

論文 P C 梁柱接合部の力学的性状に及ぼす鋼材種別の影響

岳 偉^{*1}・足立 将人^{*1}・西山 峰広^{*2}・河野 進^{*3}

要旨: 丸鋼, 異形PC鋼棒およびストランドをそれぞれ用いたPC梁・外柱接合部試験体を作製し, 静的漸増繰返し載荷実験を行い, これらの鋼材種別がせん断抵抗, 破壊性状などの接合部の性状に及ぼす影響を実験的に把握した。また, これらの鋼材を用いて引き抜き試験を行い, 付着—すべり関係を得た。これらの実験結果から, 普通強度鉄筋量が多いRCに近いPC梁柱接合部では鋼材種別の影響はほとんど見られなかった。

キーワード: プレストレス, 梁柱接合部, 付着, せん断

1. はじめに

プレストレストコンクリート(以下PCと略記)梁柱接合部の力学的性状および耐震性能に関する研究が近年いくつか行われている。鋼材の付着を実験変数とした実験もあるが, 梁の曲げ性状に及ぼす影響を調べようとしたものであり, 梁柱接合部のせん断性状に及ぼす影響に関するものはない。また, 付着がある場合とアンボンドとした場合とを比較しているものがほとんどである。

本研究では, 鋼材種(丸鋼, 異形鋼, ストランド及びアンボンド)を実験変数としたPC梁・外部柱接合部に対する載荷実験に基づき, 梁柱接合部の力学的性状に及ぼすPC鋼材種の影響を考察した結果について報告する。

2. 実験概要

2.1 試験体

本実験で作製した試験体は, 直交梁及びスラブのないPC梁・外柱接合部骨組4体である。試験体諸元を表-1に示す。また, 試験体を図-1に示す。試験体は, いずれも200x300mmの矩形断面梁と300x300mmの正方形断面柱よりなる一体打ち骨組である。実験パラメータである鋼材種として, PC-K1では13.0mm丸鋼棒(C種1号SBPR1080/1230), PC-K2では12.6mm異形鋼棒(C種1号SBPDL1080/1230), PC-K3ではφ12.4mm7本よりストランド(SWPR7AL)

表-1 試験体諸元

試験体名	PC-K1	PC-K2	PC-K3	PC-KU
構造形式	一体打ち コンクリート 設計基準強度 $F_c=30\text{N/mm}^2$			
柱	8-D19 (SD295A)			
	D10@100 (SD295A) $P_w=0.52\%$			
接合部	D10@100 (SD295A) $P_w=0.71\%$			
	6-D19 (SD295A)			
梁	D10@80 (SD295A) $P_w=0.98\%$			
	2-D13 PC鋼棒 C種1号 (SBPR1080/1230)	2-D12.6 異形PC鋼棒 C種1号 (SBPDL1080/1230)	2-D12.4 PC7本より線 A種 (SWPR7AL)	2-D13 PC鋼棒 C種1号 (SBPR1080/1230)
グラウト	あり	あり	あり	なし

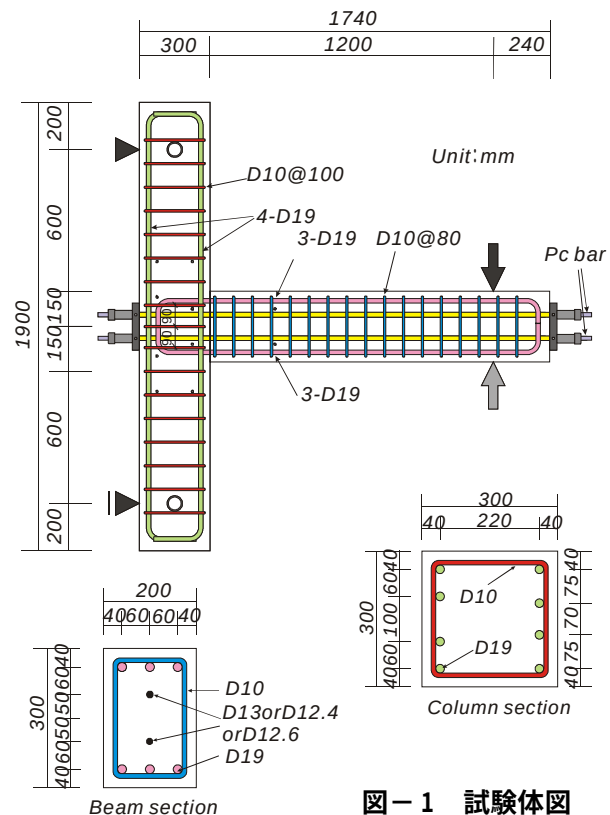


図-1 試験体図

*1 京都大学大学院建築学専攻 工修 (正会員)

