

# 論文 破壊力学に基づいた鉄筋腐食によるひび割れ発生パターンの考察

吉村伸一\*1・友田祐一\*2・大津政康\*3

要旨：鉄筋腐食により、コンクリートには様々なパターンのひび割れが発生することが知られている。これらの発生パターンを、かぶりの異なる鉄筋コンクリート供試体の電食実験により再現し、塩害環境下における鉄筋コンクリートの鉄筋腐食によって生じるひび割れの発生・進展について、解析パラメータとして線形破壊力学の限界応力拡大係数を用いて境界要素法（BEM）解析による解明を行った。

キーワード：鉄筋腐食、破壊力学、ひび割れ、境界要素法、電食実験

## 1. はじめに

近年、コンクリート構造物の早期劣化が報告されている。特に我国では周囲が海に囲まれていることなどから、除塩不足の海砂の使用あるいは海洋環境での海水中の塩類に起因した鋼材腐食による塩害損傷が問題となっている。塩害によるひび割れについて既往の研究によれば、かぶり厚がひび割れ発生パターンに大きく影響を与えることが報告されている[1]。そこで、かぶり厚を変化させて埋め込んだ供試体の電食実験により、腐食の際に発生するひび割れの発生パターンを観察し、そのひび割れの発生条件を線形破壊力学に基づいたBEM解析[2]によって、実験におけるひび割れ形態の発生・進展機構の解明を行った。

## 2. 実験概要

表-1 コンクリートの配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	水セメント 比 (%)	細骨 材率 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				混和剤 (cc)
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	
20	45	42	172	378	719	1122	150

2. 1 実験供試体  
実験に使用したコンクリートの配合を表-1に示す。混和剤としてはAE剤を使用し、空気量は5%に調整した。水中養生28日材令でのコンクリートの圧縮強度は54.9MPa、引張強度は3.96MPaであった。また、弾性係数は35.2GPa、ポアソン比は0.22であった。供試体には25cm×40cm×10cmの直方体に径10mmの異形鉄筋を4本、かぶり厚さTpを変えて埋設したものを製作した。それを図-1に示す。ここで、Tp=10.0mm、33.3mm、50.0mm、95.0mmの4ケースとした。

### 2. 2 実験方法

電食実験は、図-2のように供試体を3%塩化ナトリウム水溶液中に浸し、配線は各鉄筋を並列に接続し、異形鉄筋と銅板の間に200mA/cm<sup>2</sup>の定電流を負荷した。そして、図-3のように鉄筋周囲に長さ30mmのひずみゲージを配置した。また、鉄筋から70mm離れたところにAEセンサを取り付け、鉄筋腐食によって発生するひび割れの周辺ひずみとAE計測を実施した。

\*1 熊本大学大学院 工学研究科土木環境工学専攻（正会員）

\*2 熊本大学 工学部環境システム工学科

\*3 熊本大学教授 工学部環境システム工学科、工博（正会員）

### 3. BEM解析

#### 3.1 解析モデル

本研究では、ひび割れ進展に際しての、ひび割れ発生条件を解析することを対象としたため、ひび割れ進展に至る直前の応力解析を目標とした。そこで、図-4のような供試体の半分を対象として、鉄筋部からかぶり(Tp)方向へ進展するひび割れについては、対称断面に配置した支点の拘束解除で容易に考慮し得るモデルを考えた。ひび割れの進展に至る直前の応力を評価する内部点は円孔境界部から1mm離れた位置に設けた。これは、BEMでの境界上での応力解析の精度を考慮したためである。また、実験に対応したひずみゲージ上の応力も求めるために、円孔境界部から5mm離れた図中のひずみゲージ配置図の1~4の各点にも内部点を設けた。

#### 3.2 解析条件

実験で得られたひび割れ形態の発生条件を考察することを目的としたため、解析ではコンクリートへの負荷の境界条件を、等圧分布と変圧分布の2通りで行うことにした。コンクリートの材料定数は実験値を用いた。なお、応力集中に関しては、弾性体では必ず外部境界に最も近い円孔境界部とそれに対称な位置、つまり図における半円部の両端部が最大となる。それが、これまでの実験・解析で知られている縦ひび割れの発生原因である[3,4]。これによるひび割れの進展を解析モデルで容易に考慮できるように、かぶり方向に進展する縦ひび割れに関しては、図のTp部に配置した境界支点の拘束を、実験で観察されたひび割れ発生パターンに対応させて解除することにした。なお、拘束解除には、ひびわれ先端で応力拡大係数( $K_1$ )を求め限界応力拡大係数(破壊靱性値、 $K_{1c}$ )に達した、つまり

$$K_1 = K_{1c}$$

(1)

