

# 論文 モルタル充填式鉄筋継手を有する PCa 耐力壁の降伏後挙動に関する研究

辻口忠寛\*1・榎谷栄次\*2・新藤健太\*3・小曾根茂雄\*4

**要旨:** モルタル充填機械式鉄筋継手で結合された壁式プレキャスト鉄筋コンクリート耐力壁の接合界面におけるせん断伝達機構に関する研究資料が乏しいために、せん断伝達の影響を調べる曲げせん断実験を行った。その結果、接合筋が破断に至った。この原因として界面におけるすべり変形により大きく影響されていると考え、実験結果に対する検討を行った。実験結果より、PCa部材はRC部材と同様もしくはそれ以上の構造性能を示したことが確認された。

**キーワード:** 耐力壁、プレキャスト、せん断、継手、かさ上げ高さ、

## 1. はじめに

近年の、壁式プレキャスト鉄筋コンクリート(以後PCaと呼ぶ)構造は、モルタル充填機械式鉄筋継手を用いた工法を介して発展してきた。しかし、モルタル充填機械式鉄筋継手で結合されたPCa耐力壁の接合界面におけるせん断伝達機構に関する研究資料は乏しい。

本研究において、終局時に接合筋の破断が認められたが、その現象に対しての原因ははまだ解明されていない。よって、本研究ではプレキャスト耐力壁において<sup>①</sup>接合界面から継手下端部までの距離(以後かさ上げ高さと呼ぶ)、<sup>②</sup>接合モルタルの厚さ、<sup>③</sup>鉛直接合筋の本数といった影響因子が接合界面におけるせん断伝達に及ぼす影響を曲げせん断実験を行い、以前行われた実験<sup>②</sup>による継手の構造性能を再確認すると共に、鉛直接合筋に引張応力以外にせん断応力が作用し、複合応力を受ける場合の接合筋破断時までの力学的挙動を把握することを目的とした実験を行った。以下にその研究成果を報告する。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

試験体WPC-S3(プロトタイプ)を図-1に示す。試験体総数は7体で表-1に示すようにWPC-S1~S6にはPCa部材を適用し、PCa部材と比較を行うため継手を用いないものとしてRC部

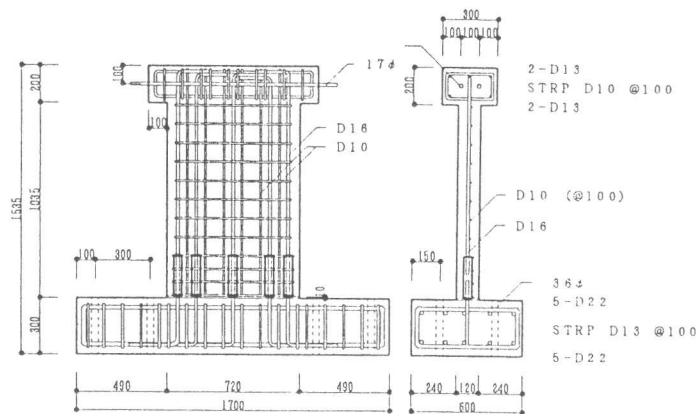


図-1 試験体配筋図(WPC-S3)

表-1 試験体概要一覧

試験体名	スリ-ブの有無 (有/無)	スリ-ブのかさ上げ (mm)	数mm厚さ (mm)	接合筋総数 (本)	中間接合筋有無 (有/無)	せん断スパン長さ (mm)
WRC	無	-	-	5	有	1035
WPC-S1	有	0	10	2	無	
WPC-S2				3	有	
WPC-S3				5		
WPC-S4		60	20	2	無	
WPC-S5				3	有	
WPC-S6				5		

各試験体とも一定軸力 $\sigma_0 = 10 \text{ kgf/cm}^2$ を載荷する。

\*1 関東学院大学大学院(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(正会員)

\*4 東京鐵鋼(株)(正会員)

