

論文

[2110] プレキャスト鉄筋コンクリート造柱部材に関する実験的研究

美原義徳*1・松森泰造*2・小谷俊介*3・青山博之*4

1. 目的

鉄筋コンクリート造建物の現場施工の省力化及び施工性の向上等の理由から、現在プレキャスト(以下、PCa)工法化への要求が高まっている。このため著者らは、特にスリーブ継手をいり水平面で接合するPCa柱部材を対象に[1]において既往の実験結果の検討を行なった。その結果、種々の軸力レベルでの接合面のすべり、目開き及び継手部近傍の曲げ変形、せん断変形分布等のデータが詳細に述べられていないため、既往の一体打ち柱部材の設計式との適合性の検討のみとなり、PCa部材独自の設計法を考察するまでには至らなかった。

そこで、本研究では上述したPCa部材独自の設計法の基礎資料となるべく、危険断面で水平接合するPCa柱部材6体の曲げせん断実験を行ない、接合面及び継手部の存在が部材全体に及ぼす影響の検討およびPCa部(接合面から部材中央までの領域)とRC部(接合面のない端部から部材中央までの領域)の比較、考察を行なった。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は、曲げ降伏前せん断破壊するもの(Sシリーズ)と曲げ降伏後せん断破壊するもの(Bシリーズ)それぞれ3体の計6体を計画した。断面はすべて30×30cmで、シリーズごとに軸力比を0.2、0.4、0.6(負側0)の3種類設定した。代表的な試験体の形状を図1に、試験体諸元を表1に示す。

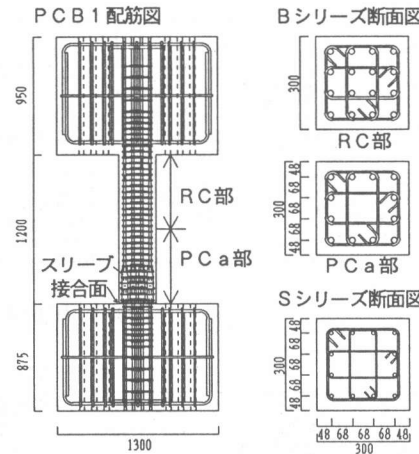


図1. 試験体形状

表2. 材料特性

(a) コンクリート, 敷モルタル, グラウト材

ID	コンクリート		敷モルタル		グラウト材
	c σ_b	E _c	w σ_b	$\sigma\sigma_b$	$\sigma\sigma_b$
PCS1	250.6	2.00×10 ⁶	443.3	750.0	750.0
PCS2	254.2	2.02×10 ⁶	534.8	769.7	769.7
PCS3	259.6	2.06×10 ⁶	441.0	799.3	799.3
PCB1	301.6	2.08×10 ⁶	607.0	815.4	815.4
PCB2	323.6	2.11×10 ⁶	592.0	853.8	853.8
PCB3	326.3	2.13×10 ⁶	608.5	875.7	875.7

c σ_b , w σ_b , $\sigma\sigma_b$: 加力時強度 [kgf/cm²]
E_c: 1/3割線弾性係数 [kgf/cm²]

(b) 鉄筋

	σ_v	E _s
D13	9060	1.74×10 ⁶
D19*1	4360	1.91×10 ⁶
D19*2	3528	1.76×10 ⁶
$\phi 6^{*3}$	4337	2.04×10 ⁶
$\phi 6^{*4}$	5313	2.16×10 ⁶
$\phi 4$	4978	2.16×10 ⁶

σ_v : 降伏点 [kgf/cm²]
E_s: 弾性係数 [kgf/cm²]
*1: 主筋, *2: RC部補強用
*3: 外周筋, *4: 中子筋

使用した鉄筋、コンクリート、敷モルタルおよびグラウト材の材料特性を表2に示す。鉄筋で明確な降伏棚が存在しないものに関しては0.2%offset値を用い、コンクリート、敷モルタルおよびグラウト材の強度は加力前後に行なった材料試験の結果から直線補間して推定した。敷モルタルは施工性を考慮して危険断面から10mmの区間とした。

