

論文

[1118] 表面被覆材及び浸透性吸水防止材の塩害防止効果に関する実験

掛川 勝*1・榊田 佳寛*2・松林 裕二*3・小俣 一夫*4

1. はじめに

鉄筋コンクリートの塩化物イオン浸透に伴う鉄筋腐食に対して、各種の表面被覆材や浸透性吸水防止材などの劣化抑制材料による腐食抑制効果について多くの実験研究が行われている。しかし、鉄筋腐食についての評価方法が確立されていないため、劣化抑制効果についてはまだ十分明らかにされていない。本実験は、代表的な表面被覆材として2種類の仕上塗材、及び浸透性吸水防止材を施した場合ならびに水セメント比を小さくした場合における塩害抑制効果を塩水浸せき・乾燥の繰返し促進試験で評価しようとしたものである。また、ばくろ試験も併行して行っているが、これについては別途報告する。なお、本実験は建設省建築研究所と日本建築仕上材工業会に設けられたコンクリート耐久性向上研究会との共同研究として実施したものである。

表-1 劣化抑制材料と水セメント比の組合せ

劣化抑制材料		水セメント比 (%)	記号
種類	主成分		
浸透性吸水防止材	シリコン系	65	65-P
薄付け仕上塗材	アクリル樹脂系		65-L
複層仕上塗材(防水形)	アクリル樹脂系		65-S
無塗布	-	55	55-N
		45	45-N

2. 実験方法

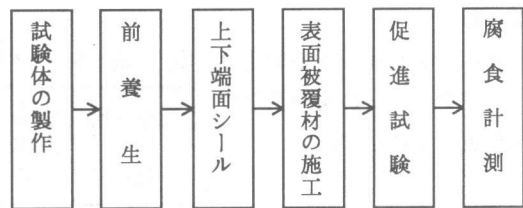
2.1 実験計画

(1) 実験の要因と水準

表-1 に劣化抑制材料の種類と水セメント比の組合せを示す。劣化抑制材料として、浸透性吸水防止材、薄付け仕上塗材及び複層仕上塗材の3種類を選定した。劣化抑制材料の塩害抑制効果は水セメント比65%のコンクリートを対象とした。無塗布のものは水セメント比65, 55及び45%のコンクリートについて試験した。

(2) 実験手順

図-1 に示す実験手順で、図-2 に示すかぶり厚さを5, 10, 20及び40mmとして、鉄筋を埋



7箇月
図-1 実験の手順

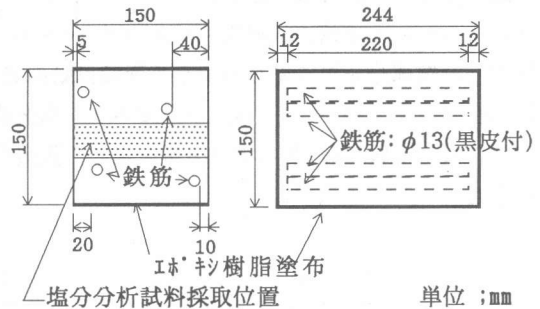


図-2 試験体の形状・寸法

単位: mm

*1 建設省建築研究所第二研究部無機材料研究室 (正会員)
 *2 建設省建築研究所第二研究部無機材料研究室 室長, 工博 (正会員)
 *3 小野田セメント(株) 建設材料研究所 研究員 (正会員)
 *4 日本建築仕上材工業会 技術委員長

め込んだコンクリート試験体に、表-2に示す要領で劣化抑制材料を施した。図-3に示す試験装置を用いて、3%塩化ナトリウム溶液（20℃）に1日浸せき・2日間気乾放置（20℃，60%R.H.）を1サイクルとして腐食促進試験を行い、促進試験期間25,50及び100サイクルにおける試験体の外観観察及び鉄筋の腐食状況を測定した。試験開始材齢は約7箇月で、各試験材齢毎に1体ずつ測定した。

表-2 劣化抑制材料の塗布量

劣化抑制材料の種類	塗布量 (kg/m ²)		
	下塗材	主 材	上塗材
浸透性吸水防止材	—	0.35	—
薄付け仕上塗材	0.20	1.50	—
複層仕上塗材(防水形)	0.10	2.00	0.30

