

# 論文 コンクリート柱の力学的特性に及ぼす歪勾配の影響

張冠華<sup>\*3</sup>・嶋津孝之<sup>\*1</sup>・荒木秀夫<sup>\*2</sup>・松本孝治<sup>\*4</sup>

**要旨：**実大コンクリート柱の偏心圧縮荷重下におけるひずみ勾配の影響を把握するため、中心圧縮、偏心率 0.1及び 0.3の偏心圧縮実験を行った。中心圧縮は、寸法効果の影響について検討するために行ったものである。これらの実験結果から偏心圧縮荷重下のコンクリートの応力度－ひずみ度曲線を算定した。この曲線と中心圧縮の応力度－ひずみ度曲線とを比較することにより、ひずみ勾配の影響を定量的に把握した。また、この応力度－ひずみ度曲線を用いた断面解析を行い偏心圧縮荷重下におけるコンクリート柱の挙動を追跡することができた。

**キーワード：**ひずみ勾配，偏心圧縮，実大柱，寸法効果

## 1. 序

近年、鉄筋コンクリート構造物の高層化への傾向がますます強まり、これに対応する各種構造物材の研究が進められている。これまで筆者等は、実大コンクリート柱を用いた偏心圧縮実験[1]を行い、その力学的特性を評価してきたが、これらの実験的研究で偏心が大きい場合、コンクリート強度等に及ぼす断面内のひずみ勾配の影響が無視できないことが分かった。ひずみ勾配の影響に関して、これまでSturman[2]、鈴木[3]の研究があり、断面内にひずみ勾配が生じている場合、マイクロクラックの進展が抑制され、中心圧縮力を受けるコンクリートとは異なる性状を示すことが報告されている。しかし、未だ十分とは言えない状況である。本研究では、偏心圧縮荷重を受けるコンクリート柱のひずみ勾配の影響を定量的に把握することを目的として、大型の無筋コンクリート柱の偏心圧縮実験を行った。

本実験では偏心率 0.1と0.3の2種類の荷重状態を考えて実験を行った。また、寸法効果の影響を検討するために中心圧縮実験も行った。

## 2. 実験概要

### 2-1 試験体形状及び作製方法

試験体形状を図2-1に示す。試験体部分は中央の 400mm×400mm断面の長さ800mmの柱であり、実物の約 1/2スケールの大型模型試験体となっている。両側にスタブを設けたのは加圧面での局部応力の発生を防ぐためである。更にスタブが破壊しないように鉄筋(D10、D6)

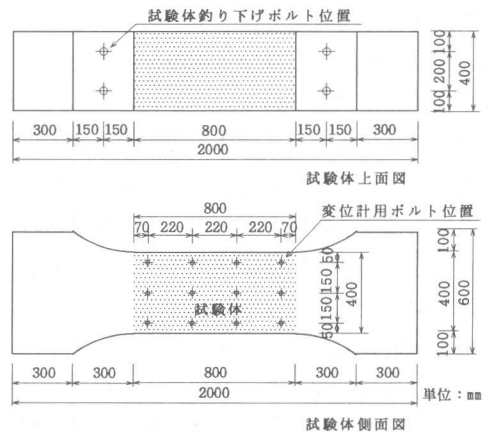


図2-1 試験体形状

\*1広島大学教授 工学部第四類 工博（正会員）

\*2広島大学助教授 工学部第四類 工博（正会員）

\*3広島大学大学院 工学研究科構造工学専攻、工修（正会員）

\*4広島大学大学院 工学研究科構造工学専攻

で補強した。試験体作製方法は、柱の材軸方向を水平にして鋼製型枠を用いて横打ちでコンクリート打設を行った。試験体の養生は、打設後、蒸気養生を2日間行い、脱形後は自然養生とした。

