

論文 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

中村 修*1・松下 博通*2・坂口 伸也*3

要旨: コンクリート橋脚柱部材の軸方向にPC鋼材を配置すること、PC鋼材で軸力を内力として与えることが、その破壊過程にどのような影響を与えるのかを明らかにすることを目的とし、静的水平力交番載荷試験を行った。その結果、異なる特性を持つ鋼材が混在する場合はそれぞれの挙動が異なること、鉄筋降伏後はPC鋼材が補強材として作用すること、内力は部材の損傷を抑制すること、PC鋼材は大変形を与えても破断しないこと等が確認された。

キーワード: 内力, 外力, PC鋼材, 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を橋脚柱部材に用いることは、コンクリート橋脚軸方向にPC鋼材を配置し、軸圧縮応力度を内力として与えることであると言い換えることができる。本研究では、コンクリート橋脚柱部材の軸方向にPC鋼材を配置すること、PC鋼材で軸力を内力として与えることが、その破壊過程にどのような影響を与えるのかを明らかにすることを目的とし、静的水平力交番載荷試験を行った。荷重-変位履歴、エネルギー吸収能等については既に発表済み¹⁾であり、ここでは軸方向鉄筋、PC鋼材、帯鉄筋の挙動より、上記の要因の影響について考察する。

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25cm×25cm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高橋脚モデルである。

実験パラメータは、表-2に示すようにPC鋼材の有無、軸圧縮応力度、軸圧縮応力の与え方とした。なお、各供試体は、軸方向鋼材量が

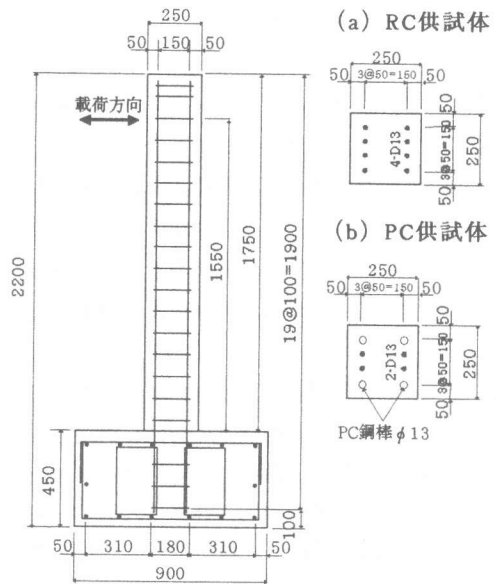


図-1 供試体形状および配筋図

ほぼ同程度となるように設計されている。

柱断面の鋼材配置は、図-1 (a), (b) に示した2種類である。(a)は軸方向鉄筋にD13×8本を配置したRC供試体であり、本実験では計2体を作製した。この供試体には上部工の自重を想定した上載荷重(以下、外力)によりそれぞれ1.47N/mm²、4.41N/mm²の軸圧縮応力度を

*1 (株)ピー・エス 九州支店 (正会員)

*2 九州大学大学院教授 工博 (正会員)

*3 九州大学大学院

与え、呼び名はそれぞれRC15、RC45とした。(b)は軸方向鉄筋としてD13×4本およびPC鋼材φ13×4本を用いたPC供試体であり、本実験では計4体を作製した。このうち2体には外力は与えずプレストレスのみによりそれぞれ1.47N/mm²、4.41N/mm²の軸圧縮応力度を与え、呼び名はそれぞれPC15、PC45とした。なお、プレストレスはコンクリートが所定の強度発現後ポストテンション方式により導入した。また残りの2体にはプレストレスは与えず外力のみによりそれぞれ1.47N/mm²、4.41N/mm²の軸圧縮応力度を与え、呼び名はそれぞれPC15外、PC45外とした。なお、PC供試体はグラウトを注入して柱本体との一体化を図った。

帯鉄筋は各供試体ともSD295 D10を10cm間(体積比1.90%)で配置した。

実際の橋脚では外力で与えられた軸圧縮力が作用しているため、内力と外力を同時に受けるものについて検討を行う必要があるが、条件を簡素化するためにこのような供試体の設定とした。

