# 1鉄筋腐食を生じた RC 梁部材の付着構成則モデルの構築

センタ

・ドセル

・ルロ・

中央大学大学院	学生会員	〇村上	祐貴
中央大学	正会員	大下	英吉
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	堤乡	印明

10@80

# 1. はじめに

鉄筋腐食を生じた RC 梁部材の付着特性は鉄筋が非 腐食の状態と異なる性状を示すことは言うに及ばない が、この付着特性を定量的に評価可能な付着構成則モ デルは未だ確立されていない。鉄筋腐食を生じた RC 梁 部材の付着特性は鉄筋の腐食量や腐食ひび割れ性状に 大きな影響を受ける。

そこで本研究では,鉄筋周辺のコンクリートの拘束 状態と鉄筋腐食率および腐食ひび割れ幅の関係に着目 し,鉄筋腐食を生じた RC 梁部材の付着構成則モデルの 構築を試みた。

### 2. 鉄筋腐食を生じた RC 梁部材の付着応力性状

図-1に著者らが実施した鉄筋腐食した RC 部材の 引抜き試験概要を示す<sup>1)</sup>。試験体は定着領域近傍の領域 を非腐食とすることにより定着を確保した試験体であ る。

図-2に腐食試験体の付着応力~すべり関係(*τ~S* 関係)の一例を示す。同図は外側鉄筋を引抜いた場合, であり,主筋のみを有する。各図(a)および(b)はそれ ぞれ非腐食および腐食時(主鉄筋の平均腐食率は約 10%)に対応している。凡例は載荷端からの距離を鉄筋 径(D16)で表示している。また,付着応力は圧縮強度の 2/3 乗,すべりは鉄筋径により正規化している。

全体的な傾向としてはいずれの場所においても, 最大付着応力は非腐食時に比べて大幅な低下を示し た。しかしながら,非腐食時においては,場所によ らず,ほぼ同一の $\tau \sim S$ 関係を示したことに対して, 腐食試験体は場所によって $\tau \sim S$ 関係が異なってい る。これは,付着特性に極めて重要な影響を及ぼす 鉄筋腐食や腐食ひび割れ幅が鉄筋軸方向に一様では なく局所的に異なるためであると考えられる。

載荷リン шſ -\* **変位計** (1/100) 160(10D) 480(30D) 320(20D) ジャッキ 腐食領域 非付着領域 付着領域 960(60D) 非付着領域終縁 (単位:mm) 図-1 試験体形状寸法<sup>1)</sup> 16D 19D 22D 28D 0.9 0.9 19D 22D 25D 島寸 0.8 0.8 0.7 0.7 0.6 2.0 fc<sup>2/3</sup> 0.6 0.6 , fo<sup>2/3</sup> 0.4 . 04 0.3 0.3 0.2 0.2 0.1 0.1 Ъ., 0.0 0.0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0 0.0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0 (a) 非腐食 (b)腐食(約10%) 図-2 付着応力~すべり関係 τ<sub>n</sub>(付着応力)  $\tan \phi$ tan φ tan 🖉 🗖 S/DSpeak/D σ "<0 て。(非腐食時の付着応力) <u>,≋≣</u> *d* ,>0 慶强臣 Q ·σ\_==0 σn(拘束圧) 腐食膨張圧により 拘束効果の増加 腐食ひび割れ 0 拘束圧の低下 図-3 モデル概要

# 3. 鉄筋腐食した RC 梁部材の付着構成則モデル

## 3.1 モデル概要

本研究では、図ー3 に示す Mohr-Coulomb の破壊基準的アプローチを利用したモデルを提案する。

鉄筋腐食を生じた RC 部材の付着応力性状は式(1)に 示すように,粘着力を非腐食時の付着応力と仮定して, その状態からの拘束圧の大きさによって,腐食時の付着 応力は変化すると仮定した。

キーワード 付着応力性状,鉄筋腐食,腐食ひび割れ性,拘束圧 連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27 中央大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻

