

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

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

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)}。著者らは、既往の実大円形RC橋脚²⁾と、使用材料の相似則に着目して製作した縮小試験体との実験⁷⁾、並びに解析的検討⁸⁾を行ってきた。

その上で、著者らは既往の実大円形RC橋脚の実験²⁾と相似則、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した⁷⁾。直径3mmの特注極小径鉄筋（直径6mm未満は市販品無）を使用し、RC橋脚の鉄筋の相似則を満たした1/10縮小試験体であっても実大の履歴ループを良く再現することに成功した。一方、直径6mmの鉄筋を使用し同じ鉄筋比とした試験体では、軸方向鉄筋の間隔が異なるため、かぶりコンクリートの損傷形態が明確に異なることが明らかとなった。この結果より、軸方向鉄筋の鉄筋あきの違いが損傷形態に影響を及ぼすと考えられ、すなわち、縮小試験体では軸方向鉄筋の鉄筋あきが相似則を満たすように製作する必要があるのではないかと考えられた。しかし、上記実験では、直径6mmの鉄筋節の形状がらせん状であったため、軸方向鉄筋の節形状ならびに鉄筋あきの両方の影響を含んだ結果となっており、鉄筋あきの明確な影響の把握には至っていない。

そこで、本研究は、著者らの既往の一連の研究に加えて、実大と同じ軸方向鉄筋の節形状でかつ鉄筋比ではあるが、異なる2種類の軸方向鉄筋径を用いた縮小試験体（図-1）の正負交番載荷実験により、軸方向鉄筋の鉄筋あきの影響について検討した。

2. 縮小試験体の実験概要

(1) 縮小試験体

図-1に本研究で製作した1/5縮小試験体（Type 5, Type 6）の形状と寸法を示す。縮小試験体は円形断面であり、実大試験体の相似則（表-1）に従い、直径400 mm、高さ1350 mmとした。1/5縮小試験体ではD6異形鉄筋により鉄筋径が相似則を満たすが、D6異形鉄筋の節形状がらせん状である。そこで、軸方向鉄筋径は相似則に従わないが、鉄筋節形状が実大と同じであるD10, D13異形鉄筋を使用し、鉄筋比（1%）に合わせた試験体を製作した。Type 5はD10異形鉄筋を16本、Type 6はD13異形鉄筋を10本とした。表-2より、太径の軸方向鉄筋を使用することで鉄筋あきが異なることがわかる。鉄筋あきはType 5, Type 6それぞれ71.5 mm, 114.4 mmとした。帯鉄筋としてφ 3.2の亜鉛めっき鉄線を65 mm間隔で使用した。フーチングは載荷方向に1000 mm、載荷直角方向に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 5, Type 6それぞれ43.4 N/mm², 44.7 N/mm²である。Type 1に使用したD6異形鉄筋と今回使用した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。

(2) 実験システム

載荷システムは文献9)と同様なものを使用した（図-2）。軸力は150 kNとし、繰り返し載荷は、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-3）。また、 $\pm 8.0 \delta_y$ 以降は $\pm 1.0 \delta_y$ ずつ増加させた。