表-2中の初期ひずみは上載荷重によりPC鋼材・鉄筋に生じる圧縮ひずみ、PC鋼材を緊張することによりPC鋼材自体に生じる引張ひずみ、プレストレスが導入されることにより鉄筋に生じる圧縮ひずみの計算値を合計したものであり引張ひずみを正として示したものである。

また、表-2中のモーメントの各項目は、軸方向主鉄筋が降伏ひずみに達するとき、PC鋼材が降伏ひずみに達するとき、断面圧縮縁が終局ひずみ(3500×10⁻⁶)に達するときの曲げモ

ーメントを表-1の材料の力学的特性値を用いて計算した結果を示したものである。

2. 2 実験方法

実験には二軸載

荷装置を使用し、

所定の一定軸圧縮応力度の下、載荷スパンはフーチング天端から1.55mの距離とし、押引用のアクチュエータにより静的水平正負交番載荷を行った。

載荷方法は、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の水平力載荷位置における水平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。

表-1 材料の力学的特性
コンクリート

Type	RC15	PC15	PC15外
圧縮強度 (N/mm ²)	45.4	35.1	39.9
弾性係数 (kN/mm ²)	26.7	24.5	21.7
Type	RC45	PC45	PC45外
圧縮強度 (N/mm ²)	47.7	42.2	48.3
弾性係数 (kN/mm ²)	29.1	25.3	25.4

軸方向鉄筋

種別	SD295A	SD295A
呼び径	D13	D10
断面積 (cm ²)	1.267	0.7133
降伏強度 (N/mm ²)	336	350
引張強度 (N/mm ²)	504	522
弾性係数 (kN/mm ²)	200	193
適用箇所	軸方向鉄筋	帯鉄筋

PC鋼棒

種別	SBPR930/1080
径	φ13
断面積 (mm ²)	227
0.2%永久伸びに対する強度 (N/mm ²)	1175
引張強度 (N/mm ²)	1264
弾性係数 (kN/mm ²)	203
適用箇所	軸方向

表-2 供試体概要

供試体 呼び名	軸力の 載荷方法	軸圧縮 応力度 (N/mm ²)	上載 荷重 (kN)	PC鋼材初期 引張応力度 (N/mm ²)	初期ひずみ (×10 ⁻⁶)		モーメント(kN・m)		
					PC鋼材	鉄筋	鉄筋 降伏	PC鋼材 降伏	設計 断面耐力
RC15	外力	1.5	91.9	0.0	—	-49	38.8	—	43.1
PC15	内力	1.5	0.0	173.2	853	-53	38.6	61.5	62.1
PC15外	外力	1.5	91.9	0.0	-60	-60	39.0	69.8	70.2
RC45	外力	4.4	275.8	0.0	—	-136	54.5	—	58.4
PC45	内力	4.4	0.0	519.5	2559	-156	54.3	61.9	63.9
PC45外	外力	4.4	275.8	0.0	-157	-157	55.1	85.7	86.1

3. 実験結果および考察

3. 1 損傷状況と破壊形態

すべての供試体は、引張鉄筋が曲げ降伏した後、圧縮側コンクリートが圧縮破壊した曲げ破壊であった。

RC供試体は、柱基部付近のかぶりコンクリートが剥離し始めた時点より急激に耐荷力が低下したのに対し、PC供試体は、柱基部付近のかぶりコンクリートが完全に剥離し、軸方向鉄筋が座屈した後も耐荷力は急激に低下することなく徐々に低下した。

図-2に荷重-載荷点変位の包絡線、図-3にコンクリート表面が剥離し始めた時点のひび割れ状況を、表-3にはその時点での、載荷モーメント、ひび割れ幅を示す。

図-3および表-3によるとコンクリート表面剥離開始時の載荷モーメントの大きさはPC15外>PC15>RC15, PC45外>PC45>RC45であり、鉄筋がPC鋼材に置換されることによって耐荷力が上昇したことがわかる。

