

中性化の影響を受ける場合の鉄筋腐食に関する劣化予測

鳥取誠一¹・宮川豊章²

¹正会員 博(工) (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町)

²フェロー会員 工博 京都大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

本論文では、格子状に配筋した比較的大型の鉄筋コンクリート供試体を促進的に中性化させた後、約5年間の屋外暴露試験を行い、鉄筋腐食に関する劣化予測法について検討した。暴露試験の結果、かぶりを15mmとした下端筋の中央付近まで促進的に中性化させた場合、下端筋の平均腐食速度は 2×10^{-3} mm/年程度であること、同一供試体中で中性化残りが10mm程度となる上端筋の平均腐食速度は下端筋の1/10程度となること、また、暴露初期にはマクロセルと想定される影響により、腐食速度がやや大きくなる傾向も見られるが、腐食速度は徐々に低下し、経年とともにマクロセルの影響も小さくなると推測されること等が把握された。以上の試験結果および既往の研究結果を基に、劣化予測法を示した。

Key Words : deterioration prediction, carbonation, corrosion of reinforcing steel

1. はじめに

近年、コンクリート構造物を長寿命化し、社会資本の保全を図る観点から、維持管理が極めて重要であるとの認識が高まってきた。このような点を背景として、土木学会「コンクリート標準示方書(維持管理編)」¹⁾が2001年に制定された。

この示方書には、i)点検~対策に至る維持管理の体系が明確に示されたこと、ii)示方書の体系を性能照査を含む性能規定型したことと並びiii)劣化予測によって構造物の性能評価・判定を行うようにした点に大きな特徴がある。

しかし、現状では劣化予測法、各性能の評価法等に関して、必ずしも精度の高い手法が確立されていないため、示方書ではグレーディングによる半定量的な評価、判定法が採用されている。このような状況から、今後は基本的な考え方は示方書に拠りつつ、より定量的な劣化予測手法を構築することが重要な課題になると考えられる。

劣化予測を行う際の劣化因子の1つとして、コンクリートの中性化による鉄筋腐食が挙げられる。中性化による鉄筋腐食は、比較的古くから研究がなされており、鉄筋腐食が生じ始める中性化残り、鉄筋が腐食し始めた後の腐食速度等に関して、ある程度の成果は得られている。しかし、これらの研究の多

くは小型のモルタル供試体を一定の温湿度の環境に比較的短期間、存置した場合の鉄筋腐食性状を調べた結果を基にしており、実環境において比較的長期間、鉄筋腐食速度等を検討した事例は少ない。

以上の状況から、本論文では鉄筋を格子状に配筋した比較的大型の供試体を約5年間、屋外に暴露した結果を基に、中性化の影響を受ける場合の鉄筋腐食に関する劣化予測法について検討することとした。

2. 既往の研究

本章においては、鉄筋が腐食し始める中性化残りと、腐食し始めた後の腐食速度に関する既往の研究を整理した。

(1) 鉄筋が腐食し始める中性化残りに関する研究

表記については、既往の研究により概ね表-1のような結果が示されている。鉄筋が腐食し始める中性化残りは研究者によって若干相違した値となっているが、いずれの研究も、中性化残りが0~10mmの範囲で鉄筋が腐食し始めることを示している。これらの結果から、「コンクリート標準示方書(維持管理編)」においては、鉄筋腐食の開始時期を中性化残り10mmの時点としている。

表-1 鉄筋が腐食し始める中性化残り

研究者	中性化残り (mm)	調査方法等
嵩ら ²⁾	0~10	建築物の調査
樋野 ³⁾	8~10	円柱コンクリート供試体、促進中性化後に屋外暴露(3年間)
佐伯ら ⁴⁾	3	角柱モルタル供試体、促進中性化+散水
高橋ら ⁵⁾	0~4	角柱コンクリート供試体、促進中性化後に乾湿繰返し

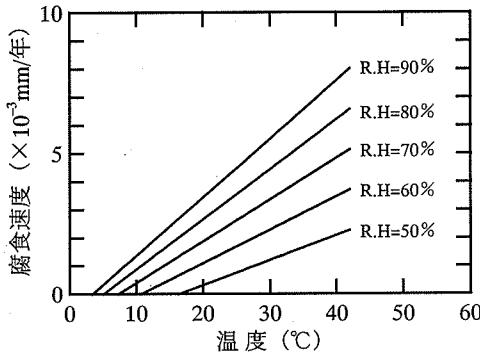


図-1 森永の提案による鉄筋腐食速度

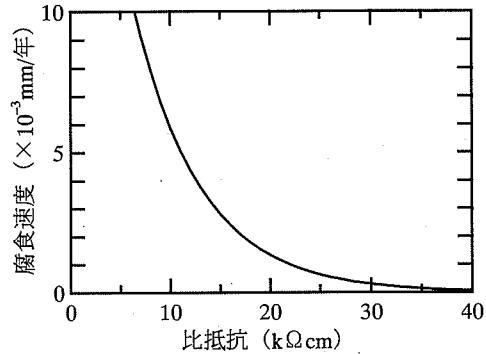


図-2 佐伯らの提案による鉄筋腐食速度

しかし、腐食開始は中性化残りによって一律に定まるのではなく、コンクリート中の水分の影響等も受けるとされている。例えば、嵩ら²⁾は、既存の30件の鉄筋コンクリート建築物から得られた中性化と鉄筋腐食に関するデータから、屋外では中性化残りが10mm付近から、また、屋内では中性化残りが負の値を示すようになってから、鉄筋が腐食し始めることを示し、中性化残りが鉄筋腐食に対する支配的な要因であると同時に、コンクリート中の水分量が腐食に大きな影響を及ぼすことを指摘している。

(2) 鉄筋の腐食速度

森永⁶⁾、佐伯ら⁴⁾は促進的に中性化させたモルタル供試体の暴露試験の結果から、鉄筋の腐食速度算定式を提案している。

森永は中心部に鉄筋を埋め込んだ角柱モルタル供試体(寸法:2×4×14.8cm, W/C=55%)の全断面を促進中性化させた後、種々の環境条件下(温度:20,50°C、湿度:50,95%、酸素濃度:0,10,20%および屋内外)に供試体を約3年間暴露し、鉄筋腐食量を測定した結果から、腐食速度算定式を示した。この式により腐食速度を算定した結果を図-1に示す。式では鉄筋表面の単位面積当たりの腐食重量の増加速度が示されているが、図-1ではこれを鉄筋腐食深さの増加速度に換算している。図-1より、一般環境(温度20°C、湿度70%)における腐食速度は2×10⁻³mm/年程度であることがわかる。

