コンクリート中の鉄筋腐食速度に及ぼす温度および中性化の影響 に関する腐食促進実験

INFLUENCE OF TEMPERATURE AND CARBONATION OF CONCRETE ON RATE OF CORROSION OF REINFORCING BAR IN CONCRETE CONTAINING CHLORIDE ION

掛川 勝^{*1}, 梶田佳寛^{*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 accelerated test (20°C, 40°C, 60°C and 80°C, moist condition) 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 (10, 30mm). It is concluded as follows, The corrosion loss of reinforcing bar in accelerated test increases in proportion to square root of test period. Rate of corrosion of reinforcing bar in carbonated concrete containing sodium chloride is larger than the rate of corrosion of reinforcing bar in un-carbonated concrete containing sodium chloride. The estimation equation of the rate of corrosion of reinforcing bar in concrete are proposed by sodium chloride content and water-cement ratio.

Keywords : *accelerated test, rate of corrosion, corrosion loss, sodium chloride content, water-cement ratio, carbonation*
促進試験, 腐食速度, 質量減少, 塩分量, 水セメント比, 中性化

1. はじめに

コンクリート中の鉄筋腐食速度に及ぼす中性化の進行度、塩化物イオン量、水セメント比、かぶり厚さ、温度などの影響を把握することは、鉄筋コンクリート造建築物の長寿命化において耐用年数を評価するために重要なことである。コンクリート中の鉄筋腐食速度に及ぼす中性化、塩化物イオン量および温度のそれぞれの影響については、多くの研究が行われ、かなり明らかにされてきている^{1)~3)}。

屋外環境での塩化物イオンを含むコンクリート中の鉄筋腐食速度に関しては、屋外暴露期間9年までの結果から、腐食した鉄筋の質量減少率を暴露試験期間に比例する一次関数で表わし、そこから求めた鉄筋の腐食速度をコンクリートのかぶり厚さ、水セメント比、塩化物イオン量の関数として表した式が報告されている⁴⁾。また、筆者らは、その後に継続実施された屋外暴露期間20年までの結果を加えると、鉄筋の質量減少率は、暴露期間(試験期間)の一次関数ではなく、時間とともに腐食速度が低下する傾向がみられたので、平方根に比例する $\sqrt{t}$ 則に従うこととし、そこから求めた腐食速度をコンクリートのかぶり厚さ、水セメント比の関数として表した式を報告した⁵⁾。なお、その際、腐食鉄筋の錆の除去の際に考慮され

る不動態皮膜(以下、黒皮)の質量は、測定期間ごとに補正を行った。

塩化物イオンを含むコンクリートが中性化すると中性化の進行に伴い、塩化物イオンが移動することが知られている⁶⁾。この現象を考慮して、コンクリートの中性化が塩化物イオンを含むコンクリート中の鉄筋の腐食量や腐食速度に及ぼす影響についての研究は、少なく^{7)~9)}、まだ、十分に明らかではない。

筆者らは、塩化物イオンを含むコンクリート中の鉄筋腐食速度に及ぼす中性化の影響を、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を用いて、促進中性化をしたものとししないものを、促進試験温度20および60°Cの高湿条件で12ヵ月間腐食促進試験を行い、腐食した鉄筋の質量減少率を促進試験期間に比例する一次関数で表わし、そこから求めた鉄筋の腐食速度を用いて評価した⁹⁾。

本報告では、既報⁹⁾の12ヵ月間の腐食促進試験以降、継続して実施してきた24ヵ月までの腐食促進試験の鉄筋の腐食量を含めて、既報⁹⁾の長期屋外暴露実験と同様の方法で鉄筋の質量減少率の補正を行い、腐食速度を求め、コンクリートの中性化やかぶり厚さ、水セメント比およびコンクリート中の塩化物イオン量が鉄筋の腐食速度に及ぼす影響を評価するものである。

本報告は、参考文献9)に、データを追加し、再度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.

