

論文

[1091] 腐食モニタリング測定値に関する一考察

正会員 〇田村 博 (日本建築総合試験所)

正会員 永山 勝 (日本建築総合試験所)

下澤和幸 (日本建築総合試験所)

1. はじめに

著者らは、自然電位のみならず、分極抵抗、液抵抗を測定し、これら3つの測定値を用いて、コンクリート中の鉄筋の腐食状況として、腐食の有無のみならず腐食速度をも推定する腐食モニタリング手法 (GBRC腐食モニタリング法) を、数年来検討してきている。<sup>1)~5)</sup>

コンクリート中の鉄筋の腐食モニタリングへの自然電位、分極抵抗といった電気化学的特性値の利用は有効ではあるが、未解決の部分も多く、充分な信頼を得るには至っていないのが現状である。そこで著者らは、基本に立ちかえて、コンクリート表面で得られる自然電位、分極抵抗、液抵抗といったすべての電気化学的特性値の意味を明らかにする必要があるとの見地にたち、同課題を解決するために有効な基礎的実験手法を考案し、コンクリート表面で得られる電気化学的特性値が、等価電気回路を用いて、鉄筋に関する電気化学的特定値とコンクリートに関する電気化学的特性値で表されること (腐食モニタリング基本式) を、明らかにした。<sup>3)</sup>

さらに、この基本式を用いて、腐食モニタリング測定値の解釈を行おうとすれば、鉄筋の腐食に関する電気化学的特性値のみならず、コンクリートの電気化学的特性値についても詳細な検討が必要である。これまでに実施した、これら電気化学的特性値に関する検討の結果、若干の基礎的なデータが得られている。<sup>4) 5)</sup>

本報告は、これらのデータと腐食モニタリングに関する基本式を、比較的単純なモデルに適用し、鉄筋の腐食面積・かぶり厚さや鉄筋の長さが、コンクリート表面で得られる自然電位、分極抵抗や液抵抗といった腐食モニタリング測定値に及ぼす影響について検討したものである。

2. 腐食モニタリング基本式<sup>3)</sup>

コンクリート表面で得られる測定値 ( $E$ : 自然電位,  $R_p$ : 分極抵抗,  $R_s$ : 液抵抗) は、図-1に示すように、鉄筋をユニットに区分することにより、鉄筋の各ユニットに関する電気化学的特性値 ( $sE_i, sR_{pi}, sR_{si}$ ) と、各鉄筋ユニットと測定用プローブの間にあるコンクリートに関する電気化学的特性値 ( $cE_i, cR_{pi}, cR_{si}$ ) を用いた下記の式で表される。

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{\sum_{i=1}^n (R_{pi} + R_{si})} \quad (1)$$

$$\frac{1}{R_s} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{si}} \quad (2)$$

$$\frac{1}{R_p + R_s} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{pi} + R_{si}} \quad (3)$$

