

# 論文 プレキャスト鉄筋コンクリート部材接合面におけるせん断伝達機構に関する研究

大西 昭徳\*<sup>1</sup>・榎谷 栄次\*<sup>2</sup>・謝 爽\*<sup>3</sup>

要旨：本論文は、接合面に摩擦が生じる場合のせん断抵抗メカニズムを解明するために、接合面圧縮力、ジョイント幅（以降、接合幅とする）、コンクリート強度を変動要因として実験を行い、その結果接合面圧縮力とせん断耐力は比例関係にあり、接合幅とコンクリート強度は摩擦力には関係ないことが認められた。また、摩擦力のせん断伝達機構は、接合面圧縮力とダウエル効果による接合筋の引張力が寄与すると考えられる。

キーワード：プレキャストコンクリート、接合部、摩擦力、せん断伝達、接合幅

## 1. はじめに

本研究では、コッターのないプレーンタイプで主筋とジョイントモルタルからなる接合部について、接合幅、コンクリート強度、接合面圧縮力を変動要因として直接せん断実験を行い、せん断抵抗メカニズムを構成するせん断摩擦効果、ダウエル効果に着目し、接合面圧縮力及び接合面摩擦力とせん断伝達との関連について研究を行った。以下にそ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想定したものである。その形状は、図-1に示すように長さ450mm、幅がそれぞれ225, 210, 180mm、厚さ225mmの2個のPCaユニットを、2-D19の接合筋と接合幅0, 30, 90mmで接合したもので、接合部分のジョイントにモルタルを使用したものを、総計18体作成した。また、接合面には表面処理を施さず、型枠にスタイロフォームを使用して平滑面をつくり、後打ちコンクリートによって摩擦面をもつ接合部を作成した。接合幅が0mmの試験体については、まず片側面を最初に打設し、コンクリート硬化後にスタイロフォームを取り外し、その後もう一方の面を打設すること

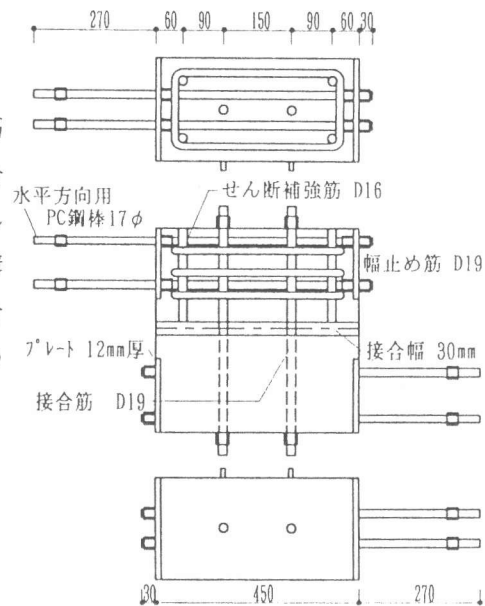


図-1 試験体形状(接合幅30mm)

表-1 試験体一覧

試験体名	接合幅 (mm)	コンクリート強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	接合面圧縮力 (kgf/cm <sup>2</sup> )
JPC00-300-10C	0	300	10
JPC00-300-20C			20
JPC00-300-40C			40
JPC30-300-10C	30		10
JPC30-300-20C			20
JPC30-300-40C			40
JPC90-300-10C	90		10
JPC90-300-20C			20
JPC90-300-40C			40
JPC00-400-10C	0	400	10
JPC00-400-20C			20
JPC00-400-40C			40
JPC30-400-10C	30		10
JPC30-400-20C			20
JPC30-400-40C			40
JPC90-400-10C	90		10
JPC90-400-20C			20
JPC90-400-40C			40

\*1西松建設(株)、工修(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、工修(正会員)

によって、試験体を作成した。試験体の変動要因は、接合面に垂直な接合面圧縮力、接合幅、コンクリート強度とし、その一覧を表-1に示す。

## 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分のジョイン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に示す様に試験体を垂直に設置し、試験体の部材部に埋め込んだPC鋼棒によって、水平方向から接合部の中心線上に、押し引き両用のオイルジャッキで変位制御によって正負交番繰り返し载荷とし、接合面圧縮力は、接合面垂直方向からオイルジャッキによって $\sigma_0 = 10, 20, 40 \text{ kgf/cm}^2$ で加力した。また、加力サイクルは、相対滑り変位 = 0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12mmの8サイクルである。

