

(98) PC鋼材の緊張レベルがPC橋脚の耐震挙動に及ぼす影響

横浜国立大学大学院 ○朴 東圭
 横浜国立大学工学部 正会員 山口 隆裕
 横浜国立大学工学部 正会員 池田 尚治

1. はじめに

軸方向にプレストレスを導入したPC橋脚が優れた耐震性能を有していることがこれまでの研究において検証されている。しかしながら、これまでの研究は主にPC鋼材と鉄筋の耐力分担率を要因として検討されており、PC鋼材の緊張レベルによるPC橋脚の挙動の差異についてはほとんど考慮されていないのが現状である。本研究は緊張レベルと耐力分担率を変化させた中実断面PC柱供試体を用いて静的正負繰返し載荷実験を行い、PC鋼材の緊張レベルの相違がPC橋脚の耐荷挙動に及ぼす影響について検討した実験的研究である。

2. 実験供試体

供試体の一覧と諸元を表-1、供試体の形状を図-1に示す。供試体はフーチング付き独立一本柱形式のもので、柱の断面は40cm×40cmの正方形断面とし、フーチング上面から載荷点までの載荷スパンを150cmとした。フーチングから84cmの高さまで3cmの間隔で帯鉄筋を配置し、曲げ破壊を誘導するように設計した。コンクリートの骨材の最大寸法は8.5mmで、プレストレスを導入した後でグラウトを行った。PC鋼材の耐力分担率は0.7(R1)と0.44(R2)の2種類とした。PC鋼材の降伏応力に対する緊張によるPC鋼材の応力の比(以下、緊張比と記す)はR1においては0、0.25、0.5、0.75の4段階、R2において0.25と0.75の2段階に変化させた。載荷には2本のアクチュエータを使用し、柱頭部に一定の軸力を載荷しながら水平変位または水平荷重を作用させた。

表-1 供試体の一覧と諸元

供試体	コンクリート 圧縮強度 [N/mm ²]	鉄筋比 [%]	PC 鋼材比 [%]	帯鉄筋比 [%]	プレストレスによる 軸応力*1 (外軸応力*2) [N/mm ²]	耐力分担率 *3	緊張比 *4
PH-P0-R1	58	0.95	0.52	0.53	0.0 (1)	0.70	0
PH-P25-R1	57	0.95	0.52	0.53	2.1 (1)	0.70	0.25
PH-P50-R1	55	0.95	0.52	0.53	4.1 (1)	0.70	0.50
PH-P75-R1	57	0.95	0.52	0.53	6.2 (1)	0.70	0.75
PH-P25-R2	69	2.87	0.52	0.53	2.1 (1)	0.44	0.25
PH-P75-R2	65	2.87	0.52	0.53	6.2 (1)	0.44	0.75

注*1: PC鋼材の緊張力によるコンクリート応力

*2: 上部構造分としてアクチュエータにより作用させた軸応力

*3: PC鋼材の耐力分担率: $(A_p \sigma_{py}) / (A_p \sigma_{py} + A_s \sigma_{sy})$ (対称断面)

*4: σ_p / σ_{py}

ここに、 A_p : PC鋼材の断面積

σ_{py} : PC鋼材の降伏応力

A_s : 鉄筋の断面積

σ_{sy} : 鉄筋の降伏応力

σ_p : 緊張によるPC鋼材の応力

表-2 鋼材の力学的特性

	種類	降伏強度 [N/mm ²]	引張強度 [N/mm ²]	弾性係数 [kN/mm ²]
鉄筋	D6 [SD345]	422	624	210
	D13 [SD345]	408	588	210
	D19 [SD345]	396	569	210
P C 鋼材	SWPR19 φ 17.8	1727	1943	194

