

中性化したコンクリートにおける乾湿繰返し作用による鉄筋腐食に関する研究

元 路寛¹・関 博²・高木 言芳³

¹正会員 工修 早稲田大学助手 理工学部土木工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

²正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

³正会員 工修 東日本旅客鉄道株式会社 総合企画本部 (〒140-0005 東京都品川区広町2-1-19)

鉄筋腐食によりコンクリート部材の性能は低下すると考えられ、性能を算定する際に鉄筋の腐食速度を把握する必要がある。本研究では、コンクリートの中性化による鉄筋腐食を対象とし、鉄筋腐食モデル（酸素拡散支配モデル、コンクリート比抵抗支配モデル）を構築した。鉄筋腐食の解析に用いるパラメータを定めるために、コンクリート細孔径分布関数を用い、含水量の算定モデルおよび酸素拡散係数の算定モデルを設定した。さらに、中性化したコンクリートに乾湿繰返し作用を与える鉄筋腐食促進実験を行った。以上の算定モデルおよび実験から求めた関数を鉄筋腐食モデルに取り込み、FEM解析を用いることにより、乾湿繰返し作用での中性化したコンクリート中の鉄筋腐食量を定量的に評価することを試みた。解析シミュレーションと促進実験結果と比較し、提案モデルの妥当性を検証した。

Key Words : corrosion model, corrosion area, corrosion weight, corrosion potential, concrete specific resistance

1. はじめに

従来、鉄筋コンクリート構造物は極めて耐久性に優れ、供用寿命は非常に長期間であると考えられてきた。しかし、最近、コンクリート部材におけるかぶりコンクリートのひび割れ、剥落などの事例が度々報告され、社会的な問題にもなっている。この現象を引き起こす主要因はコンクリート中の鉄筋腐食である。コンクリート部材の鉄筋の腐食により鉄筋を取り囲むコンクリートへ膨張圧が生じ、ひび割れや剥離が誘発されるが、コンクリートひび割れ発生後は、腐食因子の浸透が容易となるために、鉄筋の腐食速度が加速される。この結果、コンクリートと鉄筋の付着性能が低下し、鉄筋断面積が減少し、部材としての機能を著しく阻害すると考えられる¹⁾。

鉄筋コンクリート構造物の耐久性設計および維持管理を行う際には、構造物の供用寿命の算定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。コンクリート中の鉄筋の腐食は、塩害、中性化などに起因することが多いが、さらにはコンクリートの物性とも密接に関連している。実際の構造物のコンクリートは多孔質体であり、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。現在まで、鉄筋コンクリート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腐食の性状および腐食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、コンクリート比抵抗など）および鉄筋腐食の状態などは、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、最近多く指摘されているコンクリートの中性化による鉄筋腐食に焦点を絞った。上述した環境変化を念頭において、中性化したコンクリートに関して鉄筋腐食に関連する酸素拡散支配モデルとコンクリート比抵抗支配モデルを構築し、二つのモデルの解析に用いるパラメータの諸数値を決定するために、細孔径分布関数を用い、含水量の算定モデルを設定し、乾湿繰返しを受けるコンクリート内部の含水率の変化を検討した。また、この含水率の変化を考慮した酸素拡散係数の算定モデルを構築した。さらに、鉄筋を埋め込んだコンクリート供試体を用いて、中性化したコンクリートに乾湿繰返しを与え、鉄筋の腐食促進実験を行った。実験では、促進期間の変化に伴う自然電位、鉄筋の腐食面積および腐食量

の変化を測定した。測定したデータに基づいてこれらの時間経過による変化関数を求めた。これらにより酸素拡散支配モデルと比抵抗支配モデルで解析するためのパラメータを定め、有限要素解析により、乾湿繰返し作用での中性化したコンクリート中の腐食量を時間の経過により定量的に評価することを試みた。

2. 鉄筋腐食速度の算定モデル

本研究では、高温高湿と低温低湿を周期変化とし、乾湿繰返しの状態を設定することとした。高温高湿条件における鉄筋腐食では、コンクリート内部に水分が十分に存在することにより、酸素が外部からコンクリート内部に拡散しやすく、鉄筋腐食に必要な酸素量が少なく、酸素支配になる可能性が高いと考えられる。一方、低温低湿条件における鉄筋腐食では、コンクリート内部に水分が少なく、コンクリートの比抵抗が高く、腐食電流が流れにくく、鉄筋腐食の速度が小さく、コンクリートの比抵抗支配になる可能性が高いと考えられる。佐伯ら²⁾の研究の鉄筋腐食速度ではモルタルの比抵抗と酸素拡散を検討しているが、コンクリートの中性化による鉄筋腐食に関して一般環境における鉄筋腐食速度の評価は難しいと考えられる。以上の知見に基づき、本研究では酸素拡散支配モデルと比抵抗支配モデルを用い、コンクリート中における鉄筋腐食速度を求めることとした。

(1) 酸素拡散支配の鉄筋腐食モデル

酸素拡散支配の腐食モデルを以下の式(2.1)で表すこととした^{3),4)}。式(2.1)における課題の一つは、アノードとカソードの面積比の設定方法であるが、今回の解析では、コンクリート中の空隙における水が占める容積をアノード部とし、水が占めない容積をカソード部とし、この容積比をカソードとアノードの比と仮定した。含水量および酸素拡散係数は3章に示す含水量算定モデルと酸素拡散係数算定モデルにより算出する。

$$F_0 = \frac{k_n^a}{k_{oi}^c} \cdot \frac{A_c}{A_a} \cdot \left[m \times S \times D \frac{dC(L,t)}{dL} \right] \quad (2.1)$$

ここで

- F_0 : 腐食速度 ($\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)
- k_{ri}^a, k_{oi}^c : 電気化学当量
- A_c : カソード面積 (cm^2)
- A_a : アノード面積 (cm^2)
- m : 酸素の溶解度 (cm^3/cm^3)
- S : 含水量 (cm^3/cm^3)
- D : 酸素拡散係数 (cm^2/s)

