

# 論文 乾湿繰返しを受ける鉄筋腐食に関する一考察

元 路寛\*1・関 博\*2

**要旨:** コンクリートの細孔径分布をモデル化し、乾湿繰返しによる細孔径内での含水量の変化を検討した。この含水量の変化を考慮してコンクリートの酸素拡散係数のモデルを構築した。コンクリート中の鉄筋腐食モデルとしては一般に用いられている酸素拡散支配モデルに対し、細孔径内の液相と気相状態を鉄筋腐食モデルのアノードとカソードの比の変化に反映させることにより、任意の乾湿繰返し履歴条件でのコンクリート中の相対含水率、酸素拡散係数および鉄筋の腐食速度をシミュレーションした。さらに、促進実験結果と比較し、その妥当性を検討した。

**キーワード:** 細孔径分布, 相対含水率, 酸素拡散係数, 鉄筋腐食モデル, 腐食速度

## 1. はじめ

鉄筋コンクリート構造物の耐久性設計および補修維持管理を行う際には、構造物の供用寿命の予測に及ぼす影響の一つとして鉄筋の腐食速度の変化を把握する必要があると考えられる。実際の構造物のコンクリートは多孔質体であり、内部に水分を安定して保つ能力があるが、コンクリート内部の水分量は外部環境条件に密接に依存するものである。また、鉄筋腐食に関連する酸素拡散係数およびコンクリート比抵抗などは、コンクリート内部の水分状態に密接に関係するものである。

現在まで、鉄筋コンクリート構造物における鉄筋腐食に関する研究は、主としてある一定の条件での鉄筋腐食の性状および腐食減量を重点としたものが多い。実際には、コンクリート構造物は外界環境に設置されており、コンクリートの物性変化（含水量、酸素拡散係数およびコンクリート比抵抗など）および鉄筋腐食の状態などの程度は、時間の推移によってかなり影響を受けると考えられる。

本研究では、任意の外界環境におけるコンクリート内部の含水量の変化およびそれに伴う鉄

筋腐食に関連する酸素拡散係数の経時変化を検討した。さらに、コンクリート中の鉄筋腐食モデルとして一般に用いられている酸素拡散支配モデルに対し、細孔径内の液相と気相状態を鉄筋腐食モデルのアノードとカソードの比の変化に反映させることにより、任意の乾湿繰返し履歴条件でのコンクリート中相対含水率、酸素拡散係数および鉄筋の腐食速度をシミュレーションし、さらに、このモデルを促進実験結果と比較しその妥当性を検討した。

## 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

コンクリート中の空隙径は幅広い範囲を持ち、多様な形態で存在している。本研究では、水分移動経路としての役割を持つ空隙のみを考慮することにし、文献 1) よりコンクリート中の空隙に対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:

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

\*1 早稲田大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 工修 (正会員)

\*2 早稲田大学教授 理工学部土木工学科 工博 (正会員)

細孔容積分布密度関数：

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

ただし、

$V_{(\infty)}$ ：総細孔量 ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )

$B, C$ ：関数形状を決定するパラメータ

### 2.1.2 液状水と水蒸気の熱力学的平衡

細孔組織中の液状水と水蒸気の平衡から、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より満たされるとする。この水蒸気により細孔組織中において気液界面の形成される細孔の半径  $r_s$  と相対湿度  $p_v/p_{v0}$  の関係は、次の Kelvin の式(3)により与えられるとする<sup>2)</sup>。

$$\ln \frac{p_v}{p_{v0}} = -\frac{2\gamma M}{RT\rho r} \quad (3)$$

ただし、 $p_v$ ：水蒸気の分圧 (Pa)

$p_{v0}$ ：飽和水蒸気圧 (Pa)

$\gamma$ ：液体の表面張力

$M$ ：水の分子量 (kg/mol)

$R$ ：気体係数 (J/mol.K)

$T$ ：絶対温度 (K)

$\rho$ ：水の密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

### 2.1.3 含水量算定関数

式(3)によって液状水が存在する最大細孔半径  $r_s$  が求められる。半径  $r_s$  以下の細孔はすべて液状水で満たされていると仮定するとコンクリート中の含水量  $S$  として以下のような解析結果を得ることができる<sup>3)</sup>。

