

論文 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

木山 直道*1・中村 光*2・Zahra Amalia*3・三浦 泰人*4

要旨： 本研究では、腐食領域の長さや間隔、腐食率の差を変化させて、腐食が鉄筋軸方向に分布した場合の腐食率分布と表面ひび割れの長さや幅の関係を解析的に検討した。本解析では、剛体バネモデルおよび腐食生成物の移動を考慮した腐食ひび割れ解析手法を用いた。その結果、腐食率 1.5%程度の範囲で軸方向にランダムにばらついても、表面ひび割れへの影響は小さいことが示された。また、部分的に腐食が生じた場合、表面ひび割れ長さは腐食領域の長さに依存し、腐食率に依存しないことが示された。さらに、腐食領域間のひび割れが連結した場合、腐食率が分布しても最大ひび割れ幅は、最大腐食率に依存した値を示した。

キーワード： 鉄筋腐食, 表面ひび割れ幅, 表面ひび割れ長さ, 腐食分布, 腐食領域長さ, 剛体バネモデル

1. はじめに

鉄筋腐食によるひび割れの進展は、腐食を加速させるだけではなく、コンクリート片の剥落を招き、美観の問題や第三者被害を引き起こす可能性がある。さらに、鉄筋とコンクリートの付着力の低下や、鉄筋の断面欠損による耐力の低下など構造性能にも大きく影響するため、鉄筋の腐食状態を予測する必要がある。現在、電磁波レーダ法¹⁾や加振レーダ法²⁾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。一方、特殊な機器を用いず、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定量的に予測する方法の確立も望まれている。

表面ひび割れ幅と腐食量は従来から多く検討されており^{3), 4), 5)}, Qiaoら⁶⁾は鉛直・水平かぶりの影響を考慮した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樣に腐食している場合を対象としている。しかしながら、実構造物では鉄筋腐食が一樣に生じることはまれであり、腐食領域長さや腐食分布に関係したひび割れ幅と腐食量の関係のモデル化が望まれている。

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⁷⁾を用いて、腐食領域の間隔や腐食率の差を変化させて、腐食が鉄筋軸方向に分布

した場合の腐食率分布と表面ひび割れの長さや幅の関係を検討した。

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手法の概要

本研究では、図-1に示すような剛体要素間をバネで結んだモデルで構造解析を行う 3次元剛体バネモデル(RBSM)により、コンクリート部材をモデル化して解析を行った。3次元 RBSM は様々な部材で適用性が示されており、ひび割れの進展状態、局所位置での応力状態などコンクリートの不連続面の発生から破壊に至るまで精度よく評価できることが確認されている⁸⁾。コンクリート部材は図-2に示すように鉄筋、腐食層、コンクリートの3層でモデル化している。コンクリート、腐食層、鉄筋の構成モデルの詳細は既往の研究^{7), 9), 10)}を参考にして頂きたい。

腐食解析は、著者らが開発した、腐食生成物移動の拡散解析を組み込んだ腐食進展ひび割れ解析手法⁷⁾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後、鉄筋質量減少量をファラデーの法則によって計算する。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した。腐食生成物

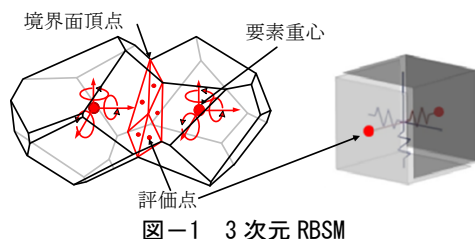


図-1 3次元RBSM

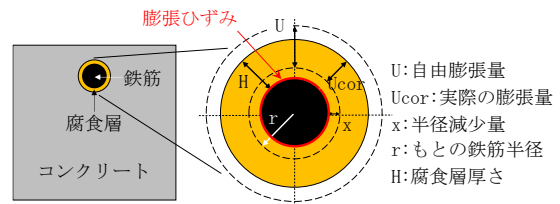


図-2 腐食層のモデル

*1 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻修士課程 (学生会員)

*2 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻教授 博士(工) (正会員)

*3 Lecturer, Dept. of Civil Engineering, Syiah Kuala University, Mr. E.

