

# 土木建築における腐食に関する研究 (その12)

——自然電位測定による鉄筋の腐食性判定法についての実験検討——

喜田大三 守屋正裕

## Study on Corrosion in Civil Engineering and Building Construction (Part 12)

——Experimental Studies on Method for Determining Corrosion Activity of Reinforcing Bars in Concrete by Estimation of Electrical Half-cell Potentials——

Daizo Kita Masahiro Moriya

### Abstract

The method of measuring electrical half-cell potentials is very useful for judgment of the corrosion of reinforcing bars in concrete. These studies were carried out in order to establish a criterion of the corrosion activity of reinforcing bars in concrete by the above method. About one hundred specimens of steel-reinforced concrete were made, and investigations were carried out regarding the relation between carbonation of concrete and spontaneous potentials of reinforcing bars under accelerated carbonation conditions. The results obtained were as follows: (1) It was found that there is a distinct correlation between carbonation of concrete and the potentials of reinforcing bars in concrete, and these are classified according to three types. (2) The corrosion activity of reinforcing bars in concrete may be judged by the following numerical values of the potentials measured (EmV, CSE):  $E > -240$ ; no corrosion (passive state),  $-440 < E < -240$ ; partial corrosion,  $E < -440$ ; corrosion (active state).

### 概 要

コンクリート中の鉄筋が、中性化や塩化物の作用で腐食する状態にあるかどうか、簡易に判定する方法として実用化が期待される自然電位法について、判定基準を確立する目的で基礎的な実験検討を行なった。実験では、コンクリートに鉄筋を埋込んだテストピース約100体について、コンクリートの中性を促進しながら自然電位を測定し、鉄筋周囲の中性化状況と自然電位の関係についてのデータを収集した。このデータをもとに、鉄筋周囲が中性化している部分は腐食傾向にあり、中性化していない部分は防食状態にあると判断して自然電位との関係について検討した。その結果、以下の知見を得た。

(1) 鉄筋周囲の中性化状況と自然電位との関係は、3タイプに分けられ、明瞭に対応していた。(2) 自然電位の測定値 (EmV, CSE) から鉄筋の腐食性を判定する基準値は次のようである。 $E > -240$ : 腐食なし,  $-440 < E < -240$ : 部分腐食,  $E < -440$ : 腐食。

### 1. はじめに

鉄が腐食し、サビに変わると、その体積は8~20倍に膨張する。コンクリート中で鉄筋が腐食すると、サビの生成に伴う膨張圧によって、コンクリートが破壊し、著しい被害を受ける。

筆者は、これまで、鉄筋の腐食防食に関する一連の実験研究を行なってきており、また、機会あるごとに被害事例の調査や鉄筋腐食の診断を実施している。

既報<sup>1)~7)</sup>では、塩化物による鉄筋の腐食機構、防錆剤

の効果とその試験法などについて一連の実験研究結果を報告している。

本報では、鉄筋の自然電位を測定して腐食性を判定する方法についての基礎的な実験検討結果を報告する。

従来、既設構造物の鉄筋の腐食性を調査、診断する際には、コンクリートを各所で、はつり取り、あるいはボーリングでコアサンプルを採取し、中性化試験や塩化物含有量の分析を行なって間接的に判定している。従来の方法は、少なからぬ労力、時間、費用を要し、調査箇所数もおおのずと制約される。

自然電位による方法は、鉄筋の腐食機構に密接した鉄筋の自然電位を直接とらえ、腐食が発生する状態か否かを判定するものである。この方法は、非破壊で、測定点数の制約を受けず、簡便であるなどの特徴を有しており実用化が期待される。

ところで、同法は、これまで主として溶液系での各種試験に適用され、例えば鉄筋用防錆剤の効果判定<sup>8),9)</sup>などに利用されている。コンクリート中の鉄筋に対してはまだ適用例は少なく、電位測定値に基づく判定基準も十分確立されていない。

