

## 第10回 鉄筋腐食（その2）

講師：中村 英佑\*1・渡辺 博志\*2

## 1. はじめに

わが国では、これまでに整備してきた膨大なコンクリート構造物の維持管理が重大な社会問題となっています。今後もこれらの構造物を長期間にわたって安全に利活用していくためには、定期的に健全度の診断や劣化予測を行い、必要に応じて劣化を予防するための対策を施すことが必要です。

コンクリート構造物の劣化事例としてはさまざまなものが報告されていますが、なかでももっとも深刻なものが、構造物内部の鉄筋の腐食です。鉄筋の腐食が進行すると、鉄筋の断面欠損等により、構造物の耐荷性能に深刻な影響を及ぼすこととなります。

通常、コンクリート内部の鉄筋の腐食が進むと、腐食生成物の体積膨脹によりコンクリート表面にひび割れが生じます。さらに腐食が進展すると、ひび割れを通じて錆汁が表面に現れるため、目視点検を定期的に行えば、鉄筋腐食を発見することができます。ところが、こうした劣化症状が構造物表面に現れていない時点においても、コンクリート内部で鉄筋腐食が潜在的に進んでいることがあります。また、ひび割れや錆汁等の劣化症状が構造物表面に現れた後では、補修に要するコストが増えるだけでなく、健全な状態に戻ることがきわめて困難になります。このため、コンクリート表面に劣化症状が現れる前に、構造物内部の鉄筋の腐食状態を正確かつ効率的に診断する技術が強く求められています。

今回は、コンクリート構造物内部の鉄筋の腐食状態を非破壊的に診断する検査方法として、自然電位、分極抵抗、コンクリートの比抵抗の測定方法と測定事例を紹介します。これらの測定は、鉄筋の腐食状態を非破壊的に推定する方法として一般的に知られています。なかでも、自然電位法については、すでに測定方法が規準化されているということもあり、実構造物の測定に用いられることも多くあります。

## 2. 自然電位法

## 2.1 自然電位法の概要

健全なコンクリートは強アルカリ性を示すため、コンク

リート中の鉄筋は不動態被膜に覆われ保護されています。ところが、塩化物イオンの侵入や中性化が進むと、この不動態被膜が破壊され腐食が生じやすくなります。この際、鉄筋の腐食状態の変化に伴い、鉄筋の電位も変化します。鉄筋の腐食反応が活性化すると、電位は卑な（マイナスで絶対値が大きい）方向へ変化します。一方、腐食の生じていない鉄筋は、貴な（マイナスで絶対値が小さい）値を示します。自然電位法は、鉄筋の電位を測定することにより、コンクリート構造物内部の鉄筋の腐食状態を推定する方法です。

自然電位法は、携帯型の測定装置を使用して簡易に鉄筋の腐食度を検査することができるため、コンクリート中の鉄筋腐食を診断する方法としてはもっとも一般的に用いられています。土木学会では、「コンクリート構造物における自然電位測定方法（JSCE-E601-2000）」として測定方法が定められています<sup>1)</sup>。また、アメリカでは ASTM 規格として測定方法が標準化されています<sup>2)</sup>。

## 2.2 自然電位の測定方法

図-1 に自然電位の測定方法の概要、写真-1 に実構造物での自然電位の測定状況を示します。

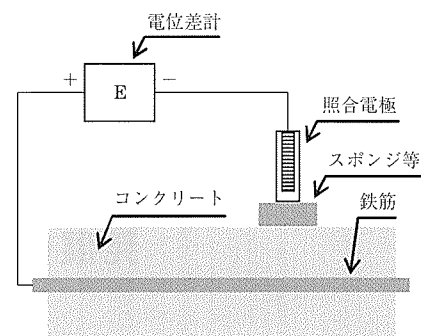


図-1 コンクリート中鉄筋の自然電位の測定方法

自然電位の測定には、照合電極と電位差計が必要です。一般的に使用される照合電極には、飽和硫酸銅電極、飽和カロメル電極、飽和塩化銀電極、鉛電極などがあります。適切に保守管理されている電極であれば、いずれを使用しても問題はありますが、使用時の環境の影響を受けにく

\*1 Eisuke NAKAMURA：（独）土木研究所 つくば中央研究所 技術推進本部 構造物マネジメント技術チーム 研究員

\*2 Hiroshi WATANABE：（独）土木研究所 つくば中央研究所 技術推進本部 構造物マネジメント技術チーム 主席研究員



写真 - 1 自然電位の測定状況

く比較的安定した電位を示すことが必要とされています。また、照合電極の種類によって測定される自然電位の値が異なるため、前述の土木学会規準の解説では飽和硫酸銅電極の値に換算して相互比較を行うための換算式が示されています。