材を用い、WRCとした。試験体断面形状は $12 \times 72 \times 103.5 \text{ cm} (\text{b} \times \text{D} \times \text{H})$ とし、試験体における鉛直接合筋はD16(SD390)とし、せん断補強筋はD10(SD390)を使用した。またコンクリート設定目標強度は $300 \text{ kgf/cm}^2$ とした。試験体に使用したコンクリート、接合モルタル及び鉄筋の材料性状をそれぞれ表-2、表-3及び表-4に示す。その他に、シアスペン比は1.44となった。

## 2.2 加力方法

加力方法は、水平方向に取り付けた押し引き両用の30t油圧シリンダー-オイルジャッキにより正負交番繰り返し載荷を行い、加力点高さは113.5cmとした。同時に鉛直方向においては、300t油圧シリンダー-オイルジャッキにより一定軸力 $\sigma_0 = 10 \text{ kgf/cm}^2$ を載荷した。加力装置の詳細については図-2に示す。加力スケジュールを図-3に示す。

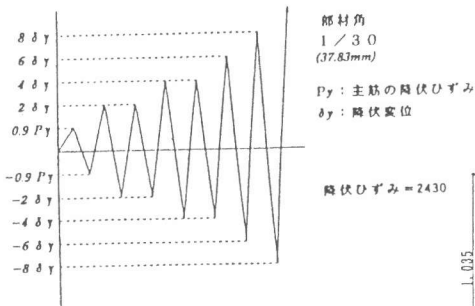


図-3 加力スケジュール

## 2.3 測定方法

測定方法は、図-4に示すように頂部及び各部の水平変位、脚部の目

開き変位及びすべり変位は、それぞれの測定位置にピストン型高感度変位計を設置し、鉛直方向接合筋のひずみ、壁部のせん断補強筋のひずみはワイヤーストレインゲージを貼付し測定した。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 ひび割れ及び破壊性状

各試験体の最終破壊性状を図-5に示す。全試験体において、鉛直方向接合筋の降伏を向かえ

表-2 コンクリート試験結果一覧

試験体名	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数 ×10 <sup>6</sup> (kgf/cm <sup>2</sup> )	※7割比	材令 (日)
WRC	459	34.5	3.18	0.33	49
WPC-S1	277	24.5	1.75	0.25	49
WPC-S2	386	28.3	2.00	0.14	54
WPC-S3	354	37.8	2.66	0.22	55
WPC-S4	416	35.2	2.10	0.16	46
WPC-S5	474	35.3	1.80	0.10	57
WPC-S6	451	31.4	2.20	0.16	53

表-3 接合モルタル試験結果一覧

試験体名	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数 ×10 <sup>6</sup> (kgf/cm <sup>2</sup> )	※7割比	材令 (日)
WPC-S1~6	455	26.2	2.15	0.27	28

表-4 鉄筋引張試験結果一覧

種類	呼び強度	引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	降伏点強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数 ×10 <sup>6</sup> (kgf/cm <sup>2</sup> )	伸び率 (%)
D10	SD390	6408	4648	1.94	12.9
D16	SD390	5980	4171	2.14	13.6

