

## 論文 自然電位による鉄筋腐食判定に関する一考察

佐々木 孝彦\*<sup>1</sup>・飯島 亨\*<sup>2</sup>・立松 英信\*<sup>3</sup>

**要旨:** 自然電位法による鉄筋腐食判定の信頼性向上を目的として、かぶり表層部の含水率および炭酸化深さと電位変動の関係を調べた結果、自然電位補正の可否はかぶり表層部の含水率で決めることができ、その補正法を提示した。また、大型供試体試験によりこの補正法を実施した結果、この有効性を確認するとともに、ASTMの不確定電位範囲をさらに区分でき、鉄筋腐食度と概ね相関が得られることが判った。

**キーワード:** 鉄筋腐食、非破壊検査法、自然電位法、含水率、補正

## 1. はじめに

コンクリート構造物中の鉄筋の腐食程度を非破壊で検知することは、維持管理上重要である。腐食反応は電気化学的反応であることから、電気化学的特性値を測定することで鉄筋腐食を検知する方法が種々検討されている。なかでも自然電位法は、装置が簡便で使いやすく、広く用いられている。しかし、コンクリート表面で測定される自然電位はかぶり部分のコンクリートの品質・性状に起因して生ずる電位分も加算される[1, 2] ため、判定と実際の腐食状況とが一致しないことがある。この電位分については、Figg, J. W. and Marsden, A. F. [3] や武若・小林[4] の報告があり、影響を及ぼす因子は示されているが、その程度は十分明らかにされているとは言い難い。

本報では、かぶり部分の品質・性状に係わる因子のうち含水率、炭酸化、塩化物イオンによる電位変動分を調べ、これらの補正法と大型供試体試験により検討した結果を報告する。

## 2. 実験概要

## 2. 1 供試体の作製

かぶり部分の性状により生ずる電位変動分を求めするためには、コンクリート表面での測定と併せて、鉄筋近傍でも自然電位を測定する必要がある。そこで、図-1に示すように鉄筋と鉛照合電極を埋め込んだコンクリート供試体を作製した。供試体の形状は100×100×400mm、使用鋼材はφ13×220mmであり、かぶりは40~45mmである。コンクリートの配合は、塩化物イオンを含まないもの(Aシリーズ)と含むもの(Bシリーズ)の2種類とした。塩化物イオンは、塩化ナトリウムを用い、混練水に加える方法で3kg/m<sup>3</sup>添加した。供試体は、単位セメント量300kg/m<sup>3</sup>、水セメント比65%のコンクリートで、打設翌日に脱型し7日間水中養生した。

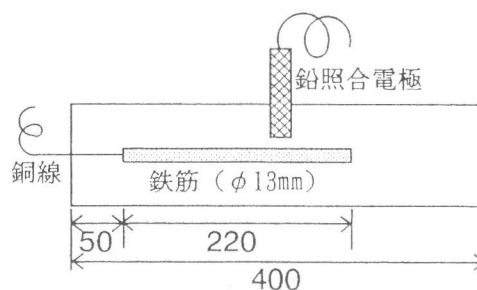


図-1 コンクリート供試体

\* 1 (財) 鉄道総合技術研究所材料技術開発推進部技師 (正会員)

\* 2 (財) 鉄道総合技術研究所材料技術開発推進部技師

\* 3 (財) 鉄道総合技術研究所基礎研究部部長、工博 (正会員)

## 2. 2 試験

最初に、含水率の変化に伴う自然電位の変動を調べるため、水中養生後、空气中に放置して所定期間乾燥させた。かぶり表層部の含水率（以下、単に含水率と記す）は、105℃恒量法による値として表示される高周波容量式水分計を用いて測定した。自然電位は、鉛照合電極と高入力抵抗（1000MΩ）の電位差計を用いて測定した。

次に、炭酸化の進行に伴う自然電位の変動を調べるため、炭酸ガス濃度20%、温度30℃、相対湿度40%の条件で所定期間炭酸化させた。炭酸化深さは、供試体の一端を切断してフェノールフタレイン溶液を噴霧し、発色しない領域の長さとして求めた。自然電位は、槽内から取り出し十分散水した後、含水率と併せて測定した。

