

プレキャスト柱梁接合部の構造性能に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON STRUCTURAL PERFORMANCE OF PRECAST RC BEAM-COLUMN JOINTS

細矢 博 — * 1 松本匡史 — * 2
金久保利之 — * 3 八十島 章 — * 4

Hiroshi HOSOYA — * 1 Masashi MATSUMOTO — * 2
Toshiyuki KANAKUBO — * 3 Akira YASOJIMA — * 4

キーワード：
鉄筋コンクリート、プレキャスト、柱梁接合部、加力実験、構造性能、機械式継手

Keywords:
Reinforced concrete, Precast, Beam-column joint, Loading test, Structural performance, Mechanical joint

Research and development on a new precast concrete system that beam-column joints are manufactured as the precast concrete has been conducted for the purpose of more efficient use of precast concrete technology. In this study, the loading test is conducted for beam-column joint specimens to investigate the structural performance. From the test results, no large differences between precast and cast-in-situ specimens can be found out in terms of failure progress, shear force - drift angle curve, deformation components and damping factor. It can be recognized that the structural performance of precast beam-column joints shows the same performance of cast-in-situ joints.

1. はじめに

施工の更なる合理化を行い生産性を向上させるという目的のため、鉄筋コンクリート(RC)造柱梁接合部を対象に、従来のプレキャスト(PCa)化技術をより効率的にした PCa 工法の研究開発が進められているが^{例え}¹⁾、筆者らもこの種の工法の開発に取り組んでいる。

本工法では、図1に示すように、柱、梁および柱梁接合部を PCa 化し、梁と柱梁接合部については、梁主筋を梁端部($0.4D_b \sim 0.5D_b$ 、 D_b : 梁径)で機械式継手により接合し、梁の空間部とスラブには現場打ちコンクリートを打設し一体化する。柱については、下階の PCa 柱の柱頭部から出た柱主筋を、柱梁接合部内のシース、またはロープで渦巻状の紋様を成型した貫通孔に通した後、シース (貫通孔) 内と下階の PCa 柱の柱頭目地にグラウトを同時に充填することにより一体化する。その後、柱脚に機械式継手が埋設された上階の PCa 柱を柱梁接合部から出ている柱主筋に嵌合した後、機械式継手内および柱脚目地にグラウトを同時に充填することにより一体化する。

本研究では、上記の工法で製作されたフル PCa 柱梁接合部 (部分架構) を対象として、実物の約 1/2.5 に縮小した十字形およびト字形試験体を用い、貫通孔の種別、梁主筋の機械式継手位置、コンクリート強度を実験変動因子とした加力実験を行い、構造性能等を検討した。

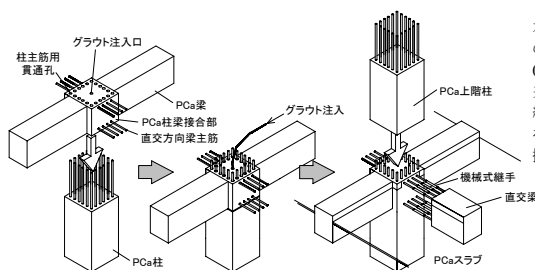


図1 本 PCa 工法の概要

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体の諸元を表1に、試験体の形状・寸法、配筋の一例を図2に示す。使用したコンクリート、グラウト、鉄筋の材料試験の結果を表2～表4に示す。試験体は、梁曲げ降伏先行型に計画された全8体である。No.1～No.6は十字形、No.7～No.8はト字形試験体である。No.1、No.5、No.7が一体打ち RC 造の基準試験体で、他は PCa 造の比較試験体である。PCa 試験体のうち、No.2、No.4、No.6、No.8では、柱主筋の貫通孔にシースを用いているが、No.3では、写真1に示すように、ロープによって柱主筋の貫通孔の内側表面に渦巻き状の紋様を成型し、貫通孔の違いが構造性能に与える影響を検討した。また、PCa 試験体では、梁主筋の機械式継手位置は、No.2、No.3においては、柱フェイスから継手の内側縁までの距離を $0.5D_b$ とし、No.4、No.6、No.8では $0.4D_b$ として、機械式継手の位置の違いが構造性能に与える影響を検討した。更に、No.5、No.6では、高強度材料を用いた場合の構造性能を検討した。

2.2 実験方法

柱の反曲点位置を油圧ジャッキで支持し、梁の反曲点位置に取り付けたアクチュエータにより、 $R=\pm 1/400\text{rad}$ 、 $\pm 1/200$ 、 $\pm 1/100$ 、 $\pm 1/67$ 、 $\pm 1/50$ 、 $\pm 1/33$ 、 $\pm 1/25$ 、 $\pm 1/20$ の層間変形角において、各2サイクルの正負交番漸増繰り返し加力を行うことを基本とした。耐力が最大耐力よりも80%以下に低下していない場合は、更に $R=\pm 1/15\text{rad}$ まで単調加力を行った。このとき、柱軸力については、高層建物の低層階の中柱を想定した No.1～No.4 では、軸力比(N/bDF_c)にして0.2、超高層建物を想定し高強度材料を用いた No.5、No.6では、油圧ジャッキの能力制限もあり0.1875、外柱を想定した No.7、No.8では0.05に相当する軸力を導入した。

