

論文

[2075] 主筋の座屈挙動に着目した変動軸力を受ける RC 柱の静加力実験

本多良政*¹・加藤大介*²

1. 序

日本建築学会の鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針（学会指針）〔1〕では、座屈防止を念頭においた軸力制限と構造規定が示されている。筆者らは、座屈防止筋の設計法をより具体的に提案するために、主筋の座屈歪度評価式を提案し〔2〕、繰り返し曲げを受ける部材の主筋の圧縮方向の累積塑性軸歪度が座屈歪度計算値に達したときを変形能の限界とすることにより、座屈防止筋の評価を試みてきた〔3〕。

一方、既往の RC 部材を対象にした実験的研究では、終局時に主筋の座屈が生じたことを報告している文献は多いが、主筋の座屈と部材の靱性との関係を明らかにしている論文は少ない。そこで、主筋の座屈が部材の靱性に及ぼす影響を把握するために、4 体の RC 柱部材の静加力実験を行った。本論文では、実験の概要と主な実験結果について報告する。

2. 実験概要

2. 1 試験体

表-1に試験体の諸元を、表-2に試験体寸法と配筋詳細を示す。各試験体とも主筋の座屈により試験体の靱性が決まり、その影響が顕著に現れるように計画した。このため、試験体の主筋量は比較的大きく、また、曲げ、せん断あるいは付着破壊によって靱性が決まることのないように、シアースパン比を大きくしている。また、一般に変動軸力を受ける部材は一定軸力を受ける部材に比べ靱性が良くなるが、文献〔2〕

でも指摘したように、主筋の座屈に関しては変動軸力を受ける部材の方が不利となる。これは主筋の歪の履歴が変動軸力を受ける場合に正負の各方向で偏り、片側の主筋の歪履歴が大きくなるからである。以上のこ

表-2 試験体寸法と配筋の詳細

断面	D × B = 220mm × 220mm
柱全高さ	L = 1200mm
有効せい	d = 195mm
帯筋外端長さ	Dc = 196mm
補強筋の種類(外周)	135度フック付き(余長36mm)
中子筋(H 3、H 4)	〃

表-1 試験体の諸元

試験体名	コンクリート 強度(kg/cm ²)	主筋	主筋強度 (kg/cm ²)	帯筋	帯筋強度 (kg/cm ²)	帯筋比 (%)	軸力 (ton)	軸力比 (全断面)
H 1	339	16-D10	3535	2-D6-@30	3953	0.97	0~70	0~0.43
H 2	328	16-D13	3480	2-D6-@30	3953	0.97	0~70	0~0.44
H 3	333	16-D13	3480	3-D6-@45	3953	0.97	0~70	0~0.43
H 4	340	16-D13	3480	3-D6-@45	3953	0.97	70	0.43

*1 新潟大学大学院 工学部建設学科（正会員）

*2 新潟大学助教授 工学部建設学科、工博（正会員）

とをふまえて、実験パラメータは、主筋量(16-D10, 16-D13)、帯筋配筋法(2-D6-@30, 3-D6-@45)、軸力載荷法(一定軸力、変動軸力)とした。帯筋の配筋法については、中子筋のない試験体の帯筋間隔は30mm、中子筋のある試験体の帯筋間隔を45mmとしているので、帯筋比は全て一定となっている。

試験体H1とH2は主筋量の違いによる挙動の違いをみるため、帯筋の配筋法を同一とし、試験体H1はD10、試験体H2はD13の主筋を用いた。また、試験体H2とH3は、中子筋の有無による挙動の違いをみるため、試験体H2の帯筋は外周のみとし、試験体H3は中子筋の入った試験体となっている。試験体H3とH4は同一配筋とし、変動軸力と一定軸力の挙動の違いをみることを目的としている。なお、試験体H1～H3は0 tonf～70 tonfの変動軸力とし、H4は最大軸力を他の試験体と同一にした。図-1に試験体H1とH3の配筋図と各試験体の断面の配筋を示す。

