

## 報告 埋設ミニセンサーによる鉄筋腐食モニタリング

下澤 和幸\*<sup>1</sup>・田村 博\*<sup>2</sup>・永山 勝\*<sup>1</sup>

**要旨：**コンクリート中の鉄筋のごく近傍に埋設したミニセンサーで、かぶりコンクリートの影響を最小限化した自然電位・分極抵抗・液抵抗という三種類の電気化学的特性値を測定し、鉄筋の腐食状態・腐食速度・腐食環境を定量的に評価する、モニタリング手法を二種類の実験により検討した。その結果、塩化物イオンがなく鉄筋が腐食しない場合、塩化物イオンにより鉄筋が腐食した場合、それを補修した場合、補修しない場合のそれぞれの場合に対応する合理的な測定値が得られることが判った。

**キーワード：**電気化学的特性値、腐食モニタリング、ミニセンサー、腐食状態、腐食速度、腐食環境

### 1. はじめに

コンクリート構造物における鉄筋の腐食状態・腐食速度・腐食環境を定量的に評価するため、埋設ミニセンサー（以下、ミニセンサーと呼ぶ）を開発し実験を重ねている [1]。本報の実験は、ミニセンサー使用腐食モニタリング手法を用いた塩害コンクリート補修性能評価の有効性を検討する目的で実施したものである。塩化物イオン含有量を 0, 3 kg/m<sup>3</sup>と変化させたコンクリート供試体中の鉄筋のごく近傍にミニセンサーを埋設し、湿潤環境下における鉄筋腐食実験（実験Ⅰ）と、実験Ⅰで用いた塩化物イオン含有量 3 kg/m<sup>3</sup>の供試体を、補修業者の手で、施工マニュアルに従って亜硝酸リチウムと亜硝酸リチウム混入高炉スラグ系ポリマーセメントモルタルで補修した供試体（以下、補修供試体と呼ぶ）と無補修の供試体（以下、無補修供試体と呼ぶ）を製作し、腐食促進環境下における鉄筋腐食実験（実験Ⅱ）を行った。本報では、両実験の結果、ミニセンサーによる腐食モニタリングで得られた電気化学的特性値で、コンクリート中の鉄筋の腐食状態・腐食速度・腐食環境の定量的評価できる可能性が高いことを報告する。

### 2. 実験方法

実験ⅠおよびⅡの実験方法は下記のとおりである。なお、供試体は供試鉄筋（φ13mmみがき鉄筋：長さ10cm）をかぶり厚さ 2 cmおよび 3 cmに各 2 本ずつ水平に埋設させた鉄筋コンクリート供試体であり、形状および寸法を図-1に示す。また、使用したコンクリートはW/C=65%とした。

**実験Ⅰ：**塩化物イオン含有量を 0 および 3 kg/m<sup>3</sup>のコンクリート中鉄筋の近傍にミニセンサーを埋設して腐食モニタリングを行った。ミニセンサーは、かぶり厚さ 2 cmおよび 3 cmの鉄筋の上面、下面および側面に鉄筋からの距離 1 mmに固定した（写真-1, 写真-2参照）。供試体については、材齢 1 日の脱型直後から 60 日間 20°C100%RHで湿潤養生し、養生開始から 1 時間ピッチで連続的に腐食モニタリングを行った。

**実験Ⅱ：**実験Ⅰで使用した供試体と同時に製作した、塩化物イオン含有量 3 kg/m<sup>3</sup>の供試体について、初期養生後（実験Ⅰの養生）コンクリート表面から亜硝酸リチウム水溶液を浸透させた

\*1: 日本建築総合試験所 材料試験室 研究員（正会員）

\*2: 日本建築総合試験所 材料試験室 室長, 工博（正会員）

後に亜硝酸リチウム混入高炉スラグ系ポリマーセメントモルタルを塗布した補修供試体を製作し、無補修供試体とともに環境条件を乾燥（50℃30%RH）と湿潤（40℃100%RH）を約1週間ピッチで繰り返す、乾湿繰り返し養生とし、腐食モニタリングは養生開始から2時間ピッチで連続的に行った。

