

論文 鉄筋の腐食過程と腐食した鉄筋の力学特性の数値解析的評価手法の開発

青山 達彦^{*1}・中村 光^{*2}・上田 尚史^{*3}・国枝 稔^{*4}

要旨：本研究では、鉄筋の腐食過程と腐食した鉄筋の数値解析的評価手法の開発の第一段階として、鉄筋単体の電食実験を対象として、開発した数値解析の手法の適用性の検討を行った。電食実験では、各種の境界条件を用いて任意の領域に腐食を生じさせ引張試験によって、腐食領域の相違による力学特性への影響を評価した。次に、開発した非構造的な電気化学的問題と構造的な問題という異なる物理現象を統合可能な数値解析的解析手法によって電食実験を評価した。解析においても実験と同様な腐食過程および力学特性を示し、開発した数値解析の解析手法の適用性を示した。

キーワード：局部腐食、電位分布解析、半径減少量、剛体バネモデル

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物は、鉄筋周囲の腐食生成物の膨張によって引き起こされるひび割れや、鉄筋の断面減少により、構造物の性能が低下する。特に、鉄筋の断面減少による剛性、降伏応力、破断ひずみなどの鉄筋の力学特性の変化は、構造物の安全性に直接的に影響を及ぼすものであり、適切な評価が非常に重要である¹⁾。従来、腐食による鉄筋の力学特性の評価は実験的に行われるのがほとんどであった²⁾。しかしながら、長期的に構造物を適切に維持管理するためには数値解析的手法により、劣化進行予測を行いながら、鉄筋の力学特性の変化と構造性能への影響の評価が望まれる。

そこで本研究では、鉄筋の腐食過程と腐食した鉄筋の力学特性の数値解析的評価手法の確立の第一段階として、鉄筋単体を対象とした数値解析の手法の開発を行った。具体的には、鉄筋単体に対し各種の境界条件を用いた電食実験を行い、任意の領域に腐食を生じさせ、引張試験によって力学特性を評価した。次に、非構造的な電気化学的問題と構造的な問題という異なる物理現象を評価可能な開発した数値解析の手法を用いて、実験により得られた鉄筋の腐食過程および腐食した鉄筋の力学特性を評価した。具体的には、腐食量と質量減少率の関係、腐食した鉄筋の半径減少量、応力 - ひずみ関係、ひずみ分布を評価した。

2. 腐食領域を変化させる鉄筋単体の電食実験

2.1 実験概要

鉄筋単体の実験供試体の概要を図-1に示す。実験供試体は長さ250mm、直径65mmの塩ビパイプ中央に、φ19のみがき鋼棒が1本配置された供試体である。腐食

対象区間は200mmとし、腐食対象区間外はエポキシ系防錆塗料を塗布することで防錆処理を行った。塩ビパイプには、3%塩化ナトリウム水溶液を電解液として充填し、内側表面に銅板をはりつけた。本実験では銅板を配置する位置を変化させることで電流の流れを制御し、鉄筋に生じる腐食分布を変化させるようにしている。具体的には、図-2に示すように、鉄筋軸方向および周方向に一樣に腐食が生じるように、塩ビパイプ全周にわたり銅板を配置したUシリーズ、軸方向には一樣であるが、周方向の1/4の一部分で腐食が進行するように塩ビパイプの円周の1/4のみ銅板を配置したQシリーズ、周方向には一樣であるが、軸方向中央部で腐食が進行するように、

