

## 論文 コンクリート中の鉄筋の腐食速度に関する基礎研究

大住道生\*1・加藤佳孝\*2・魚本健人\*3

要旨：コンクリート中の鉄筋の腐食速度を推定する方法として、拡散方程式による物質移動をもとにした腐食速度算定式を提案した。腐食速度は鉄筋表面における酸素濃度に比例すると考え、その係数がイオンの濃度分布や含水率などの関数であるとした。鉄筋コンクリートの環境条件やかぶりの条件を変えた場合の鉄筋表面の物質濃度の変化を拡散方程式より導き、これに腐食速度算定式を適用することで腐食速度の変化を求めることが可能であることを示した。

キーワード：腐食速度、拡散方程式、濃度分布、拡散支配、

### 1. はじめに

コンクリート中の鉄筋の腐食量を推定することは構造物の寿命、及び補修計画を考える上で重要な問題である。しかし腐食に影響を及ぼす因子としては、鉄筋表面の条件に限っても水分量、酸素濃度、塩分濃度、pH、温度などに影響される。そしてこれらの条件が複雑に絡み合って腐食速度は決定されるが、経時的に変化するコンクリート中の各腐食因子の状態をかぶりコンクリートの外側から正確に知るのには難しい。またかぶり部分の構造、そして環境条件の変化に伴う鉄筋表面の各腐食因子の状態を定量的に考えるのは難しいといえる。そのためこれまでの多くの研究ではかぶりコンクリートや環境の条件を一定にした中で考慮したいものについてのみを変化させ、その因子の影響を調べるといった方法が採られることが多かった。しかし、一定にした環境がどのような環境であるのかによって得られる結果は異なったものとなる。

そこで本研究においては、実験的に測定することの難しい鉄筋周辺の環境を外部環境から計算し、環境条件を変化させたときの腐食速度を定量的に求めるための手法を提案する。

### 2. 解析モデル

コンクリート中はマトリックスの間に細かい空隙が無数に存在する構造になっている。腐食因子である水、酸素、塩化物イオン、二酸化炭素などはその空隙中を通して鉄筋表面に到達すると考えてよい。まず水の移動は水蒸気による拡散移動と液状水の毛細管力による移動が考えられる。しかし本研究では水の移動は定常状態になっているときを考え、飽水状態でないときは、細孔径の小さなものから液状水によって占められていると考える。酸素、二酸化炭素、塩化物イオンについては拡散による移動であると考え、含水率により見かけの拡散係数が異なるものとした。拡散理論はフィックの第2法則(式1)に従うものとした。

水分の拡散に関しては、コンクリート面外の湿度は一定にして液状水の供給は考えず、細孔中の水は定常状態を保っているとする。また腐食反応により消費される水量は無視できる。よって本モデルでは水分の移動は考慮しない。

\*1 東京大学大学院 工学系研究科土木工学専攻 (正会員)

\*2 東京大学助手 生産技術研究所 第5部 (正会員)

\*3 東京大学教授 生産技術研究所 第5部、工博 (正会員)

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \kappa_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \kappa_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (1)$$

$u$  : 濃度

$\kappa_x$  : x 方向の拡散係数

$\kappa_y$  : y 方向の拡散係数

酸素の拡散は、拡散係数が液相と気相とで異なることから、細孔と同等の大きさにメッシュを切れば厳密な考慮が可能であるが、計算機的能力上不可能であるので含水率による見かけの拡散係数を用いた。コンクリート面で酸素濃度はその温度の飽和溶存酸素量があるものとして考えた。また、鉄筋表面においては酸素濃度に比例して腐食反応が起こり、酸素が消費されると仮定した。すなわち、鉄筋の腐食反応は反応式に直接関係のあるものは鉄と水と酸素のみであり、酸素が水に溶けた状態で腐食が始まると考えられる。そのときの腐食に使用される水量は無視できるほど小さく、反応量に対して水量は無限に大きいといえるので酸素濃度が支配的であると考えた。

