

論文 鉄筋腐食を生じたRC部材における付着性状モデル構築に関する研究

山崎 理美*1・大下 英吉*2

要旨: RC 構造物において鉄筋とコンクリートの付着は構造性能において非常に重要な位置づけにある。そこで、本研究では鉄筋腐食した RC 部材の付着性状予測を目的とし鉄筋腐食を考慮した付着性状モデルを構築した。腐食ひび割れがコンクリート表面に達している場合のみではなく、コンクリート内部にひび割れが存在する場合にも適用可能なモデルを構築することにより、汎用性が高い付着応力モデルが構築された。

キーワード: 鉄筋腐食, 付着応力, すべり, ひび割れ, 腐食膨張圧

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。昨今の時代情勢から、既存の構造物を適切に維持管理し長期的な供用を目指す動きが活発となっている。そのためには、各種劣化に起因した構造性能の変化を正確に把握する必要がある。

鉄筋コンクリートに生じる劣化現象は多岐にわたるが、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。

鉄筋腐食した RC 部材の耐荷機構および構造性能の低下を決定付ける主たる要因は、鉄筋の腐食率とその不均一性、コンクリートの腐食ひび割れ幅や間隔および腐食鉄筋とコンクリートの付着性状である。コンクリートの破壊形態は様々であり、耐荷機構や構造性能の予測においては、それぞれの要因の影響度合いあるいは複合的な影響度合いにより定性的かつ定量的に評価しなければならない。特に、鉄筋とコンクリートの一体性が前提条件である RC 部材にとって腐食鉄筋とコンクリートの付着性状が非常に重要な要因であり、その定量的評価が必要不可欠である。

近年、内的、外的要因により構造物に生じる各種劣化現象が構造性能に及ぼす影響について各方面で盛んに研究が行われている。島ら¹⁾は無拘束状態における荷重端から離れた領域での付着応力-すべり関係（以下 τ - s 関係）を構築し、定着長の長さによる τ - s 関係の違いを考慮した τ - s - ε モデルを構築した。しかしながら、島らの研究においては、側圧等のコンクリートに作用する応力状態が付着性状に及ぼす影響については全く考慮されていない。

一方、腐食を生じた鉄筋とコンクリートとの付着性状を評価した研究も散見される。その研究の多くは、鉄筋

腐食率と付着応力の最大値或いは付着応力とすべりに関するものであり、それらの関係を腐食ひび割れ幅や腐食膨張圧への依存性の観点から議論した研究はほとんどない。

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するとともに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 の破壊規準のアプローチを利用したモデルを提案する。

腐食ひび割れ発生前では、腐食膨張圧の影響により鉄筋には拘束力が作用するため、付着応力は増加する傾向にある。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 τ は式(1)のように表すことができる。なお、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。

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

$$\tau_0 = \bar{\tau}_0 \frac{\tau_{0\max} + \sigma_n \tan \varphi_{cr}}{\tau_{0\max}}$$

ここで、 τ_0 は初期付着応力であり非腐食状態における付着応力、 σ_n は拘束圧、 φ_{cr} は内部摩擦角である。また、式(1)中の $\bar{\tau}_0$ は式(2)に示す島らの非腐食試験体における τ - s 関係式であり、 $\tau_{0\max}$ はその最大値である。

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

ここで、 S/D はすべり量を鉄筋径で除した値である。

2.2 付着応力と拘束圧

一般に、Mohr-Coulomb の破壊規準は図-1に示すように、圧縮強度 f_c' および引張強度 f_t から式(3)のように導

*1 中央大学 理工学研究科土木工学専攻 (学生会員)

*2 中央大学 理工学部都市環境学科教授 工博 (正会員)

