

論文 エポキシ樹脂塗装鉄筋コンクリートの防食効果に関する研究

星野 富夫^{*1}・魚本 健人^{*2}

要旨：エポキシ樹脂塗装鉄筋に損傷を付加したものや曲げ加工を施した鉄筋を用いたコンクリート梁を作製し、海洋環境下に暴露して長期の防食効果と耐久性を研究している。

本報告では、これらコンクリート梁中の鉄筋の海洋暴露5年までの電気化学的測定結果と解体実験から得られた鉄筋の腐食性状や塩分の浸透状態等との関係について検討したものである。エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いた場合には、多少大きな損傷を付加した場合でもコンクリートに悪影響をおよぼすような腐食の進行は殆ど認められなかった。

キーワード：エポキシ樹脂塗装鉄筋，長期海洋暴露，塩分浸透，電気化学的性質，耐久性

1. はじめに

エポキシ樹脂塗装鉄筋は、コンクリートのみでは鉄筋の腐食を防げないような苛酷な塩分環境下に設置される鉄筋コンクリート構造物の最も信頼のおける防食方法として、多くの構造物に適用されている。

我が国における「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」は、1986年2月に制定され¹⁾、2003年11月には改訂がなされた。この改訂では、新たな知見が取り込まれているもののエポキシ樹脂塗装鉄筋の耐久性については明らかにされていない面もある。

本報告では、損傷を付与したものや曲げ加工等を施したエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いて作製した鉄筋コンクリート梁の長期の海洋暴露実験を行い、その防食効果や耐久性を明らかにしようとしたものである。また、エポキシ樹脂塗装鉄筋自身の暴露実験も行っている。

海洋暴露実験は、伊豆半島東海岸（静岡県伊東市富戸：伊豆海洋公園内、写真-1）で行っているものであり、今回は暴露5年までの結果を報告する。

2. 実験概要



写真-1 海洋暴露実験場

2.1 コンクリートの使用材料と配合

コンクリートには、普通ポルトランドセメント（TO社製，密度： 3.16g/cm^3 ，比表面積： $3.300\text{cm}^2/\text{g}$ ），細骨材は大井川水系陸砂（密度： 2.60g/cm^3 ，吸水率： 1.67% ，粗粒率： 2.77 ）と最大寸法20mmの砕石（青梅産砂岩，密度： 2.65g/cm^3 ，吸水率： 0.72% ）を用いた。

コンクリートの基準の配合は表-1に示すような、水・セメント比： 50% ，単位水量： 172kg/m^3 ，スランプ： $10\pm 1\text{cm}$ のコンクリートを用いた。また、比較のために一部の試験体には、水・セメント比： 40% と 60% のものも作製した。

2.2 鉄筋

*1 東京大学 生産技術研究所 技術専門官（正会員）

*2 東京大学 生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター 工博（正会員）

エポキシ樹脂塗装鉄筋は黒皮鉄筋（SD295A, D13, D19）にブラスト処理を施し、黒皮部分を落とした鉄筋に粉体エポキシ樹脂を静電塗装したものをを用いた。実験には目標塗膜厚が $200\mu\text{m}$ のエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いたが、素材の暴露実験では $300\mu\text{m}$ のものも用いた。これらのエポキシ樹脂塗装鉄筋の膜厚、ピンホール、曲げ加工性等の品質は、土木学会規準に十分適合したものである。

比較の為に用いた黒皮鉄筋と亜鉛めっき鉄筋は、エポキシ樹脂塗装鉄筋に用いたものと同種のものであるが、亜鉛めっき鉄筋には溶融亜鉛めっきを行ったものであり、亜鉛の付着量は $600\sim 800\text{g}/\text{m}^2$ であった。

2.3 試験体

実験に用いたコンクリート梁は、**図-1**～**3**に示すような形状の矩形梁を用いた。

図-1に示すコンクリート梁は、かぶりの影響を検討するためのものであって、 $15\times 15\times 53\text{cm}$ の矩形梁にかぶりが 2.5cm と 4.5cm となるように D13 と D19 の鉄筋を 4 本埋め込んだものである。

図-2に示したコンクリート梁は、曲げ加工を施した鉄筋の性状を検討するための試験体であり、 $15\times 20\times 60\text{cm}$ の矩形梁に同種の鉄筋を用いたスターラップ（D6）を用いて鉄筋を固定した。この場合の底面側のかぶりは 3cm であり、曲げ加工を施した側面のかぶりは 2.5cm である。

