

梁のPC鋼材の付着性能を要因とした柱梁接合部の終局強度に関する実験的研究

松井建設(株) 技術部 正会員 博士(工学) ○内田 龍一郎
 (株)ピーエス三菱 PC 建築部 同 博士(工学) 福井 剛
 日本大学 理工学部 同 工学博士 浜原 正行

1 はじめに

圧着タイプのプレキャストプレストレストレストコンクリート(以後、PCaPC)梁は、普通鉄筋が目地部でカットオフされているため、曲げに対して抵抗する鋼材は PC 鋼材だけである。したがって、このような部材においては、PC 鋼材の付着性能が柱梁接合部の挙動に与える影響が普通鉄筋を有している通常の PC 梁より大きいと考えられる。特に、ト型、L 型部分架構と比較すると、十字型部分架構は接合部を梁の鋼材が貫いているため、鋼材の付着性能が接合部の終局強度に与える影響が大きい。しかしながら、PCaPC 梁の PC 鋼材の付着性能が接合部の挙動に及ぼす影響については、実験例が少なく、不明な点も残されている。

本報告は梁の PC 鋼材に丸鋼と異形鋼棒を用いた 2 体の PCaPC 十字型部分架構に正負繰り返し载荷を行い、PC 鋼材の付着性能の違いが、接合部の力学的挙動に及ぼす影響について検討を加えようとするものである。

2 実験概要

2.1 試験体概要

試験体は、梁の PC 鋼材に丸鋼を用いた試験体(試験体名 PCR)と異形 PC 鋼棒を用いた試験体(試験体名 PCD)の 2 体である。これらの試験体は、梁を PCaPC 造、柱を RC 造とした。梁の普通鉄筋は通常の PCaPC 骨組に倣い接合部前面でカットオフした。表 1 に試験体の概要を、図 1 に試験体の接合部回りの配筋詳細図を示す。これらの試験体は、梁曲げ終局時の層せん断力が文献 1)による接合部せん断破壊時の層せん断力を上回るように設計した。

2.2 载荷装置と载荷ルール

载荷は、図 2 に示すように、柱脚をピン、柱頭部をローラー支持とし、柱頭に 500 kN 圧縮ジャッキで一定軸力 190 kN を加え、200 kN 串型ジャッキで梁の南北先端部を正負繰り返し加力した。载荷ルールは、初期ひび割れ発生荷重で正負 1 回繰り返しした後、層間変形角 1/200 を基準とし、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

試験体名	梁 b × D (mm)	柱 b × D (mm)	PC 鋼材	PC 鋼棒 材種	ΣP_e^* (kN)	PC 鋼材間 距離 (mm)
PCR	200 × 300	250 × 250	φ23	丸鋼	257	180
PCD			D22	異形	242	

[共通因子] スパン L=2.4mm、階高 H=1.3m、柱軸力 N=187.5kN
 柱軸筋 10-D16(KSS785) 梁軸筋 4-D10(SD345)、 ΣP_e^* =有効緊張力
 柱帯筋、梁あばら筋 □D6(SD295 相当)-@50

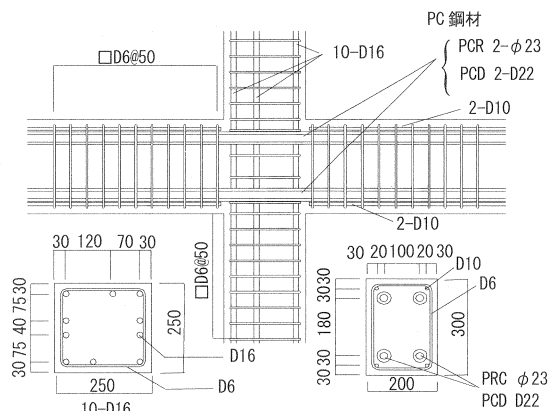


図 1 接合部回りの試験体配筋詳細図(単位 mm)