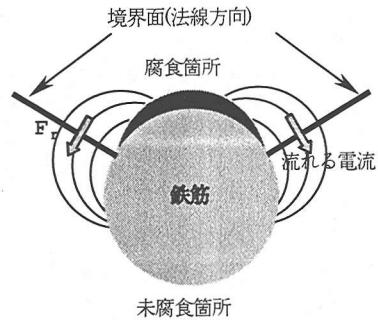


図-1 比抵抗支配モデル

$C(L, t)$: 鉄筋位置における酸素濃度 (g/cm^3)

(2) 比抵抗支配の鉄筋腐食モデル

本算定モデルでは、中性化したコンクリート中の鉄筋の腐食性状は鉄筋断面の上面でアノード、下面でカソードが形成されると考え、図-1に示すように、両部間に腐食電流が流れると仮定した。また、既往の研究^{5),6),7)}と同様に腐食電流は外部に漏れないと考えた。まず、式(2.2)を用い、鉄筋周辺の電位の分布を求め、さらに、式(2.3)、(2.4)を用い、腐食箇所と未腐食箇所の境界面に流れる電流密度を求め、この電流密度をコンクリート比抵抗支配による電流密度とした。

$$\frac{\partial^2 P_v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P_v}{\partial y^2} = 0 \quad (2.2)$$

$$F_{ri} = -\frac{P_{vi}}{\rho(S_r, T)} \quad (2.3)$$

$$F_r = \sum_1^n F_{ri} \quad (2.4)$$

ここで、

- F_r : 腐食電流密度 ($\mu\text{A}/\text{cm}$)
- P_{vi} : 境界面における電位 (mV)
- F_{ri} : 境界面における電流密度 ($\mu\text{A}/\text{cm}$)
- P_v : 自然電位 (mV)
- $\rho(S_r, T)$: コンクリートの比抵抗 ($\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$)
- S_r : 相対含水率 (%)
- T : 温度 ($^{\circ}\text{C}$)

以上のモデルにより、鉄筋腐食速度を求めることができると考えられる。しかし、解析では、多くのパラメータの諸数値を定めなければならない。このために、3章においてコンクリートの含水量、酸素拡散係数などを求め、4章において鉄筋自然電位、腐食面積、腐食量およびコンクリート比抵抗の経時変化を測定した。

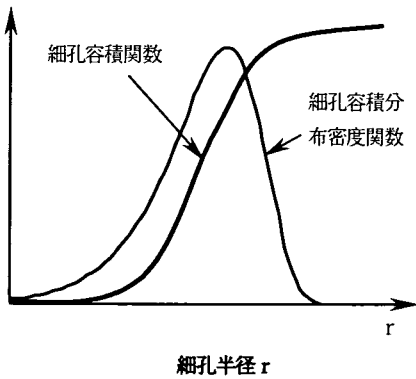


図-2 細孔容積分布密度関数の定義

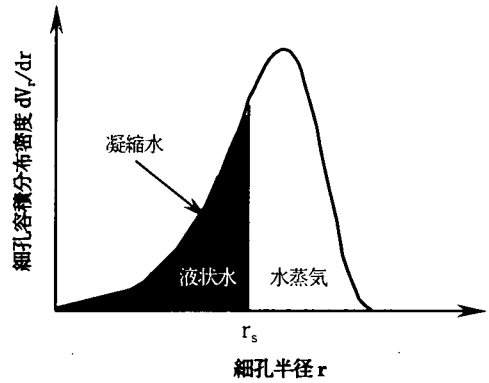


図-3 細孔組織中の水分形態

3. 含水量および酸素拡散係数の算定モデル

乾湿繰り返し作用によりコンクリートの内部において含水量が変化する。この変化を受けて鉄筋腐食速度に対する支配パラメータが変化すると思われる。すなわち、鉄筋腐食速度に影響を及ぼす必要な酸素量およびコンクリートの比抵抗が変化する。ここでは、コンクリート細孔径分布関数に着目し、コンクリート内部の含水率の変化およびこれが酸素拡散およびコンクリート比抵抗に及ぼす影響を検討する。

(1) 含水量の算定モデル^(8),9),10)

a) 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とし、図-2に示す細孔容積分布に関して細孔径分布を規定する関数を式(3.1)、(3.2)で表すこととした。

細孔容積分関数：

$$V_r = V_0 [1 - \exp(-Br^C)] \quad (3.1)$$

細孔容積分布密度関数：

$$\frac{dV_r}{dr} = V_0 BC r^{C-1} \exp(-Br^C) \quad (3.2)$$

ここで、

- v_r : 細孔半径 r における細孔量 (cm^3/cm^3)
- v_0 : 総細孔量 (cm^3/cm^3)
- B, C : 関数形状を決定するパラメータ

b) 液状水と水蒸気の熱力学的平衡

図-3に示すように、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実理想混合気体により満たされると考える。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(3.3)により与えられる。

$$\ln \frac{p_v}{p_{v0}} = -\frac{2\gamma_0 M}{RT\rho_w r_s} \quad (3.3)$$

ここで、

- p_v : 水蒸気分圧 (Pa)
- p_{v0} : 飽和水蒸気圧 (Pa)
- γ_0 : 液体の表面張力
- M : 水の分子量 (g/mol)
- R : 気体定数 ($\text{J/mol} \cdot \text{K}$)
- T : 絶対温度 (K)
- ρ_w : 水の密度 (g/cm^3)

c) 含水量算定関数

式(3.3)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。図-3に示すように、半径 r_s 以下の細孔はすべて液状水で満たされると仮定すると、コンクリート中の含水量 S として以下のような結果を得ることができる。

$$S = \int_0^{r_s} dV_r = V_0 [1 - \exp(-Br_s^C)] \quad (3.4)$$

ここで、

- s : 含水量 (cm^3/cm^3)
- r_s : 相対湿度により求めた半径 (cm)

(2) 酸素拡散係数の算定モデル

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には、気体の移動は、主に分子拡散、クヌーセン拡散、表面移動により生ずると考えられる^{11),12)}。表面移動の影響を無視すると気体の移動に対して主に分子拡散、クヌーセン拡散が支配的となる。

