

論文

[1136] 塩害環境下における RC 構造物の暴露実験

谷川 伸\*1, 大城 武\*2, 後藤 信弘\*3

1. はじめに

本研究は亜熱帯海洋性気候下の沖縄県で、海岸に隣接した暴露RC構造物を対象に、塩害による劣化過程の把握を目的としている。本構造物にはアクリルゴム系防水塗膜を部分的に初期に施工しその塗膜による耐久性向上を実験的に立証している。ここではコンクリート中の塩分量について8年3ヶ月にわたる暴露期間の経年変化を解明している。また、鉄筋腐食評価法として交流インピーダンス法を採用し、その手法の技術開発を行っている。本構造物は1984年9月に完成し、その後コンクリートの劣化過程、塗膜の保護効果、及び電気化学的特性値による鉄筋腐食評価法等の研究成果を発表してきた[1]~[5]。本報文は1992年11月の測定結果を基にこれまでの知見を加え、RC構造物の塩害劣化及び評価法を記述する。

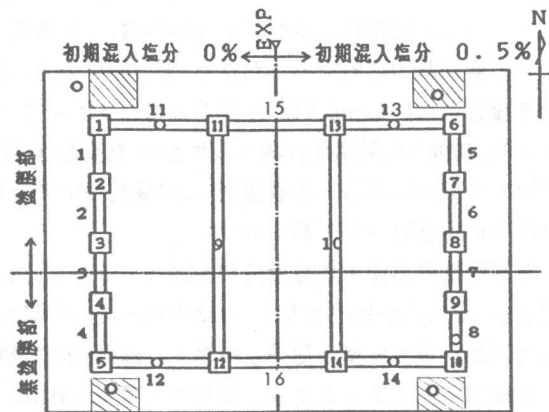
2. 試験概要

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)。本構造物は三面を海岸に隣接し、海塩粒子を常時受け、強風時には下部で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。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、西部分の無塩部と区別している。また、海岸北面に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、南面の無塗膜部と区別している。

張り出しスラブの下表面を対象に、自然電位、交流インピーダンス、鉄筋の腐食面積率、及びコンクリート中の塩分量等の測定を行っている。自然電位の測定はセンサー中央の銀・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ている。また、測定時



写真-1 構造物の外観



注: ○印, ⊠ コア抜き及び測定位置  
図-1 構造物の平面図

- \*1 東亜合成化学工業(株) 製品研究所 工修(正会員)
- \*2 琉球大学教授 工学部建設工学科 Ph.D.(正会員)
- \*3 新日本製鉄(株) 技術開発部 工修(正会員)

間を短縮するため、高周波として200Hz、低周波として0.1Hzを用いている。スラブ及び梁から採取したコンクリートコア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 塩分量分布

無塩無塗膜部の梁の塩分量分布を図-2に示している。塩分量の経年変化を解明するため、暴露期間2年、5年、6年、7年、8年の分析結果を図示する。最も塩害環境下にあるのは梁12、16の海側北面で、これらの面はスラブ下に位置し、雨水を直接受けないが、強風時には海水飛沫を受けている。暴露2年の梁16の塩分量分布から暴露5年の梁12に変化し、暴露7年の梁12にいたる経年変化が表れている。鉄筋腐食ラインの塩分量を0.03~0.04%と考えれば、かぶり40mmの鉄筋位置では、暴露2年でそのラインに達し、以後、塩分量は著しく増加している。表面から20mm間の塩分量の減少を無視し分布形状を表面まで外挿して、表面塩分量を定義する。この分布形状から拡散係数を計算する[6]。暴露7年で梁12の表面塩分量は1.68%と推定され、経年的に増加する。また、分布形状から拡散係数、 $8 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$ が求められる。梁12北面に近接した梁4の内側東面も上記の梁12、16の北面と同様の塩分量分布を示し、暴露8年の分布形状から拡散係数、 $6 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$ が求められる。

陸側南面は最も塩害環境の緩い面で、これらの面は直接海水飛沫を受けることはなく、この環境に対応し塩分量も少ない。梁12の暴露7年の表面塩分量は0.95%と推定され、この分布形状から拡散係数、 $5 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$ が求められる。鉄筋位置での塩分量は0.61%に達し、鉄筋の腐食危険ラインをはるかに越える。梁4の西面は海に面し飛塩の影響が強く、梁12の南面より塩分量は増加傾向を示す。暴露8年で表面塩分量は1.04%と推定され、拡散係数、 $8 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$ が求められる。

図示の通り、表面から20mmの範囲で塩分量の減少がみられる。この原因として雨水による洗い流し、または結露による濃度低減等が考えられるが、明らかな原因は解明されていない。

