

論文

[1110] 防食効果に及ぼすコンクリートの表面状態に関する考察

正会員○牛島 栄 (青木建設 研究所)  
 正会員 酒井芳文 (青木建設 研究所)  
 正会員 西村健太郎 (青木建設 研究所)  
 正会員 谷口秀明 (青木建設 研究所)

1. はじめに

海洋環境下において鉄筋コンクリート構造物の耐久性の向上を図る方法としては、コンクリート中の鉄筋の腐食に最も影響する塩化物イオンに対する遮塩性を高めることである。塩化物イオンの遮塩性は、かぶりコンクリートの品質によって大きく影響されるので、コンクリートの配合や養生条件を適切にし、十分な締め固めを行なって塩化物イオンの浸透しにくい密実な組織を持つコンクリートを作ることが大切である。

防食方法の基本は、第1種防食方法として密実で均一なコンクリートを用いてかぶりを大きく確保することであり、第2種防食方法として、コンクリート構造物に塗装等の表面ライニングを施すこととされている<sup>1)</sup>。

既往の研究によれば、第1種防食方法によってマイクロセルあるいはより腐食速度の大きなマクロセルについても良好な防食効果が得ることができるとされている<sup>2)</sup>。

また、表面ライニングによる腐食因子の遮蔽効果についても良好とされている<sup>3)</sup>。

一方、コンクリート表層部に中性化層が既に形成されている場合には、塩化物イオンのコンクリート中への浸透を遅延させる作用を有しているとする研究もある<sup>4)</sup>。

本研究では、中性化層の形成、ライニング等のコンクリートの表面状態が、コンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす影響について、かぶりと関連づけながら考察を行なったので報告する。

2. 試験概要

2.1 供試体の作製

コンクリートの配合を表-1に示す。

供試体は図-1に示す形状で、内部にD10の異形鉄筋をかぶり10、20、30mmに埋め込んだ。図に示すようにアルミ箔およびエポキシ樹脂を用いて打込み方向の上下面をシーリングしており、かぶり方向からの遮蔽効果のみを検討した。

なお、自然電位の測定を行なうことを目的として鉄筋端部にリード線を接続させた。

2.2 促進試験方法

(1) 試験フロー

試験のフローを図-2に示す。供試体は作製後、湿潤2週と気乾1週の養生を行ない、上下面にシーリングを施した。コンクリートの表面状態の検討としては、要因を表面ライニングの有無と中性化処理の3種類、水準として中性化深さ2種類、表面ライニング2種類の計4種類とした。

表-1 コンクリートの配合

F <sub>c</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	G <sub>max</sub> (mm)	S.L. (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kgf/cm <sup>2</sup> )			
						W	C	S	G
240	15	8	4	60	52	175	292	921	880

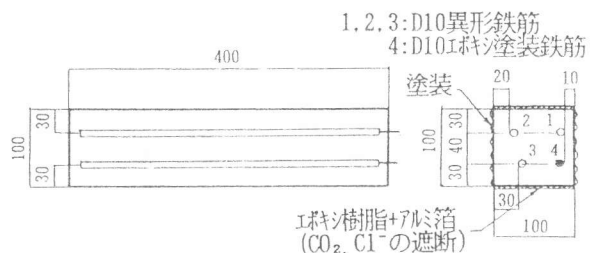


図-1 供試体の形状

## (2) 促進中性化試験

CO<sub>2</sub>環境試験機を用いて、温度20℃、湿度60%、濃度10%で促進中性化を行なった。

図-3に示すように回帰曲線から所要の中性化深さが10mm、20mmになるようそれぞれ17週および43週促進中性化を行なった。

## (3) 塩水シャワー試験

大型塩水噴霧試験機を用いて、JIS Z 2371（塩水噴霧試験方法）を参考として促進試験を行なった。試験条件は、試験装置内温度40℃、塩水濃度3%とした。試験は、連続噴霧を3日行なった後に50℃強制乾燥を4日間行なうことを1サイクルとした。試験サイクル数は、13サイクル、39サイクルの2種類で、各サイクルそれぞれ供試体数は2体とした。

ブランク供試体は塩水シャワー8サイクルで、予め中性化促進を10mmまで行なったものは塩水シャワー4サイクルでかぶり10mmの部分に鉄筋に沿ったひびわれが発生した。