表1. 試験体諸元

ID	軸力比	M/QD	主筋配筋	RC部補強用配筋	横補強筋配筋	P _w [%]
PCS1	0.19	1.5	12-D13	—	4- $\phi 6$, $\phi 4$ @58	0.471
PCS2	0.38				4- $\phi 6$, $\phi 4$ @41	0.667
PCS3	0.56, 0				4- $\phi 6$, $\phi 4$ @41	0.667
PCB1	0.18	2.0	12-D19	4-D19	4- $\phi 6$ @46	0.819
PCB2	0.33				4- $\phi 6$ @40	0.942
PCB3	0.49, 0				4- $\phi 6$ @40	0.942

PCa部の設計は、主として[2]に基づき行なった。Sシリーズは、せん断耐力が鉄筋降伏時曲げ耐力の0.7~0.8倍になるように設計し、Bシリーズは、塑性回転角約1/100においてせん断耐力

*1鹿島建設(株) A/E総事業本部、工修 (正会員)
*2東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 (正会員)
*3東京大学助教授 工学部建築学科、Ph. D、工博 (正会員)
*4日本大学教授 総合科学研究所、工博 (正会員)

と曲げ降伏時耐力が等しくなるように設計した。どちらのシリーズとも曲げ付着強度が曲げ解析により求めた付着応力度を上回るように付着設計した。

RC部の設計は、PCa部のスリーブの存在を考慮して行なった。Sシリーズでは、スリーブによるせん断耐力上昇分が不明のため、PCa部と同配筋とし、Bシリーズでは、[3]を参考にスリーブによる曲げ耐力の上昇分を軸力比に関係なく約1.15倍として配筋を決めた。

2.2 加力方法

加力装置を図2に示す。加力には、東京大学工学部総合試験所大型構造物試験室の2000tonf大型構造物試験機及び7台のジャッキを用いて定軸力のもとで変形逆対称、正負交番繰り返し水平加力を行なった。すなわち、2000tonf試験機で一定軸力をかけた状態で、試験体の上スタブと下スタブの平行を維持するように上梁両側の6個のジャッキ(圧縮用2個、引張り用4個)を制御しながら、試験部分の中央高さの水平ジャッキで加力を行なった。

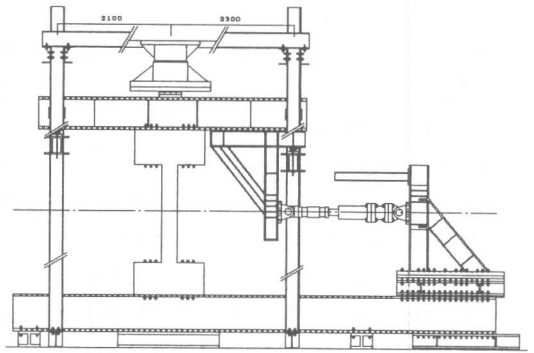


図2. 加力装置

した。S、Bシリーズの加力履歴を図

3に示す。ただし、PCB1では最初の5サイクルまでが、部材角 $1/533\text{rad}$ 、で1サイクル、 $1/266\text{rad}$ 、 $1/133\text{rad}$ 、でそれぞれ2サイクルとなっている。加力の際PCa部がRC部より厳しい条件で加力したいため、 $P-\Delta$ 効果により柱脚に比べて入力モーメントが厳しくなる柱頭をPCa部とするように試験体の天地を逆転させている。

