

## 論文 コンクリートの中性化と初期塩化物による鉄筋腐食性状

太田 和宏\*1・鳥取 誠一\*2・北後 征雄\*3・宮川 豊章\*4

**要旨:** 本論では、中性化、コンクリート練混ぜ時に含まれる塩化物（初期塩化物）および両者の影響が複合する場合の鉄筋腐食性状を5年間の暴露試験により検討した。その結果、①中性化のみの影響による鉄筋腐食速度は0.002mm/年程度と比較的小さいこと、②初期塩化物の影響を受ける場合の両者の腐食速度は、概ね笹淵らの提案式により算定できること、③中性化と初期塩化物の影響を複合的に受ける場合には腐食速度が大きくなるが、腐食量がある程度以上になると、腐食速度は徐々に低下すること等がわかった。

**キーワード:** 鉄筋腐食, 中性化, 塩化物イオン, 補修

### 1. はじめに

鉄筋腐食はコンクリート構造物の耐久性、耐荷性能を検討する上で最も重要な劣化現象の一つである。鉄筋腐食の原因にはひび割れ、コンクリートの中性化、海砂等の使用により建設時からコンクリートに含まれる塩化物（以下、初期塩化物という）、海洋から供給される塩化物等が挙げられる。

本論は、コンクリートの中性化、初期塩化物および両者が複合的に影響する場合の鉄筋腐食性状を暴露試験により検討した結果を報告するものである。また、上記の影響を受けて鉄筋が腐食する場合の補修法についても併せて検討した。

### 2. 試験概要

コンクリートには普通ポルトランドセメント、酒匂川水系産の細骨材、大月市初狩町産の粗骨材および初期塩化物イオン量調整試薬としてNaCl（一級試薬）を用いた。水セメント比は60または70%とし鉄筋にはSS41、径9mmのみがき丸鋼を用いた。

供試体の寸法・形状を図-1に示す。実構造物の配筋状況を考慮し、鉄筋は網目状に配筋した。

供試体表面に近い側の鉄筋（以下、下段鉄筋という）のかぶり厚は15mmであり、供試体製作時、コンクリートは図-1に示す方向に打ち込んだ。

供試体の種類は表-1に示すように、水セメント比、塩化物イオン、中性化深さ、補修法の種類をパラメータとして以下のように分類した。

#### ・グループA

水セメント比を60または70%とし、促進中性化深さを20mmとした供試体のグループである。本グループは、中性化のみの影響による鉄筋腐食性状を把握するものである。なお、水セメント比、塩化物イオン量および促進中性化深さの順に数値をとって、本グループ供試体を60(70)-0-20供試体と記述する場合がある。

#### ・グループB

水セメント比を70%、初期塩化物イオン量を2kg/m<sup>3</sup>とし、促進中性化深さを0または10mm程度とした供試体のグループである。本グループは主に初期塩化物イオンが鉄筋腐食に及ぼす

\*1 (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部 (正会員)

\*2 (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部 (正会員)

\*3 ジェイアール西日本コンサルタンツ技術部土木設計第二部長 (正会員)

\*4 京都大学大学院教授 工学研究科土木工学 工博 (正会員)

影響を検討するものである。エポキシ樹脂によるコンクリート表面処理による補修の影響について検討するため、表面処理の有無により、供試体をB0とB1に細分した。

・グループC

水セメント比を70%、初期塩化物イオン量を $2\text{ kg/m}^3$ とし、促進中性化深さを20mm程度とした供試体のグループである。この場合、中性化は下段鉄筋の中央部まで進行している。本グループは、中性化と初期塩化物の影響を複合的に受ける場合の鉄筋腐食性状について検討するものである。また、コンクリート表面処理の影響を調べるため、供試体をC0とC1に細分した。

・グループD

グループCと同様に中性化と初期塩化物の複合的な影響を検討する供試体のグループであるが、本グループでは初期塩化物イオン量を $5\text{ kg/m}^3$ とした。

