

# 論文 PCa 構造接合面におけるダウエル筋のせん断伝達に対する横補強筋効果に関する研究

大西 昭徳\*1・横谷 栄次\*2・謝 爽\*3

要旨：本論文は、接合面近傍に横補強筋を配して、その横補強筋が接合筋（ダウエル筋）に与えるせん断伝達能力を調べることを目的とし、横補強筋の位置、鉄筋径、接合幅、加力方法を変動要因として実験を行った。その結果、横補強筋を接合面に近づけるにつれて耐力は大きくなり、また、滑り変形が4mm時の耐力は、接合幅の影響が余り見受けられないが、最大耐力時では接合幅が大きくなるにつれて耐力が小さくなる傾向にあった。

キーワード：プレキャストコンクリート、横補強筋、接合幅、せん断伝達、ダウエル作用

## 1. はじめに

PCa 鉄筋コンクリート構造の接合部におけるせん断伝達については、コッターを持たないプレーンタイプの接合面のせん断伝達に大きく寄与するダウエル作用に関しては研究成果が乏しいと言える。また、ダウエル作用によるせん断伝達は、コンクリート圧縮強度、接合筋径及びその降伏強度、接合幅、横補強筋による接合筋周囲のコンクリートの拘束、接合筋による接合面の拘束（摩擦）、接合筋の縁明き、加力方法及び接合面滑り変形量等の多くの因子によって影響されると考えられる

そこで本研究では、横補強筋の位置、鉄筋径、又接合幅を変動要因として横補強筋が接合面のせん断伝達に与える影響に着目して研究を行った。以下にこの研究成果を報告する。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

本研究に用いた試験体は、架構式PCa鉄筋コンクリート造の接合部を局部的に想定したもので、その形状は図-1に示すように、長さ450mm、幅を225、

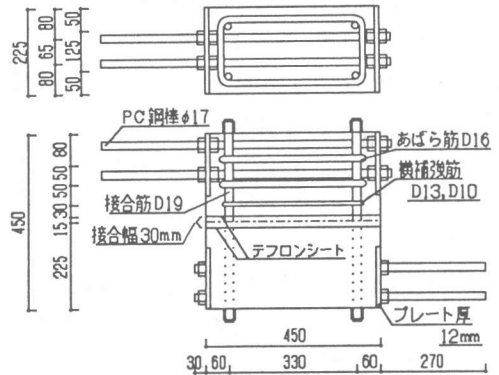


図-1 試験体形状(JPC30-10-30)

表-1 試験体一覧

試験体	接合幅 (mm)	接合面の横補強筋種類	横補強筋の位置 (mm)	載荷方法
JPC00-10-10M	0	D 10	10	単調
JPC00-13-10M		D 13		
JPC00-10-30M		D 10	30	
JPC00-13-30M		D 13		
JPC00-13-50M			50	
JPC30-10-10M	30	D 10	10	
JPC30-13-10M		D 13		
JPC30-10-30M		D 10	30	
JPC30-13-30M		D 13		
JPC30-13-50M			50	
JPC90-10-10M	90	D 10	10	
JPC90-13-10M		D 13		
JPC90-10-30M		D 10	30	
JPC90-13-30M		D 13		
JPC90-13-50M			50	
JPC00-10-30C	0	D 10	30	正負交番繰り返し
JPC00-13-30C		D 13		
JPC00-13-50C				
JPC30-10-30C	30	D 10	30	
JPC30-13-30C		D 13		
JPC30-13-50C				
JPC90-10-30C	90	D 10	30	
JPC90-13-30C		D 13		
JPC90-13-50C				

\* 1 関東学院大学大学院 工学研究科建築学専攻（正会員）

\* 2 関東学院大学教授 工学部建築学科、工博（正会員）

\* 3 関東学院大学大学院 工学研究科建築学専攻（正会員）

210, 180mm、厚さ225mmの2個のPCa

ユニットを接合幅0, 30, 90mmで接合し、4-D19の接合筋とジョイントコンクリートを使用したものを総計24体作成した。試験体の変動要因は、接合面の近傍に配した横補強筋の位置、鉄筋径、接合幅、加力方法とし、その一覧を表-1に示す。また、接合部の摩擦については、厚さ0.3mmのテフロンシートを部材部と接合部の間に使用し、生じなくした。