*4 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻助教 博士(工) (正会員)

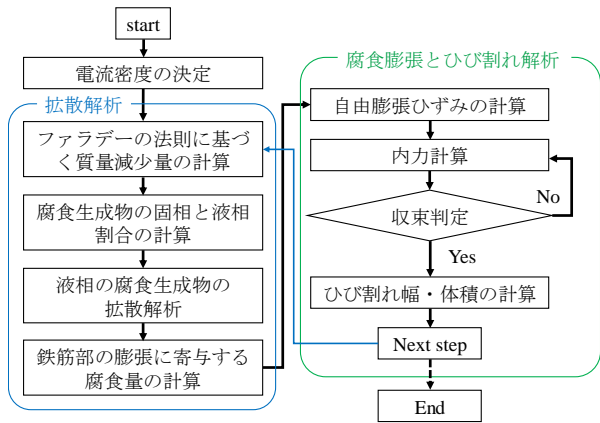


図-3 解析のフロー

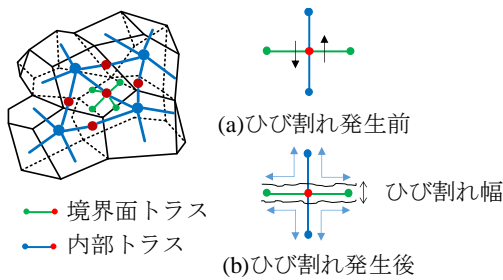


図-4 トラスネットワーク

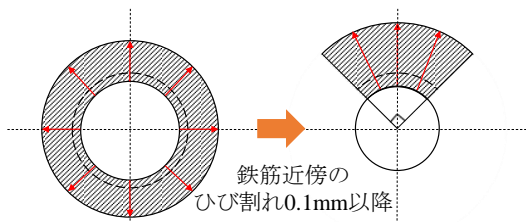


図-5 腐食の局所化モデル

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拡散解析を行っている。拡散解析には、図-4に示すトラスネットワークモデルを用いて行い、腐食生成物のコンクリート中の細孔への浸透と、ひび割れ部での移動を表現している。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-2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た。また、既往の研究¹⁰⁾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された。そのため、かぶり面方向の鉄筋近傍のひび割れ幅が0.1mm以上になった時、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)。その他の詳細は既往の文献⁷⁾を参考して頂きたい。

