

# 論文 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

足助 美岐子<sup>\*1</sup>・根岸 泰彦<sup>\*2</sup>・大下 英吉<sup>\*3</sup>

**要旨：**ひび割れ予測において、腐食生成物の力学的特性は重要なパラメータのひとつである。本研究では、腐食生成物の力学的特性を把握することを目的として、側面水圧試験を行い、実験結果と解析手法の併用により評価を行った。その結果を導入した理論モデルにより、腐食率増加に伴うひび割れ幅進展性状について検討を行い、その精度の検討を行うこととした。

**キーワード：**腐食ひび割れ、腐食生成物、弾性係数、腐食膨張圧、有限要素解析

## 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生じ易く、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は、RC 構造物の構造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、コンクリート内部における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。しかしながら、鉄筋腐食によるかぶりコンクリートの腐食ひび割れ性状から、コンクリート内部の腐食性状を定量的に評価可能な手法は未だ確立されておらず、半定量的な評価により、安全余裕度をもって構造性能を評価せざるを得ないのが現状である。また、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時期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。

鉄筋の腐食性状を適切に評価できていない一要因として、腐食生成物の弾性係数およびポアソン比が未解明であることが挙げられる。筆者らは腐食鉄筋を配筋した RC 円柱部材を対象とした、特殊装置を用いた側面水圧実験を行い、平面応力状態を仮定した腐食生成物の弾性係数とポアソン比を同定する簡易モデル<sup>1)</sup>を提案したが、ポアソン比が大きく評価されるという問題があった。

一方、既往の腐食ひび割れ幅推定モデル<sup>2)</sup>では、円筒理論により膨張圧を算出し、仮想仕事の原理に基づきひび割れ幅を推定した。実際には、ひび割れがコンクリート表面に達すると膨張圧は低下するが、既往の研究においてはこの影響を考慮していないため、ひび割れ幅が大きく評価されることとなった。

そこで本研究では、まず実験的および有限要素法による解析の手法の併用によって、腐食生成物の力学的特性を評価することとした。そして、その結果を導入した理論モデルにより、腐食率増加に伴うひび割れ幅進展性状について検討を行い、実事例との比較によってその適用性の検討を実施した。

## 2. 腐食生成物の力学的特性

腐食ひび割れを正確に予測するためには、腐食生成物の力学的特性を把握しておく必要がある。既往の研究<sup>3)</sup>は一次元的に腐食を発生させたものであったが、本来コンクリート中の鉄筋から生成される腐食物は、三次元的な拘束を受けることとなる。したがって、その種類やコンクリートによる拘束度すなわちコンクリートのかぶり厚、強度、ひび割れの有無や幅の大きさによって、力学的特性は異なることが予測される。これら状況下にある腐食生成物の力学的特性を評価するためには、当然コンクリート内部で生成された腐食物を対象としなければならない。本研究では、写真-1に示すような装置を用いた側面水圧実験を行い、有限要素解析の併用により腐食生成物の力学的特性評価を行った。

### 2.1 力学的特性評価実験

#### (1) 試験体概要

試験体は、φ150×300mm の RC 円柱供試体であり、鉄筋は事前に腐食させた D19(USD685A) 鉄筋コンクリート用高強度異型鋼を中央に配筋した。実験パラメータ



写真-1 側面水圧試験機

\*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 (学生会員)

\*3 中央大学 理工学部都市環境学科 教授 工博 (正会員)

表-1 実験パラメータ

試験体名	電食時の W/C(%)	電食時の かぶり厚(mm)	載荷時の W/C(%)	腐食生成物の厚さ(mm)
W/C60%-C50	60	50	60	0.16
W/C60%-C100		100		0.21
W/C30%-C50	30	50		0.37
W/C30%-C100		100		0.27
ST	-	-	-	0.58

表-2 コンクリートの配合

Gmax (mm)	W/C (%)	SL (cm)	Air (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
				W	C	S	G	AE剤
25	60	10	5	174	290	798	1001	1.16
25	30	10	5	165	550	617	992	5.5

