

アンボンド芯材入りRCラーメン橋脚の 弾塑性復元力特性

家村浩和¹・高橋良和²・曾我部直樹³・中尾幸平⁴・斉東亮⁵

¹工博 京都大学教授 工学研究科都市社会工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²工修 京都大学助手 工学研究科都市社会工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

³工修 京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁴京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁵京都大学 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. In this study, in order to clarify the structural characteristics of RC frame piers with unbonded high strength bars (UBRC frame piers), cyclic loading is carried out. As the results, it is confirmed that it is possible to realize the positive post-yield stiffness with the UBRC frame piers. Additionally, it is found that the difference of position of unbonded high strength bars affect the yielding process of UBRC frame piers.

Key Words : UBRC frame pier, unbonded high strength bar, post-yield stiffness, yielding process

1. はじめに

UBRC 橋脚構造では、塑性ヒンジ区間にアンボンド芯材を弾性部材として配置することにより、その復元力特性に安定した二次剛性を付与することができる^{1),2)}。既往の研究では、橋脚基部のみに塑性ヒンジが形成されるRC単柱式橋脚へUBRC橋脚構造を適用することを想定してきた。しかし、RC単柱式橋脚と同様に塑性ヒンジが発生する橋脚構造形式としては、RCラーメン橋脚構造が考えられる。特に、RCラーメン橋脚構造では、柱基部以外にも梁両端部や柱上部など複数箇所に塑性ヒンジが発生する可能性がある。つまり、それらの部分に芯材を配置することができれば、RCラーメン橋脚構造においても安定した二次剛性が発現し、UBRC橋脚構造の特性を実現できるものと考えられる。

そこで、本研究では、アンボンド芯材入りRCラーメン橋脚(UBRCラーメン橋脚)の弾塑性復元力特性に関する検討を行った。ここでは、まず、RCラーメン橋脚構造の特徴について整理し、UBRCラーメン橋脚における芯材の配置についてまとめた。そして、RCラーメン橋脚、並びに、UBRCラーメン橋脚の実験用供試体を作成し、それらに対して正負交番載荷実験を行い、UBRCラーメン橋脚構造の弾塑性復元力特性に関する考察を行った。

2. UBRC ラーメン橋脚について

UBRC 橋脚構造では、橋脚断面内にアンボンド芯材を配置し、それが、橋脚が大変形を起こした場合でもその内部で弾性挙動を示すことにより、安定した二次剛性をその復元力特性に付与することができる。そのメカニズムは、塑性ヒンジ区間に配置された芯材の復元力が、橋脚断面に対し漸増圧縮力、水平力に対する漸増抵抗モーメントとして作用することによる。つまり、UBRC橋脚構造では、塑性ヒンジ区間に芯材を配置することにより、二次剛性が発現する。そのため、単柱式橋脚では、塑性ヒンジ区間となる橋脚基部を挟むように芯材を配置、定着することを想定している(図-1)^{1),2)}。

単柱式橋脚では、上部構造の慣性力が水平力として作用した場合、曲げモーメント分布は、三角形分布となり最大モーメントは橋脚基部にのみ発生し塑性ヒンジが形成される(図-2)。これに対し、RCラーメン橋脚構造では、単柱式橋脚構造とは、異なるモーメント分布を示す。例えば、門型のRCラーメン橋脚構造に上部構造の慣性力が水平力として作用した場合、柱基部や上部、梁両端部に大きな曲げモーメントが作用する可能性がある。つまり、RCラーメン橋脚構造では、柱基部以外にも、梁両端部や柱上部などにおいて塑性ヒ

