

論文 梁主筋降伏後に接合部せん断破壊した RC 外部柱梁接合部の実験

サトウ アフォンソ トシイチ*1・雑賀 政年*2・塩原 等*3・小谷 俊介*4

要旨: 鉄筋コンクリートとプレストレストコンクリートの外部柱梁接合部試験体 6 体の静的正負繰返し載荷実験を行なった。接合部先行破壊するように設計されたが、一体を除く全ての試験体が梁主筋降伏後に接合部せん断破壊した。梁主筋および梁緊張材の定着位置が柱主筋の内側にある試験体は、定着位置が柱主筋の外側にある試験体と比べて、柱主筋の応力度は 20%以上、そして付着応力度は 50%以上小さい。定着位置が同じ試験体では、梁に緊張力を有する PC 試験体では層せん断力、接合部せん断力及び柱主筋の応力度が RC 試験体よりわずかに高い値となった。

キーワード: 鉄筋コンクリート, 柱梁接合部, 梁主筋降伏, プレストレス, 接合部せん断破壊

1. はじめに

鉄筋コンクリート外部柱梁接合部にプレストレスを導入した既往の実験は数少なく、その中でも接合部の強度を評価する目的で行われたものは更に少ない。そこで、鉄筋コンクリート及びプレストレストコンクリート外部柱梁接合部の静的正負繰返し漸増載荷実験を行い、梁主筋や緊張材の定着、柱の配筋、接合部補強筋量が接合部強度と変形に及ぼす影響を検討する。

2. 実験概要

2.1 試験体の概要

試験体は、鉄筋コンクリート (RC) 造及びプレストレストコンクリート (PC) 造の平面スラブ無し外部柱梁接合部で、実物を約 1/3 から 1/2 スケールに縮小したものである。

試験体は計 6 体で、実験の変数は、1) 梁主筋及び緊張材の柱梁接合部内の定着位置 (内, 外), 2) 梁に緊張力の有無 (PC, RC), 3) 接合部横補強筋量 (ゼロ, 最小補強), 4) 柱中段筋の有無とした。

RCJ-1 は比較用標準試験体 (梁主筋定着を柱外側に定着), RCJ-2 は定着位置比較用試験体 (梁主

表-1 試験体の諸元

試験体	RCJ-1	RCJ-2	RCJ-3	PCJ-4	PCJ-5	PCJ-6
緊張力比*(%)	0			16.7	16.9	21.1
断面 (mm ²)	200×300 (共通)					
主筋種類	SD390 (共通) $f_y = 428 \text{ MPa}$					
主筋	8D19			4D19		
PC 鋼棒***	-			1φ23	1φ26	
主筋又は PC 鋼棒の定着位置	外側	内側		外側		
横補強筋**	2D6φ30 (塑性ヒンジ範囲), 2D6φ50 (他)					4D6φ30
断面 (mm ²)	250×250	250×300			250×250	
主筋種類	USD685 (共通) $f_t = 645 \text{ MPa}$					
主筋	12D13	8D13		12D13		
横補強筋**	4D6φ50			4D6φ50	4D6φ30	
軸力	250 kN (共通), 軸力比 0.1					
接合部横補強筋**	4-D6□	4-D6□	4-D6□	なし	4-D6□	
コンクリート強度 (共通) 51 MPa						

*緊張力比=(緊張材による実験時圧縮応力度)/(コンクリートの圧縮強度), **SD295 $f_t=333 \text{ MPa}$, ***C 種 1 号 SBPR1080/1230 $f_t=1160 \text{ MPa}$ (φ23), $f_t=1171 \text{ MPa}$ (φ26)。RCJ-2 と RCJ-3 以外には、梁ヒンジ域の主筋周りにスパイラル筋を設けた (SS400 4φ)。

筋定着を柱内側に定着)である。ただし、RCJ-2 と RCJ-3 は、柱せいを大きくして、柱フェイスから定着板の距離を RCJ-1 とそろえた。RCJ-3 は、柱中段筋がなく、柱主筋の中段筋の効果を検討する。PCJ-4 は比較用標準試験体 (PC 鋼材を柱外側に定着) で、PCJ-5 は横補強筋量の影響 (接合部

*1 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 修士課程 (正会員)

*2 東京大学 工学部建築学科

*3 東京大学助教授 大学院工学系研究科建築学専攻 工博 (正会員)

