

論文 新たな方法で樹脂被覆した防食鉄筋の諸性能に関する基礎的研究

吉田 誠^{*1}・武若 耕司^{*2}

要旨：本論文は、品質未検討である三種類の被覆鉄筋の諸性能を確認するために研究を行った結果をまとめたものである。検討した被覆鉄筋は、一般的な静電粉体塗装で作られたエポキシ樹脂塗装鉄筋、コンクリートと鉄筋の付着性能を向上させるために塗装面に粗目をつけたエポキシ樹脂塗装鉄筋ならびに、ナイロン樹脂の熔融押出成形により被覆したナイロン樹脂被覆鉄筋である。検討項目は、曲げ加工性、被覆鉄筋とコンクリートの付着性、鉄筋素地と被覆の付着性、耐食性について検討を行い、保管時や施工時の紫外線劣化の影響を把握するために一定期間屋外曝露を行った各種鉄筋の品質についても検討を加えた。




キーワード：エポキシ樹脂塗装鉄筋、ナイロン樹脂被覆鉄筋、付着性、曲げ加工性、耐候性

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物において、塩害は深刻な劣化因子の一つである。その対策法としては、かぶりの増大やコンクリートの緻密化など、コンクリート自身で防食を図る第一種防食工法と、電気化学的工法や防食補強筋の使用など、コンクリート以外により防食を図る第二種防食工法がある。このうち、構造物の設計において塩害対策を施すうえでは、経済性も考慮し、まずは第一種防食工法を検討の対象とすることになる。しかし、極めて過酷な塩害環境に曝される場合には、耐久性照査を満足するためのかぶりも極めて大きくなるなど、実用的な設計が不可能となる状況も生じる。また予防保全的な観点からも、最近では、当初から第二種防食工法を適切に取り入れた構造物の設計も検討されるようになってきた。その代表的なものが、防食補強筋、特に、エポキシ樹脂塗装鉄筋（以下、EP鉄筋と称す）である。この鉄筋はコンクリート中で高い耐久性、耐食性を有し、既に多くの構造物で、第一種防食工法で生じる問題を解消できる有効な塩害対策として用いられている。

ただし、EP鉄筋の性能を有効に発揮させるためには、単に被覆に防食性を確保させるだけではなく、被覆と鉄筋素地の一体性、コンクリートと鉄筋との付着性、あるいは曲げ加工性や衝撃抵抗性などに関しても一定の品質規格を満足しなければならない。その一方で、最近、EP鉄筋の被覆に改良を加え、コンクリートとの付着性を改善した新しいタイプのEP鉄筋や、エポキシ樹脂塗装とは異なる材料および方法で鉄筋を樹脂で被覆したものが開発されるに至った。本研究では、これらの新たに開発された被覆鉄筋の品質について、土木学会：エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針〔改訂版〕¹⁾（以下、土木学会基準と称す）に準拠して、曲げ加工性試験、コンクリートとの付着試験、耐食性試験、ならびに屋外曝露試験を実施した。

表-1 実験に用いた各被覆鉄筋の概要

鉄筋種類	NY鉄筋	EP鉄筋 A	EP鉄筋 B
外観状況			
被覆厚(μm)	400±50	220±40	240±40
樹脂の特徴	耐食性に優れている 伸びに強い	耐食性、 耐アルカリ性に優れている	

2. 被覆鉄筋の各種品質に関する検討

2.1 実験に用いた被覆鉄筋

表-1 に試験に使用した被覆鉄筋の概要を示す。今回試験の対象とした被覆鉄筋は3種類である。すなわち、熱可塑性でしかも高い耐薬品性を持つナイロン12樹脂を熔融押出成形して鉄筋に接着させることでピンホールのない完全被覆を可能としたもので、さらに、コンクリートとの付着改善を目的として被覆表面に凹凸を付けた被覆鉄筋（以下、NY鉄筋と称す）、エポキシ樹脂の静電粉体塗装を2層に分けて実施し、上層については、熱硬化性樹脂骨材をエポキシ樹脂に混合して塗装を施すことで被覆表面に細かな凹凸を付与させコンクリートとの付着力を高めることを試みたEP鉄筋（以下、EP鉄筋B）、ならびに比較用として、一般のEP鉄筋と同一仕様でエポキシ樹脂を静電粉体塗装にさせたEP鉄筋（以下：EP鉄筋Aと称す）である。なお、これら使用した被覆鉄筋の被覆厚についても表-1に示しているが、EP鉄筋A以外のNY鉄筋およびEP鉄筋Bの被覆厚は、土木学会基準で規定されている220±40μmに比べて厚い。