半径 r と気体分子の平均自由行程 λ の比が 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 は平均分子速度を \bar{c} とすると次式 (3.5) となる。

$$D_n = 1/3 \bar{c} \lambda \quad (3.5)$$

半径 r と気体分子の平均自由行程 λ の比が 0.1 より小さい場合にはクヌーセン拡散が生じ、クヌーセン拡散係数 D_k は次式 (3.6) となる。

$$D_k = 2/3 \bar{c} r \quad (3.6)$$

半径 r と気体分子の平均自由行程 λ の比が 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。この中間領域拡散係数 D_m は次式 (3.7) となる。

$$D_m = \frac{D_n}{(1 + \lambda/2r)} \quad (3.7)$$

図-4 に示すように、コンクリートの細孔径 10λ から ∞ にかけて酸素拡散は主に D_n が支配的となり、 0.1λ から 10λ にかけて酸素拡散は主に D_m が支配的となり、酸素分子直径 d から 0.1λ にかけて酸素拡散は主に D_k が支配的となる。この式 (3.5), (3.6), (3.7) の細孔空隙中の気体移動の理論を酸素拡散係数の算定モデルとし、コンクリート中の細孔がある一定の大きさの組合せとすると、コンクリートの酸素拡散係数 D は式 (3.8), (3.9), (3.10) で算定することが¹³⁾できる。

$d \leq r_s \leq 0.1\lambda$ のとき：

$$D = \int_{r_s}^{0.1\lambda} \left(\frac{dV_k}{dr} \right) D_k dr + \int_{0.1\lambda}^{10\lambda} \left(\frac{dV_m}{dr} \right) D_m dr + \int_{10\lambda}^{\infty} \left(\frac{dV_n}{dr} \right) D_n dr \quad (3.8)$$

$0.1\lambda \leq r_s \leq 10\lambda$ のとき：

$$D = \int_{r_s}^{10\lambda} \left(\frac{dV_m}{dr} \right) D_m dr + \int_{10\lambda}^{\infty} \left(\frac{dV_n}{dr} \right) D_n dr \quad (3.9)$$

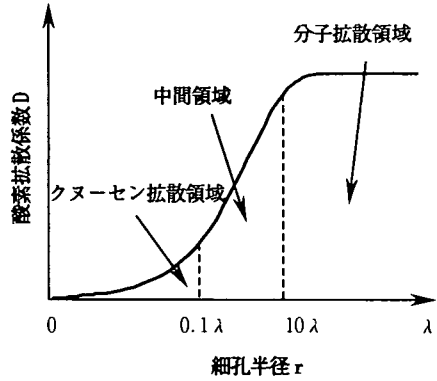


図-4 酸素拡散係数の定義

$r_s \geq 10\lambda$ のとき：

$$D = \int_{r_s}^{\infty} \left(\frac{dV_n}{dr} \right) D_n dr \quad (3.10)$$

ここで、

D ：酸素拡散係数(cm^2/s)

$D_{k,m,n}$ ：各範囲における拡散係数(cm^2/s)

$dV_k/dr, dV_m/dr, dV_n/dr$ ：各範囲における細孔量分布密度($\text{cm}^3/\text{cm}^3 \cdot \text{cm}$)

なお、平均分子速度 \bar{c} および平均自由行程 λ は以下の式 (3.9), (3.10) で表される。

$$\bar{c} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \quad (3.11)$$

$$\lambda = \frac{RT}{N \pi d^2 P} \quad (3.12)$$

ここで、

M ：水の分子量(mg/mol)

R ：気体定数($\text{J/mol} \cdot \text{K}$)

P ：気体圧力(Pa)

N ：アボガドロ数(mol^{-1})

T ：絶対温度(K)

d ：酸素分子の直径(cm)

以上の含水量の算定モデルと酸素拡散係数の算定モデルにより、コンクリート内部の含水量と酸素拡散係数との経時変化を求めることができる。これらの経時変化を2章に示した鉄筋腐食速度計算モデルに取り込むことにより、鉄筋腐食速度を求めることができると考えられる。

表-1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント
細骨材	川砂 (密度 $2.58\text{g}/\text{cm}^3$, 粗粒率 3.16)
粗骨材	碎石 (密度 $2.63\text{g}/\text{cm}^3$, 粗粒率 6.52) 最大寸法10mm
混和剤	AE減水剤
鉄筋	SR45 ϕ 9mm

表-2 示方配合表

ス ラ ン プ (cm)	空 気 量 (%)	W/C (%)	単位量(kg/m^3)				AE 減 水 剤 (ml)
			セ メ ン ト	水	細 骨 材	粗 骨 材	
8 ± 0.5	8 ± 0.5	70	260	182	926	785	662

4. 鉄筋腐食実験

鉄筋腐食速度の算定モデルに用いるパラメータを定めるために、中性化したコンクリート中における鉄筋腐食の促進実験を行った。

コンクリートを中性化させ、その後、乾湿繰返しの促進実験により、内部鉄筋の腐食性状を把握することを試みた。促進実験中に経時的に鉄筋自然電位、腐食面積、腐食量およびコンクリート比抵抗の変化を測定し、これらの項目と中性化深さおよび促進時間との関連を検討した。

(1) 実験概要

a) 実験供試体の概要

本研究において使用した材料を表-1に、コンクリートの示方配合を表-2に示す。供試体は、図-5および図-6に示すように、鉄筋腐食供試体および比抵抗供試体の2種を作製した。鉄筋腐食供試体では、鉄筋を事前に10%クエン酸二アンモニウム水溶液に浸漬して黒皮を完全に除去し、形状 $70\times 70\times 200\text{mm}$ の型枠に設置してコンクリートを打設した。打設方向は図中の下面からである。供試体作製後、材齢1日で脱型し、所定材齢7日間まで水中養生とした。また、水中養生後に温度 20°C 、相対湿度60%の室内環境下に静置し、その後一面を除き5面をエポキシ樹脂でコーティング処理を施した。なお、鉄筋の長さは 200mm で、コーティングしていない面(腐食促進面)からのかぶりは 15mm となるようにした。

