コンクリート中の鉄筋腐食速度に及ぼす各種要因の影響 に関する長期屋外暴露実験

LONG-TERM OUTDOOR EXPOSURE TEST ON THE RATE OF CORROSION OF REINFORCING BAR IN CONCRETE CONTAINING CHLORIDE ION

掛川 勝^{*1}, 榎田佳寛^{*2}, 松林裕二^{*3}, 鹿毛忠継^{*4}

Masaru KAKEGAWA, Yoshihiro MASUDA, Yuji MATSUBAYASHI
and Tadatsugu KAGE

This paper reports the results of long-term outdoor exposure test on the rate of corrosion of reinforcing bar in concrete which contains chloride ion. The factor of experiment are sodium chloride content (0~1.0%/sand), water-cement ratio (50~65%), and thickness of concrete cover (15~40mm). It is concluded as follows, The corrosion loss of reinforcing bar in long-term outdoor exposure test increases in proportion to square root of exposure period. Rate of corrosion of reinforcing bar decreases with increasing thickness of concrete cover in sodium chloride content (0~0.3%/sand). The estimation equation of the rate of corrosion of sodium chloride content (0~1.0%/sand) are proposed by thickness of concrete cover and water-cement ratio.

Keywords : long-term outdoor exposure test, rate of corrosion, corrosion loss, sodium chloride content, water-cement ratio, concrete cover

長期屋外暴露実験, 腐食速度, 質量減少, 塩分量, 水セメント比, かぶり厚さ

1. はじめに

鉄筋コンクリート造建築物の物理的な耐用年数を評価するためには、コンクリートの劣化や鉄筋腐食に及ぼす各種要因の定量的把握が必要である。このうち、鉄筋腐食の原因としては、コンクリートの中性化やコンクリートに含まれる塩化物イオンの影響が考えられる。コンクリート中に含まれる塩化物イオンは、洗浄が不十分であった海砂の使用やコンクリートの硬化促進剤に含まれる塩化物イオンによる、いわゆる内在塩化物イオンと海岸地域あるいは融雪剤を使用する地域において建築物が竣工後に、外部から塩化物イオンが浸入する、いわゆる外来塩化物イオンに分けられる。

コンクリート中に含まれる塩化物イオンが鉄筋腐食速度に及ぼす影響については、これまで多くの調査、研究が行われ、かなり明らかにされてきている³⁾⁶⁾。筆者らは、かぶり厚さを変えて鉄筋を埋込んだコンクリート試験体の高温多湿条件での腐食促進実験および9年間自然環境下で暴露実験を行った場合の塩化物イオンを含んだコンクリート中の鉄筋腐食量の変化や腐食速度について検討し、コンクリートのかぶり厚さ、水セメント比およびコンクリート中の塩化

物イオン量の関数として表すことができると報告した⁷⁻⁸⁾。

しかし、10年以上の長期にわたる塩化物イオンを含んだコンクリート中の鉄筋腐食量や腐食速度については、十分明らかでない。このようなことから、本報告では、既報⁸⁾の9年間の暴露実験以降に、継続して実施してきた塩化物イオン量、水セメント比およびかぶり厚さを変化させて鉄筋を埋込んだコンクリート試験体の20年までの暴露試験の結果を紹介するものであり、コンクリートの品質やコンクリート中に含まれる塩化物イオン量が鉄筋の腐食速度に及ぼす影響について定量的に評価するものである。

2. 実験方法

2.1 実験計画

(1) 鉄筋腐食要因

塩化物イオンを含んだコンクリート中の鉄筋腐食に影響を及ぼす要因として、水セメント比に代表されるコンクリート品質、かぶり厚さおよび塩化物イオン量を取りあげた。また、一般の建築物におけるコンクリートの中性化進行の状況をシミュレートするため、あ

本報告は、参考文献1), 2)を基に、データを見直し、再解析したものである。

^{*1} 太平洋マテリアル(株)開発研究所 工修

^{*2} 宇都宮大学工学研究科地球環境デザイン学専攻
教授・工博

^{*3} 太平洋マテリアル(株)開発研究所 博士(工学)

^{*4} 独立行政法人建築研究所 博士(学術)

R & D Lab., Taiheiyo Materials Corporation, M. Eng.

Prof., Dept. of Design and Engineering for Global Environment, Architecture Course,
Utsunomiya University, Dr. Eng.

R & D Lab., Taiheiyo Materials Corporation, Ph. D.

Building Research Institute, Ph. D.

らかじめ促進試験によって試験体の表面から約 15mmまで中性化させた。ただし、水セメント比 50%の試験体は実際の状況を考慮し、かつ促進中性化試験の時間の関係もあって約 10mmまでとした。

実験の要因と水準を表 1 に、添加した塩分量のレベル（以下、塩分量のレベル）と水セメント比の組合わせを表 2 に示す。塩分量のレベルは、洗浄が不十分な海砂を用いた場合に、砂からコンクリートに導入される塩分量に関する実態調査を基に定めたものであり、NaCl を砂質量比（%）で表したものである。塩分量のレベル 1.0% は、実態調査⁵⁾におけるほぼ最大の塩分量を想定している。

(2) 実験手順⁸⁾

実験の手順は、図 1 に示すコンクリートを打ち込んだ試験体を材齢 2 日で脱型し、材齢 3 週まで湿布散水養生、材齢 4 週まで温度 20℃、湿度 60% R.H. の恒温恒湿室で保存し、その間に試験体の両側面を除く上下面および両端面をエポキシ樹脂でシールした。その後、温度 30℃、湿度 60% RH、CO₂ 濃度 5% の条件で中性化促進を行った。

中性化の進行状況は、同じ水セメント比のモニター用の試験体を順次切断して調べた。水セメント比が 55%～65% の試験体については、モニター用試験体の中性化深さが 15mm に達した時点で中性化促進試験槽から試験体を取り出し、暴露試験の開始まで温度 20℃、湿度 60% R.H. の恒温恒湿室に保存した。また、水セメント比が 50% の試験体については、水セメント比 55% の試験体と同時期に取り出した。水セメント比 50% の試験体の中性化深さは平均 10mm 程度であった。

