

論文

[2130] 高層 PCa 壁式ラーメン壁柱の構造性能に関する研究

新藤健太^{*1}・槇谷栄次^{*2}・岡田賢一^{*3}・小曾根茂雄^{*4}

1. 研究目的

本研究は、HFW構法をプレキャスト化することを目的とする「高層壁式プレキャストラーメン鉄筋コンクリート構法の開発研究」⁽¹⁾の継続研究として、11層の桁行き方向のプレキャスト(以後PCaと略す)壁式フレームにおける第1層中壁柱の脚部に対する構造性能を調べるため、片持ち加力方式による部材の曲げ・せん断実験を行った。これより、PCa部材の接合モルタル層が力学的挙動に与える影響に関して調べた。また、壁式PCa柱の水平接合部におけるせん断抵抗メカニズムを修正 Mohr-Coulomb のコンクリート破壊規準によって検討を行った。以下に研究成果を報告する。

表-1 試験体構造諸元一覧

試験体名	柱幅 b (mm)	柱成 D (mm)	柱高 H (mm)	*1 h _m (mm)	$\frac{100(b-t)(D-t)}{b \cdot D}$ (%)	引張 鉄筋比 (%)	せん断 補強筋比 (%)	軸力比	接合 モルタル 種類
WR-PC-01	300	900	1035	10	100	1.03	1.81	0.1	従来 モルタル
WR-PC-02				80 *2					
WR-PC-03				100					
WR-PC-04				100					

*1 接合モルタル厚 *2 接合モルタルの欠陥を考慮、周囲を均等に面積比で20%低減した

2. 実験概要

2.1 試験体

本実験に用いた試験体は実際に構造設計されたPCa中壁柱の1/2スケールを考慮、全てPCa試

験体総数4体で、コンクリート設計規準強度を330kgf/cm²として行った。試験体の構造諸元一覧を表-1に示す。また試験体配筋図を図-1に、接合モルタル形状図を図-2にそれぞれ示す

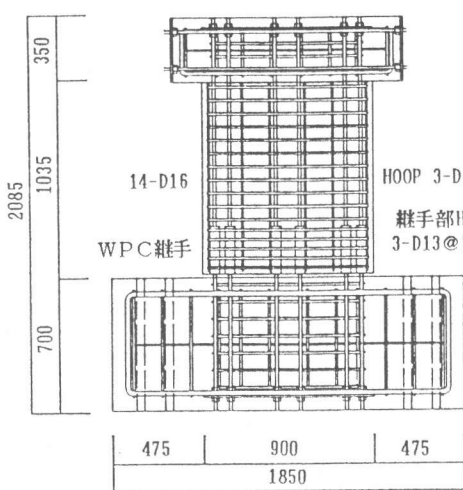


図-1 試験体配筋図

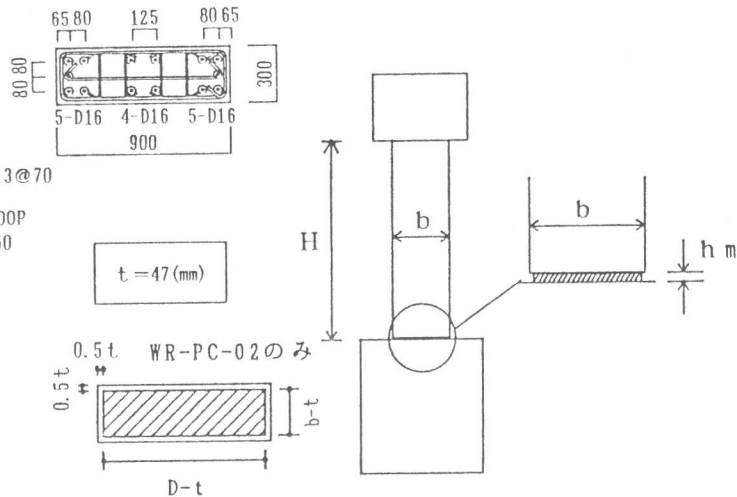


図-2 接合モルタル形状図

2.2 加力方法・測定方法

加力方法は、図-3に示すようにオイルジャッキにより水平加力と軸力を同時に加えた。反力

*1 関東学院大学大学院(正会員)

