

# [7] コンクリート中でのエポキシ樹脂塗装鉄筋の耐食性

正会員 ○ 白川 潔 (住友金属工業, 中研)

三上 尚人 (住友金属工業, 中研)

## 1. 緒言

海砂使用コンクリートの増大および海洋コンクリート構造物の出現により、鉄筋の腐食とコンクリート構造物の劣化が大きな問題となっている。このような塩分による腐食対策の一つとして、エポキシ樹脂塗装鉄筋が米国で初めて1973年、高速道路の床版鉄筋に用いられた<sup>(1)</sup>。これはコンクリート中に塩分がある場合は勿論のこと、コンクリートにひびわれが生じて防錆効果が期待できるが、使用開始してから日も浅いので耐食性については必ずしも十分解明されているとはいえない<sup>(2)(3)</sup>。

ここでは、エポキシ樹脂の種類、膜厚、塗膜の疵、鉄筋のかぶりがエポキシ樹脂塗装鉄筋の耐食性におよぼす影響を、温海中での促進暴露試験(期間:6ヶ月)と干満帯での自然暴露試験(同:1ケ年)により調査したので、その結果を報告する。

表-1 供試鉄筋の種類

供試鉄筋の種類(目標膜厚 $\mu m$ )	鉄筋のかぶり (cm)
裸材(黒皮付)	2, 4, 7
熔融亜鉛メッキ(亜鉛, 70, クロメート処理)	〃
エポキシ樹脂A (100)	〃
〃 (200)	〃
〃 (300)	〃
エポキシ樹脂B (200)	〃

## 2. 実験内容

### 2.1. 供試鉄筋

表-1に供試鉄筋の種類を示す。エポキシ樹脂A, Bは塗装方法、樹脂の組成を変えた14種の試作鉄筋から、耐食性、耐衝撃性、耐曲げ性の優れたものとして選ばれ、いずれも静電粉体塗装方式である。樹脂AはビスフェノールA型のエポキシ樹脂に酸無水物系の硬化剤、可燃性付与剤および防錆顔料を添加したもので、樹脂Bは変性エポキシ樹脂に芳香族アミン系硬化剤を添加したものである。基礎実験の結果、樹脂Aは膜厚が100 $\mu m$ あれば人工海水中に1年間浸漬しても発錆がなく樹脂Bもピンホール部のみに発錆が認められたにすぎなかった。この点を考慮し、本実験では鉄筋の運搬、組立て時に生じることが予想される塗装膜の疵を人工的に予かじめコンクリートの埋込み長の片側半分の全長にわたって与え、この点からの腐食の進行状況も調べることにした。

表-2に鉄筋表面積に対する人工疵の面積率の実測値を示す。人工疵はグラインダーでふし山の塗膜を削ることにより与えた。

なお、比較材として裸鉄筋(黒皮付)と熔融亜鉛メッキ鉄筋(クロメート処理)も供試した。

素材のねじ鉄筋D19(SD35)のふし寸法と機械的性質を表-3に示す。

### 2.2. 供試体の製作

供試体は図-1に示すように埋込み長を一定長40d(d:鉄筋直径)とし、鉄筋のかぶりと鉄筋の種類をパラメータとした両引試験体である。コンクリートの配合と強度を表-4に示す。コンクリートの打設

は鉄筋を水平に保ち、パイプレータを用いて十分締め固めた。打設後約1ヶ月間水中養生(20℃)した後、2000トン万能試験機を用いて静的引張試験を行ないコンクリートにひびわれを発生させた。この引張試験は引

表-2 鉄筋表面に占める人工疵面積率(%)

膜厚 かぶり (cm)	促進暴露				自然暴露			
	エポキシA			エポキシB	エポキシA			エポキシB
	100 $\mu m$	200 $\mu m$	300 $\mu m$	200 $\mu m$	100 $\mu m$	200 $\mu m$	300 $\mu m$	200 $\mu m$
2	10.8	5.6	10.8	7.2	4.2	3.4	5.4	4.0
4	5.6	4.2	11.0	10.8	7.4	7.8	4.8	5.0
7	5.6	4.2	10.6	5.8	5.0	6.0	4.2	4.2

