

# 報告 建設後36年経過した RC 造開水路側壁の腐食モニタリング 結果について

横田優\*1

**要旨：**実構造物を対象に、分極抵抗法(交流インピーダンス法)に基づきコンクリート中の鉄筋の腐食速度を評価するための携帯型鉄筋腐食診断器を開発した。今回、建設後 36 年経過した RC 造の開水路の干満帯部から気中部にかけての側壁を対象に、本診断器による自然電位、分極抵抗(腐食速度)の計測を行った後、コンクリート中への塩化物イオン浸透状況や内部鉄筋の腐食を調べた。その結果、鉄筋は外部から侵入してきた塩化物イオンが原因で腐食を起しており、実測された腐食量と計測された腐食速度に塩化物イオンの拡散計算から求めた腐食年数をかけた値との間には良い相関があることが確かめられた。

**キーワード：**RC 構造物, 腐食モニタリング, 分極抵抗, 腐食速度, 塩化物イオン

## 1. はじめに

経済の低成長期に入るとともに、既存の設備をいかに適切に維持管理しながらその耐久性を維持させていくかがますます重要となっている。これまで半永久構造物と考えられてきた RC 構造物も例外ではない。筆者はこのような社会的ニーズに答えるべく、コンクリート構造物の劣化現象の中で、特に被害事例の多い塩害を取り上げ、鉄筋腐食劣化を受ける鉄筋コンクリート構造物の劣化進行予測モデル(図-1)を提案するとともに、コンクリート中への塩化物イオンの浸透を拡散現象として捉え内部鉄筋の腐食開始時期を予測する手法<sup>2)</sup>やコンクリート中の鉄筋の交流インピーダンス値から分極抵抗を求め腐食速度を評価する携帯型鉄筋腐食診断器を開発した<sup>3)</sup>。

今回は、建設後 36 年を経過した RC 造の開水路の干満帯部から気中部にかけての側壁を対象に、コンクリート中への塩化物イオンの浸透状況や自然電位、分極抵抗(腐食速度)等の測定を行い、コンクリート表面に腐食によるひびわれが発生する以前の鉄筋腐食モニタリングの可能性について検討した結果を報告する。

## 2. 鉄筋腐食速度測定

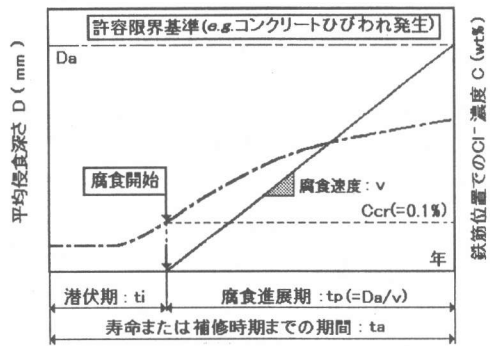


図-1 塩害を受ける RC 構造物の劣化進行予測モデル

## 2.1 鉄筋腐食診断器

本鉄筋腐食診断器は、図-2 に示すように診断器本体、コンクリート中の鉄筋との接続部およびコンクリート表面に設置するセンサー部からなっている。センサーは、図-3 に示すように、自然電位測定用の濃度 3.3mol/l の銀/塩化銀照合電極 (RE)1 個と、同中心のステンレススチール製の円板対極 2 枚(センタ対極 CCE およびガード対極 GCE)からなっており、これら 2 重対極 CCE と GCE の外径と内径はそれぞれ 4.0cm, 0.8cm および 10.6cm, 4.5cm である。分極抵抗の測定では、鉄筋の被測定面積を限定するために、2 重の対極のうち内側のセンタ対極に流れる電流のみを計

\*1 (株)四国総合研究所 土木技術部 主席研究員 工博(正会員)

測することによって、電流の及ぶ範囲を限定する方法を採用している<sup>13)</sup>。なお、センサー下面はコンクリート面との電氣的接触条件を一定とするため導電性物質(高分子吸水材)を入れ、化学繊維の布でカバーされている。