無塩塗膜部の梁の塩分量分布を同図に示している。暴露2年、5年、7年、8年の塩分量分布を梁1、11、15について示しているが、経年的に塩分量の増加は無く、塗膜の塩分浸透に対する遮塩効果を表している。同図に示されている塩分量は、季節風の卓越する冬期の3ヶ月間、コンクリート養生のため無塗膜の状態であったため、その間に浸透したものと考えられる。鉄筋位置40~50mmにおける塩分量は0.02~0.06%で、鉄筋の腐食ラインに一部で達している。鉄筋をはつり出し観察したところ、軽微な鉄筋腐食は認められるが、腐食進行速度は塗膜の遮水性により著しく低下している。これらの梁は海水飛沫を直接受け、本構造物中で最も厳しい環境下に位置していることを考慮して塗膜の保護効果が評価される。

有塩無塗膜の梁の塩分量分布を図-3に示している。初期混入塩分量0.5%に対して、梁中央面で最少値の0.46%が検出され、この量をベースに外部からの塩分浸透が増加している。海側東面において、梁8が最も多量の塩分量を表す。暴露8年で表面から40mmで著しい塩分濃縮が表れているが、この原因はマイクロクラックの発生と考えられる。梁8の海側西面も海水飛沫の影響を受け、その影響に対応して塩分量も大きく、東面と同様な塩分量分布を表している。梁8の7年目の内側西面は梁14の海側北面に近接し、暴露7年の塩分量はほぼ同程度となっている。梁14の7年目に至る経過は、梁16の2年及び梁14の5年目の塩分量分布を経ている。陸側南面においても、梁14の7年目の塩分量分布が示している様に増加の傾向を示している。

有塩塗膜部の梁の塩分量分布を同図に示している。初期混入塩分量に対応した可溶性塩分量

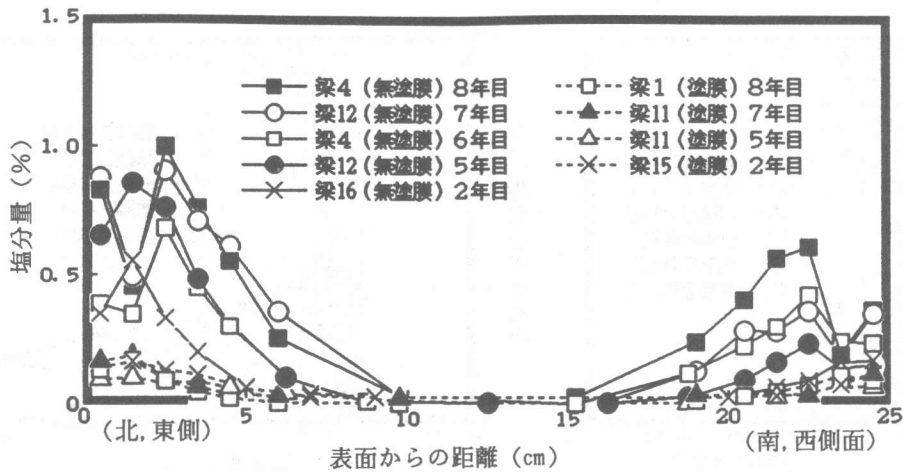


図-2 塩分量分布(梁, 無塩)

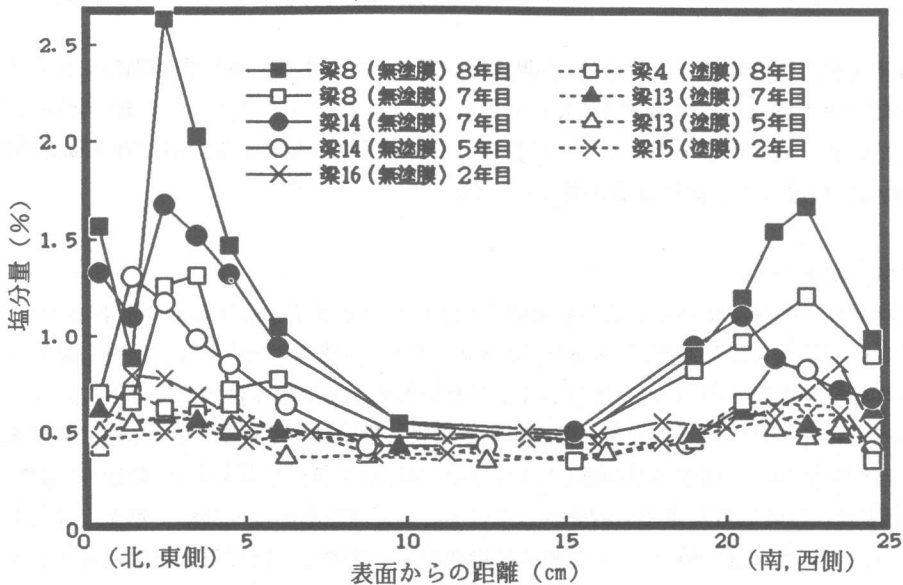


図-3 塩分量分布(梁, 有塩)