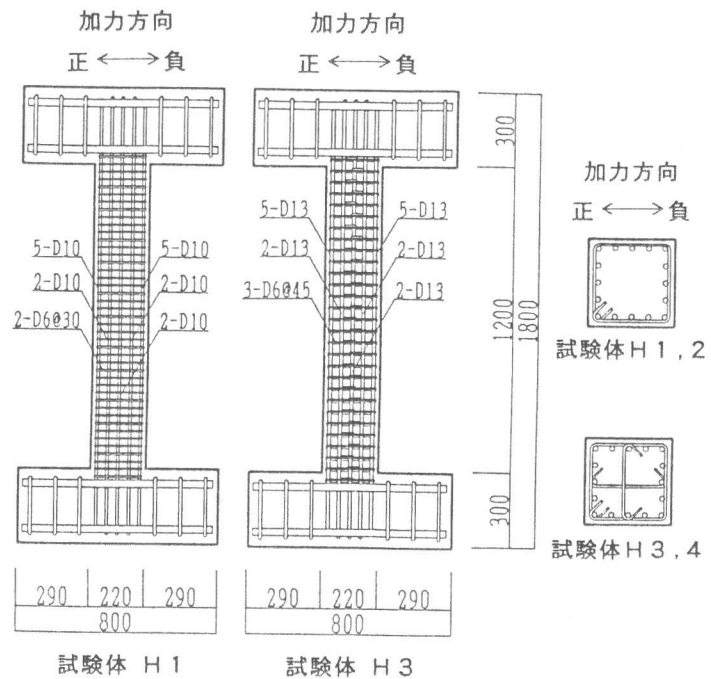


図-1 試験体配筋図

2. 2 荷重方法と計測方法

加力は、図-2に示す加力装置により逆対称変形を与えた。測定された横力は、 $P-\Delta$ 効果を考慮して修正した。すなわち、危険断面でのモーメントを軸力の効果も考慮して算出し、モーメントを2倍して高さで除したものを横力とした。荷重履歴は、同一部材角で2回づつ繰り返し、部材角は $1/200\text{rad}$ づつ増加させていった。変動軸力は梁からのせん断力の作用をなるべく現実的に即して作用させるように、図-3に示すような方法をとった。すなわち、正加力時における軸力は、 N_{max} で一定とした($a \rightarrow b$, $e \rightarrow f$)。正加力からの除荷時には、横力が0となるときの軸力が0なるように抜いていく($b \rightarrow c$)。その後、負方向の目標変位まで軸力0で($c \rightarrow d$)。負

