

論文 最近のエポキシ樹脂塗装鉄筋の諸性能

前田 聡^{*1}・須田 裕也^{*2}・山口 明伸^{*3}・武若 耕司^{*4}

要旨：エポキシ樹脂塗装鉄筋は防食性が高く、コンクリート構造物の塩害対策として極めて有用な材料である。その品質は土木学会の指針によって規定されており、2003年に指針の改訂版が発刊された。本研究では、改訂版の発刊に先立ち、最近のエポキシ樹脂塗装鉄筋の諸性能について確認実験を行った。まず、エポキシ樹脂塗装鉄筋の品質を塗膜厚およびピンホールで確認し、その後、曲げ加工性、耐衝撃性、塗装鉄筋とコンクリートの付着性などの諸性能を検討した。一方、塗膜のエポキシ樹脂は紫外線で劣化することが知られている。そこで約半年間、屋外暴露したエポキシ樹脂塗装鉄筋の諸性能についても併せて検討した。

キーワード：エポキシ樹脂塗装鉄筋、紫外線劣化、付着性、曲げ加工性、耐衝撃性

1. はじめに

2002年よりコンクリート構造物の設計概念は性能照査型に移行し、塩害環境下のコンクリート構造物の耐久性能を定量的に評価できるシステムは整った。しかし、性能照査型の設計に従うと、極めて苛酷な塩害環境下の構造物では、コンクリートの配合調整やかぶりの増加といったコンクリートの性能に頼った塩害対策では不経済となるばかりか、設計が不可能となる場合も出てきた。示方書によると、このようなケースでは、より積極的な鉄筋防食対策を実施することが明記されている¹⁾。

このような背景の下、塩害環境下に設置されるコンクリート構造物の防食方法として、エポキシ樹脂塗装鉄筋（以下、EP鉄筋と称す）は、最も汎用性に優れ、かつ信頼のおける方法の一つとして再認識されてきている²⁾。EP鉄筋の品質は、1986年に土木学会から発刊された「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）」（以下、旧指針と称す）によって規定されている³⁾。しかし、旧指針制定

以降の材料品質や、加工技術の向上等により、EP鉄筋の性能は当時と異なっている可能性がある。そこで本研究では、最近のEP鉄筋の諸性能について確認するための実験を行い、2003年の指針の改訂にあたり、一助とすることを試みた。

2. EP鉄筋の各種品質に関する検討

2.1 実験に用いたEP鉄筋

本実験に使用したEP鉄筋は公称直径10, 13, 16, 19, 25mmの異形鉄筋（以下D10, D13, D16, D19, D25と称す）をエポキシ樹脂で静電粉体塗装したものである。静電粉体塗装では、ブラスト処理により素地調整を施した鉄筋を予熱し、鉄筋に+の電気を、エポキシ樹脂粉体に-の電気をそれぞれ帯電させて、クーロン力により鉄筋表面に均一な塗装を行う。図-1にはEP鉄筋の製造工程をそれぞれ示した。塗膜厚については、いずれの試験においても、旧指針で示されていた目標塗膜厚200 μ mに加え、目標塗膜厚250および300 μ mのEP鉄筋も用いた。

*1 鹿児島大学 工学部海洋土木工学科（正会員）

*2 大林道路（株） エンジニアリング部（非会員）

*3 鹿児島大学 工学部海洋土木工学科助手 博（工）（正会員）

*4 鹿児島大学 工学部海洋土木工学科助教授 工博（正会員）

2.2 EP 鉄筋の各種品質とその試験方法

EP 鉄筋の品質を塗膜厚およびピンホールで確認し、その後、曲げ加工性、耐衝撃性、EP 鉄筋とコンクリートの付着性などの諸性能を検討した。いずれの試験方法も、旧指針に準拠して行った。以下に試験方法の概略を示した。

(1) 塗膜厚

試験装置は電磁式膜厚測定機の 1 極式プローブを使用し、塗膜厚 100~300 μ m の範囲で測定精度が \pm 4%以内であるものを使用した。試験では、D16, D19, D25 の長さ 50cm の EP 鉄筋において、1 本当たり 5 箇所測定し、塗膜厚 3 水準および鉄筋径 3 水準ごとに 5 本ずつ用いた。また、塗膜厚の測定箇所は、EP 鉄筋のふし、リブ部を除き、ふしとふし、リブとリブの間の平滑部とした。