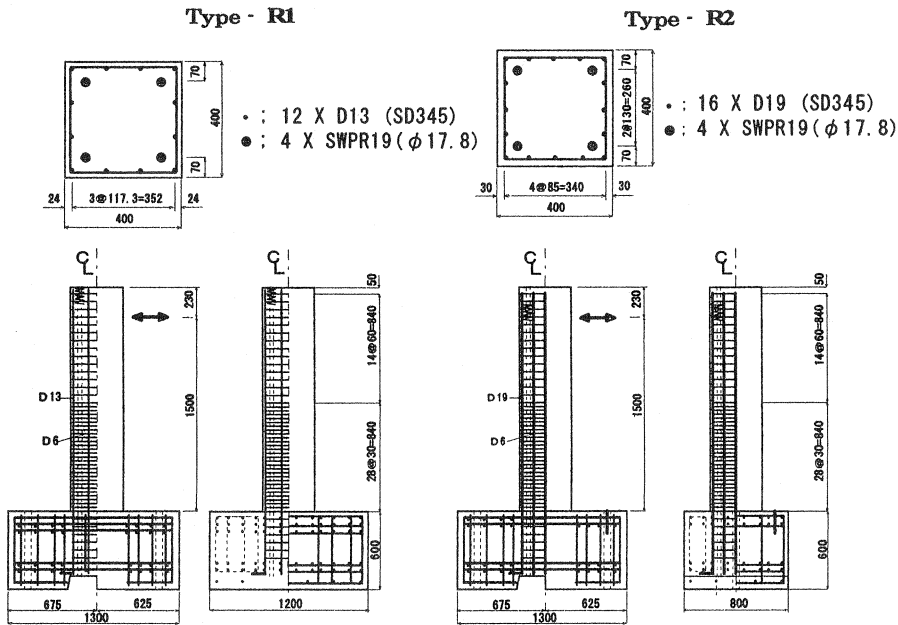


図 - 1 供試体の形状(単位: [mm])

3. 荷重方法

荷重の繰返しは管理変位ごとに正負1回とした。管理変位は、ひび割れ発生時変位及び部材回転角が1/200の整数倍の変位とした。荷重は部材のひび割れ荷重に至るまでは荷重制御方式で行い、一旦ひび割れ荷重に至った後では変位制御方式で行い、部材耐力が最大時の80%を下回った後終了した。プレストレスト力以外に上部構造分として軸方向にアクチュエータで160kN (1MPa)の定荷重を荷重した。

4. 実験結果

4.1 耐力と靱性率

実験より得られた結果をまとめて表-3に示す。供試体PH-P0-R1は緊張力が0であるが他の供試体と同様、P C 鋼材の定着用具をくさび形式としたため、P C 鋼材が圧縮応力を受けることによって定着部でくさびのすべりが発生した。したがって、実験結果としてすべりが生じるまえの±2/200radまでのデータを示す。また、PH-P25-R1の最大耐力は計算耐力より若干低い値となった。これは緊張力が小さいため、±10/200の大変形時になってもP C 鋼材は降伏せずその前に主鉄筋が座屈して耐力が減少したためである。他の4体の供試体の最大耐力は計算耐力とほぼ等しくなった。

表-3 実験結果の一覧

供試体	降伏変位 [mm]	最大荷重 [kN]	計算耐力*1 [kN]	終局変位 *2 [mm]	靱性率 (δ_u / δ_y)	正負靱性率の平均
PH-P0-R1	*	160	212	*	*	*
	*	-186		*	*	
PH-P25-R1	1.10	225	243	9.17	8.31	8.30
	-1.10	-216		-9.14	8.29	
PH-P50-R1	1.21	257	244	9.18	7.58	7.64
	-1.15	-249		-8.87	7.71	
PH-P75-R1	1.07	261	244	8.84	8.30	8.03
	-1.08	-254		-8.35	7.76	
PH-P25-R2	1.70	371	370	9.45	5.57	5.4
	-1.71	-374		-8.97	5.24	
PH-P75-R2	1.45	377	367	9.48	6.56	6.51
	-1.36	-382		-8.77	6.47	

注 *1: 材料の非線形性を考慮したファイバーモデルにより計算した値

*2: 耐力が最大荷重の80%に低下した時の変位

表-3 に示す靱性率はプレストレスト橋脚の耐震設計ガイドラインで提案している方法を基にして計算したものである。ただし、終局荷重は実験結果から最大耐力の 80%に達した点とした。図-2 に靱性率の計算に用いた荷重-変位関係の模式図を示す。今回の方法は吸収エネルギー能力を若干大きく評価すると思われるが他の方法による計算値と比較してほぼ同様な傾向を示し、実験の結果から簡単に計算できるメリットがあるので適用した。靱性率はタイプ R1 の場合 7.64 から 8.30、鉄筋を付加し耐力を増大させたタイプ R2 の場合 5.40 と 6.51 となり、鉄筋降伏時の変位が大きくなったことによりタイプ R2 の方が靱性率は小さくなった。また、最大耐力が計算耐力に到達しなかった PH-P25-R1 を除くと同一断面においては緊張比が高くなるほど靱性率も大きくなる傾向を示している。この原因としては、主鉄筋の降伏が緊張比が高くなるにつれて早期に生じることと PC 鋼材の降伏以後も耐力の急激な低下が生じないためと考えられる。

