

論文 表面被覆材および浸透性吸水防止材による鉄筋腐食抑制効果に関する屋外暴露試験

庄司広和*¹・榎田佳寛*²・鹿毛忠継*³・掛川勝*⁴

要旨：塩化物を含んだ鉄筋コンクリート試験体に、表面被覆材および浸透性吸水防止材を施して屋外暴露試験を行い、鉄筋の質量減少率を評価尺度として、鉄筋腐食抑制効果を検討した。その結果、外部からの水分の進入を抑制し、コンクリート内部の水分の蒸発を妨げないアクリル系およびシラン系浸透性吸水防止材が、鉄筋腐食に対して大きな抑制効果があることが認められた。

キーワード：鉄筋，腐食，コンクリート，塩化物，表面被覆材，浸透性吸水防止材

1. はじめに

塩害や中性化によって鉄筋が腐食し、コンクリートに劣化がみられる場合の補修工事において、外観上著しい損傷は見られないが、有害量の塩化物を含んでいたり、中性化が鉄筋の位置まで進行していると考えられる部分には、表面被覆材などを塗布して、外部からの水分や酸素を遮断して鉄筋の腐食進行を抑制する劣化抑制工法が採用されることが多い。しかし、用いられる表面被覆材などの劣化抑制効果については、不明な点が多い。

本研究は、塩化物や中性化などの劣化要因を内在した鉄筋コンクリート試験体に、各種の表面被覆材や浸透性吸水防止材を施して促進劣化試験および屋外暴露試験を行い、その鉄筋腐食抑制効果を実験的に検討したものである。本研究は、建設省建築研究所と日本建築仕上材工業会コンクリート耐久性向上研究会との共同研究として、昭和61年から実施しているものである。促進劣化試験は既に終了しており、報告済みである[1]。

2. 実験概要

2.1 劣化要因と水準

劣化要因と水準を表-1に示す。今回の実験では、洗浄が不十分な海砂を使用した場合にコンクリートに導入される塩化物量のレベルである0.3% (NaCl/砂)、すなわち、塩化物イオン量約1.55kg/m³およびストックヤードで塩化物が濃縮されその2倍にまでなった場合を想定した。中性化については、建設後10数年経過した場合に起こり得る値を設定した。

2.2 補修材料・工法の選定

本実験では、表-2に示す表面被覆材として仕上塗材、塗料、ポリマーセメントモルタルおよび組み合わせ工法と浸透性吸水防止材の計12種類の一般的な材料・工法から代表的なものを選定

表-1 劣化要因と水準

要因	水準
塩化物量	0.3, 0.6% (NaCl/砂)
かぶり厚さ	15, 40mm
中性化深さ	25mm
含水率	2.5%, 4.5%

*1 建設省建築研究所第二研究部無機材料研究室部外研究員 (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 建設省建築研究所第二研究部材料環境研究室主任研究員、学術博 (正会員)

*4 (株)小野田 開発研究所 研究員 (正会員)

し、鉄筋コンクリート試験体表面に施した。なお、比較用として無処理のものも試験した。当初、エポキシ樹脂で全面を密閉した試験体も対象としたが、暴露期間中に試験面のエポキシ樹脂にひび割れが生じ、密閉の意味がなくなったので、本報告では検討対象から除いた。

2.3 試験体

試験体は、図-1に示すように、コンクリート中に鉄筋をかぶり厚さ15mmおよび40mmで各2本ずつ合計4本埋め込んだものである。鉄筋は、黒皮付きの丸鋼φ13mm（電炉JIS製品）を用いた。コンクリートの材料は、セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は大井川産川砂（絶乾比重2.58、吸水率1.42%、粗粒率2.72）、粗骨材は青梅産碎石（絶乾比重2.64、吸水率0.73%、粗粒率6.76）混練水は水道水、混和剤はAE剤および塩化物量調整用として1級試薬のNaClを用いた。コンクリートの調合と性質を表-3に示す。

