

鉄筋腐食した RC 部材の付着応力モデル構築に関する研究

中央大学 学生会員 ○山崎 理美
中央大学 正会員 大下 英吉

1. はじめに

近年, 既存の構造物において経年劣化に伴った構造性能や耐久性能の低下が深刻な問題となっている。

特に中性化や塩害による鉄筋腐食は構造体として機能する鉄筋量を減少させるとともに鉄筋とコンクリートの付着性能を低下させるなど, 構造性能に及ぼす影響が大きい劣化現象の一つである。

近年, 各種劣化現象が構造性能に及ぼす影響について盛んに研究が行われている。しかしながら, 鉄筋腐食を考慮した付着応力モデルに関する研究は多くない。

本研究では, 鉄筋腐食した RC 梁の付着性状について腐食膨張圧, 腐食ひび割れおよびその進展を考慮したモデルを構築し, その適用性の検討を行うこととする。

2. 腐食ひび割れ発生前における付着応力モデル

2. 1 モデルの概要

本研究では, 腐食膨張圧の違いが付着性状に及ぼす影響を考慮するために, Mohr-Coulomb の破壊規準的アプローチを利用したモデルを提案する。

Mohr-Coulomb の破壊規準における粘着項を非腐食状態における付着応力として, 腐食膨張圧を考慮した付着応力は式(1)のように表すことができる。

$$\tau = \tau_0 + \sigma_n \tan \phi_{cr} \quad (1)$$

ここで, σ_n は拘束圧, ϕ_{cr} は内部摩擦角である。また, 式(1)中の τ_0 は式(2)に示す島式¹⁾であり, $\tau_{0\max}$ はその最大値である。

$$\tau_0 = 0.9 f_c'^{2/3} \left(1 - \exp \left(-40 \left(\frac{s}{D} \right)^{0.6} \right) \right) \quad (2)$$

2. 2 付着応力と拘束圧

一般に, Mohr-Coulomb の破壊規準は圧縮強度 f_c' および引張強度 f_t から式(3)のように導かれる。

$$\tau = \frac{f_c' - f_t}{2\sqrt{f_c' f_t}} \sigma_n + \frac{\sqrt{f_c' f_t}}{2} \quad (3)$$

ここで, τ は付着応力, σ_n は拘束圧である。鉄筋を引抜く際, ある付着応力 τ に対して鉄筋表面に角度 β の凹凸が存在するとその幾何学的形状によって拘束圧が生

じる。以上より鉄筋の引抜試験に対する拘束圧と付着応力の関係は式(4)で表すことができる。

$$\tau_{RC} = - \frac{(f_c' - f_t)(f_c' - f_t + 2\sqrt{f_c' f_t} \sin \beta \cos \beta)}{2\sqrt{f_c' f_t}(f_c' + f_t)} \sigma_n + \frac{-3\sqrt{f_c'^3 f_t} + \sqrt{f_c' f_t^3} - 4f_c' f_t \sin \beta \cos \beta}{2(f_c' + f_t)} \quad (4)$$

2. 3 腐食率と拘束圧

鉄筋の腐食膨張圧による拘束圧が発生する。本研究では, 厚肉円筒理論より腐食膨張圧 $\Delta \sigma_{cr}$ を算出する。

幾何学的形状によって生じる拘束圧 p_i と腐食膨張圧を考慮した拘束圧 σ_n は式(5)で示される。

$$\sigma_n = p_i + \Delta \sigma_{cr} \quad (5)$$

2. 4 マイクロクラックによる剛性低下

コンクリートに拘束圧が生じる際, 半径方向に反比例し, 円周方向に引張応力 σ_θ が発生する。

コンクリート内部にマイクロクラックによるコンクリートの剛性低下後のせん断剛性 G_{cr}' は式(6)となる。

$$G_{cr}' = \frac{1}{\frac{1}{G_0} + \frac{1}{G_{cr}}} \quad (6)$$

ここで, G_0 はひび割れのないコンクリートのせん断剛性, G_{cr} はひび割れ発生領域のせん断剛性である。

以上より, 最終的に構築した腐食ひび割れ発生前における付着応力モデルは式(7)のように表すことができる。

$$\tau = \tau_{RC} \frac{G_{cr}'}{G_0} \quad (7)$$

3. 腐食ひび割れ発生後における付着応力モデル

3. 1 モデルの概要

腐食ひび割れがコンクリート表面到達すると, 拘束効果が解放され, 付着応力は大幅に低下することとなる。ひび割れ発生後における拘束圧を σ_n' とすると, 付着応力モデルは式(8)のように定義される。

$$\tau_{cr} = \tau' + \sigma_n' \tan \phi_{cr}(s) \quad (8)$$

ここで, 粘着項 τ' は腐食膨張圧による付着応力の増加量をひび割れによる付着応力の低下量で除した低減係数 α で定義し, 式(7)に示した同一腐食率でひび割れが

