

論文 交番水平力を受ける PC 橋脚の破壊過程と鋼材の挙動

中村 修*1・松下 博通*2・佐川 康貴*3・脇坂 英男*4

要旨：本研究では、プレストレストコンクリート柱部材が繰り返し大変形を受けるときの損傷の過程を、軸方向鉄筋、PC鋼材のひずみ履歴と関連づけて考察した。その結果、荷重載荷履歴が進行するのに従い、PC鋼棒－グラウト間の付着破壊が柱基部より上方へ進展し、PC鋼棒のひずみは上方へ分散されて増加量が抑制されるため、柱基部断面の曲率が大きくなり柱の変形量が大きくなり、また、PC鋼棒の破断も発生しないものと考えられた。これらの現象は耐震設計上有利であると考えられる。

キーワード：付着、PC鋼棒、鉄筋、ひずみ、破壊

1. はじめに

プレストレストコンクリート（以下PC）を橋脚柱部材に用いるためには、PC部材が破壊に至るまでの、PC部材特有の要因とその影響を把握する必要がある。道路橋示方書に基づいたPC橋脚の具体的な設計方法についての研究は、既にプレストレストコンクリート技術協会により行われている¹⁾が、大変形を生じているときのPC鋼材の挙動、付着性状、プレストレス状態の解明が十分に明らかにされているとは言い難いとされている²⁾。そのため本研究では、PC柱部材が繰り返し大変形を受けるときの部材軸方向鉄筋およびPC鋼材のひずみ分布変化に着目し、その変形・耐荷性能の評価方法について考察することを目的とした。

2. 実験概要

2. 1 実験供試体

本実験で使用した供試体は、図-1に示すように、いずれも250mm×250mmの矩形断面を有する比較的せん断スパン比の大きな曲げ破壊先行型の独立一本柱形式のものである。

PC15-15には軸方向鉄筋 SD295A D13を4本、

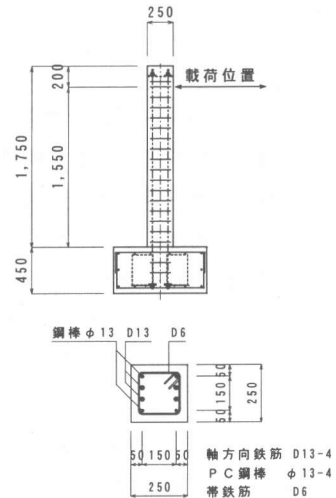


図-1 供試体形状および配筋図

PC鋼棒 SBPR930/1080(B種1号)φ13を4本、帯鉄筋としてSD295A D10を100mm間隔で配置し、プレストレス量は 1.5N/mm^2 とした。供試体名の最初のPCはプレストレストコンクリート構造であることを示し、次の数字はプレストレス量を、最後の数字は実験時に外力として与える軸圧縮応力度を示している。PC45-15はPC15-15と同一の鋼材配置とし、導入するプレストレス量を 4.4N/mm^2 とした。以上2種の供試体のPC

*1 (株) ピー・エス 九州支店 (正会員)

*2 九州大学大学院教授 工学研究院建設デザイン部門 工博 (正会員)

*3 九州大学大学院助手 工学研究院建設デザイン部門 修士(工学)(正会員)

*4 九州大学大学院 工学府建設システム専攻

表－１ 供試体概要

供試体 呼び名	上載 荷重 (kN)	プレ ストレス (N/mm ²)	PC鋼材 初期引張 応力度 (N/mm ²)	初期ひずみ ($\times 10^{-6}$)		モーメント(kN・m)				
						計算値			実測値	
				PC鋼材	鉄筋	鉄筋 降伏時	PC鋼材 降伏時	断面 耐力	鉄筋 降伏時	断面 耐力
PC15-15	91.9	1.5	179.4	863	-106	46.8	77.2	78.4	43.1	80.4
PC45-15	91.9	4.4	538.1	2694	-210	61.0	76.1	78.1	52.3	85.0
PC45-15U	91.9	4.4	538.1	2694	-210	47.2	—	50.1	44.4	74.2