中性化促進試験の期間は約 8 ヶ月間であったが、途中促進試験機の故障で中断した期間があり、水セメント比 50% および 55% の場合の促進中性化期間は 6 ヶ月であった。なお、促進中性化試験機に入っていない期間は恒温恒湿室に保存した。

屋外暴露試験は、材齢約 9 ヶ月から茨城県つくば市の建築研究所の屋外暴露試験場で行い、暴露期間 2、4、9、15 および 20 年でそれぞれ 1 体ずつ試験体を解体し、鉄筋腐食の評価を行った。なお、2、4 および 9 年での計測結果は既に報告⁸⁾しているが、今回、15 および 20 年の結果を加え、すべての結果を基に再評価した。暴露地域の環境は、気象庁つくば（館野）の気象データ(1981～2010)によると、平均気温 13.8℃、平均湿度 75% R.H.、年間降水量 1282.9 mm、日照時間 1912.8 h、全日日射量 13.1 MJ/m² である。

2. 2 使用材料およびコンクリートの性質

(1) 鉄筋

鉄筋は、JIS G 3112（鉄筋コンクリート用棒鋼）の SR24（実験当時）の規格品で、φ 13mm の丸鋼を用いた。鉄筋は酸化被膜（黒皮）付であり、コンクリート打込み前にアセトンで脱脂して用いた。

(2) コンクリートの材料

コンクリートの材料は以下の通りである。

- ① セメント：普通ポルトランドセメント（塩化物イオン量 0.005%）
- ② 細骨材：川砂（産地：大井川、絶乾比重 2.58、吸水率 1.42%、粗粒率 2.72）
- ③ 粗骨材：碎石（産地：青梅、絶乾比重 2.62、吸水率 0.73%、粗粒率 6.76）
- ④ 練混ぜ水：水道水（塩化物イオン量 80ppm）

表 1 実験の要因と水準

要 因	水 準
添加した塩分量のレベル (NaCl/砂質量, %)	0, 0.1, 0.3, 0.5, 1.0
水セメント比 (%)	50, 55, 60, 65
かぶり厚さ (mm)	15, 20, 30, 40

表 2 添加した塩分量のレベルと水セメント比の組合せ

水セメント 比 (%)	添加した塩分量のレベル (NaCl/砂質量, %)				
	0	0.1	0.3	0.5	1.0
50	—	○	○	○	○
55	—	○	○	○	○
60	○	○	○	○	—
65	○	○	○	○	—

図 1 試験体の形状・寸法

⑤ 混和剤：AE 剤（レジン系）

⑥ 塩分量調整試薬：NaCl（一級試薬）

(3) コンクリートの調合および性質

コンクリートの調合と性質を表 3 に示す。なお、表 3 では、塩分量のレベルとともに、塩化物イオン量を示した。塩分量のレベルは、絶乾の細骨材量に対する質量比として定めたため、添加した塩化物イオン量は調合において異なっている。また、供給される塩化物イオン量は、水から 0.015 kg/m³、セメントから 0.014～0.018 kg/m³ であり、およそ 0.03 kg/m³ である。

2. 3 評価項目

(1) コンクリート表面の観察

コンクリート試験体を解体する前に、目視でひび割れの有無を調べ、さらに、クラックスケールでひび割れ幅を測定した。

(2) 鉄筋の発錆面積率

トレーシングペーパーに錆の状況を複写し、錆の部分をすべて黒く塗りつぶして、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。

(3) 鉄筋の質量減少率

クエン酸 2 アンモニウム水溶液により鉄筋の錆落しを行い、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。

表3 コンクリートの調合と性質

水セメント比 (%)	添加した塩分量のレベル*1 (NaCl/砂質量比, %)	単位量 (kg/m ³)				添加塩化物イオン量 (Cl ⁻) (kg/m ³)	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 材齢28日 (N/mm ²)
		セメント	水	細骨材	粗骨材				
50	0.1	370	185	769	972	0.45	17.0	4.8	40.6
	0.3					1.36	17.0	4.6	40.8
	0.5					2.27	16.5	4.6	40.4
	1.0					4.54	16.0	4.1	41.3
55	0.1	336		798	972	0.47	18.5	4.5	34.6
	0.3					1.40	18.0	4.8	34.6
	0.5					2.34	17.5	4.5	34.5
	1.0					4.68	17.5	4.2	35.5
60	0.0	308		827	966	0.00	19.0	4.7	28.4
	0.1					0.49	18.5	4.5	28.5
	0.3					1.47	18.0	4.3	28.8
	0.5					2.44	17.5	4.4	28.0
65	0.0	285		872	940	0.00	19.0	4.7	24.7
	0.1					0.52	18.5	4.6	23.7
	0.3					1.55	18.5	4.8	23.5
	0.5					2.58	17.5	5.0	25.3

*1 細骨材の絶乾重量に対する百分率

図2 各屋外暴露期間における発錆面積率と質量減少率の関係

$$\angle w_0 = \{(W_0 - W) / W_0\} \times 100 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\angle w_0$: 質量減少率(%) W_0 : 最初の鉄筋の質量 (g) W : 暴露試験後に錆落としをした鉄筋の質量 (g)

