

論文 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

大津 政康^{*1}・堤 知明^{*2}・村上 祐治³・工藤 雄一^{*4}

要旨：鉄筋コンクリート構造に発生するひび割れについて、発生機構と発生形態を解明するため、電食と静的破砕剤によるひび割れ発生の実験を実施し、ひび割れ発生の条件、特にかぶり厚さと発生形態について検討した。それらの結果に基づいた境界要素法（BEM）による応力解析を実施し、縦ひびわれと剥離による斜めひび割れの発生機構を明かにした。

キーワード：鉄筋腐食、電食実験、静的破砕剤、ひび割れ、境界要素法

1. はじめに

コンクリート構造物中の鉄筋腐食によって発生するひび割れについては、解析的及び実験的に活発に研究が進められている[1]、[2]。その成果により、剥離ひび割れのような斜めひび割れと鉄筋から垂直あるいは水平方向に進展する縦ひび割れの発生条件が、かぶり厚さに依存することが報告されている。しかし、これについて数値解析による解明も試みられているが[3]、剥離ひび割れのような斜めに進展するひび割れの発生機構については、まだ不明な点が残されていると考えられる。そこで、そのようなひび割れ発生状況と発生機構を解明するため、丸鋼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および静的破砕剤によってひび割れを発生させる実験を実施した。そして、その結果に関して境界要素法（BEM）の応力解析により、実験におけるひび割れ形態の発生機構について力学的な考察を行った。

表一 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 ³)				混和剤 Ad. (%)
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	
10	50	46	175	350	804	972	0.03

2. 実験概要

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一 1 に示す。普通ポルトランドセメントを使用

し、大井川産の川砂を細骨材に秩父産砕石を粗骨材に使用している。混和剤としてはAE剤を用い、空気量を6%に調整した。このコンクリートの材令28日と電食実験終了時の材令150日における圧縮強度は、それぞれ421 kgf/cm²、545 kgf/cm²であり、引張強度は、36 kgf/cm²、38.2 kgf/cm²であった。また、弾性係数は3.29 x 10⁵ kgf/cm²と3.52 x 10⁵ kgf/cm²であった。供試体には60 cm x 60 cm x 40 cmの直方体に径30 mmの丸鋼を埋設したものと、静的破砕剤によりひび割れを発生させるべく30 mmの穴を設け内圧測定器[4]を設置したものを製作した。それらを図一 1 に示す。ここで、かぶり厚さ（後述のT_p）は、10 mm、30 mm、100 mm、150 mm、285 mmの5ケースとした。

* 1 熊本大学教授 工学部土木環境工学科、工博（正会員）

* 2 東京電力（株）電力技術研究所 構造研究室、工修（正会員）

* 3 （株）ハザマ技術研究所 技術研究部、工博（正会員）

* 4 建設省九州地方建設局

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せきさせ、銅板を図のように容器中に配し、丸鋼と銅板間に50 mA/cm²の定電流を負荷した。一方、静的破碎剤にはブライスターを使用し、膨張圧を内圧測定器により測定した。そして、鉄筋あるいは空隙の周囲にはひずみゲージを図中に例を示すように配置し、鉄筋腐食および破碎剤の膨張圧増加に伴う周辺ひずみも計測した。

