

論文 コンクリート構造物における電気防食工法の適用方法に関する考察

布田 仁美*1・松田 芳範*2・篠田 吉央*3・望月 紀保*3

要旨: 塩害環境下にある同一構造物に対して平行して適用した 2 種類（流電陽極方式と外部電源方式）の電気防食法に対して、防食基準は満たしてはいるものの、通電電流（経済性）に大きな差が認められた。不経済と評価された電気防食工法では過度の分極は避け、鋼材自然電位を貴化させるような通電調整がなされていないことが最大の原因であることが分かった。適正な電気防食では、経時的に鋼材自然電位は貴化し、回路抵抗も増加傾向を示すため、定電圧通電では自動制御機能が働く場合があり、定電流通電より有利である。定期的に過度の分極を避けた電流調整をすれば、通電方式に関係なく経済的運用は可能である。

キーワード: 電気防食, コンクリート, 塩害, 復極量, 維持管理, 分極抵抗, 不動態

1. はじめに

わが国においてコンクリート中鋼材に対する電気防食が始められて 30 年近くが経過しようとしている中、電気防食の適用手法としては外部電源方式が圧倒的に多いが、運用後における維持管理法については、従来の中性環境下における考え方が主流で、復極量が少なければ通電電流を増加するというパターンが圧倒的に多い。

大気環境下の RC 構造物に対する電気防食は、鋼材表面の環境改善効果による鋼材の再不動態化を目的としている^{1),2),3)}。再不動態化に必要なのは鋼材界面の pH 上昇と溶存酸素の供給である。防食電流を供給すると、鋼材表面で OH⁻ が生成され pH 上昇へとつながるが、過度の（濃度分極が生じるような）分極状態では、pH が上昇すればするほど溶存酸素は少なくなるといった相反関係が生じてしまう。従って、必ずしも通電電流の増加が再不動態化に結びつくとは限らない。本報告では、塩害環境下にある同一構造物に対して流電陽極方式と外部電源方式を平行して適用し、約 10 年間に渡って追跡した測定データを基に、今後の電気防食工法の適用方法について考察した。

2. 比較対象とした電気防食工法

2.1 亜鉛シート方式（流電陽極方式）

本方式は、亜鉛と鋼材による異種金属間の電位差を起電力としてコンクリート中鋼材へ防食電流を供給する電気防食法である。亜鉛とバックフィル材で構成された亜鉛防食板をコンクリート表面全体に設置し、鋼材と電気的に導通させることにより鋼材へ防食電流を供給する。

図-1 に亜鉛シート方式の概要図、写真-1 に陽極設置後の写真を示す。

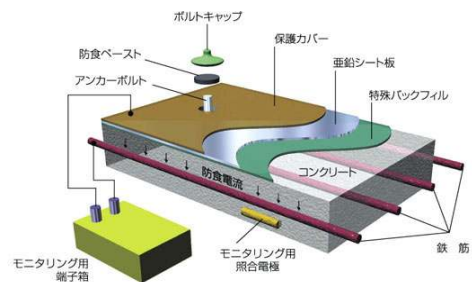


図-1 亜鉛シート方式概要図（流電陽極方式）



写真-1 亜鉛シート設置後外観

2.2 チタン溶射方式（外部電源方式）

本方式は、直流電源装置を用いてコンクリート中鋼材へ防食電流を供給する電気防食法である。対象構造物表面をブラスト等で素地調整し、チタン線材をアーク溶射により吹付け、その後溶射面にアノード電解による酸化被膜を形成させた溶射被膜を陽極としている。金属溶射は塗装感覚で皮膜を形成できるため複雑な形状の構造物にも対応可能で、重量の増加が極めて少ない。また面状陽極のため電流分布が最も良好な外部電源方式である。

