

トータルメンテナンスに貢献する

東亜合成株式会社 建材事業部  
〒105 東京都港区西新橋1-14-1  
TEL.03(3597)7341 FAX.03(3597)7380

日 付：1996.12.17

1/11

分 類：アロンウオール

**Technical Report Vol. 6**

タイトル：

## 沖縄塩害対策暴露センター 10年目の調査結果

弊社が琉球大学 大城教授と共同で研究している沖縄塩害対策暴露センターも暴露10年を迎えました。10年目までの調査結果をまとめて日本建築学会構造系論文集に発表致しましたので、本報で紹介させて頂きます。3ページ以降に発表論文そのものを掲載致しますが、内容の要点は以下の通りです。2ページの図と対比しながらご覧下さい。

### 沖縄塩害対策暴露センター10年目までの調査結果の要点

#### 1. 実験の概要

コンクリート(W/C:63%)には、初期に塩分を混入しない部分(以下、無塩部)と塩化物イオンを0.3%混入した部分(以下、有塩部)の2水準を設け、そのそれぞれにアロンウオールを施工した部分と施工しない部分を設けました。0.3%の塩化物イオン量は、JASS 5「鉄筋コンクリート工事」の許容塩化物イオン量の約24倍に相当します。

#### 2. 非塗装コンクリートでの塩害の進行

1. 無塩部では3.5年目に0.1mm程度のひび割れを確認しました。この時の鉄筋の腐食面積率は約10%で腐食グレードはII(浮き錆程度)です。有塩部では、僅か3ヵ月で0.1mm程度のひび割れが発生し、3.5年目にはこのひび割れが3mmに達し、一部かぶりコンクリートが剥落しました。3.5年目の鉄筋の腐食面積率は約100%で、腐食グレードはIV(断面欠損を生じている)です。
2. 塗装の無いコンクリートへの塩化物イオンの浸透は著しく、無塩部の鉄筋位置での塩化物イオン量は、僅か2年程度で鉄筋腐食の臨界値に到達します。
3. ひび割れの無い部分では、初期に多くの塩化物イオンが蓄積し、その後徐々に収束していく様な傾向を示します。それでも、特に海側のコンクリートは10年経過した現在、まだまだ塩化物イオンが蓄積しそうな勢いを示しています。
4. ひび割れ部では塩化物イオンが加速的に蓄積します。即ち、ひび割れ部を放置しておくと塩害が急速に進行し、致命傷となることを示しています。

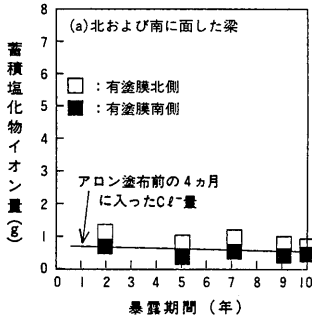
#### 3. アロンウオール被覆による塩害防止効果

1. アロンウオールのひび割れ追従性は、10年後でも初期値(約4.5mm)の約80%を保持していることを確認しました。また、暴露7年後でも、アロンウオールの遮塩性、酸素透過性、水蒸気透過性がほとんど変化していないことを確認しました。
2. アロンウオールを施工した場合、無塩部では鉄筋腐食をほぼ完全に防止していることを確認しました。有塩部では、鉄筋腐食は認められるものの、腐食の程度は浮き錆程度に留まっており、十分に鉄筋腐食を抑制していると判断されました。
3. 有塩部のひび割れの発生時期から判断してアロンウオールを施工すると鉄筋コンクリート構造物の寿命を少なくとも約28倍延長することがわかりました。これは、無塗膜部で3ヵ月で0.1mmのひび割れが発生したのに対し、アロンウオール施工部では7年後に0.1mmのひび割れ(この時アロンウオール塗膜に破断は無く、塗膜を剥ぎ取り検査しました)が発生しており、それぞれの年数の倍率から算出したものです。

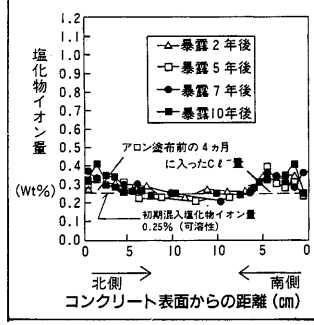
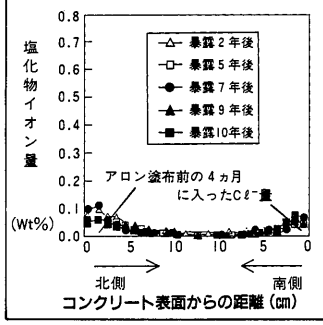
アロンウォールによる鉄筋コンクリートの塩害防止

沖縄暴露10年

アロンウォール(塩化物イオン0%)



アロンウォール施工部は塩化物イオンが全く蓄積していません。

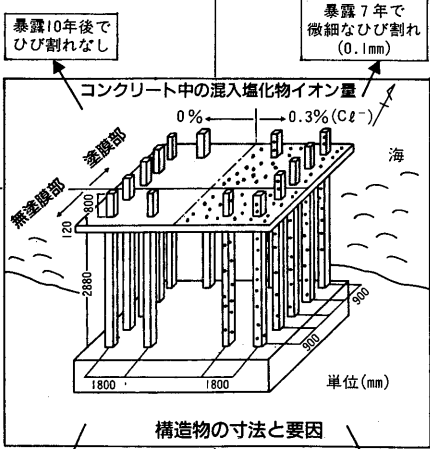
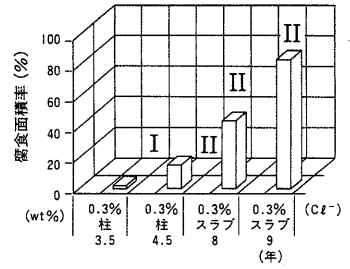
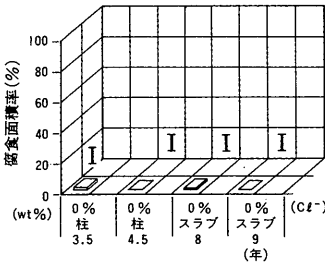


アロンウォール(塩化物イオン0.3%)

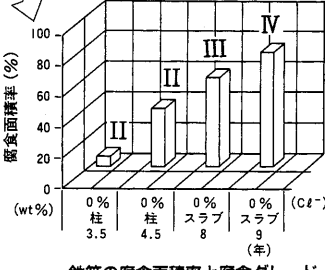
鉄筋腐食のグレードとさび評点

グレード	さび評点	鉄筋の状態
I	0	黒皮の状態、またはさびが生じているが全体的に薄い緻密なさびであり、コンクリート面にさびが付着していることはない。
II	1	部分的に浮きさびがあるが、小面積の斑点状である。
III	3	断面欠損は目視観察では認められないが、鉄筋の全周または全長にわたって浮きさびが生じている。
IV	6	断面欠損を生じている。

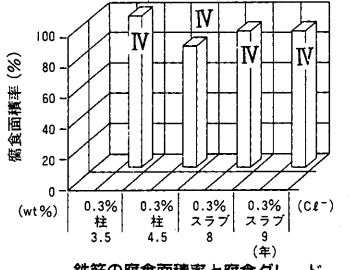
アロンウォール施工部も腐食面積が大きくなっていますが、腐食は浮き錆程度で留まっています。(腐食グレードII)