(2) ピンホール

試験装置はホリデーディテクターおよび探蝕子を使用し、試験電圧は 1000V とし、走査速度 0.5m/sec 以下の速度で探蝕子を移動させピンホールの有無を調べた。試験では、長さ 50cm の EP 鉄筋を塗膜厚 3 水準および鉄筋径 3 水準ごとに 5 本ずつ用いた。ここで旧指針では、ピンホール数が鉄筋 1m 当り、D19 以下の場合、5 個以内、D22 以上の場合、8 個以内とされている。

(3) 曲げ加工性

EP 鉄筋の曲げ加工性試験に用いた鉄筋曲げ装置は、支点ローラーや力点ローラーなどの EP 鉄筋と金属が直接接触する部分は、ウレタンでライニングした。曲げ加工性試験は、まず試験材を 24 時間以上 20℃ で保存した後、曲げ内直径を D16 では公称直径の 1.5 倍、D19 および D25 では公称直径の 2 倍とし、180°まで曲げた。その後、曲げ外周および内周表面の塗膜を肉眼により観察し、微小クラック、開口クラック、剝離などの欠陥の数を記録した。

(4) 耐衝撃性

耐衝撃性試験では、固定荷重が 1.8kg で、先端が直径 16mm の半円球状のおもりが、所定の

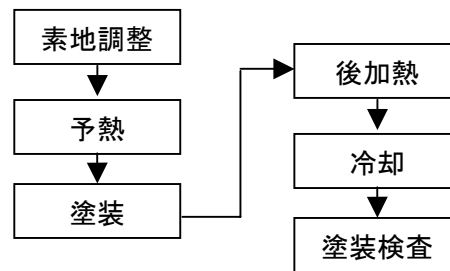


図-1 EP 鉄筋の製造工程

表-1 付着試験用コンクリート配合

W/C (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m ³)			
		W	C	S	G
60	45	203	338	857	911

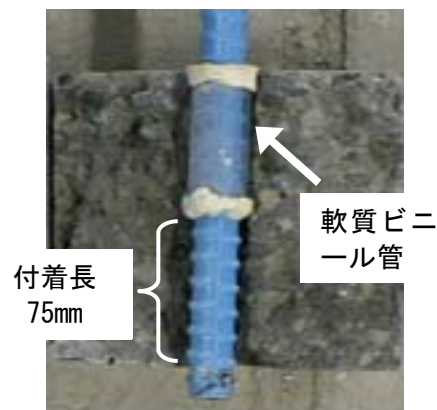


写真-1 EP 鉄筋とコンクリートの付着状況

高さから試験体に自由落下で衝撃を与えることのできる落下衝撃試験装置を用いた。本試験では、旧指針に従い衝撃強度を 30kg \cdot cm としたため、おもりは 16.7cm から落下させた。1 本の EP 鉄筋につき、合計 20 箇所の節間の平滑部におもりを落下させ、損傷率を算定した。

(5) EP 鉄筋とコンクリートとの付着性

試験材は、D10, 13, 19 のエポキシ樹脂塗装鉄筋および、その母材となった無塗装鉄筋を 1m の長さに切断したものとし、目標塗膜厚が 200, 250, 300 μ m のものそれぞれ 3 本ずつを使用した。供試体の形状は、旧指針に従い 1 辺の長さ 15cm の立方体供試体で鉄筋とコンクリートとの付着区間は自由端側に設け、その長さは 75mm とした。

コンクリートは、粗骨材の最大寸法は 20mm とし、スランプを 10 \pm 2cm、試験時の圧縮強度

を $29.4 \pm 2.9 \text{ N/mm}^2$ とした。細骨材は吸水率 2.05%，表乾密度 2.65 g/cm^3 の富士川産川砂で，セメントは早強ポルトランドセメントを使用した。コンクリート配合を表-1 に示した。コンクリートを打込む際は，コンクリートとの付着区間の鉄筋表面を清掃し，油類，汚れなどを取除いた。鉄筋の付着長が一定の長さとなるように，写真-1 に示すように付着長以外の鉄筋部分にはあらかじめコンクリートとの付着を絶つため軟質ビニール管で被覆し，鉄筋が載荷面に垂直となるようにして型枠内に水平に設置した。型枠は，材令 2 日において取り外し，その後試験まで 20 ± 3 の水中で養生した。