なお、両実験ともに腐食状態の確認を目的として製作したコントロール用供試体を破壊して鉄筋を取り出し、腐食面積および腐食減量を測定した。

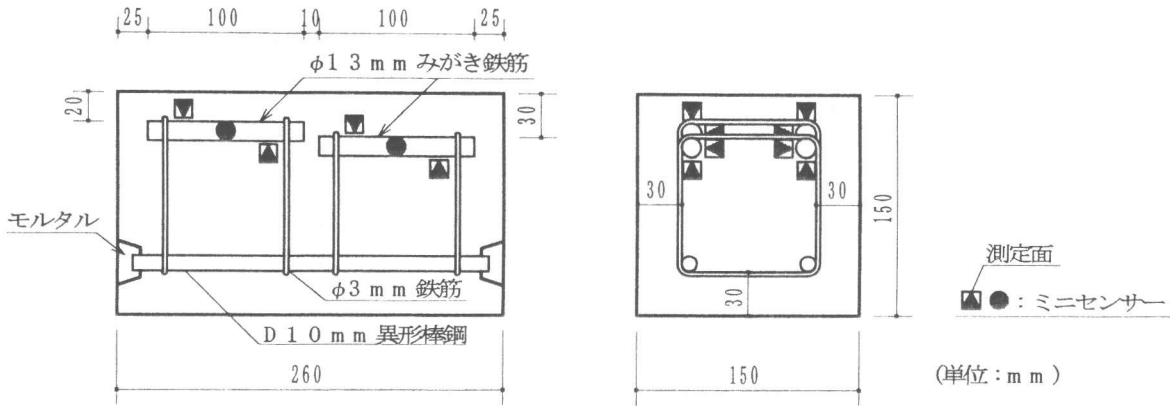


図-1 鉄筋コンクリート供試体

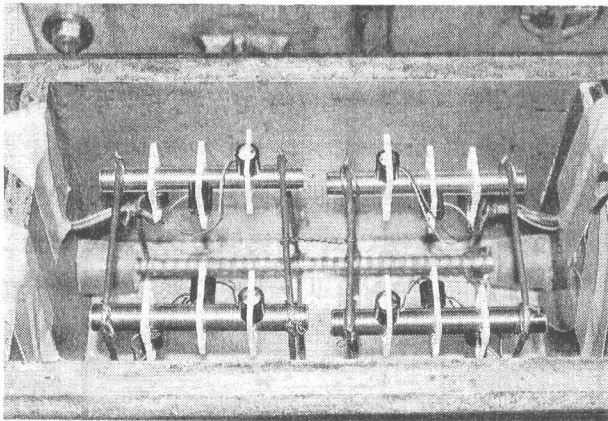


写真-1 埋設ミニセンサーと配筋状況

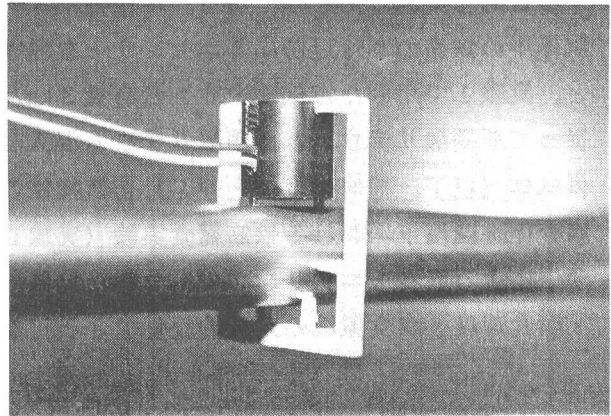


写真-2 ミニセンサーの鉄筋への固定状況

### 3. 実験結果および考察

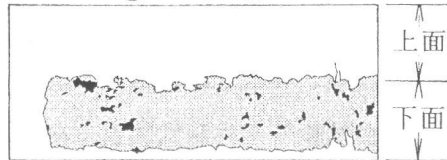
#### 3.1 実験 I

①腐食状態に関係する自然電位測定値は、塩化物イオン含有量0および3 kg/m<sup>3</sup>に対応してそれぞれ、約0mV、-200mV以下となった。これを銀塩化銀電極基準電位に換算すると、約-100、-300mV以下となり（電位換算の詳細については今後別途報告の予定である）、取り出した鉄筋の腐食状態と一致した（表-1、図-2、図-3.1、3.2参照）。

