

論文 接合部一体型プレキャスト柱・梁接合部の力学的挙動

石川 裕次^{*1}・木村 秀樹^{*2}・上田 博之^{*3}・奥出 久人^{*4}

要旨: 梁と接合部を一体としたPCa部材とPCa柱を接合する接合部一体型PCa柱・梁接合部の力学的挙動を把握するために、地震荷重を想定した柱・梁接合部実験を行った。試験体は、十字形接合部の一体打ち（梁主筋：SD490（2段配筋）、USD685（一段配筋））、接合部一体型、ト形の接合部一体型の計4体である。柱主筋がシース管内に充填されたグラウトによって一体化された接合部一体型PCa柱・梁接合部は、層間変形角R=30/1000[rad]までは一体打ち接合部と同等の構造性能（耐力、剛性および等価粘性減衰定数）を有すること確認した。

キーワード: 接合部, 鉄筋コンクリート, プレキャスト, 等価粘性減衰定数

1. はじめに

現在、高層RC造建物において、施工合理化を目的としたプレキャスト構工法が用いられている。その中で、接合部と梁部材を一体化したPCa部材を用いること、施工階において接合部コンクリートの打設工程をなくした接合部一体型PCa柱の構工法がこれまでに日本国内外で適用されている^{1), 2)}。

接合部一体型柱・梁接合部が一体打ちと異なる点は、接合部内の柱主筋が高強度無収縮グラウトおよびシース管を介して接合部コンクリートと一体化されていることである。そのため、接合部内における柱主筋の付着条件が一体打ちの場合とは異なる。ここでは接合部内における柱主筋の付着条件の違いによる柱・梁接合部の力学的挙動に与える影響を検討するために、地震荷重を想定した柱・梁接合部実験を実施した。

2. 試験体および加力方法

2.1 試験体

試験体諸元一覧を表-1に、試験体図を図-1に示す。試験体は、1/2スケールの十字形接合部3体およびト形接合部1体である。

表-1 試験体諸元一覧

試験体	BJIS	KJIS	KJIP	KJOP
接合部形状	十字形			ト形
構工法	一体打ち		接合部一体型PCa	
コンクリート: $f'_c(E_c)$	66.0($E_c=3.85 \times 10^4$ [N/mm ²]) ^{*1}			
(通し)梁主筋定着長さ比: D_c/d_b	21.6		16.0	
接合部せん断補強筋(種別)[p_m]	4-D6(SD685)[0.36%] $f_{yh}=870, E_s=1.81 \times 10^5$ 単位[N/mm ²]			
通し梁主筋定着余裕度 ^{*2}	1.02	1.41	---	
接合部せん断余裕度 ^{*3}	1.82	1.66	1.69	
柱断面	一体打ち		PCa	
B×D [mm]	475×475			
柱主筋(種別)[Pg]	12-D22(SD490)[2.06%] $f_y=511, E_s=2.00 \times 10^5$ 単位[N/mm ²]			
せん断補強筋(種別)[pw]	4-D6@50(SD685)[0.53%] $f_{yh}=870, E_s=1.81 \times 10^5$ 単位[N/mm ²]			
柱軸力比: $\eta_c=N/(BDf'_c)$	0.20		0~0.70	
梁断面	一体打ち		PCa	
B×D [mm]	340×425			
梁主筋(種別)[Pt]	4-D22(USD685)[1.16%] ^{*4}	6-D22(SD490)[1.82%] ^{*5}		
せん断補強筋(種別)[pw]	4-D6@60(SD685)[0.78%] ^{*5}			

*1: KJIP, KJOP: 梁トップ部 $f'_c=62.2(E_c=3.81 \times 10^4$ [N/mm²])
KJIP, KJOP: 下柱目地・接合部シース管内充填グラウト $f'_c=91.3(E_c=3.28 \times 10^4$ [N/mm²]) [50φ×100mm封緘養生]
KJIP, KJOP: 上柱目地・上柱スリーブ継手充填グラウト $f'_c=91.2(E_c=3.15 \times 10^4$ [N/mm²]) [50φ×100mm封緘養生]

*2: 通し梁主筋定着強度(緩和式): 靱性保証型指針式³⁾
$$\frac{d_b}{D} = \frac{1.25 \times 6.0}{1 + \gamma} \left(1 + \frac{\sigma_o}{\sigma_B} \right) \frac{\sigma_B^{0.667}}{\sigma_{yu}}$$
 式記号は文献3) 参照