2.3 EP 鉄筋の各種品質の試験結果

(1) 塗膜厚

試験では鉄筋径 3 種類，塗膜厚 3 水準について，それぞれ 5 本ずつ塗膜厚を測定し，その平均値および標準偏差を表-2 に示した。いずれの鉄筋径においても，目標塗膜厚が 250，300 μm の場合には，実測の平均塗膜厚が目標塗膜厚よりも若干小さいものの，目標塗膜厚の $\pm 5\%$ の範囲にあることから，ある程度，所定の塗膜厚を有する EP 鉄筋を作製可能であることが分かる。また，鉄筋径が等しい場合，いずれの目標塗膜厚も同程度の塗膜のばらつきがある一方で，鉄筋径が大きくなるのに伴い塗膜のばらつきが小さくなる傾向も確認した。なお，今回使用した EP 鉄筋の塗膜厚は，以前の EP 鉄筋と同程度のばらつきを有していたことも分かる。

(2) ピンホール

表-3 には 1m あたりのピンホール数を示した。目標塗膜厚が大きくなるのに伴い，ピンホール数は減少し，塗膜厚 250，300 μm においてはほとんど存在しなかった。また，今回使用した EP 鉄筋は，いずれの鉄筋径および塗膜厚においても，旧指針を満足しており，以前の EP 鉄筋と比べてもピンホール数は少ない。

表-2 塗膜厚の平均と標準偏差

鉄筋径		目標塗膜厚 (μm)			
		180*	200	250	300
D16	平均塗膜厚	-	198.0	243.0	291.5
	標準偏差	-	24.6	27.4	25.9
D19	平均塗膜厚	184.2	199.3	243.2	293.5
	標準偏差	20.8	19.8	21.6	21.9
D25	平均塗膜厚	184.4	209.7	240.7	285.9
	標準偏差	17.8	16.4	14.5	16.6

*旧指針 (p78 図-3~4) より抜粋

表-3 1m あたりのピンホール数

鉄筋径	目標塗膜厚 (μm)			
	180*	200	250	300
D16	-	2.1	0.4	0.3
D19	3.1	1.5	0.4	0.7
D25	5.5	1.7	0.4	0.5

*旧指針 (p80 図-5) より抜粋



写真-2 曲げ加工時の塗膜の破損状況 (D25, 300 μm)

(3) 曲げ加工性

D16 および D19 については塗膜厚のいかに拘らず，試験による塗膜の破損はまったく見られなかった。D25 においては塗膜厚 300 μm の場合のみ，写真-2 に示すような塗膜損傷が全 5 本のうち 3 本で見られた。旧指針では，剥離および浮きの発生頻度が 20% 以下でなければならないとしており，塗膜厚 300 μm の D25 鉄筋を除きすべてが合格であった。

(4) 耐衝撃性

耐衝撃性試験は，D25 について，塗膜厚 3 水準で各 3 本ずつ同じ試験を 2 度行い，その結果得られた各塗膜厚における破損率を図-2 に示した。旧指針では，衝撃強度 30 $\text{kg}\cdot\text{cm}$ で破損率が 20% 以下でなければならないと定められており，今回の結果では，塗膜厚 200 μm のみが旧指針の基準を満たした。なお，全体的な傾向としては，塗膜厚の増加にしたがって破損率も高

くなるようである。一方、D25 より径の小さい鉄筋においても、同様の耐衝撃性試験を行ったが、節間の幅が小さくなり試験を行うことが困難な状況だった。

(5) EP 鉄筋とコンクリートとの付着性

一例として、D10 における、各塗膜厚 3 本の平均付着応力度とすべり量の関係を図-3 に示す。すべり始めの時点では、同一付着応力度におけるすべり量は EP 鉄筋が無塗装鉄筋より大きい。付着応力度が大きくなると両者のすべり量の差はそれほどなくなる傾向にあった。また、塗膜厚の影響については、塗膜厚が大きくなるにしたがってすべり量は大きくなる傾向があった。表-4 に、すべり量 0.3mm における無塗装鉄筋の付着応力度に対する EP 鉄筋の比率を示す。指針では、最大付着応力度は無塗装鉄筋の 80% 以上でなければならないとしているが、今回の試験では、無塗装鉄筋の場合にコンクリートに割裂ひび割れが発生するなどして、正確な最大付着応力度を得ることができなかった。このため、ここでは EP 鉄筋において最大付着応力度のおよそ 80% の応力度でのすべり量に相当する 0.3mm のすべり量における両者の応力度の比を検討の対象とした。その結果、塗膜厚 300 μ m の場合には、付着応力度比が 80% を下回る状況も確認されたが、塗膜厚 200 μ m および 250 μ m の EP 鉄筋では、すべてのケースで、80% 以上の値を示した。

