

<技術ノート>

自動腐食促進装置の試作と利用法

Application of Accelerating Corrosion System

前田研一*
Ken-ichi MAEDA

作田孝行**
Takayuki SAKUTA

橘吉宏***
Yoshihiro TACHIBANA 富澤光一郎***
Kouichirou TOMIZAWA

1. まえがき

近年、鉄筋コンクリート構造物においては、海砂の使用、海水から飛来付着する塩化物や凍結防止剤に使用される塩化物の浸透などによる、コンクリート中の鉄筋の腐食、いわゆる塩害が重要視されている。そのため、鉄筋の腐食や防食に関する調査研究を目的とした試験体による屋外暴露試験が、多くの研究者によってさかんに行われるようになってきている。しかし、この暴露試験は、一般的に、腐食発生まで長い年月を要し、腐食進行速度も遅い。

そこで今回、長期にわたる暴露試験に対して、試験結果の早期確認のために、実験室内で潮の干満環境を再現した自動腐食促進装置を試作した。本文は、この自動腐食促進装置の内容と、装置の性能の確認試験結果、および、腐食防食技術研究開発における本装置の一利用例として実施した、代表的な鉄筋腐食の非破壊検査法である自然電位法の適用性に関する試験結果について紹介するものである。加えて、本装置の今後の利用法についても述べる。

なお、本文の一部は、既に報告済みである¹⁾。

2. 鉄筋の腐食機構と自動腐食促進装置

(1) 鉄筋の腐食機構²⁾

一般に、コンクリートは毛管孔隙を有する材料であり、この空隙は多くの場合、PHが12~13程度のアルカリ性溶液によって満たされている。このようなPHの高いアルカリ雰囲気では、コンクリート中の鉄筋は、その表面に薄い酸化皮膜（不動態皮膜という）を形成し、不動態化しているので腐食から保護されている。しかし、ある

条件下ではこの不動態皮膜は破壊されてしまう。その典型的な要因は、塩化物の混入、浸透と炭酸化などによるアルカリ性の低下（中性化）である。コンクリート中に混入あるいは浸透した塩化物イオンは、容易に不動態皮膜に浸透して皮膜をコロイド状に分散させてこれを破壊させる。一方、不動態皮膜は高いアルカリ度の環境下において形成されるため、コンクリートが炭酸化などによってアルカリ度が低下する（PHが11.5程度以下といわれる）と破壊される。

このように、塩化物の混入、浸透や炭酸化などによるアルカリ度の低下によって不動態皮膜が破壊されると、鉄筋は活性態となり、水と酸素の作用によって腐食を引き起こすようになる。この場合は、コンクリートが電解質となり、鉄筋表面において鉄がイオン化するアノード反応（酸化反応）と電子を受けとるカソード反応（還元反応）とが同時におこる腐食電池が形成される（図-1参照）。この腐食電池反応によって生じたFe²⁺とOH⁻が反応し水酸化第1鉄Fe(OH)₂が生じ、さらにH₂OとO₂とが反応し水酸化第2鉄Fe(OH)₃となり、引き続き水を失ってFeOOH（赤さび）となり、また一部は酸化不十分のままFe₃O₄（黒さび）となってさび層となる。

また、塩化物は、不動態皮膜を破壊するだけでなく、コンクリート層に塩分が蓄積すると前述の腐食電池反応において、電解質としたコンクリートの電気抵抗を低下させるので、鉄筋の腐食を促進することになる。

(2) 自動腐食促進装置

鉄筋の腐食は、前述したように、塩化物の作用や炭酸化などによるアルカリ性の低下によってその表面にある不動態皮膜の破壊から始まるが、今回試作した腐食促進装置は、塩化物の浸透によって腐食を促進させるもので、

