

運輸省港湾技術研究所 正 ○大郎 信明  
正 森 好生  
下沢 治

## 1. はじめに

近年、鉄筋防食の観点よりコンクリートの塩素含有量に対する関心が高まっている。一方、海洋環境におけるコンクリート構造物に大量の塩素が浸入している 実態については、認識が少ないと思われる。

本文は、海洋環境におけるコンクリートの塩素含有量について当所で行った暴露試験および実構造物調査の概要をとりまとめたものである。

## 2. 暴露試験

海洋環境に10年間および5年間暴露したコンクリート供試体(φ15×30cm)のかぶり別(2, 4, 7cm)の塩素含有量(全塩素、モルタルに対する重量百分率、以下同様)を表-1、表-2に示す。表-1には、塩素含有量およびこれに及ぼすセメントの種類(普通、早強ポルトランド、B種高炉、アルミナセメント)、かぶり、練りまぜ水(海水、水道水)の影響を示す。なお、海水を練りまぜ水として用いたことにより浸入する塩素量は、モルタルに対しておおむね0.25%である。また、ばらつきが大きいのは、コンクリートからモルタル試料を採取する際に粗骨材の混入を防止することが困難である。にことばの理由による(以下同様)。表-2には、塩素含有量およびこれに及ぼす暴露環境(海中部、感潮部、陸上部)、かぶり、骨材、打継目の影響を示す。なお、打継目はレイタンスを除かず、24時間後に打継いたものである。

表-1 塩素含有量その1 (材令10年, 全塩素, 感潮部) %

| セメントの種類          | かぶり<br>(cm) | 水道水<br>練り | 海水<br>練り | 備 考         |
|------------------|-------------|-----------|----------|-------------|
| 普通ポルト<br>W/C=53% | 2           | 1.73      | 1.65     | 7日目より<br>暴露 |
|                  | 4           | 1.55      | 1.70     |             |
|                  | 7           | 1.33      | 1.30     |             |
| 早強ポルト<br>W/C=54% | 2           | 1.63      | 2.70     | 4日目より<br>暴露 |
|                  | 4           | 1.00      | 1.75     |             |
|                  | 7           | 1.40      | 1.50     |             |
| B種高炉<br>W/C=53%  | 2           | 1.08      | 1.50     | 7日目より<br>暴露 |
|                  | 4           | 0.80      | 0.98     |             |
|                  | 7           | 0.40      | 0.98     |             |
| アルミナ<br>W/C=52%  | 2           | 0.36      |          | 7日目より<br>暴露 |
|                  | 4           | 0.16      |          |             |
|                  | 7           | 0.08      |          |             |

表-2 塩素含有量 その2 (材令5年全塩素) %

|                                     | かぶり<br>(cm) | 感潮部  | 海中部  | 陸上部  | 備 考                         |
|-------------------------------------|-------------|------|------|------|-----------------------------|
| 河川産骨材<br>(普通ポルト)<br>W/C=42%         | 2           | 0.48 | 0.69 | 0.03 | 骨材最大寸法<br>25mm<br>打設後28日で暴露 |
|                                     | 4           | 0.34 | 0.38 | 0.05 |                             |
|                                     | 7           | 0.15 | 0.25 | 0.05 |                             |
| 沖繩産骨材1<br>本部砕石<br>普通ポルト<br>W/C=44%  | 2           | 0.56 | 0.83 | 0.10 | 骨材最大寸法<br>40mm<br>打設後28日で暴露 |
|                                     | 4           | 0.55 | 0.70 | 0.07 |                             |
|                                     | 7           | 0.33 | 0.50 | 0.07 |                             |
| 沖繩産骨材2<br>宮古砕石<br>普通ポルト<br>W/C=45%  | 2           | 0.40 | 0.49 | 0.17 | 骨材最大寸法<br>25mm<br>打設後28日で暴露 |
|                                     | 4           | 0.44 | 0.48 | 0.10 |                             |
|                                     | 7           | 0.40 | 0.41 | 0.10 |                             |
| 打継目供試体<br>河川産骨材<br>早強ポルト<br>W/C=50% | 2           |      | 0.88 |      | 骨材最大寸法<br>25mm<br>打設後50日で暴露 |
|                                     | 4           |      | 0.50 |      |                             |
|                                     | 7           |      | 0.38 |      |                             |

