

RC 単柱橋脚の耐震設計

東京都市大学/吉川研究室, エイト日本技術開発

橋脚は材料や構造形式によって種々のものがある。立地条件や形状に制約をうける都市部の橋脚や、流水に配慮が必要な河川内の橋脚、あるいは山岳地における橋脚など、架設する地形の条件や環境の条件によって、適切な構造形式と形状が決定されるものである。

本論では図-1.1 に示すような、一般的な道路橋の橋脚に着目し、各種構造形式を紹介するとともに、耐震設計の概要を述べ、RC 単柱橋脚を対象とした耐震設計事例（静的照査法）を示すものである。

目 次

1.橋脚の特徴と形式	
1.1 橋脚の役割.....	1
1.2 橋脚形式.....	1
2.RC 単柱橋脚の地震時挙動	
2.1 橋脚の地震時における揺れ方.....	5
2.2 RC 橋脚特有の破壊モードと履歴特性.....	6
2.3 RC 橋脚の地震被害の特徴.....	9
3.耐震設計法	
3.1 耐震設計の手順.....	11
3.2 レベル2 地震動に対する耐震設計.....	12
3.3 耐震性能.....	14
3.4 耐震性能照査法.....	15
参考文献.....	27

1. 橋脚の特徴と形式

1.1 橋脚の役割

橋脚は橋の上部構造を支え、これを地盤に安全に伝える役割をもつ。

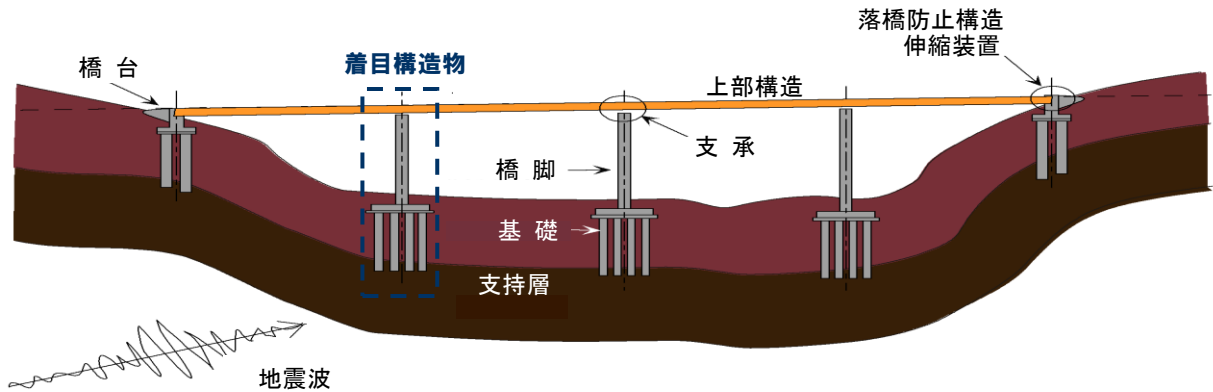


図-1.1 着目構造物

橋脚を設計する際、考慮しなければならない荷重は上部構造から伝達される荷重だけではなく、橋脚全体の荷重と流水に対する流圧、風圧、地震に耐えられる設計でなければならない。

そのため橋脚の計画に際しては、架橋地点における環境や地盤の特性を十分に調査し、上部工および下部工の両面から安全性、耐久性、機能性、環境適合性、経済性などから総合的に検討がなされ、材料、形状などが決定される。

1.2 橋脚形式

道路橋の橋脚の材質は主に鋼鉄製、鉄筋コンクリート製、および鋼コンクリートの複合材料によるものに分類できる。

(1) 鋼製橋脚

設計の自由度が高く、様々な形状が可能である。また、自重がコンクリート製より軽量であり、現場での施工期間が短く、外観的にスレンダーな構造となる利点をもつことから種々制約の多い都市部の高架橋などで鋼製橋脚が多く採用されている。



写真-1.1 鋼製橋脚（ラーメン式）



写真-1.2 鋼製橋脚（単柱式）

(2) 鉄筋コンクリート (RC) 橋脚

材料費が鋼製橋脚に比べて安価であり、道路橋の橋脚では最も一般的に使用される形式である。構造形式には壁式橋脚、張出式(方持式)橋脚、パイルベント式(多柱式基礎)橋脚、ラーメン式(π 型)橋脚があり、柱の断面形状は外観形状として矩形、円形、楕円(小判)形などがあり、断面内部として充実断面と中空断面がある。

