

# 論文 主筋の座屈挙動に着目した変動軸力を受ける高強度 RC 柱の 静加力実験

加藤大介\*1・鈴木広孝\*2・本多良政\*3

要旨：主筋の座屈が高強度材料を用いた RC 部材に及ぼす影響を検討するために、4 体の柱試験体の静加力実験を行った。主な実験パラメータは主筋強度、帯筋配筋法および軸力載荷法である。主な実験結果は、(i)主筋の座屈に対しては帯筋全体の拘束力よりも帯筋間隔の影響の方が大きい、(ii)同一配筋であれば高強度主筋の方が座屈に対して有利である、(iii)試験体の主筋の圧縮累積塑性歪度と座屈歪度計算値と比較したところ、計算値は小さく、提案した座屈防止法は高強度部材に対しても安全側であった、である。  
キーワード：主筋の座屈、変動軸力、横補強筋、靱性

## 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た[3]。さらに、主筋の座屈で部材の靱性が決定する普通強度 RC 柱部材の静加力実験を行い、本座屈防止法の妥当性を検証した[4]。一方、RC 構造の設計において高強度材料の有効利用に関する研究も盛んとなり、配筋量を低減しうる高強度主筋の利用法に関する研究も行われつつある。そこで、本報告では、学会指針の適用範囲の拡大を念頭におき、本座屈防止法が高強度材料を用いた RC 柱部材に適用可能かどうかを実験的に検討する。

表-2 試験体寸法と配筋の詳細

## 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。表-1には試験体の曲げ強度、曲げ、せん断、あるいは付着破壊

断面有効せい	D × B = 220mm × 220mm
帯筋の外端長さ(コア長さ)	d = 195.5mm
かぶり厚(主筋芯まで)	D c = 196mm
横補強筋の種類(外周)	d c = 24.5mm
中子筋の種類(J1)	135度フック付き(余長36mm)
	135度フック付き(余長36mm)

表-1 試験体の諸元と性能計算値

試験体名	コンクリート強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	主筋	主筋強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	帯筋	帯筋強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	帯筋比 (%)	軸力 (tonf)	軸力比 (全断面)	Pf (tonf) (*1)	Rf (rad) (*2)	Rp (rad) (*3)	Rs (rad) (*4)
J 1	634	6-D13H	9813	3-D6 @70	7753	0.62	0~87	0~0.28	24.5	0.034	0.034	0.062
J 2	624	6-D13L	3828	2-D6 @45	7753	0.65	0~87	0~0.29	17.1	0.023	0.059	0.108
J 3	601	6-D13H	9813	2-D6 @45	7753	0.65	0~87	0~0.30	24.2	0.022	0.035	0.050
J 4	597	6-D13H	9813	2-D6 @45	7753	0.65	87	0.30	24.1	0.022	0.035	0.050

(\*1) Pf: 曲げ強度計算値 (略算式)

(\*2) Rf: 文献 [5] による曲げ限界部材角計算値

(\*3) Rp: 学会指針 [1] のせん断強度式より逆算した降伏ヒンジの塑性回転角 (ただしコンクリートの強度の有効係数を  $\mu_0 = 3.68 * \sigma_c^{-0.33}$  とした) に弾性変形分を加えたもの

(\*4) Rs: 文献 [5] による付着指標より推定した付着割裂すべりを生じる部材角計算値

\*1 新潟大学助教授 工学部建設学科、工博 (正会員)

\*2 新潟大学大学院 工学部建設学科

\*3 安藤建設 (株)

によって決定される靱性能の計算値も示した。主筋の座屈は載荷履歴に依存するが、部材角で $1/50\text{rad}$ 以前に主筋の座屈以外の要因で靱性能が決定しないように、曲げ、せん断あるいは付着破壊によって決定される靱性能を $1/50\text{rad}$ より大きくするように設計した。そのために、シアースパン比は大きく、主筋は引張と圧縮を受ける最外端のみに配筋されている。主筋量と帯筋比は各試験体で一定とし、主筋強度( $9813\text{kg}/\text{cm}^2$ 、 $3828\text{kg}/\text{cm}^2$ )、帯筋配筋法(2-D6-@45, 3-D6-@70)を実験パラメータとした。また、最大軸力比が約 $1/3$ 以上の場合、一般に変動軸力を受ける部材は同一の最大軸力を一定軸力として受ける部材に比べ靱性が良くなるが、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[4]ので、軸力載荷法(一定軸力、一定軸力と最大軸力が同じ変動軸力)も変化させた。なお、変動軸力の場合の最小軸力は本来引張軸力となりうるが、載荷装置の制限から本実験では0とした。