完璧に腐食を抑制

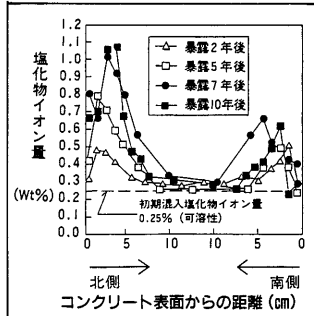
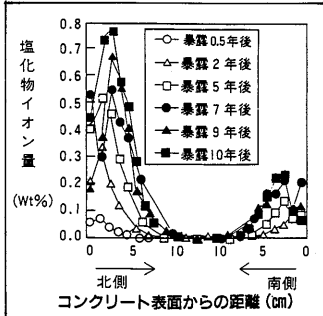
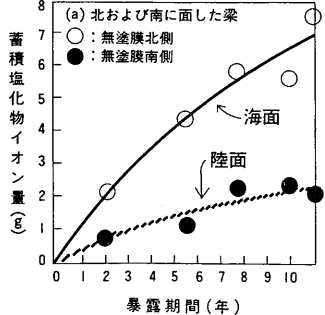


寿命を28倍延長

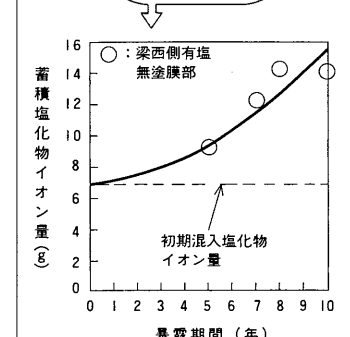


9年目位から断面欠損を生じた腐食が認められます。(腐食グレードIV)

蓄積量は収束する傾向がありますが、それでも特に海面は、まだまだ蓄積しそうです。



ひび割れ部では、塩化物イオンが加速的に蓄積していきます。



ひび割れ部での、塩化物イオン蓄積量

無塗装部(塩化物イオン0%)

無塗膜部(塩化物イオン0.3%)

# 厳しい塩害環境下での鉄筋コンクリート構造物の 耐久性に関する研究

(アクリルゴム系防水塗膜の効果)

## DETERIORATION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURE IN SEVERE MARINE ENVIRONMENT

(Acrylic rubber-based surface coating as concrete protection)

谷川 伸\*, 山田義智\*\*, 大城 武\*\*\*, 川村満紀\*\*\*\*  
Shin TANIKAWA, Yoshitomo YAMADA, Takeshi OSHIRO  
and Mitsunori KAWAMURA

A field reinforced concrete structure with and without an acrylic rubber-based surface coating was built in Okinawa for this research project, and it has been exposed to severe marine environment for ten years. The test on this structure gives the following results :

- (1) In unprotected concrete, the penetration of chloride ions into concrete is very rapid, and the corrosion of reinforcing bars occurs in early stage.
- (2) The acrylic rubber-based surface coating acts as a complete barrier to the transport of chloride ions, water and oxygen, and prevents the corrosion of the bars in chloride-contaminated concrete.

**Keywords:** acrylic rubber, surface coating, concrete protection, exposure, marine environment, corrosion  
アクリルゴム, 表面塗材, コンクリート保護, 暴露, 塩害環境, 腐食

### 1. まえがき

近年, 鉄筋コンクリート構造物の鉄筋腐食に起因する早期劣化が大きな問題となっている。海洋環境下では, 飛来塩化物イオンの作用を受けて, コンクリート中に塩化物イオンが浸透し, 鉄筋を腐食させる限界値以上にその量が早期に達するためである。その有効的な防食法の一つとして, 塩化物イオン浸透防止の目的で, コンクリートの表面被覆が提唱されているが, モルタルまたは仕上塗材による仕上げのレベルではほとんど効果がない<sup>(1)</sup>。塩害防止を目的とした表面塗材は, 腐食反応に触媒的に作用する塩化物イオンの浸透防止のみでなく, 腐食の必須要因である水と酸素の両方の浸透を, 長期にわたって防止しなければならない。さらに, 下地コンクリートにひび割れが生じて, 腐食要因となる物質の浸透を阻止できる塗膜のひび割れ追従性(弾性)と, 長期にわたる耐候性が要求される。

そこで, 暴露試験用塗材の選定にあたり, ひび割れ追従性を有する弾性系として, アクリルゴム系, ウレタンゴム系およびポリブタジエンゴム系塗膜を対象に, 耐

性, ひび割れ追従性および塩害防止等の促進実験を行った。その結果, アクリルゴム系塗膜は, 紫外線およびオゾン環境下で, ひび割れ追従性の耐久性に最も優れていたため, この材料を選択した<sup>(2)</sup>。

長期の塩害防止機能を把握する目的で, 暴露そのものが促進試験となる高温・多湿の亜熱帯気象下の沖縄県の海岸で, この防水材を塗装した鉄筋コンクリート構造物の暴露試験を行った。ここでは, 建設時のフレッシュコンクリートに塩化物イオンを含有しない場合と含有する場合の両方について, 塗膜の機能を明らかにした。なお, 初期に混入する塩化物イオン量は, 沖縄県で塩害を受けた建物のコンクリートから検出された最大の塩化物イオン量0.3% [コンクリート重量(含水率2.1~2.7wt%)に対するCl<sup>-</sup>%] とし, フレッシュコンクリート1m<sup>3</sup>に対し, 塩化ナトリウム(NaCl)を12kg混入した。この値は, JASS 5「鉄筋コンクリート工事」の許容塩化物イオン量0.3kg/m<sup>3</sup>の約24倍に相当する。

写真1に示す暴露試験用の鉄筋コンクリート構造物を, 1984年に沖縄県本部町備瀬崎の海岸に建設し(図1),

\* 東亜合成㈱研究所 工修  
金沢大学大学院自然科学研究科 博士課程  
\*\* 琉球大学工学部環境建設工学科 助手・工修  
\*\*\* 琉球大学工学部環境建設工学科 教授・Ph.D  
\*\*\*\* 金沢大学工学部土木建設工学科 教授・工博

Chief Research Engineer, Toagosei Co., Ltd. M. Eng.  
Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Kanazawa University  
Research Assoc., Dept. of Civil Engineering and Architecture, University of the Ryukyus, M. Eng.  
Prof. Dept. of Civil Engineering and Architecture, University of the Ryukyus, Ph.D  
Prof. Dept. of Civil Engineering, Kanazawa University, Dr. Eng.



写真1 暴露構造物

表1 コンクリートの調合

調合強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	スラブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	最大粗骨材の 寸法 (mm)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	絶対容積(L/m <sup>3</sup> )				重量(kg/m <sup>3</sup> )			AE剤 (g/m <sup>3</sup> )	
							セメント	細骨材	粗骨材	混和材	セメント	細骨材(1)	粗骨材(1)		混和材
280	18.0	4.0	63	20	51.5	183	92	S <sub>1</sub> :158 S <sub>2</sub> :195	332	-	291	S <sub>1</sub> :412 S <sub>2</sub> :516	900	-	728

注) (1): 表面乾燥飽水状態, 海砂(S1): 砕砂(S2) = 4.5 : 5.5 (容積比)

