

## 報告 コンクリート中のCl<sup>-</sup>イオン濃度, 深さ, 経過年数の簡易関係式

村山 八洲雄\*1・須田 久美子\*2・永田 茂\*3

要旨: フィックの拡散式に近似式をあてはめ, 中性化速度係数の場合と同様にコンクリート深さと時間の平方根の比に着目し, これを拡散係数と塩化物イオン濃度を用いて陽な関数形で表現した. そして深さ・時間平方根比に関するノモグラムを作成した. さらに時間に対する深さ, 拡散係数および塩化物イオン濃度の相互の影響度合いが比較できる式を導き, 互いの影響度合いをグラフにより表現した.

キーワード: 塩分, 塩化物イオン濃度, 拡散, 耐久性, 簡易式, ノモグラム

### 1. はじめに

RC構造物の塩害に対する耐久性を確保する設計的方法として、設計耐用年数を考慮し、環境条件に対して鉄筋位置でのCl<sup>-</sup>イオン濃度が或る値以下になるようコンクリートの配合を設定する方法が用いられる。また、既設構造物の維持管理の面から、コンクリート中のCl<sup>-</sup>イオン濃度の深さ方向分布や鉄筋位置でのCl<sup>-</sup>イオン濃度を測定し、その結果を補修計画や余命評価の材料として用いたり、既設コンクリートの拡散係数を推算したりするのに用いられている。

これらのいずれの場合も、コンクリート中のCl<sup>-</sup>イオンの移動を拡散問題としてとらえ、通常フィックの式により検討が行われている。しかしフィックの式は複雑な誤差関数を含んでいるため、設計的検討においては組み込み関数に誤差関数を具備する計算機を必要とするのみならず、環境条件から決まる表面Cl<sup>-</sup>イオン濃度に対するコンクリート被り厚と拡散係数を選定する際その兼ね合いの検討を困難にしている。また、既設構造物のCl<sup>-</sup>イオン濃度の測定結果をもとに耐久性を考える場合、環境条件(表面Cl<sup>-</sup>イオン濃度)が通常値と異なるのかそれともコンクリートの品質(拡散係数)が通常値と異なっているのか、現地での検討を困難にしている。

コンクリートの中性化の問題ではいわゆる $\sqrt{t}$ 則が実務において一般に用いられており、上述のような困難は生じない。拡散問題は基本的に $\sqrt{t}$ 則に従うことは知られているが、塩害に対する検討においては $\sqrt{t}$ 則が陽な形で表示されていないことが、前述のような実務での検討を難しくしていると考えられる。

本報告ではこのような観点から、まず拡散式を近似式を用いて陽な形で表現し、その近似式の精度を検討した。次に近似式を用いて、コンクリート深さ・時間平方根比、Cl<sup>-</sup>イオン濃度、拡散係数の3者の関係をノモグラムとして表した。このノモグラムを用いれば3者の設計値や推定値の変動の影響を大略把握することができる。更に、変動の影響をより定量的に表す式を求めた。そしてパラメータ解析を行い互いの影響度合いをグラフとして表した。

### 2. 解析式

#### 2.1 拡散式の展開

一般に用いられているフィックの拡散式は式(1)で示される。実際の設計の場合には、判定式において $\gamma_i$ を、表面塩化物イオン濃度に対して $\gamma_{cl}$ を、拡散係数に対して $\gamma_c$ をそれぞれ安全係数として別途考慮することになる。

\*1 岡山大学教授 環境理工学部環境管理工学科 工博 (正会員)

\*2 鹿島建設(株) 技術研究所土木技術研究部 主管研究員 工博 (正会員)

\*3 鹿島建設(株) 技術研究所土木技術研究部 主管研究員 工博

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

ここに、

$C$  : 深さ  $x$  における塩化物イオン濃度  
( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$C_0$  : 表面塩化物イオン濃度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$\operatorname{erf}(z)$  : 誤差関数

$x$  : コンクリートの表面からの深さ ( $\text{cm}$ )

$D$  : コンクリートの拡散係数 ( $\text{cm}^2/\text{year}$ )

$t$  : 経過年数 ( $\text{year}$ )

誤差関数のグラフは横軸に引数、縦軸に対応する誤差関数の値をとると図 - 1 のようになる。コンクリート中の  $C$  の分布と  $C_0$  および  $x$  の関係を模式的に図 - 2 に示した。

