

# 鉄筋コンクリート橋脚の耐震性能の 向上とその評価

運上茂樹<sup>1</sup>・星隈順一<sup>2</sup>・塩島亮彦<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 土木研究所耐震研究グループ(耐震) 上席研究員 (〒305-8561 茨城県つくば市南原1-6)

<sup>2</sup>正会員 工博 土木研究所耐震研究グループ(耐震) 主任研究員 (〒305-8561 茨城県つくば市南原1-6)

<sup>3</sup>正会員 土木研究所耐震研究グループ(耐震) (〒305-8561 茨城県つくば市南原1-6)

This paper introduces idealized reinforced concrete column structures which will exhibit better seismic performance than conventional reinforced concrete columns. Authors have proposed some options for improving displacement ductility capacity by enlarging plastic hinge length or deepening strain penetration so as to prevent serious damage to column bodies. In terms of reparability, authors also proposed reinforced concrete structures with reducing an amount of longitudinal bar in the plastic hinge region so as to clarify the potential inelastic response range of the steel. Cyclic loading tests were conducted to column models and inelastic behavior of these structures was discussed based on test results.

**Key Words :** seismic performance, reinforced concrete columns, reparability, seismic assessment

## 1. はじめに

橋の耐震設計に関する技術基準によると、レベル2地震動に対する橋の耐震設計においては、橋の重要度が高い場合、「限定された損傷にとどめる」<sup>1)</sup>ことや「地震後に補修を必要とするが、早期に機能が回復できる」<sup>2)</sup>ことが目標とする耐震性能として規定されている。したがって、鉄筋コンクリート橋脚に塑性ヒンジを誘導して行う橋の耐震設計では、鉄筋コンクリート橋脚に塑性変形を許容しつつも、橋脚に生じる損傷度を小さくするとともに、その修復がしやすいように予め配慮しておくことが重要な観点のひとつとなってきた。

このような背景から、著者らはこれまでに橋脚に大きな塑性変形が生じても損傷度を小さく抑えることができる構造や損傷が生じてもそれを修復しやすい構造等の高性能耐震橋脚に関する研究を行ってきた。一般に、鉄筋コンクリート橋脚の塑性変形性能を高めるためには、帯鉄筋等の横拘束筋を増やす方が有効であるが、いたずらに横拘束筋を増やすと、その施工も非常に煩雑となる。そこで、著者らは、軸方向鉄筋の配置等に注目し、これを工夫することで塑性変形性能や地震後の修復性を高めることができる橋脚構造の提案を行ってきた<sup>3),4)</sup>。そして、これまでの研究により、軸方向鉄筋の配置等に工夫を施すことにより、鉄筋コンクリート橋脚

に生じる損傷度を低減できることが正負交番荷重実験により明らかとなりつつある。

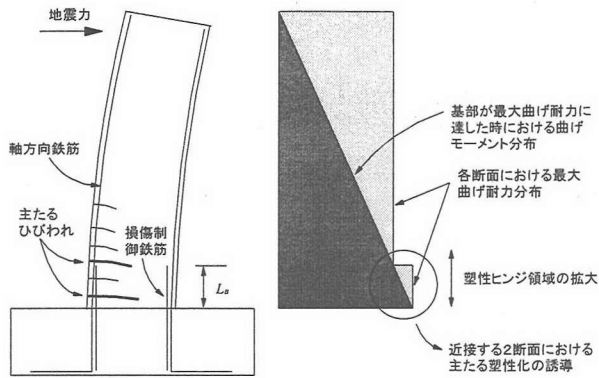
そこで、本文では、これまでの一連の研究において提案してきた橋脚構造を総括し、その破壊メカニズムを踏まえ、従来の橋脚構造との力学的な違いについて定量的な検証を行った。

