

梁せいがPC 接合部の力学的挙動に及ぼす影響に関する研究

日本大学 理工学部 正会員 〇原井 直人
 同 正会員 工学博士 浜原 正行
 松井建設(株) 正会員 博士(工学) 内田 龍一郎

1. はじめに

文献1)では、接合部破壊が接合部内の柱の曲げモーメントピーク値を結んだ直線の勾配(以後、平均せん断力と略称)によって支配されるとした考えに基づいたPC柱梁接合部の終局強度の推定式が提案されている。この推定式の計算精度は比較的高いことも示されている。しかし、計算精度の検討に用いた試験体は、接合部のアスペクト比(柱せいに対する梁せいの比)が1.0~1.2の範囲にあるため、この範囲から逸脱する接合部への適用性には疑問が残されていた。本論文は、接合部アスペクト比を要因としたPC十字型部分架構に対して正負繰り返し載荷実験を行い、この要因がPC造柱梁接合部の力学的挙動に及ぼす影響、および文献1)の推定式がアスペクト比の異なる試験体に対して適用できるか否かについて検討しようとするものである。

2. 実験概要

試験体概要 試験体は、柱をRC造、梁をPC造とした3体の十字型部分架構であり、柱断面寸法は、いずれも250mm×250mm、梁幅は200mmに統一されている。実験要因は梁せいとし、200mm、300mm、400mmの三水準とした。それぞれの梁せいに対応する接合部アスペクト比は0.8、1.2、1.6である。柱の平均軸応力 σ_c 、梁の平均プレストレス σ_p は、いずれも5N/mm²に設定した。

試験体は①~③の方針に従って設計した。①曲げ終局時においては、梁降伏が先行する。②接合部の破壊が梁の曲げ降伏に先行する。③コンクリート設計強度 F_c は30N/mm²とした。PC鋼棒にはB種1号(規格降伏点=930N/mm²)、柱と梁の主筋にはKSS785(規格降伏点=785N/mm²)を用い、設計に用いた降伏強度は規格降伏点の1.15倍に設定した。

表-1に試験体概要、図-1に梁、柱断面、図-2に接合部配筋詳細を示す。

載荷方法 図-3に載荷装置を示す。支持条件は柱脚をピン、柱頭をローラーとし、500kN圧縮ジャッキを用いて一定軸力313kNを加え、梁の左右先端部に設置した200kN串型ジャッキを用いて正負繰り返し載荷を行った。載荷ルールは初期ひび割れ発生荷重で正負1回ずつ繰り返した後、層間変形角1/200を基準部材角とし、その1, 2, 3, 4, 6, 8倍の変位振幅で正負2回ずつ繰り返した。

表-1 試験体概要

試験体	梁				接合部	
	D_b (mm)	d_p (mm)	d_r (mm)	P_e (kN)	D_b/D_c	フーフ (帯筋比 p_{wt})
I-PC2	200	130	170	200	0.8	5-□D6(0.71%)
I-PC3	300	220	270	300	1.2	7-□D6(0.67%)
I-PC4	400	290	370	400	1.6	10-□D6(0.71%)

【共通因子】コンクリート設計強度 $F_c=30\text{N/mm}^2$,
 [柱]軸筋:12-D16(KSS785),フーフ □D6-@50(SD295,帯筋比 $p_{wt}=0.51\%$),
 [梁]主筋:3-D16(KSS785),上端,下端 PC 鋼棒:1-φ23(B種1号),
 スターアップ: □D6-@50(SD295,あばら筋比 $p_{wt}=0.64\%$)
 【記号】 D_b :梁せい, d_p :梁のPC鋼棒に関する有効せい, d_r :梁の普通鉄筋に関する有効せい, D_b/D_c :接合部7 \times 8 \times 外比, P_e :有効緊張力

