

論文

[1147] 塩害環境下における RC 構造物の暴露実験について
(暴露7年目の試験結果)

正会員 大城 武 (琉球大学建設工学科)

正会員○谷川 伸 (東亜合成化学工業)

1. はじめに

本研究は、亜熱帯海洋性気候下の沖縄県において、海岸に隣接して建設した鉄筋コンクリート (RC) 暴露構造物を対象に、塩害による劣化過程を把握することを目的としている。また RC 構造物の劣化防止対策として、アクリルゴム系防水材料を建設時に構造物の半面に施工しており、その塗膜の保護効果の実験的な解明も図っている。本構造物は1984年9月に完成し、これまでの劣化過程、塗膜による保護効果、及び電気化学的特性値による腐食評価法については発表済みである[1][2][3]。本報文は、1991年11月に行った試験をもとに、その研究成果をまとめたものである。本研究の特色は、7年間にわたり暴露構造物に施してきた塗膜を試料として採取し、耐久性、気密性、及び化学的特性についての検討を新たに加えていることである。

2. 試験概要

沖縄県本部町備瀬崎に建設した暴露構造物を対象に試験を行っている (写真-1、図-1)。本構造物は海岸に隣接し、海塩粒子を常時受け、強風時には柱の下部では直接海水飛沫を受けている。コンクリートの品質は、普通ポルトランドセメントを用い、水セメント比63%、スランプ18cm、 $f_c=210\text{kgf/cm}^2$ 、空気量4%である。本構造物の東半分にはコンクリート重量に換算して0.5%の塩分(NaCl)を初期混入して、有塩部と称し、無塩部と区別している。また、北側の海側面にはアクリルゴム系の防水塗膜を施し、この部分を塗膜部と称して無塗膜部と区別している。

本構造物から塗膜及びコンクリートコアを採取し、次の試験を実施している。

2.1 ひびわれ追従性 (単純ゼロスパンテンション試験)

本実験は、塗膜の力学的特性を試験するもので、梁のコアから塗膜を下地コンクリートを含めて約5mm厚さに切断して試料としている。下地コンクリートに切込みを入れた後、両端の裏面をエポキシ系接着剤でアクリル板に固定し、温度20℃、引張り速度5mm/分で引張り、塗膜にピンホールまたは破断が生じた時点のひびわれ幅を読みとっている。その測定状況を写真2に示す。

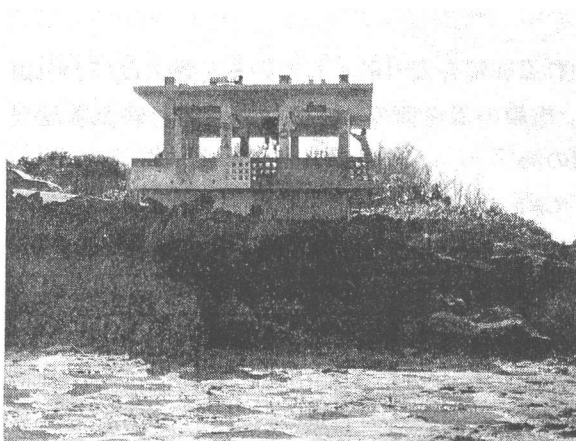


写真-1 暴露構造物の外観

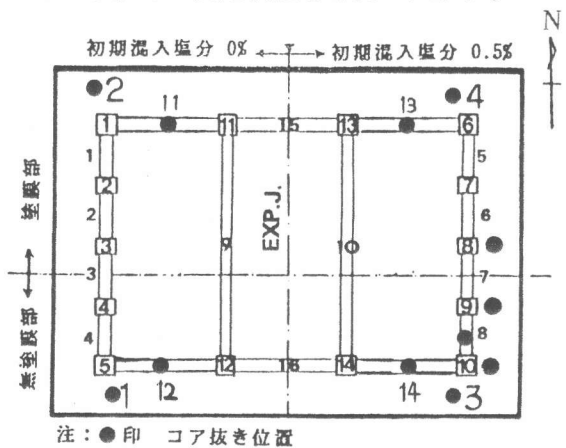


図-1 柱及び梁の配置及び番号

2.2 塗膜の気密性

海面に最も近い基礎部コンクリート上の塗膜の気密性について次の試験を行っている。

- 1) 遮塩性：道路橋の塩害対策指針（案）に準拠し[4]、塩分量の測定には塩素イオン選択性電極を用いた電位差滴定を行っている。
- 2) 水蒸気透過性：透湿カップ法による透湿度試験法（JIS-Z2028）に準拠し、40℃、90%RHの条件下で測定した。
- 3) 酸素透過性：ASTM D 3985-81に準拠して等圧法で行い、Modern Control社のOX-TRAN100試験機を用いた。