## 2. 軸方向鉄筋の配置方法により塑性化領域を制御した橋脚構造

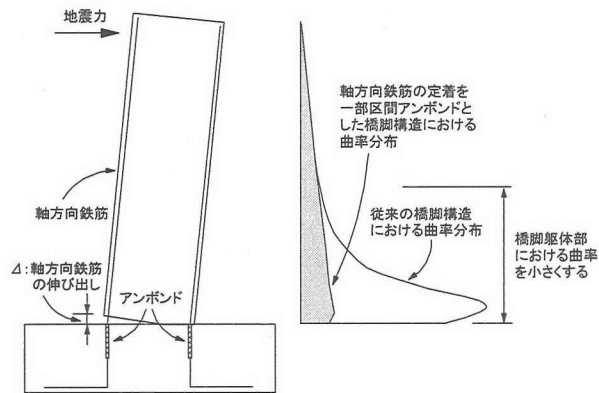
著者らは、これまでの研究により、ひびわれを分散させて塑性ヒンジ領域を従来の構造よりも広くすることができる鉄筋コンクリート橋脚構造、フーチング内部において軸方向鉄筋の定着を一部アンボンドとすることにより橋脚躯体に生じる損傷度を小さくすることができる鉄筋コンクリート橋脚構造、地震後の修復性に予め配慮した橋脚構造を提案している。これらの構造の概要は以下の通りである。

### (1) 損傷制御鉄筋により塑性化領域の拡張を図った橋脚構造

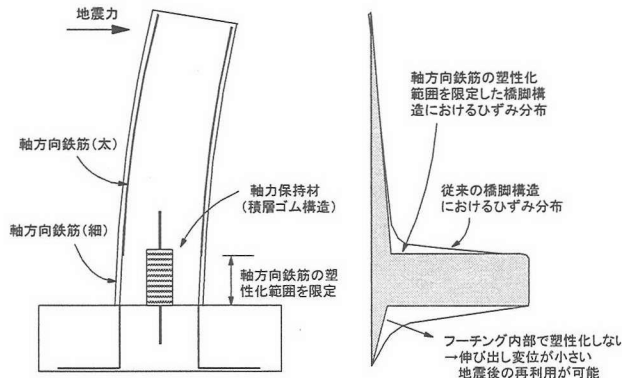
一般に鉄筋コンクリート橋脚の耐震設計では、塑性ヒンジとなる断面において必要となる軸方向鉄筋が橋脚全高にわたって配筋されている。このような配筋においては、例えば単柱式の橋脚の場合、主た



(a) 損傷制御鉄筋による塑性化領域の制御



(b) 軸方向鉄筋の伸び出しによる塑性化領域の制御



(c) 軸方向鉄筋の塑性化範囲を予め限定した構造

図-1 耐震性能の向上を図った橋脚構造

る塑性化断面は基部の一断面だけである。そこで、塑性化領域を広げることが目的として、基部の主たる塑性化断面の近傍にさらに別の主たる塑性化断面が形成されるような構造を考えた。ここで、新たに設ける主たる塑性化断面を基部の近傍としたのは、2断面に塑性化を許容しても地震時の振動モードとしては基部のみに塑性化が生じる場合と基本的に同じとなるようにするためである。単柱式の鉄筋コンクリート橋脚において、基部以外にも主たる塑性化断面を形成させる手法としては、図-1(a)に示すように、軸方向鉄筋の一部を途中定着させ、作用曲げモーメントの分布に応じて、断面の曲げ耐力を変化させる方法がある。この方法は、原理としては従

来から行われている段落しと同じであるが、途中定着させる位置が橋脚中間高さではなく意図的に基部の近傍に設定していること、確実にこの2断面に塑性化が生じるように設計することが大きな特徴である。このような設計の考え方の違いを明確にするために、途中定着する鉄筋をここではあえて損傷制御鉄筋と呼んでいる。

## (2) 軸方向鉄筋のフーチングからの伸び出し変位を大きくした橋脚構造

軸方向鉄筋の伸び出しは、フーチングへの十分な定着長が確保されている軸方向鉄筋が橋脚基部において引張ひずみを受けて伸び出してくる現象のことであり、実大規模の模型による実験でも、この現象が生じることが確認されている<sup>5)</sup>。そこで、橋脚躯体部の断面が負担する曲げ変形成分を小さくし、躯体に生じる損傷を抑制するために、図-1(b)に示すように、軸方向鉄筋のフーチングへの定着を一部区間アンボンドとして伸び出しによる回転変形を生じやすくし、橋脚の曲げ変形を主としてこの基部の回転変形で吸収させる構造を考えた。この構造においては、アンボンドとした区間が深において、確実に軸方向鉄筋を定着させておくことが重要である。

