

論文

[2065] RC円形柱のせん断及び主筋の付着特性に関する実験研究

正会員 鈴木計夫 (大阪大学工学部 )  
 正会員 中塚 信 (大阪大学工学部 )  
 正会員 ○中田浩之 (奥村組建築設計部)  
 山中昌一 (大阪大学大学院 )

1. まえがき

円形スパイラル筋を有する円形柱の曲げモーメントに対する耐力・変形挙動は、実験的、解析的に既に明らかにされてきている[1]。しかし、この種の円形柱のせん断力に対する挙動は、せん断破壊または付着破壊に関する実験データが少なく、まだ十分に明らかでないため、そのせん断および主筋の付着設計は、円形断面を等価な矩形断面に置換して、矩形断面についての設計式を便宜的に用いて行われているのが現状である[2]。

本研究は、RC円形柱のせん断・付着設計法の確立のための基礎資料を得ることを目的として、円形スパイラル筋または円形鋼管により横補強されたシアスパン比の異なるRC円形柱の一方向単調載荷実験及び正負交番繰返し載荷実験を行い、同柱のせん断破壊性状ならびに付着破壊性状を調べると共に、円形断面柱としてのせん断終局強度算定式、付着強度算定式について検討したものである。

2. 実験概要

図-1に試験体の形状及び配筋を示す。試験体は、12本の柱主筋を断面に均等に配した直径が25cmの円形スパイラル筋補強柱または直径が21.6cmの円形鋼管横補強柱(かぶりなし)で、その上下端に梁型スタブを有するI型のものである。表-1に試験体一覧を示す。本研究で採り上げた主な実験要因は、横補強筋の種類(円形スパイラル筋、円形鋼管)とその補強筋比、シアスパン比、軸力比及び載荷履歴である。各試験体のpw値は、円形スパイラル筋補強柱では0.4%、0.8%及び1.5%の3種の中から、円形鋼管横補強柱では2.3%及び3.2%を採用した。なお、鋼管とコンクリートの界面には特に処理を施していない。

シアスパン比としては、 $a/D = 1.1, 1.6$ の2種(但し円形鋼管横補強柱では $a/D = 1.3$ )を、軸力比 $N/(A \cdot \sigma_c)$ としては円形スパイラル筋補強柱では0.1、円形鋼管横補強柱では0.6を採用した。試験体の製作には、実験時での力

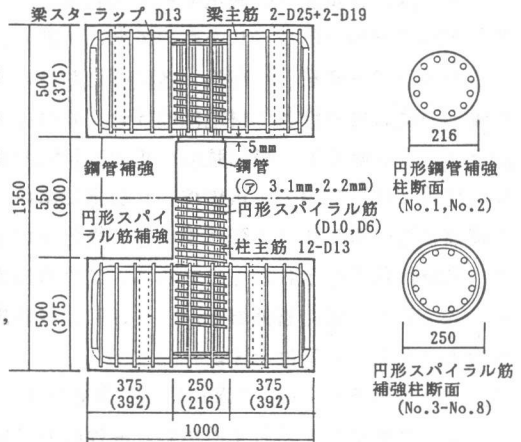


図-1 試験体形状・配筋

表-1 試験体一覧

試験体	実験要因				実験結果
	載荷履歴	クリアスパン (a/D)	横補強筋 (pw[%])	柱軸力 [ton]	最大耐力 [ton]
NO. 1 NO. 2	単調	55cm (1.3)	鋼管 (φ)2.2mm	96(0.6A・σ <sub>c</sub> )	43.4
			鋼管 (φ)3.1mm		50.3
NO. 3	単調	55cm (1.1)	D10 @43 (1.5)	24(0.1A・σ <sub>c</sub> )	39.7
D6 @72 (0.4)			20.5		
NO. 5		80cm (1.6)	D6 @36 (0.8)		27.9
NO. 6			D10 @43 (1.5)		30.2
NO. 7			繰返し		29.4
NO. 8					

a: クリアスパン D: 円形柱の直径 pw = 2aw / (S・D') D' = √π/2・D  
 aw: 一本の横補強筋断面積 S: 横補強筋の間隔 A: 柱断面積  
 σ<sub>c</sub>: コンクリート圧縮強度

