

腐食生成物の力学的特性を加味した腐食ひび割れ幅進展モデルの構築に関する研究

中央大学理工学研究科土木工学専攻 学生会員 ○足助 美岐子
中央大学理工学部都市環境学科教授 正会員 大下 英吉

1. はじめに

近年, 既存の RC 構造物において経年劣化による構造的な性能および耐久性能の低下が深刻な問題となっている. 特に, 塩害や中性化による鉄筋腐食は起こりやすく, それによるひび割れの発生は各種性能に大きな影響を及ぼす一要因である. このような背景から, 鉄筋腐食性状を適切に評価可能なモデルを構築することが, RC 構造物の構造的な性能評価を行う上で非常に重要な位置付けにある.

現在, ひび割れ幅や隆起といった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.

そこで本研究では, 腐食率とひび割れ幅の関係を統一的に評価可能なモデルの構築を行うこととした.

腐食ひび割れ進展モデル

2. モデルの概要

一般に, 鉄筋腐食は腐食生成物が鉄筋表面に堆積することにより, コンクリートには腐食膨張圧が生じ, 鉄筋を取り囲むかぶりコンクリート領域にひび割れが発生する. 本研究では, ひび割れの発生から進展といった一連の挙動を次のような段階に区分して, モデル化を行うこととする. 各段階における腐食ひび割れ進展状態を図-1 に示す.

- ① ひび割れが発生し, コンクリート表面に向かって徐々に進展する.
- ② ひび割れがコンクリート表面に到達すると同時にひび割れが開口し, 内圧が解放される. この時点におけるひび割れを一次ひび割れと称す.
- ③ 徐々に表面のひび割れ幅が増加する.
- ④ 鉄筋上縁の円周方向の応力がコンクリートの引張応力に達し, かぶり側以外にもひび割れが発生する. この時点のひび割れを二次ひび割れと称す.
- ⑤ 一次および二次ひび割れ幅の増加により, 徐々に表面のひび割れ幅が増加する.

まず, 段階①, ②ともに初期状態ではコンクリート表面にはひび割れが存在しないので, 円筒形状を仮定した円筒理論によりコンクリートに生じる内圧を算出し, それに相当するひび割れ幅を算出する. コンクリート表面にひび割れが到達すると同時に, 鉄筋を取り囲むコンクリートは円筒形状から梁形状へと移行することとなり, 腐食膨張圧の一部が解放される. 段階③では, 既にひび割れが存在してい

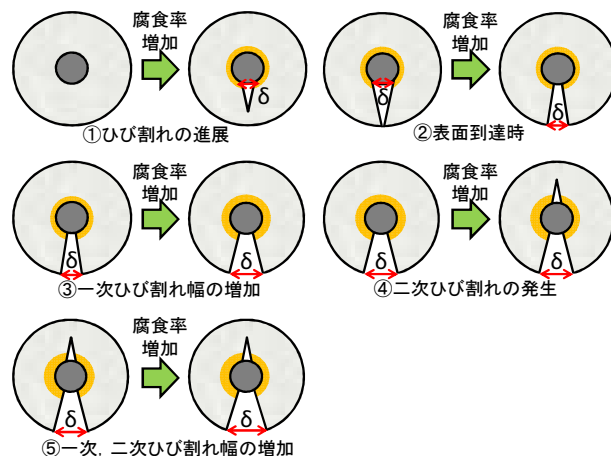


図-1 腐食ひび割れ進展状態

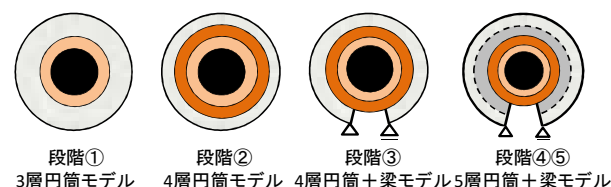


図-2 腐食膨張圧モデルの概念図

るので, 鉄筋を取り囲むコンクリートは梁形状を仮定し, 梁理論と円筒理論を併用する. 段階④では, 鉄筋上面や側面領域の引張応力がコンクリートの引張強度に達すると, その領域に二次的なひび割れが生じることとなる. そして段階⑤では, 段階④で定義した二次ひび割れが進展することにより, コンクリート表面のひび割れ幅が増加する.