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

## 2.2 酸素拡散係数予測モデル

コンクリート中の細孔空隙を半径  $r$  の円筒型の細孔と仮定すると、細孔両端の圧力が等しい場合では、気体の移動は、主に分子拡散、クヌー

ーセン拡散、表面移動により生ずると考えられる<sup>4,5)</sup>。表面移動の影響を無視すると、移動に対して主に分子拡散、クヌーセン拡散のみが支配となる。

半径  $r$  と気体分子の平均自由行程  $\lambda$  の比は 10 よりも大きい場合には分子拡散が生じ、分子拡散係数  $D_n$  は次式となる。

$$D_n = 1/3 c \lambda \quad (5)$$

半径  $r$  と気体分子の平均自由行程  $\lambda$  の比は 0.1 より小さい場合にはクヌーセン拡散が生じ、分子拡散係数  $D_k$  は次式となる。

$$D_k = 2/3 c r \quad (6)$$

半径  $r$  と気体分子の平均自由行程  $\lambda$  の比は 0.1 から 10 の範囲では分子拡散とクヌーセン拡散が同時に起こる中間領域拡散と考えることにする。この中間領域拡散  $D_m$  は次式となる。

$$D_m = \frac{D_n}{(1 + \lambda/2r)} \quad (7)$$

この式(5)、(6)、(7)の細孔空隙中の気体移動の理論を酸素拡散係数の予測モデルとすると、コンクリートの酸素拡散係数は式(8)で予測することができる。

$$D = \int_{10\lambda}^{\infty} (V_n - S_n) D_n + \int_{\lambda}^{10\lambda} (V_m - S_m) D_m + \int_D^{\lambda} (V_k - S_k) D_k \quad (8)$$

なお、平均分子速度  $c$  および平均自由行程  $\lambda$  は以下で表される。

$$c = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$$

$$\lambda = \frac{RT}{N\pi d^2 P}$$

ただし、D：酸素拡散係数(m<sup>2</sup>/s)

M：水の分子量(kg/mol)

R：気体係数(J/mol.K)

P：気体圧力(Pa)

Nアボガドロ数(mol<sup>-1</sup>)

T：絶対温度(K)

D：酸素分子の直径(m)

V<sub>m,n,k</sub>：各範囲における細孔量(m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)

S<sub>m,n,k</sub>：各範囲における含水量(m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)

### 2.3 酸素支配鉄筋腐食モデル

コンクリート中の鉄筋は塩害、中性化などが原因で腐食する。酸素拡散支配腐食モデルを以下の式(9)で表す<sup>6)</sup>。本式中で、カソードとアノードの比は、図-1に示すように、水に満たされた部分をアノード部とし、残り部分をカソードとした。この容積比をカソードとアノードの比と仮定する。

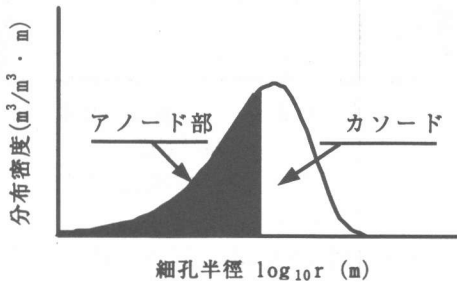


図-1 アノード部とカソード部の仮定

$$F_r = \frac{k_{pi}^a}{k_{oi}^c} \cdot \frac{C_c}{A_a} \cdot \left[ m \times S \times D \frac{dC(L,t)}{dx} \right] \quad (9)$$

ただし、k<sub>pi</sub><sup>A</sup>、k<sub>oi</sub><sup>C</sup>：電気化学当量

A<sub>c</sub>：カソードの面積(m<sup>2</sup>)

A<sub>a</sub>：アノードの面積(m<sup>2</sup>)

m：酸素の溶解度(kg/m<sup>3</sup>)

S：含水量(m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)

D：酸素の拡散係数(m<sup>2</sup>/s)

C(L,t)：鉄筋位置における酸素濃度(kg/m<sup>3</sup>)

### 3. 解析のシミュレーション

2.で述べた含水量モデル、酸素拡散モデルおよび鉄筋腐食モデルを用いて、乾湿繰返しにおけるコンクリート中の含水量、酸素拡散係数および鉄筋腐食速度の2次元解析を行った。解析対象供試体は図-2に示すように、水蒸気および酸素の拡散方向の供試体の大きさを0.1mとした。二つの境界面のうちの一つを環境に接する境界面、他の境界面を断絶面とした。

