

RC橋脚における柱筋の座屈メカニズムの考察

鹿島建設 須田 久美子*
村山 八洲雄**
一宮 利通***
新保 弘*

鉄筋コンクリート(RC)橋脚は阪神・淡路大震災において多大な被害を受けており、地震時における変形性能評価方法の精度向上に対する要求が益々高まっている。そのためには橋脚の最大荷重以降における特性と終局状態を合理的に評価する必要があるが、これらには柱基部に形成される塑性ヒンジ部分の性状、特に柱筋の座屈時期と座屈以降の挙動が大きく関与しており、解析的には柱筋の座屈時期の判定と座屈以降の履歴モデルを新しく開発する必要がある。

本研究では、これまで測定が難しかった模型試験体中の柱筋応力度を直接測定する方法を開発し、RC柱部材中における柱筋の座屈前後の応力履歴特性を初めて実験的に明らかにした。さらに、実験結果を基に、RC橋脚部材の柱筋座屈のメカニズムを明らかにし、塑性ヒンジ部分における柱筋の座屈モデルを提案した。

1. はじめに

阪神・淡路大震災において、鉄筋コンクリート(RC)橋脚が多大な被害を受けたことから、RC橋脚などの柱状構造物における耐震性能が注目を浴びている。こうした最近の動向と近年における橋梁構造物の大型化、長大化の趨勢とがあいまって、実務設計レベルにおいてもRC柱部材の変形予測に対する要求が高まっている。

現在、道路橋示方書V耐震設計編¹⁾などに示されている方法を用いることにより、最大荷重に到達するまでの荷重-変形関係をある程度精度良く解析することが可能になった。しかし、RC柱部材のじん性を評価するためには最大荷重以降の変形能力が重要であり、耐震補強方法の選定など実務的な意味においても、最大荷重以降に十分な精度で適用できる解析的な評価方法の開発が望まれている。最大荷重以降の変形能力には、柱基部に形成される塑性ヒンジの

特性、特に柱筋の座屈時期及び座屈以降の挙動が大きく関与していると考えられる。

一方、土木構造物では柱筋が部材断面の一辺に多数本配置されているという配筋上の特徴を持っているが、この特徴と、地震時における交番荷重の影響を併せて考慮した研究事例は非常に少ない²⁾。また、模型実験において、RC柱部材中における柱筋の応力度を降伏応力度を超えて、座屈時及び座屈以降について直接測定した例はない。

ここでは、長大コンクリート斜張橋のRCタワーを対象に柱基部に形成される塑性ヒンジ部分に着目した模型実験を行い、柱筋応力度を直接測定する方法を開発することによって、交番繰り返し荷重下における柱筋の座屈挙動の解明を試み、座屈モデルの検討を行った。

2. 柱筋応力度測定法の開発

従来、鉄筋コンクリート部材の模型実験では、コンクリート中における鉄筋の応力度を塑性域における交番繰り返し応力下で測定することが困難であった。本研究では、まず、以下に述べるとおり、柱筋の座屈挙動を調べることを目的に、模型試験体レベルの非常に小さな部材の基本的な特性にほとんど影響を及ぼさないで、鉄筋降伏以降の柱筋応力度を直接測定する方法の開発を行った。

