

論文 鉄筋腐食が腐食ひび割れおよび拘束圧に及ぼす影響に関する研究

山崎 理美*1・大下 英吉*2

要旨: 鉄筋腐食によるひび割れの発生やそれに伴う拘束圧の減少は、構造物の劣化予測において重要なパラメータのひとつである。また、維持管理においてひび割れ幅といった外観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、本研究では腐食ひび割れと拘束圧の関係について明らかにすることを目的とし、電食試験法による腐食実験を行った。また、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。併せて本モデルによる予測値と実験による実測値との比較により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

1. はじめに

近年、既存の構造物の経年劣化に伴った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。

鉄筋腐食により腐食生成物の体積が膨張するとコンクリートには膨張圧が生じ、その反作用により鉄筋には拘束圧が作用する。腐食膨張量が少ない場合には拘束圧により鉄筋の付着を増加させるが、膨張量が多くなり腐食ひび割れが発生および進展すると、拘束圧は解放され鉄筋の付着は低下する¹⁾。一般に、付着の低下はコンクリートの一体性を損失させ構造性能に大きな影響を与えることや鉄筋の腐食により耐荷力が低下することが知られている。

このような背景から、腐食膨張圧や腐食ひび割れ幅について数多くの研究が行われている。実験的研究では、コンクリート内部性状の測定が容易でかつ等方的な膨張挙動を生じる静的破砕剤を用いて、かぶり厚さと腐食ひび割れの関係や鉄筋間距離が最大拘束圧におよぼす影響について検討されている²⁾。しかしながら、静的破砕剤の力学的特性は腐食生成物とは異なるばかりか、その膨張特性も等方的であるため、コンクリートへのひび割れ発生やその進展挙動は異なる。すなわち、静的破砕剤によるコンクリートのひび割れ挙動は実現性を忠実に再現出来ているとは言い難い。

一方、解析的研究においては、腐食生成物の力学的特性は未解明な部分が多いことから、代表的な数値を用いて、腐食膨張圧によるコンクリート内の応力伝達について検討されている³⁾。しかしながら、腐食生成物の力学的特性は腐食環境やかぶり厚さによって異なるため、解析に用いる腐食生成物の特性は一様に決定できるものではない⁴⁾。

以上のことから、実現象を忠実に模擬した鉄筋腐食の

発生や進行に伴うコンクリートのひび割れの発生、進展といった一連の挙動に関する実験を行うことが重要である。

そこで本研究では、鉄筋の腐食に伴うコンクリートへのひび割れの発生並びに進展挙動を鉄筋の腐食率や腐食膨張圧に統一的に関連付けて表現可能なモデルを構築するとともに、両者の定量的評価実験を実施した。そして、その構築したモデルとの実験の比較を行い適用性の検討を行った。

2. 拘束圧算定モデル

鉄筋が腐食して腐食生成物が生成されるとその体積が膨張し、腐食膨張圧がコンクリートに作用することとなり、コンクリートに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うこととする。