*3: 接合部せん断強度(但し, φ=1.0): 靱性保証型式³⁾

*4: $f_y=705, E_s=1.89 \times 10^5$ 単位[N/mm²]

*5: 材料特性は柱断面の鉄筋と共通

*1 榊竹中工務店 技術研究所建設技術開発部構造部門 研究員 工博 (正会員)

*2 榊竹中工務店 技術研究所建設技術開発部構造部門 主任研究員 工博 (正会員)

*3 榊竹中工務店 大阪本店設計部 構造課長 工修 (非会員)

*4 榊竹中工務店 大阪本店設計部 構造課長代理 工修 (正会員)

試験体は、高層RC造建物の実設計を想定して、靱性保証型指針³⁾により、接合部せん断強度（但し、ここでは実験データとの比較を行うために、 $\phi=1.0$ として終局強度式として扱っている）および通し梁主筋の定着余裕度を確保した梁曲げ降伏先行型の柱・梁接合部である（使用材料の材料特性は表-1参照）。

BJIS 試験体は、梁主筋に高強度鉄筋 USD685 (NewRC⁴⁾規格準拠)を用いて、梁主筋を1段配筋とした一体打ち試験体であり梁曲げ終局強度をKJIS 試験体に合わせて設計した(図-1(a)参照)。

KJIS 試験体は、梁主筋にSD490を用いて2段配筋とした一体打ち試験体である。KJIS 試験体は、本実験の基準試験体である(図-1(a)参照)。

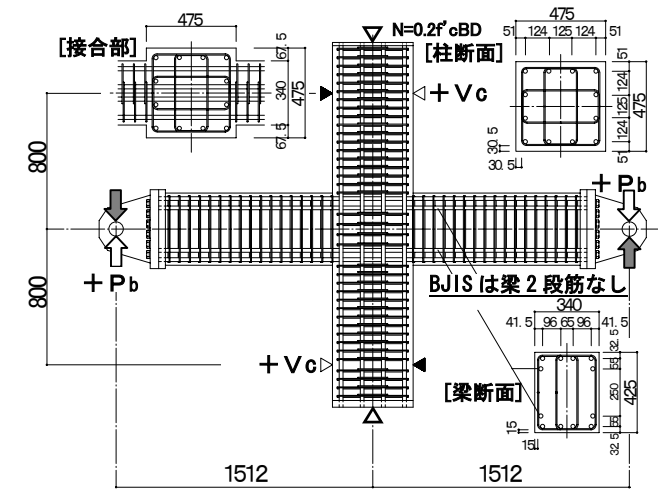
KJIP 試験体は、配筋はKJIS 試験体と同様であるが、接合部と梁部材を一体化したPCa部材とPCa柱によって製作された接合部一体型柱・梁接合部である(図-1(b)参照)。この試験体の特徴は、接合部内の柱主筋が接合部一体型PCa部材に設けられたシース管に下柱主筋が差込まれ、PCa上柱を据え置く前に、スリーブ継手に使用した高強度無収縮グラウトが充填されることである(材料特性は表-1参照)。また、接合部上下面には打ち継ぎ目地 ($t=10\text{mm}$)にも高強度無収縮グラウトが充填されている。

KJOP 試験体はト形試験体であり、配筋および試験体の製作方法はKJIP 試験体と同様である。梁主筋は接合部内で機械式定着され、柱せい(Dc)の0.71倍 ($l_{dh}/d_b=16.0$, l_{dh} : 定着投影長さ, d_b : 主筋径(呼び名))に位置で定着されている。主筋の先端は主筋径の2倍の径を有する鉄筋コブが設けられている。

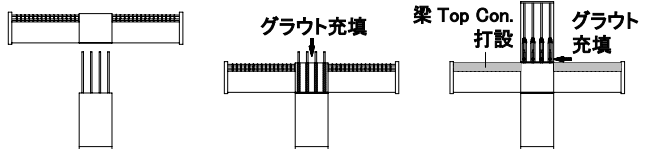
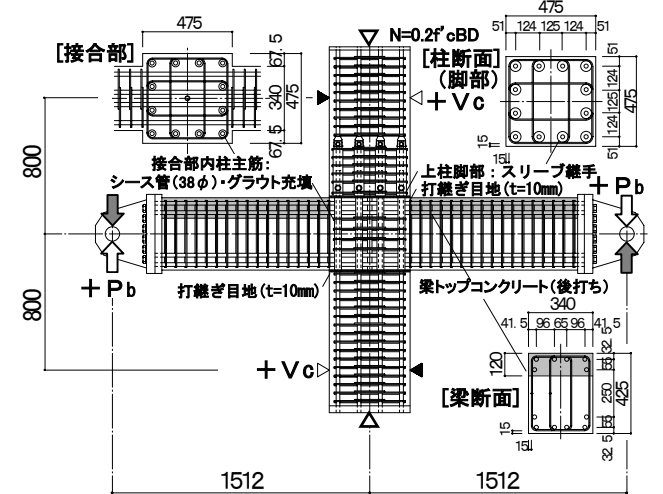
2.2 加力方法