## 2. 3 試験方法

### (1) コンクリート中の塩分分析と中性化深さの測定

コンクリートドリルにより表面より15、25、35mmの深さまで順に削孔して、その粉末を分析試料とした。分析は、JCI「硬化コンクリート中に含まれる全塩分の簡易分析方法」に従って電位差滴定法により行なった。

中性化深さの測定は、フェノールフタレイン1%エタノール溶液を噴霧し、測定点18点の平均値を中性化深さとした。図-3中に測定結果の回帰式を示した。

### (2) コンクリート中の鉄筋腐食の評価

コンクリート中の鉄筋の腐食評価は、JCI「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法（案）」に準じて腐食面積率、腐食減少率で評価し、以下の式により求めた。

$$\text{腐食面積率 (\%)} = \frac{\text{評価の対象部分の腐食面積 (cm}^2\text{)}}{\text{全面積 (cm}^2\text{)}} \times 100$$

$$\text{腐食減少率 (\%)} = \frac{(\text{試験前の重量} - \text{腐食生成物除去後の重量}) \text{ (mg)}}{\text{試験前の重量 (mg)}} \times 100$$

### (3) 細孔径分布の測定

コンクリート試料は促進中性化後の供試体から、かぶり10mm、20mmの位置でカッティングを行って、モルタル部分のみを取り出しアセトンに浸透後、1週間真空乾燥し測定試料とした。細孔径分布の測定は、MICROMERITICS社製AUTOPORE9220により行なった。

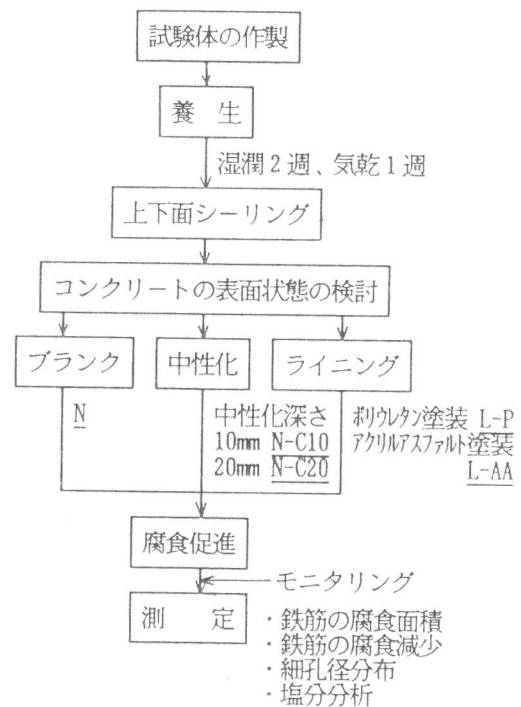


図-2 試験のフロー

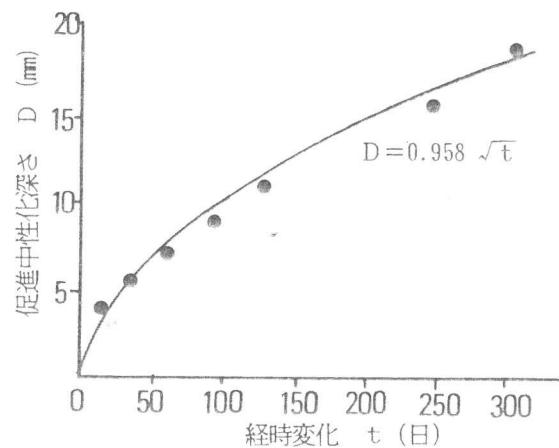


図-3 促進中性化深さの経時変化

(4) 自然電極電位法による鉄筋腐食の評価

自然電極電位の測定は、ASTM C 876-77に従って行なった。照合電極として硫酸銅電極を用いた。測定にあたっては、大型塩水噴霧試験機より供試体を取り出した後、供試体を水洗いして供試体表面の塩分を取り除き、供試体の含水率が一定になるように一昼夜20℃の水中に浸漬して、湿潤状態において測定を行なった。ブランク供試体と中性化供試体は4サイクル毎に自然電極電位の経時変化を測定した。表面ライニング供試体は、塩水シャワーによる所定の腐食促進後（13サイクル、39サイクル終了後）に表面のライニングを剥して自然電極電位を測定した。

