

論文

[1128] 流電陽極方式による電気防食における環境因子の影響

千葉 丈夫\*1 堺 孝司\*2 大越 威 \*3 小熊 文雄\*4

1. まえがき

著者等は先に、流電陽極方式によるコンクリート中の鉄筋の、凍結融解作用下における電気防食特性について報告した [1]。亜鉛と鉄の電位差を起電力とする流電陽極方式では、その発生電流は温度に大きく依存し、融解時（試験体の温度、5℃前後）には凍結時（-12℃）の5～6倍の電流が流れたが、鉄筋の電位の変化は小さく数十mVであった。しかしながら、これらの実験においては、測定が温度と鉄筋のon電位、電流のみで分極特性について十分検討できなかった。以上のことを背景に、本研究は、留萌海岸に暴露したRC試験体の2年余りの測定データの解析を行い、分極特性と環境条件の関連について検討した。

2. 留萌暴露試験

2.1 試験体

図1に暴露試験体を示す。鉄筋は、10cm間隔で格子状に、25mmのかぶりりで配置した。コンクリートには、Cl<sup>-</sup>濃度として4.5kg/m<sup>3</sup>塩分が混入されている。鉄筋の電位を測定するため、銀/塩化銀照合電極を埋設した。防食板は、図2に示すように、アノードとなる亜鉛板を含み、厚み約10mmのバックフィル層を介してコンクリート面に接するようにアンカーボルトで固定した。防食板は試験体の片面（25mmのかぶり側）に設置した。鉄筋と亜鉛板の面積は、それぞれ、0.26m<sup>2</sup>と0.27m<sup>2</sup>とほぼ同じである。

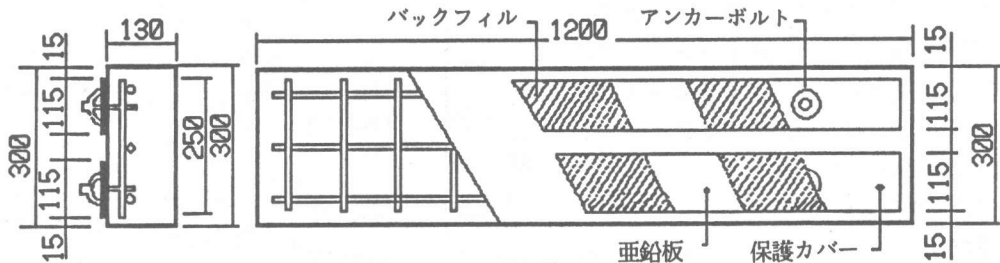


図1 試験体

2.2 流電陽極方式の分極の模式図と測定項目

図3は流電陽極方式の分極状態を模式的にあらわしたもので、E\*c、E\*aの自然電位を有するカソードとアノードを短絡すると、溶液抵抗、および、カソードとアノードの分極抵抗によって一つの電位-電流の分極曲線が描かれる。

ここで、カソードとアノードの単位面積当たりの分極

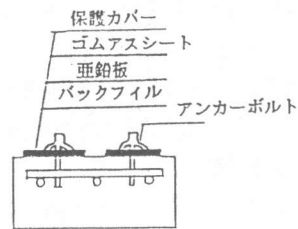


図2 防食板

\*1 (株)ナカボーテック 技術開発研究所 (正会員)

\*4 同社 RC技術部 (正会員)

\*2 北海道開発局開発土木研究所 材料研究室室長、工博 (正会員)

\*3 同所 副室長

抵抗を $h_c$ 、 $h_a$ 、面積を $S_c$ 、 $S_a$ 、溶液抵抗を $R_s$ 、ガバニック電流を $I$ とすると、点①②間の電位差はカソードの分極量で、 $h_c \cdot I / S_c$ 、点②④間は $I \cdot R_s$ とあらわされる。同様に、点④⑤間はアノードの分極量で $h_a \cdot I / S_a$ となる。