試験体の加力は梁端部から行った。十字形接合部試験体は、長期軸力を想定して柱部材の圧縮軸力比 ($\eta_c=N/BDf'_c$, N: 圧縮軸力, B: 柱幅, D: 柱せい, f'_c : コンクリート強度)を0.20一定として実験を行った。

ト形接合部のKJOP 試験体は、高層RC造建物の隅柱を想定して柱軸力を変動軸力として実験

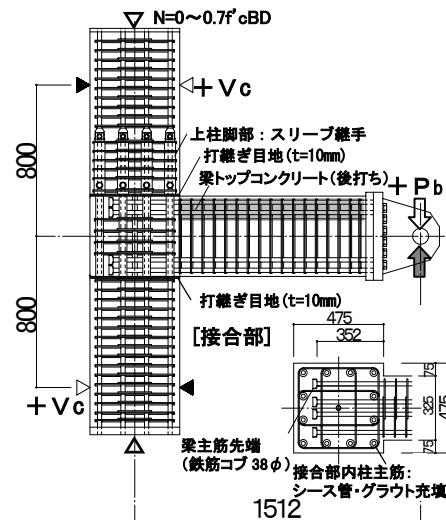


(a) KJIS, (BJIS) 試験体図 (BJISの梁主筋は1段筋のみ)



① 接合部一体型 ②下柱柱頭・接合部内柱主筋(シース管内)のグラウト充填 ③上柱柱脚目地, 上柱PCaの差込主筋スリーブ継手のグラウト充填

(b) KJIP 試験体図, 構工法図



(c) KJOP 試験体図
図-1 試験体図

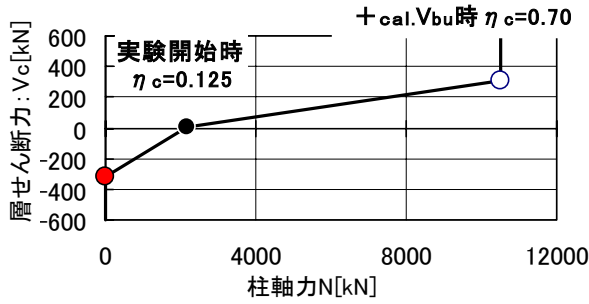


図-2 KJOP 試験体の載荷履歴 (柱軸力)

を行った。図-2 に示すように、柱軸力は実験開始時は圧縮軸力比(η_c)を 0.125 とし、正サイクルおよび負サイクルの層せん断力が梁曲げ終局強度 ($\pm \text{cal.Vbu}$: ACI318 式⁴⁾ による計算値) 時に圧縮軸力比(η_c)を、それぞれ 0.70 および 0 となるように層せん断力の増減に合わせて柱軸力を変動させた。除荷時の載荷履歴も図-2 に従った。

変位履歴は、層間変形角 $R=1, 2, 3.3, 5, (2), 7.5, 10, (5), 15, 20, (5), 30, 40, 50/1000[\text{rad}]$ を各 2 回繰返し、変位漸増載荷として行った。

