

# 鉄筋腐食によるコンクリートのひび割れ発生状況 及びひび割れ幅に関する研究

亓 路寛<sup>1</sup>・関 博<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 早稲田大学助手 理工学部土木工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

鉄筋腐食により鉄筋コンクリート部材の性能は低下すると考えられ、既存の構造物の供用性能を予測するためには、鉄筋の腐食量とひび割れ幅の関係を明らかにする必要がある。本研究は、円筒モデルを基本の算定モデルとし、鉄筋腐食によるひび割れ発生時点の鉄筋腐食量および発生後の腐食量とひび割れ幅の関係の基本算定式を誘導し、さらに、ひび割れ発生状況およびひび割れ幅と鉄筋腐食量の関係を把握するために、材料非線形性と幾何学的非線形性を考慮した有限要素解析を行った。基本算定式を基礎にし、有限要素解析によりかぶり、鉄筋径、コンクリート強度の各種要因を考慮した鉄筋腐食によるひび割れ幅と鉄筋腐食量の修正算定式を提案した。また、既往の実験データ及び調査結果を用いて、解析結果と比較し修正算定式の妥当性を検証した。

*Key Words:* cylinder model, smeared model, discrete model, crack width, corrosion amount

## 1. はじめに

コンクリート構造物は極めて重要な社会基盤を構成し、その機能を保持するためには維持管理の重要性は極めて高いと言える。コンクリート構造物は適切に設計、施工された場合には非常に耐久性に富む構造であり、従来から多くの土木構造物に用いられてきた。しかし、地球環境中で永久的な施設の構築は不可能に近く、社会基盤を支える施設を長年月に亘り、所要性能を保持するためには、コンクリート構造物の劣化機構を解明し、その対策を講ずることが大切である。

コンクリート部材の劣化問題で最も重要なものの一つに鉄筋の腐食があり、コンクリート中の内部鉄筋の腐食に関しては塩害及び中性化が主な原因と考えられている。コンクリート部材の鉄筋の腐食により腐食生成物が生成され、腐食生成物が増えるにつれて、鉄筋周囲のコンクリートへの膨張圧が生ずる。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、特に、コンクリートひび割れ発生後は、腐食因子の浸透が進行しやすいために、鉄筋の腐食速度が加速され、コンクリートと鉄筋の付着が減退し、鉄筋断面積が減少し、部材としての機能を著しく阻害すると考えられる。既存の構造物の供用寿命推定を行うとき、コンクリート中から鉄筋をはつり

出しコンクリート構造物の内部鉄筋の腐食状態を常時に調査することは現実的でない。従って、コンクリート表面の劣化状況から内部鉄筋の腐食状態を掌握することが重要になると考えられる。これによって鉄筋コンクリート部材の耐力低下あるいは供用寿命を推定することが可能と考えられる。

コンクリート部材の補修の要否の境界条件は、部材表面でのひび割れの発生時点としている場合が一般であり、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。しかしながら、ひび割れが発生した後、コンクリート構造物の性能がただちに喪失しないのが現実であると考えられ、コンクリートひび割れ発生以降における構造物の性能に関するひび割れ幅と鉄筋腐食量との関係を推定することが重要になると考えられる。したがって、実験に代わる解析的な検討手法が強く求められるが、ひび割れの発生・進展に伴う力学挙動を取り扱う破壊力学はこの問題の解析に利用可能な非常に有望な分野であると考えられる<sup>1),2)</sup>。

本研究では、円筒モデルを基本算定モデルとし、鉄筋腐食によるひび割れ発生時点の鉄筋腐食量および発生後の腐食量とひび割れ幅の関係の基本算定式を誘導した。次に、ひび割れ発生状況およびひび割れ幅と鉄筋腐食量

の関係を把握するために、材料非線形性と幾何学的非線形性を考慮し、任意の位置でひび割れが発生する可能性を有する分布ひび割れモデルを用いて、ひび割れ発生モードについて分析した。さらに、定めたひび割れ発生モードを適用可能な離散ひび割れ解析のモデルとし、鉄筋腐食によるひび割れ幅と腐食量の関係について有限要素解析を行った。基本算定式を基礎にし、数値解析によりコンクリートのかぶり、鉄筋直径、コンクリート強度の各種要因を考慮した鉄筋腐食によるひび割れ幅と鉄筋腐食量の修正算定式を提案した。また、既往の実験データ及び調査結果を用いて、解析結果と比較し修正算定式の妥当性を検証した。

## 2. 基本算定式

### (1) 基本算定式のモデル

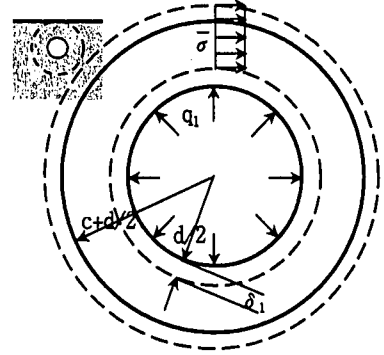
鉄筋の腐食による錆の膨張圧により鉄筋周辺のコンクリートにひび割れが発生する。コンクリート表面でのひび割れ発生前後で、コンクリート部材の特性との関係は相違すると思われる。ひび割れ発生前は、腐食量はかぶり、鉄筋直径およびコンクリート部材の引張強度などへの依存性が強いが、ひび割れ発生後は、腐食量は鉄筋直径およびコンクリート部材の引張強度への依存性は小さい<sup>3), 4), 5)</sup>。

コンクリート表面でのひび割れ発生時点の腐食量とひび割れ発生後の腐食量とひび割れ幅の関係の算定モデルを種々検討したが、本文では図-1のように仮定することとした。図-1(a), (b)の算定モデルは鉄筋周辺のコンクリートを一部切断された円筒モデルとしてモデル化したものである。鉄筋錆の膨張圧は一様な分布荷重として円筒モデルの内面に作用すると考えた。本研究では、ひび割れ発生時点の鉄筋腐食量およびひび割れ幅と腐食量の関係についての算定式は本図の簡略化された円筒モデルを用いて、算定式を誘導する。