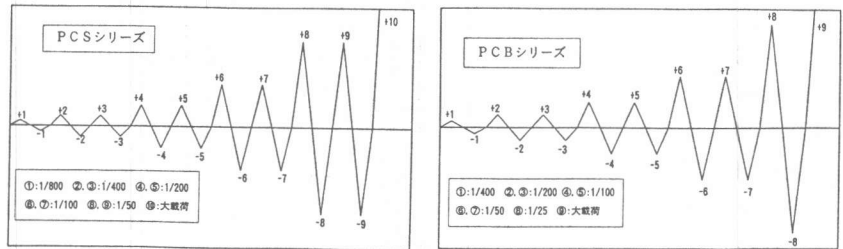


図3. 加力履歴

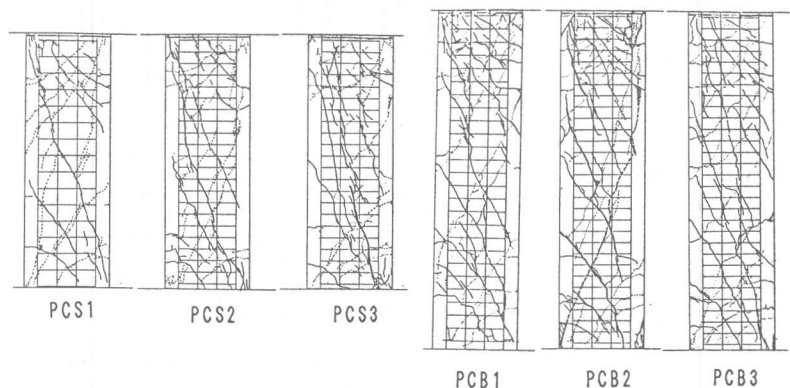


図4. 破壊状況

2.3 測定方法

柱にかかる水平力、軸力をロードセルにより、柱の

層間変位、軸変位、曲率分布、せん断変形分布、危険断面における目開き及びすべり、主筋の相対すべりを電気式変位計により測定した。また、箔ひずみゲージによって主としてヒンジ領域の主筋、補強筋の歪を測定した。また、試験体中央に設けたボルトとの相対変位を求める事で、全

体変位を前述のPCa部とRC部の変位に分離した。

3. 実験結果及び検討

3.1 破壊性状

各試験体の最大変形時の破壊状況を図4に示す。Sシリーズにおいては、接合面ひび割れ、曲げひび割れ及び曲げせん断ひび割れ発生後、主筋に沿うひび割れが生じ、それを結ぶように材長に沿う斜めせん断ひび割れが進展し、その後せん断ひびわれ幅の拡大および軸力比の高いPCS2、PCS3においては圧縮側端部に圧壊が生じた。また、軸力比が高くなるにつれ、主としてせん断ひび割れの向きが材軸に沿うかたちとなった。一方、Bシリーズでは、主筋に沿うひび割れの発生後、せん断ひび割れが材長に沿うものではなく圧縮側端部から部材成の1.5倍程度の傾きを有するせん断ひび割れが顕著に進展し、その後すべての試験体において圧壊現象が見られた。このシリーズにおいてもせん断ひび割れは、軸力比が高くなるにつれ材軸に沿うかたちとなった。また、接合面の目開き及びすべりは、Sシリーズと比較すると全般的にBシリーズの方が大きな値を示しており、特に軸力比の低いPCB1、PCB3の負側で顕著に見られた。

3.2 復元力特性

P-Δ効果とテフロン支承の摩擦を考慮した各試験体のPCa部の水平力-水平変形角関係を図5に、諸発生現象荷重及び剛性の計算値と理論値の比較を表3に示す。表中の K_e は弾性剛性、 K_y は降伏点剛性、 R_{max} は最大耐力時変形角、 R_u は最大耐力の80%までの荷重を保持できる点とした。図6には、降伏点剛性を山口式[4]によって算定し、コンクリートに修正KENT&PARKのモデルを用いて断面解析した際、鉄筋引張降伏時の耐力を実線で、圧縮縁歪度0.3%の時の耐力を一点鎖線で示し、曲げ降伏後のせん断強度を[2]により算

