

ひび割れを有する鉄筋コンクリートの腐食に関する基礎的研究 (2)

—ひび割れ間隔に関する一考察—

Study on Corrosion Rate of Reinforcing Steel Bar in Cracked Concrete (2)

—A Study on Intervals of Crack—

塚原 絵万*・加藤 佳孝**・魚本 健人*

Ema TSUKAHARA, Yoshitaka KATO and Taketo UOMOTO

1. はじめに

コンクリート中の欠陥が構造物の耐久性能の急速な低下を招く危険な因子であることは周知の事実である。しかし、欠陥を有するコンクリートの定量的な耐久性能評価は未だ確立されていない。

コンクリート中の鋼材腐食において、表面ひび割れ近傍の鋼材はアノードを形成することが知られている。筆者らはその形成過程と環境温度が及ぼす影響について、模擬海水への乾湿繰り返し実験を行い、塩化物イオンによる濃淡電池作用を考慮したマクロセル腐食モデルを構築し検討を行った^{1,2)}。本報では、ひび割れ間隔とかぶり厚さが鉄筋腐食に及ぼす影響について解析的に検討を行った結果を報告する。また、自然電位測定間隔により生じる腐食量推定誤差について検討した結果を併せて報告する。

2. 計算手法

2.1 塩化物イオン濃度分布の算出

コンクリート中の塩化物イオンの移動は、フィックの第2法則として知られる拡散方程式を用いて表現できる。境界条件に相当する表面における塩化物イオン濃度を一定として拡散方程式を解くと、解は式(1)のように表せる³⁾。

$$C_c(x, t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $C(x, t)$: 深さ x cm, 時刻 t (年) における塩化物イオン濃度 (kg/m^3), C_0 : 表面における塩化物イオン濃度 (kg/m^3), D : 塩化物イオンの見かけの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$), erf : 誤差関数

本研究では、普通ポルトランドセメントを対象とし、見かけの拡散係数を式(2)より求めた³⁾。

$$\log D = [4.5(W/C)^2 + 0.14(W/C) - 8.47] + \log(3.15 \times 10^7) \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 D : 塩化物イオンの見かけの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$), W/C : 水セメント比

境界条件として、健全部では表面における塩化物イオン濃度 C_0 を $13.0 \text{ kg}/\text{m}^3$ (飛沫帯と同値) と設定した³⁾。ここで、ひび割れを有するコンクリートの場合、ひび割れ部を境界条件とすれば、コンクリート全体の見かけの拡散係数を用いて塩化物イオンの拡散を表現することが可能¹⁾である。したがって、式(3)によりひび割れ部に境界条件を設定した。

$$C_{0cr}(x) = \alpha \sqrt{x} + C_0 \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 $C_{0cr}(x)$: 開放面から x cm の距離のひび割れ部における塩化物イオン濃度 (kg/m^3), α : ひびわれ表面塩化物イオン濃度の内奥方向への減衰を表す係数 (ひび割れ有り $\neq 0$, 無し $= 0$), C_0 : 表面における塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

ここで、境界条件とする表面塩化物イオン濃度は経時変化することが知られており、また水セメント比により異なることが考えられる^{例えは4)}。しかし、本研究では便宜的に C_0 および α を一定として計算を行った。 α は水セメント比 0.60, 環境温度 20°C の模擬海水乾湿繰り返し試験結果より、 -0.10 と設定した¹⁾。

以上の条件をもとに、2次元 FEM 拡散解析により塩化物イオン濃度分布を求めた。

2.2 鋼材腐食量の算出

塩分濃度と自然電位の関係はよい相関を持ち、塩分量が多いほど電位は卑な値となるといわれている。自然電位の差はマクロセル腐食の起電力に相当するものであり、その変化量は腐食に直接関係するパラメータと考えられる。そこで、式(4)を用いて鉄筋各位置における自然電位 E を求めた⁵⁾。

*東京大学生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター
**国土交通省国土技術政策総合研究所 総合技術政策研究センター

