

# 海岸近くの大気中に位置するコンクリート 構造物の鉄筋腐食進行評価手法

松村卓郎<sup>1</sup>・金津努<sup>1</sup>・西内達雄<sup>1</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 電力中央研究所 構造部 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646番地)

鉄筋の腐食速度を測定する方法として電極を埋設する交流インピーダンス法を新たに考案し、適用性を評価し良好な結果を得た。この方法を用いて、コンクリート中の塩分濃度、かぶり、相対湿度を要因とした14ヶ月間の室内腐食実験を行い、これらの要因が腐食速度に及ぼす影響を定量的に把握し、実験結果を基に、鉄筋腐食速度評価式を提案した。実際の環境中に適用するため降雨の影響を考慮できる指標を組み込んだ腐食進行評価手法を提案し、沖縄の海岸近くに暴露した試験体の腐食進行評価を行った。その結果、実際の腐食量が加速的に増大する様子を比較的良好に評価することができた。

*Key Words* : reinforcement corrosion, concrete, corrosion rate, salt-injury, AC impedance method

## 1. はじめに

コンクリート構造物の性能は環境作用により経年的に変化するという認識は最早一般的であり、所定の期間耐久性を確保することを目的とした設計法についてこれまで幾つかの試案が示されてきた<sup>1), 2)</sup>。また、最近では性能照査型の設計法の枠組みについての議論が進められ、耐久性能も要求性能の一つとして位置づけられようとしている。すなわち、構造物の設計に時間の概念を導入し、性能の経年的な変化を考慮することで設計をより合理的に行おうとする動きが活発である。しかし、これらの動きはまだ大きな枠組みや考え方を示そうとする段階であり、具体的な設計法として確立するためには、今後多くの課題に取り組む必要がある。なかでも、時間経過に伴う性能の変化の評価手法は確立されておらず、今後の大きな課題の一つである。

塩分による鉄筋腐食はコンクリート構造物の性能を経年的に低下させる要因の一つである。特に海岸付近の構造物においては支配的な劣化要因となる場合が多く、火力発電所などの臨海土木設備についても同様である。これらの設備に対して経年変化を考慮した合理的な設計を行うためには、塩分による鉄筋腐食の進行と時間との関係を評価(予測)する手法が不可欠である。

これまで、鉄筋腐食が発生するまでの期間については多くの検討がなされてきた。すなわち、外部からの塩化物イオンのコンクリート中への浸透は、濃度差による拡散現象として捉えることができ<sup>3) 4)</sup>、コンクリート中の見かけの拡散係数を用いて、塩化物イオンの浸透を評価

できることが分かっている。腐食の発生する限界塩化物イオン濃度についても多くの報告<sup>5), 6)</sup>があり、この濃度に達するまでの期間を求めることにより鉄筋腐食が発生するまでの期間をある程度予測することが可能である。

一方、腐食が発生した後の鉄筋腐食の進行評価手法についての検討は少ない。先ず、実験による腐食速度評価については、森永の提案<sup>7)</sup>、柘田らの提案<sup>8)</sup>があるが、建築物を対象としているため、かぶりの比較的大きな土木構造物へそのまま適用することは難しいと考えられる。また、鉄筋腐食の進行をモデル化し解析的に腐食速度を評価する試みもある<sup>9)</sup>が、使用する物性値等が実験により容易に得られないなど、実用的な方法とは言い難い。

本研究では、埋設電極を用いた交流インピーダンス法による腐食速度測定(モニタリング)手法を提案し、この手法を用いて予め塩分を混入した試験体の腐食実験を行い、同手法の適用性を検証するとともに、一定の塩化物イオン濃度のコンクリート中における鉄筋の腐食速度を実験的に把握した。さらに、実験結果を基に腐食速度評価式を提案し、評価式を用いて海岸近くに暴露した試験体の腐食進行評価を行い、実測値と比較し評価手法の適用性を検証した。

## 2. 埋設電極を用いた交流インピーダンス法の提案

### (1). 検討の目的

交流インピーダンス法はコンクリート表面に電極を設置し、鉄筋と電極の間に微小な交流電流を印加し、鉄筋

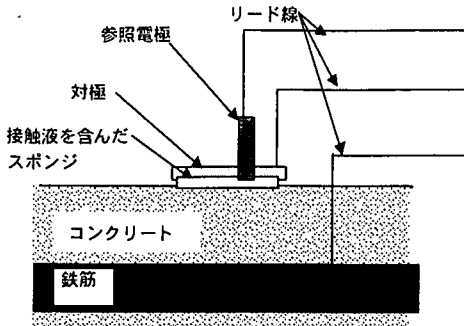


図-1 通常の交流インピーダンス法の測定方法

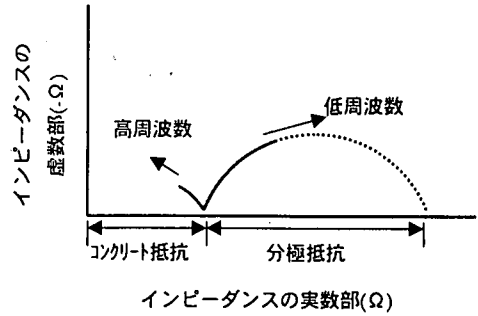


図-2 インピーダンス軌跡の形状

の腐食速度に関する抵抗値(分極抵抗)を測定する方法である。この方法では、電極に近い鉄筋表面に電流が多く流れるため、測定値にはコンクリート表面に近い鉄筋表面の情報が偏って含まれている可能性がある。また、腐食速度に関する測定値が低い周波数により得られるため、精度の高い測定を行うためには通常1時間以上の時間を要し、環境条件によっては電極とコンクリート間の接触液が乾燥し、測定値に影響を与える可能性がある。

本研究では、実験により腐食速度を把握することを目的とするため、まず、精度良く環境条件に左右されず腐食速度を測定できる方法として、コンクリート中に鉄筋を囲むように電極を埋設する方法を考案した。

## (2) 埋設電極を用いた交流インピーダンス法の概要

### a) 交流インピーダンス法の概要

交流インピーダンス法の測定は、通常、図-1に示すように、測定対象である鉄筋の他に、電位を測定するための電極(参照電極)、電流を流すための電極(対極)を使用する。参照電極で鉄筋の電位を測定し、この電位を変化させるように対極と鉄筋間に電流を流しインピーダンスを測定する。測定されたインピーダンスを複素平面上に周波数を変数として描くと、様々な形状の軌跡が得られるが、概念的には概ね図-2のような軌跡(Cole-Coleプロット)が得られる。低周波数側に現れる半円状の軌跡の直径が腐食速度と関係する分極抵抗である<sup>10)~14)</sup>。しかし、完全な半円が測定されることは希であり、得られた軌跡から外挿して分極抵抗を求めることが多い。また、最も高周波数側でインピーダンスの虚数成分が最小となる点におけるインピーダンスの実数成分は、コンクリート抵抗を表している<sup>15)</sup>。

分極抵抗( $R_p$ )の逆数は、腐食反応に伴い流れる電流(腐食電流,  $I_{corr}$ )と次式の関係がある。

$$I_{corr} = k \cdot (1/R_p) \quad (1)$$

ここに、 $I_{corr}$  : 腐食電流 ( $A/cm^2$ )

$k$  : 換算係数 ( $V$ )

$R_p$  : 分極抵抗 ( $\Omega \cdot cm^2$ )

