

平成 22 年 5 月 24 日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2008～2009
 課題番号：20760372
 研究課題名（和文）超高強度コンクリート柱における曲げ性能評価の精度向上に関する基礎的研究
 研究課題名（英文）Study on Flexural Behavior Evaluation of Reinforced Concrete Columns with Ultra High Performance Concrete
 研究代表者
 坂下 雅信（SAKASHITA MASANOBU）
 京都大学・工学研究科・助教
 研究者番号：50456802

研究成果の概要（和文）：超高強度コンクリート（UHPC）を用いた柱部材の曲げ性能の評価精度を向上させることを目的とし、断面内にひずみ勾配を有する UHPC の応力 - ひずみ関係を載荷実験より求めた。実験には、設計基準強度 130MPa の UHPC を用いたドックボーン型柱試験体 6 体を用い、偏心圧縮試験を実施した。実験変数は横補強筋量（0%、0.75%、1.30%）である。実験で得られた UHPC の応力 - ひずみ関係より、横補強筋量の増大に伴い、最大圧縮応力や最大圧縮応力時のひずみが大きくなること、また、同一配筋とした試験体でも、横補強筋の拘束の程度が異なり、UHPC の挙動が左右されることが分かった。

研究成果の概要（英文）：In order to simulate flexural behavior of reinforced concrete columns with ultra high performance concrete (UHPC), axial stress-strain curves of UHPC were measured from eccentric compressive loading test with six specimens. Experimental variable was amount of transverse reinforcement. From the axial stress-strain curves of UHPC, it was clarified that confinement effect by transverse reinforcement had influence on maximum compressive stress, compressive strain at maximum compressive stress. The confinement effect depended on the amount of transverse reinforcement, but varied widely.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：超高強度コンクリート、鉄筋コンクリート柱、曲げ性能、応力ひずみ関係

1. 研究開始当初の背景

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（UHPC）が建築物に適用される事例が増えており、同材料を用いた部材の曲げ性状の評価が急務となっている。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試験体の応力 - 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。特にひずみ勾配が及ぼす影響に関しては、普通強度コンクリートや高強度コンクリートを対象とした研究がほとんどであり、これらの材料と異なる材料特性を示す UHPC に及ぼす影響は検証されていない。

2. 研究の目的

UHPC を用いた RC 柱の曲げ性状を精度良く評価するためには、UHPC の圧縮応力 - 圧縮ひずみ関係を適切にモデル化する必要がある。そこで、本研究では、RC 柱試験体の偏心圧縮載荷実験を実施し、断面内のひずみ勾配の影響を考慮した UHPC の圧縮応力 - 圧縮ひずみ関係を算定し、ひずみ勾配の影響を定量的に評価する。

3. 研究の方法

図 1 に示すドックボーン型の鉄筋コンクリート柱試験体の偏心圧縮載荷実験を行い、Hongnestad らの提案手法に基づいて、UHPC の圧縮応力 - 圧縮ひずみ関係を算定する。試験体は表 1 に示す 6 体であり、各試験体の柱断面は 230mm 角、試験区間の長さは 690mm とした。実験変数は横補強筋量とし、同一配筋

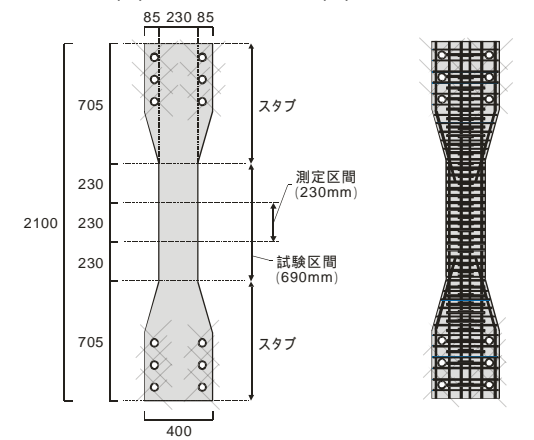
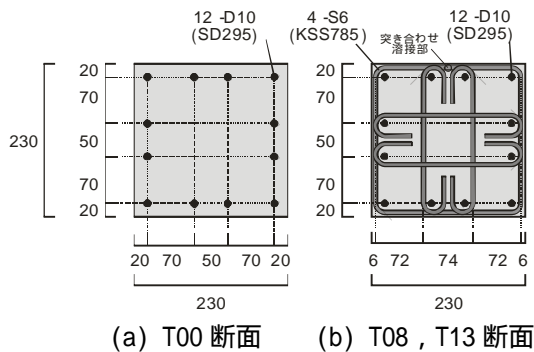


