

# [2094] 円形断面鋼管補強鉄筋コンクリート短柱の曲げ耐力および変形状に関する研究

正会員 ○肖 岩 (九州大学大学院)  
 正会員 崎野健治(九州大学工学部)  
 正会員 富井政英(九州大学工学部)

## 1. 序

従来の円形断面鉄筋コンクリート(以下RCと書く)短柱のせん断補強法として最も優れているとされているのは、円形溶接帯筋を密に配筋する方法である。この方法の欠点としては、施工上帯筋間隔に制限があることと、主筋の付着性能の保持に重要な役割があるかぶりコンクリートの剥離・崩壊を防止できないことである。著者等は、円形溶接帯筋を、施工上および断面算定上許容できる最大量配筋しても、せん断破壊を防げなかった円形断面RC短柱を、円形鋼管で横補強することにより、靱性とエネルギー吸収性能に富む曲げ降伏先行型の柱にすることができることを実証し、さらに、コンクリートの圧縮性能が鋼管により拘束されることで改善され、RC柱の曲げ性能、特に高軸力下における性能を高めることができることを示した[1]。

本論文においては、円形断面鋼管補強RC短柱の力学性状に及ぼすコンクリート強度の影響を調べるために行ったコンクリート強度が比較的低い4体の円形断面RC短柱の繰り返しせん断実験の結果を述べるとともに、柱の曲げ耐力および変形状についての解析的検討結果を述べる。

表-1 実験条件および実験結果

試験体名	補強に関する 構造条件	F <sub>c</sub> kg/cm <sup>2</sup>	軸 力		Q <sub>u</sub> <sup>+</sup> (ton)	Q <sub>u</sub> <sup>-</sup> (ton)
			N(ton)	N/A <sub>Fc</sub>		
CL-10-0.00Nc-T	鋼管補強	283	0	0	13.1	12.4
CL-10-0.35Nc-T	シャー・キー無し	258	22	0.35	18.6	18.6
CL-10-0.00Nc-TSK	鋼管補強	274	0	0	13.9	12.5
CL-10-0.35Nc-TSK	シャー・キー有り	263	22	0.35	18.8	19.7
CH-10-0.00Nc-T *	鋼管補強	438	0	0	15.1	14.7
CH-10-0.35Nc-T *	シャー・キー無し	433	37.7	0.35	24.4	25.4
CH-10-0.00Nc-TSK *	鋼管補強	390	0	0	15.3	14.6
CH-10-0.35Nc-TSK *	シャー・キー有り	364	31.1	0.35	23.2	24.1

- 注) 1) F<sub>c</sub>:コンクリートの圧縮強度  
 2) A:断面積 = πD<sup>2</sup>/4 (Dは鋼管の外径)  
 3) Q<sub>u</sub><sup>+</sup>, Q<sub>u</sub><sup>-</sup>:正加力時および負加力時の最大せん断力  
 4) 試験体名凡例: CL-10-0.35Nc-T  
     ① ② ③ ④  
     ①: Circular section, Lower strength concrete  
     ②: 主筋10-D13 ③: 0.35Nc=0.35A Fc=N ④: Tシリーズ  
 5) \*: 文献[1]に示した試験体