1) 壁式橋脚

一般的な構造形式で、躯体が直接上部構造から伝達される荷重を支持し、フーチングを介して地盤に荷重が伝達される。なお、河川などでは断面形状に楕円(小判)形断面などが採用される。

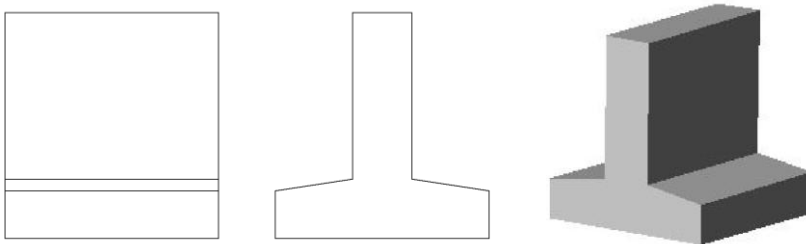


図-1.2 壁式橋脚(矩形断面)



写真-1.3 壁式橋脚(矩形断面)

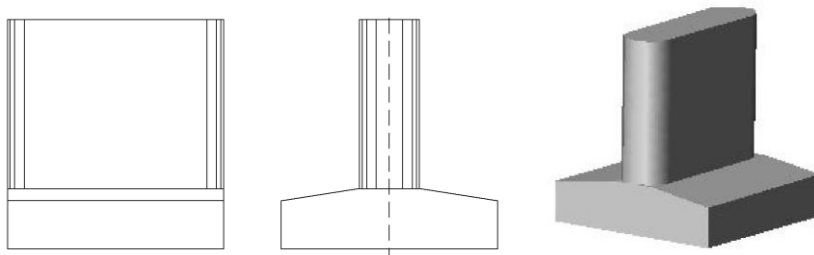


図-1.3 壁式橋脚(小判型断面)



写真-1.4 壁式橋脚(小判型断面)

2) 張出式(片持式)橋脚

一般的な構造形式で、上部構造から伝達される荷重を梁部で支持し、柱(壁)部、フーチングを介して地盤に荷重が伝達される。なお、曲線橋など水平力として主方向を持たない構造の場合には円形断面が採用される。

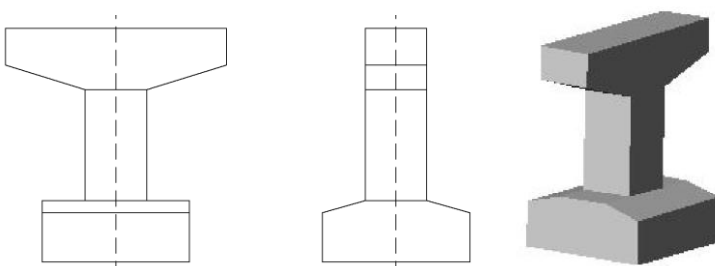


図-1.4 張出式橋脚(矩形断面)



写真-1.5 張出式橋脚(矩形断面)

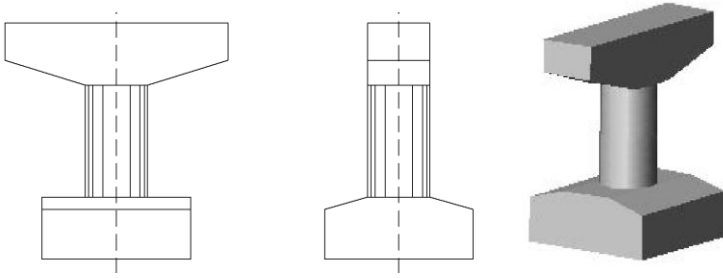


図-1.5 張出式橋脚(円形断面)



写真-1.6 張出式橋脚(円形断面)

3) パイルベント式(多柱式基礎)橋脚

杭基礎頂部を横梁で結合したラーメン構造であり、河川や海岸地域、急峻な山岳部などの基礎や橋脚施工において大きな制約（周辺環境を大きく改変する必要がある場合や仮設が大規模になるなど）をうける箇所で採用される構造形式である。

