

# 論文 PCa 梁主筋の定着方法が接合部の耐力および変形に与える影響

松本 智夫\*・西原 寛\*・鈴木 英之\*・田畑 卓\*

**要旨：**プレキャスト柱および梁で構成される十字形架構の構造性能について検証した。実験では、梁曲げ降伏型および接合部せん断破壊型の破壊モードを想定し、梁主筋の接合部での定着および接合方法を折曲げ定着、機械式継手、重ね継手の3通りとした。その結果、梁主筋の定着方法を3種類に変えても、耐力特性については通し配筋とした場合と大きな相異はみられなかったが、履歴および変形特性からは機械式継手とした場合が最も有利であり、梁端で重ね継手した場合には、付着指標を設定する際に、通し配筋よりも接合部内の付着劣化が早期に起こることを考慮する必要性が示唆された。

**キーワード：**梁主筋, 定着方法, プレキャスト部材, 接合部, 耐力, 変形

## 1. はじめに

PCa 梁の主筋定着方法は、一般的に上端筋を通し配筋とし、下端筋についてはハーフPCa 梁の場合には接合部内で折曲げ定着、薄肉PCa 梁の場合には梁端部位置での重ね継手（いも継手）としている例が多い[1]。本実験においては、さらに梁主筋を上、下端とも接合部内で機械式継手とした場合を含め、梁端部の曲げ降伏型と接合部せん断破壊型の試験体について、PCa 梁主筋の定着方法の相異が、架構接合部の耐力および変形に与える影響を比較、検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体および使用材料

試験体は表-1に示す7体であり、想定される破壊モードにより、梁曲げ降伏型（Bシリーズ）4体と接合部せん断破壊型（Jシリーズ）3体とに大別される。試験体の形状を図-1に示す。いずれもスパン2.6m、層高1.8mの十字形柱梁接合部試験体であり、一体打ちの試験体2体以外は、PCa 梁とPCa 柱によって部材構成され、接合部のみ場所打ちコンクリートとしている。

Bシリーズ試験体の内訳は、梁上、下端とも通し配筋かつ一体打ちの試験体：M-B以外に、梁主筋を上、下端ともに接合部内でモルタル充填式の機械式継手により接合した試験体：H-B、梁上端主筋は通し配筋とし、下端主筋を接合部内で90度曲げ上げ定着（折曲げ内法直径： $4d_b$ 、水平投影長さ： $20.75d_b$ 、全定着長さ： $36d_b$ 、 $d_b$ :主筋径）した試験体：P I-B および梁主筋を上、下端とも梁端部位置で重ね継手（継手長さ： $45d_b$ ）した試験体：P II-Bの4体からなる。Jシリーズ試験体については、一体打ちの試験体：M-J、Bシリーズと同様に機械式継手を用いた試験体：H-Jおよび梁下端主筋を折曲げ定着（折曲げ内法直径： $5d_b$ 、水平投影長さ： $18.05d_b$ 、全定着長さ： $32d_b$ ）した試験体：P I-Jの3体である。図-2に接合部の詳細を示す。

なお、表-1には、試験体に想定した破壊モードを確認するため、梁部材の曲げ終局強度（略算式）およびせん断強度（荒川min.式）、接合部のせん断強度について、各々を比較して示した。また、終局強度型指針[2]による接合部内の梁主筋付着指標： $\mu$ の値も併せて示した。

使用材料の試験結果を表-2に示す。Bシリーズ試験体の主筋は全てD16、SD345を用い、Jシ

\* 安藤建設(株)技術研究所（正会員）

ーズのそれは全て降伏点が685N/mm<sup>2</sup>以上(SD685と表示)のD19とした。また、接合部横補強筋は、全試験体共通に柱部分と同じくD6□-@50 ( $p_{jh}=0.32\%$ )とした。試験体は、柱主筋を全て通し配筋とし、コンクリートは横打ちにより製作した。P C a 梁部材の柱へのかかり代は18mmとし、小口にコッターは付けなかった。