研 究 速 報

$$E = -0.08 \times \ln(\text{NaCl}) - 0.735 \dots\dots\dots (4)$$

ここに、E：電位 (V)，NaCl：コンクリートに対する塩分 (NaCl) の重量%濃度

なお、2.1にて求めた塩化物イオン濃度は単位コンクリート容積中の重量濃度であるため、コンクリートの単位容積重量 (= $2.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ と設定)，および塩化ナトリウム式量により単位の補正を行い、各位置における自然電位を算出した。ここで、平成 11 年版コンクリート標準示方書 [施工編]⁶⁾ では、腐食発生限界物濃度を 1.2 kg/m^3 と定めている。これは、その塩化物イオン濃度以下であれば鋼材腐食は開始しないという意味であり、不動態被膜破壊時の塩化物イオン濃度を示していると考えられる。したがって、本研究では塩化物イオン濃度 1.2 kg/m^3 以下の場合の自然電位は -180 mV 一定と仮定し、解析中の被膜破壊以前の鋼材腐食開始を防いだ。なお、ASTM⁷⁾ によれば、この電位値は「腐食の可能性は 90% 以上無い」ことを示す (但し、照合電極が飽和硫酸銅電極の場合)。以上より求められた自然電位分布の一例を図 1 に示す。凡例中の「1 本」はひび割れの本数を示し、「20 cm」は 2 本のひび割れの間隔を示す。

次に、電位と電流量の関係はオームの法則に従うので、式 (5) により電流量分布を推定する⁸⁾。

$$I_k = \int_0^L i_{kx} dx = \int_0^{L'} \frac{kx}{R_k} dx \dots\dots\dots (5)$$

ここに、L：鉄筋長 (cm)， I_k ：点 k に流れ込む総電流量 (A/cm)， i_{kx} ：点 k に各点 x から流れ込む電流密度 (A/cm²)， v_{kx} ：点 k と各点 x の単位長さあたりの電位差 (V/cm) 本研究では、一般的なコンクリートの比抵抗値を参考に、コンクリート中で $10 \text{ k}\Omega$ 一定と設定した。式 (5) から鉄筋表面各点における電流密度が推定され、これに経過時間を乗じるにより積算電流量が算出される。式 (6) に示すファラデーの法則より、腐食量と積算電流量が比例関係となり、任意の時間 t における腐食反応量を積算電流量から予測できる。

$$W_k = \int_0^t kI(t) dt \dots\dots\dots (6)$$

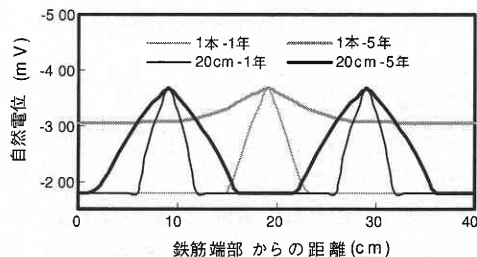


図 1 自然電位分布の一例 (かぶり 3 cm)

ここに、 W_k ：腐食反応量 (g/sec)，k：電気化学当量 (g/A/sec)

以上の手法により、塩化物イオンの経時的な濃度分布から、塩化物イオンと自然電位の関係 (式 (4))，および電気化学的理論 (式 (5) および (6)) を用いて、鋼材腐食の進行をシミュレートした。

3. 自然電位測定間隔による腐食量推定値の違い

自然電位法は、コンクリート中の鉄筋腐食状態の非破壊的診断手法として最も簡便で実構造物に広く適用されている手法である。通常、自然電位は測定時における鉄筋腐食の有無の判定を行うのみに用いられているが、式 (5) および (6) に示す電気化学的理論を用いることにより、測定値から腐食進行状態の定量的な把握が可能となる。しかし、解析上や実験室レベルはともかく、実構造物の測定においては測定間隔が大きいために、電気化学的理論の適用が思わぬ推定誤差を招くことがある。図 2 および 3 に任意の形状に分布させた自然電位とそれより求められる腐食重量 (1 年経過と仮定) を示す。図 2 および 3 は図 1 に示し

