

## 論文

## [1081] 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

正会員○福島敏夫(建設省建築研究所)

正会員 友沢史紀(東京大学工学部)

正会員 福士 勲(住宅・都市整備公団

住宅都市試験研究所)

正会員 田中 斉(飛島建設(株)技術研究所)

## 1. はじめに

コンクリートの中性化とそれに伴う鉄筋の腐食は、一般大気環境下での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、その経時進行についての定量的な評価は、古くて今なお新しい研究テーマである<sup>1)~4)</sup>。しかし、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、表面仕上材が、どの程度有効に、鉄筋の腐食進行を中断・遅延又は抑制効果を持つか、また、効果があるとすれば、その定量的な評価法はどうかと言う点については、いくつかの試みを除いてこれまで明確な情報は多くはない<sup>5)~8)</sup>。従って、本論文では、コンクリートの中性化に伴う鉄筋の腐食に対する表面仕上材の抑制効果を評価するために行なった、腐食促進試験と屋外・屋内暴露試験の結果と、その効果についての解析結果を報告すると共に、表面仕上材の抑制効果について考察を行なうものである。

## 2. 実験方法

みがき棒鋼(JIS G 3108 規定のSGD3; 9 $\phi$ ×400 mm)を鉄筋として、かぶり厚2cm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18cm)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8cm)の各試験体について、4端部にエポキシ樹脂で被覆し、残りの2側面から、鉄筋背部まで促進的にコンクリートを中性化させた後に、各種の表面仕上材による表面処理を行い、腐食促進(50℃、95% R. H.)、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(図2)。腐食促進1、2、4、8、16ヶ月後、屋外暴露1、3、6年後、屋内暴露1、3、6年後の試験体について、内部鉄筋の腐食の程度(発錆面積率、腐食減量率、最大孔食深さ)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と塩分混入コンクリート(海砂の使用状況を想定)の2種類からなる。

(1) 試験体:鉄筋コンクリートの試験体は、図1に示すように、かぶり厚2cmの真中部分に2本の鉄筋が埋め込まれた10×10×38cmの角柱である。試験体のコンクリートの使用材料及び調査は、表1及び2に示すとおりである。川砂コンクリートは、空気量4%の普通AEコンクリートであり、塩分混入コンクリートは、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である。

(2) 養生条件:図2に示すようにコンクリート打ち込み後2週まで湿潤養生(一部は蒸気養生)を行

い、4週間の室内放置を経て、6週以後に促進中性化試験を行なった。中性化深さの確認用試験体で、中性化深さが30mm(鉄筋背部の深さ)になるのを待って、2週間以内に表面処理

表1 試験体コンクリートの材料

セメント	小野田社製・普通ポルトランドセメント
細骨材	川砂 (JASS 51級 F. M. =2.80)
粗骨材	砕石2005 (20mmフルイ全通) 青梅産
混和剤	ポリリスNo.70 (原液:350cc /セメント100kg)

表2 試験体コンクリートの割合

種別	スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	絶対容積 (l/m <sup>3</sup> )			単位重量 (kg/m <sup>3</sup> )			混和剤 (cc/m <sup>3</sup> )
						セメント	細骨材	粗骨材	セメント	細骨材	粗骨材	
現場打ち	18	4.0	6.0	47.8	185	97	324	354	308	823	938	1,078
PC板用	8	4.0	5.5	47.9	165	95	335	364	300	851	967	1,050

を行ない、その後、所定の材令まで、腐食促進、屋外暴露、屋内暴露の条件下に置いた。

(3) 表面処理方法: 表面仕上材の種類は、表3に示されるとおりである。但し、表面仕上材が著しく劣化する場合は、速やかに再処理を施すことにした。

(4) 促進中性化条件及び腐食促進条件: 促進中性化条件は、中性化のメカニズムが変わらなくて、かつ十分な促進が期待される条件として、

30°C、60%R.H.、CO<sub>2</sub>:5%とした。また、腐食促進条件としては、劣化外力としての水の濃度及び反応の促進因子としての温度を考慮して、50°C、95%R.H.の高温高湿条件に設定した。

