

高性能な樹脂被覆鉄筋に関する研究

片野 啓 三 郎 竹 田 宣 典

Study on High-Performance Resin-Coated Rebar

Keisaburo Katano Nobufumi Takeda

Abstract

Epoxy-coated rebar is usually used for concrete structures in severe saline environments in order to protect against steel corrosion. However, epoxy-coated rebar has some problems. Its lower bond strength with concrete necessitates the use of a longer lap joint. Touch-up repair is required for resin damaged by bending or impact at the construction site. To solve these problems, the authors produced a new resin-coated rebar using a resin material with high adhesion and resistance against environmental factors, along with an additional new rebar by attaching silica sand to the surface of the new resin-coated rebar. According to the results of some physical examinations, it was clear that the new rebar could be treated as normal rebar, and the bond strength with concrete was increased remarkably by attaching the silica sand.

概 要

厳しい塩害環境に建設されるコンクリート構造物では、鉄筋の防食のためにエポキシ樹脂塗装鉄筋が多く使用されている。しかし、エポキシ樹脂塗装鉄筋はコンクリートとの付着力が低下する、施工時に傷がつきやすいなどの性質があり、重ね継手長さの延長、現場での損傷部分の補修（タッチアップ）などの対応がコストアップにつながっているのが現状である。筆者らは、金属との付着性が高く、耐候性、耐アルカリ性が高い等の特長を有し、接着剤やプライマーに広く使用されている樹脂に着目し、これを用いた新規被覆鉄筋を製作して各種の評価試験を行った。その結果、新規被覆鉄筋は耐衝撃性や曲げ加工性に優れることが明らかになった。さらに、被覆鉄筋の表面に珪砂を吹き付けることで、コンクリートとの付着性状を大幅に改善することができた。また、RCはりの曲げ載荷試験により、構造性能も普通鉄筋を用いた場合と同等であることを確認した。

1. はじめに

海洋環境等の厳しい環境における鉄筋コンクリート構造物では、劣化因子（塩化物イオン、炭酸ガス等）の侵入による鉄筋腐食が問題となる。特に、海水や、凍結防止剤に起因する塩害による早期劣化問題は1980年代に顕在化した。この問題を解決するため、鉄筋の表面をエポキシ樹脂で被覆したエポキシ樹脂塗装鉄筋が開発され、土木学会から「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(案)」が1986年に発刊された¹⁾。エポキシ樹脂塗装鉄筋（以下、EP鉄筋と呼称）は、亜鉛めっき鉄筋やステンレス鉄筋などの他の既存の防食鉄筋に比べ費用対効果が高く多くの実績があるが、曲げ加工時や組立て時に傷が付きやすく（Photo 1参照）、鉄筋組立後にタッチアップによる補修を行わなければならない場合がある。また、EP鉄筋は、普通鉄筋と比較してコンクリートとの付着が小さく、重ね継手を設ける場合の継手長さを無塗装の場合の1.2倍程度としなければならないとされている。

筆者らは以上のような課題を解決し、より高性能な鉄筋を開発することを目的とした新規被覆鉄筋を製作した。本報では、新規被覆鉄筋のコンクリートとの付着性能、施工時の損傷に対する抵抗性、RCはり曲げ載荷試験による構造性能の評価を行った。



(a) 曲げ加工時 (b) 組立て時
Photo 1 エポキシ樹脂塗装鉄筋の施工時の損傷
Damages on Placing of Epoxy-Coated Rebar

2. 新規被覆鉄筋の概要

新規被覆鉄筋の製作には、金属との付着性が高い、耐候性、耐アルカリ性が高い等の特長を有し、接着剤やプライマー等に広く使用されている樹脂（以下、樹脂Aと称する）を用いた。樹脂Aは、JSCE-E 528-2003（耐薬品性）およびJIS Z 2371（耐塩水噴霧性）に加え、被覆鉄筋の1年間の屋外暴露試験（Photo 2）によって耐食性が確認されている。また、エポキシ樹脂（以下、EP樹脂と称する）と比較して軟らかく変形に対する追従性があることから、曲げや衝撃によって損傷を生じにくいことが期待される。

実験に用いた鉄筋の種類をTable 1に示す。新規被覆鉄筋T1は、樹脂Aを粉体静電塗装によって被覆した鉄筋である。EPおよびT1の樹脂の膜厚は $220 \pm 40 \mu\text{m}$ とした。また、T2~T4は、コンクリートとの付着性能を改善させる目的でT1の表面に珪砂を付着させた鉄筋で、珪砂の粒径を変化させた3種類を製作した。新規被覆鉄筋の外観をPhoto 3に示す。