## 2.2 腐食速度測定

まず鉄筋探索計により鉄筋位置を調査し、コンクリート中から1ヶ所鉄筋をはり出し電氣的に接続する。一方、センサーを測りたい鉄筋の真上に設置し、電氣的回路を形成する。

各測定個所での鉄筋の分極抵抗ならびに腐食速度は次のようにして求めた。まず、コンクリート中の鉄筋の自然電位を測定し、その電位を基準に $\pm 10\text{mV}$ の2種類の周波数(今回は $10\text{Hz}$ と $10\text{mHz}$ を採用)の交流電圧を印加して、それぞれの応答電流および位相差を計測する。電圧と電流の比であるインピーダンス絶対値と位相差をもとに複素平面表示し、これら2周波数の測定点を通る半円の径を1.9倍したものを見かけの分極抵抗 $R_p'(\Omega)$ とし<sup>4)</sup>、さらに、これに2重対極のうちセンター対極真下の鉄筋(長さ4cm)の上半分の表面積 $A(\text{cm}^2)$ をかけて単位面積あたりの分極抵抗 $R_p = R_p' \times A (\Omega\text{cm}^2)$ とした。

鉄筋の腐食速度 $I_{\text{corr}} (A/\text{cm}^2)$ は、この分極抵抗 $R_p$ をSternとGearyにより提案された分極抵抗法の式(1)に代入して求めた。なお、式(1)中の定数 $K$ 値は $26\text{mV}$ とした。また、腐食速度 $I_{\text{corr}} (A/\text{cm}^2)$ はFaradayの第2法則により式(2)から1年当たりの平均侵食深さ、侵食度 $\text{PDY}(\text{mm}/\text{年})$ に変換し整理した。

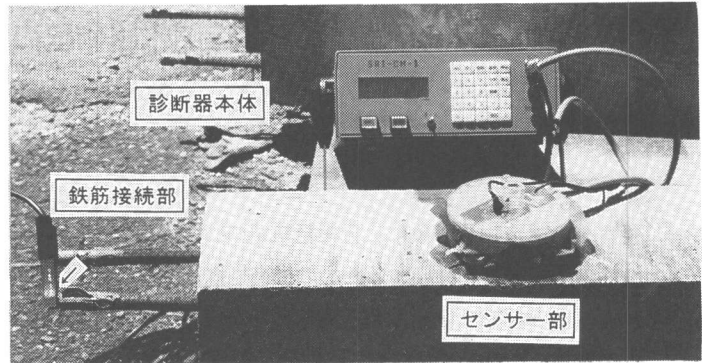


図-2 携帯型鉄筋腐食診断器

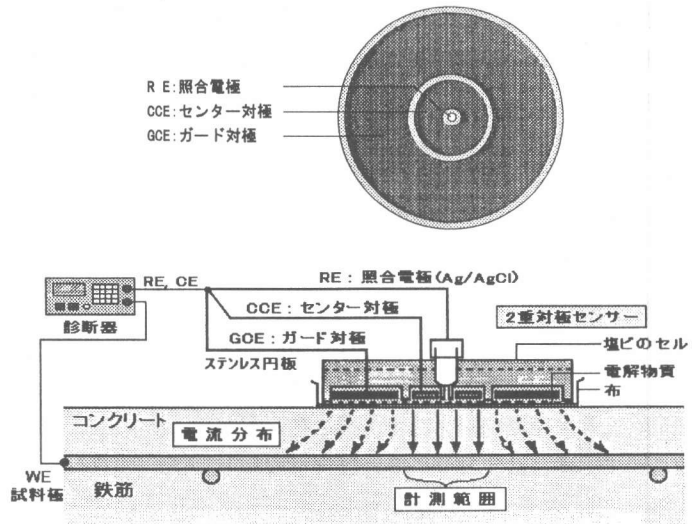


図-3 2重対極センサーによる測定概念図

$$I_{\text{corr}} = K (1/R_p) \quad (1)$$

$$\text{PDY} = 11.6 \times 10^3 I_{\text{corr}} \quad (2)$$

## 3. 調査概要

### 3.1 調査対象構造物

調査した構造物は、図-4に示すような断面を有する建設後36年を経過した開水路である。この瀬戸内海に面した幅4.0(底部)~6.8m(上部)、高さ4.7mの水路には満潮時に海水の流入があり、その時の平均水深は約3mになる。調査地点としては、コンクリート表面にひびわれや剥離が認められない海岸線からそれぞれ80m(No.1)および100m(No.2)離れた2地点を選定した。調査部位は側壁部であり、平均満潮時(H.W.L)を中心に上下約1m(横鉄筋6~7本)、横方向は約0.5m(縦鉄筋2本)

