

## [1092] エポキシ樹脂塗装鉄筋の塗膜傷部に発生するさびに関する研究

正会員 三浦 尚 (東北大学 工学部)

正会員○板橋 洋房 (東北大学 工学部)

新井 哲三 (住友金属工業 中央技術研究所)

## 1. まえがき

近年、我が国の鉄筋コンクリート構造物においても、海岸部付近では、海水中の塩化物が、また、積雪の多い地方では、冬期の凍結防止剤に含まれる塩化物がコンクリート中に浸透して構造物中の鉄筋が腐食する被害が発生している。そして、現在のところこのような被害を防ぐための最も有効的な防食方法の一つは、普通の鉄筋の代わりにエポキシ樹脂塗装鉄筋を使用することと考えられている。ところで、このエポキシ樹脂塗装鉄筋は、製造時の樹脂塗装工程や運搬、曲げ加工、組み立て等の鉄筋取り扱い中において、樹脂塗膜に損傷が発生することがある。樹脂塗膜に損傷がなければ、鉄筋に腐食が発生しないということはこれまで行なわれてきた実験・研究等でわかっているが、樹脂塗膜に損傷がある場合、それらの損傷がコンクリート中でどの程度有害となるかということが未だ明らかにされていないのが現状であり、早急に調査しなければならない課題である。本研究では、エポキシ樹脂塗装鉄筋の曲げ加工部の引張側に発生するような塗膜の引張ひび割れを人工的に作り、これをコンクリート中に埋め込み、空气中乾燥—海水中浸漬の繰り返しを与える実験室内腐食促進試験を行なって損傷部に発生するさびを調査した。また、実際の鉄筋取り扱いおよび施工時に発生すると思われる大きさの塗膜損傷等を考慮し、大きさや個数等を変えて樹脂塗膜に剝離損傷を付与したエポキシ樹脂塗装鉄筋をコンクリート中に埋め込んだ供試体と同様な試験を行なった。さらに、実験室における腐食促進試験と実際の環境とを対応させる目的で実験室と現場とに同一の鉄板を設置し、その重量減少を比較することによって、実験環境の評価を行なった。

## 2. 使用材料

引張ひび割れ型損傷に対する実験で使用した鉄筋は、公称直径D22mmの異形鉄筋(SD30、横ふし型)にエポキシを静電粉体塗装したものである。この鉄筋に塗装したエポキシ樹脂塗料は3種類(塗料:A、B、C)で、これらの塗料は、現在比較的良好と判断されているものである。塗膜厚は、平均で180 $\mu$ m程度である。また、剝離型損傷に対する実験で使用した鉄筋は、公称直径D19mmの異形鉄筋(SD35、ねじふし型)にエポキシ樹脂を静電粉体塗装したものであり、その塗膜厚は、200 $\pm$ 50 $\mu$ m程度である。また、実験室と現場に設置した鉄板の大きさは、6 $\times$ 10 $\times$ 0.3(cm)である。セメントは市販の普通ポルトランドセメントを用い、細骨材としては川砂(比重:2.56)を、粗骨材としては最大寸法15mmと25mmの碎石(比重:2.86)を使用した。水セメント比(w/c)は、50%で、混和剤には空気連行性減水剤を使用した。このコンクリートには、長期に渡って外部からの塩化物が浸透することを考慮して、予め、市販の食塩をコンクリート重量の0.8%の割合で混入した。

## 3. 実験概要

## 3.1 引張ひび割れ型損傷の実験

エポキシ樹脂塗膜に損傷を与える方法としては、引張荷重による方法と、鉄筋曲げ機(ベンダー)を用いて曲げる方法の2種とした。引張による損傷は、引張試験機で鉄筋を引張ることによ



るように樹脂塗膜損傷部は、コンクリートの打設底面側にくるように鉄筋を配置した。これらの供試体も、3. 1と同様、翌日脱型後、 $20 \pm 3$  °Cの恒温水槽で材令14日まで水中養生を行なった後、実験室内腐食促進試験を開始した。浸漬水となる海水に直接浸る供試体端部および供試体の外部に露出している鉄筋にはエポキシ樹脂系塗料で十分防食塗装を施した。

