

## モンテカルロ法を用いたコンクリート中塩化物イオン拡散のモデル化

中央大学 学生会員 ○劉 沢

中央大学 正会員 佐藤 尚次

### 1. 研究背景

鉄筋腐食を生じた RC 部材の構造性能評価に関する研究は、現在までに多数報告されている。それらの研究の多くは、実構造物へのフィードバックを考慮し、配筋状況も複雑な場合が多い。しかし、試験では実際の条件を完全に再現することはほぼ不可能である。これは、高濃度塩分溶液への浸潤などで急速に供試体を作成すると図-1 のような錆の濃淡を再現することは難しいことによる。実構造物におけるコンクリートの骨材の配置、塩化物イオンの拡散経路は、ランダムであり、正確に把握することは不可能である。ゆえに、コンクリート内部に侵入する塩化物イオンの拡散解析に関する研究が、希求されている。

### 2. 研究目的

本研究では、鉄筋の腐食に関係する塩化物イオン濃度に着目する。RC のかぶり中の鉄筋に到達する塩化物イオン濃度を、モンテカルロシミュレーションを用いてモデル化する。その結果から、かぶり厚さや骨材の配置面積、骨材の大きさなどの条件が、鉄筋に到達する塩化物イオンの濃度分布に与える影響を明らかにすることを目的とする。

### 3. 解析方法

本研究では、塩害をもたらす自然条件を想定し、シミュレーション結果をヒストグラムにして塩化物イオンの濃度分布を表す。プログラムの試行結果から、土木研究所文献の引用により過去の点検データ及び予測データを用いて、プログラムの実用性を検証する。実用性の高いプログラムを利用し、かぶり厚さ、骨材配置面積及び骨材大きさの影響を調べる。

#### 3.1 かぶり厚さの決定

プログラムの検証を行う際に、塩害データベースを利用し、点検結果を用いて比較を行う。ゆえに、点検結果に基づき、検証の時、シミュレーションを行う RC 構造物の鉄筋かぶり厚さを 10mm, 30mm, 50mm, 70mm, 90mm の 5 パターンに設定し、横幅を 10mm と設定する。プログラムの試行結果は実測データ及びフィックの拡散方程式による将来予測データと比較する。

実用性が高いプログラムにより、かぶり厚さの影響を調べるため、かぶり厚さを 10mm, 20mm, 30mm, 40mm, 50mm, 60mm, 70mm, 80mm と設定する。

