

芯材の付着剥離過程がUBRC橋脚の構造特性に及ぼす影響

家村 浩和*・高橋 良和**・曾我部 直樹***

*フェロー 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）

**正会員 博（工） 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）

***学生会員 修（工） 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）

1. はじめに

次世代の高性能橋脚に求められる要件を考えてみると、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。常時の維持・管理や想定外地震力の作用、地震後の供用をも考慮した性能が必要となってきている。現行の道路橋示方書では、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が進まない。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¹⁾。この橋脚では橋脚断面内に配置されたアンボンド高強度芯材が、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。UBRC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、アンボンド処理は建設コストの増加に直接つながる。また、コンクリートと芯材との間に空隙が生じれば、芯材の腐食についても考えなければならない。そこで、本研究では、芯材としてアンボンド処理を施さない高強度丸鋼を用いたUBRC橋脚について検討した。丸鋼であれば、アンボンド処理を施さなくとも橋脚の変形に伴いコンクリートとの付着が切れそのひずみが平滑化される。すなわち大変形領域ではアンボンド効果が期待できる芯材（以下、付着剥離芯材と称する）としての適用が可能であると考えられる。本研究では、まず、アンボンド処理を施した芯材を配置したUBRC橋脚と、アンボンド処理を施していない芯材を配置したUBRC橋脚の実験用供試体を作成し、それらに対し正負交番

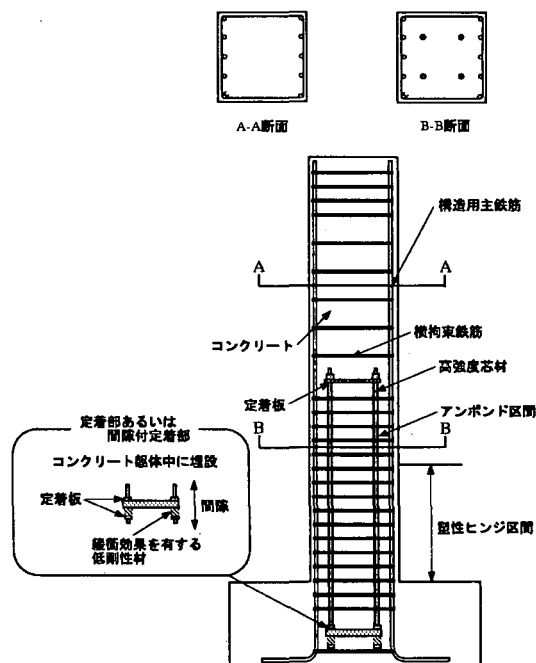


図-1 UBRC 橋脚構造

載荷実験を行った。また、芯材の付着特性を考慮したファイバーモデルを用いた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. 付着剥離芯材を用いたRC橋脚

UBRC橋脚構造（図-1）¹⁾では、大変形領域においても芯材の弾性挙動を期待するため、芯材には、コンクリートとの付着が切れるようにアンボンド処理を施すことを想定している（図-2）。しかし、芯材に施すアンボンド処理は、UBRC橋脚の建設コストの増加に繋がる。また、シース管などを用いて芯材を被覆するようなアンボンド処理を行った場合、芯材とコンクリートとの間に空隙が生じることにより、芯材の腐食が問

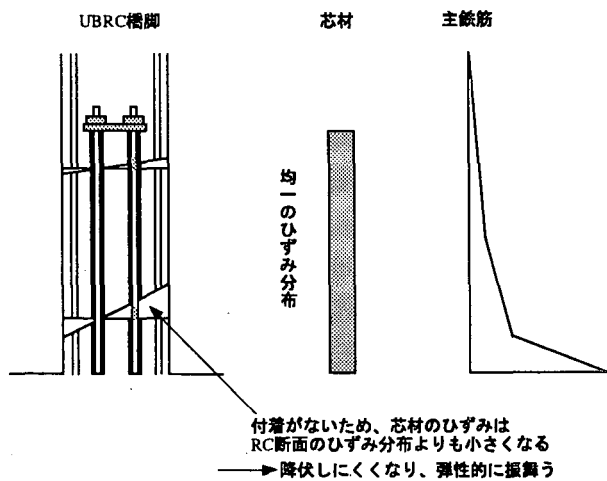


図-2 芯材のアンボンド効果

題となることが考えられる。したがって、経済性、耐久性を考えた場合、芯材にはアンボンド処理を施さない方が好ましい。つまり、安定した二次剛性を有し、かつ経済性、施工性、耐久性に富む橋脚を実現するためには、常時は芯材はコンクリートに付着し、橋脚が降伏するような大規模な地震が発生したときは、芯材とコンクリートの付着が切れ、弾性挙動を示すことにより安定した二次剛性を付与することが重要となる。

