

[1095] RCプリズム中における塩分の蓄積と鉄筋の腐食の経時変化

正会員 角 徹三 (豊橋技術科学大学建設工学系)

正会員 ○ 熊谷伸一 (竹中工務店)

1 はじめに

近年、深刻な問題として取り上げられている塩害問題を検討する上で、塩害環境下にある構造物を経時的に観察して行くことは、重要な検討項目に挙げられる。そこで著者等は、長期にわたり、その劣化の過程を追跡することを目的に、RCプリズム供試体を用いた屋外暴露試験を昭和60年12月に開始し、現在も継続して行っている。

本報告は、これまでに回収した暴露期間 7ヶ月および暴露期間19ヶ月の供試体を対象に、コンクリート中に蓄積している塩分量と鉄筋の腐食量を測定し、コンクリート中の塩分の蓄積と鉄筋の腐食の経時変化について検討したものである。

2 試験概要

2-1 試験計画 表-1に試験計画を示す。

塩分侵入経路の違いにより 2種類の暴露条件を設定し、また、試験パラメーターには主要な鉄筋の腐食因子であるかぶり厚さ、ひびわれを取り上げた。さらに、この暴露試験で鉄筋の防食被覆による塩害対策を検討するため、エポキシ樹脂

を被覆した鉄筋 (以下、エポキシ塗装鉄筋)、モルタルにカチオン性ゴムラテックスを混練したもの [カチオン性ゴムラテックス:セメント:珪砂 = 1:2.08:6.25] を被覆した鉄筋 (以下、モルタル塗装鉄筋) および被覆を施さない鉄筋 (以下、無塗装鉄筋) を試験パラメーターに加えた。

2-2 暴露試験地 図-1に示すように海岸部は三河湾に臨む護岸より 20mの位置にある。内陸部は海岸から 4km離れた大学構内で飛来塩分の影響は無視できる位置にある。

(両所とも飛来塩分の測定を行っている。)

2-3 使用材料 普通ポルトランドセメント、最大粒径20mmの川砂利、川砂を用い、表-2に示すコンクリート配合と

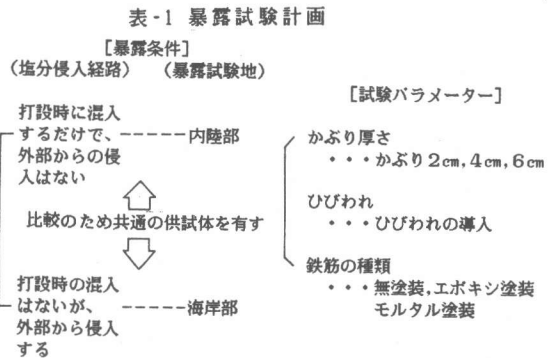


図-1 暴露試験地

表-2 コンクリートの配合

タイプ	水セメント比 W/C (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	細骨材比 s/a (%)	塩分量		単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					NaCl/W (%)	水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	塩分 NaCl	
I	50	12.5	2.6	43.7	0	189	378	729	964	0	
II	50	15.5	2.0	43.7	1.09	189	378	729	964	2.06	

した。タイプⅠは練りませ水に水道水を使用した。  
 (混入塩分測定値:  $\text{NaCl}/\text{W}=9.94 \times 10^{-4}\%$ )

タイプⅡは棒鋼の促進腐食試験法<sup>1)</sup>を参考に海水を約3倍に希釈した塩分濃度(1.09%)の食塩水を使用した。鉄筋はD19横ふし異形鉄筋( $\sigma_y=3600\text{kgf}/\text{cm}^2$ )を使用した。エポキシ塗装鉄筋の平均塗膜厚さは $207\mu\text{m}$ 、モルタル塗装鉄筋の平均塗膜厚さは $495\mu\text{m}$ であった。

**2-4 供試体** 図-2に供試体寸法を示す。供試体は長さが80cmで、断面中央部にエポキシ塗装鉄筋、モルタル塗装鉄筋、無塗装鉄筋が埋め込まれている。ここでは、かぶり厚さ2cmのものを1D、4cmのものを2D、6cmのものを3Dと表す。供試体にひびわれを導入させるため、供試体をあらかじめ、 $\sigma=3000\text{kgf}/\text{cm}^2$ の鉄筋応力で引張荷重し、暴露中も図-3のフレームによって、 $\sigma=2000\text{kgf}/\text{cm}^2$ の引張力を保持させた状態で、海岸部に24体、内陸部に23体設置している。そして、暴露7ヶ月目および19ヶ月目に供試体を回収し、コンクリート中の含有塩分量と鉄筋の腐食量を測定した。

