

論文 高強度鉄筋用モルタル充填式鉄筋継手を有する高層 PCa 柱の力学的挙動に関する研究

新藤 健太*¹, 槇谷 栄次*², 小曾根 茂雄*³, 磯 健一*⁴

要旨：高層PCaラーメン構造の低層部に用いられる、高強度鉄筋用モルタル充填式鉄筋継手を端部に有するPCa柱部材の力学的挙動を調べるために、片持ちタイプの試験体を用いて曲げ実験を行った。これより高強度材料を用いたPCa部材の終局耐力に対して既往のモデルを用い、その適用性に関して実験結果から検証した。

キーワード：高強度材料, モルタル充填式鉄筋継手, 高層PCa柱, 曲げ終局耐力

1. はじめに

鉄筋、コンクリート材料の高強度化が進む中、プレキャスト(以下PCaと略す)接合部および継手近傍の構造要素が、力学的挙動に与える影響については不明な点が多い⁽¹⁾。本研究は、高層PCaラーメン構造の低層部に用いられる高強度鉄筋用に開発されたモルタル充填式スリーブ鉄筋継手を端部に有するPCa柱部材の構造性能を調べるために、片持ちタイプの試験体を用いて曲げ実験を行った。これより力学的挙動を調べるとともに、高強度鉄筋・高強度コンクリートを用いたPCa部材の曲げ終局耐力を既往のモデルを用い、得られた実験結果と比較を行った。以下にその研究成果を報告する。

2. 実験概要

2.1 試験体

本実験に用いた試験体構造諸元一覧を表-1に示す。試験体はPCa試験体5体、従来型一体打試験体(以下RCと略す)1体の計6体とした。

表-1 試験体構造諸元

試験体名	継手の有無	接合モルタル厚(mm)	軸力比 *1	せん断補強筋配筋 *2	継手部かぶり厚(mm)	備考	
RCN-01H	—	—	0.2	一般	—	一体打	
PC-02H	○	10	0	一般	15	PCa	
PCN-03H	○		0.2		端部集中	30	PCa
PCN-04H	○			15		一般	15
PCN-05H	○				0.4		
PCN-06H	○			PCa			

幅×成：(b)×(D)=450×450(mm) 引張鉄筋比： $P_t=0.57(\%)$
 加力点高さ： $H=1200(\text{mm})$ せん断補強筋比
 シアスパン比： $H/D=2.67$ (一般部)： $P_w=1.41(\%)$
 コンクリート強度： $F_c=600(\text{kgf/cm}^2)$ (継手部)： $P_{wj}=2.26(\%)$

*1 軸力比 $N/(b \cdot D \cdot F_c)$ *2 継手部のせん断補強筋位置, 配筋図参照

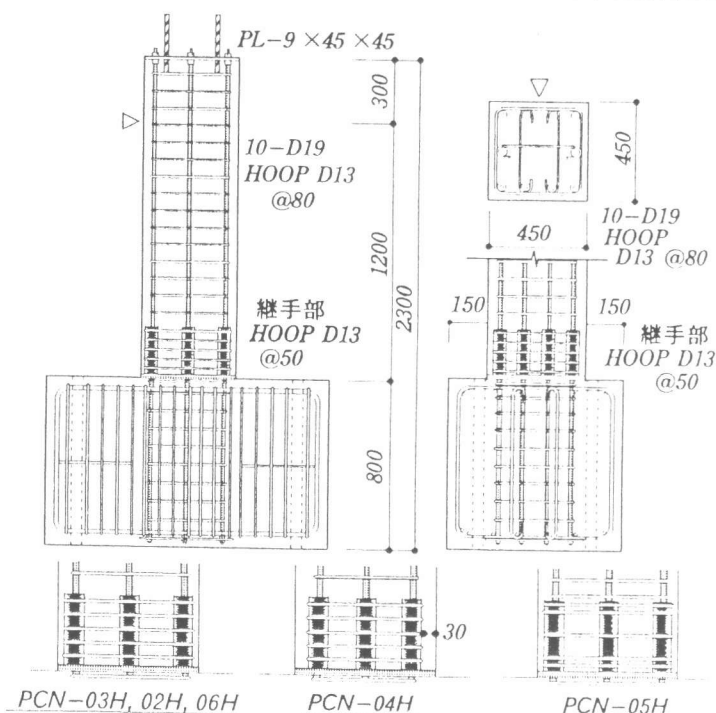


図-1 試験体配筋図

*1 関東学院大学大学院 工修(正会員)

