

## 論文 SRC 造柱梁接合部における梁主筋の手前定着性状

田畑 卓<sup>\*1</sup>・西原 寛<sup>\*2</sup>

**要旨:**鉄骨鉄筋コンクリート造内柱梁接合部での配筋の煩雑さを解消する一手法として、梁主筋を柱せい中央よりも手前で定着する方法が考えられる。本論ではその可能性を探るため、柱側への折り曲げ定着およびプレート定着により手前定着した梁主筋の定着性能について実験した。実験より、定着耐力は両定着形式で帯筋比および柱圧縮軸力とともに上昇したが、既往のRC造を対象とした実験結果に比してその影響は希薄であった。プレート定着の定着耐力は折曲げ定着より高くなる傾向を示した。また、実験結果から簡易な定着耐力式を誘導した。

**キーワード:**手前定着, 鉄骨鉄筋コンクリート造, 柱梁接合部, 折り曲げ定着, プレート定着

## 1. はじめに

鉄骨鉄筋コンクリート(SRC)造の内柱梁接合部では、一般に梁主筋を上端、下端とも通し配筋とするが、このとき梁主筋を柱鉄骨ウェブまたは柱せい中央より手前で定着することができれば、接合部内の配筋の取り合いが簡略化され、また柱鉄骨ウェブに梁主筋貫通孔を設ける必要がなくなるなど、施工上合理的であると考えられる。

梁主筋の定着力は、定着長さが十分であれば定着部で接合部圧縮束と釣り合いを保てるが、手前定着ではこの点で柱梁接合部内への応力伝達が困難であり、定着性能が大きく低下する。既往の研究<sup>1),2)</sup>ではこの改善策として、梁主筋の引張り力を帯筋により柱背面まで伝達する方法を提案し、梁主筋の降伏引張り力に相当する帯筋を定着部近傍に配せば梁の曲げ降伏耐力が発揮されることを示唆している。これらの研究は鉄筋コンクリート(RC)構造物を対象としているが、SRC 構造物では一般に RC 造の場合に比べ梁主筋本数が少なく、先の応力伝達機構を形成し易い、また梁主筋引張り力の柱背面への伝達が帯筋のほか梁材軸方向の柱鉄骨ウェブにも期待できるなど定着条件の向上が予想される。

本論では SRC 造内柱梁接合部内で折り曲げ定

着およびプレート定着により手前定着された梁主筋を対象に、定着強度に及ぼす帯筋比および柱軸力の影響について検討した。

## 2. 試験体および実験方法

## 2.1 試験体

表1に試験体一覧を、図1に試験体の形状および配筋例を示す。試験体は梁主筋が手前定着された SRC 造の十字型柱梁接合部である。梁主筋の定着は正加力時引張り側に折り曲げ定着、負加力時引張り側にプレート定着を採用し、1 体で 2 実験行えるよう計画した。折り曲げ定着筋は 2-D16、プレート定着筋は 2-D19 で、梁主筋の降伏以前に定着破壊するよう高強度鉄筋の SD685 を用いた。折り曲げ定着は柱側への折り曲げであり、水平投影定着長  $L_{ah}$  および余長を  $160\text{mm}(=10d_b, d_b\text{:主筋径})$ 、曲げ内法半径  $r$  を  $48\text{mm}(=3d_b)$  とした。柱側へ折り曲げたのは、できるだけ定着長さを長くするため、接合部側への折り曲げの場合に接合部のダイアフラムによる制約があることを考慮している。プレート定着は定着長さ  $L_d=171\text{mm}(=9d_b)$  とした。定着金物は文献<sup>3)</sup>を参考に支圧面積の大きさによる定着強度への影響がなくなるよう(支圧面積)/(鉄筋断面積) $=4.0$  の角形ナットを製作し、これを端部ネ

\*1 安藤建設(株)技術研究所 (正会員)

\*2 安藤建設(株)技術研究所 室長 (正会員)

