

[2136] 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

小川 祥平*1、楨谷 栄次*2、謝爽*3

1. はじめに

本研究は、架構式プレキャスト鉄筋コンクリート構造における、接合幅をもつ接合部のせん断伝達メカニズムを解明するために継続的に行っている研究成果の一部である。

本論は、ダウエル筋の引張強度、コンクリート圧縮強度および載荷方法を変動因子とし、直接せん断実験によって接合面におけるせん断伝達挙動について調べた。接合面におけるせん断伝達能力を支圧効果、キンキング効果および摩擦効果によって評価し比較検討を行った。

以下に実験および解析から結果に関して報告する。

2 実験概要

2.1 試験体

本研究に用いた試験体は、P C a フレーム構造における接合部を想定したもので、その形状は図-1に示すように、幅x長さx高さが225x450x20mmの

2個のP C a 部材を接合幅30mmのジョイントモルタル

によって接合し、2-D19の接合筋を配した。試験体の変動要因は、コンクリート強度、鉄筋強度、摩擦効果および加力方法とした。また、摩擦効果無くした試験体は、接合面に厚さ0.3mmのテフロンシートを配した。試験体は、表-1に示すように、繰り返し載荷によるコンクリート強度、鉄筋強度および摩擦効果の違いによる12体と単調載荷による $F_c=360\text{kgf/cm}^2$ の試験体6

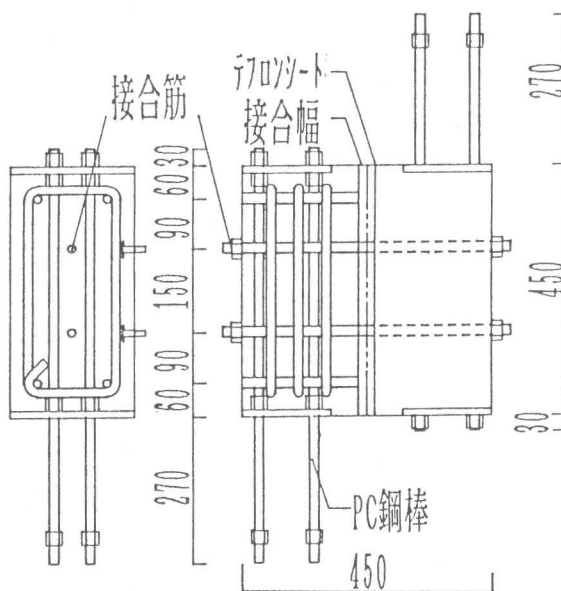


図-1 試験体形状

表-1 試験体一覧

試験体名	接合筋 (SD)	接合筋 比	接合幅 (mm)	コンクリート 目標強度 (kg/cm^2)	接合面 摩擦係数 (有無)	載荷方法
JPC30-240-300C	2-D19	0.57	30	240	無し	繰り返し
JPC30-240-301C	SD295				有し	
JPC30-240-500C	2-D19				無し	
JPC30-240-501C	SD490				有し	
JPC30-240-700C	2-D19				無し	
JPC30-240-701C	SD690				有し	
JPC30-360-300C	2-D19	0.57	30	360	無し	繰り返し
JPC30-360-301C	SD295				有し	
JPC30-360-500C	2-D19				無し	
JPC30-360-501C	SD490				有し	
JPC30-360-700C	2-D19				無し	
JPC30-360-701C	SD690				有し	
JPC30-360-300M	2-D19	0.57	30	360	無し	単調
JPC30-360-301M	SD295				有し	
JPC30-360-500M	2-D19				無し	
JPC30-360-501M	SD490				有し	
JPC30-360-700M	2-D19				無し	
JPC30-360-701M	SD690				有し	

*1 大和ハウス工業(株)(正会員)

*3 関東学院大学大学院, 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)