測定方法は、2つの部材間のずれをPCaユニットの接合筋上に設置した高感度変位計により測定し、2つの平均を相対滑り変位とし、接合筋のひずみを鉄筋ゲージによって測定した。

表-2 鉄筋の材料性状

種類	降伏点強度 ( $\text{kgf/cm}^2$ )	降伏歪み ( $\times 10^{-4}$ )	引張応力度 ( $\text{kgf/cm}^2$ )	伸び率 (%)	ヤング係数 ( $\times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ )
D16	3760	2414	5650	19.8	1.74
D19	3950	2678	5940	22.1	1.77

表-3 コンクリート材料性状

打設箇所	圧縮強度 ( $\text{kgf/cm}^2$ )	引張強度 ( $\text{kgf/cm}^2$ )	ヤング係数 ( $\times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ )	ポアソン比
部材部	333	28.7	2.53	0.23
	487	34.0	2.19	0.20
接合部	425	26.4	2.16	0.31
	452	32.0	2.29	0.22

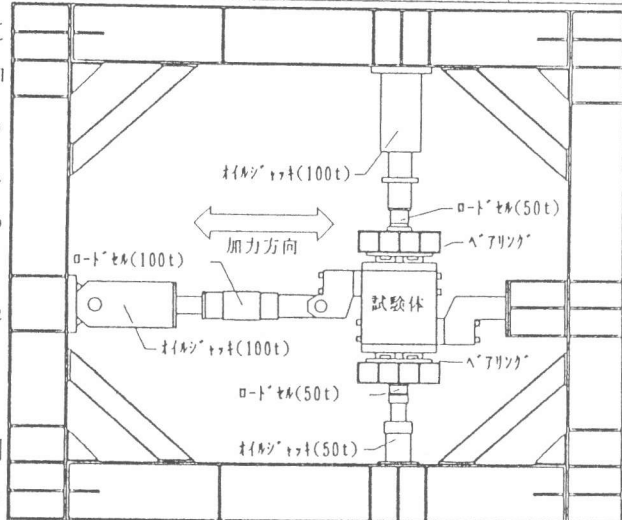


図-2 加力装置

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 ひびわれ及び破壊性状

試験体のひびわれは、図-3に示すように最初のサイクルの正側で部材部の外側に45°の角度で初期ひびわれが発生し、次に接合幅30, 90mmのものは接合部に、0mmのものは部材部に、接合筋に沿ってひびわれの発生が認められた。これは接合筋のダウエル作用による割裂破壊と考えられる。