ここで、定数 $k$ は金属の種類と環境条件により異なる定数であり、コンクリート中の鉄筋の値については、これまでに $0.017 \sim 0.050$  ( $V$ )の範囲の値が報告<sup>6), 16)</sup>されているが、十分に明らかにされているとは言えない。

式(1)は腐食電流の値であるので、電流が全て  $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$ の反応によると仮定すると、式(2)に示すファラデーの法則により式(3)を用いて分極抵抗から腐食速度を算出することができる。

$$I_{corr}/Fa = V_{corr}/(M/2) \quad (2)$$

ここに、 $Fa$  : ファラデー定数 ( $96500 C/mol$ )

$M$  :  $Fe$ の原子量 ( $55.8$ )

$V_{corr}$  : 腐食速度 ( $g/cm^2/sec$ )

$$V_{corr} = \alpha (1/R_p) \quad (3)$$

$\alpha = (M/2)(k/Fa)$  ( $\Omega \cdot g/sec$ )

本研究では、定数 $\alpha$ を実験により求め、この値を用いて、式(3)により腐食速度を算出することとした。腐食速度、分極抵抗はそれぞれ時間の関数であると考え、式(3)の両辺を時間で積分すると、腐食量と分極抵抗の逆数の時間積分値の間には式(4)の関係が導かれ、定数 $\alpha$ を実験的に求めることが出来る。

$$G = \alpha \int (1/R_p) dt \quad (4)$$

ここに、 $G$  : 腐食量 (腐食減量) ( $g/cm^2$ )

### b) 埋設型電極の提案

交流インピーダンス法で使用する電極を、全て埋設するように、図-3に示す埋設電極を考案した。対極は4本のステンレス製の線材( $SUS316$ ,  $\phi 4mm$ )を2本の同材質のステンレス製の線材で接続した形状である。電流が鉄筋表面に均等に流れるように、鉄筋を囲む位置に平行に配置し、鉄筋の長さに対応する部分以外は電流が流れないように絶縁テープで被覆した。参照電極は白金の線材( $\phi 0.5mm$ )を用い、鉄筋近傍に配置した。

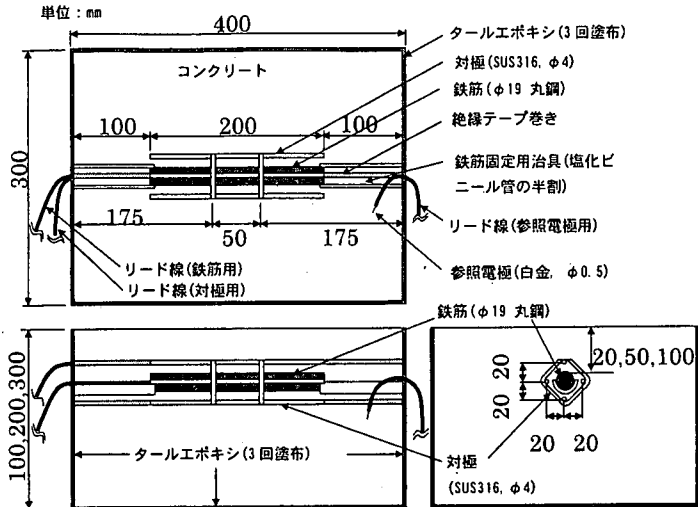


図-3 埋設電極を使用した試験体の形状

表-2 コンクリートの配合

相骨材の 最大寸法 (mm)	スラブ の範囲 (cm)	空気量 の範囲 (%)	水セメント 比 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 C×0.25%
13	12±2.5	4±1	55	179	330	737	1038	0.825

\* )混和剤はAE減水剤

表-1 腐食速度評価実験の要因

要因	水準
混入塩化物イオン量 (kg/m <sup>3</sup> )	2, 4, 6, 8, 10
かぶり(cm)	2, 5, 10
相対湿度(%)	60, 80

\*)混入塩化物イオン量はかぶり2cmの場合6kg/m<sup>3</sup>、かぶり5cmの場合8kg/m<sup>3</sup>を上限とした。

### 3. 腐食速度評価実験

#### (1) 実験の概要

##### a) 実験の要因と条件

実験の要因は表-1に示すように、試験体に予め混入する塩化物イオン量、かぶりおよび相対湿度とした。塩化物イオン量は、海洋環境にあるコンクリート構造物の調査結果などを参考に、10kg/m<sup>3</sup>を最大値とした。かぶりは、土木学会コンクリート標準示方書設計編を参考に10cmまでとした。相対湿度は、我が国の各地の月別相対湿度(1961年~1990年の平均値)の年平均が64%~80%であること<sup>17)</sup>を参考に、相対湿度60%および80%の2種類に設定した。

実験の温度は40℃一定とした。我が国の各地の月別相対湿度(1961~1990の平均値)は5.7℃(釧路)から22.4℃(那覇)までの範囲で分布<sup>17)</sup>している。一方、日射を受けるコンクリートの温度は気温だけでなく日照量など

の影響を受け、気温よりも10℃~15℃程度高いことが報告されている<sup>18)</sup>。腐食反応は温度が高い方が速く進むことから、本研究では、最も気温の高い那覇の年平均気温を参考にし、コンクリートの温度が気温よりも高くなることを考慮し、実験の温度を40℃に設定した。

##### b) 試験体

実験に用いた試験体は、図-3に示すように、かぶりをそれぞれ2cm, 5cm, 10cmとした3種類である。同一試験要因について試験体は3体とし、この内1体の試験体を交流インピーダンス測定用とし、鉄筋と電極を埋め込んだものとした。他の2体は電極を埋め込まず、電極を埋め込んだことによる腐食への影響を把握するための試験体とした。試験体は1面のみを解放面とし、他の5面をタールエポキシ(JIS K 5664タールエポキシ樹脂塗料I種適合品)でシールした。

実験に用いた試験体のコンクリートの配合は、表-2に示す通りである。所定の塩化物イオン量に対応したNaCl(3.3, 6.6, 9.9, 13.2, 16.5kg/m<sup>3</sup>)を混入した塩水を、練混ぜ水として使用した。既往の研究では、鉄筋の腐食速度に対するコンクリートの水セメント比の影響は大きいことが知られている。しかし、コンクリート標準示方書施工編「海洋コンクリート」の環境区分に応じた水セメント比の最大値を参考に、水セメント比は55%1種類とした。単位セメント量は、同じく規定されている最小のセメント量である330kg/m<sup>3</sup>を選定した。

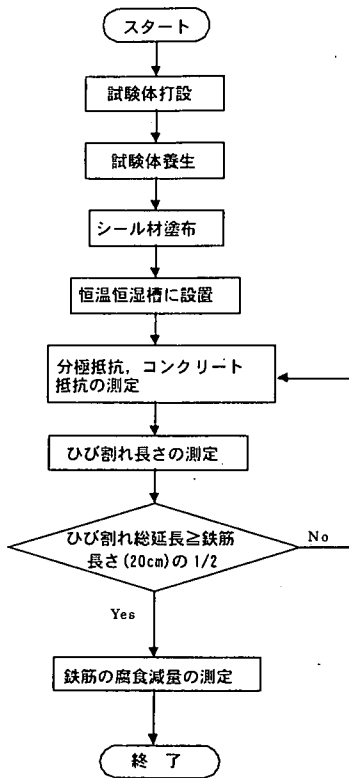


図-4 腐食速度評価実験の工程

セメントは普通ポルトランドセメントを用いた。細骨材は利根川鹿島産の川砂（比重：2.64，吸水率：0.76%，粗粒率：2.64），粗骨材は埼玉県秩父産の砕石（比重：2.69，吸水率：0.98%）を用いた。混和剤はAE減水剤を使用し，セメント重量に対して0.25%混入した。