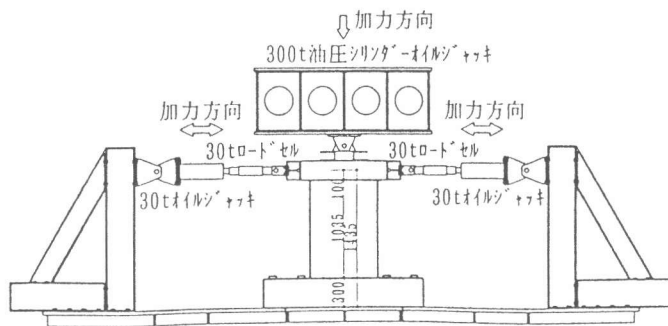


図-2 加力装置図

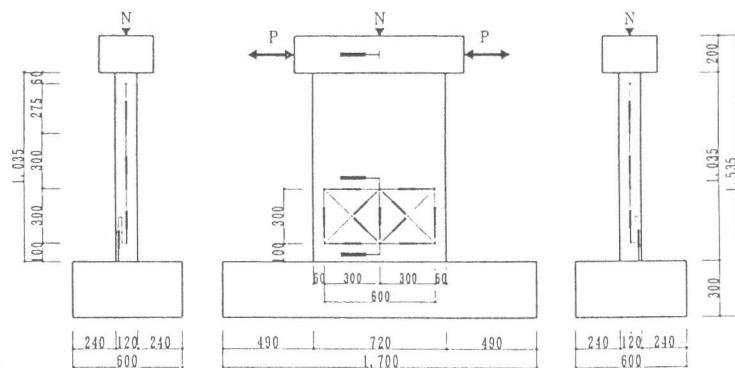


図-4 変位計取付詳細図

る前に接合モルタル-下スタブ間の接合界面に初亀裂が発現し、その後壁脚部に曲げ初亀裂が発現した後に、P C a 部材は壁部-接合モルタル、接合モルタル-下スタブ間の接合界面の両面で亀裂が貫通したのが確認された。その後に壁部-下スタブ間の接合モルタル部の圧壊が始まった。引張側の鉛直接合筋のかぶりコンクリートから付着亀裂が発現し、それ以降、その亀裂が伸び、亀裂幅も大きくなった。その後、右壁脚部の亀裂が大きく開き、継手のかぶりコンクリートが試験体本体から剥落した。終局時にWPC-S1, S2, S3, S5, S6の引張側最外端鉛直接合筋が、かさ上げ無しのもので下スタブ面より約35mm、かさ上げ60mmのもので約70mmの位置で破断が確認された。

鉛直接合筋の本数が増加すると、亀裂の本数が多く、試験体壁部全面に発現した。また、かさ上げ60mm・接合モルタル20mmとかさ上げ無し・接合モルタル10mmの試験体とで比較すると、亀裂の入り方にあまり差が見られなかったが、前者の方が壁脚部の破壊が激しかった。

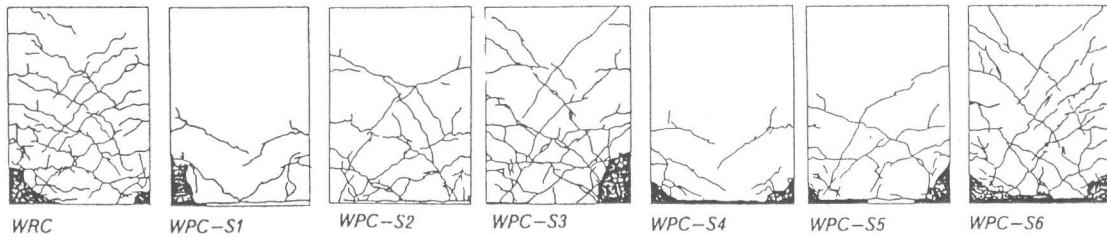


図-5 各試験体最終破壊性状

### 3.2 荷重-変形履歴曲線

実験より得られた荷重-部材角に関する履歴曲線を試験体WPC-S3 (プロトタイプ) について図-6 に示す。また、各試験体の比較検討を行うため荷重-部材角曲線による包絡線を図-7 に示す。コンクリート一体打部材と、P C a 部材のかさ上げ有り、無しの3体 (以下WRC、WPC-S3、WPC-S6とする) について考察すると、WPC-S3においては、負側サイクルで最大耐力がWRCをやや上回った。次に、かさ上げの有無、敷モルタルの厚さの違い (10mm、20mm) を接合筋本数に分け検討すると、これより、かさ上げ無しで敷モルタル10mmの方が耐力が高く、最大荷重後の耐力低下率も低いことが認められる。

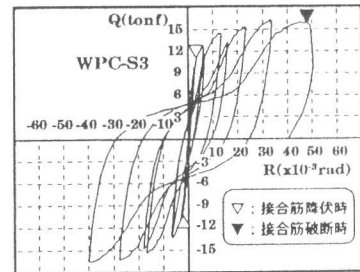


図-6 荷重-部材角曲線 (WPC-S3)

