

# 鉄筋腐食の非破壊診断法の開発（その2）

—部分腐食試験体による自然電位法の適用性検討—

喜田大三 守屋正裕  
黒木泰貴

## Study on Non-destructive Method of Investigating Corrosion (Part 2)

—Examination of Method Measuring Half-cell Potentials by Partially Corroded Reinforced Concrete—

Daizo Kita Masahiro Moriya  
Yasutaka Kuroki

### Abstract

An examination was carried out on the method of measuring half-cell potentials under partially corroded conditions. Reinforced concrete was partially corroded making macro-cells. The potentials of these concretes were measured. The results obtained were as follows:

(1) When measurements are repeated the potentials are reproduced. (2) Water can be used as an electrical contact solution. (3) The potential of the corroded place differs according to depth of cover, but there is no effect where corrosion has not occurred. (4) The potential differs depending on water content of concrete. It is desirable for potential to be measured in a thoroughly wet condition. (5) The corroded part of reinforcement can be detected from potential distribution. (6) There is a great possibility that corrosion has occurred when potential measured in a wet condition is lower than a range of  $-100$  to  $0$  mV.

### 概要

コンクリート中の鉄筋の腐食状態を、非破壊で調査する方法の一つとして、自然電位測定による方法を取りあげ、その実用化のための実験検討を行なった。今回の実験では、試験体の鉄筋の一部が腐食している状態での同法の適用性について検討した。その結果、次のような点が明らかとなった。

(1) 電位を繰り返し測定した場合の再現性は、ほぼ良好である。(2) 液絡液には水道水が使える。(3) コンクリートのかぶり厚さの違いによって腐食箇所の電位が変化し、健全部ではその影響がない。(4) 電位測定値は、コンクリート表面の湿潤程度によって大きく変化し、十分湿潤させて測定するのが望ましい。(5) 鉄筋の部分的な腐食箇所を電位の分布状況から検出できる。(6) 湿潤状態で測定した電位が $-100\sim 0$  mVよりも低い場合には、腐食している可能性が高い。

### 1. はじめに

前報<sup>1)</sup>では、小型の鉄筋コンクリート試験体を用いて、各種要因の自然電位測定への影響および自然電位と鉄筋の腐食状況との対応について実験検討した結果を報告した。

今回は、部分的に鉄筋を腐食させた少し大型の試験体を使って自然電位法の適用性について実験検討した結果を報告する。

試験体の一部に部分的な腐食促進処理を行なって、前報と同様に各種要因の自然電位測定への影響を検討するとともに、自然電位測定によって鉄筋の部分腐食箇所が

検出できるかどうかなどについて検討した。

なおこの研究は、建設省建築研究所との共同研究として実施した。

### 2. 検討課題

次に示す幾つかを主な実験課題とした。

- (a) 繰り返し測定による電位測定値の再現性
- (b) 液絡液の種類の違いによる測定値への影響
- (c) かぶり厚さの違いによる測定値への影響
- (d) コンクリートの含水状態の違いによる測定値の変化
- (e) 鉄筋の発錆状況と電位との関係

### 3. 実験方法

#### 3.1. 実験手順

実験は、次のような手順で行なった。

試験体作製→部分的な腐食促進処理（中性化促進，塩分添加）→養生・電位変化の経時測定→諸課題検討（電位測定）→解体調査→結果の検討

#### 3.2. 試験体の作製

(1) 形状，材料，調査

図一1に示す形状の試験体を，次に示す材料・調査で24体作製した。

セメント：普通ポルトランドセメント 302 kg/m<sup>3</sup>

細骨材：川砂 835 kg/m<sup>3</sup>

粗骨材：20 mm 砕石 975 kg/m<sup>3</sup>

水：水道水 169 kg/m<sup>3</sup>

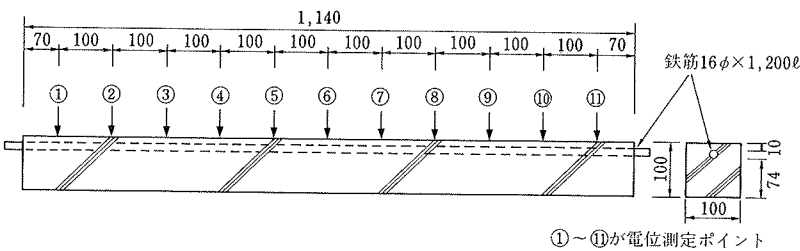
鉄筋：D16(JIS G 3112：黒皮付き異形棒鋼)

