

## [ 2 ] 鉄筋の塩化物腐食の推定手法について

正会員 岡田 清 (京 都 大 学)  
正会員 小林 和 夫 (京 都 大 学)  
正会員 ○宮川 豊 章 (京 都 大 学)  
江口 逸 雄 (京 都 大 学)

### 1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性を検討しようとする場合、その対象となる期間は構造物が施工されてから維持・補修を経て解体までの期間と考えられる。したがって、対象構造物が要求される性能を現実にもどの程度充足しているかを検討しその維持を図ることがきわめて重要であることは論をまたない。

本文では、耐久性上問題になるものとして、コンクリート中の鉄筋腐食、特に塩化物腐食の問題に対し、室内実験と併行して実構造物における鉄筋腐食程度の判定を試みるため行なった研究の一部を述べる。

### 2. 鉄筋の腐食推定

鉄筋の腐食測定手法として最も確実な方法は、鉄筋位置までコンクリートをはつり取って腐食状態を観察し、直接に腐食量、発錆面積およびその分布などを測定することである。しかし、この方法は非常に多くの労力を要し、また破壊的な手法であり、維持・管理用としては不適當である。鉄筋腐食に関して非破壊的に情報を得る手法の一つに電気化学的計測法がある。

Bažant<sup>1)</sup>は鉄筋の腐食モデルを、①酸素、塩素イオンの拡散、②腐食生成物の生成、拡散、沈澱、③ネルンスト式から求められるアノード、カソード電位およびそれらの濃度分極、④コンクリート中を流れる電流、などを特性値として用い記述している。これは、腐食を電気化学的にモデル化したものであり、特に③はアノード、カソード両反応の平衡電位からの分極によって腐食反応の存在が示され、④は腐食速度に対応している。

また、Tuutti<sup>2)</sup>はこのような腐食の電気化学的な性質に着目し、鉄筋コンクリート構造に対する腐食試験法の一つとして鉄筋の電位測定をあげ、コンクリートの電気抵抗も併せ知ることができれば、オームの法則から腐食速度の概略値を計算することができると述べている。

さらに、Stratfull<sup>3)</sup>は凍結防止剤によって腐食劣化した橋床版において鉄筋電位を測定し、 $-0.35V_{VS}CSE$ より単な部分でコンクリート中の鉄筋は塩化物の浸透によって腐食域にあったことを報告している。片脇ら<sup>4)</sup>は海洋環境における3年間の暴露試験の結果、鉄筋電位が $-0.3V_{VS}SCE$ より低い部分では腐食が認められたと報告し、同時にコンクリートの電気抵抗の測定をも行なっている。

この他、現場試験において適用された報告は無いが、実験室内において用いられる手法として分極抵抗法がある。腐食しつつある鉄筋を外部電流  $i$  によって十分小さく分極(約10 mV以下)させた場合、腐食電流  $I_{corr}$  は

$$I_{corr} = K(i/\Delta E)$$

で表わされる。しかし、現場での適用を考える場合には、多量の電流を必要とし、現実上分極の制御が困難であり、また  $K$  の値が未知であるという欠点がある。これらの欠点が解消された場合には、全体的な腐食速度の推定法として有効なものとなるであろう。

以上のように、鉄筋電位、コンクリートの電気抵抗などの電気化学的諸量は腐食状態を知る上において有力な情報となり得る。

### 3. 研究目的

筆者ら<sup>5)</sup>はすでに実験室内において種々のモデル供試体を用い、腐食が比較的初期の段階における電気化学的測定を試み、その有用性を確認した。しかし、この手法を実在構造物に適用するには種々検討すべき点がある。

現場における電気化学的測定は、特殊な装置を必要とせず、簡単に行なうことができ、得られた諸数値が信頼性に富みかつ腐食反応との具体的な対応があることが望ましい。鉄筋の電位測定は、前2項には合致するが、得られた自然電極電位の再現性およびその意味にはまだ不明な点が多い。たとえば、Stratfullの報告は腐食劣化した後についての測定結果であり、腐食開始まで、また腐食し始めてから表面にあらわれるまでにどのような電位およびその分布を示したかは明らかではない。

本研究ではこの鉄筋の電位測定を取りあげ、室内実験においては、鉄筋の電位分布の経時変化を測定することにより上記の不明な点を検討するとともに、現場試験を実施し、その適用についての基礎的な知見を得ることを目的とした。