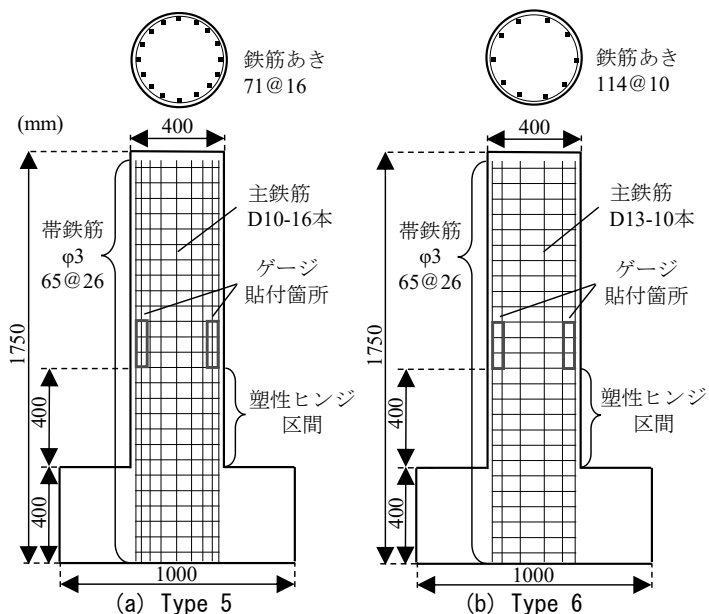


図-1 試験体の形状と寸法

表-1 各諸元の相似則

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 鉄筋径とあきの縮尺率

鉄筋径 (呼び径)	鉄筋あき (mm)	あきの縮尺率 (%)
D6	27.9	21
D10	71.5	53
D13	114.4	84

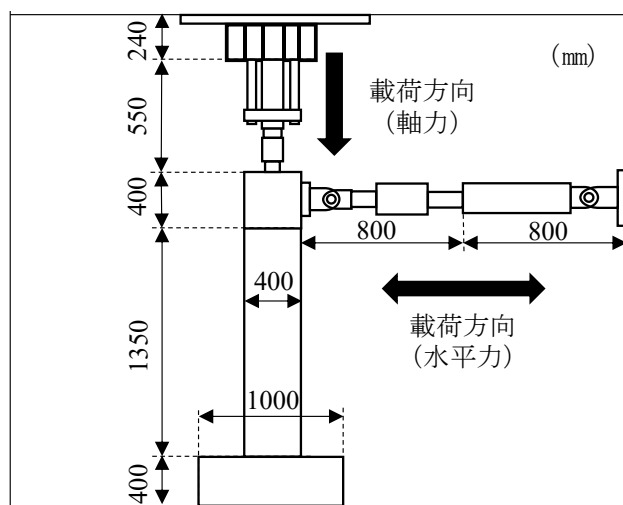
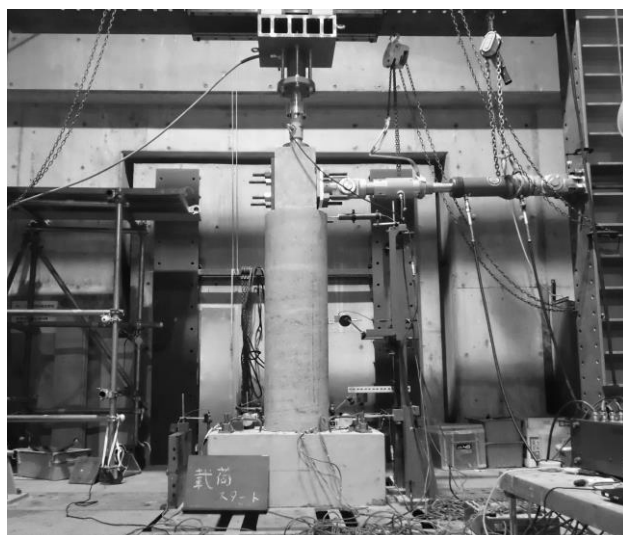


図-2 実験システム

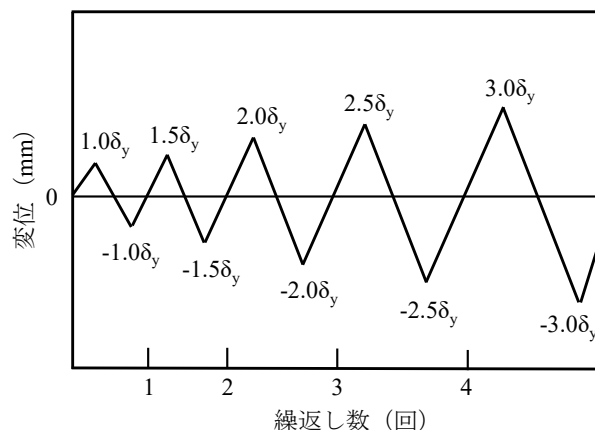


図-3 繰返し载荷方法

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、その時の载荷位置での荷重を降伏荷重 P_y とした。また、ひずみゲージ(図-1)より塑性ヒンジ区間の軸方向鉄筋の降伏を判断した。