2. 実験方法

2. 1 実験計画

(1) 鉄筋腐食要因

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¹⁰⁾におけるほぼ最大の塩分量を想定した。また、水セメント比およびかぶり厚さは、一般に建築物で用いられている範囲を対象とした。

(2) 実験手順⁹⁾

実験の手順を、図1に示す。図2に示す試験体を材齢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.の恒温恒湿室で静置し、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、促進中性化を行わないものは、温度20℃、湿度60% R.H.の恒温恒湿室で静置し、促進中性化を行うものは、温度30℃、湿度60% R.H.、CO₂濃度5%の促進槽に静置した。促進中性化は、かぶり厚さ30mmの鉄筋位置まですることを目標とした。表3には腐食促進試験開始時の中性化深さを示す。材齢約30ヵ月での中性化深さは、恒温恒湿室に静置したものは、いずれも10mm以下であった。また、促進中性化を行ったものは、水セメント比60および65%では30mmを超えていたが、水セメント比50および55%のものは、10mmを超えているが30mmには達しなかった。また、図3には、促進試験前の塩化物イオン量（全塩分）の分布を示すが、恒温恒湿室に静置したものの塩化物イオン量は、それほど変化はみられなかったが、促進中性化したものは、既往の文献⁹⁾の通り、塩化物イオンの移動がみられ、中性化深さの位置に近いところで、塩化物イオン量は小さくなり、それより深いところで大きくなる傾向であった。

腐食促進試験は、材齢約30ヵ月からステンレス製の容器中に試験体を入れ、それに接しない程度に水をはり、裏にゴムを貼った蓋を万力で締めつけて密閉し、容器ごと各温度の恒温槽に入れ、容器の中が水蒸気で充満するような条件をつくって行った。

鉄筋腐食の評価は、それぞれ1体ずつ試験体を解体して行った。

2. 2 使用材料およびコンクリートの品質

(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、φ13mmの丸鋼を用いた。鉄筋は酸化皮膜（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）
- ⑤ 混和剤：AE剤（レジン系）

⑥ 塩分量調整試薬：NaCl（一級試薬）

表4にコンクリートの調合と品質を示す。なお、表4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。なお、コンクリートの材料から供給される塩化物イオン量を計算すると、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となる。

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)	10, 30
促進中性化	無, 有
促進試験条件	温度20、40、60、80℃, 高湿条件

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
50	—	◇■△	◇△●	◇■△	◇△●
55	—	◇△	◇△	◇△	◇△
60	◇△●	◇■△	◇△●	◇■△	—
65	◇△	◇△	◇△	◇△	—

促進試験温度：◇；20℃、■；40℃、△；60℃、●；80℃

図1 実験の手順

図2 試験体の形状・寸法

単位：mm

表3 腐食試験開始時の中性化深さ

水セメント比 (%)	中性化深さ (mm)	
	恒温恒湿室	促進中性化
50	3±2	10±3
55	4±2	17±6
60	3±2	32±5
65	4±1	43±4

図3 促進試験前のコンクリート中の塩化物イオン量

表4 コンクリートの調合と品質									
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

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)鉄筋の腐食減少率

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 W_0 からの減少量を求め、式(1)を用いて質量減少率 $\angle w_0$ 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。

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

ここで、 $\angle w_0$: 質量減少率(%)

W_0 : 最初の鉄筋の質量 (g)

W : 促進試験後に錆落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、健全な鉄筋表面の黒皮が除去される。そのため、既報⁵⁾では、各測定期間の発錆面積率 2%以下と質量減少率の関係から、発錆面積率 2%以下の質量減少率の平均値を除去されたと想定される鉄筋の黒皮の質量百分率 w_s としている。本実験においても同様の方法により求めた表 5 に示す値を想定される鉄筋の黒皮の質量百分率 w_s として、式 (2) で補正質量減少率 $\angle w$ を求めた。なお、促進試験開始時に鉄筋の腐食量を測定していることから、促進試験期間 0 ヶ月では、同じ値となる。また、促進試験温度 60℃、80℃で発錆面積率 2%以下のものがないものは、40℃、60℃の値を用いた。

$$\angle w = \angle w_0 - (w_s \times (100 - s) / 100) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $\angle w$: 補正質量減少率(%)