試験体は打設1日後に脱型し，室内で1ヶ月間の湿空養生を行い，その後解放面以外の面のタールエポキシ塗布を3回行い（この期間20日間），試験に供した。

試験終了時（材令18ヶ月，相対湿度80%）のコンクリートの圧縮強度は，塩化物イオン濃度2，4，6，8，10kg/m<sup>3</sup>のものが，それぞれ35.3，38.7，38.5，41.8，41.2MPaであった。

### c) 実験の工程

実験の工程を図-4に示す。養生後の試験体を恒温恒湿槽（気温：40℃，相対湿度：60%および80%）内に静置し，交流インピーダンス法による測定を所定の間隔で行い，429日後に解体して鉄筋の腐食減量を測定した。ただし，交流インピーダンス法による測定後毎に，試験体のひび割れ状況を観察し，ひび割れの総延長が鉄筋長(20cm)の1/2になった試験体は随時解体し腐食減量を測定した。

交流インピーダンス法による分極抵抗および鉄筋と対極間のコンクリート抵抗（以降，コンクリート抵抗と称する）の測定は，測定周波数0.1mHz～10kHzの範囲を基本とし，印加電圧を自然電位±50mVで行った。測定は，

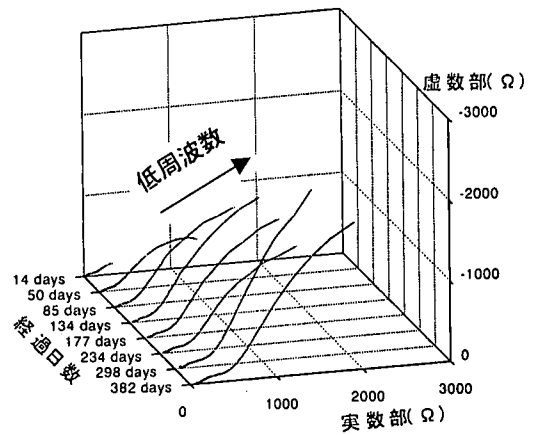


図-5 測定されたインピーダンス軌跡の例（かぶり5cm，塩化物イオン濃度4.0kg/m<sup>3</sup>）

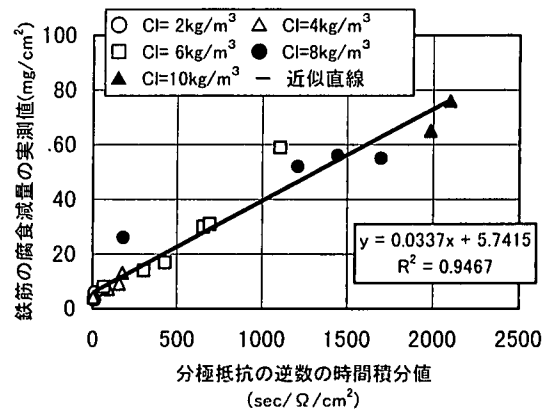


図-6 分極抵抗の逆数の時間積分値と腐食減量の関係

2週間～4週間の間隔で行い，装置はポテンシオスタット，周波数応答解析器を用いた<sup>13)</sup>。

腐食量の測定は，日本コンクリート工学協会「コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに規準（案）コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」<sup>19)</sup>を参考に，60℃の10%クエン酸二アンモニウム溶液に24時間浸漬した後，腐食生成物を除去した鉄筋の重量を測定し，腐食前の重量との差を腐食量とした。このとき非腐食部分の黒皮が除去されたため，別に健全な鉄筋を用いて上記と同じ方法により重量減少量を測定し，腐食による重量減少量から差し引いた値を腐食量とした。

### (2) 埋設電極を用いた交流インピーダンス法の適用性の検証

測定されたインピーダンスのCole-Coleプロットの例を図-5に示す。低周波数側に半円状の軌跡が現れており，

インピーダンスを良好に測定できていると判断できる。低周波数側の軌跡を半円として近似し、円が実数軸と交わる2点の距離を求め分極抵抗とした。

測定された分極抵抗の逆数の時間積分値を式(5)により計算し、腐食減量の実測値と比較した。結果を図-6に示す。図より両者の間には線形関係が認められ、本研究で提案した交流インピーダンス法により分極抵抗を精度良く測定できることが確認できた。この近似直線の傾き0.0337を用いて、式(6)により分極抵抗から腐食速度を算出できる。

$$S = \sum \Delta S_n \quad (n=1 \cdots N) \quad (5)$$

$$\Delta S_n = (1/R_{t_n} + 1/R_{t_{n-1}})(t_n - t_{n-1})/2$$

ここに、S:分極抵抗の逆数の時間積分値 (sec/Ω/cm<sup>2</sup>)

ΔS<sub>n</sub>:時刻t<sub>n-1</sub>から時刻t<sub>n</sub>までの間の分極抵抗の逆数の時間積分値 (sec/Ω/cm<sup>2</sup>)

R<sub>t<sub>n</sub></sub>:時刻t<sub>n</sub>に測定された分極抵抗 (Ω・cm<sup>2</sup>)

t<sub>n</sub>:n回目の測定時刻 (sec)

N:最大測定回数

$$V_{corr} = 0.0337(1/R_p) \quad (6)$$

ここに、V<sub>corr</sub>:腐食速度 (mg/cm<sup>2</sup>/sec)

R<sub>p</sub>:分極抵抗 (Ω・cm<sup>2</sup>)

ここで、得られた比例定数αの値は0.0337であり、この値は筆者らがこれまで報告<sup>1,4)</sup>した値0.0111と比較すると大きな値である。これは、埋設型電極を用いたことにより、鉄筋周方向の情報がより均一に得られたためと考えられる。これまでの報告では、コンクリート表面側の分極抵抗(これは鉄筋の平均的な分極抵抗より小さい)が主に測定されていたため、ある一定の腐食速度(すなわちV<sub>corr</sub>)に対してその係数αも小さく評価されていたものと考えられる。

以上のことから、埋設電極を用いた交流インピーダンス法の適用性は良好であり、同手法により鉄筋の腐食速度を精度良く測定できると考えられる。

### (3) 腐食速度評価

#### a) ひび割れおよび腐食状況

全試験体72体の内、塩化物イオン濃度が比較的高い試験体12体に腐食によると考えられるひび割れが発生した。これらの試験体はひび割れ総延長が鉄筋長の1/2に達したため試験期間終了前に解体した。

全ての鉄筋に腐食が観察された。また、同一要因の3体の試験体の腐食減量は同程度であり、電極を埋設した試験体とそうでない試験体の腐食減量に大きな違いはなかった。したがって、試験体に埋込んだ電極および交流インピーダンス測定による鉄筋腐食への影響はほとんど無いと考えられた。