佐伯らは、角柱モルタル供試体(寸法:4×4×16cm, W/C=55,65%, かぶり=5,10mm)を促進中性化させ、中性化残りを-5~7mmとした後に、恒温恒湿槽内(温度:20,40°C、湿度:60,80,98%)に20週間存置した場合の鉄筋腐食量を測定した結果から、腐食速度算定式を示した。この式においては、モルタル中の含水量の増加に伴うモルタルの電気抵抗の低下が鉄筋腐食に支配的な影響を与えるとして、鉄筋の腐食電流密度がモルタルの比抵抗の関数として表されている。この式により求まる腐食電流密度をFaraday則により、鉄筋腐食深さの増加速度に換算した結果を図-2に示す。腐食速度はモルタルの比抵抗に大きく影響されるが、比抵抗が10~20 kΩ·cmの範囲では、腐食速度が(1~6)×10⁻³mm/年程度であることがわかる。

また、森永、佐伯らの提案式では腐食速度は定常的であるとしているが、岩田ら⁷⁾は鉄筋付近まで促進中性化させた供試体の乾湿繰返し試験から、鉄筋周囲に中性化領域と未中性化領域が存在する場合にはマクロセル腐食の影響により、鉄筋腐食量が増加することを示している。

以上の既往の研究を総合すると、鉄筋の腐食速度はオーダー的にはその値が把握されていると考えられるが、提案された腐食速度算定式の基となった暴露試験は、モルタル供試体を一定の温湿度の環境に比較的、短期間存置したものである。また、鉄筋周囲に中性化領域と未中性化領域が存在する場合には

表-2 コンクリートの配合

粗骨材 の最大 寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)			
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
10	10	4	70	48	173	247	882	955
	13	4	60	47	177	295	839	964

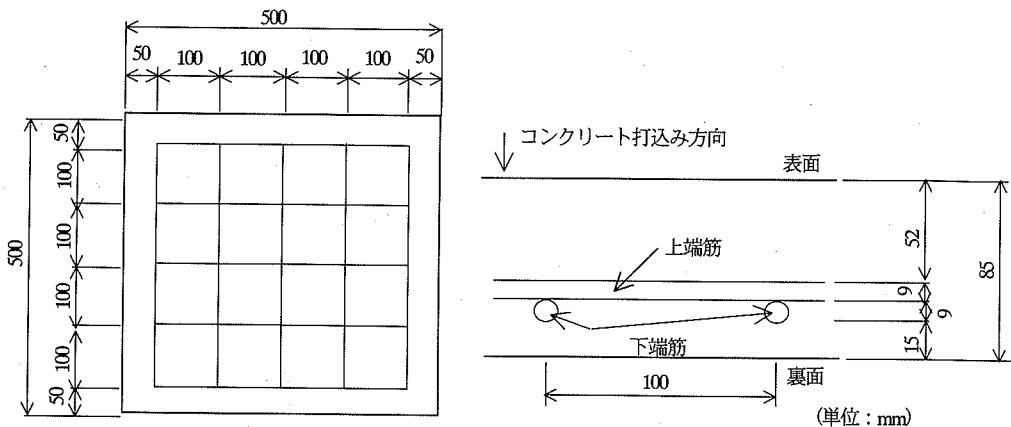


図-3 供試体の形状・寸法

表-3 暴露試験に用いた供試体一覧

シリーズ	No.	W/C (%)	目標促進中性化深さ (mm)
C0	1	70	20
	2	70	20
D0	1	60	10
	2	60	20
	3	60	20
	4	60	20

マクロセル腐食の影響も指摘されている。このようなことから、今後は実構造物に近い材料、配筋の条件で、実環境下における長期の鉄筋の腐食過程を把握することが重要と考えられる。

3. 暴露試験

(1) 試験目的

前章において示した課題を踏まえて、鉄筋の腐食速度を暴露試験により検討することとした。試験の目的、特徴等は以下のとおりである。

- 既往の鉄筋腐食速度に関する提案式は、モルタル供試体により求められたものであることから、本暴露試験ではコンクリート供試体を用いることとした。
- 鉄筋の腐食過程を把握する観点から、5年程度の

屋外暴露試験を行い、鉄筋腐食量の経時変化を把握することとした。また、暴露期間中は自然電位等を経時的に測定した。

- 比較的大型の供試体中に鉄筋を格子状に配置し、コンクリート表面に近い側の鉄筋(以下、下端筋という)と、コンクリート表面に遠い側の鉄筋(以下、上端筋という)の間のマクロセル腐食の発生可能性についても検討した。

(2) 供試体の製作

コンクリートには普通ポルトランドセメント、酒匂川水系産(F.M=2.89)の細骨材、大月市初狩町下初狩産($G_{max}=10\text{mm}$)の粗骨材、および混合剤としてAE剤(ヴィンソル)と減水剤(マイティ150)を用い、表-2の配合により製作した。鉄筋には、みがき丸鋼φ9を用いた。

供試体の寸法、形状を図-3に示す。かぶりは下端筋に対して15 mm、上端筋に対して24 mmである。コンクリートの打ち込み方向は、図-3中に示すとおりである。

本暴露試験に用いた供試体の種類を表-3に示す。目標促進中性化深さが10 mmまたは20 mmの場合には、下端筋に対する中性化残りがそれぞれ5 mmまたは-5 mmとなる。

供試体はコンクリート打ち込み後5日間、湿潤養生

を施した後、炭酸ガス濃度 10%、温度 20°C、相対湿度 60%の条件下に、目標の中性化深さ(10 または 20mm)となるまで存置した。ただし、存置期間は最大で 1箇月とした。水セメント比 70%の供試体は存置期間中に目標とする中性化深さに達したが、水セメント比 60%の場合には促進中性化期間が 1箇月で、中性化深さは 12mm 程度で、一部の供試体は目標とする中性化深さに達しなかった。なお、中性化の進行状況は、同一条件で製作した供試体を適宜、解体調査することにより把握した。

促進中性化が終了した後、供試体側面にエポキシ樹脂を塗布し、供試体を屋外(東京都国分寺市、鉄道総研構内)に暴露した。供試体はかぶりの少ない方の面(以下、裏面という)を下向きにした。これは実構造物において、コンクリートの剥離等が問題となる場合の条件に合わせたものである。