試験体J1とJ3は帯筋配筋法の違いによる挙動の違いを、試験体J2とJ3は主筋の強度の差による挙動の違いを、試験体J3とJ4は軸力載荷法の違いを、それぞれ検討できるように、それらのパラメータだけを変化させた。図-1に各試験体の配筋図と断面の配筋を示す。

## 2. 2 載荷方法と計測方法

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。載荷履歴は、同一部材角で2回づつ繰り返し、部材角は $1/200\text{rad}$ づつ増加させていくことを基本としたが、主筋の座屈を観察するために、せん断により決定される靱性能 $R_p$ よりやや小さい部材角 $1/33\text{rad}$ 時に6回載荷を繰り返した。また、試験体J4は部材角 $1/100\text{rad}$ 以降は $1/100\text{rad}$ づつ増加させた。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

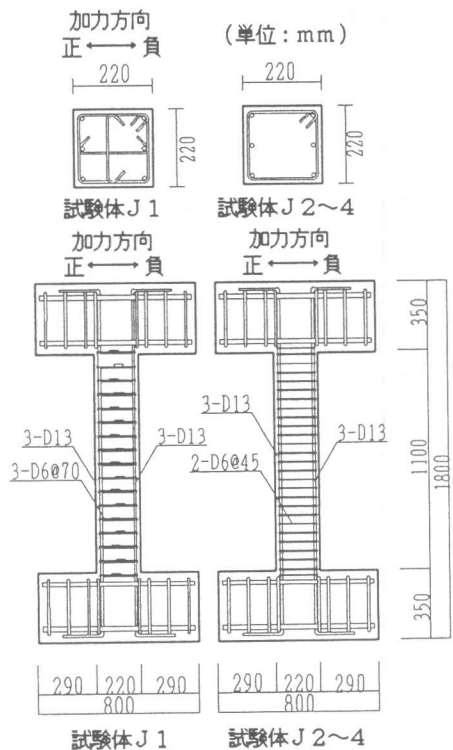


図-1 試験体配筋図

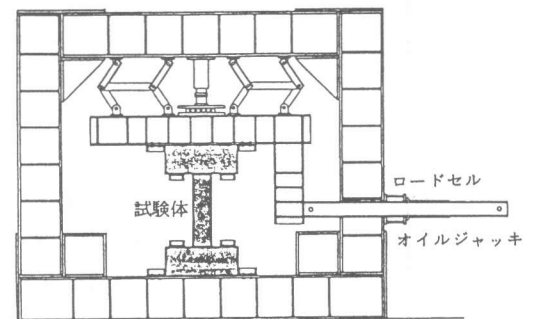


図-2 加力装置図

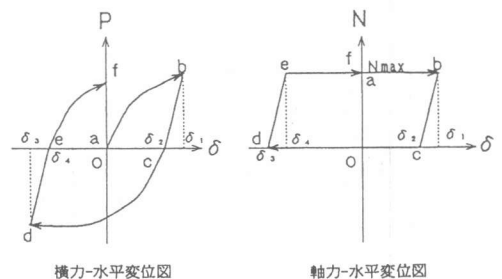


図-3 変動軸力の与え方

加力時における軸力は、 $N_{max}$ で一定とした(a→b, e→f)。正加力からの除荷時には、横力が0となるとときに軸力が0なるように抜いていく(b→c)。その後、負方向の目標変位まで軸力0で(c→d)。負方向からの除荷時には、横力が0となるとときに $N_{max}$ となるように軸力を加える(d→e)。

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。尚、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)に各試験体の加力終了時のひび割れ図を、写真-1に試験体J1の最終の座屈状況を示す。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、露出時と座屈確認時としたが、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)。

