

[52] コンクリート中の鋼材の非破壊腐食探査方法

正会員 ○田村 博 (日本建築総合試験所)

正会員 吉田正友 (日本建築総合試験所)

1. まえがき

コンクリート中の鋼材の腐食問題はコンクリート構造物の耐久性に関する重要な一課題であり、非破壊腐食探査の分野においても Stratfull、朴、宮川の各氏をはじめとして多くの研究がこれまでなされてきている。探査方法はいずれも電気化学的な手法を用いたもので、自然電位をコンクリート表面で測定するものであるが、測定時のコンクリート表面の乾湿の度合により変化する自然電位の解釈の問題など、いまだ残された問題も多い。著者らは、コンクリート中の鋼材が腐食しているか否かを判定するだけでなく、今後の腐食の進行程度を予測するために腐食速度を測定することが非破壊腐食探査の重要な課題であると考え、3つの電気化学的特性値(自然電位、分極抵抗、液抵抗)をコンクリート表面で測定する非破壊腐食探査方法を提案し、これまで予備的な実験を行なってその効果を確かめてきた。^{1) 2)} 本報告では、この非破壊腐食探査方法に用いる装置の概要を紹介するとともに、本装置によって得られる3つの電気化学的特性値と腐食速度との関係を、コンクリート中の鋼材の腐食に対して等価な電気回路モデルを設定して検討した結果について述べる。

2. コンクリート中の鋼材の腐食に対する等価電気回路

コンクリート中で鋼材が腐食する際、鋼材の表面にはミクロ的あるいはマクロ的にアノード部とカソード部が形成されその間を電気が流れているが、その間に存在する電気抵抗は分極抵抗(R_p)と液抵抗(R_e)から成っている。分極抵抗は濃度分極ならびに活性化分極によって生じる電気抵抗で、電気を切ると測定可能な速度で減衰する抵抗である。一方、液抵抗はコンクリート中の鋼材をとりまくコンクリートや塗膜さらに錆などの電気抵抗の和として考えられ、電流を切ると瞬間的に消失する抵抗である。著者らは、コンクリート中の鋼材の腐食に対して図-1(a)に示す等価電気回路モデルを設定できるものとする。すなわち、鋼材の表面では表面組織の不均一や鋼材をとりまく環境条件の不均一によって各位置で固有の電位を有することとなり、それらが互いに抵抗で結ばれた電気回路中を電気が流れていると考えることができる。これをもとに、コンクリート表面の任意の位置について適用すべき等価電気回路モデルを考えると、図-1(b)に示すような一対のアノード部、カソード部から成る単位等価電気回路モデルが考えられる。この回路について、電位、電気抵抗ならびに電流の関係を求めると下式のとおりとなる。

$$I = \frac{(aR_e + cR_e + acR_e)(cE - aE)}{(aR_p + cR_p + acR_e)(aR_e + cR_e + acR_e) - acR^2e} \quad (1)$$

$$I' = \frac{acR_e(cE - aE)}{(aR_p + cR_p + acR_e)(aR_e + cR_e + acR_e) - acR^2e} \quad (2)$$

