

## 軸方向腐食分布およびかぶりの違いが腐食ひび割れ挙動に及ぼす影響評価

名古屋大学大学院	学士(工学)	○木山	直道
名古屋大学大学院	正会員 博士(工学)	中村	光
名古屋大学大学院	博士(工学)	三浦	泰人
名古屋大学大学院	博士(工学)	山本	佳士

Abstract : In this study, the influence of corrosion distribution along rebar and cover thickness on crack behavior was investigated numerically. The analytical method was based on a rigid body spring model in which the corrosion crack analysis method considering the movement of corrosion products developed by the authors. As a result, it was clarified that the surface crack length and the maximum surface crack width increased with the increasing of the corrosion length. Furthermore, it was shown that the surface crack length at uncorroded area is almost constant regardless of the length of the corroded area.

Key words : Rebar corrosion , Cover thickness , Corrosion length , Surface crack length

## 1. はじめに

鉄筋腐食が生じると腐食ひび割れや鉄筋の断面減少が生じることで、鉄筋とコンクリート間の付着力の低下や耐力低下など構造性能を大きく低下させることが知られている。さらに、鉄筋腐食によって生じる腐食ひび割れは、コンクリート片の剥落を招き、人命にかかわる第三者被害を引き起こす可能性がある。したがって、鉄筋の腐食量や腐食ひび割れが、これらの構造物の各種性能に及ぼす影響を定量的に予測する手法を確立する必要がある。現在、電磁波レーダ法<sup>1)</sup>や加振レーダ法<sup>2)</sup>などを用いて、鉄筋の腐食状況を検知するための研究が行われ、その技術の進展が期待されている。ここで、このような特殊な機器を用いずに、容易に測定可能な表面ひび割れ幅から鉄筋の腐食量や内部のひび割れ進展挙動を評価・予測することができれば、その工学的な価値は非常に大きいと考えられる。

表面ひび割れ幅と腐食量の関係は従来から多く検討されてきた<sup>3, 4, 5)</sup>。Qiao ら<sup>6)</sup>は鉛直・水平方向のかぶり厚さとひび割れ進展の関連性に基づいて、表面ひび割れ幅から腐食量を推定する式を提案している。ただし、いずれも鉄筋の軸方向に一様に腐食している場合を対象としている。実際には、鉄筋腐食は構造物に対して局所的・部分的に生じることが大半であり、提案された表面ひび割れ幅と腐食量の関係が直接実構造物に適用できるとは限らない。そこで、著者ら<sup>7)</sup>は、鉄筋腐食の領域が鉄筋軸方向で局所的に生じる場合、あるいは複数の局所的な腐食領域が存在する場合において、腐食分布と表面ひび割れ性状の関係を解析的に評価した。その結果、鉄筋の腐食領域の分布と表面ひび割れの長さや幅が必ずしも一致しない結果が得られた。ただし、この解析的検討はかぶり 30mm のかぎられたケースで得られた結果であり、腐食ひび割れに影響するかぶり厚さや鉄筋径が異なるときの腐食分布と表面ひび割れ性状の関係を評価する必要がある。

そこで本研究では、著者らが開発した腐食生成物の移動を考慮した腐食解析モデル<sup>8)</sup>を用いて、腐食領域の長さや鉄筋かぶり厚さが腐食ひび割れ挙動に及ぼす影響を検討した。

## 2. 解析手法

### 2.1 腐食生成物の移動を考慮した腐食進展ひび割れ解析の概要

本研究では、著者ら<sup>8)</sup>が開発を進めている3次元剛体バネモデル(図-1)によって鉄筋腐食による腐食ひび割れ性状を評価した。本解析では、鉄筋、コンクリート、腐食層をモデル化した上で、図-2に示すトラスネットワークモデルで、腐食電流や腐食生成物の移動を解析する拡散解析を組み合わせ、腐食ひび割れ進展解析を行う手法を用いた。