* 1 鹿児島大学大学院理工学研究科（正会員）

* 2 鹿児島大学大学院理工学研究科 教授 工博（正会員）

2.2 被覆鉄筋の品質試験方法

各被覆鉄筋の曲げ加工性、被覆鉄筋とコンクリートの付着性、被覆と鉄筋素地との付着性、耐食性などの諸性能を検討した。各試験に用いた鉄筋の径とその本数の関係を表-2に示し、各試験方法を下記に概説する。

(1) 曲げ加工性

試験材には長さ 70cm の鉄筋を使用した。D16 および D19 の鉄筋については、曲げ加工後に塩水噴霧試験に用いるものも含めて試験に供したため、試験本数が D10 および D13 に比べて多くなっている。試験は、土木学会基準「JSCE-E 515 エポキシ樹脂塗装鉄筋の曲げ試験方法(案)」に準じて実施した。すなわち、鉄筋に触れる力点および支点ローラーにライニングを施した鉄筋曲げ機を用い、試験前 24 時間以上 20±2℃で保存した鉄筋を、D16 以下の鉄筋径に関しては、公称直径の 1.5 倍、D19 に関しては 2 倍の曲げ半径で、載荷速度 2~7 秒の間にそれぞれ 180° に曲げた。その後、曲げ外周および内周の表面の被覆を肉眼により観察し、微小クラック、開口クラック、剥離などの欠陥の数を記録した。

(2) 被覆鉄筋とコンクリートの付着性

試験材には長さ 100cm の被覆鉄筋ならびに、比較用に各被覆鉄筋の被覆前の鉄筋を試験に供した。付着性の試験は、土木学会基準「JSCE-E 516 エポキシ樹脂塗装鉄筋の付着強度試験方法(案)」に準じて鉄筋引抜き試験によって行うこととしたが、試験供試体の形状が 1 辺の長さ 15cm のコンクリート立方形供試体であること、また、D19 鉄筋を用いる供試体では、内部に直径 6mm、内径 120mm、ピッチ 40mm の鉄製スパイラルを配筋して試験を行ったことなどが、土木学会基準で規定された方法とは異なっている。これらは、試験中にコンクリートが割裂することを避けるための配慮による。使用したコンクリートは、セメントに早強ポルトランドセメント、粗骨材として最大寸法を 20mm の碎石(密度: 2.62g/cm³)、再骨材として川砂(吸水率: 1.76%, 密度: 2.64g/cm³)を使用し、目標スランプ 10.0±2.5cm として、表-3に示す配合のものを用いた。付着試験は、コンクリートの圧縮強度が 30.0±3.0N/mm²となった時点で実施した。

(3) 鉄筋と被覆の付着性(基盤目試験)

試験材は、長さを 50cm として、各被覆鉄筋とも鉄筋径が D16 および D19 のものをそれぞれ 2 本ずつ試験に供した。試験方法は、土木学会基準「JSCE-E 522-2003 エポキシ樹脂塗装鉄筋用塗料の塗膜基盤目試験方法」に準じて実施するものとし、被覆にカッターナイフで 3mm 四方のマスを一箇所について 6 個つけ、これを 10cm 間隔で 5 箇所作り、鉄筋 1 本につき計 30 個のマスを、鉄筋の種類ごと見ると 2 本の合計 60 マスで試験を実施した。試験では、このマスキに JIS Z 1522 に適合するテープを

表-2 試験に用いた被覆鉄筋の径と本数

鉄筋径	曲げ加工	付着性	基盤目	耐食性	
				曲げ加工	損傷
D10	6本	3本	-	-	-
D13	6本	3本	-	-	-
D16	8本	3本	2本	4本	6本
D19	8本	3本	2本	4本	6本

表-3 付着強度試験用コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
		W	C	S	G
70	49	203	290	897	924