グループDは無補修供試体をD0、電気防食を施した供試体をD2、脱塩・再アルカリ化を施した供試体をD3として細分した。

上記グループA～Dにおいて、促進中性化の条件を与える供試体は、コンクリート打込み後5日間、湿潤養生を施した後、炭酸ガス濃度10%、

温度20℃、相対湿度60%の条件下に、所要の中性化深さとなるまで存置した。その後は屋外（東京都国分寺市）に暴露した。中性化の条件を与えない場合には湿潤養生後に屋外に暴露した。

コンクリートに表面処理を施す供試体は、実構造物の補修条件を考慮して、コンクリート打込み面を除く5面をエポキシ樹脂等で被覆した。

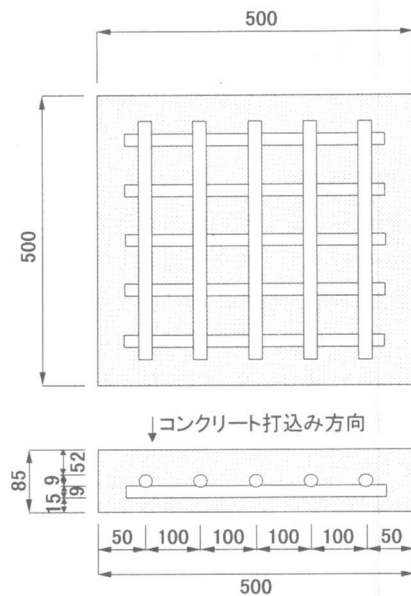


図-1 供試体の概要

表-1 供試体の種類

| 基本条件                     | グループ | N o. | W/C (%) | 塩化物イオン<br>( $\text{kg/m}^3$ ) | 促進中性化深さ<br>(mm) | 補修条件      |
|--------------------------|------|------|---------|-------------------------------|-----------------|-----------|
| 70-0-20<br>or<br>60-0-20 | A 0  | 1    | 70      | 0                             | 20              | —         |
|                          |      | 2    | 60      | 0                             | 20              | —         |
| 70-2-0<br>or<br>70-2-10  | B 0  | 1    | 70      | 2                             | 0               | —         |
|                          |      | 2    | 70      | 2                             | 10              | —         |
|                          | B 1  | 1    | 70      | 2                             | 0               | エポキシ樹脂被覆  |
|                          |      | 2    | 70      | 2                             | 10              | 同上        |
| 70-2-20                  | C 0  | 1    | 70      | 2                             | 20              | —         |
|                          | C 1  | 2    | 70      | 2                             | 20              | エポキシ樹脂被覆  |
| 70-5-20<br>or<br>60-5-20 | D 0  | 1    | 70      | 5                             | 20              | —         |
|                          |      | 2    | 60      | 5                             | 20              | —         |
|                          | D 2  | 1    | 70      | 5                             | 20              | 電気防食      |
|                          |      | 2    | 60      | 5                             | 20              | 同上        |
|                          | D 3  | 1    | 70      | 5                             | 20              | 脱塩・再アルカリ化 |
|                          |      | 2    | 60      | 5                             | 20              | 同上        |

表面処理は暴露後3箇月程度の間に行った。

電気防食は内部埋込型電極を陽極材に用いた外部電源方式により実施した。通電は暴露後3箇月で開始した。通電電流は鉄筋のオフ4時間後の復極量が150mV以上となるように定期的に調整した<sup>1)</sup>。

脱塩・再アルカリ化処理は暴露後4～5箇月で実施した。脱塩処理は約1箇月間、再アルカリ化処理は約2週間行い、その間の通電量はコンクリート表面積当たり1A/m<sup>2</sup>とした<sup>2)</sup>。

