

# 鉄筋腐食の非破壊診断法の開発 (その1)

——小型試験体による自然電位法についての基礎的研究——

喜田大三 守屋正裕  
黒木泰貴

## Study on Non-destructive Method of Investigating Corrosion (Part 1)

——Experimental Study on Measuring Method of Half-Cell  
Potential by Reinforcing Bars in Concrete——

Daizo Kita Masahiro Moriya  
Yasutaka Kuroki

### Abstract

Measuring half-cell potentials is a non-destructive method of judging corrosion of reinforcing bars in concrete. The authors are carrying out experimental studies on standardization of measurements and determination by the above method. Reinforced concrete specimens were made changing chloride content and cover of concrete with a part of the concrete carbonated. The potentials of these concretes were measured and close examinations were made.

The results show that when measurements are repeated the potential is reproduced. There were not an influence of difference of electrical contact solution and protective concrete cover in the measurement of a potential. When a reinforcing bar was corroding a measurements potential was below  $-50 \sim +35$  mV.

### 概 要

既設構造物中の鉄筋の腐食状況や防錆補修材の性能などを、非破壊で簡易に判定する方法として自然電位法を取り挙げ、その測定法の判定基準の標準化を目的として、基礎的な実験検討を行なった。鉄筋コンクリートの小型試験体を、かぶり厚さ、塩分添加量、中性化処理などの条件を変えて作製し、電位の経時変化を測定しながら、電位が安定した時点でくり返し測定の再現性、液絡液の違いによる測定値の変化、及びかぶり厚さの影響などについて検討するとともに、鉄筋の発錆状況と電位の関係について検討した。その結果、くり返し測定の再現性はほぼ良好で、液絡液の種類を変えても測定値への影響はなかった。また、同一試験体でかぶり厚さ20mmと64mmの両面から電位を測定し比較したところ有意差は認められなかった。また、電位が、 $-50 \sim +35$  mV (Ag/AgCl/飽和 KCl) 以下の値を示した場合に、鉄筋の発錆が認められた。

#### 1. はじめに

RC 構造物の劣化現象は、鉄筋腐食・ひび割れ・たわみなどに大別されるが、鉄筋の腐食現象は、それらの中でもとりわけ重要な問題である。

既設構造物の鉄筋腐食状況を調査する場合、従来は、コンクリートを各所ではつり取り、目視による調査や、中性化試験や塩化物含有量の分析などを行なって、間接的に判定する方法が行なわれてきた。しかし、この方法では、調査箇所・数に制約を受けるとともに、少なから

ぬ時間や労力及び費用が必要である。

一方、鉄筋腐食箇所の防錆補修材が数多く市販されているが、その防食効果の判定方法が十分に確立されていない。

そこで、腐食状況の調査・判定が非破壊で簡便に行なえ、防錆補修材の性能判定にも適用できるような方法の確立が望まれている。

筆者らは、そうした方法の一つとして鉄筋の自然電位による判定方法を取り挙げ、これまでに、多数の小型試験体による実験検討や、防錆補修材の性能判定などを

行なってきた。

ここでは、それらの経験を踏まえて、測定方法と判定基準の標準化を目的として、いくつかの課題について小型試験体で実験検討を行ない、有用な知見を得たので報告する。

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. 実験概要

### 2.1. 自然電位法

自然電位による判定法は、既報<sup>2)</sup>でも説明しているように鉄筋が正常な防食状態（不働態化状態）にあるときと腐食傾向（活性化状態）にあるときとで、自然電位が大きく異なる現象を利用した方法である。

健全なコンクリートは、pH 12.5～13 の強いアルカリ性を有するため、そのアルカリ雰囲気中において、本来、鉄筋は不働態化して防食状態にある。このときの、自然電位は  $-45\text{ mV}$  (vs Ag/AgCl/飽和 KCl: 以下同じ) 前後の値を示しているが、中性化や塩化物などの腐食要因によって、鉄筋が活性化状態になると、自然電位は低下して、 $-445\sim-345\text{ mV}$  程度の値を示すようになる。

自然電位（以下、単に電位とする）の測定は、図-1 に示したような回路（エレクトロメーター→照合電極→コンクリート→鉄筋→エレクトロメーター）を構成して行なう。なお、図中の液絡とは、コンクリートと照合電極の導通を確保するために用いられる導電性の溶液である。

