

論文

[2077] 交番繰返し荷重下における柱筋の座屈挙動

須田久美子*1・村山八洲雄*2・一宮利通*3・新保弘*3

1. はじめに

斜張橋のRC主塔等のような曲げが支配的なRC柱部材においては、その地震時変形性能を精度よく評価する上で、柱筋の座屈挙動を解明することが必要である。特に、地震荷重を想定した交番繰返し荷重下に適用できる座屈モデルの開発が望まれている。土木構造物では、部材の断面寸法が大きいため、通常断面の一辺に多数本の柱筋が配置される。これまで、鉄筋座屈に関する研究が数多く行われてきているが、交番載荷を対象とした研究は比較的少なく[1][2]、さらに、断面の一辺

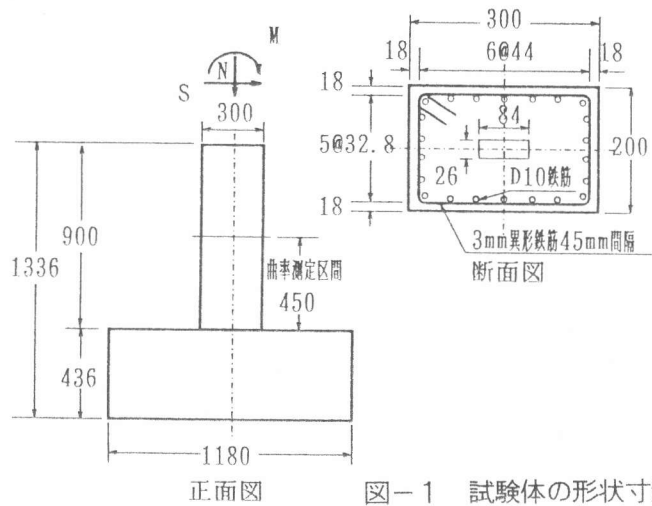


図-1 試験体の形状寸法

に多数本の柱筋が配置されている部材を扱ってのは極めて希である[1]。また、鋼材単体では座屈時及びそれ以降の応力ひずみ関係が実験的に求められているが[3]、RC部材中における柱筋については応力ひずみ関係が測定された例はない。

ここでは、長大コンクリート斜張橋のRC主塔を対象に、断面の各辺に複数本の柱筋を配置した試験体を用いて交番繰返し曲げせん断実験を行い、柱筋の応力度を直接測定した。また実験結果を基に、断面の一辺に複数本の柱筋が配置される場合における柱筋の座屈挙動の解明を試み、座屈荷重及び柱筋周辺における拘束コンクリートの引張強度等を検討した。

表-1 材料特性

コン	試験体 No.	圧縮強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)
ク	1	438	3.0×10 ⁵
リ	2	457	3.0×10 ⁵
ト	3	462	3.3×10 ⁵
ト	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
	彫3mm	3,790	4,900
	彫4mm	3,050	4,350

2. 実験概要

2.1 試験体及び加力方法

試験体の外形寸法を図-1に、使用材料の特性を表-1に示す。加力装置として、試験体の柱頭部に任意の組合わせ荷重が加力できる6自由度加力装置[4]を使用した。試験体の種類と加力方法を表-2に示す。RC計算によりあ

表-2 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)	鉄筋比 (%)		
1	D10	2.6	彫3mm	45	0.16	10	62
2			彫4mm		0.28		
3			彫3mm	80	0.16	5	13
4				45			

らかじめ求めた鉄筋降伏時の荷重を基に、降伏荷重時の曲率φ₀ (No.1~ No.3は15×10⁻⁶/mm、No.4は12×10⁻⁶/mm)を決定し、それ以降はφ₀の整数倍の曲率で正負交番加力した。加力は、柱基部(フーチング

*1鹿島技術研究所 第一研究部第一研究室 主任研究員 (正会員)
 *2鹿島技術研究所 第一研究部第一研究室 主管研究員 (正会員)
 *3鹿島技術研究所 第一研究部第一研究室 研究員、工修 (正会員)