## 2-2 試験体一覧及び材料特性

試験体一覧を表2-1に示す。中心圧縮、偏心率0.1及び0.3共に2体ずつ計6体用意した。地震時に柱頭、柱脚に発生する高レベルの軸圧とせん断力による曲げモーメントを受ける柱を想定し、偏心率としてこの2種を採用した。表中に実験実施時のシリンダー強度も併せて示す。シリンダーは $\phi 100\text{mm} \times h200\text{mm}$ の標準テストピースで、各試験体とも実験実施時に行った3本のシリンダーの平均値を表に示した。シリンダーの端面はキャッピング仕上げとした。

表2-1 試験体一覧

試験体名	偏心率	実験実施時強度		
		$F_c(\text{kg/cm}^2)$	$\epsilon(\mu)$	$E(*10^4 \text{kg/cm}^2)$
US-40-0-1	0	463.0	2633.7	2.85
US-40-0-2		423.0	2722.8	3.01
US-40-0.1-1	0.1	434.4	2221.3	3.10
US-40-0.1-2		451.3	2458.5	3.17
US-40-0.3-1	0.3	426.4	2386.6	3.10
US-40-0.3-2		396.0	2461.0	2.86

※ Eの応力レベルは  $F_c/3$

## 2-3 加力方法及び測定方法

加力には、広島大学所有の3000TON大型圧縮試験機を用いた。加力装置概要を図2-2に示す。ひずみは、長さ60mmのコンクリートゲージ及び変位計を用いて測定した。ゲージ及び変位計は両側面にセットした。

## 3. 実験結果

### 3-1 最終破壊状況

本実験は高軸圧実験のため、載加時における近接しての目視による微細なひび割れ観察は危険であり、ここでは、図3-1に中心圧縮、偏心率0.1及び0.3の試験体側面の最終破壊状況を例示するにとどめる。

中心圧縮の場合、試験体の対角線方向にひび割れが発生し、上面及び側面のコンクリートの剥落により終局となった。このひび割れは、シリンダーの圧縮試験に見られるX形破壊に類似したものとなった。

偏心率0.1及び0.3の場合、上部コンクリートの圧縮破壊が起こり、試験体上面のコンクリートが剥離した。その直後試験体下部の引張りひび割れが発生し、終局となった。図からも分かるように、最終的に中立軸が試験体断面内に入っている。また、偏心率0.3は0.1に比べ、圧縮域が少ないことが分かる。この破壊性状からみて中心圧縮、偏心率0.1、0.3

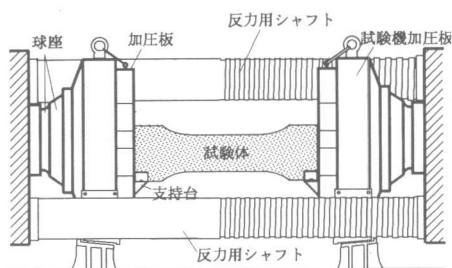


図2-2 加力装置概要

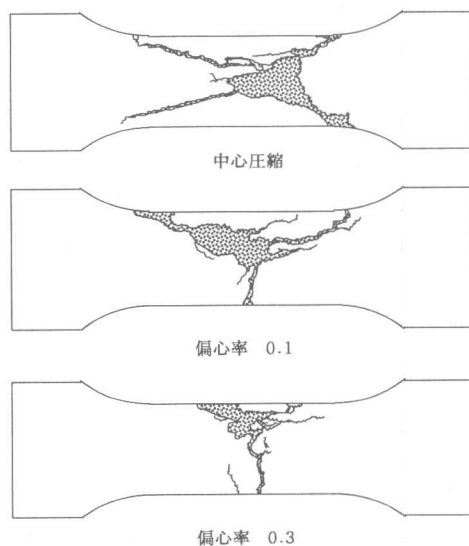


図3-1 最終破壊状況

の試験体断面内の応力性状の違いは明らかである。また、スタブ部分やスタブとの境界部分に大きなひび割れは見られなかった。

### 3-2 ひずみ分布性状

偏心圧縮試験体側面のひずみ分布性状を図3-2に例示する。ひずみは両側面に貼付したコンクリートゲージ6枚を平均したものである。偏心率0.1の試験体は約50ton、偏心率0.3の試験体は約25tonごとの荷重段階におけるひずみをプロットした。

