

論文 2方向加力を受けるプレキャスト鉄筋コンクリート造外部柱梁 接合部に関する実験的研究

大岡悦子*1 深沢協三*2 山村公志郎*3 立花正彦*4

要旨: 柱梁接合部を含む部分骨組みに関するハーフプレキャスト (以下、PCa) 造の研究は、平面試験体を中心に進められてきたのが現状である。そこで本研究は、2方向加力における一般的なPCa造立体外部柱梁接合部骨組みの変形性能の基礎資料を得ることを目的に実験を行った。その結果、PCa造の外部柱・梁接合部は、下端筋の曲げ上げ定着と2方向加力により直交梁主筋が接合部コンクリートを押し出す影響で破壊することがわかった。

キーワード: PCa造、外部柱梁接合部、2方向加力、立体骨組み

1. はじめに

梁の上部を現場打ちとするハーフプレキャスト造の柱梁接合部を含む部分骨組みに関する研究は、内柱・外柱とも平面試験体を対象としたものが多い。RC造も含めて、立体骨組みにおいて2方向加力した実験例は極めて少ない。特に、1方向が内柱で直交方向が外柱となる部分の実験例はRC造で藤井ら (例えば文献1) の実験例があるのみである。藤井らの研究¹⁾では、片側のみの直交梁では接合部の拘束効果が小さいことを指摘している。従って、2方向加力下ではこのタイプの接合部は、平面の場合より接合部の破壊が早まる可能性も考えられる。また、PCa造では一般に全ての梁主筋が接合部で定着されるため、立体骨組みで2方向加力を受ける場合には平面と異なる挙動を示すことも考えられる。

そこで本研究では、PCa造立体架構の変形性状や耐力評価の基礎資料を得ることを目的とし、RC造及びPCa造の外部柱梁接合部を含む立体骨組みに2方向加力を行い、外部梁柱接合部内の応力状況や鉄筋の定着性状等の構造性能を実験的に検証する。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体の形状・寸法及び配筋状況を図1に、試験体諸元を表1に示す。また、使用材料の機械的性質を表2に示す。試験体は、実大の5階建て事務所ビルの2階外部柱梁接合部を含む架構を対象とした約40%縮小モデルである。試験体数は、RC造 (以下JRCと略記) 1体とPCa造 (以下JPCと略記) 1体の計2体である。PCa造試験体は、柱がフルプレキャストで梁がハーフプレキャスト、接合部と梁上部が現場打ちコンクリートである。接合部の片側に梁を有する側をX方向、両側に梁を有する側をY方向とした。JRCはX方向の梁が上下端筋ともに曲げ下げ定着、Y方向の梁が上下端筋ともに通し配筋である。JPCはX方向の梁の上端筋が曲げ下げ定着で下端筋が曲げ上げ定着、Y方向の梁の上端筋が通し配筋で下端筋が曲げ上げ定着である。梁の加力スパンはX方向が1750(mm)、Y方向が1250(mm)であり、X方向はY方向の約1.4倍となっている。また、これら試験体は梁降伏型で設計した。

*1 東京電機大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)

*2 (社)日本建設業経営協会 中央技術研究所 工博 (正会員)

*3 松尾建設 (株) 経営統括本部 技術研究所 (正会員)