#### 4. 実験概要

全体の実験は室内実験と現場実験との2つに分けることができる。

##### 4.1 室内実験

中央に幅1cmのモデルびわれを設けた $5 \times 5 \times 100$ cmのコンクリート角柱の断面中央に長さ約95cmの鉄筋(D10, SD35)を埋め込み、恒温室( $25 \pm 2^\circ\text{C}$ )内にて、食塩水(NaCl 3.13%水溶液、海水相当濃度)を毎日一度散水し、散水開始後2時間、1日、1週、1月、3月および1年半後にそれぞれ電位分布を測定し、その後鉄筋をはつり出し腐食状態を観察し、H(激しく腐食)、M(中程度)、L(わずかに腐食)の3段階に分類した。電位測定には2本の塩化銀電極を用いて電位差を測定する方法<sup>5)</sup>を用い、最後に鉄筋端部をはつり出して鉄筋電位を測定し、その一致を確認した。

材料として、セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は川砂、粗骨材は最大粒径10mmの砕石、練りませ水としては水道水を用いた。

コンクリート配合は、スランブ一定とするため単位水量を $196 \text{ kg/m}^3$ と一定にし、水セメント比としては、40、50、60、70%の4種を選んだ。また一部には塩化物としてNaCl(練りませ水に対して3.13%)、および防錆剤として $\text{NaNO}_2$ (練りませ水に対して0.2%)をも用いた。なお、 $\text{NaNO}_2$ の濃度としては、市販防錆剤に含まれる亜硝酸塩量の標準的な値となっている。

##### 4.2 現場実験

対象構造物は、1963年に竣工し、1964～1978年にかけて供用され、路線変更のため廃橋となった単純合成桁橋の床版の一部( $10 \times 10$ m)とした。供用期間中、冬期には凍結防止剤として $\text{CaCl}_2$ が散布される機会があった。アスファルト舗装が取り除かれて9日後の1979年8月12～14日の3日間で測定を行なった。

床版コンクリートは水セメント比39.4%、単位セメント量 $340 \text{ kg/m}^3$ で、設計強度は $350 \text{ kg/cm}^2$ 、実施コンクリート強度は $439 \text{ kg/cm}^2$ が得られた。

鉄筋電位については、現場での作業性を考慮して堅牢な硫酸銅電極を用いて測定した。また、室内実験における水セメント比と対応させるため、コンクリート強度が水セメント比に支配されるものと仮定し、シュミットハンマーによる反発硬度から圧縮強度を求めた。以上の2項目については、測定を1m間隔で実施した。さらに、マクロセル形成の参考とするため、鉄筋がはつり出された8ヶ所について鉄筋間抵抗を測定した。

#### 5. 実験結果および考察

##### 5.1 室内実験

室内実験における結果の例を図1～7に示す。

散水期間が長く、水セメント比が大きくなるにしたがって全体の電位は単になりかつ一様になる傾向が見られる。また、練りませ水中の塩化物による電位の卑化は、1年半においては水セメント比が小さな場合の方が大きなものよりも大きい。これは水セメント比が大きな場合コンクリートの密実性が低下するため、コンクリートを通しての外部からの塩分の浸透が容易となるため、全体が腐食し、練りませ水中の塩分の影響が相対的に小さくなるためと考えられる。また、防錆剤を用いた場合、1年半においては電位の凹凸が激しく腐食が局部化してお

り, NaN  
O<sub>2</sub> のア  
ノード型  
防錆剤と  
しての特  
徴が表わ  
れている  
可能性が  
高いが、  
さらに検

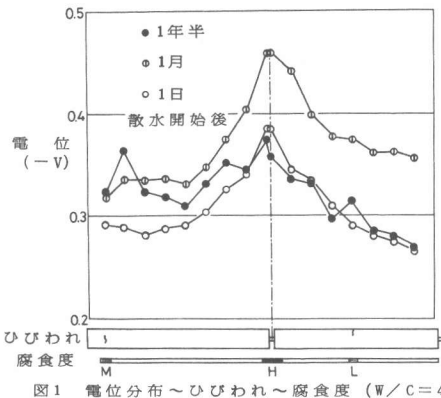


図1 電位分布～ひびわれ～腐食度 (W/C=40%)

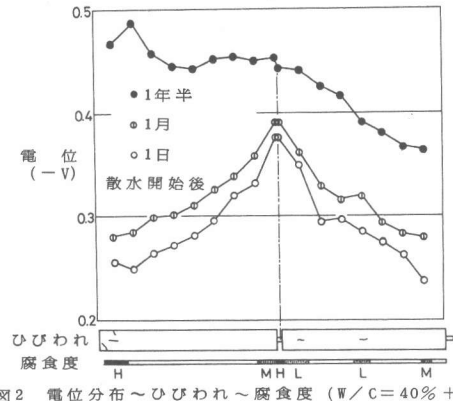


図2 電位分布～ひびわれ～腐食度 (W/C=40% + NaCl)