図-3に腐食解析のフロー図を示す。最初に電流密度を設定したのち、鉄筋質量減少量をファラデーの法則によって計算する。腐食生成物は固相と液相からなり、液相部分のみが腐食生成物の移動に関与するとして、トラスネットワークモデルによって拡散解析を行っている。なお、ひび割れを介して外気と鉄筋が接触して腐食速度が増加する影響は、ひび割れ幅に依存して有効電流量を変化させることでモデル化する。拡散解析後、鉄筋位置の腐食生成物が腐食膨張に寄与するとし、自由膨張ひずみが決定される。腐食した鉄筋による腐食生成物の膨張は、図-4に示すように鉄筋と腐食生成物層との境界に設置した垂直バネに、自由膨張ひずみを初期ひずみとして作用させることでモデル化している。また、既往の研究<sup>9)</sup>により、表面ひび割れが発生するかぶり面側の鉄筋における腐食がより進行することが明らかになっている。そのため、かぶり面方向の鉄筋近傍のひび割れ幅が0.1mm以上になったとき、膨張ひずみはかぶり面側90°にのみ作用すると仮定した(図-5)。そのほかの詳細は既往の文献<sup>8)</sup>を参考して頂きたい。

### 2.2 解析モデル

本解析で使用した解析モデルを図-6に示す。供試体寸法は幅300mm、高さ150mm、長さ800mmであり、単純ばりの境界条件を仮定した。既往の研究<sup>7)</sup>では供試体の幅を150mmとしたが、かぶり大きい場合に供試体側面にひび割れが貫通する挙動

