中央大学	学生会員	○鈴木	、綾
長岡工業高等専門学校	正会員	村上	祐貴
東電設計株式会社	正会員	鈴木	修一
東京電力株式会社	正会員	堤	知明
中央大学	正会員	大下	英吉

1.はじめに

鉄筋腐食が生じた RC 梁において, 腐食生成物および ひび割れの影響により付着応力は非腐食時に比べ大幅 に低下し,鉄筋が構造体として十分に機能しない恐れ がある。そのため,鉄筋腐食が生じた状態での鉄筋と 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, RC 構造物の現在の構造性能を評価する上で非常に 重要な位置付けである。

本研究では,鉄筋腐食率とひび割れ性状依存型の腐 食鉄筋とコンクリートの付着モデルを構築することを 目的とする。

2. 腐食鉄筋とコンクリートの付着劣化モデル

鉄筋の腐食は、その付積を何倍にも膨張させること によりコンクリートに膨張圧を生じさせるとともに、 時としてひび割れを発生させる。したがって、付着モ デルの構築に際しては腐食膨張圧或いはひび割れによ って解放される圧力を考慮しなければならず、本研究 では Mohr-Coulomb の破壊基準的アプローチを用いる こととする。また、非腐食時の付着応力と腐食時の付 着応力はコンクリートの拘束圧よって異なるため、

Mohr-Coulombの破壊基準における粘着力を無載荷状態の付着応力と仮定して,付着応力と内部摩擦角をすべりの関数として捉えることとした。

したがって,無載荷状態の付着性状を基準とすると, あるすべり量における鉄筋軸直交方向の応力が異なる 場合の付着応力は式(1)のように示すことが可能である。

 $\tau_n = \tau_0(S/D) + \sigma_n \tan\{\phi(S/D)\}$ (1) ここで、 $\tau_n : 腐食膨張圧を考慮した付着応力、<math>\tau_0 : 非$ 腐食時の付着応力(粘着力)、 $\sigma_n : 拘束圧、\phi: 内部摩擦角$ で表される。式(1)に示す内部摩擦角および粘着力は鉄 筋軸直交方向の応力に依存するとともに、付着応力は 鉄筋力勾配に依存するため、すべり量にも大きく影響 する。したがって、内部摩擦角をすべりに依存する関 数と捉え、式(2)および式(3)により評価する。

 $S/D \le S_{peak}/D \qquad \tan \phi = 3 \tan \phi_f \sqrt{2 \{100S/D\} - 4(100S/D)^2 \}}$ (2) $S/D > S_{peak}/D \qquad \tan \phi = 3 \tan \phi_f \sqrt{2 \{100S_{peak}/D\} - 4(100S_{peak}/D)^2 \}}$ (3) ここで、 $\tan \phi_f = 0.34$ 、 $S_{peak}/D = 0.1\%$ で表ある。

一方,拘束圧 σ_n は式(1)から次式のように表すことができる。

$$\sigma_n = \tau_n - \tau_0 (S/D) / \tan\{\phi(S/D)\}$$
(4)

ここで、*τ*₀ は非腐食時の付着応力であり、本研究では式(5)に示す島モデルを適用することとする。

 $\tau = 0.9 f_c^{2/3} \left\{ 1 - \exp\left(-40(S/D)^{0.6}\right) \right\}$ (5)

拘束圧は式(4)および図-1 に示すようにすべりの関数 であるとともに、すべりが生じていない状態すなわち 初期拘束圧においても図-2(a)に示すように鉄筋の腐 食率のみで初期拘束圧を評価することはできない。ま た、図-2(b)は初期拘束圧と腐食ひび割れ幅の関係を示 しているが相関性は低いことがわかる。

そのため、鉄筋の腐食率および腐食ひび割れ性状の 両者を考慮する必要がある。したがって、まずはすべ りが無い状態において腐食ひび割れが発生しないとい う仮定のもとで鉄筋の腐食膨張のみによる拘束圧の導 出を行うため、ティモシェンコの弾性理論に基づき腐 食膨張圧Poを算出した。

 $p_{0} = s / [a/E] (a^{2} + b^{2})/(b^{2} - a^{2}) + v + [(a+s)^{2}/E_{r}s]$ (6) ここで、 a:鉄筋径半径,b:最小かぶり厚,v:コンクリ ートのポアソン比,E:コンクリートの弾性係数,E;:錆の