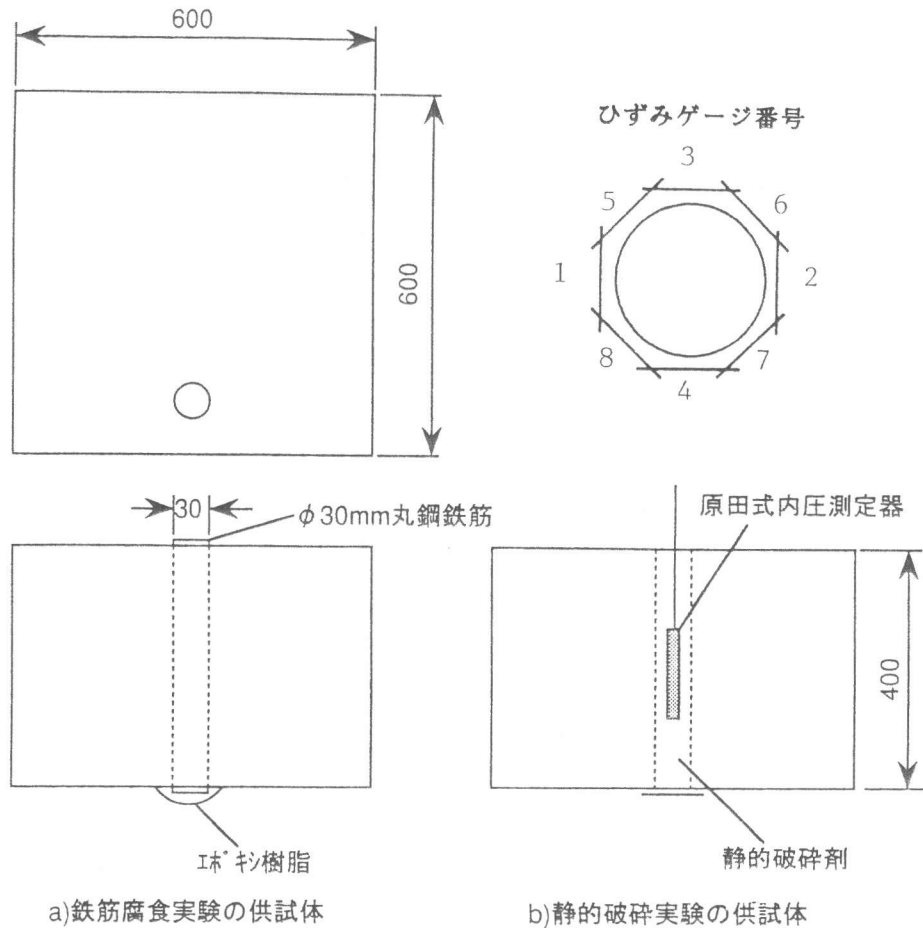


図-1 供試体の形状・寸法図 (mm)

3. BEM解析

3. 1 解析モデル

コンクリートのひび割れ進展の解析については、既に線形破壊力学に基づいた境界要素法 (BEM) 解析コードを開発している [5]。本研究ではひび割れ進展に際しての、ひび割れ発生形態を解析することを対象として、ひび割れの進展は縦ひび割れのみを考慮に入れた応力解析を目標とした。そこで、図-3のような図-1の供試体の右半分を対象として、鉄筋部から上下に進展する縦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うるモデルを考えた。要素間隔は1 mmであり、さらに応力を評価する内部点は円孔部から1 mm離れた位置に設けた。円孔の境界上の応力を求めなかったのは、BEMの境界上での応力解析精度を考慮したためである。

3. 2 解析条件

実験で得られたひび割れ形態の発生理由を考察することを主たる目的としたため、解析では一様な内圧 (9 kgf/cm²) を円孔境界に負荷することとした。コンクリートの材料定数については、実験での150日材令での値を用いた。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

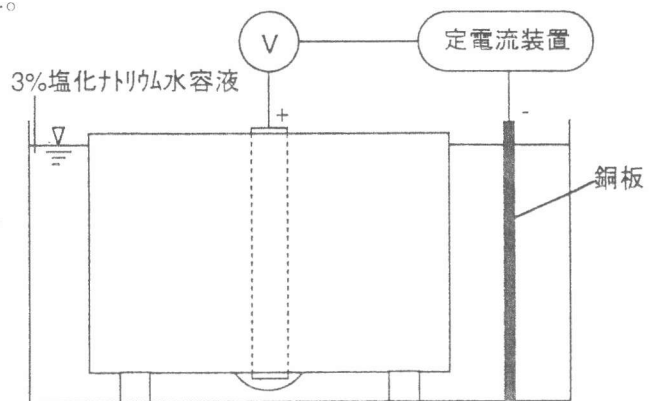


図-2 電食実験の様子

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・解析でよく知られている縦ひび割れの発生原因である[2]、[3]。これによるひび割れが解析モデルでは容易に考慮できるように、両端部より進展する縦ひび割れについては、図の下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形態に対応させて解除することにした。

