

論文

[2057] 鉄筋の座屈が RC 構造のポストピーク挙動に及ぼす影響

正会員○中村 光 (名古屋大学大学院)  
 正会員 二羽淳一郎 (名古屋大学土木工学科)  
 正会員 田辺 忠顕 (名古屋大学土木工学科)

1. はじめに

地震により崩壊した RC 柱などを観察すると、軸方向鉄筋が座屈しており、主筋の座屈がコンクリート構造の終局挙動に及ぼす影響は大きいと考えられる。したがって、終局域におけるコンクリート構造の挙動を明らかにするには、鉄筋の座屈が及ぼす影響を明確にする必要がある。

主鉄筋の座屈に関しては、主に実験的に研究対象とされてきたが[1]、コンクリート構造物内の主筋の座屈現象は、横補強筋やコンクリートの性質など各種要因が相互に影響を及ぼし合う複雑な性状を示すため、いまだ明らかにされていない。一方、解析的には島ら[2]が、座屈後の鉄筋の応力-ひずみ曲線を仮定することで座屈後の主筋が部材性状に寄与する程度の評価を試みているが、仮定した鉄筋の応力-ひずみ曲線の妥当性に対して疑問が残る。

そのような現状を踏まえ、本研究では、スターラップが組合わさった主鉄筋の座屈性状を有限変形理論に基づく解析より明確にし、座屈挙動を含む鉄筋の応力-ひずみ関係をモデル化することで、鉄筋の座屈がコンクリート構造に及ぼす影響について解析的に考察を行ったものである。

2. 鉄筋の圧縮挙動

本研究では、有限変形理論に基づく有限要素解析[5]を行うことで、鉄筋の座屈性状を明確にすることを試みた。解析は、鉄筋をLayered Beamによりモデル化し、各Layerに対する鉄筋の応力-ひずみ関係を完全弾塑性と仮定して行った。長さ73.3cm(細長比154.3), 降伏強度373(MPa), 降伏ひずみ0.002の異形鉄筋(D19)一本に対して、本解析を両端固定条件の圧縮試験に適用した結果を図-1に示す。ここで、解析では、水平方向に鉄筋が変位を起こすようにするため、微小な水平力(100N)を鉄筋まん中に常に作用させた。図-1(a)は軸方向変位-軸力関係を、図-1(b)は横方向変位-軸力関係を示す。図中○印で実験値を、また実線で解析値を示す。解析値は実験値を終局状態に至るまでよく追従しており、本解析により圧縮力を受け座屈挙動を示す鉄筋の挙動を精度よく再現できることが分かる。実験値と解析値で最大荷重が若干異なっているが、これは実験において支持条件が完全に両端固定条件を満足しなかったためと考えられる。

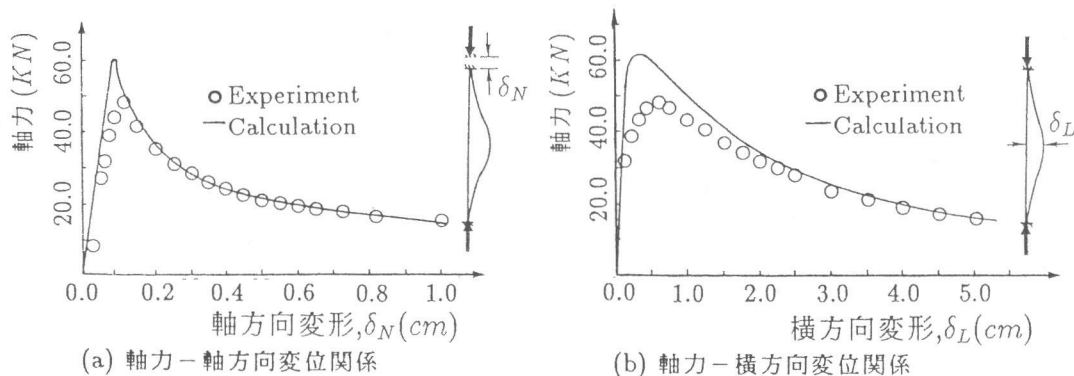


図-1 座屈する鉄筋の実験値と解析値の比較

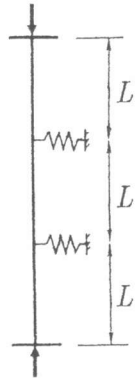


図-2 スターラップのある鉄筋の解析モデル (L=10cm)



