

論文 塩害を受ける鉄筋コンクリートの劣化促進試験方法に関する検討

竹田宣典^{*1}・十河茂幸^{*2}・出光 隆^{*3}

要旨: 塩害環境における鉄筋コンクリート構造物の劣化の進行を促進的に把握することを目的として、鉄筋腐食の促進試験を提案し、この試験における塩化物イオン浸透量および鉄筋腐食の進行について、飛沫帯における 10 年間の海洋暴露試験の結果と比較した。その結果、かぶり 2cm 程度の場合の鉄筋腐食の進行は、飛沫帯に暴露した場合に対して、海水浸漬・乾燥繰り返し試験では約 10 倍、海水噴霧・乾燥繰り返し試験では約 5 倍となることを明らかにし、本報告で提案する劣化促進試験により、鉄筋腐食の進行を早期に推定することが可能であることを示した。

キーワード: 塩害, 促進試験, 塩化物イオン, 鉄筋腐食, 暴露試験, 促進倍率

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の耐久性設計を行うためには、鉄筋コンクリート構造物に用いられる使用材料の長期的な耐久性を把握する必要がある。実環境における暴露試験は、結果が得られるまで極めて長い期間を要し、構造物調査は、新たに設計しようとする構造物が、調査構造物の環境条件、使用材料や施工条件と同じであることは少なく、古い構造物の劣化調査結果を、そのまま耐久性設計に適用することはできない。このような理由により、鉄筋コンクリートの耐久性を早期に把握する方法の確立が望まれている。そこで、本報告では、鉄筋腐食を促進的に進行させる方法として、海水浸漬・乾燥繰り返しおよび海水噴霧・乾燥繰り返しによる劣化促進試験を提案し、長期的な海洋暴露試験における塩化物イオンの浸透量および鉄筋腐食の進行程度と比較することにより、各劣化促進試験方法の促進倍率について検討した結果について述べる。

2. 実験方法

2.1 海洋暴露試験

鉄筋コンクリートの梁状供試体 (RC 供試体) と無筋の塩分浸透分析用供試体を海洋環境下の飛沫帯に暴露した。RC 供試体の形状・寸法を図 1 に示す。同供試体は、断面 $9 \times 18 \text{cm}$ 、長さ 90cm の直方体とし、かぶり 2cm の位置に異形棒鋼 (JIS G 3112, SD295, D19, 横ふし型) を配置し、図 1 に示す塩化物イオンの浸透面のみから、塩化物イオンが浸透するように、かぶり部分の面以外の表面を厚膜型エポキシ樹脂を用いて塗装した。塩分浸透分析用供試体は、直径 15cm 、高さ 15cm の円柱状とし、周面を厚膜型エポキシ樹脂により塗装し、塩化物イオンの浸透が一方方向のみから進行するようにした。コンクリートの配合および性質を表 1 に示す。普通ポルトランドセメントを用い、水セメント比を 50%、単位セメント量を 332kg/m^3 とした。

供試体の暴露場所は、静岡県清水港内の防波堤とし、図 2 に示すように、潮の干満および飛沫の影響を受ける位置に供試体

* 1 (株)大林組技術研究所 土木第三研究室 副主任研究員 工博 (正会員)
 * 2 (株)大林組技術研究所 土木第三研究室 室長 工博 (正会員)
 * 3 九州工業大学工学部教授 建設社会工学科 工博 (正会員)

を設置した。暴露後 1, 3, 6, 10 年において、コンクリート中の鉄筋の腐食程度および塩化物イオン量を測定した。鉄筋腐食は、供試体から鉄筋を取り出し、腐食面積率により評価した。塩化物イオン量の分析は、供試体の表面から 2cm 毎の深さから採取したコンクリート粉末を試料とし、JCI 標準 SC-4 に示される塩素イオン選択性電極を用いた電位差滴定法により、全塩化物イオン量を定量分析し、コンクリート質量に対する質量百分率に換算して表した。