## (3) 地震後の修復性に予め配慮した橋脚構造

兵庫県南部地震後の補修・補強では、軸方向鉄筋が座屈してかぶりコンクリートが剥落するような損傷にまで至った鉄筋コンクリート橋脚に対しては、損傷した部位のみの鉄筋を取替えることにより補修が行われた実績がある<sup>6)</sup>。橋脚を撤去再構築する場合と比較すれば、この補修工法は補修に要する時間とコストの観点からはにおいては有利な手法である。しかしながら、鉄筋を取替える範囲の決定方法が難しいこと、フーチング内の軸方向鉄筋には塑性ひずみが残留していること、補修前後で橋脚の力学的特性が変わる場合があり、それを適切に評価する必要が等しいこと等の課題もある。そこで、これらの課題点を解決するために、図-1(c)に示すような橋脚構造を考案した。

まず、橋脚基部の塑性ヒンジとなる区間で、軸方向鉄筋の直径をその上下の断面よりも取って細くし、軸方向鉄筋の塑性化がその範囲にしか生じないようにした。これは、軸方向鉄筋の取替える必要がある区間を予め明確にしておくためである。このようにすることにより、補修後に塑性化した鉄筋が残留されて再利用されることはなく、またフーチング内の軸方向鉄筋も降伏しないようになっているため、大きく伸び出してこない。したがって、従前と同等の曲げ剛性や固有振動特性を有する橋脚に補修でき

る。

また、補修時において必要となる仮設支保工の規模を最小限に抑える目的から、軸方向鉄筋を切断し、かつ内部コンクリートの一部までに損傷が進展したような状況下においても、上部構造の死荷重反力を橋脚断面で確実に支持する必要がある。そこで、本構造では、塑性ヒンジの中心位置に芯棒をコアに配した積層ゴムから構成される軸力保持材を配置している。これにより、かぶりコンクリートと内部コンクリートの一部をはつり、軸方向鉄筋を切り取った後も、その軸力保持材を介して上部構造の死荷重反力を確実に支持できるようにした。ここで、芯棒は、残留変位をもどす際に、橋脚の高さ方向に対する軸線にずれが生じないようにするために配置している。また、積層ゴムを用いたのは、軸力保持材自身が曲げ抵抗反力を保有していると、残留変位をもどす際に、それが復元力を高める要因になってしまうためであり、できる限り曲げ剛性の小さい構造となるように配慮して使用材料を決めたものである。

### 3. 実験の概要

実験に用いた模型供試体は、基準となる従来タイプの橋脚構造 (No.0供試体)、損傷制御鉄筋により塑性化領域の拡張を図った橋脚構造 (No.1供試体)、軸方向鉄筋のフーチングからの伸び出し変位を大きくした橋脚構造 (No.2供試体)、地震後の修復性に予め配慮した橋脚構造 (No.3供試体) の4体である。いずれの供試体とも、断面は1辺が600mmの正方形で、基部から載荷点までの高さは3010mmである。これらの4体の供試体は、No.0供試体を基準として相互に実験結果の比較を行うために、橋脚の水平耐力が等価となるように配筋条件等を決定している。配筋条件等の詳細については、文献3)および4)に詳述しているので、本文では省略する。

載荷は、降伏変位の整数倍毎に正負交番に行い、各載荷ステップにおける繰返し回数は3回とした。また、実験における降伏変位は、No.0、No.1およびNo.3供試体では11.5mm、フーチング内で軸方向鉄筋の一部範囲をアンボンドとしているNo.2供試体は13.6mmである。No.2供試体のみ降伏変位が大きくなっているのは、弾性変形時にもアンボンドの効果により軸方向鉄筋の伸び出し変形が他の供試体よりも大きくなるためである。なお、全ての供試体に対して、実験時には死荷重反力による軸応力として $1\text{N/mm}^2$ に相当する軸力を与えた。

