

酸素拡散理論に基づくコンクリート中の 鉄筋の腐食速度予測法

大住道生¹・魚本健人²

¹正会員 工修 建設省土木研究所 耐震研究室研究員 (〒305-0804 つくば市旭1番地)

²フェロー会員 工博 東京大学生産技術研究所 第5部教授 (〒106-0032 東京都港区六本木7-22-1)

塩化物イオンの浸入によりコンクリート中の鉄筋の腐食が開始する場合の、腐食速度の予測を差分法による拡散計算により行った。コンクリート中の鉄筋の腐食速度は鉄筋表面の酸素濃度に比例し、腐食速度は鉄筋表面の腐食因子により決定されると仮定することにより、鉄筋の腐食速度の経時変化が求められることを示した。また計算の結果から、鉄筋の腐食速度は、かぶりコンクリートの塩化物イオン透過性とその不均一度に大きく影響されることがわかった。さらに、腐食箇所以外の塩化物イオン濃度も高い可能性が示され、腐食位置のかぶりコンクリートのみののはつりだしによる補修方法は不十分であることを指摘した。

Key Words : corrosion rate, oxygen diffusion, chloride diffusion, chloride distribution, permeability of cover concrete

1. はじめに

腐食環境にある鉄筋コンクリート構造物を安全かつ計画的に供用するためには、鉄筋の補修時期を事前を知る事が強く望まれる。そのためにはコンクリート中の鉄筋の腐食速度を知ることが必要不可欠であり、その手法の確立が望まれる。

腐食反応が進行するために必要な要素として水、酸素、鉄イオンがある。また、鉄はコンクリート中のようなアルカリ性環境の中では不動態皮膜を生じるため、コンクリートが中性化するあるいは塩化物イオンがコンクリート中に浸入することによって腐食が開始する。森永の研究¹⁾によれば、コンクリート周辺の酸素濃度の上昇、コンクリート周辺の湿度の上昇、コンクリートに混練する塩化物イオン量の上昇などにより鉄筋の腐食速度が増大することは知られている。しかし、直接に腐食速度を決定するのは、鉄筋表面とその近傍での腐食因子の値であると考えられる。そして、実験的に直接その値を求めることは現在不可能である。なぜなら、かぶりコンクリートをはつて鉄筋表面を露出した段階で、その状態はすでに腐食反応の起こっていた状態から変化してしまっているからである。間接的に求める手法としては、数々の電気化学的な非破壊試験法が提案されているが、現場での測定が難しい、測定誤差

が大きいというような問題点があり²⁾、十分な方法であるとはいえず、腐食予測ではなくむしろ早期発見を目的としたものである。

そこで、拡散理論により鉄筋表面近傍での腐食因子の濃度を計算することにより、腐食速度の推定を行う必要が生じる。日本コンクリート工学協会のコンクリート構造物の補修工法研究委員会報告書(以下委員会報告書とする)³⁾では、酸素の拡散係数を仮定して、コンクリート表面からの拡散移動により鉄筋表面に供給される酸素量を使って腐食速度を推定している。委員会報告書では、酸素の拡散移動を考える際に、鉄筋表面上に拡散層という液状水で満たされた厚さ数十マイクロメートルの層を考えて、層の外側と層の内部の拡散係数を変化させることで、酸素の拡散速度と現実の腐食速度をあわせている。そのときの条件として、委員会報告書では鉄筋に到達した酸素は、直ちにすべて腐食反応に使用されると仮定している。

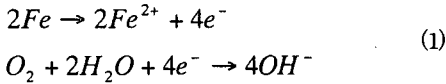
しかし、本研究では腐食速度は鉄筋表面近傍の酸素濃度に比例し、腐食速度を決定する係数部分にその他の腐食因子の影響が含まれるものと仮定した。つまり、拡散層の考え方をせず、腐食時に鉄筋表面に酸素が残っている状態で反応が進行していくとした。係数部分については、既往の実験データから決定する。このような考え方により、様々な条件における腐食速度推定の実行可能性を示し、各腐食

因子が腐食速度に及ぼす影響度について考察した。

2. 腐食速度推定理論

(1) コンクリート中における鉄筋の腐食反応

鉄筋の腐食反応は式(1)に示すように、鉄と酸素と水のみによって生じる。



腐食反応の結果生成する物質は、一般的には赤錆といわれる Fe_2O_3 は3価の鉄イオンであるが、どの段階でこの赤錆になるのかわかっていないため、初期の腐食反応では2価の鉄イオンになるものと仮定し、式(1)で計算する。