なお、クエン酸 2 アンモニウム水溶液により錆を除去する際、健全な鉄筋表面の不動態被膜（以下、黒皮）が除去される。そこで、除去される鉄筋の黒皮の質量百分率 w_s を、ダミー鉄筋を用いて同様の処理を行って求め、質量減少率を補正することが必要となる。既報⁹⁾の屋外暴露期間 9 年までの結果については、別途測定した値の平均値 0.52% を補正值としている。しかし、屋外暴露試験が長期間にわたると、各屋外暴露期間での測定において、測定者が異なることや鉄筋の錆の状況により、クエン酸 2 アンモニウム水溶液への浸せき時間や錆の除去方法に差が生じる可能性がある。そのため、各屋外暴露期間で除去される鉄筋の黒皮の質量百分率 w_s にも、ばらつきが生じると考えられる。そこで、図 2 に示すとおり、各屋外暴露期間における発錆面積率が 10% 以下の場合の発錆面積率と質量減少率との関係を確認することとした。屋外暴露期間 2 年、5 年での発錆面積率が約 2% 以下の範囲での質量減少率は、既報⁹⁾で用い

た補正值である 0.52% に近い値を示しているが、9 年目では 0.8% 程度であり、既報⁹⁾の補正值より大きな値となっている。また、15 年、20 年での質量減少率は、大きくばらついており、発錆面積率が 3～4% を超えると大きくなる傾向にある。

以上のことから本実験では、除去されたと想定される鉄筋の黒皮の質量百分率 w_s を、各屋外暴露期間ごとに求めることとした。そこで、表 4 に示すとおり、発錆面積率 2% 以下の質量減少率の平均値を算出し、除去されたと想定される鉄筋の黒皮の質量百分率 w_s として、式 (2) を用いて補正質量減少率 $\angle w$ を求めた。なお、事前に発錆面積率 2% および 3% でのそれぞれについて数値を検討したが大きな変動は見られなかった。

表 4 除去されたと想定される鉄筋の黒皮の質量百分率 w_s と標準偏差

	屋外暴露期間 (年)				
	2	4	9	15	20
w_s (%)	0.58	0.37	0.82	0.99	0.82
標準偏差	0.017	0.032	0.038	0.141	0.165

