

## [ 8 ] エポキシ樹脂被覆鉄筋を使用したRC梁の曲げ性状

正会員 ○ 武 若 耕 司 ( 東京大学 大学院 )

正会員 伊 藤 利 治 ( 東京大学 生産技研 )

正会員 小 林 一 輔 ( 東京大学 生産技研 )

### 1. まえがき

海洋環境下における鉄筋コンクリート構造物の耐久性は、海水中の塩分による鉄筋の腐食によって支配される。そのため、このような環境では積極的に防食対策を講じる必要があり、エポキシ樹脂被覆鉄筋はこの防食策の中でも最も有効な方法の一つと考えられる。エポキシ樹脂被覆鉄筋の実用化にあたっては、これまで海外ではFHW Aにおいてかなり精力的に実験検討が行なわれ、わが国においても最近その特性についての調査研究が進められつつある。しかし、これらの研究は被覆鉄筋自体の基礎的特性に関する調査が主体であり、これを使用したRC構造物の構造特性についての検討は未だ十分に行なわれていない。

そこで本報告では、これまでの基礎的実験結果に基づき、現在実用性があると考えられる4種類のエポキシ樹脂被覆を施した鉄筋についてRC部材への利用可能性を検討する目的で、RC梁の静的曲げ載荷試験および曲げ疲労試験を行なった。またこれらの実験に先がけ、使用したエポキシ樹脂被覆鉄筋の付着特性を把握するため、鉄筋の引き抜き試験も同時に行なった。なお、一連の実験においては参考のため溶融亜鉛メッキ鉄筋についても検討した。

### 2. 使用材料

1)コンクリート：細骨材は富士川産の川砂、粗骨材は最大寸法20mmの秩父両神産の砕石を用い、セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。コンクリートの配合はスランプの目標値を $10 \pm 1\text{cm}$ とし、圧縮強度の目標値が、付着試験の場合 $\sigma_{28} = 300\text{Kg/cm}^2$ 、静的載荷試験の場合 $\sigma_{28} = 350\text{Kg/cm}^2$ 、疲労試験の場合 $\sigma_{91} = 450\text{Kg/cm}^2$ となる様にw/cを定めた。コンクリートの配合を表-1に示す。

表-1 コンクリートの配合

種 別	w/c (%)	s/a (%)	単位量 (Kg/m <sup>3</sup> )			
			W	C	S	G
静的試験	57	44	190	333	815	1062
疲労試験	52	43	190	365	785	1065
付着強度試験	62	45	190	307	844	1057

表-2 エポキシ樹脂塗料の組成と塗膜厚

成 分	A 種	B 種
エポキシ樹脂 <sup>1)</sup>	62.4%	64.7%
硬化剤A <sup>2)</sup>	-	9.4
硬化剤B <sup>3)</sup>	11.7	-
着色顔料A <sup>4)</sup>	-	24.9
着色顔料B <sup>5)</sup>	15.6	-
防錆顔料 <sup>6)</sup>	9.3	-
添 加 剤 <sup>7)</sup>	1.0	1.0

目標塗膜厚	実測値の平均(μm)	
100 μm	112	117
200 μm	216	229
300 μm	315	353

1)エポキシ当量800~1000, 2)酸無水物アダクト

3)酸無水物, 4)酸化鉄系, 5)酸化チタン系

6)亜鉛系, 7)アクリル酸エステルオリゴマー

2)鉄筋とその処理方法：鉄筋は公称直径16mmの異形鉄筋(SD-35,横フシ型)を使用した。また、スターラップにはφ6mmの普通丸鋼(SR-24)を用いた。これらの鉄筋は被覆を施すにあたり、ショットブラスタングによる下地調整を行なった。

3)エポキシ樹脂被覆：実験に用いたエポキシ樹脂の種類および塗膜厚の水準は、曲げ加工性、防食効果等に関する予備的検討を考慮して選定した。塗料の種類は、樹脂に防食効果を持たせたもの(以下A種と呼ぶ)および可撓性を与えたもの(以下B種と呼ぶ)の2種類で、これらはいずれも静電塗装用の粉体塗料である。塗料の基材はともにビスフェノール/エピクロロヒドリン型のエポキシ樹脂と酸無水物系硬化剤である。樹脂の組成を表-2に示す。また塗膜厚は、目標塗膜厚100μmと200μmの2種類について検討を行なった。なお、付着試験では参考のため300μmの場合についても実験を行なった。表-2に、塗膜厚の実測結果を示す。

