

# 細孔における拡散方程式のモデル化 及びコンクリートの中性化への応用に関する研究

## その2 コンクリートの中性化における細孔情報を考慮した $\sqrt{t}$ 則の物理的意味の検討

214-055 齊藤 大地

### 1. はじめに

本研究その2では、前田論文での低水セメント比に対する間違いの追加修正の検討と、コンクリートの中性化における細孔情報を考慮した $\sqrt{t}$ 則での中性化速度係数に対して、細孔における非正常拡散方程式から導かれる物理的意味を成す $\delta/\tau^2$ の関係を検討する。

### 2. 前田論文の低水セメント比での間違いの追加修正

前田論文<sup>9)</sup>にて、多数の間違いが散見され、正しいモデルに修正した。しかし、さらに、低水セメント比におけるコンクリートの中性化の計算にて、大きな間違いが見つかったので追加修正の検討をした。

まず、前田論文図7の促進中性化試験での水セメント比と中性化深さの関係をトレースした。計算条件は、CO<sub>2</sub>濃度5%、空気量1%、細骨材吸水率 $Q_s=2\%$ 、粗骨材吸水率 $Q_G=1\%$ 、単位水量 $W_g=180\text{kg/m}^3$ 、単位粗骨材量 $G_g=1000\text{kg/m}^3$ 、水和度1で、相対湿度を60%RHと70%RHとした。

図1に検証結果を示す。前田論文図7の計算条件となる相対湿度60%RHでは、前田式と修正式ともに前田論文の中の前田計算値となる文献値と相違した。前田論文図9,11,13の計算例にて相対湿度70%RHが適用されており、相対湿度70%RHで計算してみると、前田式が文献値とほぼ一致した。従って、前田論文でのCO<sub>2</sub>拡散係数複合則の関係式の記述は、単なる誤記でなく、本質的な誤りであることがわかった。

次に、前田論文図3の屋外暴露CO<sub>2</sub>濃度0.03%で相対湿度60%RHの中性化深さ3cm到達期間と水セメント比の関係をトレースした。なお、骨材吸水率が1/100倍の $Q_s=0.02\%$ 、 $Q_G=0.01\%$ も計算した。

図2に検証結果を示す。前田式と修正式は、文献値と異なる結果になり、また、AIJ岸谷式の結果と比較して、 $W/C=55\%$ 未満の低水セメント比での中性化深さの計算結果が大きく異なった。前田の百分率対応誤りを想定し、各骨材吸水率の1/100倍で計算すると、前田式の結果が、文献値とほぼ一致した。それで、前田式や修正式のCO<sub>2</sub>拡散係数の複合則モデルは、 $W/C=55\%$ 程度より小さい低水セメント比条件で、AIJ岸谷式や実際の中性化の現象と異なり、前田論文での大きな間違いが判明した。

低水セメント比で中性化進行が遅くなる結果は、低水セメント比では、骨材とセメントペーストの付着界面の遷移帯が形成されにくいことによる。ここでのCO<sub>2</sub>拡散係数は、骨材とセメントペーストの付着界面の遷移帯をモデル化していない。