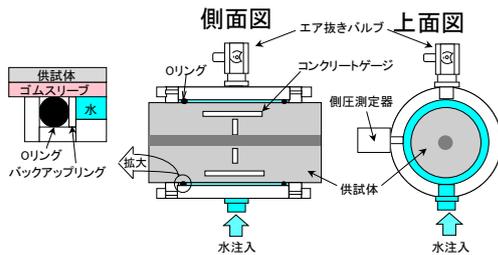


図-1 実験装置の断面概略図

表-3 電食試験概要

試験体名	試験方法	単位定電流量 (A)	積算電流量 (A・h)	通電時間 (h)
W/C60%-C50	コンクリート内部	2	50	25
W/C60%-C100				25
W/C30%-C50			150	75
W/C30%-C100				75
ST	鉄筋単体	-	10	5

は、表-1 に示すように腐食時のコンクリートのかぶり厚と水セメント比である。なお、ST 試験体の鉄筋は鉄筋単体で腐食させたものである。コンクリートの配合は表-2 に示す通りであり、電食時には 5%NaCl 溶液を練り混ぜ水として使用した。本研究では、鉄筋の腐食手法として電食試験法を採用した。表-3 に電食試験の概要を示す。電食試験後に水槽から取り出し 24 時間自然乾燥させた後、コンクリートから鉄筋をはつりだし、新たに載荷用の試験体に打設した。このとき、すべての試験体でひび割れが発生していることを確認した。

### (2) 載荷方法

図-1 に実験装置の外観と断面概略図を示す。本装置は円筒状の鋼製容器であり、その中央部にゴムスリーブに入れた RC 円柱供試体を設置する。荷重の載荷は、油圧式のポンプにより水を試験機内に注入することで装置内の水圧を上昇させ、試験体側面にのみ水圧を作用させた。側圧の載荷速度は 0.01MPa/sec であり、試験体が破壊するまで行った。

測定項目は、コンクリート縦方向のひずみ、コンクリート横方向のひずみおよび鉄筋の軸方向ひずみである。コンクリートのひずみの測定は、水平方向と鉛直方向にコンクリートゲージを埋め込み、鉄筋のひずみの測定は

張り合わせ鉄筋を用い鉄筋内部にゲージを貼り付けた。

### (3) 腐食生成物の層厚の算出

腐食生成物の層厚は、載荷用試験体の打設直前に計測した鉄筋の質量と腐食生成物を除去後の質量差から近似的に求めることとした。したがって、はつり出すときにコンクリートに残る腐食生成物は、質量に関与しない。腐食生成物は、鉄筋軸方向に一樣な厚さであると仮定し、電食終了後の鉄筋の質量  $W_c$ 、その後腐食生成物を取り除いた質量  $W_{si}$  から、以下のような関係式が得られる。

$$W_r = W_c - W_{si} \quad (1)$$

$$\left\{ \left( \frac{\varphi_{si}}{2} \right)^2 \pi - A_a \right\} \rho_s \cdot l = W_{si} \quad (2)$$

$$\left\{ \left( \frac{\varphi_{si} + 2r}{2} \right)^2 \pi - \left( \frac{\varphi_{si}}{2} \right)^2 \pi \right\} \rho_r \cdot l = W_r \quad (3)$$

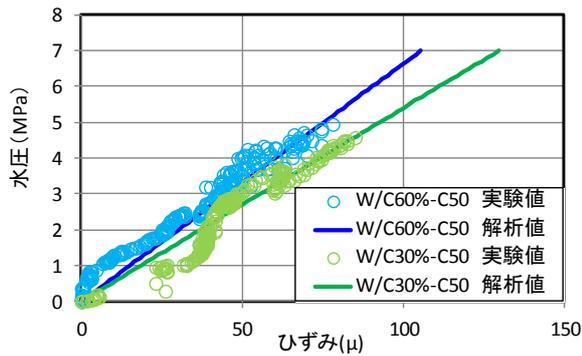
ここで、 $W_r$  は腐食生成物の質量、 $\varphi_{si}$  は鉄筋の直径、 $A_a$  は鉄筋内の切り欠き部分の断面積、 $\rho_s$  は鉄筋の密度 ( $=7.87\text{g/cm}^3$ )、 $l$  は鉄筋の長さ、 $\rho_r$  は腐食生成物の密度であるが、既往の研究<sup>1)</sup>により得られる腐食生成物のほとんどがヘマタイトであるため  $5.30\text{g/cm}^3$  とした。式(1)から式(3)の腐食生成物の厚さ  $r$  に関する連立方程式を解くことにより、腐食生成物の厚さ  $r$  が求まることとなる。

