# 論文 PC 外柱梁接合部の力学性状に及ぼす鋼材定着位置の影響

YUE Wei<sup>\*1</sup>・西山 峰広<sup>\*2</sup>

要旨:梁が PC 造または RC 造,柱が RC 造のト型柱梁接合部試験体 7 体の正負繰り返し載荷 実験を行い,PC 鋼材定着位置,梁曲げ耐力に対する PC 鋼材寄与率及びコンクリート圧縮強 度が PC 外柱梁接合部強度,破壊性状などに及ぼす影響を実験的に把握した。接合部せん断 ひび割れ発生荷重は,定着部が接合部内に入るほど小さくなった。また,PC 鋼材が接合部内 に定着されている場合には,PC 鋼材張力が小さくなり,耐力低下につながった。 キーワード:プレストレス,柱梁接合部,定着,せん断,プレストレストコンクリート

#### 1. はじめに

外柱梁接合部において, PC鋼材が接合部内に 定着されている場合には,接合部外に定着され ている場合に比べて,最大耐力が低下し,接合 部せん断変形が大きくなるなどの結果が実験で 示された<sup>1,2)</sup>。しかしながら,これらの研究にお いては,接合部の破壊及び耐力低下を起こすの は接合部せん断破壊であるのか, PC鋼材の定着 劣化であるのかについては議論されていない。

本研究では,PC 鋼材定着位置が外柱梁接合部 の破壊性状,せん断耐力などに与える影響を実 験的に考察した結果について報告する。

#### 2. 実験概要

# 2.1 試験体

試験体は、柱をRC造としたト型外柱梁接合部 骨組7体であり、PC梁のものが6体、RC梁のも のが1体となっている。試験体はいずれも200 ×300mmの矩形断面梁と250×250mmの正方形断 面柱よりなる一体打ち骨組である。代表的な試 験体を図-1に示す。試験体一覧を表-1に示 す。実験パラメータは、①梁曲げ耐力に対する PC鋼材定着板の接合部内での位置(接合部外 側柱面定着、柱梁接合面から測って0.75 $D_c$ と 0.5 $D_c$ の位置に定着、 $D_c$ は柱せい)、③PC造梁と RC造梁, ④コンクリート強度(設計強度f'c=30 及び 50N/mm<sup>2</sup>) である。



図-1 試験体図

\*1 京都大学 工学研究科建築学専攻 工修 (正会員)\*2 京都大学 工学研究科都市環境工学専攻 助教授 博士(工学) (正会員)

試験体名	PC鋼材定着位置	λ*	設計強度 (N/mm <sup>2</sup> )
KPC1-1	接合部外側	0.49	30
KPC1-2	接合部内 $(0.5D_c)$	0.49	30
KPC2-1	接合部外側	0.73	30
KPC2-2	接合部内(0.75 <i>D</i> <sub>c</sub> )	0.73	30
KPC2-3	接合部内 $(0.5D_c)$	0.73	30
KPC3	接合部内 $(0.5D_c)$	0.76	50
KRC	_	-	30

表-1 試験体一覧

\* λは材料強度に基づく曲げ解析より得られた値

試験体名	圧縮強度 <i>f'<sub>c</sub></i> (N/mm <sup>2</sup> )	割裂引張 強度 (N/mm <sup>2</sup> )	1/3ƒ′ <sub>。</sub> 割線 弾性係数 (10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup> )			
KPC1-1 KPC1-2	45.5	3.27	3.30			
KPC2-1 KPC2-2 KPC2-3	34.6	2.51	2.82			
KRC	45.5	3.27	3.30			
KPC3 64.3		- 3.43				
表-5	表-5 グラウトモルタルの力学特性(実験時)					
試験体名	圧縮強度 <i>f</i> ′ <sub>。</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	割裂引張 強度 (N/mm <sup>2</sup> )	1/3ƒ′ <sub>。</sub> 割線 弾性係数 (10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup> )			
KPC1-1 KPC1-2	53.6	2.06	1.42			
KPC2-1 KPC2-2 KPC2-3 KPC3	54.0	1.86	1.39			

表-3 コンクリートの力学特性(実験時)

すべての試験体の梁は、ほぼ同じ大きさの曲 げ強度となるように設計されている。梁の主筋 量が多いため、早期にコンクリートが曲げ圧壊 しないように、梁塑性ヒンジ想定部の横拘束補 強筋を増やしている。表-2に示されるように 実験時のプレストレス力は、鋼材の規格降伏耐 力の概ね 60%に相当する。本実験で使用した材 料の力学特性を表-3~5にまとめて示す。