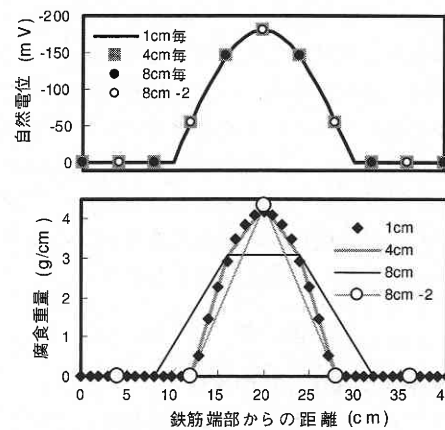


図 2 測定間隔による計算値の違い—1

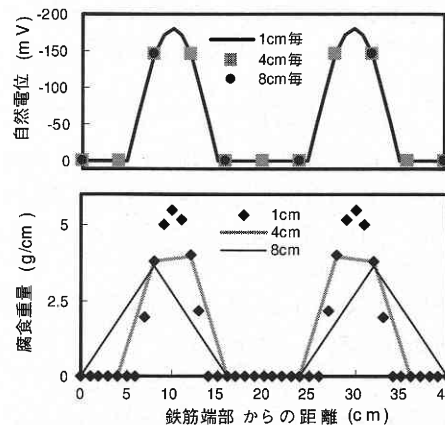


図 3 測定間隔による計算値の違い—2

たび割れを有するコンクリート中の鉄筋の自然電位分布(1年)を模擬したものであり、図中の凡例は測定間隔を示す。図より、鉄筋端部から等分布に測定間隔を定めた場合、自然電位の最卑点の把握は出来ず、測定間隔が大きくなるほど推定される腐食重量は小さい値を示すことが分かる。また、腐食発生位置にもずれが生じており、図3では測定間隔ケース毎に最大腐食量を示す位置も異なっていることが分かる。コンクリート中の鋼材腐食を検討する際、最も重要となるのは孔食の有無の判定であり、測定間隔が大きい場合、孔食の位置やその有無の判断が困難となることが予測される。ここで、図2の凡例8 cm-2に自然電位最卑値(この場合中央)より8 cm毎に電位を測定し腐食重量を求めた結果を示す。8 cm-2では最大腐食重量位置・腐食発生位置ともに1 cm毎測定結果とほぼ同等の値を示しており、これより、精度の良い推定のためには、ひび割れ等欠陥近傍の自然電位を把握するべきであることが分かる。

以上の検討より、測定間隔が大きい場合、腐食重量を小さく見積もり、鉄筋中の最大腐食位置を誤って把握する危険性が示された。したがって、実構造物測定時の測定間隔・開始位置の選定には注意を要することが考えられる。

以上のことから、測定間隔が小さいほど正確な腐食推定が可能となるが、実際の自然電位測定方法を考慮すればmm単位の測定間隔は現実的ではない。したがって、本研究では解析における自然電位測定間隔を1 cmとし、ひび割れ間隔およびかぶり厚さがひび割れを有するコンクリート中の鉄筋腐食に及ぼす影響について検討を行った。

4. ひび割れ間隔が鉄筋腐食に及ぼす影響

4.1 ひび割れ間隔とかぶり厚さに関する検討

現在まで、ひび割れが中央に1本存在する場合の鉄筋腐食性状については数々の検討がなされている(例えば¹⁾)。しかし、複数のひび割れが存在する場合については、腐食因子侵入・拡散等が多少複雑となることが予測されるため、実験結果から影響因子を特定することは困難である。そこで、本報では基礎研究として、ひび割れが左右対称に2本存在する場合のひび割れ間隔およびかぶり厚さと鉄筋腐食性状について解析的に検討を行った。なお、簡便化のため、解析モデルにおけるひび割れ深さは一定であり、ひび割れ幅はモデル中に考慮されていない。

図4にひび割れ間隔と総腐食重量比との関係をかぶり厚さ、経過年数毎に示す。解析モデルは全長40 cm, $W/C = 0.55$ と設定した。総腐食重量比は、モデル中央にひび割れが1本ある場合(ひび割れ間隔0)に対する総腐食重量の割合を表す。図より、1年後計算値では、ひび割れが2本存在する場合の方が1本の場合よりも総腐食重量は大き

