

論文 高強度材料を用いた PCa 構造接合面におけるせん断伝達挙動に関する研究

小西 伸哉^{*1}・槇谷 栄次^{*2}・謝 爽^{*3}・伊藤 嘉則^{*1}

要旨: 本論文は、プレキャスト部材接合面でのせん断抵抗メカニズムを解明するために、コンクリート強度、ジョイント・コンクリートの幅(以下、接合幅とする)、接合筋を変動要因として実験を行い、それらの因子がせん断伝達に及ぼす影響に関して調べた。そして、接合筋のダウエル効果に着目し、接合幅を考慮したせん断耐力を評価した結果、実験結果と良く対応した。

キーワード: プレキャストコンクリート、ダウェル作用、せん断伝達、接合部、接合幅

1. はじめに

プレキャスト鉄筋コンクリート構造(以下、PCa 構造とする)の接合部におけるせん断伝達に関する実験研究は、今まで、細径の接合筋を持つ接合部に対するせん断抵抗メカニズムの解明が主とされてきた。したがって、太径の接合筋からなる接合部のせん断伝達に関する研究は極めて少ないと見える。本研究では、コッターを持たないプレーンタイプで接合筋とジョイントモルタルからなる接合部について、コンクリート強度、接合幅、接合筋径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ダウェル効果に着目し、接合筋径とせん断伝達との関連について実験研究を行った。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、架構式プレキャスト鉄筋コンクリート構造の接合部を局部的に想定したもので、その試験体形状および変動要因を図-1 に示す。試験体は、長さ 450mm、幅がそれぞれ 225、210、180mm、厚さ 22.5mm の 2 個のプレキャストユニット(以下、PCa ユニットとする)を、1-D25、1-D32、1-D38 の太径の接合筋と接合幅 0、30、90mm で接合したもので、接合部分のジョイント・コンクリートにモルタルを使用した。また、接合筋は SD490 の材質の鉄筋を使用し、PCa ユニットとジョイント・コンクリートとの付着の影響を取り除くため、厚さ 0.3 mm のテフロンシートを接合面に使用した。主な変動要因は、コンクリート強度(400、600 kgf/cm²)、接合幅(0、30、90mm)、接合筋径(D25、D32、D38)とし、試験体を総計 18 体作成した。(文献 1, 文献 2)

*1 関東学院大学大学院 工学研究科建築学専攻(正会員)

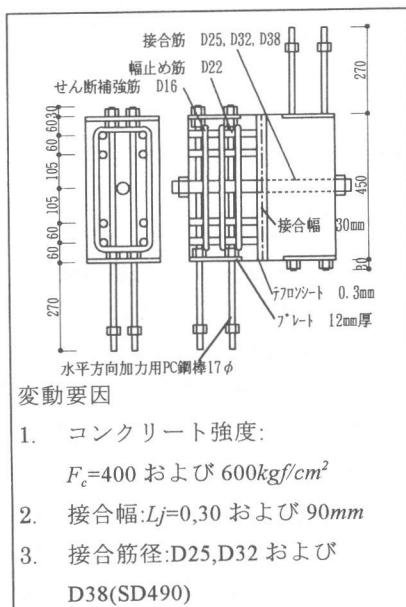


図-1 試験体形状図および変動要因

*2 関東学院大学教授 工学部建築学科、工博(正会員)

*3 北設計(株) 工博(正会員)

2. 2 材料性状

試験体に使用した鉄筋の材料性状を表-1に示す。また、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-2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を用いてせん断力を与える、変位制御の正負交番繰り返し載荷とした。その加力サイクルは、相対すべり変位=0.5、1、2、4、6、8、10、12mmの8サイクルとし最終15mmで押し切った。

測定方法は、荷重は、加力ジャッキに取り付けた100tfロードセルによって測定し、PCaユニットに設置した高感度変位計によって2つの部材間のずれを測定し、2つの平均を相対すべり変位(δ_s)とした。また、接合筋に貼付した鉄筋ゲージによって、接合筋各部のひずみを測定した。