* 川田工業技術本部中央研究室室長 **川田工業技術本部中央研究室

***株式会社メンテナンス技術部技術課

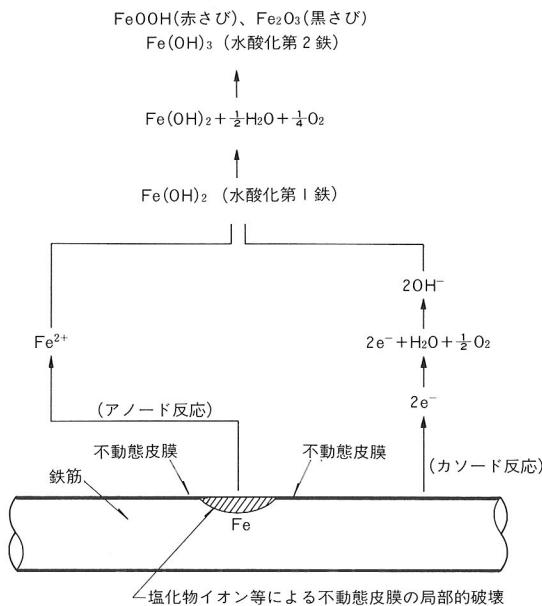


図-1 鉄筋の腐食機構

いわゆる塩害を想定したものである。

本装置は、図-2および写真-1、2に示すように、塩水貯蔵水槽、供試体設置水槽、電動ポンプ、電動弁、水位センサーと、それらを制御するコントローラーから成っている。以下に、本装置の作動原理を簡単に説明する。

まず、電動弁①③を開くことにより塩水は貯蔵水槽から供試体設置水槽①に自然流下し、所定の水位にまで達すると水位センサーからの信号により電動弁①が閉じられる。それと同時に電動弁②が開かれ、供試体設置水槽②についても同様に水位センサーの働きにより所定の水位で塩水が満たされる。各水槽への注水が終了すると電動弁③が閉じられる。塩水貯蔵水槽への揚水は、電動ポンプによってなされる。まず、電動弁②を開き供試体設置水槽②の塩水を電動ポンプによって揚水する。所定の水位まで揚水すると水位センサーからの信号により電動弁②が閉じられる。それと同時に電動弁①が開かれ、供試体設置水槽①についても同様に、水位センサーの働きにより所定の水位まで揚水される。この注水、揚水は、1日最大4サイクルまで、任意の時刻に設定できるようになっている。