*3 (株)日建ハウジングシステム(正会員)

*2 関東学院大学教授 工学部建築学科 工博(正会員)

*4 東京鉄鋼(株)(正会員)

点高さ $h = 121\text{cm}$ とし、変位制御により正負交番繰返し载荷をした。図-4 に加力サイクルを示す。また軸圧縮応力は、 $\sigma_o = 33\text{ kgf/cm}^2$ とした。

測定方法は、図-5 に示すような高感度変位計により試験体各部の変位を測定し、鉛直方向接合筋およびせん断補強筋の歪みをストレインゲージによって測定した。ひび割れ発生状況は、目視により観察した。

3. 実験結果および考察

3.1 材料性状

試験体に使用した鉄筋の機械的性質を表-2 に、コンクリートの試験結果を表-3 にそれぞれ示す。

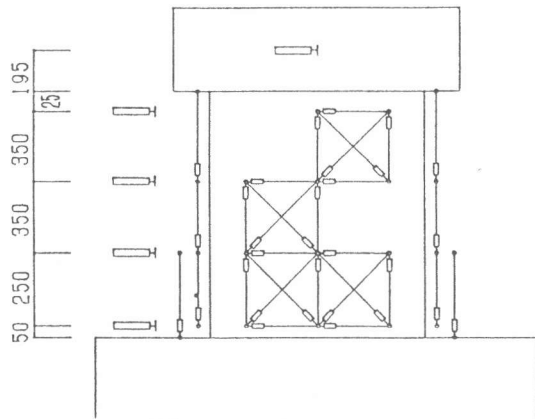


図-5 変位計取付位置

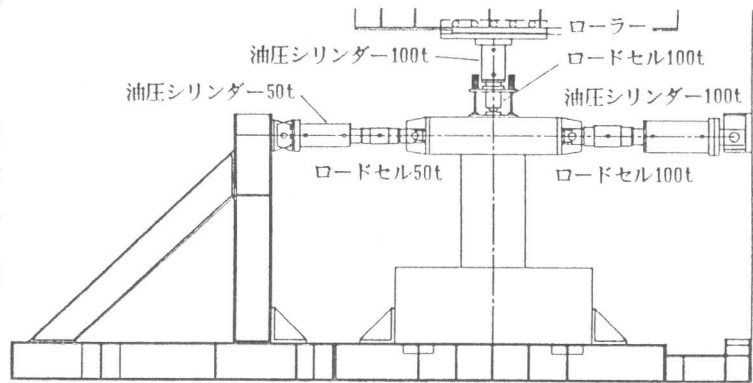


図-3 加力装置図

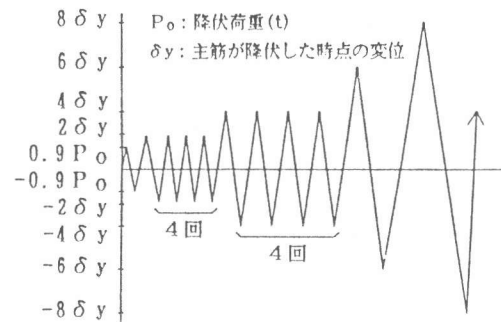


図-4 加力スケジュール

表-2 鉄筋の機械的性質

種類	呼び強度	引張強度 (kgf/cm ²)	降伏強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 (x10 ⁵ kgf/cm ²)
D 1.3	SD390	6034	4659	2.06
D 1.6	SD390	5670	4355	1.99

表-3 コンクリート材料試験結果

試験体名	コンクリート			接合モルタル			グラウト	
	圧縮強度 (kgf/cm ²)	割裂強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 (x10 ⁵ kgf/cm ²)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	割裂強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 (x10 ⁵ kgf/cm ²)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 (x10 ⁵ kgf/cm ²)
WR-PC-01	353	32.7	2.28				647	2.76
WR-PC-02	445	38.0	2.60	406	35.3	2.64	1013	2.58
WR-PC-03	330	32.3	2.41				949	2.01
WR-PC-04	313	34.9	2.17				647	2.76