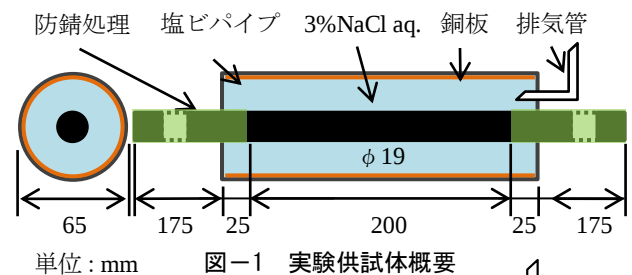


図-1 実験供試体概要

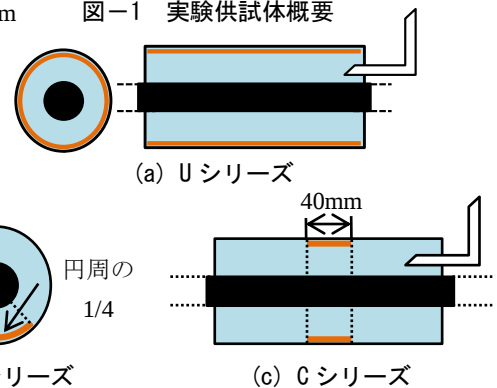


図-2 銅板の配置位置

*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教授 博士(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助教 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 実験シリーズ

	Uシリーズ			Qシリーズ			Cシリーズ		
ケース名	U-3	U-5	U-10	Q-3	Q-5	Q-10	C-3	C-5	C-10
目標質量減少率 (%)	3.0	5.0	10.0	3.0	5.0	10.0	3.0	5.0	10.0
実質量減少率 (%)	2.8	4.9	9.8	2.7	4.6	10.3	2.8	4.8	9.7

供試体中央 40mm の周方向のみに銅板を配置した C シリーズを用いて実験を行った。

実験は、供試体を水平に設置したのち、鉄筋側をアノード極、銅板側をカソード極に接続し、定電流電源装置を用いて 0.5A の電流を通電させた。また、各シリーズに対し目標質量減少率を 3%、5%、10% とし、腐食程度および腐食領域の違いによる力学特性の変化を評価できるように実験を計画した。実験シリーズ一覧を表-1 に示す。併せて、通電終了後の実質量減少率も示しておく。なお、表-1 に示すように、U シリーズにおいて目標質量減少率 3、5、10% である場合を U-3、U-5、U-10 (他のシリーズも同様) として以下記述を行う。通電終了後は、鉄筋単体を取り出し、10% クエン酸水素 2 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。

半径減少量は、鉄筋軸方向に、塩ビパイプに対して周方向の上下左右に対応する位置において、精度 0.1 μ m のレーザー変位計を用いて計測を行った。

鉄筋引張試験においては、腐食対象区間の鉄筋軸方向に 20、60、100、140、180mm の位置で、供試体を水平に設置した際の鉄筋の両側面に 2mm のひずみゲージを貼りひずみを計測した。

2.2 積算電流量と質量減少率の関係

U シリーズ、Q シリーズ、C シリーズにおける積算電流量と質量減少率の関係を図-3 に示す。図において実線はファラデーの法則から得られた計算値である。みがき鋼棒は、腐食に対して理想的な状態であり、通電開始とともに腐食反応が生じるため、各シリーズにおいて図に示すように、ファラデーの法則に従う結果となった。また、定電流電源装置によって一定の電流を通電しているため、シリーズによる違いは確認できなかった。

2.3 半径減少量

半径減少量分布の一例として、質量減少率が 5% の各シリーズの測定結果を図-4 に示す。Upside, Downside は水平に供試体を設置した際の鉄筋上下面、Side1 および Side2 は両側面の半径減少量である。U シリーズでは、鉄筋軸方向および周方向において一様に半径が減少している傾向を示した。Q シリーズでは軸方向では一様であるが、周方向に対して鉄筋上部、鉄筋左右、下部の順に半径減少量が大きくなる傾向を示した。これは、銅板を

鉄筋下部付近に配置したことによって、鉄筋下部付近における見かけの抵抗値が小さくなったからであると考えられる。また、同様の理由によって、C シリーズでは、銅板を設置した軸方向中央付近で、半径減少が顕著にみられた。実験により任意の領域を腐食させることが可能であることが分かる。なお、各シリーズにおいて、鉄筋下部が上部よりも半径減少量大きい傾向を示すが、これは塩ビパイプを水平に設置して実験を行った際に、上部に電解液が充填されていなかったことが原因である。

