コンクリート中の塩分浸透分布を用いた塩化物イオン拡散係数の算定手法に関する考察

群馬大学工学部　学生会員　湊谷　昌樹
群馬大学工学部　正 会 員　杉山　隆文
群馬大学工学部　ﾌｪﾛｰ会員　辻　幸和

１．はじめに

塩害環境下におけるコンクリート構造物の合理的な維持管理を行うためには、コンクリート中の塩分浸透分布から得られる塩化物イオン拡散係数を用いて、鉄筋の腐食発生時期の予測を行う必要がある。しかし、重要なパラメータである拡散係数の算出手法として、一般に誤差関数または正規分布関数を採用しているが、現状では統一された計算方法は無く、未だそれに関する研究は少ない。

本研究では、誤差関数及び正規分布関数を用いて、コンクリート中の塩分浸透分布から塩化物イオン拡散係数を算定して、両者を比較検討した。また、計算手法に誤差関数を採用する場合、コンピューターによる非線形最小二乗法を用いた客観的な近似手法と、人為的な誤差を把握するため、人間による近似の計算も試み、両者の差異についても比較検討した。そして、それぞれの手法から得られた拡散係数を用いて、実際に鉄筋の腐食発生時期の予測を行った。

２．本研究で使用した塩分浸透分布

図 1 は $W／C$＝65%の普通コンクリートを、1 年間厳しい塩害環境下に暴露して得られた塩分浸透分布である。

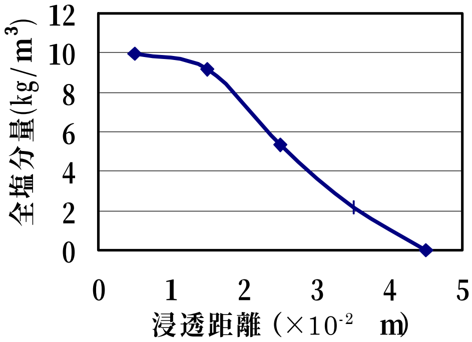

図１　全塩分量と浸透距離の関係
(自然暴露実験)

３．誤差関数及び正規分布関数

３．１　誤差関数についての基礎式

コンクリート中の塩化物イオンが一次元的に拡散する際の基礎式として、一般に Fick の第 2 法則（(1)式）が用いられている。

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

(1)式を拡散係数である D を一定として、初期条件：$C=0$（$t=0$, $x>0$）、境界条件：$C=C_0$（$t>0$, $x=0$）において解くと(2)式を得る。

$$\frac{C}{Cs} = 1-erf(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}) \qquad (2)$$

ここで、C：コンクリート中の全塩分量、 Cs：コンクリート表面の塩分量、erf：誤差関数、D：塩化物イオン拡散係数、C：暴露期間、x：コンクリート表面からの距離である。

３．２　誤差関数と正規分布関数の関係

(2)式における誤差関数と正規分布関数及び誤差関数の関係は、それぞれ(3)式及び(4)式に示される。

$$\frac{1}{2}\left(1-erf\left(y\right)\right) = 1-P\left(\sqrt{2}y\right) \qquad (3)$$

$$erf(y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^y exp\left(-y^2\right)dy \qquad (4)$$

ここで、$y=x／2\sqrt{Dt}$、P は正規分布関数である。(4)式を(3)式に代入し，変換することによって，(5)式を得る。この式より正規分布関数を用いて拡散係数を求めることができる。

$$\frac{C}{2Cs} = 1-P(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}) \qquad (5)$$

キーワード：塩分浸透分布，　塩化物イオン拡散係数，　誤差関数，　非線形最小二乗法
連絡先：〒376 - 8515　群馬県桐生市天神町 1 - 5 - 1　TEL 0277 - 30 - 1613　FAX 0277 - 30 - 1601

4．誤差関数及び正規分布関数による拡散係数の算定

4．1　誤差関数による算定結果

図2は、コンクリート中の塩分浸透分布に誤差関数を用いて表面塩分量 Cs 及び拡散係数を2変数として得られた近似曲線である。横軸に表面からの距離と暴露期間との関係($\phi = x／\sqrt{t}$)を、縦軸に全塩分量 C をプロットしたものである。最適な近似曲線を判定するために、Levenberg-Marquardt アルゴリズムを用いた非線形最小二乗法を採用している。この場合の近似は、人為的な誤差による影響が無視できる客観的な手法となる。