¹⁾ ㈱奥村組技術研究所 博士 (工学)
(〒300-2612 茨城県つくば市大砂387)
²⁾ 筑波大学大学院システム情報工学研究科 大学院生
³⁾ 筑波大学システム情報工学研究科 准教授・博士 (工学)
⁴⁾ 筑波大学システム情報工学研究科 助教・博士 (工学)

¹⁾ Technical Research Institute, Okumura Corporation, Dr. Eng.
²⁾ Graduate Student, GSSIE, Univ. of Tsukuba
³⁾ Assoc. Prof., GSSIE, Univ. of Tsukuba, Dr. Eng.
⁴⁾ Assistant Prof., GSSIE, Univ. of Tsukuba, Dr. Eng.

表 1 試験体の諸元

試験体 名称	試験体 形状	工法	梁主筋 継手 位置	柱主筋 貫通孔	柱梁接合部			柱				梁						
					F _c	横補強筋		F _c	主筋		横補強筋		軸力比 N/(bDF _c)	主筋		横補強筋		
						配筋(p _w)	鋼種		配筋(p _w)	鋼種	配筋(p _w)	鋼種		配筋(p _w)	鋼種	配筋(p _w)	鋼種	
No.1	十字形	一体打ち	-	-	60	2-D6×7 (0.31%)	SD785	60	12-D19 (2.15%)	SD490	4-D6@60 (0.53%)	SD785	0.2	48	6-D19 (1.59%)	SD490	4-D6@80 (0.53%)	SD785
No.2		PCa	0.5D _b	シース														
No.3			ローブ成型															
No.4		0.4D _b	シース															
No.5	ト字形	一体打ち	-	-	100	2-U6.4×7 (0.31%)	SD1275	100	SD685	4-U6.4@60 (0.53%)	SD1275	0.1875	60	7-D19 (1.86%)	SD490	4-D6@80 (0.53%)	SD785	
No.6		PCa	0.4D _b	シース														
No.7		一体打ち	-	-														
No.8		PCa	0.4D _b	シース														

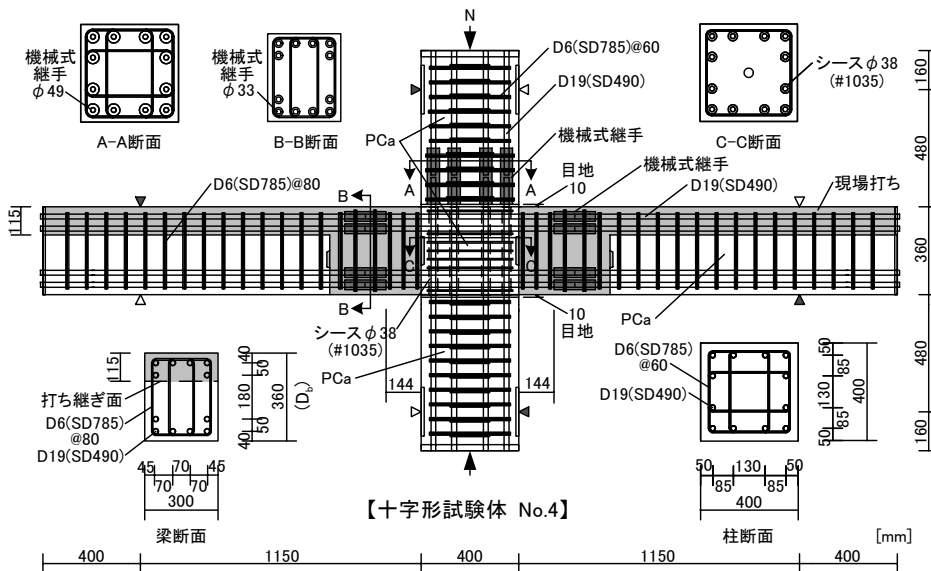


図 2 試験体の形状・寸法、配筋

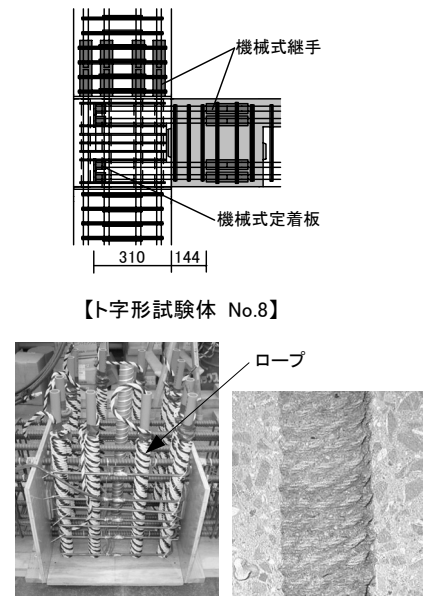


写真 1 No. 3 の柱主筋の貫通孔のローブ紋様

表 2 コンクリートの材料試験結果

F _c	σ _B (N/mm ²)	ε ₀ (×10 ⁻³)	E _c (kN/mm ²)	σ _t (N/mm ²)	備考
48	62.4	2.87	35.3	3.27	梁(No.1~4,7,8)
	57.4	2.67	34.0	3.27	梁PCa部(No.2~4,8)
60	77.1	2.91	36.5	3.82	柱、柱梁接合部(No.1~4,7,8)
	78.4	2.93	36.7	3.43	梁PCa部(No.6)
100	118.8	3.22	44.2	4.52	柱、柱梁接合部(No.5,6)

