

コンクリート中の鉄筋の腐食診断技術

Corrosion Monitoring of Steel Rebars in Concrete Structures by AC Impedance Method

横田 優/Masaru Yokota・(株)四国総合研究所 土木技術部 副主席研究員 工博

吉田倫夫/Michio Yoshida・住鉱防蝕(株) 技術部 技術課長

幸 英昭/Hideaki Miyuki・総合技術研究所 鋼管・鋼材研究部 主任研究員

大野 鐵/Tetsu Ono・小倉製鉄所 技術部 専任部長 工博

要 約

交流インピーダンスの測定により、実コンクリート構造物中の鉄筋の腐食速度を推定し、その余命を推測する、腐食モニタリング技術を開発した。

2種類の周波数を用いるだけで、迅速に交流インピーダンスを測定する方法を開発した。この方法により、1点の測定が数分以内でできるようになった。

更に、この迅速測定法を組み込んだ、測定現場に携行が可能な、軽量の測定装置を開発した。

この装置を実構造物での測定に適用した結果、この方法による鉄筋の腐食速度の推定値は、鉄筋を取り出して測定した腐食深さの実測値と良く一致した。

これらの結果から、今回開発したモニタリング技術は、実構造物に適用可能であることが確認できた。

Synopsis

Corrosion monitoring by AC impedance has been investigated to evaluate on-site corrosion rates of concrete reinforcing steel bars and to estimate the service life of concrete structures.

A new corrosion monitoring method has been developed to measure the corrosion rates of rebars in only a short time. It takes only a few minutes to obtain a corrosion rate for rebars by measuring impedance at two frequencies.

Furthermore, portable-monitoring apparatus has been successfully made for the purpose of on-site measurements of corrosion rates of rebars.

This apparatus was applied to rebars in real concrete structures.

Corrosion rates estimated by this apparatus had an almost linear correlation with measured corrosion rate.

These results proved that this newly developed method and apparatus are able to evaluate on-site corrosion rates of rebars in real concrete structures.

1. 緒 言

鉄筋コンクリート中の鉄筋は、以前は、半永久的に使用可能と考えられて来た。しかし、近年、特に海岸地帯などで、塩化物に起因する鉄筋の腐食が一部で顕在化し、問題になっている。

鉄筋がさびると、体積が約2倍に膨張するので、コンクリートに大きな力が働き、鉄筋とコンクリートとの付着が失われる結果、複合構造物としての強度が低下する。そして、ついにはコンクリートが破壊されてしまう。

ところで、わが国の社会資本のほとんどは、1960年頃からの高度経済成長時期以降の建設であり、それらの半分以上は鉄筋コンクリート造り、または鉄筋鉄骨コンクリート

造りである。これらには、海砂を使用したコンクリートや、海水で練ったコンクリートも含まれている。そして、中には寿命が尽きかけて来たものも現れている。

これらの事から、社会資本投資に占める補修費の比率は、今後、供用期間の経過と共に、確実に増加することが予測される。従って、鉄筋コンクリートの耐久性に関連する技術は、近い将来の国家経済に重要な影響を及ぼすと考えられる。

また、解体した鉄筋コンクリートの再利用は、現状では困難であるので、環境問題や廃棄物問題の見地からも、鉄筋コンクリートの耐久性は非常に重要である。

鉄筋の腐食は、コンクリートのき裂の発生や、さび汁の溢出で初めて気が付く事が多い。しかし、実際の腐食はそ

れ以前から始まっている。早い段階で鉄筋の腐食が検出できれば、鉄筋コンクリートに大きな損傷が生じないうちに、補修する事ができ、構造物の寿命の延長と補修費の低減が可能である。

このような事情でありながら、コンクリート中の鉄筋の腐食状況を、非破壊的に検知する事は、従来、非常に難しいとされて来た。本報では、株式会社四国総合研究所殿と共同で開発した、交流インピーダンスを用いる鉄筋コンクリート構造物中の鉄筋の、迅速腐食モニタリング技術を紹介する^{1)~5)}。

2. コンクリート中の鉄筋の腐食

打設直後のコンクリートは、pH12~13程度の強アルカリ性である。このような環境下では、鉄筋の表面に、厚さ数 nm 程度の、薄い不動態被膜が生じ、それが鉄筋表面を保護するので、さびは発生しない。しかし、次のような場合は、不動態被膜が破壊され、さびが発生する。

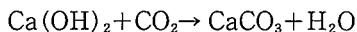
(1)コンクリートのひび割れの発生

コンクリートの表面には、大荷重、乾燥収縮、あるいは温度変化などにより、ひび割れが発生することがある。

ひび割れが発達して鉄筋表面に達すると、それを通して H_2O 、 O_2 、 Cl^- などが侵入し、鉄筋を腐食させる。

(2)コンクリートの中性化

コンクリート中に含まれている $Ca(OH)_2$ が、空気中の CO_2 と接触すると、



の反応により、コンクリートの中性化が進行する。コンクリートの pH が約10以下に低下すると、鉄筋の不動態被膜が保持できなくなり、腐食が始まる。

(3)塩化物の侵入

海塩粒子が多い環境では、コンクリート表面から Cl^- が浸透して行き、鉄筋表面に到達する。この時に不動態被膜が局部的に Cl^- で破壊され、孔食が発生する。そして、その周囲にも腐食が広がり、時間の経過と共に、全面が腐食するようになる。