図-3 鉄筋の変形挙動

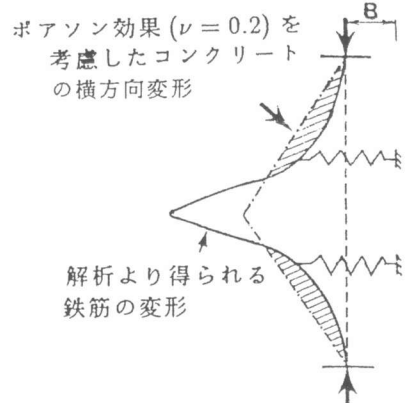


図-4 鉄筋およびコンクリートの変形

### 3. スターラップが組合わさった鉄筋の挙動

実際のRC構造物ではコンクリートおよび鉄筋を拘束するためスターラップが用いられる。そこで、スターラップが鉄筋の座屈後の挙動に及ぼす影響について解析的に調べる。

解析モデルを図-2に示す。図に示すようにスターラップはばね要素にモデル化した。図のモデルに対し解析を行った結果、図-3のように鉄筋がスターラップ位置を節として波打つような変形挙動を示した。しかし実際の構造物においては、コンクリートが存在するため、鉄筋はスターラップ側に変形をすることはできず、図-3の解析結果は非現実的である。したがって本研究では、鉄筋のコンクリート内部への変形をなくすため、図-4に示すように、鉄筋とコンクリートの挙動を別々に考慮し、図の斜線部分だけ鉄筋の変形をコンクリートが拘束していると考え、斜線部分の変位差に応じた水平力を鉄筋に作用させた。この方法により、鉄筋が内部へ変形しない境界条件を満足させることが可能となった。ただし、本解析はあくまで鉄筋単体の挙動を調べるために行ったものであり、コンクリートと鉄筋の相互作用を考慮したものではない。したがって反力は、あくまでも鉄筋が内部に変形しない境界条件を満足させるために作用させたものであり、反力によりスターラップが降伏し鉄筋の変形挙動が大きく変わるような性状は考慮していない。

図-5に、スターラップの影響を考慮した解析より得られた平均応力-平均軸方向ひずみ関係を示す。図中、実線がスターラップ区間(中央のL区間)での関係を、破線が鉄筋全長(3L)に対する関係を示している。

解析を進めると、鉄筋の挙動は最初鉄筋全体が水平方向に膨らむ挙動を示し、軸方向ひずみは各部ではほぼ等しい値であった。しかしその後、スターラップに挟まれた中央の部分は大きく外に変形し、その部分の軸方向ひずみが急増するとともに、両側の鉄筋が除荷する挙動を示した。

図-5のa, b, c各点での解析より得られた鉄筋の変形状態を図中に示す。最大荷重後は、スターラップに囲まれた区間の変位

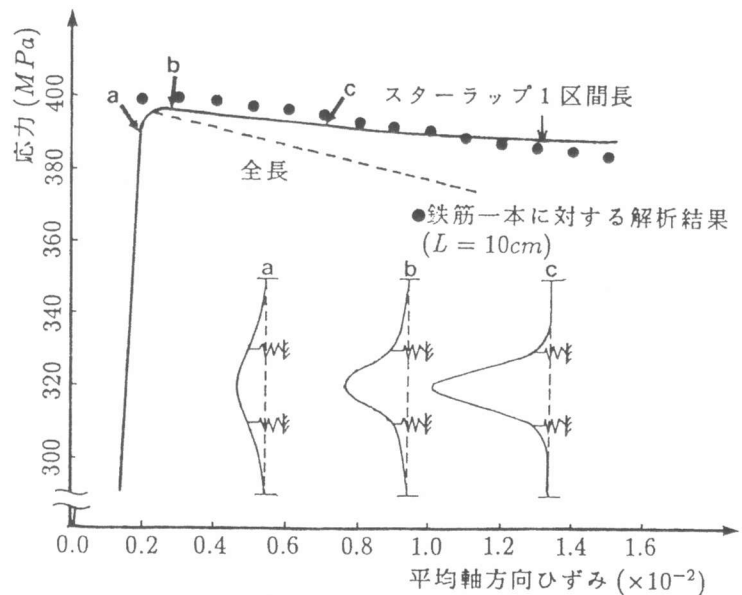


図-5 スターラップのある鉄筋の応力-平均軸方向ひずみ関係

だけが急増していることが分かる。この結果は、鉄筋一本だけの挙動を考える場合、鉄筋の座屈はあるスターラップ間に局部的に生じることを示し、スターラップ2区間、3区間にわたって生じないことを示唆している。しかし、実際の実験によれば鉄筋の座屈は、スターラップ2区間、3区間にわたって起きていることが報告されており、このことから、鉄筋の座屈長はスターラップよりもむしろ、コンクリートの破壊領域にかなり依存することが推測される。また逆に、コンクリートの破壊領域は鉄筋の座屈により決定されるのではなく、あくまでも拘束領域などを考慮した、構造物の材料的・幾何学的条件から決まるものと推測できるのである。