*1 ㈱ナカボーテック 事業統括部RC推進部（正会員）

*2 東日本旅客鉄道㈱ 建設工事部構造技術センター（正会員）

*3 ㈱ナカボーテック 技術研究所（正会員）

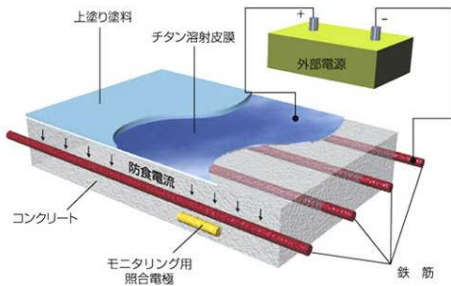


図-2 チタン溶射方式概要図（外部電源方式）



写真-2 チタン溶射施工後外観

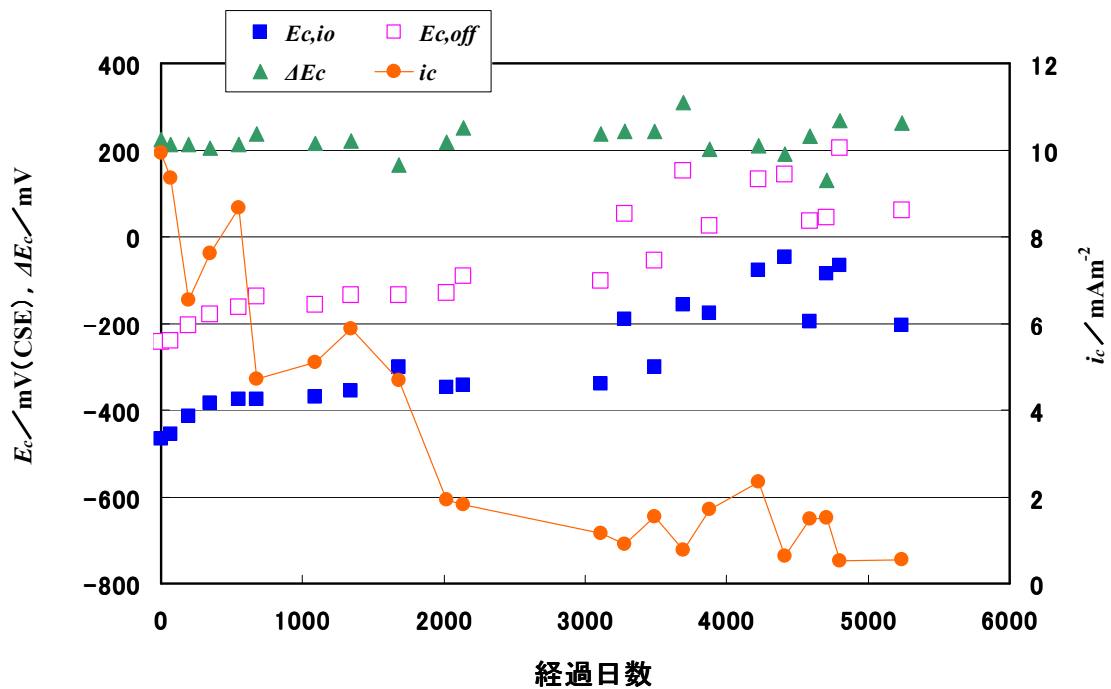


図-3 亜鉛シート方式における各種パラメータの経時変化

3. 経時変化データの比較と考察

図-3 に亜鉛シート方式（流電陽極方式）、図-4 にチタン溶射方式（外部電源方式）における各種パラメータ（鋼材インスタントオフ電位： $E_{c,io}$ 、通電オフ 24 時間後の鋼材電位： $E_{c,off}$ 、鋼材復極量： ΔE_c 、通電電流密度： i_c ）の経時変化データを示す。いずれの方式も、防食基準（ ΔE_c ：100mV 以上）を満足しているが、通電電流密度は大きく異なる。

亜鉛シート方式では、経時的に i_c は減少し、最終的には 1 mA/m² 以下まで低減した。同時に、 $E_{c,io}$ 、 $E_{c,off}$ の経時的貴化が進行し、 $E_{c,off}$ は NACE 基準（RP0290）で復極量基準適用外の電位 (-200mV, CSE) 以上に貴化した。すなわち、電気防食の適用により鋼材が完全に再不動態化したことから、通電電流は微小なカソード分極状態を維持する程度でよいことを意味する。