2.2 劣化促進試験

劣化促進試験は、海水浸漬・乾燥繰り返しによる方法（以下、海水浸漬試験と記述）と海水噴霧・乾燥繰り返しによる方法（以下、海水噴霧試験と記述）とした。海水浸漬試験では、図 3 (a) に示す様に、かぶり 2cm の位置に、異形鉄筋 (D19, 黒皮付き) を設置した供試体を用いた。海水噴霧試験では、図 3 (b) に示す様に、鉄筋コンクリート防せい剤 (JIS A 6205) 付属書 2 「コンクリート中の鉄筋の促進腐食試験方法」に示される供試体（みがき鉄筋を含む円柱供試体）を用い、みがき鉄筋（直径 13mm, 材質 JIS G 3108 SG3）を、かぶり 2cm の位置に 2 本設置した。劣化促進試験におけるコンクリートの配合は、海洋暴露試験と同様とした。

海水浸漬試験では、図 4 に示す装置を用い、人工海水の浸漬（塩素イオン濃度:1.8%, 温度:60℃）1 時間、高温湿潤（温度:70℃, 相対湿度 95%）1.5 時間、冷却乾燥 3.5 時間の 1 サイクル 6 時間の繰り返しを作用させた。海水噴霧試験では、図 5 に示す装置を用い、人工海水の噴霧（塩素イオン濃度:1.8%, 噴霧量:200ml/m²/hr, 温度:30℃）12 時間と高温乾燥（温度:40℃, 相対湿度:60%）12 時間の 1 サイクル 24 時間の繰り返しを作用させた。海水浸漬試験におい

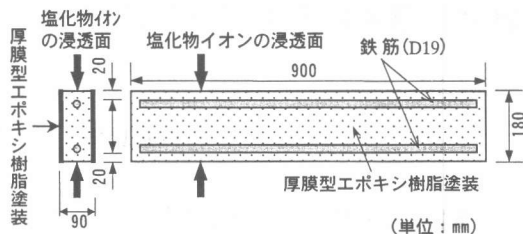


図 1 海洋暴露供試体の形状・寸法

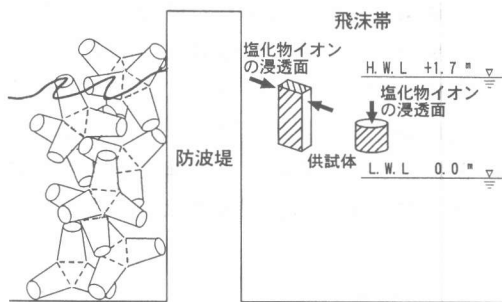
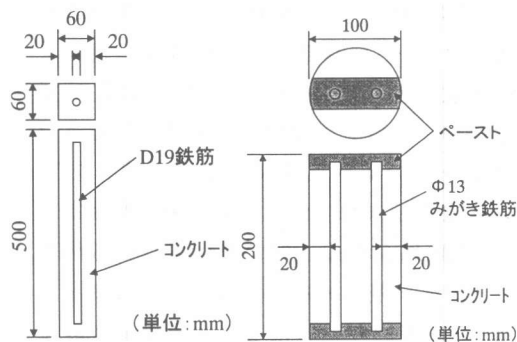


図 2 暴露試験場の環境条件

表 1 コンクリートの配合

| Gmax (mm) | W/C (%) | s/a (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | | フレッシュコンクリート | |
|--------------|------------|------------|--------------------------|-----|-----|-----|-----------|--------------|------------|
| | | | W | C | S | G | AE 減水剤 | スランブ (cm) | 空気量 (%) |
| 15 | 50.0 | 48.0 | 168 | 332 | 847 | 935 | 1.04 | 12.0 | 5.0 |



(a) 海水浸漬試験 (b) 海水噴霧試験

図 3 劣化促進試験に用いた供試体

ては、400 および 700 サイクル終了後に、海水噴霧試験は、90 および 150 サイクル終了後に、塩化物イオン量および鉄筋の腐食面積率の測定を行った。なお、塩化物イオン量の測定は、海洋暴露試験と同様な方法によって行った。