#### 4. 座屈挙動を含む鉄筋の応力-ひずみ関係

鉄筋単体を考えた場合、スターラップ一区間に座屈挙動が集中することが分かった。そこでスターラップを考慮しないスターラップ一区間長と等しい長さの両端固定の鉄筋一本の解析より得られた平均軸ひずみ-応力関係を図-5の●印で示し、スターラップがある場合の解析結果と比較を行った。その結果、スターラップを考慮しない場合の平均軸ひずみ-応力関係は、スターラップ一区間での関係とほぼ一致することが示され、座屈区間の平均軸ひずみ-応力関係は、両端固定条件の鉄筋一本のみの解析で十分模擬できることが分かった。そこでこれ以降の解析は、スターラップをモデル化せずに鉄筋一本のみで行う。図-6に他の条件を一定とし、鉄筋の長さだけを変えたときの平均軸ひずみ-応力関係を示す。鉄筋の長さは、5cm、10cm、15cm、20cmの4通りである。図によれば、最大応力以降鉄筋の平均応力は、座屈による鉄筋の横方向変位増加にともない低下するが、応力は急激に低下するわけではなく、座屈後もかなりの負担力を有している。また応力の低下は鉄筋長が長くなるほど急激になることが示されている。

最小2乗法を用いて図-6の結果を補間することで、鉄筋が圧縮力を受けて座屈する場合の応力-ひずみ関係を次式で定式化した。

$$\sigma = f_y \exp\{0.17(L/D)^2(\varepsilon - \varepsilon_b)\} \quad (1)$$

この式が、座屈後の鉄筋の座屈区間での平均応力-平均軸方向ひずみ関係式である。ここで、Lは両端固定条件での鉄筋長さ、Dは鉄筋径、 $\varepsilon_b$ は座屈開始時の平均軸方向ひずみである。今回の解析では、 $\varepsilon_b$ はすべて鉄筋の降伏ひずみ( $\varepsilon_y$ )と一致した。上式を求めるにあたり、上記の解析以外に鉄筋径を変数とした解析および降伏強度を変数とした解析を行ったが、その結果、座屈後の挙動は細長比が同じならばほぼ同じであること、降伏強度が変われば挙動は単に降伏強度に比例して現れることを確かめている。

単純圧縮を受ける鉄筋の座屈挙動をモデル化したので、次に繰り返し荷重を受ける場合を考える。細長比42.1、降伏強度400(MPa)の鉄筋に対して、軸方向繰り返し載荷を行った解析結果を

