

コンクリート中の鉄筋腐食の推定

材料研究室

最近、コンクリートの塩害という言葉をよく耳にします。これは主に、海岸部のコンクリート構造物が海からの飛来塩分によって内部の鉄筋に損傷を受けることですが、実際に構造物の表面にさび汁や軸方向ひびわれなどの劣化損傷が現われたときには、劣化が相当進んでいる

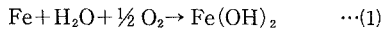
と考えられます。このような劣化損傷の程度を把握することは、コンクリート構造物を適切に維持管理する上で重要となります。

本文では、鉄筋の腐食と現在最も広く用いられているその推定手法についての御質問にお答えいたします。

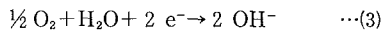
〔問1〕 コンクリート中の鉄筋は、どのように腐食していくのですか？

〔回答〕 その1、腐食とは…

鋼材を大気中に放置すると、水分と酸素の作用で式(1)の反応が起こります。



これは、さらに次の2つの式に分けられます。



式(2)は電子2個を残して鉄がイオンとなって溶けだす反応で、アノード反応といえます。この反応で生じた電子を消費するのが式(3)に示すカソード反応と呼ばれるものです。式(2)と(3)を見るとわかるように、腐食は種々の電荷を持つイオンや電子が反応に関係していることから電気化学反応であるといえます。そのために、腐食現象を電気回路でモデル化して検討する試みも数多くみられます¹⁾。

その2、コンクリート中では……

中性化していない健全なコンクリートは、pH12以上の強いアルカリ性を示すことはよく知られています。このような環境中での鋼材の表面には不動態被膜と呼ばれる目に見えないほど薄い、しかしきわめて防食性の高い被膜が生成します。このため、コンクリート中の鉄筋は原則的にはさびません。図-1に、水中での鉄の腐食速度とpHの関係を示します²⁾。コンクリートの中性化によってpHが低下した場合、あるいは塩分が侵入した場合、この不動態被膜が破壊され鉄筋の腐食が起こります。

後者の場合、塩分中の塩素イオン(Cl⁻)が鋼材の不動態被膜を破壊し、不動態被膜が破壊された部分では前述の式(2)のアノード反応が、不動態被膜でおおわれている

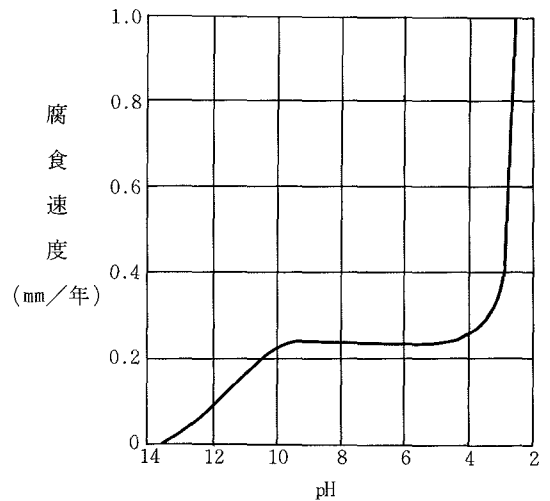


図-1 水中での鉄の腐食速度とpH

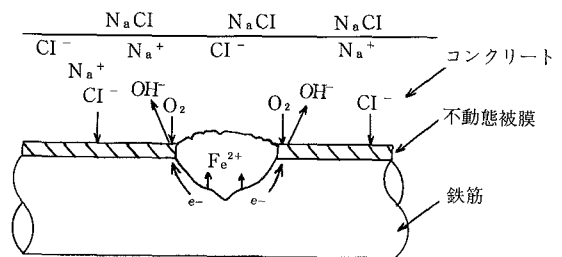


図-2 コンクリート中の鋼材の腐食

部分では式(3)のカソード反応が起きています。この様子を図-2に示します。Cl⁻には、さらに不動態被膜の再生を妨げる働きもあります。鉄筋の腐食による生成物はもとの体積の数倍にもなり、かぶりコンクリートにひびわれを発生させ、さらにそのひびわれから腐食に必要な水分と酸素が補給され、塩化物も侵入するという悪循環が

