

塩害による腐食劣化予測に対する 構造・鋼材腐食連成解析手法

鈴木 三馨*¹・福浦 尚之*¹・丸屋 剛*¹

Keywords : chloride attack, macro-cell corrosion, corrosion cracks, extensive stage,
coupled analysis of structure and reinforcement corrosion

塩害, マクロセル腐食, 腐食ひび割れ, 進展期, 構造・鋼材腐食連成解析

1. はじめに

近年, 塩害に関する耐久性照査の限界状態を腐食開始から腐食ひび割れ発生へ移行することが提案されている¹⁾。腐食ひび割れ発生を限界状態した場合に, 腐食ひび割れ発生以降の鉄筋コンクリート (以下, RC) 構造物の構造性能を時間軸で把握することはコンクリート構造物を維持管理する上で益々重要になる。そのため, 腐食ひび割れ発生以降の腐食速度も予測できる解析技術が望まれている。

また, 局所的に腐食が進行するマクロセル腐食は, 全体に一樣に腐食が進行するミクロセル腐食よりも腐食速度が速く危険性の高い腐食とされている²⁾。塩害環境下で生じるコンクリート中の鋼材の腐食は, ひび割れや材料の不均一性により外部から浸透する塩化物イオン濃度が部材位置により不均一となるため, 局所的に腐食が進行するマクロセル腐食となる可能性が高い。よって, 既設コンクリート構造物を適切に維持管理していくためには, 実環境で生じる可能性の高いマクロセル腐食がコンクリート中の鋼材の腐食速度や構造性能に及ぼす影響を適切に把握することが重要となる。

塩害環境下の RC 構造物は, コンクリートのひび割れ進展と鋼材腐食進展が相互に影響し合うことで, 構造性能が変化する (図-1)。この相互作用の影響は鋼材腐食に密接に関係しており, 塩害環境下の RC 構造物の腐食劣化予測するためにこの相互作用を考慮することは重要である。

これまでに, 鉄筋位置の塩化物イオン濃度, かぶり

や温度などを関数とした腐食速度の算定式がいくつか提案されている¹⁾が, これらは要素実験かつ内在塩分による腐食促進実験から得られた実験式であることから, マクロセル腐食を考慮しておらず, 構造部材レベルの構造物には対応していない。また, 実構造物における部材レベルでの腐食進展挙動のシミュレーションには直接的に適用することはできない。

本研究では, 非線形構造解析とRC部材中における鋼材のミクロセル腐食およびマクロセル腐食のモデル化をした鋼材腐食解析の連成解析手法を構築した。後述するRC部材中の鋼材腐食のモデル化により, 対象構造物を分割鉄筋を用いた要素レベルではなく, 構造部材レベルとした。また, 連成解析としたことで, コンクリートのひび割れ進展と鋼材腐食進展の相互作用を考慮したものとなる。さらに, 鋼材の腐食量から鋼材の断面欠損による耐荷力の低下や付着すべりの低下に反映することができる。これにより, 塩害によるRC構造物の構造性能の変化をひび割れと鉄筋腐食進展を相互に反映させて予測解析することが可能となる。

2章では, 構造・鋼材腐食連成解析手法の全体構成を, 3章では, 構造・鋼材腐食連成解析手法の検証を, 4章では, 結論を述べる。なお, 腐食ひび割れ発生以降の構造性能の変化の検証は本論文内容の対象外とする。

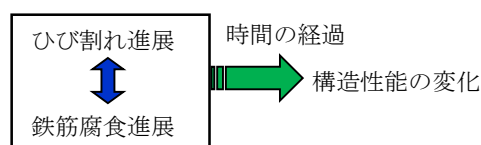


図-1 塩害環境下で荷重作用を受ける RC 構造物の劣化進行
Fig.1 Deterioration of RC structures subjected to salt environment

*1 技術センター 土木技術研究所 土木構工法研究室

2. 構造・鋼材腐食連成解析手法の構成

2.1 構造・鋼材腐食連成解析の解析フロー

構造・鋼材腐食連成解析手法は、荷重作用に関する3次元構造解析モデルとRC部材中の鋼材腐食をモデル化した3次元鋼材腐食解析モデル、そして、各解析モデル中の材料挙動に相互の解析結果を反映させるモデルを組合せたものである³⁾。

本手法は、構造解析と鋼材腐食解析の共通の尺度を時間とし、構造解析と鋼材腐食解析を連成させたことが特徴となる。解析フローを図-2に示す。構造解析では、荷重作用に応じて、コンクリートと鉄筋に応力、ひずみが発生する。構造解析で得られたひび割れたコンクリートのひずみに応じてこの時間ステップにおけるコンクリートの塩化物イオンに対する拡散係数を変化させる。鋼材腐食解析では、塩化物イオン濃度の浸透作用をモデル化し実時間に対応した塩化物イオン濃度を求める。次に、鋼材位置における塩化物イオン濃度を用いて、マイクロセル腐食電流密度及び2要素間のマクロセル腐食電流密度を計算する。そして、RC部材中の鋼材腐食のモデル化により複数要素間の腐食電流密度を算定することで鋼材の腐食電流密度を計算し、最後に、ファラデーの法則により、時間増分における腐食量を算定する。そして、次の時間ステップで鋼材腐食解析で得られた腐食量による鉄筋周りの腐食膨張を作用させる構造解析を静的に行う。