通常の RC 橋脚で用いられている異型鉄筋では、コンクリートとの付着力を強くするために節が設けられており、コンクリートと付着力が機械的に得られるためその付着は容易に切れない。しかし、表面が滑らかである丸鋼であれば、コンクリートの付着力は、化学的な接着作用と摩擦力しか存在しないため、丸鋼にある程度の力が作用すると、容易に付着が切れることが考えられる。つまり、芯材としてアンボンド処理を施していない高強度丸鋼を適用すれば、橋脚の変形に伴って付着が切れる芯材、すなわち付着剥離芯材として機能し、前述したような特性を有する UBRC 橋脚を実現することができる。

3. 正負交番载荷実験

(1) 実験概要

本研究では、通常の RC 供試体 (No.1)、アンボンド芯材を導入した供試体 (No.2)、アンボンド処理を施さず防食性を高めた芯材としてシース管にグラウトを充填し、その中に芯材を挿入したものを配置した供試体 (No.3) を作成し、正負交番载荷実験を行った。供試体は、道路橋を想定して設計された RC 橋脚²⁾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-3 に実験用供試体を示す。軸方向鉄筋には SD295D10、せん断補強筋には SD345D4、芯材には ϕ 9.2C 種 PC 鋼

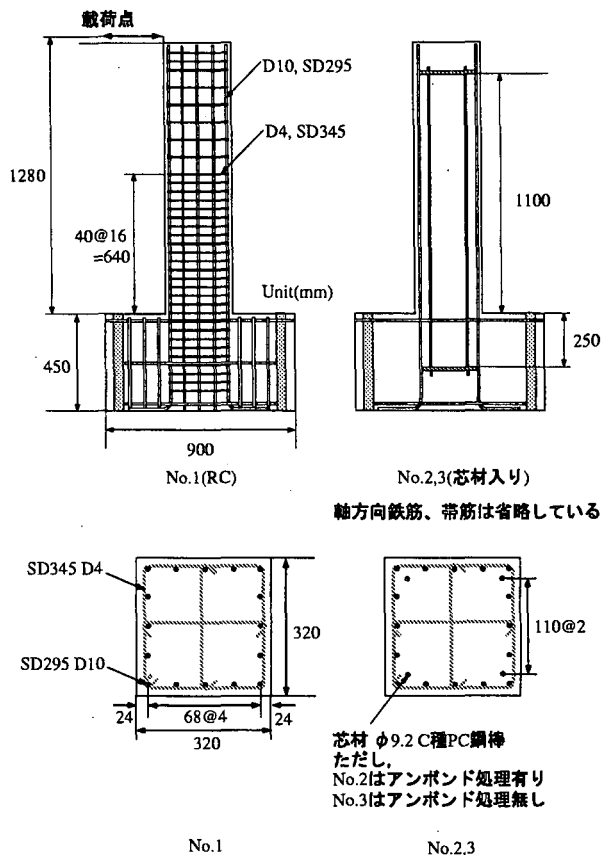


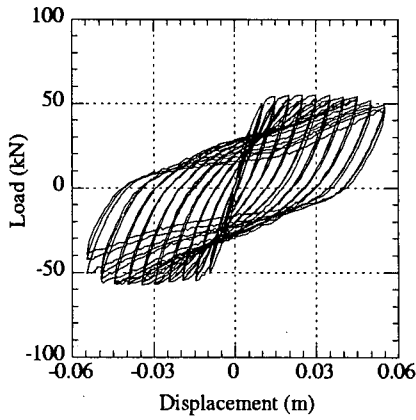
図-3 実験用 RC 橋脚模型

棒を用いた。载荷方式は軸力 88.2kN で一定として、载荷点変位 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载荷とした。

