

V-375

FEMによるコンクリートの中性化深さの推定に関する研究

早稲田大学理工研究科 学生員 チ 路寛
 東日本旅客鉄道株式会社 正会員 高木 言芳
 早稲田大学理工学部 正会員 関 博

1. まえがき

コンクリートの中性化に関してこれまでに多くの研究が行われている。様々な中性化速度の計算式が提案されているが、中性化速度とコンクリートの物性及び環境の関係は十分に明らかにされていない。本研究では、中性化速度は二酸化炭素の拡散によって左右されると考えられるが、さらに、温度、湿度などの外的要因とコンクリートの配合、使用材料などの内的要因を含んだ中性化速度を FEM を用いて誘導することを試みた。なお、この方法の適用性を検討するために、コンクリート供試体を用いて促進中性化試験を実施し、中性化速度式との比較検討を行った。

2. 基本的な拡散方程式

コンクリート中においては、二酸化炭素と水酸化カルシウムが共存する中性化進行領域があると考え、二酸化炭素の拡散は Fick の第一法則にしたがい、二酸化炭素と水酸化カルシウムの反応は一次反応と仮定した上で、次のような二酸化炭素の拡散方程式を用いた。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \quad \cdots \cdots (1)$$

初期条件： $t \leq 0, -\infty \leq x, y \leq 0 : C_x = C_0, C_y = C_0$

境界条件： $t \geq 0, x = X_0, y = Y_0 : \partial C_x / \partial x = 0, \partial C_y / \partial y = 0$

ここで、 C ：二酸化炭素の濃度、 D_x, D_y ： x, y 方向の拡散係数、 X_0, Y_0 ：コンクリート厚さ、 t ：時間

C_x, C_y, C_0 ： x, y 方向及びコンクリート静置の環境の二酸化炭素の濃度

3. FEMによる中性化深さの誘導

3.1 式の誘導

式(1)に対して任意三角要素の関数とガラーキン法を用いると式(2)になる。

$$\int_V C^* \left(\frac{\partial C}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right) dx dy = 0 \quad \cdots \cdots (2)$$

式(2)を整理すれば次の方程式が成り立つ。

$$\int_V \left(C^* \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial C^*}{\partial x} D_x \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial C^*}{\partial y} D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) dx dy = \int_S C^* \left(m D_x \frac{\partial C}{\partial x} + l D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) dS \quad \cdots \cdots (3)$$

ここに、 V は三角要素の領域を、 S はその境界を、 l, m は境界に立てた単位法線の方向の余弦である。

初期条件と境界条件によって式(3)の積分の結果及び全体系について重ね合わせると式(4)になる。

$$[M_1] \frac{\partial C}{\partial t} + [M_2] \{C\} = \{F\} \quad \cdots \cdots (4)$$

時間内の各点の $\{C\}$ の値を得るために差分法及びクランクーニコルソン法を用いて近似計算式(5)を得ることができる。

$$(M_1 + \Delta t M_2 / 2) \{C\}^{n+1} = (M_1 - \Delta t M_2 / 2) \{C\}^n + \Delta t \{F\} \quad \cdots \cdots (5)$$

キーワード：二酸化炭素、拡散係数、FEM、中性化深さ

連絡先：東京都新宿区大久保 3-4-1 早稲田大学 理工学部 51 号館 16-09 室

TEL：5286-3407 FAX：3208-8479

二酸化炭素の拡散速度に比べ、二酸化炭素と水酸化カルシウムの反応速度は非常に大きいため、中性化フロントの境界においては二酸化炭素濃度がゼロになると仮定するとともに、式(5)を用いてコンクリート中の中性化深さを求めることができる。中性化深さを求めるために、二酸化炭素の拡散係数と中性化深さ判定条件を求める必要がある。

3.2 コンクリート中の二酸化炭素の拡散係数

二酸化炭素の拡散は細孔内で行われるために、拡散係数は細孔量と関係があると考えられる。そこで、文献1)を参考し、温度及び湿度の影響を加え、次式でコンクリート中の二酸化炭素の拡散係数が算出できる。

$$D_{CO_2} = 1.64 \times 10^{-6} \epsilon_p^{1.8} (1 - RH/100)^{2.2} (T/T_0)^{0.79}$$

ここに、 D_{CO_2} ：炭酸ガスの拡散係数、 RH ：相対湿度(%)、 T ：試験時の温度、 T_0 ：293℃、 ϵ_p ：単位体積あたりにおける細孔量。 ϵ_p の算定にあたっては文献1)に示した方法によって求めた。

図-1に拡散係数とコンクリート内の細孔相対湿度及び温度との関係の例を示す。この図を見ると相対湿度が高くなれば拡散係数は小さくなり、温度が低くなれば拡散係数が小さくなる。すなわち、中性化の進行速度が遅くなることがわかる。

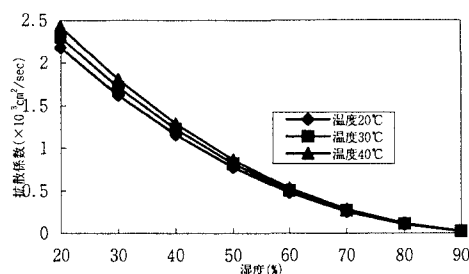


図-1 拡散係数と湿度及び温度の関係

3.3 コンクリート中に結合された二酸化炭素の濃度

中性化したコンクリート中に結合された二酸化炭素の量を示差熱分析法で求めた炭酸カルシウムの結果によって計算した。これによると中性化したコンクリート中の二酸化炭素の濃度は次式で表すことができる。

$$C_{CO_2} = 0.44 C_{CaCO_3}$$

ここに、 C_{CO_2} ：中性化したコンクリート中に結合された二酸化炭素の濃度、 C_{CaCO_3} ：測定した炭酸カルシウムの濃度である。

4. 実験結果との比較

理論計算結果の妥当性を検証するため、促進中性化試験を行った。配合を表-1に示す。促進条件は温度40℃、湿度50%、二酸化炭素の濃度10%である。試験用供試体は100×70×200mmの角柱供試体であり、5面をコーティングして、一方向に中性化を進行させた。

計算結果と実測値を図-2に示す。図を見ると両者の傾向がほぼ一致するが、促進時間が長くなると両者の差が大きくなった。これは、中性化したコンクリートの拡散係数を一定となる原因と考えられる。

参考文献

- 1) Vagelis G. Papadakis: Physical and Chemical Characteristics Affecting the Durability of Concrete, ACI Materials Journal, No. 2 March-April 1991.
- 2) 佐伯 竜彦ら：コンクリート中の中性化の機構解明と進行予測、土木学会論文集 第414号/V-12 1990年2月

表-1 コンクリートの示方配合					
粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント 比 (W/C) (%)	細骨材率 s/a (%)	
10	8	8	70	55	
単位量(kg/m ³)					
水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤(ml)	
				減水剤	AE調整剤
182	260	926	785	650	12

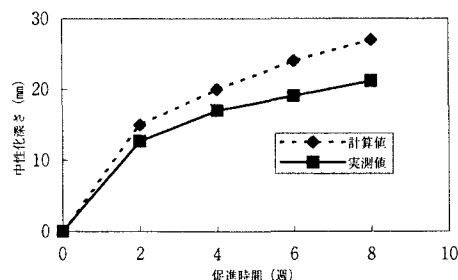


図-2 中性化深さの経時変化