3. 実験結果

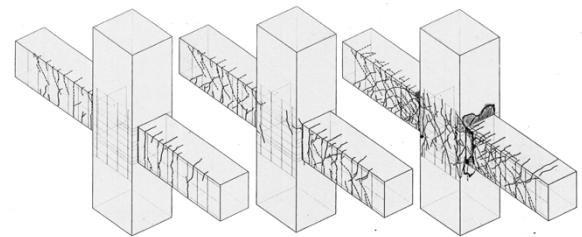
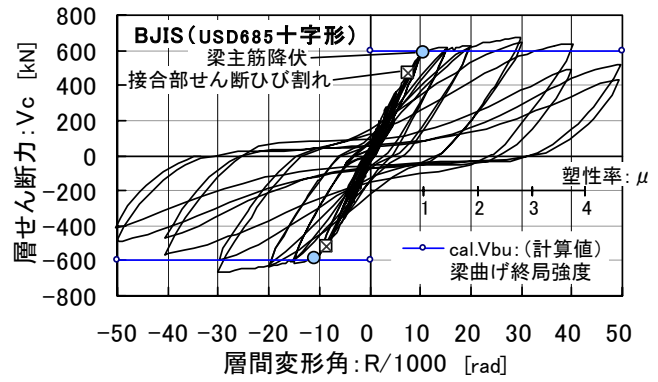
3.1 実験結果の概要

図-3、-4 に、層せん断力-層間変形角関係および層間変形角 $R=\pm 5.0, \pm 10, \pm 50/1000[\text{rad}]$ 時のひび割れ発生状況を示す (以下、層間変形角 R は、 R のみで示す)。図中には梁曲げ終局強度 (ACI318 式⁴⁾ による計算値) を併記している。以下に各試験体の実験結果の概要を示す。

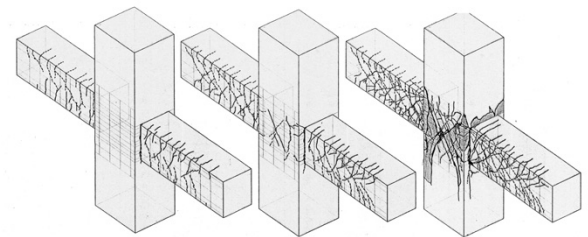
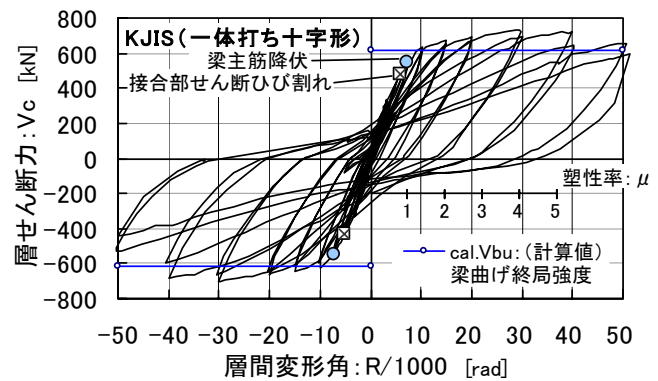
BJIS 試験体は、 $R=10/1000[\text{rad}]$ のサイクルに、他の試験体は $R=7.5/1000[\text{rad}]$ のサイクルに梁曲げ降伏に達し、その後、変形の増加と共に耐力が徐々に増加した。しかし、大変形時 ($R=40/1000 \sim 50/1000[\text{rad}]$) の柱・梁接合部の破壊状況に違いが見られた。

BJIS 試験体および KJIP 試験体は、 $R=40/1000 \sim 50/1000[\text{rad}]$ においては、耐力低下および逆 S 字の復元力特性が顕著となり、梁主筋の抜出しが目視でも確認できた。最終的に梁曲げ降伏後の通し梁主筋付着劣化に至った。

一方、KJIS 試験体は、 $R=40 \sim 50/1000[\text{rad}]$ 時に耐力が低下し始め、接合部かぶりコンクリート



$R=\pm 5/1000[\text{rad}]$ $R=\pm 10/1000[\text{rad}]$ $R=\pm 50/1000[\text{rad}]$
(a) BJIS 試験体



$R=\pm 5/1000[\text{rad}]$ $R=\pm 10/1000[\text{rad}]$ $R=\pm 50/1000[\text{rad}]$
(b) KJIS 試験体

図-3 層せん断力-層間変形角関係 (一体打ち十字形柱・梁接合部)

の剥落、接合部コア部の面外膨張が顕著となり、梁曲げ降伏後の接合部せん断破壊に至った。

ト形接合部の KJOP 試験体は、ひび割れ発生状況から判断すると梁曲げ降伏後に部材端から 1.0D 区間に塑性ヒンジ領域が形成され、主に梁端部に変形が集中した。また、接合部のひび割れ発生状況は、軸力比 (η_c) を 0.70 まで変動さ