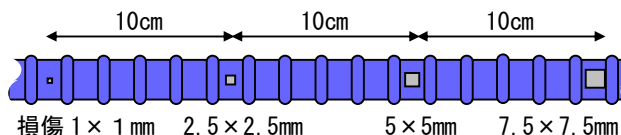


図-1 試験材の損傷状況

完全に密着するように貼り付けてから瞬時に剥がし、マス目の残存数を数え、その残存率を計算することにより、鉄筋素地と被覆の密着性を評価した。

(4) 耐食性

試験材は前述の曲げ加工試験後の鉄筋、ならびに以下に示す方法であらかじめ損傷部を設けた鉄筋について試験を行った。なお、損傷部は、図-1に示すように長さ 50cm の鉄筋の被覆に、10cm 間隔で 7.5mm 四方、5.0mm 四方、2.5mm 四方、1.0mm 四方の 4 種類の大きさの傷をつけ、鉄筋素地を露出させたものである。

試験は、各種鉄筋を 35℃に保った試験装置内に設置し、鉄筋に NaCl 濃度 5% の塩水を 2 時間噴霧した後、22 時間乾燥させる計 24 時間を 1 サイクルとし、これを最大 60 サイクルまで行うものである。今回は、20、40 および 60 サイクル終了時点で、鉄筋素地の腐食状況、被覆の異常の有無を確認した。

2.3 被覆鉄筋の品質試験結果

(1) 曲げ加工性

被覆損傷率の結果を表-4に、一例として D19 の曲げ加工後の被覆の状況を写真-1に示す。NY 鉄筋では、すべての鉄筋において被覆損傷が発生せず、高い曲げ加工性が確認された。このことは、ナイロン樹脂が高い伸び性能を有することを物語っている。一方、EP 鉄筋 A および EP 鉄筋 B についても、鉄筋径 D10、D13 および D19 の結果においては、土木学会基準において損傷と認められるような状況は生じておらず、十分に基準を満たしていた。ただし、鉄筋径 D16 においては微小なひび割れが

表-4 曲げ加工後の被覆損傷率 (%)

鉄筋径	NY鉄筋	EP鉄筋A	EP鉄筋B
D10	0	0	0
D13	0	0	0
D16	0	75	75
D19	0	0	0

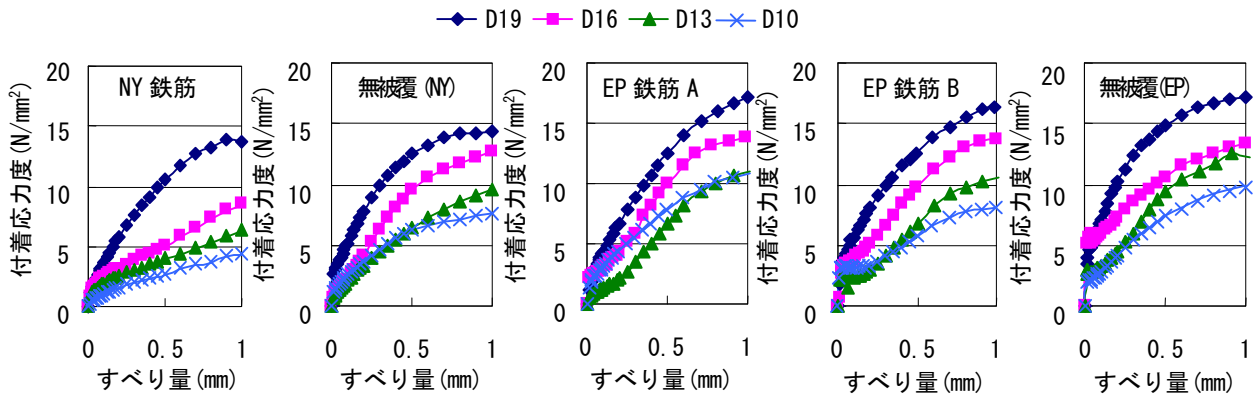


図-2 各種鉄筋の付着応力度とすべり量の関係

多数確認され、今回の試験では品質規格に定められている許容損傷率 20%を超えていた。D16 の場合のみにこのような状況が生じた原因については、今回の検討範囲では定かではないが、他の径のものについて特に問題が生じなかった点を考慮すると、被覆方法や被覆自体の問題であるとは考えにくく、素地鉄筋の品質や被覆後の鉄筋管理の状況なども含め、検討が必要である。