なお、解体時に、対極と鉄筋の隙間にもコンクリートが十分に充填されていることを確認した。

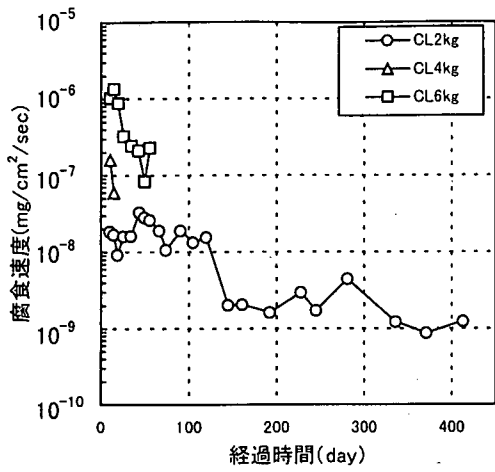
#### b) 腐食速度に及ぼす各種要因の影響

分極抵抗から算出した腐食速度の測定結果を図-7に示す。全体的な傾向として、塩化物イオン濃度が2.0~6.0kg/m<sup>3</sup>の範囲では、かぶり、相対湿度に拘わらず、塩化物イオン濃度が増大すると腐食速度は著しく増大しており、腐食速度に及ぼす塩化物イオン濃度の影響が非常に大きいことが分かる。しかし、塩化物イオン濃度が6.0kg/m<sup>3</sup>を越えると、塩化物イオン濃度の増大に伴う腐食速度の増大傾向は小さくなり、塩化物イオン濃度の腐食速度に及ぼす影響が小さくなっているようである。

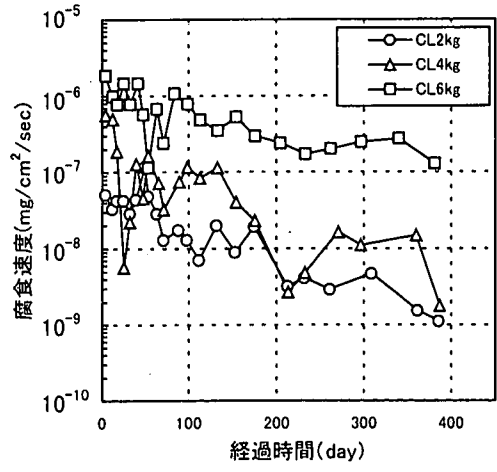
同じく図-7によれば、腐食速度は時間の経過に従い減少する傾向が認められる。時間経過と共に腐食速度が減少していく傾向は、必ずしも明確ではないが、かぶりが小さいほど、相対湿度が小さいほど強い。また、塩化物イオン濃度によって、初期(経過時間50日程度まで)における腐食速度の経時変化の性状が異なる。塩化物イオン濃度が6.0kg/m<sup>3</sup>未満では、初期における腐食速度も減少傾向にあるが、6kg/m<sup>3</sup>以上では増大した後減少する傾向が認められる。

コンクリート抵抗と経過時間の関係を図-8に示す。コンクリート抵抗の逆数の対数は経過時間の平方根とほぼ線形関係が認められる。コンクリート抵抗の増加傾向はかぶりが小さいほど、相対湿度が小さいほど強い傾向がある。また、塩化物イオン濃度の影響は明確に現れていない。コンクリート抵抗は主として塩化物イオン量および水分量により影響を受けると考えられるが、塩化物イオン濃度の影響が明確には認められないことから、経時的なコンクリート抵抗の増加は、水分量の減少、すなわちコンクリートの乾燥が主な原因と考えられる。

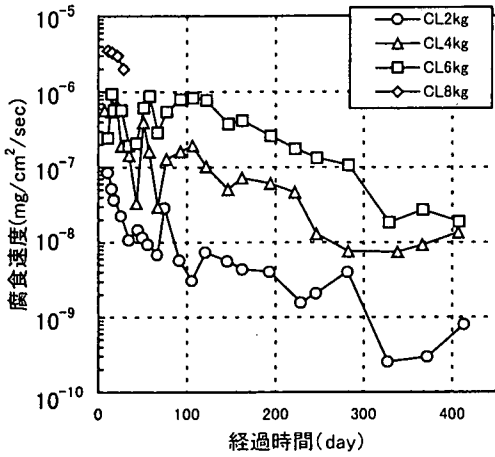
コンクリート抵抗の逆数と腐食速度の対数値の関係を図-9に示す。腐食速度は塩化物イオン濃度毎にコンクリート抵抗の逆数と強い正の相関関係が認められる。すなわち、同一の塩化物イオン濃度において、コンクリート抵抗が大きい程腐食速度は小さくなる傾向があり、腐食速度がコンクリート抵抗に大きく影響を受けていることが認められる。この傾向はコンクリート抵抗の大きい範囲で顕著である。同一の塩化物イオン濃度であれば、腐食速度はコンクリートの抵抗に大きく依存し、かぶりおよび相対湿度がコンクリート抵抗に影響を及ぼしていると考えられる。一方、コンクリート抵抗の逆数が0.04程度より大きい範囲(コンクリート抵抗が小さくなる)では、腐食速度が増大せず、反対に若干の減少傾向にある。これは、コンクリート中の水分量がある程度大きい場合には、かぶりコンクリート部の酸素の透過量が小さくなるため、腐食速度に及ぼすコンクリート抵抗の影響が小さくなったものと考えられる。



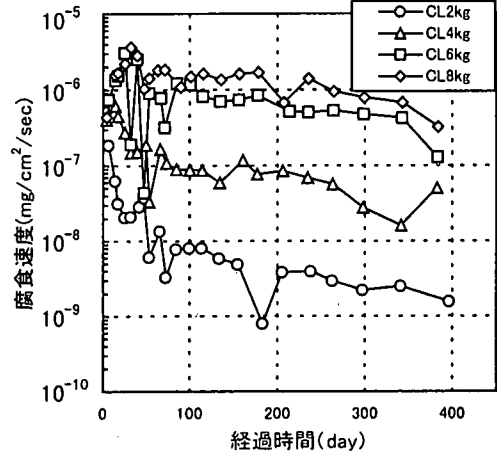
a) かぶり2cm(R.H.60%)



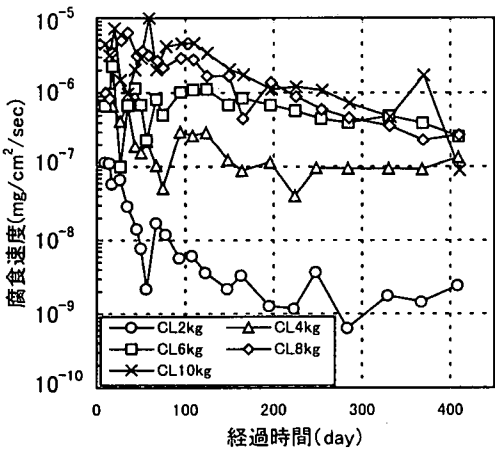
b) かぶり2cm(R.H.80%)



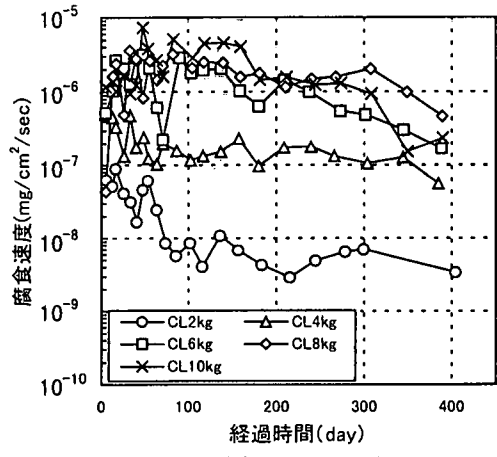
c) かぶり5cm(R.H.60%)



d) かぶり5cm(R.H.80%)

