

論文 大気中環境下における塩化物イオンの見掛けの拡散係数の設定に関する一考察

皆川 浩*1・中村 英佑*2・藤井 隆史*3・綾野 克紀*4

要旨：新しい材料で実績が少ない場合、現状では浸せき試験や電気泳動試験により、塩害環境下における鋼材腐食の照査に用いる塩化物イオンの見掛けの拡散係数を求めることになる。しかし、これらの試験は実際の環境条件を直接的に考慮した試験方法ではないため、照査結果が過剰に安全側になる可能性がある。本稿では、大気中環境下での曝露試験と浸せき試験によって得られる塩化物イオンの見掛けの拡散係数を比較し、両者の差異の主要因がコンクリート中の含水率にあることを指摘するとともに、照査で用いる塩化物イオンに対する設計拡散係数を求めるために必要となる実環境条件を考慮するための係数を検討した。

キーワード：塩化物イオンの見掛けの拡散係数, 浸せき試験, 曝露試験, 含水率

1. はじめに

2017年制定土木学会コンクリート標準示方書〔設計編：標準〕（以下、示方書）に規定されているように、塩害環境下における鋼材腐食に対する照査は、Fickの第二法則の拡散方程式の解を用いて鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値（以下、 C_d ）を算定し、その設計値の鋼材腐食発生限界濃度に対する比に構造物係数を乗じた値が1.0以下になることを確かめることにより実施されている。ここで、 C_d を算定するためには、コンクリート表面における塩化物イオン濃度（以下、表面塩化物イオン濃度 C_0 ）などの他に、塩化物イオンに対する設計拡散係数（以下、 D_d ）を定める必要がある。

D_d を定めるにあたっては、コンクリートの塩化物イオンに対する拡散係数の特性値（以下、 D_k ）が必要となるが、示方書では、(i) 水セメント比と見掛けの拡散係数との関係式、(ii) 電気泳動法や浸せき法を用いた室内実験または自然曝露実験、(iii) 実構造物調査のいずれかの方法で求めるように規定されている。

標準的あるいはそれに近い材料や配合であれば、示方書に示される(i)の関係式によって D_k を求めることができる。しかし、新しい材料で実績が少ない材料や配合の場合、現状ではJSCE-G 572「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法」、または、JSCE-G 571「電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法」等の電気化学的な試験により、 D_k を求めることになる。しかし、これらの試験は、コンクリート中の空隙が液状水で飽和され、静水かつ恒温（土木学会規準では 20℃）環境下で実施されるために、実構造物での気温、日射、乾湿繰返し等の環境条件

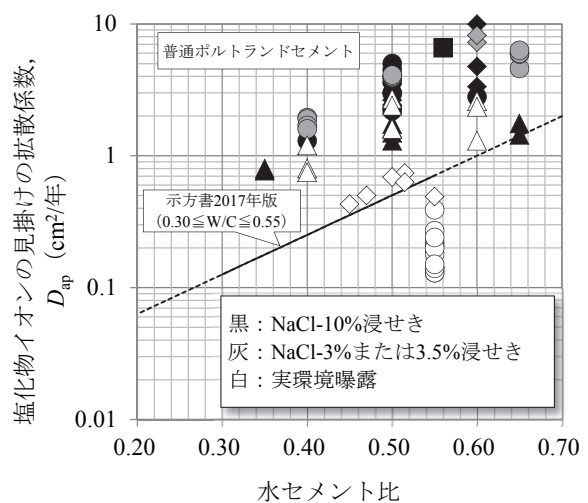


図-1 塩化物イオンの見掛けの拡散係数の測定事例

を直接的に考慮した試験方法ではない。そのため、既報において山路ら¹⁾が指摘しているように、室内試験と曝露試験とでは得られる塩化物イオンの拡散係数には差異が生じる。図-1は、参考文献^{2)~11)}に示された塩化物イオンの見掛けの拡散係数を水セメント比で整理したものである。同じセメントや水セメント比であっても、試験条件によって得られる塩化物イオンの見掛けの拡散係数が異なることがわかる。

