

# 芯材の付着特性が UBRC橋脚の構造特性に及ぼす影響

家村浩和<sup>1</sup>・高橋良和<sup>2</sup>・曾我部直樹<sup>3</sup>・永尾直也<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>工修 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 is to use perfectly unbonded bars, but in terms of the construction works and cost, it is desirable to use the round conventional bars without unbonding treatment. In this study, in order to clarify the influence of bond characteristics of bars, cyclic loading is carried out. Also, by FEM analysis, the behavior of splitting the bonding between the bars and the concrete is analyzed. As the results, it is found that it is possible to realize the UBRC structure with the conventional round bars, if the bond splitting can be controlled.

*Key Words : UBRC pier, unbonded bar, post-yield stiffness, bond characteristics of bars*

## 1. はじめに

次世代の高耐震性能橋脚に求められる要件を考えると、単に高い耐力、変形性能を有するだけではもはや十分ではない。想定外地震力の作用や、地震後の供用をも考慮した耐震設計が必要となってきた。現行の道路橋示方書<sup>1)</sup>では、地震による損傷を限定された範囲にとどめ、地震後の残留変形を1/100 (rad) 以下に制限することが規定されている。つまり重要度の高い橋脚には、大きな靱性の確保と残留変形の低減という相反する二つのことが要求されていることになる。ただ、このような高耐震性能を付与するにしても、高コストであればその利用も進まない。求められる高性能に対する合理的な耐震設計のための橋脚構造と、それを実現するに当たって必要となるコストの両面が満足してはじめてその利用が進むものと考えられる。

著者らは、以上のような性能を満たす橋脚構造としてUBRC橋脚構造を提案している<sup>2)</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>3)</sup>により明らかとなっている。また、

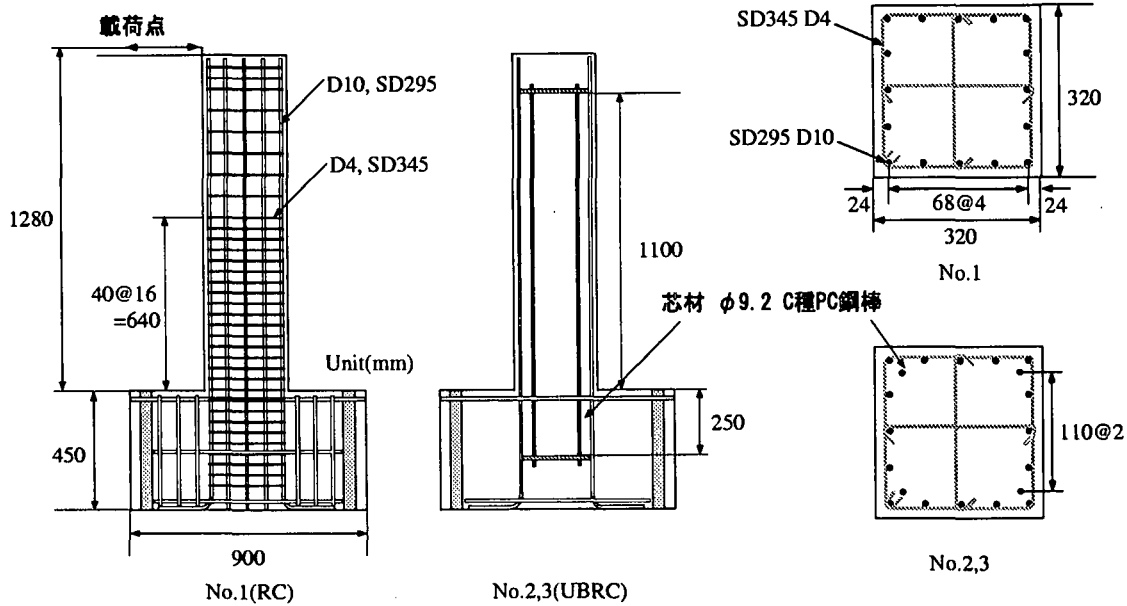
RC橋脚に安定した二次剛性を付与することは、土木学会<sup>4)</sup>で提言されている二段階耐震設計法を合理的に実現する上でも有意であることが考えられる。