*2 関東学院大学工学部建築学科 教授・工博

*3 東京鉄鋼(株)技術開発センター

*4 日本国上開発(株)技術開発研究所

共通要因として、コンクリート設定目標 600kgf/cm^2 、シアスパン比 $H/D=2.67$ 、引張鉄筋比 $P_t=0.57\%$ とし、変動要因としては、軸方向応力度係数(以下軸力比と略す)、継手部せん断補強筋配筋、かぶり厚とした。PCa試験体の配筋を図-1に示す。打設は柱部・基礎スタブ部とも横打にて行い、金属型枠面どうしを特に目荒し等の処理は行わずに接合した。接合(建方)に際しては、従来の敷モルタルは使用せず、継手内に注入するグラウトモルタルを、継手下端より接合モルタルとして流入させ、継手内と一体化する方式とした。

2.2 加力方法・測定方法

加力方法は、図-2に示すようにオイルジャッキにより水平力と軸方向力を同時に加えた。反力点高さ $h=120\text{cm}$ とし、変位制御による正負交番繰り返し载荷とした。図-3に加力サイクルを示す。

測定方法は、高感度変位計を図-4に示す位置に設置して試験体各部変位を測定した。鉛直接合筋およびせん断補強筋のひずみは、塑性域ワイヤーストレインゲージに

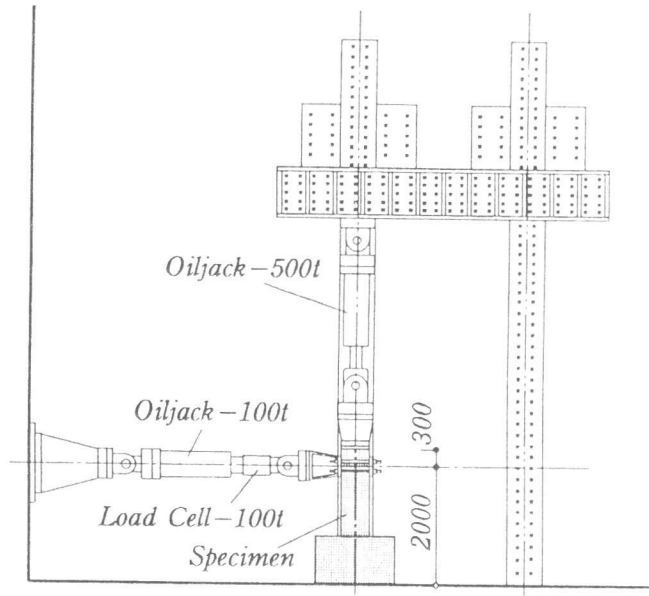


図-2 加力装置

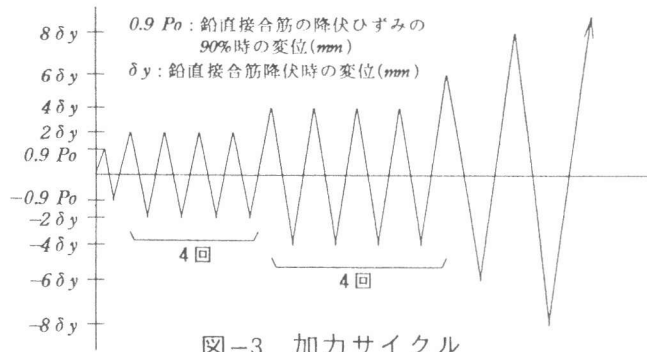


図-3 加力サイクル

表-2 鉄筋の機械的性質

径	位置	種類	降伏強度 (kgf/cm^2)	引張強度 (kgf/cm^2)	ヤング係数 ($\times 10^6 \text{kgf/cm}^2$)	伸び率 (%)
D19	主筋	SD490	5261	6890	1.96	9.2
D13	帯筋	SD785	8661	10656	2.07	12.9