#### 3.2 骨材配置面積の決定

骨材はコンクリート体積の約 70%を占め、<sup>2)</sup> これ

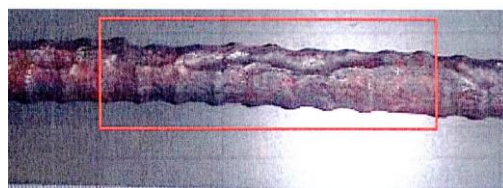


図-1 塩害により鉄筋の腐食<sup>1)</sup>

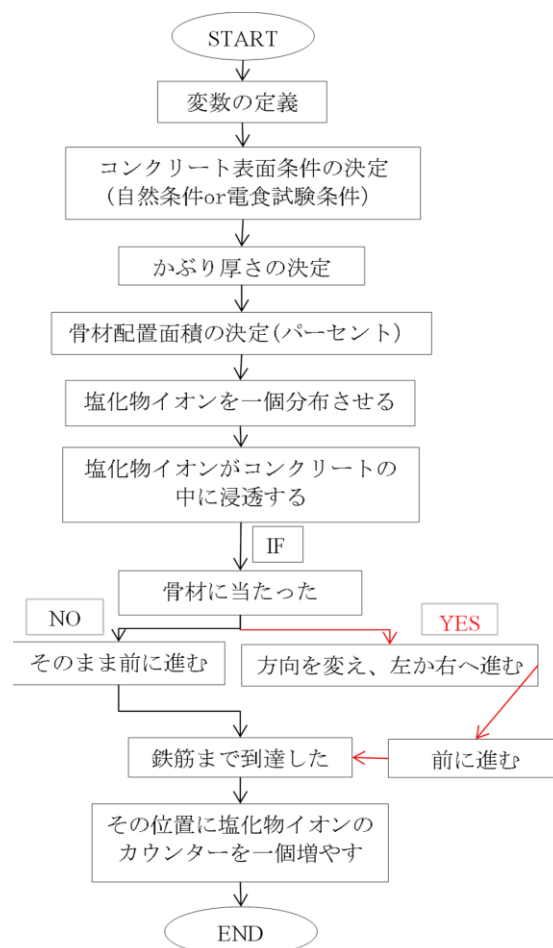


図-2 シミュレーションのフロー図

を粒径で分類すると、細骨材と粗骨材に分類できる。前者は一般に粒径が 5mm 以下の骨材、後者は細骨材より大きい骨材である。一般に、塩化物イオン濃度は体積を用いて表す。本研究では、体積におけるシミュレーションはできず、断面における塩化物イオンの拡散経路についてシミュレーションを行う。任意断面での骨材の配置を面積の 30%, 50%, 70%, 90%の数値を用いて、粗骨材と細骨材が一樣であると仮定し、配置するような単純化モデルを作る。

キーワード 鉄筋腐食, モンテカルロ法, モデル化, シミュレーション

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 TEL. 080-4154-7855 FAX. 03-3817-1803

3.3 骨材大きさの決定

骨材の大きさの影響を調べるため、骨材の大きさは3種類設定する。粗骨材は2種類の大きさを選定する。粗骨材(L)は 20mm×20mm, 粗骨材(M)は 10mm×10mm と設定する。細骨材(S)は 5mm×5mm と設定する。粗骨材を十分配置できるように、かぶり厚さを 100mm, 横幅 100mm の正方形コンクリート断面を用いる。骨材配置面積は 70%を用いる。

3.4 塩化物イオン濃度分布の算出

図-2 に示す手順に従い、鉄筋に到達する塩化物イオンのシミュレーションを行い、塩化物イオン濃度分布を再現する。なお、シミュレーションを行う際に、不規則要因としてかぶりの厚さ、骨材の配置面積、骨材の大きさなどのランダム性を考慮する。

3.5 プログラムの実用性の検証

(1) 実測データによる検証

検証データは、土木研究所により作成したコンクリート構造物の塩害データベースを用いる。プログラムの実行結果が、個数で塩化物イオン濃度を表すため、検証データの塩化物イオン濃度を単位変換により、個数によって表す。

塩化物イオンのモル量、モル質量、アボガドロ定数を用いて、単位変換を行った結果、 $1\text{kg/m}^3$  の塩化物イオン個数は  $1.6976 \times 10^{25} \text{ 個/m}^3 = 1.6976 \times 10^{16} \text{ 個/mm}^3$  となる。

実測データに単位変換を適応し、検証の精度を上げるため、 $10^{16} \text{ 個/mm}^3$  から  $10^{14} \text{ 個/mm}^3$  とし、小数点以下の端数は切り捨て、検証する体積を単位体積と設定する。表-1 は、過去の点検結果に単位変換を行った結果である。図-3 は、プログラムの試行結果と実測データを比較した図である。

図-3 に示すとおり、かぶり厚さが 10mm, 30mm, 50mm までデータは良く一致しており、再現性が高い結果が得られた。かぶり厚さが 70mm 及び 90mm の時では、プログラムの試行結果が実測データより若干大きい傾向が観察できる。プログラムの試行結果が実測データより大きい場合は、安全側（試行結果は実際の塩化物イオン濃度より大きい値を示す）に予測しているので、プログラムを用いてかぶり内部の塩化物イオン濃度を予想しても危険ではないと判断できる。ゆえに、実測データの検証により、プログラムの再現性は高いと考えられる。