2.2 実験との比較

既往の研究⁷⁾の電食実験と比較して、本研究で使用した解析モデルの妥当性を検討した。使用した解析モデル

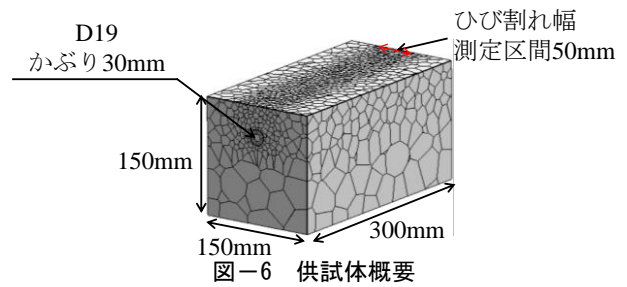


図-6 供試体概要

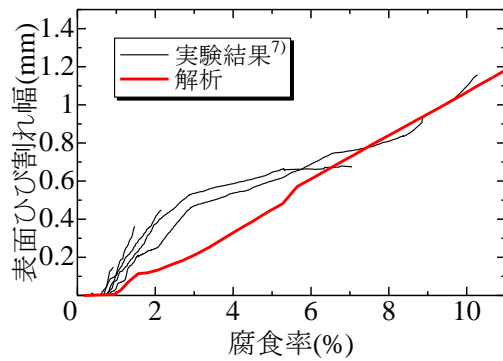


図-7 表面ひび割れ幅の進展

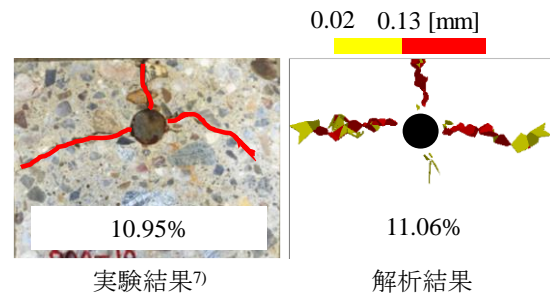


図-8 内部ひび割れの進展

を図-6に示す。供試体は、鉄筋かぶり30mmでD19鉄筋が配置された150mm×150mmの断面を有する長さ300mmの供試体である。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、その他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。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、電流密度は電食実験と同様の $900 \mu A/cm^2$ とした。図-7に本解析モデルの電食試験で得られた腐食率(質量減少率)と表面ひび割れ幅の関係を示す。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角方向50mmの区間の変位をひび割れ幅としている(図-6)。次章以降も同様の表面ひび割れ幅の定義とした。図-7より、腐食率1.5%から6%までのひび割れ幅は解析のほうが小さくなるが、腐食率がそれより大きい時のひび割れ進展挙動は実験値と概ね一致することが示された。図-8に電食実験と本解析における内部ひび割れの進展を示す。電食実験の腐食率は10.95%、解析の腐食率は11.06%と概ね等しい腐

食率が比較している。図より、本解析は内部ひび割れ進展挙動も妥当に評価していることが分かる。

3. 腐食領域の長さがひび割れ幅分布に及ぼす影響

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の、表面ひび割れの長さとの関係を解析的に検討した。

3.1 解析モデル

解析対象としては、2章で解析の妥当性を示した供試体と同様（鉄筋かぶり30mm、鉄筋D19、断面寸法150×150mm）の断面を有するものとした。腐食領域の長さの影響を検討するため、供試体長さは800mmと長くした。腐食領域の長さは図-9に示す赤色の領域であり、部材中央を中心として、100、200、400、600、800mmと変化させた。なお、腐食時に与えた腐食領域の電流密度は2章で解析の妥当性が検証された $900\mu A/cm^2$ と同様にした。

3.2 鉄筋全長が腐食した場合

図-10に、鉄筋全長が腐食しその平均腐食率が3、5、7.5、10%時の供試体長さ方向の表面ひび割れ幅分布(実線)と、腐食率の分布(点線)を示す。一様な腐食速度を仮定しているが腐食率は場所によってランダムにばらつく傾向を示した。これは、本解析ではVoronoi分割を用いた腐食解析モデルであるため、要素のランダムさにより鉄筋表面や周辺のひび割れ幅がばらつく。その影響により、鉄筋表面の有効電流量や腐食生成物の移動もばらつきが生じた結果である。平均腐食率3%時は、最小腐食率が2.74%、最大腐食率が3.31%であり、ばらつきは約

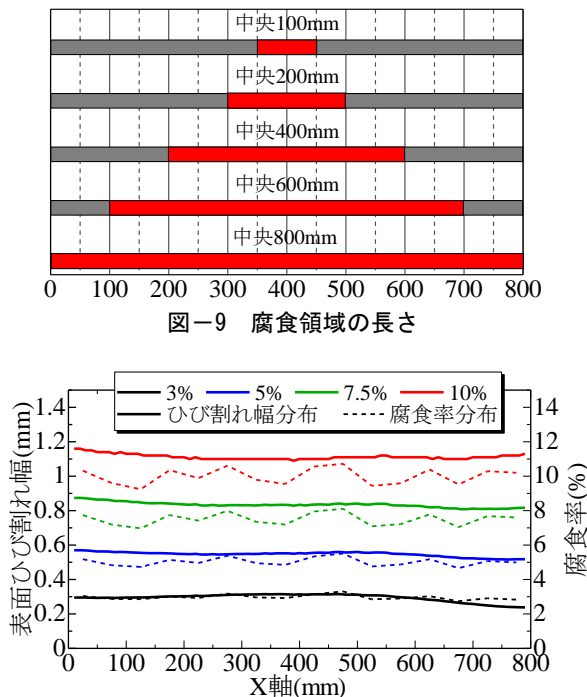


図-10 表面ひび割れ幅と腐食率分布

0.6%程度であった。一方、平均腐食率10%時は、最小腐食率が9.24%、最大腐食率が10.72%であり、ばらつきは約1.5%程度であり、腐食率のばらつきは、平均腐食率の増加に伴って大きくなる。

一方、ひび割れ幅の分布では、平均腐食率3%時は、最小ひび割れ幅が0.24mm、最大ひび割れ幅が0.32mmであり、ばらつきは0.08mmであった。平均腐食率10%時は、最小ひび割れ幅が1.09mm、最大ひび割れ幅が1.16mmであり、ばらつきは0.07mmであった。ひび割れ幅のばらつきは、平均腐食率によらず0.1mm以下であった。