電位差計は、内部抵抗が 100 MΩ 以上のものを使用することが推奨されています。これは、計器の内部抵抗が小さい場合、測定時に計器内を流れる微小電流により分極が生じ測定対象となる鉄筋の電位の変化を引き起こすことや、かぶりコンクリートの抵抗が高い場合に生じる IR ドロップ（電圧降下）により測定誤差が生じることを避けるためです。

実際の構造物の測定では、まず、コンクリートの一部をはつり、鉄筋を 2 箇所以上露出させ、鉄筋間の電位差や抵抗値を測定することにより鉄筋の導通を確認することが必要です。その後、照合電極と鉄筋をリード線を介して電位

差計に接続します。

測定前には、測定面のコンクリート表面に散水を行います。コンクリートが乾燥状態にあり測定が困難な場合には、断続的に 30 分間程度、散水することが推奨されています。その後、測定対象となる鉄筋直上のコンクリート表面に照合電極を押し当てて鉄筋の電位を測定します。鉄筋位置は、事前に配筋図を参考としたり、電磁誘導法や電磁波レーダ法により探査したりしておくとい良いでしょう。測定点は、土木学会規準では 100 ~ 300 mm の間隔で設定することが推奨されています。これは、塩害環境下の構造物において部分的に塩化物イオンが鉄筋位置まで浸透してマクロセル腐食が生じた場合にも、腐食位置を特定できるようにするためです。イギリスでは、塩害による劣化が懸念される地域の構造物では測定間隔を狭め、内陸地など塩害よりも中性化の影響を受けやすい構造物では測定間隔を広げるといった測定方法の提案がなされています<sup>3)</sup>。

### 2.3 自然電位の測定例

図 - 2 に、実構造物の自然電位測定結果の一例を示します。これは塩害環境下で約 40 年前に架設され、現在も供用されている RC 床版橋の測定結果です。コンクリート表面には、錆汁や剥離など鉄筋腐食による劣化と疑われる損傷が見られませんが、海側ほど卑な電位が測定されていることがわかります。表 - 1 に、ASTM 規格での自然電位測定結果の判定基準を示します。自然電位の標記として

表 - 1 自然電位測定結果の判定基準

自然電位 $E$ (mV : CSE)	腐食確率
$E > -200$	90 % 以上の確率で腐食なし
$-200 \geq E > -350$	不確定
$-350 \geq E$	90 % 以上の確率で腐食あり

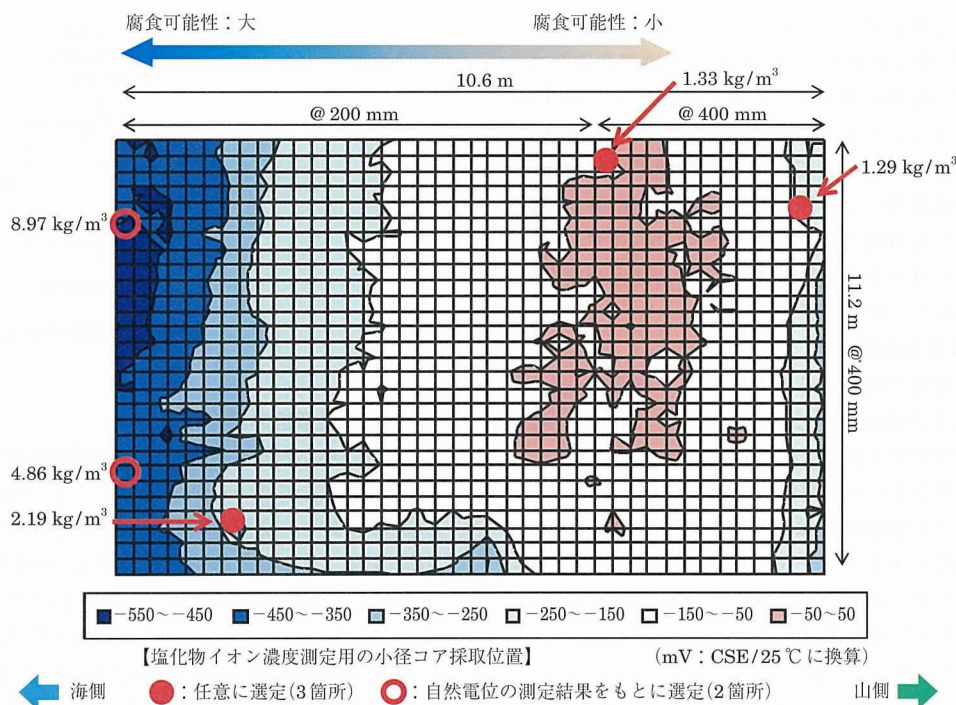


図 - 2 自然電位の測定結果例

mVの後にCSEとあるのは、測定値を飽和硫酸銅電極基準に換算したことを意味しています。ここでは-350 mVよりも卑な電位が測定された場合には90%以上の確率で腐食が生じていると評価されるため、今回対象としたRC床版橋では海側で鉄筋腐食が生じている可能性が高いと考えることができます。