鋼棒とシースの空隙には、プレストレス導入直後にフーチング内部の固定端背面に取り付けたグラウトホースにより、最下端の固定端から最頂部の緊張端までグラウトを充填した。PC45-15Uは、PC45-15と同一の鋼材配置、プレストレス量としたが、グラウトの充填は行わなかった。供試体名の末尾のUはアンボンドであることを示している。

プレストレスはコンクリートが所定の強度に達した後、フーチング内部の下端を固定端、柱頭部を緊張端として配置したPC鋼棒に、センターホールジャッキを用いて緊張力を片引きボストテンション方式として与えて導入した。

表－１には各供試体の概要を示しているが、表中のモーメントの計算値は、PC15-15とPC45-15では断面の平面保持を仮定しコンクリ

ートの引張部分を無視して算出している。

PC45-15Uの場合はPC鋼棒とコンクリートの付着がなく平面保持が成立しないため、PC鋼棒の増加ひずみが無いものと仮定して算出した。

２．２ 実験方法

実験は図－２に示すような二軸荷重装置を使用し、各供試体とも91.9kN(1.5N/mm²)の一定軸圧縮力を与えた状態で、フーチング天端から1.55mの位置に、押引用のアクチュエータを用いて静的に水平力の漸増正負交番载荷を行った。

载荷方法は、最大曲げモーメントを生じる柱基部断面の引張鉄筋が最初に降伏するまでは荷重制御とし、その後は引張鉄筋降伏時変位の正負整数倍の変位を片振り幅とする変位制御とした。

３．実験結果および考察

３．１ 損傷状況と破壊状況

(１) PC15-15

水平荷重約20kNで曲げひび割れが確認され、部

表－２ 材料の力学的特性
コンクリート

圧縮強度 (N/mm ²)	40.0
弾性係数 (kN/mm ²)	28.0

グラウト

圧縮強度 (N/mm ²)	52.0
弾性係数 (kN/mm ²)	12.0

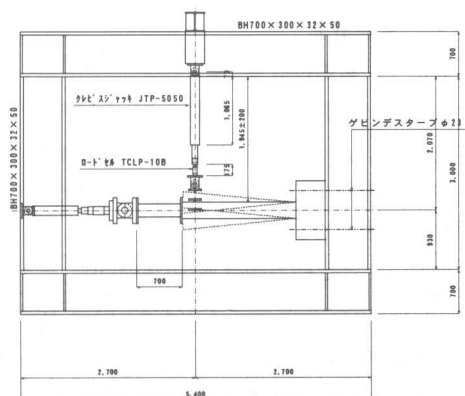
鉄筋

種別	SD295A	SD295A	SD295A
呼び径	D13	D10	D6
断面積 (mm ²)	126.7	71.33	31.67
降伏強度 (N/mm ²)	320	310	310
引張強度 (N/mm ²)	470	450	450
弾性係数 (kN/mm ²)	180	180	180
適用箇所	軸方向鉄筋	帯鉄筋	帯鉄筋

PC鋼棒

種別	SBPR930/1080
径	φ13
断面積 (mm ²)	132.7
0.2%永久伸びに対する強度 (N/mm ²)	1341
引張強度 (N/mm ²)	1439
弾性係数 (kN/mm ²)	195.9
適用箇所	軸方向