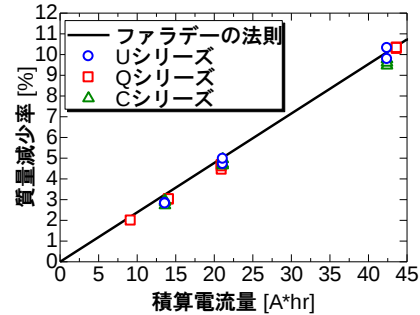


図-3 積算電流量と質量減少率の関係

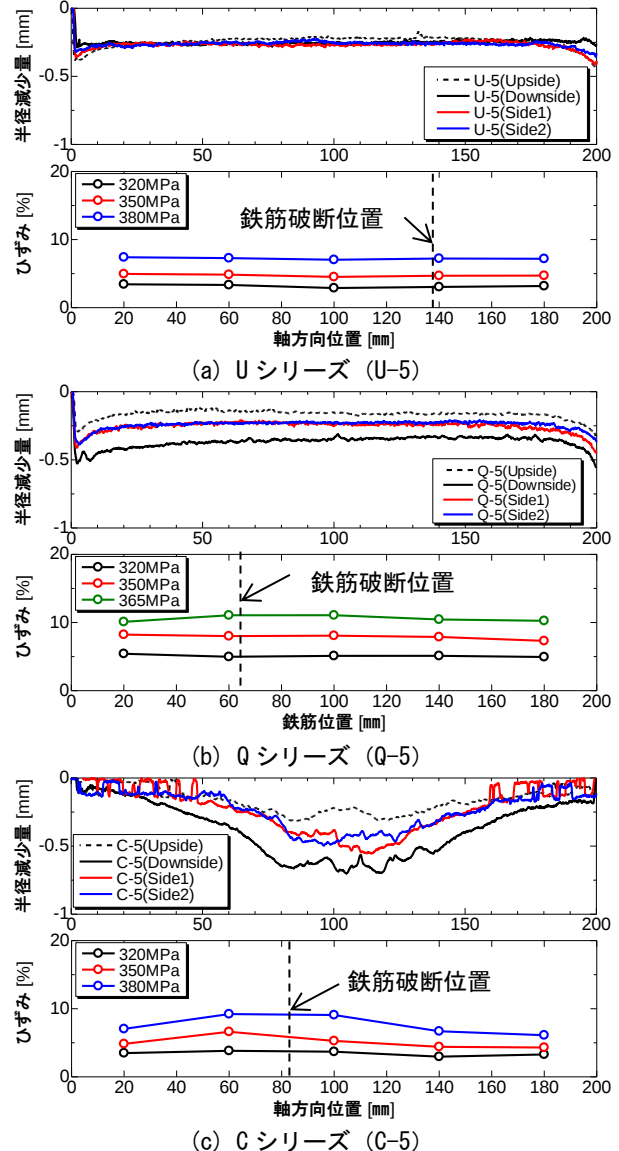


図-4 半径減少量およびひずみ分布

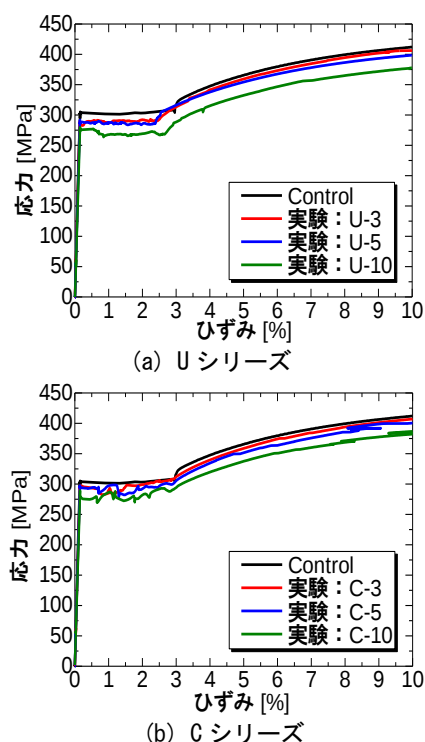


図-5 応力-ひずみ関係 (実験)