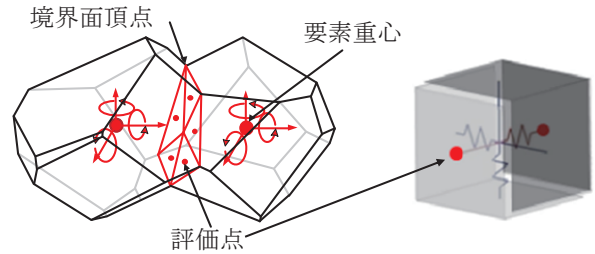


図-1 3次元剛体バネモデル

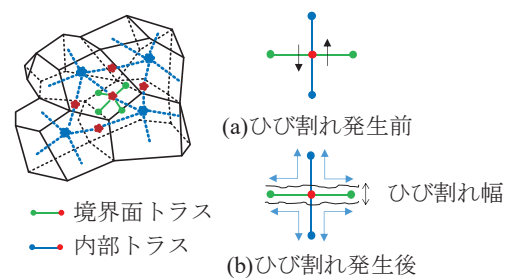


図-2 トラスネットワークモデル

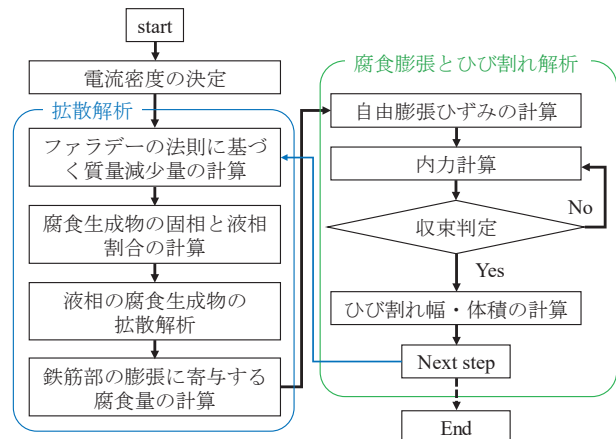


図-3 解析フロー

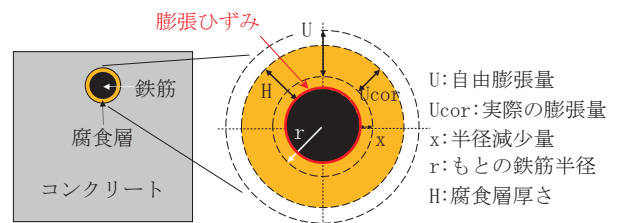


図-4 腐食層のモデル

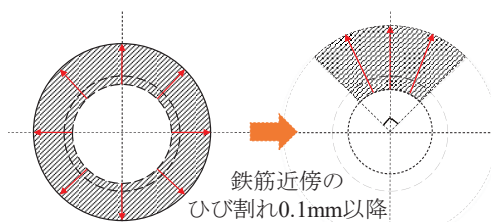


図-5 腐食の局所化モデル

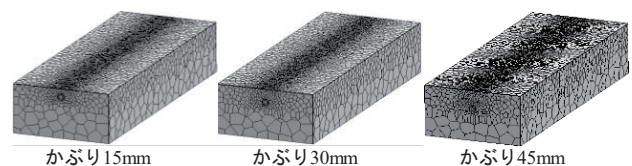


図-6 供試体モデル

を示したため、供試体幅を大きくし、側面の影響を可能な限り低減させた。本研究では、鉄筋かぶりひび割れ分布に及ぼす影響を検討するため、D19の鉄筋がかぶり15, 30, 45mmで配置されたモデルで検討を行った。解析モデルのメッシュサイズは、ひび割れが発生しやすい鉄筋上方のかぶり内から鉄筋周辺では5mmと小さくし、そのほかのひび割れがあまり進展しない箇所は計算負荷を低減させるために15~30mmとした。腐食領域の長さは図-7に示す赤色の領域であり、部材中央を中心として100, 200, 400, 600mmと変化させた。また、本解析モデルは、電流密度によって腐食量をコントロールすることが可能であり、電流密度は既往の研究<sup>7)</sup>と同様に $900\mu\text{A}/\text{cm}^2$ とした。