(2) 被覆鉄筋とコンクリートの付着性

各種被覆鉄筋において、鉄筋径ごとに3体の付着試験結果を平均して求めた付着応力度-すべり量関係を図-2 に示す。また、この結果に基づき、すべりの初期段階にあたる 0.04mm のすべり量における付着応力度を取りまとめて表-5 に、さらに、被覆なしの普通鉄筋に対する各種鉄筋の最大付着応力度の割合を図-3 に示す。

これらのうち、まず、滑り出し初期におけるコンクリートとの付着性については、特に、表面に粗目をつけることで付着性の向上を図った EP 鉄筋 B の性能が、鉄筋径の如何にかかわらず無被覆の普通鉄筋と同等の性能を示しており、改善効果が有効に発揮されているものと考えられた。NY 鉄筋および EP 鉄筋 A については、特に鉄筋径が大きい場合に初期の付着性が低下する状況が見られた。一方、最大付着応力度についてみると、EP 鉄筋 A は鉄筋径の如何にかかわらず無被覆の鉄筋と大差なく、土木学会の品質規格（JSCE-E 102 エポキシ樹脂塗装鉄筋の品質規格）に規定されている「無被覆鉄筋の 85%」を十分に満たしていた。また、今回新たに開発された EP 鉄筋 B についても、鉄筋径 D10 以外については土木学会の品質規格を満たしていたが、最大付着応力度自体は全体的に EP 鉄筋 B よりも低い値となっていた。これは、EP 鉄筋 B では、塗装を2層に分けて行ったことから結果的に塗膜厚が EP 鉄筋 A に比べて厚くなったこと（表-1 参照）に一因があると考えられる。NY 鉄筋の最大付着応力度については、D10、D13 および D16 の鉄筋径において品質規格値を下回っていた。ただし、D19 については無被覆鉄筋と同程度の付着強度を示していたことから、



写真-1 曲げ加工試験後の塗膜状況

表-5 すべり量 0.04mm 時の付着応力度 (N/mm²)

鉄筋径	NY鉄筋	無被覆(NY)	EP鉄筋A	EP鉄筋B	無被覆(EP)
D10	0.6	1.7	2.3	2.2	2.1
D13	1.3	0.6	1.5	2.4	2.3
D16	1.7	1.3	2.4	3.3	5.1
D19	2.0	3.5	2.6	4.0	4.7

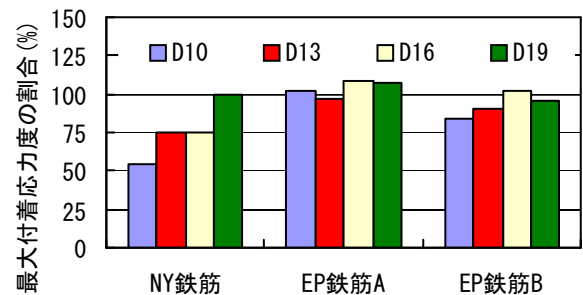


図-3 普通鉄筋に対する最大付着応力度の割合

表-6 鉄筋と被覆の付着性試験の試験結果

鉄筋径	鉄筋種類	マス目の総数	マス目残存率(%)
D16 D19	NY鉄筋 EP鉄筋A EP鉄筋B	各60個	100

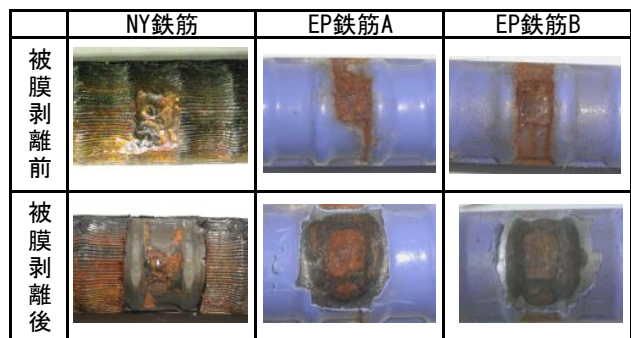


写真-2 耐食性試験 60 サイクル終了時の腐食状況

小径鉄筋における付着性の低下は、樹脂自体の影響よりは塗膜厚が通常の EP 鉄筋に比べて 2 倍程度あることにより、異形鉄筋の付着性に与える節の効果が低下したことに起因するものと考えられた。