面)に作用する曲げモーメントMと、図-1中に併記した曲率測定区間における平均曲率 ϕ を基に行った。

2.2 測定方法

a. 曲率

曲率制御に用いた平均曲率 ϕ は、フーチング表面とそこから断面高さの1.5倍の位置(図-1中の曲率測定区間)との相対変位を断面

の隅角部4箇所測定して求めた。柱基部約25cmの区間の曲率分布及びひずみ分布を求めるため、コンクリート表面に π 型変位計(検長50mm)を取付けた。

b. 鉄筋ひずみ

鉄筋のひずみは塑性ひずみゲージを横ふし間に貼付けて測定した。ひずみゲージの貼付けに当たっては、交番繰返し荷重下において5~6%のひずみが測定できるようにエポキシ系の接着剤を使用し、貼付け後に80°C・2時間の焼き付け養生を行った。ひずみゲージは鉄筋の軸方向の同じ位置の両側(かぶり側と断面内部側)に貼付け、軸ひずみはそれぞれの読み値を平均して求めた。柱筋のひずみゲージは正負荷荷面の中央部の柱筋のフーチング面位置に取付けた。帯筋のひずみゲージは正負荷荷面の中央位置で、高さ40cmまでの全ての帯筋に取付けた。

c. 柱筋応力

交番応力履歴を受ける鉄筋の塑性域での応力度を測定するため、測定箇所の部分だけを専用の加熱コイル(コイル幅5mm)で高周波焼き入れし、その部分の降伏応力度を母材の1.3倍以上に高めた(以下、焼き入れした部分を“鉄筋ロードセル”と呼ぶ)。局部焼き入れによる熱影響の範囲は鉄筋径の約1.5倍程度であり(図-2参照)、繰返し荷重(引張荷重のみ)による残留ひずみは 50×10^{-6} (応力度読取りの誤差に換算して80kgf/cm²)以内であった。鉄筋ロードセルは、載荷面中央部で、ひずみゲージを取付けた柱筋の隣の柱筋に、フーチング面及び高さ9cmの位置に取付けた。

