

# 論文 海洋コンクリートの耐久性に及ぼす暴露環境およびセメントの種類の影響

山路 徹<sup>\*1</sup>・Tarek Uddin Mohammed<sup>\*2</sup>・青山敏幸<sup>\*3</sup>・瀨田 秀則<sup>\*4</sup>

**要旨:** 海洋環境下に15年間暴露したコンクリートの耐久性に及ぼす暴露環境（干満帯および海中部）およびセメントの種類の影響について検討を行った。その結果、鉄筋腐食は海中部暴露供試体ではほとんど生じていなかった。一方、干満帯暴露供試体においては鉄筋の発錆限界塩化物イオン濃度が $1.2\text{kg/m}^3$ よりも大きくなり、またかぶりの影響を受けている傾向が認められた。

**キーワード:** 海洋コンクリート, 暴露環境, セメント, 塩化物イオン, 鉄筋腐食

## 1. はじめに

港湾構造物は常に塩化物イオンにさらされる厳しい環境に存在している。その結果、コンクリート中の鉄筋が腐食し、コンクリートの耐久性が損なわれることがある。また、暴露環境の影響を大きく受け、酸素の供給が少ない海中部では塩害は少なく、また酸素が供給される飛沫帯・干満帯では塩害が比較的進行しやすい。この暴露環境が耐久性に及ぼす影響が大きいことは分かっているが、定性的に過ぎないのが現状である。

そこで本研究では、コンクリートの長期耐久性に及ぼす影響因子として、特に暴露環境に着目して検討を行った。また、セメントの種類の影響についても検討を行った。この検討の際には、特に鉄筋腐食と塩化物イオンの関係、および鉄筋腐食と電気化学計測結果の関係に着目した。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

セメントは表-1に示す5種類のものを使用した。骨材は、細骨材として神奈川県酒匂川

産の川砂（表乾密度 $2.64\text{g/cm}^3$ 、吸水率 $1.82\%$ ）、粗骨材として神奈川県酒匂川産の川砂利（表乾密度 $2.76\text{g/cm}^3$ 、吸水率 $1.10\%$ ）を用いた。混和剤はAE減水剤および空気量調整剤を用いた。練り混ぜ水は水道水および久里浜湾より採取した海水（塩化物イオン濃度 $17\text{g/l}$ ）を用いた。

表-1 セメントの種類

| 記号  | 種類            |
|-----|---------------|
| OPC | 普通ポルトランドセメント  |
| S-A | 高炉セメントA種      |
| S-B | 高炉セメントB種      |
| S-C | 高炉セメントC種      |
| F-B | フライアッシュセメントB種 |

### 2.2 配合および供試体

試験に用いたコンクリートの配合を表-2に示す。目標スランプは $8\pm 1\text{cm}$ 、目標空気量は $4\pm 1\%$ とした。今回、暴露環境とセメントの種類に主に着目しているが、その他として水セメント比を $45\cdot 55\%$ 、練り混ぜ水を水道水・海水のそれぞれ2種類ずつ変化させて、これらの影響についても検討を行った。

また、供試体は図-1のような $\phi 15\times 30\text{cm}$ の円柱供試体で、無筋・有筋の2種類作成した。

\*1 独立行政法人港湾空港技術研究所地盤・構造部材料研究室研究官 工修（正会員）

\*2 独立行政法人港湾空港技術研究所地盤・構造部材料研究室研究官 工博（正会員）

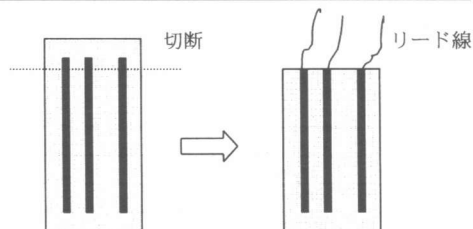
\*3 独立行政法人港湾空港技術研究所地盤・構造部材料研究室研修生（㈱ピーエス） 工修（正会員）