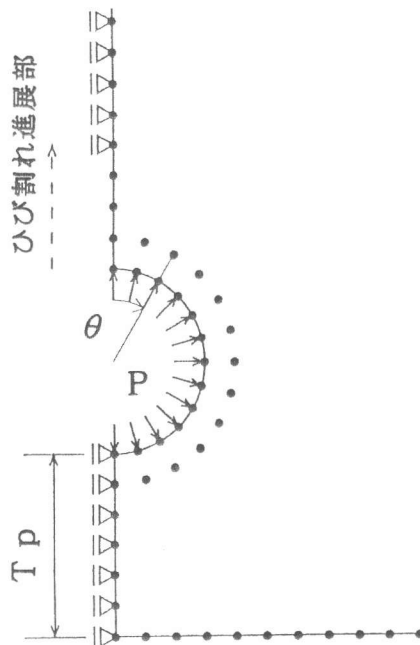


図-3 BEMによる応力解析モデル

4. 実験結果

図-4は、鉄筋電食実験で得られたひび割れ発生時における積算電流量と、試験後に行つて求めた鉄筋腐食の重量減少率を鉄筋かぶりのパラメータ D/ϕ ($D=2Tp+\phi$)の関数として示したものである。かぶりが増加するに従って、積算電流量が多く必要となり、それにつれて腐食率も増加していることがわかる。つまり、かぶりが増加する程、ひび割れ発生までに必要な腐食量が増加することを意味している。一方、静的破砕剤の実験で得られた最終ひび割れ発生時の内部応力と D/ϕ

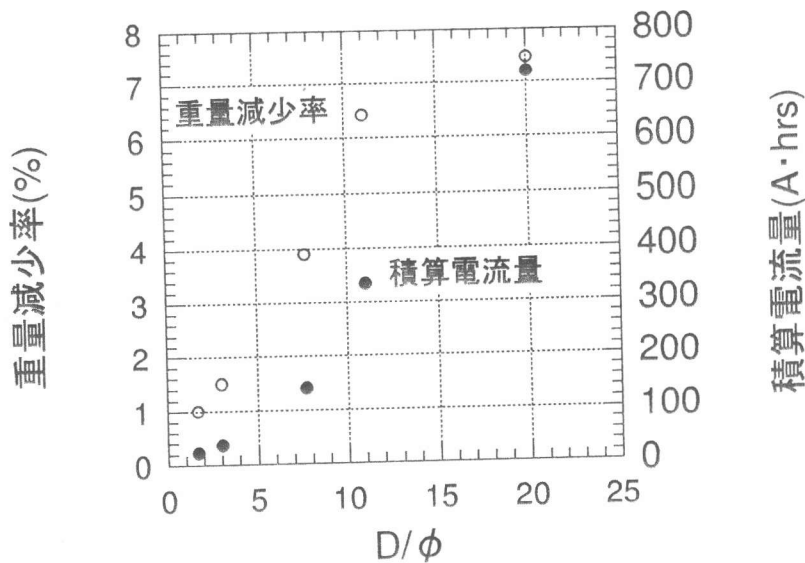


図-4 積算電流量・重量減少率と D/ϕ の関係

の関係を図-5に示す。この場合にもかぶり厚の増加により、破壊発生までの内部応力の増加する傾向が認められる。ただし、かぶり10mmの $D/\phi=1.67$ の場合のみ、異常に大きな内部応力値となるまで破壊の発生が見られないことが特徴的である。このことは、この場合には、他のかぶり厚さの場合とは異なる破壊機構により最終破壊に至ったことを暗示している。