*2 京都大学工学研究科建築学専攻 助教授 博士(工学) (正会員)

*3 京都大学工学研究科建築学専攻 助手 PhD (正会員)

表-2 PC鋼材の緊張力比較

試験体	PC-K1	PC-K2	PC-K3	PC-KU
導入時	115.6	120.7	114.0	118.7
プレストレス (kN)	122.0	117.6	113.0	116.2
載荷直前	110.9	112.0	112.8	113.4
プレストレス (kN)	117.1	109.9	111.7	111.9

表-4 コンクリート特性値

試験体種類	圧縮強度 f_c' [N/mm ²]	圧縮強度時 ひずみ度 [%]	割裂引張 強度 [N/mm ²]	1/3 f_c' 割線 弾性係数 [N/mm ²]
PC-K1	35.1	0.22	2.70	2.43×10^4
PC-K2				
PC-K3				
PC-KU	31.6	0.23	3.02	2.28×10^4

表-5 鉄筋特性値

鉄筋種類	降伏強度 [N/mm ²]	降伏ひずみ [%]	引張強度 [N/mm ²]	ヤング係数 [N/mm ²]
D19(SD295A)	345	0.192	540	1.8×10^5
D10(SD295A)	369	0.252	524	1.5×10^5

表-6 PC鋼棒機械的性質

PC鋼棒種類	0.2%永久伸び に対する荷重 [kN]	降伏応力度 [N/mm ²]	耐力時 ひずみ度 [%]	最大引張 荷重 [kN]	ヤング 係数 [N/mm ²]
Φ13 C種1号 (SBPR1080/1230)	169.8	1279	0.64	175.2	2.0×10^5
D12.6 C種1号 (SBPDL1080/1230)	150.4	1203	0.60	155.6	2.0×10^5
12.4 7本より線 A種 (SWPR7AL)	149.0	1604	0.83	168.0	1.9×10^5

表-7 接合部せん断力比較

試験体名	接合部入力せん断力 V_{jh} [kN]	接合部せん断耐力 V_{ju} [kN]	V_{ju}/V_{jh}
PC-K1	536.8	322.9	0.60
PC-K2	513.3		0.63
PC-K3	505.4		0.59
PC-KU	470.8	299.9	0.64

を用いてプレストレスを導入した。PC-KUはPC-K1と同一鋼材を緊張材として用いた試験体であるが、グラウト注入を行わず、アンボンドの状態で行った。

プレストレスは、PC鋼材規格降伏点強度の80%を目標に導入した。導入時と載荷直前のプレストレスを表-2に示す。全引張鋼材張力(圧縮普通強度鉄筋のみ除く)に占めるPC鋼材張力の比は、0.103(PC-K1)～0.091(PC-K3)となっている。

また、材料の力学特性を表-3～6にまとめて示す。

2.2 載荷方法、載荷履歴及び計測項目

図-2に載荷装置を示す。試験体を90度回転させて柱を水平に、梁を垂直に設置して梁端に水平正

表-3 グラウトモルタル特性値

試験体種類	圧縮強度 f_c' [N/mm ²]	圧縮強度時 ひずみ度 [%]	割裂引張 強度 [N/mm ²]	1/3 f_c' 割線 弾性係数 [N/mm ²]
PC-K1	44.6	0.39	2.08	1.42×10^4
PC-K2				
PC-K3	41.5	0.34	2.25	1.50×10^4

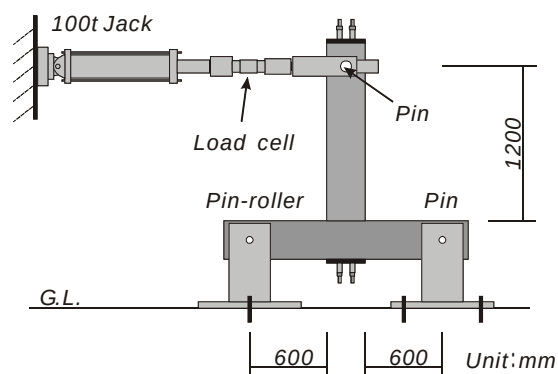
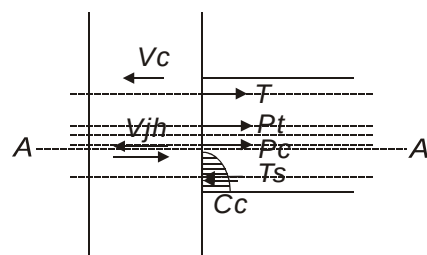


