

論文

[1075] 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

正会員 梶田 佳寛 (建設省建築研究所)  
 正会員 安田 正雪 (建設省建築研究所)  
 正会員 ○花榮 浩 (セグアイ株式会社)  
 正会員 松林 裕二 (株式会社小野田)

1. はじめに

近年、塩害による鉄筋コンクリート造の早期劣化が顕在化し、大きな社会問題となった。鉄筋コンクリートの耐久性にとって、コンクリートに含まれる塩化物は、中性化と並んで重要な影響因子の一つであり、鉄筋の腐食速度に及ぼす影響について定性的にはかなり明らかにされてきている<sup>1)2)</sup>。しかし、腐食速度については、まだ十分明らかではない。本実験は、コンクリート中に含まれる塩化物量が鉄筋の腐食速度に及ぼす影響を定量的に把握するため、塩化物量、水セメント比、かぶり厚さ及び促進劣化試験温度を変えて、腐食促進実験を行い、それらの各種要因の影響を考慮した速度式の検討を行ったものである。

2. 実験方法

2.1 実験計画

(1) 鉄筋腐食要因

塩化物量、水セメント比、かぶり厚さ及び促進劣化試験温度を要因とした。鉄筋腐食要因の水準を表-2.1に示す。

表-2.1 鉄筋腐食要因の水準

| 要因      | 水準                      |
|---------|-------------------------|
| 塩化物量 注) | 0, 0.1, 0.3, 0.5, 1.0 % |
| 水セメント比  | 50, 55, 60, 65 %        |
| かぶり厚さ   | 15, 20, 30, 40 mm       |
| 促進試験温度  | 60, 80 °C               |

注) NaCl対砂重量比

(2) 鉄筋腐食要因の組合せ

塩化物量と水セメント比の組合せを表-2.2に示す。なお表中のI, II, IIIは促進試験日数の区分を表す。

表-2.2 塩化物量と水セメント比の組合せ

| 塩化物量 (%) | 水セメント比 (%) |     |     |     |
|----------|------------|-----|-----|-----|
|          | 65         | 60  | 55  | 50  |
| 0        | I          | I   | -   | -   |
| 0.1      | I          | I   | I   | I   |
| 0.3      | II         | II  | I   | I   |
| 0.5      | III        | III | II  | II  |
| 1.0      | -          | -   | III | III |

注) I (促進期間): 3, 6, 13, 18, 24ヶ月  
 II (促進期間): 1, 3, 6, 13, 18ヶ月  
 III (促進期間): 0.5, 1, 3, 6, 13ヶ月

(3) 実験手順

実験の手順を図-2.1に示す。試験体製作後、一般構造物の中性化進行の状況をシミュレートするため、深さ15mmまで(ただしW/C:50%は5~10mm)中性化促進を行い、促進試験及び屋外曝露試験を行った。

(4) 試験体の形状・寸法

試験体の形状・寸法を図-2.2に示す。

(5) 試験条件及び試験材料

中性化の促進は温度30°C、湿度60%RH、CO<sub>2</sub>濃度5%の条件で行った。腐食促進は温度60°C、湿度95%RH以上及び温度80°C、湿度95%RH以上の2条件で行った。曝露試験は建設省建築研究所構内で実施中であり、本報告は促進18ヶ月までの結果をとりまとめたものである。

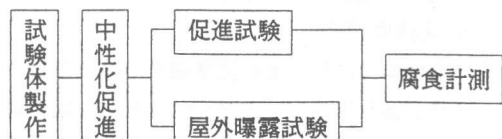


図-2.1 実験の手順

## 2. 2 試験体の製作

### (1) 鉄筋

黒皮付の丸鋼φ13mm(電炉JIS製品)を用いた。

### (2) コンクリートの材料

セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は大井川産川砂(絶乾比重2.58,吸水率1.42,粗粒率2.72)、粗骨材は青梅産碎石(絶乾比重2.64,吸水率0.73,粗粒率6.76)、混練水は水道水、混和剤はA E剤、塩化物量調整試薬は一級試薬級試薬のNaClを用いた。