2.3 試験体の製作

(1) 使用材料

鉄筋には、黒皮付き丸鋼φ13mm（電炉JIS製品）を用いた。セメントには、普通ポルトランドセメントを、細骨材には、大井川産川砂（絶乾比重2.58，吸水率 1.64%，粗粒率2.64），粗骨材には、青梅産碎石（絶乾比重2.62，吸水率0.59%，粗粒率6.71），混練水には水道水，混和剤はA E 剤を使用した。

(2) コンクリートの配合と性質 表-3 コンクリートの調合と性質

コンクリートの配合及び性質を表-3に示す。

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位セメント量 (kg/m ³)	単位水量 (kg/m ³)	スラブ [°] (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 σ ₂₈ (kgf/cm ²)
65	48	285	185	18.5	4.4	308
55	46	336	185	18.0	4.5	367
45	44	411	185	16.5	4.5	475

2.4 鉄筋腐食の評価方法

試験体から鉄筋を取り出し、ビニールシートに錆の状況を

複写し、錆部分を黒く塗りつぶして面積自動測定装置を用いて発錆面積を測定し、発錆面積率を算出した。又、10%クエン酸2アンモニウム水溶液により、鉄筋の錆落としをして鉄筋質量Wを測定し、最初の質量W₀からの減少量を求め、発錆面積率sを用いて式(1)によって質量減少率を算出した。

$$\Delta w = \frac{W_0 - W}{W_0} \times 100 - w_s \times \frac{100 - s}{100} \quad (1)$$

- ここで、 Δw : 質量減少率 (%)， W_0 : 最初の質量 (g)
 W : 腐食促進試験後に錆落としをした鉄筋の質量 (g)
 w_s : 黒皮（酸化被膜）の質量百分率 (%)
 s : 発錆面積率 (%)

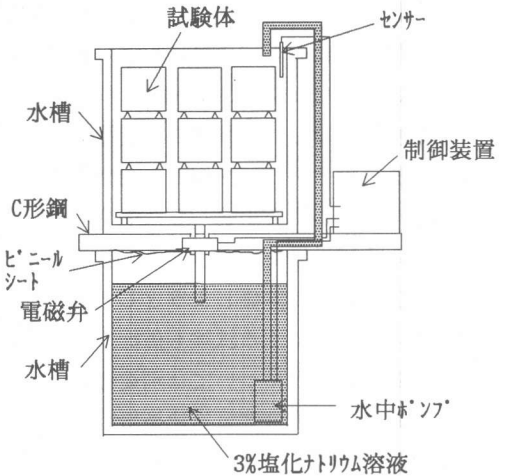


図-3 促進試験装置

黒皮の質量百分率 w_s は、腐食していない鉄筋をダミーとして、鏝落としをする際、同じ時間だけクエン酸アンモニウム水溶液に浸せきして黒皮を落とし、その質量減少率を求めて算出した。

2. 5 コンクリート中の塩分分析

コンクリート中に浸透した塩分は、図-2に示したように、コンクリート表面にひびわれのない部分から各深さごとに試料を採取し、JCI-SC4（硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法）に準拠して全塩分を分析し、塩化物イオン量として求めた。

3. 実験結果及び考察

3. 1 塩分分布

図-4に、コンクリート中の塩分分布を示す。促進試験期間の増加に伴い、塩化物イオン量は増大する傾向にある。劣化抑制材料を施したものは、無塗布のものに比べて小さな値を示しており、劣化抑制材料を施すことにより、塩化物イオンの浸透抑制効果はあるが、その効果は、複層仕上塗材の方が、浸透性吸水防止材及び薄付け仕上塗材より大きい。一方、無塗布のものは、各促進試験期間において、水セメント比が小さくなるに伴い、塩化物イオン量は、若干ではあるが小さくなる傾向にある。