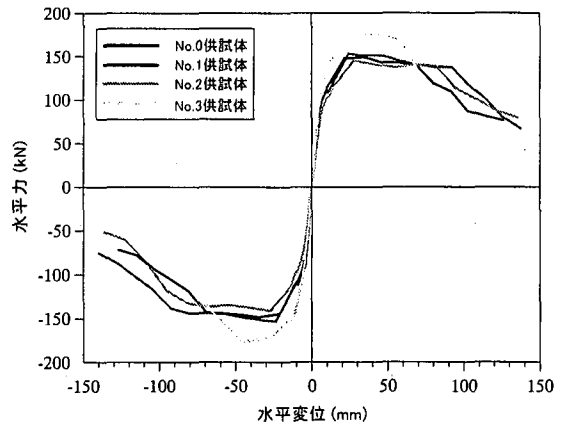


図-2 水平力-水平変位の関係の比較

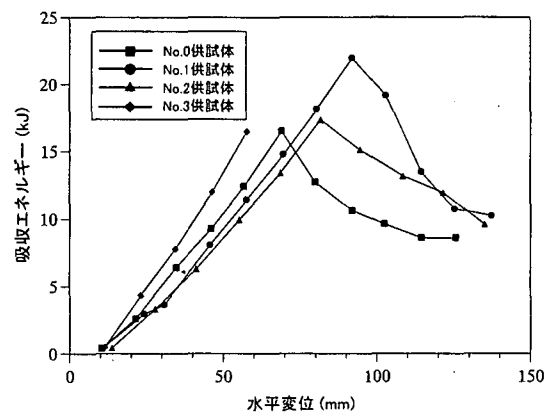
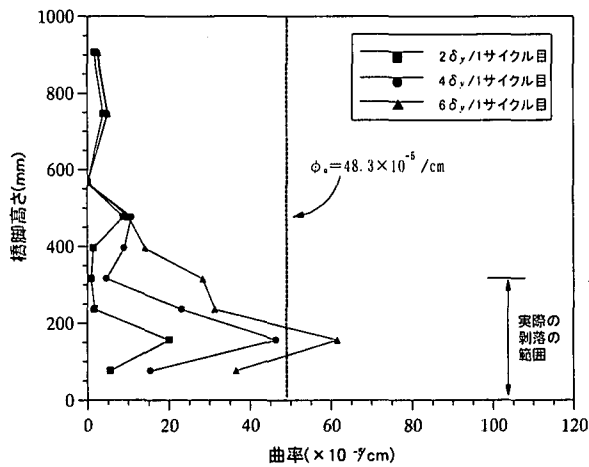


図-3 履歴吸収エネルギーの比較

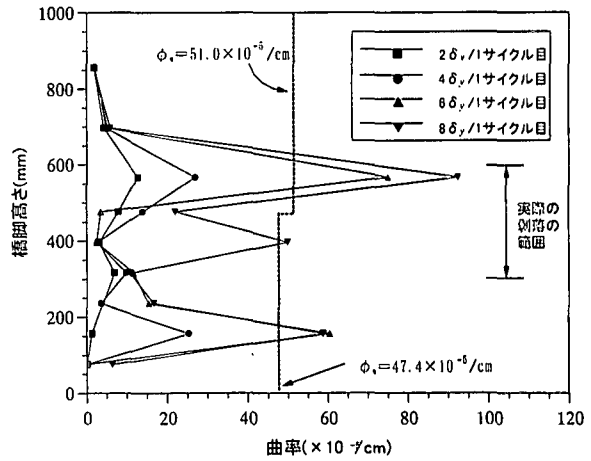
### 4. 水平力-水平変位の関係

実験により得られた各供試体の水平力-水平変位関係の履歴曲線の包絡線を比較した結果を図-2に示す。また、図-3は水平力-水平変位関係の履歴曲線から各載荷ステップにおける履歴吸収エネルギーを計算し、これを各供試体間で比較したものである。ここで、履歴吸収エネルギーは各載荷変位における1サイクル目の履歴曲線を基に算定した。