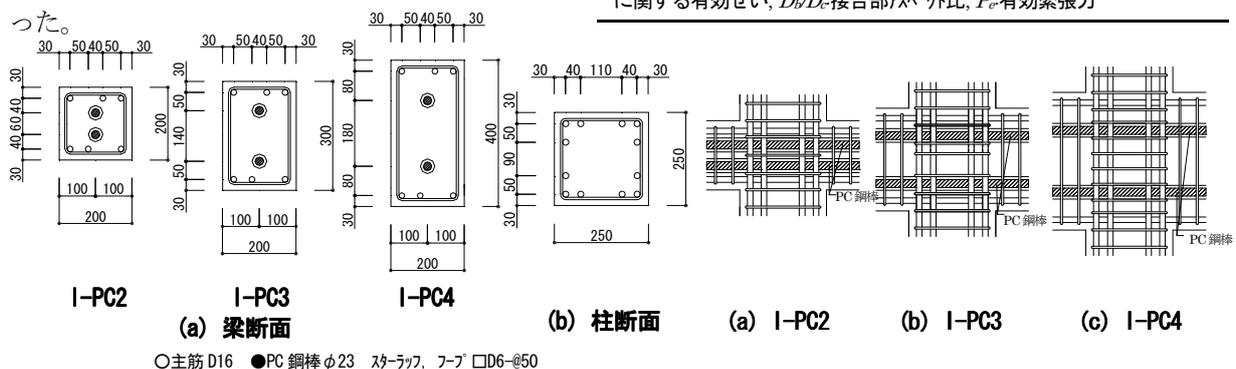


図-1 梁・柱の断面

図-2 接合部配筋詳細

材料試験結果 表-2~表-4 にそれぞれ、コンクリート調合表、コンクリート、グラウトおよび鉄筋、PC 鋼棒の材料試験結果を示す。

3. 実験結果

ひび割れ性状と最終破壊状況 図-4(a)~(c) は 載荷中における各試験体の接合部内のひび割れ状況を示したものである。これらの図より、いずれの試験体も接合部のせん断ひび割れ勾配は、接合部アスペクト比に依存せず、ほぼ 45 度となっていることが分かる。図-5(a)~(c) は各試験体の最終破壊状況を示したものである。破壊モードは、いずれの試験体も接合部せん断圧縮破壊であった。

層せん断力と層間変形角の関係 図-6(a)~(c) は層せん断力 V_c と層間変形角 R の関係を示したものである。初期の段階では原点復帰傾向の強い S 字型の履歴ループを描いているが、層間変形角の増加に伴い、スリップ傾向の強い逆 S 字型の履歴ループに変化している。アスペクト比の大きい試験体ほど最大層せん断力の値は大きく、層間変形角の増加に伴う層せん断力の増加傾向も顕著である。梁断面の平均プレストレスは 5N/mm^2 に統一されており、PC 鋼材の初期緊張力は梁せいの小さいものほど小さいが、同曲率下においては PC 鋼材の緊張力の大きいものほど曲げモーメントも大きい。このことが、上記のアスペクト比による荷重の増加傾向の違いに起因していると考えられる。

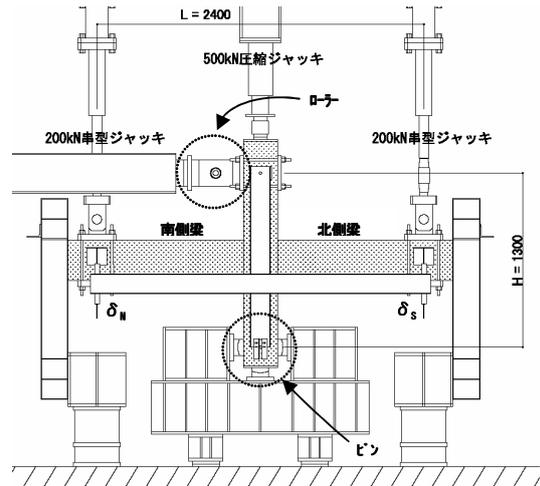


図-3 荷重装置図

表-2 コンクリート調合表

F_c (N/mm^2)	W/C (%)	$S/(S+G)$ (%)	単位重量 (kg/m^3)				混和剤
			W	C	S	G	
30	51	44.3	175	344	775	996	3.44

記号: F_c -設計基準強度, W/C -水セメント比, $S/(S+G)$ -細骨材率, W -単位セメント量, S -単位細骨材量, G -単位粗骨材量

表-3 コンクリート・グラウト材料試験結果

試験体名	コンクリート			グラウト
	σ_B (N/mm^2)	E_c (kN/mm^2)	σ_T (N/mm^2)	σ_B (N/mm^2)
I-PC3	32.6	22.6	3.1	53.7
I-PC2 I-PC4	34.9	23.8		

