

腐食生成物によるひび割れ幅のモデル化に関する研究

堤 知明¹・安田 登²・松島 学³・大賀宏行⁴

¹正会員 工博 東京電力株式会社電力技術研究所土木グループ 主任研究員 (〒230 横浜市鶴見区江ヶ崎4-1)

²正会員 工博 東京電力株式会社電力技術研究所土木グループ 主管研究員 (〒230 横浜市鶴見区江ヶ崎4-1)

³正会員 工博 東電設計株式会社技術開発本部コンクリート・材料チーム 課長 (〒110 台東区東上野3-3-3)

⁴正会員 工博 東京都立大学大学院助教授工学研究科土木工学専攻 (〒192-03 八王子市南大沢1-1)

本研究は、塩害腐食によるひび割れ幅から腐食性生成物量を推定する力学的モデルを提案したものである。このモデルから得られた腐食性生成物量は、コンクリートのかぶり厚さ、鉄筋径、およびひび割れ幅により支配される。提案モデルと電食による実験結果とを一致させるために係数 α_n を設け、梁試験体の逆解析により、 $\alpha_n = 0.114$ が求められた。提案モデルは、現位置の塩害劣化したひび割れ幅から鉄筋の腐食量を求めることができ、実用的な手法である。

Key Words : corrosion rate, crack width, chloride deterioration, model of crack due to corrosion

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の劣化が問題となってきている。特に、港湾構造物などの塩害の影響を受けやすい地域での劣化が問題となっている^{1), 2)}。そのため、現在使用している構造物があと何年供用できるかという寿命予測の方法や、構造物の劣化を遅らせるための補修方法・材料の研究がさかんに行われるようになってきた^{3), 4)}。しかし、構造物の寿命予測方法については、まだ問題も多く実構造物に適用するまでには至っていない。

鉄筋コンクリート構造物の塩害による耐力低下のしくみは、鉄筋が腐食し、腐食生成物が生成され、腐食生成物が増え、この膨張圧によってコンクリートの表面にひび割れや剥離が発生し、さらに腐食が進行するとコンクリートと鉄筋の付着が無くなり構造物として機能を果たさなくなると考えられる。現在使用中の構造物の内部鉄筋の腐食状態をコンクリートを研る方法で調査し、耐力低下の予測を行うことは、構造物の修復を必要とするため経済効率の面から考えて頻繁に実施することは難しいと思われる。そこで、表面的な劣化状況から内部鉄筋の腐食状況が認識でき、これによって鉄筋コンクリート構造物の耐力低下の把握を行うことが必要と考えられる。

一般に、コンクリート構造物の補修の要否の境界は、ひび割れが発生するまでとしている場合が一般的であり、

ひび割れが発生した時点で補修を行っている場合も多い⁵⁾。この理由として、公共的に使用されている構造物では、第三者障害による問題が考えられ、これを未然に防ぐためと思われる。しかし、構造物によっては、管理区域内に一般住民が立ち入る可能性は少なく、第三者障害が起ることは少ない構造物もある。したがって、ひび割れ等の劣化が進んでも構造物の耐荷力が維持できるならば補修の時期を遅らせてもよいと考えられる⁶⁾。これを可能にするためには、まず耐荷力の予測方法の確立が必要である。しかしながら、これらの手法は、ひび割れ発生までを推定するもので^{7), 8)}、ひび割れ発生後の評価を行ったものは少ない。本研究は、実構造物の保守管理の合理化を目指し、構造物の耐荷力に関係する鉄筋腐食量を腐食ひび割れ幅から簡便に推定するモデルを構築したものである⁹⁾。さらに本モデルを実用に供するためにモデルに補正係数を導入し、既往の実験結果との対比から、補正係数の値を設定した。腐食ひび割れ幅から腐食量を推定するには、既往の実験結果から両者の関係を把握することで推定が可能であるが、その場合は、かぶり、鉄筋径毎に両者の関係を把握しておく必要がある。本研究で提案したモデルでは、かぶり、鉄筋径がパラメータとして含まれており、補正係数も考慮した形でプログラム化する事で、より一般化され実際の保守管理に有効と考えられる。

2. 腐食ひび割れモデル

(1) ひび割れ幅と腐食量のモデルの構築

鉄筋が腐食するとその鉄筋の膨張により鉄筋に沿ったひび割れが発生することがよく見られる。ひび割れ発生後、腐食速度はひび割れあるいは剥離が生じる前の腐食速度よりも大きくなることは自明である。現行の設計等では、鉄筋腐食後のモデルが確立されていないこともあり、鉄筋の腐食開始を限界状態として設定されていることが多く、安全側の配慮がなされている¹⁰⁾。

次に、ひび割れ幅と腐食量の関係について示す。鉄筋が腐食した場合の鉄筋とコンクリートとの応力の関係のモデルを図-1のように仮定する。図に示すようにまだ腐食していない鉄筋に生じる圧力 q_0 と腐食生成物によりひび割れが発生したかぶり部のコンクリートに生じる圧力 q_1 が発生するとする。この圧力 q_1 によりコンクリート表面にひび割れが発生し、腐食が進展することによりひび割れ幅が大きくなると仮定した¹⁰⁾。

