

論文 鉄筋腐食によるひび割れ幅進展モデルを用いた内部ひび割れ進展距離に関する研究

藤井 智大*1・大下 英吉*2

要旨: 現在の維持管理の分野において、コンクリート構造物に対する精度の良い劣化予測方法が確立されていない。このことから、維持管理においてひび割れ幅といった外部変状から構造物の内部性状について把握する手法の確立は急務である。そこで、本研究では鉄筋腐食によるひび割れ幅進展の把握を目的とし、腐食率、腐食ひび割れ幅および拘束圧の関係について腐食の発生から腐食ひび割れの進展といった一連の挙動に基づいたモデルを構築した。また、実構造物を模擬した試験体を作成し電食試験法による腐食実験を行った。ここで計測した実験値と本モデルによる予測値との比較を行うことで本モデルの適用性を確認した。

キーワード: 鉄筋腐食, 腐食ひび割れ, 腐食膨張圧, 拘束圧, ひび割れ進展距離

1. はじめに

我が国では戦後に建設されたコンクリート構造物が経年劣化し、構造性能や耐久性能の劣化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比較的生じ易い現象である。腐食が進行すると、鉄筋の腐食膨張圧によってコンクリート内部に引張応力が生じ、腐食ひび割れが発生、進展する。加えて、コンクリートの剥離・剥落によるコンクリート落下事故などの第三者被害の発生が挙げられる。このような事故を未然に防ぐために、事前に補修を行うが、この際に表面の劣化状況から内部で発生する鉄筋間のひび割れを予測する必要がある。そのため、表面のひび割れ幅から、内部のひび割れ進展距離を把握できる技術の確立が急務である。

一般に¹⁾、鉄筋腐食によって生じるコンクリートのひび割れは、かぶり厚が比較的厚い場合には、鉄筋からかぶり表面に向かって進展していく。一方、かぶり厚が比較的薄い場合には、コンクリート表面から鉄筋に向かって進展していく。前者の場合、ひび割れがコンクリート表面に到達した後には、ひび割れ幅の開口が進むとともに、かぶりと反対方向或いは鉄筋水平方向に進展する。

このような背景から、腐食ひび割れ幅について数多くの研究が行われている。実験的研究¹⁾²⁾では、同一の断面寸法の供試体では、軸方向ひび割れの発生角度はかぶりによらず一定で、同腐食量ではかぶりに比例して表面ひび割れ幅が大きくなる。加えて、軸直角方向ひび割れは表面ひび割れ幅の開口速度が緩やかな段階で大きく進展した後、進展距離が一定値に収束する可能性があると指摘されている。また図-1に示すように、鉄筋腐食が生じることで腐食膨張圧がコンクリートに与える影響領域は、最小かぶり厚を半径とする円の領域よりも大きく、最小かぶり厚の約1.5倍を半径とした円の領域まで及ぶ

ことが指摘されている。

一方、解析的研究³⁾では、腐食ひび割れに関する一連の挙動をひび割れが表面に到達する以前を円筒理論で、以後を梁理論と区別することで鉄筋の腐食に伴うコンクリートへのひび割れ進展挙動モデルを構築し、実験結果と比較を行うことでその適用性の検討を行った。これにより、腐食ひび割れから拘束力および腐食率の予測を可能とするモデルの構築を可能としたが、表面のひび割れ幅や内圧の変化に関して検討を行ったものであり、コンクリート内部で発生するひび割れの進展距離（以下、二次ひび割れ進展距離）についての検討を行っていない。

そこで本研究では、著者らの構築した鉄筋の腐食に伴うコンクリートへのひび割れの発生ならびに進展挙動モデルを二次ひび割れ進展距離を算出できるよう拡張するとともに、鉄筋腐食により発生する二次ひび割れ進展距離の領域について既往の研究の実験結果⁴⁾と比較を行うことで本モデルの適用性の確認を行った。これを行うことは、今後、現場での点検時等において、コンクリート表面ひび割れ幅から、内部のひび割れ幅を把握し、剥離面の形状を推定することに有効であると考えられる。

