

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 31 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560579

研究課題名（和文）

各種劣化要因が鉄筋腐食速度に及ぼす影響の評価と RC 造建築物の寿命予測

研究課題名（英文）

Investigation on the effect of various factors on the rate of corrosion of reinforcing bar in concrete and estimation of the life of RC buildings

研究代表者

梶田 吉弘 (Yoshihiro Masuda) 宇都宮大学・工学研究科・教授

研究者番号：30272214

研究成果の概要（和文）：RC 造建築物の寿命予測のためには、コンクリートの劣化や鉄筋腐食に及ぼす各種要因の影響を定量的に評価することが重要である。本研究は、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を、20 年の長期にわたる屋外暴露試験の結果に基づいて定量的に評価したものである。

研究成果は、次のようにまとめられる。(i) ひび割れ発生前の鉄筋腐食速度係数は、塩化物イオン量が 0.3%以下の範囲では、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が、0.5%以上の範囲では、かぶり厚さの影響をほとんど受けない。(ii) 鉄筋腐食速度係数は、塩化物イオン量のレベルに応じて、本文の式(3)～(7)で表される。

研究成果の概要（英文）：The 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 (15～40 mm). It is conclude 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 decrease 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 are proposed by thickness of concrete cover and water cement ratio.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2010 年度	600,000	180,000	780,000
2011 年度	400,000	120,000	520,000
年度			
年度			
総計	3,900,000	1,170,000	5,070,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学／建築構造・材料

キーワード：腐食速度，質量減少，塩分量，水セメント比，かぶり厚さ

## 1. 研究の背景

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。

## 2. 研究の目的

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<sup>8)</sup>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。

## 3. 実験方法

### 3.1 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<sup>5)</sup>におけるほぼ最大の塩分量を想定している。

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)	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	○	○	○	○	—

### 3.2 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。

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

ここで、 $\Delta W_0$  : 質量減少率(%)

$W_0$  : 最初の鉄筋の質量 (g)

$W$  : 暴露試験後に錆落しをした鉄筋の質量 (g)

## 4. 研究成果

### 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1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くあると考えられる。

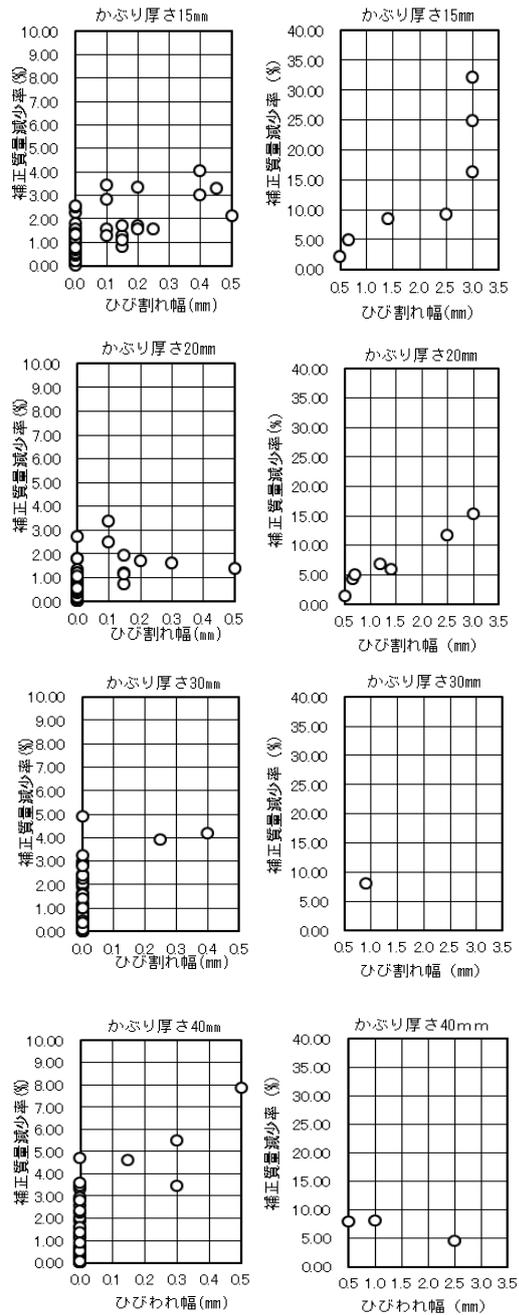


図1 各かぶり厚さ別のひび割れ幅と質量減少率の関係

### 4. 2 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3に示す腐食速度係数  $q$  とかぶり厚さ  $C$  の関係を、式(2)で最小二乗法により近似し、係数  $\beta$  を求めた。その結果を表4に示す。