コンクリートの電気抵抗および含水量を測定するための比抵抗供試体では、供試体中の電極面積は $40\times 40\text{mm}$ であり、電極間距離は 30mm である。

b) 中性化促進および腐食促進条件

材齢14日で各供試体を中性化促進試験装置内に移設し

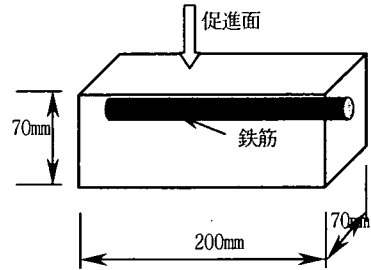


図-5 鉄筋腐食供試体の寸法

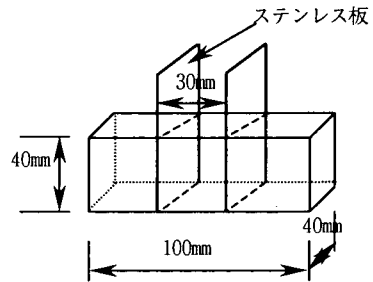


図-6 比抵抗供試体の寸法

た。中性化促進条件は温度 40°C 、湿度50%、 CO_2 濃度10%であり、中性化進行は鉄筋腐食供試体と同寸法のコンクリート供試体を随時ダイヤモンドカッターで切断し、フェノールフタレイン1%アルコール溶液を用いて中性化深さを測定した。中性化促進開始後は、中性化深さが 15mm (材齢29日程度)、 19mm (材齢35日程度)、あるいは 23mm (材齢43日程度)に到達するごとに、供試体を中性化促進試験装置から取り出し、腐食促進試験に供した。 15mm は中性化深さが鉄筋に達する深さ、 19mm は中性化深さが鉄筋中位まで達する深さ、そして 23mm は鉄筋周囲のコンクリートがほぼ中性化している状態をそれぞれ反映している。腐食促進試験では、乾湿繰返しの状態を設定した。乾湿状態は高温高湿状態(温度 40°C 、湿度95%)1週間、低温低湿状態(温度 15°C 、湿度60%)1週間を1サイクルとして、腐食促進期間20週まで繰り返した。

c) 測定方法

腐食促進試験0, 2, 4, 6, 8, 12, 16, 20週目で、鉄筋腐食供試体に対して自然電位測定を行った。鉄筋自然電位の測定には、測定に供する前に、各供試体を24時間水中浸漬し、その後湿ったスポンジを促進面上に置いて自然電位測定を行った。用いた照合電極は飽和カロメル電極(以下、SCEと記述する)である。

腐食量の測定では、鉄筋腐食供試体を腐食促進4, 8, 12, 20週において3体ずつ割裂破壊して鉄筋を取り出し、腐食面積率と腐食減量を測定した。腐食面積率はセロファンに発錆領域を写し取り、ドットカウントプログラムを用いて腐食面積を算出し、鉄筋全面積で除すことで求

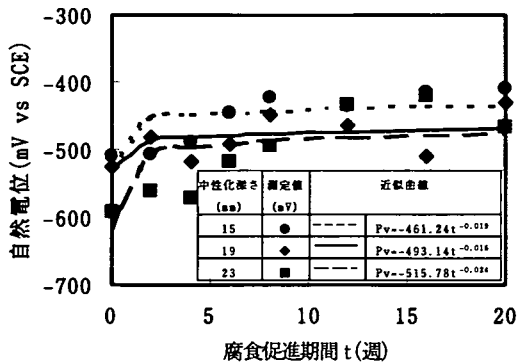


図-7 自然電位の経時変化

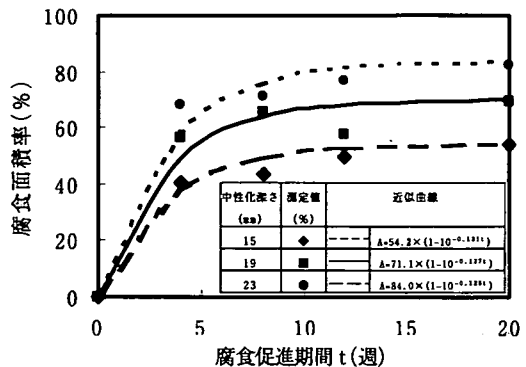


図-8 腐食面積率の経時変化

めた。また、腐食減量はクエン酸二アンモニウム 10%水溶液で錆落しをした後、式(4.1)を用いて算出した。なお、この処理で非腐食部の表面物質(不動態皮膜等)も除去することになるため、未腐食の鉄筋における重量減量 W_p を測定して補正を行った。

$$\Delta W = (W_0 - W) - W_p \times \frac{100 - A}{100} \quad (4.1)$$

ここで、

- ΔW : 腐食量 (mg)
- W_0 : 打設前の鉄筋重量 (mg)
- W : 錆落とし後の鉄筋重量 (mg)
- W_p : 非腐食部における重量減量 (mg)
- A : 腐食面積率 (%)

比抵抗供試体は鉄筋腐食供試体と同様の材齢で比抵抗を測定し、式(4.2)により比抵抗を計算した。また、式(4.3)により相対含水率を求めた。ここで、供試体を所定材齢で重量 m_t を測定後、水中に 14 日間浸漬し飽和時の重量 m_s を求めた。さらに、乾燥(105℃)に 3 日間供して乾燥時の重量 m_d を測定した。

$$\rho = \frac{Z \times A_s}{h} \quad (4.2)$$

$$S_r = \frac{m_t - m_d}{m_s - m_d} \times 100\% \quad (4.3)$$

ここで、

- ρ : コンクリートの比抵抗 ($\Omega \cdot \text{cm}$)
- S_r : 相対含水率 (%)
- Z : 周波数 1kHz でのインピーダンスの実数成分 (Ω)
- A_s : 埋め込んだステンレス板の面積 (cm^2)

h : ステンレス板の間の距離 (cm)

m_t : 試験時の供試体の重さ (g)

m_s : 飽水時の供試体の重さ (g)

m_d : 絶乾時の供試体の重さ (g)

(2) 実験結果

a) 鉄筋腐食の進行状況

鉄筋腐食供試体の鉄筋の自然電位の経時変化を図-7に示す。自然電位は、中性化深さが大きいほど卑となる傾向を示しているが、中性化の深さの相違にかかわらず、促進時間の経過とともに緩やかに貴になる傾向を示し、促進実験 8 週以後の経時変化は少ない。この自然電位の経時変化は佐伯らの報告²⁾と同様の傾向を示している。また、自然電位の経時変化は、式(4.4)を用いて近似した。

$$P_v = P_{v0} t^{-\alpha} \quad (4.4)$$

ここで、

P_v : 促進期間 t における自然電位 (mV)