## 3. 実験結果

### 3. 1 塩化物を添加しない場合の自然電位の変動

#### (1) 含水率の変化に伴う電位変動

図-2に、供試体Aシリーズについて、含水率と鉄筋近傍の自然電位（以下、E1と称す）およびコンクリート表面の自然電位（以下、E2と称す）の関係を示す。E1は-150~-160mVの一定値を示している。この事実から、含水率の低下は表層部にとどまっておらず、鉄筋近傍ではほとんどない。したがって、鉄筋は不動態が十分に形成されて健全な状態にあることが判った。また、E2は、含水率が低くなると貴な電位を示し、自然電位の補正が必要であることを確認した。

これまでの多くの研究によれば、コンクリートの含水率は電気抵抗と密接に関係し、含水率が低くなると電気抵抗は大きくなることが知られている[1]。かぶり部分の電気抵抗が大きくなれば、この間で生ずるIRドロップ（+の符号をもつ電位）が大きくなる。含水率が低くなるとIRドロップが大きくなり、E2は貴な電位を示すようになると考えられる。図-3に、含水率と電位変動分（E2-E1）の関係を示す。自然電位の測定に関わる誤差は通常0~30mVと考えられることに加えて、3.1(2)で述べるように含水率が5.5%以上であればほぼ飽水状態とみなせるので、これ以上の含水率では補正は必要ないと考えることができる。したがって、補正分は含水率が5.5%以下の場合に対して、式(1)のように表わされる。

$$Z \text{ (電位補正分, mV)} = -2.5 X \text{ (含水率, \%)} + 180 \quad (1)$$

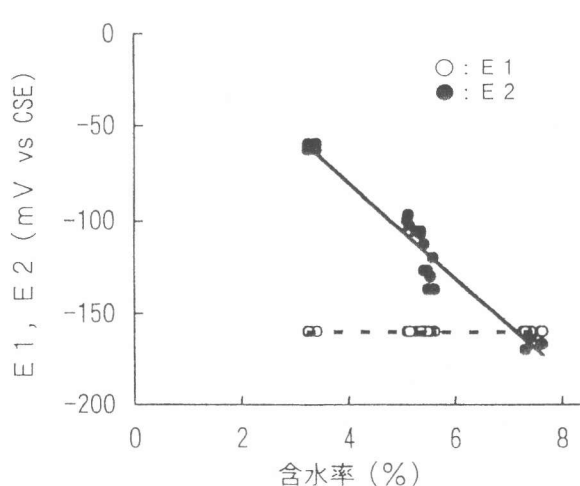


図-2 含水率とE1, E2の関係

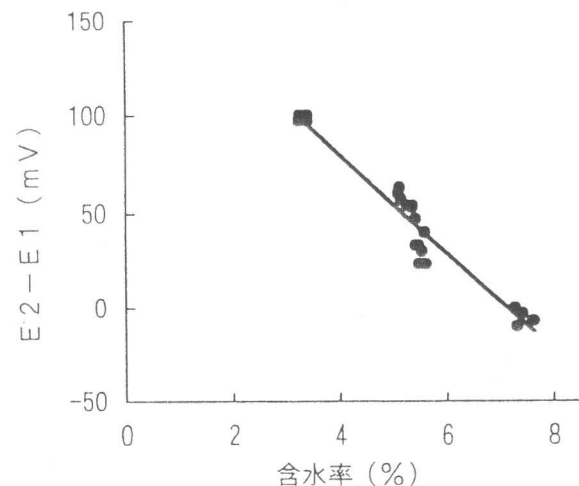


図-3 含水率と(E2-E1)の関係

## (2) 炭酸化の進行に伴う電位変動

図-4に、供試体Aシリーズについて炭酸化深さとE1およびE2の関係を示す。なお、E2は、含水率による補正を行った電位である。E1は、炭酸化の進行がかぶり部分にとどまっている限りは一定であり、E2は炭酸化深さが大きくなるとともに貴な電位を示すようになる。E1は一定で、含水率による補正も行っているので、E2の変化は炭酸化深さの変化に対応しており、この場合も自然電位の補正が必要であることを確認した。