となった時点で、ひびわれが進展する(節点分離される)という離散ひび割れモデルを導入し

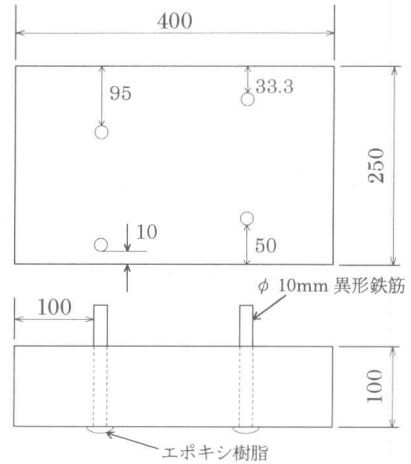


図-1 供試体の形状・寸法図(mm)

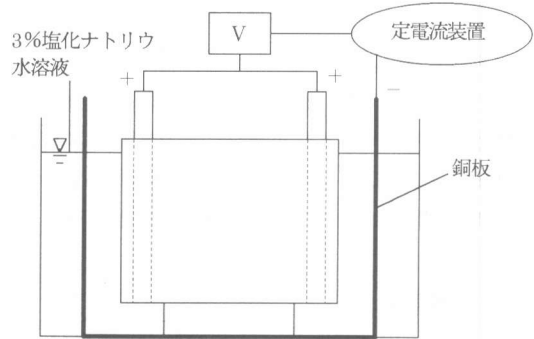


図-2 電食実験図

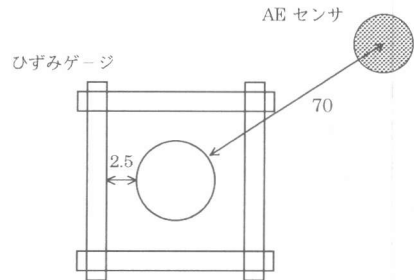


図-3 鉄筋周りのひずみゲージ・AE センサ配置図(mm)

た。ここで、解析で用いた値は実験結果を参考にして $K_{I,c} = 0.725 \text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ とした。

### 3. 3 内圧モデル

腐食生成物による内圧をモデル化したものを図-5に示す。左のモデルが一般的に考えられている腐食生成物の負荷様式[4]で、同心円上に圧力 $P$ がかかった等圧分布のモデルである。一方、右のモデルは縦ひび割れがわずかながら入っている状況を考慮したもので、両端部には微小き裂の発生により内圧の解放が起こっている。その結果、図-4の上下方向に負荷が集中するという偏圧分布のモデルである。

### 4. 実験結果

鉄筋電食実験で観察された代表的なひび割れの発生パターンを図-6に示す。 $T_p=10\text{mm}$ では剥離ひび割れが見られ、また $T_p=33.3\text{mm}$ では剥離と縦ひび割れの混在したものが見られる。他の例では、ひび割れはまずかぶり方向に進展し、 $T_p=95.0\text{mm}$ はかぶり反対方向へ、 $T_p=50.0\text{mm}$ はかぶり反対方向へ進展後、さらにコンクリート表面に対して斜め奥へと伸びていった。そこで、これらの結果を参考にしてかぶり方向の拘束を解除し、2種類の内圧モデルで解析を行った。

これらの実験で検出された $T_p=50.0\text{mm}$ のAE・ひずみのグラフを図-7に示す。ひずみゲージ1, 3, 4の順に大きな引張ひずみが発生するようになり、その前にAE頻度がそれぞれに対応して発生している様子がよく分かる。ここで、図-4のゲージ配置を参照すれば、図-6における $T_p=50.0\text{mm}$ のひび割れ1, 2, 3の発生に図-7のゲージ1, 3, 4の急増が対応し、ゲージ3のひずみの急増により、ゲージ2のひずみが解放されていることが認められる。この結果から、AEによる腐食の際に発生するひび割れ検出の有効性も確認できた。