*4 東京大学教授 大学院工学系研究科建築学専攻 Ph.D.・工博 (正会員)

内横補強筋量をゼロにした)を, PCJ-6はPC鋼材量の影響を検討する試験体とした。試験体の諸元を表-1, 試験体の接合部配筋詳細を図-1, 柱と梁の断面及び定着板を図-2に示す。

プレストレスは, ポステンション式とし, 梁にシース管を設け, コンクリート材齢14日目にコンクリート強度の設計強度の2/3を超えたことを確認し, 緊張力を導入し, シース管にグラウトを注入した。グラウトには非膨張タイプ高性能セメントグラウト注入モルタル用混和剤を使用した。

柱梁接合部内に梁主筋定着を行なうために梁主筋を定着鉄板に溶接して, それを接合部に埋め込んだ。

2.2 実験方法

実験装置を図-3に示す。鉛直方向には最大±500kNのアクチュエーター, 水平方向には±200kNのアクチュエーターを使用した。試験体柱を鉛直に支持し, 柱頭ピン支持, 柱脚ピン支持, 梁端ピン・ローラー支持とした。加力は, 柱頭に取り付けた3方向加力軸により行い, 鉛直方向のアクチュエーターで250kNの一定圧縮軸力を加え, 水平方向のアクチュエーターで変位制御の漸増載荷繰り返し加力を行った。

加力は層間変形角±1/400から±1/15まで行なった。ここで, 層間変形角とは水平方向アクチュエーターのストローク(水平変位)を柱頭のピンから柱脚のピンまでの高さ(階高)で除した値とする。加力履歴は図-4に示す。

3. 実験結果及び検討

3.1 破壊状況

各試験体の層間変形角2.7%時のひび割れ状況を図-5に示す。RC試験体とPC試験体の各部材ひび割れ発生時期を比較すると, 梁ではRC試験体, 柱ではPC試験体, 接合部ではPCJ-5を除き, PC試験体のひび割れ発生時期が早かった。全試験体の接合部に大きな斜めひび割れが入り, そのひび割れは梁が付いていない外側柱主筋に沿って上下に伸展した。梁主筋の定着板位置が外