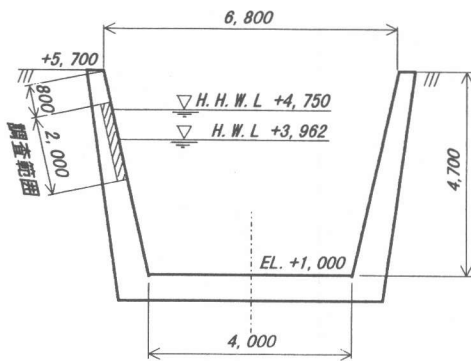


図-4 調査対象水路構造物の断面図

の範囲で実施した。

### 3.2 調査内容

調査は次の項目について実施した。

- (1) 自然電位および交流インピーダンス測定による分極抵抗(腐食速度)測定 …… 当社開発の携帯型鉄筋腐食診断器(SRI-CM-II)を使用した。
- (2) コンクリート中への塩化物イオン浸透量調査 ……  $\phi 10\text{cm}$  のコアを採取。深さ方向 2cm ごとのコンクリートに含まれる全塩分量を JCI 規準案に準拠して分析した。

(3) 鉄筋の腐食状況 ……

- ① はつり出し後の目視調査(定性分析)
- ② かぶり厚さの測定

鉄筋探査器による計測も行ったが、鉄筋をはつり出した後の実測値である。

③ 切り取った鉄筋の腐食量測定(定量分析)

$\phi 19\text{mm}$  の縦鉄筋を切り出し、約 12~17cm の長さに切断して JCI 規準案に準拠して実施。10%クエン酸アンモニウム水溶液に数日間浸漬し腐食生成物を除去し、単位長さ当りの重量測定から鋼の比重 7.87 を用いて平均侵食深さ(mm)を求めた。

### 4. 調査結果および考察

No.1 および No.2 地点で測定された自然電位、腐食速度およびかぶり厚さの結果を図-5 に、それら縦方向の分布を図-7 から図-9 に示す。また、図-6 に、No.1 地点から切り出した左右 2 本の縦鉄

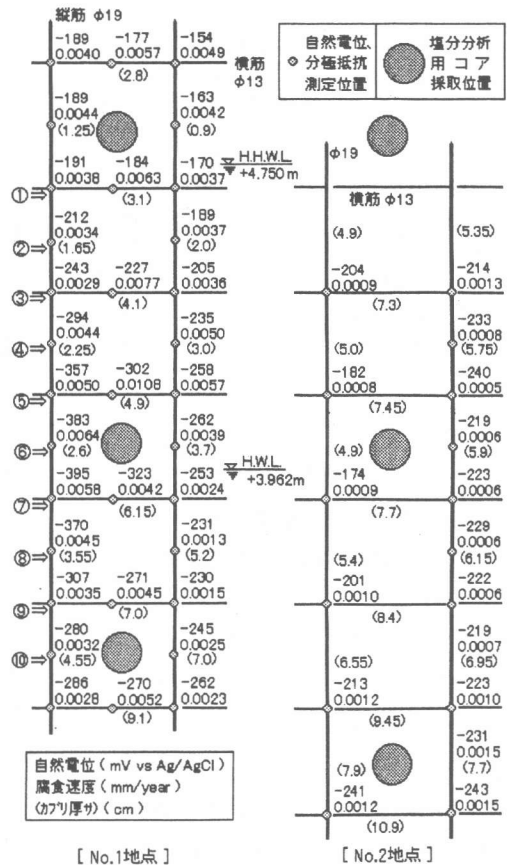


図-5 かぶり厚さ、自然電位、分極抵抗(腐食速度)測定結果

筋の平均侵食深さの分布を示す。

#### 4.1 鉄筋の腐食状況

No.1 および No.2 いずれの地点も、鉄筋は  $\phi 19\text{mm}$  の丸鋼が縦方向に約 30 cm 間隔で、 $\phi 13\text{mm}$  の丸鋼が水平方向に約 25~30 cm 間隔でそれぞれ配置されていた。縦方向鉄筋のかぶり厚さは、図-9 に示すように場所により異なるが、いずれも下部から上部にかけて減少する傾向にあり、水平鉄筋はその奥側に配置されていた。

鉄筋をはつり出し腐食状況を目視観察した結果では、No.1 地点の左側縦鉄筋のかぶり厚さは下部から上部にかけて 5cm から 1.5 cm に減少しており、腐食は全域にわたって認められた。特に H.W.L. を基準に -0.15m から +0.70m の範囲には孔食を伴う激しい腐食が認められた(平均侵食深さ 0.01~0.11mm)。右側の縦鉄筋のかぶり厚さは 7cm