$$E = aE + aR_p I + aR_e I' = cE - cR_p I - cR_e I' \quad (3)$$

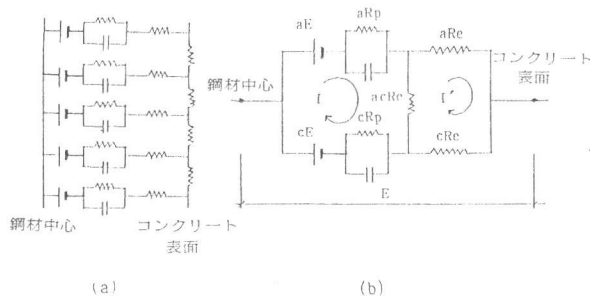


図-1 等価電気回路モデル

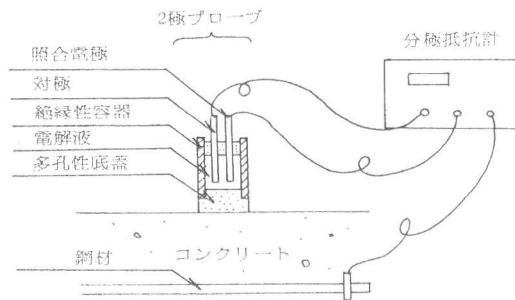


図-2 非破壊腐食探査装置

3. 非破壊腐食探査方法

3.1 方法の概要

著者らが提案する非破壊腐食探査方法は、図-2に示すようにコンクリート表面で自然電位(E)、分極抵抗(R_p)ならびに液抵抗(R_e)を、2極プローブと分極抵抗計を用いて測定するものである。すなわち、電位と電気抵抗を測定し、前述のように仮定した電気回路モデルにそれらの値を適用して、腐食速度に比例する電流Iをも含めて腐食状況を推定しようとするものである。ここで用いる分極抵抗計は、自然電位、分極抵抗ならびに液抵抗のそれぞれの値が同時に測定できるものである。抵抗は、2極プローブ中の対極と鋼材の間に微小電流を流しそれによって付加される電圧を測定して求められる。そこで以下に、対極と鋼材の間に流れる電流の分布(どの部分の抵抗が測定されるか)ならびに分極抵抗測定値、液抵抗測定値と単位等価電気回路を設定した場合の各種抵抗値との関係について述べる。

3.2 対極と鋼材の間の電流分布

図-3に示すように、鋼棒の軸線上のコンクリート表面に円盤対極を置いた場合について考える。コンクリートの導電率が一様に分布し、鋼材表面での分極も生じないものと仮定する。

まず、図-3(a)に示す対極と長さ ℓ の鋼棒の間の抵抗を求める。対極からの電流によるP点での電流の強さは、 $j_c = I / (\pi r^2 c)$

$$\text{したがってP点における電位の傾きは、} E_c = \rho j_c = \rho I / (\pi r^2 c) \quad (5)$$

$$\text{一方、鋼棒への電流によるP点での電流の強さは、} j_s = -I / \{2\pi\ell(rs+d-x)\} \quad (6)$$

$$\text{したがってP点における電位の傾きは、} E_s = \rho j_s = -\rho I / \{2\pi\ell(rs+d-x)\} \quad (7)$$

E_c と E_s の向きが同一であるので合成した電位の傾きは、

$$E_g = |E_c| + |E_s| = \rho I \{1/r^2c + 1/\{2\ell(rs+d-x)\}\} / \pi \quad (8)$$

(8)式により、対極と鋼棒間の電位差は次のようになる。

$$V = \int_0^d E_g dx = \rho I \{d/r^2c + 1/[2\ell\{\log(rs+d) - \log rs\}]\} / \pi \quad (9)$$

したがって対極と鋼棒間の抵抗は、

$$R = V/I = \rho \{d/r^2c + 1/[2\ell\{\log(rs+d) - \log rs\}]\} / \pi \quad (10)$$

次に、図-3(b)に示す長さ 5ℓ の鋼棒と対極の間の電流分布について以下に検討する。

まず、鋼棒中央部の長さ ℓ の部分(Ⅰ)だけを考えると、対極との間の抵抗は(10)式を用いて、

$$R_{\text{Ⅰ}} = \rho \{d/r^2c + 1/[2\ell\{\log(rs+d) - \log rs\}]\} / \pi \quad (11)$$

また、鋼棒中央部の長さ 3ℓ の部分(Ⅱ+Ⅰ+Ⅱ)と対極間の抵抗($R_3\ell$)ならびに中央部長さ 5ℓ の部分(Ⅲ+Ⅱ+Ⅰ+Ⅱ+Ⅲ)と対極間の抵抗($R_5\ell$)もそれぞれ(10)式を用いて、

$$R_3\ell = \rho \{d/r^2c + 1/[2(3\ell)\{\log(rs+d) - \log rs\}]\} / \pi \quad (12)$$

$$R_5\ell = \rho \{d/r^2c + 1/[2(5\ell)\{\log(rs+d) - \log rs\}]\} / \pi \quad (13)$$

ところで $R_3\ell$ は $R_{\text{Ⅰ}}$ と $R_{\text{Ⅱ}}$ を用いて

$$1/R_3\ell = 1/R_{\text{Ⅰ}} + 2/R_{\text{Ⅱ}} \quad \therefore R_{\text{Ⅱ}} = 2R\ell R_3\ell / (R\ell - R_3\ell) \quad (14)$$

$$\text{同様に、} R_{\text{Ⅲ}} = 2R_3\ell R_5\ell / (R_3\ell - R_5\ell) \quad (15)$$

したがって、対極から鋼棒の各部分(Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ)に流れる電流の比率は、

$$i_{\text{Ⅰ}} : i_{\text{Ⅱ}} : i_{\text{Ⅲ}} = 1/R_{\text{Ⅰ}} : 1/R_{\text{Ⅱ}} : 1/R_{\text{Ⅲ}} \quad (16)$$