また、図-4においてひび割れの発生状況(ひ

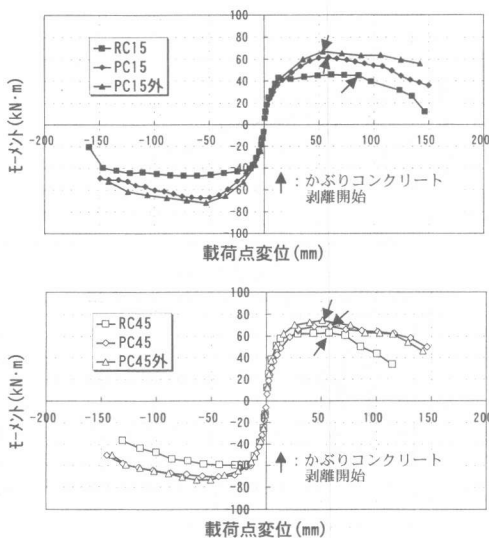


図-2 柱基部モーメント-載荷点変位包絡線

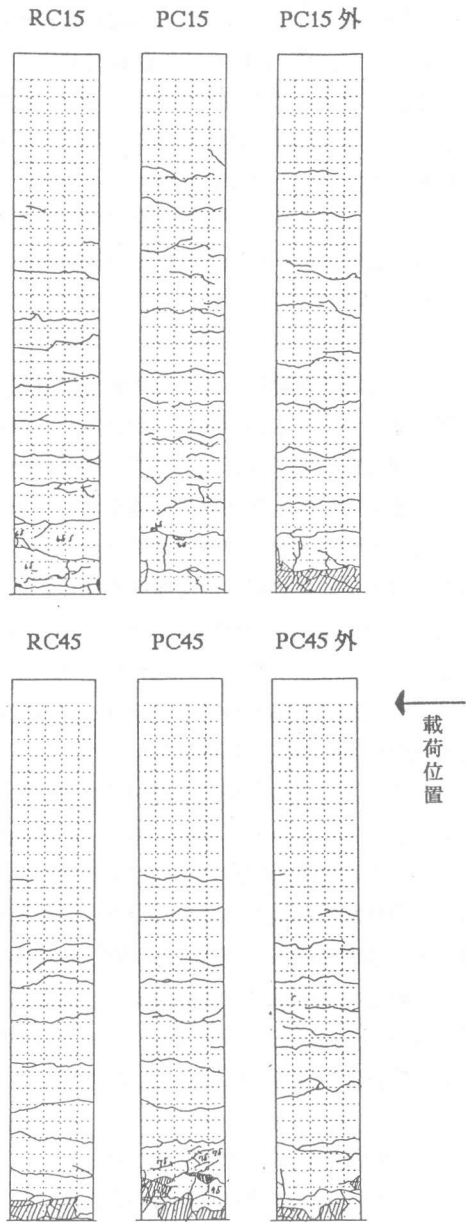


図-3 ひび割れ状況

表-3 コンクリート表面剥離時における載荷モーメントおよびひび割れ幅

供試体 名称	載荷モーメント (kN·m)	ひび割れ幅		
		5cm位置	10cm位置	15cm位置
RC15	40.3	5	3	2
PC15	61.1	5	2	0
PC15外	67.3	1	2	0
RC45	57.7	1.5	2	1
PC45	67.5	1	1	2
PC45外	69.2	1	0	0

び割れ間隔，ひび割れの種類)にRCとPCの
 差違，軸圧縮力の与え方による差違はほとんど
 見られないが，表-3においてひび割れ幅を比較
 するとRC15はPC15・PC15外に比較して，またPC45はPC45・PC45外
 に比較して大きなひび割れが発生している。し
 かし，PC15とPC15外，PC45とPC
 45外の比較においては大きな差違は見られな
 かった。