ただし、鉄はアルカリ性環境下ではその表面に不働態皮膜と呼ばれる酸化皮膜を生じ、この皮膜が酸素の透過を妨害して腐食反応が進行しないとされている²⁾。しかし鉄筋周辺のpHが低下する、あるいは塩化物イオン等がある一定濃度以上存在することにより不働態皮膜は破壊され、鉄筋の腐食が進行する²⁾。

コンクリート中の腐食環境を考えると、水はコンクリートの混練時から存在し、水和反応によっても全てが消費されることはない。また室内環境などの特殊な場合をのぞき、水分は雨、潮、水蒸気から補給される。酸素はコンクリート表面からの拡散移動によってコンクリート中を通して鉄筋表面に供給される。

コンクリート中での腐食は、腐食生成物が不均一で、電気的な不均一性もみられることから、マクロセル腐食と呼ばれる腐食形態であると考えられている⁴⁾。すなわち鉄イオンが溶出するアノード部と、酸素と水から水酸化物イオンが生成するカソード部とからなる。このときコンクリート内部に電池が生成しており、電池の陽極と陰極はイオンが移動するために液状水でつながっている必要がある。本研究では特に、腐食速度が速く鉄筋コンクリート構造物の使用上問題となる場合を考えるため、鉄筋表面に十分な液状水が存在していると仮定した。

コンクリート中の鉄筋の腐食速度を推定するためには、腐食反応のうちのどの段階が律速となっているかを考えるのが合理的である。一般に、腐食環境は腐食速度を決める要因に従って、アノード支配、カソード支配、抵抗支配の3つの状態に分類される。ただし本研究では、鉄筋表面に液状水が十分に存在する状態を仮定したため、抵抗支配とはなりにくいと考えられる。腐食反応で消費される水の量はそれに比較して十分小さいので、腐食反応が生じているときの腐食速度は直接的には水分量にはよらないといえる。本研究では、アノード支配を代表して、塩化物イオンによる不働態の破壊とその活性が腐食反応に対して支配的となる場合を想定して酸素反応速度率支配と呼び、カ

ソード支配を代表して、酸素の拡散速度による律速状態を酸素拡散支配と呼ぶ。この仮定を式で表すと式(2)のようになる。

$$q(t) = K \cdot \alpha(t) \cdot C_{O_2}(t) \quad (2)$$

ここで、

q : 腐食速度 (g/cm²/day)

K : 分子量換算係数 (=55.8×2/32.0)

α : 酸素反応速度率 (cm³/cm²/day)

C_{O_2} : 鉄筋表面付近の酸素濃度 (g/cm³)

酸素反応速度率とは、本研究で定義した用語で、鉄筋周辺の酸素濃度に対して1日あたりに酸素が反応する重量比を表している。この値は、腐食速度に対する含水率、塩化物イオン濃度、pH等による影響を数値で表したものである。これらの要因による影響は理論的に算出することができないので、既往の実験結果にすり合わせることで腐食速度の算出を可能にする。森永の論文⁹⁾から、塩分を練混ぜ水の3%混入した、水セメント比60%の中性化をしていないコンクリートが、湿度100%の環境に置かれていた場合、酸素反応速度率は0.151程度である。

(2) 腐食要素の拡散移動

腐食反応が起こる場所は鉄筋表面近傍としたが、腐食要素の中で酸素と塩化物イオンについては、コンクリート表面からの移動を考えなければならぬ。本研究ではこれらの要素はコンクリート表面から拡散移動により鉄筋表面に供給されるとし、フィックの第2法則式(3)に従うものとした。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \kappa_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \kappa_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (3)$$

ここで、

u : 濃度 (g/cm³)

κ_x, κ_y : x, y方向の拡散係数 (cm²/day)

境界条件としては、酸素はコンクリート表面で20℃の水に対する飽和溶解度とし、鉄筋表面だけで消費される半無限の拡散と仮定した。酸素の通過経路はコンクリート中の細孔であるが、細孔中に水が存在している場合と乾燥している場合とでは、酸素の拡散係数は格段に変化する。腐食反応に使われる酸素は水中に溶解している状態であると考えられることから、外気から供給される酸素は径路上のどこかで必ず水に溶解することとする。拡散移動時間は気中での移動時間と水中での移動時間の和であるが、水中での移動時間に比較して、気中での移動時間および溶解に