実験室内腐食促進試験は、室温50°Cの恒温室内の容器に入れた供試体に対して海水を入れたり出したりして1日2回（6時間毎、これを1 cycle とする。）の空气中乾燥—海水中浸漬の繰り返しを与える試験であり、その試験期間は100日間、200日間、400日間とした。

また、実際の海洋環境下にある鉄筋コンクリート構造物中の鉄筋腐食と対応させる目的で、試験槽内の鉄筋と同位置に鉄板を設置し重量減少の測定も行なった。

所定の試験期間を終えた後、供試体を割裂して内部の鉄筋を取り出し、樹脂塗膜損傷部の鉄筋素地に発生した腐食領域の面積および腐食深さを測定して腐食の状態について調べた。

#### 4. 結果および考察

##### 4. 1 引張ひび割れ型損傷

引張荷重で損傷を与えた鉄筋の樹脂塗膜のひび割れ幅は0.01~0.3mmの間にばらついていた。図-3には、バンダーを用いて塗膜に損傷を与えた時の損傷個数とその時の加工温度の関係および塗膜ひび割れ幅と腐食実験をした時に発生した腐食面積を示す。

この図からもわかるように鉄筋自体の温度を上げて曲げ加工することにより樹脂塗膜に発生する損傷を少なくすることができる。また、塗料Cを用いることによってさびの発生をごく少なくすることができる。図-4には、引張荷重で損傷を与えた鉄筋の樹脂塗膜のひび割れ幅と、その損傷部に発生した腐食面積の関係を示したものである。ばらつきはあるものの塗膜のひび割れ幅が大きくなるにつれてその塗膜損傷部に

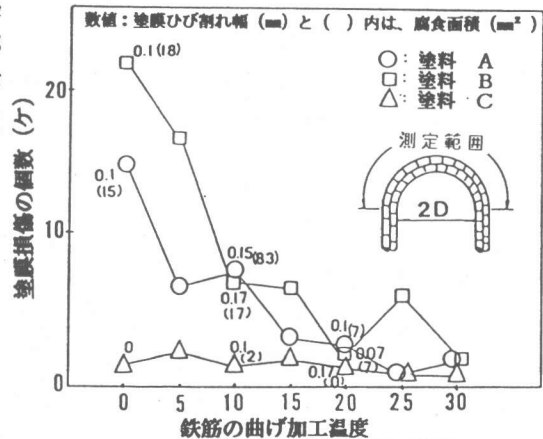


図-3 塗膜損傷数と加工温度の関係

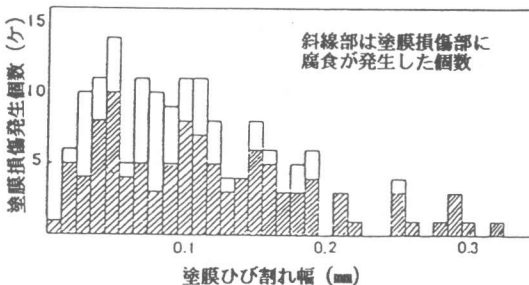


図-5 腐食発生割合

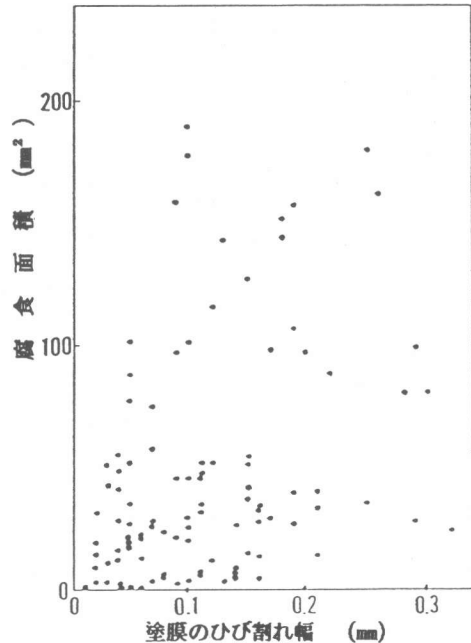


図-4 腐食面積と塗膜のひび割れ幅の関係

発生する腐食もある程度増加するようと思われる。図-5には、樹脂塗膜のひび割れ幅とそれに対応する損傷部の数およびその損傷部に腐食が発生した数を示す。樹脂塗膜に発生したひび割れ幅は0.02~0.2mm 程度のものが多かったがその範囲において塗膜のひび割れ幅が同じでも腐食が発生していないものもあった。

