

論文 腐食形態を考慮した腐食鉄筋の力学的特性に関する研究

金 螢来^{*1} 野口 貴文^{*2} 長井 宏憲^{*3}

要旨：コンクリート中での鉄筋の腐食形態を考慮した腐食鉄筋の力学的性能を FEM 解析で評価するための構成モデルを提案することを目的とする。そのため、コンクリート中における鉄筋腐食形態を定量化し、平均腐食率と局部最大腐食率に対応した腐食鉄筋の力学的性能を把握する。その結果に基づいて 1 本の腐食鉄筋での平均腐食率と局部最大腐食率との関係を求め、局部最大腐食率をパラメータとする指数関数的な鉄筋の構成モデルを提案する。

キーワード：腐食形態、局部最大腐食率、力学的性能、FEM 解析、構成モデル

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物において鉄筋はかぶりコンクリートの品質のばらつき、乾燥収縮や温度応力による初期ひび割れ、局所的な補修などにより部位ごとに腐食程度の違いが生じる。さらに鉄筋腐食が生じた同一部位に対してもかぶりコンクリートのひび割れ、塩分及び二酸化炭素など腐食劣化因子の進行速度の差によって鉄筋腐食程度は一定ではなく、局所化することが知られている。

コンクリート中での鉄筋腐食の局所化とそれに伴う鉄筋自体の力学性能および鉄筋コンクリートの構造性能に関するこれまでの研究は主に塩分腐食などのミクロセル腐食により生じる孔食に焦点を合わせて行われ、孔食係数や平均腐食率によって局部腐食を評価したことが多い^{1), 2)}。一方、マクロセル腐食により局所で集中的に発生する局部腐食に対する研究は少なく、孔食を含む局部腐食の形態を定量的に把握して鉄筋の力学的な性能にどのような影響を与えるかを提示した研究例はほとんどない。

そこで本研究ではコンクリート中での鉄筋の腐食形態を考慮した腐食鉄筋の力学的性能を FEM 解析で評価するための構成モデルを提案することに目的がある。そのために、まず腐食状

況によって様々なパターンが現れる鉄筋の腐食形態を 3 次元形状測定方法で定量化し、腐食形態と腐食鉄筋の力学的性能との関係を把握する。その結果に基づいて局部腐食を考慮した腐食鉄筋の力学的性能を FEM 解析で評価するための構成モデルを提案する。

2. 実験概要

2.1 実験因子及び水準

腐食鉄筋の 3 次元形状と力学的性能を測定するために、表-1 のように実験の因子と水準を設定した。様々な腐食形態を得るために促進腐食方法として電気腐食と塩分腐食とを選び、各々の促進腐食方法において局部的な腐食発生への影響を考慮して、かぶりコンクリートの初期ひび割れの有無も含めた。また、直径 13mm の異形鉄筋と丸鋼を対象として、3~30%程度の平均腐食率が得られるように実験を行った。

表-1 実験の因子と水準

実験因子	実験水準	水準数
促進腐食方法	電気腐食, 塩分腐食	2
ひび割れの有無	あり、なし	2
平均腐食率	3%, 5%, 10%, 15%, 30%	5
鉄筋の種類 (直径 13mm)	異形鉄筋, 丸鋼	2

*1 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 工修 (正会員)

*2 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 助教授 工博 (正会員)

*3 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 助手 工博 (正会員)

表-2 コンクリートの調合

セメント 種類	水 セメン ト比 W/C (%)	細骨 材率 s/a (%)	単位量 (kg/m³)				AE 減水 剤	ス ラン プ (cm)	空 気 量 (%)
			水 W	セメン ト C	細骨 材 S	粗骨 材 G			
普通	55	45.0	165	300	828	1035	C× 0.4%	21	3.0

