

# 付着制御型UBRC構造に関する実験的検討

家村浩和<sup>1</sup>・高橋良和<sup>2</sup>・曾我部直樹<sup>3</sup>・葭川修司<sup>4</sup>

<sup>1</sup>工博 京都大学教授 工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

<sup>2</sup>工博 京都大学助手 工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

<sup>3</sup>工修 京都大学大学院 工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

<sup>4</sup>京都大学 工学部地球工学科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

In UBRC piers, the additional high strength bars are installed to add and control the post-yield stiffness of the skeleton curve. The original concept of UBRC piers is to use perfectly unbonded bars. However it is desirable to use the round conventional bars without unbonding treatment in terms of the construction works and cost. In this study, parameters of bond characteristics are assessed. Also, the cyclic loading is carried out in order to clarify the influence of bond range of bars. As the results, it is found that it is possible to realize the UBRC structure with stable post-yield stiffness and high yield strength by the conventional round bars, if the bond splitting can be controlled.

**Key Words :** UBRC pier, high yielding strength, stable post-yield stiffness, bond range of bars

## 1. はじめに

著者らは、二段階耐震設計法<sup>1)2)</sup>で要求される性能を合理的に実現することができる橋脚構造としてUBRC橋脚構造を提案している<sup>3)4)</sup>。この橋脚では橋脚断面内に配置された芯材が、橋脚が大変形を起こした時でも弾性挙動を示すことにより、その復元力特性に安定した正の二次剛性を付与することができる。RC橋脚の復元力特性における二次剛性の発現は、地震時における最大応答変位、残留変位の低減に有効であることが既往の研究<sup>5)</sup>により明らかとなっている。また、RC橋脚に安定した二次剛性を付与することは、土木学会<sup>1)</sup>で提言されている二段階耐震設計法を合理的に実現する上でも有利であることを確認している<sup>6)</sup>。

本橋脚構造では、大変形領域における芯材の弾性挙動を期待するため、芯材にはそのひずみを平滑化するためのアンボンド処理が施される。しかし、芯材に対するアンボンド処理は、橋脚建設時におけるコストの増加に直接繋がる。また、芯材とコンクリートとの間に空隙が生ずるようなアンボンド処理を行った場合、芯材の腐食についても考える必要がある。ただ、丸鋼であれば、コンクリートとの付着力が異型鉄筋と異なり化学的な接着力と摩擦力しか存在しないため、橋脚の大変形領域において芯材の付着が切れアンボンド芯材となり、安定した二次剛性を橋脚の構造特性に付与で

きることに既往の研究<sup>7)</sup>において明らかとなっている。また、小変形領域では、芯材とコンクリートが付着しているために、アンボンド芯材を用いる場合に比べ、耐力が大きくなるという特徴も確認されている<sup>8)9)</sup>。つまり、付着剥離芯材を用いたUBRC橋脚では、芯材の付着が切れない領域ではRC構造として、付着が切れた後はUBRC構造として振舞うことにより、高い降伏耐力と安定した二次剛性が期待できる。

そこで、本研究では、UBRC構造における芯材へのアンボンド処理の省略、省力化、及び付着制御型UBRC構造の開発を目的としてまず、芯材の付着特性に影響を与える要因について整理した。また、その要因の一つである芯材の付着長さが橋脚の構造特性に与える影響を検討するために、実験的検討を行った。

## 2. 付着剥離芯材を用いたUBRC橋脚構造

### (1) 芯材の付着特性とUBRC橋脚の構造特性

UBRC橋脚構造(図-1)では、芯材の安定した弾性挙動を実現するために、芯材のひずみを平滑化するためにアンボンド処理が実施される<sup>4)</sup>(図-2)。しかし、芯材として高強度丸鋼を用いた場合、その表面が異型鉄筋と異なり滑らかであるために、大変形領域ではコンクリートとの付着が切れ、アンボンド芯材のようにふるまうと考えられる。つまり、橋脚の変形に伴って