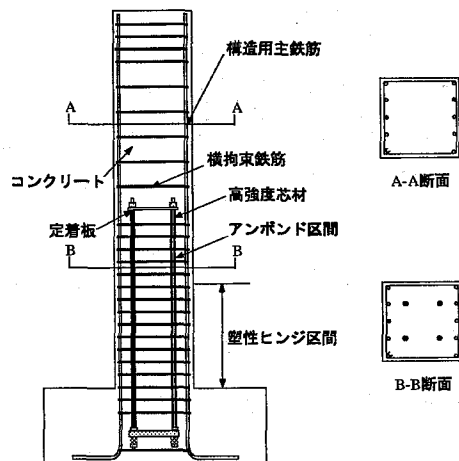


図-1 UBRC 橋脚構造

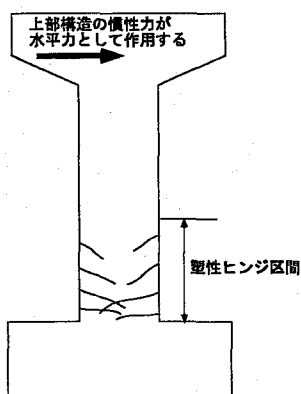


図-2 RC 単柱式橋脚における塑性ヒンジ区間

ンジが形成されることが考えられる（図-3）。UBRC 橋脚構造における二次剛性が、塑性ヒンジ区間に芯材が配置され、弾性挙動を示すことにより実現されることを考えると、RC ラーメン橋脚構造における芯材配置としては、単柱式橋脚構造のように柱基部のみではなく、梁両端部などにも配置することが考えられる。すなわち、UBRC ラーメン橋脚構造の弾塑性復元力特性を検討するためには、芯材の配置箇所の相違が橋脚全体の復元力特性、破壊過程に及ぼす影響を明らかにする必要がある。

3. 载荷実験概要

(1) 実験用供試体

本研究で対象とした RC ラーメン橋脚は、阪神高速道路の各路線から抽出した約 100 基の RC ラーメン橋脚の基本諸元をもとに、平均的な諸元である大阪西宮線 P-164 をベースとしたものである³⁾。実験用供試体は、この検討対象 RC ラーメン橋脚を相似率 7.8 で縮小したものである。表-1 に、実橋と供試体の断面、鉄

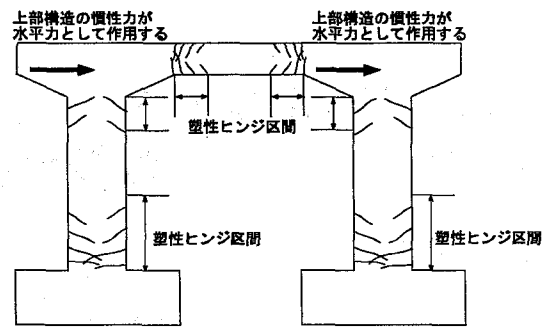


図-3 RC ラーメン橋脚の塑性ヒンジ区間

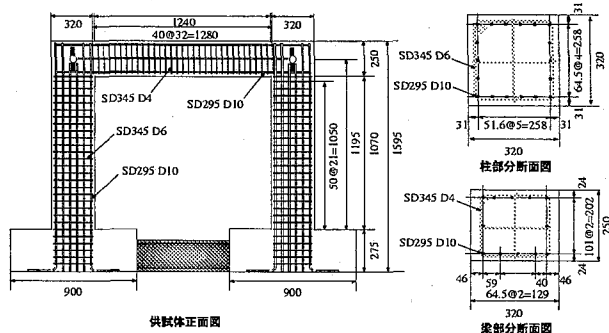
表-1 RC ラーメン橋脚の諸元

	実橋	供試体
脚高 (m)	10.26	1.32
柱断面 (m)	2.5*2.5	0.32*0.32
梁断面 (m)	2.5*2.0	0.32*0.25
柱部主鉄筋比 (橋軸) (%)	0.49	0.49
柱部主鉄筋比 (直角) (%)	0.40	0.41
梁部主鉄筋比 (%)	0.51	0.51
柱部帯鉄筋比 (%)	0.71	0.61
梁部帯鉄筋比 (%)	0.16	0.30

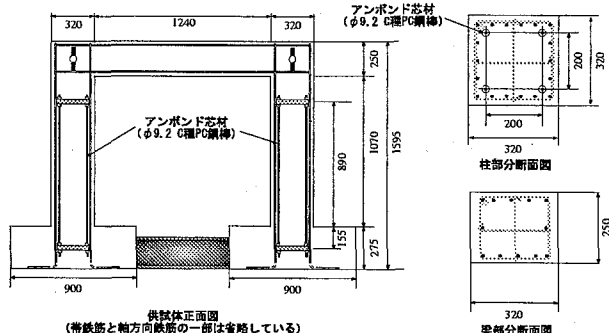
筋比などの諸元を示す。実橋では、橋脚の周囲に鋼板を巻きたてているため、その分に関しては、帯鉄筋として換算している。また、梁部分の帯鉄筋については、実験時における梁のせん断破壊を防ぐことを目的として、実橋よりも供試体の量を多くしている。