かかる時間は無視できると考えられる。また実際には、含水率とかぶりコンクリートの細孔構造によって水面位置は変化するが、水の分布を精度よく推定することは難しいこと、細孔が完全に液状水で占められているときの拡散係数のデータがないことから、拡散係数の値はマクロ的に、ある含水率での拡散係数という形で用いる。これを見かけの拡散係数と呼ぶ。

コンクリート中における酸素の拡散現象は、細孔構造中での拡散なので、経路の屈曲などの影響で障害物がない環境に比べて見かけの拡散係数は小さくなる。出頭の研究⁹⁾によれば、酸素の見かけ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¹⁰⁾で解析を行うにあたり仮定した見かけの拡散係数は、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。解析をする上では、厳密な意味での拡散係数より見かけの拡散係数を用いた方が便利であるので、以後拡散係数とは見かけの拡散係数を指すものとする。

塩化物イオンの浸透については、かぶりコンクリート表面で海水濃度とし、溶出については考慮せず、半無限の拡散とした。実構造物では、塩化物イオンは乾湿繰り返しによりコンクリート表面付近で濃縮し、濃度勾配がきつくなることや、水の移動に伴い塩化物イオンがその流れとともに移動すること、あるいは乾燥により移動が止まることがある。しかし、これらの影響は複雑であり、容易にはモデル化できないため、本研究では水分の移動はなく、含水率が一定状態での拡散とした。

また塩化物イオンはコンクリート中の水酸化カルシウム及びC-S-Hと反応し、フリーデル氏塩と呼ばれる複塩を生成することが知られている。フリーデル氏塩が生成されることにより塩化物イオンはそこに固定化されるが、フリーデル氏塩と塩化物イオンは平衡状態になるため、塩化物イオンの拡散移動が完全に止められるわけではない。よってこの効果が腐食に影響を及ぼすのは、腐食開始時期の決定のみであると考えた。腐食開始時期の決定は、鉄筋表面位置での可溶性塩分濃度によるとし、小堀らの研究¹¹⁾を参考に、全塩分内の50%が可溶性塩分であると仮定して計算した。

塩化物イオンの場合も、現実には含水率、細孔構造によって拡散速度は変化する、拡散係数は部分によって異なると考えられるが、本研究では見かけの拡散係数を用いた。

(3) 解析手法

前節(3)に示したように、酸素及び塩化物イオンは拡散のみにより移動するものとし、本研究では2次元差分法であるADI法を用いて計算した。解析のメッシュは図-1

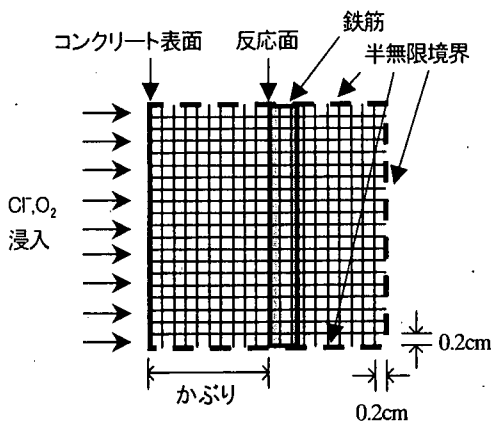


図-1 解析メッシュ

に示すように、1セルを0.2cm四方の正方形とし、塩化物イオン、酸素が施工後に浸入する場合にはコンクリート表面から浸入するとし、表面以外の3面については半無限となるように境界条件を設定した。タイムステップは1日を単位とした。解析モデルは2次元で奥行き方向には一定であるため、腐食反応は、鉄筋表面のかぶり側でのみ起こると仮定した。従って、本解析上鉄筋径はパラメータとなっていない。また、腐食生成物による拡散係数の経時変化は考慮していない。

3. 酸素拡散支配と酸素反応速度率支配

本研究で定義した酸素反応速度率の考え方を整理し、コンクリート内部の腐食環境の状態を分類するために、前章までの考えを元に、反応速度を一定すなわち α を一定と仮定した場合に、酸素の拡散係数と腐食速度の間の関係について考えてみる。既往の例¹²⁾から換算して、 $\alpha=0.151$ と仮定し、腐食反応に必要な水は十分に存在するものとした。また腐食開始の条件は満たしていることとした。これは、水セメント比60%のコンクリートに3%の塩化物イオンを混入した条件下で、酸素の拡散係数を変化させたと考えてよい。計算の結果、図-2に示すような関係が得られた。これによると、拡散係数を 1×10^7 程度に小さくすれば腐食速度を抑制することが可能であるが、 1×10^4 から 1×10^5 に拡散係数を減少させても、腐食の進行を抑制する効果はあまりないことを示している。