σ_B:圧縮強度、ε₀:圧縮強度時ひずみ度、E_c:ヤング係数、σ_t:割裂強度

表 3 グラウトの材料試験結果

保証強度	σ _B (N/mm ²)	備考
60	112.3	梁継手(No.2~4,6,8)
	134.1	柱主筋貫通孔(No.2~4,8)
80	140.6	上柱継手(No.2~4,8)
100	146.1	柱主筋貫通孔(No.6)
	156.2	上柱継手(No.6)

表 4 鉄筋の材料試験結果

種類	σ _y (N/mm ²)	σ _u (N/mm ²)	E _s (kN/mm ²)	備考
D19 (SD490)	517	702	190	梁主筋(No.1~8)
D19 (SD685)	707	889	193	柱主筋(No.1~4,7,8)
D6 (SD785)	933	989	215	梁横補強筋 (No.1~8)
				柱横補強筋 (No.1~4,7,8)
U6.4 (SD1275)	1347	1482	204	柱横補強筋 (No.5,6)

σ_y:降伏強度、σ_u:引張強度、E_s:ヤング係数

3. 実験結果

3.1 梁せん断力-層間変形角曲線

梁せん断力(Q)-層間変形角(R)曲線と、R=1/33rad における破壊状況の写真を図 3 に示す。

破壊経過は、各試験体ともほぼ同様であり、R=1/400rad までに梁に曲げひび割れが生じ、R=1/400~1/100rad において柱梁接合部(パネルゾーン)にせん断ひび割れが生じた。更に、R=1/100~1/67rad において梁主筋が降伏し、剛性低下がみられた。その後、No.6 を除いた試験体でパネルゾーンの横補強筋が降伏し、最大耐力に至った。

最大耐力は、十字形試験体、ト字形試験体の場合とも、PCa 試験体が一体打ち RC 試験体を上回った。一方、PCa 試験体どうしを比較すると、梁主筋の継手位置が 0.5D_b の場合でも 0.4D_b の場合でも、最大耐力に大差はなかった。また、柱主筋の貫通孔がシースの場合でも、ローブにより成型した渦巻き紋様の場合でも PCa 試験体の最大耐力に大差はなかった。

最大耐力以後の変形性能は、PCa 試験体が一体打ち RC 試験体を上回り、靱性能に優れていることがわかる。ここで、限界変形角(R_u)を比較すると、十字形の PCa 試験体(No.2~No.4)は一体打ち RC 試験体(No.1)に比べ 1.05~1.28 倍であり、R_u=0.049~0.060rad であった。また、高強度材料を用いた十字形の PCa 試験体(No.6)は一体打ち RC