表-3 供試鉄筋の形状寸法と機械的性質

名称	呼び名	規格	ふし寸法(mm)		機械的性質		
			ふし高さ	ふし間隔	降伏点 ( $\frac{kg}{mm^2}$ )	引張強さ ( $\frac{kg}{mm^2}$ )	伸び (%)
ねじ鉄筋	D19	SD35	1.5	10	39.0	56.9	35.6

張力Pを鉄筋公称断面積Aで除した鉄筋応力 $\sigma = P/A$ が3000  $Kg/cm^2$  になるまで静的に単調載荷し、特定応力レベルでのコンクリート表面のひびわれ幅をコンタクトゲージにより、また鉄筋のひずみを露出した部分に貼付したストレインゲージにより測定した。このストレインゲージは暴露試験の導入引張応力を制御する際に使用した。

### 2.3. 暴露条件

表-5に暴露条件を示す。両試験とも各供試体はねじ鉄筋のねじを利用して反力治具にナットで固定し、ナットを締付けることにより鉄筋に引張応力 $\sigma = 2000 \text{ Kg/cm}^2$ を与えた。

促進暴露試験は9体を一組とした供試体群を温海水をためた恒温槽内に6時間、大気中に6時間のサイクルで湿潤、乾燥を交互に繰返した。なお、海水は温度促進のため60℃に保持した。海水の分析結果を表-6に示す。

自然暴露試験も促進暴露試験と同じ形状寸法の供試体群を用いて鹿島港内の干満帯に1年間暴露した。

鉄筋引張試験におけるコンクリート表面の最大ひびわれ幅を図-2に示す。この値は両試験に供試した同一条件における6体の平均値である。すなわち、暴露試験は鉄筋のかぶり2cmでは0.11~0.12mm、同4cmでは0.16~0.19mm、同7cmでは、0.22~0.25mmのひびわれ幅の下で行なったことになる。

### 2.4. 暴露後の試験方法

供試体を反力治具から取外してコンクリートのひびわれ進行状況を観察した後、コンクリートを除去し鉄筋を露出させて以下の調査を行なった。

- (1) 外観々察：発錆面積率、腐食状況およびエポキシ樹脂のフクレ、剝離の観察を行なった。ここに発錆面積率は(1)式で定義した。

$$\text{発錆面積率(\%)} = \frac{\text{錆発生面積}}{(\text{鉄筋の公称周長}) \times (\text{埋込み長})} \times 100 \dots (1)$$

なお、エポキシ樹脂の人工疵のない部分は膜厚が100 $\mu\text{m}$ でも全く発錆していなかったため、発錆面積率は(1)式で(埋込み長)を半分にして算出した。

- (2) エポキシ樹脂の密着性と硬度：人工疵部は塗膜の縁を、また、塗膜正常部は塗膜にカッターナイフでスリットを入れ、スリット部をナイフでおこし密着性を判定した。また、エポキシ樹脂の硬度は鉛筆を塗膜に押しつけながら移動させ、樹脂にキズがついたときの鉛筆硬度で評価した。

表-4 コンクリートの配合および強度

設計強度 (%)	粗骨材の最大寸法(mm)	水セメント比(W/C)(%)	スランブ(cm)	細骨材率(%)	単 位 量 ( $Kg/m^3$ )					4 週強度( $Kg/cm^2$ )	
					(1) 水	(2) セメント	(3) 細骨材	(4) 粗骨材	(5) 減水剤 No.5 L	圧 縮	割 裂
240	25	54.9	7.8	38.6	144	262	746	1190	660	246	25.2

注(1) 水道水, (2) 普通ポルトランドセメント, (3) 鹿島産川砂, (4) 那珂川産川砂利

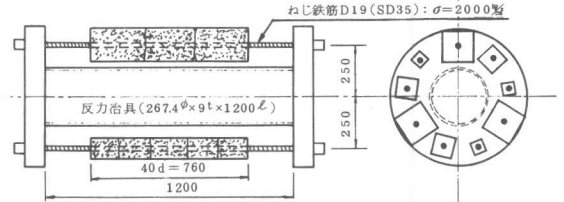


図-1 供試体の形状寸法および組立状況

表-5 暴露試験条件

種類	条件	環 境	鉄筋応力	暴露期間
促進暴露	温海水(60℃) ↔ 大気	乾燥繰返し時間: 12hr	2000 $Kg/cm^2$	6ヶ月
自然暴露	海洋干満帯 (鹿島港内)		"	1ケ年