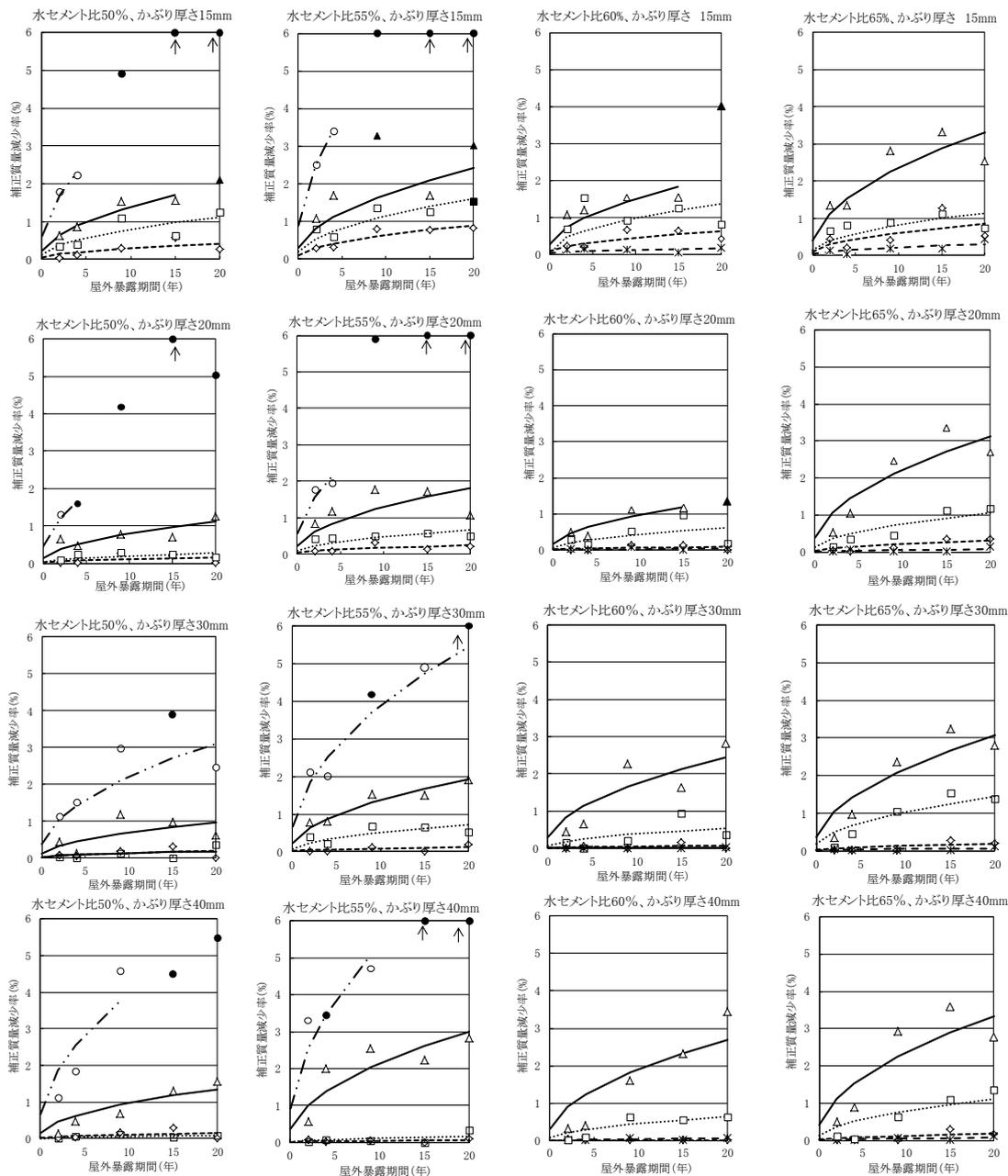


図2 屋外暴露期間と鉄筋の補正質量減少率の関係

$$q = \alpha \cdot C^\beta \quad \dots (2)$$

ここで、 $q$ ：腐食速度係数(%/√年)