一方、外部電源方式は亜鉛シート以上の電流が流れている。通電電流が大きいことは鋼材界面の pH は亜鉛シート方式よりも高いはずであるが、鋼材の $E_{c,off}$ の経時的貴化現象は生じていない。このことは、本外部電源方式では鋼材の再不動態化現象が抑制されているように思われる。

原因について、以下のように考察した。

RC の電気防食では、鋼材界面の pH 上昇が重要であることは当然であるが、再不動態化させるための酸化剤は溶存酸素であるため、pH が上昇した条件下では鋼材界面の溶存酸素濃度は高いほど良い。しかし、大きいカソード分極を得ようと大きな電流を通電すると、鋼材界面に溶存酸素の濃度分極が生じ、鋼材表面の溶存酸素濃度を低下させることになる。溶存酸素濃度が低下した条件下で pH が上昇すると、 $E_{c,io}$ は卑化する。外部電源方式では

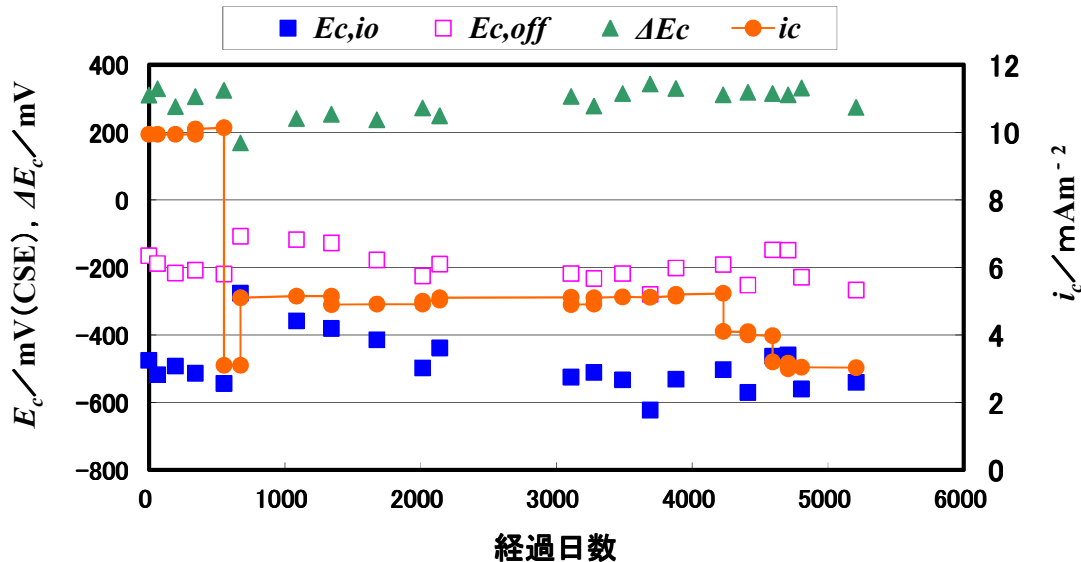


図-4 チタン溶射方式における各種パラメータの経時変化

この $E_{c,io}$ の卑化現象が経過日数 1087 日～4229 日の間で認められるため、通電電流が過剰であったと考えられる。また、本系でも電流を低下させることにより、 $E_{c,io}$ と $E_{c,off}$ が双方とも貴化した挙動が 647 日目と 4592 日目で認められ、同時に防食基準も満足するという挙動が確認されている。さらに、同一条件下で亜鉛シート方式は通電電流の大幅な低減と効率的な鋼材の再不動態化を達成することが出来ている。これらを考え合わせると、本外部電源方式における通電電流の制御は改善の余地があると思われる。

4. 分極特性の比較と考察

電気防食系の陽極と陰極に直線分極を仮定した場合、(1)式または(2)式が成立する。

$$\text{外部電源方式: } I = \frac{V_{ex} - E_a^* + E_c^*}{\frac{h_a}{S_a} + R_s + \frac{h_c}{S_c}} \quad (1)$$

$$\text{流電陽極方式: } I = \frac{E_c^* - E_a^*}{\frac{h_a}{S_a} + R_s + \frac{h_c}{S_c}} \quad (2)$$