キーワード：鉄筋コンクリート、橋脚、主塔、耐震、変形性能、柱筋、座屈、模型実験

* 鹿島建設(株)技術研究所 第一研究部第1研究室,
0424-89-7076

** 鹿島建設(株)技術研究所 第一研究部,
0424-85-1111

*** 鹿島建設(株)土木設計本部第二設計部,
03-5561-2111

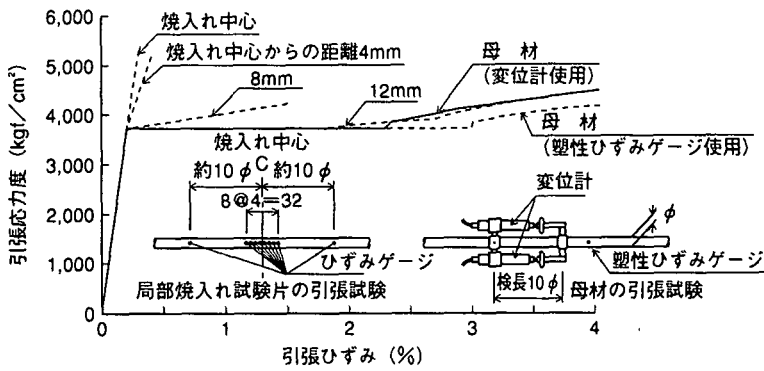


図-1 熱影響範囲の確認試験結果

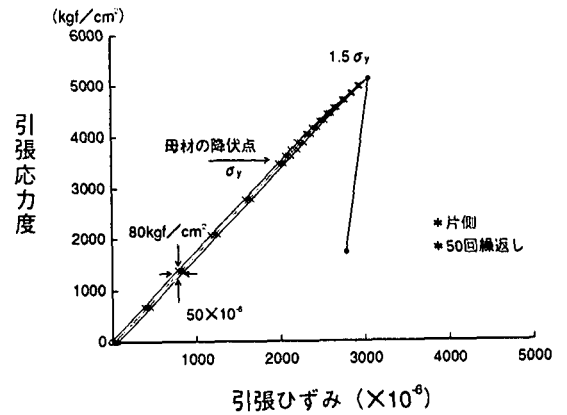


図-2 引張繰返し試験結果

(1) 測定方法の原理

専用の加熱コイル（D10鉄筋の場合にはコイル幅5mmを使用）を用いて、対象とする鉄筋の測定位置の非常に限られた部分だけを局部的に高周波焼入れし、その部分の降伏点を母材の1.3倍以上に高め、その焼入れ中心部分にひずみゲージを貼付ける。以下、これを「鉄筋ロードセル」と称する。鉄筋ロードセル部分は周辺の母材が降伏しても、応力-ひずみ関係が直線関係にあるので、あらかじめ引張試験によりひずみゲージの読み値から応力度への換算係数を求めておけば、直接応力度を測定することができる。

(2) 性能確認試験

図-1のとおり、焼入れによる熱影響の範囲は焼入れ部分も含め鉄筋径の約1.5倍程度である。図-2のとおり、繰返し载荷（引張荷重のみ）による残留ひずみは 50×10^{-6} 以内であり、残留ひずみにより生じる応力度の読み取り誤差は 80 kgf/cm^2 以内であった。

3. 柱部材実験の概要

開発した鉄筋ロードセルを柱基部の柱筋に取り付けて、静的な交番繰返し加力下における柱筋の座屈挙動を把握することを目的に縮小模型による部材実験を実施した。概要は次のとおりである。

(1) 試験体及び使用材料

試験体の種類を表-1に示す。長大コンクリート斜張橋のRCタワーを想定して、柱筋比(コンクリートの断面積に対する軸方向鉄筋の全断面積の比率)を

表-1 試験体の種類と加力方法

試験体 No.	軸方向鉄筋		帯鉄筋		せん断 スパン比	軸圧縮 応力度 (kgf/cm^2)
	鉄筋径	鉄筋比 (%)	鉄筋径	間隔 (mm)		
1	D10	2.6	異形3mm	45	10	62
2			異形4mm			
3			80	0.16		
4						
				5	13	

表-2 使用材料の特性

コンクリート	試験体 No.	圧縮強度 (kgf/cm^2)	弾性係数 (kgf/cm^2)
		1	438
	2	457	3.0×10^5
	3	462	3.3×10^5
	4	459	3.1×10^5
鉄筋	鉄筋径	降伏点応力度 (kgf/cm^2)	引張強度 (kgf/cm^2)
	D10	3,590	5,340
	異形3mm	3,790	4,900
	異形4mm	3,050	4,350

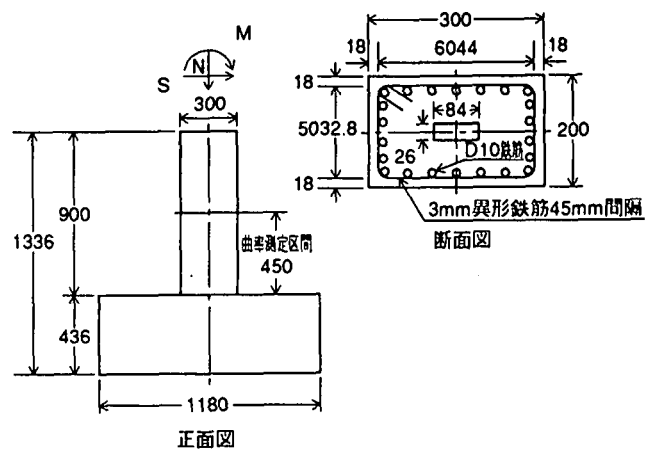


図-3 試験体の形状寸法

2.6%、せん断スパン比を10、軸圧縮応力度を 62kgf/cm^2 とした。比較のために、一般橋脚相当の軸圧縮応力度 13kgf/cm^2 の試験体(No.4)を設定した。

使用材料の材料特性は表-2のとおりである。

試験体の外形寸法及び断面の配筋状況を図-3に示す。柱頭部に曲げモーメントとせん断力を任意の組合せで直接加力できる装置を用いたため、試験体は柱基部のみを取り出した部分模型になっている。

(2) 計測方法

実験では主として次の計測を行った。

a) 柱基部測定区間 (図-3参照) の相対変位

フーチング表面とフーチングから断面高さの1.5倍(450mm)の位置の相対変位を断面の隅角部4箇所で計測した。これらの計測値から、柱基部部分の平均曲率及び断面各位置における平均ひずみを求めた。また、柱基部250mm区間についてはコンクリート表面に π 型変位計(検長50mm)を取り付け、部材軸方向のひずみ分布及び曲率分布を求めた。

b) 鉄筋の応力及びひずみ

鉄筋ロードセルのひずみゲージ及び塑性ひずみゲージは鉄筋の軸方向の同じ断面内の両側(かぶり側

と部材内側)に貼付けた。それぞれの値を平均して軸応力度及び軸ひずみを求めた。鉄筋ロードセル及び塑性ひずみゲージは部材加力面の幅のほぼ中央に配置された柱筋に取り付け、取り付け位置の高さはフーチング面から0cm及び9cm(鉄筋ロードセルのみ)とした。