式(1)を展開して整理すると式(2)が得られる。

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

一方、誤差関数は近似的に式(3)で表されることが知られている<sup>1)</sup>。

$$\operatorname{erf}(z) \approx \sqrt{1 - \exp\left(-\frac{4z^2}{\pi}\right)} \quad (3)$$

式(3)を式(2)に適用して整理すると、式(4)が得られる。

$$\frac{x}{\sqrt{t}} = \sqrt{-\pi D \times \ln \left\{ 1 - \left( \frac{C_0 - C}{C_0} \right)^2 \right\}} \quad (4)$$

式(4)は、コンクリート中の塩化物イオン濃度の値が  $C$  に達する時の深さ  $x$  と年数  $t$  の関係を陽な形で表したものになっている。いま“塩化物イオン濃度の値が  $C$  に達する”という現象を“中性化”という現象に照らし合わせると、式(4)は、中性化における中性化速度係数に対応していることがわかる。

## 2.2 ノモグラム

$(C_0 - C)/C_0$  と  $D$  を変数として式(4)で示される

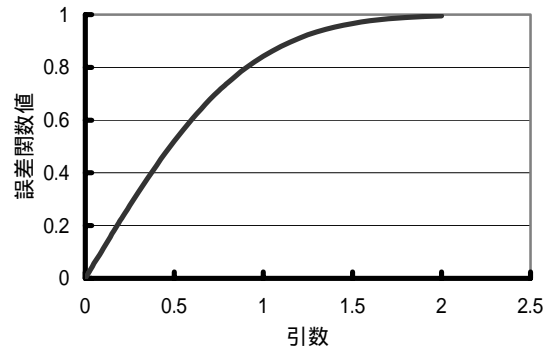


図 - 1 誤差関数の値

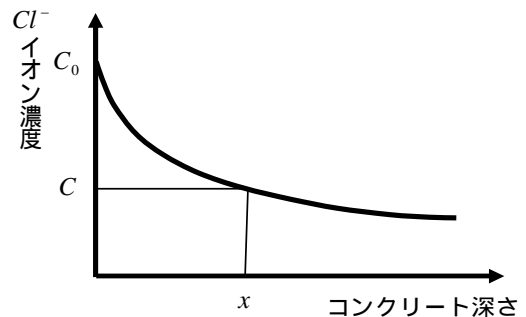


図 - 2  $\text{Cl}^-$  イオン濃度分布の模式図

$x/\sqrt{t}$  の値をパラメータ計算し、その結果を等高線形で表現して図 - 3 に示す。 $x/\sqrt{t}$  の値は図中に記載されている。

図 - 3 から、それぞれ縦軸と横軸で示される  $(C_0 - C)/C_0$  と  $D$  の値が与えられれば中性化速度係数に対応する塩害での  $x/\sqrt{t}$  の値を知ることができる。

設計的検討を例にとれば、 $C$  の値は発錆限界  $\text{Cl}^-$  イオン濃度の値とし、想定される表面  $\text{Cl}^-$  イオン濃度と設計耐用年数  $t$  に対して、コンクリートの被り厚  $x$  とコンクリートの  $\text{Cl}^-$  イオン拡散係数  $D$  の組み合わせをこのノモグラムから選択することができる。

## 2.3 近似式の精度

ここで近似式の精度を調べておく。誤差関数の近似式と精解値との比率について、引数を変化させて調べた結果を図 - 4 に示す。引数が 1 前後で近似式は過大評価となるが、誤差は 1% 程度と小さく実用上問題とならない。

近似式による誤差関数の逆関数の精度を調べた。 $(C_0 - C)/C_0$  の値に対する逆関数の近似式と

精解との比率を図 - 5 に示す。 $(C_0 - C)/C_0$  値が 1 に近づくと誤差が大きくなるが、 $(C_0 - C)/C_0$  値が 0.9 程度より小さい範囲では誤差は 1% 程度以下となっており、この範囲では実用上問題ない。 $(C_0 - C)/C_0$  値が 1 に近づくと誤差が大きくなるのは、次のように説明することもできる。すなわち、誤差関数の逆関数を求めることは、図 - 1 において、縦軸の値が与えられて横軸の値を求めることに相当する。 $(C_0 - C)/C_0$  の値が 1 に近づくと図中の曲線の勾配は著しく小さくなる。そのため  $(C_0 - C)/C_0$  の値のわずかな相違が横軸の値に大きな差異を与えることに相当していると考えられる。