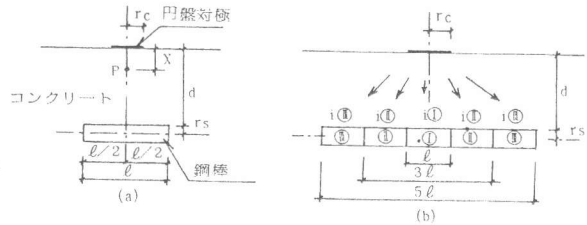


図-3 円盤対極と鋼棒の間の電流分布

表-1 電流分布算定結果

r_c (cm)	r_s (cm)	ℓ (cm)	d (cm)	$i_{\text{Ⅰ}} : i_{\text{Ⅱ}} : i_{\text{Ⅲ}}$
0.25	1.0	0.125	4	1 : 0.014 : 0.003
		0.250		1 : 0.007 : 0.001
		0.500		1 : 0.004 : 0.001
		1.000		1 : 0.002 : 0.000
0.50	1.0	0.125	4	1 : 0.055 : 0.013
		0.250		1 : 0.028 : 0.006
		0.500		1 : 0.014 : 0.003
		1.000		1 : 0.007 : 0.002
1.00	1.0	0.125	4	1 : 0.189 : 0.056
		0.250		1 : 0.104 : 0.026
		0.500		1 : 0.055 : 0.012
		1.000		1 : 0.028 : 0.006
0.25	0.5	0.500	4	1 : 0.005 : 0.001
	1.5			1 : 0.003 : 0.001
0.25	1.0	0.500	2	1 : 0.005 : 0.001
			6	1 : 0.003 : 0.001

そこで上式を用いて、対極や鋼棒の直径、鋼棒の長さならびにかぶり厚さを変化させた、いくつかの例について電流分布を算定すると、表-1のごとくなる。同表の結果から次のようなことがわかる。すなわち、コンクリート表面においた対極からその直下に軸線を持つ鋼棒に電流を流すと直下に集中して流れ、その傾向は対極の面積が小さいほど、鋼棒が太くなるほど、かぶり厚さが大きくなるほど大となる。以上のことから、図-2に示すような測定を行った場合、対極直下の鋼材周辺部分の抵抗が概ね測定されているものと考えられる。

3.3 測定される抵抗値と単位等価電気回路における抵抗値の関係

分極抵抗計によってコンクリート表面で測定される抵抗値は、図-4(a)に示す回路に含まれる R_p と R_e である。同回路に電流 I を流すとA、B間の電位は電流を流し始めてからの経過時間(t)と共に変化し、

$$t=0 \text{ のとき } Et = R_e I, \quad t=\infty \text{ のとき } Et = (R_e + R_p) I$$

一方、図-4(b)に示す回路に電流 I を流すと、

$$t=0 \text{ のとき } Et = aR_e(I_1 - I_3), \quad Et = cR_e(I - I_1 + I_3)$$

$$\therefore Et = aR_e c R_e I / (aR_e + cR_e)$$

$t = \infty$ のとき

$$Et = aR_p I_1 + aR_e (I_1 - I_3)$$

$$Et = cR_p (I - I_1) + cR_e (I - I_1 + I_3)$$

$$Et = aR_p I_1 + acR_e I_3 + cR_e (I - I_1 + I_3)$$

$$\therefore Et = \{ (aR_p + aR_e) B / A - aR_e / acR_e$$

$$\{ cR_p - (aR_p + cR_p) B / A \} I$$

ここに、 $A = (aR_e + cR_e) acR_e + (aR_p + cR_p)(aR_e + cR_e + acR_e)$

$$B = cR_e acR_e + cR_p (aR_e + cR_e + acR_e)$$

したがって測定される抵抗値は、次のように表わされる。

$$R_e = aR_e c R_e / (aR_e + cR_e)$$

$$R_p = R - R_e$$

ここに、 $R = (aR_p + aR_e) B / A - aR_e / acR_e$
 $\{ cR_p - (aR_p + cR_p) B / A \}$

