

塩化物イオンの鉄筋コンクリート構造物への浸透機構に関する研究

○中央大学 学生員 豊田亮

中央大学 正会員 佐藤尚次

1.はじめに

1980年代以降、沿岸部で鉄筋コンクリートやプレストレスコンクリートの構造物にさびを伴うひび割れが多数発見されるようになった。後に原因が塩化物イオンであると解明され、現在でも塩害により、鉄筋コンクリート構造物の劣化、およびその耐久性が深刻な問題になっている。

本研究は、浸透機構のモデル化に通常用いられる Fick の拡散方程式に理論的修正を加えて、ランダム性を与え、耐久性予測の誤差のメカニズムに考察を加えるものである。後出の式(1)で表される同モデルは確率的な方程式であり、この式および物理定義を確定的に与える限り、鉄筋までの塩化物イオンの到達時間は確定的であって、それがそのまま耐久性能の評価につながる。

これに対し、現実の現象では、コンクリート表面に飛来する塩化物イオンの量も時系列的に変化するし、拡散係数 D も一様とは限らない。また、これが様々な物理要因の影響などを受け、経時的に変化する可能性も無視できない。

今回はその為の理論的方法を説明することにする。

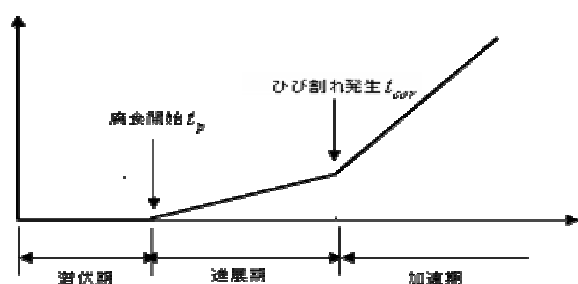


図-1 塩害による劣化進行過程

2.塩化物イオンの浸透機構に関する解析手法

2.1 塩分の浸透

塩害の進行過程は図-1 に示すように、鉄筋の腐食が開始するまでの潜伏期、腐食開始から腐食ひび割れ発

生までの進展期、腐食ひび割れの影響により腐食速度が急激に速くなる加速期に分けられる。各劣化過程は、構造物の状態に対応していることから、劣化進行の予測はそれぞれの期間の長さを予測することになる。

従来、コンクリート内部の塩化物イオン濃度の算出については、Fick の一次元拡散方程式を適切な初期条件、境界条件を下に解く手法が用いられていた。しかし、構造物内部が不均一である為、Fick の拡散理論では厳密に説明は出来ない。本研究では、Fick の拡散方程式を離散化し差分方程式に置換して経時的な感度解析をすることを試みる。

2.2 Fick の拡散方程式

Fick の拡散方程式は以下の式(1)の通りである。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \cdots (1)$$

c : 塩化物イオン濃度

D : 塩化物イオンの拡散係数

x : コンクリート表面からの距離

t : 供用期間

この式(1)を離散化する。

時間 t に関しては後退差分、

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{c_j^{n+1} - c_j^n}{\Delta t}$$

空間 x に関して中心差分を行う。

$$\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = \frac{u_{j+1}^n - 2u_j^n + u_{j-1}^n}{(\Delta x)^2}$$

これらを式(1)の左右辺に代入し整理すると以下の差分方程式(2)が得られる。

$$C_j^{n+1} = C_j^n + D \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (C_{j+1}^{n+1} - 2C_j^{n+1} + C_{j-1}^{n+1}) \cdots (2)$$

拡散方程式(1)に対して時間 t に後退差分、空間 x に対し

キーワード：塩化物イオン，塩害，拡散方程式

〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 TEL:03-3817-1816

ては中心差分で近似してスキームを求める。（陰解法）
ここで、境界条件として C_0^n を与え、初期条件として C_j^0 を設定する。このようにして初期条件と境界条件を定めると式(2)は時間ステップ $n+1$ における J 個の未知変数 C_j^{n+1} ($j=1, 2, \dots, J$) についての代数方程式となる。

