

論文 柱・梁および柱梁接合部をフルプレキャスト化した柱梁部分架構の構造性能

金本 清臣^{*1}・山野辺 宏治^{*2}・遠藤 芳雄^{*3}

要旨：これまでに開発したプレキャスト（以下、既存 PCa と略記）工法のさらなる施工性の改善を目的として、柱、梁および柱梁接合部の全てをフルプレキャスト化する工法を新たに考案し、平面十字形およびト字形柱梁部分架構の縮小試験体を用い、破壊モードをパラメータとして同架構の構造性能を実験的に確認した。本論では、実験の概要および本工法による柱梁接合部の耐力が既存 PCa 工法による柱梁接合部と同等であること、既往耐力式による耐力評価の妥当性、柱梁接合部に設けた貫通孔内の柱主筋付着性状等の検討結果について述べる。

キーワード：フルプレキャスト、柱梁接合部、柱主筋貫通孔、シース管、梁曲げ降伏、接合部せん断破壊

1. はじめに

筆者らは、これまでに鉄筋コンクリート（以下、RC と略記）造柱梁接合部に柱主筋貫通孔を設けて、この部分を PCa 化した柱梁部分架構について一連の実験を行い、本構法の構造性能とその実用性を確認している^{1)~6)}。今回、施工性のさらなる改善を目的として、**図-1**に示すようなフル PCa 工法を考案した。本工法では、柱主筋の挿入方向やグラウト材の充填方法が従来と異なるため、本工法による柱梁部分架構の構造性能を確認しておく必要がある。

本論では、これらを確認するために行った考案のフル PCa 工法による柱梁部分架構実験の概要・結果および検討結果について述べる。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体諸元一覧を表-1 に、加力概要を併記した試験体形状図を**図-2**に示す。試験体計画は、既存工法の実

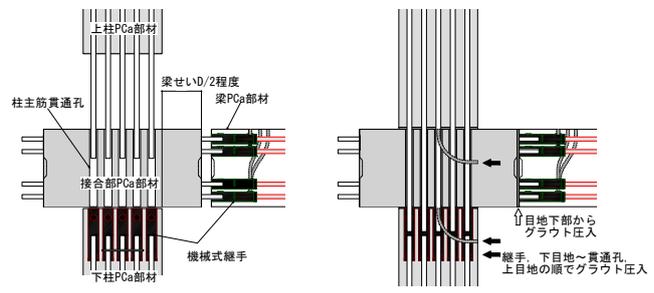


図-1 フル PCa 工法の概要

験計画^{1)~6)}の試験体諸元を踏襲した。試験体サイズは実寸法を 40%に縮小したもので、試験体数は平面十字形試験体 3 体と平面ト字形試験体 1 体で、梁断面は幅 310mm (b) × せい 400mm (D_b)、柱断面は幅 400mm (B) × せい 400mm (D_c)とした。試験体 SPU-1 と SPU-4 は梁曲げ降伏 (B) が先行するように設計し、柱と柱梁接合部のコンクリート設計基準強度は試験体 SPU-1 では Fc60, SPU-4 では Fc120 とした。柱主筋と梁主筋は、試験体 SPU-1 には SD490 材を、SPU-4 では USD685

