

論文 ハーフプレキャスト管を用いた RC 柱の純曲げ性状に関する実験的研究

中西 靖直^{*1}・浜田 公也^{*2}・杉広 邦夫^{*3}・南 宏一^{*4}

要旨：本論文は、口の字形に遠心成形されたハーフプレキャスト管（以下、シェルという）に一定量の主筋と帯筋を内蔵させ、これと後打ちの中詰めコンクリート（以下、コアという）で一体化を図る、いわゆる異種強度のコンクリートで構成される RC 柱について、4 体の純曲げ実験を行い、中心圧縮を受ける場合に評価した軸方向鉄筋、シェル、コアの応力度－ひずみ度関係を用いて、平面保持の仮定を用いた断面解析を行うことにより、曲げモーメントのみを受ける標記 RC 柱の曲げモーメントと曲率の関係を評価できることを示した。

キーワード：鉄筋コンクリート，柱，ハーフプレキャスト，遠心成形，曲げ耐力

1. はじめに

近年、コンクリートプレキャスト（P C a）型枠工法が、型枠の解体工事の不要化、熟練工の省人化、支保工の軽減化等の利点のため注目され急速に実用化されつつある。筆者らは標記 RC 柱を用いた P C a 型枠構法の開発研究を行っているが、遠心成形されたシェルと現場打ちのコアとでは、強度や変形性能に差がある場合が多く、これらが部材の弾塑性性状に及ぼす影響を明らかにしておく必要がある。そこで、第一段階として既に、中心圧縮実験より柱構成要素（シェル、コア、軸方向鉄筋）の応力度－ひずみ度関係の評価法を提案し、標記 RC 柱の軸力－ひずみ度関係の定量的な評価を行った[1]。本論文は第二段階として、特に曲げモーメントのみが作用する場合の部材の弾塑性性状を調べるために純曲げ実験を行い、標記 RC 柱の曲げモーメント－曲率関係の定量的な評価を行った。

2. 実験概要

2. 1 供試体の形状および製作方法

供試体の形状と配筋状況を図－1 に示す。シェルは遠心成形法により製作し、常圧蒸気養生を行った。シェル内面には既報[2]と同様な欠込みを設置した。供試体は、このシェルを型枠代わりにして、スタブを含めてコンクリートを縦打ちして製作し、実験時まで2～3ヶ月間、室内空中養生を行った。ただし、供試体 S 4 については、図－1 に示す純曲げ区間のみを中空としており、純曲げ区間以外の後打ちコンクリートは平打ちした。なお、目標としたシェルの平均厚さは22mmで、幅とせいは300mm であるが、実測したシェルの断面積から求めた平均シェル厚さは25mm、幅とせいは302mm であった。後述の曲げ解析を行う場合には、これらの実測寸法を用いる。