(3) 測定項目および測定方法

a) 測定項目

本試験において測定した項目は、i) 供試体の目視観察、ii) コンクリートの中性化深さ、iii) 鉄筋の腐食面積および腐食量、iv) 自然電位、v) 分極抵抗(交流インピーダンス法)、vi) 供試体内の上・下端筋間の電流である。vi)は上述の試験目的の 1つとして示した下端筋と上端筋間のマクロセル腐食について検討するため行った測定である。

b) 供試体の目視観察

供試体観察は、供試体解体時および暴露期間中に適宜行った。

c) コンクリートの中性化深さ

中性化深さは供試体解体時に φ50 のコアを 3 本採取し、コア側面に 1% フェノールフタレン溶液を噴霧して測定した。測定箇所はコア当たり 5 箇所で、3 本のコアの全測定値の平均値を中性化深さとした。

d) 鉄筋の腐食面積および腐食量

鉄筋の腐食面積は、腐食部分をセロファン紙に写し取り測定した。鉄筋腐食量は鉄筋を 24 時間 10% クエン酸 2 アンモニウム溶液に浸漬処理して測定した。鉄筋腐食による損失質量 ΔW は式(1)により求めた。 ΔW の算定に際しては、浸漬処理により失われる鉄筋の質量 $A_r w_c$ を考慮した。浸漬処理により失われる単位面積当たりの鉄筋質量 w_c は、新品鉄筋に上記の浸漬処理を施すことにより別途求めた。

$$\Delta W = W_1 - W_2 - A_r w_c \quad (1)$$

ここに、 W_1 ：供試体製作時の鉄筋質量

W_2 ：浸漬処理後の鉄筋の測定質量

A_r ：鉄筋表面積

w_c ：浸漬処理により失われる単位面積当たりの鉄筋質量

なお、鉄筋質量は電子上皿天秤を用いて 0.1mg 単位まで測定した。

e) 自然電位

供試体の表面および裏面の自然電位を測定した。1 面当たりの測定点数は 65 点である。測定時にはコンクリート表面に散水し、湿らせた状態とした。照合電極には飽和塩化銀電極を用いた。

f) 分極抵抗(交流インピーダンス法)

初回に供試体裏面の自然電位を測定した際に、最も卑な値を示した箇所の分極抵抗を経時的に測定した。測定は交流インピーダンス法によった。測定器には後藤ら⁹が開発した機器を用いたが、ガード対極が不良であったため、二重対極機能を用いないで測定した。

本測定により、コンクリート抵抗 R_c と分極抵抗 R'_p が得られるが、これらの値からコンクリートの比抵抗 ρ_c 、単位面積当たりの分極抵抗 R_p を以下のように求めた。

$$\rho_c = R_c \cdot A/c \quad (2)$$

ここに、 R_c ：コンクリート抵抗(交流インピーダンス法による測定値)

A ：作用極の領域面積

c ：かぶり

後藤ら⁹は、ラプラス方程式を定電位境界条件下で FEM により解き、分極抵抗測定時の電位および電流分布を求めている。式(2)における作用極の領域面積 A はこの後藤らの結果を用いて定めた。

単位面積当たりの分極抵抗 R_p は以下によった。

$$R_p = R'_p \cdot A \quad (3)$$

分極抵抗 R_p から Stern-Geary の式¹⁰により、腐食電流が以下のように求まる。

$$i_{cor} = K/R_p \quad (4)$$

係数 K は V の単位を有する。一般にこの値は、鉄筋の質量損失と分極抵抗値から定められている。係数 K の値はいくつかの既往の研究において示されているが、本論においては岡田ら¹⁰の研究を参考に、 K を 27 mV として腐食電流を算定した。

g) 供試体の上・下端筋間の電流

表記の測定を行うため、表-3 の D0-4 供試体においては、上端筋と下端筋が交差する箇所の上端筋をポリオレフィン樹脂製の熱収縮チューブで覆い、絶縁処理を行った。また、各鉄筋にはリード線を接続し、暴露期間中はこのリード線を供試体外で電気的に接続した。上・下端筋間の電流を測定する際には、図-4

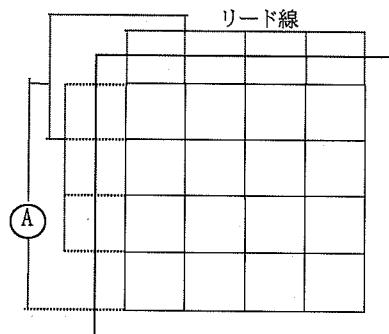
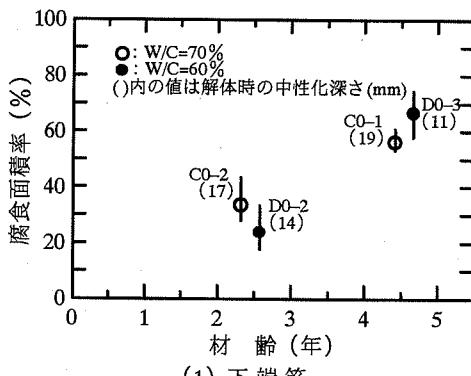
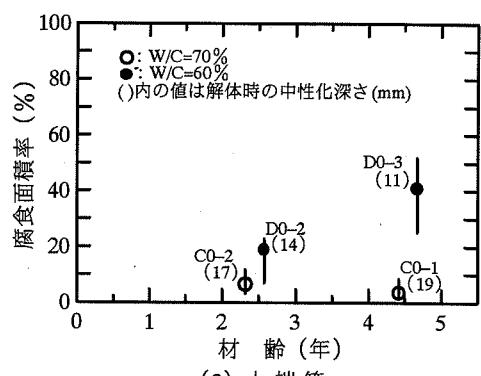


図-4 上・下端筋間の電流の測定



(1) 下端筋



(2) 上端筋

図-5 鉄筋腐食面積率の経時変化

に示すように測定対象の鉄筋と他の鉄筋の間に無抵抗電流計を挿入した。なお、D0-4 供試体以外の供試体の鉄筋は、通常の構造物と同様にコンクリート供試体内で電気的導通が確保されるように相互に接触させた。

(4) 暴露供試体の鉄筋腐食調査

a) 鉄筋腐食面積率

表-3 の供試体を適宜解体し、鉄筋の腐食状況を調べた。供試体解体前にコンクリート表面を観察した結果、ひび割れは認められなかった。

解体試験により調べた鉄筋腐食面積率を図-5 に示す。同図では下端筋と上端筋の結果を区分して示した。各図中にプロットした点は下端筋あるいは上端筋各 5 本の平均値であり、各点の直線は 5 本の鉄筋の測定範囲を示している。腐食状況の観察および図の結果から以下の点がわかる。