ここで,  $\tau_n$ : 腐食時の付着応力,  $\tau_o$ : 非腐食時時の付着応力(粘着力),  $\sigma_n$ : 拘束圧,  $\tan \phi$ : 内部摩擦角である。

式(1)に示す $\sigma_n$ はコンクリートの拘束圧であり,非腐 食時は0となる。この拘束圧は**図**-3に示すように,腐 食が比較的小さい場合,非腐食時よりも拘束圧は向上 し,正の値を示す。腐食劣化が進行すると,非腐食時 よりも拘束圧は低下するため,見かけ上負の値を示す。

また,式(1)に示される内部摩擦角及び粘着力は拘束 圧依存型の付着性状に関わる重要な要素である。工藤 ら<sup>2)</sup>は,内部摩擦角はすべりの変化に伴い変化すること を指摘しており,内部摩擦角を図-3に示すようにすべ りに依存する関数と捉え,式(2)により評価している。

 $S/D \le S_{peak}/D$   $\tan \phi = 3 \tan \phi_f \sqrt{2 \left( \frac{100S}{D} - 4 \left( \frac{100S}{D} \right)^2 \right)^2}$   $S/D > S_{peak}/D$ 

 $\tan\phi = 3\tan\phi_f \sqrt{2\left(100S_{peak}/D\right) - 4\left(100S_{peak}/D\right)^2} \qquad = 12$ 

ここで,  $S_{peak}/D=0.1\%$  ,  $\tan_f\phi=0.34$  で表される。

本研究においても、内部摩擦角は式(2)を用いて評価 することとした。

非腐食時の付着応力  $\tau_0$ に関しては、式(3)に示す島らの  $\tau \sim s$ モデルを適用した。

 $\tau = 0.9 (f'_c)^{\frac{2}{3}} \left[ 1 - \exp\{-40(S/D)^{0.6}\} \right]$ 

ここで、 $f_c$ ; コンクリートの圧縮強度、S: すべり D: 鉄筋径である。

そして,式(4)に実験値を代入することで,任意のすべり量における拘束圧を算出することとした。

ここで、 $\sigma_n$ : コンクリートの拘束圧、 $\tau_n$ : 腐食試験 体の付着応力、 $\tau_0$ : 鉄筋が非腐食時の付着応力、tan  $\phi$ : 内部摩角である。

#### 3.2 鉄筋腐食時におけるコンクリートの拘束圧

図-4 に腐食試験体の拘束圧とすべりの関係の一例 を示す。なお、拘束圧は圧縮強度の 2/3 乗、すべりは鉄



筋径 図-5 初期拘束圧と各腐食因子との関係 により正規化している。同図に示すように、いずれの 試験体においても拘束圧はすべりの増大に伴いほぼ線 形的に低下している。また、すべりが 0%付近における 初期拘束圧に着目すると、拘束圧は負の値を示してい る。これは非腐食時の拘束圧を 0 としたためであり、 非腐食時に比べて、鉄筋とコンクリートの一体性が損 失していることを意味する。

図-5(a)は全試験体の初期拘束圧と腐食率の関係を示したものである。初期拘束圧は拘束圧とすべりの関係を線形近似し算出した。同図に示すように両者には明確な相関性が確認できず、単に主筋の腐食率のみで初期拘束圧を評価することが出来ないことがわかる。

図-5(b)は各試験体の初期拘束圧と腐食ひび割れ幅 の関係を示したものであるが、この場合においても、 両者の相関性は低い。このように、鉄筋腐食率と腐食 ひび割れ性状を独立して初期拘束圧を評価することは 出来ず、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。

# 3.3 コンクリートを弾性体とした初期拘束圧の同定

前項において示したように,鉄筋腐食を生じた RC 梁部材の拘束圧の同定は,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。鉄筋腐食を 生じた場合,鉄筋近傍のコンクリートには腐食膨張圧 が作用することとなり,この圧力は腐食ひび割れが発 生しない限り,鉄筋とコンクリートの拘束を向上させ る。そこで,まずはコンクリートを弾性体と仮定し, 腐食により,鉄筋周辺のコンクリートに作用する腐食 膨張圧,すなわち拘束圧を,中空円筒理論を応用して 導出することとする。