## 2.2 加力および測定方法

加力については、まず上、下柱の反曲点位置でそれぞれローラ、ピン支持された試験体の上柱頂部に、常に一定の軸方向力 ( $N=848\text{kN}$ ) を作用させた。次に、左、右の梁の反曲点位置において、各々の梁の全体変形が逆対称になるように変位を制御しながら、正負交番の繰返し载荷を行った。加力の履歴は、層間変形角： $R = \pm 1/500(\text{rad.})$ 、 $\pm 1/300$ で各1回、 $\pm 1/200$ 、 $\pm 1/100$ 、 $\pm 1/67$ 、 $\pm 1/50$ 、 $\pm 1/33$ で各2回、最後に $+1/20$ まで行って終了とした。

測定については、上、下柱の反曲点位置でそれぞれピン、ローラ支持として取付けた計測フレームから、梁の全体変形、接合部のせん断変形、梁端部のずれと回転変形をそれぞれ測定した。また、柱、梁の主筋およびせん断補強筋についても、主要な箇所でのひずみ測定を行った。

表-1 試験体の構造諸元一覧

(単位:mm)

試験体	M-B	H-B	P I-B	P II-B	M-J	H-J	P I-J	
柱	主筋, $p_g$ 帯筋, $p_w$	12-D16(SD345), 1.49% 2-D6@50(SD295A), 0.32%				12-D19(SD685), 2.15%		
梁	主筋, $p_l$ あばら筋, $p_w$	上, 下端共: 4-D16(SD345), 0.82% 2-D6@50(SD295A), 0.43%				上, 下端共: 4-D19(SD685), 1.18% 2-S8@50, 0.66%		
	主筋の定着法	上, 下端共: 通し配筋	上, 下端共: 機械式継手	上端:通し配筋 下端:曲げ上げ	上, 下端共: 端部重ね継手	上, 下端共: 通し配筋	上, 下端共: 機械式継手	上端:通し配筋 下端:曲げ上げ
共通要因	スパン： $L=2600$ ，層高： $H=1800$ ，断面：柱 $b_c \times D_c=400 \times 400$ ，梁 $b_b \times D_b=300 \times 360$ シャースパン比：柱 $M/(Q \cdot D_c)=1.80$ ，梁 $M/(Q \cdot D_b)=3.06$ 柱軸力： $N=0.2F_c \cdot b_c \cdot D_c=848\text{kN}$ ，コンクリート設計基準強度： $F_c=26.5\text{N/mm}^2$ 接合部横補強筋：2-D6@50, $p_{jh}=0.32\%$ ，プレキャスト梁のかかり代：18, S8:高強度せん断補強筋							
想定破壊モード	梁曲げ降伏型				接合部せん断破壊型			
$BQ_{su}/BQ_{mu}^*$	1.96	←	←	←	1.25	←	←	
$fQ_{mu}/V_{ju}^{**}$	0.37	0.41	←	0.46	0.99	1.05	←	
$\mu^{***}$	8.88	9.37	←	←	18.74	19.29	←	

\* 梁部材の曲げ強度に対するせん断強度の比 (計算値)

\*\* 接合部のせん断強度に対する梁部材の曲げ終局時の接合部せん断力の比 (計算値)， $V_{ju}=0.3\sigma_B \cdot b_j \cdot D_j$

\*\*\*  $\mu = d_b \cdot \sigma_y / (D_c \cdot \sqrt{\sigma_B})$ ：付着指標， $\sigma_B$ ：接合部コンクリート圧縮強度 (表-2の実験値)，式・記号は参考文献[2]による。

