

[1158] 塩害を受ける RC 暴露構造物の劣化評価

谷川 伸\*<sup>1</sup>, 大城 武\*<sup>2</sup>, 後藤 信弘\*<sup>3</sup>, 山田 義智\*<sup>4</sup>

1. はじめに

本研究は、亜熱帯海洋性気候下の沖縄県で、海岸に隣接して建設した RC 暴露構造物を対象とし、塩害による劣化過程の解明を目的としている。本暴露構造物は1984年9月に完成し、現在に至る塩害劣化の研究成果は既発表である [1] ~ [7]。本報文は、1993年11月に行った試験をもとに、コンクリート中の鉄筋の腐食評価法に関する研究成果を論述する。ここでは、定電流二重パルス重畳方式を用いた計測装置及び二重対極式モニタリング法を用い [8]、電気化学特性値である交流インピーダンスと自然電位を測定している。また、コンクリート中の塩分量の測定も行い、塩害要因を明らかにし、電気化学特性値との相関についての考察も論述する。

2. 試験概要

沖縄県本部町備瀬崎に建設した RC 暴露構造物を対象に試験を行っている (写真-1, 図-1)。図中に電気化学特性値の測定位置及びコア採取位置を示す。本構造物は、3面を海に隣接し、海塩粒子が多量に付着する環境下にある。コンクリートの品質は、県内の建築工事で最も一般的に用いられているもので、普通ポルトランドセメント、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。建物の東部分のコンクリートには塩分量0.5% (NaCl / コンクリート重量) を初期混入し、この部分を有塩部と称し、西部分の初期混入塩分のない無塩部と区別する。また、

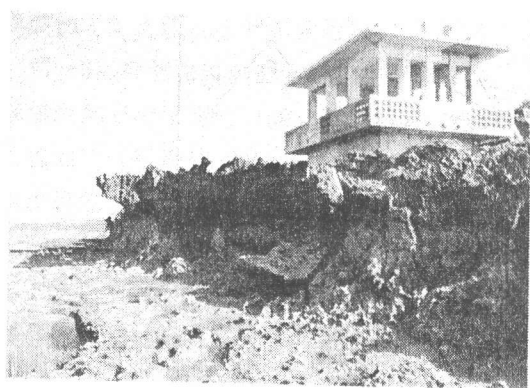


写真-1 暴露構造物の外観

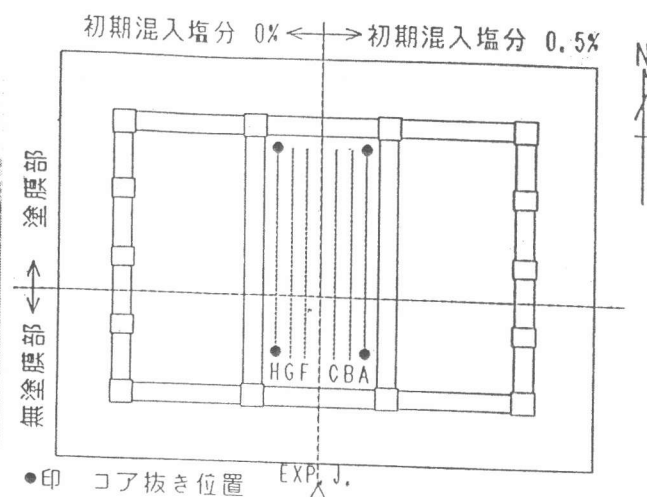


図-1 暴露構造物平面図

\*<sup>1</sup> 東亜合成化学工業 (株) 製品研究所, 工修 (正会員)  
 \*<sup>2</sup> 琉球大学教授, 工学部環境建設工学科, Ph.D (正会員)  
 \*<sup>3</sup> 新日本製鐵 (株) 技術開発部, 工修 (正会員)  
 \*<sup>4</sup> 琉球大学助手, 工学部環境建設工学科, 工修 (正会員)

