

# 論文 偏心圧縮を受ける超高強度コンクリート柱の曲げ性状に関する実験的研究

坂下 雅信\*1・河野 進\*2・林 芝英\*3, 八田 有輝\*3

**要旨:** 設計基準強度 130MPa の超高強度コンクリートを用いたドックボーン型の柱試験体を計 6 体製作し、横補強筋量を実験変数とした偏心圧縮試験を実施した。実験目的は、柱断面内のひずみ勾配が拘束コンクリートの応力-ひずみ関係に及ぼす影響を明らかにすることである。いずれの試験体でも、試験区間内でコンクリートの曲げ圧壊が起こり、急激な耐力低下が見られた。横補強筋量の増大に伴い、最大軸力、曲げ圧壊時の圧縮縁ひずみが増大する傾向が見られ、Hongnestad らの提案手法で算定した柱断面内の応力-ひずみ関係は、一部の試験体を除き、中心軸圧縮試験を基に提案された既存式と比較して高い変形性能を示した。

**キーワード:** 超高強度コンクリート, 偏心圧縮, 純曲げ, ひずみ勾配, 拘束効果

## 1. はじめに

高層化、長スパン化、部材の断面縮小などの要求に対応するため、設計基準強度 100MPa を超える超高強度コンクリートが建築物に適用される事例が増えており、全体降伏型の崩壊機構を実現するために、超高強度コンクリートを用いた部材の曲げ性状を精緻に把握することが求められている。主筋の降伏がコンクリートの圧壊に先行する曲げ引張破壊の場合、部材の荷重変形関係はコンクリートの影響を受けにくく、部材内のコンクリートの応力-ひずみ関係は、中心軸圧縮力を受けるシリンダーから得られた応力-ひずみ関係に等しいものと仮定することで工学的に十分な精度が得られることが知られている。一方、主筋の降伏以前にコンクリートが圧壊する曲げ圧縮破壊の場合、横補強筋の拘束効果や断面内におけるひずみ勾配、部材内の応力勾配の影響を受けるコンクリートの応力-ひずみ関係を正しく把握しなければ、部材の挙動を予測することは難しい。本研究ではコンクリートの性状を左右する要因のうち、特に断面内におけるひずみ勾配の影響に着目する。

Soliman はひずみ勾配が断面内に存在する場合、中心軸圧縮試験と比べて、応力-ひずみ関係のピーク時ひずみが増大し、ピーク後の変形性能も高まることを実験で立証している<sup>1)</sup>。また、荒木らは偏心率をパラメータとした鉄筋コンクリート柱の偏心圧縮実験を行い<sup>2,3)</sup>、ひずみ勾配がコンクリートの応力-ひずみ関係に及ぼす影響を推定式で示している<sup>4)</sup>。これらの研究では、普通強度コンクリートや高強度コンクリートが対象となっており、100MPa を超えるような設計基準強度を持ち、従来のコンクリートとは異なる材料特性を示す超高強度コンクリートは取り扱われていない。本研究では、超高

強度コンクリートを用いた柱部材の偏心圧縮試験を行い、ひずみ勾配が超高強度コンクリートの応力-ひずみ関係に及ぼす影響を把握することを目的とする。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

RC柱を模擬したドックボーン型の試験体を製作した。試験体は断面寸法 230mm×230mm の試験区間と上下スタブで構成されている。スタブの厚みは試験区間と同じ 230mm である。図-1 に試験区間の断面図を、図-2(a) に試験体の側面図を示す。試験区間の長さは 3D (=690mm, D は柱せい) とした。また、長さ D (=230mm) の測定区間では、軸ひずみや横補強筋のひずみを計測した。

表-1 に示すように、実験変数は横補強筋の配筋量とし、横補強筋を配筋しない T00 シリーズ、面積比で 0.75% とした T08 シリーズ、同じく 1.30% とした T13 シリーズの 3 種類とした。各シリーズで同一形状の試験体を 2 体ずつ、計 6 体の試験体を製作し、同一の条件で載荷した。図-2(b)(c) に T00 シリーズおよび T13 シリーズの配筋