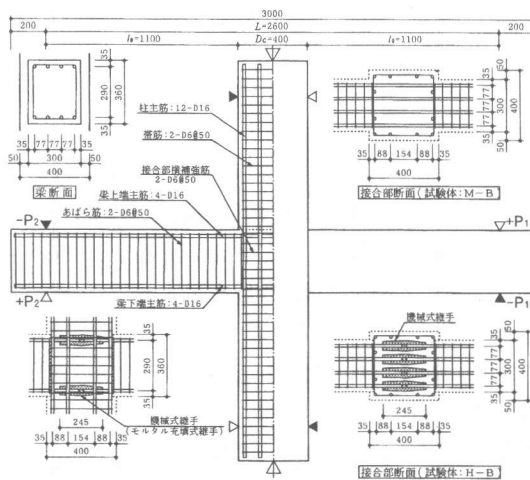


図-1 試験体の形状および配筋

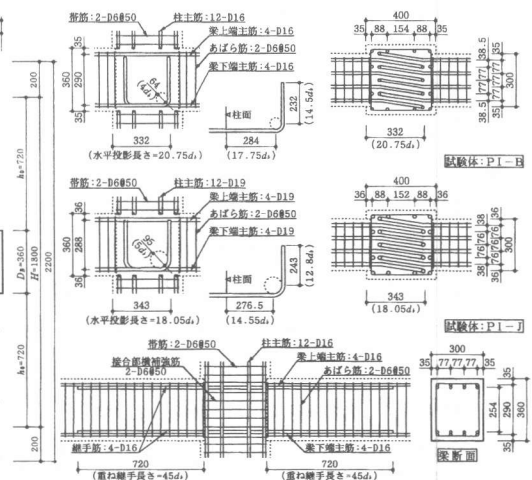


図-2 柱梁接合部の詳細

### 3. 実験結果の概要

#### 3.1 接合部のひびわれおよび最大強度

図-3に全試験体の最終ひびわれ状況を示す。また、表-3に接合部のひびわれ時および最大荷重時の接合部平均せん断応力度を示す。

これらの図表によれば、Bシリーズでは、試験体P II-Bの接合部せん断ひびわれの発現が、他の試験体に比べて遅くなっている。最大強度は、各試験体ともほぼ $R=1/33$ 以降に生じており、その時点の接合部平均せん断応力度を接合部のコンクリート圧縮強度で除した値 ( $\tau_{max}/\sigma_B$ ) で比較すれば、PCa試験体の方が一体打ちのM-Bよりもやや大きいといえる。試験体の最終破壊形式は、いずれも梁端部の曲げ破壊であると判断されるが、試験体P II-Bのひびわれ本数は他の試験体に比べて少なく、梁部材の接合端位置で柱面からの口開きが顕著になっていた。

一方、Jシリーズでは、接合部せん断ひびわれ強度は、一体打ちのM-JよりもPCa試験体の方が幾分大きい。最大強度は、いずれの試験体もほぼ $R=1/33$ で到達しており、 $\tau_{max}/\sigma_B$ の値は3体ともが0.27程度であった。最終的な破壊形式は、全試験体が接合部のせん断破壊であると判断されるが、P I-Jは定着破壊を伴った。

両シリーズとも、PCa梁主筋の定着方法の相異が、接合部耐力に与える影響は小さいと思われた。

#### 3.2 履歴性状

図-4に試験体の層せん断力-層間変位(Q- $\delta$ 関係)を例示する。ただし、Jシリーズは正側の包絡線のみとする。図中のQ $\mu$ は略算式による梁の曲げ終局強度、Q $\mu$ fは断面曲げ解析による最大強度を示している。

表-3からも分かるように、最大強度実験値は、試験体M-B、P I-BがともにQ $\mu$ の1割増し程

表-2 材料特性値 (単位:N/mm<sup>2</sup>)

a) 鉄筋	$\sigma_y$	$E_y(\mu)$	$\sigma_t$	$E_s$	伸び (%)
	主筋 D 19	693	3710	884	198
" D 16	403	2050	549	199	19
補強筋 S 8	1048*	6960*	1152	211	13
" D 6	410	2320	579	183	22

b) コンクリート	一体打ちの梁、下階柱および接合部 PCa梁, PCa柱			一体打ちの上階柱 PCa試験体の接合部		
	$\sigma_B$	$E_c$	$ft'$	$\sigma_B$	$E_c$	$ft'$
試験体						
Bシリーズ	33.6	27.9	3.35	30.2	26.6	2.89
Jシリーズ	31.5	27.4	2.89	29.7	25.9	3.03
グラウト	93.6	44.5	—	* 0.2%オフセットポイント		

$\sigma_y$ : 降伏強度,  $E_y$ : 降伏歪,  $\sigma_t$ : 引張強度,  $E_s$ : ヤング率 ( $\times 1000$ )  
 $\sigma_B$ : 圧縮強度,  $E_c$ : ヤング率 ( $\times 1000$ ),  $ft'$ : 引張強度