上部構造から伝達される荷重を梁部で支持し、多柱を介して地盤に荷重が伝達される。

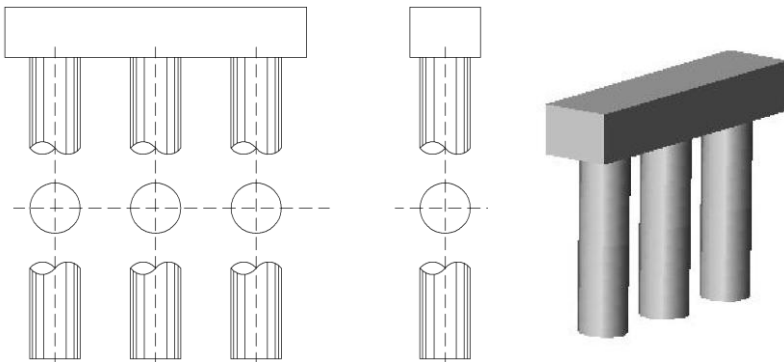


図-1.6 パイルベント式橋脚



写真-1.7 パイルベント式橋脚

4) ラーメン式(π型)橋脚

上部構造幅が比較的大きい場合（目安として 15m 以上）に採用される構造形式である。

上部構造から伝達される荷重を梁部で支持し、柱、フーチングを介して地盤に荷重が伝達される。

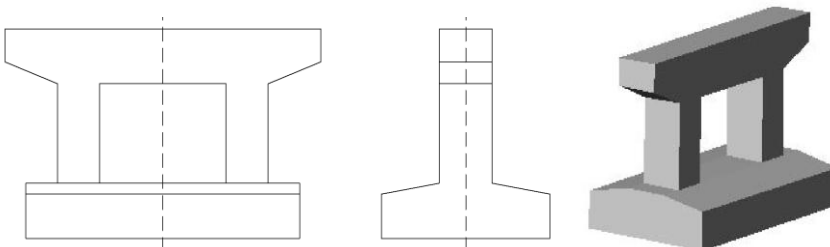


図-1.7 ラーメン式橋脚



写真-1.8 ラーメン式橋脚

(3) 鋼コンクリート複合橋脚

鋼とコンクリートの複合構造は、形状に自由度の高い鋼鉄と、安価で圧縮力に強い RC 部材を組み合わせた構造形式である。事例としては、鋼製梁と RC 柱を組み合わせた複合橋脚や RC 柱に鋼管を埋め込んだ鋼管コンクリート複合橋脚などがある。

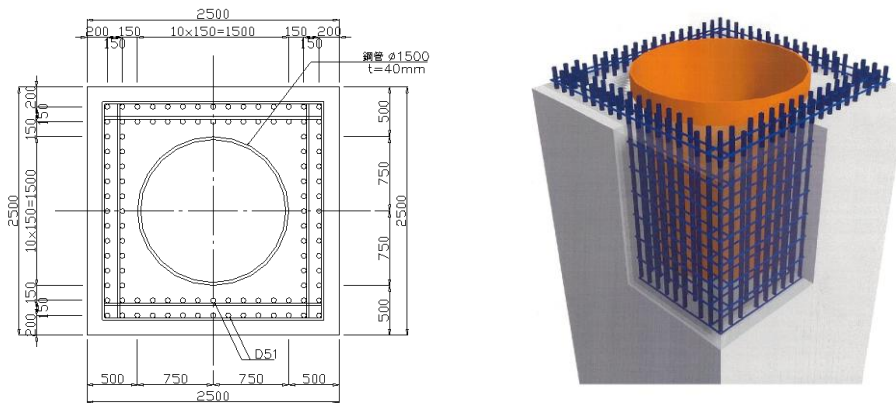


図-1.8 鋼コンクリート複合橋脚

2. RC 単柱橋脚の地震時挙動

地震時の橋梁の振動特性は、固有振動特性および減衰特性に代表される。レベル2地震動のような大規模の地震に対しては、これ以外に地盤や構造物の非線形特性、履歴減衰特性が重要となる。

橋梁構造物が要求されている耐震性能を満足するためには、地震入力エネルギーを橋梁全体系または一部で吸収しなければならない。このエネルギー吸収能力が地震入力エネルギーを下回った場合、落橋等の最悪の事態になることもある。橋梁全体系のエネルギー吸収能力は、地盤、基礎、地盤-基礎間、橋脚、橋脚-上部構造間の部位の能力に依存する。どの部位にどの程度のエネルギーを吸収させるかが橋梁構造物の応答を左右する。塑性領域の応答を前提とした場合、エネルギー吸収のほとんどが履歴減衰によるものとなる。