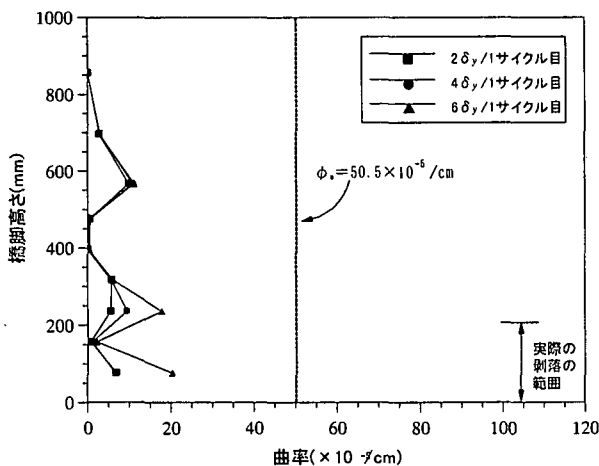
これより、従来タイプの鉄筋コンクリート橋脚構造であるNo.0供試体と比較すると、No.1供試体では水平力が低下し始める時の変位が30~40%程度大きくなっており、塑性変形性能が向上していることがわかる。No.2供試体では、No.0供試体と概ね同様な水平力-水平変位の関係が得られたが、同一の塑性率において橋脚躯体に生じている損傷度を比較すると、No.2供試体の損傷度は顕著に小さく抑えられていた。これは、軸方向鉄筋の一部区間をフーチング内部でアンボンドとしたことによる効果である。この点については、曲率分布による考察においても述べることにする。一方、塑性ヒンジ領域において軸



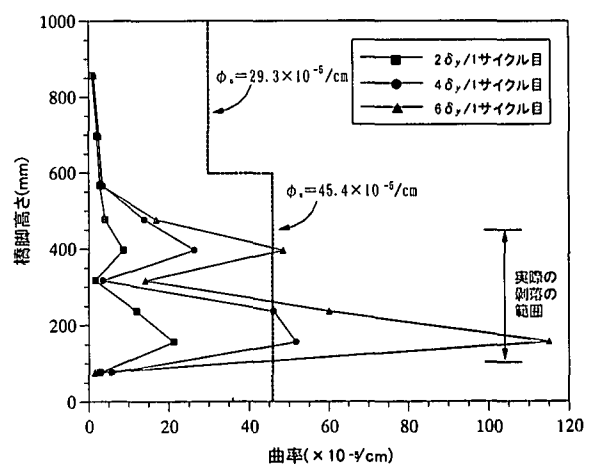
(a)No.0 供試体



(b)No.1 供試体



(c)No.2 供試体



(d)No.3 供試体

図-4 曲率分布と終局曲率の計算値との比較

方向鉄筋径をその上下の断面領域よりも細くし、断面内部に軸力保持材を配置したNo.3供試体では、他の供試体よりも降伏剛性が大きくなった。これはフーチング内部において軸方向鉄筋が降伏しないために、フーチングからの軸方向鉄筋の伸び出し変位が小さくなったためである。また、履歴吸収エネルギーで比較してみても、No.1およびNo.2供試体では1サイクルにおける履歴吸収エネルギーが最大となる水平変位の値がNo.0供試体よりも大きくなっており、耐震性が向上していることがわかる。

## 5. 橋脚躯体に生じる曲率の分布

### (1) 曲率分布

橋脚躯体に生じた損傷の程度やその分布を定量的に検討するために、橋脚基部から約1mの範囲内で曲率分布の計測を行った。ここで、断面に生じた曲率は、圧縮縁と引張縁におけるひずみを変位計により計測し（計測長は80～160mm）、その傾きとして評

価した。図-4は、載荷変位の進展に伴う各供試体の曲率分布の変化を示したものである。なお、曲率は、かぶりコンクリートが大きく剥落した後はコンクリート片が変位計と接触したため計測できていない。

これより、No.0供試体では基部から高さ150mm付近の断面で曲率が最も大きく、それよりも上方の断面では徐々に曲率が小さくなるような分布となっている。これに対して、No.1供試体では、高さ150mm付近の断面とともに高さ500mm付近の断面でも曲率が大きく、2断面で曲率のピークが生じるような分布となっており、損傷制御鉄筋によって塑性化領域が広がったことを示している。かぶりコンクリートの剥離が始まるような損傷が生じる時と比較してみても、No.0供試体よりも塑性曲率分布は広い範囲で生じており、この広がりにより変形性能が向上したものと考えられる。

No.2供試体では、No.0供試体と比較すると、載荷変位が増大しても橋脚断面に生じる曲率は顕著には変化していないことがわかる。また、かぶりコンク

リートの剥離が始まる $6\delta_y$ の荷重時点でも、No.2供試体の曲率は全高にわたって小さく、 $5\delta_y$ の荷重までに橋脚躯体に実際に生じた曲げ変形は小さく、損傷が非常に軽微だったことをよく表している。