表-2 引張試験まとめ (実験)

	Control	U-3	U-5	U-10	C-3	C-5	C-10
剛性 (GPa)	202.4	203.3	197.7	184.6	201.2	198.6	187.8
降伏強度 (MPa)	301.5	288.0	291.9	281.6	295.2	295.9	281.6
引張強度 (MPa)	432.9	427.0	418.9	393.9	415.5	403.2	388.8
破断ひずみ (%)	29.8	29.8	29.6	23.7	20.4	20.8	21.2

2.4 力学特性

図-5 に腐食していない鉄筋 (以下, Control) および U シリーズ, C シリーズの応力 - ひずみ関係を示す。応力は, 腐食前の断面積で除した値とし, ひずみは, 腐食領域に等間隔に貼付したひずみゲージの値の平均値としている。また, それぞれの剛性, 降伏強度, 引張強度, 破断ひずみを表-2 に示す。なお, 破断ひずみは 8D 区間の伸び量から求めた。U シリーズ, C シリーズとも, 質量減少率が大きくなるとともに剛性, 降伏強度, 引張強度, 破断ひずみが低下する傾向を示した。また, U シリーズと C シリーズとの比較をすると, C シリーズのほうが, 明らかに破断ひずみが小さくなっており, 局所的な腐食領域の影響が現われている。図-4 に, ひずみ硬化域において, 応力が 320, 350, 380MPa の時点における鉄筋軸方向のひずみ分布を U-5, Q-5, C-5 のケースに対して示す。なお Q-5 については, 380MPa の時点で有効なひずみゲージが無く, 365MPa の時点のひずみ分布を示す。U-5, Q-5 において, 引張強度に達する直前の応力においてひずみ分布はほぼ一様である傾向を示す。こ

れは, U-5 および Q-5 における半径減少量分布に示されるように, 鉄筋軸方向に様に断面減少が生じているためであると考えられる。一方, C シリーズでは, 応力が増加するにつれて, 局所的にひずみが大きくなっていく傾向を示し, 図-4 における半径減少量分布に示されるように局所的な腐食性状が影響していると考えられる。

3. 鉄筋の腐食過程と力学特性の数値解析的評価手法

本研究では, 鉄筋の腐食過程および腐食した鉄筋の力学特性を統一的に評価できる数値解析的評価手法を提案している。この手法では, 非構造的な電気化学的問題, と, 構造力学的問題という異なる物理現象を統合しており, それらを時間ならびに空間領域の問題で考えることができる。非構造的な問題では, 3次元空間内の物質移動を簡易に評価でき, 構造学的問題と容易に統合できるトラスネットワークモデルを用いている。本手法では, ラプラス方程式を解くことで, 電位分布評価している。構造学的問題では, 不連続体力学の1つである3次元剛体バネモデルを用いている。剛体バネモデルを用いた理由は, 次のステップではコンクリート中に埋め込まれた鉄筋の腐食過程を評価することを予定しており, その際に腐食ひび割れを直接的に表す剛体バネモデルの利用を考えているためである。またトラスネットワークモデルについては拡散方程式を解くことで, 酸素や塩化物の分布も評価できるようになる。

3.1 解析概要

(1) 3次元剛体バネモデル (3D-RBSM)

RBSM³⁾では, 連続体は剛体要素の集合とみなされ, それぞれの要素は剛体要素境界面に配置された長さ 0 のバネによって連結されている。図-6 に示すように, 各要素内の任意点 (本研究では要素重心) に 6 自由度の 3次元剛体変位を設定し, 要素境界面上には, 表面力の評価点としての積分点を設定する。積分点には, 境界面法線方向および接線方向に, 垂直バネおよびせん断バネからなるバネ系を配置する (垂直バネが 1 個, せん断バネが