Cl<sup>-</sup> = 0 kg/m<sup>3</sup> (かぶり厚さ3cm)



Cl<sup>-</sup> = 3 kg/m<sup>3</sup> (かぶり厚さ3cm)



凡例) : 薄錆発生部, : 孔食部

図-2 腐食状況観察結果（実験 I）

表-1 腐食面積・腐食減量測定結果

実験	環境条件	塩化物量 (kg/m <sup>3</sup> )	かぶり厚さ (cm)	防食処理 の有無	材 齢 (日)	腐食面積 A (mm <sup>2</sup> )	腐食減量 w (mg)
I	湿 潤	0	3	—	60	35	7
		3	3			1672	512
II	乾 湿 繰り返し	3	2	有	2 4 3	1965	410
			3			1920	332
			2	無		3926	2871
			3			3225	1933

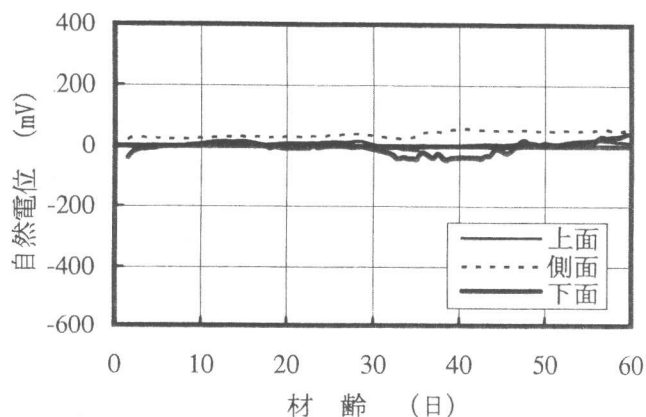


図-3.1 自然電位の経時変化  
(Cl<sup>-</sup>=0kg/m<sup>3</sup>, かぶり厚さ3cm)

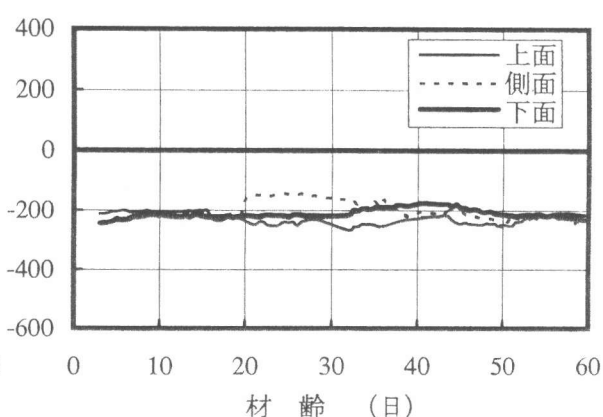


図-3.2 自然電位の経時変化  
(Cl<sup>-</sup>=3kg/m<sup>3</sup>, かぶり厚さ3cm)

②腐食速度に関する分極抵抗測定値は、塩化物イオン含有量により異なる傾向を示した。塩化物イオン含有量0 kg/m<sup>3</sup>の場合には10 k Ω から材齢とともに増大し、塩化物イオン含有量3 kg/m<sup>3</sup>の場合には10 k Ω より小さな値を繰り返し示しながら材齢とともに増大する傾向を示した(図-4.1, 4.2参照)。