表1 試験体および実験結果一覧

| 試験体    | 帯筋         |           | 柱軸<br>応力度 <sup>*1</sup><br>( $\times F_c$ ) | 加力     | 最大耐力時        |                | 定着耐力 <sup>*2</sup> (kN) |             | bTbu<br>上端筋<br>tTbu | 定着耐力<br>計算値 <sup>*3</sup><br>cTbu (kN) | tTbu<br>下端筋<br>bTbu |
|--------|------------|-----------|---------------------------------------------|--------|--------------|----------------|-------------------------|-------------|---------------------|----------------------------------------|---------------------|
|        | 間隔<br>(mm) | pw<br>(%) |                                             |        | Qmax<br>(kN) | Rmax<br>(rad.) | 上端筋<br>tTbu             | 下端筋<br>bTbu |                     |                                        |                     |
| A00-00 | —          | 0.0       | 0                                           | 正<br>負 | 185<br>193   | 1/67<br>1/100  | 131<br>196              | 125<br>177  | 0.96<br>0.90        | 133<br>224                             | 0.99<br>0.88        |
| A03-00 | 120        | 0.3       | 0                                           | 正<br>負 | 195<br>221   | 1/67<br>1/67   | 160<br>276              | 113<br>235  | 0.71<br>0.85        | 149<br>259                             | 1.07<br>1.06        |
| A03-07 | 120        | 0.3       | 1/15                                        | 正<br>負 | 195<br>224   | 1/67<br>1/67   | 175<br>290              | 132<br>250  | 0.75<br>0.86        | 163<br>279                             | 1.07<br>1.04        |
| A03-20 | 120        | 0.3       | 1/5                                         | 正<br>負 | 205<br>233   | 1/67<br>1/67   | 201<br>326              | 131<br>245  | 0.65<br>0.75        | 192<br>318                             | 1.05<br>1.03        |
| A06-00 | 60         | 0.6       | 0                                           | 正<br>負 | 202<br>227   | 1/67<br>1/67   | 188<br>282              | 142<br>267  | 0.76<br>0.95        | 181<br>295                             | 1.04<br>0.96        |

&lt; 備考 &gt;

・ 梁引張り側主筋

正加力→90° 折曲げ定着(2-D16)

水平投影定着長: 160mm(10db)

折曲げ半径: 3db 余長: 10db

負加力→プレート定着(2-D19)

定着長さ: 171mm(9db)

(ただし、定着金物を含む)

定着金物:  $w \times h \times t = 38 \times 38 \times 22 \text{mm}$ 

・ 柱鉄骨 H-250×100×6×9

・ 梁鉄骨 H-198×99×4.5×7

\*1 コンクリート強度  $F_c = 27 \text{MPa}$ 

\*2 最大耐力時の梁主筋総引張り力

(梁端位置、歪みゲージによる)

\*3 式(8)(9)による

ジ切り加工した主筋に固定した。試験体数は全 5 体であり、変動因子として帯筋比  $p_w$  ( $=0\%$ ,  $0.3\%$ ,  $0.6\%$ ) および柱軸応力度  $\sigma_o$  ( $=0$ ,  $F_c/15$ ,  $F_c/5$ ) を採用した。帯筋は各々 2-D10(SD295A)とし、帯筋間隔は柱端から 280mm の範囲で変化させた。表2に使用材料の力学的性質を示す。コンクリートは  $F_c = 27 \text{MPa}$  とし、柱および梁天端から一体打ちで打設した。

## 2.2 実験方法

加力は試験体を柱反曲点位置でピンローラー支持した後、柱に所定の軸力を与え、左右の梁に逆対称のせん断力を正負繰り返して載荷した。加力の制御は層間変形角による変形制御とし、 $R = \pm 1/500$ ,  $\pm 1/200$ ,  $\pm 1/100$ ,  $\pm 1/67$ ,  $\pm 1/50$ ,  $\pm 1/33 \text{rad.}$  で各 1 回繰り返した。計測は層間変位の他、鉄筋および鉄骨の主な箇所の歪みについて行った。

## 3. 実験結果

### 3.1 破壊経過

図2に層せん断力(Q)－層間変形角(R)関係と最終ひび割れ状況を例示する。いずれの試験体も  $R = 1/500 \text{rad.}$  で梁曲げひび割れが発生した後、梁主筋の梁端から定着部までの直線部に沿ってひび割れが発生した。 $R = 1/200 \text{rad.}$  には梁引張り側主筋の近傍で柱主筋に沿うひび割れが発生し、ほぼ同時に柱梁接合部対角のせん断ひびわれも発生した。その後、折曲げ定着では折曲げ部および