暴露後、供試体は適宜解体し、中性化深さ、塩化物イオン量、鉄筋腐食面積率および腐食量を測定した。塩化物イオンの測定は、「硬化コンクリート中に含まれる全塩分の簡易分析方法(JIS-SC5)」に準じて行なった。鉄筋腐食面積率は鉄筋の腐食部分をセロファン紙に写し取り、この面積を光電管ブラウニメータで測定することにより求めた。さらに、10%クエン酸2アンモニウム溶液に鉄筋を24時間浸漬処理して得られる質量変化量から、鉄筋の平均腐食深さを求めた。

### 3. 無補修供試体の鉄筋腐食状況

#### 3.1 塩化物イオン量

図-2にB0-1(70-2-0)供試体とC0-1(70-2-20)供試体の塩化物イオン量の深さ方向分布を示す。

C0-1供試体は約20mmの中性化深さを与えているため、小林ら<sup>3)</sup>が指摘したような塩化

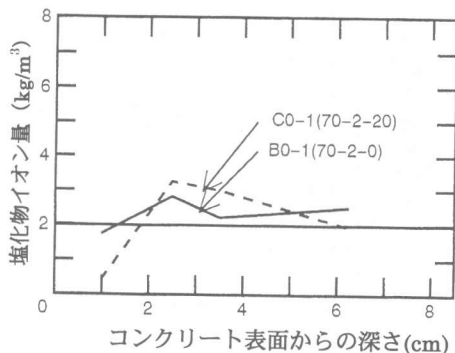


図-2 塩化物イオンの分布

物イオンの濃縮が認められるが、B0-1供試体においては、解体時点における中性化深さが9mmと小さいために、塩化物イオンの分布がほぼ一様であることがわかる。このような中性化による塩化物イオンの濃縮はすべての供試体において認められた。

#### 3.2 鉄筋腐食状況

中性化のみの影響を受ける場合、主に塩化物イオンの影響を受ける場合、中性化と塩化物イオンの影響を複合的に受ける場合の鉄筋腐食面積率の経時変化を図-3、鉄筋の平均腐食深さの経時変化を図-4に示す。なお、図中に示した腐食面積率あるいは鉄筋腐食量は下段鉄筋5本の平均値とその範囲を示している。

図-3,4より、以下の点がわかる。

- ① コンクリートの中性化が鉄筋位置程度まで進行している場合には、暴露4.5年程度で、鉄筋の腐食面積率は50%を超える結果となった(図-3の上段参照)。しかしながら、図-4上段に示すように、平均腐食深さは僅かであり、暴露4.5年程度で0.01mm程度であった。
- ② 中性化が鉄筋位置にまで達していない状態で、初期塩化物イオン量を2kg/m<sup>3</sup>とした場合の鉄筋腐食面積率の経時変化を図-3の2段目に示す。この場合には、主に塩化物イオンの影響による鉄筋腐食が認められる。暴露3.5年程度におけるデータは、表面処理を施した供試体であるため明確ではないが、主に塩化物イオンの影響を受ける場合、中性化のみの影響を受ける場合に比べ、腐食面積率はやや小さいように思われる。

しかしながら、図-4の2段目に示すように、平均腐食深さは中性化のみの影響を受ける場合よりも大きく、塩化物イオンによる鉄筋腐食は深さ方向に進展するものと考えられる。同図中には、笹渕ら<sup>4)</sup>が示した塩化物イオンの影響を受ける場合の鉄筋腐食速度算定式(式(1)参照)により求められる腐食深さも併せて示した。測定結果は笹渕式により求められる腐

食深さに概ね一致している。

$$q = (2.89 \text{ NaCl} + 0.023 \text{ W/C} - 1.52) / \sqrt{c(1)}$$

ここに、 $q$  : 腐食速度(%/年, 質量減少率)

NaCl: 塩化物量(% , NaCl/細骨材換算)

W/C: 水セメント比(%)