2.1 モデルの概要

各段階におけるひび割れ状態を図-1に示す。段階①：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。

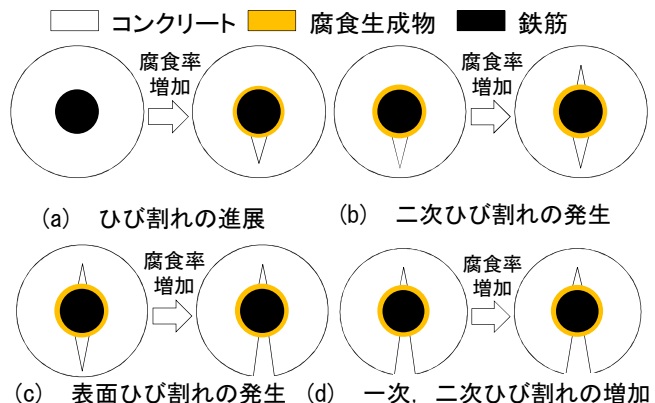
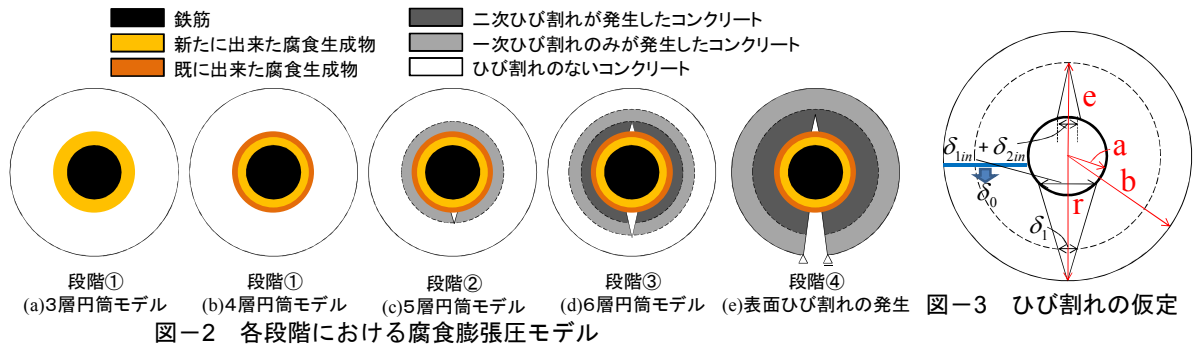


図-1 腐食ひび割れ進展状況

*1 中央大学 理工学研究科土木工学専攻 (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)



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③：一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、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到達すると同時にコンクリートはわん曲した棒部材となり梁形状へと移行する。したがって、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。

2.2 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-2(a)に示すように、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_m を算出する。腐食生成物は生成された直後とその後では物性が異なる⁴⁾ため、腐食が進行すると腐食生成物を既に出てき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。(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。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 を超えた時点を目内ひび割れ発生時点とする。なお、内部ひび割れ幅 δ_{im} 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 は腐食膨張圧によりコンクリートには圧縮力が作用していることから、弾性係数残存率 K を用い式(2)となる⁵⁾。

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

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

ここで、 ε_{\max} は圧縮強度に対応するひずみ、 $\varepsilon_{\text{peak}}$ 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))

2.3 二次ひび割れの発生と進展

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(3)で求まる。

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

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層の円筒と仮定する。(同図(d))

段階③では一次ひび割れ幅 δ_{1m} と二次ひび割れ幅 δ_{2m} を図-3のように線形形状を仮定し、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_0 、 δ_1 から δ_{1m} および δ_{2m} は式(4)、式(5)となる。

$$\delta_{1m} = \frac{r-a}{r-e} \delta_1 \quad (4)$$

$$\delta_{2m} = \delta_0 - \delta_{1m} \quad (5)$$

以下に示す式(6)から式(11)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。

$$\phi_s = \sqrt{\phi_{si}^2 - \frac{4A_r}{\pi}} \quad (6)$$

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_{ro} は次式で定義される。

$$\phi_{ro} = \sqrt{\phi_{si}^2 + \frac{4(\beta-1)A_r}{\pi}} \quad (7)$$

ここで、 β は腐食生成物の体積膨張率であり、既往の研究⁶⁾で得られた腐食鉄筋の質量変化率および腐食生成物の密度から $\beta=7850/5300$ とした。

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(8)、式(9)で表される。

$$u_{ni} = \frac{(1+\nu_n)\phi_{ni}}{2E_n(K_n^2-1)} \left\{ (1-2\nu_n)(q_{ni}-q_{no} \cdot K_n^2) + (q_{ni}-q_{no}) \right\} \quad (8)$$

$$u_{no} = \frac{(1+\nu_n)\phi_{no}}{2E_n(K_n^2-1)} \left\{ (1-2\nu_n)(q_{ni}-q_{no} \cdot K_n^2) + (q_{ni}-q_{no})K_n^2 \right\} \quad (9)$$