体の総計18体を製作した。

2.2 材料性状

試験体を使用した鉄筋の機械式性質を表-2(a)に示す。また、各使用材料の試験結果を表-2(b)に示す。

表-2(a) 鉄筋性状

種類	呼び強度	降伏点強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 ($\times 10^6$ kgf/cm ²)	伸び率 (%)
D 16	SD 345	3517	5463	1.78	21.0
D 19	SD 345	3658	5273	1.84	21.7
D 19	SD 295	3484	5444	1.91	22.1
D 19	SD 490	4762	6986	1.77	16.2
D 19	SD 695	6911	10073	1.87	4.2

2.3 加力方法および

測定方法

加力方法は、図-2に示すように試験体を設置し、P C a部材部内に配したP C 鋼棒に、接合部中心線上に取り付けた押し引き両用のオイルジャッキを取り付け、正負交番繰り返し载荷と、単調载荷を行った。繰り返し载荷の場合、2個の部材の相対ずれが大きくなると、荷重が増加しないので、最大すべり変位を12mmとし0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12mmに対する変位制御によって挙動を調べた。単調载荷の場合、治具の許容範囲内に収めるために、最大すべり変位を36mmとした。測定方法は、接合筋上における部材間の相対ずれ変位、相対見開き変位等の変形を高感度変位計によって測定し、接合筋のひずみを鉄筋ゲージによって測定した。

表-2(b) コンクリート性状

種類		圧縮強度 (kgf/cm ²)	割裂強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 ($\times 10^5$ kgf/cm ²)
P C a部 コンクリート	繰り 返し	212	21.78	2.09
		298	26.42	2.19
	単調	296	28.22	2.10
接合部 モルタル	繰り 返し	367	21.69	2.00
		398	25.14	2.11
	単調	375	26.81	1.80

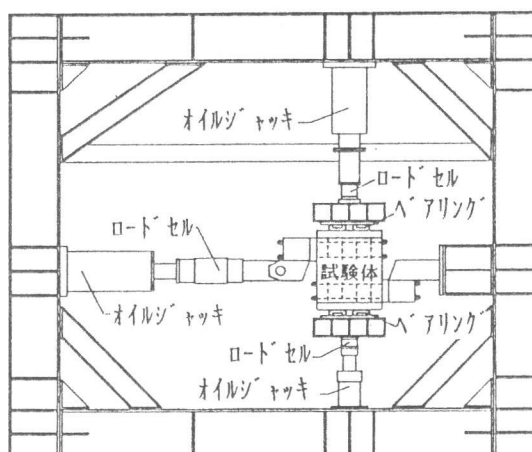


図-2 加力装置

3. 実験結果および考察

3.1 破壊性状

繰り返し・単調载荷共に、摩擦効果のある試験体の初亀裂は、接合面の付着切れによって発生し、摩擦効果の無い試験体は、接合部の接合筋上に、割裂亀裂として発生し、その後接合筋により、支圧破壊されていく事が確認された。また、図-3の破壊性状図によって、繰り返し载荷試験体よりも亀裂が少ない傾向にあった。これは、繰り返し载荷による影響によって、亀裂が多く発生したものと考えられる。

3.2 荷重-すべり変位関係

繰り返し・単調载荷による包絡線を図-4に示す。これより鉄筋強度の増加により荷重が増加する事が確認

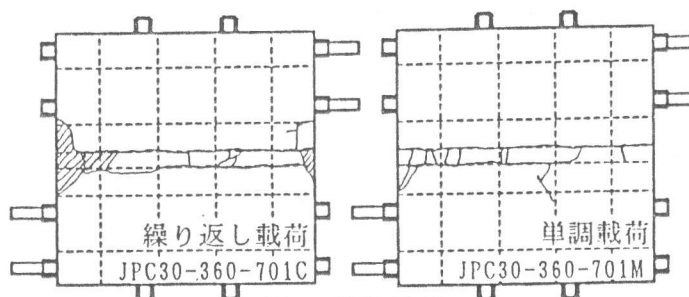


図-3 破壊性状

された。また、繰り返し载荷においては、変位2~4mm以降荷重の増加は微増であった。しかし、単調载荷においては、荷重は増大していく傾向にあった。コンクリート強度による比較としては、コンクリート強度が増加すると荷重の増大が若干みられた。