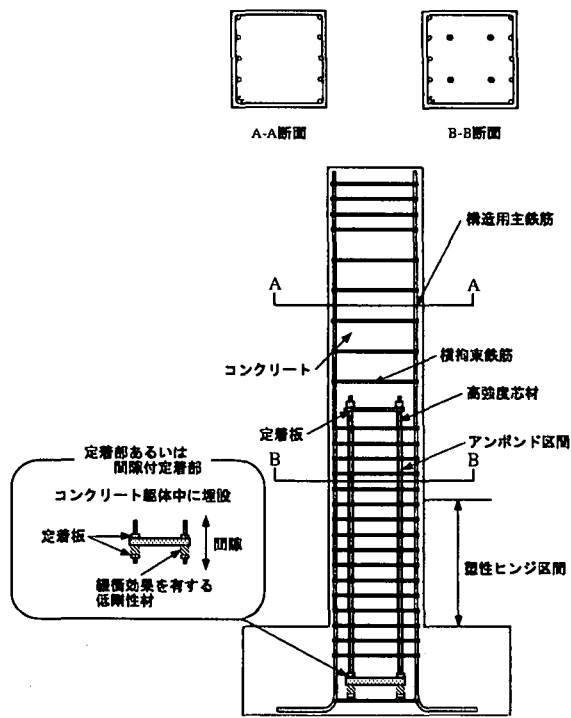


図-1 UBRC 橋脚構造

付着が切れる付着剥離芯材としての適用が期待できる。

付着剥離高強度芯材を配置した RC 橋脚では、芯材の付着状態によりその構造特性が変化する。橋脚の変形が小さい時、すなわち、芯材に大きなひずみが発生しない領域では、コンクリートとの付着強度により、芯材はコンクリートと共に挙動する。また、橋脚の変形が進むことによりコンクリートとの付着が切れ、アンボンド効果により芯材のひずみは平滑化され弾性挙動を示すことにより、二次剛性が発現する。つまり、付着剥離芯材を配置した RC 橋脚は、橋脚の変形に伴って RC 構造から UBRC 構造に変化する特性を有しているといえ、その変化は芯材の付着特性に依存している。

## (2) 芯材の付着特性に影響を与える要因

芯材の付着特性は、芯材の付着剥離区間とアンボンド区間、芯材とコンクリートとの付着強度、そして、芯材とコンクリートとの付着面積に依存している。

### a) 芯材の付着剥離区間とアンボンド区間

一本の芯材に対し、橋脚基部の部分を付着剥離区間とし、上部の芯材に対しアンボンド処理を施した場合、その部分の芯材のひずみは平滑化されることになる(図-3)。つまり、橋脚の変形に伴い付着が剥離する区間(以下、付着剥離区間と称する)における芯材の付着が切れた後のひずみの平滑化が、上部にアンボンド区間を設けることにより円滑になることが考えられ、芯材の付着剥離過程に大きな影響を及ぼす。