3. EP 鉄筋の紫外線による劣化調査

3.1 実験に使用した EP 鉄筋および暴露環境

製造時に上記 2. で示すような品質を有する EP 鉄筋を、鹿児島大学海洋土木工学科棟の屋上に写真-3 の状況で、平成 15 年 6 月～12 月までの 6 ヶ月間暴露した。

3.2 各種試験内容および結果

(1) 鉄筋と塗膜の付着性

鉄筋と塗膜の付着性を検討するために、塗膜碁盤目試験を行った。試験には D25 の EP 鉄筋を使用し、塗膜厚ごとにそれぞれ 10 本ずつ試験

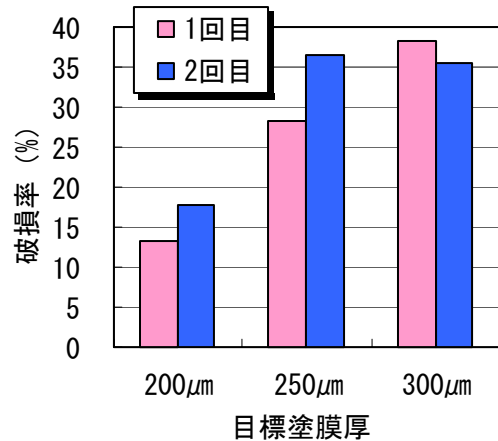


図-2 塗膜の破損率 (D25)

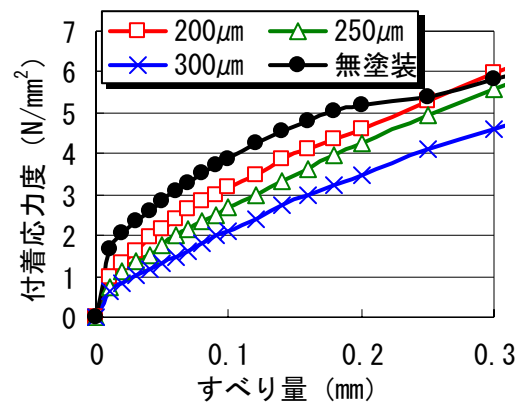


図-3 すべり曲線 (D10)

表-4 無塗装鉄筋に対する付着応力度比 (%)

	200 μ m	250 μ m	300 μ m
D10	89.0	83.5	77.0
D13	101.7	118.9	81.1
D19	82.5	89.0	76.5

を行った。試験方法は、写真-4 に示すようにナイフを用いて 1 本の EP 鉄筋に一边が 3mm の正方形のます目を 6 個つくり、その上に、JIS Z 1522 に適合するテープを完全に密着するように貼り付けてから、瞬時にはがした。塗膜厚 1 水準について計 60 個のます目を試験したが、暴露した EP 鉄筋において、塗膜がテープに付着し、素地鉄筋から剥がれたます目は全く見られず、今回の試験においては、EP 鉄筋を 6 ヶ月間屋外に暴露しても素地鉄筋とエポキシ樹脂塗膜との密着性は低下していないことが確認された。また、素地鉄筋の腐食は確認されなかった。