### 2.2 材料性状

試験体に使用した鉄筋の材料性状を表-2に示す。PCaユニットに使用したコンクリートと接合部のジョイントコンクリートに使用したモルタルの材料性状を表-3に示す。

### 2.3 加力・測定方法

加力方法は、図-2に示すように試験体を設置し、PCaユニット内に埋め込んだPC鋼棒に、接合部中心線上で押し引き用のオイルジャッキを取り付け、単調载荷と正負交番繰り返し载荷を行った。単調载荷は、治具の許容範囲内に収めるために最大滑り変位を36mmとした。繰り返し载荷は、相対すべり変位=0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12mmの8サイクルで加力した。測定方法は、2つの部材部分の滑り変位と目開きを接合筋上の高感度変位計により測定し、接合筋と横補強筋のひずみを、鉄筋ゲージによって測定した。

表-2 鉄筋性状

鉄筋の種類	降伏点応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (x10 <sup>4</sup> kgf/cm <sup>2</sup> )	伸び率 (%)	
D10	SD345	3900	5360	1.84	15.0
D13	SD345	3620	5310	1.92	17.1
D16	SD345	3900	5850	1.79	17.8
D19	SD345	3930	5930	1.95	22.6

表-3 コンクリート性状

打設箇所	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (x10 <sup>4</sup> kgf/cm <sup>2</sup> )	ポアソン比
PCa部 コンクリート	270	24.1	2.12	0.21
接合部 モルタル	313	21.1	2.10	0.21

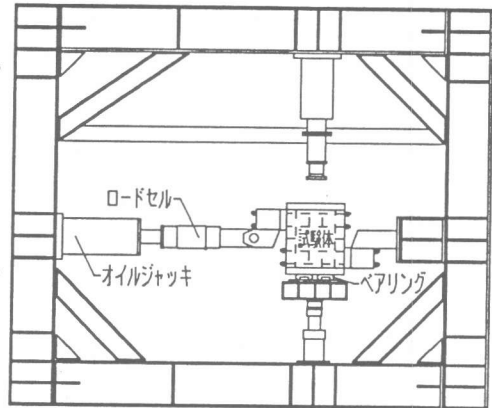


図-2 加力装置

単調载荷は、治具の許容範囲内に収めるために最大滑り変位を36mmとした。繰り返し载荷は、相対すべり変位=0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12mmの8サイクルで加力した。測定方法は、2つの部材部分の滑り変位と目開きを接合筋上の高感度変位計により測定し、接合筋と横補強筋のひずみを、鉄筋ゲージによって測定した。