表-1 試験体諸元一覧

試験体	形状	※1 比較 試験体	想定 破壊 形式	柱(400×400mm)			接合部(355×D _j mm)		梁(310×400mm)			梁曲げ 終局荷重 eQ _{ult} (kN)	柱梁曲げ 強度比 eQ _{uw} /eQ _{bu}	接合部 余裕度 eQ _{ju} /eQ _{bu}
				σ _B (N/mm ²)	主筋 [σ _y (N/mm ²)]	横補強筋 [σ _y (N/mm ²)]	σ _B (N/mm ²)	横補強筋 [σ _y (N/mm ²)]	σ _B (N/mm ²)	上下主筋 [σ _y (N/mm ²)]	横補強筋 [σ _y (N/mm ²)]			
SPU-1	十字	PJ-31 IJ-1P	BJ	59.5 (Fc60)	16-D22 p _g =3.87% [530.6]	4*4-D6@75 p _w =0.42% [936.7]	59.5 (Fc60) D _j =400	7(5)組×2-D6 p _{wj} =0.33% [373.6]	55.9 (Fc48)	7-D19 p _t =2.02% [535.2]	4-D6@90 p _w =0.45% [936.7]	489.6	2.35	1.02
SPU-2	十字	PJ-32 IJ-2P IJ-2R	J	63.5 (Fc60)	16-D22 p _g =3.87% [709.8]	4*4-U7.1@75 p _w =0.53% [1263]	63.5 (Fc60) D _j =400	7(5)組×2-D6 p _{wj} =0.32% [373.6]	53.3 (Fc48)	6-D22 p _t =2.31% [709.8]	4-D6@60 p _w =0.68% [936.7]	757.3	1.84	0.69
SPU-3	ト字	PJ-33 EJ-1P EJ-1R	BJ	63.5 (Fc60)	12-D22 p _g =2.90% [530.6]	4*4-D6@75 p _w =0.42% [936.7]	63.5 (Fc60) D _j =300	9(7)組×2-D6 p _{wj} =0.49% [373.6]	55.9 (Fc48)	8-D19 p _t =2.35% [535.2]	4-D6@80 p _w =0.51% [936.7]	275.8	正 2.25 負 5.08	0.97
SPU-4	十字	PJ-34 IJ-3P	BJ	136.3 (Fc120)	16-D22 p _g =3.87% [709.8]	4*4-U7.1@75 p _w =0.53% [1263]	136.3 (Fc120) D _j =400	7(5)組×2-D6 p _{wj} =0.32% [936.7]	55.9 (Fc48)	6-D22 p _t =2.31% [709.8]	4-D6@50 p _w =0.82% [936.7]	757.3	2.74	1.19

※1 文献 1)~6)による、※2 式(1)による梁曲げ終局耐力、※3 式(2)による接合部耐力

*1 清水建設株式会社 技術研究所 建設基盤技術センター 主任研究員 修(工) (正会員)

*2 清水建設株式会社 技術研究所 建設基盤技術センター グループ長 博(工)

*3 清水建設株式会社 設計本部 構造設計部 3 部 設計長 修(工) (正会員)

材を用いた。試験体 SPU-2 は接合部せん断破壊 (J) が先行するように設計し、柱と接合部のコンクリートは Fc60 とし、柱主筋と梁主筋には USD685 材を用いた。ト字形試験体 SPU-3 は形状以外の諸元を SPU-1 と同一とした。梁のコンクリートは全試験体とも Fc48 とした。試験体の柱および梁断面図を図-3 に、柱梁接合部の配筋詳細図を図-4 にそれぞれ示す。柱梁接合部の柱主筋貫通孔にはスパイラルシース管 (#1035) 用いた。図-3 の梁継手断面図中の主筋周りの赤丸は機械式継手を示す。PCa 柱梁接合部と上下のフル PCa 造柱との接合部分には幅 10mm の目地を設け、左右のフル PCa 造梁との接合部分には幅 15mm の目地およびシアコッターを設けた。目地、機械式継手および柱主筋貫通孔には表-2 に示すグラウト材を充填した。PCa 造柱梁接合部と PCa 造柱のグラウト材による接合順は、下柱の機械式継手～下柱目地の下端、下柱目地～柱主筋貫通孔～上柱目地の下端、上柱目地とした。PCa 造柱梁接合部と PCa 造梁とを接合するグラウト材は梁端目地下部より注入し、目地を経由して梁の機械式継手に充填した。