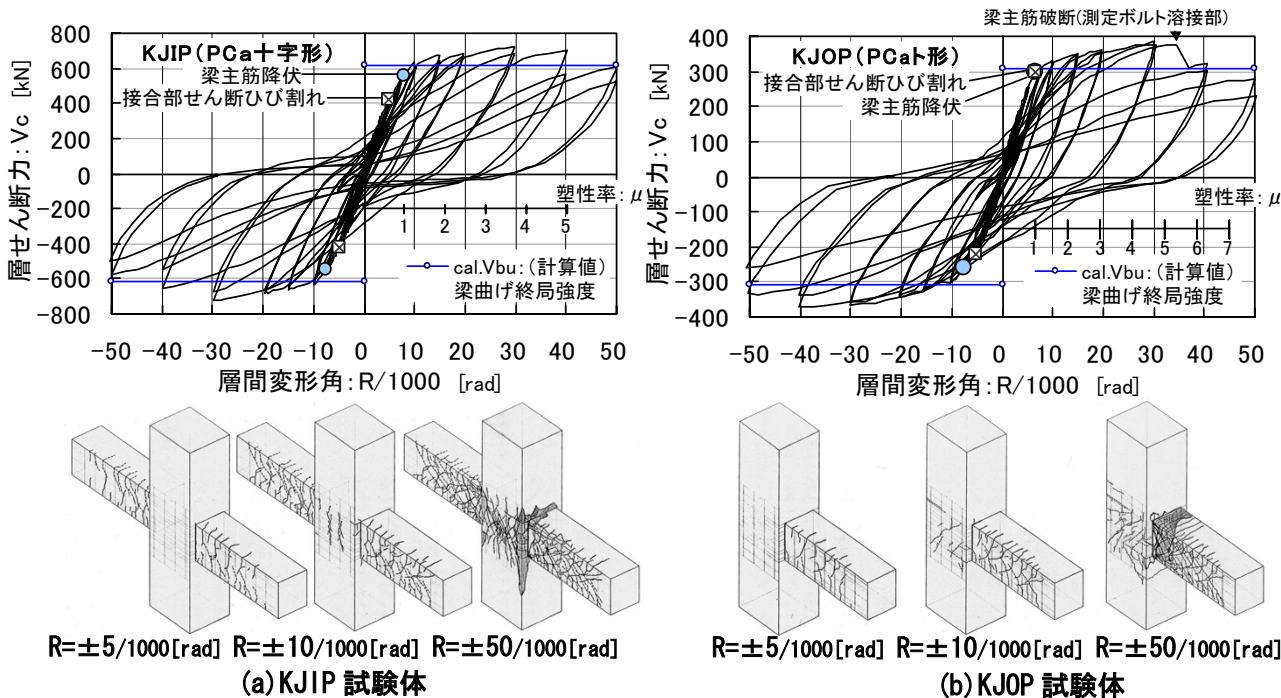


図-4 層せん断力-層間変形角関係(接合部一体型PCa接合部)

せた正サイクル時には、接合部せん断ひび割れの発生が少なく、柱軸力が0まで変動させた負サイクル時には、梁主筋定着の先端部から斜めひび割れが発生した。R=35/1000[rad]時には、主筋すべり計測用として全ネジを溶接した箇所でも梁主筋(1本)が破断した。最終的に梁端部に破壊が集中し、R=50/1000[rad]時には、梁端部D/2領域がスライディングシア破壊に至った。

3.2 ひび割れ幅

各試験体のひび割れ幅記録一覧を表-2に示す。ひび割れの観測は、クラックゲージ(分解能0.04mm)およびマイクロスコープ(分解能0.02mm)によって代表的なひび割れの幅を観測した。なお、表中のVc=0は除荷時の記録であり、±2.0*, ±5.0*は各小サイクルの記録である。

PCa接合部のKJIP試験体は一体打ちのKJIS試験体に比べ接合部せん断ひび割れ幅が相対的に小さい。T形PCa接合部のKJOP試験体は柱軸力が0となる負サイクルでのひび割れ幅が、圧縮軸力時の正サイクル比べて大きい。

4. 実験結果の検討

4.1 諸現象荷重

表-3に、諸現象荷重の実験値と計算値の比較

表-2 ひび割れ幅記録一覧(単位[mm])