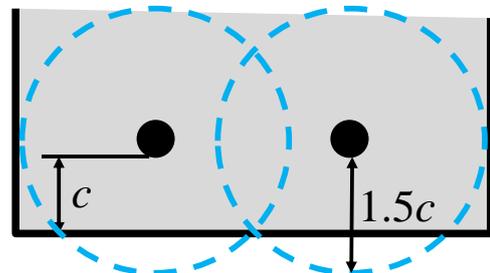


図-1 腐食膨張圧のコンクリートへの影響領域

2. 拘束圧算定モデル

既往の研究において、鉄筋腐食により腐食生成物が生

*1 中央大学 理工学研究科都市環境学専攻 (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)

成されると体積が膨張し、腐食膨張圧がコンクリートに作用することとなり、コンクリート内部の鉄筋近傍においてひび割れが発生する。本章では腐食の発生からひび割れの発生、進展といった一連の挙動を各段階に区分してモデル化を行った。これを、二次ひび割れ進展を算出できるように拡張する。

2.1 既往のモデル³⁾⁵⁾

2.1.1 モデルの概要

各段階におけるひび割れ状態を図-2に示す。

段階①：鉄筋腐食が促進し腐食率が増加することでコンクリート内部にひび割れが発生し、コンクリート表面に向かって徐々に進展する(同図(a))。この時のひび割れを一次ひび割れと称す。

段階②：一次ひび割れがコンクリート内部を進展し、かぶり側以外にもひび割れが発生する(同図(b))。この時のひび割れを二次ひび割れと称す。

段階③：さらに腐食率が増加することで一次ひび割れと二次ひび割れが進展し、一次ひび割れがコンクリート表面に到達する。そして、一次ひび割れが開口し、コンクリート内部の拘束圧が解放される(同図(c))。

段階④：一次ひび割れの幅が増加し、二次ひび割れが進展する(同図(d))。

段階①、段階②および段階③の初期では表面ひび割れが発生していないため円筒理論を用いた円筒モデルにより拘束圧および内部ひび割れ幅を算出する。段階③におけるひび割れ到達時および段階④ではひび割れが表面に