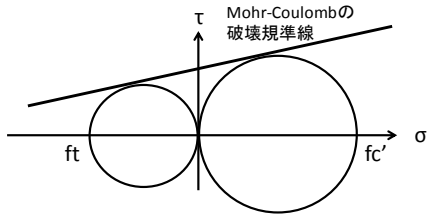


図-1 コンクリートの破壊規準線

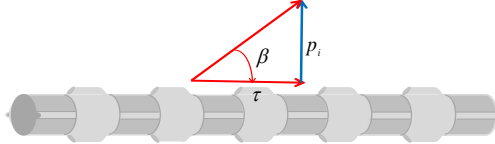


図-2 拘束圧と付着応力

かれる。

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

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 に対して図-2に示す鉄筋表面に凹凸が存在するとその幾何学的形状によって次式に示す拘束圧 p_i が発生する。

$$p_i = \tau \tan \beta \quad (4)$$

ここで、 β は鉄筋表面の凹凸と鉄筋軸方向のなす角である。

以上より、鉄筋の引抜きに対する鉄筋コンクリートの破壊規準は、Mohr-Coulombの破壊規準を適用したコンクリートの破壊規準線に加えて、鉄筋の幾何学的な拘束圧を考慮すると、引抜試験に対する拘束圧と付着応力の関係は式(5)で表すことができる。

$$\tau_{RC} = -\frac{(fc' - ft)(fc' - ft + 2\sqrt{fc'}ft \sin \beta \cos \beta)}{2\sqrt{fc'}ft(fc' + ft)} \sigma_n + \frac{-3\sqrt{fc'}^3 ft + \sqrt{fc'}ft^3 - 4fc'ft \sin \beta \cos \beta}{2(fc' + ft)} \quad (5)$$

2.3 腐食率と拘束圧

鉄筋腐食の進行により、コンクリートにはそれに応じた腐食膨張圧による拘束圧が発生する。本研究では、厚肉円筒理論を用いた腐食膨張圧モデル²⁾により腐食膨張圧 $\Delta\sigma_{cr}$ を算出する。

一方、引抜き载荷中には、式(4)に示した拘束圧が生じることとなる。したがって、腐食膨張圧を考慮した拘束圧 σ_n は式(6)で示される。

$$\sigma_n = p_i + \Delta\sigma_{cr} \quad (6)$$

2.4 マイクロクラックによる剛性低下

腐食膨張圧の反作用によりコンクリートに拘束圧が生じる際、コンクリートは円周方向に広げられ、引張応力 σ_θ が発生する。この引張応力 σ_θ は、厚肉円筒理論よれば、図-3に示すように中心からの距離に反比例する。

いま、コンクリートに作用する引張力 σ_θ が引張強度 ft に達する領域ではマイクロクラックが発生すると仮

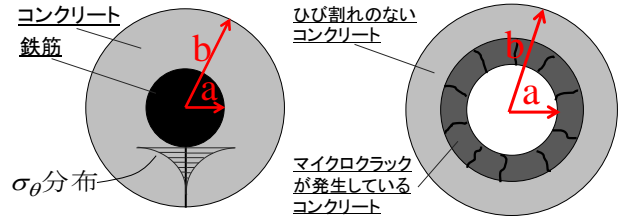


図-3 引張応力分布 図-4 ひび割れ発生領域

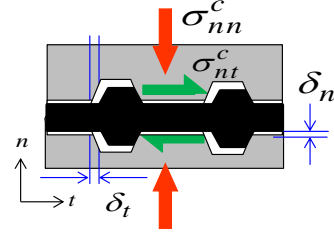


図-5 鉄筋とコンクリートの界面

$$ft \leq \frac{a^2 \cdot \sigma_n}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{b^2}{r^2} \right) \quad (7)$$