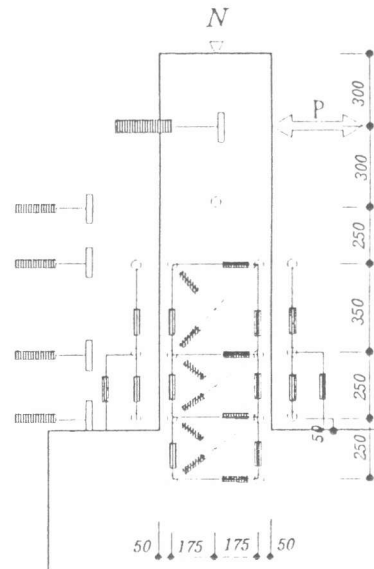


図-4 変位計取付位置

よって測定した。ひび割れ発生状況は目視により観測した。

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、コンクリート材料性状を表-3にそれぞれ示す。

表-3 コンクリート材料性状

試験体名	コンクリート			グラウトモルタル		
	圧縮強度 (kgf/cm^2)	割裂強度 (kgf/cm^2)	ヤング係数 ($\times 10^5 \text{kgf/cm}^2$)	圧縮強度 (kgf/cm^2)	割裂強度 (kgf/cm^2)	ヤング係数 ($\times 10^5 \text{kgf/cm}^2$)
RCN-01H	766	48.7	3.08	---	---	---
PC-02H	759	48.4	3.03	646	39.5	3.87
PCN-03H	783	44.7	3.16	798	45.5	4.41
PCN-04H	757	64.0	3.13	693	36.3	2.96
PCN-05H	728	31.3	2.71	806	40.9	3.67
PCN-06H	746	46.6	3.13	646	63.3	3.87

3.2 荷重-変形履歴曲線

実験から得られた荷重-部材角曲線を図-5に示す。図中X軸に対する斜線はP- δ 効果による影響を表している。本実験におけるPCa試験体の標準形(以下プロトタイプと呼ぶ)の試験体PCN-03Hは、RC試験体RCN-01Hに比して約7%最大耐力の上昇が見られた(正側)。これはPCa柱脚部に鉄筋継手が配置されているために、接合部近傍の剛性が上昇したためと考えられる。軸

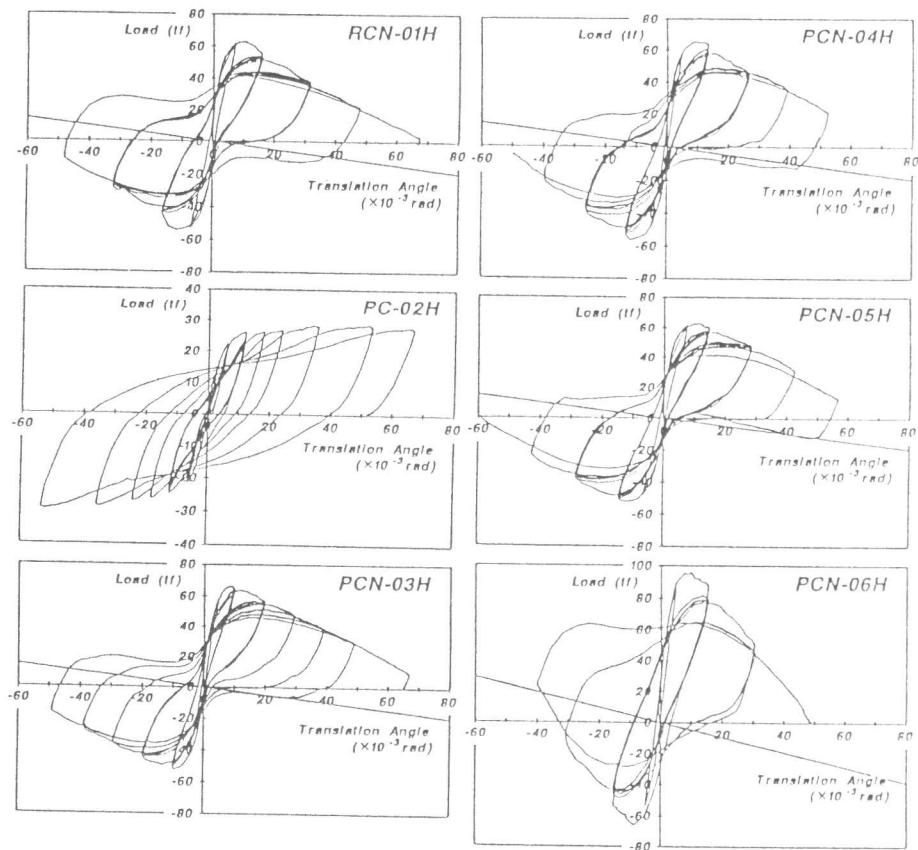


図-5 荷重-部材角履歴曲線

力比の違いについて比較すると、軸力比が高くなるほど最大耐力は上昇するが、最大強度を迎えた以降の耐力低下も大きかった。これは軸力比が高くなるにつれて柱脚の圧壊が激しくなるためであると考えられる。また配筋の違いについて比較すると、継手部かぶり厚を30mm確保した試験体PCN-04H、継手部せん断補強筋を端部に集中させた試験体PCN-05Hとも、プロトタイプのPCN-03Hと同等の性能を有していた。PCN-04Hの耐力低下が負側において若干大きかった。