平面図



図－２ 試験装置

材の剛性が低下して荷重－変位曲線の勾配がそれまでよりも緩やかになった。荷重をさらに増加させると曲げひび割れが数、幅共に増加増大して軸方向鉄筋の柱基部におけるひずみが降伏ひずみに達して剛性がさらに低下した(図-3)。図中の M_{sy} は柱基部付近の鉄筋ひずみが降伏点に達した時の曲げモーメントの実測値、 M_u は最大耐荷力の実測値を示している。変位振幅を増大させるのに従い、曲げひび割れの数には大きな変化は見られずに、その幅が拡大し、軸方向鉄筋降伏時変位の4～5倍程度の変位を与えた時に圧縮縁に縦ひび割れが発生した。さらに変位振幅を増大させると柱基部および基部より150～200mm の位置にある曲げひび割れの幅が特に広がり、それに伴って柱基部圧縮縁コンクリートの縦ひび割れの数も増加し、作用荷重は緩やかに低下し始めた。その後、柱基部コンクリートの曲げひび割れと縦ひび割れに囲まれた部分が引張側になると剥落を開始し、ついには柱基部から200mm 程度のコンクリートのかぶり部分全体が剥落し、軸方向鉄筋が帯鉄筋に拘束された形で座屈した。このとき同時に、PC鋼棒を挿入しているシースも露出したが、その外観には特に変状は見られなかった。図-4には