2. 2 供試体の種類

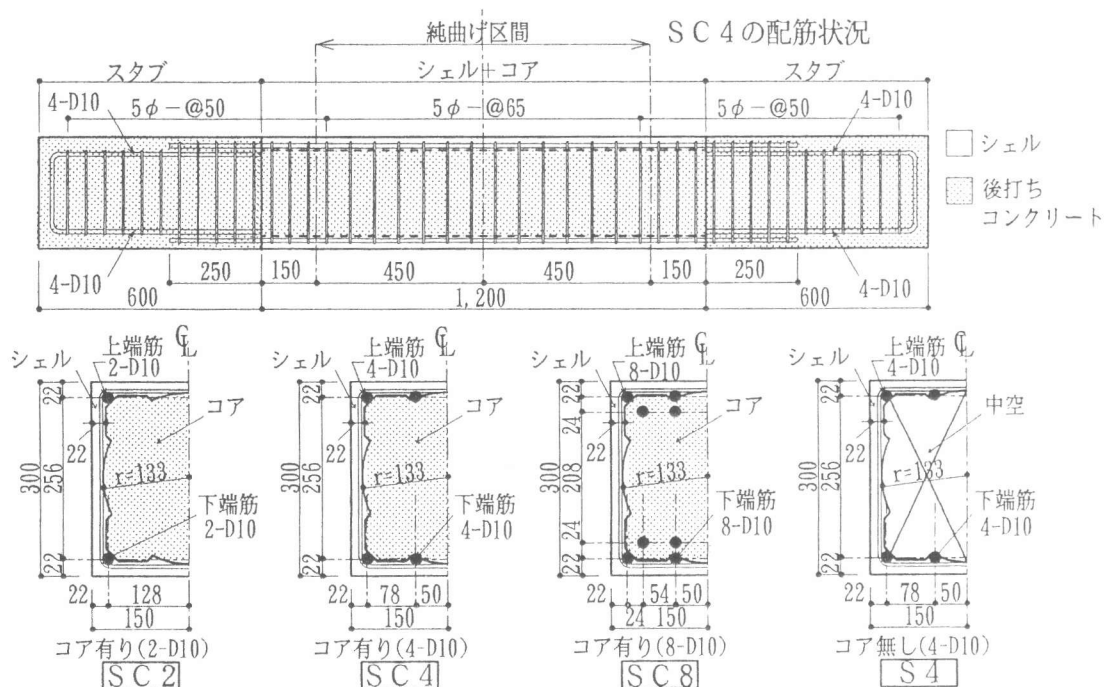
供試体の種類は、引張鉄筋比が降伏曲げモーメントとその時の曲率に及ぼす影響を調べるために、引張鉄筋本数を変化させたもの3体、部材の弾塑性性状にコアが及ぼす影響を調べるために

*1 三菱建設(株)建築技術部部長（正会員）（宇都宮大学大学院博士後期課程在籍）

*2 三菱建設(株)建築技術部主任研究員、博(工)（正会員）

*3 三菱建設(株)建築技術部（正会員）

*4 福山大学教授 工学部建築学科、工博（正会員）



図－1 供試体形状

コアを無くしたもの1体、合計4種4体とした。なお、供試体記号のうち、Sはシェル有り、Cはコア有り、数値は引張鉄筋の本数を示す。

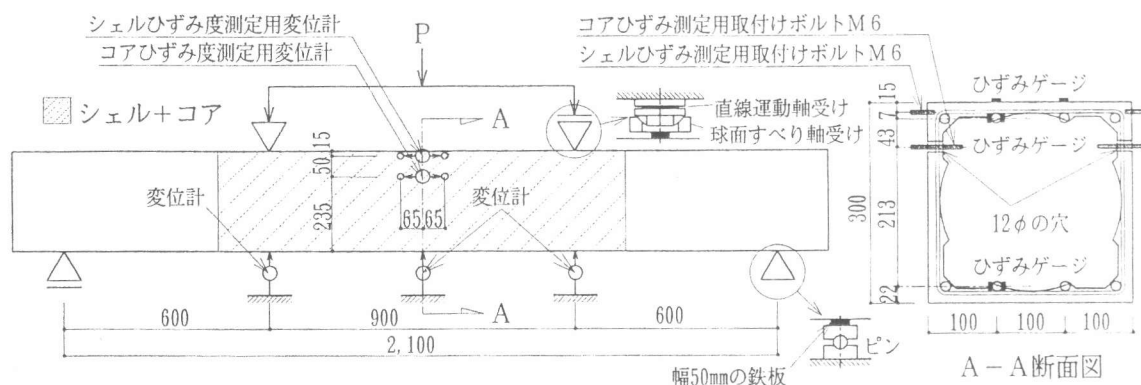
2. 3 加力および変位、ひずみ度測定

加力位置および変位、ひずみ度の測定位置を図－2に示す。加力方法は、30tfジャッキで2点等加力とし、供試体中央の変位が測定可能な45mmになるまで単調载荷を行った。ただし、供試体記号SC 8については、加力治具の不都合のため中央の変位が37mmになった時点で除荷した。支点と载荷点には、一方をピン、他方を直線運動軸受けと球面すべり軸受けのローラを用いた。