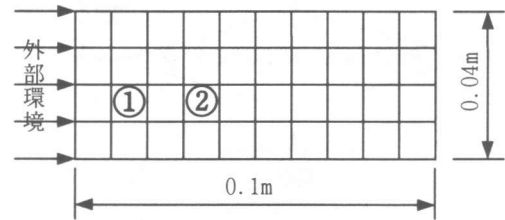


図-2 有限要素解析モデル

表-1 解析に用いたパラメータ<sup>2)</sup>

	V <sub>0</sub> (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	B	C
CASE 1	0.182	22200	0.5
CASE 2	0.204	12000	0.5

シミュレーションでは、細孔容積分布関数の異なる2ケースの解析を行なった。表-1は用いたパラメータを示す。コンクリート中における水蒸気拡散係数は、両ケースともにD=3.0×10<sup>-8</sup>(m<sup>2</sup>/s)、酸素の溶解度はm=0.0312とした。環境設定における促進条件としては1サイクルが温度40℃、湿度95%を36日間、温度15℃、湿度60%を36日間とし、3サイクルを考えた。解析のフローチャートを図-3に示す。

解析で求めた細孔容積分布密度および累積細孔容積の結果を図-4、5に示す。温度15℃とし、湿度変化を与えたときのコンクリート内部の相対含水率および酸素拡散係数比の結果を図-6、7に示す。図中のD<sub>max</sub>はコンクリート

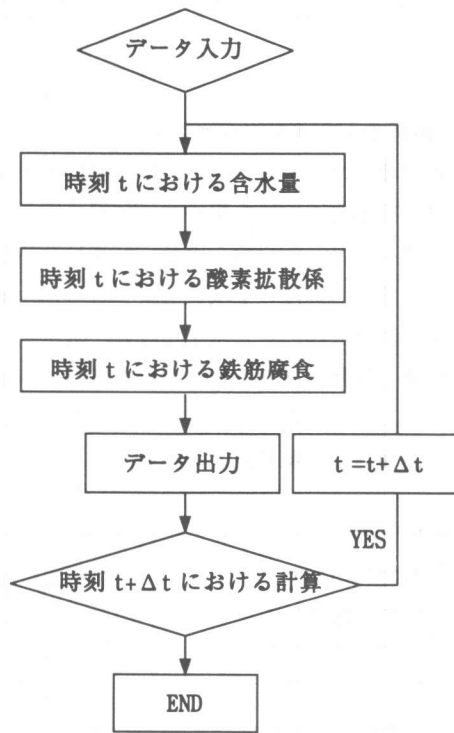


図-3 計算フローチャート

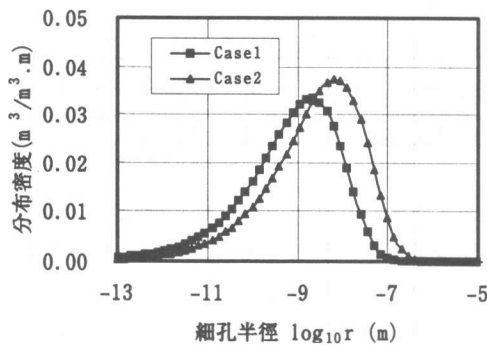


図-4 細孔容積分布密度関数

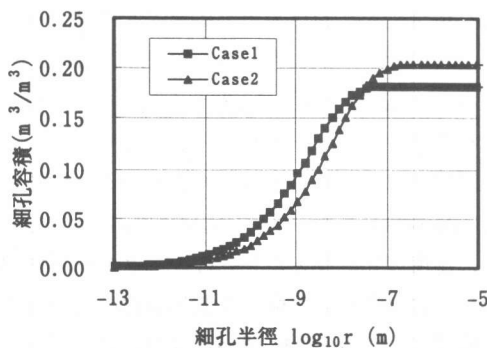


図-5 累積細孔容積分布関数

乾燥状態における酸素拡散係数である。本図によると、相対含水率と酸素拡散係数比の変化は相対湿度が0.8まで緩やかであるが、相対湿度が0.8から1.0の間で両者は急激に変化している。特に、酸素拡散係数は相対湿度が0.8から1.0までの変化が極めて大きい。