**2-5 測定方法 (A)コンクリート中の含有塩分量**

塩分量測定試料は、供試体から図-4に示すように測定部分を切り出し採取した。そして、試料を粉末にし、可溶性塩分濃度および全塩分濃度を選択性イオン電極法により測定した。ここでは塩分濃度を、コンクリート重量に対するNaCl濃度で表している。

**(B)鉄筋の腐食量** 供試体から取り出した鉄筋は、表面の腐食面積を測定した後、10%のクエン酸ニアンモニウム溶液に浸漬させ腐食生成物を除去し、その重量変化を測定した。

**3 試験結果と考察**

本報告では、比較的供試体の劣化が進展していた海岸部に限って検討を進めることにし、図-5には海岸部での飛来塩分量を示す。これは、昭和62年5月から、JIS Z 2381の方法で測定を継続して行っている結果の一部である。

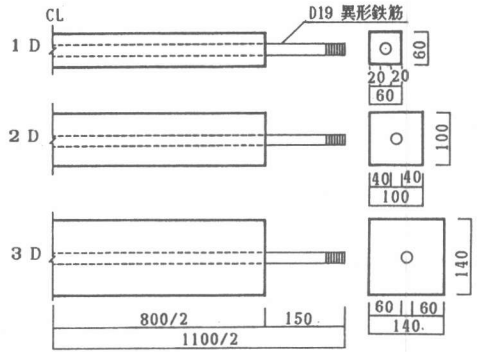


図-2 供試体寸法

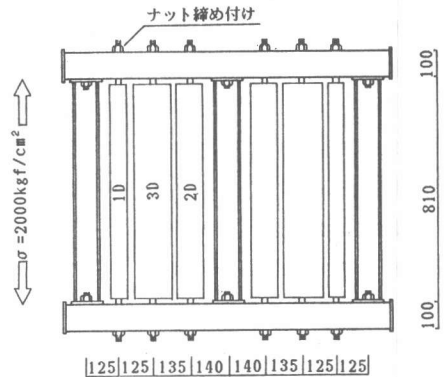


図-3 荷重フレーム

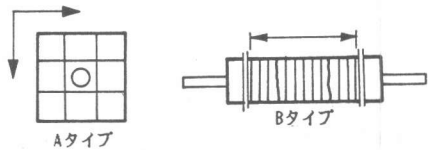


図-4 試料採取方法

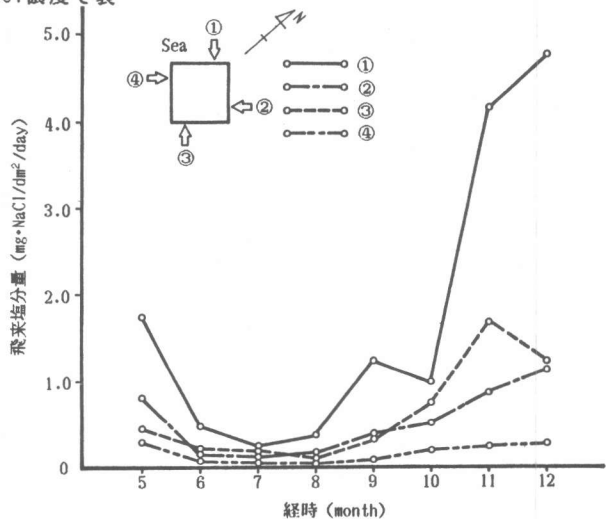


図-5 海岸部での飛来塩分量

3-1 供試体内部の塩分量 図-6は、各供試体材軸の中央付近で横断ひびわれを含む部分および含まない部分を厚さ 5cmで切りだし、さらに断面内を3D供試体では25分割、2Dでは9分割、1Dでは4分割し、各試料の塩分濃度を測定した結果を示したものである。X、Y軸は断面内の位置を示し、Z軸は塩分濃度を表している。各試料の塩分濃度は試料の重心の位置に示されている。