荷重は30tfロードセルを用いて、中央および载荷点のたわみとシェルおよびコアのひずみ度は電気式変位計を用いて測定した。主筋およびシェル表面のひずみ度は1ヶ所につき2枚のひずみゲージを用いて測定した。

2. 4 材料試験

本実験で用いた鉄筋の応力度－ひずみ度関係を図－3に、コンクリートの応力度－ひずみ度関



図－2 加力および変位、ひずみ度測定位置

係を図-4に示し、材料試験結果の諸数値を表-1に示す。なお、シェル用シリンダーは、振動成形し供試体と同一養生を行った。

3. 実験結果

曲げモーメント-曲率係を図-5に、実験終了時のひび割れ状況を写真-1に示す。図中には、ひび割れ発生付近までの拡大図を示してある。横軸の曲率は、純曲げ区間内の曲率半径が一定として、中央および荷点のたわみから求めたものである。各々の供試体について、ひび割れ、曲げモーメント、曲率の進展状況を以下に示す。

供試体SC2：約1.9tf・mで初ひび割れが発生し、曲げモーメントが約1.6tf・mまで低下し(↙)、その後、初ひび割れの進展が顕著になりながら(写真-1a左側)、曲率の増加に伴い曲げモーメントが若干増加した。曲率が 6.0×10^{-5} (1/mm)付近で、再び、ひび割れが顕著に発生して(写真-1a右側)、曲げモーメントが約1.6tf・mまで低下した(↙)。以後、ひび割れの進展とともに、曲率が増加しながら曲げモーメントが僅かに増加した。

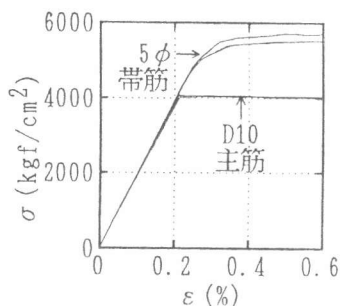


図-3 鉄筋の応力度-ひずみ度関係

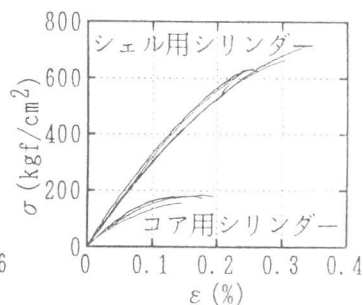


図-4 コンクリートの応力度-ひずみ度関係

表-1 材料試験結果

単位：kgf/cm²

供試体 記 号	シェル用シリンダー		コ ア用 シリンダー	主 筋	帯 筋
	圧縮強度	弾性係数			
SC2	634	3.10×10 ⁵	圧縮強度 173 弾性係数 1.95×10 ⁵	降伏点強度 4050	降伏点強度 5570 ^{*1}
SC4	667	3.22×10 ⁵		降伏点歪度 0.21%	弾性係数 1.92×10 ⁶
SC8				弾性係数 1.97×10 ⁵	
S4	634	3.10×10 ⁵			