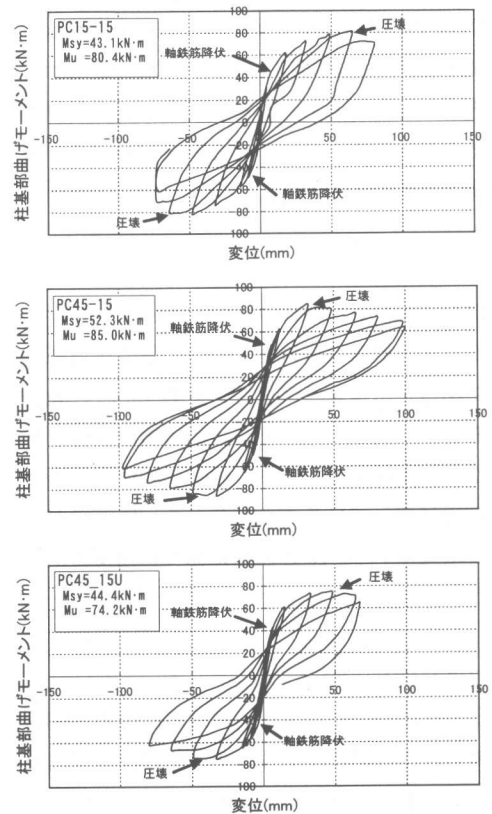


図-3 荷重－載荷点変位関係

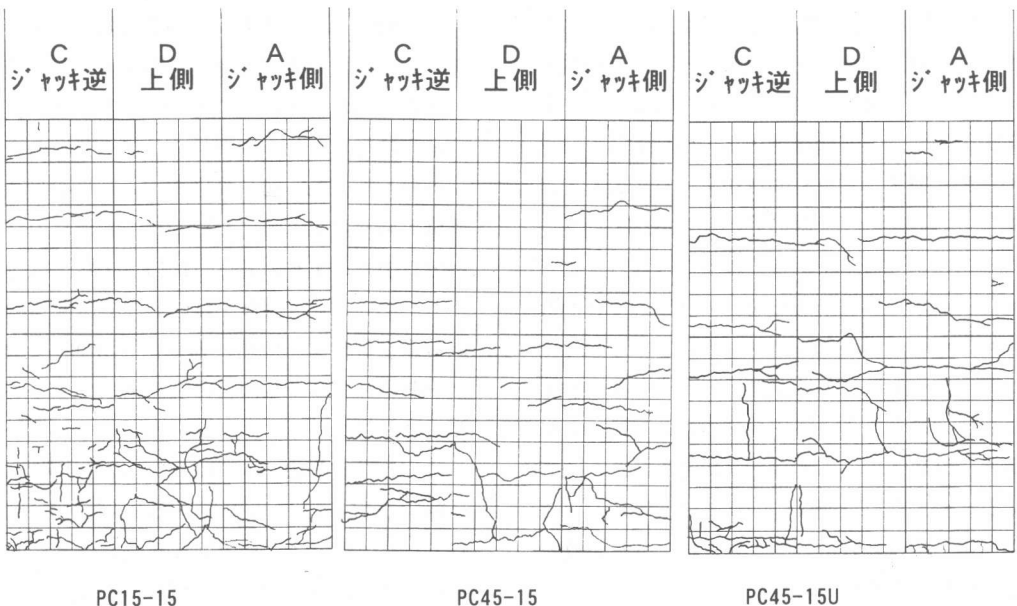


図-4 柱基部コンクリート剥落時のひび割れ図

各供試体のかぶりコンクリート剥落直前のひび割れ状況の展開図を示す。図中の格子は 50mm の間隔を示し、柱の面を示す A, C, D の記号はそれぞれジャッキ取り付け側、その裏面および側面を表す。また写真-1 には各供試体の実験終了後の側面状況を示す。

(2) PC45-15

PC45-15 のひび割れの発生、進展、かぶりコンクリート剥落状況は PC15-15 の場合とほぼ同様であった。荷重-変位関係を PC15-15 と比較するとプレストレスが多いため、履歴曲線立ち上がりの勾配が急であり、少ない変位で最大耐力に達していることが分かる。圧縮縁が破壊した後は PC15-15 と同様に徐々に耐力が減少していった。

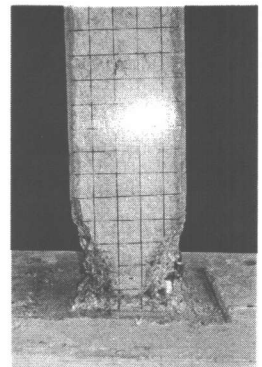
(3) PC45-15U

本供試体も損傷の進行過程は前記の PC15-15 の場合とほぼ同一であったが、曲げひび割れの分散性が悪く 1ヶ所のひび割れが幅広く成長した。柱基部コンクリートのかぶり剥落時に露出したシースはグラウトの注入が無いために損傷が激しく、かしめ部が破損して内部の P C 鋼棒が確認できる状態であったが、鉄筋が座屈しても P C 鋼棒が座屈する事は無かった。曲げ破壊モーメントの計算値は P C 鋼棒-コンクリート間の付着が無く平面保持の法則が成立しないため、P C 鋼棒の増加ひずみが無いものとして計算しているため、実際の曲げ破壊抵抗モーメントはこれよりもやや大きくなることは容易に予想されたが、付着がある場合の 9 割程度とかなり大きなものとなった。これは、P C 鋼棒-コンクリート間に付着が無い場合でも本実験のように大変形を受ける柱部材の場合には、P C 鋼棒には相当量の増加ひずみが発生したためであると考えられるが、このことは曲げに対する変形量、耐力の定量的な算定に大きな影響を与えるものと考えられる。



PC15-15

PC45-15



PC45-15U

写真-1
実験終了後の
柱基部損傷状況

3. 2 軸方向鋼材ひずみ分布

P C 鋼棒-グラウト間の付着力低下が P C 橋脚の耐力性能や変形性能に影響を与えているものと考えられたため³⁾、交番荷重の履歴が進行するのに従った軸方向鋼材のひずみ分布の変化の計測を行った。図-5 は PC15-15 における交番荷重の各ピーク時における軸方向鋼材のひずみ分布図を、履歴の進行に従い上から下へ並べたものである。供試体を試験装置に設置し、上載荷重を載荷する直前に初期値を計測したため、上載荷重および交番荷重による増加ひずみが計測されたことになり、プレストレス導入により与えられた鉄筋の 106×10^{-6} の圧縮ひずみと、P C 鋼棒の 863×10^{-6} の引張ひずみ(表-1)は考慮されていない。よって図-5 における鉄筋の降伏点は 1883×10^{-6} 、P C 鋼棒の 0.2% 永久伸びが発生するひずみは 4151×10^{-6} である。