各試験体の耐力や各種余裕度の計算には、材料試験結

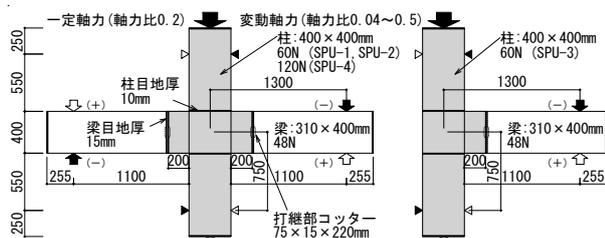


図-2 試験体形状図

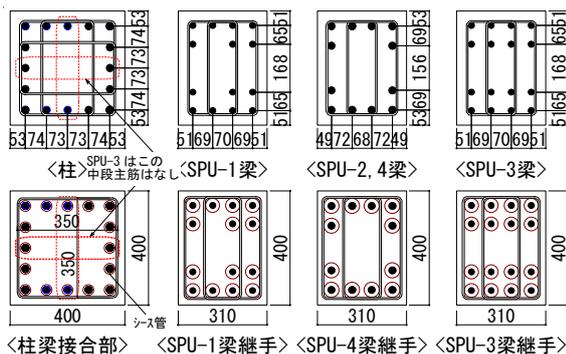


図-3 柱・梁断面図

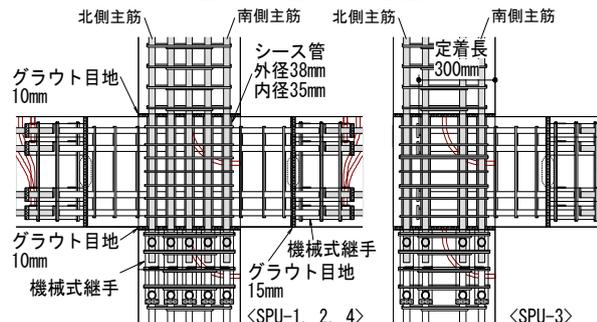


図-4 柱梁接合部の配筋詳細図

果から得られた強度を用いた。梁曲げ終局強度は式(1)、接合部せん断強度は式(2)によって算出した。なお、記号の意味等、詳細については、文献7)を参照されたい。

$$M_u = 0.9a_s \sigma_y d \quad (1)$$

$$V_{ju} = \kappa \phi F_j b_j D_j, \quad F_j = 0.8 \sigma_B^{0.7} \quad (2)$$

2.2 実験方法

試験体の加力は図-2 中に示すように柱の下面と支点位置をピン・ローラーで支持し、正負交番の逆対称曲げモーメントが生じるように梁の加力点位置を繰返し漸増加力した。加力は試験体の層間変形角 R による漸増変位制御 (図-5 右側) で行い、十字形試験体には軸力比 $\eta = 0.2$ の一定軸力 N ($N = \eta B D_c \sigma_B$ で、SPU-1: 1904kN, SPU-2: 2030kN, SPU-4: 4362kN) を、ト字形試験体 SPU-3 には図-5 左側に示す変動軸力 ($\eta = 0.04 \sim 0.5$, $N = 406 \sim 5078$ kN) を与えた。軸力の算定には加力日直近のコンクリート圧縮強度試験結果 σ_B を用いた。

3. 実験結果

3.1 柱梁接合部の破壊過程と損傷状況

各試験体の層間変形角 $R = 2.0\%$ 時および $R = 3.0\%$ 時の正負 1 回目の加力終了時点の柱梁接合部損傷状況を写真-1, 2 に示す。

梁曲げ降伏先行型の十字形試験体 SPU-1 は、 $R = 1.5\%$ 加力時に梁 1 段目主筋が、 $R = 3.0\%$ 加力時に梁 2 段目主筋が降伏し、試験体 SPU-4 は $R = 1.0\%$ 加力時に梁 1 段目主筋が、 $R = 2.0\%$ 加力時に梁 2 段目主筋が降伏して梁端コンクリートが圧壊した。接合部せん断破壊型とした試験体 SPU-2 は $R = 2.0\%$ 加力時に梁端コンクリートの圧壊が見られたが、梁 1 段目主筋は $R = 4.0\%$ 加力時に降伏した。柱と柱梁接合部のかぶりコンクリートは試験体 SPU-1 および SPU-2 では $R = 2.0\%$ 加力時に以降に剥落し始め、 $R = 3.0\%$ 加力時には柱梁接合部の広い範囲で剥落した。試験体 SPU-4 では $R = 2.0\%$ 加力時に柱のかぶりコンクリートが、 $R = 3.0\%$ 加力時に柱梁接合部のか

表-2 グラウト材の材料特性

試験体	部位	圧縮強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	ヤング係数 ($\times 10^4 \text{N}/\text{mm}^2$)	ポアソン比
SPU-1	全て	122.5	4.6	3.68	0.241
	柱継手	150.4	5.8	4.44	0.240
SPU-2	柱目地・貫通孔	131.1	4.8	3.72	0.239
	梁目地				
SPU-3	全て	127.8	4.0	3.76	0.252
	柱継手	152.9	4.4	4.47	0.246
SPU-4	柱目地・貫通孔	156.3	4.1	4.02	0.223
	梁目地	152.9	4.4	4.47	0.246

