

論文

[1139] コンクリートの中性化に伴う内部鉄筋の腐食に対する表面仕上材の抑制効果の自然暴露試験による定量的評価

正会員○福島敏夫(建設省建築研究所)

正会員 友沢史紀(東京大学建築学科)

正会員 福士 勲(住宅・都市整備公団東京支社)

正会員 田中 斉(飛鳥建設技術本部)

1. はじめに

一般大気環境下では、コンクリートの中性化とそれに伴う鉄筋の腐食は、鉄筋コンクリート造建築物の構造躯体の耐久性上重要な影響を持ち、その物理的寿命の設定の基礎をなしているために、その経時進行についての合理的な定量的評価方法にむけての研究例も多い[1-3]。最近の地球環境問題である大気中の二酸化炭素の増大傾向や、酸性雨の問題などの露呈は、鉄筋コンクリート造建築物の物理的寿命にも大きな影響を及ぼすと考えられるため、改めて、その経時進行に対する的確な評価の必要性を増している[4]。このような状況下で、既存の鉄筋コンクリート造建築物において、中性化がかなり進行して鉄筋の腐食が進行する恐れがある時に、表面仕上材により鉄筋の腐食進行を中断・遅延又は抑制することが可能であるならば、物理的寿命の延命化のための維持・補修方法の設定に役立たせることができる。しかしながら、この表面仕上材の鉄筋腐食抑制効果についての的確な評価方法についての研究例はそれほど多くない[5-6]。著者らは、前報において、腐食促進試験と6年間の屋外・屋内暴露試験の結果を基にして、表面仕上材の鉄筋腐食抑制効果について報告を行った[7]。本論文では、更に、9年間の屋外・屋内の自然暴露試験から得られた表面仕上材の鉄筋腐食抑制効果に関する新たな知見とその定量的評価結果について報告を行うものである。

2. 実験方法

みがき棒鋼(JIS G 3108規定のSGD 3; 9<sup>φ</sup> × 400 mm)を鉄筋として、かぶり厚 2 cmの位置に埋め込んだ現場打ち標準養生コンクリート(水セメント比 60%、スランプ 18 cm)及びPC板用蒸気養生コンクリート(水セメント比 55%、スランプ 8 cm)の各試験体(10×10×38 cmの角柱)について、4端部にエポキシ樹脂で被覆し、残りの2側面から、30℃、60% R. H. CO<sub>2</sub>; 5%の促進条件下で鉄筋背部まで促進的にコンクリートを5ヶ月間中性化させた後に、各種の表面仕上材(表1参照)による表面処理を行い、屋外暴露(雨ざらし状態)、屋内暴露(20℃、60% R. H.)の環境条件下に置いた。屋外・屋内暴露1、3、6、9年後の試験体について、中性化の進行状況と共に、内部鉄筋の腐食の程度(発錆面積率、平均腐食厚さ、腐食減量率)を調べ、中性化したコン

クリート中の鉄筋の腐食進行に対する表面仕上材の抑制効果の確認を行った。なお、試験体は、大きく分けて、通常の川砂コンクリート(空気量4%の普通AEコンクリート)と塩分混入コンクリート(海砂使用状況を想定、砂の絶乾重量に対して食塩(NaCl)を0.1%の割合で混入したもの)の2種類からなる。試験体製作条件、養生条件及び促進中性化試験法については、前報で詳述したの[7]で、前報を参照して

表-1 表面仕上材の種類

記号	表面仕上材
a	打放し
b	モルタル塗り
c	ビニルクロス(塩化ビニルフォーム)
d	GP塗料
e	マスチック(CE)
f	合成樹脂エマルション薄付け仕上塗材
g	セメント系厚付け仕上塗材
h	合成樹脂エマルション系(複層仕上塗材E、凸部材仕上げ、アクリル系)
i	反応硬化型合成樹脂エマルション系(複層仕上塗材、エポキシ系)
j	浸透性塗布材(RF-100)

て頂くことにして、本報では、詳細については割愛する。

### 3. 測定方法

#### 3.1 中性化深さ測定方法

試験体を、鉄筋に添った方向で割裂し、その割裂面に、JIS K 8006 - 1961に規定される1%フェノールフタレインエタノール溶液の噴霧を行い、赤紫色に着色しない部分のコンクリート表面からの平均深さを中性化深さとした。