次節では、このうち鋼材腐食解析手法を詳説する。

2.2 鋼材腐食解析のモデル化

金属の腐食は各産業界において重要な課題であり、これまでにそのメカニズムについて様々な研究、応用がなされている⁴⁾。本節では、本研究における鉄筋腐食の基本的モデルであるマイクロセル腐食とマクロセル腐食を概説し、現実的で汎用性のあるRC部材中の鋼材腐食のモデル化を提案する。

2.2.1 ミクロセル腐食モデル

マイクロセル腐食、マクロセル腐食を現実的かつ汎用性のあるモデル化のために、内部分極曲線と外部分極曲線を定式化した。内部分極曲線とは、カソード反応、アノード反応の仮想の分極曲線であり直接測定することができない⁵⁾。一般に、内部分極曲線はポテンシヨ・ガルバナスタットなどの電気化学測定機器で得られた外部分極曲線を用いて設定した実験式である式(1)、式(2)が提案されており⁶⁾、本モデル化でもこれを採用した。

マイクロセル腐食のモデル図を図-3に示す。マイクロセル

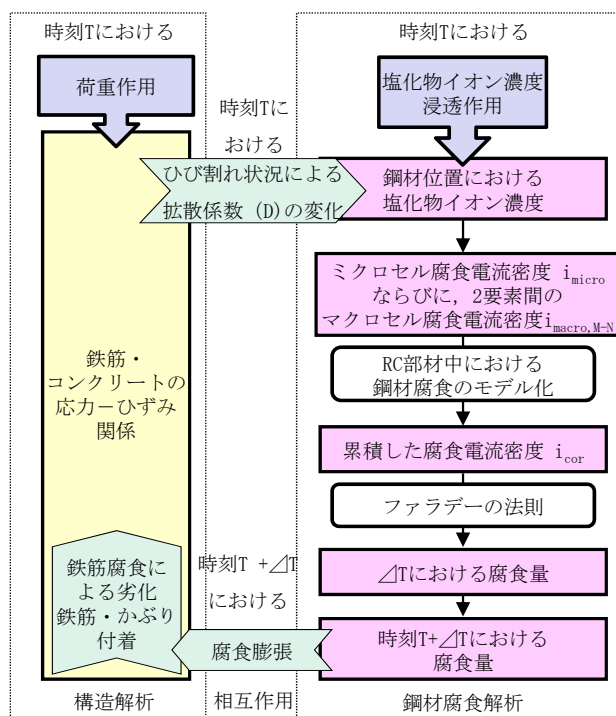


図-2 連成解析の解析フロー
Fig.2 Coupled analysis flow

腐食モデルの基本的考え方は丸屋ら⁶⁾を参考とし、係数などの値を既往の実験の値^{7), 8), 9)}を用いることでより実現象に忠実な値とした。マイクロセル腐食の算出には、内部分極曲線を用いる。マイクロセル腐食電流密度は、内部カソード分極曲線と内部アノード分極曲線の交点 (i_{micro}, E_{micro}) で決まる。内部カソード分極曲線を構成する平衡電位を式(3)に、内部アノード分極曲線を構成するカソード反応の孔食電位を式(4)に示す⁷⁾。なお、本論文での自然電位は、飽和硫酸銅電極に対する電位 (V vs.CSE) とした。内部カソード分極曲線のターフェル勾配は-0.20 (V/decade) 一定とし、内部アノード分極曲線のターフェル勾配は実験値の近似式(5)で表した⁸⁾。

$$E_c = \beta_c \times \log_{10} \left(\frac{i_c}{i_{co}} \right) + E_{co} \quad (1)$$

$$E_a = \beta_a \times \log_{10} \left(\frac{i_a}{i_{pass}} \right) + E_{pit} \quad (2)$$

$$E_{co} = 0.912 - 0.059 \times pH \quad (3)$$

$$E_{pit} = -0.092 - 0.31 \times \log_{10} \left(\frac{[Cl^-]}{[OH^-]} \right) \quad (4)$$

$$\beta_a = -0.04 \times \log_{10} (C_{total}) + 0.2 \quad (\beta_a \leq 0.2) \quad (5)$$

ここに、

E_c : 内部カソード分極曲線上の自然電位 (V)

- E_{co} : 内部カソード反応の平衡電位 (V) ⁷⁾
- β_c : 内部カソード分極曲線のターフェル勾配 (V/decade) ⁸⁾
- i_c : 内部カソード分極曲線上の電流密度 (A/cm²)
- i_{co} : 交換電流密度 6.25×10^{-10} (A/cm²) ⁹⁾
- E_a : 内部アノード分極曲線上の自然電位 (V)
- E_{pit} : 孔食電位 (V) ⁷⁾
- β_a : 内部アノード分極曲線のターフェル勾配 (V/decade) ⁸⁾
- i_a : 内部アノード分極曲線上の電流密度 (A/cm²)
- i_{pass} : 不動態電流密度 5.8×10^{-8} (A/cm²) ⁹⁾
- [Cl⁻] : 細孔溶液中の塩化物イオン濃度 (mol/l)
- [OH⁻] : 水酸化物イオン濃度 (mol/l)
- pH : 液相の pH (12.0)

