

UDC 666.982.24
669.14.018.291.3
669.146.95 : 667.633.263.3

鉄筋のエポキシ樹脂被覆に関する実験的研究

Experimental Study on the Epoxy Coatings for Concrete Reinforcing Bars

小林 一 輔*・伊 藤 利 治*・田 中 恭 一*

Kazusuke KOBAYASHI; Toshiji ITO and Kyoichi TANAKA

1. は し が き

最近のコンクリートは、海砂等の使用によりその中に塩化物を含むものが多くなっている。また、今後は各種の鉄筋コンクリート構造物が海洋環境下に構築されるケースが増大することが予想される。ただし、これらの場合に問題となるのは、コンクリート中における鉄筋の腐食である。すなわち、前者の場合にはコンクリート部分の中性化の如何に拘わらず孔食を生ずる恐れがあり、後者の場合にはコンクリートのひびわれによって露出した個所が著しく腐食するのみならず、これが進展して構造物の崩壊に至る場合もある。

以上の対策の一つとしては、防錆剤の適用があり、すでに一部では適用されているが、コンクリートにひびわれを生じた場合には鉄筋を適切な材料によって被覆する以外に方法がない。鉄筋の防食被覆としては従来から亜鉛メッキが検討されているが、亜鉛とコンクリート中のアルカリ性物質が反応して水素ガスを発生すること、亜鉛が塩化物によって腐食するなどの問題があって未だ実用化されていない。

本研究は上記のような腐食環境下における鉄筋コンクリート構造物中の鉄筋の防食を図る手段として、非金属系の被覆すなわちエポキシ樹脂塗膜の被覆による方法を取り上げ、主としてエポキシ樹脂混合物の種類と塗膜厚が被覆のしゃへい性能、加工性、コンクリートとの付着性に及ぼす影響を検討したものである。

2. 実験の概要

2.1 エポキシ樹脂塗料の組成

使用したエポキシ樹脂塗料はいずれもビスフェノール A/エピクロルヒドリン型のエポキシ樹脂と酸無水物系硬化剤を基材とし、それに各々防錆、曲げ加工性、鋼材に対する接着性などの改善を図るための副資材を添加した粉体塗料で表-1に示す3種を使用した。3種の塗料のうち、Aは防錆顔料を含有し、Bは可撓性付与剤を配合している点に特徴があるが、Cの組成のものに関して

は前処理としてプライマー処理を行なった点が前2者と異なる。なお、粉体塗料による塗装は静電スプレー法によって行なった。

表-1 エポキシ樹脂塗料の組成

成 分	エポキシ樹脂塗料 (重量比)		
	A	B	C
エポキシ樹脂 ¹⁾	641	797	668
硬 化 剤 ²⁾	95	104	80
可撓性付与剤 ³⁾	—	42	—
流れ調整剤 ⁴⁾	10	4	17
着 色 顔 料 ⁵⁾	159	53	234
防 錆 顔 料 ⁶⁾	95	—	—

- 1) エポキシ当量 800 - 1000
2) 酸無水物アダクト
3) 環状脂肪族エポキシ樹脂
4) アクリル系ポリエステル樹脂
5) 酸化チタン等 6) 亜鉛系

2.2 鉄筋とその処理方法

鉄筋は公称直径16mmの異形鉄筋 (SD-30, 横フシ型) を使用した。粉体塗装を行なう前の下地調整はショットブラスティングによって行なった。

2.3 試験項目

3種類のエポキシ樹脂塗料A, B, Cの各々について目標塗膜厚を80 μ m, 200 μ m および350 μ m とした9種類の被覆鉄筋について以下のような試験を行なった。すなわち、塗膜の性能試験として電気抵抗の測定、自然電極電位の測定、耐電圧試験、曲げ試験、衝撃試験およびコンクリート用棒鋼としての付着強度試験を実施した。なお、上記の塗膜厚のうち200 μ m および350 μ m を目標としたものでは、静電スプレーを手作業で行なったため、この値を大きく上回る膜厚となったものがある。

3. 塩化物溶液中における被覆鉄筋のしゃへい性能に関する検討

3.1 電気抵抗と自然電極電位の測定

被覆鉄筋の腐食溶液に対する長期安定性を調べるために、電気抵抗の測定ならびに金属の腐食傾向を判定するために用いられる自然電極電位の測定を長期にわたって

* 東京大学生産技術研究所 第5部

研究速報

行なった。

電気抵抗は対極として白金電極を用いベクトルインピーダンスメータ（横河ヒューレットパッカード社）によって周波数 1 KHz で測定した。

自然電極電位は照合電極として飽和カロメル電極を用いデジタル pH メータ（東亜電波 HM-20B）によって測定した。

以上の測定において腐食溶液としては海水の塩分濃度を目安として 3.5% NaCl 水溶液を使用した。

電気抵抗の測定結果のうち代表的なものを図-1に示す。また、塗料 B で塗膜厚を 350 μm とした被覆鉄筋のうち一つが他と異なった挙動を示したのでそれについても示した。