3. 実験結果および考察

3. 1 ひび割れおよび破壊性状

試験体のひび割れは、一般にはジョイント・コンクリート界面で最初に発生するが、今回はテフロンシートで界面を分離しているので、最初、接合筋に沿ったひび割れが、接合幅30、90mmのものは接合部に、0mmのものは部材部に発生が認められた。その後、接合幅が小さい場合は、ほぼ接合筋に平行にひび割れ本数が増える傾向を示すが、接合幅が大きくなると、接合筋に沿った縦ひび割れのみとなる。また、相対すべり変位(以下、すべり変位とする)の増加に伴い、接合筋に沿って発生した縦ひび割れの進行および幅が大きくなり、最終破壊に至った。図-3に試験体の最終破壊性状、図-4に荷重-変位関係の1例を示す。

表-1 鉄筋の材料性状

鉄筋の種類	降伏点強度 (kgf/cm ²)	降伏ひずみ (×10 ⁻⁶)	引張強度 (kgf/cm ²)	伸び率 (%)	ヤング係数 (×10 ⁶ kgf/cm ²)
D16	4440	2520	6380	18.7	2.00
D22	5320	3100	7360	14.0	2.02
D25	5510	2850	7310	16.7	2.03
D32	5100	2680	6950	13.3	2.11
D38	5470	2890	7170	13.7	2.01

表-2 コンクリート・モルタルの材料性状

打設箇所	圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 (×10 ⁶ kgf/cm ²)	ポアソン比
部材部	391	29.2	2.77	0.28
部材部	606	29.2	2.25	0.33
接合部	531	36.5	1.98	0.33
接合部	782	40.3	2.39	0.23

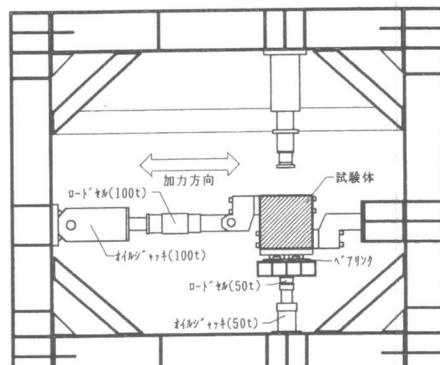
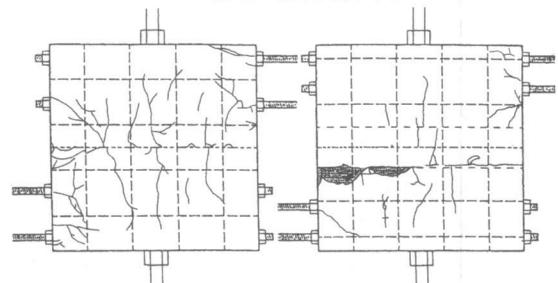


図-2 加力装置図



JPC00-600-320C JPC90-400-380C

図-3 最終破壊性状

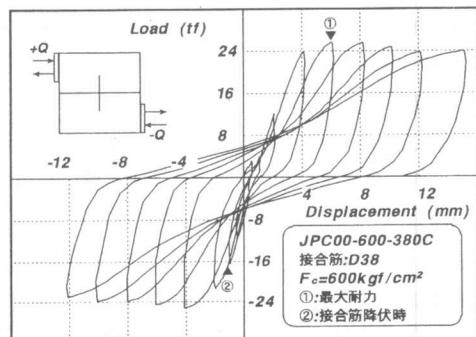


図-4 荷重-変位関係

3. 2 包絡線

コンクリート強度および接合筋径を変動要因とした包絡線を接合幅ごとに示した図を、図-5に示す。図-5より、全般的に、コンクリート強度および接合筋径が大きいほど剛性、耐力が高くなる傾向が見受けられる。

