論文 沖縄の海洋飛沫帯に長期間暴露したエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いた コンクリートの防食効果に関する研究

星野 富夫*1・上久保 通夫*2・岸 利治*3

要旨:本論文では、海洋暴露実験によりエポキシ樹脂塗装鉄筋の防食効果を明らかにするために、塗膜への損傷を付与した鉄筋や曲げ加工を施した鉄筋を用いたコンクリート梁などにより、これらの要因が鉄筋コンクリートの耐久性におよぼす影響などを検討したものである。わが国の腐食環境としては、最も過酷な環境下である沖縄沿岸での10年間の海洋暴露実験の結果、コンクリート中の鉄筋周辺に発錆限界塩分量(1.2kg/m³)の10倍程度の塩化物が浸透している場合でも、エポキシ樹脂塗装鉄筋に変状は全く認められなかった。また、節間に跨るような損傷を付与したエポキシ樹脂塗装鉄筋では、損傷部表面に腐食は認められるものの孔食のような状態は認められず、コンクリートにひび割れを誘引するような状態は認められなかった。

キーワード: エポキシ樹脂塗装鉄筋, 海洋暴露実験, 損傷付与, 耐久性, 防食効果

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過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。

この「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:土木学会」は、1986年に制定され¹⁾ 2003年に改定がなされたが、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、暴露試験における基本的な項目であるコンクリートの品質とかぶりの検討の他に、エポキシ樹脂 塗装鉄筋に様々な損傷を模擬的に付与したものや各種 の鉄筋に曲げ加工を施した鉄筋を用いて作製したコン 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。

海洋暴露実験は、わが国の腐食環境としては最も過酷な環境下である沖縄県東海岸沿岸(沖縄県浦添湾、写真 -1、飛来塩分量:60~1320Clmg/dm²/月²))で10年間行ったものであり、暴露3年時点でも一部の試験体についての解体実験を行い報告³)している。なお、塩分の浸透や腐食性状を比較・検討するために、沖縄で作製した試験体を静岡県伊東市の伊豆海洋公園内の海洋暴露場に搬送し、暴露実験を行っている。

2.実験概要

2.1 コンクリートの使用材料と配合

コンクリートには、沖縄県産の普通ポルトランドセメント(R 社製、密度: $3.16g/cm^3$, 比表面積: $3.260g/cm^2$) を用い、細骨材としては新川産(密度: $2.64g/cm^3$, 吸



写真-1 海洋暴露実験場 (沖縄県浦添湾内)

水率:1.65%,粗粒率:2.26)の海砂と本部産(密度: $2.68g/cm^3$,吸水率:0.83%,粗粒率:3.55)の石灰石砕砂を6:4の割合で混合使用したものであり、粗骨材は最大粗骨材寸法が20mmの本部産(密度: $2.70g/cm^3$,吸水率:0.40%,粗粒率:6.69)の石灰石砕石を使用した。

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:170kg/m³、スランプ:10 ±1cm、空気量:4±0.5%のコンクリートを用いた。また、素材の腐食性状などを検討するために、水セメント比:40%と60%のものも作製した。

W/C	s/a	単位量(kg/m³)			
(%)	(%)	W	С	S	G
40	43	173	433	744	999
50	47	170	340	853	975
60	51	170	283	951	926

表-1 コンクリートの配合

^{*1} 東京大学 生産技術研究所 (正会員)

^{*2} 安治川鉄工(株) 技術研究所主管 (正会員)

^{*3} 東京大学 生産技術研究所教授 博士(工学) (正会員)

2.2 鉄筋

エポキシ樹脂塗装鉄筋には、黒皮鉄筋 (SD295A, D13) にブラスト処理を施し、黒皮部分を落とした鉄筋に 2 社の粉体エポキシ樹脂塗料 (主剤:約60%, 硬化剤:22~28%, 顔料:9~17%)を静電塗装したものを用いた。この静電塗装した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、土木学会規準に適合したものである。比較のため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600~800g/m²であった。

