

鉄筋の腐食速度モデルによる塩害シミュレーション に関する研究

Study on The Salt Damage Simulation of Reinforced Concrete by Modeling Corrosion Speed of Reinforcement

則内紀彦* 那須清吾**

要約：鉄筋コンクリート構造物の塩害による損傷レベルに応じた補修工法及び最適補修パターンを導出するために必要な、コンクリート内部の pH と塩化物イオン濃度が鉄筋の腐食速度に与える影響を調査し、塩害による鉄筋コンクリートの腐食速度モデルを導出した。これにより、フィックの拡散方程式を使うことにより鉄筋近傍の塩化物イオン濃度を経年変化とともに推測することで、鉄筋が腐食を始め、クラック・剥離が発生する状況をシミュレーションすることができる。本研究ではこの為に必要な、鉄筋の腐食速度、不動態皮膜の分解時点を把握するための基礎的な実験を実施した。

Abstract: The simulation of Cl⁻ ion attack on reinforced concrete structures is necessary to calculate structural deterioration. Therefore, the influence of both magnitude of PH and density of Cl⁻ ion of the concrete on the corrosion speed of reinforcement was evaluated. The laboratory experiment was done to investigate corrosion speed of reinforcement, and strength of protection film of Fe₂O₃ or Fe₃O₄ covering reinforcement. Corrosion speed model of reinforcement which is a function of a magnitude of PH, a density of Cl⁻ ion and, time was evaluated, with which deterioration simulation of chloride attacked reinforced concrete was possible associated with Fick's law of diffusion to calculate Cl⁻ ion concentration at the reinforcement.

1. はじめに

社会資本の計画的な維持管理を目的として、アセットマネジメントの手法の構築および導入についての研究が数多く行われている。これらの研究においては、アセットマネジメントとはおおむね“既存の社会資本を健全な状態で維持し、利用者、住民に対するサービスを安定したものとするために、社会資本のライフサイクルコストを管理し、効率的、効果的な維持管理を行うこと”と捉えられている。アセットマネジメント導入の効果としては、劣化状況把握に基づいた、社会資本の維持補修に対する最適な予算配分が考えられる。既存の機能を保ち、維持、補修にかかる費用を抑え、安全なサービスを確保するためにも、如何に

最適な補修工法、補修時期を選択するかがポイントとなる。

本研究は、アセットマネジメントの実現に向けて、具体的な手法を検討するための基礎研究として、コンクリート内部のpHと塩化物イオン濃度が鉄筋の腐食速度に与える影響を実験により確認し、塩害シミュレーションのために必要な鉄筋の腐食速度モデル式の構築することで、塩害による鉄筋コンクリートへの影響をシミュレーションにより導出することを目指した。

2. 鉄筋腐食の仕組み

鉄筋の表面には、鉄の酸化物である不動態皮膜 (FeOOH) が存在する。鉄筋の腐食は、この不動態皮膜が塩化物イオン (Cl⁻) の影響により分解される。そして、不動態皮膜が分解された箇所から水 (H₂O) と酸素 (O₂) が浸入することで鉄 (Fe) と化学反応をおこし、Fe₂O₃ (酸化鉄) 等が生成される。

鉄筋の腐食は、電子が奪われる酸化反応 ([Fe] [Fe²⁺][2e⁻])、電子を得る還元反応 ([1/2O₂][H₂O][2e⁻] [2(OH⁻)]) により進行する。その後、酸素と水と化学反応をおこし水酸化第一鉄 ([Fe(OH)₂])、酸化鉄 ([Fe₂O₃]) といった錆を生成することで、腐食していく。

酸化反応[Fe] [Fe²⁺][2e⁻]

還元反応[1/2O₂][H₂O][2e⁻] [2(OH⁻)]

水酸化第一鉄[2OH][Fe²⁺] [Fe(OH)₂]

水酸化第二鉄 [Fe(OH)₂][1/2H₂O][1/4O₂]

[Fe(OH)₃]または酸化鉄[Fe₂O₃][3H₂O]

オキシ水酸化鉄 [Fe(OH)₃] [FeOOH][H₂O]

酸化鉄[6FeOOH][2e⁻] [2Fe₃O₄][2H₂O][2(OH⁻)]