#### 3.2 鉄筋の腐食度の測定法

鉄筋を取り出して、鉄筋表面の明らかに錆と認められる部分を透明なビニルシートに写し取って、展開図を作成し、両端5cmずつを取り除いた部分を測定範囲として、発生面積率を求めた。また、2-メルカプトベンゾチアゾール150 ppmを含むクエン酸二アンモニウム10%溶液中に浸漬して、錆を除去し、その前後の重量を図った。腐食減量率及び平均腐食厚は、次の式から求めた。

$$\text{腐食減量率: } L_1 (\%) = \frac{W_0 - W_2}{W_0} - \frac{(W_1 + W_2) / 2 - W_2}{(W_1 + W_2) / 2} - \frac{W_1 - W_2}{W_1 + W_2} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{腐食減量率: } L_2 (\%) = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (2)$$

但し、 $W_0$ : 錆のない健全鉄筋の重量(g)、 $W_1$ : 錆除去前の鉄筋の実測重量(g)

$W_2$ : 錆除去後の鉄筋の実測重量(g)

$$\text{平均腐食厚: } D (\text{mg/cm}^2) = \frac{\text{腐食量(mg)}}{\text{測定側面積(cm}^2)} = \frac{W_1 - W_2}{\pi \times 0.9 \times 3.8} \times 1000 \quad (3)$$

#### 4. 解析方法

腐食減量率から、中性化したコンクリート中の鉄筋腐食進行の経時変化を定量的に評価するために、曲線回帰を行った。指数則、直線則、放物線則、冪乗則等による解析を試みたが、やや相関性の高いのは、冪乗則及び定数項を伴う放物線則であったために、その2つによる解析により、鉄筋腐食進行及び表面仕上材の抑制効果の評価と解釈を行った。なお、腐食の経時進行度の解析は、2つの腐食

表-2 鉄筋の腐食進行の測定結果 (腐食減量率 $L_2$ による)

暴露条件	種別	養生方法	表面処理法	試験体記号	腐食減量率 $L_2$ (%)			
					1年	3年	6年	9年
屋外暴露 (雨ざらし状態)	川砂試験体	標準	打ち放し	N-R-a	0.95	1.11	1.20	1.37
			モルタル塗り	N-R-b	0.66	0.95	0.93	1.12
			マスチックス	N-R-e	0.34	0.87	1.08	1.03
			リシン	N-R-f	0.65	1.07	1.16	1.22
			アクリル	N-R-h	0.30	0.97	1.01	1.30
			エポキシ	N-R-i	0.23	0.94	0.98	1.19
	蒸気	打ち放し	P-R-a	0.51	0.68	0.74	0.91	
		マスチックス	P-R-e	0.29	0.55	0.66	1.18	
海砂試験体	標準	打ち放し	N-S-a	1.15	1.35	1.28	1.49	
		マスチックス	N-S-e	0.44	0.87	1.32	2.14	
屋内暴露 (20°C, 60% R. H.)	川砂試験体	標準	打ち放し	N-R-a	0.26	0.08	0.05	0.29
			ビニルクロス	N-R-c	0.24	0.07	0.05	0.32
			GPペイント	N-R-d	0.22	0.08	0.03	0.29
	蒸気		打ち放し	P-R-a	0.28	0.17	0.07	0.60
			ビニルクロス	P-R-c	0.50	0.11	0.09	0.29
	海砂試験体	標準	打ち放し	N-S-a	0.38	0.33	0.24	1.72
			ビニルクロス	N-S-c	0.47	0.28	0.27	0.44

減量率値  $L_1$ 、 $L_2$ の両方で試みたが、相関係数の関係で、後者の結果を採用して、議論する。

#### 5. 実験結果

屋内及び屋外暴露による発錆面積率の経時変化を図-1~2に示す。また、鉄筋腐食進行の結果を腐食減量率 $L_2$ の変化として、表-2及び図-3に示す。また、屋外暴露試験にお

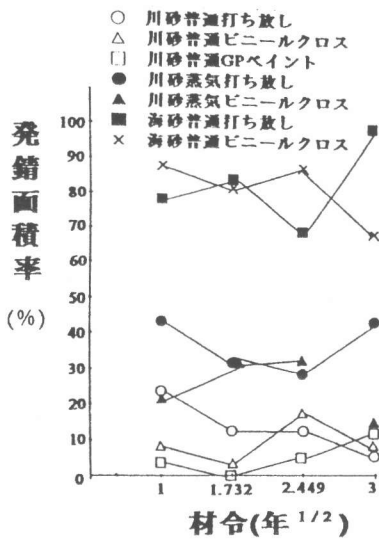


図-1 発錆面積率の経時変化 (屋内暴露)