但し

V_{ex} : 印加電圧 I : 発生電流 E : 電位

h : 分極抵抗 S : 面積

R_s : 物理的回路抵抗

上付添字 * : 自然電位

下付添字 a : アノード c : カソード

外部電源方式の分子は、 $E_c^* - (E_a^* - V_{ex})$ と変形すると陽極の自然電位が $(E_a^* - V_{ex})$ の流電陽極方式とみなすことができることから、(1)、(2)式の間係を分極曲線（電位 - 電流線図）の模式図を用いて表すと、図-5 のようになる。

物理的回路抵抗による電圧消費 (IR_s) を陽極のアノード

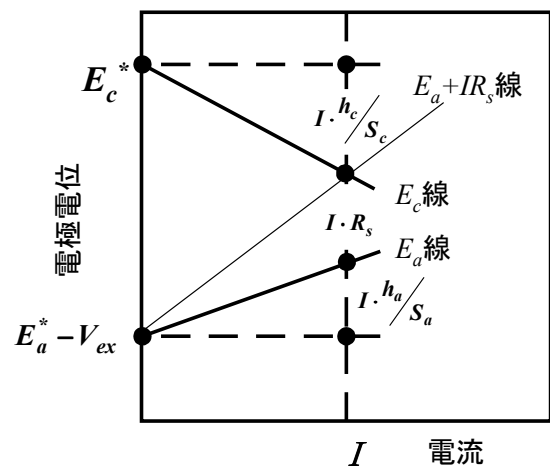


図-5 電気防食系における電位と電流の関係 (概念図)

ド分極曲線 (E_a 線) に上乗せした $E_a + IR_s$ 線を考慮すると、発生電流 I は $E_a + IR_s$ 線と E_c 線の交点で表すことができる。

大気環境下におけるコンクリート中鋼材の電気防食特性は、図-5 に示す電位-電流線図上において、 $E_a + IR_s$ 線の動きによって通電電流が決定されることが報告されている⁴⁾。本線は、外部電源方式の場合 V_{ex} により縦軸切片、陽極のアノード分極抵抗 h_a/S_a と回路抵抗 R_s の和によって傾きが制御される。

本報告で比較対照とした 2 種類の電気防食系に対して、経時変化データを電位-電流線図上にプロットしたものを、それぞれ図-6、図-7 に示す。本調査では、陽極の電位測定が試験後半の一部でしか実施されていないため、前半の $E_a + IR_s$ 線は推定線 (赤色破線) として表示してあ

る。 $E_{c,io}$ の経時変化から推定される E_c 線を緑色実線で示した。

亜鉛シート方式では、 E_a+IR_s 線の縦軸切片 (E_a^*) および傾きが経時的に上昇し、鋼材のインスタントオフ電位 ($E_{c,io}$) の貴化と共に通電電流密度 i_c が減少して行くプロセスが明瞭に現れている。すべての期間において防食基準をクリアしているため、まさに理想的な電流制御が自動的に達成されたといえる。

一方、チタン溶射方式でも、防食対象物の条件は亜鉛シート方式と同様であることから、 $E_{c,io}$ 、 i_c の挙動についても同様と推定されるが、実際は全く異なり、(i_c , $E_{c,io}$) プロットが E_c 線上を左上がり移動する挙動は明瞭に現れていないという結果になっている。

本方式の E_c 線上の点となる座標 (i_c , $E_{c,io}$) は、当初①で示す位置にあり、その後②に移動している。ここまでの挙動は亜鉛シート方式とほぼ同様の挙動であるが、その後③で示す領域に電位、電流は制御されている。③に移行するためには、 E_a+IR_s 線の傾きの調整はできないため、縦軸切片の値 ($E_a^*-V_{ex}$) を小さくする (V_{ex} を増加させる) 必要がある。本系における V_{ex} と各種パラメータの経時変化を比較すると、図-8 に示すように、1087日以降 V_{ex} を上昇させている。同時に $E_{c,io}$ の経時的卑化も認められていることから、この操作により鋼材表面の溶存酸素濃度は低減し、 $E_{c,io}$ の貴化現象に結びつかなかったと考えられる。亜鉛シート方式との差が生じた根本的原因は、まさに1087日目の制御操作にあったと推測される。