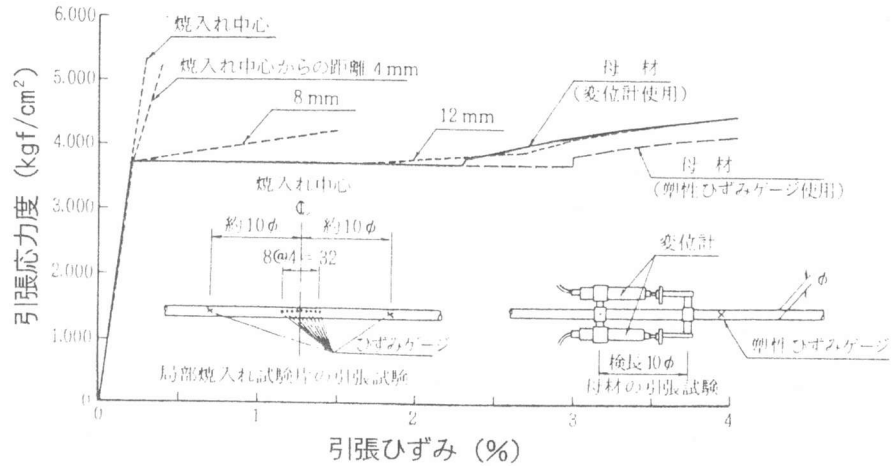


図-2 鉄筋ロードセルの性能確認試験結果

3. 実験結果

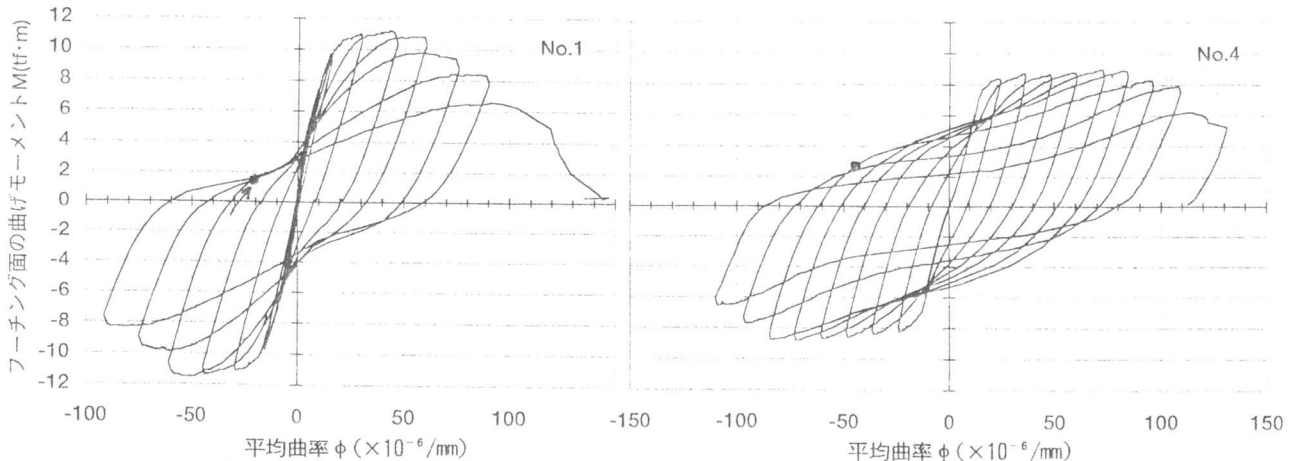


図-3 曲げモーメント曲率関係の一例

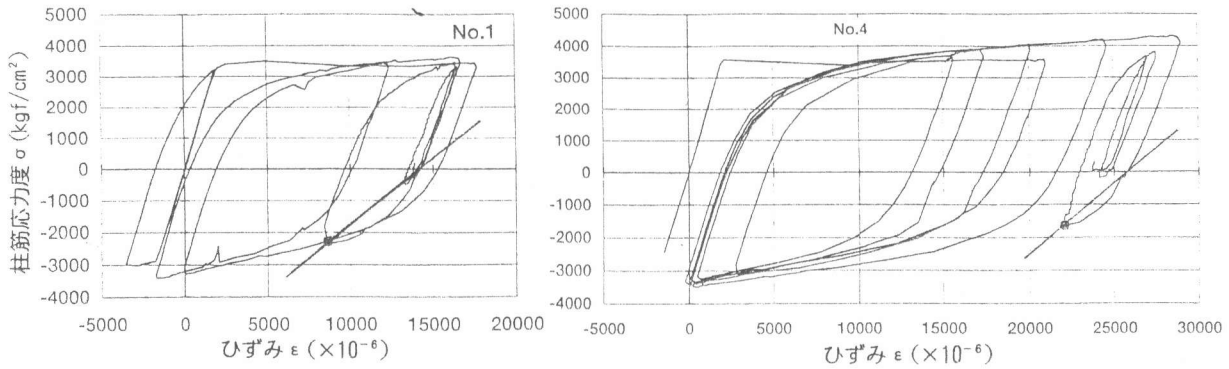


図-4 柱筋の応力ひずみ関係（フーチング面）の一例

3.1 曲げモーメント-曲率関係と試験体の変状
 フーチング面における曲げモーメント-曲率 ($M-\phi$) 関係を図-3に示す。いずれの試験体も、最大耐力が生じた後、柱筋の座屈を契機にかぶりコンクリートが剥離し、その後内部のコンクリートがさらに劣化・剥落して破壊に至った。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って塑性ヒンジ部全体が圧壊した。No. 4試験体では耐力が降伏荷重の80%以下に低下した段階で加力を終了した。

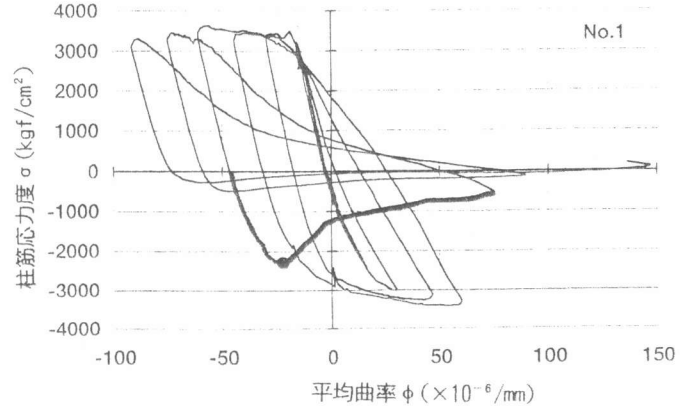


図-5 柱筋応力度と曲率の関係の一例

3.2 柱筋の軸応力-軸ひずみ関係

柱筋の軸応力-軸ひずみ ($\sigma-\epsilon$) 関係を図-4に示す。 $\sigma-\epsilon$ 関係はいずれの試験体も実験終了時まで測定されており、応力度は降伏応力度の1.3倍未満であった。これは鉄筋ロードセルの適用範囲であり、柱筋応力度は信頼できる精度で測定されたと推定される。軸力の大きいNo. 1~No. 3試験体ではいずれも圧縮側で $2000\sim 3000 \times 10^{-6}$ 以上の圧縮ひずみを経験したのに対し、軸力の小さいNo. 4試験体では柱筋の引張降伏以降はほとんど圧縮ひずみが生じなかった。