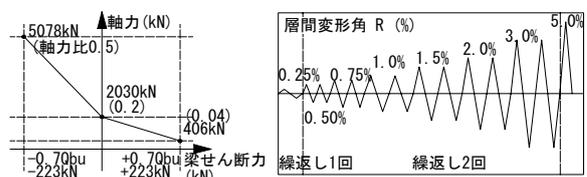


図-5 軸力載荷履歴および加力履歴

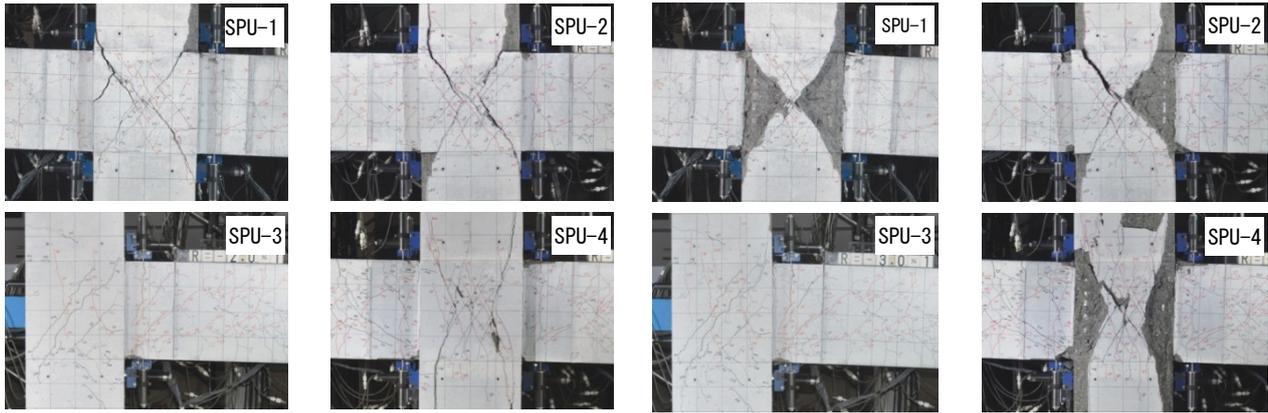


写真-1 R=2.0% 1サイクル目終了時の損傷状況

写真-2 R=3.0% 1サイクル目終了時の損傷状況

よりコンクリートが剥落した。その際、接合部パネル中央においてコンクリートの圧壊が観察された。

変動軸力を与えたト字形試験体 SPU-3 では、梁 1 段目主筋は $R=1.0\%$ 加力時および $R=-0.75\%$ 加力時に、梁 2 段目主筋は $R=1.5\%$ 加力時および $R=-1.0\%$ 加力時にそれぞれ降伏した。柱梁接合部のかぶりコンクリートは $R=3.0\%$ 加力時においても健全であった。なお、全試験体とも柱、梁の目地部に生じたひび割れの開閉が卓越することはなかった。

3.2 履歴性状

各試験体の柱せん断力 Q_c - 層間変形角 R 関係を図-6 に、実験結果一覧を表-3 にそれぞれ示す。十字形試験体 (SPU-1, 2, 4) では、 $R=0.25\%$ 加力時までに梁曲げひび割れと接合部斜めひび割れ、梁目地部に沿ったひび割れが発生した。 $R=0.50\%$ 加力時では梁せん断ひび割れが発生し、 $R=0.75\%$ 加力時では接合部四隅に柱目地と

平行な横ひび割れが発生した。梁 1 段目主筋降伏後の $R=1.0\sim 1.5\%$ 加力時では接合部斜めひび割れが増大し、柱に貫通して柱縦方向に伸長した。

十字形試験体 SPU-1 では $R=1.5\%$ 加力時に梁 1 段目主筋が降伏して最大耐力に至り、試験体 SPU-4 では $R=1.0\%$ 加力時に梁 1 段目主筋が降伏し、 $R=2.0\%$ 加力時に最大耐力に達した。試験体 SPU-2 では $R=2.0\%$ 加力時に梁端コンクリートが圧壊し最大耐力に至ったが、梁 1 段目主筋は $R=4.0\%$ 加力時に降伏した。ト字形試験体 SPU-3 では $R=1.0\%$ (低軸力側) 加力時と $R=-0.75\%$ (高軸力側) 加力時に梁 1 段目主筋が降伏し、 $R=3.0\%$ 加力時と $R=-1.5\%$ 加力時に最大耐力に達した。梁曲げ降伏先行型の試験体 SPU-1, SPU-3, および SPU-4 の最大耐力は式(1)による梁曲げ強度計算値を、接合部せん断破壊型の試験体 SPU-2 の最大耐力は式(2)による接合部せん断強度を、それぞれ上回っていた。柱に圧縮