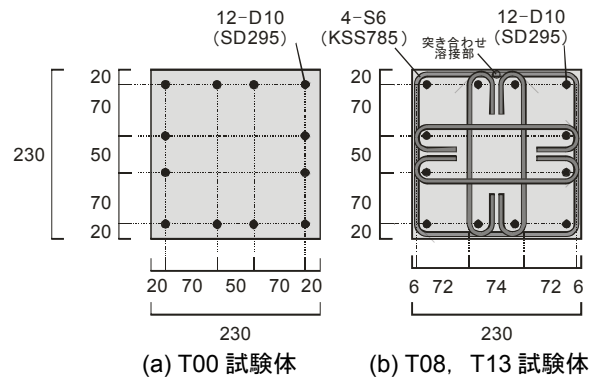


図-1 試験区間の断面図 (単位:mm)

\*1 京都大学大学院 工学研究科建築学専攻 助教 博士 (工学) (正会員)

\*2 京都大学大学院 工学研究科建築学専攻 准教授 Ph.D. (正会員)

\*3 京都大学大学院 工学研究科建築学専攻 大学院生 (正会員)

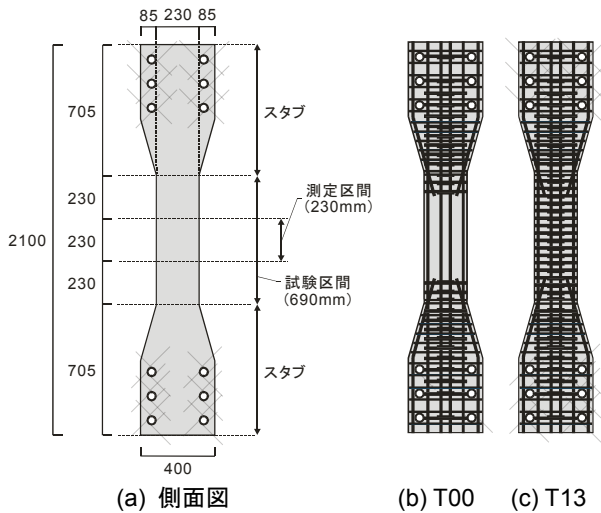


図-2 試験体側面図および配筋図 (単位:mm)

表-1 実験変数

試験体名	横補強筋			
	配筋	面積比	体積比	間隔
T00-1,T00-2		0.00	0.00	
T08-1,T08-2	4-S6@70	0.75	1.41	70mm
T13-1,T13-2	4-S6@40	1.30	2.47	40mm

図を示す。本実験では、横補強筋に拘束されたコアコンクリートの性状を把握することに主眼を置いたため、断面に占めるかぶりコンクリートの割合が小さくなるように、横補強筋のかぶり厚さを3mmに設定した。表-2(a)にコンクリートの配合、表-2(b)(c)に、シリンダー試験、鉄筋引張試験の結果を示す。コンクリートの設計強度は130MPaとし、横補強筋には規格降伏強度785MPaの高強度鉄筋を用いた。また、今回の実験では、横補強筋が図-1(b)に示す突き合わせ溶接部の横で破断する事例が見られたことから、溶接部を含むように切り出した試験片による引張試験も実施した。表-2(c)に示すように、降伏強度は通常の試験片と遜色ないが、引張強度は若干劣っている。主筋に関しては、柱断面の曲げ圧縮域における影響を小さく抑える意図でSD295とした。

## 2.2 荷重方法

図-3に荷重装置を示す。試験体は上下のスタブに鉄骨製の荷重治具を取り付け、反力床、荷重梁にPC鋼棒で緊結した。荷重では、試験体の南北に設置した2本の8000kNジャッキを用いて、試験体に偏心軸力を与えた。この際、南側のジャッキは、試験体南側の圧縮縁ひずみが漸増するように、また、北側のジャッキは、試験体材軸から80mm北側に設置した鉛直変位計D1に伸び縮みが生じないように制御した。このような荷重方向を採用することにより、試験体中央の計測区間では、図-4に示すひずみ分布が形成される。ここでは、計測区間の柱

せいの方向をX軸と定義し、試験体材軸、南側圧縮縁、北側引張縁の座標をそれぞれ  $x=0\text{mm}$ ,  $x=115\text{mm}$ ,  $x=-115\text{mm}$  としており、鉛直変位計D1によって計測される  $x=-80\text{mm}$  が中立軸位置となる。試験体に作用する外力(軸力、モーメント)は、計測区間のX軸を基準に計算し、試験体の変形も考慮した。試験体の変形が増大するにつれ、断面にはせん断力が作用するが、計測区間に作

表-2 材料の力学特性

(a) コンクリートの調査

目標強度 (MPa)	水セメント比 (%)	セメント ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	水 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	粗骨材 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	細骨材 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
130	17.0	1029	175	811	442