2.2.2 マクロセル腐食モデル

マクロセル腐食の算出には、内部分極曲線と外部分極曲線を用いる。外部分極曲線は、Jones¹⁰⁾を参考して内部分極曲線を用いて理論的に定式化した。外部カソードの腐食電流密度を式(6)に、外部アノードの腐食電流密度を式(7)で示す。これらは、図-4に示すものとなる¹⁰⁾。すなわち、内部分極曲線の定式化により、任意のEのときの*i_c*、*i_a*が明らかであることから、外部カソード分極曲線上の点 (*i_{app,c}*, *E_c*) と外部アノード分極曲線上の点 (*i_{app,a}*, *E_a*) がそれぞれ算出できる。

コンクリート中の鋼材の2要素 (要素M, N) 間に発生するマクロセル腐食を図-5に示す。要素Mはカソードとなる要素、要素Nはアノードとなる要素とする。要素Mの内部カソード分極曲線および内部アノード分極曲線をそれぞれC_M, A_Mとし、要素Nの内部カソード分極曲線および内部アノード分極曲線をそれぞれC_N, A_Nとした。要素M, 要素Nが通電していない場合、マイクロセル腐食となりそれぞれの腐食電流密度は*i_{micro,M}*, *i_{micro,N}*となる。要素M, 要素Nが通電し2要素間で電流密度*i_{g,M-N}*の電流が流れると、マクロセル腐食となる。要素M, 要素Nの内部分極曲線C_M, C_N, A_M, A_Nから、要素Mの外部カソード分極曲線 (*i_{app,c,M}*, *E_c*) と要素Nの外部アノード分極曲線 (*i_{app,a,N}*, *E_a*) をそれぞれ式(8), (9)により求める。その場合、式(10)で示すように、要素M, N間にはコンクリートによる抵抗 (*L_{M-N} · ρ_{con}*)があるため、自然電位差Δ*E_{M-N}*が生じ、要素Mと要素Nはそれぞれ異なった自然電位*E_{macro,M}*および*E_{macro,N}*を示す。要素MおよびNの腐食電流密度は、それぞれの電位における内部アノード分極曲線の腐食電流密度*i_{macro,M}*, *i_{macro,N}*となる。よって、通電前のマイクロセル腐食の状態から、要素Nはマクロセル腐食電流密度*i_{macro,M-N}*だけ増加し、要素Mはマクロセル腐食電流密度*i_{macro,M-N}*だけ減少する^{5), 10)}。なお、2要素間のマクロセル腐食モデルは

カソード要素とアノード要素の面積が等しいことが前提となる。

$$i_{app,c} = i_c - i_a \tag{6}$$

$$i_{app,a} = i_a - i_c \tag{7}$$

$$i_{app,c,M} = i_{c,M} - i_{a,M} \tag{8}$$

$$i_{app,a,N} = i_{a,N} - i_{c,N} \tag{9}$$

$$\Delta E_{M-N} = E_{macro,M} - E_{macro,N} = (L_{M-N} \cdot \rho_{con}) \cdot i_{g,M-N} \tag{10}$$

ここに、

- i_{app,c}* : 外部カソードの腐食電流密度 (A/cm²)
- i_{app,a}* : 外部アノードの腐食電流密度 (A/cm²)
- i_{app,c,M}* : 要素Mにおける外部カソードの腐食電流密度 (A/cm²)
- i_{app,a,N}* : 要素Nにおける外部アノードの腐食電流密度 (A/cm²)
- i_{a,M}* : 任意の自然電位時の A_M上の腐食電流密度 (A/cm²)
- i_{c,M}* : 任意の自然電位時の C_M上の腐食電流密度 (A/cm²)
- i_{a,N}* : 任意の自然電位時の A_N上の腐食電流密度 (A/cm²)
- i_{c,N}* : 任意の自然電位時の C_N上の腐食電流密度 (A/cm²)
- L_{M-N}* : 要素M-N間の距離(cm)
- ρ_{con}* : コンクリートの見かけの比抵抗 (Ωcm)
- i_{g,M-N}* : 通電時の要素M-N間の電流密度(A/cm²)