表-2 選定された補修材料・工法

区分	NO	補修材料・工法の種類
表面被覆材	仕上塗材	SF 複層仕上塗材（複層塗材E，防水形） ¹⁾
		ST 単層仕上塗材（防水形） ²⁾
		E 複層仕上塗材（複層塗材E，一般形）
		L 薄付け仕上塗材（外装薄塗材E）
	塗料	A アクリルエナメル塗料
		AU アクリルウレタン塗料
	ポリアセメントモルタル	PA アクリル樹脂系ポリアセメントモルタル
		PS SBR系ポリアセメントモルタル
	組み合わせ	PE SBR系ポリアセメントモルタル+複層塗材E（一般形）
		MP 無機浸透材 ³⁾ +SBR系ポリアセメントモルタル
浸透性	S1 アクリル系浸透性吸水防止材	
吸水防止材	S2 シラン系浸透性吸水防止材	
比較用	N 無処理	

注) 1); 旧称伸長形複層仕上塗材
2); 旧称伸長形単層仕上塗材
3); 塗布型の防錆材

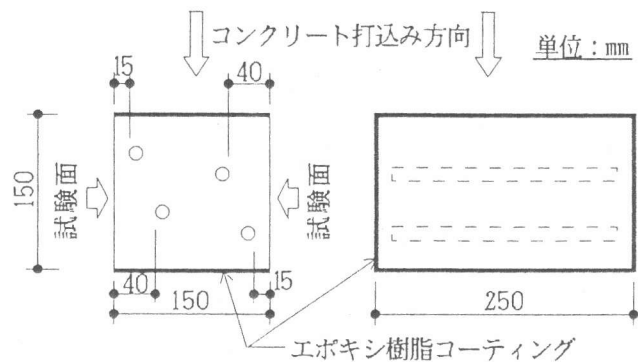


図-1 試験体の形状・寸法

表-3 コンクリートの調合と性質

塩化物量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)						スランプ (cm)	空気量 (%)	28日圧縮強度** (kgf/cm ²)
			セメント	水	細骨材*	粗骨材*	混和剤	NaCl			
0.3	65	48	285	185	850	940	0.043	2.55	18.0	4.3	289
0.6							0.043	5.10			

注) *; 絶乾重量, **; 標準養生

2.4 実験方法

試験体は材齢2週まで湿布散水養生し、6週まで恒温室内（温度20±3℃、湿度60±5%）に保存し、保存中に上下面と両端面とをエポキシ樹脂でコーティングした。試験体は、約3.5カ月間、温度30℃、湿度60% R.H.、CO₂濃度5~10%の条件で、かぶり厚さ15mmの鉄筋のほぼ裏側である25mmまで促進中性化させ、含水率のレベルを2段階に調整した後、表面被覆材などの塗布を行った。含水率4.5%の試験体は、促進中性化後7日間水中に浸漬し、表面の水分を布で拭き取ったものであり、これを湿潤と称した。また、含水率2.5%の試験体は、促進中性化後、そのまま前述の

恒温室内に保存したものであり、これを気乾と称した。屋外暴露試験は、建設省建築研究所の暴露試験場（茨城県つくば市立原1）で行った。鉄筋腐食度などの計測は、塩化物量 0.3%では暴露期間3.2および6年、塩化物量 0.6%では2および5年で行った。

2. 5 鉄筋腐食度の評価方法

(1) 腐食面積率

トレーシングペーパーに鉄筋の腐食状況を複写し、錆部分を全て黒く塗りつぶして面積の自動測定装置を用いて腐食面積を測定し、腐食面積率を算出した。

(2) 質量減少率

濃度10%のクエン酸二アンモニウム水溶液により鉄筋の錆落としを行い、鉄筋質量Wを測定し、最初の質量W0からの減少量を求め、式(1)を用いて質量減少率を算出した。鉄筋の質量の測定は電子天秤を用いて0.01gまで測定した。なお、式(1)においてΔwが負の値になる場合は、質量減少率を0%とした。

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

Δw:質量減少率(%), W0:最初の鉄筋の質量(g), W:暴露試験後に錆落としした鉄筋の質量(g)
w_s:黒皮の質量百分率(%), s:腐食面積率(%)