表-6 海水の分析結果 (単位: ppm)

$Cl^-$	$Na^+$	$SO_4^{--}$	$Mg^{++}$	$Ca^{++}$	$K^+$	PH
18700	10200	2580	1260	457	364	7.8

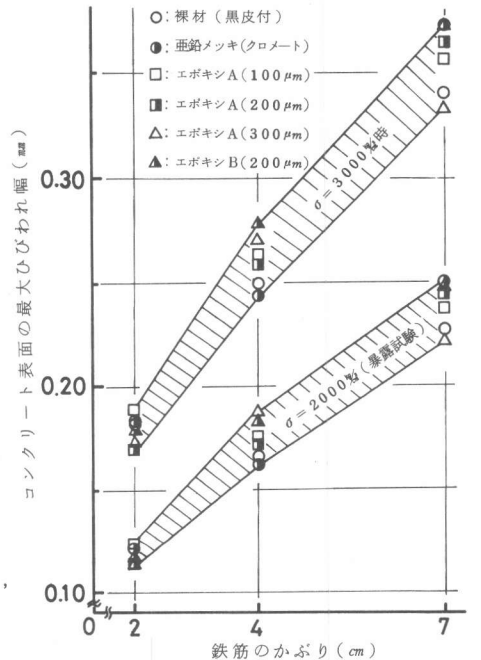


図-2 コンクリート表面のひびわれ幅とかぶりとの関係

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1. 促進暴露試験（期間：6ヶ月）

##### 3.1.1. 発錆面積率

本実験ではコンクリートのひびわれ位置と供試鉄筋発錆部または白色生成物付着位置はよく対応していた。これはひびわれに浸透した海水が鉄筋に達して発錆させたか、あるいはひびわれを通して鉄筋に達した空気中のCO<sub>2</sub>と、コンクリートから溶出したCa<sup>2+</sup>とが反応して生成したCaCO<sub>3</sub>が付着したものと考えられるので、ひびわれの多くは鉄筋迄達しているとみてよい。

本実験の場合も、鉄筋に一定引張応力を負荷したときに生じるコンクリートのひびわれ本数は鉄筋のかぶりが増えるほど少なくなっている(図-3)。したがって防食被覆の有無によって程度の差はあるが、鉄筋のかぶりが厚くなるほど発錆面積率は小さくなる(図-4)。一方、図-2よりコンクリート表面のひびわれ幅はかぶりが厚くなるにつれて大きくなっている。これらより、鉄筋の腐食にはコンクリート表面のひびわれ幅よりもかぶりの影響が大きいことが判る。

エポキシ樹脂塗装鉄筋は塗膜に疵がない部分は膜厚が100μmでも発錆せず、人工疵で素地の露出した部分が発錆している。かぶり2cmのものでは露出した素地面積以上に錆が進展しているものもあるが、かぶり4cm、7cmのものはいずれも素地面積のある割合だけが発錆している。このことから人工疵による露出素地面積を発錆しうる面積とみて、これに対して実際どれだけ発錆したかを示したのが図-5である。図よりエポキシ樹脂塗装鉄筋の発錆しうる面積に対する実際発錆面積の比率はかぶりによって異なり、かぶり2cmでは30~115%、かぶり4cmでは10~25%、かぶり7cmでは0~35%であり、かぶりが厚いほど錆やすい面も保護されることがわかる。エポキシ樹脂の種類と膜厚が発錆面積率におよぼす影響は暴露期間が短いこともあり、結論を得るまでには至っていない。

なお、亜鉛メッキ鉄筋は人工疵がないにもかかわらず、コンクリートで覆われた面積の1~9%が赤錆となっており、防錆性能がエポキシ樹脂に比して劣ることがこの結果からも明らかである。