腐食によるひび割れ幅と腐食量の関係のモデルとして、図-1(c)に示すように一部切断された円筒モデルとしてモデル化する。従って、ひび割れ幅は、腐食生成物の膨張圧によりひび割れが押し広げられると考えられる。本研究は、腐食生成物による内圧を受けるかぶりコンクリートの変形挙動を一部切断された円筒としてモデル化することで説明する。

(2) ひび割れ幅とかぶり

ひび割れ幅 δ_w と内圧 q_1 の関係の力学モデルを図-2(a), (b) に示す。両図からコンクリート表面のひび割れ幅 δ_w より δ'_w は、鉄筋の腐食膨張により押し広げられるひび割れ幅の鉄筋の中心からの角度 θ が既知であれば、式(1)および式(2)のように求められる。

$$\delta_w = \frac{1}{2}(\phi + 2t_p) \cdot \theta \quad (1)$$

$$\delta'_w = \frac{1}{2}(\phi + 2t_p) \cdot \theta \quad (2)$$

中央部のC点の円周方向の変位量 δ''_w は、式(1)および式(2)と同様に、式(3)のように求められる。

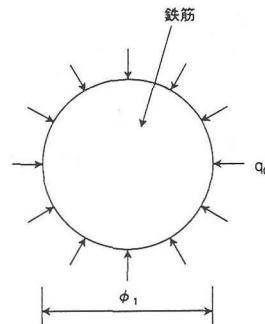
$$\delta''_w = \frac{1}{2}\phi \cdot \theta \quad (3)$$

変形後の膨張した腐食鉄筋の周長 ℓ_w は式(4)で求められる。

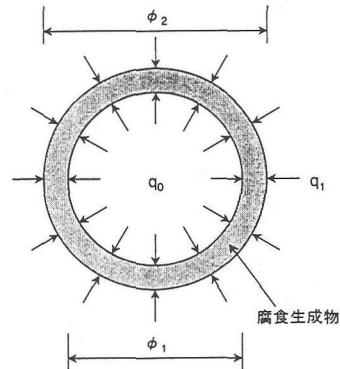
$$\ell_w = \phi \cdot \pi + \delta''_w \quad (4)$$

この時の直径 ϕ' は、式(5)で求められる。

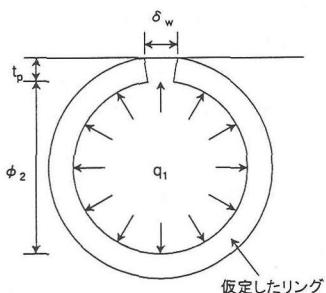
$$\phi' = \frac{\ell_w}{\pi} \quad (5)$$



(a) 腐食していない鉄筋の応力状況¹⁰⁾



(b) 腐食生成物が受ける応力状況¹⁰⁾



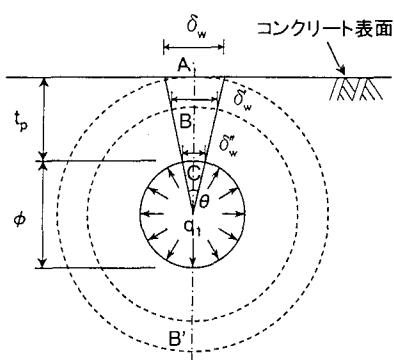
(c) かぶりコンクリートが受ける応力状況

図-1 ひび割れ幅と腐食量の力学モデル

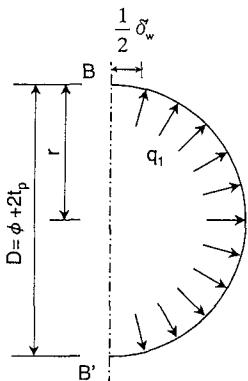
これより変形後の半径方向の変位量 u_c は、 θ の関数として式(6)のように求められる。

$$u_c = \frac{1}{2}(\phi' - \phi) = \frac{\phi}{4\pi} \theta \quad (6)$$

次に、 θ およびコンクリート表面のひび割れ幅 δ_w について求める。 δ_w を求めるために、初めに力学モデルの



(a) モデルの考え方



(b) モデル

図-2 ひび割れ幅のモデル

B点での変形量 δ'_w を求める。仮想仕事法を使って、 δ'_w を求める式(7)のように求められる。

$$\delta'_w = \frac{3 \pi q_1 (\phi + t_p)^4}{16 E_c \cdot I_c} \quad (7)$$

ここで、 E_c はクリープを考慮したコンクリートの変形係数であり、式(8)のように表すことができる。

$$E_c = E'_c \frac{1}{\phi_c + 1} \quad (8)$$

ϕ_c ：コンクリートのクリープ係数

E'_c ：コンクリートのヤング係数($=2.3 \text{ MPa}$)