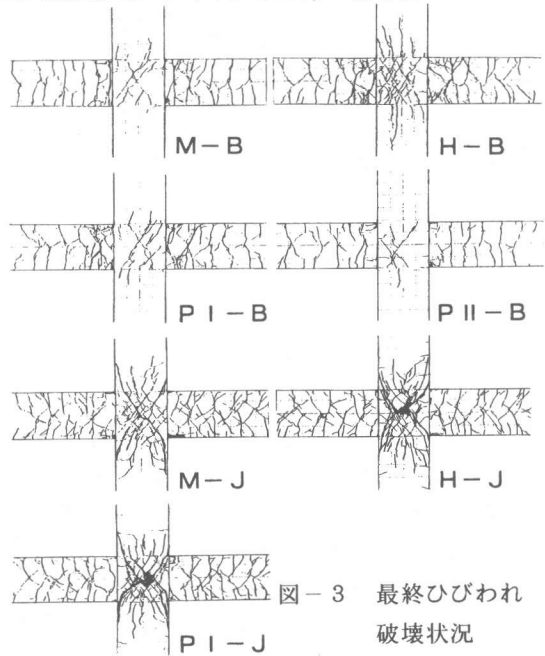


図-3 最終ひびわれ破壊状況

表-3 実験結果一覧 (正加力時)

試験体		$fT_{sc}$	$Q_{max}$	$fT_{max}$	試験体		$fT_{sc}$	$Q_{max}$	$fT_{max}$
		M-B	実 (R)	4.09 (5.06)			136.5 (29.79)	4.15 0.124*	M-J
	計	4.88	123.3	—		計	4.77	—	7.94
	実/計	0.84	1.11	—		実/計	1.00	—	1.07
H-B	実 (R)	4.16 (4.69)	149.3 (50.47)	4.53 0.150*	H-J	実 (R)	4.98 (5.08)	266.6 (29.89)	8.17 0.275*
	計	4.71	123.3	—		計	4.68	—	7.94
	実/計	0.88	1.21	—		実/計	1.06	—	1.03
P I-B	実 (R)	4.01 (5.02)	136.0 (29.78)	4.13 0.137*	P I-J	実 (R)	4.83 (5.12)	260.8 (29.86)	7.99 0.269*
	計	4.71	123.3	—		計	4.68	—	7.94
	実/計	0.85	1.10	—		実/計	1.03	—	1.01
P II-B	実 (R)	4.97 (10.00)	136.0 (50.50)	4.85 0.161*					
	計	4.71	116.4	—					
	実/計	1.06	1.17	—					

$fT_{sc}$ : 接合部せん断ひびわれ時,  $fT_{sc}$  (計) =  $1.6\sqrt{\sigma_B} \cdot \sqrt{1 + \sigma_0} / (1.6\sqrt{\sigma_B})$  [kgf/cm<sup>2</sup>]

ただし、接合部有効せいは柱応力間距離とし、有効幅は柱幅とする。

$Q_{max}$  ( $fT_{max}$ ): 最大荷重時、(Bシリーズ)  $Q_{max}$  (計) =  $0.9a_1 \cdot \sigma_y \cdot d / l_0 \cdot L / H$

(Jシリーズ)  $fT_{max}$  (計) =  $0.9 \cdot 7/8 \cdot (95.1 + 0.5 \rho_{jh} \cdot jh \sigma_y)$  [kgf/cm<sup>2</sup>]