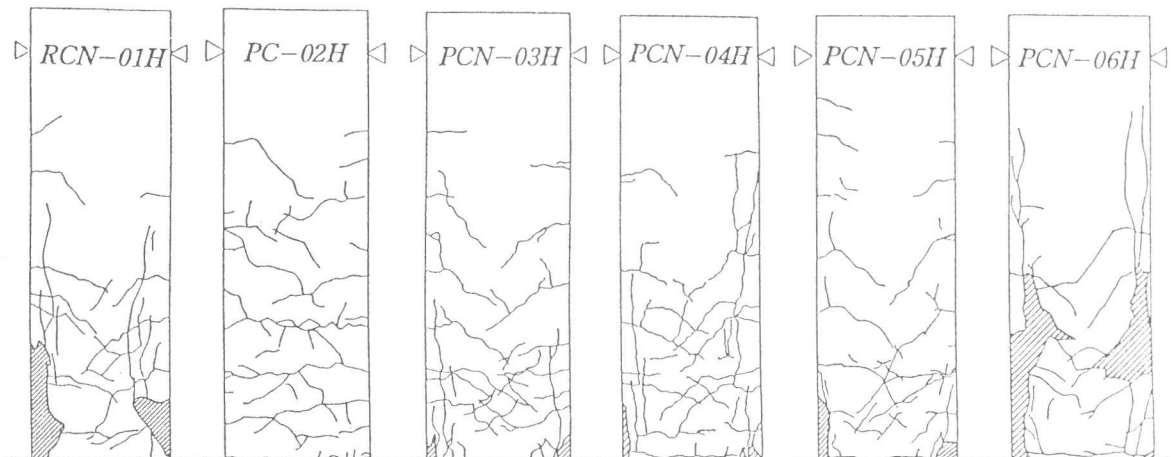


図-6 最終破壊性状

3.3 破壊性状

試験体の最終破壊性状を図-6に示す。軸力なしの試験体PC-02Hを除き、柱脚の圧壊が進行した。特にPCN-06Hの柱脚の圧壊が激しかった。また圧縮側において、かぶりコンクリートに沿った鉛直方向のきれつの進展が見られた。実験後PCa接合部近傍を調べたところ、PCN-05H試

験体の引張側鉛直接合筋1本に、鉄筋継手直下での破断が認められた。

3.4 試験体の変形量

図-7に軸力比の違いによる部材角とすべり変形量比の関係を示す。すべり変形量比とは、高感度変位計によって測定した柱脚と基礎スタブ間の相対すべり変形量を全体変形量で除した値とした。軸力比が高くなるほどすべり変形量比は低くなる傾向が