*1:永久伸びを0.2%としたときの応力度、*2シリンダーの大きさ 100φ×h200

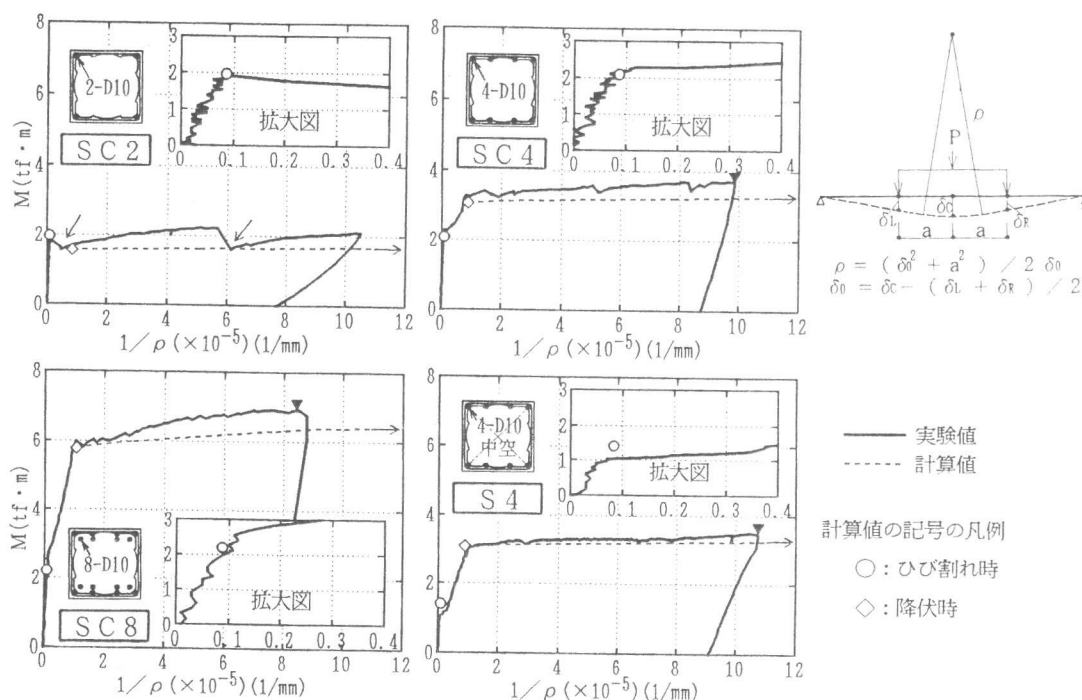


図-5 曲げモーメント-曲率関係

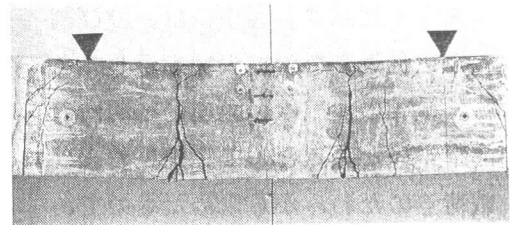
表-2 実験結果一覧

単位：弾性剛性($\times 10^3 \text{ tfm}^2$)、曲げモーメント(tfm)、曲率($\times 10^{-5} \text{ 1/mm}$)

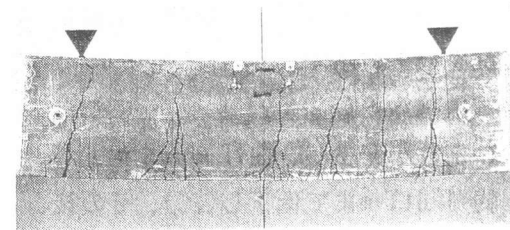
供試体 記 号	弾性剛性		ひび割れ発生時				降伏時				実験時最大		最大時	
			曲げモーメント		曲率		曲げモーメント		曲率				曲げモーメント	曲率
	実	計	実	計	実	計	実	計	実	計	計	計		
SC 2	1.91	2.18	1.91	1.96	0.10	0.09	—	1.56	—	0.85	—	—	1.71	33.5
SC 4	2.36	2.31	2.13	2.08	0.09	0.09	3.28	3.07	0.82	0.89	3.72	3.23	3.35	23.2
SC 8	2.33	2.44	2.56	2.20	0.11	0.09	5.99	5.78	1.04	1.06	6.94	6.36	6.42	12.8
S 4	1.39	1.75	0.97	1.40	0.07	0.08	3.00	3.08	0.98	0.90	3.49	3.24	3.34	22.9