3. 3 最大耐力

接合幅の違いによる比較は、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が小さくなる傾向が見受けられる。これは、接合幅が大きくなると接合筋に対するジョイント・コンクリートの拘束が弱まり、ダウェル作用による支圧が小さくなり、接合界面におけるせん断伝達能力が低減するためと考えられる。接合筋径の違いによる比較は、図-7に示すように、接合筋径が大きくなると荷重も比例的に増加する。これは、接合筋が大きくなつても、接合幅に関係なく、割裂破壊による顕著な低下が見受けられないためと考えられる。また、コンクリート強度の違いは、全般的にあまり影響は見受けられないが、一般的に接合幅がない試験体は一面せん断となるため、接合筋のダウェル効果が、耐力に直接影響を与えているものと考えられる。

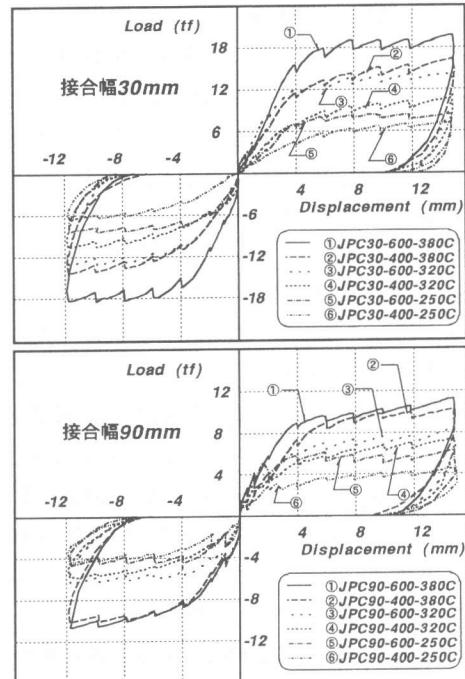


図-5 包絡線

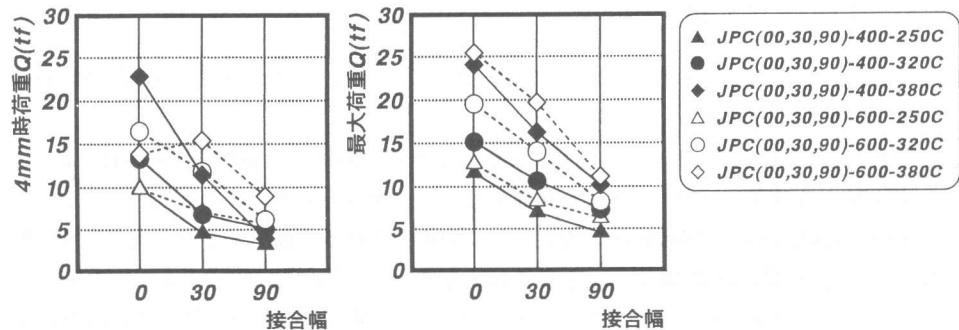


図-6 接合幅と荷重の関係

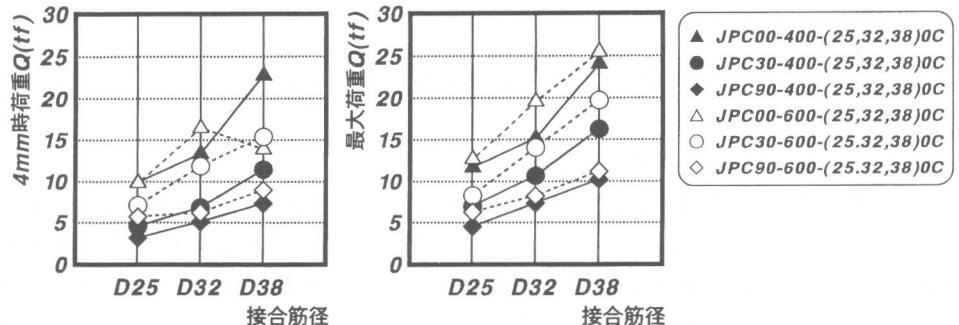


図-7 接合筋と荷重の関係

4. せん断伝達機構

4. 1 ダウェル筋による支圧限界耐力

ダウェル筋が PCa ユニットからジョイント・コンクリートを介して、他方の PCa ユニットへせん断伝達を行うとき、図-8 に示すように、すべり変形が大きくなり、ダウェル筋に不完全塑性モーメントが生じると、接合界面から a だけ離れた位置に、塑性ヒンジが形成される。この時、PCa ユニットに配されたダウェル筋の下端には、ヒンジまでの距離 a において局部的な圧縮応力(以下、局部圧縮応力とする)が生ずる。この局部圧縮応力を σ_{cc} とし、 σ_{cc} はダウェル筋の見つけ面積に対して一様と仮定すると、コンクリート圧縮強度 σ_B の数倍になることが直接せん断実験によって確かめられている。^(文献.3)

これより、 $\sigma_{cc} = C_d \times \sigma_B$ とおき、接合界面からヒンジまでが局部圧縮応力(以下、支圧耐力と称す)に達するときの耐力を、ダウェル筋による支圧耐力 Q_d と定義すると、次式のように書き表せる。