これらの実験で観察された代表的なひび割れの発生形態を図-6に示す。いずれの場合にも解析モデルの下部支点に相当する対称断面付近に上下方向の縦ひび割れが観察されるが、かぶり厚さ $Tp=10$ mmの場合には、コンクリートの表面に向かって剥離ひび割れが観察される。かぶり厚さ $Tp=30$ mmの場合には縦ひび割れのみ、かぶり厚さ $Tp=150$ mmの場合には、それ以外の斜め方向にひび割れ進展の見られることが特徴的である。

5. 解析結果および考察

図-3のモデルで円孔周辺の応力解析を行ったところ、どのような条件でも常に両端部の周方向引

張応力が最大となり、図-6のかぶり厚さ $T_p = 30\text{ mm}$ の場合に見られるような縦ひび割れが発生することが力学的に確認された。そこで、両端部の他に新たな応力集中領域の発生する機構を解明するため、両端部以外の円孔周辺の応力分布を求めることにした。図-7は、図-3のモデルで全ての支点を拘束したひび割れの無い場合に、かぶり厚さ T_p の変化に対する円周方向の引張応力分布の変動の様子を横軸を図-3の角度 θ に対して示したものである。これより、 $T_p = 10\text{ mm}$ ($D/\phi = 1.67$) の場合には、 $\theta = 120^\circ$ 付近に大きな応力集中域が発生し、わずか 9 kgf/cm^2

の内圧に対しても引張強度にほぼ達する応力となることがわかる。そして、この応力集中の位置は、図-6で $T_p = 10\text{ mm}$ の場合に見られるコンクリート剥離を生じた斜めひび割れの位置とよく一致している。この結果は、図-5の結果で見られる破壊発生時における異常な内部応力の発生と組合せると非常に示唆的である。破壊発生時の応力が高いことは、本来は、コンクリート表面に最も近いかぶりの方向に発生する最大の引張応力により縦ひび割れが発生すべきであるにもかかわらず、骨材の存在などによりそれがアレスト（拘束）されたためと考えられる。そこで、それに次ぐ応力集中域である $\theta = 120^\circ$ の位置に斜めひび割れが発生したと考えられる。

この発生過程について詳細に考察するため、 $T_p = 10\text{ mm}$ の場合に、図-3に例を示すようにコンクリート供試体の鉄筋から表面方向ではなく奥に向かっ