そこで、同法の実用化のための1ステップとして、判定基準の確立を主目的として若干の実験検討を行なった。

## 2. 判定法の原理

本来、コンクリート中の鉄筋は腐食しない。その理由は、コンクリートが pH 12.5~13の強いアルカリ性を有する材料で、そのアルカリ雰囲気中では鉄筋表面が不働態化するためである。不働態化している鉄筋の自然電位を測定すると、例えば、銅-硫酸銅電極 (CSE) に対して-200 mV 前後である。

一方、コンクリートの中性化や塩化物他の作用によって、鉄筋表面が活性状態となり、腐食の発生する条件になると、鉄筋の自然電位は卑にシフトし、例えば CSE に対して-500~-600 mV という値を示す。

そこで、コンクリートの表面に、基準となる電極を接触し、鉄筋の自然電位を測定すれば、鉄筋が不働態化しているか活性状態にあるかの判定が可能である。

また、構造物の鉄筋は電氣的に連続しているが、自然電位の測定値は、基準電極に近いところの鉄筋の影響を最も強く受ける。したがって、原理的には、基準電極を接触した部分ごとの腐食性を判定でき、平面的な分布や、構造物全体の腐食性評価も可能である。

ただし、この判定法は、本来腐食しない状態にあるはずの鉄筋が、中性化などの影響で腐食の傾向になっているかどうかを判定するもので、腐食程度の評価はできない。

なお、鉄筋の腐食現象に伴う自然電位の変化は、腐食機構と密接な関連があり、既報<sup>2),7)</sup>で詳述している。

## 3. 実験概要

鉄筋コンクリートのテストピースを作製して、鉄筋の腐食状態（腐食する状態かどうか）と、その鉄筋が示す自然電位との関係を、多数のデータによって検討し、判定基準を確立することが実験の主目的である。

ところで、鉄筋の腐食に関する各種の実験を行なう上で、最大の障壁は、コンクリート中においては鉄筋の腐

食反応がきわめて遅く、鉄筋が腐食する状態かどうかを短期間のうちにサビの発生有無で目視判定できないという点である。

そこで、今回の実験では、腐食状態の判定に、コンクリートの中性化現象を利用した。すなわち、炭酸ガスで中性化を促進しながら、毎日自然電位を測定し、適当な時にテストピースを破壊して、フェノールフタレインで中性化状況を調べ、鉄筋表面まで中性化が進んでいる部位は鉄筋が腐食する状態にある（腐食傾向にある）と判定し、中性化が鉄筋まで達していない部位は防食状態にあると判定して、中性化を調べる直前に測定した自然電位との関係を検討した。

なお、厳密にはフェノールフタレインの変色する pH と鉄筋が活性化する pH とはわずかに異なる。

テストピースは、総計約 100 体作製し、データを収集した。

## 4. 実験方法

### 4.1. テストピースの作製

次に示す材料、調合で、図-1 に示す形状のテストピースを作製した。

- (1) セメント：普通ポルトランド，350 kg/m<sup>3</sup>
- (2) 粗骨材：最大径 20 mm の碎石，1030 kg/m<sup>3</sup>
- (3) 細骨材：最大径 2.6 mm (富士川産)，770 kg/m<sup>3</sup>
- (4) 水セメント比：0.5~0.6
- (5) 鉄筋：D16 (JIS G 3112)

なお、図-1 で、鉄筋のかぶりを 20~30 mm と小さくしたのは、中性化を早めるためと、テストピースの上下から自然電位を測定してかぶり厚の影響をチェックするためである。