4)亜鉛メッキ：亜鉛メッキは、これまでの内外の実験結果に基づき、RC

構造用として適していると思われるものを選んだ。  
 メッキは溶融法により行ない、目標塗膜厚は 100  $\mu\text{m}$  とした。

### 3. 実験方法

1) 附着強度試験：被覆鉄筋のコンクリートに対する附着性能を引き抜き試験により検討した。試験方法は J I S 案に準じて行なった。供試体は一辺が 15 cm の立方体で、附着応力度の均等化を図るため、荷重端から 5 cm の間のコンクリートとの附着を絶ち、鉄筋の埋め込み長さを 10 cm とした。またコンクリート部にはらせん筋による補強を行なった。鉄筋は引張応力度が毎分 500  $\text{Kg}/\text{cm}^2$  以下となる載荷速度で引き抜き、すべり量は 1/1000 mm ダイヤルゲージを用い自由端で測定した。

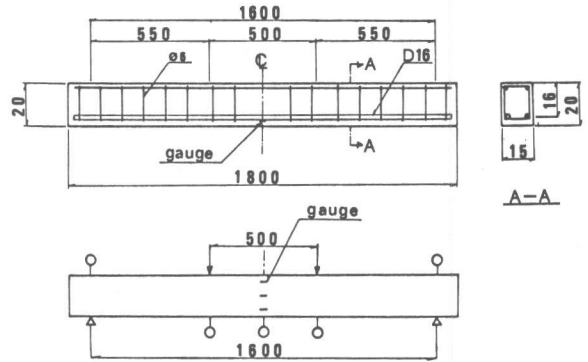


図 - 1 梁供試体の形状寸法

2) RC 梁の静的載荷試験：実験に用いた供試体は図 - 1 に示す様に 15×20×180 cm の矩形梁で、スパンを 160 cm として 2 点載荷を行なった。実験は材令 28 日より行ない、測定項目は、i) スパン中央における鉄筋とコンクリートのひずみ量、ii) スパン中央点と載荷点におけるたわみ量、iii) 等曲げモーメント区間中のひびわれ幅等である。なお、ひびわれ幅は、供試体の引張縁に 5 ~ 10 cm 間隔に  $\pi$  ゲージを取付けて測定した。

3) RC 梁の疲労試験：供試体形状および測定項目は静的載荷試験の場合と同様である。ただしひびわれ幅の測定については、 $\pi$  ゲージによる測定と合わせて、コンクリート側面の鉄筋位置および引張縁から 1 cm の位置のひびわれ幅をコンタクトゲージを用いて測定した。実験は材令 5 2 週より行ない、くり返し荷重は上限荷重を鉄筋応力度が計算上 2000  $\text{Kg}/\text{cm}^2$  となる値 (3.9 t) とし、下限荷重を一定 (1.6 t) とした。くり返し回数は最大 200 万回までとし、5 万、50 万、100 万および 200 万回に達した時点で試験機を止め上限荷重まで静的載荷し測定を行なった。なお載荷速度は毎分 400 回とした。

### 4. 実験結果および考察

1) 附着強度試験結果：図 - 2 は、各種の鉄筋について 3 個の供試体の自由端のすべり量の平均値と附着応力度との関係について示したものである。これより、樹脂被覆を施すことにより附着強度は低下する傾向にあり、例えば、すべり量が鉄筋径の 0.002 倍となる値における平均附着応力度の無処理鉄筋に対する比率を示した図 - 3 を見ると、附着強度は無処理鉄筋の約 80 % 前後に低下した。この原因としては、i) 樹脂被覆により鉄筋表面が平滑になるとともに、フシ形状も丸味を帯びて凸凹が小さくなり附着抵抗が低下すること、ii) コンクリートと鉄筋との間に弾性係数の小さな樹脂が存在するため鉄筋に見かけ上のずれ変形が起こること、などが考えられる。塗膜厚の影響に関しては、塗料 A 種を使用した場合に顕著に現われ、塗膜厚が増加するに従って附着強度は低下する傾向にあるが