図-2 載荷装置



$$V_{jh} = T + P_t + P_c - V_c \quad (1)$$

T : 普通鉄筋張力

P_t, P_c : PC鋼材張力 V_c : 柱せん断力

図-3 接合部まわりの力の状態

負繰返し荷重を加えた。柱支持条件は一端(図中右側)をピン、他端(図中左側)をローラーとしている。したがって、ピン支持された側の柱には梁端載荷の反力としての軸力が生じる。載荷は、梁部材回転角によって制御した。梁部材の回転角が0.5%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 7.5%となる変位で各2回の正負繰返し載荷を行った。ここで、載荷方向への梁端部の変位が、載荷点から柱面までの距離に対する比を梁部材の回転角とする。

計測項目については、梁端ピンとジャッキとの間に配置したロードセルによって梁端荷重を、柱外面と梁端に配置したカラナットによって同位置でのプレストレスの変動をそれぞれ測定した。また梁端載荷点における変位及び柱梁接合部周りでの変形量を変位計によって測定した。鉄筋の応力について

は、鉄筋表面に適宜貼付したひずみゲージによって計測した。

2.3 試験体設計

接合部せん断破壊を梁曲げ降伏に先行させるために、梁曲げ降伏時接合部せん断力が、日本建築学会「靱性保証型耐震設計指針」により与えられる接合部せん断強度を大きく上回るように設計した。

グラウトを行った梁の場合には、ACI318のコンクリート応力ブロックと平面保持仮定を用いて断面解析を行った。得られた鋼材張力に基づいて、式(1)によりせん断力が最大となるA-A断面(図-3)における接合部せん断力を算定した。アンボンドとした試験体の場合には、平面保持仮定がPC鋼材に対しては成立しないため、日本建築学会「プレスト

レスト鉄筋コンクリート(III種PC)構造設計・施工指針」(PRC指針)によりPC鋼材張力を略算した。

材料実験から得られた力学的特性値を用いて、以上の方法より計算された接合部入力せん断力とせん断強度を表-7にまとめる。接合部せん断強度を算定する際に、接合部の高さ D_j には普通強度鉄筋の水平投影長さを用いた。接合部せん断強度と入力せん断力の比は、0.59～0.64となる。