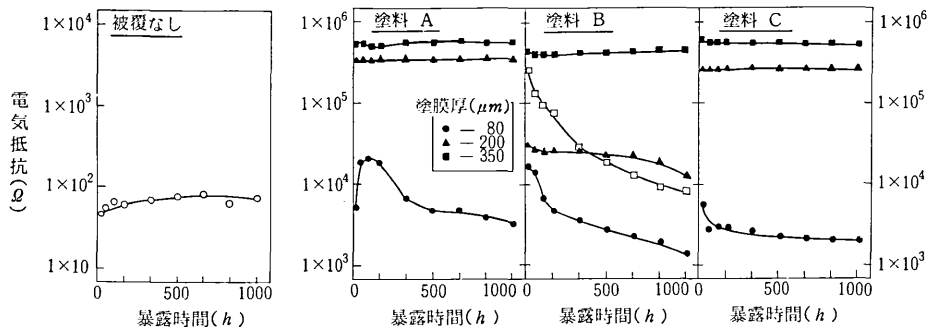


図-1 電気抵抗の経時変化

図-1より塗料 A, 塗料 C の場合で目標塗膜厚を 200 μm としたもので、および各塗料を通じて目標塗膜厚を 350 μm としたものの電気抵抗値は 1000 時間後でもそれぞれ 200 ~ 400 K Ω および 400 ~ 600 K Ω の範囲にあり、また電位も測定できなかった。さらに 4400 時間後においても全く発錆を生じなかったことから、これらは十分な電気絶縁性を有すると判定される。なお、塗料 B で塗膜厚が 350 μm の場合の試料のうち一つだけ抵抗値が低下したものがあつた。これは塗膜に 1 カ所だけ存在したピンホールのためである。

一方、各塗料を通じて目標塗膜厚を 80 μm としたものはいずれも浸漬直後からその抵抗値が 10 K Ω 程度と低く、しかも 100 時間以内にこの値が減少し始めて 1000 時間後には数 K Ω となっている。さらに、2000 時間後にはその値は 1 K Ω 以下にまで減少した。このような抵抗値の減少は鉄筋表面まで腐食溶液が浸透し被覆鉄筋の劣化が始まったことを示している。なお、塗料 B を用いて目標塗膜厚を 200 μm とした場合にも時間とともに抵抗値が減少している。塗料 B においては目標塗膜厚を 350 μm とした場合にも、その 1 試料に抵抗値の減少が認められた事実を考慮すれば、しゃへい性能に関してその組成に問題があると思われる。

自然電極電位に関しては、被覆していない鉄筋の 1000 時間後の電位が -672 mV (S.C.E 規準) であったが、錆が発生している被覆鉄筋の電位はすべて -672 mV 以上であった。

このことから被覆鉄筋の防食性の目安を示す試験方法として、自然電極電位の測定は信頼できる目安を与えるようには思われず、自然電極電位よりも電気抵抗値の方が信頼性があることを示しているものと思われる。

3.2 耐電圧試験

コンクリート中の鉄筋には陰極防食装置や迷走電流等によって外部から電気化学的応力が作用する。これらの影響を被覆鉄筋に電圧を印加することによって調べた。

ここでは電解液として 7% NaCl 水溶液を用い、定電圧定電流直流電源装置（高砂製作所 GPO-50-2）によって 2 Volt の電圧を印加してアノードにおいて鉄筋の発錆をカソードにおいて水素ガスの発生を定期的に観察した。なお、アノードとカソードはいずれも同じ物質で被覆した鉄筋を用い先端部はエポキシ樹脂を塗布した。

塗料 A と C においては目標塗膜厚を 80 μm とした場合に水素ガスの発生と鉄筋の発錆が短時間で観察されたが、200 μm と 350 μm の場合には電圧を 24 時間印加した後も上記の現象が認められなかった。

塗料 B においては目標塗膜厚を 80 μm と 200 μm とした場合に上記の現象が観察されたが、350 μm の場合には認められなかった。

また、塗膜にピンホールのある部分は電圧印加後直ちに水素ガスが発生して腐食が始まり、塗膜厚が局所的に薄い部分でもやや遅れて水素ガスの発生と鉄筋の発錆を生じた。

このことは耐電圧試験が被覆鉄筋に対する電気化学的応力の影響のみならず、ピンホールの有無を調べる試験方法として適用できることを示している。

4. 力学的特性に関する検討

4.1 曲げ加工性

鉄筋の公称直径の5倍, 8倍, 10倍および11倍に相当する直径を有するディスクを使用しそれぞれ巻付け法によって, まず曲げ角度90°まで曲げた(曲げる方向は鉄筋断面のリブを結ぶ線を軸とする方向とした)。わん曲部の外側(または内側)に塗膜のひびわれその他の欠点の有無を確かめ, 異常がない場合には更に同一試料を120°, 180°まで曲げた。