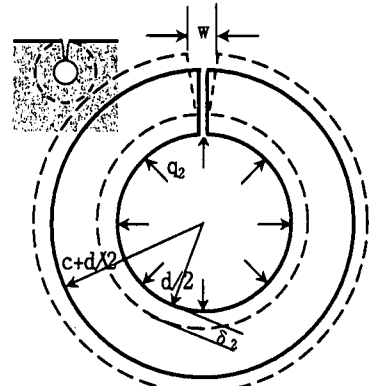
### (2) ひび割れ発生時点の算定式

円筒の円周方向に生ずる応力は均一でないが、本研究では図-1(a)に示すように円周方向の応力の平均値をひび割れ発生時点の応力とする。膨張圧により円筒内部に生じた半径方向の変位は円周方向の影響を考慮せずに、この変位を錆層の変位とすると、応力と変位は式(2.1)および式(2.2)で求められる。

$$\bar{\sigma} = \frac{q_1 d}{2c} \quad (2.1)$$



(a) ひび割れ発生時点の算定モデル



(b) ひび割れ発生後の算定モデル

図-1 基本算定式の力学モデル

$$\delta_1 = \frac{q_1 d \{ (2c + d)^2 + d^2 \}}{2E \{ (2c + d)^2 - d^2 \}} \quad (2.2)$$

ここに、 $\bar{\sigma}$ : 平均応力 (N/mm<sup>2</sup>)

$\delta_1$ : コンクリートの変位増分 (mm)

$d$ : 鉄筋直径 (mm)

$c$ : かぶり (mm)

$E$ : コンクリートヤング率 (N/mm<sup>2</sup>)

$q_1$ : 分布荷重 (N/mm)

### (3) ひび割れ発生後の算定式

ひび割れ発生後の算定モデルを図-1(b)に示す。ひび割れ発生前のコンクリートの変位増分 $\delta_1$ は鉄筋直径 $d$ に比べて非常に小さく無視できる程度であり、誘導式では省略した。膨張圧により円筒内部に生じた半径方向の平均変位を錆層の変位とし、開口箇所の変位をひび割れ幅とすると、半径方向の変位とひび割れ幅の算定式は式(2.3)および式(2.4)で求められる。

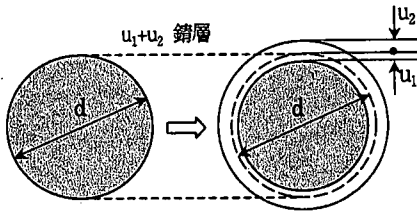


図-2 腐食量の算定モデル

$$\delta_2 = \frac{q_2(c+d)^4}{16EI} \quad (2.3)$$

$$w = \frac{\pi q_2(c+d)^3(5c+3d)}{16EI} \quad (2.4)$$

ここに、 $w$ ：ひび割れ幅(mm)

$\delta_2$ ：コンクリートの変位増分(mm)

$I$ ：二次断面係数

$q_2$ ：分布荷重 (N/mm)

#### (4) 腐食量の算定式

鉄筋が腐食すると、腐食生成物は鉄に比べて体積が増加する。腐食生成物と鉄の関係を図-2に示す。この図に示すように鉄筋の単位長さあたりの腐食を考えた場合、鉄筋腐食量の算定式は式(2.5)で表される<sup>1)</sup>。

$$W_c = \frac{\gamma}{(\rho-1)} u_2 \quad (2.5)$$

ここに、 $W_c$ ：鉄筋腐食量(mg/mm<sup>2</sup>)

$u_1$ ：鉄筋の半径方向の減少した厚さ(mm)

$u_2$ ：鉄筋の半径方向の増大した厚さ(mm)

$\gamma$ ：鉄の密度(7.85mg/mm<sup>3</sup>)

$\rho$ ：腐食生成物の体積膨張率

#### (5) ひび割れ幅と腐食量との関係となる基本算定式

ひび割れ幅と腐食量との関係の算定式については、円筒円周方向の平均応力がコンクリートの引張強度に達した時点のコンクリートの変位増分 $\delta_1$ をひび割れ発生時点の鉄筋の半径方向の増大した厚さとし、コンクリートの変位増分 $\delta_2$ をひび割れ発生後の鉄筋の半径方向の増大した厚さとする。コンクリート圧縮強度と引張強度の関係を用い<sup>6)</sup>、式(2.1)~(2.5)によりひび割れ発生時点の腐食量 $W_{c1}$ の算定式(2.6)およびひび割れ発生後のひび割れ幅と鉄筋腐食量 $W_{c2}$ の算定式(2.7)が導かれる。

$$W_{c1} = \frac{0.0673\gamma}{E(\rho-1)} \frac{\{(2c+d)^2+d^2\}}{(c+d)} f_c^{2/3} \quad (2.6)$$

$$W_{c2} = \frac{\gamma}{\pi(\rho-1)} \frac{(c+d)}{(5c+3d)} w \quad (2.7)$$

従って、式(2.6)と式(2.7)をまとめると、式(2.8)が腐食量の基本的な算定式とする。

$$W_c = W_{c1} + W_{c2} = \frac{\gamma}{\pi(\rho-1)} \left( \frac{0.22\{(2c+d)^2+d^2\}}{E(c+d)} f_c^{2/3} + \frac{(c+d)}{(5c+3d)} w \right) \quad (2.8)$$

ここに、 $W_c$ ：鉄筋の腐食量(mg/mm<sup>2</sup>)

$W_{c1}$ ：ひび割れ発生時点の鉄筋腐食量(mg/mm<sup>2</sup>)

$W_{c2}$ ：ひび割れ発生後の鉄筋腐食量(mg/mm<sup>2</sup>)

$f_c$ ：コンクリート圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)

$w$ ：ひび割れ幅(mm)

腐食算定式(2.8)により、コンクリートのひび割れ発生時点の腐食量及び発生後のひび割れ幅と腐食量との関係を求めることができる。既往の研究と調査によれば、コンクリート内部においてひび割れ発生の可能性が高いと考えられる。しかし、この基本算定モデルを立てる際には、円筒モデルの外周のコンクリートの拘束及び内部に発生したひび割れの影響を考慮しておらず、この影響を究明するために、さらに、ひび割れ発生・進展の解析方法及びひび割れ幅の解析方法を用いて解析を行った。

