

論文 鉄筋腐食に伴うコンクリートの表面および内部ひび割れ進展挙動

河村 圭亮^{*1}・Tran Khoa Kim^{*2}・中村 光^{*3}・国枝 稔^{*4}

要旨：本研究では、かぶりや断面寸法が異なる単一鉄筋を有する供試体の電食実験を行い、鉄筋腐食に伴う表面および内部ひび割れの進展挙動について検討を行った。同一の断面寸法の供試体では、軸方向ひび割れの発生角度はかぶりによらず一定で、同腐食量ではかぶりに比例して表面ひび割れ幅が大きくなることが示された。また、横方向ひび割れは表面ひび割れ幅の開口速度が緩やかな段階で大きく進展した後、進展長さが一定値に収束する可能性が示された。さらに、表面隆起量の測定を行い、その分布形状から内部ひび割れの進展挙動を推定できる可能性が示された。

キーワード：腐食、ひび割れモード、表面ひび割れ幅、内部ひび割れ、電食実験

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の劣化要因の1つに鉄筋腐食が挙げられる。鉄筋腐食に伴う構造物の劣化過程のうち、初期段階である潜伏期・進展期については定量的な評価手法が確立されてきている¹⁾。しかしながら、かぶり表面にひび割れが発生した後の加速期・劣化期では、ひび割れ進展挙動など、力学的な挙動への影響は未だ明確にはなっていない。鉄筋腐食によってひび割れが進展すると劣化進行を加速させ、コンクリート片の剥落を招き、美観上の問題や第三者被害を引き起こす可能性があり、その挙動を明確にすることは維持管理を行う上で非常に重要となる。また、劣化した構造物の補修計画を立てる際には、測定可能な表面ひび割れ幅から鉄筋の腐食量および内部ひび割れの進展挙動を定量的に評価する予測技術の確立が望まれる。

内部ひび割れのパターンについては、図-1に示すように、かぶりや鉄筋径の違いにより、剥離ひび割れモードと軸方向ひび割れモードが生じることが明らかになりつつある。しかし、表面ひび割れ幅の進展挙動について検討した例^{3),4)}は少なく、また、内部ひび割れの進展挙動については、解析的に検討^{5),6)}はされているが、明確にはなっていないのが現状である。

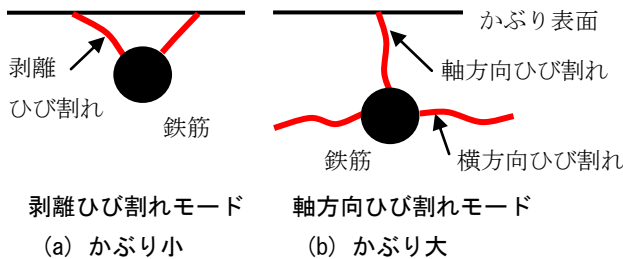


図-1 かぶりによるひび割れモードの違い

そこで本研究では、かぶりや断面寸法が異なる供試体を用いて電食実験を行い、腐食量と表面ひび割れ幅および内部ひび割れの進展挙動の関係性について検討を行った。また、鉄筋の腐食膨張に伴うかぶり表面の変形挙動を把握するために、表面隆起量の測定を行い、内部ひび割れとの関係性についての検討も行った。

2. 電食実験概要

電食実験装置の概要を図-2に示す。本実験では表面ひび割れ幅の経時変化を測定するため、図に示すようにかぶり面を上面(気中)にしている。電解液には3%塩化ナトリウム水溶液を用い、鉄筋側をアノード極、銅板側をカソード極に接続した。実験は、定電流電源装置に