キーワード 鉄筋腐食, 付着応力, すべり, 側圧

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学理工学部 TEL 03-3817-1892

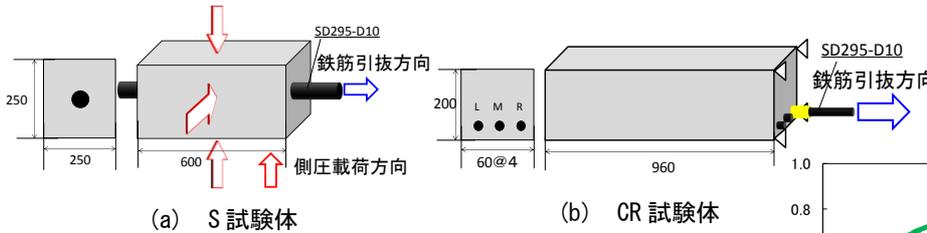


図-1 試験体概要

表-1 コンクリートの配合

試験体名	単位量 (kg/m ³)					
	W	C	S	G	混和剤	Nacl
S	174	318	748	1032	0.34	
CR	168	280	828	998	2.8	8.11

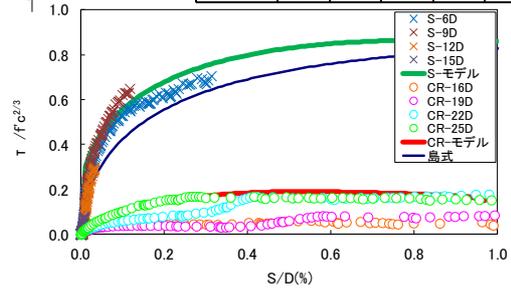


図-2 モデル適用結果

ないと仮定した場合の付着応力 τ に乗じ、式(9)で示す。

$$\tau' = \alpha \cdot \tau \tag{9}$$

3. 2 拘束圧に及ぼす鉄筋腐食の影響

腐食ひび割れの発生および進展により腐食膨張圧は解放され、一部の腐食膨張圧のみが拘束圧として機能する。既往の研究²⁾において、腐食ひび割れの進展に伴う拘束圧の変化はひび割れ幅を w として次式により定義している。なお、 β は材料固有の定数である。

$$\sigma_{n0} = e^{-\beta w} \sigma_{nmax} \tag{10}$$

3. 3 鉄筋の引抜きによる拘束圧

鉄筋を引き抜くと拘束圧は増加し、 σ'_{np} となる。それに応じてひび割れは進展する。ひび割れ幅をかぶり方向に対して線形分布を仮定すると、かぶり表面におけるひび割れ幅 w' は仮想仕事の原理より、次式で示す。

$$\delta = \frac{3\pi a^3}{EI} \sigma'_{np}$$

$$w' = \delta \frac{b}{a} + w \tag{11}$$

ここで、 δ は鉄筋表面ひび割れ幅、 a はコンクリートの内径、 b はコンクリートの外径である。

3. 4 ひび割れ幅拡大による内部摩擦角の変化

ひび割れによる剛性の低下を考慮した圧縮応力 σ'_c 、引張応力 σ_t を式(3)へ代入することで鉄筋を引抜く際の内部摩擦角 $\phi_{cr}(s)$ は次式で示される。

$$\tan \phi_{cr}(s) = \frac{\sigma'_c - \sigma_t}{2\sqrt{\sigma'_c} \sqrt{\sigma_t}} \tag{12}$$

4. 本構築モデルの精度の検討

4. 1 実験概要

引抜試験概要および形状寸法を図-1に示す。腐食ひび割れ発生前モデルの比較として、腐食膨張圧は力の釣合いから側圧にほぼ等価になるので、同図(a)に示す、側圧(3.5N/mm²)を保持し、200 μ /minでの引抜試験と比較した。腐食ひび割れ発生後におけるモデルの比較として、同図(b)に示す腐食率20%でひび割れを発生させた試験体での引抜試験はL鉄筋の9.8kN/min単調載荷試験と比較した。

コンクリートの配合を表-1に示す。なお、鉄筋腐食には電食試験法を採用した。測定項目は、腐食率、鉄筋の軸方向ひずみおよび自由端すべりである。

4.2 本モデルの適用性評価

実験結果と本モデルによる解析結果の比較を図-2に示す。なお、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と比較的良好く一致している。

S試験体においては拘束圧の増加による付着応力の増加が表されている。このことから本モデルの拘束圧モデルの妥当性が確認された。また、CR試験体においてS/Dの増加に伴う付着応力の減少が表わされている。このことから、本研究におけるひび割れ幅の拡大モデルの妥当性が確かめられた。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) Mohr-Coulomb の破壊規準的アプローチを利用したモデルを構築することによって、すべりと関連付けて評価する式を提案した。
- (2) 腐食ひび割れが表面に達していない場合においても、コンクリート内部に発生するマイクロクラックを考慮することで付着応力の定量的評価を可能にした。
- (3) 腐食ひび割れの進展をモデル化することでひび割れ進展に伴った付着応力性状の予測を可能にした。

【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) 長岡和真, 佐藤綾桂, 村上祐貴: 鉄筋腐食を生じたRC部材の付着応力性状に及ぼすコンクリートの拘束度の影響, コンクリート工学年次論文集, vol.33, No.1, pp.827-832, 2011