P_{v0} : 腐食促進前の自然電位 (mV)

α : 係数

t : 促進期間 (週)

各中性化深さにおける自然電位の近似式のパラメータは図-7に示す値になる。初期の自然電位は、中性化深さが大きいほど卑となるが、係数 α は中性化深さによる差異は比較的小さい。本実験においても、中性化深さが鉄筋腐食の自然電位に及ぼす影響が認められた。なお、別途に未中性化のコンクリート中における鉄筋の自然電位を測定し、その値はほぼ -154mV (vs SCE) であった。

鉄筋腐食面積率の経時変化を図-8に示す。いずれの中性化の深さにおいても、促進 4 週までの変化が大きく、4 週以降の変化は比較的緩慢になる傾向を示した。促進 20 週における腐食面積率は、中性化深さ 15mm の場合では

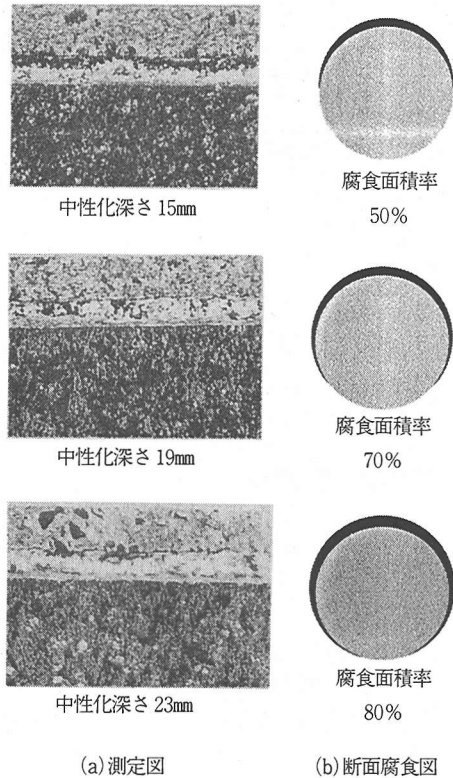


図-9 中性化深さと鉄筋の腐食状況(腐食促進20週)

50%, 中性化深さ 19mm の場合では 70%, 中性化深さ 23mm の場合では 80% である。腐食面積率の経時変化は、式 (4.5) を用いて近似した。各中性化深さにおける近似式のパラメータは図-8 に示す値になる。

$$A = A_0(1 - 10^{\beta \times t}) \quad (4.5)$$

ここで、

- A: 促進期間 t における腐食面積率(%)
- A₀: 促進時間 20 週後の腐食面積率(%)
- β: 係数
- t: 促進期間(週)

なお、腐食促進期間20週における鉄筋の腐食状況を図-9 に示す。本図において、鉄筋の腐食状況の鉄筋軸方向での変化は少なく、孔食でなく全面腐食に近い傾向を示し、鉄筋上下面での腐食の有無が顕著であった。本実験においても、中性化深さが鉄筋における腐食面積率に及ぼす影響が大きいたことが確認された。

以上より、鉄筋腐食における初期の自然電位と腐食面積は中性化深さに影響されると考えられる。

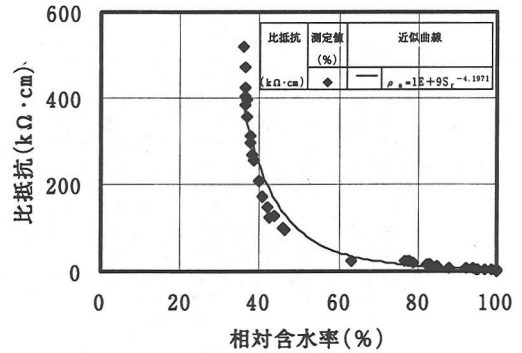


図-10 相対含水率と比抵抗の関係

b) コンクリート比抵抗の変化

図-10 に中性化促進試験を行った供試体の相対含水率と比抵抗の関係を示す。図-10 より、今回の配合条件で明らかに相対含水率の増加に伴いコンクリートの比抵抗が減少しており、今回の実験で比抵抗は含水率の関数として以下のような式 (4.6) で表すことができる。近似式における ρ_s および係数 γ は、図-10 に示す値になる。

$$\rho_s = \rho_0 S_r^{-\gamma} \quad (4.6)$$

ここで、

- ρ_s: 比抵抗(kΩ·cm)
- ρ₀: 係数(kΩ·cm)
- S_r: 相対含水率(%)
- γ: 係数

コンクリートの比抵抗は前述した相対含水率のほかに、コンクリートの細孔構造、コンクリート中のモルタル分、温度などによって相違すると考えられる。今回は配合が一定であるため、温度の項を考慮する必要がある。本研究では、コンクリートの比抵抗の温度補正については既往の研究¹⁴⁾を参考にして、以下のような式(4.7)で行った。

$$\rho_T = 2.5 \times 10^{-0.027T} \quad (4.7)$$

- ここで、ρ_T: 20℃の抵抗を基準とした温度補正係数
- T: 温度(℃)

以上の検討に基づいたコンクリートの比抵抗は最終的に以下のような式(4.8)で表すこととした。

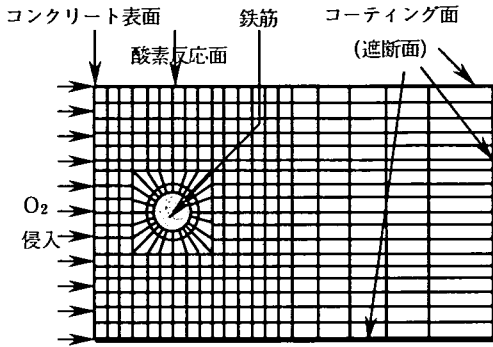


図-11 FEM 解析に用いた要素分割

表-3 解析に用いたパラメータ

$V_0(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$	0.172
B	22400
C	0.5
酸素の溶解度 $m(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$	0.034(15℃)
	0.023(40℃)
水蒸気の拡散係数 (cm^2/s)	$2.627(\times 10^{-5})$

$$\rho(S_r, T) = \rho_S \rho_T \quad (4.8)$$

ここで、 $\rho(S_r, T)$: 相対含水率 S_r , 温度 T におけるコンクリート比抵抗 ($k\Omega \cdot \text{cm}$)

