

(129) プレキャストセグメント橋脚の耐震性に関する実験的研究

(株) ピー・エス	本社土木技術部	正会員	○森 拓也
	同 上	正会員	鈴木宣政
(株) 富士ピー・エス	東京支店	正会員	太田 豊
	同 上	正会員	濱田直明

1. まえがき

プレストレストコンクリート橋脚の実施工への適用を考えた場合、省力化や工期短縮の観点から、プレキャストセグメント構造が有効であると考えられる。実際に、欧米においては、橋脚をプレキャストセグメント構造とした例がいくつか報告されているが、これらは大規模地震の発生がないと予測される地域のものであり、日本での適用を考えた場合には、プレキャストセグメント橋脚の耐震性状についての十分な研究が必要である。

本研究は、(社)プレストレストコンクリート技術協会「橋脚PC構造研究委員会」(委員長:池田尚治 横浜国立大学教授)が行った委託研究の一環として行ったものであり、プレキャストセグメント橋脚に対して行った正負交番載荷試験の結果とその基本的な耐震性状について報告する。

2. 実験概要

2.1 供試体

供試体は、40cm×40cmの正方形断面であり、載荷スパンは1.5mである。供試体一覧を表-1に示す。PCa-4、PCa-8はいずれもプレキャストセグメント供試体(以下、プレキャスト供試体)であり、それぞれ4MPaと8MPaのプレストレスが導入されている。セグメントの継目は、図-1に示すように基部および基部から1D(40cm)に位置し、この部分では軸方向鉄筋は貫通していない。製作は、フーチング打設後に打ち継ぎ部のレイタンスを除去し、コンクリートが硬化した後、第1セグメント(基部から40cmの範囲)を打ち足し、さらに同様の手順によって、第2セグメントを打ち足して行った。継目部にはせん断キーは設置しておらず、PC鋼材のみによって緊結された構造となっている。一方、PRC-4、PRC-8はプレキャスト供試体との比較対象となる供試体であり、フーチングと柱部分を一体打ちしたPRC構造の供試体(以下、一体打ち供試体)である。プレストレスはセグメント供試体と同様に、それぞれ4MPaと8MPaが導入されている。PC鋼材はすべて規格降伏点の50%で緊張されており、緊張作業後のグラウト注入によって付着を確保した。帯鉄筋については、供試体が曲げ破壊先行となるように必要な量を配置している。

交番載荷試験日に行ったコンクリートの圧縮強度試験結果、および鉄筋、PC鋼材のミルシートによる強度を表-2にまとめて示す。

2.2 載荷

実験は、鉛直方向に一定軸力を与えながら、水平方向に正負交番荷重を与えて行った。載荷サイクルは、計算上のひび割れ荷重、最外縁の軸方向鉄筋降伏時、これ以降は回転角(載荷点変位/載荷スパン)で制御し、1/200rad(載荷点変位 $\delta=7.5\text{mm}$)の整数倍ずつ漸増させた。同一変位での繰り返し回数は1回とし、原則として最大荷重が80%に低下するまで載荷を繰り返すこととした。

表-1 供試体一覧

供試体名	断面形状	軸心力度 (MPa)	コンクリート強度 (MPa)	プレストレス (MPa)	付着の有無	帯鉄筋	P C鋼材	軸方向鉄筋	備考
PCa-4	中実	1.0	35.0	4.0	有り	D6@30	8×SWPR7Bφ12.7	—	プレキャスト
PCa-8	中実	1.0	35.0	8.0	有り	D10@40	8×SWPR19φ17.8	—	プレキャスト
PRC-4	中実	1.0	35.0	4.0	有り	D6@30	8×SWPR7Bφ12.7	16×D10	一体打ち
PRC-8	中実	1.0	35.0	8.0	有り	D10@40	8×SWPR7Bφ17.8	16×D10	一体打ち