学的性質が表-2に示すような、粗骨材最大粒径が10mmのレデーミクストコンクリートを使用した。表-3に使用した鉄筋及び鋼管の力学的性質を示す。なお柱主筋は、試験体をせん断または付着破壊させるため、焼き入れして強度を高めている。

表-2 コンクリートの力学的性質

試験体	$\sigma_b$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_r$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$E_c$ [ $\times 10^5$ kg/cm <sup>2</sup> ]
NO.1, NO.2	437	32.9	3.09
NO.3	481	34.2	3.50
NO.5-NO.8	489	31.6	3.30

表-3 鉄筋・鋼管の力学的性質

鉄筋 又は 鋼管	径 又は 厚さ	$\sigma_y$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$E_s$ [ $\times 10^5$ kg/cm <sup>2</sup> ]
柱主筋	D13	8500 <sup>*1)</sup>	1.79
	D10	5620 <sup>*1)</sup>	1.88
スパイラル筋	D6	5630 <sup>*1)</sup>	1.84
	3.1mm	3140 <sup>*2)</sup>	2.18
鋼管	2.2mm	2390 <sup>*2)</sup>	1.81

\*1) 0.2%オフセット歪時の応力  
\*2) 鋼管の降伏強度は鋼管成形前の平板(周方向)の値である。

載荷は図-2に示す様な建研式加力装置を用いて行った。即ち、平行移動装置を介して反力壁に水平に固定して一定の軸力を加えた状態(軸力用ジャッキの油圧は手動制御)の試験体に、L型加力フレームを通して100t複動ジャッキにより水平せん断力を作用させた。載荷履歴は一方向単調載荷または正負交番繰返し載荷(部材角R=1/200, 1/100, 1/50及び1/25で各5回)とした。柱部分の相対水平変位、軸方向伸縮量は、上下梁スタブ部分で固定された測定フレームを介して変位変換器により、また柱主筋及び横補強筋の歪はワイヤストレーンゲージにより測定した。なお、柱端部(約1D区間)の変形測定は文献[1]に示す方法で行った。

### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 破壊モードの判別

図-3は、各試験体の破壊モードの判別に必要な実験結果の一例を示したものである。即ち、水平荷重(Q)-変形( $\delta$ )関係、各区間における付着応力度の推移性状(材端部曲げせん断ひび割れゾーンを除く)、横補強筋分担力 $Q_w$ [注1]の推移性状(図-3中の一点鎖線は、算定に用いた横補強筋の歪がすべて降伏歪に達したときの値 $Q_{wy}$ を示す)、最終ひび割れ状況及び最大耐力時の主筋降伏状況を示したものである。これらの実験結果から各試験体の破壊モードを、曲げ破壊モード(F)、せん断破壊モード(S)、付着破壊モード(B)の3種に判別した。各破壊モードの主な特徴を以下に示す。

- (1) 曲げ破壊モード(No.2, No.7): 引張主筋は2段目または3段目まで降伏し、圧縮主筋も降伏する。コンファインド効果を考慮した曲げ耐力計算値[注2]を上回る耐力を有する。付着応力は、試験体の荷重-変形関係での最大耐力以降においても耐力下降性状から予測される以上の著しい低下性状を示さない。 $Q_w$ は $Q_{wy}$ に達せず、横補強筋の降伏の程度も比較的小さい。大変形域になると、圧縮側では主筋の座屈(No.2)、引張側では主筋の破断(No.7)が生じ、材端部に破壊が集中する。
- (2) せん断破壊モード(No.1, No.5): 主筋は降伏せず、最大耐力は、コンファインド効果を考慮した曲げ耐力計算値を下回る。最大耐力時における $Q_w$ はほぼ $Q_{wy}$ に達し、横補強筋の降伏が著しい。なおNo.1試験体は、主筋が降伏して曲げ降伏が先行したが、最大耐力時に $Q_w$ はほぼ $Q_{wy}$ に達し、試験体の荷重-変形関係はそれ以降著しい低下性状を示したことからせん断破壊モードと判別した。