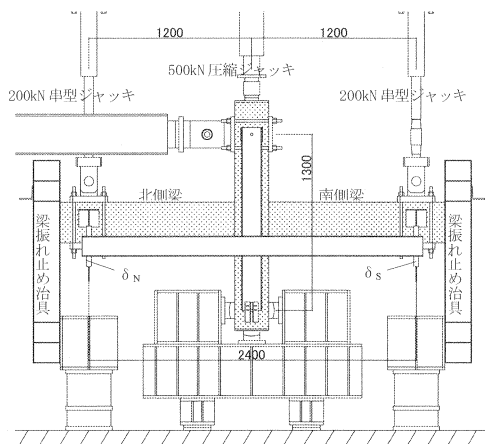


図 2 载荷装置図 (単位 mm)

2.3 変形の測定法

層間変形角 R は、梁先端部に設置した検長 200mm 電気式変位計による測定値を用いて、梁の北側載荷位置から南側載荷位置までの距離 L=2400 (mm) で除すことによって評価した。接合部変形による層間変形角は(1)式より求めた(記号は図3参照)。

$$R_j = \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{2 \cdot a \cdot b} \cdot (\delta_1 + \delta_2) \cdot \left[1 - \left(\frac{D_c}{L} \right) - \left(\frac{D_b}{H} \right) \right] \quad \text{----(1)}$$

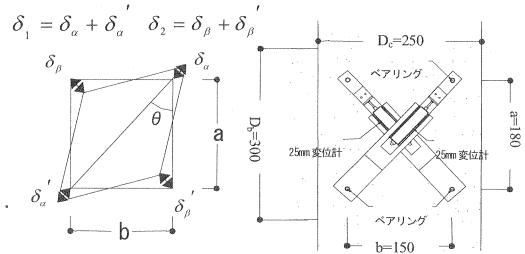


図3 接合部せん断変形の測定

2.4 材料試験結果

表2, 表3にそれぞれコンクリートの調合表と材料試験結果を示す。表4, 表5にそれぞれ鉄筋とPC鋼材の材料試験結果を示す。

表2 コンクリートの調合表

スラブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	粗骨材最大寸法 (mm)	細骨材率 (%)
18	4.5	54.0	13	48.4

単位重量 (kg/m ³)				
水	セメント	細骨材	粗骨材	混和材
185	343	822	904	3.670

表3 コンクリートとグラウトの材料試験結果

試験体名	σ_B (N/mm ²)	σ_T (N/mm ²)	E (kN/mm ²)	σ_{B6} (N/mm ²)
PCR	29.6	2.88	2.72	53.8
PCD	31.6	2.43	2.71	53.8

σ_B, σ_{B6} : コンクリートとグラウトの圧縮強度
 σ_T : コンクリートの割裂強度 E: コンクリートのヤング係数

表4 鉄筋の材料試験結果

径 (mm)	使用部位	σ_y (N/mm ²)	σ_{max} (N/mm ²)	伸び率 (%)	E (kN/mm ²)
D6	肋筋, 帯筋	454	577	17.0	205
D10	梁軸筋	398	560	20.6	192
D16	柱軸筋	869	1044	8.1	176

σ_y =降伏応力度, σ_{max} =最大応力度, E=ヤング係数
D16: 材種 KSS785, D10: 材種 SD345, D6: 材種 SD295 相当

表5 PC鋼材の材料試験結果

材種	径 (mm)	σ_y (N/mm ²)	σ_{max} (N/mm ²)	E (kN/mm ²)
異形	D22	1059	1159	200
丸鋼	ϕ 23	1054	1131	201

σ_y =降伏応力度, σ_{max} =最大応力度, E=ヤング係数

3 実験結果

3.1 破壊状況

図4(a), (b)に各試験体の最終破壊状況を示す。PC鋼材に丸鋼を用いたPCR, 異形鋼棒を用いたPCD共、損傷は、1)柱、梁の曲げひび割れ、2)接合部せん断ひび割れ、3)接合部コンクリートストラットの圧壊、4)梁上端コンクリートの圧壊の順に起こり、最終的には接合部のせん断劣化によって耐力低下を起こした。接合部のせん断劣化は両試験体とも最大耐力経前前から顕著であった。