3. 不動態皮膜の分解

塩化物イオンは鉄、クロム、ステンレス鋼などの不動態皮膜を分解し、さらに不動態化を妨げる効果があると言われている。従って、不動態皮膜を分解する要因として塩化物イオンが考えられる。塩化物イオンが浸入することで、安定した不動態皮膜が分解される原因として、次の2つが考えられる。電気陰性度 (Cl⁻: 3.0, OH⁻: 1.0) の関係から、塩化物イオンが浸入することで [Fe=O] と [Cl⁻] がつながるために [OH⁻] と [Fe=O] のつながりをはがす作用が働き、不動態皮膜が分解される原因が、1つ目として考えられる。次に、塩化物イオンが浸入することで FeOOH 同士の電氣的なつながりをはがす作用が働き、不動態皮膜が分解される原因が、2つ目として考えられる。

4. 鉄筋の腐食速度実験の概要

鉄筋の腐食速度において pH (水素イオン指数) が高いと、OH⁻ (水酸化物イオン) 濃度は高くなり、電位は卑な状態 (低い状態) になる。電位が卑な状態になると、鉄のイオン化が妨げられる。また、塩化物イオン自身は化学変化を受けず、反応速度を促進させる触媒作用があることから、pH と塩化物イオンの2つの要素が鉄筋の腐食速度に関係していると考えられる。

塩化物イオン濃度の変化による鉄筋の腐食速度の変化、pH の変化による鉄筋の腐食速度の変化、不動態皮膜を分解する時点の塩化物イオン濃度以上の3点を計測により把握することを目的として実験を行った。

表4. 1 実験の概要

計測方法	実験前と実験後の鉄筋の重量を計測し腐食速度を求める 不動態皮膜の分解時点を赤錆の発生とし目視により判定する
塩化物イオン濃度	鉄筋の腐食速度: 0.3 ~ 1.2 (kg/m ³) 0.15 間隔 7 ケース 不動態皮膜の分解: 0.6 ~ 2.4 (kg/m ³) 0.30 間隔 7 ケース
pH	鉄筋の腐食速度: pH7, 9, 10, 11, 12, 13 6 ケース 不動態皮膜の分解: pH7, 9, 10, 11, 12, 13 6 ケース
水温	20
鉄筋	D10 (異型鉄筋) 長さ 12 cm

鉄筋の腐食速度を把握する実験では、不動態皮膜を分解した鉄筋を用い、不動態皮膜の分解時点を把握する実験では、不動態皮膜を分解していない鉄筋を用いた。平成 11 年度コンクリート標準示方書「施工編」によれば暴露実験データから腐食限界塩化物イオン濃度は 0.3 ~ 1.2kg/m³と記載されている。この値を参考に、塩化物イオン濃度の範囲をそれぞれ、鉄筋の腐食速度を把握する実

験については、 $0.3 \sim 1.2 \text{ kg/m}^3$ 、不動態皮膜の分解時点を把握する実験については、 $0.6 \sim 2.4 \text{ kg/m}^3$ と設定した。pHの値は中性である pH7 からコンクリート内の pH と言われている 11 よりもアルカリ性が強い pH12 までの値を設定した。また、塩化物イオン濃度を変化させるケースでは pH の値を 11 に統一し、pH を変化させるケースでは塩化物イオン濃度を 1.8 kg/m^3 に統一した。さらに、切断面における鉄筋の腐食を防ぐために、鉄筋の両端をポリマーでコーティングするとともに、水温と水量はそれぞれ 20 ± 5 リットルに統一し、エアポンプで常に十分な酸素を供給した。

