

# 既存 RC 構造物の鉄筋腐食モニタリング技術 Technology for corrosion monitoring of reinforcement in existing RC structures.

永山 勝\*

\* (財) 日本建築総合試験所 試験研究センター  
大阪府吹田市藤白台 5-8-1  
General building research corporation of Japan,  
Research & Testing center  
5-8-1, fujishirodai, Suita, Osaka

## 1. はじめに

建築物や土木構造物の建設において、コンクリートは耐久性に富み経済性も含めて、今なお優れた構造材料である。鉄筋や鉄骨をコンクリート部材に納めた構造形式は、構造力学上の利点以外にもコンクリートの強アルカリ性が鋼材を防錆するため耐久性を有する利点もある。

一方、RC（鉄筋コンクリート）構造物の初期状態の品質や早期劣化について、近年いくつかの問題が生じ、社会的問題として取り上げられることも多く、コンクリート構造物への信頼感・安心感が揺らぎつつある。これらの問題を概観すると、施工時の初期欠陥や不具合、塩化物の混入や浸入に起因する「塩害」に代表されるような早期劣化、古い構造物の経年劣化や現行の要求性能を満足しない等に大別できる。建設初期の欠陥や不具合の場合は、相応した調査・診断を踏まえて補修・補強が慎重に行われることが多いが、経年によって劣化現象が生じた構造物に対しては、劣化原因を究明しなければ適切な補修・補強は施せない。また、その補修・補強の効果が実際に発現されているか、また持続しているのか等、経過をモニタリングする必要性が高まっている。

劣化した構造物の補修や補強を失敗に終わらせないために、近年では多くの研究が行なわれ、関心が高まっている一方、安易な対処療法が行なわれているケースも未だに多

いのが実態である。特に劣化原因が鉄筋腐食によるケースは構造物の耐久性を脅かすことも少なくない。鉄筋腐食の場合は、腐食現象の進行程度や補修を施した場合の抑制効果を直接的にモニタリングすることが適切である。

筆者は、これまでに既存 RC 構造体において、コンクリート中の鉄筋近傍にミニセンサを埋設し、自然電位、分極抵抗、液抵抗を測定する手法<sup>1)~4)</sup>で鉄筋の腐食状態を遠隔モニタリングすることを提案してきた。この手法を活用して補修工事を行なうことで、補修の効果を定量的に把握することができると考えられる。また、長期間継続的にモニタリングすることで劣化が再度、顕在化する場合には、早期に対策を講じることができると考えられる。

本稿では、鉄筋腐食が生じた鉄道高架橋の床版に表面処理工法により試験施工（補修実験）を施す際にミニセンサを埋設し、3種類の表面処理工法による腐食抑制効果について比較・検討した事例について、施工後約3年間の計測によって得られた腐食の抑制傾向、ならびに鉄筋腐食モニタリングシステムの有用性について紹介する。

## 2. 遠隔鉄筋腐食モニタリングシステム

本システムは、構造物の鉄筋の近傍に埋設したミニセンサと現地に設置する腐食モニターおよび遠隔地にある測定監視室のホストコンピュータで構成されている（図1参照）。遠隔モニタリングの操作や各種の設定は、測定監視室