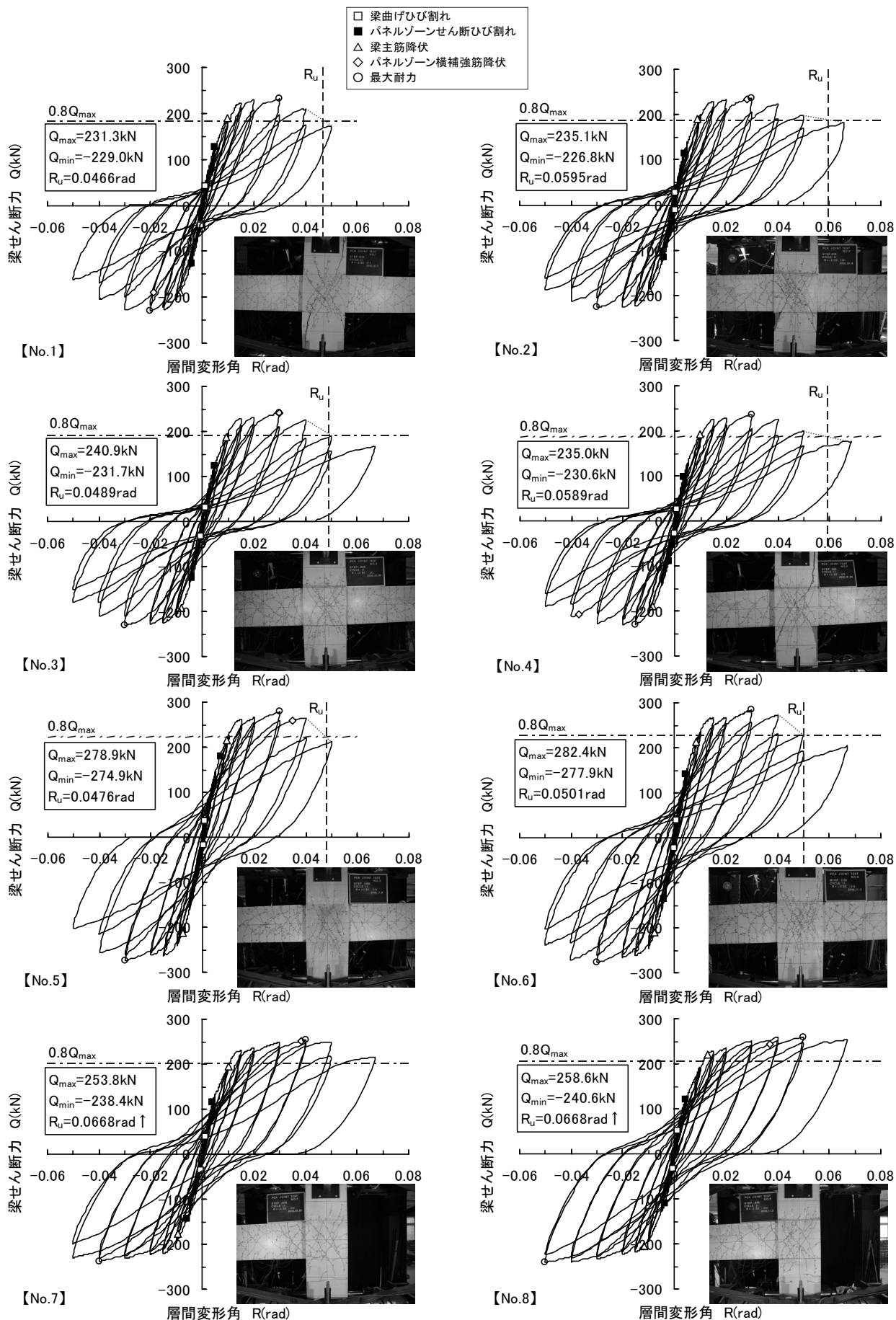


図3 梁せん断力-層間変形角曲線と破壊状況 ($R=1/33\text{rad}$)

試験体(No.5)に比べ 1.05 倍であり、 $R_u=0.050\text{rad}$ であった。一方、ト字形の試験体(No.7~No.8)では、幾分 PCa 試験体の方が一体打ち RC 試験体に比べて靱性能に勝っているが大差はなく、両者とも R_u は 0.067rad 以上であった。

以上の通り、本工法の PCa 試験体の変形性能は、柱主筋の貫通孔の種別が異なっても、また、梁主筋の機械式継手位置が異なっても大差なく、限界変形角はおおよそ $R=1/20\text{rad}$ を確保できるといえる。

本報告では、限界変形角(R_u)は、図 3 に示す通り、各所定層間変形角の Q-R 曲線の第一サイクルの包絡線上で、耐力が最大耐力の 80% に低下した時点での層間変形角と定義している。なお、ト字形試験体の No.7 と No.8 では、加力終了後まで、耐力が最大耐力の 80% まで低下しなかったため、限界変形角は特定できていない。

3.2 破壊性状

最大耐力近傍の $R=1/33\text{rad}$ でのひび割れ状況を図 4 に示す。

一体打ち RC 試験体と PCa 試験体では、ひび割れの様相は良く似ており、梁の曲げ、曲げせん断ひび割れ、パネルゾーンのせん断ひび割れ等の発生時期、進展状況はほぼ同様であった。PCa 試験体では、梁のヒンジゾーン内に機械式継手が設けられているが、その周辺に特異なひび割れが誘発されるようなことはなかった。十字形試験体では、パネルゾーンのせん断ひび割れが進展、拡幅した。No.2~No.4 の PCa 試験体を例にとると、梁主筋が降伏する $R=+1/100\text{rad}$ (短期荷重時相当) では、パネルゾーンの最大ひび割れ幅は 0.2mm であった。また、除荷時のひび割れ幅は 0.05mm であった。このことから、本 PCa 工法では、短期荷重時には修復性を損なう恐れのある損傷は生じないと判断される。

最終的な破壊形式は、十字形試験体では、一体打ち RC 試験体、PCa 試験体とも梁曲げ降伏後の柱梁接合部のせん断破壊であった。ト字形試験体では、一体打ち RC 試験体は梁曲げ降伏後の柱梁接合部のせん断破壊であったが、PCa 試験体は梁曲げ破壊であった。

3.3 梁主筋ひずみ度分布

各所定層間変形角の第一サイクルの正方向ピーク時における No.1、No.4 の梁上端一段主筋のひずみ度分布を図 5 に示す。

一体打ち RC 試験体、PCa 試験体によらず、また、PCa 試験体どうしでは、梁主筋の機械式継手の位置の違いによらず、梁主筋のひずみ度分布に大きな差はみられなかった。機械式継手による梁主筋の付着に与える影響は小さいことが確認できた。

