

高松工業高等専門学校専攻科 学生員 瀬戸亮太  
高松工業高等専門学校 正会員 水越睦視

1. はじめに

鉄筋コンクリート部材の脆性的な破壊モードの一つに付着割裂破壊がある。この破壊は、異形鉄筋がその横ふしによる機械的な噛み合いにより付着抵抗を發揮する際のくさび作用に起因する破壊形式である。付着割裂破壊の力学的メカニズムが明確になっているにも関わらず、これを解析的に定量化しようとする研究は、多くない。現在までに提案されている付着割裂強度式<sup>1)</sup>では、コンクリート寄与分と横補強筋寄与分の加算式の形をとることが多い。しかし、付着割裂破壊は横補強筋によって防止するのが原則であることから、前者のみに関する実験結果はそれ程多くない。

本研究は、横補強筋が無い場合のサイドスプリット型付着破壊を対象とした力学的機構にできる限り忠実でかつシンプルな解析モデルを提案し、既往の実験結果<sup>1)</sup>との比較によりその適用性について検討したものである。

2. 解析モデル

図-1に、RC部材の主筋1本分の領域を対象とし、主筋を表すばね要素と周囲のコンクリートとの付着を表すばね要素にモデル化したものを示す。各節点は横ふし位置に対応している。

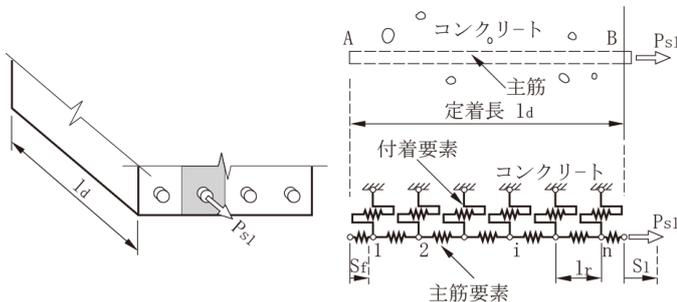


図-1 解析用ばねモデル

3. 付着要素のばね剛性の定式化

3.1. 鉄筋周囲コンクリートのせん断変形剛性  $K_c$

図-2に異形鉄筋の横ふし間隔  $l_r$  1個分の区間について、周囲コンクリートのせん断変形状態を示す。この区間における鉄筋引張力の変化量すなわち付着力を

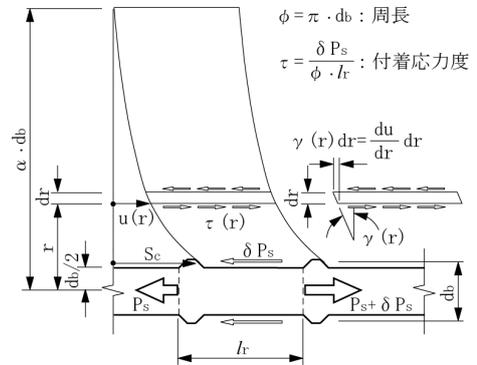


図-2 弾性せん断変形

$\delta P_s$  とすると、力の釣合いより鉄筋軸から  $r$  の距離におけるせん断応力度  $\tau(r)$  が得られる。

一方、コンクリートは弾性状態であると仮定すると、フックの法則より、せん断弾性係数  $G_c$  を用いて、せん断歪  $\gamma(r)$  が求められる。この  $\gamma(r)$  をコンクリートの弾性せん断領域について積分すると、鉄筋表面とコンクリートとの相対変位  $S_c$  が得られ、 $\delta P_s$  は次式で表される。

$$\delta P_s = 2 \cdot G_c \cdot \pi \cdot l_r / \ln(2 \cdot \alpha) \cdot S_c = K_c \cdot S_c \quad (1)$$

ここに、 $K_c$  はこのせん断変形挙動をばね要素で表現した場合の剛性であり、次のように表わす。

$$K_c = 2 \cdot G_c \cdot \pi \cdot l_r / \ln(2 \cdot \alpha) \quad (2)$$

また、 $\alpha$  は面外変形を考慮する鉄筋周囲のコンクリート領域の長さを鉄筋径  $d_b$  との比で表したものである。

3.2. 放射方向ひび割れによる片持ちばりの曲げ変形剛性  $K_t$

図-3に鉄筋半径方向への圧縮力が作用し、周辺コンクリートには鉄筋周方向への割裂き引張力(以下、リングテンション  $\sigma_t$  と表記)が生じ、放射状ひび割れの発生した中空円筒を示す。放射ひび割れは、鉄筋周囲のコンクリートの受ける放射方向圧力  $q$  による  $\sigma_t$  とコンクリート引張強度  $f_t$  とが一致する位置まで進展するものとした。