3. 試験結果および考察

3.1 コンクリート中への塩分浸透深さ

図-4に塩水シャワー13サイクルと39サイクル終了後のコンクリート中の塩分含有率のコンクリート表面からの深さの分布を示した。表面ライニングを施した2種類の供試体は遮塩効果が顕著に認められた。塩水シャワー13サイクル、39サイクルとも、予め中性化を10mmまで行なった試験体の遮塩効果は、中性化なしのブランク供試体に比較して1/2程度となった。

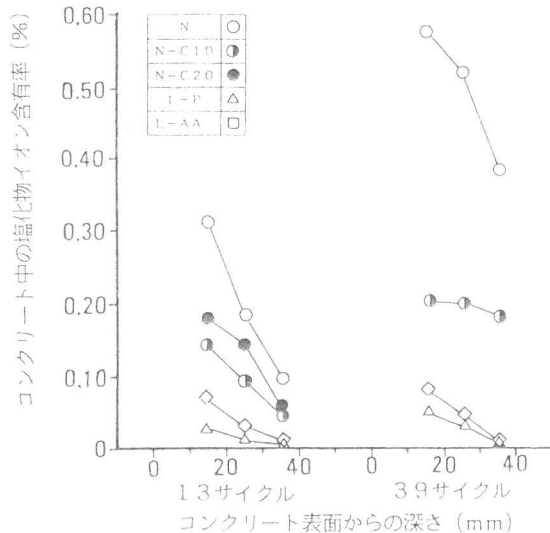


図-4 コンクリート中の塩分含有率

3.2 自然電位によるモニタリング

(1) かぶりと表面処理による防食効果

図-5に平均電位の経時変化を示す。ブランク供試体の初期値を平均した電位の値は、かぶりの大きさの違いに関わらず-130mV程度であった。

平均電位の値は鉄筋に沿った縦ひびわれが発生した塩水シャワー8サイクル終了あたりから急激に卑の値になっており、ASTMの規準値の値から判断すると、8サイクル終了時の自然電位の平均値は

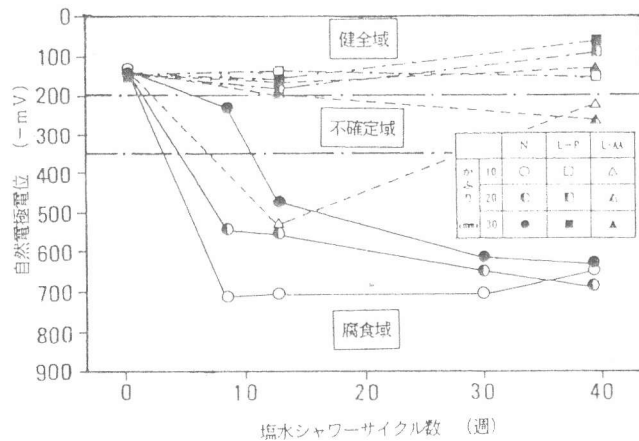


図-5 電位の経時変化 (中性化なし)

かぶり10mmで-741mV、かぶり20mmでは-541mVの腐食域であった。かぶり30mmでは-225mVとなり健全域を示した。すなわち、かぶりの違いによる自然電位の平均値は、貴の側から10mm>20mm>30mmの順となり、かぶりによる防食効果を平均電位の値から伺い知ることができた。また、塩水シャワー13サイクル以降は、急激な電位の低下は見受けられず、電位勾配は小さくなっていった。

塩水シャワー30サイクルではかぶり30mmが10mmに比べて電位の値が100mV程度貴の側になっており、平均電位の値からかぶりによる防食効果が伺えるが、電位の値は全て腐食域の値にあることから鉄筋は腐食しているものと思われる。

また、ポリウレタン表面ライニングを施した供試体では、急激な平均電位の低下は認められず塩水シャワー39サイクル経過後も電位は-150mV程度であり、ASTMの健全域の値を示していることから、表面ライニングによる防食効果が顕著に伺えた。

アクリルアスファルト表面ライニングを施した供試体では、かぶり10mmの電位の値が13サイクルで腐食域まで低下し、39サイクルで不安定域の貴の側になっていた。これは、8サイクルの時点で認められたライニング塗膜の膨れ等により遮塩効果が減少したことが原因と思われる。