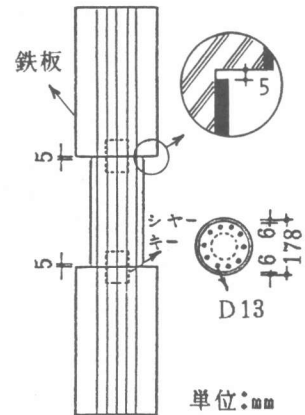


図-1 試験体の形状・寸法

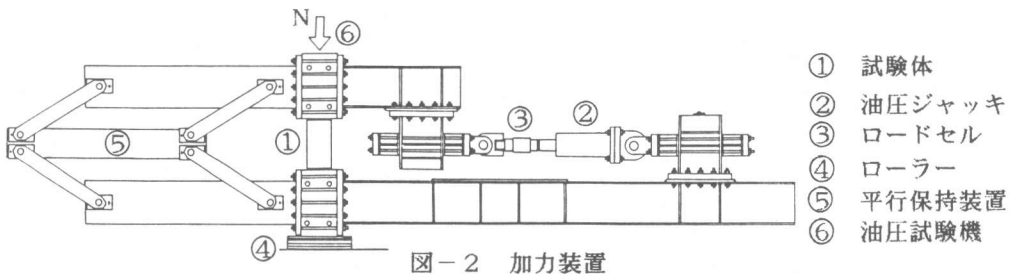


図-2 加力装置

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

試験体の一覧を表-1に示す。同表には文献[1]で述べた高強度コンクリート ( $F_c = 364 \sim 438 \text{ kg/cm}^2$ )を用いた試験体も示している。各試験体の補強に用いた円形鋼管の外径( $D = 178 \text{ mm}$ )と管厚( $t = 6 \text{ mm}$ )、せん断スパン比( $M/(QD) = 1$ )および主筋比( $P_g = 5.11\%$ )は同じである。主筋にはD13の太径鉄筋(実大の場合D38、D41程度の太径鉄筋に相当する)を用いた。主筋量は、施工が可能な範囲での最大主筋量であると考えている。今回の実験の実験変数は、軸力の大きさおよび材端におけるせん断補強法の違いである。軸力の大きさは軸力比 $N/(AF_c) = 0, 0.35$ の二種類で、柱頭・柱脚に直接せん断破壊を防ぐためのシャー・キー(外径75mm、厚さ3.2mm、長さ100mmの円形鋼管)を埋設したTSKシリーズとシャー・キーを有しないTシリーズに分けられる。これらの試験体と、文献[1]で述べたTSKおよびTシリーズの $N/(AF_c) = 0, 0.35$ の4体の試験体とは、コンクリート強度が違うだけである。試験体の形状・寸法を図-1に示す。

### 2.2 実験方法

図-2に示す加力装置を用いて、柱に逆対称変形を与えた。載荷プログラムは、変位振幅を部材角で $\pm 0.005 \text{ rad}$ ずつ $\pm 0.03 \text{ rad}$ まで増加させ、同一振幅で3サイクルずつ、計18サイクルの繰り返し載荷である。その後、 $\pm 0.06 \text{ rad}$ まで1サイクルの載荷を行った。

### 3. 実験結果

実験終了後鋼管を剥いで、充填したコンクリートのひび割れを観察した。その結果、今回のコンクリート強度が比較的低い場合でも、文献[1]で述べたコンクリート強度が高い場合と同様に、柱頭・柱脚に生じた曲げひび割れ以外にはひび割れは見られず、曲げ型の破壊性状を示していることが分かった。

