

# 論文 離散ひび割れモデルに基づく鉄筋腐食によるひび割れ幅に関する解析的検討

元 路寛<sup>\*1</sup>・関 博<sup>\*2</sup>

**要旨:** 離散ひび割れモデルを用いて、鉄筋腐食によるひび割れ幅に関する解析を実施し既往の実験との比較を行った。本解析では、ひび割れ幅と鉄筋腐食量の関係を推定することが可能になるかどうかを検証し、解析結果から既往の実験結果の傾向をよく表していることを示すことができた。

**キーワード:** 離散ひび割れモデル, 強制変位, ひび割れ幅, 鉄筋腐食量

## 1. まえがき

塩化物の浸透や中性化によりコンクリート部材に鉄筋腐食が生ずる場合、ひび割れ発生までの鉄筋腐食量に関する研究結果は数多く発表されている。しかし、内部ひび割れの本数やひび割れの方向がひび割れ発生後のひび割れ幅と鉄筋腐食量の関係に及ぼす研究に関してはあまり報告例が少ないのが現状である<sup>1)</sup>。

ひび割れ発生時点でコンクリート構造物の性能がただちに喪失することはないと考えられるが、ひび割れ発生以降においては、部材の耐荷力に関連してひび割れ幅と鉄筋腐食量との関係の推定することは重要と考えられる。

上記を予測する際に、実験に代わる検討手法として、この問題にコンクリートの破壊力学は有効な手法と考えられる。本解析では、ひび割れモデル<sup>2)</sup>を基礎にして、コンクリートの弾塑性性を組込んだ要素を配置し、ひび割れ幅と鉄筋腐食量に影響を及ぼすパラメーターについてシミュレーションを行い、解析結果と既往の実験結果の比較から、本解析方法の適用性について検証を行った。

## 2. 離散ひび割れモデル

本解析ではコンクリートの破壊力学に基づく

離散ひび割れモデルによる2次元有限要素解析プログラムを用いて解析を行った。ひび割れ発生位置を定めた上で、ひび割れ界面の要素を結合させ、解析の進行にともなって設定したひび割れ発生判断条件によって界面でのひび割れの進展解析を行った。

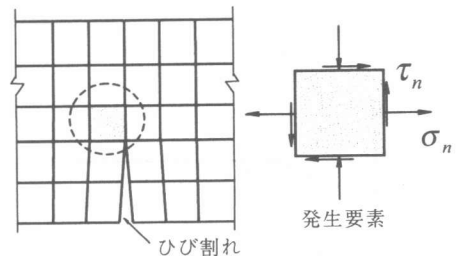


図-1 仮想ひび割れモデル

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。図-1に示すように、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。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。ひび割れ発生条件の関数  $f$  は(2.1)で定義される。

\*1 早稲田大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 工修 (正会員)

\*2 早稲田大学教授 理工学部土木工学科 工博 (正会員)

$$f = \sqrt{\left(\frac{\sigma_n}{\sigma^f}\right)^2 + \left(\frac{\tau_n}{\tau^f}\right)^2} \quad \dots\dots (2.1)$$

ここで、 $\sigma_n$  は節点においてひび割れ界面に働く応力の垂直成分、 $\tau_n$  はひび割れ界面におけるせん断応力、 $\sigma^f$  及び  $\tau^f$  はコンクリート材料の引張強度及びせん断強度である。ひび割れ発生基準は(2.2)で与えられる。

$$(1 - f_s) \leq f \leq (1 + f_s) \quad \dots\dots (2.2)$$

ここで、 $f_s$  は指定される許容値である。

### 3. 材料のモデル化

#### 3.1 コンクリートのモデル化

解析において、コンクリートを均一な材料として扱った。圧縮応力-ひずみについては、図-2 に示すように圧縮強度に達するまでは二次曲線タイプの応力曲線を用い、それ以降はひずみの増大に従い応力を一定に保持するモデルとした。