1ではほぼ降伏ひずみに達した鉄筋のひずみ分布はコンクリートの曲げひび割れの影響を受けて乱れがあるが、シース・グラウトに包まれてその影響を受けにくいP C鋼棒と同様の分布となった。2、3では柱基部より約400mmの区間では鉄筋が降伏したことにより鉄筋-コンクリート間の付着が破壊され、そのひずみ分布が乱れたものと考えられ、柱基部の圧壊が開始した5以降ではかぶりコンクリートが剥落したため、その部分の鉄筋のひずみは大きく乱れている。

P C鋼棒においては1～3まではほぼ計算値と同様の分布となったが、4以降では高さ方向のひずみ勾配が徐々に緩くなる傾向があった。P C鋼棒の付着抵抗は粘着作用によるものしか期待できず、Trost.H, Cords.H等による波打ちシース内にグラウト注入されたP C鋼材の付着状況に関する種々の実験によれば、 $\phi 26$ 丸線を $\phi 35$ のシースに配置して $\sigma_{28}=50\text{N/mm}^2$ のグラウトを注入した場合の付着応力度の最大値は 2.0N/mm^2 程度と、コンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の1/10程度しか期待できないと考えられている⁴⁾⁵⁾。そのため、付着応力の大きな柱基部から上方に向かい徐々に付着に対する抵抗を失い、ひずみが平均化したものと考えられる。これらのことはP C鋼棒-シース間にグラウトを注入した場合は、変形量が小さな範囲ではP C鋼棒はコンクリートと一体化しているが、大変形を受けると付着抵抗が減少して増加ひずみは分散され、破断の危険性の少ない変形量の大きな耐荷機構に変化することであり、耐震設計上有利な現象であると考えられる。しかし、付着性状の変化の定量化や、物理特性の異なる鉄筋とP C鋼材の混在する耐荷機構の変化のモデル化などは明確にされていないため、正しくP C橋脚の耐震性能を評価するためにはこれらの解明が今後の課題となる。

図-6にはPC45-15Uの曲げ破壊以降の6サイクル目(図-5における6と同程度の変形)における軸方向鉄筋およびP C鋼棒のひずみ分布を示す。鉄筋には高さ方向のひずみの分布が