3. 試験結果

3.1 ひび割れ幅、発錆面積率、質量減少率および補正質量減少率

表5に各屋外暴露期間におけるひび割れの有無と幅、発錆面積率、質量減少率および補正質量減少率を示す。

3.2 コンクリートの中性化深さと塩化物イオン量

コンクリートの中性化深さは、暴露期間9年までは、最小かぶりである15mmにはいずれも達していないが、屋外暴露期間15年以上以降では15mmを超えるものがあった。

表5 各屋外暴露期間におけるひび割れ幅、発錆面積率、質量減少率および補正質量減少率

水セメント比 (%)	塩分量の レベル (%)	屋外暴 露期間 (年)	かぶり厚さ15mm				かぶり厚さ20mm				かぶり厚さ30mm				かぶり厚さ40mm			
			ひび割れ 幅(mm)	発錆面 積率(%)	質量減少 率(%)	補正質量 減少率(%)	ひび割れ 幅(mm)	発錆面 積率(%)	質量減少 率(%)	補正質量 減少率(%)	ひび割れ 幅(mm)	発錆面 積率(%)	質量減少 率(%)	補正質量 減少率(%)	ひび割れ 幅(mm)	発錆面 積率(%)	質量減少 率(%)	補正質量 減少率(%)
50	0.1	2	0.00	6.9	0.58	0.04	0.00	1.1	0.56	-0.02	0.00	6.7	0.62	0.07	0.00	0.7	0.59	0.01
		4	0.00	14.6	0.43	0.11	0.00	2.0	0.39	0.03	0.00	4.8	0.41	0.06	0.00	3.4	0.40	0.04
		9	0.00	15.3	1.00	0.30	0.00	14.3	0.97	0.26	0.00	7.8	0.95	0.19	0.00	3.0	0.96	0.16
		15	0.00	6.1	1.51	0.58	0.00	4.1	1.16	0.21	0.00	4.6	1.25	0.30	0.00	3.0	1.25	0.29
		20	0.00	12.2	0.99	0.27	0.00	4.5	0.60	-0.18	0.00	6.3	0.69	-0.08	0.00	3.9	0.80	0.01
	0.3	2	0.00	24.1	0.79	0.35	0.00	11.0	0.62	0.10	0.00	2.2	0.60	0.03	0.00	2.0	0.58	0.01
		4	0.00	32.6	0.66	0.41	0.00	22.3	0.53	0.24	0.00	3.1	0.34	-0.02	0.00	2.3	0.43	0.07
		9	0.00	44.7	1.56	1.10	0.00	13.4	1.01	0.30	0.00	4.6	0.92	0.14	0.00	2.5	0.92	0.12
		15	0.00	25.6	1.36	0.62	0.00	9.8	1.13	0.23	0.00	1.1	0.99	0.01	0.00	1.1	1.01	0.03
		20	0.00	36.5	1.77	1.25	0.00	7.7	0.92	0.16	0.00	11.1	1.09	0.36	0.00	8.3	0.83	0.08
	0.5	2	0.00	59.1	0.87	0.63	0.00	62.4	0.88	0.66	0.00	23.3	0.89	0.44	0.00	4.6	0.71	0.15
		4	0.00	67.0	0.99	0.87	0.00	30.8	0.74	0.48	0.00	10.8	0.45	0.12	0.00	18.7	0.77	0.47
		9	0.10	66.0	1.82	1.54	0.00	39.0	1.27	0.77	0.00	45.6	1.62	1.17	0.00	21.6	1.33	0.68
		15	0.00	53.2	2.02	1.55	0.15	42.2	1.28	0.71	0.00	39.9	1.58	0.98	0.00	34.2	1.96	1.31
		20	0.50	31.0	2.66	2.10	0.00	13.5	1.96	1.25	0.00	34.5	1.15	0.61	0.00	31.2	2.13	1.57
	1	2	0.00	82.3	1.90	1.80	0.00	62.6	1.54	1.32	0.00	51.7	1.41	1.13	0.00	54.1	1.38	1.11
		4	0.00	93.8	2.27	2.25	0.30	63.5	1.73	1.60	0.00	64.3	1.65	1.52	0.00	56.0	2.02	1.86
		9	0.65	100.0	4.91	4.91	0.65	83.7	4.31	4.18	0.00	92.2	3.04	2.98	0.15	89.3	4.67	4.58
		15	3.00	100.0	16.33	16.33	1.20	91.7	6.78	6.70	0.25	79.2	4.11	3.90	2.50	37.9	5.12	4.50
		20	2.50	100.0	9.25	9.25	0.70	81.9	5.18	5.03	0.00	34.9	2.97	2.44	0.30	53.5	5.85	5.47
55	0.1	2	0.00	26.6	0.73	0.30	0.00	4.8	0.64	0.08	0.00	1.6	0.59	0.01	0.00	4.5	0.63	0.07
		4	0.00	23.7	0.59	0.31	0.00	8.8	0.41	0.07	0.00	0.8	0.34	-0.03	0.00	0.8	0.40	0.03
		9	0.00	44.9	1.26	0.81	0.00	24.5	0.94	0.32	0.00	2.8	0.92	0.12	0.00	3.6	0.85	0.06
		15	0.00	44.8	1.32	0.77	0.00	22.1	0.91	0.14	0.00	4.4	0.84	-0.11	0.00	1.6	0.86	-0.12
		20	0.00	49.5	1.23	0.82	0.00	18.5	0.88	0.21	0.00	9.7	0.93	0.19	0.00	2.9	0.89	0.10
	0.3	2	0.15	57.6	1.05	0.80	0.00	34.8	0.80	0.42	0.00	22.8	0.84	0.39	0.00	5.4	0.57	0.02
		4	0.00	44.4	0.81	0.60	0.00	43.9	0.65	0.44	0.00	20.3	0.52	0.23	0.00	9.7	0.41	0.08
		9	0.00	66.3	1.65	1.37	0.00	25.7	1.10	0.49	0.00	37.6	1.20	0.69	0.00	2.8	0.84	0.04
		15	0.15	56.8	1.68	1.25	0.00	26.9	1.29	0.56	0.00	38.6	1.27	0.66	0.00	3.6	0.90	-0.06
		20	0.25	57.3	1.89	1.54	0.00	19.4	1.16	0.50	0.00	20.8	1.18	0.53	0.00	11.3	1.05	0.32
	0.5	2	0.15	61.5	1.30	1.07	0.00	49.0	1.14	0.84	0.00	33.0	1.17	0.78	0.00	28.9	0.99	0.57
		4	0.15	68.5	1.82	1.70	0.00	63.9	1.31	1.18	0.00	32.0	1.07	0.82	0.00	57.4	2.17	2.01
		9	0.45	72.1	3.51	3.28	0.00	62.4	2.09	1.78	0.00	50.9	1.92	1.52	0.00	60.8	2.87	2.55
		15	0.20	75.8	1.93	1.69	0.20	57.2	2.14	1.71	0.00	46.8	2.03	1.50	0.00	43.0	2.79	2.22
		20	0.40	36.3	3.54	3.02	0.00	22.2	1.71	1.07	0.00	18.2	2.57	1.90	0.00	44.0	3.30	2.84
	1	2	0.00	91.1	2.56	2.51	0.00	67.7	1.97	1.78	0.00	48.8	2.41	2.11	0.00	98.8	3.31	3.30
		4	0.10	97.7	3.41	3.40	0.15	67.9	2.06	1.94	0.00	64.3	2.14	2.01	0.30	76.8	3.54	3.45
		9	1.40	100.0	8.40	8.40	1.40	89.6	5.99	5.90	0.40	79.2	4.34	4.17	0.00	91.4	4.78	4.71
		15	3.00	100.0	24.78	24.78	3.00	100.0	15.23	15.23	0.00	64.6	5.25	4.90	0.50	66.0	8.19	7.85
		20	3.00	100.0	32.06	32.06	2.50	90.2	11.67	11.59	0.90	100.0	8.05	8.05	1.00	60.3	8.32	7.99
60	0	2	0.00	11.8	0.64	0.12	0.00	0.4	0.60	0.02	0.00	0.1	0.58	0.00	0.00	0.9	0.58	0.00
		4	0.00	18.9	0.45	0.15	0.00	1.3	0.37	0.01	0.00	0.2	0.37	0.00	0.00	0.1	0.39	0.02
		9	0.00	9.6	0.85	0.11	0.00	4.3	0.87	0.08	0.00	0.3	0.79	-0.03	0.00	0.1	0.89	0.07
		15	0.00	3.0	1.01	0.05	0.00	0.6	0.89	-0.10	0.00	0.4	0.87	-0.12	0.00	0.3	0.87	-0.12
		20	0.00	5.8	0.95	0.18	0.00	2.5	0.83	0.03	0.00	0.4	0.84	0.03	0.00	2.5	0.88	0.08
	0.1	2	0.00	25.1	0.66	0.22	0.00	1.8	0.59	0.02	0.00	1.1	0.58	0.00	0.00	5.9	0.59	0.04
		4	0.00	29.6	0.46	0.20	0.00	1.9	0.36	0.00	0.00	2.6	0.40	0.04	0.00	2.7	0.38	0.02
		9	0.00	42.3	1.14	0.67	0.00	11.1	0.86	0.13	0.00	1.0	0.77	-0.04	0.00	0.9	0.83	0.01
		15	0.00	34.5	1.29	0.64	0.00	4.3	1.09	0.14	0.00	2.2	1.12	0.15	0.00	1.6	0.99	0.01
		20	0.00	40.6	0.90	0.41	0.00	2.7	0.49	-0.31	0.00	2.2	0.52	-0.28	0.00	1.4	0.53	-0.28
	0.3	2	0.00	54.0	0.96	0.69	0.00	37.1	0.67	0.30	0.00	12.0	0.66	0.15	0.00	4.0	0.59	0.03
		4	0.00	55.9	1.68	1.52	0.00	21.3	0.44	0.15	0.00	1.8	0.31	-0.05	0.00	10.6	0.43	0.10
		9	0.00	49.4	1.34	0.92	0.00	32.1	1.09	0.53	0.00	5.1	0.98	0.20	0.00	35.4	1.16	0.63
		15	0.00	46.1	1.77	1.23	0.00	22.6	1.75	0.98	0.00	32.7	1.60	0.93	0.00	17.7	1.38	0.56
		20	0.00	53.4	1.20	0.82	0.00	15.3	0.88	0.19	0.00	28.9	0.95	0.37	0.00	43.5	1.11	0.65
	0.5	2	0.00	63.4	1.27	1.06	0.00	28.5	0.93	0.51	0.00	27.3	0.88	0.45	0.00	14.1	0.84	0.34
		4	0.00	71.7	1.29	1.19	0.00	29.8	0.66	0.40	0.00	41.9	0.87	0.66	0.00	28.6	0.68	0.42
		9	0.00	68.5	1.79	1.53	0.00	55.6	1.48	1.11	0.00	74.5	2.47	2.26	0.00	53.7	1.98	1.60
		15	0.20	68.2	1.85	1.53	0.15	55.3	1.61	1.17	0.00	36.4	2.26	1.63	0.00	39.1	2.92	2.31
		20	0.40	59.9	4.34	4.01	0.50	40.1	1.84	1.35	0.00	40.6	3.30	2.81	0.00	42.8	3.92	3.45
65	0	2	0.00	7.4	0.66	0.12	0.00	1.8	0.58	0.01	0.00	3.4	0.61	0.04	0.00	2.0	0.58	0.01
		4	0.00	1.0	0.39	0.02	0.00	0.0	0.43	0.06	0.00	0.0	0.30	-0.07	0.00	0.0	0.40	0.03
		9	0.00	11.1	0.91	0.18	0.00	0.1	0.79	-0.03	0.00	0.2	0.80	-0.02	0.00	0.1	0.88	0.06
		15	0.00	11.1	1.06	0.18	0.00	4.0	0.97	0.02	0.00	0.4	0.93	-0.06	0.00	0.3	0.97	-0.02
		20	0.00	17.9	1.11	0.44	0.00	5.4	0.91	0.14	0.00	1.4	0.93	0.12	0.00	0.8	0.94	0.13
	0.1	2	0.00	23.3	0.87	0.42	0.00	0.4	0.63	0.05	0.00	0.5	0.58	0.00	0.00	0.8	0.56	-0.02
		4	0.00	16.0	0.51	0.20	0.00	0.6	0.38	0.01	0.00	0.3	0.35	-0.02	0.00	0.3	0.35	-0.02
		9	0.00	24.6	1.03	0.41	0.00	8.8	0.88	0.13	0.00	0.5	0.83	0.01	0.00	1.1	0.83	0.02
		15	0.10	36.3	1.89	1.26	0.00	6.9	1.29	0.36	0.00	0.9	1.26	0.28	0.00	1.7	1.28	0.30
		20	0.00	27.9	1.12	0.53	0.00	16.1	1.05	0.36	0.00	2.1	0.99	0.19	0.00	2.9	0.96	0.17
	0.3	2	0.00	46.3	0.97	0.66	0.00	12.2	0.66	0.15	0.00	6.2	0.63	0.08	0.00	9.7	0.64	0.11
		4	0.00	31.9	1.07	0.82	0.00	22.1	0.63	0.34	0.00	21.9	0.73	0.44	0.00	3.8	0.40	0.04
		9	0.00	45.3	1.34	0.89	0.00	21.4	1.11	0.46	0.00	34.7	1.58	1.04	0.00	23.4	1.26	0.63
		15	0.00	33.4	1.77	1.11	0.15	39.0	1.72	1.11	0.00	46.1	2.08	1.54	0.00	23.1	1.87	1.11
		20	0.00	37.0	1.25	0.73	0.00	48.4	1.61	1.19	0.00	43.9	1.83	1