建物の海側（北側）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、南側の無塗膜部と区別する。

図-1に示す暴露構造物中央部スラブの下層に位置する鉄筋を対象に、自然電位、交流インピーダンス、及び錆表面率の測定を行った。対象の鉄筋かぶりは、30～35mmであることが測定後のはつりにより確認された。塗膜部は塗膜を除去し、また、コンクリート表面のプライマー及びよごれはサンダーで除去している。コンクリートの乾燥の影響を少なくするため、測定前日から水を噴霧している。測定は1993年11月に行い、暴露構造物の建設から9年2カ月を経過する。自然電位の測定にはセンサー中央部の銀・塩化銀電極を用い、交流インピーダンスは対極を配置した同一のセンサーを用いて測定した。測定時間を短縮するため、高周波として200Hz、低周波として0.1Hzを用いる。また、コンクリート中の塩分量分析のためスラブから採取したコアのスライス片をクラッシュして試料を作り、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量を分析し、コンクリート重量に対する重量比（NaCl, %）で示す。

### 3. 試験結果及び考察

#### 3.1 塩分量分析試験

対象としているスラブ中央部の4カ所から採取したコンクリートコアの塩分量分析結果を図-2に示す。また、スラブと同一品質の供試体（15×15×60cm）を1992年11月から6か月間スラブ上に設置し、短期間に浸透する塩分量の解明も行い、その分析結果を同図に示す。

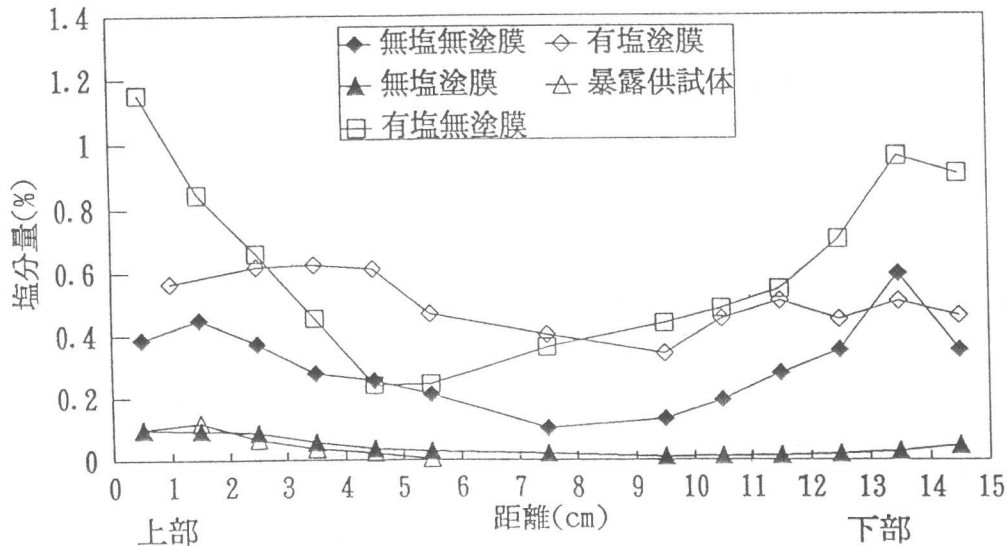


図-2 塩分量分析結果

図示のように、冬期にまたがる6か月間の暴露において、季節風に伴う多量の飛来塩分量をうけ、高濃度の塩分量がコンクリート中に浸透する。表層で0.09%を示し、3.5cmの深さまで達する。この塩分量及び分布形状は、本暴露構造物の建設から塗膜施工までの期間に浸入した初期塩分量と考えられる。

スラブの無塩塗膜部の塩分量の分布は、上部表面から30mmに至る部分まで0.09%の平均化した値を示し、漸次減少する。また、下部表層で0.04%を示し、内部にかけて減少する。試験対象の鉄筋位置で0.014%が存在する。この塗膜部分の塩分量は、塗膜施工前3か月間に浸透していた初期の塩分量が経時的に平均化したものと考えられる。無塩無塗膜部では、上、下表面からの浸透