定すると、ひび割れ発生領域は式(7)を満足する r となる。

ここで、 r はひび割れ発生距離、 a および b はコンクリートの内径および外径である。

コンクリート内部にマイクロクラックが生じると、コンクリートの剛性は低下することとなる。図-4に示すように、マイクロクラックが発生している領域と発生していない領域は直列に結合されているので、剛性が低下後のコンクリートのせん断剛性 G_{cr} は式(8)となる。

$$G_{cr} = \frac{1}{\frac{1}{G_0} + \frac{1}{G_{cr}}} \quad (8)$$

ここで G_0 はひび割れの無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。

次に、鉄筋とコンクリートの界面に作用する応力と変位を図-5に示す。局所座標系 $n-t$ に関する構成方程式はフックの法則より式(9)で表される

$$\begin{Bmatrix} d\sigma_{nn}^c \\ d\sigma_{nt}^c \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} B_{nn} & B_{nt} \\ B_{tn} & B_{tt} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} d\delta_n \\ d\delta_t \end{Bmatrix} \quad (9)$$

ここで、 $d\sigma_{nn}^c$ は垂直応力、 $d\sigma_{nt}^c$ はせん断応力、 $d\delta_n$ 、 $d\delta_t$ は開口変位増分、すべり増分、 B_{nn} 、 B_{nt} 、 B_{tn} 、 B_{tt} は材料剛性である。

一般に、応力は変位の非線形関数としてされ、応力関数を変位で微分すると接線材料剛性係数は式(10)のように表される。

$$B_{nn} = \frac{\partial f_{nn}}{\partial \delta_n}, B_{nt} = \frac{\partial f_{nn}}{\partial \delta_t}, B_{tn} = \frac{\partial f_{nt}}{\partial \delta_n}, B_{tt} = \frac{\partial f_{nt}}{\partial \delta_t} \quad (10)$$

本研究では、互いに直交する方向への寄与分は無視するものと仮定し、式(9)における対角項は0となり、ひび割れ部分の構成方程式は式(11)となる。

$$\begin{Bmatrix} d\sigma_{nn}^c \\ d\sigma_{nt}^c \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} B_{nn} \cdot C & 0 \\ 0 & B_{tt} \cdot C \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} d\varepsilon_{nn} \\ d\gamma_{nt} \end{Bmatrix} \quad (11)$$

ここで、 C はコンクリートの純かぶり厚さである。式(11)に示したように対角項を無視することにより、 f_{nn} は δ_n のみの関数となり、引張軟化曲線で表すことができ、 f_{nt} は $\sigma_{nt}' - \delta_t$ の関係式として島式¹⁾で表す。

一方、ひび割れを生じたコンクリートの弾性係数は、内圧の増加に伴うひび割れ進展およびひび割れ幅の拡大によって低下する。変位を生じたコンクリートの弾性係数低減率 K は一般に式(12)で知られている。

$$K = \exp \left[-0.73 \frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon_{\text{peak}}} \left(1 - \exp \left(-1.25 \frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon_{\text{peak}}} \right) \right) \right] \quad (12)$$

ここで、 ε_{\max} は圧縮強度に対応するひずみ、 $\varepsilon_{\text{peak}}$ は過去に受けた圧縮ひずみの最大値である。

そして、ひび割れ発生後のコンクリートのせん断剛性は式(12)を用いて式(13)となる。

$$G' = K \cdot G_0 \quad (13)$$

最終的にマイクロクラックを含むコンクリート全体のせん断剛性 G_{cr} は、式(11)に示した鉄筋とコンクリートの噛み合いによるせん断剛性とひび割れを生じたコンクリートのせん断剛性の合成、すなわち式(11)、式(13)より式(14)となる。

$$G_{cr} = \frac{1}{\frac{1}{G'} + \frac{1}{B_{tt} \cdot S}} \quad (14)$$

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(15)のように表すことができる。

$$\tau = \tau_{RC} \frac{G_{cr}}{G_0} \quad (15)$$

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、腐食膨張圧の一部が解放される。それに伴い、拘束効果が減少し、付着応力は大幅に低下することとなる。

