

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

中央大学理工学部土木工学科 学生会員 足助 美岐子
 中央大学理工学部土木工学科教授 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 知明

1. はじめに

塩害や中性化による鉄筋の腐食は、構造体として機能する鉄筋量を減少させるとともに腐食膨張によるコンクリートへのひび割れ発生、鉄筋とコンクリートの付着性能の低下等、構造性能に及ぼす影響が大きい劣化現象である。したがって、鉄筋の腐食性状を適切に評価することが不可欠であり、併せてその性状を評価可能なモデルを構築することが、RC 構造物の構造性能評価を行う上で非常に重要な位置づけにある。このようなことから、コンクリート表面のひび割れ性状や部分的な隆起といった外観変状に基づいて、鉄筋の腐食性状を評価する手法の確立が急務となっている。

鉄筋腐食によるコンクリートの腐食ひび割れ性状に関する研究は、現在までに多数実施されている。既往の研究では、かぶり厚と鉄筋径の比によって、コンクリートに生じる腐食ひび割れは、剥離ひび割れと鉄筋軸に沿ったひび割れに大別されることが明らかになっている¹⁾。しかしながら、鉄筋腐食に伴う初期ひび割れ発生時期やかぶり面にひび割れが到達する段階ならびにその後のひび割れの進展状況は未解明な部分が多く、コンクリート表面のひび割れから鉄筋の腐食性状を予測することは、尚更困難な状況にある。

そこで本研究では、鉄筋腐食率の増加に伴うひび割れ幅の増加について検討し、両者の関連性を統一的に評価可能なモデルの構築を行った。

2. 腐食ひび割れ幅推定モデル

2.1 モデルの概要

一般に、鉄筋の腐食はその数倍もの体積を有する腐

食物を生成し、鉄筋表面に堆積する。したがって、コンクリートには、腐食率に応じた膨張圧が生じ、強度との関連性からひび割れが発生することとなる。本研究ではこのような一連の挙動を厚肉円筒理論によりモデル化を行うこととする²⁾。

図 - 1 に示すように、同図(a)に示す腐食を生じる鉄筋(領域(1))が腐食により領域(2)のような自由な膨張を生じたと仮定する。しかしながら、この変形はコンクリートと領域(3)で示す非腐食鉄筋の拘束を受けることになり、実際には同図(b)の変形となる。領域(2)の外径にはコンクリートによる拘束圧 q_1 、内径には鉄筋(領域(3))による拘束圧 q_0 が作用することになる。一方、コンクリート(領域(4))には同図(c)に示す膨張圧 q_1 が作用し、非腐食鉄筋(領域(3))には膨張圧 q_0 が作用することになる。

(1) かぶりコンクリートの変位

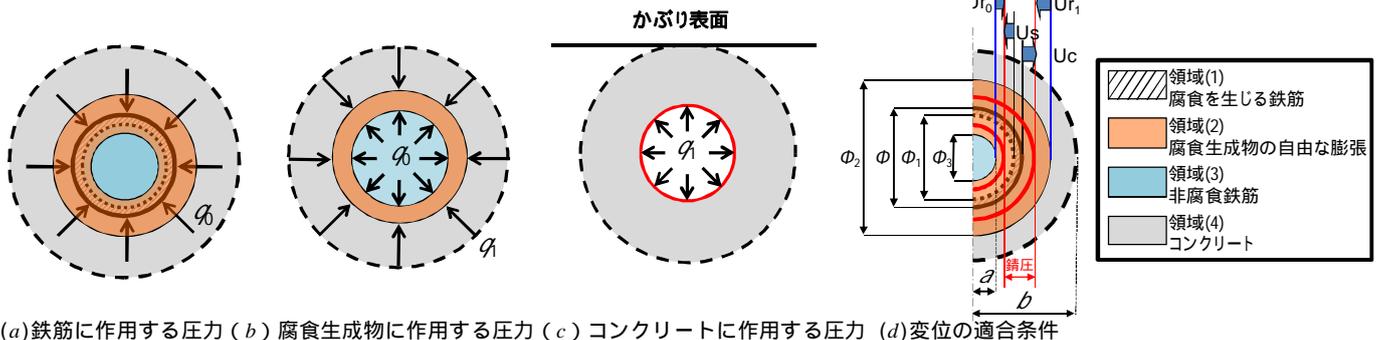
かぶりコンクリートは内圧 q_1 を受ける厚肉円筒と仮定し、コンクリート内径の膨張変位 u_c は平面ひずみ状態を仮定すると、式(1)で表される。