2.2.3 RC部材中における鋼材腐食のモデル化

鉄筋は、RC部材中に線材の集合体として存在する。

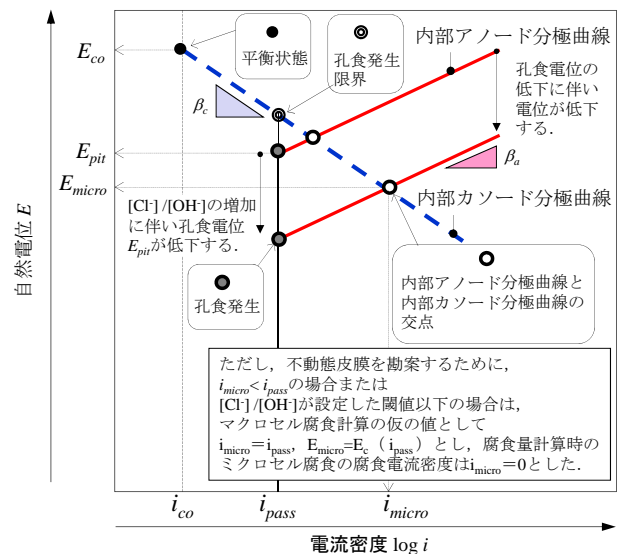


図-3 ミクロセル腐食モデル⁶⁾
Fig.3 Microcell corrosion model

このような条件下における鋼材腐食の算定モデルについては前述の通り、鉄筋を鉄筋軸に関する複数の分割要素で構成し、各要素のマイクロセル腐食と各要素間のマクロセル腐食を組み合わせる考え方^{6),11)}が示されているが、実構造物中の鉄筋の腐食シミュレーションにまで適用するには至っていないと考えられる。マクロセル腐食電流密度がカソード部に対するアノード部の面積比に依存することは、理論としても既往の実験からも明らかとなっている^{2),12)}。従来の方法では、2要素間でのマクロセル腐食電流密度の算定において面積比を考慮するものもあるが⁶⁾、アノード要素を着目要素として対となる複数のカソード要素に対して算定したマクロセル腐食電流密度を累積していくことから、1つのカソード要素と対となる他の複数のアノード要素間のマクロセル腐食電流密度の面積比依存が反映されていない。

そこで、本研究ではマクロセル腐食電流密度の分配率 β を設定し、着目するカソード要素からそれぞれのアノード要素に対して流れるマクロセル腐食電流を分配することで、複数の分割要素で表現された鉄筋のカソード部とアノード部の面積比の影響を考慮するモデル化を行った。

1つのカソード要素(M)に対してn個のアノード要素($N_i, i=1\sim n$)がある状態において、その中のある1つのアノード要素のマクロセル腐食電流密度 $i_{cor,M-N_i}$ を式(11)に示す。式(11)中の分配率 β_{M-N_i} は、カソード要素とアノード要素群の面積比と、同一面積条件下での算定される一対のカソード要素とアノード要素間におけるマクロセル腐食電流密度 $i_{macro,M-N_i}$ の関数とした式(12)で表した。

着目要素Kにおけるマクロセル腐食形成時の腐食電流密度の概念図を図-6に、着目要素Kの腐食電流密度を式(13)に示す。着目要素Kの腐食電流密度は、要素Kのマイクロセル腐食電流密度 $i_{micro,K}$ に、要素Kがアノード要素となる場合の要素K以外の全ての要素との間のマクロセル腐食電流密度を加え、着目要素Kがカソード要素となる場合の要素K以外の全ての要素との間のマクロセル腐食電流密度を引いたものとした。

$$i_{cor,M-N_i} = \beta_{M-N_i} \cdot i_{macro,M-N_i} \quad (11)$$

$$\beta_{M-N_i} = \frac{S_M \cdot i_{macro,M-N_i}}{\sum_{i=1}^n S_{N_i} \cdot i_{macro,M-N_i}} \quad (12)$$

$$i_{cor,K} = i_{micro,K} + \sum_{j=1}^n i_{cor,m_j-K} - \sum_{i=1}^n i_{cor,K-n_i} \quad (i_{cor,K} \geq 0) \quad (13)$$

ここに、

$i_{cor,M-N_i}$: RC部材中の鋼材の要素M-N_i間のマクロセル腐食電流密度 (A/cm²)

β_{M-N_i} : 要素M-N_i間のマクロセル腐食電流密度の分配率

S_M : 要素M(カソード部)の表面積 (cm²)

S_{N_i} : 要素N_i(アノード部)の表面積 (cm²)

$i_{cor,K}$: 要素Kの腐食電流密度 (A/cm²)

カソード部とアノード部の面積比が1:3の場合を例として、要素分割によらず一定のマクロセル腐食電流密度が算定されることを、図-7に示す。アノード要素を分割しない場合(図-7 a)), マクロセル腐食電流密度の分配率 β_{C-A} は1/3となり、M-N間のマクロセル腐食電流密度は(1/3)・ $i_{macro,M-N}$ となる。すなわち、ア