### 2.2 鉄筋ひずみに及ぼす腐食生成物の影響

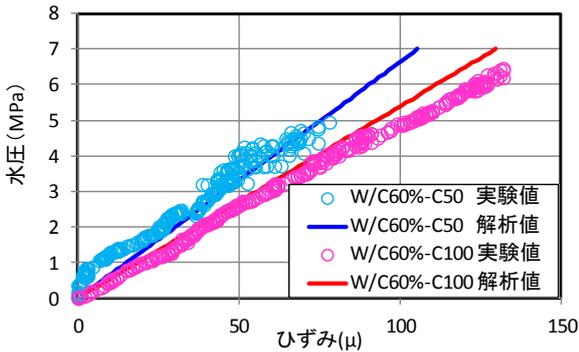
作用水圧と鉄筋ひずみ関係を図-2 に示す。腐食生成物は、緻密であるほど鉄筋に力を伝達し易くなるため、密な腐食生成物の場合は、鉄筋ひずみが大きくなり、疎な腐食生成物の場合には小さくなる傾向にある。同じ水圧を作用させたときの鉄筋ひずみに着目すると、同図 (a) では、腐食時の水セメント比 30% のものは 60% に比べて大きくなっており、水セメント比が小さいほど密な腐食物が生成される。同図 (b) (c) では、腐食時のかぶり厚 100mm のものは 50mm に比べて大きくなっており、かぶり厚が大きいほど密な腐食物が生成される。また同図 (d) では、コンクリート中で腐食させたものは鉄筋単体で腐食させたものよりも大きくなっており、コンクリートの拘束があることで腐食生成物が緻密になる。

### 2.3 解析的手法を併用した力学的特性評価

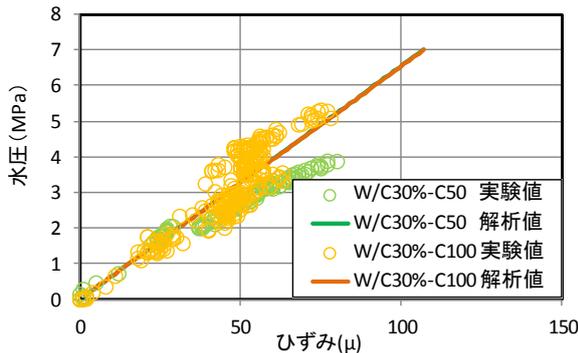
前節の実験概要に対する有限要素法による破壊挙動解析は、図-3 に示すような実験と同様の鉄筋、腐食生成物およびコンクリートから構成される軸対称 3D モデルによって実施した。解析における作用荷重増分は、試験体側面に 0.1MPa の圧力増分として与えた。解析では、腐食生成物の弾性係数およびポアソン比をパラメータスタディ的に変化させ、腐食生成物の力学的特性を同定することとなる。具体的には、実験においてひずみゲージを設置した位置でのコンクリートおよび鉄筋ひずみの実測値と解析値が一致するような腐食生成物の弾性係数とポアソン比を解析的に評価することになる。



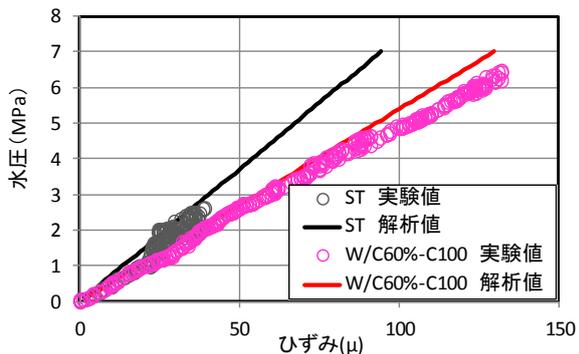
(a)水セメント比の違いによる比較



(b)かぶり厚の違いによる比較 (W/C60%)



(c)かぶり厚の違いによる比較 (W/C30%)



(d)腐食方法の違いによる比較

図-2 水圧-鉄筋ひずみ関係

解析結果を前掲の図-2の実線で示す。腐食生成物のポアソン比の変化による鉄筋ひずみの値の変化はほとんど見られなかった。一方、腐食生成物の弾性係数の変化は鉄筋ひずみに影響を与える。弾性係数が  $20000\text{N/mm}^2$  で解析した場合の鉄筋ひずみの値が実験値と比較的近い値