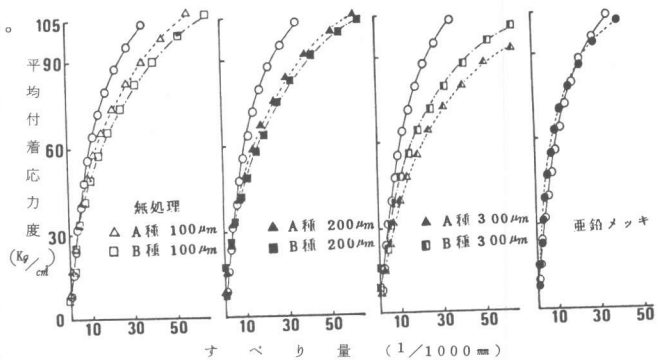


図 - 2 平均附着応力度とすべり量との関係

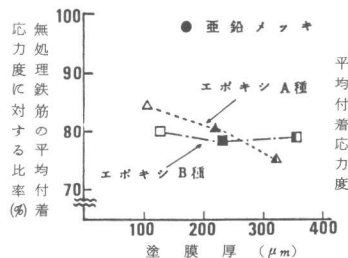


図 - 3 すべり量 0.032 mm における平均附着応力度と塗膜厚との関係

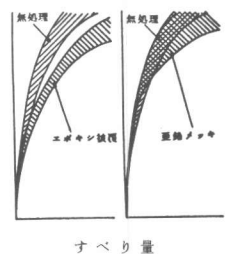


図 - 4 平均附着応力度—すべり量曲線におけるばらつき

塗料 B 種の場合にはこの傾向は明確には認められなかった。このような塗料による影響の相違は、樹脂自体の性能の相違によることも考えられるが、その他、下地処理や塗装の均一性等の影響もあるものと考えられる。また、亜鉛メッキの付着強度は無処理の場合と同程度であった。しかし図-4に示す様に無処理および樹脂被覆鉄筋と比較し、付着応力度とすべり量との関係にはばらつきが大きい。これは亜鉛がアルカリと反応することに原因があるためと思われる。なお、最大付着応力度は、すべての供試体を通じてほとんど差は認められず ( $\tau_{max} = 200 \sim 220 \text{ Kg/cm}^2$ ) 鉄筋降伏後はコンクリートに縦ひびわれが生じて破壊した。

2) 静的載荷試験結果：図-5は、等曲げモーメント区間に発生したコンクリート引張縁のひびわれ幅の最大値と荷重との関係を示したものである。初期ひびわれ荷重は0.9 t前後となり、これは被覆の有無および塗膜厚の変化にかかわらず同様の値となった。最大ひびわれ幅は、樹脂被覆鉄筋を使用することによって多少大きくなる傾向にあり、最大ひびわれ間隔も同時に増加する傾向にあることから、樹脂被覆による付着性状の低下が原因であると思われる。しかし最大ひびわれ幅の増加は最大でも10%程度であり、エポキシ樹脂被覆により鉄筋の防食が十分に行なわれていることを考え合せると、この程度のひびわれ幅の増加はRC部材の耐久性に殆んど影響を与えないと思われる。なお、最大ひびわれ幅にも樹脂の種類および塗膜厚の影響は明確には表われなかった。また図-6は、スパン中央のたわみ量と荷重との関係について示したものである。たわみ量もひびわれ幅と同様に、樹脂被覆鉄筋を使用した梁では、無処理鉄筋を使用した場合よりも増加する傾向にあるが、その増加率は8%程度であり無処理鉄筋梁のたわみ量のばらつきを考慮すると実用上問題になる程の差ではないと思われる。破壊はどの梁の場合においても等モーメント区間の鉄筋が降伏し、その上部のコンクリートが圧壊を起こす曲げ破壊であり、破壊強度は樹脂被覆の有無および塗膜厚の差にかかわらず同様の値となった。なお、この実験における亜鉛メッキ鉄筋使用梁の場合には、ひびわれ幅は無処理鉄筋の梁の15~20%増加したが、たわみ量は無処理の場合と同程度となった。

3) 疲労試験結果：今回の疲労試験では、すべての梁が200万回のくり返し載荷においても疲労破壊を生じなかったため、疲労試験終了後に静的載荷により梁の破壊試験を行なった。