図-3に示すコンクリート梁は、エポキシ樹脂塗装鉄筋に損傷を付与した場合の影響を検討するた

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単用量 (Kg/m^3)			
		W	C	S	G
40	44	172	430	741	959
50	46		344	806	965
60	48		287	863	954

めの試験体であり、 $10\times 15\times 120\text{cm}$ の矩形梁にかぶりが 2.5cm となるように同種の鉄筋を 2 本埋め込んだ。

損傷の付与は②③④と⑧⑨⑩ならびに⑬⑭⑮の箇所に施した。損傷の形状としては、節間に付与したもの（E②）と節上に付与したもの（E①）であり、節間には $4\times 3\text{mm}$ 程度のものを②③④（写真-2）に $1\times 1\text{mm}$ 程度のものを⑧⑨⑩

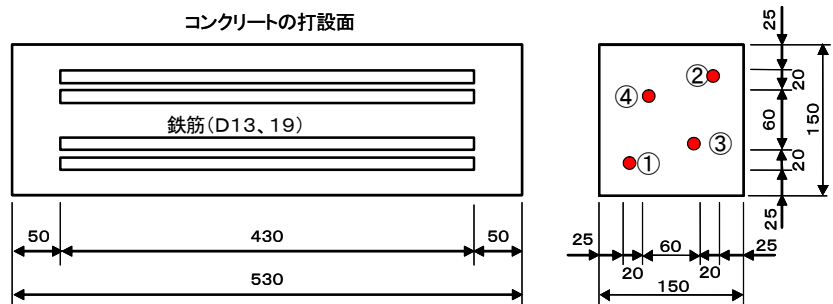


図-1 暴露試験体の形状と寸法（かぶりと鉄筋径）

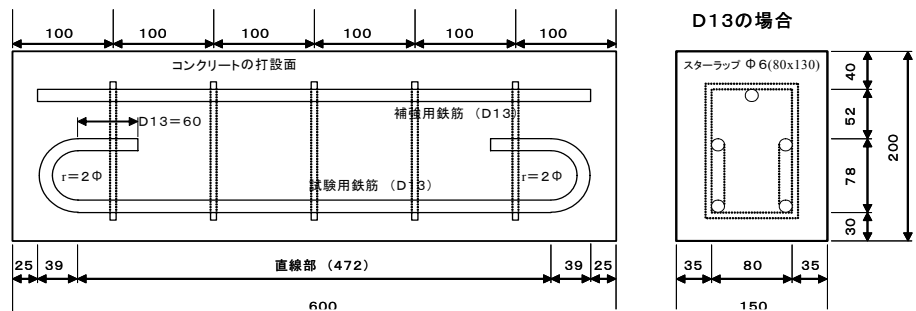


図-2 暴露試験体の形状と寸法（曲げ性状の検討）

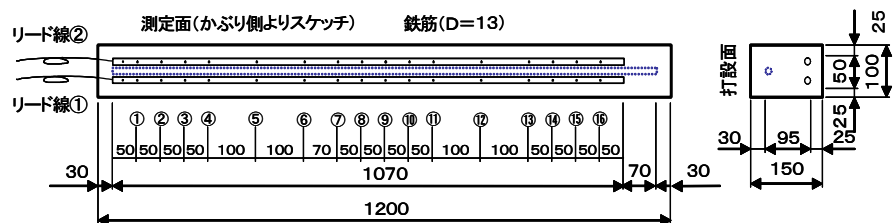


図-3 暴露試験体の形状と寸法（損傷付与の検討）

に、5×5mm 程度のものを⑬⑭⑮に付与した。

節上には直径が約 1~2mm 程度のものをカッターやグラインダーを用いて3連付与した。

3. 実験結果と考察

3.1 コンクリートの強度性状

海洋暴露実験に用いたコンクリートの暴露材令と圧縮強度の関係を図-4に示す。暴露開始から半年程度は強度の増進が顕著であるがその後の強度増加が認められない。しかし、暴露5年程度でも大幅な強度低下は認められない。