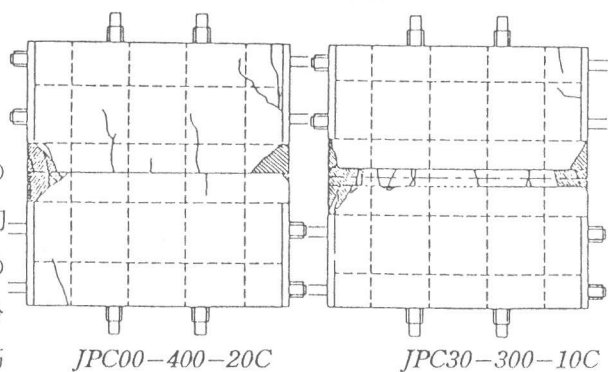


図-3 最終亀裂

### 3.2 包絡線

図-4の包絡線は、接合幅とコンクリート強度が同じものを一組にまとめて描いている。全般的に接合面の付着耐力を超える

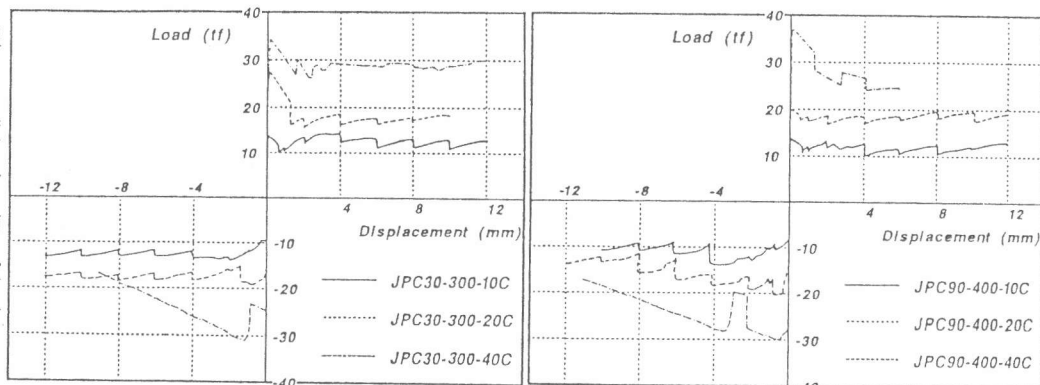


図-4 包絡線

荷重が低下し、その後は最大耐力まで荷重は増加しない傾向が見受けられる。

表-4 実験結果一覧

試験体名	接合部 せん断ひび割れ		部材部 せん断ひび割れ		2mm時	4mm時	12mm時	最大荷重			
	荷重(tf) (サイクル)	変位 (mm)	荷重(tf) (サイクル)	変位 (mm)	荷重(tf) (サイクル)	荷重(tf) (サイクル)	荷重(tf) (サイクル)	正		負	
								荷重(tf) (サイクル)	変位 (mm)	荷重(tf) (サイクル)	変位 (mm)
JPC00-300-10C	---	---	27.4(1+)	0.1	20.90	21.10	22.59	27.4(1+)	0.2	17.6(6-)	8.0
JPC00-300-20C	---	---	33.4(1+)	0.2	-18.23	20.75	21.70	33.4(1+)	0.2	18.3(3-)	2.0
JPC00-300-40C	---	---	37.0(1+)	0	36.57	37.68	---	47.3(1+)	0.2	34.0(2-)	1.4
JPC30-300-10C	14.0(1+)	0.1	14.0(1+)	0.1	13.82	14.62	13.17	14.8(4+)	4.0	13.5(3-)	2.0
JPC30-300-20C	29.0(7+)	0	29.0(1+)	0	17.13	18.14	18.64	29.0(1+)	0	20.0(2-)	1.3
JPC30-300-40C	36.7(1+)	0.1	32.4(1+)	0.1	27.38	29.14	29.99	36.7(1+)	0.1	30.7(6-)	9.3
JPC90-300-10C	11.5(3+)	1.8	7.0(1+)	0.1	11.86	13.37	10.65	15.3(1+)	0.3	14.1(1-)	0.8
JPC90-300-20C	21.2(1+)	0.2	21.2(1+)	0.2	15.33	15.33	17.08	21.2(1+)	0.2	15.6(2-)	1.1
JPC90-300-40C	32.9(1+)	0.2	32.9(1+)	0.2	30.34	---	---	33.2(1+)	0.2	30.0(2-)	1.7
JPC00-400-10C	---	---	20.0(1+)	0	-16.07	18.39	21.65	39.2(1+)	0.1	17.7(4-)	4.5
JPC00-400-20C	---	---	44.7(1+)	0.2	-16.82	19.95	25.67	44.7(1+)	0.2	21.1(8-)	12.0
JPC00-400-40C	---	---	61.0(1+)	0.1	-28.78	30.49	34.81	61.0(1+)	0.2	34.4(8-)	15.9
JPC30-400-10C	11.8(1+)	0.1	11.8(1+)	0.1	12.81	13.36	15.12	15.2(8+)	12.0	11.6(4-)	4.0
JPC30-400-20C	14.4(1+)	0.1	14.4(1+)	0.1	-14.91	-18.33	17.49	17.6(8+)	12.0	19.8(6-)	8.0
JPC30-400-40C	30.4(1+)	0.1	30.4(1+)	0.1	-34.05	35.57	---	41.3(1+)	0.2	35.6(4-)	4.0
JPC90-400-10C	13.4(1+)	0.1	13.4(1+)	0.1	13.01	-13.46	12.66	13.4(1+)	0.1	13.7(4-)	4.0
JPC90-400-20C	20.6(1+)	0.1	20.6(1+)	0.1	-19.13	18.69	19.09	20.6(1+)	0.1	20.3(1-)	0.8
JPC90-400-40C	37.2(1+)	0.2	30.6(1+)	0.1	27.08	26.85	---	37.2(1+)	0.2	30.2(2-)	2.1