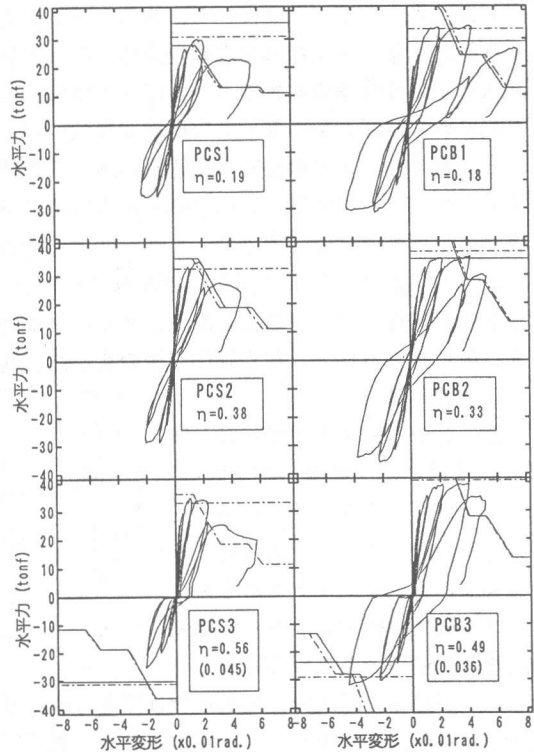


図5. 復元力特性

表3. 諸発生荷重と剛性

		K_e [tonf/cm]		K_y [tonf/cm]		R_{max} [rad]		R_u [rad]	
		exp	cal	exp	cal	exp	cal	exp	cal
		PCa部	196.3	370	—	51.2	0.898×10^{-2}	1.127×10^{-2}	
RC部	189.3	370	—	51.2	0.781×10^{-2}	0.979×10^{-2}			
PCS2	PCa部	365.0	374	—	58.4	0.861×10^{-2}	1.036×10^{-2}		
RC部	365.0	374	—	58.4	0.811×10^{-2}	0.956×10^{-2}			
PCS3	PCa部	403.1	380	—	64.6	$*0.517 \times 10^{-2}$	1.104×10^{-2}		
RC部	308.2	380	—	64.6	$*0.465 \times 10^{-2}$	0.886×10^{-2}			
PCB1	PCa部	89.5	206	22.79	28.4	2.142×10^{-2}	2.234×10^{-2}		
RC部	124.4	206	21.25	26.8	1.705×10^{-2}	1.789×10^{-2}			
PCB2	PCa部	80.9	208	22.67	31.0	2.100×10^{-2}	2.660×10^{-2}		
RC部	116.0	208	21.54	29.6	1.913×10^{-2}	3.604×10^{-2}			
PCB3	PCa部	164.4	208	21.11	33.8	$*1.927 \times 10^{-2}$	2.589×10^{-2}		
RC部	223.2	210	21.11	32.4	$*1.920 \times 10^{-2}$	3.416×10^{-2}			

		Q_{jc}	Q_{sc} [tonf]		Q_y [tonf]		Q_u [tonf]		Q_{max} [tonf]	Q_{su} [tonf]
		[tonf]	exp	cal	exp	cal	exp	cal		
PCS1	PCa部	10.86	14.11	8.06	23.17	12.5	N	35.8	N	31.1
	RC部	—	14.11	8.06	23.17	12.5	N	35.8	N	31.1
PCS2	PCa部	10.04	19.24	13.0	31.47	15.6	N	42.8	32.41	32.4
	RC部	—	10.04	13.0	24.74	15.6	N	42.8	32.41	32.4
PCS3	PCa部	9.36	*	17.8	25.57	18.8	N	48.0	33.27	33.1
	RC部	—	16.32	17.8	32.71	18.8	N	48.0	33.27	33.1
PCS3	PCa部	3.90	*	4.41	18.85	10.3	N	30.3	19.31	31.3
	RC部	—	3.90	4.41	18.85	10.3	N	30.3	19.31	31.3
PCB1	PCa部	10.39	6.18	7.07	16.16	11.7	30.90	29.0	32.87	33.4
	RC部	—	7.85	7.07	18.80	11.7	31.96	29.0	*	33.4
PCB2	PCa部	11.19	*	11.1	21.67	15.0	34.21	35.6	34.21	38.0
	RC部	—	6.66	11.1	19.77	15.0	34.69	35.6	25.78	38.0
PCB3	PCa部	15.44	*	15.2	28.37	18.4	38.18	41.6	35.32	40.7
	RC部	—	15.44	15.2	28.37	18.4	38.18	41.6	35.06	40.7
PCB3	PCa部	1.04	6.00	4.03	14.92	9.56	23.49	23.7	*	29.1
	RC部	—	4.10	4.03	14.92	9.56	19.93	23.7	32.03	29.1

Q_{jc} : 打継面ひび割れ, Q_{sc} : 曲げひび割れ, Q_{sc} : せん断ひび割れ, Q_y : 主筋引張降伏
 Q_u : 曲げ終局, Q_{max} : 最大耐力, Q_{su} : せん断耐力 (指針A法)
 exp: 実験値, cal: 計算値, N: 発生せず, *: 発生しているが数値なし