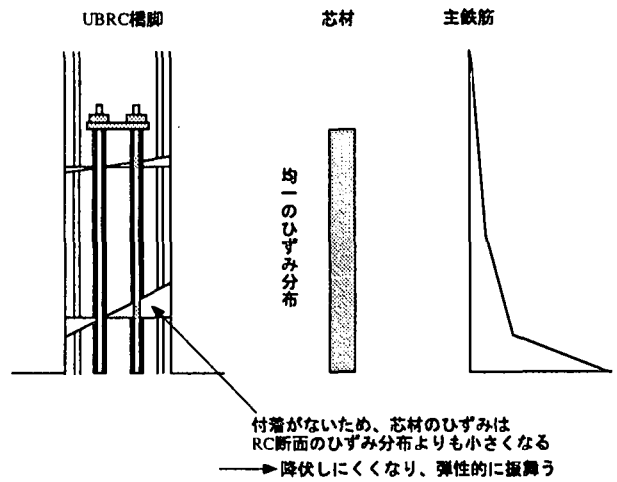


図-2 芯材のアンボンド効果

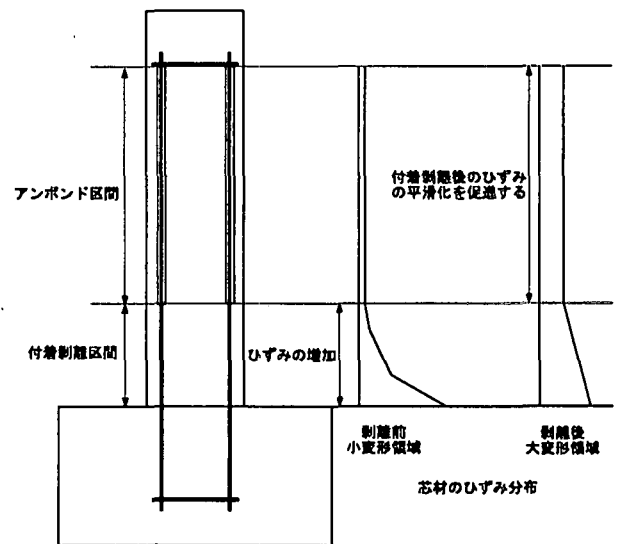


図-3 付着剥離区間とアンボンド区間を有する芯材

特に、橋脚基部における芯材を付着剥離芯材とすることにより、小変形領域において基部の芯材がコンクリートと共に挙動する、すなわち RC 構造として機能することができる。また、上部をアンボンド区間とすることにより付着剥離後のひずみの平滑化が促進され、最大耐力経験時までの芯材の弾性挙動の実現、安定した二次剛性の発現を期待することができる。

### b) 芯材とコンクリートとの付着強度

芯材とコンクリートとの付着強度については、芯材が丸鋼であればその表面が滑らかであるため、付着力は化学的な接着力と摩擦力のみにより確保される。そのため、節による付着力が存在する異型鉄筋に比べ、容易に付着が切れること、また、付着剥離後の摩擦力も小さくなることが考えられる。丸鋼の付着強度は、Prince

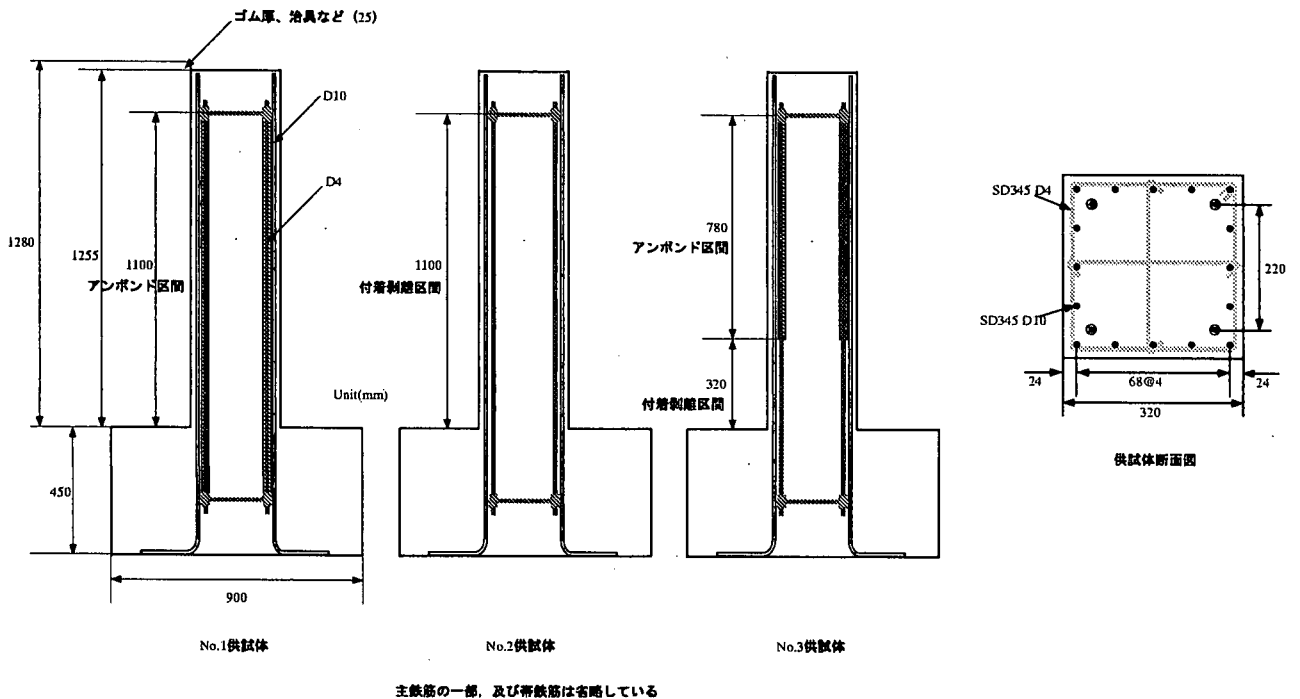


図-4 実験用 UBRC 橋脚模型

### 3. 実験概要

らが行った付着強度試験結果<sup>10)</sup>に代表されるようにコンクリートとの圧縮強度に依存している。つまり、芯材と直接接触する材料の強度を変化させることで、付着強度を変化させることができる。