(2) フィックの拡散方程式に基づいた予測による検証

塩分が実際のコンクリート中を浸透する現象は、細孔溶液中に濃度拡散による塩分の移動及び塩分の化学的固定あるいは吸着など様々な要因が複雑に絡み合った現象である。また、飛沫帯などで乾湿が繰り返される環境では、コンクリート中の水分の移動に伴う拡散（移流拡散）も考えられ、塩分の浸透現象を濃度拡散のみで評価することは必ずしも適当とはいえない場合がある。しかし橋梁部材に対して、環境中の塩分が付着し、内部に浸透していく過程の評価は、一般には濃度拡散のみに着目してフィック

表-1 過去の点検結果<sup>3)</sup>

|       | 塩化物イオン量             |                      |
|-------|---------------------|----------------------|
|       | 測定値                 | 個数変換 $\times 169.76$ |
| かぶり厚さ | ( $\text{kg/m}^3$ ) | (10 の 14 乗個)         |
| 10mm  | 12.5                | 2122                 |
| 30mm  | 8                   | 1358                 |
| 50mm  | 5                   | 848                  |
| 70mm  | 2.5                 | 424                  |
| 90mm  | 2                   | 339                  |

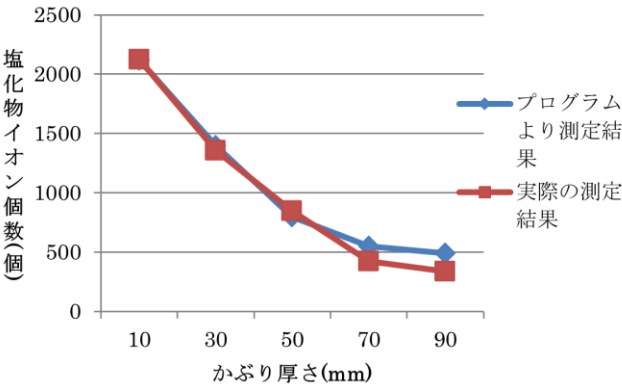


図-3 プログラムの試行結果と実測データとの比較

表-2 フィックの拡散方程式を用いた予測<sup>3)</sup>

|       | 塩化物イオン量             |                      |
|-------|---------------------|----------------------|
|       | 予測値                 | 個数変換 $\times 169.76$ |
| 桁側面   |                     |                      |
| かぶり厚さ | ( $\text{kg/m}^3$ ) | (10 の 14 乗個)         |
| 10mm  | 13.5                | 2291                 |
| 30mm  | 9.5                 | 1612                 |
| 50mm  | 6.5                 | 1103                 |
| 70mm  | 4                   | 679                  |
| 90mm  | 2.5                 | 424                  |

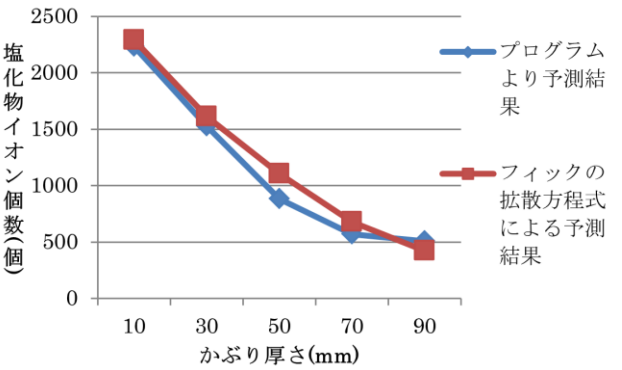


図-4 プログラムの試行結果とフィックの拡散方程式による予測データとの比較

の第2法則として知られている拡散方程式(式1)を用いてある程度予測可能であることが明らかにされている。<sup>4)</sup>

$$C(x,t) = C_0 \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_\alpha t}} \right) + C(x,0) \quad \dots \text{式1}$$

ここに、 $C(x,t)$ は深さ  $x(\text{cm})$ 、時刻  $t$  (年) における塩化物イオン濃度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、 $C_0$ は表面における塩化物イオン濃度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、 $D_\alpha$ は塩化物イオンの見かけの拡散係数 ( $\text{cm}^2/\text{年}$ )、 $\operatorname{erf}$ は誤差関数を表す。