変動軸力を受け高強度主筋を有する試験体J1とJ3は、いずれも正加力

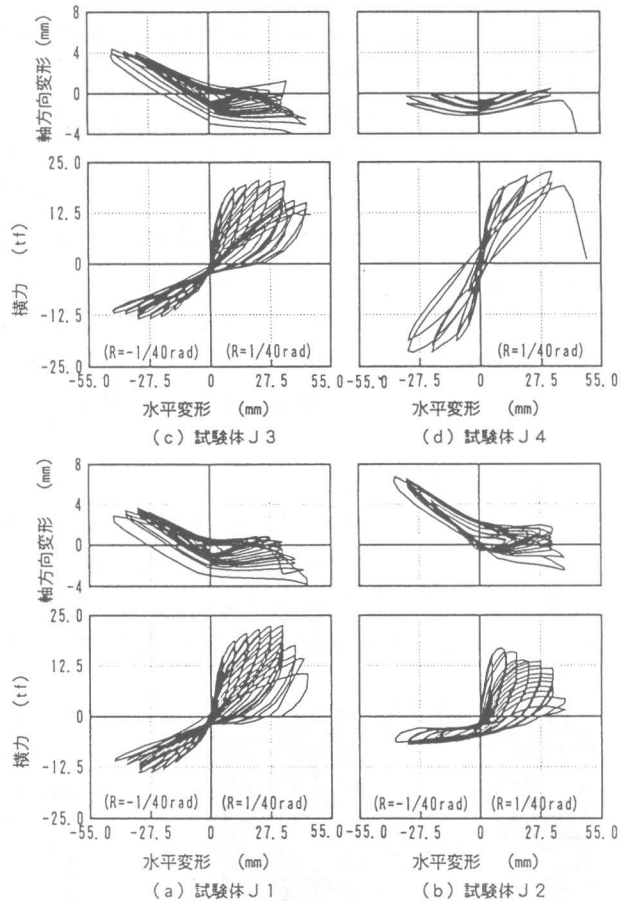


図-4 試験体の水平力、軸方向変形と水平変形の関係

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 と靱性要因 (rad)	主筋露出時部材角			主筋座屈時部材角		
				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)
J 1	22.5	0.030	0.030*座	0.025	—	0.025	0.040	—	0.040
J 2	16.8	0.009	0.025 曲	0.020	0.030	—	0.040	0.030	—
J 3	20.7	0.020	0.030*曲	0.025	0.025	—	—	—	—
J 4	22.7	0.030	0.030 せ	0.030	—	—	—	—	—

注1：靱性要因→座：主筋の座屈、曲：曲げ圧縮コンクリートの圧壊、せ：曲げ降伏後のせん断破壊  
 注2：限界部材角欄の\*は6回の多数回繰返しに起因するものなので、載荷履歴が異なれば違う結果が得られた可能性がある。

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 $0.03\text{rad}$ までは安定した挙動を示した。ここで、6回の繰り返し载荷を行い、いずれも復元力が最大耐力の $80\%$ 以下に低下した。その後、中子筋を用いて帯筋間隔を広くした試験体J1では主筋の座屈が観察されたが、中子筋がなく帯筋間隔が狭い試験体J3では座屈が観察されなかった。この2体は帯筋比が同一で、帯筋の配筋法だけが異なる。すなわち、主筋の座屈に対しては、帯筋全体の拘束力よりも帯筋間隔の影響の方が大きいことを示している。一方、主筋強度が試験体J3より低い試験体J2は、部材角 $0.03\text{rad}$ の多数回繰り返し载荷に至る前に、復元力が最大耐力の $80\%$ に低下した。このときの主筋状態は露出したばかりであり、靱性決定要因としては座屈よりもむしろ圧縮コンクリートの強度劣化の影響が大きいと判断される。しかし、その後部材角 $0.03\text{rad}$ の多数回繰り返し载荷時に、試験体J2では主筋の座屈が観察され、高強度主筋を有する試験体J3で座屈が観察されなかったことより、同一配筋であれば高強度主筋の方が座屈に対して有利であると判断できる。なお、一定軸力を受ける試験体J4は他の試験体と異なる载荷履歴を受けたが、靱性決定要因は曲げ降伏後のせん断破壊であった。ただし、試験体J4は一定軸力を受けたために、主筋個々に累積される軸歪度は変動軸力を受ける試験体の主筋よりも小さく、従って、試験体J3よりも座屈に対しては有利と考えられる。すなわち、J3の実験結果より同一の载荷履歴を受けても試験体J4の主筋の座屈は生じないと判断できる。

#### 4. 実験結果の考察

図-6(a)~(d)は各試験体の危険断面モーメントと危険断面から $11\text{cm}$ までの領域での平均曲率関係を試験体上下の領域で平均をとって示したものである。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 $11\text{cm}$ )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こと

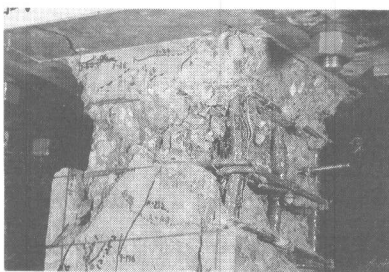
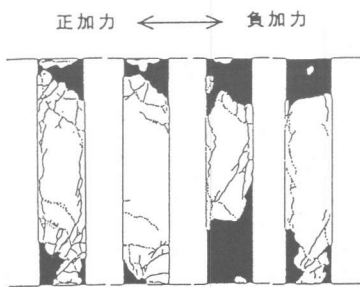