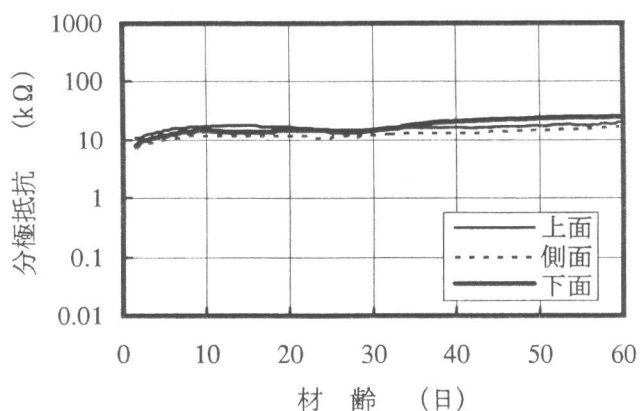


図-4.1 分極抵抗の経時変化  
(Cl<sup>-</sup>=0kg/m<sup>3</sup>, かぶり厚さ3cm)

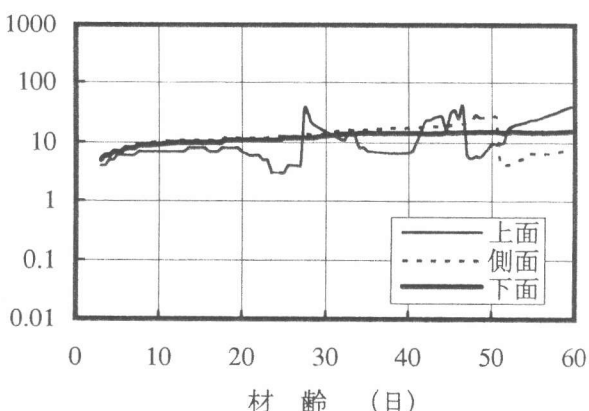


図-4.2 分極抵抗の経時変化  
(Cl<sup>-</sup>=3kg/m<sup>3</sup>, かぶり厚さ3cm)

③腐食環境に関する液抵抗測定値も、塩化物含有量により異なる傾向を示した。塩化物イオン

含有量  $0 \text{ kg/m}^3$  の場合には  $1 \sim 5 \text{ k}\Omega$  のほぼ一定値を示したが、塩化物イオン含有量  $3 \text{ kg/m}^3$  の場合には、鉄筋下面では小さな値となるなど、ミニセンサーの設置位置の違いにより測定値が大きく異なった。これは、鉄筋下面での腐食部分に塩化物イオンが濃縮されるなど、鉄筋周囲の塩化物イオン濃度の不均一が関係しているのではないかと考えられた（図-2、図-5.1、5.2参照）。

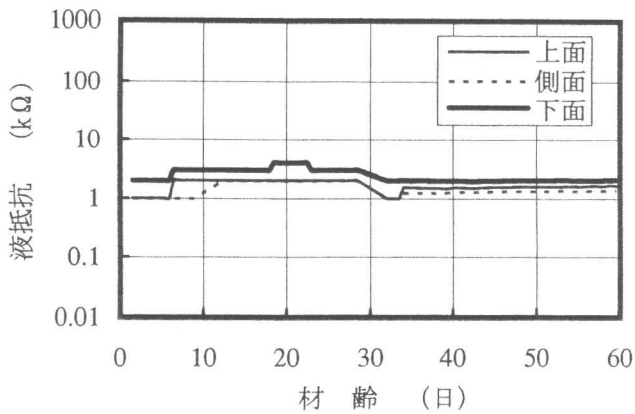


図-5.1 液抵抗の経時変化  
( $\text{Cl}^- = 0 \text{ kg/m}^3$ , かぶり厚さ  $3 \text{ cm}$ )

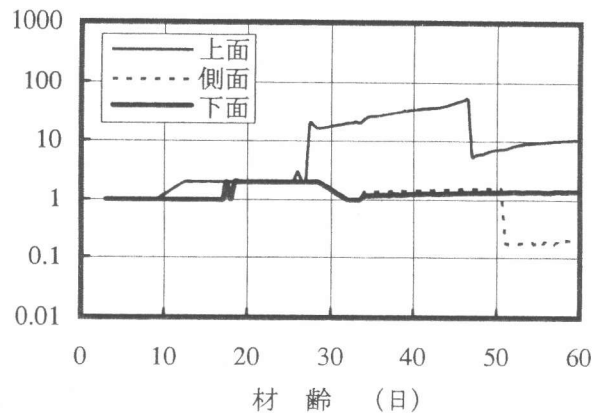


図-5.2 液抵抗の経時変化  
( $\text{Cl}^- = 3 \text{ kg/m}^3$ , かぶり厚さ  $3 \text{ cm}$ )