偏心率0.1の場合、試験体上面から底面の全域にわたって圧縮域となっており、試験体上面から底面にかけて緩やかなひずみ勾配がある。また、ほぼ平面保持が成り立っていることがわかる。偏心率0.3の場合、試験体底面付近は引張域となっている。引張域におけるコンクリートゲージの値は不安定であるが、どの荷重段階においても直線的なひずみ性状でありほぼ最終状態まで平面保持が成り立っている。また偏心率0.1よりも急なひずみ勾配になっている。

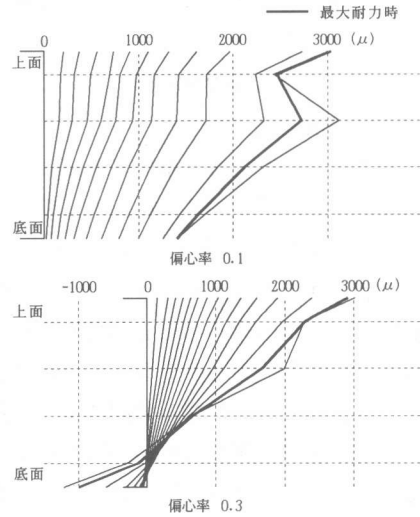


図3-2 ひずみ分布性状

## 4. 実験結果の考察

### 4-1 偏心圧縮荷重下の応力度－ひずみ度曲線推定方法

以下に偏心圧縮荷重下のコンクリートの応力度－ひずみ度曲線の推定方法について説明する。柱に偏心荷重  $N$  が作用し、中立軸が断面内及び断面外にある場合のひずみ及び応力分布を図4-1に示す。中立軸深さを  $c$  とし、一般的な柱を考え正方形断面を仮定した。平面保持及び曲げ圧縮域のどの高さでも同じ応力度－ひずみ度曲線に従うと仮定し、中立軸から距離  $x$  の点の応力を  $f(\epsilon_x)$ 、ひずみを  $\epsilon_x$  とすると、釣り合いから(1)式となり、 $\epsilon_c$  で微分すると(2)式[4]となる。

本実験では、圧縮部分の応力度－ひずみ度曲線が塑性状態に入ると、中立軸が移動する。その

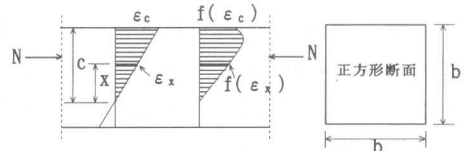
$$N = b \int_0^c f(\epsilon_x) dx = \frac{bc}{\epsilon_c} \int_0^{\epsilon_c} f(\epsilon_x) d\epsilon_x \quad (1)$$

$$f(\epsilon_c) = \frac{\epsilon_c}{bc} \frac{dN}{d\epsilon_c} + \frac{N}{bc} \quad (2)$$

$$f(\epsilon_c) = \frac{\epsilon_c}{bc} \frac{dN}{d\epsilon_c} + \frac{N}{bc} - \frac{N\epsilon_c}{bc^2} \frac{dc}{d\epsilon_c} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} f(\epsilon_c) - \left(1 - \frac{b}{c} + \frac{\epsilon_c b}{c^2} \frac{dc}{d\epsilon_c}\right) f(\epsilon_1) \\ = \frac{\epsilon_c}{bc} \frac{dN}{d\epsilon_c} + \frac{N}{bc} - \frac{N\epsilon_c}{bc^2} \frac{dc}{d\epsilon_c} \quad (4) \end{aligned}$$