W / C：0.56

なお，かぶり厚さは，後述する部分的な中性化促進処理が，短期間で鉄筋まで到達するように配慮すると共に，同一鉄筋の電位をかぶり厚さの異なる面から測定できるように上面側を小さく設定した。

(2) 塩分添加

表一1に示すように，一部の試験体では，鉄筋全体の腐食促進条件として，NaClを砂に対する重量割合で0.3%添加した。なお，コンクリート1m<sup>3</sup>当りの塩素(Cl<sup>-</sup>)含有量に換算すると1520gである。

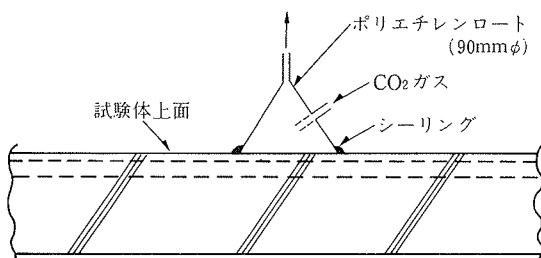


図一1 試験体の形状と電位測定ポイント

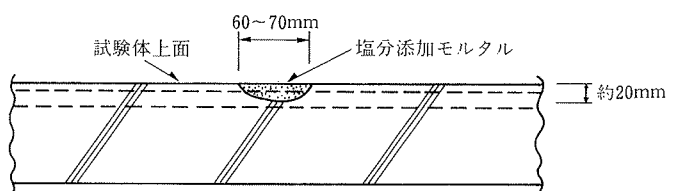
記号	腐食促進処理	
	塩分添加	中性化促進
B	無し	無し
C1		⑥
C2		④、⑧
N1	⑥	無し
N2	④、⑧	
NB		
NC1	全体	⑥
NC2		④、⑧

④、⑥、⑧は部分的な腐食促進箇所(図一1参照)

表一1 試験体の種類



図一2 部分的な中性化促進



図一3 部分的な塩分添加

#### 3.3. 試験体の部分的な腐食促進処理

一部の試験体について，次のような方法で部分的な中性化促進処理または塩分添加による腐食促進処理を行なった。試験体の種類ごとの腐食促進条件および腐食促進箇所は，表一1に示した。

(1) 中性化促進

図一2に示すように，試験体上面の一部にロートを取り付け，そこに炭酸ガスを流して部分的に中性化を促進した。

(2) 塩分添加

図一3に示すように，試験体の一部に塩分を添加したモルタル（セメント：砂＝1：3）を後打ちし，部分的に塩分を含有させた。塩分添加量は，モルタル中の砂に対するNaClの重量割合で0.3%とした。

#### 3.4. 電位測定法

(1) 使用機器

照合電極：Ag/AgCl/飽和KCl（銀塩化銀電極）

エレクトロメータ：内部抵抗10<sup>3</sup>MΩ以上のデジタル式

(2) 液絡液

コンクリートとその表面に接触させる照合電極との間の導通を確保するための溶液（液絡液）として，標準的には水道水を使用した。液の種類を変えた場合の影響を検討するために，飽和KNO<sub>3</sub>（硝酸カリウム）水溶液，飽和Ca(OH)<sub>2</sub>（水酸化カルシウム）水溶液を用いた。

### (3) 測定要領

試験体表面に水道水を散布して、コンクリートを湿潤状態とし、照合電極の先端に取り付けたスポンジに液絡液を含浸させた後、測定ポイントに接触させて電位を測定した。なお、電極を接触させた直後はエレクトロメータの指示値が不安定なため、ほぼ安定するまで4～10分間待って読み取った。