表-2 材料の特性値

供試体名	コンクリート		帯鉄筋		軸方向鉄筋		P C鋼材	
	圧縮強度	弾性係数	降伏強度	弾性係数	降伏強度	弾性係数	降伏強度	弾性係数
	σ_c (MPa)	E_c (MPa)	σ_{sy} (MPa)	E_s (MPa)	σ_{sy} (MPa)	E_s (MPa)	σ_{py} (MPa)	E_p (MPa)
PCa-4	41.6	2.66×10^4	389	2.10×10^5	—	—	1758	1.95×10^5
PCa-8	40.8	2.63×10^4	377	2.10×10^5	—	—	1771	1.92×10^5
PRC-4	42.2	2.48×10^4	387	2.06×10^5	401	2.06×10^5	1754	1.94×10^5
PRC-8	32.8	2.48×10^4	401	2.06×10^5	401	2.06×10^5	1791	1.90×10^5

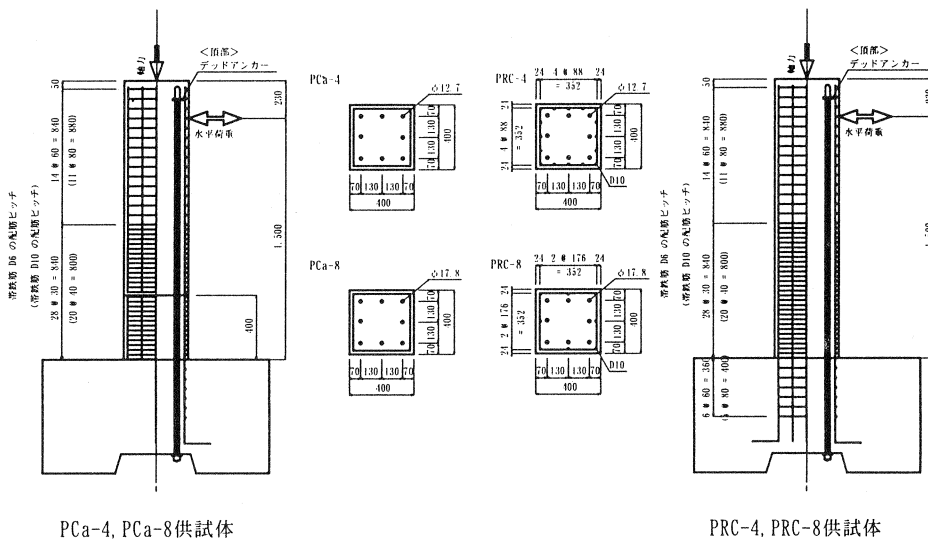


図-1 供試体構造図

3. 実験結果

3.1 荷重-変位関係

各供試体の荷重-変位関係を図-2に示す。図中には、目視による軸方向鉄筋の座屈(●)および破断(▲)とPC鋼材が降伏点(○)に達した時点を示している。PC鋼材の降伏は、実験で計測した増加ひずみと初期導入ひずみとの和が、ミルシートによる降伏ひずみに達した時点とした。プレキャスト供試体PCa-4、PCa-8では、PC鋼材が降伏した時点でほぼ最大荷重となり、それ以降はきわめて緩やかな載荷荷重の減少を示す。一方、一体打ちの供試体PRC-4、PRC-8においても、載荷荷重は最大点の後緩やかに減少するが、軸方向鉄筋の座屈、破断を経て減少の度合いが大きくなる傾向にある。したがって、よく行われるように載荷荷重が最大値の80%に低下した時点を終局とした場合、プレキャスト供試体は一体打ちの供試体に比べて高い変形性能を有していると言える。