そこで、ひび割れ発生後における付着応力モデルは、腐食ひび割れ発生前のモデルと同様に拘束圧の影響を考慮した Mohr-Coulomb の破壊規準の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 τ' は、腐食ひび割れによって腐食膨張圧の一部が解放された後に残存する拘束圧の影響を表すことになる。また、腐食ひび割れ幅はすべりの増加に伴って拡大するため、内部摩擦角をすべり $\phi_{cr}(s)$ の関数として、腐食ひび割れを考慮した付着応力モデルを式(16)のように定義した。

$$\tau_{cr} = \tau' + \sigma_n' \tan \phi_{cr}(s) \quad (16)$$

ここで、粘着項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(15)に示した同一腐食率でひび割れがないと仮定した場合の付着応力 τ に乘じ、式(17)で示す。

$$\tau' = \alpha \cdot \tau \quad (17)$$

$$\alpha = \frac{\sigma_{n0} \tan \phi_n(s)}{\sigma_{out} \tan \phi_{out}(s)}$$

3.2 腐食率と腐食ひび割れ幅

既往の研究³⁾において、腐食率 ρ と腐食ひび割れ幅 w には相関性が認められており、その関係を式(18)に示す。

$$w = 0.1106\rho + 0.096 \quad (18)$$

3.3 拘束圧に及ぼす鉄筋腐食の影響

図-6 に腐食ひび割れ幅と拘束圧の関係を示す。一般に鉄筋腐食が生じると腐食膨張圧により拘束圧が増加するが、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こととなる。

既往の研究⁴⁾では、腐食ひび割れの進展に伴う拘束圧の変化 σ_{n0} は次式により定義している。

$$\sigma_{n0} = e^{-\beta w} \sigma_{n\max} \quad (19)$$

ここで、 $\sigma_{n\max}$ は腐食ひび割れ表面到達前における拘束圧の最大値、 β は横かぶり厚および圧縮強度から求まる材料固有の定数であり次式に示す。

$$\sigma_{n\max} = 0.1916c1 + 0.1076fc - 0.61043 \quad (20)$$

$$\beta = (-0.5376 \log[c2] + 2.7589) fc^{\frac{2}{3}}$$

ここで、 $c1$ は最小かぶり厚、 $c2$ は横かぶり厚である。

したがって、ひび割れが開くことによって失われる解放圧 σ_{out} および半径方向の最大ひずみ $\varepsilon_{r\max}$ は式(21)で表すことができる。

$$\sigma_{out} = \sigma_{n\max} - \sigma_{n0} \quad (21)$$

$$\varepsilon_{r\max} = \frac{\sigma_{n\max}}{E}$$

ここで、 E はコンクリートの弾性係数である。

式(20)で導いた半径方向の最大ひずみ $\varepsilon_{r\max}$ を式(12)へ代入することで鉄筋を引抜く前の残存弾性係数が得られる。

3.3 鉄筋の引抜きによる拘束圧

鉄筋の引抜きにより拘束圧は増加し、その後腐食ひび割れが拡大することで再び圧力は解放されることとなる。この際の拘束圧 σ'_{np} は式(6)と同様に次式に示す。

$$\sigma'_{np} = \sigma_{n0} + pi \quad (22)$$

拘束圧が鉄筋に作用すると、コンクリートには拘束圧と等価な膨張圧が作用する。この膨張圧によるコンクリ

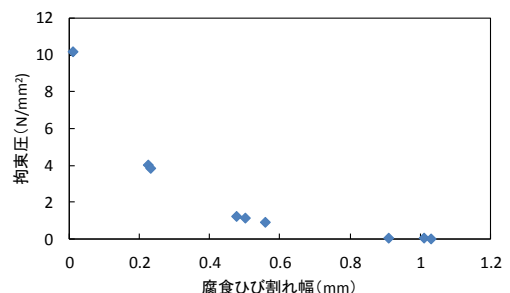


図-6 腐食ひび割れ幅と拘束圧の関係

ートの半径方向のひずみ $\varepsilon'_{r\max}$ は次式で表すことができる。

$$\varepsilon'_{r\max} = \frac{\sigma'_{n\max}}{E} \quad (23)$$

鉄筋の抜け出しによって拘束圧が増加し、それに伴ってひび割れは進展するとともにその開き幅も増大する。

図-7 に示すように、ひび割れ幅 w' 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は仮想仕事の原理より、拘束圧 σ'_{np} の関数として次式で表すことができる。

