

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

山本 翔吾¹・木下 幸治²

¹学生会員 岐阜大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻（〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1）

²正会員 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 准教授（〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1）

1. はじめに

近年、実大規模の試験体を用いた震動台実験¹⁾や静的載荷実験²⁾に基づいて、実大規模の試験体を用いた実験データが蓄積され、それらのデータを活用して、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)}。

川島ら⁶⁾は、実大橋脚模型の震動台実験と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径がRC橋脚の破壊特性及び曲げ復元力に及ぼす影響を検討された。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。

このような背景を受け、著者ら⁷⁾は、既往の実大円形RC橋脚の実験と、縮小率、粗骨材有無や鉄筋比に着目して独自に製作した縮小試験体の実験との比較を行った。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（2体）の履歴曲線では $\pm 4.0\delta_y$ まで大きな差異は見られないことから、 $\pm 4.0\delta_y$ までは粗骨材有無の影響は明確でないことを示した。一方、鉄筋径・鉄筋比の縮尺率を合わせた1/10縮小試験体の履歴曲線は実大試験体のそれと良く一致するが、実大試験体と異なる節形状を有する異形鉄筋を使用した1/5縮小試験体と1/10縮小試験体

の履歴曲線と実大試験体の履歴曲線には差異が見られた。この結果より、異形鉄筋の節形状もが履歴曲線に影響を及ぼす可能性があることが示された。

そこで、本研究では、著者らの既往の研究で検討した試験体の鉄筋とコンクリートを完全付着と仮定したファイバー要素解析を実施し、履歴曲線の解析結果と実験結果との比較より縮小試験体に用いる異形鉄筋の節形状が、その曲げ復元力特性に及ぼす影響について考察した。

2. 縮小試験体の実験概要⁷⁾

(1) 試験体の概要

図-1に本研究で解析した1/5縮小試験体と1/10縮小試験体の形状と寸法、表-1に試験体一覧を示す。

縮小試験体は円形断面橋脚であり、1/5縮小試験体は、直径400mm、高さ1350mm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 $\phi 3.2$ の亜鉛めっき鉄線を65mm間隔で使用した。1/5縮小試験体は2体製作し、粗骨材有無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650mmとし、帯鉄筋は縮尺率に合わせ $\phi 1.2$ の亜鉛めっき鉄線を30mm間隔で使用した。1/10縮小試験体では、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