(2) 予め中性化を行なった場合の防食効果

図-6に予め中性化を行なった場合の電位の経時変化を示す。中性化を行なう前の自然電位の値は、かぶりの大きさに関わらず-140mVの健全域を示した。促進中性化をかぶり厚10mmの深さまで行なうと、かぶり10mmの位置に設置した鉄筋では-500mV程度まで急激に卑の値になるが、かぶり20mm、30mmの位置のものは初期値と同じ値を示していた。

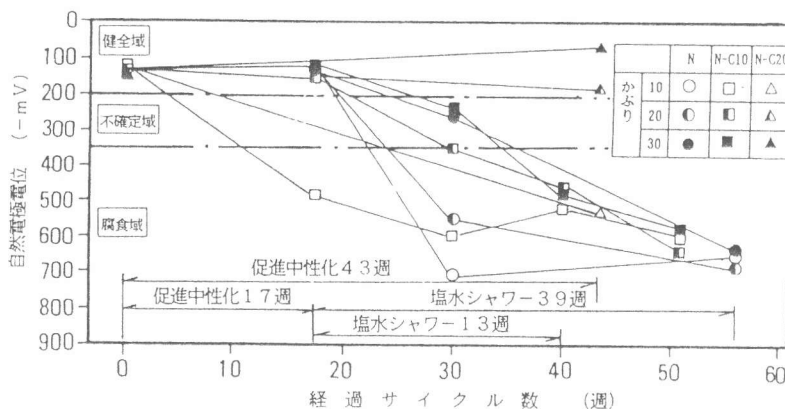


図-6 電位の経時変化 (中性化あり)

すなわち、中性化域にある鉄筋の自然電位は、鉄筋がまだ腐食していなくても、非中性化域にある鉄筋の自然電位の値と異なり、中性化によって鉄筋の周囲のコンクリートのアルカリ濃度が低下すると、ASTMの腐食域の電位に近づくことがわかった。

予め、中性化を行なった供試体に塩水シャワーを施すと、かぶりが10mmの鉄筋の電位は、ブランク供試体に比べて急激に電位の値が卑の側に低下するが、かぶりが大きな20mm、30mmの鉄筋の電位は卑の値への低下が小さくなっている。すなわち、電位の値は、かぶり10mmは腐食域、20mmは不確定域、30mmは健全域にあり、中性化層により、非中性化部分に位置する鉄筋の防食効果の可能性を伺うことができた。

3. 3 コンクリート中の鉄筋腐食の評価

(1) 腐食面積率

塩水シャワー13サイクルと39サイクル終了後の供試体中の鉄筋の腐食面積率の測定結果を図-7に示す。図より表面ライニングを施したものはブランク供試体に比較して腐食面積率が小さく、防食効果が顕著に認められた。特にポリウレタン表面ライニングによる防食効果は著しかった。

予め中性化を10mm行なった供試体とブランク供試体の塩水シャワー13サイクル終了後の防食効果を比較すると、中性化10mmの供試体はかぶり10mmにおいては、ブランク供試体よ

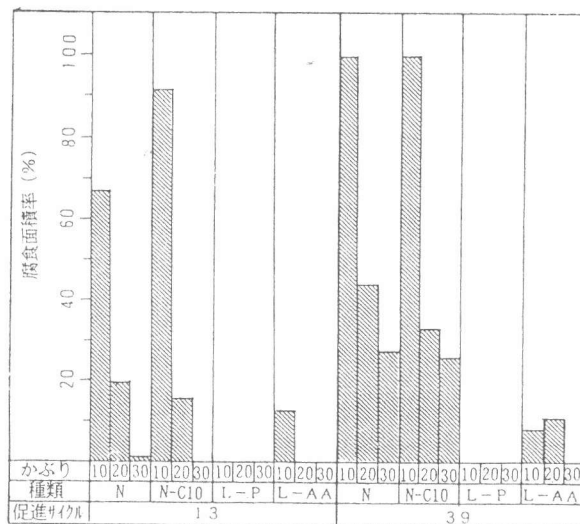


図-7 腐食面積率

りも腐食面積率が大きいものの、非中性化部であるかぶり20mm、30mmでは、共に同一かぶりのブランク供試体の腐食面積率の値より小さな値となっており、中性化によるコンクリート中への塩分の遮塩性が高まったことによって非中性化部にある鉄筋の腐食が小さな傾向であった。