3. 鉄筋の腐食の測定方法

3-1 従来の測定方法

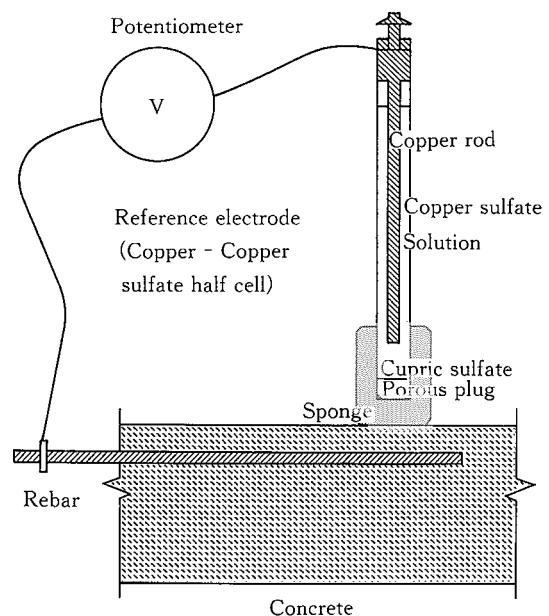
鉄筋の腐食状況を最も確実に知る方法は、表面のコンクリートをはく離して観察することである。しかし、この作業は多大の手間と時間と費用を要し、その上、鉄筋が腐食していなくても、観察後の補修が必要である。従って、実用的には、非破壊的に鉄筋の腐食状況を知ることが必要である。

非破壊的に、鉄筋コンクリート中の鉄筋の腐食状況を、調べる方法として、ASTM法がある。ASTM C 876-91

では、第1図に示すように、参照電極—湿潤させたコンクリート—鉄筋、の電気回路を作り、参照電極と鉄筋表面との電位差を測定する方法が規定されている。参照電極には、飽和硫酸銅電極 (CSE) が標準とされているが、その他の電極、たとえば飽和カロメル電極 (SCE) などを参照電極に使ってもよい、と規定されている。測定結果から、電位の貴卑により、腐食状況が次のように判定される。

| CSEに対する鉄筋の自然電位 | 判定 |
|----------------|--------------------|
| -0.20V 以上 (貴) | 90%以上の確率で腐食が生じていない |
| -0.20~-0.35V | 不確定 |
| -0.35V 以下 (卑) | 90%以上の確率で腐食が生じている |

この方法の長所は、大がかりな装置を必要としないので、比較的容易に実施できる事である。しかし、測定結果は定性的なものであり、腐食速度に関しては、なんらの情報も与えないのが短所である。

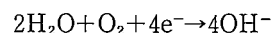
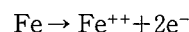


第1図 コンクリート中の鉄筋の自然電位の測定方法
Fig.1 Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete

3-2 腐食速度の測定原理

今回開発した方法は、交流インピーダンスを測定して、鉄筋の腐食速度を求めるものである。その原理について簡単に触れる。

腐食は、次のような、Feの陽極溶解反応と、環境中の酸素の陰極還元反応との、同時進行現象である。



それぞれの部分反応速度 (電流 i) は、電位 E に依存し、次の Butler-Volmer の式に従う。

$$i = i_0 \exp(azF\eta/RT)$$

ここで、記号は次のとおりである。

a : 移動係数

z : 電荷数

F : ファラデー定数

η : 過電圧 (電位 E の、可逆電位 E_r からのずれで、腐食電位では、この値はかなり大である)

R : 気体定数

T : 絶対温度

すべての電流の和が0になる電位を、腐食電位 E_{corr} と言う。一般的には、 $\Delta E = E - E_{\text{corr}}$ とし、式を展開後の多次数項を省略すると、次のようになる。

$$(\Delta E / \Delta i)_{E_{\text{corr}}} = R_c$$

$$= RT / mF \cdot i_{\text{corr}}$$

i_{corr} は、腐食電流密度 (腐食速度) であり、上式から、次の通りとなる (K は定数)。

$$i_{\text{corr}} = K / R_c$$

すなわち、腐食電位の近傍 ($\pm 0.01\text{V}$ 程度) では、電流の変化は電位の変化に比例する。そして、腐食電流密度 (腐食速度) i_{corr} は、そのこう配 R_c 、すなわち、分極抵抗 (Ωm^{-2}) の逆数に比例する。なお、 $K = 0.02 \sim 0.05\text{V}$ (298K) である。

従って、鉄筋の分極抵抗を測定すれば、その腐食速度が測定できる。

3-3 交流インピーダンスの測定方法

上記の分極抵抗 R_c は、交流インピーダンスの測定により、求めることができる。この交流インピーダンス法は、コンクリートのような、電気抵抗の大きな環境下でも、適用できるのが特長である。

交流インピーダンス Z は、直流回路での抵抗に相当するもので、電圧を $V_m \sin \omega t$ 、電流を $I_m \sin(\omega t - \theta)$ で表す時、次のように定義される (ω は角速度、 θ は位相差)。

$$Z = V_m \sin \omega t / I_m \sin(\omega t - \theta)$$

腐食している鉄筋の電氣的等価回路は、第2図のように表すことができる。 R_s はコンクリートの抵抗、 C は電気二重層容量である。

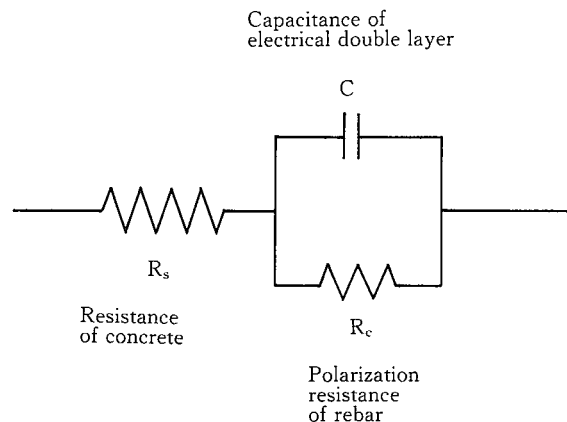
この回路の複素インピーダンス \dot{Z} は、交流回路理論により、次の通りとなる。

$$\dot{Z} = R_s + 1 / (1 / R_c + j\omega C)$$

交流の周波数 f ($= \omega / 2\pi$) を変えて交流インピーダンスを測定し、位相差とともに複素平面に描くと、その軌跡は第3図のような円弧になる。これを Cole-Cole プロットという。