ここで K_n は内径と外径の比($=\phi_{ni}/\phi_{no}$)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(10)、式(11)となる。

$$\phi_{na} = \phi_{ni} + 2u_{ni} \quad (10)$$

$$\phi_{nb} = \phi_{no} + 2u_{no} \quad (11)$$

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(6)から式(11)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。

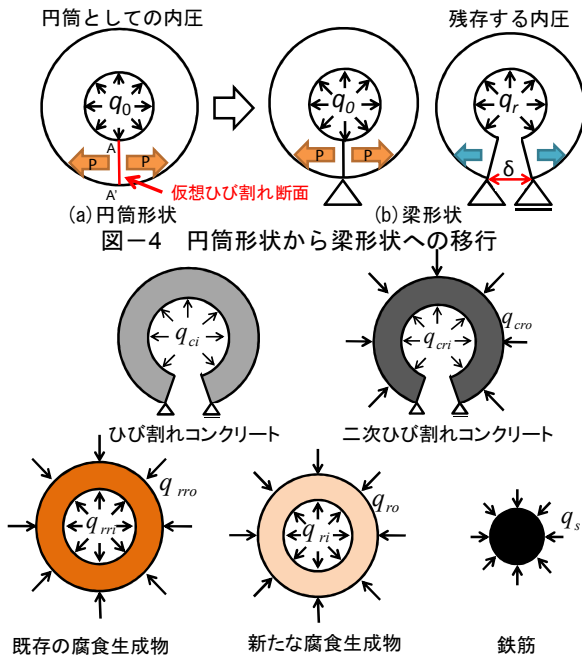


図-5 段階④における各層の展開図

2.4 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。

$$\delta_p = \frac{4\pi D}{E'_c} \quad (12)$$

ここで、 D はわん曲した棒の曲げに対する初等理論の解⁷⁾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(13)のように表される。

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

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

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、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} は次式となる。

$$\delta_{1out} = \delta_p + \delta_m \quad (14)$$

段階④において、表面ひび割れが発生した以降は図-2(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を算出することができる。例として図-5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内圧 q_{2in} は式(3)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。

3. 実験概要

2章で構築したモデルの適用性を評価するため腐食実験を行い、腐食ひび割れ幅および拘束圧を測定した。

3.1 試験体概要および実験パラメータ

試験体概要を図-6 に示す。200×200×200mm の角柱供試体であり D19 鉄筋を配筋した。また、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(18)に依存し $k < 3.0$ では図-7(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⁸⁾で報告されている。

$$k = \frac{2c + \phi}{\phi} \quad (18)$$

そのため、実験パラメータは表-1 に示すように、かぶり厚さおよび水セメント比とした。コンクリートの配合を表-2 に示す。なお、鉄筋の腐食促進のため練混ぜ水には NaCl 水溶液を使用した。

3.2 腐食実験手法

鉄筋の腐食には図-8 に示す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、所定の積算電流量まで通電した。測定項目はコンクリート表面のひび割れ幅、鉄筋の軸方向ひずみ、鉄筋内温度および腐食率である。また、試験体端面を定点カメラにより 10 分間隔で撮影し腐食ひび割れを観測した。鉄筋の

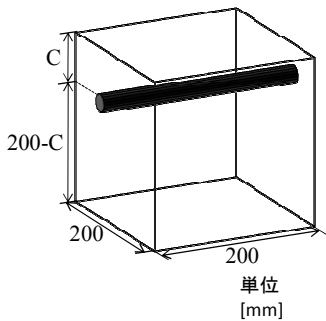


図-6 試験体概要

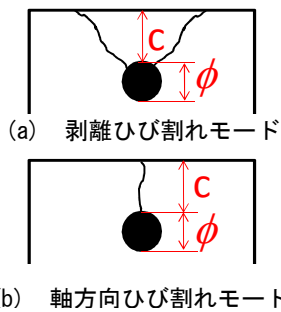


図-7 ひび割れモード

表-1 実験パラメータ

| | 水セメント比(%) | C(純かぶり)(mm) | k(鉄筋比) |
|---------|-----------|-------------|--------|
| WC60C40 | 60 | 40 | 5.2 |
| WC60C10 | | 10 | 2.1 |
| WC30C40 | 30 | 40 | 5.2 |
| WC30C10 | | 10 | 2.1 |