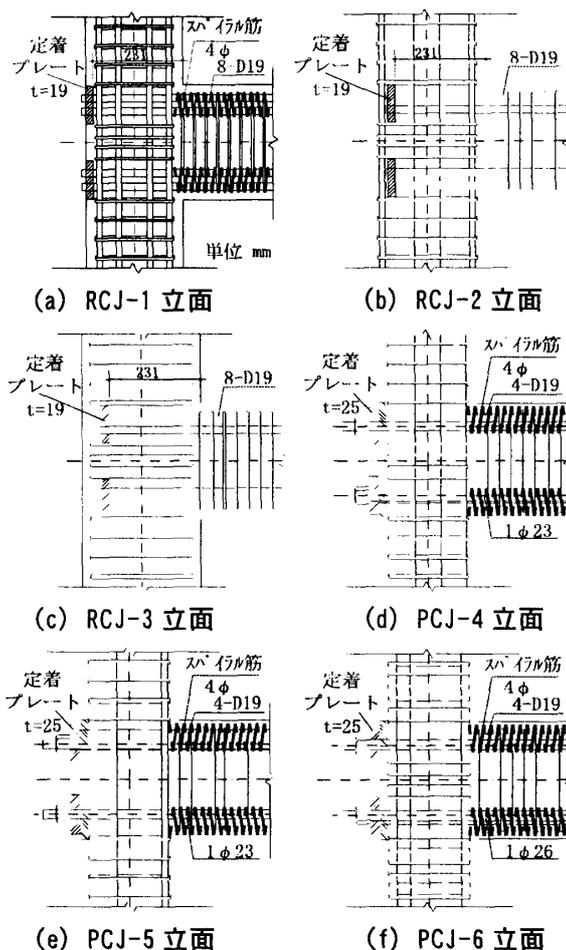


図-1 試験体の接合部配筋詳細

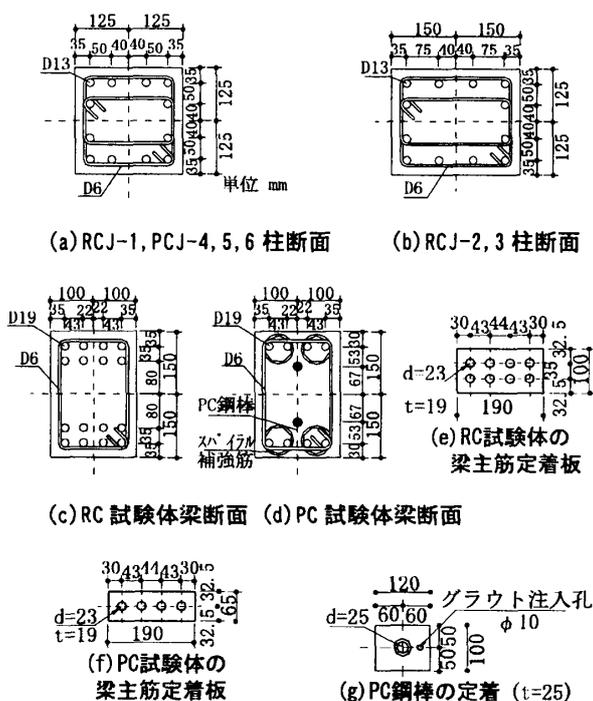


図-2 柱と梁の断面及び定着板

側柱主筋の内側に定着されている試験体(RCJ-2とRCJ-3)では、外側柱主筋のカバーコンクリートが柱主筋に沿ったひび割れを境に板状になって剥がれ落ちた。他の試験体では定着板に拘束されているので、部分的に剥落した。

梁主筋の定着板位置が外側柱主筋の外側にある試験体は梁側の梁ヒンジ域(特に梁危険断面)コンクリートの剥落が多かった。PC試験体の梁のひび割れ数はRC試験体と比べると明らかに少なく、発生時期も遅かった。ただし、接合部横補強筋が入っていないPC試験体(PCJ-5)では、最大強度に達するまでは他の試験体とそれほど違いはなかったが、最終的には破壊状況が最も激しかった。

3.2 実験結果

表-2 に実験結果一覧表を示す。最大層せん断力はRC試験体よりPC試験体の方が正方向加力時で10%、負方向加力時で5%大きかった。

梁主筋、柱主筋の降伏は、鉄筋の両面に貼付されている2枚の歪ゲージの平均値が降伏歪に最初に到達した時とした。接合部横補強筋の降伏は、鉄筋に貼付した歪ゲージ1枚が降伏歪に達し、同じ面の歪ゲージの値もそれに近いことを確かめた上で判定した。

全ての試験体で梁主筋が、曲げ降伏時の層せん断力の計算値に達する前に降伏した。また、PCJ-4とPCJ-6試験体の梁主筋は、試験体の最大耐力に達する前に降伏した。降伏した梁主筋は梁の危険断面及び危険断面に隣接する接合部内部分で降伏が起きている。

柱主筋については、PCJ-4を除いて、全ての試験体で柱の主筋降伏が起こった。いずれの試験体でも柱曲げ降伏時の層せん断力の計算値に達していない。特にRCJ-3とPCJ-6試験体では最大層せん断力に達する前に柱主筋が降伏していた。柱主筋の降伏している位置は接合部の上端か下端に多く見られた。