3.2 暴露した鉄筋の変状

写真-3に5年間海洋暴露した鉄筋(D13)の腐食状態を示す。右から3本目が黒皮鉄筋であり、鉄筋が大幅にやせ細っている。また、左側に示した亜鉛めっき鉄筋には、白濁した腐食生成物と若干の赤錆が認められたが重量減少は認められなかった。コンクリート中における亜鉛めっき鉄筋は、塩分が進入すると爆発的な腐食となるが²⁾、鉄筋単体では塩分環境下での防食効果が認められる。

右から1,2本と4,5本がエポキシ樹脂塗装鉄筋であり、1と4本目のものが塗膜厚が200 μ mであり、2と5本目が300 μ mである。塗膜厚が200 μ mの場合には、腐食が認められるが塗膜が剥がれるような状態ではなかった。一方、塗膜厚が300 μ mの場合には、塗膜に若干の褪色があるものの腐食は全く認められない。

エポキシ樹脂塗装鉄筋をこのような環境下に直接曝した状態で使用することは考えられないが、塗膜厚を300 μ m程度にすればこのように過酷な腐食環境下でも十分耐えられる。

3.2 コンクリート梁の鉄筋の腐食性状

表-2には、図-1のコンクリート梁(黒皮鉄筋)から取り出した鉄筋の腐食面積率を示す。かぶりが2.5cmのコンクリート梁の底面側(①)と打設面側(②)ならびにかぶりが4.5cmの底面側(③)と打設面側(④)である。この表中では、腐食が認められない鉄筋については削除してある。水・セメント比が60%のコンクリー

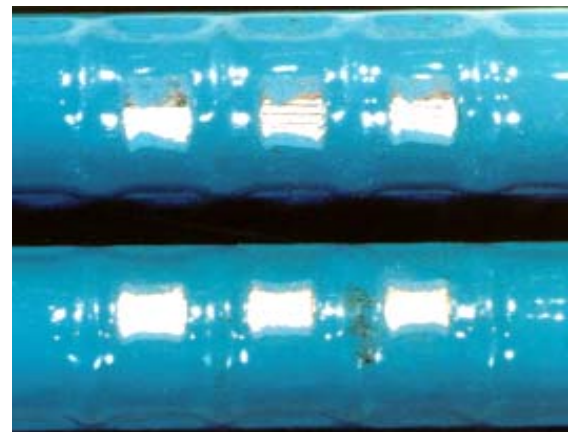


写真-2 塗装鉄筋への損傷の付与

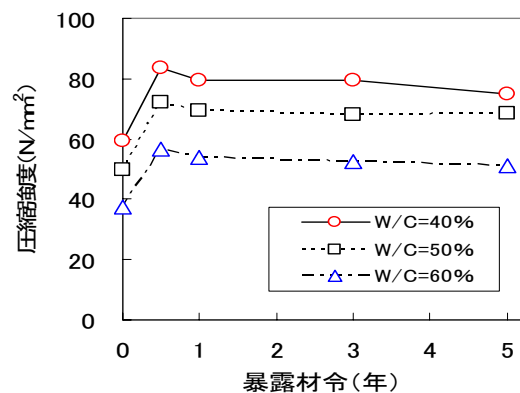


図-4 圧縮強度の経時変化



写真-3 暴露鉄筋の腐食状態(暴露5年)

トと鉄筋径が19mmの場合に大きな腐食面積率を示している。また、かぶりが4.5cmの場合には、水・セメント比が60%のコンクリートと50%の鉄筋径が19mmの鉄筋に腐食が認められた。

一方、鉄筋径が13mmと19mmのエポキシ樹脂塗装鉄筋コンクリート梁から取り出した鉄筋には、全く腐食は認められなかった。

この試験体から取り出したエポキシ樹脂塗装鉄筋のピンホールをホリデーディテクターにより調べ、かぶりが 2.5cm の鉄筋にあったピンホールを写真-4 に示す。高電圧の印加で微少な孔が出来ているが、その周辺では、腐食などの変状は全く認められなかった。

図-3 に示したコンクリート梁は、かぶりが 2.5cm で水・セメント比が 50% のものであるが、前述のものとは異なり、黒皮鉄筋の場合には 72% もの腐食面積率を示した。このコンクリート梁の場合には、暴露 3~3.5 年の間にコンクリート梁の側面に鉄筋腐食によるひび割れと錆汁が観察され、暴露 5 年時点ではかぶり側と側面に鉄筋に沿った大きなひび割れが認められた。