梁端部(接合部付け根)のひずみ度は最大耐力に至る前の $R=1/100\text{rad}$ 近傍で全ての試験体が降伏ひずみ度に達していた。このことから、梁の曲げ降伏先行型であるといえ、最大耐力を決定する一つの要因であると考えられる。

3.4 柱主筋ひずみ度分布

各所定層間変形角の第一サイクルの正方向ピーク時における No.1、No.4 の柱一段主筋のひずみ度分布を図 6 に示す。

一体打ち RC 試験体、PCa 試験体によらず柱主筋のひずみ度分布に大差ないことがわかる。また、PCa 試験体において、シースの場合でも、シースに代わり貫通孔の表面がロープで成型された渦巻き

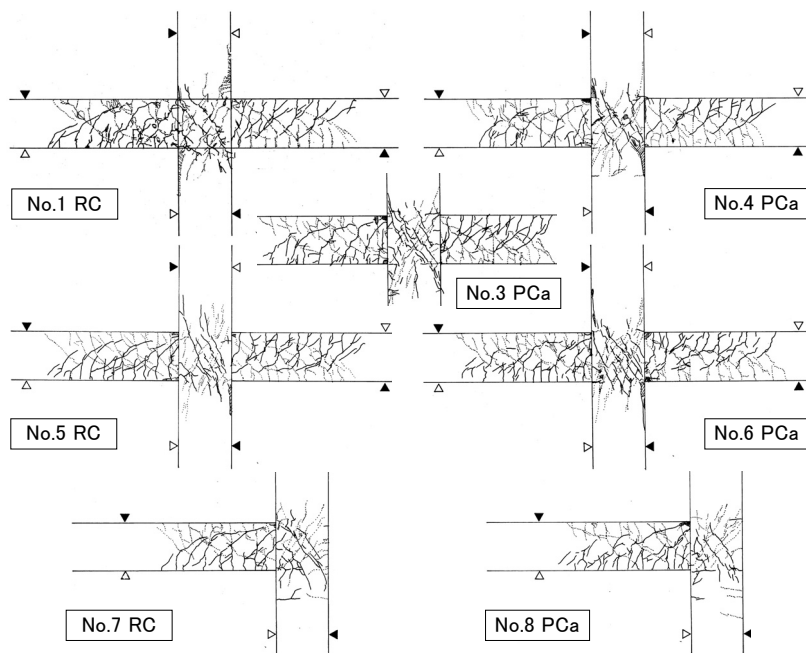


図 4 ひび割れ状況 ($R=1/33\text{rad}$)

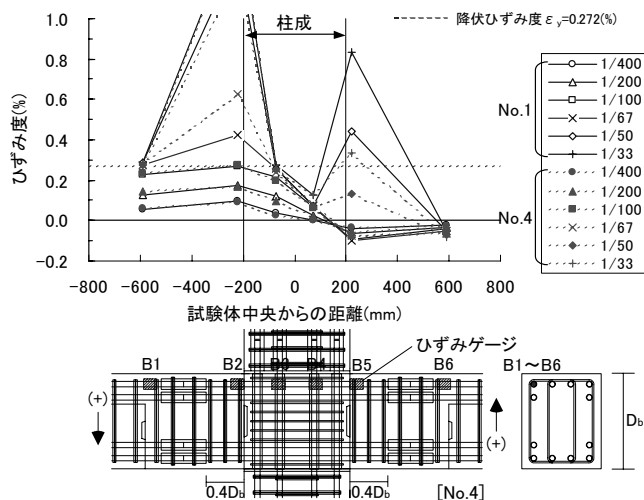


図 5 梁主筋ひずみ度分布 (No.1 と No.4)

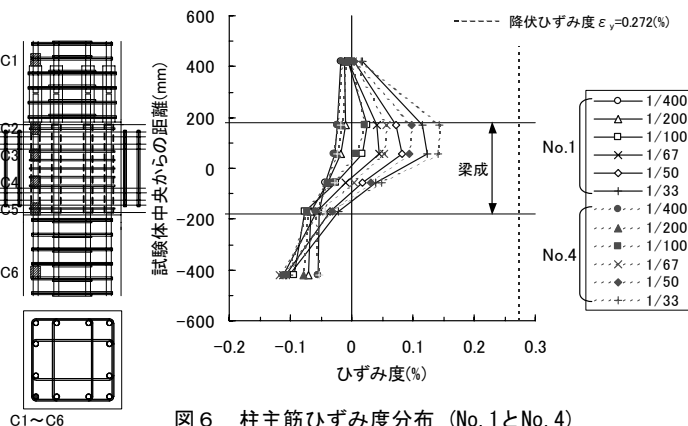


図 6 柱主筋ひずみ度分布 (No.1 と No.4)

紋様の場合でも、柱主筋のひずみ度分布には大差なかった。以上から、貫通孔にグラウトを充填する PCa 試験体でも、柱主筋の柱梁接合部内での定着は良好であることが確認できた。