3. 実験結果

(1) 荷重—変位関係

図-4に Type 5, Type 6の実験結果を示す。Type 5 ($\delta_y=4.44$ mm, $P_y=39.3$ kN)は、ひび割れの発生と軸方向鉄筋の降伏を経て、 $\pm 9.0 \delta_y$ サイクル付近で最大荷重は 71 kN となった。最大荷重以降はかぶりコンクリートの剥離と軸方向鉄筋の座屈により徐々に復元力が低下し、最大荷重の 80 %以下の荷重低下で载荷を終了した。履歴曲線はエネルギー吸収の大き

い紡錘型で繰返し荷重下に生じる破壊モードは曲げ破壊型であった。

一方、Type 6 ($\delta_y=3.89$ mm, $P_y=35.8$ kN) は Type 5 と同様に $\pm 9.0 \delta_y$ サイクル付近で最大荷重は 68.3 kN となった。軸方向鉄筋の降伏以降、 $\pm 7.5 \delta_y$ サイクル付近から繰返し载荷中に斜めひび割れが発生し、X 字状のひび割れを形成した。履歴挙動は Type 5 と同様に最大荷重以降も荷重は低下した。しかし、かぶりコンクリートの剥離した量は少なく、斜めひび割れが進展した。 $+13.0 \delta_y$ サイクルで斜めひび割れ幅の増大より载荷を終了した。履歴曲線は Type 5 ほど変位は増大していない。繰返し荷重下に生じる破壊モードは曲げ降伏後のせん断破壊型であった。

図-5、図-6、図-7 にそれぞれ $\pm 1.0 \delta_y$ 、 $\pm 2.0 \delta_y$ 、 $\pm 4.0 \delta_y$ 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、 $\pm 1.0 \delta_y$ 、 $\pm 2.0 \delta_y$ 、 $\pm 4.0 \delta_y$ サイクルを抜き出した。これらの図より、 $\pm 4.0 \delta_y$ サイクル付近までは各試験体の履歴曲線に差異は見れない。

(2) 損傷状況の比較

図-8 と図-9 に载荷終了時の損傷状況を示す。Type 5 の損傷は载荷方向の正、負側でかぶりコンクリートが剥離し、鉄筋が見える状態であった (図-8 (a)、(c))。载荷直角方向の正面ではフーチング表面と平行にひび割れが生じていた (図-8 (b))。また、帯鉄筋位置に沿って円形橋脚部を 1 周取り巻くようにひび割れが生じた。フーチング表面から高さ約 130 mm、幅 150 mm の広範囲でかぶりコンクリートは 3 本の座屈した鉄筋に押し出され剥離した。

Type 6 の損傷は载荷方向の正、負側ではかぶりコンクリートの剥離は少なく、軸方向鉄筋位置に沿ったひび割れを確認した (図-9 (a)、(c))。载荷直角方向の正面では X 字状のひび割れを確認した (図-9 (b))。また、Type 5 と同様に帯鉄筋位置に沿って円形橋脚部を 1 周取り巻くようにひび割れが生じていたが、载荷方向の負側 (図-9 (c)) では $\pm 9.0 \delta_y$ サイクル付近の最大荷重時から帯鉄筋位置とは異なる位置でひび割れが生じた。このひび割れが最大荷重以降に斜めひび割れとして進展した。Type 6 は鉄筋あきが Type 5 より大きいために軸方向鉄筋によるかぶりコンクリートの損傷が少なく、斜めひび割れ発生につながったと考える。