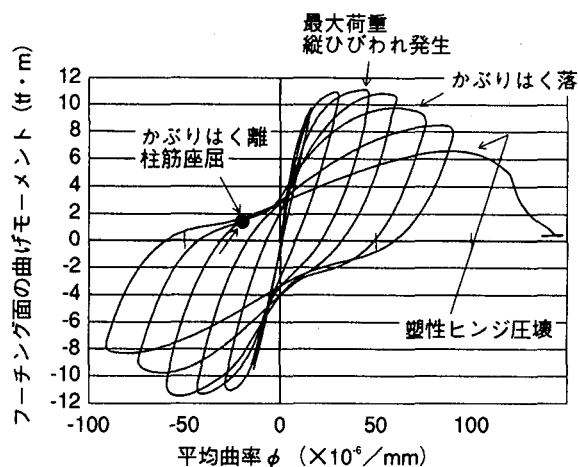
(3) 加力方法

加力は試験体の柱頭部に任意の組み合わせ加力が可能な装置を用いて、曲げモーメントとせん断力(せん断スパン比は表-1参照)を交番繰り返し加力した。

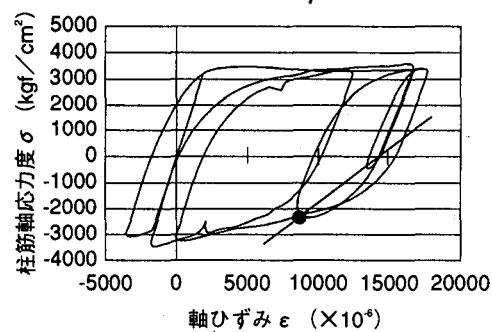
加力制御は、断面計算によりあらかじめ求めた鉄筋降伏時の荷重をもとに、これ以前は荷重制御、これ以降はこのときの測定区間(450mm)における平均曲率の整数倍の曲率で変形制御とした。

(4) 実験結果

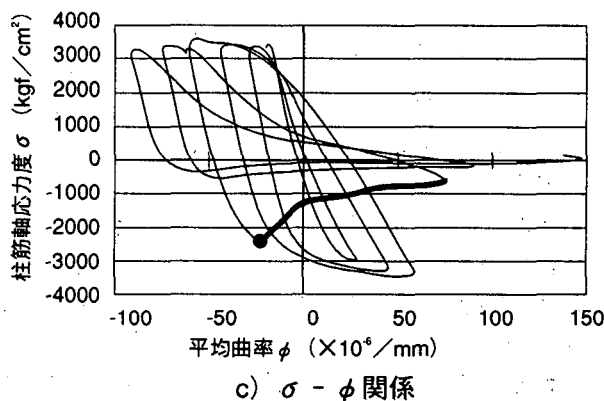
図-4に測定結果の一例として、No.1試験体について、a) 柱基部の曲げモーメント M と平均曲率 ϕ の関係、b) 柱筋軸応力度 σ と軸ひずみ ϵ の関係、c) 柱筋軸応力度 σ と平均曲率 ϕ の関係及びd) 柱筋の軸応力



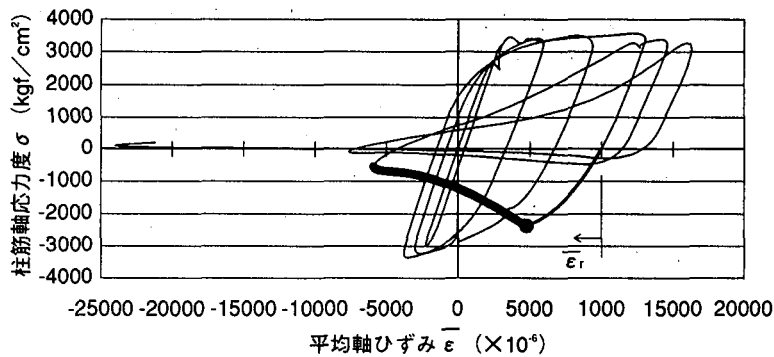
a) $M - \phi$ 関係



b) $\sigma - \epsilon$ 関係



c) $\sigma - \phi$ 関係



d) $\sigma - \bar{\epsilon}$ 関係

図-4 実験結果の一例(No.1試験体)

度 σ と測定区間(450mm)における柱筋位置の平均軸ひずみ $\bar{\epsilon}$ の関係を示す。

図-4 a) に示すように、最大荷重時に柱基部の隅角部コンクリートが一部剥離し、その後の交番加力で柱筋に沿ってかぶりコンクリートが剥離すると同時に柱筋が座屈し、さらに内部のコンクリートが劣化・剥落して破壊に至った。いずれの試験体も破壊過程はほぼ同様であった。軸力の大きいNo.1~No.3試験体では、最終的に軸力を保持できなくなり塑性ヒンジ部全体が圧壊した。No.4試験体では荷重が鉄筋降伏時の80%以下に低下した段階で加力を終了した。