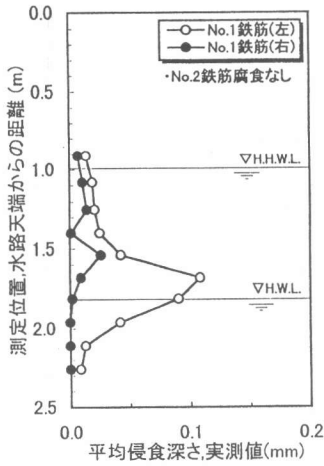


図-6 縦鉄筋腐食量実測値  
(平均侵食深さ)測定結果

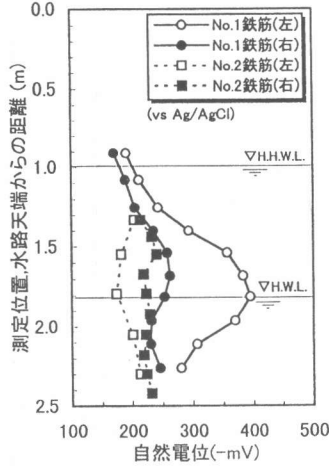


図-7 自然電位測定結果

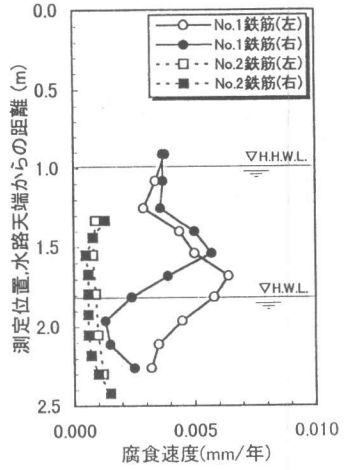


図-8 分極抵抗から求めた  
腐食速度測定結果

から 1.5 cm まで変化しており、かぶり厚さの大きい H.W.L. 付近から -0.50 m の区間には腐食は認められず、H.W.L. から上部にかけて特に H.W.L. を基準に +0.15 m から +0.70 m の範囲に孔食を伴う激しい腐食が認められた(平均侵食深さ 0.007 ~ 0.026 mm)。一方、No.2 地点の鉄筋のかぶり厚さは 8 cm から 5 cm と No.1 地点よりは大きく、鉄筋には供用後の腐食は全く認められなかった。

#### 4.2 自然電位

腐食の可能性について、ASTM 制定の判定基準によると、自然電位が  $-90\text{mV}$  ( $3.3\text{mol/l Ag/AgCl}$  電極換算) 以上で「90%以上の確率で腐食なし」、 $-230\text{mV}$  以下で「90%以上の確率で腐食あり」、その間の電位では「不確定」とされている。今回測定された自然電位は図-5 および図-7 に示すように、No.1 地点の左側の鉄筋の H.W.L. 付近の腐食を敏感に捉えているものの、腐食を起していない No.2 地点の電位が腐食している No.1 地点上部の電位より小さい値を示すところがあるなど、ASTM 判定基準のように絶対値だけで評価するのは問題があると考えられる。

#### 4.3 分極抵抗から求めた腐食速度

図-5 および図-8 は測定された分極抵抗から求めた腐食速度の分布を示している。腐食を起していた No.1 地点の鉄筋の腐食速度が 0.0013 ~

0.0108 mm/年 ( $0.11 \sim 0.93 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) と評価されたのに対し、腐食していなかった No.2 地点では 0.0005 ~ 0.0015 mm/年 ( $0.04 \sim 0.13 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) と一般的に小さい値を示している。No.1 および No.2 地点を通して、腐食速度値が 0.0015 mm/年以下と診断された箇所では腐食が認められなかった。

以上より分極抵抗および、それより求められる腐食速度は調査時点での内部鉄筋の腐食位置の検出や腐食の程度の判定に有用なことが確認できた。

#### 4.4 塩化物イオン浸透量

図-5 中の○印の個所のコンクリート中に含まれる全塩分量の分布を図-10 に示す。

No.1 地点の塩分量が No.2 地点に比べてやや多い傾向が認められるが、いずれの地点も海水浸漬時間の長い下方のコンクリートほど塩化物イオンの浸透量が多いことがわかる。一方これまでの海岸部コンクリート構造物の調査結果から発錆限界塩分量は 0.1% 程度であることをつかんでいる<sup>9)</sup>。たとえば、H.W.L. 付近では表面から 4.5 cm (No.2) ~ 7.0 cm (No.1) までのコンクリート中に 0.1% を越える塩分量が含まれているのに対し、下部ではその限界が表面から 6.5 cm (No.2) ~ 8.5 cm (No.1) の深さまで達していることがわかる。