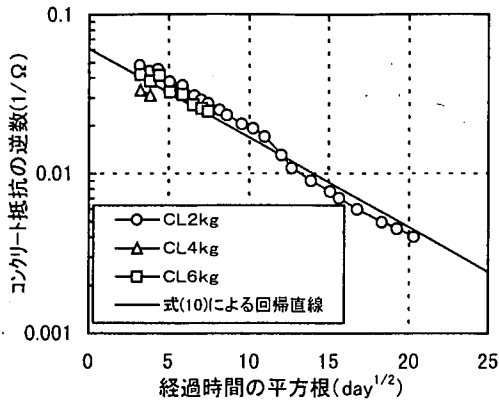


e) かぶり10cm(R.H.60%)

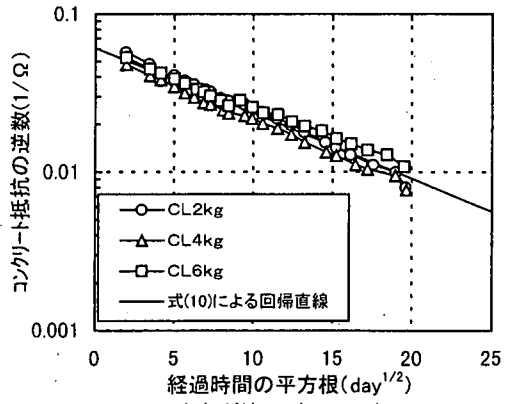


f) かぶり10cm(R.H.80%)

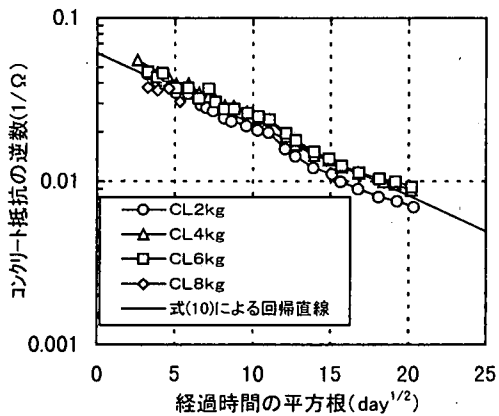
図-7 腐食速度の測定結果



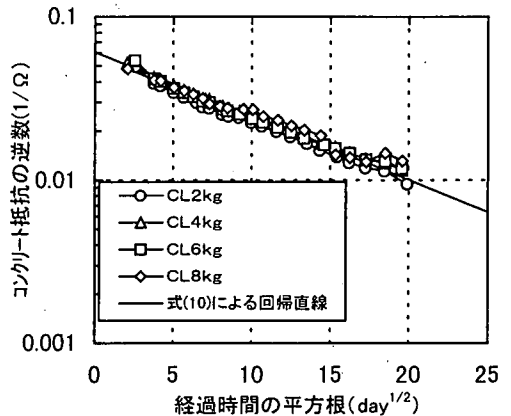
a) かぶり2cm(R.H.60%)



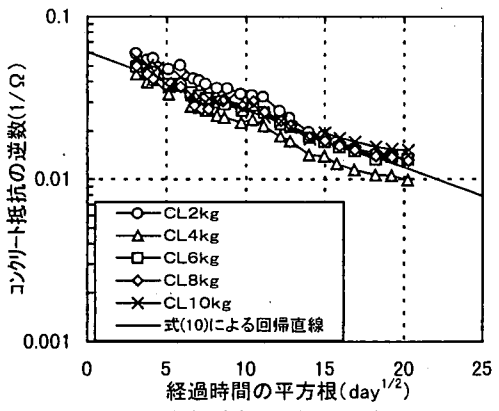
b) かぶり2cm(R.H.80%)



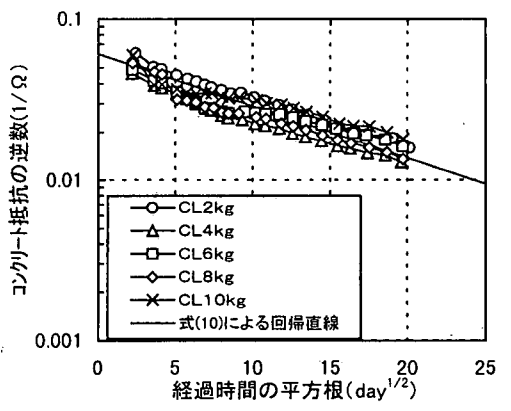
c) かぶり5cm(R.H.60%)



d) かぶり5cm(R.H.80%)



e) かぶり10cm(R.H.60%)



f) かぶり10cm(R.H.80%)

図-8 コンクリート抵抗の逆数の対数値と経過時間の関係

#### 4. 腐食速度評価式の提案

##### (1) 腐食速度の評価式

腐食速度評価実験の結果、コンクリート抵抗の逆数が

0.04程度以下の範囲では、同一の塩化物イオン濃度におけるコンクリート抵抗の逆数と腐食速度の対数値との間に強い正の相関関係が認められた。コンクリート抵抗の逆数と腐食速度との関係を定式化するために、先ず、コ

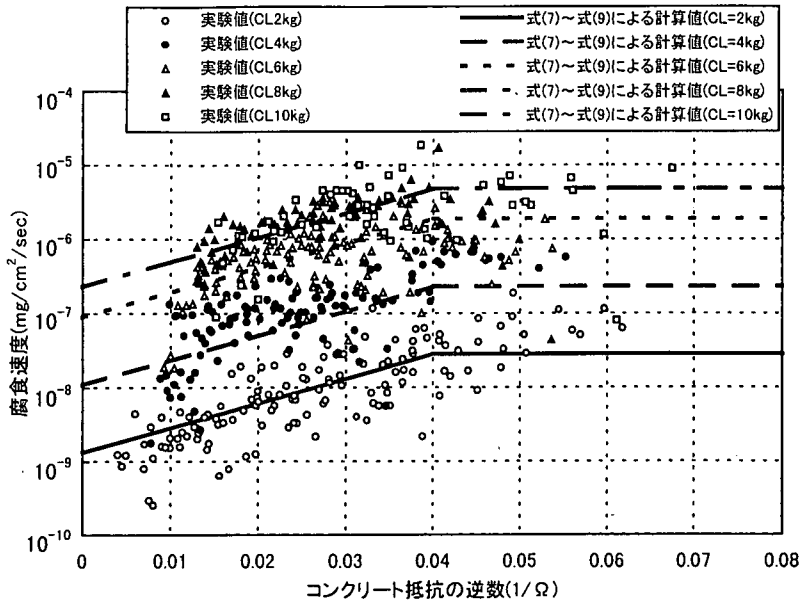


図-9 腐食速度の実験値と評価式による計算値の比較

ンクリート抵抗の逆数が 0.04以下の範囲における両者の関係を直線で回帰した。回帰直線の傾きは塩化物イオン濃度に係わらずほぼ同程度であり、塩化物イオン濃度による傾きへの影響は大きくないと考えられた。そこで、塩化物イオン濃度ごとの各回帰直線の傾きの平均値を求め、これを全体の回帰直線の傾きとして固定し、y切片（コンクリート抵抗の逆数が零の時の腐食速度：定式化する上で考えられる数値）だけを自由にして直線回帰を行った。得られたy切片の値と塩化物イオン濃度の関係を図-10に示す。塩化物イオン濃度が高くなるにしたがいy切片の値も増大するが、増大傾向は徐々に減少し、塩化物イオン濃度が8kg/m<sup>3</sup>以上になると殆ど増大しない。本研究では、図-9に示すように、両者の関係を塩化物イオン濃度により2つの範囲に区分して定式化した。評価式は式(7)の通りである。

$$Y=0.457 \cdot C-9.79(C \leq 6.89 \text{kg/m}^3) \quad (7)$$

$$Y=-6.64 \quad (C \geq 6.89 \text{kg/m}^3)$$

ここに、Y：コンクリート抵抗の逆数がゼロの時の腐食速度の対数値  
C：塩化物イオン濃度 (kg/m<sup>3</sup>)