亜鉛めっき鉄筋の場合には、腐食面積率は 25% 程度であるが、写真-5 に示すように赤錆以外の部分には、鉄筋の全長にわたり白濁と黄褐色の生成物が認められた。この生成物は、鉄筋自身を暴露した場合に出来た生成物とは異なり、腐食の前兆を思わせるものである。

このコンクリート中のエポキシ樹脂塗装鉄筋に損傷を付与しないものと、2 種類の損傷を付与したものをを用いた。写真-6 は、節間をまたぐような大きな損傷（約 5×5mm）を付与した部分の腐食性状を示したものである。損傷を付与した部分に微かな腐食が認められるが、損傷を付与した大部分では光沢を保っている。この部分には腐食の発生に十分な塩分量が存在していたことから、取り出した鉄筋は空気に触れ、数日で腐食した。これよりも小さな腐食を付与したものと節上に付与した場合には、全く腐食が認められなかった。

3.3 コンクリートへの塩分の浸透

図-5 には、損傷の影響を検討したコンクリート梁（10×15×120cm）の塩分分析結果を示した。このシリーズでは、黒皮鉄筋の場合にはほぼ全長にひび割れが認められ、塩分の浸透がひび割れの影響を受けていることから、エポキシ樹脂塗装鉄筋のコンクリート梁から採取したコンクリート粉を分析した。ここに示す値は、JCI

表-2 コンクリート梁中の鉄筋の腐食状態
(海洋暴露 5 年)

W/C (%)	鉄筋径 (mm)	測定位置	かぶり (cm)	腐食面積 (%)
40	13	①	2.5	2.4
		②	2.5	3.4
50	13	①	2.5	2.2
		②	2.5	2.2
	19	①	2.5	59.8
		②	2.5	18.6
		③	4.5	14.6
		④	4.5	5.3
60	13	①	2.5	55.1
		②	2.5	18.0
		③	4.5	2.5



写真-4 エポキシ樹脂塗装鉄筋のピンホール

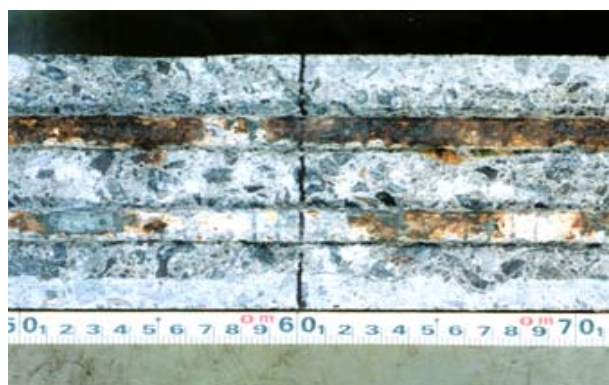


写真-5 亜鉛めっき鉄筋の腐食状態

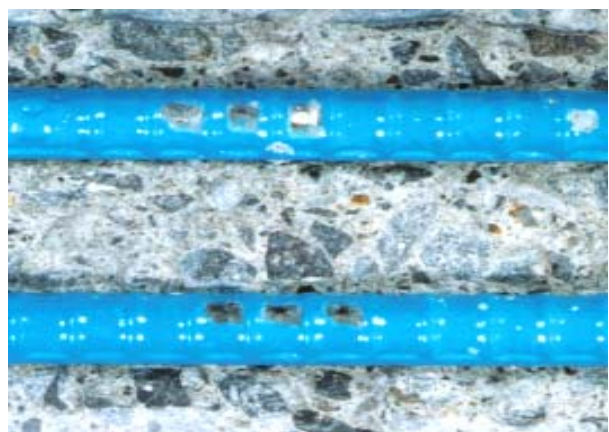


写真-6 エポキシ樹脂に付与した損傷の変状

—SC5の分析方法による全塩分であるが、鉄筋の位置ではCl量で約7kg/m³となり、鉄筋腐食の発生に十分な塩分量が認められた。

3.4 曲げ加工した鉄筋の性状

写真-7には、曲げ加工したエポキシ樹脂塗装鉄筋を埋め込んだコンクリート梁の端部を割裂して取り出した鉄筋の状態を示す。

この曲げ加工部のエポキシ樹脂の表面には、ひび割れの発生や変色などは認められなく、暴露開始時の様相を保っていた。また、黒皮鉄筋を用いた場合には、曲げによる鉄筋の降伏状態が認められるものの腐食は認められなかった。

