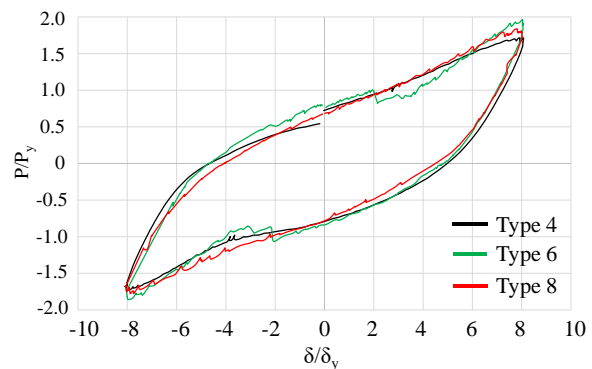


図-9 $\pm 8.0 \delta_y$ サイクル

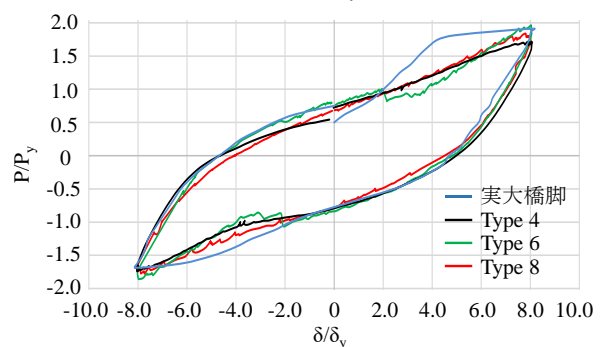


図-10 実大橋脚と1/5縮小試験体の比較

究成果より、軸方向鉄筋寸法によらず1/5縮小試験体により、実大橋脚の最大耐力程度までの履歴曲線を良く評価できることを示した。一方、実大橋脚の最大耐力以降の再現性向上のためには、縮小試験体製作において鉄筋比・鉄筋径のみならず、節の形状に関する更なる検討が必要であると考えられる。

謝辞

繰返し载荷実験に際して、岐阜大学の内田裕市教授、国枝稔教授には、実験に関する貴重な助言をいただいた。また、本研究室の学生に試験体の製作、繰返し载荷実験の準備、実験を手伝っていただいた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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 回年次学術講演概要集, 第 I 部門, pp.765-766, 2011.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 山本翔吾, 杉森克成, 木下幸治, 内田裕市: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol. 37, No.2, pp.655-pp.660, 2015.7.
- 8) 山本翔吾, 木下幸治: 異なる軸方向鉄筋径により製作した円形 RC 橋脚縮小試験体の正負交番載荷実験, 第 19 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.215-220, 2016.7.
- 9) 山本翔吾, 木下幸治: 円形 RC 橋脚の曲げ復元力特性に及ぼす鉄筋節形状の影響の解析的検討, 第 18 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.165-172, 2015.7.