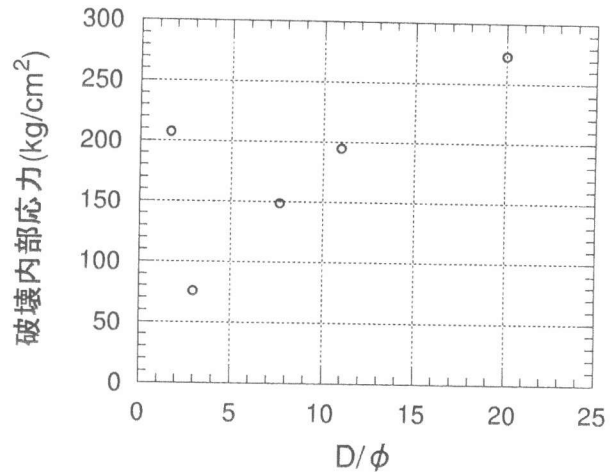


図-5 破壊時の内部応力と D/ϕ の関係

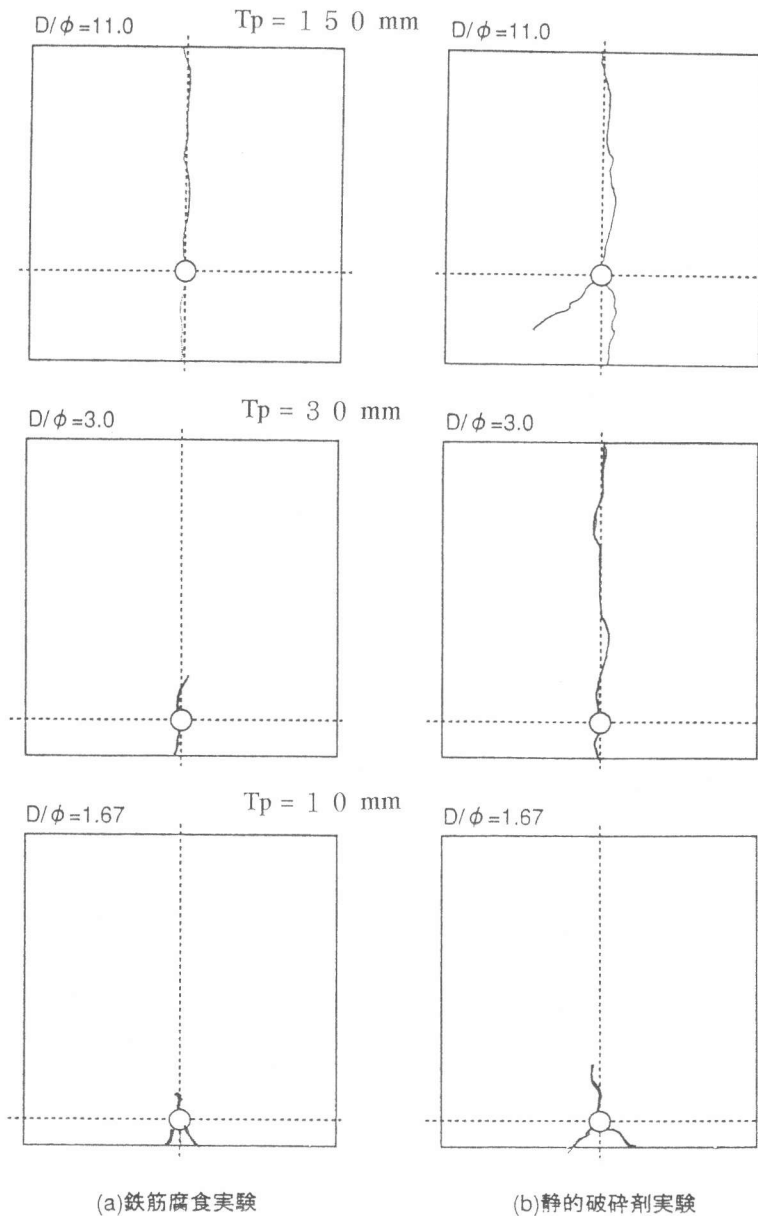


図-6 ひび割れ状況図

て進展する縦ひび割れの影響について検討した。ひび割れの存在しない場合と縦ひび割れがコンクリート供試体の奥に向かって40 mm進展した場合の円孔上の円周方向の引張応力分布を図-8に示す。ひび割れが進展しない(0 mm)場合に比べて、40 mm進展した場合の応力分布では、ひび割れ進展により実際にひび割れの発生した $\theta = 120^\circ$ の位置の引張応力が大きく増加し、内圧はそのままでも容易に引張強度以上の応力値に達していることがわかる。これより考えられることは、最終段階で見られた斜め方向の剥離ひび割れは、図-3で鉄筋から上方への縦ひび割れの進展によって応力集中がさらに助長され促進的に発生させられたと推定される。

かぶり厚さ $T_p = 30$ mm ($D/\phi = 3$)と $T_p = 150$ mm ($D/\phi = 1.1$)の場合については、図-6の実験でのひび割れ形態を考慮し、上下方向(図-3では円孔より左右両方向)に同時にひび割れが