図-4 に実験用供試体を示す。コンクリートは呼び強度 24MPa の普通コンクリートであり、柱部分には、軸方向鉄筋には SD295D10、せん断補強筋には SD345D6 を用い、梁部分では、軸方向鉄筋に SD295D10、せん断補強筋では SD345D4 を用いている。

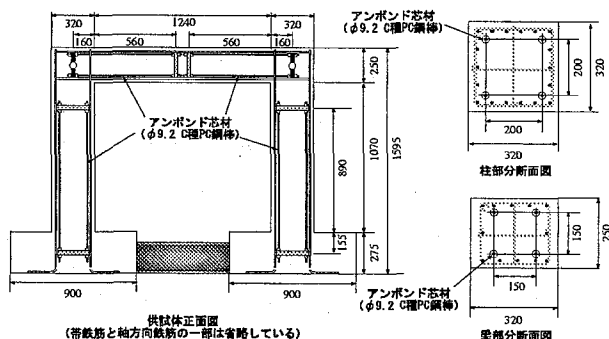
RC-1 供試体は検討対象 RC ラーメン橋脚を想定した RC ラーメン供試体である。これに対し、UBRC-1, 2, 3 供試体は芯材として $\phi 9.2$ C 種 PC 鋼棒 (SBPR $\phi 9.2$) を配置した UBRC ラーメン供試体である。ただし、UBRC-1 供試体では、柱基部（橋脚基部から 890mm まで）にのみ芯材を配置し、UBRC-2 供試体は、柱基部と梁両端部（梁端部から 560mm まで）の両方に芯材を配置している。すなわち、RC, UBRC-1, 2 供試体の特性を比較することにより、芯材の有無、配置箇所の相違が橋脚全体の特性に及ぼす影響を評価できる。また、UBRC-3 供試体は、UBRC-2 供試体と同様に柱基部と梁両端部の両方に芯材を配置しているが、柱、梁部分の軸方向鉄筋が少ない UBRC ラーメン橋脚となっている。これは、軸方向鉄筋を減らして芯材を配置した UBRC ラーメン橋脚の特性を評価するためのものである。なお、供試体に配置する芯材には、全区間アンボ