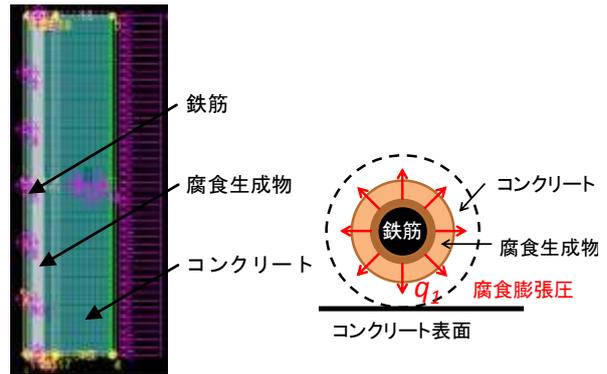


図-3 解析対象および解析メッシュ

図-4 鉄筋腐食により発生する腐食膨張圧

であったことから、コンクリート中で腐食させた腐食生成物の弾性係数は  $20000\text{N/mm}^2$  程度であると考えられる。また同様に、鉄筋単体で腐食させた場合の弾性係数は  $500\text{N/mm}^2$  程度であると考えられる。本研究では、弾性係数のおおよそのオーダーを決定することはできたものの、パラメータスタディのみの検討に留まっている。かぶり厚および水セメント比の違いが、具体的にどの程度弾性係数に影響を与えるかの検討は今後の課題としたい。

### 3. 腐食ひび割れ進展モデル

#### 3.1 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、コンクリートに図-4に示すような腐食膨張圧が生じ、コンクリートにひび割れが発生する。本章では、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。各段階におけるひび割れ状態を図-5に示す。

段階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。(同図①)

段階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。(同図②)この時点におけるひび割れを一次ひび割れと称す。

段階③：徐々に表面のひび割れ幅が増加する。(同図③)

段階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。(同図④)

段階⑤：一次ひび割れ幅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。(同図⑤)

次に、このような各段階におけるひび割れの発生と進展に関するモデル化について説明する。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

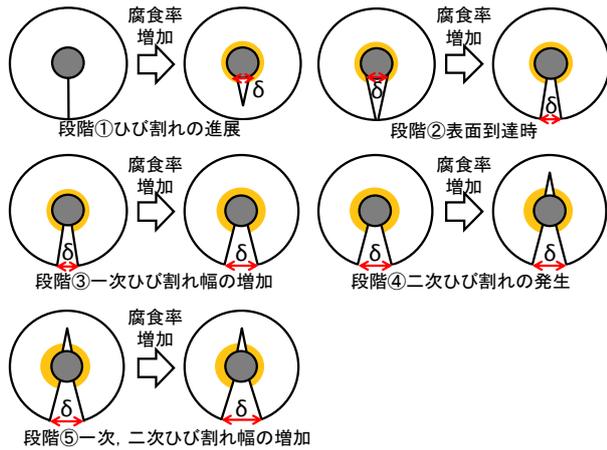


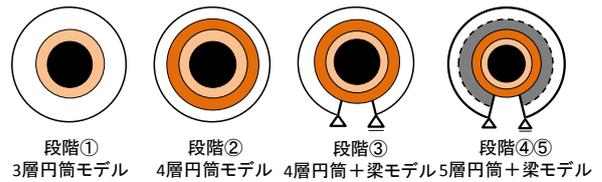
図-5 腐食ひび割れ進展状況

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こととなる。段階③では、既にひび割れが存在しているので、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ことにより、膨張圧とひび割れ幅を算出する。段階④では、鉄筋を取り囲むコンクリート領域において、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表面のひび割れ幅が増加する。

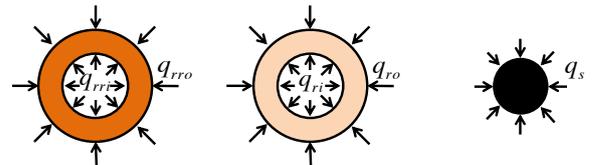
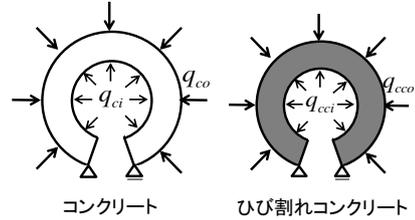
### 3.2 腐食膨張圧