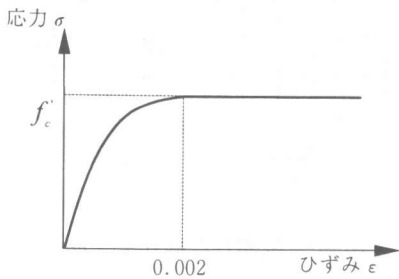


図-2 応力-ひずみ曲線

$$\epsilon \leq 0.002, \quad \sigma = f'_c \times \frac{\epsilon}{0.002} \times \left(2 - \frac{\epsilon}{0.002}\right) \quad \dots (3.1)$$

$$\epsilon > 0.002, \quad \sigma = f'_c \quad \dots\dots (3.2)$$

#### 3.2 鉄筋及び錆層のモデル化

鉄筋及び錆層の材料特性は、図-3 に示すように一次直線タイプの応力直線を用い、完全な弾性モデルとした。

$$\sigma_s = E_s \epsilon_s \quad \dots\dots (3.3)$$

#### 3.3 鉄筋腐食量算定モデル

鉄筋腐食量の算定モデル<sup>3)</sup>は、図-4 に示す

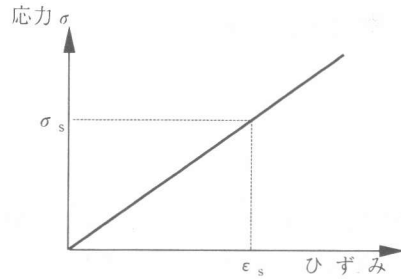


図-3 応力-ひずみ直線

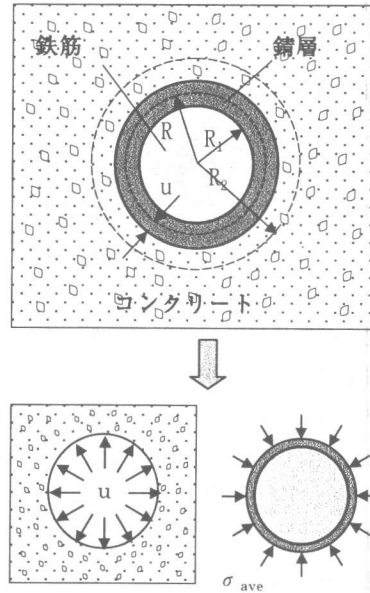


図-4 鉄筋腐食量算定のモデル

ようにひび割れ発生の腐食量は鉄筋周辺のコンクリート周辺への強制変位  $u$  および平均的な応力  $\sigma_{ave}$  の釣合条件を考慮し、腐食量を算定した。

鉄筋腐食量は式(3.4)を満足する  $R_1$  を求めて式(3.5)によって求めることができる。

$$R_2 - \delta - R - u = 0 \quad \dots\dots (3.4)$$

$$W_{corr} = 0.5 \rho (R^2 - R_1^2) / R_1 \quad \dots\dots (3.5)$$

ここで、

$$\delta = \frac{\sigma_{ave}}{E_2 (R_2^2 - R_1^2)} \left[ \frac{4R_1^2 R_2^3}{R_1^2 (1 - \nu_1) + R_2^2 (1 + \nu_2) + c_1} - c_2 \right]$$

$$c_1 = \frac{E_2}{E_1} (R_2^2 - R_1^2) (1 - \nu_1)$$

$$c_2 = R_2 [R_2^2 (1 - \nu_2) + R_1^2 (1 - \nu_2)]$$

$W_{corr}$  : 鉄筋の腐食量 (mg/mm<sup>2</sup>)  
 $R$  : 元の鉄筋半径 (mm)  
 $R_1$  : 腐食後の鉄筋の半径 (mm)  
 $R_2 = R + u(\beta - 1)$  : 無拘束の腐食鉄筋の半径 (mm)  
 $\beta$  : 体積膨張率 (3.0)  
 $\rho$  : 鉄の密度 (7.85mg/mm<sup>3</sup>)  
 $u$  : 強制変位 (mm)  
 $E_1, \nu_1$  : 鉄筋のヤング率 (N/mm<sup>2</sup>), ポアソン比  
 $E_2, \nu_2$  : 錆層のヤング率 (N/mm<sup>2</sup>), ポアソン比

#### 4. 数値解析

##### 4.1 解析手法

解析対象とした鉄筋周囲のコンクリートは、いずれも鉄筋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。有限要素解析において、仮定ひび割れ面以外のコンクリート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強制変位を与えていく変位制御型の増分解析である。

##### 4.2 基本手順

ひび割れモデルを適用する場合、ひび割れ発生位置及び本数を適切に定めておくことは最も重要なことである。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。これが実験的なバラツキとなって現れてくるものと思われる。しかしながら、ひび割れの位置、角度、本数及び形状が、おおよその程度の範囲にあるかを予測することは、既往の研究・実験結果<sup>3,4,5)</sup>を参考すれば、それほど困難なことではないと考えられる。