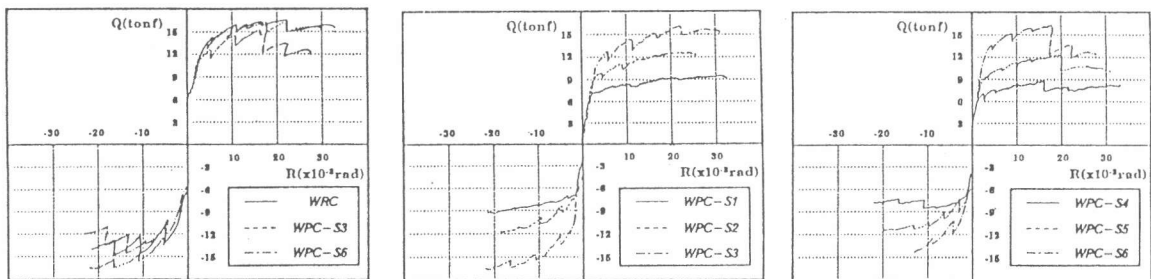


図-7 包絡線

### 3.3 降伏以降の力学的特性

実験より得られた試験体WRC、WPC-S3における正加力時の荷重-部材角曲線による包絡線をそれぞれ図-8、図-9、見かけ上の鉄筋の伸び変形(壁脚部の目開き量)による包絡線をそれぞれ図-10、図-11、荷重-すべり曲線に対する包絡線をそれぞれ図-12、図-13に示す。最大荷重時ではWRCよりWPC-S3の方が荷重が若干大きく発現し、最大荷重時以降において見てみると、WRCは

低下していることがわかる。この一つの原因として壁脚部が圧壊したことが考えられる。また、見かけ上の鉄筋の伸び変形においては、WRCよりもWPC-S3の方が伸び変形量で約1.5倍の変形を示しており、WRCよりもWPC-S3の方が大きく変形していることがわかる。すべり変形においてもWRCよりもWPC-S3の方が約1.6倍の値を示している。WPC-S3に関しては終局時に鉄筋の破断が確認されたが、WRCに関しても実験終了後に接合筋を確認したところ、局部的に伸び変形による鉄筋径の減少が確認された。

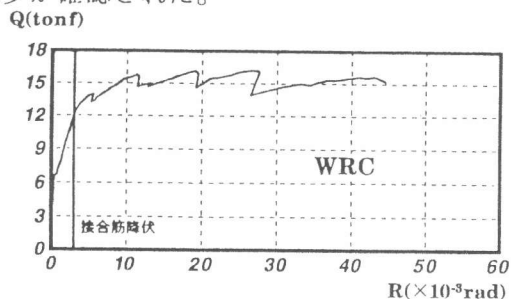


図-8 荷重-部材角(WRC)

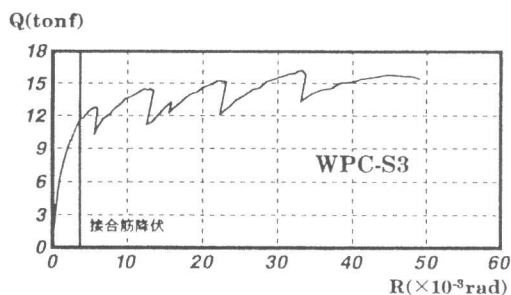


図-9 荷重-部材角(WPC-S3)

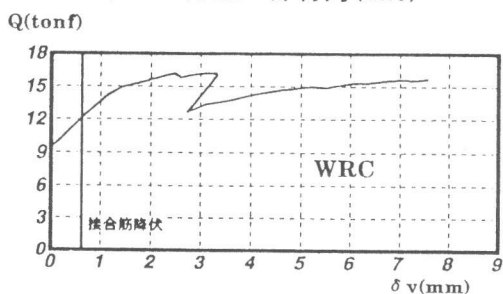


図-10 見かけ上の鉄筋伸び変形(WRC)

