

[44] 鉄筋コンクリートの電気防食設計に関する基礎的研究

正会員 ○ 片 脇 清（建設省土木研究所）
 守 屋 進（建設省土木研究所）
 蒔 田 実（建設省土木研究所）

1. まえがき

電気防食とは、鋼材の腐食が電気化学的な作用であることを利用して、鋼材の電位そのものを外部より制御し鋼材の電位そのものを腐食電位領域より非腐食電位領域へと遷移させるという本質的な防食手段である。

既に、鋼製の海洋構造物においては、多くの実績を有する方法であるが、コンクリート中の鋼材（鉄筋）を対象として電気防食を適用しようとするのは、ごく最近になってからであり多くの研究機関で研究が活発に進められている。

電気防食の利点のひとつは、とりわけて腐食性が厳しくて他の防食手段ではなかなか耐久性が保ちえない環境、たとえば海中やたえず海水飛沫で濡れているような条件下で、すぐれた防食効果を発揮しうることである。

しかし、防食するに必要な電位や電流密度、防食方式の種類、過防食の影響など防食設計上不明な点があることから、これらの問題点について基礎的な研究を行なった結果を今回報告するものである。

2. 研究の概要

海中の鉄筋コンクリートおよび海水飛沫でたえず濡れている鉄筋コンクリートを今回の研究対象とする。これら2つの腐食環境をモデル的に再現した水槽中に鉄筋コンクリート供試体を暴露し、各々の供試体の設定電位を変えて、非防食供試体との腐食性状の差異を観察するとともに、防食電流等を測定した（電気防食試験）。

これと併わせて、電気防食による鉄筋のコンクリートとの付着強度への影響を知るために、防食後の供試体の付着強度と非防食供試体の付着強度の差異を「引抜き試験による鉄筋コンクリートとの付着強度試験」（日本工業規格案）に準じて測定した。

付着強度試験は、供試体の形状を除いてコンクリートの品質や防食条件等は電気防食試験と同一なので以下には電気防食試験方法のみを記している。

この電気防食試験の設定条件を表-1に示している。

(1) 鉄筋コンクリート供試体の製作

表-1 試験条件の設定

		試 験 条 件	
		条件 A	条件 B
環境条件の設置 (目1)	想定した実際条件	海中の鉄筋コンクリート	海上でたえず濡れている鉄筋コンクリート
	今回の試験条件	空気を吹き込む天然海水中に供試体を浸漬	空気を吹き込み泡立てながらたえず濡れるように水面上2 cm に供試体かぶり面下面を設置する。
防食電位の設置 (目2)	目標電位値	a 腐食電位	放置（防食せず）
		b - 0.75 V	外部電源方式
		c - 1.0 V	犠牲陽極方式（亜鉛陽極）
		d - 1.5 V	犠牲陽極方式（マグネシウム陽極）
		e - 3.0 V	外部電源方式

表-2 コンクリートの配合

粗骨材最大寸法 mm	スランプ cm	空気量 %	W/C %	S/a %	単 位 量 kg / m ³			
					W	C	S	G
25	8	5.5	55	43.2	160	293	826	1,090

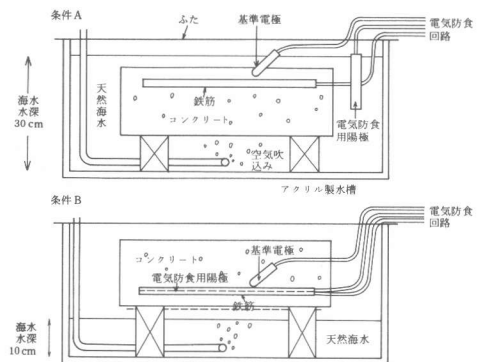


図-1 電気防食実験（条件AとB）

代表的な土木用 A E コンクリート（表-2）を用いて鉄筋（SR 24，直径 16mm）2 本を埋め込み，外形寸法（10 cm × 15 cm × 50 cm）の供試体を製作した。条件 B の供試体には，鉄筋以外に，陽極（材）および基準電極をも埋め込んでいる。