$\angle w_0$: 質量減少率(%)

w_s : 除去されたと想定される鉄筋の黒皮の質量百分率(%)

s : 発錆面積率(%)

表5 除去されたと想定される鉄筋の黒皮の質量百分率 w_s

促進温度 (℃)		促進試験期間(ヵ月)			
		0	6	12	24
20	w_s	0.48	0.48	0.35	0.41
	標準偏差	0.032	0.013	0.015	0.025
40	w_s	(0.48)	0.47	0.36	0.44
	標準偏差	(0.032)	0	0.013	0.012
60	w_s	(0.48)	(0.47)	0.35	0.44
	標準偏差	(0.032)	0	0.013	0.012
80	w_s	(0.48)	(0.47)	0.40	(0.44)
	標準偏差	(0.032)	0	0.013	(0.012)

(4)コンクリート中の塩化物イオン量

各促進試験期間において、JCI-SC4「硬化コンクリート中に含まれる塩分分析方法」に準じて、鉄筋位置 (10mm、30mm) での塩化物イオンを測定した。

3. 試験結果

3.1 促進試験期間と鉄筋の補正質量減少率

図 4 から図 7 には、促進試験温度別の促進試験期間と補正質量減少率の関係を示す。図中では、促進試験までの養生として、恒温恒湿室内で静置したものを中性化無とし、促進中性化したものを中性化有としている。また、添加した塩分量のレベル 0%のものは、材料から供給される塩化物イオン量を考慮して、塩化物イオン量 0.03kg/m³と表記している。なお、図中の回帰線については、4.2 で述べることとする。

鉄筋の補正質量減少率は塩化物イオン量が多くなるのに伴い、大きくなる傾向にある。なお、塩化物イオン量 0.03 kg/m³で、促進試験温度 20℃、水セメント比 60%および 65%の中性化無のものは腐食がほぼ 0 であるが、促進試験温度が高くなるに伴い、鉄筋の腐食が若干みられ、中性化有のものについても、鉄筋の腐食が確認された。また、促進試験温度 20℃から 60℃までの鉄筋の補正質量減少

図4 促進試験期間と補正質量減少率の関係（促進試験温度 20℃）

図5 促進試験期間と補正質量減少率の関係（促進試験温度 40℃）

図 6 促進試験期間と補正質量減少率の関係（促進試験温度 60℃）

図 7 促進試験期間と補正質量減少率の関係（促進試験温度 80℃）

図8 促進試験期間と塩化物イオン量の関係（促進試験温度 20℃）

率は、促進試験温度が高くなるに伴い、大きくなる傾向にある。しかし、促進試験温度 80℃の補正質量減少率は、促進試験温度 60℃のものよりも小さな値を示している。一般に、鉄鋼の腐食速度と海水温度の関係は、温度上昇と共にほぼ直線的に腐食速度は大きくなるが、80℃以上では溶存酸素量が減少するため小さくなるといわれている¹¹⁾¹²⁾。コンクリート中の鉄筋の腐食には、水と酸素がある一定量必要であることから、促進試験温度 80℃での補正質量減少率が小さい理由としては、溶存酸素量の減少によるものと考えられる。更に、促進試験温度にかかわらず、かぶり 10mm の鉄筋の補正質量減少率は、かぶり厚さ 30mm のものよりも大きくなっている。

3.2 鉄筋位置でのコンクリート中の塩化物イオン量

図 8 に、中性化無と中性化有で水セメント比 50%、促進試験温度 20℃での各促進試験期間の鉄筋位置での塩化物イオン量を示す。

中性化無のものは若干の変化はあるもののほぼ一定の値であるが、中性化有のものは、促進試験期間の経過の伴い、かぶり厚さ 10mm での塩化物イオン量が少なくなるものがあり、かぶり厚さ 30mm では多くなる傾向がみられた。この傾向は、他の試験体でも同様である。