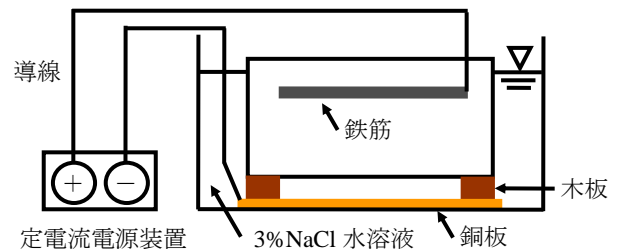


図-2 電食実験概要

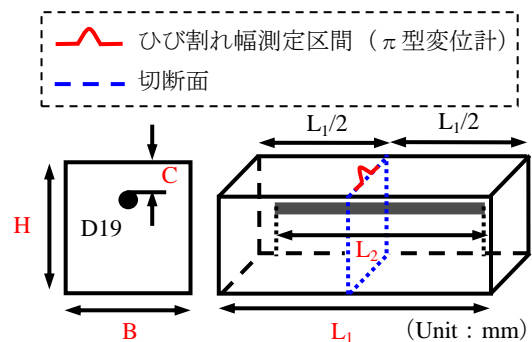


図-3 実験供試体概要

*1 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻修士課程 (正会員)
 *2 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻博士課程 修士(工) (正会員)
 *3 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻教授 博士(工) (正会員)
 *4 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻准教授 博士(工) (正会員)

表-1 実験ケース一覧

断面寸法 幅 B(mm)×高さ H(mm)	かぶり C(mm)	長さ L ₁ (L ₂) (mm)	供試体数 (体)	目標質量減少率 (%)	通電開始時 の材齢(日)	通電開始時の 圧縮強度(MPa)
150×150	30	300(250)	10	1.5, 3, 10, 20	28	26.2
150×150	7.5, 15, 45	300(250)	各 4	1.5, 3, 10, 20	28	24.0
250×250	30	200(150)	1	20	14	19.8
400×400	30	200(150)	3	3, 10, 20	14	19.8

より電流密度 0.9mA/cm² の電流を通電させた。

実験供試体は図-3 に示すような異形鉄筋 D19 が 1 本埋設された角柱供試体であり、かぶりおよび断面寸法を変化させた供試体を作製した。実験ケース一覧として供試体緒元、供試体数、目標質量減少率、通電開始時の材齢およびコンクリートの圧縮強度を表-1 に示す。目標質量減少率は既往の実験結果⁴⁾を参考にして定めており、同一緒元の供試体を複数作製し、各々の通電時間を変化させることで、腐食量の違いによる内部ひび割れの進展挙動を観察できるように実験を計画した。基準となる断面寸法 150×150mm、かぶり 30mm のケースはひび割れ進展挙動をより詳細に確認するため、通電時間ごとに複数の供試体を作製した。供試体は打設後 1 日目に脱型した後、通電開始まで 20℃ の恒温室にて湿布養生した。

通電中には図-3 に示すように、かぶり表面の中央部で検長 100mm のπ型変位計を用いてひび割れ幅の経時変化を測定した。また、通電終了後、ひび割れ幅の測定を行った地点において、コンクリートカッターを用いて供試体を切断し、断面内のひび割れ進展挙動を観察した。さらにクラックスケールを用いて断面内のひび割れ幅を測定した。その後、鉄筋をはつり出し 10%クエン酸アンモニウム水溶液に約 24 時間浸漬させて腐食生成物を除去した後、質量の測定を行い、質量減少率を算出した。なお、論文中の単位表面積あたりの腐食量は積算電流量と質量減少率の関係を 2 直線で近似し、その近似式に従って質量減少率が変化すると仮定して算出している⁴⁾。

3. かぶりの違いがひび割れ進展挙動に及ぼす影響評価

3.1 かぶりによるひび割れモードの違い

断面寸法が 150×150mm でかぶり 7.5, 15, 30, 45mm の各ケースでの切断面におけるひび割れ進展状況を、その時点での腐食量および表面ひび割れ幅の値と併せて写真-1 に示す。なお、かぶり 7.5mm のケースでは測定区間内に複数の表面ひび割れが生じたため表面ひび割れ幅の値は示していない。写真中の黒線は目視で観察できたひび割れを示しており、ひび割れ幅約 0.05mm 以上のものと推定される。かぶり 7.5mm のケースでは鉄筋位置からかぶり面に向かって斜め方向の剥離ひび割れが