図-4 b) はフーチング面の位置の隣合った柱筋の軸応力度と軸ひずみの関係を示したものである。軸応力度-軸ひずみ関係はいずれの試験体も実験終了時まで測定されたが、軸応力度は降伏応力度の1.3倍未満であり、信頼できる精度で柱筋応力度が測定されたと考えられる。

図-4 c) 図中●印に示すように、単調載荷の途中で柱筋の圧縮応力度が増加から減少に転じる点が見られる。小ハンマーによる打撃試験ではこの前後で打撃音の変化が起こり、かぶりコンクリートが完全に剥離したと考えられる。目視観察でも●印以降に柱筋の座屈現象が確認された。ここでは、●印位置を座屈開始点と定義し、その位置を a) b) d) に示した。

図-4 d) に示すように柱筋軸応力度と平均軸ひずみの関係は鉄筋単体の実験結果³⁾と類似した履歴形状を示しているが、鉄筋単体の場合における座屈開始点は細長比によって異なるが、細長比が大きい場合でもひずみがゼロ付近であるのに対し、鉄筋コンクリート部材内の柱筋の場合には、座屈開始点が圧縮ひずみに達する前の引張ひずみ域で生じているのが特徴的である。これは、a) c) d) を総合して考えると部材の曲げ変形による曲率が柱筋の座屈開始点に大きく関与していることを示すものである。また、座屈後は直ちに応力がゼロになるのではなく、なだらかな軟化特性を示し、徐々に応力がゼロに漸近している。再び引張応力が加えられると、前回の最大引張ひずみ時の引張応力度よりも低い位置を目指している。その理由は鋼管を対象とした既往の研究⁴⁾等から、座屈によって塑性ヒンジ部分の柱筋の長さが伸びるためではないかと考えられる。

柱筋が一旦座屈すると、次サイクルで圧縮を受けた時にはほとんど応力を分担せず、発生する圧縮応力度は座屈開始点の1~2割に減少してしまう。

4. 実験結果の考察

今回対象としたような、断面の一辺に多数本の柱

筋が配置される場合では、柱筋の座屈挙動を支配する主な要因として次の3つが考えられる。

- 1) 柱筋周辺のコンクリートの割裂強度
- 2) 帯筋の曲げ剛性
- 3) 柱筋自身の曲げ剛性

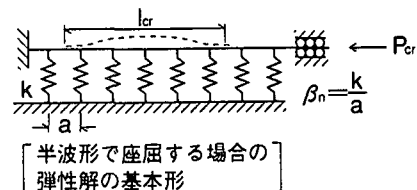
以下、これらの影響を検討する。

(1) 弾性座屈理論との対比

まず、2) 3) の影響について、弾性座屈理論により検討を行う。

かぶりコンクリートが無い柱筋の座屈荷重 P_{cr} と座屈長さ l_{cr} を試算するため、図-5に示すように、端部を回転拘束され、弾性支承上に配置された直棒部材が半波形で座屈する場合を考えた。計算に当たっては、柱筋の弾性係数 E には座屈開始点の割線勾配(図-4 b) 参照)を用い、帯筋の曲げ剛性 β_n には両端固定梁と仮定した弾性バネモデルを適用し、断面の一辺に多数本の柱筋が存在する影響も考慮した。

理論解による座屈応力度と実験値を対比して図-6に示す。理論解は実験値よりも小さく、他の試験体でも同様であった。実際には実験結果で述べたように、柱筋は部材が変形して曲率がある状態で座屈が起こるので、かぶりコンクリートの無い柱筋の座屈