### 3. 各要因の変動の影響

#### 3.1 式の展開

コンクリート表面からの深さ  $x$  (cm)

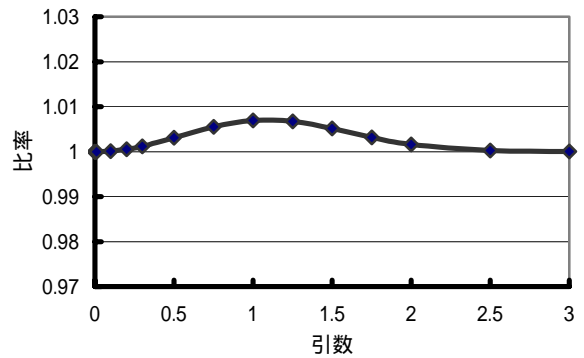


図 - 4 近似式の精度

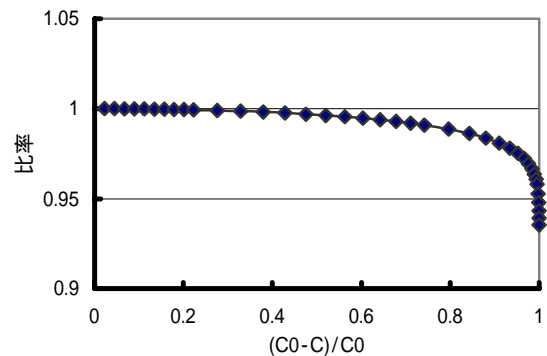


図 - 5 近似式の逆関数の精度

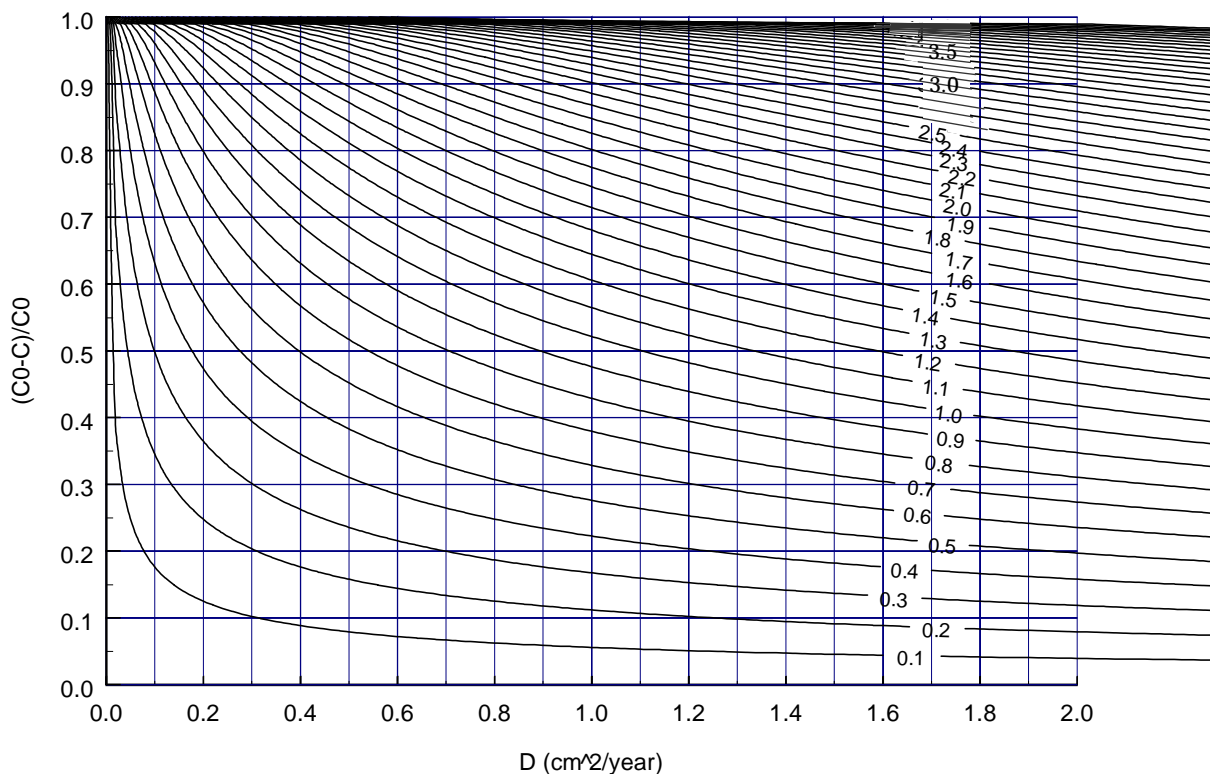


図 - 3 深さ、年数、Cl<sup>-</sup>濃度、拡散係数の関係

において、塩化物イオン濃度  $Cl^-$  ( $kg/m^3$ ) が発錆濃度のような特定の値になるまでの経過年数  $t$  (年) の推定値に対する表面塩化物イオン濃度  $C_0$  ( $kg/m^3$ ) および拡散係数  $D$  ( $cm^2/year$ ) などの各要因の影響度合いを調べた。

式(4)を基に検討するが、

$$\zeta = \frac{C_0 - C}{C_0} \quad (5)$$

とにおいて、式(4)を展開すると年数  $t(\zeta, x, D)$  は次のように表現される。

$$t(\zeta, x, D) = \frac{x^2}{-\pi D \ln(1 - \zeta^2)} \quad (6)$$

ここで、 $\zeta, x, D$  がそれぞれ  $\zeta_0, x_0, D_0$  時の年数  $t$  を  $t_0$  とする時、 $\zeta_0, x_0, D_0$  がそれぞれ  $\zeta_1 = \zeta_0 + \Delta\zeta$ 、 $x_1 = x_0 + \Delta x$ 、 $D = D_0 + \Delta D$  に変化したあとの  $t_1 = t_0 + \Delta t$  を求める。

式(6)より、

$$\Delta t \approx \left(\frac{\partial t}{\partial \zeta}\right)_0 \Delta\zeta + \left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)_0 \Delta x + \left(\frac{\partial t}{\partial D}\right)_0 \Delta D \quad (7)$$

一方、

$$\frac{\partial t}{\partial \zeta} = \frac{-2x^2}{\pi D} \frac{\zeta}{(1 - \zeta^2)\{\ln(1 - \zeta^2)\}^2} \quad (8)$$