### (3) コンクリートの調合及び性質

コンクリートの調合と性質を表-2.3に示す。

## 2. 3 評価項目

### (1) 外観の状況

コンクリート表面の鉄筋膨張に起因するとみられるひびわれを目視により観察した。

### (2) 鉄筋腐食度

鉄筋腐食度の評価は、①発錆面積及び②質量減少率とした。

## 3. 実験結果及び考察

### 3. 1 外観の状況

鉄筋腐食に起因するとみられるコンクリート表面のひびわれは、かぶり厚さの薄い部分、塩化物量の多い試験体に多く見られた。かぶり厚さ別の質量減少率と最大ひびわれ幅との関係を図-3.1に示す。かぶり厚さが小さい場合は、鉄筋の腐食量が小さい時期(15mmの場合は0.8%,20mmの場合は1.6%)でひびわれが発生し、その後の腐食量の増加に対するひびわれ幅の増加はあまり大きくない。しかし、かぶり厚さが30mm以上の場合、質量減少率が約2.2%になってひびわれが生じ、その後のひびわれ幅の増加は著しいことがわかる。

### 3. 2 発錆面積率

発錆面積率は材令とともに増加する傾向にあるが、発錆面積がある程度大きくなるとそれ以上増加しないものも出てくる。これは錆の進行方向が鉄筋の面方向であったり、深さ方向であったりす

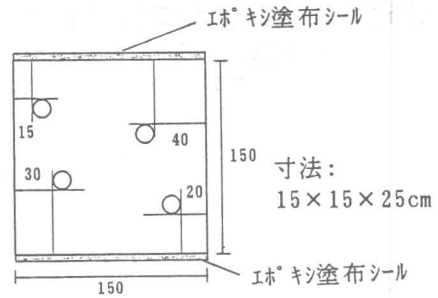


図-2.2 試験体の形状・寸法

表-2.3 コンクリートの調合と性質

| 水セメント比 (%) | 塩化物量 (%)                 | 細骨材率 (%) | 単位セメント量 (kg/m <sup>3</sup> ) | 単位水量 (kg/m <sup>3</sup> ) | スランプ (cm) | 空気量 (%) | 圧縮強度σ <sub>28</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> ) |
|------------|--------------------------|----------|------------------------------|---------------------------|-----------|---------|--|
| 65         | 0<br>0.1<br>0.3<br>0.5   | 48       | 285                          | 185                       | 19.0      | 4.7     | 252  |
|            |                          |          |                              |                           | 18.5      | 4.6     | 242  |
|            |                          |          |                              |                           | 18.5      | 4.8     | 240  |
|            |                          |          |                              |                           | 17.5      | 5.0     | 258  |
| 60         | 0<br>0.1<br>0.3<br>0.5   | 46       | 308                          | 185                       | 19.0      | 4.7     | 290  |
|            |                          |          |                              |                           | 18.5      | 4.5     | 291  |
|            |                          |          |                              |                           | 18.0      | 4.3     | 294  |
|            |                          |          |                              |                           | 17.5      | 4.4     | 286  |
| 55         | 0.1<br>0.3<br>0.5<br>1.0 | 45       | 336                          | 185                       | 18.5      | 4.5     | 353  |
|            |                          |          |                              |                           | 18.0      | 4.8     | 353  |
|            |                          |          |                              |                           | 17.5      | 4.5     | 352  |
|            |                          |          |                              |                           | 17.5      | 4.2     | 362  |
| 50         | 0.1<br>0.3<br>0.5<br>1.0 | 44       | 370                          | 185                       | 17.0      | 4.8     | 414  |
|            |                          |          |                              |                           | 17.0      | 4.6     | 416  |
|            |                          |          |                              |                           | 16.5      | 4.6     | 412  |
|            |                          |          |                              |                           | 16.0      | 4.1     | 421  |