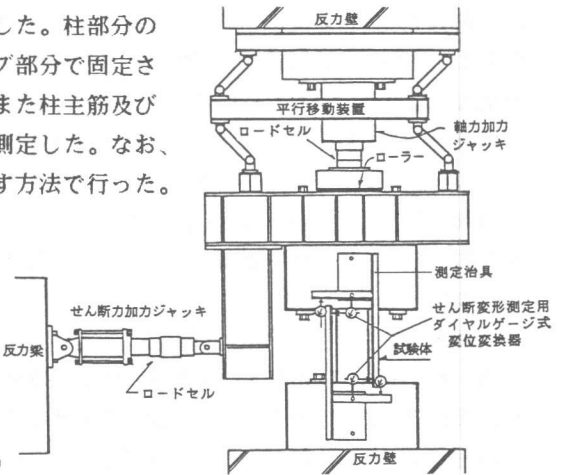


図-2 載荷・測定装置

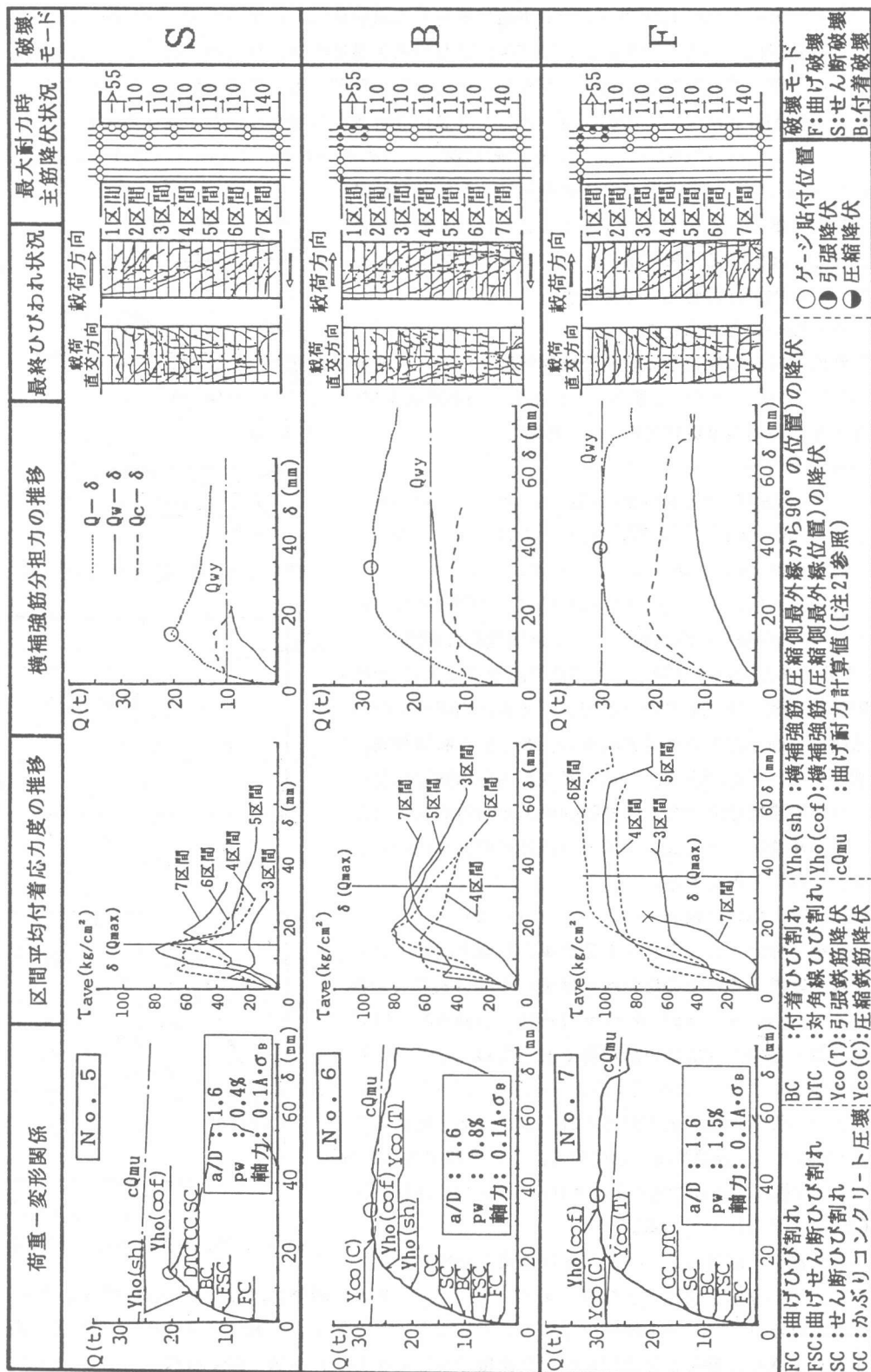
[注1]  $Q_w$ は、横補強筋張力の載荷方向成分を合計した横補強筋の分担せん断力を表す。横補強筋張力は、柱の材端部の圧縮最外縁位置から斜め45°方向の位置で横補強筋に貼付したワイヤストレーンゲージの歪測定値から求めている。  
[注2] 曲げ耐力計算値 $Q_{mu}$ には、右記のコンファインドコンクリートの応力-歪関係[3]ならびにかぶりコンクリートを無視した断面を用いて断面分割法によって計算した値を採用している。なお、鋼管補強柱については、 $S=1, ps=2 \cdot t/D$  ( $t$ : 厚さ,  $D$ : 外径)として同式を適用した。