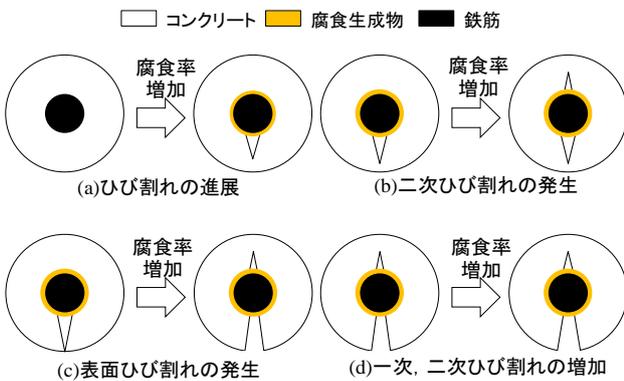


図-2 腐食ひび割れ

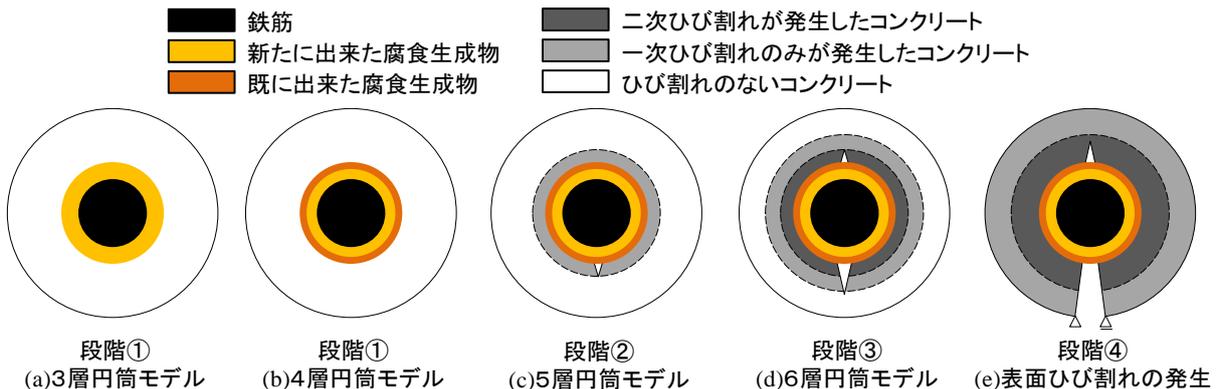


図-3 各段階における腐食膨張圧モデル

到達すると同時にコンクリートは梁形状へと移行し、円筒理論と梁理論を併用した併用モデルから拘束圧および表面ひび割れ幅・二次ひび割れ進展距離を算出する。なお、各段階の詳細および各モデルの詳細については次節以降で説明する。

2.1.2 内部ひび割れの発生と剛性の低下

段階①では表面ひび割れが存在しないので円筒形状を仮定した。腐食が発生する初期においてはRC構造物を構成する要素は図-3(a)に示すように、内側から鉄筋、腐食生成物およびコンクリートの3層であり円筒理論を用いて拘束圧 q_{in} を算出する。腐食生成物は生成された直後と既存のものでは物性が異なる⁵⁾ため、腐食が進行すると腐食生成物を既に来た腐食生成物と新しく出来た腐食生成物に分けた、4層になることとする(同図(b))。また、腐食膨張圧がコンクリートに生じる際、コンクリートは円周方向に広げられ、引張応力が発生する。また、鉄筋中心からの距離 r における引張応力は式(1)の右辺となる。コンクリート内部におけるひび割れはこの引張応力が引張強度 f_t に達する領域で発生すると仮定すると、ひび割れ進展距離は式(1)を満足する r となる。

$$f_t = \frac{a^2 \cdot q_m}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{b^2}{r^2} \right) \quad (1)$$

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

この r が a を超えた時点が内部一次ひび割れ発生時点とする。なお、内部のひび割れ幅 δ_{in} は内部ひび割れ発生時からコンクリートに生じた変位とした。また、段階①から段階②の初期において、内部ひび割れが生じるとコンクリートの剛性は低下する。内部ひび割れが生じたコンクリート剛性 E'_c の低下は、厳密的には実測に基づくもので決定すべきであるが、本研究では弾性係数残存率 K を用い式(2)とした⁶⁾。

$$E'_c = KE_c \quad (2)$$

$$K = \exp \left(-0.73 \frac{\epsilon_{max}}{\epsilon_{peak}} \left(1 - \exp \left(-1.25 \frac{\epsilon_{max}}{\epsilon_{peak}} \right) \right) \right)$$

ここで、 ϵ_{max} は圧縮強度に対応するひずみ、 ϵ_{peak} は過

去に受けた圧縮ひずみの最大値、 E_c はコンクリートの健全部における弾性係数である。

また、内部ひび割れが発生した時点から RC 構造物を構成する材料はひび割れたコンクリートとひび割れのないコンクリートを分け5層となる(同図(c))。

2.1.3 表面ひび割れの発生と進展

段階③でコンクリート内部を進展したひび割れが表面に到達すると、表面ひび割れが発生する。表面にひび割れが到達した時のひび割れ幅の算出にはまず円筒形状を仮定し、図-4に示すように仮想ひび割れ断面 A-A' を設ける。この断面には円筒理論により円周方向応力が(合力 P) が作用する。しかしながら、ひび割れの発生により合力はゼロとなることから、作用方向とは逆向きに合力 P を作用させた時の変形量を円筒形状から梁形状へ移行する際のひび割れ幅 δ_p とし、次式により算出する。

$$\delta_p = \frac{4\pi D}{E'_c} \quad (3)$$

ここで、 D はわん曲した棒の曲げに対する初等理論の解⁸⁾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(4)のように表される。