以上のような装置の作動によって、水槽に設置された供試体は、乾燥と湿潤とが繰り返されて、常に塩水と空気からの酸素の供給を受けることになる。

また、エアーコンディショナー、加湿器とこれを制御する温湿度センサーを設置しているので、温湿度を自由に調整し、実験を行うことができる。

鋼材の腐食期間の短縮を目的とした腐食促進法は、これまでにも、自動塩水噴霧装置や炭酸ガス中性化装置等その試験目的に合わせていくつか開発され、成果を上げ

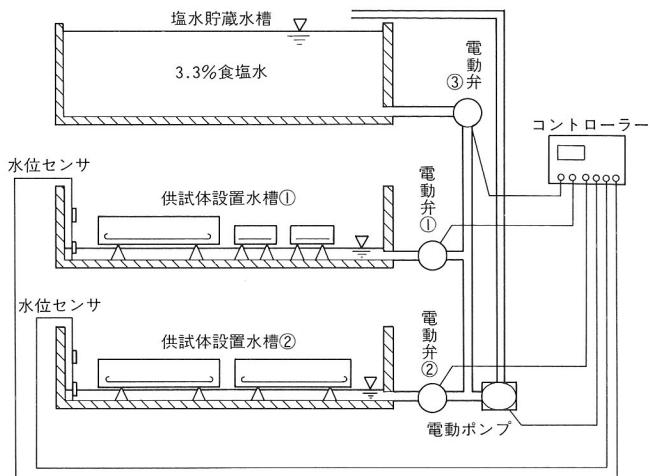


図-2 自動腐食促進装置の構造



写真-1 コントローラーおよびエアコンディショナー、加湿器

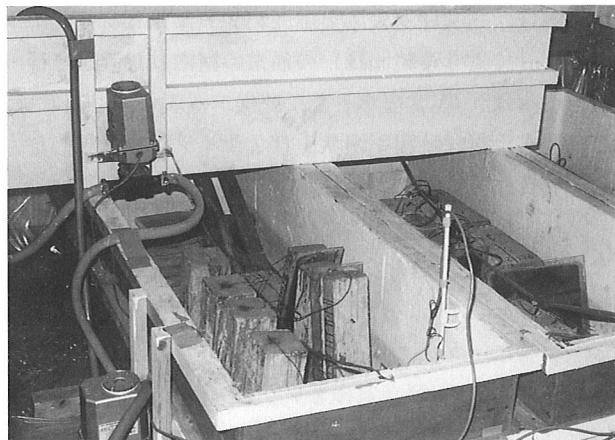


写真-2 塩水貯蔵水槽と供試体設置水槽

ている。これらの各装置に比べ、今回試作した装置は、

- ① 作成が容易で、しかも安価である
- ② 構造が単純なため故障が少なく、かつ自動制御で
あるため維持管理が容易である
- ③ 任意の場所に設置が可能である
- ④ 塩水が水槽内だけの移動であるため、周囲に与え
る塩分の影響が少ない

といった特徴を有している。

3. 性能の確認試験と一利用例

本装置の性能の検証は、鉄筋コンクリート供試体(RC供試体)数体を腐食促進させることで行った。腐食状態の確認は、鉄筋を直接観察することができるガラス貼り供試体を作成し、これを観察し、必要に応じて供試体から鉄筋を削り出すことにより行った。

また、非破壊的腐食鉄筋検査法の一つである自然電位法の適用性に関する試験を、性能確認試験と合わせて実施した。

以下、本装置の性能確認試験の結果と、本装置の一利用例として、腐食防食技術に関する研究開発の一環である自然電位法の適用性試験の結果の一部を示す。

(1) 性能の確認試験

a) RC供試体

促進試験に用いた供試体は、図-3、写真-3に示す直方体供試体である。鉄筋は黒皮付き異形棒鋼とし、コンクリートには普通ポルトランドセメントを用い、水セメント比は59%とした。

また、腐食状況を観察する目的として、図-4、写真-4に示すガラス貼り供試体を作成した。この供試体は、図-3に示した直方体供試体の鉄筋を含む断面を半割りし、その表面に透明のガラス板をエポキシ樹脂系の接着剤により密着させたもので、ガラス越しに鉄筋の腐食進行状況を観察することができる。

b) 腐食環境

試験は、腐食促進装置を湿度が50~70%（自記記録式温湿度計により連続記録）の通常の室内に設置して行った。塩水は3.3%食塩水とし、乾燥・湿潤の繰り返しは、2時間水没後10時間乾燥で1日2サイクルで実施した。

(2) 自然電位法の適用性試験

図-1に示したように、コンクリート中の鉄筋の腐食は、電池反応の一種であるから、腐食の状況に対応した電位分布を呈する。自然電位法は、図-5、写真-5に示すように、コンクリート中の鉄筋を一方の電極とし、もう一方の電極（照合電極という）をコンクリート表面上に設けて電池回路を形成し、この電池の起電力の大きさによって鉄筋の腐食状態を検討しようとするものである。

この自然電位法に関する規準は、わが国ではまだ定められていないが、ASTM C876によって標準化されている。ASTMでは、照合電極として飽和硫酸銅電極を用いた場合、自然電位E (mV) が測定された箇所における腐食状況は、表-1の状態にあるとして基準値を設定している。