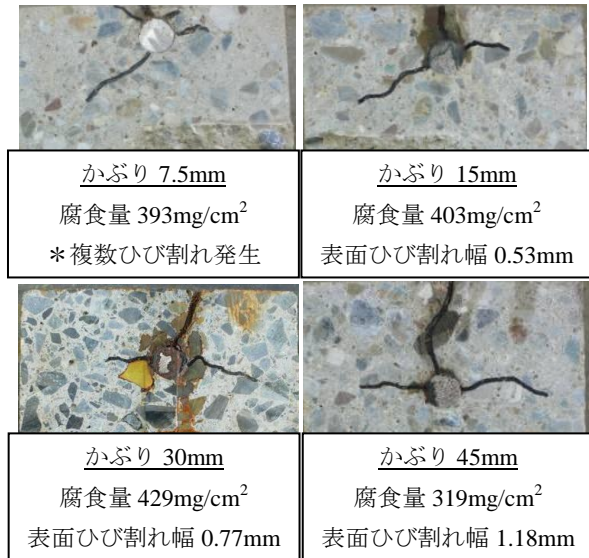


写真-1 断面内のひび割れ進展挙動

生じている(剥離ひび割れモード)。かぶり 15, 30, 45mm のケースでは鉄筋軸に沿った軸方向ひび割れと側面方向への横方向ひび割れが生じている(軸方向ひび割れモード)。なお、いずれのケースでも軸方向ひび割れが先にかぶり面側から生じた後、鉄筋位置から横方向ひび割れが生じていた⁴⁾。

堤ら²⁾は、ひび割れモードはかぶり(C)と鉄筋径(φ)をパラメータとする $k=D/\phi$ ($D=2C+\phi$) に依存し、 $k<3.0$ のときは剥離ひび割れモード、 $k\geq 3.0$ のときは軸方向ひび割れモードが生じると報告している。本実験でのかぶり 7.5, 15, 30, 45mm の各ケースはそれぞれ $k=1.79, 2.58, 4.16, 5.74$ に相当する。 $k=3.0$ より小さい $k=2.58$ のかぶり 15mm のケースでも鉄筋軸に沿ったひび割れが生じているが、乾湿繰り返しによって行われた促進腐食実験⁷⁾ や 3 次元剛体バネモデルによる解析⁸⁾でも同様の傾向が見られており、本実験結果はひび割れモードとしては既往の知見と一致している。以下では、軸方向ひび割れモードを対象として、軸方向および内部ひび割れの進展挙動について考察を行う。

3.2 腐食量と表面ひび割れ幅の関係

図-4 に軸方向ひび割れモードが生じたかぶり 15, 30, 45mm のケースの腐食量と表面ひび割れ幅の関係を示す。表面ひび割れ発生時の腐食量は、かぶり 15, 30mm のケ