### 3. ひび割れ発生・進展の解析手法

既往の研究及び調査から鉄筋腐食によるひび割れ発生モードは、かぶり、鉄筋間隔、拘束条件などにより相違する。ひび割れ幅の計算のために、離散ひび割れモデルを適用することが考えられるが、このモデルが使うためにコンクリートのひび割れ発生位置を定めることが重要になると考えられる。本解析では、ひび割れ発生モードを判断することができる分布ひび割れモデルを用いひび割れ発生モードの解析を行い、ひび割れ幅の計算には4章で述べる離散ひび割れモデルを用いた。

#### (1) ひび割れのモデル化

##### a) 解析手法

鉄筋腐食によるひび割れ発生モードの判断にあたり、鉄筋軸直角方向でのひび割れの発生を考慮した2次元有限要素解析を用いることとした。コンクリートの引張強度は、骨材の噛み合わせなどの影響により、ひび割れ発生

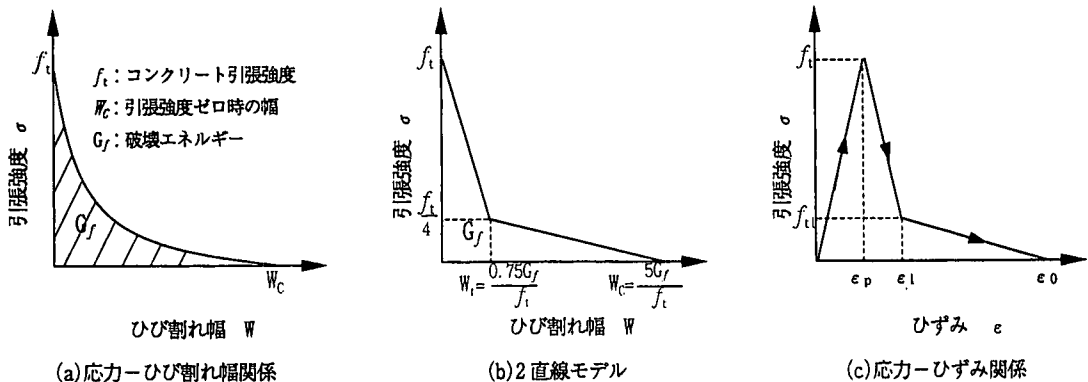


図-3 コンクリートの引張軟化特性

後に急激に応力を解放するのではなく、ひび割れの開口幅が増加するとともに徐々に応力を解放することが知られている。本研究では、図-3(a)のひび割れ幅と引張応力の関係として、図-3(b)に示すように2直線で表される計算ひび割れモデルに適用し、コンクリートの引張軟化特性を表現することとした。

#### b) ひび割れに対する構成則

一般的な仮想ひび割れモデルでは、応力とひび割れ幅の関係が直接用いられる。例えば、JCIの構造破壊力学研究論文集が示した方法<sup>7)</sup>は、仮想ひび割れ位置に二つの節点を設けておき、仮想ひび割れに沿ったひび割れ位置の先端を入力データとして割線解析を行うものである。本研究では、コンクリートすべての要素にコンクリートの引張軟化挙動を応用させて解析を行った。

引張軟化曲線は、各種の方法で実験的に求められている。また、解析上の数値モデルにも各種の提案があるが、ここでは、標準的なモデル内の1/4モデルを用いることとした<sup>7),8)</sup>。

ひび割れ幅  $w$  は、要素の幅  $B$  を介して、ひずみに換算されるので、応力-ひずみ幅関係は、図-3(c)および次式に示すような応力-ひずみ関係に変換できる。

$$(1) \quad 0 \leq \varepsilon < \varepsilon_p$$

$$\sigma = E_E \cdot \varepsilon \quad (3.1)$$

$$E_t = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = E_E \quad (3.2)$$

$$(2) \quad \varepsilon_p \leq \varepsilon < \varepsilon_l$$

$$\sigma = f_t - \frac{0.75f_t(\varepsilon - \varepsilon_p)}{\varepsilon_l - \varepsilon_p} \quad (3.3)$$

$$E_t = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = -\frac{0.75f_t}{\varepsilon_l - \varepsilon_p} \quad (3.4)$$

$$(3) \quad \varepsilon_l \leq \varepsilon < \varepsilon_0$$

$$\sigma = 0.25f_t - \frac{0.25f_t(\varepsilon - \varepsilon_l)}{\varepsilon_0 - \varepsilon_l} \quad (3.5)$$

$$E_t = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = -\frac{0.25f_t}{\varepsilon_0 - \varepsilon_l} \quad (3.6)$$

$$(4) \quad \varepsilon_0 \leq \varepsilon$$

$$\sigma = E_t = 0 \quad (3.7)$$

$$\text{ただし、} \varepsilon_p = \frac{f_t}{E_t}, \quad \varepsilon_l = \frac{0.75G_f}{f_t \cdot B} + \varepsilon_p, \quad \varepsilon_0 = \frac{5.0G_f}{f_t \cdot B}$$

ここに、 $G_f$ : 図-3(a)に示すコンクリートの破壊エネルギー(0.1N/mm)

$f_t$ : コンクリート引張強度(N/mm<sup>2</sup>)

$B$ : 要素幅(mm)

このようにして定式化された要素の剛性を全体剛性マトリクスに組み込んで数値解析を行った。

#### (2) 解析モデル

有限要素解析において、コンクリートの圧縮側はすべて弾塑性であるとし、4節点の四角形要素によりモデル化した。解析方法は、鉄筋膨張を鉄筋周囲のコンクリートへ変位を与えていく変位制御型の増分解析である。