□ は、付着耐力によって滑り変位がとんだため、履歴の荷重を示す

### 3.3 最大荷重

表-4に実験結果一覧を示す。接合面圧縮力の違いによる比較は、図-5に示すように、接合面圧縮力が大きくなると荷重も比例的に増加する。これは接合面圧縮力が大きくなると、摩擦力も大きくなるからだと考えられる。また、接合幅がない場合はコンクリート強度が耐力に影響しているため、コンクリート強度はあまり摩擦力に関係がなく、接合幅がある場合において荷重にばらつきが見受けられないのは、接合幅が摩擦力に関係がないからだと考えられる。接合幅の違いに

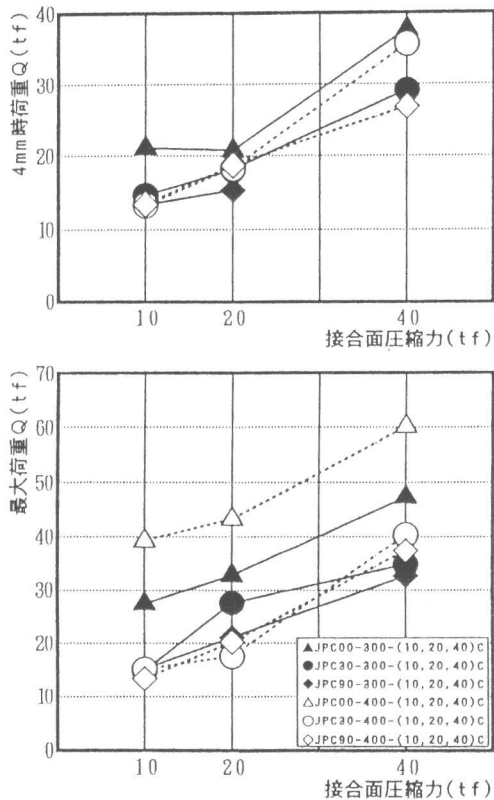


図-5 接合面圧縮力と荷重の関係

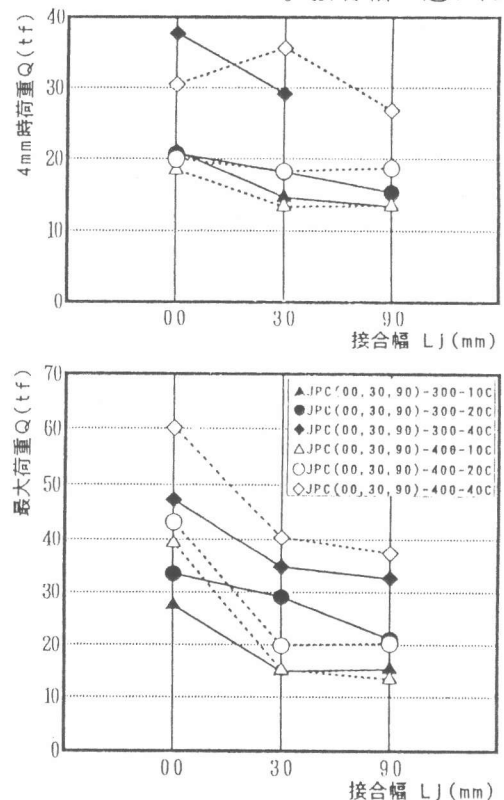


図-6 接合幅と荷重の関係

よる比較は、図-6に示すように、全般的に接合幅が大きくなると最大耐力は小さくなる傾向が見られる。これは、接合幅が大きくなるとダウエル効果によって最大荷重が小さくなるからだと考えられる。また、コンクリート強度の違いは、接合幅30, 90mmのものにはあまり影響はなく、接合幅がないものはコンクリート強度が高い程荷重は増加している。これは、接合幅がない試験体が一面せん断となるため、コンクリート強度がダウエル効果によって直接耐力に影響していると考えられる。

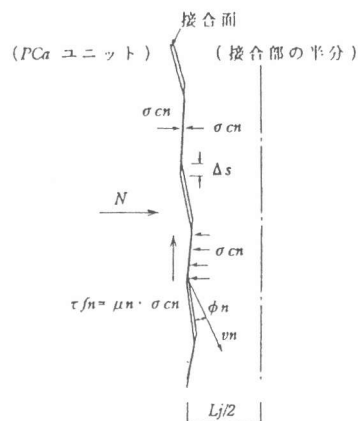


図-7 ダウエル効果による摩擦モデル

#### 4. せん断伝達機構

接合面に摩擦があるプレーンタイプのPCa部材が、せん断力を受けると、接合筋とその周りのコンクリートの支圧によって構成されるダウエル効果  $Q_{dc}$  と接合面に生じる摩擦力  $Q_f$  によって抵抗すると考えられる。摩擦効果のせん断抵抗は、図-7に示すような接合面に垂直