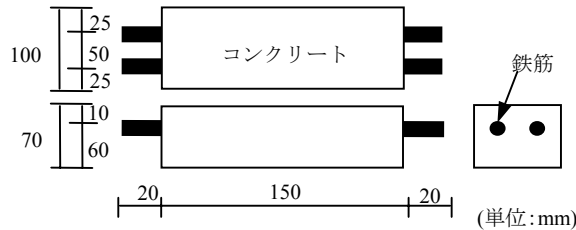


図-1 試験体の形状

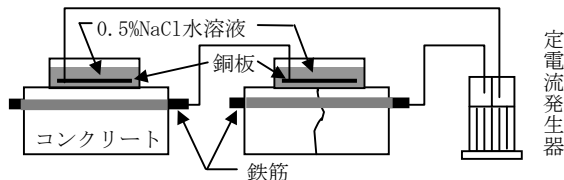


図-2 電気腐食試験

2.2 試験体の製作

鉄筋腐食試験体の製作に用いた使用材料として、コンクリートの調合は表-2の通りであり、鉄筋はSD295を使用した。試験体の寸法は図-1の通りである。鉄筋コンクリート試験体は材齢28日まで水中養生した。一方、塩分腐食の場合はコンクリートを練混ぜる際、6kg/m³の塩化ナトリウムを添加した。力学的性能評価のための中央区間(L=8D、Dは鉄筋の直径)以外の鉄筋の両端部は腐食しないよう、熱収縮ゴム及びガムテープで被覆処理した後、型枠の中に設置した。

2.3 鉄筋の促進腐食

電気腐食の場合は、図-2のようにコンクリート上面にプールを作り0.5%NaCl水溶液を入れて、銅板と鉄筋の間に1mA/cm²の腐食電流を流した。塩分腐食の場合には、70℃-RH95%を2日間、70℃-RH50%を3日間、塩水浸漬を2日間行うことを1サイクルとして、所定の回数を繰り返した。

2.4 鉄筋の力学的性能の試験方法

鉄筋の力学的性能評価のために、試験片はJIS Z 2201(金属材料引張試験片)に準じて用意し、JIS Z 2241(金属材料引張試験方法)によって試

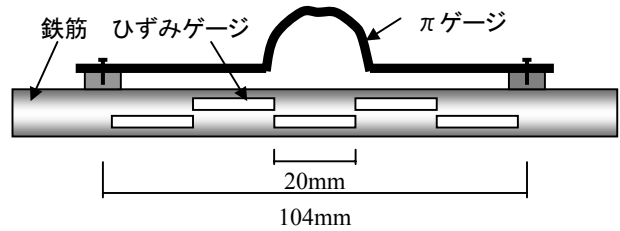


図-3 腐食鉄筋のひずみ測定方法

験を行った。特に、本研究では局部的に腐食程度のばらつきが大きい腐食鉄筋の力学的性能の発現特性を把握し、腐食形態が鉄筋の力学的性能にどのように影響を及ぼすかを評価するために、腐食鉄筋の伸びだけでなく図-3に示すように標点間の距離を分割して部位ごとのひずみ測定ができるように、腐食鉄筋表面にポリマー接着剤を塗り平らにしてゲージを張った。

2.5 鉄筋の腐食形態の評価方法

腐食鉄筋の局部的な侵食深さと断面積の分布を定量的に表現するために、プローブ接触式3次元表面形状測定器により表面形状を測定した³⁾。

測定間隔(ピッチ)はX軸方向が0.2mm、Z軸方向が0.5mm、Y軸方向が0.025mmとして測定した。測定においては、鉄筋を円周方向に45°ずつ回りながら上部表面を測定し、図-4のように鉄筋の断面中心を原点として鉄筋表面の各位置における測定点の座標を求めた。また、得られた45°区間ごとのデータを図-5のようにベクトル回転し組合せて1本の鉄筋全体の形状を表現した。それによって測定値の連続性を確保し、鉄筋長さ方向の全区間で0.5mm間隔に断面形状を求めた。