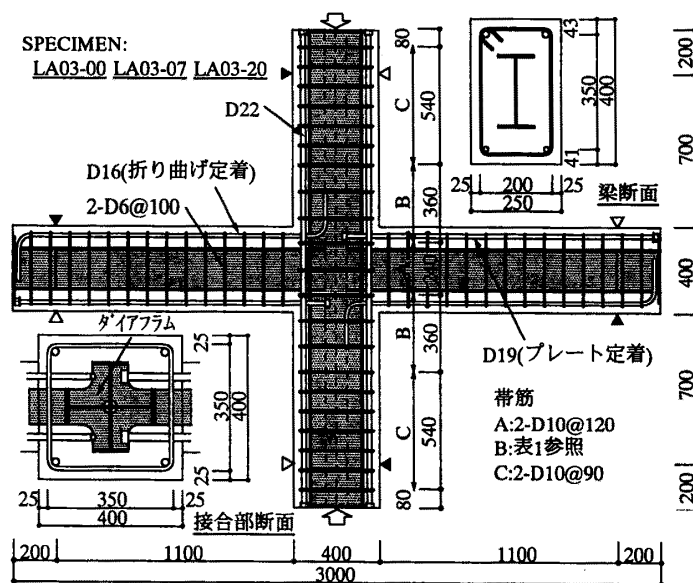


図1 試験体形状および配筋例

表2 使用材料の力学的性質

#### a) 鉄骨・鉄筋

| 種別   | 鋼種     | 使用箇所   | $\sigma_y$<br>(MPa) | $\epsilon_y$<br>(%) | $\sigma_u$<br>(MPa) | $E_s$<br>(GPa) |
|------|--------|--------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------|
| D22  | SD345  | 柱主筋    | 381                 | 0.196               | 590                 | 195            |
| D19  | SD685  | 梁主筋    | 817                 | 0.611               | 1084                | 198            |
| D16  | SD685  | 梁主筋    | 762                 | 0.367               | 981                 | 208            |
| D10  | SD295A | 帯筋     | 352                 | 0.188               | 496                 | 187            |
| D6   | SD295A | 肋筋     | 418                 | 0.221               | 551                 | 189            |
| H198 | SS400  | 梁鉄骨    | 324                 | 0.161               | 465                 | 204            |
| H250 | SS400  | 柱鉄骨    | 319                 | 0.153               | 460                 | 209            |
| PL9  | SS400  | ダイヤフラム | 299                 | 0.141               | 447                 | 212            |

 $\sigma_y$ : 降伏強度,  $\epsilon_y$ : 降伏歪み,  $\sigma_u$ : 引張強度,  $E_s$ : ヤング係数

#### b) コンクリート

| $\sigma_c$<br>(MPa) | $\sigma_t$<br>(MPa) | $E_c$<br>(GPa) | $\sigma_c$ : 圧縮強度 | $\sigma_t$ : 引張割裂強度 | $E_c$ : ヤング係数 |
|---------------------|---------------------|----------------|-------------------|---------------------|---------------|
| 29.3                | 2.51                | 24.1           |                   |                     |               |

余長部に沿ってひび割れが進展し、プレート定着では定着金物付近からコーン状のひび割れが発生した。しかし、これらのひび割れはそれ以降拡大せず、最終的には柱主筋沿いのひび割れが進展、

拡大し最大耐力に至った。最大耐力に達するのはいずれの試験体も梁鉄骨フランジの降伏( $R=1/100r$  ad.)以降であり、ひび割れ発生状況には変動因子による明確な違いはみられなかった。柱主筋沿いのひび割れは、付着割裂ひび割れではなく掻き出し破壊によるものと考えられ、破壊形式は全試験体が梁主筋降伏前の定着破壊であると判断された。