PC鋼棒については、全て未降伏であった。

接合部横補強筋については、PCJ-5とRCJ-1を除けば、試験体の最大層せん断力に達する前に

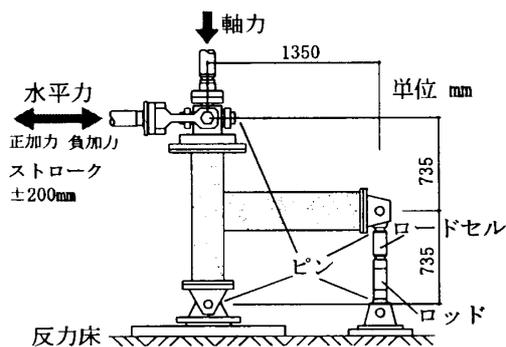


図-3 加力装置

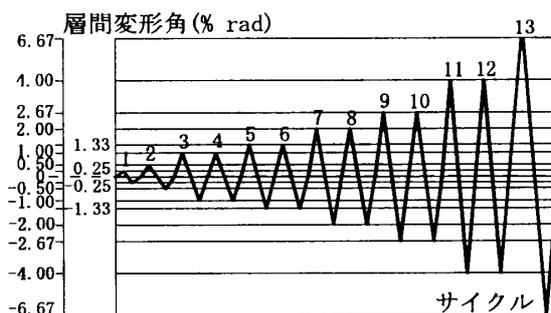


図-4 加力履歴

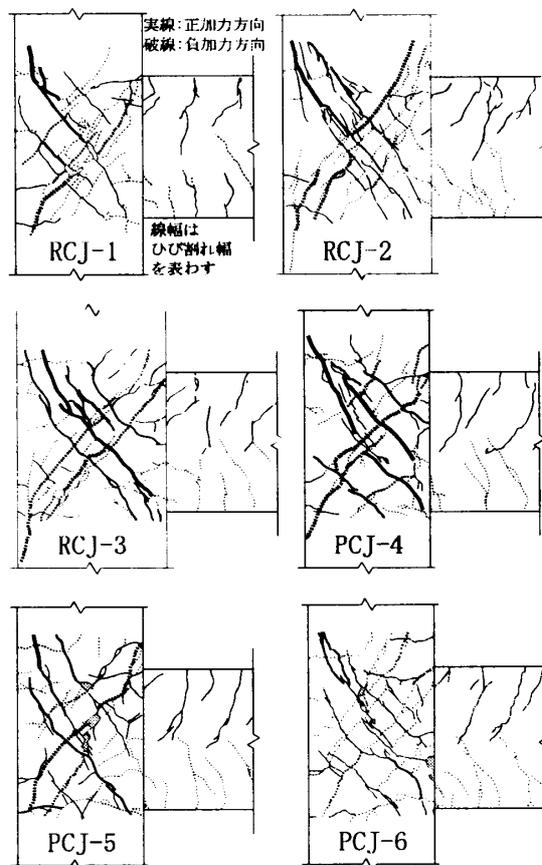
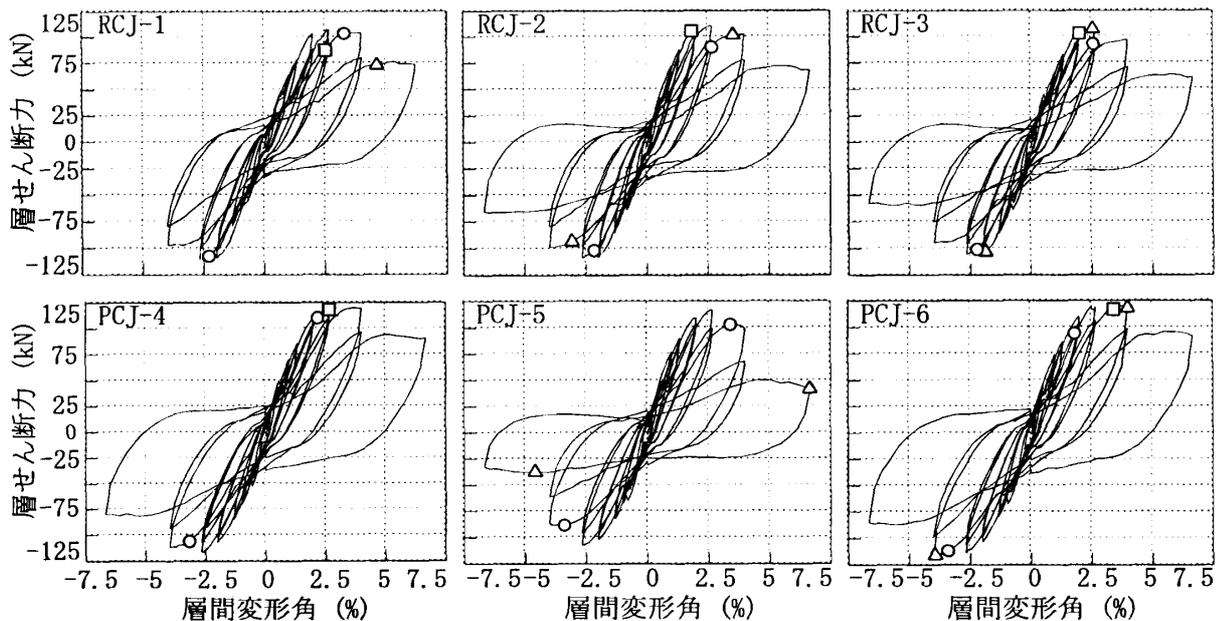