測定は次の項目について、ほぼ1ヶ月毎に行った。

- 1) 発生電流 ( $I$ ) : 図3の点⑥の値
- 2) on電位: 一つの照合電極による通電時の電位 (図3の点③に相当し、 $E_{on}$ と表す)
- 3) instant off電位: 通電遮断直後の溶液抵抗降下を除いた、カソードとアノード電位(図3の点②と④の電位に相当し、 $E_{io}$ 、 $E_{ao}$ と表す)
- 4) off電位: 電流を遮断してから4時間後の電位(図3の点⑦、⑧の電位に相当し、 $E_{coff}$ 、 $E_{aoff}$ と表す)
- 5) 気温: 測定時および前日の最高、最低気温

なお、本報告では4時間後のoff電位を自然電位とみなした。

### 3. 暴露試験体の結果

#### 3.1 気温と電流

図4に温度と電流の経時変化を示す。流電陽極方式の特徴であるスタート時の大きな電流と10ヶ月までの急激な減衰期間を除くと、概ね気温の上下に連動して電流が増減していた。

#### 3.2 電位の変化

図5に、アノードとカソードの $i_o$ 、および、off電位の経時変化を示す。電流の変化に較べ電位の変動が小さいことが分る。

#### 3.3 分極量

電気防食が効果的に作動していることの確認に、分極量の値が実用的に使われている。分極量は、図5の $E_{io}$ と $E_{coff}$ の差で示されるが、NACE防食基準の100mV以上を常に保っていた。

#### 3.4 分極状態

図5に示す電位変化は各時点において、大きな変化は認められないが、電気防食系全体における他のパラメータに大きな変化が認められた。その典型的な例を図6、図7に示す。各パラメータの値は、図3に示す考え方にに基づき求め、その結果を表1に示した。図6は分極量が最小値を示した12ヶ月後と、分極量が回復した14ヶ月後を比較したもので、カソードの分極抵抗は同じであるが、アノードの分極抵抗に大きな差があった。図7は、発生電流に大きな差があった例として、測定時

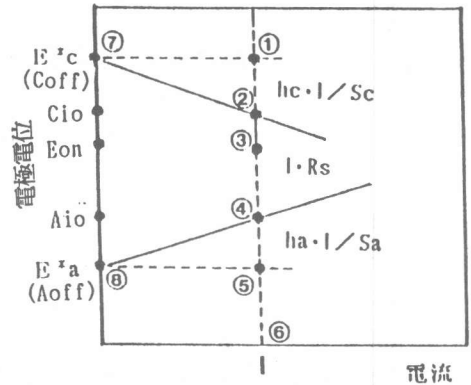


図3 分極曲線の模式図

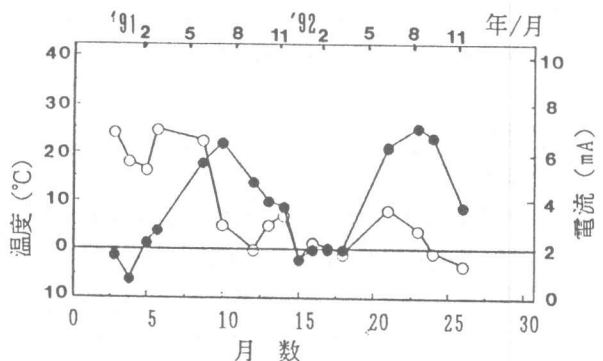


図4 気温と電流の経時変化

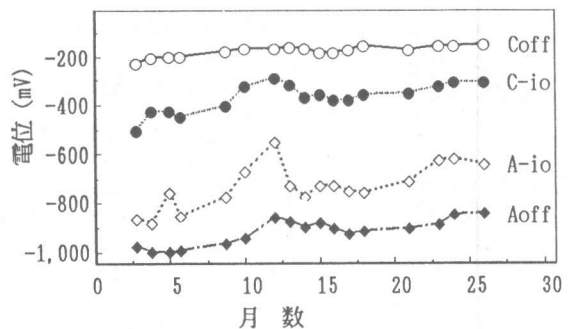


図5 電位の経時変化

の気温が-2℃の15ヶ月後と、21℃の21ヶ月後を比較したもので、溶液抵抗、および、アノードとカソードの分極抵抗に大きな差があった。15ヶ月後は、低温のため溶液抵抗が大となり電流が半減したが、カソードの分極抵抗が増大したため、分極量はほぼ同じ結果となった。

