

V-153 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モデル

建設省土木研究所 正会員 大住 道生
東京大学生産技術研究所 正会員 魚本 健人

1. まえがき

コンクリート中の鉄筋の腐食速度を推定する手法が、構造物を安全にかつ計画的に供用するために必要とされている。しかし鉄筋の腐食速度は、様々な要因の複合的な影響によって変化するため、腐食要因をひとつずつ変化させて得られる実験結果からは、定性的な影響しか分らない。また腐食反応は時間のかかる反応であり、腐食速度に影響を与える因子は数多く、そのすべての組み合わせについて実験をしてみるわけにはいかない。

そこで本研究では、腐食速度は鉄筋表面における酸素濃度に比例すると仮定し、この仮定をもとに様々な腐食因子による影響を整理し、腐食速度を定量的に求めるための手法を提案する。またその手法により、塩化物イオンの侵入が原因で起こる腐食の補修工法として、腐食部のはつりだしによる補修の危険性を示す。

2. 解析モデル

鉄筋の腐食反応に直接関与する鉄イオン、水、酸素の内、腐食反応は鉄筋表面付近で起こるため、鉄イオンは十分に供給されるものと考え、腐食速度は水と酸素の量により決定されると仮定した。また、鉄筋の腐食は液状水の中で起こるものと考え、腐食反応により消費される水量は無視できるものとした。その結果、腐食開始に必要な液状水が鉄筋表面に存在する場合、腐食速度は鉄筋表面の酸素の濃度に比例することになる。この比例係数を酸素反応速度率と定義する。酸素は、フィックの第2法則に従いコンクリート表面からの拡散移動により供給されると考えると、鉄筋表面の酸素濃度は、コンクリート表面の酸素濃度、かぶり中での酸素拡散係数、酸素反応速度率により決定される。

一方、酸素反応速度率とは腐食の反応速度を決定する係数であり、これは様々な腐食因子の影響を受けると考えられるが、本研究ではその効果を定量的に表すために必要な実験結果があり、影響が大きいと思われる塩化物イオン濃度の変化に対する腐食速度の変化を考えた。海洋構造物を念頭に置き、塩化物イオンは海水により供給されるものとし、含水率は常に高い状態であるとする。塩化物イオンの腐食速度に与える影響として以下の3点について考慮した。

- ①鉄筋表面での塩化物イオン濃度がコンクリート重量の0.06%に達したときに不動態皮膜が破壊され、腐食反応が開始する。
- ②塩化物イオンには腐食電流を流れやすくする効果があるために、塩化物イオン濃度の増加により直線的に酸素反応速度率が上昇する。
- ③鉄筋表面間での塩化物イオン濃度に差がある場合は、塩化物イオン濃度が高いところほど自然電位が下がり、アノードとなり、酸素の消費量は塩化物イオン濃度の上昇に伴い直線的に減少し、腐食反応の速度は直線的に上昇する。

森永の研究¹⁾によると、供試体に塩分を練り込んだ場合、温度、湿度、酸素濃度の変化によって傾きは異なるものの、塩化物イオン濃度の上昇により、腐食速度は直線的に上昇する。塩分を練り込んだ場合は、鉄筋表面間で塩化物イオンの濃度差はないものと考え、このことから②を仮定した。

石川²⁾によると、塩化物イオン濃度と自然電位の間には線形関係が見られ、柴田ら³⁾によると、塩化物イオン濃度が鉄筋表面間で差のある場合、アノードとカソードの差がはっきりと現れ、腐食減量もかなり大きくなる。アノードでは腐食反応の速度が、そしてカソードでは酸素消費量が自然電位に従って増減すると考え、このことから③を仮定した。これらの仮定に基づき、腐食速度算定式を以下のように定める。

$$q = K \cdot \left\{ \alpha - (0.151 + 16.9 \cdot C_{Cr}) (1 + 220 \cdot \Delta C_{Cr}) \right\} C_{O_2}$$

q : 腐食速度(g/cm²)

K : 原子量換算係数

C_{Cr} : 塩化物イオン濃度(g/cm³)