$$\frac{\partial t}{\partial x} = \frac{-2x}{\pi D \ln(1 - \zeta^2)} \quad (9)$$

$$\frac{\partial t}{\partial D} = \frac{x^2}{\pi D^2 \ln(1 - \zeta^2)} \quad (10)$$

であるから、式(11)が得られる。

$$\frac{\Delta t}{t_0} = \frac{2\zeta_0}{(1 - \zeta_0^2)\ln(1 - \zeta_0^2)} \Delta\zeta + \frac{2}{x_0} \Delta x - \frac{1}{D_0} \Delta D \quad (11)$$

$\Delta\zeta$ 、 $\Delta x$ 、 $\Delta D$  の変化量が  $\Delta t$  の値を相殺する場合を考えると、

$$\frac{2\zeta_0}{(1 - \zeta_0^2)\ln(1 - \zeta_0^2)} \Delta\zeta + 2\frac{\Delta x}{x_0} - \frac{\Delta D}{D_0} = 0 \quad (12)$$

変数が3つあるが、そのうちの一つを固定した場合には次のようになる。

$D$  を変化させない時

$$\frac{\Delta x}{\Delta \zeta} = \frac{-\zeta_0 x_0}{(1 - \zeta_0^2)\ln(1 - \zeta_0^2)} \quad (13)$$

$x$  を変化させない時

$$\frac{\Delta D}{\Delta \zeta} = \frac{2\zeta_0 D_0}{(1 - \zeta_0^2)\ln(1 - \zeta_0^2)} \quad (14)$$

$\zeta$  を変化させない時

$$\frac{\Delta D}{\Delta x} = \frac{2D_0}{x_0} \quad (15)$$

以上の式(13)～式(15)を用いて、経過年数  $t$  に対する  $x$ 、 $\zeta$ 、 $D$  の互いの相対的影響度合いを求めることができる。

### 3.2 パラメータ計算の結果と考察

$\Delta x/\Delta\zeta$ 、 $\Delta D/\Delta\zeta$  および  $\Delta D/\Delta x$  についてそれぞれパラメータ計算を行った。パラメータの範囲は次に述べる範囲とした。