亜鉛シート方式のような電位、電流制御をするためには、過度な復極量は避け、一定以上の防食効果 (例えば $\Delta E_c \geq 150\text{mV}$) を満たしている条件下では、可能な限り通電電流を低減させる方向で調整することが重要と思われる。

5. RC 電気防食の運用について

図-5、図-6 に示すように、RC 構造物に対する電気防食では、カソード分極特性 (E_c 線) に大きな変化がないため、通電電流を低減させるためには E_a+IR_s 線の切片または傾きの増大によってコントロールしなければならない。傾きは回路中への可変抵抗器の挿入、切片は外部電源法であれば、印加電圧 V_{ex} によって制御が可能である。

一方、カソード (鋼材) 側も低電流で防食基準 ($\Delta E_c \geq 100\text{mV}$) を満たすためには、分極曲線を直線近似した際の分極抵抗は増大しなければならない。 E_c 線が一定のターフェル式で与えられた場合、直線近似した分極曲線の傾き (分極抵抗) は自然電位の貴化と共に上昇するため、電気防食の適用により鋼材自然電位が貴化すればカソード分極抵抗 h_c の増大は担保できる。

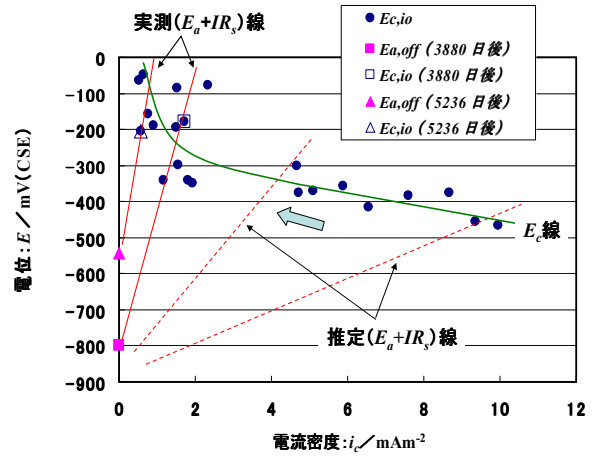


図-6 亜鉛シート方式における E_c 線

E_a+IR_s 線の経時変化

(青矢印は経時変化方向を示す)

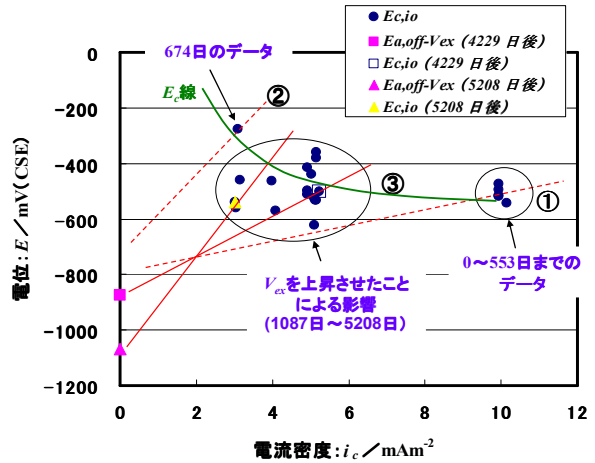


図-7 チタン溶射方式における E_c 線

[(i_c , $E_{c,io}$) プロット], E_a+IR_s 線の経時変化

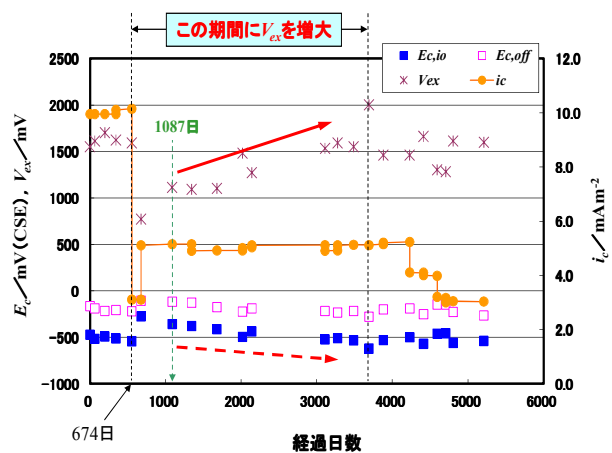


図-8 チタン溶射方式における各種パラメータ

経時変化

(V_{ex} と他のパラメータとの相関)