図-7は、等モーメント区間の鉄筋位置における最大ひびわれ幅と荷重との関係を、処女載荷時および破壊試験時のものについて示したものである。この図より、処女載荷時における樹脂被覆鉄筋使用梁の最大ひびわれ幅は無処理鉄筋使用の場合に比べて増加する傾向にあるが、上限荷重から破壊に至る荷重域では、樹脂

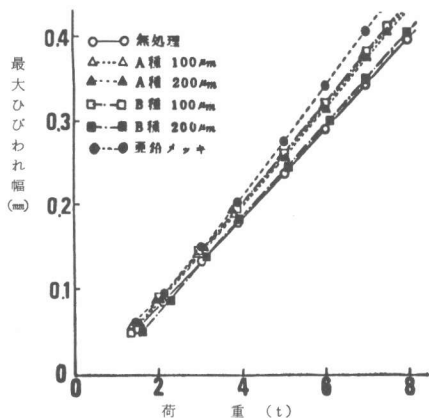


図-5 最大ひびわれ幅と荷重との関係  
(静的載荷試験：コンクリート引張端)

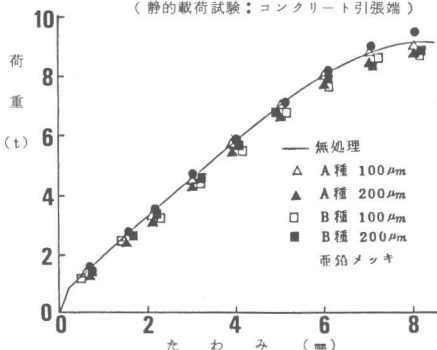


図-6 梁中央部のたわみと荷重との関係  
(静的載荷試験)

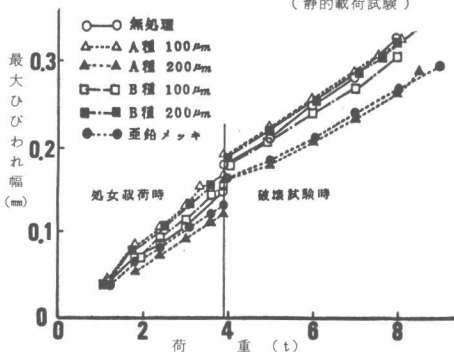


図-7 最大ひびわれ幅と荷重との関係  
(疲労試験：鉄筋位置)

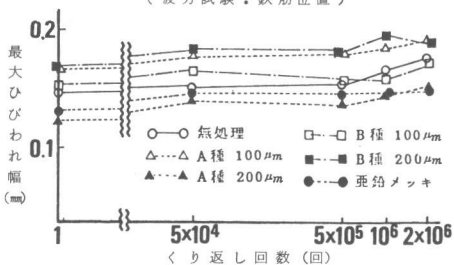


図-8 上限荷重時の最大ひびわれ幅とくり返し回数との関係

の有無による最大ひびわれ幅の差はほとんど認められなくなった。また、疲労試験時におけるひびわれ幅の変化を調べるため、図-8にくり返し回数の増加に伴う上限荷重時の最大ひびわれ幅の変化を、図-9にこの時の最大ひびわれ幅の増加率を示した。これらの図より、いずれの場合も、くり返し回数の増加とともに最大ひびわれ幅も増加するが、樹脂被覆鉄筋を使用した場合にはすべて、無処理鉄筋を使用した場合よりもその増加率は小さく、くり返し载荷の影響を受けにくいことがわかる。図-10、図-11は、たわみ量と荷重との関係およびたわみ量に及ぼすくり返し载荷の影響を示したものである。たわみ量に関してはひびわれ幅ほど明確な傾向は把握できなかったが、少なくとも樹脂被覆が疲労試験時のたわみ量の変化に悪影響を及ぼすことはないようである。さらに、200万回くり返し载荷直後のひびわれ発生状況は図-12より明らかなように、樹脂の有無および塗膜厚の如何にかかわらず大きな差は認められない。亜鉛メッキ鉄筋使用梁の曲げ疲労特性については、最大ひびわれ幅の値が前述の静的载荷試験の結果と異なり、処女载荷時から破壊試験時まで無処理鉄筋使用の場合よりも小さくなった。この原因については今後の検討を待つ必要がある。