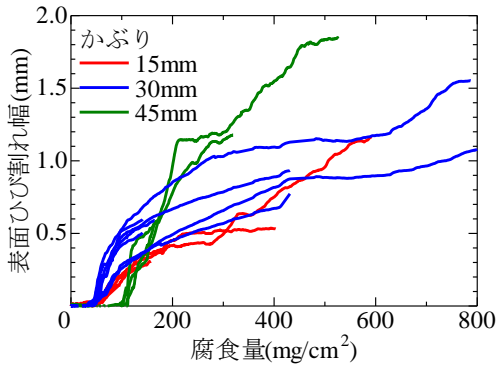


図-4 腐食量と表面ひび割れ幅の関係

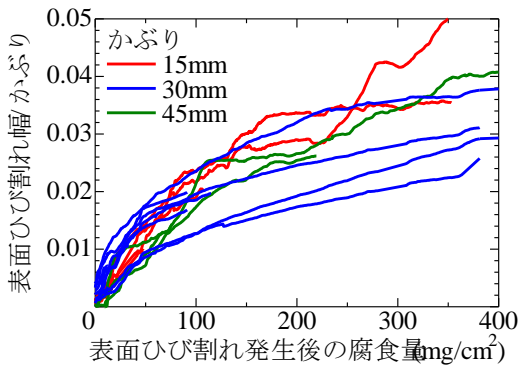


図-5 表面ひび割れ幅をかぶりで正規化

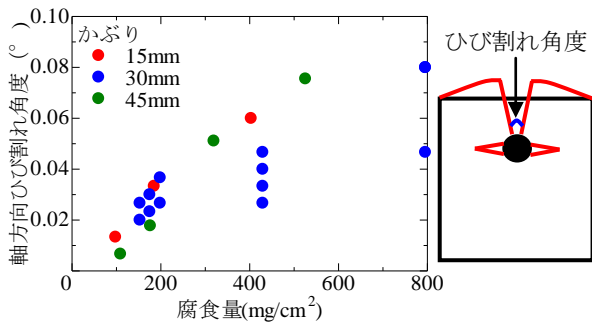
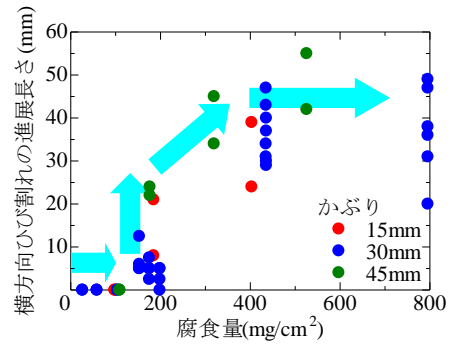


図-6 軸方向ひび割れ角度

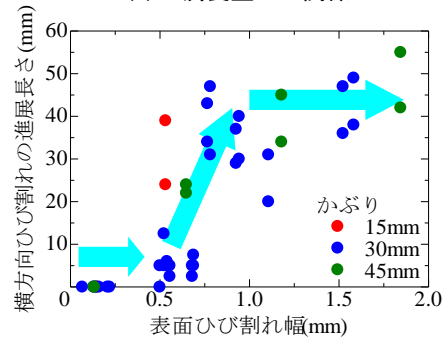
ースでは約 $50\text{mg}/\text{cm}^2$ 、かぶり 45mm のケースでは約 $100\text{mg}/\text{cm}^2$ となっており、かぶりが大きいほど大きくなった。その後の表面ひび割れ幅の拡大する勾配はかぶりが大きいほど大きくなった。また、表面ひび割れ発生後、勾配が変化し緩やかになる時点以降の表面ひび割れ幅はかぶりが大きいほど大きくなった。

3.3 断面内のひび割れ進展挙動

軸方向ひび割れの進展挙動についてかぶりとの関係を確認するために、表面ひび割れ幅をかぶりで正規化した値と表面ひび割れ発生後の腐食量との関係を図-5に示す。正規化した値が同程度の値を示していることから表面ひび割れ幅とかぶりに相関関係があると言える。また、軸方向ひび割れ幅は鉄筋近傍から表面に向かって大きくなるため、そのひび割れ角度を図-6に示す。なお、ひび割れ角度は表面および鉄筋近傍でのひび割れ幅とかぶりから算定している。同腐食量時点では、ひび割れ角度はかぶりによらず一定であることが推測される。



(a) 腐食量との関係



(b) 表面ひび割れ幅との関係

図-7 横方向ひび割れの進展長さ

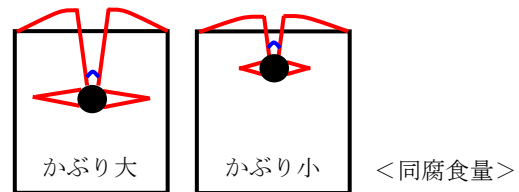


図-8 内部ひび割れ進展挙動

図-7に横方向ひび割れの進展長さについて腐食量および表面ひび割れ幅との関係を示す。横方向ひび割れは、腐食量約 $200\text{mg}/\text{cm}^2$ で、軸方向ひび割れがかぶりに依存して $0.3\sim 0.5\text{mm}$ 程度開口する範囲で発生し、腐食量約 $400\text{mg}/\text{cm}^2$ まで長さが進展するが、その後は進展長さが一定となる傾向にある。表面ひび割れ幅との関係で見ると、図-4に示すように腐食量約 $200\sim 400\text{mg}/\text{cm}^2$ の時点は表面ひび割れの開口速度が緩やかな段階であるが、表面ひび割れ幅 $0.5\sim 1.0\text{mm}$ の間で横方向ひび割れは大きく進展し、一定値に収束する。なお、一定となる横方向ひび割れの長さについては5章で考察を行う。