*4 東京電機大学助教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

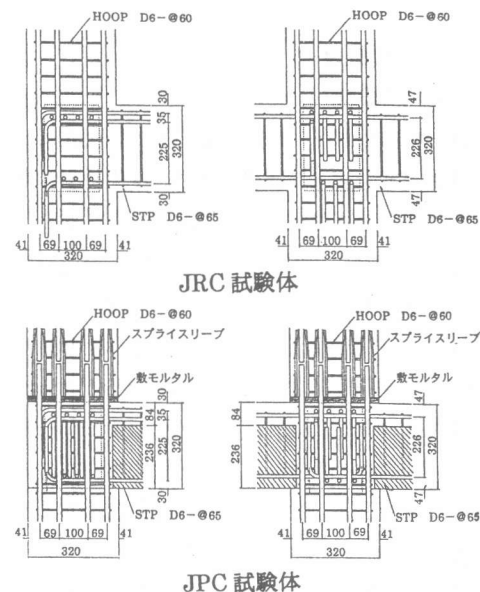
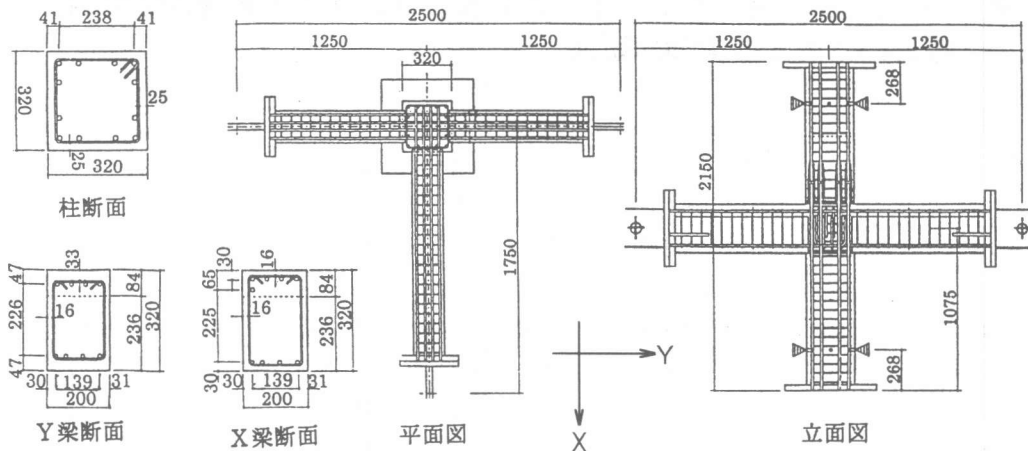


図1 試験体形状・寸法及び配筋状況

表1 試験体諸元

試験体名		JPC	JRC
柱	B×D	320×320 (mm)	
	主筋	12-D16 (Pg=2.33%)	
	フープ	D6-φ60 (Pw=0.33%)	
梁	B×D	200×320 (mm)	
	主筋 (X方向)	上端筋	上段: 4-D13 (Pt=1.09%) 下段: 1-D13 (Pt=1.09%)
		下端筋	3-D13
	補助筋	1-D10	なし
		主筋 (Y方向)	上端筋
	補助筋	上端筋	3-D13
		下端筋	1-D10
スターラップ(X・Y方向)	D6-φ65 (Pw=0.42%)		
柱・梁接合部内帯筋	D6-φ60 (Pw=0.33%)		
接合部内 梁主筋 定着方法	X方向	上端筋	曲げ下げ定着
		下端筋	曲げ上げ定着
	Y方向	上端筋	通し配筋
		下端筋	通し配筋

表2 使用材料の機械的性質

	鋼種	σ_y (N/mm^2)	σ_u (N/mm^2)
D6*	SD295	367.5	475.3
D10	SD295	340.1	481.2
D13	SD390	476.3	653.7
D16	SD390	443.0	607.6

注) *0.2%オフセット

		F_c (N/mm^2)	材令 (日)	σ_B (N/mm^2)
JRC	場所打ち	26.5	48	17.2
JPC	場所打ち	26.5	62	19.2
	PCa部	36.8	75	42.7
	SSモルタル		54	84.0

F_c : 設計時のコンクリート圧縮強度

2.2 実験方法

加力装置を図2に示す。柱上部及び下部をピンローラー支持とする。加力方法は、まず柱頭部に取り付けたアクチュエーターで柱軸力 $N=949.3kN (=0.35bDF_c)$ の定軸力を作用させ、その後、梁端部に取り付けたアクチュエータ (X、Y方向) で梁にせん断力を作用させる。加力サイクルパターンを図3に示す。加力パターンは田の字型とし、X、Y方向とも変形制御で層間変形角 $R=\pm 1/300, \pm 1/200, \pm 1/100, \pm 1/50, \pm 1/25$ rad. の正負繰り返し加力を行った後、両方向同時に $R=+1/15$ rad. まで単調荷重を行う。また加力方向は、X方向の梁の曲げ下げとY方向の梁を直交梁を有する側から見て時計回りを正とした。