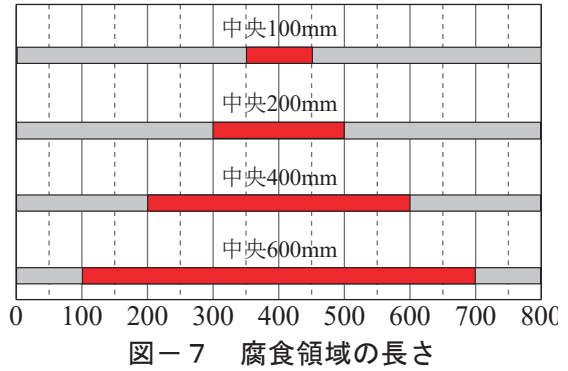


図-7 腐食領域の長さ

### 3. 腐食領域長さと鉄筋かぶりひび割れ挙動に及ぼす影響

本章では、部材内の鉄筋の特定の領域で腐食が生じた場合を想定し、ひび割れ挙動に及ぼす腐食領域長さと鉄筋かぶりの影響を解析的に検討した。

#### 3.1 ひび割れ分布

図-8に腐食領域の平均腐食率（以下、平均腐食率）10%時の、腐食領域長さ200mmのケースの表

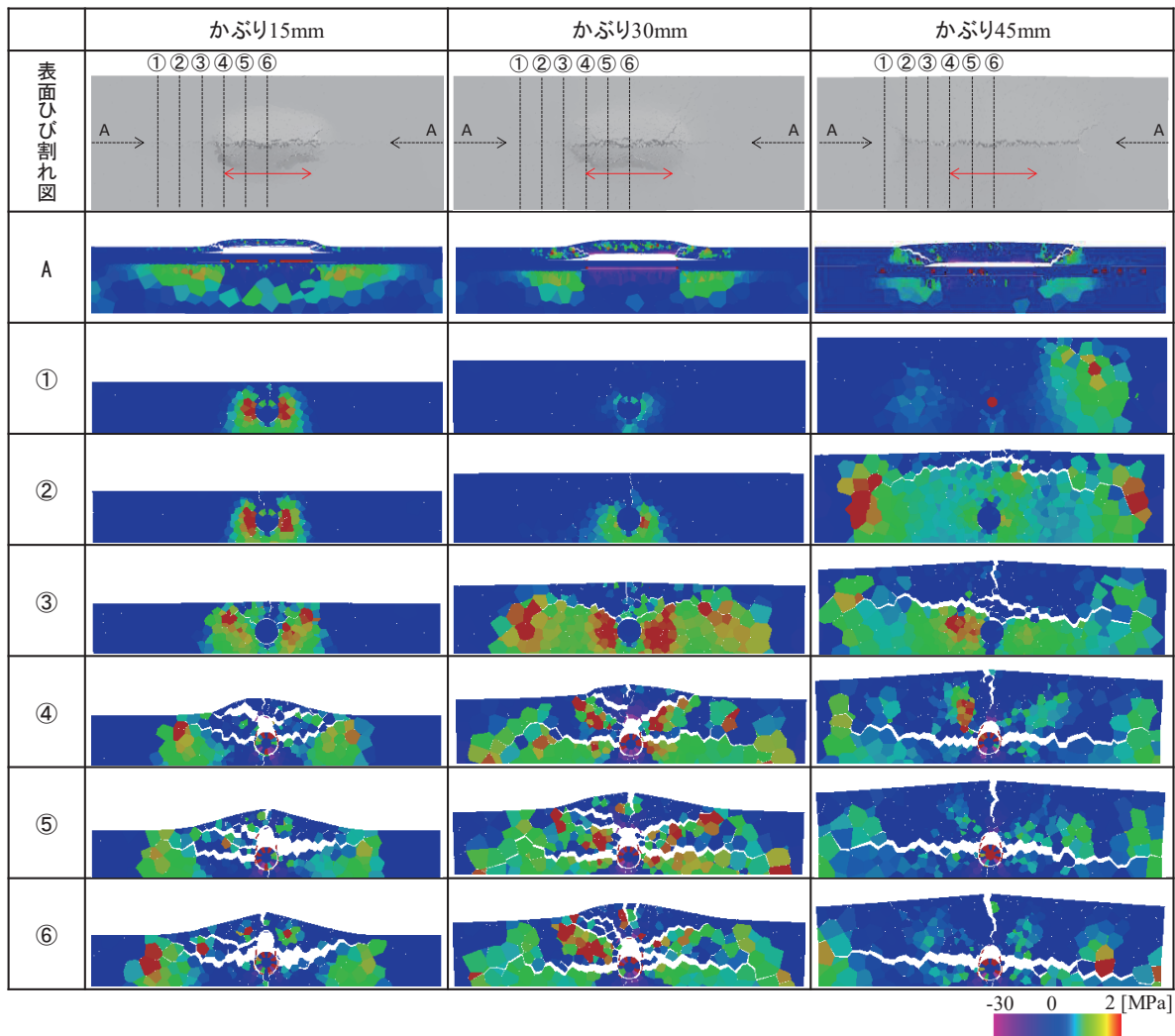


図-8 表面ひび割れ、内部ひび割れおよび内部応力図 (倍率=20)

面ひび割れ図と、内部ひび割れおよび内部応力図を示す。なお、表面ひび割れ図と内部ひび割れ図の変形倍率は20倍であり、表面ひび割れ図中の、赤い矢印は腐食領域区間を示し、黒色の点線は内部ひび割れ図の断面の位置を示す。部材内部の断面は、部材直角方向は①～⑥の6箇所、部材軸方向Aの鉄筋位置とした。表面ひび割れ図より、かぶりが大きくなるにつれて、表面に発生するひび割れ長さは長くなること示された。また、かぶり15, 30mmのケースではひび割れを中心に表面が浮き上がる挙動を示したが、かぶりが大きい45mmのケースでは、中央の浮き上がりが小さいことが分かる。一方、内部ひび割れと内部の鉛直方向応力について、かぶり15mmの場合は、腐食領域中央の断面⑥では、水平方向から若干かぶり方向に向かうひび割れが進展している。腐食領域端部の断面④では、水平方向のひび割れと斜め45°程度でかぶり方向に向かう幅の大きなひび割れが発生する。断面⑤では、④と⑥の中間的な挙動を示す。腐食領域全体(断面④～⑥)では、水平方向のひび割れの先端に引張応力が作用している。また、腐食領域外(断面①～③)でも、鉄筋の側面に引張応力が発生していることが分かる。かぶり30mmの場合は、腐食領域全体で、水平方向のひび割れと斜め45°程度でかぶり方向に向かうひび割れが進展している。かぶり45mmの場合は、腐食領域全体で水平方向と鉛直方向のひび割れが進展している。腐食領域端部から未腐食領域に向かっては、水平方向のひび割れがかぶり面に向かって推移している。部材軸方向の断面Aのひび割れ図と応力によれば、かぶり15, 30mmの場合、腐食領域の端部から斜め45°程度でかぶり面に向かってひび割れが進展している。一方、かぶり45mmでは、腐食領域より長い領域にひび割れが進展したのち、斜め45°程度でかぶり面に向かってひび割れが進展し、かぶりの影響がより現れている。以上より、鉄筋直角方向断面や、鉄筋軸方向断面の内部ひび割れのパターンは、かぶりの大きさに顕著に影響されることが示された。