次に、酸素の拡散係数を 1×10^7 としたときの酸素反応速度率(以下 α とする)の変化による腐食速度の変化について調べた。この計算の結果得られた腐食速度と α の関係を図-3に示す。この図から拡散係数 $10^7 \text{cm}^2/\text{s}$ の場合、 α が0.2以上では α が大きくなっても腐食速度はほとんど増加していない。このように、 α をそれ以上大きくしても腐食速度が増加しない状態を本研究では「酸素拡散支配」と定義する。このときの鉄筋表面近傍での酸素濃度は、図

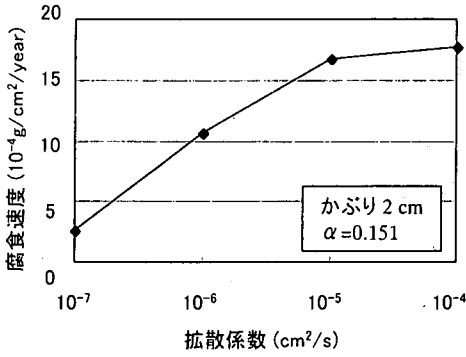


図-2 酸素拡散係数と腐食速度の関係

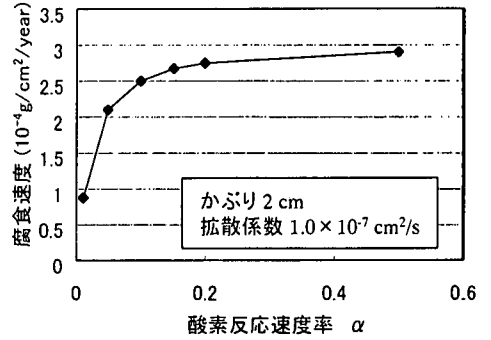


図-3 酸素拡散係数が比較的小さい場合の酸素反応速度率と腐食速度の関係

-4に示すように α が大きい領域で低下しており、これは酸素拡散が遅いため α の上昇に伴って酸素濃度が減少してそれ以上腐食速度は増加しなくなったものと考えられる。それに対して図-5の拡散係数 $10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$ の場合、 α 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 α に支配される。この状態を本研究では酸素反応速度率支配と定義する。以上のことから、コンクリート中の鉄筋の腐食環境には大きく分けて、酸素拡散支配と酸素反応速度率支配の二つの状態が存在することがわかる。このことが既往の研究において、各腐食因子の腐食に対する効果の定量化を阻んできた一つの要因であると考えられる。すなわち、たとえば酸素拡散支配の状態では塩化物イオン濃度を増加させた場合と、酸素反応速度率支配の状態では塩化物イオン濃度を増加させた場合では、腐食速度の変化率は異なることになる。しかも塩化物イオン濃度を増加させたことにより、酸素反応速度率支配から酸素拡散支配へと移行することもあるわけである。

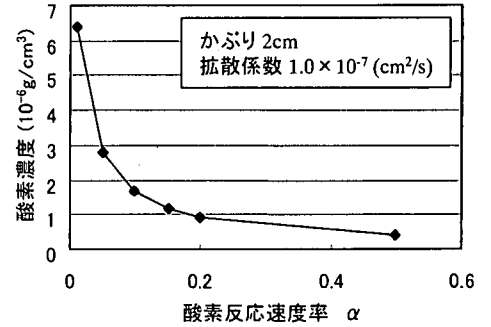


図-4 酸素拡散係数が比較的小さい場合の酸素反応速度率と酸素濃度の関係

また、森永³⁾に拠ればかぶりの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。かぶりを変化させた結果を図-6に示す。このように酸素反応速度率支配である $\alpha=0.1, D=10^5$ の場合、かぶりを増やしても塩分練混みなので α 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 $\alpha=0.5, D=10^7$ の場合にはかぶりの増加による酸素供給速度の低下の効果が分かる。