が著しく、下部鉄筋位置において0.276%の高濃度の塩分量を示す。

有塩塗膜部においては初期混入塩分量に塗膜施工前の浸透量が加算されている。分布形状は、無塩塗膜部と同様に経年的に平均化している。また、無塗膜部においては、外部からの塩分の浸透量が加算され、表面近くで著しい塩分量を表す。下部の鉄筋位置において、有塩塗膜部及び有塩無塗膜部で、各々、0.45%、0.55%を示す。

上記の塩分量に対応し、無塗膜部(無塩及び有塩)においては目視によりクラックが観察される。塗膜除去後の有塩塗膜部のコンクリート表面にも同様にクラックが存在するが、無塩部は健全状況である。

### 3. 2 電気化学特性値

スラブ下面の南北方向の鉄筋を対象にする。鉄筋のかぶりは30~35mmである。測定に際しては塗膜を除去し、図-1に示す6本の鉄筋の電気化学特性値(自然電位、分極抵抗、コンクリート抵抗)の測定を行い、その試験結果を図-3~5に示す。図中では有塩部と無塩部の鉄筋を区別し、さらに、塗膜部と無塗膜部を図示する。

図-3に自然電位の測定結果を示す。塗膜無塩部での平均値-109mVに対し、塗膜有塩部では平均値-203mVの卑の値を示す。無塗膜無塩部では外部からの浸透塩分量、0.276%があり、腐食環境下にある。従って、平均値-251mVの卑の値を示す。無塗膜有塩部が最も卑な値で、平均値-394mVを示す。このように、塩分量及び長期間の塗膜遮水効果に関わるコンクリートの含水量等の腐食環境要因によって自然電位に差異が表れる。鉄筋の腐食評価法としては、ASTM-C876が広く用いられる。この評価法に基づくと、塗膜無塩部における平均値-109mV、Ag/AgCl(-229mV, CSE換算)は腐食のない確率が高いと評価されるが、その