$$D = -\frac{P}{N_1}(a^2 + b^2) \quad (4)$$

$$N_1 = a^2 - b^2 + (a^2 + b^2)\log(b/a)$$

また、コンクリートが円筒形状から梁形状に移行するとコンクリート梁には曲げモーメントが生じることで、円筒理論から梁理論へ移行する際のひび割れ幅 δ_p にひび割れ幅 δ_m を与えることとなる。したがってひび割れ開口時の表面ひび割れ幅 δ_{1out} は式(5)のように表される。

$$\delta_{1out} = \delta_p + \delta_m \quad (5)$$

2.2 二次ひび割れ進展モデルへの拡張

本論では新たに、二次ひび割れの発生と進展距離に関してモデル化を行った。段階②において腐食膨張圧の一部は一次ひび割れの進展に使用され、残りの腐食膨張圧(以下、残存内圧)で二次ひび割れが発生するかを検討する。

一次ひび割れに使用する圧力 q_1 は仮想仕事の原理から式(6)で求まる。

$$q_1 = \frac{E'_c I}{3\pi a^4} \delta_{1in} \quad (6)$$

$$I = \frac{(b-a)^3}{12}$$

ここで、 I は断面二次モーメントである。なお、段階②、③における二次ひび割れの進展距離 e は一次ひび割れ同様、円筒理論から算出することとした。

また、二次ひび割れが生じるとコンクリートの剛性は更に低下する。よって、コンクリートを二次ひび割れの発生しているコンクリート、一次ひび割れのみが発生しているコンクリートおよびひび割れのないコンクリートに分け段階③では6層の円筒形状と仮定する(図-3(d))。

段階③では図-5のように一次ひび割れ幅 δ_{1in} と二次ひび割れ幅 δ_{2in} を線形形状と仮定し、コンクリート内側および二次ひび割れ先端それぞれの円周方向変位 δ_1 , δ_2 から δ_{1in} および δ_{2in} は式(7), 式(8)となる。

$$\delta_{1in} = \frac{r-a}{r-e} \delta_1 \quad (7)$$

$$\delta_{2in} = \delta_0 - \delta_{1in} \quad (8)$$

以下に示す式(9)から式(14)で円筒モデルの詳細を説明する。本モデルでは腐食は鉄筋径 ϕ_{si} に均一に発生するとし、腐食により減少した後の鉄筋径 ϕ_s を次式で定義した。

$$\phi_s = \sqrt{\phi_{si}^2 - \frac{4A_r}{\pi}} \quad (9)$$

ここで、 A_r は鉄筋の腐食を生じる断面積である。

段階①から段階③の円筒理論において自由膨張後における腐食生成物の外径 ϕ_{no} は次式で定義される。

$$\phi_{no} = \sqrt{\phi_{si}^2 + \frac{4(\beta-1)A_r}{\pi}} \quad (10)$$

ここで、 β は腐食生成物の体積膨張率であり、既往の研究⁷⁾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、内圧 q_{ni} および外圧 q_{no} を受ける n 層目の円筒における内径 ϕ_{ni} の自由な変位 u_{ni} および外径 ϕ_{no} の自由な変位 u_{no} はそれぞれ式(11), 式(12)で表される。

$$u_{ni} = \frac{(1+\nu_n)\phi_{ni}}{2E_n(K_n^2-1)} \left\{ (1-2\nu_n)(q_{ni}-q_{no} \cdot K_n^2) + (q_{ni}-q_{no}) \right\} \quad (11)$$

$$u_{no} = \frac{(1+\nu_n)\phi_{no}}{2E_n(K_n^2-1)} \left\{ (1-2\nu_n)(q_{ni}-q_{no} \cdot K_n^2) + (q_{ni}-q_{no})K_n^2 \right\} \quad (12)$$