2.3 塗膜の化学的特性

海面に最も近い基礎部コンクリート上の塗膜の化学的特性の変化を、次の2つの試験で検討している。

1) 熱分析（Tg測定）：暴露及び非暴露の試料に対して熱分解特性を測定した。測定温度範囲は30～700℃、昇温速度20℃/分、及び窒素ガスフローにて測定した。

2) X線マイクロアナライザー（EPMA）分析測定：塗膜の含有塩分量を、下地コンクリートを含めて堀場EM AX-2000を用いて膜厚方向に線分析を行った。さらに確認のため、塗膜5gを巾約2mmの短冊状に切り、200ccの水で80℃、1時間熱水抽出を行い、塩素イオン濃度を測定した。

2.4 コンクリート表層部の化学的特性

梁部より採取した骨材を含むコンクリートコアの表層部1cmを粉碎し、粉末X線回折（X線源CuK α 、電位30KV、電流20mA）及び熱分析（測定温度範囲30～1,000℃、昇温速度20℃/分、及び窒素ガスフロー）を行った。

2.5 コンクリート中の塩分量分布

梁、スラブ及び柱から採取したコアを表面から1cm間隔で切断し、粉碎して試料をつくり、塩素イオン選択性電極を用いた電位差滴定で可溶性塩分濃度を測定し、コンクリート重量に対する重量比（NaCl%）で示している。

3. 試験結果及び考察

3.1 ひびわれ追従性

梁から採取した試料に対する塗膜の最大ひびわれ追従幅を表-1に示している。最大ひびわれ追従幅の分布は2.7～5.2mm、平均値3.6mmである。塗膜の暴露前のメーカーによる材料試験結果（初期値）は4.5～5.5mmであることから、長期間の海洋環境下での暴露にもかかわらず、初期値に対して約80%のひびわれ追従性を維持している。

3.2 塗膜の気密性

塩素イオン透過性、透湿性、及び酸素透過性の試験結果を表-2に示している。最も厳しい塩分環境条件下に7年間暴露した後においても、それらの特性値の低下は認められず、塗膜性能が十分維持されている。

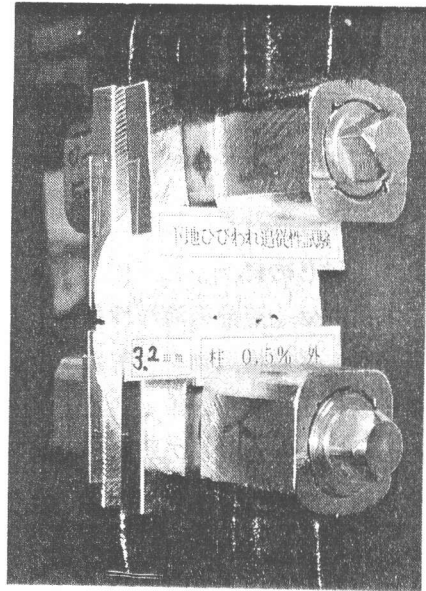


写真-2 ひびわれ追従性測定状況

表-1 最大ひびわれ追従幅

No	初期塩分	方向	最大追従幅(mm)
1	無塩部	海側	3.2
2	無塩部	陸側	2.7
3	有塩部	海側	3.2
4	有塩部	陸側	5.2

3.3 塗膜の化学的特性

暴露及び非暴露塗膜試料の熱分析曲線を図-2に示している。いずれも同様な熱減量特性を有し、化学的な分解特性が同一であることを示し、7年間の暴露後でも化学的特性に変化が無いことを示している。

暴露塗膜のEPMAによる塗膜中と界面の有塩下地コンクリートの塩含有状態を写真-3に示す。写真中では、上塗層で付着塩分に起因したCl⁻のピークが現われるが、主材には大きなピークは見られない。有塩の下地コンクリートで波形が急激に変化し、ピーク及びベースラインが大きく変化している。写真に示しているEPMAの検出限界は約1重量%であるが、中塗部に塩分は検出されず塩分浸透阻止効果がうかがわれる。今後は解析精度の向上が検討課題である。