4. 考察

4.1 等価な促進試験期間と腐食速度係数

コンクリート中の鉄筋の腐食速度係数の指標としては、既報⁹⁾と同様に鉄筋腐食に及ぼすひび割れの影響を考慮して、ひび割れ幅 0.1mm 未満を対象に、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。しかし、促進試験開始以降の補正質量減少率がひび割れ幅 0.1mm 以上のものしかない場合には、試験開始後の最初の測定時の補正質量減少率を用いて解析をおこなっている。また、既報⁹⁾と同様に、補正質量減少率がマイナスの値のものは、発錆が認められていることを考慮して 0 とし、補正質量減少率は、試験期間の平方根に比例する $\sqrt{t}$ 則とすることとする。

鉄筋の腐食は、図 9 に示す通り、促進試験開始までの前養生（恒温恒湿室静置、促進中性化）の期間に開始していることが考えられる。既報⁹⁾では、推定腐食開始時から促進試験開始までの期間 t_0 を、促進試験期間 t に加えた、いわゆる等価な促進試験期間 $(t+t_0)$ を用いて、補正質量減少率 $\angle w$ は、等価な促進試験期間の平方根に

図9 等価な促進試験期間と補正質量減少率の関係

表 6 促進試験温度別 t_0 の値

促進試験 温度(℃)		t_0 の値	
		中性化無	中性化有
20	平均値	3.0	2.0
	中央値	1.5	1.5
40	平均値	0.4	1.2
	中央値	0.4	1.2
60	平均値	1.1	1.1
	中央値	0.9	0.9
80	平均値	0.8	1.9
	中央値	0.8	1.7

比例することとし、腐食速度係数との関係を式(3)としている。ここでは、既報⁹⁾と同様に、推定腐食開始時から促進試験開始までの期間 t_0 を、式(3)を用いて、促進試験温度別に、中性化無と中性化有のそれぞれについて求めた。

$$\angle w = q (t+t_0)^{0.5} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $\angle w$: 補正質量減少率(%)

q : 腐食速度係数(%/ $\sqrt{\text{月}}$)

t : 促進試験期間(月)

t_0 : 推定腐食開始時から促進試験開始までの期間(月)

その結果、 t_0 は、いずれもばらつきが非常に大きく、負の値や最長期間の 30 ヶ月より大きな値を示すものが見られた。そこで、負の値と最長期間の 30 ヶ月より大きな値を除いた t_0 を中性化無と中性化有に分けて平均値および中央値を求めると、表 6 の通りとなる。ここでは、推定腐食開始時から促進試験開始までの期間 t_0 に中央値を用いることとした。次に、 t_0 を表 6 に示す中央値として、式(3)を用いて、最小二乗法により腐食速度係数を求めた。腐食速度係数については、4.3 で述べることにする。

4.2 促進試験期間と補正質量減少率の関係の回帰線

図 4 から図 7 に、等価な促進試験期間 $(t+t_0)$ を考慮して、式(3)を用いて、最小二乗法により得られた腐食速度係数を用いて回帰した線を示す。回帰した線は、概ね測定値に近似しており、促進試験温度にかかわらず、概ね塩分量のレベルが高いほど補正質量減少率が大きいことがわかる。

4.3 塩化物イオン量と腐食速度係数の関係

図 10 には、平均塩化物イオン量と 4.1 で求めた腐食速度係数の関係を示す。図中では、図 4 から図 7 と同様に、恒温恒湿室に静置したものを中性化無、促進中性化したものを中性化有と示している。また、3.2 で述べた通り、塩化物イオン量については移動がみられるため、添加塩化物イオン量および各促進試験期間の塩化物イオン