以上から、軸方向ひび割れは図-8に示すように腐食の進行に伴い一定の角度で開口していくため、同腐食量時点での表面ひび割れ幅はかぶりに比例して大きくなるものと考えられる。また、内部での横方向ひび割れは表面ひび割れの開口速度が緩やかな段階でも大きく進展することから、その挙動を適切に予測することが重要であると考えられる。

4. 腐食膨張に伴うかぶり表面の隆起量の測定

軸方向ひび割れは鉄筋の腐食膨張圧によってかぶり

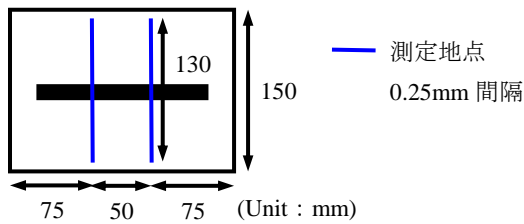


図-9 かぶり表面での測定地点



写真-2 レーザー変位計での測定状況

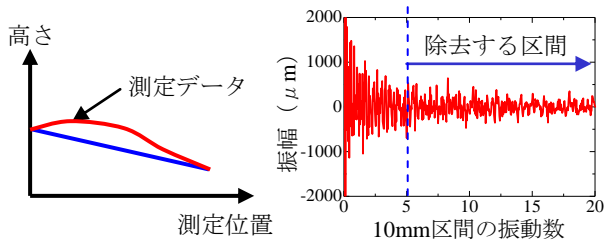


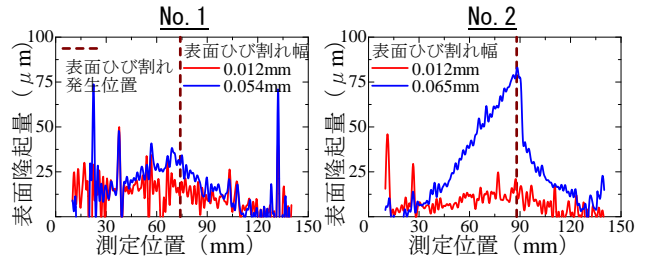
図-10 測定データの処理方法

が押し上げられる変形挙動によって表面から内部に向かって進展するものと考えられる⁴⁾。そこで本実験ではかぶり表面における隆起量の測定を行った。

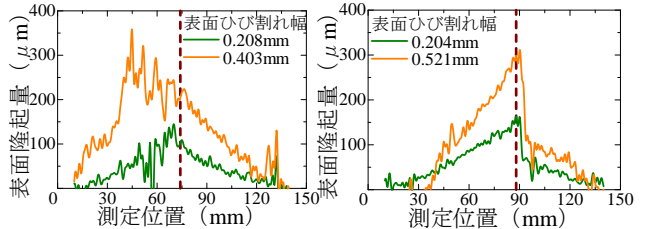
4.1 測定方法

測定は断面 150×150mm、かぶり 30mm、供試体長さ 200mm、鉄筋長さ 150mm の供試体を別途 9 体作製して行った。通電は材齢 14 日にて開始しており、その時点での圧縮強度は 19.8MPa であった。

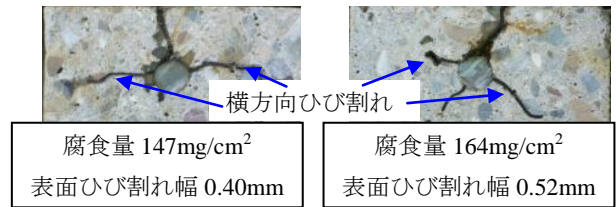
かぶり表面の隆起量は精度 0.1μm のレーザー変位計を用いて測定を行った。測定は図-9 に示すようにかぶり表面で軸方向に 75, 125mm の 2 地点で、横方向に両端 10mm を除いた 130mm 区間を 0.25mm 間隔で行った。測定状況を写真-2 に示す。本実験では測定結果として高さの絶対量が得られるため、図-10 に示すように測定区間の両端の高さが 0 であると仮定し、両端に対する相対変位の分布を求めた。すなわち図中の赤線と青線の差がその位置での高さであるとした。高さの分布は測定時の微細な振動やコンクリート表面の凹凸などの要因から波形状のデータとして得られる。そこで、得られた結果に対して高速フーリエ変換を行い、図-10 に示す 10mm 区間の振動数が 5 以上の微細な波を除去し、逆変換を行った。これらの処理を行い得られた高さの分布について、通電開始前の測定結果からの変位量をその時点の表面隆起量とした。