ここに、

$$E_i = sE_i + cE_i \quad (4)$$

$$R_{pi} = sR_{pi} + cR_{pi} \quad (5)$$

$$R_{si} = sR_{si} + cR_{si} \quad (6)$$

3. 算定例

対象モデル: 図-2に示すように、かぶり厚さ  $t$  で配置された鉄筋 (全ユニット数:  $N$ , 単一

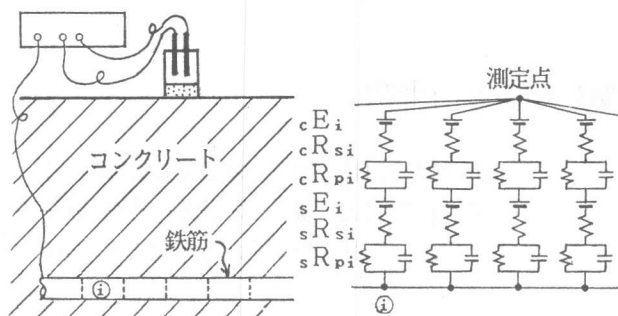


図-1 測定点と鉄筋ユニットを結ぶ電気回路

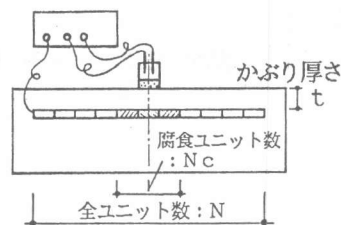


図-2 算例対象モデル

ユニットの長さ：45mm（＝測定用プローブ底面直径）の中央部が腐食し、腐食ユニット数が  $N_c$  の場合の、コンクリート表面中央部での測定値を主として求めた。かぶり厚さ  $t=2, 4, 6, 8, 10$ cm, 全ユニット数  $N=1\sim 101$ （全長：45～4545mm），腐食ユニット数  $N_c$  は1～11（腐食部長さ：45～495mm）に変化させた。

コンクリートに関する電気化学的特性値：コンクリートに関する電気化学的特性値は、コンクリートの含水状態によって著しく変化するが、今回の検討では、飽水状態を対象とすることとし、コンクリートの内部電位差  $cE_i$  は零と仮定した。<sup>2)</sup> また、コンクリートの抵抗は、 $W/C=55\%$  のコンクリート板（19×40cm,  $t=4, 6$ cm）ならびにコンクリート柱体（8×8×19cm）の飽水状態における電気抵抗を、底面直径45mmの二極プローブ（白金対極と銀・塩化銀電極を飽和KCl溶液に浸漬し、測定面（底面）には塩橋（KCl飽和寒天）を設けたもの）と同径の試験極プローブ（鉄筋を電解液に長期間浸漬して定常状態とし、測定面（底面）には塩橋（KCl飽和寒天）を設けたもの）を用いて測定し、<sup>2)</sup> その結果を用いた。なお、コンクリートの抵抗に及ぼす鉄筋径の影響を考慮する場合には、コンクリートに接する試験極プローブの接触面は、鉄筋ユニットがコンクリートに接する形態を模擬した、例えば長さは鉄筋ユニット長さ（45mm）で幅を鉄筋径とした長方形とするのがよいと考えており、現在検討中である。得られた結果を抵抗率（ $c\rho_{pi}$ ：分極抵抗率,  $c\rho_{si}$ ：液抵抗率）で表すと下記のとおりとなり、分極抵抗： $cR_{pi}=c\rho_{pi}\cdot l/A$ , 液抵抗： $cR_{si}=c\rho_{si}\cdot l/A$ で与えた（ $l$ ：プローブ間距離（cm）， $A$ ：プローブの底面積（ $cm^2$ ）。

$$l < 40 \text{ cm のとき} : c\rho_{pi}=0.741 \times l^{-0.842358}, \quad c\rho_{si}=9.842 \times l^{-0.535718}$$

$$l \geq 40 \text{ cm のとき} : c\rho_{pi}=0.741 \times (40)^{-0.842358}, \quad c\rho_{si}=9.842 \times (40)^{-0.535718}$$

上式に示すように、実験結果によれば、 $c\rho_{pi}$ ,  $c\rho_{si}$ はともに、 $l$ のある限界値までは一定値でなく  $l$  の関数となっており、興味深い。現在この点について、さらに詳細な検討を行っている。  
鉄筋に関する電気化学的特性値：鉄筋の腐食部ならびに健全部の電気化学的特性値の一例として、前者には鉄筋（供試長さ：45mm）を  $Ca(OH)_2$  飽和水溶液に浸漬したとき、後者には同鉄筋を  $NaCl-2\%$  とした  $Ca(OH)_2$  飽和水溶液に浸漬したとき、それぞれ3日後に得られた下記の測定値を与えることとした（文献5）とはほぼ同様の別の実験による）。

腐食部： $sE_i=-481\text{mV}$ ,  $sR_{pi}=0.166\text{k}\Omega$ ,  $sR_{si}=0.028\text{k}\Omega$