(b) シリンダー試験

	圧縮強度 (MPa)	割裂強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)
実験前(材齢164日)	135	6.83	45.1
実験後(材齢221日)	148	5.15	45.4

(c) 鉄筋引張試験

	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)
S6 *	1045	1213	189
S6(溶接部) *	1036	1091	209
D10	358	496	184

\* S6の降伏強度は0.2%オフセット降伏点から求めた。

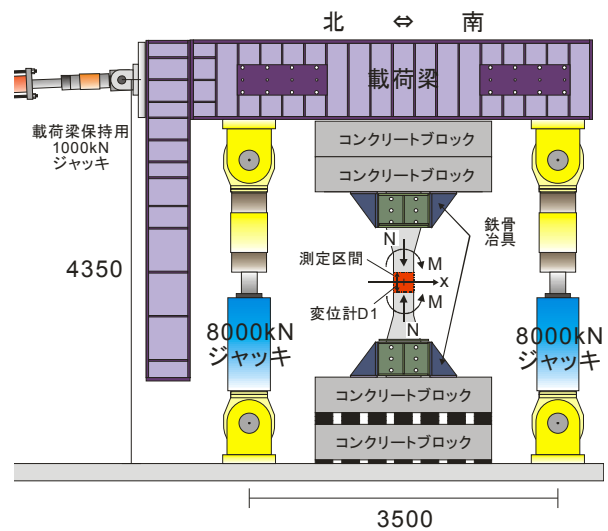


図-3 荷重装置 (単位:mm)

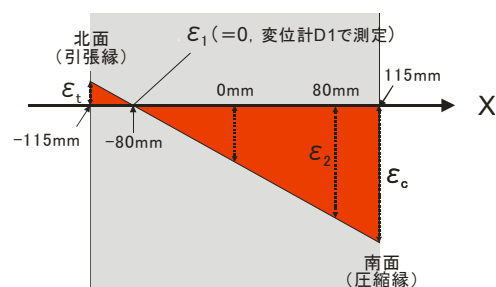


図-4 計測区間におけるひずみ分布

用したせん断応力は、最大で0.18MPa程度に収まっており、影響は軽微であると考えられる。

次に、試験区間の中立軸位置、圧縮縁ひずみの算定方法について述べる。計測区間の東側では、前述した変位計D1とは別に変位計D2をx=80mmの位置に設置し、変位計D1、D2で軸ひずみ $\epsilon_{E1}$ 、 $\epsilon_{E2}$ を計測した。また、試験体の西側でも、x=-80mm、x=80mmの位置に60mmのコンクリートゲージS1、S2を貼り付け、軸ひずみ $\epsilon_{W1}$ 、 $\epsilon_{W2}$ を計測した。これらの東西の軸ひずみを平均し、東西方向のひずみ勾配を考慮したx=-80mm、x=80mmにおける軸ひずみ $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$ を計算している。但し、ひずみゲージS2はカバーコンクリートの剥離により、実験早期に計測不能となるため、実際には、式(1)に従い、 $\epsilon_{W2}$ を求めた。また、圧縮縁ひずみ $\epsilon_c$ (x=115mm)は、 $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$ を用いて、式(2)により求めた。

$$\epsilon_{W2} = \epsilon_{E2} - (\epsilon_{E1} - \epsilon_{W1}) \quad (1)$$

$$\epsilon_c = -(\epsilon_2 - \epsilon_1) / 160_{mm} \times 195_{mm} + \epsilon_1 \quad (2)$$

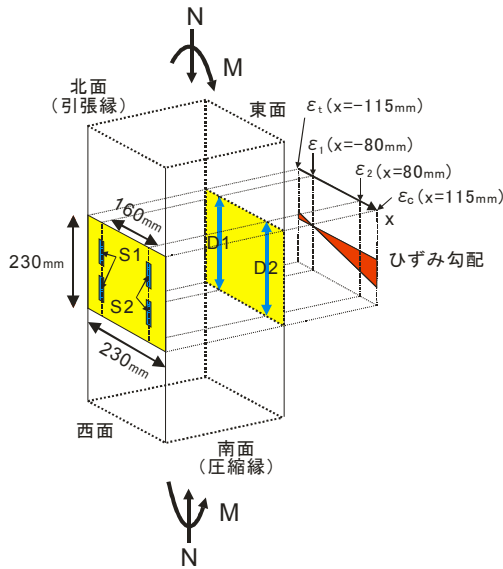


図-5 計測区間における軸ひずみの測定

### 3. 実験結果

#### 3.1 破壊性状

##### (i) T00-1 試験体, T00-2 試験体

横補強筋が無いT00-1試験体、T00-2試験体では、圧縮縁ひずみ $\epsilon_c=0.20\% \sim 0.30\%$ で、圧縮縁隅角部のコンクリートが剥落し始め、 $\epsilon_c$ が0.30%を超えると、隅角部の主筋がむき出しになった。また、 $\epsilon_c=0.40\%$ 付近でコアコンクリートが圧壊し、軸力を保持できなくなった。