回帰直線の傾きの平均値33.1と式(7)を合わせて、塩化物イオン濃度およびコンクリート抵抗の逆数を変数とする腐食速度評価式は、式(8)により表される。

$$\log V_{\text{corr}} = 33.1 \cdot (R_{\text{rc}})^{-1} + Y \quad (R_{\text{rc}} \leq 0.04) \quad (8)$$

ここに、R<sub>rc</sub>：コンクリート抵抗の逆数 (1/Rc)

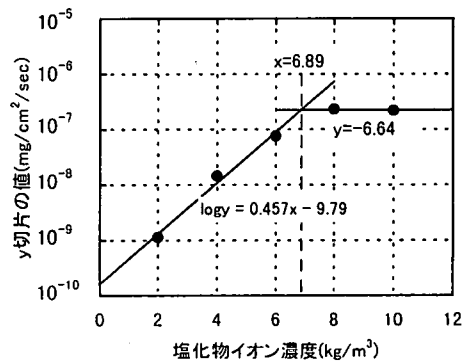


図-10 腐食速度評価式のy切片と塩化物イオン濃度の関係

ここで、Yの値は、理論的にはあり得ないコンクリート抵抗が無限大であるときの腐食速度を表すが、ここでは定式化するために必要な値として設定した。

一方、コンクリート抵抗の逆数が0.04以上の範囲では、腐食速度はコンクリート抵抗の逆数が大きくなっても増大せず、同程度あるいは減少している。この範囲においては、腐食速度はコンクリート抵抗ではなくコンクリートの酸素の透過性などの他の要因に支配されている可能性があり、定式化のためには更に詳細な検討が必要であると考えられる。しかし、コンクリート抵抗の逆数が0.04以上の範囲の腐食速度は、コンクリート抵抗が小さくなくても増大しないことに着目し、安全側の評価式として、式(9)で表すことができる。

$$\log V_{\text{corr}} = 33.1 \times 0.04 + Y \quad (R_{\text{rc}} \geq 0.04) \quad (9)$$



評価式による計算値を実験値とともに図-9に示す。概ね良好に評価できていると考えられる。

(2) 鉄筋近傍のコンクリート抵抗の逆数の評価式

鉄筋近傍のコンクリート抵抗の逆数の対数値は、図-8に示すように、経過時間の正の平方根 ( $\sqrt{t}$ ) と線形関係が認められ、塩化物イオン濃度による影響はほとんど認められなかった。そこで、かぶり、相対湿度、経過日数を変数とした評価式を導いた。まず、同一のかぶりおよび相対湿度毎に  $\log R_{rc}$  と  $\sqrt{t}$  の関係を線形関係として近似した。次に、0日のY切片の値 ( $\log R_{rc}$  値) は、かぶりおよび相対湿度に依らず同じ値であると考えられるため、全近似直線のy切片の値を平均した値 (-1.216) を全体のy切片の値として固定し、時間経過に対する勾配

( $B_{L,H}$ ) が変化するものとして、直線近似を行った。得られた近似式を式(10)に示す。

$$\log((R_{rc})_{L,H}) = A + B_{L,H} \sqrt{t} \quad (10)$$

ここに、( $R_{rc}$ )<sub>L,H</sub> : かぶりLおよび相対湿度Hにおけるコンクリート抵抗の逆数 ( $1/\Omega$ )

t : 経過日数 (日)

A : 定数 (= -1.216)

$B_{L,H}$  : かぶりLおよび相対湿度Hにおける定数

近似結果を図-8中に実線で示す。得られた  $B_{L,H}$  の値は図-11に示すように、かぶりが小さい程、相対湿度が小さい程小さい値となる。さらに、この  $B_{L,H}$  の値をかぶりLおよび相対湿度Hを変数とした線形関数として近似した。得られた結果を式(11)に、相対湿度60%および80%の場合の近似直線の例を図-11中に実線および点線

$$B_{L,H} = B_0 + B_L \cdot L + B_H \cdot H \quad (11)$$

ここに、 $B_0 = -0.07744$ ,  $B_L = 0.00180$ ,

$B_H = 0.00037$

式(10)および式(11)を用いて、かぶりL、相対湿度H、経過日数tにおける鉄筋近傍のコンクリート抵抗の逆数の対数値を評価することが出来る。図-12に式(10)および式(11)を用いて計算した結果を実測値とともに示す。概ね良好に評価できていると考えられる。

5. 提案式の適用性の検討

(1) 検討対象とした暴露試験の概要

対象とした試験体は、沖縄県石川市の沖縄電力 (株)

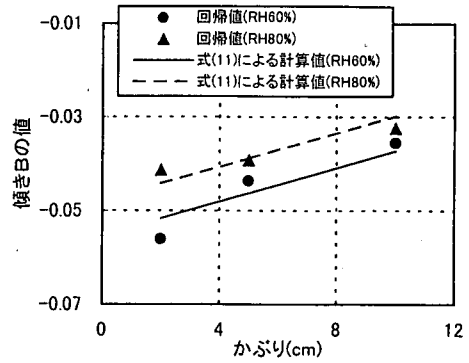


図-11 y切片固定後の傾きとかぶりの関係

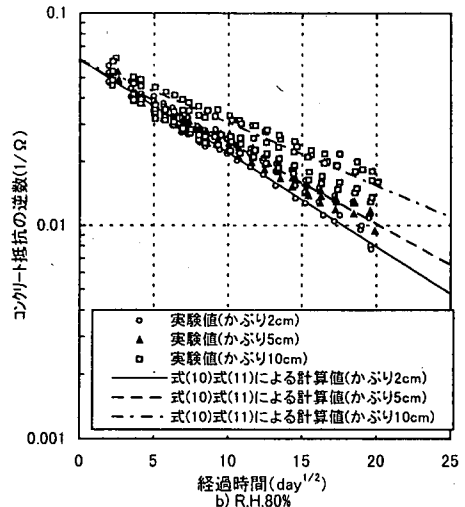
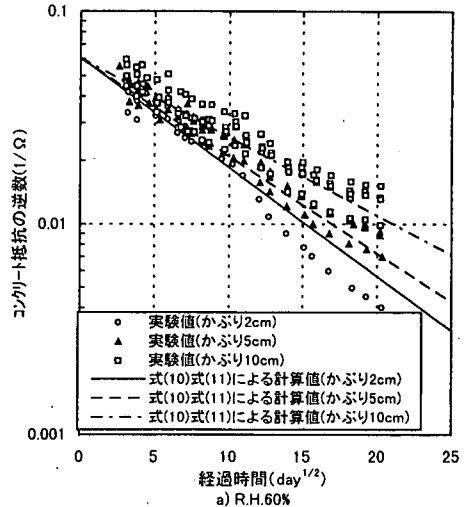


