鉄筋とコンクリートの付着性状に及ぼす鉄筋腐食の影響に関する研究

中央大学大学院　学生会員　○鈴木　綾
中央大学　学生会員　高田　翔太
中央大学　正会員　大下　英吉

1. はじめに

RC 構造物において鉄筋の腐食は，補強材の実質断面積の減少は勿論のこと，コンクリートへの腐食ひび割れ発生によって付着応力が非腐食状態に比べ大幅に低下し，構造性能に大きな影響を及ぼすことになる。したがって，腐食が生じた鉄筋とコンクリートの付着応力性状を定量的に評価することは，現在の RC 構造物の構造性能を把握する上で非常に重要である。

本研究では，鉄筋とコンクリートの付着性状に及ぼす鉄筋腐食の影響を定量的に評価することを目的として，鉄筋の腐食率，腐食ひび割れ幅と載荷に伴うひび割れ幅の進行の影響を考慮した付着構成則を提案し，その適用性を検討した。

2. 鉄筋腐食率とひび割れ幅を考慮した付着構成則

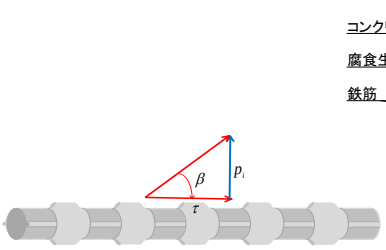
2.1 モデル概要

腐食した鉄筋とコンクリートの付着応力は，鉄筋の腐食量に依存する腐食膨張圧やコンクリートに発生する腐食ひび割れ性状ならびに鉄筋とコンクリートの相対すべり量に応じて変化する。コンクリートに腐食ひび割れが発生する以前では，コンクリートの拘束効果により付着応力は増加することに対して，発生後はその喪失により大幅に低下する。したがって，付着応力性状は，式(1)に示すように非腐食鉄筋の付着応力性状を基準として，それらの影響を加味することにより表現可能となる。

本研究では， Mohr-Coulomb の破壊基準における初期粘着力を非腐食状態における付着応力として，それを腐食ひび割れの発生と進展による腐食膨張の低下およびすべり量に依存させることとした。本来であれば，内部摩擦角も腐食ひび割れ幅に依存する関数となるが，本研究ではすべり量を介して間接的に加味した。

$$\tau_n = \tau_0(S/D) + \sigma_n \tan\{\phi(S/D)\} \qquad (1)$$

ここで， τ_n:ひび割れ幅を考慮した付着応力， τ_0:非腐食時の付着応力， σ_n:腐食膨張圧およびひび割れに大きく影響する。例えば，異形鉄筋では，節間のせん断破壊および 2 次ひび割れの発生による影響が大きく，徐々に進展するコンクリートの破壊が密接に関係する。したがって，内部摩擦角はすべりに伴って変化するため，内部摩擦角をすべりに依存する関数と捉えた [2]。式(1)中の付着応力 τ_0 には，島式 [1]を適用した。なお，次節以降では腐食膨張圧などの内的にコンクリートに生じる圧力を拘束圧と総称することとする。



図－１　拘束圧と付着応力　図－２　ひび割れ幅の仮定

3.2 拘束圧と付着応力

一般に，図－１に示す異形鉄筋のような表面に凹凸が存在する鉄筋を引き抜くと，凹凸部分とコンクリートの噛み合わせにより鉄筋軸直交方向にはずれに伴った開きを生じる。したがって，鉄筋表面にはせん断応力（付着応力）とリングテンション（拘束圧）を分力とした合力が次式のように生じることとなる。

$$p_i = \tau \tan\beta \qquad (2)$$

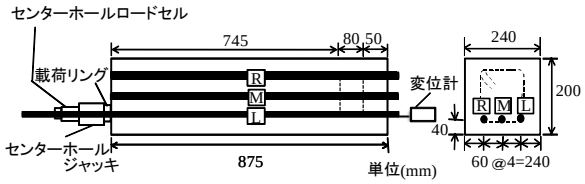
ここで， p_i:コンクリートに作用する内圧，τ:付着応力，β:リブ表面と鉄筋軸方向の間の角（β=45°）で表される。

3.3 ひび割れ幅に伴う拘束圧の低下

コンクリートに腐食ひび割れが発生する以前においては，拘束圧に応じて付着応力が増加するが，ひび割れ発生以降では拘束圧の低下に伴って付着応力が低下する。このような挙動を統一的に評価するには，ひび割れ発生前では鉄筋の腐食率を関数とした膨張圧，発生以降ではひび割れ幅を関数とした拘束圧の低下割合を表現しなくてはならない。前者は腐食率と剛性による厚肉円筒理論，後者はそれが梁理論に移行することとした。

まず，コンクリートには，鉄筋の腐食膨張圧によって圧力 q_1 が発生し，この値が引張強度以上になると腐食ひび割れが発生する。本研究では厚肉円筒理論により足助ら [2]による腐食膨張圧モデルより q_1 を算出した。そして，かぶり表面にひび割れが到達すると，その幅は図－２に示すようにかぶり方向に対して線形分布を