供試体 SC 4、SC 8：SC 4は約 $2.1 \text{ tf}\cdot\text{m}$ 、SC 8は約 $2.6 \text{ tf}\cdot\text{m}$ で初ひび割れが発生して剛性が低下し、SC 4は約 $3.3 \text{ tf}\cdot\text{m}$ 、SC 8は約 $6.0 \text{ tf}\cdot\text{m}$ で降伏性状が認められた。その後、曲げひび割れの進展(写真-1b)とともに、曲率が増加しながら曲げモーメントが僅かに増加した。

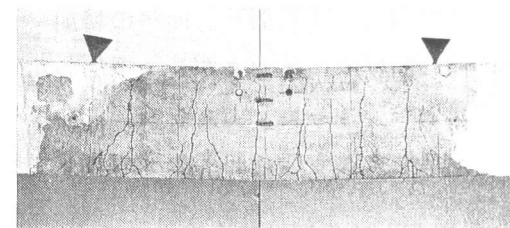
供試体 S 4：約 $1.0 \text{ tf}\cdot\text{m}$ で初ひび割れが発生して剛性が低下し、約 $3.0 \text{ tf}\cdot\text{m}$ で降伏性状が認められた。その後、曲げひび割れの進展(写真-1c)とともに、曲率は増加するが曲げモーメントの増加はほとんど認められなかった。



(a) SC 2



(b) SC 4



(c) S 4

写真-1 実験終了時のひび割れ状況

4. 曲げモーメント-曲率関係の定量的な評価

4. 1 仮定事項

(1) 平面保持の仮定

実験時の、ひび割れ、降伏、最大曲げモーメント時について、シェルの圧縮縁、圧縮側鉄筋、引張側鉄筋のひずみ度、シェルおよびコアの変位から求めたひずみ度の分布を図-6に示す。図から各供試体ともひずみ度分布は、降伏曲げモーメント時まではばらつきが大きいが概ね直線になっていることがわかる。そのため、以後に述べる部材断面の曲げモーメント-曲率関係を評価する場合に平面保持の仮定を用いる。

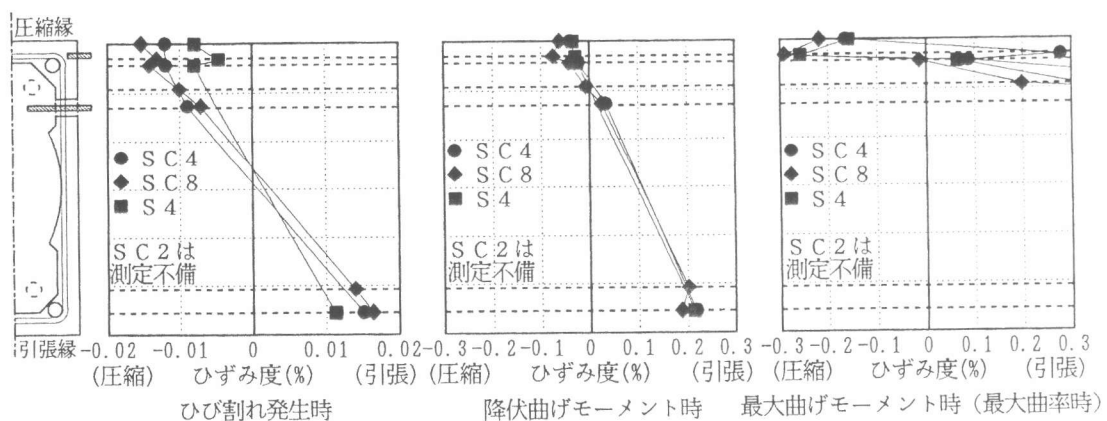


図-6 断面のひずみ度分布

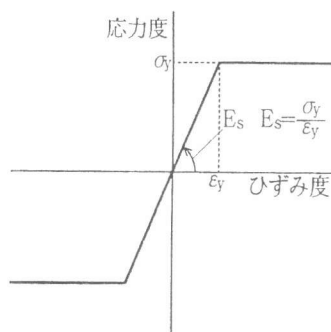
(2) 主筋の応力度－ひずみ度

関係の仮定

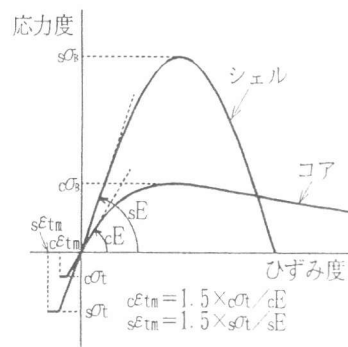
主筋の応力度－ひずみ度関係は、ひずみ硬化を無視し図－7に示す完全弾塑性型に仮定する。