暴露 7ヶ月目に比べ19ヶ月目の塩分濃度は極めて高く、この傾向はかぶり厚が小さいほど顕著である。3Dの供試体についてみると、表層部で高く内部が低いすりばち状の分布となり、2方向からの塩分侵入を受ける隅角部が一段と高い。また、塩分濃度は海側の面、側面、背面の順となっており塩分の飛来方向に関連があると思われる。次に、ひびわれと侵入塩分量の関係では、ひびわれを含む部分の塩分濃度がひびわれを含まない部分より高くなっている。

図-7は材軸方向の塩分濃度分布を示したもので、ひびわれ位置での塩分濃度は他の部分より高く、その影響はひびわれを中心に 4cm程度まで及んでいる。さらに、ひびわれ上部（試料採取位置 3および 9）の塩分濃度はひびわれ下部（試料採取位置 5および11）より高く、コンクリート中に侵入した塩分は、上方に向い移動しているものと思われる。

3-2 可溶性塩分量と全塩分量の関係 暴露 7ヶ月目、19ヶ月目それぞれにおいて、可溶性塩分量と全塩分量の関係を最小 2乗法により直線回帰してみると、高い相関関係で (1)式および (2)式の関係式が得られた。この (1)式および (2)式は、森本等が同様の方法で導いた (3)式の関係式<sup>2)</sup>とほぼ一致する。

$$\text{暴露期間 7ヶ月} : Y = 0.695X - 0.020 \quad (r = 0.938) \quad \dots (1)$$

$$\text{暴露期間 19ヶ月} : Y = 0.774X - 0.059 \quad (r = 0.941) \quad \dots (2)$$

$$\text{森本等の式} : Y = 0.75X \quad \dots (3)$$

X : 全塩分量 (%) Y : 可溶性塩分量 (%) r : 相関係数

最終的には、この両者の関係は、コンクリート中の塩分のうちフリーデル氏塩としてコンクリートに固定されるものは全て固定され、ここでコンクリート中に固定されるフリーデル氏塩量を Cl<sup>-</sup>量でセメント重量の0.4%<sup>3)</sup>とすると、本試験で使用した供試体中に固定される塩分量は、コンクリート重量に対するNaCl濃度で0.110%となり、(4)式に示す関係式が得られる。

$$Y = X - 0.110 \quad \dots (4)$$

図-8はこの (4)式と (1)式および (2)式を比較したものである。暴露19ヶ月目の可溶性塩分量

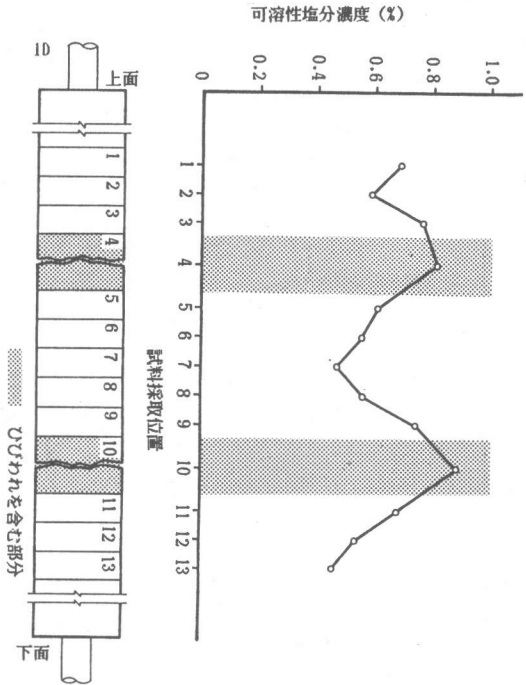


図-7 材軸方向の塩分濃度分布 (暴露期間19ヶ月)