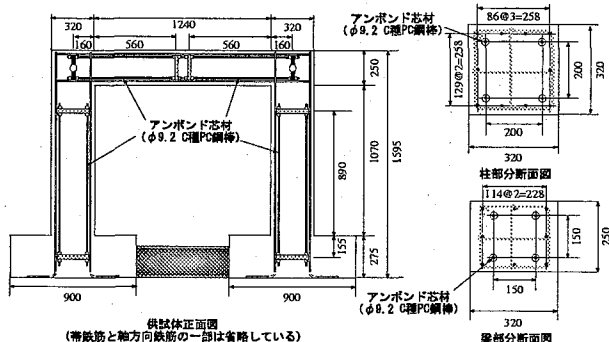
RC供試体



UBRC-1供試体



UBRC-2供試体



UBRC-3供試体

図-4 実験用供試体

ンド処理を行い、コンクリートとの付着を切っている。

(2) 荷重システム

正負交番荷重実験における供試体への水平力の荷重は、1台のデジタル制御されたアクチュエーターを用い

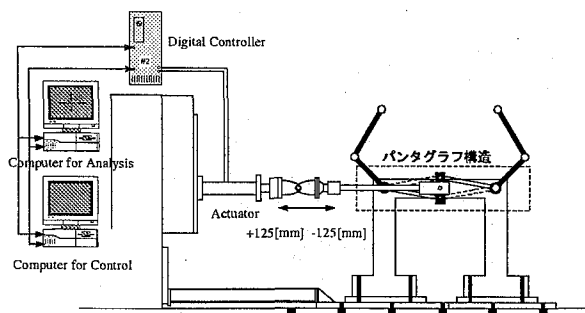


図-5 荷重システム

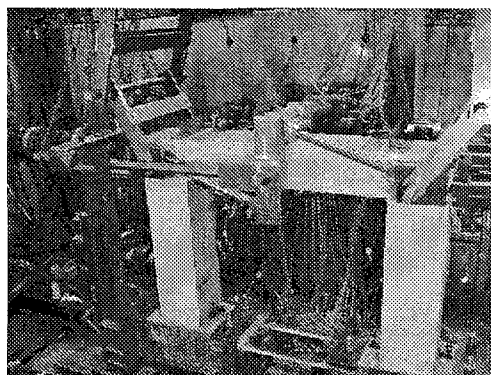


写真-1 荷重システム

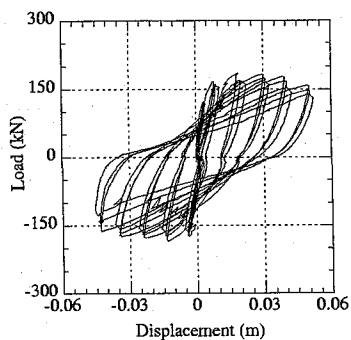
て行った。図-5、写真-1に荷重システムを示す。この荷重システムでは、柱頭部をヒンジでリンクしたパンタグラフ型の治具を用いて、柱頭部の平均水平変位を対象に変位制御で荷重が行われる。そのため、ラーメン供試体には、パンタグラフの軸方向力により柱頭部2点に荷重力が加えられる。また、パンタグラフ構造を採用したことにより、梁の曲げ、軸変形を拘束することなくラーメン供試体への荷重が可能となっている⁴⁾。

荷重方式は、アクチュエーターの変位5mmを単位 μ とし、その整数倍($\mu = \pm 1, \pm 2, \text{etc}$)の変位振幅で増加させていく、振幅漸増型荷重とした。なお、同一振幅における繰り返しは3回とした。ただし、RC供試体の荷重実験では、アクチュエーターの制御に問題があったため荷重波形が不規則となっている。また、他の供試体でも荷重システムのゆるみ、変形などによりアクチュエーターの変位と実際の供試体との変形に差が生じたため、実験結果は、供試体に設置した外部変位計による観測値で整理している。