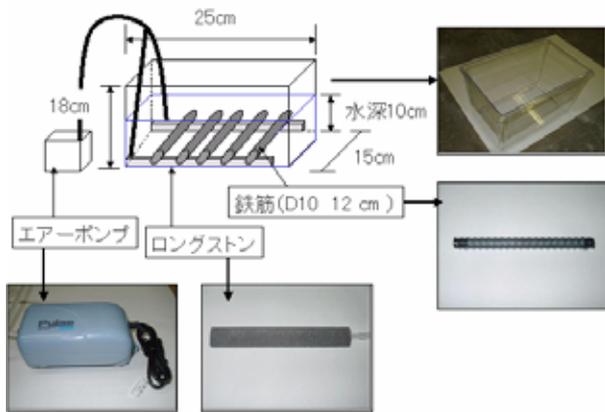


図 4.1 実験装置の概要

5. 腐食速度の測定方法

実験前（水槽投入前）と実験後（水槽投入後）の鉄筋の重量を錆発生時から 5 日間隔で測定していくことで鉄筋の重量変化を測定し、腐食速度を算定した。

1) 鉄筋の腐食速度把握実験

鉄筋表面の錆を落とし、鉄筋を乾燥させる。その後計測を行い、

実験開始前の鉄筋の重量 (g)

- 計量日における鉄筋の重量 (g) - (式 1)
(式 1) により、錆発生量を求める。錆が生成されることで鉄筋の重量は減少していく。したがって (式 1) の答えは正の値となる。

2) 不動態皮膜の分解時点把握実験

鉄筋表面の錆を落とさず、鉄筋を乾燥させて計測を行う。

計量日における鉄筋の重量 (g)

- 実験開始前の鉄筋の重量 (g) - (式 2)

(式 2) 式により、錆発生量を求める。錆を落とさずに計測を行うために、実験前の重量に発生した錆の重量が加算されているために、(式 2) の答えも正の値となる。

6. 測定結果および考察

6.1. 塩化物イオン濃度と腐食速度

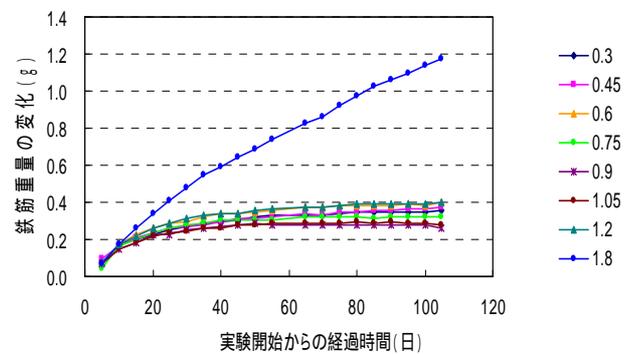


図 6.1. 各 Cl⁻ 濃度における鉄筋重量の変化

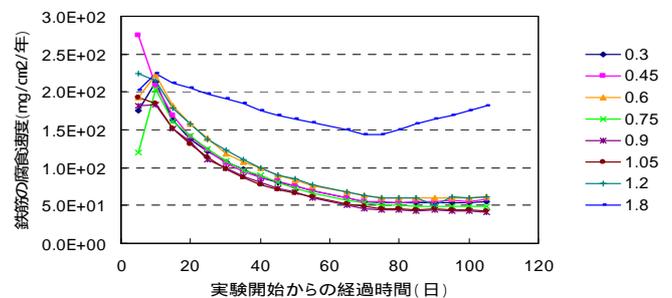


図 6.2. 各 Cl⁻ 濃度における腐食速度の経時変化

図 6.1. のグラフは重量の経時変化を塩化物イオン濃度別にグラフ化した結果である。塩化物イオン濃度 1.8 kg/m^3 のケース以外は、80 日時点を堺に、鉄筋重量の変化が安定している。塩化物イオン濃度 1.8 kg/m^3 は 80 日時点以降重量が変化しつづけている。

図 6.2. は、各ケースの塩化物イオン濃度と鉄筋の腐食速度 (1 年間の単位面積あたりの腐食量) の関係についてである。 $0.3 \text{ kg/m}^3 \sim 1.2$

kg/m³の塩分濃度においては，初期においては腐食速度が変化するが，時間が経過するにしたがって，濃度差による腐食速度差が減少するとともに，速度も一定になる．しかし，1塩分濃度.8kg/m³では，他のケースの腐食速度と大きく異なることがわかる。