3.2 破壊性状

試験体の最終破壊性状を図-6 に示す。接合モルタルを全底板面積に対し周辺を均等に20%欠損させた試験体WR-PC-02を除く試験体で、引張鉄筋の降伏後圧縮縁のコンクリートが圧壊したが、WR-PC-02試験体のみ圧縮縁のコンクリートの圧壊はほとんどみられなかった。その後全試験体と

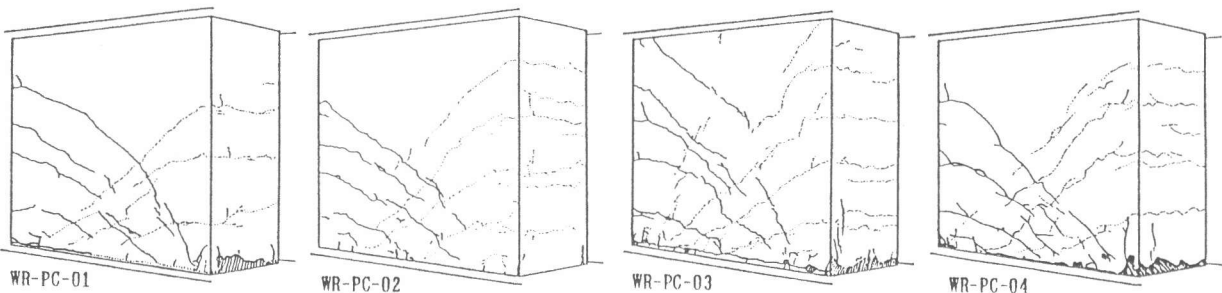


図-6 最終破壊性状

も、耐力の増加はみられなかった。破壊形式は、全ての試験体において曲げ降伏破壊であったと考えられる。

3.3 荷重-変形履歴曲線

図-7に試験体のP- δ 曲線を示す。最大耐力は、接合モルタル20%欠損の試験体WR-PC-02が、標準タイプのWR-PC-01と比べ、予想に反して約2%程度の耐力低下であった。これは接合モルタルが主筋のダウエル効果によって割裂ひび割れを発生し、その端部が欠損部に押し出され、欠損部の面積が減少したためと思われる。接合モルタル厚20mmであるWR-PC-03試験体、スリーブ内に充填するグラウトモルタルを接合モルタルとして用

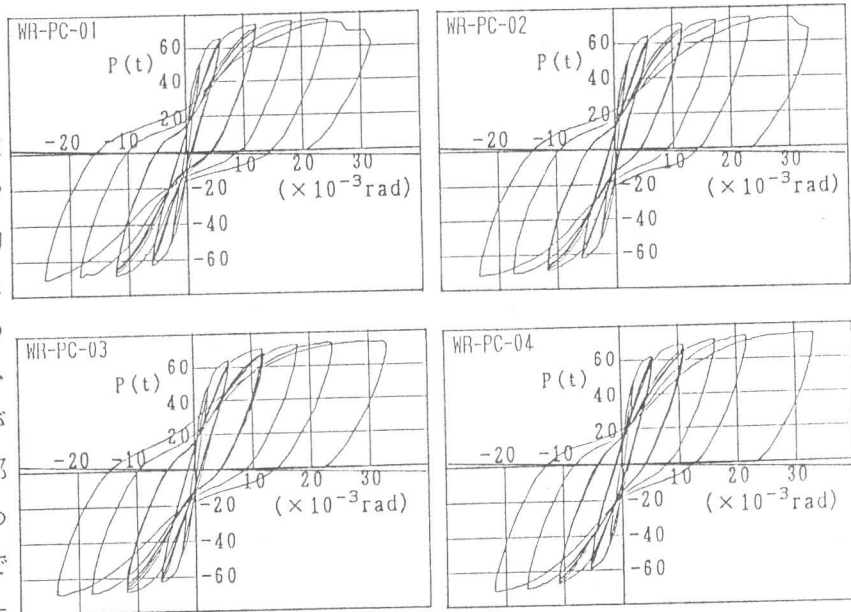


図-7 荷重-変形曲線

いた試験体WR-PC-04はいずれもWR-PC-01と比べ、若干耐力が低くなったが、最終サイクルまで耐力低下はみられず、靱性能についての差はみられなかった。また最終サイクルにおいて、WR-PC-01試験体で2回、WR-PC-02試験体で1回それぞれ耐力低下がみられたが、実験終了後に試験体を調べたところ、WR-PC-01試験体の引張側鉛直接合筋が、スリーブ直下で1箇所破断したのが確認された。WR-PC-02試験体についても、確認はできなかったものの鉛直接合筋の破断が類推される。