3. 試験結果および考察

3. 1 鉄筋の腐食面積率と質量減少率との関係

鉄筋の腐食面積率と質量減少率との関係を図-2に示す。

腐食面積率と質量減少率の間には、概ね直線関係が認められた。塩化物量が0.3%の場合には、腐食面積率に対する質量減少率は0.02程度である。塩化物量が0.6%の場合には、腐食面積率に対する質量減少率は0.035と大きく、かつばらつきも大きい。このことから、塩化物量が0.6%の時は、0.3%の時と腐食の形態が異なり、鉄筋の表面に錆が進行するだけでなく、深さ方向

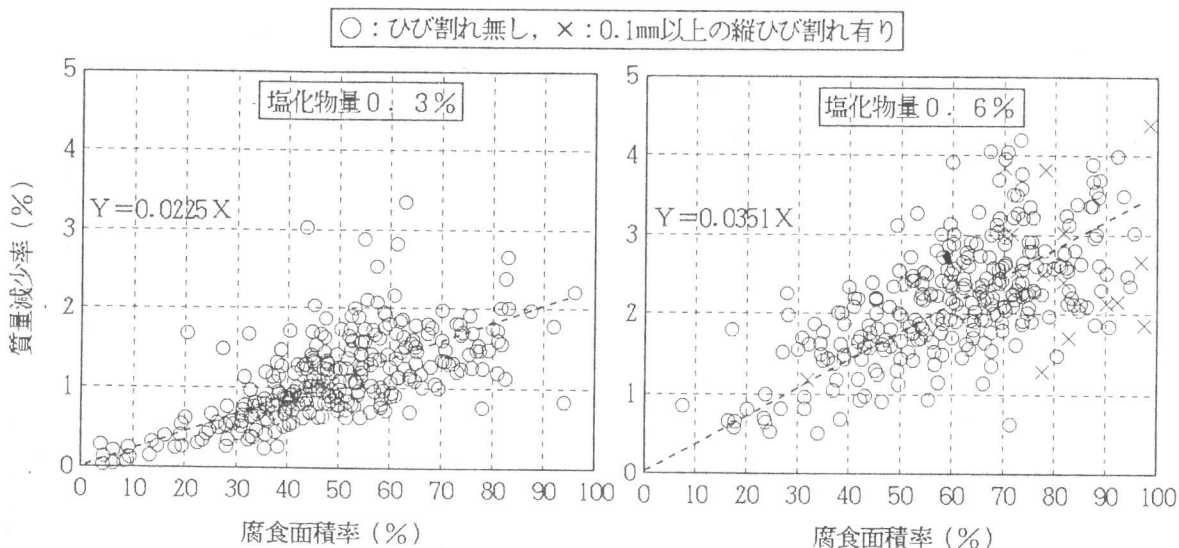


図-2 腐食面積率と質量減少率の関係

へも腐食が進行していることが考えられる。

以上のことから、鉄筋の腐食面積率に対する質量減少率には差があるため、以下では、質量減少率を鉄筋腐食度の評価尺度として検討を進めるものとする。

3. 2 試験体の上端筋と下端筋との腐食状況

試験体の作製には、鉄筋を水平にしてコンクリートを打ち込んでいるため、上端筋と下端筋との腐食状況の差について検討する必要がある。上下の鉄筋の質量減少率の関係を図-3に示す。鉄筋に沿って縦ひび割れが発生している場合、鉄筋の質量減少率は、急激に大きくなる傾向にあるため、ここでは鉄筋に沿って0.1mm以上の縦ひび割れがある試験体は、測定の対象から除いた。かぶり厚さ15mmでは、上端筋の方がより腐食した鉄筋の本数が多いようであるが、回帰式によれば下端筋の方が腐食が大きくなっている。

かぶり厚さ40mmでは、回帰式によれば上端筋の方が下端筋に比べて2割ほど腐食が大きい、ばらつきも大きい。いずれにせよ各試験体ごとに上下の鉄筋での腐食の違いには、ばらつきが大きいので、これを区別して解析するのは困難であるので、上端筋と下端筋の区別はしないでまとめて扱うこととする。

3. 3 コンクリートの含水率

鉄筋腐食度測定時のコンクリートの含水率の測定結果を図-4に示す。表面被覆材などにひび割れがあると試験体の吸湿性に影響を与えられ、そのため、ここでは0.1mm以上のひび割れが発生した試験体を除いた平均値