$$\delta = \frac{3\pi a^3}{EI} \sigma'_{np} \quad (24)$$

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

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。

ひび割れ幅の拡大に伴って拘束圧 σ'_n は式(19)と同様に、次式のように変化する。

$$\sigma'_n = e^{-\beta w'} \sigma'_{np} \quad (25)$$

したがって、鉄筋の引抜きによるひび割れ幅の拡大に伴う解放圧 σ'_{out} は次式となる。

$$\sigma'_{out} = \sigma'_{np} - \sigma_{n0} \quad (26)$$

3.3 ひび割れ幅拡大による剛性の低下

ひび割れ幅拡大に伴う圧力解放後もコンクリートには残留ひずみが存在する。一般に、残留ひずみ ε_p は次式で表す事ができる⁵⁾。

$$\varepsilon_p = \varepsilon'_{r\max} - 2.86\varepsilon'_{peak} \left(1 - e^{-0.35 \frac{\varepsilon'_{r\max}}{\varepsilon'_{peak}}}\right) \quad (27)$$

ここで、 ε'_{peak} は引張強度に対応するひずみである。

図-8(a)に示すように、ひび割れによる剛性の低下を考慮した状態での圧縮応力 σ'_c は、式(27)で示した塑性ひずみ ε_p と式(12)に示した弾性係数低下率 K より次式で示される。

$$\sigma'_c = (\varepsilon_{r\max} - \varepsilon_p) KE \quad (28)$$

同様に、同図(b)に示す引張応力状態においても、ひび割れによる剛性の低下を考慮した状態での引張応力 σ_t は一般に次式で示される。

$$\sigma_t = ft \left(\frac{\varepsilon_{tpeak}}{\varepsilon_{\theta\max}} \right)^{0.4} \quad (29)$$

ここで、 ε_{tpeak} は引張強度に対応するひずみであり、円周方向の最大ひずみ $\varepsilon_{\theta\max}$ は表面ひび割れ幅 w' を用い、式(30)となる。

$$\varepsilon_{\theta\max} = \frac{w'}{2b\pi} \quad (30)$$

図-9 に示すように鉄筋を引抜く際の内部摩擦角 $\phi_{cr}(s)$ は式(28)、式(29)で求めた圧縮応力 σ'_c および引張応力 σ_t を式(3)へ代入することで、式(31)で表すことができる。

$$\tan \phi_{cr}(s) = \frac{\sigma'_c - \sigma_t}{2\sqrt{\sigma'_c} \sqrt{\sigma_t}} \quad (31)$$