図-3に各試験体のせん断力・部材角関係( $Q-R$ 関係)を示す。図中に実線および一点鎖

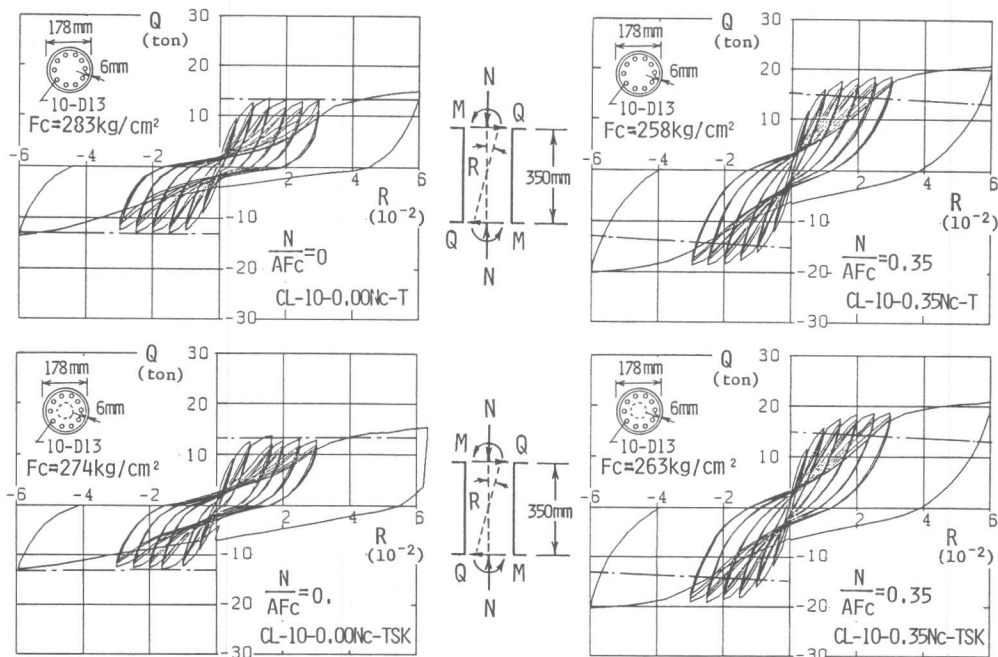


図-3 せん断力 $Q$ -部材角 $R$ 関係図

線で示す水平耐力理論線については、次節で述べる。図-3よりわかるように、文献[1]で述べた高強度コンクリートを用いた円形断面鋼管補強短柱の場合と同様に、強度が比較的低いコンクリートを用いた今回の各試験体も、エネルギー吸収性能のよい履歴曲線を示し、繰り返し载荷による耐力の低下はほとんど見られない。また、シャー・キーの有無による履歴性状の差はほとんどない。図-3に示している履歴ループの形状は、文献[1]に示した高強度コンクリートを用いた場合のそれに比べて若干細い。この原因の一つに鉄筋とコンクリートの間の付着性状の劣化が考えられるが、繰り返し付着性状に及ぼすコンクリート強度の影響に関する実験的研究や、それを考慮に入れた解析的研究によって今後それを明らかにする必要がある。

#### 4. 軸力と曲げを受ける円形断面鋼管補強RC柱の終局強度

図-3に実線および一点鎖線で示す水平耐力理論線は、それぞれ図-4に実線および一点鎖線で示すコンクリートの応力度・ひずみ度関係( $\sigma - \epsilon$ 関係)を用いて計算した曲げ終局強度にもとづく水平耐力理論線である。なお、鉄筋の $\sigma - \epsilon$ 関係としては、図-5に示す完全弾塑性モデルを用いる。図-4に一点鎖線で示す無拘束コンクリートの $\sigma - \epsilon$ 関係はACI規準で推奨されているストレスブロックに関するStüssiの定数を満足する $\sigma - \epsilon$ 関係である。鋼管の拘束によるコンクリートの圧縮強度と変形能力の上昇を考慮して決められた実線で示す拘束コンクリートの $\sigma - \epsilon$ 関係は、著者等が提案したもので[1]、高強度コンクリートを用いた円形断面鋼管補強RC柱の曲げ終局強度を精度よく算定できる $\sigma - \epsilon$ 関係である。これらの $\sigma - \epsilon$ 関係を用いて計算した今回の試験体の曲げ終局強度(平均コンクリート強度 $270\text{kg/cm}^2$ を用いた)と実験値の比較を図-6に示す。計算値は、柱頭・柱脚の鋼管で補強していない部分(鋼管に軸方向応力度が導入されないように設けた長さ5mmの部分)の断面(直径 $D' = D - 2t$ )にもとづいて計算した。実験値を表す点は、部材角振幅が $0.03\text{rad}$ における正加力時の最大水平耐力に対応する材端曲げモーメントを示している。材端曲げモーメントには軸力と水平変位による付加曲げモーメントも考慮している。図-6からわかるように、著者等の提案