図-12 提案する評価式によるコンクリート抵抗の逆数の計算値と実験値の比較

石川火力発電所構内に暴露した試験体である。試験体の設置状況を図-13に示す。試験体は、通常、海水に直接接

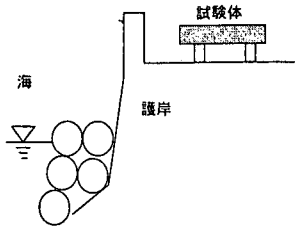
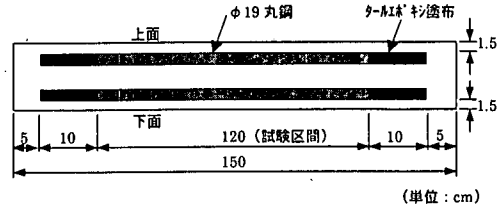
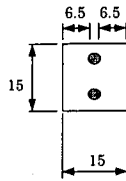


図-13 暴露試験体の設置状況の概要



(単位: cm)

図-14 暴露試験体の形状

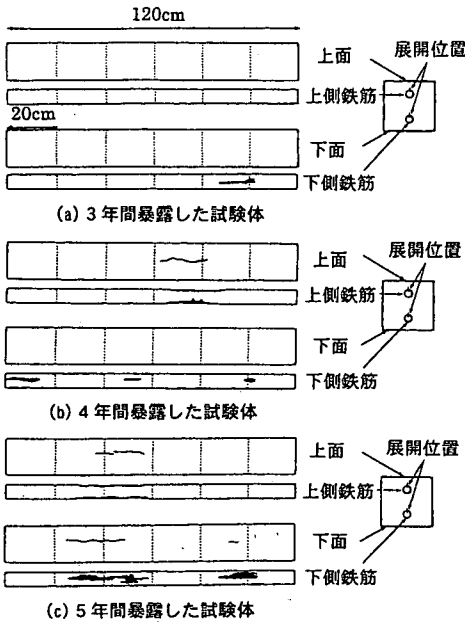


図-15 暴露試験体のひび割れおよび腐食状況

しない大気中であるが、台風などの接近時には波しぶきを受ける。試験体の形状は、図-14に示すように、断面が15cm×15cm、長さ150cmのはり部材であり、鉄筋はφ19mmの丸鋼(SR235)を使用し、かぶり1.5cmの位置に上下各1本配置してある。コンクリートの配合および使用材料は、先の腐食速度評価実験に用いたものと同一である。ただし、塩分は混入していない。試験開始当初の試験体数は10体であり、1年に1体の試験体を解体し、腐食減量の測定を行った。また、半年から1年間隔で、別に用意した同一配合、同一断面の長さが20cmの小型の試験体を用いて、塩化物イオン量の測定を行った。暴露期間は5年間であり、この間に腐食によるひび割れが発生している。図-15にひび割れ状況および腐食状況を示す。腐食によるひび割れは、4年経過時に上側の鉄筋に沿って発生し、5年経過時には下側の鉄筋沿いにも発生した。

深さ15-35mmの位置の塩化物イオン濃度と経過時間の関係を図-16に示す。若干のばらつきはあるが、塩化物イオン濃度は時間経過とともにほぼ直線的に増大している。

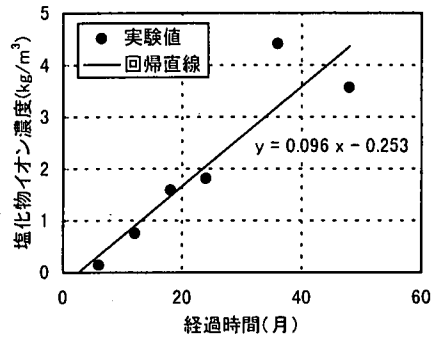


図-16 鉄筋位置の塩化物イオン濃度と経過時間

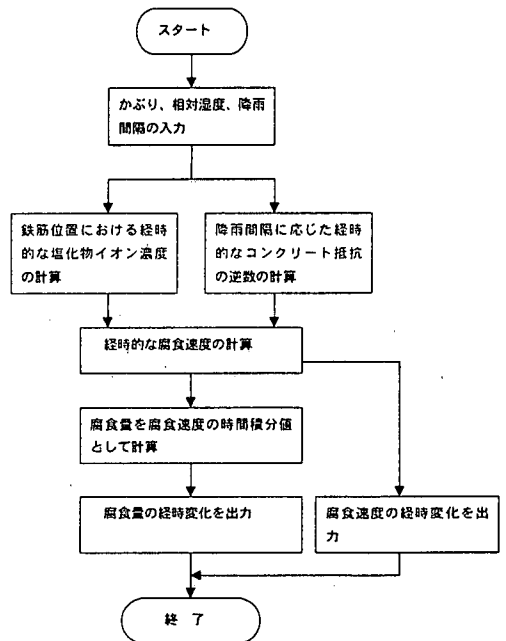


図-17 腐食進行評価計算の手順

## (2) 腐食進行評価の手順

腐食進行評価計算は、図-17に示すように、次のように行った。時間刻みは1日とした。

- a) かぶり、相対湿度、鉄筋位置の塩化物イオン濃度、降雨間隔の設定  
相対湿度を76%(那覇の年平均値)<sup>17)</sup>、かぶりを1.5cm、

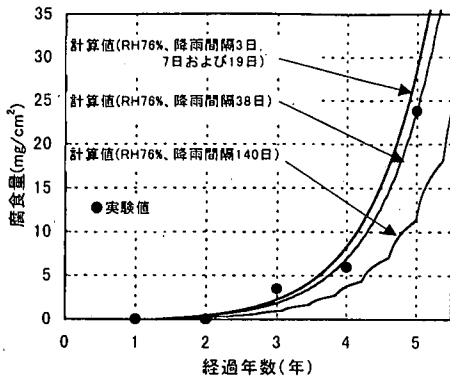


図-18 暴露試験体の腐食量の計算値と実験値の比較

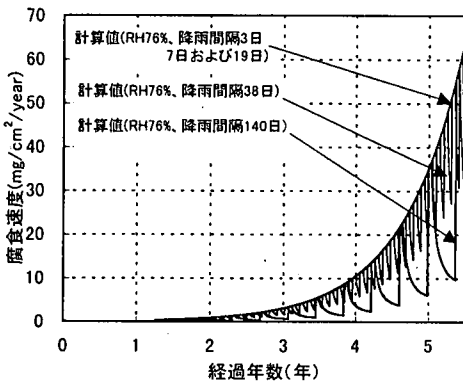


図-19 暴露試験体の腐食速度の経時変化の計算結果

鉄筋位置の塩化物イオン濃度と経過時間の関係を図-16に示す回帰直線（ただし、塩化物イオン濃度は0以上）の関係で与えた。また、降雨によるコンクリートの含水状態の変化を考慮するための指標として降雨間隔を設定した。降雨間隔は、那覇における日降水量<sup>17)</sup>（1, 10, 30, 50, 100mm以上）に応じた年間の降雨日数（125.8, 50.1, 19.2, 9.5, 2.6日）で365日を除いた値を参考に、3, 7, 19, 38, 140日の5種類とした

#### b) コンクリート抵抗の逆数の経時変化の計算

コンクリート抵抗の逆数の経時変化を式(10)、式(11)により計算した。ここで、降雨時に試験体は完全に飽水し、その後次の降雨までの間は定湿度環境において乾燥していくと考え、降雨間隔に応じて式(10)における経過時間を0に戻した。例えば、降雨間隔が7日であれば、式(10)における経過日数は、0, 1, 2, 3, 4, 5, 6日の繰り返しとなる。