表-4 実験結果一覧

試験体名	接合部せん断ひずみ		支圧強度限界滑り変形時荷重		2mm時			4mm時			12mm時			最大荷重		
	荷重 (tf)	変位 (mm)	荷重 (tf)	変位 (mm)	荷重 (tf)	荷重 (tf)	荷重 (tf)	荷重 (tf)	荷重 (tf)	荷重 (tf)	荷重 (tf)	荷重 (tf)	荷重 (tf)	荷重 (tf)	荷重 (tf)	
JPC00-10-10M			20.1		17.5	19.5	21.6	29.4								
JPC00-13-10M			23.3		17.9	21.5	26.3	34.7								
JPC00-10-30M			14.8	6.0	12.4	13.6	17.3	26.4								
JPC00-13-30M			14.4		12.8	13.7	16.7	30.3								
JPC00-13-50M			12.3		12.7	12.8	13.5	23.4								
JPC30-10-10M	6.4	0.4	12.2		10.7	12.7	17.4	27.7								
JPC30-13-10M	5.7	0.9	10.7		8.6	11.3	16.8	29.0								
JPC30-10-30M	4.6	0.4	10.0	3.9	9.3	10.0	12.0	21.7								
JPC30-13-30M	4.8	0.5	8.9		12.3	9.0	11.1	24.2								
JPC30-13-50M	5.8	0.8	10.1		8.9	10.1	11.8	24.1								
JPC90-10-10M	6.1	0.8	11.7		10.0	12.9	14.6	21.8								
JPC90-13-10M	3.5	0.2	12.0		11.0	13.1	15.0	24.7								
JPC90-10-30M	2.8	0.1	7.1	2.3	6.9	7.4	8.3	15.7								
JPC90-13-30M	3.2	0.2	7.0		7.0	7.8	9.6	18.6								
JPC90-13-50M	2.4	0.1	8.1		8.2	8.9	9.1	15.4								
JPC00-10-30C			14.4		12.4	13.9	15.3	15.3	12.7							
JPC00-13-30C			14.4	6.0	13.4	14.3	13.3	14.4	13.8							
JPC00-13-50C			12.6		12.2	12.0	10.8	12.6	12.0							
JPC30-10-30C	4.8	0.2	9.5		8.6	9.5	10.8	10.8	9.1							
JPC30-13-30C	1.8	0.1	10.4	3.9	9.9	10.4	11.7	11.7	8.0							
JPC30-13-50C	5.5	0.3	9.6		9.4	9.5	10.7	10.7	8.8							
JPC90-10-30C	3.4	0.2	7.5		7.6	8.1	8.1	8.4	7.5							
JPC90-13-30C	2.0	0.1	7.5	2.4	7.5	7.7	9.8	9.8	5.3							
JPC90-13-50C	4.3	0.1	7.2		7.2	7.9	9.7	9.7	6.5							

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 破壊性状

破壊性状については、単調载荷も繰り返し载荷とともに、テフロンシートで接合面を分離しているので、初亀裂は接合部の接合筋に沿って発生し、次に付着劣化領域（部材部）へと亀裂の発生が確認された。接合部に生ずる亀裂は割裂破壊によって入り、付着劣化領域に入る亀裂は図-3に示すように接合筋から外側に

45°の角度で発生が確認された。また、単調載荷よりも繰返し載荷の方が、亀裂が多い傾向にあった。

### 3.2 包絡線と最大荷重

図-4の包絡線は、接合幅と加力方法が同じものを一組にまとめて描いたものである。最大荷重については、接合幅が大きくなるにつれて最大耐力は低下していく傾向にある。横補強筋の

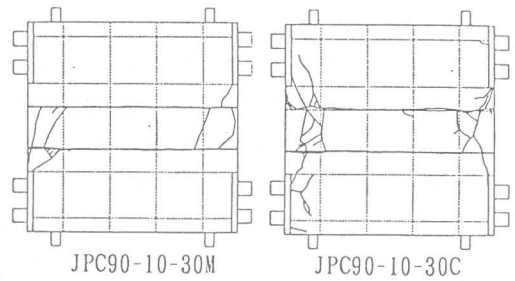
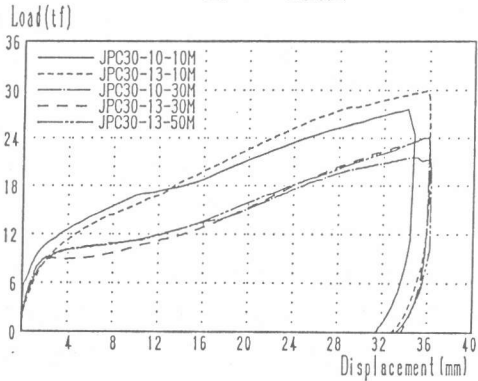
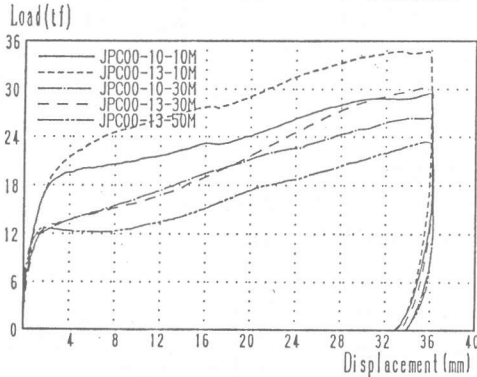