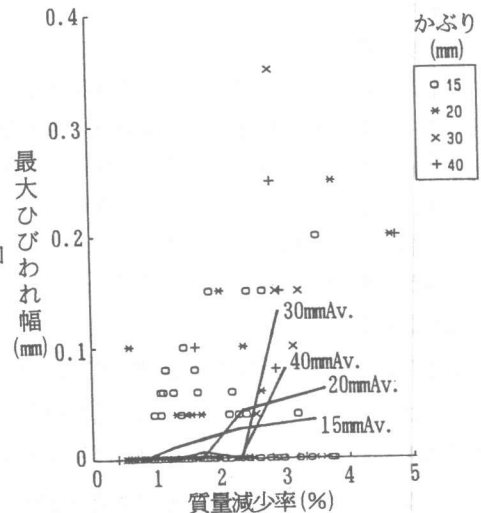


図-3.1 鉄筋の質量減少率と最大ひびわれ幅との関係

るためであると考えられる。図-3.2は発錆面積率と質量減少率との関係を示したものである。促進試験初期においては、質量減少率はそれほど増加せず、発錆面積率が増加している傾向にあるが、促進試験期間が進むにつれて発錆面積率が頭打ちとなり、質量減少率が増加している。このことから、鉄筋の腐食がある程度進行してくると、鉄筋の腐食量を評価するためには質量減少率を指標とすることが適切であると考えられ、以下、鉄筋の質量減少率を検討することとした。

### 3. 3 質量減少率

促進試験期間と鉄筋の質量減少率との関係を図-3.3に示す。促進温度60℃において、促進試験期間の増加に伴い鉄筋の質量減少率は増大する傾向にあり、塩化物量の増加に伴いその増加傾向は顕著となっている。促進温度80℃において、促進試験期間の増加に伴い質量減少率は増大する傾向にあるものの、促進温度60℃に比べて増大傾向は大きくない。また、促進温度80℃においては質量減少率が急激に立ち上がる期間がある。図-3.4は、促進温度60℃の質量減少率と促進温度80℃の質量減少率との関係をプロットしたものである。この図からも促進試験期間が進むにつれて、促進温度60℃の腐食が大きくなっていることが判る。これは、促進温度の違いによる鉄筋周辺の溶存酸素量の差または腐食形態の違い等によるものと思われるが、現在のところ、その原因は明らかではない。以後の解析は促進温度60℃のみとした。

### 3. 4 腐食速度解析

図-3.3の促進温度60℃の結果から、鉄筋の質量減少率と促進試験期間とは、ほぼ比例していることが判る。そこで、鉄筋の質量減少率Wと促進試験期間tとの関係を式(1)で近似させ、その係数を腐食速度qとした。また、使用した鉄筋の質量減少率のうち、酸化被膜(黒皮)の質量分は錆落とし時に除去されるため、その補正を行った。酸化被膜の質量率は、図-3.2より約0.52%となることがわかる。

$$W = q t + 0.52 \cdots \text{式(1)} \quad \text{ここに、} W: \text{質量減少率}(\%), t: \text{促進試験期間}(\text{月}) \\ q: \text{腐食速度}(\%/\text{月}), 0.52: \text{実験定数}$$

#### (1) 腐食速度に及ぼす塩化物量の影響

塩化物量と腐食速度との関係を図-3.5に示す。この図から水セメント比に関わらず、塩化物量の増加に伴い、腐食速度は著しく増大する傾向が判る。また、かぶり厚さの違いにより若干の差