I_c ：単位厚さのリングの断面2次モーメント(cm^4)

$$I_c = \frac{1}{12} t_p^3$$

クリープ係数は、コンクリート標準示方書を参考に $\phi_c = 2.5$ とした。 θ と δ'_w は、式(2)と式(7)の関係から式(9)のように求められる。

$$\theta = \frac{3 \pi \cdot q_1 (\phi + t_p)^3}{8 E_c \cdot I_c} \quad (9)$$

従って、 δ_w および u_c は、式(10)および(11)のように求められる。

$$\delta_w = \frac{3 \pi \cdot q_1 (\phi + t_p)^3 \cdot (\phi + 2t_p)}{16 E_c \cdot I_c} \quad (10)$$

$$u_c = \frac{3 q_1 (\phi + t_p)^2}{32 E_c \cdot I_c} \cdot \phi \quad (11)$$

(3) 腐食量と内圧の関係

腐食により鉄筋の元の径 ϕ_1 が減少しており、腐食生成物が鉄筋表面に均一の厚さに生成されるものと仮定すると、腐食により減少した径 ϕ_1 と腐食生成物により膨張した外周径 ϕ_2 は式(12.a, b)によって求められる。

$$\phi_1^2 = \phi^2 - \frac{4A_w}{\pi} \quad (12.a)$$

$$\phi_2^2 = \phi^2 + 4 \frac{(n-1)A_w}{\pi} \quad (12.b)$$

ここで、

n ：腐食生成物の体積膨張率

A_w ：腐食による断面減少面積で、式(13)で表される。

$$A_w = A_s - A_r \quad (13)$$

A_r ：腐食した鉄筋の断面積(cm^2)

A_s ：鉄筋の公称断面積(cm^2)

腐食生成物の体積膨張率は、須田らが行った研究¹¹⁾および腐食膨張率に関する既往の文献^{12), 13)}を参考に $n=2.5$ を採用した。

腐食生成物が内径 ϕ_1 、外径 ϕ_2 の円筒であると仮定し、内圧 q_0 および外圧 q_1 が生じているとする、内周半径方向の変位 u_{r0} と外周半径方向の変位 u_{rl} は、式(14.a, b)で表される(図-1(b)参照)。

$$u_{r0} = \frac{(1+\nu_r)\phi_1}{2E_r(K^2-1)} \left\{ (1-2\nu_r)(q_0 - q_1 \cdot K^2) + (q_0 - q_1) \cdot K^2 \right\} \quad (14.a)$$

$$u_{rl} = \frac{(1+\nu_r)\phi_2}{2E_r(K^2-1)} \left\{ (1-2\nu_r)(q_0 - q_1 \cdot K^2) + (q_0 - q_1) \right\} \quad (14.b)$$

ここで、

$$K = \frac{\phi_1}{\phi_2} \quad (15)$$

E_r は、クリープを考慮した腐食生成物のヤング係数で、式(16)で求められる。

$$E_r = E'_r \frac{1}{\phi_r + 1} \quad (16)$$

E'_r ：腐食生成物のヤング係数

ϕ_r ：腐食生成物のクリープ係数、コンクリートと同じ

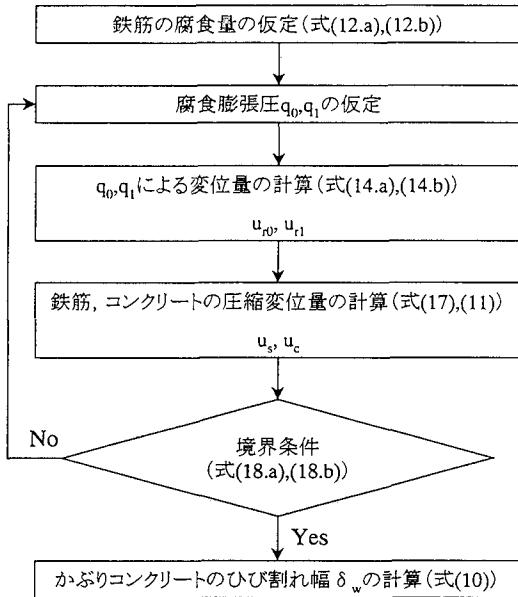


図-3 解析フロー

$\phi_r = 2.5$ とした。

ν_r : 腐食生成物のポアソン比

吉岡ら¹³⁾は、腐食生成物の力学的特性について基礎的な検討を行うため、腐食生成物の応力へひずみ関係を検討した。その結果、拘束のある場合の応力へひずみ曲線の勾配よりヤング係数が 2.0~3.0kPa となる。この結果をもとに、 $E_r = 2.0\text{kPa}$ と本研究では設定した。ポアソン比は、1/6 を採用した。

まだ腐食していない部分の鉄筋変位は、中実円形断面が、外圧を受けるものとして、式(17)のように求められる(図-1(a)参照)。

$$u_s = -\frac{(1-\nu_s)\phi_1}{2E_s} \cdot q_0 \quad (17)$$

ここで、

ν_s : 鉄筋のポアソン比(=1/6)