そこで、ここでは RC 単柱橋脚の地震時挙動に着目し、塑性領域での一般的な挙動、履歴減衰特性（エネルギー吸収能力）を示す。

2.1 橋脚の地震時における揺れ方

ここでは上部構造を、支承構造を介して支持する RC 橋脚の地震時挙動について述べる。

構造物の振動は、構造物自体の剛性（硬さ）と質量（重さ）によって、地震時に揺れやすい周期（固有周期）と支配的となる揺れの形状（固有振動モード）が決まる。図-2.1 に固有周期と固有振動モードの模式図を示す。

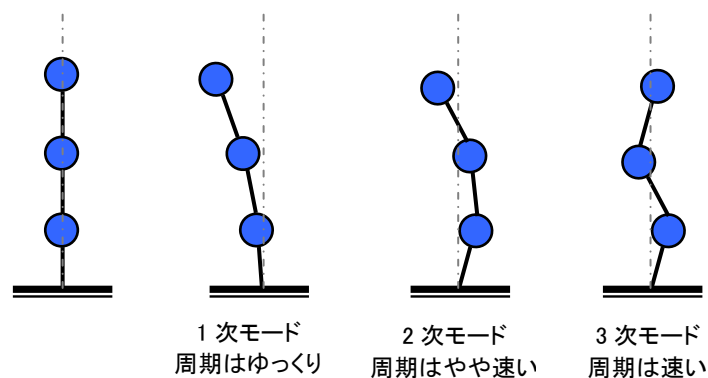


図-2.1 固有周期と固有振動モード

設計地震動の強さは、周期によって変化するため、構造物の揺れやすい振動（周期帯）を把握した上で設計地震動を決定する必要がある。これらの構造物特有の固有振動特性を固有値といい、固有値解析で求めることができる。

以下に、橋梁各部位の固有周期の事例を示す。

- 一般的な高架橋の下部構造 0.5～1.0 秒
- ゴム系支承 1.0～1.5 秒
- 杭基礎 ～0.3 秒

ここで取り上げる一般的な桁橋を支持する RC 橋脚の固有振動モードは、上部構造の慣性力による 1 次モードの揺れが支配的となる (図-2.2) ことから、橋脚の応答加速度は一自由度系のそれとほぼ等しくなることから、震度法 (レベル 1) やエネルギー一定則に基づく地震時保有水平耐力法 (レベル 2) のような静的解析法が適用可能である。

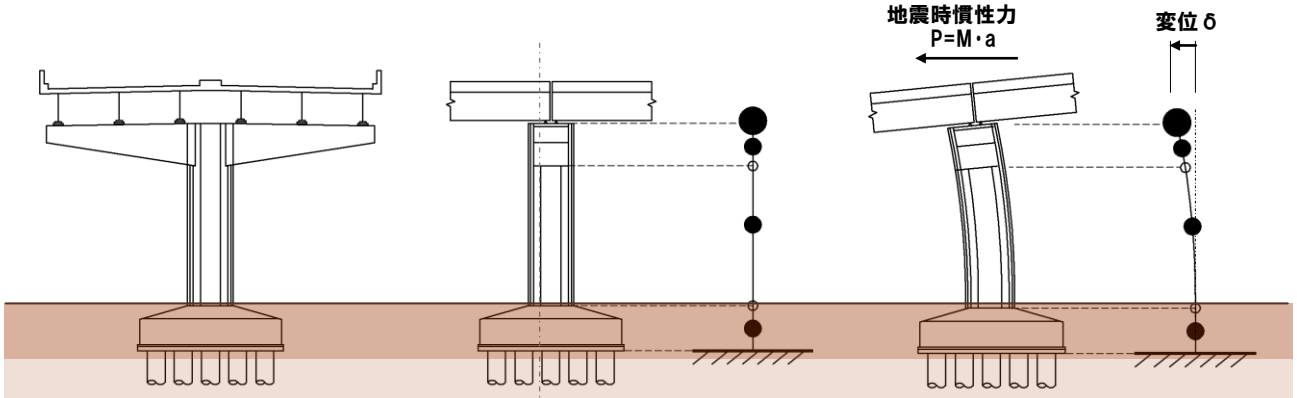


図-2.2 一般的な RC 橋脚の固有振動モードと変形

ただし、橋脚高の大きな高橋脚 (写真-2.1) は、1 次モードのみならず、2 次、3 次といった高次モードの影響を受けることから、橋脚に発生する応答加速度は複雑な形となる。このような複雑な振動系を有する構造物の耐震設計は動的解析によるのが合理的である。