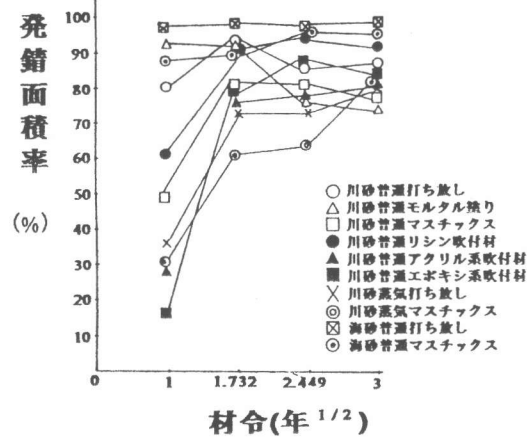


図-2 発錆面積率の経時変化 (屋外暴露)

ける平均腐食厚の経時進行を図-4に、発錆面積率と腐食減量率  $L_1$ 、 $L_2$  との関係を図-5~6にす。表-3~4は、腐食減量率  $L_2$  の経時進行を、最小2乗法を利用して、冪乗則及び放物線則回帰分析した結果である。

## 6. 議論と考察

### 6.1 発錆面積率の経時変化

図-1及び図-2からわかるのは、屋内暴露状態では、水と酸素の同時供給条件が整わず、中性化したコンクリート中の鉄筋の腐食の進行は、コンクリート中に塩分が含まれている場合を除き、ほとんど進行しないが、塩分を含む場合には、初期から80%近い発錆があり、ビニルクロスによっても発錆は抑制できないということである。他方、屋外暴露状態では、打ち放しコンクリートは、最初から100%近い発錆が見られる。また、表面仕上材は、モルタル及びリシンを除き、最初のうちは、発錆を良く抑制しているが、後期では、表面仕上材の劣化によると考えられるが、この抑制効果が見られない。

### 6.2 腐食減量率の経時変化

屋外暴露状態では、鉄筋腐食進行は、腐食減量率  $L_2$  の方が、腐食減量率  $L_1$  よりも大きく現われる。コンクリート中に塩分が含まれない場合にはマスチック、アクリル、エポキシ系表面仕上材は、初期における鉄筋腐食進行を良く抑制するが、後期では、表面仕上材の劣化により、この鉄筋腐食効果は、ほとんど期待し得ない。また、塩分の混入がある場合には、最初から激しい腐食が起こり、表面仕上材の抑制効果は、初期のごくわずかな効果を除き、ほとんど認められない。他方、屋内暴露状態では、発錆面積率の経時進行とほとんど同じ傾向を示す。

### 6.3 平均腐食厚の経時変化

平均腐食厚の経時進行は、腐食減量率の経時進行の傾向とほとんど同じである。

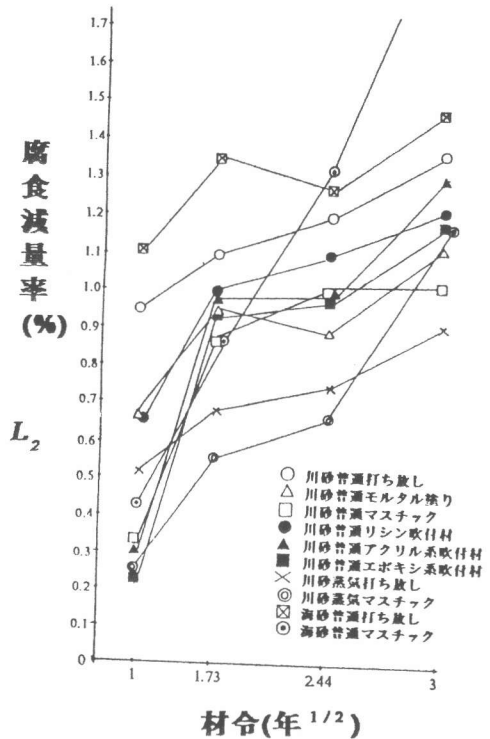


図-3 鉄筋の腐食減量率( $L_2$ )の経時変化(屋外暴露)