く、その傾向はかぶり厚さには依存せず、ひび割れ間隔にのみ影響される結果となった。これは、各かぶり厚さにおいて、他と比較してひび割れ部は極端に塩化物イオン濃度が高いために電位差が大きくなり、集中的に腐食が発生したためと考えられる(図3 2本-1年参照)。5年後ではかぶり厚さが小さい方が腐食の進行は早くなっているが、全体の傾向は、やはり、かぶり厚さよりもひび割れ間隔に支配される結果となった。

ここで、前述のように、コンクリート中の鋼材腐食を検討する際、最も重要となるのは孔食の判定であり、特にひび割れが存在する場合、腐食因子の侵入が容易であるため孔食が生じやすくなることが考えられる¹⁾。そこで、ひび割れ部の腐食重量のみに着目し、かぶり厚さ、ひび割れ間隔との関係について検討した。図5にひび割れ間隔とひび割れ部の腐食重量比の関係を示す。腐食重量比は、モデル中央にひび割れが1本ある場合(ひび割れ間隔0)のひび割れ部腐食重量に対するひび割れ2本の場合(内1本のみ)の腐食重量の割合を表す。これより、図4と同様、ひび割れ部の腐食重量においてもかぶり厚さよりもひび割れ間隔

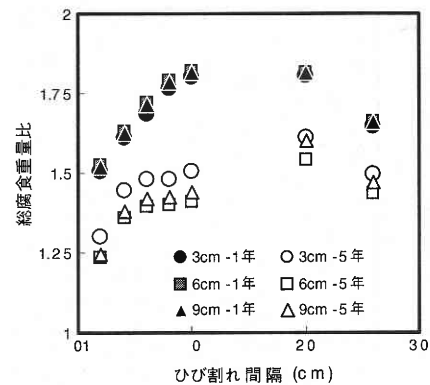


図4 ひび割れ間隔と総腐食重量比の関係 ($W/C = 0.55$, 鉄筋長 40 cm)

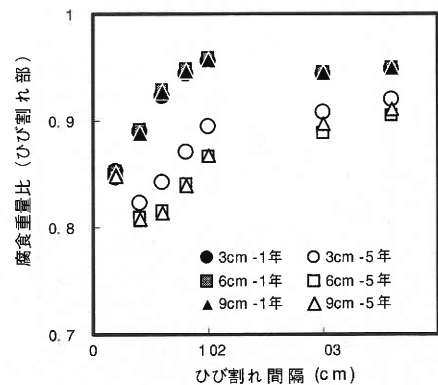


図5 ひび割れ間隔とひび割れ部の腐食重量比の関係 ($W/C = 0.55$, 鉄筋長 40 cm)

研 究 速 報

に支配される傾向となることが分かる。また、ここではひび割れ間隔 1 ~ 10 cm ではひび割れ間隔が増す毎に腐食重量が増加し、それ以降はほぼ一定の値をとる結果となった。これより、ひび割れ部の腐食重量が最大となるひび割れ間隔が存在することが考えられる。さらに、ひび割れ部における腐食重量はひび割れ 2 本の場合よりも 1 本の場合の方が大きく、これより孔食の危険性はひび割れ 1 本の場合の方が大きいことが考えられる。

以上の結果は、塩化物イオンの拡散からひび割れを 2 本有するコンクリート中の鉄筋腐食を推定した一例である。式 (2) に示した様に、塩化物イオン拡散係数は配合要因に依存するものである。そこで、次節において、W/C を変化させたコンクリートのひび割れ間隔と孔食の危険性について検討を行った。

4.2 水セメント比とひび割れ部の腐食重量に関する検討

図 6 および 7 に W/C = 0.35, 0.60 時のひび割れ間隔とひび割れ部の腐食重量比の関係を示す。W/C = 0.35 の場合、塩化物イオン拡散係数は小さくなるため、初期は他と比較してひび割れ部は極端に塩化物イオン濃度が高いため