なお、熱水抽出で基礎部塗膜中に0.08%(NaCl、0.13%)の塩素イオンが検出されている。

3.4 コンクリート表層部の化学的特性

粉末X線回折の代表的な結果を図-3に示す。無塩塗膜部ではCa(OH)₂の回折ピークが全く認められず、中性化の様相を示している。しかし、塗膜部ではCaCO₃とともにCa(OH)₂の存在を示す回折ピークが現われている。この回折パターンにCaCO₃が多量に存在する原因は、使用骨材が石灰石系であり、この骨材を試料に含めたことによる。

熱分析の代表的減量パターンを図-4に示す。434°Cに現われるCa(OH)₂脱水ピーク(ピークA)と、750°C付近に現われるCaCO₃脱炭酸ピーク(ピークB)の重量減少比からコンクリート中のCa(OH)₂とCaCO₃の重量分率%を求め、その結果を表-3に示す。無塗膜部の試料についてはCa(OH)₂のピークが検出されず、中性化していることを示す。また、塗膜部の試料にはCa(OH)₂が2.9%及び3.7%存在し、アルカリ性が保持されている。さらに、塗膜及び無塗膜部の有塩の試料には、無塩の試料に比較してCaCO₃の比率が高く、塩分含有量による中性化の促進が認められる。ここでもCaCO₃の割合が多いことの原因は、前述と同様に使用骨材によるものである。

表-2 塗膜の気密性

試料	塩素イオン透過量 (mg/cm ² ·day)	透湿度 (g/m ² ·day)	酸素透過性 (mg/cm ² ·day)
暴露試料	7.2×10 ⁻⁴	34.6	4.9×10 ⁻²
非暴露試料	4.8×10 ⁻⁴	37.1	3.3×10 ⁻²