測定項目は荷重をアクチュエーターのロードセルで、全体変位、梁回転角、柱及び接合部回転角を変位計にて測定した。また、各鉄筋の歪

みとコンクリートの歪みを W.S.G にて測定した。

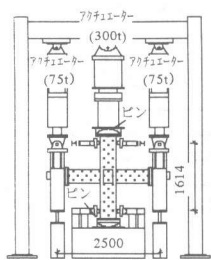


図2 加力装置

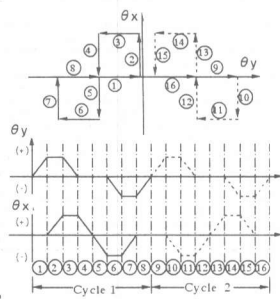


図3 加力サイクル

3. 実験結果と考察

3.1 ひび割れ及び破壊状況

X方向及びY方向の最終破壊状況を図4、図5に示す。梁のひび割れは両試験体、両方向ともに曲げひび割れ、曲げせん断ひび割れ、せん断ひび割れの順に発生した。梁付け根の圧壊は、両試験体共に $R=1/50$ より観察された。JRCではX方向梁の上面以外がすべて圧壊した。JPCでは各梁ともに現場打ちコンクリートである梁上部の損傷が激しかった。JPCはプレキャストコンクリートと現場打ちコンクリートの打ち継ぎ面に沿ったひび割れも確認できたが、目認できる

ようなずれは生じていない。また、 $R=1/25$ においてJPCのX方向梁付け根の下面で梁主筋の座屈による被りコンクリートの剥落が観察された。

接合部のうち、X方向で梁の取り付く面では、両試験体ともに梁の圧壊に伴って梁付け根の隅及び柱のコンクリートが剥落した。JPCよりもJRCの損傷が激しかった。Y方向接合部は、両試験体ともに $R=1/200$ でせん断ひび割れが発生した。JRCでは中央部を中心に数本のひび割れが発生した。一方、JPCは接合部全体に細かい斜めひび割れが多数発生し、特に接合部中央付近では、両方向から多数の斜めひび割れが生じることにより最終的に中央部のコンクリートが剥落した。また、JPCのY方向の直交梁の取り付けられない面では、接合部のひび割れが柱上部に進展し、柱隅のコンクリートが剥落した。これは、梁を有する側の同位置でもみられた。

3.2 履歴特性

両試験体のX方向、Y方向の荷重～変形曲線を図6に示す。両試験体、両方向共に $R=1/200$

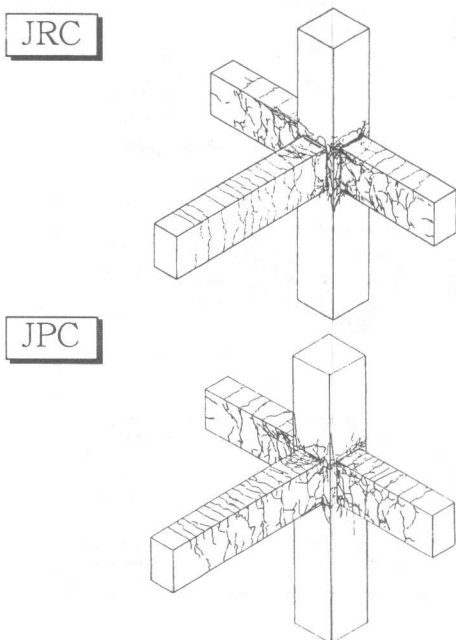


図4 最終破壊状況 (全体)