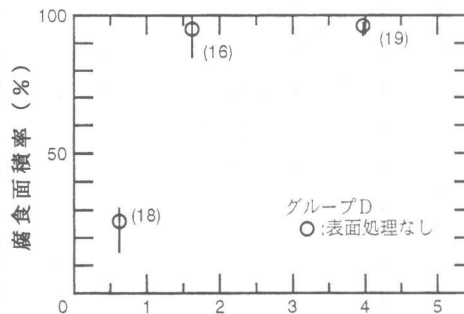
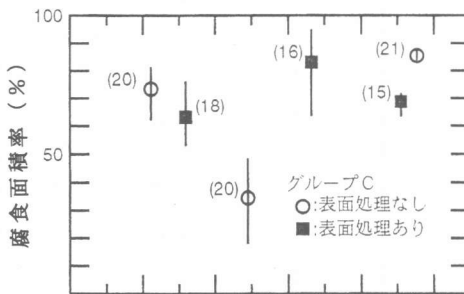
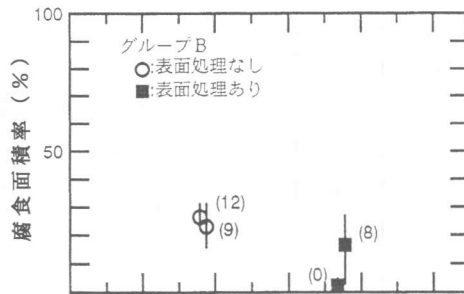
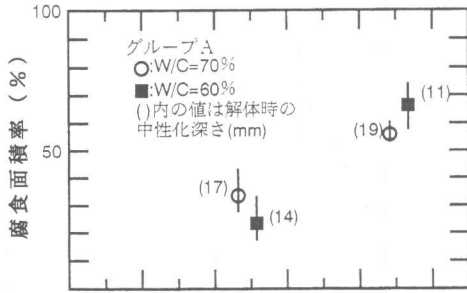


図-3 鉄筋腐食面積率の経時変化

$c$  : かぶり(mm)

- ③ 初期塩化物イオンを2または5 kg/m<sup>3</sup>とし、鉄筋位置程度まで中性化が進行している場合、鉄筋腐食面積率は経年 1.5~2年程度で100%近い値にまで急増する(図-3の3,4段

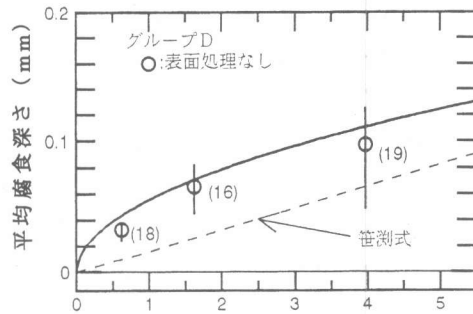
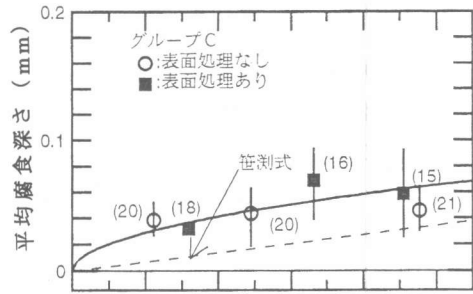
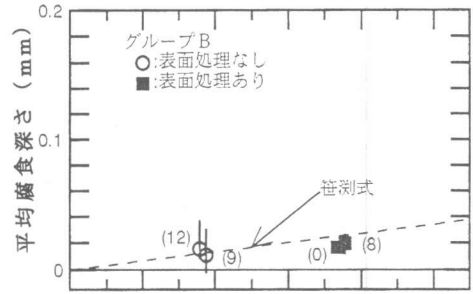
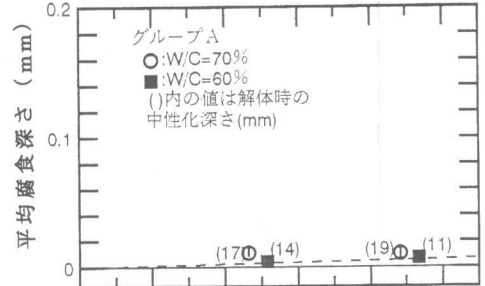