0.35%をベースに、両表面で僅かに増加している。この現象は前述の塗膜施工前の塩分の浸透によるものと考えられる。この塩分量分布には塩分濃度勾配が少なく、孔食の発生を低減している。

無塩無塗膜部のスラブの塩分量分布を図-4に示している。上面及び下面から中央部に向けた塩分浸透が表れているが、上面からの浸透の方が大きい。暴露7年の表面塩分量は上、下面で各々1.03, 0.38%で上面が大きい。拡散係数は上、下面で各々 $3 \times 10^{-8}$ ,  $4 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sec}$  が求められ、ほぼ同じ値を示している。暴露2, 7, 8年の塩分量分布が経時変化のパターンを表している。無塩塗膜部のスラブの塩分量分布を同図に示している。上、下面で大きくなっているが経年的変化はなく、塗膜の遮塩効果を示している。両面での増加した塩分量は梁の場合と同様に、塗膜の施工前の浸透塩分量に起因すると考えられる。

有塩無塗膜部スラブの塩分量分布を図-5に示している。暴露2年の塩分量分布がこのスラブの初期塩分量分布のパターンを表している。初期混入塩分量をベースに浸透塩分量が加算され、さらに、内部塩分の下方への移動も表れ増加傾向を増している。上、下面側の鉄筋周辺において高濃

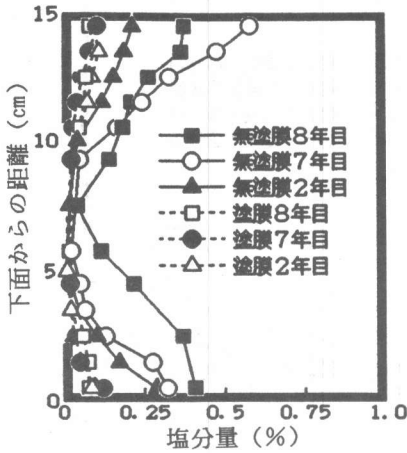


図-4 塩分量分布 (スラブ、無塩)

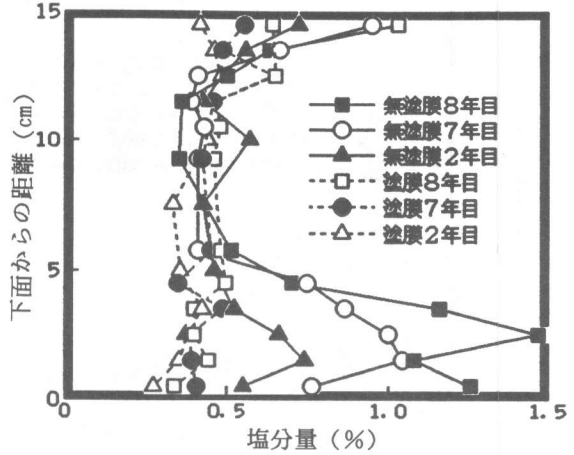


図-5 塩分量分布 (スラブ、有塩)

度の塩分量に達し鉄筋腐食を生じさせ、上側鉄筋の腐食はコンクリートに界面剥離を生じさせている。下部では下表面からの塩分浸透に伴って増加し、又、マイクロクラックに起因する塩分濃縮も表れている。有塩塗膜部のスラブの塩分量分布を同図に示している。初期混入塩分量の分布が維持され、塗膜による遮塩効果が表れている。

### 3.2 電気化学的特性値

測定位置は図-1に示している。同位置での南北方向のスラブ下部鉄筋のかぶりは40mmである。下部鉄筋の測定結果を自然電位、分極抵抗、及びコンクリート抵抗について図-6～8に示している。図中には有塩部及び無塩部、および塗膜部及び無塗膜部の水準の組み合わせで示している。また今回(1992年11月)と前回(1990年11月)の測定結果を平均値と分散幅( $\pm 2\sigma$ , 95.5%)で表す。