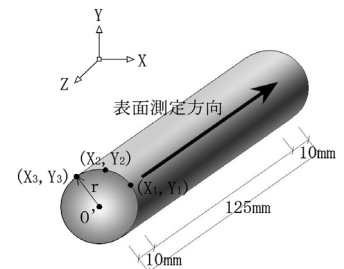


図-4 測定概念と座標

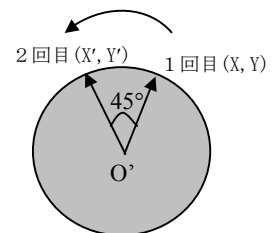


図-5 ベクトル回転

3. 鉄筋の腐食形態における特性

腐食鉄筋の3次元形状測定および分析を通じ

て、鉄筋1本の平均腐食率(腐食鉄筋の平均断面積減少分/健全鉄筋の平均断面積×100(%))とともに鉄筋長さ方向への位置別に断面積及び侵食深さの分布を求め、局部最大腐食率(腐食鉄筋の最大断面積減少分/健全鉄筋の平均断面積×100(%))と孔食係数(最大侵食深さ/平均侵食深さ)を算出した。

腐食鉄筋において局部最大腐食率はその鉄筋の平均腐食率の約1.8倍(電気腐食が2.06倍、塩分腐食が1.40倍)になった。また、図-6に示すように同一程度の平均腐食率でも塩分腐食より電気腐食の方で局部最大腐食率が大きくなった。これは既往研究結果とは異なる傾向であり、電気腐食においてプールを設けたコンクリートの上部一面から腐食させた影響が大きいと判断される。一方、実際条件においてもマクロセル腐食が発生する場合は平均腐食に比べ、もっと大きい局部最大腐食率が得られると予想される。

孔食係数は図-7のように、塩分腐食の場合平均腐食率3~20%で約4~8になり、平均腐食率が3%以下の場合10以上と大きい値を示した。

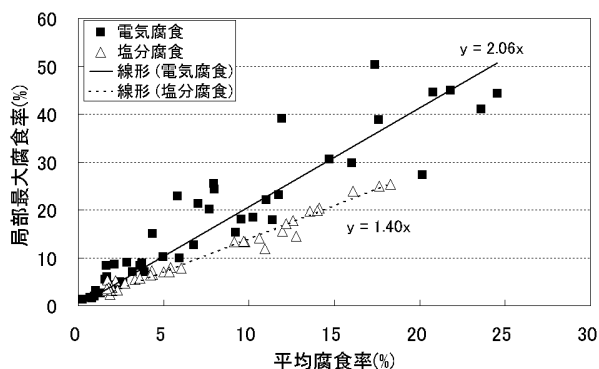


図-6 鉄筋の平均腐食率と局部最大腐食率

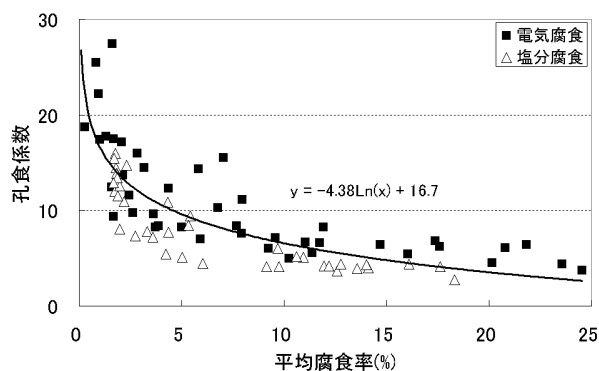


図-7 鉄筋の平均腐食率と孔食係数

4. 腐食鉄筋の力学的特性

鉄筋の部位ごとの腐食率の分布と腐食鉄筋の応力-ひずみの関係を図-8に示す。局部最大腐食率が同程度であるが、平均腐食率に差がある3本の丸鋼においては、部位ごとの腐食形態に応じて降伏時期が異なり、破断時のひずみも影響を受けることが分かる。また、1本の鉄筋の腐食率分布における局部最大腐食率により、その鉄