#### c) 芯材とコンクリートとの付着面積

芯材とコンクリートとの付着面積が大きいほど、最大付着力  $P_b$  は大きくなる。芯材とコンクリートとの付着面積は、芯材の径  $r$  に依存している。芯材に作用する力  $P$  は、作用している応力  $\sigma$  に断面積を乗じたものとなる。また、芯材の最大付着力  $P_b$  は、付着強度  $\sigma_b$  に付着区間  $L$  の芯材の表面積を乗じたものとなり、 $P$  が  $P_b$  より大きくなったとき、すなわち、次式の値が1を超えたときに付着が切れる。

$$\frac{P}{P_b} = \frac{\sigma r}{8\sigma_b L} \begin{cases} > 1 & (\text{付着が切れる}) \\ \leq 1 & (\text{付着が切れない}) \end{cases} \quad (1)$$

(1) 式より、 $\sigma$ 、 $\sigma_b$ 、 $L$  が同一条件である場合、芯材の径が小さいほど付着が切れにくいことが分かる。つまり、同じ配置面積でも大きな径の芯材を少数配置する場合と、小さな径の芯材を多数配置する場合では、付着の剥離過程に相違が現われる。そのため、UBRC 橋脚において芯材の付着剥離過程を考慮する場合、芯材の径が重要な設計パラメータとなる。

本研究では、前述した芯材の付着特性に影響を与えるパラメータのうち、芯材の付着剥離区間とアンボンド区間が UBRC 橋脚の構造特性に与える影響を明らかにすることを目的として実験的検討を行った。

実験用供試体は、道路橋を想定して設計された RC 橋脚<sup>11)</sup>を相似率 7.5 で縮小したものに芯材 ( $\phi 9.2$  C 種 PC 鋼棒) を配置した UBRC 供試体である。No.1 供試体は、芯材の全区間にアンボンド処理を施したアンボンド芯材を配置している。No.2 供試体は、逆に、一切アンボンド処理を施していない付着剥離芯材を配置している。また、No.3 供試体では、基部から 1D 区間は付着剥離区間としてアンボンド処理を施さず、それより上部の芯材に対してはアンボンド処理を施している付着剥離区間とアンボンド区間を有する芯材を配置している (図-4)。

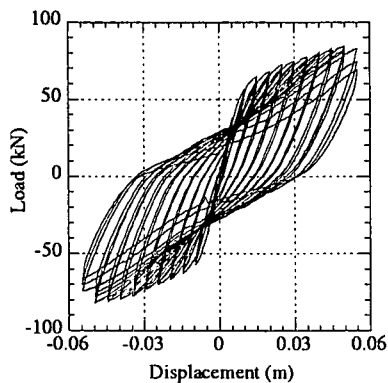
実験手法は、軸力 88.4kN 載荷下における正負交番載荷実験である。載荷波形は、単位振幅 5.0mm で同一振幅における繰り返し回数 3 回の振幅漸増波形である。

### 4. 実験結果

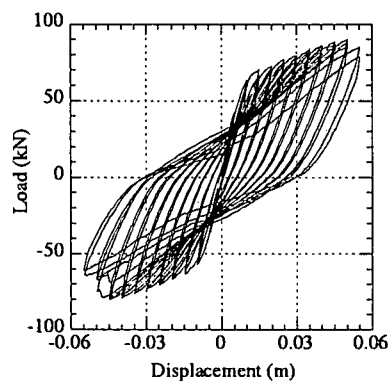
#### (1) P- $\Delta$ 履歴曲線

図-5 に各供試体の P- $\Delta$  履歴曲線、また、図-6 に骨格曲線の比較を示す。

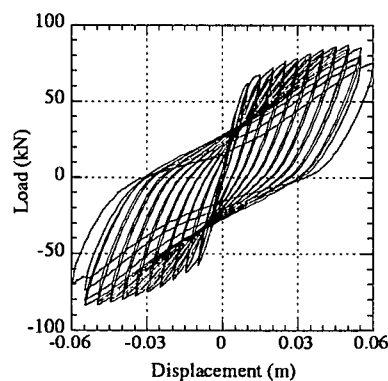
まず、全ての供試体において UBRC 橋脚の特徴であ



No.1供試体



No.2供試体



No.3供試体

図-5 P-Δ履歴曲線

る安定した二次剛性が確認できる。つまり、付着条件の相違に関わらず、UBRC 橋脚の特徴である二次剛性の発現が実現できていることがわかる。次に、骨格曲線の比較では、小変形領域の耐力に相違が確認できる。す