R/1000 [rad]	BJIS (USD685)				KJIS (一体打ち)			
	Joint	Vc=0	Beam	Vc=0	Joint	Vc=0	Beam	Vc=0
2.0	0.00	0.00	0.05	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00
5.0	0.00	0.00	0.15	0.02	0.00	0.00	0.15	0.02
2.0*	0.00	0.00	0.10	0.06	0.00	0.00	0.10	0.02
10.0	0.08	0.02	0.30	0.06	0.15	0.05	0.25	0.20
5.0*	0.06	0.02	0.25	0.10	0.08	0.02	0.20	0.15
20.0	0.45	0.15	2.00	1.00	0.40	0.10	3.00	2.00
R/1000 [rad]	KJIP (PCa十字形)				KJOP (PCaT形)			
2.0	0.00	0.00	0.05	0.02	0.00	0.00	0.08	0.02
5.0	0.05	0.00	0.20	0.02	0.00	0.00	0.20	0.02
2.0*	0.02	0.00	0.10	0.02	0.00	0.00	0.12	0.02
10.0	0.12	0.05	0.50	0.25	0.05	0.02	0.55	0.30
5.0*	0.12	0.08	0.50	0.25	0.05	0.05	0.40	0.25
20.0	0.35	0.08	2.00	1.50	0.05	0.02	1.50	1.20
-2.0	0.00	0.00	0.05	0.02	0.00	0.00	0.05	0.00
-5.0	0.02	0.00	0.25	0.05	0.02	0.00	0.15	0.02
-2.0*	0.02	0.00	0.15	0.08	0.02	0.02	0.12	0.02
-10.0	0.12	0.12	0.50	0.30	0.30	0.10	0.50	0.20
-5.0*	0.08	0.05	0.50	0.30	0.15	0.08	0.50	0.30
-20.0	0.25	0.08	2.00	1.50	0.40	0.15	1.80	1.00

※Joint: 接合部せん断ひび割れ(ピーク時,Vc: 除荷時)

※Beam: 梁危険断面曲げひび割れ(ピーク時,Vc: 除荷時)

を示す。実験値は正負サイクルの平均値である。

接合部せん断ひび割れ強度の計算値(靱性保証型指針³⁾)は、十字形接合部の実験値に比べやや小さいが、ほぼ適合した。

梁曲げ降伏先行型である各試験体の最大耐力の実験値と計算値(梁曲げ終局強度式のACI318式⁴⁾)の比は、概ね1.12倍から1.22倍であり、計算値と実験値は適合している。

表-3 諸現象荷重の実験値と計算値の比較

項目	試験体(キーワード)		BJIS (USD685十字形)	KJIS (一体打ち十字形)	KJIP (PCa十字形)	KJOP*3 (PCaト形)
	記号	単位				
実	接合部	$ex \tau_{cr}$ [N/mm ²]	7.18	7.06	6.55	5.08
計	せん断ひび割れ強度*1	$cal \tau_{cr}$ [N/mm ²]	8.06	8.06	8.06	8.06
	実/計: $ex \tau_{cr} / cal \tau_{cr}$		0.89	0.88	0.81	0.63
実	梁曲げ降伏	$ex.V_{by}$ [kN] ($R_{by}/1000$) [rad]	586 (10.8)	552 (7.4)	552 (7.8)	280 (7.1)
実	最大耐力(梁曲げ降伏)	$ex.V_{bu}$ [kN] ($R_{bu}/1000$) [rad]	670 (29.8)	716.4 (29.3)	722.8 (29.7)	378.1 (34.9)
計		$cal.V_{bu}$ *2 [kN]	596	619	619	310
	実/計: $ex.V_{bu} / cal.V_{bu}$		1.12	1.16	1.17	1.22
実	限界変形角(0.95 $ex.V_{bu}$)	($R_u/1000$) [rad]	(36.7)	(43.9)	(39.4)	(45.2)
実	塑性率($ex.\mu = R_u/R_{by}$)	$ex.\mu$	3.40	5.97	5.06	6.39
計		$cal.\mu$ *1	5.14	5.21	5.21	---
	実/計: $ex.\mu / cal.\mu$		0.66	1.15	0.97	---

表記 *1: 靱性保証型指針式, *2: ACI318式, *3: KJOP: 限界変形角, 塑性率は負サイクル値

限界変形(最大耐力の95%耐力時の変形)時の塑性率の計算値(靱性保証型指針³⁾)は, KJIS試験体およびKJIP試験体の塑性率(実験値)に適合し, 一体打ちと接合部一体型PCa接合部の違いは現れていない。また, 高強度鉄筋USD685を用いたBJIS試験体は, 限界変形角はKJIS試験体(主筋SD490)と大きな違いは見られないが, 梁曲げ降伏点の変形がKJIS試験体に比べて1.50倍と大きいいため, 塑性率(実験値)は計算値の0.66倍に留まった。これは, 高強度鉄筋USD685は, 靱性保証型指針式³の適用範囲外であるためと考えられる。