土木研究所の「コンクリート中の塩化物イオン濃度分布簡易分析シート」<sup>5)</sup> (以下簡易シート) という予測ソフトを用いて、予測を行う。簡易シートは、フィックの拡散式に基づく曲線を引き、塩化物イオン量の測定結果と比較することができる。

表-2は、簡易シートを用いた予測結果及び単位変換を行った結果である。図-4は、プログラムの試行結果と簡易シートによる予測結果を比較した図である。図-4に示すとおり、かぶり厚さが10mm, 30mm, 70mm, 90mmにおいて良い一致が見られる。しかし、かぶり厚さが50mmの時のみ、プログラムの試行結果が簡易シートによる予測結果より10%ほど下回る結果が観察できた。ただし、安全側の予測値が期待されるため、プログラムの試行結果から10%上乘せし、将来予測値として用いることが妥当だと考えられる。

### 3.6 塩化物イオン濃度分布の分析

拡散シミュレーションを行うことで、鉄筋の各位置の塩化物イオン濃度をヒストグラムによって統計分析し、鉄筋の腐食性状を塩化物イオン濃度により再現する。

#### (1) 自然条件におけるかぶり厚さ別分析

図-5は、自然条件における塩化物イオンが1000個発生させる時、かぶり厚さ別塩化物イオンの濃度分布である。図-5で示すとおり、骨材分布が同じ程度でも、かぶり厚さが厚くなるにつれ、塩化物イオン分布のばらつきが小さくなり、分布する場所も集中する。横幅の0と11はコンクリートの横幅に侵入できない塩化物イオンを表すため、かぶり厚さが厚ければ、コンクリートに侵入できる確率は小さくなる。すなわち、かぶりが厚ければ、骨材に遭遇する確率が大きくなるため、塩化物イオンの浸透経路への影響が大きく、分布が狭い範囲で集中する。

#### (2) 自然条件における骨材配置面積別分析

図-6は、自然条件における塩化物イオンが1000個発生させる時骨材配置面積別塩化物イオンの濃度分布である。図-6の上図に示すとおり、骨材配置面積が30%と50%の時に塩化物イオンの分布は全体的に、幅広く分布する。一方、図-6の下図に示すとおり、骨材配置面積が70%と90%の時は、塩化物イオンの分布は横幅の端の塩化物イオンが増加し、集中することが観察できる。上述した通り、横幅の端はコンクリートに侵入できない塩化物イオンを表している。この現象の原因は、骨材の配置面積が増大し、塩化物イオンの浸透経路が減少し、コンクリートの