$$Q_d = C_d \times \sigma_B \times a \times \sum dr \quad (1)$$

ここで、 C_d は、実験によって算出される支圧係数、 $\sum dr$ は、ダウェル筋の直径の累加を示す。

4. 2 塑性ヒンジ距離 a

2 個の半無限 PCa ユニットとジョイント・コンクリートがダウェル筋で繋結された接合部がせん断力を受ける場合、ダウェル筋に作用する曲げモーメント分布における最大曲げモーメントが生じる位置(接合面からの距離) a_p に塑性ヒンジが形成されると仮定すると、接合幅が小さい場合、せん断力 Q_d を受けた PCa ユニット部におけるダウェル筋直下に生ずる支圧応力を $\sigma_{cc(p)}$ とし、またジョイント・コンクリート部分では、 $\sigma_{cc(j)}$ とすると、最大曲げモーメントは M_{max} は、次式で与えられる。^(文献.2)

$$M_{max} = M_0 + Q_{d(j)} \times \frac{a_p}{2} = \left(\frac{1}{8} \sigma_{cc(j)} \times dr \times L_j^2 + \frac{1}{2} \sigma_{cc(p)} \times dr \times L_j \times a_p \right) + \frac{1}{2} \times \sigma_{cc(p)} \times dr \times a_p^2 \quad (2)$$

ここで、 dr は接合筋径、 L_j は接合幅である。

ダウェル筋のヒンジにおける弾塑性モーメント M_y は、完全塑性モーメントを用いて、 $M_y = \sigma_y \times dr^3 / 6$ によって与えられ、ヒンジにおけるモーメントの釣り合い式 $M_{max} = M_y$ から、(2)および完全塑性モーメントの式を用いると、接合面からヒンジまでの距離 a_p は、PCa ユニット部およびジョイント・コンクリート部の支圧応力をそれぞれ $\sigma_{cc(p)} = C_{dp} \times \sigma_{Bp}$ および $\sigma_{cc(j)} = C_{dj} \times \sigma_{Bj}$ で表すと、次式のように導かれる。