図-5 層間変形角 2.7%時のひび割れ状況



○ 梁主筋の引張降伏 △ 柱主筋の引張降伏 □ 接合部横補強筋の降伏

図-6 各試験体の層せん断力-層間変形角関係

接合部横補強筋が降伏している。RC 試験体では梁が付いている面以外の面での横補強筋が降伏しているが、PC 試験体では全ての面で降伏が起った。

3.3 層せん断力-層間変形角関係

各試験体の層せん断力-層間変形角関係を図-6に示す。PCJ-6以外の試験体は層間変形角2.7%時に最大層せん断力に達している。PCJ-6のみが層間変形角4.0%の時に最大層せん断力に到達した。試験体の最大耐力到達後の耐力劣化には、接合部横補強筋が無いPCJ-5を除いて、ほぼ同じ傾向が見られた。PCJ-5では、最大耐力に到達するまでは違いは見られなかったものの、到達後の耐力劣化が顕著であった。

3.4 接合部せん断力

各試験体の接合部せん断力-層間変形角関係の包絡線を図-7に示す。いずれの試験体も文献¹⁾の接合部せん断力の定義に従い、鉄筋またはPC鋼棒の応力を用いて式(1)、式(2)で求めた。

$$V_j = T_s - V_c \quad (\text{RCJ-1, 2, 3}) \quad (1)$$

$$V_j = T_p + T_s - V_c \quad (\text{PCJ-4, 5, 6}) \quad (2)$$

ここに、 T_p , T_s は、曲げモーメントを受ける時の梁の危険断面における引張側の緊張材応力

表-2 実験結果一覧表

試験体	RCJ-1	RCJ-2	RCJ-3	PCJ-4	PCJ-5	PCJ-6	
最大層せん断力 (+) (kN)	107	111	108	122	117	121	
層間変形角 (%)	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	4.0	
最大層せん断力 (-) (kN)	110	109	105	117	107	117	
層間変形角 (%)	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	4.0	
鉄筋降伏時の	柱主筋	+4.9	-3.6	-2.0	未*	-5.1	-2.0
	梁主筋	-2.3	-2.3	-2.5	+2.2	-3.4	+2.3
層間変形角%	梁PC鋼棒	-	-	-	未*	未*	未*
	接合部 γ - γ'	+2.5	+1.9	+2.0	+2.6	-	+3.5
梁曲げ降伏時の層せん断力 (kN)* ¹	142	145	145	126	126	131	
最大接合部せん断力 (+) (kN)* ²	706	748	690	722	694	781	
最大接合部せん断力 (-) (kN)* ³	678	669	635	709	648	743	
接合部せん断強度計算値 V_{ju} (kN)	420	420	420	420	420	420	

*¹ 曲げ理論による計算値, *² 層間変形角+4.0%時, *³ 層間変形角-4.0%時, **未降伏。

(有効プレストレス力を含む)と鉄筋応力、 V_c は、柱のせん断力である。鉄筋と緊張材の応力は歪ゲージの計測値から計算した。

上記の定義を使用して得られた計算値(図-7に実線で示す)よりも実験結果から得られた接合部せん断力の方が1.5から1.8倍大きな値となった。全ての試験体で層間変形角4.0%の時に

最大接合部せん断力に達している。

3.5 柱主筋の応力度分布

各試験体の正加力時柱主筋の応力度分布を図-8に示す。ここで考察の対象にする柱主筋はより柱の中心に近く、かつ定着板の位置の影響を直接受けているものとした。

RCJ-1とPCJ-4を比較すると緊張力のあるPCJ-4の接合部内柱主筋応力度がRCJ-1よりも多少大きい。内側鉄筋については20%程度、外側鉄筋については50%と大きく異なった。

梁主筋定着板の定着位置が外側柱主筋の外・内に配置されることに関しては、RCJ-1とRCJ-2を比較すると層間変形角2.7%(最大耐力時)の内側鉄筋の正加力時では顕著な違いが見られない。外側鉄筋の正加力時では梁の定着板が外側柱主筋の外にあるRCJ-1がRCJ-2より70%程度大きくなっている。

3.6 柱主筋の付着応力度

正加力時、または負加力時における接合部内の柱主筋付着応力度-層間変形角関係を図-9に示す。

柱主筋内側鉄筋の正加力時における接合部内の付着応力度はRCJ-3以外、層間変形角4.0%時に最大値に達しており、RCJ-3では層間変形角2.7%時に最大値を迎えている。最大値に達した後はPCJ-5以外、ほぼ最大値を保っている。接合部横補強筋が無いPCJ-5では、最大値に達した後、主筋の付着応力度が急激に低下している。負加力時には、全ての試験体が層間変形角2.7%時に最大値に達しており、その後低下している。ただし、PCJ-4ではその低下が最も緩やかに起こ