- i) 鉄筋腐食箇所は下面側に多く認められた。これはブリーディングおよび中性化の進行の影響と考えられる。
- ii) 鉄筋腐食面積率は一部のデータを除き、経年とともに増加する傾向にあり、下端筋の腐食面積率

のほうが上端筋のそれよりも大きい値を示した。

iii) 上端筋においては、水セメント比 60%の中性化深さが水セメント比 70%のそれよりも小さいにも拘わらず腐食面積率が大きい結果になった。この原因は不明であるが、目視観察では上端筋の錆の色は下端筋に比べて薄かったことから、腐食量自体は少ないと思われた。この点については次項において詳細に検討する。

b) 鉄筋腐食量

表-3 に示した供試体の鉄筋腐食量の経時変化を図-6 に示す。なお、ここでは式(1)により求めた鉄筋腐食量が、鉄筋表面で均一に生じているものとして算出した平均腐食深さを縦軸にとった。この結果から以下の点がわかる。

- i) データ数は十分でないが、下端筋の腐食速度を直線回帰により求めた結果、 $2.3 \times 10^3 \text{ mm/year}$ の値が得られた。この値は 2. (2) に示した既往の研究における腐食速度に近い。
- ii) 上端筋の腐食量は下端筋のそれに比べ相当に小さく、1/10 程度であった。これは上端筋に対する中性化残りが 5~13mm 程度と比較的大きな値であったためと思われる。

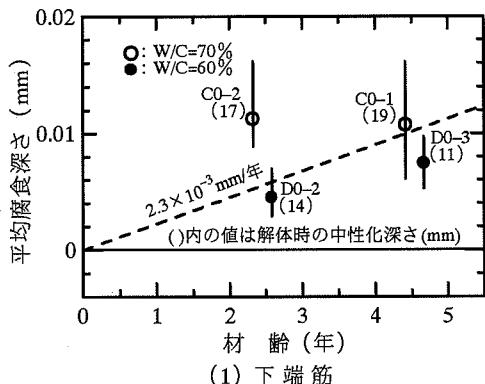
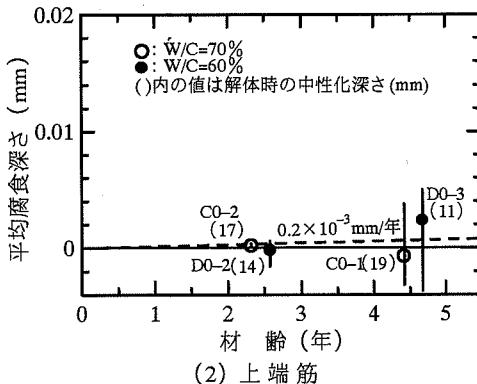


図-6 鉄筋腐食量の経時変化



(2) 上端筋

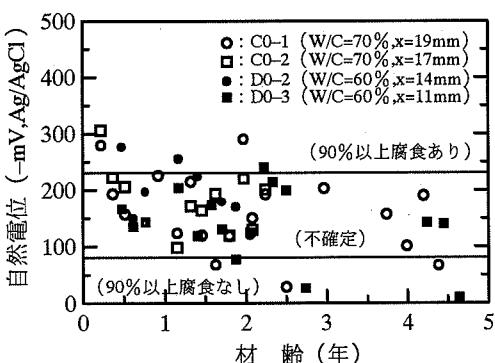


図-7 自然電位の経時変化

ii) 2. (2)に示したように、岩田ら⁷は鉄筋周囲に中性化領域と未中性化領域が存在すると、マクロセルの影響により鉄筋腐食が進行する可能性を指摘している。図-6において、材齢約2.5年で測定した中性化深さ17mmと14mmの下端筋の腐食深さを比較すると、前者の場合のほうが多い。供試体のかぶりは15mm、鉄筋径9mmであり、中性化深さ17mmの場合には鉄筋周囲に中性化領域と未中性化領域が存在するため、マクロセルの影響により鉄筋腐食量が増加したとも考えられる。しかし、材齢約4.5年で測定した中性化深さ19mmと11mmの場合には、両者間の腐食量の差は減少している。

また、i)に示したように4点のデータから直線回帰により求めた腐食速度は、森永がモルタル断面全域を中性化させた状態で求めた腐食速度と概ね一致している。以上の結果から、中性化が鉄筋近傍に進行した段階では、マクロセルの影響により鉄筋腐食が進行する可能性も考えられるが、材齢とともにその影響は小さくなると推測される。

なお、上記図-6においては水セメント比が60%

と70%の場合を比較しているが、後述のように、本暴露試験における鉄筋腐食速度は水分の影響を受けていると考えられているため、ここでは水セメント比の相違を考慮せずに検討している。

(5) 自然電位の経時変化

各供試体の自然電位を暴露期間中に適宜測定した。(3)e)に示したとおり、自然電位は供試体の表裏面の各面当たり65点測定した。図-7に解体供試体裏面における65点の測定値の平均値の経時変化を示した。

水セメント比が70%で、解体時の中性化深さが下端筋のかぶり以上であったC0-1およびC0-2供試体の自然電位は、暴露初期においてASTM C-876に示される「90%以上腐食あり」の卑な電位を示したが、材齢とともに電位が貴化する傾向にあった。また、水セメント比が60%で、解体時の中性化深さが下端筋のかぶり程度であったD0-2供試体の自然電位も上記のC0-1およびC0-2供試体と同様の経時変化を示した。

一方、水セメント比が60%で解体時の中性化深さが11mmとやや小さいD0-3供試体の自然電位は暴露期間中ほぼ「不確定」の範囲を推移した。なお、表面側から測定した自然電位の経時変化も図-7の結果とほぼ同様であった。

(6) 分極抵抗等の経時変化

a) 交流インピーダンス法による測定結果

図-8に測定結果の代表例をBode線図とCole-coleプロット⁹により示す。図-8には材齢が数箇月程度の場合と、3年程度の場合を示した。図中の(1)はC0-1供試体、(2)はD0-4供試体の結果である。C0-1供試体の水セメント比は70%，解体時の中性化深さは19mmで、下端筋の中央付近まで中性化が進行している。解体時の下端筋の平均腐食深さは約0.01mm(図-6参照)である。D0-4供試体の水セメント比は60%である。

