

腐食ひび割れ発生方向と腐食量算定モデルに関する検討

四国総合研究所 正会員 ○中川 裕之 四国電力 正会員 甲把 浩基
香川大学 小坂 隆博 香川大学 フェロー会員 松島 学

1. はじめに

鉄筋腐食膨張によりコンクリートに生じるひび割れは、図-1 に示したように、鉄筋間隔が小さい場合には水平はく離ひび割れ、鉄筋間隔が大きくなるにしたがって鉄筋に沿ったひび割れが発生する。本研究では、腐食ひび割れの発生方向（以下、ひび割れモード）およびひび割れ発生時の鉄筋腐食減量（以下、ひび割れ腐食量）を検討した。

2. モデル化による計算

2.1 腐食生成物による膨張圧

腐食した鉄筋とかぶりコンクリートについて、図-2 のような一次元モデルを考えた。一般的に主筋下面側にはブリーディングによる弱層が形成されるため、本モデルでは、かぶりコンクリート側にブリーディングによる空隙を考慮した。空隙 r_0 は、鉄筋 D10 を有する梁供試体を切断して当該部の空隙を染色により求めた結果、0.1~0.2mm であり、本研究では 0.1mm とした。

腐食生成物の膨張圧 q_0 によるコンクリートの変位量 u_1 および腐食生成物の変位量 u_2 は、式(1)、式(2)で表される。

$$u_1 = D \cdot q_0 / E_c \quad (1)$$

$$u_2 = n \cdot \Delta t \cdot q_0 / E_r \quad (2)$$

腐食膨張量 u を式(3)、変位適合条件を式(4)とすると、膨張圧 q_0 は式(5)で表される。腐食生成物の膨張前厚さ Δt は式(6)となる。

$$u = (n-1) \cdot \Delta t \quad (3)$$

$$u - r_0 = u_1 + u_2 \quad (4)$$

$$q_0 = \frac{\{(n-1) \cdot \Delta t - r_0\} \cdot E_c \cdot E_r}{D \cdot E_r + n \cdot \Delta t \cdot E_c} \quad (5)$$

$$\Delta t = 10 \Delta W / 1000 \rho \quad (6)$$

ここで、 n ：膨張率、 D ：かぶり (mm)、 E_c ：コンクリート弾性係数 (N/mm²)、 E_r ：腐食生成物弾性係数 (N/mm²)、 ΔW ：腐食減量 (mg/cm²) である。

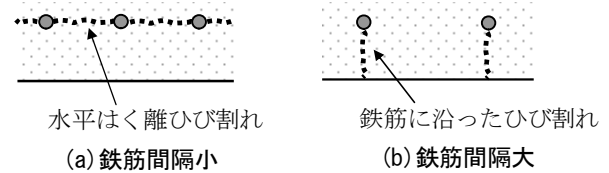


図-1 鉄筋間隔によるひび割れモードの違い

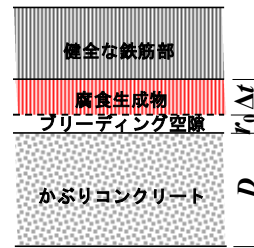


図-2 一次元モデル

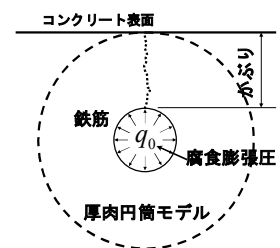


図-3 厚肉円筒モデル

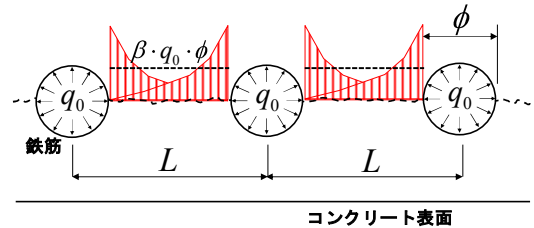


図-4 水平はく離ひび割れ発生モデル

2.2 鉄筋に沿ったひび割れ発生モデル

かぶりコンクリートについて、図-3 に示したように、膨張圧 q_0 を受ける厚肉円筒モデルを採用した。円筒に生じるひび割れは、円周引張応力の平均値がコンクリート引張強度に達したときに発生する¹⁾と考えた。平均引張応力を式(7)で表す。

$$f_t = q_0 / \alpha \cdot \{(2D + \phi) / \phi - 1\} \quad (7)$$

ここで、 ϕ ：鉄筋径 (mm) である。 α は、局部ひび割れ発生と進展を考慮した低減係数であるが、本研究では $\alpha=1/1.5$ とした²⁾。

2.3 水平はく離ひび割れ発生モデル

水平はく離ひび割れは、膨張圧 q_0 の鉛直成分の合力 P_v (N) が鉄筋間のコンクリート引張強度に達したときに発生すると考えた。

$$P_v = 2 \int_0^{\pi/2} q_0 \sin \theta \cdot \frac{\phi}{2} \cdot d\theta = q_0 \cdot \phi \quad (8)$$