#### 4.2 剥離型損傷

図-6には、それぞれの試験サイクルにおいて無塗装鉄筋及び成分調整鉄筋に発生した腐食面積を示す。100サイクルにおいては、かぶりが大きくなるにつれて腐食面積も大きくなるという逆の傾向を示したが、これは試験期間が短かったことにより腐食面積が小さく、測定値にばらつきがあったためと思われる。また、無塗装鉄筋と成分調整鉄筋に発生した腐食にあまり違いは見られなかった。200サイクルにおいて、かぶり2cmでは100サイクルの結果に比べてかなり腐食が進行していることがわかる。この場合、無塗装鉄筋と成分調整鉄筋は腐食面積でおよそ80cm<sup>2</sup>程度の違いがあり、これは無塗装鉄筋の供試体に鉄筋軸に沿って縦ひび割れが入ったためと考えられる。かぶり4cmと7cmの供試体には縦ひび割れはなかったが、かぶり4cmの腐食面積はかぶり7cmのものより小さく、試験期間が2倍になっても100サイクルのものと同様であまり違いはみられなかった。この2つのかぶりにおいては、100サイクルと同様な傾向を示した。400サイクルにおいて、それぞれの供試体の側面に鉄筋軸方向に縦ひび割れが確認された。かぶり2cmでは、そのひび割れ部に部分的にさび汁の付着物があり、また、かぶり4cmでは、そのひび割れ幅が最大で2mm程度になっていた。供試体を割裂する前に赤インクに浸漬し、割裂後の観察で鉄筋まで赤インクが達していたことが確認されたことから、海水に供試体が浸漬されるごとに海水がひび割れを通して鉄筋まで浸入していたものと思われる。かぶり7cmでも同様に縦ひび割れは発生していたが、ごく表面近くのひび割れで鉄筋まで到達していなかったものと思われる。図-7には、400サイクル時の普通の鉄筋に発生した腐食

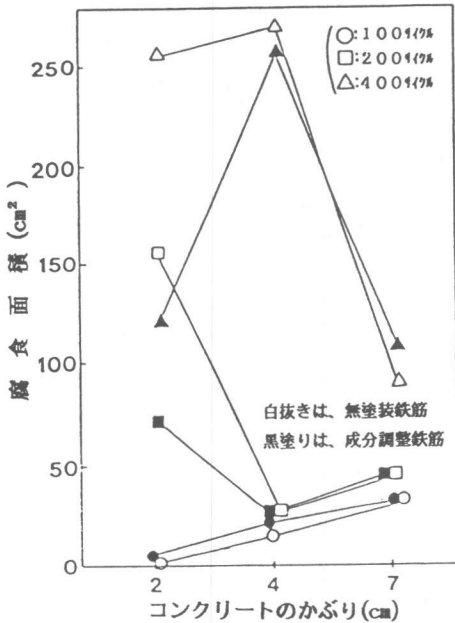


図-6 各サイクルにおける普通鉄筋の腐食面積

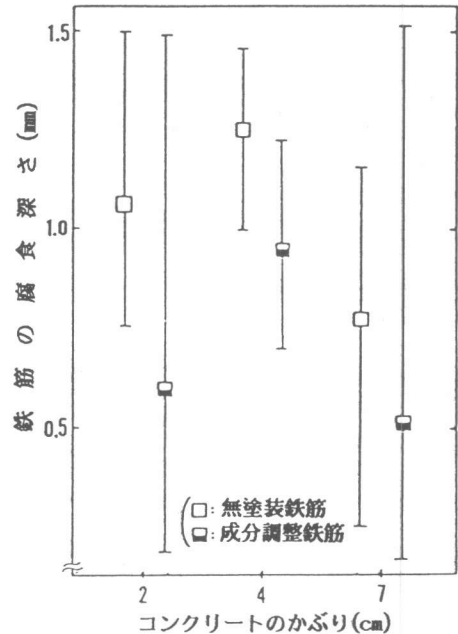


図-7 普通鉄筋の腐食深さ

の孔食深さの測定結果を示す。この値は、打設底面側に集中していた鉄筋表面の錆を取り除いてからポイントカウントマイクロメーターを用いて測定したものである。それぞれのかぶりにおいて、鉄筋に発生した腐食の深さにばらつきはあったが、成分調整を行なった鉄筋の腐食深さの方が無塗装鉄筋のものより浅くなっていると思われる。