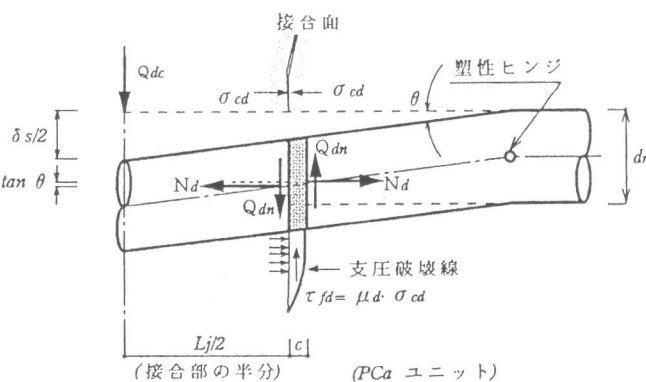


図-8 節合圧縮力によるモデル

に作用する接合面圧縮力の摩擦と図-8に示すように、滑り変形  $\delta_s$  と接合筋直下の支圧破壊の下で生じた接合筋のダウエル効果による引張力が界面のせん断摩擦となる2つの抵抗メカニズムが考えられる。

図-9に示すように、接合面に摩擦力  $Q_f$  が作用するとき、接合面においてダウエル効果による変位ベクトルと接合面とのなす角をそれぞれ  $v_d$  と  $\phi_d$  とし、接合面圧縮力  $N$  による変位ベクトルと接合面とのなす角をそれぞれ  $v_n$ 、 $\phi_n$  とおくと、摩擦力  $Q_f$  と接合面部圧縮力  $N$  のなす仕事  $W_E$  は、次式によって与えられる。

$$W_E = Q_f \cdot v_n \cos \phi_n - N \cdot v_n \sin \phi_n \quad (1)$$

また、内力のなす仕事  $W_I$  は、鉄筋のダウエル効果によって生じる  $N_d$  から次式で与えられる。

$$W_I = N_d \cdot v_d \sin \phi_d \quad (2)$$

ここで、 $W_E = W_I$  とおけば、接合面における摩擦力  $Q_f$  は、次式によって与えられる。

$$Q_f = C_{dn} \cdot N_d + N \cdot \tan \phi_n \quad (3a)$$

ここで、 $C_{dn}$  は次式によって与えられる。

$$C_{dn} = \frac{v_d \sin \phi_d}{v_n \sin \phi_n} \quad (3b)$$

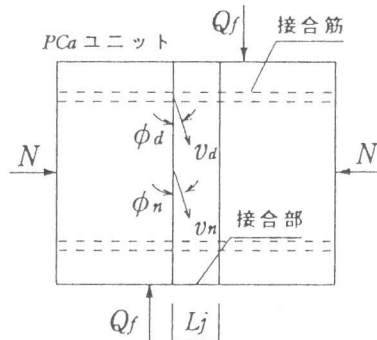


図-9 摩擦メカニズム

$Nd$ は、鉄筋の弾性変形とVon Misesの降伏条件を用いると、次式のように与えられる。

$$Nd = \frac{a_j \sigma_y}{\sqrt{1+3\left(\frac{G}{E}\right)^2 \tan^2 \theta}} \cdot \left( \cos^2 \theta + \frac{G}{E} \sin^2 \theta \right) \quad (4)$$

$a_j$ 、 $\sigma_y$ 、 $E$ 、 $G$ は、それぞれ接合筋の断面積( $\text{cm}^2$ )、降伏強度( $\text{kg/cm}^2$ )、ヤング係数( $\text{kg/cm}^2$ )、せん断弾性係数( $\text{kg/cm}^2$ )を示す。また、鉄筋が塑性状態にあるときは、 $G/E=1/3$ と考えられ、 $\sin \theta$ と $\cos \theta$ は次式によって与えられる。

$$\sin \theta = \frac{\delta s}{\sqrt{(2a+Lj)^2 + \delta s^2}}, \quad \cos \theta = \frac{2a+Lj}{\sqrt{(2a+Lj)^2 + \delta s^2}} \quad (5)$$