炭酸化層の存在は、かぶり部分にpHの異なる領域があることに他ならない。これまでの腐食反応の研究によれば、かぶり部分がpHの異なる二つの領域で構成されている場合、その界面で電気化学的ポテンシャルの差に応じて液間電位差(+)の符号をもつ電位が生ずることが知られている[1]。炭酸化による液間電位差の発生により、E2はより貴な電位を示すようになると考えられる。また、図中の矢印は、促進炭酸化により炭酸化深さが7mm程度に達した供試体を、約1週間水中に浸漬した後の結果である。この場合の含水率は5.5%であったことから、5.5%という値は十分に水分を含んだ飽水状態と推察される。炭酸化が進行しても、かぶり部分の含水率が十分に高くなると、E2≒E1となり、含水率がこの値以上であれば、炭酸化による電位変動分は補正する必要がなくなることが明らかとなった。炭酸化深さと電位変動分(E2-E1)の関係は、図-5に示すとおりで、補正分は含水率が5.5%以下の場合に対して式(2)で表わされる。なお、炭酸化深さ5mm以下の変動幅は小さく、補正の必要はないと考えられる。

$$Z \text{ (電位補正分, mV)} = 8 Y \text{ (炭酸化深さ, mm)} \quad (2)$$

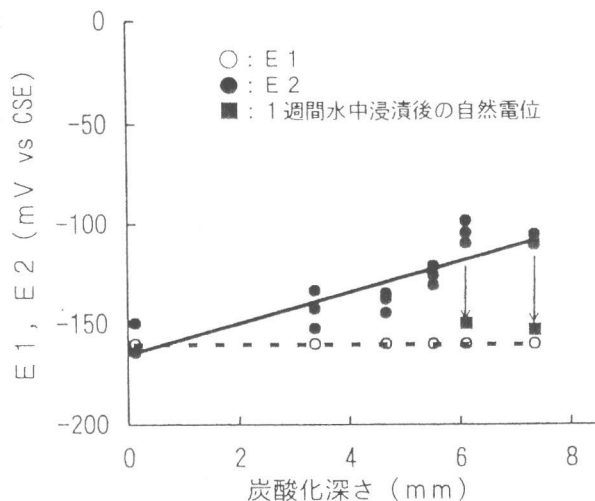


図-4 炭酸化深さとE1, E2の関係

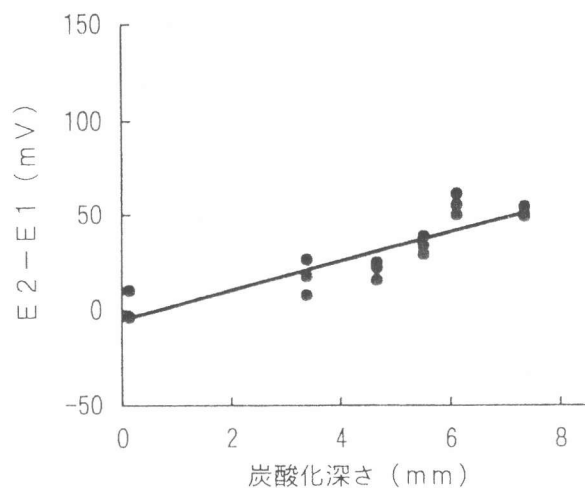


図-5 炭酸化深さと(E2-E1)の関係

## 3. 2 塩化物イオンを添加した場合の自然電位の変動

### (1) 含水率の変化に伴う電位変動

図-6に、塩化物イオンを含む供試体Bシリーズについて、含水率とE1およびE2の関係を示す。供試体BシリーズのE1は、供試体Aシリーズと比べ卑な電位を示す。この理由として、鉄に対する親和力は水酸イオンより塩化物イオンの方が大きいため、不働態が十分形成されず、鉄の溶解が起こりやすい条件にあるためと考えられる。また、E2は含水率が低くなると貴な電位を示す。この場合も、電気抵抗が低下することで生ずるIRドロップで電位は変動している。