◎中立軸が断面内の場合



◎中立軸が断面外の場合

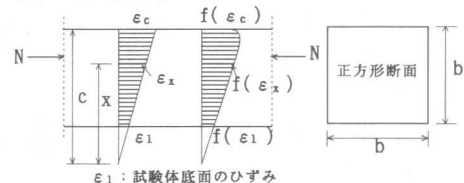


図4-1 ひずみ及び応力分布

ため、 $c$ は $\varepsilon_c$ の関数として考えると、中立軸が断面内及び断面外にある場合、(3)(4)式になる。  
ここに、軸力 $N$ 、上面ひずみ $\varepsilon_c$ 、底面ひずみ $\varepsilon_t$ 、中立軸深さ $c$ は実験値を用い、実験における軸力を細分して軸力増分 $\Delta N$ に対する上面ひずみ増分 $\Delta \varepsilon_c$ を求め、 $\Delta N / \Delta \varepsilon_c \approx dN / d\varepsilon_c$ とおくことにより上面応力 $f(\varepsilon_c)$ と上面ひずみ $\varepsilon_c$ の関係を求め得る。先の仮定よりこの関係はどの位置に対しても成り立っているから、この関係が求める偏心圧縮荷重下の応力度－ひずみ度関係となる。

## 4-2 ひずみ勾配の影響

### (1) 無次元化曲線

4-1で示した方法を用いて推定した偏心率0.1及び0.3の偏心圧縮荷重下の応力度－ひずみ度曲線及び中心圧縮試験体の応力度－ひずみ度曲線を実験実施時のシリンダーの最大応力( $\sigma_0$ )及び最大応力時ひずみ( $\varepsilon_0$ )で無次元化した曲線を図4-2に示す。図からも分かるように、中心圧縮試験体と比較して、どちらの偏心率においても初期剛性はあまり変わらないが最大応力及び最大応力時ひずみが増加している。この相違がひずみ勾配による影響と考えられる。また、その影響は実験結果に示したひずみ性状から分かるようにひずみ勾配が急である偏心率0.3の方が大きくなっている。

### (2) 力学的特性

偏心圧縮荷重下のコンクリートの応力度－ひずみ度曲線における最大応力、最大応力時ひずみに関して、実験実施時のシリンダー及び中心圧縮試験体との比較を行う。まず最初に表4-1に最大応力 $\sigma$ について示す。表中の最大応力の欄は、偏心圧縮については(1)で求めた応力度－ひずみ度曲線の値を、中心圧縮については大型実験の実験値を示している。その値を実験実施時シリンダーの最大応力 $\sigma_0$ で無次元化した値(図4-2の最大値)を次欄に示す。その平均をみると、中心圧縮試験体の値は、シリンダーと比べ最大応力で約22%の低下が見られた。これはシリンダーと大型試験体との大きさの違いからくる寸法効果による影響と考えられる。一方、偏心圧縮試験においては見かけ上、このような影響は見られず、逆に偏心率0.3の試験体はシリンダーの値を大きく上回っている。これは、一旦寸法効果により低下した応力が、偏心荷重をかけたことによるひずみ勾配の影響を受けて大きくなった結果と考えられる。表

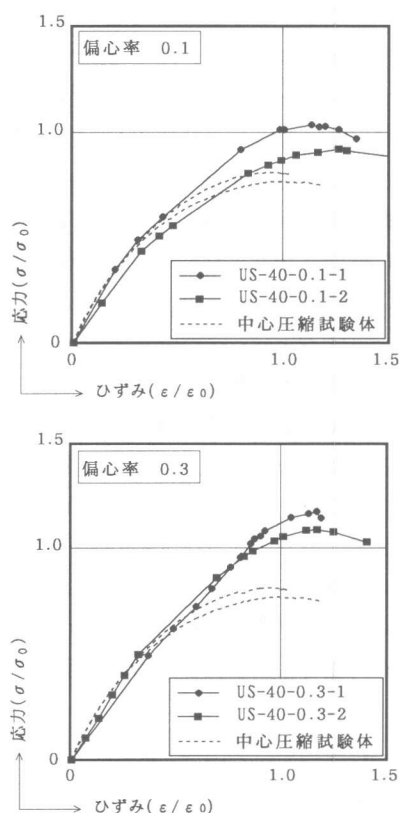


図4-2 無次元化応力度－ひずみ度曲線

表4-1 最大応力

試験体名	最大応力 $\sigma$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma / \sigma_0$	平均	ひずみ勾配の影響
US-40-0-1	291.3	0.767	0.786	1.000
US-40-0-2	340.6	0.805		
US-40-0.1-1	446.6	1.028	0.974	1.239
US-40-0.1-2	414.8	0.919		
US-40-0.3-1	598.7	1.173	1.130	1.437
US-40-0.3-2	430.7	1.088		