3. 理論的解析方法

中性化したコンクリート中であっても、水と酸素の同時供給条件が伴わないかぎり、内部鉄筋の腐食の進行はすぐには起こらないと考えて、コンクリート表面からの水及び酸素

の非定常拡散方程式に基づいて、鉄筋表面での水と酸素の濃度の経時増大を表わす式を求め、更に、腐食反応の等価電気回路理論に基づいて、鉄筋の腐食減量の経時変化の式の導出を行った。その解析過程を以下に示す。

1. 水及び酸素の拡散過程: 水の濃度;  $C_A = C_A(x, t)$ , 酸素の濃度;  $C_B = C_B(x, t)$

[基礎微分方程式]

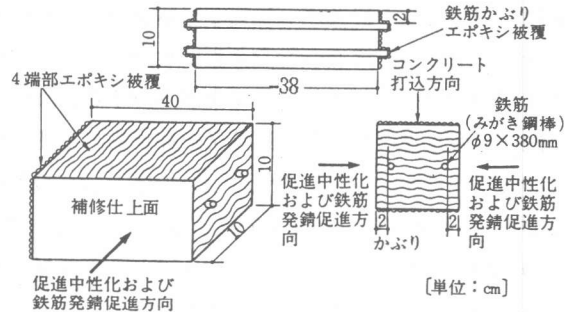


図1 表面仕上材の鉄筋腐食抑制効果確認実験概要図

表3 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 (外壁3層, 1層5~6mm)
c	ビニルクロス (塩化ビニルフォーム)
d	G P塗料
e	マスチック (CE)
f	合成樹脂エマルジョン薄付仕上塗料 (リシン)
g	セメント系厚付仕上塗料 (スタッコ)
h	合成樹脂エマルジョン系 (複層仕上塗料E, 凸部仕上げ, アクリル系)
i	反応硬化型合成樹脂エマルジョン系 (複層仕上材, エポキシ系)
j	浸透性塗布材 (RF-100)

$$\partial C_A / \partial t = D_{\text{eff},A} \partial^2 C / \partial x^2 - a(C_A - C_{Am}) \dots (1)$$

$$\partial C_B / \partial t = D_{\text{eff},B} \partial^2 C / \partial x^2 \dots (2)$$

$$D_{\text{eff},A} = D_{\text{eff},A}(0) \exp(-E_A / RT_m) \dots (3)$$

$$D_{\text{eff},B} = D_{\text{eff},B}(0) \exp(-E_B / RT_m) \dots (4)$$

a: 骨材の吸水係数

$D_{\text{eff},A}$ : 水の有効拡散係数

$D_{\text{eff},B}$ : 酸素の拡散係数

$D_{\text{eff},A}(0), D_{\text{eff},B}$ : 絶対零度における水及び酸素の拡散係数

$E_A, E_B$ : 水及び酸素の拡散の活性化エネルギー

$T_m$ : コンクリートの平均温度

$C_{Am}$ : コンクリート中の初期含水率

$C_{Bm}$ : コンクリート中の初期含酸素率

[初期条件]

$$t \leq 0, x > 0: C_A = C_{Am}, C_B = C_{Bm} \dots (5)$$

[境界条件]

$$t > 0, x = 0: C_A = C_{Ai}, C_B = C_{Bi} \dots (6)$$

$$t > 0, x \rightarrow +\infty: C_A = C_{Am}, C_B = C_{Bm} \dots (7)$$

$C_{Ai}$ : 表面仕上材中の初期含水率

$C_{Bi}$ : 表面仕上材中の初期含酸素率

[解析解]

鉄筋表面における水及び酸素の濃度の経時変化: 水の濃度;  $C_{AL}(t)$ , 酸素の濃度;  $C_{BL}(t)$

L: 内部鉄筋のコンクリートかぶり厚

$$\frac{C_{AL} - C_{Am}}{C_{Ai} - C_{Am}} = \frac{1}{2} \left\{ \exp \left[ -\sqrt{\frac{a}{D_{\text{eff},A}}} L \right] \operatorname{erfc} \left[ \frac{L}{2\sqrt{D_{\text{eff},A}t}} - \sqrt{at} \right] + \exp \left[ \sqrt{\frac{a}{D_{\text{eff},A}}} L \right] \operatorname{erfc} \left[ \frac{L}{2\sqrt{D_{\text{eff},A}t}} + \sqrt{at} \right] \right\} \dots (8)$$

$$\frac{C_{BL} - C_{Bm}}{C_{Bi} - C_{Bm}} = \operatorname{erfc} \left[ \frac{L}{2\sqrt{D_{\text{eff},B}t}} \right] \dots (9)$$