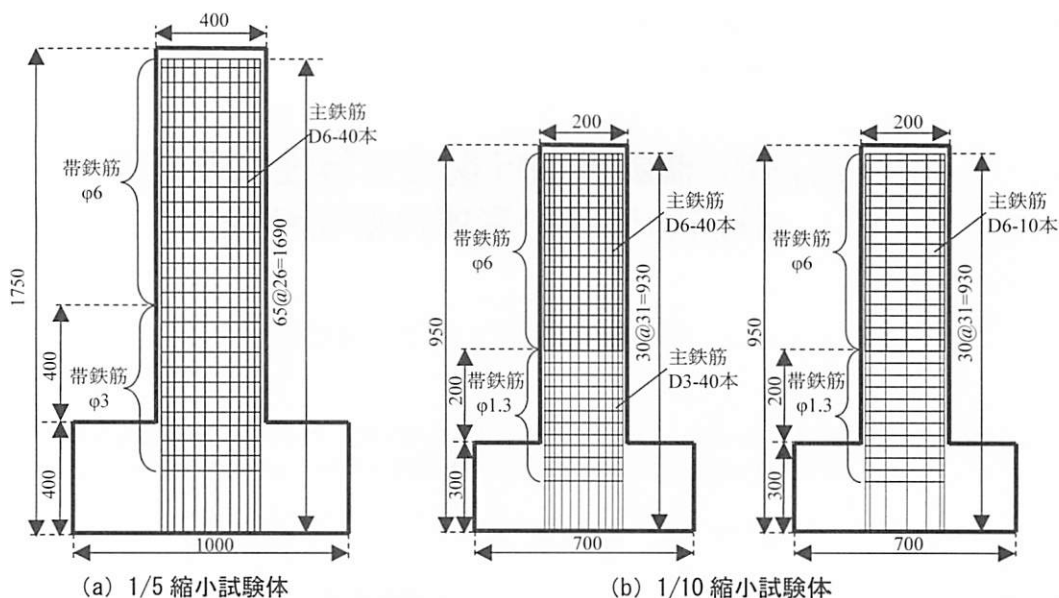


図-1 試験体の寸法

表-1 試験体一覧

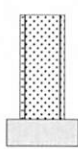
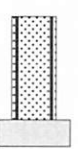
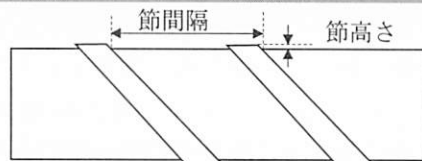
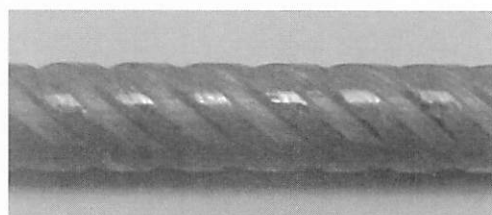
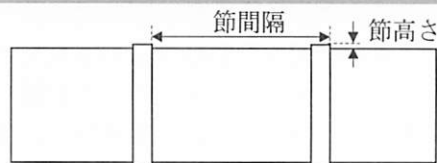
試験体	1/5縮小試験体		1/10縮小試験体	
	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
				
材料	コンクリート	モルタル	モルタル	
主鉄筋	D6		D3	D6

表-2 節形状の計測結果

軸方向鉄筋	節高さ (mm)	節高さの縮尺	節間隔 (mm)	節間隔の縮尺
D3	0.16	0.08	2.17	0.11
D6	0.42	0.20	4.40	0.22
D29	2.10	1.00	20.00	1.00



(a) らせん節形状 (D6)



(b) 通常の節形状 (D3)

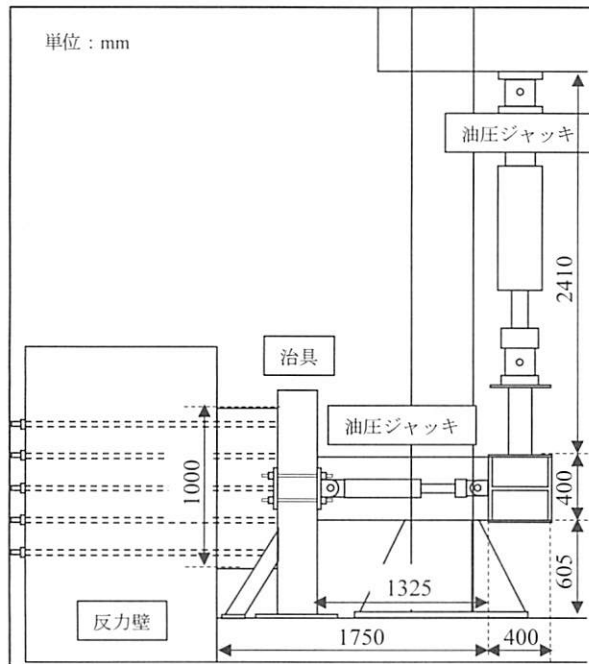
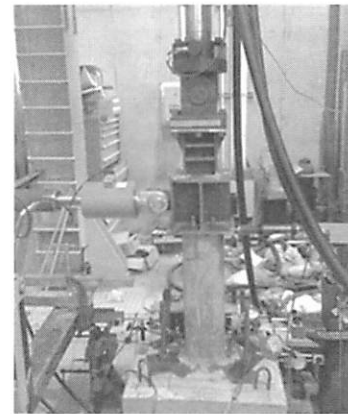
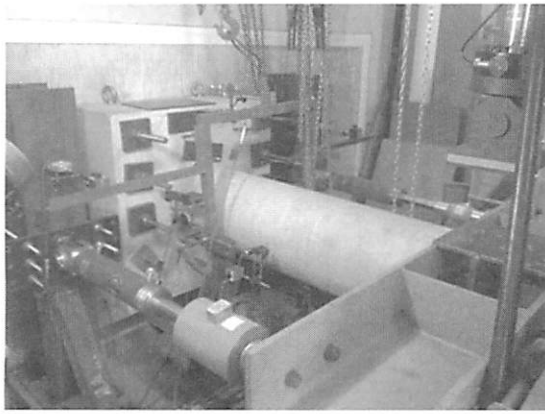
図-2 軸方向鉄筋の節形状