図-10 にかぶりコンクリートの剥離状況を示

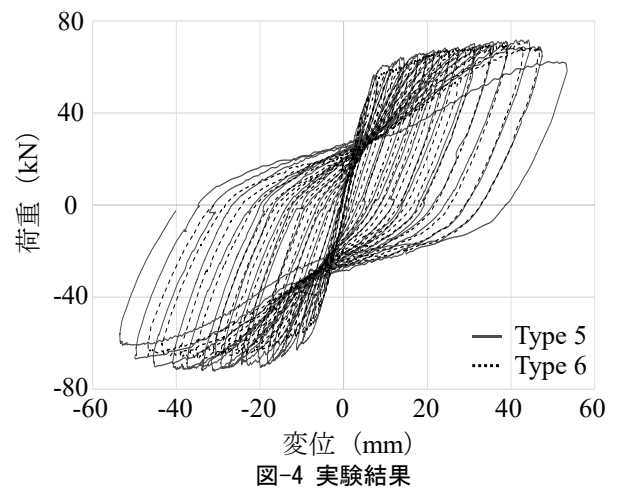


図-4 実験結果

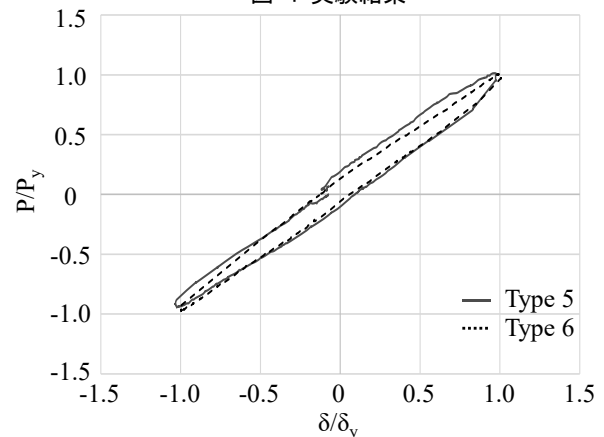


図-5 $\pm 1.0 \delta_y$ サイクル

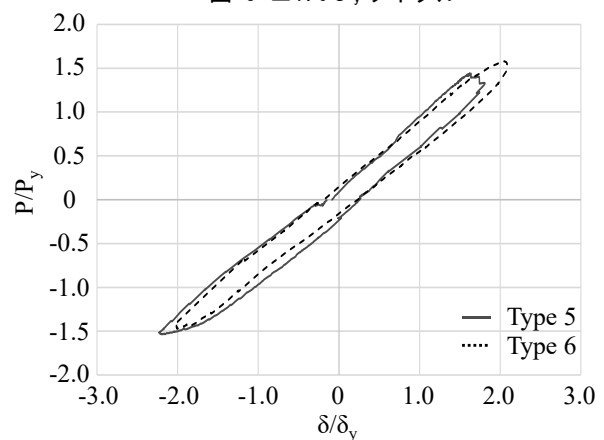


図-6 $\pm 2.0 \delta_y$ サイクル

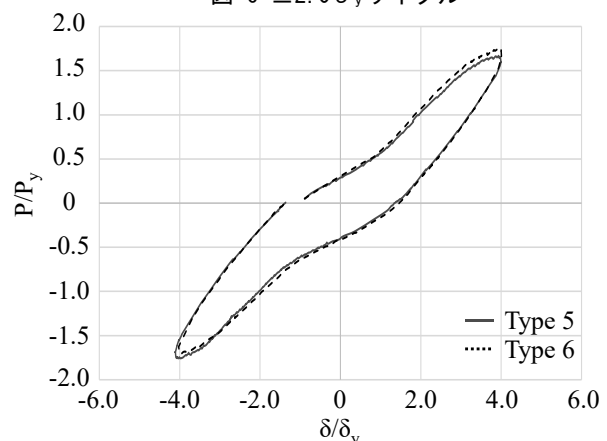


図-7 $\pm 4.0 \delta_y$ サイクル



(a) 正側



(b) 正面



(c) 負側

図-8 Type 5 の損傷状況



(a) 正側

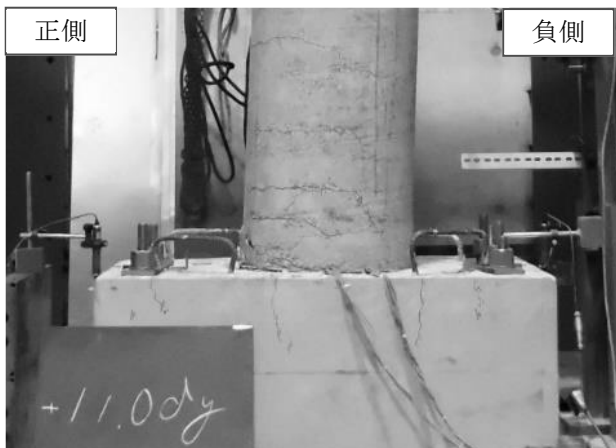


(b) 正面

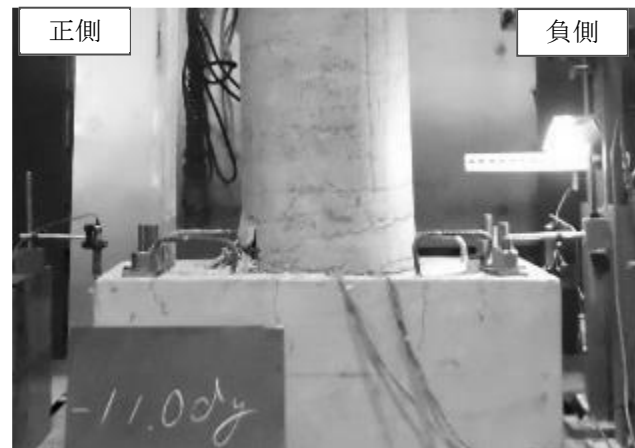


(c) 負側

図-9 Type 6 の損傷状況



(a) $+11.0\delta_y$



(b) $-11.0\delta_y$



(c) $+12.0\delta_y$



(d) $-12.0\delta_y$

図-10 Type 5 のかぶりコンクリートの剥離状況

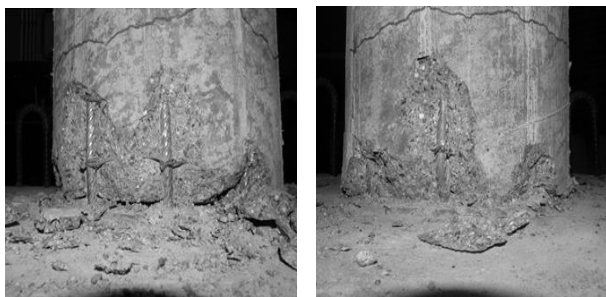