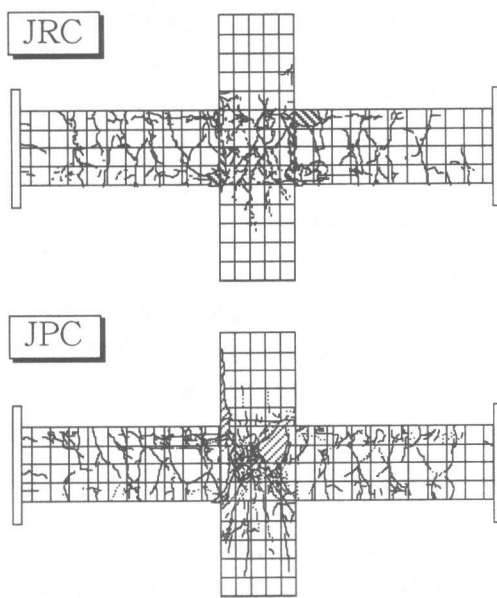


図5 最終破壊状況 (Y方向外側面)

表3 耐力一覧

試験体	加力方向	梁主筋降伏 (kN)				最大耐力 Qmax (kN)						平均せん断力の最大値(N/mm ²)					
		R	eQb	cQb	e/c	R	eQmax	cQmax1	e/c1	cQmax2	e/c2	R	eτmax	eτ/σ _B	cτmax	e/c	
JRC	X梁	+	1/100②	38.3	43.7	0.88	1/25②	50.1	45.0	1.11	44.4	1.13	1/25②	3.20	0.19	3.09	1.04
		-	1/100⑤	24.3	27.4	0.89	1/25⑤	38.3	29.4	1.30	26.5	1.45	1/25⑤	2.45	0.14	3.09	0.79
	Y梁	+	1/100①	46.3	46.6	0.99	1/25①	51.1	47.3	1.08	49.5	1.03	1/25①	5.00	0.29	5.15	0.97
		-	1/100④	46.3	35.2	1.31	1/50⑥	44.6	36.3	1.23	36.9	1.21	1/50⑥	4.51	0.26	5.15	0.88
JPC	X梁	+	1/100②	40.1	43.4	0.92	1/25②	48.2	46.3	1.04	44.4	1.09	1/25②	3.08	0.16	3.46	0.89
		-	1/100⑤	27.0	27.9	0.96	1/50⑤	34.2	30.4	1.13	26.5	1.29	1/50⑤	2.19	0.11	3.46	0.63
	Y梁	+	1/100①	43.7	48.0	0.91	1/25①	53.9	50.6	1.07	49.5	1.09	1/25①	5.13	0.27	5.77	0.89
		-	1/200①	32.6	36.4	0.89	1/50⑥	47.4	39.3	1.21	36.9	1.29	1/50⑥	4.65	0.24	5.77	0.81

計算値: cQb, cQmax1 = 応力歪関係と平面保持を仮定したM-φ関係より算出した。

$$cQmax2 = 0.9 \times a_s \times \sigma_s \times d / l_k$$

$$c\tau_x = 0.18 \times \sigma_B$$

$$c\tau_y = 0.30 \times \sigma_B$$

注) 加力方向: (+) 上端筋引張状態、(-) は下端筋引張状態

までほぼ弾性挙動を示し、R=1/100より紡錘型となっている。X方向ではR=1/50まで両試験体ともほぼ同様のループを示しているが、R=1/25からJPCよりもJRCが高い耐力を示している。これは、JPCのX方向梁に確認された下端筋の座屈がR=-1/50において生じた影響であると考えられる。Y方向では、最終まで両試験体ともほぼ同様なループを描いている。しかし、ループ面積はJRCよりもJPCの方が大きい。また、両方向とも2サイクル目は1サイクル目よりも10~15%程耐力低下している。等価粘性減衰定数と層間変形角の関係を図7に示す。図中の(1)(2)は、1サイクル目と2サイクル目を示している。等価粘性減衰定数は、両試験体共にR=1/200で最小値を示した。各方向ともにJRCよりもJPCの方が0.02~0.04ほど値が高く、2サイクル目よりも1サイクル目の方が0.04~0.1ほど値が高い。以上より、R=1/25rad.でJPCがJRCより若干低い耐力を示した以外は、JPCがJRCより良好な性能を示した。