塩化物イオンの拡散は、イオンなので液相でしか拡散しないものとした。そして塩化物イオンはアルミネートと反応してフリーデル氏塩を形成するが、液相中では自由塩化物イオンとフリーデル氏塩は平衡を保つものと考えて、濃度を考慮した。固定化量には限界が存在するはずであるが、本研究では初期腐食まで考えれば十分であるので、固定化限界は考慮しない。また、炭酸化により塩化物イオンが遊離すると言われているが、本研究では二酸化炭素と塩化物イオンが同時に影響を及ぼすことはないものとする。塩化物イオンに起因する腐食開始条件は、鉄筋表面で塩化物イオン濃度が限界濃度に達した時点とする。また塩化物イオン濃度が増加するに従って腐食が増加する現象を、塩化物イオンにより腐食電池の電子が運ばれることにより比抵抗が変化するためであると考え、腐食速度の酸素濃度に対する係数が塩化物イオンの関数であるとした。この係数の決定に際しては濃度差による電位差の影響を考慮して、塩分を練混ぜ時に混入した濃度が均一であると思われる供試体の腐食速度のデータから算出した。塩化物イオンの電位に対する影響は存在することがわかっているが、電位に影響を及ぼす因子は多く、しかもその影響の度合いがよくわかっていないので、本研究では演繹的に考慮するにとどめる。

なお解析には2次元差分法のADI法を用い、0.2cm正方形メッシュに分割し、反応、拡散を1日単位で計算し、繰り返し計算を行った。

### 3. 酸素拡散支配

コンクリート中における酸素の拡散では、細孔構造中の拡散なので、経路の屈曲などの影響で通常の場合より拡散係数は小さくなる。出頭の研究[1]によれば、酸素の拡散係数は含水率に大きく影響され、含水率0%のコンクリートで $10 \sim 30 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{s}$ 、含水率80%で $0.1 \sim 0.4 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{s}$ である。またJCIのコンクリート構造物の補修工法研究委員会報告書[2]では海洋暴露(80%)ではコンクリートが $10^{-5} \text{cm}^2/\text{s}$ 、モルタルが $10^{-6} \text{cm}^2/\text{s}$ 、補修モルタルが $10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}$ である。この範囲でかぶり2cmのときに酸素の拡散係数の違いによる、酸素反応速度率(以下 $\alpha$ とする)の変化による腐食速度の変化について調べた。 $\alpha$ は鉄筋表面の酸素濃度に対して1日あたりの腐食する割合を示した数字で、イオンの濃度分布、含水率などの変化により変化する。森永の論文[3]から塩分を練混ぜ水の3%混入の鉄筋で、環境湿度100%の場合0.15程度である。

解析の条件として、かぶりコンクリートの表面は空気中の酸素濃度、溶解度に従って常に一定で、拡散によって減少した分すぐに補充されるものとし、酸素は鉄筋表面でのみ消費されるとする。この計算の結果得られた腐食速度と $\alpha$ の関係を図1に示す。この図から拡散係数  $10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$  では $\alpha$ が0.2以上では $\alpha$ が大きくなってても腐食速度はほとんど増加していない。この状態を本研究では酸素拡散支配と定義する。図2に示す様に酸素濃度は低下しており、つまり酸素拡散が遅いために $\alpha$ の上昇に伴って酸素濃度が減少してそれ以上腐食量は増加しなくなったと考えられる。それに対して図3の拡散係数  $10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$  では $\alpha$ の上昇にほぼ比例して腐食速度が上昇している。ここでは酸素移動はかぶりコンクリートによってほとんど影響を受けず、高濃度で定常状態に達するために腐食速度は $\alpha$ に支配される。また図4に示すように $\alpha$ が0.1程度では酸素拡散係数  $10^{-5}$ 程度までは拡散支配であり、その後酸素反応速度率に支配されている。また、森永[3]に拠ればかぶり厚さの2乗の逆数と腐食速度の間には比例関係が成り立つことが実験的に示されている。かぶり厚さを変化させた結果を図5に示す。このように酸素反応速度率支配である $\alpha=0.5, D=10^{-7}$ の場合には、かぶり厚さを増やしても塩分練混みなので $\alpha$ は変化せず、腐食防止にあまり効果がない。しかし酸素拡散支配である $\alpha=0.1, D=10^{-5}$ の場合にはかぶり厚さの増加による酸素供給速度の低下の効果が分かる。