図-11 既往の1/10縮小試験体の損傷状況

す。Type 5 の $\pm 11.0 \delta_y$, $\pm 12.0 \delta_y$ サイクル時に正側も負側もかぶりコンクリートの剥離を確認した。 $+11.0 \delta_y$ では、正側のかぶりコンクリートは引張の状態であり（図-10 (a) ）、 $-11.0 \delta_y$ の正側ではかぶりコンクリートが押し出されるように剥離した（図-10 (b) ）。 $+12.0 \delta_y$ では、負側のかぶりコンクリートは押し出され（図-10 (c) ）、 $-12.0 \delta_y$ で負側でも完全にかぶりコンクリートが剥離した（図-10 (d) ）。

図-11 に著者らの既往の相似則に従っていない太径の軸方向鉄筋（D6 異形鉄筋）にて鉄筋比を合わせて製作した1/10縮小試験体の損傷状況を示す。この試験体は鉄筋あきが大きく、最大耐力が大きい履歴挙動を示し、軸方向鉄筋位置に沿ってかぶりコンクリートが剥離する損傷形態であった。このかぶりコンクリートの剥離の状況は、Type 6 の損傷状況に良く似ていることがわかった。以上より、縮小試験体において相似則に従わない太径の軸方向鉄筋を使用した試験体では、鉄筋あきが大きくなることにより、軸方向鉄筋位置に沿ってかぶりコンクリートが剥離する損傷形態となるため、かぶりコンクリートが多く残存するために、荷重低下が抑制されと考えられる。

