

V-176 コンクリートの中性化速度に関する研究

宮崎大学大学院 学生員 張 日紅 宮崎大学工学部 正会員 新西 成男
宮崎大学工学部 正会員 中澤 隆雄 宮崎大学工学部 正会員 今井 富士夫

1. まえがき

コンクリートの中性化に関してこれまで多くの研究がなされ、得られた成果を基に中性化速度式が提案されているが、現状においては中性化速度とコンクリートの内部組織構造との関係が十分には明らかにされていない。本研究では、中性化が炭酸ガスのコンクリート内での拡散によって左右されたと考え、炭酸ガスの濃度や気温、湿度等の外的要因とコンクリートの配合、内部細孔構造等の内的要因を含んだ中性化速度式を誘導するとともに、この式の適用性を検証するため、38年間の自然暴露コンクリートの中性化深さの実測値との比較検討を行った。

2. 中性化速度の予測

コンクリート中の初期 CO_2 濃度を $C_i (x > 0, t = 0)$ 、表面での CO_2 濃度を $C_s (x = 0, t > 0)$ として、Fick の第2法則をラプラス変換することによって、コンクリート中の CO_2 濃度 C_x に関する次式が得られる。

$$\frac{C_i - C_x}{C_i - C_s} = \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \quad (1)$$

ここに、 D は CO_2 のコンクリート中での拡散係数である。中性化深さの時間 dt での変化量 dX はコンクリート中に拡散する炭酸ガス量に比例するとすれば

$$dX = \phi D \left(-\frac{\partial C_x}{\partial x} \right)_{x=X} dt \quad (2)$$

ここに、 ϕ は dX とコンクリート中に拡散した CO_2 量との比例関係を表す係数である。

式(1)から次の偏微分式が得られる。

$$\frac{\partial C_x}{\partial x} = (C_i - C_s) \frac{1}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) \quad (3)$$

これを式(2)へ代入し、 $\psi = X/2\sqrt{Dt}$ とおけば次式が得られる。ここに X は中性化深さである。

$$C_i - C_s = -\sqrt{\pi} \psi \frac{1}{\phi} \exp(\psi^2) \quad (4)$$

$x \geq X$ の所では $C_x = 0$ として、また、 $Ca(OH)_2$ と化学的に結合された CO_2 の濃度を W_{CO_2} とすれば、 $\phi = 1/W_{CO_2}$ になる。式(1)と式(4)から次の式が求められる。

$$\frac{C_s}{W_{CO_2}} = \sqrt{\pi} \psi \exp(\psi^2) \operatorname{erf}(\psi) \quad (5)$$

大気中の CO_2 の濃度は低いため、 $C_s \ll W_{CO_2}$ であるから、式(5)において $\psi \ll 0$ でなければならない。その場合は $\exp(\psi^2) \approx 1$ 、 $\operatorname{erf}(\psi) \approx 2\psi/\sqrt{\pi}$ であるから、式(5)の右辺は $\sqrt{\pi} \psi \exp(\psi^2) \operatorname{erf}(\psi) = 2\psi^2$ になる。 $\psi = X/2\sqrt{Dt}$ とおいていることから、中性化深さ X を求める式が結局次のように誘導できる。

$$X = \sqrt{\frac{2DC_s t}{W_{CO_2}}} \quad (6)$$

このように、中性化深さ X は経過時間 t の平方根に比例するという $\sqrt{t}$ 則と一致した式が求められた。

3. コンクリート中での CO_2 の拡散係数

CO_2 のコンクリート中での拡散は気相細孔内で行われるため、拡散係数は気相細孔量の関数と考えられる。そこで、文献1)を参照し、温度の影響も加え、次式で CO_2 のコンクリート中での拡散係数を算出する。

$$D = 3.82 \left\{ (3.62 \times 10^{12})^{V_g} - 1 \right\} \left(\frac{T}{T_0} \right)^n \times 10^{-10} \quad (7)$$

ここに、 V_g :コンクリートの単位体積あたりの全気相細孔量、 $T_0 = 293^\circ K$ 、 n :気体の粘性と温度との関係を表すマクスウェル・レイリー式中の定数で、 CO_2 の場合は0.79である。 V_g は以下に示すコンクリートの累積細孔量分布関数を用いて表される。

$$V_g = V(\infty) \exp(-Br_w^C) \quad (8)$$

ここに、 $V(\infty)$:単位体積あたりにおける細孔量、 r_w :コンクリート内における液状水が存在する最大細孔半径、 B と C :コンクリートの単位セメント量及び水セメント比に関連するもので、関数の形状を決定するパラメータである。なお、 $V(\infty)$ の算定にあたってはA. M. Nevilleが示した方法²⁾によって求めることができ、 r_w についてはKelvinの式がコンクリート内の細孔に存在する液状水と水蒸気にも適用できるものとして求めることができる。