また、コンクリートの強度や品質、養生条件などは、自然電位測定には影響しないので、特に考慮していない。

テストピースは、コンクリートを打設した翌日に脱型し、自然電位を測定しながら、室内放置あるいは 1~10% の炭酸ガス雰囲気中に放置した。

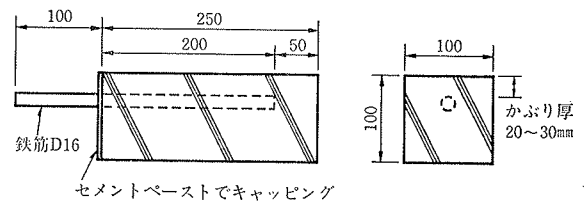


図-1 テストピースの形状

### 4.2. 自然電位の測定法

自然電位は、電位差計→基準電極→コンクリート→鉄筋→電位差計からなる電氣的回路の構成によって測定される。したがって、測定に際しては、コンクリート（か

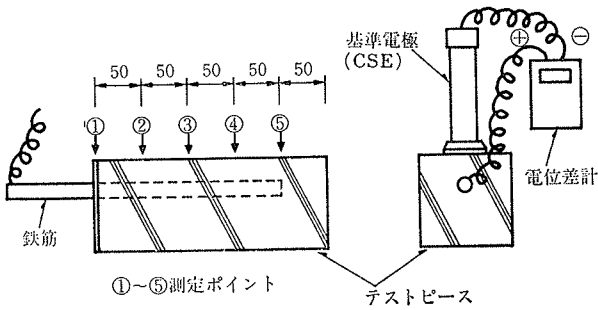


図-2 自然電位の測定法



写真-1 自然電位測定状況

り部分)の電氣的導通を確保する必要がある。そこで、測定前に、テストピース表面に水をスプレーで噴霧し、湿潤状態とした。なお、湿潤が不十分の場合には、電位差計の指示値がプラスとなったり、安定しないので比較的容易に判別できる。

測定要領を図-2に、測定の様子を写真-1に示す。基準電極には、銅-硫酸銅電極(CSE)を用い、電位差計には、内部抵抗10MΩのデジタル式を用いた。図に示しているように、①~⑤の位置に順次CSEを移動し、各テストピースとも5ヶ所で測定した。

### 4.3. 中性化試験

テストピースを鉄筋に沿って半割りし、鉄筋を取り出してその周囲およびコンクリート断面にフェノールフタレイン溶液を噴霧して中性化をチェックした。なお、中性化状態は、テストピース全数について、スケッチならびに写真で記録した。

## 5. 実験結果と検討

### 5.1. 自然電位の経時変化

テストピースを破壊して中性化状況を調査するまでの間、原則的に毎日1回、自然電位を測定した。その数例を図-3、4に示す。同図は、各テストピースごとに、①~⑤の5点の平均値をプロットしている。

図-3は、中性化を促進せずに室内に放置したテストピースについての測定例である。脱型直後から電位は次第に上昇し、数日で-200 mV付近に安定している。この間の電位変化は、コンクリートのアルカリによって鉄