#### 4. 含水率の変化による腐食速度の変化

マクロセル腐食を考える場合、腐食反応が起こるためにはアノードとカソードが液状水でつながっていないと、イオンの移動ができないために腐食しない。これがつながるかどうかは含水率に依存するため、含水率は酸素の拡散係数に影響を及ぼすだけでなく、酸素反応速度率にも影響を及ぼす。飯島ら[4]に拠れば水分量3.5%で腐食が開始し、水分量の増加に従って腐食量は増すことから、含水率で24.5%で腐食が

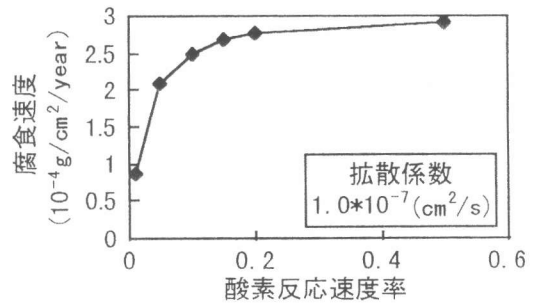


図1 酸素拡散係数が比較的小さい場合の酸素反応速度率と腐食速度の関係

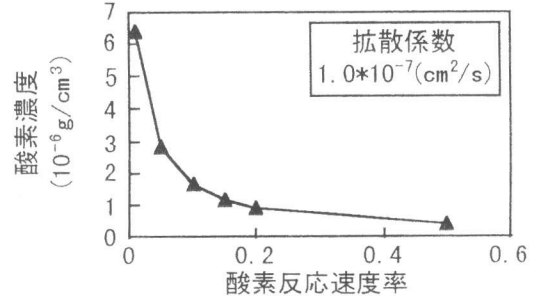


図2 酸素拡散係数が比較的小さい場合の酸素反応速度率と酸素濃度の関係

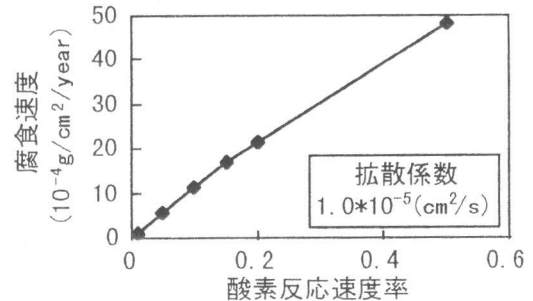


図3 酸素拡散係数が比較的大きい場合の酸素反応速度率と腐食速度の関係

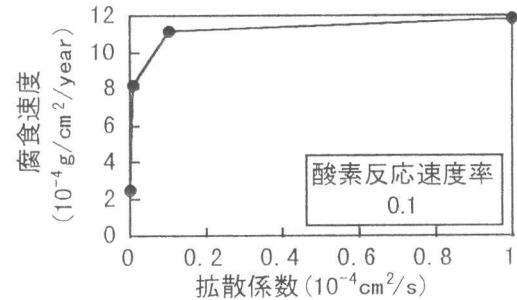


図4 酸素反応速度率一定とした場合の拡散係数と腐食速度の関係

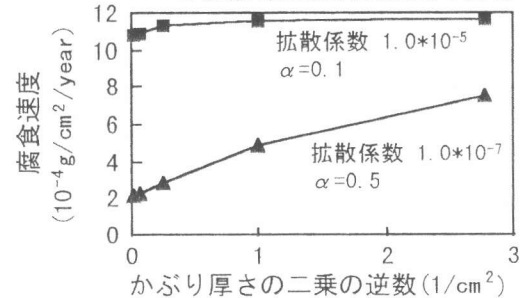


図5 かぶり厚さが腐食速度に影響を及ぼす条件

開始し 100%まで酸素反応速度率は直線的に増加すると仮定した。また拡散係数は出頭[1]による含水率と拡散係数の関係を以下の(式2)で近似した。

$$D_{O_2} = 2.0 \times 10^{-9} (105 - C_w)^3 \quad (2)$$

$D_{O_2}$  : 酸素の拡散係数(cm<sup>2</sup>/s)