本橋脚構造では、芯材としてアンボンド処理を施した高強度鉄筋を想定しているが、アンボンド処理の実施は橋脚建設時におけるコストの増加につながる。そこで、本研究では、アンボンド処理を施さない芯材の付着特性がUBRC橋脚の構造特性に及ぼす影響を明らかとすることを目的として、まず、正負交番載荷実験を中心とした検討を行った。また、FEM解析において芯材の付着が切れていく過程を再現することにより、芯材の付着特性がUBRC橋脚の構造特性に及ぼす影響のメカニズムについて検討した。

## 2. 正負交番載荷実験

### (1) 実験概要

本研究では、通常のRC橋脚(No.1)、アンボンド芯材を導入したRC橋脚(No.2)、アンボンド処理を施さない芯材を配置したRC橋脚(No.3)の三体の供試体を作成し、正負交番載荷実験を行った。供試体は、道路橋を想定して設計されたRC橋脚<sup>5)</sup>を相似率7.5で縮小したものであり、320×320mmの正方形断面を有し、せん断スパンは1280mmである。図-1に実験用供試体



軸方向鉄筋、帯筋は省略している

図-1 実験用 RC 橋脚模型

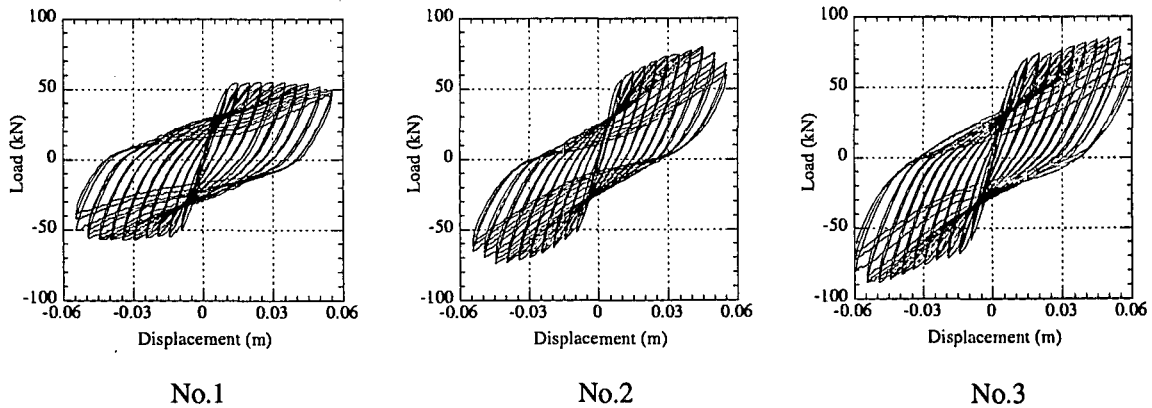


図-2 P - Δ 履歴曲線

を示す。軸方向鉄筋には SD295D10、せん断補強筋には SD345D4、高強度芯材には φ 9.2C 種 PC 鋼棒を用いた。載荷方式は軸力 88.2kN で一定として、載荷点変位 5mm を  $d_y$  とし、その整数倍の変位振幅でそれぞれ 3 回繰り返す振幅漸増型載荷とした。

## (2) 実験結果

図-2 に各供試体の P - Δ 履歴曲線、及び図-3 に P - Δ 曲線の骨格曲線について各供試体の比較を示す。No.1 供試体では、ほとんど二次剛性が存在せず、RC 橋脚特有の紡錘性の卓越した復元力特性を示している。これに対し、UBRC 橋脚構造である No.2, 3 供試体の骨格曲線では、降伏後の剛性である二次剛性の発現が確認でき、履歴形状も全体的に線型性を帯びたものとなっている。