\*4 独立行政法人港湾空港技術研究所地盤・構造部材料研究室長 工博（正会員）

有筋のものはかぶりが2,4,7cmの3種類で鉄筋が挿入されている。

表-2 配合

| No. | セメント | W/C (%) | 単用量(kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |     |      |
|-----|------|---------|-------------------------|-----|-----|-----|------|
|     |      |         | W                       | C   | S   | G   |      |
| 1   | OPC  | 45      | 水道水                     | 162 | 360 | 738 | 1110 |
| 2   |      | 55      |                         | 166 | 302 | 826 | 1056 |
| 3   |      | 45      | 海水                      | 165 | 367 | 732 | 1102 |
| 4   |      | 55      |                         | 168 | 305 | 823 | 1051 |
| 5   | S-A  | 45      | 水道水                     | 158 | 351 | 758 | 1094 |
| 6   |      | 55      |                         | 158 | 287 | 820 | 1092 |
| 7   |      | 45      | 海水                      | 160 | 356 | 756 | 1091 |
| 8   |      | 55      |                         | 162 | 295 | 812 | 1081 |
| 9   | S-B  | 45      | 水道水                     | 160 | 355 | 736 | 1108 |
| 10  |      | 55      |                         | 162 | 295 | 793 | 1099 |
| 11  |      | 45      | 海水                      | 162 | 360 | 733 | 1103 |
| 12  |      | 55      |                         | 164 | 298 | 789 | 1094 |
| 13  | S-C  | 45      | 水道水                     | 162 | 360 | 714 | 1120 |
| 14  |      | 55      |                         | 164 | 298 | 770 | 1112 |
| 15  |      | 45      | 海水                      | 164 | 364 | 710 | 1114 |
| 16  |      | 55      |                         | 166 | 302 | 767 | 1107 |
| 17  | F-B  | 45      | 水道水                     | 158 | 351 | 738 | 1110 |
| 18  |      | 55      |                         | 160 | 291 | 792 | 1097 |
| 19  |      | 45      | 海水                      | 160 | 356 | 733 | 1103 |
| 20  |      | 55      |                         | 162 | 295 | 790 | 1096 |



かぶり 4, 7, 2cm

図-1 供試体 (φ15×30cmの円柱)

### 2.3 暴露環境

港湾技術研究所所有の循環水槽内における図-2の干満サイクルが生じている干満部・海中部に

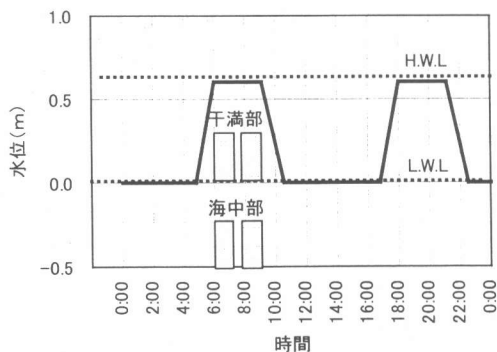


図-2 暴露位置および干満サイクル

それぞれ暴露を行った。なお海水中の塩化物イオン濃度は17g/lである。1985年に暴露を開始し、約15年後の2000年4月に供試体を引き上げた。

### 2.4 試験項目

以下に各試験方法の概要について述べる。

#### (1) 圧縮試験

φ15×30cm供試体を用い、JIS A 1108に準拠して実施した。

#### (2) 塩化物イオン量測定

φ15×30cm供試体側面から深さ方向に5~15, 15~25, 35~45, 65~75mmの範囲で試料を採取し、JCI-SC4に準拠し電位差滴定方法により全塩化物イオン量および可溶性塩化物イオン量を測定した。

#### (3) 電気化学測定

φ15×30cmの有筋供試体を水平方向に切断して鉄筋を露出させ、リード線をはんだで接続した後(図-1参照)、供試体を海水中に浸漬させた状態で海水塩化銀電極を用いて自然電位の測定を行った。また、交流インピーダンス法により分極抵抗 $R_p$ の測定を行い、式(1)を用いて腐食速度 $I_{corr}$ への換算を行った。

$$I_{corr} = B / R_p \quad (1)$$

ここで、B: 定数 (0.026V) を用いた<sup>1)</sup>。また、結果の判定については、自然電位については文献2)、腐食速度については文献3)を参考に行った。それぞれの判定表を表-3および表-4に示す。