$C_w$  : 含水率

その他の条件は、含水率 100%の時の酸素反応速度率を 0.151、かぶり厚さ 2cm、酸素濃度はコンクリート表面で常に飽和しているとして、腐食速度を計算した結果、図6のような曲線が得られた。この図では含水率 90%のときに腐食速度は最大に達し、それより含水率が高くても低くても腐食速度が減少する。まず含水率が 80%以下では酸素減少速度率に対して含水率が低いために拡散に対する妨げとなっておらず腐食速度は直線的に増加し、そこからは拡散による影響と酸素反応速度の影響が拮抗して、含水率 100%では酸素拡散支配となっている。このように含水率と腐食速度の関係において、ある含水率で極大値を持つことについては報告されており(たとえば[5])、現象をよく表しているといえる。またかぶりがモルタルに変わった場合など拡散係数が変化することがあるが、この場合には腐食速度が極大値に達する含水率が変化することは容易に予測できる。

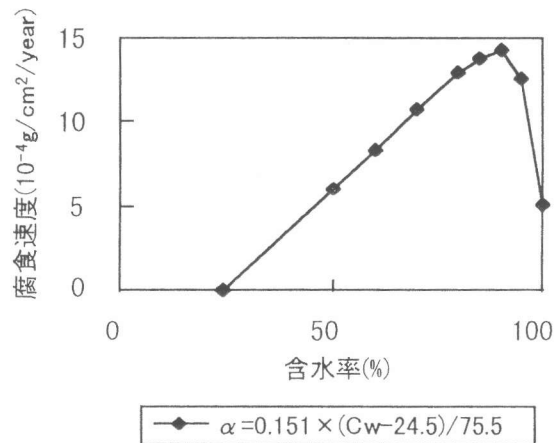


図6 含水率による腐食速度の変化

### 5. 腐食速度の推定

マクロセル腐食における腐食速度を考えるとときに自然電位、分極抵抗、比抵抗などによってモデル化されることがあるが、これらは非破壊検査としては有用な考え方であるが、直接これらを予測するのは難しい。そこで本研究においては腐食速度は酸素濃度に比例しその係数は以下のように与えられると仮定した。(式3)

この式の考え方は、まず電氣的な腐食の考え方と同様に、腐食速度は電流密度に比例すると考え、電流密度はオームの法則により自然電位を比抵抗で除したもので表される。しかし全面腐食の例に見られるように、電位差のみから腐食を考えることでは現象を表しきれないので、腐食推進力として実験的に値を求める。比抵抗に影響を及ぼすものとして水分分布、細孔構造、塩化物イオン濃度の影響が大きいと考え定式化した。

$$\alpha = \frac{(E_A + E_{\Delta Cl^-}) (kC_{OH^-} + IC_{Cl^-}) \cdot P_w}{R_A \cdot F_w \cdot F_{w/c}} \quad (3)$$

$E_A$  : 塩化物イオンの濃度差による以外の腐食推進力 (分極抵抗分を含む)

$E_{\Delta Cl^-}$  : 塩化物イオン濃度差による腐食推進力

$C_{OH^-}$  : 水酸化物イオン濃度

- $C_{Cl^-}$  : 塩化物イオン濃度
- $P_w$  : 含水率による抵抗の変化
- $R_A$  : 基本抵抗
- $F_w$  : 単位水量の関数
- $F_{w/c}$  : 水セメント比の関数

この章ではこのうち塩化物イオンによる項のみを考慮して解析を行う。森永の論文[3]より、まず塩化物イオンを練り混ぜ水に混入し、かぶり厚さ 1mm の鉄筋の相対湿度 100% の腐食速度より塩化物イオンの濃度差がない状態の腐食速度を求める。このとき鉄筋表面の酸素濃度は常に飽和状態であると仮定し、この練り混ぜ水への塩化物イオンの混入量を変化させることで、塩化物イオン濃度による影響が得られる。この影響度が上式の 1 である。このときの腐食速度に対して塩化物イオン濃度の差があるものについて腐食速度を測定することにより  $E_{\Delta Cl^-}$  が求められる。これについては条件のよく合う既往の実験が見つからなかったため柴田ら[5]の研究などを参考に適当に定めた。