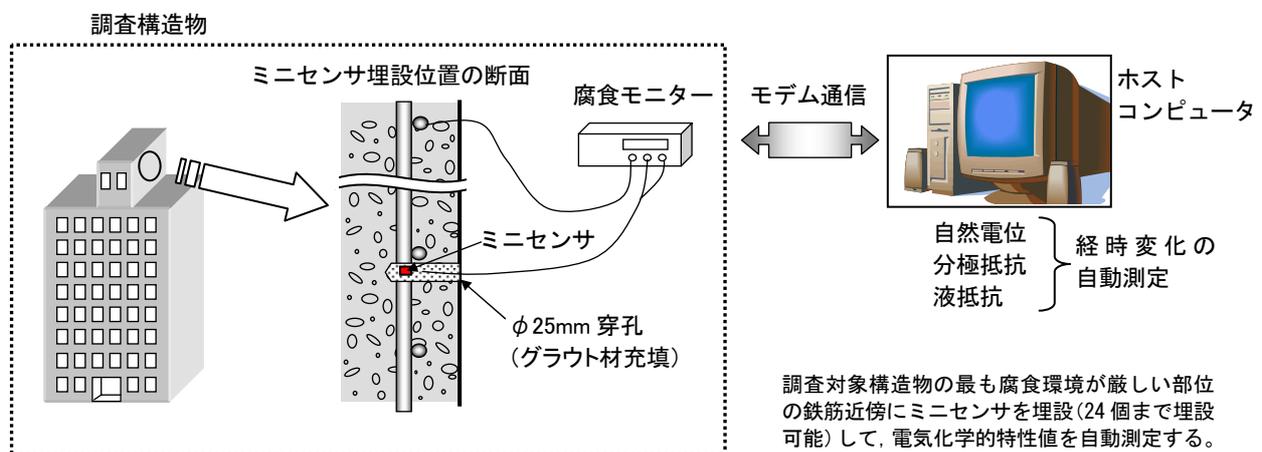


図1 遠隔鉄筋腐食モニタリングシステム

から行なう方法が基本であるが、現地の腐食モニターからの自動転送も可能であり、一定時間経過すると電話回線を使用して、測定監視室のホストコンピューターを呼び出し、自動的にデータを転送することもできる。

鋼材の腐食現象は明快な電気化学的反応であり、その反応速度（腐食進行速度）は、腐食を促進するような因子（例えば、塩化物イオンの有無や濃度、水分、酸素）と逆に鋼材を防食する因子（例えば、アルカリ濃度）のバランスで決定され、電気化学的特性値である自然電位や分極抵抗を測定することで腐食状態を推定することが可能である。また、コンクリート中の環境では水分量の変化によって腐食速度が大きく変化するため、水分量に関連した液抵抗を合わせて測定することが望ましい。これら電気化学的特性値と腐食状態の関係は以下のとおりである。

### 2.1 自然電位

鉄筋が錆びているかどうか推定できる特性値であり、一般に、表1に示すように鉄筋の自然電位が $-0.35\text{V}$ よりも卑（マイナス側）な場合、90%以上の確率で腐食が生じていると推定する。

表1 自然電位による腐食状態の評価<sup>5)</sup>

自然電位 (E) (V vs. CSE) *	鉄筋腐食の可能性
$-0.20 < E$	90%以上の確率で腐食なし
$-0.35 < E \leq -0.20$	不確定
$E \leq -0.35$	90%以上の確率で腐食あり

\*: 自然電位は、銅-硫酸銅電極基準 (CSE) で示す

### 2.2 分極抵抗

分極抵抗は腐食反応の速度を推定できる特性値である。一般に、分極抵抗の逆数と腐食速度が比例し、分極抵抗が小さいと腐食速度が速いと評価する。絶対値の判定は未だ確立していないが、その評価指標は表2のようなものが提案されている。

### 2.3 液抵抗

主にコンクリートの電氣的抵抗と鉄筋表面の抵抗を表す特性値であり、鉄筋が錆びやすい環境（塩化物や水分）にあ

るかどうか評価するのに利用する。

以下に各構成品の概要を述べる。

### 2.4 腐食モニター

腐食モニターは、交流矩形波電流分極法による重畳式二重パルス方式の装置を使用し、分極電圧が $4\sim 40\text{mV}$ の適正範囲に入るよう電流レンジを自動選択できるように設定しており、分極測定用パルス印加時間は8秒としている。このモニターは、測定機能と併せてモデム内蔵による通信機能を有している。測定データは、モニター内部のメモリに蓄積された後、ホストコンピューターからの転送命令、または本腐食モニターからの自動転送によりデータ転送を行なう。

### 2.5 ミニセンサ

ミニセンサは、既往の水溶液実験において電気化学的特性値を測定するための電極として十分な性能を保有していることを確認しており、その特徴は、下記のとおりである（写真1参照）。

