

論文

[1116] コンクリート埋め込み鉄筋の塩水中における腐食促進特性

小野 博宣\*1 大岸 佐吉\*2

1. まえがき

コンクリート中に埋め込まれた鉄筋の腐食モニタリングについての研究が注目され [1,2,3]、コンクリートに覆われた鉄筋の腐食程度を非破壊的に検知する電気的方法として自然電位法や分極電位法などを用いた研究例がある [4]。また物理的方法としては、鉄筋腐食面積の測定と鉄筋の鉄筋質量損失率の測定によって鉄筋の腐食程度を調べる事も試みられている [5]。そしてこれらの研究の方法がコンクリートの埋め込み鉄筋の腐食判定に有効である事が既に示されている。

本研究は、埋め込み鉄筋の腐食に及ぼす①コンクリートの因子；セメント種別、W/C、添加塩化物量、珪石微粉末混合量、試料の含水率の影響、②埋め込み鉄筋の因子；種別、かぶり厚さ等の影響を、次いで鉄筋の耐腐食性を向上するための③腐食抑制法；コンクリート表面の塗布、含浸処理の効果について試験を行った。

実験は塩水中に浸した試料の鉄筋に定電圧の直流印荷して鉄筋腐食を促進し、一定印荷期間の電流、自然電位、鉄筋の錆発生面積、鉄筋質量損失率等の測定により鉄筋の腐食特性を検討した。

表-1 供試体一覧表

因子	水準		数
	供試体条件	含水率	
基本	OCC60 磨き鉄筋 かぶり厚3cm	15%	7
		0%	3
W/C	50%	15%	5
		0%	2
	40%	15%	5
		0%	2
セメント種別	高炉	15%	7
		0%	2
混合珪石量	15% cwt	15%	7
		0%	2
	40% cwt	15%	7
		0%	2
鉄筋種別	黒皮異形	15%	6
	亜鉛メッキ	15%	6
	Pアクリル	15%	7
	※1 + W/C P777+40%	15%	7
かぶり厚さ	2cm	15%	6
	4cm	15%	6
塩化物量	0.2% cwt	15%	6
	0.4% cwt	15%	6
合計			101

2. 実験概要

2・1 鉄筋腐食因子および腐食抑制法別実験計画

- 鉄筋腐食に関する実験因子と、水準は表-1に示す通りである。
- 鉄筋腐食抑制効果試験：普通ポルトランドセメント使用、W/C：60%コンクリートに5種類の含浸または塗布処理を施した。

2・2 使用材料

a) セメント；普通ポルトランドセメントまたは、高炉セメント (B種) を使用。 b) 骨材；砂 (比重/2.6, 最大径5mm)、砂利 (比重2.65, 最大径20mm)。 c) 混合材；硫黄島産珪石粉末 (SiO<sub>2</sub>-97.7%) を使用。 d) 鉄筋；磨き丸鋼 (13mmφ)、黒皮異径鉄筋 (D13mmφ)、亜鉛メッキ鉄筋 (13mmφ) を使用 (長さL=360mm)。 e) 鉄筋防錆用表面塗布材；フッ素樹脂3回塗布。 f) コンクリート混入、含浸、塗布剤；①アルキルアルコキシシラン (以下AAKSと呼称し略記)、②ポリマーエマルジョン混和 (20%/Cwt)、③亜硝酸防錆剤 (6 l / 1 m<sup>3</sup> Conc.)、④フッ素樹脂、⑤ポリウレタン樹脂。

\*1 中部大学 工学部建築学科助教授 工博 (正会員)

\*2 名古屋工業大学 名誉教授 工博 (正会員)