$$P_{cr} = C_1 \sqrt{\beta_n EI} \quad (C_1 = 2.4 \sim 3.3)$$

$$l_{cr} = C_2 \sqrt[4]{EI / \beta_n} \quad (C_2 = 4.4 \sim 5.4)$$

図-5 弾性座屈モデル

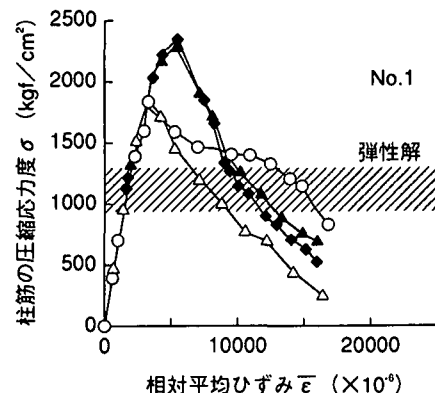


図-6 座屈応力度

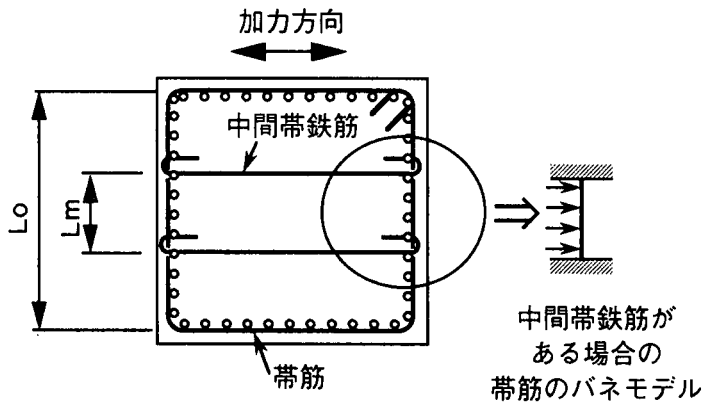


図-7 中間帯鉄筋の役割

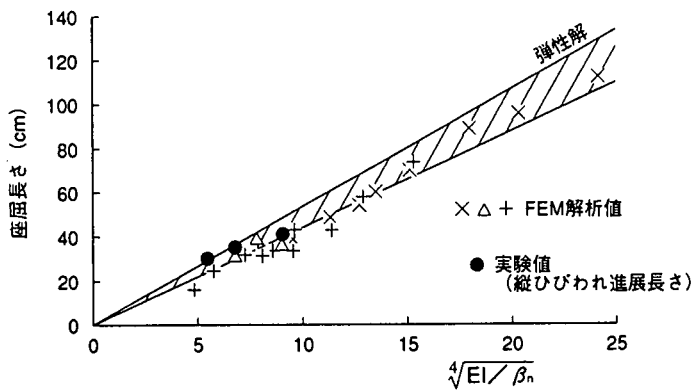


図-8 座屈長さ

応力度は理論解よりさらに小さくなる。このことは、曲率による初期不整をモデル化したFEM解析（材料及び幾何学的非線形性考慮）でも確認した。

以上のことは、断面の一边に多数本の柱筋が配置されて、帯筋による柱筋の拘束が帯筋の曲げ剛性に支配されるような場合には、柱筋の座屈に対して上述のD)の影響以上に、I)の影響が大きいことを示唆している。これに対して、図-7のように中間帯鉄筋を配置することにより、見掛け上、帯筋の曲げ剛性 βn が大きくなる。中間帯鉄筋の軸剛性が帯筋の曲げ剛性に比べて非常に大きいため、 βn を算出する際に仮定した弾性バネモデルのスパン L_0 (ほぼ断面幅に相当)が中間帯鉄筋の断面内における間隔 L_m になるとして試算すると、帯筋の部材軸方向における間隔 a が一定の場合、 βn は $(L/L_0)^3$ に比例して大きくなり、その結果座屈荷重 P_{cr} は $(L/L_0)^{3/2}$ に比例して大きくなる。ただし、部材の変形が大きくなると、曲率による初期不整が大きくなるので、弾性理論解より小さな荷重で座屈を起こすことが見込まれるが、別途、中間帯鉄筋を配筋して行った模型実験では、かぶりコンクリートの剥落後もある程度の曲率まで

は柱筋が十分な圧縮応力を分担できることを確認している。すなわち、中間帯鉄筋は圧縮部コンクリートの拘束効果だけでなく、柱筋の座屈を抑制するという観点からも重要であると言える。

理論解による座屈長さを実験値の関係を図-8に示す。実験値では柱筋に沿った縦ひびわれの進展長さを座屈長さとした。座屈長さに関しては、両者は比較的良い一致を示しており、今回の実験の範囲では弾性座屈理論により座屈長さが推定できると言える。

(2) 柱筋周辺のコンクリートの割裂強度

ここでは、I)の影響について検討する。

図-9に示すようにある曲率をもった柱筋に圧縮力が作用すると、かぶりコンクリートを外側に押し出そうとする力 ΔH が生じる。 ΔH は柱筋応力度と曲率の積に比例するが、実験結果から得られた座屈開始点では柱筋応力度と曲率の積がそれまでの載荷履歴の内ではほぼ最大になることが確認できた。