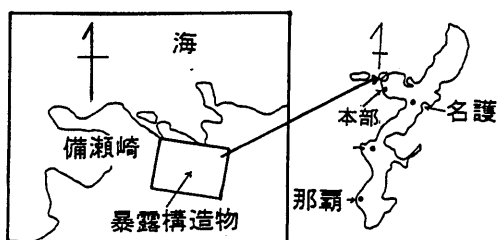


図1 暴露場所

表2 アクリルゴム系防水材の仕様

種類	化学組成	塗布量 (kg/m <sup>2</sup> )	膜厚 (μm)
下塗材	合成樹脂系	0.3	30
中塗材	アクリルゴム系 ・樹脂量: 54% ・主成分: 2-エチルヘキシルアクリレート	1.7	900
上塗材	アクリル樹脂系	0.3	100

暴露試験は現在も継続中である。この構造物の配置および寸法を図2に示す。暴露環境は、飛来塩化物イオン量の測定結果にもとづいて評価した。

本論文は、次の2つの点に注目して研究を行った。

- 1) 無塗膜のコンクリート中への塩化物イオン浸透過程と鉄筋腐食
- 2) アクリルゴム系防水塗膜の機能保持、塩化物イオン浸透阻止および腐食抑制

本報告は、既報の暴露1年<sup>(3)</sup>、2.5年<sup>(4)</sup>、3.5年<sup>(5)</sup>、4.5年<sup>(6)</sup>、5年<sup>(7)</sup>、6年<sup>(8)</sup>、7年<sup>(9)</sup>、8年<sup>(10)</sup>、9年<sup>(11)</sup>、および10年間<sup>(12)</sup>の暴露試験結果をとりまとめ、新たな知見を加えたものである。

## 2. 試験概要

本鉄筋コンクリート構造物は、図2に示すように、柱、梁およびスラブから構成され、西半分のコンクリートには初期塩化物を含有せず(以下、無塩部と称す)、東半分には塩化ナトリウム(NaCl) 12kg/m<sup>3</sup>(コンクリート重量に対し0.3%の塩化物イオン量)を初期混入した(以下、有塩部と称す)。その境界には、エキスパンションジョイントを設け、区別している。さらに、海側(北側)をアクリルゴム系防水材で被覆し(以下、塗膜部と称す)、陸側(南側)はコンクリート面を露出させた(以下、無塗膜部と称す)。コンクリート用材料として、普通ポルトランドセメント、海砂(沖縄県国頭産、除塩済み)、砕砂(沖縄県本部産)、砕石(本部産、最大寸法20mm)およびAE減水剤を用いた。コンクリートの調合は、沖縄県内の鉄筋コンクリート建築工事用として一般的なもの

を用いた。その調合を表1に示す。かぶり厚さは一律40mmとしたが、スラブのみ30mmを採用した。

使用したアクリルゴム系防水材は、表2に示す3種類で構成され、塗装後の総膜厚は約1mmである。中塗材の構成は、アクリルゴム54%、無機質充填剤46%である。アクリルゴムの組成は、ガラス転移点が-80℃と極めて低い2-エチルヘキシルアクリレートを90%以上含む柔軟なポリマーより構成される。このゴム状塗膜は、20℃での伸びが330%で、-80~100℃までの広範囲の温度領域で弾性を維持する。

10年間の暴露試験中に測定した以下の項目について、それらの試験法を示す。

(1) 外観変化: 塗膜外観およびコンクリート面のひび割れ等の異常を目視で観察した。塗膜部のコンクリート面

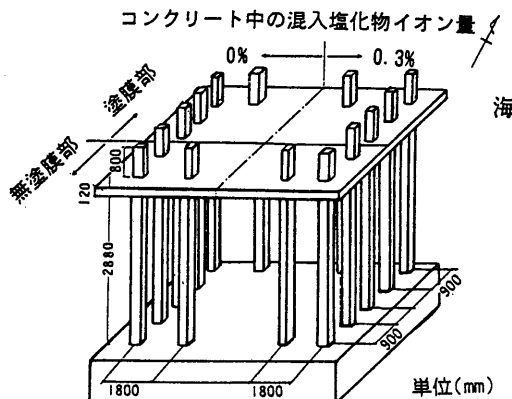


図2 構造物の寸法と要因

は、塗膜を除去して観察した。

(2)塗膜の機能：ひび割れ追従性は、梁の塗膜部から採取した直径10cmのコアを、下地コンクリートを含めて5mm厚さに切断し、試料とした。裏面コンクリート中央部に横一文字に深さ3mmの切込みを入れ、上下部をつかみ、温度20℃、5mm/分の速度で引張り、塗膜面に破断が生じた時のひび割れ幅を読み取った。

遮塩性は日本道路協会「道路橋の塩害対策指針(案)」酸素透過性はASTM D 3985-81 (Standard Test Method for Oxygen Gas Transmission Rate Through Plastic Film and Sheeting Using a Coulometric Sensor) の等圧法に準拠し、また、水蒸気透過性はJIS Z 0208「防湿包装材料の透湿度試験方法(カップ法)」の温度40℃、湿度90%R.H. の条件で測定した。

(3)飛来塩化物イオン量：本構造物のスラブ上に、土研式塩化物捕集器を設置し、飛来する塩化物イオンの試料を毎月採取した。その試料を塩化物イオン選択性電極を用いた電位差滴定法によって分析し、塩化物イオン量を求めた。

(4)コンクリート中の塩化物イオン量：直径10cmのコアを、梁、柱およびスラブからそれぞれ採取し、粉砕して試料を作り、塩化物イオン選択性電極を用いた電位差滴定法によって可溶性塩化物イオンを分析した<sup>(13)</sup>。塩化物イオン量は、コンクリート重量(含水率2.1~2.7wt%)に対する重量比(wt%)で示した。

(5)コンクリートの中性化深さ：フェノールフタレインの1%エタノール溶液を、採取したコンクリートコア断面に塗布し、赤色に変化しない領域を中性化深さとし、スケールで読み取った。

(6)鉄筋の腐食面積：かぶりコンクリートをはつり、鉄筋を切り出して試料とした。トレーシングペーパーに腐食部を写し取り、腐食面積を測定し、その面積から腐食面積率を求めた。また、腐食グレード<sup>(14)</sup>も観察した。

3. 試験結果および考察

3.1 外観変化

塗膜の割れ、はがれ等の異常は、暴露10年後も認められなかった。鉄筋腐食に起因するコンクリートのひび割れは、表3に示すように、無塩・無塗膜部では暴露3.5年に認められた。さらに、有塩・無塗膜部では暴露後わずか3カ月後でひび割れが発生し、3年後にはひび割れ幅は3mmに達し、一部のかぶりコンクリートがはく落した。無塩・塗膜部のコンクリートには、暴露10年後もひび割れは認められず、有塩・塗膜部では暴露7年後に微細なひび割れが認められた。多量の塩化物イオンを含む場合でも、塗膜部は、無塗膜部に対し、同程度の腐食に至るまでに長期間を要し、その延命効果を示した。

3.2 塗膜の機能

塗膜の力学的特性の一つであるひび割れ追従性は、

表3 コンクリートのひび割れ

塗膜の種類	無塩部 (0%)	有塩部 (0.3%)
無塗膜部	暴露3.5年でひび割れ (0.1-0.3mm)	暴露3カ月でひび割れ (0.1-0.3mm)
塗膜部	暴露10年後でひび割れなし	暴露7年で微細なひび割れ (0.1mm)