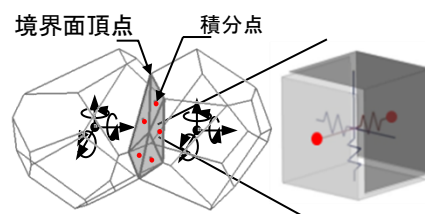


図-6 3次元剛体バネモデル

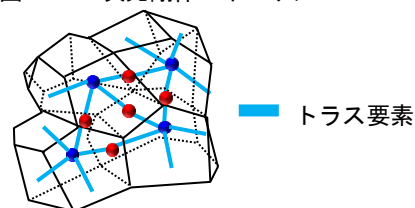


図-7 トラスネットワークモデル

2 個)⁴⁾。本モデルでは、鉄筋を剛体の集合体としてモデル化するため、垂直バネに後述する鉄筋の応力-ひずみ関係を導入している。

(2) トラスネットワークモデル

鉄筋および電解液中の電位分布を評価する手法として、トラスネットワークモデル⁵⁾を用いた。本モデルは、図-7に示すように各ボロノイ母点間を結ぶ3次元のトラスネットワークを設定し、各トラス間の一次元の物質移動問題を解くことで簡易に3次元空間内の物質移動を評価できる手法である。

(3) 鉄筋の構成モデル

鉄筋の構成モデルは、図-9に示すようなひずみ硬化域まで評価できるモデル⁶⁾を用いた。図-9に示すように、応力は、弾性域では線形的に増加し、降伏ひずみに達すると降伏強度で一定となる。さらに、ひずみ硬化が開始する時点のひずみ以降では、引張強度に漸近するように非線形に応力が増加していくモデルとなっている。

(4) 解析フロー

開発した手法は、前述の3D-RBSMとトラスネットワークモデルを統合することで、鉄筋の腐食過程および力学特性を評価するものである。図-10に本研究で開発した統合解析手法の解析フローを示す。

解析は、トラスネットワークモデルを用い、ラプラス方程式を解くことで電解液および鉄筋内の電位分布を計算する。得られた電位分布から、オームの法則により、腐食電流量を算定する。また、鉄筋の質量減少率をファラデーの法則により、算定する。図-10において、 ϕ は電位(V)、 D は電気伝導率($1/\Omega \text{ cm}$)、 I_{corr} は腐食電流密度(mA/cm^2)、 R は腐食層の電気伝導率($1/\Omega \text{ cm}$)、 W_r は腐食量(mg/cm^2)、 t は時間(s)、 M は鉄の原子量、 n は鉄イオンの当量(mol eq.)、 F はファラデー定数($\text{C}/\text{mol eq.}$)である。

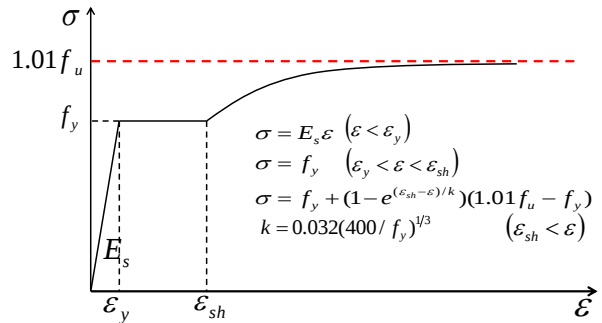
また、構造力学的問題としては、腐食解析によって求めた質量減少量から半径減少量を計算する。さらに半径減少量から、断面減少率を算出する。そして、鉄筋表面部分の剛体要素の断面減少を評価するために、要素剛性を断面減少に従うように変化させる。この手順により腐食分布に対応した断面減少分布を考慮でき、鉄筋腐食に伴う力学性能の低下を算出することになる。

4. 数値解析的評価手法の適用性

4.1 解析概要

開発した解析手法の適用性を示すために2章で行った実験を対象として解析を行った。図-11に解析モデルを示す。電解液の部分は要素寸法 4mm のボロノイ多角形要素⁷⁾を用い、鉄筋は16角形で、軸方向に40要素になるようにモデル化⁸⁾を行った。なお解析では実験における腐食対象区間の200mmのみの部分をモデル化した。