$\sigma_0$ : 実験実施時シリンダーの最大応力

中の最後の欄は、無次元化の平均値を中心圧縮試験体の値で基準化した値で、この値がひずみ勾配の影響と考えられる。その影響は偏心率0.1及び0.3でそれぞれ、1.24倍、1.44倍となっている。

次に最大応力時ひずみについて表4-2 に示す。中心圧縮では寸法

効果の影響はあまり見られなかった。また、中心圧縮試験体との比較によるひずみ勾配の影響については、最大応力時ひずみに関しては、どちらの偏心率についても約 1.2倍程度増加するが、偏心率の違いによる影響はあまりみられない。

### 4-3 解析値との検討

#### (1) 解析方法

偏心圧縮試験体の荷重とひずみの関係を推定するために、平面保持仮定の断面分割（40×40分割）による曲げ圧縮解析を行った。解析に用いたコンクリートの応力度－ひずみ度曲線は、推定した応力度－ひずみ度曲線との対応を考え、最大応力までは Park式[5]、最大応力以降は修正野口式[6] を用いてモデル化した。本実験で使用したモデルを(5)、(6)式及び図4-3 に示す。また、このモデルと推定した応力度－ひずみ度曲線との比較を図4-4 に例示する。ここで、 $f_{c0}$ と $\epsilon_0$ については前項で推定した表 4-1、表4-2の第1 欄の値を用いている。

Park式

$$\sigma_c = f_{c0} \left\{ (2\epsilon / \epsilon_0) - (\epsilon / \epsilon_0)^2 \right\} \quad (0 \leq \epsilon < \epsilon_0) \quad (5)$$

修正野口式

$$\sigma_c = -\frac{9f_{c0}}{17\epsilon_0} \epsilon + \frac{26}{17} f_{c0} \quad (\epsilon_0 \leq \epsilon < 2.7\epsilon_0)$$

$$\sigma_c = 0.1f_{c0} \quad (2.7\epsilon_0 \leq \epsilon) \quad (6)$$

#### (2) 偏心圧縮試験体の最大耐力

偏心圧縮試験体の最大耐力（実験値及び計算値）一覧を表4-3 に示す。（ ）内は実験値／計算値である。（ ）内の値はほぼ1であり、計算値は実験値とほぼ一致していることが分かる。

#### (3) 偏心圧縮試験体の軸力－上部ひずみ曲線

次に偏心率0.1及び0.3の軸力－上部ひずみ曲線を図4-5 に例示する。上部ひずみは試験体両側

表4-2 最大応力時ひずみ

試験体名	最大応力時ひずみ $\epsilon(\mu)$	$\epsilon / \epsilon_0$	平均	ひずみ勾配の影響
US-40-0-1	2380.0	0.984	0.951	1.000
US-40-0-2	2552.0	0.937		
US-40-0.1-1	2655.0	1.195	1.227	1.277
US-40-0.1-2	3095.0	1.259		
US-40-0.3-1	2861.5	1.164	1.165	1.212
US-40-0.3-2	2867.5	1.165		

$\epsilon_0$ : 実験実施時シリンダーの最大応力時ひずみ

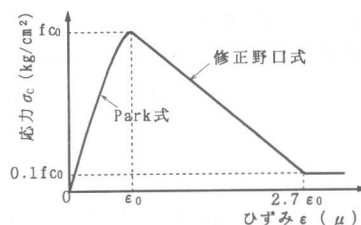


図4-3 応力度－ひずみ度のモデル化

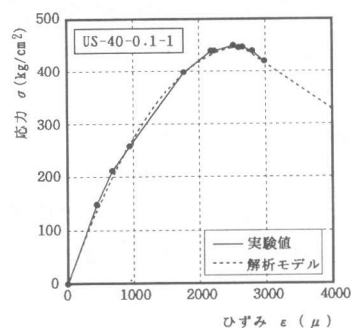


図4-4 解析モデルとの比較

表4-3 最大耐力一覧

試験体名	偏心率	最大耐力(ton)	計算値(ton) (実/計)
US-40-0.1-1	0.1	517	521.0 (0.992)
US-40-0.1-2		479	483.9 (0.990)
US-40-0.3-1	0.3	349	348.9 (1.000)
US-40-0.3-2		268	251.2 (1.066)