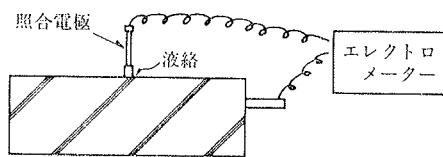


図-1 電位測定要領

### 2.2. 検討課題

次に示すいくつかを主な検討課題とした。

- くり返し測定による電位測定値の再現性
- 液絡液の種類による電位測定値の変化
- かぶり厚さの違いによる電位測定値の変化
- 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

図-2 に実験の手順をフローで示す。

### 3.2. 試験体の作製

- 形状・材料・調合

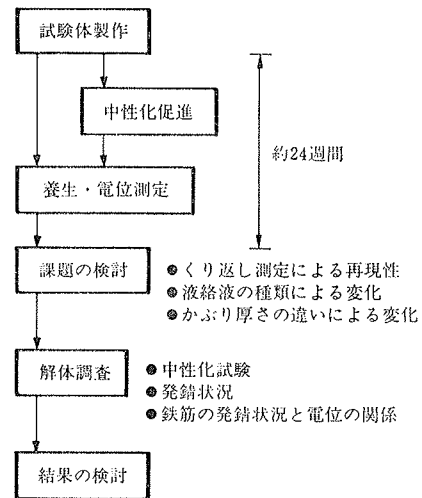


図-2 実験手順

図-3 に示す形状の試験体を、次に示す材料・調合で作製した。

- セメント：普通ポルトランドセメント  $302\text{ kg/m}^3$
- 細骨材：川砂  $835\text{ kg/m}^3$
- 粗骨材：20 mm 碎石  $975\text{ kg/m}^3$
- 水：水道水  $169\text{ kg/m}^3$
- 鉄筋：D16 (JIS G 3112)
- W / C：0.56
- 塩分：0, 0.03, 0.1, 0.3, 3, 10%  
(砂に対する NaCl の重量割合)

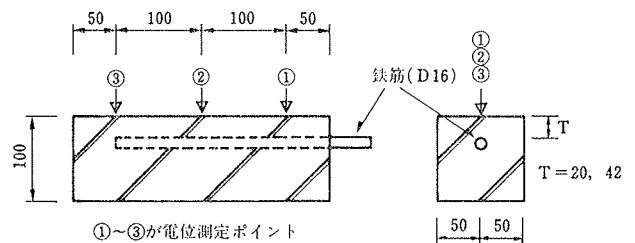


図-3 試験体の形状と測定ポイント

### (2) 腐食促進処理条件

一部の試験体については、塩分添加・中性化促進の2要因によって、鉄筋の腐食を促進した。

#### a. 塩分添加

試薬1級の NaCl を用い、試験体作製時に所定量をコンクリートの混練水に溶かして練り込んだ。

#### b. 中性化促進

炭酸ガス 100% 雰囲気中に、試験体を置いて中性化を促進した。

### 3.3. 電位測定法

#### (1) 使用機器

エレクトロメーター：内部抵抗  $10^9\text{ M}\Omega$ ，デジタル式  
照合電極：Ag/AgCl/飽和 KCl

(2) 液絡液の種類

水道水, 飽和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  水溶液, 飽和  $\text{KNO}_3$  水溶液の3種類を用いた。

(3) 測定要領

照合電極の先端を液絡液に浸した後, 図-3 に示した①~③の測定ポイントに接触させ, 図-1 に示す要領で測定した。なお, 測定値はエレクトロメーターの指示値が安定するのを待って読み取った。

3.4. 試験体の解体調査

電位測定完了後, 試験体を鉄筋に沿って割裂し, コンクリートの中酸化状況と鉄筋の発錆状況を調査した。

(1) 中性化試験

コンクリートの断面に, フェノールフタレイン溶液を噴霧して中性化の進行状況を調査し, スケッチならびに写真で記録した。

(2) 発錆度の測定

鉄筋の発錆箇所を透明シートにトレースして, 発錆面積率を測定した。

4. 実験結果と検討

4.1. 電位の経時変化

材令を追いつながら, 電位を測定した結果, その経時変化は, 試験体によって図-4 のような四つのパターンに分類された。

(a) 中性化や塩分などの腐食要因がない試験体の電位は, 初期から比較的高い値を示し, 材令とともに徐々に高くなり, 約10週間後, 50 mV 程度で安定した。これは鉄筋が, 次第に安定な不動態化状態に推移する様子を示している。塩分添加量が0.1%以下の試験体と0.3%の試験体の一部も, 中性化処理をしない場合には, 同様の傾向を示した。