腐食解析では、鉄筋の電気伝導率は鉄の値を参考とし、 $1.0 \times 10^4 (1/\Omega \text{ cm})$ 、電解液の電気伝導率は海水の値を参考とし $1.0 \times 10^{-2} (1/\Omega \text{ cm})$ とした。また、鉄筋の端部に電位1(V)を与えることで、実験のアノード極を模擬し、さらに、カソード極を模擬し銅板設置位置において電位が0(V)となるように境界条件を設定した。鉄筋引張解析では、両端を固定し、変位を制御することで解析を行った。鉄筋の材料諸元は実験における Control 試験体の挙動に従うようにキャリブレーションを行った結果を用いた。



σ : 応力 (Mpa) ϵ_y : 降伏ひずみ
 ϵ : ひずみ ϵ_{sh} : 硬化開始ひずみ
 E_s : 剛性 (Gpa) f_u : 引張強度 (Mpa)
 f_y : 降伏強度 (Mpa)

図-9 鉄筋の構成モデル

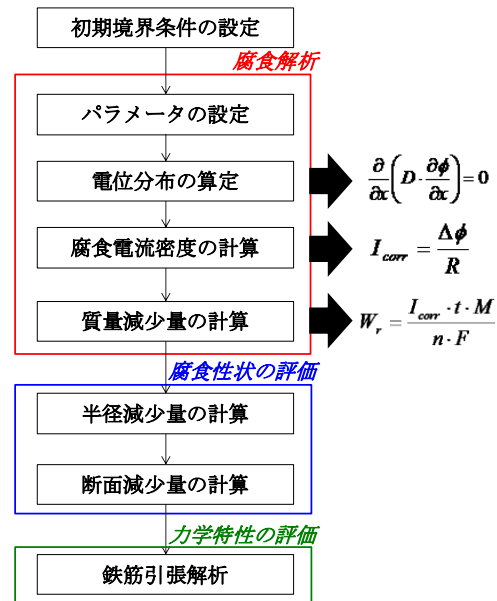


図-10 解析フロー

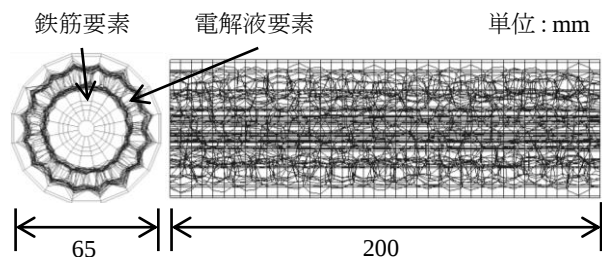


図-11 解析モデル

4.2 半径減少量

図-12 に、質量減少率が 5% の各シリーズの実験と解析を比較した結果を示す。なお解析値において U-5、C-5 のケースでは周方向に一様であるため上下、両端を区別していない。U-5 についてみると、実験値と解析値は概ね一致した分布を示していることが分かる。Q-5 では、Side1、2 において解析値は概ね適切に実験値を評価できている。Upside、Downside においては、Upside が解析値よりも実験値のほうが大きく、Downside では解析値のほうが大きくなる分布を示している。これは、塩ビパイプ上部に電解液が充填されず、電解液が銅版に接触せず、鉄筋上部において電位勾配が小さくなり、それに伴い電流量も小さくなったためと考えられる。しかしながら直径減少量でみると、実験値と解析値は同様の値を示しており、解析と同様に理想的な条件で実験を行えば、より