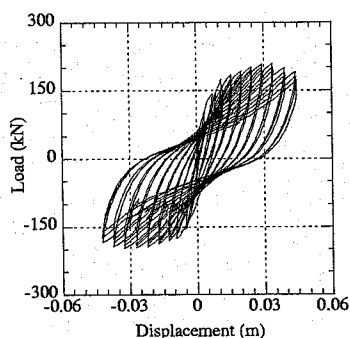
4. 実験結果及び考察

(1) P- Δ 履歴曲線

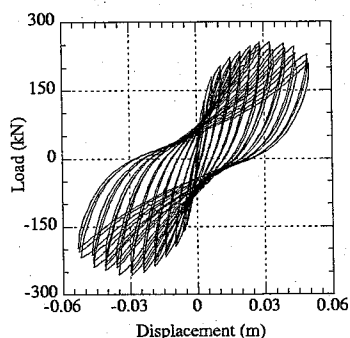
図-6、図-7に正負交番荷重実験で得られた各供試体



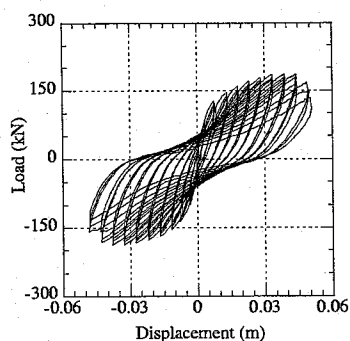
RC供試体



UBRC-1供試体



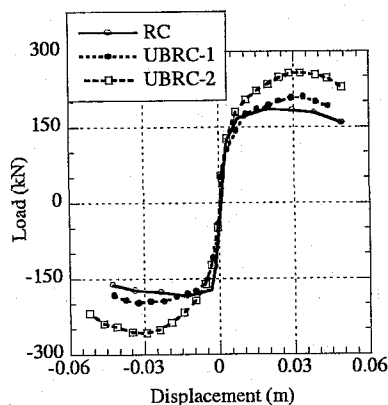
UBRC-2供試体



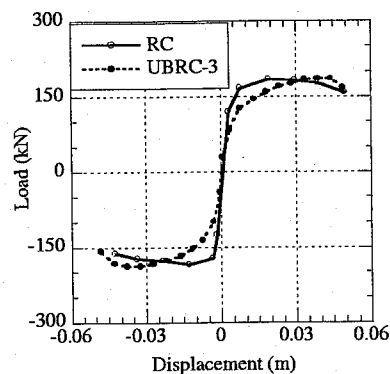
UBRC-3供試体

図-6 P-Δ 履歴曲線

の P-Δ 履歴曲線と骨格曲線の比較を示す。まず、P-Δ 履歴曲線を見てみると、芯材を配置していない RC 供試体では、載荷点変位が 0.01m ~ 0.015m の間で最大耐力（約 185kN）を示した後は、一定の耐力、若しくは



芯材の配置位置による相違



主鉄筋を減らしたUBRC橋脚との比較

図-7 骨格曲線の比較

緩やかに耐力が下降していることが分かる。これに対し、芯材を柱、梁部分の両方、若しくは、その一方に配置している UBRC-1 ~ 3 供試体では、UBRC 橋脚構造の特徴である正の二次剛性が確認できる。つまり、ラーメン橋脚構造でも芯材を配置することにより正の二次剛性を有する復元力特性を実現できることが実証された。ただし、UBRC 供試体における二次剛性、最大耐力の大きさは各供試体で大きく異なっている。例えば、柱基部のみに芯材を配置した UBRC-1 供試体よりも柱基部と梁両端の両方に芯材を配置している UBRC-2 供試体の方が、二次剛性の大きさが著しく大きくなっている。単柱式橋脚では、芯材の配置位置、量、範囲のみで二次剛性の大きさが変化していたが⁵⁾、複数部材で構成されるラーメン橋脚では、梁や柱部などの芯材の配置箇所によっても芯材配置効果である二次剛性の大きさが変化することが分かる。

一方、UBRC-2 供試体から柱、梁の主鉄筋を減らした供試体である UBRC-3 供試体と RC 供試体の P-Δ 履歴曲線、骨格曲線を比較すると、UBRC-3 供試体において正の二次剛性が発現することにより、降伏耐力が