5. 鉄筋腐食進行の算定

本章では、2章に示した鉄筋腐食の算定モデル(酸素拡散支配モデルとコンクリート比抵抗支配モデル)を用い、3章に示したコンクリート含水量の算定モデルと酸素拡散係数の算定モデルおよび4章に示した鉄筋腐食実験結果を用いて解析に用いるパラメータを定め、中性化したコンクリート中における鉄筋腐食の進行の解析を行った。

(1) 解析条件

本研究では2次元有限要素法を用いて計算した。促進条件におかれた供試体を解析対象として実験結果との比較を行った。

酸素拡散支配の解析では、解析のメッシュは図-11に示すように、すべてのセルを四方形とし、水蒸気および酸素はコンクリートに侵入する場合にはコーティングしていない面から侵入するとし、コーティングした面からの侵入は0とした。

コンクリート比抵抗支配の解析では、鉄筋腐食の自然電位の経時変化の回帰式(4.4)を2章に示したコンクリート比抵抗支配算定モデルにおける腐食箇所の電位の経時変化として取り扱うこととした。すなわち、測定した自然電位を腐食箇所(鉄筋の上表面)の電位とし、別途測定した未中性化の鉄筋の自然電位を未腐食箇所(鉄筋の下表面)の電位とした。解析のメッシュは図-11に示すと同様に、すべてのセルを四方形とし、メッシュの最大寸法を0.5mmとした。解析に用いる式(3.1)における細孔分布関数のパラメータおよび水分移動に関する水蒸気拡散係数は既往のデータ⁷⁾を用いた。この結果を表-3に示す。すべての腐食促進の乾湿繰返し条件で水蒸気の拡散係数は一定とした。

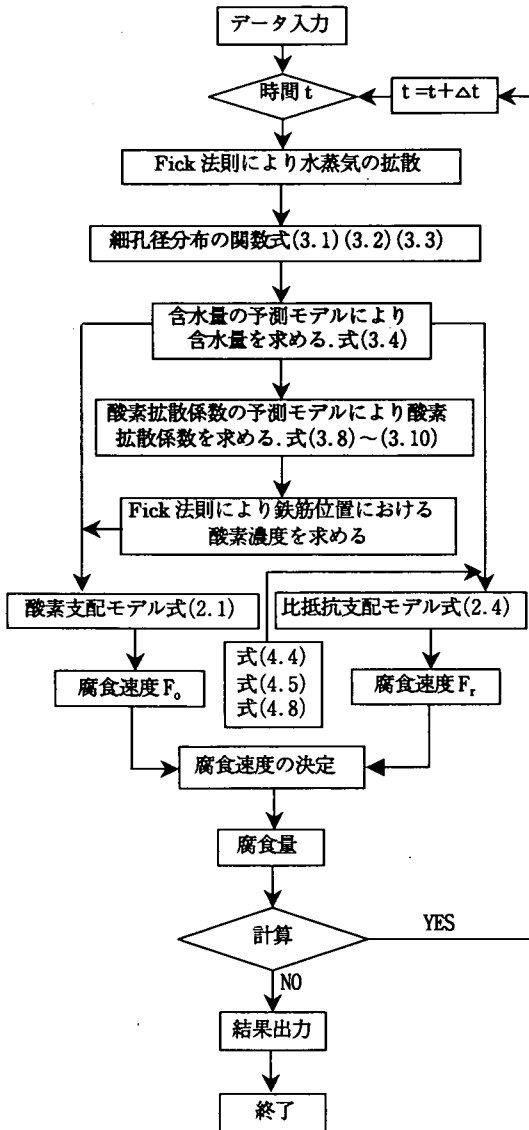


図-12 鉄筋腐食量の計算フロー

表-4 含水量及び酸素拡散係数の計算結果

計算条件	含水量 (cm^3/cm^3)	酸素拡散係数 (cm^2/s)
高温高湿	0.162(最大)	5.70×10^{-4} (最小)
低温低湿	0.095(最小)	1.33×10^{-3} (最大)

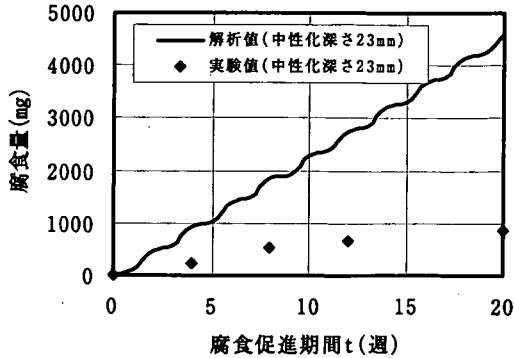


図-13 促進期間と腐食減量の関係 (酸素支配モデル)

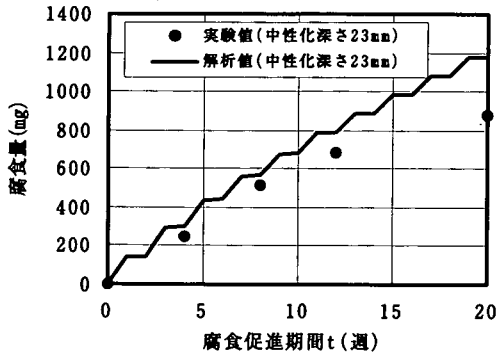


図-14 促進期間と腐食減量の関係 (比抵抗支配モデル)

(2) 解析結果と実験の比較

鉄筋腐食速度および腐食量の算定の計算フローを図-12に示す。

表-4は、乾湿繰返しを受けたコンクリートの内部の含水量及び酸素拡散係数の計算結果を示したものである。この表によると、コンクリート内部の含水量は高温高湿(温度 40°C 、湿度95%)で最大になり、低温低湿(温度 15°C 、湿度60%)で最小になることがわかる。一方、酸素拡散係数は逆の傾向になることがわかる。

図-13, 14は、中性化深さ23mmを例とし、促進期間に伴う鉄筋腐食量を示したものである。図-13は酸素支配モデルのみから求めた鉄筋腐食量の解析結果であり、図-14は比抵抗支配モデルのみから求めた鉄筋腐食量の解析結果である。図-13における解析による腐食量は、ほぼ直線的に増加しており、その傾向は実験と同様である。