同時に、図-2には、小径コア(φ=25 mm)を採取して鉄筋位置での塩化物イオン濃度を測定した結果も示しています。ここでは、自然電位測定前に任意に選定した3箇所と、自然電位の測定結果をもとに比較的卑な位置で選定した2箇所で小径コアを採取し、電位差滴定法により塩化物イオン濃度の測定を行いました。すると、自然電位が卑な値を示した位置ほど、高濃度の塩化物イオンが鉄筋位置まで浸透していたことがわかります。すなわち、自然電位の測定結果を参考とすることで、外部から高濃度の塩化物イオンが鉄筋位置まで浸透し鉄筋腐食の疑われる位置を非破壊的に推定することが可能といえます。

このように、自然電位法は、目視検査のみでは把握することのできないコンクリート構造物内部の鉄筋の腐食傾向を簡易に推定することができるという点で非常に有効な検査方法であると考えられます。ただし、かぶりコンクリートの中性化が進行している場合や、局所的に塩化物イオンが浸透しマクロセル腐食が生じている場合などには、測定値に誤差が生じることも報告されています。このため、実構造物の健全度を診断する際には、中性化深さや塩化物イオン濃度の調査等も併せて実施することで、より正確な診断結果を得ることができると考えられます。

### 3. 分極抵抗法

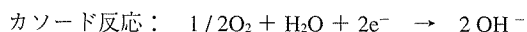
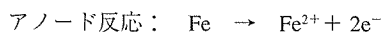
#### 3.1 分極抵抗法の概要

前章で述べた自然電位法は、簡易にコンクリート内部の鉄筋の腐食状態を推定できるものです。しかし、自然電位は、鉄筋が腐食状態にあるかどうかを示す指標であるため、鉄筋の腐食速度を直接評価することは不可能です。鉄筋の腐食速度を測定することができると、コンクリート構造物の合理的な維持管理計画を立てることが可能です。たとえば、将来的な鉄筋腐食による断面欠損量の推定や耐荷性能の評価を行うことも可能となります。本章で紹介する分極抵抗法は、コンクリート構造物内部の鉄筋の腐食速度を非破壊的に推定することが可能です。

#### 3.2 分極抵抗法の原理

分極抵抗法の原理を理解するためには、金属の腐食反応に関連する電気化学の知識が必要となります。詳細な解説は電気化学の教科書や文献1)をご参照いただくこととし、本稿ではこの原理をきわめて簡潔に説明します。

コンクリート中の鉄筋腐食は、以下に示す、鉄イオンが溶出して電子を放出するアノード反応と、その電子が溶存酸素を還元するために消費されるカソード反応とが同時に進行することによって生じます。



ここで、上記2つの反応で受け渡しされる電子の流れを

腐食電流  $I_{corr}$  と呼び、腐食反応の速度を表すものとみなすことができます。ファラデーの法則によると、腐食電流  $I_{corr}$  は時間単位面積当たりの腐食減量として変換できることが示されています ( $1 \mu A / cm^2 = 2.50 mg / dm^2 / day$ )<sup>4)</sup>。

また、腐食電流  $I_{corr}$  は、分極抵抗と呼ばれる腐食反応の抵抗  $R_p$  との関係を決る次の Stern-Geary 式で表されることが知られています。

$$I_{corr} = K \cdot \frac{1}{R_p} \quad (1)$$

ここで、 $I_{corr}$ ：腐食電流 ( $A / cm^2$ )、 $R_p$ ：分極抵抗 ( $\Omega cm^2$ )、 $K$ ：金属の種類や環境等によって定まる定数 (V) とします。