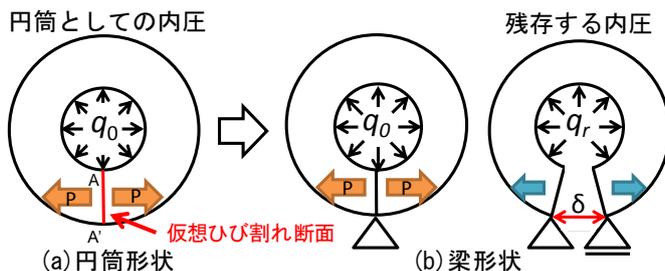
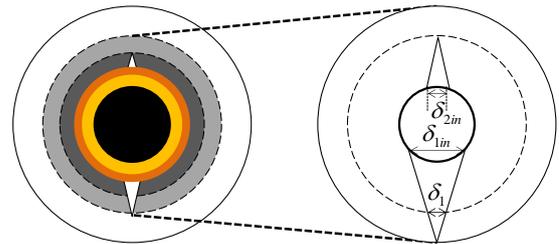


図-4 円筒形状から梁形状への移行



段階③6層円筒モデル

図-5 ひび割れの仮定

ここで K_n は内径と外径の比(= ϕ_{ni}/ϕ_{no})であり、 ν_n はポアソン比、 E_n は弾性係数である。よって、自由な変形後の内径 ϕ_{na} および外径 ϕ_{nb} は式(13)、式(14)となる。

$$\phi_{na} = \phi_{ni} + 2u_{ni} \quad (13)$$

$$\phi_{nb} = \phi_{no} + 2u_{no} \quad (14)$$

円筒の中心の要素から1層目と数えると、 n 層目の内径、外径はそれぞれ $n-1$ 層目の外径、 $n+1$ 層目の内径と等価となる。また、 n 層目の内圧、外圧はそれぞれ $n-1$ 層目の外圧、 $n+1$ 層目の内圧と等価となる適合条件から式(9)から式(14)を用いて各層の内圧、外圧および変位が求まることとなる。

段階④において、表面ひび割れが発生した以降は図-3(e)に示すように円筒理論と梁理論を組み合わせた併用モデルにより腐食膨張圧およびひび割れ幅、二次ひび割れ進展距離を算出することができる。例として図-6に段階④における各層の展開図を示す。なお、適合条件は前述した円筒モデルと同様、各層に生じる変位および圧力である。

まず、一次ひび割れの増加による解放圧 q_{1out} は梁に生じる軸力 P_n および一次ひび割れ角 γ_1 から次式で表すことができる。

$$q_{1out} = \frac{P_n}{(a + \gamma_1 a / 2\pi)(1 - \cos\pi)} \quad (15)$$

次に、二次ひび割れ幅を保持するコンクリートに対する内圧 q_{2in} は式(6)と同様に仮想仕事の原理から式(16)となる。

$$q_{2in} = \frac{E'_c I}{3\pi a^4} \delta_{2in} \quad (16)$$

すなわち、ひび割れ進展後の残存内圧 q_r は次式で表す

ことができる。

$$q_r = q_0 - q_{1out} + q_{2in} \quad (17)$$

ここで、 q_0 は円筒理論より求まる内圧である。

二次ひび割れ進展後の残存内圧 q_r による円周方向に働く応力 σ_θ は円筒形理論から式(18)で表すことができる。

$$\sigma_\theta = -\frac{4M}{N_2} \left[-\frac{a^2 b^2}{a^2} \log\left(\frac{b}{a}\right) + b^2 \log\left(\frac{a}{b}\right) + a^2 \log\left(\frac{a}{a}\right) + b^2 - a^2 \right] \quad (18)$$

$$M = 2 \frac{a+b}{2} q_r$$

$$N_2 = (b^2 - a^2)^2 - 4a^2 b^2 \log\left(\frac{b}{a}\right)^2$$

ここで M は曲げモーメント、 N_2 は定数である。

鉄筋を取り囲むコンクリートの引張応力がコンクリートの引張強度を上回ると二次ひび割れが進展し、式(18)は式(19)の右辺で表される。ここで e は二次ひび割れ進展距離、 b は二次ひび割れ進展距離の最大値とする。すなわち、二次ひび割れ進展距離 e は式(19)を満足する値となる。

$$f_t = -\frac{4M}{N} \left[-\frac{a^2 b^2}{e^2} \log\left(\frac{b}{a}\right) + b^2 \log\left(\frac{e}{b}\right) + a^2 \log\left(\frac{a}{e}\right) + b^2 - a^2 \right] \quad (19)$$