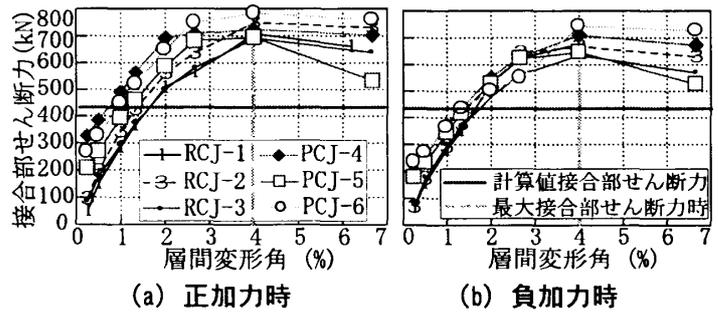


図-7 接合部せん断力-層間変形角関係の包絡線

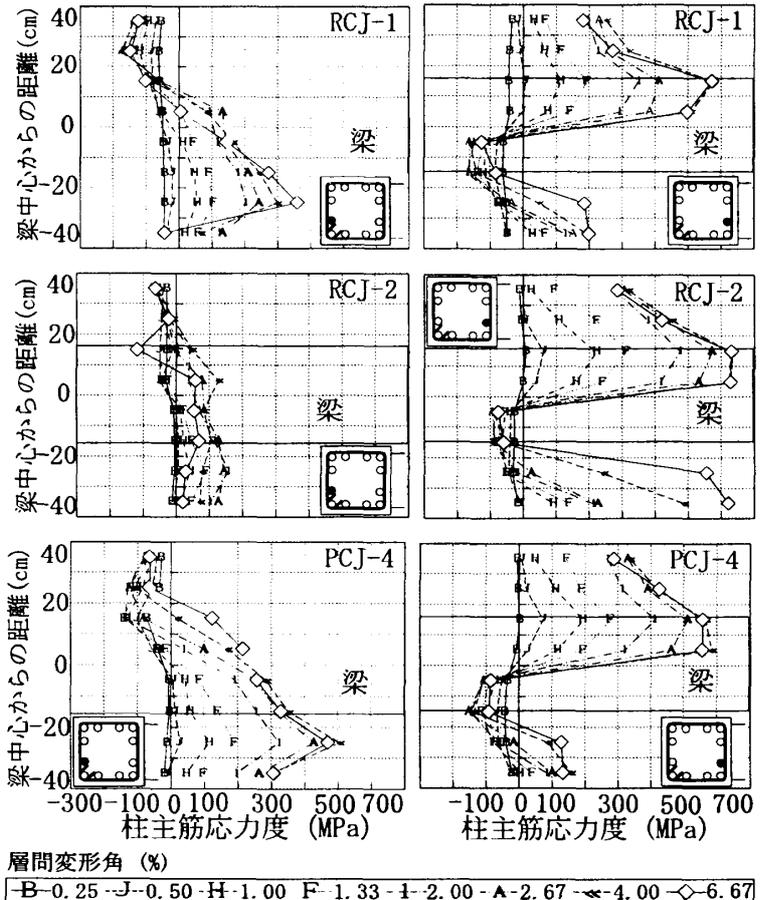


図-8 各試験体正加力時の柱主筋の応力度分布

っている。

柱主筋外側鉄筋の正加力時における接合部内の付着応力度は、PC試験体では層間変形角2.7%時に最大値に達しており、4から5MPa程度であった。それに対し、RC試験体では層間変形角2.7%を超えても付着応力度が上がり続けて、RCJ-1では最大4MPaに到達した。梁主筋の定着位置が柱外側主筋の内側にあるRCJ-2とRCJ-3では付着応力度が2MPaを超えなかった。負加力時にもRCJ-2とRCJ-3が、他の試験体と比べて、付着応

力度が半分以下に止まっているのが目立つ。そして、PCJ-5は最大値に達した後、急激に付着応力度が低下しているのが見られる。ここでは、PC試験体がRC試験体に比べて全体的に付着応力度が高くなっている傾向が見られる。