### 3.5. 試験体の解体調査

電位測定実験終了後、試験体を鉄筋に沿って割裂し、鉄筋を取り出した後、コンクリートの破断面にフェノールフタレイン溶液を噴霧して中性化状況を調査した。鉄筋の発錆状況は、鉄筋に透明シートを巻き、トレースして調査した。

## 4. 実験結果と検討

### 4.1. 繰り返し測定の再現性

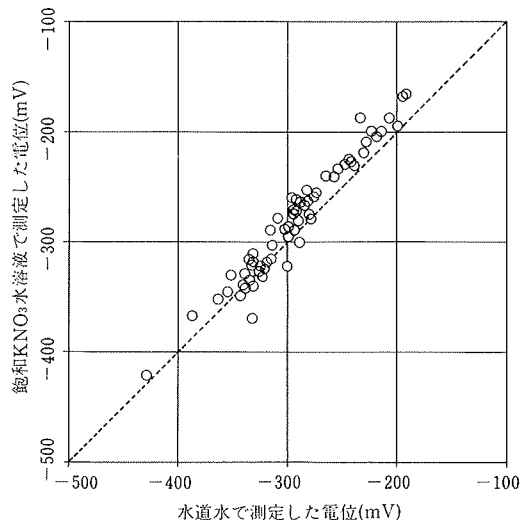
電位がほぼ安定してきた時点で、1日1回の測定を繰り返し、測定値の再現性についての検討を行なった。

その結果、図示しないが小型試験体での実験結果同様、ある程度のバラツキはあるものの、ほぼ良好な再現性が認められた。

### 4.2. 液絡液の種類による影響

この一連の実験では標準的な測定条件として液絡液に水道水を用いている。一方、照合電極の内部溶液は飽和KCl水溶液であり、コンクリートの含有水は飽和Ca(OH)<sub>2</sub>水溶液と考えられる。このように種類の異なる溶液が接触する界面においては電位差が生じるため、測定誤差を生む要因となる可能性がある。

そこで、液絡液に飽和Ca(OH)<sub>2</sub>水溶液と飽和KNO<sub>3</sub>水溶液を用いた測定も合わせて行ない、水道水の場合と比較した。なお、KCl水溶液の代わりにKNO<sub>3</sub>水溶液を用



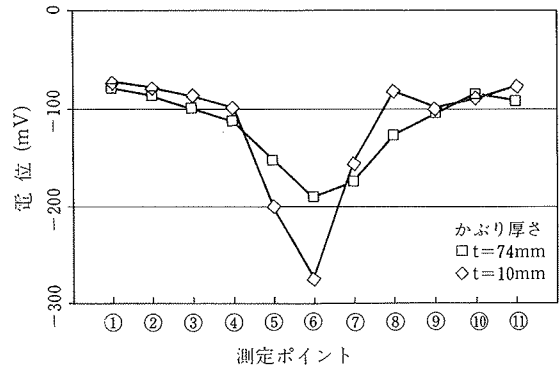
図一四 液絡の種類の影響 (試験体6体×11ポイント)

いたのは、KCl水溶液が鉄筋に有害な塩素イオンを含んでいるためである。

図一四に、水道水と飽和KNO<sub>3</sub>水溶液を使用した場合との対応関係を例示する。電位は、ほぼ1:1の直線状に対応しているが、飽和KNO<sub>3</sub>水溶液を使用した場合の電位は、水道水の場合よりも約15 mV程度高く測定される傾向がある。飽和Ca(OH)<sub>2</sub>水溶液の場合においても同様の傾向が認められたが、この程度の差であれば実用上問題にならないので、水道水で十分と考えられる。

### 4.3. かぶり厚さの違いによる影響

同一鉄筋の電位を、かぶり厚さ10 mm側と74 mm側とから測定し、比較した結果、部分的に腐食促進を行なった試験体では、図一五に例示するように、腐食促進箇所の電位が、かぶり厚さの小さい側からの方が低く測定される傾向が認められた。しかし、腐食促進を行なわない試験体や、腐食程度の軽度な状態と考えられる場合においては、ほぼ同じ電位を示し顕著な差は認められない。従って、上述の腐食促進箇所における測定値の差異は、かぶり厚さの違いによるものではなく、鉄筋の上面側と下面側で腐食状況が異なっていて、かぶり厚さの小さい上面側の腐食が著しいために上面側の測定値がより低くなっている可能性がある。