II. 鉄筋の腐食過程: 腐食減量率;  $W/W_0 = W(t)/W_0$ ,  $W_0$ : 腐食してない健全鉄筋の重量

[基礎微分方程式]

$$\delta = E_A - E_C = E_{A0} - E_{C0} + E(t)$$

$\delta$ : 腐食反応の電位差ポテンシャル

$$= -0.440 - 0.401 - \frac{0.0591}{2} \log \frac{(C_{BL})^{1/2}}{[\text{Fe}^{2+}][\text{OH}^-]} \dots (10)$$

$E_A, E_B, E_A, E_B$ : アノード及びカソードの電位及び自然電極電位

$$(R_1 + R_2(t)) dQ/dt + Q/C_a = E(t) \dots (11)$$

$R_1, R_2(t)$ : 溶液及び腐食生成物の電気抵抗

$Q(t)$ : 腐食反応に伴う時間  $t$  における電気量

[初期条件]

$$Q_0 = C_a (E_{A0} - E_{C0}) \dots (12)$$

[腐食減量率の経時進行度]

$W(t)$ : 腐食による時間  $t$  における

$$W(t)/W_0 = 2.89 \times 10^{-4} \int_0^t Q(t) dt / W_0 \dots (13)$$

鉄筋の重量損失積分量  
η: 腐食反応の効率

この解析結果から、中性化したコンクリート中の内部鉄筋の表面に水と酸素が到達するには、一定の誘導期が存在し、内部鉄筋の腐食の進行は、腐食生成物の電気抵抗が  $R_2(t)$  が、時間に関してどのような式で表わせるかに応じて、指数則、直線則、放物線則、冪乗則等で表わせることがわかるが、放物線則が妥当と考えられる。実験結果は、最小2乗法で曲線回帰するとき、指数則、直線則、放物線則、冪乗則等による解析を行ったが、放物線則による回帰が最も相関性が高いために、実験結果は、放物線則に基づいて解析し、結果の解析を行った。

#### 4. 実験及び解析結果

打放しの鉄筋コンクリート試験体の促進中性化試験による中性化の経時進行度は、打放しの無筋コンクリートに関する結果と完全に一致した。従って、各種の条件下での腐食進行の確認試験に供する試験体の表面処理は、中性化深さが30mmに達する事

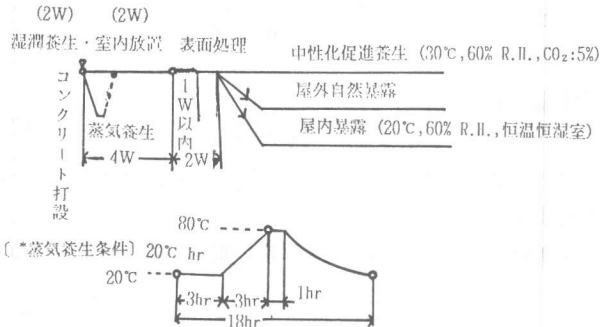


図2 試験体製作、養生、中性化、鉄筋腐食条件

が予測される時期として、促進中性化の5ヶ月後に行なった。腐食促進条件下及び屋外暴露・屋内暴露条件下での中性化したコンクリート中の鉄筋の腐食減量率の経時変化を、表4、5に示す。また、各暴露条件下での中性化したコンクリート中の内部鉄筋の腐食進行の様子を図3、4に示す。なお、鉄筋の腐食減量率は、次式により算定した。

$$\text{腐食減量率 } Y(\%) = (W_0 - W) / W_0 \times 100$$

$W_0$ : 腐食前の健全な鉄筋の重量、

$W$ : クエン酸2アンモニウム溶液による錆の除去後の鉄筋の実測重量

一方、腐食促進条件下での中性化したコンクリート中の鉄筋の腐食の経時進行度を推定評価し、各種表面仕上材の鉄筋腐食抑制効果の評価を行うために、最小2乗法による回帰分析を行った。その結果を表7に示す。