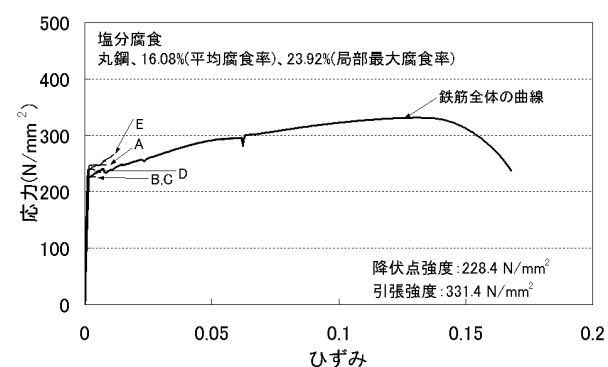
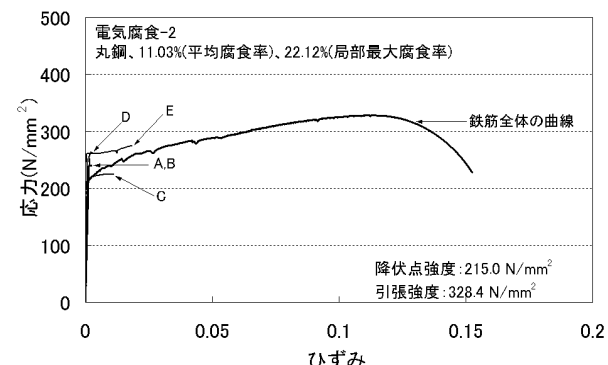
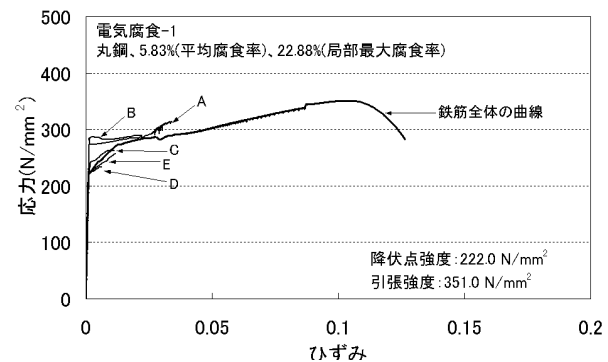
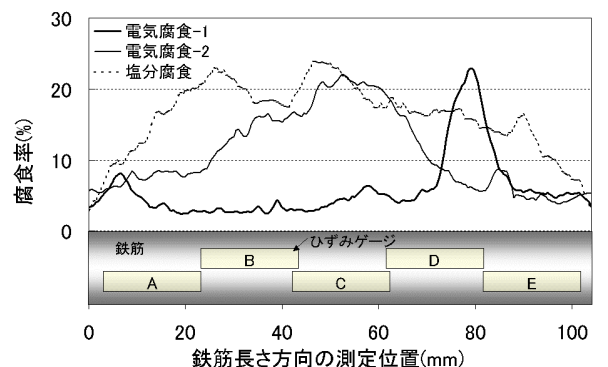
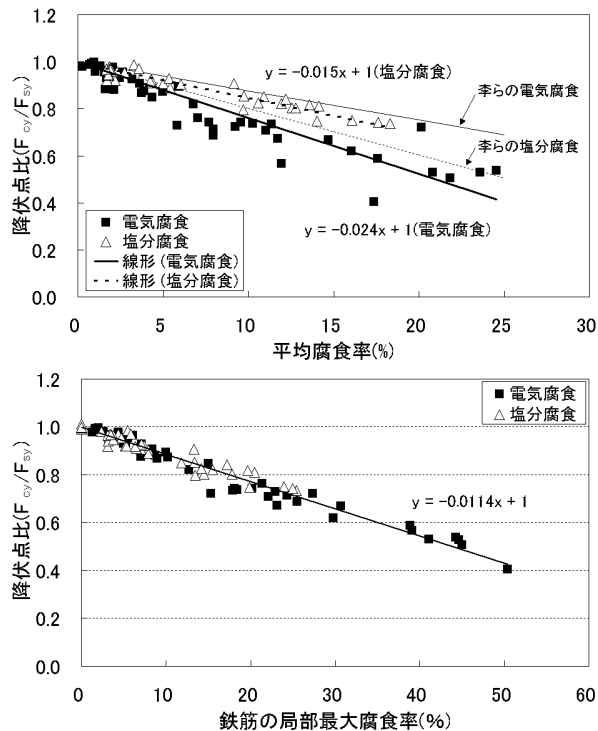