この基準値は、室内実験の結果得られた値であり、実構造物へ適用するにあたっては、種々の環境下における

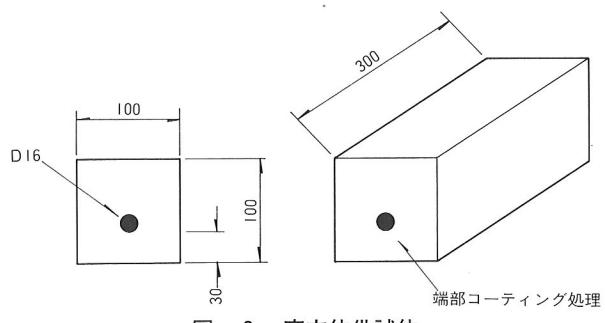


図-3 直方体供試体

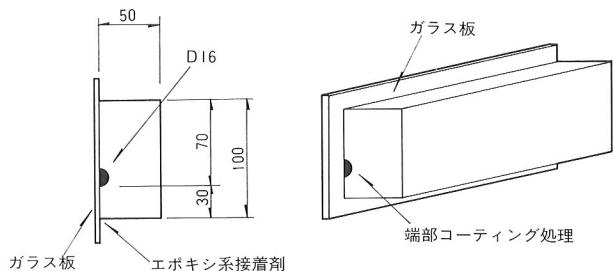


図-4 ガラス貼り供試体

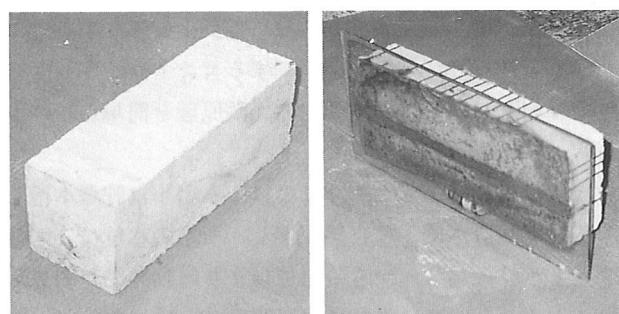


写真-3 直方体供試体

写真-4 ガラス貼り供試体

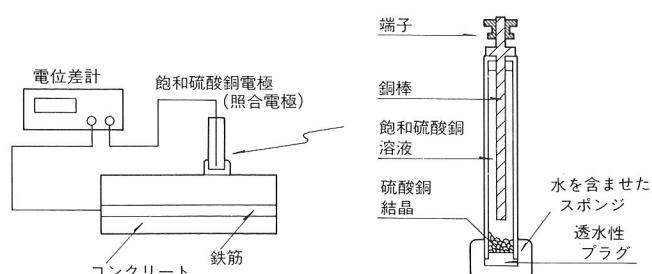


図-5 自然電位測定概要

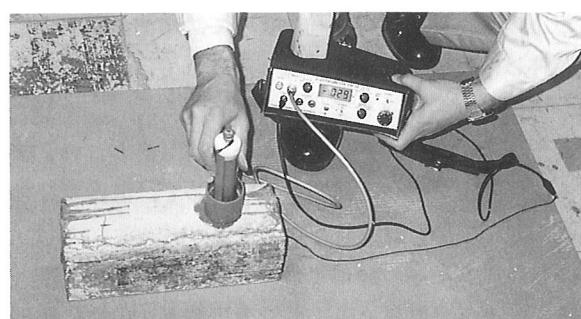


写真-5 自然電位測定状況

表-1 ASTM規定³⁾

$-200 < E$	90%以上の確率で腐食は生じていない
$-350 < E \leq -200$	不確定
$E \leq -350$	90%以上の確率で腐食は生じている

十分な調査が必要であると考えられている^{4),5)}。

今回の試験における自然電位の測定は、本装置の性能確認試験のため腐食促進中の供試体に対して、照合電極としては飽和硫酸銅電極を用い、約10日間の間隔で実施した。

(3) 試験結果と考察

a) 腐食状況確認結果

いずれのガラス貼り供試体も、腐食促進を始めて約180日で緑色の生成物が鉄筋の周辺に発生しているのが確認された。図-6に、220日経過した時点でのその緑色生成物の状況の例を示す。この緑色の生成物は、水酸化第1鉄 Fe(OH)_2 から水酸化第2鉄 Fe(OH)_3 への移行段階で生じる緑色錯体の一種(みどりさび)であり、コンクリート中の鉄筋の不動態皮膜が破壊され、活性化している状態であると推定された。