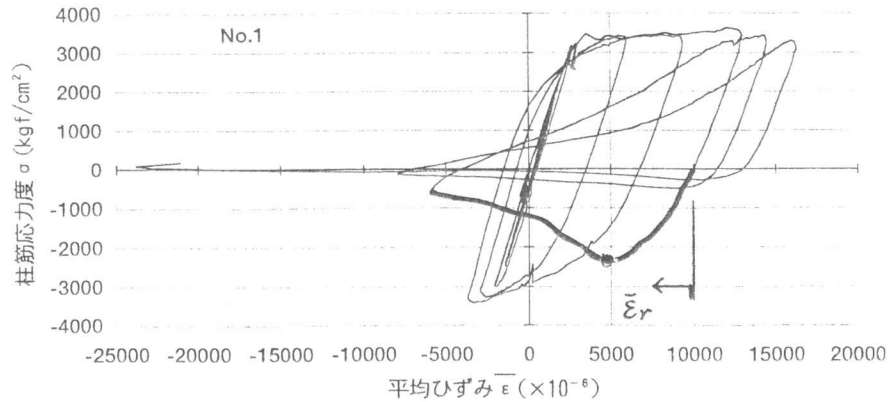


図-6 柱筋応力度と平均ひずみの関係の一例

3.3 柱筋軸応力-曲率関係

$\sigma-\phi$ 関係を図-5に示す。これで見ると図中太線で示すように、柱筋応力の圧縮側において、曲率が単調に変化するにも拘らず、圧縮応力が増加から急激に減少に転じる点 (●) が見られる。目視により、この後柱筋の座屈現象が確認されている。ここでは、●を座屈開始点と定義した

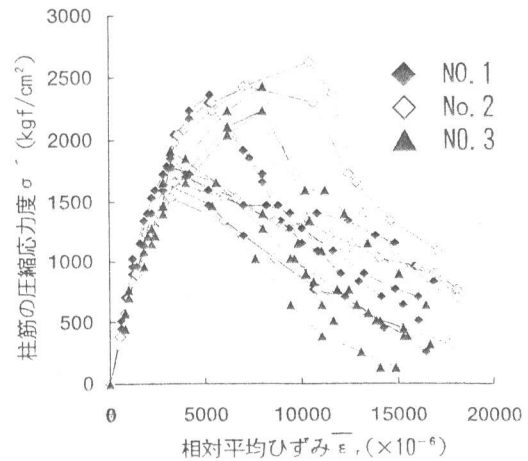


図-7 帯筋拘束の影響

(図-3～図-7にもこれに対応する位置を示した)。座屈開始点は、柱筋に圧縮力が作用して反対側の ϕ に転じるかなり以前に起こっていることが分かる。この履歴特性は、帯筋の量や配置または軸力の大小に拘らず、全ての試験体で同様であった。

3.4 柱筋の軸応力-平均ひずみ関係

σ と平均曲率測定区間(図-1参照)における相対変位から求めた柱筋位置の平均ひずみ $\bar{\varepsilon}$ の関係を図-6に示す。これは既往の鉄筋単体の実験結果[3]と比較的良好似た履歴形状となっているが、鉄筋単体の場合の座屈開始点はひずみがゼロ付近であるのに対して、柱筋の場合は第4象限にあることが特徴的である。これは、 ϕ との履歴特性(図-5)と併せて、曲げ変形による柱筋の曲率が座屈開始点に大きく関与している可能性を示唆するものである。

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有して、徐々に応力がゼロに漸近していく様子が分かる。その後、引張力が加えられると前回の最大引張ひずみ時の応力よりも必ず低い位置を目指す。鋼管の実験において同様の現象が報告されており、その理由は座屈によって鋼材全体の長さが伸びるためと説明されている[5]。

