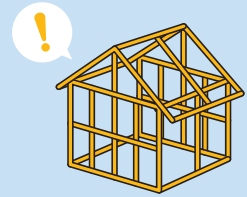




付着割裂破壊の解説①



■はじめに

付着割裂破壊は保有水平耐力計算を行う場合、せん断破壊と同じ「構造耐力上支障のある急激な耐力の低下のおそれのある破壊」(脆性破壊)として扱われ、RC造のはりおよび柱の種別をFA～FCに区分するには付着割裂破壊による脆性破壊を防止することが必要です。現在、RC規準2010¹⁾、RC規準2018²⁾、靱性指針³⁾による3種類の検討方法が示されています。今回の「知っておきたい基礎シリーズ」では付着割裂破壊を題材にして、付着応力度の基本的概念から各規準の付着検討式とその要点、および適合性判定での関連指摘の事例と理由について2回に分けて解説します。

■付着応力度の基本的な解説

付着応力度の概念は以下に示す曲げ付着応力度および平均付着応力度の二つに分類されます。特に平均付着応力度の概念はRC規準2010¹⁾、RC規準2018²⁾、および靱性指針³⁾の各規準の付着応力度式に用いられています。

曲げ付着応力度 τ_{a1}

曲げ付着応力度とは平面保持仮定の基で生じる局所的な付着応力度 τ_{a1} です。その値が過大な大きさとなる場合、付着破壊によって局所的にコンクリートと鉄筋の一体性は損なわれます。

$$dT = \frac{dM}{j} \quad dT = \tau_{a1} \cdot \phi \cdot dx \quad Q = \frac{dM}{dx} \quad \text{より}$$

$$\tau_{a1} = \frac{Q}{\sum \phi_j} \leq f_a \quad \dots\dots\dots (1)$$

ϕ : 鉄筋周長 j : 応力中心間距離

平均付着応力度 τ_{a2}

局所的に曲げ付着応力度 τ_{a1} が損なわれたとしても鉄筋の最大応力位置からの定着長さの中で「平均的に一定の付着応力レベル」であれば曲げ性能を発揮できることが実験的にも確認されています。この「平均的に一定の

付着応力レベル」が平均付着応力度 τ_{a2} です。

この際、せん断力が大きく材端にせん断ひび割れが発生し、有効せい d だけ離れた位置まで、 σ_t が一定分布すると見なし(テンションシフト範囲)、RC規準2018²⁾解説図16.2に示すように $(l_d - d)$ を有効な付着長さとする平均付着応力度で確認します。

$$\tau_{a2} = \frac{\sigma_t \cdot a}{\phi(l_d - d)} = \frac{\sigma_t (\pi d_b^2 / 4)}{\pi d_b (l_d - d)} = \frac{\sigma_t \cdot d_b}{4(l_d - d)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

l_d : 付着長さ d : 有効せい d_b : 鉄筋径

σ_t : 付着検定断面での鉄筋存在応力

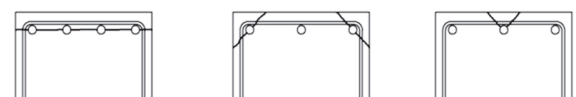
■RC規準2010¹⁾ 付着割裂破壊(大地震動に対しての付着破壊)の解説

付着割裂強度 τ_{bu}

許容付着応力度は十分に大きなコンクリート中に定着された鉄筋の引き抜き試験より定められていますが、異形鉄筋が多く並ぶ一定の大きさの部材内では鉄筋の節が押し広げるくさび効果によってかぶりコンクリートの割れ裂けが生じます(図-1)。この場合の付着割裂強度 τ_{bu} の算定式⁷⁾(藤井・森田式)は終局強度型指針⁵⁾で示されています。

$$\tau_{bu} = 1.22 \left(0.307 b_i + 0.427 + 24.9 \frac{k \cdot A_{st}}{s N d_b} \right) \sqrt{\sigma_B}$$

なお、水平上端筋には係数1.22を1とします。



(a) サイドスプリット (b) コーナースプリット (c) Vノッチスプリット

図-1 付着割裂パターン¹⁾

RC規準2010¹⁾の大地震動に対する付着安全性の検討式(3)は、上記の τ_{bu} に0.8を乗じて簡略化したものを付着割裂強度 $K \cdot f_b$ として、鉄筋配置と横補強筋による修正係数 K と付着割裂の基準となる強度 f_b を定めています。また、付着割裂破壊防止を確認する場合には鉄筋応力を降伏強度 $1.1 \cdot \sigma_y$ とします。

$$\tau_y = \frac{\sigma_y \cdot d_b}{4(l_d - d)} \leq K \cdot f_b \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{修正係数 } K = 0.3 \left(\frac{C+W}{d_b} \right) + 0.4 \leq 2.5$$