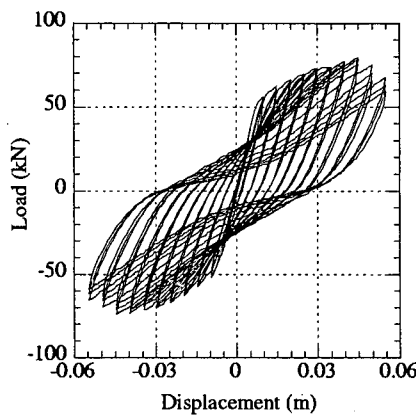
(2) 実験結果

図-4 に各供試体の $P - \Delta$ 履歴曲線、及び図-5 に $P - \Delta$ 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。

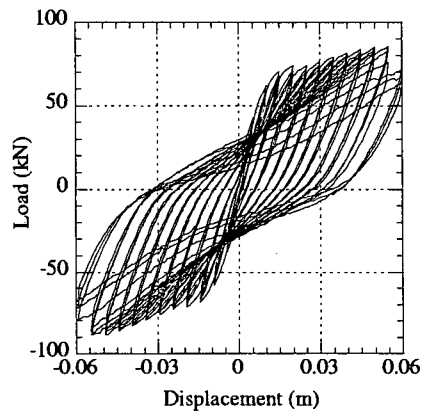
ただ、No.2 供試体の骨格曲線では、最大耐力経験時まで安定した二次剛性が骨格曲線について見られるのに対し、No.3 供試体の骨格曲線では、異なる傾向が現れている。No.3 供試体では、载荷点変位が 0.015m になるまでは、耐力が増加しているが、変位が 0.015m から 0.02m の間では一時的に耐力の増加が鈍化している。しかし、その後、変位の増加に伴い再び、耐力の増加が始まっており、その剛性の大きさは No.2 供試体の二次剛性のそれとほぼ同じである。また、No.3 供試体の降伏耐力は、今回実験を行った供試体の中で最も高い



No.1



No.2



No.3

図-4 P-Δ履歴曲線

ものとなっている。

次に図-6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

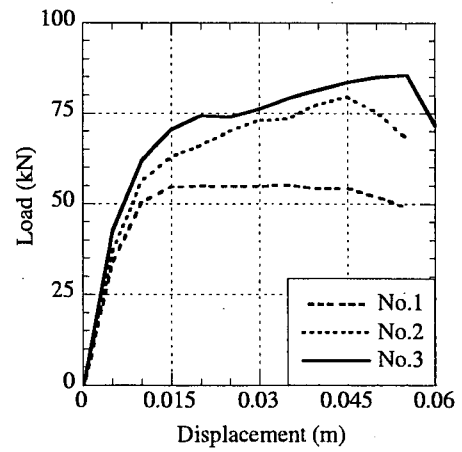
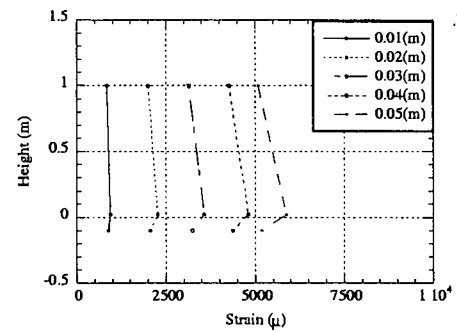
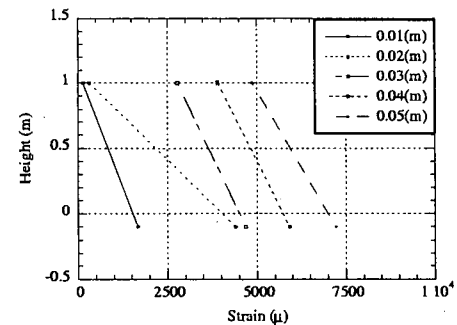