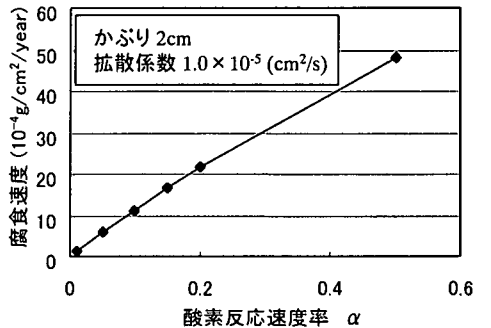


図-5 酸素拡散係数が比較的大きい場合の酸素反応速度率と腐食速度の関係

4. 含水率の変化による腐食速度の変化

本章では酸素反応速度率にかわり、含水率の変化に伴うコンクリート中の電気抵抗を考えた場合について同様の考え方ができることを検証する。マクロセル腐食を考える場合、腐食反応はコンクリート中のイオンが電荷を運搬することによって成立するため、含水率は酸素の拡散係数に影響を及ぼすだけでなく、コンクリート中の電気抵抗にも

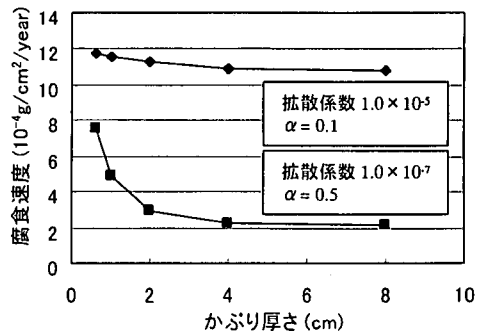


図-6 かぶり厚さが腐食速度に影響を及ぼす条件

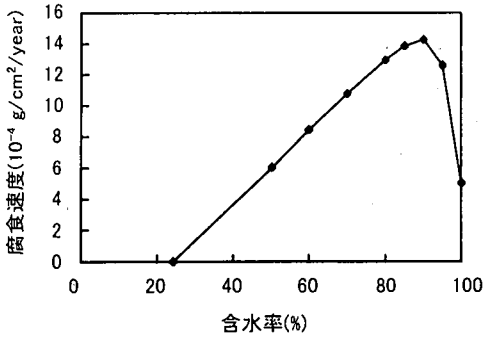


図-7 含水率の違いによる腐食速度の変化

影響を及ぼす。飯島ら⁷⁾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、含水率が 24.5%で腐食が開始し 100%で 0.151 まで抵抗は直線的に増加すると仮定した(式(4))。

$$q(t) = K \cdot R \cdot C_{O_2}(t)$$

$$R = 0.002 \times (C_w - 24.5) \quad (4)$$

ここで、
 R : 抵抗
 C_w : 含水率(%)

また拡散係数は出頭⁸⁾による含水率と拡散係数の関係を以下の式(5)で近似した。

$$D_{O_2} = 2.0 \times 10^{-9} (105 - C_w)^3 \quad (5)$$

ここで、
 D_{O_2} : 酸素の拡散係数(cm²/s)

その他の条件は、かぶり 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-7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。含水率が 24.5%以上 80%以下では抵抗支配となっており、含水率の上昇に従って腐食速度は直線的に増加する。含水率 80%から 95%程度の間は、拡散による影響と抵抗の影響が拮抗して、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既往の研究においても報告されており(たとえば⁹⁾、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。

5. 塩化物イオンが腐食速度に及ぼす影響

次に、塩化物イオンが腐食速度に及ぼす影響を考える。これまでに腐食時の酸素の役割、含水率と腐食速度の関係を考えてきたが、現実の腐食を考えるときにはそれだけでは不十分である。塩化物イオンは腐食反応の直接の反応物質ではないが、塩化物イオンが存在する場合、腐食反応に影響を与えているのは明らかである。塩化物イオンの影響について本研究では以下の3点を考える。

- ① 塩化物イオン濃度が鉄筋表面で 0.3%になると腐食反応が開始する。
- ② 鉄筋表面付近の塩化物イオン濃度の上昇に伴って、腐食速度は線形に増加する。
- ③ 鉄筋表面間の塩化物イオン濃度の差に伴って、相対的に塩化物イオン濃度が高い方が腐食速度は増大し、低い方は腐食速度が減少する。

①については、練り込む塩分量を変化させたときに、コンクリート中の鉄筋の腐食の有無を調べる実験¹⁰⁾において、塩化物イオン濃度が 0.3%以下ではほとんど腐食が見られなかったのに対して、塩化物イオン濃度が 0.3%以上で腐食がみられる割合が急激に上昇したことから、この濃度が不動態皮膜が破壊される濃度であると仮定した。

②については、練り込む塩分量を変化させてそのときの鉄筋の腐食減量を調べた実験¹¹⁾において、かぶり 1mm、相対湿度 100%の環境条件で、練り込む塩分量と腐食減量から求めた腐食速度の間に線形関係がみられたことから、このように仮定した。