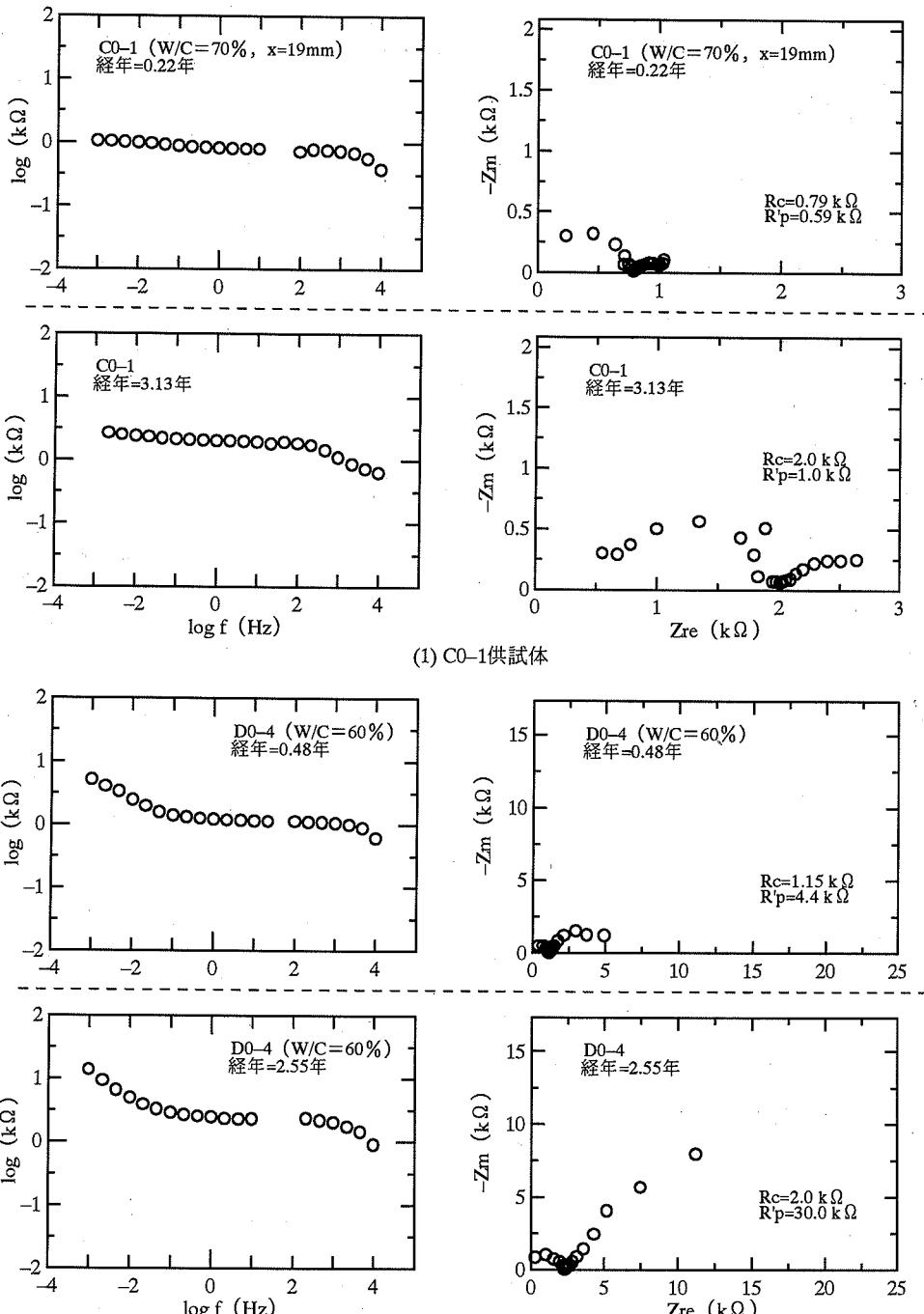
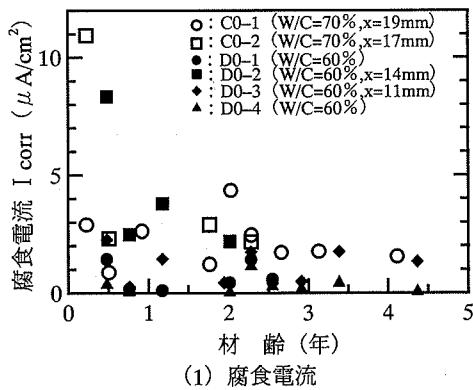


図-8 交流インピーダンス法による測定結果

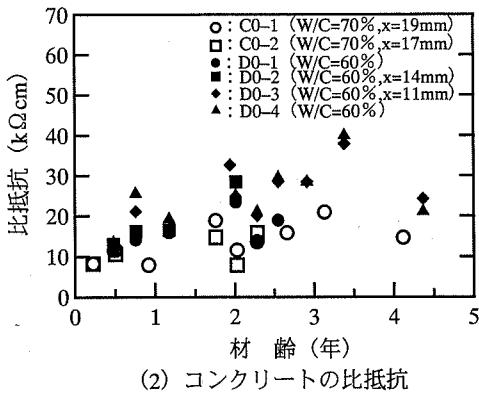
この供試体は解体していないため、中性化深さ、鉄筋腐食量は不明であるが、自然電位は「不確定」～「90%以上腐食なし」を推移しており、腐食はほとんど生じていないものと推測される。

図-8の結果から、以下の点がわかる。

i) C0-1 供試体の分極抵抗 R'_p は $1\text{ k}\Omega$ 以下であるのに対して、D0-4 供試体の分極抵抗は相当に大きく、Bode 線図の低周波部の台地は認められない。この結果は鉄筋の腐食状況、自然電位の経時変化とも整合している。なお、Cole-cole プロットに見られ



(1) 腐食電流



(2) コンクリートの比抵抗

図-9 腐食電流等の経時変化（交流インピーダンス法）

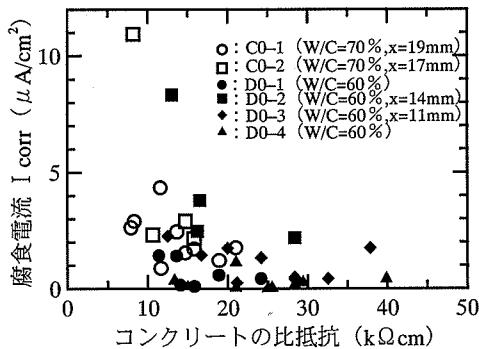


図-10 コンクリートの比抵抗と腐食電流の関係

る高周波側の半円は、かぶり部分のコンクリートのインピーダンス特性を反映したものであると考えられる¹¹⁾。

ii) いずれの供試体においても、分極抵抗 R_p' およびコンクリート抵抗 R_c は経時とともに増加する傾向が伺われる。この点は以下で詳細に検討する。

b) 腐食電流およびコンクリートの比抵抗の経時変化

交流インピーダンス法による測定結果から、式(2), (3)により求めた腐食電流およびコンクリートの比抵抗の経時変化を図-9に示す。これより、以下の点がわかる。

- i) C0-1, C0-2, D0-2 供試体のように中性化が鉄筋位置（下端筋かぶり: 15mm）あるいはその近傍まで進行している場合には、暴露初期において比較的大きな腐食電流を示すこともあるが、材齢とともに腐食電流は減少する傾向にある。
- ii) 暴露期間中、自然電位が「不確定」～「90%以上腐食なし」を推移した供試体(D0-1, D0-3, D0-4)は、腐食電流も比較的小さな値を示した。
- iii) コンクリートの比抵抗は材齢とともに増加する傾向にある。水セメント比が 70%の供試体では、暴露初期に $10 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ 程度の値を示すが、徐々に