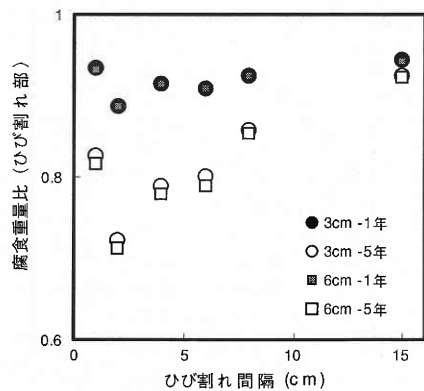


図 6 ひび割れ間隔とひび割れ部の腐食重量比の関係 (W/C = 0.35, 鉄筋長 110 cm)

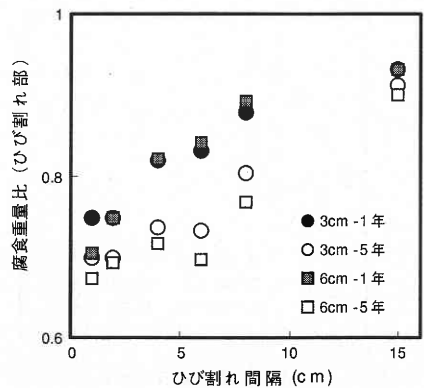


図 7 ひび割れ間隔とひび割れ部の腐食重量比の関係 (W/C = 0.60, 鉄筋長 110 cm)

に電位差が大きくなり、集中的に腐食が発生することとなる。したがって、ひび割れ間隔の腐食重量比の差があまり生じないことが考えられる。5 年後では、ひび割れ間隔が小さい場合には、ひび割れ間部分にも塩化物イオンが浸透するため、腐食重量比はひび割れ間隔に支配される結果となったことが考えられる。W/C = 0.60 の場合、塩化物イオン拡散係数は大となる。したがって、早期においてひび割れ部位外にも塩化物イオンが浸透し腐食が生じることが考えられ、故に腐食重量はひび割れ間隔に支配されることとなる。これより、W/C が大きい場合、ひび割れ間隔が小さい時はひび割れ部のみに極端な塩化物イオン濃度差が生じることではなく、その周辺全体に腐食が進行するため、W/C が小さい場合と比較して孔食の危険性は低くなることが考えられる。

5. ま と め

本研究により得られた成果を以下に示す。

- (1) 測定間隔が大きい場合、腐食重量を小さく見積もり、鉄筋中の最大腐食位置を誤って把握する危険性がある。
- (2) 腐食重量・位置を推定するためには、ひび割れ等欠陥近傍の自然電位を把握するべきである。
- (3) ひび割れを 2 本有するコンクリート中の鉄筋の総腐食重量、およびひび割れ部における腐食重量は、かぶり厚さよりもひび割れ間隔に支配される。
- (4) W/C が小さい場合、何れのひび割れ間隔においても、ひび割れ部のみ集中的に腐食が発生することが考えられる。W/C が大きい場合、ひび割れ間隔が小さい時は、ひび割れとその周辺全体に腐食が進行するため孔食の危険性は低くなることが考えられる。

(2001 年 9 月 10 日受理)

参 考 文 献

- 1) 塚原・魚本：ひび割れを有する鉄筋コンクリートの腐食に関する基礎的研究，生産研究，Vol. 51 No. 11, 1999.
- 2) 塚原・魚本：ひび割れを有するコンクリート中の鉄筋腐食シミュレーション，生研リーフレット，No. 304, 2000. 6.
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書 [維持管理編]，2001.
- 4) 横関 他：ひび割れを有する鉄筋コンクリートの塩化物浸透挙動と寿命予測に関する検討，コンクリート構造物のリハビリテーションに関するシンポジウム論文集，1998.
- 5) JCI：補修工法研究委員会報告書，1996.
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書 [施工編]，1999.
- 7) ASTM C-876: Standard Test Method for Half cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete, 1980.
- 8) 小山 他：自然電位を用いた鉄筋腐食状態の推定手法に関する基礎的研究，土木学会論文集，No. 550/V-33, 1996. 11.