JSCE-G 571 や JSCE-G 572 による試験では、コンクリート中の空隙は液状水で飽和している。それに対し、水掛かりが少ない実部材のコンクリートでは、乾燥によって空隙水の飽和度が低下し、塩化物イオンの拡散経路となる液状水の連続性が低下する。この場合、コンクリートが乾燥するほど、塩化物イオンの見掛けの拡散係数は

*1 東北大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 准教授 博(工) (正会員)

*2 国立研究開発法人土木研究所 先端材料資源研究センター 主任研究員 博(工) (正会員)

*3 岡山大学大学院 環境生命科学研究科 社会基盤環境学専攻 准教授 博(工) (正会員)

*4 岡山大学大学院 環境生命科学研究科 社会基盤環境学専攻 教授 博(工) (正会員)

表-1 試験体の諸元^{15), 16)}

| 配合 | W/B (%) | 単位量(kg/m ³) ※ () 内数字は置換率 | | | | | | | | スランプ (cm) | 空気量 (%) | 圧縮強度 (N/mm ²) | 曝露場所 | |
|-----------|---------|---------------------------------------|-----|-----------|-----------|-----------|------------|------|-----|-----------|---------|---------------------------|------|------|
| | | W | HPC | BS4 | BS6 | FA | S | BFS | G | | | | 新潟 | 沖縄 |
| H40 | 40 | 165 | 413 | — | — | — | 758 | — | 968 | 11.5 | 4.6 | 59.8 | ○ | ○ |
| H40B430 | | | 289 | 124 (30%) | — | — | 749 | — | | 10.5 | 3.8 | 57.9 | ○ | ○ |
| H40B450 | | | 206 | 206 (50%) | — | — | 744 | — | | 13.5 | 5.1 | 47.9 | ○ | ○ |
| H40B630 | | | 289 | — | 124 (30%) | — | 750 | — | | 13.5 | 4.7 | 57.3 | ○ | ○ |
| H40B650 | | | 206 | — | 206 (50%) | — | 745 | — | | 14.5 | 4.8 | 57.2 | ○ | ○ |
| H40B670 | | | 124 | — | 289 (70%) | — | 740 | — | | 13.0 | 4.9 | 53.6 | ○ | ○ |
| H40F10 | | | 371 | — | — | 41 (10%) | 746 | — | | 9.5 | 4.2 | 59.0 | ○ | ○ |
| H40F20 | | | 330 | — | — | 83 (20%) | 734 | — | | 14.0 | 4.5 | 49.9 | ○ | ○ |
| H40F30 | | | 289 | — | — | 124 (30%) | 721 | — | | 12.0 | 4.3 | 45.4 | ○ | ○ |
| H36 | | | 36 | 458 | — | — | — | 721 | | — | 968 | 12.0 | 5.3 | 65.3 |
| H36BFS30 | — | — | | | — | 505 | 227 (30%) | 9.0 | 5.4 | 67.8 | | — | ○ | |
| H36BFS50 | — | — | | | — | 361 | 379 (50%) | 11.5 | 5.2 | 67.9 | | — | ○ | |
| H36BFS70 | — | — | | | — | 216 | 531 (70%) | 13.0 | 5.0 | 68.7 | | — | ○ | |
| H36BFS100 | — | — | | | — | — | 758 (100%) | 13.0 | 5.3 | 68.7 | | — | ○ | |