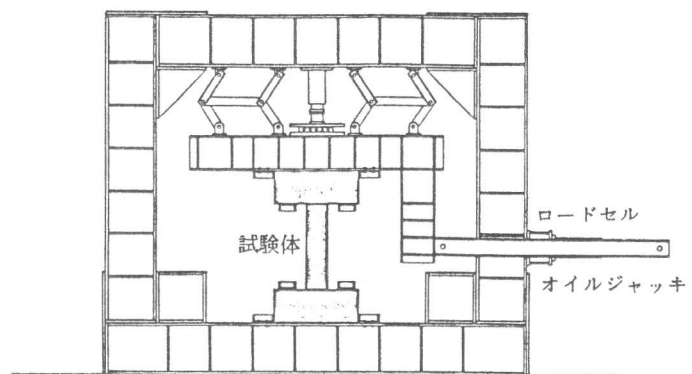


図-2 加力装置図

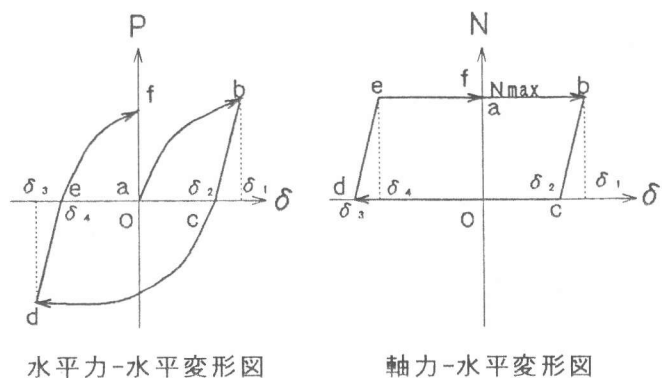


図-3 変動軸力の与え方

方向からの除荷時には、横力が0となるとときにNmaxとなるように軸力を加える(d→c)。

測定は、水平変形、軸方向変形の絶対変形その他、曲げ変形成分を計算するための柱軸方向に10領域に分割された領域での曲率及びせん断変形を測定した。なお、せん断変形は柱の上下のヒンジゾーン(22cm)において縦、横、斜め方向をそれぞれ2方向ずつ測定して求めた。この他に、主筋と帯筋の歪を測定した。

3. 実験結果

図-4(a)～(d)に各試験体の水平力－水平変形関係および軸方向変形－水平変形関係を示す。また、図-5(a)～(d)に各試験体の最大耐力時と加力終了時のひび割れ図を示す。さらに、試験体の限界部材角および主筋に関する目視による観察事項をまとめて表-3に示す。

主筋の観察事項は、隅角部主筋、無拘束中間主筋および拘束中間主筋の3つについて、それぞれ、露出、座屈確認および破断としたが、表には観察されたサイクルの最大部材角が示してある。また、試験体の限界部材角は包絡線上で耐力が最大耐力の80%に低下した点とした(一定軸力の場合には正負の小さい方)。

変動軸力を受ける3体は、いずれも正加力時には軸変形が圧縮側になるが、負加力時には軸変形が引張側となり、部材角0.03radまでは安定した挙動を示した。この部材角前後から主筋が露出し始め、その後主筋の座屈が確認され、座屈が確認された部材角付近で限界部材角となっている。また、