図-3 亀裂図



荷重-すべり変位曲線

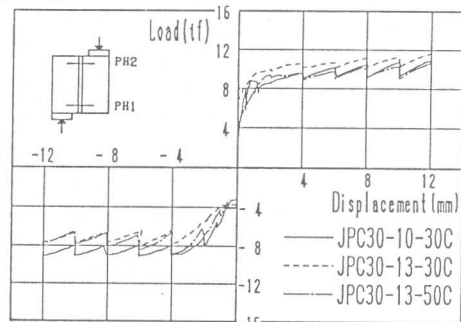
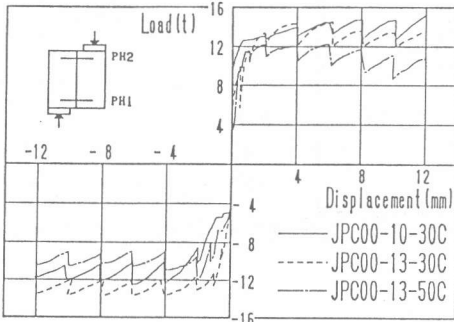


図-4 荷重-すべり変位の関係

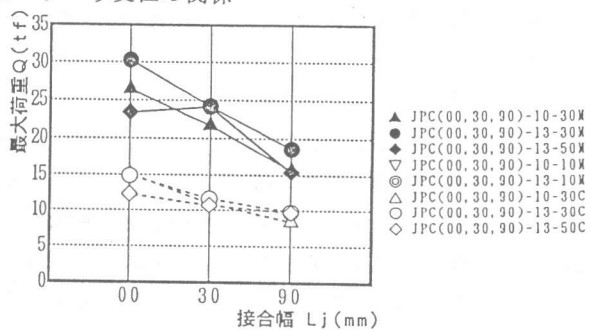
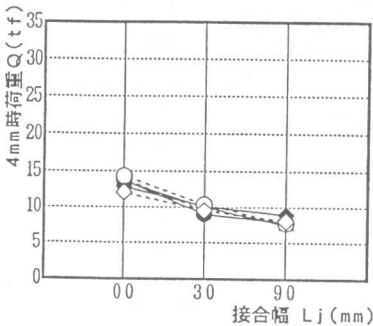


図-5 接合幅と荷重の関係

径が大きくなるにつれて耐力が増加する傾向がみられ、また横補強筋の位置が接合面から離れるにつれて耐力が低下している。単調載荷の場合、どの試験体も変位2mm付近で支圧破壊が進み、接合面が滑り始め、その後接合筋のダウエル作用において、接合筋の引張力による抵抗メカニズムを構成するキンキング効果により荷重が増加し、変位36mmまでは単調増加の傾向にある。<sup>(4)</sup>

図-5から4mm時については、接合幅の同じ試験体の場合、各試験体の耐力差はあまりみられない。接合幅が大きくなるほど耐力は低下しているのが認められる。横補強筋の位置による比較としては、図-6から30mmと50mmでは耐力差があまりみられないが、10mmと比較してみると耐力は低下している。このことから、最大荷重時で接合幅0mm（一面せん断）のとき横補強筋の位置が10mmでは、横補強筋が顕著に抵抗していることがわかる。