この結果は、腐食率のばらつきが1.5%程度のランダムな腐食率の分布では、表面ひび割れ幅の分布への影響は小さいことを示している。

3.3 鉄筋の一部が腐食した場合

図-11に腐食領域の平均腐食率(以下、平均腐食率)が3、10%時の、腐食領域長さ100、200、400、600、800mmのケースの表面ひび割れ図を示す。図中には赤い矢印で腐食領域を示している。図より、表面ひび割れは、腐食領域よりも長い領域で発生すること、腐食領域600mm以下では、腐食率が大きくなると表面ひび割れ先端近傍において供試体側面に向かって斜め2方向に進展すること

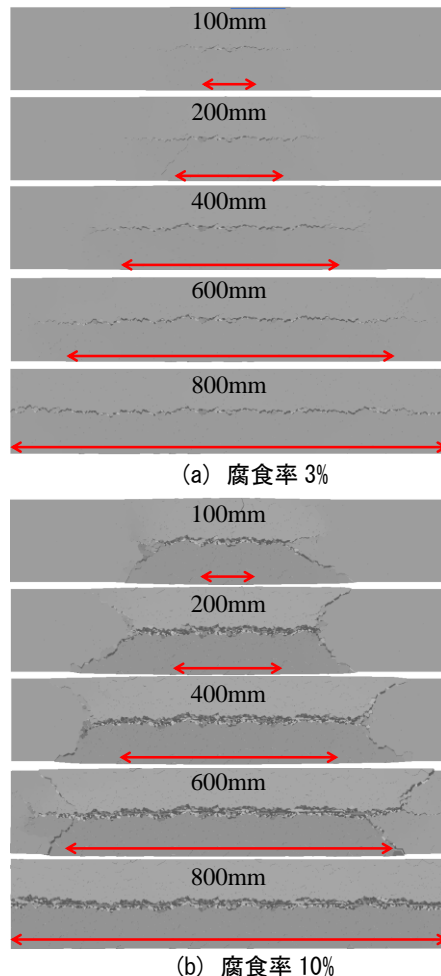


図-11 表面ひび割れ図(倍率=10)

が示された。

図-12に腐食領域の長さ 100, 400mm のケースの、平均腐食率 3, 5, 7.5, 10%時の表面ひび割れ幅分布を示す。図中の赤いハッチングは腐食領域を示す。図より、腐食領域の長さが異なっても、ひび割れ幅の分布は同様の傾向であった。すなわち、腐食領域中央のひび割れ幅が最大となり、腐食領域の外側 50~80mm 程度までひび割れ幅は徐々に小さくなる。それよりも外側では急激にひび割れ幅が減少する挙動を示す。また、いずれの腐食領域の長さにおいても、腐食率が小さい 3%時で発生したひび割れ長さは腐食率が増加しても変わらない傾向を示し、腐食率とひび割れ長さに関係がないことが示された。

図-13に異なる腐食領域に対する平均腐食率 10%時の腐食領域外に進展している表面ひび割れ長さの変化を示す。なお、ひび割れ進展長さは腐食領域端部からひび割れ幅 0.05 mm 以上の位置までとし、両側の平均の値とした。図より、腐食領域長さが 100mm の場合は腐食領域の端から表面ひび割れが 100mm 程度進展し、最も表面ひび割れ長さへの影響が大きいことが示された。腐食領域が 400mm までが長くなるとひび割れ進展長さは 70 mm まで徐々に小さくなり、600mm では若干増加した。全体の傾向として、ひび割れ進展長さは 70~105mm 程度であり、腐食領域長さの影響は小さいことが確認できる。

図-14に異なる腐食領域長さに対する、腐食領域中央位置のひび割れ幅(最大ひび割れ幅)を全長腐食した場合(腐食領域長さ 800mm)の部材中央のひび割れ幅で正規化した値を示す。図より、腐食率の変化によらず、腐食領域長さの増加に伴って最大ひび割れ幅比が増加する傾向を示し、腐食領域長さ 400mm 以上で最大ひび割れ幅は全長腐食のひび割れ幅に近くなった。また、腐食率の増加に伴い、最大ひび割れ幅比は増加する傾向を示した。