(b) 塩分添加量が0.3%以上の場合, 一部の試験体を除いて, 電位は初期から低い値を示し, 明らかに活性化状態にあると判定され, 材令を追っても再不動態化する兆候はなかった。なお, 当然ながら, 塩分添加量0.3%で中性化処理を行なった場合も同様の傾向を示した。

(c) 塩分無添加や添加量が0.1%以下で中性化処理をした場合, 一旦は活性化して低い電位を示すが, 中性化処理を停止した後は, 再不動態化する傾向を示した。短期間で急速に中性化を促進したために, アルカリが回復して, このような傾向を示したものと考えられる。

なお, さらに材令が進むと塩分を含むものは, 再び電位が低くなっていく。

(d) 塩分量が0.3%で初期に電位が高い値を示した試験体を中性化処理した場合, 活性化した後, 中性化処理を停止しても, 電位は低いまま, 再不動態化する兆候は

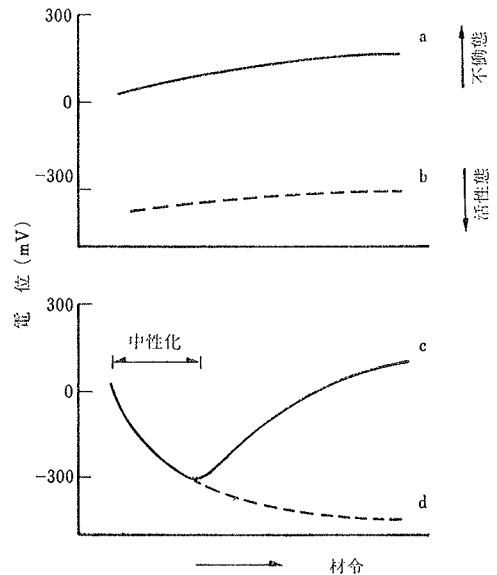


図-4 電位の経時変化

認められなかった。

4.2. 測定の再現性

電位がほぼ安定してきた時点で, 繰り返し測定を行ない, 測定値の再現性(ばらつき)についての検討を行なった。

まず, 任意に選んだ12体の試験体について, 約2時間の間隔を空け, 測定を3回くり返し行なった。その結果を図-5に示す。若干ばらつきの大きなデータがあるが, ほぼ良好な再現性を示している。次に, 24時間経過前後で電位測定値の比較をした結果を図-6に示す。ばらつきの大きなデータもあるが, ほとんどのデータは,  $\pm 30$  mV の範囲内で分布し, ほぼ良好な再現性を示している。