3.4 試験体の変形量

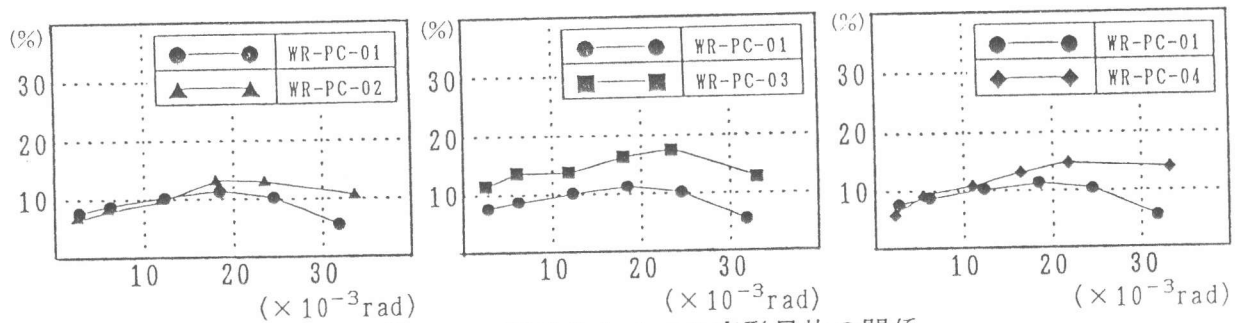


図-8 部材角とすべり変形量比の関係

図-8に各試験体の部材角-すべり変形量比の関係を示す。すべり変形量比は全体の変形に対するすべり変形の割合で、すべり変形量を全体変形量で除した値とした。敷モルタルの影響を比較すると、WR-PC-03試験体を除く3体はほとんど差がなく、最大15%程度になっている。WR-PC-03試験体は、すべり変形量比がやや高く発現している。このことから、敷モルタル厚が増加するとすべり

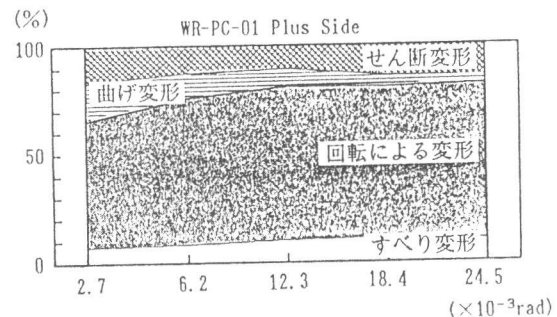


図-9 全体変形に対する変形要素

変形量はやや大きくなる傾向が認められた。

また図-9にWR-PC-04試験体の全体変形における各変形要素の割合を示す。変形成分の約60~70%が目開きによる回転変形であることが分かる。

3.5 等価粘性減衰定数

試験体の復元力特性を調べるために等価粘性減衰定数を算出した。部材角と等価粘性減衰定数の関係を図-10に示す。敷モルタル部にグラウトモルタルを使用したWR-PC-04試験体に若干靱性の伸びがみられるが、各試験体ともほぼ同等な復元力特性を示しており、また接合モルタルの影響もほとんど無いものと思われる。

3.6 曲げ終局耐力

曲げ終局耐力を算出するのに用いた評価式を以下に示し、算定値と実験値の比較一覧を表-4に示す。また1992年度の試験体⁽¹⁾を含めた曲げ終局耐力における算定値と実験値の関係を図-11に示す。実験値と算定値を比較すると、1.01~1.05とたいへんよく適合している。また1992年度の試験体を含めても0.95~1.05と、ばらつきはあまり見られない。1992年度の試験体にわずかではあるが過大に評価されているものがある。

$$cQ_{mu} = D / H [0.74(a_t + 0.5a_w)\sigma_y + 0.5N(1 - \frac{N}{bD\sigma_B})]$$