(3) 被覆と素地鉄筋の付着性(基盤目試験)

被覆と鉄筋素地の付着性試験を調べた結果を取りまとめたものを表-6 に示す。いずれの被覆鉄筋においてもマス目の残存率は 100%となり、鉄筋素地と被覆の付着性には問題が無いことが確認された。

(4) 耐食性

予め損傷を与えた鉄筋において、60 サイクル終了後にその損傷部に発生した腐食状況の一例を写真-2 に示す。また、各損傷部に発生した腐食の面積を測定した結果を取りまとめて図-4 に示す。

写真-2 から明らかなように、いずれの損傷部においても腐食は損傷部のみに留まらず、元々は健全であった損傷周辺部の被覆下面にまで広がっており、また、腐食の形態としては、損傷によって鉄筋が露出している部分では赤錆となり、被覆下面部では黒錆として確認された。また、腐食面積について見てみると、すべての被覆鉄筋において損傷が大きくなるにつれて腐食面積自体も大きくなる傾向があった。ただし、被覆鉄筋ごとに腐食状況を比較すると、NY 鉄筋の腐食面積が EP 鉄筋 A あるいは B に比べ、明らかに小さい結果となっていた。これについては、鉄筋素地露出部の腐食面積はいずれの鉄筋についても同等であったことから、NY 鉄筋では被覆下面への腐食の広がりが EP 鉄筋に比べて小さかったことを意味する。これについては、NY 鉄筋の塗膜厚が EP 鉄筋に比べ厚かったことなどにより被覆自身の物質遮断性に優れていたことに加え、被覆と鉄筋素地の密着性が高かったことも一因として考えられた。また、EP 鉄筋同士と比較では、EP 鉄筋 B の方が腐食の進行速度が遅いようであった。

曲げ加工部の耐食性について検討した結果を図-5 に示す。今回の試験では、曲げ加工試験で損傷が生じた試験体についても耐食性の実験を行った。その結果、曲げ試験で損傷が顕在化した EP 鉄筋 A, B の D16, および土木学会基準では損傷と見なされない程度のわずかな割れを有していた EP 鉄筋 A の D19 試験体で、損傷部を中心として鉄筋素地に腐食が認められた。曲げ加工時に目視で損傷が認められなかったものについては、写真-3 に示すようにいずれの被覆鉄筋についても腐食は認められず、高い耐食性を有していることが確認された。