健全部： $sE_i=-148\text{mV}$ ,  $sR_{pi}=1.495\text{k}\Omega$ ,  $sR_{si}=0.048\text{k}\Omega$

### 3. 結果および考察

算定結果を図-3.1～5.3に示す。これらの図から、次のようなことが明らかとなった。  
自然電位について（図-3.1, 4.1, 5.1）：

- ・全面腐食あるいは全面健全の場合には、かぶり厚さや鉄筋の長さに関係なく、鉄筋表面の自然電位値  $sE_i$ （＝一定）がコンクリート表面で測定される。コンクリートが飽水状態の場合に

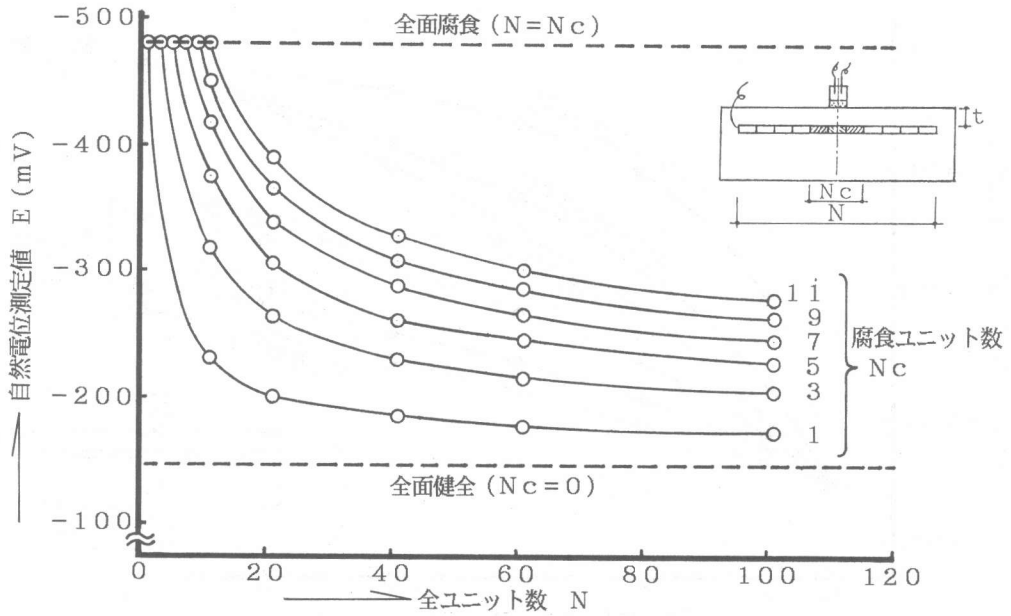


図-3.1 鉄筋長さ・腐食面積と自然電位測定値

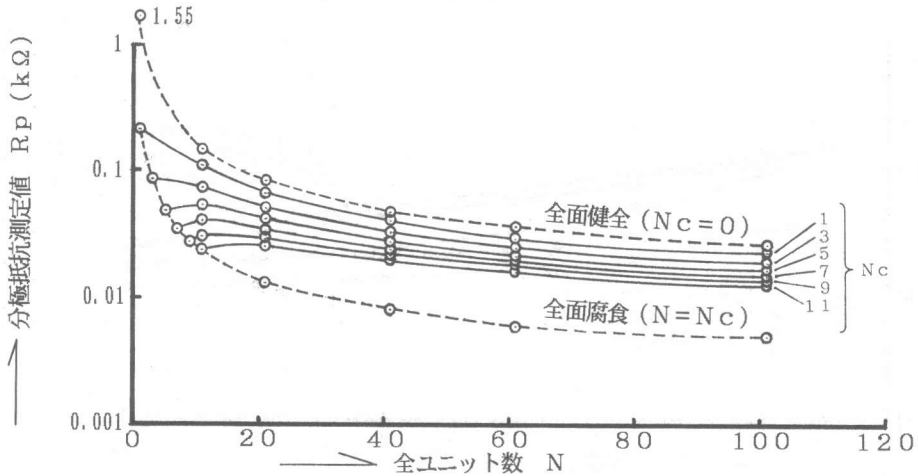


図-3.2 鉄筋長さ・腐食面積と分極抵抗測定値

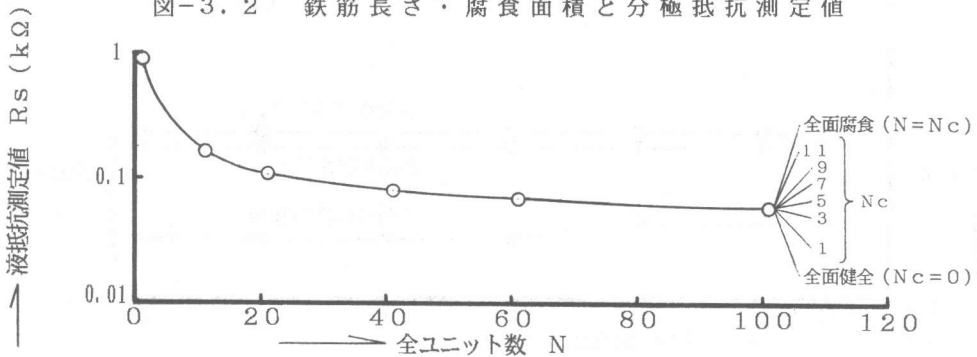


図-3.3 鉄筋長さ・腐食面積と液抵抗測定値

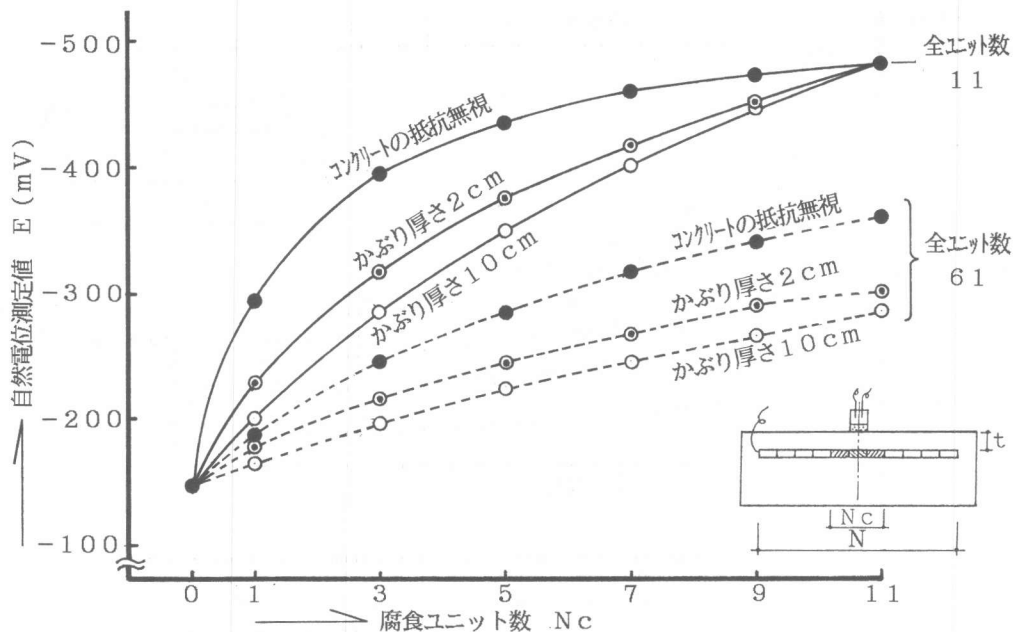