$20 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ 近くまで増加している。水セメント比が 60%の場合にはさらに増加傾向が明確であり、 $20\sim40 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ 程度にまで増加している。

c) コンクリートの比抵抗と腐食電流の関係

コンクリートの比抵抗と腐食電流の関係を図-10に示す。これより、両者は概ね反比例の関係にあり、佐伯ら⁴⁾の提案式と同様の結果となった。

一般に、コンクリートの比抵抗値はコンクリート中の含水量に大きく左右され、比抵抗値が小さい場合には、含水量が多いと推測される¹²⁾。また、含水量の増加は酸素の拡散速度の低下をもたらす。すなわち、含水量の増加は鉄筋腐食速度を増加させる作用と低下させる作用の両方を有しているが、図-10ではコンクリートの比抵抗が小さい（すなわち、含水量が多い）ほど、鉄筋腐食速度が大きい結果となっている。これより、佐伯ら⁴⁾が指摘したように、本暴露試験においても、鉄筋の腐食速度が主としてコンクリートの電気抵抗に律速されていると考えられる。

なお、図-10に示した腐食電流は佐伯らの提案式から求まる値よりも相当に大きい。この理由には、交流インピーダンス法により測定する場合の電流の拡がる範囲の算定法等が影響していることが考えられる。

(7) 上・下端筋間の電流

D0-4 供試体の上・下端筋間の電流を測定した結果を図-11に示す。D0-4 供試体の水セメント比は 60%である。解体していないため、中性化深さは不明であるが、前述の自然電位あるいは交流インピーダンスの測定結果から、鉄筋腐食はほとんど進行していないと判断されるため、上・下端筋間の電流は非常に小さい。

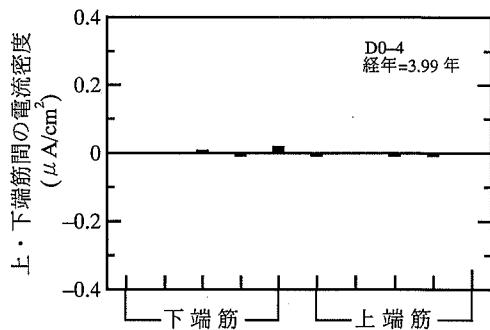
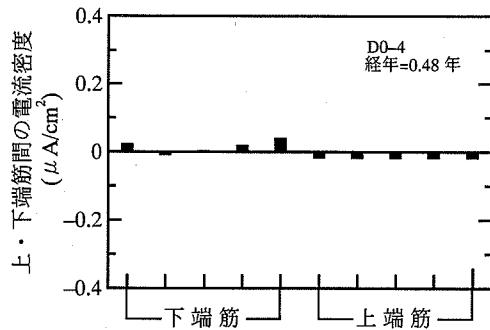


図-11 上・下端筋間の電流

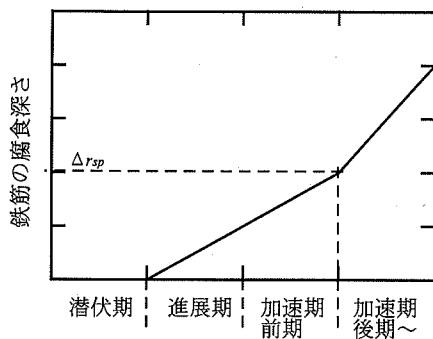


図-12 鉄筋の腐食過程

4.劣化予測

(1) 鉄筋の腐食過程

a) 鉄筋腐食過程のモデル化

既往の研究および前節までの結果を基に、中性化の影響を受ける場合の鉄筋腐食過程をモデル化すると図-12 のようになる。図中の各鉄筋腐食過程は以下のように考えることができる。

b) 潜伏期

潜伏期は中性化の影響による鉄筋腐食が生じ始めるまでの期間である。一般に、鉄筋の腐食開始時期は中性化残りに影響され、表-1 に示したように既往の研究においても 0~10mm の中性化残りに達した時点で、鉄筋が腐食し始めるとしている。また、筆者らの暴露試験においても、図-6 に示すように、中性化残りが 5~13mm である上端筋の腐食速度は下端筋のそれの 1/10 程度と相当に小さく、上端筋は潜伏期にあると判断してもよいと考えられた。

以上より、中性化残りが 10mm に達した段階で、鉄筋が腐食し始めるものと仮定する。

c) 進展期

進展期は、鉄筋の腐食開始からコンクリート表面

に腐食ひび割れが生じるまでの期間である。

腐食ひび割れが生じる際の鉄筋の腐食量に関しては、横関ら^{13),14)}がコンクリートの引張軟化、クリープなどを考慮した非線形 FEM 解析結果を基に定式化している。筆者ら¹⁵⁾はこの提案式をさらに簡略化し、鉄筋純間隔が鉄筋半径よりも大きい場合には、腐食ひび割れが生じる際の鉄筋の腐食深さ Δr_{cr} を概ね式(5)で表せるとした。

$$\Delta r_{cr} = 13(c/\phi) \times 10^{-3} \quad (5)$$

ここに、 Δr_{cr} : 腐食ひび割れが生じる際の鉄筋の腐食深さ (mm)
 c : かぶり
 ϕ : 鉄筋径

鉄筋の腐食速度算定式に関しては、2.(2)に示したように、森永の提案式と佐伯の提案式がある。図-1, 2 に示すように、森永の提案式によれば、一般環境(温度 20°C, 湿度 70%)における鉄筋腐食速度は 2×10^{-3} mm/年程度、佐伯の提案式によれば、モルタルの比抵抗が 10~20 k·Ωcm の範囲で、 $(1\sim6) \times 10^{-3}$ mm/年程度となる。また、図-6 に示すように、筆者らの暴露試験では腐食量の多い下端筋の腐食速度の平均値が 2.3×10^{-3} mm/年であった。以上の結果を総合的に勘案すると、中性化が進行した段階における平均的な腐食速度としては 3×10^{-3} mm/年程度の値を用いればよいと判断される。なお、腐食速度の設定に際してはコンクリートの水セメント比等の影響を考慮していない。これは、3.(6)c)に記述したように、腐食速度は主としてコンクリートの比抵抗に律速され、比抵抗はコンクリート中の含水量に大きく影響されること、本論文における暴露試験は供試体を屋外に暴露したものであり、通常の構造物と同程度の含水状態にあると推測されること等による。また、3.(5), (6)の自然電位あるいはむき地抵抗の測定結果からは、腐食速度が材齢とともに減少する傾向が伺われるが、