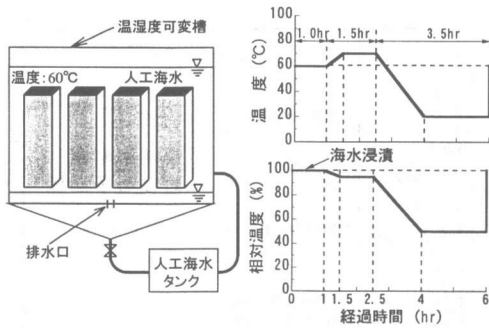


図4 海水浸漬・乾燥繰り返し試験装置

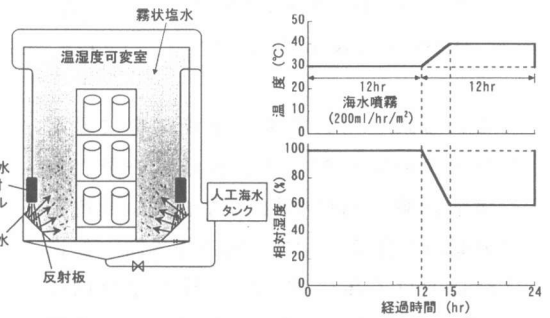


図5 海水噴霧・乾燥繰り返し試験装置

3. 試験結果

3.1 塩化物イオンの浸透量

促進試験および海洋暴露試験における塩化物イオン浸透量の分布を図6に示す。海洋暴露試験においては、深い位置まで塩化物イオンが浸透しているが、促進試験では、塩化物イオン量は、表面部分で多く、深い部分において少ない傾向が見られた。海水浸漬・乾燥繰り返し700サイクル(175日間)および海水噴霧・乾燥繰り返し150サイクル(150日間)における表面部(深さ0~2cm)の塩化物イオン量は、飛沫帯に暴露した場合の同位置における1~3年間の塩化物イオン浸透量に相当した。

また、飛沫帯に暴露した場合の塩化物イオンの浸透量の変化を図7に示す。筆者らは、これまでに、塩化物イオン浸透量は、Fickの拡散方程式の解(式(1))により表すことができ、表面塩化物イオン量(C_0)および見かけの拡散係数(D_c)は、時間経過と伴に変化することを示し、普通ポルトランドセメントを用いた水セメント比50%のコンクリートを飛沫帯に暴露した場合の C_0 および D_c は、式(2)、式(3)により表すことができること示した¹⁾。

$$C = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_c \cdot t}} \right) \right\} \quad (1)$$

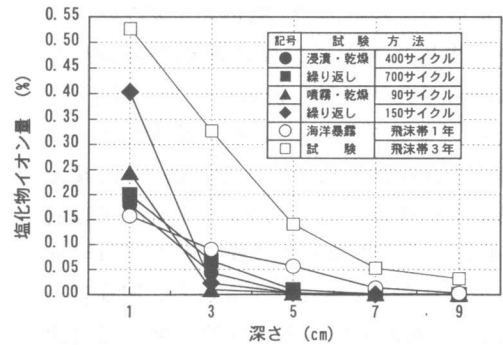


図6 促進試験および海洋暴露試験における塩化物イオン浸透量の分布

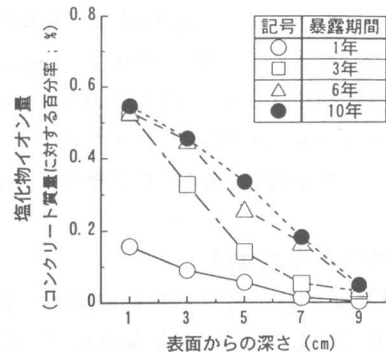


図7 塩化物イオン浸透量の変化(飛沫帯暴露)

x : 表面からの深さ (cm), t : 経過時間 (s)

C : 深さ x における塩化物イオン量 (%)

C_0 : 表面塩化物イオン量 ($x=0$ における塩化物イオン量 (%))