3. 各種被覆鉄筋の屋外暴露後の品質試験

3.1 試験に使用した被覆鉄筋および暴露環境

製造時点で上記 2. で示した品質を有する NY 鉄筋, EP

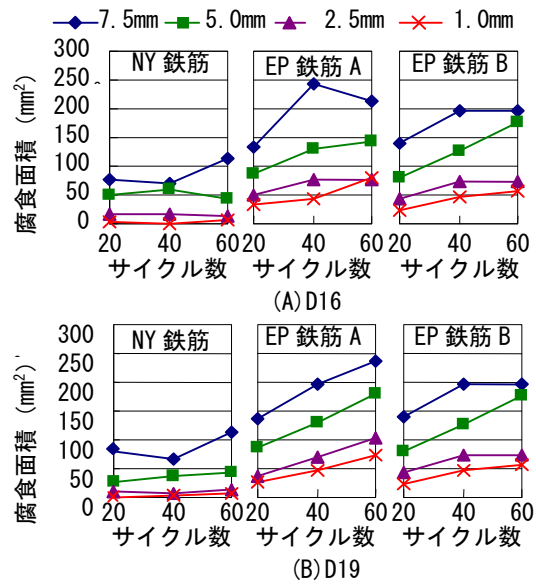


図-4 損傷部の腐食面積の経時変化



写真-3 耐食性試験後の腐食状況

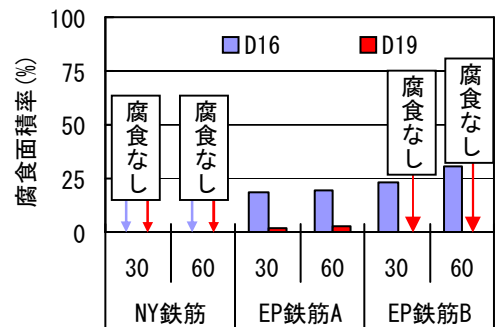


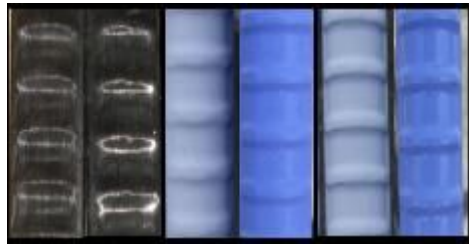
図-5 曲げ加工後の各種鉄筋の耐食性試験 30 サイクル, 60 サイクル終了時の腐食面積率

表-7 屋外暴露試験に用いた各種被覆鉄筋の径と本数

鉄筋種類	鉄筋径	曲げ加工		付着性	基盤目
		曝露面外	曝露面内		
NY 鉄筋	D16	3本	2本	3本	2本
	D19	3本	2本	3本	2本
EP 鉄筋 A	D16	3本	3本	3本	2本
	D19	3本	3本	3本	2本
EP 鉄筋 B	D16	3本	3本	3本	2本
	D19	3本	3本	3本	2本



写真-4 鉄筋曝露状況



曝露半年 NY鉄筋 曝露半年 EP鉄筋A 曝露半年 EP鉄筋B
写真-5 屋外曝露後の被覆状況
(左:曝露面, 右:曝露裏面)

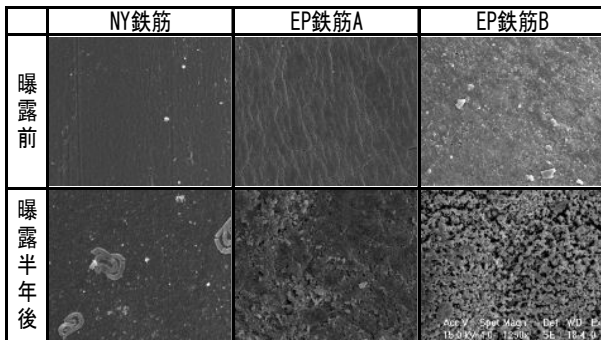


写真-6 曝露前と曝露半年後の被覆状況(倍率×1250)

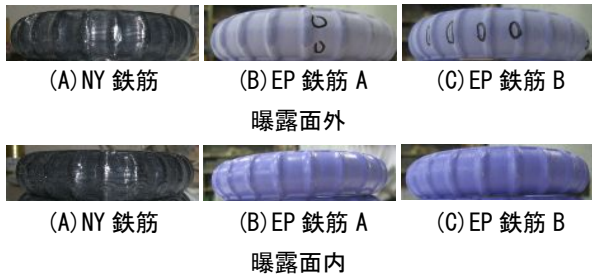


写真-7 曝露半年における曲げ加工試験後の被覆の状況

鉄筋 A および B を鹿児島大学海洋土木工学科棟の屋上に写真-4 の状態で曝露し、所定の期間経過したものについては、外観観察を行った後、曲げ加工試験、コンクリートとの付着試験ならびに、鉄筋素地と被覆との付着性試験(基盤目試験)に供した。ここでは、曝露半年までの調査・試験結果を取りまとめて示す。なお、表-7 には、曝露半年の試験に使用した鉄筋の種類と本数を示す。

3.2 外観状況

曝露期間半年経過時の被覆の外観状況を写真-5 に示す。NY 鉄筋の曝露半年の被覆には、曝露面、曝露裏面の違いにかかわらず、曝露前に見られた光沢が失われていたが、それ以外に外観上の大きな変状は認められなかった。一方、EP 鉄筋 A および B の曝露面側の被覆は、光沢が失われ、チョーキングの発生も確認された。また、曝露裏面では、チョーキングは認められず曝露前の被覆状況から大きな変化はなかった。