3.3 繰り返し载荷と単調载荷の比率

繰返し載荷と単調載荷の比率を図-5に示した。これより、ばらつきがみられるが、変位10mm時以降に、繰返し載荷の場合、荷重は単調載荷に比して約30%低減される。

3.4 最大荷重および変位12mm時荷重

最大荷重と鉄筋強度の関係を図-6(図中の記号は、図7に準ずる)に示す。これより最大荷重が、最大すべり変位で与えられるものは、鉄筋強度に比例して最大荷重も大きくなっていく事が確認された。しかし、繰返し載荷の摩擦効果のある場合、最大荷重が接合面の付着切れにより与えられる。また、接合筋がSD695の単調載荷の場合、変位量が大きくなると、鉄筋の伸び率が低いため、変位量がそれぞれ18mm(30-360-701M)および32mm(30-360-701M)時で破断した。変位12mm時荷重と鉄筋強度の関係を図-7に示す。これにより、変位12mm時荷重は、鉄筋強度に比例して荷重の上昇が確認された。また、単調載荷の場合、繰返し載荷よりも荷重が高くなる事が認められた。

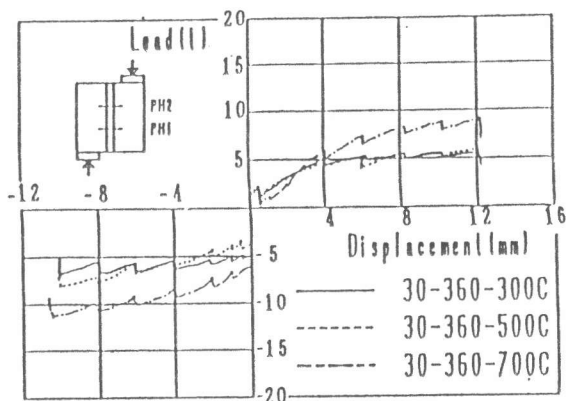


図-4(a) 包絡線(繰返し載荷)

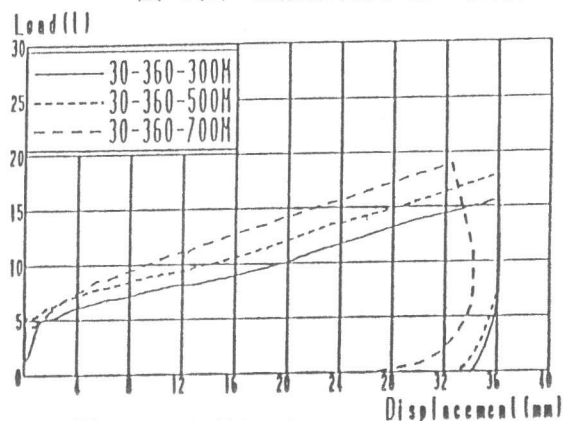


図-4(b) 包絡線(単調載荷)