$$u_c = \frac{(1+\nu_c)\{(1-2\nu_c)+K_0^2\}\phi}{2E_c(K_0^2-1)}q_1 \quad (1)$$

ここで、 ν_c はコンクリートのポアソン比、 E_c はコンクリートの弾性係数、 K_0 はかぶりと鉄筋径の比($=b/a$)であり、 a および b はそれぞれ a は鉄筋半径、 b は鉄筋中心からコンクリート表面までの距離である。

(2) 鉄筋の変位

径 ϕ_1 を有する鉄筋に均一な腐食が発生すると、腐食により減少した径 ϕ_0 は、式(2)で表される。



(a)鉄筋に作用する圧力 (b) 腐食生成物に作用する圧力 (c) コンクリートに作用する圧力 (d)変位の適合条件

図 - 1 膨張圧と変位モデル

キーワード 腐食 表面腐食ひび割れ 理論式 電食実験 ひび割れ幅推定モデル

住所：東京都文京区春日 1-13-27 中央大学 TEL：03-3817-1892

$$\phi_1 = \sqrt{\phi^2 - 4 \cdot A_r / \pi} \quad (2)$$

ここで、 A_r は鉄筋の腐食を生じる断面積であり、式(3)で表される。

$$A_r = A_s \cdot \alpha / 100 \quad (3)$$

ここで、 A_s は鉄筋の断面積であり、 α は鉄筋の腐食率(腐食後の質量減少率)であり、式(4)で表される。

$$\alpha = (W_b - W_a) / W_b \times 100 \quad (4)$$

鉄筋は、外圧 q_0 の圧縮力を受け、それによる変位 u_s は式(5)のように求められる。

$$u_s = -\frac{(1 + \nu_s)(1 - 2\nu_s)\phi_1}{2E_s} \cdot q_0 \quad (5)$$

ここで、 ν_s は鉄筋のポアソン比、 E_s は鉄筋の弾性係数である。

(3)腐食生成物の変位

腐食生成物は、自由膨張を生じることにより、内径 ϕ_3 、外径 ϕ_2 の円筒になるものと仮定する。その時の ϕ_2 、 ϕ_3 は式(6)、(7)で表される。

$$\phi_2 = \beta \sqrt{\frac{4n \cdot A_r}{(\beta^2 - 1)\pi}} \quad (6)$$

$$\phi_3 = \sqrt{\frac{4n \cdot A_r}{(\beta^2 - 1)\pi}} \quad (7)$$

ここで、 n は腐食生成物の体積膨張率であり、既往の研究³⁾で得られた鉄と腐食生成物の単位体積質量比(=7850/5300)を用いた。また、 β は内径と外径の比(= ϕ_2 / ϕ_3)であり、式(8)の制約条件を満足しなければならない。なお、本研究では式(8)を満足する平均的な値とした。

$$\phi_3 < \phi_1 < \phi_2 \quad (8)$$

腐食生成物が、内圧 q_0 、外圧 q_1 を受けると、内径の膨張変位 u_{r0} および外径の拘束変位 u_{r1} はそれぞれ式(9)、(10)で表される。

$$u_{r0} = \frac{(1 + \nu_r)\phi_3}{2E_r(K_1^2 - 1)} \left\{ (1 - 2\nu_r)(q_0 - q_1 \cdot K_1^2) + (q_0 - q_1)K_1^2 \right\} \quad (9)$$

$$u_{r1} = -\frac{(1 + \nu_r)\phi_2}{2E_r(K_1^2 - 1)} \left\{ (1 - 2\nu_r)(q_0 - q_1 \cdot K_1^2) + (q_0 - q_1) \right\} \quad (10)$$