6.2. PHと腐食速度

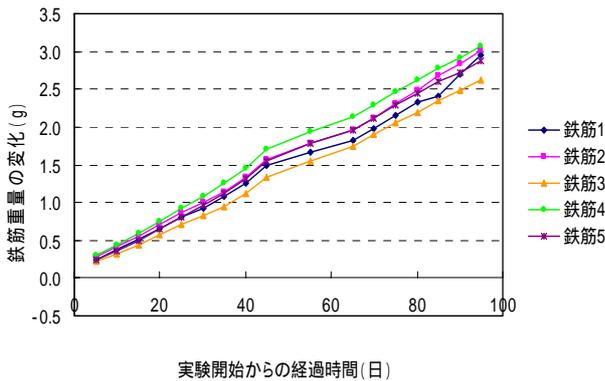


図 6.3.pH7 での 5 日間毎の鉄筋重量の変化 (累計)

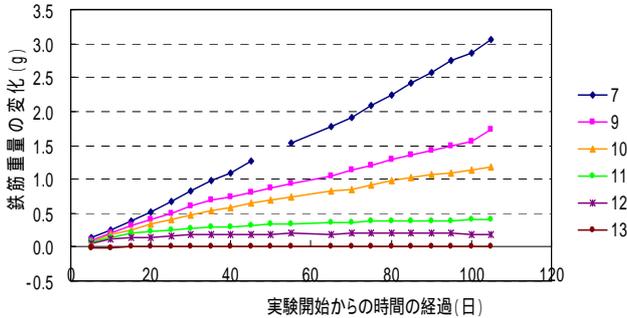


図 6.4.各 pH における鉄筋重量の変化

図 6.3.は、PH7 における鉄筋の腐食速度の経時変化を示しているが、他の PH のケースについても同様の計測を実施し、その平均値の経時変化を示したものが図 6.4.である。pH7, 9, 10 のケースにおいては、鉄筋の腐食量が増加しつづけるが、pH11,12,13 は早い時点で腐食量が安定し、時間の経過とともに pH の値による腐食量の変化に大きな差が現れている。

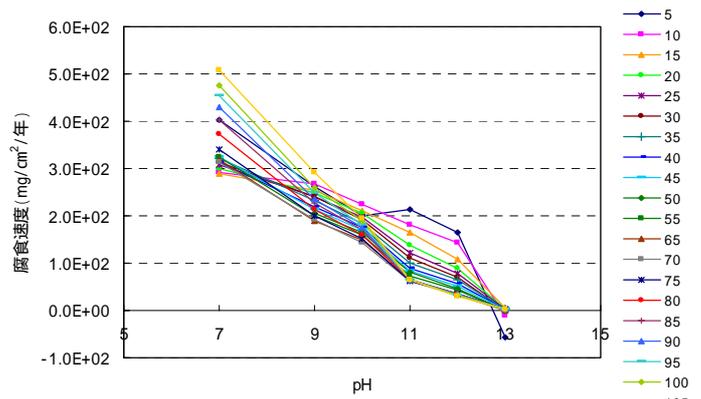


図 6.5. pH と腐食速度の関係 経過日数

図 6.5.は、pH と鉄筋の腐食速度の関係について示している。pH と腐食速度の関係は明快であり、pH の値が低ければ腐食速度は速く、高ければ腐食速度は遅く、pH13 では殆んど腐食しないという傾向があらわれている。

6.3. 塩化物イオン濃度と不動態皮の分解

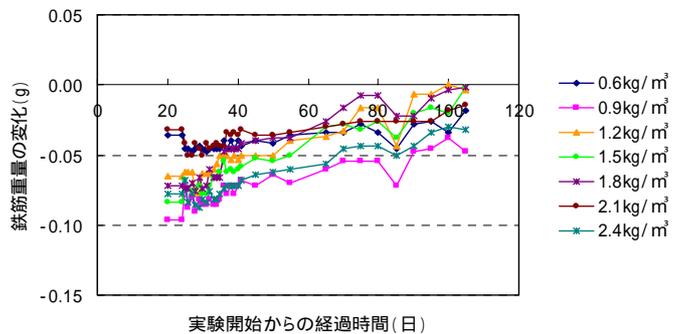


図 6.6.塩分濃度と鉄筋の平均重量変化

図 6.6.は、塩分濃度毎の鉄筋の重量変化を示す。60 日時点までは塩化物イオン濃度を变化させた各ケースとも 0.01 g ~ 0.02g 程度の鉄筋重量の変化は見られるが、不動態皮膜を取り除いた鉄筋の腐食による重量変化レベルとは大きく異なり、不動態皮膜が大きく損傷したとは考えられない。