### 3.2 実験II

①亜硝酸リチウムによる補修供試体と無補修供試体とでは、腐食促進養生を行った結果、コンクリート中の鉄筋の腐食状態や形態に違いが認められた（表-1、図-6参照）。

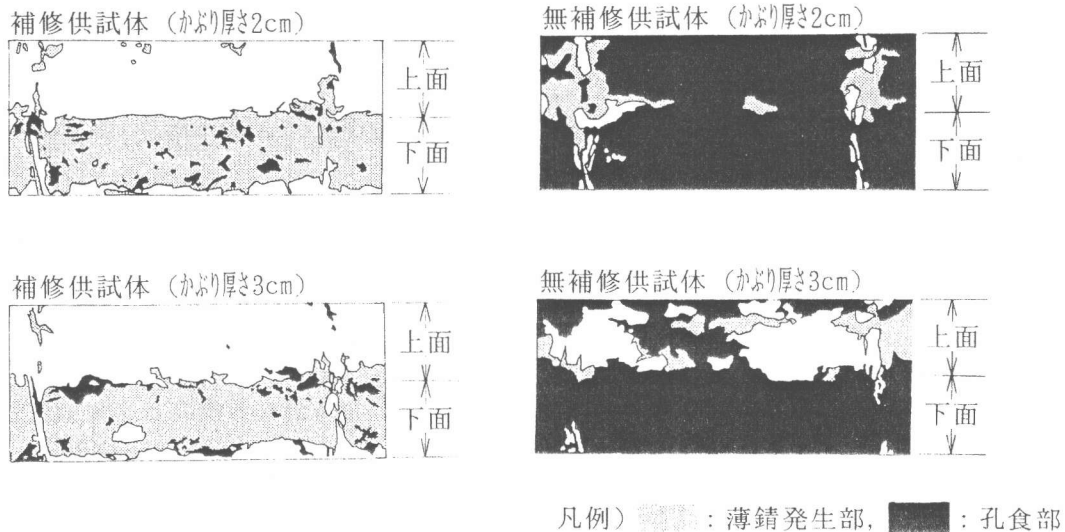


図-6 腐食状況観察結果（実験II）

②自然電位測定値では、補修した供試体では約  $0 \text{ mV}$  とほぼ一定値であるのに対し、無補修供試体では初期の時点で一時的な期間ではあるが約  $-300 \text{ mV}$  の値を示した。この結果を、実験Iと同様に銀塩化銀電極基準電位に換算してみると、補修したものは約  $-100 \text{ mV}$ 、無補修のものは約  $-400 \text{ mV}$  となり、腐食状態と一致する値であった（図-7.1~7.4参照）。

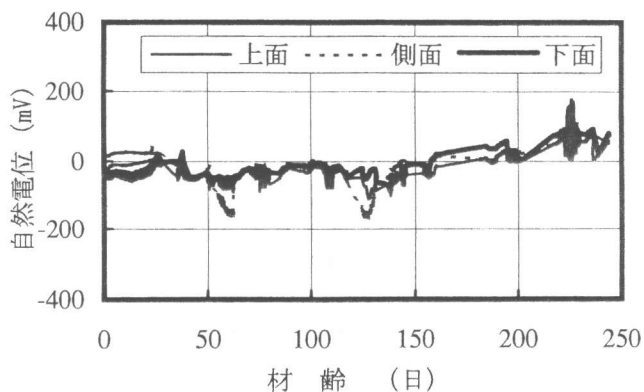


図-7.1 自然電位の経時変化  
(補修, かぶり厚さ3cm)