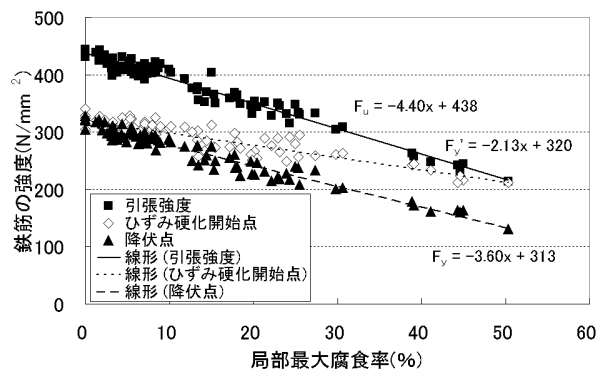
図-8 腐食形態と腐食鉄筋の応力-ひずみ曲線



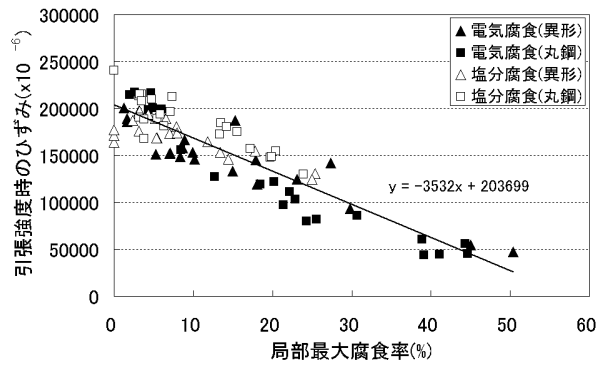
図－9 腐食鉄筋の降伏点比と腐食率の関係

筋の降伏点が決められることが分かる。更に、図－9 に示すように腐食による降伏点比の変化は平均腐食率より局部最大腐食率との相関関係が高いので、本研究では局部最大腐食率によって腐食鉄筋の力学性能を評価することにした。

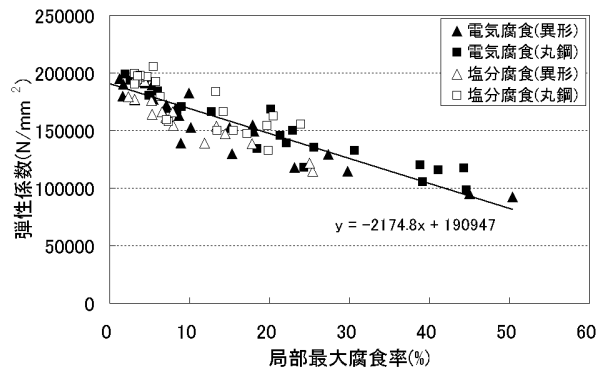
図－10～図－12 に腐食鉄筋の局部最大腐食率と強度(引張強度、ひずみ硬化開始点強度、降伏点強度)、引張強度時のひずみ及び弾性係数との関係を示す。局部最大腐食率と力学的性能の低下とは高い相関関係を持ち、ひずみ硬化開始点強度以外の力学的性能の低下率が局部最大腐食率の増加率より多少大きく、特に引張強度時ひずみの低下率が大きくなった。



図－10 局部最大腐食率と鉄筋強度との関係



図－11 局部最大腐食率と引張強度時ひずみ



図－12 局部最大腐食率と弾性係数との関係

一方、局部最大腐食率の増加に伴う降伏点強度及びひずみ硬化開始点強度の低減程度には図－10 のように大きな差が確認された。ここで、局部最大腐食率というのは、図－8 に示したように 1 本の鉄筋の腐食率分布において最大腐食率となる狭い領域の腐食率のことであり、その領域から降伏が生じて降伏領域が広がって行くので、腐食鉄筋の降伏点と局部最大腐食率とは密接な関係がある。それに対してひずみ硬化開始点は最後に降伏する領域の腐食率と関連すると考えられる。従って、局部最大腐食率の増加による降伏点の低下に比べ、ひずみ硬化開始点の低下は小さくなったと判断される。そして、平均腐食率に比べて局部最大腐食率の影響が大きく、その局部最大腐食の領域が狭いほど、降伏点後のひずみ硬化率が大きくなると判断される。