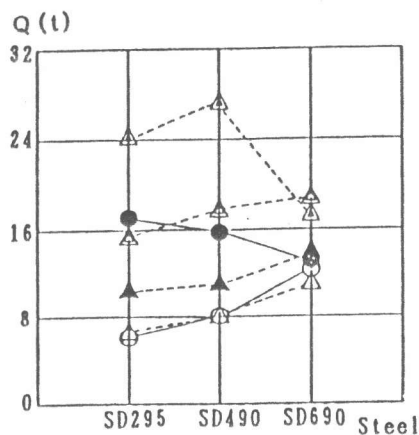


図-6 最大荷重と鉄筋強度の関係

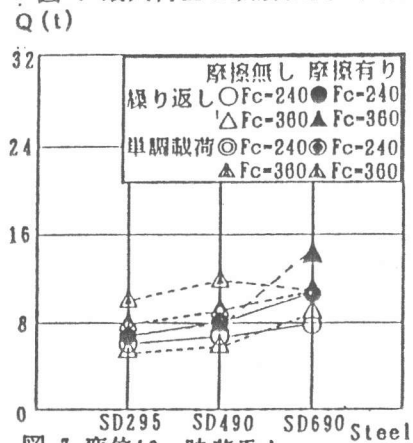


図-7 変位12mm時荷重と、鉄筋強度の関係

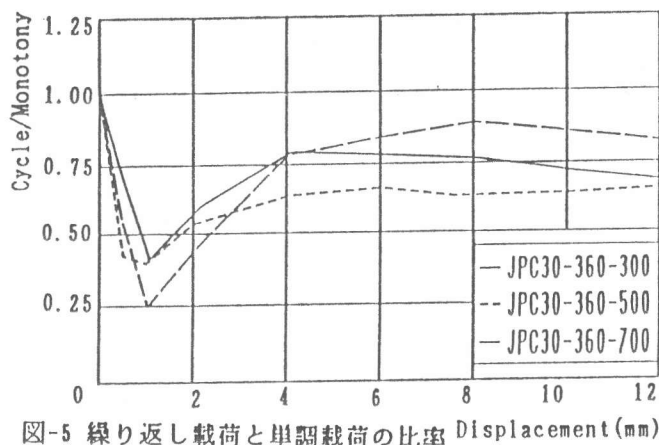


図-5 繰返し載荷と単調載荷の比率

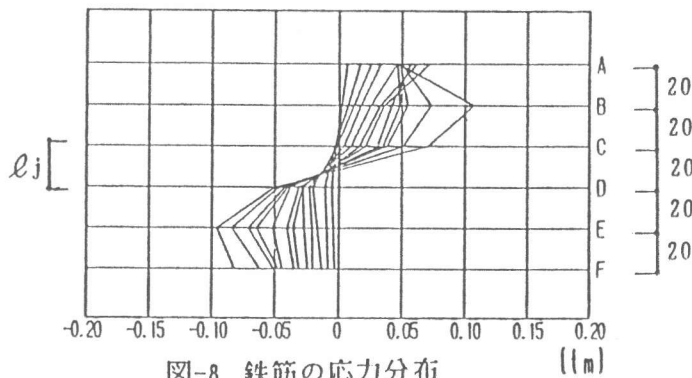


図-8 鉄筋の応力分布

3.5 鉄筋の応力度分布

鉄筋の応力分布図(30-360-300M)を図-8に示すこれより、最大モーメントが接合面より部材部内に15mmの近傍に生ずることが認められた。

4. ダウエル筋の力学的特性

接合面にコッターを持たない2個のプレキャスト部材がジョイントコンクリートと鉄筋で緊結された接合部においてせん断伝達を受けると、図-9に示すように、片方のPCa部材からジョイントコンクリートを介して、他方のPCa部材にせん断伝達が行われる。この際、直接せん断力を伝達するのは、接合面を横切る鉄筋である。このせん断伝達は、第1段階では、鉄筋によるコンクリートの支圧(効果)で与えられ、第2段階(支圧限界すべり変形以降)では、鉄筋のキンキング効果および摩擦効果により与えられる。