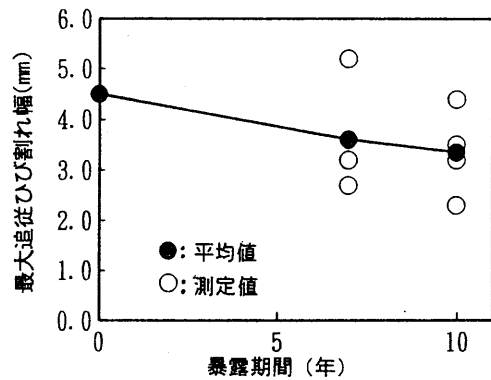


図3 塗膜のひび割れ追従性

表4 塗膜の拡散抵抗

暴露期間 (年)	拡散抵抗 (mg/cm <sup>2</sup> ·day)		
	塩化物イオン	酸素	水蒸気
0	4.8 x 10 <sup>-4</sup>	3.3 x 10 <sup>-2</sup>	3.7
7	7.2 x 10 <sup>-4</sup>	4.9 x 10 <sup>-2</sup>	3.5

表5 方位別飛来塩化物イオン量

方位	北	東	南	西
飛来塩化物イオン量 (mg/dm <sup>2</sup> ·year)	2990	1281	670	776

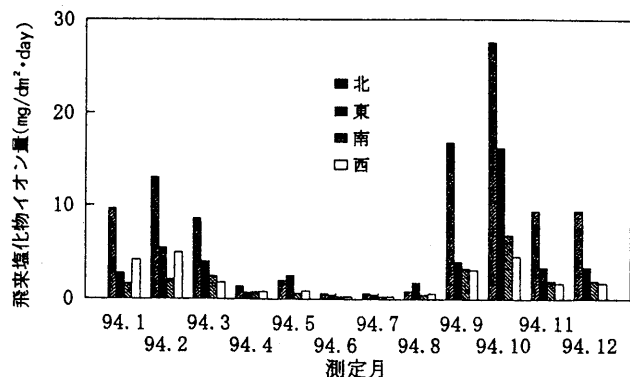


図4 月別の日平均飛来塩化物イオン量

図3に示すように、厳しい海洋環境下での暴露10年後も、初期値の約80%の機能を保持している。さらに、暴露7年後の塗膜の腐食要因に対する拡散抵抗は、表4に示すように、低下が認められず、遮断機能は維持されている。

### 3.3 飛来塩化物

1994年1月から12月までの1年間にわたる方位別年間飛来塩化物イオン量を表5に、また、月ごとの日平均飛来塩化物イオン量を図4に示す。暴露地点は、南西から東まで広範囲に海に面し、その海岸は岩礁で形成されているので、碎波の影響を受ける。飛来塩化物イオン量は、12月から3月の期間が高く、この期間の北側（海面）の塩化物イオン量は、平均で約 $10\text{mg}/\text{dm}^2 \cdot \text{day}$ で、6月～7月の $0.59\text{mg}/\text{dm}^2 \cdot \text{day}$ に比して高い。台風シーズンの9月～11月にはさらに高く、最高値 $27\text{mg}/\text{dm}^2 \cdot \text{day}$ が10月に記録されている。なお、飛来塩化物イオン量は、北、東、西、南の順に高い。

### 3.4 コンクリート中の塩化物

#### (1) 塩化物イオン量分布

図5に無塩部および有塩部、塗膜部および無塗膜部の要因の異なる北-南に面した梁について、暴露期間ごとの塩化物イオン量分布を示す。図5は、行列状に各要因下の塩化物イオン量分布を示し、1行目は無塩部、2行目は有塩部での分布を示す。また、1列目は無塗膜部、2列目は塗膜部での分布を示す。各図とも、縦軸は塩化物イオン量（可溶性、wt%）、横軸は北側および南側コンクリート表面からの内部深さ位置を示す。有塩部では、打込み時に混入した塩化物イオン量 $0.3\%$ を全塩化物イオン量と見なし、この値を可溶性塩化物イオン量に換算し、図中に破線で示す<sup>(15)</sup>。この換算は、暴露試験結果の塩化物イオン量分布から判断すると妥当と思われる。

無塗膜部では、海に面した北側で多量の飛来塩化物イオンが付着し、コンクリート内部へ浸透している。コンクリート中の鉄筋を腐食させる塩化物イオン量の限界値を $0.05 \sim 0.11\%$ <sup>(16)</sup>とすると、北側に面したかぶり厚さ $40\text{mm}$ の鉄筋位置では、暴露約2年後にその値に達し、暴露10年後にはその5倍～10倍に達する。無塗膜部では、

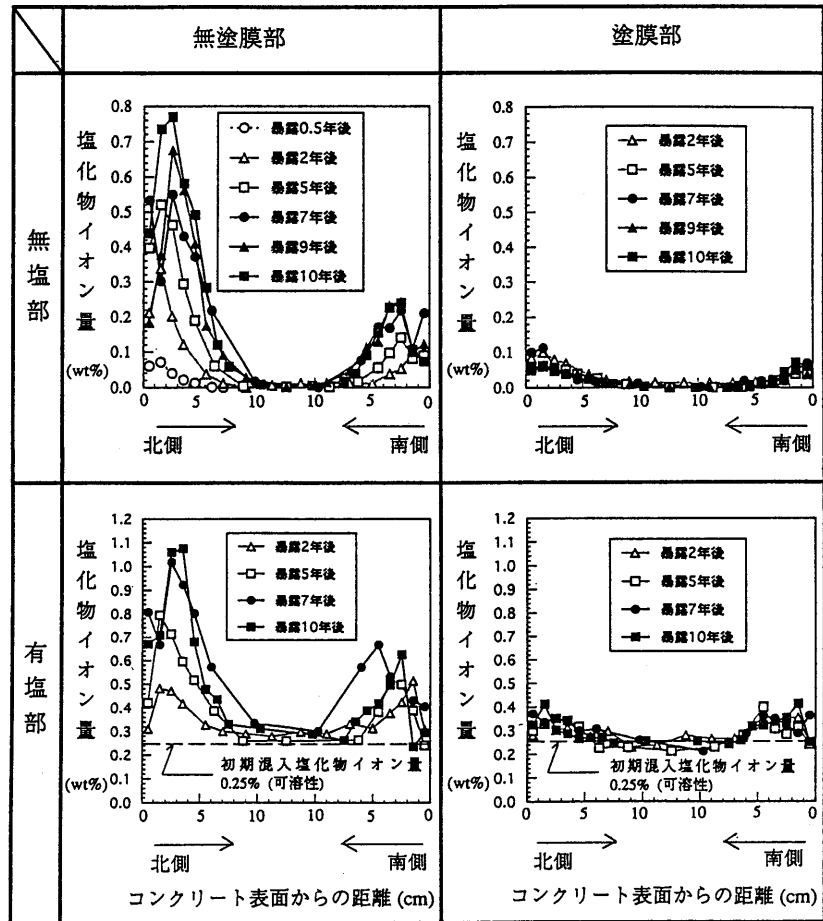


図5 梁の塩化物イオン量分布

塩化物イオン量の増加が著しいが、塗膜部では、わずかに増加しているだけである。この塗膜部でのわずかな増加は、コンクリート打込み後4カ月間、塗膜を施さずに放置したため、この期間中に浸透した塩化物イオンによるものと考えられる。この塗膜部の塩化物イオン量分布は、無塩・無塗膜部の暴露半年後とほぼ同様であり、上述のことが証明される。したがって、暴露10年間、塗膜部には、塩化物イオンの浸透がほとんどないと言える。北側と南側の塩化物イオン量分布の比較から、海に面した飛来塩化物イオンの多い北側の方が、陸に面した南側よりコンクリート中の塩化物イオン量が多いことが図5よりわかる。