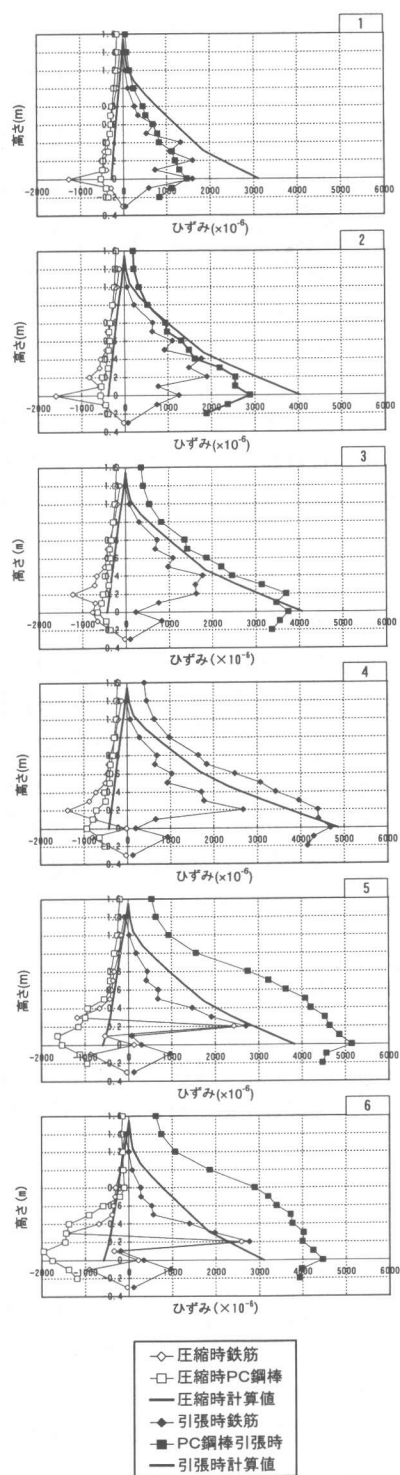


図-5 PC15-15 における軸方向鋼材の各ピーク時におけるひずみ分布

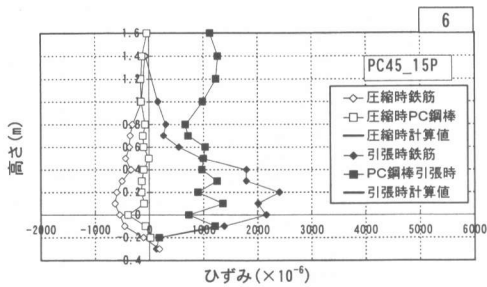


図-6 PC45-15Uの軸方向鋼材ひずみ分布

見られるがP C鋼棒では全長にわたって 100×10^{-6} 前後のほぼ等しいひずみでありアンボンドの特徴が明確に現れている。

3. 3 グラウト

これまでの考察により、柱基部のグラウトはかなり損傷を受けているものと考えられたため、実験終了後に柱基部のコンクリートをはつりシーを切開してその内部の様子を観察したところ、写真-2に示すように、少なくとも軸方向鉄筋が座屈してかぶりコンクリートが剥落した部分では水平方向のひび割れが多数発生して、粉碎された状況が確認できた。

4. 結論

- ・ 大変形を受ける柱部材のP C鋼棒-コンクリート間の付着が無い場合の最大耐力は、付着がある場合の9割程度となる場合がある。
- ・ 本実験のように大変形を受ける柱部材の場合、付着の無いP C鋼棒であっても相当量の増加ひずみが発生するものと考えられ、曲げに対する変形量、耐力の定量的な算定に大きな影響を与えるものと考えられる。
- ・ 鉄筋の座屈が生じてP C鋼棒の座屈は生じない。
- ・ グラウト未充填の場合は、ひび割れ分散性能が劣る。
- ・ P C鋼棒-シーす間にグラウトを注入し

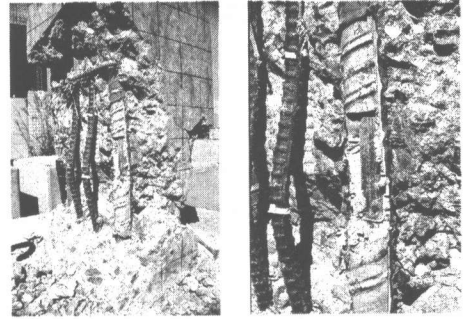


写真-2 実験終了後のグラウト

た場合であっても、変形量が小さな範囲ではP C鋼棒はコンクリートと一体化しているが、大変形を受けると付着抵抗力が減少して増加ひずみは分散され、破断の危険性の少ない変形量の大きな耐荷機構に変化するため、耐震設計上有利であると考えられる。

- ・ P C橋脚の耐震性能を正しく評価するためには、P C鋼棒-グラウト間の付着性状の変化の定量化や、物理特性の異なる鉄筋とP C鋼材の混在する耐荷機構の変化のモデル化などが必要である。

参考文献

- 1) PC橋脚の耐震設計ガイドライン, 社団法人プレストレストコンクリート技術協会
- 2) 丸山 久一: これからの構造解析技術, プレストレストコンクリート, Vol. 43, No1, Jan. 2001
- 3) 中村 修・松下 博通・坂口 伸也: 軸力の与え方および軸方向鋼材の違いがコンクリート橋脚の破壊過程におよぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, No. 3, pp. 877-882, 1999, 6
- 4) Fritz Leonhardt, Eduard Monning: 鉄筋コンクリートの設計, 鹿島出版会, pp107, 1986. 5
- 5) Fritz Leonhardt: プレストレスコンクリート, 鹿島出版会, pp36-pp42, 1983. 9