$$E_c f_c / F_o = 1 + 4.41 (ps \cdot \sigma_y / F_o) (1 - 1.24 \cdot S/D)$$

$$e \text{ oc} f_c / e \text{ oc} = 1 + (100 / F_o)^2 \cdot ps \cdot \sigma_y (1 - 1.10 \cdot S/D)$$

$$E_c f_c / E_o = 1 - \{1 - 1 / ((163 / F_o)^2 \cdot ps \cdot \sigma_y + 1)\} (1 - (S/20)^2)$$

(各記号については文献[3]参照)



FC: 曲げひび割れ  
 FSC: せん断ひび割れ  
 SC: せん断ひび割れ  
 CC: かぶりコンクリート圧壊  
 BC: 付着ひび割れ  
 DTC: 対角線ひび割れ  
 Yho(C): 引張鉄筋降伏  
 Yho(sh): 横補強筋(圧縮側最外縁から90°の位置)の降伏  
 Yho(cof): 横補強筋(圧縮側最外縁位置)の降伏  
 Yco(T): 引張鉄筋降伏  
 cQmu: 曲げ耐力計算値(注2)参照

破壊モード  
 ○: ゲージ貼付位置  
 ●: 引張降伏  
 ●: 圧縮降伏

図-3 実験結果の一例

(3) 付着破壊モード(No.3, No.6, No.8)：本破壊モードの試験体は、いずれも曲げ降伏後に付着破壊し、その特徴は次のようである。各測定区間における付着応力は、せん断力の増大と共に増加するが、端部曲げせん断ひび割れゾーンを除くほぼ全ての区間において最大耐力時以前に低下し始める。ひび割れ状況は、1段筋位置のみならず2段筋位置の付着ひび割れの進展も著しい(No.6, No.8)。なお、曲げ破壊モードおよびせん断破壊モードの場合でも、せん断ひび割れ、斜張力ひび割れの発生に伴って各測定区間での付着応力が試験体の最大耐力以前に低下する現象が生ずるが、これはせん断力伝達機構の変化に起因する現象であって、付着破壊ではない。

