

高松高専専攻科 学生会員 ○瀬戸亮太
高松高専 正会員 土居正信

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発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、それ程多くない。現在までに提案されている付着割裂強度式¹⁾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、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¹⁾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、それを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。

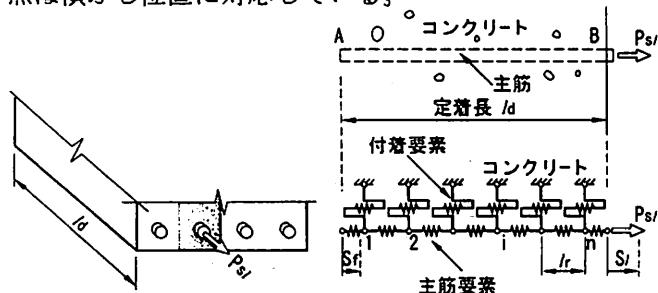


図-1 解析ばねモデル

3. 付着ばね剛性の定式化

3.1 鉄筋周囲の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、周りの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 δP_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 $\gamma(r)$ が求められ

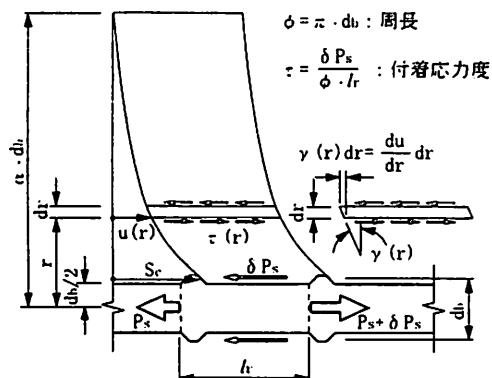


図-2 弾性せん断変形

る。この $\gamma(r)$ を鉄筋周囲のコンクリート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、 δP_s は次式で表される。

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

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、

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

また、 α 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 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_c

図-3に鉄筋半径方向への圧縮力（以後、放射力 P_v と表記）が作用し、周辺コンクリートには鉄筋周方向への割り裂き引張力（以下、リングテンション σ_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。放射状ひび割れは、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 σ_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 σ_1 、 σ_2 および σ_t 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-5左側に、鉄筋横ふしから進展する放射状ひび割れの角度 θ_t 分の領域をモデル化したものを示す。解析において、同図の鉄筋軸から放射状ひび割れ進展距離 r_t は鉄筋軸から斜めひび割れの先端までの距離 r_c よりも大きい場合、 r_c とした。いま、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。

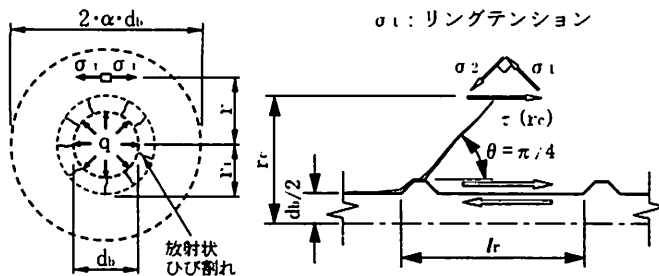


図-3 放射状ひび割れの発生した厚肉円筒モデル

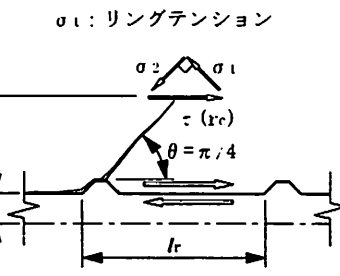


図-4 内部斜めひび割れ先端の微小要素

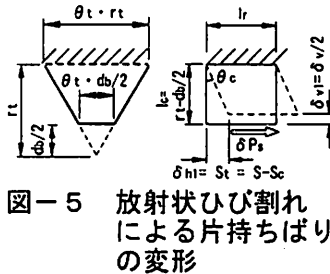


図-5 放射状ひび割れによる片持ちばりの変形

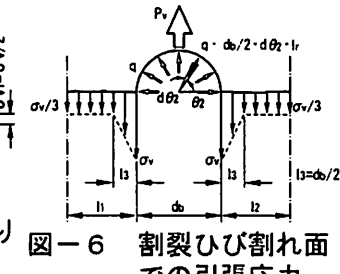


図-6 割裂ひび割れ面での引張応力分布の仮定

その曲げ変形より、 δP_s は次式と表せる。

$$\delta P_s = \{\pi E_c (r_t + db/2) \cdot l_r^3 / [4 \cdot (r_t - db/2)^3]\} \cdot S_r = K_r S_r \quad (3)$$