また、塩化物イオンの拡散理論に経験ある人と未経験の人それぞれに、コンピューターの計算より得られた表面塩分量と誤差関数を用いて拡散係数を算出してもらった。このときを主観的な手法とし、客観的に得られた結果と比較検討した。

4．2　正規分布関数による算定結果

図3は、コンクリート中より得られた塩分浸透分布を正規確率紙に置き換えたものである。つまり、横軸を浸透面からの距離 x、縦軸を $C／(2Cs)\times100$ としてプロットしている。これより両者の関係が直線式で近似され、この直線の傾きを求めると $1／(2\sqrt{Dt})$となり、この傾きから塩化物イオン拡散係数が求められる。この場合の近似直線も最小二乗法によるコンピューターの繰り返し計算から客観的に求めた。

また、正規分布関数を用いる場合には、誤差関数を用いた場合と異なり、予め Cs を決定する必要がある。なお、今回は誤差関数より得られた表面塩分量を用いて計算を行った。

5．鉄筋の腐食発生開始時期の予測

表1に、各手法により算出された塩化物イオン拡散係数の結果を示した。これより、拡散係数の相違が明らかとなったが、誤差関数と正規分布関数は、理論的には拡散係数が等しくなるはずである。しかし、この相違は、それぞれのプロットを近似する際に生じた誤差によるものである。また、主観的な手法として人間による手計算で得られた拡散係数にも相違が認められるが、これも同様な理由が言える。

次に、全塩分量が 1.2(kg／m^3)となる時期を鉄筋の腐食発生開始時期として、かぶりが 7.5cm における鉄筋が腐食し始める時期を予測した。その結果を示したのが図4である。これより、誤差関数を用いて客観的に求めた場合と、正規分布関数から求めた場合では約3年、誤差関数を用いて主観的に求めた場合では約1年と腐食発生時期に差が生じた。したがって、拡散係数の評価や、塩害環境下にあるコンクリート中の鉄筋の腐食発生時期の予測は、各計算手法における近似手法に影響を受ける。

6．まとめ

塩分浸透分布から誤差関数を用いて拡散係数を計算する際、近似手法に伴う計算誤差により正規分布関数を用いた場合とは異なる値が計算される。また、誤差関数を用いても、近似手法が主観的か客観的かで拡散係数の値に差が生じた。

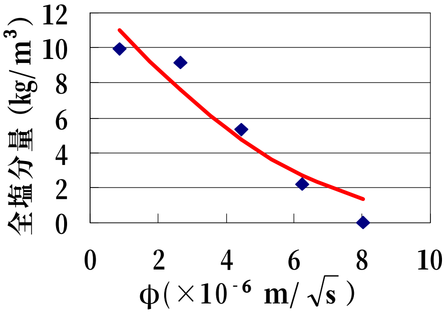

図2　誤差関数における近似曲線

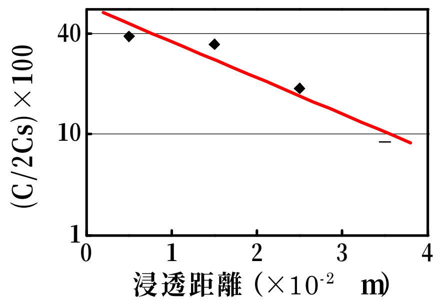

図3　正規分布関数における近似直線

表1　各手法における拡散係数の関係

計算手法		表面塩分量 Cs(kg／m^3)	塩化物イオン拡散係数 D（×10^{-11} m^2／s）
誤差関数	コンピューター	12.8	1.24
	経験者		1.12
	未経験者		0.85
正規分布関数（コンピューター）			0.57

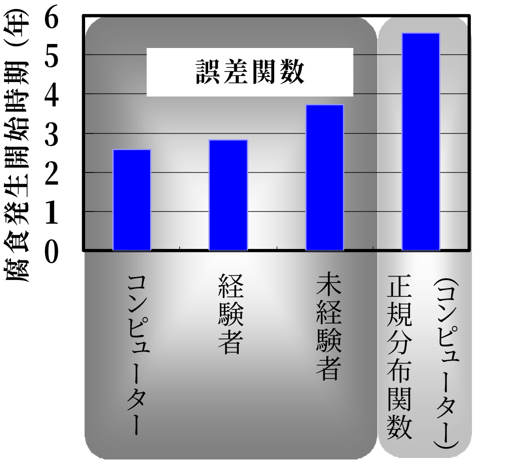

図4　鉄筋の腐食発生開始時期の予測結果