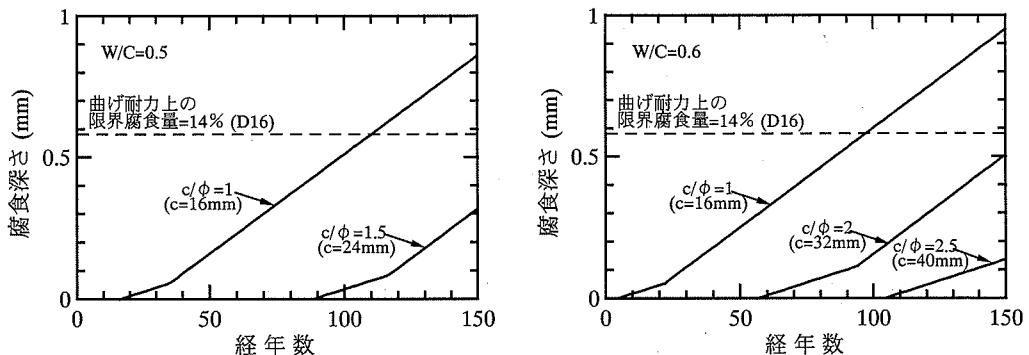


図-13 劣化予測の例

ここでは安全側の劣化予測を行う観点から、図-6に示した腐食量の経時変化から求まる平均的な腐食速度を劣化予測に用いることとした。

以上の腐食ひび割れが生じる際の鉄筋腐食量と、鉄筋腐食速度から進展期の期間が算定される。例えば、 c/ϕ が 2 の場合には、 $13 \times 2 \times 10^3 / (3 \times 10^{-3}) = 8.7$ 年となる。

d) 加速期前期

加速期前期は、腐食ひび割れ発生からコンクリートの剥離・剥落が生じるまでの期間である。

現状では、コンクリートの剥離・剥落が生じる際の鉄筋腐食量は必ずしも明確でないが、筆者らはひび割れを有する鉄筋コンクリート供試体を一般環境と考えられる新潟県塩沢町に約 40 年間暴露した結果^{15), 16)} および榎田ら¹⁷⁾の実験結果を参考に、剥離・剥落が生じる際の鉄筋の腐食深さを $56(c/\phi) \times 10^{-3}$ mm に設定した。図-12 には、この鉄筋腐食腐食深さ Δr_{sp} を示してある。

加速期前期における腐食速度も必ずしも明確でないが、以下の点を考慮して、進展期の腐食速度と同一とした。

i) 上述の新潟県塩沢町における暴露試験から得られた腐食速度は、進展期と加速期前期においてほぼ同一で、 2×10^{-3} mm/年程度と推測された。また、この腐食速度の値は c) に示したように、中性化の影響を受ける場合の進展期の腐食速度と同程度である。以上から、中性化の影響を受ける場合も進展期と加速期前期の腐食速度には大差がないと推測した。

ii) 腐食ひび割れが生じた時点でのひび割れ幅は非常に小さく、中性化のみの影響を受ける一般環境では、腐食ひび割れが生じた直後から鉄筋腐食が加速されるとは考え難い。

以上のコンクリートの剥離・剥落が生じる際の鉄筋の腐食深さと、鉄筋腐食速度から加速期前期の期間

が算定される。例えば、 c/ϕ が 2 の場合には、 $(56 \cdot 13) \times 2 \times 10^{-3} / (3 \times 10^{-3}) = 29$ 年となる。

e) 加速期後期以降

加速期後期以降においては、かぶりコンクリートの鉄筋腐食に対する保護能力は、ほとんど失われると思定される。したがって、この期間の腐食速度には裸鋼材の腐食速度を用いることとした。本論では、建設省によって行われた鋼材の暴露試験結果¹⁸⁾を基に、裸鋼材の腐食速度を 7×10^{-3} mm/年と推測した^{15), 16)}。

(2) 試算例

(1) に示した仮定の基に劣化予測を行った例を図-13 に示す。試算条件は以下のとおりである。

- i) コンクリートの水セメント比は 0.5 あるいは 0.6 とし、中性化深さを「コンクリート標準示方書（維持管理編）」に示された式(6)により算定した。

$$y = R(-3.57 + 9.0W/B) \sqrt{t} \quad (6)$$

ここに、 y : 中性化深さ (mm)

W/B : 有効水結合材比

$$= W/(C+k \cdot Ad)$$

W : 単位体積当たりの水の質量

B : 単位体積当たりの有効結合材の質量

C : 単位体積当たりのポルトランドセメントの質量

Ad : 単位体積当たりの混和材の質量

R : 環境の影響を表す係数 (図-13 では $R=1.6$ として算定)

k : 混和材の影響を表す係数

- ii) 鉄筋は D16 とし、かぶりと鉄筋径の比 c/ϕ を 1 ~ 2.5 の範囲で検討した。 c/ϕ が 1 の場合のかぶりは 16mm、2.5 の場合のかぶりは 40mm となる。

- iii) 鉄道構造物の維持管理マニュアルである「建造物保守管理の標準(案)同解説コンクリート構造¹⁹⁾」においては、橋梁への列車入線に対して、設

計曲げモーメント M_d に対する曲げ耐力 M_u の比である破壊安全度 M_u/M_d を 1.4 以上確保するように規定している。この条件から求まる限界腐食量を図-13 中に示した^{15),16)}。

図-13 の結果から以下の点がわかる。

- i) 潜伏期間は中性化残りが 10mm に達するまでの期間であるので、当然ながら水セメント比 W/C が小さく、かぶり c が大きいほど、その期間が長くなる。
- ii) かぶりが小さい $c/\phi=1$ の場合でも、曲げ耐力上の限界腐食量に達するのは経年 100 年程度であり、耐力が問題になることは少ないと考えられる。
- iii) 中性化の進行が速く、かぶりが小さい場合には、コンクリートの剥離・剥落が生じる程度に鉄筋腐食が生じることも想定されるため、適切な時期に補修等の対策を施すことが必要になると考えられる。