3. 実験結果及び考察

3.1 試験体破壊性状

図-4に各試験体最終ループ载荷終了時における接合部パネル付近のひび割れ分布を示す。同図中に示されている点は、接合部周りの変形計測用金具取り付け位置である。

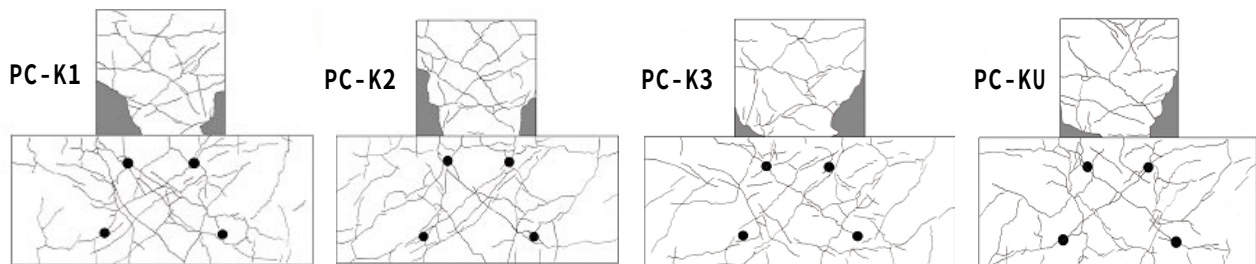


図-4 接合部近傍ひび割れ

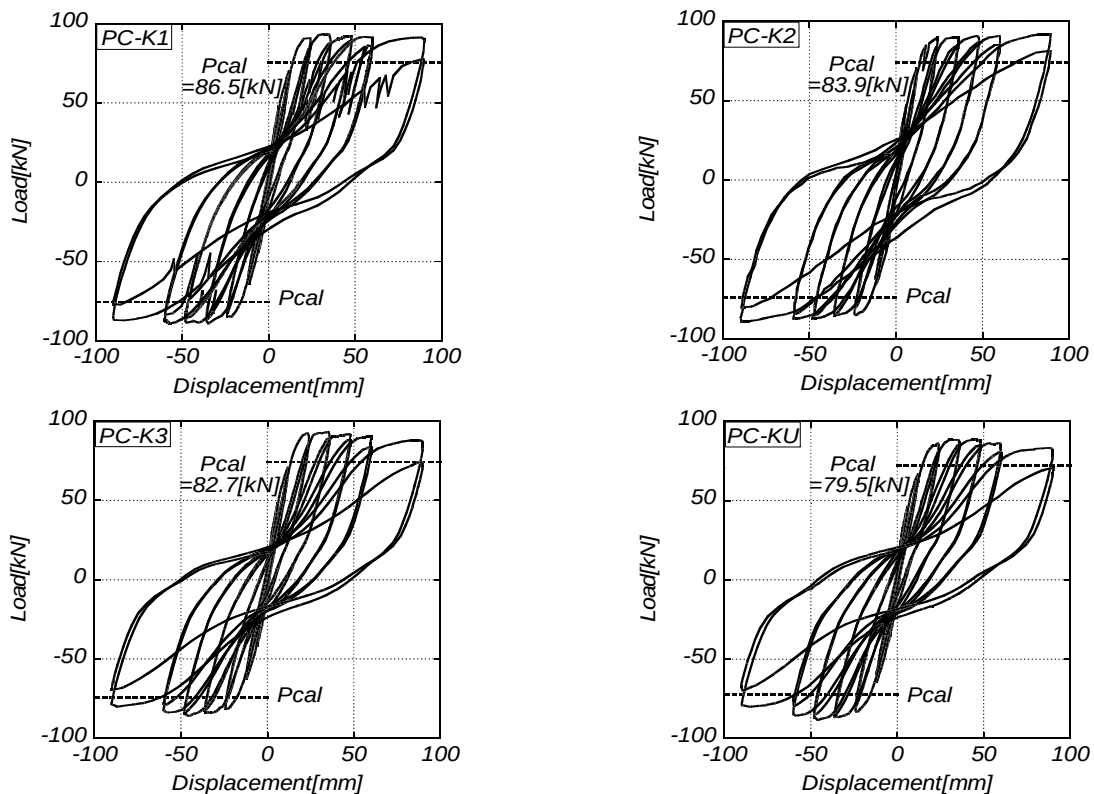
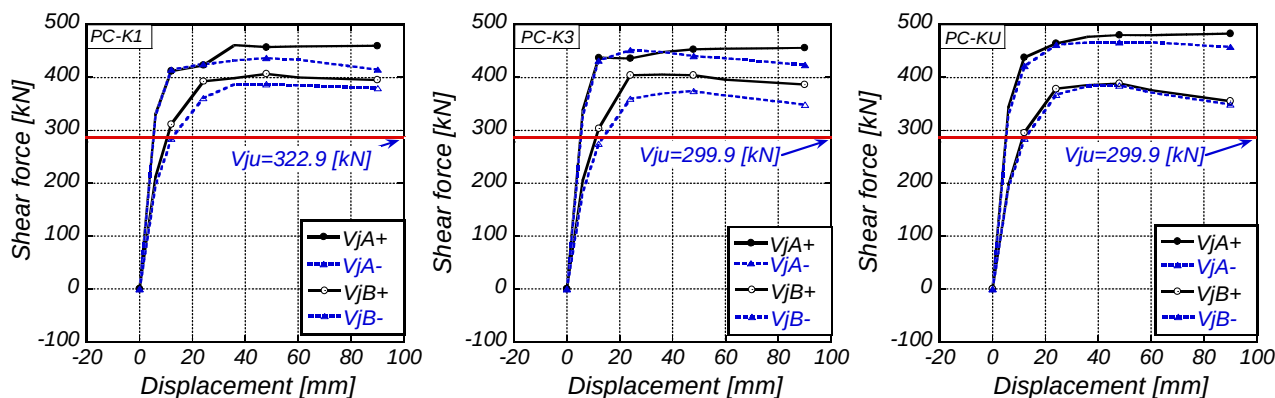