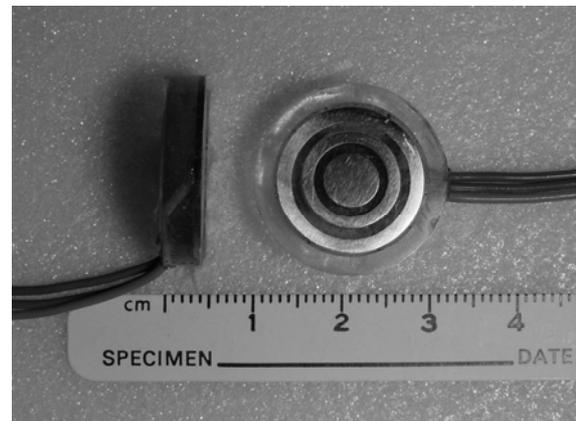


写真1 モニタリングに使用したミニセンサ

- (1) 鉄筋近傍に埋設することにより、かぶりコンクリート（部材表面から鉄筋までの間にあるコンクリート）の影響を最小限にした測定値が得られる。
- (2) 鉄筋の腐食状態・腐食速度・腐食環境を評価するための三種類の電気化学的測定値（自然電位、分極抵抗、液抵抗）を測定できる。

表2 分極抵抗値に基づく腐食速度とひび割れ発生年数の関係の評価（試案）<sup>6)</sup>

浸食度 V ( $\mu\text{m/year}$ )	腐食電流密度 $I_{\text{corr}}$ ( $\mu\text{A/cm}^2$ )	分極抵抗の平均値 $R_p$ ( $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ )*1	腐食速度の評価	ひび割れ発生年数の目安*2
$1.2 > V$	$0.10 > I_{\text{corr}}$	$260 < R_p$	停止状態	40年以上
$2.4 > V \geq 1.2$	$0.21 > I_{\text{corr}} \geq 0.10$	$124 < R_p \leq 260$	低速～許容範囲	20～40年
$4.9 > V \geq 2.4$	$0.42 > I_{\text{corr}} \geq 0.21$	$62 < R_p \leq 124$	中速	10～20年
$16 > V \geq 4.9$	$1.4 > I_{\text{corr}} \geq 0.42$	$19 < R_p \leq 62$	高速	3～10年
$V \geq 16$	$I_{\text{corr}} \geq 1.4$	$R_p \leq 19$	激しい速度	3年未満

\*1:  $R_p$  は、Stern & Geary による  $R_p$  と  $I_{\text{corr}}$  の関係式より、逆算して求めた。

$$I_{\text{corr}} = K \cdot 1/R_p \quad K: \text{実験定数 (C. Andrade らによる } 0.026\text{V を代入した)}$$

\*2: 直径 13mm の鉄筋がかぶり 2～3cm にあり、コンクリートに 0.10～0.20mm のひび割れが発生するのに要する年数。なお、ひび割れ発生時の腐食量は、鉄筋の断面欠損率（腐食減量率）で 1.5% として算定した。

- (3) ミニセンサは直径が約2cmの円盤状の小型センサであり、ステンレスを用いた円形の照合電極とリング状の対極およびガード対極を備えたものである。各電極の材料として、高耐久性を保有させるため金を使用している。
- (4) 実環境下での実構造物の連続腐食モニタリングが可能である。

### 3. 試験施工（補修実験）の概要

#### 3.1 対象構造物

試験施工を行った構造物は、写真2に示す鉄道高架橋である。本高架橋は、コンクリートの中酸化が約30mm程度まで進行しており、部位によっては鉄筋位置に達している箇所がある。また、コンクリート中の塩化物量は $1.47\text{kg/m}^3$ 存在し、腐食発生限界値（ $1.20\text{kg/m}^3$ ）を超えていることから、床版において内部鉄筋の腐食によるひび割れ等が生じ、劣化段階としては進展期にある構造物である。



写真2 試験施工を施した構造物

在阪の民間鉄道会社の高架橋であり、昭和52年に建設されたものである。上部工の側壁などは、過去にコンクリート片の剥落防止補修等の修繕を行っているが、床版下面は建設当時のままである。