図3 屋外暴露期間 20 年のコンクリート中の塩化物イオン量

しかし、後述する図 6 の中でみられるように、鉄筋腐食に対する影響は、ほとんどなかった。

図 3 に、屋外暴露期間 20 年におけるコンクリート中の塩化物イオン量を示す。表層部は、中性化による移動あるいは雨水等の影響での流出により小さい値を示すが、鉄筋が存在するかぶり厚さ 15mm より深い部分については、塩分量レベル 0 から 0.5% の範囲では、概ね添加塩化物イオン量に近い値を示している。塩分量のレベル 1.0% については、混入塩化物イオン量より小さい値を示すが、この理由については、別途検討することとする。

4. 考察

4.1 補正質量減少率に影響するひび割れ幅

コンクリートにひび割れが発生すると、鉄筋の腐食は急激に進行することが指摘されている。そこで、かぶり厚さ別にひび割れ幅と補正質量減少率の関係を調べた。その結果は図 4 に示すとおりである。ひび割れが発生していない場合の補正質量減少率の最大値は、かぶり厚さ 15mm では 2.55%、かぶり厚さ 20mm では 2.69%、かぶり厚さ 30mm では 4.90%、かぶり厚さ 40mm では 4.71% であり、かぶり厚さが大きくなるに伴い、補正質量減少率の最大値は大きくなっている。このことから、かぶり厚さ 30mm および 40mm の場合、かぶり厚さ 15mm および 20mm よりも、ひび割れが生じた時点での鉄筋の腐食がかなり進行しているものが多いと考えられる。また、かぶり厚さ 15mm および 20mm では、ひび割れ幅が 0.5mm を超えると補正質量減少率が 5% 以上になるものが多いが、かぶり厚さ 30mm および 40mm では、ひび割れ幅が 0.3mm を超えると補正質量減少率が 5% 以上になるものがある。このことから、ひび割れ発生後も、鉄筋のかぶり厚さにより鉄筋の腐食の度合いが異なることがわかる。