腐食膨張圧モデルの概念図を図-6 に示す。同図(a)に示すように、段階①のような鉄筋に腐食が発生する初期においては、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種類であり、円筒理論を用いて腐食膨張圧を算出することができる。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。

ここで、新たな腐食生成物とは、本モデルは増分腐食率に基づく解析を行なっているため、そのステップで生成されるものを指す。一方既存の腐食生成物は、そのステップまでに生成されたものを指す。その後、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を算出することができる。段階④以降では、二次ひび割れが発生するため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ひび割れたコンクリートと健全なコンクリートを分けた5種類となる。鉄筋の一部が腐食生成物に変化することにより、体積膨張を生じ、そのときの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。なお、同図(b)に例として段階④以降



(a)各段階における腐食膨張圧モデル



(b)段階④以降の5層円筒+梁モデルの展開図

図-6 腐食膨張圧モデルの概念図

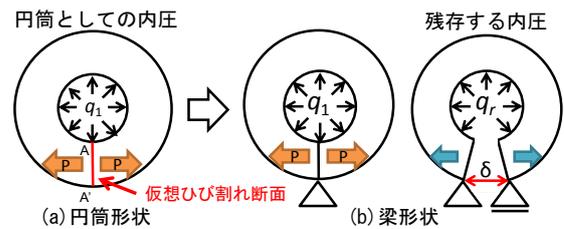


図-7 円筒形状から梁形状への移行

における各層の展開図を示す。

### 3.3 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

まず、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。図-7(a)に示すような、コンクリートのかぶり厚を肉厚とした円筒上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には応力  $\sigma_\theta$  (合力  $P$ ) が作用するが、実際にはひび割れが発生することによりその合力はゼロとなる。すなわち、作用方向とは逆向きに合力  $P$  を作用させた時の変位量がひび割れ幅となるものとした。このときのひび割れ幅は式(4)のように表される。

$$\delta_0 = \frac{4\pi D}{E} \quad (4)$$

ここで、 $D$  はわん曲した棒の曲げに対する初等理論の解<sup>5)</sup>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(5)のように表される。

$$D = -\frac{P}{N} (a^2 + b^2) \quad (5)$$

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

ここで、 $a$  は腐食生成物を含めた鉄筋半径、 $b$  は鉄筋中

心からコンクリート表面までの距離である。

残存する内圧は、図-7(b)に示すように円筒形状から梁形状に移行して、力のつりあいにより算出する。そして、残存する内圧と等価となるようなひび割れ幅を算出することとなり、このときの残存内圧 $q_r$ およびひび割れ幅 $\delta$ は式(6)および式(7)で表される。

$$q_r = q_0 - \frac{P}{\left(a + \frac{\gamma a}{2\pi}\right)(1 - \cos\pi)} \quad (6)$$

$$\delta = \frac{3\pi a^4}{E_c I} q_r \quad (7)$$

ここで、 $q_0$ は円筒理論より求まる内圧であり、 $I$ は断面二次モーメントである。

### (2)一次ひび割れ幅の算出

コンクリートのかぶり表面におけるひび割れ幅は、腐食膨張によるコンクリートに生じる変位として算出し、かぶり厚とひび割れ角度による補正を行った。

### (3) 二次ひび割れ幅の発生と進展

次に、コンクリートのかぶり領域以外にひび割れが発生する際の検討方法について説明する。鉄筋を取り囲むコンクリートには、図-8に示すような腐食膨張圧によって引張応力が作用することとなる。この引張応力がコンクリートの引張強度を超えると、鉄筋上面や側面領域に二次的なひび割れが生じることとなる。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。図-9に示すように、二次ひび割れ発生直前に生じていた一次ひび割れの鉄筋中心角 $\gamma$ は、二次ひび割れ発生後も同一の角度を保持しているものと仮定すると、かぶり表面位置でのひび割れ幅は、一次ひび割れによる幅と二次ひび割れの鉄筋位置での開口幅(同図に示す $\delta_{二次}$ )を重ね合わせたものである。この時のひび割れの進展による解放圧は、同図に示すような梁の分担によるものとした。すなわち、ひび割れ発生前のコンクリートの梁とひび割れ発生後の健全なコンクリートの梁は、同一の表面ひび割れ幅を保持すると仮定し、仮想仕事の原理に関連付けることにより、ひび割れ前の内圧を $q_1$ とすると、ひび割れ後の内圧 $q_2$ は式(8)で表される。

$$q_2 = \frac{I_2 \cdot a^3}{I_1 \cdot e^3} \times q_1 \quad (8)$$

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二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。