このように、経済的電気防食を達成するためには、①鋼材自然電位の貴化、②鋼材カソード分極抵抗の上昇、③ E_a+IR_s 線の上昇の3条件が満たされることが必須であ

る。これら3条件が満たされた場合、電気防食の通電方法（定電圧通電、定電流通電）によって各種パラメータ（ E_c 、 ΔE_c 、 $E_a - V_{ex}$ ）がどのような挙動をとるのかを(1)式を用いてシミュレーションすることを試みた。

具体的シミュレーション方法を以下に記す。

(1)(1)式を満足する表1を初期条件とし、鋼材自然電位を-0.3V~0.15Vまで50mVピッチで変化させる。

表-1 初期条件

E_c^*/V	-0.3	E_a^*/V	1
$h_c/\Omega m^2$	10	$h_a/\Omega m^2$	20
S_c/m^2	1	S_a/m^2	1
R_s/Ω	5		
V_{ex}/V	2	I/A	0.02

(2) 自然電位が貴化したときのカソード分極抵抗は図-9より、(3)式に従って上昇するとし、 R_s は自然電位が50mV上昇するごとに1.2倍上昇する((4)式)とする。

$$h_{c,2} = h_{c,1} + \Delta E_c^* / i_1 \quad (3)$$

$$R_{s,2} = 1.2 \times R_{s,1} \quad (4)$$

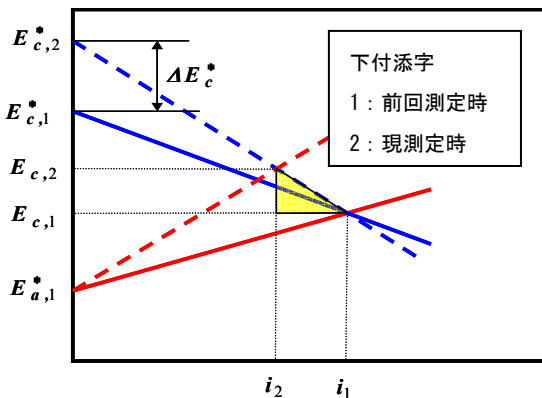


図-9 自然電位の貴化に伴うカソード分極抵抗の変化を示す概念図

結果を図-10に示す。

定電圧通電では、自然電位の貴化に伴って通電電流は減少し、 E_c は貴化するという図-3、図-6と同様の挙動が表れている。防食基準となる ΔE_c も増加していることから、陽極寿命および電気料金における経済的電気防食が自動的に達成されているといえる。

一方、定電流通電では、自然電位の貴化と共に ΔE_c は上昇することから、防食基準は満たしているものの、 E_c は貴化せず、印加電圧が上昇するという図-8で見られたような挙動を示しており、不経済な電気防食となっている。