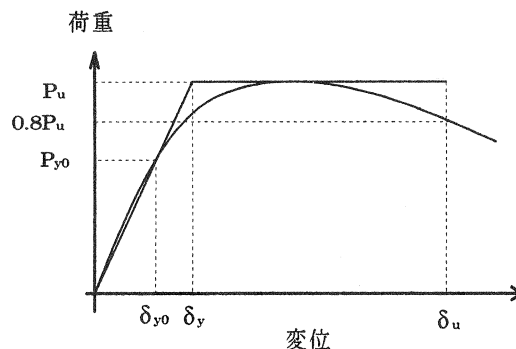


図-2 水平力-水平変位関係の模式図

ここに、 P_u : 最大荷重 δ_{y0} : 初降伏変位
 P_{y0} : 鉄筋降伏荷重 δ_y : 降伏変位

4.2 緊張比と耐力分担率の影響

実験より得られた荷重-変位関係の包絡線を図-3 に示す。また、図-4 には設計地震力以内の挙動を詳細に検討するために変形 5/200rad までの包絡線の比較を示す。これらの図より、断面構成が同じでも緊張比により得られる荷重-変位関係は異なり、特に、最大耐力時の変形量が大きく異なり緊張比が小さいほど大きな変形時となっている。したがって、設計地震力作用時や共用限界時の検討においては緊張比を考慮しておくことは重要である。また、緊張比が荷重-変位関係に与える影響は 0.5 と 0.75 ではほとんど差がなく 0.25 と 0.5 では大きいことが示された。さらに緊張比の影響は PC 鋼材の耐力分担率が小さくなるにつれて減少する傾向が示された。PC 鋼材の降伏応力の 75%で緊張した緊張比 0.75 の供試体 PH-P75-R1 と PH-P75-R2

の場合、高い緊張レベルにもかかわらず緊張材の破断は生じなかった。予測した通り緊張比が高いほどPC鋼材の降伏は早期に生じたが、PC鋼材の鉄筋とは異なる降伏後の独特の応力-ひずみ曲線のためPC鋼材の降伏以後でも急激な耐力の減少は見られず、特にタイプR2部材は鉄筋の高い耐力分担率のためPC鋼材降伏以後の耐力の変動はタイプR1よりさらに小さくなった。耐荷挙動から判断して、PC鋼材の耐力分担率が0.44~0.7の範囲においては、緊張比は0.5~0.75程度が適切であると考えられる。最小緊張比に関しては部材の最大曲げ強度を発揮できるように主筋の座屈以前にPC鋼材が降伏出来る程度にPC鋼材を緊張したほうがよく、特に摩擦形式の定着具を使用する場合には終局時までPC鋼材が圧縮応力を受けないようにプレストレスを導入しておくことが最低限必要である。

4.3 残留変形

基部回転角と残留変位の関係を図-5と図-6で示す。全体的に見ると緊張比より耐力分担率の方が大きく残留変位に影響を与えていることがわかる。緊張比が残留変位量に与える影響を詳細に検討するために図-6に回転角5/200radまでを拡大した図を示す。PC鋼材の耐力分担率が0.44の場合緊張比の相違による影響は小さいが、0.7の場合緊張比が0.5以下と以上では残留変位量に差が生じることが示されている。PC鋼材の耐力分担率を0.7としている供試体PH-P25-R1, PH-P50-R1, PH-P75-R1は道路橋示方書で示されている残留変位の一つの判定基準である1/100radをそれぞれ回転角6/200rad, 7/200rad, 8/200rad時にその基準を超えている。一方、PC鋼材の耐力分担率を0.44としているタイプ-R2部材においては緊張比と関係なく5/200radで上記の残留変位基準を超えている。PC固有の特性としている小さい残留変位を持つためにはPC鋼材の耐力分