記号: σ_B -圧縮強度, E_c -ヤング係数, σ_T -割裂強度

表-4 鉄筋・PC 鋼棒材料試験結果

径	材種	使用部位	σ_y (N/mm^2)	σ_B (N/mm^2)	E (kN/mm^2)
D6	SD295	フープ、スターアップ	349	546	198
D16	KSS785	柱、梁主筋	969	1060	209
$\phi 23$	B種1号	梁の緊張材	1046	1126	200

記号: σ_y -降伏強度, σ_B -引張強度, E -ヤング係数

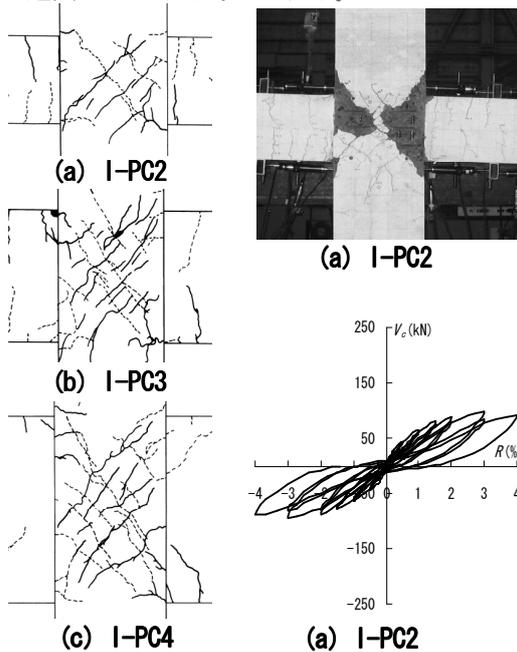


図-4 ひび割れ性状

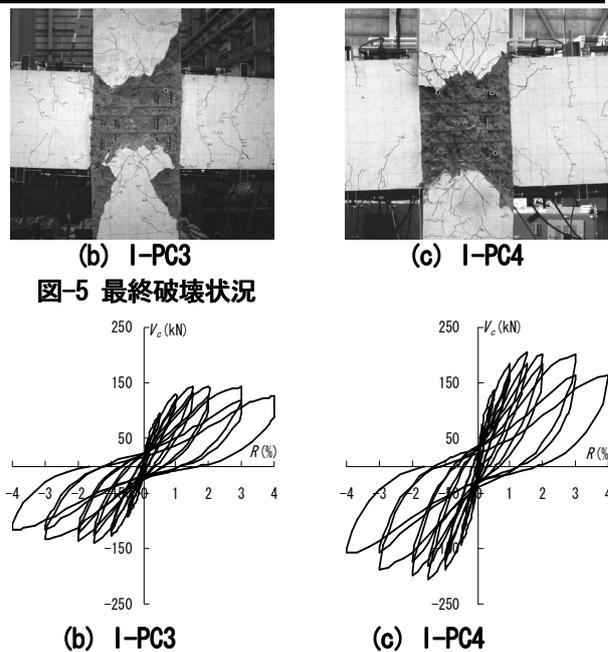


図-5 最終破壊状況

図-6 層せん断力-層間変形角

最大層せん断力 表-5は各試験体の最大層せん断力 V_{max} と V_{max} 時の層間変形角 R の一覧を示したものである。この表より $V_{max}=0.46\sim 0.51\times D_b$ となっており、最大層せん断力は、ほぼ梁せいに比例している。

接合部せん断終局時における層せん断力 接合部せん断終局強度の算定には、文献1)の推定式を用いた。この手法は、柱・梁接合部の終局強度が接合部の最大入力せん断力ではなく平均せん断力に支配されると仮定し、接合部せん断終局強度の推定式を誘導したものである。ここで平均せん断力とは、接合部内の柱曲げモーメントのピーク値を結んだ直線(図-8中、実線)の勾配として評価されるものである。この推定式の具体的な誘導仮定を以下に示す。