#### 3.2 実験の内容

当該高架橋の床版の下面を対象とし、3種類の補修工法について各1床版、補修を行わない1床版（無補修）、計4床版を選定し、試験施工を行った。適用した補修工法は表3、各補修施工位置は図2のとおりである。また、施工の工程を図3に示す。なお、補修対象の4床版は、事前にひび割れ補修を行うか否かによる補修効果への影響を確認することを目的として、あらかじめ床版の半分についてのみ、ひび割れ補修を行った。

表3 適用した鉄筋腐食補修工法の種類

記号	補修工法名
A	陽極防錆剤塗布工法(亜硝酸リチウム)
B	水蒸気透過性表面被覆工法
C	気化性両極防錆剤塗布工法(アミノアルコール系)
D	無補修

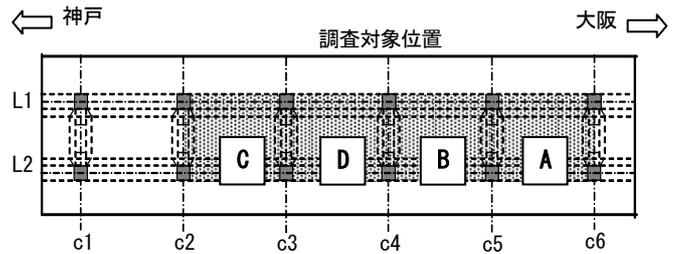


図2 試験施工を行なった高架橋床版の平面位置

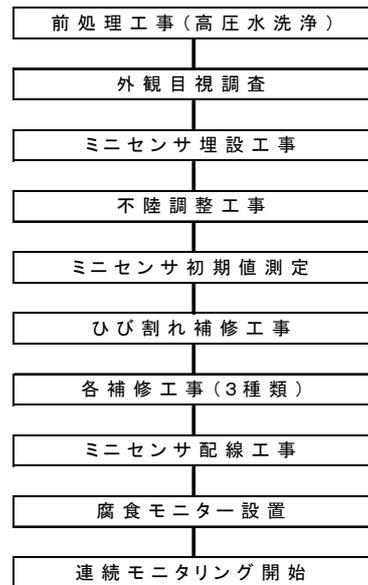


図3 試験施工の概略工程

#### 3.3 本事例のモニタリング仕様

本事例では、コンクリート中の鉄筋の電気化学的特性値（自然電位、分極抵抗および液抵抗）を2時間間隔で連続的に測定し、定期的に測定値を回収する方式を適用した。なお、電話回線の敷設が可能であれば、データのリアルタイムチェック、測定間隔の設定・変更、また異常発生時の回復などを全て遠隔操作が可能である。

図5に示すように、鉄筋探査により配筋位置を確認したうえで、対象鉄筋の近傍に $\phi 25\text{mm}$ の孔を穿孔して、埋設した。埋設数量は、各床版について、ひび割れ補修面に3箇所、ひび割れ非補修面に3箇所の計6箇所とした。なお、ミニセンサ埋設後に測定コードを延長し、自動腐食モニタリングシステムをc3通りの柱に設置した（図4、写真3参照）。

#### 3.4 各補修工法の仕様

コンクリート表面の清掃や付着物の除去のために、高圧水洗浄（ $70\sim 120\text{kg/cm}^2$ ）を行った。その後、ひび割れ幅が $0.4\text{mm}$ 以上のものを対象に無機系超微粒子注入材によって補修を行った。なお、ひび割れ補修は各床版の半分だけについて行った。以上の前処理工事後、下記の仕様により床版下面に対し3種類の防錆補修工法を施した。