キーワード 塩害、腐食ひび割れ、鉄筋腐食量

連絡先 〒761-0192 香川県高松市屋島西町 2109-8 T E L 050-8802-4790

$$f_h = \beta \cdot q_0 \cdot \phi / (L - \phi) \tag{9}$$

ここで、 L ：鉄筋間隔（mm）である． β は、 α と同様の低減係数であり、本研究では $\beta=1.5$ とした（図-4）．

3. 腐食ひび割れ実験

鉄筋間隔の異なる供試体を製作し、ひび割れモードおよびひび割れ腐食量を実験により検討した．

供試体形状は、900×400×180mm、主筋 D19 を 60、120、240mm 間隔、かぶり 30mm、配力筋 D16 を 120mm 間隔（主筋 60mm 間隔）、240mm 間隔（主筋 120、240mm 間隔）で設置した．図-5 に供試体外観を示す．

主筋と配力筋間は絶縁処理を行い、電食により主筋のみ腐食させた．印加電流は 1.0mA/cm² 程度、発生した腐食ひび割れ延長が供試体幅（400mm）あるいは主鉄筋間（720mm）に対して 2/3 程度発生した時点で電食を終了した．腐食した主筋を研り出し、各供試体の主筋から 2 本ずつを 10cm 毎に切断、10cm 当たりの平均腐食減量を求めた．電食実験から求められたひび割れモードおよびひび割れ腐食量を表-1 に示す．

4. モデル化による計算と実験結果の比較

各実験供試体の配筋条件について、先に示したモデル化による計算（以下、モデル計算）でひび割れモードとひび割れ腐食を求めた．計算の諸条件を表-2 に示す．供試体の圧縮強度は 37N/mm²、引張強度は 2.75N/mm²（材齢 28 日）である．静弾性係数は、圧縮強度値から 3.0×10⁴N/mm²程度と考えられるが、本研究では、腐食膨張圧に対するコンクリート部の挙動にクリープ変形を考慮して弾性係数を低減した．

モデル計算結果を図-6 に示す．各供試体の主鉄筋間隔は鉄筋径（ $\phi=19$ mm）との比として無次元化した．

発生するひび割れモードは、図-6 中の太線で示したように、各ひび割れ発生モードのモデル計算で求められたひび割れ腐食量の小さい方であり、鉄筋間隔に対してひび割れモードが変化する境界は、図-6 に示した点線と考えられる．図-6 には、供試体実験結果のひび割れモードおよびひび割れ腐食量も示した．

実験した各供試体のひび割れモードは、モデル計算による境界線と合っており、ひび割れ腐食量もほぼ同じ腐食量であった．さらに、筆者らが提案している腐食速度評価式³⁾におけるひび割れ腐食量は、式(10)で表される．

$$M_{cr} = 44.2 (D/\phi)^{0.721} \tag{10}$$

式(10)で求められたひび割れ腐食量は 61.44mg/cm² となり、本研究におけるモデル計算および実験結果とほぼ同じ値であった．

参考文献：1) 佐藤和郎，茂村達也，永井文雄：ぜい性材料からなる円筒の内圧破壊に及ぼす延性の影響，日本機械学会論文集（A 編），Vol.45, No.391, pp.220-226, 1979.3 2) 原田哲夫，出光隆，渡辺明：静的破砕剤を用いたコンクリートの解体に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.360/V-3, pp.61-70, 1985.8 3) 松田耕作，横田優，中川裕之，松島学：曝露試験結果に基づいた外部塩害を受けるコンクリート構造物の鉄筋腐食進行予測法の提案，土木学会論文集 E2, Vol.70, No.3, pp.289-300, 2014

表-1 腐食ひび割れ実験結果 (mg/cm²)

	D19ctc240	D19ctc120	D19ctc60
測定値	65.68	73.29	72.58
黒皮量	22.77		
腐食減量	42.91	50.52	49.81
ひび割れモード	鉄筋に沿ったひび割れ	鉄筋に沿ったひび割れ	水平はく離ひび割れ
供試体外観			

表-2 モデル計算条件

n	腐食膨張率		2.5
f_t	コンクリート引張強度	(N/mm ²)	2.75
E_c	コンクリート弾性係数	(N/mm ²)	15000
E_r	腐食生成物弾性係数	(N/mm ²)	200
r_0	ブリーディング空隙	(mm)	0.1
ρ	鉄筋比重	(g/cm ³)	7.8
ϕ	鉄筋径	(mm)	19



図-5 供試体外観

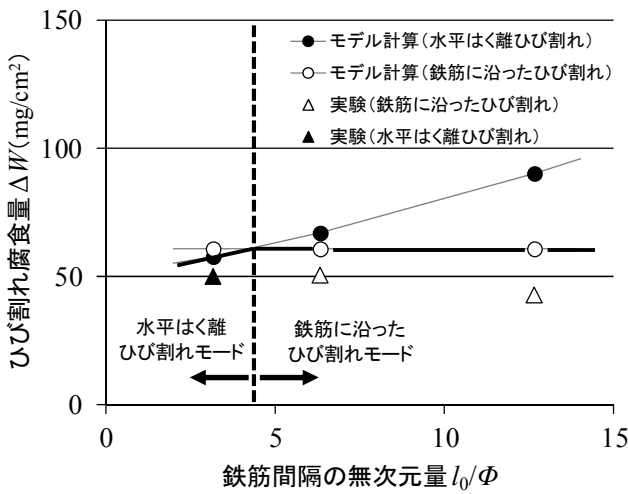


図-6 ひび割れモデルとひび割れ腐食量