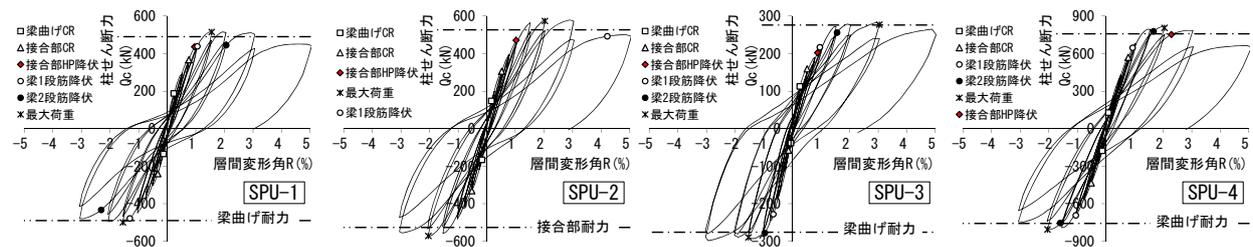


図-6 柱せん断力-層間変形角関係

表-3 実験結果一覧

試験体	実験結果												計算値		【注】	
	梁曲げひび割れ		接合部斜めひび割れ		梁1段筋降伏		梁2段筋降伏		接合部横補強筋降伏		最大荷重		破壊形式 ^{*1}	耐力 ^{*2} cQu _{cal} (kN)		対実験値 cQmax / cQu _{cal}
	Rbc (%)	cQbc (kN)	Rjc (%)	cQjc (kN)	Rby1 (%)	cQby1 (kN)	Rby2 (%)	cQby2 (kN)	Rjy (%)	cQjy (kN)	Rmax (%)	cQmax (kN)				
SPU-1	正	0.23	187.4	0.76	367.5	1.06	438.4	2.06	444.6	0.96	436.2	1.56	514.7	BJ	489.6 (B)	1.05
	負	-0.13	-135.1	-0.33	-239.7	-1.31	-478.0	-2.31	-432.8	—	—	-1.55	-499.5			
SPU-2	正	0.17	147.6	0.52	305.8	4.22	492.1	—	—	1.03	470.4	2.04	574.1	J	526.3 (J)	1.09
	負	-0.17	-166.2	-0.52	-331.3	—	—	—	—	—	—	-2.04	-571.8			
SPU-3	正	0.26	112.3	0.52	159.2	0.96	216.6	1.56	255.9	0.88	202.2	3.04	276.8	B	275.8 (B)	1.00
	負	-0.05	-38.3	-0.13	-57.3	-0.67	-228.0	-0.97	-278.0	—	—	-1.54	-289.6			
SPU-4	正	0.09	128.3	0.78	569.6	0.93	645.9	1.66	776.8	2.28	752.5	2.04	805.3	BJ	757.3 (B)	1.06
	負	-0.13	-177.2	-0.51	-434.2	-1.05	-692.8	-1.60	-754.4	—	—	-2.04	-805.6			