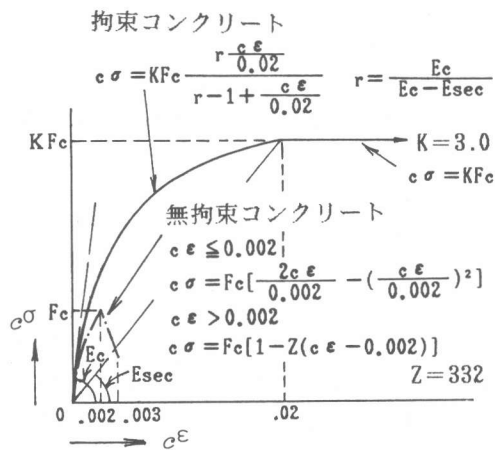


図-4 コンクリートの応力度・ひずみ度関係図

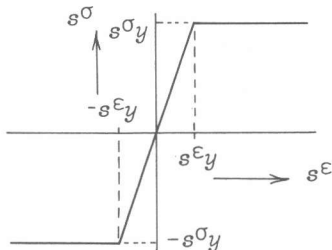


図-5 鉄筋の応力度・ひずみ度関係図

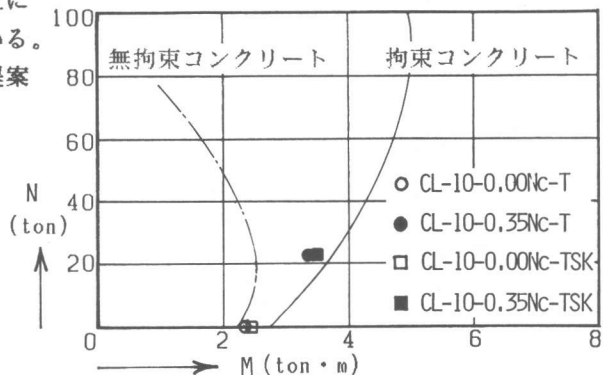


図-6 曲げ終局強度の解析結果と実験結果の比較

による計算値(実線)は、実験結果をやや大きめに評価するが鋼管の拘束によるRC柱の曲げ終局強度の上昇をよく示している。軸力比 $N/(AFe)=0.35$ の柱の軸力は、無拘束コンクリートの $\sigma-e$ 関係を仮定して計算した場合の最大曲げモーメント時の軸力に対応している。著者等の提案による計算値(実線)の妥当性については、今後さらに高軸力の範囲まで実験的に確認する必要があるが、これは今後の研究課題である。実験値が実線で示す計算値より若干小さくなった原因としては、次節で示すように鉄筋とコンクリートの間の付着性能が若干低下したためと思われる。主筋の付着すべりの終局強度に及ぼす影響については次節で解析的に検討する。

### 5. 円形断面鋼管補強RC短柱の変形状態に関する解析的検討

RC短柱が短くなってくると、曲げ変形以外にせん断変形や主筋とコンクリートの間の付着すべりに起因する変形の影響が顕著となり、変形を弾塑性域にわたり解析的に求めることが困難となってくる。しかしながら、鋼管で補強したRC短柱においては、前述の破壊性状から推察されるように、塑性域においては、せん断変形の影響が小さいと思われる。したがって、本節においては、柱の塑性域における変形状態に支配的な塑性ヒンジの弾塑性曲げ変形状態と主筋の付着すべりを考慮に入れた解析を行い、実験結果との比較検討を行う。RC短柱や柱・はり接合部における鉄筋の付着破壊の問題に関しては、市之瀬〔2〕、多田・武田〔3〕等の研究がある。前者は鉄筋の付着性状を考慮した剛性行列を用いた線材解析法である。後者は材端に一樣な曲率を生じるヒンジ領域および付着性状を取り入れた有限個の付着バネで剛なコンクリートと鉄筋を結合させた定着域を持つモデルを用いた解析法である。本論文においては、多田・武田のモデルを用い、それを鉄筋が多段配筋されている円形断面のRC柱の解析にも適用できるように、新たに解析法の定式化を行った。それを用いて、円形断面鋼管補強RC短柱について、主筋の付着性状を考慮に入れた解析を行った。

#### 5.1 解析仮定

次の解析仮定にもとづいて、単調載荷の場合の $Q-R$ 関係を解析的に求める。

- 1) 柱頭・柱脚近傍に柱せいの $1/3$ の長さを持つヒンジ領域を仮定し、残りの柱中央部分のコンクリートの曲げ変形は無視する(図-7参照)。
- 2) ヒンジ領域には柱端曲げモーメントに対応する曲率が一樣に分布する。ヒンジ領域のコンクリート断面のひずみ度は中立軸よりの距離に比例する。
- 3) ヒンジ領域内の鉄筋のひずみ度分布を一樣とする。また、柱中央部分の鉄筋と曲げ変形に関して剛体と仮定したコンクリートとの間の付着応力度分布は一樣とする。
- 4) 材料の諸構成則に関しては次の仮定を置く。i)コンクリートの引っ張り応力度は無視す