ただ、No.2 供試体の骨格曲線では、最大耐力経験時まで安定した二次剛性が骨格曲線について見られるのに対し、No.3 供試体の骨格曲線では、異なる傾向が現れている。No.3 供試体では、載荷点変位が 0.015m になるまでは、耐力が増加しているが、変位が 0.015m から 0.02m の間では一時的に耐力の増加が鈍化している。しかし、その後、変位の増加に伴い再び、耐力の増加が始まっており、その剛性の大きさは No.2 供試体の二次剛性のそれとほぼ同じである。また、No.3 供試体の降伏耐力は、今回実験を行った供試体の中で最も高いものとなっている。

次に図-4 に載荷点変位が 0.01m から 0.05m 時における No.2, 3 供試体の芯材のひずみ分布を示す。No.2 供試体では、アンボンド処理を芯材に施しているために、ひずみ分布は橋脚高さ方向にほぼ一定である。これに

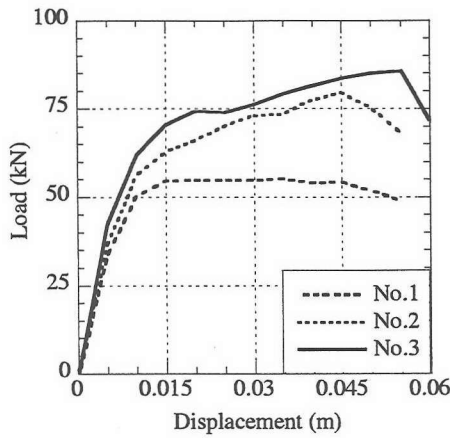


図-3 骨格曲線

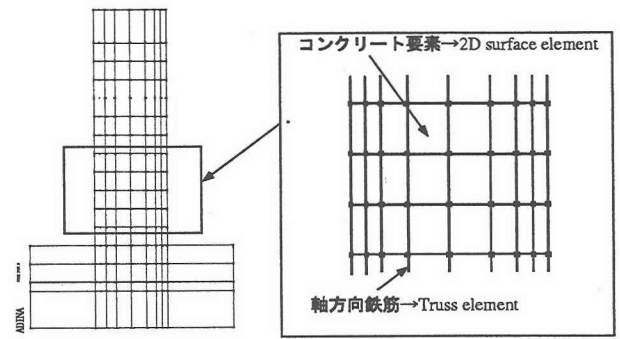
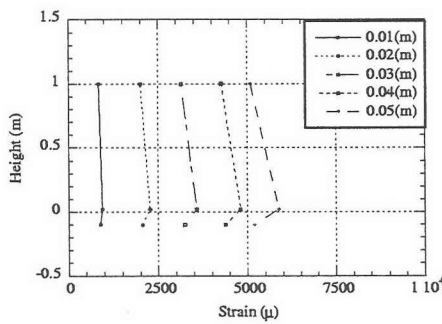
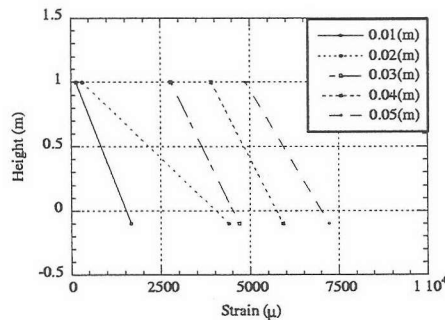


図-5 FEM モデル



No.2 (アンボンド処理を施した芯材)



No.3 (アンボンド処理を施していない芯材)