小さくなる。

この現象を考慮し、塩化物イオンの拡散係数とコンクリート中の相対含水率（相対含水率の定義は、後述の2.3(2)の式(3)を参照）の関係を実験的に定式化した事例としては、例えば、佐伯らの式¹²⁾がある。

$$\frac{D_w}{D_0} = 0.0032 \times 10^{0.025w} \quad (1)$$

ここに、 D_w ：相対含水率 w の試験体の拡散係数 (cm²/年)、 D_0 ：飽水状態の拡散係数 (cm²/年)、 w ：相対含水率 (%), である。

また、電気抵抗率の含水率依存性¹³⁾に基づいて塩化物イオンの拡散係数とコンクリート中の相対含水率の関係を議論した文献¹⁴⁾では、次式の実験式が示されている。

$$\frac{D'_w}{D'_0} = \left(\frac{w}{100} \right)^{2.493} \quad (2)$$

ここに、 D'_w ：相対含水率 w の試験体の電気抵抗率の測定値から推計した拡散係数 (cm²/年)、 D'_0 ：飽水状態の試験体の電気抵抗率の測定値から推計した拡散係数 (cm²/年)、 w ：相対含水率 (%), である。

一方、干満帯のように乾湿繰返し作用が強い環境では、塩化物イオンの移動は拡散だけでなく移流の影響も受け

るようになり、塩化物イオンの見掛けの拡散係数の含水率依存性は、より複雑になる。

本稿では、移流の影響が比較的小さいと考えられる大気中の実環境下での曝露試験によって得られる塩化物イオンの見掛けの拡散係数と、浸せき試験によって得られる塩化物イオンの見掛けの拡散係数を比較した結果を示す。ここで、両者の曝露期間および浸せき期間はほぼ同等と見なせるものである。さらに、塩害環境下における鋼材腐食に対する照査で用いる塩化物イオンの見掛けの拡散係数について、それを求めるために必要となる実環境条件を考慮するための係数を同じ曝露試験と浸せき試験の結果に基づいて検討する。

2. 実験概要

2.1 試験体の概要

(1) 使用材料および配合

コンクリートの配合と基礎物性を表-1に示す。コンクリートの配合は14種類である。水結合材比は $W/B = 40, 36\%$ の2水準である。基準配合は、それぞれの水結合材比において、結合材として早強ポルトランドセメントのみ、細骨材として天然砂のみを用いた配合である H40 お



(a) 新潟の曝露試験場（海岸より、0.1km 付近）



(b) 沖縄の曝露試験場（汀線付近）

写真－1 曝露試験場の環境条件

よび H36 である。混和材として高炉スラグ微粉末を使用したケースでは、結合材質量の 30 % および 50 % を高炉スラグ微粉末 4000 で置換した配合、あるいは、同 30, 50, 70 % を高炉スラグ微粉末 6000 で置換した配合がある。また、フライアッシュを使用したケースでは、結合材質量の 10, 20, 30 % をフライアッシュ II 種とした配合である。また、高炉スラグ細骨材を用いた配合は、細骨材の容積の 30, 50, 70, 100 % を高炉スラグ細骨材とした。なお、これらの試験体は既報^{15), 16)}と同じものであり、したがって、 $W/B = 40\%$ および 36% の配合の使用材料はそれぞれ、参考文献 15) および 16) に示されるものと同じである。

(2) 試験体の作製

コンクリートを型枠に打込んだ後、 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ の室内で封緘養生を行い、翌日に脱型して材齢 28 日まで $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ の養生槽で水中養生を行った。曝露試験用の試験体は $100 \times 100 \times 200\text{ mm}$ の角柱であり、実際のコンクリート構造物が置かれる状況を模擬するために、コンクリート打込み方向に対して側面 ($100 \times 200\text{ mm}$) を曝露面とし、残りの面はエポキシ樹脂にてシールした。曝露試験に際しては、曝露面を側面とした状態で試験体を曝露試験場に設置した。一方、浸せき試験用の試験体は $\phi 100 \times 200\text{ mm}$ の円柱で、厚さ 150 mm となるように中央部を切り出し、切断面を曝露面とした。曝露面以外はエポキシ樹脂でシールし、浸せき試験に供した。

2.2 曝露試験の概要

(1) 実環境での曝露試験

曝露試験を行ったのは、新潟県上越市名立区（平均気温： $13.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，平均相対湿度： 76.0% ，積算降水量： $10\,378\text{ mm}$ ）と沖縄県国頭郡大宜味村（平均気温： $22.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，平均相対湿度 74.6% ，積算降水量： $7\,828\text{ mm}$ ）である。これらの場所は、雨掛りはあるものの、海水や漏水が恒常的に直接作用するものではなく、乾燥によってコンクリート内部の含水率が低下する環境である。