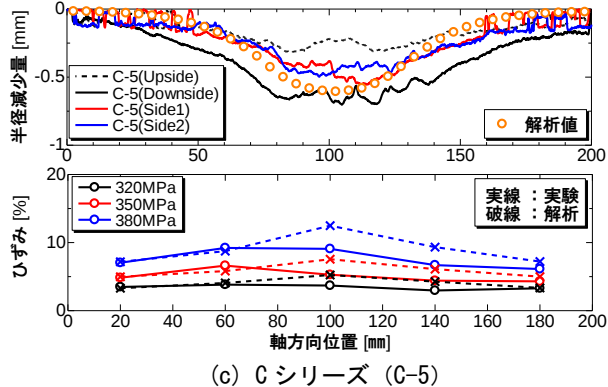
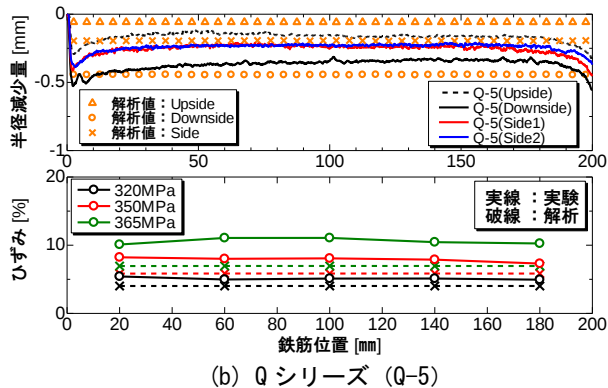
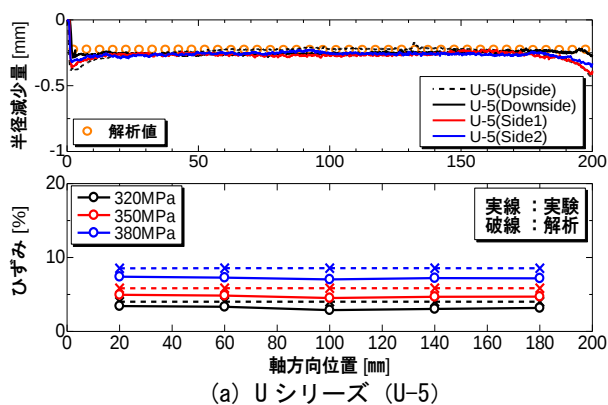


図-12 半径減少量およびひずみ分布
(実験と解析の比較値)

解析値は実験値に近づくと考えられる。また C-5 においても、解析値は概ね実験値を評価でき軸方向の腐食量の変化を適切に再現している。ただし、Upside において破線で示す実験値はプロットで示す解析値の半分程度の値を示している。これは Q-5 と同様の理由が考えられる。

4.3 力学特性

図-13 に、U シリーズおよび C シリーズにおいて質量減少率が 3%、5%、10% のケースに対して、それぞれの応力-ひずみ関係を実験値と解析値を比較して示す。解析値の応力とひずみの算定は、2.4 節で示した実験値の定義と同様に行った。なお併せて実験のみの結果も示しておく。U シリーズでは、弾性域、降伏棚、ひずみ硬化域において、実験値と概ね一致しており、一様な断面減少量とそれに伴う応力負担減少量を評価できていることが分かる。C シリーズの実験結果において、降伏棚で勾配が存在し応力が増加しながらひずみ硬化域に達する挙動がみられる。これは、相対的に半径減少量が多い範囲においてひずみ硬化が生じるためであると考えられる。C シリーズの解析結果においても早期のひずみ硬化挙動