鉄筋のかぶり厚さは 2 cm と 5 cm の 2 種類で，5 cm のかぶり厚さの供試体に対しては，試験開始直前にひびわれ巾 0.1 mm 前後のひびわれを 4 点載荷法によって導入した。

打設方法および養生方法はコンクリート示方書に拠り，7 日間の湿潤養生後は，試験開始まで約 1 ケ月間室内に放置した。

(2) ばくろ

水槽を室内に設置し，図-1 に示す 2 種類の方法で 200 日間，供試体をばくろした。

条件 A では天然海水を 20 日間ごとに交換し，条件 B では適宜海水を補充した。たえず空気を送りこんでいるため，条件 A では海水が空気飽和しており，条件 B では供試体下面（かぶり面）が飛沫のために常時濡れている。

(3) 電気防食方法

防食を施さない鉄筋（腐食電位）の他に，防食電位 4 水準（-0.75，-1.0，-1.5，-3.0 V）の鉄筋を設けるために図-2 の電気回路を製作した。

電位の設定にあたっては，これまでの研究^{1) 2)}を参考にした。また，鉄筋コンクリート用に開発した特殊な陽極材（リボン状の亜鉛陽極，リボン状のマグネシウム陽極，白金めっきプラチナ線）を用いた。

3. 実験結果

3.1 鉄筋の電位と腐食の測定結果

鉄筋の電位とその防食効果との関係を表-3 に示した。この表から次のように考察出来る。

(1) 条件 A（海水中）の場合

非防食供試体中では鉄筋は，青緑色や茶色の錆を生じひびわれ供試体ではこの錆汁の流出が見られた。この腐食は，-0.95V 印加の場合には点錆と腐食も小さくなり -1.0 V では腐食は見当らなかった。同様に -1.5 V，-3.0 V でも腐食しないことから，防食電位の下限はほぼ -1.0 V と考えられる。

(2) 条件 B（海面上）の場合

非防食供試体では，赤茶色の錆を生じコンクリートに小さなひびわれを生じたり，鉄筋の断面が錆のために欠けたりし，水

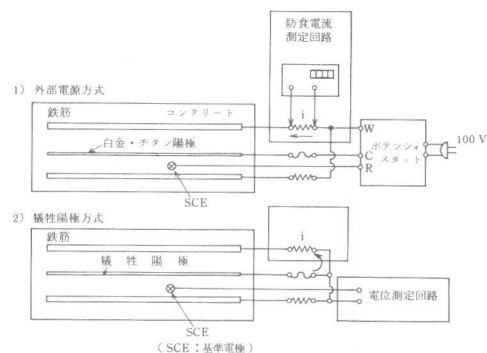


図-2 電気防食回路図

表-3 防食性能に関する測定結果（試験結果 200 日）

鉄筋コンクリート供試体 かぶり厚さ	電位水準	条 件 A			条 件 B		
		コンクリートの外観	鉄筋の腐食性状	腐食面積 mm ²	コンクリートの外観	鉄筋の腐食性状	腐食面積 mm ²
2cm	a 腐食電位 (-0.50 V)	変化なし	青緑色錆	13.2	錆汁の流出 小さなひびわれ	赤茶色錆	29.6
	b -0.75 V	〃	点 錆	0.3	変化なし	点 錆	4.2
	c -1.0 V	〃	腐食なし	0.0	〃	腐食なし	0.0
	d -1.5 V	〃	〃	0.0	コンクリートにひびわれ発生	赤茶色錆	163.8
	e -3.0 V	〃	〃	0.0	40日で試験中止	腐食なし	0.0
5cm ひびわれ入り	a 腐食電位 (-0.50 V)	錆汁の流出	ひびわれ位置で青緑色と茶色錆	3.1	錆汁の流出	ひびわれ位置で赤茶色錆	3.9
	b -0.75 V	変化なし	腐食なし	0.0	変化なし	〃	1.2
	c -1.0 V	〃	〃	0.0	〃	腐食なし	0.0
	d -1.5 V	〃	〃	0.0	〃	〃	0.0