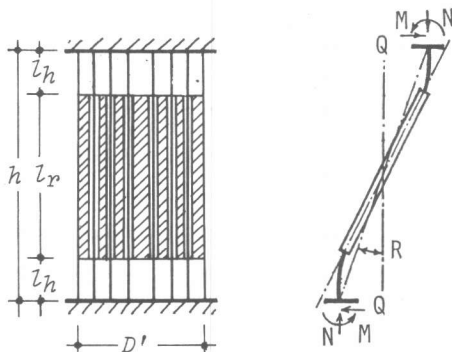


図-7 解析モデル

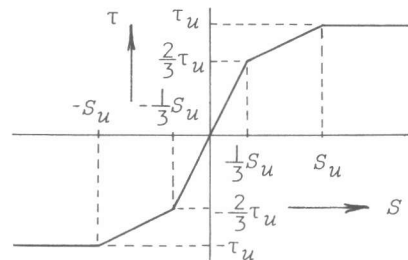


図-8 鉄筋とコンクリートの間の平均付着応力度・平均すべり量関係

る ii)コンクリートおよび鉄筋の $\sigma - \epsilon$ 関係は断面位置によらず同一とし、それぞれ図-4の実線および図-5に示した $\sigma - \epsilon$ 関係を仮定する iii)柱中央部分における鉄筋とコンクリートの間の付着応力度と平均すべり量関係( $\tau - S$ 関係)は、鉄筋の断面内における位置によらず図-8に示す $\tau - S$ 関係を仮定する。 $\tau - S$ 関係は、文献[2]に示された $\tau - S$ 関係と同じく最大付着応力度 $\tau_u$ に達するまではバイリニアールとし、それ以後は鋼管の拘束効果により付着応力度は低下せず $\tau_u$ を保持するものと仮定した。

- 5) 材端の曲げモーメントには、軸力と水平変位による付加曲げモーメントを考慮する。
- 6) せん断変形は弾性変形のみを考慮する。
- 7) 柱スタップ部分からの鉄筋の抜け出し、スタップ部分へのめり込みは無視する。

## 5.2 解析方法

部材角を $R$ とし、それに対応するヒンジ領域におけるコンクリート断面の圧縮縁から中立軸までの距離 $x_n$ の初期値を仮定する。鉄筋 $i$ (断面の重心から加力方向に関して同じ位置にある鉄筋の合計)の柱中央部分における平均すべり量を $S_i$ とすると、鉄筋 $i$ の柱頭・柱脚ヒンジ領域におけるひずみ度 $s^{\epsilon it}$ 、 $s^{\epsilon ib}$ は次式で与えられる。

$$s^{\epsilon it} = (s d_i + x_n - \frac{D'}{2})\rho + \frac{S_i}{l_h}, \quad s^{\epsilon ib} = (-s d_i + x_n - \frac{D'}{2})\rho + \frac{S_i}{l_h} \quad (1)$$

ここで、 $s d_i$ : 断面重心位置より鉄筋 $i$ の重心までの距離  $D'$ : コンクリート断面の直径、 $D' = D - 2t$   $\rho$ : 柱端ヒンジ領域の曲率、 $\rho = Rh / [(h - l_h)l_h]$   $h$ 、 $l_h$ : 柱のうちり高さおよびヒンジ領域の長さ(図-7参照)。

鉄筋 $i$ の平均すべり量 $S_i$ は、次の(2)式で表す鉄筋 $i$ に関する軸方向のつりあい条件が満足されるまで、繰り返し計算によって定められる。

$$s a_i (s^{\sigma it} - s^{\sigma ib}) - s \phi_i l_p \tau_i = 0 \quad (2)$$

ここで、 $s^{\sigma it}$ 、 $s^{\sigma ib}$ : (1)式で表される $s^{\epsilon it}$ 、 $s^{\epsilon ib}$ を鉄筋の $\sigma - \epsilon$ 関係に代入して求めた鉄筋 $i$ の柱頭・柱脚のヒンジ領域における応力度  $\tau_i$ :  $S_i$ を鉄筋とコンクリートの間の $\tau - S$ 関係に代入して求めた鉄筋 $i$ の平均付着応力度  $s a_i$ 、 $s \phi_i$ : 鉄筋 $i$ の断面積および周長  $l_p$ : 柱中央剛体部分の長さ、 $l_p = h - 2l_h$  (図-7参照)。

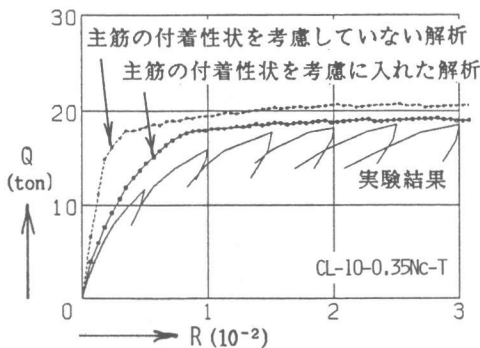
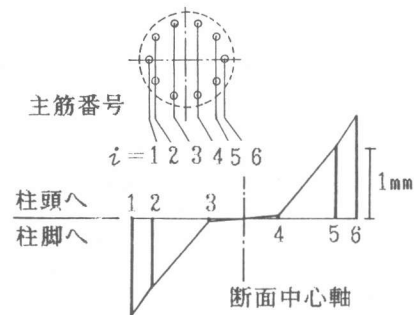
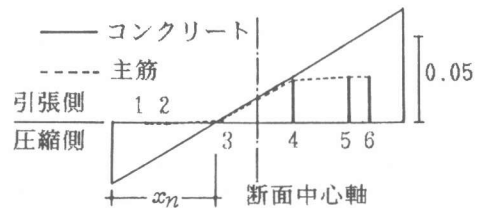