そして、式(3)に式(4)を代入し、摩擦係数 $\mu_n$ にBennettらと東らが提案する0.6と既存の実験結果を使用すると次式が与えられる。(文献1, 文献3)

$$Q_f = \mu_d \cdot a_j \cdot \sigma_y + 0.6N \quad (6a)$$

ここで、 $\mu_d$ はダウエル効果によって生ずる摩擦係数に対応する。

$$\mu_d = \frac{0.13 \left( \cos^2 \theta + \frac{G}{E} \sin^2 \theta \right)}{\sqrt{1+3\left(\frac{G}{E}\right)^2 \tan^2 \theta}} \quad (6b)$$

また、ダウエル効果のせん断抵抗 $Q_{dc}$ は、既存の研究より次式のように与えられる。(文献2, 文献4)

$$Q_{dc} = 0.15 \cdot \sigma_B \cdot a \cdot \Sigma dr \quad (7)$$

$\Sigma dr$ は接合筋直径の総和( $\text{cm}$ )、 $\sigma_B$ はコンクリート圧縮強度( $\text{kg/cm}^2$ )、 $a$ は接合面から塑性ヒンジまでの距離( $\text{cm}$ )とする。また、 $a$ は梁の弾性支受理論から次式で与えられる。(文献2, 文献5)

$$a = \frac{1}{\beta} \tan^{-1} \left( \frac{1}{1 + \beta Lj} \right) \quad (8)$$

$\beta$ は接合筋とコンクリートの相対剛性( $1/\text{cm}$ )で次式で与えられる。(文献2, 文献5)

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k}{4EsIs}} \quad (9)$$

$k$ はコンクリートの支承係数、 $Es$ と $Is$ はダウエル筋のヤング係数( $\text{kg/cm}^2$ )と断面二次モーメント( $\text{cm}^4$ )とする。(文献2)

以上の結果を用いると、接合面に摩擦があるときのせん断耐力 $Q$ は、摩擦効果式(6)とダウエル効果式(7)の累加として次式で与えられる。

$$Q = Q_{dc} + Q_f \\ = Cdc \cdot \sigma_B \cdot a \cdot \Sigma dr + \mu_d \cdot a_j \cdot \sigma_y + 0.6N \quad (10)$$

表-5 計算結果一覧

試験体名	相対剛性 $\beta$ ( $cm^{-1}$ )	塑性ヒンジまでの距離 $a$ (cm)	支圧限界滑り変形 $\delta_{sl}(cm)$	支圧限界耐力 $Q_{d0}(t)$	摩擦耐力 $Q_f(t)$			せん断耐力 $Q(t)$					
					$Q_d$ (t)		$Q_n$ (t)	実験値		理論値		実/理	
					2mm時	4mm時		2mm時	4mm時	2mm時	4mm時	2mm時	4mm時
JPC00-300-10C	0.318	2.470	0.445	4.205	2.93	2.92	6.0	20.90	21.10	13.14	13.13	1.591	1.608
JPC00-300-20C	0.318	2.467	0.444	4.423	2.93	2.92	12.0	-18.23	20.75	19.35	19.34	0.942	1.073
JPC00-300-40C	0.318	2.466	0.444	4.230	2.93	2.92	24.0	36.57	37.68	31.16	31.15	1.174	1.210
JPC30-300-10C	0.323	1.458	0.263	2.776	2.93	2.90	6.0	13.82	14.62	11.71	11.68	1.180	1.252
JPC30-300-20C	0.325	1.441	0.259	2.793	2.93	2.84	12.0	17.13	18.14	17.72	17.63	0.967	1.029
JPC30-300-40C	0.326	1.438	0.259	2.959	2.93	2.90	24.0	27.38	29.14	29.89	29.86	0.916	0.976
JPC90-300-10C	0.322	0.780	0.140	1.466	2.92	2.87	6.0	11.86	13.37	10.39	10.34	1.143	1.294
JPC90-300-20C	0.324	0.787	0.142	1.569	2.92	2.87	12.0	15.33	15.33	16.49	16.44	0.930	0.933
JPC90-300-40C	0.326	0.765	0.138	1.574	2.92	2.87	24.0	30.34	—	28.49	28.44	1.065	—
JPC00-400-10C	0.340	2.312	0.416	6.641	2.93	2.92	6.0	-16.07	18.39	16.67	15.56	0.964	1.182
JPC00-400-20C	0.335	2.345	0.422	6.021	2.93	2.92	12.0	-16.82	19.95	21.14	21.13	0.796	0.944
JPC00-400-40C	0.341	2.303	0.415	6.814	2.93	2.92	24.0	-28.78	30.49	33.74	33.73	0.853	0.904
JPC30-400-10C	0.337	1.371	0.247	3.687	2.93	2.89	6.0	12.81	13.36	12.62	12.58	1.015	1.062
JPC30-400-20C	0.337	1.376	0.247	3.675	2.93	2.89	12.0	-14.91	-18.33	18.70	18.56	0.797	0.987
JPC30-400-40C	0.339	1.358	0.244	3.846	2.93	2.89	24.0	-34.05	35.57	30.78	30.74	1.106	1.157
JPC90-400-10C	0.339	0.715	0.129	2.014	2.92	2.87	6.0	13.01	-13.46	10.93	10.88	1.190	1.237
JPC90-400-20C	0.336	0.725	0.130	1.917	2.92	2.87	12.0	-19.13	18.69	16.84	16.79	1.136	1.113
JPC90-400-40C	0.340	0.709	0.128	2.077	2.92	2.87	24.0	27.08	26.85	29.00	28.95	0.934	0.928