### 3.2 表面ひび割れ幅とひび割れ長さ

図-9に平均腐食率5, 10, 15, 20%時の、腐食領域長さ400mmのケースの表面ひび割れ幅分布を示す。図中の赤いハッチは腐食領域を示す。なお、鉄筋直上のかぶりコンクリートを中心とした鉄筋直交方向の50mm区間の変位を表面ひび割れ幅としている。図より、表面ひび割れ幅の分布性状は、かぶりによらず、同様の傾向であった。すなわち、腐食領域内ではほぼ一定であり、腐食領域端部から未腐食領域にかけて急激にひび割れ幅は低下する挙動を示している。より詳細にみると、かぶりの大きい45mmのケースでは、腐食領域端部から未腐食領域にひび割れが進展しやすくなる傾向を示した。また、かぶりが大きくなるにつれ、表面ひび割れが滑らかに変化していることが分かる。これは図-8の内部ひび割れ進展からわかるように、かぶりが小さい15, 30mmのケースではかぶり面側に複数のひび割れが発生し、表面ひび割れ幅に影響しているのに対し、かぶり45mmでは鉛直ひび割れのみがひび割れ幅に関与したためと推察される。

図-10に腐食領域長さ100, 200, 400mmのケースの、表面ひび割れ幅の最大値と腐食率の関係を示す。図より、腐食率の増加に伴い、表面ひび割れ幅

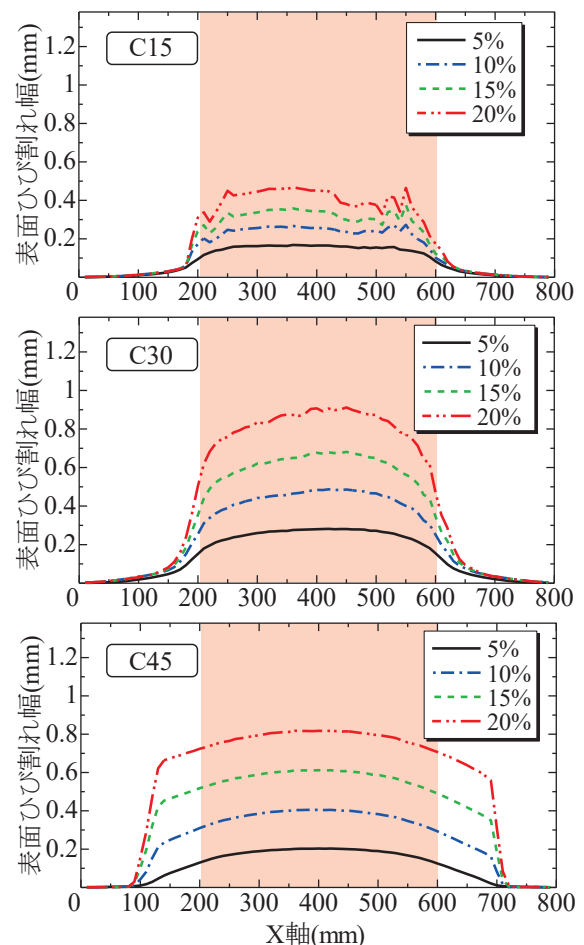


図-9 表面ひび割れ幅分布

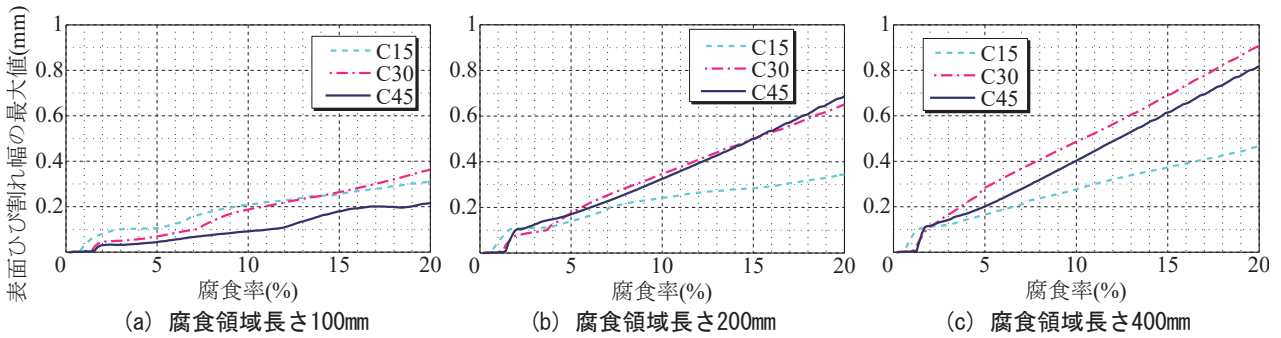


図-10 表面ひび割れ幅の最大値と腐食率の関係

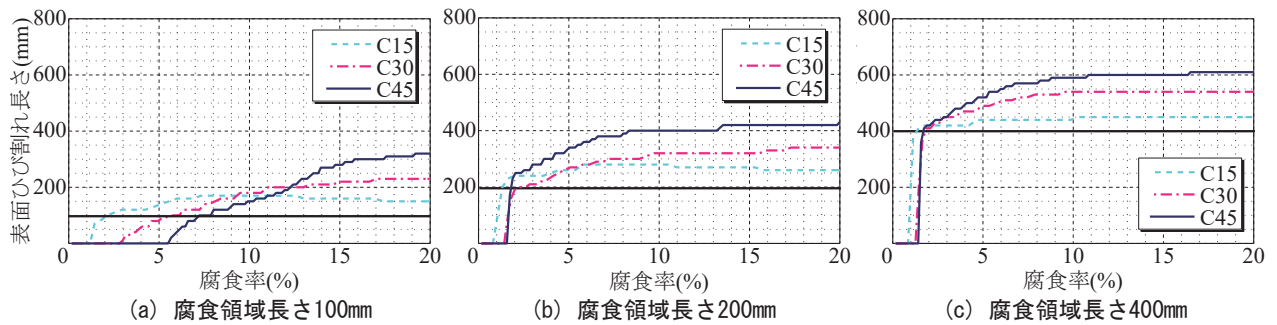


図-11 表面ひび割れ長さと腐食率の関係