### 3.2 梁端モーメントと曲率の関係

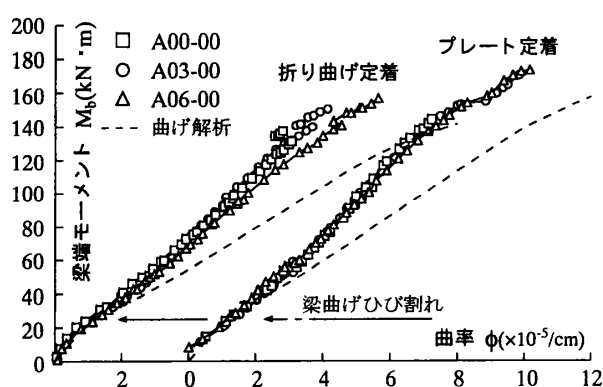
図3は梁端モーメント( $M_b$ )と RC 部の曲率( $\phi$ )の関係を示している。 $M_b$  は梁荷重より、 $\phi$  は主筋歪みを用いて式(1)より求めた。

$$\phi = |\epsilon_u - \epsilon_d| / mbd \quad (1)$$

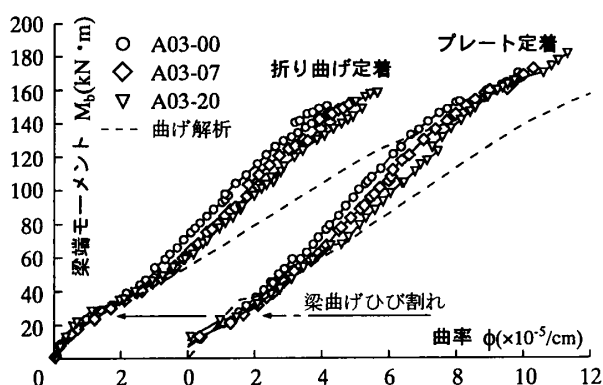
$\epsilon_u$  ( $\epsilon_d$ ): 梁上(下)端主筋の梁端歪み

$mbd$ : 梁の上下の主筋間距離(cm)

図中の点線は平面保持を仮定した断面曲げ解析による計算値である。特定荷重階の  $\phi$  はいずれもある段階から計算値を下回っている。これは梁端の曲げひび割れの口開きに伴い主筋の抜け出しが生じたためであると考えられ、同時に RC 部の負担モーメントが劣化したことを示唆している。双方の定着形式では、柱軸力を増すことによって幾分  $\phi$  の低下傾向が抑制されているようにも見受けら



a) 帯筋比の影響



b) 柱軸力の影響

図3 梁端モーメント  $M_b$  - RC 部の曲率

れるが、その影響は帯筋比が異なる場合を含めそれほど明確ではなかった。

### 3.3 帯筋の歪み

図4に  $R=1/67rad$  時における帯筋の歪み分布を示す。 $R=1/67rad$  は A00-00 の折り曲げ定着以外の最大耐力時に相当する(表1参照)。歪み値は接合部中央の帯筋を除き、全て弾性範囲内に留まっているが、歪み分布の様相は定着形式により異なることがわかる。折り曲げ定着では、折り曲げ部か

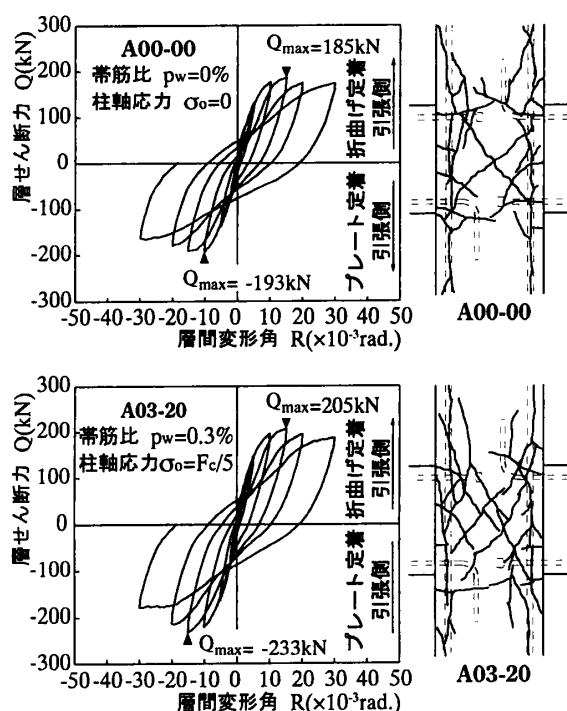


図2 Q-R関係と最終ひび割れ状況

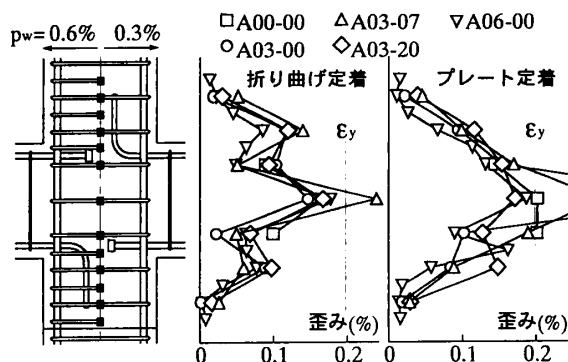


図4 帯筋の歪み分布 ( $R=1/67$ 時)