図-4 鉄筋の平均腐食深さの経時変化

目参照)。

平均腐食深さも腐食面積率と同様の増加傾向であり、中性化と塩化物イオンの影響が複合する場合には大きな腐食速度を示すことがわかる。

しかし、ある程度腐食が進行した後は、腐食速度が徐々に低下し、概ね笹刈式に一致するようになった。

### 3.3 実構造物における鉄筋腐食過程の推定

上記の結果を基に、i) 中性化の影響を受ける場合、ii) 初期塩化物イオンの影響を受ける場合、iii) 両者の影響を複合的に受ける場合、について実構造物中の鉄筋の腐食過程を推測すると図-5のようになる。

中性化の影響を受ける場合、中性化残り(かぶりから中性化深さを減じた値)が10mm程度になると腐食が生じ始めるといわれている。しかし、鉄筋位置まで中性化が進行した場合でも、実構造物における鉄筋腐食量は僅かな場合が多く、腐食量を算定する上では、中性化が鉄筋位置に達した後に腐食が生じ始めると考えてよいと思われる。また、図-4の上段の結果からわかるとおり、この場合の鉄筋腐食速度は比較的小さな値である。

初期塩化物イオンの影響を受ける場合には、構造物建設直後から鉄筋腐食が生じ始める。この場合の鉄筋腐食速度は、式(1)により算定できると考えられる。

中性化と初期塩化物の影響を複合的に受ける

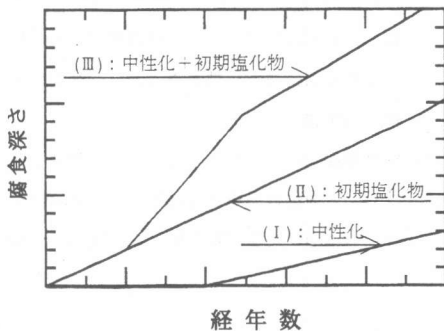


図-5 鉄筋の腐食過程

場合、鉄筋の腐食過程は3つの段階に大別できる。初期段階は中性化がそれほど進行していないため、初期塩化物の影響により鉄筋腐食が進行する。その後、中性化が進行すると塩化物イオンとの複合的な影響により、腐食速度が増加すると想定される。しかしながら、ある一定以上の腐食量に達すると、腐食速度は初期段階における腐食速度まで減少すると推測される。

## 4. 補修供試体の鉄筋腐食状況

### 4.1 塩化物イオン量

脱塩・再アルカリ化を施す前後におけるD3-1(70-5-20)供試体の全塩化物イオン量の分布を図-6に示す。これより、鉄筋位置よりコンクリート表面に近い範囲では全塩化物イオン量が減少していることがわかる。

なお、電気防食を施した供試体、表面処理を施した供試体についても解体時に塩化物イオン量の分布を調べたが、明確な塩化物イオンの移動は認められなかった。

### 4.2 各補修工法による鉄筋の防食効果

図-7左側に無補修、表面処理、電気防食を施し、約4年間暴露した場合の鉄筋の平均腐食深さ、同図右側に無補修と脱塩・再アルカリ化を施して8箇月間暴露した場合の結果を示す。これより、以下の点がわかる。