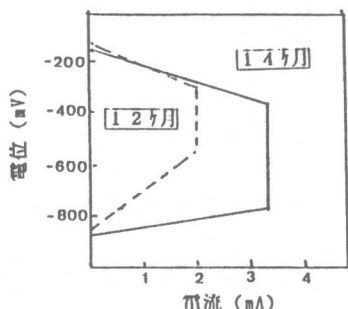


図6 分極の例 (その1)

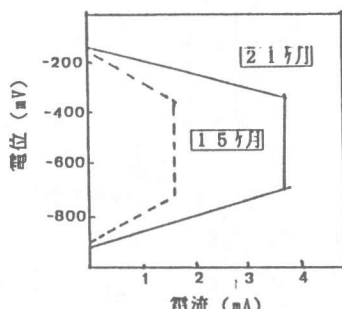


図7 分極の例 (その2)

表1 各パラメータの計算値

経過月	1 2	1 4	1 5	2 1
年月	91/09	91/11	91/12	92/06
Rs	132	116	226	98
ha	41	10	25	14
hc	17	16	28	13
気温	14	9	-2	21

Rs(Ω)、ha&hc(Ω・m<sup>2</sup>) 気温(℃)

#### 4. 分極特性に影響するパラメータの解析

##### 4.1 電流値を支配する因子

電流は次の(1)式で求められる

$$I = (E^*c - E^*a) / (hc/Sc + ha/Sa + Rs) \dots (1)$$

分子の起電力差と分母の抵抗成分の総和(全抵抗)について、それぞれ、平均値と標準偏差を求めた下表より、電流は抵抗成分に支配されていることが分る。

	平均	標準偏差
$E^*c - E^*a$	741	37(mV)
$hc/Sc + ha/Sa + Rs$	266	117(Ω)

図8および図9から、溶液抵抗Rsは平均して全抵抗の約5割を占め、変動も大きいことから電流変化に対して最も大きな支配因子といえる。また、カソード側の抵抗hc/Scの全抵抗に占める割合は、約20%で安定しているのに対し、アノード側の抵抗は、時期により著しく増大し、Rsを上回ることがあった。

図6の12ヶ月後に見られた分極量の減少は、

このようなアノード側の抵抗増大による電流の減少が原因であると考えられる。

##### 4.2 抵抗成分を支配する因子

図10および図11は、それぞれ溶液抵抗(Rs)と気温、全抵抗と気温との相関を示す。これらの結果は、気温以外の影響因子がかなりあることを示している。アノード側の抵抗を含む全抵抗の相関が溶液抵抗の場合より低いことから、アノードが表面層にあることを考慮すると、気温以外に水分が影響しているものと思われる。

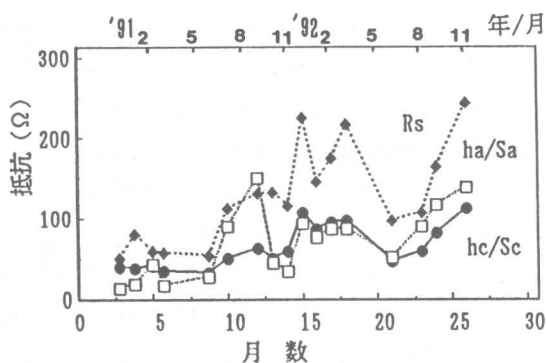


図8 抵抗成分の経時変化

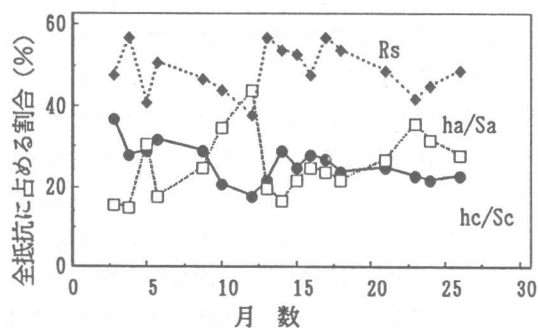


図9 各抵抗成分の構成比

### 4.3 分極量を支配する因子

少ない防食電流で効率的な電気防食、即ち、十分な分極量が得られるためには、図6、および、図7の分極曲線の模式図から明らかのように、溶液抵抗( $R_s$ )とアノード分極抵抗( $h_a$ )が小さく、逆にカソードの分極抵抗( $h_c$ )が大きいことが望ましい。図8に見られように、溶液抵抗およびアノードの分極抵抗の大きな変化の割には年間を通じて、分極量の変化が小さかった。その理由として以下のことが考えられる。