3.5 柱梁接合部の横補強筋のひずみ度分布

各所定層間変形角の第一サイクルの正方向ピーク時におけるNo.1、No.4の横補強筋のひずみ度分布を図7に示す。

R=1/50rad程度までは、PCa試験体のNo.4は一体打ちRC試験体のNo.1よりひずみ度が幾分か大きい、その後は、No.1のパネルゾーン中央のひずみ度が急増し、降伏ひずみ度に達しており、ひずみ度分布に違いがみられる。PCa試験体では、パネルゾーンに高強度グラウトが注入されたシースが埋設されているため、一体打ちRC試験体に比べ、強度、剛性に勝り、大変形時における横補強筋のひずみ度の増加が抑制されたものと考えられる。

4. 実験結果の検討

4.1 諸耐力ならびに変形角の実験値と計算値

最大耐力、降伏変形角、限界変形角の実験値、ならびに諸部材耐力の計算値を表5に示す。部材耐力を求めるために、梁の曲げ耐力には、建築学会略算式²⁾およびACIストレスブロック式³⁾を、柱の曲げ耐力には建築学会略算式²⁾を用いた。梁と柱のせん断耐力、柱梁接合部のせん断耐力、および通し筋の定着余裕度には靱性保証型設計指針式³⁾を用いた。ここで、計算値の算出には、コンクリートならびに鉄筋の材料試験値を用いた。

梁曲げ耐力の計算値と、最大耐力の実験値はほぼ対応していることがわかる。全ての試験体が梁曲げ降伏先行型であることが確認できる。十字形試験体では、梁曲げ耐力時のパネルゾーンのせん断応力度に対するパネルゾーンのせん断耐力の比（せん断余裕度）は、No.1～No.4では1.43、高強度材料を用いたNo.5～No.6では1.64であった。この程度のせん断余裕度があっても、本実験では最終的にはパネルゾーンのせん断破壊に至った。一方、ト字形試験体では、パネルゾーンのせん断余裕度が1.50であったが、No.8のPCa試験体では曲げ破壊であった。

本実験の十字形試験体の通し筋の定着余裕度は、No.1～No.4では1.19、高強度材料を用いたNo.5、No.6では1.59であったが、最終的な破壊に至るまで梁主筋の抜け出しはみられなかった。

4.2 梁せん断力－層間変形角曲線の包絡線の比較

各試験体の梁せん断力－層間変形角曲線の包絡線の比較を図8に示す。最大耐力は全てPCa試験体が一体打ちRC試験体を若干上まわる結果となっている。最大耐力に至った後の耐力低下は、一体打ちRC試験体はPCa試験体より大きい。以上の様

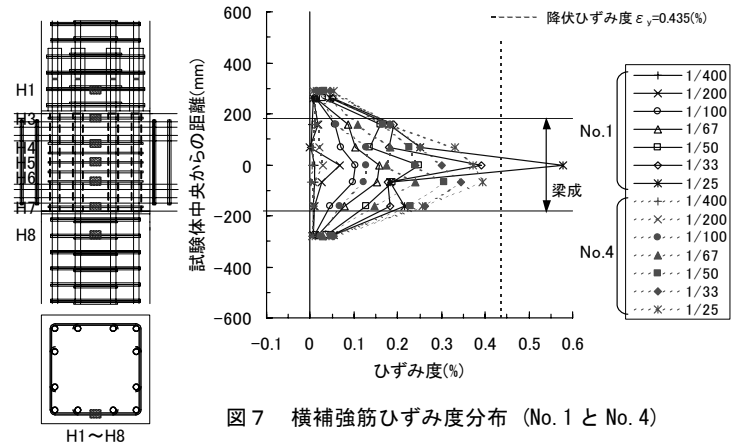


図7 横補強筋ひずみ度分布 (No.1とNo.4)

表5 諸耐力ならびに変形角の実験値と計算値

項目	試験体	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8
実験値	最大耐力 Q_{max} (kN)	231	235	241	235	279	282	254	259
	降伏変形角 R_y (rad)	0.0120	0.0125	0.0130	0.0130	0.0130	0.0125	0.0140	0.0135
	限界変形角 R_u (rad)	0.0466	0.0595	0.0489	0.0589	0.0476	0.0501	0.0668↑	
	塑性率 $\mu = R_u/R_y$	3.88	4.76	3.76	4.53	3.66	4.01	4.77↑	4.95↑
計算値	梁曲げ耐力 ^{*1} bQ_{mu} (kN)	219				253		219	
	Q_{max}/bQ_{mu}	1.06	1.07	1.10	1.07	1.10	1.12	1.16	1.18
	梁曲げ耐力時のパネルせん断応力度 τ_j (N/mm ²)	9.97				11.78		6.65	
	パネルせん断強度 ^{*2} τ_{ju} (N/mm ²)	14.24				19.27		9.97	
	パネルせん断余裕度 τ_{ju}/τ_j	1.43				1.64		1.50	
	通し筋定着余裕度	1.19				1.59		-	
	梁曲げ耐力 ^{*3} bQ_{mu2} (kN)	211				242		211	
	梁せん断耐力 ^{*2} bQ_{su} (kN)	455				505		455	
	柱曲げ耐力 ^{*3} cQ_{mu} (kN)	523				779		574	
	柱せん断耐力 ^{*2} cQ_{su} (kN)	440				599		881	
	柱梁曲げ耐力比 cQ_{mu}/bQ_{mu2}	2.48				3.21		2.72	