キーワード 付着応力, すべり, 付着劣化

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



弾性係数で表される。

の影響を考慮した。

なお, 錆厚 s は次式により算出される。

$$s = 2a\sqrt{1 + \alpha(\gamma - 1) - 2a} \tag{7}$$

ここで,α:腐食率,γ:錆の膨張圧で表される。 次に,上式を腐食ひび割れが存在する状態に対して

も適用可能なように拡張しなければならない。 コンクリートの拘束圧は腐食ひび割れ幅が発生する ことにより低下するため,次式により腐食ひび割れ幅

 $W = p_0 \times w_{cri} \times C_i \times \Delta L / (G_f \times \Delta L_k \times C_k)$

ここで、W:腐食膨張および腐食ひび割れ幅を考慮した劣化パラメータ、 w_{cri} :コンクリート表面の腐食ひび割れ幅、 C_i :かぶり厚、 ΔL :単位定着長、 G_f :破壊エネルギー、 ΔL_k および C_k :単位量(ΔL_k =1, C_k =1)で表される。

なお,式(8)はコンクリートの腐食ひび割れの発生に よって解放されるエネルギーと破壊エネルギーを考慮 した場合の解放されるエネルギーの比である。

3. 腐食鉄筋の引抜試験と付着劣化モデルの特徴

3.1 劣化パラメータの同定

コンクリートの拘束圧はすべりの増加とともに減少 する。しかしながら、その減少率は腐食ひび割れ幅お よびせん断補強筋の有無によって異なり一様ではない。 特に、せん断補強筋を有する場合、せん断補強筋が無 い場合に比べ拘束圧の低下率が少ない。なお、初期拘 束圧 $\sigma_{n0} \epsilon f_c^{2/3}$ により除することで正規化した量を次 式に示す。

$$\sigma_{n0} / f_c^{2/3} = -0.2039 \ln(W) - 0.30324$$
 (9)

図−3 は初期拘束圧と拘束圧の低下率の関係を示して おり、図中に示す通りコンクリートの拘束圧σ_nは、せ ん断補強筋の有無により場合分けを行う。

せん断補強筋有り

$$\sigma_n = f_c^{2/3} \left[\frac{\sigma_{n0}}{f_c^{2/3}} + \left(3.049 \frac{\sigma_{n0}}{f_c^{2/3}} - 1.202 \right) \left(\frac{S_D}{D} \right) \right]$$
(10)

せん断補強筋無し

$$\sigma_n = f_c^{2/3} \left[\frac{\sigma_{n0}}{f_c^{2/3}} + \left(5.695 \frac{\sigma_{n0}}{f_c^{2/3}} + 1.892 \right) \left(\frac{S}{D} \right) \right]$$
(11)

以上のように導出した式(10),(11)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。

3.2 モデルの適用性評価試験

図-4実施したRC梁部材の片引き試験体寸法であり、 試験体は梁全長にわたり鉄筋腐食を生じさせている。 なお、実験パラメータを表-1に示す。

本モデルは、鉄筋腐食率を一様であるものと仮定し、 腐食ひび割れ幅は平均ひび割れ幅、腐食率は主鉄筋の 平均腐食率を用いた。試験結果と本モデルによる解析 結果の比較を図-5に示す。各図中には島モデルを導入 した結果も示している。いずれの結果においても、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。なお、島モデ ルを導入した解析結果は実験結果を過大に評価したも のとなっている。しかしながら、腐食率を一定、腐食 ひび割れ幅は平均値を代入したため、実際は腐食があ まり進んでいない鉄筋も一様に腐食されていると仮定 したこととなる。なお、本モデルは、せん断補強筋間 隔およびせん断補強筋量に関して考慮していないこと から、図-5(a)および(b)に比べ(c)および(d)の精度が 落ちてしまっていると考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- (1)付着応力の低下量は,主筋の腐食程度,腐食ひび割れ幅およびせん断補強筋の有無により変化する。
- (2)鉄筋腐食率および腐食ひび割れ幅を考慮した付着劣 化モデルは実験結果と比較的良好に一致し,その妥 当性が示された。
- (3)局所的な鉄筋腐食およびせん断補強を考慮し,鉄筋 やコンクリートの材料特性を変更する必要がある。

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