図-5 梁端荷重－梁端変位関係



V_{jA} :式(1)により計算された接合部せん断入力

V_{jB} :梁端モーメントを上下普通強度鉄筋間距離で除して、求めた接合部せん断入力

+: 正方向載荷 -: 負方向載荷

図－6 接合部せん断入力－梁端変位関係

全試験体で梁危険断面で普通強度鉄筋が引張降伏した後、梁コンクリート圧縮部で圧壊が生じた。柱梁接合部のせん断ひび割れは、梁部材角0.5%あるいは1.0%載荷時に発生したが、そのひび割れ幅は梁の曲げ破壊後も大きく広がることはなく、最終梁部材角載荷時でも約1～1.5mm程度であった。試験体ごとの接合部せん断ひび割れパターンに大きな違いは見られなかった。また、緊張材として異形PC鋼棒を用いたPC-K2試験体では、柱梁危険断面側の柱主筋沿いにひび割れが発生し、載荷が進むに従って大きく開く様子が観察された。

なお、試験体PC-K2では、計測装置の不調により、梁端荷重－梁端変位関係以外の計測データが得られていない。

3.2 梁端荷重－梁端変位関係

図－5に各試験体の梁端荷重－梁端変位関係を示す。図中の P_{cal} は、ACI318の方法を用いた曲げ解析に基づいて計算された梁曲げ耐力時の梁端荷重である。アンボンド試験体PC-KUでは、PC鋼材張力は、日本建築学会PRC指針を用いて算定した。実験から得られた各試験体の最大荷重(正負方向絶対値の平均値)及びその P_{cal} に対する比は、それぞれ、91.3kNと1.06(PC-K1)、90.3kNと1.08(PC-K2)、89.6kNと1.08(PC-K3)及び84.0kNと1.06(PC-KU)であり、全ての試験体において実験値は計算値を上回る結果となった。

図－5によると、最終履歴ループの幅に関して、

若干PC-K2の幅が広く、PC-KUの幅が狭い様子が伺えるが、全般にそのループ形状には違いが見られない。

3.3 接合部せん断特性

図－6に各履歴サイクル一回目の変位最大時における柱梁接合部への入力せん断力と梁端変位との関係を示す。柱梁接合部への入力せん断力は二種類の方法によって求め、それぞれ V_{jA} 、 V_{jB} とした。 V_{jA} は図－3での式(1)を用いて算定した。同式中でのPC鋼材張力 P_t 、 P_c の値は、柱外面に配置したカラナットの計測値を用いている。柱せん断力は、接合部中心における梁曲げモーメントが上下の柱に等分されたとした柱モーメントより算定した。

また V_{jB} は、柱梁危険断面での曲げモーメントを応力中心間距離で除すことによって求めた。本試験体では、柱梁危険断面内に普通強度鉄筋及びPC鋼材が配置されているため、応力中心間距離の適切な評価が難しい。本計算では応力中心間距離が、梁断面に配置された上端及び下端普通強度鉄筋間の距離で一定値を保つものと仮定した。同図中には靱性保証型耐震設計指針に基づいて得られた柱梁接合部せん断強度 V_{ju} (表－7参照)についても示している。

全ての試験体で V_{jA} 及び V_{jB} の値が V_{ju} を大きく上回っている。これは、 V_{ju} の値がRC部材を対象とした設計式で求めたこと、及び V_{ju} の値が過小評価されたためと考えられる。また、 V_{jA} と V_{jB} の値が

せん断入力として適切かどうかについても議論の余地がある。

3.4 梁端変位の変形成分

接合部内4点及び接合部面から柱両側に2点ずつ、梁側に2点の合計10点に対して、配置した変位計により相対変位を計測した。変位計による計測区間を図-7に示した。計測結果に基づいて接合部周りにおける各種変形を計算して、梁端変位の変形成分の分離を行った。今回考慮した変形成分は柱梁接合部のせん断変形 Dj 、柱ヒンジ部（梁面から300mmの範囲）の曲げ変形 Dc 、梁ヒンジ部（柱面から275mm＋柱内へ65mmの範囲）のせん断変形 $Db1$ 、梁ヒンジ部の曲げ変形 $Db2$ 及び梁ヒンジ部以外の曲げ変形 $Db3$ の5種類とした。この中で $Db3$ を除く変形成分は接合部周りに配置した変位計による計測値から算出し、 $Db3$ についてはヒンジ部以外の梁が弾性変形しているものとして計算により求めた。これら変形成分の梁端変位への寄与率を図-8に示す。