すなわち、コンクリート内部の鉄筋の腐食速度を得ることは、分極抵抗  $R_p$  を測定することと同義であるといえます。

そこで、分極抵抗の概念を解説するために用いられるのが、図-3に示す等価電気回路モデルです<sup>4)</sup>。水溶液中での金属の腐食反応では、水と接する金属表面に電気二重層と呼ばれる領域があり、ここでは正負の電荷が向かい合った状態にあるため、コンデンサの役割を担うことが知られています。一方、水溶液中の腐食は、金属原子が金属から飛び出して水溶液中で陽イオンとなるため、金属原子から陽イオンへの電気二重層を通じての変化は、容易に行われず、抵抗が存在することとなります。この抵抗の大小に腐食速度は支配されていると考えることができます。したがって、金属と水溶液の界面はコンデンサと抵抗の両方の働きをするため、コンデンサと抵抗を並列に組み合わせた回路で近似することができます。分極抵抗法は、コンクリート中で鉄がイオンとして溶出する際の抵抗、すなわち図-3における  $R_{ct}$  を測定することで、鉄筋の腐食速度を推定する方法です。

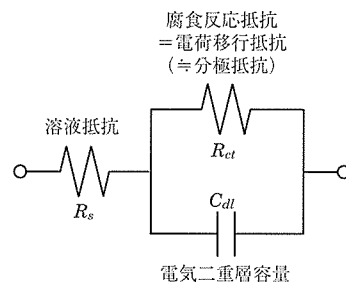


図-3 等価電気回路モデル

#### 3.3 分極抵抗の測定方法

分極抵抗の実際の測定には、直線分極抵抗法や交流インピーダンス法が用いられます。ここでは後者について簡潔に説明します。交流インピーダンス法では、印加する電流の周波数により電流経路が異なるという回路の電気的特性を利用して分極抵抗に相当する図-3の  $R_{ct}$  を求めるものです。図-3において、コンデンサ  $C_{dl}$  がほとんど充電されない程度の高周波数の電流を印加すると電流は  $R_s \sim C_{dl}$  を流れ、コンデンサ  $C_{dl}$  に十分充電される程度の低周波数の電流を印加すると、電流は  $R_s \sim R_{ct}$  を流れることとなります。

このため、高周波数の電流を印加した場合と低周波数の電流を印加した場合の抵抗の差を求めると、分極抵抗に相当する  $R_p$  を得ることができません。

写真 - 2 に、分極抵抗の測定状況を示します。分極抵抗は供試体を用いた室内実験で主に測定が行われてきましたが、近年では携帯型の測定装置も開発され実構造物への適用方法に関する研究も活発に行われています。



写真 - 2 分極抵抗の測定状況

### 3.4 分極抵抗の測定例

図 - 4 に分極抵抗の測定結果の一例を示します。これは、塩分を含んだコンクリートと塩分を含んでいないコンクリートを用いて製作した供試体の測定結果です。コンクリートに塩分を含んでいない供試体中の鉄筋の見かけの分極抵抗は大きく、腐食速度が小さいことを意味しています。一方で、塩分を含んだ供試体中の鉄筋の見かけの分極抵抗は小さく、腐食速度が大きいと考えられます。

このように、分極抵抗法を用いると、鉄筋の腐食速度という実構造物の劣化予測や維持管理においてきわめて有用な情報を得ることができます。しかし、分極抵抗法には、測定規準が整備されていないこと、測定装置によって異なる測定値が得られる場合があることなど、実用化にあたって明確にすべき課題がいくつか残されています。

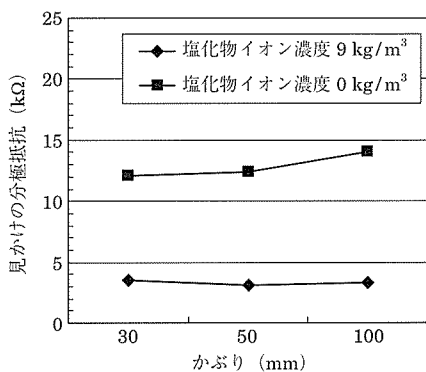


図 - 4 分極抵抗の測定結果例

## 4. コンクリートの比抵抗

### 4.1 比抵抗の概要

前章までに紹介した自然電位法と分極抵抗法は、コンクリート内部の鉄筋の腐食状態や腐食速度を直接測定するものでした。本章で紹介するコンクリートの比抵抗の測定は、鉄筋の腐食速度などを直接測定するものではなく、かぶりコンクリートの品質評価、すなわち、かぶりコンクリートの比抵抗を測定することにより、構造物内部の鉄筋の腐食度を推定するものです。なお、比抵抗とは、物質の単位体積当たりの電気抵抗のことを表します。