コンクリートの深さ  $x$  : 5～10cm

$(C_0 - C)/C_0$  の値 : 0.1～0.9

拡散係数  $D$  : 0.1～1.5  $cm^2/year$

計算結果をそれぞれ図 - 6、図 - 7、図 - 8 に示した。これらのうち図 - 7 については、 $\Delta t$  の値を相殺する  $\Delta D$  と  $\Delta\zeta$  の関係が図 - 3 から容易に求めることができるので必ずしも必要とされないが、参考として掲載した。

これらの図から、つぎのことがいえる。

$\Delta x/\Delta\zeta$  値は大半が 10～30 の範囲にある。これは例えば、 $(C_0 - C)/C_0$  値が 0.1 増加しても、コンクリート被り厚を 1～3cm 増加させれば発錆までの年数は大きく変わらないことに相当する。

$\Delta D/\Delta\zeta$  値は大半が -1～-10 の範囲にある。例えば、 $(C_0 - C)/C_0$  値が 0.1 増加しても、拡散係数を 0.1～1.0  $cm^2/year$  減少させれば発錆までの年数は大きく変わらないことに相当する。

$\Delta D/\Delta x$  値は大半が 0.1～0.5 の範囲にある。例えば、コンクリート深さを 1cm 増加させれば、拡散係数を 0.1～0.5  $cm^2/year$  増加させても発錆までの年数は大きく変わらないことに相当する。