討が必要であろう。

電位が卑となる傾向に対応して腐食状態もまた激しくなっており、腐食によると考えられる鉄筋軸方向のひびわれも顕著になった。腐食度は水セメント比50%から急にHが多くなるのに対して、軸方向ひびわれは60%から顕著であるのは水セメント比の増大に伴うコンクリート強度の低下にも起因するものと考えられる。

散水開始後1年半では、全電位が Stratfull の基準  $-0.35V_{vs} CSE \approx -0.24V_{vs} Ag/AgCl$  よりも卑となっている。しかし、対応する腐食度には腐食していないものからHまでの全てが含まれている。この原因としては次の2つが考えられる。まず、かぶり厚が小さいため全て腐食領域に入ったもののコンクリートの密実性に起因する腐食速度に差がある。またモデルひびわれ部をアノードとし、その他の部分をカソードにすることはできたが、ひびわれ部の影響による電位の卑化が全体におよんだことが考えられる。これらに関しては、よりかぶり厚その他の諸次元の大きな供試体を用いてさらに検討する必要があるものと考えられる。

しかし、全体に腐食している場合には電位分布が比較的平坦で  $-0.5V_{vs} Ag/AgCl$  近傍であるのに対し、モデルひびわれ部に腐食が集中する傾向にあるものは、電位分布がモデルひびわれ部に凸となる傾向にあり、異なった型を示している。これらの特徴は、電位分布による腐食状態の推定に有効であるものと考えられる。

### 5.2 現場実験

実験現場を写真1に、鉄筋とリード線との結線を写真2に、使用電極を写真3に示す。シュミットハンマーによる圧縮強度の推定値を等強度線図にして図8に、鉄筋の電位分布を等電位線図にして図9に示す。

本橋床版はアスファルト舗装を取り去ってから9日間夏期の激しい日光が直射している状態であったため乾燥していた。このため、コンクリート表面に河川水を散水したところ、電位は卑に変化したが生活性領域<sup>3)</sup>には至らなかった。このことから、コンクリートの含水状態が電位に与える影響を除くため、電位測定は舗装を取り去った直後、あるいは散水してコンクリートの含水状態がほぼ定常となった状態で行なうのが適当であると考えられ

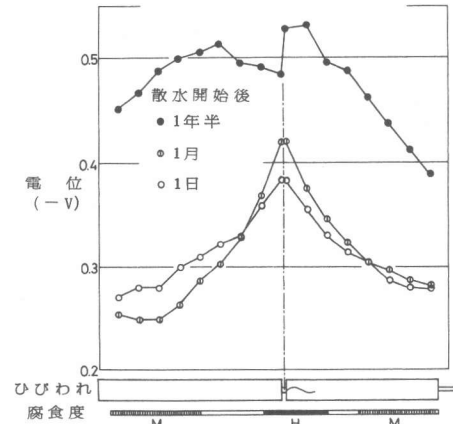


図3 電位分布～ひびわれ～腐食度 (W/C=50%)

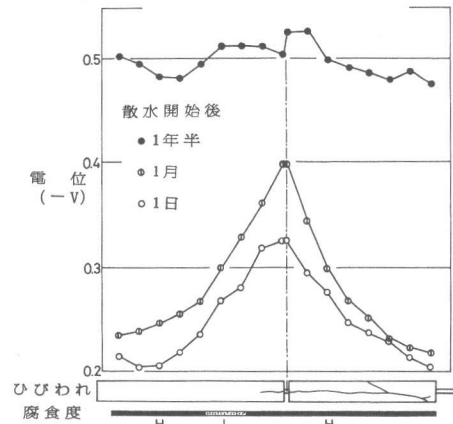


図4 電位分布～ひびわれ～腐食度 (W/C=60%)