(a) 表面ひび割れ発生までの表面隆起量分布



(b) 表面ひび割れ発生後の表面隆起量分布



(c) 断面内のひび割れ進展挙動

図-11 表面隆起量分布

4.2 ひび割れ発生前後の表面隆起量

図-11 に 2 体の供試体 (それぞれ No.1, No.2 とする) における測定位置 75mm での表面隆起量の分布を、目視で観察できる表面ひび割れの発生までと発生後に分けて示す。なお、図中の破線は表面ひび割れ発生地点を示している。また、最後の測定終了後に供試体を切断しており、そのときの内部ひび割れの進展状況を併せて示す。

目視ではひび割れの確認ができない表面ひび割れ幅 0.012mm の時点ですでに約 110mm の長さにわたり表面全体が盛り上がっている挙動が確認できる。隆起量は表面ひび割れが発生する位置付近が盛り上がりのピークとなるような分布になっており、かぶり面から生じる軸方向ひび割れを誘発するものと考えられる。しかし、その値は 20~30μm 程度と非常に小さな値であり、表面隆起量からひび割れの発生を予測することは困難であると考えられる。

表面ひび割れ発生後も同様に表面ひび割れ発生位置をピークとして盛り上がる変形挙動が見られた。また、隆起範囲は腐食量によらず、表面ひび割れ発生以降、大きく変化することはなかった。

断面内でのひび割れ進展状況と比較すると、内部で横方向ひび割れが大きく進展している No.1 の方が No.2 より横方向ひび割れ直上での表面隆起量が大きくなっていることが確認できる。その値は 100μm 程度であり、この微小な表面隆起量が測定できると、表面から内部で

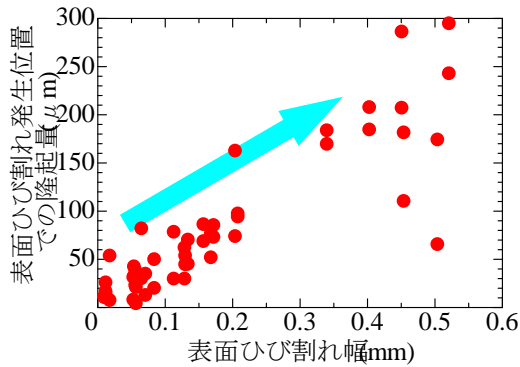


図-12 表面ひび割れ幅とその地点での隆起量の関係

発生する横方向ひび割れの進展長さを推測できる可能性があると考えられる。また、No.2の右側を見るとひび割れが裏面方向より進展しているが、この位置では表面隆起量が相対的に小さくなっている。このような表面隆起量の分布形状は3章の結果から横方向ひび割れがほとんど進展していないと考えられる0.05mm程度の表面ひび割れ幅の時点から表れている。このような分布形状の傾向は他の供試体でも同様であった。したがって、横方向ひび割れが発生する前の時点で、微小な表面隆起量が測定できればその進展方向も推測できる可能性があると考えられる。

また、図-12に表面ひび割れ幅とその位置での隆起量の関係を示すが、ほぼ線形関係にあることが分かり、図-8に示すようなかぶり面が押し上げられるような変形挙動により、表面でのひび割れ幅が拡大していくことが確認された。

5. 断面寸法の違いがひび割れ進展挙動に及ぼす影響評価

5.1 腐食量と表面ひび割れ幅の関係

図-13にかぶり30mmで断面寸法が150×150、250×250、400×400mmの各ケースの腐食量と表面ひび割れ幅の関係を示す。断面寸法によらず表面ひび割れ発生時の腐食量は同程度であるが、断面寸法が大きくなるほどその後の表面ひび割れ幅の拡大する勾配および表面ひび割れ幅の値は小さくなった。