図 10 平均塩化物イオン量と腐食速度係数の関係

量の平均値（以下、平均塩化物イオン量）で示すこととした。なお、水セメント比 50 および 55% のかぶり厚さ 30mm では、促進中性化を行ったものの鉄筋位置までコンクリートが中性化していないため、中性化無となる。このことを考慮して、促進中性化したが、鉄筋まで中性化が達していないかぶり厚さ 30mm、水セメント比 50 および 55% の腐食速度係数を求める際に、鉄筋腐食開始から促進試験開始までの期間 t_0 の値を中性化無のものを使用して算出し、中性化無で得られた腐食速度係数との平均値を示すこととした。

促進試験温度 20°C では、水セメント比が大きいほど、腐食速度係数は大きな値となっているが、平均塩化物イオン量の増加の伴い増加する割合は、水セメント比 50 および 55% のものよりも、水セメ

ント比 60 および 65% の方が小さくなる傾向にある。これは、水セメント比が大きい場合に、初期段階で腐食が進行し鉄筋表面に錆層ができることにより、その後の腐食進行が抑制されたものと考えられる。かぶり厚さ 10mm での腐食速度係数は、平均塩化物イオン量が約 2kg/m^3 以下では、中性化有のものは中性化無のものよりも大きな値を示すが、平均塩化物イオン量が約 2kg/m^3 以上では、ほぼ同程度の値となっている。このことから、塩化物イオン量が少ない場合には、鉄筋腐食速度に及ぼす中性化の影響は大きい、塩化物イオン量が多くなると中性化の影響が小さくなると考えられる。また、かぶり厚さ 10mm の腐食速度係数は、中性化の有無にかかわらず、概ねかぶり厚さ 30mm より大きな値を示している。

表 7 係数 α および β の値

促進試験温度(℃)	水セメント比(%)	中性化無				中性化有			
		かぶり厚さ10mm		かぶり厚さ30mm		かぶり厚さ10mm		かぶり厚さ30mm	
		α	β	α	β	α	β	α	β
20	50	0.030	1.52	0.008	1.88	0.107	0.76	-	-
	55	0.030	1.57	0.029	1.29	0.158	0.54	-	-
	60	0.081	1.07	0.005	1.66	0.233	0.56	0.124	0.25
	65	0.048	0.52	0.015	0.3	0.209	0.62	0.157	0.14
40	50	0.066	1.82	0.030	1.15	0.192	1.02	-	-
	55	-	-	-	-	-	-	-	-
	60	0.044	2.98	0.012	2.82	0.288	0.33	0.199	0.84
	65	-	-	-	-	-	-	-	-
60	50	0.044	1.84	0.039	1.4	0.235	0.28	-	-
	55	0.181	0.69	0.139	0.59	0.278	0.45	-	-
	60	0.249	0.66	0.106	0.87	0.471	0.43	0.287	0.42
	65	0.257	0.5	0.227	0.63	0.458	0.46	0.334	0.40
80	50	0.515	-0.43	0.166	-0.09	0.147	0.57	-	-
	55	-	-	-	-	-	-	-	-
	60	0.185	0.46	0.114	0.58	0.473	1.00	0.119	0.84
	65	-	-	-	-	-	-	-	-
平均値			1.10		1.09		0.59		0.48

促進試験温度 40℃の腐食速度係数は、水準が少ないが概ね、促進試験温度 20℃より大きな値を示している。かぶり厚さ 10mm の水セメント比 60%を除けば、中性化有の腐食速度係数は、中性化無のものよりも大きくなっている。

促進試験温度 60℃の腐食速度係数は、促進試験温度 20 および 40℃のものよりも大きな値を示しており、平均塩化物イオン量および水セメント比と腐食速度係数の関係は、促進試験温度 20℃とほぼ同様の傾向である。