3.4 各種電気化学的特性値の関係

コンクリート表面で得られる3つの電気化学的特性値と単位等価電気回路における各種電気化学的特性値の関係を明らかにするため、上記の関係式を用いていくつかの例について計算を行い(但し、 $aR_e = cR_e$ とした)、その結果を図-5(a)~(c)にまとめた。

これらの図から次のようなことがわかる。

acR_e の値の大小によって傾向が異なるが、まず acR_e が小さい場合には次のような特徴がある。

- ① 電流(I)は主として分極抵抗(R_p)に依存し、 R_p が小さいほど I は大きくなる。
- ② カソード支配の場合は電位が貴なほど、アノード支配の場合は電位が卑なほど電流は大となる。

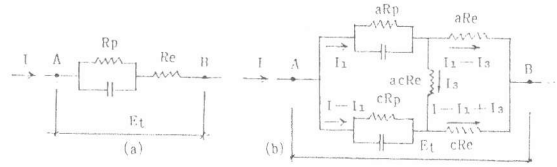
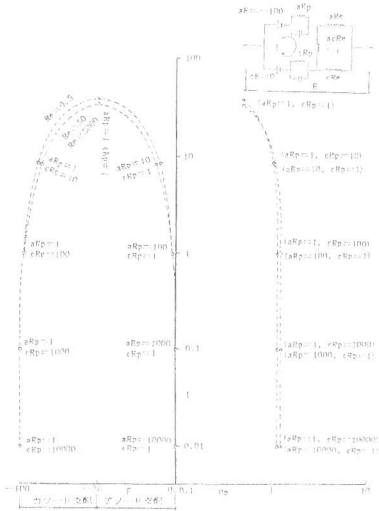
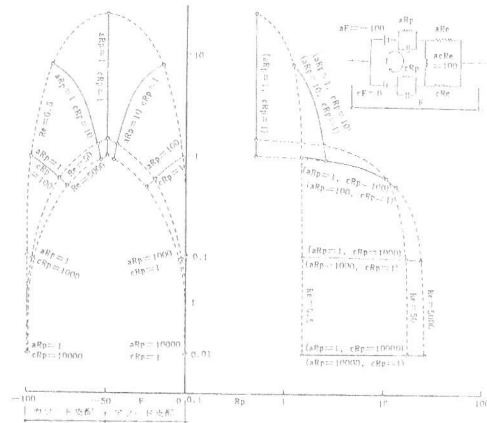


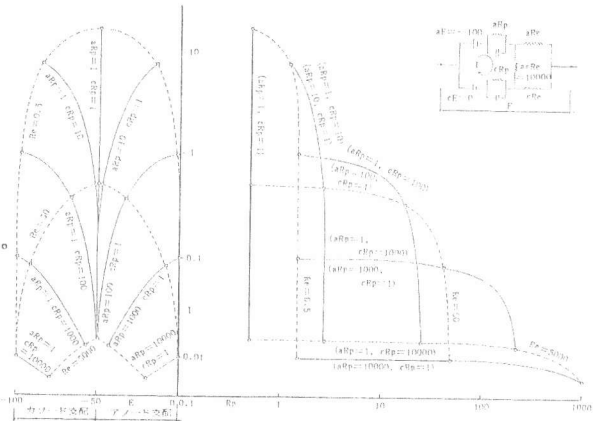
図-4 電流 I の流れる電気回路



(a) $acR_e = 1$



(b) $acR_e = 100$



(c) $acR_e = 10000$

図-5 各種電気化学的特性値の関係

- ③ 分極抵抗 (R_p) は、液抵抗 (R_e) にほとんど影響されず、自然電位 (E) や電流 (I) に影響を及ぼす。
- ④ 液抵抗 (R_e) は、自然電位 (E) や電流 (I) にほとんど影響を及ぼさない。

一方、 acR_e の値が大きい場合には次のような特徴がある。

- ① 電流 (I) は、自然電位 (E)、分極抵抗 (R_p)、液抵抗 (R_e) それぞれによって影響される。
- ② 分極抵抗 (R_p)、液抵抗 (R_e) は、自然電位 (E) に影響を及ぼす。
- ③ 分極抵抗 (R_p) は、強いアノード支配あるいは強いカソード支配の場合には、液抵抗 (R_e) に大きく影響される。
- ④ 分極抵抗 (R_p)、液抵抗 (R_e) に応じ電流 (I) の上限値が定まる。それぞれの抵抗値が大きいほど、 I の上限値は小さくなるので、少なくとも一方が極めて大きい場合には、電流は小さいと考えられる。