3.7 接合部の応力状態

図-10に負加力時層間変形角が-2.7%と-4.0%の時の接合部応力状態を示す。鉄筋の応力は歪ゲージの値から、コンクリートの応力は断面の力の釣合いを考慮して求めた。ここで、梁の上端、下端に注目する。負加力時には最初は梁主筋の下端が引張りで上端は圧縮を受けている。層間変形角が増すと、次第にコンクリートの圧縮合力が上へと移動し、層間変形角が-2.7%の時には梁上端主筋が引張りに転化している事が確認できる。層間変形角-4.0%の時には梁の上下主筋全てが引張りを受けている。この現象は、層間変形角が小さいうちは見られないが、層間変形角が大きくなることに連れて現れ、顕著になる。

4. まとめ

本研究で以下の知見が得られた。

- (1) 全ての試験体で梁曲げ降伏時の層せん断力の計算値に達する前に降伏し、一体を除いて、梁主筋降伏後に接合部せん断破壊した。
- (2) 梁主筋及び緊張材の定着位置が外側柱主筋の外に定着した場合、定着板によって柱主筋の付着条件が改善され、柱主筋応力度及び付着応力度が上昇している。
- (3) PC試験体では層せん断力、接合部せん断力、柱主筋の応力度がRC試験体より高い値となった。
- (4) 接合部に横補強筋を配置しない試験体では最大層せん断力に到達するまでは顕著な差が見られないが、その後の耐力低下が激しかった。
- (5) 柱中段筋を配置されなかった試験体は接合部せん断力および外側柱主筋の付着応力度が他の試験体より低かった。

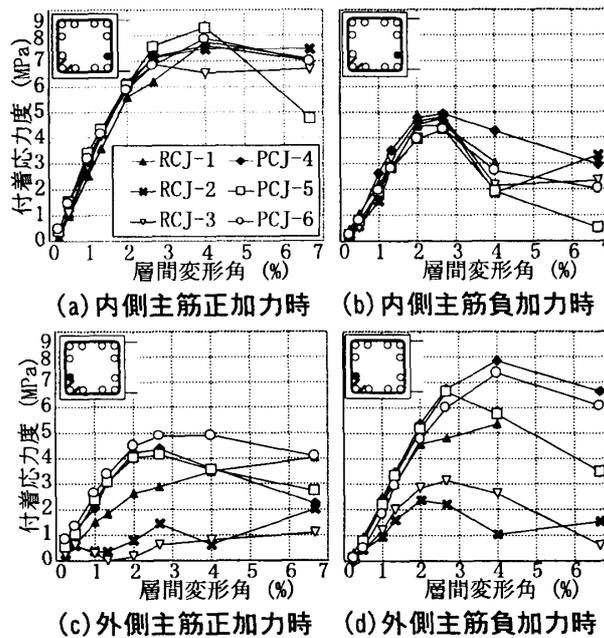


図-9 柱主筋付着応力度-層間変形角関係

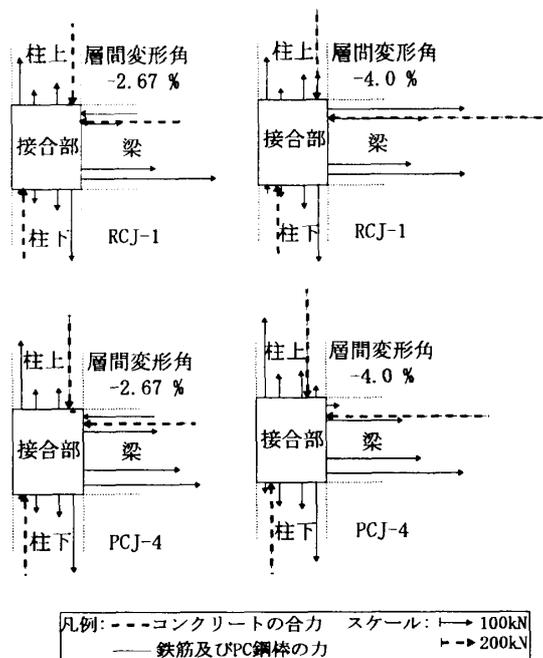


図-10 負加力時の接合部応力状態

謝辞: 本研究は、株式会社ピー・エス研究助成を受けて行なった。

参考文献

1) 楊成旭, 塩原等, 小谷俊介: 梁にプレストレスを導入した鉄筋コンクリート柱梁接合部の接合部強度, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), C-2, pp.1065-1068, 1999.9