促進試験温度 80℃の腐食速度係数は、水準が少ないが、中性化無で水セメント比 50%のものを除けば、かぶり厚さおよび中性化の有無にかかわらず、塩化物イオン量が多いところでは、促進試験温度 60℃よりも小さな値を示している。この傾向は、3.1 での補正質量減少率および既報¹³⁾と同様の傾向であり、鉄筋腐食に必要な溶存酸素が減少したことによるものと考えられる¹¹⁾¹²⁾。

4.4 腐食速度係数推定式

4.3 に示す通り、腐食速度係数は、概ね平均塩化物イオン量が大きくなるに伴い、大きくなる傾向にある。そこで、腐食速度係数 q と平均塩化物イオン量 Cl の関係を、式(4)で最小二乗法により近似し、係数 α および β を求めた。

$$q = \alpha \cdot Cl^{\beta} \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここで、 q : 腐食速度係数(%/√月)

Cl : 平均塩化物イオン量(kg/m³)

α 、 β : 係数

式(4)で得られた係数 α および β の値を表 7 に示す。

係数 α の値は、中性化の有無にかかわらず、概ね水セメント比の増加に伴い大きくなる傾向にある。

係数 β の値は、中性化無の場合、促進試験温度 20 および 40℃では、概ねかぶり厚さにかかわらず 1.0 から 3.0 であり、促進試験温度 60℃では、0.5 から 1.0 の範囲にある。また、促進試験温度 80℃では、水セメント比 50%ではマイナスであるが、0.4 から 0.6 の範囲にある。中性化有では、促進試験温度 20 から 80℃の範囲では、概ね 1.0 以下となっている。また、かぶり厚さごとの中性化無と中性化有の平均値をみるとほぼ同じ値となっている。このことから、ここでは、中性化無の β の値を 1.1、中性化有の β の値を 0.5 とし、以後の解析を進めることとした。

表 8 係数 β の平均値を用いたときの係数 α の値

促進試験温度(℃)	水セメント比(%)	中性化無		中性化有	
		かぶり厚さ10mm	かぶり厚さ30mm	かぶり厚さ10mm	かぶり厚さ30mm
		α	α	α	α
20	50	0.053	0.010	0.137	-
	55	0.054	0.042	0.163	-
	60	0.079	0.001	0.235	0.115
	65	0.032	0.000	0.212	0.128
40	50	0.116	0.032	0.235	-
	55	-	-	-	-
	60	0.215	0.049	0.265	0.233
	65	-	-	-	-
60	50	0.118	0.057	0.200	-
	55	0.108	0.075	0.268	-
	60	0.186	0.091	0.473	0.278
	65	0.174	0.164	0.458	0.325
80	50	0.075	0.043	0.158	-
	55	-	-	-	-
	60	0.132	0.095	0.398	0.130
	65	-	-	-	-

係数 β の平均値: 中性化無 $\beta=1.1$ 、中性化有 $\beta=0.5$

表 9 腐食速度係数推定式

促進試験温度(℃)	かぶり厚さ	中性化無(未中性化域)	中性化有(中性化域)
20	10mm	$0.054 \cdot Cl^{1.1}$	$0.006[(W/C) \cdot 26.0] \cdot Cl^{0.5}$
	30mm	$0.013 \cdot Cl^{1.1}$	$0.003[(W/C) \cdot 16.7] \cdot Cl^{0.5}$
40	10mm	$0.010[(W/C) \cdot 38.0] \cdot Cl^{1.1}$	$0.003[(W/C) + 28.7] \cdot Cl^{0.5}$
	30mm	$0.017[(W/C) \cdot 31.7] \cdot Cl^{1.1}$	$0.233 \cdot Cl^{0.5}$
60	10mm	$0.005[(W/C) \cdot 27.3] \cdot Cl^{1.1}$	$0.020[(W/C) \cdot 39.6] \cdot Cl^{0.5}$
	30mm	$0.071[(W/C) \cdot 44.3] \cdot Cl^{1.1}$	$0.009[(W/C) \cdot 30.2] \cdot Cl^{0.5}$
80	10mm	$0.006[(W/C) \cdot 36.5] \cdot Cl^{1.1}$	$0.024[(W/C) \cdot 43.4] \cdot Cl^{0.5}$
	30mm	$0.052[(W/C) \cdot 41.9] \cdot Cl^{1.1}$	$0.130 \cdot Cl^{0.5}$