\*1 W/C=45%のコンクリート使用、他は60%一定。

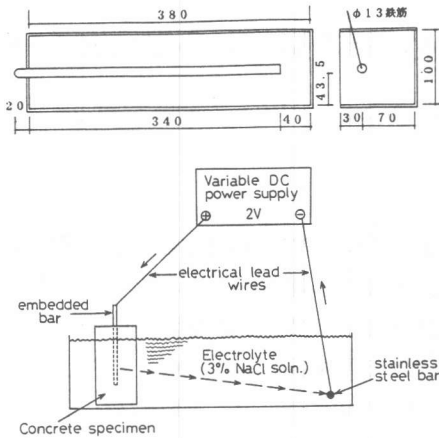


図-1 供試体の形状と寸法(単位:mm)と鉄筋腐食試験法

### 2・3 供試体作製

使用コンクリートの重量調合比は普通セメント・ポルトランドセメントおよび高炉セメントの両者の場合も以下の通りである。 $C/W/S/G = 1/0.6/2.79/3.41, = 1/0.5/2.09/2.78, = 1/0.4/1.33/2.11$  (以降、普通コンクリートを OCC-60, 50, 40、高炉セメント使用コンクリートを BFC-40, 50, 60 と記す。)。なお、珪石は細骨材の内割りとして混和しその量はセメント重量比の15%, 40%とした。供試体寸法は  $100 \times 100 \times 380 \text{ mm}$  である(図-1 参照)。打ち込みの翌日に脱型し、材令 28 日まで  $20^\circ \text{C}$  水中養生した後、供試体中自由水の含水率を  $105^\circ \text{C}$  下で 15% に調湿した。(高温乾燥による内部含水率の調湿は供試体表面の微細ひび割れを生じる恐れもあるが、供試体の含浸塗布の前処理条件とより過酷な試験条件による錆発生促進を考慮した) の条件鉄筋の腐食に及ぼすかぶり厚さの影響を調べるため、かぶり厚さを変えた試験面(吸水面)以外の5面を塗布材を用い下塗り、中塗り、上塗りの3工程の塗布作業を24時間おきに行い乾燥硬化のため2週間室内に保存した。(図-1 参照)

### 2・4 供試体の含浸塗布処理

○ 防水材(ポリウレタン樹脂とフッ素樹脂)の塗布: 角柱コンクリート供試体の表面に防水の目的で有機系の塗布材料すなわちフッ素樹脂とポリウレタン樹脂を下塗り、中塗り、上塗りの3行程の塗布を24時間おきに行い、乾燥硬化のため2週間室内に保存した。

○ AAKS含浸処理効果: 試験体を温度  $105^\circ \text{C}$  で24時間以上乾燥した後(80%乾燥後)、常温常圧下でコンクリート供試体を AAKS 液中に24時間浸漬した。その後、2週間室内で保存