実験で得られた荷重-変位関係から、各変位ごとの累積吸収エネルギーと残留変位を求め、図-3、4に示す。累積吸収エネルギーについては、各供試体ごとの曲げ破壊耐力が異なっていることから、最大荷重で除して正規化している。累積吸収エネルギーに着目すると、部材角4/200($\delta=30.0\text{mm}$)程度までは大きな差は生じていないが、それ以降は徐々にプレキャスト供試体のエネルギー吸収が小さくなっている。また、残留変位は、プレキャスト供試体と一体打ち供試体とで明らかな差があり、特に、部材角10/200($\delta=75.0\text{mm}$)程度までのプレキャスト供試体の残留変位は際だって小さい。以上より、プレキャスト供試体は一体打ち供試体に比べ、エネルギー吸収、残留変位がともに小さく、原点指向に近い履歴性状を有していると言える。また、PCa-4とPCa-8の累積吸収エネルギー、残留変位には大きな差はなく、導入プレストレスの相違が履歴性状に与える影響は小さいと考えられる。

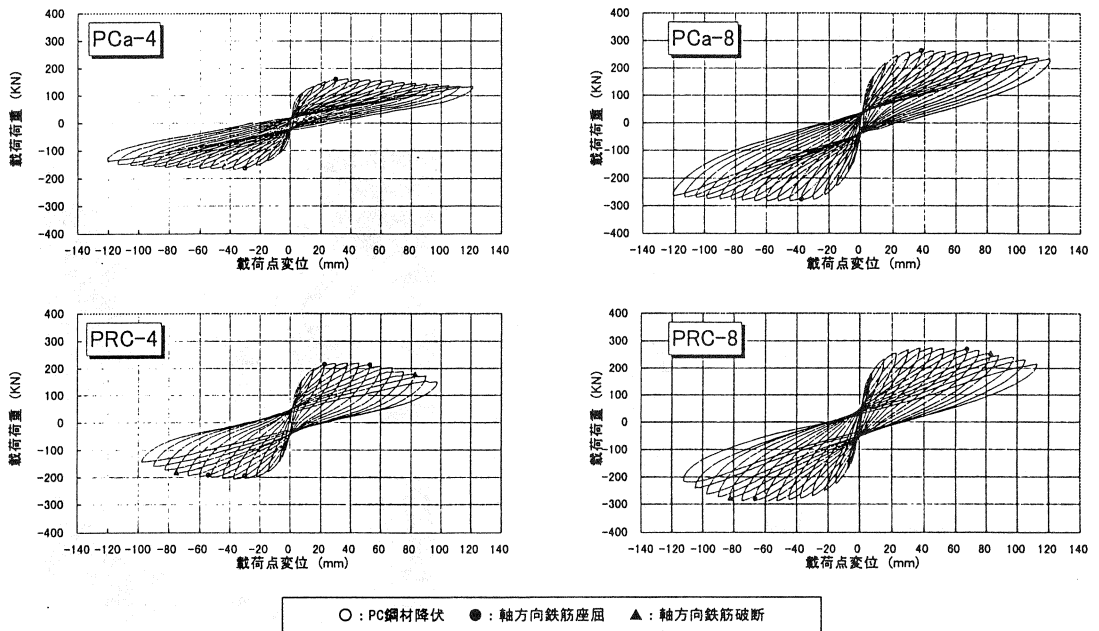


図-2 荷重-変位関係

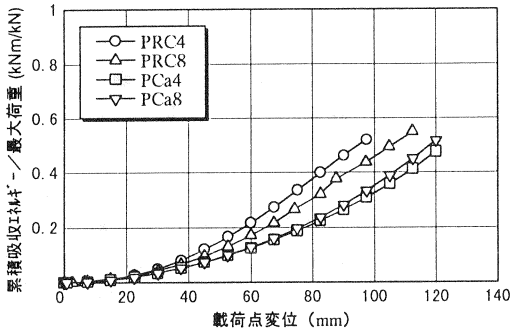


図-3 累積吸収エネルギー

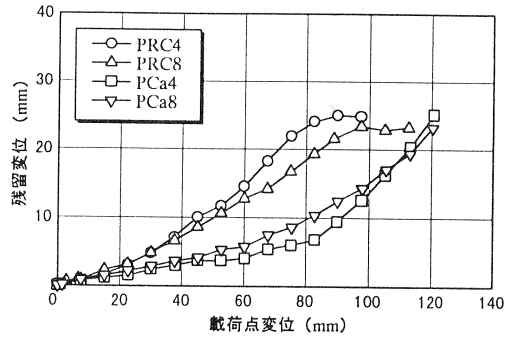


図-4 残留変位

3. 2 損傷状況

各供試体の回転角 5/200、10/200 および載荷終了時点のひび割れおよびかぶりコンクリートの剥落を図-5に示す。全体的には、プレキャスト供試体は一体打ち供試体に比べてひび割れ本数が少なくなっている。また、プレキャスト供試体の損傷は継目部に集中しており、載荷変位が大きくなっても継目部の開きは大きくなるが、継目部以外のひび割れが大きく進展することはなかった。