図一五 かぶり厚さの異なる上下面からの電位測定例 (⑥の箇所に塩分を部分添加した試験体, N1)

### 4.4. コンクリートの含水状態の影響

一連の実験では、コンクリート表面に水道水を十分に散布してから測定を行なっているが、含水状態が自然電位に及ぼす影響を把握するために、含水程度を変えて電位測定を行なった。

試験体を一旦、十分湿潤させて電位を測定した後、自然放置状態で乾燥させた。その過程で電位測定と、コンクリート水分計による含水率の測定を行なった。なお、含水率の測定には、市販の誘電率式水分計を用いた。

その結果、図一六に例示するように、乾燥が進むのに伴って電位は高く測定される傾向が認められた。

図一七は、各測定ポイントごとに含水率と電位の関係

を例示している。同図から明らかなように、含水率が7～8%以下の場合には電位測定値への影響は極めて大きく、安定した値を得るためには十分湿潤状態として測定する必要がある。

使用したエレクトロメータは、内部抵抗が十分大きいので、含水状態の違いによるコンクリートの電気抵抗変化が、影響要因とは考えられず、水分状態によって鉄筋の電位そのものが何らかの原因で変化していると推定される。

一方、同一鉄筋上での電位の分布状態を見ると、図一6から明らかなように、腐食箇所と健全箇所との相対的な電位の関係は、水分状態の違いによって大きくは変化していない。従って、調査範囲の水分状態がほぼ均一であれば、電位の分布状態から腐食箇所の検出が可能であると考えられる。

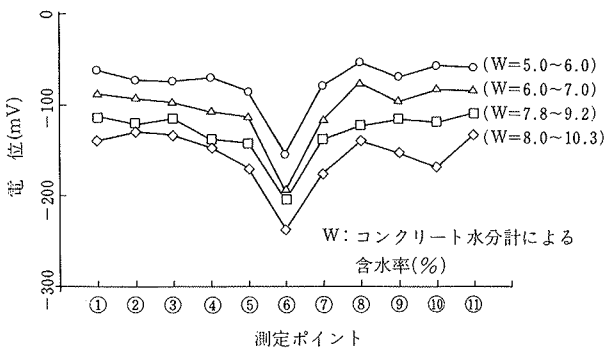
4.5. 鉄筋の腐食状態と電位分布

図一8、9に試験体の種類ごとの電位分布を例示する。これらの図から明らかなように、腐食促進箇所の電位は、

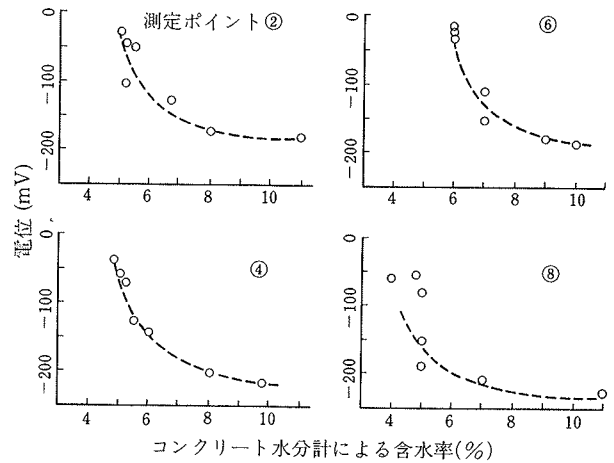
その周辺に比べて低い値を示す傾向になり、電位の分布状態から部分的な腐食箇所を判定できる可能性がある。