本研究において、各部位からコンクリートコアを採取する際、鉄筋部を避け、かつ、目視にてひび割れのない場所から採取を心掛けた。初期に多量の塩化物イオンを含む場合は、鉄筋腐食によるひび割れが多く発生し、その発生時期も早期である。そのため、この部位近くから採取したコアには、表面および内部に微細なひび割れが生じている可能性が高く、塩化物イオンの浸透が容易になっていると推察される。この理由は、無塩・無塗膜部

の塩化物イオン量分布と、有塩・無塗膜部の塩化物イオン量分布から初期混入塩化物イオン量を引いた分布とを比較すると、塩化物イオン量のピークおよび分布とも、有塩部が高い値を示していることで説明される。

以上、北-南に面した梁の塩化物イオン量分布について述べたが、東-西に面した梁および柱についての塩化物イオン量分布も、定性的には上述のことと同様である。

図6にスラブの塩化物イオン量分布を、図5と同様に行列状に示す。梁では、暴露期間が長くなるに従って、塩化物イオン量が増加したが、スラブでは、暴露6,7年後より増加していない。ところで、暴露10年後の塩化物イオン量は減少している。その原因は、コア採取位置が飛来塩化物イオンの遮蔽されやすいスラブ上の角柱近であったり、別に設置した暴露供試体の裏面であったこと等が影響していると思われる。

有塩部スラブの塩化物イオン量は、梁に比べ、部材中央部で初期混入量よりかなり低下している場合が多い。これは、コンクリートの打込み時のブリージングに伴い、初期混入塩化物イオンの一部がコンクリートの外へ流出したものと考えられる。

スラブでは、梁および柱に比べ、塗膜が広範囲に施工され、沖縄県の強い紫外線にさらされている。しかし、塗膜には遮塩効果の低下は認められなく、梁の塗膜部と同様に、塩化物イオンの浸透はほとんど認められない。

梁およびスラブ共に、塩化物イオン量のピークは、コンクリート表面ではなく、内部側に生じている。このピーク位置は暴露期間の経過に伴って、より内部へ移動している。この塩化物イオンの移動によるピーク形成のメカニズムは、水分の移動や<sup>(17)</sup>・<sup>(18)</sup>、炭酸化部のフリーデル氏塩の分解で生じた塩化物イオンの細孔溶液中での移動で検討されている<sup>(19)</sup>。

暴露10年後の無塗膜部における各部材位置でのコンクリートの中性化深さを表6に示す。なお、塗膜部でのコンクリートの中性化は、ほとんど認められなかった。無塗膜部のコンクリートにおいて、炭酸化が塩化物イオン量のピーク形成に影響する可能性については、本研究か

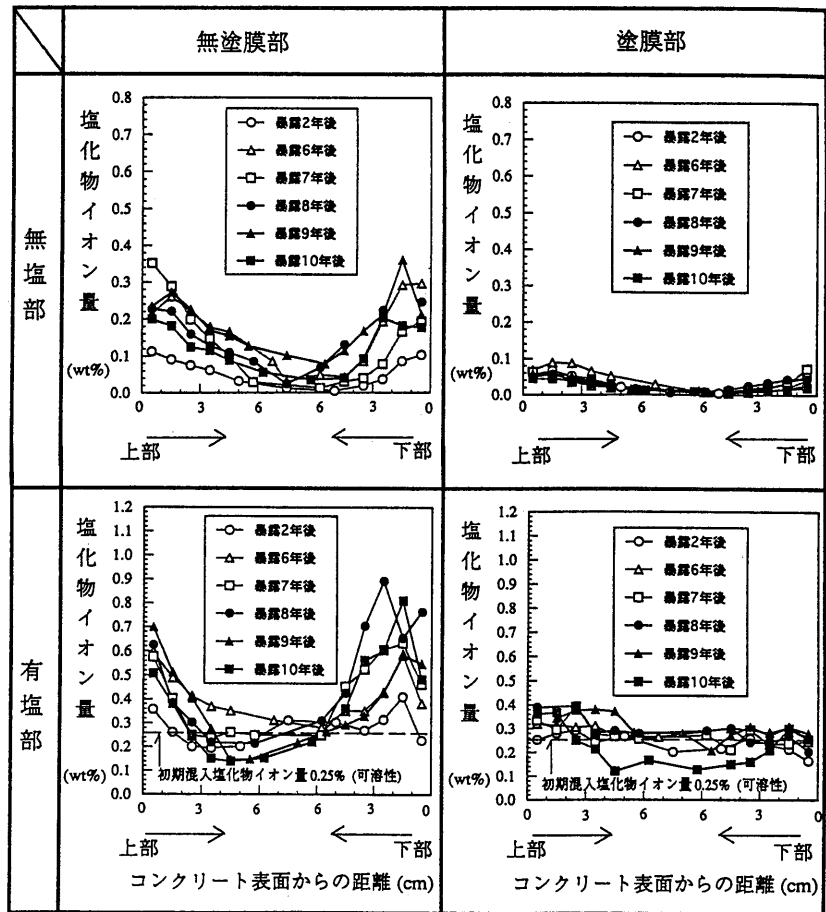


図6 スラブの塩化物イオン量分布

表6 暴露10年後のコンクリートの中性化深さ

部 位	梁				スラブ	
	北側	東側	南側	西側	上部	下部
中性化深さ (mm)	11.0	15.9	14.0	13.0	3.5	9.8

らも、次の3点により示唆される。

(i) 中性化深さの浅いスラブ上面では、コンクリート表面側に塩化物イオン量のピークがあり、そのピークの内部側への移動がない場合が多い。

(ii) 中性化が時間に伴って、より内部に進行するように、塩化物イオン量のピーク位置も時間に伴って、より内部へ移動している。

(iii) 暴露10年後の塩化物イオン量のピークは、スラブ上部側を除き、コンクリート表面から深さ20~30mm位置の10mm幅コンクリート片中(図中の深さ25mm位置に相当)に多く生じており、中性化深さの位置から平均約12mm内部側にある。文献[20]では、コンクリート中のpH勾配を測定し、水セメント比60%では、フェノールフタレイン

法で測定した中性化深さより11.5mm以上の深さに、真に中性化していない境界があるとしている。このことから、コンクリートの炭酸化は、フェノールフタレイン法で測定された中性化深さより11.5mm以上の深さまで達しており、本研究で得られたピークの位置と対応している。

(2)浸透塩化物イオン量

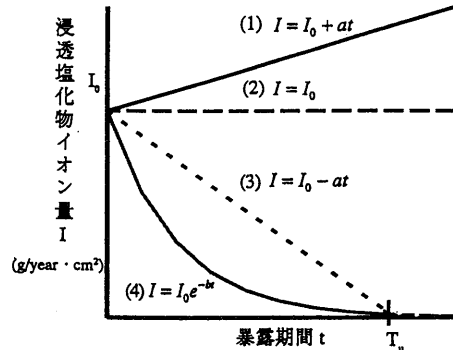
打込み時に塩化物イオンが混入していない場合、コンクリート中に蓄積する塩化物イオン量は、海から飛来する塩化物イオンがコンクリート表面に付着し、その一部がコンクリート内部に浸透する結果として生ずる。また、打込み時にコンクリート中に塩化物イオンを含む場合は、そのイオン量に累加して飛来塩化物イオンの一部がコンクリート表面から浸透し、蓄積する。