続きます。

かくして、コンクリート表面にひびわれの発生が見られるわけですが、この段階までくると腐食の進行をくい止めるには大規模な補修しか方法はありません。そこで、このような段階にいたる前にコンクリート中の鉄筋の腐食を非破壊で知る手法が必要になります。

〔問2〕 鉄筋腐食の推定方法について教えてください。

〔回答〕 その1、自然電極電位法

この方法は、複雑な測定機器を必要とせず簡単に鉄筋腐食に関する情報を得られるため、測定実績も多く最も実用的に確立された手法といえます。測定の概略を図-3に示します。コンクリート中の鉄筋とコンクリート表面上の照合電極で鋼材の電位差を測定することにより、鋼材の腐食の有無を推定します。

具体的には、入力抵抗の大きな電位差計(10MΩ以上)の一方をコンクリート中の鉄筋に接続し、他方を照合電極に接続して測定します。照合電極には、飽和硫酸銅電極、飽和塩化銀電極、飽和カロメル電極などの安定した電位を持つ電極を使用します。これらの照合電極を、水道水などを含ませたスポンジなどをはさんでコンクリート表面の測定点と接触させます。測定値はコンクリートの含水率などによって大きく変動する場合がありますので、コンクリートの表面を十分に濡らすなどの措置が必要になることがあります。同一測定点において、5分程度同一の値が得られれば十分に安定していると考えてよいでしょう³⁾。

ASTM C876では、電位 E (VS 硫酸銅電極) の測定結果から以下のように腐食の有無を推定しています。

- 200mV < E ……90%以上の確率で腐食が生じていない
- 350mV < E < -200mV ……不確定
- E < -350mV ……90%以上の確率で腐食が生じている

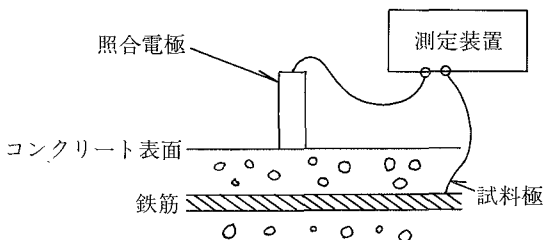


図-3 自然電極電位測定の概略

しかし、電位はコンクリートの含水率や塩化物の含有量などによって変動する欠点があり、測定値のみで腐食状態を推定せず、実際には図-4に示すような電位分布図、図-5に示す等電位線図などで判断するのが一般的です。これは、電位の絶対値に比べて、その分布形状がコンクリートの状態が変化してもあまり変化せず、バラツキも少ないという理由からです。

その2、分極抵抗法

コンクリート中の鉄筋の腐食を推定するとき、腐食の有無のほか腐食の量や腐食の進行速度というものについても考えなければいけません。自然電極電位は腐食の有無を表わすもので、これによって腐食量や腐食速度を推定することは困難です。そこで、腐食速度を推定する方法として試みられているのが分極抵抗法です。

これには種々の方法がありますが、一般的に用いられているのは図-6に示すような測定装置によるものです。原理は対極からコンクリート中の鉄筋に微小電流 ΔI を流し、鉄筋の電位を ΔE だけを分極させると、ΔE が十分小さいとき(自然電位付近: ±10~20mV)、電流と電圧の間には次の式(4)で表わされる直線関係が成立します。