図 1 試験体図 (単位:mm)

の試験体を 2 体ずつ製作した。横補強筋比は 0%, 0.75%, 1.30% の 3 種類である。UHPC の設計基準強度は 130MPa, 横補強筋の規格降伏強度は 785MPa である。実強度に関しては、標準シリンダーを用いた UHPC の圧縮強度は 142MPa, 引張試験片を用いた横補強筋の降伏強度は 1045MPa であった。

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 2 に載荷装置を示す。試験体は上下のスタブに鉄骨製の載荷治具を取り付け、反力床、載荷梁に PC 鋼棒で繋結した。載荷では、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、計測区間内の試験体材軸から 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。このような載荷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 3 に示すひずみ分布が形成される。計測区間の柱せいの方向を X 軸と定義す

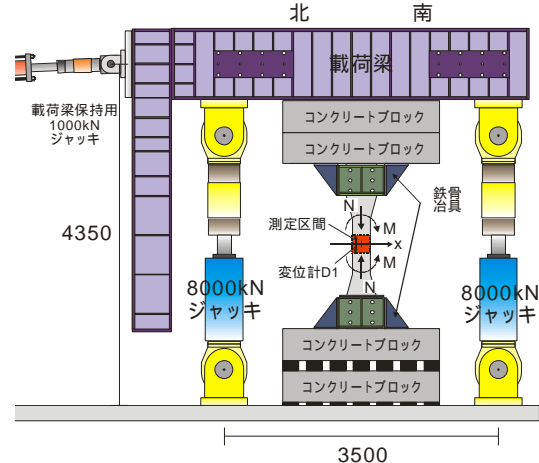


図 2 載荷装置 (単位:mm)

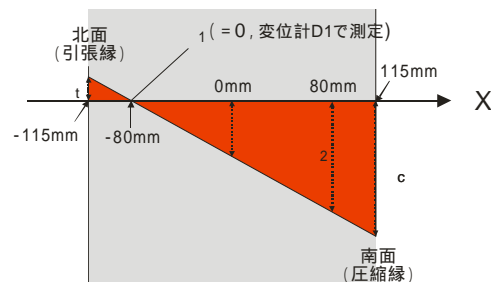


図 3 計測区間におけるひずみ分布

ると、試験体材軸、南側圧縮縁、北側引張縁の座標はそれぞれ $x=0\text{mm}$, $x=115\text{mm}$, $x=-115\text{mm}$ となる。また、鉛直変位計 D1 による計測が行われる $x= -80\text{mm}$ が断面内の中立軸位置となる。

UHPC の圧縮応力 - 圧縮ひずみ関係の算定に用いる断面内のひずみ分布は、変位計 D1 だけでなく、計測区間に設けた複数の変位計とひずみゲージを用いて計測した。また、図 1 に示す計測区間（長さ 230mm）内の横補強筋にはひずみゲージを貼付し、コアコンクリートの膨張によって生じる引張りひずみの計測も行った。

4. 研究成果

(1) いずれの試験体も軸力の増大に伴い、圧縮縁のカバーコンクリートが剥落し、コアコンクリートに損傷が進展した。横補強筋の無い T00-1 試験体や T00-2 試験体では、カバーコンクリートの剥落直後に、コアコンクリートが曲げ圧壊し、試験体は軸力保持能力を急激に喪失した。横補強筋を配した T08-1 試験体、T08-2 試験体、T13-1 試験体では、コアコンクリートに縦方向のひび割れが入り、横補強筋間で剥落が見られた後も軸力を保持したが、横補強筋の破断が引き金となりコアコンクリートが曲げ圧壊した（図 4、図 5）。いずれの試験体も、横補強筋は試験体側面の突き合わせ溶接部近傍で破断しており、溶接部の強度を十分に確保することができれば、より高い圧縮靱性を得られた可能性が高い。T13-2 試験体に関しては、载荷装置の制限により、コアコンクリートの曲げ圧壊が起こる前に実験を終了した。