ひび割れの発生による2次元的な挙動を表現するために、コンクリートへの膨張力方向の応力-ひずみ関係はこの方向に平均化したものを用いる。

ひび割れ発生後の軟化特性は図-3に示した2次直線でモデルを行った。コンクリートの圧縮領域の構成則

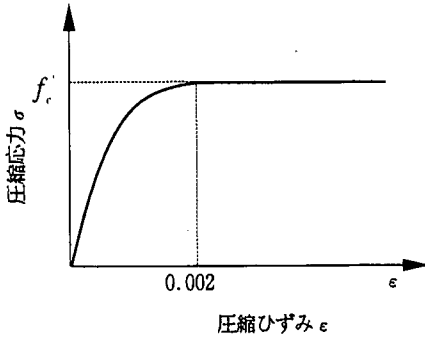


図-4 応力-ひずみ曲線

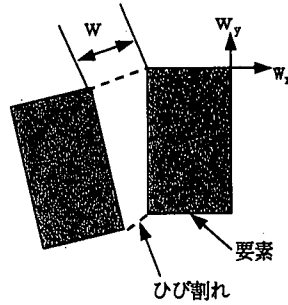


図-5 ひび割れ幅の算定モデル

は、図-4 および次に示す曲線によるモデル<sup>9)</sup>を設定した。面内ひび割れは分布ひび割れモデルで表現するものとした。

$$\varepsilon \leq 0.002, \quad \sigma = f_c \times \frac{\varepsilon}{0.002} \times \left( 2 - \frac{\varepsilon}{0.002} \right) \quad (3.8)$$

$$\varepsilon > 0.002, \quad \sigma = f_c \quad (3.9)$$

ここで、 $f_c$  : コンクリート圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

以上の解析モデルを用いることにより、鉄筋腐食によるひび割れ発生モードを判断することができると考えられる。

#### 4. ひび割れ幅と鉄筋腐食量の解析手法

離散ひび割れモデルをひび割れ幅を予測できるものとした場合、ひび割れ発生位置及び本数を適切に定めることが必要である。実際に鉄筋腐食によって発生するひび割れの位置は、鉄筋直径、かぶり、鉄筋間隔、拘束条件など各種の要因の影響を受けて変化すると考えられる。本研究では、3.で述べた分布ひび割れモデルに基づいた解析結果の上で、解析的に最も分布ひび割れモデルに近いと考えられるひび割れの位置、角度及び本数を定めることにして、ひび割れ幅に関する解析を実施した。

ひび割れの発生を考慮した有限要素解析では、コンクリート引張強度基準に基づいたひび割れ判断が一般に行われてきた。コンクリートのひび割れ発生条件としては、仮想ひび割れ界面の節点が負担する局所的な応力がコンクリートの引張強度に達するとひび割れが発生する。本研究では、ひび割れ発生界面で接触要素を使うため、ひずみ軟化をひび割れ界面の節点に应用することが難し

く、このため、ひび割れが発生するとコンクリート引張強度はゼロと仮定した。なお、本解析では、図-5に示すようにひび割れ面に対して平行方向と直交方向に変位が発生し、ひび割れ開口幅は式(4.1)で示される計算式で計算した。このひび割れ開口幅を鉄筋腐食によるコンクリートの表面に発生したひび割れ幅とした。

$$w = \sqrt{w_x^2 + w_y^2} \quad (4.1)$$

ここに、 $w$  : ひび割れ開口幅 (mm)

$w_x$  : 平行方向のひび割れの変位 (mm)

$w_y$  : 直交方向のひび割れの変位 (mm)

以上により、鉄筋腐食によるひび割れ幅と鉄筋腐食の関係を求めることができると考えられる。

#### 5. 数値解析および実験結果の比較

4.までは、鉄筋腐食によるコンクリートひび割れ発生時点の鉄筋腐食量及びひび割れ発生後のひび割れ幅と腐食量の関係についての基本算定式を提案し、有限要素方法による解析手法を示した。ここではこれらの方法の妥当性について解析を行い、さらに既往の実験結果と比較し検証を行なった。

##### (1) 解析対象

解析の対象としたコンクリート実験体<sup>10),11)</sup>は図-6に示すように、いずれもスターラップを含まないものとし、コンクリートに鉄筋の腐食膨張による膨張変位が作用する状態を想定した。解析用パラメーターを表-1に示す。

ひび割れ進行・発生及びひび割れ幅の解析手法の妥当性を検証するために、既往の実験を対象として解析を行った。表-1に示すように、Case1とCase3は、鉄筋を一

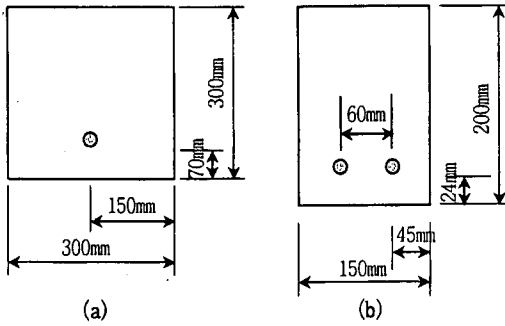


図-6 解析用供試体の寸法図

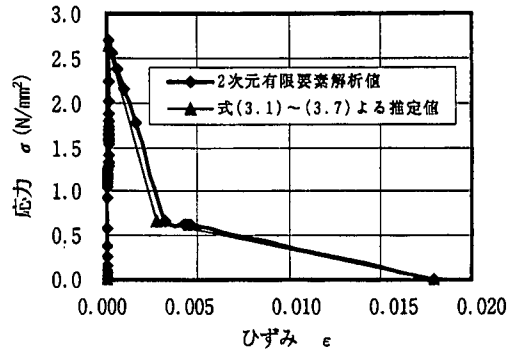


図-7 応力-ひずみの比較

表-1 解析に用いたパラメータの一覧

ケース	かぶり c (mm)	鉄筋 本数	鉄筋 直径 d (mm)	コンクリート	
				圧縮強度 $f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 $f_t$ (N/mm <sup>2</sup> )
Case1	70	1	19	30.5	2.63
Case2	24	2	16	35.6	3.2
Case3	25	1	19	30.5	2.63

本埋め込んだ正方形供試体であり、Case2 は、鉄筋を 2 本埋め込んだ矩形はり供試体である。解析モデルとしては、Case1 と Case3 は実験体と同様、Case2 は供試体の 1/2 を解析モデルとし、対称面の水平の変位が拘束される。解析方法は、鉄筋周囲のコンクリートへ均等変位を与える。

## (2) 解析結果

### a) ひび割れの構成則の検証

仮想ひび割れ要素の周方向引張応力とひずみの推定値と 2次元有限要素解析結果の関係を比較した一例を図-7 に示す。本図は表-1 に示す Case1 の結果である。図に見られるように、2次元有限要素解析から得られた平均応力-ひずみ関係は 3. (1) の構成則から得られた平均応力-ひずみ関係とはほぼ同様の傾向であり、ひずみが大きい範囲で両者はほぼ一致している。この結果により、2次元有限要素解析において引張軟化特性を考慮したひび割れに対する構成則は妥当であると判断できる。