本実験では、PCa4 供試体は際だって柱部分のひび割れが少なくなっている。この原因については、必ずしも明らかではないが、柱直下のフーチング内の損傷が激しかったことが実験中に観察されており、この部分が回転することにより変形に追従したのではないかと推察される。また、かぶりコンクリートの剥離については、プレキャスト供試体と一体打ち供試体とで大きな差はなく、いずれの場合も 8MPa のプレストレスを与えた供試体の方が、4MPa の供試体より早期にかぶりが剥離し、その範囲も大きくなっている。部材角 16/200 における PCa-8 と PRC-8 供試体の損傷状況を写真-1に示す。プレキャスト供試体 PCa-8 では、かぶりコンクリートは剥離しているが、軸方向鉄筋やPC鋼材が座屈しないことにより、大変形状態においても帯鉄筋内のコアコンクリートはきわめて健全であることが確認できる。

なお、本実験ではセグメント継目にせん断キーを配置していないが、実験終了に至るまで継目部のずれは確認されなかった。

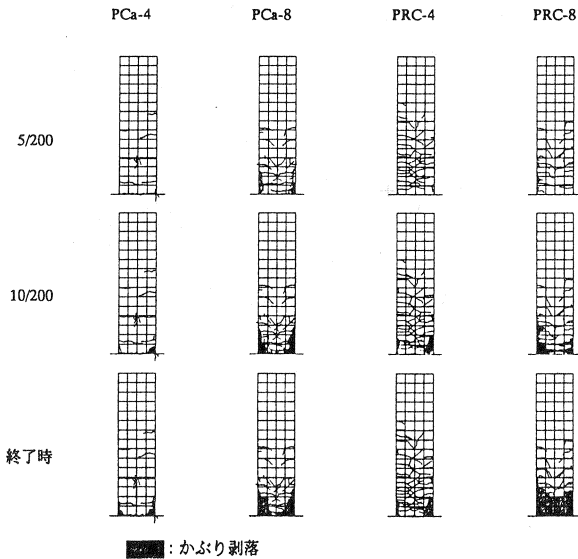


図-5 損傷状況

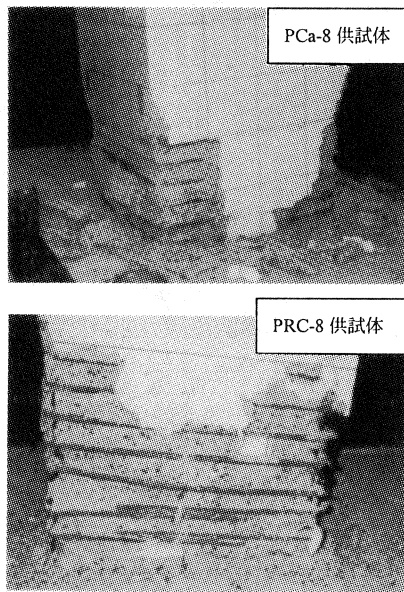


写真-1 基部損傷

3. 3 PC鋼材の増加ひずみ

各載荷点変位における基部のPC鋼材の増加ひずみを図-6に示す。測定値は(1)橋脚基部位置および(2)基部から40cm上方位置において、PC鋼材(φ12.7、φ17.8)に貼り付けた4枚のひずみゲージの平均値であり、それぞれ、引張側のPC鋼材の値である。PC鋼材には、規格降伏点の50%の初期緊張力が与えられているので、増加ひずみが約6000μに達したときがPC鋼材の降伏(0.2%残留ひずみ)に相当する。