表-2は試験結果を示したもので全般的な傾向として, 曲げた場合にひびわれを生じさせないためには塗膜厚が厚くなるほど同一条件に対してわん曲部における内側曲げ直径を大きくする必要がある。すなわち, 塗料AおよびBについてみると, 塗膜厚が60~90μmの場合にはわん曲部の内側曲げ直径を8D以上とすればよく, 130~240μmの場合には10D以上とすればひびわれを生じないが, 300μm以上では本試験における最大の曲げ直径である11Dとした場合にも90°曲げた段階で数多くのひびわれを生じた。塗料Cを被覆したものは他の塗料を用いたものに比べて曲げ変形に対する追従性が劣り, 塗膜厚が80μmの場合のみ内側曲げ直径を10D以上としたときにひびわれを生じなかった。

表-2 被覆鉄筋の曲げ試験結果

塗料	塗膜厚(μm)		曲げ直径			
	目標値	実測値	5D	8D	10D	11D
A	80	60~93	×	○	○	○
	200	140~474	×	×	△	○
	350	480~505	×	×	×	×
B	80	58~108	×	○	○	○
	200	127~238	×	×	○	○
	350	269~364	×	×	×	×
C	80	55~62	×	×	○	○
	200	267~362	×	×	×	×
	350	442~640	×	×	×	×

○ 曲げ角度180°までクラックなし
 △ 曲げ角度120°までクラックなし
 × 曲げ角度90°においてクラックあり

4.2 耐衝撃性

鉄筋はその運搬または作業の間に局部的に衝撃を受けることがあるので, 塗膜の衝撃に対する抵抗性を検討した。

衝撃試験はASTM G14-69Tに規定されているパイプのコーティングの衝撃抵抗性の試験方法に準じて行なった。塗膜の衝撃に対する抵抗性は衝撃エネルギーの大きさをしだいに増加させ, 初めて塗膜の破壊を生ずるときの衝撃エネルギー値をもって表わした。

図-2は実験結果を示したものであるが, これらの結果から明らかなことは, 塗料AおよびBを用いて100μm

以下の塗膜厚とした場合の衝撃抵抗値が著しく大きく, いずれも156 in·lb以上の値となった。しかし同じ塗膜厚の場合には塗料Cを用いると67 in·lbにとどまった。塗料Cはプライマー処理を行なっているが, その処理方法が適切でなく, 下地との接着性が不十分であったことによるものと考えられる。

なお, 塗膜厚が150μm以上の場合も塗料の種類の違いを問わずその衝撃抵抗値は65 in·lbにとどまった。

図-2より明らかなように塗膜の耐衝撃性は塗膜厚を100μm以下とすることにより急激に増大する。

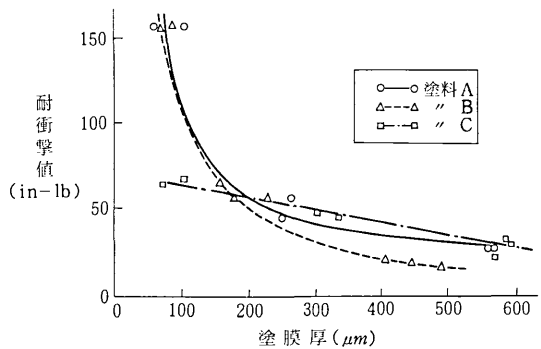


図-2 塗膜厚と耐衝撃値との関係

4.3 付着強度

被覆鉄筋のコンクリートに対する付着性能を引抜試験方法によって検討したものである。供試体は1辺が15cmの立方体を用い, コンクリート断面の図心と鉄筋断面の図心を一致させるようにした。鉄筋の埋込長は供試体の荷重端から5cmの間のコンクリートの付着を絶ち10cmとした。コンクリート部分(σ_c=320 kg/cm²)はらせん筋による補強を行なった。なお, コンクリートの打込時における鉄筋の方向は鉛直とした。

引抜試験は鉄筋の自由端に1/1000mmのダイヤルゲージ1個をとりつけて, コンクリートに対する鉄筋の滑りを測定し, 荷重と滑りとの関係を求めた(図-3)。また付着応力度は次式によって計算した。

$$Z = P / UL \quad \left\{ \begin{array}{l} P: \text{各段階の荷重} \\ U: \text{鉄筋の周長} \\ L: \text{の埋込長} \end{array} \right.$$