ここで、 a_t : 引張側主筋断面積 σ_y : 主筋の降伏強度
 a_w : 中間部主筋断面積 σ_B : コンクリート圧縮強度
 N : 軸方向力

4. 接合モルタル層のせん断伝達

4.1 降伏線とコンクリートの破壊基準

PCa部材が曲げ・せん断および軸方向力を受けると、PCa部材の圧縮領域に接合したモルタル層には、曲げおよび軸方向力による圧縮力 c とせん断力 Q が作用する。図-12に示すようにこの圧縮力による変位を一樣に仮定し、せん断力によってPCa部材の圧縮領域と接合モルタルの界面で変位が不連続になる線、すなわち降伏線について考える。両者の相対変位はX軸と α の角度を持つベクトル v によって表される。接合モルタル層における塑性ひずみは次式で与えられる。

$$\dot{\epsilon}_x = 0, \quad \dot{\epsilon}_y = \frac{v}{t} \sin \alpha, \quad \dot{\gamma}_{xy} = 2\dot{\epsilon}_{xy} = \frac{v}{t} \cos \alpha \quad (1)$$

ここで、 t は接合モルタル厚さである。

コンクリートの破壊基準として、図-13に描かれているように、修正 Mohr-Coulomb の降伏条件を採用する。これより、次のすべり基準が導かれる。

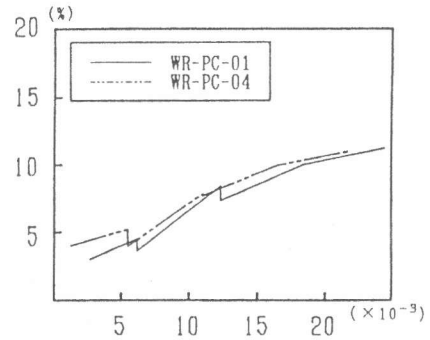


図-10 等価粘性減衰定数

表-4 曲げ終局耐力算定値 単位: tf

試験体名	実験値		計算値	
	降伏荷重 eQ_y	最大耐力 eQ_u	曲げ終局耐力 cQ_{mu}	実/計
WR-PC-01	53.7	77.0	73.4	1.05
WR-PC-02	53.4	75.2	74.0	1.02
WR-PC-03	51.9	74.1	73.2	1.01
WR-PC-04	51.4	74.8	73.0	1.02

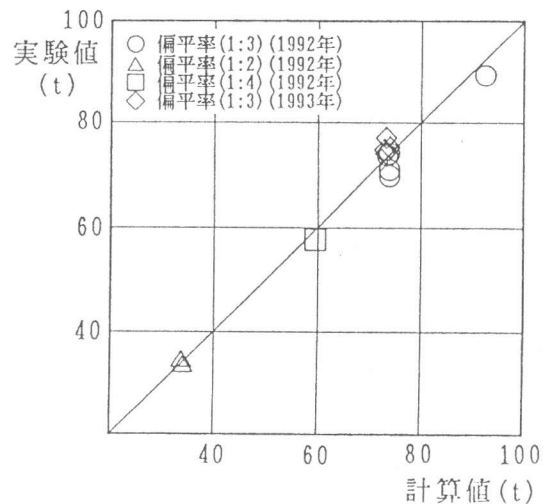


図-11 実験値と計算値の比較

$$\tau = c - \sigma \tan \phi \quad (2)$$

ここで、 τ 、 σ は接合モルタル断面に作用するせん断応力と垂直応力、 c は付着力、 ϕ は内部摩擦角を示す。

4.2 せん断伝達能力

Jensen の不連続理論を用いると、図-13から内部塑性仕事 D_A は、ベクトル OQ と変位ベクトル v のスカラー一積によって次式のように導かれる。(3)

$$\begin{aligned} D_A &= OQ \cdot v = (OM + MQ) \cdot v \\ &= (R - \sigma t) v \sin \alpha + R v \end{aligned} \quad (3)$$