※1 記号は以下
BJ: 梁曲げ降伏後の接合部破壊
B: 梁曲げ降伏先行
J: 接合部破壊

※2 記号は以下
B: 略算式による梁曲げ終局耐力
J: 靱性指針による接合部せん断耐力

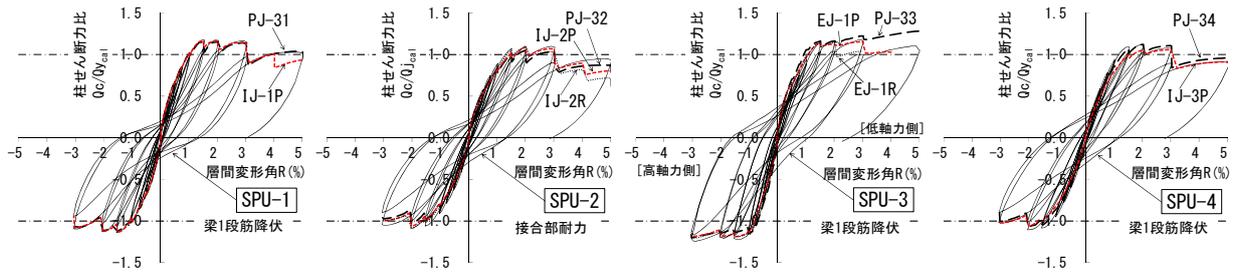


図-7 強度比を用いた柱せん断力比-層間変形角関係の比較

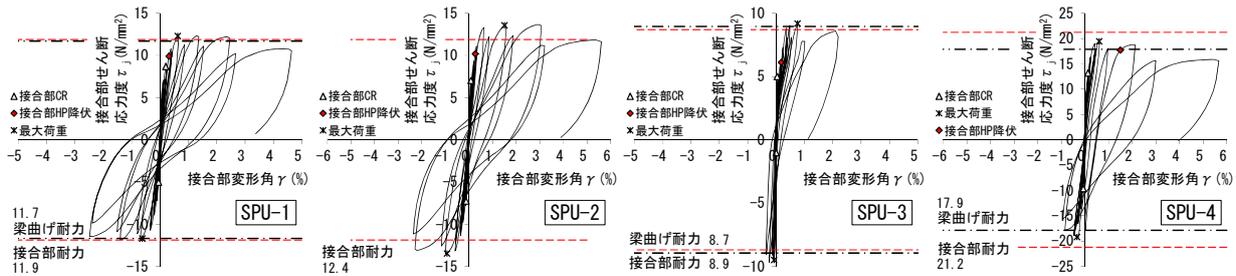


図-8 接合部せん断応力度-接合部せん断変形角関係

強度 120N/mm^2 の超高強度コンクリートを用いた試験体 SPU-4 では最終加力まで安定した紡錘形の履歴性状を保ったが、試験体 SPU-1 および SPU-2 では $R=3.0\%$ の2サイクル目の加力以降の履歴性状にスリップ性状が見られた。試験体 SPU-3 の履歴性状にはスリップ性状は見られなかった。

本試験体と既存工法の PCa 造柱梁接合部試験体^{1)~6)}の柱せん断力比-層間変形角関係を図-7 に示す。接合部がせん断破壊した試験体 SPU-2 の柱せん断力比のみ接合部せん断強度時の柱せん断力 cQ_{ycal} に対する比を、梁曲げ降伏が先行した試験体 SPU-1, 3, 4 の柱せん断力比は梁1段目主筋降伏時の柱せん断力 cQ_{ycal} に対する比を用いた。 cQ_{ycal} は、平面保持を仮定したファイバーモデルによる断面曲げ解析によって求め、コンクリートと鉄筋の構成則はそれぞれ Kent-Park モデル¹⁰⁾とバイリニアモデルとした。試験体 SPU-3 より若干耐力の大きい既存工法の試験体があるものの、概ね最大耐力に達する $R=2.0\%$ 加力時までを比較すると、本試験体の耐力は既存工法の試験体と概ね同等であることが分かる。

低軸力側での柱梁接合部の損傷を抑制し、高軸力側で柱の軸圧縮破壊を防止するために接合部横補強筋量 p_{wj} を 0.45% としたト字形試験体 SPU-3 では、柱梁接合部の損傷は抑えられたものの、 $R=5.0\%$ に向かう加力途中で $p_{wj}=0.30\%$ とした既存工法の試験体と同様、柱が軸圧縮破壊した。いずれの試験体も設計で想定している層間変形角よりも大きな変形角で軸圧縮破壊していること、 $R=3.0\%$ 加力時以前における柱梁接合部の損傷程度は軽微であることから、通常的设计で想定している層間変形角 ($R=2.0\%$) 以下で本工法を用いる場合には、接合部

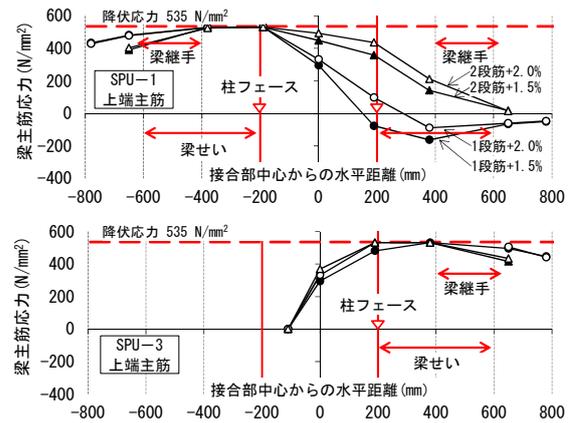


図-9 梁主筋応力度分布

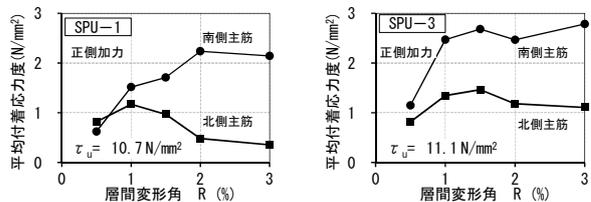


図-10 柱主筋の貫通孔内平均付着応力度

形状に関わらず p_{wj} は 0.30% 以上確保すればよいものと考えられる。

各試験体の接合部せん断応力度 τ_j -接合部せん断変形角 γ 関係を図-8 に示す。 τ_j は、文献 7) に示されている式 (解 8.3.1) による接合部せん断力 Q_j を式 (2) における有効断面積 ($b_j \times D_j$) で除して求めた。試験体 SPU-1, SPU-2 および SPU-3 は、 $\gamma=1.0\%$ 以前に式 (2) による接合部せん断強度に達した。また、試験体 SPU-1, SPU-2 および SPU-4 の正加力時では、 γ は接合部横補強筋の降