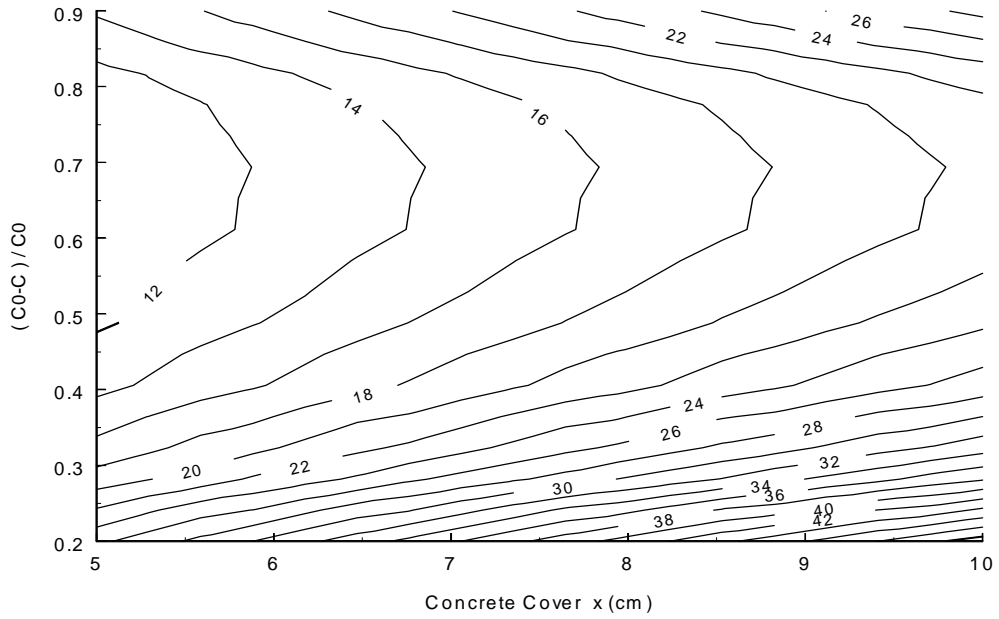


図 6 時間と拡散係数一定のときの深さ増分と塩分濃度差（無次元）増分の関係（図中の数値は式(13)の値を示す）

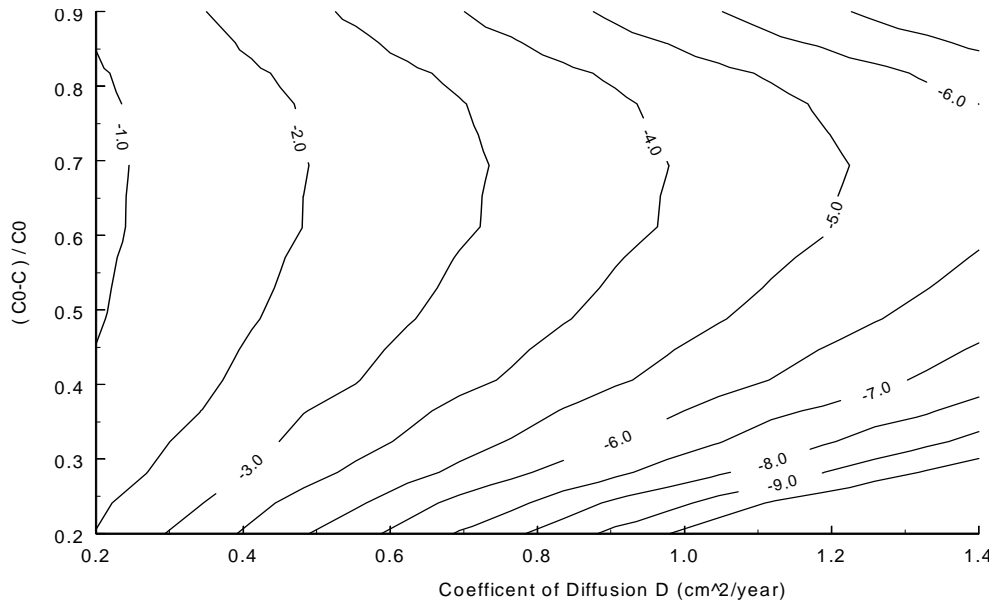


図 7 時間と深さ一定のときの拡散係数増分と塩分濃度差（無次元）増分の関係（図中の数値は式(14)の値を示す）

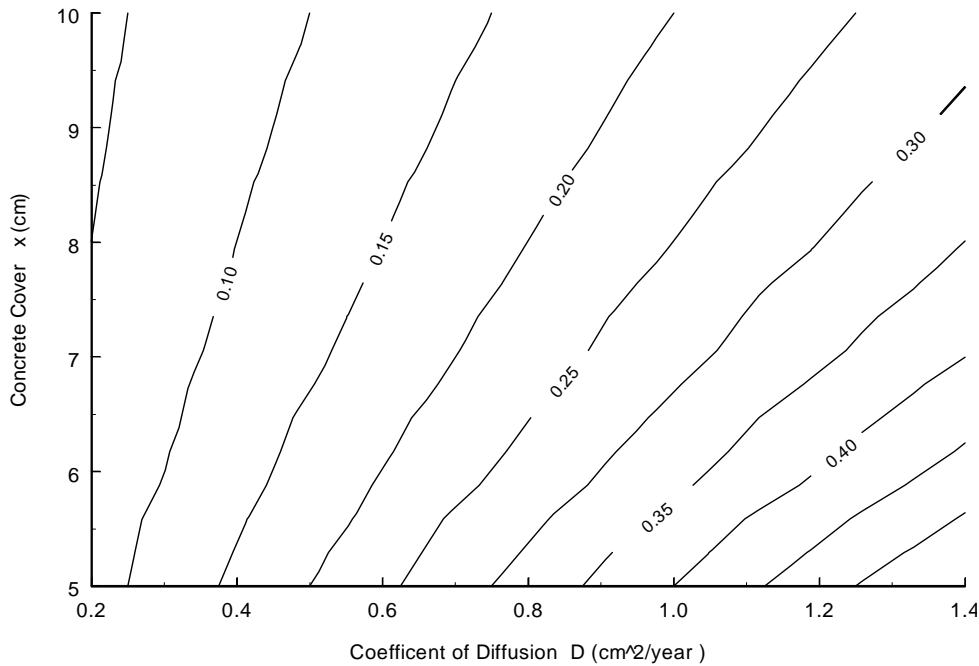


図 - 8 時間と塩分濃度差(無次元)一定のときの拡散係数増分と深さ増分の関係  
(図中の数値は式(15)の値を示す)

#### 4. まとめ

塩化物イオン濃度に関するフィックの拡散式をもとに誤差関数に近似式をあてはめ、コンクリート表面からの深さと時間の平方根の比をイオン濃度と拡散係数を用いて陽な形で表現した。中性化現象でいえば中性化速度係数に相当するこの指標に関するノモグラムを用意した。さらに、コンクリートが或る塩化物イオン濃度に達する経過年数に着目し、影響要因としてのコンクリート深さ、その位置での基準化した塩化物イオン濃度および拡散係数の相互の影響度合いを式によって示し、グラフで表現した。

こうして得られた評価式やグラフは、塩害に対するコンクリート構造物の耐久性設計の基本検討において利用することができるとともに、既設構造物で取得された塩化物イオン濃度の試験値をもとに拡散係数や余命の評価を行う時に利用が可能と思われる。

#### 参考文献

- 1) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事，p.515，1997年