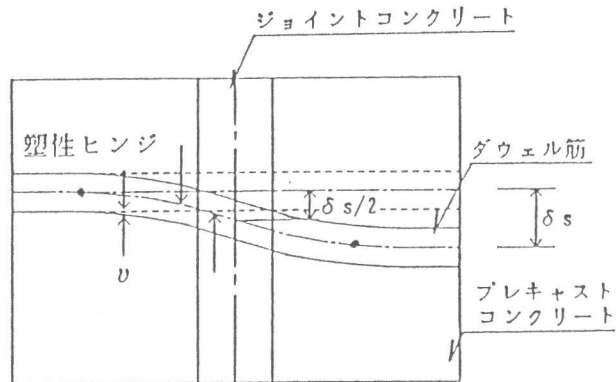


図-9 ダウエル筋のせん断伝達モデル

4.1 支圧効果

ダウエル筋がせん断伝達を行うとき、ダウエル筋にヒンジが形成されると、プレキャスト部材に配されたダウエル筋の下端には、ヒンジまでの距離 a において局所的な圧縮応力が生ずる。この局所圧縮応力 σ_{cc} はダウエル筋の見つけ面積に対して一様と仮定すると、 $\sigma_{cc} = C_{dc} \cdot \sigma_B$ (σ_B : コンクリート圧縮強度)とおき、接合面からヒンジまでの局所圧縮応力をダウエル筋による支圧強度 Q_{dc} と定義すると、次式のように書き表される。

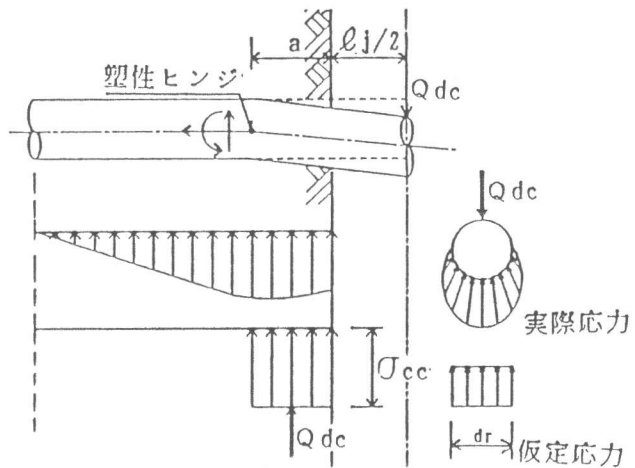


図-10 支圧強度抵抗メカニズム

$$Q_{dc} = C_{dc} \cdot \sigma_B \cdot a \cdot \sum dr^2 \cdot (\delta s / \delta s_c)^{-1/2} \quad (1)$$

ここで、 $C_{dc} = 3.0$ を採用し、 δs_c は支圧限界すべり変形
ヒンジ距離 a は接合幅 l_j が小さい場合($l_j \leq 2.37$)、つぎの略算式を用いる。^[3]

$$a = \frac{1}{\beta(1+\beta l_j)} \left[1 - \frac{1}{3} \left(\frac{1}{1+\beta l_j} \right)^2 \right] \quad (2)$$

ここで β は、直接せん断実験より次式のように得られた。^[3]

$$\beta = \frac{1}{dr} (0.82 - 0.02 \frac{\sigma_y}{\sigma_B}) \quad (\sigma_y / \sigma_B \leq 20) \quad (3)$$

$$\beta = 0.22 \quad (20 < \sigma_y / \sigma_B) \quad (4)$$

4.2 キンキング効果

接合幅を持つ接合部におけるせん断伝達は、支圧限界すべり変形 δ_{sc} までは、ダウエル筋下端におけるコンクリートの支圧による抵抗メカニズムを示すが、このすべり変形を越えると接合面近傍のダウエル筋下端のコンクリートの支圧強度が限界に達し、圧壊を生ずる。この圧壊コンクリート領域において、ダウエル筋が局所くびれ(キンキング)を起こす。このとき、既にくびれ部のダウエル筋は全断面が、降伏点強度に達していると考えられる。そこで、ダウエル筋の断面積および降伏点強度をそれぞれ a_s 、 σ_y で表し、ダウエル筋の傾斜角を θ とすると、図11から、全降伏引張力 $T_y = a_s \cdot \sigma_y$ の鉛直成分は、 $a_s \cdot \sigma_y \cdot \sin \theta$ として考えられる。ダウエル筋の傾斜角の正弦成分は、塑性ヒンジとモーメントの反曲点の間の距離に対するすべり変形比の関数として仮定すると、 $\sin \theta = C_{dk} (\delta_s / a)$ として表される。ここで、 C_{dk} は係数である。したがって、ダウエル筋のキンキング効果による接合面のせん断伝達能力 Q_{dk} は、この式を用い、また、 $C = \alpha \cdot a$ と仮定すると次式のように与えられる。