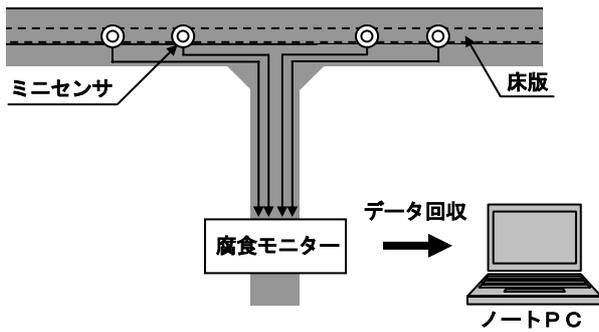


図4 調査対象高架橋における測定機器の構成

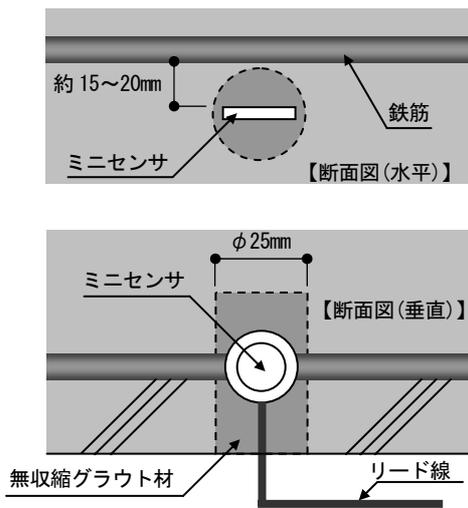


図5 RC床版下面主筋へのミニセンサ埋設位置



写真3 ミニセンサ設置後の床版下面

#### A: 陽極防錆剤塗布工法(亜硝酸リチウム)

コンクリート表面の清掃乾燥後、亜硝酸リチウム40%濃度の溶液をコンクリート表面にローラー塗りにより、塗布浸透させる。本工法における溶液の設計塗布量は $0.6\text{kg}/\text{m}^2$ であり、必要塗布量を3回に分けて塗布浸透させた。

#### B: 水蒸気透過性表面被覆工法

コンクリート表面の清掃乾燥後、含浸型のシラン系撥水材を塗布し、その上から、水蒸気透過性を有する柔軟型ポリマーセメントモルタルおよびビニロンメッシュをローラ

ーにより塗装する。仕上げとして水性トップコートにて被覆を行う。本工法に用いる材料は、無機質系高弾性コンクリート保護材と呼ばれ、中性化抑制やアルカリ骨材反応抑制用として市場に供給されているものである。

#### C: 気化性両極防錆剤塗布工法(アミノアルコール系)

コンクリート表面の清掃乾燥後、アミノアルコール系の両極防錆剤(アノード部・カソード部の両極を防錆する)をコンクリート表面にローラー塗りにより、塗布浸透させる。本工法における防錆剤の設計塗布量は $0.334\text{kg}/\text{m}^2$ であり、必要塗布量を2回に分けて塗布浸透させた。

## 4. 補修施工実験の結果

### 4.1 腐食モニタリングによる評価方法

電気化学的特性値による腐食抑制効果の評価方法は、施工直後の初期値が経過日数に伴って、相対的に変化する状況を把握することによった。自然電位の測定結果は、銅-硫酸銅電極基準(CSE)に換算した値を表示している。測定値の評価は、本来であれば表2に示した基準で絶対値評価を行なうことが理想的であるが、しかしながら、個々のミニセンサの電極の表面状態によって、その測定値には誤差が含まれていることが室内実験で分かっており、この誤差を定量化する方法が確立していないため、今回の施工実験では経時的な変化や傾向などを相対的に評価することとした。また、分極抵抗の評価は鉄筋表面の単位面積あたりの分極抵抗値( $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ )によって評価することが理想的ではあるが、上記と同じ理由により、現時点での腐食速度は相対的な経時変化を中心に評価することとした。

### 4.2 腐食モニタリング結果

モニタリング結果は、各床版に3箇所ずつ埋設したミニセンサのうち、代表する2箇所について、2001年2月から2004年3月までの約3年間のデータ(ひび割れ補修:有)を、図6.1~6.4に示した。なお、図中の各特性値のデータに一部途切れている部分があるが、これは、1箇所当たりの測定制限時間(3分間)内に、電気化学的に不安定な状態が継続したことで、測定値が得られていないことを示す。これらの結果の所見は以下のとおりである。