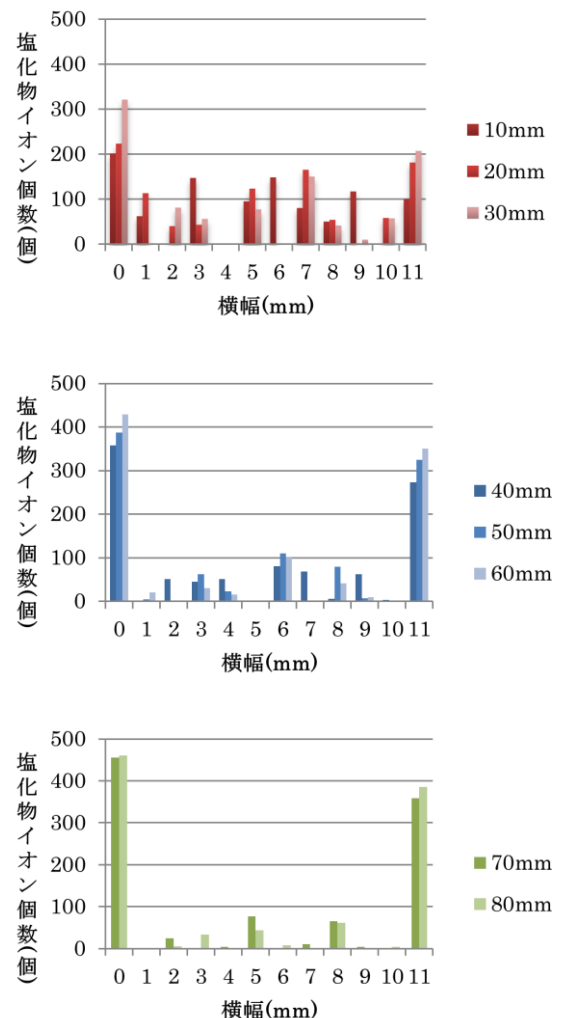


図-5 自然条件におけるかぶり厚さ別塩化物イオン分布

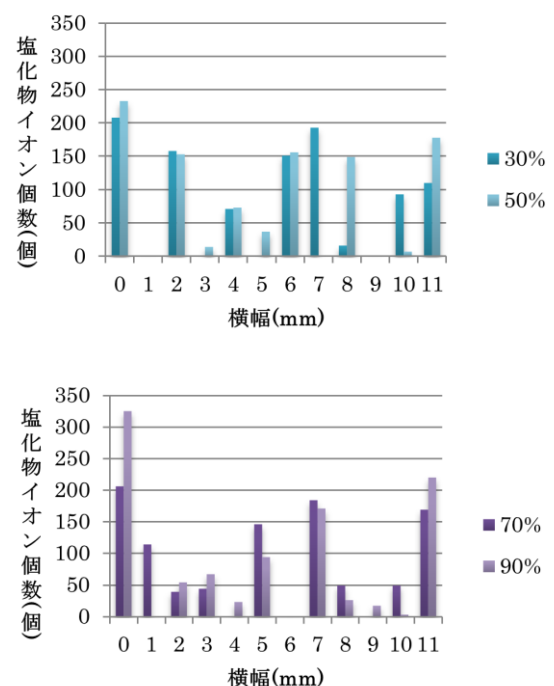


図-6 自然条件における骨材配置面積別塩化物イオン分布



奥深部まで浸透できなくなったと考えられる。

### (3) 自然条件における骨材大きさ別分析

図-7は、自然条件における骨材の大きさを変化させた配置例である。100mm×100mmの断面において、粗骨材(L),粗骨材(M),細骨材(S)を断面積の70%占めるように、ランダムに配置させる。図-8は、自然条件における塩化物イオンが1000個発生させる時、骨材大きさ別の塩化物イオン濃度分布である。図-8に示すとおり、骨材の大きさが小さくなるにつれ、塩化物イオン分布のばらつきは小さくなるが、浸透量は同じ程度という結果が観察できる。

### 4. まとめと今後の方針

本研究では、点検結果及びフィックの拡散方程式に基づき予測結果を用いて、自然条件におけるプログラムの実用性を検証した。

実測データの検証において、プログラムの試行結果は実測データより安全側に予測する傾向があった。自然条件における、実測データをシミュレーションするのに、プログラムの実用性は高いと考えられる。フィックの拡散方程式に基づいた予測データの検証において、かぶり厚さが10mm, 30mm, 70mmの時の再現性が高く、50mmの時のみプログラムの試行結果は予測データより10%小さい結果が観察できる。自然条件における、将来結果の予測をするのに、プログラムの試行結果を10%上げて、予測結果として用いた方が良くと考えられる。

自然条件におけるかぶり厚さ別、骨材配置面積別、骨材大きさ別の塩化物イオン分布シミュレーションを行った。自然条件のもとでかぶり厚さと骨材配置の影響が大きい。かぶり厚さが増加や骨材配置面積の増加により、骨材の影響が著しくなり、浸透経路が定められ、飛来塩化物イオンの濃度分布が狭い範囲で集中して分布する。骨材大きさは塩化物イオン分布に与える影響として、骨材が小さくなるにつれ、塩化物イオン分布のばらつきが小さくなる。すなわち、将来発生する鉄筋腐食が平均的であることが予想できる。

今後の方針として、塩害点検データの収集を行う。最も鉄筋腐食に影響を及ぼす可能性が高い、自由塩化物イオンのデータを用いて、プログラムの実用性を検証する。また、腐食が生じた鉄筋がコンクリートに与える影響を鉄筋腐食時期別に明らかにする。