3.5 座屈に対する帯筋の拘束効果

柱筋座屈に及ぼす帯筋拘束の影響を見るため、図-6の太線部分に相当する部分をNo.1～No.3試験体の各測定値から取り出して図-7に比較して示す。縦軸は柱筋の圧縮応力度、横軸は相対平均ひずみ $\bar{\varepsilon}_r$ (図-6参照)である。各試験体で座屈開始点(3.3参照)の応力度に着目すると、最大応力度は大きい方からNo.2、No.3、No.1の順であり、拘束効果の指標である β (図-10参照)の大きい順と一致しているが、今回はその差は顕著ではなかった。

帯筋のかぶり側のひずみ ε_t と ϕ の関係を図-8に示す。図に示した ε_t は座屈による柱筋の変形が最も大きかった高さにおける帯筋のかぶりコンクリート側のひずみゲージのものである。載荷面にある複数本の柱筋がそれらを囲む帯筋で拘束された場合には、隅角部の柱筋を除く中間の柱筋の座屈に帯筋の曲げ剛性が深く関与すると考えられる。ひずみゲージの読み値はひびわれの位置などの影響を受け易いので一概には言えないが、今回の実験では、図-8の測定例に代表されるように全ての試験体において同様な測定結果が得られており、載荷面の帯筋中央が曲げ降伏する前に柱筋の座屈が開始していたと考えられる。

3.6 柱筋周辺のコンクリートの圧縮ひずみ

π ゲージの測定値から求めた柱筋位置における圧縮時の高さ方向のひずみ分布を図-9に示す。せん断スパン比の小さいNo.4試験体では、平均曲率の測定区間(図-1参照)における曲率の変化が、他の試験体に比べて相対的に大きいため、 $\bar{\varepsilon}$ が見かけ上小さくなっているが、同じ ϕ の時の圧縮ひずみの最大値は他の試験体とはほぼ同等になっていることが分かる。せん断スパン比の大きいNo.1～No.3試験体では $\bar{\varepsilon}$ が座屈部

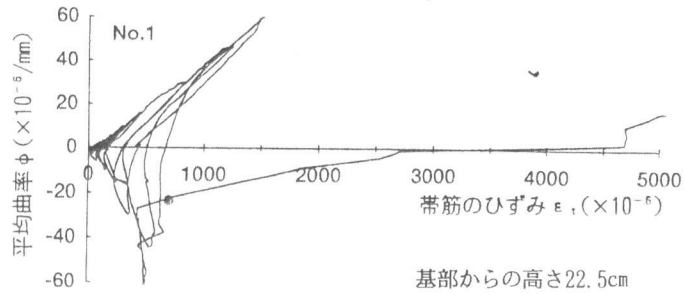


図-8 平均曲率と帯筋ひずみの関係の一例

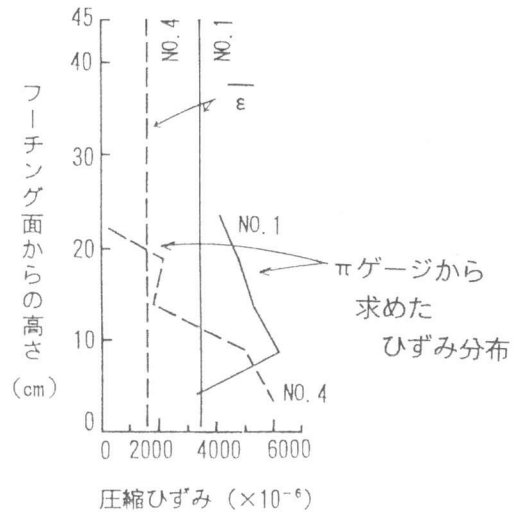


図-9 柱筋位置の圧縮ひずみ分布 ($\phi = 60 \times 10^{-6}/\text{mm}$)

分のコンクリートの平均的な圧縮ひずみと見なせるが、せん断スパン比の小さいNo. 4試験体では $\bar{\epsilon}$ がかなり小さめの圧縮ひずみを与えることになる。

$\bar{\epsilon}$ はフーチング面との相対変位量から求めているので、柱部分のフーチングへのめり込み（フーチングの変形による沈下）分もその値に含まれていると考えられるが、 $\bar{\epsilon}$ が π ゲージによるひずみ分布から予想される平均値と比較的良好に対応しているので、めり込み分の影響は少ないと考えられる。