4.3. 液絡液の種類による電位測定値の変化

種類の異なる溶液が接触する界面においては, 液間電位差が生じることから, 液絡液の種類によって, 液間電

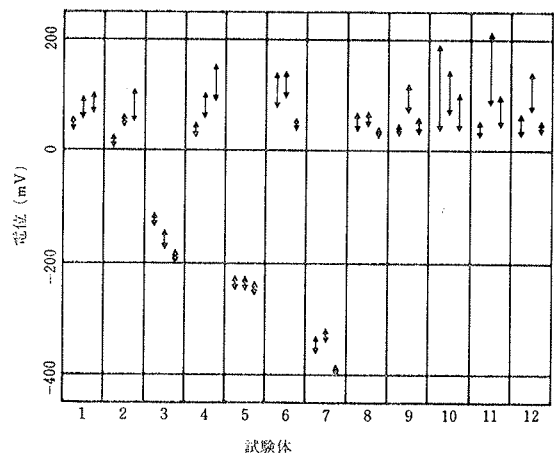


図-5 同一日でのくり返し測定のばらつき

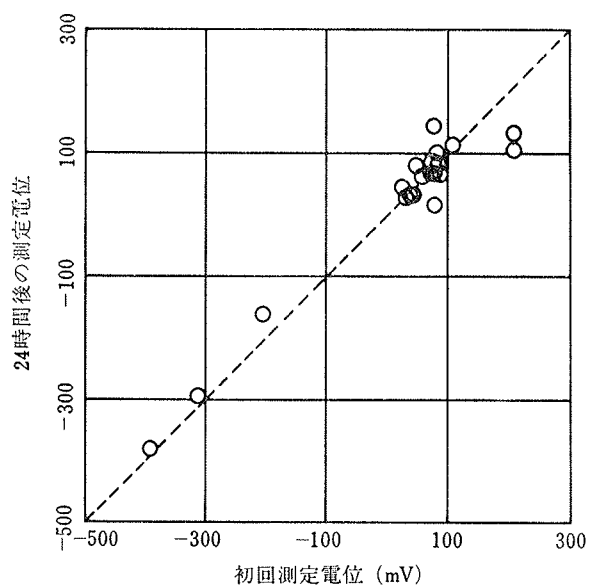


図-6 24時間前後の測定のばらつき

位差が、電位測定の誤差要因となる可能性がある。

そこで、液絡液の種類を変えて電位の測定を行ない、その影響について検討した。

通常の測定では、液絡液には水道水を用いたが、さらに飽和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  水溶液と飽和  $\text{KNO}_3$  水溶液を用いて測定を行ない、比較検討した。

液絡液を水道水→飽和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  水溶液→飽和  $\text{KNO}_3$  水溶液の順で変え、同一試験体の電位を同一日に測定した。

図-7 に測定値を比較した結果を示す。いずれの場合も一定の傾向を持った偏りはなく、ばらつきの範囲が、くり返し測定の時と同程度であるので、有意差はないと判定された。

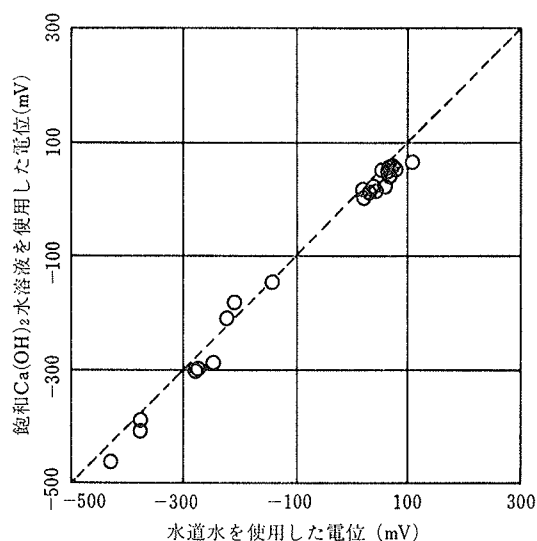
#### 4.4. かぶり厚さの違いによる電位測定値の変化

鉄筋の表面状態（活性化、不動態化の状況）が同じでも、かぶり厚さによって、電位測定値が変化すると考えられ、その点について検討した。

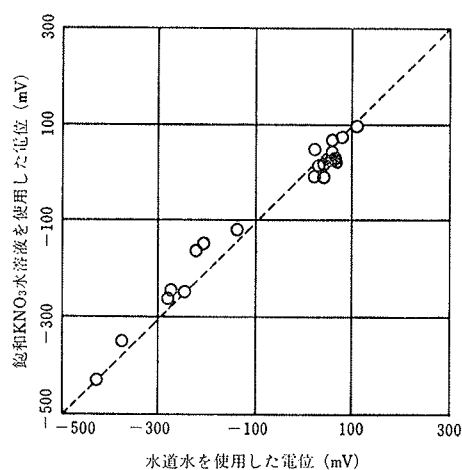
12体の試験体について、同一鉄筋の電位を、かぶり厚さの異なる、表 ( $T=20\text{ mm}$ ) と裏 ( $T=64\text{ mm}$ ) の両面から測定し、比較した。

結果を図-8 に示す。測定値は、概ね 1:1 の直線上で対応し、そのばらつきの範囲は、くり返し測定の時と同程度である。したがって、かぶり厚さ 20~64 mm の範囲では、電位測定値に有意差はないと判定された。