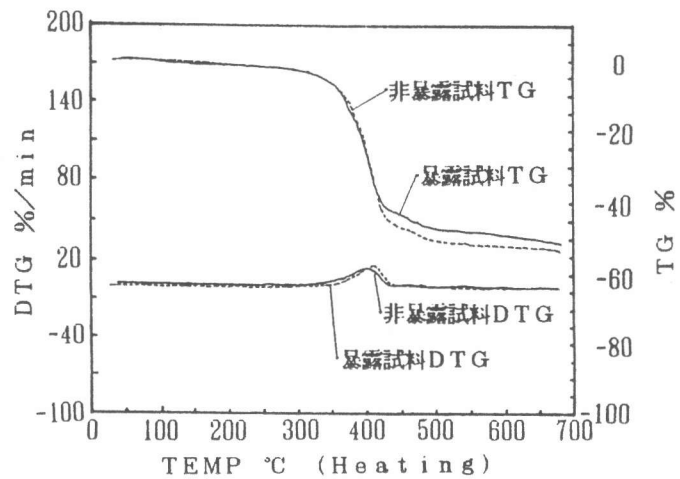


図-2 暴露及び非暴露試料の熱減量特性

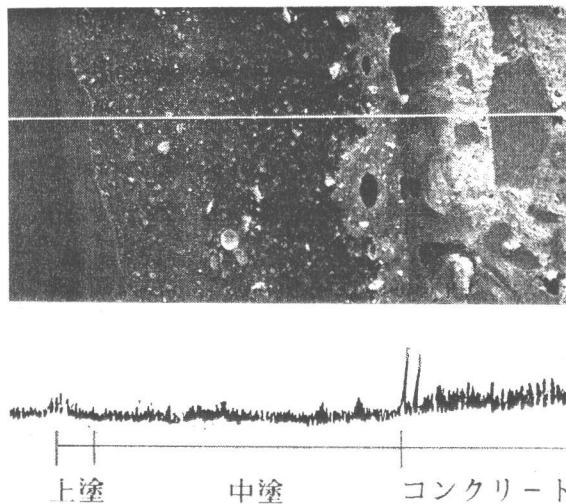


写真-3 塗膜及びコンクリートのEPMA写真

3.5 塩分量分析結果

1) 梁11クリート中での塩分量分布
 梁コンクリート中での塩分量分布を図-5に示す。無塩・無塗膜部の梁の北面（海側面）には、外部から多量の塩分量が浸透している。表層部では2~3cm内部に入った箇所よりも増加量が少なく、2~3cmで0.9%と高濃度を示している。分布形状は、中心部での濃度0.03%へと暫時減少し、外部からの塩分浸透状況を明らかに示している。陸側面の塩分浸透量は海側面の約半分となっている。無塩・塗膜部の梁11については、海側面の表層部で浸透塩分量が検出されているが、上記の梁12と比較して著しく少なく、鉄筋周辺部では有害量に達していない。陸側面では表層部で0.1%を示し、3~4cmの深さ位置では微量となっている。これらの塩分量分布の差異が塗膜の遮塩効果を明かにしている。有塩・無塗膜の梁14については、初期混入塩分量を現わす0.4%をベースに、外部からの浸透塩分量が加算され、著しく多量の塩分量を現わしている。海側面の表層部では2~3cm入った箇所よりも増加量が少なく、2~3cm深さでは1.7%の塩分濃縮を示している。陸側面は、海側面よりも少いが絶対量としては多く、この位置でも海塩粒子の付着が著しいことを示している。上記の梁14に近接する梁8について、内部の初

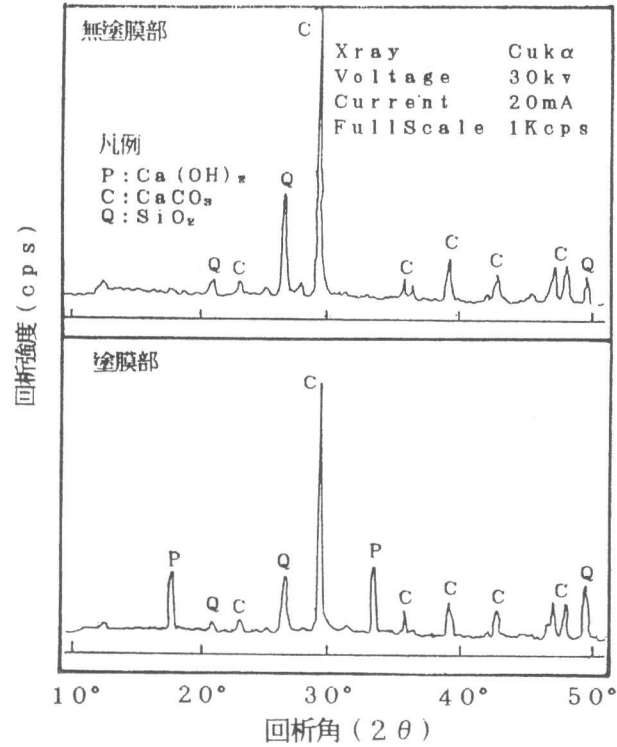


図-3 塗膜部及び無塗膜部の粉末X線回折図

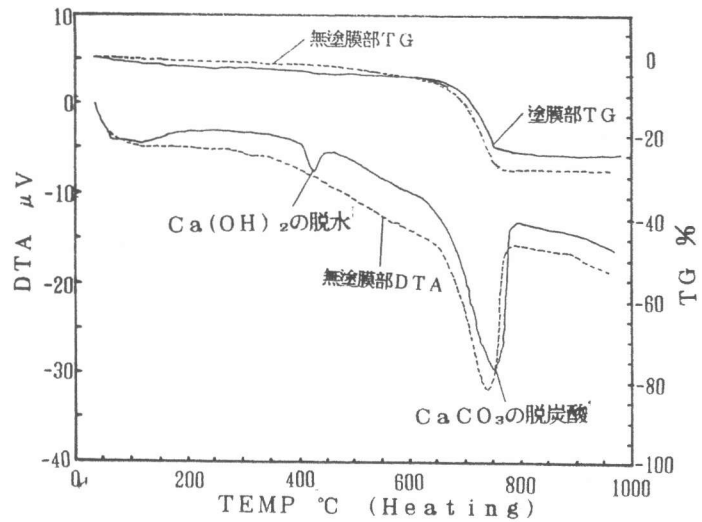


図-4 塗膜及び無塗膜部試料の熱分析(TG)曲線

表-3 試料中の水酸化カルシウムと炭酸カルシウムの重量分率

		重量減少率 (%)		重量分率 (wt%)		フェノールフタールによる 中性化診断
		ヒ°-A	ヒ°-B	Ca(OH) ₂	CaCO ₃	
無塗膜部 試料	有塩	なし	27.2	0.6	61.8	非変色
	無塩	なし	21.7	0.4	49.3	非変色
塗膜部 試料	有塩	0.9	16.8	3.75	58.2	赤変
	無塩	0.7	17.3	2.93	39.5	赤変

