

論文

[1100] コンクリートへの塩分の拡散浸透に関する表面塩分量の定式化

正会員 ○丸屋 剛 (大成建設技術研究所)

正会員 宇治公隆 (大成建設技術研究所)

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の塩害劣化とその耐久性が社会的問題となって以来、コンクリート中への劣化因子の浸透機構及び鉄筋の腐食機構の解明が、鉄筋コンクリート構造物の劣化度診断、耐久性診断及び耐久性設計において重要な課題となっている。

劣化因子のうち塩分の浸透機構に関しては、フィックの第2法則を種々の境界条件のもとで解くことにより解析することが一般的である。特に、表面塩分量に相当する境界条件を一定とすることは、解析が容易なこと、表面塩分量の経時変化を示すデータが僅少であったことなどから最も一般に行われてきた。しかし近年では、表面塩分量が経時的に増加する傾向を示すデータが蓄積されつつあり、表面塩分量の経時変化について1, 2の定式化が既に試みられている。<sup>1) 2)</sup>

本研究は、海洋環境下にある実構造物の塩分量実測データより、表面塩分量の経時変化を定式化し、塩分浸透量の予測手法の提案、検討を行ったものである。

2. 塩分の浸透に関する解析手法

2-1 塩分の拡散浸透機構

塩分の浸透現象は、コンクリート中の細孔における水分の浸透に伴う塩分の移動、細孔溶液中における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が複雑に絡み合った現象である。特に飛沫帯などの乾湿繰り返しの環境はコンクリート中の水分の移動が激しいものと考えられ、塩分の浸透現象を濃度拡散概念のみで把握することは適当とはいえない。しかし、飛沫帯も含めた実構造物の塩分量実測データには、フィックの第2法則として知られている拡散方程式を、表面塩分量に相当する境界条件を一定とすることにより近似することが可能である。このことから、塩分の浸透現象を見掛け上の拡散現象と見なすことが妥当となる。さらに、このときの境界条件が供用期間により変化が見られることから、表面塩分量を供用期間の関数として定式化し、この比例定数を各種海洋環境条件で分類する。

2-2 表面塩分量の定式化

フィックの第2法則は以下の式(1)で表すことができる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

- ここに、 C : コンクリートの重量に対する塩分量 (wt%)
- t : 供用期間 (sec)
- x : コンクリート表面からの距離 (cm)
- D : 塩分の見掛けの拡散係数 (cm<sup>2</sup>/s)

式(1)を 初期条件 C(x, 0) = 0

境界条件 C(0, t) = C<sub>0</sub> (一定)

のもとで解くと、式(2)のようになる。

$$C(x,t) = C_0 \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (2)$$

ここに、 $C_0$  : 表面塩分量 (wt%)  
 $\operatorname{erf}$  : 誤差関数

式(2)により実構造物における塩分量の実測データを近似させた例を図-1に示す。近似の方法としては、式(2)が正規分布であることを利用して正規確率紙<sup>3)</sup>で最小2乗法による回帰分析を行う。これを示したのが図-2である。ただし、表面付近の塩分量が洗い出しなどの影響で極端に小さいとき及び内奥部の塩分量が極端に大きいときは、そのデータは解析に用いないこととする。

このようにして求めた表面塩分量 $C_0$ は供用期間とともに増加する傾向があるため、式(3)に示すように供用期間の平方根に比例するものと仮定する。

$$C_0 = C_0(t) = S\sqrt{t} \quad (3)$$

ここに、 $S$  : 表面塩分量係数

### 2-3 拡散方程式の適用

実構造物の塩分量データは式(2)により適当な近似が可能であるが、式(2)に示すように表面塩分量が経時変化すると式(1)を

$$\text{初期条件 } C(x, 0) = 0$$

$$\text{境界条件 } C(0, t) = S\sqrt{t}$$

のもとで解くと、次のようになる。

$$C(x,t) = S\sqrt{t} \left\{ \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) - \frac{x\sqrt{\pi}}{2\sqrt{Dt}} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right\} \quad (4)$$