ここで、 K_1 は ϕ_2 / ϕ_3 、 ν_r は腐食生成物のポアソン比、 E_r は腐食生成物の弾性係数である。

(4)変位の適合条件

鉄筋と腐食生成物、腐食生成物とかぶりコンクリートにおける変位の適合条件は式(11)のように表される。

$$\begin{aligned} u_s &= \phi_1 / 2 - \phi_3 / 2 - u_{r0} \\ u_c &= \phi_2 / 2 - \phi / 2 - u_{r1} \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)に各種のデータを入力し、連立方程式を解くことにより内圧 q_0 および外圧 q_1 が求まることになる。

2.2 鉄筋腐食率によるコンクリート表面のひび割れ幅

図-2に示す、厚肉円筒を仮定したかぶりコンクリート断面に発生する円周方向の応力 σ_θ は、内圧を q_1 、

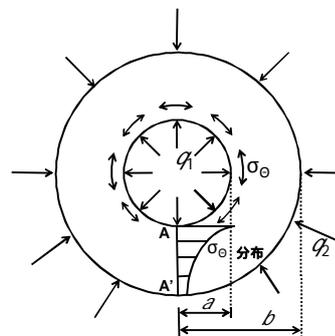
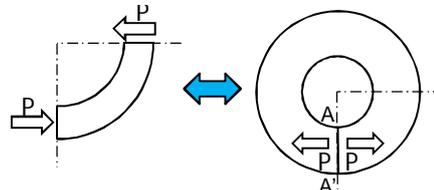
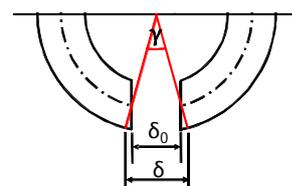


図-2 腐食生成物に作用する内圧



(a) 仮想ひび割れと解放される応力



(b) 腐食ひび割れ開口幅

図-3 腐食ひび割れモデル図

外圧を q_2 とすると(12)式で表される。

$$\sigma_\theta = -\frac{a^2 b^2 (q_2 - q_1)}{b^2 - a^2} \frac{1}{r^2} + \frac{q_1 a^2 - q_2 b^2}{b^2 - a^2} \quad (12)$$

ここで、内圧 q_1 は前節で示した式(11)で求まる値である。一方外圧 q_2 は、複数本の鉄筋が配筋された場合に、相互の膨張圧により決定される圧力である。なお本研究では、一本の鉄筋を対象としているため無視することとする。

式(12)で示した円周方向の応力 σ_θ がコンクリートの引張強度を超えると、ひび割れが生じ徐々にコンクリート表面に向かって進展する。そして、表面に到達するとひび割れが開口すると同時に全応力が解放されることになる。その幅は解放される全応力に依存したものとなる。

いま、図-3(a)に示すように、仮想ひび割れを設定する。仮想ひび割れは、初期状態においては互いに接合しているが、図-2に示した内圧を受ける状態では、上述した解放される合力に相当する幅 δ_0 が開口するものとする(図-3(b))。さらに、リング形状を保持するために、開口幅 δ_0 は同図(b)に示すような中心角に相当する幅 δ となる⁴⁾。

(1)解放される全応力とひび割れ幅

ひび割れが発生する A-A'断面における応力 σ_θ によるひび割れ幅 δ_0 は、図-3に示すように、合力 P を作用させた際の開口幅となり式(13)で表される。