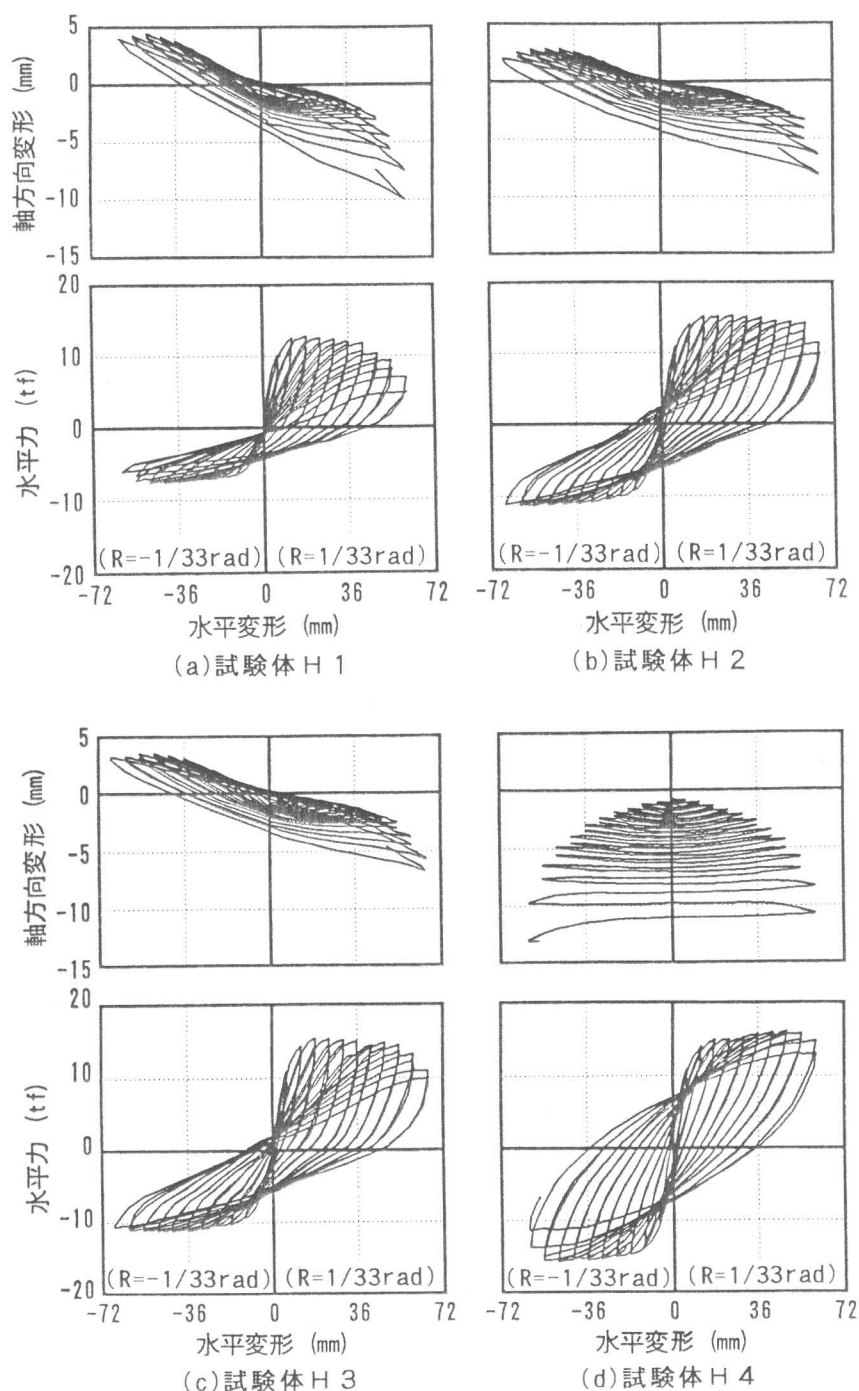


図-4 試験体の水平力、軸方向変形と水平変形の関係

主筋の座屈は無拘束の中間主筋が早く確認される傾向があった。この3体を個別に比較すると、主筋が細い試験体H1では、露出後($R=0.035\text{rad}$)まもなく主筋の座屈が確認され($R=0.04$)、このときは既に限界部材角($R=0.035\text{rad}$)となっており、限界変形が最も小さかった。また、唯一主筋の破断が観察された。しかし、軸変形-水平変形関係は最後まで安定しており、曲げ圧縮部のコンクリートは健全であったことを示している。帯筋比が一定で配筋法が異なる試験体H2とH3を比較すると、主筋の座屈確認や限界部材角はほとんど変わらなかった。主筋の座屈はコンクリートのかぶりがなくなってしまうため、本試験体では横補強筋の配筋法よりもかぶりコンクリートの座屈防止効果の方が顕著に作用したといえる。