期混入塩分量に浸透塩分量が加算され、塩分分布形状は海側面（東側）で大きくなっている。有塩・塗膜部の梁13は、表層部で僅かに増加する傾向を示しているが、ほぼ平均化した値を示し、外部からの塩分浸透には影響されていない。

2) 屋根スラブコンクリート中の塩分量分布

スラブコンクリート中での塩分量分布形状を図-6に示す。無塩・無塗膜部のコア-1は、本構造部中で最も良い環境下に位置している。しかし、上面表層部で0.6%と高い濃度を示し、内部5cmの位置まで塩分浸透を現わしている。下面では

上面に比較して浸透塩分量は少ないが、浸透深さは4cmまで進んでいる。上記のコア-1よりも海岸に隣接し、外的環境の最も厳しい無塩・塗膜部のコア-2は、上面表層部で0.1%、2~3cmの位置で0.03%と微量の塩分量しか検出されない。下面部では表層部で0.15%を示しているが、1~2cmで0.03%と微量となっている。このような塩分量の差異が塗膜の遮塩効果を示している。有塩・無塗膜部のコア-3は、内部の初期混入塩分に加え外部からの浸透塩分量が加算されている。下部は海水飛沫を受ける環境下に位置し、多量の塩分付着が存在し、浸透塩分量も多くなっている。有塩・塗膜部のコア-4は、外部からの影響が少なく、初期混入時の塩分量分布を維持している。

3) 柱コンクリート中の塩分量分布

柱8, 9は1989年に、柱10は1988年に補修を行っている。柱8にはカチオン性アクリル系ポリマーコンクリート、柱9にはカチオン性アクリル系グラウト材を注入したプレパクトコンクリートを用いた。柱10も柱9と同様にプレパクトコンクリートを用い、アクリル系グラウト材を注入している。

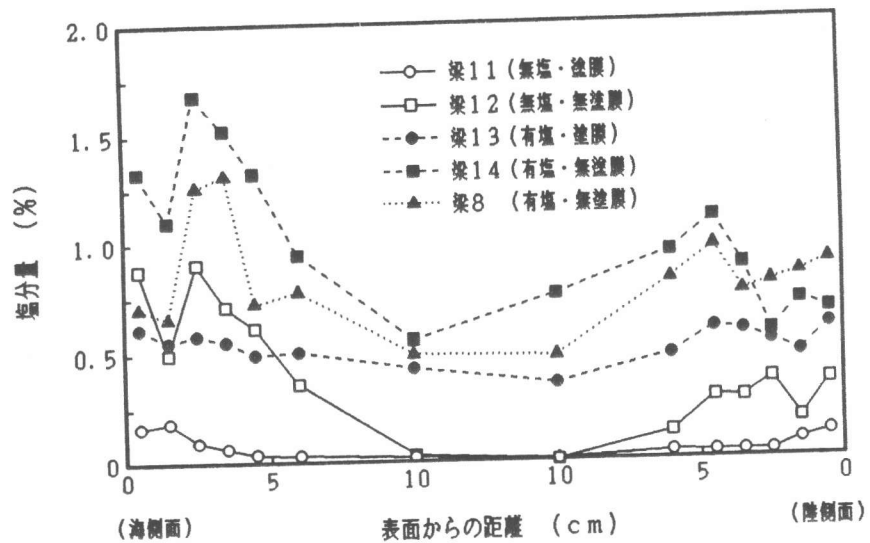


図-5 塩分量分布図(梁)

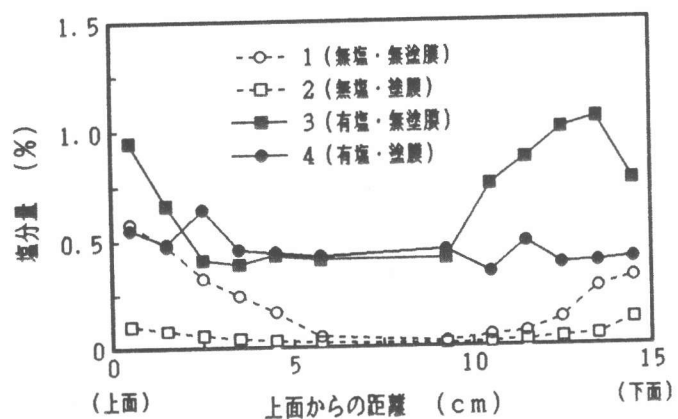


図-6 塩分量分布図(スラブ)