これらの被覆の変化をより詳しく検討するために曝露

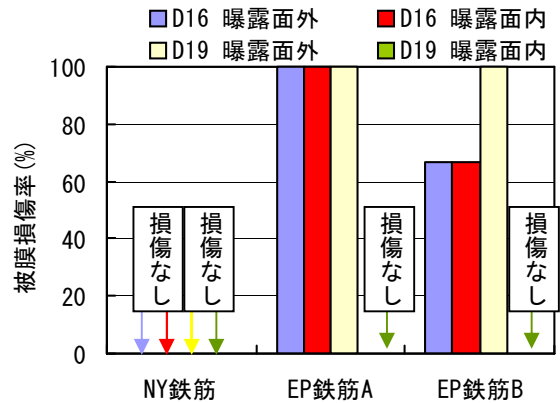


図-6 曝露半年時における曲げ加工試験の結果

前と曝露半年後それぞれの被覆表面の状況を SEM により確認した。SEM で撮影した倍率 1250 倍の被覆表面状況を写真-6 に示す。

曝露前の NY 鉄筋の被覆表面は滑らかな状況にあったが、曝露半年経過時では曝露前に比べ表面が幾分粗な状態になっていた。ただし、被覆に大きな変状は認められず、比較的高い耐候性を保持しているようであった。EP 鉄筋 A の曝露前の被覆表面は、滑らかではあったが薄いシワのような線が多数確認されていた。しかし、曝露半年経過時では、このシワが確認できないほど、曝露前に比べ表面が粗くなっており、微小な割れなども確認された。EP 鉄筋 B の曝露半年後の被覆表面は、他の 2 つに比べてさらに粗い状態となり、表面に多数の微細な穴やひび割れなどが確認された。

3.3 曲げ加工性

屋外曝露後の被覆鉄筋の曲げ加工試験は、曝露面(紫外線影響面)を外側にして曲げる場合と内側にして曲げる場合で、それぞれ実施した。各種鉄筋の被覆損傷率を図-6 に、また、一例として、曝露半年を経過した D19 鉄筋の曲げ加工試験後の状況を写真-7 に示す。これらの結果から、NY 鉄筋については、D16 および D19 のいずれについても曝露前と同様に曲げ加工による被覆の損傷は認められず、高い耐候性と曲げ加工性を有していることが確認された。一方、EP 鉄筋 A および B では、曝露前に比べ損傷が多く発生して、その傾向は特に紫外線の影響を多く受ける曝露面側を外側にして曲げた場合に顕著であった。また、結果として、これらの鉄筋では、曝露半年で EP 鉄筋の品質規格に定められている損傷率 20% 順守できなくなっていた。

3.4 被覆鉄筋とコンクリートの付着性

図-7 に曝露半年経過時の付着応力度とすべり量の関係を示す。付着応力度とすべり量の関係は、曝露前と同様に全体として滑らかな曲線を描いていた。表-8 にすべり量 0.04mm における付着応力度を、また、図-8 には

無被覆鉄筋の最大付着応力度に対する各種被覆鉄筋の付着応力度の割合を示した。これらの結果より、いずれの被覆鉄筋においても、コンクリートとの付着性は、曝露前と大差ないか、かえって向上する傾向が認められ、特に、NY鉄筋の鉄筋径 D16 の場合のように、顕著な付着性能の増加を示すケースも見られた。この理由については必ずしも明確ではないが、上記した SEM 写真にも表れているように、屋外曝露することにより被覆表面が粗くなったことも付着強度の向上に何らかの効果を与えた可能性がある。なお、今回の曝露半年の付着性試験に限ると、いずれの被覆鉄筋も EP 鉄筋の品質規格値である無被覆鉄筋の 85%以上の付着強度を有していた。

3.5 鉄筋素地と被覆の付着性(基盤目試験)

曝露半年後の被覆鉄筋における鉄筋素地と被覆の付着性試験を行った結果を表-9 に示す。いずれの鉄筋においてもマス目の残存率は 100%となり、曝露半年間では鉄筋素地と塗膜の付着が劣化するまでに紫外線の影響は至っていないと考えられた。