φ12.7を8本配置し、4MPaのプレストレスを与えたPca-4とPRC-4供試体の橋脚基部での結果を比較すると、載荷点変位がそれほど大きくない範囲においては、両者に顕著な差はない。しかし、部材角4/200($\delta=30\text{mm}$)以上になると、プレキャスト供試体のPC鋼材ひずみが急激に大きくなっている。φ17.8を8本配置し、8MPaのプレストレスを与えたPca-8とPRC-8供試体においても、橋脚基部では同様の傾向が見られ、5/200($\delta=37.5\text{mm}$)以降では、プレキャスト供試体と一体打ち供試体との差が大きくなっている。プレキャスト供試体の鋼材ひずみが急激に大きくなる時点の増加ひずみ量を見ると、Pca-4、Pca-8いずれの供試体も約6000μであり、これはPC鋼材の降伏に相当する。

一方、基部から40cm上方位置における増加ひずみをみると、いずれも降伏には至らず、プレキャストと一体打ち供試体とで大きな差はない。この位置は、プレキャスト供試体ではセグメント継目部であるが、基部継目部のように大きな増加ひずみが生じていないことから、大変形に対しては、主として基部継目部の目開きで追従していると考えられる。

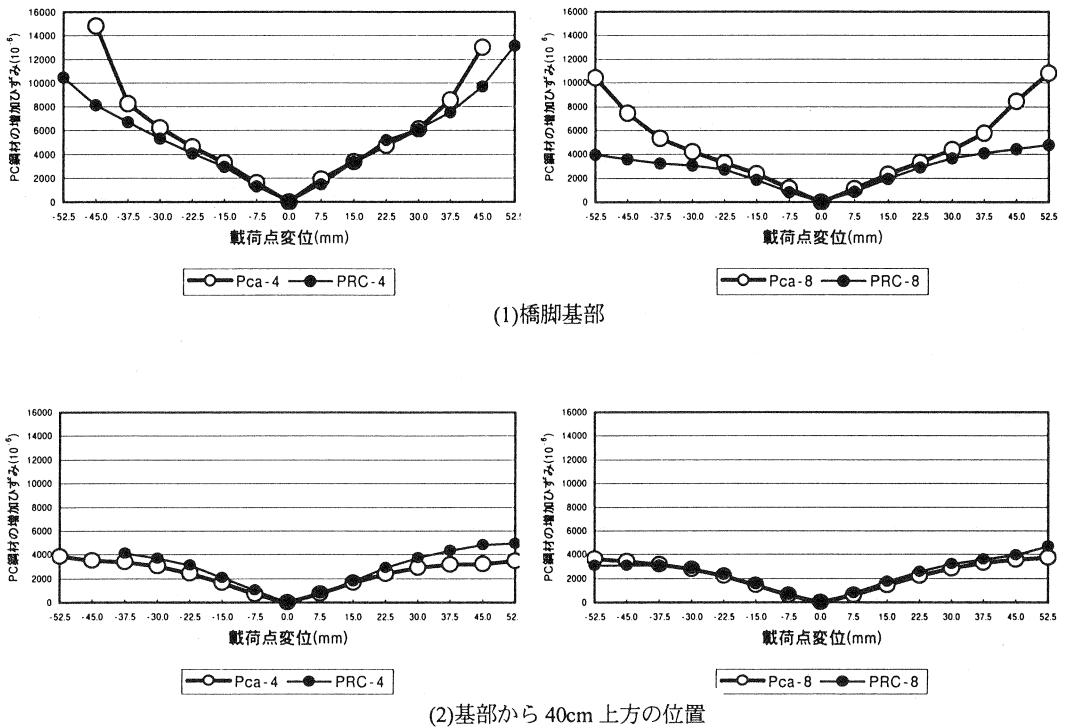


図-6 PC鋼材の増加ひずみ

4. まとめ

今回行った正負交番載荷実験から、以下のようなプレキャスト橋脚の耐震特性が明らかになった。

- ① プレキャスト供試体では、PC鋼材の降伏時にほぼ最大荷重となり、それ以降はきわめて緩やかな耐力低下を示す。したがって、載荷荷重が最大荷重の80%に低下した時点を終局とすれば、一体打ちのPRC供試体に比べて高い変形性能を有していると言える。
- ② プレキャスト供試体は、一体打ちのPRC供試体に比べて、エネルギー吸収性能、残留変位ともに小さくなり、その履歴は原点指向モデルに近い。
- ③ プレキャスト橋脚において、導入プレストレスを4MPaとした供試体と8MPaとした供試体とで、その履歴性状に大きな差はない。したがって、プレストレス導入量が履歴性状に与える影響は小さいと考えられる。
- ④ プレキャスト橋脚では一体打ち供試体に比べ、損傷が継目部に集中し、ひび割れの発生本数が少ない。また、軸方向鉄筋やPC鋼材の座屈が生じないことから、大変形状態においても帯鉄筋内のコアコンクリートは健全である。ただし、PCa-4 供試体で見られたように、フーチングの損傷が進むおそれがあるので注意を要する。
- ⑤ プレキャスト橋脚では、PC鋼材が降伏した後、基部のセグメント継目部でPC鋼材のひずみが急激に増加する傾向がある。