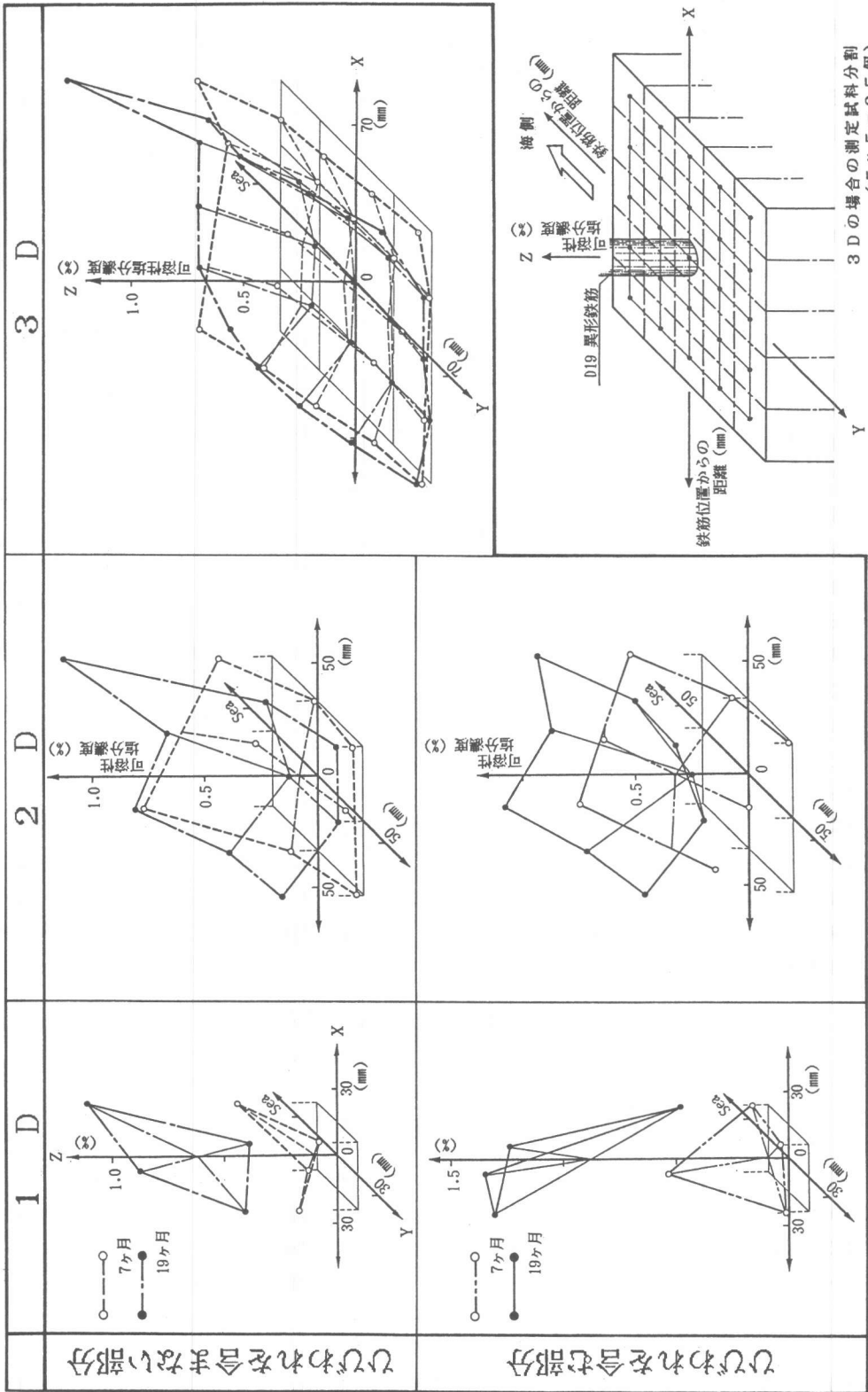


図-6 供試体内部の塩分濃度分布

と全塩分量の関係は、暴露 7ヶ月目と比較して、コンクリート中に蓄積した塩分量が多い場合、可溶性塩分量の比率が高く、逆に塩分量が少ない場合、その比率は低くなり、両者の関係が暴露 7ヶ月から19ヶ月までの間に(4)式の関係に近づいている。このことから、コンクリート中に蓄積した塩分量が多い表層部では、既に0.110%の塩分が固定され、現在、内部において塩分の固定化が進んでいるものと思われる。今後、さらに内部で塩分の固定化が進むと、いっそう(4)式の関係に近づいて行くものと考えられる。