図-4.1 かぶり厚さ・腐食面積と自然電位測定値

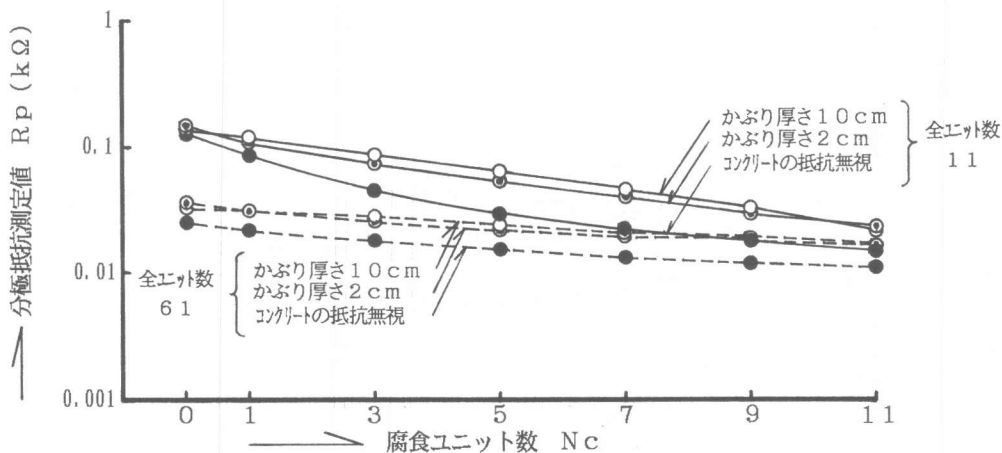


図-4.2 かぶり厚さ・腐食面積と分極抵抗測定値

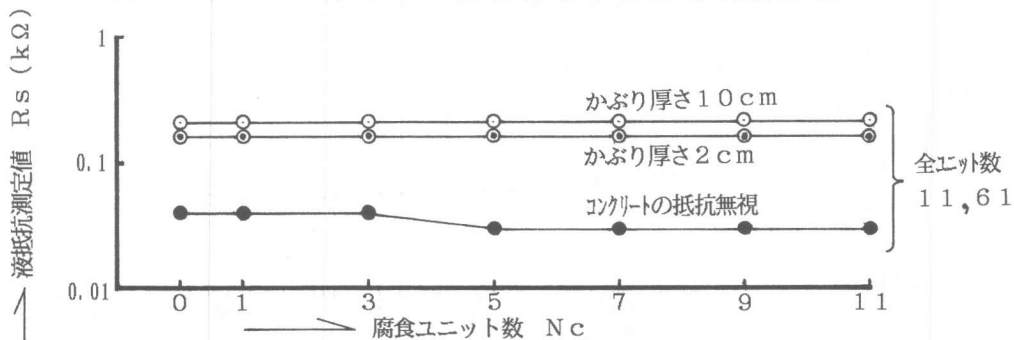


図-4.3 かぶり厚さ・腐食面積と液抵抗測定値

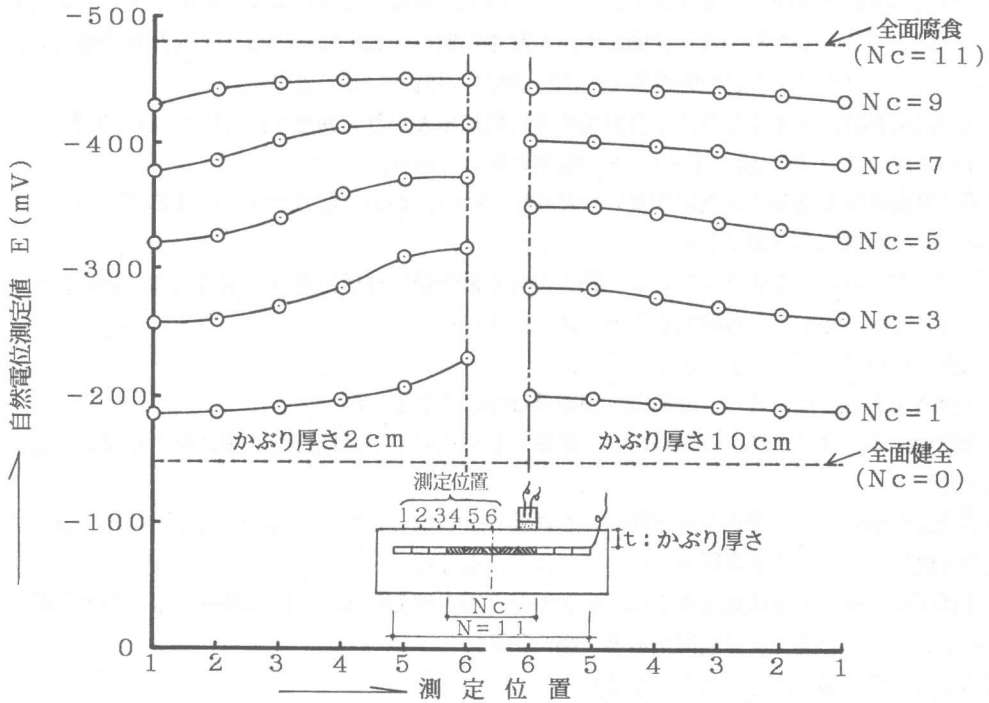


図-5.1 腐食面積と自然電位測定値の分布

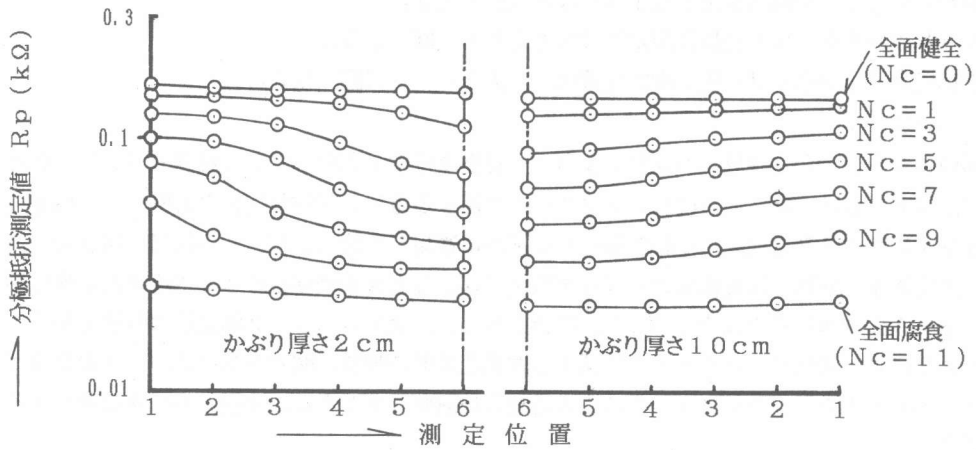