*1:ACIストレスブロック式 *2:靱性保証型設計指針式 *3:建築学会略算式

注:柱曲げ耐力、柱せん断耐力は、梁せん断力換算値

靱性保証型設計指針式においては、梁: $R_p=0.02$ 、柱: $R_p=0.01$

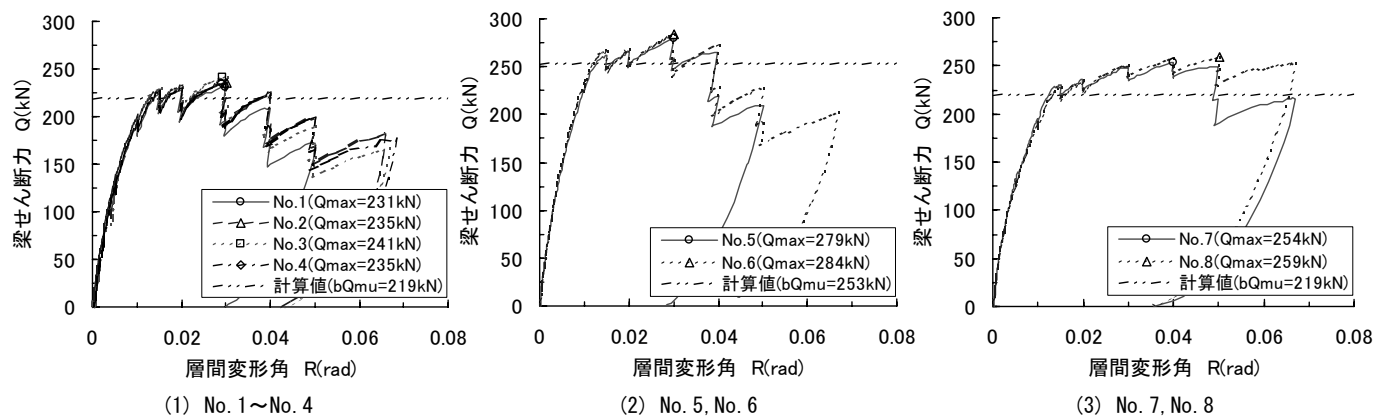


図8 梁せん断力－層間変形角曲線の包絡線

に耐力、変形性能ともに PCa 試験体が一体打ち RC 試験体よりも上回った。一方、PCa 試験体としては、柱主筋の貫通孔の種別、梁主筋の機械式継手位置の違いによらず、耐力と変形性能における大きな差はないことが確認できる。

4.3 変形成分割合

十字形試験体 No.1、No.4 ならびに T 字形試験体 No.7、No.8 の梁、柱およびパネルゾーンの変形量の全体変形量に対する割合の推移を図 9 に示す。

十字形試験体では層間変形角が増大するにつれてパネルゾーンの変形成分が卓越してくるが、T 字形試験体では梁の変形成分が支配的である。大変形に至るまで、十字形、T 字形試験体とも、一体打ち RC 試験体、PCa 試験体によらず、変形成分割合の推移には大きな差はみられなかった。また、高強度材料を用いた一体打ち RC 試験体 No.5 と PCa 試験体 No.6 においても同様な性状であった。

4.4 等価粘性減衰定数

十字形試験体 No.1、No.4 ならびに T 字形試験体 No.7、No.8 の等価粘性減衰定数 h_{eq} と層間変形角の関係を図 10 に示す。

一体打ち RC 試験体と PCa 試験体では等価粘性減衰定数の大きな違いはみられなかった。また、十字形 PCa 試験体としては、柱主筋の貫通孔の種別の違い、梁主筋の機械式継手位置の違いによらず、等価粘性減衰定数の違いはほとんどみられなかった。図中に示した点線は、武田モデルによる等価粘性減衰定数評価式(式(1))から得られた計算値である。ほぼ全ての試験体において、 $R=1/25\text{rad}$ まで実験値が計算値を上まわった。しかし、それ以降の層間変形角になると、十字形試験体では、実験値は計算値を下回った。破壊モードが柱梁接合部のせん断破壊に移行し、エネルギー吸収量が低下したためと考えられる。

$$h_{eq} = \frac{1}{\pi} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\mu}} \right) \quad \text{ここで、} \mu : \text{塑性率} \quad (1)$$