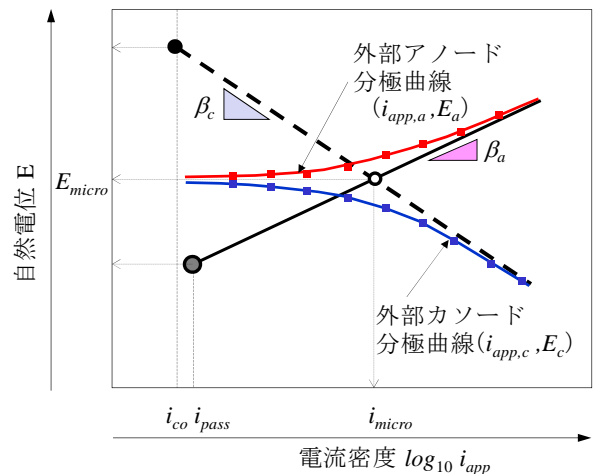


図-4 外部分極曲線
Fig.4 External polarization curve

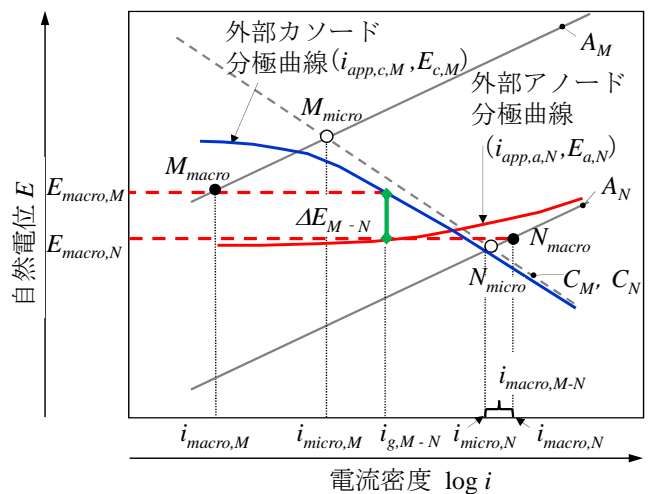


図-5 マクロセル腐食時の電流密度
Fig.5 Current density of the macrocell corrosion

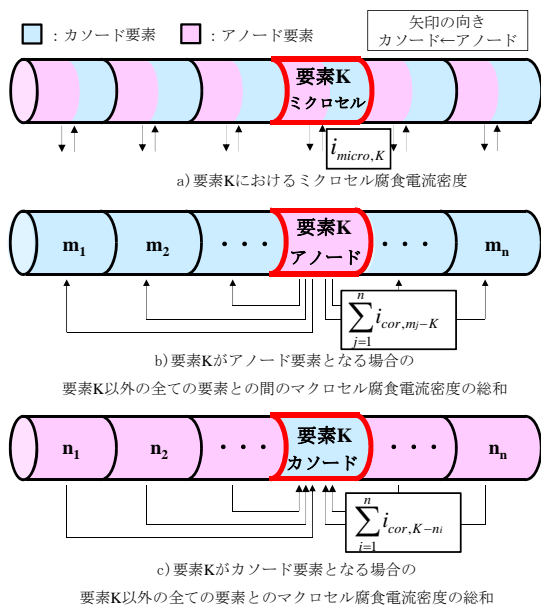


図-6 着目要素 K の腐食電流密度

Fig.6 Corrosion current density of the element K

ノード要素の面積が大きいほど、相対的にマクロセル腐食電流密度は小さくなっていく。アノード要素を3等分した場合(図-7 b)), β_{M-N_1} , β_{M-N_2} , β_{M-N_3} はそれぞれ 1/3 であることから M-N₁, M-N₂, M-N₃ 間のマクロセル腐食電流密度はそれぞれ $1/3 \cdot i_{macro,M-N}$ となり、アノード要素を分割しない場合に一致する。各アノード要素のマクロセル腐食電流密度が異なる場合には、各要素の面積のみならず、腐食電流密度による重みづけが反映され、分配率が設定される。

2.2.4 電流密度から腐食量への計算方法

要素 K の時間増分における腐食量は腐食電流密度 $i_{cor,K}$ を用いて式(14)に示すファラデーの法則から求める。

$$\Delta m_K = \frac{i_{cor,K} \cdot \Delta t \cdot a}{n \cdot F} \quad (14)$$

ここに、

Δm_K : 要素 K の時間増分における腐食量 (g/cm²),
 Δt : 時間増分 (s), a : 鉄の原子量 (55.845), n : 溶解した鉄イオンの当量 (2mol eq), F : ファラデー定数 (96500C/mol eq)

3. 腐食開始時期および腐食ひび割れ発生時期の検証

マクロセル回路形成による鋼材の腐食現象を再現した塩水による乾湿繰返し既往実験⁶⁾を対象に、本解析手

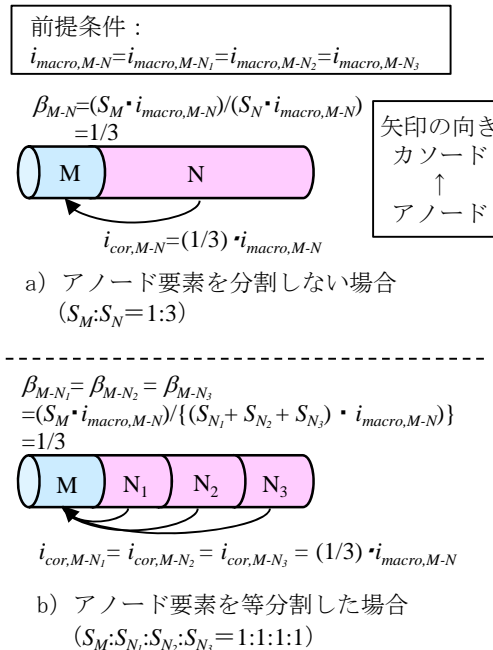


図-7 マクロセル腐食計算例

Fig.7 Example of macrocell corrosion calculation

法を適応し、腐食開始時期、腐食ひび割れ発生時期および腐食ひび割れ発生以降の腐食量を検証した。腐食ひび割れの影響を受けない鋼材腐食解析のみのケースも行い、腐食量の経時変化を比較した。