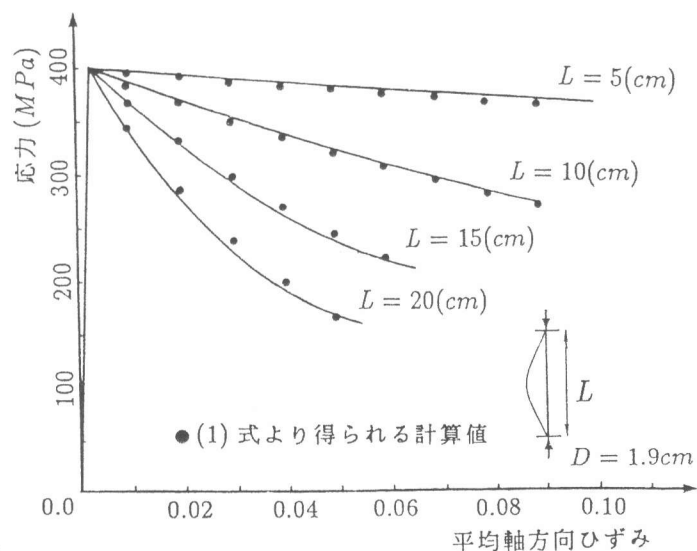


図-6 座屈後の鉄筋の応力-平均軸方向ひずみ関係

図-7の破線で示す。繰り返し荷重下では鉄筋は、破線に示すように複雑な挙動を示すが、解析に容易に取り込めるように、この挙動を図-7の実線に示すように簡素化してモデル化した。すなわち、圧縮荷重後引張荷重を行うときは応力は初期剛性と等しい傾きで移動し、引張降伏時の直線に一致する(A点→B点)。また引張降伏後、圧縮荷重を受ける場合は、ひずみが過去に経験した最大ひずみを越えない場合は、初期の圧縮側座屈曲線へ初期剛性で向かいその後座屈曲線上を移動する(C点→D点→A点)。過去に経験した最大ひずみを越えてから圧縮荷重を受ける場合、鉄筋は降伏強度まで初期剛性で応力増加し、その後新たな座屈曲線を移動すると仮定した(E点→F点→G点)。

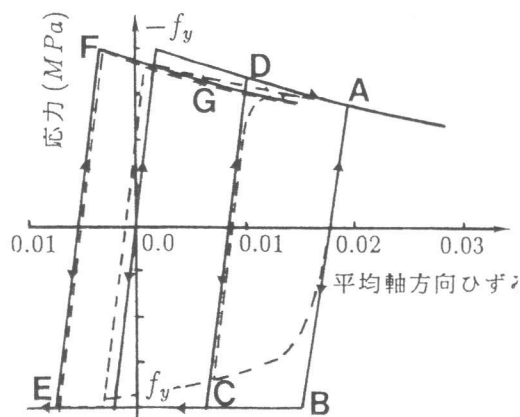


図-7 繰り返し荷重下での鉄筋の挙動

## 5. 鉄筋の座屈を生じたコンクリート構造物の挙動

### 5. 1 座屈が生じた鉄筋コンクリート断面のM-φ関係

既往の実験結果と本座屈モデルを用いた鉄筋コンクリート部材の挙動とを比較する。比較する実験は、畑中ら[3]がRCはりを対象として行ったもので、圧縮側鉄筋が座屈することで破壊に至ったものである。畑中らの実験のうち10N1(スターラップ間隔10cm)供試体に対する実験値および解析値を図-8に示す。図中●印は実験値であり、最大モーメント断面から1h区間の断面のモーメント指数( $M/bd^2$ )-曲率指数( $d \cdot \phi$ )曲線の平均値を示したものである。また実線は先に提案した座屈モデルを用いた解析結果を示し、破線が座屈を考慮しない場合の解析結果である。ここで、コンクリートの応力-ひずみ関係は、圧縮強度時( $f'_c=35\text{MPa}$ ,  $\epsilon_c=0.002$ )までは2次放物線で増加し、その後 $\epsilon_c=0.025$ まで応力は直線的に減少すると仮定している。図によれば、圧縮側鉄筋の座屈を考慮することにより、RCはり構造の終局状態に於ける耐荷力減少の傾向をうまく表していることが分かる。ここで、鉄筋の座屈長さは実験結果を参考にし10cmとしている。