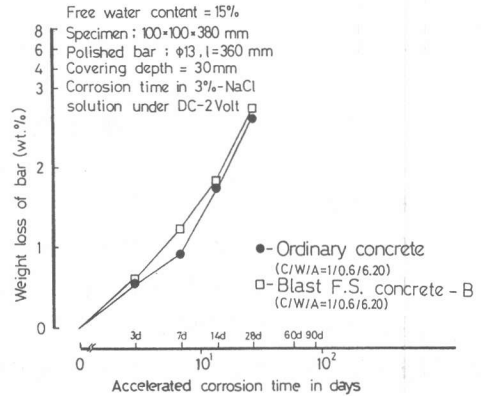


図-2 セメント種と鉄筋質量損失率の関係

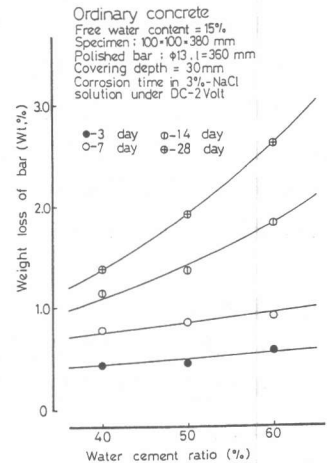


図-3 水セメント比と鉄筋質量損失率の関係

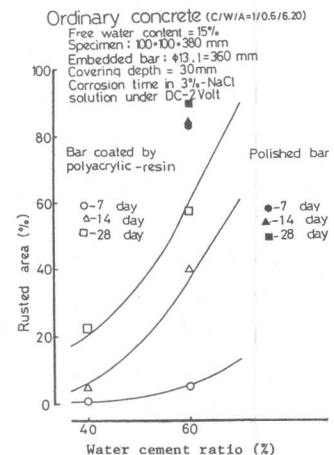


図-4 水セメント比と腐食面積率の関係

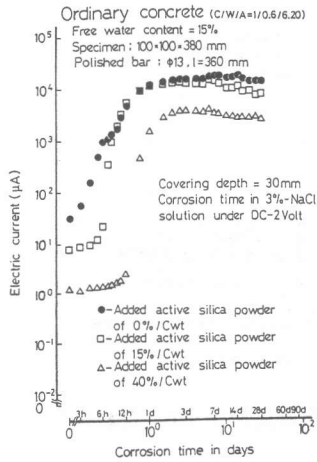


図-5 混合珪石量と電流の関係

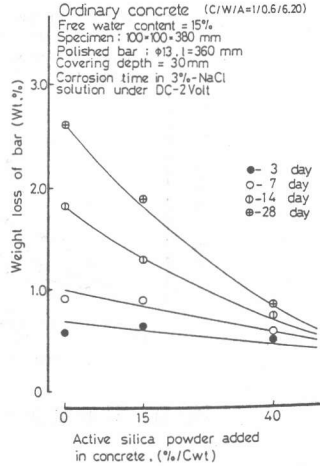


図-6 混合珪石量と鉄筋質量損失率の関係

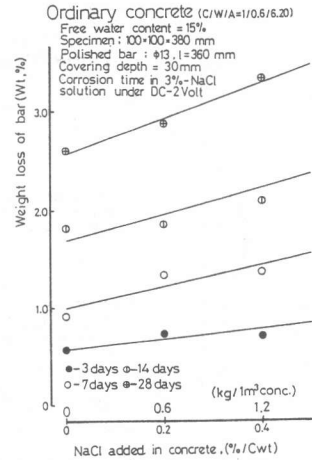


図-7 添加塩化物量と鉄筋質量損失率の関係

し縮合反応させた。

○ コンクリート中に混合した防水抑制剤の効果：防水効果を検討するためにコンクリートの混練時にこれら2種類の混和剤（防錆抑制剤；亜硝酸塩[6l/lm<sup>3</sup>conc.], またはホリマ-イマルジョン[20%/Cwt]）を用いた。供試体は水中養生後、乾燥後実験面のみを残し他の5面にフッ素樹脂の塗布を施した。

#### 2・4 腐食促進試験

NaCl-3%(wt)水溶液に供試体を浸漬し、DC-2VOLTの電圧を常流し腐食試験を行った(図-1参照)。試料の浸漬は各個一槽(20x20x450mm)を個別に通電した。

#### 2・5 定電圧下電流および、電圧無印荷時自然電位の測定

促進試験開始直後に電流と電位を測定し、以後電流は1hrおきに12hrまで、その後18, 24hrに測定し、3dまで12hrおき、さらに14dまで毎日測定した。自然電位は14dまで1日1回測定。14d以降は電流も30dまで2日おきに、その後は35, 40, 50, 60, 90d, に測定し、観測を終了する。

#### 2・6 腐食面積率および腐食による鉄筋鉄筋質量損失率

腐食期間3, 7, 14, 28, 60, 90dのうち、適当な時期を選び供試体を割裂し鉄筋を取り出し腐食部分に赤インクを塗り、鉄筋の腐食面積を測定した。その後、錆除去剤(英国製クリアラースト；商品名)の5倍希釈液(弱有機酸溶液)に5日間浸漬し、初期の鉄筋鉄筋質量損失率を求めた。なお、黒皮異形鉄筋および亜鉛メッキ鉄筋の場合には錆除去剤により除去される黒皮やメッキの重量を別に求めておき重量補正した。