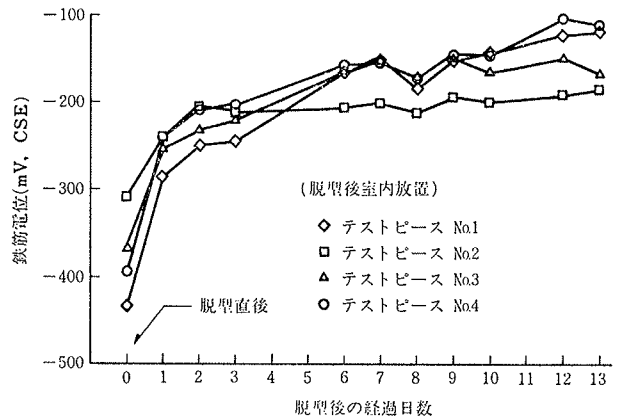


図-3 自然電位の経時変化

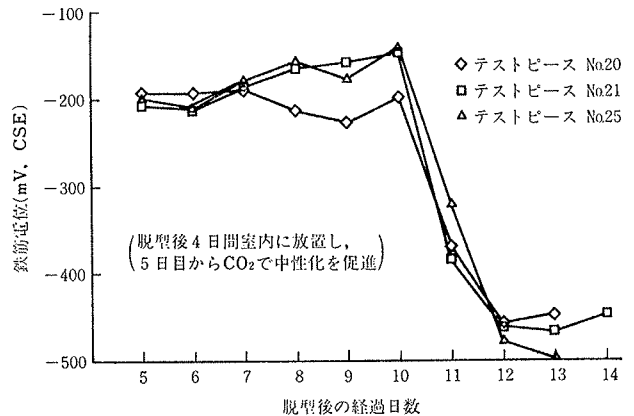


図-4 自然電位の経時変化

筋表面が次第に不働態化していく過程を示している。

図-4は、脱型後4日間室内に放置し、その後炭酸ガスで中性化を促進した場合である。10日目までは図-3の例のように、-200 mV前後の電位を示しているが、11日目から急に電位が低下し、-400~-500 mV付近に落ち着いている。すなわち、10日目から11日にかけて、中性化が鉄筋面まで達し、11日目以後、鉄筋が腐食の傾向になっている様子を示唆している。

### 5.2. かぶり厚の影響

参考までに、同一テストピースで、かぶり厚20~30 mmの表側と、かぶり厚40~50 mmの裏側から自然電位を測定し、測定値を比較した。いくつかのテストピースについて比較検討した結果、かぶり厚の違いによる電位差はいずれも10 mV以内で、実験した範囲内では大きな影響は認められなかった。

なお、かぶり厚の影響について理論上は次のように考えられる。

まず一つは、コンクリートの電気抵抗の影響である。電位測定回路構成上、鉄筋と基準電極間の電気抵抗(コンクリートの抵抗)が小さく、かつ電位差計の内部

抵抗が大きいほど、抵抗成分の測定値への影響は小さくなる。したがって、かぶり厚が小さいほど抵抗による誤差は小さくなる。前述のように、今回の実験では、電位測定前にコンクリート面を水で十分湿潤し、抵抗の低減を図るとともに内部抵抗の大きな(10 MΩ)電位差計を用いてその影響を除いている。

もう一つは、図-5に模式的に示すように、測定値に対する鉄筋表面の影響範囲の違いである。同図のように、基準電極が鉄筋に近い(かぶり厚が小さい)ほど、鉄筋上のより狭い範囲の電位が測定され、基準電極と鉄筋が離れるほど、基準電極を中心としてより広い範囲の平均的電位が測定される。この影響範囲は、コンクリートの電気抵抗によっても変化し、一概に求められないが、実際のなかぶり厚の範囲においては実用上特に考慮する必要はないと考えられる。

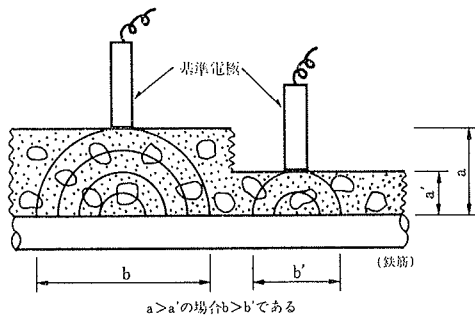


図-5 かぶり厚の影響 (模式図)

### 5.3. 中性化状況と自然電位

鉄筋周囲の中性化状況と、中性化試験の直前に測定した自然電位との関係を整理集計するために、まず、中性化状態を次の四つのタイプに分類した。

タイプI: 鉄筋周囲が全く中性化していないテストピース (記号○)

タイプII: 鉄筋周囲が一部中性化しているテストピースの、中性化していない部分 (△)

タイプIII: 同上テストピースの中性化している部分 (▲)

タイプIV: 鉄筋周囲が全て中性化しているテストピース (●)

タイプIIとIIIは、同一テストピースの5点の測定位置の中で混在していることになる。

さて、このようにして、総計414のデータを、10 mVの電位幅でクラス分けし、ヒストグラムに表わした結果が図-6である。これらの結果から次の点が明らかである。

鉄筋周囲の中性化の有無と自然電位とは明瞭に対応しており、-240 mV以上ではほとんどがタイプI (○)で、-430 mV以下ではタイプIV (●)である。また、