4. 考察

4.1 弾性座屈理論による座屈荷重の推定

かぶりコンクリートがない柱筋の座屈応力度を試算するため、端部が回転拘束された直棒部材が弾性支承上において半波形で座屈する場合を考えた。弾性座屈理論解は図-10のように与えられ、ここに定数Cの値は理論式の近似解の求め方によって多少異なり、C=

2.4、3.3となった。柱筋の弾性係数Eには座屈開始点での割線勾配（図-4参照）を用いた。帯筋の拘束効果は弾性バネで考慮し、断面の一边に多数の柱筋が存在することから、柱筋の座屈を想定した載荷面における帯筋を両端固定梁と仮定し、隅角部を除いた柱筋の本数を考慮してバネ定数k（ $=k_0/n_{ef}$ ）を求めた（図-11参照）。

理論解による座屈応力度と実験結果を対比して図-12に示す。理論解はいずれの試験体の実験値とも同程度またはそれ以下であった。前節でも述べたとおり、実際には部材が曲がることによる曲率の影響があるので、かぶりコンクリートがない場合の座屈応力度は理論解よりさらに小さくなると考えられ、これは曲率等の初期不整を与えた材料及び幾何学的非線形FEMでも確認された。これより、今回の実験の範囲では柱筋の座屈に対して、柱筋周辺におけるコンクリートの拘束による影響がかなり大きいと考えられる。