表-2 コンクリートの配合

| 単位量 (kg/m ³) | | | | | |
|--------------------------|-----------|----------|----------|----------|-----------|
| 水 W | セメント C | 細骨材 S | 粗骨材 G | 混和剤 A | NaCl N |
| 167 | 279 | 839 | 1003 | 1.12 | 8.37 |
| 158 | 527 | 657 | 965 | 2.11 | 7.92 |

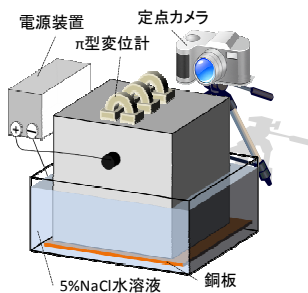


図-8 電食実験概要

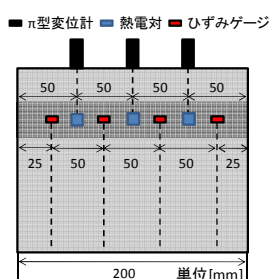


図-9 測定位置

軸方向ひずみおよび鉄筋内温度の具体的な測定方法は貼り合わせ鉄筋を用いて鉄筋内部にひずみゲージおよび熱電対を設置することにより測定した。また、コンクリート表面のひび割れ幅の測定には π 型変位計を用いた。なお、各測定項目の測定位置は図-9 に示すとおりである。

3.3 実験結果

(1) 各試験体の特性

表-3 に各試験体の圧縮試験および割裂試験から得られた材齢 7 日における圧縮強度、引張強度および弾性係数を示す。水セメント比が小さいほど圧縮強度、引張強度および弾性係数は大きくなり一般的な傾向を示した。

(2) 腐食率と腐食ひび割れ幅

表-4 に定点カメラで撮影した写真から判定した表面ひび割れが発生時における腐食率と腐食ひび割れ幅の一覧を示す。なお、腐食率の実験値は次式に示す既往の研究⁸⁾と同様に腐食率 n と積算電流量 V の関係式から算出した値である。

$$n = 0.111V \quad (19)$$

同一水セメント比である試験体 WC60C40 と試験体 WC60C10 を比較すると、ひび割れ発生時の腐食率と腐食ひび割れ幅はかぶり厚さに応じて大きくなっていることがわかる。この傾向は水セメント比が 30% である試験体 WC30C40 と試験体 WC30C10 の比較からも言える。また、同一かぶり厚さである試験体 WC60C40 と試験体 WC30C40 を比較すると、水セメント比が小さいほど表面ひび割れ発生時の腐食率および腐食ひび割れ幅が大きくなるという既往の研究⁸⁾と同様の傾向がみられた。また、かぶり厚さが小さい試験体の比較においても同じ傾向が見られる。すなわち、水セメント比が小さくかぶり厚さが大きいほどひび割れが発生しにくく、ひび割れ開口幅が大きくなることわかる。これは、水セメント比が小さい試験体の引張強度が大きいため、ひび割れ発生までに発生する膨張圧が大きくなりひび割れが開口に及ぼす力が大きくなるためである。

図-10 に鉄筋の腐食率と腐食ひび割れ幅の関係を示す。破線は実験値であり、実線は本モデルによる予測値を示している。なお、実験値の腐食率は腐食率と積算電流量の関係から算出した結果である。