図 4 破壊時の様子 (T08-2 試験体)



図 5 実験終了後の損傷状況 (T08-1 試験体)

(2) Hongnestad らが提案した手法に基づき、実験結果より、UHPC の圧縮応力 - 圧縮ひずみ関係（図 6、図 7、図 8）を算定した。また、同関係より、最大圧縮応力や最大圧縮応力時の圧縮ひずみ、コアコンクリートが曲げ圧壊し、軸力保持能力が喪失する際の圧縮ひずみを検証した（表 2）。

実験結果を全体的に見れば、横補強筋量の増大に伴い、最大圧縮応力や最大圧縮応力時

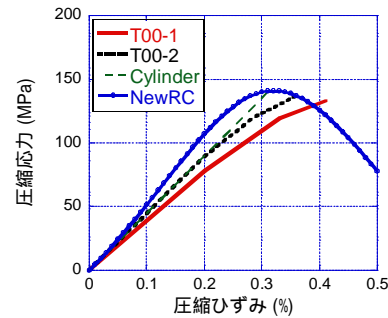


図 6 応力 - ひずみ関係 (T00-1, T00-2)

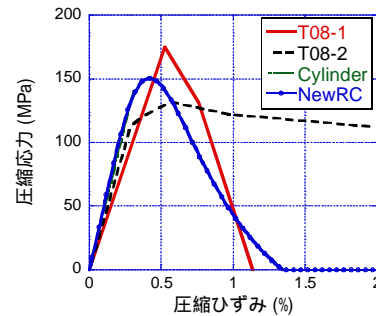


図 7 応力 - ひずみ関係 (T08-1, T08-2)

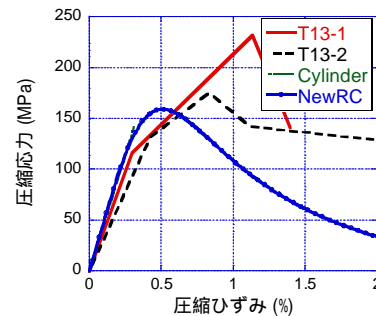


図 8 応力 - ひずみ関係 (T13-1, T13-2)

表 2 実験結果と既存算定式の比較

	実験結果			NewRCモデル	
	コンクリート曲げ圧壊時ひずみ(%)	最大応力時ひずみ(%)	最大応力 (MPa)	最大応力時ひずみ(%)	最大応力 (MPa)
T00-1	0.41	0.41	133	0.32	141
T00-2	0.36	0.36	138		(1.06)
T08-1	1.3	0.53	175	0.42	151
T08-2	1.9	0.57	132		(1.14)
T13-1	1.4	1.1	232	0.51	159
T13-2		0.83	175		(0.69)
					159
					(0.91)

括弧内の数値は、実験結果に対する算定式の比を示している。

の圧縮ひずみ、コアコンクリート曲げ圧壊時の圧縮ひずみが増大する傾向が見られたが、横補強筋の無い T00-1 試験体や T00-2 試験体を除くと、同一配筋とした T08-1 試験体と T08-2 試験体、また、T13-1 試験体と T13-2 試験体を比較すると、各計測値に大きな乖離が見られた。乖離の原因に関しては、横補強筋によるコアコンクリートの拘束の程度が試験体によって異なっていたことが関係していると考えられる。

図 9 に計測区間内の横補強筋に貼付したひずみゲージの位置を、表 3 に UHPC の圧縮応力 - 圧縮ひずみ関係において、最大圧縮応力に達した際の引張側、側面、圧縮側の横補強筋の引張ひずみを示す。また、各ひずみに材料試験から求めたヤング係数を乗じて、補強筋が負担する引張応力を計算した。表 2 に示すように、同一配筋とした試験体と比較して、最大圧縮応力が大きい T08-1 試験体や T13-1 試験体では、最大圧縮応力時の横補強筋の引張ひずみが大きく、コアコンクリートが高い拘束圧を受けていることが分かる。また、これらの試験体では、横補強筋の負担引張応力が大きいため、横補強筋の突き合わせ溶接部近傍における破断が早期に起こり、部材の圧縮靱性が低下している。このように、横補強筋ひずみを分析することで各試験体の挙動を説明することができるが、同一配筋とした試験体で横補強筋の拘束効果が異なった原因に関しては不明である。