### 3.2 RC円形柱のせん断終局強度

#### (1) せん断終局強度算定式

角形断面部材を対象とするせん断終局強度算定式(A法)[2]を以下に示す(a)~(c)に基づいて修正し、円形断面部材に対するせん断終局強度算定式(1)式を誘導した。

$$cQu = \pi/4 \cdot p_{wc} \cdot \sigma_{wy} \cdot D \cdot j_t \cdot \cot \phi + \tan \theta / 2 \cdot (1 - c\beta) \cdot \pi/4 \cdot D^2 \cdot \nu \cdot \sigma_E \quad \dots(1)$$

$$\text{ここに、} \tan \theta = \sqrt{\{(L/D)^2 + 1\}} - L/D \quad \dots(2)$$

$$c\beta = \{(1 + \cot^2 \phi) \cdot p_{wc} \cdot \sigma_{wy}\} / (\nu \cdot \sigma_E)$$

$$p_{wc} = 2a_w / (S \cdot D) \quad j_t = D - 2dt \quad D: \text{円形柱の直径}$$

$a_w$ : 一本の横補強筋断面積  $S$ : 横補強筋の間隔

$dt$ : 主筋芯までのかぶり厚さ(その他の記号は文献[2]参照)

(a) 円形横補強筋は、その形状が円形であるため図-4(a)における横補強筋分担力の載荷方向成分、即ちせん断補強効果が低減される。その割合は、一辺の長さが円形補強筋の巻径と等しい矩形横補強筋のせん断補強効果の $\pi/4$ 倍である[4]。(b) トラス機構におけるコンクリート圧縮束の応力 $\sigma_{tc}$ は下式で与えられると仮定する。

$$\sigma_{tc} = p_{wc} \cdot \sigma_{wy} \cdot (1 + \cot^2 \phi) \quad \dots(3)$$

トラス機構におけるコンクリート圧縮束の断面を図-4(b)に示す楕円と考えるとその応力 $\sigma_{tc}$ は正しくは下式で表せる。

$$\sigma_{tc} = \pi \cdot p_{wc} \cdot \sigma_{wy} \cdot \cot^2 \phi / (\pi - 2\phi + 0.5 \sin 4\phi) \quad \dots(3)'$$

しかしながら(3)'式は扱いが煩雑であるため、ここでは安全側を考慮して $\sigma_{tc} / \sigma_{tr} = \sqrt{(\pi)}/2$ (一定値、図-5中一点鎖線、 $\sigma_{tr}$ : 等断面積の正方形柱のコンクリート圧縮束応力)とし(3)式のように表記することにする。この意味するところは、 $\cot \phi$ の増加とともに低下する $\sigma_{tc} / \sigma_{tr}$ を $\cot \phi = 1$ の時の値 $\sqrt{(\pi)}/2$ にすることである。

(c) アーチ機構におけるコンクリート圧縮束の角度 $\theta$ を(2)式

で与える。この理由を図-6より説明する。なお図-6では、縦軸には $Q_a$ を柱断面積 $A$ とアーチ機構におけるコンクリート圧縮束応力 $\sigma_a$ で無次元化した値を、横軸には $\tan 2\theta$ に $L/D$ を乗じたものをとり、さらに参考までに円形柱と断面積の等しい正方形柱の値(図中破線)も示している。