なお、静的载荷試験および疲労試験を終了した梁を、かぶりコンクリートを除去し被覆の状態を調べたが、エポキシ樹脂被覆はどの種類の場合にも梁が破壊した後も健全な状態であり、被覆に割れや剝離等の現象は認められなかった。

## 6. まとめ

実用化の可能性があると考えられる4種類のエポキシ樹脂被覆鉄筋を用いたRC梁の曲げ性状について検討を行なった結果、これらの曲げ性状は無処理鉄筋を使用した場合と比較してほとんど差がなく、エポキシ樹脂被覆鉄筋はコンクリート構造部材に十分利用できることが認められた。なお、この一連の実験と平行して、現在、海洋飛沫帯においてひびわれを導入したRC梁の曝露実験を行なっており、放置後1ケ年を経過した現在までの所では、エポキシ樹脂被覆を行なったものは良好な防食効果を示している。

なお、本研究を実施するに当たり、種々御協力いただいた大成建設株式会社技術研究所の方々へ厚く御礼申し上げます。また、本研究は文部省科学研究費補助金（一般研究C）による研究成果の一部であることを付記する。

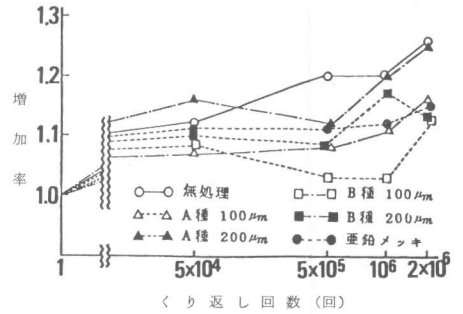


図-9 疲労試験時のひびわれ幅の増加率

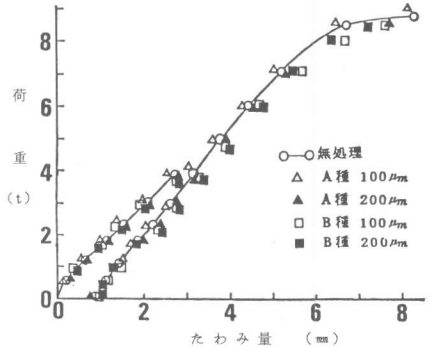


図-10 たわみ量と荷重との関係(疲労試験)

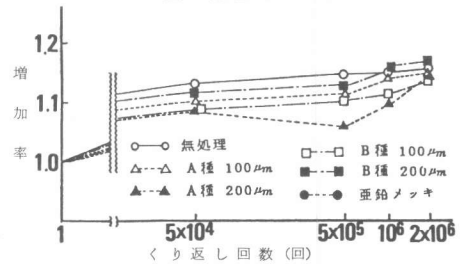


図-11 疲労試験時のたわみ量の増加率

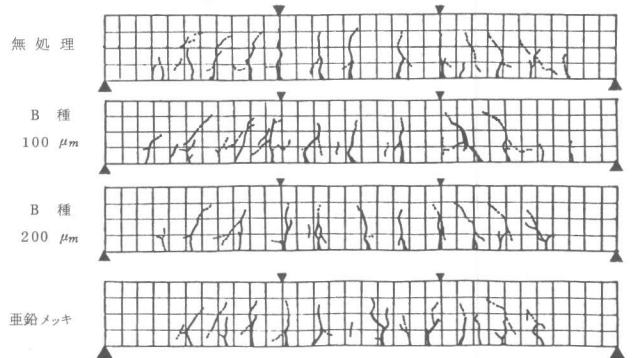


図-12 ひびわれ状況(200万回くり返し载荷直後)

- (参考文献) 1)Clifton, Beeghly, Mathey "Nonmetallic Coatings for Concrete Reinforcing Bars" FHWA-RD-74-18, February 1974  
 2)片脇他、「エポキシ樹脂塗装鉄筋の利用に関する基礎的研究」昭和54年度日本コンクリート工学協会第1回年次薄演論文集  
 3)小林・伊藤他、「鉄筋のエポキシ樹脂被覆に関する実験的研究」生産研究 29巻, 10号