3. コンクリートとの付着性能

3.1 概要

1章で述べたように、EP鉄筋では普通鉄筋と比較してコンクリートとの付着力の低下が問題になる場合がある。そこで、鉄筋の引抜き試験を実施することで新規被覆鉄筋のコンクリートとの付着性能を評価した。

3.2 試験方法

試験は、JSCE-E 516-2003「エポキシ樹脂塗装鉄筋の付着強度試験方法」¹⁾を参考にして行った。供試体および試験装置の模式図をFig. 1に示す。供試体は、一辺が150mmの立方体のコンクリートの中心に鉄筋を1本配した鉄筋コンクリートとし、鉄筋とコンクリートとの付着長さが75mmとなるように作製した。供試体の数は1ケースにつき3個とした。鉄筋は、JIS G 3112「鉄筋コンクリート用棒鋼」のうち異形棒鋼SD345 D19を母材とし、無処理（被覆なし）のものNおよび各種被覆鉄筋EP, T1, T2, T3, T4を用いた。コンクリートは、普通ポルトランドセメントを用いた水セメント比59.0%のものを製造して用いた。コンクリートの使用材料、配合をTable 2およびTable 3に示す。供試体は材齢28日まで標準養生に供し、その後試験を行った。試験時のコンクリートの圧縮強度試験は 37.1N/mm^2 であった。

引抜き試験は定格荷重250kNのオートグラフを使用した。Fig. 1 (b) のように供試体を載荷板上に固定し、上部から鉄筋をつかんで上方に載荷した。供試体下部の鉄筋が突出した部分に変位計を設置し、鉄筋のすべり量を測定した。

試験結果の整理は、文献1)に従って以下のようにして行った。まず、付着応力度を式(1)で計算し、各供試体の付着応力度-すべり曲線を描いた。次に、すべり量が0.002D (D: 鉄筋径) における付着応力度と最大付着応力度を供試体3個の平均値として求めた。また、すべり量が0.002Dにおける付着応力度と最大付着応力度について、普通鉄筋(N) に対する割合を求めた。なお、すべり量が0.002Dのときの付着応力度は、鉄筋表面（被覆鉄筋の場合は樹脂表面）とコンクリートとの摩擦が卓越する段階であり、初期すべりに対する抵抗性を相対的に評価できると考えられる。

$$\tau = 222\alpha \cdot p \times 10^{-6} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 τ : 付着応力度(N/mm²)

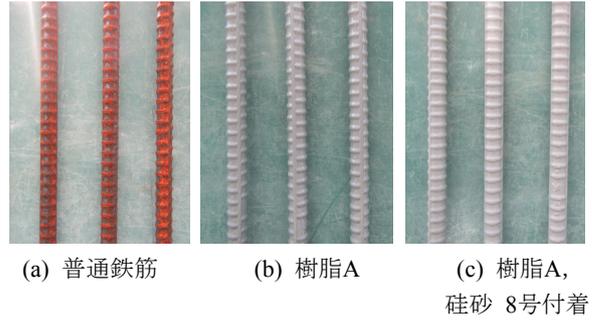


Photo 2 鉄筋の屋外暴露試験結果 (1年間)
Exposure Test of Rebar

Table 1 鉄筋の種類
Types of Rebar

種類	名称	被覆	珪砂付着
普通鉄筋	N	無処理(被覆なし)	—
EP鉄筋	EP	EP樹脂	珪砂付着なし
新規被覆鉄筋	T1	樹脂A	珪砂付着なし
	T2	樹脂A	珪砂 9号
	T3	樹脂A	珪砂 8号
	T4	樹脂A	珪砂 7号