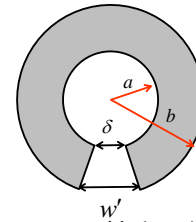


図-7 ひび割れの仮定

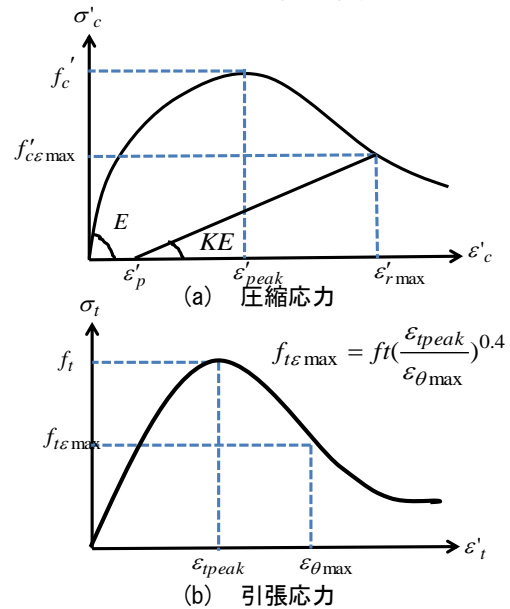


図-8 剛性の低下を考慮した応力

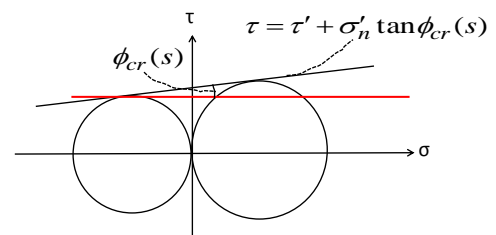
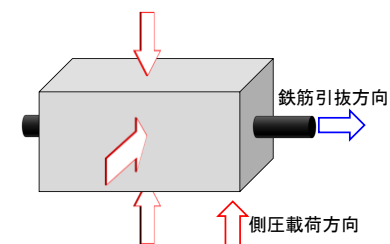
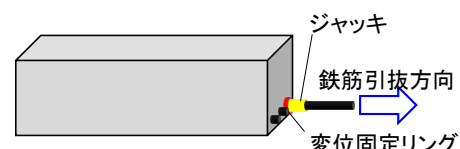


図-9 ひび割れ進展中の破壊規準



(a) Sシリーズ試験体



(b) CRシリーズ試験体

図-10 引抜試験概要

4. 本構築モデルの精度の検討

4.1 実験概要

引抜試験概要を図-10 に示す。腐食膨張圧は力の釣合いから同図(a)示す側圧にはほぼ等価になるので、腐食ひび

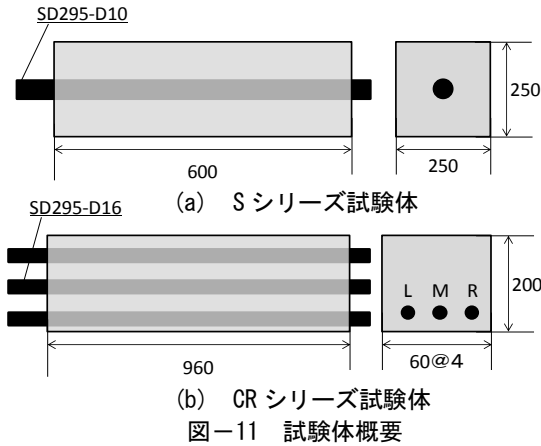


図-11 試験体概要

表-1 コンクリートの配合

シリーズ	単位量 (kg/m ³)					
	水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤	NaCl
S	174	318	748	1032	0.343	/
CR	168	280	828	998	2.8	

表-2 コンクリートの力学特性およびパラメータ

試験体名	側圧 (N/mm ²)	腐食率 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
S-3	3.4	/	22	1.9	26800
S-6	6.6	/	22	2.4	27300
CR-10	/	10	24	1.9	20400
CR-20	/	20	20	1.7	20000

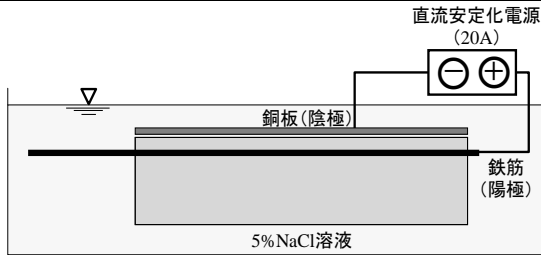


図-12 電食試験概要

割れ発生前モデルの比較として、所定の側圧を保持し、200 μ /min で引抜試験を行った。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)に示す腐食ひび割れを発生させた状態での引抜試験は 9.8kN/min の単調載荷で行った。なお、以降では、側圧載荷試験体を S シリーズ、腐食試験体を CR シリーズ試験体とする。