検討することを目的としているために、粗骨材の影響を取り除くこととし、モルタルを使用した。

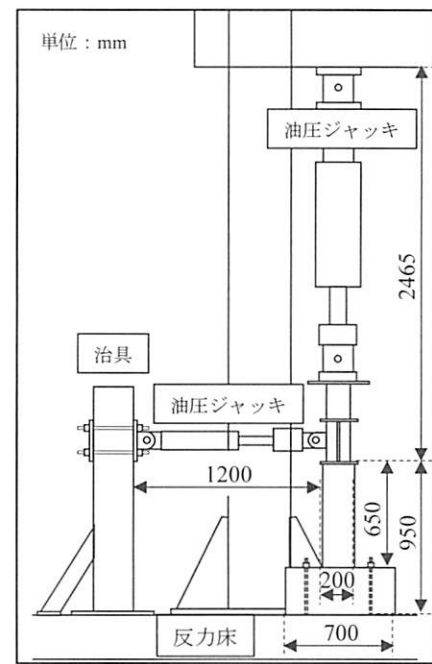
図-2に1/5縮小試験体と1/10縮小試験体に用いた軸方向鉄筋の節形状の比較と計測位置を示す。D3異形鉄筋は、通常の鉄筋と同様に、鉄筋の節が鉄筋軸直角方向に再現されているとともに、節の高さ、間隔は縮尺に合わせて再現されている（表-2）。一方、D6異形鉄筋の節はらせん状であり節の形状・間隔は直径の大きい鉄筋と異なっている。

コンクリート、ならびにモルタルの圧縮強度は文

献2)に示される30.0 N/mm²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は28.0 N/mm²（Type 1）、モルタルの圧縮強度は33.8 N/mm²（Type 2）、1/10縮小試験体のモルタルの圧縮強度は40.8 N/mm²（Type 3, 4）であった。また、D6鉄筋の降伏強度と引張強度は456 N/mm²と588 N/mm²、D3鉄筋の降伏強度と引張強度は349 N/mm²と421 N/mm²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。



(a) 1/5 縮小試験



(b) 1/10 縮小試験

図-3 実験システム

表-2 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	ρ	1	1	1
応力	σ	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	ε	1	1	1

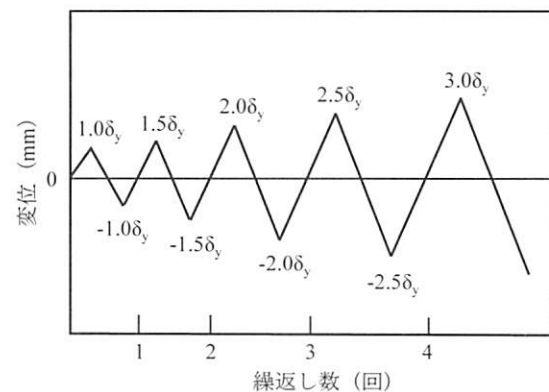


図-4 繰返し荷荷方法

(2) 実験システム

図-3に実験システムを示す。1/5縮小試験体の実験システムは試験体を水平に反力壁に設置して鉛直方向に荷荷した。軸力を左右に設置した2本の油圧ジャッキにより荷荷し、1本の油圧ジャッキにより水平力を荷荷した。1/10縮小試験体の実験システム

は、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荷した。荷荷した軸力は実大試験体に荷荷された軸力（1565kN）から相似比（表-2）に従い、1/5縮小試験体は60kN、1/10縮小試験体は15kNとした。繰返し荷荷は、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サイクル載荷した(図-4)。1/5縮小試験体のType 1は $\pm 6.5\delta_y$ まで載荷を行い、Type 2は $\pm 7.5\delta_y$ まで載荷を行った。1/10縮小試験体のType 3(主鉄筋D3使用)は $\pm 7.5\delta_y$ まで載荷し、Type 4(主鉄筋D6使用)は、 $\pm 11.0\delta_y$ になるまで載荷した。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2)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 δ_y を軸方向鉄筋に貼付したひずみゲージが降伏ひずみに達した時の変位としている。一方、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、それに代わり、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 δ_y と降伏荷重 P_y を算出した。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、その時の載荷位置での荷重を降伏荷重とした。

(3) 実験結果

ここでは実験結果の掲載は紙面の都合上省略したが、主な結果は以下のとおりである。

- [1] 1/5縮小試験体の載荷実験結果より、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は $\pm 4.0\delta_y$ まで差異が見られなかったことから、粗骨材有無による影響は小さいといえる。
- [2] 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。1/10縮小試験体の載荷実験により、縮尺率に従い製作した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] 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・鉄筋径のみならず、鉄筋とコンクリートの付着性状に大きな影響を与えと考えられる節形状も縮尺率を満足する必要がある。