\* 最大荷重時の接合部平均せん断応力度と接合部コンクリート圧縮強度との比

ただし、この場合の接合部有効せいは柱せいと、有効幅は梁幅に柱の協力幅を加えた値

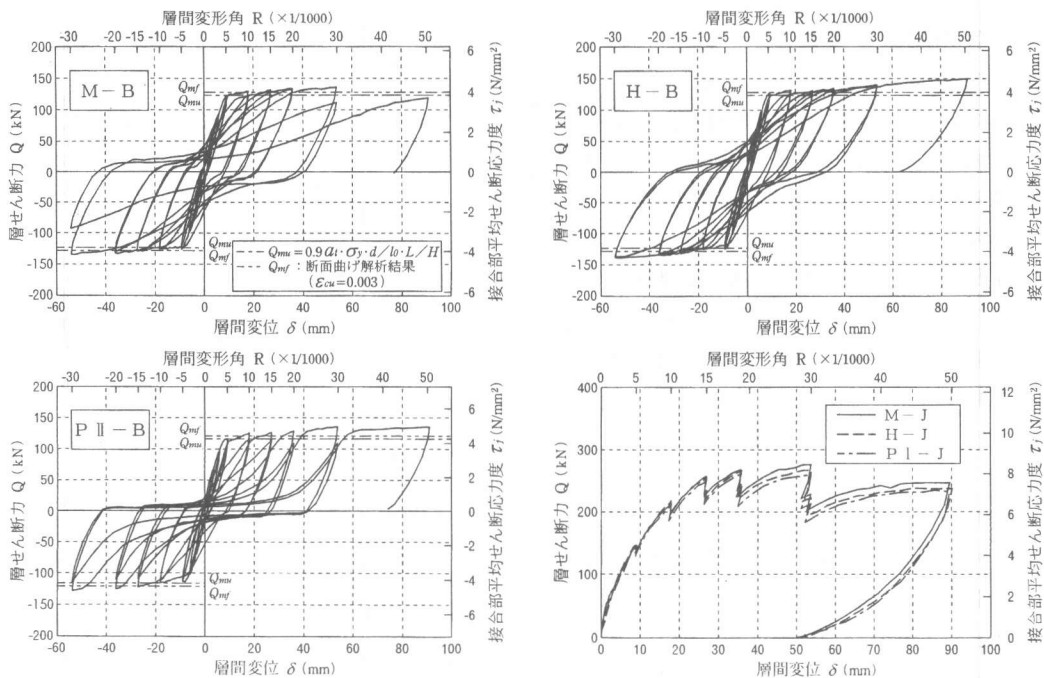


図-4 層せん断力-層間変位 (Q-δ) 関係

度であるのに対して、H-BおよびP II-Bは、 $Q_{mu}$ に対する比がそれぞれ1.21および1.17と、最終加力時まで耐力は上昇続けた。いま、左、右の梁の加力点での変位の絶対値が同一となるように変位制御による加力を行っていることから、H-BおよびP II-Bでは、継手を設けた主筋および重ね継手した継手筋が、梁端部付近で局所的にひずみ硬化域に達する状態になったことで、最終まで耐力が漸増したと考えられる。

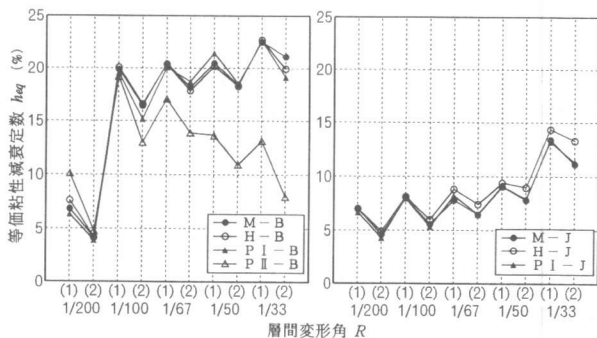


図-5 等価粘性減衰定数の比較

図-5にR=1/33までの履歴ループについて、等価粘性減衰定数( $h_{v,q}$ )をシリーズ別に示した。Bシリーズについては、いずれの試験体も終局強度型指針[2]の付着劣化の限界条件とされる「R=1/50での $h_{v,q}=0.1$ 」を確保できている。表-1に示す付着指標： $\mu$ からみると、試験体M-Bに比べ接合部の $\sigma_B$ が低い分、他の3体の試験体の $\mu$ の値は若干大きくなっている。いま、試験体H-B、P II-Bでは、M-Bよりも耐力上昇の割合が大きいため、接合部内鉄筋の付着状態は、通し配筋のM-Bよりも厳しくなっていることが予想される。しかしながら、試験体H-Bの $h_{v,q}$ は、R=1/33までM-Bとほとんど変わらないことから、本実験の接合部内での梁主筋の機械式継手は、履歴性状からは通し配筋と同等以上の性能を有すると判断される。これに対して、梁端で重ね継手したP II-Bでは、試験体の耐力が上昇したことにより、実質的な $\mu$ についてはさらに大きくなっていると考えられ、接合部内の継手筋の付着劣化が早まったと思われる。従って、R=1/67の繰返し加力時からは、特に復元力特性がエネルギー吸収量の少ない逆S字形の履歴