そこで、おおよその範囲を定めて、ひび割れの位置、角度と本数を変化させた解析を実施し、解析的に最も実験結果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た。

##### 4.3 異なるひび割れモードを用いた解析結果

本研究では鉄筋腐食によって発生した鉄筋軸ひ

び割れを解析対象とするモデルを用いてコンクリートクリープを考慮せずに解析を行った。比較対象とした研究は、丸山らの実験結果<sup>6)</sup>である。

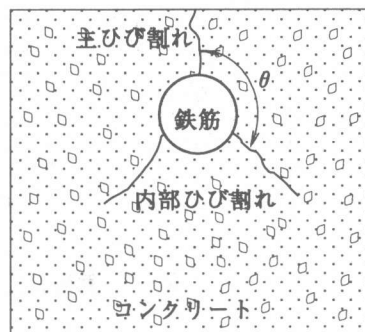


図-5 ひび割れ発生のモード

対象としたひび割れモードの一例を図-5に示す。ひび割れ角度及び本数は表-1に示したものである。解析に用いたパラメータは表-2に示した。

表-1 仮定ひび割れ発生モード

モード	内部ひび割れ本数(本)	主ひび割れに対する角度
I	-	-
II	2	90°
III	1	180°
IV	2	135°
V	3	90°

表-2 解析用パラメータ

	コンクリート	鉄筋	錆層
圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	30.5	-	-
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	2.24	-	-
ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	28×10 <sup>3</sup>	200×10 <sup>3</sup>	200
ポアソン	0.2	0.3	0.2

解析用寸法: 300×300mm、かぶり: 70mm、鉄筋直径: 19mm

解析に用いた基本的な要素分割を図-6示す。

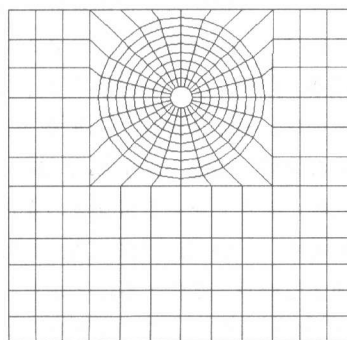
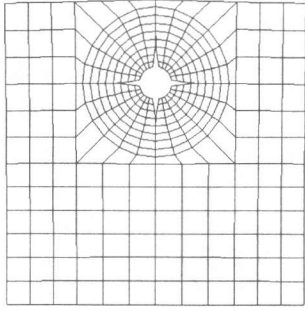
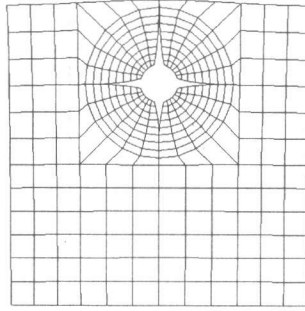


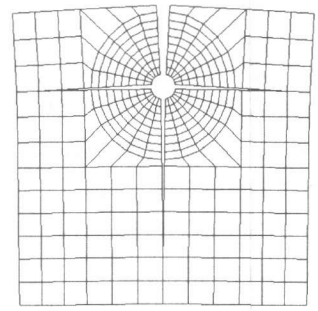
図-6 要素分割図



腐食量  $W_{\text{corr}}=0.027\text{mg/mm}^2$   
(拡大率：500)



腐食量  $W_{\text{corr}}=0.041\text{mg/mm}^2$   
(拡大率：700)



腐食量  $W_{\text{corr}}=0.137\text{mg/mm}^2$   
(拡大率：50)

図-7 鉄筋腐食の進行に伴うひび割れの進行の状況

図-7は、ひび割れ Mode V 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、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。

表-3 ひび割れ発生時の腐食量 ( $\text{mg/mm}^2$ )

Mode I	Mode II	Mode III	Mode IV	Mode V
0.043	0.042	0.041	0.041	0.041

表-3に示すように、コンクリート表面におけるひび割れ発生時の鉄筋腐食量はほぼ同じ値となる。この結果によれば、ひび割れモードによるコンクリート表面でのひび割れ発生時の腐食量に、それほど差はないものと考えられる。一方、図-8, 9, 10, 11, 12に示すように、ひび割れ発生後は、各ひび割れモードでひび割れ幅と腐食量の関係に相違が生ずる。Mode Iでは、ひび割れ幅が大きくなると腐食量の変化が非常に顕著であり、Mode II、III、IV、Vは、腐食量の増加が穏やかに変化することがわかる。これは、ひび割れ本数によるコンクリートの鉄筋膨張に対する拘束能力が変わることによるもの