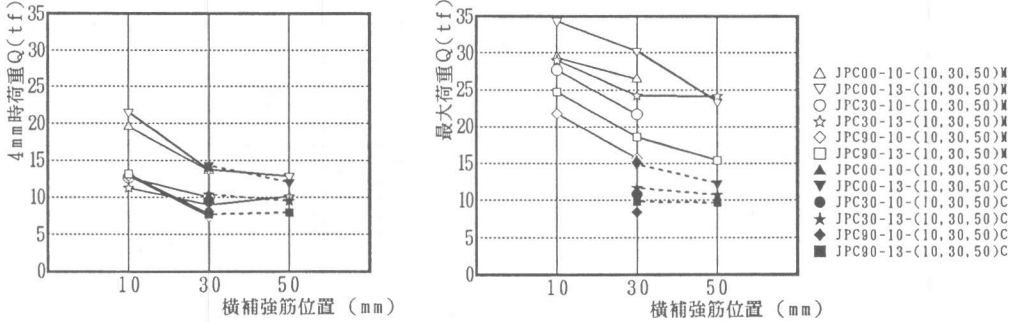


図-6 横補強筋位置と荷重の関係

### 3.3 接合筋と横補強筋のひずみ

接合筋のひずみは、図-7に示すように接合部内の鉄筋より部材部の鉄筋の方が先に降伏している。横補強筋のひずみは、荷重とともに増加していくが、横補強筋の位置30,50mmでは降伏は見られず、10mmでは図-8より、加力点側のS-1において降伏しているのが解る。

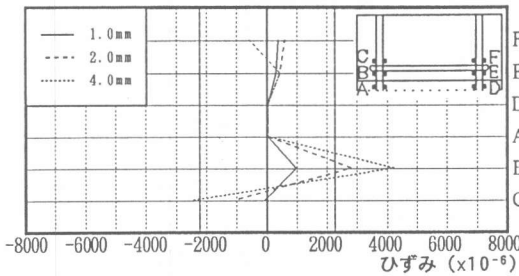


図-7 ひずみ分布(JPC00-13-50M)

ひずみ (x10<sup>-6</sup>)

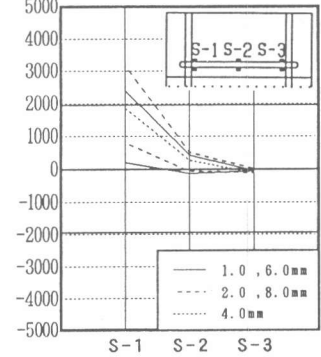


図-8 横補強筋ひずみ分布 (JPC00-10-10M)

### 4. 横補強筋のせん断伝達

2個のPCaユニットが、ジョイントコンクリートと接合筋によって接合され、せん断力を受けると、接合面は滑り変形を生じ、接合筋では曲げモーメントが、接合面からaだけ離れた位置で最大になり塑性ヒンジが形成される。<sup>(1)</sup>

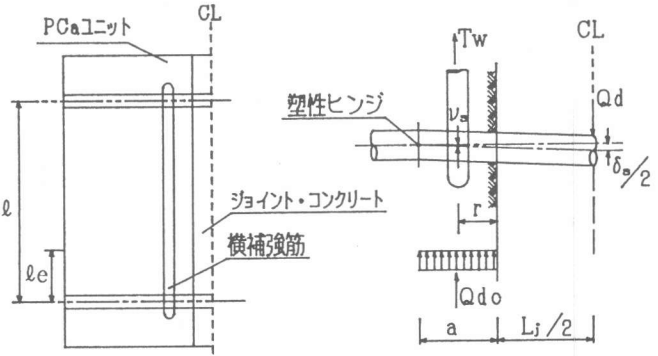


図-9 横補強筋のせん断伝達メカニズム

この際、接合面から塑性ヒンジまでの間の接合筋直下のコンクリートには、局部圧縮による抵抗を生じる。この支圧抵抗が最大になるときのせん断耐力を支圧限界耐力 $Q_{dc}$ とし、そのときの滑り変形を支圧限界滑り変形 $\delta_{sc}$ とすると、以下の式で与えられる。<sup>(2)</sup>

$$Q_{dc} = C_{dc} \cdot \sigma_B \cdot a \cdot \sum d_r$$

$$\delta_{sc} = 0.18 \cdot a$$

(1)

ここで、 $Cdc$ は支圧係数、 $\sum dr$ は接合筋直径の総和、 $\sigma B$ はコンクリート圧縮強度、接合面から塑性ヒンジまでの距離  $a$  は、接合幅を  $Lj$  とおくと、はりの弾性支承理論から次式で与えられる。<sup>(1)</sup>

$$a = \frac{1}{\beta} \tan^{-1} \left( \frac{1}{1 + \beta Lj} \right) \quad (2)$$