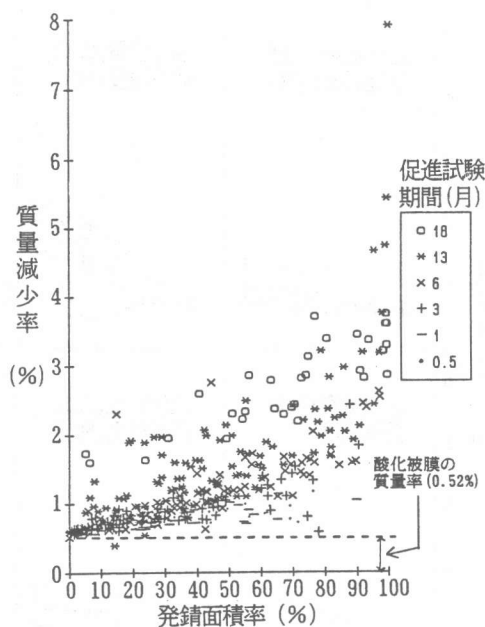


図-3.2 鉄筋の発錆面積率と質量減少率との関係

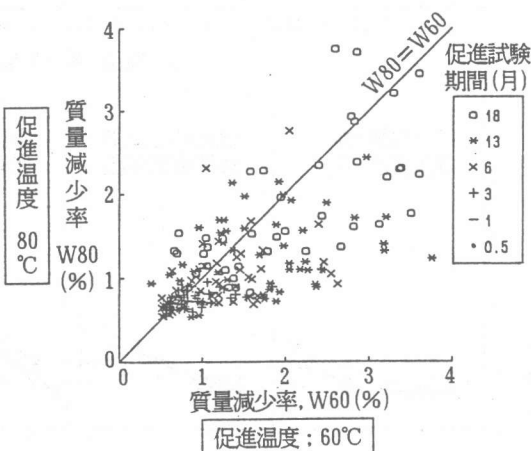


図-3.4 促進温度60℃の質量減少率と80℃の質量減少率との関係

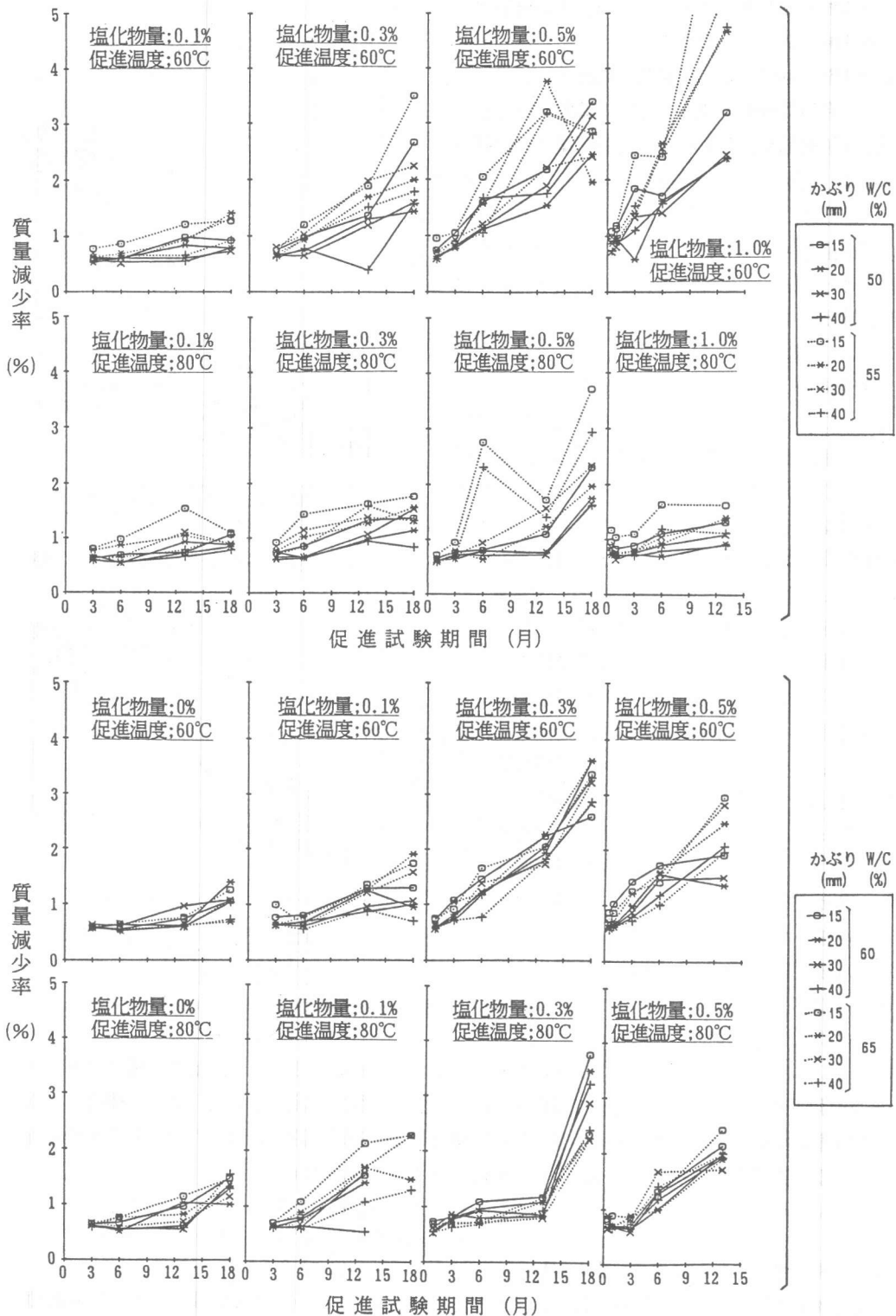


図-3.3 促進試験期間と鉄筋の質量減少率との関係

異はあるものの、かぶり厚さごとのデータを平均すると、その増大傾向は、概ね比例関係となっている。このことから、全データから腐食速度係数 $q$ と塩化物量との関係を塩化物量の1次式で近似させ、腐食速度に影響を及ぼす塩化物量の比例定数を求めた。求めた近似式を式(2)に示す。

$$q \text{ (\%/月)} = 0.016 + 0.256 \times (\text{NaCl}) \dots\dots\dots \text{式(2)}$$