#### 参考文献：

- 1) 村上 祐貴：鉄筋腐食を生じた RC 梁の残存耐荷性能に関する研究
- 2) 桜井 邦昭・近松 竜一・入矢 桂史郎・十河 茂幸：フレッシュコンクリートの変形特性に及ぼす骨材の粒度構成の影響
- 3) 渡辺博志・古賀裕久：コンクリート構造物の塩害データベースの構築とその利用による維持管理の合理化
- 4) コンクリート標準示方書：10.3.3.2 塩化物イオンの拡散の予測シート
- 5) 土木研究所：コンクリート中の塩化物イオン濃度分布簡易分析

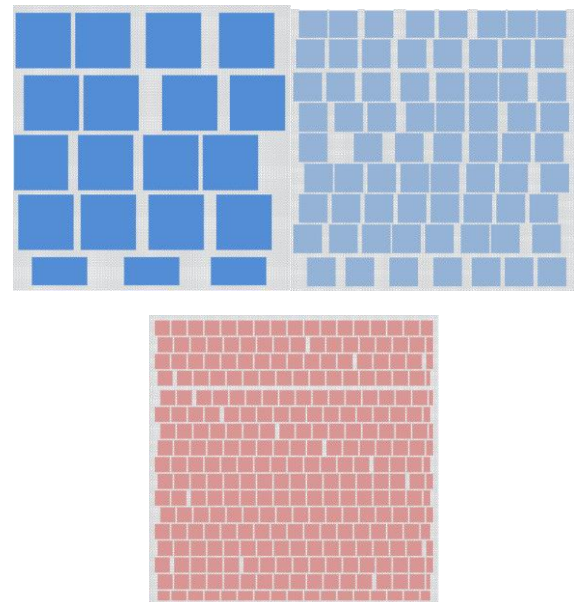


図-7 骨材大きさ別の配置例(左上は粗骨材 L,右上は粗骨材 M,下は細骨材 S)

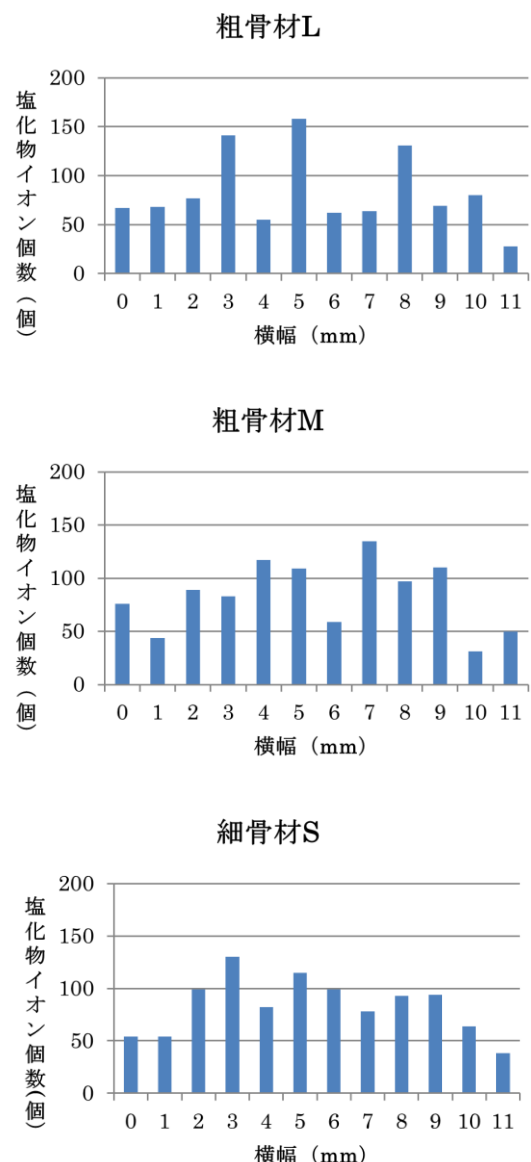


図-8 骨材の大きさ別に塩化物イオン濃度分布