試験体を設置した曝露試験場を写真－1 に示す。写真

－1 を見て分かるように、新潟の曝露試験場は、海水が供試体に直接降りかかることはないが、海中の消波ブロックや波打ち際で生成された海水の飛沫によって飛来塩分が供給される環境である。一方、沖縄の曝露試験場は、天候によっては海水が供試体に直接降りかかることもある環境である。いずれの曝露試験場も、供試体への水分の供給が常時行われる環境ではなく、供試体の含水状態は不飽和状態であったと考えられる。また、海岸線からの大よその位置関係から、新潟および沖縄の曝露試験場の環境は、示方書に示される塩害の環境区分で、海岸からの距離 0.1 km 付近および汀線付近にそれぞれ相当すると考えられる。

なお、表－1 に示すように、 $W/B = 40\%$ の試験体については新潟および沖縄の両所にて、 $W/B = 36\%$ の試験体については沖縄のみにて、曝露試験を実施した。また、 $W/B = 40\%$ の試験体を新潟に曝露したケース（以下、【新潟 $W/B = 40\%$ 】）、 $W/B = 40\%$ の試験体を沖縄に曝露したケース（以下、【沖縄 $W/B = 40\%$ 】）、 $W/B = 36\%$ の試験体を沖縄に曝露したケース（以下、【沖縄 $W/B = 36\%$ 】）の曝露期間は、それぞれ、2012 年 2 月 7 日～2013 年 10 月 17 日、2012 年 2 月 14 日～2013 年 10 月 8 日、2017 年 1 月 20 日～2018 年 8 月 20 日である。

また、コンクリート中の含水状態を測定するために、茨城県つくば市南原（平均気温： $13.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，平均相対湿度： 71.8% ，積算降水量： $4\,896\text{ mm}$ ）に、新潟および沖縄に設置したのと同じ配合で形状・寸法が $\phi 100 \times 200\text{ mm}$ の試験体を曝露した。

(2) 浸せき試験

浸せき試験は JSCE-G 572-2013 「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法（案）」に準拠して実施した。ただし、浸せき期間および塩水濃度は、 $W/B = 40\%$ の試験体は 601 または 608 日間（約 20 ヶ月間）および 10% であり、 $W/B = 36\%$ の試験体は 365 日および 3.0% である。

2.3 測定項目

(1) コンクリート中の全塩化物イオン濃度分布

コンクリート中の全塩化物イオン濃度分布を測定するための試料は、曝露試験に供した試験体については、全てのケースで、曝露面から 0～5、5～10、10～15、15～20、20～30、30～40 mm の位置で採取した。一方、浸せき試験については、 $W/B = 40\%$ のケースでは、曝露面から 10 mm ピッチで 60 mm の深さまでの位置で、 $W/B = 36\%$ のケースでは、曝露面から 0～5、5～10、10～15、15～20、20～30、30～40 mm の位置で試料を採取して分析に用いた。採取した試料中の全塩化物イオン濃度は JIS A 1154 (硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法) に準拠して測定した。

(2) 相対含水率

相対含水率は、 $\phi 100 \times 200$ mm 試験体の中央部から厚さ 50 mm の試料を切り出した後に質量を測定して式(3)から求めた値であり、100 % に近づくほど空隙が水で飽和した状態に近いことを示す。

$$w = \frac{(W_w - W_d) - (W_w - W_i)}{W_w - W_d} \times 100 \quad (3)$$

ここに、 w : 相対含水率 (%), W_w : 飽水状態とした試料の質量 (g), W_d : 絶乾状態とした試料の質量 (g), W_i : 曝露試験終了直後の試料の質量 (g), である。