付着割裂面を横切る横補強筋効果を表す係数 W

$$W = 80 \frac{A_{st}}{s \cdot N} \leq 2.5 d_b$$

付着長さ l_d の設定

カットオフする鉄筋の場合、部材端部(最大引張応力位置)から鉄筋末端部までが付着長さ l_d になります。ただし、付着長さ l_d はカットオフ筋が不要となる位置を超えて有効せい d 以上延長します。通し配筋で両端に曲げ降伏が生じる場合は $(L+d)/2$ 、一端のみ降伏する部材長さ L として、またせん断ひび割れが生じない部材では d を考慮しないことが可能です。

「荒川式による」付着割裂破壊の検討

(せん断終局強度 Q_{su})

はりのせん断終局強度 Q_{su} の推定式(荒川式)は付着破壊した試験体を含む実験結果から導出された式であることから、付着割裂破壊に対する安全性の検討に用いることを可能とされることが2020技術基準⁴⁾付録1-3で示されています。また、保有耐力と変形性能⁶⁾に「荒川min式はせん断破壊時の強度だけでなく、付着割裂破壊時の強度も近似的に表す傾向がある」との記載があります。荒川式(荒川min式)を以下に示すが、荒川mean式は下式の第1項の係数を0.068としたものです。

$$Q_{su} = \left\{ \frac{0.053 p_t^{0.23} (F_c + 18)}{M/(Qd) + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_w \sigma_{wy}} \right\}$$

荒川式は、梁の引張鉄筋比 p_t が大きいほど、あばら筋の降伏強度 σ_{wy} が高いほど、せん断スパン比 M/Qd が小さいほどせん断強度が増大する傾向にありますが、前述の藤井・森田式や後述の前田・小谷式には p_t 、 σ_{wy} 、 M/Qd に関する項がなく、付着割裂破壊の強度はそれらに応じて増大する傾向が見られません。そのため、例えば p_t が大きく1段に多数の主筋を並べた梁や、 σ_{wy} が高くあば

ら筋比 p_w が小さい梁、 M/Qd が小さく主筋の付着長さが短い梁などは、付着割裂破壊の強度が荒川式による強度の計算値を下回る可能性があるので注意を要します。

「荒川式による」せん断終局強度 Q_{su} を用いて通し筋の付着割裂破壊の検討を行う場合、各耐力式の特徴を理解し安全側に対処することが必要です。また、カットオフ筋を有する場合は荒川式の適用が検証されていないため使用することは出来ません。

RC規準2010¹⁾及び「荒川式による」

付着割裂破壊の検討の要点

- 1) 付着割裂の基準となる強度 f_b は付着割裂強度 τ_{bu} の算定式⁷⁾(藤井・森田式)がベースになっています。
- 2) 大地震動時応力の付着応力度 τ_y は付着有効長さ $(l_d - d)$ の平均付着応力度で評価しています。また、せん断ひび割れを生じないことを確認した場合は有効せい d を減じないことが可能です。
- 3) 付着割裂破壊の防止を確認する場合、鉄筋応力は $1.1 \cdot \sigma_y$ (降伏強度)とします。
- 4) カットオフする鉄筋および通し配筋の付着応力度 τ_y は共に(3)式を用いて降伏状態に応じた付着長さ l_d で算出します。
- 5) 「荒川式による」付着割裂破壊の検討の適用条件はせん断終局強度が荒川式であり、かつ通し筋であることが必要です。

■ 靱性指針³⁾の付着割裂破壊の解説

付着割裂破壊の検討は設計用付着応力度 $\tau_f \leq$ 付着信頼強度 τ_{bu} を確認します。靱性指針の付着信頼強度は、前田・小谷式と呼ばれる付着割裂強度式⁸⁾に基づいています。この前田・小谷式は、藤井・森田式では考慮されていなかった中子筋の効果を取り入れ、100N/mm²クラスの高強度コンクリートを用いた部材にも適用することが可能とされています。