##### 3.1.2. エポキシ樹脂のフクレと硬度

エポキシ樹脂はかぶりの薄いもの(2cm、4cm)で、人工疵に隣接した所にわずかに剝離とフクレがある他は、外観上、初期の光沢を保っており、暴露による硬度劣化はなかった。

##### 3.1.3. エポキシ樹脂の密着性

人工疵近傍のエポキシ樹脂の密着性は正常部のそれに比して低下している。これは、エポキシ樹脂塗膜の収縮応力が解放されて素材との間に相対すべりが生じ、これが熱応力の繰返しにより助長され、そ

表-7 暴露試験結果<sup>(1)</sup>

試験項目 鉄筋の 種類	コンクリート のかぶり	促進暴露(6ヶ月)			自然暴露(1年)		
		発錆面 積率(%)	塗膜の フクレ	塗膜の 密着性	発錆面 積率(%)	塗膜の フクレ	塗膜の 密着性
		(2)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)
裸材 (黒皮付)	2cm	20	—	—	94	—	—
	4cm	21	—	—	9	—	—
	7cm	1	—	—	2	—	—
亜鉛メッキ (クロメート処理)	2cm	4	—	—	0.8	—	—
	4cm	9	—	—	0	—	—
	7cm	1	—	—	0	—	—
エポキシ樹脂 A(100μm)	2cm	12.4	有(5ヶ所)	×	1.6	無	○
	4cm	1.4	有(3ヶ所)	△~×	0	#	○
	7cm	0	無	○~△	0	#	○
エポキシ樹脂 A(200μm)	2cm	6.4	#	×	0.2	#	○~△
	4cm	0.4	#	△~×	0.2	#	○~△
	7cm	0.2	#	○~△	0	#	○~△
エポキシ樹脂 A(300μm)	2cm	3.0	有(4ヶ所)	×	0.2	#	○~△
	4cm	2.8	無	○~△	0	#	○~△
	7cm	0	#	○~△	0	#	○~△
エポキシ樹脂 B(200μm)	2cm	3.0	有(2ヶ所)	×	0.2	#	△
	4cm	2.0	有(3ヶ所)	△~×	0.6	#	△
	7cm	2.0	無	△~×	0	#	△

(注) (1)エポキシ樹脂は人工疵のある領域(埋込み長の半分)のみ対象

(2)フクレの大きさは0.6~3mm

(3)○:良 △:やや低下 ×:無

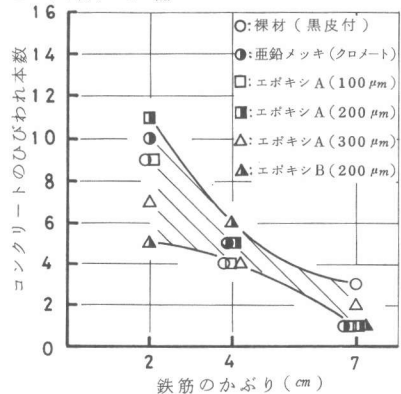


図-3 コンクリートのひびわれ本数とかぶりとの関係(促進暴露試験)

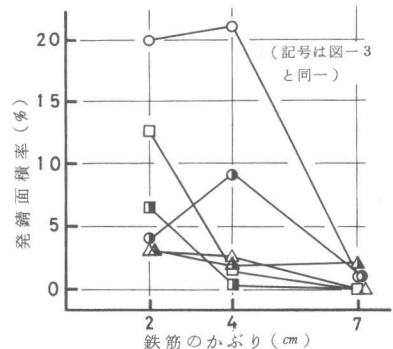


図-4 発錆面積率(促進暴露試験)

こにひびわれより浸入した海水が達して発錆（黒錆）し、密着性が低下したものと推定される。すなわち、コンクリートのひびわれが少なく海水が鉄筋に達しにくい場合（かぶり 7 cm）はエポキシ樹脂塗装鉄筋の収縮応力解放と繰返し熱応力が密着力低下の主原因であろうし、ひびわれが多く海水が容易に鉄筋に達するかぶり 2 cm の場合には、これに海水発錆が加わってさらに密着力低下を促進させたものと推定される。