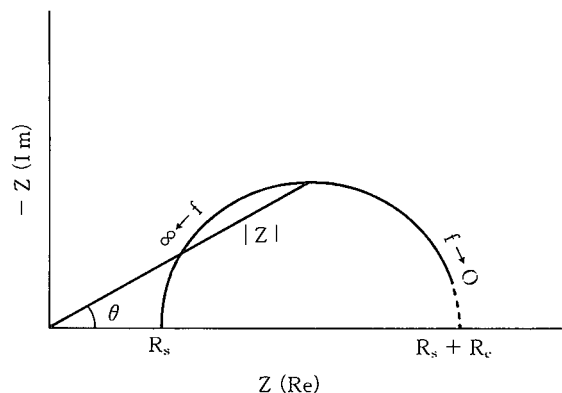
上記の複素インピーダンス式で、 f が限りなく大きくなると、 Z の実数値は R_s となり、 f が限りなく0に近づくと、 Z の実数値は $R_s + R_c$ となる。したがって、Cole-Cole

プロットを作成し、円弧と抵抗軸との交点を求めれば、分極抵抗 R_c が求められる。



第2図 腐食している鉄筋の電氣的等価回路

Fig.2 Equivalent electric circuit of corroded rebar in concrete



第3図 複素インピーダンスの Cole-Cole プロット

Fig.3 Cole-Cole plots of complex impedance

4. 測定原理の検証実験

4-1 実験方法

$\phi 12\text{mm}$ の丸鋼2本を埋め込んだ、モルタル供試体を製作した。第4図にモルタル供試体の概要を示す。丸鋼の端部は有機被膜で被覆した。

第1表にモルタルの配合比を示す。丸鋼の腐食を速めるために、食塩を混入した。

この供試体を、乾湿繰り返し環境 (大気中に6時間-35°C、3% NaCl 中に6時間) に2~12ヶ月放置した後、交流インピーダンスを測定した。

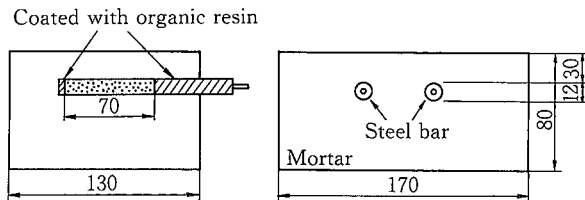
交流インピーダンスの測定には3電極法を用いた。第5図に測定系を示す。

丸鋼を作用電極とし、対極には白金黒円板電極 (直径13mm)、参照電極には、酸化鉛電極 (平衡電位 $= -725\text{V vs. SCE}$) を用いた。電極と供試体とは、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液で湿らせたスポンジを介して、接触させた。印加電圧は10mV、周

波数は1mHz~10kHzとした。

計測及び記録装置としては、周波数応答解析装置、電位差計、パーソナル・コンピュータ、プロッタ及びプリンタを用いた。

交流インピーダンスを測定した供試体は、モルタルを破壊して丸鋼を取り出し、腐食減量から腐食速度を求めた。



第4図 モルタル製供試体
Fig.4 Test samples of reinforced mortar (mm)

第1表 モルタルの配合(kg/m³)
Table 1 Composition of mortar(kg/m³)

| Water (W) | Cement (C) | Sand | W/C | NaCl |
|-----------|------------|------|-----|--------------------|
| 238 | 475 | 1499 | 0.5 | 0.1, 0.2, 2.0, 4.5 |

4-2 実験結果

第6図に、Cole-Coleプロットの例を示す。

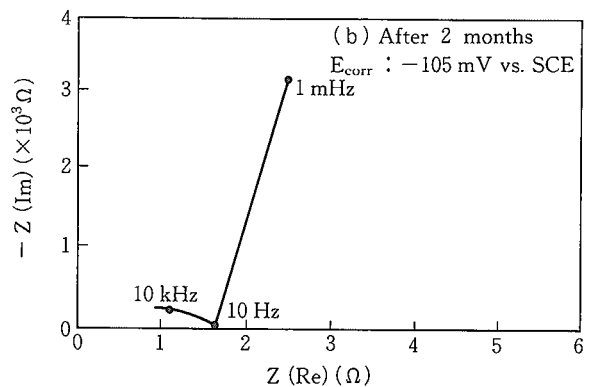
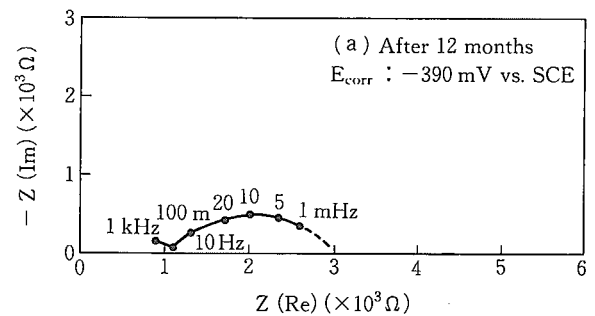
(a) は、鉄筋が腐食している場合で、円弧が実数軸と交わってできる弦の長さが、分極抵抗 R_c に相当する。この図では R_c は約 $1.9k\Omega$ である。