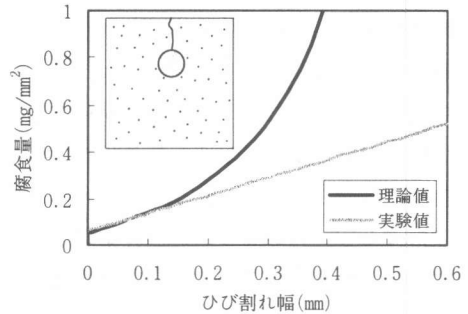


図-8 モード I

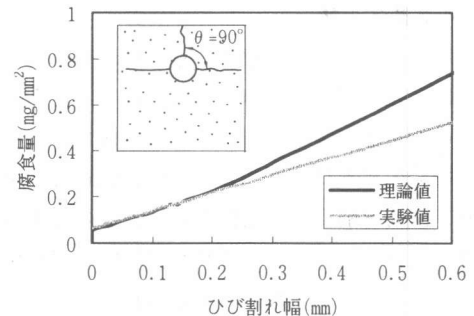


図-9 モード II

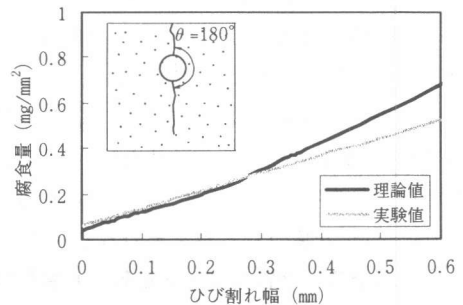


図-10 モード III

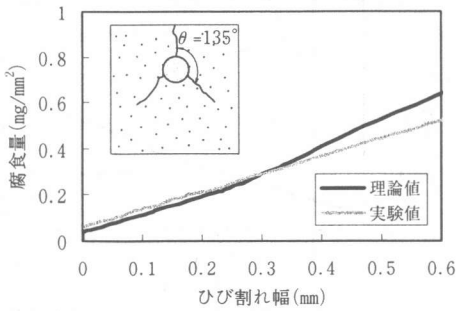


図-11 モード IV

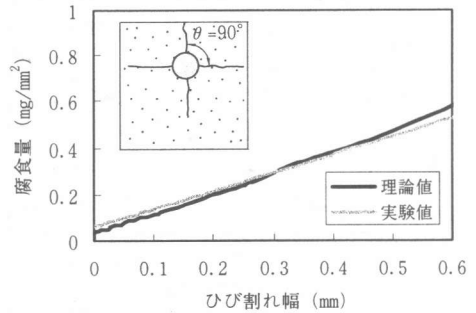


図-12 モード V

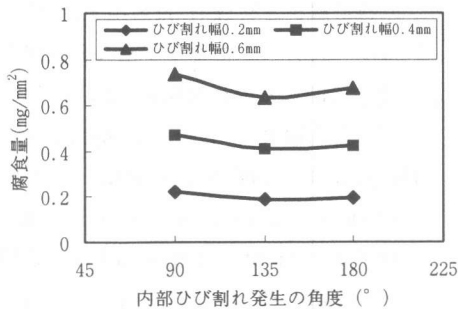


図-13 ひび割れ角度と腐食量の関係

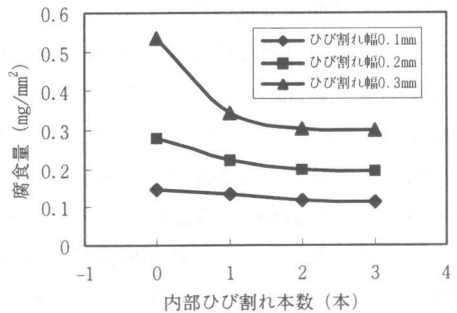


図-14 ひび割れ本数と腐食量の関係

と考えられる。

ひび割れ角度と腐食量の関係に関しては、Mode II、III、IV では、図-13 に示すように、ひび割れ角度の変化に従うひび割れ幅と腐食量の関係の変化はあまり認められなかった。

ひび割れ本数と腐食量の関係に関しては、Mode I、III、IV、V では、図-14 に示すように、ひび割れ本数の増加に従い同じひび割れ幅での腐食量は減少する傾向がある。