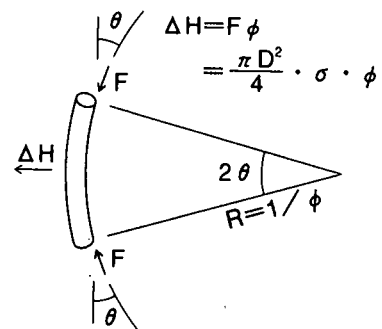


図-9 曲率を持った柱筋

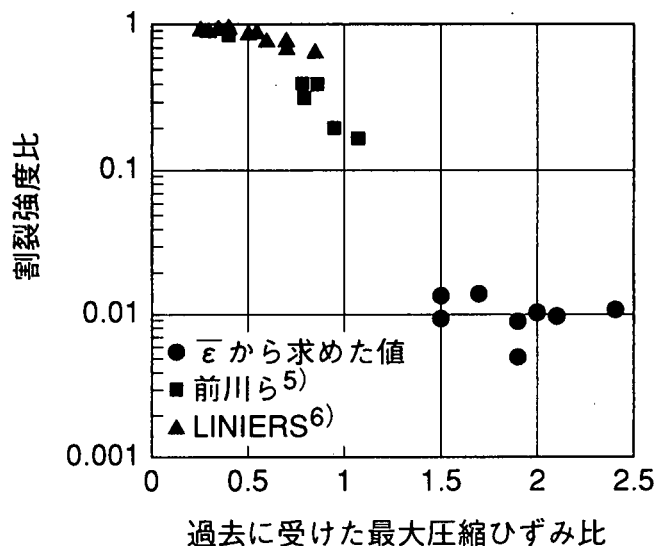


図-10 柱筋周辺コンクリートの割裂強度

図-10に ΔH を柱筋の純間隔と帯筋の純間隔の積により求めたコンクリート断面積で除して求めた応力度 $\Delta\sigma$ と柱筋周辺のコンクリートが柱筋の座屈開始点以前に経験した最大の圧縮ひずみの関係を示す。図中には既往の材料実験結果⁵⁾⁶⁾も併記した。前節の検討により帯筋の曲げ剛性及び柱筋自身の曲げ剛性については、今回の場合、柱筋の座屈応力度に及ぼす影響が比較的小さいことがわかっているため、 ΔH が全て柱筋周辺のコンクリートを割り裂くために使われたと考えられるが、それでも、柱筋周辺コンクリートの割裂強度は非常に小さかったことがわかる。これは、既往の材料実験結果からも類推されるように、過去に経験した圧縮ひずみ履歴に因るものと考えられる。いずれにしても、このように非常に小さい割裂強度であっても、柱筋の座屈を抑制できることは実験結果から明らかである。

(3) 座屈後の履歴特性

図-11に、実測された柱筋軸応力度と平均軸ひずみの関係から、座屈開始点以降の圧縮軟化曲線の部分(図-4 d)太線部分に相当)を取り出して示す。縦軸は圧縮応力度を座屈開始点の応力度で正規化し、横軸は座屈開始点からのひずみ変化量で表わした。各計測データにはばらつきがあるものの、正規化した座屈開始点からの勾配はほぼ同じであり、応力ゼロの軸と交わる点はデータを外挿すると座屈開始点からのひずみの変化量にして約1.8%~2.0%程度と考えられる。

座屈後再び引張力が加力された時に着目し、図-12に座屈直前の最大引張ひずみ時における引張応力度に対する座屈後の同一ひずみ時の引張応力度の比と座屈開始点から圧縮側へのひずみ変化量の関係を示す。ひずみの変化量が1%程度以下では座屈前の引張応力度と等しくなるのに対し、ひずみの変化量が1%以上になると、その値が大きくなるほど引張応力度が低下する傾向を示しており、2%の時には座屈前の約9割に低下することがわかる。

5. 柱筋座屈モデル

以上の検討結果をもとに柱筋座屈の検討フローを図-13のように提案する。検討手順としては、まず、部材のモデル化にあたって、塑性ヒンジ長さを設定し、柱筋の応力ひずみ関係の履歴モデルとして、通常の鉄筋モデルを使用する範囲と、座屈モデルを使用する範囲を決める。次に、解析では、はじめは全ての柱筋に通常の履歴モデルを使用して、塑性ヒンジ区間において柱筋の座屈が生じたかどうかを、所定の座屈判定基準により逐次判定する。座屈が起きたと判定されたら、塑性ヒンジ区間における柱筋の応力ひずみ関係を座屈後のモデルに変える。