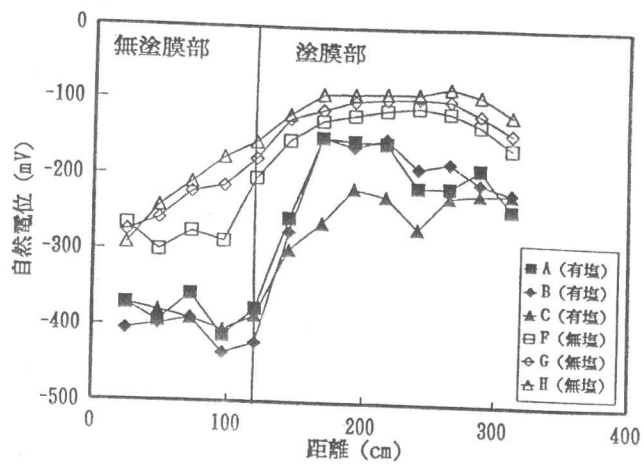


図-3 自然電位測定結果

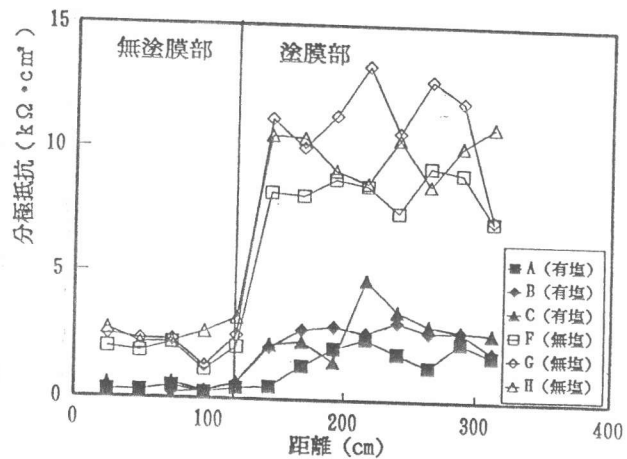


図-4 分極抵抗測定結果

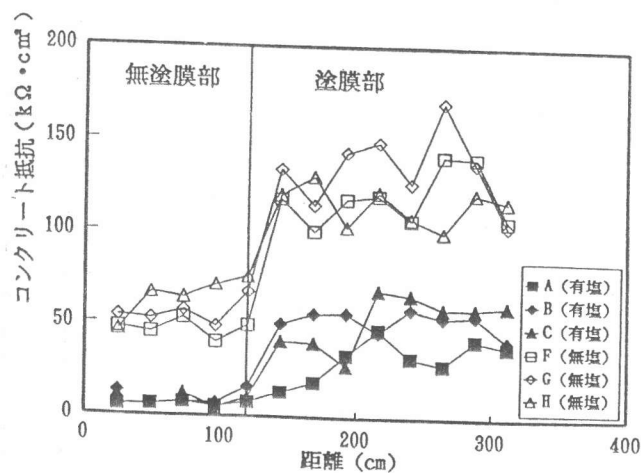


図-5 コンクリート抵抗測定結果

他の部分は腐食の発生が予測される評価である。

図-4の分極抵抗測定結果は、自然電位に対応した傾向を表す。塗膜無塩部で平均値 $9.8\text{K}\Omega\cdot\text{cm}^2$ と大きな値を示すが、無塗膜無塩部では多量の浸透塩分量により鉄筋腐食が進行し、その状況に対応し平均値 $2.1\text{K}\Omega\cdot\text{cm}^2$ と低い値を示す。無塗膜有塩部ではさらに低く、平均値 $0.4\text{K}\Omega\cdot\text{cm}^2$ を示すのに対し、塗膜有塩部は平均値 $2.5\text{K}\Omega\cdot\text{cm}^2$ で、無塗膜無塩部と同様の値を表す。

塩水噴霧促進試験及び実構造物を対象とした分極抵抗と鉄筋腐食の関係を解明し、その研究成果を発表してきた。〔3, 4, 6, 7〕。その研究成果では、健全域で $10\sim 15\text{K}\Omega\cdot\text{cm}^2$ を表すのに対し、鉄筋腐食の進行した活性域では $1\sim 5\text{K}\Omega\cdot\text{cm}^2$ となる。この評価法に準じると、本スラブの塗膜無塩部は健全域を表すのに対し、塗膜有塩部及び無塗膜部は活性域と考えられる。

図-5のコンクリート抵抗も塗膜及び塩分の有無により差異が表れる。塗膜無塩部の平均値 $122\text{K}\Omega\cdot\text{cm}^2$ に対し、塗膜有塩部で平均値 $47\text{K}\Omega\cdot\text{cm}^2$ の低い値を示す。無塗膜無塩部は浸透塩分量に対応し、塗膜有塩部と同様な平均値 $53\text{K}\Omega\cdot\text{cm}^2$ を表す。無塗膜有塩部ではさらに小さく、平均値 $9\text{K}\Omega\cdot\text{cm}^2$ となる。

中央スパンでの今回の測定結果（1993年11月）と、3か年前の端スパンの同一位置での測定結果〔4〕の比較を行う。図-6～8は、自然電位、分極抵抗、コンクリート抵抗について、各々、平均値及び $\pm 2\sigma$ の上、下限値を図示する。

有塩無塗膜部の自然電位は、平均値 $-354\text{mV}$ から $-394\text{mV}$ へと卑に移行しているのに対し、有塩塗膜部では、 $-208\text{mV}$ から $-203\text{mV}$ とほぼ同様の平均値が維持されている。無塩無塗膜部では $-303\text{mV}$ から $-251\text{mV}$ の貴の値に移行している。この原因は測定時の