今後は、中性化深さとかぶり厚の関係について、中性化速度（中性化速度  $D = \text{中性化深さ} / \text{かぶり厚} \times 100\%$ ）<sup>5)</sup>を参考にして中性化20mmの値が測定されたときに検討する予定である。

### (2) 腐食減少率

塩水シャワー13サイクルと39サイクル終了後の供試体中の鉄筋の腐食減少率の測定結果を図-8に示す。図-7と図-8を比較すると、13サイクルでは腐食面積率は測定できるが、腐食減少率が認められないので塩水シャワー13サイクルの腐食は鉄筋表面の表層錆であると考えられた。しかし、塩水シャワー39サイクルでは腐食面積率が大きな値を示しており、腐食減少率はblank試験体と中性化試験体のかぶり10mmでは腐食減少率は4.5%程度を示していた。この値はひびわれ発生時の許容重量減少率にほぼ等しい $35\text{mg}/\text{cm}^2$ となり、著者らの研究<sup>6)</sup>と同様な結果が得られた。

縦ひびわれ部分の鉄筋を観察すると黒色ないし褐色を示していた。

### 3.4 細孔径分布

中性化の有無による比較では、ほぼ両者とも類似した細孔分布であるが、中性化ありの⑥⑦が全体的に、中性化なしの④に比べて全細孔量は少なく、また、細孔直径で $0.005\ \mu\text{m}$