図4 各かぶり厚さ別のひび割れ幅と補正質量減少率の関係

ひび割れ幅が 0.2mm までの補正質量減少率は、ひび割れなしのものより小さい値を示しているものが多くある。既報⁷⁸⁾では、ひび割れ幅が 0.1mm 以上となると鉄筋の質量が非常に大きくなっていることから、0.1mm 以上の鉄筋の質量減少率を腐食速度の評価の際に除外している。しかし、本実験での結果からは、ひび割れ幅 0.2mm までは、鉄筋の補正質量減少率が大きいものは比較的少ない。「コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針」⁹⁾によれば、コンクリート中の鋼材腐食に及ぼすひび割れ幅の部材性能への影響に関しては、ひび割れ幅 0.2mm 以下では影響が小さいとしている。これらのことを考慮して、ここでは、外部から塩化物イオンの侵入がない条件での屋外暴露試験におけるコンクリート中の鉄筋腐食速度を補

正質量減少率で評価する場合、ひび割れ幅 0.2mm以下を対象とすることとし、以後、考察することとした。

4.2 腐食傾向定数と暴露開始までの期間

一般に、コンクリート中の鉄筋の腐食速度係数の指標としては発錆面積率と質量減少率が挙げられるが、既報⁹⁾において、質量減少率を指標とすることが適当であるとして用いており、ここでも、補正質量減少率を用いて鉄筋腐食速度を解析し、評価することとした。また、補正質量減少率がマイナスの値のものも、発錆が認められていることを考慮して0とした。暴露期間と質量減少率を用いた腐食速度係数については、他の多くの研究⁹⁾¹⁰⁾および既報⁹⁾の屋外暴露期間9年までの結果において、直線関係として解析を行っているが、本実験での暴露期間15年および20年でのデータを加えてみたところ、全体として、暴露期間9年までは、暴露期間の経過に伴い補正質量減少率は直線的に増加する傾向であるが、それ以降は増加の割合が小さくなっており、傾向が異なっている。また、鉄筋の腐食は、屋外暴露試験開始までの前養生および中性化促進試験を実施している期間に進行していることが考えられる。そこで、補正質量減少率 Δw と屋外暴露期間 t に試験体製作後の屋外暴露開始までの期間 t_0 を加えた、いわゆる等価な暴露期間の関係を最小二乗法により、式(3)で近似し、腐食傾向定数 b を求めることとした。なお、屋外暴露開始までの期間 t_0 は既報⁷⁾の促進試験では2/12年(2ヵ月)としており、実際に暴露試験を開始したのが試験体製作後9/12年(9ヵ月)であるので、それぞれについて検討した。

$$\Delta w = q'(t + t_0)^b \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 Δw ：補正質量減少率(%)

q' ：腐食速度係数(%/年^{1/b})

t ：屋外暴露期間(年)

t_0 ：試験体製作後、屋外暴露開始までの期間(年)

b ：腐食傾向定数

図5には、 $t_0=2/12$ 年(2ヵ月)として、得られた腐食傾向定数 b を、水セメント比ごと、かぶり厚さごとおよび塩分量のレベルごとのそれぞれの値と中央値を示す。いずれもばらつきはあるが、それぞれ中央値は、概ね0.5となっている。また、 $t_0=9/12$ 年(9ヵ月)についても、それぞれの中央値は0.5に近い値であった。すなわち、補正質量減少率は、等価な暴露期間($t + t_0$)の平方根に比例すると考えられる。

鉄筋の腐食が酸素と水分の供給量に比例するとすれば、鉄筋位置に拡散してくる酸素の蓄積量は時間に比例するため、腐食量も時間に

比例することになるが、今回の結果からは、時間に比例していない。この傾向と類似の傾向を示す研究¹⁰⁾¹¹⁾もあり、腐食量は必ずしも経過年数に比例し直線的に増加するわけではないと考えられる。

この理由として、鉄筋腐食に伴い、鉄筋表面に生成される錆層の影響が考えられる。鉄筋腐食が進行すると錆層ができ、健全な鉄筋表面へ酸素あるいは水が接触するためには、錆の層を通過することから腐食速度が変化すると考えられる。その場合の錆の層の影響による腐食速度の変化は、コンクリートの中性化進行での状況と同様であると考えられる。

次に、腐食傾向定数 $b=0.5$ として、式(4)を用いて最小二乗法により、 t_0 を求めることとした。

$$\Delta w = q(t + t_0)^{0.5} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 Δw ：補正質量減少率(%)

q ：腐食速度係数(%/√年)

t ：暴露期間(年)

t_0 ：試験体製作後、屋外暴露開始までの期間(年)

その結果、 t_0 は、ばらつきが非常に大きく、負の値や最長期間の9/12年(9ヵ月)より大きな値を示すものが見られた。そこで、負の値は0とし、最長期間の9/12年(9ヵ月)より大きな値は、9/12年(9ヵ月)として、 t_0 の平均値および中央値をみると、平均値は3.7/12年(3.7ヵ月)、中央値は3.2/12年(3.2ヵ月)であった。ここでは、鉄筋腐食開始から屋外暴露開始までの期間 t_0 を前述の中央値の3.2/12年(3.2ヵ月)とすることとした。これは、促進中性化期間および恒温恒湿室に保存した期間の9ヵ月が、大略、屋外暴露期間3.2/12年(3.2ヵ月)に相当するとしたことを意味している。