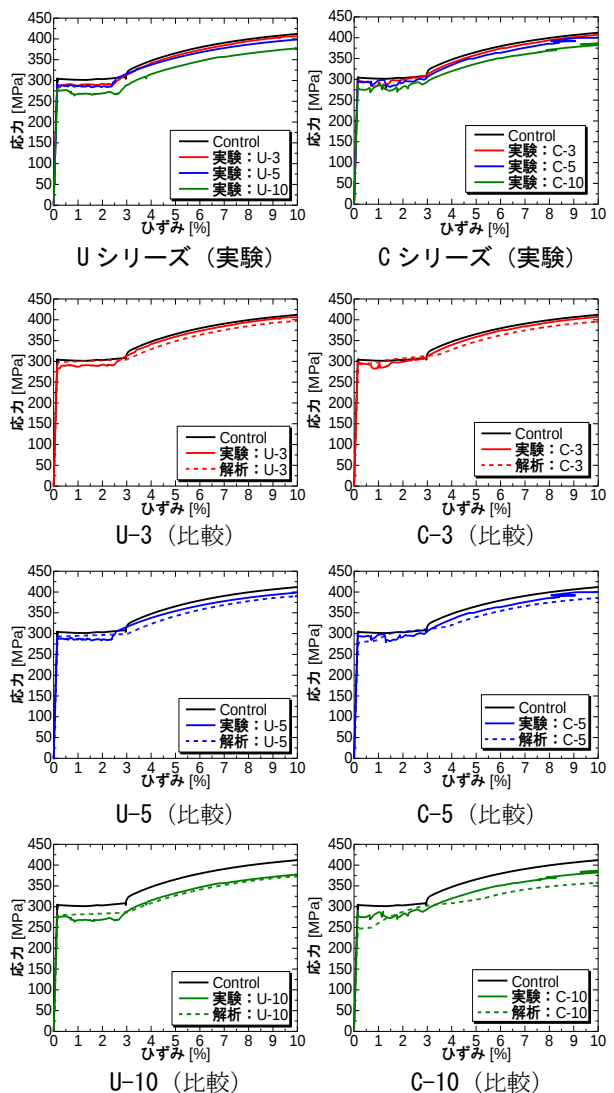


図-13 応力-ひずみ関係 (比較)

を確認することができ、弾性域、降伏棚、ひずみ硬化域において、実験値を概ね評価できていることがわかる。

5. まとめ

本研究では、任意の領域を腐食させる鉄筋単体の電食実験を行い、腐食性状の観察と、それに伴う力学特性の変化について検討を行った。さらに、非構造的な電気化学的問題と構造的な問題という異なる物理現象を統合可能な数値解析的手法を用いて、実験を評価し、開発した手法の適用性を確認した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 塩ビパイプを用いた供試体において、塩ビパイプに張り付ける銅板の位置を変化させることで、鉄筋単体に対し任意の腐食分布を与えることができる。なお今回は、みがき鋼棒を用いて実験を行った。
- (2) シリーズ C では、軸方向中央部の半径減少が大きく、それに伴い、一様に半径減少しているシリーズ U に対して、引張強度および破断ひずみが小さくなる傾向を示した。
- (3) 開発した解析手法を用いることで、銅板の位置を変えることで腐食分布を制御した実験において、腐食性状を適切に評価できることが示された。
- (4) さらに、開発した手法を用いることで、腐食した鉄筋の降伏強度、剛性、引張強度の低下を適切に評価できることが示された。特に、シリーズ C にみられる早期にひずみ硬化が始まる挙動も評価できることが示され、開発した数値解析的手法の適用性を確認した。

参考文献

- 1) 土木学会, 材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能, コンクリート技術シリーズ 71, 2006
- 2) 佐藤 孝史, 疋田 雅也, 倉知 星人, 小林 幸一: 電食と塩分による鉄筋の腐食が鉄筋の腐食性状に与える影響の比較, コンクリート工学, Vol.31, No.1, pp.1063-1068, 2009
- 3) Kawai, T: New discrete models and their application to seismic response analysis of structure, Nuclear Engineering and Design, Vol.48, pp.207-229, 1978
- 4) 山本佳士, 中村光, 黒田一郎, 古屋信明: 3 次元剛体バネモデルによるコンクリート供試体の圧縮破壊解析, 土木学会論文集, Vol.64, No.4, pp.612-630, 2008
- 5) Nakamura, H., Worapong, S., Yashiro, R. and Kunieda, M.: Time-Dependent Structural Analysis Considering Mass Transfer to evaluate Deterioration Process of RC Structures, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.4, No.1, pp.147-158, 2006
- 6) 岡村 甫, 前川 宏一: 鉄筋コンクリートの非線形性解析と構成則, 技報堂出版, p174, 1991
- 7) Bolander, J. and Saito, S.: Fracture Analysis using Spring Networks with Random Geometry, Engineering Fracture Mechanics, Vol.61, No.5-6, pp.569-591, 1998
- 8) 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, Vol.31, No.1, pp.1075-1080, 2009