図-5 および図-9 中のかぶり厚さと図-10 の塩分

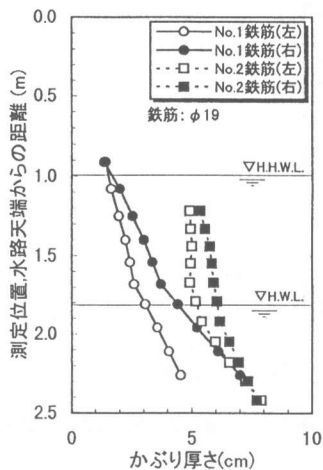


図-9 かぶり厚さ測定結果

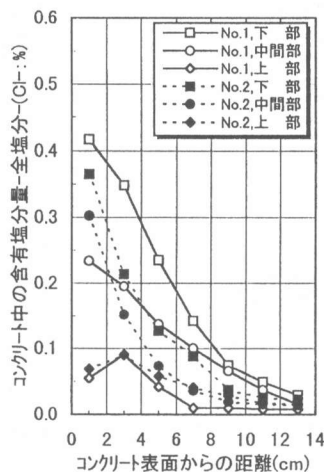


図-10 塩分浸透量調査結果

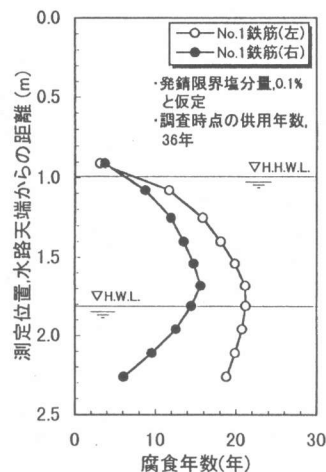


図-11 腐食年数計算結果

量を対比すると、腐食が認められたNo.1 地点ではかぶり厚さが小さく鉄筋位置での塩化物イオン量が発錆限界塩分量に達しているのに対して、腐食していないNo.2 地点の鉄筋は比較的かぶり厚さが大きく塩分量も発錆限界塩分量に達していないことがわかる。これらのことから4.1の鉄筋腐食は外部から浸透してきた塩化物イオンに起因することがわかる。

### 5. 腐食量モニタリングの可能性

No.1 地点について、計測された腐食速度とコンクリート中への塩分浸透量をもとに拡散計算より求められる腐食年数から内部鉄筋の腐食量を推定することを試みた。

#### 5.1 拡散方程式

一般に、コンクリート中への塩化物イオンの浸透は拡散現象として近似でき、Fick の第2法則として知られている拡散方程式(3)で表現される。今回は式(3)をコンクリート表面に連続して塩分が付着しその全てがコンクリート中に浸透すると仮定して解いた式(4)を用いた<sup>2)</sup>。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) \quad (3)$$

$$C(x, t) = C' + W \cdot \left[ 2\sqrt{t/\pi D} \cdot \exp(-x^2/4Dt) - (x/D) \cdot \{1 - \text{erf}(x/2\sqrt{Dt})\} \right] \quad (4)$$

ここに、C ; コンクリート中に含まれる全塩化

物イオン量(%), x ; コンクリート表面からの距離 (cm), t ; 供用開始からの期間 (s), W ; 飛来塩分のうちコンクリート表面に付着し内部に侵入する塩分量 (%/cm<sup>2</sup>・s), D ; 見かけの拡散係数 (cm<sup>2</sup>/s), C' ; 初期塩分混入量 (%)

#### 5.2 腐食年数

各測定地点での塩分浸透量データはそれぞれ図-10 に示す上部、中間部および下部 3 地点での塩分量を距離で内挿補間して求めた。これら分布データを最小 2 乗法により式(4)に近似して、見かけの拡散係数 D, 付着塩分量 W, 初期塩分混入量 C' を求めた。結果は D=1.6~2.9×10<sup>-8</sup> cm<sup>2</sup>/s, W=0.43~2.4×10<sup>-9</sup> %/cm<sup>2</sup>・s (NaCl 換算で 0.44~2.4g/m<sup>2</sup>/月), C'=0.008%となった。