3.2 荷重-層間変形角

図5(a), (b)に各試験体の梁先端荷重 P と層間変形角 R の関係を示す。この図より、両試験体もループ面積が小さい逆 S 字型の履歴ループを描いていることが分かる。最大耐力時の層間変形角は PC 鋼材に異形鋼棒を用いた PCD のほうが丸鋼を用いた PCR より小さい。

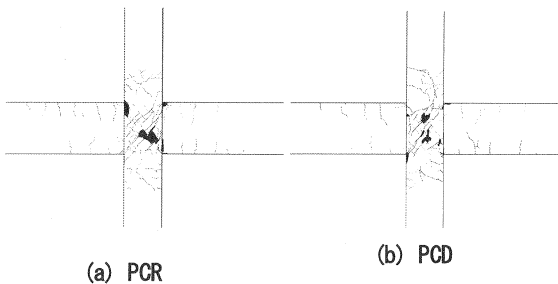


図4 試験体の最終破壊状況

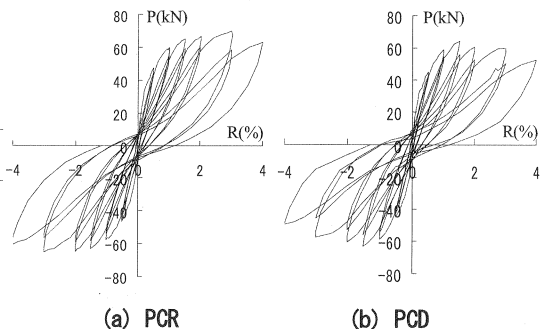


図5 荷重-層間変形角関係

3.3 最大荷重

表6は梁最大せん断力の実験値 V_e (以後, 最大荷重), 最大荷重時の層間変形角 R , 破壊モード, 接合部せん断強度時の梁せん断力の計算値(V_u), 梁終局モーメント時における梁せん断力(V_M)の一覧を示したものである。なお, 接合部せん断耐力強度時の梁せん断力の V_u は, (2)式¹⁾によって算定した。梁の終局モーメントは, 平面保持に基づき, コンクリートの応力-ひずみ関係には e 関数を用い, 終局縁ひずみは0.35%とした。

表6より以下のことが指摘できる。

- 1) 梁のPC鋼材に異形鋼棒を用いた試験体PCDの最大荷重を, 丸鋼を用いた試験体PCRの最大荷重で除すと, $(PCD=63.8kN)/(PCR=67.6)=0.944$ となり, 両試験体の間に有意な耐力の違いは見られない。この結果より, 軸方向鋼材の付着性能の違いが柱梁接合部の終局強度に影響を与えることはなく, 梁の軸方向鋼材の付着力の増加が柱梁接合部の終局強度の増加にはつながらない場合があることが分かる。
- 2) 最大荷重時の層間変形角は梁のPC鋼材に丸鋼を用いた試験体PCRが3%である。これに対して, 異形鋼棒を用いた試験体PCDはその1/2の1.50%であり, PCRと比較するかなり早期に最大荷重に至っている。
- 3) 両試験体とも, 最大荷重を曲げ終局強度で除した値(V_e^*/V_u)は50%を下回っている。目視から判断した破壊プロセスは, この計算結果によく対応しているといえる。
- 4) 最大荷重を(2)式から求めた計算値で除した値 V_e^*/V_u は, PC鋼材に丸鋼を用いた試験体PCRで0.958, 異形鋼棒を用いた試験体PCDで0.864であり, 計算値が実験値を若干上回っているが, 計算精度は比較的良好であるといえる。