No.3供試体では、基部からの高さが100mmの断面から600mmまでの断面において軸方向鉄筋径を細くしているため、その区間のみで大きな曲率を生じている。

## (2) 終局曲率の計算値との比較

図-4中には、道路橋示方書V耐震設計編に示される鉄筋コンクリート橋脚の曲げモーメント-曲率関係の解析手法に基づいて計算した終局曲率の値を併記した。この手法により評価される終局時とは、これまでの多数の実験結果との比較から、軸方向鉄筋が座屈してかぶりコンクリートが剥落し始める程度の損傷が生じる時に概ね相当している<sup>7,8)</sup>。なお、終局曲率の計算値が橋脚高さ方向に変化している供試体があるが、これは軸方向鉄筋量が途中で変化しているためである。

これより、No.2供試体以外の供試体では、断面に生じる曲率が終局曲率を超えた範囲において軸方向鉄筋の座屈に伴うかぶりコンクリートの剥落が生じていることがわかる。曲率の計測値は、計測長の区間内の断面における平均的な値として計測されるため、塑性ヒンジ領域内であっても、大きなひびわれの生じた計測区間とその前後の計測区間で曲率の計測値が大きく違うこともある。そこで、実際に軸方向鉄筋の座屈によるかぶりコンクリートの剥落が生じた範囲内において、そのような損傷が生じた時に計測された曲率を平均化すると、No.0供試体で $39.4 \times 10^{-5}(1/cm)$ 、No.1供試体で $43.8 \times 10^{-5}(1/cm)$ 、No.3供試体で $47.8 \times 10^{-5}(1/cm)$ となる。これは、図中に示した終局曲率の計算値に比較的近似していると言える。

一方、No.2供試体では、橋脚躯体に生じた曲率が終局曲率に達さないうちに軸方向鉄筋の座屈とかぶりコンクリートの剥落が生じたことになる。これは、No.2供試体では軸方向鉄筋をフーチング内部で一部区間をアンボンドとしたことにより、引張力を受けた時に生じる伸び出し変位が従来構造よりも大きくなり、その大きく伸び出した軸方向鉄筋が次に圧縮力を受けた時に座屈し、その座屈によってかぶりコンクリートが剥落したものである。したがって、No.2供試体のような構造においては、No.0供試体のような従来の鉄筋コンクリート橋脚において生じる塑性ヒンジとはその発生メカニズムが大きく異なっている。

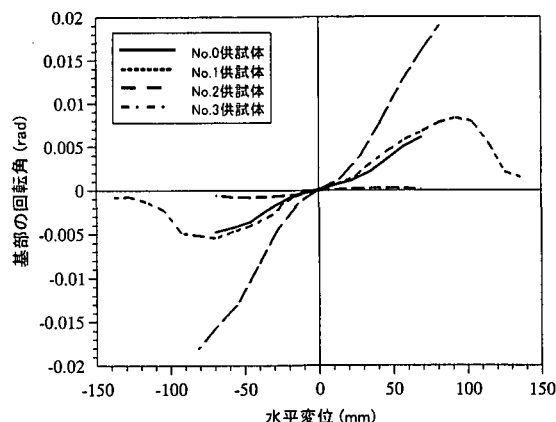


図-5 軸方向鉄筋の伸び出しによる橋脚基部の回転角

## 6. 軸方向鉄筋の伸び出しによる基部の回転

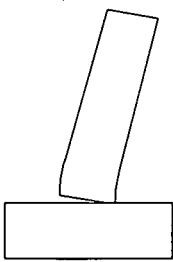
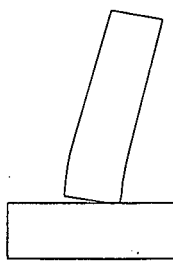
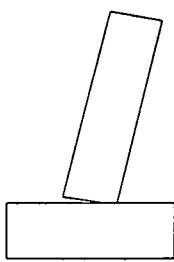
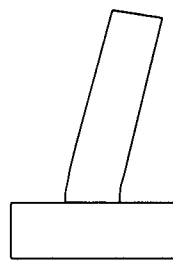
図-5は、軸方向鉄筋のフーチングからの伸び出しに伴う橋脚基部の回転角と荷重点における水平変位の関係を各供試体間で比較して示したものである。ここで、橋脚基部の回転角は、圧縮縁と引張縁において、フーチング上面と基部から高さ45mmの位置の間の相対変形を計測し、その角度として算定した。