図-5 骨格曲線



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-6 芯材のひずみ分布

れに対し、No.3供試体のそれは、載荷点変位が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。

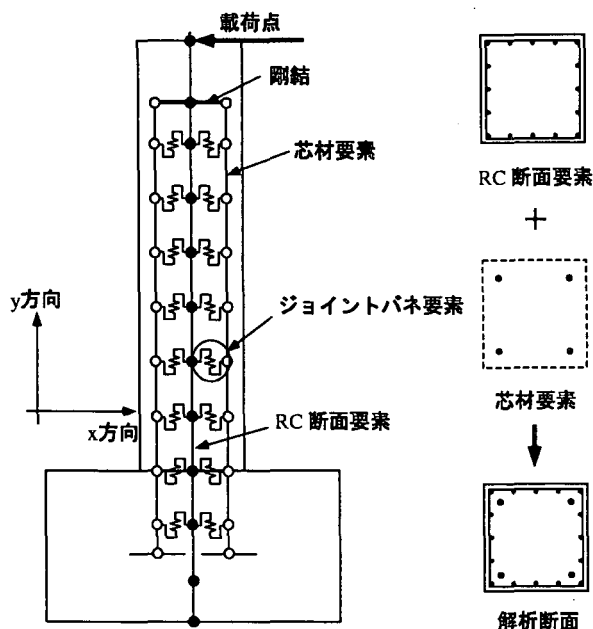


図-7 芯材のモデル化

4. 正負交番载荷解析

(1) 解析手法及び解析モデル

ファイバーモデルによる解析では、その仮定において平面保持の仮定が用いられている。つまり、鉄筋とコンクリートが完全に付着していることが、解析の前提条件となっている。通常の RC 部材の解析では、鉄筋の付着強度が高く、平面保持の仮定を適用することが可能である。しかし、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、平面保持の仮定が成立せず、RC 部材のように解析断面を構成する一要素として芯材をモデル化することができない。そこで、本研究では、RC 橋脚部分を構成するファイバー要素と芯材を構成するファイバー要素を分割し、それらのノード間を非線形特性を有する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-7 に解析モデルを示す。

(2) 芯材の付着特性

図-7 に示す解析モデルで用いるジョイントバネ要素は、図-8 に示すような非線形特性を有している。この非線形バネ要素では、バネに発生する力が、鋼とコンクリートとの付着強度により決定する最大付着力 P_b に至るまで付着力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。非線形特性の繰り返しについては、PC 構造の緊張材 (PC 鋼より線やストランドなど) を対象として、付着応力-すべり関係に関する研

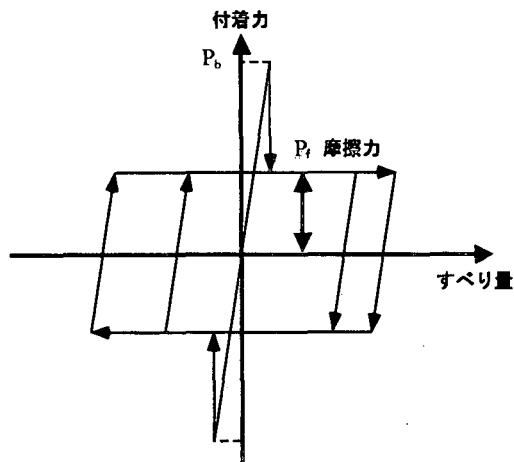


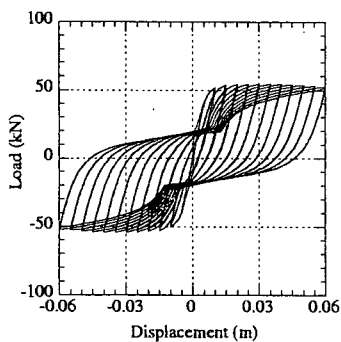
図-8 ジョイントバネ要素の非線形特性

究^{3), 4)} がなされているが、今回の解析では高強度丸鋼を芯材として用いているため、付着が切れた後の付着力-すべり関係は、摩擦力のみが存在する初期剛性の大きな完全弾塑性型モデルとした。すなわち、本解析モデルでは、 P_b や P_f を設定することにより芯材の付着特性を表すことができる。

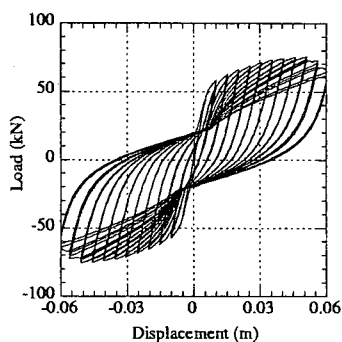
例えば、アンボンド処理を施した芯材が配置されている No.2 供試体の解析を行う場合、 P_b を 0 と設定して解析を行う。また、アンボンド処理を施していない芯材を配置している No.3 供試体の解析については、以下に述べるように P_b や P_f を決定した。まず、 P_b の値は、丸鋼と芯材の付着強度 σ_b に芯材要素一区間当りの表面積を乗じて算出した。ただし、丸鋼に対する付着強度については、Prince らが行った丸鋼の引き抜き試験結果⁵⁾ より、2.8MPa とした。 P_f については、付着が切れた後に芯材表面に発生している摩擦応力 τ_f を荷重点変位 0.03m 時の芯材ひずみ分布より算出し (0.55MPa)、それに芯材要素一区間当りの表面積を乗じて決定した。