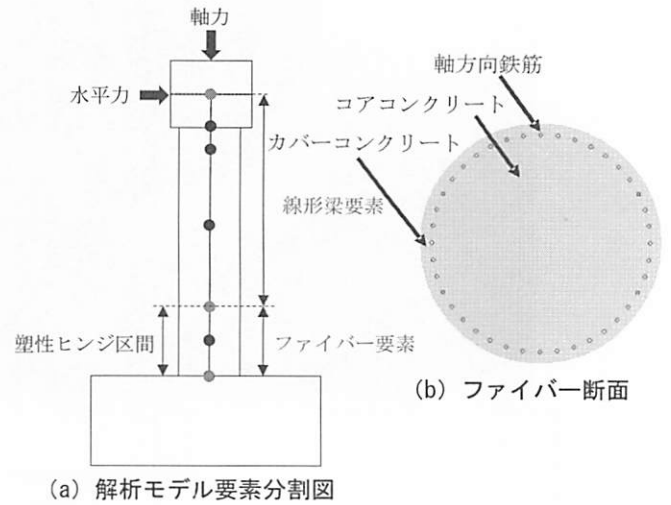


図-5 解析モデル

3. ファイバー要素解析

ここでは、上記した実験的検討に基づき各試験体のファイバー要素解析により、鉄筋とコンクリートの付着性状を考察する。すなわち、鉄筋とコンクリートを完全付着と仮定する解析と実験の比較から付着への影響を検討した。

図-5にファイバー要素を用いた解析モデルとファイバー要素の断面を示す。塑性ヒンジ区間には1層のファイバー要素、塑性ヒンジ区間以外の部分には線形梁要素を用いた⁸⁾。主鉄筋D3を使用した1/10縮小試験体については、橋脚部の途中で主鉄筋D3から主鉄筋D6に変わる箇所まで分割した。塑性ヒンジ区間は道路橋示方書⁹⁾に基づいて選定した。図-6にファイバー要素によるコンクリートの応力-ひずみ曲線を示す。コアコンクリート及びカバーコンクリートの応力-ひずみ関係のモデル化について、応力-ひずみ関係はHoshikumaらの提案式(式(1), (2))¹⁰⁾を用いた。

・ 応力上昇域 ($0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cc}$)

$$f_c = E_c \varepsilon_c \left\{ 1 - \frac{1}{n} \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \right)^{n-1} \right\} \quad (1)$$

$$\text{ただし } n = \frac{E_c \varepsilon_{cc}}{E_c \varepsilon_{cc} - f_{cc}}$$

・ 応力下降域 ($\varepsilon_{cc} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}$)

$$f_c = f_{cc} - E_{des} (\varepsilon_c - \varepsilon_{cc}) \quad (2)$$

$$\text{ただし } \varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cc} + \frac{f_{cc}}{2E_{des}}$$