ら柱側へ概ね  $45^\circ$  に向かう線分と柱主筋とが交差する位置に配した帯筋で最も歪みが大きく、これを離れるほど歪み値も減少している。プレート定着では、定着筋に近い帯筋ほど歪みが大きく、接合部側と柱側で特に折り曲げ定着のような歪み値の違いはみられない。従って、帯筋は定着筋の近傍に配することが好ましく、特に折り曲げ定着では折り曲げ方向に配した方が効果的であるといえる。

#### 4. 定着耐力の検討

表1に各試験体の定着耐力を示す。ここでは歪みゲージより求めた最大耐力時の梁主筋総引張力を定着耐力と定義した。上端主筋についてみれば、定着耐力は双方の定着形式で帯筋比並びに柱軸力とともに上昇しており、同一試験体においてプレート定着が折り曲げ定着の1.5～1.7倍を発揮している。下端主筋の定着耐力は上端主筋の80%程度に留まっているが、これは下端主筋が柱梁接合部のダイアフラムの直下で定着されたため、コンクリートの充填性の低下を受け定着性能が劣化したものと思われる。以下ではコンクリートの充填性の影響が比較的少ないと思われる上端主筋について検討した。

##### 4.1 各要素の負担力

梁主筋の総引張力( $T_b$ )が帯筋の負担力( $T_w$ )と鉄骨コンクリート(SC)部の負担力( $T_{sc}$ )とに分けられるとすれば、各々の推移は図5のようになる。ここで、 $T_w$ は先の帯筋の歪み分布を参考に図6のコンクリート圧縮場を仮定し、これを横切る帯筋の引張り力の合計を実験値から求めたものである。つまり、折り曲げ定着では定着筋から柱側へ  $L_1$  の範囲、プレート定着では定着筋から柱側および接合部側へ各々  $L_2/2$  の範囲に配された帯筋を有効な帯筋とみなした。また、 $T_{sc}$ は  $T_b$  から  $T_w$  を減じて求めた。

図5より、帯筋比が異なる試験体相互(図a参照)では、 $T_{sc}$ が定着耐力までほぼ同様に推移しており、定着耐力は概ねそのときの  $T_w$  に依存し変化していることがわかる。柱軸力が異なる試験体相互(図b参照)では、これとは逆に  $T_w$  の推移に違い