③については、練り込んだ塩分量の異なるコンクリートを隣接させた供試体による腐食実験¹²⁾において、鉄筋表面間の塩化物イオン濃度の差により、アノードとカソードの区別ができ、差が大きいほど腐食速度の差も大きくなる。また、塩化物イオンの濃度差と自然電位の電位差が比例するという報告もある¹³⁾。よって以上のように仮定した。

かぶりコンクリートが一様で経時的にも変化しないと仮定した場合、鉄筋表面は全面同時に腐食を開始する。塩化物イオン濃度の上昇とともに酸素反応速度率は上昇し、やがてコンクリート内部の塩化物イオン濃度は、コンクリート表面の塩化物イオン濃度で定常状態に達する。そのとき、酸素の消費量も定常状態となり、コンクリート表面から鉄筋表面までの酸素濃度は、直線的に減少し、鉄筋より内側の酸素濃度は一定である。ここまでは計算によらずとも容易に考えられるが、しかし現実にはこのように定常状態となったときには、すでに腐食がかなり進行している。腐食速度の予測の目的の一つである補修時期の決定のためには、定常状態となるまでの過程が重要なことが多い。そのためには、酸素反応速度率を塩化物イオン濃度の式で表すことが必要となる。そこで①、②、③の仮定を元に、森永の研究、柴田の研究の腐食データとの擦り合わせによ

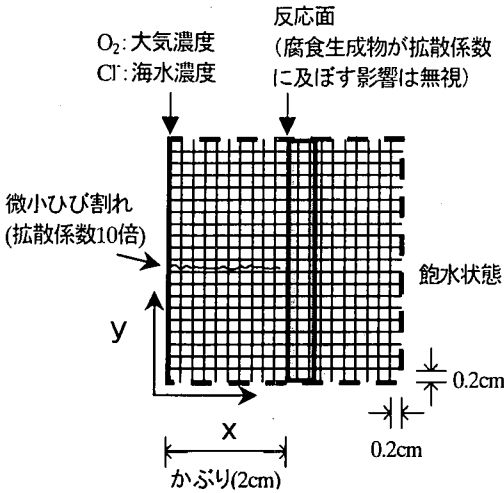


図-8 解析条件

表-1 境界条件

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

つて、 α を以下の式(6)のように定める。

$$\alpha = \alpha_0 - (0.151 + 16.9 \cdot C_{Cl^-}) (1 + 220 \cdot \Delta C_{Cl^-}) \quad (6)$$

ここで、

α_0 : 基準酸素反応速度率

C_{Cl^-} : 鉄筋位置での塩化物イオン濃度

ΔC_{Cl^-} : 鉄筋位置間での塩化物イオン濃度の差

式(6)を用いて、コンクリート表面から塩化物イオンが進入するときの腐食速度の経時変化を計算した。

まず、かぶりコンクリートに初期ひび割れが存在する部分の、鉄筋の腐食速度の変化を計算した。解析モデルを図-8に示す。モデルはかぶり 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考え、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 倍と仮定した。そしてコンクリート表面から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