図-4に鉄筋横ふしから進展する内部斜めひび割れを示す。この斜めひび割れは  $\theta = \pi/4$  の角度で進展するものとする。斜めひび割れは、主応力  $\sigma_1, \sigma_2$  および  $\sigma_1$  により生じるひび割れの直交方向の引張歪が引張限界歪と等しい位置まで進展するものとする。

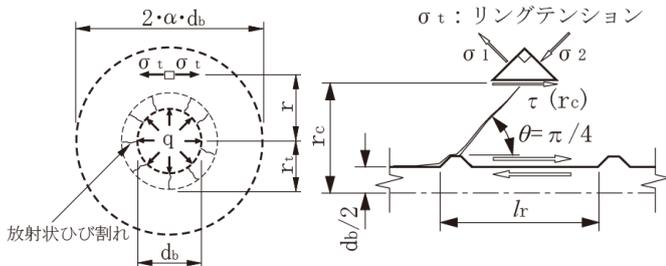


図 - 3 放射状ひび割れの発生した厚肉円筒モデル

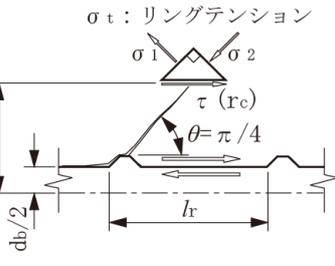


図 - 4 内部斜めひび割れ先端の微小要素

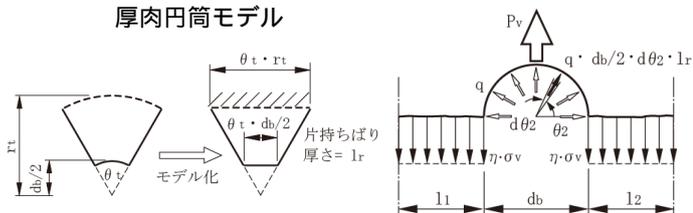


図 - 5 放射状ひび割れによる片持ちばり

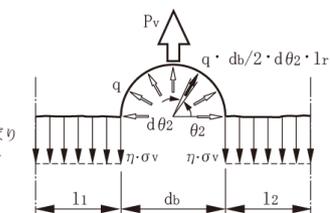


図 - 6 割裂ひび割れ面での引張応力分布の仮定

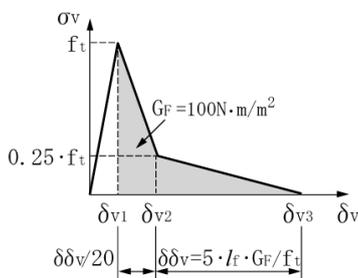


図 - 7 コンクリート引張応力 - ひび割れ領域の伸び関係

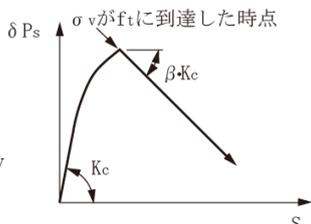


図 - 8 鉄筋引張力低下時の剛性の処理

図 - 5 左側に、鉄筋横筋から進展する放射状ひび割れの角度  $\theta_t$  分の領域をモデル化したものを示す。今、この内部ひび割れ進展域を図 - 5 右側の片持ちばりに置換する。その曲げ変形より、 $\delta P_s$  は次式と表せる。

$$\delta P_s = \frac{\pi \cdot E_c \cdot (r_t + db/2) \cdot l_r^3}{4 \cdot (r_t - db/2)^3} \cdot S_t = K_t \cdot S_t \quad (3)$$

ここに  $K_t$  は放射ひび割れ発生による変形剛性である。

$$K_t = \frac{\pi \cdot E_c \cdot (r_t + db/2) \cdot l_r^3}{4 \cdot (r_t - db/2)^3} \quad (4)$$

### 3.3 合成ばね剛性 $K_b$ (付着要素剛性式)

鉄筋表面での相対変位を  $S$  とすると、次式となる。

$$S = S_c + S_t = (1/K_c + 1/K_t) \cdot \delta P_s = 1/K_b \cdot \delta P_s \quad (5)$$