3. 2 各かぶり厚さにおける塩化物イオン量

図-5には、促進試験期間と各かぶり厚さにおける塩化物イオン量を示す。浸透性吸水防止材を施した場合は、いずれのかぶり厚さでも、促進試験期間の増加に伴い塩化物イオン量は増加する傾向にある。薄付け仕上塗材を施した場合、コンクリート表層部分では、25サイクル以降、塩化物イオン量はほぼ一定となっているが、かぶり厚さ20mm以上の部分では、促進試験期間の増加に伴い、塩化物イオン量は増加する傾向にある。無塗布の場合には、かぶり厚さ5及び10mmでの塩化物イオン量の増加は、水セメント比の違いによる差はあまりないが、かぶり厚さ20mm以上の部分では、水セメント比が小さくなるに伴い少なくなっている。

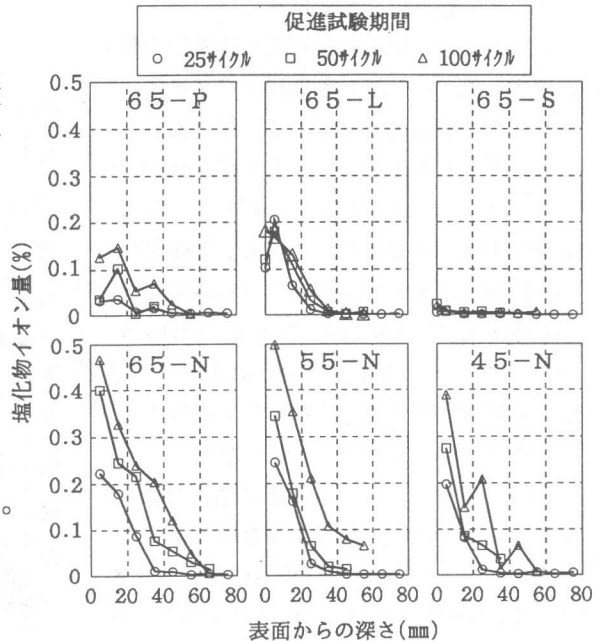


図-4 コンクリート中の塩分分布

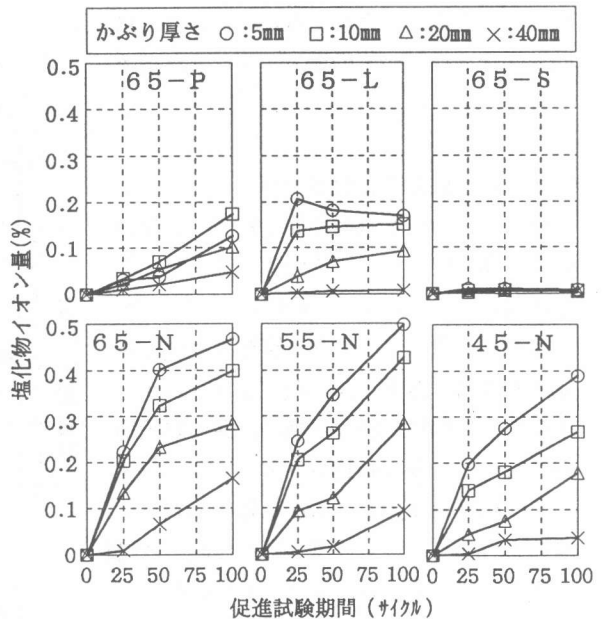


図-5 各かぶり厚さにおける塩化物イオン量

3. 3 鉄筋の発錆面積率

図-6には、促進試験期間と鉄筋の発錆面積率を示す。促進試験期間の増加に伴い、鉄筋の発錆面積率は増加する。浸透性吸水防止材を施したものは、かぶり厚さ5mmでは、コンクリート表面にひびわれが生じ、発錆面積率も大きな値となっている。無塗布の場合には、水セメント比にかかわらず、かぶり厚さ5及び10mmでは、25あるいは50サイクルでコンクリート表面にひびわれが生じ、鉄筋の発錆面積率は著しく増加する傾向にある。かぶり厚さ20mm以上では、水セメント比が小さくなるに伴い、鉄筋の発錆面積率は小さくなり、100サイクルでかぶり厚さ20mmでは水セメント比55及び45%のものは、水セメント比65%のもの約1/2及び1/5であり、かぶり厚さ40mmでは、ほぼ1/10以下である。このことから、かぶり厚さ20mm以上では、水セメント比を小さくすることにより、鉄筋の腐食を抑制する効果があることが認められる。