$$\Delta E = R_p \cdot \Delta I \quad (4)$$

この直線の傾き R_p が、分極抵抗です。また、分極抵抗 R_p と腐食電流 I_{corr} (腐食速度)の間には、式(5)の関係があります。

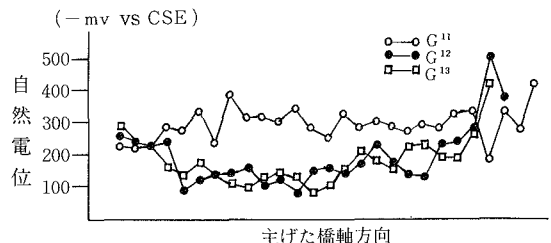


図-4 電位分布図

$$I_{corr} = K/R_p \dots (5)$$

ここで、Kは金属の種類、環境などによって決まる定数です。厳密にはこの比例定数Kを求めなければ腐食速度

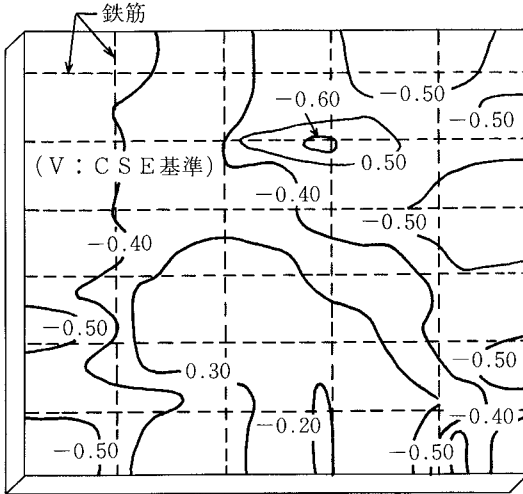


図-5 等電位線図

〔問3〕 実際にはどの程度まで推定できるのですか？

〔回答〕 材料研究室でも数年前から供試体や実構造物を対象にして自然電極電位法、分極抵抗法による鉄筋の腐食推定を行っています。今回は廃橋となったPC橋について、推定結果と解体して調べた腐食状態を比較したものを紹介します。

図-7は、けた腹部内部の鋼材の腐食状態と等電位線図です。電位の測定値自体はそれほど卑（マイナス側）になっていませんが、等電位線の入組んでいる部分（電位勾配の急な部分）ではシースの著しい腐食が見られます。

図-8は、けた腹部のシース直上での自然電位と分極抵抗の分布です。配筋の複雑な実構造物では、前述の理由から分極抵抗値の信頼性には多少問題があります。しかし、この図から判断する限りでは、けた中心から5mと6~7mの部分での分極抵抗が小さいことから、この部分のシースの腐食速度が他の部分と比較して速いといえます。

このように、自然電極電位法と分極抵抗法は、鉄筋コンクリート構造物の鋼材腐食の推定に有力な手法であることがよくわかりただけたと思います。

(文責 佐々木慎一)

はわかりませんが、 R_p の相対的变化から腐食速度を推定することができます。

実際に分極抵抗を測定する場合は、①鋼材を分極させる微小電流が、どのくらいの範囲に影響を及ぼすかについて考慮する必要がある、②実構造物では鋼材を分極させるのに多量の電流を必要とするため、分極の制御が難しいなどの解決すべき問題があります。

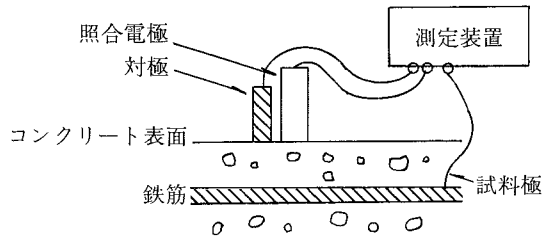
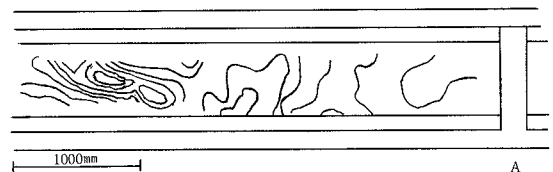
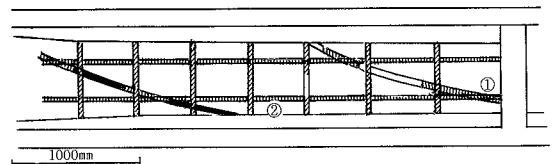