これより、No.0とNo.1供試体では軸方向鉄筋の定着条件が同じであるため、回転角と水平変位の関係はほとんど等しい挙動となった。また、これらの供試体においては、荷重点における水平変位に占める伸び出しに伴う基部の回転による水平変位の割合は20~30%であった。また、No.2供試体では、アンボンド処理を施していないNo.0供試体と比較すると、同一の荷重点水平変位に対して、基部に生じる回転角が2.5~3倍程度大きくなっている。これからも、アンボンド効果により軸方向鉄筋の伸び出し変位が大きくなり、基部の回転によって橋脚の曲げ変形が吸収されていることがわかる。一方、塑性ヒンジ領域で軸方向鉄筋径を細くしたNo.3供試体では、フーチング内部において軸方向鉄筋が降伏しないように設計されているため、軸方向鉄筋の伸び出しはほとんど生じていない。

## 7. まとめ

本研究では、橋脚断面に生じる損傷レベルの軽減や損傷の修復性の向上を目的として、塑性化領域の制御が可能な鉄筋コンクリート橋脚構造に着目し、そのアイデアとして、損傷制御鉄筋により塑性化領域を拡張させた構造、軸方向鉄筋のフーチングへの定着を一部区間アンボンドとした構造、地震後の修

表-1 耐震性能の向上を図った橋脚構造とその特性

	No.0供試体	No.1供試体	No.2供試体	No.3供試体
変形モード図				
橋脚躯体に生じる損傷	6 $\delta$ の変形においてかぶりコンクリートの剥落が開始	8 $\delta$ の変形においてかぶりコンクリートの剥落が開始	6 $\delta$ の変形においてかぶりコンクリートの剥落が開始	5 $\delta$ の変形においてかぶりコンクリートの剥落が開始
橋脚構造と損傷の特徴	損傷は橋脚基部からおおよそ高さ300mmの範囲に生じる	従来タイプの橋脚よりも広い範囲に損傷を分散させることができる 塑性変形性能が最も向上する	終局時に相当する6 $\delta$ の変形の前までは橋脚躯体に生じる損傷度を小さく抑えることができる 伸び出し変位が大きくなる	軸方向鉄筋が塑性化する範囲を限定できる フーチング内部の軸方向鉄筋が塑性化しない(伸び出し変位が小さい)

復性に予め配慮した橋脚構造を考案した。そして、これらの構造の破壊過程や塑性挙動について正負交番載荷実験により検討した結果、その構造的特徴を表-1のようにまとめた。

謝辞：本研究は、科学技術振興調整費「構造物の破壊過程解明に基づく生活基盤の地震防災性向上に関する研究」の一環として実施したものである。また、(社)土木学会技術推進機構に設置された「構造物の破壊過程解明に基づく生活基盤の地震防災性向上に関する研究」第3分科会第4班において貴重な意見を賜った。ここに、関係各位に謝意を表する。

#### 参考文献

- 1)(社)日本道路協会：道路橋示方書V耐震設計編、1996年12月
- 2)鉄道構造物等設計標準・同解説、耐震設計編、1999年10月
- 3)星隈順一、運上茂樹、長屋和宏：鉄筋コンクリート橋脚の耐震性能の向上策に関する実験的研究、第1回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム、pp.135-140、2000年3月

- 4) 運上茂樹、星隈順一、長屋和宏、塩島亮彦：曲げ損傷した鉄筋コンクリート橋脚の修復性能の向上策に関する実験的研究、第2回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム、pp.183-188、2001年3月
- 5) 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年2月
- 6)(社)日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の震災復旧・耐震補強技術と事例
- 7) 武村浩志、川島一彦、運上茂樹、星隈順一：繰返し載荷実験に基づくRC橋脚の終局変位の評価、構造工学論文集、Vol.43A、pp.869-880、1997年3月
- 8) 星隈順一、運上茂樹、川島一彦、長屋和宏：載荷繰返し特性と塑性曲率分布に着目した曲げ破壊型鉄筋コンクリート橋脚の塑性変形性能とその評価法、構造工学論文集、Vol.44A、pp.877-888、1998年3月