3. 2 軸方向鋼材の降伏直後までの挙動

図-4にPC45の柱基部におけるPC鋼材
 と軸方向鉄筋のモーメント-ひずみ履歴曲線を示す。この図は軸方向鉄筋降伏直後までを示した
 ものであるが，鉄筋が降伏する以前においては両者はほぼ同様の弾性的な履歴を描いている。
 鉄筋ひずみは降伏値 (1680×10^{-6}) を越えると急激に増加しているが，PC鋼材ひずみの増加
 量は鉄筋に比較するとわずかであり，その勾配
 に変化が見られる。これは鉄筋が降伏したこと
 により増加する引張力がPC鋼材に集中してき
 きた事を示しているものと考えられる。このよ
 うに，異なる特性を持つ鋼材が混在する場合は，
 全ての鋼材が弾性範囲内である場合にはその挙
 動の予測は容易であるが，一部が塑性域に達す
 るとそれぞれの挙動は全く異なるものとなり，
 挙動の予測のためには適切な弾塑性域での履歴
 モデルを設定しなければならないと考えられる。

3. 3 軸方向鉄筋の降伏以降の挙動

図-5に各供試体軸方向鉄筋の柱基部にお
 けるモーメント-ひずみ履歴曲線を示す。RC1
 5は鉄筋が降伏した後大きなひずみを受けた後，
 繰り返し荷重を与えてもほぼ一定のひずみを持
 続する状態となり，この状況はRC45におい
 ても同様であった。これは，荷重を受け持つメ
 カニズムが，軸方向鉄筋が降伏した後にはそれ
 以前とは異なったものに变化した事を示してい
 るものと考えられる。PC15ではこれとは異
 なり，降伏した後大きなひずみを経験した後で

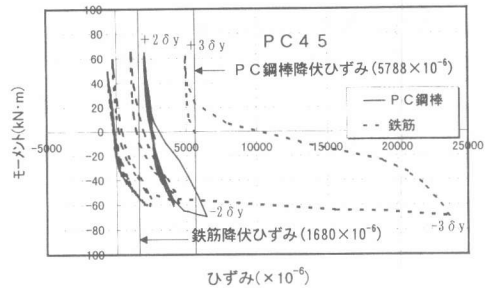


図-4 軸方向鋼材の鉄筋降伏直後
 までの柱基部モーメント-ひずみ履歴

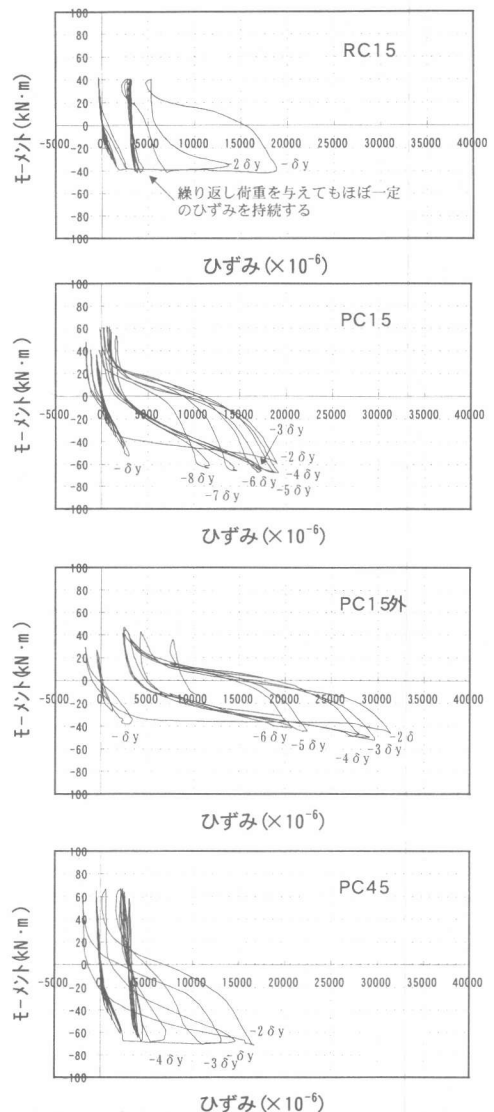


図-5 柱基部モーメント-軸方向鉄筋ひずみ履歴

あっても、圧縮側となるとひずみは0近くまで回復し一定の規則的な履歴を描いている。PC15外でもこの傾向は見られ、これは鉄筋が降伏した後PC鋼材が引張力を受け持つ役割を果たしているためであると考えられる。また、PC15外はPC15に比べ最大ひずみ量が大きく、圧縮側となったときの残留ひずみも大きい。これは、同レベルの軸圧縮応力度であってもプレストレスとして与えた方が、鉄筋降伏後の耐荷機構は安定していることを示しているものと考えられる。