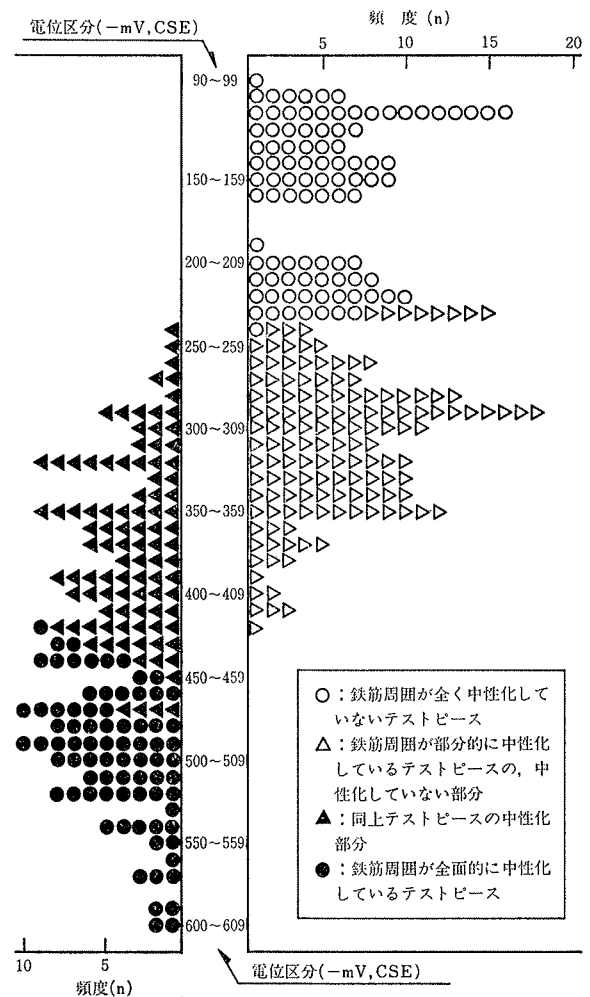


図-6 実験データのヒストグラム

中間の-240~-440 mVの範囲には、タイプII (△)とタイプIII (▲)が分布している。さらに、-240~-440 mVの中間の電位域は、おおむね次の二つに区分できる。-240~-360 mVの範囲ではタイプII (△)の出現度が高く、-360~-440 mVの範囲ではタイプIII (▲)の出現度が高い。

すなわち、-240 mV以上では不働態化しており、-440 mV以下では活性化している。-240~-440 mVでは活性化部と不働態化部が混在し、-360 mV以下では活性化している確率が高い。

なお、-240~-440 mVの中間的な電位を示す状況について、以下に若干考察を加える。

既報<sup>7)</sup>で述べているように、鉄筋の腐食発生過程においては、不働態化部と活性化部との間で passive-active cell が形成され、その電位差が駆動力となって腐食が促進される。今回の実験で、中間的な電位を示しているテストピースでは、鉄筋周囲の中性化していない部分(不働態化部)がカソード、中性化している部分(活性化部)がアノードとなってマクロな passive-active cell が形成

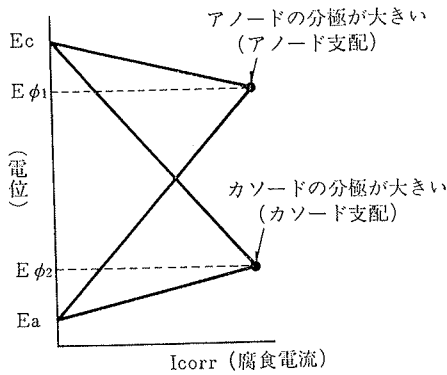


図-7 分極モデル

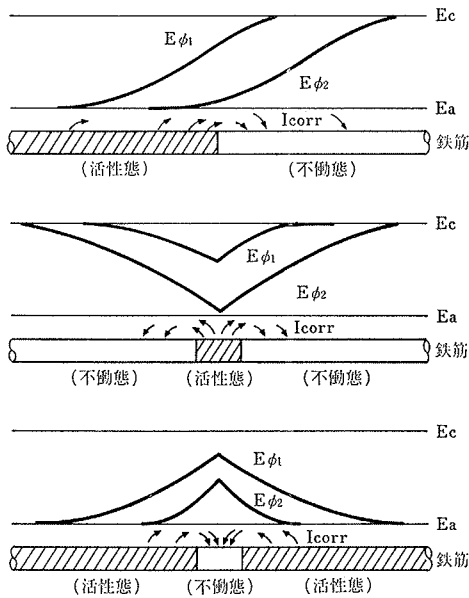


図-8 Passive-active cell による分極挙動 (模式図)