図-7は、腐食促進中供試体の表面温度経時変化を示したものである。表面温度が80日以降は10°C前後と低い時期であったことから、腐食反応が活発でなく鉄筋腐食の確認まで約180日要したが、本装置(現在は恒温恒湿室内に設置されている)の腐食促進装置としての有用性が確認された。

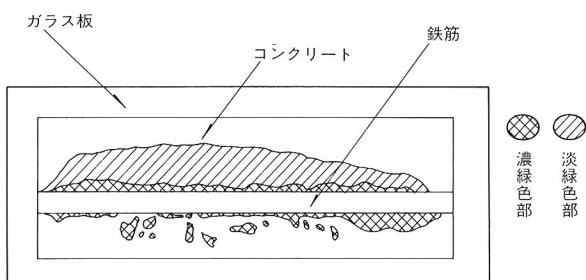


図-6 ガラス貼り供試体の腐食状況の例(220日経過)

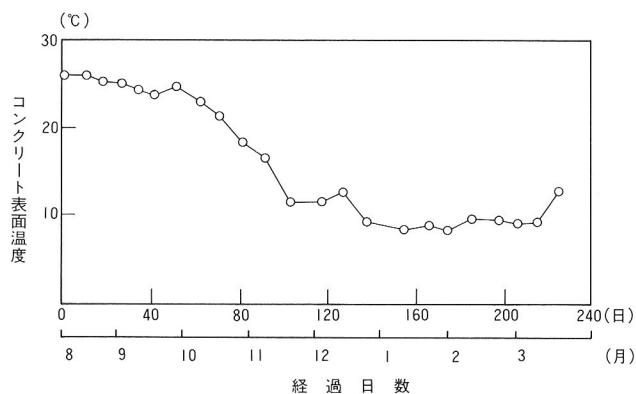


図-7 コンクリート表面温度の経時変化

b) 自然電位測定結果

図-8は、ガラス貼り供試体の自然電位の経時変化の一例で、横軸に腐食促進開始後の経過日数、縦軸に電位測定値を示している。この図から、ガラス貼り供試体において緑色生成物が確認され始めた約180日以降から、電位値が卑の方向(マイナスの値が大きくなる方向)に変化していることがわかる。このことから、供試体の腐食状況と電位値とはよく対応しており、自然電位法の鉄筋腐食検出法としての有効性が確かめられた。

なお、図-8で、腐食促進開始後10日目の電位値が急激に卑の方向に変化しているが、これは、塩分浸透初期段階においては、鉄筋かぶり部に蓄積した塩分の濃度差による濃淡電位差が生じるため、これを含めて測定しているためと考えられ、含水量、中性化の影響とともに重要な課題である。⁵⁾