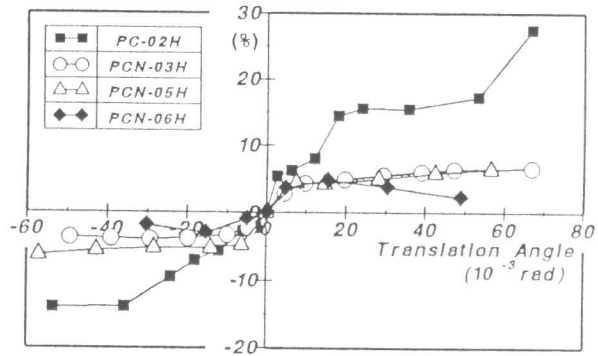


図-7 部材角とすべり変形量比の関係

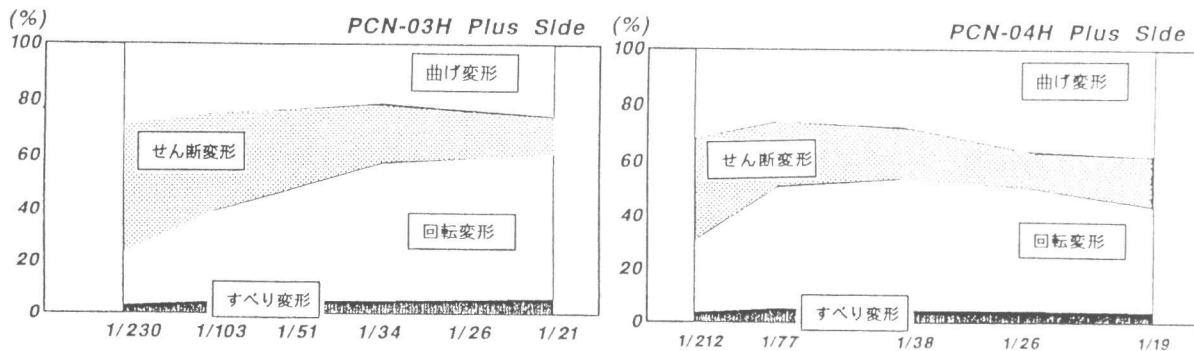


図-8 各変形要素の比率

見られた。軸力のある試験体は、すべり変形量比が全体変形量の約5%以下であった。

またPCN-03H, 04H試験体の全体変形における各変形要素の割合(正側)を図-8に示す。変形の進行に伴って、せん断変形の比は減少し、回転変形の比は上昇する傾向が見られた。PCN-03H試験体の曲げ変形の比は約30%で一定であったのに対し、PCN-04H試験体の曲げ変形の比は約30~40%と、変形の増大に伴ってやや上昇する傾向が見られた。これはPCN-04H試験体の継手直上付近の曲げひびわれが進展した影響であると思われる。

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、等価粘性減衰定数 h_e を算出した。部材角との関係を図-9に示す。RC試験体PCN-01Hは、PCaプロトタイプ^oの試験体PCN-03Hより h_e の値が大きく発現した。これは柱脚のすべりによる影響を受けているものと考えられる。配筋の違いによる影響はほとんど見られなかったが、PCN-05Hの初期(15×10⁻³rad)において h_e の値が大きく発現した。これは継手端部にせん断補強筋を集中させたことによる影響であると考えられる。

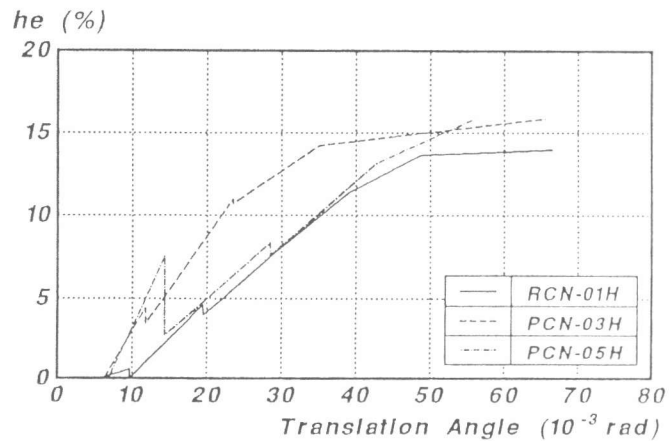


図-9 部材角と等価粘性減衰定数の関係

表-4 実験値と計算値一覧

試験体名	実験値		計算値	
	降伏荷重 $eQ_y(t_f)$	最大荷重 $eQ_u(t_f)$	曲げ終局耐力 $cQ_{mu}(t_f)$	実/計
RCN-01H	57.7	65.7	56.5	1.16
PC-02H	14.6	22.5	18.1	1.24
PCN-03H	59.6	69.4	56.7	1.22
PCN-04H	63.9	69.5	56.5	1.23
PCN-05H	60.7	66.3	56.2	1.18
PCN-06H	99.0	104.2	79.9	1.30

3.6 曲げ終局耐力

曲げ終局強度式(後述の(4)式)⁽²⁾を用いて算出した値と実験値との比較を表-4、図-10にそれぞれ示す。実験値については、P-δ効果を考慮した値とした。実験値と算定値を比較すると、1.16~1.30と、実験値が算定値を上回る結果を示した。これより既往の曲げ終局強度式は、高強度材料を使用した場合の曲げ耐力を、適正に評価しきれないものと考えられる。