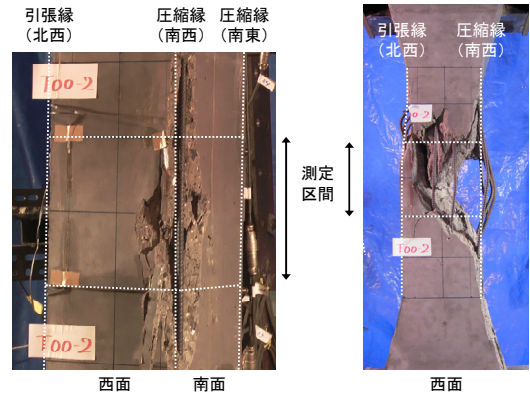
##### (ii) T08-1 試験体, T08-2 試験体

2体とも圧縮縁ひずみ $\epsilon_c=0.40\%$ 付近で、圧縮縁隅角部のコンクリートの剥落が見られ、 $\epsilon_c$ の増大に伴いカバーコンクリートの剥落が引張側へと進展した。T08-1試験

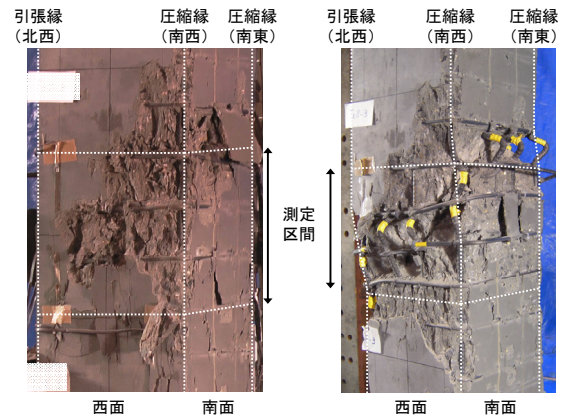
体は $\epsilon_c=1.2\%$ で、T08-2試験体は $\epsilon_c=1.9\%$ で横補強筋が溶接部横で破断し、コアコンクリートが圧壊、軸力を保持できなくなった。

##### (iii) T13-1 試験体, T13-2 試験体

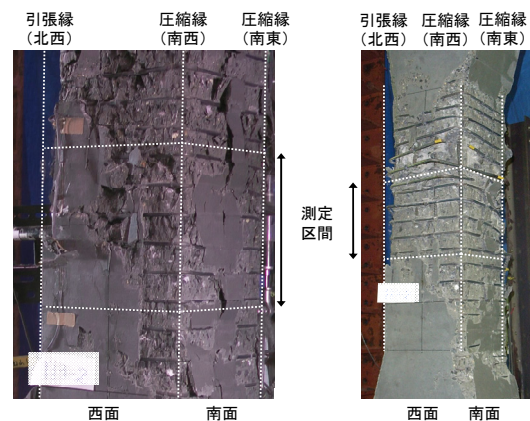
2体とも圧縮縁ひずみ $\epsilon_c=0.40\%$ 付近で、圧縮縁隅角部のコンクリートの剥落が見られ、 $\epsilon_c$ の増大に伴い、カバーコンクリートの剥落が引張側へと進展した。T13-1試験体は $\epsilon_c=1.4\%$ で横補強筋の破断により、コアコンクリ



(a)  $\epsilon_c=0.36\%$  (b) 実験終了後  
写真-1 T00-2 試験体の損傷状況



(a)  $\epsilon_c=1.9\%$  (b) 実験終了後  
写真-2 T08-2 試験体の損傷状況

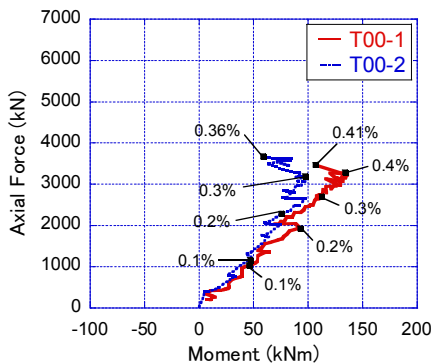


(a)  $\epsilon_c=1.4\%$  (b) 実験終了後  
写真-3 T13-1 試験体の損傷状況 (西面)