ここで、単位面積当たりのコンクリート表面から単位時間当たりに浸透する塩化物イオン量を、浸透塩化物イオン量 (g/year・cm<sup>2</sup>) と定義する。また、ある暴露期間後、単位面積当たりのコンクリート中に分布する塩化物イオン量を深さ方向に累加し、その値を蓄積塩化物イオン量 (g/cm<sup>2</sup>) と定義する。この浸透塩化物イオン量および蓄積塩化物イオン量の暴露期間との関係を図7に示す。図7-(a)は、浸透塩化物イオン量と暴露期間の関係を4種類の関数で表している。式(1)は、浸透塩化物イオン量が暴露期間と共に増加していく場合であり、式(2)は、経時的に変化しない場合である。式(3)および式(4)は、暴露期間と共に、比例あるいは指数的に減少していく場合である。図7-(b)は、図7-(a)の浸透塩化物イオン量に対応した蓄積塩化物イオン量の経時変化を表す。任意の暴露期間Tに対し、式(1)、(2)、(3)、(4)は、それぞれ、式(a)、(b)、(c)、(d)に対応している。

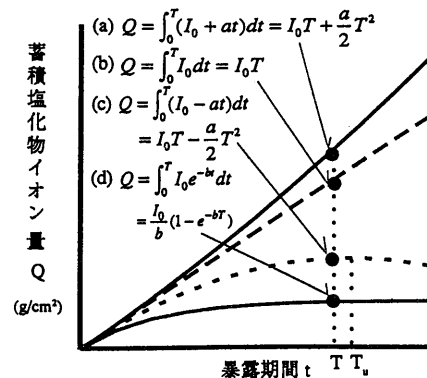
これらの浸透塩化物イオン量および蓄積塩化物イオン量を、実際の現象と照らし合わせて考察する。式(1)は、暴露期間に伴って浸透塩化物イオン量が比例的に増加することを意味し、ひび割れのない健全なコンクリートでは考えにくい。式(2)は、 $I=I_0$ 一定で塩化物イオンが浸透することを示す。しかし、コンクリート表面は炭酸化等で細孔構造が変化すること、また、細孔の水分が暴露期間中に失われていくこと等から、Iが暴露期間中、一定であるとは考えられない。式(3)は、浸透塩化物イオン量が経時変化に伴って、図中のTu経過後、負すなわち流出となり、対応する式(c)は、上に凸の暴露期間に関する二次関数となる。このため、ある暴露期間(Tu)以後は、蓄積塩化物イオン量が減少に転じることを意味し、現実的には考えられない。式(4)の浸透塩化物イオン量の経時変化では、コンクリート中の蓄積塩化物イオン量は、式(d)のように、ある一定値に収束する。筆者らは、海水濃度と同じNaCl溶液を用い、コンクリート片で浸漬試験および乾湿繰返し試験を行って、コンクリート片中の塩化物イオン量の変化を測定した。その結果、塩化

物イオン量は、ある値に収束する結果を得た<sup>(4)</sup>。これらの結果より、コンクリートにひび割れがない場合、式(4)および式(d)の関係式が、浸透塩化物イオン量および蓄積塩化物イオン量の現象関係の説明に有効であると考えられる。また、かぶりコンクリートにひび割れが発生し、さらに、鉄筋腐食の進行に伴うひび割れが進行すると、見掛けのコンクリート表面が増大し、単位面積当たりの浸透塩化物イオン量は増加する。その増加量の正確な経時変化の定式化はできないが、ここでは、ひび割れ進展の影響により、式(1)のように、比例的に増加するものと仮定する。したがって、蓄積塩化物イオン量は、暴露期間に対し、二次関数として増加する。ただし、ひび割れ部、すなわち、見掛け上のコンクリート表面は、無限に増加するわけではない。したがって、ひび割れの進行程度により、ある時点から浸透塩化物イオン量および蓄積塩化物イオン量は、式(4)および式(d)に移行するものと考えられる。

図8に無塩・無塗膜部より採取したコア中の蓄積塩化物イオン量の経時変化をプロットした。ここでの蓄積塩化物イオン量は、コアを中央で、各方位および上下部に切断して二分割し、直径10cmの断面積を考慮して、それぞれのコアについて求めた。式(a)~(d)が成り立つため



(a) 浸透塩化物イオン量と暴露期間



(b) 蓄積塩化物イオン量と暴露期間

図7 浸透塩化物イオン量および蓄積塩化物イオン量の経時変化概念図



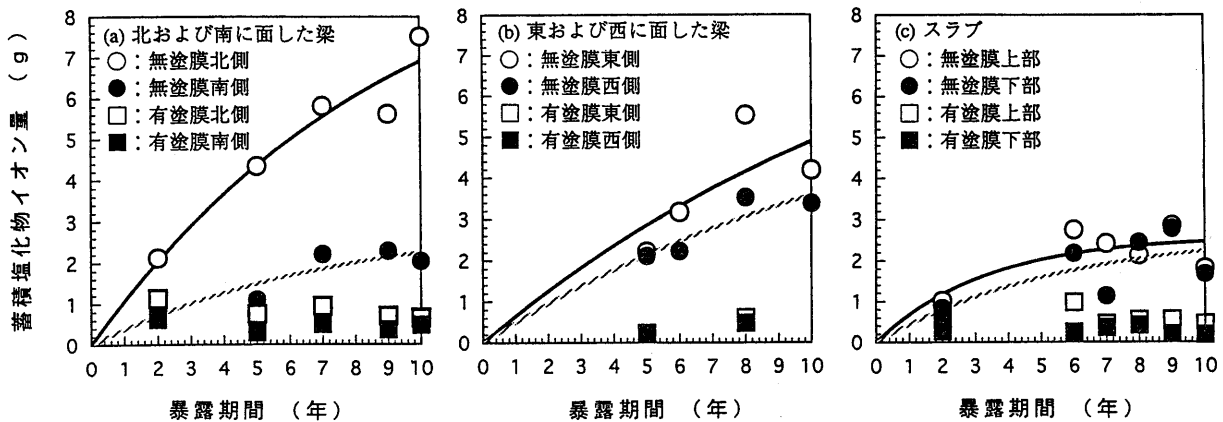


図8 無塩・無塗膜部コンクリートの蓄積塩化物イオン量の経時変化

には、上述の分割したコアは、飛来塩化物イオン浸透面（コンクリート表面）以外の他の面からの塩化物イオンの浸透がないものでなければならない。ここで、分割したコアの側面側では、同一条件の部材中であるため、塩化物イオン量が等しく、側面からの出入りはない。また、切断した中央位置の断面では、その近傍の塩化物イオン量がほぼ等しいことから、この断面での塩化物イオンの出入りはないと考える。なお、図中の蓄積塩化物イオン量は、全塩化物イオン量に換算した<sup>(15)</sup>。本図より、ひび割れの影響がないと考えられる部位での蓄積塩化物イオン量の経時変化は、式(d)で表されることがわかる。図中に、式(d)による近似曲線を示す。塗膜部の蓄積塩化物イオン量は、無塗膜部での半年間の蓄積塩化物イオン量とほぼ同じであり、塗膜施工までの4カ月間に蓄積された量であることがわかる。また、その蓄積塩化物イオン量が暴露10年間、ほとんど増加しないことから、本研究で用いた塗膜の塩化物イオン浸透阻止効果が証明される。