図-9 Q-R関係の包絡線の解析結果と実験結果の比較



(a) 主筋のすべり量



(a) コンクリートと主筋のひずみ度分布  
図-10 主筋のすべり量および柱頭ヒンジ領域におけるコンクリートと主筋のひずみ度分布 ( $R = 0.03 \text{ rad}$ )

最後に、ヒンジ領域の断面における軸力に関する釣り合い条件が満足されるように、繰り返し計算により  $\alpha_n$  の値を定めて、柱端部の曲げモーメントおよびせん断力を計算する。

### 5.3 Q-R関係の解析結果および主筋の付着すべり挙動

解析例として、前述の試験体CL-10-0.35Ne-Tについて解析した単調載荷の場合のQ-R関係と実験で得られた履歴曲線の正加力側の包絡線を図-9に示す。解析においては、図-8に示す $\sigma$ -S関係の最大付着応力度 $\tau_u$ として、実験で加力方向に沿う一番外側の二本の主筋について測定した材軸方向ひずみ度より求めた平均付着応力度の最大値 $60\text{kg/cm}^2$ を用いた。 $\tau_u$ に対応するすべり量 $S_u$ は、文献[4]の角形鋼管で被覆補強されたコンクリートと異形鉄筋の間の付着性状に関する実験で得られた断面のコーナーにある鉄筋の $\sigma$ -S関係を参照して $0.5\text{mm}$ とした。なお、図-9には、主筋の付着すべりが無いとした場合の解析結果として、前述の(1)式において、 $S_i$ を零と置いて求めたQ-R関係の解析結果も示している。図-9よりわかるように、鉄筋の付着性状を考慮に入れたQ-R関係の解析結果は、実験結果のそれをよく説明している。

図-9に示した主筋の付着性状を考慮に入れた解析結果の部材角 $R=0.03\text{rad}$ における各主筋の柱中央部分におけるすべり量、および柱頭ヒンジ領域における断面内のコンクリートと主筋のひずみ度分布を、図-10(a)および(b)に示す。図-10よりわかるように、主筋の付着すべりの発生によって、主筋のひずみ度は緩和され、中立軸よりの距離に比例しなくなる。その結果、主筋の応力が減少し、柱端部の曲げモーメントは、主筋の付着すべりが無いとした場合のそれより低下することになる。

## 6. 結論

- 1) 強度が比較的低いコンクリートを用いた円形断面鋼管補強RC短柱の場合でも、円形鋼管で横補強することにより、文献[1]で述べた高強度コンクリートを用いた場合と同じように、せん断破壊を防止でき、大きい耐力および優れた靱性とエネルギー吸収性能が期待できる。
- 2) 多田・武田によって提案された鉄筋の付着すべりを考慮に入れた柱解析モデルを、主筋が多段に配筋された円形断面にも適用できるような解析法を示した。また、その解析法を用いて得られた円形断面鋼管補強RC短柱の単調載荷の場合のせん断力と部材角関係の解析結果は繰り返し実験結果の包絡線とよく一致することがわかった。

[謝辞] 実験にあたって、九州大学文部技官藤原文夫、川口晃、久島昭久諸氏ならびに九州大学学生奥田晃嘉、萩尾浩也両氏の協力を得た。ここに深く感謝します。本研究は文部省科学研究補助金・総合研究(A)(課題番号60302071)により行われた。

### [参考文献]

- [1] 肖 岩、富井政英、崎野健治：円形断面鉄筋コンクリート短柱のせん断破壊を鋼管補強により防止する設計法に関する実験的研究、第8回コンクリート工学年次講演会論文集、pp.517-520、1986。
- [2] 市之瀬敏勝：付着すべりを考慮した鉄筋コンクリート骨組の非線形解析法、日本建築学会論文報告集、第328号、pp.26-35、昭和58年6月。
- [3] 多田利正・武田寿一：鉄筋コンクリート部材における付着劣化過程の解析的研究、(その1)解析モデル、解析手法、解析例、日本建築学会論文報告集、第351号、pp.22-30、昭和60年5月。
- [4] 森下陽一・富井政英・崎野健治：鋼管で被覆補強されたコンクリートと異形鉄筋の間の付着性状、コンクリート工学年次論文報告集、1987。