図-4 芯材のひずみ分布

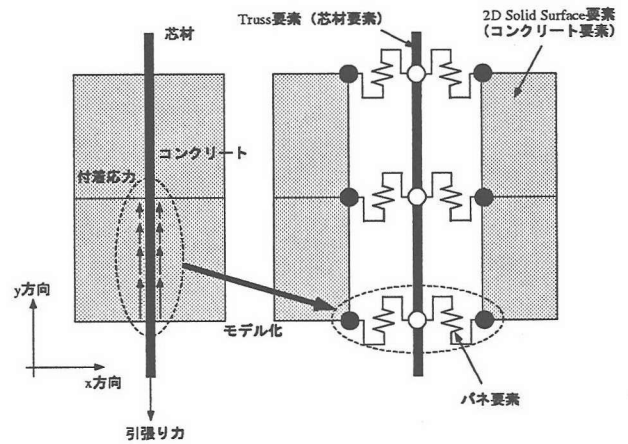


図-6 芯材のモデル化

れたため、この区間では橋脚上部のひずみしか増加していないものと思われる。この時、前述したように橋脚の耐力の増加が一時的に鈍化していることを考えると、芯材の付着特性が橋脚の構造特性に大きな影響を与えていることが分かる。

対し、No.3 供試体のそれは、荷重点変位が 0.02m になるまでは、ひずみの分布形状は逆三角形となっている。しかし、変位が 0.03m の時のひずみ分布では、橋脚の上部における芯材のひずみのみが増加しており、その後は変位が 0.03m の時の分布形状を保ちながら、ひずみの値が増加している。このひずみ分布形状の変化は、No.3 供試体に配置したアンボンド処理を施していない芯材とコンクリートとの付着が切れたことを示している。すなわち、変位が 0.02m ~ 0.03m の間において、芯材の付着が切れたことによりそのひずみが平滑化さ

### 3. FEM 解析を用いた UBRC 橋脚の詳細解析

#### (1) 解析モデルについて

UBRC 橋脚の FEM モデルは、複数の要素により構成されている (図-5)。コンクリートの要素としてコンクリートの応力-ひずみ関係を有する 2D Solid Surface 要素、軸方向鉄筋、芯材についてはそれぞれの応力-ひずみ関係を有する Truss 要素を用いている。

通常の RC 部材の FEM 解析では、平面保持の仮定を用いることにより、軸方向鉄筋の要素とコンクリート要素の縁を一致させるすなわち、軸方向鉄筋とコンクリートが完全に付着しているようにモデル化を行う。

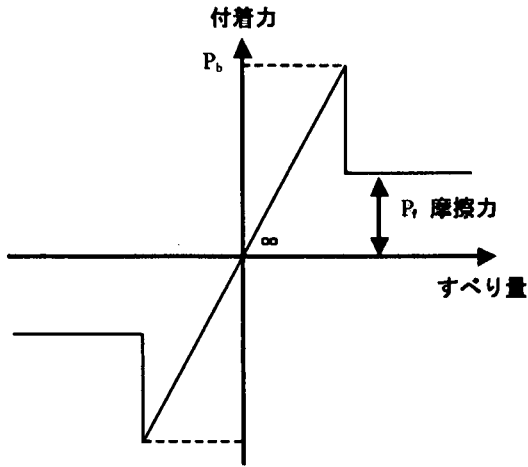
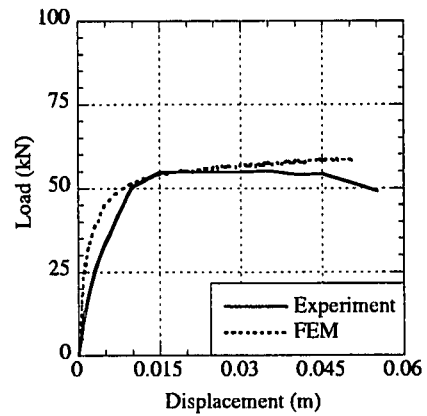