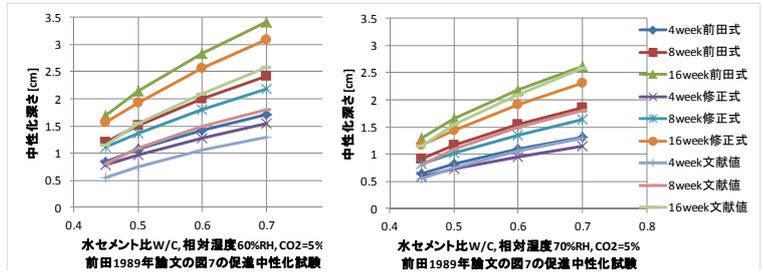


図1 前田論文図7の促進中性化試験での水セメント比と中性化深さの計算の検証結果

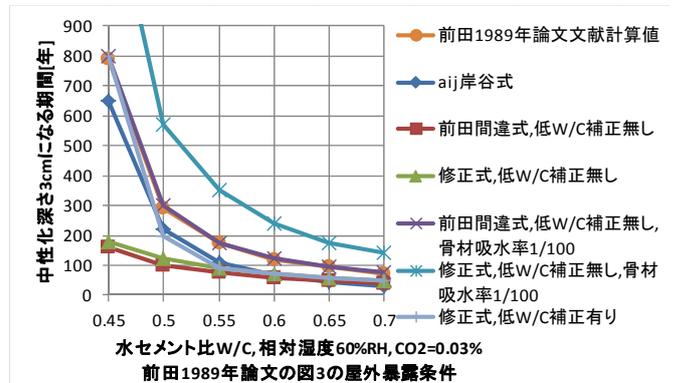


図2 前田論文図3の屋外暴露条件の中性化深さ3cm到達期間と水セメント比の関係の検証結果

それで、低水セメント比で遷移帯が形成されにくくなることは、見かけ上、骨材表面が空隙の少ない殻で覆われて骨材中のCO<sub>2</sub>拡散を遮蔽していくことと考え、骨材の吸水率を水セメント比の関数にして、低水セメント比になるほど骨材吸水率を小さくしていくモデルを考え、次の式(1)と式(2)で対応することにした。ここで、 $W/C$ ：水セメント比(小数表示)、 $Q_{Stz}$ ：遷移帯考慮見かけ細骨材吸水率[%]、 $Q_s$ ：細骨材吸水率[%]、 $Q_{Gtz}$ ：遷移帯考慮見かけ粗骨材吸水率[%]、 $Q_G$ ：粗骨材吸水率[%]。

$$\text{式(1)} \quad 45\% < W/C < 55\%$$

$$Q_{Stz}[\%] = 9 \cdot Q_s[\%] \cdot (W/C) - 3.95 \cdot Q_s[\%]$$

$$Q_{Gtz}[\%] = 9 \cdot Q_G[\%] \cdot (W/C) - 3.95 \cdot Q_G[\%]$$

$$\text{式(2)} \quad W/C \leq 45\%$$

$$Q_{Stz}[\%] = 0.1 \cdot Q_s[\%]; \quad Q_{Gtz}[\%] = 0.1 \cdot Q_G[\%]$$

$W/C=55\%$ 以上は設定した各骨材吸水率で対応し、 $W/C=55\%$ 未満から $W/C$ が小さくなると、骨材吸水率を小さくすることとして、 $W/C=45\%$ で各骨材吸水率の0.1倍にする。これより低い $W/C$ では、 $W/C=45\%$ での各骨材吸水率の0.1倍のまま一定とする。

図2中に低水セメント比での骨材吸水率補正結果を示す。AIJ岸谷式結果と同じで、低水セメント比で中性化進行が遅くなる結果になり、間違いを正すことができた。

### 3. 各種のコンクリートの中性化における細孔情報を考慮した $\sqrt{t}$ 則の中性化速度係数での $D_e$ と $\delta/\tau^2$ の検討

コンクリートの中性化での細孔情報を考慮した $\sqrt{t}$ 則において、前田論文の修正式と優れた中性化の既往研究と認識のパパダキス論文<sup>2)</sup>と白川論文<sup>3)</sup>の各中性化速度係数での物理的意味を成す $D_e$ と $\delta/\tau^2$ を再定義する。

中性化速度係数 $a$ は、細孔でのFick第2法則の検討結果から、 $CO_2$ バルク拡散係数 $D_0$ 、コンクリートの $CO_2$ 実効拡散係数 $D_e$ 、境界条件 $CO_2$ 量 $C_1$ 、コンクリート空隙率 $\varepsilon_c$ 、収斂度 $\delta$ 、屈曲度 $\tau$ の非定常拡散方程式の第1近似解での $\sqrt{t}$ 則の比例係数になる。 $\delta/\tau^2$ が大きいほど中性化しやすい物理的意味を持つ。なお、炭酸化反応量は、水酸化カルシウム量 $CH$ のみの場合と、ケイ酸カルシウム水和物量 $CSH$ も併せて考える場合がある。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_e \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \right) ; C(x=0,t) = C_1 ; D_e = \frac{\delta \cdot \varepsilon_c}{\tau^2} \cdot D_0$$

$$x = a \cdot \sqrt{t} = \sqrt{\frac{2 \cdot D_e \cdot C_1}{\text{炭酸化反応量}}} \cdot \sqrt{t} = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon_c \cdot D_0 \cdot C_1}{\text{炭酸化反応量}}} \cdot \frac{\delta}{\tau^2} \cdot \sqrt{t}$$