図-6の自然電位の測定結果の平均値(Ag/AgCl)は、有塩無塗膜部が最も卑な $-390\text{mV}$ を示すのに対し、有塩塗膜部は比較的貴な値 $-191\text{mV}$ を示している。無塩無塗膜部は $-265\text{mV}$ を示すのに対し、無塩塗膜部は $-129\text{mV}$ の最も貴な値を示し、塗膜部は無塗膜部に比較して自然電位を貴に維持する機能を示す。

図-7に分極抵抗の測定結果を示す。有塩無塗膜部、有塩塗膜部、無塩無塗膜部及び無塩塗膜部に対し、各々、平均値、 $0.8, 2.2, 2.3, 7.1\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ を示す。これらの分極抵抗から評価すると腐食反応は有塩無塗膜部が最も激しく、有塩塗膜部及び無塩無塗膜部でも腐食反応は活性と考えられ、また、無塩塗膜部では不活性から活性への遷移域であると考えられる[4]。無塩無塗膜部では浸透塩分量は多く、有塩塗膜部とほぼ同様の腐食反応を示している。今回の分極抵抗は前回よりも低くなっている。このことは、本測定位置が最も厳しい塩害環境を受けていることに起因している。

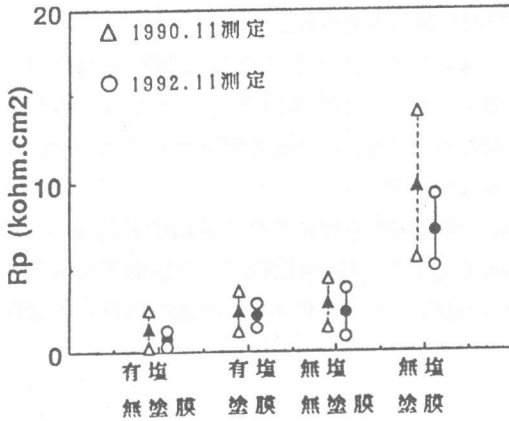
図-8にコンクリート抵抗の測定結果を示す。有塩無塗膜部、有塩塗膜部、無塩無塗膜部、及び無塩塗膜部の順で大きくなり、平均値は各々 $8, 24, 51, 93\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ を示す。無塩塗膜部は無塩無塗膜部の値の約2倍を示し、塗膜がコンクリート抵抗を高めている。また、有塩部の高濃度の初期混入塩分はコンクリート抵抗を低下させている。

無塩塗膜部及び無塗膜部の分極抵抗の等高線図を図-9, 10に示している。分極抵抗はいずれの部分においても先端の軒先に向けて低下する傾向が表れている。この原因は、先端に水切りが存

在し、鉄筋の先端部のかぶりが少なくなり、鉄筋腐食が活性状況にあることを表す。

上記の特性値中、分極抵抗に対応させて鉄筋の腐食状況を記述する。無塩塗膜部測定域の15ヶ所の測定点中、2ヶ所のみに軽微な鉄筋腐食断面率10.13%がみられる。この状況に対応する分極抵抗 $6\sim 8\text{K}\Omega\cdot\text{cm}^2$ は、健全域から腐食活性域への遷移域を表している。また、測定領域外の先端水切り部において鉄筋の腐食が表れ、その状況に対応し分極抵抗が先端部で低くなっている。

無塩無塗膜部の測定域先端部で著しい腐食があり、腐食面積率は4ヶ所の測定位置で43, 65, 96, 27%の値を示している。これら



試験水準  
図-7 分極抵抗  
梁部

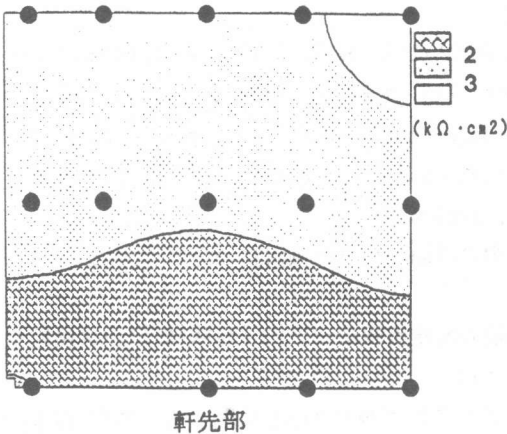
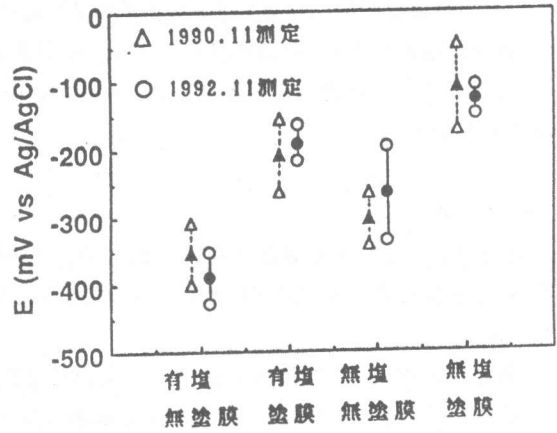
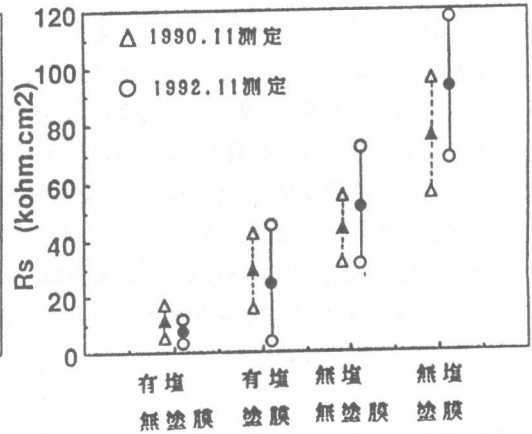