次に、これらの値を用いて鉄筋位置での塩分量が発錆限界塩分量 C<sub>cr</sub> (=0.1%)に達する期間を求めて、調査時点の供用期間 36 年から引いた値を腐食年数とした。結果を図-8 に示す。

図より、No.1 地点では、かぶり厚さと塩分浸透量との関係から H.W.L.~+0.2m 付近の鉄筋が最初に錆び始め、H.H.W.L.付近では 2~3 年前に錆び始めたものと推定される。

#### 5.3 腐食量の推定

前述のとおり、実際の腐食量(図-6)と自然電位(図-7)および分極抵抗から求めた腐食速度(図-8)

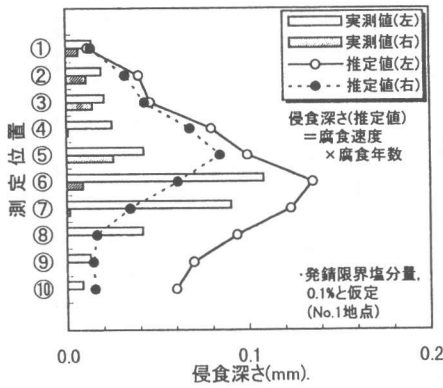


図-12 腐食量(侵食深さ)の推定値と実測値との関係(1)

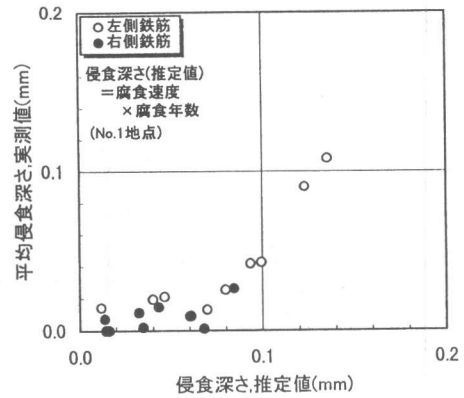


図-13 腐食量(侵食深さ)の推定値と実測値との関係(2)

との間には明確な相関関係は認められなかった。そこで 4.4 の分極抵抗から求めた腐食速度に 5.2 で求めた腐食年数をかけて侵食深さを計算し、平均侵食深さの実測値との関係を求めた。結果を図-12 および図-13 に示す。

図より、分極抵抗から求めた腐食速度に腐食年数を考慮して求めた侵食深さ(推定値)は、腐食を起こしていないところを含めて腐食の軽微なところの腐食量を過大に評価する傾向はあるが、推定値と実測値との間には良好な相関関係があることがわかる。

以上のことから、分極抵抗は式(1)に示すように、測定時点の腐食速度を適切に反映していることが改めて確認された。ただし、腐食速度はコンクリート中の含水率等によって変化することも考えられる。よって、今回の計測回数は1回だけであったが、1年を通じて何度か測定し平均腐食速度を求めることによってモニタリング精度の向上が図られるものと考えられる。

### 5. 結論

実構造物を対象に、交流インピーダンス法に基づく分極抵抗測定からコンクリート中の鉄筋の腐食速度を評価する機器を開発した。今回、干満帯から気中部に位置する開水路側壁を対象に腐食モニタリングを行った結果、以下のことが判明した。

- (1)分極抵抗から求めた腐食速度は自然電位よりも内部鉄筋の腐食の有無を含めて腐食の進展を知る上で有力な指標となる。
- (2)腐食速度が  $0.0015 \text{ mm/年}$  ( $0.13 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ )以下と診断された箇所では腐食が認められなかった。
- (3)腐食速度に塩化物イオンの拡散計算から求めた腐食年数を考慮することによって内部鉄筋の腐食量をある程度推定できる。

### 参考文献

- 1)横田優：コンクリート構造物の劣化評価,日本材料学会腐食防食部門委員会資料, No.184, Vol. 34, pp.6-20, 1995. 1
- 2)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, Vol.9, No.1, pp.443-446, 1987
- 3)横田優：鉄筋腐食診断器の開発, 電力土木, No.257, pp.64-71, 1995. 5
- 4)Miyuki, H., Ohno, T., Yokota, M. and Yoshida, M.: Corrosion Monitoring of Steel Rebars in Concrete Structures by AC Impedance Method; Proc. of International Symposium on Plant Aging and Life Predictions of Corrodible Structures, Sapporo, Japan, pp.447-451, 1995. 5
- 5)横田優：社内資料