1) アノードの分極抵抗 $h_a$ が大きくなるとカソードの分極量の増大には不利となるが、図12に見られるように、 $h_a$ に連動した形でカソードの分極抵抗 $h_c$ も大きくなった。

2) 経時とともに全抵抗が増し、電流が減少傾向にあるが、カソードの分極抵抗 $h_c$ は、徐々に増加傾向にあり、また、季節的にみると低温時に増加する。結果として、 $h_c$ と $I$ の間には図13の関係が見られ、分極量 $h_c \cdot I / Sc$ の値は、ほぼ一定であった。

### 5. まとめ

2年余の暴露試験の電位、電流測定値から、各抵抗成分、分極抵抗を求めることにより、流電陽極方式の分極挙動に対する環境因子の影響を推測することができた。

1) 発生電流の変動には、コンクリートの抵抗変化が、最も大きく寄与しており、この抵抗は気温に大きく依存することが分った。しかしながら、時期によってはアノードの分極抵抗が増大し、電流値やカソードの分極量を下げることがあった。

2) アノード分極抵抗の一時的な増大は、アノードが表面層にあるため、水分の変化によるものと考えられる。気温の他に試験体内温度と水分量のデータがあると、さらに解析精度を上げることができよう。

3) 暴露後の時間経過とともに抵抗が増し、電流が減少する傾向にあるが、反対に、カソードの分極抵抗は徐々に増加傾向にある。このため、環境の変動の割には分極量の変動が小さなものとなった。

参考文献 1) 堺 孝司・大越 威・千葉丈夫・小熊文雄・加納伸人：積雪寒冷地における流電陽極方式による鉄筋の電気防食、土木学会第46回年次学術講演会(平成3年9月) V-180

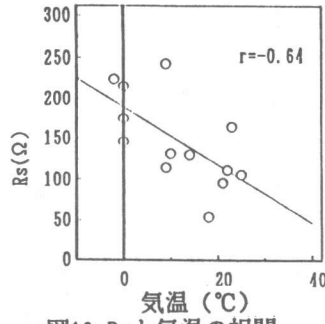


図10  $R_s$ と気温の相関

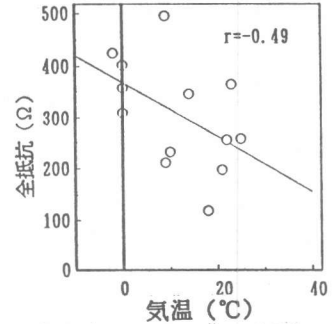


図11 全抵抗と気温の相関

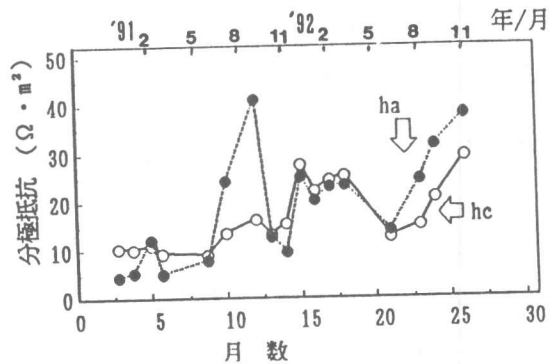


図12 分極抵抗の経時変化

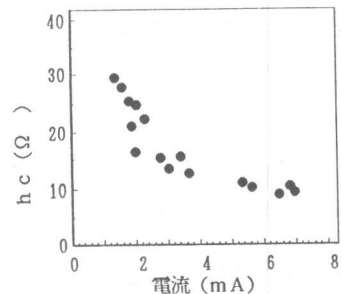


図13  $h_c$ と電流の関係