

早稲田大学理工学部 学生会員 ○井原 啓知
早稲田大学大学院 学生会員 仁平 達也
早稲田大学 正会員 関 博

1. はじめに

従来、酸素拡散係数のモデルを構築する場合、細孔組織中の液状水と水蒸気の平衡関係から、細孔組織中の気相は、水蒸気と乾燥空気の理想混合気体に満たされているとしていた。しかし、実際の細孔組織中の気相には、吸着水が存在している。本研究では、細孔組織中に存在する吸着水の考慮の有無が酸素拡散係数に与える影響を検討した。

2. 解析モデル

2.1 含水状態予測モデル

2.1.1 細孔容積と分布密度の関数

コンクリート中の細孔径は幅広い範囲を持ち、セメントペースト中に均一に分布していると考えられる。そこで、本研究で用いる細孔容積に関して細孔径分布を規定する関数を式(1),(2)で表す。

細孔容積関数

$$V_{(r)} = V_{(\infty)} [1 - \exp(-Br^C)] \quad (1)$$

細孔容積分布密度関数

$$\frac{dV_{(r)}}{dr} = V_{(\infty)} B C r^{C-1} \exp(-Br^C) \quad (2)$$

ここで、

$V_{(r)}$: 細孔半径 r のときの細孔量(mm^3/mm^3),

$V_{(\infty)}$: 総細孔量(mm^3/mm^3), r : 細孔半径(m)

B, C : 関数の形状を決定するパラメータ

2.1.2 細孔中の液状水の存在形態

細孔組織中において気液界面に形成される細孔半径 r_s と相対湿度 P_v/P_{v0} の関係は、次の Kelvin 式で表されると考えられる。

$$\ln \frac{P_v}{P_{v0}} = -\frac{2\gamma M}{RT\rho r_s} \quad (3)$$

ここで、 P_v : 水蒸気分圧(Pa), P_{v0} : 飽和水蒸気圧(Pa),

γ : 液体の表面張力(N/m), M : 水の分子量(g/mol),

R : 気体定数(J/mol · K), T : 絶対温度(K),

ρ : 水の密度(mg/mm^3)

2.1.3 含水量算定関数

式(3)により与えられた半径 r_s 以下の細孔は、全て液状水に満たされていると仮定すると、コンクリート中の単位体積当たりの液状水量 S は、次式(4)で得ることができる。

$$S = \int_0^{r_s} dV = V_{(\infty)} [1 - \exp(-Br_s^C)] \quad (4)$$

2.1.4 細孔壁面への吸着水

コンクリート中の水分には、前述の Kelvin 式によって決定される凝縮水だけではなく、実際には細孔表面に物理吸着するものもある。本研究では、細孔中の吸着層の厚さ $t_a(\text{m})$ を Hillerborg による次式を用いて表す。

$$t_a = \frac{0.525 \times 10^{-8} RH}{\left(1 - \frac{RH}{RH_m}\right) \left(1 - \frac{RH}{RH_m} + 15RH\right)} \quad (5)$$

ここで、 RH : 相対湿度, RH_m : ある吸着水厚さ t_a を満足するのに必要な相対湿度

細孔を毛管と仮定し、 RH_m を以下のように表す。

$$RH_m = \exp\left(\frac{-\gamma M}{\rho R T r_l}\right) \quad (6)$$

ここで、 r_l : 細孔半径から吸着水層の厚さを差し引いたもの

2.2 酸素拡散係数予測モデル

コンクリート中の細孔を両端の圧力が等しい半径 r の円筒型と仮定すると、気体の移動は分子拡散、クヌーセン拡散が支配的になる。 $r \geq 10\lambda$ のとき、分子拡散係数が生じ、分子拡散係数 D_n は次式となる。

$$D_n = \frac{1}{3} \bar{c} \lambda \quad (7)$$

$r \leq 0.1\lambda$ のとき、クヌーセン拡散係数が生じ、クヌーセン拡散係数 D_k は次式となる。

$$D_k = \frac{2}{3} \bar{c} \lambda \quad (8)$$

$0.1\lambda \leq r \leq 10\lambda$ のとき、分子拡散係数とクヌーセン

キーワード: 酸素拡散係数, 細孔組織, 吸着水

連絡先: 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 早大理工 51-1 関研究室 TEL: 03-5286-3407 FAX: 03-3208-8749

拡散が同時に起こる中間領域拡散と考える。この中間領域拡散係数 D_m は次式となる。

$$D_m = \frac{D_n}{(1 + \lambda/2r)} \quad (9)$$

式(6),(7),(8)より、コンクリートの酸素拡散係数は次式で予測できる。

$$D = \int_{10\lambda}^{\infty} (V_n - S_n) D_n dr + \int_{\lambda}^{10\lambda} (V_m - S_m) D_m dr + \int_0^{\lambda} (V_k - S_k) D_k dr \quad (10)$$