$$\delta_0 = \frac{4\pi D}{E} \quad (13)$$

ここで、Dはわん曲した棒の曲げに対する初等理論の解をほぼ完全なリングに応用することにより求まる積分定数であり、式(14)のように表される。

$$D = -\frac{P}{N}(a^2 + b^2) \quad (14)$$

ここで、Nは式(15)で表され、Pは式(12)で示した円筒理論から求まるの合力とした。

$$N = a^2 - b^2 + (a^2 + b^2) \log \frac{b}{a} \quad (15)$$

$$P = \int_a^b \sigma_\theta dr \quad (16)$$

(2) 中心角とひび割れ幅

最終的なひび割れ幅は、図-3に示すように中心角 δ をもった曲げ変形であることから、中心角 δ およびひび割れ幅 γ は、式(17)、(18)で表される。

$$\gamma = \delta_0 \frac{2}{a+b} \quad (17)$$

$$\delta = \gamma \cdot b \quad (18)$$

3. 鉄筋腐食によるコンクリートのひび割れ進展実験

3.1 実験概要

試験体は、図-4に示すような200×200×500mmの角柱であり、鉄筋はD22(SD345)異形鉄筋が表-1に示すかぶり位置に1本配置した。かぶり表面に発生する腐食ひび割れ幅の測定にはπ型変位計を用い、その設置位置は図-4に示す鉄筋軸方向の中央断面、端面、およびその中心断面の3ヶ所とした。実験パラメータは表-1に示すように純かぶりと目標腐食率である。純かぶりの水準は3水準であり、前章に示した b/a に換算すると2.8, 4.2, 6.0となる。目標腐食率は、1.5%, 2.0%の2水準とした。コンクリートの配合は表-2に示す通りである。なお、セメントには早強セメントを使用し、練り混ぜ水には鉄筋腐食を促進させるため5%NaCl水溶液を使用した。

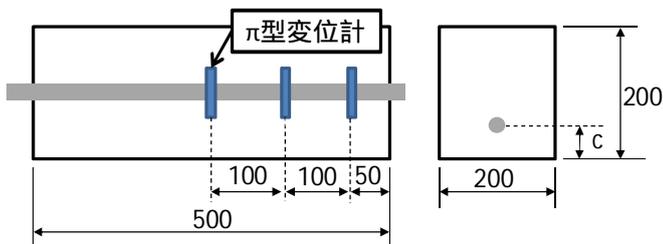


図-4 試験体概要

表-1 実験パラメータ

試験体No	かぶり厚 C(mm)	目標腐食率 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)
C20-1.5	20	1.5	13.3
C35-1.5	35		
C55-1.5	55		
C20-2.0	20	2.0	19.3
C35-2.0	35		
C55-2.0	55		

3.2 腐食試験方法と測定項目

本実験では、腐食試験方法として電食試験法を採用した。試験体は、図-5に示すように練り混ぜ水5%NaCl水溶液を満たした水槽内にかぶり面を上にした状態で、ひび割れ幅測定面が浸漬しないように設置した。また、銅版は試験体底面(水槽下面)に設置し、鉄筋を陽極側、銅板を陰極側に接続した状態で直流定電流を通電した。

鉄筋の腐食率は質量減少率で定義し、腐食前の鉄筋の質量は配筋の前に直接計測し、単位長さ当りの質量は場所によらず一定と仮定した。電食試験終了後に、試験体からは取り出した鉄筋は、10%濃度クエン酸二アンモニウム溶液に24時間浸漬させ、腐食生成物を除去した後に質量を計測した。鉄筋腐食率の測定箇所は、鉄筋を50mm間隔で切断し、局所腐食率を計測した。

図-6に各試験体の鉄筋の腐食率分布を示すように、鉄筋軸方向ではほぼ一様な腐食率となっている。

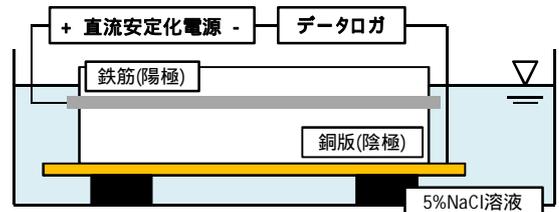


図-5 電食実験概要

表-2 コンクリートの配合

Gmax (mm)	W/C (%)	Sl (cm)	Air (%)	単位水量(kg/m ³)				混和剤
				W	C	S	G	
20	60	10.0	5.0	164	290	798	1003	2.9