連絡先　〒112-8551　東京都文京区春日 1－13－27　中央大学　理工学部　都市環境学科　TEL:03-3817-1892
キーワード　付着応力，すべり，付着劣化，せん断補強筋



図－3　試験体の形状寸法および配筋

表－1　コンクリートの配合（設計基準強度 30N/mm²）

G_{max} (mm)	W/C (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位量(kg/m³)					
				水	セメント	細骨材	粗骨材	混和材	NaCl
				W	C	S	G		
20	60	10	5.0	168	280	826	996	2.80	8.11

表 - 2　実験パラメータ

試験体名	引抜き鉄筋	目標腐食率[%]	実測値[%]
BD-S0-20L	L鉄筋(外側)	20	16.0
BD-S0-10M	M鉄筋(内側)	10	6.5

仮定するとかぶり表面におけるひび割れ幅は，中心角にかぶり厚さを乗じた値となり，その時に発生するモーメント M_0 は次式となる。

$$M_\theta = \frac{a^2}{4}(1-\cos\theta)q_2 \tag{3}$$

ここで，a:鉄筋と腐食生成物の半径，θ：ひび割れ発生時の角度(**図－2** 参照)，q_2：拘束圧（内圧）である。

また，鉄筋表面におけるひび割れ幅 δ は，梁理論により次式となり，

$$\delta = \frac{3\pi a^4 q_2}{EI} \tag{4}$$

コンクリート表面でのひび割れ幅 δ' は次式で表すことができる。

$$\delta' = \frac{b}{a}\delta \tag{5}$$

ここで，a:鉄筋径，b:かぶり(**図－2** 参照)である。

ひび割れの発生によって解放される圧 q_2 は，(4)および(5)式から次式によって示される。

$$q_2 = \frac{EI}{3\pi a^3 b}\delta' \tag{6}$$

そして，腐食膨張圧およびひび割れ幅を考慮した拘束圧 σ_n は次式によって表される。

$$\sigma_n = q_1 - q_2 \tag{7}$$

最終的に，すべりに応じた拘束圧である式(7)を式(1)に代入することにより，付着モデルが構築されることとなる。

3. モデルの適用性評価

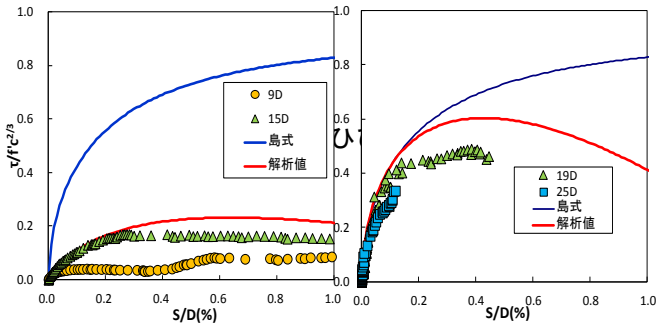


図 - 4　付着応力-すべり関係

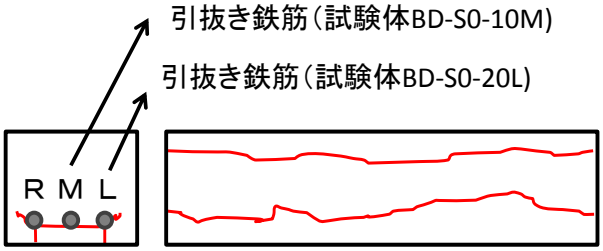


図 - 5　腐食ひび割れ性状

3.1　実験概要

引抜き試験概要を**図－3** に示す。引抜きの対象とした鉄筋は，配筋された 3 本の鉄筋のうちの L 鉄筋および M 鉄筋である。なお，コンクリーとの配合を**表－1**，実験パラメータを**表－2** に示す。載荷試験方法は単調片引き試験とし載荷速度は 9.8kN/min とした。

3.2　付着モデルの精度の検討

本モデルでは，鉄筋腐食率は鉄筋軸方向および断面内で一様であるものと仮定した。試験結果と本モデルによる解析結果の比較を**図－4** に示す。各図中には島式も示している。いずれの試験体においても，本モデルは実験結果を比較的精度良く評価していることから，本モデルの適用性が確認される。試験体 BD-S0-20L および試験体 BD-S0-10M を比較すると，**図－5** に示すように引抜く鉄筋軸上に腐食ひび割れが発生していない試験体 BD-S0-10M は付着応力が増加している。

5. まとめ

以下に本研究で得られた知見を要約する。

(1) 鉄筋の腐食率と腐食ひび割れ幅やその進展に依存した付着構成モデルが構築された。

(2) 構築したモデルは，実験結果との対比によりその適用性が評価された。

参考文献

1) 島弘，山本恭史：腐食した鉄筋の局所応力～局所すべり関係，コンクリート工学年次論文集，vol.13，No.1，pp.663-668，1991

2) 足助美岐子，大下英吉，鈴木修一，堤知明:鉄筋腐食率に基づく腐食ひび割れ幅推定手法に関する研究，vol.66,V-233,pp465-466,2011