(3) 解析結果

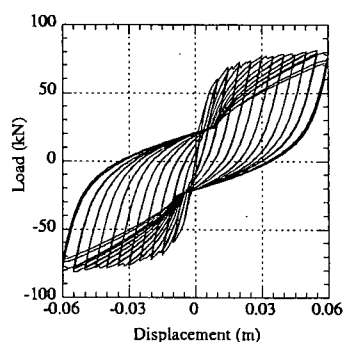
図-9 と図-10 に各供試体の P- Δ 履歴曲線の解析結果とその骨格曲線について実験結果との比較を示す。ただ、今回の解析では橋脚基部を固定として解析モデルを構築しているため、実験結果に含まれる基部における主筋のフーチングからの抜け出しは考慮していない。したがって、本研究では、抜け出しによる供試体の回転変位は、実験時に供試体基部に設置した変位計の観測結果より荷重点変位の約 30% であると仮定し、解析結果にはその分の変位を加算している。また、解析に用いたコンクリート、鉄筋、芯材の応力-ひずみ履歴モデルは、六車モデル、Menegotto-Pinto モデルを改良した Ristić モデル⁶⁾ を用い、材料値については材料試験値を用いている。



No.1供試体

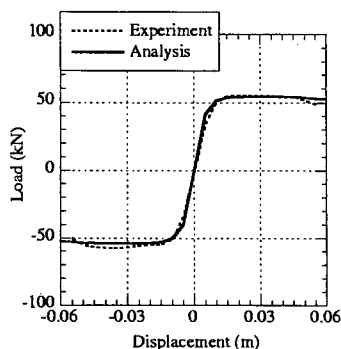


No.2供試体

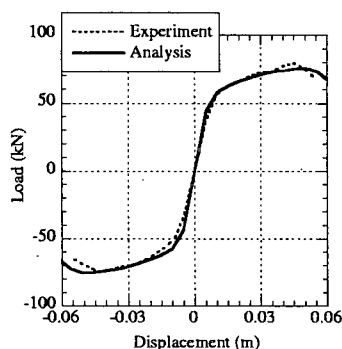


No.3供試体

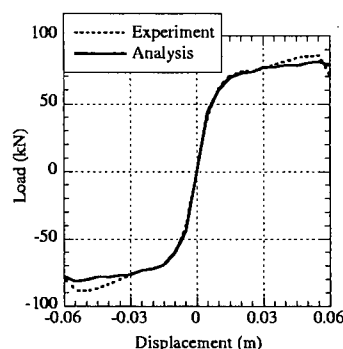
図-9 P-Δ履歴曲線（解析結果）



No.1供試体



No.2供試体



No.3供試体

図-10 骨格曲線の比較

まず、RC 橋脚を想定している No.1 供試体では、概ね、実験結果と解析結果が最大耐力などにおいて良く一致していることが確認できる。ただ、耐力が低下を始める領域では、実験結果と解析結果に若干の相違が見られる。これは、軸方向鉄筋の座屈による耐力低下などを考慮していないためと考えられる。

No.2 供試体の骨格曲線では、最大耐力や UBRC 橋脚構造の特徴である二次剛性などについて、実験結果との良い近似が確認できる。一方、No.3 供試体の骨格曲線（図-11）では、最大耐力について、解析結果が実験結果に比べて小さく、若干の相違が認められる。しかし、載荷点変位が 0.02m から 0.025m の間で耐力の増加が一時的に鈍化しており、その後、橋脚の変形が進むに従って再び耐力が増加していることが解析結果においても確認でき、実験結果で見られた傾向を良く表現している。この載荷点変位 0.02m 時における耐力増加の鈍化のメカニズムは、後に示すように芯材の付着に起因する。

図-12 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、ジョイントパネ要素の P_0 を 0 としているためである。一方、No.3 供試