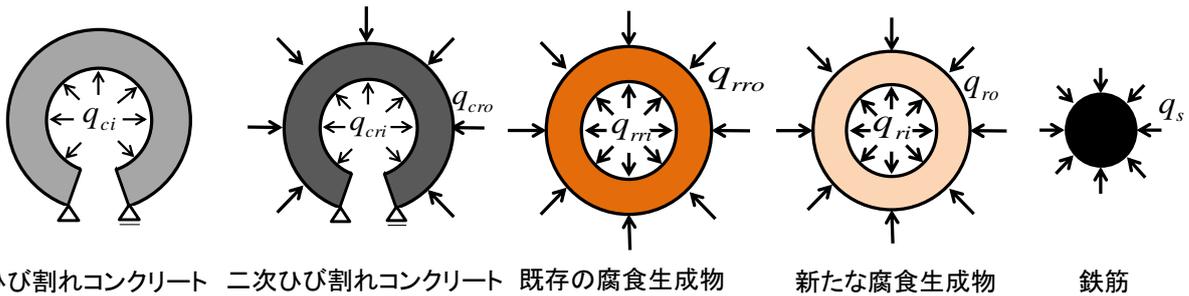


図-6 段階④における各層の展開図

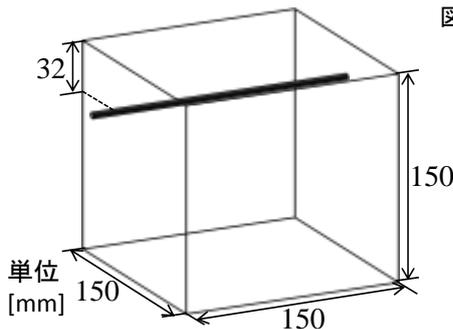


図-7 試験体概要

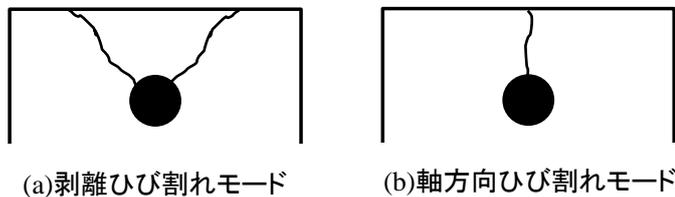


図-8 ひび割れモード

3. 実験概要

3.1 腐食生成物の影響範囲

図-7に示すように試験体は150×150×150mmの角柱供試体である。腐食ひび割れモードは鉄筋径 ϕ と純かぶり c をパラメータとする式(20)に依存し $k < 3.0$ では図-8(a)に示す剥離ひび割れモード、 $k \geq 3.0$ では同図(b)に示す軸方向ひび割れモードが生じることが既往の研究⁹⁾で報告されている。

$$k = \frac{2c + \phi}{\phi} \quad (20)$$

そのため、縦かぶり厚は32mm、横かぶり厚は70mm、D16鉄筋を1本配筋した。コンクリートの配合は表-1に示す通りである。また、セメントは早強ポルトランドセメントを使用し、水セメント比は60%とした。なお、練り混ぜ水には鉄筋腐食を促進させるため、5%NaCl水溶液を用いた。

3.2 腐食実験手法

既往の研究⁴⁾では、試験体内部の鉄筋の腐食には図-9に示すような設定した腐食率が早期に得られ、その制御が比較的容易な電食試験法を採用した。試験体を5%のNaCl水溶液を満たした水槽に浸漬させ、鉄筋を陽極側、銅板を陰極側に接続し、銅板を最小かぶり面に設置し所定の積算電流量まで通電した。鉄筋腐食率は、附着区間における試験前後の鉄筋質量減少率により評価した。測定項目はかぶり側以外に進行する二次ひび割れ進展距離である。