PC45は降伏直後はPC15と同様の履歴を描くが数サイクルの後にはRC15と同様な一定ひずみ状態となるが、これは導入プレストレス量の違いに起因するものと考えられる。

3. 4 PC鋼材の降伏以降の挙動

図-6にPC15およびPC45におけるPC鋼材のモーメント-ひずみ履歴曲線を示す。図中の実線は柱基部のものであり、破線は同一PC鋼材の柱基部と載荷点の中間点におけるものである。ただし柱基部のものについては、データの一部が大ひずみとなった場合に明らかに異常な値を示したため一部省略している。なお、プレストレス導入による初期ひずみは考慮していない。柱基部のPC鋼材ひずみが大きく動き出す点は鉄筋が降伏した時点と一致しており、この点からもPC鋼材の補強鋼材としての有効性が確認できる。鉄筋降伏以降の挙動は、鉄筋よりも残留ひずみが少なく、明確な降伏点が存在しないPC鋼材の特性がよく現れている。

中間部の挙動を見ると、大変形を繰り返すのに従い、作用する曲げモーメントはほとんど増加していないのにひずみが徐々に引張時には引張側に、圧縮時には圧縮側に移動していることがわかり、PC45はPC15に比べてその傾向が大きい。中間部は柱基部の二分の一の曲げモーメントが作用する断面であり、PC鋼材は降伏する以前の弾性範囲内にあるため、平面保持の原則が成立するはずである。このような断

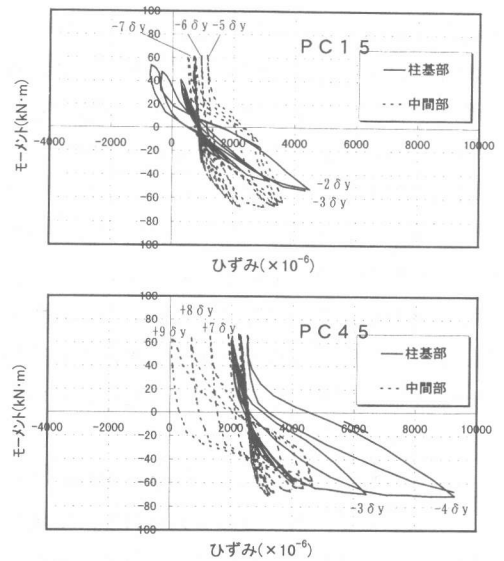


図-6 柱基部モーメント-PC鋼材ひずみ履歴
面で圧縮時に圧縮側へひずみが移動することはコンクリートの圧縮ひずみよりも大きな圧縮ひずみが発生していることを示しているものと考えられるが、これは最初に導入された初期ひずみが徐々に減少している事を示しているものと考えられ、初期緊張力の大きなPC45にその影響が顕著に現れたものと考えられる。このような現象が生じる原因は、大変形が繰り返されることにより柱基部で生じたPC鋼材の残留ひずみが、PC鋼材とグラウト間の付着力が低下するのに従い柱上部方向へ徐々に分散されたものと考えられる。PC鋼材は鉄筋と比較して降伏後の伸び能力が小さく、大変形を受けると破断する恐れがあったが、このような理由で柱基部での集中的な損傷を受けずに済み、鉄筋は座屈して最終的に破断に至ったものもあったが、PC鋼材は実験終了まで破断するものは無かった。

3. 5 帯鉄筋の挙動

図-7にRC15, PC15, PC15外(軸圧縮応力度 1.47N/mm^2)の柱基部における帯鉄の荷重-ひずみ履歴曲線を示す。履歴が進行する毎に荷重の変化はわずかであるが帯鉄筋のひずみ量は増加している。これは柱基部の損傷