表-3 長期間海洋環境に暴露された  
無筋コンクリートの塩素含有量 (%)

| 構造物         | 試験時までの<br>経過年数 | かぶり (cm) |      |       |      |
|-------------|----------------|----------|------|-------|------|
|             |                | 0~4      | 8~12 | 16~20 |      |
| 七尾港<br>岸壁   | 18 年           | 0.24     | 0.22 | 0.23  | 0.29 |
|             |                | 0.32     | 0.32 | 0.33  |      |
|             |                | 0.29     | 0.37 | 0.34  |      |
|             |                | 0.29     | 0.32 | 0.21  |      |
| 滝港<br>護岸    | 44 年           | 0.26     | 0.12 | 0.04  | 0.04 |
|             |                | 0.20     | 0.12 | 0.05  |      |
|             |                | 0.23     | 0.14 | 0.05  |      |
|             |                | 0.23     | 0.10 | 0.02  |      |
|             |                | 0.13     | 0.10 | 0.05  |      |
| 津港<br>護岸    | 15 年           | 0.13     | 0.08 | 0.06  | 0.06 |
|             |                | 0.08     | 0.07 | 0.06  |      |
|             |                | 0.08     | 0.07 | 0.06  |      |
| 宇治山田<br>港護岸 | 15 年           | 0.10     | 0.06 | 0.03  | 0.07 |
|             |                | 0.07     | 0.06 | 0.06  |      |
|             |                | 0.08     | 0.09 | 0.07  |      |

この結果、海中部および感潮部に長期間暴露したコンクリートの塩素含有量は、コンクリート材料に含まれる場合の制限(塩分3%の海水および塩分0.1%の海砂を使用した場合、塩素含有量はそれぞれ0.25%および0.04%程度である)に比べて著しく多い(例えば、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートを感潮部に10年間暴露した場合のかぶり7cmにおける塩素含有量は1.3%であった)。普通および早強ポルトランドセメントを用いたものの塩素含有量は、B種高炉、アルミナセメントに比べて多い、かぶりが大きいほど塩素含有量は

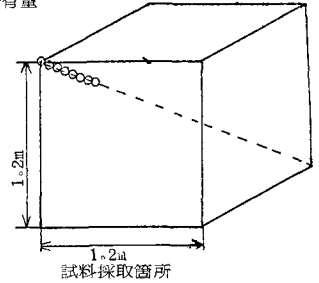
さいなどの点が認められた。

### 3. 実構造物調査および見かけの拡散係数

建設後15~44年経過してコンクリート岸壁および護岸の塩素含有量を表-3に示す。これら構造物は、感潮部に近い海面上にあり、比較的少ない塩素含有量である。また、浸透後およそ15年経過して浅い海中部の根固めブロックの対角線方向の塩素含有量を表-4に示す。10, 20, 30 cmでは、1.66, 0.76,

表-4 海中コンクリートブロックの(%)  
水溶性塩素含有量

| 深さ (cm) | 塩素含有量 (%) |
|---------|-----------|
| 10      | 1.66      |
| 20      | 0.76      |
| 30      | 0.35      |
| 40      | 0.09      |
| 50      | 0.06      |
| 60      | 0.07      |
| 70      | 0.08      |
| 80      | 0.08      |



0.35%と比較的多く含んでいるが、40~80 cmでは塩素含有量は0.1%と微量である。さらに、建設後それぞれ15年および20年経過して感潮部に近い海面上(飛沫部と称する)にあるさん橋スラブの塩分含有量を表-5に示す。

次に、文献りに準じて見かけの塩素拡散係数を求めた。塩素の浸入方向が垂直角かつ塩素の浸入量が1つという計算上の仮定を考慮し、計算には表-5のデータを使用した。塩素含有量の分布を  $C/C_0 = 1 - \operatorname{erf}(-x/2\sqrt{Dt})$  と仮定し、最小二乗法により見かけの拡散係数を求めた。データおよび計算結果を図-1および表-5に示す。参考として文献2)のデータも示す。D'はおよそ  $10^{-8} \sim 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$  の範囲にあると思われる。(x: 表面からの距離(cm), C: xでの塩素含有量(%),  $C_0$ : x=0でのC, t: 経過時間(s), D': 見かけの拡散係数( $\text{cm}^2/\text{s}$ ))