また、腐食生成物のひび割れへの流入を考慮し、まだひび割れの存在しないコンクリート領域に新たにひび割れが進展した場合には、その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が作用せず、完全に埋めると同時に作用するものとした。

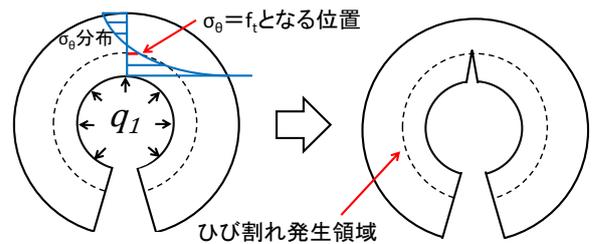


図-8 コンクリートに生じる応力分布

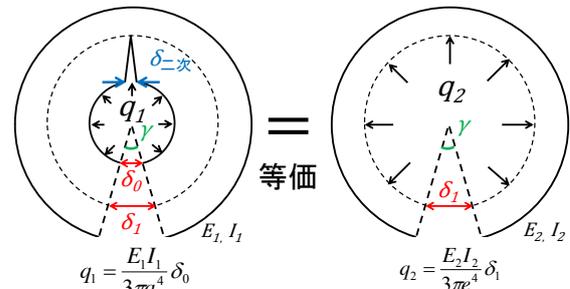


図-9 梁の分担による残存内圧

表-4 実験パラメータ

試験体名	鉄筋径	かぶり厚(mm)	D/Φ
D22-C20	D22	20	2.8
D22-C35		35	4.2
D22-C55		55	6.0
D16-C20	D16	20	3.5
D16-C25		25	4.1
D16-C40		40	6.0

## 4. 腐食ひび割れ進展実験

### 4.1 実験概要

3章で構築したモデルの適用性を評価するため、鉄筋腐食の進行に伴うコンクリートの表面に発生するひび割れ幅の測定を行い、ひび割れの進展挙動について検討した。実験パラメータは表-4に示すように、鉄筋径およびかぶり厚であり、鉄筋にはD16およびD22を用い、かぶり厚はそれぞれ3水準とした。表中の $\phi$ は鉄筋直径であり、 $D$ は $(2 \times (\text{かぶり厚}) + \phi)$ を示す。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、コンクリート表面のひび割れ幅の測定には $\pi$ 型変位計を用いて鉄筋軸方向の中央断面に設置した。

### 4.2 腐食ひび割れ進展状況

図-10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。

コンクリートの表面にひび割れが発生する時点の腐食率は、D22シリーズのかぶり厚20mm、35mmおよび55mmにおいて、それぞれ0.03%、0.10%および0.27%であり、その時点における急激なひび割れの開口幅は0.01mm、0.03mmおよび0.05mmというように、いずれもかぶり厚に応じて大きくなるのが分かる。D16シリ