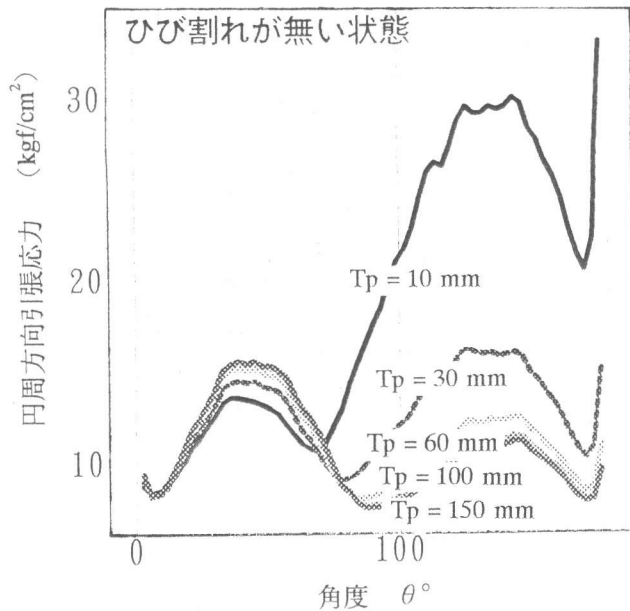


図-7 ひび割れを考慮しない場合の円孔上の応力分布

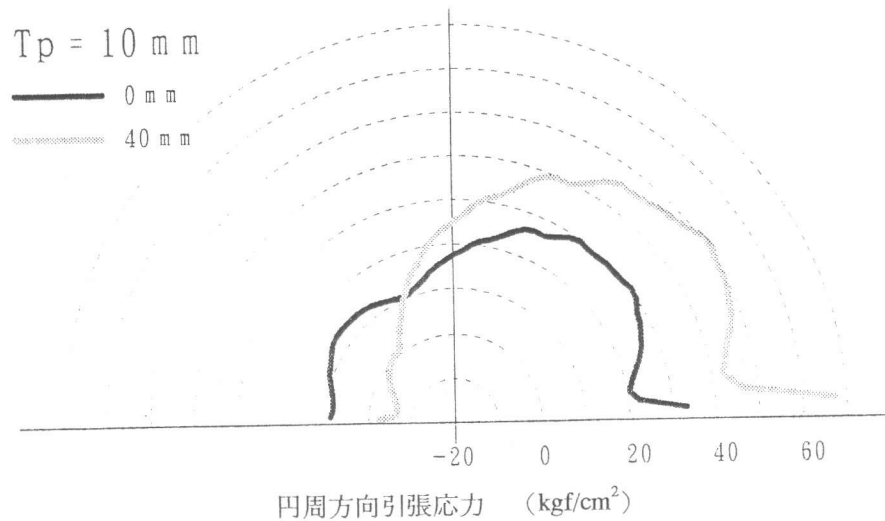


図-8 内部への縦ひび割れ進展に伴う応力分布の変化

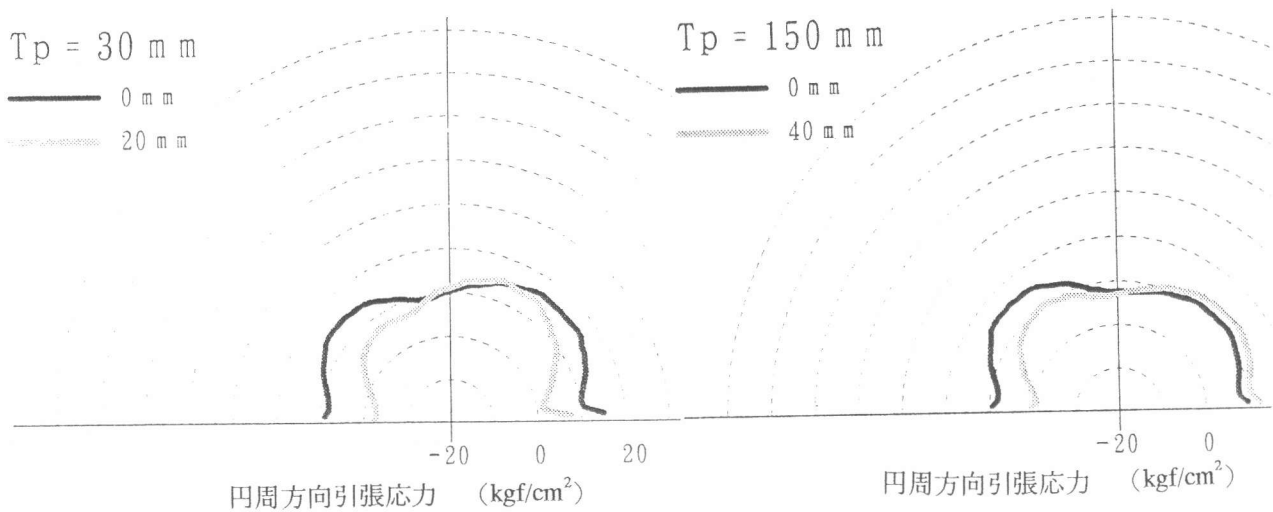


図-9 縦ひび割れ進展に伴う応力分布の変化

進展するモデルを解析した。解析結果としての円周方向の引張応力分布を図一 9 に示す。かぶり厚さ 30 mm の場合にはひび割れ進展 (0 から 20 m) に伴って円周上の応力は低減している。つまり、縦ひび割れの進展により新たな応力集中域あるいはひび割れ発生域は存在しないことが観察される。これは、実験の供試体で上下方向のみに縦ひび割れが観察された結果と一致する。一方、かぶり厚さ 150 mm の場合には、 $\theta = 30^\circ$ の位置では円周方向引張応力は低減するのに、 $\theta = 120^\circ$ の位置ではわずかながら応力増加が観察される。これが、静的破碎剤の実験結果に見られる斜めひび割れの発生につながったと推定される。

6. 結論

鉄筋腐食に伴うコンクリートのひび割れ発生状況と発生機構を解明するため、丸鋼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および静的破碎剤によってひび割れを発生させる実験を実施した。そして、その結果に関して境界要素法 (BEM) の応力解析により、実験におけるひび割れ形態の発生機構について力学的な考察を行った。その結果、以下のような結論が得られた。

(1) 電食と静的破碎剤の実験により、かぶりが厚くなる程、ひび割れ発生までに必要な腐食量が増加し、破壊発生までの内部応力の増加する傾向が認められた。ただし、かぶり厚さ 10 mm の場合のみ、異常に大きな内部応力値となるまで破壊の発生が見られないことが明かになった。