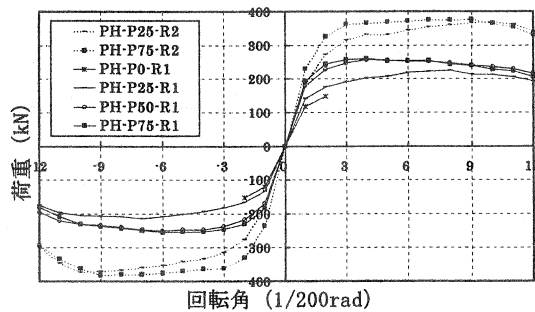


図-3 12/200radまでの荷重-変位関係の包絡線の比較

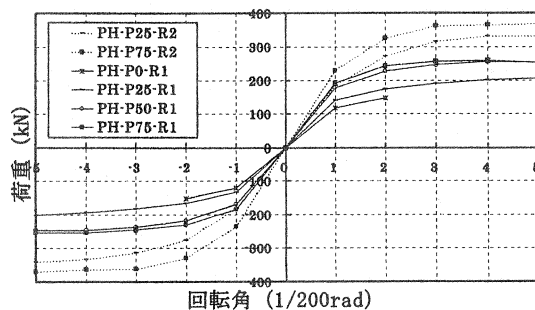


図-4 5/200radまでの荷重-変位関係の包絡線の比較

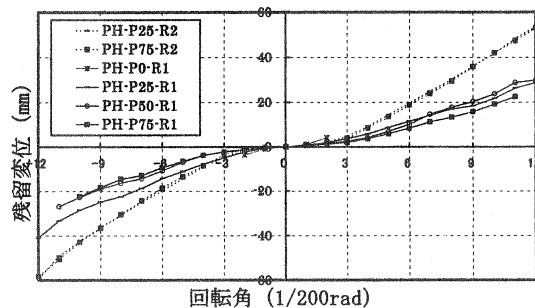


図-5 12/200radまでの残留変位の比較

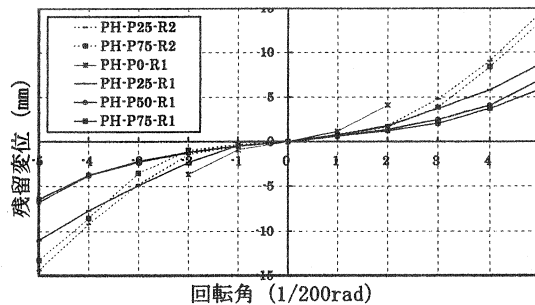


図-6 5/200radまでの残留変位の比較

担率を鉄筋の耐力分担率より大きく設計することが適切であると判断される。

4.4 累積吸収エネルギー量

回転角と累積吸収エネルギー量の関係を図-7 に示す。P C鋼材の耐力分担率の小さいタイプ R2 では RC 部材と同様な挙動を示すため、タイプ R1 に比べて大きな累積吸収エネルギー量を示している。吸収エネルギー量に関しては断面構成に関係なくタイプ R1、R2 とも同程度の緊張比の影響を受け若干異なっている。また、緊張比 0.25 と 0.75 の間には累積吸収エネルギー量に差が見られるが 0.5 と 0.75 にはほとんど差が生じていない。

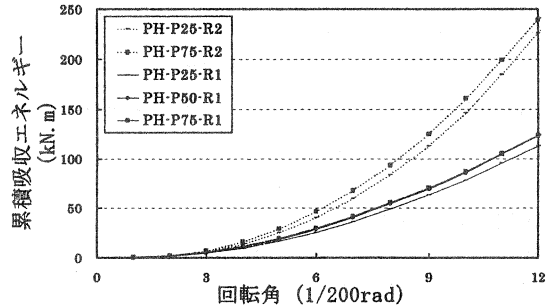


図-7 累積吸収エネルギー量の比較

4.5 破壊モード

すべての供試体はせん断破壊が生じることなく靱性的な挙動を示した。写真-1 に緊張比 0.25 と 0.75 供試体の各載荷レベルでのひび割れパターンと損傷の進展を示す。PH-P25-R1、PH-P50-R1、および PH-P25-R2