ここに、
$$\operatorname{erfc} x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-\xi^2} d\xi$$

図-2より明らかなように、塩分量実測データは式(2)による近似が可能であり、また、そのときの境界条件である表面塩分量は経時変化すると仮定した。従って、式(2)の曲線上の値を仮想データとし、それに式(4)を近似させることにより解析を行う。つまり、仮想データを媒介として実測データを近似することになる。

図-3は、図-1及び図-2と同一のデータを式(2)により近似させた曲線を、塩分量実測データに対して塩分量仮想データの分布を示す曲線とし、その仮想データに式(4)を近似させた例である。また、これを正規確率紙上で示すと図-4のようになる。図-3及び図-4から、塩分量実測データに対する式(4)による近似は良いことがわかる。

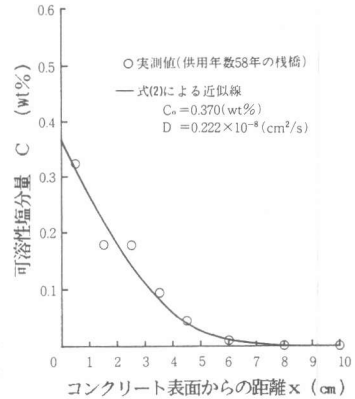


図-1 式(2)による塩分量実測データの近似

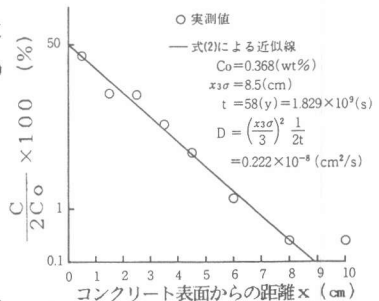


図-2 正規確率紙における塩分量実測データの近似

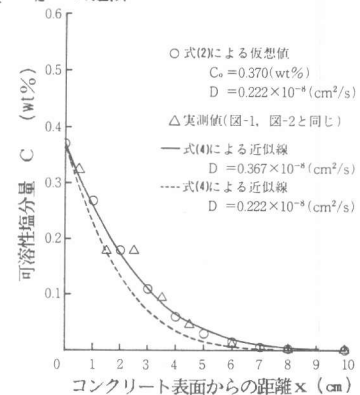


図-3 式(4)による塩分量仮想データの近似

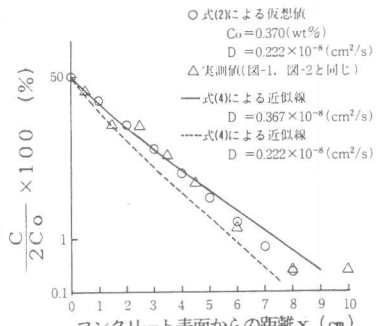


図-4 正規確率紙における塩分量仮想データの近似

塩分量分布の予測に関しては、同一の塩分量実測データに近似させるとき、塩分の見掛けの拡散係数は式(4)による方が式(2)によるよりも大きくなることから、近似材令以後の供用期間については、表面塩分量の増加も考慮すれば式(4)による予測の方が安全側となる。

### 3. 実構造物における塩分浸透の解析

#### 3-1 解析条件

① 本解析に使用する塩分量実測データは、当社において測定した供用年数約7年から60年までの各種海洋環境下におけるRC構造物の可溶性塩分量である。

② 塩分の見掛けの拡散係数D及び表面塩分量係数Sは、供用環境条件以外にセメントの種類、単位セメント量及び水セメント比などの配合条件、さらには施工法、施工時期といった施工条件など種々の要因に影響されると考えられるが、これらは明確ではないため解析上考慮しない。