以上の結果から、鉄筋腐食によるひび割れ幅と鉄筋腐食量の関係を求める解析モデルとしてひび割れ Mode II、III、IV、V が考えられる。ひび割れモードの妥当性をさらに検証するために、Mode V を用い、既往の研究結果と比較した。

## 5. 既往の実験結果との比較

比較対象とした研究は、丸山らの実験結果<sup>6)</sup>である。

解析に用いたコンクリート材料のパラメータは 4.3 節で示したのと同じものであり、鉄筋直径は 19mm、コンクリートかぶりは各々 25、

100mm である。

本解析結果と丸山ら<sup>6)</sup>の実験結果の比較を図-15、16、17 に示す。

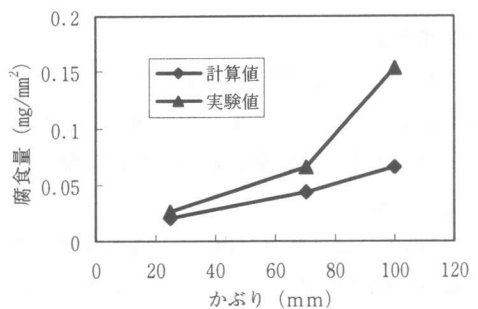


図-15 かぶりとはび割れ発生時腐食量の関係

図-15 に示すようにコンクリート表面におけるひび割れ発生時の腐食量は、本解析及び実験においてもかぶりの増加に伴い増大する。その傾向はかぶりの増加に従って実験結果の方が顕著であるが、かぶりが大きくなると実験値と理論値に大きな相違が認められる。

図-16 及び図-17 は、コンクリート表面上にひび割れが発生した後のかぶりの違いによるひ

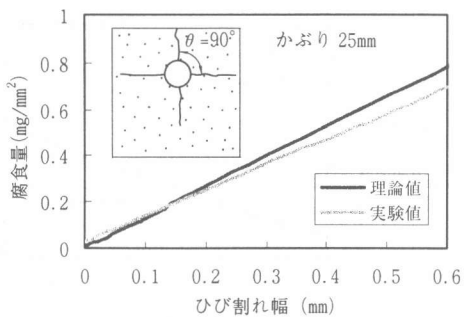


図-16 腐食量とひび割れ幅の関係

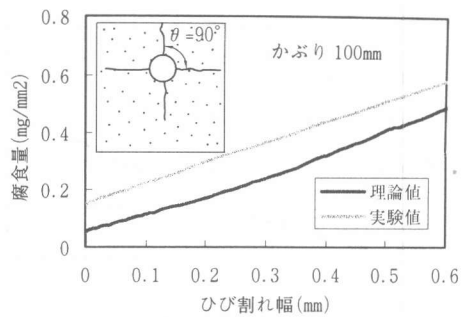


図-17 腐食量とひび割れ幅の関係

び割れ幅と鉄筋腐食量の関係を示している。図-16では、実験値と理論値はほぼ同一の傾向を示しており、ひび割れが大きくなると理論値が実験値を上回っている。図-17では、ひび割れ発生時点の実験値と理論値の差で修正すれば、図-16における同様の結果になると考えられる。既往の研究によると、鉄筋腐食によるひび割れ形成において主要なひび割れの成長過程で微細なクラックが発生している。本解析では、上述した微細なクラックの発生、鉄筋腐食形状による影響などを考慮しておらず、同じひび割れ幅で腐食量が大きくなったものと思われる。

## 6. まとめ

本研究では、鉄筋腐食によるひび割れ幅と鉄筋腐食量の関係について、数値解析的な検討を行った。本研究の結果から得られた結論は以下の通りである。

(1) 仮想ひび割れ面を用いて、鉄筋腐食によるひび割れ幅と腐食量の関係を推定することが可能となった。

(2) 本解析結果は、既往の実験より得られたひび割れ幅と腐食量の関係の傾向をよく表わしている。

## 参考文献

- 1) 鉄筋腐食・防食及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・前川広一: 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) 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集, V-14, No.1, pp. 751-756
- 4) H. J. Dagher and S. kulendran: Finite Element Modeling of Corrosion Damage in Concrete Structures, ACI STRUCTURAL JOURNAL, V. 89, No. 6, November-December 1992
- 5) 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, V-30, No. 532, pp. 159-166, 1996. 2
- 6) 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に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文集報告集, V-10, No. 2, pp. 505-510, 1988