(2) 曲げ加工性

曲げ加工性試験では、長さ 70cm の D13 および D19 の EP 鉄筋を使用し、塗膜厚ごとに、暴

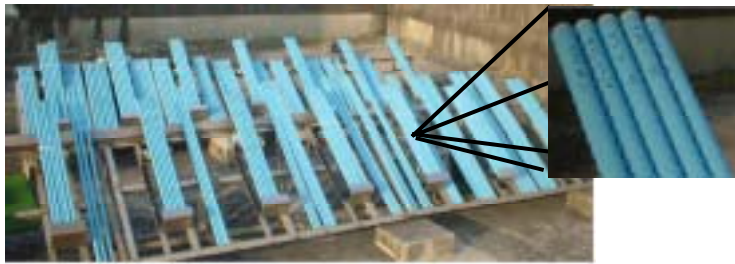


写真-3 屋外暴露の状況

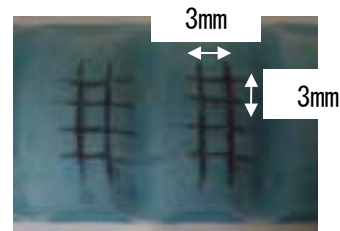
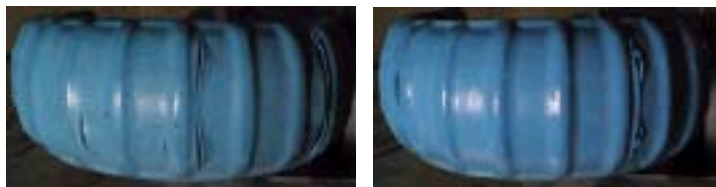


写真-4 塗膜基盤目試験の状況



暴露面加工

暴露裏面加工

写真-5 EP 鉄筋 (D19, 300 μm) の曲げ加工後の塗膜

表-5 曲げ加工時の破損率 (%)

塗膜厚	200μm	250μm	300μm
保管	33	0	17
暴露面	0	100	100
暴露裏面	33	50	67

露した面を外側にした場合（以下，暴露面加工と称す），および暴露した面を内側にした場合（以下，暴露裏面加工と称す）それぞれについて曲げ加工試験を実施した。また，比較として室内に同じ期間保管した場合についても同様の試験を実施した。写真-5には，一例として，暴露した EP 鉄筋 (D19, 300μm) の曲げ加工後の塗膜の状況を示した。この写真にも見られるように，曲げ加工面が暴露面あるいは暴露裏面のいかに拘わらず，いずれも EP 鉄筋の曲げ加工部の塗膜には割れが生じた。特に，暴露面加工の場合には細かい割れと大きな割れが混在しているのに対し，暴露裏面加工の場合には開口によって素地が見えるほどの大きな割れだけが生じる結果となった。また，表-5には，D13の EP 鉄筋を曲げ加工した際に割れが生じた割合（試験した 6 本中，割れの大小のいかに拘わらず，割れが 1 個でも生じた本数の割合）を塗膜厚および曲げ加工面ごとに示した。これより，暴露面加工および暴露裏面加工の場合には，塗膜厚が大きくなるのに伴い，割れ発生率も大きくなるのが分かる。なお，室内に保管していた場合においても，塗膜厚が 200 および 300μm の EP 鉄筋には割れが生じるものがあった。

(3) 耐食性

耐食性試験には，上記の曲げ加工試験後の U



写真-6 塩水噴霧試験の状況



写真-7 暴露面加工の腐食状況
(塩水噴霧 25 サイクル)

字型の EP 鉄筋を使用した。EP 鉄筋は，写真-6 に示すように，濃度 5% の塩水噴霧を 2 時間と乾燥を 22 時間の計 24 時間を 1 サイクルとし，35 で保たれた塩水噴霧試験装置内に設置した。塩水噴霧 25 サイクル時の EP 鉄筋 (D19, 200μm, U 字, 暴露面加工) の状況は写真-7 に示す通りであり，曲げ加工時に生じた微小な割れから，素地鉄筋の錆汁が染み出ている状況を確認できた。

(4) EP 鉄筋とコンクリートとの付着性

6 ヶ月間暴露した EP 鉄筋を，上記 2.2(5) と同様な方法で試験を行った。一例として，室内で保管していた EP 鉄筋，および屋外暴露 6 ヶ月後の EP 鉄筋の付着応力度比（同一すべり量