形状を示し、 $h_{0.4}$ は漸減した。

一方、Jシリーズでは、 $R=1/50$ まで3体とも $h_{0.4}$ は10%を下回っていたが、3体のうちでは、機械式継手の試験体H-Jの復元力特性が、他の2体に比べ若干高いエネルギー吸収能を示した。

#### 4. 変形成分にみるPCa梁主筋の定着方法の影響

図-6は、Jシリーズの試験体について、柱、梁、接合部の変形成分の推移を示した。Bシリーズのそれは、4体とも最終加力時まで梁部材のみの変形が90%以上を占めるので図示を割愛した。図-6によれば、試験体M-J、H-Jの各部材の変形成分の割合は、おおむね同様に推移していることから、梁主筋を接合部内で機械式継手したことによる変形成分への影響はほとんど認められない。これに対して、試験体P I-Jでは、一見すると柱部材の変形成分は他の2体と同程度で、接合部の変形成分は大変形時でも小さく、その分梁部材の変形成分が大きくなっているように見受けられる。そこで、Jシリーズ試験体の接合部の変形図を重ねて描くと図-7のようになる。 $R=1/100$ では、3体の変形図にほとんど差異はないが、最大荷重時の $R=1/33$ では、試験体P I-Jの接合部は、上端に対して折曲げ筋の下端が左右に拡がるおおよそ台形状に変形している。これは、接合部内の定着破壊の進行で、逆方向の荷重によっても接合部のひびわれが閉じることなくせん断変形が残留してしまうため、図-7にみるような接合部の変形状態となったと考えられる。

一方、Bシリーズ試験体とJシリーズのP I-Jについては、図-8に示す方法により、梁部材の変形を左右の梁端部の拔出しとずれおよび端部以外の区間の変形とに分けて、それぞれの割合の推移を示した。試験体M-Bを基準にして考えると、H-Bの梁端での拔出し量は、左右梁端部とも大変形時になるとM-Bに比べて明らかに小さい。これは、H-Bの機械式継手のある接合部内での変形は小さく、梁の加力点側では大きな変形を示すことによる。これとは対照的に、試験体P II-Bでは、接合部内の継手筋は早期に付着劣化を起こし、また、端部降伏後の降伏域は接合部内へと進展する。このため、 $R=1/100$ 以降は梁部材の変形の大部分が、左右梁端部での接合部からの拔出し変形に依存しており、履歴ループにもスリップ性状となって現れている。

梁下端主筋を折曲げ定着とした試験体P I-BおよびP I-Jについては、層間変形角が大きい

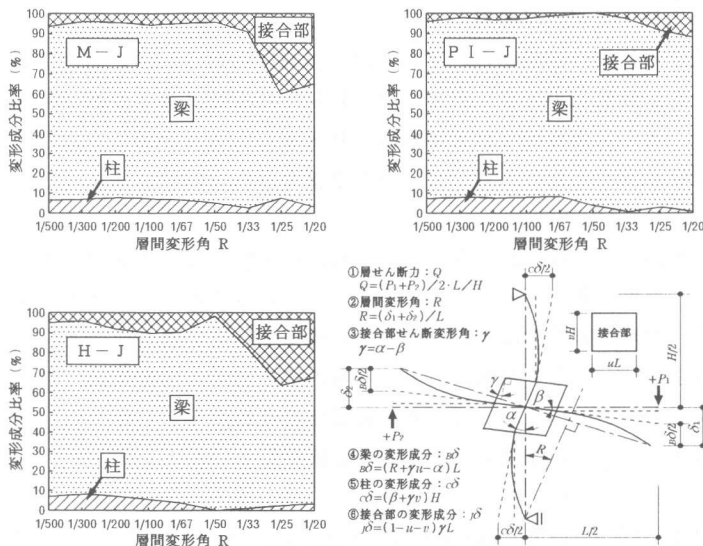


図-6 各部材の変形成分の割合 (Jシリーズ)