### 4. まとめ

- (1) 海洋環境に長期間暴露してコンクリートの塩素含有量は著しく多い。例えば、普通ポルトランドセメント、かぶり7cm、暴露期間10年の場合の塩素含有量は、モルタル重量に対して1.0%を越える。
- (2) コンクリートの塩素含有量は、使用するセメントの種類によつて差がある。
- (3) 普通ポルトランドセメントを用いた実構造物コンクリート中の塩素の見かけの拡散係数はおよそ  $10^{-8} \sim 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$  である。

表-5 塩素含有量および見かけの拡散係数

|             | データの<br>種類                                      | かぶり<br>(cm)    | 塩素<br>含有量(%) | 経過<br>年数 | 計算値   |      |
|-------------|-------------------------------------------------|----------------|--------------|----------|-------|------|
|             |                                                 |                |              |          | Co(%) | D' ※ |
| 飛<br>沫<br>部 | ① スラブ<br>コン<br>リート<br><br>C=315kg/m³<br>W/C=36% | 2.5            | 0.08         | 20 年     | 0.10  | 0.39 |
|             |                                                 | 7.5            | 0.05         |          |       |      |
|             |                                                 | 12.5           | 0.035        |          |       |      |
|             |                                                 | 17.5           | 0.03         |          |       |      |
|             | ② スラブ<br>コン<br>リート<br><br>C=480kg/m³<br>W/C=43% | 2.5            | 0.63         | 20 年     | 0.56  | 0.13 |
|             |                                                 | 7.5            | 0.21         |          |       |      |
|             |                                                 | 12.5           | 0.10         |          |       |      |
|             |                                                 | 17.5           | 0.02         |          |       |      |
|             | ③ スラブ<br>コンク<br>リート<br>(はり部)<br><br>W/C=60%     | 2.5            | 0.29         | 15 年     | 0.28  | 0.26 |
|             |                                                 | 2.5            | 0.16         |          |       |      |
|             |                                                 | 7.5            | 0.10         |          |       |      |
|             |                                                 | 7.5            | 0.06         |          |       |      |
|             |                                                 | 15.0           | 0.02         |          |       |      |
|             |                                                 | 15.0           | 0.05         |          |       |      |
| 海<br>中<br>部 | 文献 2)<br><br>モルタル<br>W/C=40%                    | 0.5            | 0.35         | 0.5 年    | 0.94  | 0.11 |
|             |                                                 | 1.25           | 0.15         |          |       |      |
|             |                                                 | 1.75           | 0.01         |          |       |      |
|             |                                                 | 0.5            | 0.50         |          |       |      |
|             |                                                 | 1.25           | 0.30         | 1.0 年    |       |      |
|             |                                                 | 2.0            | 0.15         |          |       |      |
|             |                                                 | 2.75           | 0.01         |          |       |      |
|             |                                                 | 0.25           | 1.00         |          |       |      |
|             |                                                 | 0.90           | 0.52         | 2.0 年    |       |      |
|             |                                                 | 1.5            | 0.38         |          |       |      |
|             |                                                 | 2.25           | 0.25         |          |       |      |
|             |                                                 | 3.1            | 0.08         |          |       |      |
|             |                                                 |                |              |          |       |      |
| 文献 1)       |                                                 | ペースト W/C=40.0% |              |          | 0.694 |      |

※ ( $10^{-7} \text{ cm}^2/\text{sec}$ )

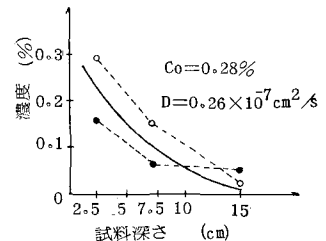


図-1 塩素含有量の実測値と計算値  
(表-5 ③に対応)

### 参考文献

- 1) 近藤, 佐竹, 牛山 "セメント硬化体中のイオン拡散" セメント年報XXVIII, pp.58~61, S49
- 2) O.E. Gjrv, F. Vennesland "Diffusion of chloride ions from sea water into concrete" C.C.R. Vol 9, pp.229~238, 1979