

(V-59) コンクリート中の気体拡散係数の定式化に関する考察

(財) 首都高速道路技術センター ○正会員 青木 聡

〃 正会員 植木 博

(株) 太平洋コンサルタント 正会員 後藤孝治

日本電子計算(株) 正会員 川口和広

1. はじめに

コンクリート中の空隙はコンクリートの配合、養生条件等の違いにより大きさ、形状、分布状態が異なる。また、空隙は相互に連続しており、コンクリート中を移動する水および気体物質の移動経路として機能する。この空隙中を、気体は主に拡散により移動するため、二酸化炭素による炭酸化、中性化による鉄筋の腐食を論じる際、拡散係数の精度の向上が重要となる。しかし、実構造物での拡散係数の測定は、コアを抜くなどの多くの時間と費用を要する。そこで筆者らは配合、養生条件を考慮し、空隙の総細孔容積とその分布を規定した細孔容積分布密度関数を用いて拡散係数の定式化を試み、得られた値と実測値とを比較検討した¹⁾。今回、本方法により、水和反応の進展と飽水率を考慮した精度の高い拡散係数を得られることが分かった。

2. コンクリートの拡散係数の定式化

2.1 細孔容積と分布密度の関数

本研究では、水分移動経路としての役割を持つ、コンクリート中の連続する空隙に対して細孔径分布を規定する関数²⁾を式(1)、(2)で表す。

$$\text{細孔容積分布密度関数} : \frac{dV_r}{dr} = V_0 B C r^{C-1} \exp(-B r^C) \quad \dots (1)$$

$$\text{細孔容積関数} : V_r = V_0 \{1 - \exp(-B r^C)\} \quad \dots (2)$$

ここに V_0 : 総細孔量 [m^3/m^3]、 B, C : 関数形状を決定するパラメータ、 C は 0.5 とした。

2.2 空隙における水分の存在形態

コンクリートの空隙中の気相と液相が平衡状態にあるとき、気液界面が形成される最大細孔半径を r_s [m] とすれば、 r_s より小さい部分は全て空隙水で満たされることになる。式(2)より得られる V_r を日本コンクリート工学会「酸素の拡散係数係数試験方法(案)」(以下、JCI 方法)における飽水率と考える。 r_s は Kelvin の式より(3)式で表せる。

$$r_s = - \frac{2\gamma M_w}{RT\rho_L} \left(\ln \frac{p_v}{p_{v0}} \right)^{-1} \quad \dots (3)$$

ここに、

γ : 液体の表面張力 [N/m] M_w : 水の分子量 [Kg/mol]

R : 気体定数 [$\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$] T : 絶対温度 [K]

P_v/P_{v0} : 相対湿度 [-] ρ_L : 空隙水の密度 [kg/m^3]

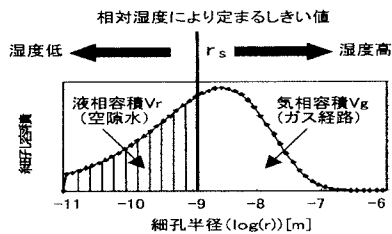


図-1 相対湿度と含水状態の関係

図-1に r_s のしきい値の考え方を模式的に示す。湿度が高くなると r_s は右側に移動し、その結果、気相容積が減少することによってコンクリート中の気体の拡散係数は小さくなる。

キーワード : 拡散係数、耐久性、炭酸化

連絡先 : 東京都港区虎ノ門 3-10-11 (財) 首都高速道路技術センター技術部

ここで、本研究で拡散係数の比較対象とする水セメント比の異なる3ケース ($\underline{W}/\underline{C}$ =41、50、58%) のコアに対して、相対湿度 70%でのコンクリートの飽水率 V_r を式 (2) ～式 (6) を用いて求める。総細孔量 V_0 は式 (4) のように表わせる。

$$V_0 = \frac{\underline{W} - \omega \cdot \underline{C}}{\rho_L} \quad \dots \quad (4)$$

$$\omega = (0.061 + 0.054 \cdot \ln t_d) \cdot \left(\frac{\underline{W}}{\underline{C}} \right)^{0.5} \quad (5)$$