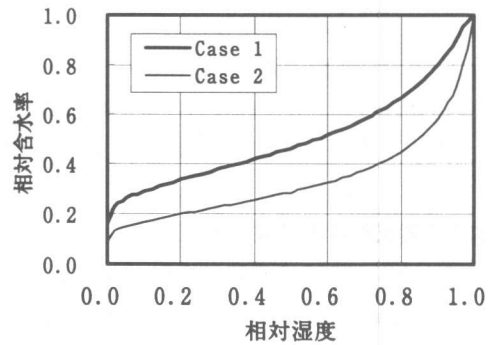


図-6 相対含水率の変化

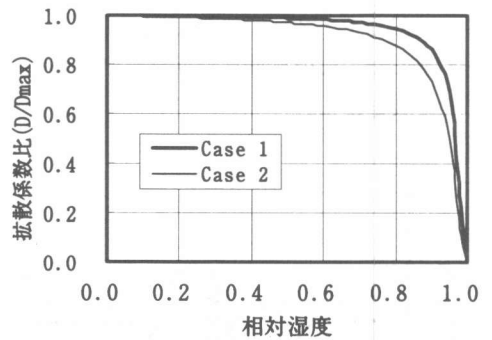


図-7 酸素拡散係数比の変化

ケース1に関して乾湿繰返しを受けたコンクリートの内部の相対含水率、酸素拡散係数および同一位置にある鉄筋の腐食速度の結果を示したものが、図8～図10であり、図-11ではケース2も含めて示してある。

図-8によると、コンクリート内部の相対含水率は高温高湿（湿度95%、温度40℃）で高くなり、低温低湿（湿度60%、温度15℃）で低くなること分かる。一方、図-9に示すように、酸素拡散係数比は逆の傾向になること分かる。また、コンクリート内部における表面の近い箇所①ではこれらの変化の程度が速いが、箇所②は箇所①に比べて変化度が小さいことが

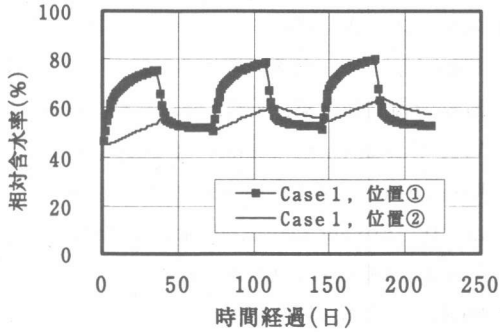


図-8 相対含水率の経時変化

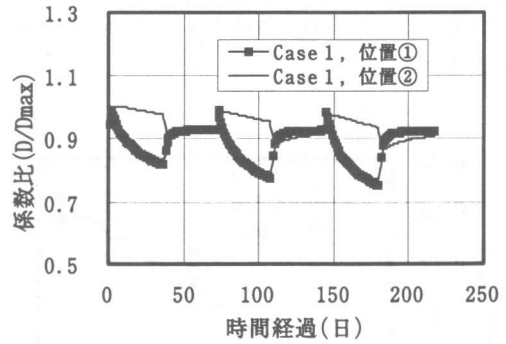


図-9 酸素拡散係数比の経時変化

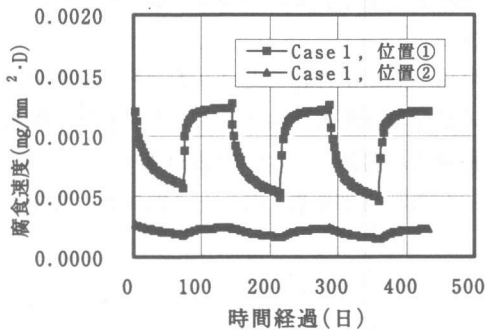


図-10 鉄筋腐食速度の経時変化(1)

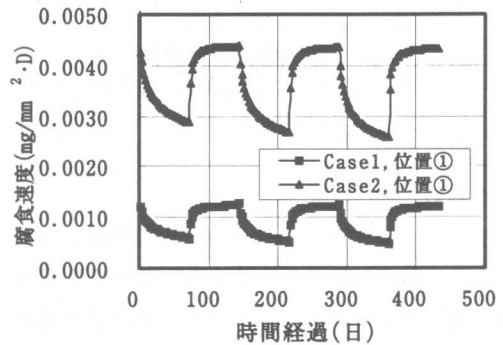


図-11 鉄筋腐食速度の経時変化(2)