(b) は鉄筋がほとんど腐食していない場合である。これは円の直径が非常に大きい、つまり、 R_c が非常に大きい、ことを意味している。

第7図に、モルタル供試体での、分極抵抗 R_c の逆数と、鉄筋の腐食速度の実測値との関係を示す。

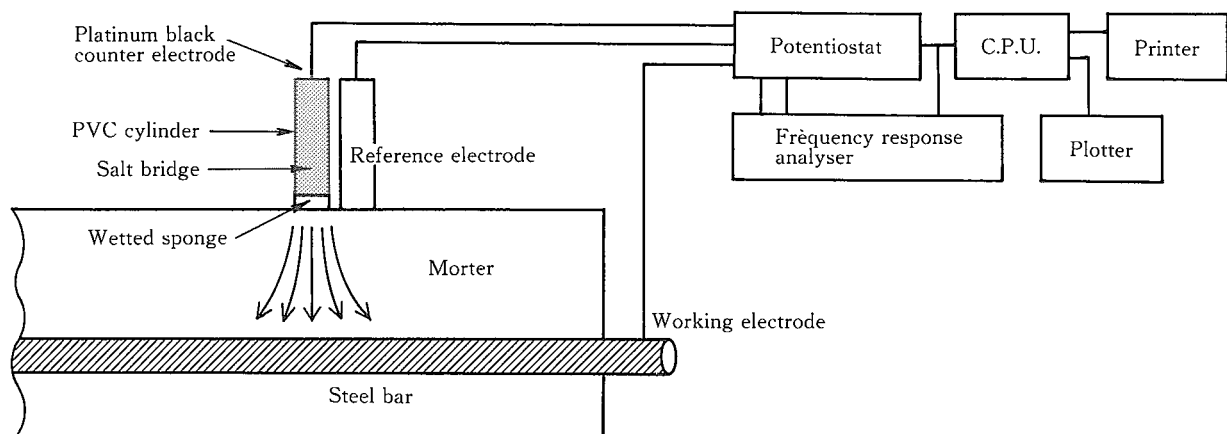
腐食速度と $1/R_c$ との間には、良好な相関関係が認められる。 $R_c = RT / (mF \cdot i_{corr})$ の式で、 m の値を1, 2および4とした時の計算値を、同図に記入した。それを見ると、 $m=2$ が最も良く合っている。

この結果から、交流インピーダンスを測定することにより、鉄筋の腐食速度が推定できることが確かめられた。

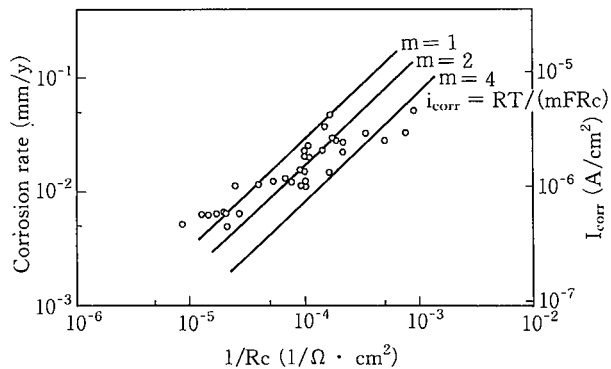


第6図 乾湿繰り返し試験後のモルタル鉄筋供試体の交流インピーダンス(NaCl: 2.0kg/m³)

Fig.6 Cole-Cole plots for impedance of steel bars embedded in mortar after cyclic immersion tests at 35°C (Initial NaCl content: 2.0kg/m³)



第5図 交流インピーダンス法による腐食監視システム
Fig.5 Corrosion monitoring system by AC impedance method



第7図 腐食速度と分極抵抗との関係

Fig.7 Relationship between corrosion rate and $1/R_c$

5. 測定上の問題点とその解決

5-1 測定時間の短縮

一つの周波数に対するインピーダンスを求めるためには、交流電流を少なくとも1サイクル流す必要がある。交流の周波数が大きい場合は、1サイクルに要する時間は極めて短時間である。たとえば、1kHzの場合は、1/1000秒で1サイクルが終わる。

逆に、周波数が小さくなると、1サイクルに要する時間が著しく長くなる。たとえば、1mHzの場合は、1000秒=17分を要する。

Cole-Coleプロットの1点を求めるのに、このような長時間を要するようでは、実用的に問題である。また、実構造物を対象とする作業を想定すると、このような長時間の間、電極を1点に支えておくのでは、作業性が劣る。そこで、測定時間を短くする方法を開発した。

5-1-1 迅速測定法

この方法では、10Hzと10mHzの、2種類の周波数を用いる。以下、第8図を用いて説明する。

Cole-Coleプロットで、10Hzでの測定値が実数軸上にある、と近似する(座標は $(R_H, 0)$)。次に、10mHzでの測定値を、Cole-Coleプロットに記入する(座標は (R_L, C_L))。これらの2点を通る円弧を想定し、その円弧と実数軸との、もう一つの交点の座標を $(R_H + R_c', 0)$ とする。この時、見掛けの分極抵抗値は R_c' となる。