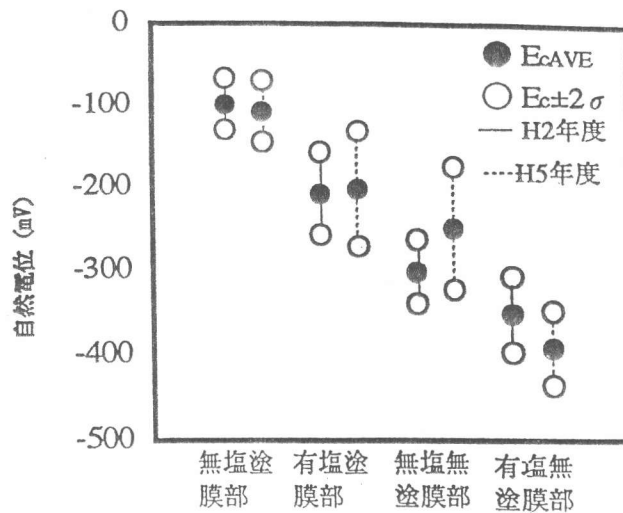


図-6 自然電位の比較

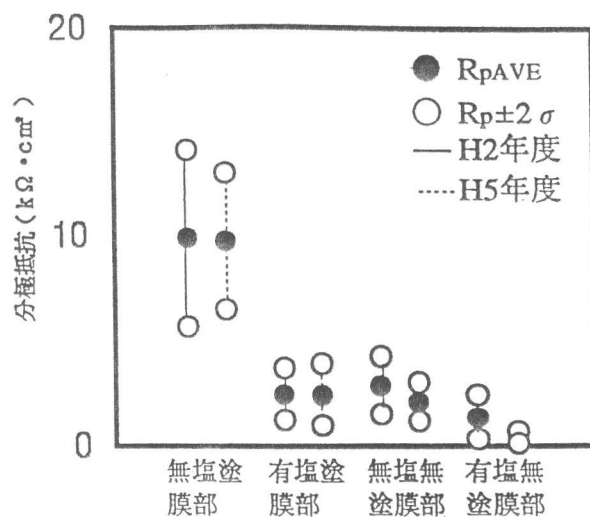


図-7 分極抵抗の比較

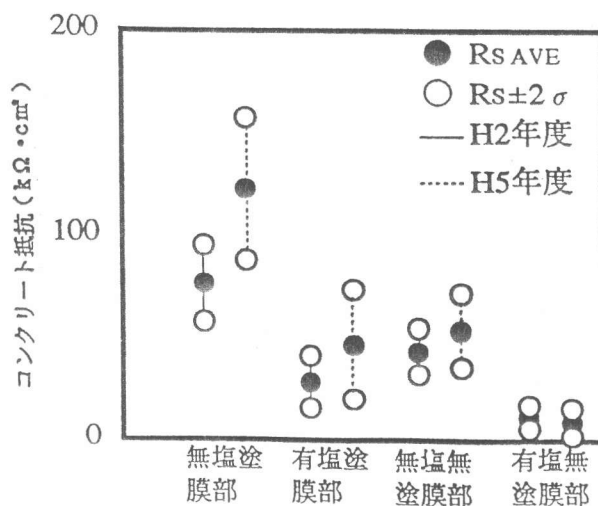


図-8 コンクリート抵抗の比較

乾燥度に起因していると考えられる。無塩塗膜部では $-100\text{mV}$ から $-109\text{mV}$ に移行し、ほぼ同じ平均値を示す。この様に、塗膜部分では自然電位が経時的に同一値で維持されている。