# 2.2 載荷方法,載荷履歴及び測定項目

載荷装置を図-2 に示す。試験体を 90 度回転 させて、一端をピン、他端をローラーとし、梁 端に正負繰り返し水平荷重を加えた。載荷履歴 は、梁部材回転角により制御し、±0.5%、±1%、 ±2%、±3%、±4%、±5%、±7.5%の各変位 で 2 回ずつ繰り返し載荷を行った。

表 -2 有効プレストレスカ $P_e$  (実験時)

試験体名	$P_{e}$ (kN)	$P_{e}/bDf'_{c}$
KPC1-1	323.6(0.61 <i>f</i> <sub>py</sub> )	0.12
KPC1-2	314.4(0.59f <sub>py</sub> )	0.12
KPC2-1	$555.6(0.59f_{py})$	0.27
KPC2-2	556.2(0.59 <i>f</i> <sub>py</sub> )	0.27
KPC2-3	538.2(0.57 <i>f</i> <sub>py</sub> )	0.26
KPC3	$599.4(0.64f_{py})$	0.16

 $f_{py}$ : PC鋼材降伏強度,b:梁幅,D: 梁全せい

表-4 鋼材の力学特性

鋼材種		降伏強度	ヤング係数	引張強度
		(N/mm <sup>2</sup> )	$(10^{5} N/mm^{2})$	(N/mm²)
異形	D19	1064	2.01	1176
PC鋼棒	D25	5 1026 2.01		1146
	D10	307	1.76	437
普通強 度鉄筋	D16	375	1.85	533
	D19	387	1.83	570
	D25	417	1.88	614



測定項目は,梁端荷重,梁端変位,接合部・ 梁塑性ヒンジ想定部・柱塑性ヒンジ想定部の変 形,PC 鋼材ひずみ,軸方向鉄筋ひずみ,せん断 補強筋ひずみなどとなっている。

# 3. 実験結果及び考察

# 3.1 接合部せん断ひび割れ強度

接合部せん断ひび割れを最初に目視した時の 梁端荷重を $V_{cr}$ として表-6に示す。また,接合 部内の主引張応力度がコンクリートの引張強度 を超えるとせん断ひび割れが生じるとする,主 応力度式(1)により算定した接合部せん断ひび 割れ強度 $V_{ic}$ を,式(2)を用いて梁端荷重に換算

試験体名	実験値 <i>V <sub>cr</sub></i> (kN)	計算值 V <sub>cr.cal</sub> (kN)	V <sub>cr</sub> /V <sub>cr.cal</sub>
KPC1-1	56.4	70.9(61.8)	0.80(0.91)
KPC1-2	42.2	70.5(60.1)	0.60(0.70)
KPC2-1	52.2	71.9(56.8)	0.73(0.91)
KPC2-2	45.3	71.9(55.6)	0.63(0.92)
KPC2-3	32.3	71.3(51.7)	0.45(0.62)
KPC3	36.8	92.4(73.8)	0.40(0.50)
KRC	36.7	56.6(56.6)	0.65(0.65)

表-6 接合部せん断ひび割れ時梁端荷重

$$V_{jc} = b_j D_c \sqrt{\sigma_t^2 + \frac{P_e}{bD} \sigma_t}$$
 (1)

$$V_{cr.cal} = V_{jc} \frac{2j_b}{L - D_c - \frac{L}{H}j_b}$$
(2)

試験体名	接合部せん断補強筋 平均圧縮ひずみ (10 <sup>-6</sup> )	接合部内コンクリート 平均圧縮応力 <sup>*</sup> <i>σ <sub>cj</sub></i> (N/mm <sup>2</sup> )	梁断面平均 プレストレス応力 $\sigma_{cb}$ (N/mm $^2$ )	$\sigma_{\it cj}/\sigma_{\it c}$
KPC1-1	64	2.11	6.21	0.34
KPC1-2	44	1.45	6.41	0.23
KPC2-1	116	3.27	11.4	0.29
KPC2-2	94	2.65	11.2	0.24
KPC2-3	35	0.99	10.8	0.09
KPC3	77	2.64	11.5	0.23

表-7 プレストレス導入時接合部せん断補強筋ひずみ

#### \* コンクリートの弾性係数には、実験時の値を使用した。

した値を $V_{crcal}$ として,同じく,**表**-6に示す。 ここで, $b_j$ :接合部有効幅(= $(b+b_c)/2$ , $b_c$ は,柱 幅), $j_b$ :梁の応力中心間距離(=7/8d,dは,普通 強度鉄筋の有効せい),H:柱支点間距離, $D_c$ : 柱せい,L:梁スパン(梁載荷点から接合部中心 までの距離×2), $\sigma_c$ : コンクリート引張強度