4.2 柱筋座屈時における柱筋周辺のコンクリートの引張強度

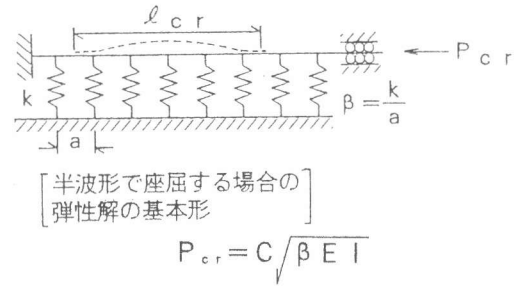


図-10 弾性座屈モデル

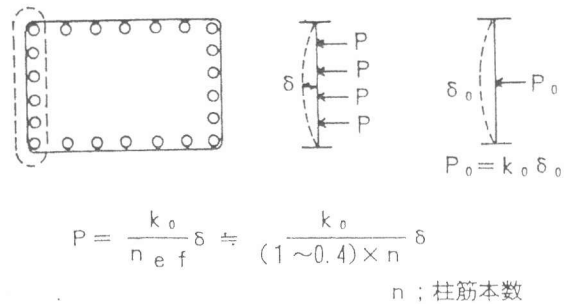


図-11 帯筋の取扱い

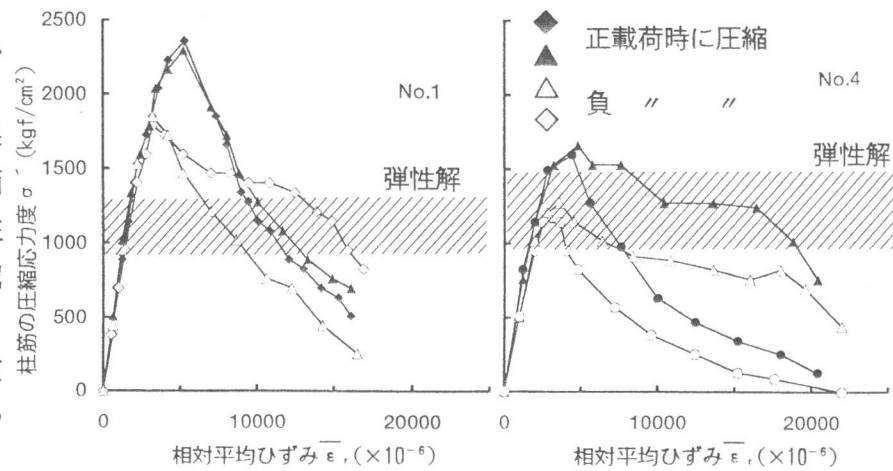


図-12 座屈応力度

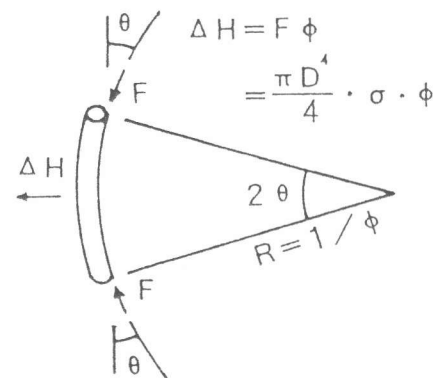


図-13 簡易モデル

図-13のように、ある曲率をもった柱筋に圧縮力が作用すると外側に押し出そうとする力 ΔH が生じる。 ΔH が柱筋周辺にあるコンクリートの引張強度を上回った時にかぶりコンクリートが剥離して、座屈が開始すると考える。 ΔH は柱筋の応力度と曲率の積に比例して増加するので、図-5を基に ΔH を求め、引張応力度比（ ΔH から求められる引張応力度と引張強度の比）に換算した結果を図-14に示す。なお、 ΔH の推定に用いた曲率には、座屈区間における局部的な曲率の増加を考慮するため、 ϕ に $\varepsilon/\bar{\varepsilon}$ （各測点に応じて1.3~1.9）を乗じたものを用いた。横軸には圧縮ひずみ比（過去に受けた最大圧縮ひずみと圧縮強度に達する時のひずみとの比）をとり、既往の実験結果[7][8]を併記した。ここで、過去に受けた圧縮ひずみの最大値は測定区間の平均ひずみ $\bar{\varepsilon}$ から求めたが、図-9に示すとおり、せん断スパン比の小さいNo. 4試験体については、柱基部における π ゲージから求められた圧縮ひずみの最大値と $\bar{\varepsilon}$ の差が大きくなるので、 $\bar{\varepsilon}$ の代わりに π ゲージから求められた値を用いた。

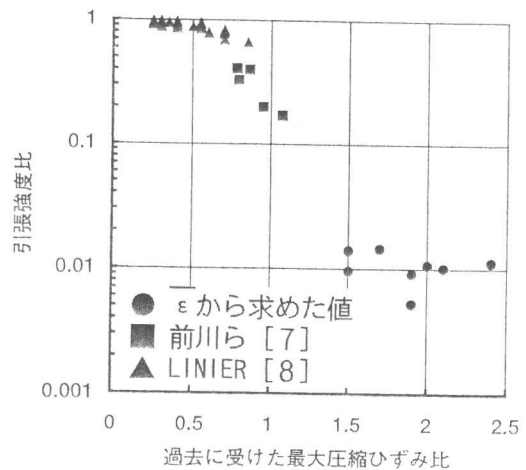


図-14 柱筋周辺コンクリートの引張強度

図-14より、かぶりコンクリートが剥離する時の柱筋周辺コンクリートの引張強度は非常に小さいと言える。これは、柱筋の座屈以前に経験した過去の圧縮ひずみ履歴に起因するものと推定される。

5. まとめ

以上の実験及び検討結果をまとめると次のとおりである。

- ① R C柱部材内の柱筋について座屈区間の軸応力度と平均ひずみ関係をその座屈以降まで測定することができた。
- ② 柱筋の座屈時の応力ひずみ関係は、鉄筋単体のものとは座屈開始点の位置が明らかに異なった。これは、部材の曲げによる曲率の影響と考えられる。
- ③ 圧縮履歴を受けたコンクリートの引張強度が非常に小さいにも拘らず、柱筋周辺のコンクリートが座屈荷重に及ぼす影響は非常に大きいことが分かった。

[参考文献]

- [1] 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
- [2] 中村光ほか: 鉄筋の座屈が R C 構造のポストピーク挙動に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文集、Vol. 14、pp. 337-342、1992
- [3] Monti, G et al.: Nonlinear Cyclic Behavior of Reinforcing Bars Including Buckling, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 118, N. 12, pp. 3268-3284, Dec. 1992
- [4] 新保弘ほか: 6 自由度加力装置を用いた R C 柱部材実験、コンクリート工学年次論文集、Vol. 14、pp. 815-818、1992
- [5] Maison, B. F. et al.: Cyclic Response Prediction for Braced Steel Frames, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 106, No. ST7, pp. 1401-1416, July, 1980
- [6] 鈴木計夫ほか: 各種の形状の横補強筋を用いたコンファインドコンクリート内における圧縮軸筋の座屈性状、コンクリート構造物の靱性と配筋方法に関するシンポジウム論文集、コンクリート工学協会、pp. 61-68、1990. 5
- [7] 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、1883. 3
- [8] Liniers, D: Microcracking of Concrete under Compression and its influence on tensile strength, Materials and Structures, Vol. 20, pp. 111-116, 1987