同図によると、载荷サイクルが進むに連れて $Db3$ の寄与率が低下し、それとは逆に $Db2$ の寄与率が上昇しており、梁ヒンジ部へ変形が集中していく様子が分かる。载荷中全サイクルを通して、 Dj の変形成分は非常に少ない。また、いずれの試験体も各変形成分の合計が終局で全変形の100%になっていないのは、柱ヒンジ部のせん断変形など他の変形を考慮していないこと及び梁ヒンジ部以外の梁が弾性変形していると仮定したためであると考えられる。

しかしながら、試験体ごとによる変形成分推移の違いは観察できなかった。この原因として、今回の試験体では危険断面に普通強度鉄筋量が多く配筋されたため、PC鋼材種別の影響がほとんど現れなかったことが考えられる。

4. 鋼材引き抜き試験

前節で述べたPC梁・外柱接合部骨組への载荷実験で使用したPC鋼材種による付着－すべり特性の違いを見るために引き抜き試験を行った。

载荷装置及び試験体を図-9に示す。試験体は150mm角の立方体であり、その中央に、梁柱接合部試験体で使用した外径23mm、内径20mm、厚さ0.25mm

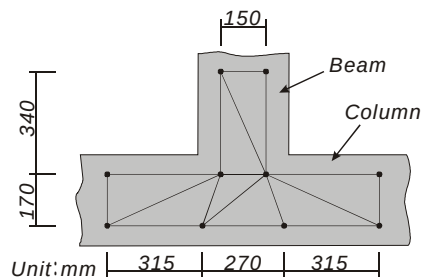


図-7 変位計による計測区間

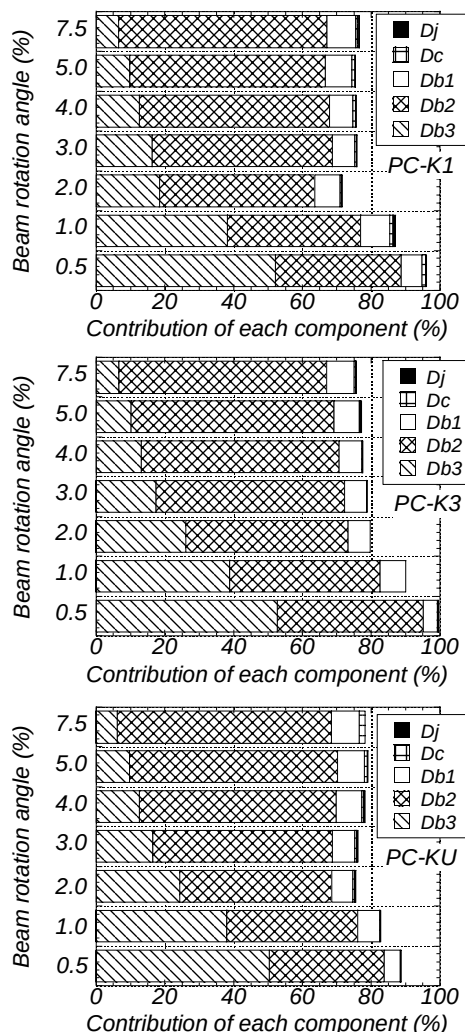


図-8 梁端に対する変形分離

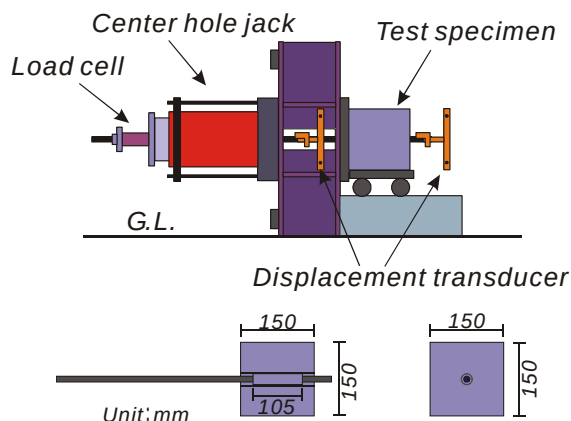
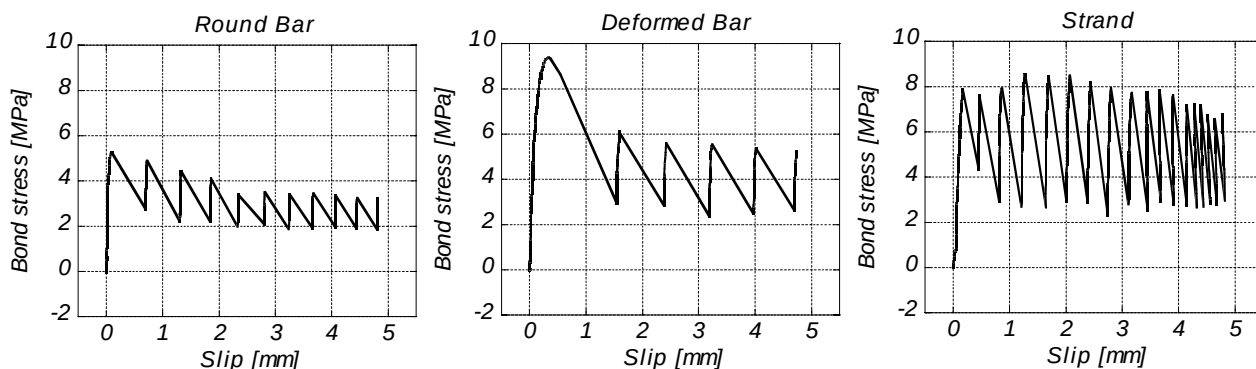


図-9 付着実験载荷装置及び試験体

表－８ 付着実験結果

試験体	No1		No2		No3		平均	
	τ_y [MPa]	S_y [mm]	τ_y [MPa]	S_y [mm]	τ_y [MPa]	S_y [mm]	τ_y [MPa]	S_y [mm]
PC丸鋼	5.28	0.075	4.65	0.089	4.01	0.138	4.65	0.101
異形PC鋼	9.42	0.322	10.47	0.228	10.51	0.230	10.13	0.260
PC鋼より線	7.90	0.162	7.04	0.114	8.05	0.095	7.66	0.124



図－１０ 付着応力度－滑り量関係