以上の結果に基づき、健全鉄筋の値を基準とした腐食鉄筋の力学的性能の算定式を式(1)～式(5)に提示する。

$$E_{cs} = (1 - 1.139(\Delta W_{\max}/100)) \cdot E_{ss} \quad (1)$$

$$F_{cu} = (1 - 1.00(\Delta W_{\max}/100)) \cdot F_{su} \quad (2)$$

$$F_{cy}' = (1 - 0.66(\Delta W_{\max}/100)) \cdot F_{sy}' \quad (3)$$

$$F_{cy} = (1 - 1.14(\Delta W_{\max}/100)) \cdot F_{sy} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{cu} = (1 - 1.73(\Delta W_{\max}/100)) \cdot \varepsilon_{su} \quad (5)$$

ここで、 $\Delta W_{\max}$ は局部最大腐食率、 E_{cs} と E_{ss} は各々腐食鉄筋と健全鉄筋の弾性係数 (N/mm²)、 F_{cu} と F_{su} は腐食鉄筋と健全鉄筋の引張強度 (N/mm²)、 F_{cy}' と F_{sy}' は腐食鉄筋と健全鉄筋のひずみ硬化開始点強度 (N/mm²)、 F_{cy} と F_{sy} は腐食鉄筋と健全鉄筋の降伏点強度 (N/mm²)、 ε_{cu} と ε_{su} は腐食鉄筋と健全鉄筋の引張強度時のひずみである。

5. 腐食鉄筋の応力-ひずみ関係のモデル

5.1 既往のモデル

鉄筋コンクリートにおける鉄筋の構成則は鉄筋単体の特性とコンクリートとの付着作用による影響を考慮して数値モデル化される必要がある。ところで、解析プログラムでは鉄筋の応力-ひずみの関係を多直線形やバイリニア形で与えるようになっているのが一般的である。

これまでは、降伏棚がある場合、第 2 剛性がゼロに近い値という意味で、図-13 のモデル-1 のようなバイリニア形のモデルとして第 2 剛性を弾性係数の 1/100、あるいは 1/1000 という値にすることが多い。また、図-13 のモデル-2 のように鉄筋の応力-ひずみ曲線の実験値に基づき、ひずみ硬化開始点のひずみ及びそれ以降の形を降伏点と引張強度とによって定式化した島らのモデルがある⁴⁾。