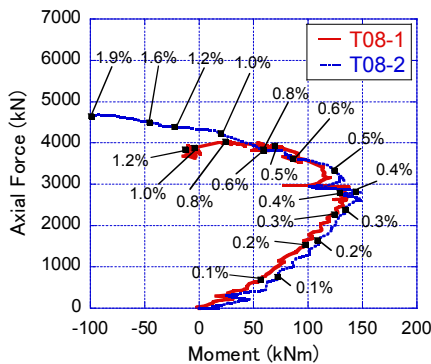
ートの圧壊が起こった。この際、T08-1 試験体や T08-2 試験体とは異なり、横補強筋の破断は溶接部の横だけでなく、試験体隅角部でも起こっていた。一方、T13-2 試験体では、コアコンクリートの圧壊を迎える前に載荷梁保持用の 1000kN 水平ジャッキ (図-3 参照) のストロークが限界に達したため、載荷を終了している。コアコンクリートの圧壊が起こった T13-1 試験体の実験終了後の損傷状況 (写真-3(b)参照) を見ると、他の試験体とは異なり、損傷が試験区間全体に及んでいる。

### 3.2 軸力-モーメント関係

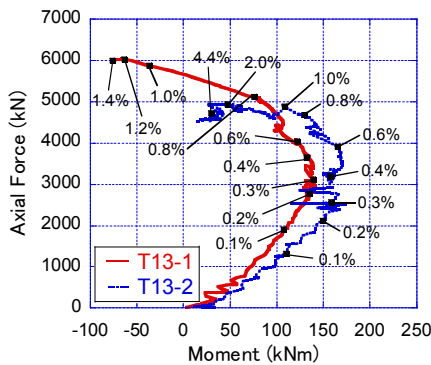
図-6 に各試験体の軸力-モーメント関係を示す。図中に示した数値は、圧縮縁ひずみ  $\epsilon_c$  を示している。いずれ



(a) T00-1 試験体, T00-2 試験体



(b) T08-1 試験体, T08-2 試験体



(c) T13-1 試験体, T13-2 試験体

図-6 軸力-モーメント関係

(図中の数値は圧縮縁ひずみ  $\epsilon_c$  を示す)

の試験体でも、圧縮縁隅角部でカバーコンクリートの剥落が生じ始める圧縮縁ひずみ  $\epsilon_c=0.4\% \sim 0.6\%$  付近で最大モーメントを計測した。横補強筋のない T00-1 試験体、T00-2 試験体では、最大モーメントを迎えた後、直ちに曲げ圧壊し、軸力を負担できなくなった。一方、横補強筋による拘束効果が見られる残り 4 体の試験体では、モーメントの低下を伴いながらも、コアコンクリートが圧壊するまで、軸力は増大した。表-3 に各試験体の最大軸力および曲げ圧壊時の圧縮縁ひずみ  $\epsilon_{cu}$  を示す。横補強筋量の増大に伴い、最大軸力や  $\epsilon_{cu}$  が大きくなり、横補強筋が超高強度コンクリートの圧縮強度の増強や変形性能の向上に寄与していることが分かる。但し、同一配筋とした各シリーズ内で比較すると、特に T08 シリーズ、T13 シリーズでは、両者のばらつきが大きくなっている。

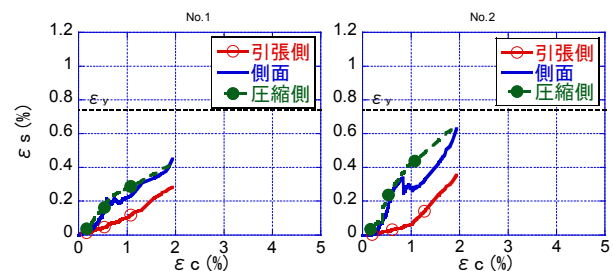
表-3 最大軸力と曲げ圧壊時の圧縮縁ひずみ  $\epsilon_{cu}$

試験体名	最大軸力		$\epsilon_{cu}$	
	各試験体 kN	平均値 kN	各試験体 %	平均値 %
T00-1	3475	3577	0.41	0.39
T00-2	3679		0.36	
T08-1	4016	4347	1.2	1.6
T08-2	4678		1.9	
T13-1	6053	4966 *	1.4	4.0 *
T13-2	4966 *		4.0 *	