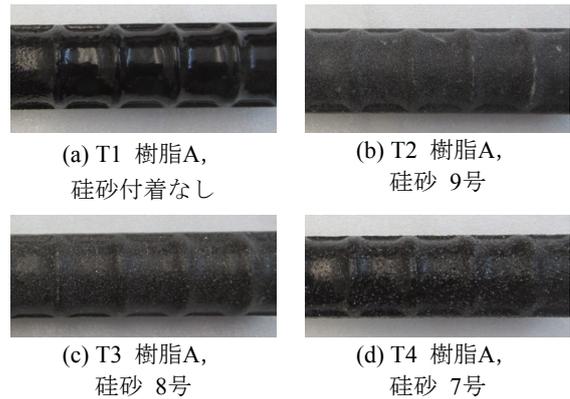
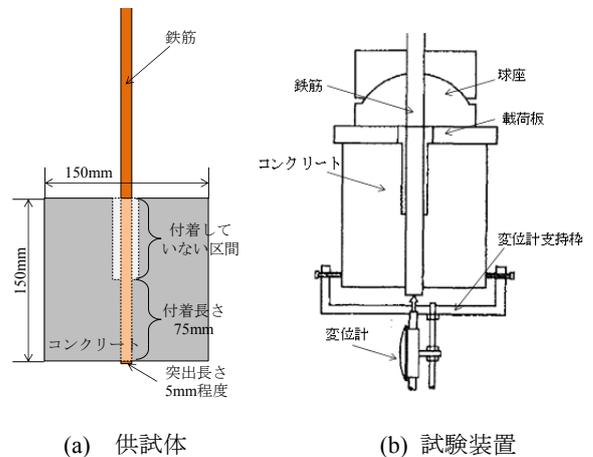


Photo 3 鉄筋の外観
Appearance of Rebar



(a) 供試体 (b) 試験装置

Fig. 1 引抜き試験の模式図
Pullout Test Specimen and Apparatus

- p : 引張荷重(N)
- α : コンクリートの圧縮強度に対する補正係数, $\alpha = \frac{30.0}{\sigma_c}$
- σ_c : 同時に作製した円柱供試体の試験時材齢における圧縮強度 (N/mm²)

3.3 試験結果および考察

試験結果をTable 4, Fig. 2に示す。すべり量が比較的小さい0.002D (0.038mm) のときの付着応力度は、Nの場合で2.47N/mm²であり、EPではその約0.7倍と小さかった。一方、T1ではNの場合より大きくなり、約1.2倍となった。

新規被覆鉄筋に硅砂吹付処理を施したT2, T3およびT4では、すべり量が0.002Dのときの付着応力度が増加した。T2 (硅砂 9号) がNに対して約1.5倍、T3 (硅砂 8号) が約2.8倍、T4 (硅砂 7号) が約2.3倍となり、9号<7号<8号の順に付着応力度が大きくなった。これは、初期すべりに対して最も大きく抵抗する硅砂の粒径が存在することを示しており、本実験の範囲内において、硅砂 8号を使用することですべり量0.002Dのときにおける鉄筋とコンクリートとの付着応力度が大きくなることが分かった。

次に、最大付着応力度に着目する。最大付着応力度は、Nの場合で12.0N/mm²であり、EPおよびT1ではNの場合とほぼ同等であった。異形棒鋼にはふしやリブがあり、ふしが引抜きに対して機械的に抵抗するため、最大付着応力度は被覆の有無あるいは被覆材の種類に大きく左右されないと考えられる。また、被覆鉄筋は樹脂の膜厚のためにふしの形状が滑らかになり、最大付着応力度が小さくなるという知見^{2), 3)}があるが、今回の供試体の条件(樹脂の膜厚: 220±40μm) ではその影響は顕著ではないことが分かった。

新規被覆鉄筋に硅砂吹付処理を施したT2, T3およびT4では、T2 (硅砂 9号) がNに対して1.0倍、T3 (硅砂8号) とT4 (硅砂 7号) が約1.1倍であり、骨材吹付処理を施すことで最大付着応力度が若干であるが増加することが分かった。

以上より、EP鉄筋で重ね継手の継手長さを1.2倍程度と

しなければならいとされているのに対し、コンクリートとの付着を考慮すると新規被覆鉄筋の場合は無塗装の場合と同等としてよいと考えられる。

Table 2 コンクリートの使用材料
Materials of Concrete

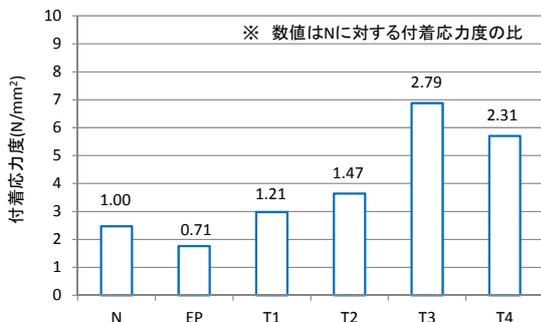
分類	種類	記号	摘要
水	上水道水	W	—
セメント	普通ポルトランドセメント	C	密度3.16g/cm ³
細骨材	陸砂	S	密度2.61g/cm ³ , 吸水率1.97%, 粗粒率2.64, 木更津産
粗骨材	碎石2005	G	密度2.65g/cm ³ , 吸水率0.72%, 粗粒率6.60, 青梅産
混和剤	AE減水剤	WR	リグニンスルホン酸系
	空気連行剤	AE	変性アルキルカルボン酸系