3.1 実験概要と解析モデル

解析対象の実験概要⁹⁾を図-8に示す。試験体は断面100×100mm、長さ1200mmとし、かぶり20mmの断面中央部にD13を配置した。上下面800mm区間が暴露面となるように他の面はアクリル樹脂で被覆した。セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、コンクリートの水セメント比は60%とした。試験体の暴露条件は、室内環境で、20℃塩化ナトリウム濃度3%水溶液に3日浸せきと20℃65%RHの乾燥環境に4日放置を1サイクルとする乾湿繰返しとし試験体数は1体とした。実験結果を表-1に示す。腐食発生時期を自然電位の低下開始とする時点は暴露開始から1.2年(約440日)後、腐食ひび割れ発生時は目視観察により暴露開始から1.7年(約600日)後であった。また、試験体解体時の最大腐食量は約580mg/cm²(暴露4.3年時点)であった。

解析モデルを図-9に示す。解析モデルは、断面および暴露条件の対称性を加味して1/2モデルとした。試験体の腐食ひび割れ発生時の腐食ひび割れ位置をアノード想定部、それ以外を一般部とし、アノード想定部と一般部のコンクリートの塩化物イオンに対する拡散係数Dをそれぞれ設定した。コンクリートの塩化物イ

オンに対する拡散係数 D を全範囲で一様としないのは、コンクリートの不均一性により同じ配合のものであっても場所によって塩化物イオンの浸透速度が異なることを考慮したものである。上下面 800mm 区間にコンクリート表面における塩化物イオン濃度 C_0 を設定した。

鉄筋位置の塩化物イオン濃度分布の解析値と実験値を図-10 に示す。パラメータスタディによる C_0 と D の設定はアノード想定部の塩化物イオン濃度を実験値にほぼ一致させ、一般部の塩化物イオン濃度は実験値にばらつきがみられるが小さい箇所を基準にした。

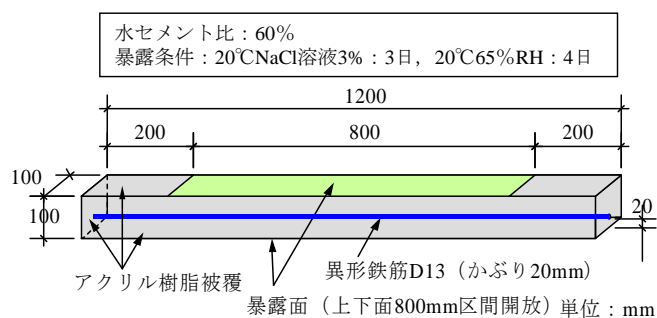


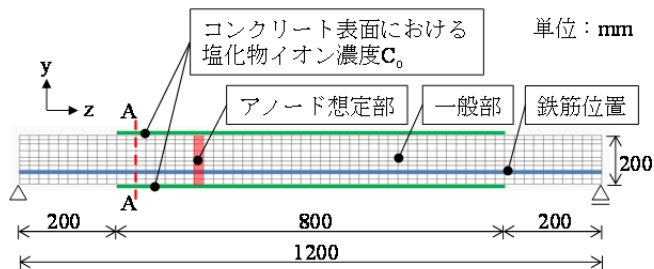
図-8 実験の概要⁶⁾

Fig.8 Overview of the experiment

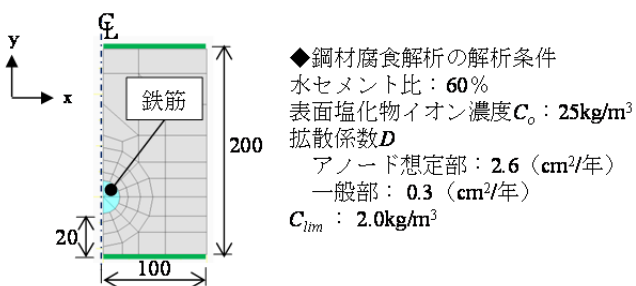
表-1 実験結果

Table.1 Experimental result

腐食開始時期 (年)	腐食ひび割れ 発生時期 (年)	解体時期 (年)	最大腐食量 (mg/cm ²)
1.2 (440日)	1.7 (600日)	4.3 (1580日)	580



a)側面図



b)断面図 (A-A 断面)

図-9 解析モデル

Fig.9 FEM model

3.2 腐食発生時期と腐食ひび割れ発生時期

解析でのコンクリート表面の腐食ひび割れ位置の軸直方向の引張ひずみの経時変化を図-11に示す。解析における腐食発生時期は0.75年となった。実測値1.1年に比べて若干早い。試験体の腐食ひび割れ発生位置の自然電位の経時変化は暴露後0.65年で一旦低下している⁶⁾ことから、概ね妥当な値と考えられる。

解析における腐食ひび割れ発生時期は、解析モデルの要素寸法とひずみの値により推定することができる。試験体の目視観察による腐食ひび割れ発生は、暴露1.7年後でそのときのひび割れ幅は0.6mmであった。このときの解析の軸直方向のひずみは 5000×10^{-6} 程度であり要素寸法は約10mmであることから、0.05mm程度のひび割れと換算することができ、実験の値と同程度となった。しかし、解析のひずみの経時変化と実構造物のひび割れ幅の経時変化の関係の整合性の確認は今後の課題である。