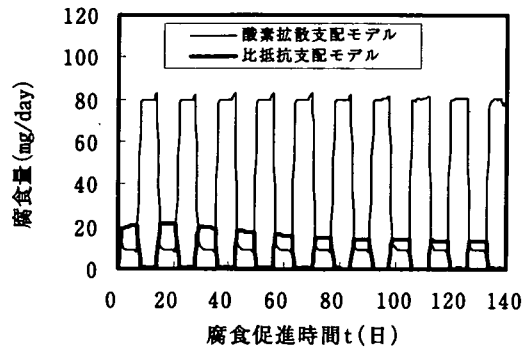


図-15 腐食量の比較

しかし、解析値は実験値を大幅に上回っており、この結果により、促進期間における鉄筋腐食量は酸素支配のみが支配的になる可能性は少ないと考えられる。図-14では、解析による鉄筋腐食量の変化は実験値と類似した傾向を示している。解析値は実験値を若干上回っており、両者の相違は促進期間の増加に伴い若干大きくなっている。本研究では、鉄筋腐食促進条件としては、2章に述べたように、乾湿状態は高温高湿状態(温度 40°C 、湿度95%)1週間、低温低湿状態(温度 15°C 、湿度60%)1週間で1サイクルとした。このような促進条件下では酸素拡散支配とコンクリート比抵抗支配は交互に律速条件になる可能性が高いと考えられる。

図-15は、促進期間による酸素拡散支配モデルと比抵抗支配モデルにより、計算した鉄筋腐食量の解析結果である。酸素拡散支配モデルの腐食量が比抵抗支配モデルの腐食量を下回る期間は高温高湿状態(温度 40°C 、湿度95%)1週間の期間であり、一方、後者が前者を下回る期間は低温低湿状態(温度 15°C 、湿度60%)1週間の期間である。高温高湿状態ではコンクリート内部で水分は十分に存在し、酸素はコンクリートへの拡散がしにくく、腐食反応において酸素拡散律速と考えられる。一方、低温低湿状態ではコンクリート内部で水分は十分に存在しておらず、コンクリートの比抵抗が大きいため、腐食電流が流れにくくなったと考えられる。両者の結果をまとめると、高温高湿状態では酸素拡散支配になり、低温低湿状態ではコンクリート比抵抗支配になっていると推定される。これは、湿度が高い場合には、酸素拡散支配の可能性が高く、湿度が低い場合には、コンクリート比抵抗支配の可能性が高いという既往の研究結果^{2), 15)}とよく符号する結果である。

以上のことを考慮して、乾湿繰返しを受ける鉄筋の腐食モデルによる計算値を組合せ、腐食促進試験中の鉄筋腐食量の算定を行った。組合せの方法としては、図-15に示したように、高温高湿の促進条件においては酸素拡散支配モデルから算出した鉄筋腐食量と比抵抗支配モデル

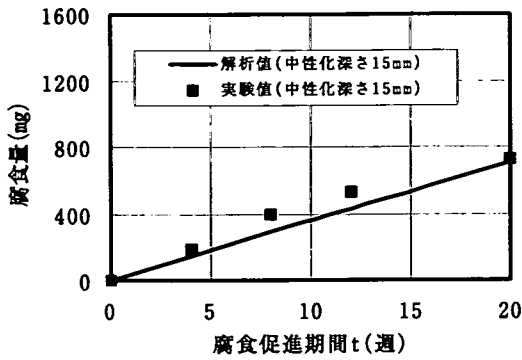


図-16 鉄筋腐食量の変化
(中性化15mm)

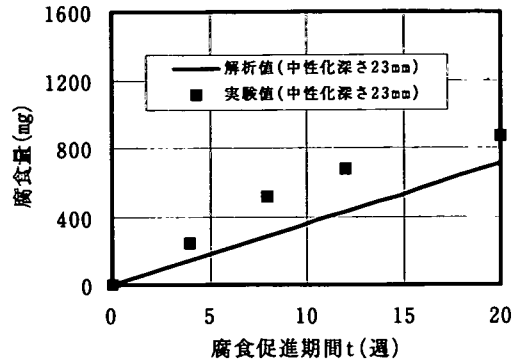


図-18 鉄筋腐食量の変化
(中性化23mm)

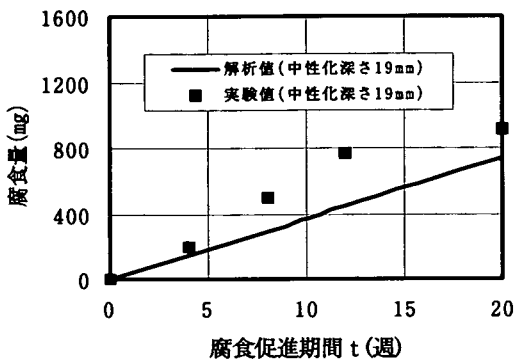


図-17 鉄筋腐食量の変化
(中性化19mm)

ルから算出した腐食量を比較した結果、酸素拡散支配モデルから算出した鉄筋腐食量を実際の鉄筋腐食量とした。同様に、低温低湿の促進条件におけるコンクリート比抵抗支配モデルから算出した腐食量を実際の鉄筋腐食量とした。このように促進条件の時間ごとの腐食量を加算すると腐食促進期間と腐食量の関係を求めることが出来る。

図-16, 17, 18 はそれぞれに中性化深さ 15mm, 19mm, 23mm の供試体における鉄筋腐食量の解析値と実験値を示した。これらの図により、解析における腐食量はほぼ直線的に増加しており、佐伯、森永の実験結果^{2), 16)}と類似した傾向を示している。また、実験値と解析値はほぼ一致している。中性化による鉄筋腐食の算定手法は基本的に妥当であると考えられる。しかし、図-17, 18 において、解析結果は変化の傾向を捉えているが、値は相違している。これは、コンクリート比抵抗支配モデルを構築した際に、鉄筋の分極抵抗の影響を考慮しておらず、錆層における流れ電流を省略したことも一因と考えられる。