E_s : クリープひずみを考慮した鉄筋のヤング係数

これら各式の境界条件は、各変位の制約式となり、式(18.a, b)となる。

$$u_{r0} = u_s \quad (18.a)$$

$$u_c = \frac{\phi_2}{2} - \frac{\phi}{2} - u_{r1} \quad (18.b)$$

この境界条件により、腐食量からひび割れ幅を求めることができる。具体的な計算フローを図-3を用いて説明する。はじめに、鉄筋の腐食生成物による鉄筋の外周径、内周径および腐食膨張圧を仮定する。仮定された ϕ 、 ϕ_r 、 q_0 、 q_1 を用いて腐食生成物の変位量 u_{r1} 、 u_{r0} を求める。同時

に u_s 、 u_c を求める。この計算で q_0 、 q_1 を変化させ、 $u_{r1}=u_s$ 、 $u_{r0}=u_c$ になるまで繰り返し計算する。その結果得られた q_1 を用いて、腐食膨張圧によるひび割れ幅が計算できる。

3. 既往の研究結果との比較

(1) 比較に用いた試験体

本モデルと既往の実験結果との比較を行った。対象とした研究は、丸山ら⁸⁾、および武若ら¹⁴⁾の実験結果である。丸山らの研究は、角柱供試体に丸鋼の鉄筋を埋め込み電食試験により鉄筋を腐食させ、ひび割れ幅と腐食量の関係を調べたものである。武若らの実験は、電食試験によりコンクリート中の異形鉄筋を腐食させ、付着強度、および耐荷力に及ぼす腐食量あるいはひび割れ幅の影響を検討したものである。対象とした試験体は、梁供試体である。筆者ら¹⁵⁾も、梁供試体を用いて異形鉄筋を電気的に腐食させた後、載荷試験を行っている。実験は、ひび割れ幅と主鉄筋の間隔を検討因子として行っている。

(2) 検討結果

a) ひび割れ幅と腐食量

丸山らの実験結果⁸⁾と本モデルの解析結果の比較を図-4に示す。ただし、比較した実験でのひび割れ幅は、平均ひび割れ幅である。図に示すように本モデルの解析結果の方が実験結果よりも小さいが、ひび割れ幅が大きくなると腐食量が直線的に増加する傾向は一致する。

梁供試体による武若らの実験結果¹⁴⁾と本モデルの解析結果の比較を図-5に示す。実験結果でのひび割れ幅の最大値は 0.5mm 程度であり、実構造物の点検でみられるひび割れ幅よりも小さい。図に示すように、本モデルの解析結果が小さいが、その傾向は一致する。

筆者らの実験¹⁵⁾より得られた腐食量と本モデルによる計算結果の比較を図-6に示す。本実験の特徴は、ひび割れ幅が大きく、実際の調査したひび割れ幅の最大値を考慮して、最大 4mm まで行っている。この場合も本モデルの解析結果が小さいが、その傾向は一致する。実験では、ひび割れ幅が大きいと腐食量も増大するが、溶液中に錆が溶けだしたこともあり、ひび割れ幅の評価が小さめと判断される。

b) かぶりと腐食量

丸山の実験結果から、かぶりによる腐食量の変化と本モデルの解析結果の比較を図-7に示す。ここでは、かぶりとひび割れ幅を設定して腐食量を求めた。図に示すように、本モデルの解析結果はかぶりが小さいと腐食量が大きく、かぶりが大きくなるにつれて一定になる。実験結果は、かぶりの大きさに関係なく、一定値を示す。これは、実際の測定データでは、かぶりに対して、腐食量はほとんど変化しないが、本モデルは、かぶりが大きくな

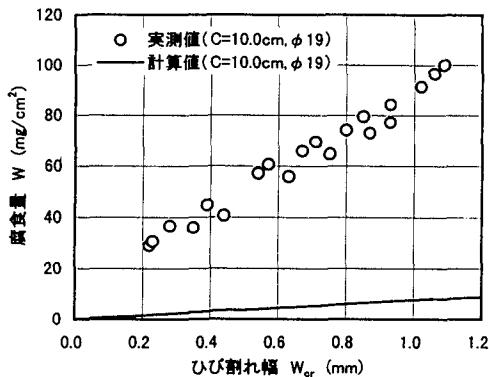


図-4 ひび割れ幅と腐食量の関係
(丸山ら⁸⁾の実験結果と本モデルとの比較)

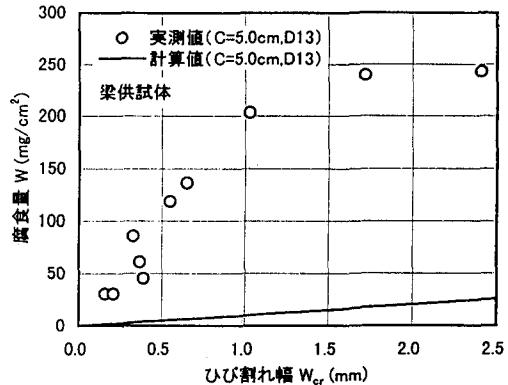


図-6 ひび割れ幅と腐食量の関係
(筆者ら¹⁵⁾の実験結果と本モデルとの比較)