3.3 腐食ひび割れ発生後の腐食量の分布と経時変化

実験で腐食量を測定した暴露4.3年後の解析と実験の腐食量の分布の比較を図-12に、腐食量の経時変化を図-13

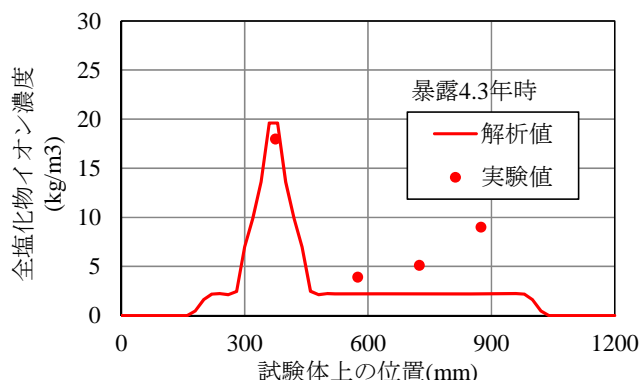


図-10 塩化物イオン濃度分布比較

Fig.10 Chloride ion concentration distribution

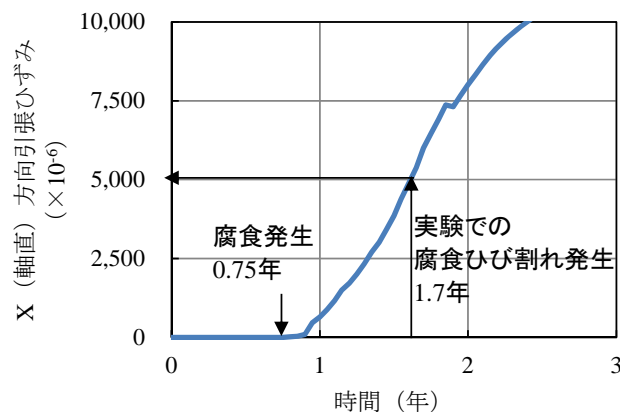


図-11 腐食ひび割れ位置の引張ひずみの経時変化

Fig.11 Time course of tensile strain at corrosion cracking position

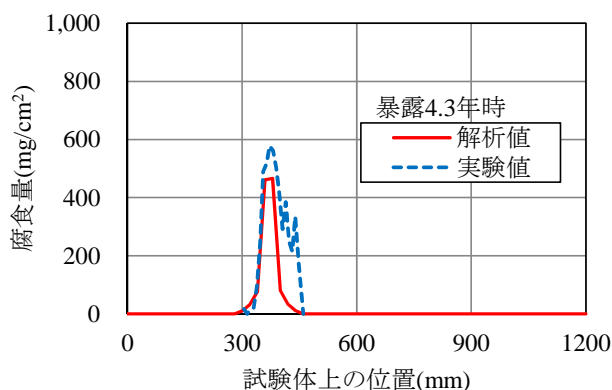


図-12 腐食量分布の比較
Fig.12 Corrosion weight distribution

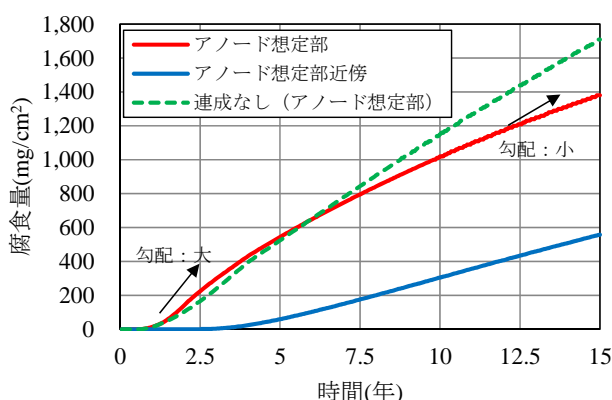


図-13 解析上の腐食量の経時変化
Fig.13 Time-dependent change of corrosion amount

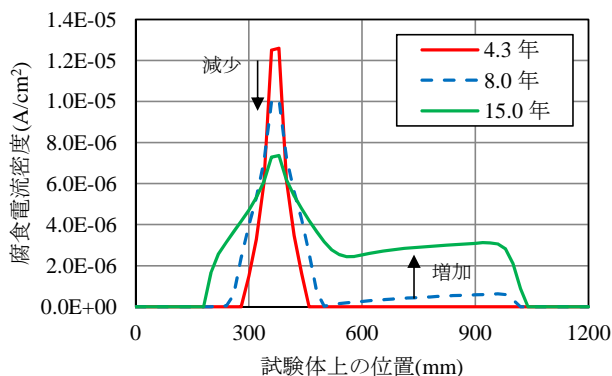


図-14 腐食電流密度分布 (解析)
Fig.14 Corrosion current density distribution(analysis)

に、腐食電流密度分布を図-14に示す。

腐食量の分布を実験と解析で比較すると、暴露後4.3年の最大腐食量が同等の値である。腐食領域の広がりについては、腐食生成物の膨張率やひび割れ後の拡散係数の影響を受け、これらの影響を把握することは今後の課題となる。