一般に、腐食率が小さい場合、腐食率と腐食ひび割れ幅の関係は線形となり、その後二次ひび割れが発生するとともに傾きが小さくなる。しかしながら、同図(a), (b) に示す水セメント比が 60% である試験体においては腐食率が 1% 程度で傾きが小さくなっている。これは写真-1(a)に示す水セメント比が 30% である試験体と比較し同写真(b)に示すように水セメント比が 60% の試験体では比較的小さな腐食率においても複数のひび割れが発生したためである。一方、同図(c), (d) に示す水セメント

表-4 表面ひび割れ発生時の

| | 圧縮強度 (N/mm ²) | 引張強度 (N/mm ²) | 弾性係数 (kN/mm ²) |
|---------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| WC60C40 | 28 | 1.8 | 21 |
| WC60C10 | 27 | 2.2 | 19 |
| WC30C40 | 32 | 3.0 | 28 |
| WC30C10 | 35 | 3.0 | 29 |

| | 腐食率 (%) | 腐食ひび割れ幅 (mm) |
|---------|------------|-----------------|
| WC60C40 | 0.12 | 0.14 |
| WC60C10 | 0.01 | 0.02 |
| WC30C40 | 0.14 | 0.32 |
| WC30C10 | 0.04 | 0.16 |

比が 30%である試験体では前述した一般的な傾向を示した。

(3) 腐食ひび割れ幅と拘束圧

拘束圧 σ_n の実験値は次式により算出した。

$$\sigma_n = \frac{\nu_s E_s}{(\nu_s - 1)} \left(\varepsilon_z - \frac{\sigma_z}{E_s} \right) \quad (20)$$

ここで、 ν_s は鉄筋のポアソン比、 E_s は鉄筋の弾性係数、 σ_z は軸方向応力、 ε_z は軸方向ひずみであり、軸方向ひずみは実験で得られた軸方向ひずみ ε_{tz} と鉄筋内温度から得られる温度ひずみ ε_{tt} を用いて式(20)となる。

$$\varepsilon_z = \varepsilon_{tz} - \varepsilon_{tt} + \varepsilon_{tf} \quad (21)$$

ここで ε_{tf} は付着応力により生じるひずみであり、付着応力は ε_z から算出した。

図-11 に各試験体における表面ひび割れ幅と拘束圧の関係を示す。破線は実験値であり、実線は本モデルによる予測値である。

同図(a), (c)に示す同一のかぶり厚さ 40mm である試験体 WC60C40 と試験体 WC30C40 を比較すると拘束圧の最大値は 23.3N/mm²、26.6N/mm² と水セメント比が小さいほうが最大拘束圧は大きくなっている。また、同図(b), (d)に示すかぶり厚さが 10mm の試験体 WC60C10 と試験体 WC30C10 の拘束圧の最大値が 15.4N/mm²、20.5N/mm² と同様の傾向がみられた。これは表-3 に示したように、水セメント比が小さいほど引張強度が大きくひび割れが発生しにくいからである。

3.4 モデルの適用性評価

2章で構築したモデルに本実験の条件を用いて、モデルの適用性評価を検討する。なお、解析に用いたパラメータを表-5 に示す。また剥離ひび割れモードとなるかぶり厚さが 10mm の試験体においてひび割れは図-12 に示すように入ると仮定し、かぶり方向のひび割れ 2本が表面に到達した時点を表ひび割れ発生時点とした。

(1) 腐食率と腐食ひび割れ幅の関係

図-10 に示すいずれの試験体においても初期の増加傾向は精度良く一致している。また、同図(c), (d)に示す水セメント比が 30%の試験体 WC30C40 と試験体 WC30C10 ではその後の傾きも非常に良好な一致を示している。しかしながら、水セメント比が 60%の試験体においては精度良く評価できていない。これは本モデルに