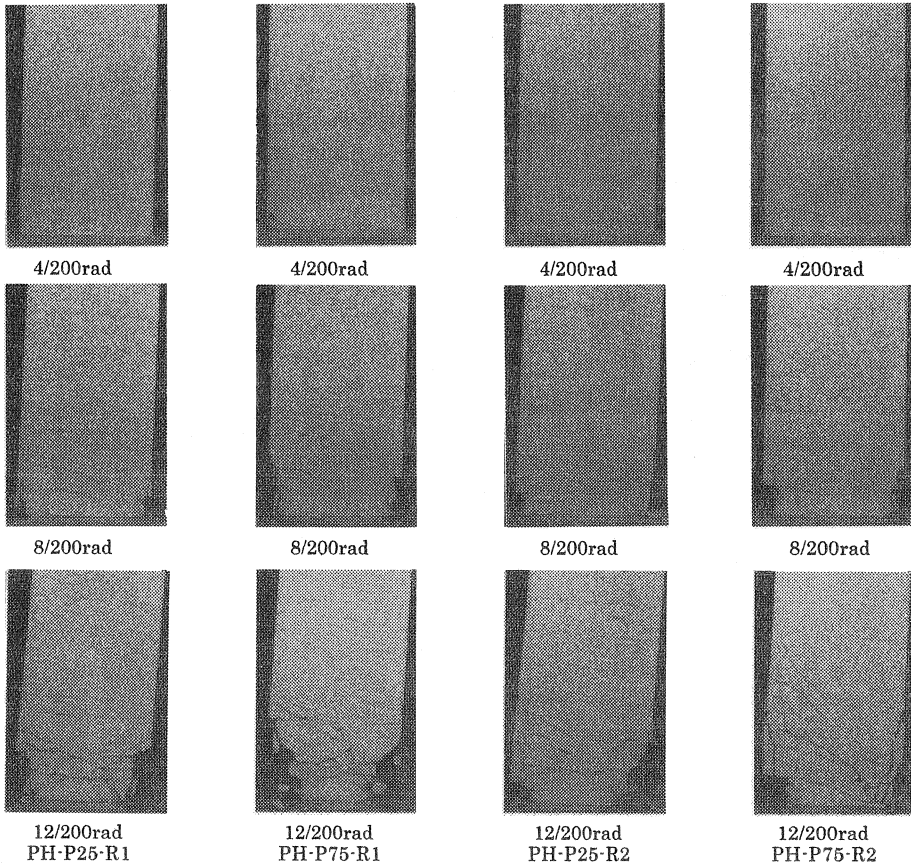


写真-1 損傷状況

供試体ではコンクリートの圧壊が $\pm 5/200\text{rad}$ 付近で生じ、PH-P75-R1とPH-P75-R2供試体のように大きい緊張力を持つ場合はそれよりも早い $\pm 4/200\text{rad}$ 付近でそれが見られた。以後、主鉄筋の座屈やかぶりコンクリートの剥離が続いた。主鉄筋の座屈はタイプR1の場合 $7/200\text{rad}$ 付近で、タイプR2の場合 $10/200\text{rad}$ 付近で始まり、座屈の開始は緊張比と関係なく鉄筋の径と耐力分担率に影響を受けた。終局時における基部コンクリートの圧縮破壊による損傷状況には緊張比の相違による差は見られなかったが、帯鉄筋比を同じとしたため、耐力が大きく鉄筋比の大きいタイプR2の供試体の方がせん断ひび割れは多く発生した。

5. 結論

PC鋼材の初期導入プレストレス力を降伏点の0.25, 0.5, および0.75と変化させたPC柱供試体を用いて、載荷実験を行った本研究の範囲内で得られた結果をまとめると以下の通りとなる。

1. 緊張比により初期剛性、最大耐力時の変形量などの荷重-変位関係が大きく異なることが明らかとなり、設計地震力下での耐荷挙動を検討する場合において、緊張力を考慮する必要のあることが示された。
2. 緊張比が0.5以上0.75以下程度であれば、緊張比の違いが耐荷挙動に与える影響は小さく、降伏の75%の緊張力でも終局時までPC鋼材の破断は生じなかった。
3. 優れた復元力特性と靱性を有しかつ適切な曲げ強度を持つPC橋脚を設計するためには、PC鋼材の耐力分担率と緊張比の適切な組合せを決定する必要がある。実験結果から判断すると、PC鋼材の緊張レベルは0.5~0.75の範囲とし、PC鋼材の耐力分担率を鉄筋の耐力分担率より大きくすることが妥当であると考えられる。

謝辞

供試体の製作に関しては(株)富士ピー・エスに多大なお世話をいただいた。また、実験の実施にあたり横浜国立大学の森下豊教官ならびに澤大輔君、林和彦君に協力を得た。ここに、関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 伊藤忠彦・山口隆裕・池田尚治: 軸方向プレストレスを有するコンクリート橋脚の耐震性能, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19, No. 2, pp. 1197-1202, 1997
- 2) 池田尚治・森 拓也・吉岡民夫: 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, pp. 40-47, Sep. 1998
- 3) 白浜 寛・山口隆裕・池田尚治: 軸方向プレストレスを有するコンクリート橋脚の地震応答挙動, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No. 3, pp. 745-750, 1998
- 4) 葛野 敦・山口隆裕・池田尚治: プレストレストコンクリート橋脚の地震応答挙動に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, No. 3, pp. 883-888, 1999
- 5) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, 1996. 12
- 6) プレストレストコンクリート技術協会: プレストレスト橋脚の耐震設計ガイドライン