以下、塑性ヒンジ長さの設定方法、座屈開始点の判定方法および座屈以降の履歴モデルについて詳しく述べる。

(1) 塑性ヒンジ長さの設定方法

塑性ヒンジ長さは、図-5に示した座屈長さ l_{cr} を求

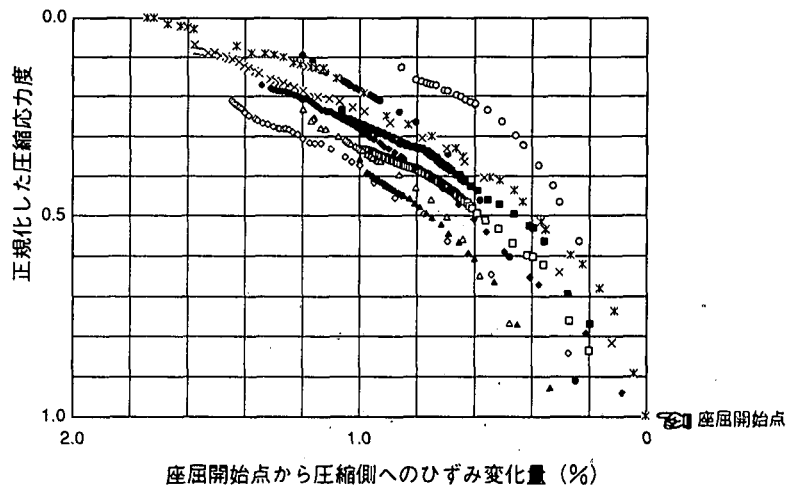


図-11 座屈後の圧縮軟化域曲線

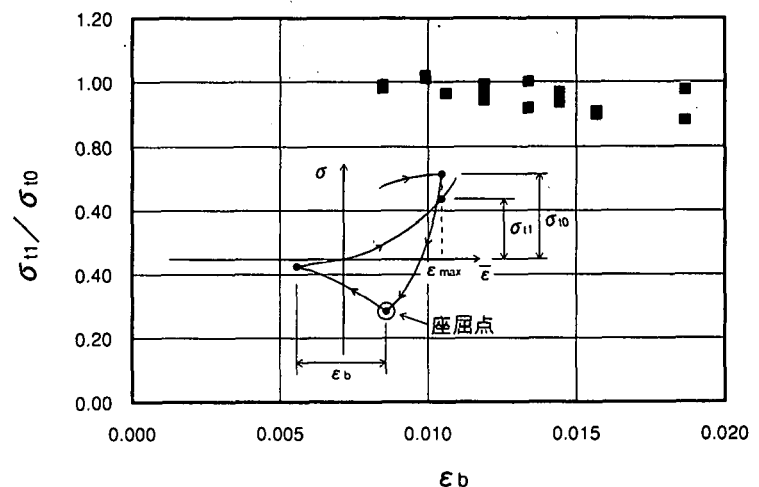


図-12 座屈後の再引張時の応力度

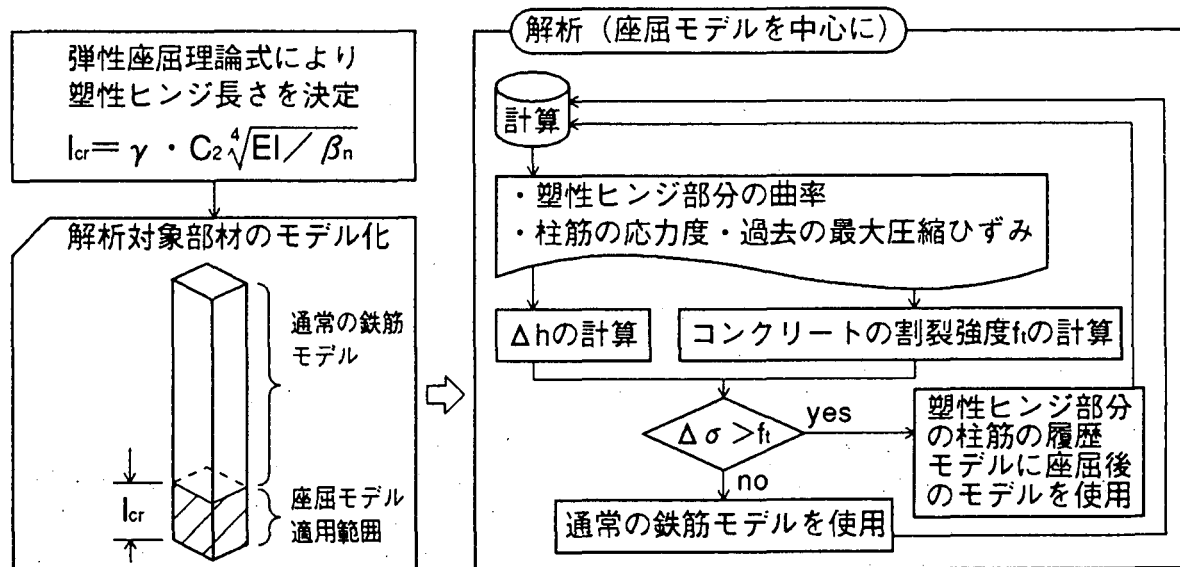


図-13 柱筋座屈の検討フロー

める弾性座屈理論式に補正係数 γ を乗じて設定する。次節のとおり、柱筋の座屈の判定には塑性ヒンジ区間の平均曲率を用いることから、結果として安全側の評価を与えるように $C_2=4.4$ 、 $\gamma=0.9$ とする。

(2) 座屈開始点の判定方法

実構造物では、部材の断面寸法に対する柱筋径の比率や帯筋による柱筋の拘束効果はより小さくなると考えられるので、座屈に及ぼす柱筋周辺におけるかぶりコンクリートの影響がより支配的になる。そこで、座屈開始点を判定する際には、曲率を持った柱筋に圧縮力が作用する場合に生じる水平力、すなわち柱筋の応力度と部材の曲率との積の関数で表わされる ΔH が全てかぶりコンクリートの割れ裂き力に相当すると仮定して、柱筋間のコンクリートに作用する割れ裂き応力 $\Delta\sigma$ を求めることとした。

また、当該柱筋の周辺コンクリートの割れ裂き強度は、柱筋位置のコンクリートが過去に経験した最大の圧縮ひずみ量から推定する。

座屈開始点は、柱筋間のコンクリートの割れ裂き応力がコンクリートの割れ裂き強度を上回った時点とし、それ以降の塑性ヒンジ部分における柱筋の応力-ひずみ関係は後節の履歴モデルに従うものとした。