含水率と電位変動分 ( $E_2 - E_1$ ) の関係は図-7に示すとおりで、供試体Aシリーズと同様、補正分は式(3)で表わされる。近似した直線は、供試体Aシリーズの場合と比べると切片、傾きとも僅か小さい。

$$Z \text{ (電位補正分, mV)} = -2.0 X \text{ (含水率, \%)} + 15.0 \quad (3)$$

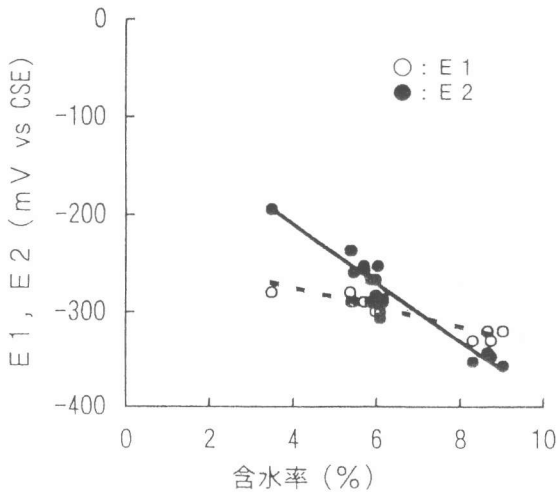


図-6 含水率と  $E_1$ ,  $E_2$  の関係

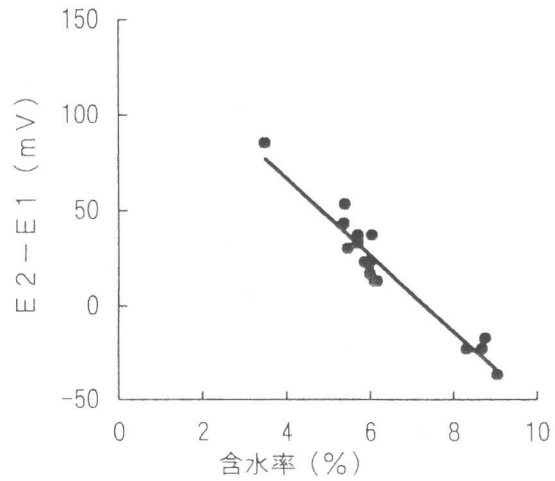


図-7 含水率と ( $E_2 - E_1$ ) の関係

## (2) 炭酸化の進行に伴う電位変動

図-8に、供試体Bシリーズについて炭酸化深さと  $E_1$  および  $E_2$  の関係を示す。なお、 $E_2$  は、含水率による補正を行った電位である。 $E_1$  は炭酸化の進行に関わらず一定であるが、 $E_2$  は炭酸化深さが大きくなると貴な電位を示すようになる。この場合も、Aシリーズと同様で、炭酸化深さと電位変動分 ( $E_2 - E_1$ ) の関係は、図-9に示すとおりで補正分は式(4)で表わされる。近似した直線の傾きは供試体Aシリーズと比べて小さい。