**図ー6**に示すように,鉄筋腐食が生じた場合,鉄筋周 辺のコンクリートには膨張圧が作用する。この膨張圧 を内圧として捉えれば,半径方向および円周方向の応 力は中空円筒理論を用いて次式により算出される。

$$\sigma_r = \frac{a^2 P_0}{b^2 - a^2} (1 - \frac{b^2}{r^2})$$

ここで、 $\sigma_r$ : 半径方向の応力、 $\sigma_{\theta}$ : 円周方向の応力、  $p_{\theta}$ : 内圧(腐食膨張圧)、a: 内径、b: 外形、r: 内円 の中心からの距離であり、aは鉄筋径/2、bは最小かぶ り厚に対応する。

鉄筋とコンクリートの境界面を  $S_I$ 境界とすれば、この  $S_I$ 境界における  $\sigma_r$  および  $\sigma_{\theta}$  は式(5)および式(6)より次式により算出される。

また、フックの法則より、*S*<sub>1</sub>境界上の円周方向のひ ずみは次式により示される。

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{1}{E} (\sigma_{\theta} - \nu \sigma_{r})$$
$$= \frac{1}{E} \frac{a^{2} + b^{2}}{b^{2} - a^{2}} P_{0} + \nu P_{0}$$
$$\overrightarrow{\text{E}}(9)$$

ここで,  $\epsilon_{\theta}$ : 円周方向のひずみ, E: コンクリートの弾性係数,  $\mu$ : ポアソン比である。

 $S_{l}$ 境界が内圧(腐食膨張圧) $p_{0}$ が作用することにより、 半径方向に  $s_{1}$ 変位したとすれば、円周方向のひずみは  $\varepsilon_{\theta}=s_{1}/a$ であることから、 $s_{1}$ 変位は次式により算出さ れる。

$$\frac{1}{E}\frac{a^{2}+b^{2}}{b^{2}-a^{2}}P_{0}+vP_{0}=\frac{s_{1}}{a}$$

$$s_{1}=\frac{aP_{0}}{E}\frac{a^{2}+b^{2}}{b^{2}-a^{2}}+v\qquad \overrightarrow{\text{Ex}}(10)$$

次に,図-7に示すように,内径がa,外形がa+(s<sub>1</sub>+s<sub>2</sub>)の薄肉円筒を考える。ここで,s<sub>1</sub>は式(10)に示したコン



図-7 腐食膨張による鉄筋周辺の変位

クリートに拘束された状態での錆厚であり, s<sub>2</sub>はコンク リートの拘束が無い状態における錆厚である。

*S*<sub>1</sub>境界上における半径方向および円周方向の応力は 次式に示すようになる。

また, *S*<sub>1</sub>境界上における円周方向のひずみは次式に示 すようになる。

ここで, Er: 錆の弾性係数である。

**図-7** に示すようにコンクリートの拘束によって錆層 が半径方向に s2変位することから, *S*1境界上における 周方向のひずみは次式に示すようになる。

$$\varepsilon_{\theta} = -\frac{s_2}{a + s_1 + s_2} \qquad \qquad \overrightarrow{\text{rt}}(13)$$

式(12)および式(13)より、コンクリートの拘束が無い 状態における錆の膨張変位 s2 は次式により算出される。

最終的に,式(10)および式(14)より内圧(腐食膨張圧) は次式に示すようになる。

$$P_0 = \frac{s}{\frac{a}{E}(\frac{a^2 + b^2}{b^2 - a^2} + v) + \frac{(a+s)^2}{E_v s}}$$
  $\overrightarrow{\text{E}}(15)$ 

式(16)中のsは錆厚であり、次式により算出される。

$$s = a\sqrt{1 + \alpha(\gamma - 1)} - a \qquad \qquad \overrightarrow{\mathrm{T}}(16)$$