一方、エポキシ樹脂塗装鉄筋では、塗膜損傷の大きいものであっても400サイクル時においてもコンクリートにひび割れ等発生せず、外観から言うとな変化していなかった。また、発生したさびもごく浅いものであった。

エポキシ樹脂塗装鉄筋の結果は次の通りである。

#### (1) 試験期間100サイクル

100サイクルにおいては、塗膜損傷部に腐食が発生したり、発生しなかったりとはばらつきが大きかった。図-8には、塗膜損傷の大きさと損傷1個あたりの腐食面積を示す。かぶり2cmでは、損傷面積が8mm<sup>2</sup>において、それ以上の損傷より腐食面積が大きくなった。

かぶり4cmでは、3および8mm<sup>2</sup>において、腐食面積はごく小さく、20、65mm<sup>2</sup>の損傷では、腐食面積も増加している。損傷面積が100mm<sup>2</sup>では他のものに比べ腐食面積は小さかった。いずれにしても、試験期間が短い100サイクルにおいては、全体的に塗膜損傷部に腐食が発生したり、発生しなかったりというばらつきが他の塗膜損傷に比べて大きかった。

#### (2) 試験期間200サイクル

かぶり2cmで損傷面積が、3mm<sup>2</sup>の供試体では損傷の間隔が小さく、また、65mm<sup>2</sup>の供試体では損傷の面積が大きい等により、隣り合う損傷部に発生した腐食は塗膜と鉄筋との付着を低下させ広い範囲に腐食が進行していた。

図-9には、塗膜損傷の大きさと損傷1個あたりの腐食面積を示す。かぶり2cmでは、塗膜損傷面積が大きくなるにつれて腐食も増加傾向を示している。かぶり4cmでの腐食面積は、損傷面積3及び8mm<sup>2</sup>においては腐食はごく