3.7 主筋のひずみ分布

RC試験体(RCN-01H)とPCa試験体(PCN-03H)の引張側鉛直方向筋(以下主筋と呼ぶ)のひずみ分布を図-11に示す。PCa試験体の主筋のひずみは、RC試験体より大きくなる傾向が見られた。これはPCa接合界面のすべりによる影響を受けているものと考えられる。また柱中央部主筋は、最大荷重時である2δy時に降伏ひずみを大きく超える5000(×10⁻⁶)に達していた。これより部材の最大耐力に対して、引張側主筋だけでなく中央部主筋も影響していることが認められる。

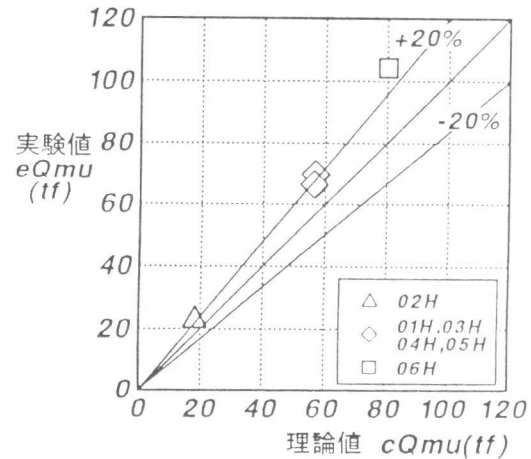


図-10 実験値と算定値の比較

4. 柱の曲げ耐力と

実験結果の対応

PCa部材が水平力および鉛直方向外力を受けると、柱部材には曲げ・せん断および軸方向力が生じる。接合面を含んだPCa部材には、これらの複合応力が作用する。高強度材料を用いた柱部材が曲げ・せん断を受けたときの終局耐力を評価するために、軸力比の上昇を考慮した曲げ終局耐力式として、以下の算定式が導かれている⁽²⁾。

$$\cdot N_{max} \geq N > 0.4b \cdot D \cdot F_c \text{ の場合}$$

$$Mu = \{0.8at \cdot \sigma_y \cdot D + 0.12b \cdot D^2 \cdot F_c\} \left(\frac{N_{max} - N}{N_{max} - 0.4 \cdot b \cdot D \cdot F_c} \right) \quad (1)$$

$$\cdot 0.4 \cdot b \cdot D \cdot F_c \geq N \geq 0 \text{ の場合}$$

$$Mu = 0.8 \cdot at \cdot \sigma_y \cdot D + 0.5N \cdot D \left(1 - \frac{N}{b \cdot D \cdot F_c} \right) \quad (2)$$

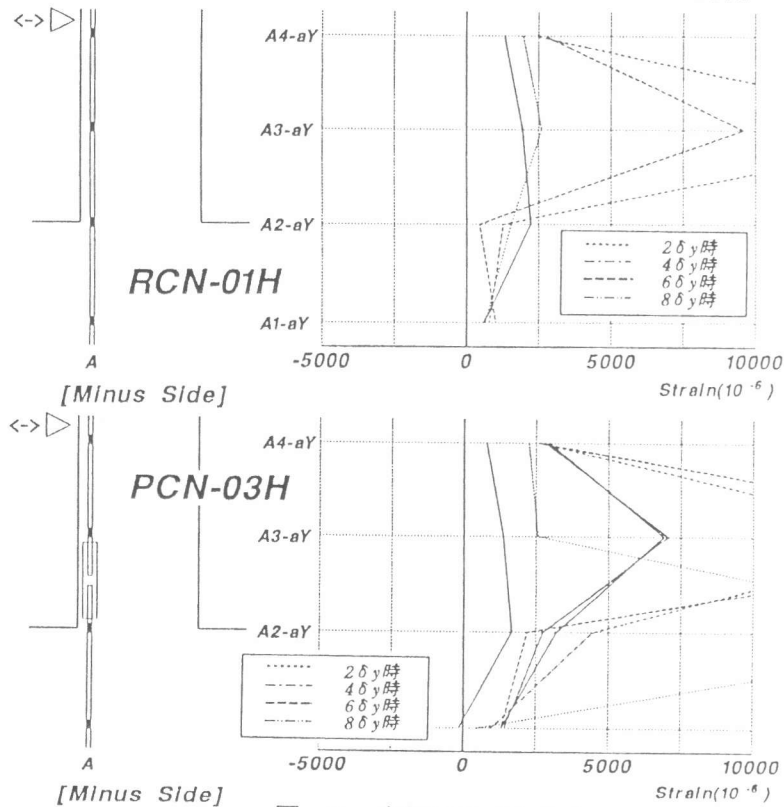


図-11 主筋のひずみ分布

ここで、 b : 柱幅(cm), D : 柱成(cm), N : 軸方向力(kgf)
 F_c : コンクリート圧縮強度(kgf/cm²) σ_y : 鉄筋降伏強度(kgf/cm²)
 a_t : 引張鉄筋総断面積(cm²) a_g : 柱主筋全断面積(cm²)
 $N_{max} = b \cdot D \cdot F_c + a_g \cdot \sigma_y$