2.1. 腐食膨張圧

腐食膨張圧モデルの概念図を図-2 に示す. 段階①のような鉄筋に腐食が発生する初期においては, 円筒理論を用いて算出する. RC 部材を構成する材料は, 鉄筋, 腐食生成物およびコンクリートの 3 種類である. その後, 段階②のように腐食が進展すると, 腐食生成物は既存のものと新たなものに分けた 4 種類となる. 段階③のようにコンクリート表面に腐食ひび割れが発生した後においては, 鉄筋を取り囲むコンクリートは円筒形状から梁形状へと移行することから, 円筒理論と梁理論を組み合わせることにより腐食膨張圧 q_0 を算出することができる. 段階④以降では, 二次ひび割れの発生によりコンクリートの剛性は大幅に低下する. したがって, RC 部材を構成する材料は二次ひび割れの発生したコンクリートとひび割れの無いコンクリートを分けた 5 種類となる. 各層の変位と層と層の間の変位の適合条件から, 各層に作用する圧力が求まる.

キーワード 腐食ひび割れ, 電食試験, 力学モデル

連絡先

〒112-0003 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学 コンクリート研究室

TEL 03-3817-1892

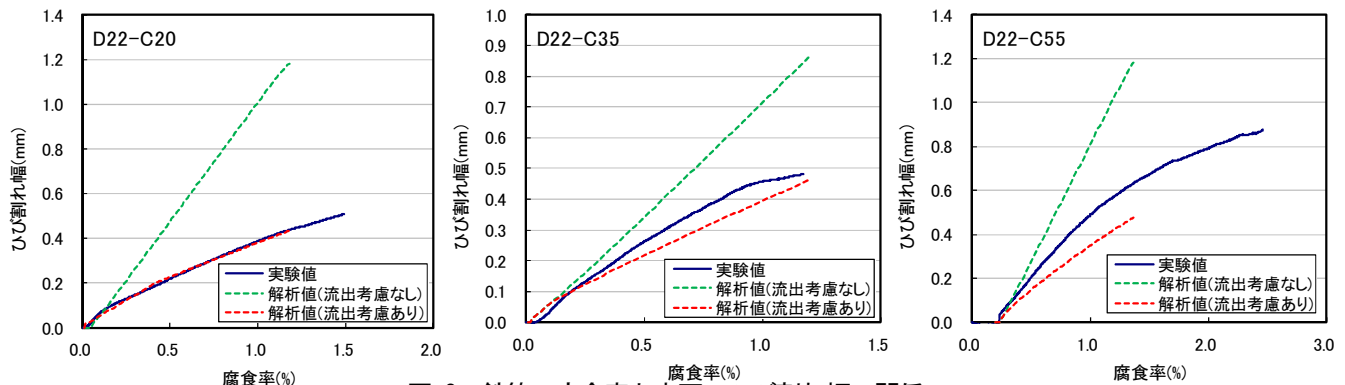


図-3 鉄筋の腐食率と表面のひび割れ幅の関係

2.2. ひび割れ発生と進展による解放膨張圧

(1) ひび割れ発生時

ひび割れが表面に到達したときのひび割れ幅の算出には、円筒形状を仮定する。かぶり厚を肉厚とした円筒上に、仮想ひび割れ断面を設け、この断面に作用する軸力と対応するような変位量をひび割れ幅とし、次式で表される¹⁾。