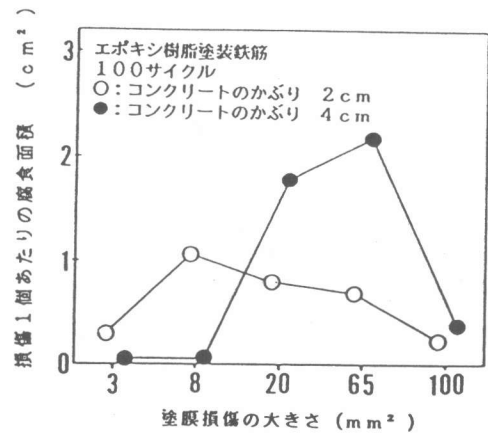


図-8 100サイクルの促進試験結果

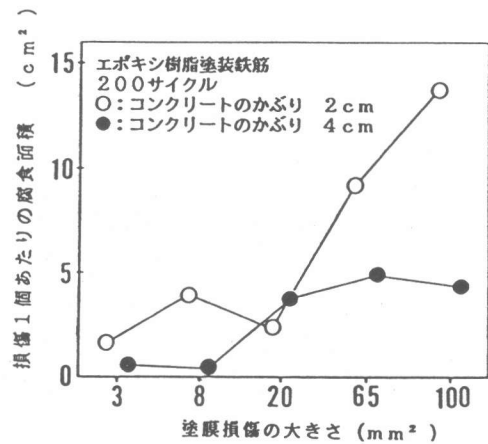


図-9 200サイクルの促進試験結果

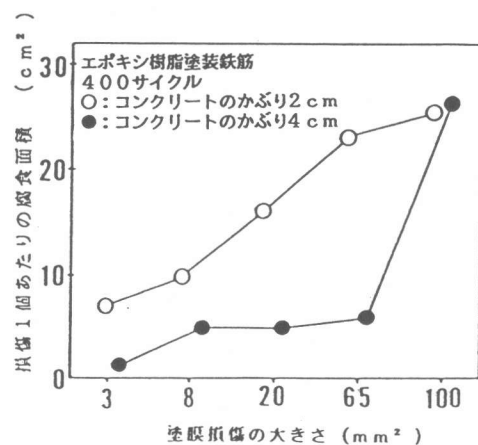


図-10 400サイクルの促進試験結果

少なく、これより大きな損傷面積においては、損傷面積が大きくなるにつれて徐々に増加している。

### (3) 試験期間400サイクル

かぶり2cmでは、損傷面積 $65\text{mm}^2$ 以下の損傷部に発生した腐食は打設底面側の鉄筋全面に進行しているものが多かった。損傷面積が $100\text{mm}^2$ においては、損傷の間隔が他のものに比べて大きいため、隣り合う損傷部に発生した腐食との結合はなかったが、打設上面側にまで腐食が進行しているものが多かった。かぶり4cmにおいては、かぶり2cmの場合に比べて、損傷部に腐食が発生していないものの割合が大きかった。図-10には、塗膜損傷の大きさと損傷1個あたりの平均腐食面積を示す。かぶり2cmにおいて損傷面積が大きくなるにつれて、腐食も増加している。かぶり4cmでは、損傷面積が8、20、 $65\text{mm}^2$ においてほぼ一定の値を示しているが $100\text{mm}^2$ では、他のものに比べて大きく増加している。

なお、実験室に設置した鉄板の重量減少は、400サイクルで約54%であった。この重量減少の量は、腐食性の現場で約20年から30年の腐食量に相当していることが確認された。

## 5. ま と め

エポキシ樹脂塗膜に人工的に損傷を与えたエポキシ樹脂塗装鉄筋や比較する目的で無塗装鉄筋等を用いて作製した鉄筋コンクリート供試体に対して、かなり厳しい条件のもとでの実験室内腐食促進試験を行なった結果、次のようなことがわかった。

(1) 塗膜損傷の大きさが同じであっても腐食が発生したり、発生しなかったりとばらつきが見られた。そのばらつきは、試験期間が短いほど、また塗膜損傷個数が多いものほど顕著であった。なお、この傾向は、引張りひび割れ型損傷と剝離型損傷とでほぼ同じであることがわかった。

(2) 無塗装鉄筋および成分調整鉄筋を用いた供試体では、鉄筋軸に沿ってコンクリートに縦ひび割れが発生した。腐食深さは、かぶり2cmと4cmにおいて最大で1.5mm程度であったが、成分調整鉄筋の方が幾分腐食深さが浅くなるようである。これらの鉄筋に比べてエポキシ樹脂塗装鉄筋の場合は、損傷面積が大きくても、いずれのかぶりにおいても縦ひび割れの発生はなく腐食に伴う鉄筋の断面減少は無視できるほど小さかった。

(3) 基礎的研究によって、塗膜損傷部分がある程度小さくなると腐食が進行しなくなるという結果が得られているが、今回の実験においては、いずれの損傷においてもばらつきはあるものの腐食は発生し、試験期間が長くなるにつれて、僅かずつではあるが樹脂塗膜と鉄筋との付着性を低下させながら腐食が進行していた。また、塗膜損傷面積が大きくなるにしたがって腐食も増加する傾向が見られた。

(4) 今回の実験では、いずれの場合にも塗膜損傷部に腐食が発生した。しかし、今回行なった実験は、腐食性の環境で20年から30年に相当するものである。そして、そのような場合においてかぶりが小さく、さらにエポキシ樹脂塗装鉄筋の塗膜に大きな損傷がある場合においてさえも、コンクリートに縦ひび割れも発生せず、錆の深さはごく浅いものであった。このことから一般の腐食性環境下のコンクリート構造物にエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いた場合、塗膜にかなり大きな損傷があっても数十年のオーダーでかなり長期間安全に使用できるものと思われる。なお、より長期に腐食を防ぐことを目的に、腐食の発生を一切認めないような構造物を造る場合には、損傷面積を更に小さくした実験によって、腐食の発生しない許容損傷量を求める必要があると思われる。