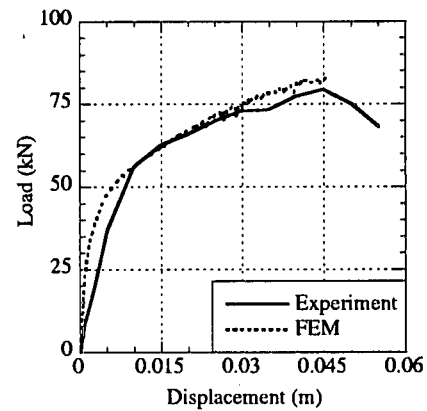
図-7 ジョイントバネ要素の非線形特性

これに対し、UBRC 部材では、芯材とコンクリートの付着が切れているために、同様にモデル化することはできない。そこで、本研究では、芯材要素のノードとコンクリート要素のノードをバネ要素によって繋ぐことにより、芯材の付着特性を考慮することとした。図-6 に芯材のモデル化を示す。このモデルにおけるバネ要素は、幾つかの特性を有している。まず、図-6 における x 方向のバネ剛性は無限大に近い値としている。これは、UBRC 橋脚内における芯材の x 方向の挙動がコンクリートに拘束されていることを示すためである。また、y 方向のバネ剛性は、0 としている。これは、アンボンド処理により芯材の y 方向の挙動がコンクリートと独立していることを示すためである。以上のようなバネ特性は、アンボンド処理を施した芯材を配置した No.2 供試体の解析を想定している。

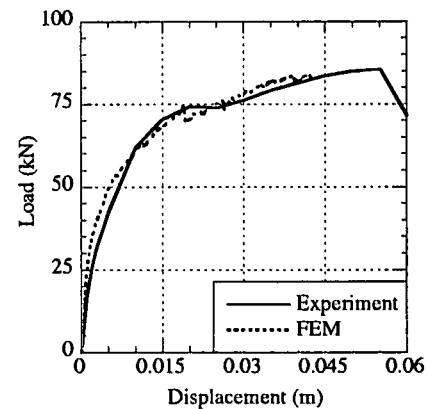
これに対し、アンボンド処理を施していない芯材を配置している No.3 供試体の解析を行う場合、芯材の付着特性を考慮する必要がある。そこで、本研究では、ジョイントバネ要素の y 方向の剛性に図-7 のような非線形特性を与える。この非線形バネ要素では、バネに発生する力、すなわち、芯材とコンクリートがずれようとする力が、芯材の付着力  $P_b$  に至るまで剛性が大きくなっている。これは、芯材とコンクリートが付着していることを示している。また、芯材とコンクリートの付着が切れた後は、バネに発生している力は  $P_f$  という一定値を示すようになる。これは、芯材の付着が切れた後にその表面に発生している摩擦力を意味している。本研究では、 $P_b$  については丸鋼の付着応力に芯材要素一区間当りの表面積を乗じた値 (21000N) を用いた。また、 $P_f$  については、実験結果において芯材の付着が切れた後のひずみ分布より芯材表面に発生している摩擦応力を算定し、それに芯材要素一区間当りの表面積を