この曲げ部のかぶりは2.5cmであり、鉄筋位置での塩分量は0.12% (Wt・%, NaCl換算)と図-5に示した上下方向のものよりは大幅に塩分量が少ない。このことから、このような傾向を示したものと思われる。

3.5 損傷の付与と電気化学的性質

図-6は、エポキシ樹脂塗装鉄筋に損傷を付与したコンクリート梁と同一な梁での黒皮鉄筋の自然電位の変化を暴露5年まで調べたものである。自然電位は、銀-塩化銀電極で測定したものであるが、暴露3年から4年にかけて鉄筋上での変化が認められる。前述したが暴露3年から3.5年にかけて梁側面にひび割れが発生したものであり、ひび割れの進行や解体して取り出した鉄筋の腐食状態は、この電位変化と良く対応している。また、この自然電位が暴露4年から5年にかけて貴側に移行した明らかな理由は判らない。

図-7には、エポキシ樹脂塗装鉄筋の節間に比較的大きな損傷を付与した鉄筋(E2)の自然電位の変化を示す。

この自然電位の変化をみると、暴露2年まではあたかも腐食が進行しているように思われるが、その後は貴側に転じ、暴露5年時点で急激に卑の値となっている。大きな損傷を付与した②③④と⑬⑭⑮の位置に対応するような傾向は認められなく、鉄筋上での変化も殆ど認められない。この自然電位の測定は、一本の鉄筋上で3

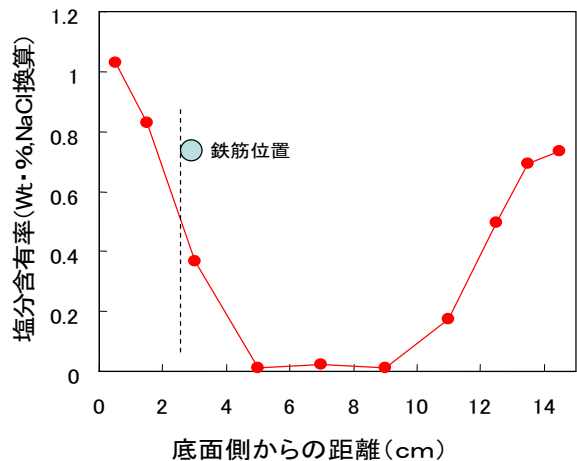


図-5 コンクリートへの塩分の浸透



写真-7 曲げ加工した鉄筋の外観 (海洋暴露5年)

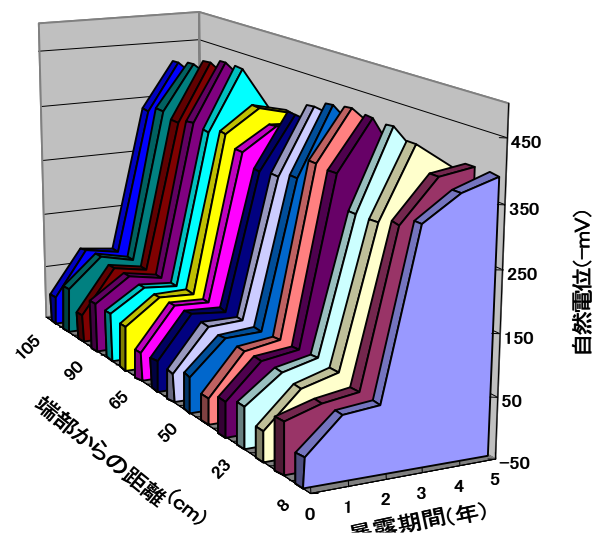


図-6 自然電位の経時変化 (黒皮鉄筋)

回以上の測定を行っているが、損傷を付与した場合のエポキシ樹脂塗装鉄筋の場合には、変動が少ない値が測定されることもある。このよう

な値は、端部に接続した鉄筋周辺のコンクリートからの導通による回路から得られるものであり、真の値でない場合があるものと思われる。

エポキシ樹脂塗装鉄筋の節上に損傷を付与したものと損傷を付与しない場合の自然電位は、コンクリート抵抗等の影響により、測定時に安定しないことから省略した。

図-8には、上述のコンクリート梁の海洋暴露5年時点で測定したコンクリート抵抗を示す。

このコンクリート抵抗は、S社製の腐食診断器により測定したものであり、コンクリートを介して鉄筋と照合電極間の抵抗を計っている。また、ここではかぶり厚さや鉄筋の面積を計算に入れていない見掛けのコンクリート抵抗で示している。