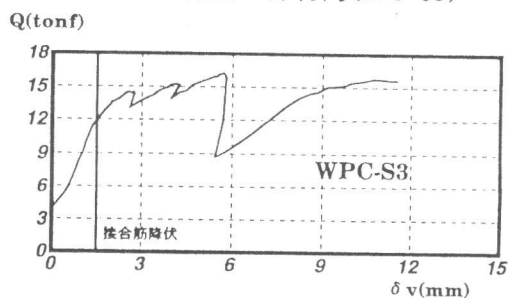


図-11 見かけ上の鉄筋伸び変形(WPC-S3)

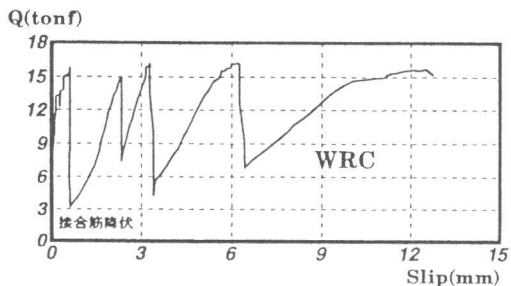


図-12 荷重-すべり量(WRC)

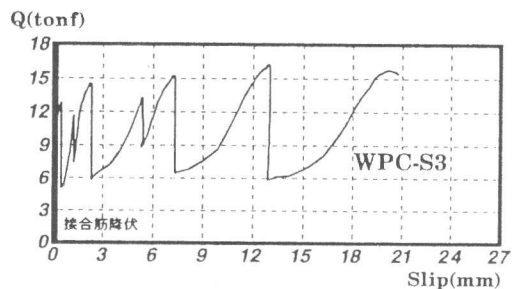


図-13 荷重-すべり量(WPC-S3)

### 3.4 接合筋破断時の特性

図-14に荷重と最大すべり量が見受けられた時の変位の関係について示す。すべり量を見てみると、接合筋の破断が認められた試験体については、最大すべり変形量が約12mm以上の値を示している。図-15に接合筋降伏時変位、図-16に接合筋破断時変位を示す。接合筋破断時変位については、接合筋本数が増えるほど接合筋破断時変位は、大きくなる傾向があり、接合モルタル厚さが厚い方が接合筋破断時変位は、大きくなっている。曲げせん断を受けたP

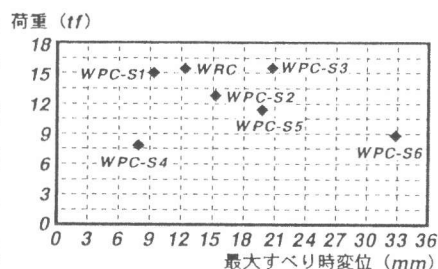


図-14 荷重とすべり量 の関係

C a 耐力壁において引張力を受けた鉄筋は、界面におけるすべり変形によって、ダウエル作用が生じ、鉄筋の曲げモーメントが最大になる箇所（界面から壁の内部に入った所）で塑性ヒンジが形成される。このヒンジでは、曲げ、引張、せん断による複合応力が作用する。本実験ではこの

ヒンジに相当する箇所、最終的に壁はすべりによる変形が特に大きいためダウエル作用によるせん断力により接合筋が破断したものと考えている。破断した接合筋を見ても約45°