しかし、70 日時点において、鉄筋の重量が大きく増加し、その後 80 日時点においては鉄筋の重量が減少している。これは、70 日時点において不動態皮膜が損傷した結果、鉄筋の腐食が進行

して鉄筋重量が増加した一方、水の濁りや沈殿物が増加した現象とあわせて、80日時点で鉄筋の表面に付着している錆が水中又は剥がれ落ちた結果として鉄筋重量が減少し、その後増加しないものと考えられる。

7. 鉄筋の腐食速度モデル式

鉄筋の腐食速度モデル式の構築には図6.2.に基づき構築を試みた。腐食速度の経時変化が小さくなった80日時点での腐食速度と塩化物イオン濃度の関係をグラフ化したものが図7.1.である。

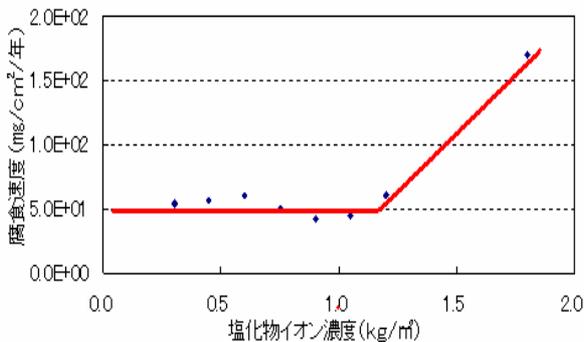


図 7.1.鉄筋の腐食速度と塩分濃度の関係

低い塩化物イオン濃度ではほぼ腐食速度が一定であるが、1.2 kg/m³以上の塩分濃度においては腐食速度が大きく変化する。今回の実験においてはこれ以上の塩分濃度のケースは実施していない。現在、更に高いCl⁻濃度(1.2~18kg/m³)での実験を実施中であるが、これまでの情報に基づき、以降のシミュレーションに使用するモデル式として下式を提案する。

$$y=95.6 (0 < C_{Cl^-} < 1.1) \quad (\text{式 3})$$

$$y=181.74\ln(C) + 78.084 (1.1 < C_{Cl^-})$$

C:Cl⁻濃度(kg/m³)

y:鉄筋の腐食速度(mg/cm²/年)

ここで、上記式は実験上のモデルであり、酸素や水を十分に供給されていることが前提となっていることに留意する必要がある。

8. 塩害シミュレーション

8.1. コンクリート構造物内部へのCl⁻の浸透

海からの飛来塩分によりコンクリートの表面に塩化物イオンが付着する。そして、コンクリート内に拡散浸透していく。鉄筋の位置における塩化物イオン濃度はコンクリートのかぶりにより異なり、鉄筋腐食速度が大きくなる塩分濃度への到達時期も異なる。

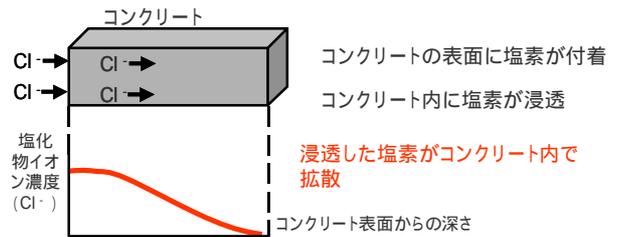


図 8.1.コンクリート構造物内部へのCl⁻の浸透

$$C(x,t) = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1 \cdot x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right\} + C(x,0)$$

x:コンクリート表面からの距離

t:時間

C(x,t):距離x時間tの塩化物イオン濃度

C₀:表面塩化物イオン濃度

erf(s):誤差関数

D:見かけの拡散係数

図 8.2.フィックの拡散方程式

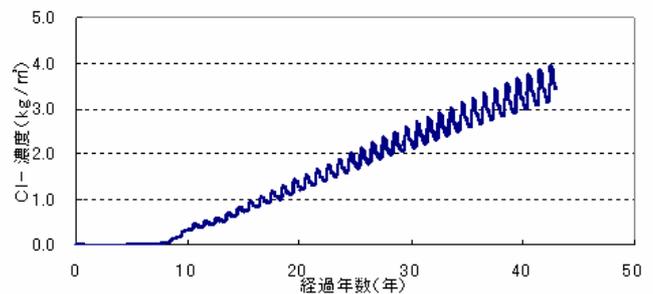


図 8.3.塩素濃度と時間の関係

本研究では高知県の国道55号穴内橋の調査データに基づきコンクリート内部の塩化物イオン濃度を試算した。フィックの拡散方程式によってコンクリート内部の塩化物イオン濃度を算出したかぶり5cmの位置におけるコンクリート内