4.2 柱主筋分布

図-6に, 一体打ちのKJIS試験体と接合部一体型PCaのKJIP試験体の柱主筋歪み分布(正サイクル1回目ピーク時)を示す(図中のRは層間変形角を示す)。

KJIP試験体の接合部内の柱主筋は, グラウトおよびスリーブを介してコンクリートと一体化されている。各層間変形角において, 柱主筋歪みは引張側に移行する傾向が見られる。そのため, 圧縮側となる上柱の柱主筋歪みは引張側に移行している。この影響は通し梁主筋定着応力を主に負担すると考えられる柱危険断面の圧縮領域の減少を示していると考えられ, KJIP試験体が最終的に通し梁主筋の付着劣化に至った要因と考えられる。しかし, 接合部内における柱主筋歪み分布は, 一定の勾配を有しており, 柱

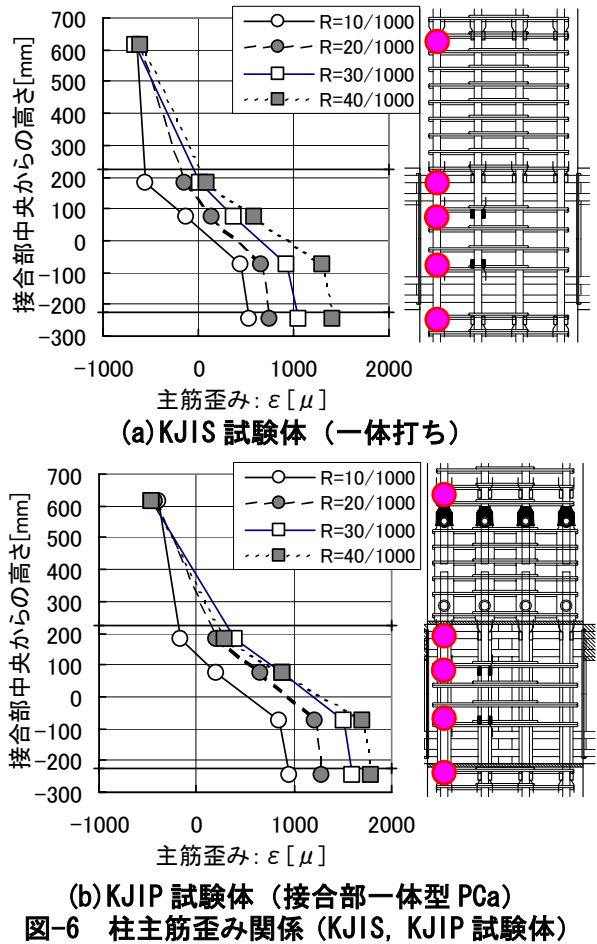


図-6 柱主筋歪み関係 (KJIS, KJIP 試験体)

主筋としては付着応力度が確保されていることを示している。

4.3 等価粘性減衰定数

各試験体の構造特性を比較するために, 等価粘性減衰定数を各サイクル2回目の層せん断力-層間変形角(柱, 梁, 接合部変形の総和)関係から検討した。その結果を図-7に示す。図-7に

は武田モデル⁵⁾ (降伏点以後の耐力上昇を考慮しない場合) の等価粘性減衰定数 (式 (1)) の計算値を併記した。

武田モデルによる等価粘性減衰定数⁵⁾
(降伏点以後の耐力増加は考慮しない場合)

$$h_{eq} = \frac{1}{\pi} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\mu}} \right), 1/\pi = 0.318, \mu : \text{塑性率} \quad (1)$$

梁主筋に高強度鉄筋 USD685 を使用した BJIS 試験体および接合部一体型 P C a 接合部の KJIP 試験体は、層間変形角 $R=30/1000[\text{rad}]$ までは、降伏点変位が相対的に大きい、ほぼ武田モデルの計算値よりも大きな等価粘性減衰定数を示した。しかし、梁主筋の拔出しが顕著となり耐力低下を生じた $R=40/1000[\text{rad}]$ 以降には、計算値を実験値が下回った。