黒皮鉄筋と亜鉛めっき鉄筋のコンクリート抵抗は、1~3kΩと損傷を付与したエポキシ樹脂塗装鉄筋よりも著しく小さな値を示している。既往の研究³⁾でも、海水の影響等を受ける場合には、この程度のコンクリート抵抗となり、腐食の進行に伴ってコンクリート抵抗は小さくなる。

この図では、エポキシ樹脂塗装鉄筋の節上に損傷を付加(E①)した場合のものがコンクリート抵抗と良く対応し、損傷付与箇所のコンクリート抵抗は、健全部の1/3程度となっている。しかし、節間に損傷を付与(E②)した場合も、スケールを30kΩ程度にすると損傷の付与箇所と対応し、損傷の大きさに比例してコンクリート抵抗が低下し、大きな損傷面積を付与した場所では、健全部に比べ1/3程度の値となっている。

3. まとめ

エポキシ樹脂塗装鉄筋に損傷や曲げ加工を付与した鉄筋を用いたコンクリート梁の5年間の海洋暴露実験の結果から、多少大きな損傷を付加してもその部分の腐食は殆ど認められない。また、通常のエポキシ樹脂塗装鉄筋では、かぶりが2.5cm程度でも全く変状が認められない。一方、素材自身の暴露結果を見ると、300μmの塗膜厚ならば5年間でも変化が認められなく、

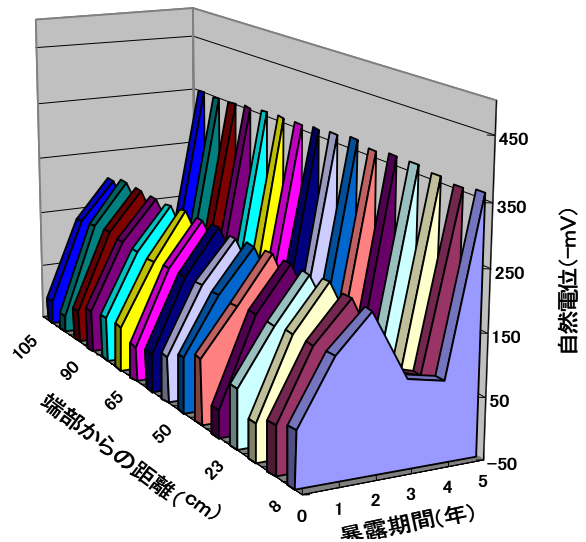


図-7 自然電位の経時変化
(エポキシ樹脂塗装鉄筋, E②)

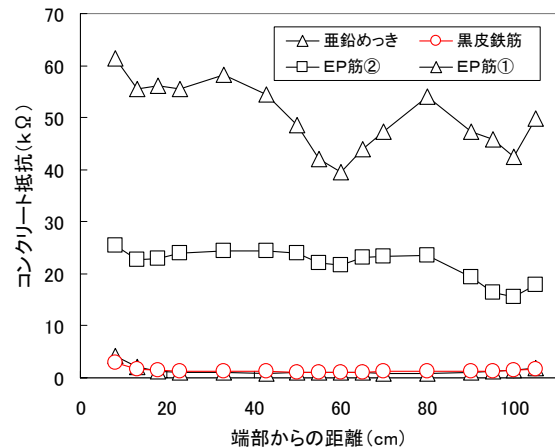


図-8 コンクリート抵抗
(海洋暴露5年)

この鉄筋の曲げ加工を行っても割れや剥離が生じなかった。

参考文献

- 1) 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), 土木学会, コンクリートライブラリー第58号, 1986年2月
- 2) 星野富夫, 魚本健人, 小林一輔: 15年間の海洋暴露実験を行ったエポキシ樹脂塗装鉄筋コンクリート梁の耐久性と防食効果, 土木学会論文集, No.592, V-39, pp.107-120, 1998年5月
- 2) 星野富夫, 魚本健人: コンクリート抵抗による耐久性評価に関する実験的検討, 土木学会年次学術講演概集, V-425, pp.850-851, 2001年10月