Table 3 コンクリートの示方配合
Mix Proportion

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				WR (C×%)	AE (C×%)
		W	C	S	G		
59.0	45.8	165	280	838	1008	0.25	0.002

Table 4 引抜き試験結果
Result of Pullout Test

名称	被覆	付着応力度 (N/mm ²)	
		すべり量が0.002Dのとき	最大
N	無処理 (被覆なし)	2.47	12.0
EP	EP樹脂	1.76	11.7
T1	樹脂A	2.98	11.9
T2	樹脂A+9号硅砂	3.64	12.3
T3	樹脂A+8号硅砂	6.88	13.4
T4	樹脂A+7号硅砂	5.70	13.5



(a) すべり量が0.002Dのときの付着応力度の比較



(b) 最大付着応力度の比較

Fig. 2 引抜き試験結果
Result of Pullout Test

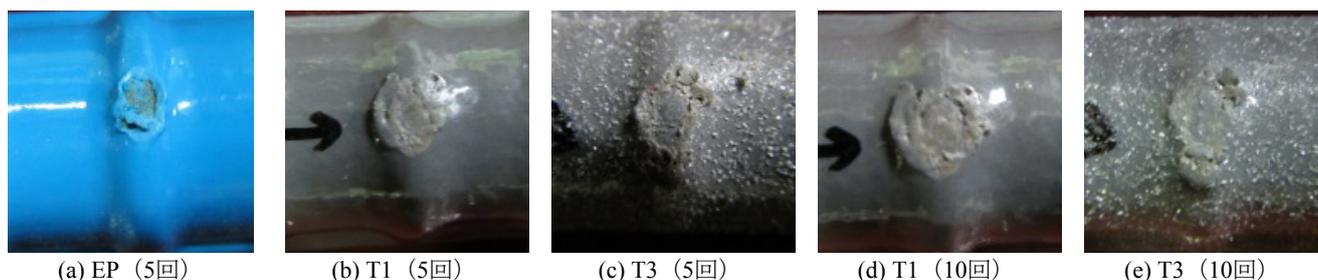


Photo 4 耐衝撃性試験後の状況
Result of Impact Strength Test

4. 施工時の損傷に対する抵抗性

4.1 概要

被覆鉄筋は、組立て時に鉄筋同士あるいは周囲の設備や資材に接触し、局部的に被膜が損傷することがある。また、曲げ加工を行った際に被膜が割れ、裂け、はがれなどを生じることがある。どちらの場合も鉄筋の素地が部分的に露出することとなり、防食に対する信頼性を保証するためにコンクリートを打設する前にタッチアップによる補修を行わなければならない。したがって、これらの施工時に発生する不具合を再現する実験を行い、新規被覆鉄筋の損傷に対する抵抗性を評価した。

使用した鉄筋は、異形棒鋼SD345 D19を母材として各種樹脂被覆を施した試験片とし、EP、T1（樹脂A、珪砂付着なし）およびT3（樹脂A、珪砂8号付着）の3種類とした。

4.2 耐衝撃性試験

4.2.1 試験方法 試験は、JSCE-E 514-2003「エポキシ樹脂塗装鉄筋の耐衝撃性試験方法」¹⁾を参考にして行った。すなわち、鉄筋を床に置き、質量0.8kgの鋼製の棒をおもりとして自由落下させることによって衝撃を与え、塗膜の破壊状況を確認することで耐衝撃性を評価した。このとき、1回の試験における衝撃強度は $3.0N \cdot m$ となるようにおもりを鉄筋から38cmの高さから落下させた。また、鉄筋のふしの真上におもりが当たるように試験を行った。