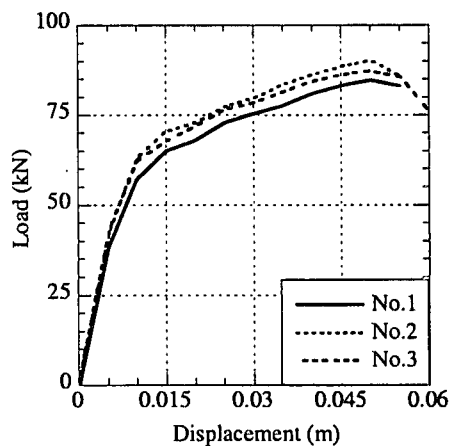


図-6 骨格曲線の比較

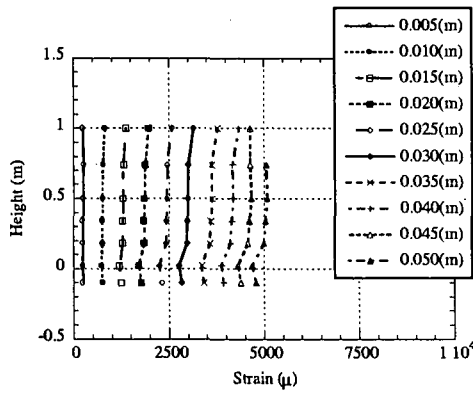
なわち、荷重点変位 0.01m 時の耐力では、付着剥離芯材を配置した No.2 供試体が最も大きく (約 63kN)、アンボンド芯材を用いた No.1 供試体が最も小さい値 (約 57kN) を示している。また、橋脚基部の芯材が付着剥離芯材である No.3 供試体は、両者の中間的な性状を示している。

## (2) 芯材ひずみ分布

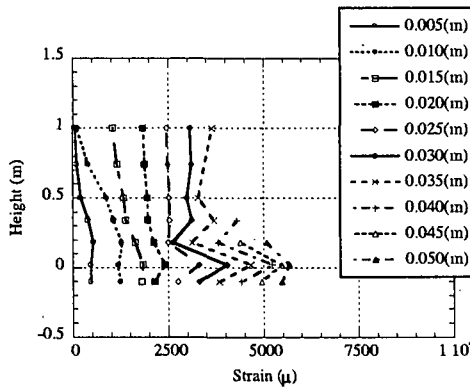
図-7 に各供試体の芯材ひずみ分布、また、図-8 に荷重点変位が 0.01m と 0.015m, 0.03m である時のひずみ分布の比較を示す。なお、同図においては、ひずみゲージが剥がれるなどの原因によって観測不可能となったデータについては省略している。

まず、図-8 における軸方向鉄筋と芯材のひずみ分布を比較してみると、各供試体とも芯材の最大ひずみが低減されており、全ての供試体において芯材ひずみの平滑化効果が確認できる。

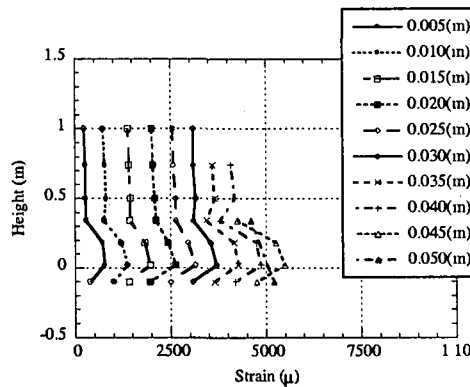
No.1 供試体の芯材では、アンボンド処理によりどの変形状態においてもひずみが橋脚高さ方向に平滑化され、一定となっている。それに対し、No.2 供試体のひずみは、荷重点変位 0.01m までは、橋脚基部のひずみのみが増加し、その分布形状は逆三角形となっている。ただ、荷重点変位が 0.015m になった時点で、橋脚上部のひずみの増加が始まり、0.02m 時にはほぼ橋脚高さ方向に一定となっている。これは、橋脚の変形に伴って芯材の付着が切れたことに起因する。ただし、橋脚の変形が大きくなっている領域では、橋脚基部における芯材ひずみの平滑化にばらつきが発生している。これは、橋脚基部の曲率が大きくなったことにより、芯材表面に発生するコンクリートとの摩擦力が大きくなったた