一方、一定軸力を受ける試験体H4においても、主筋の座屈確認時と限界部材角がほぼ同じで、

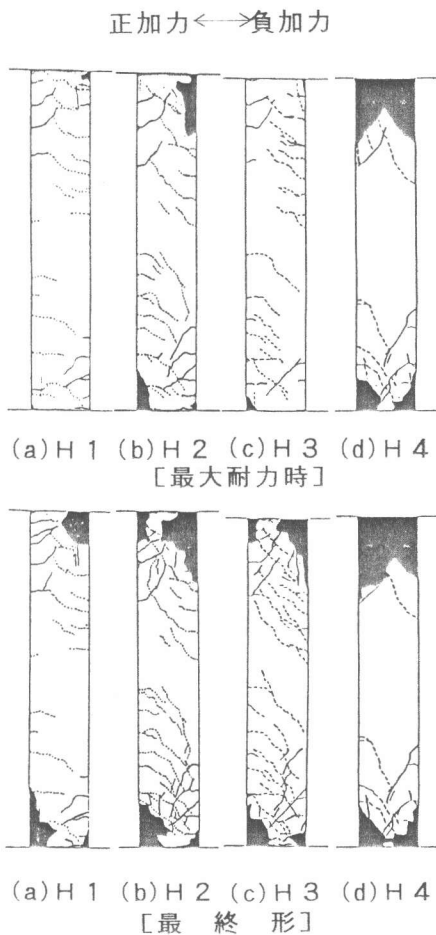


図-5 試験体のひび割れ図

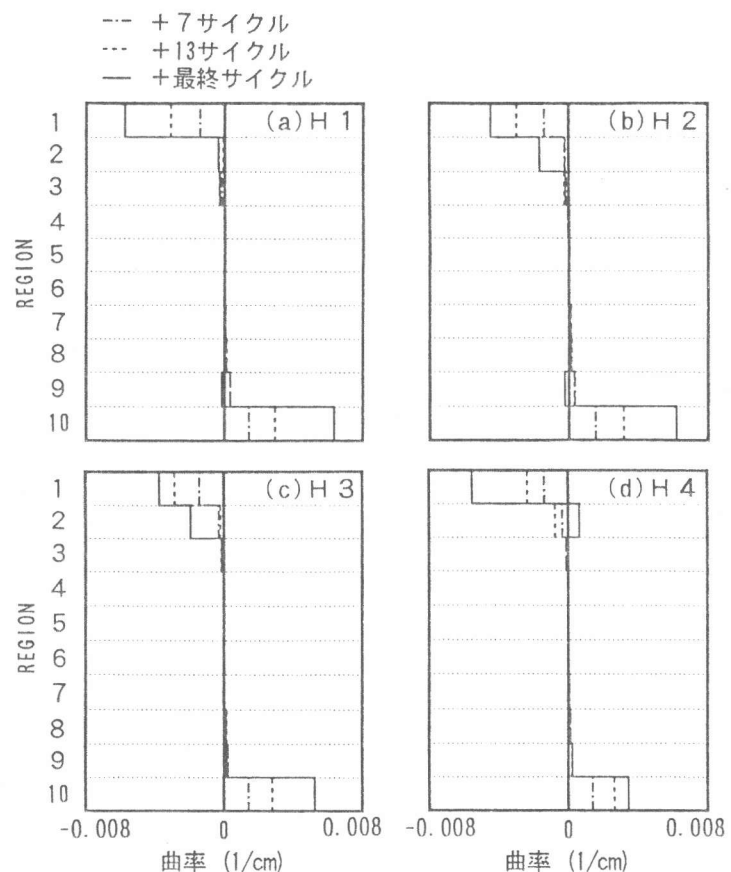


図-6 曲率分布

表-3 実験結果一覧

試験体名	最大耐力 (tonf)	最大耐力時 部材角 (rad)	限界部材角 (rad)	主筋露出時部材角			主筋座屈時部材角			主筋破断時 部材角 (rad)
				隅角部 (rad)	無拘束 中間 (rad)	拘束 中間 (rad)	隅角部 (rad)	無拘束 中間 (rad)	拘束 中間 (rad)	
H 1	12.8	0.015	0.035	0.035	0.035	—	0.050	0.040	—	0.05
H 2	15.4	0.025	0.051	0.035	0.035	—	0.050	0.050	—	—
H 3	15.4	0.015	0.049	0.030	0.030	—	0.050	0.045	0.050	—
H 4	16.2	0.040	0.051	0.030	—	—	0.050	0.045	—	—