表-3 自然電位判定表

| 電位(mV, Ag/AgCl)  | 腐食の確率     |
|------------------|-----------|
| $E > -80$        | 90%以上腐食なし |
| $-230 < E < -80$ | 不確定       |
| $E < -230$       | 90%以上腐食あり |

表-4 腐食速度判定表

| 腐食速度<br>$I_{corr}$<br>( $\mu A/cm^2$ ) | 判定          |
|--|-------------|
| 0.1-0.2未満                              | 不動態状態(腐食無し) |
| 0.2-0.5                                | 低~中程度の腐食速度  |
| 0.5-1                                  | 中~高程度の腐食速度  |
| 1以上                                    | 激しい、高い腐食速度  |

#### (4) 鉄筋腐食面積測定

供試体を割裂して鉄筋を取り出し、腐食部分を透明フィルムに写し取って、その面積を求めた。

### 3. 実験結果

#### 3.1 圧縮強度

##### (1) 干満帯暴露

図-3はW/C=55%で練り混ぜ水が水道水の供試体の材齢28日および15年における圧縮強度をセメント別に整理したものである。S-Cの伸びが大きく、その他は横ばいあるいは微増であった。

##### (2) 海中部暴露

図-4はW/C=55%で練り混ぜ水が水道水の供試体の材齢28日および15年における圧縮強度をセメント別に整理したものである。図-1と同様にS-Cの伸びが大きく、その他は横ばいあるいは微増であった。

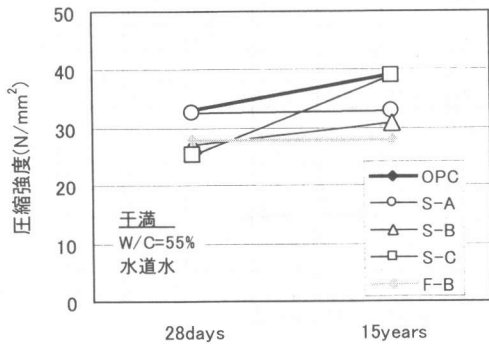


図-3 圧縮強度 (干満帯・セメント別)

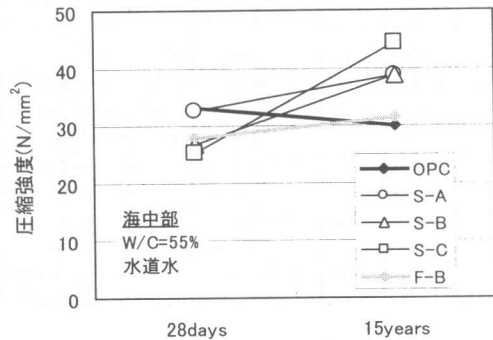


図-4 圧縮強度 (海中部・セメント別)

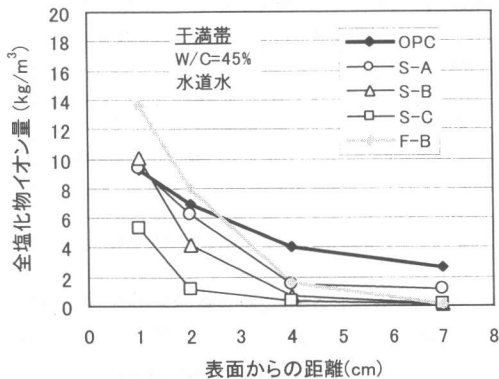


図-5 全塩化物イオン量  
(干満帯・セメント別)

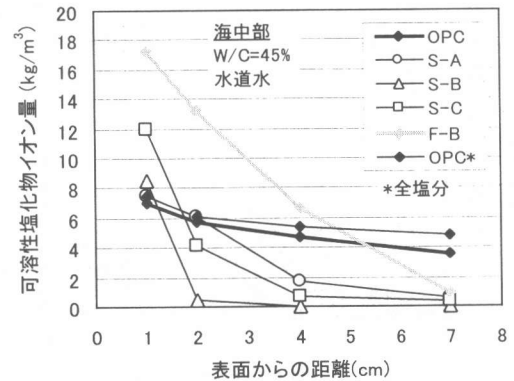


図-6 可溶性塩化物イオン量  
(海中部・セメント別)