f_{cc} : 最大圧縮応力

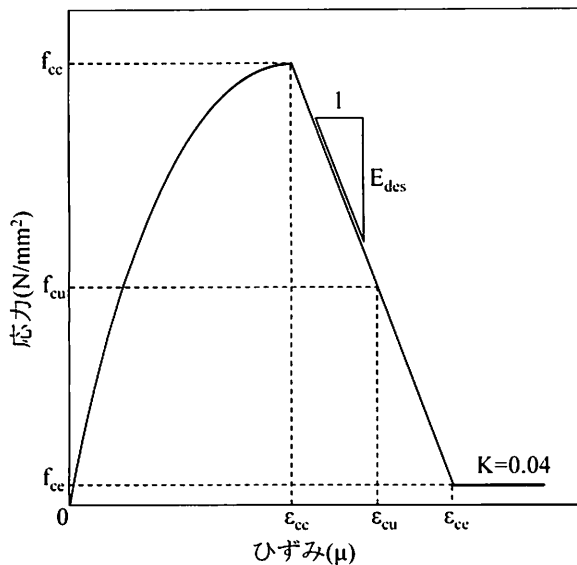


図-6 コンクリートの応力-ひずみ曲線

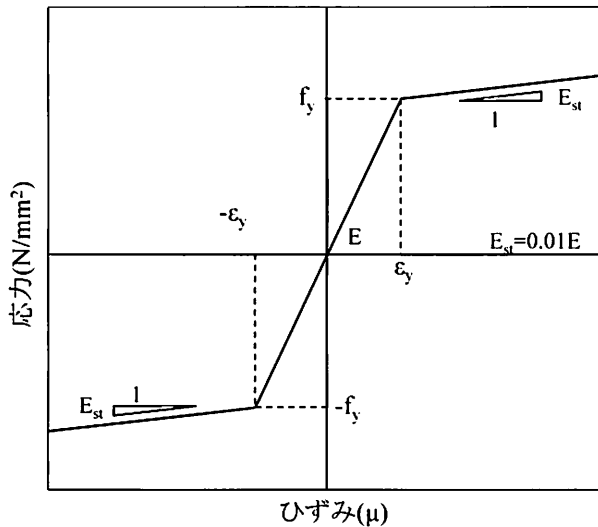


図-7 軸方向鉄筋の応力-ひずみ曲線

ϵ_{cc} : 最大圧縮応力時のひずみ

ϵ_{cu} : 終局ひずみ

E_c : 初期弾性係数

E_{des} : 下降勾配

また、コンクリートの部分的な除荷・再載荷の履歴については堺らのモデル提案¹¹⁾を用いた。RC構造において梁部材に使用されるコンクリートは、ひび割れ発生以後もコンクリートと鉄筋との付着によって引張応力を伝達する能力を保持するが、非線形領域が部材の一部が構造物の応答に及ぼす影響は小さいことから引張応力を無視した。また、コンクリートの残留圧縮強度は圧縮強度の4%とした。コンクリートの圧縮強度は30.0 N/mm²とし、要素実験結果と一致させた。図-7に軸方向鉄筋の応力-ひずみの関係を示す。軸方向鉄筋は2次勾配を弾性係数の1%程度とするバイリニア移動硬化型モデルで表すこと

にした。軸方向鉄筋に使用したD6とD3の降伏強度はそれぞれ456 N/mm²と349 N/mm²とし、要素実験結果と一致させた。

4. 解析結果

ここでは、ファイバー要素解析結果と実験結果との比較に荷重-変位曲線を用いることとし、両者の荷重と変位の関係、並びにエネルギー吸収性能の観点から考察した。エネルギー吸収性能は履歴曲線の形状と大きさにより判断することとした。

ここでは、まず荷重-変位関係の全体的な比較を目的とし、図-10に実験終了時までの解析結果と実験結果との比較を示す。図-10(a), (b)に実大と1/2縮小試験体の結果を示す。

実大と1/2縮小試験体では、最大耐力までは解析結果と実験結果が良く一致していることがわかる。よって、実大と1/2縮小試験体の大型の試験体を用いた実験結果と解析結果が良く一致し、本解析が妥当であると言える点から、実大と1/2縮小試験体の軸方向鉄筋とコンクリートは、完全付着に近い状態にあると考えられる。一方、最大耐力以降は、解析結果は実験結果のように大きく荷重低下しないことがわかる。これは解析において軸方向鉄筋の座屈を考慮していないことに起因したものであり、1/5縮小試験体と1/10縮小試験体の解析結果においても同様である。よって、最大耐力までの比較に留めて考察を進めた。

図-10(c), (d)に鉄筋節形状がらせん状であるD6を使用した1/5縮小試験体の解析と実験の比較を示す。1/5縮小試験体では解析結果の方が実験結果よりも荷重が大きくなっていることが確認できる。このため、解析結果は実験結果よりも全体的に大きくなっており、本解析により実験結果をよく再現できていないことがわかる。図-10(e), (f)に1/10縮小試験体の実験結果と解析結果の比較を示す。1/10縮小試験体のType 3では、1/5縮小試験体と同様に解析結果の方が実験結果よりも荷重が大きくなった。一方、1/10縮小試験体のType 4ではType 3に比べ解析結果と実験結果の最大耐力が近いことが確認できる。以上より、実大試験体と1/2縮小試験体の実験結果と解析結果は良く一致するものの、1/5縮小試験体と1/10縮小試験体の実験結果と解析結果には差異が見られた。これより、1/5縮小試験体と1/10縮小試験体の軸方向鉄筋とコンクリートは完全付着といえない状態にある、または、寸法を縮小したことによる他の要因の影響により差異が生じたと考えられる。