接合部内における柱のピーク曲げモーメント間の距離(以後、等価応力中心間距離)を j_{be} 、梁の左右のフェイスモーメントの総和を M_{bf} (図-7参照)、層せん断力を V_c とすると、平均せん断力は、(1)式で与えられる。

$$\bar{V}_j = \frac{M_{bf}}{j_{be}} - V_c \text{-----(1)}$$

梁のフェイスモーメントの総和 M_{bf} を層せん断力 V_c で表すと(2)式ようになる。

$$M_{bf} = V_c \cdot H \left[1 - \frac{D_c}{L} \right] \text{-----(2)}$$

ここに、 H =階高、 L =スパン、 D_c =柱せい

(1)式に(2)式を代入すると平均せん断力は(3)式のようにになる。

$$\bar{V}_j = \frac{V_c \cdot H}{j_{be}} \cdot \left[1 - \frac{D_c}{L} - \frac{j_{be}}{H} \right] \text{-----(3)}$$

接合部の終局せん断応力を τ_{ju} とすると、接合部のせん断耐力は(4)式で与えられる。

$$\bar{V}_j = \tau_{ju} \cdot b_j \cdot D_c \text{-----(4)}$$

ここに、 b_j =接合部有効幅(柱幅と梁幅の平均値)

(3)式=(4)式と置き、 V_c について解くと、接合部終局強度時における層せん断力 V_{ju} は、

$$V_{ju} = \frac{\tau_{ju} \cdot b_j \cdot D_c \cdot j_{be}}{H \cdot \left(1 - \frac{D_c}{L} - \frac{j_{be}}{H} \right)} \text{-----(5)}$$

(5)式中 τ_{ju} は RC 靱性保証型指針式によって評価している。これは、(6)式で与えられる。

$$\tau_{ju} = 0.799 \cdot \sigma_B^{0.712} \text{-----(6)}$$

ここに、 σ_B =コンクリート圧縮強度

平均せん断力を求めるための等価応力中心間距離 j_{be} は、略算的に(7)式で与えている。

$$j_{be} = 0.8 \cdot D_b \text{-----(7)}$$

ここに、 D_b =梁せい

表-5 最大層せん断力

試験体	最大層せん断力 V_{max} (kN)				層間変形角 R (%)		
	正	負	平均	$\frac{V_{max}}{D_b}$	正	負	平均
I-PC2	97.0	94.0	95.5	0.48	3.0	3.0	3.0
I-PC3	143.1	140.3	141.7	0.46	1.5	1.5	1.5
I-PC4	205.5	206.3	205.9	0.51	1.5	1.5	1.5

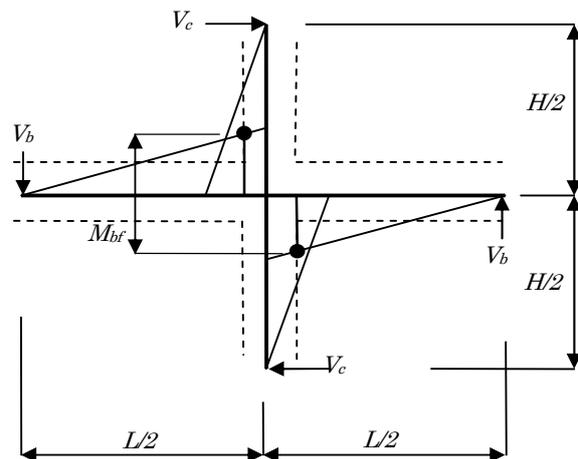


図-7 骨組の曲げモーメント分布

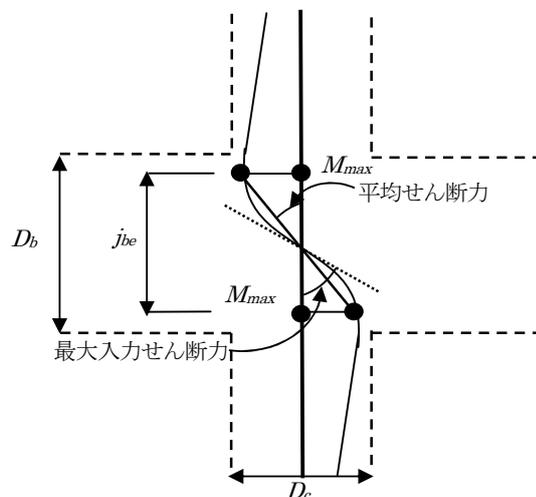


図-8 接合部内柱曲げモーメント分布

接合部の平均せん断応力 図-9(a)~(c)は(8)式による接合部平均せん断応力と層間変形角 R の関係を示したものである。図-9中の水平方向の実線は(6)式のRC 靱性保証型指針式による接合部せん断耐力時におけるせん断応力を示している。

$$\bar{\tau}_j = \frac{\bar{V}_j}{b_j \cdot D_c} = \frac{V_c \cdot H}{b_j \cdot D_j \cdot j_{be}} \cdot \left[1 - \frac{D_c}{L} - \frac{j_{be}}{H} \right] \dots\dots\dots(8)$$