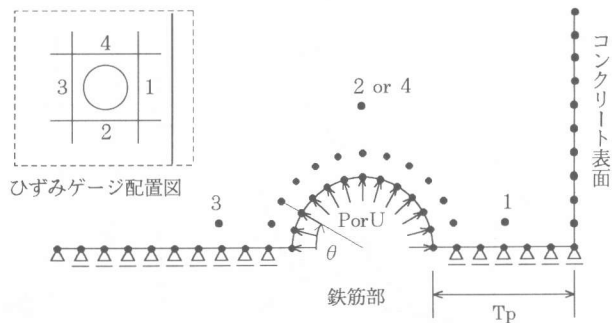


図-4 BEM 解析モデル

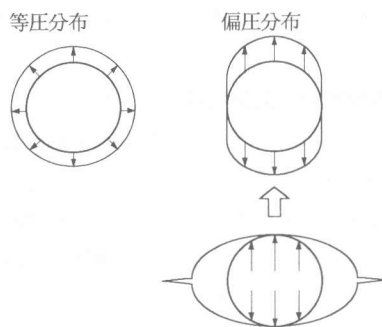


図-5 内圧モデル

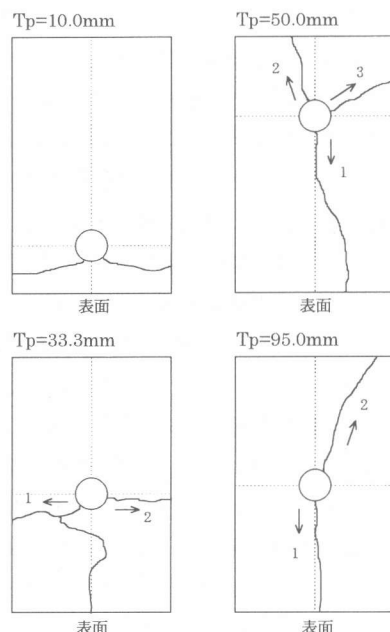


図-6 ひび割れ状況図

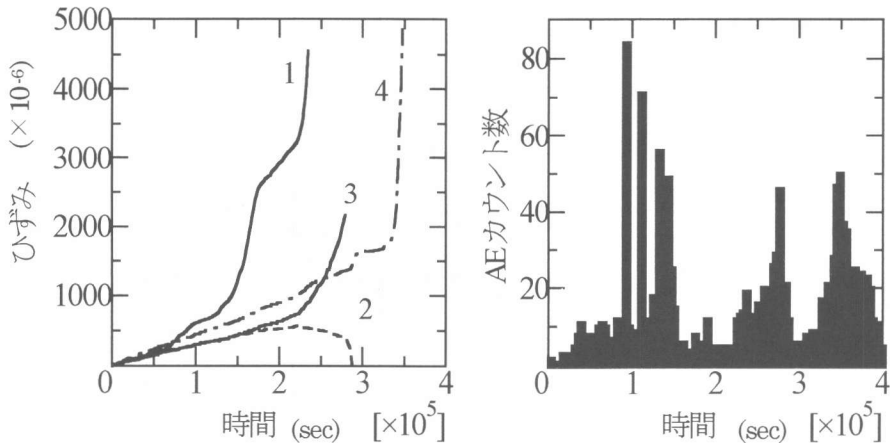


図-7 AE カウント数及びひずみの変化( $T_p=50.0\text{mm}$ )

### 5. 解析結果および考察

図-4の解析モデルで、 $T_p=50.0\text{mm}$ 、 $95.0\text{mm}$ の2種類のかぶり厚の場合について、内圧モデルが偏圧分布の場合の解析を行った。なお、図-6のように $T_p=10.0\text{mm}$ と $T_p=33.3\text{mm}$ では剥離ひび割れが検出されたので、今回の解析対象から除外した。剥離ひび割れについては、かぶり方向に進展すべきひび割れが、骨材などの存在によって拘束された場合に発生することがすでに明らかになっている[2]。

図-8にかぶり方向にひび割れが進展したときのひずみゲージ上の応力を示す。いずれの場合もひび割れが進展して行くにつれて、つまりゲージ1の点はすでに応力解放が進んでいるので別として、ゲージ3での応力値が増大し、一方、ゲージ2、4では応力が解放され低下している様子がよく分かる。これは図-7の実験で検出されたゲージ3でのひずみの急増とゲージ2でのひずみ解放によく一致している。

次に、ひび割れ進展時における図-4のモデルの円孔部頂点の鉛直方向の膨張圧と膨張変位の関係のグラフを図-9に示す。 $T_p=50.0\text{mm}$ と $T_p=95.0\text{mm}$ のいずれのケースでもひび割れの進展に伴ってコンクリートへの膨張圧はピーク点Bまで増加する。そして、ひび割れがかぶり方向に貫通する直前に急激に低下することが認められる。