を求めた。各種材料塗布時に湿潤状態の試験体は、含水率が減少する傾向にあり、一方気乾のものは含水率が増加する傾向にあるが、一般に湿潤状態であった方が含水率は大きい。浸透性吸水防止材は、全体的に含水率が小さく、湿潤のものでは各種材料塗布時から約1.5%小さくなっており、気乾のものでは各種材料塗布時からそれほど増加していない。このことから、浸透性吸水防止材には、コンクリートの表面に撥水作用をもたせることにより、外部からの水分の進入を抑制するだけでなく、コンクリート内部の水分の蒸発を妨げない効果があるものと考えられる。

3. 4 鉄筋の腐食速度

(1) 質量減少率の経時変化

表面被覆材などによる鉄筋腐食の抑制効果は、かぶり厚さが小さい時に顕著であると考えられ

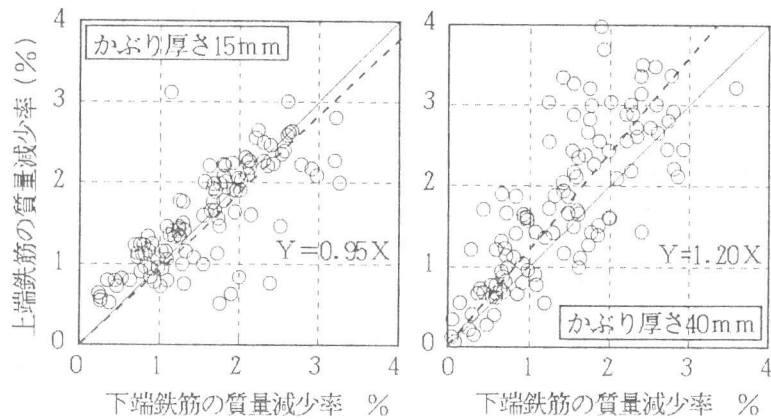


図-3 上端筋と下端筋との腐食状況

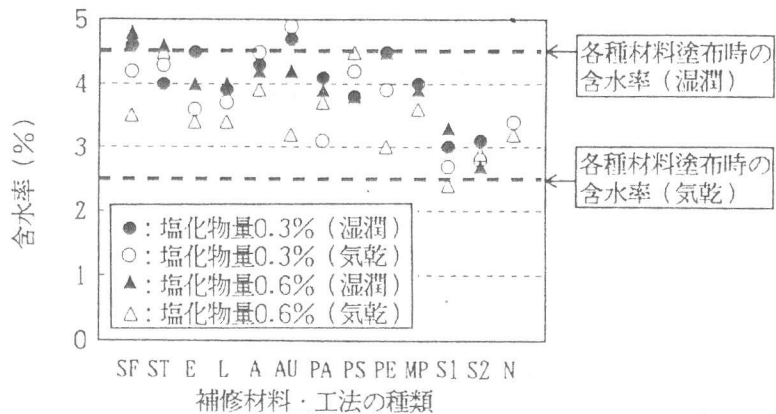


図-4 コンクリートの含水率

るので、以下ではかぶり厚さ15mmの場合を検討することとする。質量減少率の経時変化を図-5に示す。鉄筋の質量減少率は、暴露期間の経過にともない増加する傾向にあるが、一部には質量減少率が、同程度か若干減少しているものが見られる。各種材料塗布時の湿潤状態および気乾状態の違いによる質量減少率は、全体的に見て湿潤の方が若干大きいようである。