ここで、 $\underline{W}$ は単位水量 [kg/m₃]、 $\underline{C}$ は単位セメント量 [kg/m₃]、 ω はセメントの重量結合水率である。また、細孔容積分布密度関数の形状を決定するパラメータ B は式(6)を用いた。

$$B = (1880 + 2680 \cdot \ln t_d) \cdot (\underline{W}/\underline{C})^{-1.2} \quad (6)$$

ここで、乾燥開始材令 t_d (day)は、水和反応の進展を考慮して 28 日とした。従って、式(2)

～(6)から各ケースの飽水率は表-1 (①～⑧) の値を用いて表-1 (⑨) のように導出できる。

表-1 飽水率の算出に用いた値と結果

変数	定義	[単位]	ケース1	ケース2	ケース3
① $\underline{W}/\underline{C}$	水セメント比	[%]	41	50	58
② t_d	乾燥開始材令	[day]	28		
③ P_v/P_v0	相対湿度	[%]	70		
④ γ	液体の表面張力	[N/w]	0.07270		
⑤ M_w	水分の分子量	[Kg/mol]	0.01802		
⑥ R	気体定数	[J/mol/k]	8.31453		
⑦ T	絶対温度	[K]	293.0		
⑧ ρ_L	間隙水の密度	[kg/m ³]	1000.0		
⑨ V_r	飽水率	[%]	82	74	68

2.3 定式化による CO₂ 拡散係数の導出

筆者らが定式化した次式から、CO₂ の拡散係数 D'_{CO_2} を求める。

$$D'_{CO_2} = K \cdot V_g \cdot D_{CO_2} \quad \dots \quad (7) \quad K_v = \frac{1}{3} \cdot 120 \cdot B^{-0.69} \quad \dots \quad (8)$$

K : コンクリート細孔組織中の狭さや屈曲の影響を表す材料係数で下村²⁾ の提案している式(8)を用いる。

V_g : CO₂ の拡散に有効な空隙率を表す材料係数で下村²⁾ の提案している式 ($V_g = V_0 - V_r$) を用いる。

D_{CO_2} : CO₂ と空気の相互拡散係数 (0.138×10^{-4} [m²/s])

2.4 実測値との比較検証

実測値は JCI 方法に準拠して、O₂ に対する拡散係数と飽水率の関係から各ケースの飽水率 (表-1 ⑨) に対応した拡散係数を求め、この値を CO₂ に換算した値である。ケース1～3 までの CO₂ の実測値と解析値を表-2 に示す。解析結果より細孔容積分布密度関数を用いて定式化したは実測値より小さいが、ほぼ同じ値となることが分かった。

表-2 CO₂ 拡散係数の実測値と解析値の比較表

	ケース1	ケース2	ケース3
実測値	0.755×10^{-8}	1.590×10^{-8}	3.840×10^{-8}
解析値	0.679×10^{-8}	1.364×10^{-8}	2.115×10^{-8}

3. まとめと今後の課題

本研究では、乾燥開始材令を水和反応の進展を考慮して 28 日とし、またコア採取の際に使用する水によって変動する実測の飽水率を用いるのではなく、相対湿度に平衡する飽水率を計算することにより、精度良く拡散係数を求めることができた。実構造物は、多種多様な条件が重なり均一な状態でないが、これを均一とし、含水状態は相対湿度と平衡状態にあると仮定すれば、非常に有効な拡散係数算出方法である。

最後に、拡散係数の測定をして頂いた(株)太平洋コンサルタント・石川陽一氏に深く感謝する次第である。

参考文献 1) 植木, 益子, 後藤: コンクリートの気体拡散係数の定式化 第 24 回日本道路会議, 一般論文集(B), pp. 487-492, 2001

2) 下村, 福留, 前川: 微視的機構^等によるコンクリート乾燥収縮挙動解析 土木学会論文集 NO. 514, V-27, pp. 41-53