図-5.2 腐食面積と分極抵抗測定値の分布

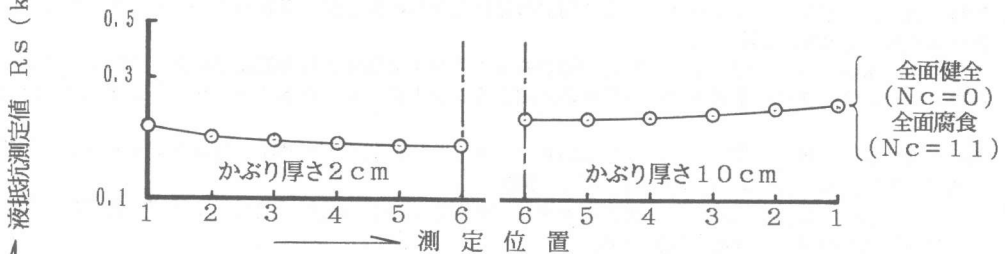


図-5.3 腐食面積と液抵抗測定値の分布

は、今回の検討で無視したようにコンクリートの内部電位差  $cE_i$  は零と考えてよく、上記のことが成立する。しかし、含水状態がかぶり厚さ方向に一様でない場合には内部電位差  $cE_i$  が存在し、コンクリート表面各位置での測定値は  $(sE_i + cE_i)$  となる。<sup>2)</sup>