部の塩化物イオン濃度と時間の関係を図 8.3. に示す .

8 . 2 . コンクリート構造物の塩害シミュレーション

塩害シミュレーションを行うにあたって ,第実験結果(鉄筋の腐食速度把握実験)から導出された鉄筋の腐食速度モデル(式 3)を用いて , 図 8.3.に示す塩分濃度の経年変化にも基づき算出した鉄筋の腐食量を図 8.5.に示す .

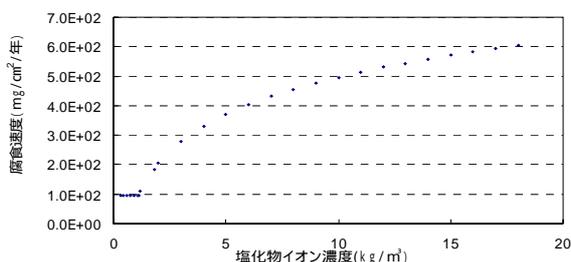


図 8.4.鉄筋の腐食速度モデル

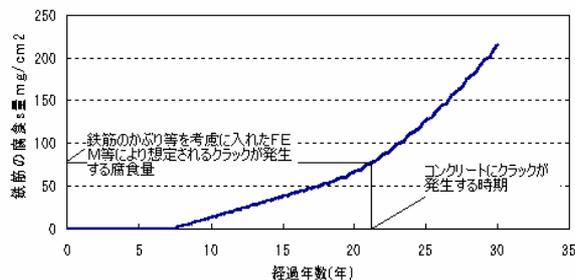


図 8.5. 鉄筋の単位面積当たり腐食量と、クラック発生時期の推定

鉄筋の腐食速度モデルを構築することで ,鉄筋周辺の塩分濃度の経年変化に基づき鉄筋の腐食量の経年変化を算出できる .その結果 ,鉄筋のかぶりやコンクリート強度等の条件を考慮した FEM 解析などの手法によりコンクリートのひび割れ発生時の鉄筋腐食量が算出できれば , 塩害を受けている鉄筋コンクリート構造物のクラック発生時期を推定することが可能となる。

9 . 結論

本研究では , 調査 , 実験 , シミュレーションの 3 段階をふまえ , 研究を行った . 塩害による鉄筋

の腐食の仕組みを調査し , 実験を用いて塩化物イオン濃度と pH を考慮した腐食速度モデルの構築を試みた . また , 鉄筋の表面を覆っている不動態皮膜についても生成 , 分解の両プロセスについて調査した . 調査の結果 , 鉄筋の腐食には , 塩化物イオン濃度と pH が影響していること , 不動態皮膜の分解については塩化物イオン濃度が影響していること等が分かった .

実験結果から , 塩化物イオン濃度 1.2kg/m^3 までは鉄筋の腐食速度がほぼ同一であり , これを超えると腐食速度が大きくなることも判明した . 一方で , 塩化物イオン濃度 1.8kg/m^3 以上の腐食速度は不明であることから , 今後追加実験により塩分の高濃度域における腐食速度についてもモデル化を試みる .

文献

- (1) 社団法人土木学会四国支部
「社会資本の管理(アセット・マネジメント)システムに関する研究報告書」
- (2) H.H.ユーリック , R.W レヴィー
「腐食反応とその制御」
- (3) 下平三郎「腐食・防食の材料学」
- (4) Songkram Piyamahant : SIMULATION FOR CORROSION CRACKING DUE TO CHLORIDE ATTACK IN REINFORCED CONCRETE STRUCTURES
- (5) Swatekititham Supakit : Computational model for chloride concentration at surface of concrete under actual environmental condition