ここで三角法により R_c' を求めると、次の通りとなる。

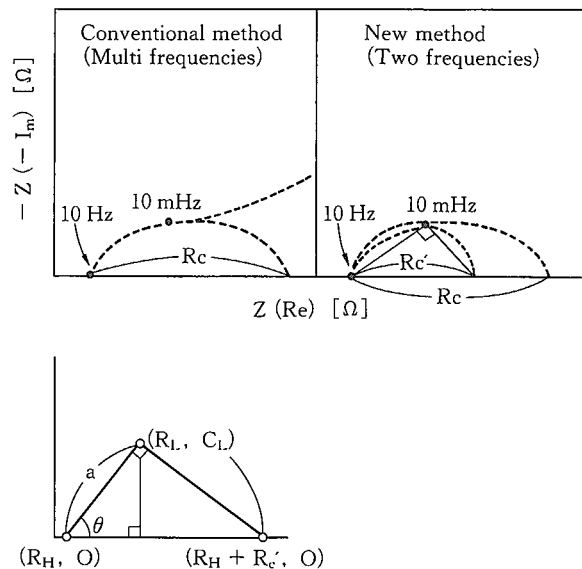
$$a^2 = C_L^2 + (R_L - R_H)^2$$

$$\cos \theta = (R_L - R_H) / a$$

$$= a / R_c'$$

$$R_c' = \{C_L^2 + (R_L - R_H)^2\} / (R_L - R_H)$$

R_c' と R_c の間に、定量的な関係があれば、迅速法として使用できることになる。



第8図 交流インピーダンスの迅速測定法

Fig.8 A Newly developed estimation method of AC impedance for a short time

5-1-2 迅速測定法の検証実験

前出のモルタル供試体について、通常法および迅速法により、それぞれ R_c および R_c' を測定した。測定結果を比較した結果、

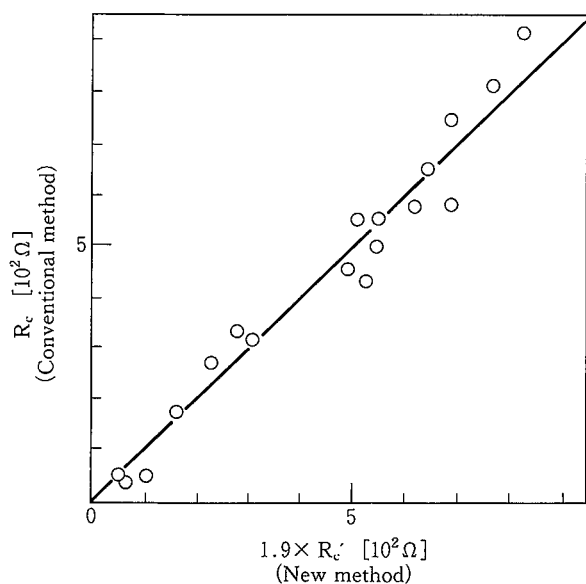
$$R_c = 1.9 R_c'$$

の関係がある事が分かった。その様子を第9図に示す。そこで、迅速法では次の式で R_c を定めた。

$$R_c = 1.9 R_c'$$

$$= 1.9 \{C_L^2 + (R_L - R_H)^2\} / (R_L - R_H)$$

迅速法による腐食速度の推定値と、実測値との対応を調



第9図 迅速測定法と従来法との測定値の比較

Fig.9 Relationship between a conventional method and a newly developed method for the measurement of AC impedance

べるために、実構造物を模擬した長尺コンクリート供試体を製作した。第10図に供試体を示す。D16異形棒鋼4本を埋め込んである。異形棒鋼の端面は有機被膜で被覆した。

第2表にコンクリートの配合比を示す。丸鋼の腐食を速めるために、食塩を混入した。

この供試体を、海水中に約1年間漬けた後、2年9ヶ月屋外に放置して、鉄筋を腐食させた。

測定系は、先に示したものと同じである。通常法および迅速法を用い、鉄筋の長さ方向に50mm間隔で、交流インピーダンスを測定した。測定後に、供試体を破壊して異形棒鋼を取り出し、腐食減量から腐食速度を求めた。

この実験では、鉄筋の測定対象面積が問題になる。そこで、別途に、鉄筋コンクリートを模擬した水模型を用いて、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液中で微小直流電流を印加し、対極センサー下の電流の分布状況を調べた。その結果、印加した電流の30%は、コンクリートのかぶり厚さにほぼ関係なく、対極センサーの直下を中心として、150mmの範囲に集中することが分かった。そこで、 i_{corr} を求める式を、次のように修正した。

$$i_{\text{corr}} = 0.3RT/2FSR_c$$

ここで、Sは、鉄筋の呼び径をDとして、 $15\pi D(\text{cm}^2)$ である。

第11図に、迅速測定法による腐食速度の推定値と、150mm幅での実測値との対応を示す。若干のばらつきはあるものの、かなり良好な相関関係が認められる。

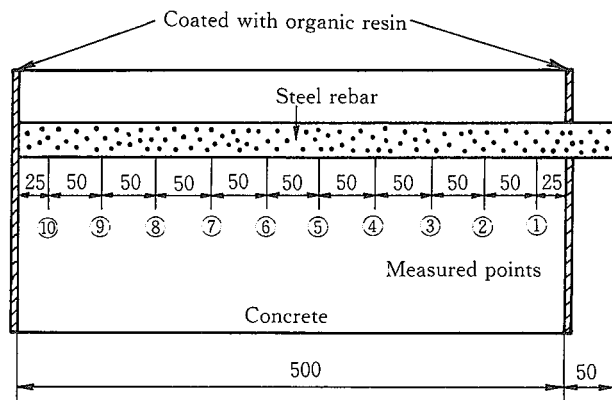
このことから、迅速分極抵抗測定法により、実構造物を模擬した長尺の供試体でも、非破壊的に腐食速度の推定ができる事が分かった。

従来は R_c を求めるのに数十分を要したが、この迅速法の開発により、所要時間をわずか数分に短縮する事ができた。

第2表 コンクリートの配合(kg/m^3)

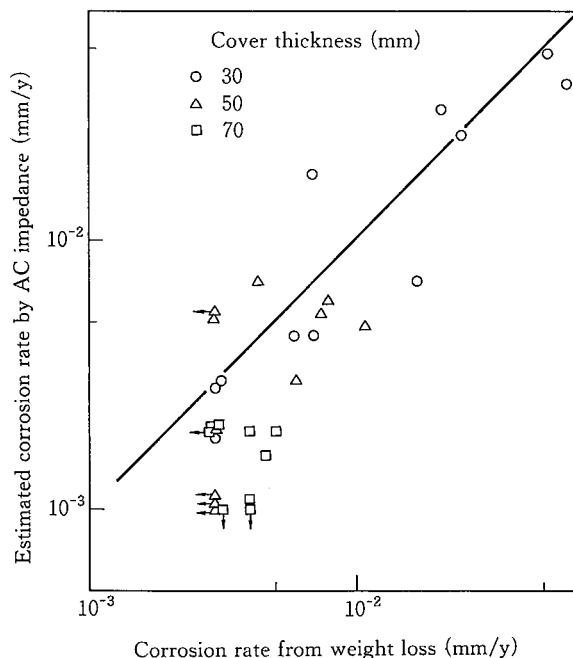
Table 2 Composition of concrete(kg/m^3)

| Water (W) | Cement (C) | Sand | Gravel | W/C | NaCl |
|-----------|------------|------|--------|------|------|
| 202 | 310 | 806 | 814 | 0.65 | 2.0 |