(2)式に含まれる  $\beta$  は、次式のように書き表される。

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k}{4EsIs}} \quad (3)$$

ここで、 $k$ はコンクリートの支承係数、 $EsIs$ は接合筋の曲げ剛性を示す。

接合面をはさんだ2個の塑性ヒンジ間をダウエル領域と呼ぶと、図-9に示すようにその間に存在する横補強筋は、接合筋の接合面における滑り変形を拘束することによって、接合面におけるせん断伝達の向上に寄与する。横補強筋における垂直方向変形  $v_s$  は、接合部の1/2を取り出した図-9から、接合幅の中心における滑り変形  $\delta s/2$  を用いると、次式のように導かれる。

$$v_s = \frac{(a - r)}{(a + \frac{Lj}{2})} \cdot \frac{\delta s}{2} \quad (4)$$

ここに、 $r$ は横補強筋の接合面からの距離を示す。横補強筋の有効長さを  $l_e$  とおくと、 $v_s$ によって横補強筋に生ずる引張力  $T_w$  は、ひずみ  $\varepsilon$  が降伏ひずみ  $\varepsilon_y$  より小さい場合 ( $\varepsilon < \varepsilon_y$ ) と降伏ひずみを超える場合 ( $\varepsilon \geq \varepsilon_y$ ) に分けて、次式のように表される。

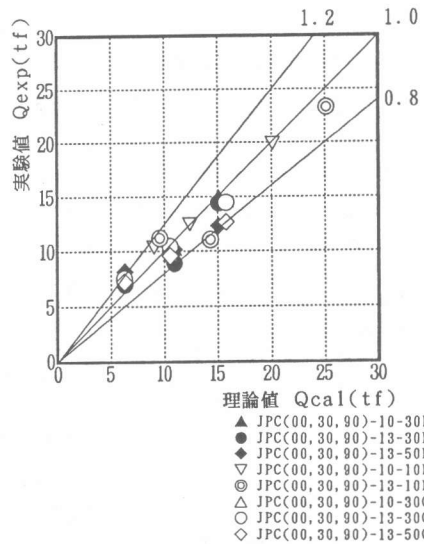
$$\begin{aligned} T_w &= E_w \cdot \frac{v_s}{l_e} \cdot a_w \quad (\varepsilon < \varepsilon_y) \\ T_{wy} &= a_w \cdot \sigma_{wy} \quad (\varepsilon \geq \varepsilon_y) \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $E_w$ 、 $a_w$ 、 $\sigma_{wy}$ は、それぞれ横補強筋のヤング係数、全断面積及び降伏点強度を示す。また横補強筋の有効引き抜き抵抗長さに関しては、接合筋の間の距離を  $l$  とおくと、

$$l_e = Cr \frac{l}{dr} \quad (6)$$

で表される。<sup>(3)</sup>ここで係数は、横補強筋に貼ったひずみゲージにより  $Cr = 4.24 - 0.38Lj$  が得られた。

以上の結果を用いると、ダウエル領域に横補強筋が有効な場合は、支圧限界滑り変形時の接合面におけるせん断伝達能力  $Q_d$  は、支圧限界耐力式(1)と横補強筋の拘束効果式(5)の累加として次式で与えられる。ここで、 $\varepsilon$ は支圧限界滑り時のひずみ。



$$Qd1 = Cdc \cdot \sigma_B \cdot a \cdot \sum dr + Ew \frac{v_s}{l e} a w \quad (\varepsilon < \varepsilon_y)$$

$$Qd2 = Cdc \cdot \sigma_B \cdot a \cdot \sum dr + a w \cdot \sigma_{wy} \quad (\varepsilon \geq \varepsilon_y) \quad (7)$$

