

塩分浸透における $\sqrt{t}$ 則

岡山大学 フェロー会員 ○村山八洲雄
 鹿島技術研究所 正会員 須田久美子
 鹿島技術研究所 正会員 永田 茂

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。

1. まえがき

R/C 構造物の塩害に対する耐久性設計や維持管理における余命評価において塩分浸透に関するフィックの式がよく用いられる。しかし、この式には複雑な誤差関数を含んでいるため、設計においては表面Cl⁻イオン濃度に対してコンクリート被り厚と拡散係数を選定する際に両者の兼ね合いの検討を困難にしている。また、既設構造物の耐久性の検討においては、環境条件（表面Cl⁻イオン濃度）が通常値と異なるのか或いは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。これらの困難を緩和するため、フィックの式を近似式を用いて陽な形で表現し、中性化でいうところの $\sqrt{t}$ 則に相当する式を導出した。導出した式を用いて、コンクリート深さ・時間平方根比、Cl⁻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。

2. 解析式

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 γ_i を、表面塩化物イオン濃度に対して γ_{cl} を、拡散係数に対して γ_c を安全係数として別途考慮することになる。

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

ここに、 C は深さ x における塩化物イオン濃度（ kg/m^3 ）、 C_0 は表面塩化物イオン濃度（ kg/m^3 ）、 $\operatorname{erf}(z)$ は誤差関数、 x はコンクリートの表面からの深さ（ cm ）、 D はコンクリートの拡散係数（ cm^2/year ）、 t は経過時間（ year ）である。

式(1)を展開して整理すると式(2)が得られるが、誤差関数は近似的に式(3)で表される¹⁾ことが知られているので、これを式(2)に適用して整理すると式(4)が得られる。

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

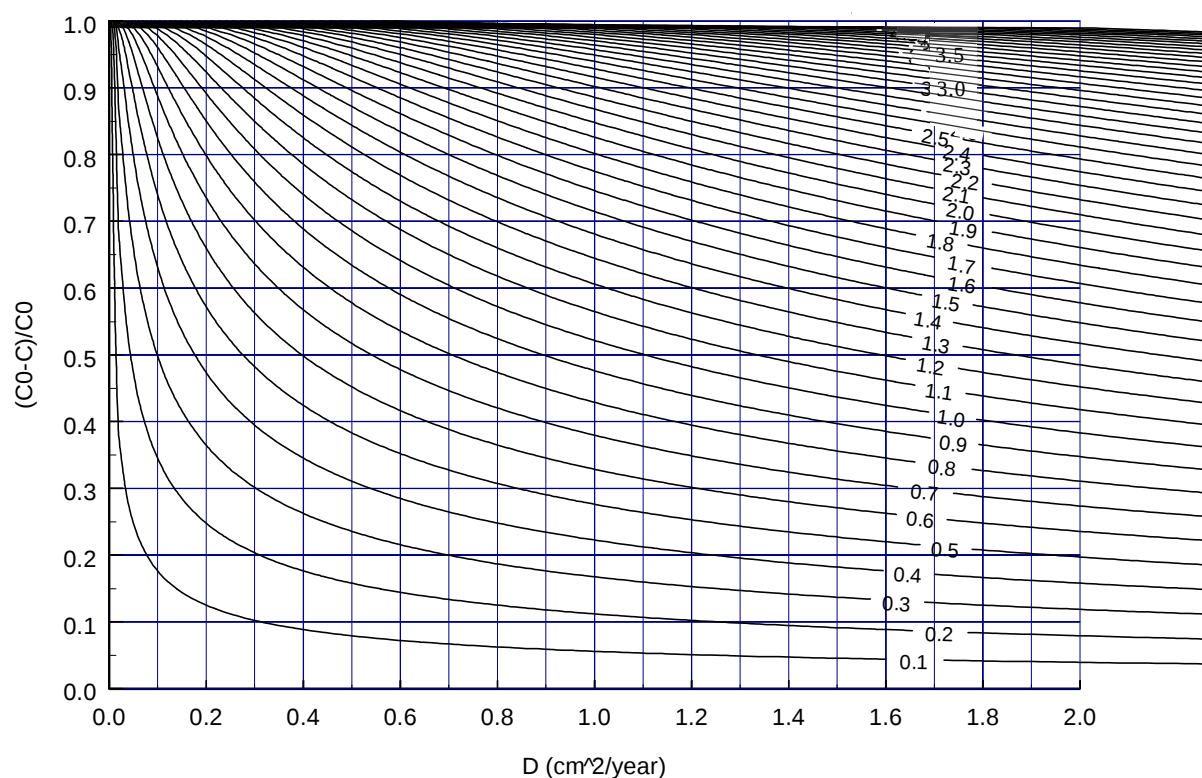
$$\operatorname{erf}(z) \approx \sqrt{1 - \exp\left(-\frac{4z^2}{\pi}\right)} \quad (3)$$

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

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てみると、式(4)の右辺は、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。その値は、拡散係数および塩化物イオン濃度の表面コンクリートとの差分により決まっている。

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

連絡先 〒700-8530 岡山市津島中三丁目1番1号 岡山大学環境理工学部環境管理工学科 TEL 086-251-8161

図 - 1 深さ、年数、 Cl^- 濃度、拡散係数の関係

3. 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 $x/\sqrt{t}$ の値をパラメータ計算し、その結果を等高線の形で表現して図-1に示す。 $x/\sqrt{t}$ の値は図中に記載した。図の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。なお、誤差関数の近似解と精算解の比率は図-2に示すようであり、近似式は引数が1前後で1%程度過大評価となる。また、誤差関数の逆関数の近似解と精算解の比率は図-3に示すようであり、 $(C_0 - C)/C_0$ 値が0.9程度より小さい範囲では誤差は1%程度以下であるが、1に近づくにしたがい過小評価となる。

4. あとがき

提示したノモグラムを用いれば、例えば設計的検討において C の値を発錆限界 Cl^- イオン濃度の値を用い、設定された表面 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 Cl^- イオン拡散係数 D の組み合わせを容易に選択することができる。

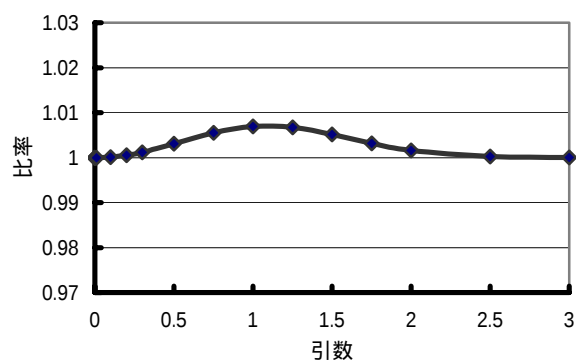


図 - 2 近似式の精度

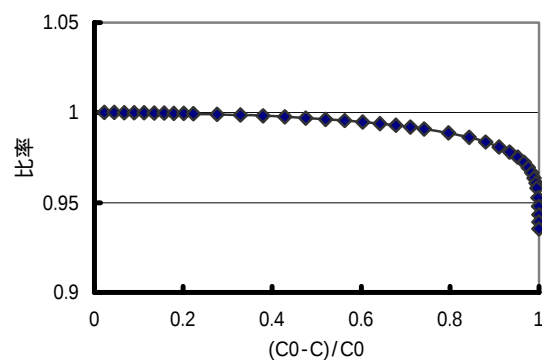


図 - 3 近似式の逆関数の精度

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