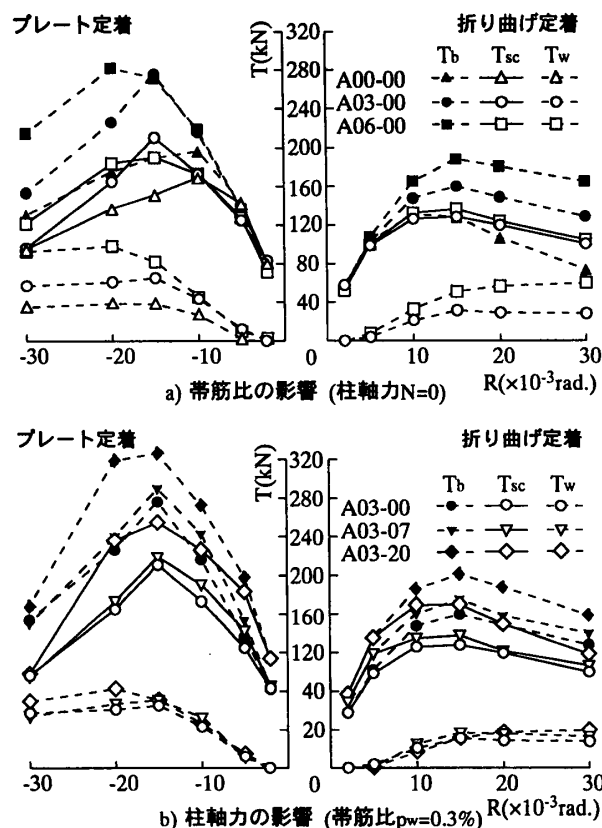


図5 梁主筋引張り力と帯筋・SC部の負担力

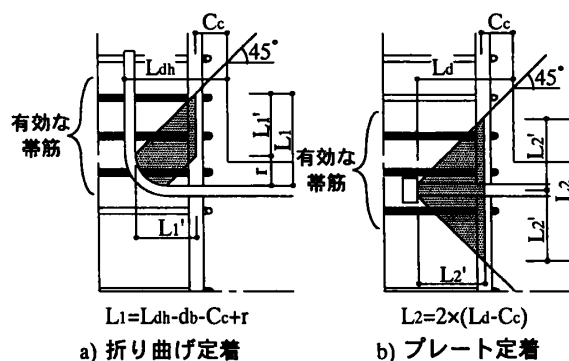


図6 定着に有効な帯筋の仮定

はなく、 $T_{sc}$ の大きさに依存して定着耐力が変化している。これらの傾向は双方の定着形式に共通であり、従って、定着耐力は有効範囲に配された帯筋の負担力と、柱軸力の影響を考慮したSC部の負担力との累加により評価できるものと考えられる。なお、文献<sup>4)</sup>ではRC造柱梁接合部内で、柱せい中央付近に折り曲げ定着された梁主筋の(掻き出し破壊を対象とする)定着耐力式が提案されており、定着耐力は帯筋負担力とコンクリート負担力の和で表されとしている。本実験結果はこれと類似することから、以下では文献<sup>4)</sup>を参考に評価式を誘

導してみた。プレート定着については現時点で手前定着を想定した評価式は提案されていないので、折り曲げ定着と同様に評価することとした。

## 4.2 帯筋の負担力

図7に定着耐力時の帯筋負担力( $T_{wu}$ )と( $a_w \cdot w\sigma_y$ )の関係を示す。ここで、 $a_w$ 、 $w\sigma_y$ は図6に示す有効な帯筋の全断面積とその降伏強度である。 $T_{wu}$ は概ね  $a_w \cdot w\sigma_y$  に比例して上昇しているが、上昇の程度はプレート定着において折り曲げ定着の2倍以上となっている。特にプレート定着で有効な帯筋の組数は、図7からもわかるように、一般には折り曲げ定着の場合と同じかそれ以上となるので、双方の  $T_{wu}$  の差は、以下に示す式(2)と式(3)の直接的な比較よりさらに大きくなることが予想される。

$$T_{wu}=0.32a_w \cdot w\sigma_y \quad [\text{折り曲げ定着}] \quad (2)$$

$$T_{wu}=0.71a_w \cdot w\sigma_y \quad [\text{プレート定着}] \quad (3)$$

また、式(2)は文献<sup>4)</sup>に示される折り曲げ定着の帯筋の効果  $T_{wu}=0.9a_w \cdot w\sigma_y$  に比して小さく、加えて有効な帯筋組数も本実験の方が少なく見積もられるため、SRC造とすることによりその効果は希薄になると推察される。ただし、ひび割れ発生以降では帯筋の他に柱鉄骨ウェブも抵抗し、帯筋の負担力は柱鉄骨の負担力によって変化することも考えられ、この点について今後、より詳細な検討を要する。

## 4.3 柱軸力がない場合のSC部の負担力

図5a)に示す試験体はいずれも柱軸力を導入しなかった試験体であるが、定着耐力時のSC部負担力( $T_{scu}$ )は、帯筋比が異なる場合も概ね一致していることがわかる。そこで、折り曲げ定着とプレート定着について  $T_{scu}$  の平均値を求めると各々 132kN、188kN となる。折り曲げ定着の  $T_{scu}$  はプレート定着に比べ幾分低い。文献<sup>4)</sup>に基づき鉄骨がないものとして算定した  $T_{scu}(=47.7\text{kN})$  に比して非常に高く、定着耐力に対する柱鉄骨の効果が推測される。