ここで、a:鉄筋径、a:腐食率、 $\gamma$ :錆の体積膨張 率である。

次に,コンクリートの拘束圧は腐食ひび割れが発生 することにより,低下する。そこで,この腐食ひび割 れ幅の影響を次式により考慮することとした。

ここで、W:腐食膨張圧および腐食ひび割れ幅を考慮 した劣化パラメータ、 $w_{cr}$ : 腐食ひび割れ幅、 $C_{min}$ : 最小 かぶり厚、C: かぶり厚である。

式(17)に示すように、腐食ひび割れ幅の影響はエネル ギー観点に立脚し、底面および側面のかぶりコンクリ ートに発生した腐食ひび割れ幅にそれぞれのかぶり厚 を乗じてその総和を取ることにより評価している

図-8 に腐食試験体の拘束圧と同定した劣化パラメ ータWの関係を示す。同図に示すように腐食率および 腐食ひび割れ幅のみを考慮した場合に比べて,劣化パ ラメータと初期拘束圧の関係は比較的良好な相関性を 有していることがわかる。

**図-8**を回帰し初期拘束圧(*σ<sub>n0</sub>*)と劣化パラメータ W の関係は次式に示すようになる。

 $\sigma_{m0} = -0.20 \ln(W) - 0.31$   $\vec{x}(18)$ 

## 3.4 すべりの増加に伴う拘束圧の低下に関する検討

3.2項において示したように、拘束圧はすべりの増加 とともに減少する。しかしながら、その減少量は腐食 率、腐食ひび割れ幅およびせん断補強筋の有無によっ て異なっており一様では無い。

**図-9** は初期拘束圧と拘束圧の低下率の関係を示したものである。初期拘束圧と拘束圧の低下率には比較的良好な線形関係を有していることが分かる。さらに、 せん断補強筋の有無によってその低下率は明らかに異なっており、せん断補強筋を有する場合の初期拘束圧は主筋のみを有する場合に比べて拘束圧の低下率が少ない。これは、せん断補強のコンファインド効果によって鉄筋の抜出しが抑制されるためである。

**図-9**の初期拘束圧と拘束圧の低下率の関係を線形 近似すれば式(19)に示すようになる。

$$\sigma_m = 5.70\sigma_m - 1.89$$
 補強筋無  
 $\sigma_m = 3.04\sigma_m - 1.20$  補強筋有 式(19)



ここで, σ<sub>m</sub>:拘束圧の低下率である。

最終的に鉄筋腐食を生じた RC 梁部材の付着応力~すべり関係を式(1),式(18)および式(19)より決定される。

# 3.5 構築した付着構成則モデルの適用性評価

図-10 に各腐食試験体のすべり関係と本構築モデル の対比を示す。同図に示すように、構築した付着モデ ルは実験値を比較的良好に評価しており、その妥当性 が確認される。

# 4 結論

本研究では、腐食鉄筋を有する RC 梁部材の定着を有 する場合における付着応力すべり関係について検討を 行うとともに、鉄筋とコンクリートの拘束圧を考慮し た付着構成則モデルを構築した。

- (1)鉄筋腐食を生じた RC 梁部材の付着応力性状は鉄筋 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。
- (2)本付着構成則モデルは実験結果と比較的良好な一致 をしており、その妥当性が示された。

参考文献

- (1)島弘,周礼良,岡村甫:マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力・すべり-ひずみ関係,土木学会論文集, No.378, V-6, pp.165-174, 1987.2
- (2)福井亨平,佐藤優,鈴木修一,大下英吉:定着を有する腐食鉄筋とコンクリートの付着 応力性状に関する研究,コンクリート工学年次論文集,vol.28, No.2, pp.667-672, 2006

(3) 工藤礼央,大下英吉:拘束効果を有する鉄筋とコンクリートの付着性状に関する研究,

コンクリート工学年次論文集, vol.22, No.3, pp.1267-1272, 2000