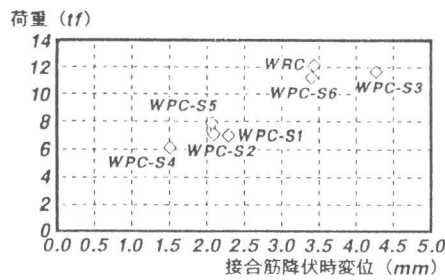


図-15 接合筋降伏時変位

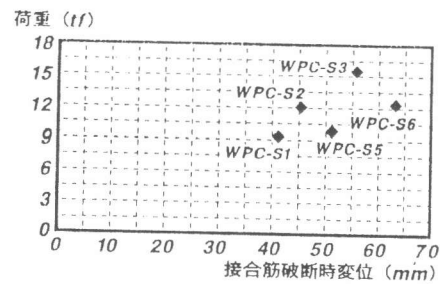


図-16 接合筋破断時変位

の角度で破断しているのが確認されたことからせん断が卓越したものと考えられる。

### 3.5 各種変形成分

試験体WRC、WPC-S3（プロトタイプ）について正加力時における全体変形に対する各変形成分の割合を図-17に示す。降伏以降の変形成分比については、図からもわかるようにWRCにくらべWPC-S3の方が目開きによる回転変形の割合が多く占められている。また、すべり変形の割合においても同様のことが認められ、サイクルが増すごとに成分比が増加することがわかる。

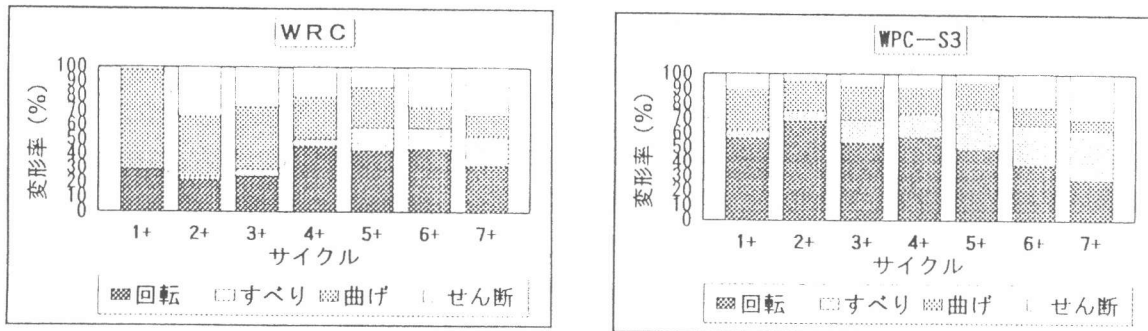


図-17 全体変形に対する各成分の割合

### 3.6 等価粘性減衰定数

履歴曲線より得られた降伏以降の等価粘性減衰定数と部材角の関係を図-18に示す。WRCとWPC-S3について、最大荷重時において両者とも約23%程に存在しており、初期時から最終時においてほとんど差が見られないものの最終時においてWPC-S3の方が若干だが上回っている。復元力は約 $13 \times 10^{-3}$  rad以降は向上する度合いが小さいことがわかる。

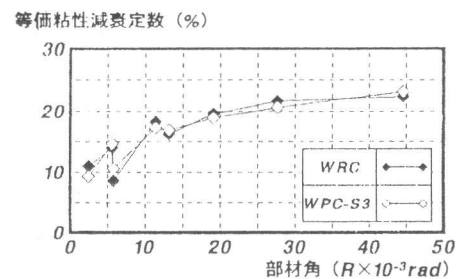


図-18 降伏以降の部材角と

等価粘性減衰定数の関係

## 4. せん断伝達理論による検討

### 4.1 理論と実験結果の比較

PC a部材が曲げモーメント、せん断力及び軸方向力を受けると、接合面にせん断力が伝達される。このせん断伝達能力は継手直上部に形成された圧縮ストラットと引張鉄筋の合成によるタイ作用と軸方向力によって部材内に生ずるアーチ作用による摩擦力と圧縮鉄筋によるダウエル作用の累加により、次式のように表される。<sup><1></sup>

$$Q_u = \mu_t \cdot \sigma_y \cdot (a_t \cdot \gamma \cdot a_{tm}) + \mu_s \cdot N + \phi \cdot C_d \cdot \sigma_B \cdot a \cdot [d_r \cdot (\delta_s / \delta_{su})^{1/2} \cdot \dots] \quad (1)$$