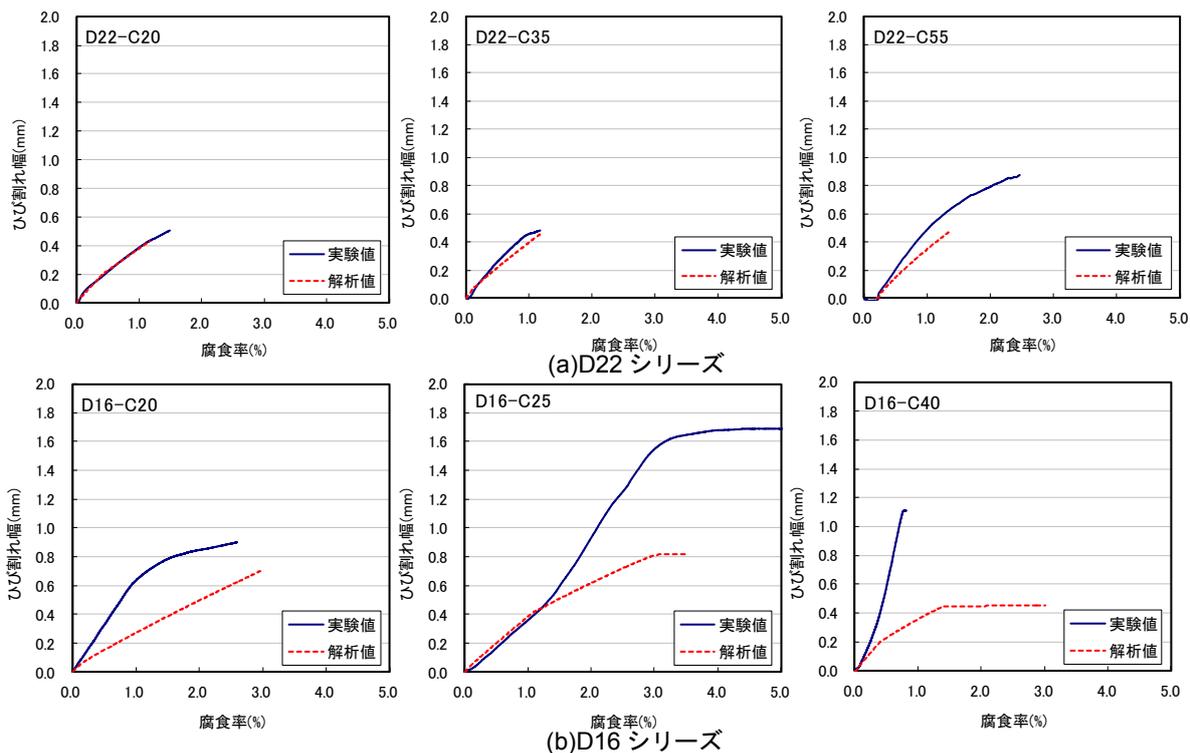


図-10 鉄筋の腐食率と表面のひび割れ幅の関係

表-5 解析パラメータ

	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比
コンクリート	それぞれの実験値	0.2
ひび割れコンクリート	$2.0 \times 10^2$	0.2
既存の腐食生成物	$2.0 \times 10^4$	0.3
新たな腐食生成物	$2.0 \times 10^2$	0.3
鉄筋	$2.1 \times 10^5$	0.3

ズにおいても同様の傾向が確認された。また同じ鉄筋腐食率では、かぶり厚が大きいほどひび割れ幅が大きい。

#### 4.3 構築モデルの適用性評価

3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の検討を行うこととする。なお、解析に用いたパラメータを表-5に示す。既存の腐食生成物の弾性係数は2章で得られたコンクリート内部で生成された場合の値とした。一方、新たに生成されるは固体ではなく液体状であり、本実験で取り扱ったものとは異なる。そのため、吉岡ら<sup>2)</sup>の研究で得られた値を用いた。

いずれの試験体においても、表面にひび割れが発生した後のひび割れ幅は、実験値および予測値ともに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。D22シリーズにおいては非常に良好な一致を示しており、既往の研究<sup>5)</sup>において $D/\phi$ が3.0以下の場合には応力状態が異なるためひび割れの予測が困難とされていたが、それを可能とした。なお、D16シリーズにおいては解析値が実験値よりも小さく評価しているが、これは本モデルで二次ひび割れが1本であると仮定していたのに対して、実際には二次ひび割れが複数本発生していたためであると考えられる。二次ひび割れ

は、複数本ある場合には表面ひび割れ幅の進展が大きくなるが、ある程度まで発達すると進展しなくなり、その結果、表面ひび割れはある一定以上大きくならない。

#### 5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1)腐食生成物の力学的特性の評価を行った結果、コンクリート中での腐食生成物の弾性係数は、約 $20000\text{N/mm}^2$ 程度であると考えられる。
- (2)ひび割れ進展実験の実験値と本モデルによる予測値は良好な一致を示し、内圧の低下および腐食生成物の力学的特性を考慮することの有用性を示した。

#### 6. 参考文献

- 1) 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, pp.1096-1101, 2012.
- 2) 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, pp.41-49, 1994.5
- 3) 吉岡保彦, 米沢敏男: 鉄筋の腐食生成物の力学的特性に関する基礎的な検討, 土木学会第39回年次学術講演会第5部, pp.271-272, 1984.11
- 4) S.P.Timoshenko: 弾性論, コロナ社, pp65-91, 1973.
- 5) 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.