ここで、 W/C : 水セメント比(%), Cl : 平均塩化物イオン量(kg/m³)

表 8 には、係数 β の平均値を用いて、再度解析した係数 α の値を示す。中性化無の係数 α の値は、促進試験温度 20℃のものを除けば、概ね水セメント比が増加するに伴い、大きくなる傾向にある。そこで、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(4)に代入して表すと表 9 のようになる。なお、促進試験温度 20℃の中性化無での係数 α は、水セメント比が大きくなるに伴い小さくなっているため、係数 α の平均値を求め、代入している。また、中性化有の係数 α の値で、促進試験温度 40 および 80℃のかぶり厚さ 30mm のものは、水セメント比 60%のもののみであることから、表 8 の値をそのまま代入している。

図 11 に、実験値と表 9 の腐食速度推定式の計算値の関係を示す。促進試験温度 60℃で、ばらつきがみられるものの、他の温度では、概ね実験値と計算値は近い値となっている。

図 12 には、表 9 の腐食速度推定式を用いた促進試験温度 20℃および 60℃での平均塩化物イオン量と腐食速度係数(計算値)の関係を示す。なお、水セメント比 50 および 55%でかぶり厚さ 30mm では、中性化有のものがいないため、ここでは、10mm のものだけを示している。

かぶり厚さ 10mm においては、促進試験温度にかかわらず、水セメント比 50 および 55%での腐食速度係数は、平均塩化物イオン量が少ない場合、中性化有のものは、中性化無のものより大きな値を示しているが、平均塩化物イオン量が多くなるに伴い、中性化有のものは、中性化無に近い値となる。この理由としては、中性化無では、塩化物イオン量の増加に伴い、鉄筋腐食速度は、一定の割合で増加するが、中性化有では、腐食促進試験前の促進中性化を含む初期段階で、鉄筋が腐食して鉄筋表面に錆層を形成したことによる影

図 11 腐食速度係数の実験値と計算値

響や促進中性化によりコンクリート表層部が緻密化¹⁴⁾したことの影響により、腐食の進行が抑制されることが考えられる。なお、促進試験温度 60℃では、促進試験温度 20℃よりも、平均塩化物イオン量が少ないところで、中性化有の腐食速度係数は、中性化無のものと同程度となっている。

かぶり厚さ 30mm については、前養生で促進中性化を行ったが、水セメント比 50 および 55% で鉄筋位置まで中性化が達していなかったことから、データを得てはいないが、水セメント比 60 および 65% での中性化有の腐食速度係数は、中性化無のものより大きくなる傾向にある。

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 10 および 30mm で鉄筋を埋め込んだ試験体を用いて、鉄筋位置のコンクリートが中性化していない (中性化無) のものと、中性化している (中性化有) のものを、促進試験温度 20、40、60℃および 80℃、高温条件で腐食促進試験を行い、ひび割れ幅 0.1mm 未満の鉄筋の補正質量減少率を用いて鉄筋の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) 腐食促進試験前に促進中性化を行ったものの塩化物イオンは、腐食促進試験期間中でも移動する。
- (2) 鉄筋の補正質量減少率は塩化物イオン量が多くなるのに伴い、大きくなる傾向にある。促進試験温度 20℃から 60℃までの鉄筋の補正質量減少率は、促進試験温度が高くなるに伴い、大きくなる傾向にあるが、促進試験温度 80℃の補正質量減少率は、促進試験温度 60℃のものよりも小さな値を示している。