③ 供用環境である海洋環境を、感潮部、飛沫帯、海上大気中に3分類した。これらの分類は試料採取位置により以下のように定めた。

感潮部：栈橋のコンクリート杭における干満部

飛沫帯：栈橋のスラブ下面及びスラブ下面の梁

海上大気中：栈橋のスラブ上面及びスラブ上面の壁

#### 3-2 表面塩分量係数の定量化

塩分量実測データに式(2)を近似して求めた表面塩分量C<sub>0</sub>を表-1～表-3に、また、式(3)の仮定によりこれらの値を整理したものを図-5に示す。図-5を各種海洋環境別にみると、表面塩分量と供用期間の間には明らかに相関関係が認められ、図中に示した実線により区分することが可能である。このことから、表面塩分量係数Sは各種海洋環境別に定量化できることがわかる。

図-5から、飛沫帯では海上大気中や感潮部に比較して表面塩分量係数Sの値の範囲が大きいことがわかる。これは、飛沫帯が海上大気中および感潮部に比べて環境条件のばらつきが大きいこと、コンクリートに関する各種の条件を考慮していないことによると考えられる。従って、海洋環境条件が同一でも表面塩分量係数Sは一意的には決定できず、個々の構造物ごと、あるいは部位ごとに塩分量の分布を調査し定める必要がある。

また、図-5に示した破線はコンクリート表面部が飽和食塩水で飽水状態にあるとしたとき、点線は海水で飽水状態にあるとしたときの表面塩分量の概略の計算値であり、それぞれ1wt%、0.13wt%程度となる。本図からもわかるように、表面塩分量は飛沫帯及び感潮部ではほとんどが0.13wt%以上であり、コンクリート表面部での塩分の濃縮現象を示している。

表-1 海上大気中における表面塩分量

| 構造物名称 | 供用期間(YEAR) | 表面塩分量Co(wt%)   | 表面塩分量係数(×10 <sup>-6</sup> )  |      |
|-------|------------|--|--|------|
|       |            |  | S  | 平均値  |
| A栈橋   | 58         | 0.065<br>0.116<br>0.108<br>0.338   | 1.52<br>2.71<br>2.53<br>7.90   | 3.67 |
| B栈橋   | 32         | 0.202<br>0.087<br>0.196<br>0.105   | 6.30<br>2.74<br>6.17<br>3.31   | 4.63 |
| C栈橋   | 32         | 0.064  | 2.01   | 2.01 |
| D擁壁   | 32         | 0.045<br>0.041<br>0.044<br>0.041<br>0.048<br>0.025<br>0.015<br>0.056<br>0.043<br>0.040<br>0.108<br>0.055<br>0.050<br>0.079 | 1.42<br>1.29<br>1.39<br>1.29<br>1.51<br>0.787<br>0.472<br>1.35<br>1.26<br>3.40<br>1.73<br>1.57<br>2.49 | 1.56 |
| E栈橋   | 23         | 0.044  | 1.63   | 1.63 |
| F栈橋   | 23         | 0.082  | 3.04   | 3.04 |
| H栈橋   | 55         | 0.232  | 5.57   | 5.57 |

表-2 飛沫帯における表面塩分量

| 構造物名称 | 供用期間(YEAR) | 表面塩分量Co(wt%)   | 表面塩分量係数(×10 <sup>-6</sup> )                                  |      |
|-------|------------|--|--|------|
|       |            |  | S  | 平均値  |
| A栈橋   | 58         | 0.193<br>0.370<br>0.370<br>0.354<br>0.126                            | 4.51<br>8.65<br>8.34<br>8.95                                 | 6.95 |
| B栈橋   | 32         | 0.435<br>0.342<br>0.516<br>0.229<br>0.375                            | 13.7<br>10.8<br>16.2<br>7.21<br>11.8                         | 11.9 |
| C栈橋   | 32         | 0.209<br>0.248<br>0.266  | 6.58<br>7.81<br>8.37   | 7.59 |
| E栈橋   | 23         | 0.390  | 14.5   | 14.5 |
| F栈橋   | 23         | 0.356<br>0.795<br>0.357<br>0.356<br>0.312<br>0.415<br>0.594<br>0.429 | 13.2<br>29.5<br>13.3<br>13.2<br>15.6<br>15.4<br>22.1<br>15.9 | 16.6 |
| H栈橋   | 55         | 0.583<br>0.570   | 14.0<br>13.7   | 13.9 |
| I栈橋   | 24         | 0.146  | 5.31   | 5.31 |
| J栈橋   | 17         | 0.250<br>0.199<br>0.081<br>0.138<br>0.127<br>0.094                   | 10.8<br>8.59<br>3.50<br>5.96<br>5.48<br>4.06                 | 6.40 |