前田論文の修正式は、炭酸化反応量が $CH$ で、 $CO_2$ 量 $C_1$ 、相対湿度 $RH$ 、セメントペーストと骨材とコンクリートの各空隙率 $\varepsilon_p$ 、 $\varepsilon_a$ 、 $\varepsilon_c$ 、骨材と空気量合わせた容積率 $V_{aa}$ 、 $CO_2$ バルク拡散係数 $D_0$ から、複合則実効拡散係数 $D_{ec}$ と境界条件と中性化速度係数 $a$ となり、細孔でのFick第2法則の $D_e$ と $\delta/\tau^2$ を再定義した。

$$D_{ec} = (1 - RH) \cdot \left( \frac{\varepsilon_p \cdot \varepsilon_a}{(\varepsilon_p + \varepsilon_a) \cdot V_{aa}^{1/3}} + \varepsilon_p \cdot (1 - V_{aa})^{1/3} \right) \cdot D_0$$

$$\text{境界条件 } C(x=0,t) = (1 - RH) \cdot \varepsilon_c \cdot C_1$$

$$x = a \cdot \sqrt{t} = \sqrt{\frac{2 \cdot D_{ec} \cdot (1 - RH) \cdot \varepsilon_c \cdot C_1}{CH}} \cdot \sqrt{t}$$

$$\therefore D_e = (1 - RH)^2 \cdot \left( \frac{\varepsilon_p \cdot \varepsilon_a}{(\varepsilon_p + \varepsilon_a) \cdot V_{aa}^{1/3}} + \varepsilon_p \cdot (1 - V_{aa})^{1/3} \right) \cdot \varepsilon_c \cdot D_0$$

$$\therefore \frac{\delta}{\tau^2} = (1 - RH)^2 \cdot \left( \frac{\varepsilon_p \cdot \varepsilon_a}{(\varepsilon_p + \varepsilon_a) \cdot V_{aa}^{1/3}} + \varepsilon_p \cdot (1 - V_{aa})^{1/3} \right)$$

パパダキス論文式は、炭酸化反応量が $CH+3 \cdot CSH$ で、 $\varepsilon_p$ と $RH$ から中性化速度係数 $a$ となり、細孔でのFick第2法則の $D_e$ と $\delta/\tau^2$ を再定義した。

$$D_{e,CO_2} [m^2/sec] = (1.64 \times 10^{-6}) \cdot \varepsilon_p^{1.8} \cdot (1 - RH)^{2.2}$$

$$\text{境界条件 } C(x=0,t) = C_1$$

$$x = a \cdot \sqrt{t} = \sqrt{\frac{2 \cdot D_{e,CO_2} \cdot C_1}{CH + 3 \cdot CSH}} \cdot \sqrt{t}$$

$$\therefore D_e = D_{e,CO_2}$$

$$\therefore \frac{\delta}{\tau^2} = D_{e,CO_2} \cdot \frac{1}{\varepsilon_c \cdot D_0 [m^2/sec]}$$

白川論文式は、炭酸化反応量が $CH+CSH$ で、セメントペーストの $CO_2$ 実効拡散係数 $D_{ep}$ が中高相対湿度領域と低相対湿度領域の重畳で表され、空隙率 $\varepsilon$ が明示されていない。ここでは、中高相対湿度領域を対象に、セメントペースト容積率 $V_p$ と粗骨材容積率 $V_g$ と細・粗骨