### b) ひび割れの進行と発生を検証

ひび割れ発生・進行の解析手法の妥当性を検証するために、鉄筋が 1 本(Case1)と鉄筋が 2 本(Case2)の供試体について解析を行った。鉄筋腐食によるひび割れ発生状況の解析結果と既往の実験結果を図-8 に示す。図中のグレーの領域は主ひずみが小さいことを表し、白領域は主ひずみが大きいことを表す。図-8 に示すように、鉄筋周辺のコンクリートに与える変位が小さいあるいは引張ひずみが小さい場合、すなわち、鉄筋周辺のコンクリートひずみが 3 章に述べた  $\epsilon_p$  より小さい場合、内部から表面へひび割れが徐々に進展した。さらに、与える変位が大

きいあるいは引張ひずみが大きい場合、すなわち、鉄筋周辺のコンクリートに生ずるひずみが  $\epsilon_p$  より大きい場合、コンクリート表面に主ひび割れが発生した。

図-8(a)に Case1 の解析におけるひび割れ発生を白のエリアで示す。強制変位を与えた 30step 目では、コンクリート内部からコンクリート表面に向かってほぼ放射状にひび割れが生じており、さらに解析を終局まで継続すると内部から発生したひび割れがコンクリート表面に到達し、このひび割れ面での応力伝達が計算上なくなるために計算を終了した。この時点において、ひび割れは鉄筋表面とコンクリート表面の最短距離を結ぶもの以外に、鉄筋表面からコンクリート周辺に進展するものもみられた。発生したひび割れの形状はほぼ十字型になっている。

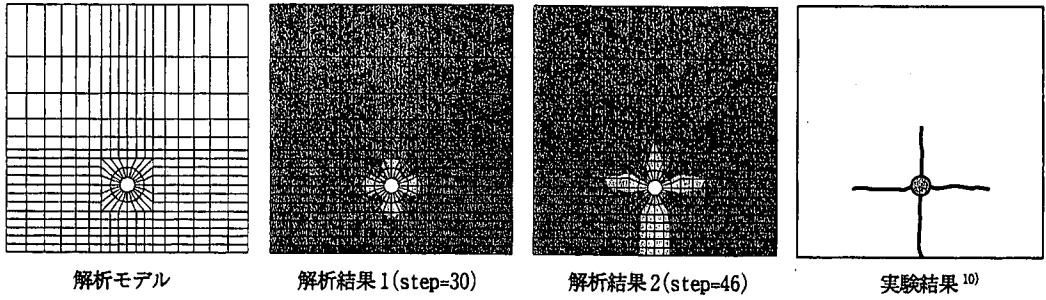
図-8(b)に Case2 における解析・実験のひび割れ発生状況を示す。解析結果によるとひび割れの進展は内部からコンクリート表面に向かうもの、鉄筋間を連結するものが認められる。既往の実験結果<sup>12)</sup>によると、鉄筋間隔が大きい場合、主にコンクリート表面に到達するひび割れが卓越し、間隔が小さい場合、主に隣接する鉄筋を連結するひび割れが全体として顕著となる。一方、解析結果では、ひび割れ発生状況はおおよそ実験結果と同様なひび割れ進行状況となっている。なお、step28 で白に変化した領域において、さらに、強制変位を与えたにもかかわらず、増加量が少なく、step80 で再びグレーとなった領域もある。

この解析結果により、有限要素解析において引張軟化特性を考慮したひび割れ発生モードを判断することができる。

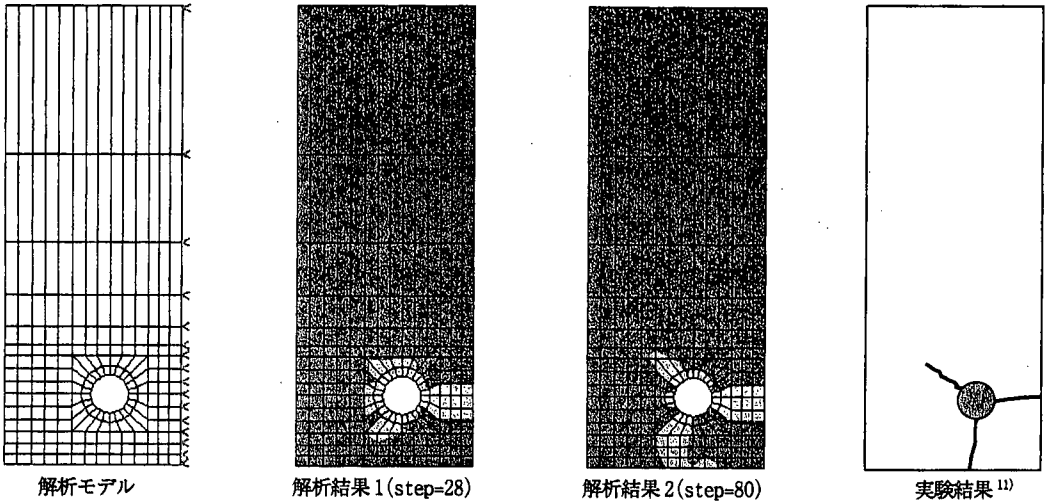
### c) ひび割れ幅と腐食量の検証

上述のように、分布ひび割れモデルを用いてひび割れ発生位置と本数を判断した上で、さらに離散ひび割れモデルでひび割れ幅と鉄筋腐食量の関係について検証した。解析に用いたパラメータは表-1 と同様である。錆の膨張率は 3.0 と仮定する<sup>13)</sup>。

図-9 は、Case1 を例とし、鉄筋腐食の進行に伴うひび割れの進行の状況を示したものである。本図では、コン



(a) Case 1(実験体)



(b) Case 2(実験体)