3. 塩化物イオン見掛けの拡散係数の環境依存性

3.1 曝露試験と浸せき試験の結果の比較

図-2 および図-3 は、浸せき試験と曝露試験から得られた塩化物イオンの見掛けの拡散係数 D_{ap} および表面塩化物イオン濃度 C_0 をそれぞれで比較した結果である。ここで、 D_{ap} と C_0 は、2.3(1)で示した方法で得られた試験体中の各深さで測定された全塩化物イオン濃度に式(4)をフィッティングして算出する。つまり、ここでは、 D_{ap} と C_0 の両者を未定係数として取り扱っている。

$$C(x, t) = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1 \cdot x}{2\sqrt{D_{ap} \cdot t}} \right) \right\} + C_i \quad (4)$$

ここに、 $C(x, t)$: 曝露または浸せき試験期間 t 年において、表面から x mm の位置における全塩化物イオン濃度 (kg/m^3), C_0 : 表面塩化物イオン濃度 (kg/m^3), D_{ap} : 塩化物イオンの見掛けの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$), x : コンクリート表面からの距離 (mm), t : 曝露または浸せき試験期間 (年), C_i : 初期全塩化物イオン濃度 (kg/m^3), である。

図-2 より、 D_{ap} は、浸せき試験よりも曝露試験で得られるものの方が小さい。これは、雨掛りによる水の浸透が少なく、移流による塩化物イオンの移動の影響が小さかったこと、および、コンクリート内部が乾燥して塩化物イオンの拡散経路となる液状水の連続性が低下したこ

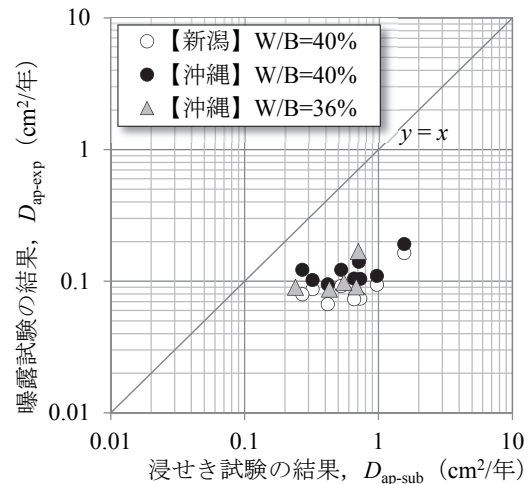


図-2 塩化物イオンの見掛けの拡散係数の比較結果

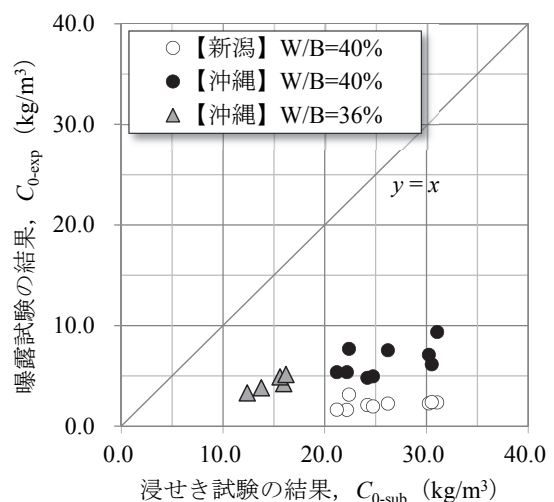


図-3 表面塩化物イオン濃度の比較結果

とよると推測される。なお、 $W/B = 40\%$ のケースにおいて、同一配合で曝露試験場による違いを比較すると、新潟よりも沖縄の方が D_{ap} は大きくなる傾向が得られた。これは、既報^{17), 18)}で述べられている拡散係数の温度依存性が一因であり、沖縄の平均気温が高いために、コンクリート中での塩化物イオンの拡散速度が速かったためと考えられる。