ここに  $K_b$  は合成ばね剛性であり、次のように表せる。

$$K_b = 1/(1/K_c + 1/K_t) \quad (6)$$

### 3.4 局部的付着割裂破壊条件

図 - 6 にサイドスプリット型付着破壊の生じた RC 部材断面の応力状態を示す。同図では、ひび割れ発生前の割裂面全体にわたって等分布を仮定した場合の応力値と、ひび割れの進展中の平均引張応力値との離れ

表 - 1 実験変数および解析結果

試験体 No	6	9	11	12	13	14	15	16
定着長 $l_d$ [mm]	500	500	500	500	500	500	500	500
主鉄筋本数 $n$ [本]	4	3	3	4	3	4	4	4
鉄筋径 $d_b$ [mm]	19.1	19.1	19.1	19.1	19.1	19.1	25.4	25.4
部材幅 $b$ [mm]	300	300	300	300	300	300	300	300
圧縮強度 $f_c'$ [MPa]	22.2	25.7	27.1	27.1	27.1	27.1	30.0	30.0
引張強度 $f_t$ [MPa]	2.11	2.32	2.41	2.41	2.41	2.41	2.28	2.28
弾性係数 $E_c$ [MPa]	23906	25076	25546	25546	25546	25546	24851	24851
弾性係数 $E_s$ [GPa]	200	200	200	200	200	200	200	200
横筋間隔 $l_r$ [mm]	12	12	12	12	12	12	16	16
粗骨材最大寸法 $G_{max}$ [mm]	20	20	20	20	20	20	20	20
割裂面幅 $C_s$ [mm]	54.9	91.9	91.9	54.9	91.9	54.9	46.6	46.6
剛性低下パラメータ $\beta$	0.3	0.5	0.5	0.3	0.5	0.3	0.2	0.2
引張応力係数 $\eta$	0.5	0.4	0.4	0.5	0.4	0.5	0.5	0.5
実験値 $\tau_{exp}$ [MPa]	2.21	2.39	2.62	1.95	2.80	2.23	1.72	1.74
解析値 $\tau_{cal}$ [MPa]	1.98	2.42	2.48	2.20	2.48	2.20	16.26	1.63
$\tau_{exp}/\tau_{cal}$	1.11	0.99	1.06	0.89	1.13	1.01	1.06	1.07
$\tau_{exp}/\tau_{cal}$ 平均値 $m$	1.04							
$\tau_{exp}/\tau_{cal}$ 標準偏差	0.08							
$\tau_{exp}/\tau_{cal}$ 変動係数 [%]	7.50							

度合いを考慮するため係数  $\eta$  を導入して割裂面直交方向応力を  $\eta \cdot \sigma_v$  と表している。

### 3.5 付着要素の剛性低下の評価

図 - 7 に 解析で使用する割裂面でのコンクリート引張応力  $\sigma_v$  と伸び  $\delta_v$  (割裂ひび割れ面を含む長さ  $l_f$  の領域での平均伸び) との関係を示す。

図 - 8 に  $\sigma_v$  が  $f_t$  に到達した後における付着要素の剛性  $K_b$  を模式的に示す。合成剛性  $K_b$  を  $\beta \cdot K_c$  へと強制的に低下させることを試みた。ここに、 $K_c$  は式(2)の初期せん断剛性、 $\beta$  は剛性低下パラメータである。

### 4. 解析結果

解析には変位増分法を用い、各節点位置での割裂ひび割れ領域の伸び  $\delta_v$  を微量ずつ増加させることによって、その他の増分量を逐次求めていった。

表 - 1 に実験変数および平均付着割裂強度の実験値  $\tau_{exp}$  と解析値  $\tau_{cal}$  の比較の一例を示す。同表より、強度比  $\tau_{exp}/\tau_{cal}$  は 0.98 ~ 1.13 の間にあり、その平均値  $m$  は 1 以上で安全側に評価できた。

### 5. おわりに

本研究では、鉄筋とコンクリートの材料特性、力の釣合い式および変形の条件式のみを使用し、割裂面でのコンクリートの引張応力分布を等分布と仮定した解析モデルを提案した。横補強筋を無い RC 部材のサイドスプリット型付着破壊を対象とし、変位増分法による数値解析を実行した。得られた付着割裂強度の解析値は既往の実験値と良く一致した。

### 参考文献

- 1) 藤井 栄：鉄筋コンクリートにおける付着・定着特性とその部材性能に及ぼす影響に関する研究、京都大学学位論文、1992.1