KJIS 試験体は、負サイクルにおける等価粘性減衰定数は、計算値よりやや小さいが、層間変形角 $R=50/1000[\text{rad}]$ まで、ほぼ計算値と同等な等価粘性減衰定数を示した。

KJOP 試験体は、層間変形角 $R=50/1000[\text{rad}]$ まで、ほぼ計算値と同等な等価粘性減衰定数を示した。なお、梁曲げ降伏前の等価粘性減衰定数は、十字形接合部試験体では 3%~5%であり、ト形試験体では 2%~3%前後であった。

5. まとめ

梁と接合部を一体とした P C a 部材と P C a 柱を接合する接合部一体型 P C a 柱・梁接合部の力学的挙動を把握するために、地震荷重を想定した柱・梁接合部実験を行った結果、以下の知見が得られた。

- 1) 接合部一体型 P C a 柱梁接合部は、層間変形角 $R=30/1000[\text{rad}]$ までは、一体打ちの柱・梁接合部と同等な構造性能を示した。
- 2) 梁主筋に高強度鉄筋 USD685 を用いた柱・梁接合部は、層間変形角 $R=30/1000[\text{rad}]$ までは、梁主筋に SD490 を用いた場合と、梁曲げ降伏点が相対的に大きい点以外は、ほぼ同等な構造性能を示した。

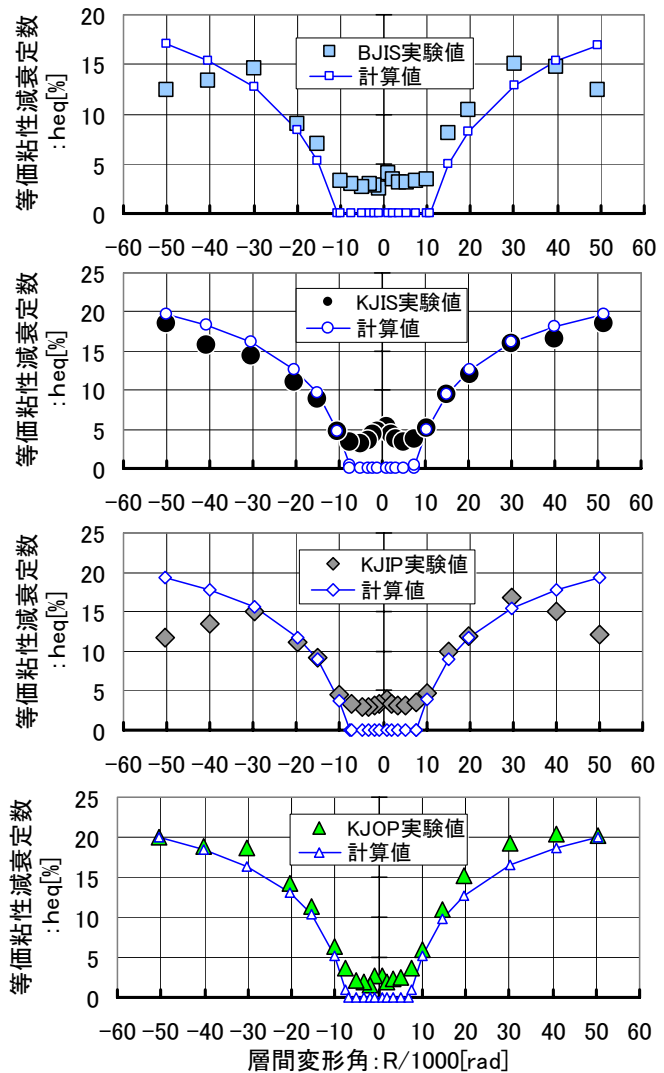


図-7 等価粘性減衰定数-層間変形角関係

参考文献

- 1) Robert Park, : A Perspective on the Seismic Design of Precast Concrete Structures in New Zealand, PCI Journal, Vol.40, No.3, pp.40-60, May./June 1995
- 2) 角 彰:プレキャスト複合化工法による高層 RC 建築の実施, コンクリート工学, Vol.41, No.1, pp.87-95, 2003.1
- 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(案)・同解説, 1997.7
- 4) Building Code Requirements for Structural Concrete (318-02)and Commentary (318R-02), American Concrete Institute, 2002
- 5) Toshikazu Takeda, Mete A. Sozen, Norby Nielsen: Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, Journal of the Structural Division, ASCE, pp2557-2573, 1970.12