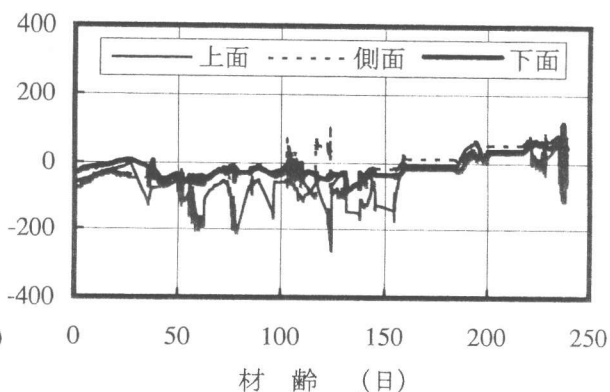


図-7.2 自然電位の経時変化  
(補修, かぶり厚さ2cm)

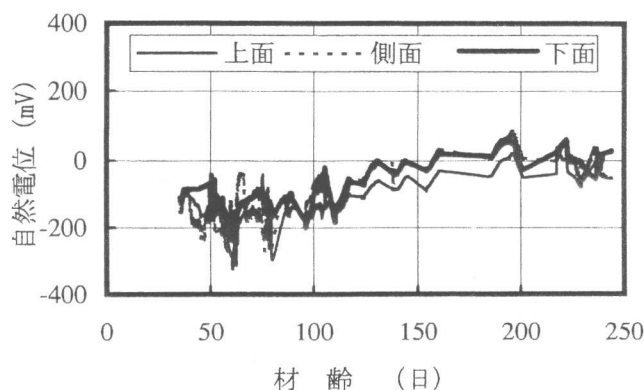


図-7.3 自然電位の経時変化  
(無補修, かぶり厚さ3cm)

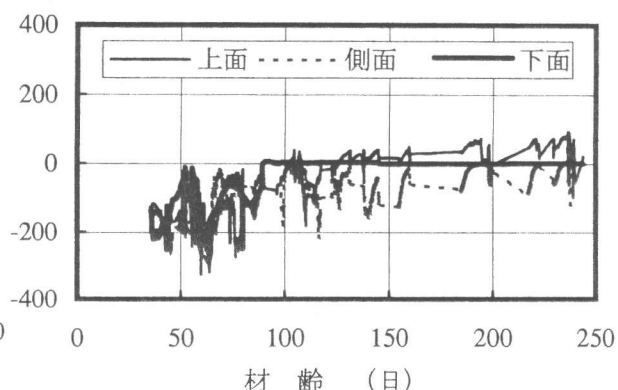


図-7.4 自然電位の経時変化  
(無補修, かぶり厚さ2cm)

③分極抵抗測定値は、補修供試体では約 $10\text{ k}\Omega\sim 100\text{ k}\Omega$ の範囲であった。無補修供試体は材齢とともに $1\text{ k}\Omega$ よりも小さな値となっていく傾向が認められた。補修供試体のかぶり厚さ $2\text{ cm}$ の上面では比較的小さな値を示したが、測定値は変動しながら次第に大きくなる傾向であった(図-8.1~8.4参照)。

④液抵抗測定値では、腐食状態が最も進行していた、無補修のかぶり厚さ $2\text{ cm}$ の液抵抗測定値が $1\text{ k}\Omega$ 以下の一定値を示し、腐食環境が厳しかったことが推測された(図-9.1~9.4参照)。

⑤腐食促進養生により、無補修供試体には約200日目後に約 $0.15\text{ mm}$ 程度の軸方向ひび割れが生じた。225日目頃に鉄筋の下面に設置したミニセンサーの分極抵抗および液抵抗測定値が一層小さな値に変化していったことはひび割れ発生の影響と考えられる。(図-8.3, 8.4, 9.3, 9.4参照)。