写真-1 試験体J1の柱頭部座屈状況



(a) J1 (b) J2 (c) J3 (d) J4

図-5 試験体の最終ひび割れ図

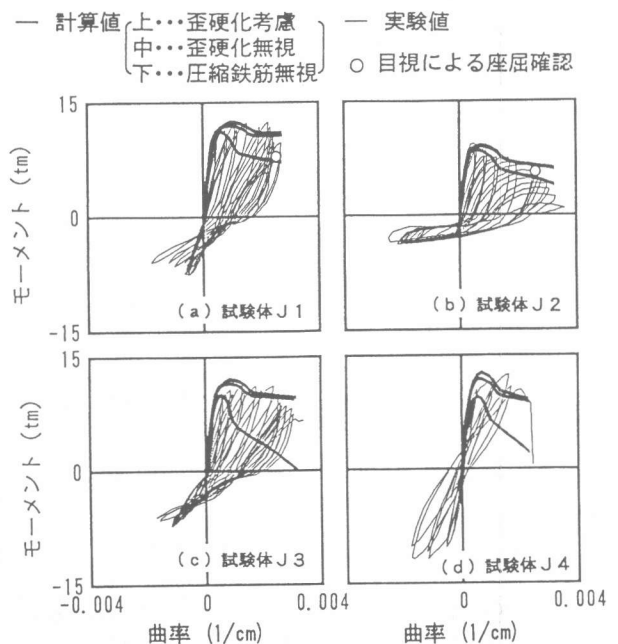


図-6 ヒンジ領域のモーメント曲率関係

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き出し量は、基礎部は剛体と仮定し、図-7に示すように、基礎部に添付した歪ゲージの値より算出した。ただし、歪ゲージを添付していない箇所の歪度は直線補間し、基礎鉄筋折れ曲がり点で歪度と変位を0と仮定した。全体変形は正負で同一振幅であるが、図-6をみると軸力が0となる負方向載荷で振幅が小さくなっており、負方向で引き抜け量が多いことが分かる。これは、文献[4]の普通強度部材より顕著であった。

図-6には、平面保持を仮定した3種類の曲げ解析の結果も示した。解析はコンクリートモデルを共通とし、主筋のモデルをパラメータとした。解析結果は太線で示してあり、上から、主筋の歪硬化の影響を Ramberg-Osgood 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。また、コンクリートモデルは帯筋により拘束効果を考慮した文献[6]のモデルを用いた。なお、いずれのケースも、一方向載荷の結果である。また、図中には座屈確認点を○で示してある。図をみると、主筋の座屈が確認された試験体J1とJ2は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、圧縮主筋を無視した線に近づいていき、その後主筋の座屈が確認されている様子が認められる。一方、主筋の座屈が確認されなかった試験体J3とJ4は圧縮主筋を無視した計算値は非常に低く、実験値はそこまで耐力が低下しておらず、ほぼ加力終了まで主筋は圧縮力を負担していたことが分かる。

次に、試験体の主筋の圧縮方向累積塑性軸歪度(図-8参照)の挙動に着目し、座屈歪度計算値および実験での座屈確認点との関係について検討する。

図-9は、前述した主筋位置の歪の履歴より、圧縮方向累積塑性歪度の履歴(正加力で圧縮力を受けるもの)を計算し、加力サイクルを横軸にとって示したものである。同図には平面保持解析で図-6に示したヒンジゾーンのモーメント-曲率関係を追跡した際の主