の最大値は増加する傾向を示した。また、腐食領域長さが大きくなるにつれて、表面ひび割れ幅の最大値も増加する傾向を示した。ただし、かぶりの違いによる明確な傾向は認められず、たとえば腐食領域長さ200mmの場合、かぶり30mmと45mmはほぼ同一の値となったが、腐食領域長さ400mmの場合、かぶり30mmは、かぶり45mmより大きな値となる。本解析では腐食生成物のひび割れへの移動も考慮した解析を行っており、腐食生成物がひび割れに入るほど膨張圧が低減する。したがって、かぶり30、45mmで表面ひび割れ幅の最大値に変化がない理由は、発生したひび割れ体積中への腐食生成物の移動の影響によるものと推察する。

図-11に腐食領域長さ100、200、400mmのケースの、腐食率と表面ひび割れ長さの関係を示す。図中の黒線は腐食領域の長さを示す。なお、表面ひび割れ幅0.05mm以上のひび割れが発生した区間の長さを表面ひび割れ長さとした。図より、腐食領域長さ200、400mmのケースでは、腐食率2%までに腐食領域長さと同じ長さの表面ひび割れ長さのひび割れが発生し、そののち約10%まで、表面ひび割れ長さは緩やかに大きくなり、約10%以降はほぼ一定の値を示した。腐食領域長さ100mmのケースでは、かぶり15mmの場合、腐食領域長さ200mmと400mmと同様に、腐食率2%までに腐食領域長さと同じ長さの表面ひび割れ長さのひび割れが発生し、そののち約10%まで、表面ひび割れ長さは緩やかに大きくなり、約10%以降はほぼ一定の値を示した。一方、かぶりが大きくなると表面ひび割れが発生する腐食率が大きくなり、緩やかに表面ひび割れ長さが大きくなる傾向を示した。これらのことから、かぶりに対して腐食領域長さが比較的短い場合、かぶりの影響を顕著に受けることが示された。