軸変形－水平変形関係は最後まで安定しているため、主筋の座屈が靱性能の決定要因であったと判断できるが、限界部材角は変動軸力を受ける試験体H3とほぼ同じであった。一般に、軸力比が高い場合、変動軸力を受ける試験体は、同一の最大軸力で一定軸力を受ける試験体に比べ、その靱性能が非常に大きくなるのが通常である。本実験のこの結果は、主筋の座屈に対しては、変動軸力が不利に働くことを示したものである。

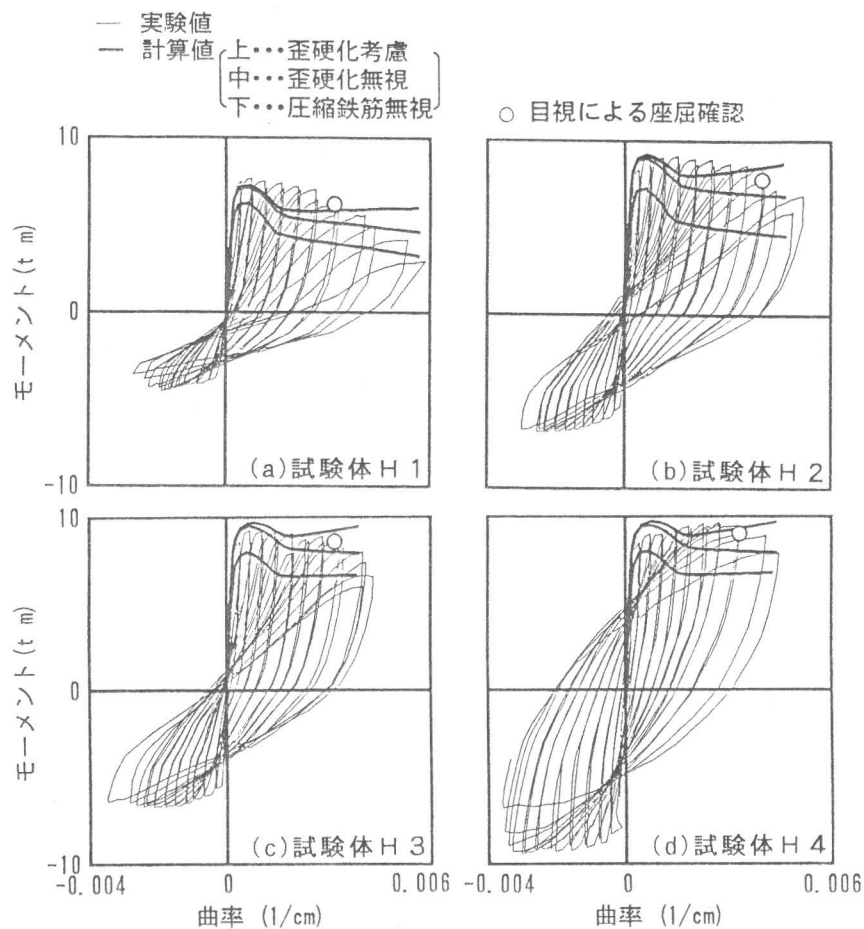


図-7 ヒンジ領域のモーメント曲率関係

4. 実験結果の考察

図-6(a)～(d)に各試験体の+7、+13および最終サイクルのピーク時での曲率分布を示す。各試験体とも危険断面から11cmの範囲に変形が集中していることがわかる。また、本報告では示していないが、せん断変形はわずかであった。そこで、本試験体の挙動を曲げ解析と比較するために、危険断面モーメントと危険断面から11cmまでの領域での平均曲率関係を算出した。