面上にあるのかえって条件 B は腐食条件として厳しいようである。このため，防食供試体と非防食供試体との

腐食差は容易に見分けられた。かぶりが2cmの場合には、腐食が見られなくなるのは-1.0 V、かぶりが5cmの場合、ひびわれ位置で腐食が見られなくなるのも-1.0 Vであった。

一方、-1.5 Vでは、試験期間中にコンクリートに新たな大きなひびわれが生じ、このひびわれに沿って赤茶色の錆が発生した。このひびわれは、マグネシウム陽極から始まっており、陽極が直接コンクリートに埋め込まれていることからこの陽極の溶解生成物の体積膨張によってひびわれが起こったものである。また、このような大きなひびわれの場合には、防食電流が均一に流れないことから防食効果が失われたものであろう。

-3.0 Vでは、40日を経過しても電流低下がみられず、過大な電流を必要としたことからこの場合のみ40日間で試験を中止した。

以上の点から、不適切な電位は防食効果よりかえってひびわれなど他への悪影響を及ぼすこと、実験的にはばくろ条件によるちがいは見当たらず、コンクリート中の鋼材は-1.0 Vで十分な防食効果が得られることが、確かめられた。

鋼材をとりまく環境のpH変化(ΔpH)による電位のシフト値(Δe)は電気化学的に、ある仮定のもとで次式のように求められている¹⁾。

$$\Delta e = -0.08 - 0.059 \Delta (pH) \quad \text{単位: V}$$

さてコンクリート中のpH(12.5)と海水中のpH(8.5)をこの式に挿入すると、

$$\Delta e = -0.059 (pH_{12.5} - pH_{8.5}) \div 0.24 V$$

となり、コンクリート中の防食電位は海水中の鋼材の防食電位(-0.75V)より-0.24V低下して-0.99Vとなることから、今回の実験値は理論値と良い対応を示している。

3.2 防食電流の測定結果

防食電流等の測定結果を表一

表一 電位及び電流測定結果(試験結果200日)

4に示す。

条件Aでは、防食電流密度は8-10 mA/m²(-1.0V時)、60 mA/m²(-1.5V時)であった(防食電流密度は、鉄筋表面単位面積あたりの電流量)。

条件Bでは、防食電流は日変動があったが、平均的な値は10-14 mA/m²(-1.0V時)、80-90 mA/m²(-1.5V時)であった。

このように、かぶりが5cm程度まではかぶりの大小よりも設

供 試 体		条 件 A				条 件 B			
か 厚 ぶ り さ	電位水準	平均電位 V	平均電流 mA	平均電流 密度 mA/m ²	陽極の外 観(海水 中)	平均電位 V	平均電流 mA	平均電流 密度 mA/m ²	陽極の外 観(コン クリート中)
2cm	b	-0.75	0.10	4	変化なし	-0.75	0.17	7	変化なし
	c	-1.05	0.20	8	表面のみ 溶けている (Zn)	-0.90	0.25	10	表面のみ 溶けている (Zn)
	d	-1.45	1.50	60	溶けている (Mg)	-1.45	2.00	80	溶けている (Mg)
	e	-3.05	7.28	290	変化なし	-3.00	7.53	300	変化なし
5cm (ひ び わ れ り)	b	-0.75	0.20	8	変化なし	-0.75	0.25	10	変化なし
	c	-1.05	0.25	10	表面のみ 溶けている (Zn)	-0.95	0.35	14	表面のみ 溶けている (Zn)
	d	-1.45	1.50	60	溶けている (Mg)	-1.45	2.26	90	溶けている (Mg)

定電位の高低に防食電流量は左右され、電位を低下すれば急激に電流量が増加する。

防食効果は電位によって決まるが、電気防食の経済性は陽極数量、消費電力量等、いずれも防食電流の大小によって決まることから、できれば防食電流が少ないことが望ましいが、防食電流密度10 mA/m²の場合実際の鉄筋コンクリートの単位表面積あたり、5-20 mA/m²となり、今回の試験結果は実用的な値と考えられる。