図-8 有限要素法によるひび割れ発生モードの検証

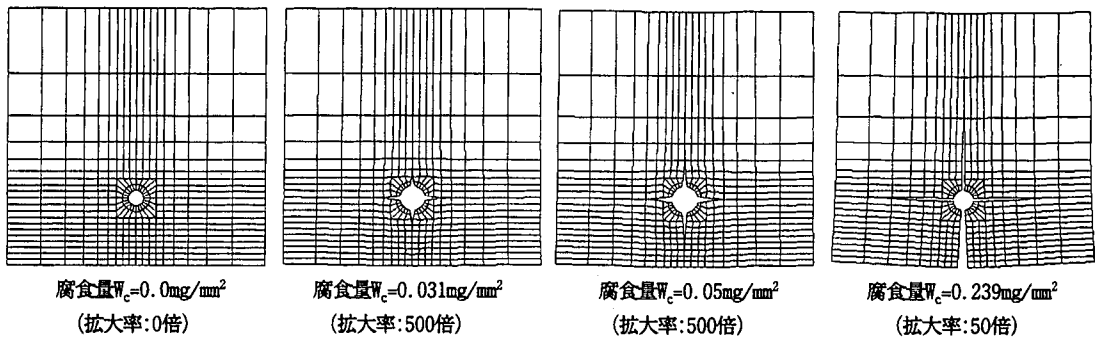


図-9 鉄筋腐食の進行に伴うひび割れの進行状況

クリート内部のひび割れ幅の変化を容易に観察できるようにするために、変位を意図的に拡大している。鉄筋腐食の進行に伴いひび割れが内部からコンクリート表面へ進行していることがわかる。コンクリート表面にひび割れが発生する前に、鉄筋近傍で発生したひび割れ幅が最大値(0.088mm)となり、コンクリート表面にひび割れが発生した後は、コンクリート表面のひび割れ幅が鉄筋近傍で発生したひび割れ幅に比べて大きくなったことが

認められる。

本研究では、既往の実験のデータが少ないために、鉄筋が1本のCase1およびCase3についてひび割れ幅と鉄筋腐食量の関係を求めた。図-10にCase3、図-11にCase1の結果を示す。これらの図によると、実験値と有限要素解析値はほぼ同様の傾向を示している。なお、基本算定式(2.8)による計算値はひび割れ幅の増加と腐食量の増加の傾向は一致するが、値が小さいことがわかる。

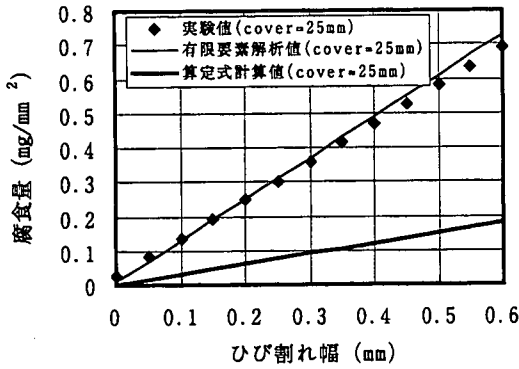


図-10 ひび割れ幅と腐食量の関係(1)

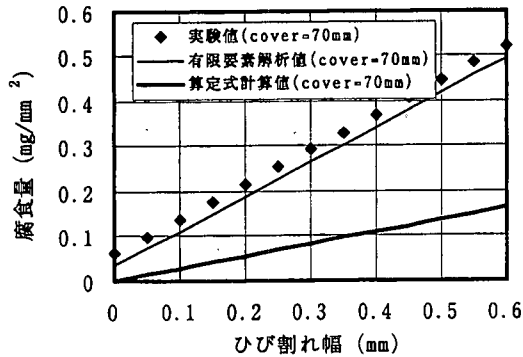


図-11 ひび割れ幅と腐食量の関係(2)

基本算定式モデルを立てる際には、円筒モデル外周のコンクリートを含めておらず、このため、円筒モデルへの拘束影響を考慮せず、基本算定式による計算値は小さくなる。また、図-8、図-9の有限要素解析の結果で示したように主ひび割れの成長過程においてコンクリート内部にひび割れが発生していると考えられる。しかし、基本算定式では、コンクリート内部に発生したひび割れを考慮しておらず、さらに、ひずみの軟化による影響なども含めていない。これらが、同じひび割れ幅で腐食量が小さくなったものと思われる。

以上のように、ひび割れ幅と鉄筋腐食量との関係は本研究で提案した有限要素解析手法で評価できる。しかし、提案した基本算定式は変化の傾向は捉えているが、値は相違しており、修正しなければならないと考えられる。

## 6. 修正算定式の検討

5.まではコンクリート引張軟化特性、鉄筋腐食によるひび割れ発生状況、ひび割れ幅と鉄筋腐食量の関係それぞれに着目し、有限要素解析の値が実験と良く符合していることを示した。しかし、常にこのような解析を行な

表-2 解析ケースの一覧

計算対象	かぶり c (mm)	鉄筋直径 d (mm)	コンクリート	
			圧縮強度 $f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 $f_t$ (N/mm <sup>2</sup> )
供試体	30	12	20.0	1.98
	50			
	70			
	100			

注:  $f_t = 0.2693f_c^{0.21}$

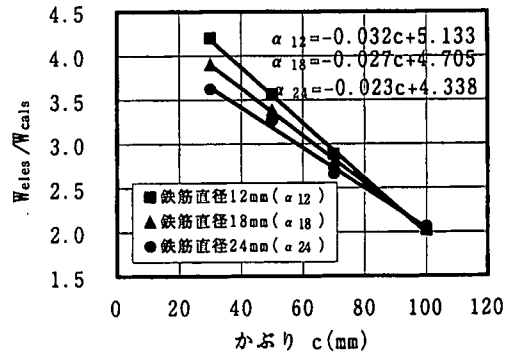


図-12 かぶりに関する補正式

うことは困難であり、式(2.8)を修正し、簡易式を提出することを試みる。ここで、修正算定式を検討するにあたり、パラメトリック解析を行なった。

図-8の結果をみるとわかるように、鉄筋本数によってひび割れ発生本数が異なる。発生したひび割れの本数は鉄筋腐食量とひび割れ幅の関係に影響を及ぼすと考えられるが、本研究では、実験データのある鉄筋が1本の供試体について検討を行った。

解析は図-6(a)に示すような供試体である。4章の解析結果によるとひび割れは4本発生しており、図-8(a)に示すような解析モデルを解析対象とした。かぶり、鉄筋直径、コンクリート圧縮強度を解析因子とし、これらの解析因子を組み合わせ解析を行った。解析に用いた各パラメータの値を表-2に示す。解析条件は5章のCase1と同様である。