平均分子速度 $\bar{c}$ および平均自由行程 λ は以下の式(11),(12)で表される。

$$\bar{c} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \quad (11)$$

$$\lambda = \frac{RT}{N\pi d^2 P} \quad (12)$$

ここで、 D ：酸素拡散係数(m^2/s)、 P ：気体圧力(Pa)、

N ：アボガドロ数(mol^{-1})、 d ：酸素分子の直径(m)、

$V_{m,n,k}$ ：各範囲における細孔量(m^3/m^3)、

$S_{m,n,k}$ ：各範囲における含水量(m^3/m^3)

3. 実験概要

モルタルは、水セメント比 0.5, 0.6 の普通ポルトランドセメントを使用し、打設後 1 日湿潤養生させてから脱型し、引き続き材齢 7 日まで水中養生(約 25℃)を施し、材齢 35 日、63 日に酸素拡散試験および水銀圧入法による細孔径分布測定試験を行った。酸素拡散試験は角柱 $10 \times 10 \times 1 \text{cm}$ の供試体を用いる。各試験前に各供試体は重量変化が 0.1% 以下になるまで炉乾燥(105℃)を施した。

4. パラメータの決定

解析に用いた $V_{(\infty)}$ および B, C を表 1 に示す。

表 1 解析に用いた B, C 及び $V_{(\infty)}$

	B	C	$V_{(\infty)}$
w/c=0.5, 材齢 35 日	3959	0.5	0.13233
w/c=0.5, 材齢 63 日	4143	0.5	0.13128
w/c=0.6, 材齢 35 日	3398	0.5	0.17947
w/c=0.6, 材齢 63 日	3493	0.5	0.15190

5. 解析結果

吸着水を考慮したときの解析結果を実線、考慮しないときの解析結果を破線で図 1~2 に示す。各図から、吸着水を考慮すると酸素拡散係数は若干下回るものの、

その差は微小であることがわかる。

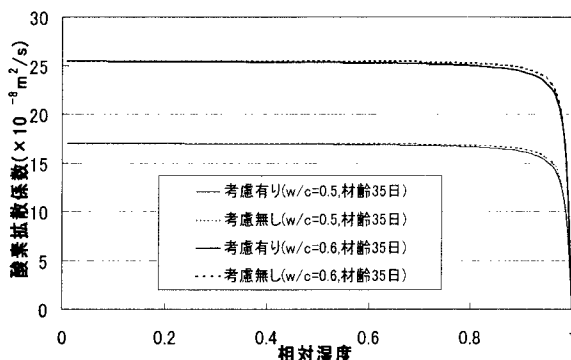


図1 相対湿度と酸素拡散係数の関係

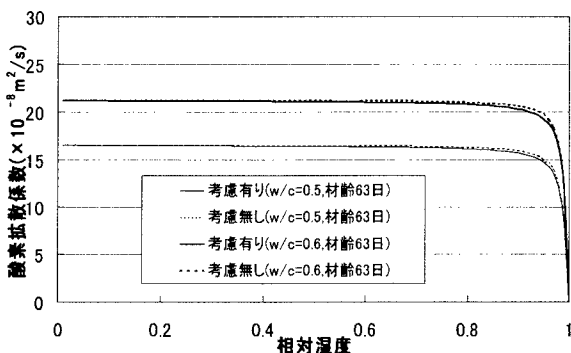


図2 相対湿度と酸素拡散係数の関係

6. 解析と実験の比較

相対湿度 0% での材齢 35 日、63 日及び水セメント比が 0.5, 0.6 による酸素拡散係数の実験値と解析値を比較したものを図 3 に示す。解析値の酸素拡散係数は、実験値の傾向を良く表しているといえる。

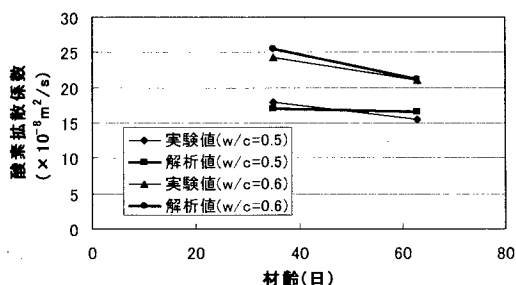


図3 解析値と実験値の酸素拡散係数

7. まとめ

実験値との比較の結果、提案した解析モデルは有効であると考えられる。解析結果より、吸着水の考慮の有無が酸素拡散係数に与える影響は少ないといえる。

【参考文献】

Qi Lukuan, 関 博：乾湿繰り返しを受ける鉄筋腐食に関する一考察，コンクリート年次論文報告集, Vol. 22, No. 181-186, 2000