### 3. 実験結果と考察

#### 1. セメント種別の影響

図-2に示すようにBFC埋め込み鉄筋はOCC埋め込み鉄筋よりも錆による鉄筋質量損失率が若干高い事が認められる。これは普通ポルトランドセメントは成分の60%以上をCaOが占めるのに対して、高炉セメントでは約50%と低い。このため生成するCa(OH)<sub>2</sub>が少なくOCCに比べ弱いアルカリ性を示すこと、また供試体の事前乾燥により塩水の浸透が早まった事など本実験に関する限り高炉セメント使用の優位性は認められなかった。

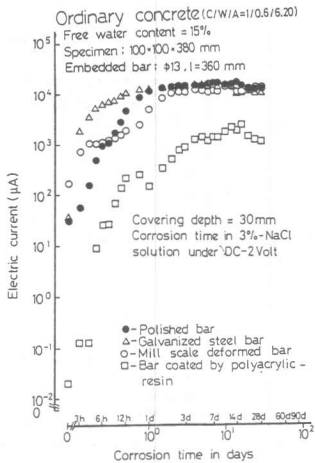


図-8 鉄筋種別と電流の関係

## 2. 水セメント比の影響

図-3, 図-4に示すごとく水セメント比が大きくなるにつれて腐食量は増大する。これは、水セメント比が大きいほど、同一体積中に自由水分が多くまた供試体調湿時に多くの水が蒸発し、このとき生じた気孔が組織を粗にし塩水を浸透し易くするためである。

## 3.3 混合珪石量の影響

珪石の影響は図-5と図-6に示す如く非常に顕著である。混和量が多いほど電流値が小さく、腐食量も少ない。これは、珪石の主成分である活性シリカ ( $SiO_2$ ) が、ポゾラン反応により  $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$  という水に不溶性生成物を作り、塩水の浸透に対する阻止性能が増大するためと考えられる。

## 3.4 塩化物量

本項の実験は、海砂使用時を想定したものがあがる、図-7に示すようにコンクリート中への添加塩化物量が多いほど鉄筋腐食減量が増大する事が分かる。

## 3.5 鉄筋種別の影響

酸化第二鉄の薄い層で覆われた黒皮異形鉄筋は、図-8と図-9からもある程度の効果が読みとられる。また異形の凹部よりも凸部分の腐食が激しかった。電気的に鋼材表面に亜鉛の被膜をつけた亜鉛メッキ鉄筋は、通常自然環境下ではかなりの耐食効果持っているが、本実験に於けるDC-2 Volt印荷腐食促進条件下ではほとんど結果は認められなかった。ポリアクリル酸樹脂塗布鉄筋は、腐食面積率・電流・腐食重量のいずれをとっても良い効果を示している(図-4, 8, 9)。