4.3 屋外暴露期間と補正質量減少率の関係

図6には、屋外暴露期間と補正質量減少率の関係と鉄筋腐食開始から屋外暴露開始までの期間 t_0 を3.2/12年(3.2ヵ月)、腐食傾向定数0.5として、最小二乗法で回帰した曲線を示す。図中では、ひび割れ幅0.2mm以下と0.2mmを超える場合とを区別して示した。いずれの暴露期間においても、塩分量のレベルが高いほど、補正質量減少率は大きな値を示している。表6に各条件ごとの腐食速度係数 q の算定結果を、図7には回帰より得られた腐食速度係数とかぶり厚さの関係を示す。腐食速度係数は、塩分量のレベルが0から0.3%の範囲では、かぶり厚さが大きくなるに伴って小さくなる傾向にある。一方、塩分量のレベルが0.5%以上では、かぶり厚さ15mmにおける腐食速度係数と、かぶり厚さが40mmの場合とほぼ同程度の値を示している。この理由としては、塩分量のレベル0.5%以上

図5 各種要因と腐食傾向定数 b の関係($t_0=2$ ヵ月の場合)

図6 屋外暴露期間と鉄筋の補正質量減少率の関係

で、かぶり厚さが40mmの場合、ひび割れが発生しにくく、補正質量減少率の値の大きいものが腐食速度係数の解析に反映されているが、かぶり厚さ20mm以下の場合、早い時期にひび割れが発生し、その時期の特定が困難であり、質量減少率の値が比較的小さいものの値が腐食速度係数の解析に反映されたため、ばらつきがあることが考えられる。

4.4 腐食速度係数推定式

腐食速度係数は、一般に、かぶり厚さが大きくなるに伴い減少する傾向にある。そこで、図7に示す腐食速度係数 q とかぶり厚さ C の関係を、式(5)で最小二乗法により近似し、係数 β を求めた。その結果を表7に示す。

表 6 各条件ごとの腐食速度係数の算定結果(%/√年)

水セメン ト比 (%)	かぶり厚 さ (mm)	塩分量のレベル (%)				
		0	0.1	0.3	0.5	1.0
50	15	-	0.090	0.249	0.434	1.119
	20	-	0.034	0.062	0.248	0.805
	30	-	0.040	0.041	0.216	0.689
	40	-	0.035	0.019	0.300	1.227
55	15	-	0.199	0.357	0.537	1.645
	20	-	0.053	0.146	0.402	1.019
	30	-	0.025	0.158	0.426	1.211
	40	-	0.016	0.035	0.666	1.670
60	15	0.035	0.139	0.301	0.468	-
	20	0.009	0.020	0.137	0.307	-
	30	0.005	0.015	0.119	0.543	-
	40	0.013	0.005	0.141	0.599	-
65	15	0.067	0.187	0.253	0.735	-
	20	0.016	0.069	0.234	0.694	-
	30	0.014	0.039	0.319	0.679	-
	40	0.017	0.039	0.245	0.739	-

図 7 腐食速度係数とかぶり厚さの関係

$$q = \alpha \cdot C^{\beta} \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここで、 q : 腐食速度係数(%/√年)

C : かぶり厚さ(mm)

α 、 β : 係数

係数 β の値が負でないものについては、腐食速度係数がかぶり厚さの増大に伴う減少が見られないことから、0 として平均値を求めている。係数 β の平均値は、塩分量のレベルが 0% の場合、かぶり厚さの約 1.9 乗に、塩分量レベルが 0.3% の場合、約 0.8 乗に、塩分量のレベルが 0.3% の場合、約 0.6 乗に、塩分量のレベルが 0.5% の場合、約 0.2 乗に反比例している。また、塩分量のレベルが 1.0% の場合には、0 となり、かぶり厚さが 15~40mm の範囲では腐食速度係数に与える影響が少ないといえる。一方、水セメント比と係数 β との関係は一定の傾向がみられない。

図 8 には、かぶり厚さと C^{β} の関係を示す。塩分量のレベルが大きくなるに伴い、腐食速度係数に及ぼすかぶり厚さの影響は小さくなる傾向になっている。

表 7 係数 β の値

水セメン ト比 (%)	塩分量のレベル (%)				
	0	0.1	0.3	0.5	1.0
50	—	-0.66	-0.89	-0.47	(0.07)
55	—	-1.11	-0.74	-0.14	(0.09)
60	-1.97	-0.67	-0.60	0	—
65	-1.82	-0.81	-0.30	-0.10	—
平均値	-1.90	-0.81	-0.63	-0.18	0

図 8 かぶり厚さと C^{β} の関係

腐食速度とかぶり厚さの関係について、森永³⁾の暴露試験では、腐食速度はかぶり厚さの 2 乗に反比例するとしており、松林ら⁷⁾の促進試験では、腐食速度はかぶり厚さの平方根に反比例するとしている。腐食速度が鉄筋の位置に達する酸素の量に比例するとすれば、理論的にかぶり厚さに反比例することになるが、本実験での係数 β の値からみると、腐食速度に及ぼすかぶり厚さの影響は、塩分量のレベルにより異なり、塩分量が少ない場合は森永式に、多い場合は松林式に近づき、更に多い場合は、かぶり厚さの影響がかぶり厚さ 40mm 以内の範囲でなくなるといえる。

表 8 には、塩分量のレベルごとの係数 β の平均値を用いて、式 (5) によって求めた係数 α の値を示す。係数 α は、概ね水セメント比が大きくなるに伴い大きくなる傾向にある。なお、水セメント比 55% と 60% とで値が逆転しているが、これは、当初の試験体作製時の誤差であったと考えている。

表 8 係数 α の値

水セメン ト比 (%)	塩分量のレベル (%)				
	0	0.1	0.3	0.5	1.0
50	—	0.62	0.70	0.57	0.96
55	—	1.06	1.25	0.95	1.39
60	5.27	0.66	1.19	0.89	—
65	9.90	1.13	1.65	1.34	—

係数 α と水セメント比の関係を最小二乗法により直線近似して求めた式を、式 (5) に代入すると腐食速度係数の推定式は、式 (6) から (10) で表すことができる。

塩分量のレベル 0%

(添加塩化物イオン量 0 kg/m³)

$$q = 1/C^{1.9} (0.927 \text{ W/C} - 50.3) \\ = 0.927/C^{1.9} (\text{W/C} - 54.3) \quad \dots\dots\dots(6)$$