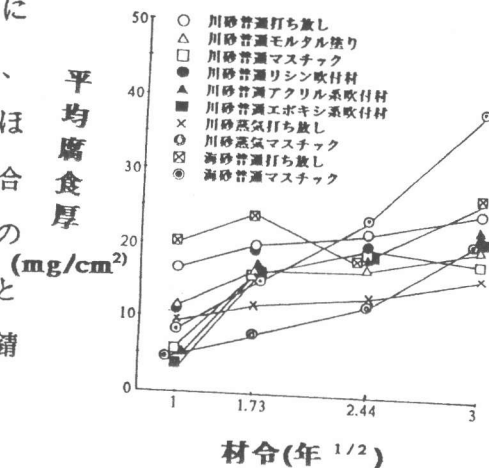


図-4 平均腐食厚の経時変化(屋外暴露)

#### 6.4 発錆面積率と腐食減量率の関係

図-5及び図-6からわかるように、発錆面積率が小さいときには、発錆面積率と腐食減量率の

関係は

、良い  
相関関  
係にあ  
るが、  
発錆面  
積率が  
80%を  
こえる  
と、鉄

筋の腐  
食は、

鉄筋表

面方向での拡がりより  
は、主に鉄筋内部への  
進行が起こり、発錆面  
積率と腐食減量率の相  
関性が全く見られなく  
なる。塩分が混入され  
ている場合には、孔食  
傾向が反映されて、こ  
の非相関性が著しい。  
従って、鉄筋腐食の経  
時進行の評価は、腐食  
減量率を用いるのが妥  
当である。

#### 6.5 最小2乗法

鉄筋腐食抑制効果は、

冪乗則及び定数項を伴

う放物線則の2つのパラメーターで評価し得る。鉄筋腐食抑制効果を明瞭に示すのは、マスチ  
ック、アクリル、エポキシ系の表面仕上材であり、モルタル及びリシンは、この効果は、顕

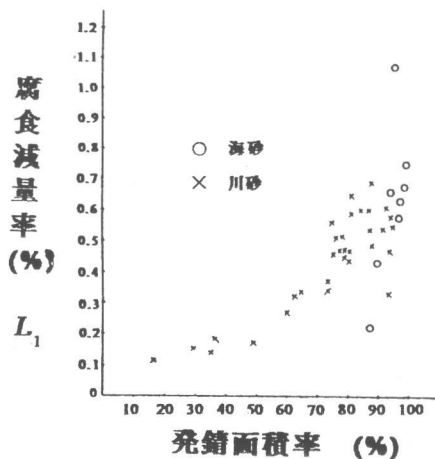


図-5 鉄筋の発生面積率と腐食減量率 $L_1$ との関係(屋外暴露)

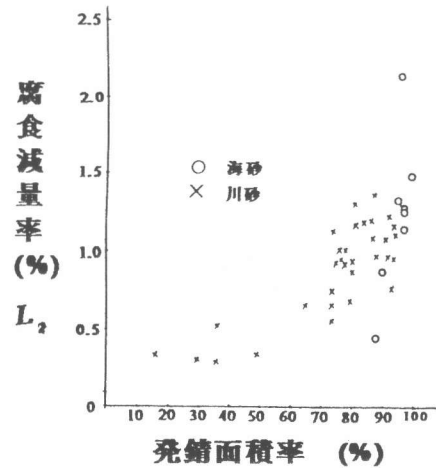


図-6 鉄筋の発生面積率と腐食減量率 $L_2$ との関係(屋外暴露)

表-3 屋外暴露試験による中性化したコンクリート中の鉄筋腐食進行の最小2乗法による評価結果

(その1. 冪乗則による評価結果)

( $Y$ :腐食減量率 $L_2$ (%)、 $t$ :経過時間(年))

	試験体記号	経時進行度推定式	相関係数
川砂試験体	N-R-a	$Y=0.910t^{0.184}$	$r=0.866$
	N-R-b	$Y=0.684t^{0.219}$	$r=0.892$
	N-R-e	$Y=0.397t^{0.517}$	$r=0.873$
	N-R-f	$Y=0.697t^{0.285}$	$r=0.908$
	N-R-i	$Y=0.287t^{0.720}$	$r=0.865$
	N-R-h	$Y=0.351t^{0.839}$	$r=0.890$
	P-R-a	$Y=0.512t^{0.248}$	$r=0.967$
	P-R-e	$Y=0.285t^{0.581}$	$r=0.940$
塩分混入試験体	N-S-a	$Y=1.164t^{0.000}$	$r=0.741$
	N-S-e	$Y=0.426t^{0.000}$	$r=0.983$