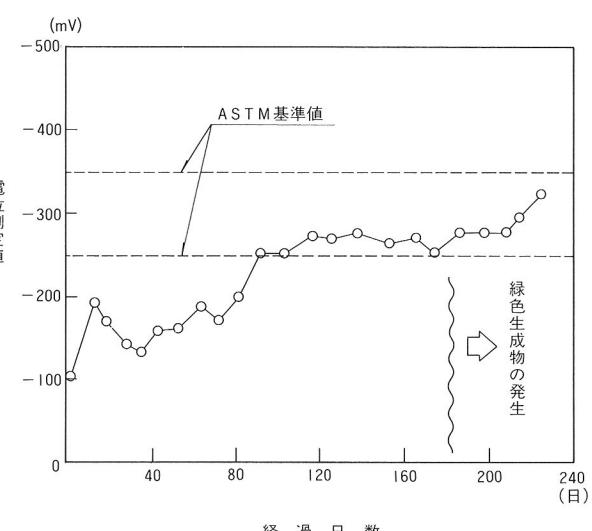


図-8 ガラス貼り供試体電位測定結果

4. 今後の利用法

鉄筋コンクリート構造物の腐食防食に関する基本技術は、腐食鉄筋の検査法と防食法であるといえる。ここで紹介した自然電位法は、前にも述べたようにASTMによって規準化されており、使用される機会も増えてきている⁶⁾。しかし、実構造物への適用にあたっては、環境条件によっては電位値が変動する等、問題点も少なくはない。この他の腐食鉄筋の非破壊的検査法としては、分極抵抗法、放射線透過法、電磁誘導法、電気抵抗法等があるが、いずれも種々の問題点を抱えており、現在までのところ確立したものは無いといえる。

一方、防食技術に関する研究開発も進められている。主な防食法としては、「道路橋の塩害対策指針(案)⁷⁾」にもあるコンクリート塗装や鉄筋塗装、その他亜鉛メッキ鉄筋、耐塩性鉄筋、電気防食、防錆剤の使用等があげられ、実績も増えてきている。しかしながら、施工後比較

的早い時期に劣化が発見されたという報告^{8),9)}もあり、問題点も多く、最善の工法、材料等を模索している段階といえる。

したがって、この分野の研究開発は、今後ますます進んでいくことが予想される。その際、本装置は、

- ① 3章で紹介した自然電位法適用性試験に類似した腐食鉄筋非破壊検査法の研究開発の際の腐食促進法
- ② 新しく開発された防食工法、材料の耐塩性に関する検証試験の際の試験機

として利用され、威力を發揮することが期待される。

5. あとがき

以上述べたように、ガラス貼り供試体の腐食状況の確認結果からは、試作した装置が腐食促進装置として有用であることを確認できた。また、本装置を利用した一例として、腐食防食の基本技術の一つである腐食鉄筋検査法の適用性試験の結果を紹介したが、他にも多くの用途に供し得ることを予測できた。今後は、現地の環境条件等を考慮し、その試験目的に合わせて適宜改良していくことも必要であろう。

なお、本装置による防食材料の適用性に関する実験を開始したことを付け加える。これは、本装置を恒温恒湿室に設置し、防食材料数種の耐塩性の検証を行っているものである。この実験の結果については、別の機会に報告したいと思う。

最後に、本文をまとめるにあたり貴重な御助言をいただいた、金沢大学・梶川康男先生、京都大学・宮川豊章先生に対し、心より謝意を表する。

参考文献

- 1) 橋・作田・前田・梶川：自動腐食促進装置の試作と腐食モニタリングに関する考察、第42回土木学会年次学術講演会概要集（V），1987.
- 2) 腐食防食協会：防食技術便覧、日刊工業新聞社、1986.
- 3) ASTM C876-77 : Half Cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete, 1977.
- 4) 前田・作田・橋・富沢：腐食床版の自然電位法による非破壊検査と耐荷力の評価法に関する研究、川田技報、Vol. 6, 1987.
- 5) 梶川・前田・作田・橋・富沢：自然電位法によるRC床版の鉄筋腐食検査、橋梁と基礎、Vol. 21, No.11, 1987.
- 6) 例えば、作田・橋・前田・梶川：自然電位法による鉄筋腐食検査の実例と適用性に関する考察、第42回土木学会年次学術講演会概要集（V），1987.
- 7) 日本道路協会：道路橋の塩害対策指針（案）・同解説、1984.
- 8) 牛島・関・宮内・八重樫：コンクリート構造物の補修システムの評価と最適工法の選定、第42回土木学会年次学術講演会概要集（V），1987.
- 9) 真崎：日本道路公団における橋梁・高架の維持管理、橋梁、Vol. 23, No. 9, 1987.