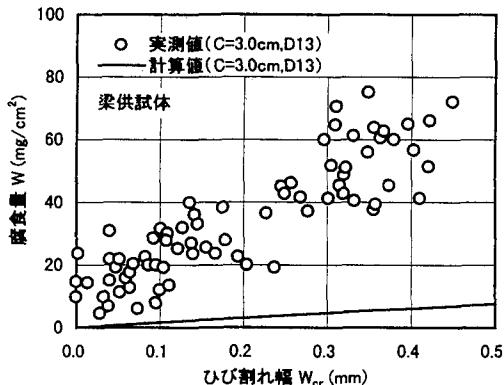


図-5 ひび割れ幅と腐食量の関係
(武若ら¹⁴⁾の実験結果と本モデルとの比較)

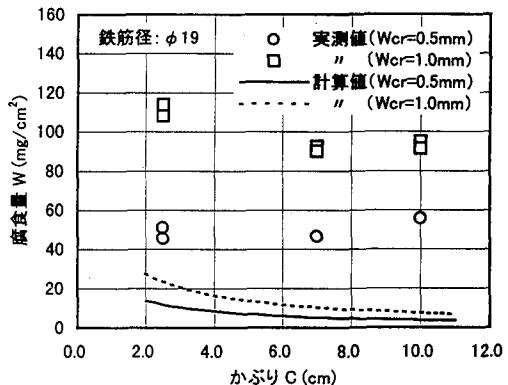


図-7 かぶりと腐食量の関係
(丸山ら⁸⁾の実験結果と本モデルとの比較)

なると腐食量の低下が若干認められるためである。既往の筆者らの研究¹⁶⁾からかぶりが小さいと厚肉円筒の力学モデルが適用できないことがわかつており、かぶりが小さい場合は、応力状態が異なるために、整合性が得られなかつたと考えられる。

c) 鉄筋径と腐食量

武若らの実験¹⁴⁾による鉄筋径と腐食量の関係と本モデルによる解析結果の比較を図-8に示す。図に示すように実験結果は、鉄筋径の変化に対して腐食量の感度はほとんど無い。本モデルの検討結果でも鉄筋径の増加に伴い、若干の増加が認められるが、腐食量に対する感度は小さい。

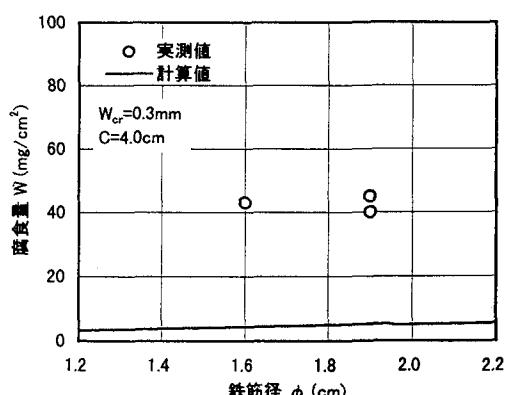


図-8 鉄筋径と腐食量の関係
(武若ら¹⁴⁾の実験結果と本モデルとの比較)

4. モデルの補正係数 α_n の導入

(1) 係数 α_n と各因子

電食試験との比較では、腐食量は計算値と大きく異なっていた。この理由として次のことが考えられる。①電食実験であるため、鉄が溶出し、腐食膨張圧が減少するため、測定されたひび割れ幅よりも腐食量が大きくなつた。②モデルでは、鉄筋背後（かぶりと反対側）のひび割れを考慮していないが、実際には鉄筋背後にもひび割れが生じる。このため、同じ腐食量でのひび割れ幅が小さくなる。③電食実験では、腐食量の評価として、質量減少量を測定するか、積算電流から計算するため、鉄筋全体に亘る平均的な腐食量となり、孔食による腐食の不均一性を評価できない。これらのことと定量的に評価することは困難であるため、前述のモデルに式(19)に示す補正係数を導入することとした。

$$\phi_2^2 = \phi^2 + 4 \frac{(n-1)\alpha_n A_w}{\pi} \quad (19)$$

本章では、補正係数 α_n を本提案モデルの計算値と実験による実測値から図-3によるフローを用いて逆算によって求めることとした。

a) ひび割れ幅と α_n の関係

ひび割れ幅と α_n の関係を図-9に丸山らの実験⁸⁾を、図-10に武若らの実験¹⁴⁾の結果を示す。 α_n のばらつきは若干認められるが、ひび割れ幅が 0.1mm 以上では、腐食量の測定値のばらつきを考慮すると同程度の値を示す。丸山らの実験⁸⁾よりも武若らの実験の方が α_n の値が小さい。この理由として、丸鋼と異形鉄筋の違い、梁試験体はせん断補強筋によりひび割れ幅が拘束されること等によるものである。筆者らの実験結果¹⁵⁾を図-11に示す。本実験でも、ひび割れ幅が大きくなると、係数 α_n が増加する傾向も認められ、丸山、武若の実験結果^{8), 14)}と傾向は同じである。全ての供試体において、ひび割れ幅 0.1mm 以下では、 α_n の値が 0.1mm 以上のひび割れ幅の場合よりも小さくなっている。

b) かぶりと係数 α_n の関係

かぶりと係数 α_n の関係を図-12に示す。図に示すようにかぶりが大きくなると係数 α_n の値が小さくなっていることがわかる。しかしながら、かぶりが小さい 2cm では α_n はかなり大きな値となっている。筆者の一部が指摘しているように¹⁶⁾かぶりが小さい場合は腐食膨張による応力状態が厚肉円筒と異なるため、 α_n の値は適用出来ないものと考えられる。一方、土木学会コンクリート標準示方書に示されているかぶりの範囲¹⁷⁾と同程度の 3.0 ~ 7.0cm に着目すると、かぶりが大きくなるにつれて若干小さくなる傾向は示すものの、本問題のばらつきを考慮すると一定と判断できる。