4.2.2 試験結果および考察 衝撃試験を複数回繰り返して実施した際の塗膜の状況をPhoto 4に示す。EPの場合、5回の衝撃によって塗膜が剥がれて鉄筋の素地が露出していることがわかる。一方、T1の場合、おもりが落下した位置で塗膜が変形しつぶれてはいるものの、鉄筋が露出することはなかった。また、T1およびT3に対して試験を10回繰り返して実施したが、特に目立った損傷は確認されなかった。これは、樹脂AがEPと比較して変形に対する追従性に優れていることを示唆しており、このことによって、同じ衝撃エネルギーによる損傷度合いが比較的軽微になったと考えられる。また、珪砂吹付処理の有無は損傷度合いに大きな影響を及ぼさないと考えら

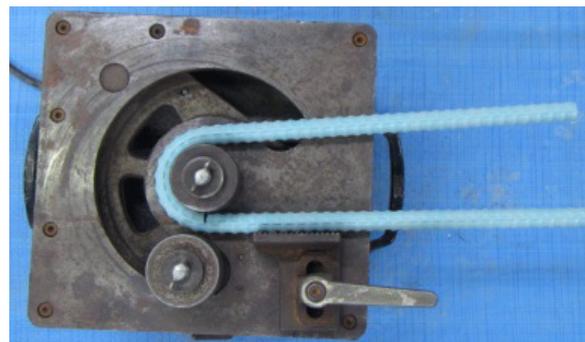


Photo 5 曲げ加工性試験の状況
Bendability Test

れる。以上より、新規被覆鉄筋T1およびT3は、EPと比較して衝撃に対する耐性に優れていることが分かった。

4.3 曲げ加工性試験

4.3.1 試験方法 試験は、JSCE-E 515-2003「エポキシ樹脂塗装鉄筋の曲げ試験方法」¹⁾を参考にして行った。約1mの長さに切断した鉄筋を用い、鉄筋曲げ装置によって曲げ加工した際に発生する塗膜の欠陥を確認した。Photo 5に示すように、鉄筋をリブが上下になる状態で置き、曲げ内半径 $2D$ (38mm)、曲げ角度 180° まで曲げ加工を行った。試験は鉄筋1種類につき5本について行い、その後、表面の塗膜を肉眼で観察し、割れ、剥離等の欠陥を確認した。

4.3.2 試験結果および考察 試験結果をTable 5、Fig. 3およびPhoto 6に示す。欠陥の評価は割れの長さで以下のランクに区分した。

- 区分A：5mm以上
- 区分B：2～5mm
- 区分C：2～5mmで塗膜が捲れ上がっているもの
- 区分D：1～2mm
- 区分E：1mm以下

著しく大きな割れである区分Aの欠陥はEPで5本中2本、T1で1本の鉄筋に発生し、T3では発生しなかった。比較的大きな区分Bの欠陥は、EPで5本中4本、T1で1本、T3で2本の鉄筋で発生した。また、1mm以下の小さな割れはEPおよびT3で多く発生したのに対し、T1ではほとんど発生しなかった。これらの結果は、耐衝撃性と同様に、樹脂AがEPと比較して変形に対する追従性に優れている

ことによると考えられる。以上より、新規被覆鉄筋T1およびT3は、EPと比較して曲げ加工の際の欠陥が発生しにくいことがわかった。

5. 構造性能

5.1 概要

新規被覆鉄筋のコンクリートとの付着性状が構造性能に及ぼす影響を確認するため、RCはり供試体を用いた曲げ載荷試験を行った。一般のはり部材を模擬するために、曲げ破壊型として供試体を設計し、曲げによる耐荷重やたわみ、ひび割れ性状の評価を行った。

5.2 試験方法

鉄筋の種類は、N、EP、T1（樹脂A、珪砂付着なし）およびT3（樹脂A、珪砂 8号付着）の4種類とした。使用する鉄筋の母材はSD345とし、主筋をD19とした。圧縮側鉄筋およびせん断補強筋には同種類の鉄筋でD13とした。鉄筋の材料試験結果をTable 6に示す。コンクリートの配合をTable 7に示す。また、コンクリートの材料試験結果をTable 8に示す。

供試体は、4種類の鉄筋を軸方向鉄筋およびせん断補強筋に用いてそれぞれ1体ずつ作製した。供試体の配筋および計測器位置図をFig. 4に示す。供試体は試験日（材齢19および20日）まで室温で気中養生に供した。