伏後に増大し、 $R=3.0\%$ 加力時に 2.0% を超えた。試験体SPU-3, SPU-4の負側加力では、最終加力まで γ は 2.0% を下回っていた。

3.3 梁主筋応力度分布と柱主筋の平均付着応力度

梁曲げ降伏が先行した試験体 SPU-1 および SPU-3 を代表例として、 $R=1.5\%$, 2.0% 時の梁 1 段目, 2 段目主筋の応力度分布の推移を図-9 に、正側加力時の北側および南側柱主筋 (図-4 参照) の貫通孔内平均付着応力度の推移を図-10 にそれぞれ示す。

梁主筋の応力は、梁主筋の応力-ひずみ関係がバイリニア則に従うものとして、実験から得られた鉄筋のひずみを応力度に換算した。柱主筋の平均付着応力度は、ひずみから換算した応力度を隣り合うひずみ測定点における応力度の差分を梁主筋の周長と隣り合うひずみ測定間距離との積で除して求めた。

図-9 より、概ね両試験体とも梁 1 段目主筋は柱フェースから梁せい (400mm) 程度、梁 2 段目主筋は柱フェースから梁せいの $1/2$ (200mm) 程度までの範囲で引張降伏していることが分かる。

図-10 において、試験体 SPU-1, SPU-3 の北側柱主筋の貫通孔内平均付着応力度が、それぞれ $R=1.0\%$, $R=1.5\%$ 以降低下しているのは、本実験に先立って実施した鉄筋の引抜き試験結果から得られた知見に基づき、同主筋とグラウト材との付着力の減退によるものと考えられる。同図中に示す τ_u は、式(3)によって算定した柱梁接合部内の付着強度で、実験から得られた柱主筋の貫通孔内平均付着応力度は τ_u の 30% 程度になっていることが分かる。なお、式(3)中の記号の意味等、詳細については文献7)を参照されたい。

$$\tau_u = 0.7 \left(1 + \frac{\sigma_0}{\sigma_B} \right) \sigma_B^{2/3} \quad (3)$$

3.4 履歴エネルギー

図-11 に示す定義に基づいて算出した各試験体の履歴エネルギーを図-12 に示す。試験体 SPU-3 以外の履歴エネルギーは、正側、負側ともほぼ同様な傾向を示しているが、試験体 SPU-3 の履歴エネルギーは $R=-1.5\%$ 以降、正側より大きな値を示している。