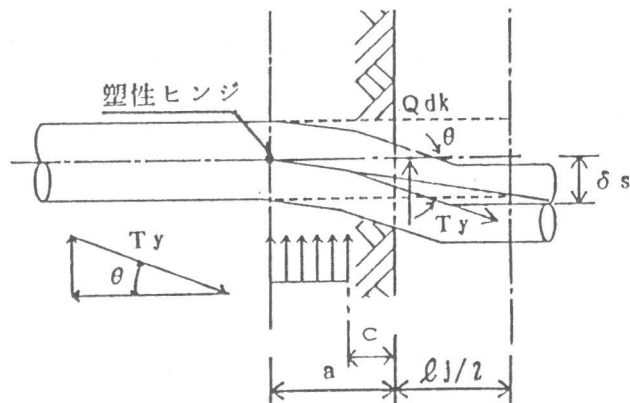


図-11 キンキング効果による抵抗メカニズム

$$Q_{dk} = \phi \cdot C_{dk} \cdot a_s \cdot \sigma_y \cdot \left(\frac{\delta_s}{a} \right) \quad (5)$$

ここで、直接せん断実験結果から $C_{dk} = 0.559 - 0.026 \ell_j (\text{cm})$ が得られた。また、 C_{dk} は、載荷方法の影響を受ける。繰り返し載荷の場合、単調載荷の実験結果を用いて決め($\phi = 1.0$)、繰り返し載荷については、低減係数 $\phi = 0.7$ を適用した。

支圧限界すべり変形 δ_{sc} は、支圧強度(1)式がキンキング強度(2)式と等しくなったときのすべり変位として与えられる。これより、次式が導かれる。

$$\delta_{sc} = \frac{C_{dc}}{C_{dk}} \cdot \frac{\sigma_B}{\sigma_y} \cdot \frac{a^2 \cdot \sum d_r}{a_s} \quad (6)$$

4.3 摩擦効果

プレキャスト・コンクリート・ユニットと接合幅の界面に付着が無くなると、すべり変形が急激に増大する。この際ダウエル筋には降伏引張力が生じ、コンクリート界面の垂直方向に対して、圧縮応力が作用する。この圧縮応力によって、コンクリート界面では、摩擦力が生ずる。この界面に作用する摩擦力 Q_{df} は、傾斜角 θ をもつダウエル筋に生ずる降伏引張力 $a_s \cdot \sigma_y$ の水平力成分 $a_s \cdot \sigma_y \cdot \cos \theta$ に摩擦係数 μ を乗ずることによって、次式のように与えられる。

$$Q_{df} = \mu_d \cdot a_s \cdot \sigma_y \quad (7)$$

ここで、 $\mu_d = \mu \cdot \cos \theta$ で表し、0.2の値を採用する。

4.4 せん断耐力式

以上より、ダウエル強度 Q_d は、 $\delta_s \leq \delta_{sc}$ のとき支圧強度で、 $\delta_{sc} > \delta_s$ のときキンキング強度と摩擦力の累加で与えられる。

$$\delta_s \leq \delta_{sc} \quad Q_d = Q_{dc} \text{より}$$

$$Q_d = C_{dc} \cdot \Gamma_B \cdot a \cdot \Sigma d_r \cdot (\delta_s / \delta_{sc})^{1/2} \quad (1)$$

$$\delta_{sc} < \delta_s \quad Q_d = Q_{dk} + Q_{df} \text{より}$$

$$Q_d = \phi \cdot C_{dk} \cdot a_s \cdot \Gamma_y \cdot \left(\frac{\delta_s}{a} \right) + \mu d \cdot a_s \cdot \Gamma_y \quad (8)$$