図-3 より、 C_0 は、浸せき試験よりも曝露試験で得られるものの方が低い。これは、浸せき溶液と比較して大気中に存在する塩化物イオン量が少なく、したがって、コンクリート表面への塩化物イオン量の接触頻度が、浸せき試験よりも曝露試験の方が少ないことによると考えられる。さらに、 $W/B = 40\%$ のケースにおいて、同一配合で曝露試験場による違いを比較すると、新潟よりも沖縄の方が、 C_0 が高い傾向にある。これは、写真-1 に示したように、汀線からの試験体までの距離が主要因であり、海洋から試験体近傍までに輸送される塩化物イオン量の減衰の程度の差によると考えられる。

図-4は、図-2に示した曝露試験と浸せき試験から得られた D_{ap} の比（拡散係数比）を頻度分布図に整理したものである。ここで、拡散係数比を式(5)に定義する。

$$r = \frac{D_{ap-exp}}{D_{ap-sub}} \quad (5)$$

ここに、 r ：拡散係数比、 D_{ap-exp} ：曝露試験から得られる塩化物イオンの見掛けの拡散係数、 D_{ap-sub} ：浸せき試験から得られる塩化物イオンの見掛けの拡散係数、である。

図-4より、本研究の範囲では、 r は0.10から0.15の範囲のデータ数が最も多く、平均値は0.20であった。

3.2 拡散係数比と相対含水率の相関性

曝露試験と浸せき試験から得られた D_{ap-exp} と D_{ap-sub} に差が生じた要因としては、両試験体の内部の空隙水の飽和度が異なることが推察された。そこで、新潟と沖縄の曝露試験体と同時に製作して、茨城県つくば市南原の雨掛りのある屋外に曝露した円柱試験体（ $\phi 100 \times 200 \text{ mm}$ ）で求めた各配合の相対含水率 w と、式(5)に定義した拡散係数比 r を比較した。その結果を図-5に示す。なお、図中の線は、前述の式(1)¹²⁾と式(2)¹⁴⁾から得た r と w の関係である。なお、式(1)および式(2)は特定の範囲の w において実施された実験の結果に基づいて定式化されたものであるため、図-5中においては、実験の対象範囲外の r と w の関係を破線で示した。

図-5より、 w と D_{ap} の測定環境や試験体の形状、寸法および評価領域が異なることに留意が必要ではある。しかし、曝露条件が同じ大気環境下であるので、同一配合であれば、曝露試験場に関わらず、各試験体間の w はほぼ同等であると見なせば、 r と w には正の相関があり、コンクリートの w が低く乾燥した試験体のほど、 D_{ap-exp} は D_{ap-sub} よりも小さくなる傾向であることが確認できる。

4. 大気中環境を考慮するための係数の検討

4.1 導出方法

前章までに示したように、 D_{ap-exp} はコンクリートが乾燥するほど D_{ap-sub} よりも小さくなる。したがって、 D_{ap-sub} を活用して塩害環境下における鋼材腐食に対する照査を実施する場合、浸せき試験と実環境の差異を考慮した係数を導入して、式(6)のように設計に用いる塩化物イオンに対する拡散係数を設定することが、設計の便を図るうえで望ましい。

$$D = \rho_e D_{ap-sub} \quad (6)$$

ここに、 D ：照査に用いる拡散係数（ $\text{cm}^2/\text{年}$ ）、 ρ_e ：実環境条件を考慮するための係数、である。

ここでは、新潟および沖縄の曝露試験結果を用いて ρ_e を導出する。新潟および沖縄の曝露試験場は、それぞれ示方書に示される「海岸より0.1 km付近」および「江線付近」に該当する立地である。そのため、式(4)の表面塩