2.3 試験体

実験に用いたコンクリート梁は、シリーズ 1~3 に大別され、図-1~3に示すような形状の矩形梁を用いた。シリーズ 1 では、図-1 に示すようなコンクリート梁を用い、鉄筋の素材とかぶりの影響を検討したものであって、15×15×53cm の矩形梁にかぶりが 2.5cm と 4.5cm となるように 4 本の鉄筋を埋め込んだものである。

シリーズ 2 では、曲げ加工を施した鉄筋の性状を検討するために、図-2に示すような $15\times20\times60$ cm の矩形のコンクリート梁を用い、土木学会規準で

定める 2D で曲げ加工した 2 本の鉄筋の端部のかぶりが 2.5cmとなるよう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。この場合の底面側からのかぶりは 3cmと端部のかぶりよりも大きくした。この曲げ加工により、亜鉛めっき鉄筋の場合には、亜鉛めっきが剥げ落ちることからジンクリッチペイントで補修して試験に供した。

シリーズ3は、エポキシ樹脂塗装鉄筋に

損傷を付与した場合の 影響を検討するための 試験体であり、図-3 に示すような10×15× 120cm の矩形のコンク リート梁を用い、かぶ りが2.5cm となるよう に同種の鉄筋を2本埋 め込んだものである。

エポキシ樹脂塗装鉄筋への損傷の付与は, 電気化学的な測定位置 に対応させた2と9な らびに15の箇所に施 した。損傷の形状とし ては,節上に付与した もの (E1) と節間に付与したもの (E2) であり, 節上への損傷 (E1) の付与は,上述の2と9ならびに15の位置のエポキシ樹脂塗装鉄筋の節上に直径が約 1mm 程度のものをカッターやグラインダーにより,鉄筋に損傷を与えないように3連、3箇所付与した。節間への損傷(E2)の付与は、2の位置に5×5mm程度のものを3連付与し,1×1mm程度のものを9の位置に3連,3×3mm程度のものを15の位置に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

コンクリート梁の打設時に作製した圧縮強度試験用 (D10×20cm) コンクリートの海洋暴露材齢と圧縮強度の関係を図ー4に示す。暴露開始から半年程度は強度の増加は顕著であるが、その後の強度の増進は緩やかであったが、今回の暴露 10 年では強度の低下が明らかに認められた。

3.2 コンクリート梁の鉄筋の腐食性状

表-2には、鉄筋の素材とかぶりの影響を検討したシ リーズ1のコンクリート梁から取り出した鉄筋の腐食面

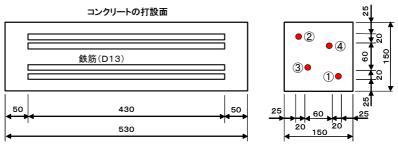


図-1 暴露試験体の形状と寸法(かぶりの検討、単位:mm)

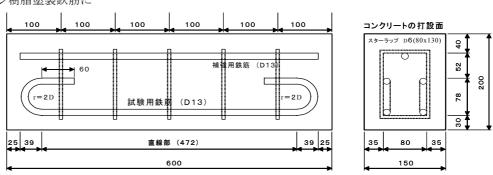


図-2 暴露試験体の形状と寸法(曲げ性状の検討,単位:mm)

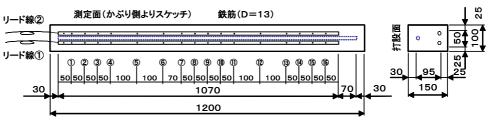


図-3 暴露試験体の形状と寸法(損傷付与の検討,単位:mm)

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、腐食が全く認められなかった鉄筋とエポキシ樹脂塗装鉄筋については削除してある。

黒皮鉄筋のコンクリート梁については、水セメント比が 40,50,60%のものを示している。水セメント比が 50%,60%の場合には、何れのかぶりの場合にも全面腐食を呈し、60%のコンクリート梁の解体前のコンクリート表面には大きなひび割れが認められ、剥落寸前の状態であった。このコンクリート梁から取り出した鉄筋には、大きな断面欠損も認められた。一方、水セメント比が 40%のコンクリート梁の場合には、何れの鉄筋にも腐食は認められるもののかぶりと配置による腐食面積率の影響が顕著に認められる。