#### 5. 考察

以上の実験結果から、中性化したコンクリート中の鉄筋腐食進行及び表面仕上材による抑制効果に関して、次のことが明らかとなった。

(1) コンクリート中に塩分が

表4 腐食促進条件下での中性化したコンクリート中の鉄筋の腐食減量率の経時変化

種別	養生方法	表面処理法	試験体記号	腐食減量率 (%×10 <sup>-2</sup> )							
				1ヶ月	2ヶ月	4ヶ月	8ヶ月	16ヶ月			
川砂試験体	標準	打ち放し モルタル塗り ビニルクロス GPペイント マスチック リシン アクリル エポキシ RF-100	N-R-a 1	72	79.5	98	54.5	66.5			
			N-R-b 1	51	85	113	77	88			
			N-R-c 1	50	43	51.5	60.5	69			
			N-R-d 1	13	36.5	72	73	48.5			
			N-R-e 1	20	100	86	66	78.5			
			N-R-f 1	15	43.5	78	67.5	61.5			
			N-R-g 1	14.5	36	77.5	73	82.5			
			N-R-h 1	10	36.5	99	73.5	69			
			N-R-j 1	18	32	99	73.5	69			
			海砂試験体	標準	打ち放し モルタル塗り ビニルクロス マスチック	P-R-a 1	58.5	80.5	108.5	61.5	74
						P-R-b 1	49.5	86	87.5	76.5	55.5
						P-R-c 1	56	51	65	75	89
P-R-e 1	14	103.5				81.5	72	71			
N-S-a 1	56.5	109.5				120	127	178			
N-S-b 1	79	123.5				134.5	106	159			
海砂試験体	蒸気	打ち放し モルタル塗り ビニルクロス マスチック	N-S-c 1	70	74	83.5	114	145			
			N-S-e 1	30	106.5	125	116	160			
			P-S-a 1	49.5	121	128	121	176			
			P-S-b 1	71.5	122	126.5	152	233			
			P-S-c 1	73	67	91	129.5	185			
			P-S-e 1	37	103	125.5	136.5	218.5			

混入されない限り、中性化していない部分の鉄筋の腐食はほとんど見られず、また、コンクリートが中性化しても、屋内にあって、水の供給がない乾燥状態の場合は、内部の鉄筋は、ほとんど腐食しない。他方、屋外に暴露されたり、腐食促進条件下に置かれ、鉄筋腐食の直接的な劣化外力である水と酸素の外部からの同時供給が予測される場合でも、表面仕上材による表面処理を行って、水と酸素の外部からの拡散を遮断すれば、その後の鉄筋の腐食進行に対して、一定程度の抑制効果を期待し得る。

(2) 塩分の混入がある場合には、屋内暴露状態では、ほとんど鉄筋の腐食は進行しないが、

表5 屋外暴露・屋内暴露促進条件下での中性化したコンクリート中の鉄筋の腐食減量率の経時変化

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 (% $\times 10^{-5}$ )			
					1年	3年	6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 2	76	119.5	117	
			モルタル塗り	N-R-b 2	77	126	138	
			マスチック	N-R-e 2	54	97	87	
			リシン	N-R-f 2	70	115	118	
			アクリル	N-R-h 2	60	108.5	95.5	
			エポキシ	N-R-i 2	47	97	95	
	蒸気	打ち放し	マスチック	P-R-a 2	62	93	78	
				P-R-e 2	67	110	103	
	海砂試験体	標準	打ち放し	マスチック	N-S-a 2	115	127	122
					N-S-e 2	94	112	140
屋内暴露 (20℃, 60% R.H.)	川砂試験体	標準	打ち放し	N-R-a 3	38	22	16	
			ビニルクロス	N-R-c 3	34	16	12	
			CPペイント	N-R-d 3	40	19	13	
	蒸気	打ち放し	ビニルクロス	P-R-a 3	37	30	14	
				P-R-c 3	38	22	19	
	海砂試験体	標準	打ち放し	ビニルクロス	N-S-a 3	49	36	25
					N-S-c 3	50	35	30