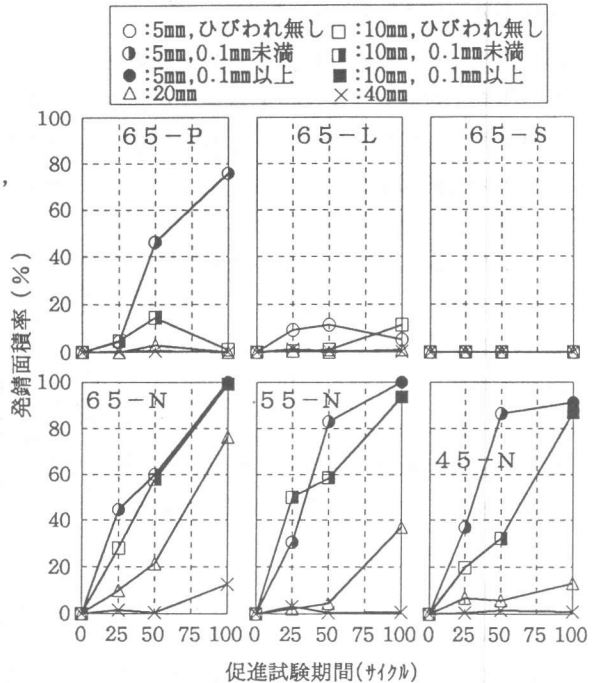


図-6 促進試験期間と発錆面積率の関係

3. 4 鉄筋の質量減少率

図-7に、促進試験期間と鉄筋の質量減少率の関係を示す。浸透性吸水防止材を施した場合、かぶり厚さ5mmでは、25サイクルで、ひびわれが発生しており、質量減少率は増加する傾向にある。又、かぶり厚さ10mm以上及び仕上塗材を施した場合、促進試験期間50サイクル時に少し腐食がみられるが、全体としては質量減少率の増加は認められない。無塗布の場合、かぶり厚さ5及び10mmの質量減少率は、いずれの水セメント比においても、促進試験期間50サイクルまでは、小さい値であり、100サイクルでは大きなひびわれが発生し1.0%以上の非常に大きな値となっている。又、かぶり厚さ20mm以上では試験期間を通して比較的小きな値にとどまっている。

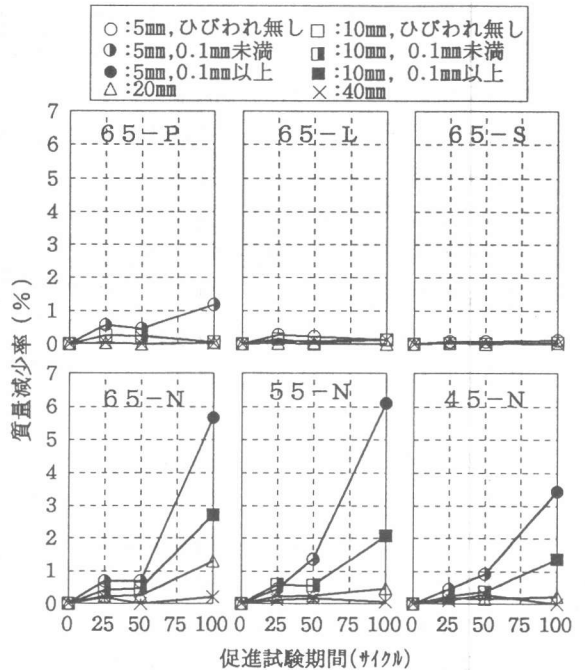


図-7 促進試験期間と質量減少率の関係

3. 5 発錆面積率と質量減少率の関係

図-8には、発錆面積率と質量減少率の関係を示す。質量減少率は、発錆面積率60~70%までは

ほぼ直線的に増加する傾向にある。発錆面積率が60~70%までは、質量減少率は1%以下であり、発錆面積率60~70%を越すと、質量減少率が著しく増大している。このことから、腐食が進行すると、鉄筋腐食は面方向だけでなく、深さ方向にも進行していくことがわかる。したがって、鉄筋の腐食を評価する際、発錆面積率60~70%以下では、発錆面積率での評価が可能であり、発錆面積率60~70%を超えると、質量減少率に差がでてくるため、質量減少率を指標とすることが適切であると考えられる。