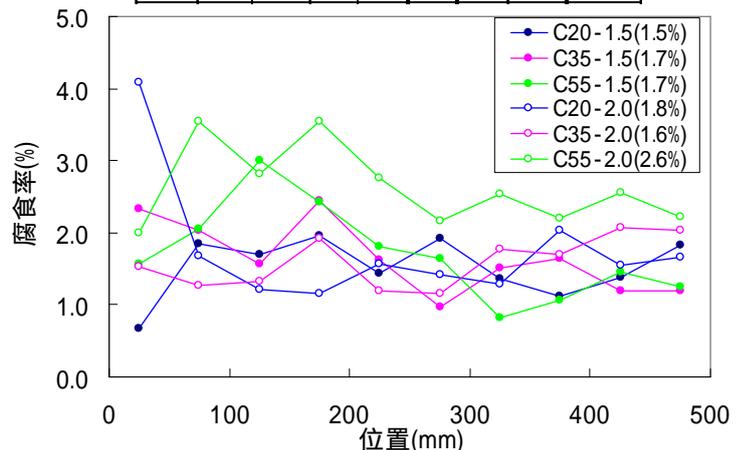


図-6 各試験体の平均腐食率と腐食率分布

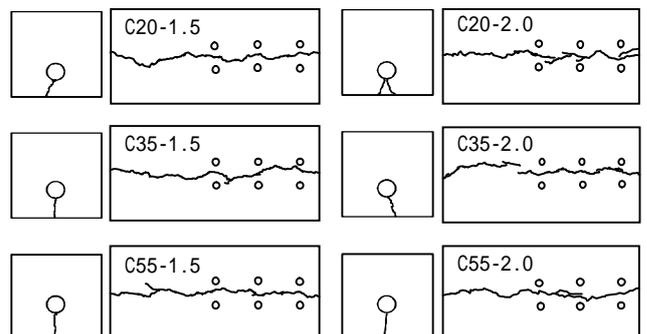


図-7 かぶりコンクリートの腐食ひび割れ性状

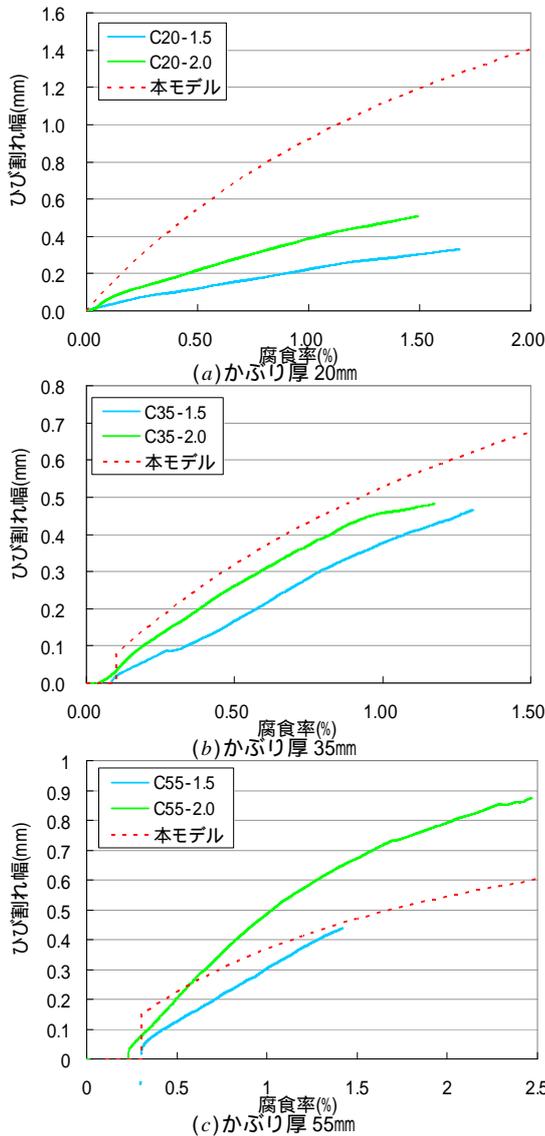


図 - 8 腐食率と腐食ひび割れ幅の関係

表 - 3 解析に用いたパラメータ

	弾性係数(N/mm ²)	ポアソン比
コンクリート	$E_c=18958$	$\nu=0.2$
鉄筋	$E_s=2.1 \times 10^5$	$\nu=1/6$
腐食生成物	$E_r=2.0 \times 10^2$	$\nu=1/6$