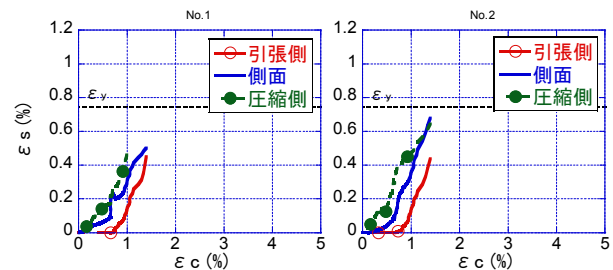
\* T13-2 試験体ではジャッキストロークの限界により載荷を終了したため、載荷終了時の値を参考値として掲載した。

### 3.3 横補強筋ひずみ $\epsilon_s$ -圧縮縁ひずみ $\epsilon_c$ 関係

図-7 に横補強筋ひずみ  $\epsilon_s$ -圧縮縁ひずみ  $\epsilon_c$  関係を示す。横補強筋ひずみ  $\epsilon_s$  は、計測区間 (230mm) 内の 2 本の横補強筋に貼り付けたひずみゲージから計測した。図中には、補強筋 (S6) の 0.2% オフセット降伏点のひずみ



(a) T08-2 試験体



(b) T13-1 試験体

図-7 横補強筋ひずみ  $\epsilon_s$ -圧縮縁ひずみ  $\epsilon_c$  関係

$\varepsilon_y (=0.75\%)$  も併せて示す。各補強筋には、**図-8** に示すように、外周部の補強筋の圧縮側、側面、引張側の中央に一枚ずつ、ゲージを添付している。各シリーズで同様の結果が得られたため、ここでは、T08-2 試験体と T13-1 試験体の結果のみを示す。いずれも、横補強筋ひずみ  $\varepsilon_s$  は、圧縮側、側面、引張側の順に小さくなった。また、各試験体が最大モーメントを迎える圧縮縁ひずみ  $\varepsilon_c=0.4\% \sim 0.6\%$  時の  $\varepsilon_s$  を見ると、いずれの試験体でも、そのひずみ値は降伏ひずみ  $\varepsilon_y$  を大きく下回っていた。

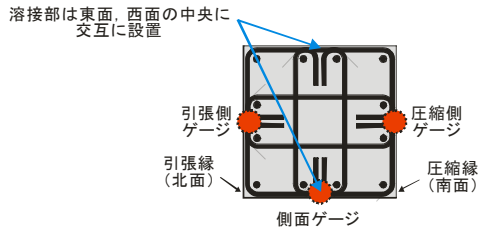


図-8 ひずみゲージの貼り付け位置

### 3.4 拘束コンクリートの応力 $f$ - ひずみ $\varepsilon$ 関係

Hongnestad ら<sup>9)</sup>が提案した式(3)を用いて、試験体断面におけるコンクリートの応力-ひずみ関係を算定した。なお、式(3)内の軸力  $N$  は、計測区間に作用する軸力から、断面のひずみ分布に基づいて計算した主筋の軸方向力を差し引いた値とし、コンクリートのみが分担する軸力

を用いた。主筋の応力-ひずみ関係はバイリニア型とし、降伏後の剛性はゼロとした。

$$f(\varepsilon_c) = \frac{N}{b \cdot c} + \frac{\varepsilon_c}{b \cdot c} \frac{dN}{d\varepsilon_c} = f_o + \frac{df_o}{d\varepsilon_c} \varepsilon_c \quad (3)$$

最初に、各試験体の平均圧縮応力  $f_o$  - 圧縮縁ひずみ  $\varepsilon_c$  関係を求めた。 $f_o$  は、軸力  $N$  をコンクリート圧縮域の面積 (中立軸深さ  $c \times$  柱幅  $b$ ) で除すことで求め、 $c$  は軸ひずみ  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  を線形補間することで計算した。**図-9** に各試験体の  $f_o - \varepsilon_c$  関係を示す。

次に  $f_o - \varepsilon_c$  関係を用いて、コンクリートの圧縮応力  $f$  - 圧縮ひずみ  $\varepsilon_c$  関係を算定した。この際、**図-9** に示す実験結果を式(3)に直接適用すると、 $f_o - \varepsilon_c$  関係の曲線の凸凹が  $f - \varepsilon_c$  関係に影響し、算定結果のばらつきが大きくなる。そこで、ばらつきを小さく抑えるため、**図-9** に示すように、 $f_o - \varepsilon_c$  関係を 2 折れ線から 4 折れ点線で近似し、各折れ点において式(3)を適用した。**図-10** に  $f - \varepsilon_c$  関係を示す。