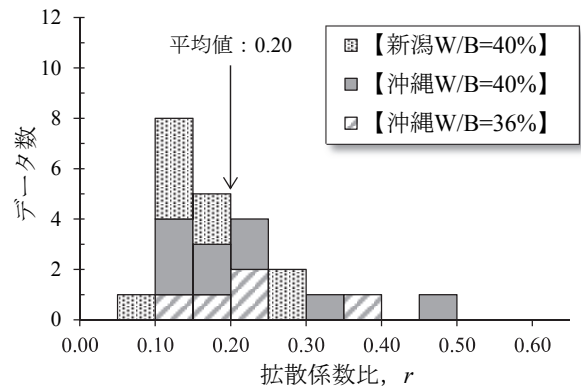


図-4 拡散係数比の頻度分布

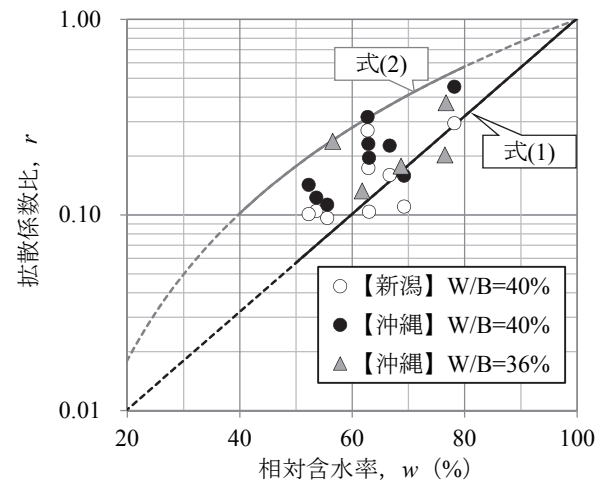


図-5 拡散係数比と相対含水率の関係

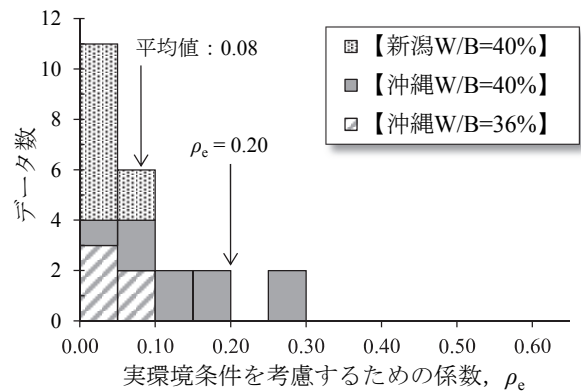


図-6 実環境条件を考慮するための係数の頻度分布

化物イオン濃度 C_0 を新潟は 4.5 kg/m^3 、沖縄は 9.0 kg/m^3 とし、さらに式(4)の D_{ap} に式(6)に代入し、 ρ_e を変化させて曝露試験により求められた全塩化物イオン濃度分布に式(4)をフィッティングすることで ρ_e を定めた。

4.2 導出結果と考察

4.1に示す手順にて、 ρ_e を導出した。図-6は、その結果を頻度分布図に整理して示したものである。本研究の範囲では、 ρ_e の平均値は0.08で、 ρ_e が0.20を超過する確率は8%であった。本稿に示した曝露試験場の環境条件のように、大気中で水の移流の影響を受けにくい場所で

あれば、 D_{ap-sub} に、0.2程度の ρ_e を乗じた値が、照査に用いる実環境下における塩化物イオンの見掛けの拡散係数 D として見なせると考えられる。なお、図-5の傾向を踏まえると、 ρ_e の値は、コンクリートの乾燥が進むほど小さくなると推測される。一方、閉鎖空間で海面からの距離が比較的近く、部材周囲の相対湿度が高い場合には、コンクリートの相対含水率は高い状態に保たれるため、 ρ_e は0.2よりも大きくなると推測される。

5. まとめ

本稿では、大気中環境下での曝露試験と浸せき試験によって得られる塩化物イオンの見掛けの拡散係数を比較し、両者の差異の要因がコンクリート中の含水率にあることを指摘した。また、照査で用いる塩化物イオンに対する拡散係数を求めるために必要となる実環境条件を考慮するための係数 ρ_e を検討した。その結果、本研究の範囲では、大気中環境下の ρ_e は0.2程度となった。

謝辞

本研究の一部は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の「SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」（管理法人：NEDO）によって実施した。