3.4 柱梁接合部のせん断ひび割れ荷重

表7は柱梁接合部せん断ひび割れ発生時における梁のせん断力の実験値 V_e (以後, 柱梁接合部せん断ひび割れ荷重)と層間変形角 R および(3)式による計算値 V_c を比較示したものである。

- 1) 柱梁接合部ひび割れ発生荷重は梁のPC鋼材に丸鋼を用いた試験体PCRが34.5kN, 異形鋼棒を用いた試験体PCDが36.1kNであり, 両試験体の間には有意な差は見られない。
- 2) 実験値/計算値はPCRで0.94, PCDで0.98であり, 主応力式を用いた(3)式による計算値は実験値と比較的良好に一致しているといえる。

表6 最大荷重

	実験結果							計算値(kN)		実験値/計算値		
	最大荷重 V_e (kN)				最大荷重時層間変形角 (%)			破壊モード*	V_u	V_M	V_e^*/V_M	V_e^*/V_u
	正	負	平均	耐力比	正	負	平均					
PCR	69.8	65.3	67.6	1	3.00	3.01	3.00	J	70.5	168.4	0.401	0.958
PCD	64.4	63.3	63.8	0.944	1.51	1.50	1.50	J	73.9	160.6	0.397	0.864

J: 曲げ降伏を伴わない柱梁接合部せん断破壊 V_e^* =最大荷重の正負平均値

$$V_u = D_c \cdot b_j \cdot j_{be} \times 0.799 \cdot \sigma_B^{0.712} / [L - D_c - j_{be} \cdot (L/H)] \quad \text{-----}(2)^{1)}$$

[記号] D_c =柱せい, b_j =柱梁接合部有効幅(柱幅と梁幅の平均値), j_{be} =等価応力中心間距離($=0.8 \times D_b^2=240mm$), D_b =梁せい($=300mm$), H =階高($=1300mm$), L =スパン($=2400mm$), σ_B =コンクリート圧縮強度(N/mm^2)

表7 接合部せん断ひび割れ荷重

試験体	V_e (kN)			計算値 V_c (kN)	V_e^*/V_c
	正	負	平均		
PCR	39.7	29.3	34.5	36.6	0.94
PCD	33.9	38.3	36.1	36.8	0.98

$$V_c = j_b \cdot b_j \cdot D_c \sqrt{\sigma_T^2 + (\sigma_o + \sigma_g) \cdot \sigma_T + \sigma_o \cdot \sigma_g} / [L - D_c - (L/H) \cdot j_b] \quad \text{-----}(3)$$

[記号] $\sigma_g = \Sigma P_e / (b_j \cdot D_b)$ $\sigma_o = N / (b_c \cdot D_c)$ σ_T はコンクリート引張強度 $=0.07 \times \sigma_B^{3/2}$, N は柱軸力(N), ΣP_e は有効緊張力(N), j_b は梁の応力中間距離 $=(7/8) \times d_b$, d_b は梁の有効せい(圧縮縁-引張側PC間距離 $=240mm$)

3.5 梁と柱の曲げひび割れ荷重

表 8、表 9 は、それぞれ梁と柱に曲げひび割れが発生した時の梁せん断力の実験値 V_c と (4) 式による計算値 V_c および実験値と計算値を比較したものである。表 8、表 9 より、柱、梁とも曲げひび割れ発生の実験値/計算値は大きくばらついていることが分かる。

$$\text{梁: } V_c = \frac{b_b D_b^2}{3(L-D_c)} \left(\sigma_{tb} + \frac{\Sigma P_e}{b_b D_b} \right) \quad \text{柱: } V_c = \frac{b_c D_c^2}{3(H-D_b)} \left(\sigma_{tb} + \frac{N}{b_c D_c} \right) \cdot \frac{H}{L} \quad \text{-----(4)}$$