第10図 コンクリート製供試体

Fig.10 Test samples of reinforced concrete



第11図 迅速測定法による腐食速度の推定値と実測値の比較

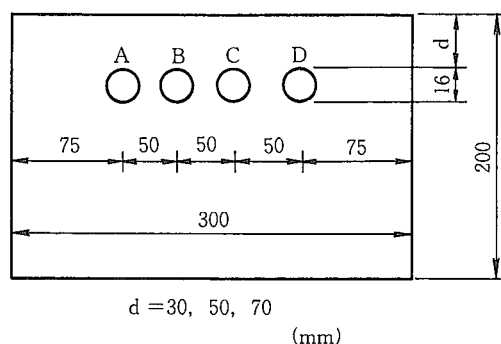
Fig.11 Relationship between corrosion rate from weight loss and estimated corrosion rate by AC impedance (Steel rebars embedded in concrete which were exposed to the atmosphere for 24 000 hours after immersion in seawater for a year)

5-2 測定装置の軽量化

実験室でのインピーダンスの測定には、前記のように、交流発生装置、周波数応答解析装置、電位差計、パーソナル・コンピュータ、等々を用いる。これらの装置の全重量は、数十 kg 以上になる。測定対象が実際の構造物である場合には、このような重い装置は実用的ではない。持ち運びのできるポータブルタイプの装置が是非必要である。

そこで、これらの装置をまとめた、携帯可能な装置を新たに製作した。写真1にその外観を示す。この装置は重さが約10kgで、一人で持ち運ぶことができる。

電源には蓄電池を用いる。装置にはCPUが内蔵されており、腐食速度の計算結果を液晶に表示すると共に、紙テ



技術解説

ープに印刷する。腐食電位の測定も同時に行えるようになっている。

RS-232C 端子から、情報をコンピュータに出力する事もできる。

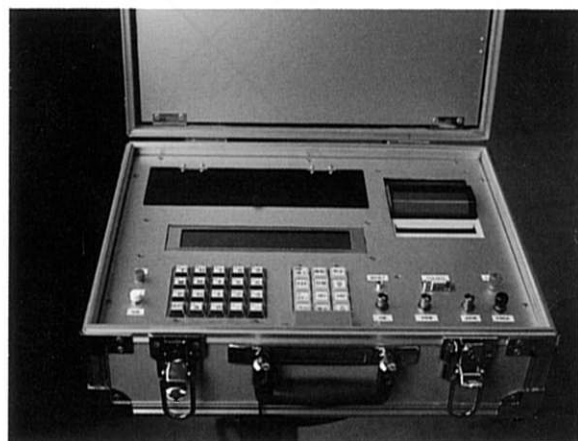


写真1 新たに開発した腐食モニタリング装置
Photo 1 Newly developed measuring apparatus for corrosion monitoring

6. 実構造物への適用結果

6-1 実構造物での測定の手順

迅速測定ソフトウェアを組み込んだ、軽量装置による測定の手順は、次の通りである。

(1)鉄筋コンクリート構造物の外観の観察

さび汁の発生や、コンクリートのひび割れの有無を観察する。

(2)鉄筋の位置の検知

パコメータという市販の器具で、鉄筋コンクリートの表面をなぞると、鉄筋の位置、寸法、およびかぶり厚さを探知することができる。

(3)測定位置の決定

検出した鉄筋の位置を、コンクリート表面に描き、外観やかぶり厚さ等を勘案して、交流インピーダンスの測定位置を決める。

(4)導線の接続

コンクリートを1箇所だけはく離して、鉄筋に導線を接続する。

(5)交流インピーダンスの測定

コンクリート表面の測定位置に電極を当てて測定を行う。腐食速度と自然電位が装置の液晶に表示され、かつ紙テープに印刷される。

6-2 栈橋での実験

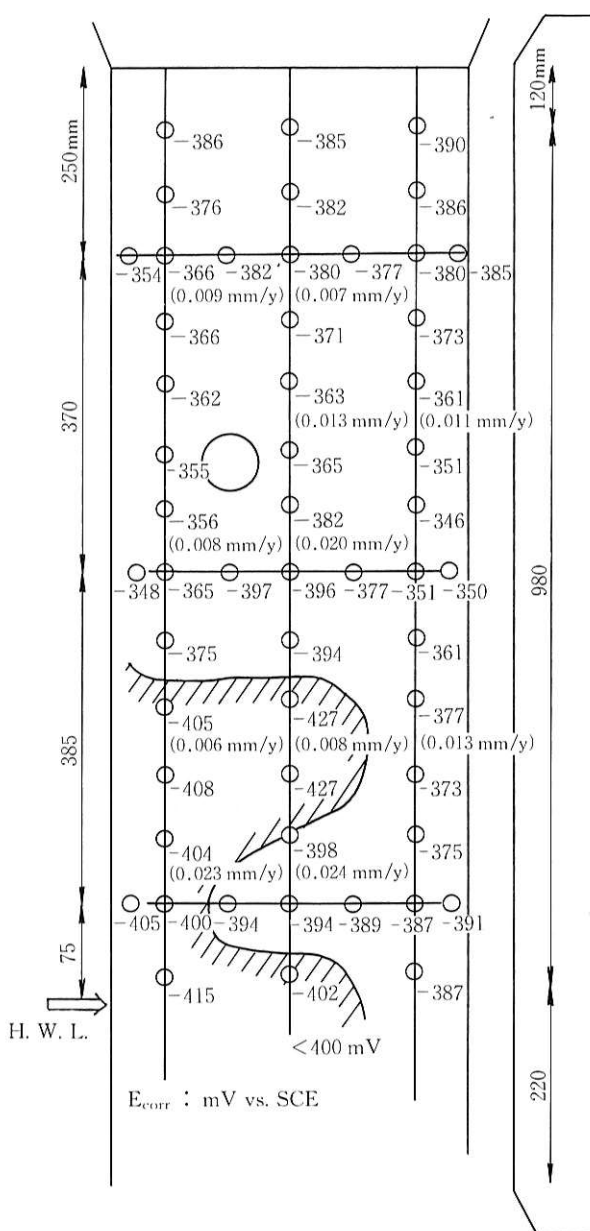
実験の対象は、重油受け入れ栈橋および荷役用栈橋の脚である。これらの構造物は、建設後30年以上を経ているが、正確な建設時期は不明である。この実験を行う数年前に、一部に補修が加えられていた。