設計用付着応力度

設計用付着応力度

$$\tau_f = d_b \Delta \sigma / \{4(L-d)\} \quad \text{靱性指針}^{3)} \text{ (6.8.1) 式}$$

$$\Delta \sigma = 2 \sigma_{yu} \quad (\text{両端に降伏ヒンジ})$$

$$2 \text{ 段目主筋 } \Delta \sigma = 1.5 \sigma_{yu}$$

$$\sigma_{yu} \text{ 鉄筋上限強度算定用強度} \quad d_b \text{ 鉄筋径}$$

$$L \text{ それぞれ部材クリアスパン長} \quad d \text{ 有効せい}$$

付着信頼強度

1 段目の付着信頼強度 τ_{bu}

$$= a_t \{ (0.085bi + 0.10) \sqrt{\sigma_B + k_{st}} \} \text{ 靱性指針 }^{(3)}$$

(6.8.4)式

a_t は上端筋の付着強度低減係数、靱性指針⁽³⁾

(6.8.5)式

bi は割裂長さ比、靱性指針⁽³⁾ (6.8.6)～(6.8.8)式

k_{st} は横補強筋の効果、靱性指針⁽³⁾ (6.8.9)式

2 段目の付着信頼強度 τ_{bu2}

$$= a_2 \cdot a_t \{ (0.085b_{st2} + 0.10) \sqrt{\sigma_B + k_{st2}} \} \text{ 靱性指針 }^{(3)}$$

(6.8.10)式

a_2 強度低減係数

a_2 は主筋の付着力の関係から求めるが、 $a_2 = 0.6$ としてもよい。

b_{st2} および k_{st2} は割裂線長さ比

靱性指針⁽³⁾ (6.8.11)式、(6.8.12)式

カットオフ筋の付着

2 段目をカットオフ配筋とする場合、付着信頼強度式靱性指針⁽³⁾ (6.8.10)式の低減係数 a_2 には0.6のかわりに、靱性指針⁽³⁾ (解6.8.13)式による低減係数 a_2 を採用することが可能です。また、設計用付着応力度 τ_f は L をカットオフ長さとして適用します。

付着破壊の影響を考慮したせん断信頼強度

付着破壊の影響を考慮したトラス・アーチ機構に基づくせん断信頼強度 V_{bu} 式は靱性指針⁽³⁾ (6.8.14)式、(6.8.15)式が該当します。付着破壊の影響を考慮したせん断信頼強度 V_{bu} (両式の最小値) が終局時のせん断力を上廻る場合は、主筋の付着応力が主筋の付着信頼強度 τ_{bu} に達していない状態を意味しています。ただし、トラス・アーチ機構の成立しないカットオフ配筋にせん断信頼強度 V_{bu} を用いることはできません。

靱性指針による付着割裂破壊検討の留意事項

- 1) 付着信頼強度 τ_{bu} は中子筋の効果を見込んだ前田・小谷式⁽⁸⁾ 付着割裂強度式に基づき100 N/mm²クラスの高強度コンクリート部材にも適用することが可能とされています。
- 2) 設計用付着応力度 τ_f は有効付着長さ $(L - d)$ の平均付着応力度で評価します。
また、実験結果による検証が行われていないため有効せい d に関する緩和措置は示されていません。
- 3) 原則 σ_{yu} 鉄筋上限強度による設計用付着応力度 $\tau_f < \text{付}$

着信頼強度 τ_{bu} を確認します。

- 4) 付着信頼強度 τ_{bu} は1 段目配筋の場合(6.8.4)式、2 段目配筋は(6.8.10)式により算出します。この際、2 段目配筋 τ_{bu2} に対する低減係数 a_2 を0.6とすることが出来ます。
- 5) せん断信頼強度 V_{bu} 式を用いた付着割裂破壊の検討はカットオフした配筋には用いることが出来ません。
- 6) 多段配筋として示されている説明図は2 段配筋で、3 段目配筋の付着信頼強度の説明は行われていません。

以降は第2 回目の解説に続きます。

【参考文献】

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造設計規準・同解説 2010
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造設計規準・同解説 2018
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説 1999
- 4) 国交省住宅局建築指導課他監修：2020 年版建築物の構造関係技術基準解説書
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説 1990
- 6) 日本建築学会：建築耐震設計における保有耐力と変形性能 1990
- 7) 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1982. 9、第324号1983. 2
- 8) 前田匡樹・小谷俊介：異形鉄筋とコンクリートの付着応力伝達機構に基づいた付着割裂強度式(その1)(その2)、日本建築学会大会学術講演梗概集、1994. 9

お問合せ先

構造判定センター 構造計算判定部 審査課 野坂
業務課 長岡

〒540-0026 大阪市中央区内本町2-4-7

大阪U2ビル7階

Tel.06-6943-4680 Fax.06-6943-4681

E-mail : hantei5@gbrc.or.jp