また、耐力の一覧²⁾を表3に示す。両試験体、両方向共にR=1/100において梁の主筋が降伏している。梁降伏時の梁耐力の実験値と計算値の比は0.9~1.0程度であった。最大耐力においては、実験値と計算値の比が1.0~1.4程度となっている。

3.3 接合部の性状

(a) 平均せん断応力度

各試験体の平均せん断応力度(τ)~せん断変形角(γ)曲線を図8に示す。JRCのR=1/25以降については、接合部の損傷が激しくせん断

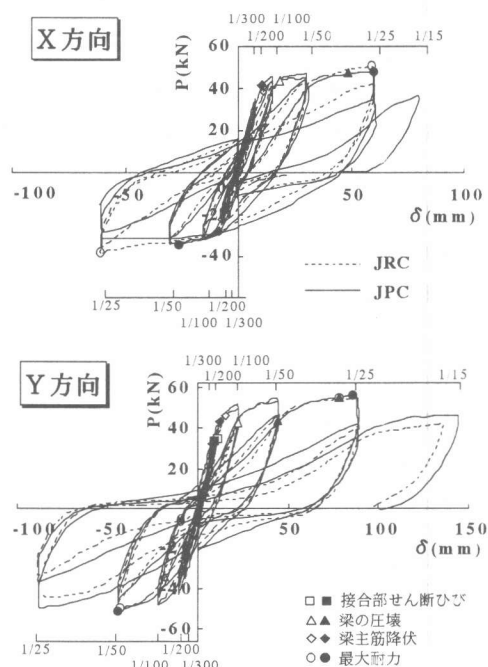


図6 荷重~変形曲線

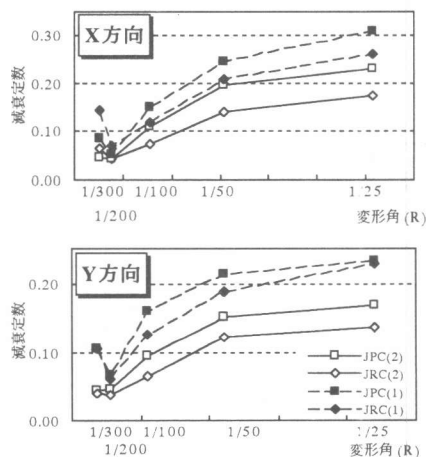


図7 等価粘性減衰定数~層間変形角関係

変形角測定のために埋め込んだインサートが動き、正確な値が得られなかったため省略した。両試験体、各方向共に $R=1/50$ より残留変形を生じるようになる。特に、JPCのY方向は急激に γ が大きくなり、剛性の低下が著しい。平均せん断応力度の最大値(τ)と接合部のコンクリート圧縮強度(σ_B : JRC=17.2、JPC=19.2 N/mm²)の比はJRCのX方向が0.19、Y方向が0.29、JPCのX方向が0.16、Y方向が0.27であり、計算値との比はJRCのX方向が1.04、Y方向が0.97、JPCのX方向が0.89、Y方向が0.89であった。

(b) 変形分担率

1サイクル目の全体変形に対する梁、柱、接合部の変形の割合を図9に示す。全体的に正加力時よりも負加力時において接合部と柱の変形が大きい傾向にある。X方向は、両試験体共に層間変形角の増加に伴い梁の変形分担率が増加している。Y方向において梁の降伏後、JRCは層間変形角の増加に伴い梁の変形分担率が若干増加するの 비해、JPCは梁・柱・接合部の変形分担率がほとんど変わらない傾向にある。

(c) 接合部の破壊性状の相違

接合部のひび割れ状況及び $\tau \sim \gamma$ 関係・各部位の変形分担率から、JRCのX、Y方向及びJPCのX方向は梁の曲げ降伏後の梁の曲げ破壊であり、JPCのY方向は梁の曲げ降伏後の接合部せん断破壊であったと判断される。