パコメータによる探査では、縦筋の呼び径は16mm、かぶり厚さは55~60mmであった。

重油受け入れ栈橋の脚で1箇所(a)、荷役用栈橋の脚で2箇所(bおよびc)を選び、コンクリート中の鉄筋の腐食診断を行った。測定範囲は、満潮時の海面(H.W.L.)から上、約1mとした。

第12図に、測定例として、測定位置bでの鉄筋の腐食電位と腐食速度の測定結果を示す。最大0.024mm/年の腐食速度が観測され、鉄筋がさびている事が推定できる。腐食電位も SCE に対して-300V 以上卑であり、こちらからも定性的ながら鉄筋がさびていることが推定できる。

第13図に鉄筋の垂直方向の腐食速度の分布を示す。腐食速度は、満潮時の海面から上、0.8m 程度までの範囲で大き



第12図 コンクリート製栈橋の鉄筋の自然電位と腐食速度(b位置)

Fig.12 Corrosion potential and corrosion rate of steel rebars at a concrete pier (Sample b)

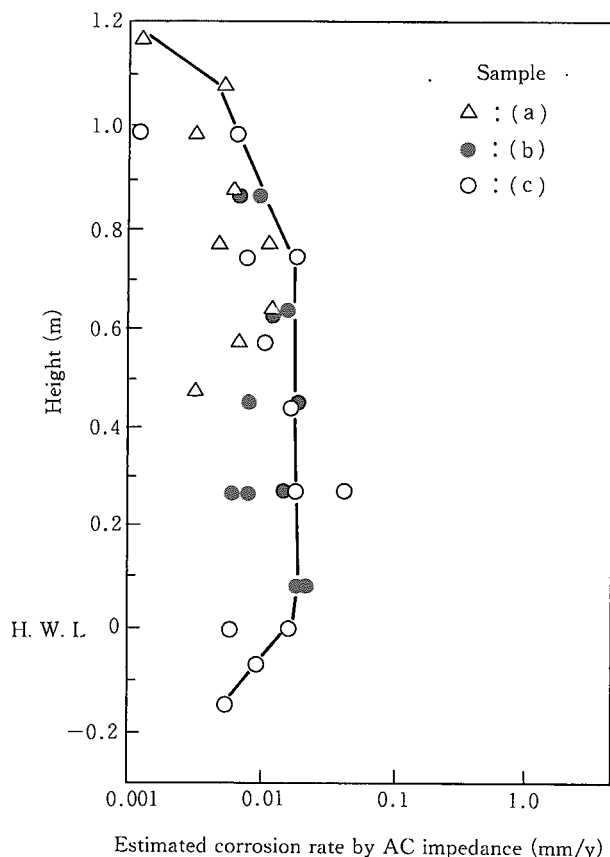
い。この範囲はスプラッシュ・ゾーンに相当する。これは従来の裸鋼材の海水腐食に関する知見と一致するものである。

コンクリートをはく離して観察した結果、鉄筋に著しいさびが認められ、インピーダンス法による推定が正しいことが分かった。

第14図に、コンクリートをはく離して測定した鉄筋の腐食深さと、交流インピーダンス法で測定した腐食速度との関係を示す。両者の間には直線関係がある。そして、最大深さは、推定した平均深さの3倍を超える事は無く、推定はほぼ妥当と考えられる。

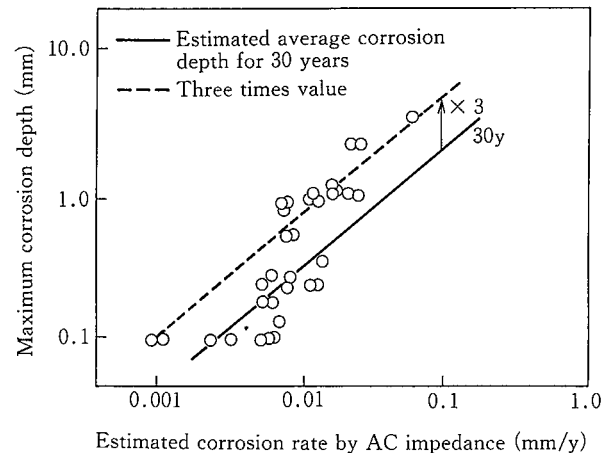
これらの事から、鉄筋の腐食が進んだ鉄筋コンクリート構造物で、今回開発した方法が有効に適用できる事が確認できた。

なお、採取したコンクリート・コア試料に、フェノールフタレンを滴下して調べた結果では、中性化深さは3mm程度と、浅かった。一方、コンクリート中のCl⁻濃度は、0.05～1.0%であり、鉄筋のさびがCl⁻の浸透によるものである事が確かめられた。



第13図 コンクリート製栈橋の鉄筋の垂直方向の腐食速度の分布

Fig.13 Vertical distribution of corrosion rate of steel rebars at the concrete piers



