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

1.はじめに

腐食膨張によるコンクリートへのひび割れ発生は, 構造性能に及ぼす影響が大きい劣化現象である。現在 コンクリート表面の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。しか し,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,困 難な状況にある。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

ー般に,鉄筋の腐食は腐食物生成物が,鉄筋表面に 堆積することにより,コンクリートに腐食膨張圧が生 じ,ひび割れが発生する。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った¹⁾。

(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,内径の膨張変位 u_c は式(1)で表される。

$$u_{c} = \frac{(1+v_{c})\{(1-2v_{c})+K_{0}^{2}\}\phi}{2E_{c}(K_{0}^{2}-1)}q_{1}$$
(1)

ここで, 。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, 鉄筋半径および鉄筋 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 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 」は,式(2)で表される。

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

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。 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。

$$Ar = As \cdot \alpha / 100 \tag{3}$$

$$\alpha = (W_b - W_a) / W_b \times 100 \tag{4}$$

鉄筋は,外圧 q₀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.

$$u_{s} = -\frac{(1+v_{s})(1-2v_{s})\phi_{1}}{2E_{s}} \cdot q_{0}$$
(5)

ここで, _sは鉄筋のポアソン比, E_sは鉄筋の弾性係 数である。

中央大学大学院	学生会員	足助 身	€岐子
中央大学教授	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

(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 3,外径 2の円筒になるものと仮定する。その時の 2, 3は式(6),(7)で表される。

$$b_2 = \beta \sqrt{\frac{4n \cdot A_r}{(\beta^2 - 1)\pi}} \tag{6}$$

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

ここで,nは腐食生成物の体積膨張率であり,既往の研究²⁾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。

腐食生成物内径の膨張変位 u_{r0} および外径の拘束変 位 u_{r1} はそれぞれ式(8),(9)で表される。

$$u_{r0} = \frac{(1+\nu_r)\phi_3}{2E_r(K_1^2-1)} \left\{ \left(1-2\nu_r\right) \left(q_0 - q_1 \cdot K_1^2\right) + (q_0 - q_1)K_1^2 \right\}$$
(8)

$$u_{r1} = -\frac{(1+\nu_r)\phi_2}{2E_r(K_1^2 - 1)} \left\{ (1 - 2\nu_r) (q_0 - q_1 \cdot K_1^2) + (q_0 - q_1) \right\}$$
(9)

ここで,K₁は ₂/₃, _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(10)のように表される。 $u_s = \phi_1/2 - \phi_3/2 - u_{r0}$ (10) $u_s = \phi_2/2 - \phi_2/2 - u_{s1}$

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 q₀および外圧 q₁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

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 は,式 (11)で表される。

$$\sigma_{\theta} = -\frac{a^2 b^2 (q_2 - q_1)}{b^2 - a^2} \frac{1}{r^2} + \frac{q_1 a^2 - q_2 b^2}{b^2 - a^2}$$
(11)

ここで,内圧 q1 は前節で示した式(11)で求まる値で ある。一方外圧 q2 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。本研究では一本 の鉄筋を対象としているので無視することとする。



(a)仮想ひび割れと解放応力 (b)ひび割れ開口幅 図 - 1 腐食ひび割れモデル図

円周方向の応力 によって、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。表面に到達し ひび割れが開口すると同時に全応力が解放され、その 幅は解放される全応力に依存する³⁾。 (1)解放される全応力とひび割れ幅

図 - 1(a)示す仮想ひび割れが発生する A-A'断面のひ び割れ幅 ₀は,式(12)で表される。

$$\delta_{0} = \frac{4\pi D}{E}$$
ここで,Dは式(13)のように表される。
(12)

$$D = -\frac{P}{N} \left(a^2 + b^2 \right) \tag{13}$$

ここで,Nは式(14)で表され,Pは式(11)で示した 円筒理論から求まるの合力とした。

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

$$(14)$$

$$P = \int_{a}^{b} \sigma \, dr \qquad (15)$$

$$P = \int_{a} \sigma_{\theta} dr \tag{15}$$

(2)中心角とひび割れ幅

最終的なひび割れ幅 は,図-1(b)に示すように中 心角 をもった曲げ変形であることから,中心角 お よびひび割れ幅 は,式(16),(17)で表される。

$\gamma = \delta_0 \frac{2}{a+b}$	(16)
$\delta = \gamma \cdot h$	(17)

表-1 実験パラメータ

試験体No	鉄筋径	かぶり厚 C(mm)	水セメント比 W/C(%)	a/b	圧縮強度 (N/mm2)
D22-W/C60%	22	25	60	12	19.3
D22-W/C30%	22	30	30	4.Z	35.5
D16-W/C60%	16	40	60	11	24.0
D16-W/C30%	01	40	30	4.1	43.9



図 - 2 腐食率と腐食ひび割れ幅の関係

表-2 解析に用いたパラメータ

	弾性係数(N/mm2)	ポアソン比
コンクリート	それぞれの実験値	c=0.20
鉄筋	2.1 × 10 ⁵	s=0.17
腐食生成物	2.0×10^{2}	r=0.17

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

実験パラメータを表 - 1 に示す。試験体は,200×200 ×500mmの角柱であり,鉄筋は異形鉄筋を任意のかぶ り位置に1本配置した。かぶり表面の腐食ひび割れ幅 の測定には型変位計を用い,鉄筋軸方向の中央断面 に設置した。

3.2 腐食率と表面ひび割れ幅の関係

図 - 2 に各試験体の腐食率と腐食ひび割れ幅の関係 を示す。なお,図中に示す記号 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。

図に示すように,圧縮強度が大きいほど急激にひ び割れが開口することが分かる。これは圧縮強度が 大きいほどコンクリートは脆性的になることが考え られる。

3.3 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表 - 2に示すパラメータを 用い,モデルの適用性評価の検討を行うこととする。

まず,いずれ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,水セメント比が60%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。

また,実験結果においては圧縮強度が大きくなると, 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) 表面ひび割れ幅は圧縮強度が高いほど急激に開口 する傾向にある。
- (2) 水セメント比が 60%のものは,本モデルと比較的 良好な一致を示した。

参考文献

- 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
- 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
- 3) S.P.Timoshenko: 弾性論, コロナ社, pp65-91