材表乾密度 $\rho_s$ と $\rho_g$ とし、次の中性化速度係数 $a$ から、細孔でのFick第2法則の $D_e$ と $\delta/\tau^2$ を再定義した。

$$D_{ec} [m^2/sec] = \left[ 1 - \frac{RH^{0.1}}{1 + \left( \frac{1 - RH}{0.45} \right)^{10}} \right] \cdot \left( \frac{V_p \cdot D_{ep01} + ia \cdot iS_{ac}}{(2.5 \cdot V_g + 1) \cdot D_{eim0}} \right)$$

$$D_{ep01} [m^2/sec] = 10 \cdot D_{ep01,55} [m^2/sec] \cdot (W/C)^{3.85}$$

$$D_{ep01,55} [m^2/sec] = 1.04 \times 10^{-7}$$

$$D_{eim0} [m^2/sec] = 1.96 \times 10^{-6} \times (W/C) - 6.60 \times 10^{-7}$$

$$ia = 20 [\mu m] = 0.002 [cm]$$

$$iS_{ac} [l/cm] = S_s [cm^2/g] \cdot V_s [m^3/m^3] \cdot \rho_s [g/cm^3] + S_g [cm^2/g] \cdot V_g [m^3/m^3] \cdot \rho_g [g/cm^3]$$

$$S_s = 52.17 [cm^2/g] ; S_g = 3.02 [cm^2/g]$$

$$\text{境界条件 } C(x=0,t) = C_1$$

$$x = a \cdot \sqrt{t} = \sqrt{\frac{2 \cdot D_{ec} \cdot C_1}{CH + CSH}} \cdot \sqrt{t}$$

$$\therefore D_e = D_{ec}$$

$$\therefore \frac{\delta}{\tau^2} = D_{ec} [m^2/sec] \cdot \frac{1}{\varepsilon_c \cdot D_0 [m^2/sec]}$$

### 4. 各種の $\delta/\tau^2$ の試算による比較

単位水量 $170 [kg/m^3]$ と単位粗骨材量 $920 [kg/m^3]$ と空気量 $4.5 [vol\%]$ 一定の一般的な調合を基に、相組成モデルから解いた空隙率 $\varepsilon_p$ と $\varepsilon_c$ 、 $CO_2$ バルク拡散係数 $D_0=1.64 \times 10^{-5} [m^2/sec]$ 等の諸条件を同じにして、各種の $\delta/\tau^2$ を試算した。図3に比較結果を示す。 $\delta/\tau^2$ は低 $W/C$ や高 $RH$ で小さく、修正式とパパダキス式がほぼ同じで、60% $RH$ で約 $\delta/\tau^2=0.005 \sim 0.01$ 前後になった。白川式は、 $W/C$ に関わらず、修正式やパパダキス式より、70% $RH$ から低湿度領域で急激に大きくなり、また70% $RH$ から高湿度領域で小さく、両式と傾向が異なった。

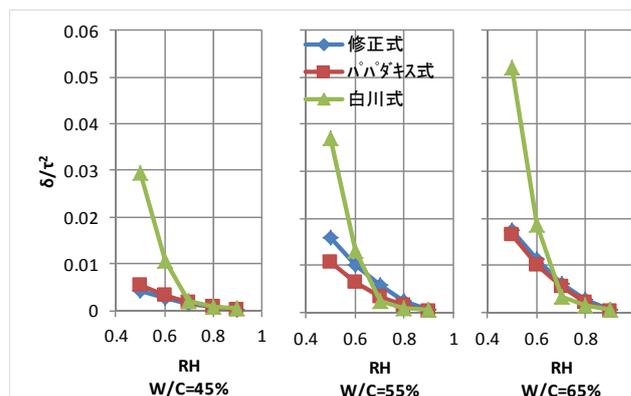


図3 各種の $\delta/\tau^2$ の試算による比較結果

### 5. まとめ

本研究その2は、前田論文における低水セメント比に対する間違いの追加修正ができた。また、細孔での $\sqrt{t}$ 則に対して物理的意味を成す $\delta/\tau^2$ を検討し、修正式が60% $RH$ で約 $\delta/\tau^2=0.005 \sim 0.01$ 前後を試算できた。

#### 参考文献

- 1) 前田孝一: コンクリートの中性化の数値解析に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, No.402, pp.11-19, 1989.8
- 2) Papadakis, V.G. et al.: Effect of Composition, Environmental Factors and Cement-Lime Mortar Coating on Concrete Carbonation, Materials and Structures, Vol.25, pp.293-304, 1992
- 3) 白川敏夫: コンクリートにおける炭酸化進行予測に関する研究, 大分大学博士論文, 2001.3 (中村研究室)