なお、エポキシ樹脂 B の密着性はエポキシ樹脂 A のそれに比して低下しているが、これは樹脂そのものと塗装法の差によるものと考えられる。

### 3.2. 自然暴露試験（期間：1 ケ年）

試験結果を表-7、図-6 に示す。表より、裸材のかぶり 2 cm の発錆面積率が促進暴露のそれより大きいことを除外すると、発錆面積率は促進暴露試験の数分の 1 以下と小さく、樹脂のフクレもなく、しかも密着性の低下もわずかであることが判る。また、エポキシ樹脂塗装鉄筋の人工疵面積に対する発錆面積の比率も小さい（図-6）。

これらより、干満帯における 1 年間の暴露試験ではエポキシ樹脂塗装鉄筋の耐食性を十分評価するまでに至っていないので、今後の長期試験（3 年、6 年）の結果に待つ必要がある。

### 4. 結 言

かぶり 2 cm、4 cm、7 cm のコンクリートで被覆したエポキシ樹脂塗装鉄筋に  $3000 \text{ Kg/cm}^2$  の引張応力を導入してコンクリートにひびわれを生ぜしめた後、応力を  $2000 \text{ Kg/cm}^2$  に保持して促進暴露と自然暴露試験を行なった結果、以下の諸点が判明した。

- (1) エポキシ樹脂塗装鉄筋は優れた耐食性を示し、 $100 \mu\text{m}$  の塗膜でもひびわれからの海水浸透に対して鉄筋を保護し、塗膜自体に異常は認められない。
- (2) 鉄筋が発錆するのは塗膜に疵がつくことによって素地が露出した場合であるが、かぶり 4 cm で素地露出面積が数パーセントでも発錆面積率が 3% 以下（促進暴露）、1% 以下（自然暴露）と小さい。なお、現実には連続疵よりも分散疵が多いので、発錆面積率はさらに小さくなると考えられる。
- (3) 鉄筋応力を一定とした場合には鉄筋のかぶりが厚くなるにつれて発錆面積は小さくなる。

現在、両試験を引き続き実施中であるので、促進暴露と自然暴露との関係については別途報告する。

なお、本研究を実施するに当たり、早稲田大学土木工学科関博助教より種々御指導を賜ったことを付記し、謝意を表す。

### ○参考文献

- (1) Kilareski, W.P., "Epoxy Coatings for Corrosion Protection of Reinforcement Steel" Chloride Corrosion of Steel in Concrete, ASTM STP 629, 1977, PP 82-88
- (2) 小林一輔, 伊藤利治, 田中恭一, "エポキシ樹脂による鉄筋の防食被覆について," セメント技術年報 31, 昭和 52 年 PP 496~499
- (3) 片脇清, 守屋進, 深田幾夫, "エポキシ樹脂塗装鉄筋の利用に関する基礎的研究。" 第 1 回コンクリート工学年次講演会講演論文集 1979, PP 49~52

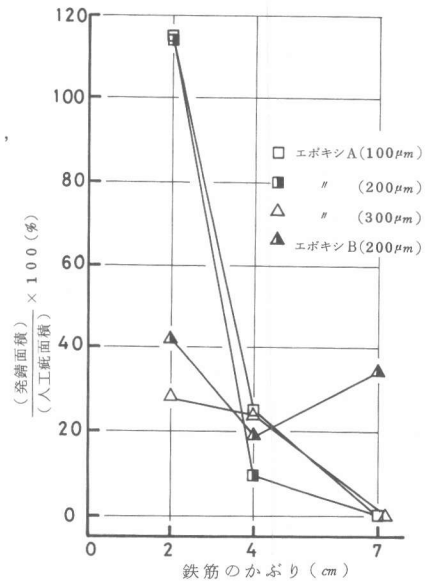


図-5 人工疵面積に対する発錆面積の割合（促進暴露試験）

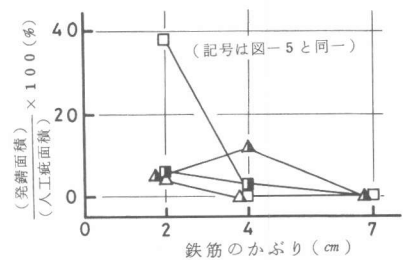


図-6 人工疵面積に対する発錆面積の割合（自然暴露試験）