定した結果も合せて載せている。Bシリーズの方がSシリーズよりも靱性がよく、同一シリーズでは軸力比が大きくなるほど靱性が悪くなっていることが分る。Sシリーズでは、すべて主筋は降伏せず弾性範囲のままであり、PCS1が中央部のせん断ひび割れ、PCS2、PCS3は中央部せん断ひび割れ後の端部コンクリートの圧壊で最大耐力に達した。PCa部もRC部も同様な復元力であった。一方、Bシリーズでは主筋は圧縮降伏も引張降伏もしており、PCB3が圧縮降伏先行であったのに対しそれ以外では圧縮と引張りほとんど同時に降伏し最大耐力に達した。RC部の復元力は、主筋降伏までは同様な復元力であったが、RC部の補強を行なったため、降伏後、軸力比の低いPCB1及びPCB3の負側でRC部の変形が抑制されたのだが、軸力比が高いPCB2及びPCB3の正側ではPCa部よりも変形が進んだ。このことから、スリーブは高軸力になると曲げによる圧縮力をかなり負担でき、単に耐力だけではなく降伏以後の変形能も向上させることができると言えよう。

3.3 曲率分布

S、Bシリーズの中でPCS3、PCB3の材軸に沿う曲率分布を図6に示す。ただし、正サイクルのピーク時の値のみである。図で見られるようにS、Bシリーズともスリーブ位置での曲率は小さく、その区間は剛体のように振る舞っている

ことが分る。最大耐力付近までは端部に曲げ変形が集中する傾向を両シリーズとも示したが、最終的にはSシリーズが部材中央付近まで曲げ変形が分布したのに対し、Bシリーズは端部に集中する傾向が見られた。これは、Sシリーズでは部材を横断する大きなせん断ひび割れの開閉による見掛けの曲げ変形が部材中央において起こったものと思われる。

3.4 せん断変形角分布

両シリーズにおいて部材軸にそって計測したせん断変形角の分布を述べる。ただし、正サイクルのピーク時の値のみである。S、Bシリーズともほぼ同様な傾向を示したため、代表的な例として軸力比の差が大きいPCS1とPCS3のせん断変形分布の比較を行い、図7に

示す。計測範囲は、PCa部がスリーブ区間とその直下170mmの区間、RC部が端部から170mmまでの2区間である。ここで、Sシリーズを検討の対象としたのは、スリーブ部でのせん断変形には接合面の滑り量も含まれて計測されるが、Sシリーズでは滑り量が軸力比によってほとんど変わらず、極めて滑り量が小さかったためである。図をみると、軸力比の低いPCS1ではスリーブ部でのせん断変形が大きいのに対し、軸力比が高くなるPCS3ではスリーブ部での変形は軸力比によって抑えられ、最大耐力以後はRC部にせん断変形が集中している。また、スリーブの存在のためその直下でのせん断変形が集中するような現象は全般的に見られなかった。

3.5 主筋の滑り

各試験体の部材中央で主筋にボルトを溶接して、主筋とコンクリートの相対的な滑りを計測し、付着の指標とした。図8に、S、Bシリーズそれぞれの水平変形角と主筋の滑り関係を示す。各サイクル正側のピーク時だけの値を抽出し、滑りの方向はスリーブから抜け出る方向を正としてい

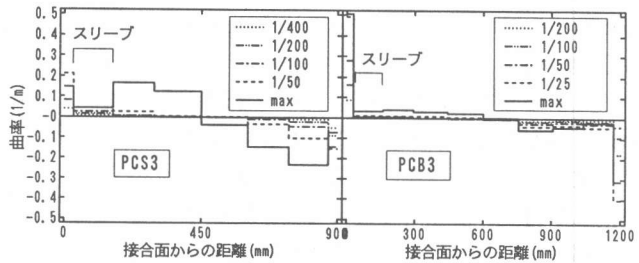


図6. 曲率分布

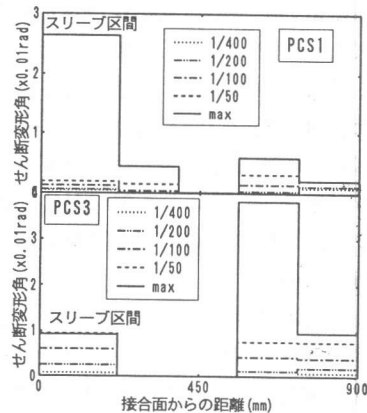


図7. せん断変形角分布

る。図中、シンボルの○は中間主筋、△は隅主筋を表す。図を見ると、どの試験体も水平変形角の増加とともに主筋の滑りは大きくなり、水平変形角1/100rad程度までは全ての試験体で主筋の滑り量はほぼ一定であるが、それ以後Sシリーズの方がBシリーズより滑りが大きくなり、付着が悪くなっていることが分る。また、Sシリーズでは軸力比が高くなるにつれ、付着性状が悪くなるが、軸力比がある値以上になると主筋の滑りに差は生じなくなっている。一方、Bシリーズでは、すべての試験体で主筋は圧縮側も引張り側も降伏したため、軸力比による相違はそれほど顕著には現れていないと言える。