表7に式(d)で近似して得られた各係数の値を、梁およびスラブの方位別に示す。ここに、 $I_0$ は、初期浸透塩化物イオン量を示す。この値は、同一のコンクリートであれば、飛来塩化物イオン量と対応する。飛来塩化物イオン量の最も多い北側の $I_0$ は最も大きく、最も少ない南側の $I_0$ は最も小さい。係数 $b$ は、浸透塩化物イオン量の減衰性状を表すもので、この値が大きい程、浸透塩化物イオン量の減衰性が顕著である。この値に影響を及ぼす因子は、経時的な細孔構造の変化およびコンクリートの含水状態の変化等が考えられる。すなわち、コンクリート表面側の細孔量および細孔径に変化があれば、浸透塩化物イオン量は変化する。また、コンクリートの含水率が低下すれば、塩化物イオンを内部へ拡散する媒体が減少するため、見掛け上、浸透塩化物イオン量を抑える効果が生じるものと考えられる。ここで、細孔構造に変化

を与える要因を考察するため、表6の中性化深さと減衰性を表す係数 $b$ を対応して検討する。南側を除いて、中性化が進んでいる所ほど、係数 $b$ の値が小さく、浸透塩化物イオン量の減少の割合が小さい結果となっている。文献[21]によれば、水セメント比43%のコンクリートを用い、 $CO_2$ 濃度10%、湿度60%R.H.、温度20°Cの条件下で炭酸化処理を行い、海岸沿いに暴露した結果、炭酸化部分が塩化物イオンの浸透を遅延させる効果があると報告されており、本研究の結果とは逆になっている。また、文献[22]によれば、モルタルを用いた乾湿繰返しを行わない促進中性化試験では、経時的に全細孔量は減少するが、乾湿繰返し促進中性化試験では、水セメント比65%の時の細孔量は経時的に増加すると報告されている。このことから、上述の文献[21]の条件は、乾湿繰返しを行わない場合に相当し、本研究の条件は、自然環境下で炭酸化が進行する場合であり、乾湿繰返し中性化促進試験に相当するものと考えられる。したがって、炭酸化の進行する環境条件と水セメント比の相違が細孔量の違いとなり、浸透塩化物イオン量の経時変化に関して、異なった結果をもたらしている。

表7 近似式(d)の係数の値

部位	方位	係数の種類			近似式の決定係数 $R^2$
		$I_0$	$b$	$I_0/b$	
梁	北	1.127	0.108	10.435	0.92
	東	0.674	0.067	10.060	0.55
	南	0.405	0.133	3.045	0.80
	西	0.514	0.075	6.853	0.82
スラブ	上	0.780	0.301	2.591	0.71
	下	0.473	0.175	2.703	0.60

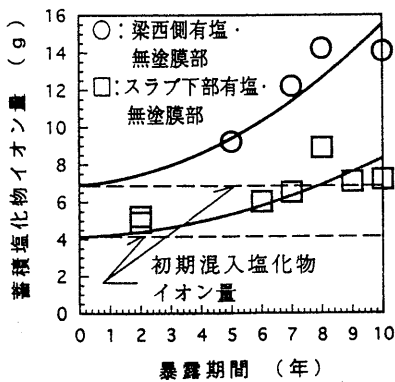


図9 ひび割れ影響部の蓄積塩化物イオン量の経時変化

コンクリートの含水率を測定していないが、スラブ上部および梁南側では、日射の影響で他の部位よりコンクリート内部の含水率の低下が大きいと考えられる。これが要因となり、減衰性を表す係数 $b$ を大きくしているものと推察される。

$I_0/b$ は、蓄積塩化物イオン量の収束値である。上述したように、初期浸透塩化物イオン量 $I_0$ は、飛来塩化物イオン量と対応し、減衰性を表す係数 $b$ は、環境条件が同一であればほぼ等しくなる。したがって、減衰性を表す係数 $b$ が同じであれば、飛来塩化物イオン量の少ない環境下のコンクリートほど、蓄積塩化物イオン量は小さな値に収束する。

有塩・無塗膜部のコンクリートでは、打込み後3カ月で、ひび割れが目視にて観察されている。本研究では、コア採取にあたって、ひび割れ部は避けるよう心掛けた。しかし、採取したコアの中には、細かいひび割れが観察された。このように、ひび割れの影響を受けているスラブ下部および東西方向に面した梁のコアについて、蓄積塩化物イオン量の経時変化を計算し、図9に示す。いずれの場合も、暴露10年間の測定では、図7-(b)中の式(a)のように、蓄積塩化物イオン量が経時的に増加している。図中には、式(a)によって近似した曲線も示す。これより、コンクリートがひび割れの影響を受けている場合、蓄積塩化物イオン量は、式(a)の二次関数的に増加し、水と酸素の供給状態も増加することとあわせて、鉄筋腐食をより加速する。ただし、ひび割れの進展は無限ではなく、ひび割れ影響部のコンクリートでも、蓄積塩化物イオン量に収束値があるものと考えられる。

3.5 鉄筋腐食

飛来塩化物イオンの浸透に起因する鉄筋腐食を、柱とスラブの鉄筋について測定し、その腐食面積率とグレードを求め、その結果を図10に示す。

(1) 無塗膜部

無塩部の腐食面積率は、暴露3.5年後で7%(柱)、4.5年後で38%(柱)、8年後で58%(スラブ)、9年後で75%(スラブ)というように経時的に増大している。腐食グレードは、暴露3.5年後の柱でIIに達し、微細ひび割れがコンクリートに発生している。

有塩部では、暴露わずか3カ月後でグレードIIの腐食に達し、柱に微細なひび割れが生じている。暴露3.5年後には全面が腐食し、腐食グレードもIVと著しく、腐食の最終段階に達している。

(2) 塗膜部

無塩部(柱)は、暴露10年後も腐食が全く認められず、塩化物イオン浸透防止効果をよく表す。観察されたわずかな腐食は、コンクリート打込み時に既に生じていたものである。なお、有塩部では、柱、スラブ共、鉄筋腐食を完全には防止できず、腐食面積率は暴露期間の経過に伴い増加している。しかし、腐食グレードは、無塗膜部に比して、1から2レベル小さく、塩害劣化を抑制している。このことは、許容塩化物イオン量(0.3kg/m<sup>3</sup>)の約24倍の塩化物を打込み時に含む場合でも、外界からの酸素と水分の供給を遮断することにより、鉄筋腐食の進行をくい止め、遅延させていることを示す。

表8では、鉄筋周辺部の塩化物イオン量と腐食面積率

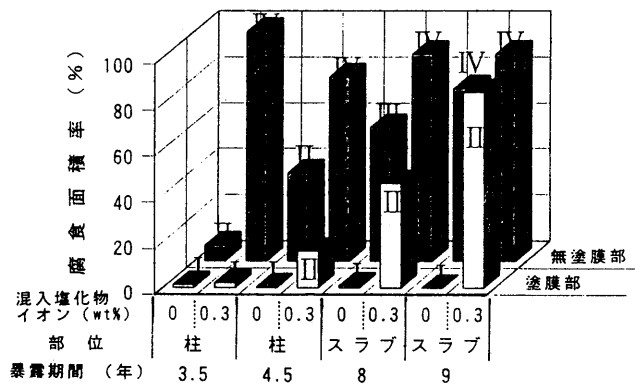


図10 鉄筋の腐食面積率と腐食グレード

表8 鉄筋部の塩化物イオン量と鉄筋の腐食面積率および腐食グレードとの関係

鉄筋の腐食状態	鉄筋部の塩化物イオン量(wt%)	
	無塗膜部	塗膜部
鉄筋腐食面積率 (%)	0-3	—
	3-25	0.22
	25-50	0.29
	50-75	0.22-0.36
	75-100	0.33-0.89
鉄筋腐食グレード*	I	**
	II	0.22-0.29
	III	0.22-0.36
	IV	0.33-0.89