- (1) いずれの補修工法も「無補修(記号:D)」の床版と比較し、自然電位、分極抵抗および液抵抗の測定結果については、明瞭な違いは見られなかった。したがって、腐食抑制効果は未だ認められない。
- (2) しかしながら、「気化性両極防錆剤塗布工法(記号:C)」により補修した床版では、補修の直後から自然電位が貴な方向(グラフの縦軸で上方に)に変化しており、その値を持続している。ただし、約2年を経過した時点で一時的に卑な方向(グラフの縦軸で下方に)に変化する傾向を示したが、再び貴な方向に変化している。分極抵抗についても、補修の直後から他の工法に比べて増大している。「無補修(記号:D)」の分極抵抗の経時変化に

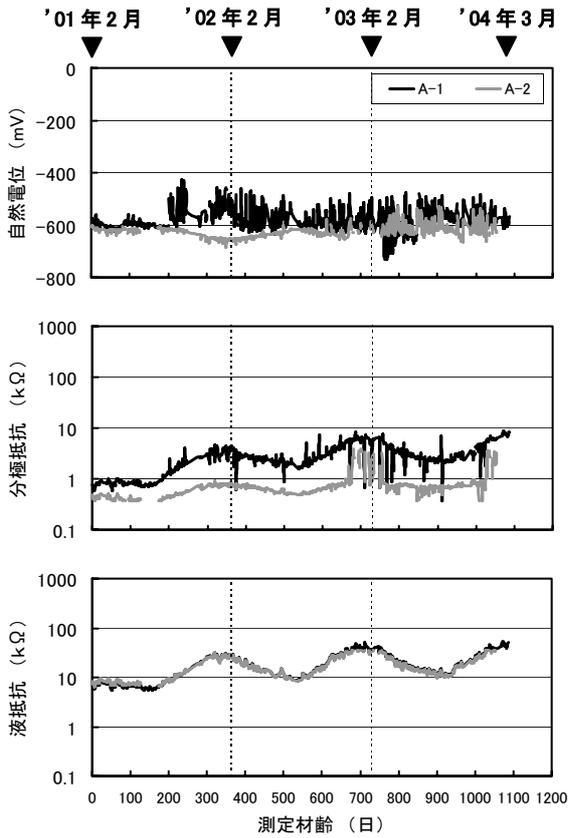


図 6.1 電気化学的特性値の経時変化  
(A:陽極防錆剤塗布工法 (亜硝酸リウム))

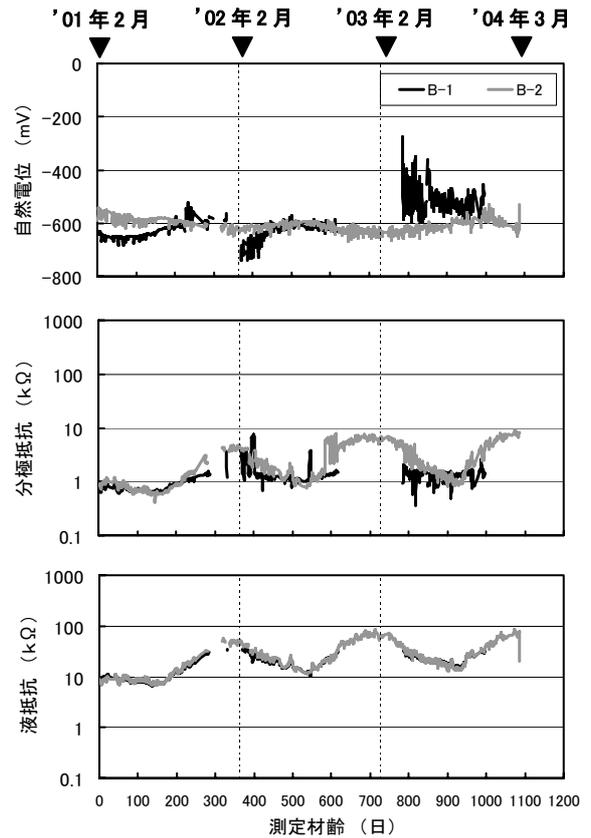


図 6.2 電気化学的特性値の経時変化  
(B:水蒸気透過性表面被覆工法)