$$\delta_0 = 4\pi D/E \quad (1)$$

$$D = -P(a^2 + b^2)/N \quad (2)$$

$$N = a^2 - b^2 + (a^2 + b^2)\log(b/a)$$

ここで、 a は腐食生成物を含めた鉄筋半径であり、 b は鉄筋中心からコンクリート表面までの距離である。

このときの残存する内圧 q_r は、力のつりあいより算出する。この内圧と等価となるひび割れ幅 δ は次式で表される。

$$q_r = q_0 - P/\{(a + \gamma a/2\pi)(1 - \cos\pi)\} \quad (3)$$

$$\delta = q_r \times 3\pi a^4/E_c I \quad (4)$$

ここで、 q_0 は2.2節で算出されたコンクリートの内径に作用する内圧であり、 I は断面二次モーメントである。

(2) 一次ひび割れ幅の算出

かぶり表面におけるひび割れ幅は、腐食膨張によってコンクリートに生じる変位とした。この変形は中心角をもつ曲げ変形であるため、ひび割れ角度による補正をした。

(3) 二次ひび割れ幅の発生と進展

鉄筋を取り囲むコンクリートには、腐食膨張圧により引張応力が作用することとなる。コンクリートの引張強度と鉄筋を取り囲むコンクリートの引張応力が一致する位置までの鉄筋中心からの距離をひび割れ進展距離 e とする。この時のひび割れの進展による解放圧は、梁の分担によるものとした。ひび割れ前の内圧を q_1 とすると、ひび割れ後の内圧 q_2 は次式で表される。

ここで、 I_1 および I_2 はそれぞれひび割れ発生前および発生後の梁の断面2次モーメントであり、 a および e はひび割れ発生前および発生後の梁の内径である。

$$q_2 = (I_2 \cdot a^3 / I_1 \cdot e^3) \times q_1 \quad (1)$$

(4) 腐食生成物のひび割れへの流出

まだひび割れの発生していないコンクリート領域に新たにひび割れが進展すると、そのひび割れ面には腐食生成物が流出することとなる。したがって、その新たなひび割れ

を腐食生成物が完全に埋めるまでは腐食膨張圧は作用せず、その後完全に埋めると同時に圧力が作用するものとした。

3. 腐食ひび割れ進展実験

3.1. 実験概要

実験パラメータは鉄筋径およびかぶり厚であり、鉄筋はD16およびD22を用い、かぶり厚はそれぞれ3水準とした。試験体は、 $200 \times 200 \times 500\text{mm}$ の角柱形状であり、鉄筋を所定位置に1本配筋した。鉄筋の腐食試験方法には電食試験法を採用し、ひび割れ幅の測定には π 型変位計を用いて鉄筋軸方向の中央断面に設置した。

3.2. 構築モデルの適用性評価

図-3に各試験体における鉄筋の腐食率とコンクリート表面のひび割れ幅の関係を示す。実線は実測値と積算電流量の関係から求めた実験値であり、破線は本モデルによる予測値である。腐食生成物の弾性係数については、新たなものは既往の研究で得られた自由膨張時の値($=2.0 \times 10^2 \text{N/mm}^2$)を用い、既存のものは著者らが行った実験²⁾で得られたコンクリート中で生成された場合の値($=2.0 \times 10^4 \text{N/mm}^2$)を採用することとした。

いずれの試験体においても、表面にひび割れが発生後のひび割れ幅の実験値は、腐食率とともに放物的に大きくなり、二次ひび割れ発生とともに傾きは小さくなる傾向がある。ひび割れへの流出考慮ありの解析値は流出なしのものよりひび割れ幅を小さく評価できており、ひび割れ発生による内圧の解放を良く表現できている。特に流出考慮ありの解析値においては、非常に良好な一致を示している。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) ひび割れ進展実験で得られた値と本モデルによる予測値は同様の傾向が確認され良好な一致を示した。
- (2) ひび割れ幅予測においてひび割れ発生・進展による内圧の低下、腐食生成物の力学的特性、ひび割れへの腐食生成物の流出を考慮する有用性を示した。

参考文献

- 1) S.P.Timoshenko：弾性論，コロナ社，pp.65-91
- 2) 足助美岐子，後藤成道，大下英吉：腐食生成物の力学的特性に関する研究，コンクリート工学年次論文集 Vol.34, No.1, pp.1096-1101, 2012.7