4. まとめ

本研究では、品質が未検討であるナイロン樹脂被覆鉄筋および被覆表面処理を施したエポキシ樹脂鉄筋の品質を確認するために『エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針 [改訂版]』¹⁾ に準じて諸性能について検討を行い、以下の結論が得られた。

- (1) ナイロン樹脂被覆鉄筋 (NY 鉄筋) の曝露前の品質としては、特に、曲げ加工性および耐食性に優れていた。ただし、鉄筋径 D16 以下では鉄筋とコンクリートとの付着性が品質規格を満足しておらず、今後、付着性について改善の余地があると考えられた。一方、屋外曝露後の品質試験の結果から、NY 鉄筋は曝露前と同様の曲げ加工性や付着性を有しており、高い耐候性を有していることも確認された。
- (2) 付着性を高めたエポキシ塗装鉄筋 (EP 鉄筋 B) は、付着性、耐食性に優れており、特に、通常のエポキシ鉄筋 (EP 鉄筋 A) に比べて、すべり初期におけるコンクリートとの付着性改善が確認された。しかし、今回の実験では、鉄筋径 D16 が曲げ加工性試験で規格外となった。これについては、同時期に同じ場所で製造された EP 鉄筋 A についても同様の結果となったことから、素地鉄筋の品質など、被覆の性能以外に問題がある可能性もあり、原因を明確にする必要がある。また、屋外曝露後の品質試験の結果より、付着性の低下は確認されなかったが、半年間で曲げ加工性大きく低下するため、保管方法には十分な注意が必要である。

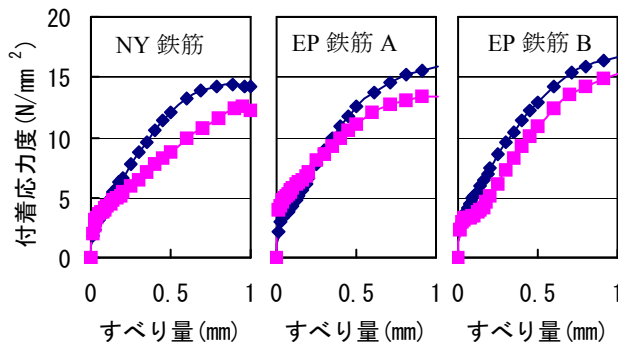


図-7 曝露半年における付着応力度とすべり量の関係

表-8 すべり量 0.04mm 時の付着応力度 (N/mm²)

鉄筋径	NY鉄筋	EP鉄筋A	EP鉄筋B
D16	2.8	4.7	3.2
D19	2.9	3.5	3.4

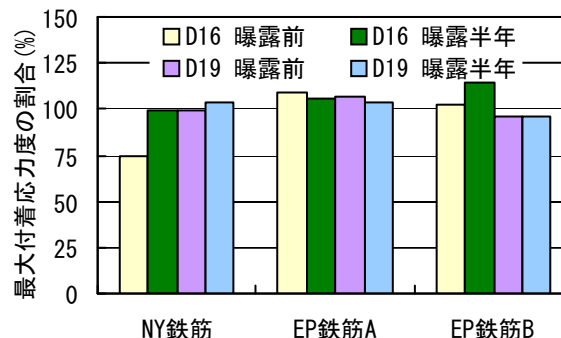


図-8 普通鉄筋に対する最大付着応力度

表-9 鉄筋と被覆の付着性試験の試験結果

鉄筋径	鉄筋種類	マス目の総数	マス目残存率 (%)
D16 D19	NY鉄筋 EP鉄筋A EP鉄筋B	各60個	100

謝辞：本文は、(社)日本材料学会「熱可塑性樹脂被覆鉄筋のコンクリート補強材としての評価に関する委員会」ならびに「鉄筋コンクリート構造物における高付着型エポキシ樹脂塗装鉄筋に関する確認・実証に関する委員会」(いずれも、委員長：宮川豊章京都大学教授)の依頼で実施した研究の一部を取りまとめたものである。研究の実施にあたり、試験体の提供等でご協力頂いたヒエン電工(株)ならびに(株)明希の関係各位に感謝する次第である。

参考文献：

- 1) 土木学会：エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針 [改訂版]，コンクリートライブラリー112，2003