【記号】 b_b, D_b =梁の幅とせい(mm), b_c, D_c =柱の幅とせい(mm), L =スパン(mm), H =階高, σ_{tb} =コンクリートの曲げ引張強度 $= (5/3) \times 0.07 \sigma_B (\text{N/mm}^2)^{3/4} \Sigma P_e$, N =有効緊張, 軸力(N)

3.6 柱梁接合部のせん断ひずみによる層間変形角

図 6 は横軸に層間変形角 R , 縦軸が接合部のせん断変形による層間変形角 R_j が全層間変形角 R に占める割合 R_j/R (以後、接合部のせん断変形成分と略称) を示したものである。この図より以下のことが指摘できる。

1) 接合部のせん断変形成分は PC 鋼材に異形鋼棒を用いた試験体 PCD のほうが丸鋼を用いた試験体 PCR より大きい。すなわち、梁の鋼材の付着力が大きい骨組は全体変形に占める接合部のせん断変形の割合が大きいたことが分かる。ただし、両者の差は層間変形角の増加に伴って縮まっており、 $R=4\%$ に達すると両者の差は殆どない。

2) 最大荷重時における層間変形角 R と接合部によるせん断変形成分 R_j/R は、丸鋼を用いた試験体 PCR で $R=3\%$, $R_j/R=41.8\%$, 異形鋼棒を用いた試験体 PCD で $R=1.5\%$, $R_j/R=40.7\%$ となっている。3.3 節でも述べたように、最大荷重時の部材角は PCR と PCD 間で大きな開きが見られるが、最大荷重時の接合部のせん断変形成分は、ほぼ等しいといえる。

4 まとめ

- 1) PC 鋼材に丸鋼を用いた PCR, 異形鋼棒を用いた PCD は共に接合部パネルのせん断圧縮劣化によって耐力低下を起し、梁柱の損傷は終局に至るまで顕著化しなかった。
- 2) 梁の荷重と層間変形角についても両試験体の間に顕著な履歴性状の違いは見られなかったが、最大耐力時の層間変形角は PCD のほうが PCR より小さかった。
- 3) 梁の PC 鋼材に異形鋼棒を用いた試験体と丸鋼を用いた試験体の間に有意な耐力差は見られなかった。
- 4) (2) 式の最大荷重に対する適合性は比較的良好であった。接合部せん断ひび割れ荷重は主応力式に基づいた (3) 式によって比較的精度よく推定できた。
- 5) 接合部せん断変形成分は PC 鋼材に異形鋼棒を用いた試験体のほうが丸鋼を用いたものより大きかった。

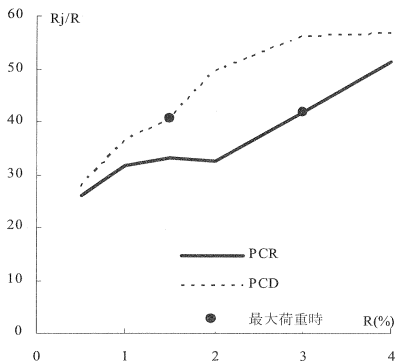


図 6 接合部せん断変形成分の割合

表 8 梁の曲げひび割れ荷重の実験値と計算値

試験体	実験値 V_c (kN)			計算値 V_c (kN)	V_e^*/V_c
	正	負	平均		
PCR	36.0	35.3	35.6	21.6	1.648
PCD	15.9	15.7	15.8	21.5	0.735

表 9 柱の曲げひび割れ荷重の実験値と計算値

試験体	実験値 V_c (kN)			計算値 V_c (kN)	V_e^*/V_c
	正	負	平均		
PCR	15.7	16.2	16.0	18.2	0.879
PCD	41.7	20.0	30.9	18.9	1.635

【参考文献】 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針(案)同解説, p246, 2001年9月
 2) 浜原ほか：プレキャストプレストレストコンクリート外側柱梁接合部の終局強度に関する実験的研究(その 3), 大会梗概集 C-2, 構造IV, pp.907-908, 2004, 8
 3) 日本建築学会：プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説, p87, 1998, 11