支圧係数Cdcは、接合筋のコンクリートのかぶり厚さdcが十分にある場合（dc≥5dr）、Cdc=3.0とおけるが、かぶり厚さが小さい場合（dc<5dr）、かぶりコンクリートが接合筋のダウエル変形によってせん断破壊を生じるために、支圧効果が減ずることから、Cdc=3.0×φcとする。<sup>(3)</sup>ここでφcは、かぶり厚さのせん断効果に与える影響係数で、直接せん断結果から

$$\phi c = 0.85 \quad (r \geq 30)$$

$$\phi c = 0.75 \quad (r < 30)$$

が得られた。

支圧限界滑り時の実験値と理論値の比較を表-5に示し、両者の比較を図-10にプロットした。

表-5 支圧限界滑り時の実験値と理論値の比較

試験体名	相対剛性 β (cm <sup>-1</sup> )	最大曲げ モーメント 位置a(cm)	支圧限界 滑り変形 δ <sub>s,c</sub> (cm)	支圧限界 滑り変形時 ひずみε	せん断伝達能力Qd(tf)		
					実験値	理論値	実/理
JPC00-10-30M				-67	14.8		0.99
JPC00-13-30M	0.235	3.345	0.60	-64	14.4	15.0	0.96
JPC00-13-50M				28	12.3		0.82
JPC30-10-30M				-49	10.0		0.91
JPC30-13-30M	0.238	2.172	0.39	-33	8.9	10.9	0.81
JPC30-13-50M				-26	10.1		0.92
JPC90-10-30M				-32	7.1		1.14
JPC90-13-30M	0.237	1.303	0.23	-28	7.0	6.3	1.11
JPC90-13-50M				-32	8.1		1.29
JPC00-10-30C				-9	14.4		0.91
JPC00-13-30C	0.236	3.322	0.60	42	14.4	15.8	0.91
JPC00-13-50C				-93	12.6		0.80
JPC30-10-30C				-76	9.5		0.90
JPC30-13-30C	0.237	2.189	0.39	-43	10.4	10.5	0.99
JPC30-13-50C				-37	9.6		0.91
JPC90-10-30C				-19	7.5		1.19
JPC90-13-30C	0.237	1.306	0.24	-32	7.5	6.3	1.20
JPC90-13-50C				-21	7.2		1.15
JPC00-10-10M				2337	20.1	20.1	1.00
JPC00-13-10M	0.243	3.230	0.58	1267	23.3	25.1	0.93
JPC30-10-10M				827	12.6	12.3	1.02
JPC30-13-10M	0.244	2.103	0.38	518	11.0	14.3	0.77
JPC90-10-10M				333	10.5	9.0	1.17
JPC90-13-10M	0.245	1.235	0.22	136	11.2	9.6	1.17

- (1). 横補強筋の径が大きくなるにつれて耐力が大きくなる。
- (2). 横補強筋を接合面に近づけるにつれて耐力は大きくなる。
- (3). 滑り変形が4mm時の耐力は、接合幅の影響が余り見受けられないが、最大耐力時では接合幅が大きくなるにつれて耐力が小さくなる傾向にある。
- (4). 横補強筋のひずみは、荷重とともに増加していくが、30, 50mmでは降伏は見られず、10mmでは、加力点側が降伏している。
- (5). 横補強筋はダウエル領域内に存在するとき、耐力の向上に著しく寄与する。
- (6). 横補強筋とコンクリートの支圧効果を考慮したせん断伝達能力式はよく実験結果と対応している。

#### 参考文献

- 1) Makitani, A. and Xie, S., et al : *The Dowel Action of Steel Bars in the Joint Connection of Precast Reinforced Concrete*、コンクリート工学年次論文集、Vol.16, No.2, pp.835-840, 1994.6
- 2) 榎谷 栄次・小川 祥平ほか：接合幅を有するプレキャスト部材接合部ダウエル筋のせん断伝達、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16, No.2, pp.817-822, 1994.6
- 3) Tsoukantas, S. G. and Tassios, T. P. : *Shear Resistance of Connections between Reinforced Concrete Linear Precast Elements*, ACI Structural Journal, Title no.86-S26, pp.242-248, May-Jun. 1989
- 4) Makitani, A. and Xie, S., et al : *Shear Transfer of Precast Reinforced Concrete Connection under Large Dowel Displacement*、コンクリート工学年次論文集、Vol.17, Jun. 1995