 $(\sigma_{t} = 0.626 \sqrt{f_{c}}': 日本建築学会「高強度コンク$ リートの技術の現状」より), <math>D: 梁全せい, b:

梁幅である。表-6の接合部ひび割れ時の梁端 荷重は、PC鋼材定着部が接合部内に入るほど小 さくなる傾向がある。

式(1)においてプレストレス力P<sub>e</sub>による接合 部への梁材軸方向圧縮応力は, P<sub>e</sub>/bDとして計算 している。これは,梁断面平均プレストレスで あり,接合部内ではさらに応力が広がるため, 実際に接合部に生じている梁材軸方向圧縮応力 は式(1)で与えられる値よりも小さくなるはず である。プレストレス導入時に接合部せん断補 強筋ひずみ(接合部中央付近に配置した 2 組) を測定した結果から,接合部に生じている梁材 軸方向コンクリート圧縮応力を算定した結果を 表-7に示す。ひずみゲージは柱側面中央付近 に貼付されている。ここでは,せん断補強筋ひ ずみが接合部内コンクリートの平均ひずみを表 していると仮定した。定着部が接合部内に設置 されている試験体ほど,せん断補強筋ひずみが 小さくなる傾向があり,有効なプレストレスが 接合部に導入されていないことが分かる。接合 部内の梁材軸方向コンクリート圧縮応力は梁断 面平均プレストレス応力と比べて,34~9%程度 にまで小さくなっている。それぞれの試験体に 対して,表-7の右端の比率をプレストレス力 に乗じて計算した結果を表-6の()内に示す。 これにより,実験値により近い計算値となる。

# 3.2 梁端荷重-変位関係および最大耐力

図-3に各試験体の梁端荷重-梁端変位関係 を示す。履歴ループ形状は、いずれの試験体も エネルギー消費能力に乏しいスリップ型であり、 PC 鋼材定着位置及びプレストレス力の有無(PC, RC)による違いはほとんど見られない。

図-3に示されているように、すべての試験 体で梁端最大荷重に達するまでに梁普通強度鉄 筋が降伏した。定着部が接合部外側に設置され た KPC1-1 では、梁端最大荷重に達する前に PC 鋼材が降伏ひずみに達した。これは PC 鋼材の径 が小さいことと、その定着がよいためと考えら れる。高強度コンクリート試験体 KPC3 では梁端 最大荷重に達した後に PC 鋼材が降伏ひずみに達 した。他の試験体では PC 鋼材は降伏していない。

表-8に梁端最大荷重実験値と, ACIのコンク リート応力ブロックと鋼材の実強度を用いて算 定した梁曲げ強度時の梁端荷重計算値Pcalを示 す。梁端最大荷重がPcalに達した試験体は、定着 部が接合部外側に設置されたKPC1-1のみである。 これは定着板が接合部外側に設置されており, 接合部コンクリートが有効に拘束され,図-4 に示すようにPC鋼材の張力がPC鋼材降伏まで発 揮されたためと考えられる。梁断面曲げ強度に 対するPC鋼材寄与率が同じ試験体において、梁 端最大荷重(正負平均値)は、定着部が接合部外 に配置されたKPC1-1, KPC2-1 のほうが, 定着部 が接合部内に設置されたKPC1-2, KPC2-3 より, それぞれ 9%と 13%大きい。定着部位置が接合 部外から接合部内に移行するにつれて、梁端最 大荷重が低下している。

3.3 接合部せん断変形成分

#### 表-8 梁端最大荷重実験値と計算値の比較

試験体名	載荷 方向	実験値 V <sub>b max</sub> (kN)	計算値 P <sub>cal</sub> (kN)	$V_{b max}/P_{cal}$
	正	121.5	114.0	1.06
	負	112.5	114.9	0.98
KDC1_2	正	111.6	114.0	0.97
NFUT Z	負	102.2	114.5	0.89
	正	107.3	109.2	0.99
KP02-1	負	100.7	106.2	0.93
	н	104.1	109.2	0.96
	負	97.8	106.2	0.90
KDC3-3	Ш	95.4	108.6	0.88
NFUZ J	負	88.1	108.0	0.81
KDC2	正	115.3	100.0	0.94
NF03	負	106	122.3	0.87
KDC	正	118.1	120.1	0.92
NIC	負	104.5	129.1	0.81

図-5に示した接合部及びその周辺での各種 変形成分の梁端変位への寄与率から、いずれの 試験体も梁部材回転角の上昇に伴い、柱梁接合 部のせん断変形成分が増加していることが分か る。載荷終了時での柱梁接合部せん断変形の梁 端変位への寄与率(正負方向の平均値)を各試験