#### 3.2 塩化物イオンの浸透性

##### (1) 干満帯

図-5はW/C=45%で練り混ぜ水が水道水の供試体に浸透した全塩化物イオン量を示す。表面付近ではセメントに関係無く多くの塩化物イオンが浸透しているが、高炉セメント・フライアッシュセメントの場合は内部において浸透量が著しく減少している。また、S-A,S-B,S-Cと高炉スラグの量が増えるにつれて浸透量は少なくなった。

##### (2) 海中部

図-6にW/C=45%で練り混ぜ水が水道水の供試体に浸透した可溶性塩化物イオン量を示す。また図中には比較として、OPCの場合の全塩化物イオン量も掲載した。干満帯の結果と同様に、高炉セメント・フライアッシュセメントの場合は内部において浸透量が著しく減少している。

### 3.3 塩化物イオンと腐食の関係

表-5に干満帯・海中部暴露供試体に浸透した塩化物イオン量(全・可溶性)および鉄筋の腐食面積率を示す。ここで、海中部の配合No.5,9,13,17は可溶性塩化物イオン量である。可溶性塩化物イオン量は全塩化物イオン量よりも少ないため、実際に供試体中に浸透している全塩化物イオン量は表-3の値よりも大きくなっている可能性が高い。

また、図-7に干満帯・海中部における塩化物イオンと腐食面積率の関係をかぶり深さ別に整理したものを示す。また、図中の「 $1.2\text{kg/m}^3$ 」はコンクリート標準示方書(施工編)に示された発錆限界塩化物イオン濃度の値である。干満帯の方は塩化物イオンが $2.0\text{kg/m}^3$ 付近から腐食の傾向が見られ始め、さらに大きくなると明確な腐食傾向が見られる。また、当然のことながらかぶり深さが小