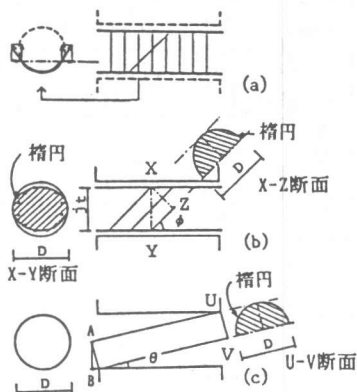


図-4 (1)式誘導過程での考え方

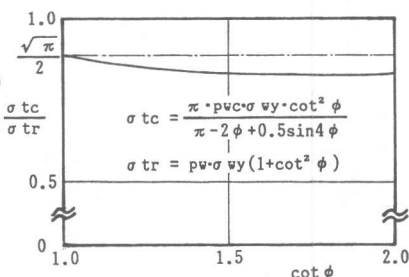


図-5  $\sigma_{tc} / \sigma_{tr}$ - $\cot \phi$ 関係

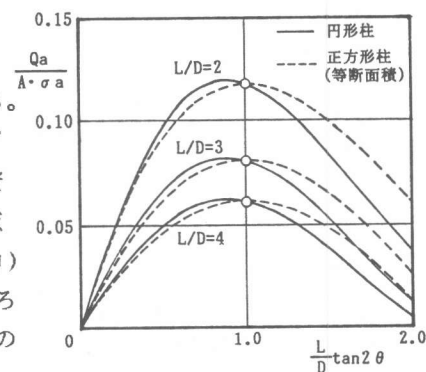


図-6  $Q_a / (A \cdot \sigma_a)$ - $L/D \cdot \tan 2\theta$ 関係

円形柱のアーチ機構におけるコンクリート圧縮束の断面を図-4(c)に示す楕円で与えると、アーチ機構の負担せん断力 $Q_a$ はアーチ角度 $\theta$ に応じて図-6中の実線で示すように変化し、 $L/D \cdot \tan 2\theta$ が1より小さい時に $Q_a$ の最大値をとる。しかしその最大値は $L/D \cdot \tan 2\theta$ が1の時の値と大差がないので計算の簡略化のため $L/D \cdot \tan 2\theta$ が1の時の $\theta$ 値を用いる。

### (2) 実験値との比較

誘導した円形柱のせん断終局強度算定式(1)式及び断面積の等しい正方形柱に置換しその $p_w$ 値を $\sqrt{\pi}/2$ 倍して適用する角形断面のA法式((4)式[注3])の適合性を、既往の円形柱の実験値[5]~[9]ならびに本実験値を用いて比較、検討した結果を図-7に示す。同図では、誘導した(1)式及び(4)式による計算値と実験値を曲げ耐力計算値([注2]参照) $cQ_{mu}$ で除した値( $cQ_u/cQ_{mu}$ ,  $eQ/cQ_{mu}$ )で表している。また同図中には、せん断耐力実験値 $eQ$ の各せん断終局強度計算値 $cQ_u$ に対する比( $eQ/cQ_u$ )の平均値ならびに変動係数を示している[注4]。図-7によれば、(1)式は(4)式に比べ平均値で7%程度精度が向上し、また変動係数も小さくなっており、誘導した(1)式は円形柱のせん断終局強度算定式として有用であると考えられる。図-7に円形鋼管で横補強されたNo.1, No.2試験体の実験値(図中左側(\*)印)を併記しているが、実験値は計算値を60%以上も上回り適合性は良くない。しかし(1)式において、コンクリート強度有効係数 $\nu$ を1とし、コンクリート強度 $\sigma_c$ にコンファインド効果を考慮した強度([注2]参照)を用いた計算結果(右側(\*)印)は実験値を良好に推定している。これは円形鋼管横補強柱のせん断終局強度の推定法に対する興味ある一つの結果である。

### 3.3 円形柱の主筋の付着強度

#### (1) 付着強度算定式

文献[2]に示された角形断面部材の主筋に対する付着強度算定式の考え方と以下の(a), (b)の仮定に基づいて、円形柱の主筋の付着強度算定式(5)式を導いた。

$$\tau_{bu} = \tau_{co} + \tau_{st} \quad \dots(5)$$

$$\tau_{co} = (0.4 b_{ic} + 0.5) \sqrt{\sigma_c} \quad \dots(6)$$

$$b_{ic} = \min(b_i) \quad \dots(7)$$

$$b_i = (L_i - i \cdot db) / (i \cdot db) \quad \dots(7)'$$

$L_i$ : 柱断面における割裂面全長(主筋径を含む)

$i$ : 割裂面を横切る主筋本数( $2 \leq i \leq N_g/2$ )  $db$ : 主筋径

$$\tau_{st} = 5(1 + 2\pi/N_g) \cdot 2a_w/S \cdot \sqrt{\sigma_c} / db \quad \dots(8)$$

$N_g$ : 全主筋本数( $\geq 8$ ) (その他の記号は文献[2]参照)