No.1 供試体



No.2 供試体



No.3 供試体

図-8 骨格曲線

乗じた値 (5300N) を用いた。

本研究では、正負交番載荷実験で用いた供試体に対し、以上のような FEM モデルを構築し、解析を行うことにより、芯材の付着特性が橋脚の構造特性に及ぼす

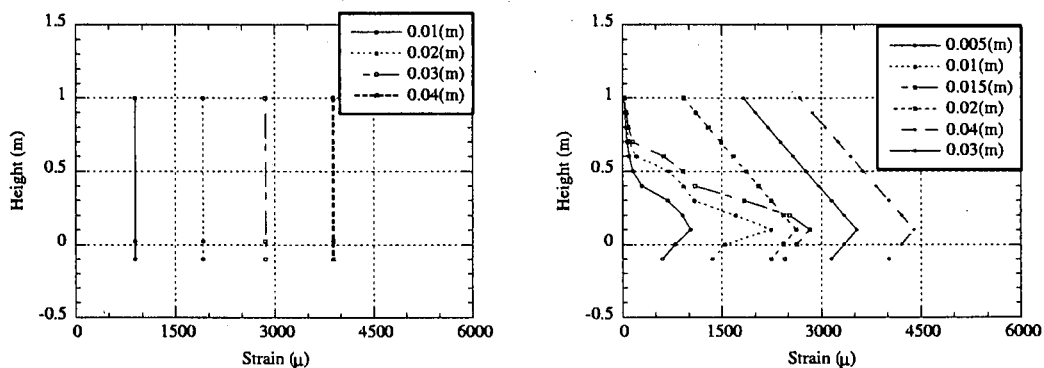


図-9 芯材のひずみ分布（解析結果）

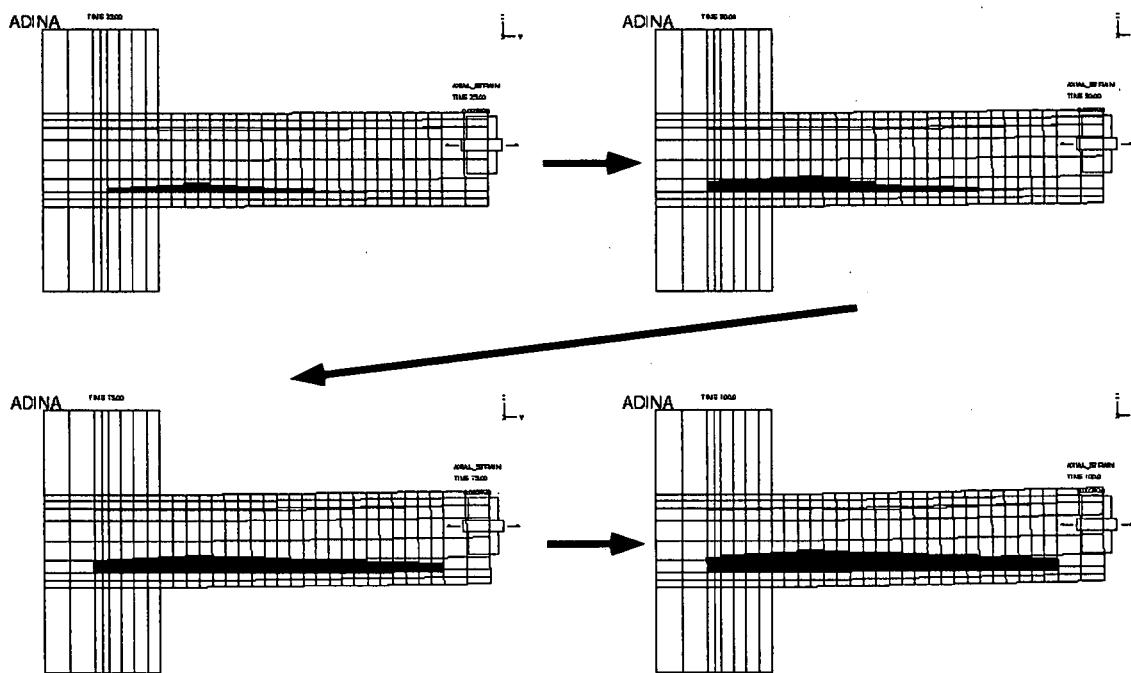


図-10 No.3 供試体の芯材のひずみ分布の変化（解析結果）

影響のメカニズムを明らかとする。なお、今回の解析では、FEM 解析汎用プログラム ADINA を用いて解析を行った。

## (2) 解析結果

図-8 に各供試体の骨格曲線について実験結果と解析結果の比較を示す。この図を見ると、骨格曲線における初期剛性が、解析結果の方が大きくなっているが、最大耐力などその他の構造特性は実験結果に良く一致していることが確認できる。この結果より、今回の解析で用いた FEM モデルが RC 部材の解析に適していることが分かる。

No.2 供試体の骨格曲線では、最大耐力や二次剛性の大きさなどについて実験結果と良い近似が見られる。また、特に No.3 供試体の骨格曲線では、荷重点変位が 0.015m から 0.02m の間で耐力の増加が一時的に鈍化しており、その後、変位の増加に伴って再び耐力が増加していることが確認でき、実験結果を良く表現している。この荷重点変位 0.02m 時における耐力増加の鈍化のメカニズムは、次に示すように芯材の付着に起因する。