図-4は図-3を整理して得られたものである。この図より明らかなように, 被覆鉄筋の付着強度は塗膜厚の増大とともに低下する傾向が認められる。塗料の種類の影響に関しては塗料Aを用いたものが最も付着強度の低下が少なく, 以下塗料B, 塗料Cの順序となる。塗料Aを用いた場合で塗膜厚を200μmとしたときの付着強度は被覆のない鉄筋の値の約80%となる。しかし, この比率は鉄筋の直径によって異なることが予想され, 直径が

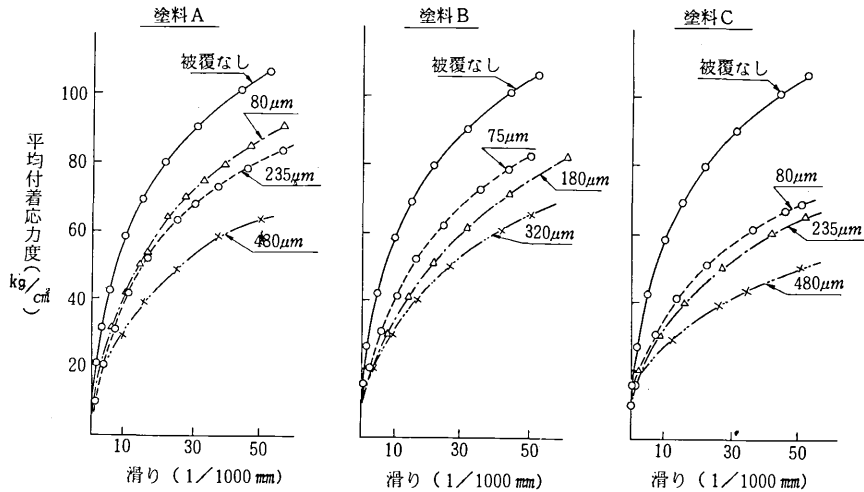


図-3 平均付着応力度-滑り曲線と塗膜厚との関係

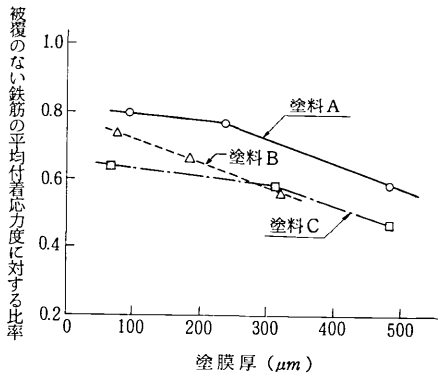


図-4 滑り量0.03mmにおける平均付着応力度と塗膜厚との関係

大きくなるとこの比率も大きくなると思われる。

5. む す び

以上の結果をとりまとめると表-3のようになる。この表より明らかなように、一般に塗膜厚が厚くなるほどしゃへい性能は改善されるが力学的特性は逆に低下する。このように塗膜厚に対するしゃへい性能と力学的特性の関係は相反するが、塗装法を改善し均一な塗膜が得られれば、塗膜厚をかなり薄くしても十分なしゃへい性能を有することができると思われる。また塗膜厚が薄くなればなるほど、力学的特性は改善されることから両方の特性を満足するための塗膜厚の差は小さくなると考えられる。

表-3 被覆鉄筋の性能の総合評価表

項目	塗料の種類 塗膜厚 (μm)	A			B			C		
		80	200	350	80	200	350	80	200	350
しゃへい性能	絶縁性	×	○	○	×	×	△	×	○	○
	発錆傾向	×	○	○	×	×	△	×	○	○
	耐電圧性	×	○	○	×	×	○	×	○	○
力学的特性	曲げ加工性	○	△	×	○	△	×	△	×	×
	耐衝撃性	○	△	×	○	△	×	△	×	×
	付着強度	○	○	×	○	×	×	×	×	×

- 満足な結果が得られたもの
- △ もう少し塗料の組成、スプレー法等を改善すれば満足な結果が得られると思われるもの
- × 好ましくない結果となったもの

本研究の範囲内でしゃへい性能と力学的特性の両方を満足する条件は、塗料Aを用いて塗膜厚を200μmとした場合である。この場合も曲げ加工性と耐衝撃性に関しては改善の余地があるが、上に述べたように塗装方法を検討することによって塗膜厚をより薄く均一にすれば、これらの点は容易に解決し得ると思われる。今回の実験的検討により、エポキシ被覆鉄筋の実用化への見通しが得られたものと考えられる。

最後に、本研究の実施にあたり、粉体塗料の調整に関してご協力をいただいた日本チバガイギー(株)ならびに衝撃試験に関して多大のご助力をいただいた日本鋼管(株)技術研究所の木村忠雄課長に深謝する。

(1977年8月8日受理)