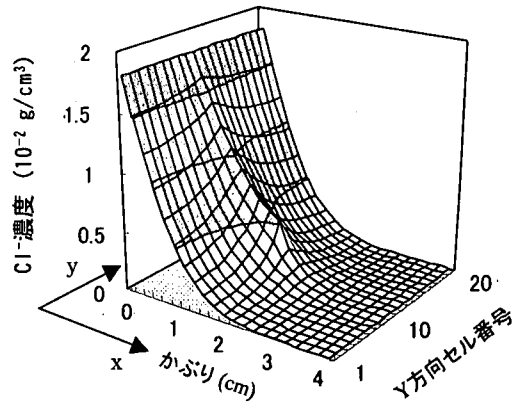


図-9 50日後の塩化物イオン濃度の分布

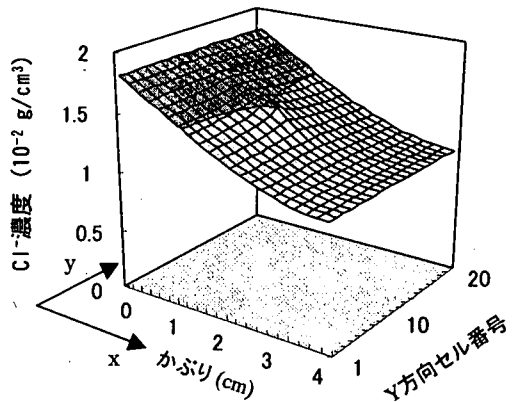


図-10 2年後の塩化物イオン濃度の分布

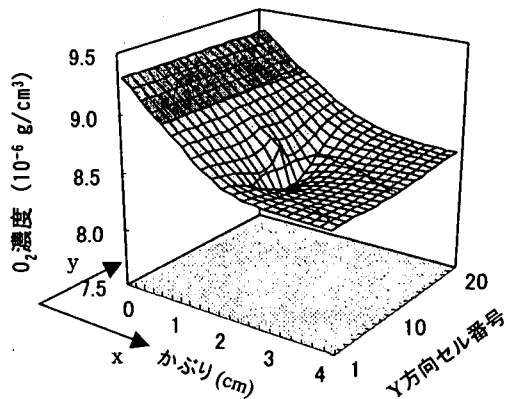


図-11 2年後の酸素濃度の分布

が停止する。ここで塩化物イオンの拡散は腐食反応の影響を受けないものとした。計算に使用した拡散係数、初期濃度、境界濃度については表-1に示す。

以上の条件により計算して得られた50日後の塩化物イオン濃度の分布、2年後の塩化物イオン濃度の分布、酸素濃度の分布、腐食量の分布をそれぞれ図-9、図-10、

図-11, 図-12に示す。図-9を見るとわかるように、塩化物イオンはひび割れから急速に浸入し、周辺部よりかなり濃度が高くなっている。しかしこのときはまだ腐食開始濃度にはなっていない。その後、図-10に示すように鉄筋表面の塩化物イオン濃度が全体的に上昇するとともに、鉄筋表面間の濃度差は減少している。このとき、図-11に示すように酸素濃度はかなり高い濃度であり、酸素濃度の供給は全体に十分であるといえる。このような状態の下で、2年後の腐食減量は図-12のようにひび割れ直下に腐食が集中し、周辺部ではほとんど腐食していない。これは、微小ひび割れのある中央部分直下の鉄筋付近では塩化物イオン濃度が高く、鉄筋表面間で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ことを示している。この結果は、一般にかぶりコンクリートにひび割れ等の欠陥が存在する場合の腐食が、その直下に集中するという現象をよく表している。さらにこの結果から、腐食箇所以外も塩化物イオン濃度が高い可能性が示されており、このような場合、腐食位置のみのはつり出しによる補修を行うと他の部分がアノードとなるため、腐食を防ぐことはできないといえる。

次に、同じモデルの8年後の塩化物イオン濃度の分布、腐食量の分布を図-13, 図-14に示す。ただし腐食生成物によるひび割れの発生や拡大はないものとした。このときの塩化物イオン濃度は図-13に示すように、さらに上昇すると同時に均一化している。また、このときの腐食減量の分布は図-14に示すように、ひび割れ直下でも増加すると同時に、周辺部においても腐食が開始している。これは周辺部においても塩化物イオン濃度が腐食開始濃度を超え、さらに鉄筋表面間の濃度差による影響が打ち消される程度にまで濃度上昇をしたためである。逆に、ひび割れ直下では腐食速度は減少し、全面でほぼ等しい腐食速度となっている。本計算では腐食生成物による腐食要因物質の拡散移動の阻害効果を考慮に入れていないため、ひび割れ直下での腐食速度はこれ以上減少しないが、腐食域が部分腐食から全面腐食に至る現象をよく表しているといえる。

6. 結論

コンクリート中の鉄筋の腐食速度を推定するために、酸素濃度に着目し、腐食速度は鉄筋表面の酸素濃度と酸素反応速度率の積で表されると仮定した。その結果以下に示すような結論を得た。

- ・鉄筋腐食時の状態として、酸素拡散支配と酸素反応速度率支配との大きく二つの状態に分けられる。
- ・コンクリート中の含水率の変化によって酸素の拡散係数、及び酸素反応速度率が変化すると仮定すると、腐食