次に、各試験体の履歴曲線から $\pm 2\delta y$, $\pm 4\delta y$ サイク

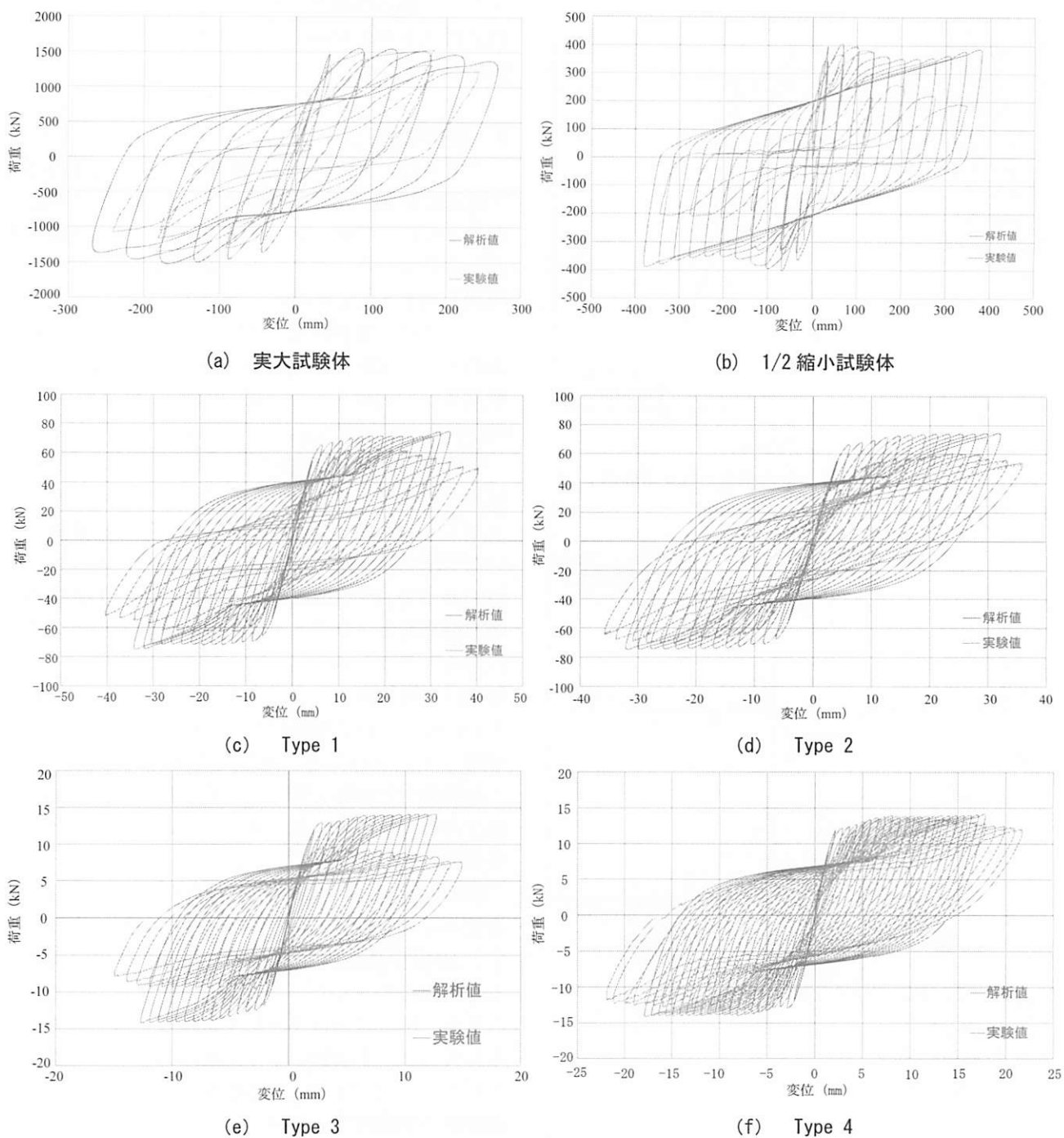


図-10 解析結果と実験結果の比較

ル時を抜き出した解析結果と実験結果の履歴曲線の形状の詳細な比較を図-11と図-12に示す。図-11と図-12より、実大と1/2縮小試験体では、 $\pm 2\delta_y$ 、 $\pm 4\delta_y$ サイクル時ともに、解析結果と実験結果の履歴曲線が良く一致することが確認できる。履歴曲線の特徴的な点は、エネルギー吸収が大きくなる膨らみがある履歴ループを描くことがわかる。よって、これらの結果より、試験体の軸方向鉄筋とコンクリートが完全付着に近い場合、エネルギー吸収量大きい膨らみがある履歴曲線を示すといえる。

次に図-11と図-12より、1/5縮小試験体では $\pm 2\delta_y$ 、 $\pm 4\delta_y$ サイクル時ともに解析結果は実験結果よりも膨らみがある履歴曲線を示していることがわかる。さらに、D6鉄筋を使用した1/10縮小試験体についても同様に、 $\pm 2\delta_y$ 、 $\pm 4\delta_y$ サイクル時ともに解析結果は実験結果よりも膨らみがある履歴曲線を示した。一方、D3鉄筋を使用した1/10縮小試験体では解析結果が実験結果と良く一致していることが伺える。