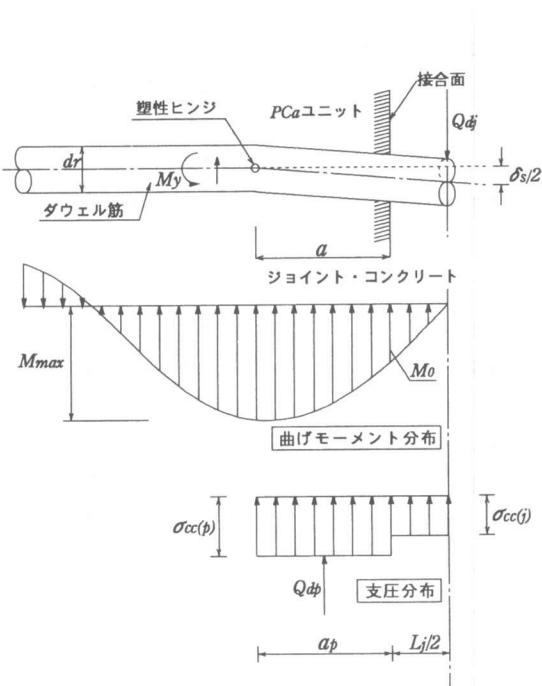


図-8 支圧効果のせん断抵抗モデル

$$\alpha_p = \frac{dr}{2} \left(\sqrt{\lambda_r^2 \left(1 - \frac{C_{dj}}{C_d} \times \frac{\sigma_{Bj}}{\sigma_{Bp}} \right) + \frac{4}{3} \times \frac{1}{C_d} \times \frac{\sigma_y}{\sigma_{Bp}}} - \lambda_r \right) \quad (3)$$

ここで、 $\lambda_r = \frac{L_j}{dr}$ 、 C_{dp} 、 σ_{Bp} および C_{dj} 、 σ_{Bj} は、それぞれ PCa ユニット部およびジョイント・コンクリート部の支圧係数とコンクリートの圧縮強度を示す。

接合幅の大きい場合、ダウェル筋に作用する曲げモーメント分布は、接合面とジョイント・コンクリートの中央部でモーメントは 0 となり、最大曲げモーメントの位置は、接合面から PCa ユニット部に入った a_p とジョイント・コンクリートに入った a_j に依存する。また、PCa ユニット部分では接合幅がない接合状態(無制限)における曲げモーメント分布と同じものと考えられ、ジョイント・コンクリート部では、2つの接合界面と中央部で曲げモーメントが生じない逆対称曲げモーメント分布と仮定される。これより、曲げモーメント分布における最大値は、PCa ユニット部とジョイント・コンクリート部に対して接合界面からそれぞれ a_p と a_j の位置に生じるが、後者は前者より小さい。したがって、接合界面におけるせん断伝達力は、 a_j によって決定される。

ジョイント・コンクリート部におけるダウェル筋の曲げモーメント分布は、2つの界面を中央部に曲げモーメントが生じないとする境界条件と接合界面に原点を持つ座標系を考えると、近似的に次式のようにべき関数で与えられる。

$$M_{jx} = K_j x^\alpha \cdot \left(\frac{L_j}{2} - x \right)^\beta \cdot (L_j - x)^\gamma \quad (4)$$

ここで K_j は、弾性支承に関連した定数である。また α 、 β 、 γ はべきである。

以上の結果を用いると、塑性ヒンジの位置 a_j は、 $\alpha = \beta = 1$ 、 $\gamma = 5$ と仮定し、極値条件 $dM_{jx}/dx = 0$ より、 $a_j = 0.12L_j$ が導かれる。

a_j は、厳密には、ダウェル筋の支承となるコンクリートの特性やダウェル筋の剛性に影響されるが、ここでは、近似解を求めることが前提としているので、これらの因子を考慮しない。

接合幅の小さな接合部と接合幅の大きな接合部の境界は、両者のせん断伝達 $Q_{dp} = C_{dp} \cdot \sigma_{Bp} \cdot dr \cdot a_p$ 、 $Q_{dj} = C_{dj} \cdot \sigma_{Bj} \cdot dr \cdot a_j$ が等しくなる条件を用いると、次式に示す接合幅によって表わされる。

$$L_{jn} = dr \sqrt{\frac{\frac{1}{C_{dp}} \times \frac{\sigma_y}{\sigma_{Bp}}}{0.36 \frac{\sigma_{Bj}}{\sigma_{Bp}} \left(0.12 \frac{\sigma_{Bj}}{\sigma_{Bp}} + 1 + 2 \frac{C_{dj}}{C_{dp}} \right)}} \quad (5)$$