5.2 断面内のひび割れ進展挙動

写真-3に切断面におけるひび割れ進展状況を、その時点での腐食量および表面ひび割れ幅の値と併せて示す。ひび割れモードは断面寸法によらず同様である。横方向ひび割れは、断面150×150mmのケースでは腐食量198mg/cm²の時点では片側のみ発生しており、その後、両側に大きく進展している。一方、断面400×400mmのケースでは、腐食量205mg/cm²の時点ですでに横方向ひび割れが大きく進展しており、その後、進展長さに変化がないことが確認できる。

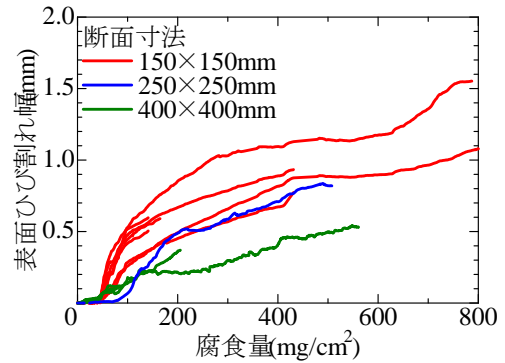


図-13 腐食量と表面ひび割れ幅の関係

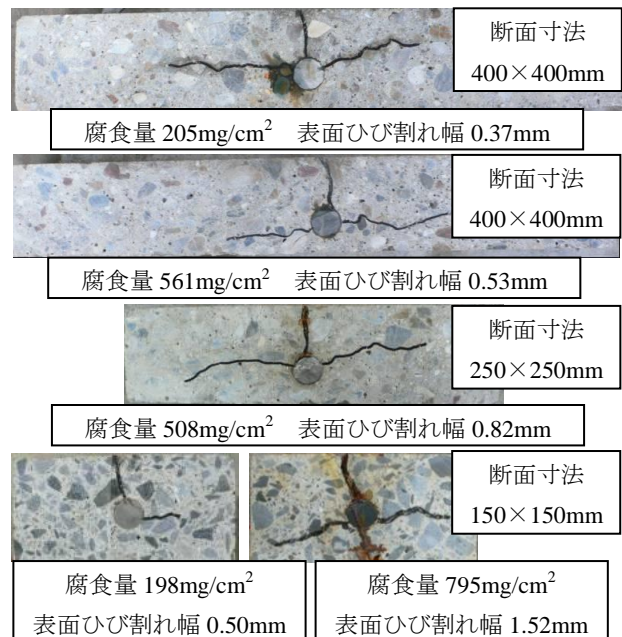
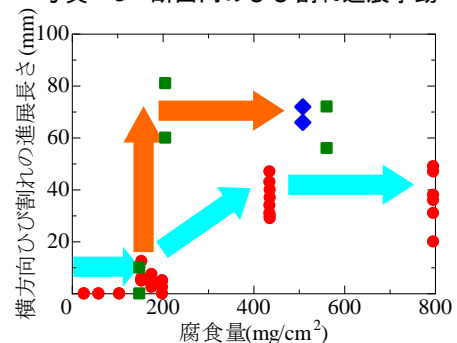
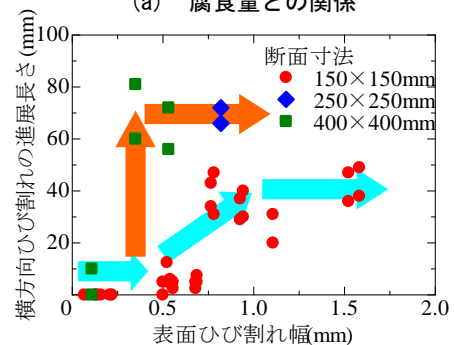