腐食量の経時変化(図-13)より、連成しない場合腐

食速度はほぼ一定だが、連成解析した場合、アノード想定部の腐食量は腐食開始時に急激に立ち上がり時間の経過とともに緩やかになっている。これは、時間とともにアノード部となる領域が広がり、カソード部に対するアノード部の面積比が大きくなりアノード想定部の腐食速度が低減しているためである。腐食量の傾きに当たる腐食電流密度の経時変化と分布図(図-14)からも明らかである。0.25mm程度のひび割れを導入した海洋環境下におけるRC試験体の暴露実験¹³⁾では、時間が経過することでひび割れ部のマクロセル腐食の腐食速度は時間が経つと低減しており、その原因については、鋼材周りの塩化物イオン濃度によりカソード部に対するアノード部の面積比が大きくなるためとも考えられている。連成解析を行うことで、カソード部に対するアノード部の面積比が時間とともに大きくなりアノード想定部の腐食速度が時間とともに低減する傾向を表現することができる。

4. 結論

本研究において得られた結論は以下の通りである。

- (1) RC非線形構造解析とRC部材中における塩化物イオンの拡散とこれにより生じる鋼材のミクロセル腐食およびマクロセル腐食のモデル化を組み込んだ鋼材腐食解析、そしてこれらの相互作用を考慮した連成解析手法を構築した。
- (2) 内部分極曲線と外部分極曲線間の整合性のとれた定式化をすることにより、ミクロセル腐食およびマクロセル腐食による腐食量の算定モデルの汎用性をより高めた。
- (3) カソード要素を着目要素とし、マクロセル腐食電流密度の分配率 β を設定することで、複数の分割要素からなるRC部材中の鉄筋のマクロセル腐食電流密度が要素分割の影響を受けないものとなり、RC構造物中の鉄筋の配置および腐食量を解析に適切に反映することができる。
- (4) 本解析手法を用いて、マクロセル腐食を模擬した塩水による乾湿繰返し実験をシミュレーションし、構造解析との連成が、腐食発生時期、腐食ひび割れ発生時期、塩化物イオン濃度、および腐食量に与える影響を確認し、本解析手法の妥当性を検証した。その結果、本実験シミュレーションの範囲内においては、ひび割れ前のコンクリートの材料の不均一性を考慮し、膨張率を1.25としたときに実験との整合性が良い結果となった。

(5) 本解析手法は現時点では、まだ十分な精度を持つ予測ツールには至っていないが、各パラメータに幅を持たせることで、実際の腐食進展挙動における比較的大きなばらつきを包含する劣化シミュレーションが可能となると考えられる。今後、予測精度の精度向上のためには、解析手法の高度化はもとより、実験データの蓄積による腐食劣化機構およびそのプロセスの明確化を行い、相互に検証して行くことが必要と考える。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術研究小委員会（338委員会）成果報告書（その2）およびシンポジウム論文集，コンクリート技術シリーズ99，410p，2012.10.
- 2) 渡辺博志，木村嘉富，古賀裕久，中村英佑：塩害環境下にあるコンクリート中鉄筋のマクロセル腐食形成機構，土木研究所資料，第4131号，pp.1-38，2009.1.
- 3) 福浦尚之，丸屋剛，武田均，小山哲：鉄筋腐食による材料劣化と荷重作用の連成解析システムの構築に関する一検討，土木学会第62回年次学術講演会，5-073，pp.145-146，2007.
- 4) 藤井哲雄：目で見てわかる金属材料の腐食対策，日刊工業新聞社，260p.，2009.3.
- 5) 青木繁，天谷賢治，宮坂松甫：境界要素法による腐食防食問題の解析，裳華房，pp.4-14，1998.6.
- 6) 丸屋剛，武田均，堀口賢一，小山哲，許鑑麟：コンクリート中の鋼材のマクロセル腐食に関する解析手法の構築，土木学会論文集E，Vol.62，No.4，pp.757-776，2006.11.
- 7) Bird, H.E.H., Pearson, B.R. and Brook, P.A. : The breakdown of passive films on iron, Corrosion Science, Vol.28, No.1, pp.81-86, 1988.
- 8) Funahashi, M., and J.B. Bushman : Technical Review of 100mV Polarization Shift Criterion for Reinforcing Steel in Concrete, Corrosion, pp.376-386, 1991.5.
- 9) S.C. Kranc and Alberto A. Sagues : Modeling the Time-Dependent Response to External Polarization of a Corrosion Macrocell on Steel in Concrete, J. Electrochem. Soc. , Vol.144, No.8, 1997.8.
- 10) Denny A. Jones : Principles and prevention of corrosion second edition, pp.86-98, pp.168-198, 1996.
- 11) 親本俊憲，横関康祐，宮里心一，長谷川祐介：ひび割れを有するモルタル中の鉄筋腐食速度解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.1089-1094，2004.
- 12) 社団法人 日本材料学会 腐食防食部門委員会：実験で学ぶ腐食防食の理論と応用，389p，1999.9.
- 13) 山路徹，審良善和，濱田秀則：海洋環境下におけるコンクリートひび割れ部での腐食挙動，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.857-862，2011.7.