3.6 接合面の目開き及び滑り

PCa部接合面の目開き-滑り関係を図9に示す。計測区間は接合面を含む30mmの区間であり、滑り変形は断面に沿い2点測定した中で引張り側のスタブとの相対的なずれであり、目開き変形は断面に沿い3点計測した中の引張り側のスタブとの開きである。目開きを求める際にはその区間の軸歪分を補正している。図は、各サイクル正側ピーク時での引張り側断面における目開きと滑り量を表している。SシリーズよりもBシリーズの方が滑り、目開きともに大きく、すべての軸力比でそのような現象が見られる。また、Sシリーズでは、軸力比に関係なく目開き及び滑り量がほぼ同じであり、最大耐力以後は逆に目開き、滑り量が減少している。これは、接合面以外の部分に変形が集中したことを示唆するものである。一方、Bシリーズでは、軸力比が小さくなるにつれ滑り量は大きくなっている。特にPCS1においては全体変形角1/50の時滑り変形がPCa部変形の約10%、1/25及び最大変形時で約5%を占めている。

3.7 接合面の設計式の検討

一般にPCa部材の水平接合部に用いられている設計式は、以下の式(1)[5]である。

$$Q = \mu (at \cdot \sigma_y + N) \quad \text{ここで、} Q_{\max} < Q \quad (1)$$

ただし、 $\mu = 0.7$ 、 at :引張鉄筋面積、 σ_y :主筋降伏点、 N :軸力、 Q_{\max} :最大荷重

今、実験時最大荷重を Q_{\max} として求めた μ_{\max} を表4に示す。ここで、 $\mu_{\max} < \mu (=0.7)$ となれば、滑り破壊を起こさないことになる。これを見ると、SシリーズとBシリーズとも指標 μ_{\max} にはほとんど相違がないため、両シリーズの滑りの違いを適切に表現しているとはいえない。そこで、図10に示すように部材内部で伝達されるコンクリートの圧縮力と接合面のなす角を θ とすると、

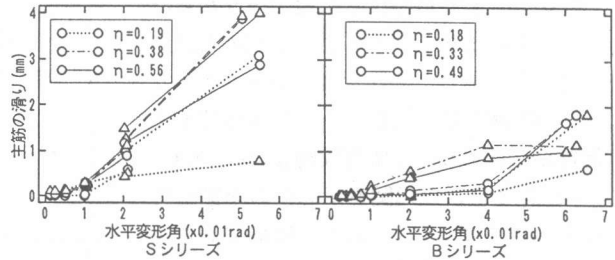


図8. 主筋の滑り

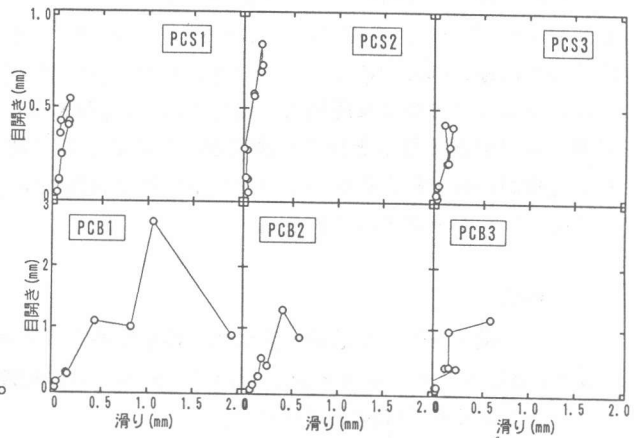


図9. 接合面の目開き-滑り

表4. 各試験体の μ_{\max}

ID	μ_{\max}	ID	μ_{\max}
PCS1	0.268	PCB1	0.281
PCS2	0.222	PCB2	0.213
PCS3(+)	0.173	PCB3(+)	0.179
PCS3(-)	0.319	PCB3(-)	0.374