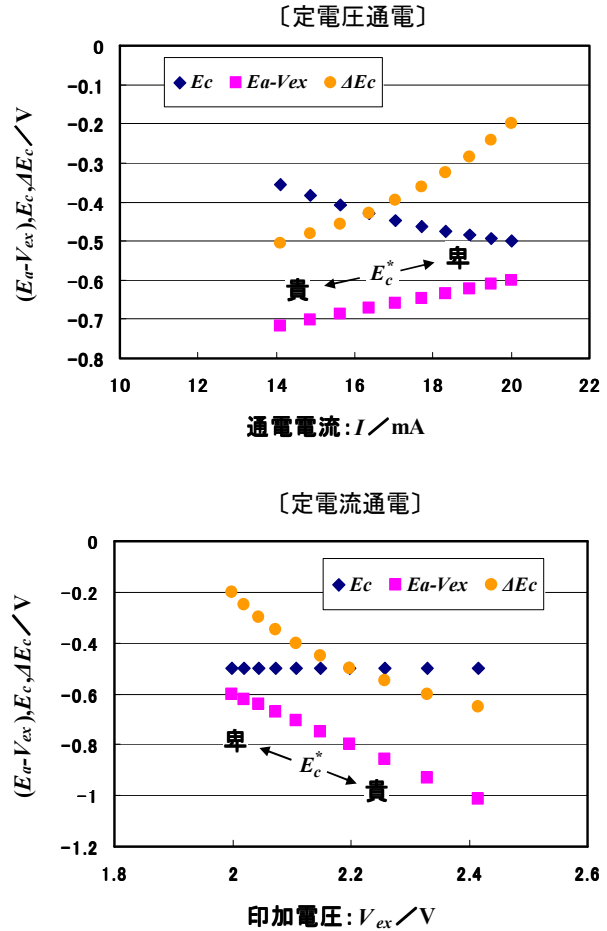


図-10 自然電位の貴化に伴う各種パラメータの変化

R_s の経時的増大は、人為的に制御困難なパラメータではあるが、本環境下では通常生じる現象である。定電圧通電を適用した場合、自動制御機能（鋼材自然電位の貴化と共に通電電流が減少する機能）が付加される可能性があることから、本環境下ではより適正な通電方法と思われる。

一方、上記シミュレーション条件下で、各測定時に(5)式で示されるような電流制御（印加電圧制御）を実施した場合を考える。

$$i_2 = i_1 - \Delta E_c^* / h_{c,2} \quad (5)$$

(5)式は、復極量 ΔE_c を一定に保持することを目的とした場合の電流制御式である。

結果は図-11に示すように、電気防食方式に関係なく電位-電流平面上で各パラメータとも同一のプロフィールを描く。一定の ΔE_c が確保でき、通電電流も経時的に低減する経済的な通電となっていることが分かる。

RCの電気防食では、定期的に必要パラメータを測定し、鋼材自然電位が貴化する方向に最適な通電電流を印加電圧によって調整することが経済的電気防食に繋がる

ことが示された。

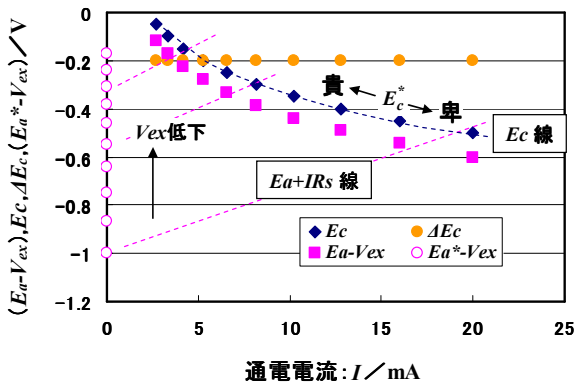


図-11 図-10 に示すシミュレーション条件下で〔4〕式に示す電流制御を実施した場合の各種パラメータ変化

6. まとめ

塩害環境下にある RC 構造物に適用される電気防食工法の適用方法について考察した。

電気防食の適用効果は、鋼材表面の環境改善 (pH 上昇) による鋼材再不動態化である。経済的かつ効率的な電気防食法を実施するためには、過度な復極量は避け、自然電位を貴化させる方向で通電電流を調整することが重要

である。通電方式は、定電圧方式の場合、自動制御機能（鋼材自然電位の貴化と共に通電電流が減少する機能）が働く可能性がある分、定電流方式より有利であるが、定期的に過度の分極を避けた電流調整をすれば、通電方式に関係なく経済的電気防食は可能である。

参考文献

- 1) G.K.Glass, A.M.Hassanein, N.R.Buenfeld : Cathodic protection afforded by an intermittent current applied to reinforced concrete, Corrosion Science, 43, pp 1111-1131, 2001
- 2) G.K.Glass : Analysis of data on a reinforced concrete cathodic protection system, Materials Performance, 35, 2, 1996
- 3) 大谷俊介, 小林浩之, 若林徹, 望月紀保 : 鋼材表面の環境改善を考慮した電気防食試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1030-1035, 2012
- 4) 布田仁美, 篠田吉央, 松田芳範 : コンクリート鉄道橋に適用した各種電気防食工法における長期検証結果, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1037-1042, 2010