図-9 に No.2, 3 供試体の芯材のひずみについての解析結果を示す。また、図-10 に No.3 供試体の芯材ひずみの分布形状が変化していく様子を示す。まず、No.2 供試体の解析結果では、芯材のひずみ分布は橋脚高さ

方向に一定となっている。これは、No.2 供試体の解析において、芯材要素とコンクリート要素を結ぶバネ要素の y 方向の剛性を 0 としているためである。この結果より、y 方向の剛性を 0 としたジョイントバネ要素を用いることが芯材のアンボンド特性を解析する上で有意であることが分かる。一方、No.3 供試体の解析結果では、載荷点変位が 0.015m に至るまでは、芯材のひずみ分布形状が三角形であること、すなわち、橋脚基部の芯材のひずみしか増加していないことが確認できる。しかし、載荷点変位が 0.02m 時では芯材のひずみは、上部のひずみしか増加しておらず、その分布形状は大きく変化している。そして、その後は、その形状を維持したまま、芯材のひずみは増加している。これは、載荷点変位が 0.015m から 0.02m の間において、ジョイントバネ要素の剛性が変化したためであり芯材の付着が切れたことを表している。また、この区間は、No.3 供試体の骨格曲線において耐力の増加が一時的に鈍化している区間と一致している。解析結果で見られたこのような傾向は、実験結果でも見られた傾向であり、芯材の付着特性を非線形ジョイントバネ要素でモデル化することが、芯材の付着が切れていく過程を再現する上で有意であることが分かる。

以上より、芯材の付着特性が UBRC 橋脚の構造特性に及ぼす影響のメカニズムとしては、以下のようなことが考えられる。まず、アンボンド処理を施していない高強度丸鋼を UBRC 橋脚の芯材として配置した場合、芯材が付着している間は、RC 構造として挙動するためアンボンド処理芯材を用いた UBRC 構造よりも大きな耐力を示す。しかし、橋脚の変形がある程度進んだところで芯材とコンクリートとの付着が切れる。その時、芯材ひずみが橋脚高さ方向に平滑化され、UBRC 構造として機能し始め、橋脚の変形に伴い二次剛性が発現する。また、その大きさはアンボンド処理芯材を用いた UBRC 構造のそれの大きさとほぼ同等である。したがって、芯材が降伏しなければ芯材の配置条件により二次剛性が決まることになる。以上より、芯材が降伏する前にその付着が切れることを保証することができれば、アンボンド処理を施していない高強度丸鋼でも UBRC 橋脚の芯材として有用であることが考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、UBRC 橋脚内に配置された芯材の付着特性が橋脚の構造特性に及ぼす影響を明らかとするために、正負交番載荷実験並びに FEM 解析を用いた検討を行った。その結果、以下のようなことが明らかとなった。

- UBRC 橋脚における芯材の付着特性は、橋脚の構

造特性に大きな影響を与える。すなわち、芯材がコンクリートと付着している間は、RC 構造として挙動するため大きな耐力を示し、また、芯材の付着が切れた後は、芯材のひずみが平滑化され芯材が弾性挙動を示すため UBRC 構造として二次剛性の発現などが期待できる。

- アンボンド処理を施していない高強度の丸鋼を芯材として用いても、橋脚の変形に伴い芯材の付着が切れることにより、そのひずみはある程度平滑化される。つまり、芯材の付着特性を制御することができれば、アンボンド処理を施さなくても、UBRC 橋脚を建設することができる可能性がある。
- 芯材とコンクリートとの付着が切れていく過程を、FEM 解析により再現した。また、FEM 解析結果より芯材の付着特性が橋脚の構造特性に及ぼす影響のメカニズムを明らかとした。

**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。(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) 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。
- 2) 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。
- 3) 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。
- 4) 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。
- 5) 星隈順一，連上茂樹，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。
- 6) 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，2001。
- 7) H.Iemura, N.Sogabe, Y.Takahashi: INFLUENCE OF BOND CHARACTERISTICS OF BARS ON UBRC BRIDGE PIERS, The Fourteenth KKNN Symposium on Civil Engineering, pp.317-322, 2001.