第14図 最大腐食深さと交流インピーダンス法による腐食速度推定値との関係

Fig.14 Relationship between maximum corrosion depth and estimated corrosion rate by AC Impedance (at the concrete piers)

7. 余寿命の推定

鉄筋の腐食による鉄筋コンクリート構造物の劣化過程を、第15図に示す。余寿命Tは、次の式で示される。

$$T = t_c - t_2$$

$$= (t_c - t_1) + t_1 - t_2$$

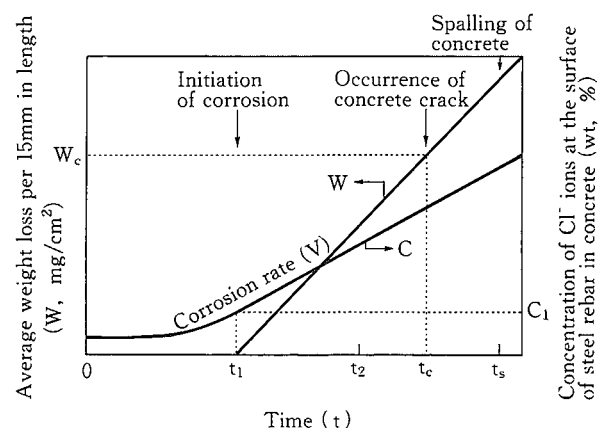
上式の第1項は、次の通りである。

$$t_c - t_1 = W_c / v$$

従って、余寿命は次の通りとなる。

$$T = W_c / v + t_1 - t_2$$

余寿命を知るためには、 t_1 を知る必要がある。そこで、以下の方法で t_1 を推定する。



第15図 コンクリート構造物の劣化過程

臨界腐食減量: $W_c = 40 \text{ mg/cm}^2$
 臨界 Cl⁻濃度: $C_1 = 0.05 \text{ wt\%}$
 t_c : 耐用期間
 t_2 : 現在

Fig.15 Deterioration process of concrete structures

Critical weight loss: $W_c = 40 \text{ mg/cm}^2$
 Critical chloride concentration: $C_1 = 0.05 \text{ wt\%}$
 t_c : Service life
 t_2 : Present time during monitoring

技術解説

第16図は、コンクリート中の Cl^- の分布を示したものである。 Cl^- のコンクリートへの浸透は、拡散現象であると考えられる。 Fick の拡散則を用いると、拡散係数が一定であるとして、次の式が得られる。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

この微分方程式の解は次の通りである。

$$c = c_0 [1 - \text{erf}(x/2\sqrt{Dt})]$$

境界条件は、 $x = d$ 、 $c = C_d$ 、 $t = t_1$ であるから、次の通りとなる。

$$\text{erf}(d/2\sqrt{Dt}) = 1 - c_d/c_0$$

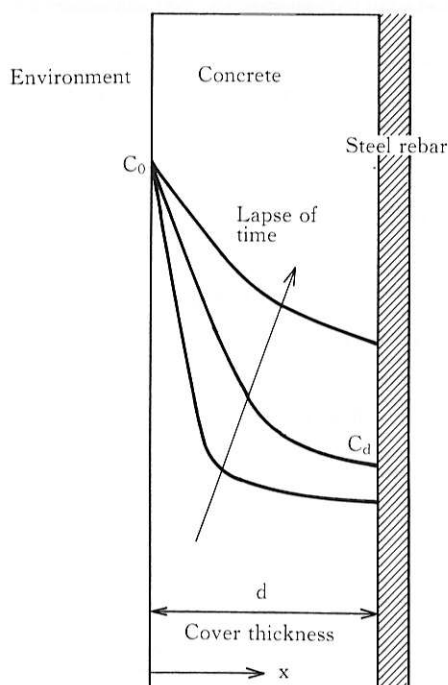
ここで、 $c_d = 0.05\%$

$c_0 = 0.4\%$ (海水中)

$D = 10^{-9} \sim 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$

とおくと、かぶり厚さ d が 5 cm の時は、 t_1 は 1800~18000日、つまり、5~50年となる。これは合理的な値と考えられる。

このような方法により、余寿命の推定が可能である。



第16図 コンクリート中の Cl^- 濃度分布のモデル
Fig.16 A distribution model of chloride concentration in concrete

8. 結 言

- (1) 交流インピーダンスの測定により、コンクリート中の鉄筋の腐食速度が、推定できることを確かめた。
- (2) 2種類の周波数を用いるだけで、迅速に交流インピーダンスを測定する方法を開発した。
- (3) この迅速測定法を組み込んだ、測定現場に携行が可能な、軽量の測定装置を開発した。
- (4) この装置を実構造物の測定に適用し、鉄筋の腐食を定量的に推定できることを確かめた。
- (5) 測定結果の解析により、鉄筋コンクリートの余寿命の推定が可能になった。



大野 鐵/Tetsu Ono

小倉製鉄所 技術部 専任部長
工博

(問合せ先: 06(220)5544)

参考文献

- 1) 横田, 幸: 土木学会第44回年次学術講演会講演概要集, V-278, p.610, 1989年10月。
- 2) 横田, 浮田, 幸: 土木学会「土木工学における非破壊評価シンポジウム」講演論文集, p.241, 1991年10月。
- 3) Miyuki, Yokota, Ono and Tada: Life Prediction of Concrete Structure by Corrosion Monitoring of Steel Rebars; 3rd NACE International Relations Committee Symposium "Life Prediction of Corrodible Structures", Nov., 1991, Kauai, Hawaii, USA.
- 4) 幸, 大野, 横田, 井上: 腐食防食協会腐食防食'92講演集, p.241.
- 5) Miyuki, Ono, Yokota and Yoshida: Corrosion Monitoring of Steel Rebars in Concrete Structures by AC Impedance Method; International Symposium on Plant Aging and Life Prediction of Corrodible Structures, May, 1995, Sapporo, Japan.