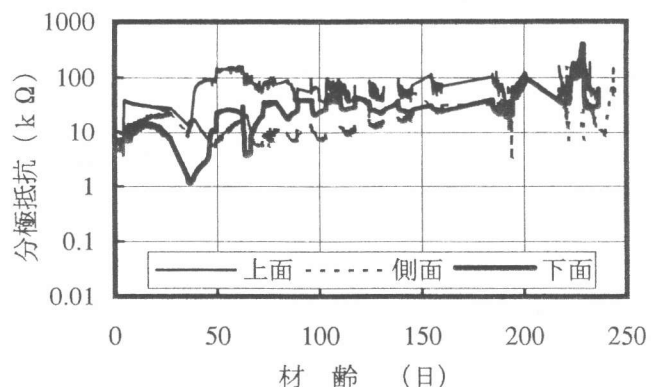


図-8.1 分極抵抗の経時変化  
(補修, かぶり厚さ3cm)

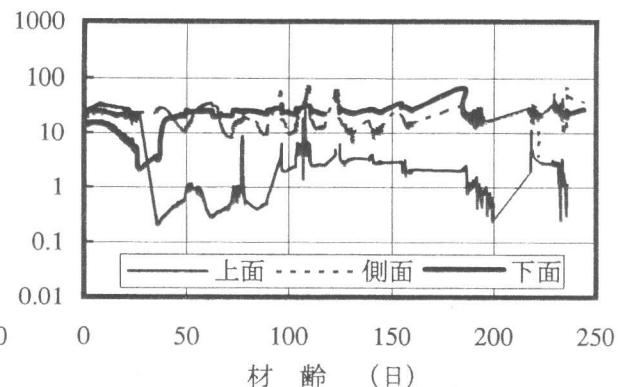


図-8.2 分極抵抗の経時変化  
(補修, かぶり厚さ2cm)

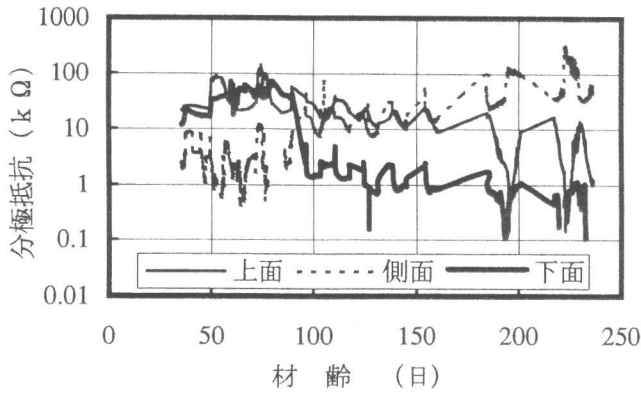


図-8.3 分極抵抗の経時変化  
(無補修, かぶり厚さ3cm)

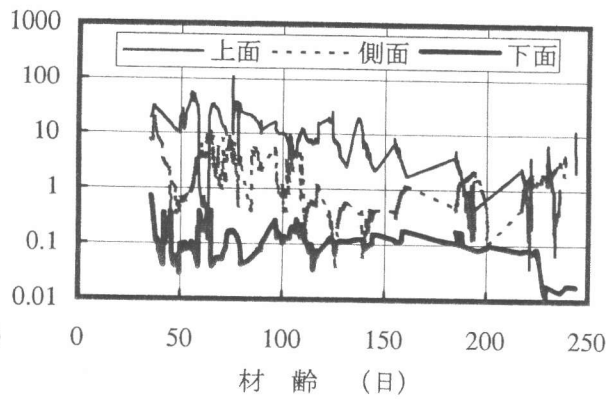


図-8.4 分極抵抗の経時変化  
(無補修, かぶり厚さ2cm)

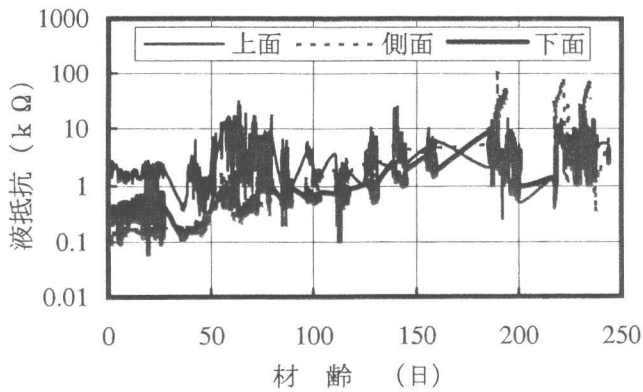


図-9.1 液抵抗の経時変化  
(補修, かぶり厚さ3cm)