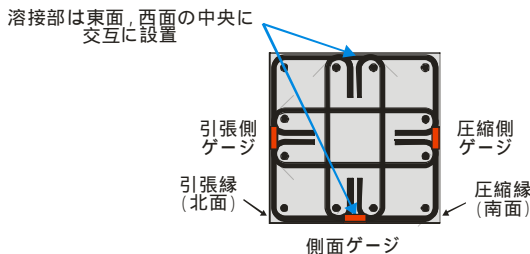


図 9 計測区間における横補強筋ひずみゲージの計測位置

表 3 最大圧縮応力時の横補強筋の引張ひずみと引張応力

	横補強筋のゲージ位置					
	引張側		側面		圧縮側	
	ひずみ (%)	応力 (MPa)	ひずみ (%)	応力 (MPa)	ひずみ (%)	応力 (MPa)
T08-1	0.04	67	0.23	439	0.42	790
T08-2	0.04	72	0.21	389	0.22	421
T13-1	0.25	482	0.46	863	0.54	1015
T13-2	0.02	46	0.19	353	0.41	768

(3) 中心軸圧縮試験の結果を基に提案された既往のコンクリート圧縮応力 - 圧縮ひずみ関係 (NewRC モデル) と、実験で得られた偏心圧縮試験の圧縮応力 - 圧縮ひずみ関係を比較した (図 6, 図 7, 図 8, 表 2)。NewRC モデルに関しては、UHPC を対象とした小室に

よる修正式を用いている。いずれの試験体でも、最大圧縮応力時の圧縮ひずみは、実験結果の方が NewRC モデルよりも大きくなった。横補強筋が早期に破断した T08-1 試験体や T13-1 試験体の圧縮靱性が NewRC モデルの圧縮靱性より劣っていることは図中より明らかであるが、横補強筋の破断が早期に起こらず、高い圧縮靱性を示した T08-2 試験体や T13-2 試験体に関しては、NewRC モデルを上回る圧縮靱性を有していることが分かる。

断面内にひずみ勾配を有する部材では、コンクリートの損傷の進展具合が圧縮側と引張側で異なる。中立軸付近の健全なコンクリートが圧縮域で生じるマイクロクラックの進展を抑制すると、中心軸圧縮試験と比較して、コンクリートの圧縮靱性が向上し、最大圧縮応力が増大する。一方で、圧縮縁のひずみが中心軸圧縮試験と等しい場合、圧縮域におけるポアソン効果が弱まり、横補強筋の効きが悪くなる可能性がある。この場合、横補強筋による拘束効果は低下するが、一方で、拘束圧を受ける横補強筋近傍のコンクリートの局所的な破壊が抑制され、圧縮靱性の向上に寄与する可能性がある。このように、ひずみ勾配の影響を評価するためには、幾つかの因子を考える必要がある。

本研究では、実験試験体を用いた中心軸圧縮試験を実施しておらず、ひずみ勾配が及ぼす影響を明確にうかがい知ることはできない。しかし、T08-2 試験体や T13-2 試験体は、中心軸圧縮試験に基づく NewRC モデルを大きく上回る圧縮靱性を示しており、ひずみ勾配が拘束コンクリートの圧縮靱性に寄与する方向に働いた可能性が考えられる。今後は、FEM 解析等を用いて、ひずみ勾配が及ぼす影響を定量的に評価していくことが課題となる。

(4) UHPC の圧縮応力 - 圧縮ひずみ関係が RC 柱部材の曲げ性能に及ぼす影響を検証するため、平面保持を仮定した実験試験体の断面解析を実施した。各試験体の断面は図 10 に示すように 23 分割してモデル化した。主筋はバイリニアでモデル化し、降伏後の剛性はゼロとした。また、コンクリートのモデルには、前述した NewRC モデルを用いた。断面解析で求めた軸力 - 圧縮縁ひずみ関係を実