D_c : 見かけの拡散係数 (cm^2/s)

erf: 誤差関数 $\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^z e^{-t^2} \cdot dt$

$$Co(t)=0.70 (1 - e^{-0.61t}) \quad (2)$$

$$Dc(t)=18.9 \times 10^{-8} \cdot t^{-0.54} \quad (3)$$

これら式を用いて求めた飛沫帯に暴露した場合の塩化物イオン浸透量の予測値と促進試験における塩化物イオン浸透量の実測値を図8に示す。飛沫帯暴露と促進試験における塩化物イオン浸透量を比較し、促進試験における塩化物イオン浸透量が、何年間の飛沫帯の暴露期間に相当するかについて検討した。塩化物イオン浸透量から求めた各促進試験の海洋暴露対応年数および促進倍率を表2に示す。深さ0~2cmの位置の塩化物イオン浸透量より求めた飛沫帯暴露に対する促進倍率は、塩水浸漬・乾燥繰り返し700サイクルでは約1.4倍、塩水噴霧・乾燥繰り返し150サイクルでは約4.8倍と推定される。同様に、深さ2~4cmの位置の塩化物イオン浸透より求めた飛沫帯暴露に対する促進倍率は、塩水浸漬・乾燥繰り返し700サイクルでは約1.0倍と推定される。塩水噴霧・乾燥繰り返し150サイクルでは、深さ2~4cmの位置に塩化物イオンが浸透しておらず、塩化物イオンの浸透を促進させるためには、さらにサイクル数を増加する必要がある。

3.2 鉄筋腐食の進行

(1) 海洋暴露試験における鉄筋腐食の推定

海洋暴露試験における腐食面積率の経時変化を図9に示す。筆者らは、これまでに、鉄筋位置における塩化物イオン量とその存在時間の積分値を、式(4)に示す積算塩化物イオン量(TCL)と定義し、様々な海洋環境における鉄筋の腐食面積率とTCLの関係を調べた。その結果、腐食面積率とTCLの間には、図10に示す様な直線的な相関関係があり、腐食面積率が30%程度以下の範囲では、TCLにより鉄筋の腐食面積率を推定できることを示した¹⁾。

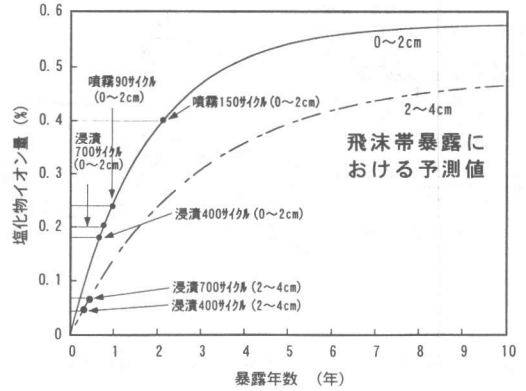


図8 塩化物イオン量の飛沫帯暴露における予測値と促進試験における測定値

表2 塩化物イオン量より求めた促進倍率

| 試験方法 | サイクル数(回) | 日数(日) | 深さ0~2cm | | 深さ2~4cm | |
|--------|----------|-------|-----------|------|-----------|------|
| | | | 暴露対応年数(年) | 促進倍率 | 暴露対応年数(年) | 促進倍率 |
| 海水浸漬試験 | 400 | 100 | 0.6 | 2.2 | 0.3 | 1.1 |
| | 700 | 175 | 0.7 | 1.4 | 0.5 | 1.0 |
| 海水噴霧試験 | 90 | 90 | 1.0 | 4.0 | 0.1 | 0.3 |
| | 150 | 150 | 2.0 | 4.8 | 0.3 | 0.7 |

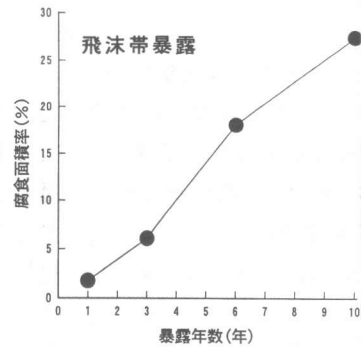


図9 鉄筋腐食面積率の経時変化

図10より、飛沫帯における鉄筋の腐食面積率(Ra)と積算塩化物イオン量(TCL)の関係は、式(5)で表される。ある時間間隔で塩化物イオン量を測定する暴露試験における積算塩化物イオン量(TCL)は、その期間における鉄筋位置の塩化物イオ