が進行し、せん断力に抵抗できるコンクリートの断面が減少し、せん断補強鉄筋として帯鉄筋の果たす役割が徐々に増大した様子を示すものと考えられる。RC15では帯鉄筋のひずみが急激に増加する点が明確に現れているが、PC15、PC15外ではRC15に比べるとやや緩やかな増加となっている。RC15はその後荷重の絶対値が増加する過程で一度ひずみを減少させるという複雑な履歴を描くが、これは柱の損傷が急激に進行していることを示しているものと考えられる。PC15、PC15外はRC15に比較して規則正しい履歴を示し、RC15のようなひずみの谷も見られず、安定して断面力に対抗していると考えられる。各供試体とも履歴を重ねると徐々にひずみが増大する

が、PC15はPC15外に比較して、その量は少ない。これはPC15外はPC15に比較して帯鉄筋の受け持つ引張力が大きいことを示しているものと考えられ、コンクリート断面の損傷が激しいことを示しているものと考えられる。

4. 結論

PC鋼材の有無、軸圧縮応力度、軸圧縮応力の与え方をパラメータとした静的水平力交番載荷試験を行った結果、今回の実験の範囲内では以下の事項が確認できた。

- ・ RC供試体は耐荷力が急激に減少するが、PC供試体は耐荷力の減少は緩やかである。
- ・ 同程度の軸圧縮応力度では、鉄筋をPC鋼材に置き換えることによって耐荷力は上昇する。
- ・ ひび割れ幅は同程度の軸圧縮応力度を受ける場合、RCはPCに比較して大きくなる。外力と内力の差違は見られなかった。
- ・ 鉄筋とPC鋼材のように降伏点が異なる鋼材が混在する場合は、一方が塑性域に達するとそれぞれの挙動は全く異なるものとなる。
- ・ 鉄筋降伏後はPC鋼材が補強鋼材として十分な役割を果たす。
- ・ 鉄筋降伏後の耐荷機構は同程度の軸圧縮応力度の場合は、内力として与えた方が外力で与えたものより安定している。
- ・ 大変形を受けると鉄筋は座屈して最終的に破断に至ったものがあつたが、PC鋼材は破断するものは無かつた。これはPC鋼材の付着力低下が原因と考えられる。
- ・ 同程度の軸圧縮応力度では、PCよりもRCが、軸力は内力で与えるよりも外力で与える方が部材の損傷が激しいことが帯鉄筋からも考えられる。

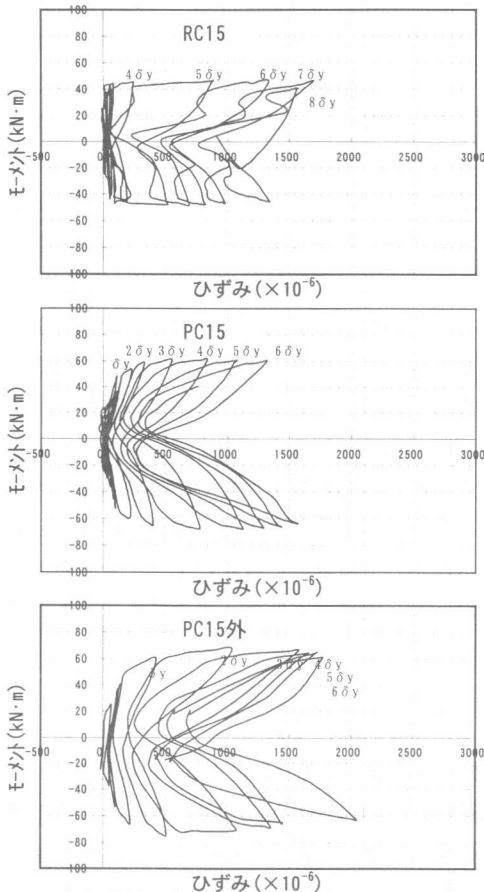


図-7 柱基部モーメント帯鉄筋ひずみ履歴

参考文献

- 1) 中村修・松下博通・坂口伸也・楳本真：PC橋脚の耐震性能とプレストレス量に関する実験的研究、プレストレスコンクリート技術協会 第8回シンポジウム論文集、1998.10