注) : a-jは、表2に示す表面仕上材の種類

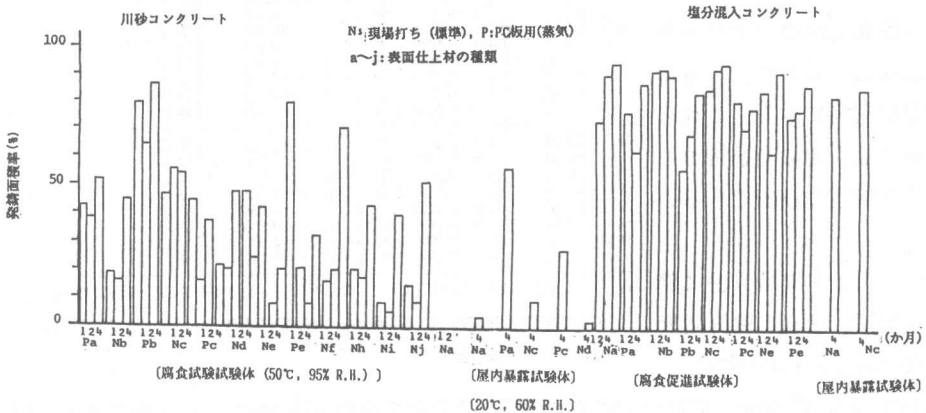


図3 鉄筋の発錆面積率の経時変化(腐食促進試験50℃、95%R.H.)

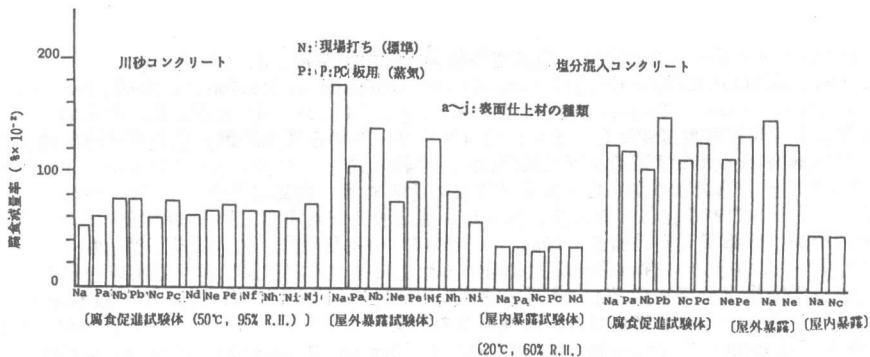


図4 各暴露条件下での鉄筋の腐食減量率の測定結果(8ヶ月)

屋外暴露及び腐食促進条件下では、急激な鉄筋の腐食が進行し、いずれの表面仕上材も、その抑制効果は乏しい傾向がある。この場合の鉄筋腐食は、孔食型が多い。かぶりコンクリートにひびれが発生したのは、腐食促進試験では、16ヶ月であったが、この時の腐食減量率は、約1.8%であり、腐食の程度は小さい。

3) 中性化したコンクリート中の鉄筋腐食に対しては、塩分の混入がないかぎり、一定期間、腐食進行を遅延又は中断し得ると考えられ、その抑制効果は、負の定数項を含む一般的な放物線則で表わすことができる( $Y = A\sqrt{t} - B : Y$ ; 腐食減量率(%);  $t$ ; 経過時間(month))。但し、長時間経過すると、鉄筋の腐食減量率は飽和し、この放物線則からはずれてくる傾向がある。また、塩分の混入がある場合は、いずれの表面仕上材も鉄筋腐食に対する抑制効果は乏しく、コンクリートが中性化する前から腐食が始まっていると考えられ、その場合の鉄筋の腐食進行は、正の定数項を含む放物線則で表わすことができる( $Y = A\sqrt{t} + B$ )。

## 6. 結論

表面仕上材は、酸素に対する透気率及び透水率と厚さに基づいて、鉄筋腐食の劣化外力である水と酸素の拡散に対する遮断機能を有し、塩分の混入のない限り、中性化したコンクリート中の鉄筋腐食に対して、一定の抑制効果が期待できる。これらの抑制効果は、定数項を持つ一般的な放物線則で評価できる。

### 【謝辞】

本研究における実験方法に関する諸検討は、(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。委員各位に深謝したい。