#### c) 腐食速度の経時変化の計算

式(8)あるいは式(9)に、鉄筋位置の塩化物イオン濃度およびコンクリート抵抗の逆数を与えて経過日数に応じた腐食速度を計算する。

#### d) 腐食量の経時変化の計算

当該日の1日間の腐食量は、当該日とその前日の腐食

速度の平均値を当該日の腐食速度とし、1日の時間（秒）との積として求めた。当該日までの腐食量はこれらの和とした。

#### (2) 腐食進行評価計算結果

腐食量の計算結果を実験値と共に図-18に、腐食速度の計算結果を図-19に示す。図-18における実験値は上下の鉄筋の平均値を表している。試験体には、図-15示すように、4年経過時に上側の鉄筋に、5年経過時には上下の鉄筋にひび割れが生じており、厳密にはこの期間ではひび割れの生じる前の腐食とは言えないものの、経過年数の増大に従い腐食量が加速的に増大していく様子を比較的良好に評価できていると考えられる。降雨間隔が3日～19日の範囲では計算値はほとんど同じ値であった。これはコンクリートがほぼ飽水状態と評価されたためである。また、降雨間隔が38日以上（日降水量が50mm以上）の場合に最も実験値に近い結果となった。これは、図-19に示すように、降雨の影響で腐食速度が変化するためであり、実際の腐食速度もこのように変化している可能性がある。

以上の結果から、提案した腐食進行評価式により暴露試験体の腐食進行を概ね良好に評価できると考えられる。コンクリートの乾燥程度を的確に評価することが出来れば、精度の向上が期待できる。

#### 6. まとめ

海岸近くの大気中に位置する鉄筋コンクリート構造物の鉄筋腐食進行の予測手法を提案することを目的として、予め塩分を混入した試験体を用いた鉄筋腐食速度評価実験を行った。実験では埋設電極を用いた交流インピーダンス法を考案し腐食速度を測定した。得られた結果を基に腐食速度評価式を提案し、沖縄に暴露した試験体の腐食進行評価を行い、試験体レベルでの評価式の適用性を検討した。

本研究で得られた主な結果を纏めると次の通りである。

- (1) 提案した埋設電極を用いた交流インピーダンス法により、腐食速度を比較的精度良く測定できることが確認できた。
- (2) コンクリート中の塩化物イオン濃度が腐食速度に及ぼす影響は非常に大きく、塩化物イオン濃度が增大すると腐食速度は著しく増大する。しかし、塩化物イオン濃度が6kg/m<sup>3</sup>程度を越えると腐食速度はあまり増大しなくなる。
- (3) 定温定湿度環境では、コンクリート中の鉄筋の腐食速度は、塩化物イオン濃度が一定でも経時的に減少する傾向があり、一方、鉄筋近傍のコンクリートの電気抵抗（コンクリート抵抗）は経時的に増大する傾向が

- ある。コンクリート抵抗の増大により腐食反応が生じにくくなるためと考えられ、ある程度乾燥したコンクリート中の鉄筋の腐食速度は、塩化物イオン濃度の他にコンクリート抵抗にも関係していると考えられる。
- (4) コンクリート抵抗が経時的に増大する傾向は、かぶりがかさいほど、湿度が低いほど顕著である。このため、コンクリートが経時的に乾燥することによる含水量の低下が、コンクリート抵抗の増大の主な原因と考えられる。
- (5) 実験結果に基づいて、腐食速度評価式を提案した。提案式では、腐食速度は塩化物イオン濃度とコンクリート抵抗に支配され、コンクリート抵抗はかぶり、湿度、経過時間（乾燥期間）に依存すると仮定した。
- (6) 実環境への腐食速度評価式の適用性を検証するため、降雨の影響を考慮して、沖縄（沖縄県石川市）に暴露した試験体の腐食量を計算した。その結果、経年的に増大する腐食量の変化を比較的良好に評価することができた。

謝辞：本研究では暴露実験を進めるに当たり、沖縄電力（株）の皆様にも暴露実験場を提供頂いた。また、（株）日本ソフトテクニカルの大塚章氏には、実験の実施からデータ整理に至るまで多大なるご協力を頂いた。ここに感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート構造物の耐久性設計指針（試案），1988.
- 2) 日本コンクリート工学協会：鉄筋コンクリート構造物の耐久性設計に関する考え方，1991.
- 3) 武若耕司，松本進：海洋環境下におけるコンクリート中の塩分浸透について，セメント技術年報37，pp.337-340，1983.
- 4) 横田優，浮田和明，重松俊一，藤枝正夫：拡散理論に基づいた海岸部塩分汚染環境評価，コンクリート工学年次論文報告集9-1，pp.443-446，1987.
- 5) 例えば，武若耕司，小林一輔：オートクレーブによるコンクリート中の鋼材の腐食促進試験，第3回コンクリート工学年

- 次講演会講演論文集，1981.
- 6) 土木学会：コンクリート技術シリーズ26 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.
  - 7) 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，東京大学学位論文，1986. 11.
  - 8) 榊田佳寛，安田正雪，花榮浩，松林祐二：塩分環境下におけるコンクリート中の鉄筋腐食速度に関する一実験，コンクリート工学年次論文報告集12-1，pp.441-446，1990.
  - 9) 関博，松井邦人，松島学，金子雄一，田畑祐：コンクリート構造の寿命予測に関する一考察：コンクリート工学年次論文報告集12-1，pp.569-574，1990.
  - 10) 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.
  - 11) 松村卓郎，金津努，西内達雄：交流インピーダンス法による海岸暴露試験体の鉄筋腐食検査，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.1，pp.1309-1314，1997.6.
  - 12) 松村卓郎，金津努，西内達雄：交流インピーダンス法による鉄筋腐食の非破壊検知，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.1，pp.871-876，1995.
  - 13) 松村卓郎，金津努，西内達雄：交流インピーダンス法を用いたコンクリート中の鉄筋腐食の非破壊検査手法，電力中央研究所報告U94043，1995.3.
  - 14) 松村卓郎，金津努，西内達雄：交流インピーダンス法による海岸に暴露された試験体中の鉄筋腐食量の検知，電力中央研究所報告U95033，1996.3.
  - 15) 関博，宮田克二，北峯博司，金子雄一：比抵抗によるコンクリートの緻密性に関する実験的一考察，土木学会論文集No.451/V-17，pp.49-57，1992.8.
  - 16) 横田優：電気化学的手法によるコンクリート中の鉄筋腐食評価，コンクリート工学年次論文報告集12-1，pp.545-550，1990.
  - 17) 国立天文台：理科年表，丸善株式会社，1995.
  - 18) 遠藤孝夫：日射を受ける原子力発電所外周コンクリート壁の温度応力解析手法，電力中央研究所報告U93520，1994.
  - 19) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに規準（案）JCI-SC，1987.

(1999.4.21 受付)

## AN EVALUATION METHOD FOR CORRODING OF REINFORCEMENT IN CONCRETE STRUCTURE LOCATED IN SEASHORE ATMOSPHERE

Takuro MATSUMURA, Tsutomu KANAZU and Tatsuo NISHIUCHI

The objective of this study is to make a proposal on an evaluation method of steel corrosion in concrete structures located in seashore environment. Corrosion tests, which changed concentration of chloride ion, cover thickness and relative humidity, were conducted for fourteen months. In the tests, the corrosion rates of reinforcements were measured by AC impedance method using embedded electrodes. An equation evaluating corrosion rates of reinforcement in concrete was proposed based on the test results. Using indicator for influence of rain, an evaluation method of corrosion in concrete structures located in seashore atmosphere was proposed. Evaluated corrosion of specimens, which exposed at near seashore in Okinawa showed comparatively good agreement with real corrosion.