表4によれば海水中的陽極は(条件A)、白金めっきチタン陽極は外見の変化が無いが、亜鉛陽極は表面が、マグネシウム陽極は内部まで溶出しており、陽極寿命の点から前二者が適している様である。コンクリート中に埋め込まれた陽極(条件B)では、マグネシウム陽極の消耗が大きくコンクリート内部に空洞を生じ長期間の防食効果の接続は期待できない。亜鉛陽極も表面が既に溶け出していることから、適切なバックフィルが必要となろう。これに反して、白金めっきチタン陽極は外見変化は無くコンクリート中においても不溶性の陽極であるこ

とが確かめられた。

3.3 付着強度試験結果

200日間、3種類の電位（ -0.75 、 -1.0 、 -1.5 V）に設定した防食供試体と非防食供試体の異型鉄筋（SD30、公称16mm）の付着強度試験結果を表-5に示す。

これまで電気防食時に発生する水素等がコンクリートと鉄筋との付着を阻害し鉄筋の付着強度を低下させる怖れがあることが指摘されているが、表-5からはいずれの電位の場合でもすべり量も含めて付着強さは非防食供試体と同じか（または大きく）、付着強度が低下する傾向は認められなかった。（供試体解体時の観察でも鉄筋表面に気泡は見られなかった。）

これは異型鉄筋であるがために付着が阻害されにくいこと、電流が小さいために有害な水素等の気体の発生が少なく、しかもかぶり厚さが比較的大きくないために発生した気体が逃げ易いためと考えらる。

4. まとめ

(1) 海水中やたえず海水で湿潤な環境にある厳しい腐食条件下のコンクリート中の鋼材に対しても電気防食は低電圧、小電流で防食効果が得られる。

(2) 防食電位の下限は防食効果試験より、その上限は付着強度試験より求まり、防食電位の範囲が定められる。

(3) 防食電流密度は、コンクリートの品質だけでなく周囲の環境によっても異なる。そこで条件Aでは海水を電導体に条件Bではコンクリート自体を電導体にして防食電流の節減を試みた。

以上を含めて表-6に、今回の実験結果を示した。

5. あとがき

鉄筋コンクリート構造物の電気防食設計には、コンクリート中であるが故の特別の設計方法と、装置や陽極素材等の開発、電位調整方法の改良を要するが、電気防食は新設時のみでなく構造物の補修にも利用できる技術であることから、現在実用化のための研究を進めている。

参考文献

- 1) コンクリートモデル中の鋼材の防食に関する研究，土木研究所年次報告（1974）
- 2) 東京湾における鉄筋コンクリートの腐食に関する暴露試験，土木技術資料（1977）

表-5 鉄筋の付着強度測定結果（ひきぬき試験）

供試体	ばくろ方法	電位水準	付着応力度測定結果(kg/cm ²)			破 壊 性 状
			すべり 2D/100 mm	すべり 4D/100 mm	最大付着 応 力 度	
日本工業規格より作成した供試体*	期間電中気は防食	b - 0.75V	146	190	252	コンクリートにひびわれ
		e - 1.0 V	145	190	252	コンクリートにひびわれ
		d - 1.5 V	148	192	250	コンクリートにひびわれ
	室内に放置	防食せず	145	190	250	コンクリートにひびわれ

*異型鉄筋（SD30 D16）を用いた。

各3回繰返しによる平均値
コンクリートの $6.28 = 310 \text{ kg/cm}^2$

表-6 鉄筋コンクリートへの電気防食

	条 件 A	条 件 B
1) 環境条件	海水中の鉄筋コンクリート	海面上の湿潤な鉄筋コンクリート
2) 防食電位	$-1.0 \text{ V} \sim -1.5 \text{ V}$	$-1.0 \text{ V} \sim -1.5 \text{ V}$
3) 防食電流	$8 \sim 60 \text{ mA/m}^2$	$10 \sim 90 \text{ mA/m}^2$ (時間的変動がある)
4) 電気防食方式	外部電源方式、犠牲陽極の両方式でも可能であるが、陽極は海水中に設置する。	外部電源方式では不溶性陽極を用いる。 犠牲陽極方式では陽極はコンクリートに直接接しないようにバックフィル材等を用いる。
5) 防食効果	かぶりの薄いコンクリートやひびわれ入りのコンクリートに対しても防食効果があった。	