Y方向接合部の柱外側面において、破壊性状の相違は梁の降伏後($R=1/100$ より)顕著になり、JRCは数本のひび割れが生じたのに対し、JPCは多数の細かなひび割れが発生した。そして、JPCはJRCよりも τ/σ_B が低いにも関わらず接合部が破壊した。以下、この事項について検討する。

まず、要因の一つとして下端筋の定着状況の違いがあげられる。図10にY方向の梁主筋の歪分布を示す。両試験体とも通し配筋である上端筋は、JRC、JPC共に $R=1/50$ より付着劣化が見られる。下端筋については、通し配筋のJRCで $R=1/50$ より、曲げ上げ定着のJPCで水平定着部が $R=1/50$ より、折り曲げ部は $R=1/25$ より付着劣化が見られ

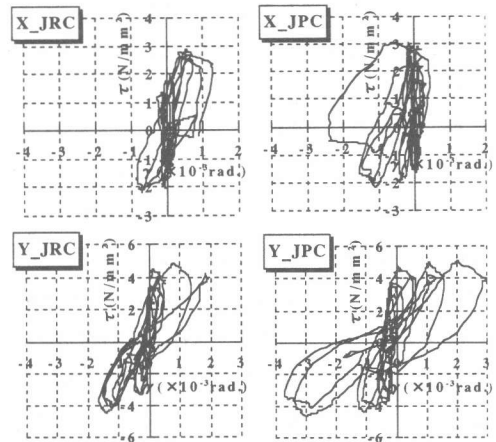
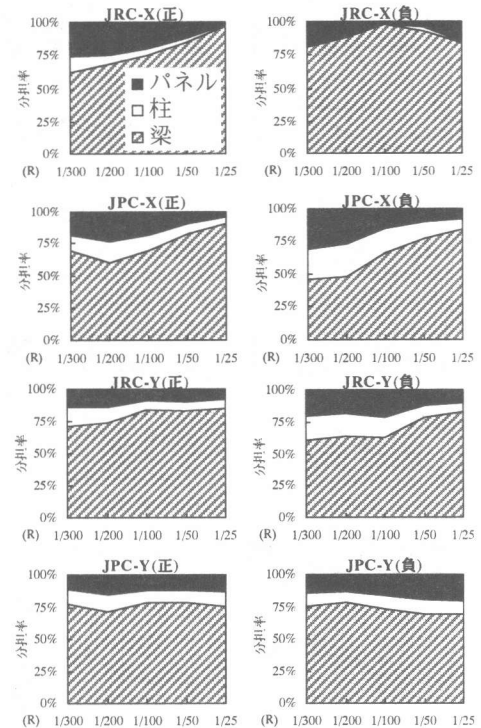


図8 接合部の $\tau \sim \gamma$ 曲線



注) $R=1/25$ の接合部の変形は、全体変形から梁の変形と柱の変形を引いたものとした。

図9 変形分担率

る。これより、下端筋についてはJRCよりもJPCの付着状況が良かったといえる。JRCの接合部は、付着の劣化が早期に生じたことにより、主なせん断抵抗は圧縮ストラットであり、コンクリート圧縮ストラットがせん断力抵抗したが、接合部に生じるせん断ひび割れが少なく、また圧縮ストラットに生じる圧縮力が小さいので梁

降伏後も接合部がせん断破壊しなかった。一方、JPCの接合部は曲げ上げ定着の下端筋の付着が良かったことにより、接合部内にせん断力が分散して多数の細かなひび割れが生じたと考えられる。また、林らの研究³⁾によると、平面ト型試験体において上端筋が曲げ下げ定着で下端筋が曲げ上げ定着の接合部では、梁主筋尾長部の跳ね出しと圧縮鉄筋の押し出しによって、梁を有しない側の接合部に直交筋に沿った縦ひび割れ等の損傷が生じる事が報告されている。本実験において、JRC接合部には縦ひび割れが見られなかった。しかし、**図11**に示すようにJPCでは $R=1/50 \sim 1/25$ にかけ