一方、比較に用いた亜鉛めっき鉄筋を用いたコンクリート梁の場合には、水セメント比は50%のコンクリートであるが、かぶりの影響は認められ同種の黒皮鉄筋よりも腐食面積自体は小さな値を示している。しかし、鉄筋表面には腐食と判定されない白濁した生成物が全面に認められた。

エポキシ樹脂塗装鉄筋コンクリート梁から取り出し た鉄筋には全く変状が認められなかった。

3.3 エポキシ樹脂塗装鉄筋塗膜の性状 (シリーズ 1)

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(印加電圧:1kV)により調べ、かぶりが2.5cmの鉄筋から検出されたピンホールを写真-2の右側に示す。写真の下側に示したメジャーの間隔は1mmであることから、このように検出されるピンホールは0.2mm程度であることが分かる。このように検出されたピンホールは、腐食を誘引するような欠陥そのものでないことがこの写真からも分かる。また、写真-2の左側に示したピンホールは、コンクリート打設前の段階で鉄筋のピンホールを調べ、マークしたものを示しているが、長期間の暴露期間中にピンホールの開口部が閉塞したような状態を呈し、この開口部の塗膜が浸食されたり腐食の原因となるような兆候は全く認められない。

このエポキシ樹脂塗装鉄筋の塗膜を削り取り、示差走 査熱量測定(DSC)や赤外分光法(IR)により塗膜の性 状を調べた。

図-5には、海洋暴露 10 年のコンクリート梁から取り出したエポキシ樹脂塗装鉄筋の塗膜部を削り取り、DSC 測定したものの一例 (N社)を示したものである。一般的に塗膜劣化が進行すると化学結合の切断が発生し架橋密度の低下を招き、ガラス転移温度の低下を誘発するが、100℃近辺の静的ガラス転移温度からは塗膜の

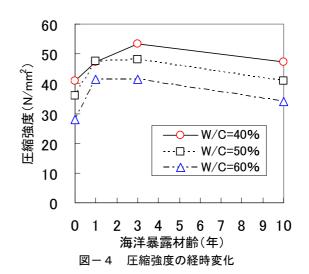
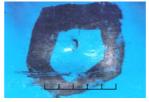
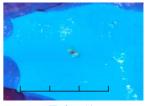


表-2 コンクリート梁中の鉄筋の腐食状態 (海洋暴露 10 年)

鉄筋種	W/C	測定位置	かぶり	腐食面積率
业人月刀作主	(%)		(cm)	(%)
	40	1	2.5	100
		(2)	2.5	10
		3	4.5	61
		4	4.5	6
	50	1	2.5	100
黒皮鉄筋		2	2.5	100
無及奶奶		3	4.5	100
		4	4.5	100
	60	1	2.5	100
		2	2.5	100
		3	4.5	100
		4	4.5	100
	50	1	2.5	75
亜鉛めっき		2	2.5	50
亜鉛のプラ		(3)	4.5	5
		4	4.5	15
黒皮鉄筋	50	1	2.5	99
沖縄作製		2	2.5	90
伊豆暴露		3	4.5	15
17 立 祭 時		4	4.5	29





暴露前に検出

暴露後に検出

写真-2 ピンホールの検出(横軸の単位:mm) 劣化は認められない。

IRの測定結果は図示していないが、エポキシ樹脂塗膜を構成する結合部の吸収値の変化は認められず、塗膜の劣化は認められないと推察された。今回の暴露実験には、2社のエポキシ樹脂粉体塗料を用い、塗膜性状の分析結果はN社のものであるがK社のエポキシ樹脂塗膜の分析結果でも同様な傾向を示している。