載荷は、載荷スパン 300 mm、支点間スパン 2300 mm（せん断スパン 1000 mm）の4点曲げによって行った。載荷試験の状況をPhoto 7に示す。測定項目は、載荷荷重、鉛直変位およびひび割れ幅の3項目とした。鉛直変位はFig. 4中のD2~D4の変位計で測定し、支点位置に設けたD1およびD5の変位を補正することで算出した。ひび割れ幅はFig. 4中のP1~P5のπゲージによって測定し、最大値を示したπゲージの変位によって評価した。ひび割れ幅の測定はπゲージの最大変位が5mmに達した時点で終了し、安全のためにπゲージを除去した。なお、載荷試験時に適時目視によるひび割れの調査を行った。

5.3 試験結果および考察

荷重と供試体中央部の鉛直変位（D3補正值）の関係をFig. 5に示す。すべての供試体が上縁部コンクリートの圧壊によって破壊した。最大荷重は、Nが191kNであったの

に対し、EP、T1およびT3の被覆鉄筋は182~183kNと若干小さかったが、その差は5%以内に留まった。また、荷重と中央変位の曲線からは、鉄筋の種類による著しい相違は確認できなかった。

荷重とひび割れ幅（最大値を示したπゲージの変位）

Table 5 曲げ加工性試験結果
Result of Bendability Test

名称	番号	損傷の個数*				
		区分A	区分B	区分C	区分D	区分E
EP	1	1	0	0	8	30以上
	2	0	1	3	10	30以上
	3	1	6	0	1	30以上
	4	0	5	0	5	30以上
	5	0	7	0	4	30以上
T1	1	0	0	0	0	1
	2	1	0	0	0	2
	3	0	0	0	0	0
	4	0	0	1	0	2
	5	0	3	0	0	1
T3	1	0	1	0	6	30以上
	2	0	2	0	2	30以上
	3	0	0	0	0	30以上
	4	0	0	4	15	30以上
	5	0	0	0	12	30以上

*A:5mm以上, B:2~5mm, C:2~5mmで塗膜が捲れ上がっているもの, D:1~2mmの割れ, E:1mm以下

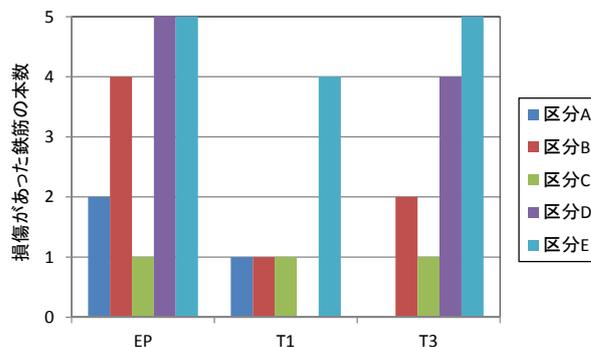
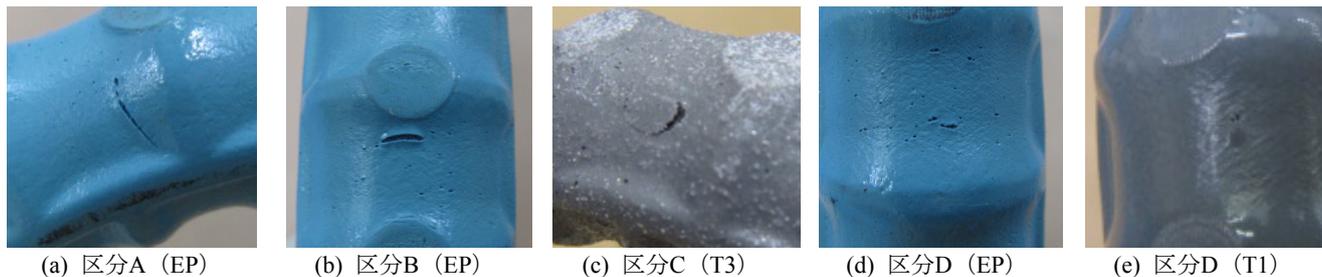


Fig. 3 曲げ加工性試験結果
Result of Bendability Test



(a) 区分A (EP)

(b) 区分B (EP)

(c) 区分C (T3)

(d) 区分D (EP)

(e) 区分D (T1)

Photo 6 曲げ加工性試験後の状況
Result of Bendability Test

の関係を図. 6に、載荷中の供試体のひび割れ状況をPhoto 8に示す。Fig. 6より、最大ひび割れ幅およびその進展過程に鉄筋の種類による有意な差は見られなかった。Photo 8からも、ひび割れの方向や分散性に異常な点はなく、ほぼ同一の過程で曲げ破壊が進展していったことが見て取れる。