前述したように、コンクリート内部の鉄筋の腐食反応は、アノード反応とカソード反応の間で電子の受け渡しを行うことにより生じます。アノード反応とカソード反応の生じる領域が離れている場合には、これらの間に存在するコンクリートの抵抗によって腐食速度が律速されます。このため、コンクリートの比抵抗が大きい場合には腐食が生じにくく、小さい場合には激しい腐食が生じると考えられます。すなわち、かぶりコンクリートの比抵抗を適切に測定することができれば、内部の鉄筋の腐食速度を間接的に推定することが可能となります。

### 4.2 コンクリートの比抵抗の測定方法

コンクリートの比抵抗を測定する方法としては、図 - 5 に示す 4 点電極法 (Wenner 法) が主に用いられます<sup>4)</sup>。この方法は、土壌抵抗の測定に用いられる方法で、コンクリート表面に一定間隔  $a$  で 4 本の電極を配置し、内側 2 本の電極 C, D で測定される電位差  $\Delta\phi$  から式 (2) を用いて比抵抗を求める方法です。このとき、両端の電極 A, B には直流もしくは低周波数の交流を流します。

$$\rho = \frac{2 \pi a \Delta\phi}{I} \quad (2)$$

ここで、 $\rho$  : コンクリートの比抵抗 ( $\Omega \text{ cm}$ )、 $a$  : 電極の間隔 (cm)、 $\Delta\phi$  : 電極 C, D 間の電位差の実測値 (V)、 $I$  : 電極 A, B 間を流れる全電流 (A) とします。

コンクリートの比抵抗と鉄筋の腐食性の関係は表 - 2 の

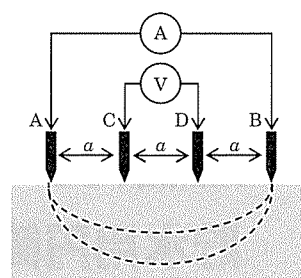


図 - 5 4 点電極法によるコンクリートの比抵抗測定

表 - 2 比抵抗による腐食性評価

比抵抗 ( $\Omega \text{ cm}$ )	腐食性
< 5 000	非常に大きい
5 000 ~ 10 000	大きい
10 000 ~ 20 000	小さい
> 20 000	ない

よくなること示されています<sup>5)</sup>。コンクリートの比抵抗は、コンクリートの配合や含水率、塩化物イオンの含有量などが影響しますが、ここでは比抵抗が 20 000 Ωcm 以上であれば、鉄筋位置に塩化物イオンや酸素などが浸透しても鉄筋腐食による被害は生じないとされることが述べられています。ただし、コンクリートの比抵抗は、内部の鉄筋の腐食状態を直接測定するものではなく、あくまでもかぶりコンクリートの品質から間接的に腐食速度を推定するものであるという点で、実際の使用にあたっては注意が必要であると考えられます。

## 5. おわりに

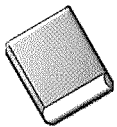
今回は、自然電位法や分極抵抗法、コンクリートの比抵抗の測定など、コンクリート構造物内部の鉄筋腐食に関連する非破壊検査を紹介しました。膨大な既設コンクリート構造物を合理的に維持管理していくためには、鉄筋腐食による劣化症状が構造物表面に顕在化した後に補修を行う事後対策に甘んじるのではなく、予防的な保全を積極的に講じていくことも重要です。このためには、定期的な目視点検に加えて、非破壊検査を用いて潜在的な鉄筋腐食の兆候を発見することが必要です。今回紹介した3種類の非破壊

検査の中でも、とりわけ自然電位法は、測定方法が既に規準化され簡易な作業でコンクリート内部の鉄筋の腐食可能性を推定できるという点で非常に有用です。定期的な目視点検に加え、今回紹介した非破壊検査を実施することにより、より合理的なコンクリート構造物の維持管理計画を策定することが可能となるのではないのでしょうか。

## 参考文献

- 1) 土木学会：鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向（その2）－コンクリート委員会腐食防食小委員会（2期目）報告－，コンクリート技術シリーズ40，2000
- 2) ASTM：C876-91，Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete，1999
- 3) P. R. Vassie：The half-cell potential method of locating corroding reinforcement in concrete structures，Transport and Road Research Laboratory，Application Guide 9，1991
- 4) 土木学会：鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向－コンクリート委員会腐食防食小委員会報告－，コンクリート技術シリーズ26，1997
- 5) 小林豊治ほか：鉄筋腐食の診断，コンクリート構造物の耐久性診断シリーズ，1993

【2006年6月16日受付】



新刊図書案内

PC技術規準シリーズ

# 貯水用円筒形PCタンク設計施工規準

頒布価格：会員特価 3 500 円（送料 500 円）

：非会員価格 4 200 円（送料 500 円）

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会 編  
技報堂出版