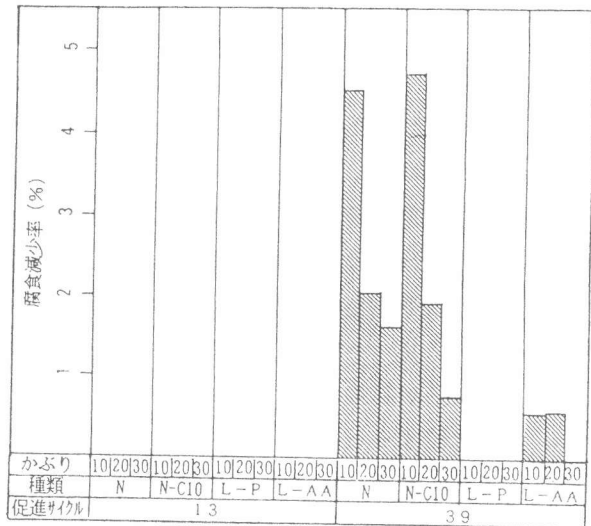


図-8 腐食減少率

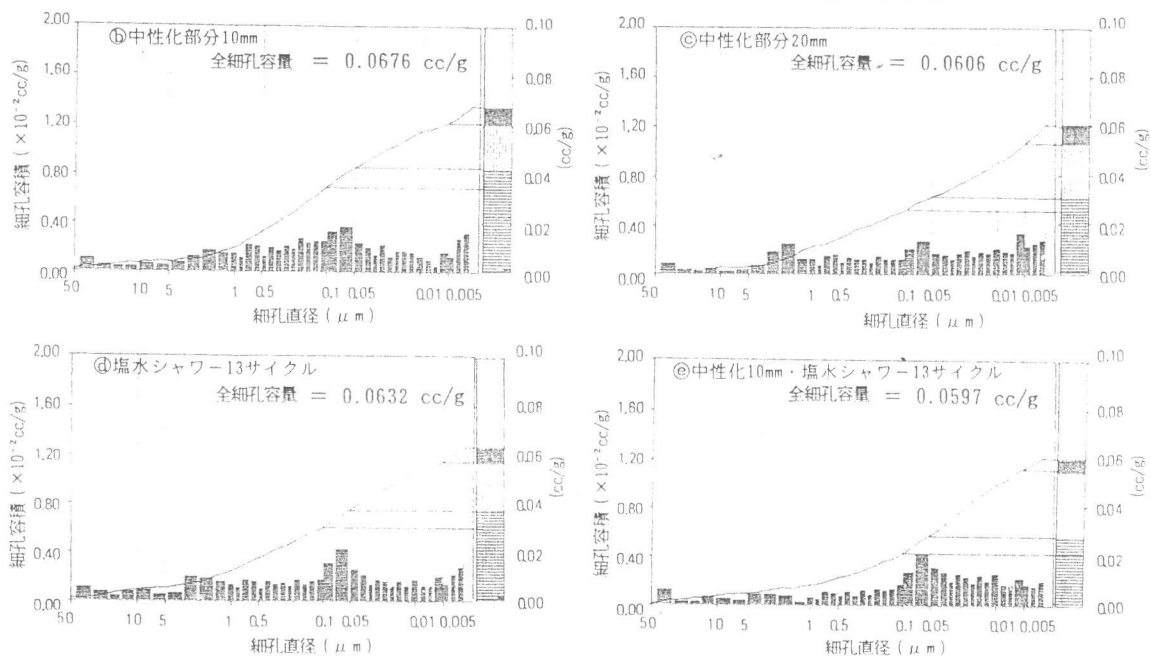


図-9 細孔径分布の測定結果

以下にかなりの減少の傾向が見られた。中性化10mmと中性化20mmの全細孔量を比較すると、中性化の値が大きくなるに従い、全細孔量が幾分減少するように思われた。

また、塩水シャワーを39サイクル行なった場合には、いずれの試料も全細孔量は減少しており細孔分布も $0.1\ \mu\text{m}$ 以上の比較的大きな細孔が減少し、 $0.05\ \mu\text{m}$ 以下が多くなっているのが見受けられた。これは塩水シャワー試験による乾湿の繰り返しなどにより細孔組織が緻密となったことによると思われた。

#### 4. まとめ

本試験の範囲で得られた結果を以下に示す。

- (1) 細孔径分布の測定結果から、予め促進中性化を行なうことによって、細孔直径で $0.005\ \mu\text{m}$ 以下のものが減少し、全細孔量が促進中性化を行なわないものより減少していた。
- (2) コンクリート中への塩化物浸透深さの測定結果から、予め中性化を行なった場合には、遮塩効果が認められ、中性化を行っていないものの1/2程度であった。中性化10mmと20mmを比較すると20mmの方がより遮塩効果が大きかったことから、全細孔量の減少が遮塩性に大きく影響することがわかった。
- (3) ASTMの規準に従い、かぶりによる第1種防食効果および表面ライニングによる第2種防食効果を自然電位の測定値から健全域、不確定域、腐食域に推定することができるが、腐食面積率との明確な対応は認められなかった。
- (4) 腐食面積率と腐食減少率の測定結果から、表面ライニングおよびかぶり厚の確保による防食効果が顕著に認められた。また、予めコンクリートを中性化した場合には、遮塩効果により非中性化域にある鉄筋に対して腐食を小さくする傾向がみられた。

以上をまとめると、海洋構造物などの塩害環境下においては、コンクリート表面ライニングによる塩化物イオン等の腐食因子遮蔽効果、かぶり厚の確保による防食効果は、促進試験の範囲では顕著であった。

予めコンクリート表面を中性化させて中性化層を作ると、コンクリート表面の細孔径量が減少し、特に $0.1\ \mu\text{m}$ 以上の比較的大きな細孔が減少し、細孔組織が微細かつ緻密になり、塩化物の遮蔽効果が認められる。換言すればかぶりコンクリート組織の緻密化により遮塩効果は顕著となり、適切な養生などにより水和反応を十分に行なうことが重要であることがわかる。

今後は、塩化物イオンによる鉄筋腐食について中性化深さとかぶり厚の関係の点から検討する予定である。

#### 参考文献

- 1) コンクリート標準仕様書施工編、昭和61年度制定、土木学会
- 2) 岡田清、西林新蔵、宮川豊章、明石外世樹、他：最新コンクリート工学、国民科学社、昭和61年3月
- 3) 大城武、谷川伸：塗膜によるRC構造物の保護について、コンクリート工学年次論文報告集 pp.483-488 1990年
- 4) 星野富男、小林一輔：コンクリートの炭酸化が海洋環境下における塩化物の浸透に及ぼす影響、土木学会第45回年次学術講演会 pp.436-437 平成2年
- 5) 福島泰信、杉田英明、御手洗泰文：鉄筋の発錆に及ぼす中性化の影響、セメント技術大会、pp.200-201 昭和63年
- 6) 牛島栄、鳥取誠一：断面修復を施した塗装RC梁の塩水噴霧試験による防食効果に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集 pp.535-540 1988年