図 12 平均塩化物イオン量と腐食速度係数 (計算値) の関係

- (3) 促進試験温度にかかわらず、水セメント比 50 および 55% の腐食速度係数は、塩化物イオン量の増加の伴い増大するが、水セメント比 60 および 65% では、増大の割合が小さくなる傾向にある。
- (4) 促進試験温度が 20℃から 60℃の範囲では、中性化の有無にかかわらず、促進試験温度が高くなるに伴い腐食速度係数は大きくなる傾向にあるが、促進試験温度 80℃では、平均塩化物イオン量が多いところでは、60℃のものよりも小さくなっている。

- (5) 促進試験温度 20℃から 80℃における中性化無と中性化有のかぶり厚さ 10 および 30mm の腐食速度係数の推定式は表 9 の通り表すことができる。
- (6) 表 9 の推定式による腐食速度係数（計算値）と平均塩化物イオン量との関係から、塩化物イオンを含むコンクリート中の鉄筋の腐食速度係数は、塩化物イオン量が小さい場合には、コンクリートの中性化が腐食速度係数に及ぼす影響は大きい、塩化物イオン量が多くなるに伴い、中性化の影響は小さくなると考えられる。その傾向は、水セメント比が小さい場合、かぶり厚さが小さい場合、環境温度が高い場合に顕著にみられる。

参考文献

- 1) 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，東京大学学位論文，1986. 11
- 2) 大即信明，丸山真一，西田孝弘，Baccy Melito Alibuyog：中性化したコンクリート部材中の鉄筋の腐食速度に及ぼす温度の影響，材料，Vol. 53, No. 1, pp. 108-113, 2004. 1
- 3) 飯島 亨，工藤輝大，玉井 譲：コンクリート中の鉄筋の腐食速度に及ぼす気温の影響，鉄道総研報告，Vol. 23, No. 6, 2009. 6
- 4) 松林裕二，榊田佳寛，笹淵優樹：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，No. 536, pp. 9-15, 2000. 10
- 5) 掛川 勝，榊田佳寛，松林裕二，鹿毛忠継：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，日本建築学会構造系論文集，第 77 巻，第 672 号，pp. 143-151, 2012. 2
- 6) 小林一輔，白木亮司，河合研至：炭酸化により引き起こされるコンクリート中の塩化物、硫黄化合物およびアルカリ化合物の移動と濃縮，コンクリート工学論文集，Vol. 1, No. 2, pp. 69-82, 1990
- 7) 岸谷孝一，小林一輔，樫野紀元，宇野祐一：塩化物を含むコンクリート中における鉄筋腐食と中性化の関係，コンクリート工学論文集，Vol. 2, No. 2, pp. 69-82, 1991. 1
- 8) 鳥取誠一，宮川豊章：中性化と初期塩化物イオンの複合的影響を受ける場合の鉄筋腐食速度に関する劣化予測，土木学会論文集，No. 802, V-69, pp. 181-196, 2005. 11
- 9) 榊田佳寛，掛川 勝，花榮 浩：コンクリート中の鉄筋腐食速度におよぼす各種要因の影響に関する実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 14, No. 1, pp. 781-786, 1992. 5
- 10) 友沢史紀，榊田佳寛，阿部道彦，田中斉，安田正雪他：鉄筋コンクリート造建築物の塩害実態調査，建築研究報告，No. 118, 1981. 11
- 11) 化学第辞典 9，共立出版，p. 458, 1989. 8
- 12) 防食技術便覧，日刊工業新聞社，pp. 201-202, 1986. 11
- 13) 榊田佳寛，安田正雪，花榮 浩，松林裕二：塩分環境下におけるコンクリート中の鉄筋腐食速度に関する一実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 12, No. 1, pp. 441-446, 1990. 5
- 14) 佐伯竜彦，米山紘一，長滝重義：中性化によるモルタルの強度変化，土木学会論文集，No. 451, V-17, pp. 69-78, 1992 年 8 月

(2012年 4 月 9 日原稿受理，2012年 8 月27日採用決定)