$$Z \text{ (電位補正分, mV)} = 4 Y \text{ (炭酸化深さ, mm)} \quad (4)$$

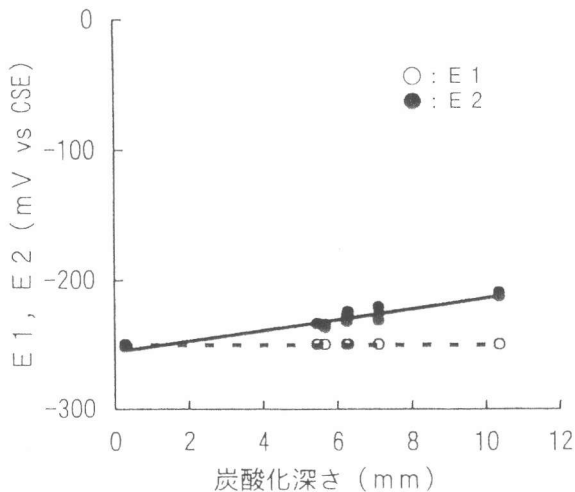


図-8 炭酸化深さと  $E_1$ ,  $E_2$  の関係

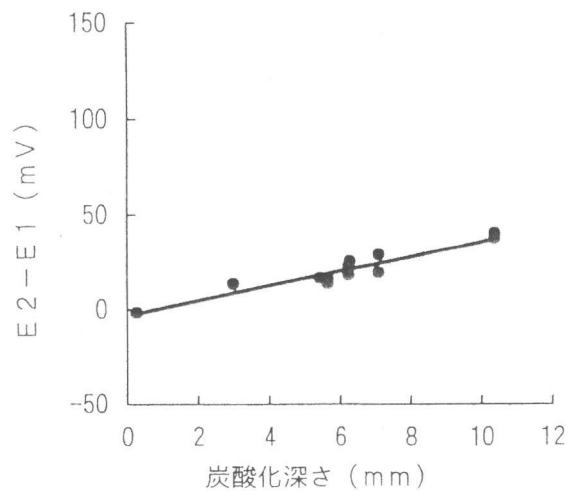


図-9 炭酸化深さと ( $E_2 - E_1$ ) の関係

### 3. 3 補正法

以上述べたように、含水率の変化と炭酸化の進行に伴う電位変動の結果をもとに、コンクリート表面での自然電位の測定値を補正する場合を考える。含水率による変動は、5.5 %以上の場合の変動幅は比較的小さく、自然電位の測定誤差範囲内であること、加えて、この場合は炭酸化の進行に伴う変動分も考慮しなくてもよいことから、含水率5.5 %を基準にして、この値より高い場合は補正の必要はないと考えられる。一方、この値より低い場合は、含水率と炭酸化深さを変数とした前述の式(1)～(4)による補正が必要であることが判った。

## 4. 大型供試体試験

### 4. 1 大型供試体

鉄筋コンクリート柱を模擬した大型供試体を用いて、前述の補正法により鉄筋腐食状態の調査を行った。供試体の形状は、500 × 500 × 1000mmである。コンクリートの単位セメント量は300kg/m<sup>3</sup>、水セメント比は65%で、鉄筋の腐食を促進させるために、塩化物イオンを3kg/m<sup>3</sup>添加した。配筋の状況は図-10に示すとおりで、かぶりは少ないところで25mmである。暴露期間は3年間で、暴露箇所は、鉄道総研国立研究所内の日当たりの良い場所で、暴露環境区分では田園環境である。

### 4. 2 調査概要

大型供試体の自然電位の測定は、照合電極とコンクリートの接触抵抗を無くするために十分散水した後、回転型鉛照合電極を用いて迅速に行った。また、補正を行うため含水率と炭酸化深さを測定した。また、かぶりをはつきり落として、鉄筋の腐食状態を実際に観察した。

### 4. 3 調査結果

自然電位を測定した結果、-350mV以下の箇所はほとんど無く、ASTMの判断基準によれば、大部分が不確定の領域である。しかし、かぶり部分をはつきり取り、目視により腐食の程度を観察した結果(図-11)は、縦筋、横筋とも腐食していた。

そこで、含水率と炭酸化深さを求めて、塩化物イオンを含む場合の式(3)と(4)を用いて自然電位を補正し、これと建設省総合技術開発プロジェクト「コンクリートの耐久性評価技術の開発」に示されている鉄筋腐食度の評価基準との相関について検討した。含水率は3.8～4.7%

であり、含水率と炭酸化深さの両方の補正が必要な場合に相当する。図-11には、補正した自然電位を用い、-350mV以下の領域をハッチングして示す。測定誤差等が影響して一部腐食の有無と符合しない部分もあるが、-350mV以下の領域と鉄筋腐食度Ⅲ、すなわち面さびの範囲は概ね一致し、提示した補正を行うことで、現状よりは高い信頼性をもって判定できることが明らかとなった。また、鉄筋腐食度Ⅱ、すなわち点さびの領域は、補正した自然電位で-300mV程度であった。以上の事実から、電位の補正を行うにあたってASTMで不確定と判定される電位範囲(-200～-350mV)をさらに区分でき、鉄筋腐食度と概ね相関が得られることが判った。