図8は梁主筋の定着力に対するSC部の抵抗機構を想定したものである。この場合、梁主筋の定着力は柱主筋に向かう  $T_r$  と柱鉄骨に向かう  $T_s$  に分割され、 $T_s$  に対しては柱鉄骨ウェブが抵抗する。

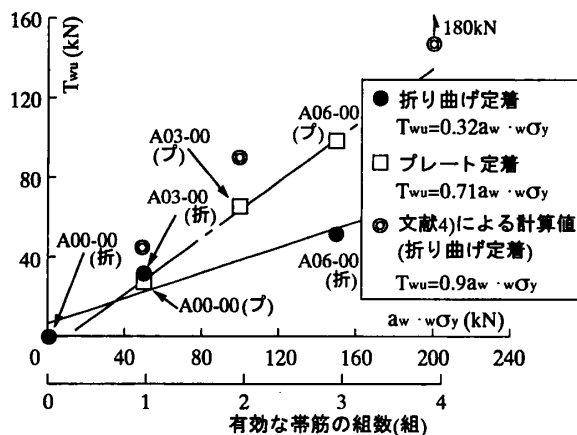


図7 帯筋負担力  $T_{wu}$  -  $a_w \cdot w\sigma_y$  関係

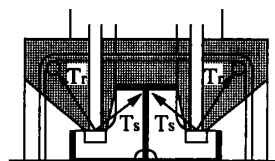


図8 梁主筋の定着力に対するSC部の抵抗機構

$T_r$  は網掛け部分のコンクリートの掻き出し破壊を生じさせる力で、これに対しコンクリートが引張り抵抗している。つまり、 $T_s$  は掻き出し破壊に関与せず、その分だけ RC 造の場合より耐力が向上する。本実験ではこれを明確に区別できないが、鉄骨の効果は即ち  $T_r$  の軽減であるので、暫定的に両者を合わせコンクリートの引張り抵抗として SC 部の負担力を評価する。さらに図6の  $L_1$  および  $L_2$  の範囲に発生した柱主筋沿いのひび割れによって  $T_{scu}$  が決定されたとすれば、これらは簡略的に式(4)(5)で表すことができる。

$$T_{scu}=\alpha \cdot L_1 \cdot b_c \cdot \sigma_t \quad [\text{折り曲げ定着}] \quad (4)$$

$$T_{scu}=\beta \cdot L_2 \cdot b_c \cdot \sigma_t \quad [\text{プレート定着}] \quad (5)$$

$\alpha$ 、 $\beta$ :有効係数  $b_c$ :柱幅(mm)

$\sigma_t$ :コンクリート引張り割裂強度(MPa)

$\sigma_t$  を  $\sqrt{\sigma_B}$  に置き換え、図8の結果から未知数の  $\alpha$  および  $\beta$  を求めると、 $\alpha=0.42$ 、 $\beta=0.43$  となる。

## 4.4 柱軸力の影響

定着耐力は柱圧縮軸力の導入によって上昇する。これは前述したように SC 部負担力  $T_{scu}$  が向上するため、柱軸力と帯筋負担力  $T_{wu}$  とに相関性はないものと判断される。そこで、柱軸力の影響を  $T_{scu}$  について整理した。図9は柱軸力を導入しなかった A03-00 の  $T_{scu}$  を  $T_{scu0}$  とし、これに対する  $T_{scu}$

の上昇率  $T_{scu}/T_{scu0}$  と柱軸応力度  $\sigma_o$  の関係を示したものである。なお、柱軸力のうち鉄骨の負担分は定着耐力に影響しないと考えられるので、 $\sigma_o$  は SRC 断面を等価な RC 断面に置き換え求めた。 $T_{scu}$  は柱軸応力の増大に従い直線的に上昇している。その上昇割合は両定着形式でほぼ一致しているが、文献<sup>4)</sup>に示される RC 造の場合( $=0.19\sigma_o$ )に比べ緩慢であった。