表-5 塩化物イオン量(全・可溶性)と腐食面積率

| No. | W/C | 水   | 干満帯                 |       |      |          |      |      | 海中部                 |              |             |             |     |     |     |
|-----|-----|-----|---------------------|-------|------|----------|------|------|---------------------|--------------|-------------|-------------|-----|-----|-----|
|     |     |     | 全塩分 $\text{kg/m}^3$ |       |      | 腐食面積率(%) |      |      | 全塩分 $\text{kg/m}^3$ |              |             | 腐食面積率(%)    |     |     |     |
|     |     |     | 2                   | 4     | 7    | 2        | 4    | 7    | 2                   | 4            | 7           | 2           | 4   | 7   |     |
| 1   | OPC | 水道水 | 45                  | 6.98  | 4.07 | 2.63     | 26.0 | 3.0  | 0                   | 6.11         | 5.38        | 4.78        | 0   | 0   | 0   |
| 2   |     |     | 55                  | 7.09  | 5.43 | 2.66     | 93.2 | 12.8 | 6.1                 | 9.84         | 7.68        | 8.32        | 0   | 0   | 0   |
| 3   |     | 海水  | 45                  | 10.04 | 7.37 | 5.62     | 47.2 | 35.8 | 0                   | 9.79         | 11.50       | 6.72        | 0   | 0   | 0   |
| 4   |     |     | 55                  | 7.77  | 7.11 | 7.01     | 11.0 | 11.4 | 4.8                 | 15.03        | 12.86       | 12.94       | 0   | 1.4 | 0.2 |
| 5   | S-A | 水道水 | 45                  | 6.29  | 1.52 | 1.20     | 21.8 | 0    | 0                   | <i>6.05</i>  | <i>1.74</i> | <i>0.63</i> | 0   | 0   | 0   |
| 6   |     |     | 55                  | 7.12  | 2.03 | 0.24     | 9.8  | 7.9  | 0                   | -            | -           | -           | 0   | 0   | 0   |
| 7   |     | 海水  | 45                  | 5.93  | 2.92 | 1.56     | 16.0 | 0    | 0                   | -            | -           | -           | 0   | 0   | 0   |
| 8   |     |     | 55                  | 7.99  | 4.62 | 2.85     | 15.7 | 5.9  | 0                   | -            | -           | -           | 2.0 | 2.6 | 4.0 |
| 9   | S-B | 水道水 | 45                  | 4.12  | 0.67 | 0.17     | 1.1  | 0    | 0                   | <i>0.40</i>  | -           | -           | 0.8 | 0   | 0   |
| 10  |     |     | 55                  | 6.19  | 2.02 | 0.14     | 51.7 | 0    | 0                   | -            | -           | -           | 2.4 | 0   | 0   |
| 11  |     | 海水  | 45                  | 5.89  | 2.94 | 1.56     | 37.6 | 2.1  | 0                   | -            | -           | -           | 3.5 | 1.5 | 0   |
| 12  |     |     | 55                  | 7.36  | 4.04 | 1.64     | 7.3  | 5.7  | 0                   | -            | -           | -           | 2.4 | 2.2 | 0   |
| 13  | S-C | 水道水 | 45                  | 1.19  | 0.33 | 0.09     | 0    | 0    | 0                   | <i>4.10</i>  | <i>0.69</i> | <i>0.33</i> | 0   | 0   | 0   |
| 14  |     |     | 55                  | 2.76  | 0.30 | 0.51     | 6.0  | 0    | 0                   | -            | -           | -           | 0   | 0   | 0   |
| 15  |     | 海水  | 45                  | 5.08  | 1.32 | 1.49     | 8.8  | 0.23 | 0                   | -            | -           | -           | 4.9 | 0   | 0   |
| 16  |     |     | 55                  | 4.53  | 2.42 | 1.91     | 21.8 | 5.13 | 0                   | -            | -           | -           | 0   | 0   | 0   |
| 17  | F-B | 水道水 | 45                  | 8.00  | 1.68 | 0.11     | 53.6 | 0    | 0                   | <i>13.19</i> | <i>6.62</i> | <i>0.92</i> | 0   | 0   | 0   |
| 18  |     |     | 55                  | 7.29  | 4.92 | 3.28     | 86.8 | 28.1 | 0                   | -            | -           | -           | 0   | 0   | 0   |
| 19  |     | 海水  | 45                  | 10.97 | 4.75 | 1.11     | 84.1 | 43.7 | 0                   | -            | -           | -           | 0.3 | 0.6 | 0   |
| 20  |     |     | 55                  | 11.82 | 6.35 | 1.92     | 60.7 | 29.2 | 0                   | -            | -           | -           | 0   | 0.6 | 0.3 |

(斜体は可溶性塩分の値)

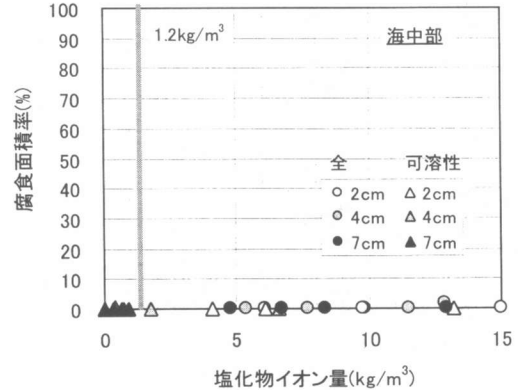
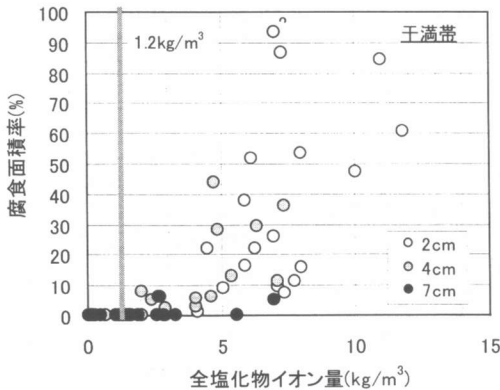