(1), (2)式より、圧縮側コンクリートのモーメント比 $m = \frac{Mu}{b \cdot D^2 \cdot F_c}$ 、軸力比 $n = \frac{N}{b \cdot D \cdot F_c}$ 、鉄筋係数 $q = \frac{a_t \cdot \sigma_y}{b \cdot D \cdot F_c}$ とおき、 $N_{max} = b \cdot D \cdot F_c + a_g \cdot \sigma_y$ より $n_{max} = 1 + \frac{a_g \cdot \sigma_y}{b \cdot D \cdot F_c}$ であるから、次の無次元

化式が得られる。

・ $n_{max} \geq n > 0.4$ の場合

$$m = (0.8q + 0.12) \cdot \frac{n_{max} - n}{n_{max} - 0.4} \quad (3)$$

・ $0.4 \geq n \geq 0$ の場合

$$m = 0.8q + 0.5n(1 - n) \quad (4)$$

本実験より得られた曲げ終局強度と、(3), (4)式との関係を図-12に示す。(3), (4)式における F_c は試験体6体の平均値757kgf/cm²とした。

(3), (4)式に囲まれたハッチ部分は危険側を、それ以外は安全側を示している。また破線は(3),(4)式の安全側+20%を示している。実験値はいずれも安全側に評価されており、軸力比の上昇に伴って実験値は、より安全側に評価される傾向が見られた。これはダボ効果(ダウエル効果)による影響や、接合界面の接触面上昇に伴う摩擦の増加等が影響しているものと考えられる。

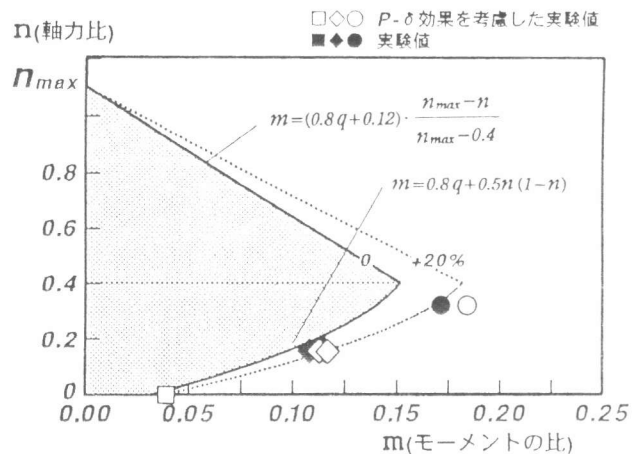


図-12 曲げ終局強度評価式と実験値の比較

5. まとめ

- (1). PCaプロトタイプの試験体(PCN-03H)は、RC試験体に比して最大荷重で約7%上昇しており、RC試験体と同等以上の構造性能を有していたと認められる。
- (2). 軸力比の上昇に伴い、最大荷重は上昇するが、耐力低下も大きくなる傾向が見られた。
- (3). 継手部のかぶり厚を30mm確保した試験体(PCN-04H)は、プロトタイプの試験体に比して、同等の構造性能を有していることが認められた。
- (4). 鉄筋継手端部にせん断補強筋を集中配筋した試験体(PCN-05H)は、プロトタイプの試験体と同等の構造性能を有していることが認められた。
- (5). 柱の曲げ強度式で得られた算定値と実験値を比較した結果、軸力比0.2以下の試験体ではおおむね対応したが、軸力比が大きくなると算定値は過小評価されることが認められた。

【参考文献】

- (1). 横谷栄次、小澤健一ほか：モルタル充填式スリーブ継手を用いたPCa部材の耐震性能に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.2, pp.301-306, 1994.6
- (2). 構造計算指針・解説(1991版), 日本建築センター, pp.231-232, 1991.6