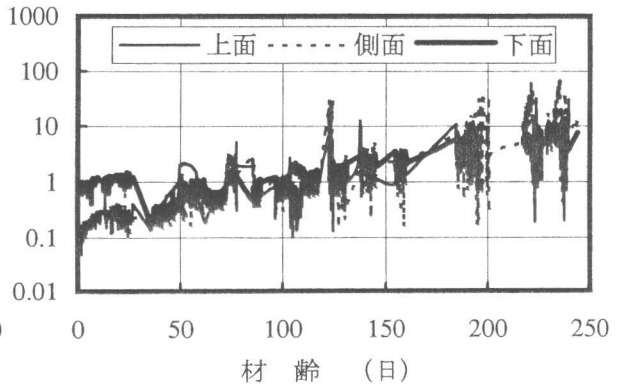


図-9.2 液抵抗の経時変化  
(補修, かぶり厚さ2cm)

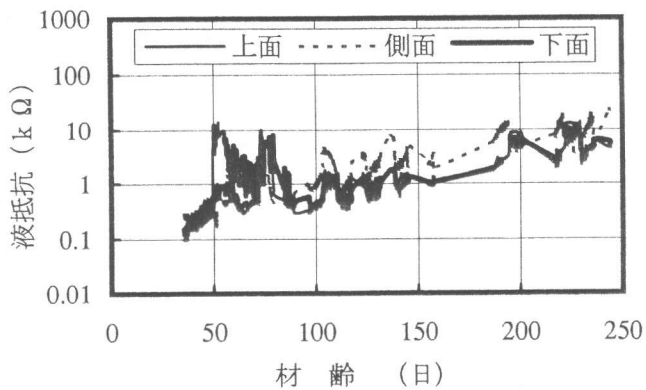


図-9.3 液抵抗の経時変化  
(無補修, かぶり厚さ3cm)

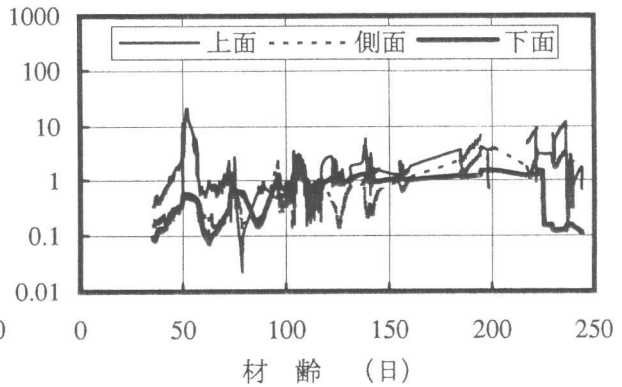


図-9.4 液抵抗の経時変化  
(無補修, かぶり厚さ2cm)

#### 4. まとめ

本実験の結果, コンクリート中に埋設したミニセンサーによる鉄筋腐食モニタリングで得られる, 自然電位・分極抵抗・液抵抗の測定値が, コンクリート中の鉄筋の腐食状態・腐食速度・腐食環境の推定に対して, それぞれ有効なことが明らかとなった。

今後もミニセンサーによるモニタリングデータの収集・整理を行って鉄筋の腐食状態・腐食速度・腐食環境の定量的判定基準を策定するなどして, ミニセンサーを用いたコンクリート中の鉄筋腐食モニタリング手法を確立したい。

[謝辞] 供試体の補修にあたっては, 国際コンクリートリフォーム技術協会・会員の協力を得た。ここに謝意を表します。

#### (参考文献)

1. 下澤和幸・田村博・永山勝: 小型埋設センサーによる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. 16, No. 1, pp. 793-798, 1994