No.1供試体

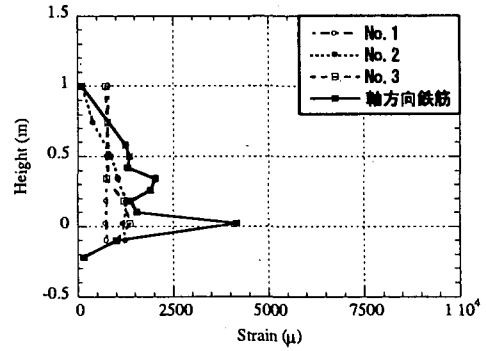


No.2供試体

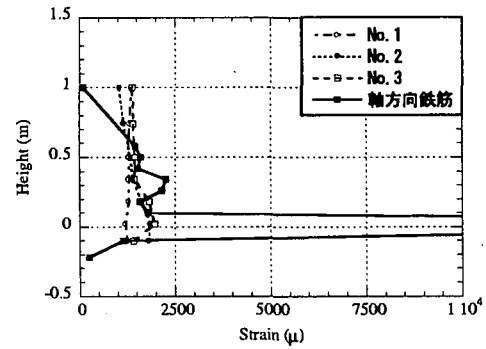


No.3供試体

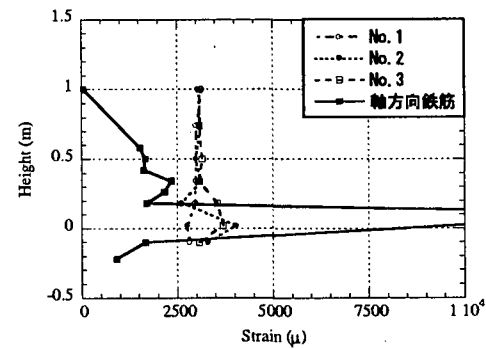
図-7 各供試体の芯材ひずみ分布



載荷点変位0.01m



載荷点変位0.015m



載荷点変位0.03m

図-8 芯材ひずみ分布の比較

めであると考えられる。一方、No.3 供試体では、載荷点変位が 0.01m 時には、橋脚基部の芯材ひずみは No.2 供試体に酷似している。そのため、同変形状態における耐力も、No.2 供試体と同様な大きさである。ただし、付着が切れる 0.015m 時には、No.1 供試体と同様に芯材ひずみが橋脚高さ方向に平滑化されている。これは、芯材上部をアンボンド芯材としたことにより、橋脚基部の付着が切れた後のひずみの平滑化が、No.2 供試体に比べ促進されたためである。また、芯材の降伏、す

なわち、芯材の最大ひずみが  $5000\mu$  を超える変形状態は、No.1 供試体が 0.05m、No.2 供試体が 0.04m、No.3 供試体が 0.045m であり、アンボンド区間が長いほど大変形領域における芯材の弾性挙動が実現されている。

以上より、橋脚基部が付着剥離区間であれば、小変形領域の耐力を増加させる上で有利であること、芯材上部がアンボンド区間であることにより、付着剥離後のひずみの平滑化が促進されることがわかった。また、アンボンド処理を実施しなくても、丸鋼であれば橋脚

の変形に伴い、コンクリートとの付着が切れるためにひずみの平滑化が期待できる。ただし、橋脚基部の曲率によっては、芯材ひずみの平滑化にばらつきが現れる可能性があるため、アンボンド処理を省略する場合には、芯材の付着剥離、及び、最大耐力経験時における弾性挙動を保証する必要があることが明らかとなった。

## 5. まとめ

本研究では、UBRC 橋脚における芯材の付着特性、特に、芯材の付着剥離区間やアンボンド区間がその構造特性に与える影響を明らかにすることを目的として、正負交番載荷実験に基づく検討を行った。その結果、以下のようなことが明らかとなった。