以上のような特性を持つプレキャスト橋脚の耐震設計を考えると、復元力特性として原点指向モデルを与えることによって、大規模地震時における動的解析は可能である。しかし、プレキャスト橋脚の終局の定義および設計上の制限の設定に関しては十分な検討を行う必要がある。耐荷力の低下によって、終局を定義すれば、プレキャスト橋脚は高い変形性能を有しており、設計上有利となる。しかも、復元力が大きいことから残留変位も問題とはならないと思われる。しかし、この場合上記⑤に述べたように、継目部のPC鋼材ひずみが過大となっているおそれがある。さらに、降伏点をこえて繰り返し荷重を受けると、PC鋼材の初期緊張力が徐々に低下し、地震後の供用性を損なうことも考えられる。これらの影響を考慮して、設計地震動に対してどのような制限値を設定するかが、今後のプレキャスト橋脚に対する重要な研究課題である。

謝辞

本研究は、(社)プレストレストコンクリート技術協会「橋脚PC構造研究委員会」(委員長:池田尚治 横浜国立大学教授)の一環として行ったものである。ここに関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) S.Ikeda; Seismic Behavior of Reinforced Concrete Columns and Improvement by Vertical Prestressing, Proceedings of the 13th FIP Congress on Challenges for Concrete in the Next Millennium, Vol.12,May,1998
- 2) 池田、森、吉岡;プレストレストコンクリート橋脚の耐震性に関する研究、プレストレストコンクリート、Vol.40, No.5
- 3) 太田、新井、山本;プレストレストコンクリート橋脚の耐震性に関する実験的研究(その1)、第8回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、平成10年10月、プレストレストコンクリート技術協会
- 4) 清水、羽生、日紫喜、新井;プレストレストコンクリート橋脚の耐震性に関する実験的研究(その2)、第8回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、平成10年10月、プレストレストコンクリート技術協会
- 5) 鈴木、森、吉岡、大谷;プレストレストコンクリート橋脚の耐震性に関する実験的研究(その3)、第8回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、平成10年10月、プレストレストコンクリート技術協会