写真-2.1 高橋脚

2.2 RC 橋脚特有の破壊モードと履歴特性

図-2.2 に示すような一般的な RC 橋脚において、上部工慣性力作用位置に荷重をかけた時の水平荷重-水平変位曲線は図-2.3 のとおりとなる。橋脚基部 (曲げモーメント最大) において、①コンクリートのひびわれ ②鉄筋降伏 ③かぶりコンクリートの剥落 ④鉄筋はらみだし座屈・破断 (終局) と断面損傷が進行する。地震力のように繰り返し荷重を受けると、剛性低下を伴いつつ図-2.4 のような履歴を描く。

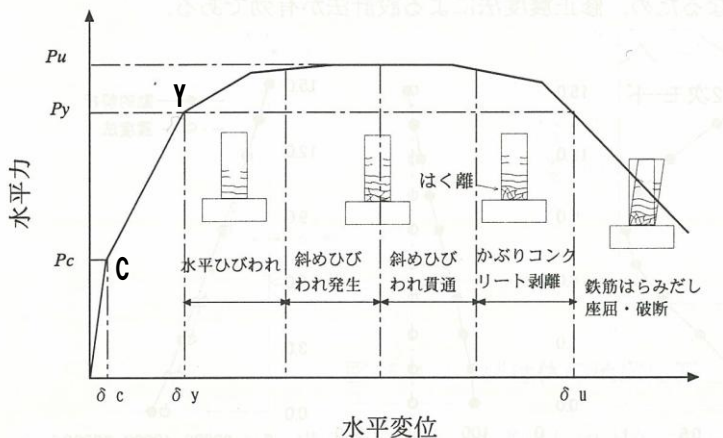


図-2.3 RC 橋脚の損傷プロセス

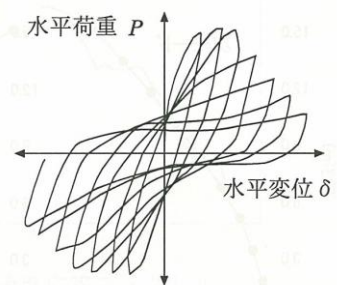


図-2.4 RC 橋脚の履歴特性

RC 橋脚において、断面の引張側にひびわれが発生し（図-2.3 点 C）、その後鉄筋が降伏し（図-2.3 点 Y）、終局に至る過程で断面剛性は低下するため、RC 橋脚は非線形な挙動を示す。適切に設計された RC 橋脚であれば、耐力を保ったままで降伏変位 δy の数倍もの大きな塑性変形に耐えることが可能である。すなわち、RC 橋脚は鉄筋の降伏以降、大きな塑性変形挙動の中で大きなエネルギー吸収能力を発揮する特徴がある。

圧縮鉄筋と引張鉄筋が等しく配置された断面をもつ RC 部材が純曲げモーメントを受けた場合、理屈上は鉄筋の座屈や伸びの限界に達するまで塑性変形することができる。また、コンクリートは三軸圧縮状態ではコンクリートの終局耐力およびひずみが増加することが分かっている。RC 橋脚にはこのような優れた特性がある一方で、せん断耐力が不足していたり、軸方向鉄筋が不用意に定着されていたり、帯鉄筋による内部拘束（主鉄筋を含めた内部コンクリートの拘束）が不十分であると、降伏耐力に達する前、あるいは降伏耐力に達しても、塑性変形が大きくなる前に耐力が低下し、脆性的な挙動を示すことになる。

地震時の RC 橋脚の破壊形態は以下の 4 パターンに集約できる。

- ① 曲げモーメントにより鉄筋が降伏し、その後コンクリートが圧縮破壊するパターン
(曲げ圧縮破壊)
- ② 曲げモーメントにより鉄筋が降伏し、その後コンクリートが圧縮破壊する前に鉄筋が破断するパターン
(曲げ引張破壊)
- ③ 曲げモーメントにより鉄筋が降伏し、その後断面性能の低下によりせん断耐力が減少し、せん断破壊するパターン
(曲げせん断破壊)
- ④ 鉄筋の降伏以前にせん断破壊するパターン
(せん断破壊)