- 高強度丸鋼を付着剥離芯材として用いれば、橋脚の変形に伴い芯材の付着が切れ、大変形領域においてそのひずみはある程度平滑化される。しかし、橋脚基部の曲率が大きくなる領域では、芯材とコンクリートとの摩擦力の増加により、その平滑化にばらつきが現れる。
- 橋脚基部を付着剥離区間、上部をアンボンド区間とすることにより、小変形領域における耐力の増加、付着剥離後の芯材ひずみの平滑化を促進することができる。
- UBRC 橋脚において芯材のアンボンド処理を省略・省力化する場合、芯材の付着剥離、及び最大耐力経験時における芯材の弾性挙動を保証する必要がある。
- 橋脚基部の芯材の付着特性により小変形領域の UBRC 橋脚の耐力が決定されるという性質を利用することにより、付着制御型 UBRC 橋脚を開発することができる。例えば、基部における芯材のみをシース管等で被覆し、芯材との付着強度が大きくなるような材料を充填することにより、小変形領域における UBRC 橋脚の耐力を効率よく上げることができる。
- 逆に、大変形領域における芯材ひずみの平滑化のばらつきが見られた橋脚基部の芯材に対しアンボンド処理を行うことは、大変形領域の弾性挙動を実現する上で有意であることが考えられる。つまり、付着剥離前は RC 構造として高い耐力を有し、付着剥離後は UBRC 構造として安定した二次剛性を有する橋脚を、基部における芯材の付着特性のみを制御することにより実現することができる。
- UBRC 橋脚におけるアンボンド処理の省略、省力化は橋脚建設における経済性、施工性、また維持・管理においても有利である。特に、芯材の配置長

さが長くなる高橋脚では、アンボンド処理の省略・省力化は UBRC 構造を適用する上で重要な問題となる。

UBRC 橋脚において芯材の付着特性を考慮することは、高い降伏耐力と安定した二次剛性を有する橋脚を実現する上で有意である。しかし、芯材の付着強度や付着剥離などは、材料によるばらつきが大きく、設計において考慮するためには、精度良い芯材の付着強度算定式の提案が必要である。また、建設されてから時間が経過した UBRC 橋脚の付着剥離芯材でも、レベル 2 地震発生時に芯材の付着が切れることを保証する必要がある。それらの点については今後の課題であると考ええる。

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。(社)土木学会技術推進機構に設置された第 3 分科会委員各位から貴重な意見を頂いた。ここに謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 土木学会：土木構造物の耐震基準等に関する「第二次提言」, 土木学会誌, Vol.81, No.2, 1996.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 平成 8 年.
- 3) 家村浩和, 高橋良和, 曾我部直樹, 鶴飼正裕：アンボンド高強度芯材による高耐震性能 RC 橋脚の開発, 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論文集, pp.157-162, 2000.
- 4) 家村浩和, 高橋良和, 曾我部直樹：アンボンド芯材を活用した高耐震性 RC 橋脚の開発, 土木学会論文集, Vol.I-60, pp157-162, 2002 年 7 月
- 5) 家村浩和, 高橋良和, 曾我部直樹：アンボンド高強度芯材入り RC 橋脚のハイブリッド地震応答実験, 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論文集, pp.157-162, 2001.
- 6) 家村浩和, 高橋良和, 曾我部直樹, 鶴飼正裕：UBRC 構造を用いた小規模断面橋脚の二段階耐震性能評価, 地震工学シンポジウム, No.271, 2002.
- 7) 永尾直也, 家村浩和, 高橋良和：高耐震化芯材の付着特性が RC 橋脚の弾塑性挙動に及ぼす影響, 土木学会年次学術講演会, V-363, 2001.
- 8) 家村浩和, 高橋良和, 曾我部直樹, 永尾直也：芯材の付着特性が UBRC 橋脚の構造特性に及ぼす影響, 第 3 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論文集, pp.201-206, 2002.
- 9) H.Iemura, N.Sogabe, Y.Takahashi：INFLUENCE OF BOND CHARACTERISTICS OF BARS ON UBRC BRIDGE PIERS, The Fourteenth KKN Symposium on Civil Engineering, pp.317-322, 2001.
- 10) 村田二郎：コンクリート技術 100 講, 山海堂
- 11) 星隈順一, 運上茂樹, 長屋和宏：実大鉄筋コンクリート橋脚に対する正負交番載荷実験, 第 3 回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.189-194, 1999.