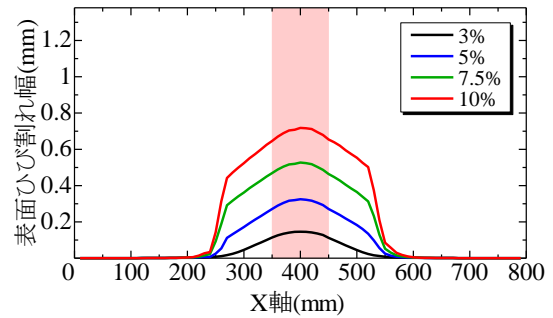
以上の結果から、表面ひび割れ長さは、腐食率が小さい段階で決定し、腐食率が増加しても変化しないこと、表面ひび割れは腐食領域の外側に 70~105mm 程度進展するが腐食領域長さの影響は小さいこと、腐食領域長さが 400mm 程度以上では最大ひび割れ幅は腐食領域に関わらず概ね一定となることが示された。

4. 腐食領域の分布がひび割れ幅分布におよぼす影響

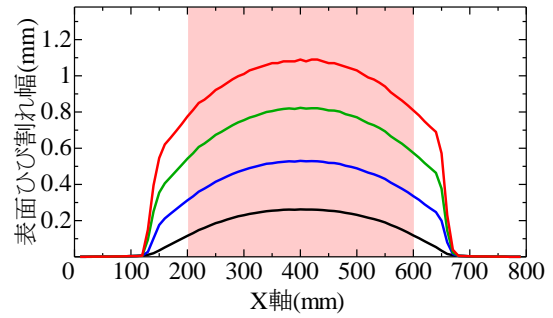
本章では、腐食領域がある間隔で分布した場合を仮定し、腐食領域間隔と腐食率の差を変化させた場合の表面ひび割れ幅分布を解析的に検討した。

4.1 解析モデル

対象とした部材は 3 章と同様である。図-15に各ケースの腐食領域分布を示す。Case1 は腐食領域長さを 100mm とし、その間隔を 300mm とし、腐食領域以外は



(a) 腐食領域長さ100mm



(b) 腐食領域長さ400mm

図-12 表面ひび割れ幅分布

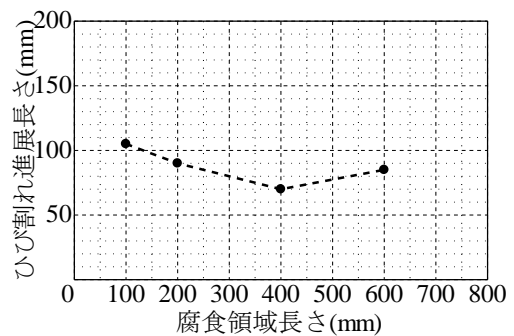


図-13 腐食領域外への表面ひび割れ進展長さ

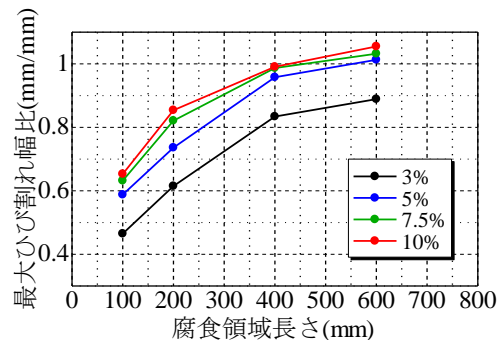


図-14 全長腐食と部分腐食の最大ひび割れ幅比

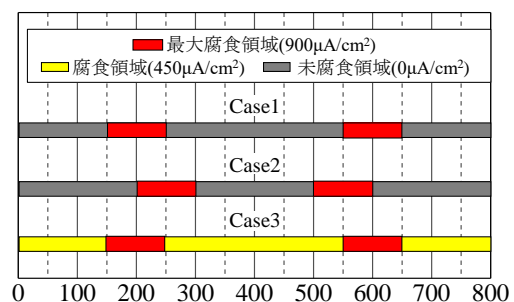


図-15 各ケースの腐食領域の分布

未腐食とした。腐食領域の間隔を 300mm としたのは、3章の腐食領域長さが 100mm の検討結果より、それぞれの腐食領域から発生する表面ひび割れが連結しにくい状況を想定したためである。Case2 は、腐食領域を 100mm とし、その間隔を 200mm とした。これは Case1 に対して、腐食領域からの表面ひび割れが連結する状態を想定したためである。Case3 は、鉄筋全長に渡ってある程度の腐食が生じた上で、Case1 と同様に局部的に大きな腐食が生じた場合を想定したものである。そのため、図中の赤色領域の腐食は Case1 と同じ量になるとし、それ以外はその半分の腐食が生じるとした。腐食量については解析のインプットデータである電流密度で制御し、黄色領域は赤色領域の半分の $450 \mu A/cm^2$ とした。