同図中には、超高強度コンクリートの応力-ひずみ関係<sup>9)</sup>として、小室らが修正した六車・渡邊式<sup>7)</sup>と、小室が修正した NewRC 式<sup>8),9)</sup>も併せて示す。NewRC 式に関しては、 $D$  の下限値を 0.5 とし、切片  $\alpha$  を式(4)に基づいて定める手法<sup>9)</sup>を用いた。今回の検証では、コンクリートの圧縮強度、ヤング係数には、表-2(b)に示したシリンダー試験の結果を、横補強筋の降伏強度には、表-2(c)で示した S6 の降伏強度の材料試験値を用いた。また、これらの算定式では、外周筋もしくは閉鎖型の中子筋による拘束を前提としているものと考えられるが、本研究では、**図-1(b)**に示すように  $180^\circ$  フックの中子筋を用いているため、閉鎖型の中子筋と比べ拘束効果が弱まり、拘束による強度上昇や靱性能の向上を適切に評価できない可能性があることに注意されたい。

$$\alpha = 2.0 (\rho_h < 0.02), \quad \alpha = 70\rho_h + 0.06 (\rho_h \geq 0.02) \quad (4)$$

コンクリートの初期剛性 (ヤング係数) に関しては、T00 シリーズ、T08 シリーズでは、シリンダー試験と比べ、本実験で得られた初期剛性は若干小さくなったが、T13 シリーズでは、両者は概ね良く対応していた。T08 シリーズ、T13 シリーズでは、最大強度時のひずみが算定式よりも大きな値になっている。圧縮強度に関しては、シリンダー試験の結果を大きく上回った T13-1 試験体を除けば、おおよそ計算式に近い値が得られていると考えられる。

圧縮強度後の挙動に関しては、六車・渡邊式は全ての

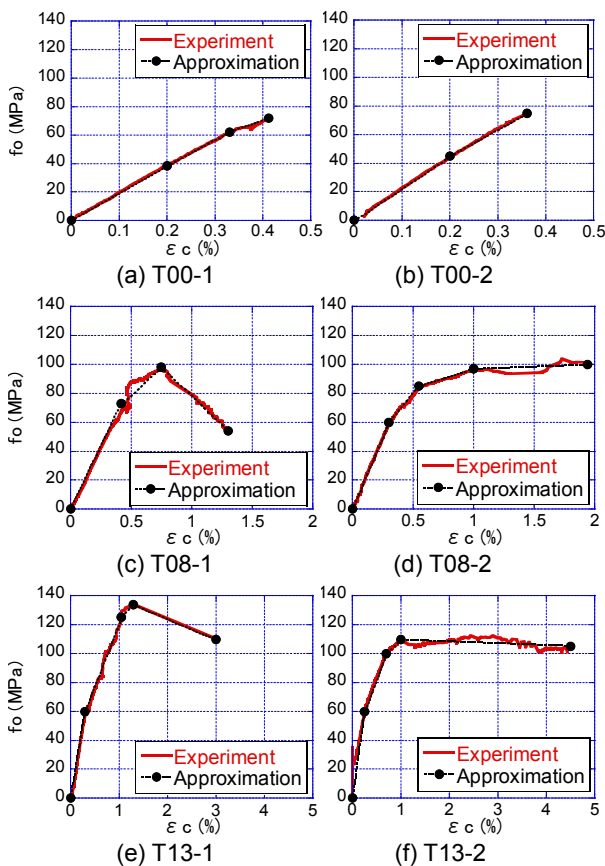


図-9 平均圧縮応力  $f_o$  - 圧縮縁ひずみ  $\varepsilon_c$  関係

試験体において、補強試験体の変形性能を過小評価した。また、NewRC 式に関しても、変形性能が乏しい T08-1 試験体を除くと、補強試験体の変形性能を過小評価している。但し、本実験では、試験体間のばらつきが大きく、実験で見られた高い変形性能がひずみ勾配に起因するものかどうかを確認するまでは至らなかった。ばらつきの一因としては、図-3 に示す試験体とコンクリートブロックの接続に用いた鉄骨治具や載荷梁の剛性が小さく、試験体の固定度が十分でなかったことが考えられる。