参考文献

- 1) 山路徹, 審良善和, 大里睦男, 森 晴夫: 異なる試験方法により求めた銅スラグ細骨材コンクリートの塩化物イオン拡散係数の比較, 土木学会コンクリート技術シリーズ, No. 85, 2009. 10
- 2) 高橋佑弥, 井上翔, 秋山仁志, 岸利治: 実構造物中のフライアッシュコンクリートへの塩分浸透性状と調査時材齢の影響に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 1, pp. 803-808, 2010
- 3) 佐野慶成, 杉山和人, 水田真紀, 児島孝之: 水セメント比および浸漬期間がコンクリートへの塩化物イオン浸透のばらつきに与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 34, No. 1, pp. 784-789, 2012
- 4) 壽祐太郎, 山口明伸, 武若耕司, 中島正志: コンクリートの見かけの塩化物イオン拡散係数と表面塩化物イオン濃度の関係に関する一考察, 土木学会第66回年次学術講演会講演概要集, pp. 435-436, 2011
- 5) 皆川浩, 久田真, 榎原彩野, 齊藤佑貴, 市川聖芳, 井上浩男: コンクリートの電気抵抗率と塩化物イオンの見掛けの拡散係数との関係に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E, Vol. 66, No. 1, pp. 119-131, 2010
- 6) 網野貴彦, 大即信明, 斎藤豪, 羽淵貴士: 棧橋上部工の空間的位置の違いが塩化物イオン浸透性状および鉄筋の腐食速度に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 1, pp. 779-784, 2010
- 7) 審良義和, 濱田秀則, 大即信明, Tarek. U.M.: 円柱供試体側面から浸透した塩化物イオンの拡散係数の算出方法について, コンクリート工学年次論文集, Vol. 27, No. 1, pp. 613-618, 2005
- 8) 藤原斉, 堀水紀, 細谷多慶, 藤木昭宏: 高炉スラグがコンクリートの塩分浸透性に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 39, No. 1, pp. 757-762, 2017
- 9) 藤井隆史, 堀水紀, 藤原斉, 綾野克紀: 高炉スラグを用いたコンクリートの中性化, 塩化物イオン浸透性および電気抵抗性に関する研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol. 16, pp. 195-200, 2016
- 10) 藤井隆史, 中山敦郎, 綾野克紀: 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの塩分浸透性と鋼材腐食に関する研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol. 18, pp. 25-30, 2018
- 11) 細谷多慶, 森脇拓也, 綾野克紀, 阪田憲次: コンクリート中の塩化物イオンの拡散および固定化の予測に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 27, No. 1, pp. 685-690, 2005
- 12) 佐伯竜彦, 二木央: 不飽和モルタル中の塩化物イオンの移動, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 18, No. 1, pp. 963-968, 1996
- 13) 皆川浩, 榎原彩野, 齊藤佑貴, 久田真: 電気抵抗率から推計した塩化物イオン拡散係数の含水率依存性, セメント技術大会講演要旨, Vol. 64, pp. 20-21, 2010
- 14) 杉本記哉: 電気抵抗率から推計した塩化物イオン拡散係数に及ぼす空隙構造と含水状態の影響, 東北大学修士学位論文, p. 216, 2016
- 15) 中村英佑: 低炭素社会構築に資する大量に混和材を用いたコンクリートの耐久設計に関する研究, 東北大学学位論文, 2017. 3
- 16) 中村英佑, 水戸健介, 古賀裕久: 高炉スラグやフライアッシュを用いたコンクリートの遮塩性能の迅速評価手法コンクリート工学年次論文集, Vol. 40, No. 1, pp. 219-214, 2018
- 17) 横関康祐, 渡辺賢三, 林大介, 坂田昇, 大即信明: 水和反応と温度依存性を考慮したセメント系材料のイオン拡散係数予測モデル, 土木学会論文集, No. 725, pp. 131-142, 2003. 2
- 18) 松村卓郎, 白井孝治, 三枝利有: コンクリート中の塩化物イオン拡散係数に与える温度の影響, 材料, Vol. 52, No. 12, pp. 1478-1483, 2003. 12