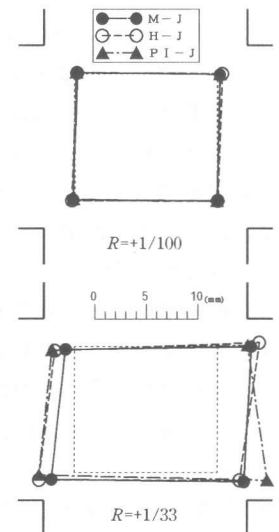


図-7 接合部の変形図

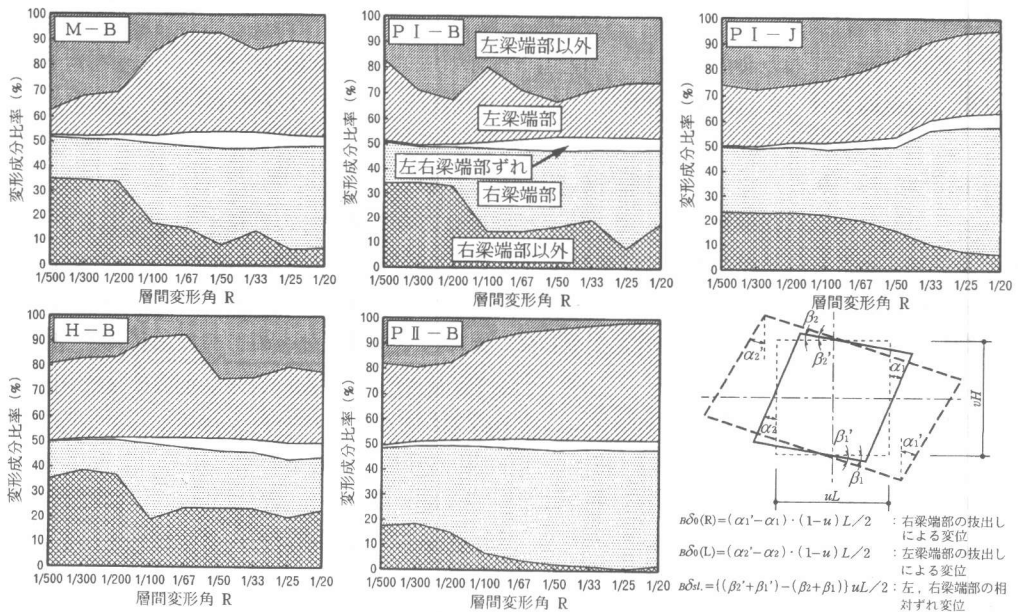


図-8 梁部材の各変形成分の割合

くなるに従い、下端引張側での折曲げ部の定着が、左梁端部での抜出しを抑止していることが窺える。ただし、P I-Jの左梁端部の抜出し量が漸増しているのは、徐々に定着破壊が進行していることによると思われる。

## 5. まとめ

PC a 梁主筋の定着方法を要因とした内柱梁接合部の加力実験から以下の知見が得られた。

1) 梁曲げ降伏型の試験体の耐力に関しては、梁下端主筋を折曲げ定着としたPC a 試験体は、上、下端とも通し配筋とした一体打ち試験体と同程度であったが、梁主筋の上、下端とも機械式継手または上、下端とも端部重ね継手としたPC a 試験体では、梁主筋または継手筋のひずみが局所的に増大することで、最終加力時まで耐力は漸増していた。

2) 履歴性状については、梁曲げ降伏型の試験体のいずれもが、層間変形角1/50のときに等価粘性減衰定数0.1を確保できていた。最終加力時まで耐力が上昇し続けた機械式継手を有する試験体と重ね継手とした試験体では、ともに実質的な付着指標はより大きくなっていることになるが、前者は一体打ちと同様の履歴性状を示したのに対して、後者は接合部内での付着の劣化が顕著で履歴形状も逆S字形を示した。

3) 接合部せん断破壊型の試験体については、接合部の平均せん断応力度の最大値をコンクリート圧縮強度で除した値は、3体とも梁主筋の定着方法によらず0.27程度であった。また、履歴性状からは、機械式継手とした場合に等価粘性減衰定数は幾分大きくなっていた。

4) 梁主筋を接合部で機械式継手としたPC a 試験体の梁端からの抜出しによる変形は、通し配筋かつ一体打ちとした試験体よりも小さい。これに対して、梁端部で重ね継手としたPC a 試験体では、梁部材の変形の大部分は梁端からの抜出しによる変形に依存していた。

## 参考文献

- [1]例えば、日本コンクリート工学協会:コンクリート工学, 特集°レキャスト化の現状と将来, Vol. 30, No. 11, 1992. 11
- [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・同解説, 7章, pp. 151-169, 1990. 11