$C$ ：かぶり厚さ(mm)

$\alpha$ 、 $\beta$ ：係数

係数 $\beta$ 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 $\beta$ 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

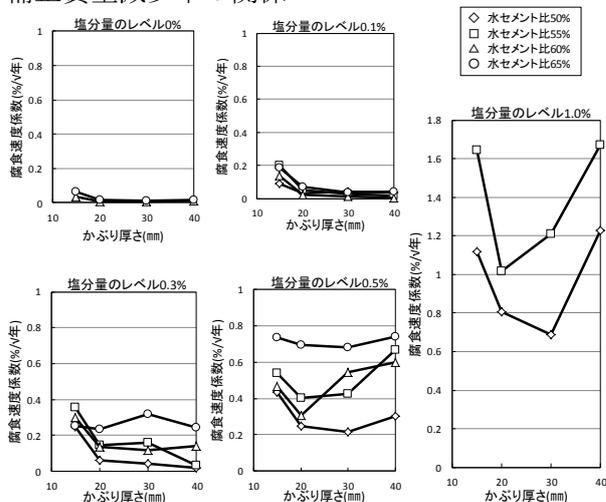


図3 腐食速度係数とかぶり厚さの関係

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、約表

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  $\beta$  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  $C^\beta$  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。

腐食速度とかぶり厚さの関係について、森永の暴露試験では、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<sup>7)</sup>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  $\beta$  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 5 には、塩分量のレベルごとの係数  $\beta$  の平均値を用いて、式 (2) によって求めた係数  $\alpha$  の値を示す。係数  $\alpha$  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。

係数  $\alpha$  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 (2) に代入すると腐食速度係数の推定式は、式 (3) から (7) で表すことができる。

表 3 条件ごとの腐食速度係数の算定結果 (%/ $\sqrt{\text{年}}$ )

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	-

表 4 係数  $\beta$  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

表 5 係数  $\alpha$  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	-

塩分量のレベル 0%

(添加塩化物イオン量 0 kg/m<sup>3</sup>)

$$q = 0.927/C^{1.9} (W/C - 54.3) \quad \dots (3)$$

塩分量のレベル 0.1%

(添加塩化物イオン量 0.45~0.52 kg/m<sup>3</sup>)

$$q = 0.023/C^{0.8} (W/C - 18.7) \quad \dots (4)$$

塩分量のレベル 0.3%

(添加塩化物イオン量 1.36~1.55 kg/m<sup>3</sup>)

$$q = 0.056/C^{0.6} (W/C - 35.7) \quad \dots (5)$$

塩分量のレベル 0.5%

(添加塩化物イオン量 2.27~2.58 kg/m<sup>3</sup>)

$$q = 0.045/C^{0.2} (W/C - 34.4) \quad \dots (6)$$

塩分量のレベル 1.0%

(添加塩化物イオン量 4.54~4.68 kg/m<sup>3</sup>)

$$q = 0.085/C^0 (W/C - 38.8) \quad \dots (7)$$

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 (%)

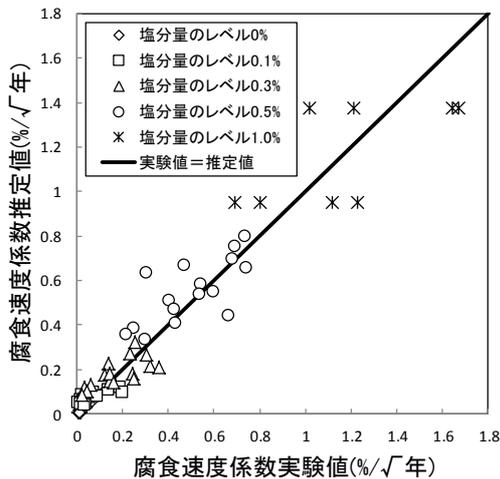


図4 腐食速度係数の推定値と実験値の関係

#### 4. 3 結論

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<sup>8)</sup>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/m<sup>3</sup>) の範囲での屋外暴露における鉄筋の腐食速度係数は、式(3)から(7)で表される。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (1件)

掛川勝、榎田吉弘、松林裕二、鹿毛忠嗣、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、査読有り、Vol.77 No.672 2012.2 pp143~152

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

榎田 吉弘 (Yoshihiro Masuda)

宇都宮大学・工学研究科・教授

研究者番号：30272214