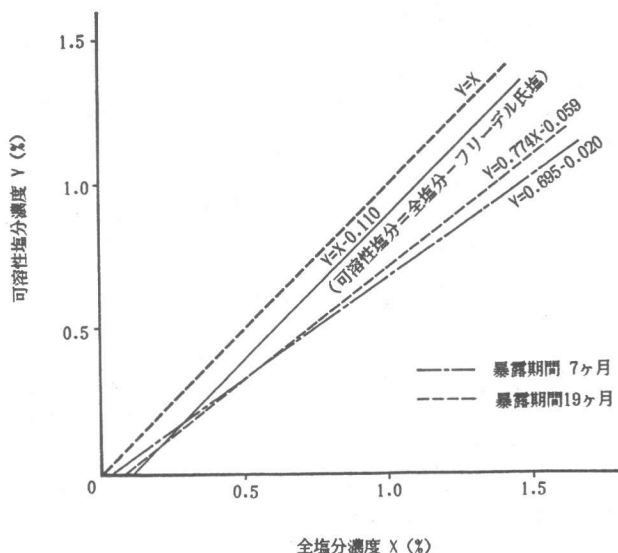


図-8 可溶性塩分量と全塩分量の関係

3-3 鉄筋の腐食状況 図-9に供試体のひびわれ状況と鉄筋の腐食状況を示す。鉄筋の腐食はひびわれ付近で発生し、主要な腐食要因の1つである、ひびわれの影響を明確に示した結果となっている。また、ひびわれの中には、暴露中、腐食が原因で発生したと思われる、ひびわれを見ることができる。特に暴露 7ヶ月目の1D、暴露19ヶ月目の2Dでは、縦ひびわれが鉄筋に沿って発生し、供試体を貫通しており、腐食→ひびわれ→腐食と繰り返されて進展していく、塩害の劣化過程の一端をうかがうことができる。

次に鉄筋の腐食状況を経時的に見ると、腐食域は暴露期間の経過とともに拡大し、1D、2Dでは暴露19ヶ月目になると腐食は広範囲におよんでいる。図-10は、鉄筋の腐食量と暴露期間の

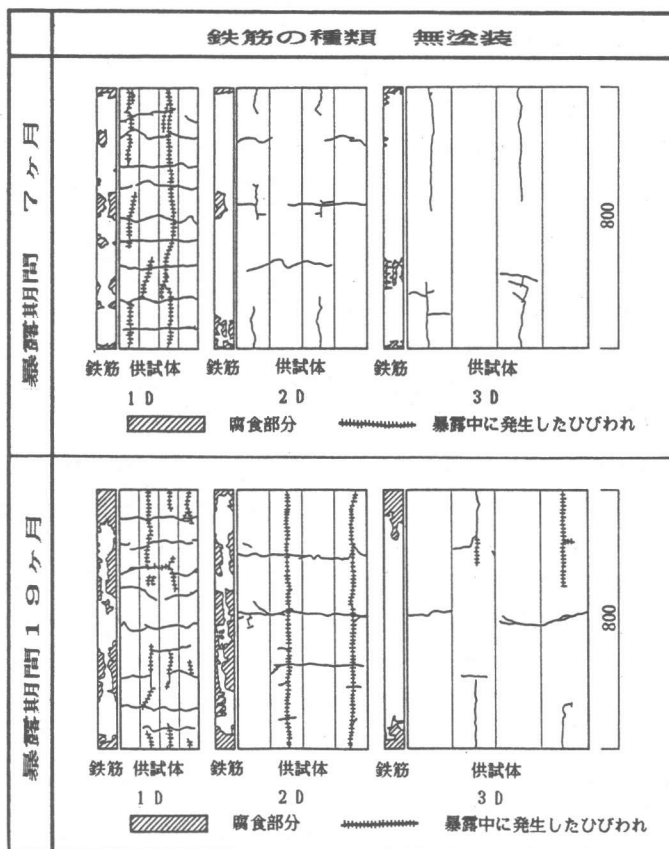


図-9 供試体のひびわれ状況と鉄筋の腐食状況

関係をかぶり厚さで比較したものである。一般に、かぶり厚さを増すことは防食上有効と考えられているが、2Dは1Dと同程度、腐食が進行し、かぶり厚さを増した効果が見られない。これに対して3Dは明らかに腐食の進行が遅れ、かぶり厚さが防食上有効に働いたものと思われる。このことから、防食上有効なかぶり厚さは、鉄筋径の3倍以上と考えられ、Attimtayが示した鉄筋径の2.5~3倍以上、小林等が示した鉄筋径の4倍以上<sup>4)</sup>と一致する。