## 3.6 かぶり厚さの影響

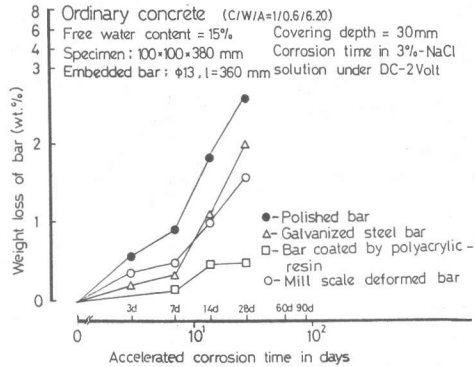


図-9 鉄筋種別と鉄筋質量損失率の関係

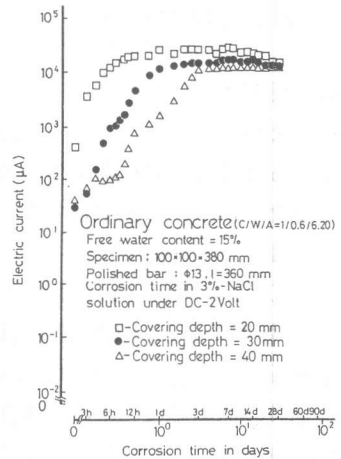


図-10 かぶり厚さと電流の関係

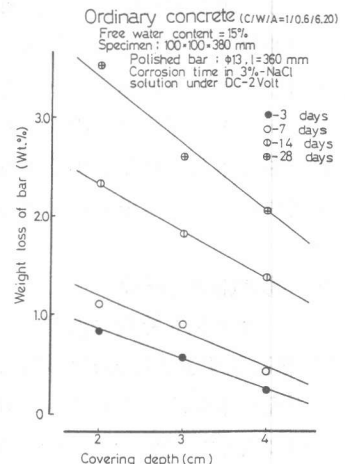


図-11 かぶり厚さと鉄筋質量損失率の関係

図-10 に示す如く、電流値の上がり方に差異を生じさせるには、かぶり厚さの大小により塩素イオンが鉄筋まで浸透するのに要する時間と関係している。図-11の如く腐食の進行はかぶり厚さが大きいほど緩やかである。

### 3・7 含水率の影響

含水率15%と0%では図-12の如く、高材令では電流に大きな差異はみられない。

図-13は 試料含水率と鉄筋重量減少率の関係を示す。高含水ほど腐食が小さい。

### 3・8 自然電位と鉄筋腐食の関係

図-14 に自然電位と錆による鉄筋鉄筋質量損失率を示した。腐食が進むにつれ、自然電位値が正の方に移っていき、 $-500 \sim -700$  mV前後で集束する傾向がある。

鉄筋の腐食量は自然電位により定量的に精度よく判断出来ないと思われる。本実験では錆発生時期の違いがあるものの、全ての埋込み鉄筋が腐食しているので、腐食していない供試体と同様の条件下に於いて比較できれば、ある程度の腐食判断が可能となろう。