4.2 腐食領域の間隔によるひび割れ分布の影響

図-16 に Case1 の平均腐食率 3, 5, 7.5, 10% 時の表面ひび割れ幅分布(実線)を示す。図の赤色は腐食領域に対応している。また、図中には点線で図-12(a) で示した 3章で得られた腐食領域長さ 100mm の表面ひび割れ分布を示す。表面ひび割れ幅は解析モデルで想定した通り、それぞれの腐食領域を中心としてひび割れ幅が独立して増加する傾向を示した。実線と点線の形状と値はほぼ一致することが確認できる。したがって、ある程度腐食領域が離れば表面ひび割れは連結せず、相互の腐食領域が干渉しないことが示された。

腐食領域の間隔が小さい Case2 の平均腐食率 3, 5, 7.5, 10% 時のひび割れ分布(実線)を図-17 に示す。図中には点線で図-12(b) の腐食領域長さ 400mm の表面ひび割れ分布を示す。腐食率 3% の場合はそれぞれの腐食領域を中心ひび割れ幅が分布する挙動を示す。その形状と値は腐食領域長さ 100mm の図-12(a) のひび割れ分布と近いものであった。一方腐食率が 5% 以上になると、それぞれの腐食領域から発生したひび割れが連結し、未腐食領域を含む腐食領域間に挟まれた領域でひび割れ幅はほぼ一定になった。実線と点線はひび割れが連結した平均腐食率 5% 以上では概ね一致した。

図-18 に Case3 の最大腐食領域の平均腐食率 3, 5, 7.5, 10% 時の表面ひび割れ分布を示す。図中の黄色のハッチングは赤いハッチングの半分の腐食量を与えた領域を示す。Case3 の場合は、鉄筋に一樣の腐食が発生した上で、局所的な腐食が発生することを想定しているの、一樣な腐食の影響で 3章の全長腐食のケースと同様に、部材全長にわたり表面ひび割れが発生する。全長に渡ってひび割れが発生する場合、腐食率が分布しても表面ひび割れはそれほど分布しない結果であった。最大腐食領域の平均腐食率が 10% の場合でも供試体長さ方向におけるひび割れ幅の差は 0.2mm 以下であった。