試験体の形状寸法および配筋を図-11 に示す。CR シリーズ試験体においては、引抜く鉄筋は同図(b)における L 鉄筋とした。コンクリートの配合を表-1 に、実験パラメータおよび力学特性を表-2 に示す。鉄筋腐食には電食試験法を採用した。図-12 に電食試験概要を示す。5%NaCl 水溶液を満した水槽内に浸漬させ、鉄筋を陽極側、銅板を陰極側に接続し直流電源 20A を通電した。

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。鉄筋の軸方向ひずみは張り合わせ鉄筋を用い、ひずみゲージを鉄筋内部に設置した。

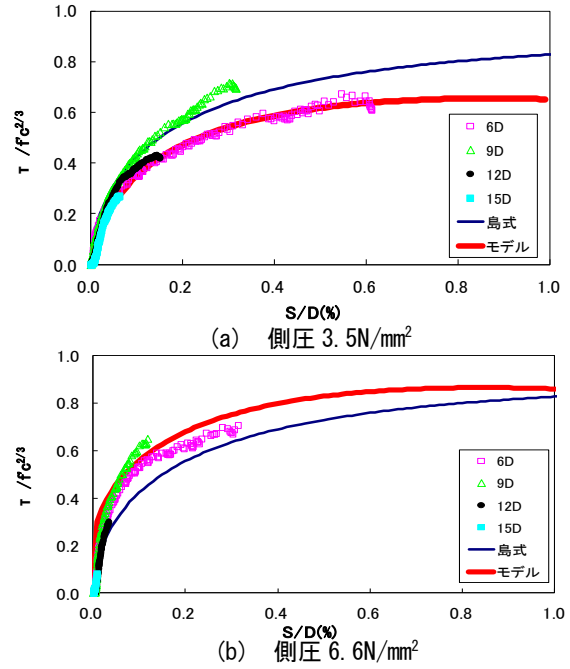


図-13 腐食ひび割れ発生前におけるモデルの検討

4.2 腐食ひび割れ発生前の本モデルの適用性評価

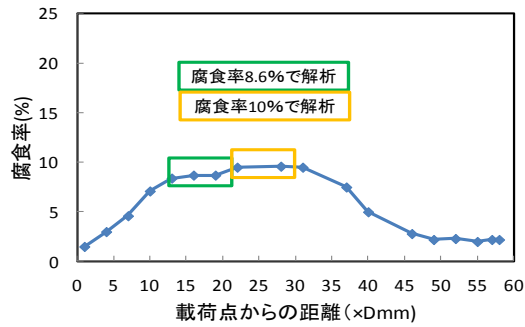
腐食ひび割れ発生前のモデルの適用性評価として、側圧を腐食膨張圧と仮定することにより、S シリーズ試験体の実験結果との比較を行う。なお、本研究において式(5)における β は 45 $^\circ$ とした。

S シリーズ試験体の実験結果と本モデルによる解析結果の比較を図-13 に示す。図中には島式も示している。なお、図中の 6D, 9D, 12D, 15D は載荷点からの距離(\times D)を表している。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く一致している。同図(a)においては、島式より小さく評価しているが、既往の研究⁹⁾において、ある一定の側圧を超えた場合にのみ拘束効果が発揮され付着応力性状に影響が見られると報告されており、本モデルにおいても同様な結果が得られた。すなわち、本モデルの小さな拘束圧への適用性が確認された。

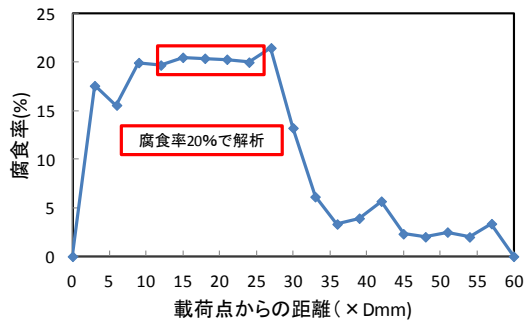
4.3 腐食ひび割れ発生後の本モデルの適用性評価

図-14 に各試験体の腐食率分布を示す。同図(a)に示すように CR-10 の試験体では腐食率にばらつきを生じているため、CR-10 の試験体 16D および 19D, 22D および 28D における実測の局所腐食率 8.6% および 10% の 2 通りで解析を行うこととした。一方、CR-20 においては、解析の対象とした領域において腐食率は 20% ほぼ一定であるため、20% で解析を行った。