### 3・9 塗布含浸材による鉄筋腐食抑制効果

図-15に示すように フッ素、AAKS、ポリウ

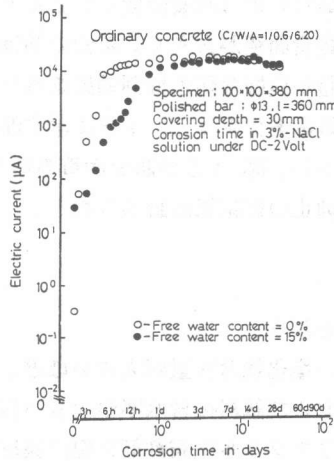


図-12 含水率と電流の関係

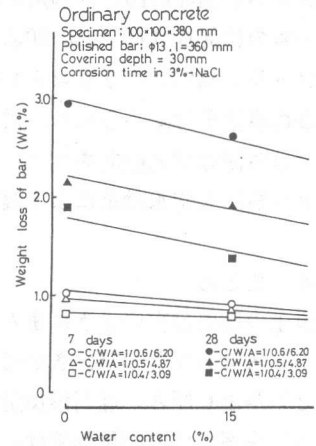


図-13 含水率と鉄筋質量損失率の関係

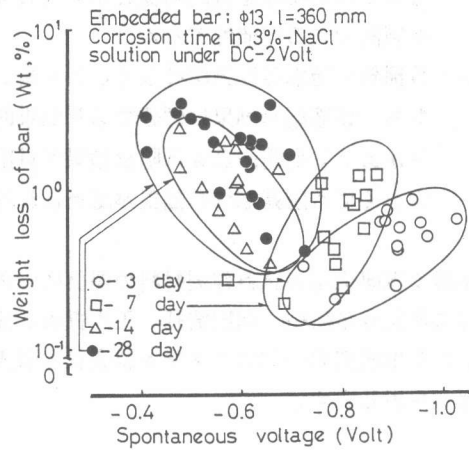


図-14 自然電位と鉄筋質量損失率の関係

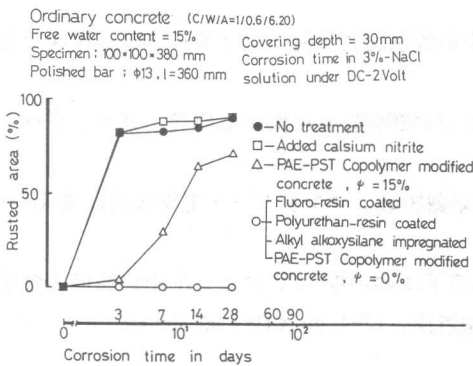


図-15 腐食面積と促進期間の関係

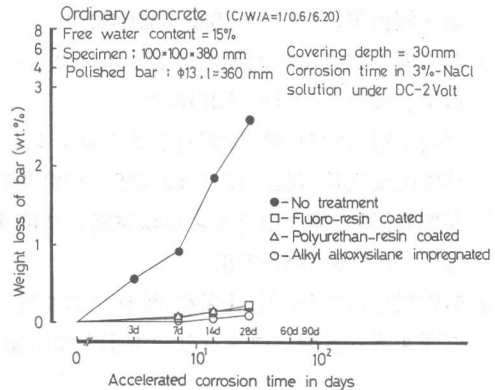


図-16 鉄筋質量損失率と促進期間の関係

レタンの3種類の防水抑制剤を用いたものは腐食面積がほとんど零である。また3日後亜硝酸添加のものは促進3日でOCC-60より腐食面積が大きく、防食の効果は、認められない。このことからフッ素、AAKS、ポリウレタン樹脂が良好な防水抑制効果をもつ。またポリマーエマルションはある程度結果は認められる。鉄筋質量損失率は 図-16 に示すOCC-60の鉄筋の腐食による質量損失率は急激な増大傾向を示す。しかし、図-15の腐食面積の例と同様に AAKS、フッ素、ポリウレタン樹脂共防水効果による腐食抑止の好結果が認められる。

#### 4. まとめ

以上の結果は次のようにまとめられる。

- 1) 水セメント比が大きいくほど、塩化物含有量が大きいくほど、埋込み鉄筋は腐食し易い。
- 2) かぶり厚さ、珪石添加量、および試料の含水率が大きいく程、埋込み鉄筋は腐食しにくい。
- 3) 鉄筋自体の防錆効果は、ポリアクリル塗布鉄筋>黒皮異形鉄筋>亜鉛メッキ鉄筋>磨き丸鋼の順に効果が認められた。
- 4) 自然電位-700mV以下の場合、鉄筋は完全に錆びると判断される。自然電位と腐食量との間に明確な定量的関係を見いだせなかったが、錆無しの電位を比較する事で腐食程度を判断できる可能性がある。
- 5) 5種類の防水処理方法のうち、フッ素、AAKS、ポリウレタン樹脂が良好な防水抑制効果を持ち、鉄筋耐食効果は顕著であり効果的である。またポリマーエマルションはある程度効果がある。亜硝酸Caは防食効果が見出されなかった。AAKSを含浸すれば水セメント比が大きいくとも防錆制御の効果が認められる。

謝辞：本研究用の試料作製材料の提供につき関西ペイント（株）に謝意を表します。本研究の実行にあたり卒研生：向田浩基、正木貞義、荒井敦徳、山田堅二、加藤聡の各氏の協力を得ました、また本研究の一部はセメント協会奨励研究費と中部大学特別研究費の助成によりました記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 田村博,永山勝,下澤和幸;腐食モニタリング測定値に関する一考察、コンクリート工学年次論文報告集, 12-1, pp.533-538(1990).
- 2) 横田優;電気化学的手法によるコンクリート中の鉄筋腐食評価コンクリート工学年次論文報告集, 12-1, pp.545-550(1990).
- 3) 高橋正行,外門正直,志賀野吉雄;コンクリート中の鋼材腐食に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集, 12-1, pp.435-440(1990).
- 4) 大城武,谷川伸;塩害による鋼材腐食に関する暴露実験、コンクリート工学年次論文報告集, 11-1, pp.569-574(1989).
- 5) 榊田桂寛,安田白雪,花栄浩,松林祐二;塩分環境下におけるコンクリート中の鉄筋腐食速度に関する一実験、コンクリート工学年次論文報告集, 12-1, pp.441-446(1990).