ここで R は、幾何学的関係から次式で与えられる。

$$R = \frac{1}{2} \sigma_B - \sigma t \frac{\sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (4)$$

ここで $\sigma_B \cdot \sigma t$ は、それぞれモルタルの引張および圧縮強度を示す。

(4)式を(3)式に代入すると、 D_A は次式のように書き改められる。

$$D_A = v \left(\frac{1 - \sin \alpha}{2} \sigma_B + \frac{\sin \alpha - \sin \phi}{1 - \sin \phi} \sigma t \right) \quad (\alpha \geq \phi) \quad (5)$$

外部塑性仕事 W_E は、降伏線に沿って作用するせん断力 Q_{jm} と垂直方向に作用する圧縮力 $\sigma \cdot A_j$ によって、次式のように書き表せる。

$$W_E = Q_{jm} \cdot v \cos \alpha - \sigma \cdot A_j \cdot v \sin \alpha \quad (6)$$

ここで A_j がせん断面積とすると、 $\sigma = c/A_j$ で与えられる。

極限解析より、(5)式と(6)式を等しくおき、引張強度 σt は小さいので無視すると、接合モルタル層のせん断伝達能力は $\tau_{jm} = Q_{jm}/A_j$ となり、次式が導かれる。

$$\frac{\tau_{jm}}{\sigma_B} = \sigma_B \frac{1 - \sin \alpha}{2 \cos \alpha} + \eta \tan \alpha \quad (7)$$

ここで $\eta = \sigma/\sigma_B$ 。なお、本論では鉛直方向鉄筋のダウエル効果に関しては考慮していない。

4.3 PCa壁柱の実験結果との対応

PCa部材と接合モルタル層の界面ですべり破壊をするとき、 $\alpha = \phi$ となる。コンクリートに対する ϕ の取り得る範囲として、 $26.6^\circ \leq \phi \leq 45^\circ$ と考え、 $\phi_{\min} = 26.6^\circ$ を採用すると、(7)式から接合モルタル層のせん断伝達能力 τ_{jm} は、次式によって推定される(2)。