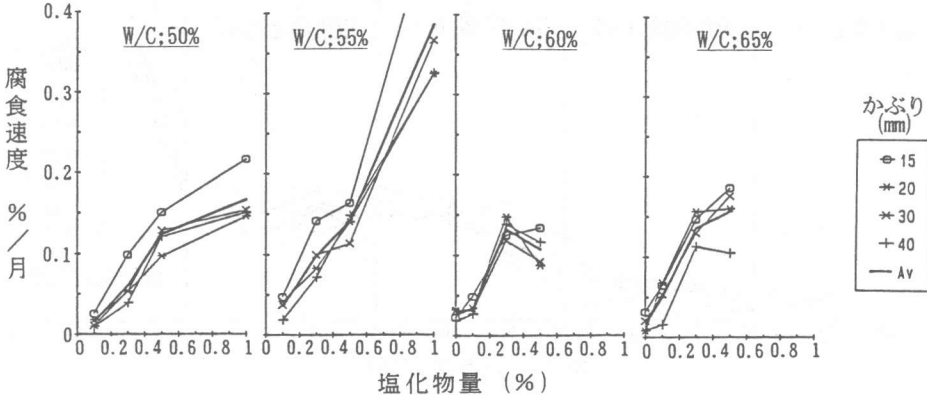


図-3.5 塩化物量と腐食速度との関係

(2) 腐食速度に及ぼすかぶり厚さの影響

かぶり厚さと腐食速度との関係を図-3.6に示す。かぶり厚さが大きくなるに連れ腐食速度は減少する傾向にあり、また、塩化物量が少ない場合、腐食の進行がゆるやかとなり、かぶり厚さと腐食速度との関係は、ほぼ直線関係に近いようである。しかし、塩化物量が多くなるに連れて、コンクリート表面に近い鉄筋の腐食速度は、かぶり厚さが大きなものに比べて著しく大きくなる。実態調査時の近似関数<sup>3)</sup>と同様に、これらの傾向から腐食速度をかぶり厚さの平方根の逆数として近似させ、(1)より求めた塩化物量の関数を加味し、腐食速度に影響を及ぼす塩化物量とかぶり厚さの実験定数を求めた。求めた近似式を式(3)に示す。

$$q = 4.969 \times (1/\sqrt{C}) \times \{0.016 + 0.256 \times (\text{NaCl})\} \dots\dots \text{式(3)}$$

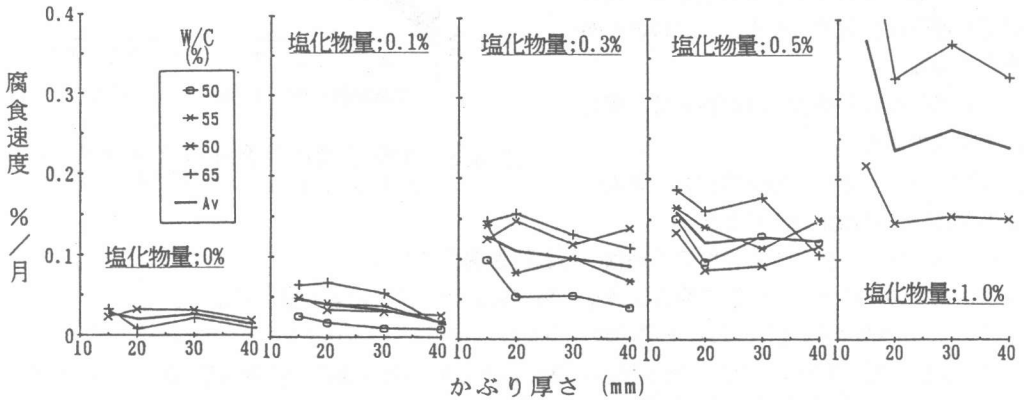


図-3.6 かぶり厚さと腐食速度との関係

(3) 腐食速度に及ぼす水セメント比の影響

水セメント比と腐食速度との関係を図-3.7に示す。塩化物量1.0%の場合を除き、水セメント比

の増大に伴い、腐食速度はわずかに大きくなる傾向にある。その傾向は、概ね比例関係であることから、腐食速度を水セメント比の1次式として近似させ(2)より求めた塩化物量とかぶり厚さの関数を加味して近似式(4)を得た。