注)\*: I: 黒皮、薄さび、II: 部分浮きさび、III: 全面浮きさび、IV: 断面欠損  
 \*\*: 暴露3.5年でII以上に達した。  
 \*\*\*: 暴露9年までII以下を維持した。

および腐食グレードとの関係を、無塗膜部および塗膜部と比較している。無塗膜部の場合、塩化物イオン量が0.22%の時、腐食面積率は約25%となり、塩化物イオン量が0.29%を越えてくると、腐食面積率は50%を越える傾向にある。腐食グレードは、無塗膜部では塩化物イオン量0.22%の時にグレードⅡであるが、塗膜部では塩化物イオン量0.32%の時もグレードⅠにしか達していない。このことより、塗膜によるコンクリート表面被覆は、鉄筋の防食に有効であり、構造物の耐久性向上に大きく貢献している。

#### 4. まとめ

鉄筋コンクリート構造物を用い、沖縄県の海岸で10年間にわたり暴露試験を行った。その暴露試験より、コンクリート中への塩化物イオン浸透過程および鉄筋の腐食過程を、初期混入塩化物イオンの有無別に明らかにした。試験結果より、アクリルゴム系防水材料被覆が鉄筋の防食法として有効であることを実証した。本研究で明らかになった知見を要約すると、次の通りである。

(1)本暴露環境下において、厚さ40mmのかぶりコンクリートでは、塩化物イオンの浸透を抑制することができず、暴露約2年後に、鉄筋が腐食する塩化物イオン量の限界値に達し、暴露約4年後で鉄筋腐食によるひび割れを生じた。

(2)アクリルゴム系防水塗膜は、沖縄県の厳しい環境下での長期暴露期間中、腐食要因となる各種の物質に対して高い拡散抵抗性を示す。また、十分なひび割れ追従性を有している。特に、この防水塗膜は、外部からの塩化物イオンの浸透をほぼ完全に阻止している。

(3)コンクリート中に浸透した塩化物イオンは、コンクリート表面より内側に塩化物イオン量のピークを形成する傾向がある。このピーク形成のメカニズムに関しては、解明の余地を残すが、一つの可能性として、炭酸化の影響が示唆される。

(4)ひび割れの生じていないコンクリート中の蓄積塩化物イオン量は、暴露期間の経過に伴って、一定値に収束する傾向にある。その収束値は、飛来塩化物イオン量、中性化および含水率等の影響で変動する。一方、暴露期間中、ひび割れの影響が高いコンクリートの蓄積塩化物イオン量は、二次関数的に増大する。

(5)無塗膜部の場合、塩化物イオン量が0.22%で、腐食面積率は約25%、塩化物イオン量が0.29%以上となると、腐食面積率は50%を越える傾向にある。塗膜部の腐食グレードは、無塗膜部の場合のそれに比べ、2レベル小さく、塩害劣化を抑制している。

今後の課題として、本研究で得られた知見をもとに、各地域の海岸付近の鉄筋コンクリート構造物を対象に、その塩害環境の位置づけ、耐久性把握および有効な塩害

対策を検討していく必要がある。

#### (参考文献)

- 1) 榊田他：実際の建物におけるコンクリートの塩化物量の調査、日本建築学会大会学術講演梗概集 A, pp. 1081-1082, 1995. 8
- 2) 谷川 伸, 永井 健太郎, 宮沢 健：アクリルゴム系塗膜材被覆によるコンクリートの塩害防止効果、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 9, No. 1, pp. 411-416, 1987. 6
- 3) 大城 武, 谷川 伸, 永井 健太郎：鉄筋コンクリート構造物の暴露試験について、コンクリート工学年次講演会論文集, Vol. 8, pp. 193-196, 1986. 6
- 4) 大城 武, 堀園 義昭, 谷川 伸, 永井 健太郎：コンクリート中への塩素イオンの浸透に関する実験的及び解析的研究、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 9, No. 1, pp. 369-374, 1987. 6
- 5) 大城 武, 谷川 伸, 永井 健太郎：鉄筋コンクリート構造物の暴露実験、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 10, No. 2, pp. 547-552, 1988. 6
- 6) 大城 武, 谷川 伸：塩害による鋼材腐食に関する暴露実験、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 11, No. 1, pp. 569-574, 1989. 6
- 7) 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, Vol. 12, No. 1, pp. 483-488, 1990. 6
- 8) 大城 武, 谷川 伸, 後藤 信弘：コンクリート中の鉄筋腐食評価法について、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 13, No. 1, pp. 503-508, 1991. 6
- 9) 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)、Vol. 14, No. 1, pp. 855-860, 1992. 6
- 10) 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, Vol. 15, No. 1, pp. 811-816, 1993. 6
- 11) 谷川 伸, 大城 武, 後藤 信弘, 山田 義智：塩害を受けるRC構造物の劣化評価, Vol. 16, No. 1, pp. 953-958, 1994. 6
- 12) 大城 武, 山田 義智, 谷川 伸：厳しい環境下での実大RC建物の長期暴露試験について, Vol. 17, No. 1, pp. 961-966, 1995. 6
- 13) 日本コンクリート工学協会編：JCI-SC4 硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法、コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに基準(案)、日本コンクリート工学協会, pp. 23-33, 1987. 4
- 14) 建設大臣官房技術調査室 監修、(財)国土開発技術研究センター編、建築物の耐久性向上技術シリーズ、建築構造編Ⅰ、鉄筋コンクリート造建築物の耐久性向上技術, pp. 42-43, 技報堂出版, 1986. 6
- 15) 星野 富雄, 魚本 健人, 守屋 正裕：海洋環境下におけるコンクリートへの塩化物の浸透と暴露環境に関する研究、コンクリート構造物の補修工法と電気防食に関するシンポジウム論文報告集, 日本コンクリート工学協会, 東京, pp. 1-6, 1994. 10
- 16) 岸谷 孝一, 西澤 紀昭他編：コンクリート構造物の耐久性シリーズ 塩害(Ⅰ), pp. 33, 技報堂出版, 東京, 1986. 5
- 17) 大城 武, 山田 義智, 谷川 伸：厳しい環境下での実大RC建物の長期暴露試験について、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 17, No. 1, pp. 961-966, 1995. 6
- 18) 岸谷 孝一, 西澤 紀昭編：コンクリート構造物の耐久性シリーズ 塩害(Ⅱ), pp. 21, 技報堂出版, 東京, 1991. 4
- 19) 小林 一輔, 白木 亮司, 河合 研至：炭酸化によって引き起こされるコンクリート中の腐食因子の移動に関する研究、コンクリート工学論文集, Vol. 1, No. 2, pp. 62-68, 1990. 6
- 20) 檜野 紀元：鉄筋コンクリート造構造物の耐久性, pp. 72-76, 鹿島出版会, 東京, 1988
- 21) 小林 一輔, 白木 亮司, 星野 富雄：コンクリートの炭酸化と海洋環境下における塩化物の浸透, 生産研究, Vol. 42, No. 3, pp. 75-78, 1990. 3
- 22) 佐伯 竜彦, 大賀 宏行, 長滝 重義：中性化によるコンクリートの微細組織の変化, 土木学会論文集, No. 420, pp. 33-42, 1990. 8

(1995年12月5日原稿受理, 1996年5月8日採用決定)