図-19 に最大腐食領域の平均腐食率が 10% 時の各ケ

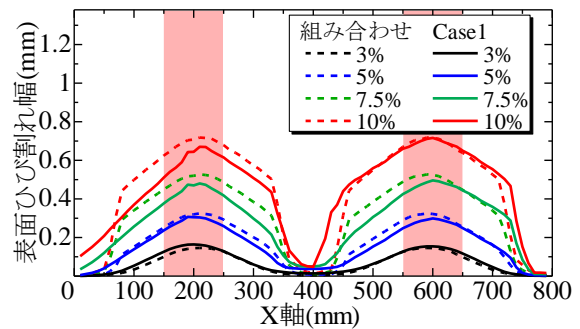


図-16 Case1 の表面ひび割れ幅分布

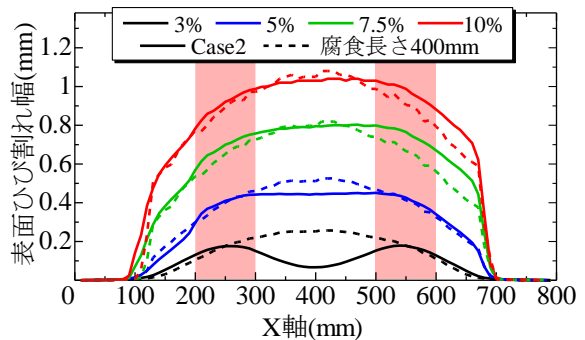


図-17 Case2 の表面ひび割れ分布

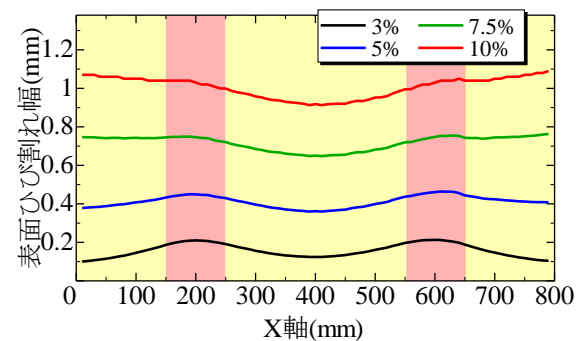


図-18 Case3 の表面ひび割れ分布

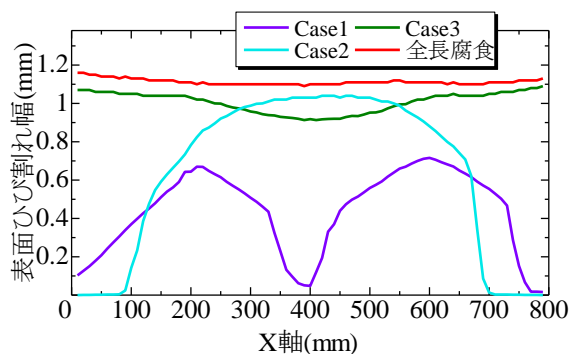


図-19 平均腐食率 10% 時の各ケースの表面ひび割れ分布

ースのひび割れ幅分布を示す。また、比較のため同腐食率における鉄筋全長が腐食した時のひび割れ幅分布も示す。ひび割れが連結しない Case1 では鉄筋全長を腐食させた場合のひび割れ幅と比べて小さい値となる。しかし、腐食領域に挟まれた未腐食領域上でひび割れが連結する Case2 では、最大ひび割れ幅は全長腐食のひび割れ幅に

近くなることわかる。ある程度の腐食を全長に発生させた Case3 も Case2 と同様であった。また Case2 と Case3 の最大ひび割れ幅は等しいものであり、鉄筋全長が腐食した時との差は 0.05mm 程度であった。

以上より、腐食率が分布していても、表面ひび割れが連結した場合は、最大ひび割れ幅は腐食の分布形状や腐食率の差によってあまり影響されず、最大腐食率に依存した値を示すことが示唆された。

5. まとめ

本研究では、腐食生成物の移動と拡散を考慮した腐食解析モデルを用いて、腐食が鉄筋軸方向に分布した場合の腐食率分布と表面ひび割れの長さや幅の関係を検討した。得られた知見を以下に示す。なお、本解析では断面 150×150mm で D19 鉄筋をかぶり 30mm で配置された供試体に対して検討を行った。腐食ひび割れは、断面幅、かぶり、鉄筋径に影響されることが知られており、得られた結果は、限定的なものである。一般的な結論を得るため、幅広いケースでの検討が今後必要と考えている。

- (1) 腐食率が 1.5%程度 の範囲で軸方向にランダムにばらついていても、表面ひび割れ幅への影響は小さいことが示された。
- (2) 部分的に腐食が生じた場合の腐食領域外への表面ひび割れ進展長さは、腐食領域長さの影響は小さく、腐食領域 100～600mm の範囲では 70～105mm 程度であることが示された。また表面ひび割れ長さは、腐食率が大きくなってほとんど変化しないことが示された。
- (3) 腐食領域が分布する場合、領域の間隔がある程度大きいと腐食は腐食領域を中心に独立して分布するが、間隔が狭くなるとそれぞれの腐食領域からのひび割れが連結して、未腐食領域を含む領域全体が腐食した場合と同様のひび割れ幅進展となることが示された。
- (4) 各腐食領域からのひび割れが連結した場合、腐食率が分布しても最大ひび割れ幅は、腐食の分布形状や腐食率の差によってあまり影響せず、最大腐食率に依存した値を示すことが示唆された。

謝辞

本研究の一部は、内閣府総合科学技術・イノベーション

ン会議の「SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」(管理法人:NEDO), ならびに科学研究費補助金(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。

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) 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
- 8) 岩本拓也ら: ビーム・アーチ機構に基づく RC はりのせん断抵抗メカニズムに関する一考察, 土木学会論文集 E2, Vol.73, No.1, pp.70-81, 2017
- 9) Tran, K. K. et al.: Analysis of crack propagation due to rebar corrosion using RBSM, Cem. Concr. Compos., Vol.33, pp.906-917, 2011
- 10) 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