(a)  $b_i$  算定時において、引張側各主筋に対する割裂面を図-8のように仮定する。

(b) 円形横補強筋の効果は(8)式で与える。これは次の考え方による。即ち、円形横補強筋の付着強度への効果の大きさが、

[注3]  $cQ_u = p_w' \cdot \sigma_w \cdot D' \cdot j_t' \cdot \cot \phi + \tan \theta / 2 \cdot (1 - \beta) D'^2 \cdot \nu \cdot \sigma_c \dots(4)$

$p_w' = \sqrt{\pi} / 2 \cdot 2a_w / (S \cdot D')$   $D' = \sqrt{\pi} / 2 \cdot D$   $j_t' = D' - 2dt$

$D$ : 円形柱の直径  $a_w$ : 一本の横補強筋断面積

$dt$ : 主筋芯までのかぶり厚さ (その他の記号は文献[2]参照)

[注4] 検証用実験データの収集に際し、せん断耐力時までの各材角における繰り返し載荷回数が各3回以上の試験体、及び $p_w = 0$ である試験体のデータは除外した。また、統計特性値算出の際には、 $cQ_u/cQ_{mu} > 1.0$  (曲げ破壊領域)である試験体のデータは除外した。

実験データの変数範囲	
変数	データ範囲
$\sigma_B$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	196~560
$\sigma_y$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	3700~9840
$\sigma_{wy}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	3200~14900
$p_g$ [%]	2.54~5.08
$p_w$ [%]	0.2~1.8
$N/(A \cdot \sigma_B)$	0~0.6
$L/D$	2.1~4.2
$A$ [cm <sup>2</sup> ]	491~627

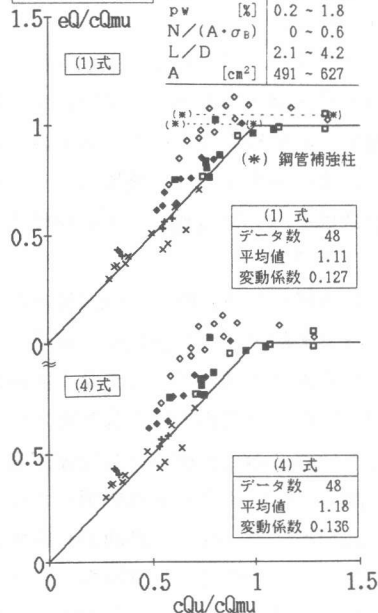


図-7 (1)式,(4)式の検証結果

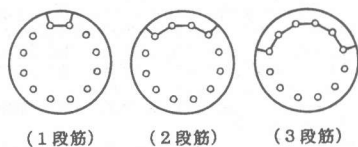


図-8 円形柱主筋の想定割裂面

角形横補強筋の全割裂の場合における隅角部主筋(図-9中A主筋)に対する効果( $K=1.0$ )と直接横補強筋のかかっていない主筋(図-9中B主筋)に対する効果( $K=0.5$ )の間にあるとし、ここではその大きさ( $K_c$ )を便宜的にリングテンションによる主筋1本当りの横拘束力( $P$ )の1次関数で与える。

(2) 実験値との比較

図-10は、(5)式による付着強度計算値 $\tau_{bu}$ と、本実験において付着破壊モードとなった各試験体の、端部曲げせん断ひび割れゾーンを除いた区間における1, 2段目主筋の平均付着応力度の最大値 $\tau_{av}$ をコンクリート強度の平方根 $\sqrt{\sigma_c}$ で除して比較したものである。同図によれば、(5)式による計算値は、繰返し載荷試験体を除き、 $\tau_{av}$ のほぼ下限値を与える。

4 まとめ

本研究より得られた主な結果を以下にまとめる。

(1) 各試験体の主筋降伏状況、付着応力の推移、横補強筋分担力の推移等のデータをもとに、本実験における円形柱の破壊モードを、曲げ破壊モード、せん断破壊モード、付着破壊モードに判別し、各破壊性状の特徴を示した。(図-3参照)

(2) 円形柱のせん断終局強度算定式を導いた。同式の適合性を本実験データ及び既往の実験データを用いて検討し、同式の適合性は円形柱断面を等価な正方形断面に置換して求めたせん断終局強度算定式よりも優れていることを示した。(図-7参照)