(3) 履歴吸収エネルギーの比較

図-12 に最大荷重以降の履歴曲線を示す。Type 5 は最大荷重以降では徐々に荷重低下し、 $\pm 12.0 \delta_y$ サイクルではかぶりコンクリートの剥離に伴い、急な荷重低下を確認できた。一方、Type 6 は最大荷重以降では徐々に荷重低下したが、斜めひび割れ幅の増大より実験を終了したため、Type 5 のような急な荷重低下を確認できなかった。また、履歴ループの面積はType 5 より小さい。

図-13 に履歴吸収エネルギーの比較を示す。最大荷重以降の履歴曲線の各サイクル（図-12）ごとの履歴ループの面積を履歴吸収エネルギーとして式(1)により算出した⁵⁾。

$$W = \sum_i \frac{1}{2} (P_{i+1} + P_i) (\delta_{i+1} - \delta_i) \quad (1)$$

ここで、 W は履歴吸収エネルギー（kNmm）、 P_i は i 番目のデータ計測時の水平力（kN）、 δ_i は i 番目のデータ計測時の水平変位（mm）を表す。

Type 5 は $\pm 9.0 \delta_y$, $\pm 10.0 \delta_y$, $\pm 11.0 \delta_y$ サイクルではかぶりコンクリートの損傷に伴い、履歴吸収エネルギーは徐々に減少した。 $\pm 12.0 \delta_y$ サイクルではかぶりコンクリートの剥離に伴い、最大変位での履歴吸収エネルギーが $\pm 11.0 \delta_y$ サイクルの履歴吸収エネルギーと同等まで減少した（図-13 (a) ）。

一方、Type 6 では $\pm 9.0 \delta_y$, $\pm 10.0 \delta_y$, $\pm 11.0 \delta_y$, $\pm 12.0 \delta_y$ サイクルで履歴吸収エネルギーは500 kNmm間隔で増大した（図-13 (b) ）。Type 6 は斜めひび割れ発生により載荷終了したが、 $+13.0 \delta_y$ サイクルまでは斜めひび割れ幅の増大による履歴吸収エネルギーへの影響は見られなかった。

以上より、異なる2種類の鉄筋径を用いたことでかぶりコンクリートの損傷の違いが、特に最大耐力以降の履歴吸収エネルギーに影響を及ぼすと考えられる。

4. まとめ

本研究では、縮小試験体における鉄筋あきの影響について、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により検討した。ここでは、縮小試験体の履歴挙動や破壊モード、損傷状況を基に、鉄筋あきの影響について以下の結論を得た。

1. Type 5 の繰返し荷重下に生じる破壊モードは曲げ破壊型であり、広範囲のかぶりコンクリートの剥離を確認した。一方、Type 6 の繰返し荷重下に生じる破壊モードは曲げ降伏後のせん断破壊型であった。かぶりコンクリートの剥離は少なく、繰返し載荷中に斜めひび割れが発生した。
2. 異なる2種類の鉄筋径を用いたことで生じる鉄筋あきの違いがかぶりコンクリートの損傷に影響を与えることを明らかにした。既往の1/10縮小試験体の損傷状況の比較から、Type 6 は鉄筋あきが大きく、軸方向鉄筋位置に沿ってかぶりコンクリートが剥離し、かぶりコンクリートが多く残存したことによりType 5 に見られた広範囲なかぶりコンクリートの剥離による荷重低下を抑制した。
3. 履歴吸収エネルギーの比較より、異なる2種類の鉄筋径を用いたことでかぶりコンクリートの損傷の違いが、特に最大耐力以降の履歴吸収エネルギーに影響を及ぼすと考えられる。