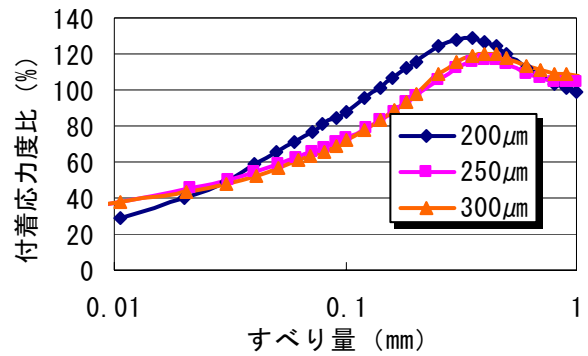
時の無塗装鉄筋の付着応力度に対する比率)と鉄筋の自由端すべり量の関係を図-4 にそれぞれ示した。これより、室内保管および屋外暴露後のいずれも、すべり量が0.1mm以下においては、無塗装鉄筋に比べて、EP鉄筋の付着応力度は小さくなったが、すべり量が大きくなるとむしろEP鉄筋の付着応力度が大きくなった。また、全体的な傾向として、塗膜厚のいかに拘らず、室内保管に比べ屋外暴露後の方が付着応力度比は若干大きいようである。図-5には、D10、D19のEP鉄筋の最大付着応力度比(無塗装鉄筋の最大付着応力度に対する比率)を示した。EP鉄筋の最大付着応力度は、無塗装鉄筋に比べて全体的に大きい。また、屋外暴露の影響については、鉄筋径や塗膜厚が等しい場合、一部を除いて、暴露前に比べ暴露後の付着応力度は大きくなる結果となった。

4. まとめ

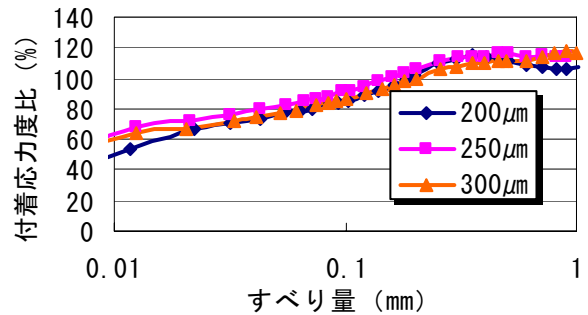
本研究では、最近のエポキシ樹脂塗装鉄筋の諸性能を確認するとともに、エポキシ樹脂塗装が紫外線で劣化した場合のエポキシ樹脂塗装鉄筋の性能試験も行い、次のことを確認した。

最近の技術により、ピンホールがほとんど存在せず、目標塗膜厚の±5%の範囲で、所定の塗膜厚を有するEP鉄筋を作製することが可能である。しかしながら、耐衝撃性については、径が小さい場合には試験自体が困難になるため、試験方法を見直す必要があると考えられる。EP鉄筋とコンクリートの付着性は、すべり始めの時点では、同一付着応力度のすべり量はEP鉄筋が無塗装鉄筋より大きいが、付着応力度が大きくなると両者のすべり量の差は小さくなる傾向がある。

6ヶ月間の屋外暴露により、素地鉄筋と塗装の付着が低下することはないが、曲げ加工すると、暴露面のいかに拘らず、塗膜に大小の割れが生じる。また、曲げ加工により目視では確認できないような細かい割れが生じた場合でも、耐食性は著しく低下したことから、EP鉄筋の屋



(a) 室内保管していた EP 鉄筋



(b) 屋外暴露した EP 鉄筋

図-4 すべり量と付着応力度比の関係 (D19)

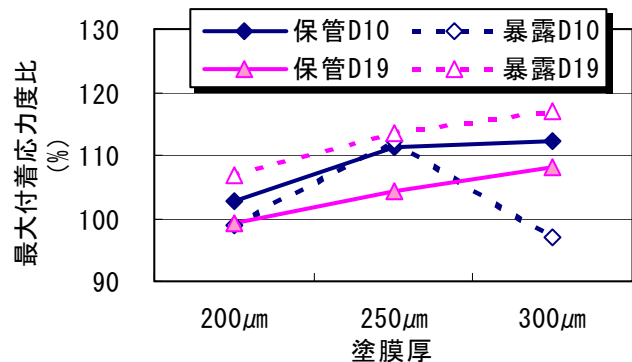


図-5 鉄筋径および塗膜厚ごとの最大付着応力度比

外での放置は避けるべきである。一方、EP鉄筋とコンクリートとの付着性については、暴露による影響は見られなかった。

参考文献

- 1) 土木学会：2002年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕, 2002
- 2) 日本道路協会：道路示方書・同解説 コンクリート橋編, 2002
- 3) 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(案), コンクリートライブラリー第58号, 1986