質量減少率が小さい範囲で、ひびわれ幅0.1mm未満を対象として、発錆面積率と質量減少率との関係を直線近似すると、その傾きはほぼ0.013となっている。ここで、直径d(mm)、長さL(mm)の鉄筋の表面積 S_0 (mm^2)、質量を W_0 (mg)とすると、鉄筋の密度を ρ として、 $S_0 = \pi d L$ 、 $W_0 = \pi d^2 L \rho / 4$ となる。質量減少量 ΔW は、発錆面積 ΔS と平均的な腐食深さ Δd とで式(2)のように表される。又、質量減少率と発錆面積率の関係は上記により、式(3)のように表される。

$$\Delta W = \Delta S \times \Delta d \times \rho \quad (2)$$

$$\Delta W / W_0 = 0.013 (\Delta S / S_0) \quad (3)$$

式(2)、(3)より平均的な腐食深さは、

$$\begin{aligned} \Delta d &= \Delta W / (\Delta S \times \rho) = 0.013 W_0 / (S_0 \times \rho) \\ &= 0.013 \cdot d / 4 \end{aligned} \quad (4)$$

となり、本実験での鉄筋は $d=13\text{mm}$ であるから $\Delta d=0.04\text{mm}$ となる。このことから、錆が鉄筋の表面方向に広がっていく時の平均的な腐食深さは約0.04mmであると考えられる。

次に、質量減少率が大きくなるとコンクリートにひびわれが発生し、質量減少率の増加と共にひびわれ幅が増大することが考えられる。図-9は、質量減少率と最大ひびわれ幅の関係を示したものであるが、質量減少率が1.0%以上になると、ひびわれ幅も急激に増大し、鉄筋の腐食速度もますます加速されることが考えられる。

3.6 塩化物イオン浸透量と発錆面積率の関係

一般に、鉄筋腐食が始まる塩化物イオン量はコンクリートの質量に換算するとほぼ0.05%程度とされている[1]。又、腐食速度は塩化物イオン量と相関関係にあるといわれている[2]。そこで、

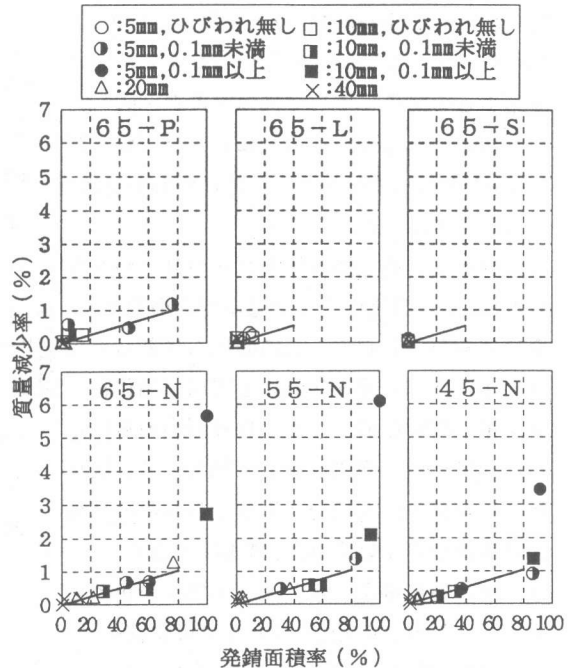


図-8 発錆面積率と質量減少率の関係

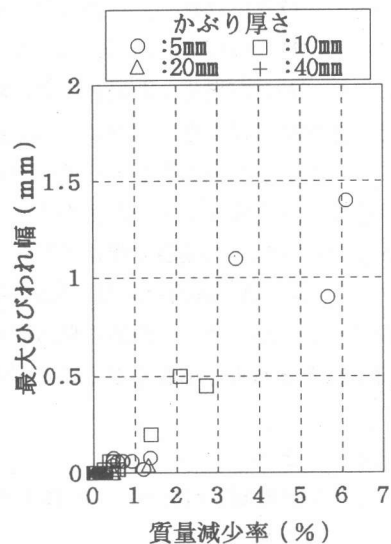


図-9 質量減少率と最大ひびわれ幅の関係

塩化物イオン量が0.05%以上となった後の、塩化物イオン量を時間で積分したものと発錆面積率との関係について図示すると、図-10のようになる。この図には、ひびわれ幅0.1mm未満のもの対象とし、ひびわれの有無を区別して示した。