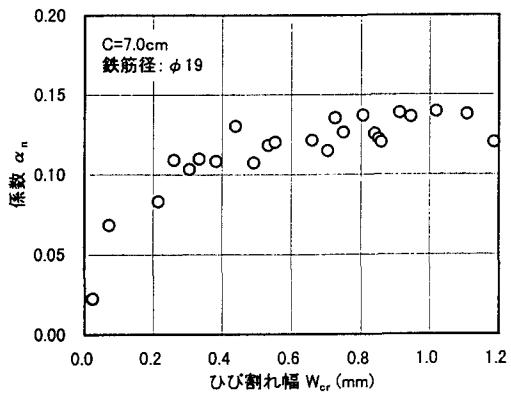


図-9 ひび割れ幅と係数 α_n の関係 (丸山ら⁸⁾)

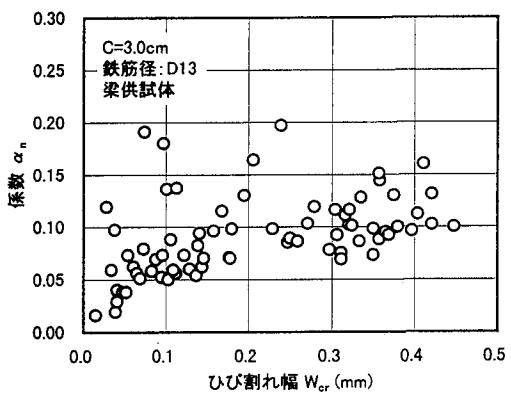


図-10 ひび割れ幅と係数 α_n の関係 (武若ら¹⁴⁾)

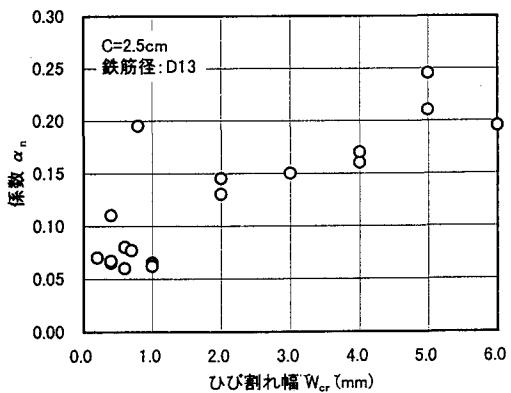


図-11 ひび割れ幅と係数 α_n の関係 (筆者ら¹⁵⁾)

c) 鉄筋径と係数 α_n の関係

鉄筋径と係数 α_n の関係を図-13に示す。データが少ないため明確なことは言えないが、鉄筋径の変化に対し、係数 α_n の値は一定値を取り、 $\phi 16\sim 20\text{mm}$ 程度の範囲では感度がないと言える。

d) 係数 α_n の分布

各供試体において係数 α_n がどのような値をとるかを調べた。a)～c)の解析から係数 α_n の値は、測定した腐食量のばらつきを考慮するとひび割れ幅 0.1mm 以上ではひび割れ幅の値にあまり影響しないことが判明した。かぶりの変化に対する係数 α_n は、かぶりが小さい場合は理論的に適用できないこともわかった。また、鉄筋の種類(異形あるいは丸鋼)が同じならば、係数 α_n はほぼ同程度の値をとる。

丸山らの実験結果⁸⁾から求めた係数 α_n の値の分布を図-14に示す。分布は、平均値が 0.135 で、 $0.05\sim 0.3$ の範囲にあり、ほとんどの値が $0.1\sim 0.15$ の間にあることがわかる。武若らの実験結果¹⁴⁾の梁供試体による係数 α_n の分布を図-15に示す。分布は、平均値が 0.114 で、 $0.05\sim 0.15$ の範囲にあることがわかる。著者らの実験結果¹⁵⁾から求めた係数 α_n の分布を図-16に示す。

分布は $0.05\sim 0.25$ の範囲にあり、平均値は 0.113 である。分布曲線は武若らの梁供試体の実験結果とほぼ同じであり、丸山らの丸鋼の実験⁸⁾から求めた α_n よりも小さいことがわかる。

(2) 提案する係数 α_n

実構造物に対応する係数 α_n を設定するには、実構造物を調査したデータを用いるか、実構造物に近い供試体による測定データを用いるべきである。しかしながら、実構造物に関して、ひび割れ幅と腐食量の関係を調査したデータは無く、実構造物に近い配筋状況の武若らの梁供試体と筆者らの実験のデータを合わせて係数 α_n の値を求めめた。