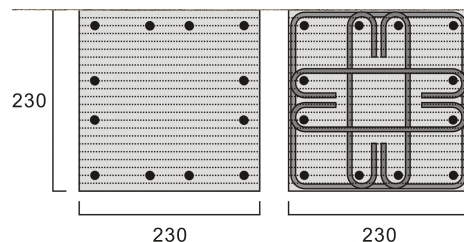


図 10 断面解析におけるメッシュの分割

験結果と比較する（図 11，図 12，図 13，表 4）。

横補強筋の無い試験体では，カバーコンクリートの剥落直後に，コアコンクリートが曲げ圧壊し，軸力保持能力を急激に喪失する。一方，断面解析では，図 6 に示す NewRC モデルをコンクリートの圧縮応力 - 圧縮ひずみ関係として用いたため，最大応力以後も負担する応力はゼロとならず，ある程度応力を負担できる。その結果，部材の最大軸力は実験値よりも 2 割程度大きな値を示している。

横補強筋を有した試験体では，図 7，図 8，表 2 に示したように，実験で得られた最大圧縮応力と，NewRC モデルを用いて計算した最大圧縮応力との間に最大で 3 割程度の差異がある。しかし，部材の最大軸力に関しては，いずれの試験体でも実験値との差異が 1 割以内に収まっており，両者の乖離は小さい。一方で，図 12 や図 13 に示すように，最大軸力後の圧縮靱性に関しては，圧縮応力 - 圧縮ひずみ関係と同様に，実験結果と解析結果の乖離

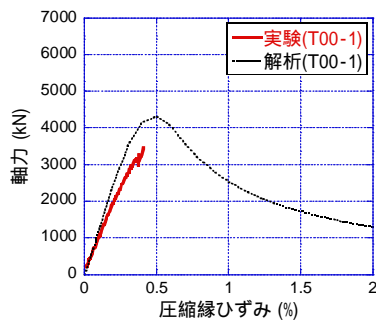


図 11 軸力 - 圧縮縁ひずみ関係 (T00-1)

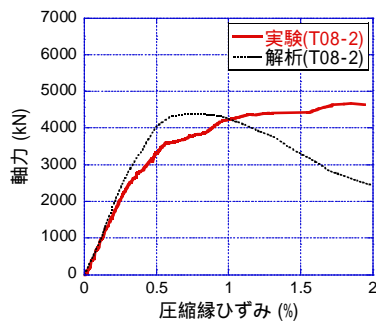


図 12 軸力 - 圧縮縁ひずみ関係 (T08-2)

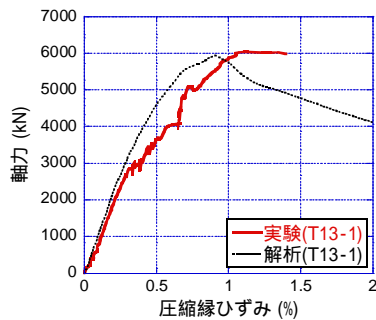


図 13 軸力 - 圧縮縁ひずみ関係 (T13-1)

が大きく，部材性能を精度良く評価するために，拘束コンクリートの圧縮応力 - 圧縮ひずみ関係を適切にモデル化する必要があることが再確認された。

表 4 最大軸力の比較

	実験結果	解析結果
	最大軸力 (kN)	
T00-1	3475	4314 (1.24)
T00-2	3679	4495 (1.22)
T08-1	4051	4378 (1.08)
T08-2	4678	4392 (0.94)
T13-1	6053	5961 (0.98)
T13-2	4966	5261 (1.06)

括弧内の数値は，実験結果に対する解析結果の比を示している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計3件)

尹亨在，林芝英，坂下雅信，河野進，八田有輝，西山峰広：130MPa 級超高強度コンクリート柱の偏心圧縮性状に関する実験的研究(その1:実験概要)，査読無し，日本建築学会大会学術講演梗概集，印刷中，2010

林芝英，尹亨在，坂下雅信，河野進，八田有輝，西山峰広：130MPa 級超高強度コンクリート柱の偏心圧縮性状に関する実験的研究(その2:実験結果)，査読無し，日本建築学会大会学術講演梗概集，印刷中，2010

坂下雅信，河野進，林芝英，八田有輝：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，査読有り，コンクリート工学年次論文集，第32巻，印刷中，2010

6. 研究組織

(1)研究代表者

坂下 雅信 (SAKASHITA MASANOBU)

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：50456802