図一10は、試験体を解体する直前に測定した最終測定電位と、鉄筋の発錆状況の展開図とを対比して例示している。図中のBは腐食促進を行なわなかった試験体で、解体調査でも発錆していないと確認された。その電位は、-20 mV 前後を示し、鉄筋の長さ方向の分布はほぼ直線的である。すなわち、鉄筋の全長にわたって不働態化している様子を示している。

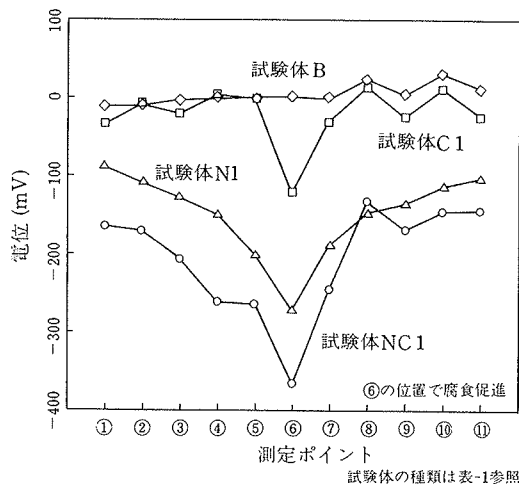
他方、明らかに発錆の認められた N2, NC2, NC1 は、健全なBと比べて全般に電位が低く、発錆面積が広がるほど電位の低下が著しくなる傾向が認められる。さらに、発錆箇所が限定されている N2 や NC2 では、発錆箇所の電位が周辺よりも低く現われる傾向が認められ、前述のように、電位分布を基に部分的な発錆箇所をある程度特定できる可能性を示唆している。なお、N2 や NC2 において、発錆箇所とその周辺との電位差があまり小さくなく、電位が NC1 と B の中間に位置しているのは、マ



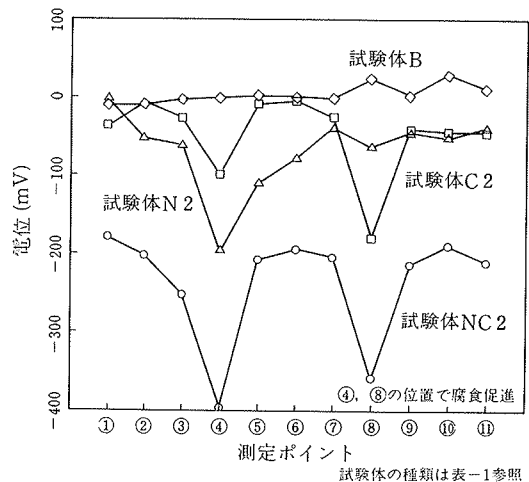
図一6 コンクリート含水率の影響例 (1)  
(⑥の箇所に塩分を部分添加した試験体, N1)



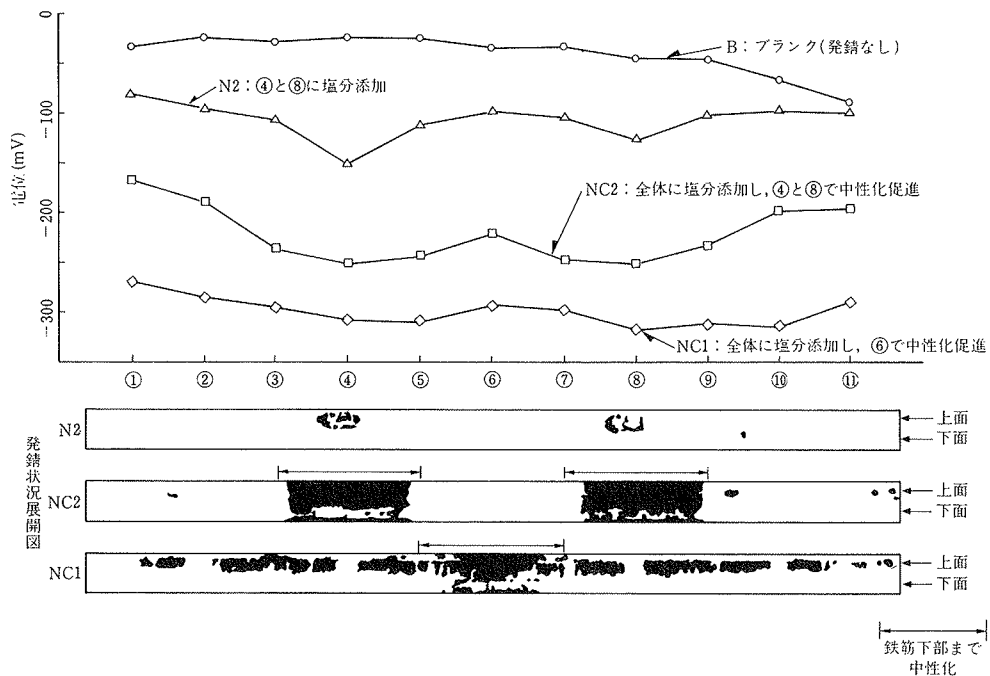
図一7 コンクリート含水率の影響例 (2)  
(④, ⑧の箇所に塩分を部分添加した試験体, N2)