3.4 コンクリートへの塩分の浸透

図-6には、シリーズ1のコンクリート梁の塩分分析

結果を示す。

このシリーズでは、黒皮鉄筋や亜鉛めっき鉄筋を用い たコンクリート梁では、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結果を示す。

塩分の分析試料は、コンクリート梁を割裂して鉄筋を 取り出した中央部分を深さ方向に切断し、粉砕して分析 したものであって、JCI-SC5 の分析方法による全塩分で ある。

この図には、暴露3年時の分析結果と伊豆海洋暴露場 に搬送して暴露(11年)したものについても示している。

コンクリート梁の底面側を暴露上面としたこともあ り, 打設面側よりも底面側からの塩分の浸透が著しく, 底面側のかぶり位置 (2.5cm) では、NaCl 換算で 1.0% (Cl-:約15kg/m³) の塩分量となっている。

沖縄で作製して伊豆の海洋暴露場に搬送した暴露場 は常時海水飛沫を受ける環境であるが、この沖縄の暴露 場が写真-1で示すように岸壁の内側に設けられてい るにも関わらず、塩化物の浸透が大きいことが分かる。 3.5 曲げ加工した鉄筋の性状 (シリーズ 2)

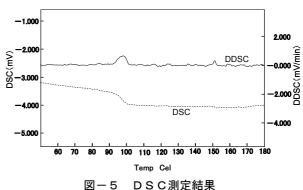
写真-3には、曲げ加工して埋め込んだコンクリート 梁の端部を割裂して取り出した鉄筋の性状を示す。

この曲げ加工部の鉄筋の曲げ半径は 2D であるが、エ ポキシ樹脂塗装鉄筋の塗膜表面には, ひび割れの発生や 変色などは全く認められず、暴露開始時の様相を保って いる。一方, 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とともに断面欠損を伴う全 面腐食の状態を呈し、側面のかぶり側のコンクリートに も大きなひび割れが発生していた。この黒皮鉄筋に比し, 亜鉛めっき鉄筋の場合には,全面腐食の状態にはなって いないものの非腐食部も白濁と黄褐色した生成物で覆 われている。

この亜鉛めっき鉄筋の曲げ加工時には、曲げ部の皮膜 が全面的に剥げ落ちたことから、その部分をジンクリッ チペイントで補修し試験に供した。このことから、厳密 には亜鉛めっきの腐食状態であると断定出来ない。

このコンクリート梁の端部鉄筋の曲げ部のかぶりは 2.5cm であるが、図-7に示した塩分分析結果からはこ の位置での塩分量は 0.3% (Wt・%, NaCl 換算) となっ ている。

この塩分分析も, 黒皮鉄筋や亜鉛めっき鉄筋の場合に はひび割れの影響を受けていると思われることからエ ポキシ樹脂塗装鉄筋のコンクリート梁を分析したもの である。また、このように鉄筋に挟まれている部分から の塩分分析試料は、切断や割裂から採取するのが難しい ことからドリル形式の採取装置により深さ方向に採取



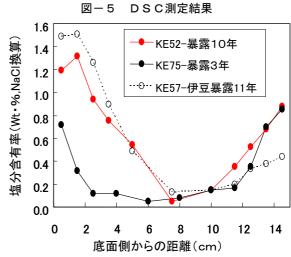




図-6

写真-3 曲げ加工した鉄筋の外観(暴露10年)

コンクリートへの塩分の浸透

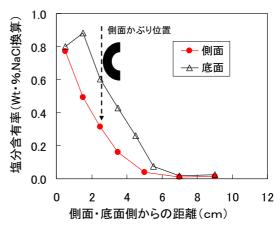


図-7 曲げ加工した鉄筋コンクリートへの塩分浸透

して分析した。

このシリーズ2の試験体の場合も暴露面はコンクリー ト梁の打設底面を上側にして暴露したことから、底面側 からの塩分の浸透が卓越している。

3.6 損傷を付与したエポキシ樹脂塗装鉄筋の性状と電気化学的性質(シリーズ3)

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の電気化学的性質を明らかにするとともに鉄筋腐食・劣化等の耐久性の判定への適用を視野に検討しているものである。