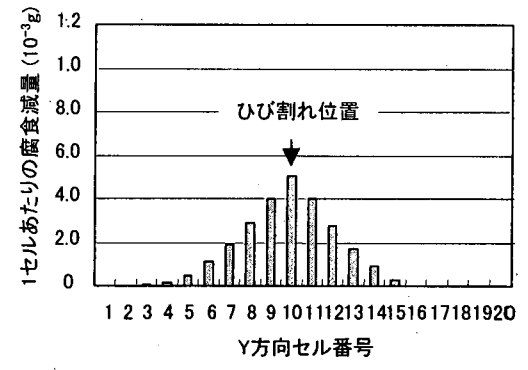


図-12 2年後の腐食減量の分布

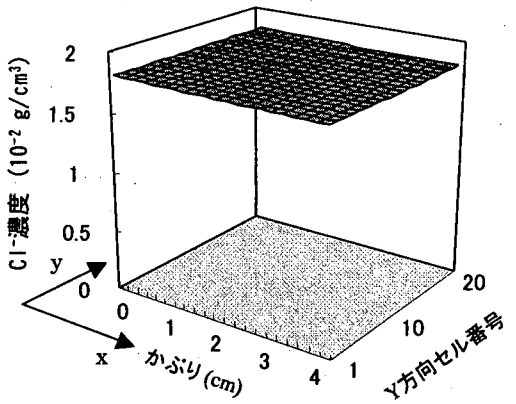


図-13 8年後の塩化物イオン濃度の分布

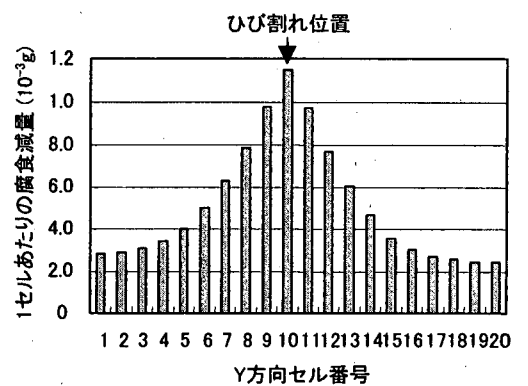


図-14 8年後の腐食減量の分布

速度と含水率の関係は、ある含水率でピークを持つ曲線になる。この事実は既往の研究により確認されている。

- ・酸素反応速度率を塩化物イオン濃度の関数として表すことで、コンクリート表面から塩化物イオンが浸入する場合の鉄筋の腐食速度の経時変化を計算できることがわかった。
- ・塩化物環境下にあるコンクリート中の鉄筋が腐食した際の補修方法として、部分のはつり出しによる補修では腐食を防ぐことができない可能性が示された。

謝辞:本研究は東京大学生産技術研究所魚本研究室で行った修士論文の一部であります。本研究を行うに当たり、貴重なご助言を頂きました東京大学の前川先生、鹿児島大学の武若先生に深く感謝いたします。また、ご助力を賜りました魚本研究室の加藤先生を始め、研究室のみなさまには感謝にたえません。

参考文献

- 1) 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, 1986.
- 2) 小林豊治, 米澤敏男, 出頭圭三, 小林一輔編:鉄筋腐食の診断, コンクリート構造物の耐久性診断シリーズ3, 森北出版株式会社, 1993.
- 3) 日本コンクリート工学協会:コンクリート構造物の補修工法研究委員会報告書, 1992.
- 4) 伊藤伍郎:腐食科学と防食技術, コロナ社, 1969.
- 5) 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, 1986.
- 6) 小堀光憲, 永野宏雄:コンクリート中の鉄筋腐食と塩分量に関する一考察, 第8回コンクリート工学年次講演会論文集, 1986.
- 7) 飯島亨, 石原義明, 下田譲二, 原田康朗:鉄筋腐食に及ぼす中性化、塩分量、水分量の影響, 土木学会年次講演会第5部, 1995.
- 8) 柴田常德, 大即信明, 長滝重義, 宮里心一: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, 土木学会年次講演会第5部, 1995.
- 9) 石川光男:コンクリート構造物の補修工法研究委員会「解析WG」第9回資料.

(1999.1.8 受付)

PREDICTION METHOD OF CORROSION RATE OF REINFORCING BAR IN CONCRETE BASED ON OXYGEN DIFFUSION THEORY

Michio OHSUMI and Taketo UOMOTO

In this research, we suggested the method to estimate corrosion rate of reinforcement in concrete, because chloride ion has permeated into concrete. Assuming that the corrosion rate of reinforcing bar in concrete is in proportion to concentration of oxygen around reinforcing bar, and reaction rate of corrosion is decided by corrosion factors around reinforcing bar, then the time historical corrosion rate of reinforcing bar can be predicted. And from the result of this calculation, corrosion rate of reinforcing bar is fairly influenced by chloride permeability and rate of inequality of chloride. Furthermore it is possible that chloride's concentration is high even there is no rust, so we indicate it is not enough to remove concrete around rust for repair.