ここに、 K_t は式 (2) と同様に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、

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

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、

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

ここに、 K_b は合成ばね剛性であり、

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

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、応力集中を考慮して、鉄筋近傍での応力値を鉄筋から離れた位置での 3 倍に仮定した。図-5 右側より、割裂面直交方向応力 σ_v が f_t に到達した後の付着ばね要素 K_t は、

$$K_t = 2/3 \cdot \pi \cdot (l_1 + l_2 + 2 \cdot l_3) \cdot l_r \cdot K_2 \cdot K_0 \quad (7)$$

ここに、剛性 K_2 は図-8 の σ_v が f_t に到達した後の下り勾配の値を採用する。 K_0 は図-5 右側より、 δv_1 と δv_2 の比を表す。 l_1, l_2, l_3 は、図-6 の各幅である。

5. 解析結果

解析には増分法を用い、各節点位置での割裂ひび割れ領域の伸び δ_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 に平均付着割裂強度の実験値 τ_{exp} と解析値

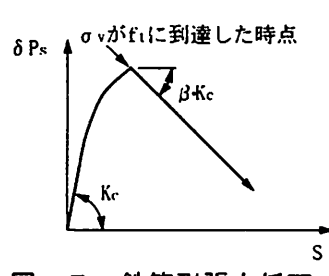


図-7 鉄筋引張力低下時の剛性の処理

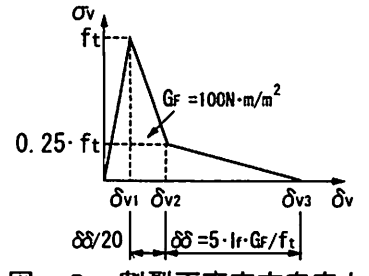


図-8 割裂面直交方向応力-ひび割れ領域の伸び関係

表-1 平均付着割裂強度の実験値と解析値の比較

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]	22.246	25.676	27.146	27.146	27.146	27.146	29.990	29.990
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 h [mm]	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	16.0	16.0
粗骨材最大寸法 d_{max} [mm]	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
割裂面幅 c [mm]	54.9	91.9	91.9	54.9	91.9	54.9	46.6	46.6
実験値 τ_{exp} [MPa]	2.205	2.391	2.617	1.950	2.803	2.225	1.715	1.744
解析値 τ_{cal} [MPa]	1.627	3.090	3.109	1.641	3.109	1.641	1.190	1.190
τ_{exp} / τ_{cal}	1.355	0.774	0.842	1.188	0.901	1.355	1.442	1.466
τ_{exp} / τ_{cal} 平均値 m	1.165							
τ_{exp} / τ_{cal} 標準偏差 σ	0.285							
τ_{exp} / τ_{cal} 相対誤差 δ [%]	24.242							

τ_{cal} の比較の一例を示す。主鉄筋の定着長 l_d が約 $20d_b$ を超えると τ_{exp} への l_d の影響が小さくなるという既往の研究結果¹⁾に基づき、実験値は $l_d \geq 20d_b$ の場合を基準とした。また設計基準強度 f_c が $20 \sim 30$ MPa で、粗骨材最大寸法 d_{max} は一般的な 20 mm のものを対象とした。同表より、強度比 τ_{exp} / τ_{cal} は $0.774 \sim 1.466$ 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。次に、上述の方法は煩雑であるので、図-7 に示すように σ_v が f_t に到達した後は式 (6) の合成ばね剛性 K_b を $-\beta K_c$ へと強制的に低下させることを試みた。ここに、 β は剛性低下パラメータ、 K_c は式 (2) のせん断剛性である。 β を導入した場合の τ_{exp} / τ_{cal} の m は 1.071 、相対誤差 δ は 8.099% となり、解析値と実験値の一致度がさらに良好となった。

6. まとめ

本研究では、横補強筋を無い一般的な配合の RC 部材においてサイドスプリット型付着破壊を対象とした 1 次元ばねモデルを提案し、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, 森田司郎: 異形鉄筋の付着割裂強度に関する研究 (第 1 報), (第 2 報), 日本建築学会論文報告集, 第 319 号, 第 324 号, pp. 47-55, pp. 45-53, 昭和 57 年 9 月, 昭和 58 年 2 月。