以上より、新規被覆鉄筋を用いたRCはりの曲げ性状は、普通鉄筋やエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いた場合と遜色ないことが明らかになった。

6. まとめ

高性能化を目的に製作した新規被覆鉄筋について、各種性能評価試験を行った結果、以下の知見が得られた。

- 1) 引抜き試験によるコンクリートとの最大付着応力度は、普通鉄筋とほぼ同等であった。また、新規被覆鉄筋に珪砂を吹き付けた場合、すべり量が小さい範囲での付着応力度が著しく増加した。したがって、付着応力度の観点では、新規被覆鉄筋を用いた重ね継手の長さは普通鉄筋と同等としてよいと考えられる。
- 2) EP鉄筋より耐衝撃性や曲げ加工性に優れ、損傷しにくいことから、施工時のタッチアップによる補

修手間を軽減できると考えられる。

- 3) RCはりの曲げ載荷試験の結果、曲げたわみ性状、ひび割れ性状について普通鉄筋と遜色ないことが明らかになった。

なお、新規樹脂被覆鉄筋を用いたコンクリートの構造性能に関する評価として、本研究ではRCはりの曲げ破壊による試験を、主鉄筋の径を1種類として実施した。今後の課題として、鉄筋径が異なる場合、重ね継手を有する場合、繰返し荷重を受ける場合などの評価が必要であると考えられる。

Table 6 鉄筋の材料試験結果
Property of Rebar

種類	呼び径	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び率 (%)
N	D19	397	586	23.5
	D13	395	573	23.5
EP	D19	405	585	20.2
	D13	421	583	19.8
T1	D19	394	574	20.3
	D13	416	602	19.9
T3	D19	397	577	20.3
	D13	415	600	19.8

Table 7 コンクリートの示方配合

Mix Proportion							
W/C (%)	s/a (%)	単体量(kg/m ³)				WR (C×%)	AE (C×%)
		W	C	S	G		
45.0	45.4	163	362	802	978	0.25	0.002

Table 8 コンクリートの材料試験結果

Property of Concrete					
試験体	試験日の材齢	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	ポアソン比	割裂引張強度 (N/mm ²)
N, EP	19日	46.3	29.5	0.18	3.35
T1, T2	20日	41.7	29.8	0.19	3.25



Photo 7 載荷試験の状況
Flexural Loading Test

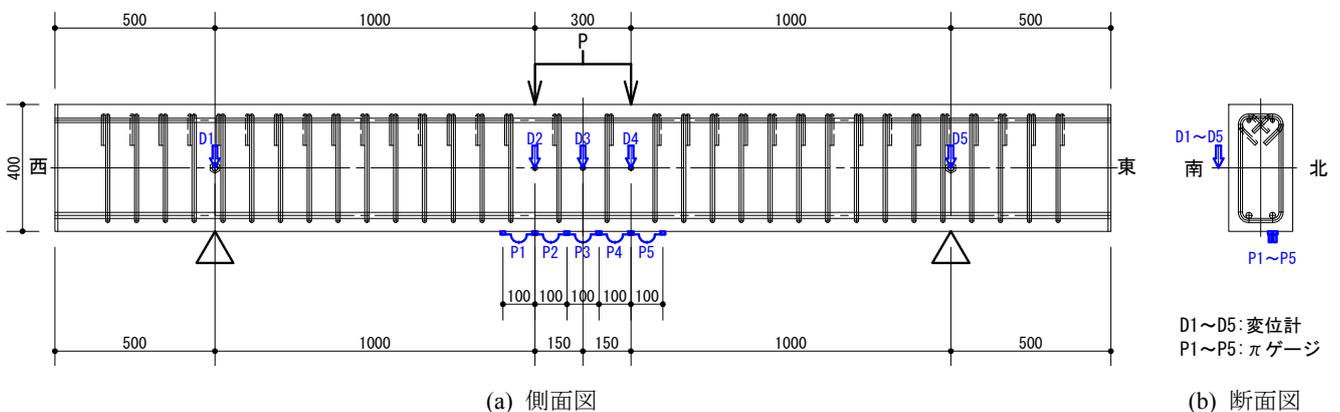


Fig. 4 RCはり供試体の配筋および計測器位置図 (単位: mm)