図-7 塩化物イオン量(全・可溶性)と腐食面積率

いほど腐食傾向にあり、かぶり大きいものは全塩化物イオン量が大きくても腐食していないのが目立つ。

今回の干満帯の結果において、発錆限界塩化物イオン濃度は「 $1.2\text{kg/m}^3$ 」よりも大きくなっているようである。これは、腐食の要因である酸素の拡散性状はコンクリートの含水量の増加とともに小さくなるため<sup>4)</sup>、陸上部などと比較して乾燥することが少ない干満帯のような環境では発錆限界塩化物イオン濃度が大きくなると考えられる。ゆえに同じ干満帯でも乾燥の度合いによって異なると考えられる。

一方、海中部の方は塩化物イオンが干満帯よりも多く浸透しているにもかかわらず、ほとんど腐食していない結果となった。これは海中部のため、外部からの酸素の供給量および内部を浸透する量が少なかったためと考えられる。

### 3.4 かぶりと腐食の関係

図-8はかぶりと塩化物イオン量に対して、鉄筋の腐食状況をプロットしたものである。ここで、腐食面積率が1%以下のものを「腐食なし」、1%以上のものを「腐食あり」と定義した。また図中の点線は文献5)における腐食領域と非腐食領域の境界線を引用しており、かぶり大きいほど発錆限界塩化物イオン量の値が大きくなることを示唆

するものである。干満帯の方はかぶりが2cmの場合はほとんどが腐食しており、逆に7cmの場合は腐食が認められないか、あるいは非常に軽微なものであった。そして全体として、文献5)の結果と同様にかぶりとともに発生限界塩化物イオンが増加するという傾向を示しているようである。

一方、海中部においては先にも述べたように塩化物イオンがかなり多いにもかかわらず腐食はほとんど認められない。

### 3.5 腐食性状と電気化学測定結果の比較

図-9に自然電位と腐食面積率の関係を、図-10に分極抵抗より求めた腐食速度 $I_{\text{corr}}$ と腐食面積率の関係をかぶり別に整理した結果を示す。図-9 a)干満帯において、自然電位が卑になるにつれて腐食面積率が大きくなっていることが分かる。また、表-3の「 $-230\text{mV}$ 」を超えると概ね腐食している傾向にある。一方、b)海中部においては自然電位がかなり卑になっても腐食していない。

図-10 a)干満帯において、 $I_{\text{corr}}$ が大きくなるにつれて腐食面積率が大きくなっていることが分かる。また、表-4の「中から高程度の腐食速度: $0.5\sim 1.0\mu\text{A/cm}^2$ 」を超えると概ね腐食している傾向にある。一方、b)海中部においては $I_{\text{corr}}$ がかなり大きくなっても腐食していない。