面上部に設置した 6 本の変位計の平均をとったものである。実線が実験値、点線は 4 - 2 で推定した曲線を用いた計算値である。

最大耐力と同様、偏心率 0.1 及び 0.3 の試験体とも実験値と解析値との対応は良好であり、実験値から偏心圧縮荷重下の応力度 - ひずみ度曲線の推定がほぼ正しかったことが分かる。

## 5. 結論

本論文の結論を以下に列記する。

(1) 中心圧縮試験より、大型コンクリート柱の寸法効果の影響を確認した。その影響は、最大応力に対して大きく現れており、最大応力で約 22% 低下した。

(2) 偏心圧縮荷重下のコンクリートの応力度 - ひずみ度曲線を推定し、中心圧縮の応力度 - ひずみ度曲線と比較した。その結果、ひずみ勾配による応力及びひずみに対する影響を定量的に把握した。

(3) 偏心圧縮荷重下のコンクリートの推定曲線を用いた解析を行った結果、実験値と解析値との対応は良好であった。

今後は偏心率とひずみ勾配の関係や鉄筋を有する場合について検討していきたいと考えている。

## 謝辞

実験実施にあたっては、ニチブ（株）、長岡鉄工建設（株）、広島大学文部技官清水、京泉両氏に協力頂いた。また、実験及びデータ整理には平成 6 年度卒論生堀内弘太君に協力頂いた。ここに、関係各位に深く感謝いたします。

## 参考文献

- [1] 張冠華、嶋津孝之、荒木秀夫他：実大鉄筋コンクリート柱の弾塑性挙動に関する実験的研究、構造工学論文集，Vol.40B，1994，pp.323～334
- [2] G.M.Sturman：Effects of Flexural Strain Gradients on Microcracking and Strength Design.,ACI Journal, Vol.62, No.7, pp.805～822
- [3] 鈴木計夫、中塚佑、深野慶：曲げひずみ勾配下におけるコンクリートの力学的特性に関する実験的研究、セメント技術年報，X X IX，1975，pp.317～321
- [4] 小坂義男、森田司朗編：鉄筋コンクリート構造、丸善、1975
- [5] Park,R., Priestley,M.J.N, and Gill,W.D.：Ductility of square confined concrete columns.,Journal of Structural Division, Proceedings, ASCE, Vol.108,pp.929～950
- [6] 前中敏伸他：高強度コンクリートの力学特性に関する基礎的研究（その 2）、日本建築学会大会学術講演梗概集，1991，pp.467～468

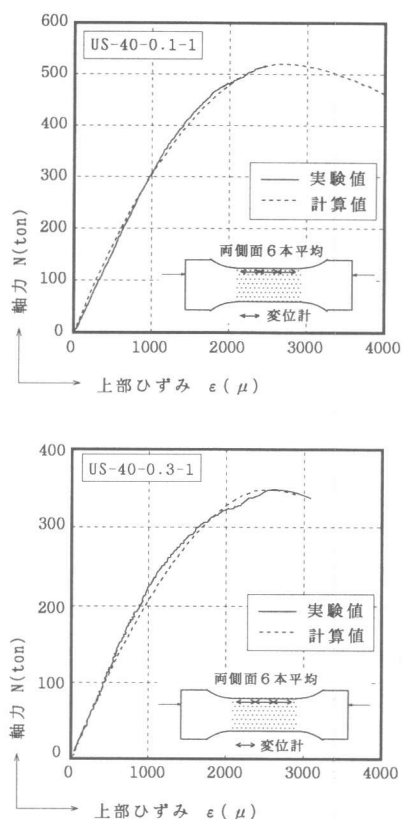


図4-5 軸力－上部ひずみ曲線