(3) コンクリートの応力度－ひずみ度関係の仮定

筆者らは、既に、Sarginらが提案している[3] コンクリートの圧縮応力度－ひずみ度関係の形を基に、遠心成形法による影響を考慮したシェル、および帯



図－7 主筋の応力度－ひずみ度関係の仮定

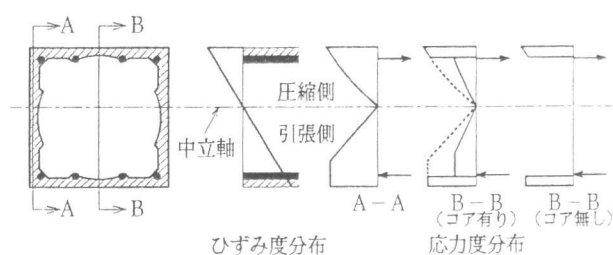


図－8 コンクリートの応力度－ひずみ度関係の仮定

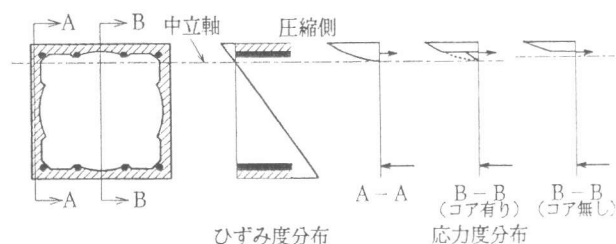
筋により拘束されたコアの圧縮応力度－ひずみ度関係を示している[1]。しかし、曲げモーメントを定量的に評価しようとするれば、当然断面内には引張力が生じるため、引張応力度－ひずみ度関係が必要になる。しかしながら、遠心成形されたコンクリートの引張応力度－ひずみ度関係は、現在では定量化されていない。また、ひび割れ発生後では、コンクリートの引張強度が曲げモーメントの大きさに与える影響が小さいため、通常コンクリートの引張強度は無視して考えられている。これらから、かなり大胆であるが、引張応力度－ひずみ度関係を次のように仮定した。則ち、引張強度は、シェルは $s\sigma_t = 1.07 \times s\sigma_B^{0.566}$ 、コアは $c\sigma_t = 1.07 \times c\sigma_B^{0.566}$ [4]、弾性係数は、シェルは $sE = 4 \times 1.4 (s\sigma_B / 1000)^{1/3} \times 10^5$ 、コアは $cE = 4 \times 1.0 (c\sigma_B / 1000)^{1/3} \times 10^5$ [1]、引張強度時のひずみ度は、シェルは $s\varepsilon_{tm} = 1.5 \times s\sigma_t / sE$ 、コアは $c\varepsilon_{tm} = 1.5 \times c\sigma_t / cE$ 、形は完全弾塑性型で表されると仮定した。圧縮側とともに応力度－ひずみ度関係を図－8に示す。

4. 2 ひび割れ時の曲げモーメント

ひび割れは、シェルの引張縁のひずみ度が引張強度時のひずみ度 $s\varepsilon_{tm}$ に達した時に生じると仮定する。その時の断面のひずみ度分布および応力度分布を図－9に示す。ここで、軸方向鉄筋の応力度は考慮する。いま、ひび割れ時の曲げモーメントとその時の曲率を断面の力の釣り合いより求めて図－5中に○印で示した。実験値に対する計算値の比は、ひび割れ時の曲げモーメントは 0.81～1.3、その時の曲率は 0.75～1.14 の範囲でばらついている。ここで、コアが有る供試体3体についてシェルにひび割れが発生する時点における、コアの引張強度時のひずみ度に対するコアの最外引張縁のひずみ度の比を求めてみると 1.02～1.05 であるが、1を越える程度は僅かであるので、