ここでは、 $\mu_t = \xi / \lambda$  ( $\lambda = H/D$ :シラス $^\circ$ ソ比、 $\xi = 0.8$ :係数)

$$\mu_s = (1 - \eta) / 2\lambda \quad (\eta = N/bD\sigma_B)$$

上記のせん断耐力式(1)<sup><1></sup>で、 $\mu_t$ 、 $\mu_s$ は接合筋が引張を受けることで生じるコンクリートの圧縮力と軸方向力によるせん断伝達を見かけ上の摩擦としてそれぞれを表現し、これを見かけ上の摩擦係数と呼ぶ。 $a_t$ 、 $a_{tm}$ はそれぞれ接合筋の断面積、中央筋の断面積、 $\gamma$ は中央筋の位置に関する係数(中央の時とし $\gamma = 0.5$ )、 $\phi$ は低減係数( $\phi = 0.5$ )、 $C_d$ は支圧係数( $C_d = 3.0$ )、 $\sigma_B$ はコンクリート圧縮強度、 $b$ 、 $D$ は壁幅及び壁高を示す。 $a$ は接合モルタル厚さ、 $d$ は接合筋径を示す。今回のダウエル力の算定にあたっては圧縮鉄筋のみ考慮し、 $\delta_{su}$ 、 $\delta_s$ はそれぞれ最終時、最大荷重時のすべり量を用いた。

計算結果と曲げせん断実験より得られた最大荷重の結果を図-19上にプロットした。図からも良くわかるように計算値は実験値の $\pm 20\%$ 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旨く推定していることがいえる。

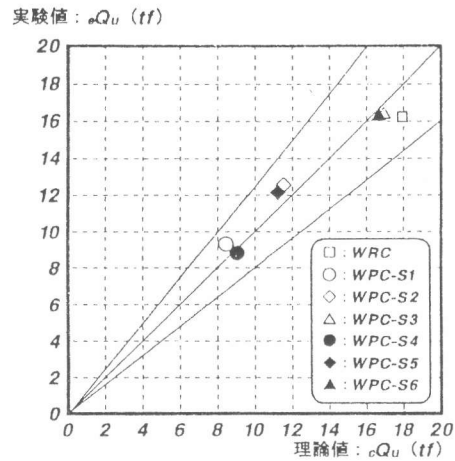


図-19 計算値と実験値の比較

## 5. まとめ

モルタル充填式鉄筋継手を有するP C a 耐力壁の曲げせん断実験及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)最大荷重について、R C 部材(WRC)とP C a 部材(WPC-S3)とではほとんど差が見られず、むしろ若干だがP C a 部材の方大きく発現した。
- (2)全変形に対する各変形成分の割合において、R C 部材よりもP C a 部材は回転変形、すべり変形ともに高い値を示した。
- (3)せん断伝達理論式により得られた結果と、実験より得られた最大荷重との誤差は約10%であった。よって理論式は実験結果を良く評価しているものと考えられる。

一体打ちとP C a 部材とではほぼ同等の性能が得られた。さらには継手の構造性能も含め、P C a 部材でかさ上げ無し・敷モルタル10mm試験体は一体打ちの構造性能以上のものがあると考えられる。破断が確認された接合筋は回転変形量、すべり変形量ともに大きな値を示していることから、回転による引張力を受けた状態で、界面における大きなすべり変形により、ダウエル作用が生じ、45°方向に破断した事実からも最終的にはせん断が卓越して鉄筋が破断したものと考えられる。

継手から鉄筋が引き抜ける事なく、破断に至った事からも継手に関する付着性能を十分に有していると考えられる。

## 参考文献

- <1>横谷栄次、王功、小曾根茂雄、謝爽：  
高強度鉄筋用機械式継手を有するP C a 部材の力学的挙動に関する研究、日本建築学会、構造工学論文集、Vol.40B 1994年3月
- <2>高実子光、横谷栄次、新藤健太、謝爽：  
モルタル充填式スリーブ継手を用いたP C a 耐力壁の構造性能に関する研究、コンクリート