モデル-1 のバイリニア形のモデルでは、鉄筋の弾性係数(第 1 剛性)が大きいほど第 2 剛性も

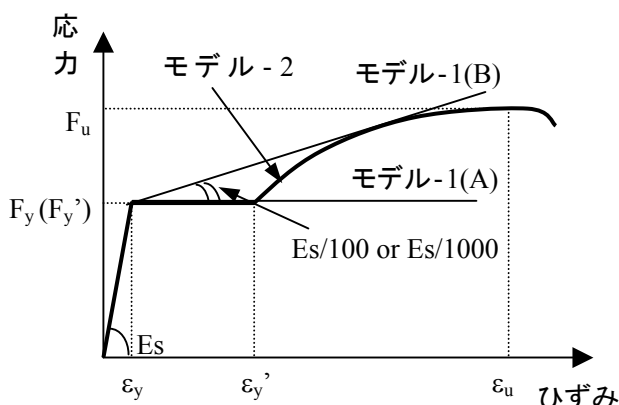


図-13 鉄筋の応力-ひずみの関係モデル

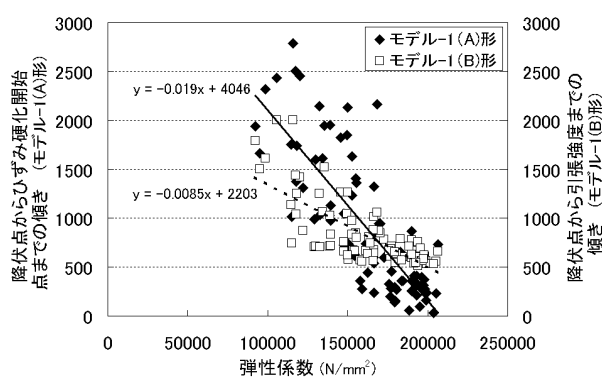


図-14 腐食鉄筋における弾性係数と第 2 剛性

大きくなるべきである。しかし、このモデル-1 は健全な鉄筋には良く合うが、実際の腐食鉄筋においては図-14 のように鉄筋腐食率が大きくなって弾性係数が減少しても第 2 剛性は増加する傾向が確認され、既往のモデルとは反対の結果が得られた。また、モデル-2 の場合もひずみ硬化開始点での応力が降伏点に等しい場合に適用されるため、腐食鉄筋には直接適用できない。

5.2 腐食鉄筋の構成則モデル

腐食鉄筋の場合は局部的な腐食集中により最大腐食率を持つ領域が生じ、断面積の分布も一定ではない。そのため、図-8 に示したように降伏後直ちにひずみ硬化域に入ることが分かった。従って、本研究では腐食鉄筋の構成則モデルとして図-13 に示したモデル-2(島らのモデル)を参考にして、式(6)～式(8)のような区間別指数関数的なモデルを導いた。

- ① 弾性区間 ($0 \leq \sigma_1 \leq F_y$ 、 $0 \leq \varepsilon_1 \leq \varepsilon_y$)

$$\sigma_1 = E_{cs} \cdot \varepsilon_1 \text{ (既存モデルと同一)} \quad (6)$$

- ② 降伏点～ひずみ硬化開始点

$$\begin{aligned} & (F_y \leq \sigma_2 \leq F_y', \quad \varepsilon_y \leq \varepsilon_2 \leq \varepsilon_y') \\ & \sigma_2 = F_y + (1.01F_y' - F_y)(1 - e^{(\varepsilon_y - \varepsilon_2)/K_1}) \quad (7) \\ & \text{但し, } K_1 = 0.0381(\Delta W_{\max})^{-0.4202} \\ & \varepsilon_y = F_y / E_{cs} \end{aligned}$$

- ③ ひずみ硬化開始点～引張強度

$$\begin{aligned} & (F_y' \leq \sigma_3 \leq F_u, \quad \varepsilon_y' \leq \varepsilon_3 \leq \varepsilon_u) \\ & \sigma_3 = F_y' + (1.01F_u - F_y')(1 - e^{(\varepsilon_y' - \varepsilon_3)/K_2}) \quad (8) \\ & \text{但し, } K_2 = 0.076 - 0.0013(\Delta W_{\max}) \\ & \varepsilon_y' = m \cdot \varepsilon_y, \quad m \text{ は実験値 (本実験では 18)} \end{aligned}$$

上記のモデル式におけるひずみ硬化率を決定するのは、係数 K_1 および係数 K_2 で、図-15 および図-16 のように実験値から得た値と局部最大腐食率との関係より実験式の形で求められる。