のワインディングシースを試験体コンクリートとともに打ち込んだ。材齢15日でこのシース中に鋼材を挿入し、グラウトを施した。グラウトは、鋼材が鉛直に立った状態で、底側にふたをし、上部より流し込んだ。鋼材の付着区間は、試験体各端から20mmをアンボンド区間としたため、その付着長さは110mmとなる。しかしながら、グラウトのブリージングの影響により各試験体でその長さは若干異なり、平均すると約105mmとなった。

各鋼材種について同一の試験体を3体作製した。試験体のPC鋼材に金属製アングルを取り付け、試験体駆体コンクリート部に埋め込まれたナットに取り付けた変位計固定用金具との間の相対変位を測定した。

対象区間の付着応力は、PC鋼材の断面形状が、その公称径を直径とする円断面であると仮定して算出した。また、すべりは計測された相対すべりから、付着区間両端の変位を算出してその平均をもってすべりとした。

図－１０に得られた付着応力－すべり関係の一例を、また、表－８に最初に大きく付着応力が低下し、すべりが進行した点(付着降伏点)の付着応力 τ_y 、及びその時のすべり S_y の一覧を示す。

図－１０によると、鋼材種に関わらず全ての試験体で上下動の大きな付着応力－すべり関係を示し

た。これは、今回使用したシースの内径とPC鋼材径が近いために、グラウトとPC鋼材との摩擦抵抗が大きかったことが原因である。

表－８により、異形PC鋼、PC鋼より線、PC丸鋼の順に τ_y の値が大きいことが分かる。

５．結論

本研究ではPC鋼材種別を実験変数とした柱梁接合部せん断破壊先行型PC梁・外柱接合部試験体を作成し、静的漸増繰返し载荷実験を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) 载荷実験により得られた接合部せん断耐力は、RC構造部材を対象とした靱性保証型耐震設計指針より計算された接合部せん断強度を大きく上回った。
- 2) PC鋼材種別がPC梁・外柱接合部試験体の力学的挙動に及ぼす影響は、ほとんど観察されなかった。これは、危険断面に普通強度鉄筋が多く配筋されたため、PC鋼材種別の影響が現れなかったためであると考えられる。

【謝辞】

本実験で使用したPC鋼材は、住友電工株式会社と高周波熱錬株式会社より提供していただいた。