図-1に拡散係数とコンクリート内の細孔相対湿度との関係の一例を示す。なお、このとき $B = 300$ 、 $C = 0.387$ を用いている。細孔内の相対湿度が高くなれば拡散係数は小さくなり、中性化の進行が遅くなることがわかる。

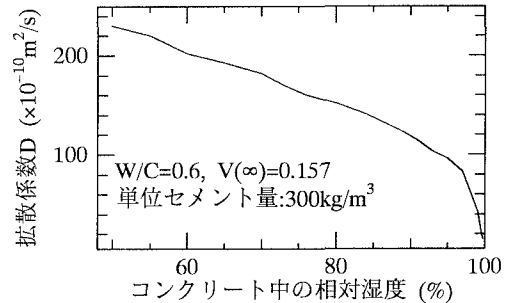


図-1 拡散係数と細孔内の相対湿度との関係

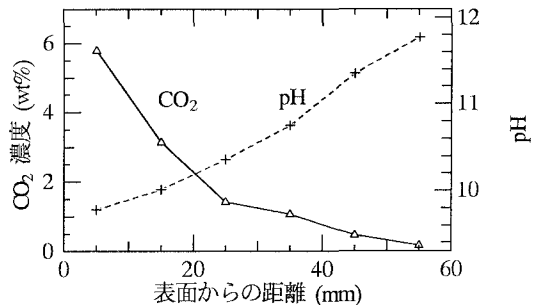


図-2 コンクリートと結合された CO_2 濃度の分布

4. コンクリート中に結合された CO_2 の濃度

実構造物のコンクリート中に結合された CO_2 の量を強熱減量法で求めた結果を図-2に示す。この結果を基に結合された CO_2 の濃度の表面から内部に向かっての減少を直線で近似すれば、 W_{CO_2} は次式で表すことができる。

$$W_{CO_2} = 1/2 W_{CO_2}(0) = 5\alpha\beta W_c \quad (9)$$

ここに、 $W_{CO_2}(0)$:コンクリートの表面部で結合された CO_2 の濃度、 α :セメントの水和率、 β :セメント中の CaO の割合、 W_c :単位セメント量である。

5. 実験結果との比較

経過年数38.8年のRCT桁橋の床版及び桁の中性化深さを測定し、予測式による計算結果との比較を行った。予測式による計算にあたっては $B = 296$ 、 $C = 0.377$ 、 $\alpha = 1$ 、 $\beta = 0.62$ 、 $W_c = 296$ の各値を用いている。なお、コンクリート表面から深さ4、8、12、20および20mm以上の位置での湿度は、本橋の架設地点の年平均湿度及びParrotの実験結果³⁾を参照して、74、80、82、85、90%とした。図-3には本研究で提案した式と岸谷式及び魚本式⁴⁾による床版コンクリートの中性化深さの解析結果を示しており、提案式は実測値ならびに岸谷式、魚本式の結果とよく一致していることが分かる。

参考文献

- 1) 小林一輔ら:各種セメント系材料の酸素の拡散性状に関する研究、コンクリート工学論文、No. 86.12-1.
- 2) A. M. Neville: Properties of Concrete, Third Edition, Pitman, 1981.
- 3) L. J. Parrott: Factors Influencing Relative Humidity in Concrete, Magazine of Concrete Research, Vol. 43, No. 154, March 1991.
- 4) 魚本建人ら:コンクリートの中性化に及ぼす要因、土木学会論文集、No. 451.

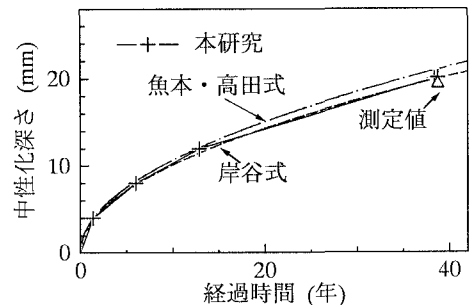


図-3 桁の中性化深さの解析結果と実測値