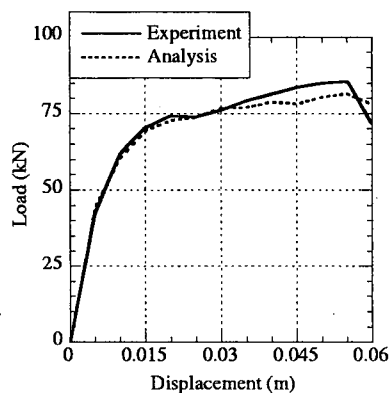
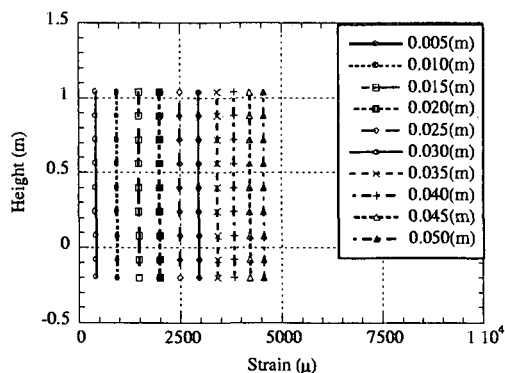
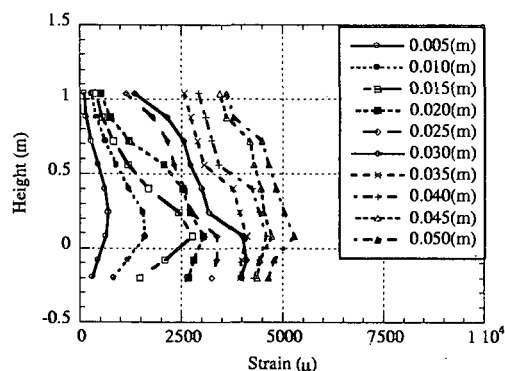


図-11 骨格曲線の比較 (No.3 供試体)

体の解析結果では、載荷点変位が 0.02m に至るまでは、芯材のひずみ分布形状がほぼ三角形であること、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 0.025m 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



No.2 供試体 (アンボンド処理有り)



No.3 供試体 (アンボンド処理無し)

図-12 芯材のひずみ分布 (解析結果)

は、ほぼ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、荷重点変位が0.02mから0.025mの間において、ジョイントバネ要素に発生している力が、最大付着力 P_0 を超え摩擦力 P_f に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により、芯材の付着が切れていく過程を再現できることが分かる。

以上より、芯材の付着特性が橋脚の構造特性に及ぼす影響をまとめると次のようになる。まず、アンボンド処理を施していない高強度丸鋼を芯材として橋脚内に配置した場合、芯材が付着している間は、高強度鉄筋を有する 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るため、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。

5. まとめ

本研究では、芯材の付着剥離過程が UBRC 橋脚の構造特性に与える影響を検討するために、正負交番荷重実験及び芯材の付着特性を考慮したファイバーモデルによる正負交番荷重解析を行った。その結果、以下のようなことが明らかとなった。

- 付着剥離芯材を配置した RC 橋脚では、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。
- 芯材の付着特性を保証することができれば、アンボンド処理を施さなくても、芯材とコンクリートとの付着が切れることによりそのひずみが平滑化され、安定した二次剛性を有する橋脚を建設することができる。アンボンド処理の省略は、橋脚建設時における経済性、施工性の向上及び常時の維持・管理に有利である。
- ファイバーモデルを用いた解析において芯材の付着剥離過程を、付着特性を表現する非線形特性を有するジョイントバネ要素を用いることにより再現した。また、同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。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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関する正負交番荷重実験, 第3回地震時保有水平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 年
- 3) 松倉満智子, 上田正生, 内山武司, 土橋由造: 緊張鋼材の付着すべりを考慮したプレストレストコンクリート梁部材の材料非線形解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.2, pp.709-712, 1995 年
- 4) 足立将人, 西山峰広: 緊張材の付着特性を考慮したプレストレストコンクリート骨組の履歴挙動解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.895-900, 1999 年
- 5) 村田二郎: コンクリート技術 100 講, 山海堂
- 6) Ristić, D., Yamada, Y. and Iemura, H.: Stress-strain based modeling of hysteretic structures under earthquake induced bending and varying axial loads, Technical report, Kyoto University, 1986. KUCE, No.86-ST-01.