電気化学的測定としては、自然電位、分極抵抗、コンクリート抵抗等であるが、これらの値に大きく関与するコンクリートの含水率の測定は必ず行い、乾燥の影響を受けていないことを確認した(6~8%)。

図-8,9は、二重対極センサー式腐食診断器により 測定した分極抵抗とコンクリート抵抗の測定結果を示 したものであり、かぶりが2.5cmの底面側に面したエポ キシ樹脂塗装鉄筋の節上に損傷を付与したもの(E1)と 節間に付与したもの(E2)である。なお、電気化学的測 定はコンクリート梁試験体の乾燥による影響を排除す る目的で、沖縄の暴露場周辺で採取した海水を1週間散 水し、湿潤状態を保ちながら測定した。

図-8に示した分極抵抗には、コンクリート梁中の2本の鉄筋について示しているが、参考として黒皮鉄筋のデータも図示している。この黒皮鉄筋は、シリーズ1の結果と同様に全面が腐食し、断面欠損を生じている部分もあり、コンクリートには大きなひび割れも生じている。

この黒皮鉄筋の分極抵抗値としては、鉄筋腐食が進行している他の構造物などで測定される値と同様な値を示している。一方、エポキシ樹脂塗装鉄筋の場合には、何れも黒皮鉄筋よりも非常に大きな値を示している。この損傷を付与したエポキシ樹脂塗装鉄筋の場合には、損傷の程度が小さい E1 の分極抵抗が大きな値を示し、節間に異なる損傷を付与した E2 の場合には、損傷の程度が大きなものものほど分極抵抗は小さくなり、大きな損傷(□5×5mm)を付与した13cmの位置では、黒皮鉄筋の値に近くなるような値を示している。しかし、何れの場合にも損傷の付与個所に対応して変化している。このように損傷付与個所に対応して分極抵抗が測定されることは、腐食状態・腐食の程度に対応しているのではなく、コンクリート抵抗の影響を受けているものと思われることからコンクリート抵抗を図−9に示す。

黒皮鉄筋のコンクリート抵抗は $1\sim 3k\Omega$ 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。また、この鉄筋は、断面欠損を伴う全面腐食を呈していることからコンクリート抵抗の変化は殆ど認められない。

この図では、エポキシ樹脂塗装鉄筋に損傷を付与した個所がコンクリート抵抗と良く対応し、損傷付与個所のコンクリート抵抗は、健全部の1/3程度となり、分極抵抗よりも鮮明に損傷の大きさに比例してコンクリート

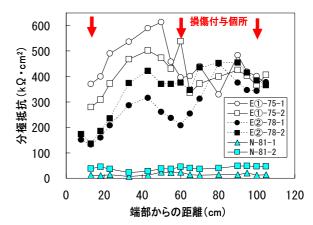


図-8 分極抵抗(海洋暴露10年)

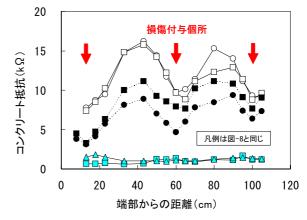


図-9 コンクリート抵抗(海洋暴露10年)

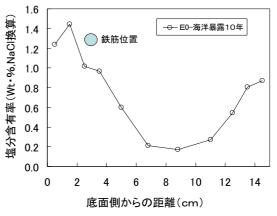


図-10 コンクリートへの塩分の浸透

抵抗が低下していることが分かる。損傷個所の面積とコンクリート抵抗の関係には、必ずしも直線的な傾向が認められないことから、腐食の要因を加味した値を示しているとも考えられる。このようなことから、エポキシ樹脂塗装鉄筋の損傷個所を検証する場合には、コンクリート抵抗による測定が有意義であることを示唆している。