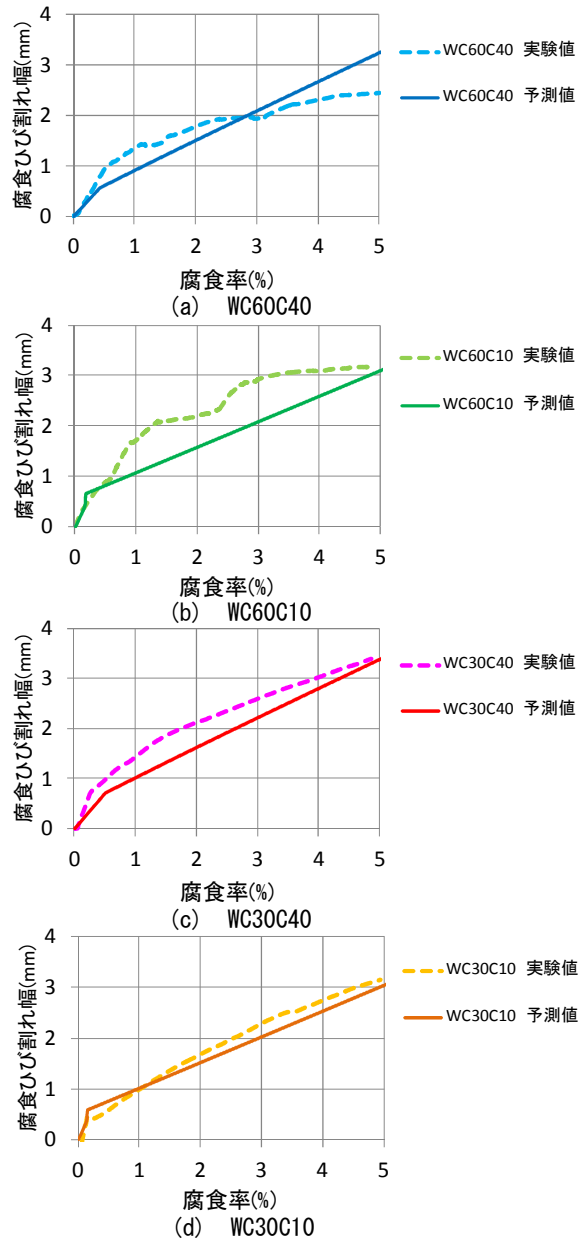
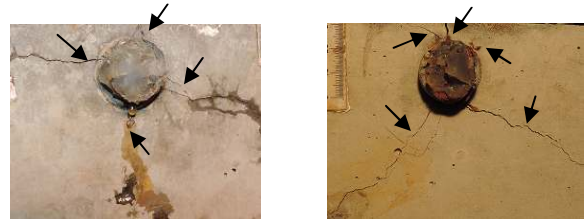


図-10 腐食率-腐食ひび割れ幅関係



(a) WC30C10 腐食率 0.6% (b) WC60C10 腐食率 0.4%

写真-1 端面ひび割れ

おける二次ひび割れをかぶり厚さが 40mm, 10mm の試験体でそれぞれ 1本および2本と仮定しているが、水セメント比が 60%の試験体では前述したとおり比較的小さな腐食率においても複数のひび割れが発生したためである。

(2) 腐食ひび割れ幅と拘束圧の関係

拘束圧が最大に到達するまでの傾向を比較すると実験値と予測値は比較的良く一致している。このことから、

段階①から段階③の初期における円筒モデルの妥当性が確かめられた。また、拘束圧が最大に達した後の減少傾向もよく一致していることから、段階③、④における円筒理論と梁理論の併用モデルの適用性が確かめられた。以上のことから腐食ひび割れから拘束圧および腐食率の予測を可能とするモデルが構築されたといえる。