本研究で提案した指数関数モデルによる腐食鉄筋の応力-ひずみ関係は、図-17 のように実験

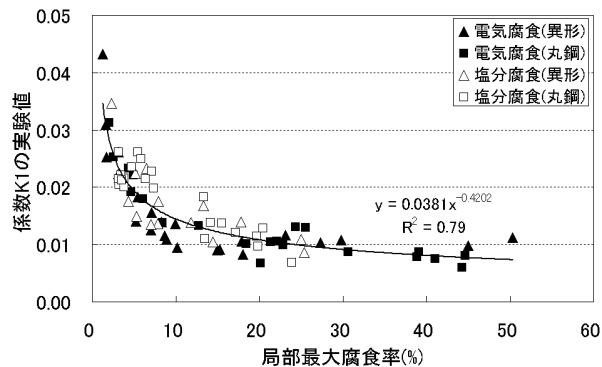


図-15 局部最大腐食率と係数 K_1 との関係

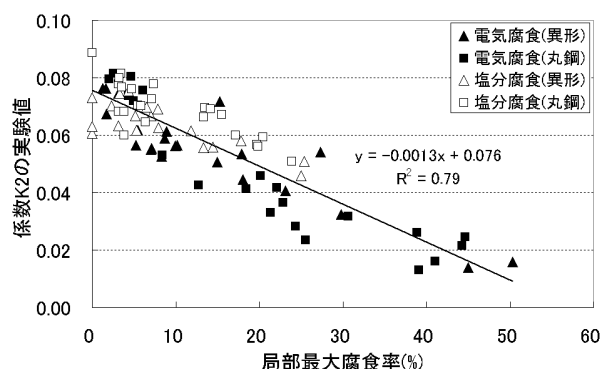


図-16 局部最大腐食率と係数 K_2 との関係

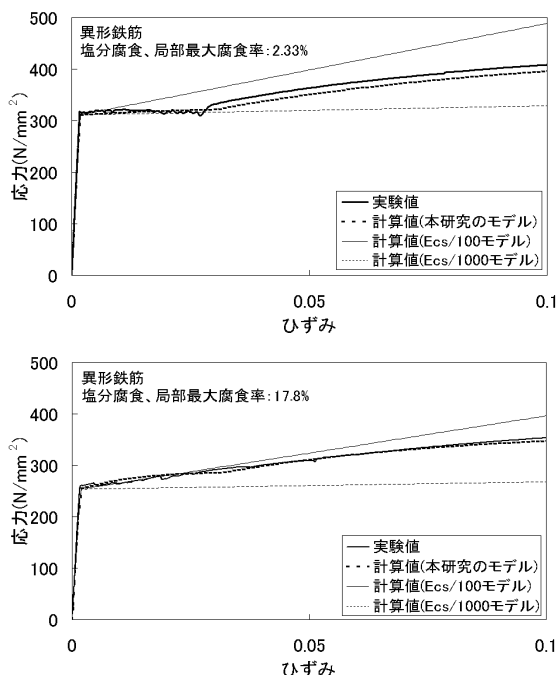


図-17 腐食鉄筋の応力-ひずみ関係の実験値と計算値との比較

値とよく合う結果が得られた。

6. まとめ

- (1) 腐食鉄筋において局部最大腐食率は平均腐食率の約 1.8 倍となり、同一程度の平均腐食率の場合、コンクリートの一面から腐食させた電気腐食の方が局部での腐食集中現象が顕著であり、局部最大腐食率が大きくなった。
- (2) 腐食鉄筋の局部最大腐食率と力学的性能との間には高い相関関係が確認され、平均腐食率より局部最大腐食率の方がより精度高く腐食鉄筋の力学的性能を推定できる。
- (3) 局部最大腐食率が大きくその局所領域が狭いほど、鉄筋腐食に伴うひずみ硬化開始点の低下に対して降伏点の低下が大きくなり、ひずみ硬化率が高く評価される。
- (4) 実験結果より腐食鉄筋の応力-ひずみ関係の指数関数モデルを提案し、そのモデルによる推定結果は実験値とよく合うことを確認した。

謝辞：本研究は東京大学 21 世紀 COE プロジェクト「都市空間の持続再生学の創出」の一環として実施したものである。

参考文献

- 1) J. Rodriguez, et al. : Corrosion of Reinforcement and Service Life of Concrete Structures, DBMC7, Vol. 1, pp. 117-126, 1996
- 2) 李翰承ほか：引張主筋の腐食した RC 梁の有限要素解析法による耐力性能評価に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文報告集，Vol. 506, No. 4, pp. 43-50, 1998
- 3) 金螢来ほか：腐食した鉄筋の 3 次元形状分析及び力学的性能の評価(その 1)，日本建築学会学術講演梗概集，pp. 485-486, 2006
- 4) Shima, et al. : Micro and Macro Models for Bond Behavior in Reinforced Concrete, Journal of the Faculty of Engineering, Univ. of Tokyo, Vol. 39, No. 2, pp. 133-194, 1987
- 5) 岡村甫ほか：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技報堂出版，1990