(2) BEM の応力解析により、かぶり厚さの浅い ($T_p = 10$ mm) 場合には、コンクリート表面への最短位置にひび割れは発生しようとするが、それが骨材の存在で拘束された場合には、新たな応力集中が発生することが認められた。その位置は、剥離ひび割れの発生位置に一致し、そのような応力集中は鉄筋からコンクリート内部への縦ひび割れ進展によって助長されることが明かになった。

(3) かぶり厚さ $T_p = 30$ mm と $T_p = 150$ mm の場合については、実験でのひび割れ形態を考慮し、鉄筋からかぶり方向と内部に同時に縦ひび割れが進展するモデルを解析した。解析結果として、かぶり厚さ 30 mm の場合にはひび割れ進展に伴って円周上の応力は低減することが認められた。つまり、縦ひび割れの進展により新たな応力集中域あるいはひび割れ発生域は存在しないことが示され、これは実験の供試体で上下方向のみに縦ひび割れが観察された結果と一致した。一方、かぶり厚さ 150 mm の場合には、斜めひび割れの発生が縦ひび割れの進展により導入されることが明かになった。

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) 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
- 3) 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
- 4) 原田哲夫・副田孝一・出光 隆・渡辺 明：静的破碎剤の膨張圧測定法と膨張圧の諸性質、土木学会論文集、No. 478/V-21, pp. 91-100, 1993. 11
- 5) A. H. Chahrour and M. Ohtsu : Simulation of Discrete Cracking in a Concrete Gravity Dam, コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 16, No. 2, pp. 45-50, 1994. 6