以上より、実大試験体と1/2縮小試験体とD3鉄筋を使用した1/10縮小試験体のType 3の履歴曲線の形

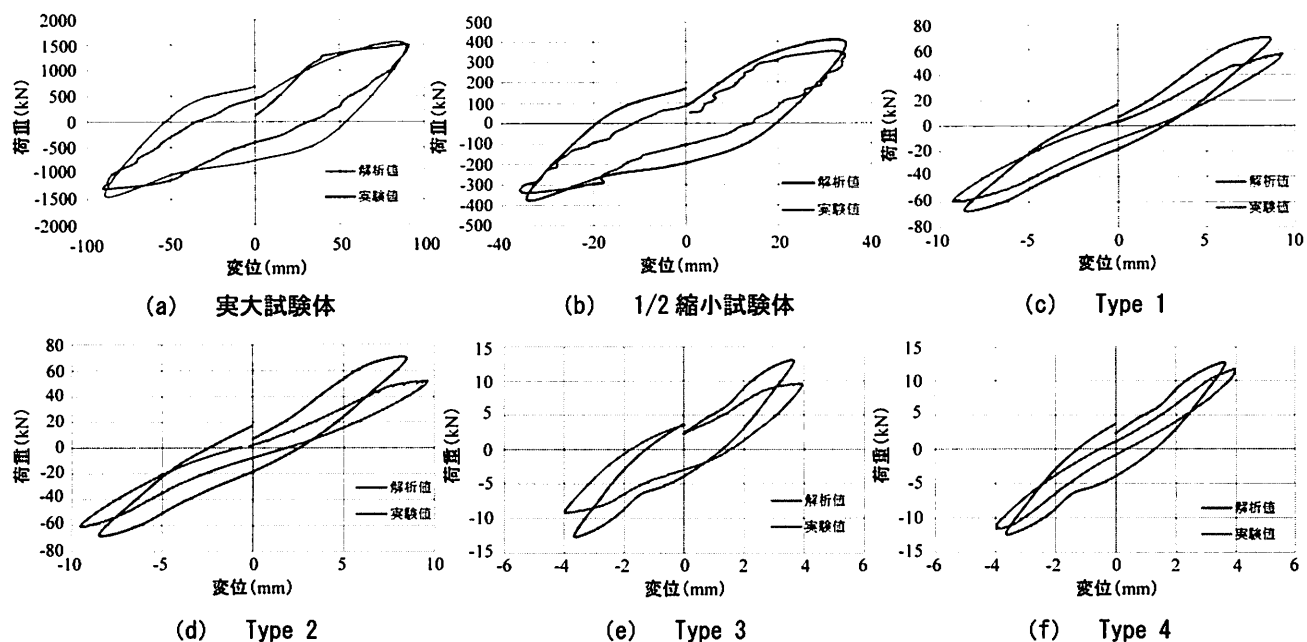


図-11 $\pm 2.0\delta_y$ サイクル時

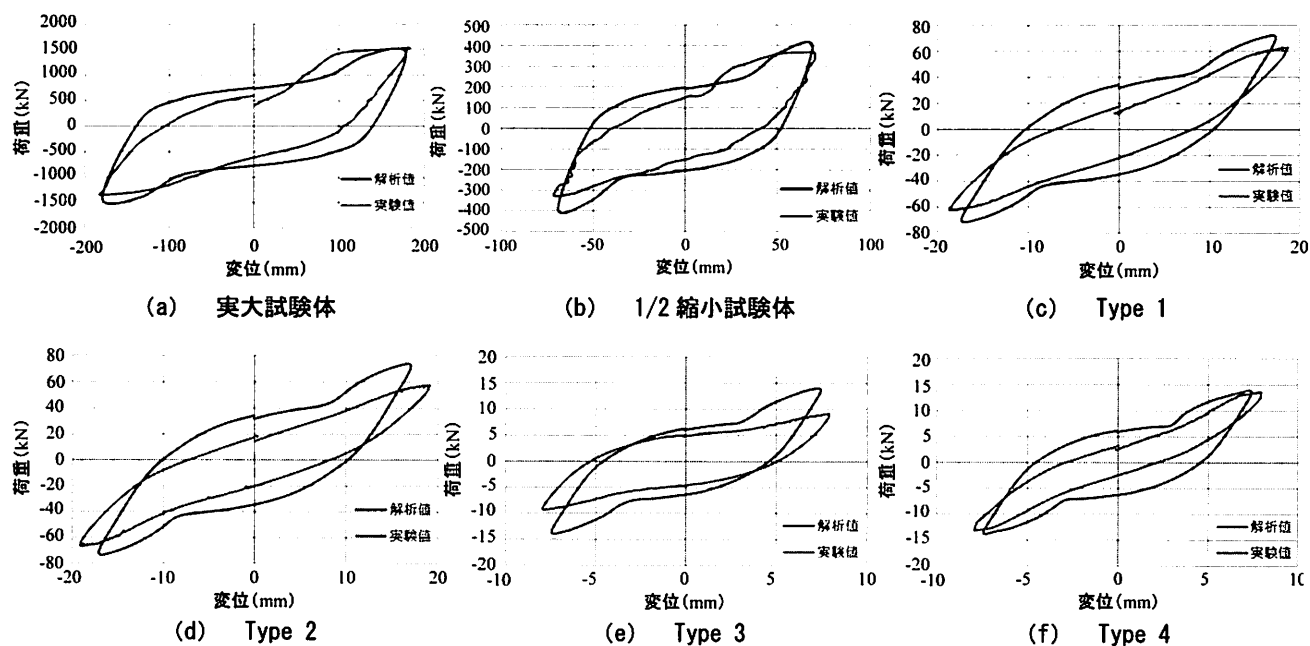


図-12 $\pm 4.0\delta_y$ サイクル時

状が解析結果と比較的一致することから、1/10縮小試験体であっても、実大試験体と同じように鉄筋軸に直行する節が配置された軸方向鉄筋を使用することで完全付着に近い状態に近づくといえる。なお、履歴曲線の形状は比較的一致したが、最大荷重の再現性が低い点は課題として残っている。

他方、解析結果と実験結果の荷重が合わなかった要因には、図-11と図-12に示されるように実験結果

と解析結果との剛性の差の影響も考えられる。この理由は、解析では塑性ヒンジ区間のコンクリートの引張側応力を無視し、鉄筋が降伏するまで剛性が変わらず荷重が上がるに対し、実験の履歴曲線は微細なひび割れの発生、ひび割れの進展、鉄筋の降伏といった順序で剛性が低下しながら傾く。よって、実験では剛性低下の要因が複数存在し、履歴曲線が傾くため解析結果と実験結果の荷重が完全に一致しな

かったといえる。解析において橋脚の剛性低下を忠実に再現できれば解析と実験の荷重が一致し、最大耐力も一致するのではないかと考えられる。よって、解析結果を実験結果とを一致させるには載荷初期段階のモデル化の改善も必要と考える。

5. まとめ

本研究では、解析的に付着性状を明らかにするためにファイバー要素解析により実大、1/2、1/5、1/10縮小試験体の解析を行った。軸方向鉄筋とコンクリートを完全付着と仮定し、実大と1/2縮小試験体の実験結果の比較より解析モデルの妥当性を確認した。