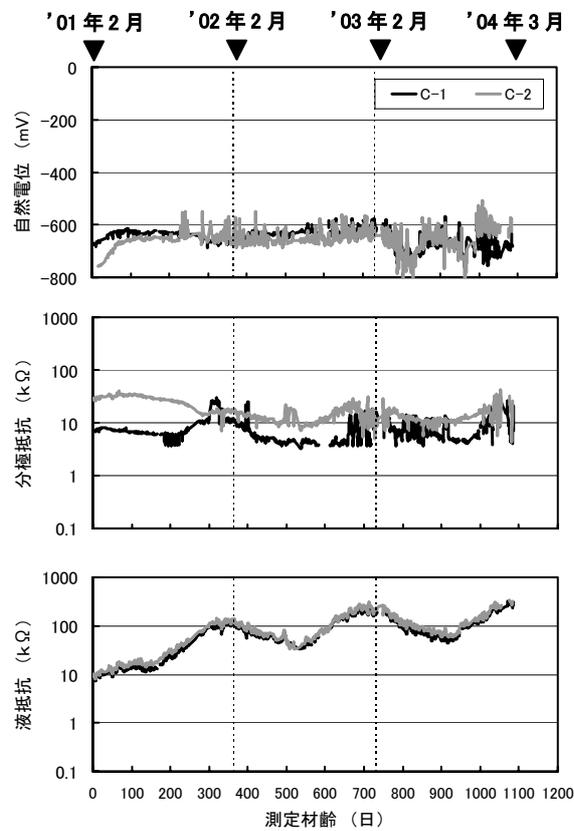


図 6.3 電気化学的特性値の経時変化  
(C:気化性両極防錆剤塗布工法 (アミノアルコール系))

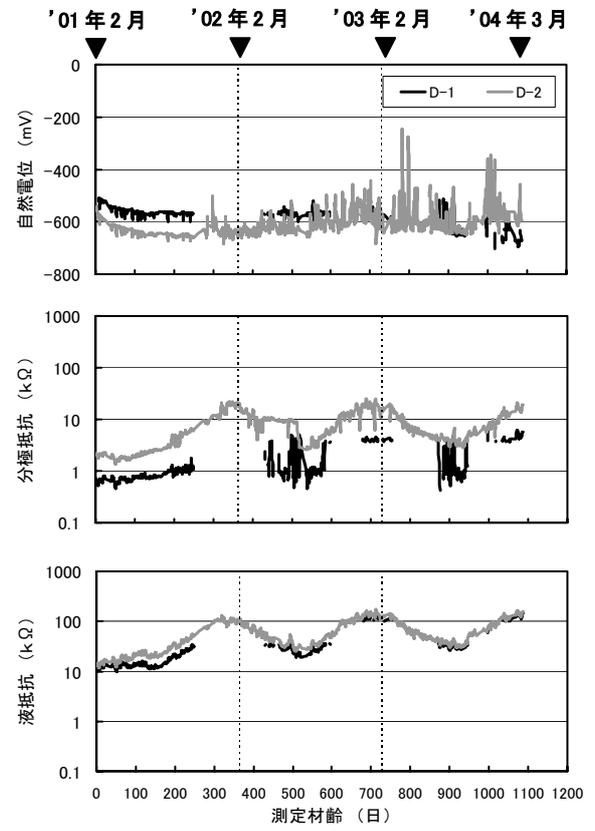


図 6.4 電気化学的特性値の経時変化  
(D:無補修)

において、夏季（高温環境時）に小さくなる傾向（図 6.4 参照）が見られるが、同工法ではその傾向が顕著に抑制されている。また、液抵抗についても、他の工法に比べ約 5～10 倍程度大きな値で推移しており、分極抵抗の傾向と一致している（図 6.3 参照）。これらの結果より、同工法は全般に腐食速度を抑制していると考えられる。