武若の梁供試体と筆者らの実験による係数 α_n の値を合わせて係数 α_n の分布を図-17に示す。ただし、前節のa)～c)で検討したように、対象とする範囲は、異形鉄筋で、梁部材を考えており、かぶりが 3.0cm 以上、ひび割れ幅が 0.1mm 以上のデータで整理した。分布の範囲は、 $0.05\sim 0.3$ になっている。分布形状を χ^2 検定した結果 α_n は、対数正規分布を示し、平均値 0.114 、標準偏差 0.041 となつた。さらに、武若らの実験¹⁴⁾と筆者らの実験¹⁵⁾から求めた値はほとんど変わらない範囲を示す。 α_n の変動係数は 0.36 と大きなものになっているが、筆者の一部が調査した実構造物の腐食量のばらつきは¹⁸⁾大きく、本研究で示した、かぶりから $3.0\sim 7.0\text{cm}$ 程度、鉄筋径 $\phi 16\sim 20$ 程度であれば十分な精度と考えられる。

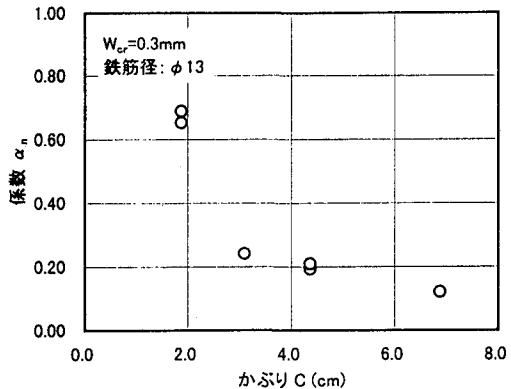


図-12 かぶりと係数 α_n の関係 (武若ら¹⁴⁾)

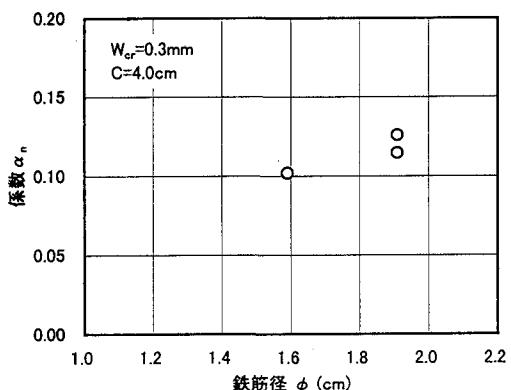


図-13 鉄筋径と係数 α_n の関係

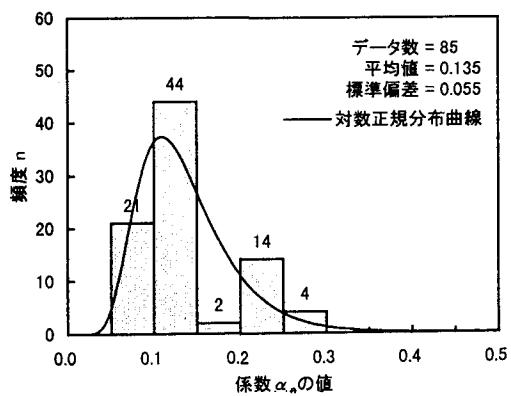


図-14 逆算された係数 α_n の分布 (丸山ら⁸⁾)

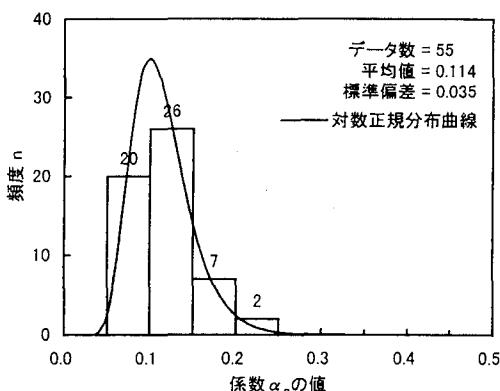


図-1 5 逆算された係数 α_n の分布 (武若ら¹⁴⁾)

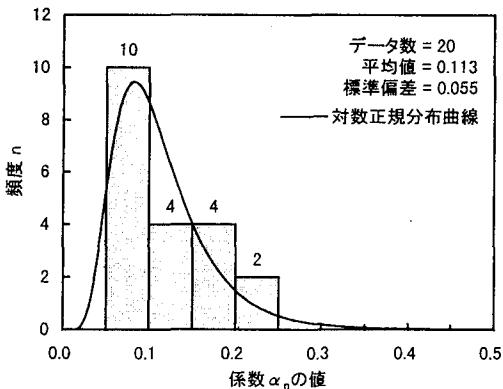


図-1 6 逆算された係数 α_n の分布 (筆者ら¹⁵⁾)