CR シリーズ試験体の実験結果と本モデルによる解析結果の比較を図-15 に示す。いずれの試験体においても実験結果と良く一致している。本モデルにおいて 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。また、腐食率が小さいと腐食の進行に

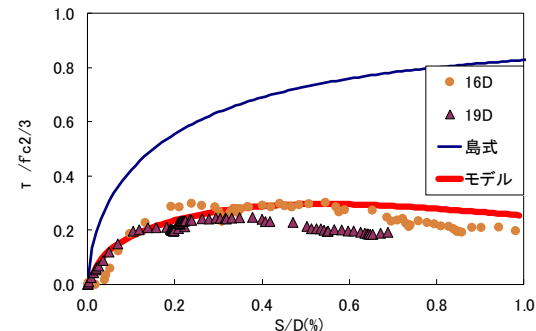


(a) CR-10

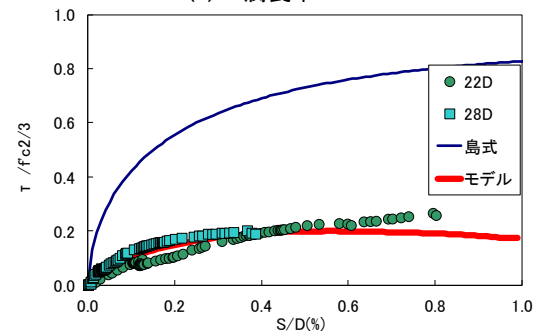


(b) CR-20

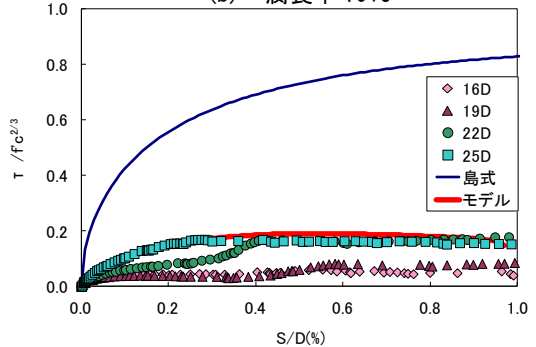
図-14 腐食率分布



(a) 腐食率 8.6%



(b) 腐食率 10%



(c) 腐食率 20%

図-15 腐食ひび割れ発生後におけるモデルの検討

よる付着応力の低下率は顕著であるが、腐食の進行が激しくなりある程度まで低下すると腐食の進行に伴う付着応力の低下率は小さくなる。本モデルにおいても同様な傾向を示している。

5. まとめ

本研究では、腐食した鉄筋とコンクリートの付着性状に及ぼす腐食膨張圧や腐食ひび割れの影響に関する検討を行い、それらの依存性を加味した付着応力モデルの構築並びにその適用性評価を行った。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。
- (4) 腐食ひび割れの有無だけではなく、局所的な腐食率の違いに対しても実験結果との比較により、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, 土木学会年次学術講演会講演概要集 Vol.66, V-233, pp.465-466, 2011
- 3) 阿部哲雄, 番場俊介, 村上祐貴: かぶり面の腐食ひび割れ幅が異なる腐食した鉄筋コンクリートの付着応力性状に関する研究, 土木学会関東支部第 29 回新潟会研究調査発表会論文集, pp.398-401, 2011.11
- 4) 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
- 5) 土木学会: 2007 年制定コンクリート標準示方書[設計編], 2007
- 6) 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報告集, vol.22, No.3, pp.1267-1272, 2000