ΔC_{Cr} : 鉄筋表面間の塩化物イオン濃度差(g/cm³)

C_{O_2} : 酸素濃度(g/cm³)

α : 基準酸素反応速度率(cm³/cm²/day)

解析モデルは海洋構造物を想定し、かぶり厚さ 5cm で、コンクリート表面から鉄筋に向かって微小ひび割れがのびている部分を仮定した。計算は二次元の差分法を用い、図 1 に示すようなメッシュ幅 0.2cm で、コンクリート表面の塩化物イオン濃度、及び酸素濃度を一定として拡散移動し、酸素は鉄筋表面でのみ消費するものとした。拡散係数、初期濃度、境界条件は表 1 に示す。

3. 計算結果

この計算の結果、鉄筋長さ方向の腐食減量の分布は図 2 のようになった。これはひび割れ部分からの塩化物イオンの浸透が速いために、ひび割れ直下の不動態皮膜が先に破壊し、その後も塩化物イオンの濃度差により腐食域が限定され、部分腐食が進行している様子を表している。

一方、3 年後の塩化物イオン濃度の分布を図 3 に示すと、塩化物イオン濃度は全体的に高く、すべて不動態皮膜の破壊濃度より高い。このことは塩化物イオンの浸入による腐食の場合、ひび割れ等の存在する腐食箇所のみのはつりだしによる補修を行っても、すぐにその周辺部から腐食が開始してしまうことを意味している。

4. まとめ

- (1) 腐食速度が鉄筋表面の酸素濃度に比例するとして、その係数をその他の腐食因子の関数として定義することで、鉄筋の腐食速度を計算することができる。
- (2) 計算の結果、腐食部分のみのはつりだしによる補修は場合によってはあまり効果がないことが示された。

最後に、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。本研究を行うにあたり、貴重なご助言を賜りました鹿児島大学の武若耕司助教授に深く感謝いたします。

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；1986.11 2) 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；1996.1 3) 柴田常徳、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；土木学会年次学術講演会第 5 部；1995.9

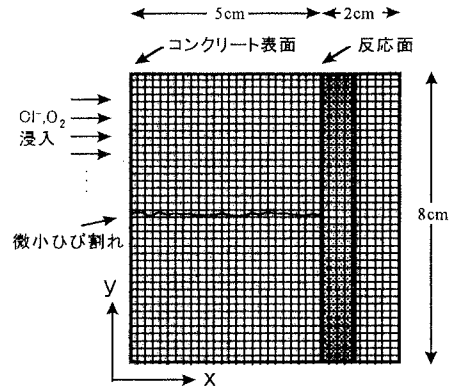


図1 供試体図

表1 計算条件

	拡散係数(cm ² /s)		初期濃度	境界濃度
	健全部	ひび割れ部	(g/cm ³)	(g/cm ³)
酸素	1×10^{-5}	1×10^{-4}	9.31×10^{-6}	9.31×10^{-6}
塩化物イオン	1×10^{-7}	1×10^{-6}	0	1.82×10^{-2}

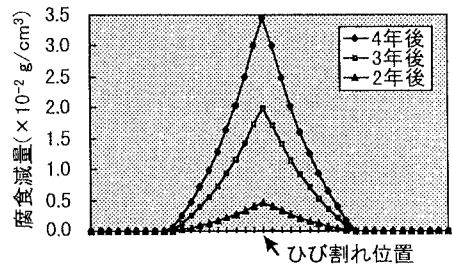


図2 鉄筋長さ方向の腐食減量の分布

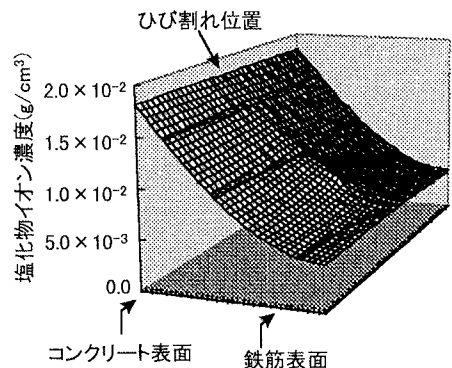


図3 3年後の塩化物イオン濃度