- (3) 「無補修（記号：D）」の各測定結果は、経時変化を巨視的に見れば、自然電位は、緩やかではあるが貴な方向に変化する時期や逆に卑な方向に変化する時期があり、単調ではない。また、その傾向は繰り返し認められる（図 6.4 参照）。このことから、環境変化の影響を受けて、緩やかではあるが腐食状況も変化していることが窺える。
- (4) 試験対象とした高架橋床版の下面は、常に乾燥した状況にあり、いずれの床版も液抵抗値が徐々に大きくなる傾向にあることから、腐食環境としては比較的穏やかな状況と考えられる。そのため、防錆効果の有無や優劣を評価するためには、さらにモニタリング期間を延長し、継続した計測することが必要であると考えられる。なお、各床版のひび割れ補修を行わなかった部分では、ひび割れ補修を行ったものと同様に、腐食傾向に有意な違いは認められていない。

#### 4.3 結果のまとめ

試験施工の実施から約 3 年を経過したが、補修を行った床版の再劣化および非補修部材の劣化進行は、今のところ見られない。雨がかりがなく乾燥した環境であることが腐食速度を抑えている要因のひとつと考えられる。本試験では、気化性両極防錆剤塗布工法において、防錆効果が早期に発現する傾向が見られたが、「無補修」と比べ明らかに異なる程の傾向ではなく、今後の推移を踏まえて評価する必要がある。

#### 5. おわりに

本稿では、効果的な補修工法を検討することを目的に行った試験施工の事例をとりあげ、その評価を行う一つの手法として、埋設型ミニセンサによる鉄筋腐食モニタリングを適用した事例を紹介した。同手法において、自然電位や分極抵抗といった電気化学的特性値の絶対値で鋼材の腐食状況を推定することが理想的であるが、実構造物を対象とした場合は、残念ながらセンサ表面の接触具合や計測対象面積の特定など幾つかの課題が残っている。しかしながら、本事例のように相対的な評価であっても現場での検証を行うことで、各種補修工法の補修効果や適用限界などに関する有用な知見が得られるものと考えられる。また、長期的な計測によって補修効果の評価やその持続性を評価することは重要なことであり、具体的な計測手法の一つとして、本手法は有用な計測法であると言える。

当試験研究センターでは、本稿で紹介した事例の他、新

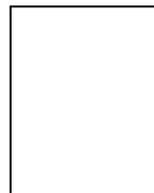
築構造物の健全性を確認することを目的として、建設時に対象部材に埋設型ミニセンサを設置しておき、鉄筋腐食遠隔モニタリングによる連続監視を実施中である。今後も、本モニタリングを高精度なものにするため、データの収集・整理に努め、鉄筋コンクリート構造物の維持管理に役立てていきたい。

#### 参 考 文 献

- 1) 下澤和幸, 田村博, 永山勝, 山本祐子: 「コンクリート構造物の鉄筋腐食遠隔モニタリング」, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No. 2, pp.997-1002, 1998
- 2) 下澤和幸, 田村博, 永山勝, 山本祐子: 「ミニセンサによる鉄筋腐食モニタリング (その 3. 実構造物の遠隔腐食モニタリング)」, 日本建築学会大会梗概集, 材料施工, pp.437-438, 1998.9
- 3) 下澤和幸, 田村博, 永山勝, 山本祐子: 「コンクリート構造物の鉄筋腐食遠隔モニタリング」, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.997-1002, 1999
- 4) 下澤和幸, 田村博, 永山勝, 山本祐子: 「コンクリート構造物の鉄筋腐食遠隔モニタリング」, 日本建築学会大会梗概集, 材料施工, pp.953-954, 1999.9
- 5) ASTM C876-91: Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing steel in Concrete.
- 6) 永山 勝: 学位請求論文『コンクリート構造物における鉄筋腐食の非破壊モニタリングに関する研究』, 名古屋大学大学院工学研究科, 1999.1

#### [著 者 紹 介]

なが やま まさる  
永 山 勝 君



1999 年名古屋大学大学院工学研究科博士課程修了, 博士 (工学)。1976 年 (財) 日本建築総合試験所に入社, 現在 材料部部長。日本建築学会, 日本コンクリート工学協会, 日本材料学会, 日本非破壊検査協会 など正会員