$$q = 0.0011 \{(-5.141) + 79.360 \times (W/C)\} (1/\sqrt{C}) \{0.016 + 0.256 \times (NaCl)\} \dots \text{式(4)}$$

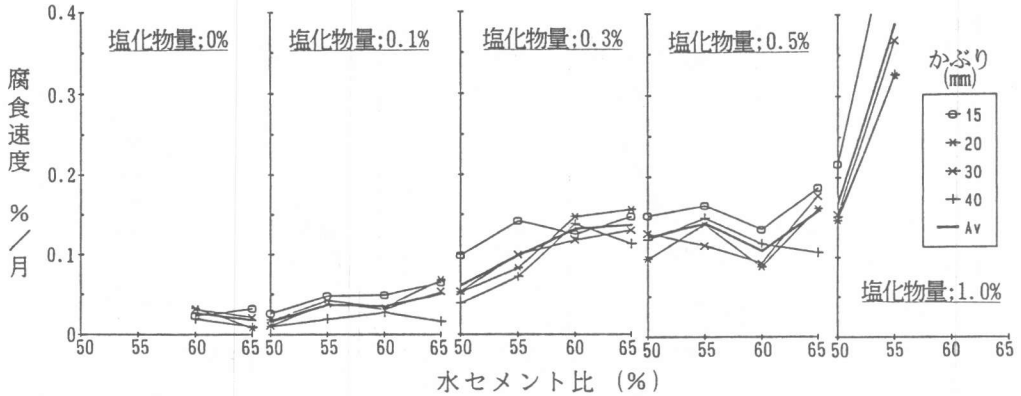


図-3.7 水セメント比と腐食速度との関係

(4) 腐食速度近似式

(3)より得られた近似式による腐食速度の計算値と実際の腐食速度との関係を図-3.8に示す。両者は、ほぼ1対1で対応しており、実験の妥当性がわかる。

4. まとめ

(1)鉄筋の腐食がある程度進行している場合、鉄筋の腐食を評価するには発錆面積率よりも質量減少率を指標とすることが適切である。

(2)鉄筋の腐食は、促進試験期間が進むに連れ促進温度80℃よりも、60℃のほうが大きくなる。

(3)塩化物量と腐食速度の関係は、概ね比例関係である。

(4)かぶり厚さの平方根の逆数と腐食速度の関係は、概ね比例関係である。

(5)水セメント比と腐食速度の関係は、概ね比例関係である。

(6)温度60℃における鉄筋の腐食速度 $q$  (%/月)は、次式により求められる。

$$q = 0.0011 \{(-5.141) + 79.360 \times (W/C)\} (1/\sqrt{C}) \{0.016 + 0.256 \times (NaCl)\}$$

《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、東京大学学位請求論文、Nov. 1986.

2) 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、Mar. 1981.

3) 友沢、榊田、阿部、田中、安田、原、天沼：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、Nov. 1986.

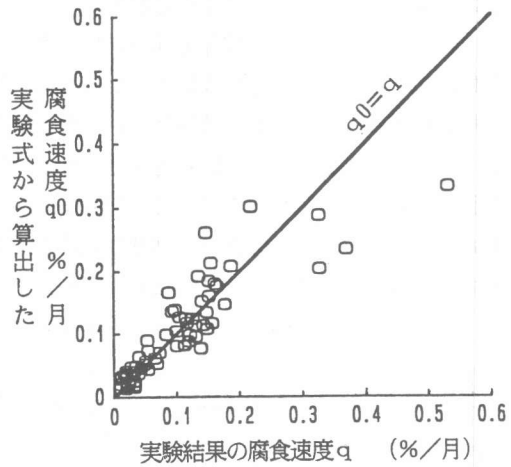


図-3.8 実験結果の腐食速度と実験式から算出した腐食速度との関係