以上のとおり、 $E-I-R_p$ 図 (図-5(a)~(c)) により、各電気化学的特性値の関係が理解できた。したがって、このような $E-I-R_p$ 図をさらに整備すれば、本探査法によって得られた測定値から鋼材の腐食状況を推定する際に非常に役立つものとなろう。なお、前述のとおり acR_e 値の大小によって他の電気化学的特性値の関係が著しく異なったが、 acR_e はアノード部とカソード部を直接結ぶ液抵抗であり、その値が小さいときマイクロセル腐食状態、大きいときマクロセル腐食状態とそれぞれ呼ばれているものと考えられ、図-1(b)に示した単位等価電気回路モデルは、それらの状態を連続的に表現できる妥当なものと思われる。

3.5 実測例

本報の示す探査方法により既存RC柱について行なった電気化学的特性値の測定の一例¹⁾を図-6に示す。調査時においてコンクリート表面は気乾状態にあったが、強制的に表面を湿らせた状態でも測定を行なった。気乾状態の場合は腐食部分に隣接する箇所では分極抵抗が小さく電位が卑となる傾向があり、一方湿潤状態の場合は腐食部分で電位が卑、液抵抗が小、腐食部分に隣接する箇所では分極抵抗が小となる傾向が認められた。また、代表的な腐食状況を示す4つの測定点を選び各点での測定結果を大まかに $E-I-R_p$ 図(略図)中に示すと図-7のごとくなる。同図により、湿潤状態では気乾状態に比べ腐食電流が大きくなり、腐食部分に隣接する箇所でも最も大きな値を示していることが確認された。

4. まとめ

本報において、著者らはコンクリート中の鋼材の腐食状況を非破壊的に探査する新しい方法を提案し、次のようなことを明らかにした。

- ① コンクリート表面にあてた2極プローブと分極抵抗計により、プローブ直下部の鋼材に関する3つの電気化学的特性値が得られる。
- ② コンクリート中鋼材の腐食反応に対して単位等価電気回路が設定でき、3つの電気化学的特性値の測定結果から鋼材の腐食状況を推定する場合には、 $E-I-R_p$ 図が有効である。

今後さらに検討を行ない、腐食状況を判定するための電気化学的特性値を提案していきたい。

(参考文献) 1) 田村、吉田：日本建築学会大会学術講演梗概集、1983、pp.43~46
2) 田村、吉田：G B R C、Vol.9、No1、1984、pp.32~38

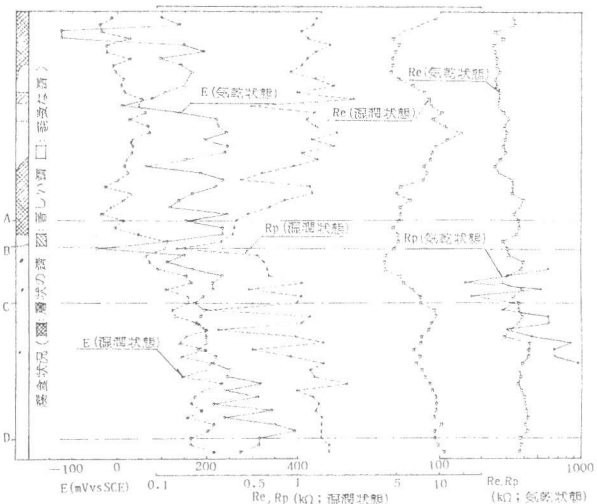


図-6 本報に示す探査方法による実例結果の一例

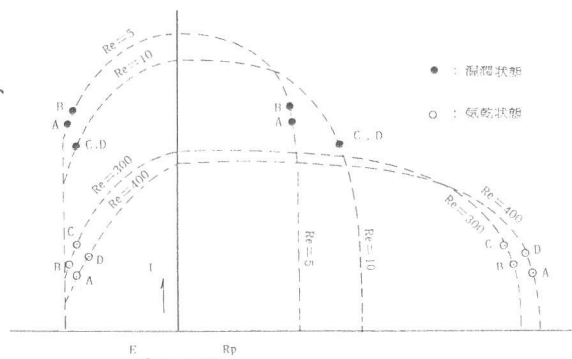


図-7 実測結果の $E-I-R_p$ 図(略図)へのプロット例