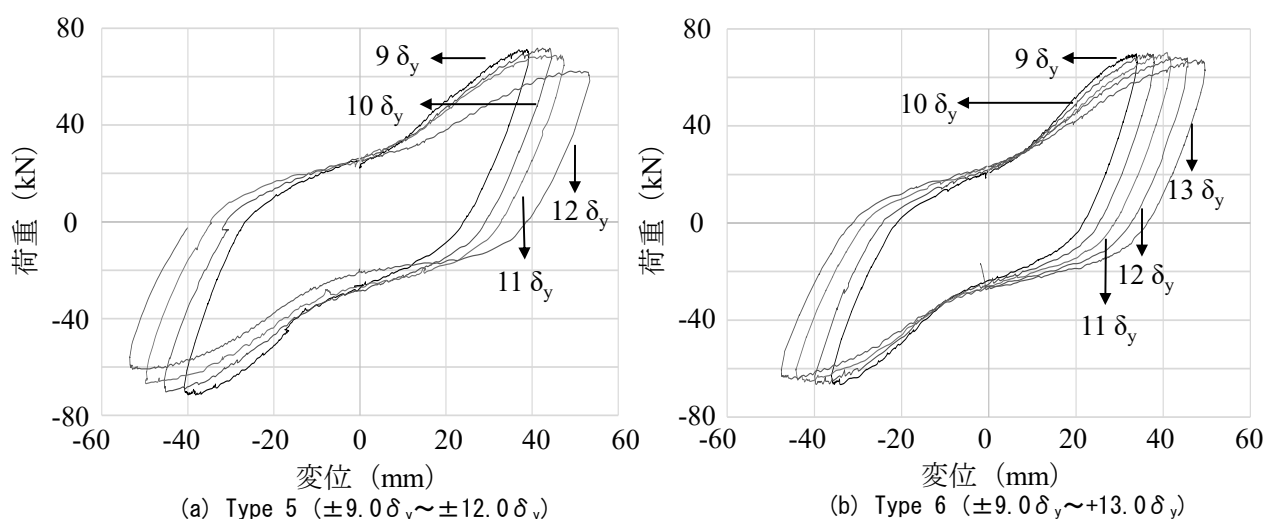


図-12 最大荷重以降の履歴曲線

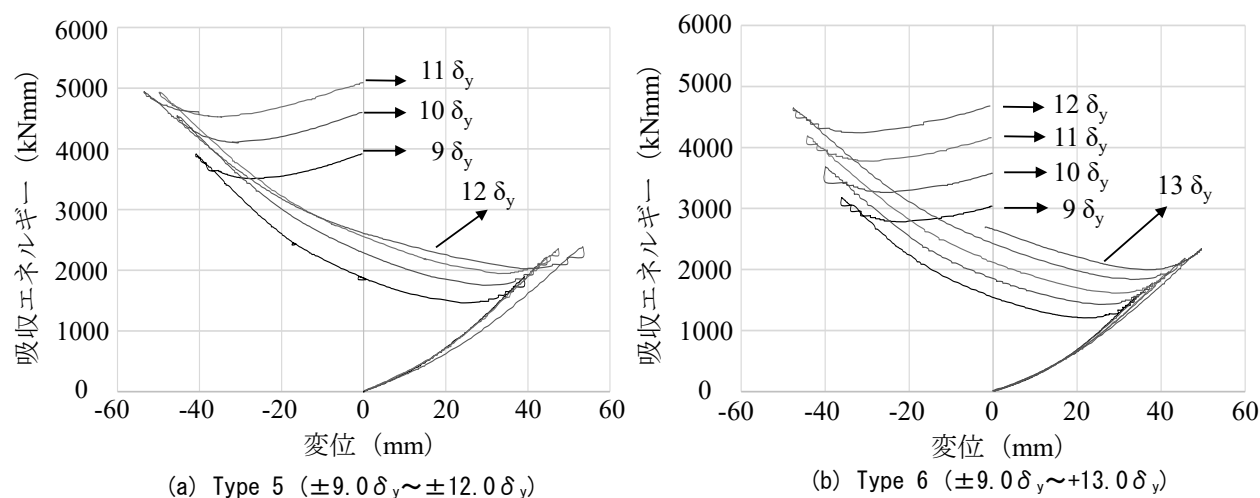


図-13 吸収エネルギーの比較

参考文献

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 加藤貴裕, 国枝稔, 澤田敏幸, 山口貴義: 鋼板巻立て補強したRC柱の腐食による耐力低下の可能性に関する基礎的検討, 土木学会全国大会, 2015.