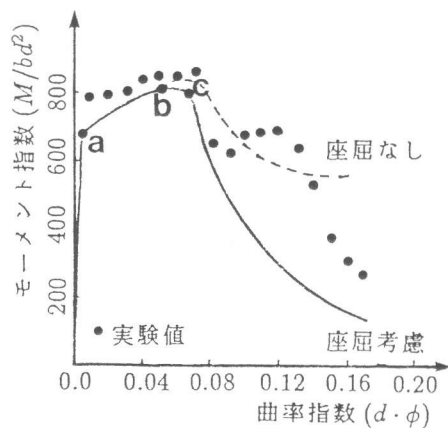


図-8 モーメント-曲率関係

図-9(a)に解析より得られた圧縮鉄筋の挙動を鉄筋応力

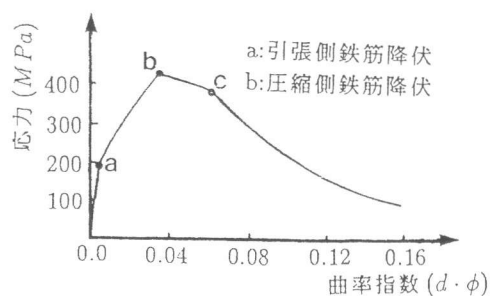


図-9(a) 鉄筋応力-曲率関係

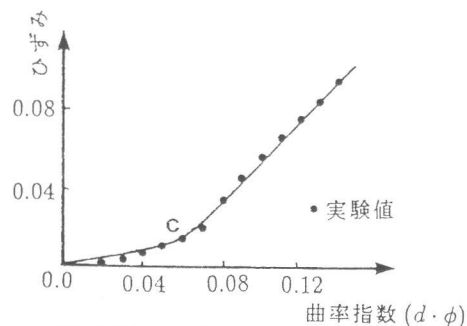


図-9(b) ひずみ-曲率関係

-曲率指数曲線で示し、図-9(b)に圧縮側最外縁のコンクリートひずみ-曲率指数曲線を示す。図中a点は引張鉄筋降伏時、b点は圧縮鉄筋降伏時、c点は図-9(b)中で圧縮側最外縁のコンクリートひずみが急激に増加する点である。また図-9(b)の●点は実験より得られた値である。座屈を考慮した場合、b点を越え圧縮鉄筋降伏後、鉄筋の負担力は徐々に減少するが、その程度は余り著しくない。また $M/bd^2-d\cdot\phi$ 関係にもその影響は顕著に現れず、断面のモーメント耐荷力も増加している。これはまだ圧縮側コンクリートがかなり負担力を持つためである。しかしc点を過ぎ、圧縮側コンクリートが劣化した領域では、圧縮側コンクリートの負担力が徐々に低下していくため、図-9(b)に示すように圧縮側のひずみが急激に増加ようになる。この時鉄筋は既に座屈しているため、コンクリートの応力低下分を負担することができず、逆に圧縮ひずみの急増に伴い鉄筋自身の応力が急激に低下する性状を示す。断面耐荷力の急激な低下は、このように圧縮側のコンクリートおよび鉄筋の座屈により荷重支持能力が急激に減少するために生じることが分かる。

本解析において鉄筋の座屈発生点は、鉄筋単体の解析結果より圧縮鉄筋降伏と同時に生じると仮定している。一方、実際の構造物には、かぶりコンクリートの存在により鉄筋の横方向変形は拘束されているため、降伏後も鉄筋は自由な変形をすることができず、必ずしも鉄筋降伏時が座屈発生時と一致しないと考えられる。しかし、かぶりの荷重支持能力が大きい間は、座屈による鉄筋の応力低下はわずかであり、上記の仮定が解析値に及ぼす影響はそれほど大きくない。実質的に座屈の影響が生じるのは図-9の圧縮側ひずみが急激に生じるc点と考えることができる。

また本解析は、コンクリートおよび鉄筋の応力-ひずみ関係は独立に与えたものであり、鉄筋の座屈によるかぶりの剥落やコンクリートの応力-ひずみ関係の変化は一切考えていない。それにもかかわらず、解析値は実験値をよく評価できるのである。このことより、本解析結果のみに限れば、鉄筋の座屈はあくまでもかぶりコンクリートの軟化などによりコンクリートの荷重支持能力が低下した後に生じるものであるという結論が導かれる。

## 5. 2 繰り返し荷重を受けるRC柱の座屈時の挙動

次に繰り返し荷重を受けるRC柱を対象とした解析を行った。解析に用いたモデルは、村上ら[4]が曲げ降伏するRC柱を対象として行った正負交番載荷実験のC22供試体と同様なものとした。

図-10に実験結果および解析結果の荷重-変位関係を示している。また●印で、鉄筋の座屈を考慮しない解析結果を示している。鉄筋の座屈長さは実験結果より20(cm)と仮定した。座屈を考慮した場合と考慮しなかった場合での両者の差はそれほど大きく現れることはなかった。しかし、 $10\delta y$  載荷時の曲線において鉄筋の座屈の影響が現れるようになり、部材の耐荷力は座屈を考慮した場合約25%程度の低下が見られた。解析では、鉄筋の座屈による圧縮側鉄筋の耐荷力の減少は、 $4\delta y \rightarrow 6\delta y$  載荷時に既に生じているが、被りコンクリートにある程度の耐荷能力がある間は、座