$$T_{scu} / T_{scu0} = 1 + 0.079\sigma_o \quad [\text{折り曲げ定着}] \quad (6)$$

$$T_{scu} / T_{scu0} = 1 + 0.075\sigma_o \quad [\text{プレート定着}] \quad (7)$$

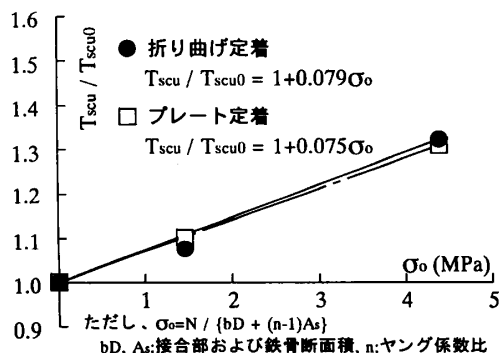


図9 柱軸応力によるSC部負担力の上昇

以上の結果を整理し、定着耐力式を導くと式(8)(9)が得られる。式(8)(9)は掻き出し破壊による場合を対象とし、被り厚が十分で尚かつ局部支圧破壊を生じないことが前提である。

[折り曲げ定着] (単位: N, mm, MPa)

$$T_{bu} = 0.32a_w \cdot w\sigma_y + (0.42 \cdot L_1 \cdot b_c \cdot \sqrt{\sigma_B})(1 + 0.079\sigma_o) \quad \dots (8)$$

[プレート定着] (単位: N, mm, MPa)

$$T_{bu} = 0.71a_w \cdot w\sigma_y + (0.43 \cdot L_2 \cdot b_c \cdot \sqrt{\sigma_B})(1 + 0.075\sigma_o) \quad \dots (9)$$

ここで、 $L_1 = L_{dh} - d_b - C_c + r$   $L_2 = 2(L_d - C_c)$

図10に定着耐力実験値と式(8)(9)による計算値の対応を示す。実験値と計算値の比は折り曲げ定着で 1.04、プレート定着で 1.05 であり、良い対応を示している。ちなみに、本実験の折り曲げ定着に対して文献<sup>4)</sup>の評価式を適用すると、帯筋比や柱軸力が小さい試験体で実験値は計算値を上回るが、実験値の高い試験体では計算値との差がほとんどなかった。現時点では SRC 造の手前定着に関する実験が皆無に等しく、実験データの蓄積と、

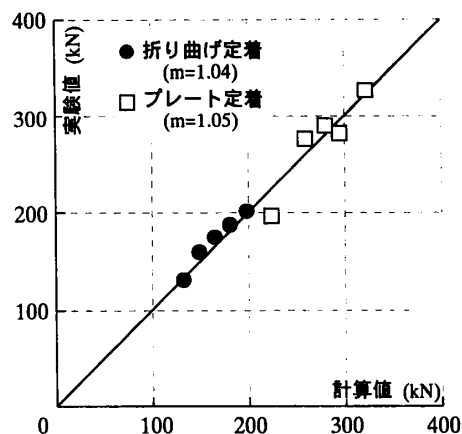


図10 実験値と式(8)(9)による計算値の対応

帯筋や柱軸力による耐力向上の限界の把握、本実験で扱わなかった影響因子の定量的検討などが今後の課題として残されている。

## 5. 結論

本研究において得られた知見を以下に示す。

1) 折り曲げ定着とプレート定着のいずれも、定着強度は帯筋比および柱圧縮軸力の増加とともに上昇した。

2) 定着強度に及ぼす帯筋比および柱軸力の影響を定量的に検討し、簡易な定着耐力式を誘導した。本実験で得られた定着強度は、既往の RC 造を対象とした定着耐力式に比べて帯筋および柱軸力の効果が希薄になる傾向が認められた。

## 参考文献

- 1) 岡本聡・西村泰志・南宏一：鉄骨鉄筋コンクリート外部柱はり接合部における梁主筋の手前定着の可能性，日本建築学会大会学術講演梗概集 C，pp1705-1706，1993．9
- 2) 森岡政宏・西村泰志・南宏一：鉄骨鉄筋コンクリート外部柱はり接合部における梁主筋の手前定着の可能性(その2)，日本建築学会大会学術講演梗概集 C，pp1789-1790，1994．9
- 3) 村上雅英・宮崎史・窪田敏行：高強度電炉鉄筋の開発に関する研究(その21 RC 外部はり柱接合部の梁主筋の機械式定着強度実験式の提案)，日本建築学会大会学術講演梗概集 C，pp-127-128，1993．9
- 4) 宮本泰志・城攻・後藤康明・北野敦則：柱梁接合部における90°折り曲げ鉄筋の掻き出し定着破壊耐力の評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.2，pp1017-1022，1997