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 原因で腐食を起こしており、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¹⁾,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²⁾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³⁾。

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/1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)

-185-

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^{1),3)}。なお、セ ンサー下面はコンクリート 面との電気的接触条件を一 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

まず鉄筋探査計により鉄 筋位置を調査し, コンクリ ート中から 1 ヶ所鉄筋をは つり出し電気的に接続する。 一方, センサーを測りたい 鉄筋の真上に設置し, 電気 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±10mVの2種 類の周波数 (今回は10 Hz と 10mHz 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 Rp'(Ω)とし⁴,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4 cm)の上半分の 表面積 A(cm²)をかけて単位面積あたりの分極抵 抗 Rp=Rp'×A (Ω cm²)とした。

鉄筋の腐食速度 Icorr (A/cm²)は、この分極抵抗 Rp 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 mV とした。また、腐食速度 Icorr (A/ cm²)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 PDY(mm/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

ľ))
	l	I)

$$PDY = 11.6 \times 10^3 Icorr$$
 (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、平均満潮位(H.W.L)を中心に上下約±1 m(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 …… ¢10cm のコアを採取。深さ方向 2cm ごとのコンクリート中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)

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



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 φ 19 mm の丸鋼が縦方向に約 30 cm間隔で,φ13 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、No1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

-187-



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-0.50m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+0.15mから+0.70m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~ 0.026mm)。一方,No2 地点の鉄筋のかぶり厚さは 8cm から 5 cmとNo1 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-90mV(3.3mol/l Ag/AgCl 電極換算)以上で「90%以上の確率で腐食なし」、 -230mV 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、Na1 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、腐食を起こしていな いNo2 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。腐食を起こしていたNo.1 地点の鉄筋の腐食速度が 0.0013~

0.0108 mm/年(0.11~0.93 μA/cm²)と評価されたのに 対し,腐食していなかったNo2 地点では 0.0005~ 0.0015 mm/年(0.04~0.13 μA/cm²)と全般的に小さい 値を示している。No1 およびNo2 地点を通して, 腐食速度値が 0.0015 mm/年以下と診断された個所 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 中の〇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部イオ 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⁹。たとえば,H.W.L.付近では表面から 4.5cm (No.2)~7.0cm(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 6.5cm (No.2)~8.5cm(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

ー般に、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²⁾。

 $\partial C / \partial t = D (\partial^2 C / \partial x^2)$ (3) $C(x,t) = C' + W \cdot (2\sqrt{t/\pi D} \cdot \exp(-x^2/4Dt) - (x/D) \cdot (1 - \operatorname{erf}(x/2\sqrt{Dt}))$ (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 (%/cm²·s), D; 見かけの拡散係数 (cm²/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= 1.6~2.9×10⁸ cm²/s, W=0.43~2.4×10⁹ %/ cm²·s (NaCl 換算で 0.44~ 2.4g/m²/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 Ccr (=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)

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。



図-13 腐食量(侵食深さ)の推定値と実測値との関係(2)

- (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 mm/年(0.13 µA/cm²)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