そこで、ひび割れ発生時(A)、膨張圧のピーク時(B)、ひび割れが表面まで達したとき(C)の内部での応力分布を図-10に示す。ひび割れが進展しない場合(A)に比べて、膨張圧のピーク時(B)の応力分布ではひび割れ進展によって、実験での(図-6参照)2つ目のひび割れ発生箇所 $\theta=10^\circ \sim 20^\circ$ 付近での引張応力の大きな上昇が見られる。この原因により、かぶり方向へのひび割れ発生後に、内部へのひび割れ進展が生じたと考えられる。

ここで確認のために、等圧分布の場合の解析も同様に行った。その応力分布図を図-11に示す。図中のA,B,Cは図-10と同様の時点である。この場合には、かぶり方向にひび割れが進展後、応力集中が $\theta=45^\circ$ 、 $135^\circ$ 付近にみられ、斜め方向のひび割れ発生の可能性を示している。これは、今回の実験結果と一致しておらず、 $T_p=50.0\text{mm}$ 、 $95.0\text{mm}$ の鉄筋腐食での現象は偏圧分布によるものであることが認められた。ただし、等圧分布は、剥離ひび割れの形成に影響することが明らかになっている[2]。

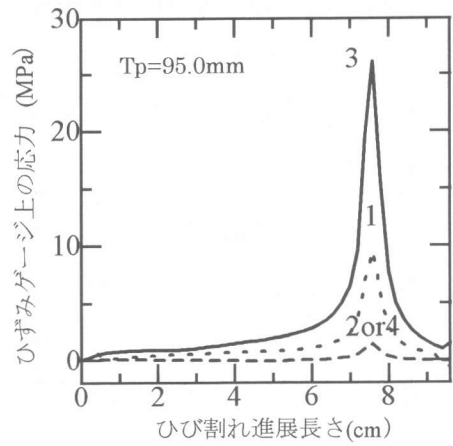
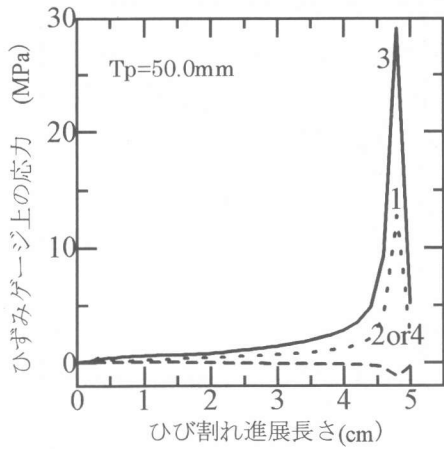


図-8 ひび割れ進展中のひずみゲージ上の応力分布

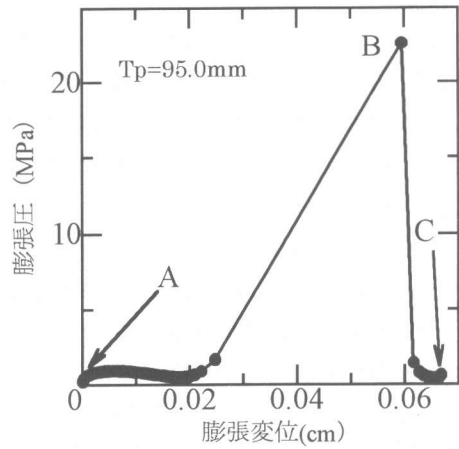
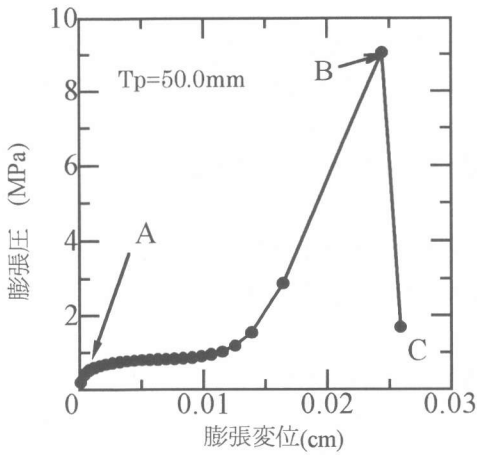