図－9 ひび割れ発生時の断面のひずみ度分布と応力度分布の仮定



図－10 降伏曲げモーメント時の断面のひずみ度分布と応力度分布の仮定

シェルが先にひび割れを生じると仮定した。

4. 3 降伏曲げモーメント

降伏は、引張鉄筋が降伏点ひずみ度 ε_v に達した時に生じると仮定する。その時の断面のひずみ度分布および応力度分布を図-10に示す。ここで、コンクリートの引張強度は曲げモーメントの大きさに与える影響は小さいため無視した。いま、降伏曲げモーメントとその時の曲率を断面の力の釣合いより求めて図-5中に◇印で示した。実験値に対する計算値の比は、降伏曲げモーメントは0.93~1.02、その時の曲率は0.91~1.08の範囲で、計算値は実験値とよく符合している。ただし、SC2の降伏曲げモーメント時の曲率については、実験で明確に表れなかったために比較はしていない。

4. 4 最大曲げモーメント

降伏曲げモーメント時から最大曲げモーメント時までの曲げモーメント-曲率関係は、上記で示した仮定を用いて断面の力の釣合いによる逐次解析を行って求め、図-5に破線で示した。最大曲げモーメントは、断面の力の釣合いから最も大きくなる曲げモーメントの値とし、その時の曲率の値とともに表-2中に示した。また、実験を行った曲率の範囲での最大曲げモーメントの実験値を図-5に▼印で示した。実験値(▼印)に対する計算値の比は、SC2を除き、SC4で1.16、SC8で1.08、S4で1.09で、いずれも実験値は計算値を若干上回っている。

ひび割れ時の曲げモーメントが降伏曲げモーメントより大きいSC2、コア部分が中空のS4は例外的であるが、実験を行った曲率の範囲では、本論文で示した評価法は、標記RC柱の曲げモーメント-曲率関係を十分評価できることがわかる。

5. まとめ

今回、純曲げ実験を行って、ハーフプレキャスト管を用いたRC柱の弾塑性性状を調べた結果、ひび割れ時の曲げモーメント、降伏曲げモーメントは、引張鉄筋が多いほど大きいこと、コアの無い場合は有る場合に比べ、ひび割れ時の曲げモーメントは小さいが、降伏曲げモーメントはほぼ等しいことがわかった。これらの結果を踏まえて、標記RC柱の断面内の応力分布を仮定し、中心圧縮実験から求めたコンクリートの応力度-ひずみ度関係を用いて断面解析を行うことにより、異種強度のコンクリートで構成される標記RC柱の曲げモーメントと曲率の関係を定量的に評価できることを示した。

謝辞：本研究を行うに際して、宇都宮大学田中淳夫教授に貴重なご助言を頂きました。記して感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 中西靖直, 浜田公也, 泉田伸二, 杉広邦夫, 竹井聖貴, 南宏一: Sargin式によるハーフプレキャスト管RC柱の荷重ひずみ度関係の評価(その1)(その2)、日本建築学会中国・九州支部合同研究報告集、第10号、pp. 449-456、1996. 3
- [2] 中西靖直, 浜田公也, 泉田伸二, 南宏一: 異種強度のコンクリートで構成されるRC柱の中心圧縮耐力、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 17、No. 2、pp. 255-260、1995. 6
- [3] Sargin, M., Ghosh, S. K. and Handa, V. K.: Effects of Lateral Reinforcement upon the Strength and Deformation Properties of Concrete, Magazine of Concrete Research, Vol. 23, pp. 99-110, Jun./Sep. 1971
- [4] 日本建築学会: 高強度コンクリートの技術の現状、pp. 83、1991. 1