図-6 分極抵抗測定の概略

等電位線図



鋼材の腐食状況



- 腐食なし
- ▨ ごく表面的な腐食
- ▤ 浅い孔食など断面欠損の軽微な腐食
- 断面欠損が著しい腐食

図-7 主げた腹部の電位と鋼材の腐食

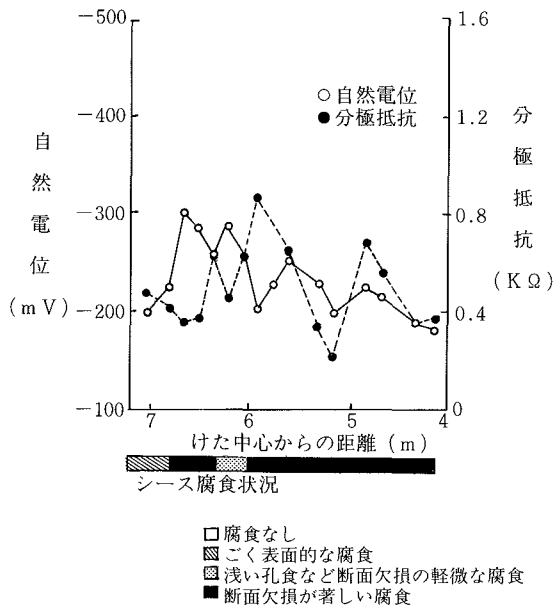


図-8 自然電位と分極抵抗の分布

参考文献

- 1) 例えば, 田村 博, 永山 勝, 下澤和幸; 腐食モニタリング測定値に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集, 1990,
- 2) 岸谷考一ら編, 大即信明ら著; コンクリート構造物の耐久性シリーズ塩害 (I), 技報堂出版, 1986.
- 3) 宮川豊章; コンクリート中の鋼材の電位測定方法の一試案, 海洋コンクリート構造物の防食指針 (案), (社) 日本コンクリート工学協会, 1983.
- 4) 小尾 稔, 界 孝司; 補修・補強を施した PC 橋の劣化および耐荷力, 土木学会第45回年次学術講演会, 1990.

サ □ ン

ワープロ機能

わが研究室には大小合わせて3台のワープロがある。報告書, 論文, 予算調書, ほとんどがワープロで作成されている。便利なものだ。削除も挿入も思いのまま。文章のコピーも移動も簡単。だが, 使い慣れてくるにつれ, 奇妙なことに気が付いた。

従来, 文章を書くときはどうしたか。まず全体構想を頭に描く。次に各章・各節で述べることを頭で整理し, 一つ一つの文章を十分頭で練ってから, これぞとおもう文章ができて初めてペンを握る。つまり, 何度も消したり書いたり煩わしいから, なるべく完成に近い形にして書き出したものだ。ところが, ワープロを使うようになってからは, 頭に浮かんだことをなんでもかんでも即座に打ち出し, 前後の脈絡を無視してとにかくキーを叩き続ける。一応思いつくだけの文章を吐き出したら, 今度は面画とにらめっこしながら, アッチの文をコッチに移し, コッチをアッチに持っていく。形容詞, 副詞を挿入する。やがて満足した文章が出来上がる。

頭で勝負していたときには, 考えたことを記憶させるスペースが広大で, かつ何層にもなっていて, それが有機的に組織化されていたような気がする。ワープロを使うようになってからは, 記憶スペースがどんどん狭まり, 薄べらになって, いわば単細胞化していくようだ。記憶力が悪くなったのは年のせいだけではないんじゃないか。

たまにやペンを握ることもある。へたな字が増々へたになっていて, 自分でも読めないほどだ。おまけに, 少しやっこしい漢字は全部カタカナで済ませてしまう。なに, キーを叩けば漢字に変わるんだから。字の書順なんて覚える必要はない。キーの配列を覚えればいい。漢字を書けなくとも読めればいい。昔は書けなかった鸚鵡, 蠟燭, 鎧兜, 蜘蛛, …。今は何だって漢字にできる。漢字にできないものだって漢字にできる。ワープロさえ使えば。

(記 能登繁幸)