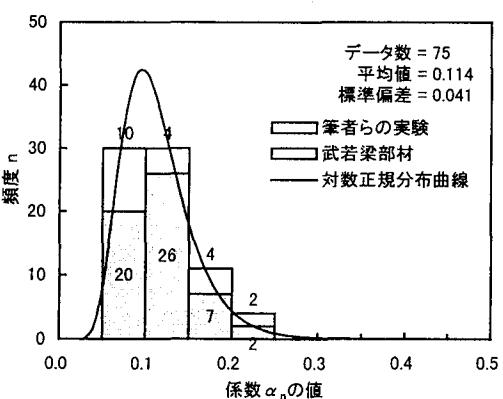


図-1 7 提案する係数 α_n

5. まとめ

本研究は、ひび割れ幅と鉄筋の腐食量関係を求めるたひび割れ幅を腐食によって生じる膨張圧により、一部切断された円筒モデルとして提案するとともに、モデルの補正係数を既往の実験結果からの逆算により算出した。本研究結果をまとめると以下の通りである。

(1) 腐食生成物の形成の不均一性を考慮して、係数 α_n を定義した。既往の電食実験から逆算によりもとめた。ただし、本モデルの適用範囲は、かぶり 3.0cm 以上、ひび割れ幅 0.1mm 以上である。

(2) その結果、 α_n は対数正規分布を示し、平均値 0.114、標準偏差 0.041 が得られた。この値を算出したものと同様な構造物に対しては、ひび割れ幅から腐食量を推定することができるものと考えられ、点検・評価に利用することができる。

謝辞：本研究を遂行するに当たり、東電設計株式会社技術開発本部コンクリート・材料チーム中川貴之氏には、データの整理など煩雑な苦労も惜しまず協力して頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 小林一輔：コンクリート構造物の耐久性、コンクリート工学, Vol. 23, No. 2, pp. 4~12, Feb. 1985.
- 2) 大即信明, 原茂雅光, 浜田秀則：桟橋コンクリート上部工劣化実態詳細報告, 港湾技研資料, No. 627, 1988.
- 3) 森永繁：鉄筋の腐食速度に基づいた鉄筋コンクリート建築物の寿命予測に関する研究, 東京大学学位論文, 1986.
- 4) 和泉意登志：構造物の耐久性設計手法一鉄筋のかぶり厚の信頼性設計手法一, コンクリート工学, Vol. 24, No. 11, pp. 38~42, 1988
- 5) 鉄筋コンクリート構造物の耐久設計に関する考え方, 日本コンクリート工学会, 1991, 5.
- 6) 出頭圭三, 米澤敏男, 小林豊次：コンクリート構造物の耐久性診断シリーズ3鉄筋腐食の診断, 森北出版株式会社, pp. 155~156, 1993, 3.
- 7) 関博：鉄筋の腐食による膨張ひび割れの発生機構について, セメントコンクリート No. 458, pp. 20~27, Apr. 1985.
- 8) 丸山久一, 田森清美, 小田川晶史, 橋本親典：鉄筋の発錆によるコンクリートのひび割れ性状に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 10, No. 2, 1988, pp. 505~510.
- 9) 堤知明, 松島学, 村上祐治：既設構造物のひび割れ幅からの腐食量の推定, コンクリート工学年次論文報告集, 第18卷1号, pp. 789~794, 1996.
- 10) 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. 44

～49, 1994 年 5 月.

- 11) 須田久美子, S. Misura, 本橋賢一: 腐食ひび割れ発生限界
腐食量に関する基礎的研究 コンクリート工学年次論文報告
集, Vol. 14, No. 1, 1992.
- 12) 三沢俊平: 鉄筋の生成機構, 大気腐食と試験法, 日本材料學
会, 腐食防食部門委員会, pp. 1～16, 1991.
- 13) 吉岡保彦, 米澤敏男: 鉄筋の腐食生成物の力学的特性に関する
基礎的な検討, 第 37 回土木学会年次講演会, pp. 271～272,
1982.
- 14) 武若耕治, 松本 進: コンクリート中の鉄筋がRC部材の力
学的性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集,
Vol. 6, No. 2, 1988, pp. 177～180.
- 15) 松島 学, 福田靖大, 堤 知明, 村上祐治: 鉄筋腐食時のひ
び割れ発生に関する変形挙動 土木学会第 47 回年次学術講演
会第 5 部, pp. 1214～1215, 1992 年 9 月.
- 16) 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 年 2 月.
- 17) コンクリート標準示方書平成 8 年度制定設計編, (社) 土木學
会, 1996. 3.
- 18) 堤 知明, 白井 伸一, 安田 登, 松島 学: 塩害劣化に関する
影響要因の実データに基づく定量評価, 土木学会論文集,
No. 544/V-32, pp. 33～41, 1996 年 8 月.

(1996. 9. 18 受付)

STUDY ON MODEL OF CRACK WIDTH DUE TO CORROSION PRODUCTS

Tomoaki TSUTSUMI, Noboru YASUDA, Manabu MATSUSHIMA and Hiroyuki OHGA

The mathematical model of relationship between crack width and corrosion products is proposed in this paper. Corrosion products obtained from this model are governed by thickness of concrete cover, diameter of reinforcement and crack width. Coefficient α_n is obtained to coincident with results of existing galvanic corrosion test and proposed model. According to results of inverse analysis, $\alpha_n = 0.114$ is determined. Proposed model is useful to estimate corrosion rate of reinforcement from crack width due to chloride deterioration in situ.