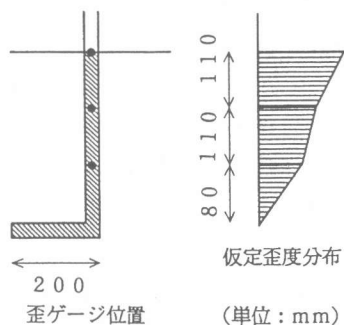


図-7 基礎からの主筋引き抜け量の算定法

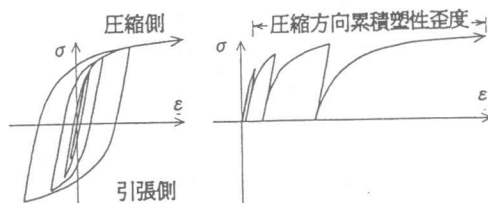


図-8 圧縮方向累積塑性歪度の概念

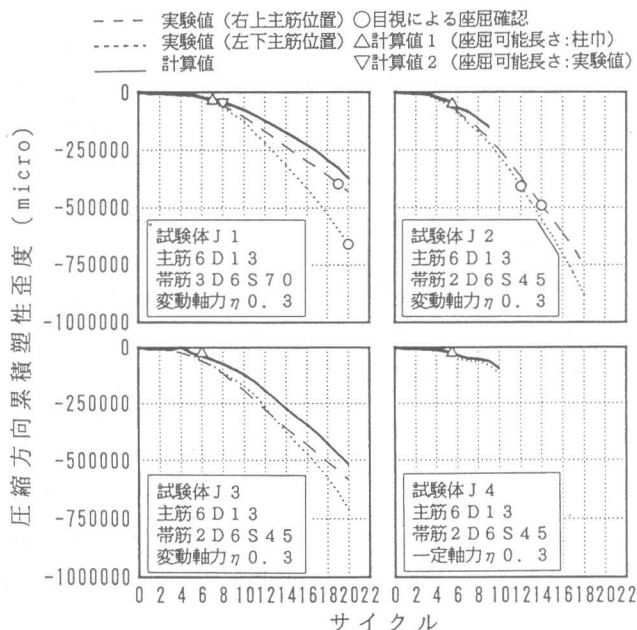


図-9 主筋位置の歪の圧縮方向累積塑性歪度の履歴と座屈歪度計算値の関係

筋の圧縮方向累積塑性歪度も併せて示した。両者は概ね一致している。なお、試験体 J 2 の計算値は圧縮コンクリートの圧壊により途中で計算が終了している。一方、実験と解析より得られた線上には、それぞれ座屈が確認された点と文献 [2] による座屈歪度計算値を記号で示した。この座屈歪度計算値は、中心軸圧縮実験から得られた主筋の応力度-歪度関係を用いて実験的に評価した式で、主筋の応力度が歪硬化域から再び降伏応力度のレベルに低下した点を座屈点と定義している。また、座屈が帯筋の数区間に渡って生じる場合を考慮できる点に特徴があり、本報告では座屈可能な長さを柱幅としたものと実験で観察された座屈長さとしたものの 2 通り行った。実験で観察された座屈長さは試験体 J 1 が写真-1 のように 140mm (座屈区間 2)、試験体 J 2 が 90mm (座屈区間 2) である。結果をみると、主筋の座屈が確認された試験体でも座屈確認実験値 (○) は計算値 (△▽) を大きく上回っており、文献 [2] の主筋の座屈歪度計算値は部材に適用すると実験値と比較して非常に小さいことがわかる。従って、その計算式を基に評価した文献 [3] の座屈防止法は高強度部材の場合も安全であると判断できる。ただし、文献 [4] で示した普通強度材料を用いた場合の結果に比べ、曲げせん断部材での座屈歪度実験値と文献 [2] の計算値の差はさらに広がった。今後、この点に関する検討が必要である。

## 5. まとめ

(1) 中子筋を用いて帯筋間隔を広くした試験体では主筋の座屈が観察されたが、中子筋がなく帯筋間隔が狭い試験体では観察されなかった。この 2 体は帯筋比が同一で、帯筋の配筋法だけが異なる。すなわち、主筋の座屈に対しては、帯筋全体の拘束力よりも帯筋間隔の影響の方が大きい。

(2) 低強度主筋を有する試験体では主筋の座屈が観察され、同一条件で高強度主筋を有する試験体では座屈が観察されなかったことより、同一配筋であれば高強度主筋の方が座屈に対して有利であると判断できる。

(3) 試験体の主筋の圧縮累積塑性歪度を評価し、文献 [2] の主筋の座屈歪度計算値と比較したところ、計算値は非常に小さかった。従って、その計算式を基に評価した文献 [3] の座屈防止法は高強度部材の場合も安全であると判断できた。ただし、文献 [4] で示した普通強度材料を用いた場合の結果に比べ、曲げせん断部材での座屈歪度実験値と文献 [2] の計算値の差はさらに広がった。今後、この点に関する検討が必要である。

### [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 R C 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、1993年、11月、pp. 141-147
- 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、1993年、10月、pp. 99-107
- 4) 本多良政、加藤大介：主筋の座屈挙動に着目した変動軸力を受ける R C 柱の静加力実験、第16回コンクリート工学年次論文報告集、1994年、pp. 455-460
- 5) 加藤大介：高強度材料を用いた R C 柱の靱性能、第14回コンクリート工学年次論文報告集、1992年、pp. 925-930
- 6) 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、1993年、8月、pp. 81-88