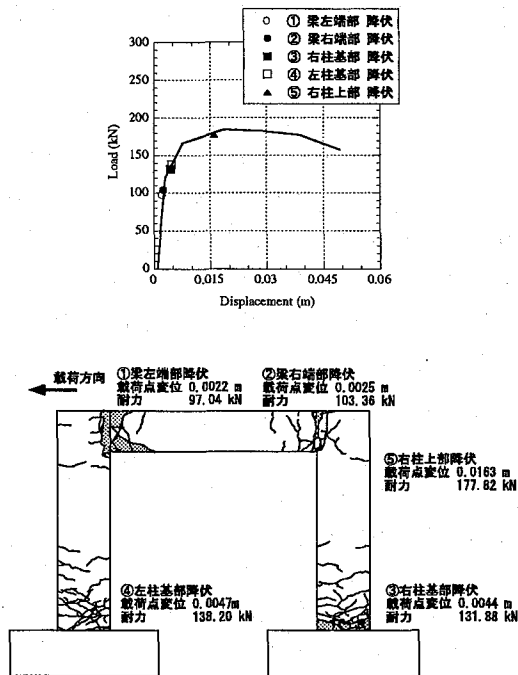


図-8 RC 供試体の降伏過程とひび割れ分布

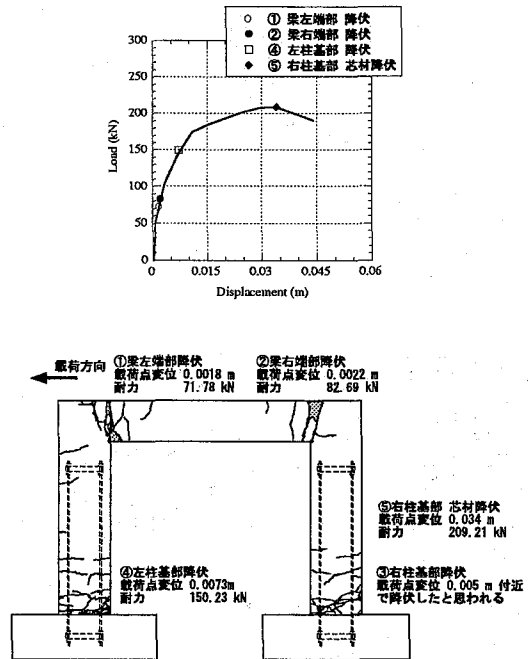


図-9 UBRC-1 供試体の降伏過程とひび割れ分布

RC 供試体よりも小さく、最大耐力が RC 供試体と同等、若しくは大きい復元力特性が実現できていることが分かる。ラーメン橋脚構造においてこのような構造特性が実現できることは、既往の研究において単柱式橋脚で検討してきた二次剛性を利用した二段階耐震設計法⁶⁾をラーメン橋脚へ適用する上で有用であると考えられる。

(2) 降伏過程とひび割れ分布

図-8～図-11 に、各供試体の主鉄筋、及び、芯材の降伏過程と載荷実験終了時のひび割れ分布図を示す。本研究では、主鉄筋、及び、芯材に設置したひずみゲージの値を基に各部材の降伏を判定している。すなわち、柱基部では、基部から 0.5D 区間 (0.16m) の主鉄筋のひずみ、柱上部では上部より 0.5D 区間 (0.16m) の主鉄筋のひずみ、さらに、梁部では、梁端部より 0.5D 区間 (0.125m) の主鉄筋のひずみが 1405μ を越えた時をそれぞれの部分の塑性化、降伏時と定義している。また、芯材に関しては、芯材ひずみが 5000μ を越えた時を降伏時としている。

まず、RC 供試体の降伏過程では、載荷点変位 0.002 ～ 0.003m の間に梁両端が塑性化し、その後、載荷点変位 0.004 ～ 0.005m において左右柱基部が塑性化している。そして、載荷点変位 0.016m 付近で、右柱上部の主鉄筋が降伏している。しかし、柱上部のひび割れが少なく、その幅が小さいこと、及び、左柱上部の主鉄筋が

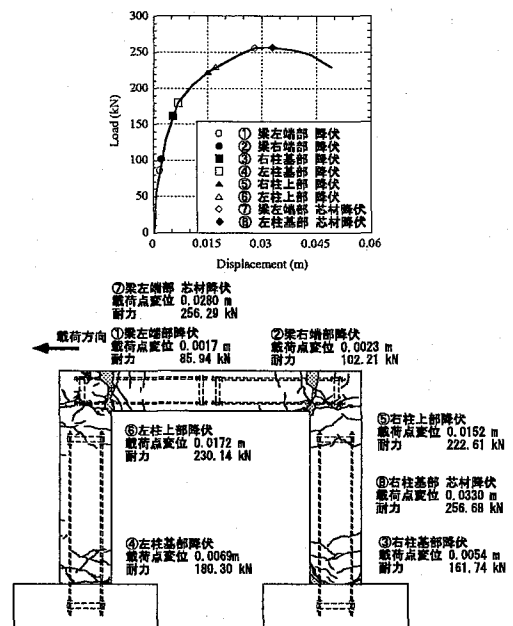


図-10 UBRC-2 供試体の降伏過程とひび割れ分布

降伏していないことから、柱上部の塑性化は大きくないものと判断できる。橋脚全体の復元力特性では、梁両端、左右柱基部の塑性化が進行するに従って、剛性が低下し、右柱上部の降伏後は、一定の耐力を保つ、若しくは、緩やかに下降を始めている。次に、柱基部にのみ芯材を配置している UBRC-1 供試体では、梁両端、柱基部などの降伏過程は、ほぼ RC 供試体と同じであ