- ・鉄筋の腐食面積が大きくなるほど自然電位測定値は卑となり、鉄筋が短いほど(図-3.1)、かぶり厚さが小さいほど(図-4.1)、その傾向は顕著である。
- ・鉄筋の腐食面積が同じでも鉄筋が長いほど(図-3.1)、かぶり厚さが大きいほど(図-4.1)、より貴な自然電位が測定される。
- ・自然電位測定値の分布状態をもとに、腐食部分と健全部分の区分を行う場合には、かぶり厚さの小さい方が、容易となる傾向がある(図-5.1)。

分極抵抗について(図-3.2, 4.2, 5.2) :

- ・腐食面積が大きくなるほど、分極抵抗測定値は小さくなる(図-3.2)。
- ・全面腐食あるいは全面健全の場合には、鉄筋が長いほど、分極抵抗測定値は小さくなる(図-3.2)。
- ・局部腐食の場合には、腐食面積が同じでも鉄筋が長いほど、かぶり厚さが大きいほど、分極抵抗測定値は小さくなるとは限らない(図-3.2, 4.2)。
- ・分極抵抗測定値の分布状態をもとに、腐食部分と健全部分の区分を行う場合には、かぶり厚さの小さい方が、容易となる傾向がある(図-5.2)。

液抵抗について(図-3.3, 4.3, 5.3) :

- ・液抵抗測定値は腐食面積に影響されない(図-4.3)。
- ・鉄筋が長いほど、液抵抗測定値は小さくなる(図-3.3)。
- ・かぶり厚さが大きいほど液抵抗測定値は大きくなる(図-4.3)。
- ・液抵抗測定値は鉄筋端部に近い測定位置ほど、大きくなる(図-5.3)。

#### 4. おわりに

鉄筋の腐食面積・かぶり厚さや鉄筋の長さが、自然電位や分極抵抗などの腐食モニタリング測定値に及ぼす影響を、鉄筋ならびにコンクリートに関する電気化学的特性値の実験値と、腐食モニタリングに関する基本式を、比較的単純なモデルに適用して検討した。その結果、腐食モニタリング測定値が、鉄筋の腐食面積のみならず鉄筋のかぶり厚さや鉄筋の長さに影響される状況がコンクリートが飽水状態の場合について、把握された。腐食モニタリング測定値の解釈を精度よく行うためには、鉄筋やコンクリートに関する電気化学的特性値に関する基礎的データの収集が不可欠であるとともに、多様なモデルによる各種の検討が必要である。今後さらに検討を深める予定である。

#### (参考文献)

- 1) 田村 博, 吉田正友 : コンクリート中の鋼材の非破壊腐食探査方法 : 第6回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.205~208, 1984.
- 2) 田村 博, 永山 勝, 下澤和幸 : 鉄筋の腐食モニタリングに関する基礎的実験結果, 鉄筋腐食による損傷を受けたコンクリート構造物の補修技術に関するシンポジウム, 日本コンクリート工学協会, pp.7~14, 1989.
- 3) 田村 博, 永山 勝, 下澤和幸 : 鉄筋の腐食モニタリングに関する一考察, 日本コンクリート工学年次論文報告集, Vol.11, No.1, pp.581~584, 1989.
- 4) 田村 博, 永山 勝, 下澤和幸 : 腐食モニタリング測定値の等価電気回路による解釈, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.649~650, 1989.
- 5) 田村 博, 永山 勝, 下澤和幸 : 鉄筋の電気化学的特性値に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.1, 1990.