ここに、 V_c =層せん断力、
 H =階高、 D_c =柱せい、 L =スパン、 b_j =接合部有効幅

表-6は(5)式の平均せん断力による最大層せん断力の計算値 V_{ju} と実験値 V_{max} を比較したものである。

図-9、表-6より以下のことが指摘できる。

- 1) 接合部の平均せん断力を接合部断面積で除した(8)式から求まるせん断応力の最大値は接合部アスペクト比に依存せず、(6)式で与えられるRC 靱性保証型指針式から算定される終局せん断応力に極めて良く一致している。
- 2) 最大層せん断力の計算値 V_{ju} /実験値 V_{max} は1.01~1.06の範囲にあり実験値と計算値は極めて良く一致している。
- 3) 1), 2) より、(5)式~(7)式で与えられる文献1)で提案されている推定式は、接合部アスペクト比に関わりなく適用可能なことが分かる。

4. まとめ

実験結果は以下のとおりであった。

- 1) 破壊モードは、いずれの試験体も接合部せん断圧縮破壊であった。
- 2) 接合部のせん断ひび割れ勾配は接合部アスペクト比に依存せず、ほぼ45度となっていた。
- 3) 最大層せん断力は $0.46 \sim 0.51 \times D_b$ となっており、最大層せん断力はほぼ梁せいに比例していた。
- 4) 接合部破壊が先行する試験体の最大層せん断力は、接合部アスペクト比に関わりなく平均せん断力による推定式によって精度よく推定することができた。

【参考文献】

1) Hamahara et al. "Design for Shear of Prestressed Concrete Beam-Column Joint Cores, ASCE, Jour. of Structural Engineering, pp. 1520-1530, Nov. 2007
 2) 日本建築学会：RC 造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説，pp.246-249，1999年8月

表-6 平均せん断力による計算値と実験値の比較

試験体名	最大層せん断力の実験値 V_{max} (kN)			V_{ju} (kN)	V_{max}/V_{ju}
	正	負	平均		
I-PC2	97.0	94.0	95.5	89.6	1.06
I-PC3	143.1	140.3	141.7	139.5	1.01
I-PC4	205.5	206.3	205.9	203.6	1.01

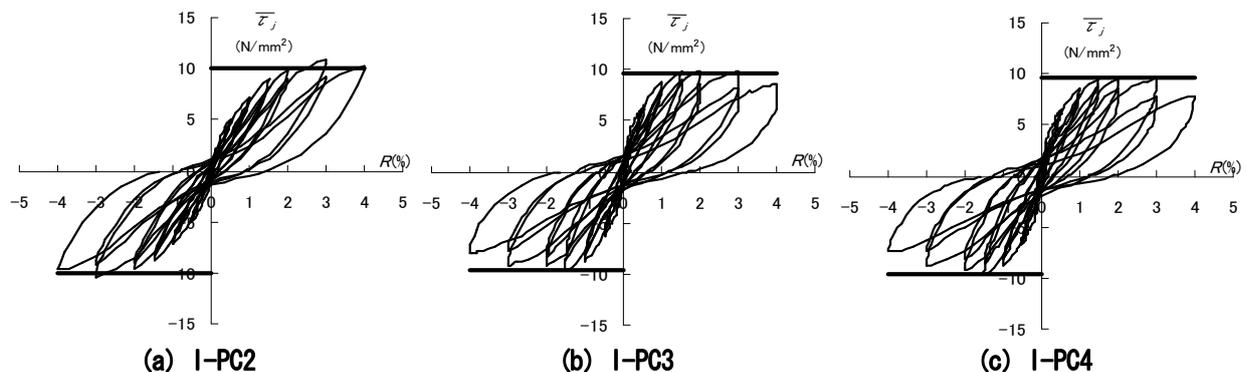


図-9 平均せん断応力-層間変形角