著ではない。冪乗則よりは、定数項を伴う放物線則で評価する方が妥当性が高い。

表-4 屋外暴露試験による中性化したコンクリート中の鉄筋腐食進行の経時進行度の最小2乗法による評価結果  
(その2. 定数項を伴う放物線則による評価結果)  
(Y:腐食減量率 $L_2$ (%)、t:経過時間(年))

## 7. 結論

鉄筋の背部までコンクリートを促進中性化した後に各種の表面仕上材により表面処理をした試験体についての9年間にわたる屋外・屋外暴露試験の結果から。表面仕上材は、中

	試験体記号	経時進行度推定式	相関係数
川砂試験体	N-R-a	$Y = 0.690 + 0.217\sqrt{t}$	$r = 0.937$
	N-R-b	$Y = 0.502 + 0.205\sqrt{t}$	$r = 0.854$
	N-R-e	$Y = -0.124 + 0.348\sqrt{t}$	$r = 0.796$
	N-R-f	$Y = 0.475 + 0.271\sqrt{t}$	$r = 0.843$
	N-R-i	$Y = -0.057 + 0.439\sqrt{t}$	$r = 0.837$
	N-R-h	$Y = -0.030 + 0.454\sqrt{t}$	$r = 0.873$
	P-R-a	$Y = 0.330 + 0.188\sqrt{t}$	$r = 0.963$
	P-R-e	$Y = -0.155 + 0.405\sqrt{t}$	$r = 0.890$
塩分混入試験体	N-S-a	$Y = 1.035 + 0.142\sqrt{t}$	$r = 0.726$
	N-S-e	$Y = -0.468 + 0.813\sqrt{t}$	$r = 0.949$

性化したコンクリート中の鉄筋腐食進行に対する抑制効果を有し、その効果は、冪乗則または定数項を伴う放物線則の2つのパラメーターで評価し得るが、定数項を伴う放物線則の方が、鉄筋腐食抑制効果を評価しやすいことが明きらかになった。

【謝辞】: 本研究は、建設省総合技術開発プロジェクト「建築物の耐久性向上技術の開発」(昭和55~59年度)において、建設省建築研究所と住宅・都市整備公団との間の共同研究として行われたものであるが、実験方法の諸検討は、(社)建築研究振興協会に設置されたJHC 中性化委員会(委員長: 岸谷孝一東京大学教授(当時)、日本大学教授(現))及びその実験研究WG(主査: 笠井芳夫日本大学教授)で行われた。委員各位に心から深謝したい。

## (参考文献)

- 1) 和泉意登志・嵩英雄・友沢史紀・福士勲: 鉄筋のかぶり厚さの信頼性設計法による耐久性向上技術の提案、第6回コンクリート工学年次講演会論文集、pp. 185 - 188、1984. 5
- 2) 友沢史紀・福士勲・森永繁: 中性化及び鉄筋腐食速度に基づく鉄筋コンクリートの速度論的耐久性予測法に関する予備的考察、日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)、材料・施工、pp. 101 - 102、1985、10
- 3) 森永繁: 鉄筋の腐食速度に基づいた鉄筋コンクリート造建築物の寿命予測に関する研究、東京大学学位論文、1986、11
- 4) 福島敏夫: 鉄筋コンクリート造建築物の寿命-中性化と鉄筋腐食進行を基礎として、p. 142、技報堂出版、1990
- 5) 福士勲・福島敏夫: 仕上塗材によるコンクリートの中性化及び鉄筋の腐食の抑制、セメント・コンクリート、Vol. 463、No. 9、pp. 74 - 81、1985.
- 6) Fukushima T., Tomosawa F., Fukushi I., and Tanaka H.: Suppressive Effects of Surface Finishing Materials on the Progress of Carbonation of Concrete and Corrosion of Reinforcement, Proc. 2nd Internatl. Sym. Cement and Concrete, Beijing, China, Vol. 3, pp. 31 - 38, 1989. 9
- 7) 福島敏夫・友沢史紀・福士勲・田中 齊: コンクリートの中性化に伴う鉄筋腐食進行に対する表面仕上材の抑制効果の定量的評価、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 12 No. 1、pp. 477 - 482、1990. 6