モデルとしてはかぶり厚さ 2cm、飽水状態の鉄筋コンクリート梁で、中央に微小ひび割れがあり、塩化物イオンは表面で海水濃度が保たれているものとした。この微小ひび割れは直線状に連続的であるので、微小ひび割れ部分の見かけの拡散係数の鉛直方向のみが大きくなるとし、均一部分に対してその見かけの拡散係数を塩化物イオン、酸素とも 10 倍とした。そして塩化物イオンと酸素を同時に拡散させ、鉄筋上の塩化物イオンが腐食開始濃度になったところから腐食が開始すると仮定した。このため、鉄筋上で塩化物イオンの濃度が相対的に高いところは腐食速度が増大し、低いところは腐食速度が減少し、濃度差が大きくなると濃度が低い部分の反応が停止する。塩化物イオンの拡散は腐食反応の影響は受けないものとした。使用した値については表 1 に示す。供試体図を図 7 に、またこれらの条件により計算して得られた二年後の塩化物イオン分布、酸素分布、腐食量分布を図 8 に示す。

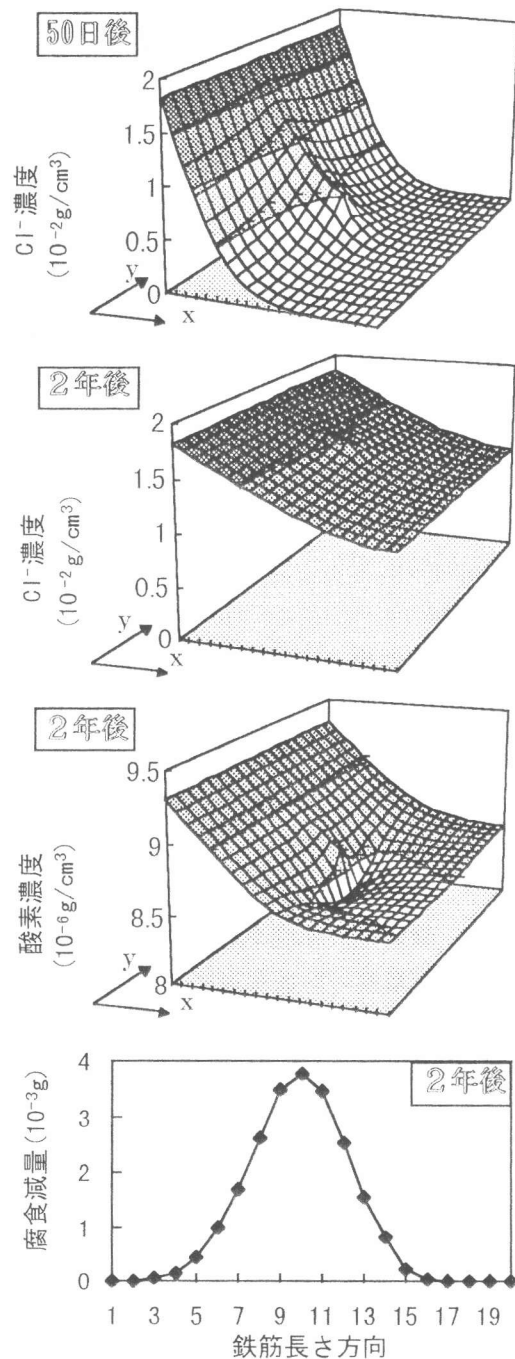
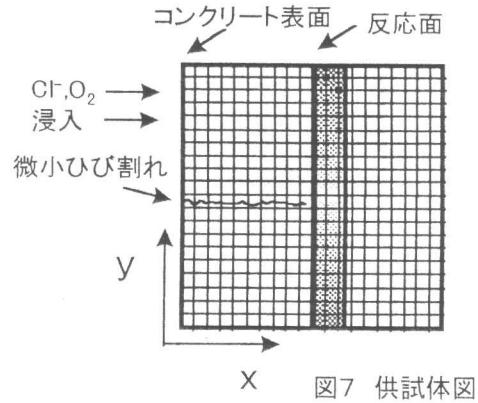