- ① 表面処理を施した場合の鉄筋の平均腐食深さと、無補修供試体の鉄筋の平均腐食深さは概ね同等である。塩化物イオンを含み、鉄筋

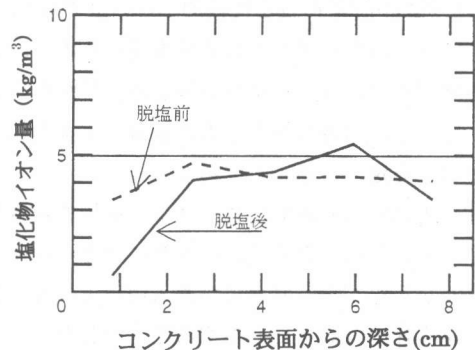


図-6 脱塩・再アルカリ化前後の全塩化物イオン量

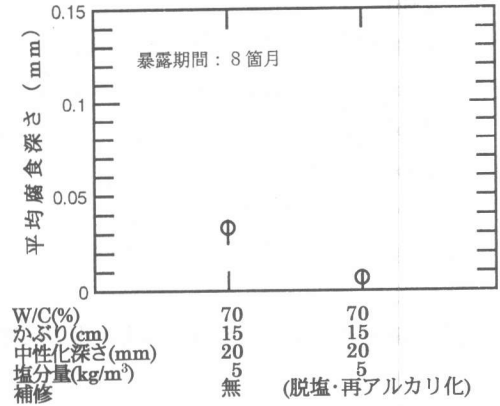
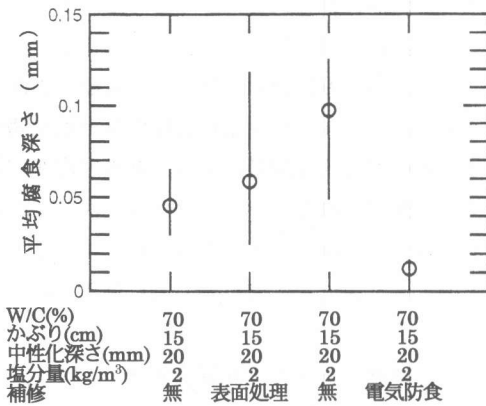


図-7 補修効果の検討

位置程度まで中性化が進行した場合には、表面処理のみでは必ずしも十分な補修効果が得られないと考えられる。

- ② 電気防食を施した場合の鉄筋の平均腐食深さは、無補修あるいは表面処理を施した場合よりも小さく、補修の効果が認められる。なお、図-7に示した電気防食を施した場合の平均腐食深さは、通電前に生じていた腐食によるものと推測される。
- ③ 脱塩・再アルカリ化を施した場合にも、電気防食の場合と同様の補修効果が認められる。

## 5. 結論

本論の結果をまとめると下記のとおりである。

- ① 中性化のみの影響を受ける場合、鉄筋の腐食面積は比較的大きくなるが、腐食速度は0.002mm/年程度と比較的小さい値であった。
- ② 初期塩化物イオンの影響を受ける場合、鉄筋腐食は、コンクリート打込み直後から生じる。この場合の腐食速度は笹淵らの提案式により算定できるようであった。
- ③ 中性化と初期塩化物イオンの影響を複合して受けると、腐食速度は非常に大きくなる。しかしながら、腐食量がある値以上になると腐食速度は徐々に低下することがわかった。
- ④ ①～③の結果を基に、実構造物における鉄筋の腐食過程を推定した。

- ⑤ 各補修工法の鉄筋防食効果について検討した結果、塩化物イオンを含み、中性化が鉄筋近傍まで進行している場合には、表面処理のみでは必ずしも十分な効果が得られないこと、一方、電気防食、脱塩・再アルカリ化によれば所要の防食効果が得られることが把握された。

## 参考文献

- 1) 矢島秀治, 井川一弘, 鳥取誠一: 中性化により鉄筋腐食が生じたコンクリート構造物への電気防食の適用, 第43回日本学術会議材料研究連合講演会, 1999.10
- 2) 鳥取誠一, 北後征雄, 宮川豊章: 中性化と初期塩化物イオンによる鉄筋腐食に対する脱塩・再アルカリ化補修の適用性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No1, pp.823~828, 1997.6
- 3) 小林一輔, 白木亮司, 河合研至: 炭酸化によって引き起こされるコンクリート中の塩化物, 硫酸化合物及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, 1990.7
- 4) 笹淵優樹, 榎田佳寛, 中村成春: 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暴露試験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No1, 1998.6