### (1) ひび割れ幅と鉄筋腐食量の関係の補正式

#### a) かぶりと鉄筋直径の影響に関する補正式

かぶりを30, 50, 70, 100mm, 鉄筋直径を12, 18, 24mm, コンクリート圧縮強度を20N/mm<sup>2</sup>として有限要素数値解析から得られた直線の傾きを用いて、基本算定式を修正することを試みる。回帰方法の手順は以下である。まず、有限要素法で得られたひび割れ幅と腐食量の関係の直線の傾きを用い、有限要素解析値の傾き  $W_{eles}$  と基本算定値の傾き  $W_{cals}$  の比を係数  $\alpha_i$  として、解析因子ごとに変数を



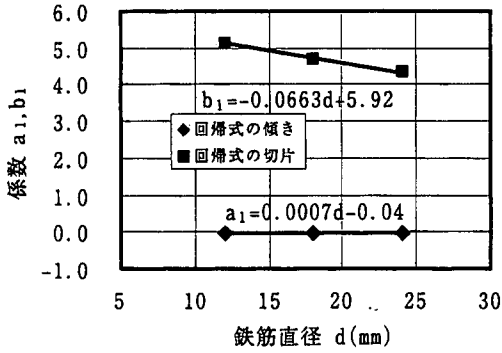


図-13 鉄筋直径に関する補正式

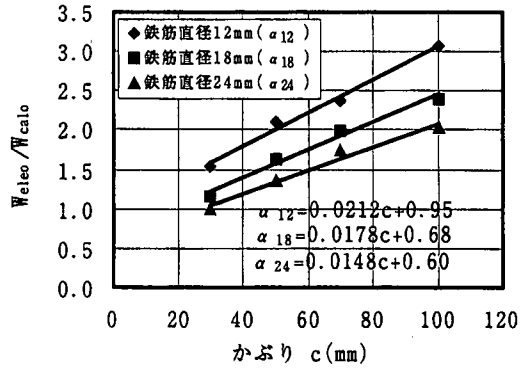


図-15 かぶりに関する補正式

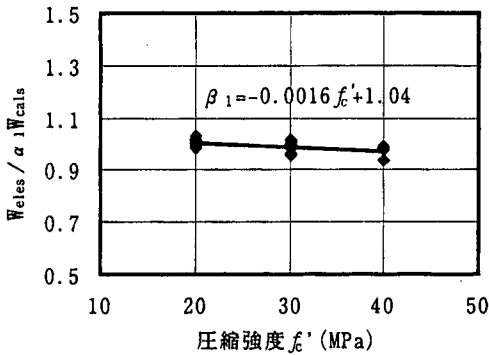


図-14 圧縮強度に関する補正式

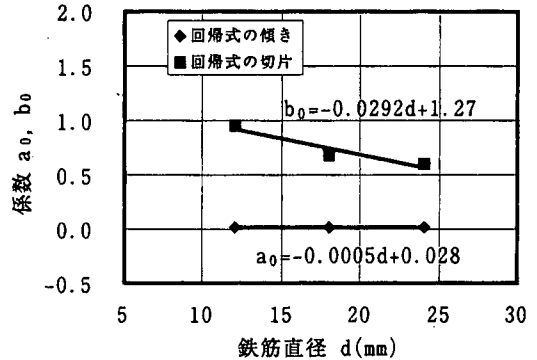


図-16 鉄筋直径に関する補正式

求める。例えば、かぶりに関して鉄筋直径12mmでは、この係数の回帰式は図-12に示すような回帰式 $\alpha_{12}$ で表される。次に、この回帰式 $\alpha_{12}$ 、 $\alpha_{18}$ 、 $\alpha_{24}$ の傾きと切片を用い、さらに、鉄筋直径の影響の回帰式を求める。図-13に示したように、鉄筋直径に関する回帰式 $a_1$ 、 $b_1$ を求めた。回帰式 $a_1$ 、 $b_1$ と回帰式 $\alpha_{12}$ 、 $\alpha_{18}$ 、 $\alpha_{24}$ をまとめると、回帰式(6.1)を得ることができる。ここで得られた回帰式(6.1)をかぶりと鉄筋直径に関する補正式 $\alpha_1$ として用いる。

$$\alpha_1 = (0.0007d - 0.04)c + (-0.0663d + 5.92) \quad (6.1)$$

#### b) コンクリート圧縮強度に関する補正式

有限要素解析から得られた腐食量 $W_{eles}$ を $\alpha_1 W_{cal1}$ (基本算定値)で除することで、かぶりと鉄筋直径に関する影響を除去した。図-14に、コンクリート圧縮強度と $W_{eles}$ と $\alpha_1 W_{cal1}$ の比の関係を示す。ここで得られた回帰式(6.2)をコンクリート強度に関する補正式 $\beta_1$ に用いる。

$$\beta_1 = -0.0016 f_c' + 1.04 \quad (6.2)$$

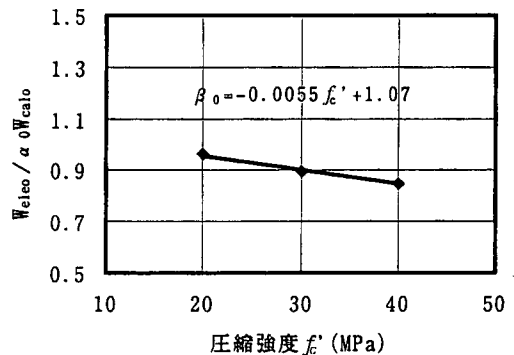


図-17 圧縮強度に関する補正

#### (2) ひび割れ発生時点の腐食量の補正式

有限要素解析から得られた直線の切片をひび割れ発生時点の鉄筋腐食量として、この数値を用いて基本算定式を再評価する。回帰方法は6.(1)で述べたと同様であり、結果を図-15, 16, 17に示す。ここで得られたひび割れ発生時点の鉄筋腐食量の補正式は以下の式(6.3)、(6.4)に示すようになる。

$$\alpha_0 = (-0.0005d + 0.028d)c + (-0.0292d + 1.27) \quad (6.3)$$

$$\beta_0 = -0.0055f_c' + 1.07 \quad (6.4)$$

### (3) 新たな腐食量の算定式

以上より、式(2.8)、(6.1)~(6.4)に基づいて式(6.5)を新たな鉄筋腐食量とひび割れ幅の関係の修正算定式とする。

$$W_c = \frac{\gamma}{\pi(\rho-1)} \left( \alpha_0 \beta_0 \frac{0.22\{(2c+d)^2 + d^2\}}{E(c+d)} f_c'^{2/3} + \alpha_1 \beta_1 \frac{(c+d)}{(5c+3d)} w \right) \quad (6.5)$$