4.5 セン断耐力式の評価

繰り返しと単調の比較のためまたキンキング効果と摩擦効果を検証するために、繰り返しにおける終局時に対する変位12mm時の(8)式から計算された計算値と実験結果を図.12と図.13にプロットした。これより、計算値が実験値に対して鉄筋強度が高くなると過小評価になるものも若干見られるが、概ね±30%以内にある事が確かめられた。

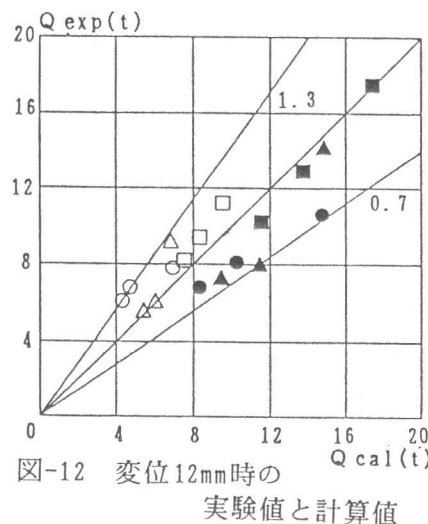


図-12 変位12mm時の

実験値と計算値

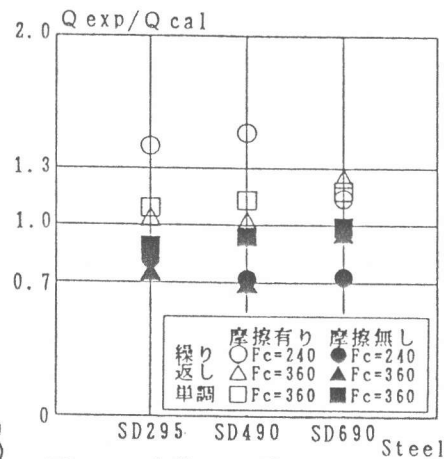


図-13 変位12mm時の

実験値と計算値

5. まとめ

P C a 部材接合部の直

接せん断実験から、ダウエル挙動に関して、次の事柄が示唆される。

- (1). 最大荷重は、鉄筋強度が高くなると、最大荷重も大きくなる事が確認された。しかし、付着切れによって決まる場合、鉄筋強度により収束していく傾向にあった。また、変位12mm時荷重は、鉄筋強度に比例して、すべての試験体は、耐力が高くなっていく事が確認された。
- (2). 耐力は、載荷方法に大きく影響され、変位12mm時に単調載荷に比して繰り返し載荷は、約30%減少する。これは、繰り返しによるダウエル強度の劣化が原因だと考えられる。
- (3). 摩擦効果の有る試験体は、摩擦の無いものよりも、荷重が高くなる事が確認された。これによりキンキング効果に摩擦効果が累加されることが確認された。この傾向は、単調載荷の場合と接合筋がSD690に対しても顕著にみられた。
- (4). 鉄筋の最大曲げモーメントは、接合面よりより部材部内の15mm近傍に生ずる事が認められた。

参考文献 [1]. B. F. Friberg: Design of Dowels in Transversed Joint of Concrete Pavements, Transaction, ASCE, Vol. 105, pp1076, 1940

[2]. 望月 重: 壁式プレキャスト鉄筋コンクリート構造の耐震性能に関する研究、総合研究(A)、研究成果報告書(1993)

[3]. 小川祥平、槇谷栄次、謝爽: プレキャスト部材のせん断伝達能力、コンクリート工学年次論文集、Vol. 15, No. 2, 1993