分極抵抗の値は、有塩無塗膜部で $1.4\text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ から $0.4\text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ に低下し、有塩塗膜部では $2.5\text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ の値が維持されている。無塩無塗膜部で $2.9\text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ から $2.1\text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ にわずかに低下し、無塩塗膜部では $9.9\text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ が $9.8\text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ と維持されている。このように塗膜部において、自然電位と同様に、分極抵抗が同一値で維持されることは、鉄筋腐食の速度の変化が塗膜によって抑えられていることを表す。

コンクリートの抵抗は、有塩無塗膜部で $11.4\sim 8.9\text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ と小さな値を表す。しかし、有塩塗膜部、無塩無塗膜部、及び無塩塗膜部で各々、 $29\sim 47, 43\sim 54, 76\sim 122\text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ と増加している。このことは、測定時の表面の乾燥度がコンクリート抵抗に大きく影響している。

上記の電気化学特性値を測定位置で比較し、図9～10に示す。ここでは、測定位置での経年変化を明らかにすると同時に、測定値の再現性に注目する。各測定位置において、自然電位は一部を除きほぼ同じ値、または単に移行する。自然電位に対応し、分極抵抗も同じ値または減少する傾向を示す。この様に、自然電位及び分極抵抗の値の変化は、鉄筋の腐食と明らかに対応する。

### 3. 3 錆面積率

有塩及び無塩部から、各々2本の鉄筋(A, B, F, G)をはつり取り、錆面積率を求めている。塗膜無塩部では測定不可能な軽微の錆が確認されるだけで、健全状態にある。しかし、塗膜有塩部では85%と錆面積率が拡大する。無塗膜無塩部では75%の錆面積率を示し、無塗膜有塩部で