(2) ひび割れ発生前の腐食速度

本実験ではあらかじめ約25mmの深さまで促進中性化を行っているため、かぶり厚さ15mmの鉄筋は、屋外暴露試験開始前の中性化促進期間中に、既に腐食が進行していると考えられる。そこで、屋外暴露期間中の腐食速度を調べるために、まず、暴露試験開始時の質量減少率の評価を行うこととした。ここでは、各補修材料・工法および塩化物量ごとに、鉄筋に沿った縦ひび割れが発生していない鉄筋の質量減少率を用いて、期間 t (年) と質量減少率 Δw (%) の関係を直線回帰し、 $t = 0$ における鉄筋の腐食試験開始時の質量減少率 Δw を算出した。そして、促進試験の結果も加味して、塩化物量ごとに Δw の中間値を求めることとした。その理由は、補修材料によって暴露期間が長い方が短い方よりも鉄筋の質量減少率が、小さな値を示している場合があり、厳密な意味での平均値が求められなかったことによるものである。その結果、かぶり厚さ15mmの鉄筋の暴露試験開始時の質量減少率 Δw は、塩化物量0.3%の場合は0.3%、塩化物量0.6%の場合は0.51%となった。この腐食試験開始時の質量減少率を用いて、これを切片 (b) とし、各塩化物量およびかぶり厚さ別に期間 t と質量減少率の関係を直線回帰 ($y = ax + b$) した。その傾き a を腐食速度として、各補修材料・工法の鉄筋腐食抑制効果を検討した。かぶり厚さ15mmの鉄筋の腐食速度を図-6に示す。

表面被覆材を施した場合の鉄筋の腐食速度は、無処理の場合と比べて、各種材料塗布時の含水状態が湿潤および気乾の場合ともに概ね大きくなっている。これに対して、浸透性吸水防止材を施した場合の鉄筋の腐食速度は、無処理と比べて、概ね小さくなっている。

塩化物を含んでいるコンクリート中の鉄筋腐食を抑制するためには、コンクリート表面からの酸素と水分の進入を妨げることが必要であるとされていることから、コンクリート中の含水率が鉄筋腐食速度に影響することが考えられる。

図-4に示すコンクリー

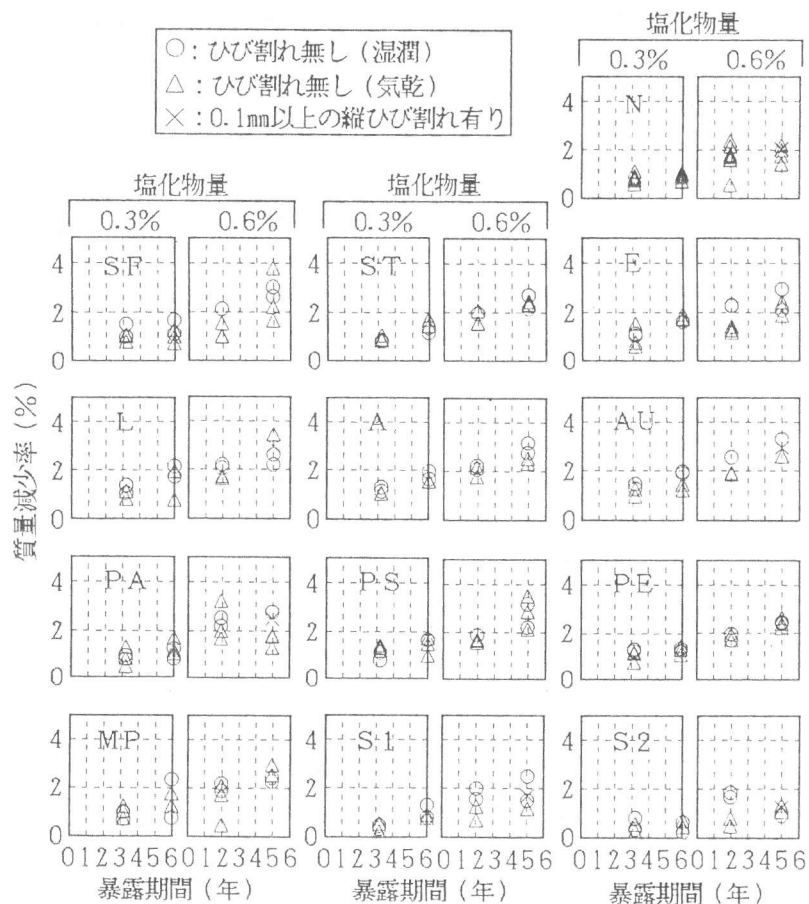


図-5 鉄筋の質量減少率の経時変化 (かぶり厚さ15mm)