3.3 実験結果

表-2に腐食率と二次ひび割れ進展距離の結果を示す。また、図-10に試験体の端部において発生したひび割れ図を示す。表-2、図-10から二次ひび割れは一次ひび割れの発生した後に生じた。二次ひび割れは腐食率1.34%においては発生していないが、腐食率3.32%においては発生していることが確認できた。

表-1 コンクリートの配合

W/C(%)	単体量(kg/m ³)				
	W	C	S	G	混和剤
60	155	258	835	1040	2.58

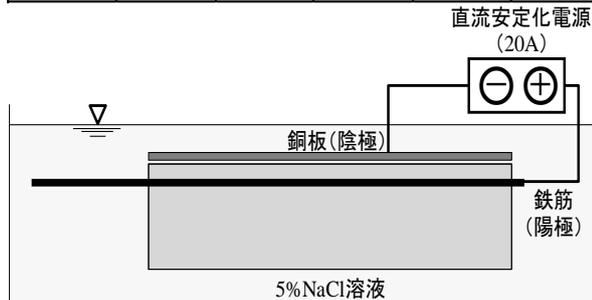


図-9 試験体電食方法

4. 実験結果と比較によるモデルの適用性評価

本実験を行った試験体に対して、2章で構築したモデルを適用することにより、二次ひび割れ進展距離に関するモデルにより算出した値と実験値の比較を行った。表-3に本モデルで使用する解析条件である鉄筋径、縦かぶり厚、横かぶり厚、二次ひび割れ進展距離最大値を示す。

一次ひび割れは鉄筋から最小かぶり面にかけて発生するため一次ひび割れ進展距離は縦かぶり厚と同一となる。

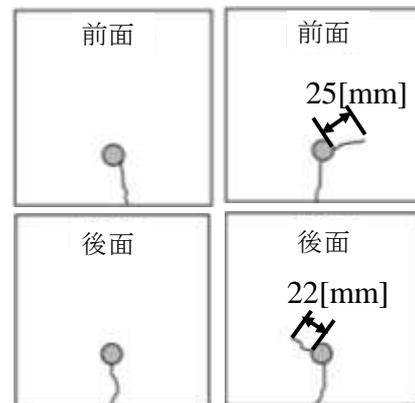
実験における試験体端部の断面が150×150mmとなっており、縦かぶり面の逆方向に鉛直に二次ひび割れが発生した際に二次ひび割れ進展距離が最大になる。このことから図-11に示すように、本モデル上で使用する二次ひび割れ進展距離の最大値を110mmとした解析モデルを用いた。図-12に本モデルで算出した腐食率毎のひび割れ進展距離と実験値から得た腐食率1.34%、3.32%での二次ひび割れ進展距離を示す。実線がモデルによる解析結果、点線が二次ひび割れ進展距離48mm、プロットが実験結果である。表-4に腐食率1.34%、3.32%における二次ひび割れ進展距離の実験値と解析値を示す。図-12から二次ひび割れ進展距離は腐食率が増加するにつれて増加していることが確認できた。既往の研究²⁾において、鉄筋腐食が生じることで腐食膨張圧がコンクリートに与える影響領域は、最小かぶり厚を半径とする円の領域よ

表-2 腐食率と二次ひび割れ進展距離

腐食率 (%)	二次ひび割れ進展距離(mm)	
	前面	後面
1.34	0	25
3.32	0	22

表-3 解析条件

鉄筋径 (mm)	縦かぶり (mm)	横かぶり (mm)	二次ひび割れ進展距離最大値(mm)
16	32	70	110



(a)腐食率1.34% (b)腐食率3.32%

図-10 ひび割れ進展

りも大きく、最小かぶり厚の 1.5 倍を半径とした円と考えられることが指摘されている。このことから本研究において、試験体の最小かぶり厚が 32mm であることから二次ひび割れは 48mm を半径とした円内で発生すると考えられる。本モデルの解析結果において、腐食率が増加するにつれて約 43mm を漸近線として収束しており既往の研究²⁾と同様な傾向がみられることが確認できた。図-12、表-4 から、腐食率 1.34%、3.32% において解析結果と実験結果が比較的良く一致していることが確認できた。これらのことから、同一の断面寸法の供試体、5%以下の腐食率において本モデルで二次ひび割れ進展距離が表現できており、本モデルにおいて適用性の可能性を示した。また、実構造物においては鉄筋が複数本配筋されているため、今後このような状態へ適用可能とするモデルの拡張が必要である。