分かる。

図-10 はコンクリート内部における鉄筋腐食速度の経時変化の傾向が酸素拡散係数の変化の傾向とほぼ同様な結果となっている。これは、酸素拡散係数の相違により拡散した酸素量が異なることが原因と考えられる。図-11 は同一位置におけるケース1とケース2の鉄筋腐食速度の経時変化を示したものであり、B値が小さい方が鉄筋腐食速度が大きくなる。B値が小さいことはW/Cが大きいことと符合しており、図-6、図-7に示したように、内部の相対含水率が小さくなり、酸素拡散係数が大きくなり、この結果腐食速度が大きくなったと考えられる。この傾向は既往の実験結果とも一致するものである。

#### 4. 実験との比較

今回の解析方法の有効性を検証するために、

表-2 実験から求めたパラメータ

$V_0$ ( $m^3/m^3$ )	B	C
0.172	22500	0.5

乾湿繰返しを受ける鉄筋腐食促進実験を行なった。実験から求めた細孔分布関数パラメータを表-2に示す。水蒸気の拡散係数は  $2.27(\times 10^{-5} m^2/s)$  とした。鉄筋腐食の供試体は  $100 \times 70 \times 70mm$  のコンクリート角柱供試体であり、鉄筋を1本埋め込んだ<sup>7)</sup>。供試体を十分に中性化させて、所定の中性化深さに達してからコンクリート中の鉄筋腐食促進実験を行なった。促進条件は1サイクルが温度  $40^\circ C$ 、湿度  $95\%$  を1週間、温度  $15^\circ C$ 、湿度  $60\%$  を1週間である。10サイクル促進実験を行なった。今回の解析では、中性化したコンクリートの細孔分布関数を式(1)に示すような関数としている。解析結果と

実験結果の比較を図-12に示す。解析結果と実験結果がほぼ同様の傾向を示していることが分かる。

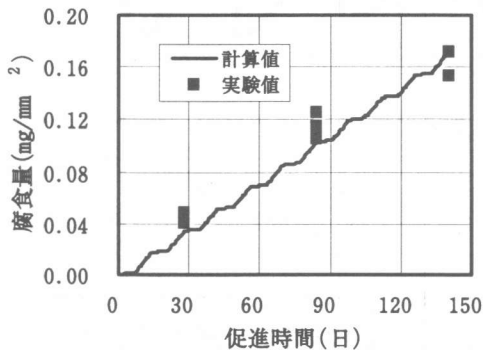


図-12 鉄筋腐食量の経時変化

## 5. まとめ

本研究ではコンクリートの細孔容積分布関数モデル、酸素拡散係数モデルおよび酸素支配鉄筋腐食モデルを用い、コンクリート内部の相対含水率、酸素拡散係数およびコンクリート中における鉄筋腐食速度の経時変化の解析を行なった。この解析の結果により、提案したモデルが有効なモデルになる可能性が高いと言えるだろう。

今後は、さらに、中性化したコンクリートの正確な細孔容積分布関数を用いて検討すると共に、鉄筋腐食に対するコンクリート比抵抗の支配も研究する必要があると考えられる。

## 参考文献

- 1) 下村 匠他：細孔構造モデルによるコンクリート中の水分移動解析，コンクリート工学年次論文集報告集，V-14，No. 1，pp. 631-636，1992
- 2) 下村 匠他：微視的機構に基づくコンクリートの乾燥収縮モデル，土木学会論文集，No. 520/V-28，pp. 35-45，1995.8
- 3) 石田 哲也他：任意の乾湿繰返しを受けるコンクリートの含水状態予測モデル，土木学会

論文集，No.564/V-35，pp.199-209，1997.5

- 4) スジヨノ、A. S他：コンクリート中の気体移動について，セメント・コンクリート研究討論会論文報告集，V25，pp.83-88，1998.10
- 5) Yves F.Houst：Influence of Porosity and Water Concrete On The Diffusivity of CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> Through Hydrated Cement Paste，Cement and Concrete Research，Vol. 24，No.6，pp. 1165-1176，1994
- 6) 関 博他：コンクリート中の鉄筋における腐食速度の解析に関する一考察，コンクリート工学年次論文集報告集，V-9，No. 1，pp. 381-386，1987
- 7) 岩田 亮：中性化したコンクリート中における鉄筋の自然電位および腐食電流密度と腐食面積率の関係，土木学会第54回年次学術講演会講演概要集第5部，pp.624-625，1999