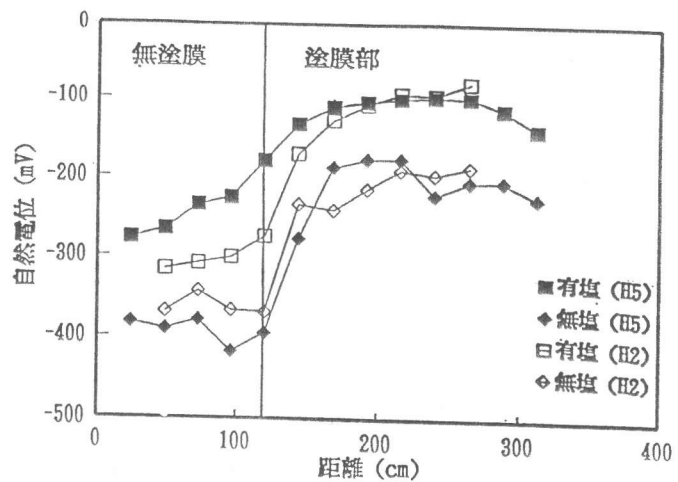


図-9 自然電位 (平均値) 測定結果

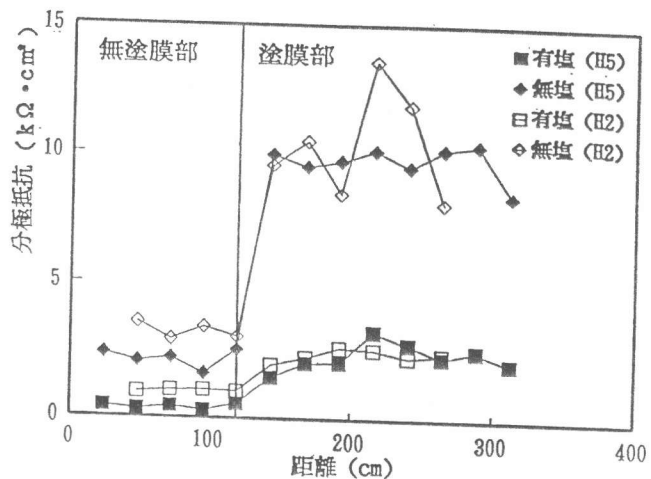


図-10 分極抵抗 (平均値) 測定結果

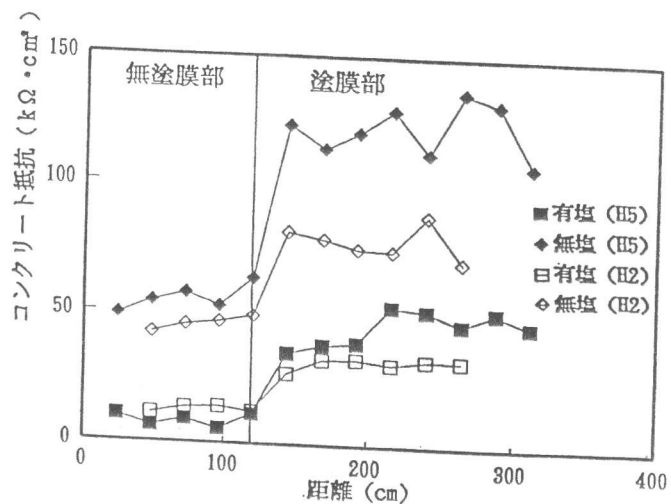


図-11 コンクリート抵抗 (平均値) 測定結果

90%に拡大する。この有塩部では、クラックを通じて水の浸透した位置で孔食が生じ、断面欠損をもたらしている。この様な鉄筋の錆発生状況は、上記の塩分量及び電気化学特性値と定性的に対応し、鉄筋腐食の評価法の妥当性を示す。

#### 4. まとめ

暴露構造物を対象に、塩分量分析、電気化学特性値、及び鉄筋錆面積率の測定を行い、以下の研究成果が得られた。

- (1) 厳しい塩害環境下において、コンクリート中への塩分の拡散浸透量はコンクリート打設直後の初期から経年的に増加する。この様な外部環境に対し、アクリルゴム系の塗膜は完全に遮塩効果を表す。
- (2) 塗膜無塩部では鉄筋腐食の発生がなく、健全域を表す。この状況に対応し、自然電位は平均値  $-109\text{mV (Ag/AgCl)}$  の値を表す。しかし、塩分量の大きい塗膜有塩部及び無塗膜部では鉄筋の腐食環境に対応し、自然電位は卑の値を表す。
- (3) 塗膜無塩部の分極抵抗の平均値  $9.8\text{K}\Omega\cdot\text{cm}^2$  は健全域を表し、塩分量の多い有塩部、及び無塗膜部では  $2.5\text{K}\Omega\cdot\text{cm}^2$  より小さな値を表し、鉄筋腐食の活性域に対応する。
- (4) コンクリート抵抗は塩分量に影響され、また、測定時のコンクリート表面及び内部の乾燥度によって大きく影響される。
- (5) 鉄筋の錆面積率は電気化学特性値に対応している。これらの研究成果から、電気化学特性値を考慮した鉄筋腐食の評価法は有効である。

#### 参考文献

- 1) T.Oshiro and S.Tanikawa : **Effect of Surface Coating on the Durability of Concrete Exposed to Marine Environment, Concrete in Marine Environment, ACI SP-109** p179-198, 1988.
- 2) 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.**
- 3) 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. 1, P433-447, 1991**
- 4) 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.**
- 5) 大城 武, 谷川 伸 : **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)**
- 6) 大城 武, 野里 耕正, 風間 洋, 後藤 信弘 : **PC橋の鋼材腐食評価法について, コンクリート工学年次論文報告集 14-1, P655-660, 1992.**
- 7) 谷川 伸, 大城 武, 後藤 信弘 : **塩害環境下におけるRC構造物の暴露実験, コンクリート工学年次論文報告集 15-1, P811-816, 1993**
- 8) 後藤信宏, 松岡和巳, 伊東 毅, : **交流インピーダンス法によるコンクリート中の鉄筋腐食モニタリング, コンクリート工学年次論文報告集, 12-1, P527-532, 1990.**