トの含水率の測定結果からも分かるように、表面被覆材は、湿潤状態のものに施工した場合、コンクリートの含水率は各種材料塗布時からあまり低下しておらず、このことからコンクリート中の水分の蒸発が妨げられていることが考えられる。また、気乾状態のものに施工した場合、当初よりも含水率が増加しており、外部からの水分の進入を抑制できなかったと考えられる。一方、浸透性吸水防止材は、湿潤のものに塗布した場合、含水率が減少し、気乾のものに塗布した場合も含水率はそれほど増加していない。これは、浸透性吸水防止材の塗布によってコンクリートの表面が撥水作用をもち水分の進入を抑制したものと考えられる。これらのことから、コンクリートの含水率と鉄筋の腐食速度との間には、含水率が小さいほど鉄筋の腐食速度も小さくなるという関係があるといえる。含水率の違いから鉄筋腐食速度の違いが生じる理由として、含水率が高い場合にはコンクリートの電気抵抗性が小さくなり腐食速度が大きくなることが考えられる。

以上のことから、浸透性吸水防止材は、他の補修材料・工法と比べて0.3% (NaCl/砂) 以上の塩化物を含んだコンクリートにおける鉄筋腐食に対する抑制効果があるといえる。

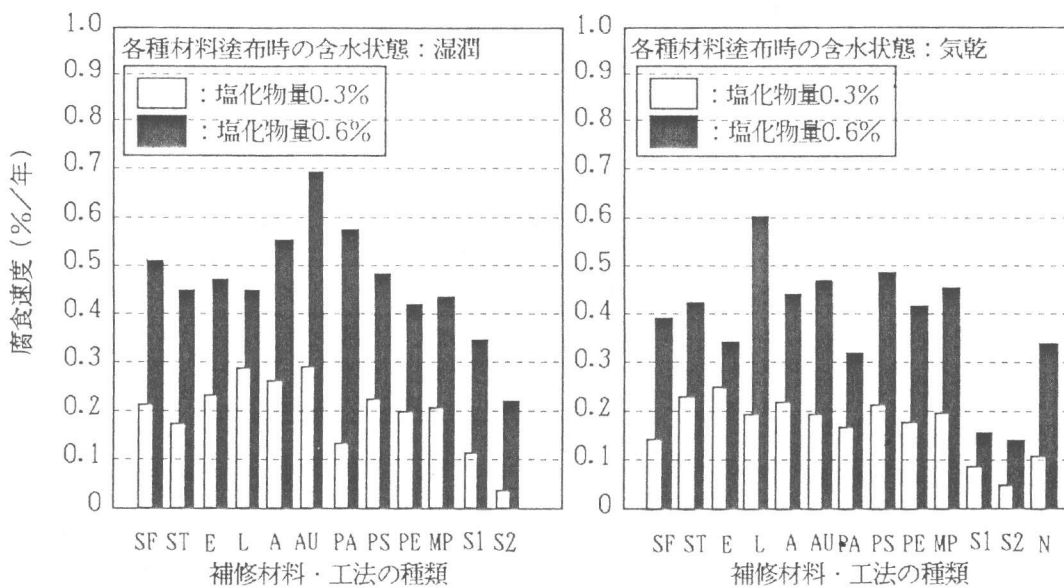


図-6 鉄筋の腐食速度 (かぶり厚さ15mm)

4. 結論

本実験は、コンクリート中の塩化物量が多く、かつ中性化が進行している場合に表面被覆材などによって、劣化進行をどの程度抑制できるかをみるために行ったのであるが、その結果は以下のようにまとめられる。

- (1) 浸透性吸水防止材は、無処理のものおよび他の補修材料と比べて、塩化物を含んだコンクリート中の鉄筋腐食に対する抑制効果があった。
- (2) 鉄筋に沿った縦ひび割れが発生するまでの期間の腐食速度を抑制するためには、コンクリートの表面を仕上塗材などで被覆するのではなく、コンクリート内部の水分を蒸発させることが有効である。

参考文献

- 1) 榊田佳寛ほか：表面被覆材および吸水防止材による鉄筋コンクリート造の塩害劣化抑制効果に関する実験、日本建築学会構造系論文報告集 No433、pp.1~10、1992.3