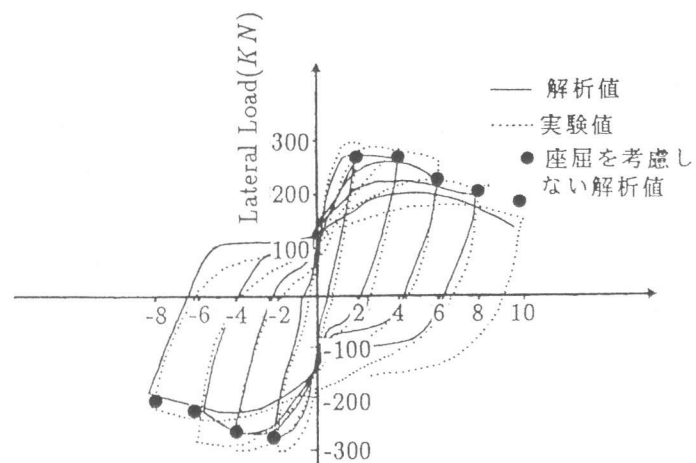


図-10 繰り返し荷重を受けるRC柱の荷重-変位関係

屈の影響は殆ど現れないことが分かる。実験では、 $8\delta y$ で圧縮鉄筋の座屈および被りコンクリートの落下がみられ、 $10\delta y$ でその影響がさらに激しくなると報告されている。本解析においてもほぼ同様な傾向がみられた。また $8\delta y$ から $10\delta y$ にいたる座屈が急激に発達する状況は、図-10を見れば分かるように、本座屈モデルを用いることで精度よく再現されていることが分かる。

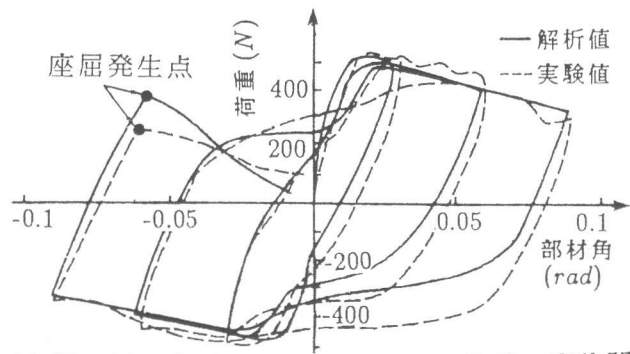


図-11 繰り返し荷重を受けるRC柱の荷重-変位関係

次に、名古屋大学で行ったRC柱の大変形実験[5]での座屈後の挙動と本解析との比較を行った。図-11に実験値および解析値の荷重-変位関係を示す。図中、実線が解析値を、破線が実験値を示している。実験においては、終局状態は被りコンクリートが剥落すると同時に鉄筋が座屈することで生じた。しかし、鉄筋座屈までは被りコンクリートの圧壊や付着ひびわれなどの現象は確認されなかった。そこで解析においては、荷重-変位曲線の最大ループにおいて初めて、圧縮側鉄筋の座屈が生じると仮定し、それ以前では鉄筋の座屈を考慮しなかった。解析は鉄筋の座屈長さを実験結果からスターラップ区間(4cm, 細長比53.3)とした。

解析結果を見ると、圧縮側鉄筋降伏時で座屈発生を定義することにより、実験値の座屈発生時をほぼ妥当に評価できていることが分かる。また、座屈後の構造物が破壊にいたる性状もよく再現していることが分かる。

## 6. 結論

鉄筋一本の座屈時の挙動を有限変形解析を用いて明らかにし、座屈を考慮した鉄筋の応力-ひずみ関係を提案した。そして、提案した座屈を考慮した鉄筋の応力-ひずみ関係を用いれば、座屈後の構造物の挙動も正確に把握できることを示した。また、鉄筋の座屈区間は、スターラップの影響よりもむしろ構造物の破壊領域に密接に関係すること、鉄筋の座屈は被りコンクリートの軟化によるコンクリートの荷重支持能力が低下した後に生じることが解析結果より示された。

## 参考文献

- [1] 鈴木計夫、中塚侑、井上和政 “円形横補強筋を用いたコンファインドコンクリートの応力ひずみ特性および同コンクリート内に配筋された鉄筋の座屈性”、コンクリート構造物の靱性とその評価法に関するコロキウム論文集、JCI、pp. 21-32、1988年3月
- [2] 島弘、伊藤圭一、水口裕之 “曲げ破壊型RC橋脚における鉄筋座屈モデルによる靱性解析”、第8回コンクリート工学年次講演会論文集、pp. 525-528、1986年
- [3] 畑中重光、梁川幸盛、吉田徳雄 “RC梁の終局域における圧縮筋の座屈に関する一考察”、第13回コンクリート工学年次論文報告集、pp. 275-280、1991年
- [4] 村上雅英、今井弘 “変位履歴の相違が曲げ降伏するRC柱の破壊性状に与える影響”、コンクリート工学、Vol. 24、pp. 105-120、1986年5月
- [5] 中村光、二羽淳一郎、田辺忠顕 “鉄筋コンクリート柱の終局変位に関する解析的研究”、土木学会論文集、第420号/V-13、pp. 115-124、1990年8月