(3) 座屈後の応力ひずみ関係のモデル化

座屈後における塑性ヒンジ部分の平均的な応力ひずみ関係を図-14のようにモデル化した。

前節の方法により座屈開始点B点が決定され、座屈後の圧縮軟化時BC及び再引張時CEを直線でモ

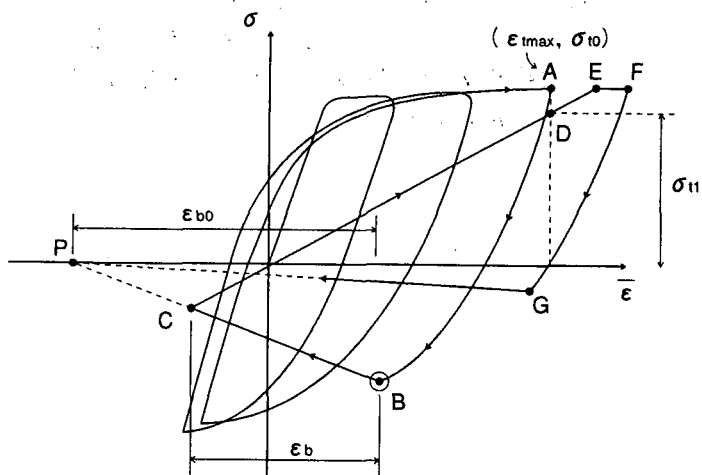


図-14 座屈後の履歴モデル

デル化した。BCが目標とするP点は座屈開始点から圧縮側へのひずみの変化量 ϵ_{b0} で定義する。 ϵ_{b0} は実験結果より2%とする。CEが目標とするD点は前サイクルの最大引張ひずみ位置とし、その引張応力度 $\sigma_{t,i}$ (i は座屈後のサイクル)は実験結果から得られた次式で定義する。

$$\sigma_{t,i} = \sigma_{t,i-1} \times \alpha(\epsilon_b)$$

ここに、

$$\alpha(\epsilon_b) = 1.0 \quad (\epsilon_b \leq 1\%)$$

$$= 1.1 - 0.1 \epsilon_b \quad (\epsilon_b > 1\%)$$

EF及びFGは通常の履歴モデルに従うものとし、G点の圧縮応力度はB点の応力度の10%とする。また、圧縮軟化時は常にP点を目標とする。

6. まとめ

【参考文献】

本研究では、斜張橋のタワーや高橋脚を対象に R C 柱部材の柱筋における座屈挙動を実験的に明らかにした。主な結論は次のとおりである。

- 1) 模型実験において、塑性ヒンジ部分における柱筋の応力度と平均ひずみの関係を座屈以降まで測定することができた。
- 2) 柱筋の応力度と平均ひずみの関係は、鉄筋単体の場合と異なり、部材の変形による柱筋の曲率の影響により、引張ひずみが残留している比較的小さい圧縮応力度で座屈が起っている。
- 3) 斜張橋のタワーや高橋脚を対象とした R C 柱部材では、柱筋の座屈に及ぼす柱筋自身の曲げ剛性や帯筋による柱筋の拘束の影響は少なく、柱筋周辺のコンクリートによる影響が大きい。
- 4) 以上の様な特性を考慮して、R C 柱部材の変形予測解析に組み込み可能な座屈モデルの提案をした。これにより、土木構造物を対象とした R C 柱部材の変形性能をその終局まで精度良く予測できる見通しが得られた。

- 1) 日本道路協会；道路橋示方書・同解説，V耐震設計編，平成2年2月。
- 2) 島弘ほか；曲げ破壊型 R C 橋脚における鉄筋座屈モデルによる靱性解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.12，pp.741-746，1990。
- 3) Monti,G et al.；Nonlinear Cyclic Behavior of Reinforcing Bars Including Buckling，Journal of Structural Engineering，ASCE，Vol.118，No.12，pp.3268-3284，Dec.1992。
- 4) Maison,B.F. et al；Cyclic Responce Prediction for Braced Steel Flames，Journal of the Structural Division，ASCE，Vol.106，No.ST7，pp.1401-1416，July，1980。
- 5) 前川宏一ほか；2軸応力下（圧縮-引張領域）にあるコンクリートの変形特性，コンクリート工学論文集，Vol.21，No.3，1983.3。
- 6) Liniers,D；Microcracking of Concrete under Compression and Its Influence on Tensile Strength，Materials and Structures，Vol.20，pp.111-116，1987。

A Study of Buckling Mechanism of Longitudinal Reinforcing Bars in RC Piers

Kumiko Suda, Yasuo Murayama, Toshimichi Ichinomiya, Hiroshi Shimbo

In designing the reinforced concrete (RC) columns such as towers of long-span cable stayed bridges and high-rise piers, it is important to verify the ductility of these members. However, in order to evaluate deformation capacity during earthquakes, it is necessary to understand the characteristics of a plastic hinge at the bottom of a column, especially, buckling point of longitudinal reinforcing bars and stress-strain relationships of these bars after buckling.

In this study, the method for direct measuring the stress of longitudinal reinforcing bars embedded in concrete was developed, and the hysteresis phenomenon of these bars before and after buckling was made clear by experiments. In addition, mechanism of buckling of these bars was also made clear, and a new analytical model of buckling was proposed.