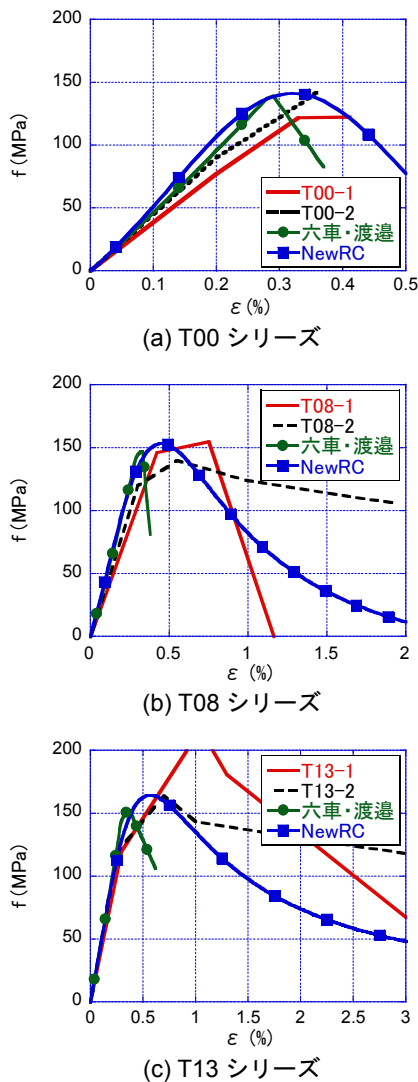


図-10 コンクリートの応力 $f$ -ひずみ $\epsilon$ 関係

#### 4. 結論

設計強度 130MPa の超高強度コンクリートを用いたドックボーン型の柱試験体を製作し、横補強筋量を実験変数とした偏心圧縮試験を実施し、以下の知見を得た。

1. T13-2 試験体を除く全ての試験体で、試験区間でコアコンクリートの曲げ圧壊が起り、脆性的に破壊した。

2. 横補強筋量の増大に伴い、最大軸力、曲げ圧壊時の圧縮縁ひずみが増大する傾向が見られた。但し、同一配筋とした試験体間でのばらつきは大きかった。
3. 圧縮縁ひずみと横補強筋ひずみの関係より、圧縮縁コンクリートが圧縮強度に達した時、横補強筋は降伏強度に達していないことを確認した。
4. T08-1 試験体を除く 3 体の補強試験体では、拘束コンクリートの応力-ひずみ関係が、既存の計算式よりも高い変形性能を示した。

#### 参考文献

- 1) Soliman, M.T.M. and Yu, C.H. :The Flexural Stress-Strain Relationship of Concrete Confined by Rectangular Transverse Reinforcement, Magazine of Concrete Research, Vol.19, No.61, pp.223-238, 1967.12
- 2) 松本孝治ほか：ひずみ勾配を持つ大型コンクリート柱の力学的性状に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.299-302，1995.8
- 3) 堀内弘太ほか：ひずみ勾配を持つ鉄筋コンクリート柱の力学的性状に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.211-214，1996.9
- 4) 山本昌則ほか：偏心圧縮を受ける実在鉄筋コンクリート柱の耐力・変形性能に関する推定式の提案，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.429-432，1998.9
- 5) Hognestad E., Hanson, N.W. and McHenry, D. :Concrete Stress Distribution in Ultimate Strength, No.52-28, Journal of American Concrete Institute, v.27, No.4, Dec.1955
- 6) 日本建築学会：高強度コンクリートの技術の現状，pp.271-284，2009.10
- 7) 小室努ほか：100～180N/mm<sup>2</sup>の超高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート柱の圧縮特性，日本建築学会構造系論文集，第 577 号，pp.77-84，2004.3
- 8) (財)国土開発技術研究センター：平成 4 年度 New RC 研究開発概要報告書，pp.(3-2-79)-(3-2-98)，1993.3
- 9) 小室努：超高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート柱の圧縮特性に関する研究，京都大学博士論文，2007

#### 謝辞

本研究は、文部科学省科学研究費（課題番号・20760372，研究代表者・坂下雅信 および 課題番号・20360252，研究代表者・河野進）を用いて行われた。実験に際して、住倉鋼材（株）より資材の提供を受けた。また、超高強度コンクリートの製作にあたり、株式会社京都生コンの広野紀一氏、太田昇氏、宇部三菱セメント株式会社の岩本春美氏、BASF ポゾリス株式会社の吉田基和氏に御協力頂いた。ここに謝意を表す。