図-9 分極抵抗の等高線  
(無塩無塗膜部)



試験水準  
図-6 自然電位:



試験水準  
図-8 コンクリート抵抗  
軒先部

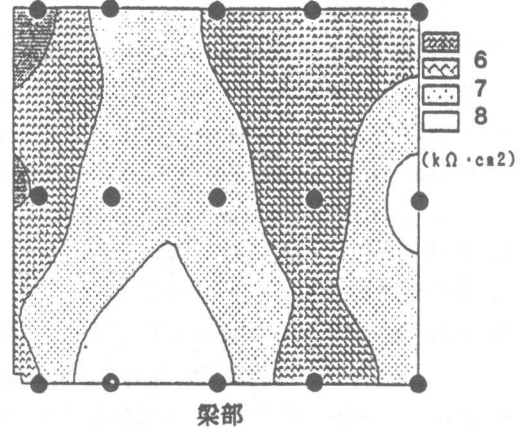


図-10 分極抵抗の等高線  
(無塩塗膜部)

の値に対応する分極抵抗は $1\sim 2k\Omega \cdot cm^2$ の値で、この様な低い値は激しい腐食の活性状況を表している。有塩塗膜部においては分極抵抗の低い値に対応して下表面側の全面で鉄筋が著しく腐食し、腐食面積率は平均値45%に達している。有塩無塗膜部においては2段配筋の上側が著しく腐食し、スラブ中央面に界面の剥離が生じている。この状況に対応し分極抵抗も平均値 $0.8k\Omega \cdot cm^2$ を示している。

#### 4. まとめ

塩害環境下における構造物を対象に、その劣化過程及びアクリルゴム系防水塗膜の保護効果、さらに、鉄筋腐食の評価法等について研究を行っている。過去8年間の研究成果から次の知見が得られた。

- (1) 暴露構造物の無塩塗膜部においては、長期の暴露期間を経過しても塩分量は初期のレベルが維持され、外部からの浸透塩分量による増加が表れて無い。このことは塗膜による遮塩効果を表している。この塩分量分布に対応し、鉄筋腐食は軽微で、RC構造物の耐久性向上が期待出来る。無塩無塗膜部においては外部からの塩分浸透が著しく、鉄筋の塩化物腐食を防止できない。従って、塩害環境下においては適切な防食対策を早期に講じる必要がある。  
有塩無塗膜部においては、初期混入塩分量をベースにして外部からの浸透塩分量が加算された塩分量分布を表し、著しい高濃度の塩分量を表している。有塩塗膜部では、初期混入塩分量が長期にわたり塗膜の遮塩、遮水性によって維持され、外部からの塩分量の著しい増加を防止している。この結果、孔食に伴う鉄筋断面の損失を防いでいる。
- (2) 無塩塗膜部の自然電位及び交流インピーダンスは、塩害劣化過程における鉄筋の健全域から僅かに劣化し、鉄筋腐食活性域にいたる遷移域にある。また、無塩無塗膜部及び有塩部の分極抵抗は、鉄筋腐食の活性域を表している。この様に、交流インピーダンス法は鉄筋腐食の評価法として活用出来る。

#### 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, Vo1. I, 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) コンクリート工学年次論文集14-1, P855-860, 1992.
- 6) 入田 一 ほか : アクリルゴム系防水材料のコンクリート相当かぶり厚さに関する一考察, 日本建築学会大会梗概集A (中国) P155-156, 1990.