補修した柱コンクリート中での塩分量分布を図-7に示している。柱8のコアは海側表層部で0.4%の値が、3~4cmで0.02%と漸次減少している。5~7cmで補修時の微量の塩分量を示しているが、それより内部では初期混入塩分量0.4%を現わしている。陸側面では浸透塩分量が少なくなっている。柱9のコアは、柱8のコアとはほぼ同様の傾向であるが、海側面で僅かに塩分量が多い。柱10は暴露期間が3年で、海側面で著しい塩分量を現わし、外部からの浸透量が多いことを示している。4~5cmで0.01%と補修材中の初期の塩分量に減少し、それより内部では初期混入塩分量を現わす値に増加している。陸側面では塩分環境に対応して塩分量は少ない。

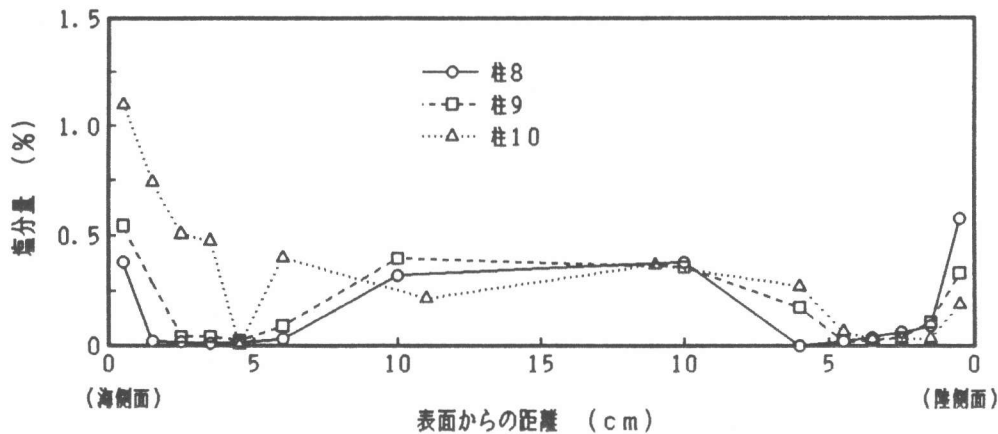


図-7 塩分量分布図(柱)

4. まとめ

本研究では、海洋環境下におけるRC構造物を対象に、その劣化過程及びアクリルゴム系防水塗膜による塩害劣化防止効果等の検討を行っている。ここでは次の点が明らかとなった。

- (1) 厳しい海洋環境下での7年間暴露後においても、使用している塗膜は化学的特性を損なうことがない。また、力学的特性は初期値の8割レベルで、気密性はほぼ初期値並みの性能を保持している。
- (2) 塗膜で被覆されたコンクリートは、水酸化カルシウムを無塗膜部に比較して多く含むことが定量分析で明らかとなり、塗膜の保護効果を化学的特性の面でより定量的に示している。
- (3) 塗膜は7年の暴露後でも遮塩性を保持し、コンクリート中への外部からの塩分浸透を阻止している。また、初期混入塩分量分布は、塗膜被覆部のコンクリート中では平均化し、鉄筋周辺部での塩分濃度勾配を防いでいる。

今後は、施工済みの断面補修工法との関連で塗膜の保護効果を長期に把握する予定である。

参考文献

- 1) T. Oshiro, and S. Tanikawa: A Field Study on Durability of RC Buildings Exposed to a Marine Environment, Protection of Concrete, E&H. N. Spon, P483-482, 1990.
- 2) T. Oshiro, S. Tanikawa, and N. Goto: A Study on Durability of Structures Exposed to Marine Environment, Evaluation and Rehabilitation of Concrete Structures and Innovations in Design, ACI SP-128, Vol. I, P433-447, 1991.
- 3) 大城 武、谷川 伸、後藤 信弘: コンクリート中の鉄筋の腐食評価法について、コンクリート工学年次論文集13-1, P503-508, 1991.
- 4) 社団法人 日本道路協会: 道路橋の塩害対策指針(案)・同解説、P61-63, 昭和59年