4. 3 せん断耐力式の検討

コッターを持たず、接合幅を持つ PCa 部材の接合面におけるせん断伝達能力 Q_u は、接合筋におけるダウェル作用による Q_{dc} によって与えられる。(1)式を用いて書き表すと、

$Q_u = Q_{dc}$ より

$$Q_{dc(p)} = C_{dc(p)} \cdot \sigma_{Bp} \cdot a_p \cdot \sum dr \quad (L_j \leq L_{jn} \text{ の時}) \quad (6)$$

$$Q_{dc(j)} = C_{dc(j)} \cdot \sigma_{Bj} \cdot a_j \cdot \sum dr \quad (L_j > L_{jn} \text{ の時}) \quad (7)$$

ここで Q_{dc} は、(6)式と(7)式によって算出された値を支圧耐力として採用する。また、(6)式および(7)式において、支圧係数 $C_{dc(p)}$ 、 $C_{dc(j)}$ は、実験結果に対して $C_{dc(p)}$ 、 $C_{dc(j)}$ の値をパラメーターとして理論値との対応を検証するために、両者の相関係数(γ)を検討した結果、 $C_{dc(p)}=3.0$ 、 $C_{dc(j)}=2.5$ の値が最も適していると思われる。

以上より、(6)式もしくは(7)式より算出される計算結果と直接せん断実験より得られた変位 2 mm 時、4mm 時の荷重の結果を図-9 上にプロットした。その結果、変位 2mm 時において計算値は実験値を過大評価しているのが確認されるが、変位 4mm 時における計算値は実験値の概ね $\pm 20\%$ の範囲内に存在しており、接合界面におけるせん断伝達能力をよく推定していると考えられる。

5.まとめ

PCa 部材接合部の直接せん断実験および解析により検討を行った結果、以下のような結果が得られた。

1. コンクリート強度および接合筋径が大きくなると、剛性、耐力が高くなる傾向が確認される。
2. 全般的に、接合幅が大きくなると最大耐力が小さくなる傾向が見受けられる。これは、接合幅が大きくなると支圧効果が小さくなるためと考えられる。
3. せん断伝達理論式により得られた結果と、実験により得られた耐力は、すべり変位 4mm 時においては概ね $\pm 20\%$ 内に存在しており、理論式は実験結果をよく評価しているものと考えられる。

参考文献

1. 大西昭徳、楳谷栄次、謝 爽：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、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 18, No. 2, pp. 1151-1156, 1996. 7
2. 小川祥平、楳谷栄次、謝 爽：接合幅を有するプレキャスト部材接合部のダウェル筋のせん断伝達、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. 望月 重、楳谷栄次、永坂具也：壁式プレキャスト構造鉛直接合部のせん断耐力—ダウェル効果および圧縮拘束力を考慮した場合、日本建築学会構造系論文報告集第 424 号、pp. 11 ~22、1991 年 6 月

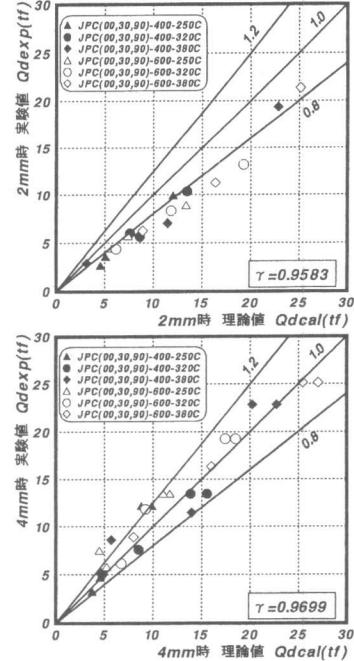


図-9 実験値と理論値の比較