3.3 腐食率と表面ひび割れ幅の関係

図 - 7 および図 - 8 は、各試験体の腐食ひび割れ性状および各試験体の腐食率と腐食ひび割れ幅の関係を示す。なお、図 - 8 に示す記号は、各試験体の腐食率とひび割れ幅の実測値であり、実線は上述の実測値と積算電流量から求めた、腐食率とひび割れ幅の近似曲線である。

図-7においては、C20-2.0では剥離ひび割れ、その他の試験体では軸方向ひび割れが確認できた。

図-8に示すように、コンクリート表面にひび割れ発生する時の腐食率は、かぶり厚 20mm、35mm および 55mm において、それぞれ 0.03%、0.10% および 0.27% であり、その時点における急激なひび割れの開口幅は 0.01mm、0.03mm および 0.05mm というように、いずれもかぶり厚に応じて大きくなる。

3.4 表面ひび割れ発生後のひび割れ幅進展予測

2章で構築したモデルに本実験の条件を代入し、モデルの適用性評価の検討を行うこととする。なお、解析に用いた各パラメータは実験値であり、それらを表 - 3 に示す。

まず、いずれのかぶり厚の試験体においても、表面ひび割れ発生後からのひび割れ幅は、実験値および理論値ともに腐食率に応じて放物的に大きくなるという同一の傾向を示している。また、かぶり厚が 35mm および 55mm の試験体においては、理論値と実験値のひび割れ幅は比較的良好な一致を示しているが、かぶり厚 20mm においては全く異なる傾向を示している。この差異の一要因としては、腐食生成物が早い段階からひび割れを通じて水中やコンクリート表面に流出したため、その量に応じて腐食膨張圧が小さくなったことが考えられる。

また、実験結果においてはかぶり厚が大きくなると、腐食ひび割れ幅は大きくなるという傾向を示しているが、本モデルでは逆に小さくなるという傾向を示している。今後、本モデルの改良を行っていく必要がある。

4. まとめ

本研究は、鉄筋腐食による膨張圧およびひび割れ幅予測モデルの構築を行った。また、電食実験を行い、腐食率とひび割れ幅の関係をモデルと比較したところ、以下の結果が得られた。

- (1) 表面ひび割れ発生時の腐食率とその時点での開口幅はかぶり厚が大きくなるとともに大きくなる傾向にある。
- (2) かぶり厚が鉄筋径に比べて大きいものは、比較的良好な一致を示した。
- (3) 実験結果において、表面ひび割れ幅はかぶり厚と鉄筋径の比 (b/a) によって異なり、同じ腐食率において b/a が大きくなるほど、ひび割れ幅も大きくなる傾向にある。

参考文献

- 1) 堤知明, 松島学, 村上祐治, 関博: 腐食ひび割れの発生機構に関する研究, 土木学会論文集, No.532/V-30, pp159-166, 1996
- 2) 松島学, 堤知明, 関博, 松井邦人: 塩害環境下における RC 構造物の設計かぶり, 土木学会論文集, No.490/V-23, pp41-49, 1994.5
- 3) 大下英吉, 堀江宏明, 長坂慎吾, 谷口修, 吉川信二郎; 鉄筋の強制加熱により変動するコンクリート表面温度性状に基づいた RC 構造物の鉄筋腐食性状評価に関する研究, 土木学会論文集, E Vol. 65, No. 1, pp.76-92, 2009.2
- 4) S.P.Timoshenko: 弾性論, コロナ社, pp65-91