表-3 感潮部における表面塩分量

| 構造物名称 | 供用期間(YEAR) | 表面塩分量Co(wt%)            | 表面塩分量係数(×10 <sup>-6</sup> ) |      |
|-------|------------|-------------------------|-----------------------------|------|
|       |            |                         | S                           | 平均値  |
| A栈橋   | 58         | 0.696<br>0.802<br>0.975 | 16.3<br>18.8<br>22.8        | 19.3 |
| G栈橋   | 7.6        | 0.364                   | 23.5                        | 23.5 |
| H栈橋   | 55         | 0.759                   | 18.2                        | 18.2 |

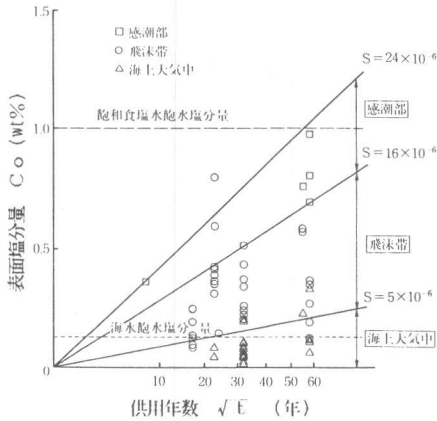


図-5 表面塩分量と供用年数との関係

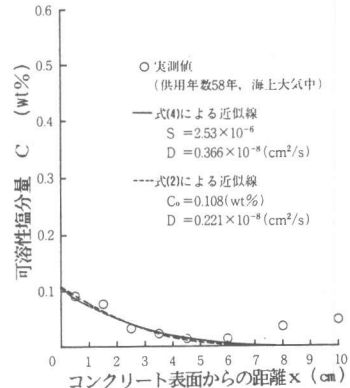


図-6 塩分量実測データに対する式(4)の適用 (海上大気中)

### 3-3 拡散方程式の適用

図-3、図-4には既に、式(4)による塩分量実測データへの近似の一例を示したが、図-6～図-8には供用年数58年の海上大気中、32年の飛沫帯、7.6年の感潮部における式(4)の適用例を示す。比較のために式(2)による近似線も示す。図をみる限り式(2)と式(4)の近似線はほとんど一致しており、いずれの式による近似も可能であることがわかる。しかし、式(4)による方が拡散係数は大きくなり、それぞれ式(2)の拡散係数の約1.66、1.71、1.65倍となる。

### 3-4 塩分量分布の予測

図-9に、見掛けの拡散係数Dを $1.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ 、表面塩分量係数Sを $10.0 \times 10^{-6}$ としたときの予測の塩分量分布を、供用年数20年および50年について式(4)による計算値で示した。また、供用年数20年で式(4)による分布に式(2)を近似させたときの見掛けの拡散係数Dと表面塩分量を求め、これらを用いて式(2)による供用年数50年の予測の塩分量分布も比較のために示した。

図-9からも明らかなように、式(4)による予測線では表面部及び表面付近の塩分量が供用年数20年から50年で大きく増加していることがわかる。また、式(2)による予測線では表面塩分量が供用年数に伴い変化せず、コンクリート内部についても式(4)による予測線と比較して増加量が小さいことがわかる。これらのことから、

2章3節にも述べたように鉄筋の腐食に関しては式(4)による塩分量の分布の予測は式(2)の予測と比較して安全側となる。さらに、鉄筋の腐食を開始させる塩分量を設定することにより、式(4)からその塩分量に到達する年数を、コンクリートの深さごとに計算し、鉄筋のかぶり位置における腐食開始年数として算出することができる。