図-3 梁端荷重-変位関係

体で比較すると、定着部が接合部内に設置され た KPC1-2 は、定着部が接合部外に設置された試 験体 KPC1-1 より 28%大きい。また、KPC2-3 は、 KPC2-2、KPC2-1 より、それぞれ 17%、41%せん 断変形成分が大きい。これらにより、定着部を 柱梁接合部外側に設置することによって、接合 部のせん断変形成分が抑えられることが分かる。

# 3.4 破壊形式

試験体はすべて,載荷が進むにつれ,柱梁接 合部にせん断ひび割れが多数発生,進展し,接 合部コンクリートに圧壊が生じた。定着部が接 合部内にあることにより,接合部の破壊が接合 部せん断破壊とPC鋼材定着劣化の2種類となり 得る。そこで,試験体の破壊形式を判定する際 に,以下の6項目を判断基準とした。

① 普通強度鉄筋が降伏ひずみに達した変位

② PC 鋼材が降伏ひずみに達した変位

③ 破壊状況の外観









Contribution to beam end displacement [%]







- *P<sub>pc</sub>*:載荷時 PC 鋼材張力
- *P<sub>pe</sub>*:載荷直前 PC 鋼材張力
- *D<sub>i</sub>*: 柱梁接合部せん断変形
- D<sub>b</sub>:梁塑性ヒンジ想定部での曲げ 変形(柱梁接合面から梁側へ 300mm+接合部内へ 55mm の 領域)
- D<sub>c</sub>:柱塑性ヒンジ想定部の曲げ変 形(接合部両側 150mm の領 域)
- D<sub>b1</sub>:梁塑性ヒンジ想定部以外の
  弾性計算による曲げ変形



図-5 正載荷時梁端変位に対する各変形成分の寄与率

④ 鋼材の張力より算定した接合部せん断入力 と梁端荷重の比較

⑤ 接合部せん断ひずみの推移

⑥ 接合部せん断変形の割合

1) KPC3 と KRC: 図-6から接合部せん断入力が 載荷につれて,増加する或いはほぼ一定の値と なる。図-3に示したこの二体の試験体の梁端 荷重を見ると,梁部材回転角3%時に最大値とな り,その後低下した。また,この二体の試験体 では普通強度鉄筋とPC鋼材がともに降伏したこ とより,KPC3 と KRC は梁曲げ降伏により耐力低 下したが,最終的に接合部せん断破壊が生じた と考えられる。

 2) KPC1-1: 図-3から PC 鋼材降伏後,梁部材 回転角が2.7%時に最大耐力に達し,梁曲げ降伏 が生じたと考えられる。しかし,接合部せん断 ひずみが載荷につれて増加していること(図-7)と,接合部破壊状況および載荷につれて接 合部せん断変形成分が増加すること(図-5) から KPC1-1 は最終的に接合部せん断破壊したと 判定される。

3) KPC2-1 と KPC2-2: 普通強度鉄筋は降伏した が, PC 鋼材は降伏せずに, 載荷につれて, PC 鋼 材張力が増加していく (図-4)。接合部せん断 入力は梁部材回転角 2%時に最大となり, その後 低下する (図-6)。また, 接合部のせん断ひず みは図-7のように載荷につれて増加する。従 って, KPC2-1 と KPC2-2 の耐力の低下は接合部せ ん断破壊によるものであることが分かる。

4) KPC1-2 と KPC2-3: 図-7 で示されるように 接合部せん断ひずみが最も大きくなるが、図4のように PC 鋼材張力が最も小さく, PC 鋼材張 力が発揮されていないことがわかる。これによ り PC 鋼材の定着劣化が生じたと考えられる。

# 4. まとめ

 1)定着部が接合部内に設置されている試験体ほど,接合部に有効なプレストレスが導入されず, 接合部せん断ひび割れ荷重は小さくなった。
 2)定着部位置が接合部外から接合部コア中央に



移行するにつれて,最大耐力が9~13%低下した。 3)定着部を柱梁接合部外側に設置することによって,接合部のせん断変形が抑えられた。 4)柱梁接合部の破壊と最大耐力の低下に対しては,接合部のせん断破壊だけではなく,PC 鋼材 定着劣化もその要因となる。

#### 謝辞

本研究は,(社)プレストレストコンクリート 技術協会内に設けられた「PC 造柱梁接合部研究 委員会(委員長,京都大学大学院渡邉史夫教授)」 における研究の一環として行われたものである。

### 参考文献

- 西山ほか: PC 鋼材定着位置の梁柱接合部強 度に及ぼす影響,日本建築学会大会学術講演 梗概集, C-2,構造IV, pp.927-930, 2001.9
- 2) 浜原ほか:プレストレス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,日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, 構造 IV, pp. 1009-1014, 2003.9