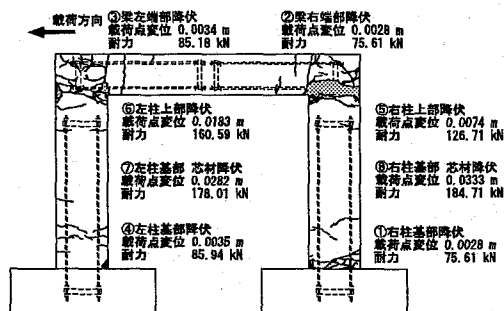
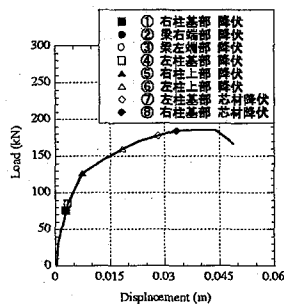


図-11 UBRC-3 供試体の降伏過程とひび割れ分布

り、左右柱上部の塑性化も確認できなかった。復元力特性では、梁両端と左右柱基部の塑性化に伴い、橋脚の剛性が低下しているが、右柱基部に配置した芯材が降伏するまで（荷重点変位 0.034m）RC 供試体には見られない二次剛性が発現し、耐力の増加が続いている。

以上より、RC、UBRC-1 供試体では、概ね、同様な降伏過程を示していることが明らかとなった。これに対し、梁両端に芯材を配置している UBRC-2 供試体では、RC、UBRC-1 供試体とは異なる破壊過程が確認できる。梁両端部、左右柱基部の塑性化の順序、変形状態は、RC、UBRC-1 供試体とほぼ同様であるが、UBRC-2 供試体では、荷重点変位 0.015 ～ 0.020m において左右柱上部が塑性化していることが相違点として確認できる。ひび割れ分布図でも、RC、UBRC-1 供試体と異なり左右柱上部のひび割れが増加し、進展している。また、UBRC-2 供試体から主鉄筋を減らした UBRC-3 供試体でも、左右柱上部が大きく塑性化している。UBRC-2、3 供試体において柱上部の損傷が進行した原因としては、梁に芯材を配置したことが考えられる。つまり、UBRC ラーメン橋脚では芯材の配置箇所、特に、梁に対する芯材の配置により橋脚全体の破壊過程が変化することが分かる。

5. まとめ

本研究では、アンボンド芯材を用いたラーメン橋脚構造である UBRC ラーメン橋脚構造の弾塑性復元力特

性を明らかにすることを目的として、正負交番荷重実験による検討を行った。その結果、以下のようなことが明らかとなった。

- 柱基部や梁端部に芯材を配置することにより、ラーメン橋脚構造でも、その復元力特性に二次剛性を付与できることを実証した。また、柱基部のみに芯材を配置した場合と梁にも芯材を配置した場合では、後者の方が二次剛性が大きくなり、芯材の配置箇所の相違が二次剛性の大きさに影響を与えることを明らかにした。
- 柱、梁部の主鉄筋を減らしても、芯材を配置することにより、降伏耐力は、RC ラーメン橋脚より小さいものの、最大耐力は、同等、若しくは大きい復元力特性を有する UBRC ラーメン橋脚を実現できることを実証した。このことは、二次剛性を利用した二段階耐震設計法をラーメン橋脚へ適用する上で有意であると考えられる。
- 梁に芯材を配置した場合、柱上部の損傷が早期化し、大きくなる傾向が正負交番荷重実験により確認された。UBRC ラーメン橋脚では、芯材の配置箇所によって構造全体の破壊過程が変化するものと考えられる。

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) 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。
- 2) 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, pp.283-296, 2002 年 7 月
- 3) 幸左賢二、吉原聡、田中克典、田口純子：RC ラーメン橋脚梁部の耐震性能評価実験、第 5 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.271-276, 2002 年
- 4) 渡邊英一、杉浦邦征、永田和寿、古川正宏、徳林宗孝、陵城成樹：鋼製ラーメン橋脚の弾塑性面内挙動に関する実験的研究、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.195-200, 1999 年
- 5) 高橋良和、家村浩和、曾我部直樹：アンボンド芯材入り RC 構造の解析モデルと芯材パラメータの影響、構造工学論文集、Vol. 49A, pp.945-954, 2003 年 3 月
- 6) 家村浩和、高橋良和、曾我部直樹：二次剛性を利用した二段階耐震設計法の提案と UBRC 橋脚への適用、第 27 回地震工学研究発表会論文集（CD-ROM）、No.196, 2003。