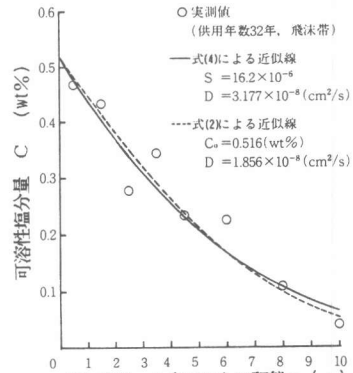


図-7 塩分量実測データに対する式(4)の適用 (飛沫帯)

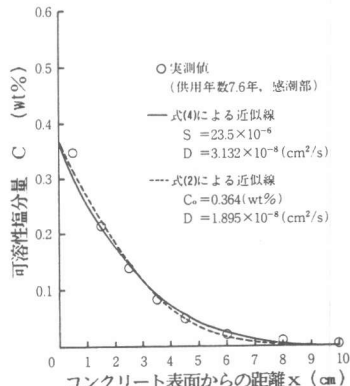


図-8 塩分量実測データに対する式(4)の適用 (感潮部)

#### 4. 表面塩分量係数の考察

##### 4-1 表面塩分量係数の次元

ここまでは、表面塩分量係数  $S$  を無次元であるかのようにして解析に用いてきたが、式(4)からも明らかのように実際には  $1/\sqrt{T}$  の次元をもつ。

フィックの第1法則は式(5)で表すことができる。

$$F(x, t) = -D \frac{\partial C^*}{\partial x} \quad (5)$$

ここに、

$F$  : 単位時間に単位面積を通過する拡散量 ( $g/cm^2 s$ )

$C^*$  : コンクリートの容量に対する塩分量 ( $g/cm^3$ )

ここで拡散流束  $F$  も式(1)と同様の形をとることから、

$$\frac{\partial F}{\partial t} = D \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \quad (6)$$

$x=0, t>0$  で  $F=F_0$  (一定) と仮定して式(6)を解くと、

$$F(x, t) = F_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \quad (7)$$

コンクリート表面における拡散流束  $F$  は、コンクリート表面に供用環境から供給される塩分が単位時間にコンクリート表面を内部に向かい通過する量である。従って、この値を一定とすることは供給される塩分が一定で、かつ、供給塩分中の一定の割合がコンクリート表面を内部に向かい通過することに相当する。実際の現象もこのように考えられることから、拡散流束に関する上記仮定は妥当である。

式(6)、式(7)より、

$$C^*(x, t) = 2F_0 \left\{ \sqrt{\frac{t}{\pi D}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) - \frac{x}{2D} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right\} \quad (8)$$

また、式(8)の両辺を  $\rho$  (コンクリートの比重  $g/cm^3$ ) で割ることにより、塩分量をコンクリート重量に対する塩分量に換算すると、以下の式(9)のようになる。

$$C(x, t) = \frac{C^*(x, t)}{\rho} = 2\frac{F_0}{\rho} \left\{ \sqrt{\frac{t}{\pi D}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) - \frac{x}{2D} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right\} \quad (9)$$

ここで、式(9)と式(4)を比較することにより、表面塩分量係数  $S$  とコンクリート表面における拡散流束  $F_0$  との関係は式(10)のようになる。

$$S = \frac{2F_0}{\rho\sqrt{\pi D}} \quad (10)$$

ここで、明らかに表面塩分量係数  $S$  の次元は  $1/\sqrt{T}$  であることがわかる。

##### 4-2 表面塩分量係数の意味

式(1)の拡散方程式を式(3)を境界条件として解くことは、コンクリート表面における拡散流束が一定であることに相当する。つまり、図-9で、 $x=0$  における式(4)による予測線の傾きが供用年数にかかわらず一定であることになる。

式(10)は表面塩分量係数  $S$  がコンクリート表面における拡散流束  $F_0$  と見掛けの拡散係数  $D$  の関数であり、前者に比例し、後者の平方根に反比例することを示している。ここで、拡散流束