(3) 円形柱の主筋の付着強度算定式を誘導し、同式が本実験で付着破壊した円形柱の主筋の平均付着応力度の最大値に対しほぼ下限値を与えることを示した。(図-10参照)

謝辞 SD50鉄筋を御提供頂いた住友金属工業(株)ならびに焼き入れ高強度鉄筋を御提供頂いた高周波熱練(株)に深謝致します。また、本報告での実験、DATA整理等に多大な労を煩わした大阪大学大学院生・上寛樹君、同大学研究生・文雪峰君、同大学卒論生・中村昇君、ならびに実験計画全般にわたり貴重な御助言を頂いた(株)奥村組・安藤邦彦氏に謝意を表します。

<参考文献>

- [1] 鈴木計夫、中塚浩、中田浩之、山中昌一：高強度コンクリート・高強度横補強筋を用いたRC柱部材の荷重-変形特性、コンクリート工学年次論文報告集、第11巻、第2号、1989、PP.455-460
- [2] 日本建築学会：鉄筋コンクリート建築物の終局強度型耐震設計指針(案)・同解説、1988、PP.112-154
- [3] 鈴木計夫、中塚浩、吉田晴彦：円形横補強筋を用いたコンファインドコンクリートの強度及び変形特性、材料、1985、1
- [4] 渡辺史夫、六車照、西山峰広：曲げとせん断を受けるPCパイルの耐力評価に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、第9巻、第2号、1987、
- [5] 鈴木計夫、中塚浩、中田浩之、白沢吉衛：SD50材の円形スパイラル筋を用いたRC円形柱のせん断耐力・変形特性、コンクリート工学年次論文報告集、第10巻、第3号、1988、PP.601-606
- [6] 荒川卓、賀明玄、荒井康幸、溝口光男：らせん鉄筋補強コンクリート柱の終局せん断強度について、コンクリート工学年次論文報告集、第9巻、第2号、1987、PP.299-304
- [7] 荒川卓、賀明玄、荒井康幸、溝口光男：らせん鉄筋柱のせん断抵抗性状について、コンクリート工学年次論文報告集、第10巻、第3号、1988
- [8] 黒正清治、林静雄他：鉄筋コンクリート円形断面部材のせん断強度と変形性状に関する実験研究、日本建築学会関東支部研究報告集、1979
- [9] 黒正清治、林静雄他：曲げ及びせん断を受ける鉄筋コンクリート円形断面柱のせん断強度と変形性状に関する実験研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、1982

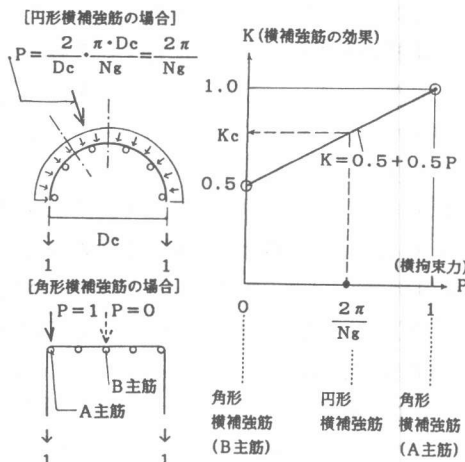


図-9 円形横補強筋の効果

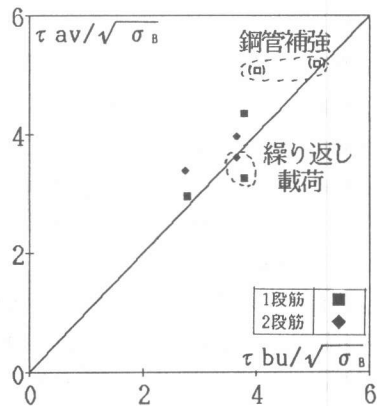


図-10  $\tau_{av}/\sqrt{\sigma_c}-\tau_{bu}/\sqrt{\sigma_c}$ 関係