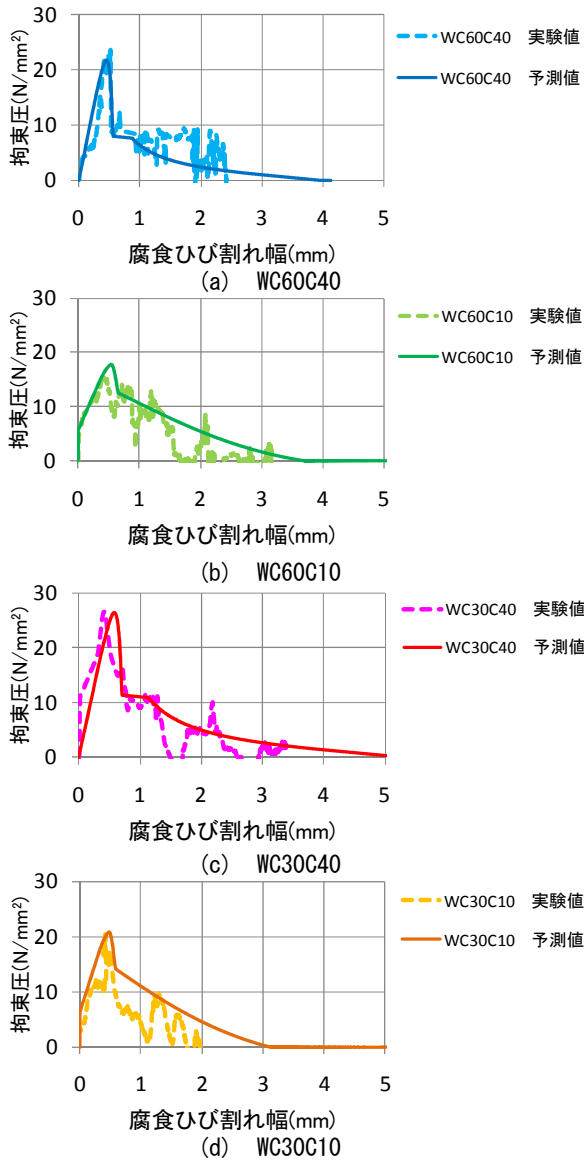


図-11 腐食ひび割れ幅-拘束圧関係
表-5 解析パラメータ

| | 弾性係数(N/mm ²) | ポアソン比 |
|-------------------|--------------------------|-------|
| コンクリート | 実験値 | 0.2 |
| 二次ひび割れが発生したコンクリート | 2000 | 0.2 |
| 既存の腐食生成物 | 20000 | 0.3 |
| 新たな腐食生成物 | 200 | 0.3 |
| 鉄筋 | 210000 | 0.3 |

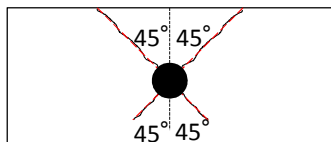


図-12 ひび割れ発生位置の仮定

4. まとめ

本研究では腐食率、腐食ひび割れ幅および拘束圧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果を以下に示す。

- (1) 表面ひび割れ発生時の腐食率および腐食ひび割れ幅はかぶり厚さが大きく、水セメント比が小さいほど大きくなる。
- (2) 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のモデルが構築された。
- (3) 剛性の低下を考慮することで、引張強度が大きな試験体についての評価が可能となった。
- (4) 電食実験で得られた実験値と本モデルによる予測値は腐食率、腐食ひび割れ幅および拘束圧の関係において良好な一致を示した。

参考文献

- 1) 福井享平, 佐藤優, 鈴木修一, 大下英吉: 定着を有する腐食鉄筋とコンクリートの付着応力性状に関する研究. コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp667-672, 2006
- 2) 大津政康, 堤知明, 村上祐治, 工藤雄一: 鉄筋腐食によるひび割れ進展に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.17, pp.955-960, 1995
- 3) 荒木弘祐, 高谷哲, 服部篤史, 宮川豊章: コンクリート中の鉄筋腐食膨張圧モデル, 土木学会第 59 回年次学術講演会 V-277, 2004
- 4) 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, pp1045-1050, 2013
- 5) 土木学会: 2007 年制定コンクリート標準示方書[設計編], 2007
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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