6. まとめ

本研究では、中性化したコンクリート中における乾湿繰返し作用による鉄筋の腐食性状を明らかにすることを目的とした。このため、鉄筋腐食速度に関して、既往の提案式を基礎として算定モデルを設定した。酸素拡散支配モデルでは、コンクリート中の空隙における水が占める容積をアノード部、水が占めない容積をカソード部とし、この容積比をカソードとアノードの比とした。比抵抗支配の鉄筋腐食モデルでは、腐食箇所と未腐食箇所の境界面に流れる電流密度を求め、この電流密度をコンクリート比抵抗支配による電流密度とすることを提案した。鉄筋腐食モデル中のパラメータを求めるために、鉄筋腐食速度の算定モデルを設定し、鉄筋を埋め込んだコンクリート供試体を製作し、中性化させた供試体に関して鉄筋腐食促進実験を行い、有限要素解析を行った。本研究の範囲では以下のことが明らかとなったと思われる。

- (1)コンクリート中性化深さの相違により、鉄筋の自然電位が相違し、中性化の進行が大きいほど自然電位が卑となる傾向があった。
- (2)コンクリート中性化深さの程度により鉄筋の腐食面積率が異なる。中性化が深いほど腐食面積率が大きくなった。
- (3)コンクリートの中性化による鉄筋腐食に関して、中性化した範囲で孔食は認められず、鉄筋の表面はほぼ全面腐食になった。
- (4)酸素拡散支配モデルとコンクリート比抵抗支配モデルによる計算結果により、高温高湿では鉄筋腐食は酸素拡散支配になり、低温低湿ではコンクリート比抵抗支配になったと推定される。
- (5)中性化したコンクリート中における鉄筋の自然電位、腐食面積率、コンクリート比抵抗の結果を、含水量の算定モデルおよび酸素拡散係数の算定モデルを考慮した鉄筋腐食モデルと組み合わせることにより、鉄筋の腐食量を

算定することができた。従って、本解析手法により、中性化したコンクリートにおける乾湿繰返し作用による鉄筋腐食速度を算定することが可能であると考えられる。

本研究では、実験から求めた近似式を用いて解析を行っているが、鉄筋腐食モデルに用いるパラメータの一般化の計算式を求めるためには実構造物および多量の実験データを蓄積することが今後の大きな課題であると考えている。

謝辞：本研究を行うにあたり、石沢 一二(現三井物産株式会社)、岩田 亮(現日揮株式会社)にご協力頂きました。なお、多大なご助言とご協力を頂いた土木学会コンクリート委員会腐食・防食小委員会の皆様から感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向、コンクリート委員会腐食防食小委員会報告, 1997.
- 2) 佐伯 竜彦, 大即 信明, 長滝 重義: 中性化によるモルタル中の鉄筋腐食の定量的評価, 土木学会論文集, No. 532/V-30, pp. 55-66, 1996.
- 3) 関 博, 山本 英夫: 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, Vol. 9, No. 1, pp. 381-386, 1987.
- 4) コンクリート構造物の構造・耐久設計境界問題研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, 1998.
- 5) 小山 理智, 矢島 哲司, 魚本 健人, 星野 富夫: 自然電位を用いた鉄筋腐食状態の推定手法に関する基礎的な研究, 土木学会論文集, No. 550/V-34, pp. 13-21, 1996.
- 6) 乙丸 正彦, 大津 政康: 3次元BEM解析に基づいた自然電位法による鉄筋腐食の評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集報告集, Vol. 12, No. 1, pp. 539-544, 1990.
- 7) 大津 政康, 山村 浩紀: 自然電位法の仮想電荷法(CSM)解析による鉄筋腐食の評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集報告集, Vol. 13, No. 1, pp. 527-532, 1991.
- 8) 下村 匠, 小沢 一雅: 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, Vol. 14, No. 1, pp. 631-636, 1992.
- 9) 下村 匠, 前川 宏一: 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.
- 10) 石田 哲也, Rajesh P. CHAUBE, 岸利治, 前川 宏一: 任意の乾湿繰返しを受けるコンクリートの含水状態算定モデル, 土木学会論文集, No. 564/V-35, pp. 199-209, 1997.
- 11) Yves F. Houst: Influence of Porosity and Water Concrete On The Diffusivity of CO₂ and O₂ Through Hydrated Cement Paste, Cement and Concrete Research, Vol. 24, No. 6, pp. 1165-1176, 1994.
- 12) 小林 一輔, 出頭 圭三: 各種セメント系材料の酸素の拡散性状に関する研究, コンクリート工学, Vol. 24, No. 12, pp. 91-106, 1986.
- 13) スジヨノ, A. S., 関 博: 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.
- 14) 小野 博宣, 大岸 佐吉, 文堅: コンクリートの電気抵抗に及ぼす試験条件および作用応力の影響, コンクリート工学年次論文集報告集, Vol. 13, No. 1, pp. 441-446, 1991.
- 15) 大住 道生, 魚本 健人: 酸素拡散理論に基づくコンクリート中の鉄筋の腐食速度算定法, 土木学会論文集, No. 648/V-47, pp. 1-8, 2000.
- 16) 森永 繁: 鉄筋の腐食速度に基づいた鉄筋コンクリート建築物の寿命算定に関する研究, 清水建設研究報告書別冊, No. 23, 1986.

(2000. 9. 26 受付)

STUDY ON CORROSION OF REINFORCING BAR DUE TO CONCRETE NEUTRALIZATION UNDER ALTERNATE DRYING AND WETTING CONDITIONS

Lukuan QI, Hiroshi SEKI and Kotoyoshi TAKAGI

In this paper, the two models are proposed so as to estimate corrosion rate of reinforcing bar embedded in concrete due to neutralization. In order to clarify mechanisms of reinforcing bar corrosion, the experiment that corrosion of reinforcing bar due to concrete neutralization under alternate drying and wetting conditions was carried. Measured corrosion potential, corrosion area ratio and specific resistance of concrete were used in these models. Through this analysis, it is confirmed that corrosion of reinforcing bar is oxygen control in high temperature and high humidity, specific resistance control of concrete in low temperature and low humidity. The amounts of corrosion on the theoretical analysis not only show the same tendency, but also show almost the value compare with experimental results. It is confirmed that these corrosion models of reinforcing bar is useful for calculation of corrosion amounts.