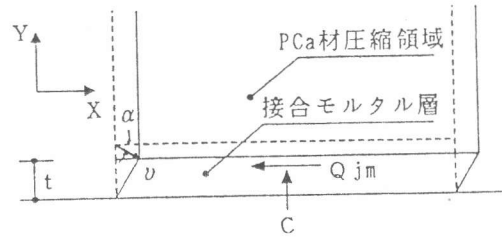


図-12 圧縮領域部接合モルタルの変位図

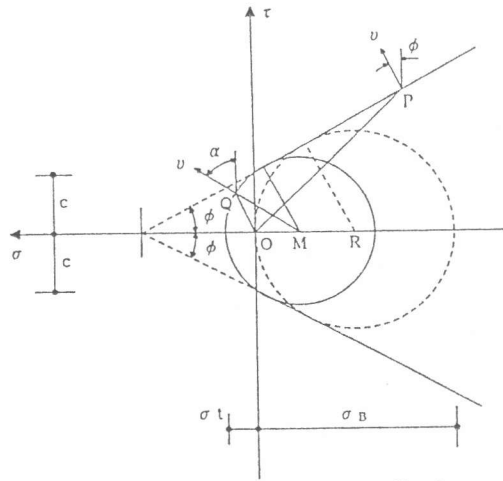


図-13 コンクリートの修正 Mohr-Coulomb の破壊基準

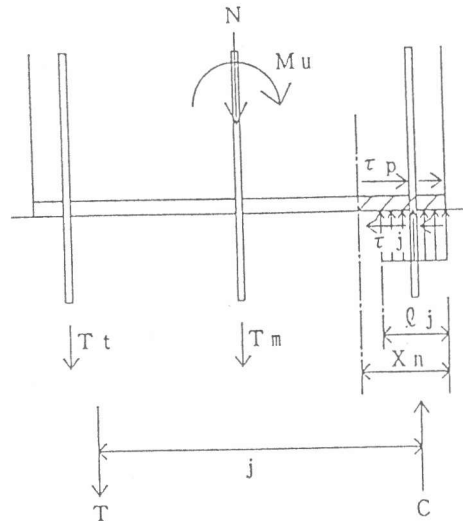


図-14 PCa壁柱の応力状態

$$\tau_{jm}/\sigma_B = 0.309 + 0.5\eta \quad (8)$$

接合モルタル層に作用する軸圧比 η には、曲げモーメントによる圧縮合力と軸方向力が含まれる。図-14に示すように、壁柱の応力中心間距離 $j = 0.8D$ 、圧縮応力に有効な接合モルタル層の長さ $l_j = 0.2D$ と仮定すると、軸力比 η はRC造壁柱の曲げ終局強度式から次式で書き表される。

$$\eta = \frac{1}{A_j \cdot \sigma_B} \left[0.93(\sum a_t + 0.5\sum a_w)\sigma_y + 0.63N \left(1 - \frac{N}{bD\sigma_B}\right) \right] \quad (9)$$

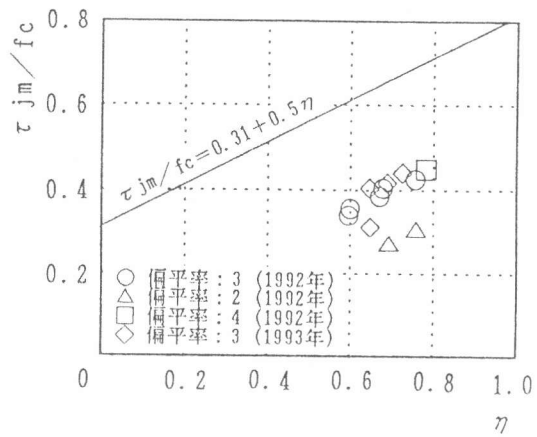


図-15 τ_{jm}/f_c と η の関係

ここで $A_j = 0.2b \cdot D$ (b は壁柱の幅：ただし接合モルタルが断面欠損している試験体については、実長さ)

PCa壁柱の τ_{jm}/σ_B と η の関係に対して、(8)式から得られた接合モルタル層のせん断伝達能力と、(9)式を用い、本実験の試験体(4体)と1992年度の試験体(8体)に対する実験結果を図-15に表した。これより、実験による接合モルタル層のせん断伝達能力は、パラメータ η が大きくなると(8)式と同じ傾きで増加することが認められ、実験結果よりせん断伝達能力に対して1.5~2.4倍の安全余裕度があるものと推定される。

5. まとめ

- (1). 全体変形に対するすべり変形量比は最大20%以下で、回転による変形量比は60~70%であった。
- (2). 接合モルタルを壁柱全底板面積に対し均等に20%欠損させた試験体において、接合モルタルの断面が100%の試験体に比して若干耐力の低下がみられたものの、ほぼ同等な挙動を示した。
- (3). 接合モルタルの厚さを20mmに増加した試験体についても、接合モルタル厚10mmの試験体に比して若干耐力の低下がみられたものの、ほぼ同等の挙動を示した。
- (4). PCa部材の接合モルタル層のせん断伝達能力は、曲げおよび軸方向力による圧縮応力に大きく影響されることが、本研究で導かれた推定式およびPCa壁柱の実験からも確認された。また曲げせん断と軸方向力を受けたPCa壁柱の接合モルタル層のせん断伝達能力は、実験結果との比較から、終局時において十分な余裕度が存在することも推定される。

[参考文献]

- (1). 槇谷栄次・岡田賢一ほか：高層PCa壁式ラーメン柱の力学的挙動に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 15、No. 2、pp. 677-682、1993. 6
- (2). 槇谷栄次ほか：WR-PC構法に関する共同研究-壁柱の実験(その3. 敷モルタルのせん断伝達)、日本建築学会大会学術講演梗概集、C構造II、pp. 525-526、1993. 9
- (3). Jensen, B. C. : Lines of discontinuity for displacements in the theory of plain and reinforced concrete, Magazine of Concrete Research, Vol. 27, no. 29, pp. 143-150, September 1975