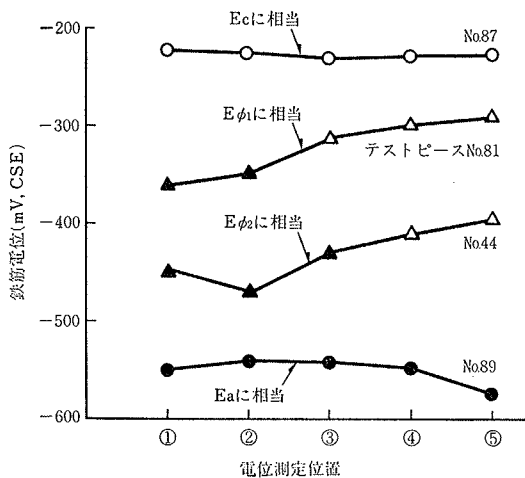


図-9 自然電位と測点位置 (代表例)

されていると考えられる。このマクロセルによって腐食電流 ( $I_{corr}$ ) が流れ、それに伴って両極の分極が起こり、その結果、電流の影響を受けている部分の電位は、開路状態のアノードとカソードの示す電位の中間的な値

自然電位(mV, CSE)	判定	ランク
$E > -240$	測定点およびその周辺部は防食状態にある	I
$-440 < E < -240$	測定点およびその周辺で、腐食の有無が混在している	II
$E < -440$	測定点およびその周辺部は腐食傾向にある	III

図-1 腐食性判定基準

を示す。この様子を模式的に図-7, 8 に示している。同図の  $E_c$  が  $-200$  mV 前後の不動態化状態に相当し、 $E_a$  が  $-400 \sim -600$  mV の活性状態に相当する。 $E_\phi$  がマクロセルの電流による分極の影響を受けた電位で、両極の分極状態によって  $E_c-E_a$  間でいろいろな値をとる。したがって、図-8 のように、活性化部と不動態化部の境界付近において中間的な電位が測定される。今回の実験データの中から例示すると図-9 のようである。

## 6. 判定基準と留意点

自然電位の測定値から、鉄筋の腐食性を判定する際の目安となる基準値は、前述の結果から、おおむね表-1 のようになる。

従来、溶液系での腐食試験にこの方法を適用する場合は、自然電位の経時変化に注目し、電位が貴に向うか卑に向うかの变化パターンによって腐食性を判定している<sup>8),9)</sup>。鉄筋コンクリートの試験体や構造物においても、コンクリートが比較的若材令で、自然電位が安定するまでの段階においては、同様の变化パターンによる判定も有効な場合がある。前報<sup>6)</sup>にその適用例を示している。

なお、これまで、海洋環境での暴露試験や腐食被害の発生した実在構造物の調査において、自然電位を測定した報告がいくつかあるが<sup>10)</sup>、それらによると、例えば、 $-300$  mV vs SCE ( $-374$  mV vs CSE) 以下あるいは  $-350$  mV vs CSE 以下の場所で腐食が確認されている。表-1 は三段階に分けているが、図-6 に示した今回の実験データでもおよそ  $-360$  mV vs CSE 以下では腐食の確率が高いという判定もでき、この点では既往の実験データとも一致している。

ところで、今回の基礎的な実験検討結果ならびに前報<sup>6)</sup>の現場試験での適用経験を踏まえ、同法を実在構造物の調査などに活用していく上での留意点、問題点などについて以下に列記する。

(1) 今回の実験は、鉄筋の腐食有無を確認する方法として、コンクリートの中性化に着目して実施したが、この結果は塩化物による腐食や、クラックによる局所的な腐食に対しても同様に適用できる。