写真-3 断面内のひび割れ進展挙動



(a) 腐食量との関係



(b) 表面ひび割れ幅との関係

図-14 横方向ひび割れの進展長さ

図-14 に横方向ひび割れの進展長さについて腐食量および表面ひび割れ幅との関係を示す。腐食量との関係を見ると、断面 250×250mm および 400×400mm の場合は、横方向ひび割れの進展長さが一定値に収束する傾向は断面 150×150mm の場合と同様であるが、腐食量約 200mg/cm² の時点で一気に収束する長さまで進展している。また、収束するときの進展長さは断面 250×250mm および 400×400mm のケースでは共に約 70mm 程度である。よって、横方向ひび割れの進展長さにはかぶりや鉄筋径によって特定の長さが存在する可能性がある。一方、断面 150×150mm の供試体では横方向ひび割れの進展長さは 40mm 程度と小さい値となったが、これは断面寸法の影響を受けて進展長さが制限されて 70mm より小さい値で収束したものと考えられる。したがって、鉄筋の腐食膨張に伴う内部ひび割れの進展挙動について議論する際は、断面寸法によってその挙動が変わることに注意する必要があると考えられる。表面ひび割れ幅との関係を見ると、断面 400×400mm のケースでは、表面ひび割れ幅 0.37mm の時点ですでに 70mm 程度の横方向ひび割れの進展が確認できる。実構造物で、複数の鉄筋が隣接して配筋されている場合を考えると、それぞれの鉄筋から横方向に 70mm 程度のひび割れが進展すると鉄筋間でひびわれがつながる可能性があり、軸方向ひび割れおよび鉄筋間のひび割れによりかぶり全体が剥落する危険性も考えられる。したがって、この点からも内部での横方向ひび割れの進展挙動を適切に評価することが重要であると言える。

6. まとめ

本研究では、かぶりや断面寸法が異なる供試体を用いて電食実験を行い、腐食量と表面ひび割れ幅および内部ひび割れ進展挙動の関係性についての検討を行った。また、鉄筋の腐食膨張に伴う表面隆起量の測定を行い、内部ひび割れとの関係性についての検討を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) かぶりとひび割れモードの関係はかぶりが小さいと剥離ひび割れモード、大きくなると軸方向ひび割れモードが生じており、モードが変わる時のかぶりは既往の知見と一致している。
- (2) 軸方向ひび割れは腐食の進行に伴い、一定の角度で開口していくため、同腐食量時点での表面ひび割れ幅はかぶりに比例して大きくなる。また、横方向ひび割れは表面ひび割れ幅の開口速度が緩やかな段階でも大きく進展することからその挙動を適切に評価することが重要であると言える。
- (3) 表面隆起量の測定より、かぶり面が押し上げられるような変形挙動により軸方向ひび割れがかぶり面

から生じ、拡大していくことが示された。また、横方向ひび割れの進展挙動は、表面ひび割れ発生以前の微小な表面隆起量およびその形状から推測できる可能性が示された。

- (4) 横方向ひび割れの進展長さにはかぶりや鉄筋径による特定の長さが存在する可能性が示された。また、断面寸法が小さい供試体では進展長さが幅の影響を受けて制限されるため注意する必要があると考えられる。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金（基盤研究(C)、課題番号：20560432）により行った。ここに記して謝意を表す。また、本研究での表面隆起量の測定にあたり、名古屋大学大学院北根安雄助教にレーザー変位計を借用させていただき、測定方法についてご教授いただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書維持管理編，2007
- 2) 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
- 3) 田森清美，丸山久一，小田川昌史，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，Vol10，No2，pp.505-510，1988
- 4) 河村圭亮，中村光，国枝稔，上田尚史：鉄筋腐食に伴うコンクリートのひび割れ進展挙動評価に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol31，No1，pp.1075-1080，2009
- 5) 元路寛，関博：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，土木学会論文集，No.669/V-50，pp.161-171，2001
- 6) 松尾豊史，西内達雄，松村卓郎：鉄筋の腐食膨張に伴うひび割れ進展解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol19，No2，pp.99-104，1997
- 7) 中川裕之，田中大博，横田優，松嶋学：塩水を用いた乾湿繰返し促進腐食実験によるひび割れモードとひび割れ発生時の腐食量，土木学会論文集 E，Vol64，No1，pp.110-121，2008
- 8) 河村圭亮，中村光，国枝稔，上田尚史：腐食ひび割れ進展解析における鉄筋腐食膨張モデルに関する研究，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第8巻，pp.285-292，2008