てより直交梁の主筋に沿った縦ひび割れが生じている。これにより、せん断ひび割れに縦ひび割れが加わって、JPCの接合部はコンクリートのひび割れが増加し、剥落したと思われる。

これらのことから、梁の降伏以降、JRCは早期の梁主筋の付着劣化により、接合部コンクリートの圧縮ストラットが形成され、数本のせん断ひび割れが生じたのに対し、JPCは梁主筋の定着が良いことで梁主筋が接合部せん断力を分散させ、接合部に多数の細かなひび割れが入った。すなわち、JPCのY方向接合部は、直交梁の拘束のない面で主方向のせん断力に直交梁の加力の影響が加わって、梁曲げ降伏後、せん断破壊したと考えられる。

4. まとめ

外部柱梁接合部を含むPCa造立体架構試験体に2方向加力実験を行った結果、以下の知見を得ることができた。

- (1) 梁降伏 ($R=1/50$) までのPCa造とRC造の立体骨組み全体の変形性状は、ほぼ同様である。
- (2) 2方向加力を受ける立体骨組みのうち、ト型方向で直交梁の取り付けられない接合部では、損傷状況がRC造とPCa造で梁下端筋の定着状況等の影響により異なるが、梁降伏 ($R=1/50$) までの履歴性状は、ほぼ同様であった。
- (3) 大変形時 ($R=1/25$ 以降) におけるPCa造の接合部の損傷は、直交梁の拘束のない面で、主方向のせん断力に加え、2方向加力により直交梁の主筋が接合部のコンクリートを押し出し、破壊が進行する。

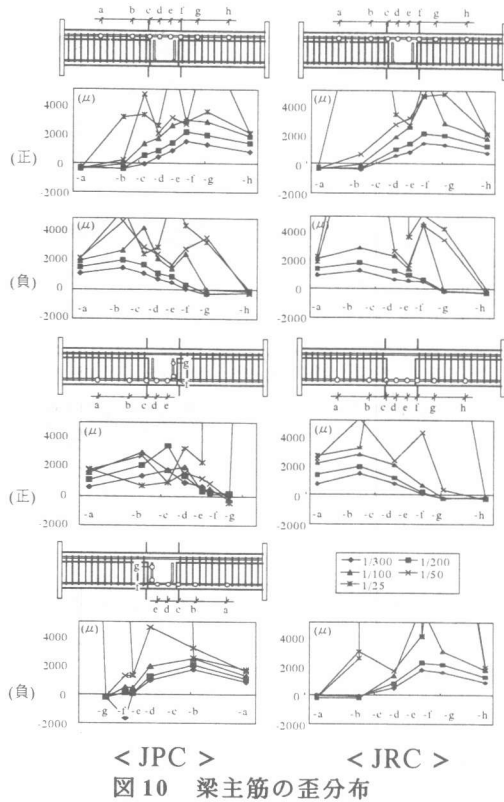


図10 梁主筋の歪分布

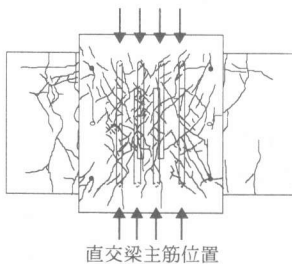


図11 Y方向接合部(JPC)の破壊状況

[謝辞] 本研究を行うにあたり、松尾建設(株)石橋靖夫、東京電機大学卒研究生 小室直人、重松宏治の各氏の協力を得ました。ここに謝意を表します。

[参考文献] 1) 藤井栄、森田司郎: 二方向荷重を受けるPC外部柱・梁接合部の挙動、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.9, No.2, pp.181~186, 1987

2) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針(案)・同解説, 1990.11

3) 林和也ほか: RC造外部柱・梁接合部内折り曲げ梁主筋の定着補強に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.2, pp.657~662, 1990