5. まとめ

本研究では腐食率、二次ひび割れ進展距離の関係を明らかにすることを目的とし、実験およびモデルの構築を行い、その適用性の検討を行った。本研究で得られた結

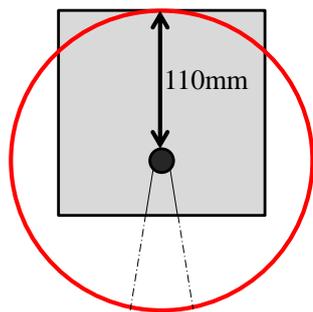


図-11 解析モデル

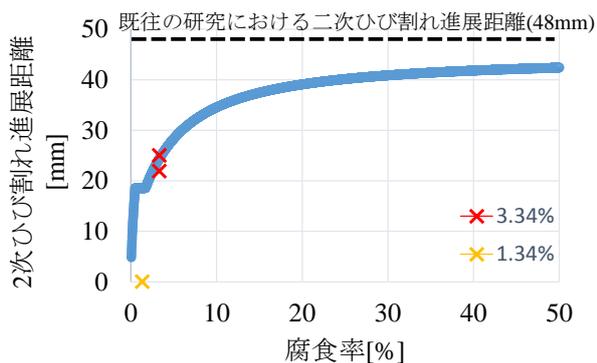


図-12 縦かぶり面逆方向への二次ひび割れ進展距離

表-4 二次ひび割れ進展距離の実験値と解析値

腐食率(%)	実験値(mm)	解析値(mm)
1.34	0	18.5
	0	
3.32	21.9	24.3
	25	

果を以下に示す。

- (1) 腐食ひび割れに関する一連の挙動について段階を区分することで腐食ひび割れ幅および拘束圧、二次ひび割れ進展距離のモデルが構築された。
- (2) 本モデルにおいて鉄筋腐食が生じることで腐食膨張圧がコンクリートに与える影響領域は、同一の断面寸法の供試体、5%以下の腐食率において仮定していた最小かぶり厚を半径とする円の領域よりも大きく、かぶり厚の 1.5 倍を半径とした円内であることを表現できており、モデルの適用性の可能性を示せた。
- (3) 二次ひび割れ進展モデルの構築により、コンクリート内部のひび割れ性状を定性的に評価可能とした。

参考文献

- 1) 河村圭亮, Tran Khoa Kim, 中村光, 国枝稔: 鉄筋腐食に伴うコンクリートの表面および内部ひび割れ進展挙動, コンクリート工学論文集, Vol.32, No.1, pp.1007-1012, 2010
- 2) 長岡和真, 古川雄太, 村上祐貴: 複数の鉄筋腐食膨張圧がコンクリートの拘束圧に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1048-1053, 2012
- 3) 山崎理美, 大下英吉: 鉄筋腐食が腐食ひび割れおよび拘束力に及ぼす影響に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, pp.1150-1155, 2014
- 4) 長岡和真, 阿部哲雄, 番場俊介, 村上祐貴: 主鉄筋の腐食膨張挙動に対するコンクリートの拘束圧に基づく付着割裂性状評価, コンクリート工学論文集, Vol.24, No.2, pp.29-42, 2013
- 5) 足助美岐子, 根岸泰彦, 大下英吉: 腐食生成物の力学的特性を考慮した腐食ひび割れ幅進展モデル, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, pp.1045-1050, 2013
- 6) 土木学会: 2007年制定コンクリート標準示方書[設計編], 2007
- 7) 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
- 8) 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, pp.159-166, 1996
- 9) 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, 土木学会第66回年次学術講演会 V-233, 2011