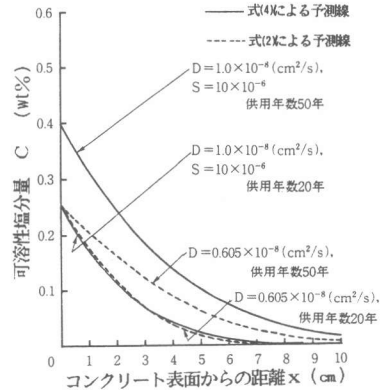


図-9 塩分量分布の予測

$F_0$ は供用環境条件により変化し、拡散係数はコンクリートの品質により変化すると考えられる。さらに、コンクリート表面における拡散流束 $F_0$ が大きいことは、環境条件が塩分の浸透に関して厳しいことに相当し、見掛けの拡散係数 $D$ が小さいことはコンクリートが塩分の浸透に関して大きな抵抗性能を持つことに相当する。また、式(10)より $F_0$ が増大すればするほど、あるいは、 $D$ が減少すればするほど表面塩分量係数は大きくなる。従って、供用期間が等しければ、同一環境条件にあるコンクリートでは見掛けの拡散係数 $D$ が小さいほど、同一品質のコンクリートでは環境条件が厳しいほど表面塩分量が大きくなると考えられる。高炉セメントを使用した場合、普通ポルトランドセメントに比較して表面付近の塩分量が極端に大きくなり、内部の塩分量が小さくなることは、これらのことから説明できるものと考えられる。

## 5. まとめ

(1) フィックの第2法則として知られる拡散方程式を解くにあたり、境界条件を供用期間の平方根に比例する関数とすることは、実構造物における塩分量実測データに対する近似が良いことから適当である。

(2) 拡散方程式の境界条件に相当する表面塩分量は、海上大気中、飛沫帯、感潮部それぞれの海洋環境下で供用期間の平方根に比例する。このときの比例定数、すなわち表面塩分量係数は、海上大気中、飛沫帯、感潮部の順に大きくなる。しかし、飛沫帯における表面塩分量係数の値の範囲は広く、その値には飛沫帯特有の要因やコンクリートの品質が大きく影響していると考えられる。従って、表面塩分量係数は構造物ごと、あるいは部位ごとに定める必要がある。

(3) 表面塩分量係数は、供用環境条件に関係するコンクリート表面における拡散流束と、コンクリートの品質に関係する拡散係数の関数として表すことができる。このとき、拡散流束が大きければ、つまり供用環境からの塩分の供給量が多ければ表面塩分量係数は大きくなる。また、コンクリートの品質に関係する拡散係数が小さければ、つまり良い品質のコンクリートほど表面塩分量係数は大きくなる。

(4) 実構造物の塩分量実測データから求めた見掛けの拡散係数及び表面塩分量係数を用いることにより、将来の塩分量分布を求めることができる。従って、酸素が十分に供給される環境下では、鉄筋の不動態被膜が破壊される塩分量を設定することにより、鉄筋の腐食開始年数を予測することが可能となる。

(5) 本解析手法のように表面塩分量が経時的に増加するとして塩分量の分布を予測することは、表面塩分量を一定として予測するよりも安全側となる。つまり、耐久性設計において鉄筋のかぶりを定める場合、塩分が要因となる鉄筋の腐食に関しては、本解析手法により塩分の拡散浸透状況を予測することによって定めることが適当である。

## 参考文献

- 1) 国土開発技術研究センター：コンクリートの耐久性向上技術の開発に関する調査報告書：1988. 3 : pp. 178~183
- 2) 大城 武他：コンクリート中への塩素イオンの浸透に関する実験的及び解析的研究：コンクリート工学年次論文報告集9-1 : 1987 : pp. 369~374
- 3) 永野宏雄：塩分汚染コンクリート構造物の診断手法の提案：大成建設技術研究所報18号 1986. 3 : pp. 67~73