Bar Arrangement and Measuring Instrument Drawing of RC Beam Specimen

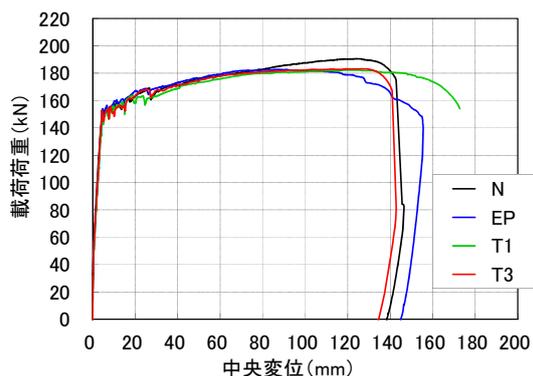


Fig. 5 荷重と中央変位の関係
Relationship between Load and Central Displacement

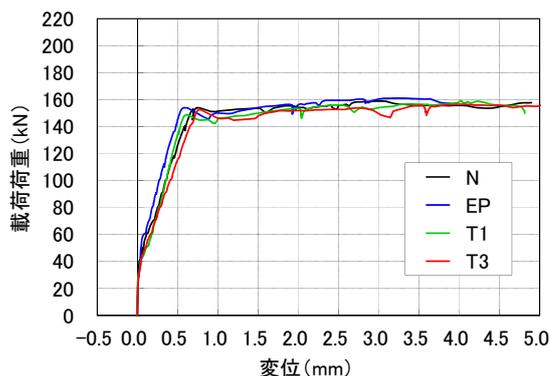
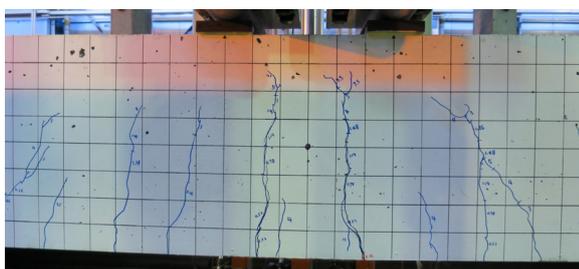
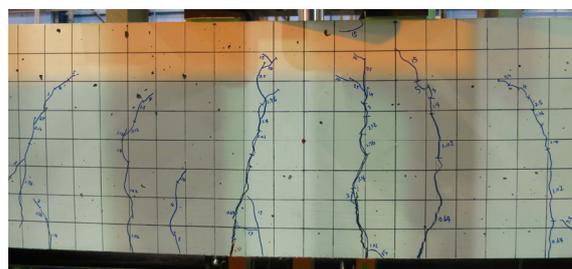


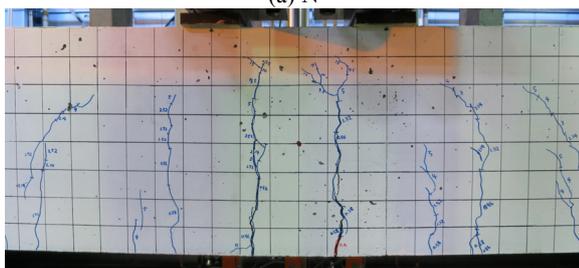
Fig. 6 荷重とひび割れ幅の関係
Relationship between Load and Crack Width



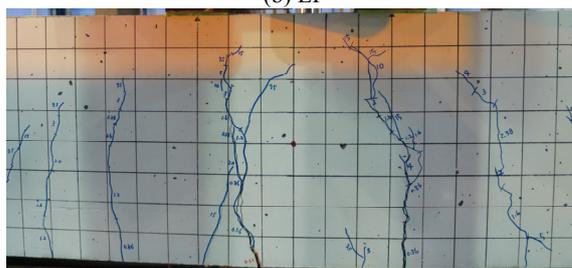
(a) N



(b) EP



(c) T1



(d) T3

Photo 8 荷重中のひび割れ状況 (中央変位15mmのとき)
Flexural Cracks in the Term of 15 mm Central Displacement

参考文献

1) 土木学会：コンクリートライブラリー112 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] , 2003.11

2) 小林一輔, 他：エポキシ樹脂塗装鉄筋に関する実験的研究, コンクリート工学論文, 21(2), pp.91-106, 1983.9
3) 前田聡, 他：最近のエポキシ樹脂塗装鉄筋の諸性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, 2005. 7