5.まとめ

本論の結果を以下にまとめる。

- 1) 既往の研究から、鉄筋が腐食し始める中性化残りは 0~10mm 程度であることを確認した。
また、腐食開始後の腐食速度は温度、湿度、あるいはこれらの関数であるコンクリートの比抵抗によって定まり、森永の提案式によれば、一般環境(温度 20°C、湿度 70%)における鉄筋腐食速度は 2×10^3 mm/年程度、佐伯らの提案式によれば、モルタルの比抵抗が $10 \sim 20 \text{ k}\cdot\Omega\text{cm}$ の範囲で、 $(1 \sim 6) \times 10^3$ mm/年程度となることが把握された。
- 2) 格子状に配筋した供試体(かぶり: 15mm、鉄筋径: Φ9、W/C: 60,70%)の中性化深さが 10~20mm 程度になるまで促進中性化させた後に、鉄道総研構内に約 5 年間屋外暴露した供試体の調査から下記の結果が得られた。
 - a) 供試体の下端筋、上端筋の腐食面積率は一部データを除き、経年とともに増加する傾向にあり、また、下端筋の腐食面積率のほうが上端筋のそれよりも大きい値を示した。
 - b) 鉄筋腐食量は下端筋の方が相当に大きく、上端筋の概ね 10 倍程度であった。下端筋の腐食量から求めた平均的な腐食速度は 2.3×10^3 mm/年で、森永あるいは佐伯らの提案式により求まる値に近かった。経年 2.5 年程度で調査した供試体の一部には腐食量が相当に大きいものもあり、マクロセルの影響も想定されたが、経年 4.5 年程度で調査し

た結果ではこのような傾向は認められず、経年とともにマクロセルの影響は小さくなるものと推測された。

- c) 暴露期間中に自然電位を経時に測定した結果、暴露初期においては ASTM C-876 に示される「90%以上腐食あり」の卑な電位を示す場合もあるが、経年とともに貴な電位に移行する傾向にあることがわかった。
- d) 交流インピーダンス法により分極抵抗、コンクリート抵抗の経時変化を調べた結果、鉄筋腐食が著しい供試体では分極抵抗が小さく、鉄筋腐食と分極抵抗には相関が認められること、分極抵抗とコンクリート抵抗は経時に増大する傾向にあること、分極抵抗から求めた腐食電流とコンクリートの比抵抗は概ね反比例の関係にあること等がわかった。
- (3) 既往の研究および暴露試験結果等を基に、鉄筋の腐食過程をモデル化し、劣化予測の試算例を示した。

参考文献

- 1) 土木学会 : コンクリート標準示方書(維持管理編), 2001.1.
- 2) 嵩英雄、和泉意登志 : 既存RC構造物におけるコンクリートの中性化と鉄筋腐食について(その1~3), 日本建築学会学術講演梗概集, 1983.
- 3) 横野紀元 : 鉄筋コンクリート構造物の耐久性, 鹿島出版会, 1988.
- 4) 佐伯竜彦、大即信明、長瀧重義 : 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.
- 5) 高橋修平、Qi Lukuan、高木言芳、閔 博 : コンクリートの中性化による内部鉄筋の腐食性状について, 土木学会第53回年次学術講演会, 第V部, 1998.
- 6) 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予測に関する研究, 東京大学博士論文, 1986.
- 7) 岩田亮、Qi Lukuan、閔博 : 中性化したコンクリート中における鉄筋腐食機構の電気化学的考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.1, pp.181~186, 2000.
- 8) 後藤信弘、松岡和己、伊藤敏 : 交流インピーダンス法によるコンクリート中の鉄筋腐食モニタリング, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.1, pp.527~532, 1990.
- 9) 土木学会 : 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, 1997.12.
- 10) 岡田清、小林和夫、宮川豊章、本田哲 : 分極抵抗法を用いた鉄筋腐食モニタリングによる補修基準について, 第5回コンクリート工学年次講演会講演論文集, pp.249~252, 1983.

- 11) 横田優, 浮田和明, 幸英昭: 交流インピーダンス法によるコンクリート中の鉄筋腐食評価, 土木工学における非破壊評価シンポジウム講演論文集, 土木学会, No.38, pp.241~246, 1991.
- 12) ACI Committee 222 : Corrosion of Metals in Concrete, ACI Journal, 82, No.1, Jan–Feb. 1985.
- 13) 日本コンクリート工学協会: コンクリート構造物の補修工法研究委員会報告書(III), 1996.10.
- 14) Yokozeki, K., Okada, K., Motohashi,K., and Tsutsumi,T. : A Rational Model to Predict Service Life of RC Structures in Marine Environment, Forth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, 1997.
- 15) 鳥取誠一: 鉄筋腐食に関する暴露試験等に基づいたコンクリート構造物の劣化予測, 京都大学博士論文, 2002.
- 16) 鳥取誠一, 土田伸治, 宮川豊章: ひび割れと鉄筋腐食に関する暴露試験に基づいたコンクリート構造物の劣化予測, コンクリート工学論文集, 第10巻第3号, pp. 1~15, 1999. 9.
- 17) 桜田佳寛, 原謙治, 松林裕二, 田中齊ほか: 表面被覆材および浸透性吸水防止材による鉄筋コンクリートの塩害劣化抑制効果に関する実験, 日本建築学会構造系論文報告集, 第433号, pp.1~10, 1992.3.
- 18) 建設省土木研究所: 耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書(X), 1989.12.
- 19) 鉄道総合技術研究所: 建造物保守管理の標準・同解説 コンクリート構造, 1987.9.

(2003. 6. 12受付)

DETRIORATION PREDICTION OF CONCRETE STRUCTURES CONCERNING REBAR CORROSION DUE TO CARBONATION

Seiichi TOTTORI and Toyoaki MIYAGAWA

In order to estimate the rebar corrosion rate in carbonated concrete, reinforced concrete specimens acceleratedly carbonated were subjected to a 5-year exposure test. In concrete specimens, rebars were arranged in lattice direction. Test results showed that the average corrosion rate of the lower part of lattice rebars was about 0.002mm/yr. Based on the above-mentioned test results and the past references, deterioration prediction of concrete structures was carried out. As the result, it was considered that bearing capacity of concrete structures is not seriously hampered by rebar corrosion. However, the possibility of deterioration such as the spalling of cover concrete is rather high, as carbonation precedes.