平均曲率は主筋の抜け出しを考慮して求めた。すなわち、曲げ変形を測定する2つの変位計（測定区間：ヒンジゾーン11cm）より引張および圧縮を受ける両主筋位置の平均軸変形を求め、主筋の基礎からの抜け出し量を減じるにより、両主筋位置の真の軸変形を推定し、この真の軸変形を用いて曲率を算出した。なお、主筋の基礎からの抜け出し量 l_B は文献[4]の方法を参考にした。すなわち、基礎部での主筋の歪度分布を三角形分布とし、付着有効長さ l_t は平均付着力 τ_B を主筋の歪 ε_s に依存させた式(1)で算出した。以上の仮定より、抜け出し量は式(2)で与えられる。

$$\tau_B = 850 \cdot \sqrt{\varepsilon_s} \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (1)$$

$$l_B = 1/2 \cdot \varepsilon_s \cdot l_t \quad (l_t = \sigma_s \cdot a_s / (\phi_s \cdot \tau_B)) \quad (2)$$

ただし、 σ_s 、 a_s 、 ϕ_s は主筋の応力度、断面積、周長で、主筋の応力度は ε_s の履歴を完全弾塑性モデルに入力して算出した。なお、 l_t は各サイクルでピークの値を共通に用い、また、主筋が引張歪を受ける場合のみ考慮した。図-7(a)～(d)に算出されたモーメント－曲率関係を示す。

なお、曲率は上下のヒンジ領域の平均である。本試験体は高軸力が作用するので、結果として抜け出しの影響は小さかった。

図-7には、平面保持を仮定した3種類の曲げ解析の結果も太線で示した。上から、主筋の歪硬化の影響を文献[5]のモデルで考慮したもの、主筋の歪硬化を無視し完全弾塑性としたもの、および、正方向加力で圧縮を受ける最外縁の主筋が最初から無いとしたモデルである。なお、いずれのケースも、繰り返し解析を行った結果の包絡線のみを示してある。図をみると、各試験体とも加力半ばぐらいまでは、歪硬化を考慮したケースに近いが、徐々に耐力が低下し、歪硬化を無視した線、さらには、圧縮主筋を無視した線に近づいていくことが認められる。また、図中には座屈確認点を○で示してあるが、この点前後で実験値が歪硬化を考慮したモデル化から離れていくことがわかる。すなわち、試験体において主筋が座屈することにより、耐力が減少していく様子が曲げ解析によって裏付けられている。

5. まとめ

主筋の座屈が部材の靱性に及ぼす影響を把握するために、4体のRC柱部材の静加力実験を行い、以下の結論を得た。

(1)各試験体とも、座屈が確認された部材角付近で限界部材角となっており、主筋の座屈が試験体の靱性能の決定要因となった。

(2)主筋が細い試験体の限界部材角は最も小さく、唯一主筋の破断が観察された。

(3)帯筋比が一定で配筋法が異なる試験体では、主筋の座屈確認や限界部材角はほとんど変わらなかった。すなわち、本試験体では横補強筋の配筋法よりもかぶりコンクリートの座屈防止効果の方が顕著に作用したといえる。

(4)一定軸力を受ける試験体の限界部材角は変動軸力を受ける試験体とほぼ同じであり、主筋の座屈に対しては、変動軸力が不利に働くことが確認された。

(5)平面保持を仮定した曲げ解析の結果、試験体において主筋が座屈することにより、耐力が減少していく様子が裏付けられた。

〔参考文献〕

- 1)日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説、1990年
- 2)加藤大介、若月康二：高強度材料を用いたRC部材の主筋の座屈性状、日本建築学会構造系論文報告集、第453号、pp. 141-147、1993. 11
- 3)加藤大介：鉄筋コンクリート造部材の配筋設計法に関する研究(コンクリートの拘束筋と主筋の座屈防止筋に関する考察)、日本建築学会構造系論文報告集、第452号、pp. 99-107、1993. 10
- 4)靱性部材配筋詳細研究委員会報告書、2.4橋脚の主筋のフーチングからの抜け出し、pp. 43-52、日本コンクリート工学協会、1990
- 5)加藤大介：配筋法を考慮した鉄筋コンクリート造柱の変形能の評価法、日本建築学会構造系論文報告集、第450号、pp. 81-88、1993. 8