ここで、代数方程式の係数を、

$$a_j = \beta, \quad b_j = 1 + 2\beta, \quad c_j = \beta, \quad d_j = c_j^n$$

$$\beta = D \frac{\Delta t}{\Delta x^2}$$

とおくと、以下の式(3)となる。

$$-a_j u_{j-1} + b_j u_j - c_j u_{j+1} = d_j \quad (j=1, 2, \dots, J)$$

・・・(3)

これを行列式(4)で表現する。

$$\begin{pmatrix} b_1 & -c_1 & & & \\ -a_2 & b_2 & -c_2 & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & -a_{J-1} & b_{J-1} & -c_{J-1} \\ & & & -a_J & b_J \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_{J-1} \\ u_J \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_{J-1} \\ d_J \end{pmatrix}$$

$$Au = b$$

・・・(4)

ここで、式(4)の係数行列 A は三重対角行列で、 $a_j = c_{j-1}$ であるから A は対称行列となる。行列 A の要素は Δt 、 Δx と拡散係数 D のみの関数であるから、この時、係数行列 A は一度だけ求めればよいことになる。位置 $x=i$ における濃度 u_i^j が分かったならば、それに係数行列 A をかけることにする。そのようにして同じ計算を繰り返すことにより時間ステップごとに濃度を求めることができる。

2.3 解析条件

初期条件 $C(x,0)=0$

境界条件 $C(0,t)=C_0$ （一定）

C_0 : 表面塩化物イオン濃度

本研究では、拡散係数 D にはばらつきがあると考え、差分要素ごとにある変動係数 V_0 を定め、正規分布に従うようにランダムに与えてシミュレーションをした。

6.31×10^5 (m/年) を平均とした変動係数 0.1 の正規分布に従う拡散係数 D と一様分布に従う拡散係数 D の

2種類で差分要素ごとにランダムに与えて解析した。

2.4 解析結果

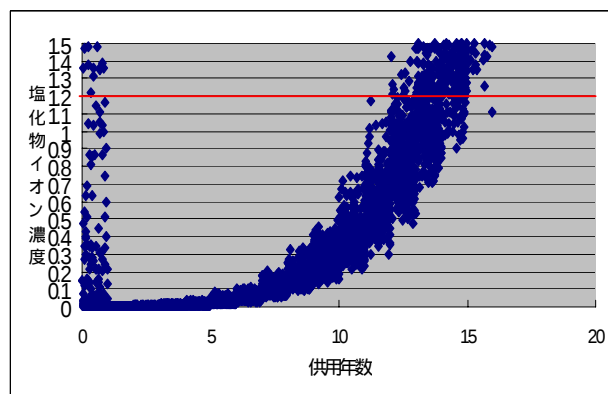


図-2 正規分布に従う場合

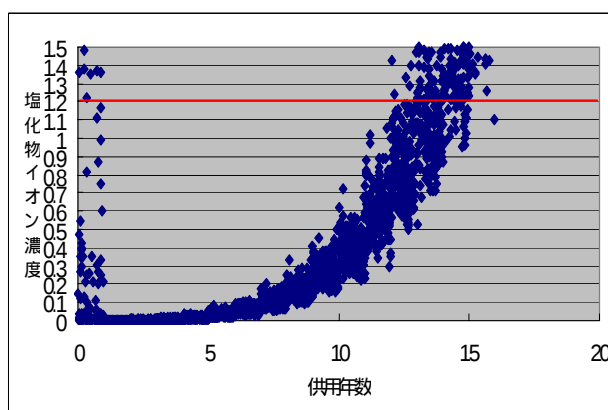


図-3 一様分布に従う場合

拡散係数 D を正規分布に従わせて発生させた場合は $13 < t < 15$ (年)、一様分布に従わせた場合は $12 < t < 16$ (年) の幅をもたせることができた。

2.5 まとめ

拡散係数 D を正規分布と一様分布に従うようにランダムに発生させ塩分濃度のばらつきを表現することができた。

3.今後の課題

今回は一次元解析を行ったが、今後は二次元解析を行い、その際、内部の骨材などを考慮して拡散係数 D を決定することを試みる。

（参考文献）

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書 維持管理 2001年制定
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書 維持管理編制定資料 2001年制定
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書 施行編 2002年制定