量の平均値と測定時間間隔(Δt_i)の積の総和として、式(4)により近似的に求めることができる。

$$TCL = \int_0^T Cl(t)dt \approx \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{Cl_i + Cl_{i+1}}{2} \cdot \Delta t_i \right) \quad (4)$$

TCL : 積算塩化物イオン量 (%・年)

T : 暴露期間 (年)

Cl_i : i 回目の測定の塩化物イオン量 (%)

Δt_i : 塩化物イオンの測定時間間隔 (年)

n : 塩化物イオン量の測定回数

$$Ra = 8.64 \cdot TCL \quad (5)$$

Ra: 鉄筋の腐食面積率 (%)

(2) 促進試験の促進倍率の検討

促進試験における鉄筋の腐食面積率を表3に示す。海水浸漬・乾燥繰り返しを700サイクル行った場合の腐食面積率は約10%、海水噴霧・乾燥繰り返しを150サイクル行った場合の腐食面積率は約2%となり、海水浸漬・乾燥繰り返し試験の方が、鉄筋腐食の進行は速いと考えられる。

普通ポルトランドセメントを用いた水セメント比50%のコンクリートを飛沫帯に暴露した場合について、式(1),(2),(3)を用いて求めた鉄筋位置(深さ3cm)の塩化物イオン浸透量の経時変化の予測値を図11に示し、式(4)を用いて求めた積算塩化物イオン量(TCL)の経時変化の予測値を図12に示す。さらに、積算塩化物イオン量(TCL)の予測値より、式(5)を用いて求めた飛沫帯に暴露した場合の鉄筋の腐食面積率の予測値と促進試験における鉄筋の腐食面積率の実測値を図13に示す。

海洋暴露試験の結果に基づく鉄筋の腐食面積率の予測値と促進試験における鉄筋腐食の実測値を比較することにより、飛沫帯暴露に対する各促進試験の促進倍率

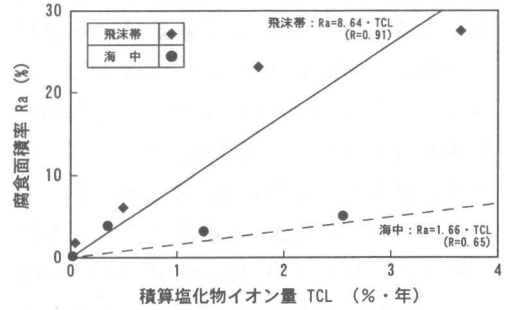


図10 積算塩化物イオン量(TCL)と腐食面積率(Ra)の関係

表3 促進試験における鉄筋腐食面積率

| 試験方法 | サイクル数 (回) | 日数 (日) | 腐食面積率 (%) |
|------------|--------------|-----------|--------------|
| 海水浸漬 試験 | 400 | 100 | 4.6 |
| | 700 | 175 | 10.1 |
| 海水噴霧 試験 | 90 | 90 | 0.9 |
| | 150 | 150 | 2.1 |