ここに、 $W_c$ :鉄筋腐食量(mg/mm<sup>2</sup>)

$\gamma$ :鉄の密度(7.85mg/mm<sup>3</sup>)

$\rho$ :腐食生成物の体積膨張率

$c$ :コンクリートかぶり(mm)

$d$ :鉄筋の直径(mm)

$w$ :ひび割れ幅(mm)

$E$ :コンクリートヤング率(N/mm<sup>2</sup>)

$f_c'$ :コンクリート圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)

ひび割れ発生時点の補正係数

$\alpha_0$ :かぶりと鉄筋直径に関する補正

$$= (-0.0005d + 0.028d)c + (-0.0292d + 1.27)$$

$\beta_0$ :コンクリート圧縮強度に関する補正

$$= -0.0055 f_c' + 1.07$$

ひび割れ発生後の補正係数

$\alpha_1$ :かぶりおよび鉄筋直径に関する補正

$$= (0.0007d - 0.04)c + (0.0663d + 5.92)$$

$\beta_1$ :コンクリート圧縮強度に関する補正

$$= -0.0016 f_c' + 1.04$$

この新たな腐食量の算定式より、コンクリートかぶり $c$ 、鉄筋直径 $d$ 及びコンクリート圧縮強度 $f_c'$ がわかることにより鉄筋腐食量とコンクリートひび割れ幅の関係を求めることができる。

### (4) 修正算定式の検証

鉄筋腐食量とひび割れ幅の関係について、式(6.5)より求めた修正算定値と実験値<sup>4),10),14)</sup>を図-18に示す。修正算定値 $W_{\text{cal}}$ と実験値 $W_{\text{exp}}$ の比は平均値0.9、変動係数13%である。この結果からわかるように、両者は類似の値となっている。

## 7. 結論

鉄筋腐食によるコンクリート内部のひび割れ発生状況、すなわち、ひび割れ発生位置と本数及びひび割れ幅と鉄筋腐食量の関係について、数値解析により検討を行い、さらに既往の実験結果と比較を行った。本研究では以下のことが明らかとなった。

(1)コンクリートの引張軟化特性を考慮した分布ひび割れモデルによる解析から得られたひび割れ発生状況より、ひび割れ発生位置・ひび割れ本数の解析を行うことが可能になった。この解析結果から得られたひび割れ発生モードは実験結果と一致することを確認した。

(2)分布ひび割れモデルで判断した結果に基づいた定められたひび割れ発生位置及び本数を離散ひび割れモデルで発生するひび割れと仮定することにより、ひび割れ幅と鉄筋腐食量の関係を求めることができる。この解析結果は、実験結果と同様な傾向を示すことを確認した。

(3)かぶり、鉄筋直径、コンクリート圧縮強度の各種要因を考慮した新たな算定式(6.5)を用いることで、ひび割れ幅と鉄筋腐食量の関係を簡易に算定できた。

謝辞:本研究を実施するにあたり、多大なご助言とご協力を頂いた土木学会コンクリート委員会腐食・防食小委員会の皆様に心から感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1)鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向、コンクリート委員会腐食防食小委員会報告、1997.12.
- 2)岡村甫、前川宏一:鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則、技術出版社、1991.
- 3)松尾 豊史、西内 達雄、松村 卓郎:鉄筋の腐食膨張に伴うコンクリートのひび割れ進展解析コンクリート工学年次論文報告集、Vol.19、No.2、pp.99-104、1997.
- 4)堤 智明、松島 学: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、1996.2.
- 5)森川 雅行、関 博、奥村 隆:鉄筋の腐食膨張によるひび割れの発生機構に関する基礎的研究、土木学会論文集、No.378/IV-6、pp.97-106、1987.
- 6)吉井 幸雄、飯島 政義、斎藤 修一、松島 学:送電用鉄塔基礎の支圧板方式による脚材定着手法に関する実験的研究、土木学会論文集、No.606/V-41、pp.129-140、1998.
- 7)コンクリート構造の破壊力学に関するコロキウム論文集、日本コンクリート工学協会、1990.
- 8)コンクリートの寸法効果と引張軟化曲線、コンクリート技術シリーズ、土木学会コンクリート委員会寸法効果小委員会、1997.5.
- 9)コンクリート標準示方書「設計編」、土木学会、1996年.
- 10)丸山 久一:鉄筋の発錆によるコンクリートのひび割れ性状

- の関する基礎研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.10, No. 2, pp.505-510, 1988.
- 11) 橋 吉宏, 梶川 康男, 川村 満紀: 鉄筋腐食によって損傷を受けた RC ばりの挙動に関する考察, 土木学会論文集, No. 402/ V-10, pp. 105-114, 1989.
- 12) Orangun,C.O. and Breem,J.E : Reevaluation of Test Data on Development length and Splices, ACI JOURNAL/MARCH, pp.114-122,1977.
- 13) 須田 久美子: 腐食ひび割れ発生限界腐食量に関する解析的検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 14, No. 1, pp. 751-756, 1992.
- 14) 武若 耕司, 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, pp. 177-180, 1984.

(2000. 2. 24 受付)

## ANALYTICAL STUDY ON CRACK GENERATION SITUATION AND CRACK WIDTH DUE TO REINFORCING STEEL CORROSION

Lukuan QI and Hiroshi SEKI

The proof strength of concrete structures decreases due to corrosion of reinforcing steel. The relationship between crack width and amount of reinforcing steel corrosion is an important parameter in maintenance and management of the concrete structures. In this paper, basic calculation formulation was derived using cylinder model. A smeared crack model was used to evaluate the crack mode due to reinforcing steel corrosion. Crack generation and progression, crack location and number of cracks were analyzed. Then, the relationship between crack width and amount of reinforcing steel corrosion was calculated using a discrete crack model.

In this study, crack generation position and number of cracks can be determined by using the smeared crack model. The relationship between crack width and amount of reinforcing steel corrosion can be obtained using the discrete model and calculation formulation corrected.