る。今回は含水状態を一定とすることはできなかったため、散水後電位がほぼ落ち着いたひびわれ腐食度

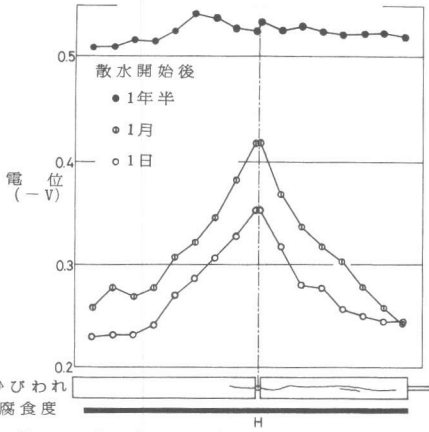


図5 電位分布～ひびわれ～腐食度 (W/C=70%)  
ける測定値を使用した。

種々の位置の鉄筋間の電気抵抗は全てはほぼ0Ωであり、本橋床版においては、鉄筋は全て電的に短絡していると思なしてよいと考えられた。

コンクリートの強度は全てはほぼ350～450kg/cm<sup>2</sup>の間にあり、外観上にも劣化は見あたらなかった。

鉄筋の電位は全て-0.20VsCSEより貴であり不働態領域(-0.30VsCSE以上<sup>3)</sup>)にあった。これは種々の位置ではつり出された鉄筋が腐食していなかった事実と一致する。コンクリート強度からも知れるようにコンクリートは高品質のものが用いられているため、鉄筋は防食され腐食領域に至らなかったものと考えられる。

以上より、鉄筋の電位測定の有用性は十分に認められ、さらに試みる必要があるものと考えられる。

おわりにあたり、本現場実験において種々の便宜を賜った山根巖氏(名古屋道路エンジニア株式会社)、ならびに実験遂行にあたって援助いただいた太田誠、山田真人(京都大学)の両氏に感謝します。

<参考文献>

- 1) Z.P.Bažan, Jour. of SD, ASCE, Vol.105, pp.1137～1135, 1979-6
- 2) K.Tuutti, Private Communication, SCCRI, Stockholm
- 3) R.F.Stratfull, HRR, No. 433, pp.1～11, 1973-12
- 4) 片脇清, 守屋進, 土木技術資料, 第18巻, 第10号, pp.13～18, 1976-10
- 5) たとえば, 岡田清, 宮川豊章, セメント技術年報, 第33巻, pp.494～497, 1979-12



写真2 結核



写真3 電極

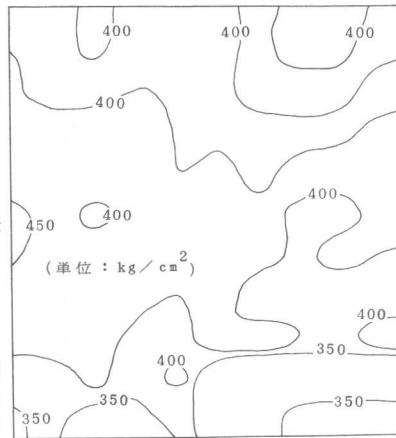


図8 シュミットハンマーによる等強度線図



写真1 実験現場

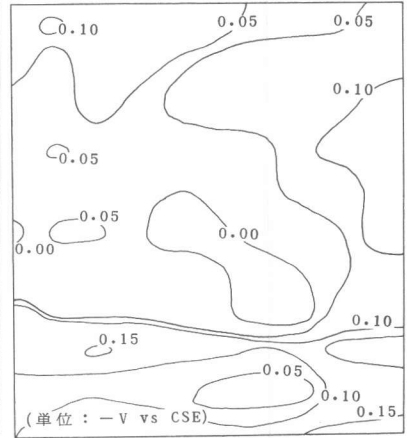


図9 等電位線図

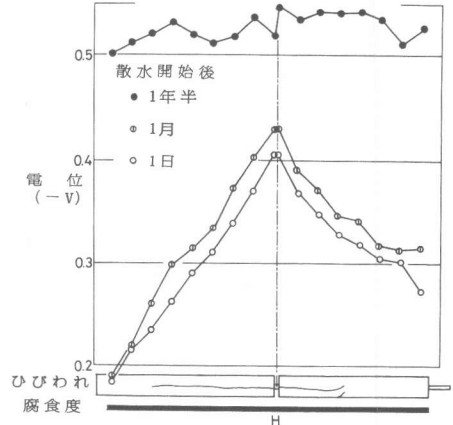


図6 電位分布～ひびわれ～腐食度 (W/C=70%+NaCl)

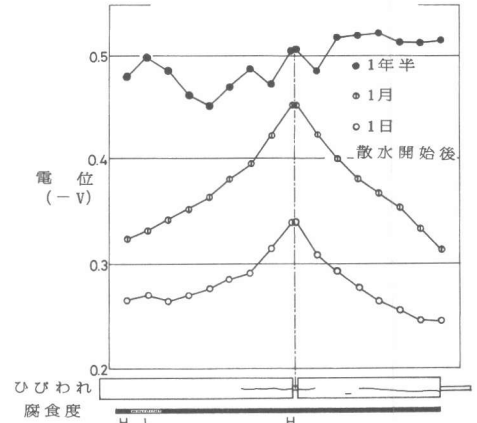


図7 電位分布～ひびわれ～腐食度 (W/C=70%+NaCl+NaNO<sub>2</sub>)