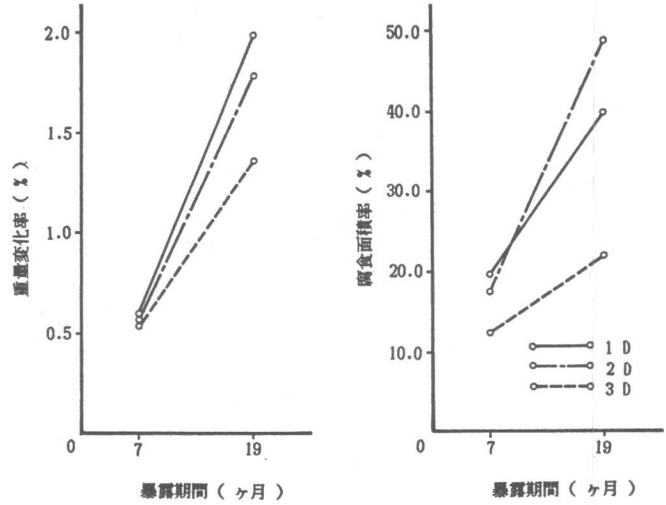


図-10 鉄筋の腐食量

### 3-4 被覆塗装鉄筋の防食効果

エポキシ塗装鉄筋およびモルタル塗装鉄筋の腐食状況は、部分的に、また均一に腐食が観察できた無塗装鉄筋に対し、塗膜のピンホール等で点錆状に腐食が散在し、図-11は、その腐食量を示したものである。エポキシ塗装鉄筋およびモルタル塗装鉄筋の腐食量は、特に無塗装鉄筋で腐食の進行が著しい1D、2Dにおいても3Dと同程度であり、エポキシ塗装鉄筋およびモルタル塗装鉄筋には、防食効果が期待できるものとする。

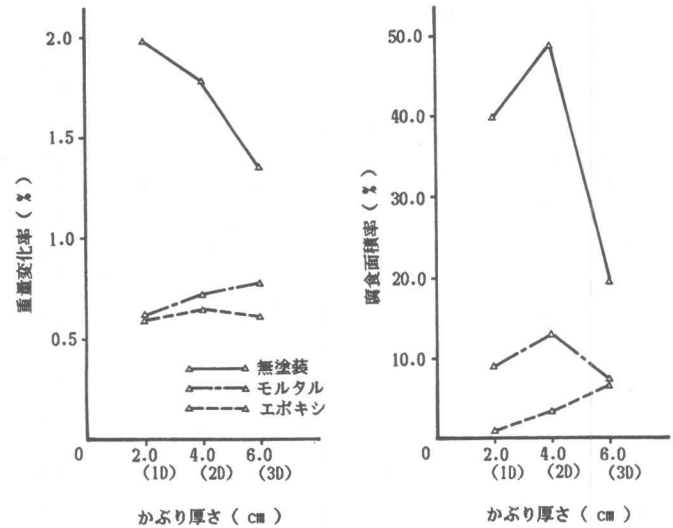


図-11 被覆塗装鉄筋の腐食量 (暴露期間19ヶ月)

### 4 まとめ

暴露期間19ヶ月までの範囲で、以下のことが明らかになった。

- (1) 供試体内部の塩分濃度分布は表層部が高く、内部が低い、すりばち状の分布形状である。
- (2) ひびわれは塩分の侵入を容易にし、鉄筋の腐食に深く関与する。(3) 暴露中に腐食が原因で発生したと思われるひびわれが観察できた。(4) 防食上有効なかぶり厚さは、鉄筋径の3倍以上である。(5) エポキシ塗装鉄筋およびモルタル塗装鉄筋に防食効果が確かめられた。

今後、コンクリート中の塩分の蓄積と鉄筋の腐食の関係を経時的に明記していく所存である。

#### <参考文献>

- 1) 「塩分を含んだコンクリート中における補強用棒鋼の促進腐食試験方法(案)」コンクリート工学, Vol.23, No.3, March 1985, pp.57~58
- 2) 森本、小堀、高木：塩分を含んだコンクリート中の鉄筋腐食に関する研究 コンクリート工学年次論文報告集 9-1, 1987 pp.351~356
- 3) v. チェルニン著・徳根訳：セメント・コンクリート化学, 1978 pp.61
- 4) 大即、櫻野、片脇、小林、宮川著：塩害(1), 1986 pp.40, 技報堂出版