### (参考文献)

- 1) 岸谷孝一: 鉄筋コンクリートの耐久性、鹿島建設技術研究所出版部、p. 165、1963
- 2) H. Hamada: Neutralization (Carbonation) of Concrete and Corrosion of Reinforcing Steel, Proc. 5th Internatl. Sym. Chem. Cem., Tokyo, Japan, 3, 1968, pp. 343-369
- 3) 友沢史紀、福士勲、森永繁: 中性化および鉄筋腐食速度にもとづく鉄筋コンクリートの速度論的耐久性予測手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、1985、pp. 101-102
- 4) 樫野紀元: 鉄筋コンクリート構造物の耐久性—鉄筋の腐食とその対策、鹿島出版会、p. 216、1988
- 5) 福島敏夫: コンクリートの中性化と抑制方法、あらか、建築研究成果撰 2、秋季講演会特集号、建設省建築研究所編、建築研究振興協会、1984、pp. 89-103
- 6) 福島敏夫、友沢史紀、福士勲、田中斉: コンクリートの中性化に伴う鉄筋腐食に対する仕上材等の抑制効果に関する実験的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)、材料・施工、1984、pp. 529-530
- 7) 福士勲、福島敏夫: 仕上塗材によるコンクリートの中性化および鉄筋腐食の抑制、セメント・コンクリート、463、1985、pp. 74-81
- 8) T. Fukushima, F. Tomosawa, I. Fukushi, H. Tanaka: 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, 3, 1989, pp. 31-38

表6 腐食促進試験による鉄筋腐食の経時進行度の最小2乗法による評価結果

(Y: 腐食減量率 (%) t: 経過時間 (month))

試験体記号 <sup>1)</sup>	経時進行度推定式	相関係数	備考	
川 砂 試 験 体	N-R-a1	$Y = 0.44 + 0.26 \sqrt{t}$	$r = 0.980$	2) 3)
	N-R-b1	$Y = -0.07 + 0.61 \sqrt{t}$	$r = 0.976$	2) 4)
	N-R-c1	$Y = 0.45 + 0.02 \sqrt{t}$	$r = \text{—}$	2) 3)
	N-R-d1	$Y = -0.47 + 0.59 \sqrt{t}$	$r = 1.000$	2) 4)
	N-R-e1	$Y = -0.20 + 0.60 \sqrt{t}$	$r = 0.498$	2) 4)
	N-R-f1	$Y = -0.47 + 0.63 \sqrt{t}$	$r = 0.998$	2) 4)
	N-R-h1	$Y = -0.51 + 0.64 \sqrt{t}$	$r = 0.993$	2) 4)
	N-R-i1	$Y = -0.73 + 0.83 \sqrt{t}$	$r = 0.938$	2) 4)
	N-R-j1	$Y = 0.09 + 0.50 \sqrt{t}$	$r = 0.933$	2) 3)
	P-R-a1	$Y = 0.09 + 0.36 \sqrt{t}$	$r = 0.999$	2) 3)
	P-R-b1	$Y = 0.02 + 0.10 \sqrt{t}$	$r = 0.693$	2) 3)
	P-R-c1	$Y = 0.43 + 0.10 \sqrt{t}$	$r = 0.501$	2) 3)
P-R-e1	$Y = -0.23 + 0.61 \sqrt{t}$	$r = 0.425$	2) 4)	
塩 分 混 入 試 験 体	N-S-a1	$Y = 0.20 + 0.41 \sqrt{t}$	$r = 0.905$	5) 3)
	N-S-b1	$Y = 0.38 + 0.33 \sqrt{t}$	$r = 0.700$	5) 3)
	N-S-c1	$Y = 0.18 + 0.33 \sqrt{t}$	$r = 0.933$	5) 3)
	N-S-e1	$Y = 0.16 + 0.40 \sqrt{t}$	$r = 0.822$	5) 3)
	P-S-a1	$Y = 0.22 + 0.41 \sqrt{t}$	$r = 0.834$	5) 3)
	P-S-b1	$Y = 0.16 + 0.54 \sqrt{t}$	$r = 0.953$	5) 3)
	P-S-c1	$Y = 0.09 + 0.44 \sqrt{t}$	$r = 0.972$	5) 3)
	P-S-e1	$Y = 0.32 + 0.54 \sqrt{t}$	$r = 0.949$	5) 3)

(注) 1) 表示方法は表5を参照。2) 1, 2, 4か月のデータを利用。3) 発錆促進開始以前の腐食を意味する。4) 鉄筋腐食の一時的遅延を意味する。5) 1, 2, 4, 8, 16か月のデータを利用。