図 8 塩化物イオンの浸入による腐食解析例

表1 解析条件

	拡散係数(cm <sup>2</sup> /s)	初期値(g/cm <sup>3</sup> )	境界値(g/cm <sup>3</sup> )	腐食開始濃度(g/cm <sup>3</sup> )
塩化物イオン	1.0 × 10 <sup>-7</sup>	0	1.82 × 10 <sup>-2</sup>	2.10 × 10 <sup>-3</sup>
酸素	1.0 × 10 <sup>-5</sup>	9.31 × 10 <sup>-6</sup>	9.31 × 10 <sup>-6</sup>	-

計算結果から、微小ひび割れのある中央部分直下の鉄筋付近が塩化物イオン濃度が高く、その濃度差により集中的に腐食し、両端では逆に腐食開始条件を満たす前に中央部分との濃度差が大きくなり、結局腐食していない。腐食速度についてはひび割れ直下が飛び抜けて大きい、しかし図9に示すように、ひび割れ直下では約2年後以降になると腐食速度は下がり逆に周辺部の腐食が開始する。通常腐食の進行に従って腐食速度が下がるのは錆による拡散速度の低下によるものと考えられているが、本モデルではその効果については考慮しておらず、塩化物イオン濃度の濃度差が減少してきたことによる酸素反応速度率の低下が原因である。現実の腐食においてもこのことは考慮するに値することがらであると思われる。ここで得られた腐食速度は実際にあり得る値ではあるが、実構造物の腐食速度の予測には、境界条件の精度や環境の経時的変化に対する対応が必要となる。

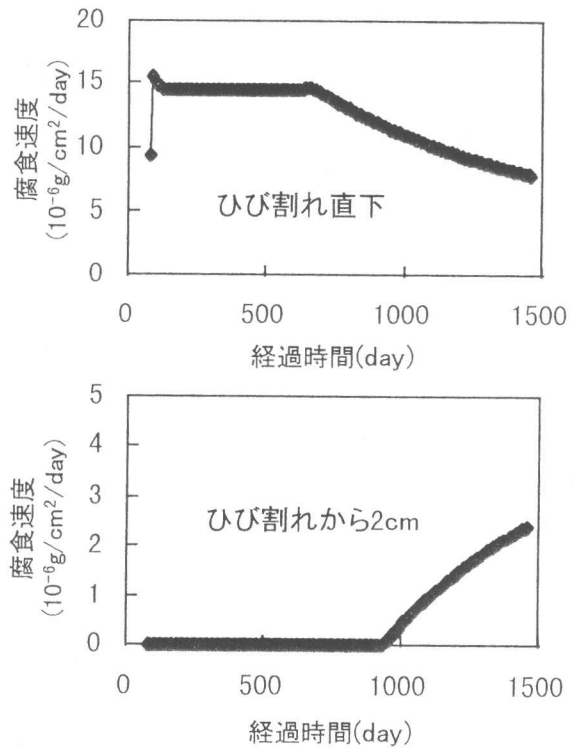


図9 Cl<sup>-</sup>の腐食速度に対する影響

## 6. まとめ

本研究で明らかになったことは以下の通りである。

1. 腐食速度が酸素濃度に比例すると考えると、拡散理論を使って酸素拡散支配の起こる条件を数値的に示すことができた。
2. 含水率の変化によって、酸素の拡散係数と酸素反応速度率が変化すると考えると、それらの値によっては、ある含水率で腐食速度が極大値を持つことを計算的に示すことができた。
3. 酸素拡散速度率を鉄筋表面及びかぶりコンクリートの条件により定義すると、塩化物イオン濃度の拡散移動に従って腐食が開始し、腐食速度が変化する様子を数値的にモデル化することができた。今後さらに各因子の値やその腐食速度への影響度について研究が進めば、腐食速度の定量的予測が可能になるとと思われる。

## 参考文献

- [1]出頭圭三：セメント系材料の酸素拡散性状に関する研究；東京大学学位論文
- [2]JCI：コンクリート構造物の補修工法研究委員会報告書；1992
- [3]森永繁：鉄筋の腐食速度に基づいた鉄筋コンクリート建築物の寿命予測に関する研究；東京大学学位論文
- [4]飯島亨他：鉄筋腐食に及ぼす中性化、塩分量、水分量の影響；土木学会年次学術講演会 1995
- [5]柴田常德他：酸素透過性が鉄筋コンクリートのマクロセル腐食に及ぼす影響；土木学会年次学術講演会 1995