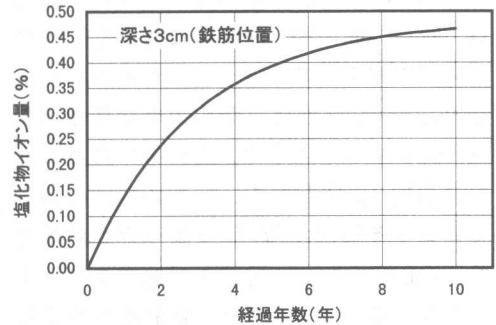


図11 塩化物イオン量の経時変化の予測値

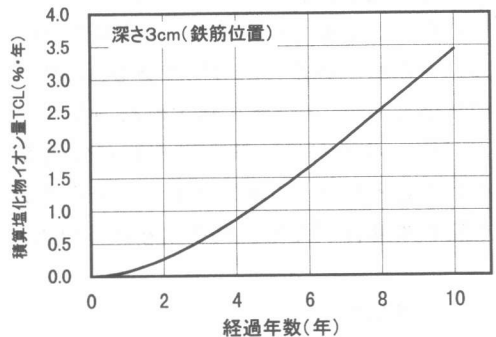


図12 積算塩化物イオン量(TCL)の経時変化の予測値

について検討した。鉄筋の腐食面積率から求めた各促進試験の海洋暴露対応年数および促進倍率を表4に示す。海水浸漬・乾燥繰り返し 700 サイクルにおける鉄筋の腐食面積率 (10.1%; 図 13 中の A) は、飛沫帯に暴露した場合の 4.8 年に相当し、海水噴霧・乾燥繰り返し 150 サイクルにおける鉄筋の腐食面積率 (2.1%; 図 13 中の C) は、飛沫帯に暴露した場合の 2.0 年に相当した。したがって、かぶりが 2cm の場合、鉄筋の腐食面積率から求めた海水浸漬試験の促進倍率は、飛沫帯に暴露した場合の約 10 倍であり、同様にして求めた海水噴霧試験の促進倍率は、飛沫帯に暴露した場合の約 5 倍であると考えられる。

本報告で提案する促進試験の促進倍率は、塩化物イオンの浸透量から求めた場合と鉄筋の腐食程度から求めた場合と異なる。例えば、海水浸漬・乾燥繰り返し試験では、鉄筋位置の塩化物イオンの浸透量は、同じ時間の間、飛沫帯に暴露した場合と同等であり、塩化物イオンの浸透は促進されないが、鉄筋腐食から求めた促進倍率は、表4に示すように、飛沫帯に暴露した場合の約 10 倍となる。すなわち、本報告で提案する海水浸漬・乾燥繰り返し試験では、塩化物イオンの浸透を促進することができない場合においても、鉄筋腐食の進行は著しく促進される。同様に、海水噴霧・乾燥繰り返し試験においても、塩化物イオンの浸透が促進されなくても、鉄筋腐食の進行を促進することが可能である。これらの試験においては、養生温度が高いことおよび短いサイクルの乾湿繰り返し作用を受けることにより、コンクリート中の鉄筋の腐食の進行が促進されることが考えられる。

4. まとめ

飛沫帯に暴露した鉄筋コンクリート供試体中の鉄筋の腐食の進行と劣化促進試験における鉄

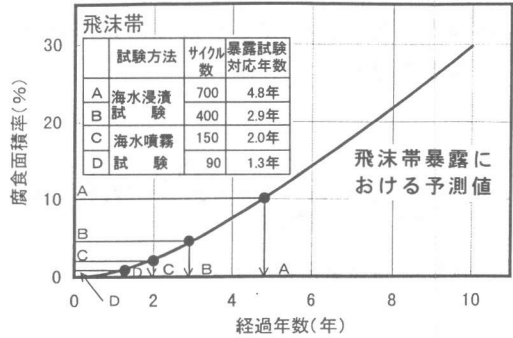


図 13 腐食面積率の飛沫帯暴露における推定値と促進試験における実測値

表 4 腐食面積率から求めた促進倍率

| 試験方法 | サイクル数 (回) | 日数 (日) | 暴露対応年数 (年) | 促進倍率 |
|--------|-----------|--------|------------|------|
| 海水浸漬試験 | 400 | 100 | 2.9 | 10.4 |
| | 700 | 175 | 4.8 | 9.8 |
| 海水噴霧試験 | 90 | 90 | 1.3 | 5.2 |
| | 150 | 150 | 2.0 | 4.8 |

筋腐食の進行を比較した結果、かぶりが 2cm 程度である場合、塩害劣化の促進試験として、本報告で提案する海水浸漬・乾燥繰り返し試験における鉄筋腐食の促進倍率は、飛沫帯に暴露した場合の約 10 倍、海水噴霧・乾燥繰り返し試験における鉄筋腐食の促進倍率は、飛沫帯に暴露した場合の約 5 倍であると考えられる。これらの塩害劣化の促進試験方法により、実環境における鉄筋腐食の進行を、ある程度推定することが可能であると考えられる。今後、実海洋環境と劣化促進試験による鉄筋腐食のメカニズムの差異等について検討する必要がある。

参考文献

- 1) 竹田宣典ほか: 種々の海洋環境条件におけるコンクリートの塩分浸透と鉄筋腐食に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 599/V-40, pp. 91~104, 1998