5. まとめ

本実験の範囲で得られた知見を以下に示す。

- 1) PCa 試験体は一体打ち RC 試験体とほぼ同様な破壊経過を示し、ひび割れ状況に大きな違いはみられなかった。
- 2) 梁せん断力-層間変形角曲線、ならびにその包絡線の比較から、PCa 試験体の最大耐力および変形性能は、一体打ち RC 試験体と同等以上の性能を示し、限界変形角(R_u)は $R=1/20\text{rad}$ 程度であった。
- 3) PCa 試験体において、柱梁接合部内の柱主筋の貫通孔の成型方法(シース、ロープによる渦巻き状の紋様)の違い、ならびに梁主筋の機械式継手位置($0.5D_b$ 、 $0.4D_b$)の違いによる最大耐力や変形性能における有意な差なかった。
- 4) PCa 試験体と一体打ち RC 試験体は、梁主筋や柱主筋のひずみ度分布、梁、柱ならびにパネルゾーンの変形成分割合、等価粘性減

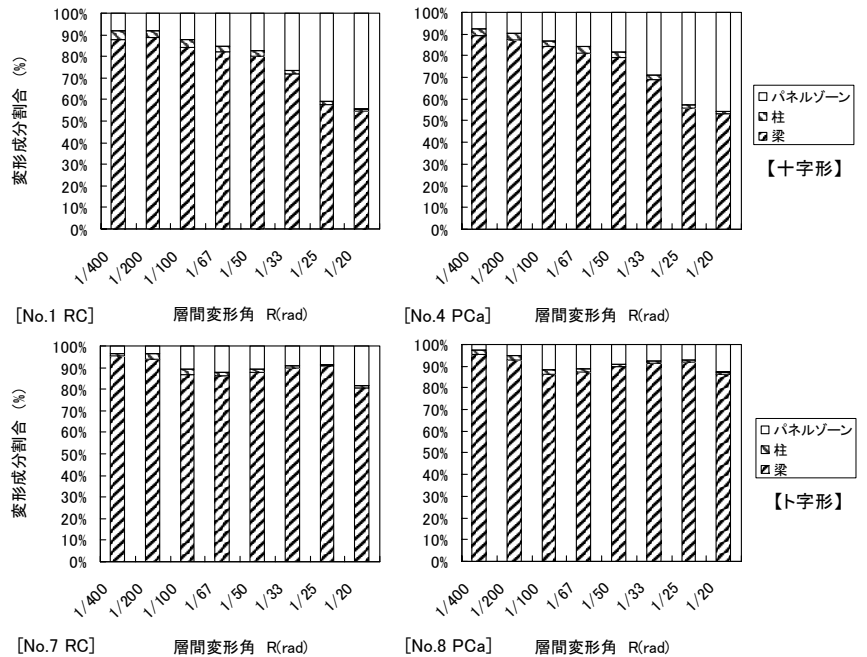


図 9 変形成分割合 (第一サイクル)

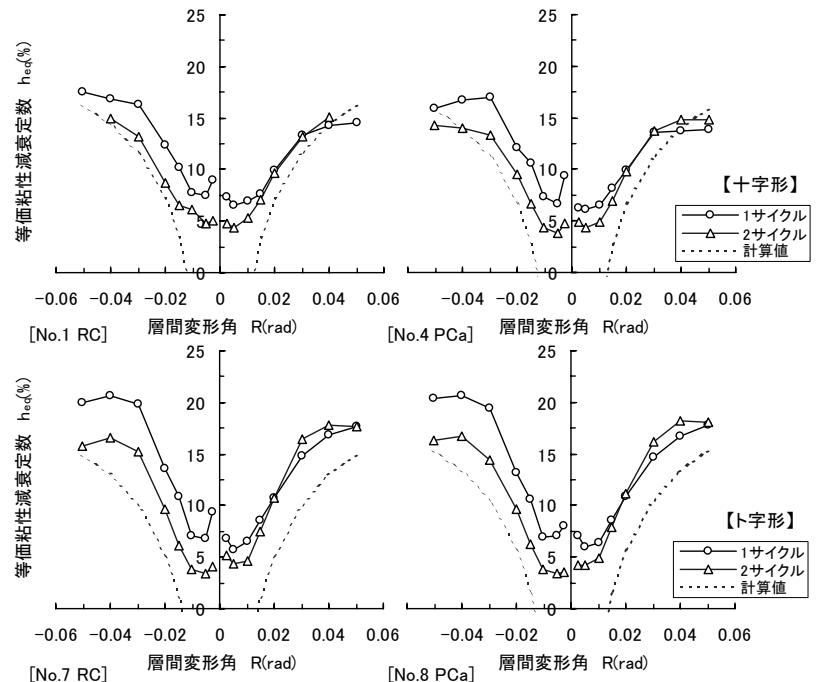


図 10 等価粘性減衰定数

衰定数において大きな差はみられないことから、両者同等の性能を有すると考えられる。

参考文献

- 1) 木本敏一、中岡章郎、鴨川直昌、埴田幸治、中井謙三：柱梁接合部プレキャスト架構の加力実験(その1、その2)、日本建築学会大会学術講演梗概集、23020~23021、2006.9
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、2010
- 3) 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

[2011 年 9 月 15 日原稿受理 2011 年 12 月 28 日採用決定]