表面ひび割れ長さの進展が一定になったときのひび割れ長さは、かぶりが大きいほど大きくなる傾向を示した。ただし、腐食率10%時のかぶり45mmにおいて、腐食領域長さ200mmの場合は表面ひび割れ長さが400mmであることから未腐食領域には200mmの表面ひび割れが、腐食領域長さ400mmの場合は表面ひび割れ長さが590mmであることから未腐食領域には190mmの表面ひび割れが進展している。したがって、未腐食領域に進展する表面ひび割れ長さは、腐食領域の長さによらずほぼ一定であることが示された。

#### 4. まとめ

本研究では、幅300mm、高さ150mm、長さ800mmの供試体に対して、腐食生成物の移動を考慮した腐食解析モデルを用いて、ひび割れ挙動に及ぼす、腐食領域長さと鉄筋かぶりの影響を検討した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 内部ひび割れ進展は、かぶりが15, 30mmの場合、鉄筋直交方向の断面内では、水平方向と斜め45°程度でかぶり面に向かう方向のひび割れが支配的であった。また、鉄筋軸方向の断面内では、腐食領域端部から45°程度でかぶり面に向かってひび割れが進展することが示された。一方、かぶりが45mmの場合、鉄筋直角方向の断面内では、水平方向と鉛直方向のひび割れが支配的であった。また、鉄筋軸方向の断面内では、腐食領域以上に内部ひび割れは進展し、そのうち45°程度でかぶり面に向かってひび割れが進展することが示された。
- (2) かぶりに対して腐食領域がある程度長い場合、表面ひび割れ長さは、腐食率2%までに腐食領域長さと同等であり、そのうち緩やかに増加し、腐食率約10%で一定となる挙動を示した。加えて、かぶりが大きいほど、表面ひび割れ長さは長くなる傾向を示した。
- (3) 表面ひび割れ幅の最大値は腐食量の増加に伴って大きくなる傾向を示し、同じ腐食量の場合、腐食領域長さが大きいほど表面ひび割れ幅の最大値も大きくなることを示された。
- (4) 未腐食領域に進展する表面ひび割れ長さは、腐食領域の長さによらずほぼ一定であることが示された。

#### 謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金（基盤研究(B)、課題番号：18H01510）により行った。ここに記して謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 多田祐希, 中村光, 三浦泰人: 自己組織化マップを用いた電磁波伝搬特性での内部ひび割れの検出に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1605-1610, 2018
- 2) 三輪空司, 本多秀聡, 富田沙希, 中川貴之: 加振レーダ法を用いた電食中の鉄筋振動変位計側による早期鉄筋腐食検出の試み, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1671-1676, 2018
- 3) Vidal, T., Castel, A. and Francois, R.: Analyzing Crack Width to Predict Corrosion in Reinforced Concrete, Cem. & Conr. Res., Vol.34, pp.165-174, 2004
- 4) Chernin, L., Stewart, M. G. and Val, D. V.: Prediction of Cover Crack Propagation in RC Structures Caused by Corrosion, Mag. Conr. Res., Vol.64(2), pp.95-111, 2012
- 5) Khan, I., Francois, R. and Castel, A.: Prediction of Reinforcement Corrosion Using Corrosion Induced Cracks Width in Corroded Reinforced Concrete Beams, Cem. & Conr. Res., Vol.56, pp.84-96, 2014
- 6) Qiao, D. et al.: Geometric Parameters Relating Corrosion Penetration to Surface Crack Width, Proc. JCI, Vol.38, No.1, pp.1143-1147, 2016
- 7) 木山直道, 中村光, Zahra, A., 三浦泰人: 鉄筋腐食の軸方向分布と表面ひび割れ幅関係の解析的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.953-958, 2019
- 8) Zahra, A., et al.: Development of simulation method of concrete crack behavior and corrosion products movement due to rebar corrosion, Constr. Build. Mater., Vol.190, pp.560-572, 2018
- 9) Qiao, D.: Crack patterns of concrete with a single rebar subjected to non-uniform and localized corrosion, Constr. Build. Mater., Vol.116, pp.366-377, 2016