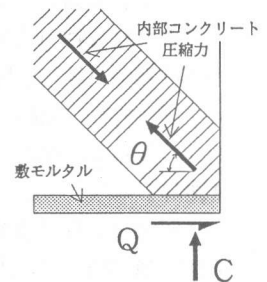


図10. PCa接合面の応力状態

接合面での摩擦係数 μ_s は以下の式(2)で表される。

$$\mu_s = Q / C = \cot \theta \quad (2)$$

ここで、接合面で滑りが生じないためには、 $\mu_s < \mu_{crit}$ を満たすことが必要である。ただし、 μ_{crit} は、コンクリート界面の摩擦係数で通常 0.6~0.8である。

そこで、主筋に貼付した歪ゲージからBi-Linear型の鉄筋モデルを仮定し求めた鉄筋の合力と、軸力との釣り合いからコンクリートの圧縮力Cを算出し、一方実験時せん断力をQとすることで実験時 μ_s を求めた。 μ_s と滑り量との相関を示したのが図11である。ここで、[2]のように横補強筋によるせん断伝達に主筋の付着が貢献しているとする。そのことを考慮して、図11を見る

とSシリーズでは μ_s の値が総じて小さい。これは、主筋の付着が喪失し、(2)式中の θ の大きな圧縮力が伝達されたためであり、一方、Bシリーズでは付着力がある程度せん断伝達に貢献したため、総じて θ の小さな圧縮力が伝達されて μ_s が大きくなっている。また、3.5でも述べたように軸力比が大きくなると付着の喪失が生じること等の理由から、 μ_s が小さくなっていく。つまり、付着が良好で軸力比が小さいPCB1やPCB3の負側の方が、PCS1やPCS3の負側よりも接合面に厳しい状況となるのである。

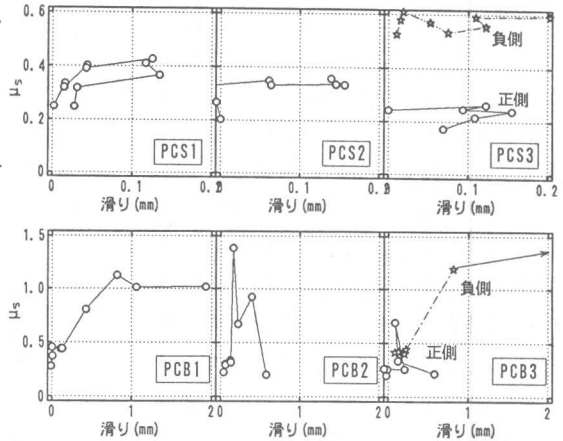


図11. μ_s -滑り関係

4. 結論

スリーブ継手を用いた危険断面に水平接合部を有する柱部材に関して得られた知見をまとめる。

- ①PCa部のスリーブによる曲げ耐力の上昇は1.15倍程度であるが、変形能に関しては軸力が高い方がよくなる傾向が見られた。
- ②曲率分布、せん断変形角分布より以下のことが分った。スリーブ部分は剛体変位をおこしやすく、高軸力になるに従いその部分でのせん断変形は抑えられる。つまり、軸力比 0.6程度までなら軸力比が大きくなるに従い、スリーブでのせん断力負担は大きくなると言える。
- ③付着が良好で、軸力比が低いものほど接合面での摩擦は厳しくなる。この点から関していえば、式(1)の設計コンセプトは適切ではない。つまり、主筋の付着を考慮して、接合面に入力される圧縮力の方向を決定し、接合面の設計を行なう必要がある。

【謝辞】

本研究は、建設省建築研究所日米共同研究 PRESSSの一部として実施された。試験体製作及び実験実施の際には、大成プレハブの吉田宏氏、浅川敏雄氏、平松道明氏、大成サービスの山田敏夫氏および大成建設技術研究所の方々、東京大学大型構造物試験室の技官の方々にお世話頂きました。ここに、厚く御礼申し上げます。

【参考文献】

- [1] 美原義徳、小谷俊介、青山博之：プレキャスト鉄筋コンクリート柱部材の設計式の検討、JCI、1992、pp499-504
- [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、1988
- [3] 清水洋、渡辺史夫他：プレキャストRC柱脚ヒンジ部の変形性状に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、1992. 8、pp983-986
- [4] 山口育雄、東端泰夫：鉄筋コンクリート短柱の崩壊防止に関する総合的研究(その48)初ひび割れ時及び降伏の剛性、日本建築学会大会学術講演梗概集、1977. 10、PP1507-1508
- [5] 日本建築学会：壁式プレキャスト鉄筋コンクリート造設計基準・同解説、1982