なお、大型の試験体や、実構造物において、鉄筋上でマクロセルが形成されている場合は、かぶり厚さの影響が大きく現われる可能性が考えられ、この点についてはさらに検討を要する。



a. 飽和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  水溶液



b. 飽和  $\text{KNO}_3$  水溶液

図-7 液絡の種類による測定値の変化

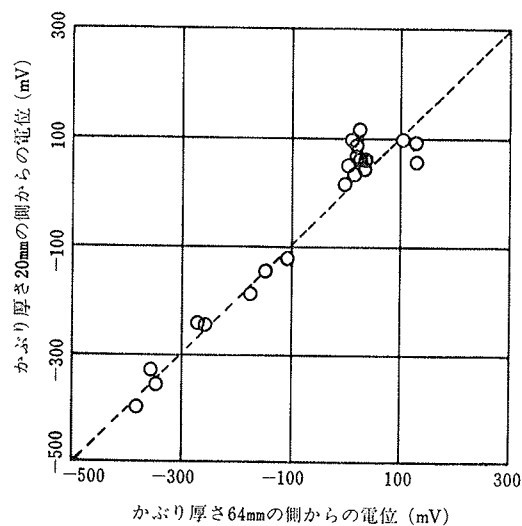


図-8 かぶり厚さの影響

#### 4.5. 発錆状況と電位の関係

試験体を解体調査する直前に測定した電位と塩分添加量、発錆面積、中性化処理の有無との関係を検討した。

図-9に、電位と塩分添加量及び発錆面積との関係を示す。塩分添加や中性化処理によって鉄筋が腐食し、発錆面積が増大する傾向を示している。また、明らかに腐食傾向にあると判定される鉄筋の電位は、 $-350 \sim -50$  mV の範囲に分布し、腐食がほとんど認められず、腐食傾向にないと判定される鉄筋の電位は、およそ  $+35$  mV 以上の高い値を示した。

また、電位の分布状況から、鉄筋腐食の有無を判定する境界電位は、 $-50 \sim +35$  mV の付近にあると考えられる。これは、筆者らが先に実験で求めた中性化状況と電位との関係に基づく判定基準 ( $-85$  mV:  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$  に

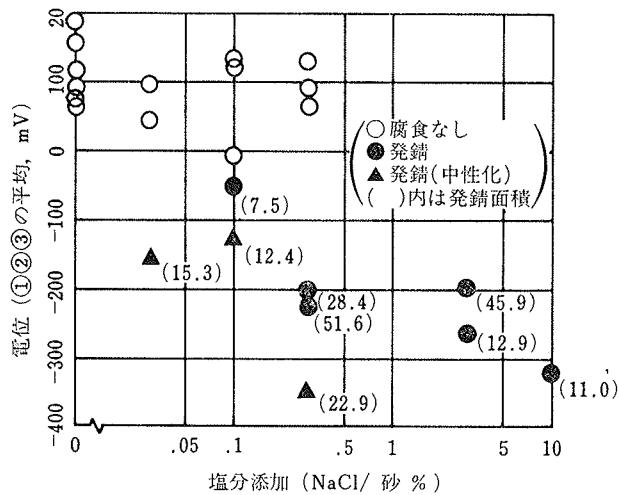


図-9 塩分添加量と自然電位の関係

対しては、 $-240$  mV 以上で腐食傾向にない) と概ね一致している。

#### 5. まとめ

コンクリート中の鉄筋の腐食傾向を非破壊で判定する方法の1つとして、自然電位測定法を取り上げ、小型試験体による基礎的な実験検討を行なった結果、次の点が明らかとなった。

(1) 測定値の再現性は、同じ要領で測定する場合、極端な変動は示さない。

(2) 照合電極とコンクリートを電氣的に接続する液絡液の種類の違いによる、電位への影響を検討した結果、水道水、飽和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  水溶液、飽和  $\text{KNO}_3$  水溶液の3種類においては、極端な変動は認められなかった。

(3) かぶり厚さの違いによる、電位への影響を検討した結果、今回の実験では、影響は認められなかった。なお、今後は、大型の試験体を用い、鉄筋上でマクロセルが形成された状態での検討を重ねていく予定である。

(4) 防食状態にある鉄筋の電位は、およそ  $+35$  mV 以上を示し、腐食状態にある鉄筋の電位は、 $-50 \sim -350$  mV の範囲にあった。この結果から、鉄筋の腐食傾向の境界は、 $+35 \sim -50$  mV 付近にあると判断できる。

判定基準をより確かなものにするためには、今後も、実験検討を重ねていく必要がある。

#### 参考文献

- 1) 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