図一8 腐食促進した試験体の電位分布 (1)



図一9 腐食促進した試験体の電位分布 (2)



図一〇 鉄筋の発錆状況と電位分布

クロセルにおけるアノードとカソードの分極状態を反映しているためと考えられる。

以上のデータを総合すると、電位測定値から腐食の有無を判定する際のボーダーラインは、十分に湿潤した状態で、これら一連の実験と同じ要領で測定する場合、およそ $-100 \sim 0$  mV の間にあり、 $-100$  mV 以下の測定値が得られた場合にはその付近で腐食の生じている確率が高いと評価できよう。これは、小型試験体での実験結果や、既報<sup>2)</sup>での判定基準と概ね一致している。

## 5. まとめ

前報<sup>1)</sup>に引続き、コンクリート中の鉄筋の腐食傾向を非破壊で判定する自然電位測定法について、基礎的な実験検討を行なった。今回の実験では、鉄筋の腐食を部分的に促進して、マクロセルが形成された状態とし、繰り返し測定の実験の再現性、液絡液の種類やかぶり厚さおよび含水状態の違いによる影響などについて実験検討を行なった。その結果、次の点が明らかとなった。

(1) 同じ要領で測定する限り、繰り返し測定の再現性はほぼ良好である。

(2) 液絡液の種類の違いによっては、液間電位差の影響で電位測定値が若干変化するが、実用的には簡便な水道水で十分と判断される。

(3) かぶり厚さの違いが、直接測定値に影響しているような傾向は認められないものの、部分腐食箇所では、かぶり厚さの小さい側からの測定値の方が、数十ミリボルト低く現れる傾向が認められた。これは、鉄筋周囲の

腐食状態が全周にわたって均一でないなどの影響によると推察されるが、今後さらに検討を要する。

(4) コンクリートの含水状態によって、測定値が著しく変化する現象が確認された。安定した測定値を得るには、測定時に十分な散水を行ない、コンクリート水分計による含水率が7~8%以上の条件で測定する必要がある。

(5) コンクリートを湿潤させない状態で電位を測定した場合、湿潤状態での測定値に比べて電位が高く現れる傾向を示すが、腐食箇所と健全箇所との相対的な電位の関係は大きく変化しない。従って、測定範囲の含水状態がほぼ均一であれば、十分に湿潤していなくても鉄筋に沿った電位の分布状況から、部分的な腐食箇所が検出できる可能性が認められた。

(6) 腐食の有無を判定するための境界は、湿潤状態で測定した場合におよそ $-100 \sim 0$  mV の付近にあると判断され、 $-100$  mV 以下の値を示した場合には、その測定箇所付近で腐食の発生している確率が高い。

## 参考文献

- 1) 喜田, 守屋, 黒木: 鉄筋腐食の非破壊試験法の開発 (その1), 大林組技術研究所報, No. 36, (1988), pp. 129~133
- 2) 喜田, 守屋: 土木建築における腐食に関する研究 (その12), 大林組技術研究所報, No. 29, (1984), pp. 150~155