(2) 電位測定に際しては、測定点のコンクリート (か

ぶり部分)を十分湿潤状態にすることが重要である。指示値が安定しない場合やプラスの値が表示される場合には湿潤が不十分である。なお、当然ながら、コンクリート面に不透水性の塗装やライニングなどが施されている場合には、それを取り除く必要がある。

(3) 電位差計のプラス端子は鉄筋に接続するが、鉄筋と電氣的に接触していれば配管やその他の金物類に接続してもよい。

(4) 調査する構造物が、電鉄軌道の近くにあり、鉄筋が迷走電流の影響を受けているような場合には、正常な測定ができない可能性がある。同様に、基礎鋼管杭に対する電気防食の影響を受けている場合もその可能性がある。

(5) 基準電極は、原則として鉄筋の直上部に接触させるのが望ましいが、コンクリートが十分湿潤状態にあって、内部抵抗の大きい電位差計(10 MΩ以上)を用いれば、鉄筋位置から多少ずれても大きな誤差とはならない。

(6) 基準電極の温度その他による電位変化や指示計の読み取り誤差等を考慮すると、測定値は絶えず±10~20 mV程度の誤差を含んでいると考えられ、判定に際してはその点を勘案する必要がある。

(7) 測定点の間隔は、細かくとるほど良いが、実用的には0.3~1 mピッチが適当と思われる。

(8) 腐食性の判定、評価に際しては、表一1が一応の目安となるが、前述の分極現象を念頭に置き、測定値を等電位分布図やヒストグラムに整理することによってより多くの情報が得られる。

(9) 図一8に模式的に示した passive-active cell の影響範囲(電流の到達距離)とそれによる電位変化(分極)現象について、アノードとカソードの面積比やコンクリートの電気抵抗、通気性、かぶり厚などとの関係で定量的に解明できれば、同判定法を活用していく上で参考となるだけでなく、腐食速度の予測調査法に発展する可能性もある。この点は今後の課題である。

## 7. おわりに

コンクリート中の鉄筋が、塩化物や中性化の影響によって腐食する状態にあるか否かを調査判定する方法とし

て、従来の中性化試験や塩化物量の分析による方法に代わって実用化が期待される自然電位法について、基礎的な実験検討を行なった。この結果は、先に報告した海水練り泥水を用いた OWS 壁の鉄筋腐食に関する現場試験に活用している<sup>6)</sup>。また、鉄筋用防錆剤の試験をはじめ、鉄筋の腐食防食に関する暴露試験や各種実験への活用も期待される。

実在構造物の診断に適用していく上では、さらに検討を要する点もあり、今後、実用化を進めながらデータを蓄積し、測定法の改良や判定方法の整備、問題点の解決を図っていきたい。

## 参考文献

- 1) 喜田, 守屋: 鉄筋の腐食メカニズムを解明, 金属, Vol. 49, No. 4, (1979), pp. 26~30
- 2) 喜田, 守屋: 土木建築における腐食に関する研究(その3), 大林組技術研究所報, No. 15, (1977), pp. 108~111
- 3) 喜田, 守屋: 同題(その4), No. 17, (1978), pp. 111~116
- 4) 喜田, 守屋: 同題(その5), No. 19, (1979), pp. 74~78
- 5) 喜田, 守屋: 同題(その6), No. 21, (1980), pp. 130~134
- 6) 喜田, 守屋: 同題(その11), No. 27, (1983), pp. 72~77
- 7) 守屋, 喜田: コンクリート中における鉄筋の腐食に関する基礎的実験と被害事例, 防錆管理, Vol 28, No. 4, (1984), pp. 2~9
- 8) JIS A 6205 鉄筋コンクリート用防せい剤, (1982)
- 9) 工藤矩弘: 防錆剤, セメント・コンクリート, No. 427, (Sept, 1982), pp. 80~88
- 10) たとえば, 片脇 清, 守屋 進: コンクリート中の鉄筋の腐食に関する電気化学的計測, 土木技術資料, Vol. 18, No. 10, (1976), pp. 13~18
- 11) 岡田 清, 小林和夫, 他: 鉄筋の塩化物腐食の推定手法について, 第2回コンクリート工学年次講演会講演論文集, (1980), pp. 5~8