写真-2.2 曲げ破壊

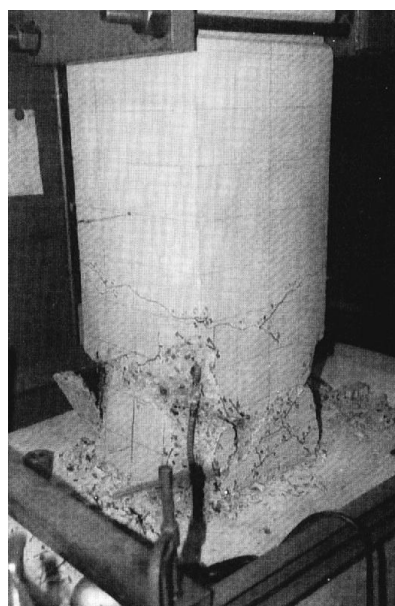


写真-2.3 曲げせん断破壊



写真-2.4 せん断破壊

上記の破壊形態は、軸方向鉄筋量、帯鉄筋量、せん断スパン比、軸圧縮力、荷重の繰り返し回数などに支配される。すなわちこれらによって算定される曲げ耐力 P_u （終局水平耐力）とせん断耐力 P_s との大小で破壊形態が決定される。ここに、破壊形態の判定基準を示す

$P_u < P_s$	曲げ破壊
$P_s < P_u < P_{s0}$	曲げ破壊からせん断破壊移行(曲げせん断破壊)
$P_{s0} < P_u$	せん断破壊
<p>P_{s0} : 正負交番繰り返し作用の影響に関する補正係数を 1.0として算出される RC 橋脚のせん断耐力</p>		

地震荷重を受けた RC 橋脚において、軸方向鉄筋が降伏した後の変形性能に期待し、安定した耐力を発揮する（曲げ破壊型）ためには、内部コンクリートを適切に拘束し、鉄筋の座屈を防ぐことが重要となる。このため帯鉄筋の適切な配置ならびに構造細目に対する配慮が重要となる。

2.3 RC 橋脚の地震被害の特徴

ここでは、平成 8 年、14 年と「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編」の改定のきっかけとなった兵庫県南部地震（1995 年 M=7.2）の被害を紹介する。

震源地は明石海峡、震源深さは 14km。神戸市を中心に甚大な被害を与える。

【被害の特徴】

- ・ RC 橋脚の脆性的な破壊、倒壊（せん断破壊）
- ・ RC 橋梁の段落し部の損傷
- ・ 鋼製橋脚の座屈
- ・ ゲルバー桁、曲線桁の落橋

【被害写真】



☞ 円形断面の柱を有する張出式橋脚で、橋軸方向の地震力によってせん断破壊に至った事例である。段落とし位置付近から斜めひび割れが進展し、拡大したものと推察される。

写真-2.5 RC 橋脚 せん断破壊状況



☞ 上部構造と橋脚が一体構造のピルツ橋脚で、当形式 17 基がすべて一体となって倒壊に至った事例である（左）。橋軸直角方向の地震力によって、段落とし位置付近から斜めひび割れが進展し拡大、その後 P- δ 効果（自重が一方向に载荷し続ける）により崩壊に至ったと推察される。

写真-2.6 ピルツ式橋脚 倒壊状況



☞ 円形断面の柱を有する張出式橋脚で、橋軸方向の地震によって柱基部で曲げ破壊に至った事例である。地震による繰り返し荷重により、かぶりコンクリートは剥落し、主鉄筋ははらみだし、さらに鉄筋内部のコアコンクリートの破壊に至ったと推察される。

写真-2.7 RC 橋脚 曲げ破壊状況



☞ 円形断面の柱を有する張出式橋脚で、地震によって段落とし部の全集に渡ってかぶりコンクリートの剥落および軸方向鉄筋のはらみ出しが発生している。帯鉄筋はフックのない重ね継手であったため、鉄筋内部のコンクリートの拘束効果はなく、一部帯鉄筋が落下している（左）。

写真-2.8 RC 橋脚 段落とし部破壊状況