図-9 膨張圧—変位関係

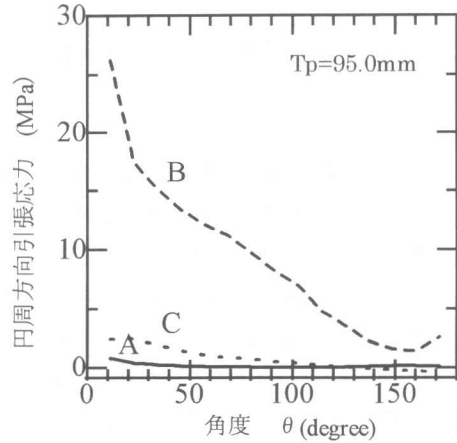
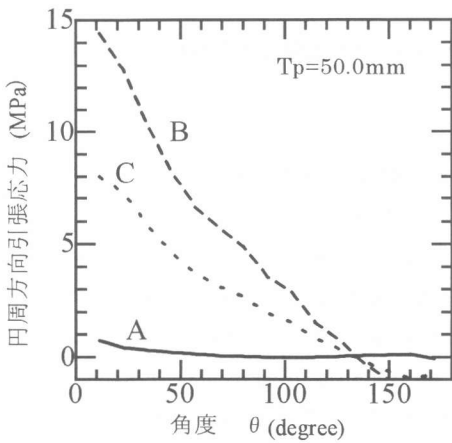
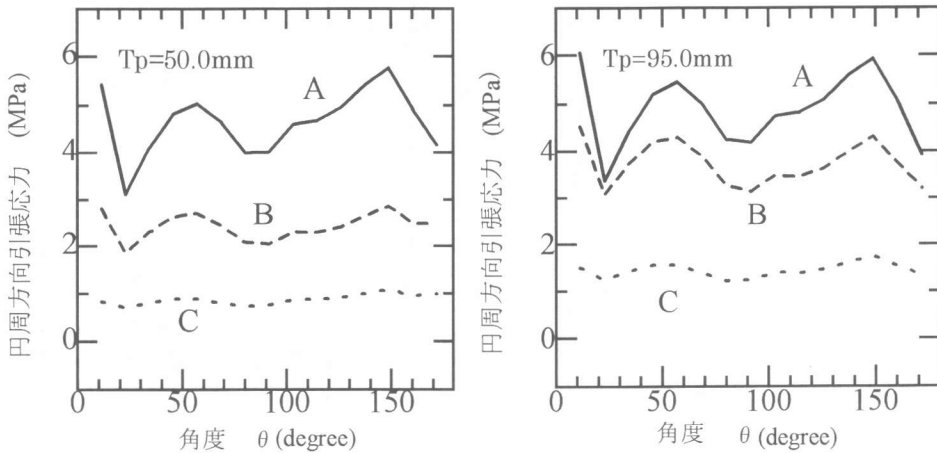


図-10 鉄筋周辺の内部応力分布



図一 1 1 鉄筋周辺の内部応力分布

## 6. 結論

本研究では、鉄筋腐食によるコンクリートひび割れの発生機構の解明を行った。異形鉄筋をかぶり厚さを変化させて埋め込んだ供試体に電食実験によりひび割れを発生させる実験を実施した。そして実験で検出されたひび割れを、線形破壊力学による応力拡大係数を力学パラメータとして採用し、境界要素法 (BEM) により解析した。その結果、ひび割れ発生機構に関して以下のような結論が得られた。

- (1) 電食実験によりかぶりの厚さの違いによってひび割れの発生形態に変化が見られた。AE とひずみ計測の結果、AE はひび割れ発生に対応して発生し、しかもひずみよりも早期に検出されることが確認された。
- (2)  $T_p=50.0\text{mm}$  と  $T_p=95.0\text{mm}$  のひび割れを腐食による内圧モデルを等圧、偏圧の分布として解析したところ、偏圧分布ではかぶり方向の後、内部へのひび割れ発生が予測され実験結果と一致した。つまり、今回の実験でのかぶり厚の大きい場合には等圧分布ではなく、ひび割れ要因となるコンクリートへの負荷は偏圧分布によるものであることが認められた。

今後は、剥離ひび割れをも含めた斜めひび割れの進展を考慮した解析も進める予定である。

## 参考文献

- [1]松島 学、堤 知明、関 博、松井邦人：鉄筋の腐食膨張によるひびわれモード、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15、No.1、pp.727-732、1993.6
- [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われ進展に関する基礎実験および BEM 解析、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17、No.1、pp.955-960、1995.6
- [3]松島 学、堤 知明、村上祐治：鉄筋腐食膨張による表面コンクリートのひび割れモデル、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16、No.1、pp.799-804、1994.6
- [4]山田義智、大城 武：破壊力学に基づく FEM による縦ひびわれ発生腐食量の解析的検討、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15、No.1、pp.733-738、1993.6