塩分量のレベル 0.1%

(添加塩化物イオン量 0.45~0.52 kg/m³)

$$\begin{aligned} q &= 1/C^{0.8} \quad (0.023 \text{ W/C} - 0.43) \\ &= 0.023/C^{0.8} \quad (\text{W/C} - 18.7) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(7)$$

塩分量のレベル 0.3%

(添加塩化物イオン量 1.36~1.55 kg/m³)

$$\begin{aligned} q &= 1/C^{0.6} \quad (0.056 \text{ W/C} - 2.00) \\ &= 0.056/C^{0.6} \quad (\text{W/C} - 35.7) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(8)$$

塩分量のレベル 0.5%

(添加塩化物イオン量 2.27~2.58 kg/m³)

$$\begin{aligned} q &= 1/C^{0.2} \quad (0.045 \text{ W/C} - 1.55) \\ &= 0.045/C^{0.2} \quad (\text{W/C} - 34.4) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(9)$$

塩分量のレベル 1.0%

(添加塩化物イオン量 4.54~4.68 kg/m³)

$$\begin{aligned} q &= 1/C^0 \quad (0.085 \text{ W/C} - 3.30) \\ &= 0.085/C^0 \quad (\text{W/C} - 38.8) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(10)$$

ここで、 q : 腐食速度係数(%/√年)

C : かぶり厚さ(mm)

W/C : 水セメント比 (%)

これらの式をみると、塩分量のレベルが 0%のときは、水セメント比が 54.0%程度以下で、塩分量のレベル 0.3~1.0%のときは、水セメント比が 35.0%程度以下で腐食速度係数は 0 となる。

図 8 には、式 (6) から (10) を用いて計算した腐食速度係数の推定値と実験値の関係を示すが、塩分量のレベル 0.3%までは比較的良好に近似されているが、塩分量のレベル 0.5 および 1.0 では、ばらつきが大きくなっていることがわかる。

図 9 腐食速度係数の推定値と実験値の関係

5. 結 論

本実験は、水セメント比を 50~65%、塩分量のレベルを NaCl/砂質量比で 0~1.0% (添加塩化物イオン量 0~4.68 kg/m³) のコンクリート中に、かぶり厚さを 15~40mm で鉄筋を埋め込んだ試験体を用いて、20 年間屋外暴露実験を行い、ひび割れ幅 0.2mm 以下の鉄筋の補正質量減少率を用いて鉄筋腐食速度を評価したものである。本実験の範囲では、以下のようにまとめられる。

- (1) ひび割れが発生していない場合の補正質量減少率の最大値は、かぶり厚さが大きくなるに伴い、大きくなる傾向にある。
- (2) 鉄筋の補正質量減少率は、既報⁹⁾の屋外暴露期間 9 年までの場

合には暴露期間の増加に伴い直線的に増加する傾向にあったが、暴露期間 15 年および 20 年までの結果を加えると屋外暴露期間の平方根に比例する傾向にある。

- (3) 鉄筋腐食速度係数は、塩分量のレベル 0~0.3% では、かぶり厚さが大きくなるに伴い、小さくなる傾向にある。
- (4) 添加した塩分量のレベルが 0.5% および 1.0% では、かぶり厚さ 15mm における腐食速度係数は、かぶり厚さ 40mm ものとはほぼ同程度の値を示している。
- (5) 鉄筋腐食速度係数に及ぼすかぶり厚さの影響は、塩分量のレベルにより異なる。
- (6) 水セメント比を 50~65%、塩分量のレベルを NaCl/砂質量比で 0~1.0% (添加塩化物イオン量 0~4.68 kg/m³) の範囲での屋外暴露における鉄筋の腐食速度係数は、式 (6) から (10) で表される。

参考文献

- 1) 李 榮蘭, 梶田佳寛, 掛川 勝: 塩化物を含んだコンクリート中の鉄筋腐食に及ぼす各種要因の影響その 1 実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1 材料施工, pp. 1287-1288, 2010. 8
- 2) 掛川 勝, 梶田佳寛, 李 榮蘭: 塩化物を含んだコンクリート中の鉄筋腐食に及ぼす各種要因の影響 その 2 解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1 材料施工, pp. 1289-1290, 2010. 8
- 3) 森永 繁: 鉄筋の腐食速度に基づいた鉄筋コンクリート建築物の寿命予測に関する研究, 東京大学学位請求論文, 1986. 11
- 4) コンクリート専門委員会報告 F-33 : 海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究, セメント協会, 1981. 3
- 5) 友沢史紀, 梶田佳寛, 阿部道彦, 田中斉, 安田正雪他: 鉄筋コンクリート建築物の塩害実態調査, 建築研究報告, No. 118, 1981. 11
- 6) 建設省総合技術開発プロジェクト報告書: コンクリートの耐久性向上技術の開発, 建設省, 1988. 11
- 7) 梶田佳寛, 花榮 浩, 松林裕二, 原謙治, 安田正雪: 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, 第 435 号, pp. 19-27, 1992. 5
- 8) 松林裕二, 梶田佳寛, 笹渕優樹: 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屋外暴露実験, 日本建築学会構造系論文集, 第 536 号, pp. 9-15, 2000. 10
- 9) 社団法人日本コンクリート工学協会: コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針 - 2009 -, 2009. 3
- 10) 岩田亮, Qi Lukuan, 関 博: 中性化したコンクリート中における鉄筋腐食機構の電気化学的考察, コンクリート工学年次論文集 Vol. 22, No. 1, pp. 181-186, 2000. 6
- 11) 西村眞治他 3 名: 長期暴露試験体の鉄筋質量減少率に基づく断面修復工の補修効果の評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 75 巻, 第 655 号, pp. 1601-1608, 2010. 9

(2011 年 6 月 8 日原稿受理, 2011 年 10 月 25 日採用決定)