実大と1/2縮小試験体では解析と実験は良く一致したことから、実大と1/2縮小試験体の軸方向鉄筋とコンクリートは完全付着に近いといえる。鉄筋径、節形状の縮尺率のみならず、節の方向までも合わせた1/10縮小試験体の解析結果は実大と1/2縮小試験体と近く、解析により良く再現できた。一方、実大の鉄筋の節形状と異なる節形状の異形鉄筋を使用した1/5と1/10縮小試験体の実験結果と解析結果には差異が大きいことが明らかとなった。

以上より、軸方向鉄筋とコンクリートの付着性状の違いが、実大試験体と縮小試験体の履歴特性に影響を及ぼす一つの要因ではないかと考えられる。

6. 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る。

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 会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, 日本コンクリート工学会, 2015. (掲載予定)
- 8) 堺淳一, 川島一彦: ファイバー要素を用いた鉄筋コンクリート橋脚の地震応答解析, 土木学会構造工学論文集Vol.45A, 1999.
- 9) 日本道路協会, 道路橋示方書(V 耐震設計編), 丸善, 東京, 1980, 1990, 1996, 2002.
- 10) Hoshikuma,J, Kawashima,K, Nagaya,K. and Taylor,A.W : Stress-Strain Model for Confined Reinforced Concrete in Bridge piers, J.struct.Enginnering, ASCE, Vol.123, No.5, pp.624-633, 1997.
- 11) 堺淳一, 川島一彦: 部分的な除荷・再載荷を含む履歴を表す修正Menegoto-Pintoモデルの提案, 土木学会論文集, No.738/I-64, pp.159-169, 2003.