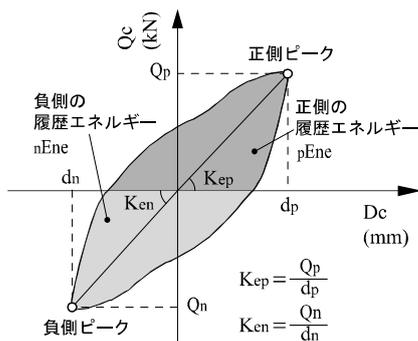


図-11 履歴エネルギーの定義

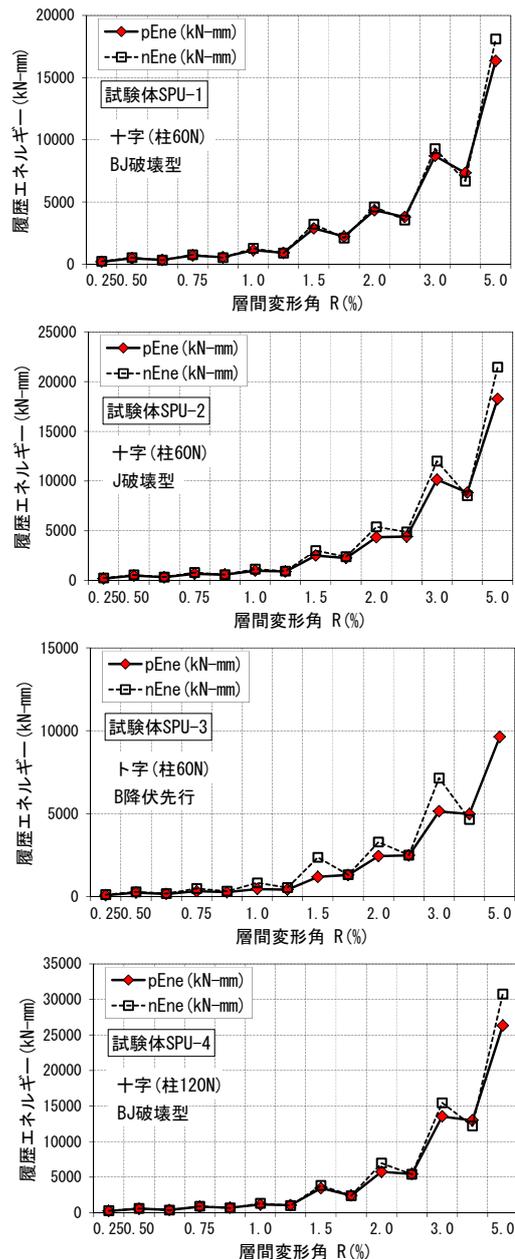


図-12 履歴エネルギー

4. まとめ

考案したフルPCa工法による平面十字形およびト字形柱梁部分架構の構造性能について、縮小試験体を用いて実験的に確認した。実験および検討の結果、得られた知見を要約して以下に記す。

- (1) 各試験体の耐力は、既往の梁曲げ耐力式、柱梁接合部のせん断強度式で評価できる。
- (2) 本工法による試験体の耐力は、通常的设计で想定している層間変形角 ($R=2.0\%$) 以下では、既存工法の試験体の耐力と同等である。
- (3) 実験から得られた柱梁接合部内に設けた貫通孔内の柱主筋の平均付着応力度は、既往の評価式による計算値の 30% 程度である。

【謝辞】本実験を実施するにあたり、高周波熱練（株）殿より超高強度せん断補強筋（U7.1）の提供を受けました。ここに記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 宮崎裕一，大久保香織，中澤春生，淵本正樹，佐々木仁志，戸澤正美，刑部 章：プレキャスト化した鉄筋コンクリート造柱梁接合部の構造性能確認実験 その1. 静的加力実験の概要，日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），C-2，構造 IV，pp.433-434，2010.9
- 2) 大久保香織，宮崎裕一，中澤春生，淵本正樹，宮崎裕一，佐々木仁志，戸澤正美，刑部 章：プレキャスト化した鉄筋コンクリート造柱梁接合部の構造性能確認実験 その2. 実験結果，日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），C-2，構造 IV，pp.435-436，2010.9
- 3) 澤口香織，中澤春生，遠藤芳雄，淵本正樹：シースレス貫通孔を有するプレキャスト柱梁接合部の構造性能に関する実験 その1. 実験概要，日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），構造 IV，pp.769-770，2013.8
- 4) 中澤春生，澤口香織，遠藤芳雄，淵本正樹：シースレス貫通孔を有するプレキャスト柱梁接合部の構造性能に関する実験 その2. 実験結果および検討，日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），構造 IV，pp.771-772，2013.8
- 5) 神野靖夫，中澤春生：梁主筋を機械式定着としたト形接合部の構造性能に関する実験 その1. 実験概要，日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），構造 IV，pp.371-372，2014.9
- 6) 中澤春生，神野靖夫：梁主筋を機械式定着としたト形接合部の構造性能に関する実験 その2. 実験結果および検討，日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），構造 IV，pp.373-374，2014.9
- 7) （一社）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・同解説，1999.8
- 8) 遠藤芳雄，山野辺宏治，金本清臣，澤口香織，戸澤正美，横山一智：柱頭および梁端に機械式継手を設けたフルプレキャスト柱梁接合部の構造実験 その1. 実験概要，日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），構造 IV，pp.359-360，2016.8
- 9) 山野辺宏治，遠藤芳雄，金本清臣，澤口香織，戸澤正美，横山一智：柱頭および梁端に機械式継手を設けたフルプレキャスト柱梁接合部の構造実験 その2. 実験結果の概要，日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），構造 IV，pp.361-362，2016.8
- 10) Kent, D.C., Park, R. : Flexural Members with Confined Concrete, Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, ST7, pp.1969-pp.1990, July, 1971