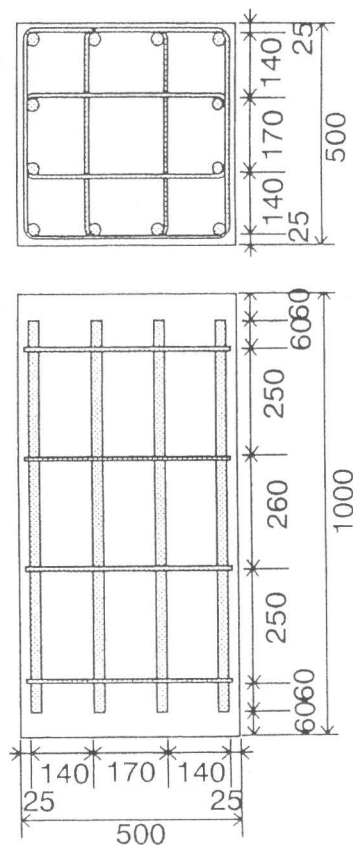


図-10 大型供試体の配筋

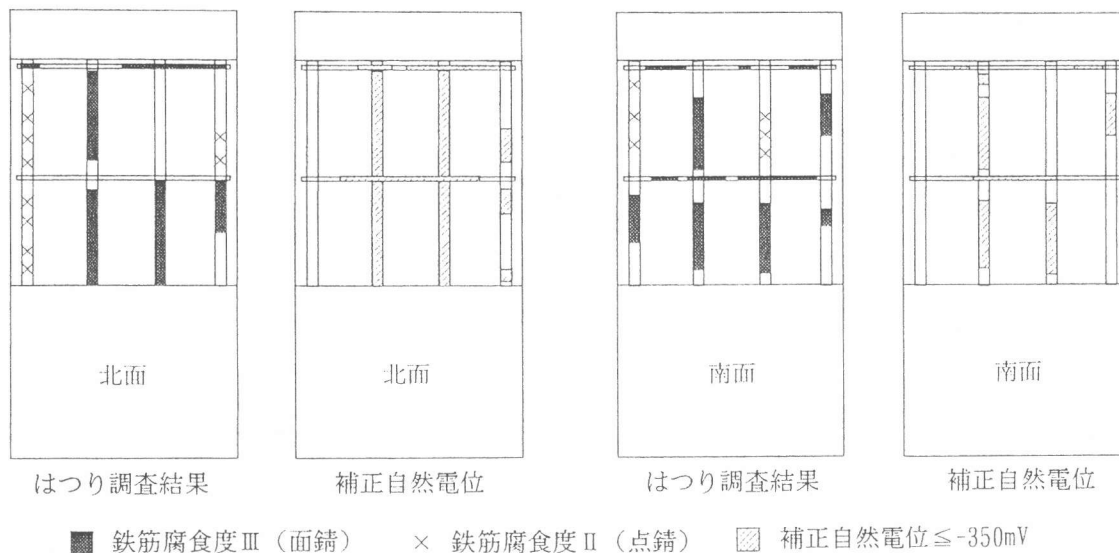


図-11 鉄筋腐食調査結果

## 5. まとめ

自然電位法による鉄筋腐食判定の信頼性向上を目的として、コンクリート供試体を作製し、かぶり部分の性状に起因する要因としての含水率と炭酸化深さについて補正法を検討するとともに大型供試体での確認試験を実施した結果、以下のことが判った。

- (1) 含水率が低くなると電気抵抗が大きくなるため、IRドロップが生じて、自然電位は貴の方向に変動する。また、炭酸化によってもかぶり部分にpHの異なる領域が生ずるため、液間電位差により同方向に変動する。
- (2) コンクリート表面での自然電位の測定値を補正する場合、含水率5.5%が基準となり、含水率がこの値より低い場合は補正が必要である。
- (3) 大型供試体の鉄筋腐食調査の結果、自然電位補正法の有効性が確認され、ASTMで不確定と判定される電位範囲をさらに区分でき、鉄筋腐食度と相関が得られる。

## 参考文献

- [1] 小林豊治、米澤敏男、出頭圭三：コンクリート構造物の耐久性診断シリーズ3 鉄筋腐食の診断、森北出版（株）、p. 86、1993
- [2] 片岡国牟：自然電位法によるコンクリート中の鉄筋の腐食診断に関する測定方法について、防錆管理、Vol. 39、No. 11、pp. 5-11、1995. 11
- [3] Figg, J. W. and Marsden, A. F. : Development of Inspection Techniques for Reinforced Concrete、Offshore technology Report OTH84205、1985
- [4] 武若耕司、小林一輔：自然電位法の非破壊的鉄筋検査手法への実用化について、コンクリート構造物の耐久性診断に関するシンポジウム論文集、pp. 79-84 1988. 5