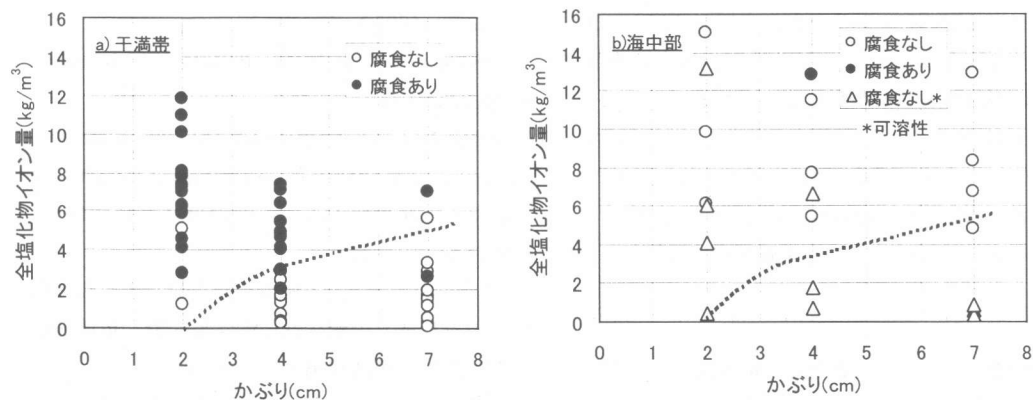


図-8 かぶり・全塩化物イオン量と腐食の関係

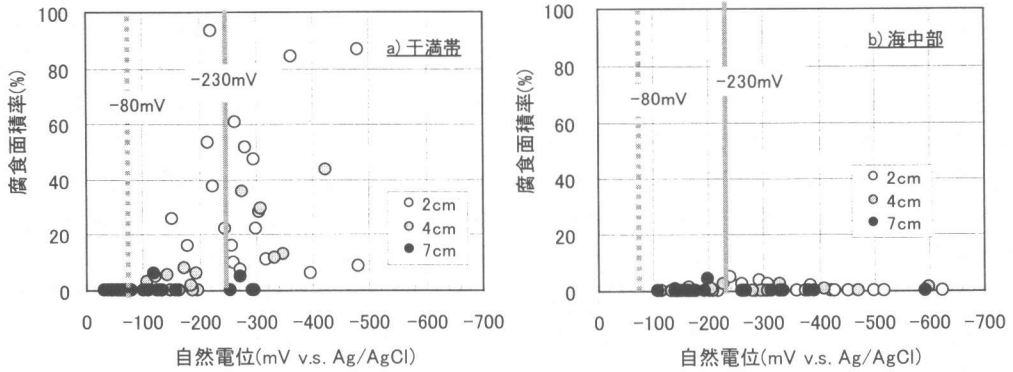


図-9 自然電位と腐食面積率の関係

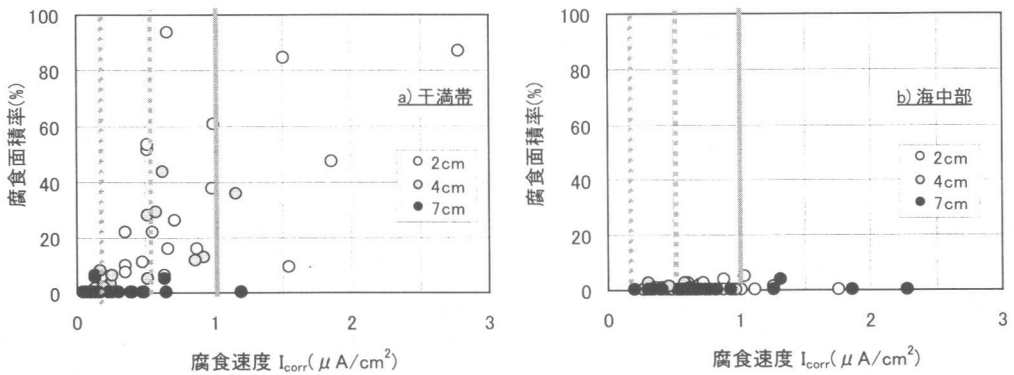


図-10 腐食速度 $I_{corr}$ と腐食面積率の関係

#### 4. 結論

得られた結果を以下に示す。

- (1) 塩化物イオンは干満帯に比べて海中部の方が多く浸透している。また高炉セメント・フライアッシュセメントを用いた場合に内部に浸透する量がかなり抑えられる。
- (2) 鉄筋腐食は海中部ではほとんど生じていない。一方干満帯の場合、発生限界塩化物イオン濃度が $1.2\text{kg/m}^3$ よりも大きく、またかぶりの影響を受けている傾向が認められた。

#### 謝辞

本実験において、呉高専迫井裕樹氏、(株)テクニカの方に多大なるご協力を頂きました。ここに厚くお礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 横田優：交流インピーダンス法に基づくコンクリート中の鉄筋腐食評価に関する研究，徳島大学博士論文，1995.3
- 2) ASTM C876：Half-Cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete
- 3) CEB Working Party V/4.1：Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures affected by Reinforcement Corrosion (draft 4)，BBRI-CST C-WTCB，1997.12
- 4) 福手・山本・濱田：海水を練り混ぜ水とした海洋コンクリートの耐久性に関する研究，港湾技術研究所報告，第29巻第3号，1990.9
- 5) 武田・丸屋：鉄筋腐食による劣化を考慮した補修後のかぶり，土木学会第55回年次学術講演会，2000.9