浸透性吸水防止材を施したものは、かぶり厚さ5mmで、塩化物イオン量の時間積分が小さいにもかかわらず、発錆面積率は著しく大きい。かぶり厚さ20mm以上では、塩化物イオン量の時間積分は小さく発錆面積率も小さい。薄付け仕上塗材を施した場合には、塩化物イオン量の時間積分は増加するものの発錆面積率は小さくいずれも20%未満である。一方、無塗布の場合、水セメント比にかかわらず、かぶり厚さの5及び10mmでは塩化物イオン量の時間積分5~10%・サイクル程度で、ひびわれが発生し、この時の発錆面積率は大きくなる。この場合、塩化物イオン量の時間積分は鉄筋そのものの位置ではなく、ひびわれのない部分のかぶり厚さ位置における値であるため、実際の鉄筋位置では、ひびわれの影響により、これより大きな値となっていると考えられる。このことから、ひびわれが発生した場合には、塩化物イオン量の時間積分と発錆面積率の関係を評価することは非常に困難であると考えられる。

そこで、ひびわれ無しのものについて、塩化物イオン量の時間積分と発錆面積率の関係を直線近似し、その傾きから、塩化物イオン浸透に伴う鉄筋の発錆面積の速度についてみる。浸透性吸水防止材を施した場合の傾きは0.30、薄付け仕上塗材を施した場合は0.99、無塗布のもので水セメント比が65%の場合は5.40、55%の場合では3.92、45%の場合は3.28である。このことから、塩化物イオンの浸透に伴う鉄筋の発錆面積の速度は、水セメント比が小さい方が小さく、劣化抑制材料を施すと非常に小さくなるのがわかる。

4. まとめ

- (1) 劣化抑制材料を施すことにより、塩化物イオンの浸透は抑制され、その効果は複層仕上塗材が最も大きい。
- (2) 無塗布の場合には、かぶり厚さ20mm以上では、水セメント比が小さくなると塩化物イオン量も小さくなる。
- (3) 錆が鉄筋の表面方向に広がっていく時の平均的な腐食深さを算定すると約0.04mmである。
- (4) 塩化物イオンの浸透に伴う鉄筋の発錆面積の速度は、水セメント比が小さい方が小さく、劣化抑制材料を施すと非常に小さくなる。

参考文献 1) 岸谷孝一, 西沢紀昭他編: コンクリート構造物の耐久性シリーズ 塩害(I), 技報堂出版, 1986. 5
 2) 樹田佳寛 他: 塩化物を含んだコンクリート中の鉄筋腐食速度に関する実験, 日本建築学会構造系論文報告集, No. 435, pp. 19-27, 1992. 5

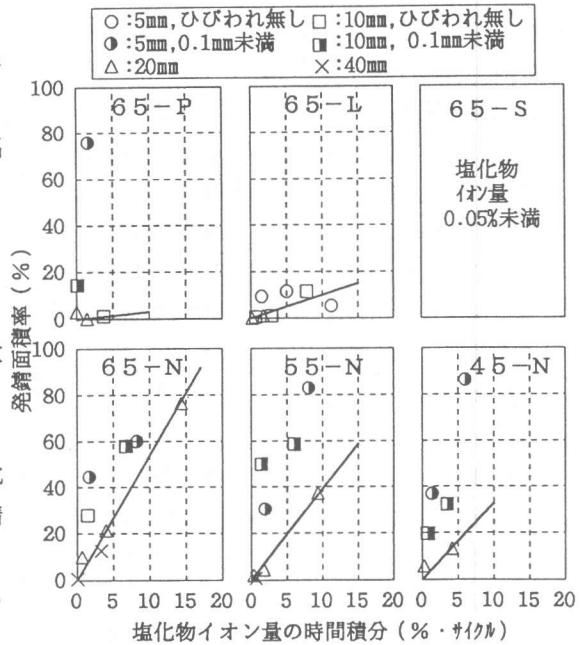


図-10 塩化物イオン量の時間積分と発錆面積率の関係