この式を使用した計算結果一覧を表-5に示し、実験値との比較を図-10に示す。これより、計算値は滑り変形2mm, 4mm時の実験結果に対して、1体を除きよく対応している。

5. まとめ

PCa接合部の直接せん断実験から摩擦効果に関して、次の事柄が示唆される。

- (1). 接合面圧縮力が大きくなると、比例的に増加する。
- (2). 接合幅とPCaユニットのコンクリート強度は、摩擦効果とは関係が認められない。
- (3). 接合面圧縮力と接合筋の引張力による摩擦効果を考慮したせん断伝達式は、実験結果とよく対応している。

参考文献

1) 榎谷栄次、西岡幸一、小川祥平：プレキャスト部材接合部におけるダウエル挙動に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14, No.2, pp.481-486, 1992.6  
 2) Eiji MAKITANI, Shuang XIE, Kenta SINDO, Akinori OHNISI: Shear Transfer of Precast Reinforced Concrete Connection under Large Dowel Displacement, Proceedings of the Japan Concrete Institute, pp.159~164, 1995.6

3) 日本建築学会：プレキャスト鉄筋コンクリート構造の設計と施工、日本建築学会、pp.171~176  
 4) 榎谷栄次、小川祥平、謝 爽：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  
 5) 榎谷栄次、大西昭徳、謝 爽：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、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17, No.2, pp.165~170, 1995.6

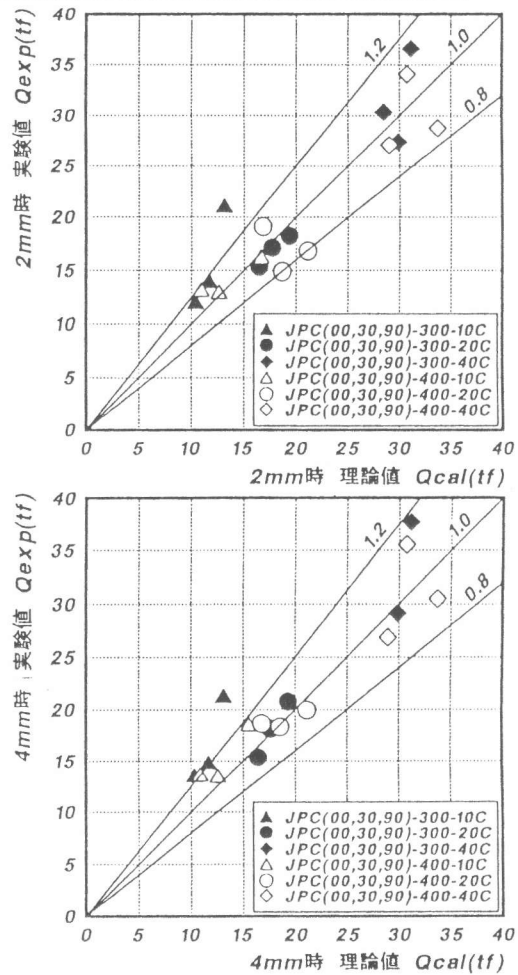


図-10 実験値と理論値の比較