3.7 損傷を付与したエポキシ樹脂塗装鉄筋の腐食性状

この損傷を付与したエポキシ樹脂塗装鉄筋コンクリート梁の塩分の分析結果を**図-10**に示す。

このコンクリート梁の場合も底面側を暴露面とした ことから打設面側よりも底面側の塩分含有率は大きく, 鉄筋のかぶり位置では1.0%(Wt・%, NaCl 換算)と非常に多くの塩分が浸透している。このような塩分環境下での損傷を付与したエポキシ樹脂塗装鉄筋の腐食性状を写真-4、5に示す。写真-4は、節間に大きな損傷(□5×5mm)を付与したものであるが、腐食した錆び汁がかぶり側のコンクリートに認められるが、損傷付与個所の錆の状態を観察すると腐食が生じていない領域があることが分かる。また、この腐食は損傷を付与した鉄筋表面のみのものであり、孔食のような性状は認められなかった。

写真-5には、節上に約 D1mm 程度の損傷を付与した エポキシ樹脂塗装鉄筋の腐食性状を示すが、この場合も かぶり側のコンクリートに錆び汁が認められるが、大き な損傷を付与したものよりも腐食していない領域が少 ない。これらの腐食状態を写し取り、腐食領域を一覧に したものを表-3に示す。

この腐食面積率は、2本の鉄筋に付与した6ヶ所の腐食面積の平均の割合を示したものである。損傷の大きさによる傾向が認められないが、このように腐食していない領域が存在していることが分かる。この腐食状態は、コンクリート梁を解体した時点で測定したものであり、しばらく放置して観察したところ非腐食部分にも新たな錆の発生が認められた。

4.まとめ

エポキシ樹脂塗装鉄筋の防食効果を明らかにするために、わが国の腐食環境としては最も過酷な環境下である沖縄沿岸での10年間の暴露実験を行い、各種の調査・測定による検討を行った。

その結果、コンクリート中の鉄筋周辺に鉄筋の発錆限界塩分量の10倍程度の塩化物が浸透している場合でも、エポキシ樹脂塗装鉄筋に変状は全く認められなかった。また、コンクリート中のエポキシ樹脂塗膜の物性上の経年劣化も認められなく、エポキシ樹脂塗装鉄筋の節間に跨るような損傷を付与したエポキシ樹脂塗装鉄筋でも、損傷部表面に腐食は認められるものの孔食のような状態は認められなく、コンクリートにひび割れを誘引するような状態は認められなかった。

謝辞:本実験の遂行に際しては、琉球大学大城武名誉教授ならびに東京大学魚本健人名誉教授には、ご指導・ご協力を頂きました。また、素材の化学分析等を日本ペイント(株)工業用塗料事業本部ならびに関西ペイント(株)粉体塗料開発部に引き受けて頂きました。ここに記して、厚く御礼申し上げます。

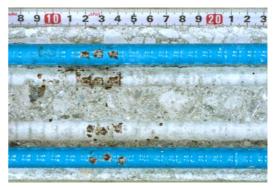


写真-4 損傷付与部分の腐食状態(節間:□5mm)

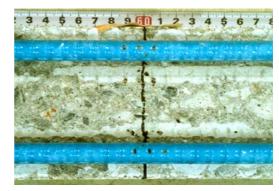


写真-5 損傷付与部分の腐食状態(節上: O1mm)



写真-6 損傷部の拡大写真(節間: □3mm)

表-3 付与した損傷の腐食状態(海洋暴露10年)

端部からの距離(mm)		13	60	100
	損傷形状	φ1mm	φ1mm	φ1mm
	腐食面積率(%)	75	55	45
節間	損傷形状	□5 × 5mm	□1 × 1mm	□3 × 3mm
	腐食面積率(%)	58	30	33

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, 1986.2
- 2) 大城, 伊部, 近藤, 成底: 塩害環境下における RC 構造物の劣化過程について: コンクリート工学年次 論文集, Vol.16, No.1, pp.947-952, 1994.7
- 3) 星野,大城,山田,魚本:エポキシ樹脂塗装鉄筋を 用いたコンクリートの防食効果に関する研究,土木 学会年次学術講演会,V-022,pp.43-44,2003